

제 5 차 년 도
최 종 보 고 서

KR-95(T)-17

Geotomography에 의한 암반구조 연구(V)

Study of Rock Structures by Geotomography(V)

연 구 기 관
한 국 자 원 연 구 소

과 학 기 술 처

제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 “Geotomography에 의한 암반구조 연구(V)” 과제의
5차년도 최종 보고서로 제출합니다.

1995. 12.

주관연구기관 : 한국자원연구소

총괄연구책임자 : 김 중 열

연구원 : 김 유 성

현 혜 자

여 백

요 약 문

I. 제 목

Geotomography에 의한 암반구조 연구 (V)

II. 연구개발의 목적 및 중요성

수직 및 수평 방향의 불균질 매질 혹은 이상대는 측정되는 탄성파 도달의 주시에 이상을 초래하며 그 이상에 대한 역해 계산은 바로 이상대의 형태를 재현할 수 있다는 것이 지오토포그래피의 근본 원리이다. 상기 방법이 최근 탄성파탐사 분야에서 큰 몫을 차지하는 이유는 그 분해능이 재래의 탄성파탐사(반사법)에 의해서는 거의 불가능한 것이 가능할 수 있기 때문이다. 지난 수년간 탄성파 지오토포그래피는 그의 응용 범위가 크게 확장되어 핵폐기물 저장 암반조사, 석재산업에서의 암반 파쇄대 조사, 댐 지반 조사, 공동 탐사 등에 이르고 있다.

본 과제의 최종 목표는 크게 세가지 기술개발 과정으로 나누어 단계적으로 수행되어 이룩된다. 그 하나는 국내 탄성파 지오토포그래피 전산처리 시스템의 확립으로서 특히 기존의 정규 전산처리 시스템인 MicroMAX와 연결하여 전산처리의 효율을 극대화한다. 또 다른 기술 개발은 시추공 토모그래피에서 필수적으로 요구되는 시추공 발생원 및 수진기 시스템 개발이다. 세번째는 하나의 시추공 탐지기기인 borehole scanner의 기술정립이다. 상기 기술의 확립은 바로 국내 암반구조 연구에 큰 디딤돌이 될 것이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

당해년도(최종년도)의 연구 내용은 지금까지 개발되어 축적된 기술 및 경험을 바탕으로 본 과제 최종목표로 선정된 두가지 첨단 기술 즉, 탄성파 토모그래피 및 텔레뷰어 기술이 세계적인 수준에서 완성되고 또한 국내 실용화되기 위한 제반 보완 기술을 개발하는 데 있다.

Ⅳ. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

(1) 한·독 국제공동연구를 통하여 당해년도에 완성된 텔레뷰어 시스템 즉, FACSIMILE-40이 현존하는 세계적인 기술 수준에서 최대의 분해능을 보여주며 또한 국내 실용화되기까지의 그 배후에는 무엇보다 다음과 같은 기술 개발들 즉, ① 방사되는 초음파 빔을 다시 초점화하고 동시에 logger 몸체를 최소화하게 할 수 있게 한 transducer-lense-mirror 시스템 개발, ② 텔레뷰어 측정 시스템에 구성된 각 hardware가 서로 독립되어 조립되게 함으로써 시스템의 보완 내지 다른 검층기기와의 호환을 용이하게 함, ③ 측정데이터를 효율적으로 제어하고 또한 여러 개의 서로 다른 검층기기(예: sonic, gamma log)의 운용 내지 상호 데이터 호환을 가능하게 한 ALT DMTLS(software)의 개발, ④ 텔레뷰어 측정데이터로부터 최대한의 정보를 추출할 수 있는 방대한 전산처리 기법 개발 등이 뒷받침한 데 있었다.

(2) 탄성파 토모그래피는 이미 1993년 구포 기차전복사고 지반조사 이후 부평공원묘지 붕락사고, 절취사면 안정성, 각종 터널공사, 대형구조물 지반조사 등에서 많은 성공사례를 낳게 하였다. 특히, 당해년도에 개발한 다음과 같은 주요 연구 실적들 즉, ① 시추공 발생원으로서 세계 최초 다중발파 시스템 개발로 인한 탐사 효율성 증대, ② 한번 발생원 구사에서 48채널 기

록을 얻을 수 있기 위한 수신장치 및 AD 개발, ③ 데이터 제어 기능을 향상시킬 수 있는 측정 운영 software 개발 등과 또한 당해년도에 이룩한 여러 차례의 성공사례를 통한 응용 기술의 축적은 세계적인 기술수준에서 토모그래피의 국내 실용화를 더욱 촉구하였을 뿐만 아니라 탐사시간을 크게 단축시키는 효과를 초래하였다.

(3) 상기 두개의 첨단 탄성과 이용 기법은 지반조사를 위한 핵심요소 기술로서 그 자체로 독특한 응용성을 보여주고 있음이 이미 일부 토목분야에서도 알려지고 있다. 그러나, 일반 토목설계 및 시공을 위한 매개변수 산출을 위해서는 단지 하나의 방법만으로는 미흡하다고 볼 수 있다. 만약, 상기 두개의 기법들이 동시에 활용된다면 각개의 응용에 따른 취약점들이 상호 보완되어 지반조사에 대한 정확도가 더 한층 높아지고 있음을 경험하고 있다.

여 백

ABSTRACT

I. TITLE

Study of rock structures by geotomography

II. PURPOSE AND IMPORTANCE OF THE WORK

Since computerized axial tomography has revolutionized medical x-ray imaging, geotomography has found its big impact in the field of seismic exploration because of its ability to clearly image subsurface velocity structures and attenuation characteristics of the formations. For example, lateral or vertical inhomogeneities may generate distortions in the observed arrival time and/or amplitude of seismic waves. By evaluating such distortions, one can locate the inhomogeneities which may not be detected easily by the conventional surface seismic survey. Recently, seismic geotomography has been successfully used as an efficient aid for solving various geophysical problems such as evaluating radioactive waste repository, detecting fracture zones in crystalline rocks, dam site investigation, cavity detection and so on. However, application of seismic methods to such environmental problems as above has rarely been conducted, thus many problems including development of suitable equipment and processing facilities still to be attacked.

The objectives of this project can be categorized in three major parts. The first is an establishment of the geotomographical

processing system on personal computers. This includes the development of an effective routines useful for the first onsets picking. The second is associated with the development of borehole source and receiver systems which provide meaningful data for geotomography. The small and light but powerful borehole acquisition system which is suitable for our field environment is needed to be developed. The third is concerned with the establishment of borehole scanner (televviewer) system for obtaining detailed information about fractures, bedding planes, geothermal reserviors etc. It is evident that the above mentioned developments should represent our potential of crosshole seismic methods for the exploration of subsurface.

III. CONTENT AND SCOPE OF THE STUDY

The purpose of this year's investigation is to realize the highly efficient seismic methods i.e. Geotomography and Televviewer in our country by upgrading the corresponding measuring and processing systems developed past years, and by maximizing their field applicability.

IV. RESULTS AND SUGGESTIONS

(1) Through the Korea-Germany joint project, the borehole acoustic scanner (Televviewer), FACSIMILE-40 has been realized this year in our

country. Abundant experiences were gained, relating to the development of the revolutionary sensor technology (adaptive ultrasonic beam focussing with respect to the target distance), the modular design of hardwares, the multi tool family capacity, the diverse processing facilities and the corresponding field works. The Televier was able to produce images of excellent resolution and also has acquired economics in the field applications, which has become one of the most efficient borehole logging system.

(2) The realization of geotomography technique has been accomplished this year, based on the last years' abundant techniques, by developing a new efficient borehole source, i.e. multiple shot borehole source in cooperation with the Hanwha company and the DMT-institute, and also by upgrading the measuring and processing systems. The effectiveness of the source and receiver has been proved through a lot of field works.

(3) Each method, Geotomography or Televier, has found its big impact in the field of exploration. However, it is highly expected that the seismic tomography complemented by the Televier will provide very powerful means for the exploration of subsurface.

여 백

CONTENTS

Abstract	3
Chapter 1. Introduction	41
Chapter 2. Application of Televiwer technique	45
Section 1. Introduction	45
Section 2. Principle	50
Section 3. Measuring system	54
Section 4. Logging function	66
1. Dip direction and dip angle of fault, fracture and layer boundary	66
2. Televiwer image from the various formations of rocks	79
3. Derivation of rock strength	87
4. High resolution caliper log	102
5. Magnetic survey (magnetometer function)	112
6. Hole deviation (inclinometer function)	112
Section 5. Application field	119
1. Land slope design and estimation of its stability	121
2. RQD (Rock Quality Designation)	131
3. Classification of rocks	135
1) Q-system	136
2) RMR (Rock Mass Rating)	136
4. Fluid flow	137
5. Ground subsidence	139
6. Underground foundtaion survey for the large-scale construction	152

7. Other applications	155
Section 6. Data processing procedure	160
Section 7. Examples of the successful field applications	174
1. Underground foundation survey for the high building	174
2. Underground foundation survey for the Incheon subway construction	190
3. Underground foundation survey for the large-scale construction in Pyeongtaek, Kyeongkido	226
4. Underground foundation survey for the Daegu subway construction	241
Chapter 3. Application of seismic tomography	254
Section 1. Introduction	254
Section 2. Upgrade of measuring system	258
Section 3. Development of multiple shot borehole source system ...	261
Section 4. Examples of the successful field applications	286
1. Underground foundation survey for the power-line tunnel construction in Pusan	286
2. Survey of underground concrete pile in Pusan	320
3. Underground foundation survey for the high building	341
4. Underground foundation survey for the Incheon subway construction	355
5. Underground foundation survey for the ground subsidence in the stremlet	367
Chapter 4. Conclusions and suggestions	387
Abbreviaiton	390
References	391

목 차

요약문	3
제 1 장 서 론	41
제 2 장 텔레뷰어 기법의 응용	45
제 1 절 개 요	45
제 2 절 근본 원리	50
제 3 절 측정 시스템	54
제 4 절 검층 기능	66
1. 단층, 절리 및 암층 경계면의 경사방향 및 경사각	66
2. 암석에 따른 텔레뷰어의 이미지	79
3. 임피던스 (rock strength) 산출	87
4. 공경 검층 (caliper log)	102
5. 자력 탐사 (magnetometer 기능)	112
6. 시추공 편차 검층 (inclinometer 기능)	112
제 5 절 응용분야 및 기대효과	119
1. 절취사면 설계 및 안정성 평가	121
2. 암질 지수 RQD (Rock Quality Designation)	131
3. 암반 분류	135
1) Q-system	136
2) RMR (Rock Mass Rating)	136
4. 용질 유동	137
5. 지반 침하	139
6. 대형구조물 지반조사	152
7. 기 타	155

제 6 절	전산처리 과정	160
제 7 절	텔레뷰어 현장응용 성공사례	174
1.	대형빌딩 지반조사	174
2.	인천 지하철공사 지반조사	190
3.	경기도 평택군 대형구조물 시설 지반조사	226
4.	대구 지하철공사 지반조사	241
제 3 장	탄성과 토모그래피의 응용	254
제 1 절	개 요	254
제 2 절	측정시스템의 고도화	258
제 3 절	다중발파 시스템의 개발	261
제 4 절	현장응용 성공사례	286
1.	부산 전력구 터널공사 지반조사	286
2.	부산지역 지하 매설물(콘크리트 파이프) 조사	320
3.	대형빌딩 지반조사	341
4.	인천 지하철공사 지반조사	355
5.	소하천 침하 지반조사	367
제 4 장	결언 및 제언	387
약어 설명	.....	390
참고 문헌	.....	391

FIGURE CAPTIONS

- Fig. 1. Optical view of the borehole wall with the Borehole Camera TV Logging System. The measurement was made in a water-filled hole at Bupyong survey site. Fractures are visible as a dark line. In addition, flowing water from the fractures into the borehole can be seen clearly (bright area in (d)). 46
- Fig. 1. (continued). 47
- Fig. 2. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).
When an acoustic beam of ultrasonic transducer strikes the interface normally, the reflected acoustic energy changes from specularly reflected to backscattered (due to the fracture) energy. 51
- Fig. 3. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).
An acoustic source (piezoelectric transducer) fires an ultrasonic beam at the borehole wall as the Televiewer tool is pulled up the hole. The pulses reflected from the borehole wall are recorded, and from these an unwrapped image of the wall of the hole is constructed with the borehole azimuth on the horizontal axis and the depth on the vertical axis. 53
- Fig. 4. Logger tool of FACSIMILE-40.
(a) A part of the logger tool is the ultrasonic sensor. It carries out the actual acoustic measurements travel time and amplitude. Other parts of the tool take care of signal processing, data transmission, power supply and various measurements (orientation of the tool, earth magnetic field, temperature), etc. 56
- Fig. 4. (continued).
(b) The measurement principle of the sensor part.
The main components of the sensor part are the piezoelectric transducer, the rotating reflector driven by a stepper motor and the housing window. The transducer generates and detects beams

of ultrasonic energy, with frequencies up to 1.4 MHz.
 The reflector redirects the beam towards the borehole wall and also focuses the ultrasonic energy. The beam travels through the housing window, the water to the borehole wall, where it is reflected. The reflected ultrasonic energy returns to the transducer along the same route. It is detected by the transducer and transformed into an electric signal that is passed to the signal-processing part of the logger tool. 57

Fig. 4. (continued).
 (c) The Televier logger in use at the surveying site. 58

Fig. 5. Plan view of ALT(Advanced Logic Technology) data acquisition system (Digital Multi Tool Logging System : DMTLS). 60

Fig. 5. (continued).
 Cable connections between PC and 19" rack. 61

Fig. 5. (continued).
 Upper part : front view of DMTLS.
 Lower part : rear view of DMTLS. 62

Fig. 6. Cable winch and example of system software operation.
 Several windows are opened to give full on-line control of the FACSIMILE-40 logging. 63

Fig. 7. Principle of borehole acoustic scanner (Televier).
 Perspective view of a simple planar fracture intersecting a round borehole and the resulting schematic fracture signature(sine curve). 67

Fig. 8. Principle of borehole acoustic scanner (Televier).
 Strike and top view of a simple planar fracture intersecting a round borehole. It helps to derive an analytic expression for fracture signature shown in Fig. 7. 68

Fig. 9.	Various types of fracture signature. On the right side is the grayscale amplitude image(Televiewer raw data), the lightness of the image is proportional to the amplitude of the reflected pulse. On this plot diverse type of fracture signature can be observed. On the left side, a presentation of four picked fracture signatures are displayed.	70
Fig. 10.	Televiewer image log measured at the study site Cheongyang, Korea. Diverse types of fractures, faults and layer boundaries can be clearly observed. Left : amplitude image, middle : travelttime image, right : arrow plot for the tectonic elements. In the picture the picked fracture planes (sine curves) are overlaid to the structures.	72
Fig. 10.	(continued). A good overview of change in rock strength and rock quality can be yielded by displaying both the amplitude and travelttime image side by side.	73
Fig. 10.	(continued). Open fractures are well recognized by clearly visible changes of the borehole radii (travelttime image).	74
Fig. 11.	Televiewer image log measured at the survey area Pyongtaek, Korea. Open vertical fractures can be clearly observed.	78
Fig. 12.	Two examples of Televiewer amplitude image in soft sedimentary rock formations (in Germany). Fine layers embedded in a sedimentary sequence and thin, steeply dipping fractures (left picture) are visible as dark lines.	80
Fig. 13.	Example of Televiewer image log in hard sedimentary rock formations in the survey area Daegu, Korea.	82
Fig. 14.	Example of Televiewer image log in granite rock (in Germany).	83
Fig. 14.	(continued).	84

Fig. 15.	Example of Televiwer amplitude image in metamorphic rock (in Germany). There are numerous thin interbedded layers of hard(bright) and soft(dark) rock.	85
Fig. 16.	Example of Televiwer image log measured in metamorphic rock at the survey area Pyongtaek, Korea. Thin interbedded layer is clearly visible.	86
Fig. 17.	Example of Televiwer image log measured in igneous metamorphic rock at the survey area Incheon, Korea.	88
Fig. 18.	Example of Televiwer amplitude image in concrete formation. The texture of the concrete and its weathered zone (indicated by arrows) are clearly visible.	89
Fig. 19.	Comparison of Televiwer rock strength (the fourth trace) with the real rock strength (the third trace) derived from the density log (the first trace) and the sonic log (the second trace).	92
Fig. 20.	Crossplot of Televiwer reflectivity and acoustic reflection coefficient.	93
Fig. 21.	Comparison of the behaviour of the rock strength derived from three different combinations of measuring procedures.	94
Fig. 22.	Televiwer rock strength (left side) was evaluated from the amplitude image measured at the study site Cheongyang, Korea. The abrupt variation of the rock strength is well matched to the tectonic elements (faults in general) shown in the arrow plot (right side).	96
Fig. 23.	Televiwer rock strength measured at the survey area Pyongtaek, Korea. The rock strength was scaled by core measurement.	98
Fig. 24.	Televiwer rock strength measured at the survey area Pyongtaek, Korea. The rock strength was scaled by assuming the strength of the steel casing.	99

Fig. 25.	Crosshole tomography.	
	(a) All ray paths perpendicular to the borehole axis are shown.	100
Fig. 25.	(continued).	
	(b) Crosshole data derived from the measuring procedure in (a).	101
Fig. 26.	Televiwer rock strength measured at the survey area Kangnam, Seoul.	103
Fig. 27.	Study of rock stress field.	
	(a) Illustration of the stress concentration around a vertical borehole in a elastic body subject to the most compressive and least compressive far field stresses S_H and S_h , respectively.	
	(b) Example of borehole cross section showing breakouts.	104
Fig. 27.	(continued).	
	(c) Rock broken by a differential stress system (from Miller, 1977). A : Differential compressive stress resolved into principal stress axes. B : Fracture plane develops parrallel to the maximum and intermediate stress axes.	106
Fig. 28.	Circular cross sections of 32 depth intervals(10cm) taken from the Televiwer travelttime image measured in the survey area Pyongtaek, Korea. Cross sections at greater depth are nested inside those at shollower depths. The borehole was made by rotary drill and its diameter is 76mm. On this plot certain features like fractures can be observed. However, the picture shows no apparent breakouts.	107
Fig. 29.	Circular cross sections of 100 depth intervals(10cm) taken from the Televiwer travelttime image measured in the survey area Pyongtaek, Korea. The borehole was made by rotary drill (bit size 76mm). Certain features like fractures and roughness can be observed. However there are no significant breakouts.	108

- Fig. 30. Borehole cross sections for 8 depth intervals(10m) derived from the Televiwer traveltime image measured in the survey area Inchon, Korea. The borehole was made by T-4 drill (bit size 150mm). Certain features like fractures and zones of roughness can be observed. Shown is also the Televiwer not centered in the hole during logging. 109
- Fig. 31. Borehole cross sections for 8 depth intervals(5m) derived from the Televiwer traveltime image measured in the survey area Pyongtaek, Korea. The borehole was made by rotary drill (bit size 76mm). ... 110
- Fig. 32. Borehole cross sections for 6 depth intervals(5m) derived from the Televiwer traveltime image measured in the survey area Kangnam, Seoul. The borehole was made by crawler drill (bit size 100mm). Shown is the Televiwer not centered in the borehole during logging. Certain features like fractures and zone of roughness can be observed. 111
- Fig. 33. 3-D plot of borehole shape derived from the Televiwer image. 113
- Fig. 34. Example of Televiwer magnetometer (Flux-gate magnetometer) measurement in the survey area Inchon, Korea. The direction of the ultrasonic beam can be determined by the magnetometer. In addition, the total intensity can be also evaluated by the three components. 114
- Fig. 35. Example of the Televiwer inclinometer measurements for investigating the borehole deviation in the survey area Pyeongtaek, Korea. The borehole depth is about 50m. 116
- Fig. 36. Example of the Televiwer inclinometer measurements for investigating the borehole deviation in the survey area Pyeongtaek, Korea. The borehole depth is about 50m. 117
- Fig. 37. Example of the Televiwer inclinometer measurements for investigating the borehole deviation in the survey area Inchon, Korea. The borehole depth is about 130m. 118

Fig. 38.	Televiwer can be applied to diverse geotechnical problems, based on detailed evaluation of tectonic elements (layering, fracturing and faulting of the rock) and in-situ rock strength, to the landsliding in road and railroad construction, to the fluid-flow in waste deposit sites and contaminated areas, to the foundation, to the subsidence problems, to the description of geothermal reservoirs, to the determination of the direction of the stress field, and to the inspection of casing and concrete for corrosion, defect.	120
Fig. 39.	Slope failure in overburden soil, waste rock or heavily fractured rock with no identifiable structural pattern	122
Fig. 40.	Plane failure in rock due to the filled(e.g. clay) discontinuity.	124
Fig. 41.	Example of rock sliding due to the filled discontinuity. Outlook of Pangyo survey area. Severe large cracks in the cut-out area are clearly shown.	125
Fig. 42.	Sliding type of wedge failure. Interpreted geological cross-section of borehole H1-B3-B5 and B4-B3-B2 area, Pangyo.	127
Fig. 43.	Plane map of cracks in Pangyo survey area.	128
Fig. 44.	Example of grouping of surveyed (in Kangnam, Seoul) discontinuities into families and determination of the most frequent dip direction and dip angles.	129
Fig. 45.	Example of grouping of surveyed (in Kangnam, Seoul) discontinuities into families and determination of the most frequent dip direction and dip angles.	130
Fig. 46.	Principle of rock quality designation based indirectly on the number of fractures and the amount of softening or alteration in the rock mass as observed in the rock cores from a drill hole.	132

Fig. 47.	Display of the structural data extracted from the acoustical image of the borehole wall measured in the survey area Kangnam, Seoul. From left to right : 3-dimensional view, planar view, RQD, number of structural data.	133
Fig. 47.	(continued).	134
Fig. 48.	Schematic representation of the transport processes in fractured granite (after Frick et.al, 1988). In the case of crystalline rocks, geosphere transport occurs mainly along fractures. Compared with flowing water, dissolved materials are transported considerably more slowly.	138
Fig. 49.	Mining Subsidence Engineering. The cavity artificially created underground by tunneling or the extraction of minerals removes the natural support from the overlying strata. As a result, successive layers of rock bend under the influence of gravity, until finally the movement reaches the upper earth surface. The soft layers of earth moving downwards and sideways towards the syncline axis are also compressed at the center of trough and extended at its margins.	141
Fig. 50.	Examples of subsidence damage (after Kratzsch, 1983). (a),(b) Damage to railway tracks : vertical distortion, lateral distortion. (c),(d) Damage to streets. (e),(f) Damage to pipes laid in the ground.	142
Fig. 50.	(continued).	143
Fig. 51.	Scene from ground subsidence in Bupyong civil cemetery. Left: subsided area (the second survey area), right: the first survey area.	145
Fig. 52.	Subsided area within a streamlet near Bupyong civil cemetery.	147
Fig. 53.	Sink-hole type ground subsidence near Bupyong civil cemetery. Borehole locations (H2, H3) for geotomography underlaid by three levels of exploited area in Bupyong (abandoned) mine are shown.	148

Fig. 54.	Plane view of excavated areas in Bupyong abandoned mine. Subsided areas are indicated with circles (excavation No. #2, #9-1).	149
Fig. 55.	Plane view of Bupyong mining claim area.	150
Fig. 56.	Evaluated rock strength from the neighbouring boreholes in the survey area Kangnam, Seoul.	153
Fig. 57.	Evaluated rock strength from the neighbouring boreholes in the survey area Pyongtaek, Korea.	154
Fig. 58.	Televiwer amplitude image of perforated casing in the geothermal production well.	156
Fig. 59.	Televiwer images of casing end.	157
Fig. 60.	Example of orientation of the Televiwer images (raw data). The raw images should be oriented to a fixed direction, magnetic north or the high side of the borehole.	161
Fig. 61.	Example of correction of Televiwer image. (a) Due to the high decentralization the amplitude (image) changes considerably one scan around the borehole. (b) Due to the removal of the effects of decentralization the texture of the concrete, fractures and some nearly vertical fractures are now clearly visible.	163
Fig. 62.	Example of correction of Televiwer image. (a) The image quality was much degraded by irregular borehole conditions. (b) The image quality was much improved by application of a dynamic normalization process.	164
Fig. 63.	Extraction of tectonic elements from the Televiwer images. As soon as three points are tracked along one structural feature, the corresponding sinusoid is calculated and displayed directly on the	

	image. By this way the proper tracking is checked and can be corrected before the final decision is made. A classification of the structural feature can be chosen from a user defined menu and displayed e.g. as an arrow plot.	165
Fig. 64.	Deviation of the strength of the rock is very important in all geotechnical logging. A fuzzy classification was applied to derive the amplitude image one amplitude trace. The result is contrasted with the images. The rock strength can be abruptly varied especially due to the faults.	166
Fig. 64.	(continued).	167
Fig. 65.	Presentation of dip direction of all extracted tectonic elements in a rose diagram.	169
Fig. 66.	Presentation of dip of all extracted tectonic elements in a polar (stereographic) projection. Up : area-equal projection, down : area-equal projection.	170
Fig. 66.	(continued). Up : area-equal, down : area-equal.	171
Fig. 66.	(continued). Up : angle-equal, down : angle-equal.	172
Fig. 67.	Borehole locations for the Televier measurement in the survey area Kangnam, Seoul.	175
Fig. 68.	Televier image log measured in the survey area (borehole H-9) Kangnam, Seoul. Left : amplitude image, middle : travelttime image, right : arrow plot for the tectonic elements.	176
Fig. 68.	(continued).	177
Fig. 68.	(continued).	178

Fig. 69.	Televiwer image log measured in the survey area (borehole H-5) Kangnam, Seoul. Left : amplitude image, middle : travelttime image, right : arrow plot for the tectonic elements.	179
Fig. 69.	(continued).	180
Fig. 69.	(continued).	181
Fig. 70.	Representation of dip directions of all extracted tectonic elements measured in the survey area (borehole H-9, H-5) Kangnam, Seoul.	183
Fig. 71.	Representation of dip angles of all extracted tectonic elements measured in the survey area (borehole H-9, H-5) Kangnam, Seoul.	184
Fig. 72.	Representation of dip directions of all extracted tectonic elements within the user defined depth intervals.	185
Fig. 73.	All tectonic elements derived from the borehole H-9, H-5 are contrasted in the arrow plots.	186
Fig. 74.	Shown is the Televiwer rock strength derived from the borehole H-9, H-5.	187
Fig. 75.	Plan view of fault analysis showing dip and dip direction. Solid line corresponds to the dip direction ranging within $\pm 45^\circ$ from the cross section (H-9 ~ H-5), otherwise dotted line.	188
Fig. 76.	Plan view of layer boundary analysis showing dip and dip direction. Solid line corresponds to the dip direction ranging within $\pm 45^\circ$ from the cross section (H-9 ~ H-5), otherwise dotted line.	189
Fig. 77.	Rose diagrams showing dip direction.	191
Fig. 78.	Pole diagrams showing dip angle.	192

Fig. 79.	Televiewer image log measured in the survey area (borehole H1) of Incheon subway construction. Left : amplitude image, middle : travelttime image, right : arrow plot for the tectonic elements.	194
Fig. 79.	(continued).	195
Fig. 79.	(continued).	196
Fig. 79.	(continued).	197
Fig. 80.	Televiewer image log measured in the survey area (borehole H2) of Incheon subway construction. Left : amplitude image, middle : travelttime image, right : arrow plot for the tectonic elements.	198
Fig. 80.	(continued).	199
Fig. 80.	(continued).	200
Fig. 80.	(continued).	201
Fig. 80.	(continued).	202
Fig. 80.	(continued).	203
Fig. 80.	(continued).	204
Fig. 80.	(continued).	205
Fig. 80.	(continued).	206
Fig. 80.	(continued).	207
Fig. 81.	Televiewer image log measured in the survey area (borehole H3) of Incheon subway construction. Left : amplitude image, middle : travelttime image, right : arrow plot for the tectonic elements.	208

Fig. 81. (continued).	209
Fig. 81. (continued).	210
Fig. 81. (continued).	211
Fig. 81. (continued).	212
Fig. 81. (continued).	213
Fig. 81. (continued).	214
Fig. 81. (continued).	215
Fig. 82. Rose and pole diagrams for the tectonic elements of two depth intervals in borehole H1.	217
Fig. 83. Rose and pole diagrams for the tectonic elements of two depth intervals in borehole H2.	218
Fig. 84. Rose and pole diagrams for the tectonic elements of two depth intervals in borehole H3.	219
Fig. 85. Plan view of fault analysis showing dip and dip direction. Solid line corresponds to the dip direction ranging within $\pm 45^\circ$ from the cross section (H-1 ~ H-3), otherwise dotted line.	220
Fig. 86. Plan view of layer boundary analysis showing dip and dip direction. Solid line corresponds to the dip direction ranging within $\pm 45^\circ$ from the cross section (H-1 ~ H-3), otherwise dotted line.	221
Fig. 87. Shown is the Televiewer rock strength derived from the borehole H1 in the survey area of Incheon subway construction.	222
Fig. 88. Shown is the Televiewer rock strength derived from the borehole H2 in the survey area of Incheon subway construction.	223

Fig. 89.	Shown is the Televiwer rock strength derived from the borehole H3 in the survey area of Incheon subway construction.	224
Fig. 90.	Plot of the layer boundaries derived from the layer boundary analysis and the Televiwer image log.	227
Fig. 91.	Televiwer image log measured in the survey area (borehole WB5) Pyongtaek, Korea. From left ro right, amplitude image, traveltime image, rock strength, arrow plot.	229
Fig. 91.	(continued).	230
Fig. 91.	(continued).	231
Fig. 91.	(continued).	232
Fig. 91.	(continued).	233
Fig. 91.	(continued).	234
Fig. 91.	(continued).	235
Fig. 91.	(continued).	236
Fig. 91.	(continued).	237
Fig. 92.	Representation of dip directions of all extracted tectonic elements derived from the borehole WB5.	239
Fig. 93.	Representation of dip directions of all extracted tectonic elements within the user defined depth intervals.	240
Fig. 94.	Shown is the Televiwer rock strength derived from the borehole WB5.	242

Fig. 95. Televiewer image log measured in the survey area (borehole BH9-1) Daegu, Korea. From left to right, amplitude image, traveltime image, rock strength, arrow plot.	243
Fig. 95. (continued).	244
Fig. 95. (continued).	245
Fig. 95. (continued).	246
Fig. 96. Televiewer image log measured in the survey area (borehole B-7) Taegu, Korea. From left to right, amplitude image, traveltime image, rock strength, arrow plot.	248
Fig. 96. (continued).	249
Fig. 96. (continued).	250
Fig. 96. (continued).	251
Fig. 96. (continued).	252
Fig. 96. (continued).	253
Fig. 97. Geotomographic measuring system Upper part: old AD converter device (SEAMEX compact) with 24 DSP boards. Lower part: new AD converter device (SUMMIT compact) with 48 DSP boards.	260
Fig. 98. Geotomographic measuring system - borehole explosive source. The picture shows the use of a single seismic detonator developed in Korea.	262

Fig. 99.	Geotomographic measuring system - multiple shot borehole source. Shown is the schematic of the multiple shot borehole source developed first in Korea.	264
Fig. 100.	Geotomographic measuring system - a blasting machine with a multiple shot distribution unit.	265
Fig. 101.	Geotomographic measuring system. Shown is the schematic of the blasting machine with a multiple shot distribution unit.	266
Fig. 102.	Geotomographic measuring system. Upper part: the detonator of Hanwha is compared with that of Nobel. Lower part: the detonator is connected to the multiple-explosion cable.	267
Fig. 103.	Geotomographic measuring system. Shown is the operating procedure of the multiple shot borehole source.	269
Fig. 104.	Source and receiver locations for the crosshole measurement.	270
Fig. 105.	Delay time and amplitude test for the new borehole seismic detonator developed by Hanwha using the multiple shot borehole source. The data show very stable time delay.	271
Fig. 105.	(continued).	272
Fig. 105.	(continued).	273
Fig. 106.	Delay time and amplitude test for the new borehole seismic detonator developed by Nobel using the multiple shot borehole source. Compare with the data in Fig. 105.	274
Fig. 106.	(continued).	275

Fig. 106.	(continued).	276
Fig. 107.	Compared are the blasted detonators. Upper part: from the Hanwha detonator. Lower part: from the Nobel detonator.	277
Fig. 108.	Delay time and amplitude test for the old borehole seismic detonator developed by Hanwha using the single shot borehole source. Compare with the data in Fig. 105.	278
Fig. 108.	(continued).	279
Fig. 109.	Frequency content test for the Hanwha borehole seismic detonator using the multiple shot borehole source.	281
Fig. 110.	Frequency content test for the Nobel borehole seismic detonator using the multiple shot borehole source. Compare with the result in Fig. 109.	282
Fig. 111.	Frequency content test for the Hanwha borehole seismic detonator using the single shot borehole source. Compare with the result in Fig. 109.	283
Fig. 112.	Shown is the multiple-explosion cable after blasting.	284
Fig. 113.	Shown is the complete multiple shot borehole source modified by Hanwha.	285
Fig. 114.	Borehole locations for Eomgung geotomographic survey.	287
Fig. 115.	Outlook of Eomgung survey area in Pusan.	288
Fig. 116.	Eomgung geotomographic survey. (a) All raypaths perpendicular to the borehole axis are shown.	290

Fig. 116.	(continued).	
	(b) Crosshole data derived from the measuring procedure in (a).	.. 291
Fig. 116.	(continued).	
	(c) Frequency content derived from the data in (b).	..... 293
Fig. 117.	Eomgung geotomographic survey.	
	Example of crosshole data acquired from the BH18-BH20 cross section.	
	(a) Source was located at shot point 32 (borehole BH18) and receiver arrangement at BH20 borehole.	..... 295
Fig. 117.	(continued).	
	(b) Shot gather 32 (trace normalization).	..... 296
Fig. 117.	(continued).	
	(c) Shot gather 32 (file normalization).	..... 297
Fig. 117.	(continued).	
	(d) Frequency content derived from the data in (c).	..... 298
Fig. 118.	Eomgung geotomographic survey.	
	(a) All raypaths perpendicular to the borehole axis are shown.	..... 300
Fig. 118.	(continued).	
	(b) Crosshole data (trace normalization) derived from the measuring procedure in (a).	..... 301
Fig. 118.	(continued).	
	(c) Frequency content from the data in (b).	..... 302
Fig. 118.	(continued).	
	(d) Crosshole data (file normalization) derived from the measuring procedure in (a).	..... 303

Fig. 118.	(continued).		
	(e) Frequency content from the data in (d).	.....	304
Fig. 119.	Eomgung geotomographic survey.		
	Example of crosshole data acquired from the BH8-BH7 cross section.		
	(a) Source was located at shot point 18 (borehole BH8) and receiver arrangement at BH7 borehole.	.....	305
Fig. 119.	(continued).		
	(b) Shot gather 18 (trace normalization).	.....	306
Fig. 119.	(continued).		
	(c) Frequency content from the data in (b).	.....	307
Fig. 119.	(continued).		
	(d) Shot gather 18 (file normalization).	.....	308
Fig. 119.	(continued).		
	(e) Frequency content from the data in (d).	.....	309
Fig. 120.	Eomgung geotomographic survey.		
	Example of crosshole data (file normalization) acquired from the BH8-BH7 cross section.		
	(a) shot gather 1 (b) shot gather 2.	.....	311
Fig. 120.	(continued).		
	(c) shot gather 3 (d) shot gather 4	.....	312
Fig. 120.	(continued).		
	(e) shot gather 15 (f) shot gather 16	.....	313
Fig. 120.	(continued).		
	(g) shot gather 17 (h) shot gather 18	.....	314
Fig. 120.	(continued).		
	(i) shot gather 22 (j) shot gather 23	.....	315

Fig. 120.	(continued).		
	(k) shot gather 30	(l) shot gather 31	..... 316
Fig. 121.	Eomgung geotomographic survey.		
	(a) Shot gather 30 from the BH8-BH7 cross section.		
	(b) Frequency content from the data in (a).		..... 317
Fig. 121.	(continued).		
	(c) Frequency content after eliminating the high frequency content using bandpass (frequency range 0 Hz~1000 Hz) mapping.		
	(d) Shot gather 30 derived from the frequency content in (c).		..... 318
Fig. 122.	Eomgung geotomographic survey.		
	Interpreted physical properties of rocks in the Eomgung survey area.		..... 319
Fig. 123.	Outlook of Kwaebeob survey area in Pusan.		..... 321
Fig. 124.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Borehole(B1~B4) locations for the geotomographic measurements.		323
Fig. 125.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Plan view of the concrete piles intersecting the shield tunnel.		..... 324
Fig. 126.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Source and receiver locations for the crosshole seismic survey.		.... 325
Fig. 127.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Examples of crosshole data acquired from the B1-B2 cross section.		
	(a) shot gather 3	(b) shot gather 4.	..... 327
Fig. 127.	(continued).		
	(c) shot gather 5	(d) shot gather 6.	..... 328
Fig. 127.	(continued).		
	(e) shot gather 7	(f) shot gather 8.	..... 329

Fig. 127.	(continued).		
	(g) shot gather 9	(h) shot gather 10.	..... 330
Fig. 128.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Shown are all raypaths perpendicular to the borehole axis.		..... 331
Fog. 129.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Crosshole data and the corresponding frequency content derived from the measuring procedure in Fig. 128.		..... 332
Fig. 130.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Source and receiver locations for the crosshole seismic survey.		.... 334
Fig. 131.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	(a) shot gather 4	(b) shot gather 5	..... 335
Fig. 131.	(continued).		
	(c) shot gather 15	(d) shot gather 16	..... 336
Fig. 131.	(continued).		
	(e) shot gather 17	(f) shot gather 18	..... 337
Fig. 132.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Crosshole data (shot gather 8, 9) acquired from the B3-B4 cross section.		..... 338
Fig. 133.	Kwaebeob geotomographic survey.		
	Shown are the interpreted physical properties of rocks and the estimated pile depth in the Kwaebeob survey area.		..... 339
Fig. 134.	Kangnam geotomographic survey.		
	Borehole locations for the crosshole seismic survey.		..... 342

Fig. 135.	Kangnam geotomographic survey. Frequency content test from an example of crosshole data from the H-4 - H-5 cross section. Source (shot number 7) was located at 47m (ground level) and receivers were located at 52m~4m.	343
Fig. 135.	(continued). Source (shot number 25) was located at 30m (ground level) and receivers were located at 52m~4m.	344
Fig. 136.	Kangnam geotomographic survey. Raypath diagrams for the geotomographic measurements.	345
Fig. 137.	Kangnam geotomographic survey. All raypaths perpendicular to the borehole axis are shown.	346
Fig. 138.	Kangnam geotomographic survey. Crosshole data derived from the measuring procedure in Fig. 137.	347
Fig. 139.	Kangnam geotomographic survey. Examples of crosshole data (shot gather 12~17) acquired from the H-2 - H-1 cross section.	349
Fig. 139.	(continued).	350
Fig. 140.	Kangnam geotomographic survey. Examples of crosshole data (shot gather 13~18) acquired form the H-2 - H-3 cross section.	352
Fig. 140.	(continued).	353
Fig. 141.	Kangnam geotomographic survey. Geotomographic velocity distribution (tomogram) of H1-H2-H3 cross section.	354
Fig. 142.	Kangnam geotomographic survey. Interpreted physical properties of rocks of H1-H2-H3 cross section.	356

Fig. 143.	Kangnam geotomographic survey. A contour display of base rock structure and the borehole locations.	357
Fig. 144.	Kangnam geotomographic survey. A 3-dimensional topographic view of base rock structure of the Kangnam survey area.	358
Fig. 145.	Kangnam geotomographic survey. A contour display of the intermediate base rock structure and the borehole locations	359
Fig. 146.	Incheon subway geotomographic survey. (a) Example of raypath diagrams for the H1-H2 crosshole measurements.	360
Fig. 146.	(continued). (b) Example of raypath diagrams for the H2-H3 crosshole measurements.	361
Fig. 147.	Incheon subway geotomographic survey. Example of crosshole data acquired from the H1-H2 cross section. (a) shot gather 11.	362
Fig. 147.	(continued). (b) shot gather 15.	363
Fig. 147.	(continued). (c) shot gather 23.	364
Fig. 147.	(continued). (d) shot gather 29.	365
Fig. 147.	(continued). (e) shot gather 35.	366

Fig. 148.	Incheon subway geotomographic survey. Example of crosshole data acquired from the H3-H2 cross section. (a) shot gather 13.	368
Fig. 148.	(continued). (b) shot gather 16.	369
Fig. 148.	(continued). (c) shot gather 18.	370
Fig. 148.	(continued). (d) shot gather 25.	371
Fig. 148.	(continued). (e) shot gather 28.	372
Fig. 148.	(continued). (f) shot gather 33 (trace max.).	373
Fig. 148.	(continued). (g) shot gather 33 (given value).	374
Fig. 149.	Incheon subway geotomographic survey. Geotomographic velocity distribution (tomogram) of the H1-H2 cross section.	375
Fig. 150.	Incheon subway geotomographic survey. Geotomographic velocity distribution (tomogram) of the H2-H3 cross section.	376
Fig. 151.	Incheon subway geotomographic survey. Interpreted physical properties of rocks of H1-H2-H3 cross section.	377
Fig. 152.	Bupyong subsidence geotomographic survey. Raypath diagram for the geotomographic measurements.	379

Fig. 153.	Bupyong subsidence geotomographic survey. Example of crosshole data (shot gather 15, 16) acquired from the H2-H3 cross section.	380
Fig. 154.	Bupyong subsidence geotomographic survey. Example of crosshole data (shot gather 29, 30) acquired from the H2-H3 cross section.	381
Fig. 155.	Bupyong subsidence geotomographic survey. Example of crosshole data (shot gather 39, 40) acquired from the H2-H3 cross section.	382
Fig. 156.	Bupyong subsidence geotomographic survey. Geotomographic velocity distribution (tomogram) of the H2-H3 cross section.	383
Fig. 157.	Bupyong subsidence geotomographic survey. Interpreted physical properties of rocks of the H2-H3 cross section.	385

Table List

Table 1.	Dip angle, dip direction and thickness of the tectonic elements derived from the Televiwer image are summarized.	76
Table 1.	(continued).	77

여 백

제 1 장 서 론

WTO 체계하에서 국내 모든 분야는 생존을 위한 기술무한경쟁을 받아들여야 하는 입장에 놓여 있다. 즉, 학계는 물론 산업현장에 이르기까지 기술의 국제경쟁력 강화는 바로 현실적인 과제로 대두되고 있으며 그에 따라 나름대로의 과감한 체질 개선이 도처에서 진행되고 있는 실정이다. 물론, 건설분야에서도 이러한 경향은 결코 예외는 아니다. 더구나, 최근 잇달아 발생한 국내 대형사고들은, 비록 이러한 사고가 국내에만 일어나는 것이 아니라 하더라도, 일반 건설 기술인들에게 자성의 계기를 마련한 것이 되었으며 동시에 정부도 우선 시설물 안정성에 대한 국민의 신뢰를 얻기 위해 각종 제도 개선 차원의 다각적인 대책을 적극적으로 검토하고 있다. 여기서 시설물 안정성은 바로 공사의 불확실성을 조장하는 여러가지 요인을 제거하는데 있으며 그 중 지반상태에 대한 불확실성은 특히 국내에서 소홀히 다룬(극복)대상이 되어 왔다. 예를 들면, 국내 터널공사(예: 지하철, 전력구)에서 발생한 무수한 함몰사고는 대부분 지반상태의 불확실성에서 비롯되었으며, 이를 극복하기 위한 노력보다는 오히려 그러한 불확실성이 자연의 조화에 대한 불가항력이라는, 예상할 수 없는 구실로써 간주되어왔던 것도 부인할 수 없는 것이다. 이러한 견해 하에서 지반조사는 비경제적이라고 보는 안일한 주장이 배태될 수 있었으며 그 배후에는 무엇보다 대단히 불만족스러운 지반조사 관행도 일조를 한 것으로 보고 있다. 그런데, 최근에 이르러 지반조사 분야에서 대단히 긍정적인 변화가 일고 있다. 즉, 지금까지 거의 경시되어 온 지반조사를 위해 보다 선진화된 기법을 모색함으로써 지반에 대한 불확실성을 극복하고자 하는 노력이 경주되고 있으며 그로 인해 현재 국내에는 많은 양의 첨단 탐사장비와 더불어 아직까지 생소한 새로운 조사 기법 명칭(예: radar 탐사, 토모그래피)이 유포되고 있다. 이러한 변모는 우

선 전면 책임감리제, 사고 책임소재의 분담(시공사-감리-발주처) 및 기술의 무한경쟁이라는 시대적 흐름에 의해 촉구되었다고 할 수 있겠으나 그보다 성실 시공을 위한 국내 건설인의 자성이 큰 계기가 된 것으로 본다.

본 과제수행에서 지난 5년간 꾸준히 지속적으로 축적된 기술개발 내용(텔레뷰어 및 토모그래피)은 우선 상기 시대적 요구에 적절히 대처될 수 있는 것이라 할 수 있겠으며 한편으로 그간 보여준 다양한 현장응용 성공사례가 무엇보다 지반조사에 대한 필요성 내지 신뢰성을 불러일으킨 것으로 볼 수 있다. 지반조사의 목적은 대체로 암반분류에 귀결된다. 암반분류는 크게 암석의 물성(예: 탄성파속도)에 근거한 암층분리와 절리상태 파악으로 대변된다. 여기서 암층분리에는 주로 각 암층의 물성 및 암층의 경계면이외에도 파쇄대 및 지하공동 유무는 주요 내용이 된다. 반면, 암반 내에 형성된 절리는 기존 암층의 물성이나 강도를 크게 변화시킬 뿐만 아니라 용질을 유동시키는 통로가 되기 때문에 지반조사에서는 결코 간과될 수 없는 정보가 된다. 특히, 국내 천부지질에서 흔히 볼 수 있는 변성암 내지 화성 변성암 지역에서는 절리구조 규명이 무엇보다 바람직한 것이 되며 때에 따라서는 그 자체로써 주어진 탐사목적(예: 절취사면 설계, 방사성 폐기물 유동)에 결정적인 기여를 할 수 있는 것이다.

본 과제 최종목표인 텔레뷰어 및 토모그래피 기술의 국내 토착화는 당해년도(최종년도)에 이르러 우선 각 기술의 선진화 내지 활성화에 초점을 두면서 기술의 국내 보편화(정규화)를 도모하는 데 역점을 두고 있다. 여기서 기술의 선진화란 ① 탐사 시간을 최소화함과 동시에 고분해능 측정데이터를 취득하고, ② 고도의 전산처리 시스템을 확립하여 측정데이터로부터 보다 바람직한 매개변수를 적극적으로 도출하는 과정을 말한다. 한편, 기술의 활

성화는 우선 국내 다양한 현장실험을 통하여 토목분야에서 요구하는 바람직한 매개변수를 실질적으로 얻을 수 있음을 입증하고 나아가 그들이 지반조사를 위한 핵심요구 기술로써 일반화(정규화)되도록 각종 정보활동(학회 및 심포지움)을 적극적으로 펼쳐나가는 데 있다.

제 2 장에는 우선 한·독 국제공동연구를 통하여 이룩한 텔레뷰어 측정시스템 개발과정(제 3 절)을 서술하고 동시에 그것이 현존하는 세계적인 기술수준에서 최대 분해능을 보여주고 있음을 보여주고 있다. 제 4 절은 텔레뷰어 본연의 주요 기능들 즉, 절리의 정확한 경사 방향 및 경사각 규명, 암석강도 산출, 공경검층 기능, 자력탐사 기능 및 시추공 편차검증 기능을 국내 현장응용 사례에 비추어 구체적으로 서술하고 있다. 특히, 텔레뷰어 암석강도치는 연속적인 in-site값이며 더구나 공간적인 개념에서 유래되었기 때문에 그의 유용성은 크게 강조되고 있다. 제 5 절에는 텔레뷰어를 응용함으로써 얻게 되는 모든 결과들이 부분적으로 혹은 총체적으로 활용될 수 있는 응용분야 내지 그에 따른 기대효과를 요약하고 있다. 제 6 절에는 텔레뷰어 측정데이터로부터 바람직한 결과를 얻기까지 거쳐야 할 주요 전산처리과정을 서술하고 또한 분석결과를 효율적으로 표현할 수 있는 다양한 도면화 기법을 소개하고 있다. 끝으로, 제 7 절은 국내 텔레뷰어 현장응용 성공사례들을 선별하여 주어진 탐사목적에 비추어 요약하고 있다.

탄성파 토모그래피에 대한 기술개발 내용 및 현장응용 성공사례들은 제 3 장에서 다루고 있다. 당해년도에는 무엇보다 탐사의 효율성을 극대화함으로써 기술의 국제 경쟁력강화에 초점을 두었다. 여기에는 다음과 같은 기술개발이 연구 대상이 되었다.

- 발생원 시추공 내에서 여러 개의 뇌관을 연속으로 발파하게 함으로써 (다중발파 시스템 개발) 탐사 시간을 크게 단축한다.
- 수진기 시추공 내에 48개의 수진기를 장착한 새로운 수진장치(이전에는 24개 수진기 장착)를 제작하여 응용할 수 있도록 함으로써 탐사 시간을 또 다시 크게 단축하게 한다.
- 기존의 AD장치(SEAMEX compact) 및 데이터 제어장치를 크게 보완 함으로써 고분해능 데이터를 취득하게 한다.

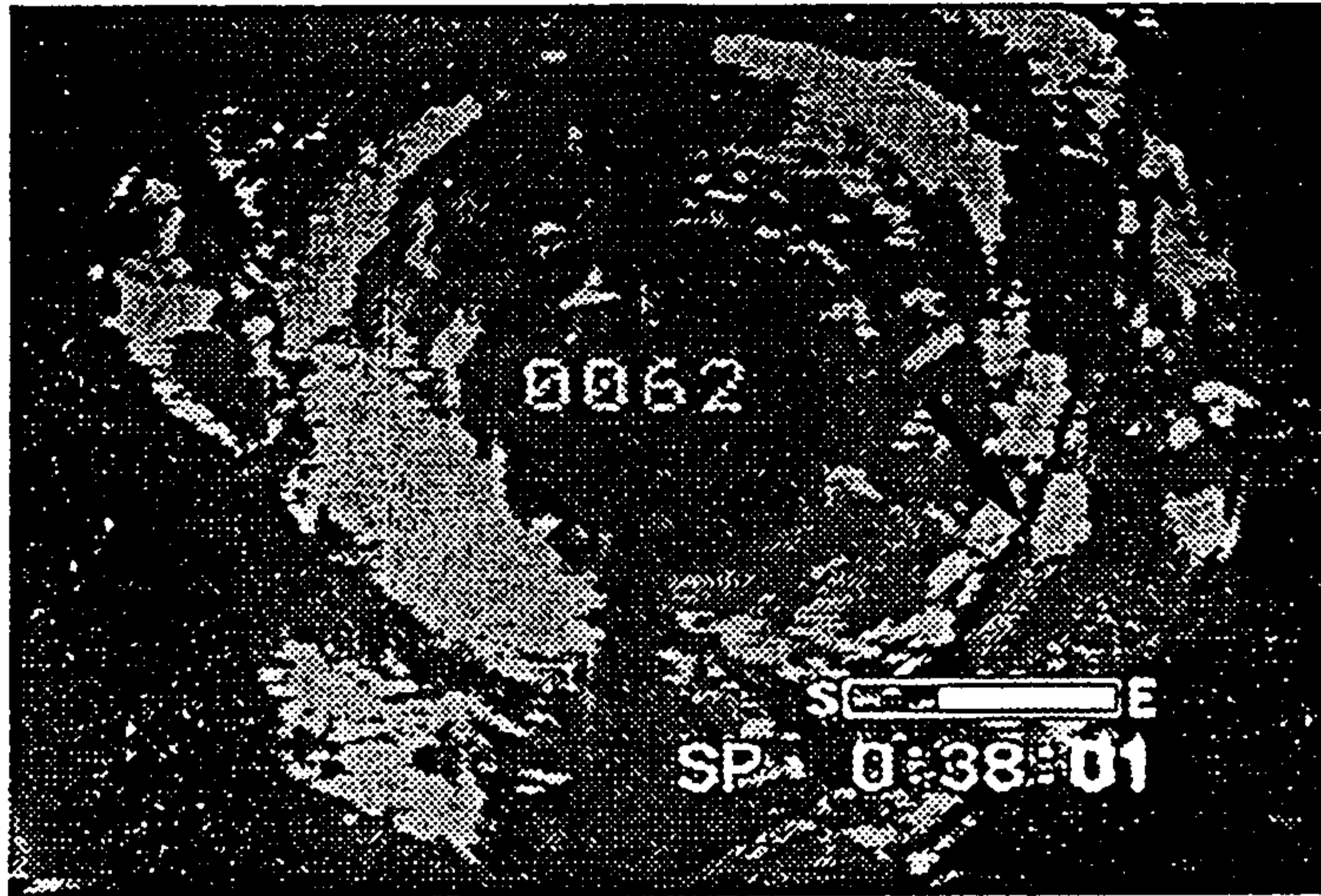
제 2 절 및 제 3 절에는 상기 기술 개발 내용을 상술하고 있으며 특히 한·독 국제공동연구에 의해 개발된 다중발파 시스템 개발(제 3 절 참조)은 국내 토모그래피 활성화를 위한 디딤돌이 되고 있음을 보여주고 있다. 당해년도의 토모그래피 현장 응용은 우선 부산지역 연약지반을 대상으로 수행하여 그에 따른 제반 현장응용 기술을 축적하게 되었으며(제 4 절 참조) 나아가서 대형구조물 및 터널공사를 위한 지반조사도 병행하게 되었다.

제 2 장 텔레뷰어기법의 응용

제 1 절 개 요

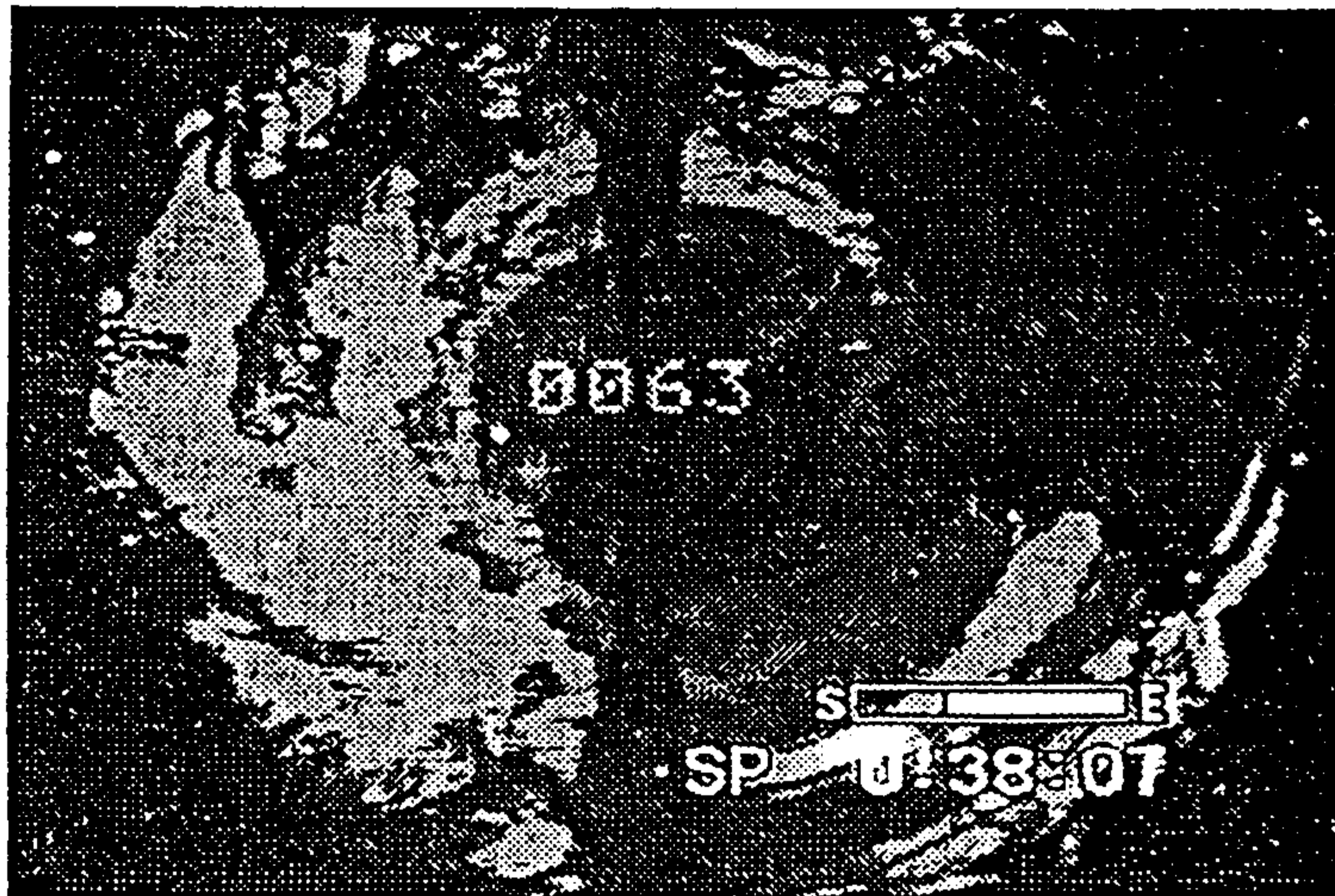
최근 국내에는 두가지 시추공 검층기법이 개발되어 서로 유사한 이름으로 급격히 보급되고 있다. 그 하나는 시추공벽을 바로 광학적으로 촬영하여 영상화하는 시추공 TV(television) 검층 시스템(borehole TV logging system 혹은 borehole camera TV logging system) 혹은, 간단히 표현하여 시추공 내시경이며, 또 다른 하나는 초음파를 시추공벽에 주사하여 반사되는 초음파의 진폭 및 주시치를 영상화하는 시추공 초음파 주사 검층기법(borehole acoustic scanner(Televiewer)) 혹은 간략하게 텔레뷰어(Televiewer)이다. 상기 기법들은 시추공벽을 그대로 묘사하는 데에서 서로 공통점을 찾을 수 있으나 그들 각각의 근본원리나 응용 효율성은 상당한 차이를 보여주고 있다. 예를 들면 시추공 내시경은 직접 시추공벽을 TV촬영하기 때문에 시추공 내벽에 표출된 암반상태를 시각적으로 관찰할 수 있는 큰 장점이 있다. Fig. 1은 국내 화성변성암 지질에서 내시경에 의한 시추공 촬영 결과(권광수 외, 1993)를 나타내고 있다. 여기서 화살표로 표시된 부분((a)참조)은 절리를 나타내고 있으며 특히, 공벽이 크게 부서진 부분((b)의 우상부 어두운 부위)주위에는 절리를 통해 유입되는 지표수가 관찰된다((d)에서 매우 밝은 부분도 해당). 이러한 큰 유용성은 최근 대량의 외국산 시추공 TV 카메라의 국내 유입을 초래하였다. 그러나, 그들 대부분은 잦은 고장으로 인하여 대단히 낮은 정상 가동율을 보여주고 있는 실정이다. 당소에서는 지난 수년간 시추공 내시경에 대한 현장 경험을 가장 많이 보유하고 있는 기업체(강서 엔지니어링)와 공동 연구하에 기존 장비 구성의 취약점을 근원적으로 보완한 새로운 시추공 TV검층 시스템을 개발하기에 이르

(a)



[좌하부와 우중앙에서 아래로 등근 검은 선 - 절리]
[좌하부의 검은 부분 - 공벽이 부서진 곳]

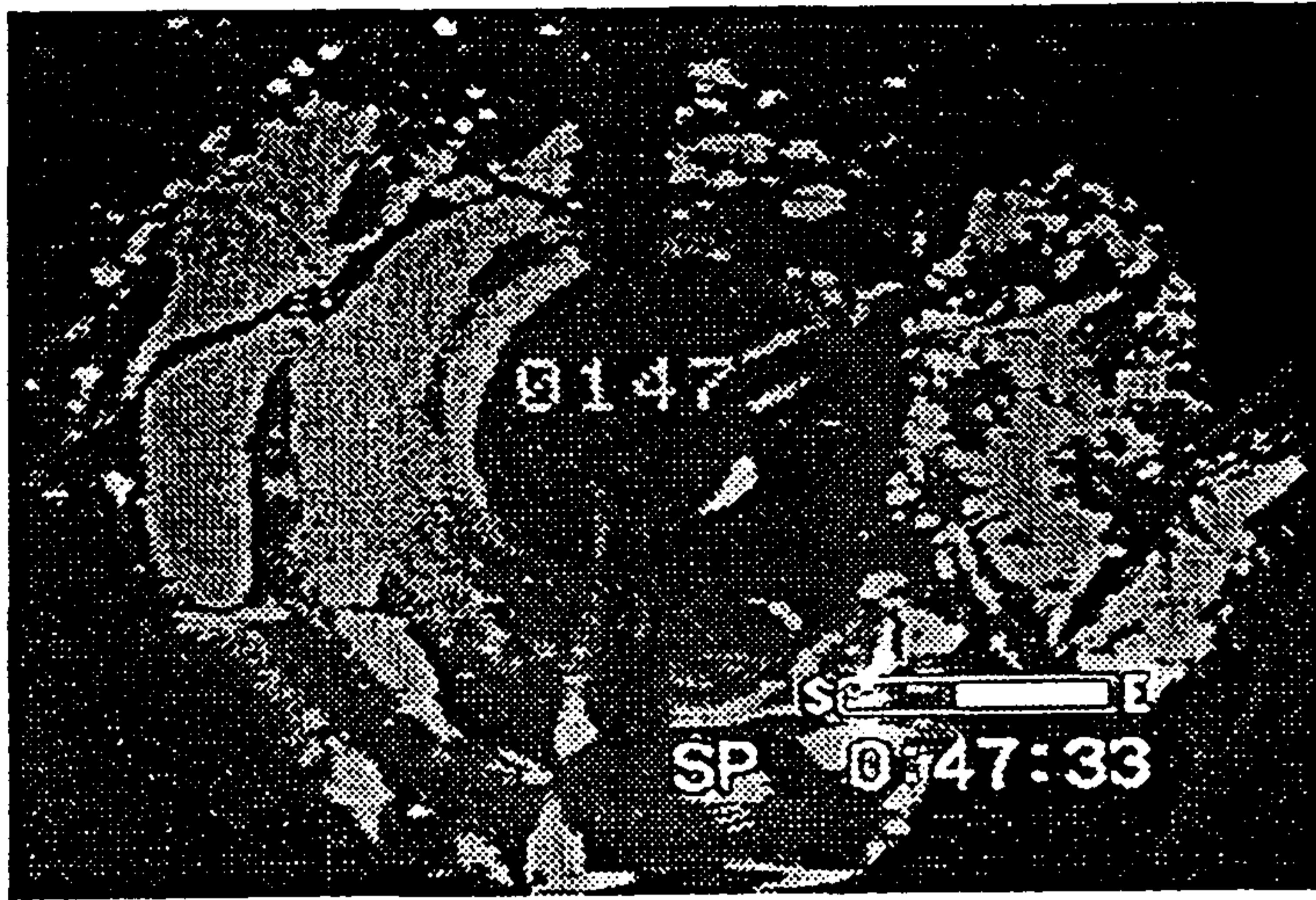
(b)



[좌중앙 상부의 검은 부분 - 일부 부서진 절리]
[우상부의 큰 검은 부분 - 공벽이 크게 부서진 곳]

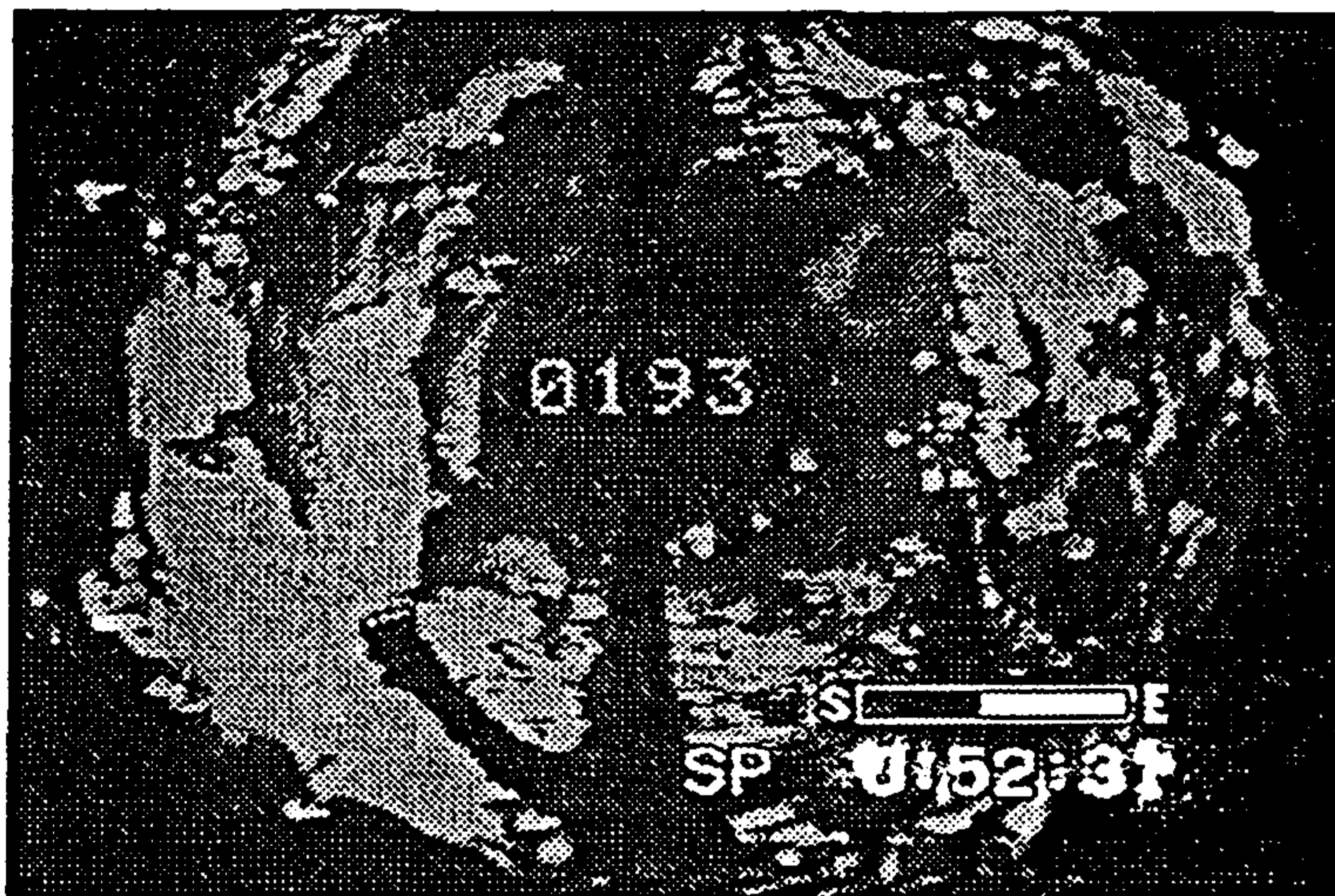
Fig. 1. Optical view of the borehole wall with the Borehole Camera TV Logging System. The measurement was made in a water-filled hole at Bupyong survey site. Fractures are visible as a dark line. In addition, flowing water from the fractures into the borehole can be seen clearly (bright area in (d)).

(c)



[좌중앙 π 자 형태 검은선 - 절리]
[우상부, 우하부의 검은 부분 - 공벽이 부서진 곳]

(d)



[중앙하부 반원형태 굵은 검은선 - 일부 부서진 절리]
[매우 밝은 부분 - 절리를 통해 유입되는 지표수]

Fig. 1. (continued).

렸다(정현기 외, 1995). 그로 인해 우선 저렴한 국산 내시경이 생산될 수 있었으며 더구나 발전기를 배제한 무수액 축전지 전원 사용으로 인한 장비의 휴대용화, 스크린 자막 내용(심도의 cm 표시, 시추공명, 시간, 날짜 등) 제어를 위한 software 개발 및 고화질을 위한 41만 화소(pixels) CCD(전하결합소자) 모듈 제작 등은 무엇보다 국내의 불리한 탐사여건(예: 산악지대 탐사)을 극복하면서 양질의 데이터를 얻게할 뿐만 아니라 고장시 신속한 자체 보수를 통한 장비의 가동율을 크게 높이는 것이 되었다.

텔레뷰어는 시추공 내시경의 여러가지 주요기능들 즉, ① 공내의 지하수 유동 탐지, ② 지하공동의 촬영, ③ 공내 물이 없을 경우도 촬영할 수 있는 기능을 갖고 있지 않다. 그러나, 공벽에 반사되는 초음파의 주시 및 진폭은 바로 암반의 물성과 직접적으로 연관되고 동시에 절리에 대한 정량적인 분석을 가능하게 하기 때문에 그의 응용 결과는 무엇보다 암반구조를 대변할 수 있는 정확한 자료가 되는 것이다. 즉, 시추공 내시경이 Fig. 1에서 나타난 바 비록 절리 상태에 대한 개략적인 정보를 보여주고 있으나 암반내 절리구조를 대변할 수 있는 정확성에는 크게 미치지 못하고 있는 것이다. 한편, 텔레뷰어 응용에서 산출될 수 있는 또 다른 결실인 정확한 암석강도(3차원)변화 및 응력장 상태 파악은 암반구조 연구에서 결코 간과될 수 없는 기본 자료인 것이다. 따라서 시추공 내시경은 여러면(예: 용질유동)에서 텔레뷰어 분석결과를 보완할 수 있는 훌륭한 검층기법이라 할 수 있다.

텔레뷰어 기법은 상기 서술된 다양한 응용성에도 불구하고 최근에는 그의 실효성을 보게된 그 배후에는 무엇보다 hardware 구성 및 그에 따른 운용 기술, 나아가서 방대한 데이터의 전산처리 면에서 상당한 어려움이 뒤따른 데 있었다고 볼 수 있다. 1927년 Conrad, Marcel Schumberger에 의

해 최초로 시추공 검층법(당시 전기검층법)이 시도된 후 이에 병행하여, 지금까지 보편화되고 있는 제반 물리 검층법(예: 음파검층, 온도검층, 밀도검층, 공경검층(caliper logging))들도 현장 응용 내지 분석 기술에 이르기까지 급격한 발전을 보게되어 일찌기 그들은 정규화된 물리검층법으로 정착되어 왔다. 반면, 텔레뷰어 기법은 1964년에 이르러서야 미국 Mobil Oil에서 최초로 시도되었으며 그로 인한 측정 데이터는 텔레뷰어 본연의 기능에는 크게 미흡한 자료에 불과하였다. 이에 대한 보완연구는 70년대에도 지속적으로 계속되었으나 이렇다할 바람직한 성과는 얻지 못하게 되었다. 1980년대에 이르러 특히 사회간접 자본사업의 활성화에 따른 다양한 대형 토목공사 지반조사를 위해 상기 기법의 응용성이 재차 크게 부각되었다(Wiley, 1980; Broding, 1981). 예를 들면, 암반 내에 형성된 절리 구조는 방사능의 유출, 비축된 석유 및 가스의 유출, 지하수의 흐름 및 터널공사 안정성들과 직접적으로 상관되기 때문이었다. 그 후 1988년에 이르러 Schullumberger회사에서는 4개의 시추공에 대한 바람직한 측정 데이터를 얻게 되었다. 한편, 독일 DMT(Deutsche Montan Technologie) 물탐연구소도 역시 1980년도 초반에 최초의 텔레뷰어 검층기기를 개발하여 그로부터 바로 디지털 데이터를 얻음으로써 근원적으로 분해능의 고도화를 이루었으며(Hinz and Schepers, 1981, 1983) 나아가서 초음파 빔의 초점화를 위한 다양한 세부 기술들이 보완되어 최근에는 하나의 완벽한 시스템 즉, FACSIMILE(Focussed ACoustic System to Image the Inside of boreholes and pipes)라는 이름으로, 그의 실효성은 세계적인 기술 수준에서 독보적임이 입증되고 있는 실정이다.

다음절(제 2 절)에는 우선 텔레뷰어의 근본원리가 서술되고 있으며 그의 현실화를 위한 최첨단 측정시스템(FACSIMILE-40)은 제 3 절에서 요약되고 있다.

제 2 절. 근본원리

탄성파(텔레뷰어에서는 초음파)가 지층경계면에 수직으로 입사되면(Fig. 2 참조) 그에 따른 반사파의 에너지(진폭)는 그 경계면의 반사계수 R에 의해 가늠된다.

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \quad (1)$$

V_1, V_2 : 각 매질의 탄성파 속도(P파)

ρ_1, ρ_2 : 각 매질의 밀도

$\rho_1 V_1$: 입사 매질의 임피던스

$\rho_2 V_2$: 굴절 매질의 임피던스

반사계수 R은 일반적으로 입사각, 탄성파의 주파수, 매질의 흡수성에 따라 변화하나 입사각이 임계각보다 작을 경우에는 식(1)이 1차 근사로서 대변된다. 경험에 의하면 입사각이 약 6° 미만에서는 식(1)이 유효하다. Fig. 2의 아랫부분은 초음파빔이 물에서 연직으로 암반에 입사하는 상태를 보여주고 있다. 만약 초음파 빔이 암반위에 입사되는 영역이 대단히 작을 경우 즉, 빔의 에너지 방사각(opening angle)이 약 12° (현실 응용에서는 약 6° 미만의 빔이 사용) 미만이면 반사되는 초음파 빔의 진폭은 식(1)에 따라 관찰될 수 있다는 것이다. 이러한 빔이 바로 절리위에 입사된다면 반사되는 에너지는 큰 변화를 나타내게 된다. 즉, 암반 절리 내부가 점토로 충전되었

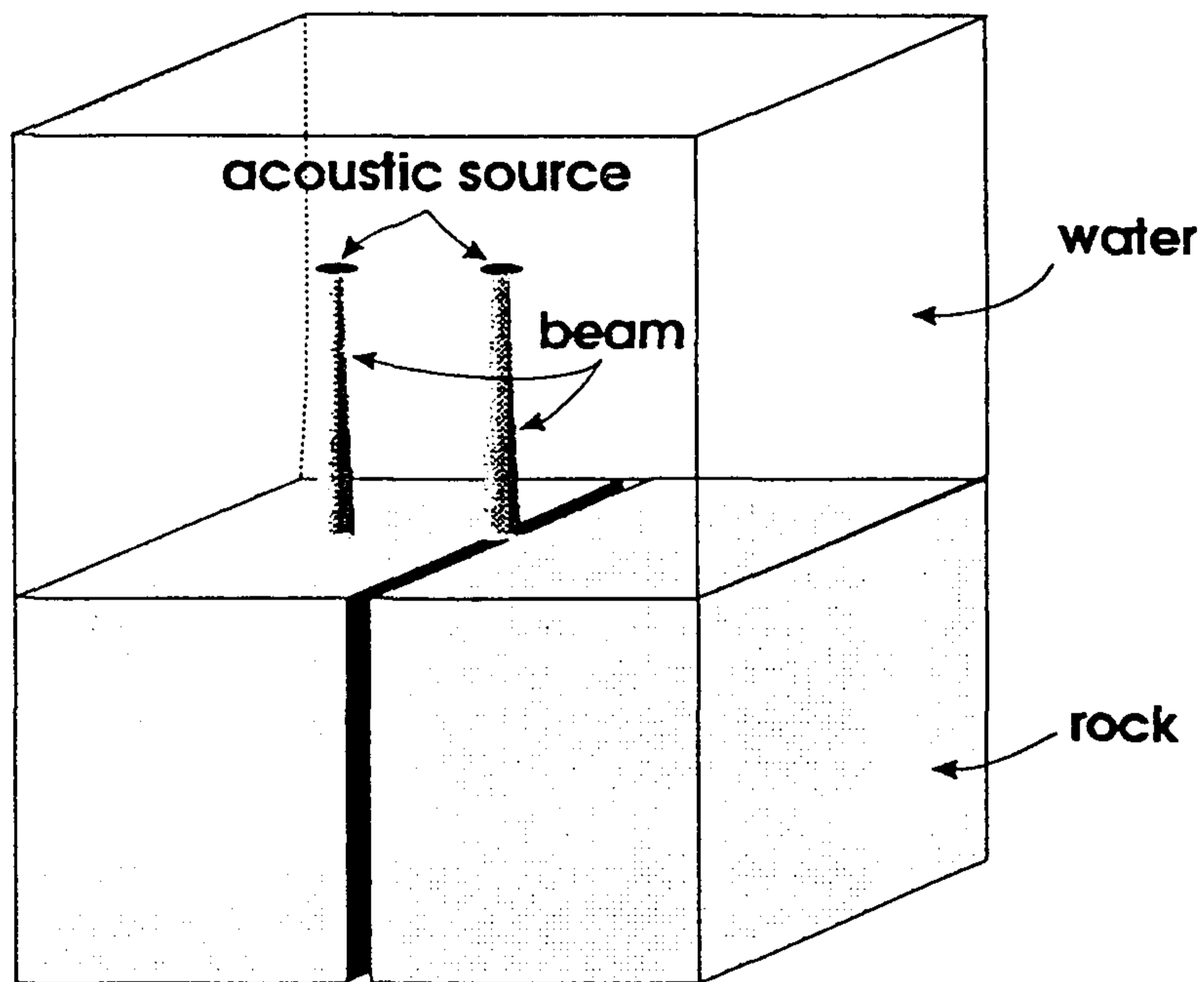
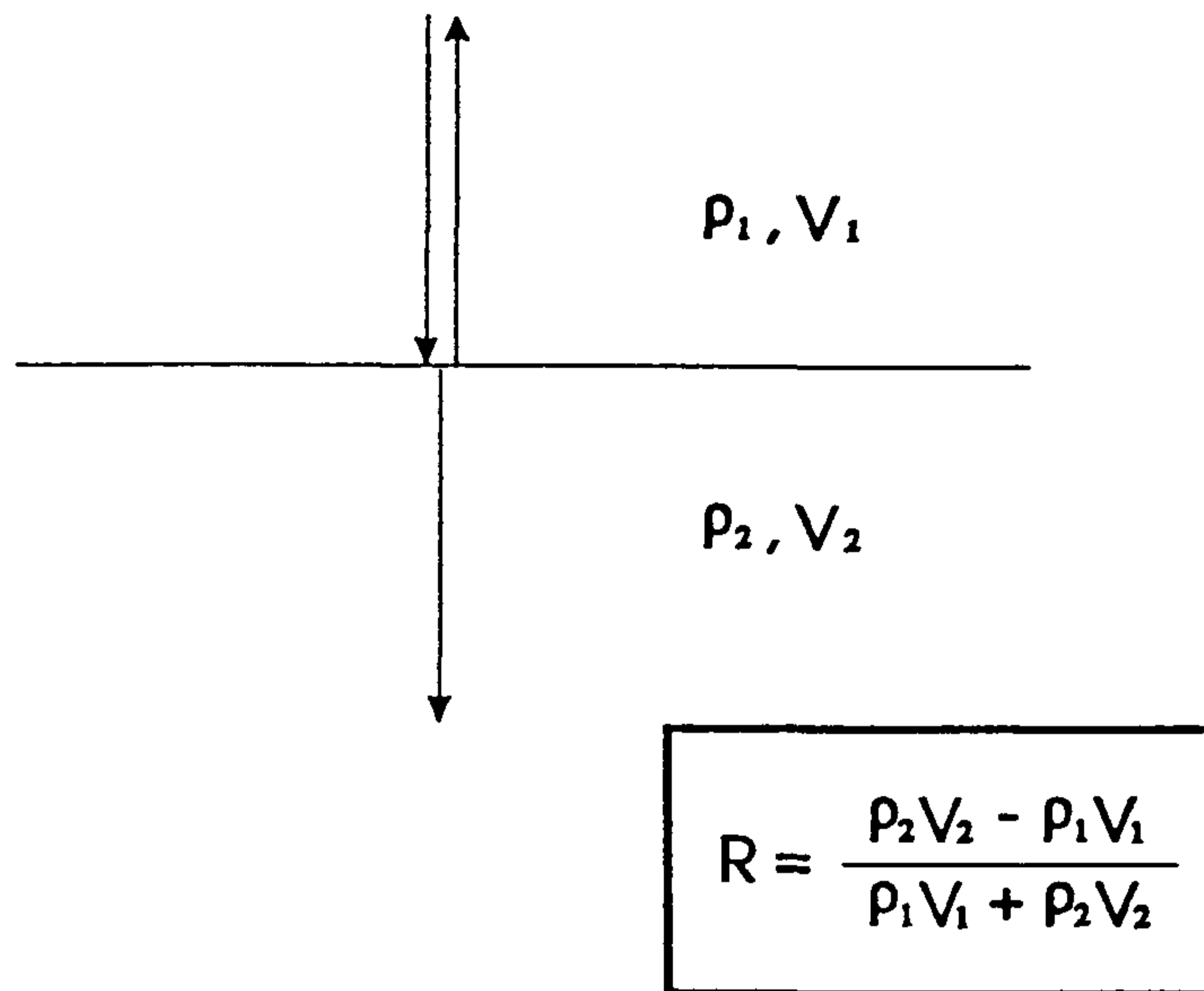


Fig. 2. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).
 When an acoustic beam of ultrasonic transducer strikes the interface normally, the reflected acoustic energy changes from specularly reflected to backscattered (due to the fracture) energy.

다면 식(1)에서 보여주는 물/점토 간의 임피던스 대조에 의해 반사파의 진폭(현실적으로 그 진폭이 미약)이 관찰될 것이다. 나아가서 그 질리가 벌어져 있는 경우에는 탄성파의 산란에 의해 극히 미약한 반사파의 에너지가 관찰된다. 만약, 이러한 빔이 반사면(실제로는 시추공 공벽)위 모든 위치에서 밀집하게 입사되어 반사되는 초음파의 진폭치들을 상호 대조하면 질리의 입체적인 발달 상태가 규명될 것이며 그에 따른 분해능은 일차적으로 빔의 초점화와 상관되는 것이다.

Fig. 3은 시추공 내에서 텔레뷰어 초음파 빔이 방사되는 상태를 시각적으로 보여주고 있다. 즉, 시추공 중심부에서 시추공벽으로 주사되는 초음파 빔이 중심축상에서 선회하고 또한 이동하면서 시추공 벽에 빈틈없이 방사된다. 이러한 측정과정을 하나의 구체적인 보기에 의해 살펴보기로 한다. HQ 시추공 크기(직경 약 96mm)에서 초당 3회 회전하며 매 회전마다 256번 초음파 빔을 방사한다면 시추공벽에 입사된 각 빔 사이의 거리는

$$96\text{mm} \times \pi / 256 \approx 1.2\text{mm}$$

이 된다. 즉, 1.2mm 간격을 둔 지점에서의 정보를 얻게 된다는 뜻이다. 만약, 매 회전시 수직으로 4mm 선회한다면

$$4\text{mm} \times 3\text{회/sec} \times 60\text{초/min} \times 60\text{분/hour} \approx 43\text{m/hour}$$

시간당 약 43m에 달하는 시추공 연장에 대한 검층이 가능하게 되는 것이다.

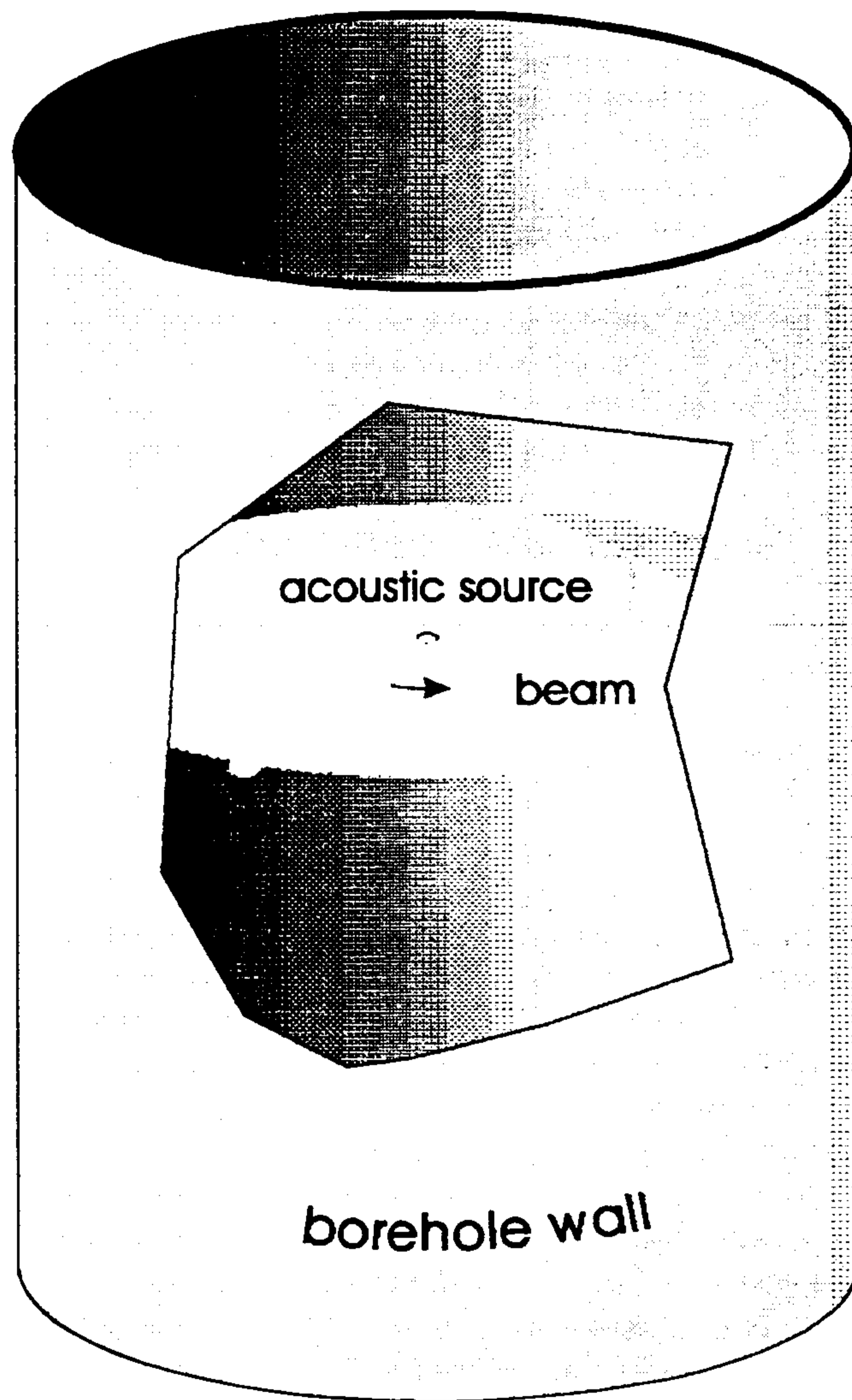


Fig. 3. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).
An acoustic source (piezoelectric transducer) fires an ultrasonic beam at the borehole wall as the Televiewer tool is pulled up the hole. The pulses reflected from the borehole wall are recorded, and from these an unwrapped image of the wall of the hole is constructed with the borehole azimuth on the horizontal axis and the depth on the vertical axis.

제 3 절 측정 시스템

세계적인 기술 수준에서 텔레뷰어가 개발되어 제대로 운영되고 있는 곳은 극히 제한되고 있는 실정이며 그중 본 절에서 서술한 FACSIMILE-40(Focus Acoustic System to Image the Inside of borehoLEs and pipes)은 이미 상대 연구소 DMT에서 개발된 텔레뷰어 시스템으로써 그의 분해능이나 내구성 내지 운용 software 및 processing software는 지난 수년간 한·독 국제공동연구를 통하여 크게 보완되었다. 그에 따른 상기 시스템의 우월성은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 검층시 초점화된 초음파 빔(주파수 약 1.4 MHz)을 시추공 벽에 주사 (spot size < 3mm × 3mm)하기 때문에 0.3mm 크기의 결리도 인식될 수 있는 분해능을 나타내고 있다.
- 센서 장치가 transducer-lense-mirror system으로 구성되어 있기 때문에 무엇보다 logger의 몸체가 크게 축소화(몸체 직경 40mm) 될 수 있게 되어 모든 규격의 시추공(예: Bx size)에도 그의 실효성을 찾게 되었다.
- 검층 시스템에 구성된 각 hardware는 서로 독립되어 있기 때문에 (modular design of haware) 시스템의 보완 내지 다른 검층기기 (예: sonic log)와의 호환이 용이하다.
- 측정을 위한 운용 software 및 방대한 전산처리 시스템은 데이터(진폭 및 주시)의 정량적인 분석 내지 해석을 가능하게 한다.

FACSIMILE-40 측정 시스템에 구성된 각각의 hardware는 COAL

(COmputer Assisted Logging) 시스템의 제어하에 운용되고 있으며 그들은 대체로 다음과 같이 구분된다.

- ① Logger
- ② Surface unit

Logger의 핵심 부분은 초음파 빔을 발생하고 또한 수신할 수 있는 센서 장치이며 그외 부분은 공벽으로부터 반사된 초음파의 주시 및 진폭치를 발췌하는 기능(signal processing), 데이터 통신, power supply 및 각종 측정기능(magnetometer, inclinometer, thermometer)을 갖고 있다(Fig. 4(a) 참조). Fig.4(b)는 센서 장치의 근본원리를 나타내고 있다. 압축소자(disc swinger)에서 약 1.4 MHz에 달하는 초음파 빔이 logger측에 평행하게 방사되면 motor에 의해 회전되는 반사경(알루미늄 재질)에 의해 방향 전환됨과 동시에 housing window를 통과하여 시추공 벽에 초점화된 빔이 거의 수직으로 도달된다. 여기서 초점거리는 일반적인 경우 약 37.5mm에 달하며, 이는 바로 LX 시추공 규격에 대응된다. 장치 내부는 oil로 충전되어 초음파의 전달을 원활하게 하며 또한 외부(시추공 내)와의 상호 압력 균형이 이루어진다. 공벽에서 반사된 초음파는 입사할 때와 동일한 경로를 통하여 transducer에 도달하며 이 때 전기에너지로 변환된 전기 펄스는 peak detector(signal-processing part)에 의해 주시 및 진폭치가 발췌된다. 한편, window에 의한 내부 반사의 진폭을 타당한 window 재질(예: polymer)을 선정함으로써 극소화시키고 있으며 더구나 그의 도달시기(약 75 μ s)는 대부분의 응용에서 공벽에 의한 반사파의 주시보다 훨씬 이르기 때문에 측정시 적정한 시간영역(time gate)을 선정함으로써(공벽 반사파를 포착하기 위한) 공벽 내부 반사로 인한 효과를 크게 약화시킬 수 있다.

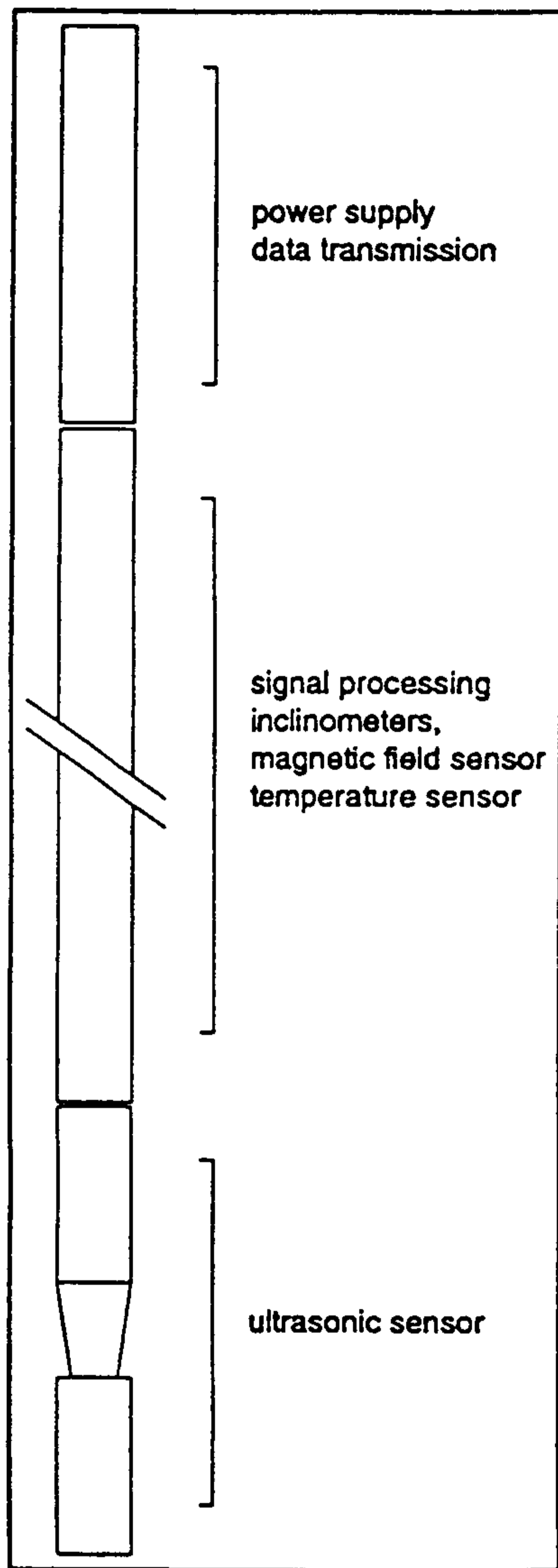


Fig. 4. Logger tool of FACSIMILE-40.

(a) A part of the logger tool is the ultrasonic sensor. It carries out the actual acoustic measurements travel time and amplitude. Other parts of the tool take care of signal processing, data transmission, power supply and various measurements (orientation of the tool, earth magnetic field, temperature), etc.

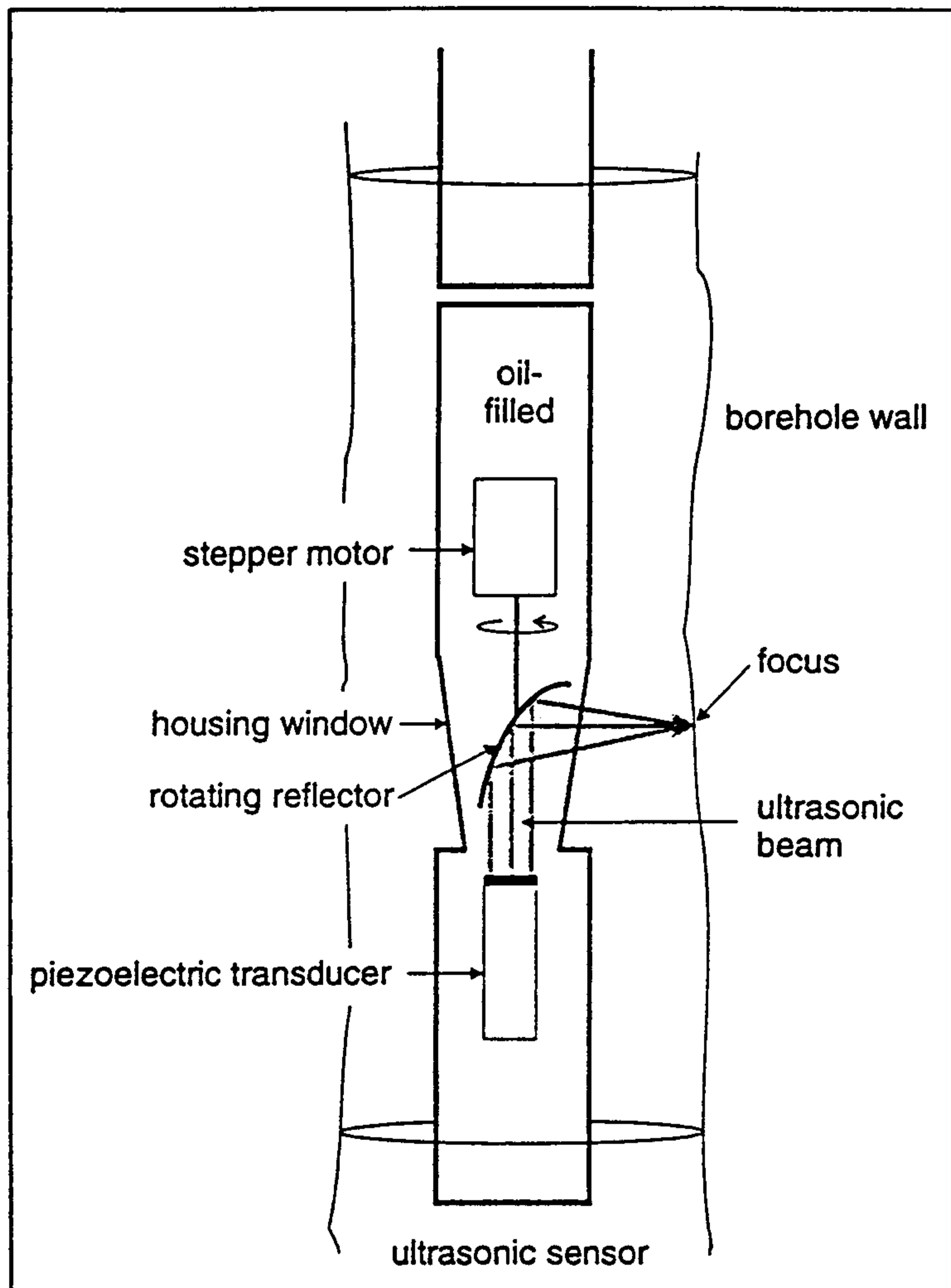


Fig. 4. (continued).

(b) The measurement principle of the sensor part.

The main components of the sensor part are the piezoelectric transducer, the rotating reflector driven by a stepper motor and the housing window. The transducer generates and detects beams of ultrasonic energy, with frequencies up to 1.4 MHz.

The reflector redirects the beam towards the borehole wall and also focuses the ultrasonic energy. The beam travels through the housing window, the water to the borehole wall, where it is reflected. The reflected ultrasonic energy returns to the transducer along the same route. It is detected by the transducer and transformed into an electric signal that is passed to the signal-processing part of the logger tool.

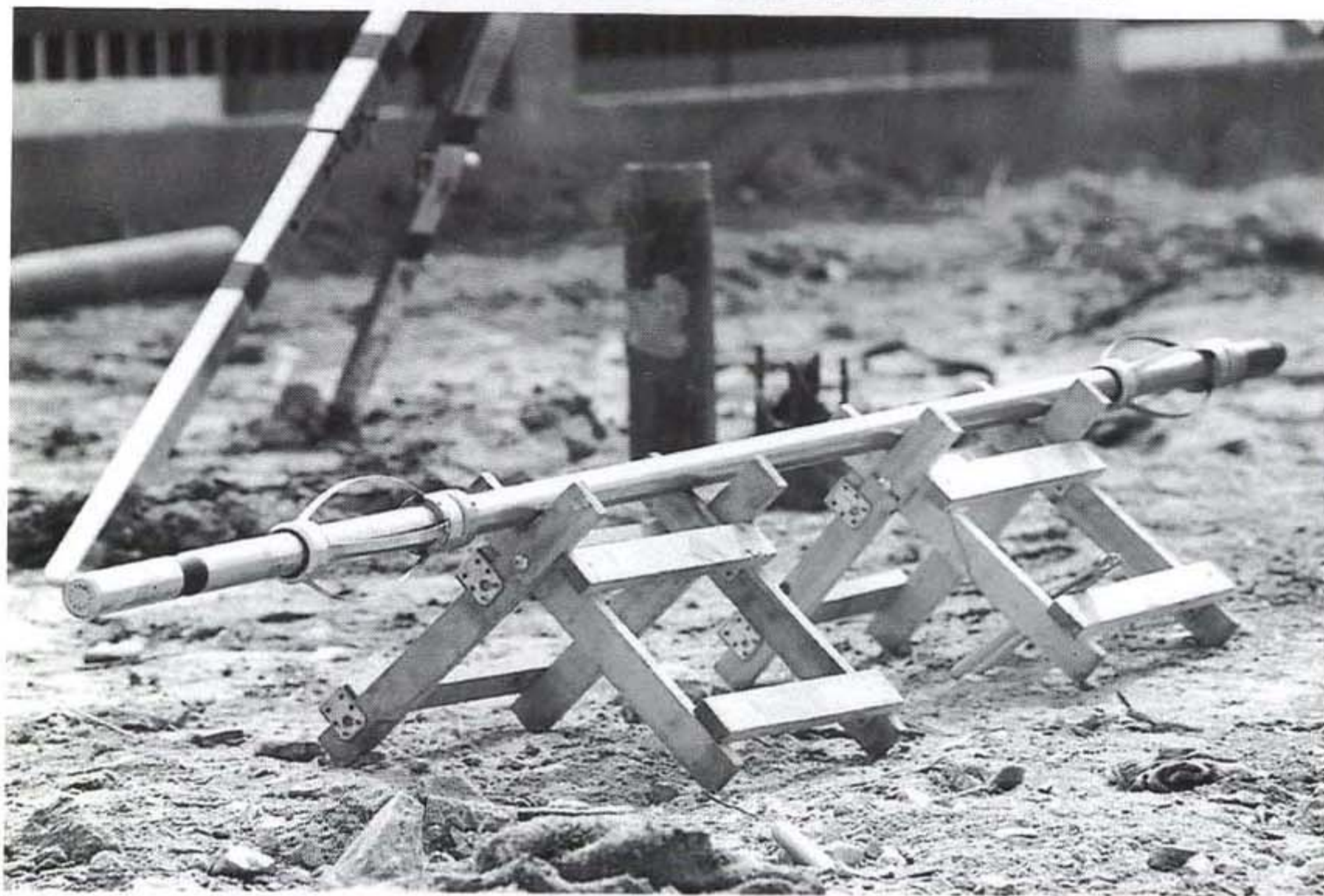


Fig. 4. (continued).

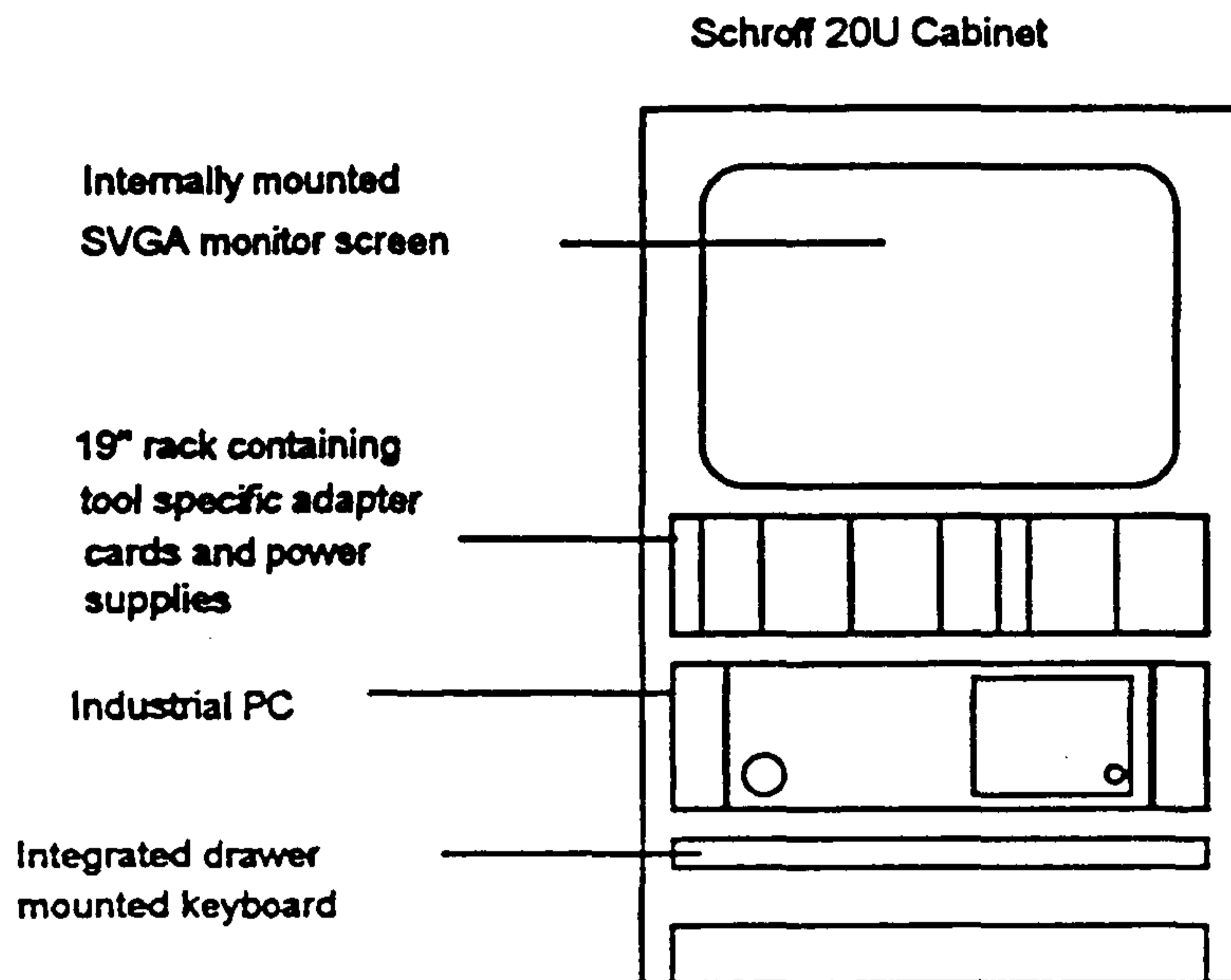
(c) The Televue logger in use at the surveying site.

Orientation part는 3-axis magnetometer(Flux-gate magnetometer)와 2-axis(3-axis optional) inclinometer로 구성되어 상기 측정된 주시 및 진폭치 등 주어진 좌표축(자북방향)에 대해 정돈하는 기능을 갖고 있다.

Surface unit는 ALT(Advanced Logic Technology) Digital Multi Tool Logging System(DMTLS)과 depth counter가 장착된 cable winch로 구성되어 있다. 여기서 DMTLS는 다시 Industrial 486/66DX2 PC(16Mb RAM, 250Mb harddisk, tape drive), SVGA color monitor와 별도로 제작된 19" rack으로 구성되어 있으며(Fig. 5 참조), 측정 운영은 32bits MS Windows NT operating system을 바탕으로 개발된 data acquisition system software에 의해 진행된다. 19"rack에는 여러 개의 서로 다른 검층기기(예: sonic, gamma)를 운용하기 위한 소위 Tool Specific Adapters 및 각종 보드(예: communication board, programable depth counter board)가 내장되어 Logging-PC간의 데이터 전송 및 winch 제어가 가능하게 된다. 한편, system software는 Microsoft Win 32TM API(Application Programming Interface)에 의해 프로그램화된 순수한 multi tasking software(그림 6 참조)이다.

데이터 전송률(data transmission rate)의 한계는 logging cable 선정에 따라 달리하며, 전송률 그 자체는 DMTLS software 혹은 cable drivers에 의해 조정될 수 있다. DMTLS는 초당 약 250 Kbits 데이터 전송이 가능하기 때문에 검층속도 변화의 폭이 이전보다 크게 확대되었다. 예를 들면, 센서가 시추공 내에서 한번 회전에 288번(maximum) 빔을 방사하고, 초당 12번(maximum) 회전할 경우 초당 도합 $288 \times 12 = 3456$ 번 빔을 방사하게 된다. 만약 하나의 빔 방사에 의해 얻게 되는 데이터 양이 약 50 bits(주시 및 진폭치, orientation tool에 의한 데이터 등)이라면 초당 약 172,800 bits가

Front View



Rear View

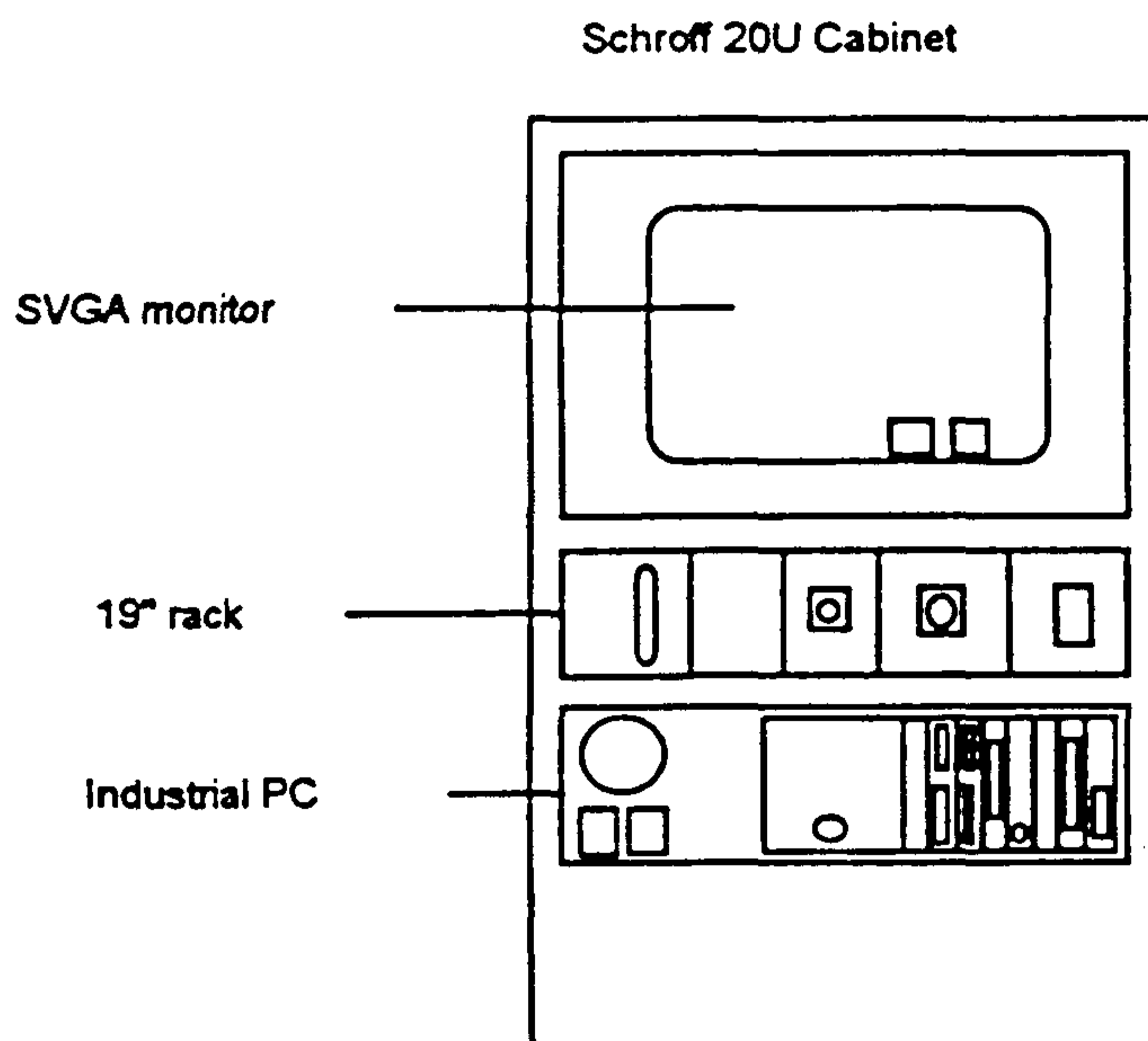
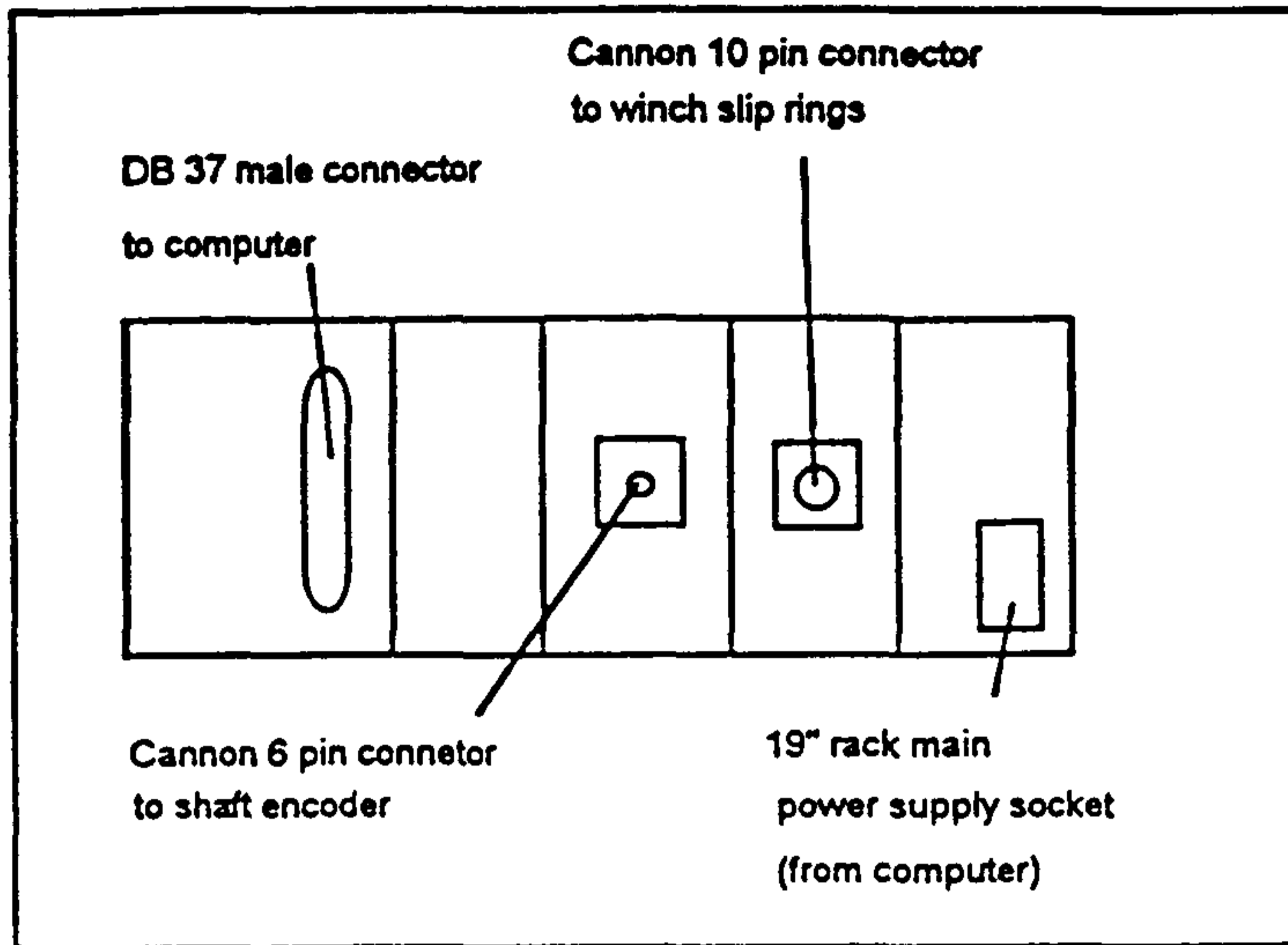


Fig. 5. Plan view of ALT(Advanced Logic Technology) data acquisition system (Digital Multi Tool Logging System : DMTLS).



PC Connections

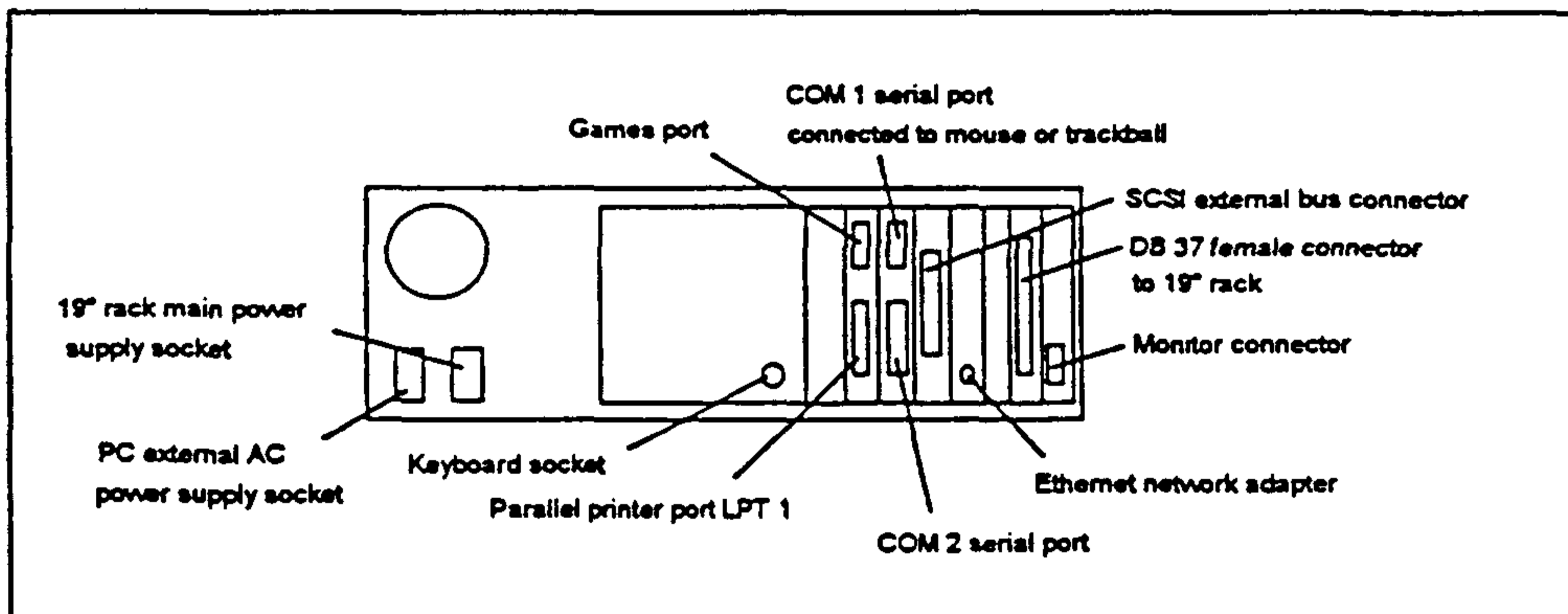


Fig. 5. (continued).
Cable connections between PC and 19" rack.

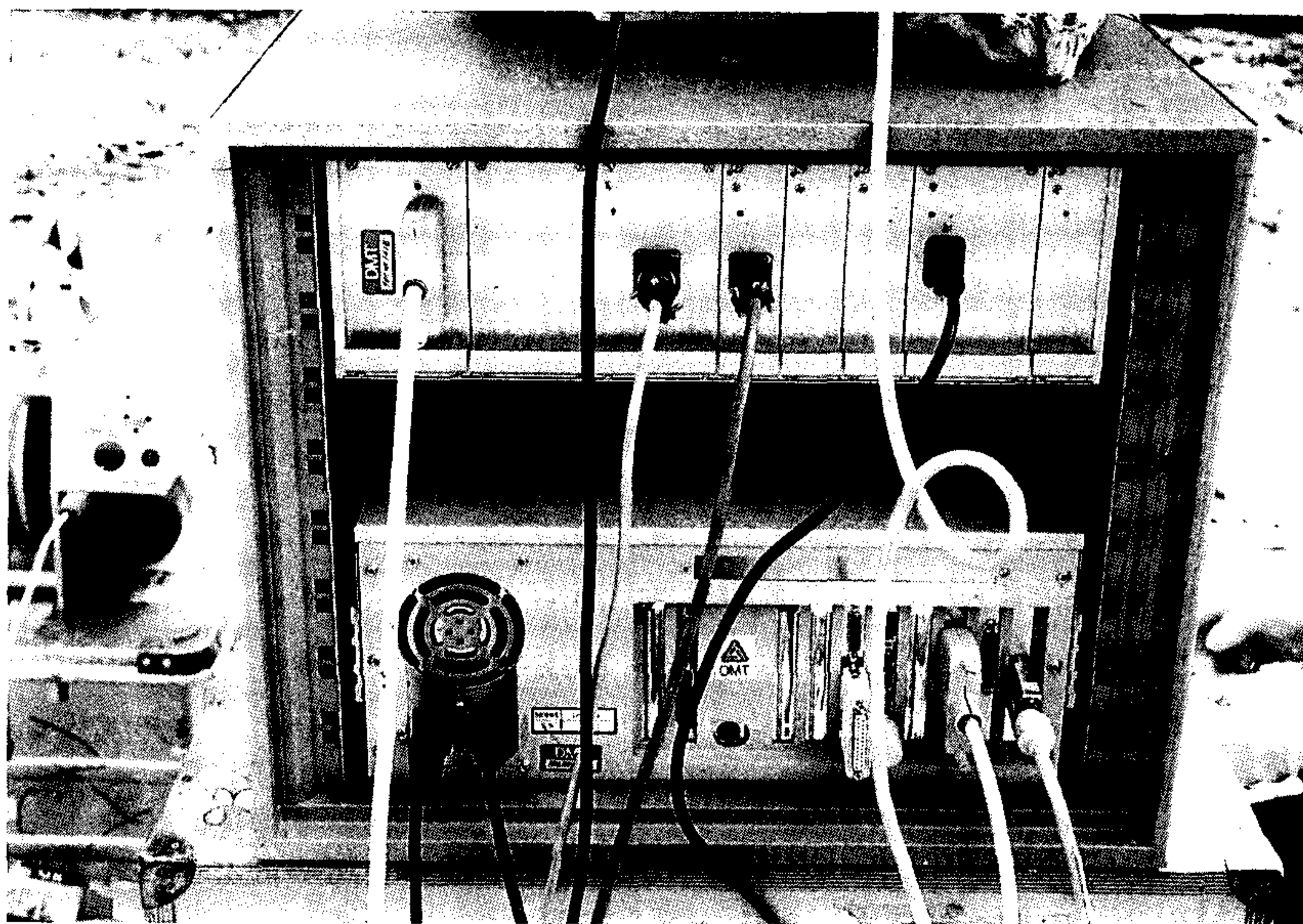


Fig. 5. (continued).
Upper part : front view of DMTLS.
Lower part : rear view of DMTLS.

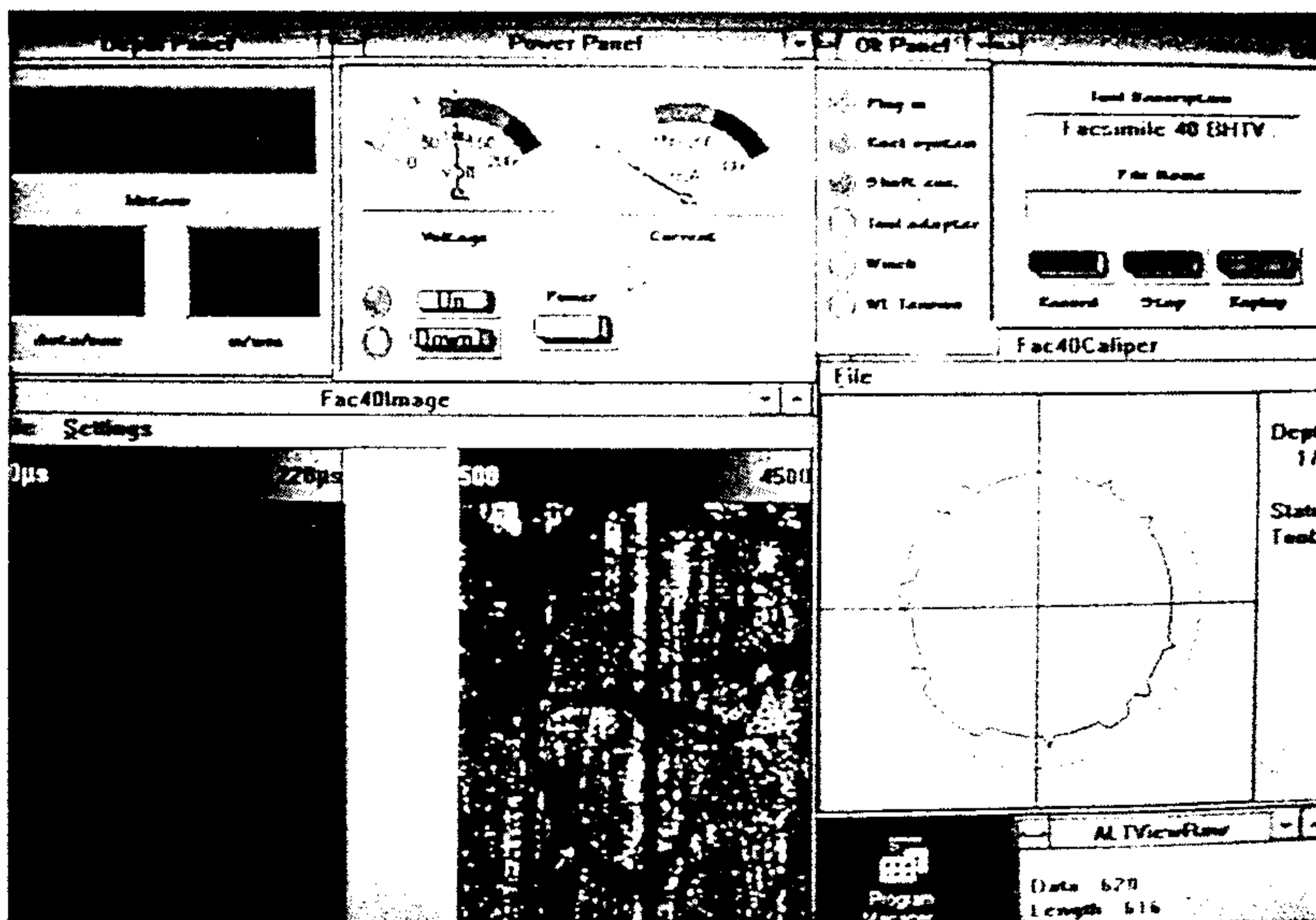
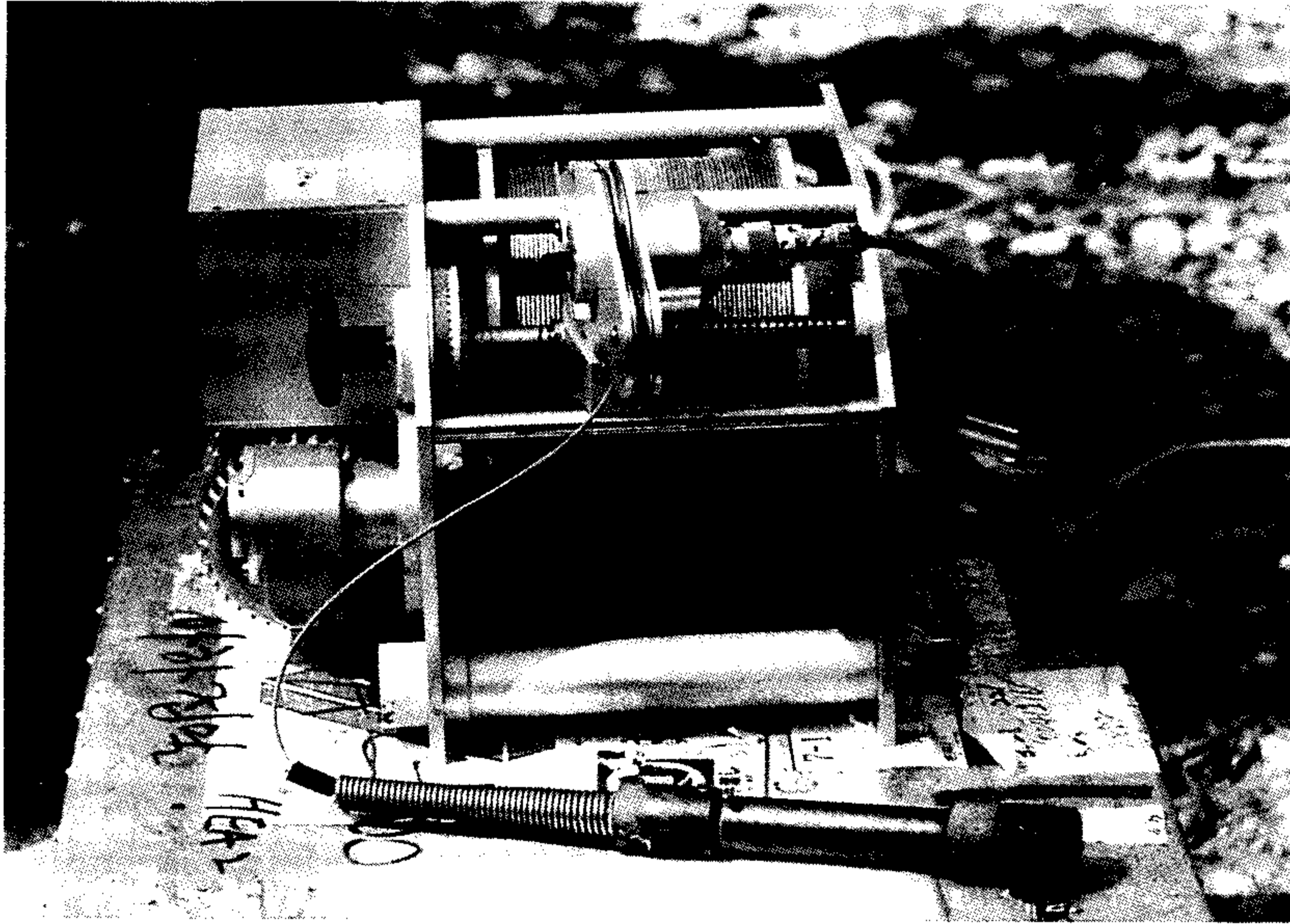


Fig. 6. Cable winch and example of system software operation. Several windows are opened to give full on-line control of the FACSIMILE-40 logging.

되어 데이터 전송이 원활하게 이루어질 수 있다는 것이다. 이번에는 텔레뷰어 수평 및 수직 분해능에 대해 언급하고자 한다. 텔레뷰어 분해능은 우선 초음파 빔이 공벽에 주사되는 면적(spot size)과 상관된다. FACSIMILE-40은 그의 초점화 기능에 의해 3" 시추공(LX 규격)에서 3mm × 3mm, 10" 시추공에서 약 6mm × 6mm spot size를 보여준다. 만약, 한번 회전에서 288번 빔을 방사하게 된다면 그의 중첩률은 약 70%를 상회하며, 144번에서는 약 45%가 된다. 따라서, 수평 분해능 측면에서는 한번 회전에 144번 빔 방사으로써도 바람직한 결과에 도달될 수 있다는 것이다. 수직 분해능은 부차적으로 검층 속도와 직접적으로 관련된다. 만약, 수직 분해능이 최소한 5mm를 유지하고자 한다면, 검층속도는 수직으로 5mm × 12(revolutions) /sec를 초과하지 말아야 한다. 센서가 시추공 아래서부터 상행하면서 측정하는 일반적인 경우(측정운용 메뉴에서 depth mode라 함) 수직 검층속도는 대체로 5mm/sec 미만이기 때문에 대단히 높은 수직 분해능을 얻게 된다. 따라서 측정하기 이전 시추공 규격, 데이터 전송률, 수평 및 수직 분해능 등을 상호 고려하여 불필요한 과도한 데이터 취득은 배제함이 바람직하다고 하겠다.

다음은 FACSIMILE-40에 대한 기술적인 제원을 나타내고 있다.

Diameter : 40mm

Length : approx. 2000mm

Max. Temp : 70℃

Max. Pressure : 160 bar

Borehole diameter : 56mm ~ 400mm

Gain : fixed gain, 0 ~ 63 dB in 1 dB steps
or automatic gain control

Frequency : 1.4 MHz

Beam width : < 3mm × 3mm

No. of sample per revolution : 72, 144, 288

Transducer rotation rate : 3 to 12 revs./sec

Orientation : 3 axis magnetometer,

2 inclinometer or optional accelerometer

측정기기 운영 시스템 : ALT(Advanced Logic Technology) Digital
Multi Tool Logging system (DMTLS)

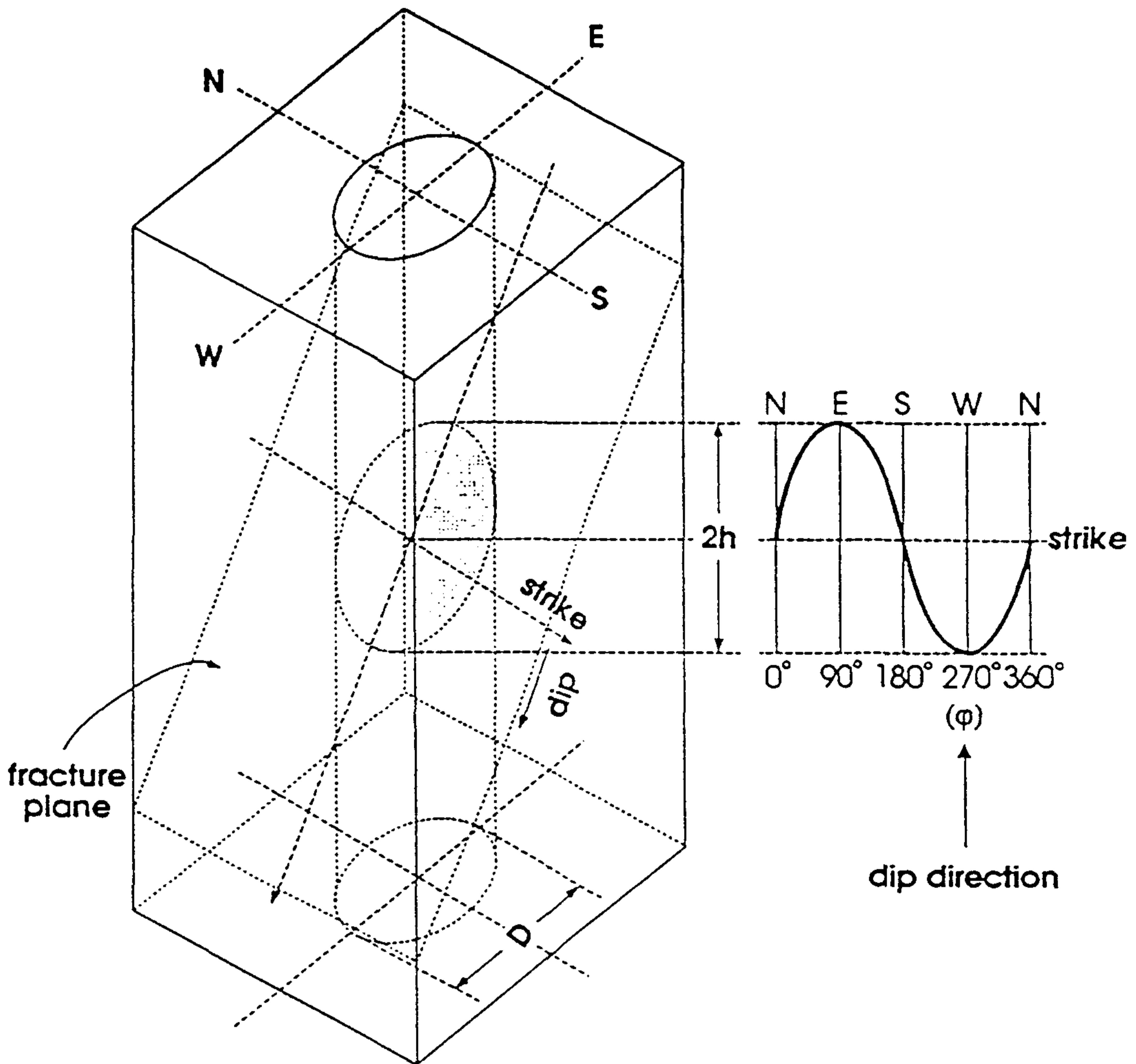
제 4 절 검층 기능

1. 단층, 절리 및 암층 경계면의 경사방향 및 경사각

텔레뷰어가 응용됨으로써 암반상태에 대해 독보적으로 얻게되는 주요 정보는 무엇보다 불연속면(절리, 단층 및 암층경계면)의 정확한 경사방향 및 경사각이다. Fig. 7은 임의의 경사를 띤 절리면이 존재할 경우 그것이 텔레뷰어 측정데이터에 반영되는 상태를 나타내고 있다. 왼쪽 그림에는 경사를 띤 절리면이 시추공을 절단함으로써 시추공벽에 타원형의 절리 흔적이 형성되고 있음을 보여주고 있다. 그림의 오른쪽 부분에 나타낸 sine 곡선은 시추공 내에서 검층기가 상향 혹은 하향됨에 따라 시추공벽에 표출된 절리 흔적에 대한 반응(상대적으로 낮은 진폭을 갖는 반사파 반응)을 나타내고 있다. 일반적으로 검층 데이터는 지자기 북극을 기준(N-E-S-W-N)으로 표현되며 그로부터 절리면의 주향 내지 경사가 결정된다.

상기 sine 곡선에 대한 해석은 원통형 좌표계(cylindrical coordinate system : r, ϕ, z)에 의해 쉽게 풀이될 수 있다. Fig. 8에 나타난 바 원점(0,0,0)을 시추공 축과 절리면이 교차하는 점으로 정의하고 또한 편의상 두 개의 서로 다른 평면 즉, 시추공 축과 직교하는 평면과 시추공 축과 평행하면서 동시에 주향 방향을 나타내는 평면을 설정하였을 때 각 절리점(spot point of fracture)으로부터 수직 평면에 이르는 거리 x 는 다음과 같이 표현된다.

$$x = \frac{D}{2} \sin \phi \quad (2)$$



$$\theta = 90^\circ - \varphi$$

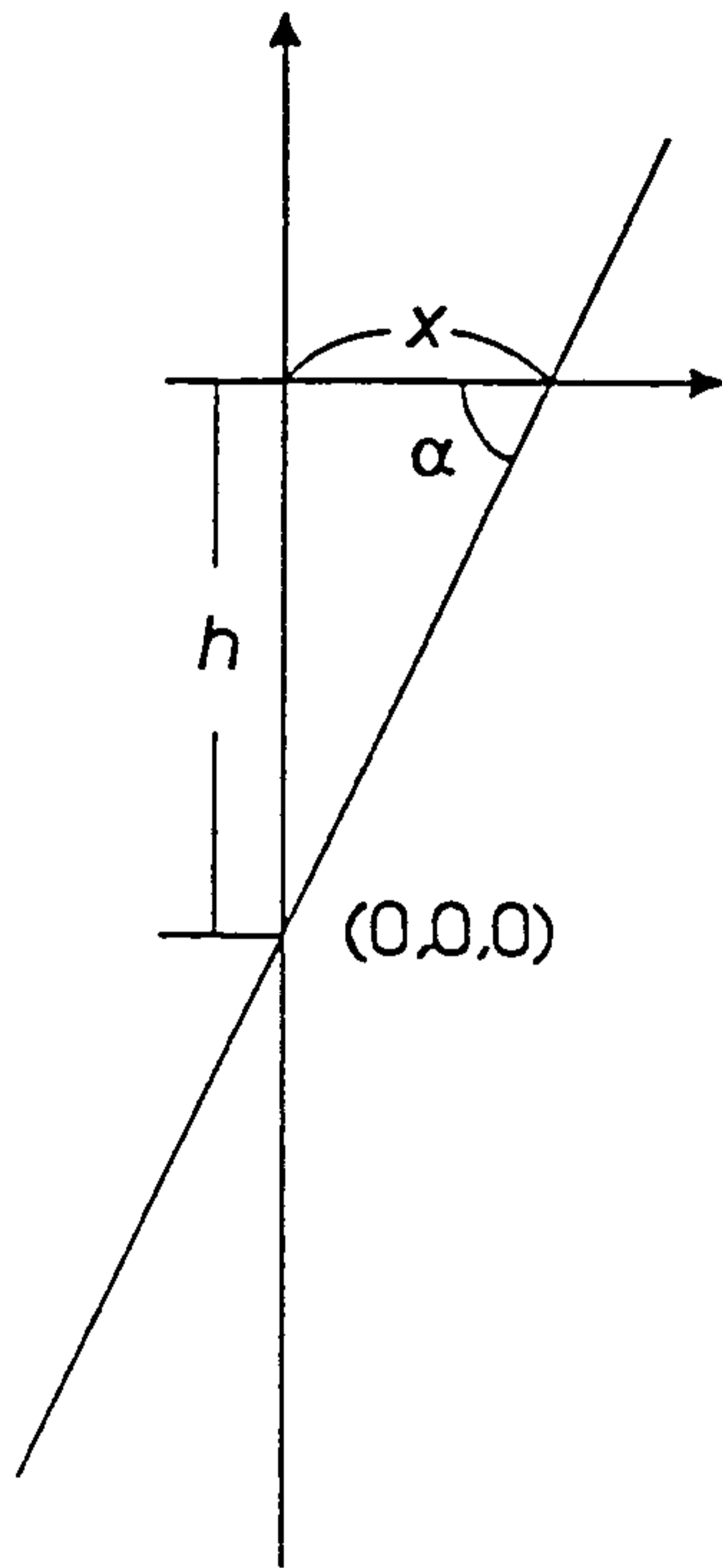
θ : **strike angle**

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2h}{D}\right)$$

α : **dip angle**

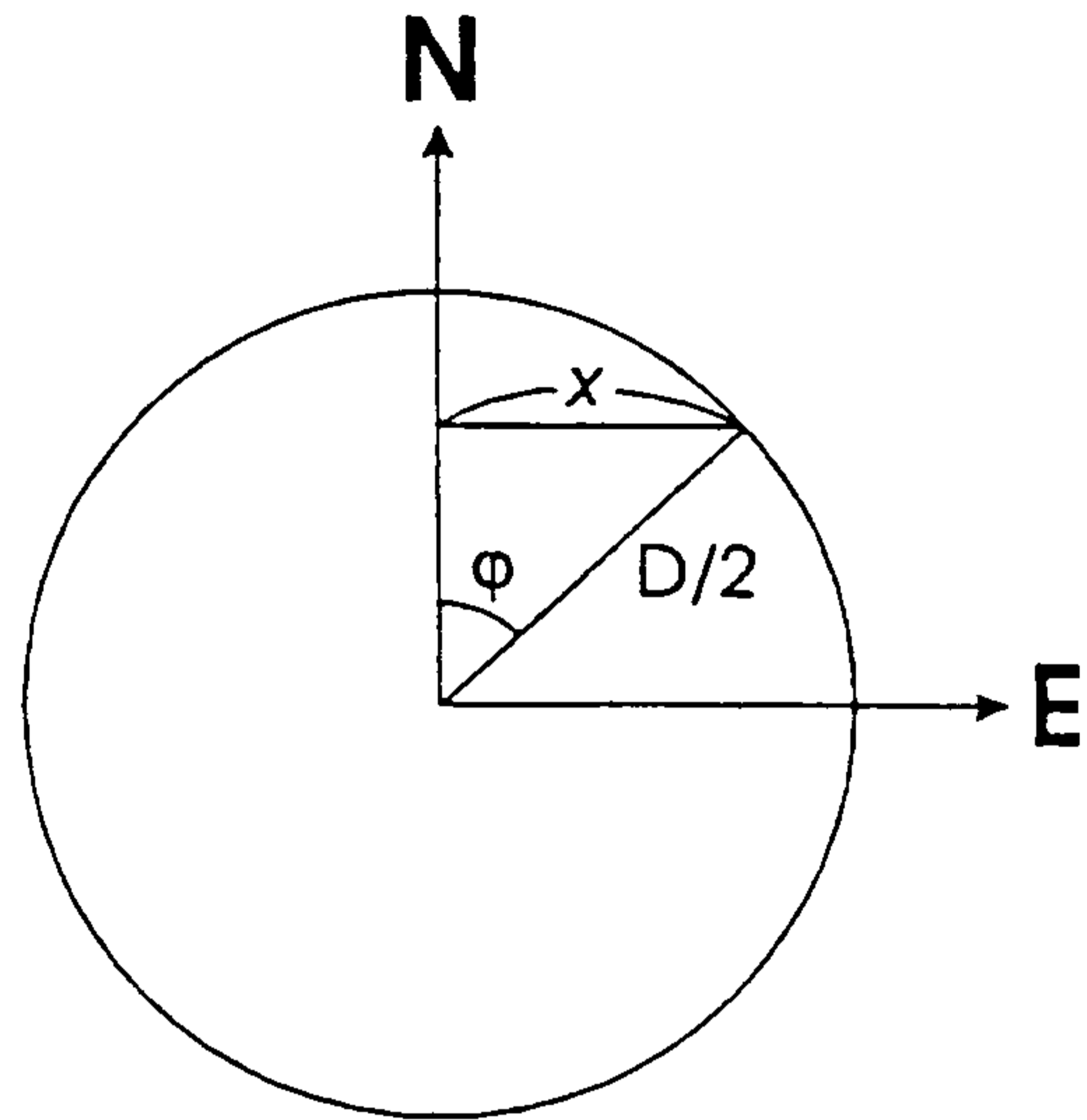
Fig. 7. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).
 Perspective view of a simple planar fracture intersecting a round borehole and the resulting schematic fracture signature(sine curve).

borehole axis



$$h = x \tan \alpha$$

Strike view



$$x = \frac{D}{2} \sin \phi$$

Top view

Fig. 8. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).
Strike and top view of a simple planar fracture intersecting a round borehole. It helps to derive an analytic expression for fracture signature shown in Fig. 7.

ϕ : 수직 평면으로부터 각 절리점에 이르는 방위각

D : 시추공 직경

여기서 $\sin \phi$ 값이 최소가 될 때의 위상(Fig. 7 참조)은 바로 절리면 경사 방향을 나타내며 그에 따른 주향 방향은 상호 수직이므로 주향각 θ 는

$$\theta = 90^\circ - \phi \quad (3)$$

가 된다.

한편, 원통형 좌표계에서 z 는 Fig. 8에 나타낸 strike view를 고려하여 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$\begin{aligned} z &= x \tan \alpha \\ &= \frac{D}{2} \sin \phi \tan \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

로부터 경사각 α 는 검출된 sine 곡선으로부터 쉽게 유도된다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2h}{D}\right) \quad (5)$$

Fig. 9는 실제로 측정 데이터에서 다양한 모양의 sine 곡선들이 관찰되고 있음을 보여주고 있다. 오른쪽 부분은 측정 데이터(텔레뷰어 진폭이미지)이며 왼쪽 부분은 그로부터 추출된 sine 곡선들을 나타내고 있다. 각 절리면의 주향 및 경사는 식(3) 및 (5)에 의해 쉽게 구해지며 나아가서 그들의 두께 및 거칠음 정도(roughness)도 바로 가늠될 수 있다. 여기서 언급한 절리면의 거칠음은 관찰되는 절리의 두께 변화와 또한 절리상(fracture image)

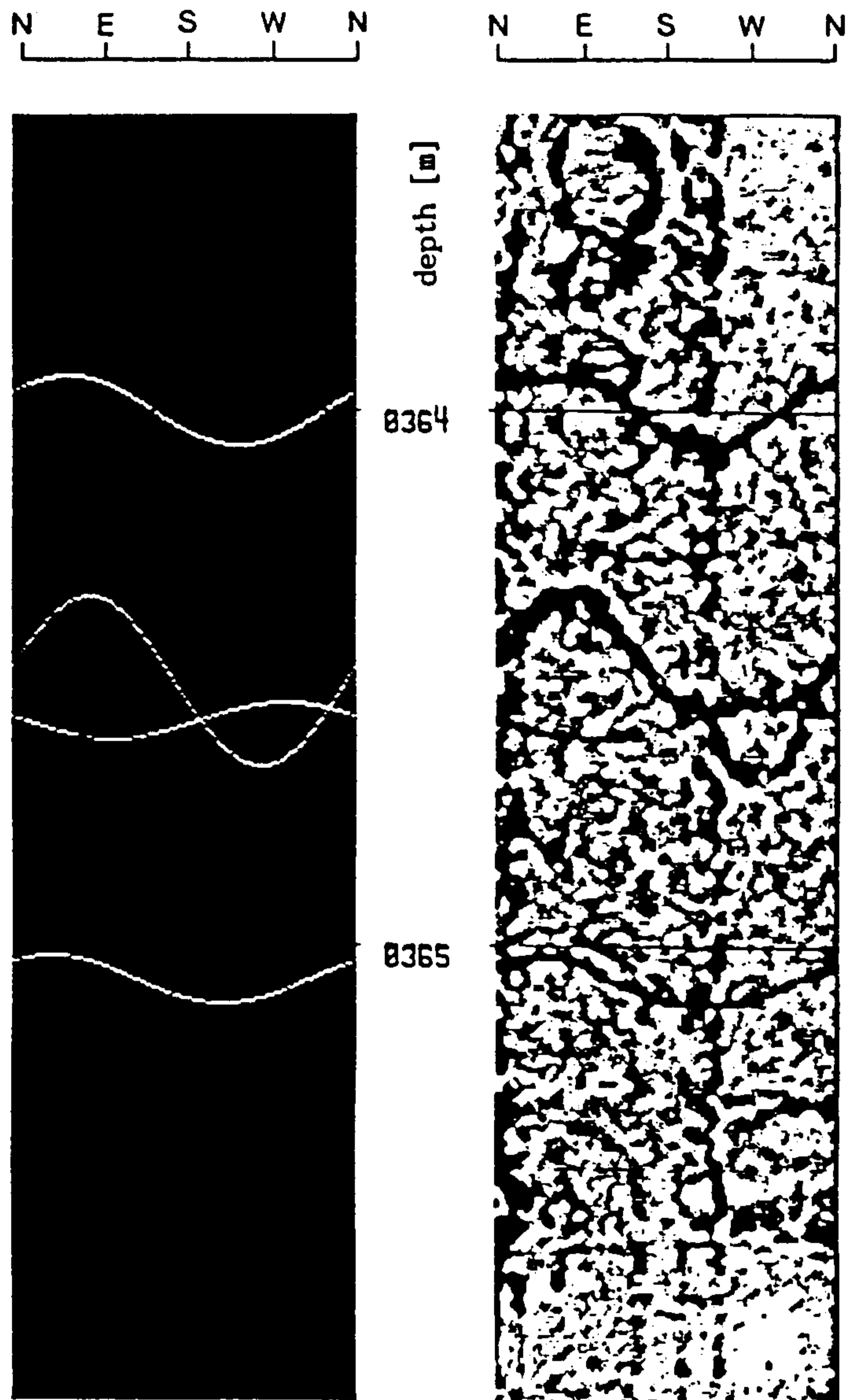


Fig. 9. Various types of fracture signature.

On the right side is the grayscale amplitude image (Televiewer raw data), the lightness of the image is proportional to the amplitude of the reflected pulse. On this plot diverse type of fracture signature can be observed. On the left side, a presentation of four picked fracture signatures are displayed.

이 sine 곡선에 부합되는 정도(작은 규모의 요철(unevenness))에 의해 추정될 수 있다.

텔레뷰어 데이터로부터 추출할 수 있는 불연속면은 절리면 이외에도 층리면(혹은 암층 경계면) 및 단층면이다. 물론 상기 불연속면에 대한 판단은 어디까지나 분석 경험이 뒷바침 되어야 하겠으나 그들은 대체로 다음과 같은 관찰에 의해 식별된다.

- 절리로 인한 진폭 변화는 현저하게 나타나며 동시에 절리 주변 암석에 대한 진폭은 대체로 균일하다.
- 암층 경계면은 그 경계로부터 전반적인 진폭차가 관찰된다.
- 단층면은 대체로 단층 파쇄대(fault zone)로 나타나기 때문에 진폭 약화 구간이 크며 동시에 그의 두께가 불균등하다.

Fig. 10은 국내 최초로 충청남도 청양군에 소재한 시추공(NX 규격, 심도 약 97m)을 대상으로 상기 FACSIMILE-40가 응용되어 얻어진 텔레뷰어 측정데이터로써 여기에는 단지 심도구간 약 12.5m~21.5m에 대한 데이터만 선정하여 나타내고 있다. 왼쪽 그림은 측정된 반사파의 진폭치를 나타내고 있다(진폭이미지). 여기서 상대적으로 낮은 진폭치는 그만큼 짙은 색깔로 표현되고 있다. 가운데 그림은 반사파의 주시치를 보여주고 있으며(주시이미지) 이번에는 밝은 색깔이 주시가 상대적으로 느림을 나타낸다. 절리, 단층 및 암층경계면에 대한 판단은 주로 진폭이미지에서 이루어지며 이에 부응하여 주시이미지는 대체로 절리의 열린 상태나 단층 충전물에 대한 정보를 제시한다. 일별하여 심도 약 16.7m 주위에는 비교적 큰(급경사를 띤) 단층이 관찰되며 이보다 더 큰 규모(약 23cm 두께의 파쇄대)의 단층은 심도

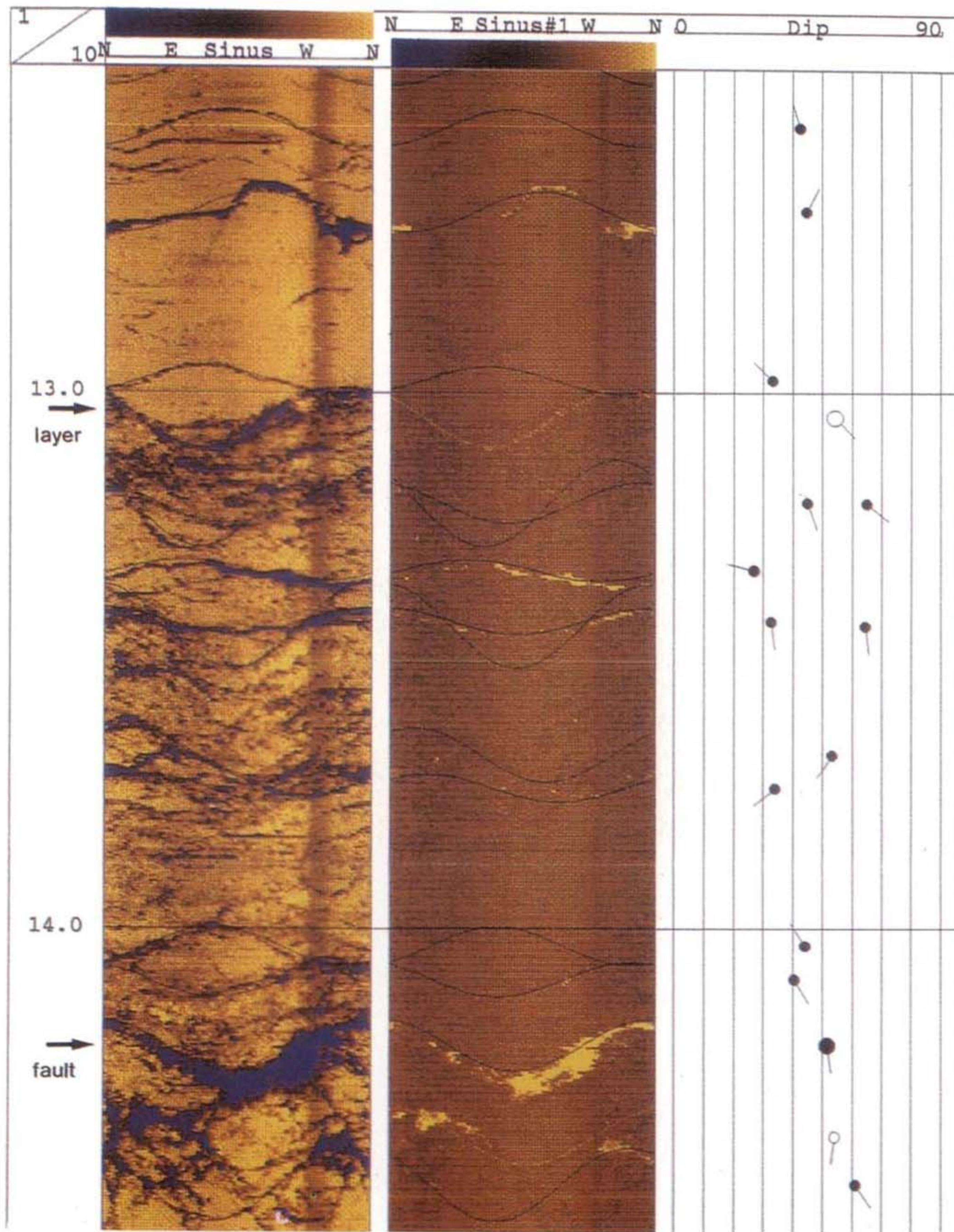


Fig. 10. Televiewer image log measured at the study site Cheongyang, Korea. Diverse types of fractures, faults and layer boundaries can be clearly observed. Left : amplitude image, middle : traveltime image, right : arrow plot for the tectonic elements. In the picture the picked fracture planes (sine curves) are overlaid to the structures.

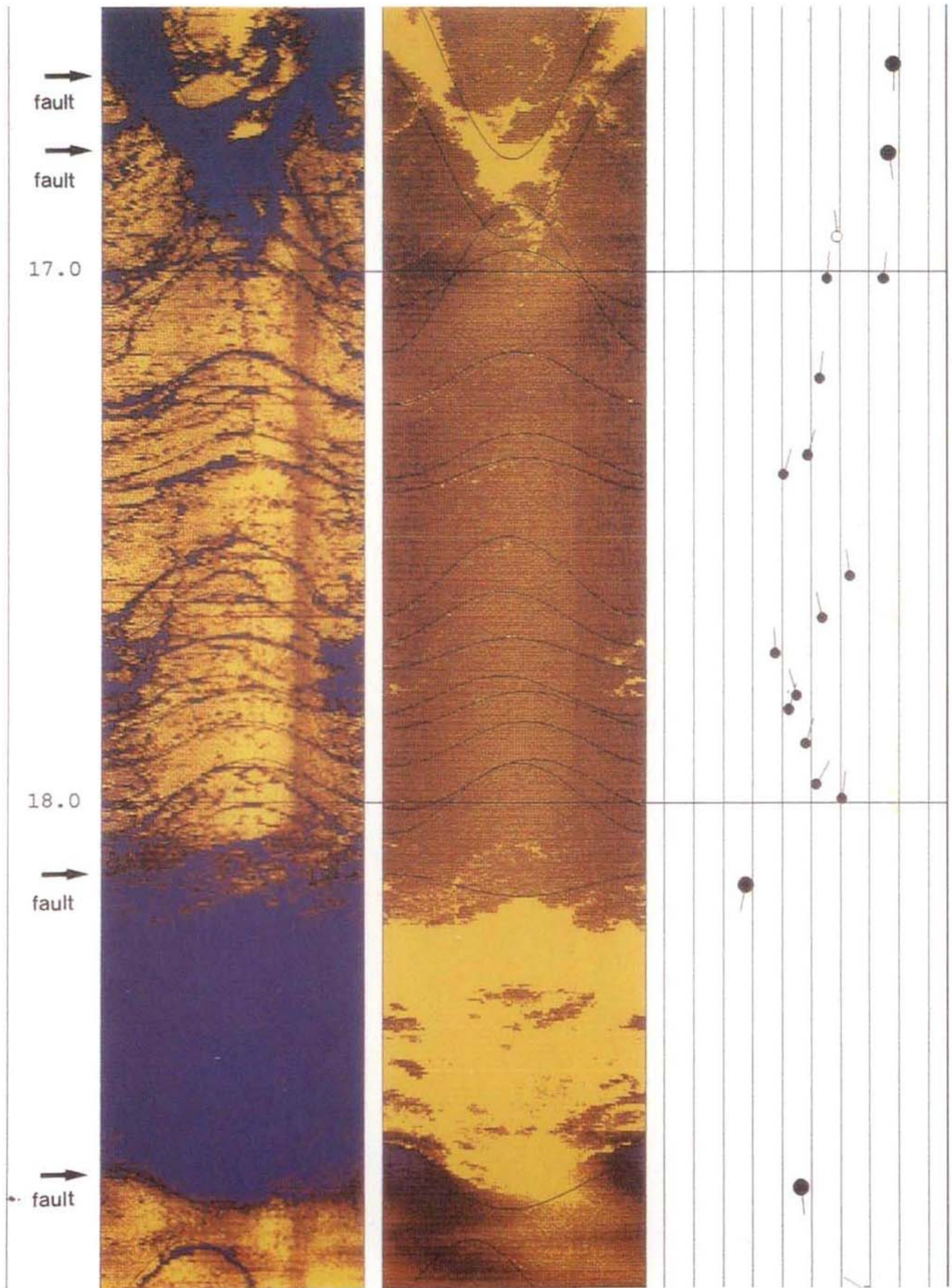


Fig. 10. (continued).

A good overview of change in rock strength and rock quality can be yielded by displaying both the amplitude and traveltime image side by side.

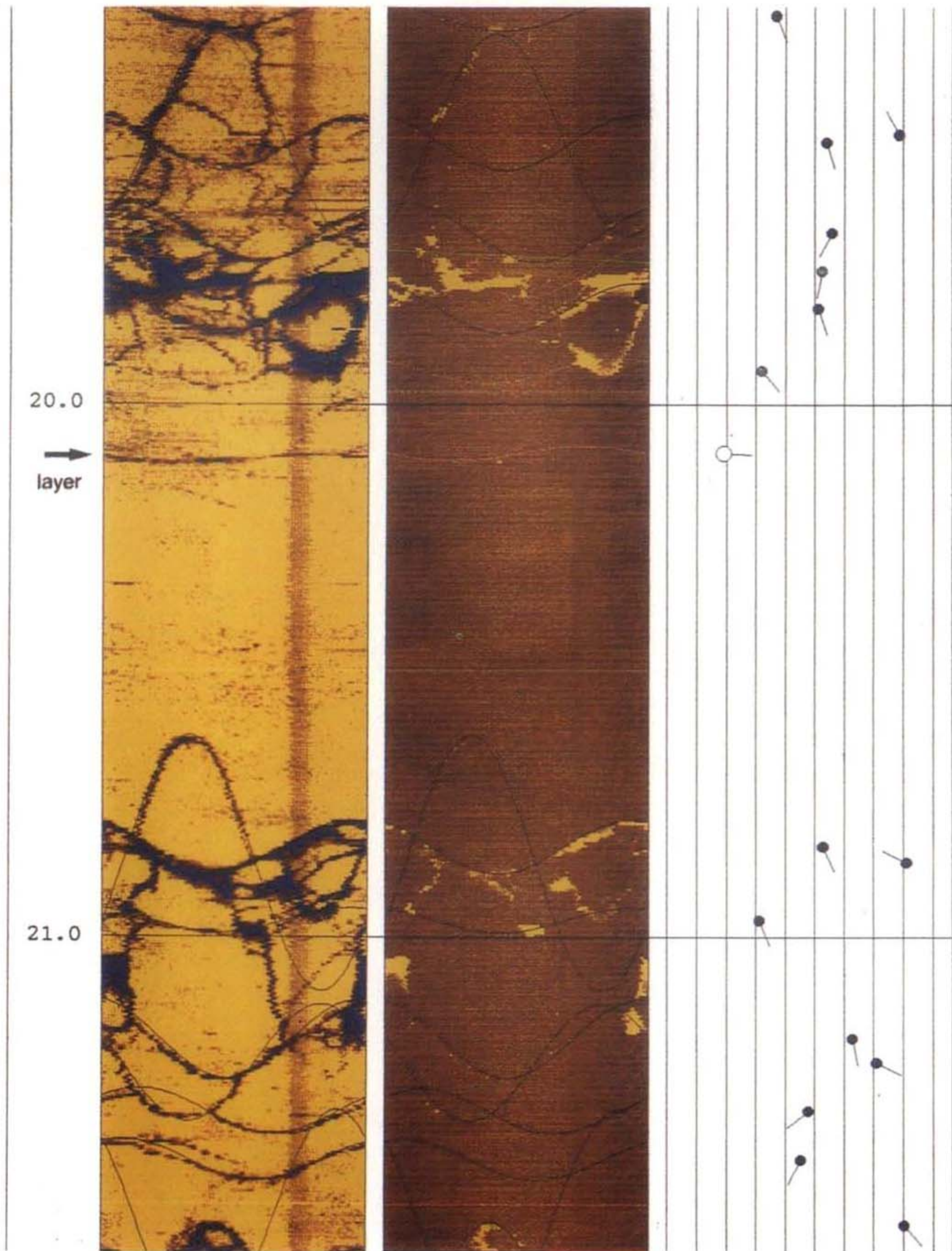


Fig. 10. (continued).

Open fractures are well recognized by clearly visible changes of the borehole radii (traveltime image).

약 18.5m 주위에서 인식된다. 한편, 진폭이미지는 그의 높은 분해능으로 인하여 심도 약 13m 및 20.1m에서 암층경계면이 존재하고 있음도 여실히 보여주고 있다. 오른쪽 그림에 나타낸 소위 arrow plot는 이미지로부터 발체된 지질구조 자료(tectonic elements)를 그들의 경사방향 및 경사각으로 표현하였다. 즉, 흰색 큰원은 암층경계면을, 흑색 큰원은 단층을 나타내고 있으며 반면 절리는 우선 시각적인 판단에 의해 흑색(뚜렷한), 회색(보통) 및 흰색(미약한) 작은 원으로 세분되었다. Table 1에는 상기 심도구간에서 발체된 모든 지질구조 자료로부터 심도에 따른 그들의 경사각 및 경사방향을 나타내고 동시에 그들의 두께변화(최소치, 최대치 및 평균치)도 가늠하여 code번호로 분류되고 있다(code 1 : 2mm 이상, code 2 : 1mm 이상 2mm 미만, code 3 : 1mm 미만).

Fig. 11은 또 다른 응용 실례로써 경기도 평택군의 NX규격 시추공(경암 일부 구간)에서 얻어진 텔레뷰어 이미지를 나타내고 있다. 이번에는 sine curve를 띤 절리들 이외에 뚜렷한 수직절리(심도구간 약 39.4m~41.8m)가 관찰되고 있다. 더구나 그 절리에 대응하는 주시는 느리게 나타나기 때문에(주시이미지 : 가운데 그림) 절리는 열려있는 것으로 관찰된다. 시추과정에서는 그로부터(수직절리) 많은 양의 물이 뿜어나오고 있음이 관찰되었다. 참고로, 진폭이미지에서 인식되는 sine curve들은 시각적으로 큰 굴곡을 보여주고 있지 않지만 arrow plot에서는 그들이 실제로 큰 경사각을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이것은 단지 이미지 도면화 측면에서 수평축(시추공벽)과 수직축(심도)의 척도가 달라지기 때문이다. 즉, 수평축 길이가 약 $\pi \times 7.6\text{cm} \approx 24\text{cm}$ 임에 비추어 수직축의 척도는 상대적으로 약 3.5배 단축된 상태(sine curve가 압축된 모양)이다.

TECTONIC ELEMENTS								
NO	TECTONIC	DEPTH [m]	DIP ANGLE	AZIMUTH	THICKNESS [mm]			CODE
					MIN.	MAX.	AVE.	
1	<i>fracture</i>	12.7	45	27	1.8	3.6	2.7	1
2	"	13.0	33	315	1.9	1.9	1.9	2
3	"	13.2	45	161	1.6	1.6	1.6	2
4	"	13.2	65	128	0.9	0.9	0.9	3
5	"	13.3	27	287	2.0	5.6	3.8	1
6	"	13.4	33	173	2.1	4.2	3.2	1
7	"	13.4	64	173	0.9	0.9	0.9	3
8	"	13.7	53	214	1.5	4.5	3.0	1
9	"	13.7	34	231	2.1	5.2	3.7	1
10	"	14.0	44	328	1.0	3.2	2.1	1
11	"	14.1	41	148	1.1	2.8	2.0	1
12	Fault	14.2	52	172	15.5	15.5	15.5	9
13	<i>fracture</i>	14.4	54	187	0.7	1.0	0.9	3
14	"	14.5	61	145	0.7	2.4	1.6	2
15	"	14.8	52	25	0.8	0.8	0.8	3
16	"	14.9	52	237	0.8	1.6	1.2	2
17	"	14.9	60	182	0.6	1.3	1.0	2
18	"	15.2	77	337	0.1	0.6	0.4	3
19	"	15.4	78	335	0.1	0.8	0.5	3
20	"	15.5	42	102	0.9	2.2	1.6	2
21	"	15.6	55	154	0.9	0.9	0.9	3
22	"	16.0	39	258	2.0	4.0	3.0	1
23	"	16.1	40	125	1.7	3.5	2.6	1
24	"	16.2	54	37	0.9	1.2	1.1	2
25	"	16.3	62	35	0.8	0.8	0.8	3
26	"	16.4	33	219	1.5	2.5	2.0	1
27	Fault	16.6	78	178	13.1	14.1	13.6	9
28	Fault	16.8	77	172	13.8	14.9	14.4	9
29	<i>fracture</i>	16.9	59	355	1.3	1.3	1.3	2
30	"	17.0	56	4	1.0	1.4	1.2	2
31	"	17.0	75	5	0.6	0.6	0.6	3
32	"	17.2	53	5	0.4	2.3	1.4	2
33	"	17.4	49	15	0.7	1.0	0.9	3
34	"	17.4	41	16	1.1	3.8	2.5	1
35	"	17.6	63	353	1.1	2.3	1.7	2
36	"	17.7	54	348	0.9	1.5	1.2	2
37	"	17.7	38	358	1.4	2.0	1.7	2
38	"	17.8	45	344	0.7	1.8	1.3	2
39	"	17.8	43	15	0.7	1.5	1.1	2
40	"	17.9	48	16	0.7	1.7	1.2	2

Table 1. Dip angle, dip direction and thickness of the tectonic elements derived from the Televiwer image are summarized.

41	<i>fracture</i>	18.0	52	28	0.8	1.6	1.2	2
42	"	18.0	61	7	0.7	1.8	1.3	2
43	Fault	18.2	28	192	123.2	132.0	127.6	9
44	Fault	18.7	46	174	96.6	103.5	100.1	9
45	<i>fracture</i>	18.9	69	302	0.9	1.8	1.4	2
46	"	19.0	58	304	0.7	0.9	0.8	3
47	"	19.1	63	179	0.8	3.0	1.9	2
48	"	19.2	52	12	0.8	0.8	0.8	3
49	"	19.3	37	158	0.9	3.0	2.0	1
50	"	19.5	79	332	0.2	1.4	0.8	3
51	"	19.5	54	163	1.5	2.7	2.1	1
52	"	19.7	56	207	1.4	2.8	2.1	1
53	"	19.8	52	191	1.1	1.4	1.3	2
54	"	19.8	51	162	1.9	3.2	2.6	1
55	"	19.9	32	139	1.1	1.1	1.1	2
56	"	20.8	53	156	1.8	4.2	3.0	1
57	"	20.9	81	297	0.5	0.5	0.5	3
58	"	21.0	31	158	1.3	2.2	1.8	2
59	"	21.1	63	168	1.1	1.4	1.3	2
60	"	21.2	71	117	0.8	1.0	0.9	3
61	"	21.3	48	231	1.5	1.7	1.6	2
62	"	21.4	45	208	1.6	1.8	1.7	2

LAYER BOUNDARY					
NO	TECTONIC	DEPTH [m]	DIP ANGLE	AZIMUTH	CODE
1	<i>LAYER</i>	13.1	54	135	8
2	"	20.1	19	92	8

Table 1. (continued).

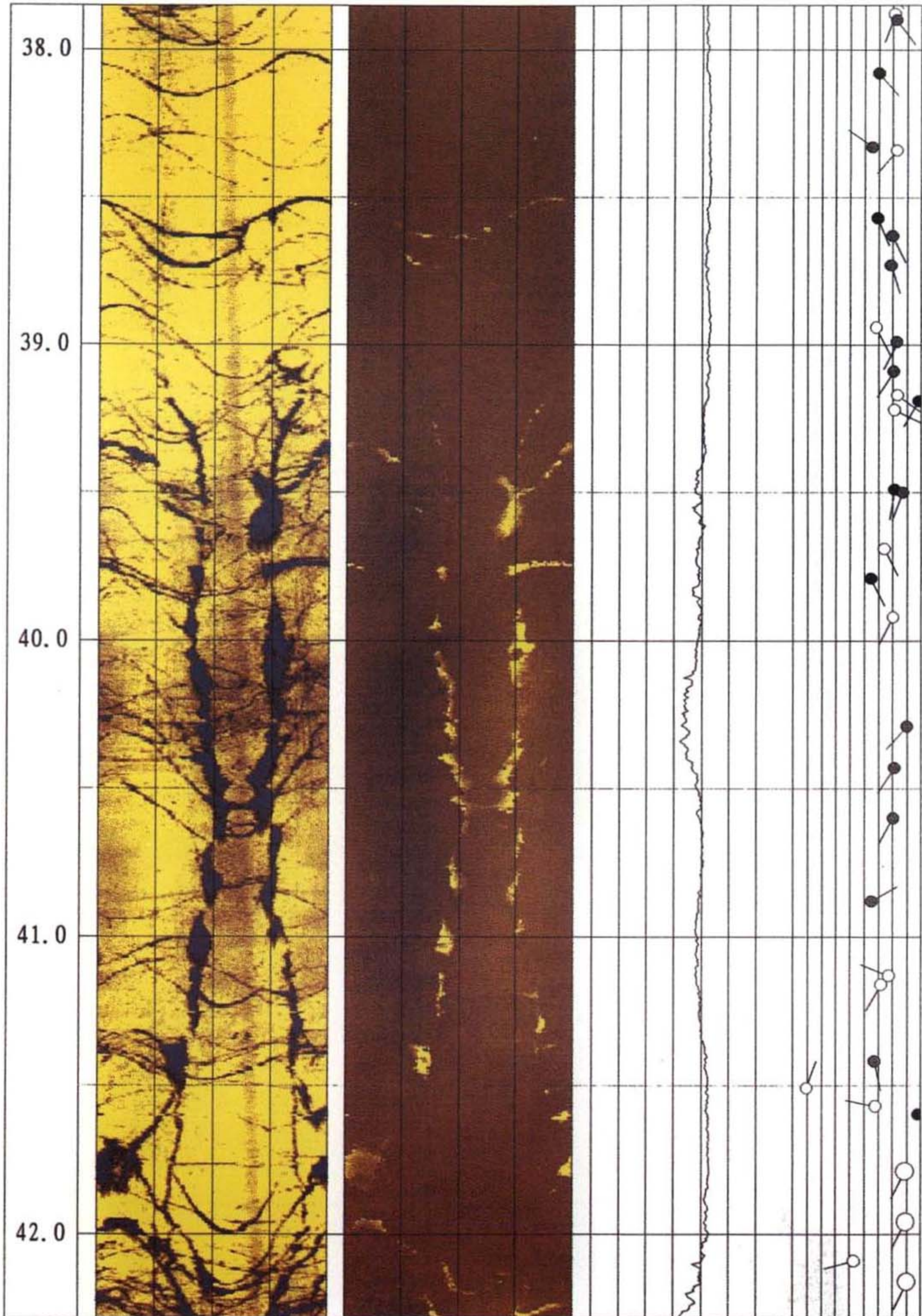


Fig. 11. Televiwer image log measured at the survey area Pyongtaek, Korea. Open vertical fractures can be clearly observed.

상기 국내 현장 실험 결과는 바로 텔레뷰어의 응용성을 훌륭하게 반영한 것이라 할 수 있다. 미세한 절리(약 0.2mm 두께)의 인식, 절리들의 교차, 뚜렷한 암층경계면의 존재, 단층의 발달상태, 절리의 열린 상태, 단층 충전물의 강도, 일관성을 띤 절리의 존재 그리고 수직절리의 형성 등 나아가서 그들 각각의 정확한 주향 및 경사각을 암반을 대상으로 한 모든 연구분야에서 귀중한 자료가 될 것으로 사료된다. 이러한 기본자료들은 주어진 조사 목적에 따라 다양한 도면화 기술에 의해(제 6 절 참조) 분석된다.

2. 암석에 따른 텔레뷰어의 이미지

변성암은 퇴적암이나 화성암에 비하여 상대적으로 오래된 암석이기 때문에 그간 수차례의 지각 변동으로 인하여 절리 및 단층이 발달되고 또한 그의 방향 및 경사가 대체로 불규칙하다. 반면 화성암 특히 관입암(예: 화강암)일 경우에는 마그마가 심부에서 식을 때 수축에 의해 절리가 발생하기 때문에 대체로 규칙적인 절리가 관찰된다. 퇴적암에서 형성된 절리는 대체로 층리에 따라 발달하는 경우가 많으며 그 이외에는 단절된 절리가 흔히 관찰된다.

Fig. 12는 독일 남부 퇴적층을 대상으로 한 텔레뷰어 데이터(약 2m 구간)를 보여주고 있다. 왼쪽 그림(심도 약 146m)에서는 대체로 박층의 층리가 발달되어 있으며 인식되는 절리도 층리를 따라 형성되고 있다. 한편, 미세한 절리가 급경사를 띠면서 산발적으로 발달되고 있음도 관찰된다. 오른쪽 그림(시추 심도 약 90m)에는 수평 층리 이외에 뚜렷한 절리가 인식되고 있다.

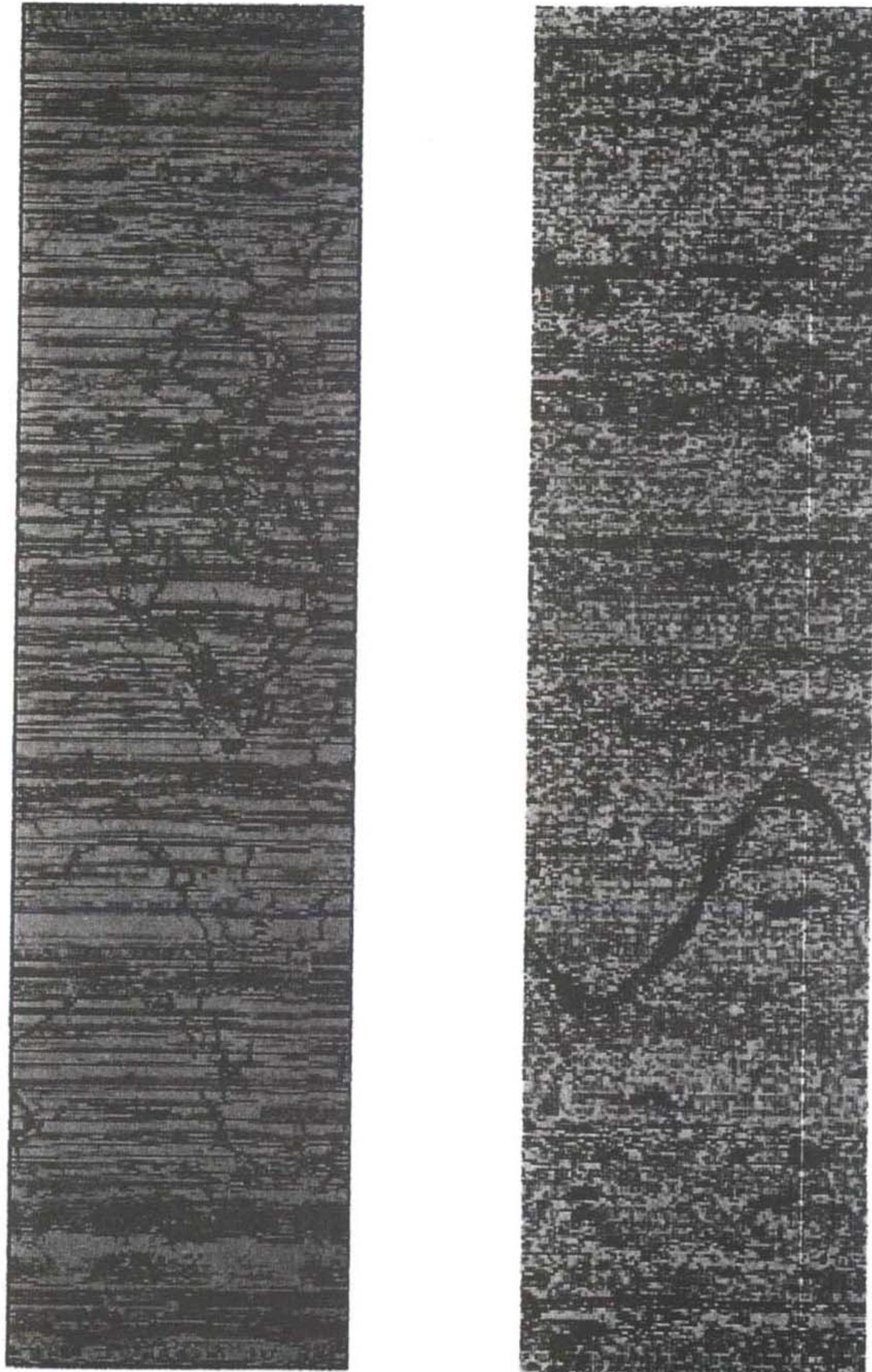


Fig. 12. Two examples of Televier amplitude image in soft sedimentary rock formations (in Germany). Fine layers embedded in a sedimentary sequence and thin, steeply dipping fractures (left picture) are visible as dark lines.

Fig. 13은 국내 대구광역시 도심지의 강한 퇴적층(시추공 LX 규격)에서 얻어진 텔레뷰어 이미지(심도 약 12m~16m)를 보여주고 있다. 여기서 세 번째 그림은 암석강도 변화(제 3 절 참조)를 나타내고 있다. 인식되는 절리의 수는 일반 국내 지반상태에 비추어 대단히 적다. 반면, 거의 수평에 가까운 층리들이 훌륭하게 발달되고 있으며 동시에 박층을 띤 연약한 매질(예: 점토)이 급격한 강도 하락을 보이면서(예: 심도 약 14.1m) 각 층리에 협재되고 있음을 볼 수 있다. 지질학적 측면에서 퇴적상태(층리 및 엽리)는 잘 보존되어 관찰되고 있으며 곳에 따라 미세 절리 내에 석영질이 결정화된 흔적도 관찰되고 있다(예: 심도 약 15.5m, 화살표로 표시).

Fig. 14에는 독일 남부 서로 다른 지역에서 화강암을 대상으로 얻어진 텔레뷰어 진폭이미지를 보여주고 있다. 전체적으로 절리 동이 서로 평행을 유지하고 있는 특징이 관찰된다. (a)는 심도 약 70m 주위 약 1.5m 구간에 해당되며 여기에는 미소한 절리들이 관찰되고 있다. (b)의 경우(심도 약 130m 주위 약 2m구간)에서도 미소한 절리들이 좁은 간격으로 발달되고 있음을 볼 수 있다. (c)는 심도 약 50m 주위 약 3m 구간에서 얻어진 데이터로써 정확한 절리 이외에도 별도로 거의 수직에 가까운 절리도 훌륭하게 인식되고 있음이 관찰된다(화살표로 표시).

Fig. 15는 유럽지역 편마암(변성암) 지대에서 흔히 관찰되는 텔레뷰어 진폭이미지를 나타내고 있다. 여기에는 서로 다른 강도를 갖는 박층들이 호상을 이루고 있음이 훌륭하게 반영되고 있다. 그런데, 국내 변성암(경기도 평택군 지역)을 대상으로 한 텔레뷰어 이미지(Fig. 16 참조)는 또 다른 양상을 보여주고 있다. 심도 약 35.8m 주위에는 약 25cm 폭의 박층이 상대적

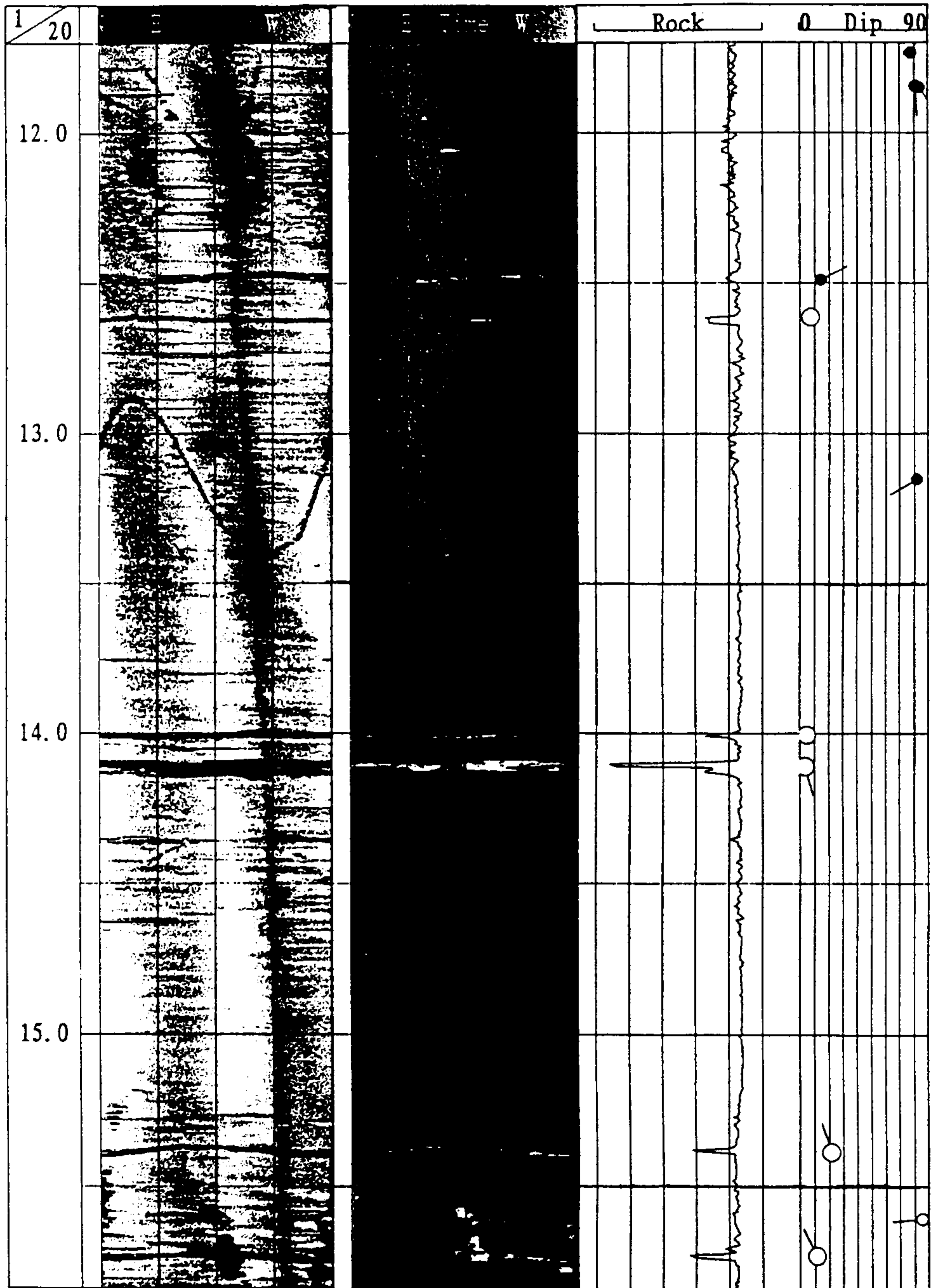
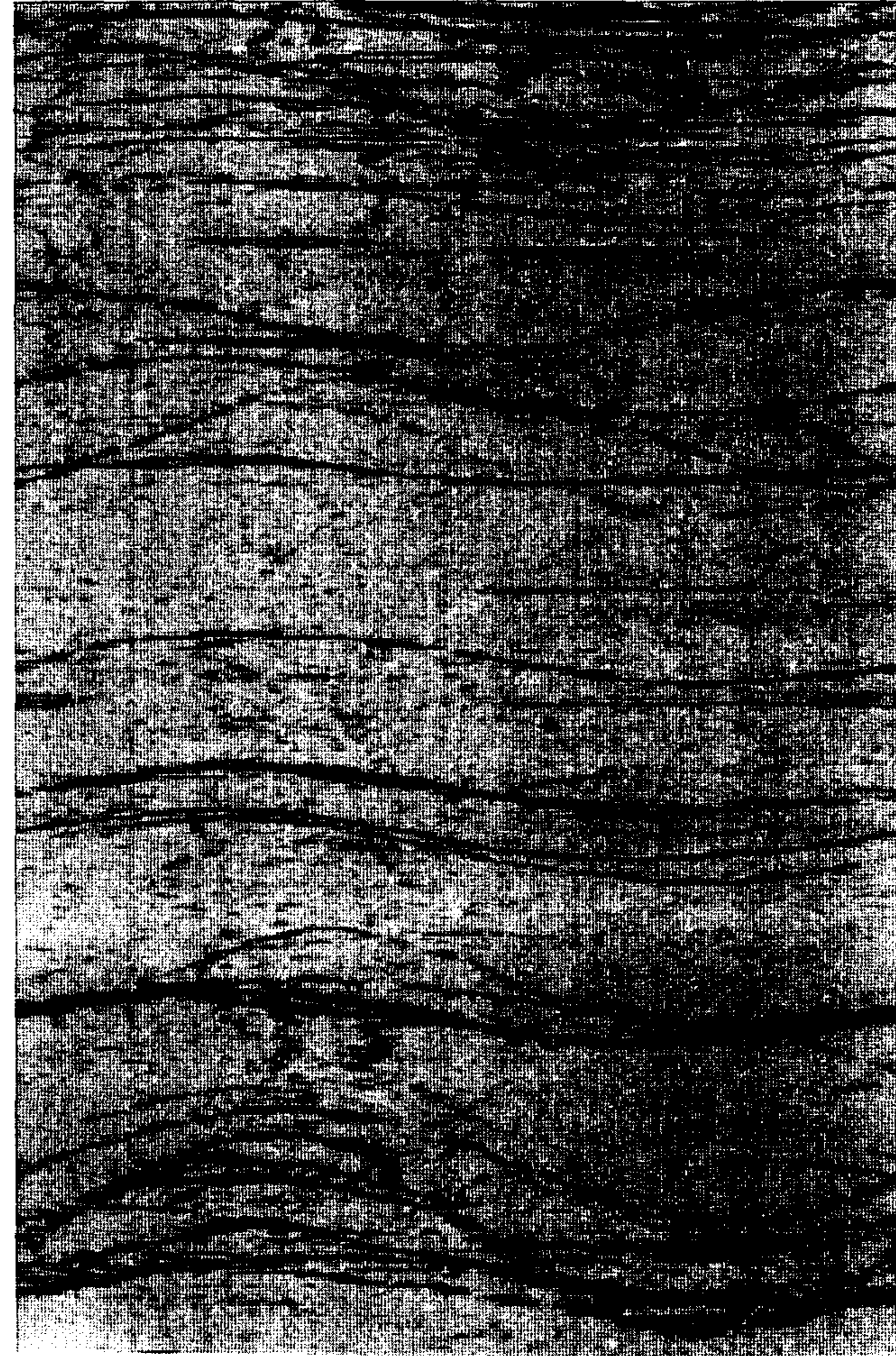


Fig. 13. Example of Televiwer image log in hard sedimentary rock formations in the survey area Daegu, Korea.



(a)



(b)

Fig. 14. Example of Televiwer image log in granite rock (in Germany).

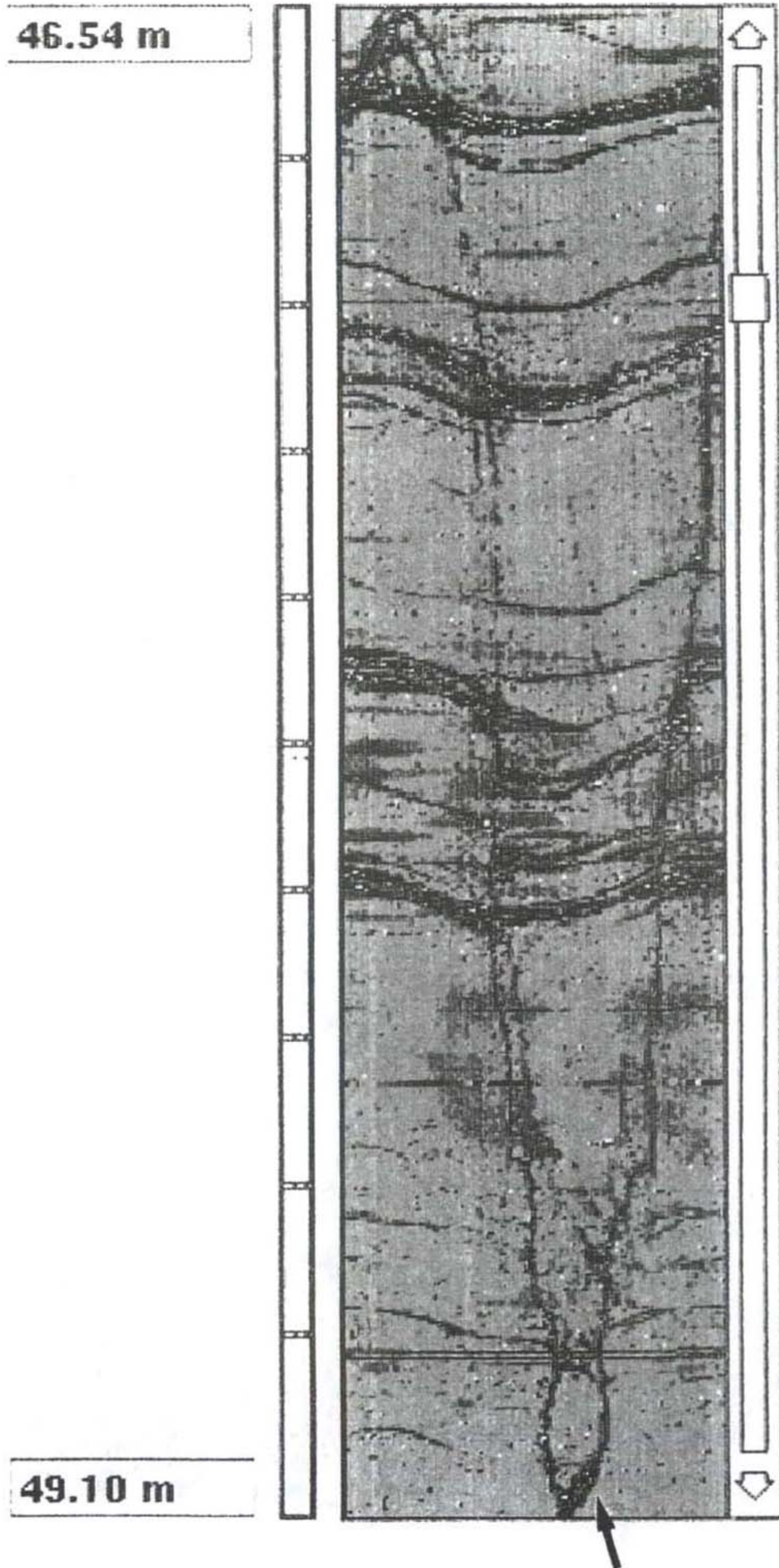


Fig. 14. (continued).

(c)

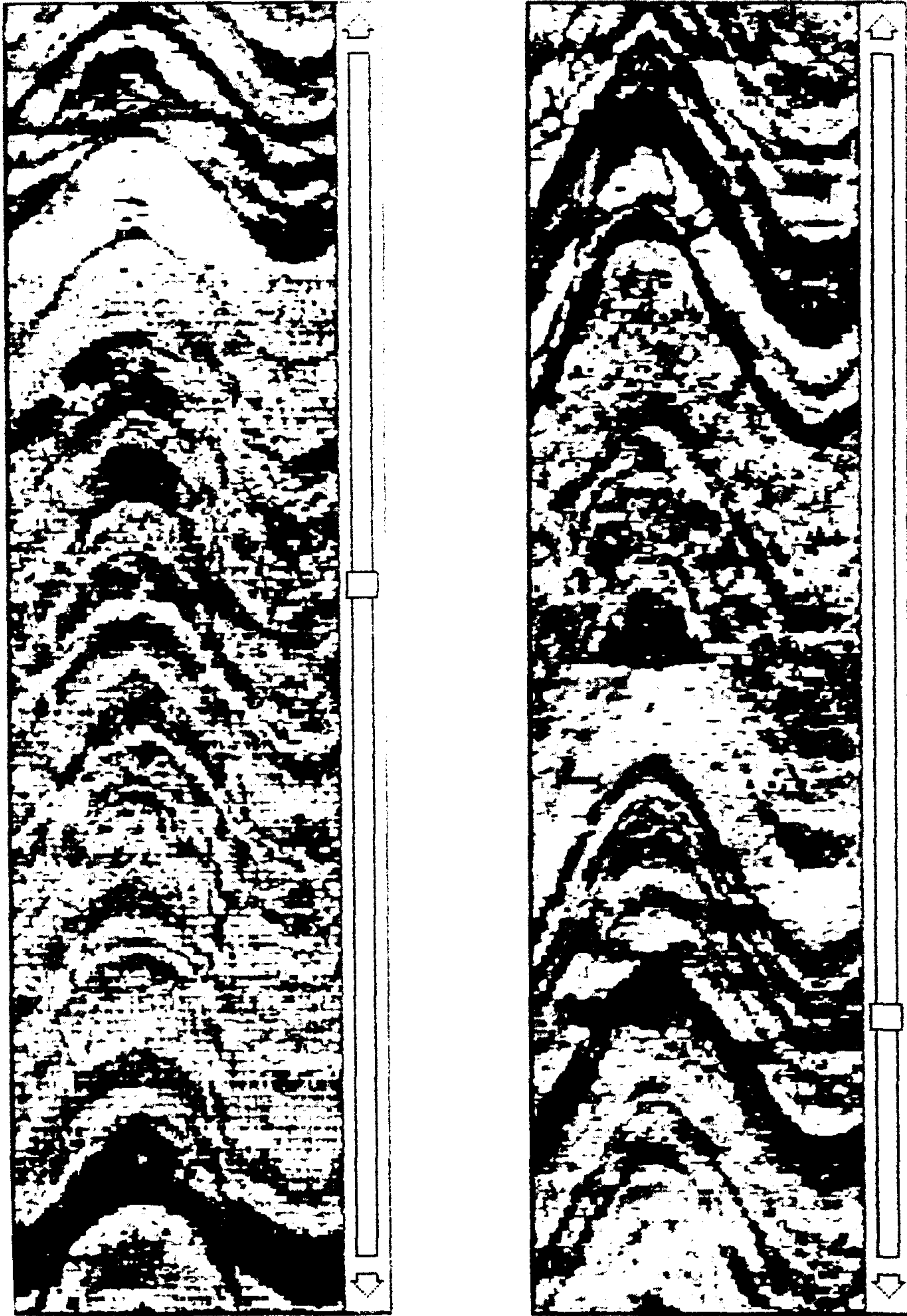


Fig. 15. Example of Televiwer amplitude image in metamorphic rock (in Germany). There are numerous thin interbedded layers of hard(bright) and soft(dark) rock.

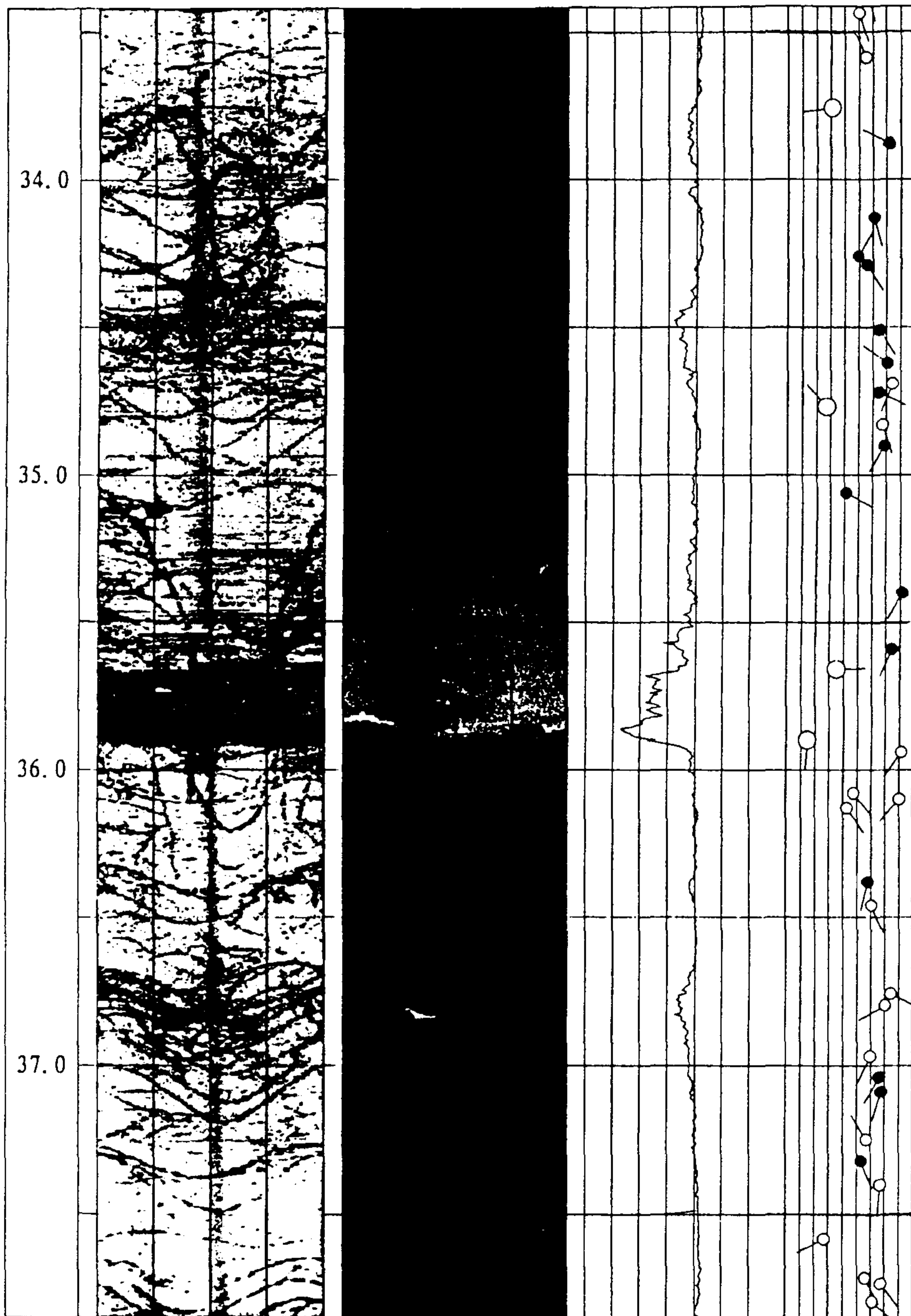


Fig. 16. Example of Televierer image log measured in metamorphic rock at the survey area Pyongtaek, Korea. Thin interbedded layer is clearly visible.

으로 약한 강도를 보여주면서(세번째 그림 참조) 경암 내에 협재하고 있으며 또한 그 주위에 여러개의 절리군(화살표로 표시)들이 좁은 간격을 두면서 관찰되고 있다. Fig. 17은 국내(인천광역시 도심지) 화성변성암에서 관찰된 텔레뷰어 이미지를 나타내고 있다. 이번에는 거의 극경암에 해당하는 박층(석영질 결정체로 간주됨)이 호상을 이루면서 발달되고 있음을 볼 수 있다.

지금까지 소개한 현장응용 사례는 우선 각 암석의 특징적인 부분에 대한 텔레뷰어 반응을 보여주는 것이며 나아가서 고분해능 텔레뷰어가 암반구조 연구에 결정적인 기여를 할 수 있음을 입증하는 것이기도 하다.

끝으로 Fig. 18에는 콘크리트 구조물에 대한 텔레뷰어 데이터를 보여주고 있다. 자갈 및 모래의 분포가 고분해능 텔레뷰어 기법에 의해 뚜렷이 인식되고 있다. 여기서 흥미의 대상이 되는 부분은 상대적으로 낮은 진폭을 보여주는 구간(화살표로 표시)으로써 이는 바로 콘크리트 내부가 그 구간에서 부식되고 있다는 것을 의미하고 있는 것이다.

3. 임피던스(rock strength) 산출

텔레뷰어 측정시 얻게 되는 데이터 내용은 초음파 빔이 공벽에 의해 반사되는 초음파의 진폭과 주시이다. 여기서 진폭은 공벽의 반사계수 R 과 직접적으로 연관되며, R 은 식(1)에 의거 단지 공벽에 인접한 두 매질의 임피던스 즉 $I_W (= \rho_1 V_1)$, $I_R (= \rho_2 V_2)$ 에 의해 결정된다. 텔레뷰어의 측정에서는 일반적으로 시추공 내에 물로 채워지기 때문에 I_W 는 쉽게 측정된다($\rho_1 \sim 1$,

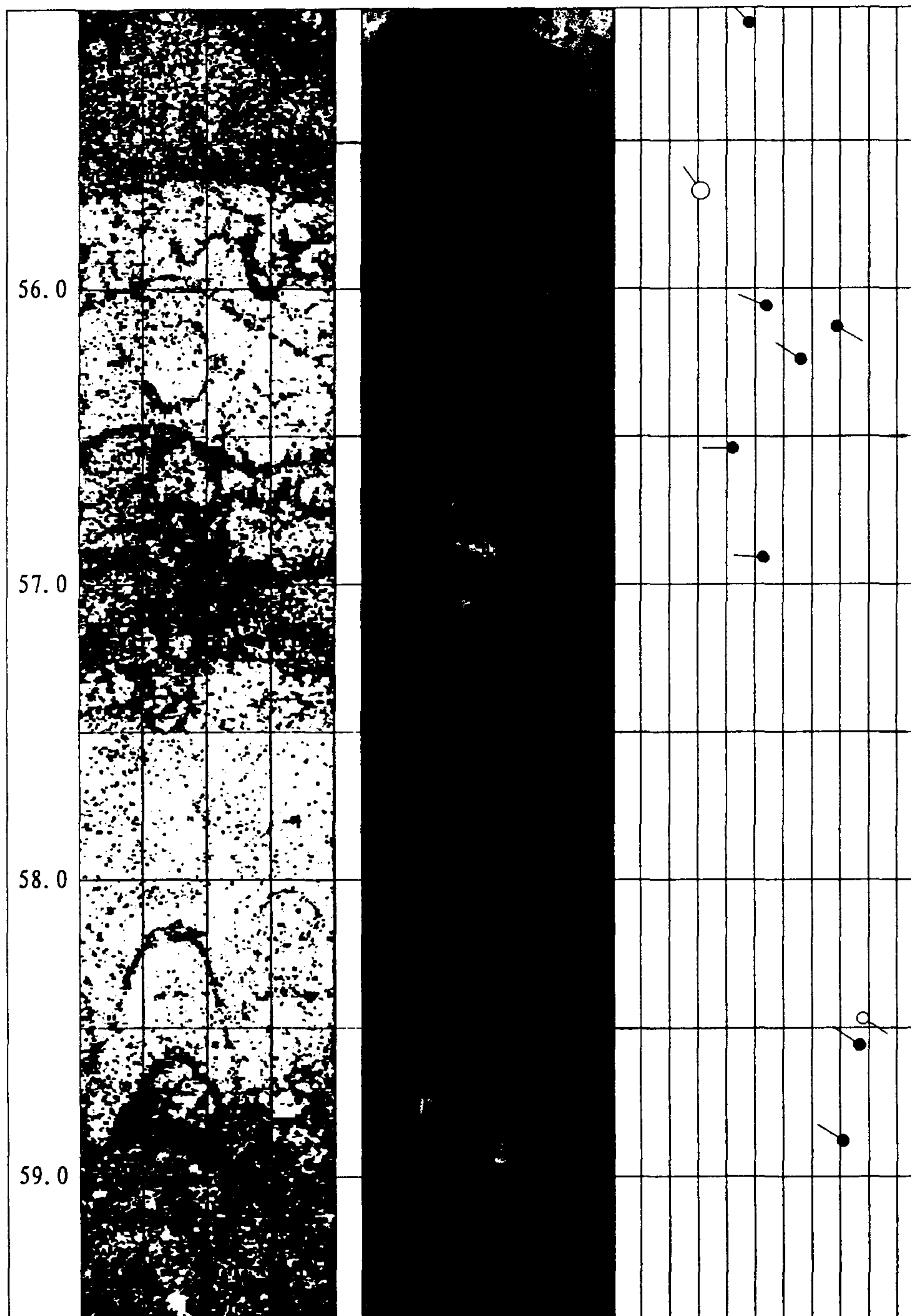


Fig. 17. Example of Televiwer image log measured in igneous metamorphic rock at the survey area Incheon, Korea.

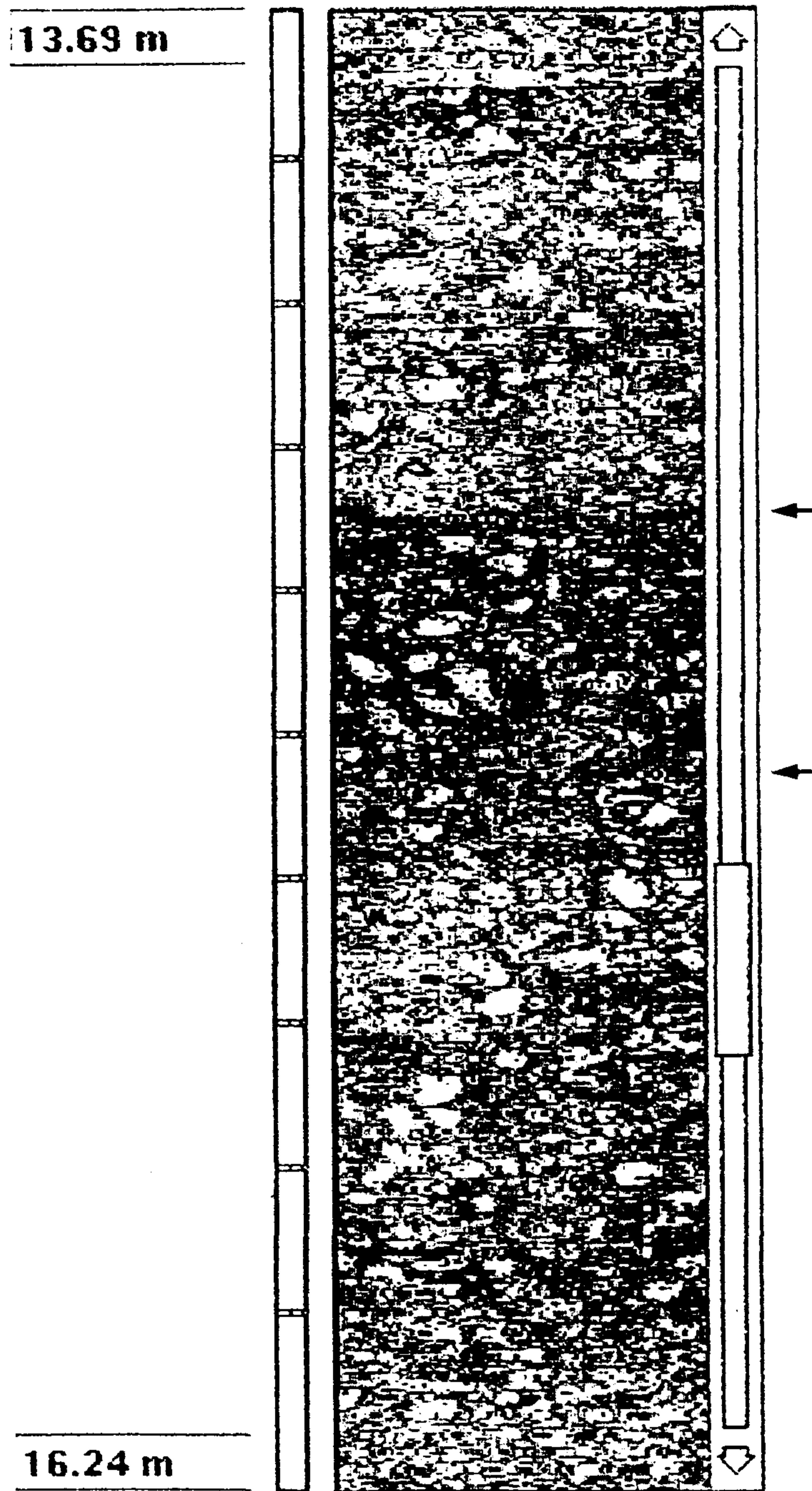


Fig. 18. Example of Televierer amplitude image in concrete formation. The texture of the concrete and its weathered zone (indicated by arrows) are clearly visible.

$V_1 \sim 1500m/sec$). 따라서 I_R 은 바로 측정된 진폭치로부터 구할 수 있게 된다. 여기서 얻게되는 I_R 은 암석의 탄성과 속도와 밀도 정보를 잠정적으로 내포하고 있기 때문에 이것은 텔레뷰어 측정에서 부차적으로 얻게 되는 큰 수확이라 할 수 있겠다. 시추공 검층시 일반적으로 암석의 탄성과 속도 변화는 밀도 변화보다 훨씬 크기 때문에 I_R 자체의 상대적인 변화는 암층의 분리를 가능하게 한다. 즉, 견고한 암석(예: $V \sim 5000m/sec$, $\rho \sim 2.7g/cm^3$)과 연약한 암석(예: 파쇄대 $V \sim 3000m/sec$, $\rho \sim 2.5g/cm^3$)의 임피던스는 상당한 차이(약 1.8배)를 나타내기 때문에 흔히 I_R 은 reflectivity 혹은 rock strength로 대변된다.

일반적으로 "space modulus" M 은 속도 검층기(sonic log)에서 얻게 되는 P 및 S의 초동주시 Δt_p 및 Δt_s 와 밀도에 의해 다음과 같이 정의되며 (Serra, 1984)

$$M = K + \frac{4}{3}\mu = \frac{\rho_b}{\Delta t_p^2} = \rho_b \cdot V_p^2 \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2}$$

$$K = \rho_b \left[\frac{1}{\Delta t_p^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right]$$

ρ_b : bulk density

$\Delta t_p, \Delta t_s$: 1/P파속도(V_P), 1/S파속도(V_S)

μ : shear modulus

K : compressional modulus

이 때 M은 암석 변형에 저항하는 소위, 암석 강도에 대한 척도(rock strength index)로 간주된다. 여기서 ρ_b 및 V_P 는 속도 및 밀도 검층에 의해 구할 수 있으며 그로부터 M에 대한 절대치(absolute value)는 물론 반사 계수 R도 계산될 수 있다. 여기서 큰 흥미의 대상은 텔레뷰어 진폭치 즉, reflectivity와 상기 M과의 상관관계이다. Fig. 19는 실질적인 암석강도(strength index)와 텔레뷰어 reflectivity를 상호 비교하고 있다. 그림의 첫 번째 및 두 번째 기록은 각각 밀도검층(density log) 및 속도검층(sonic log)에 의해 얻어진 것으로서 그로부터 실질적인 암석강도(세 번째 기록) M이 산출되고 있다. 이에 대응하여 네 번째 기록에는 소위 텔레뷰어 암석강도를 나타내고 있다. 일별하여, 상호 훌륭한 대조를 보여주고 있다. 특히, 텔레뷰어 고유의 고분해능 측정기능은 무엇보다 호상을 띤 박층의 강도변화를 보다 명확하게 나타내고 있다(시추코아 비교). 한편, 이러한 상호비교 연구는 바로 텔레뷰어 강도치와 실제 강도치와는 상호 상수배 관계를 나타내고 있음을 시사한 것이 된다. Fig. 20은 텔레뷰어 강도치와 속도 및 밀도 검층으로부터 산출된 반사계수와의 연관성을 보여주고 있다. 두 개의 값들은 서로 선형관계를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 여기서 선형으로부터 이탈된 부분은 무엇보다 각 기법들(텔레뷰어, 속도 및 밀도검층)이 박층에 대해 서로 다른 분해능을 갖고 있는데 연유된다.

지금까지 서술된 내용을 근거로 Fig. 21에는 실질적인 암석강도를 산출할 수 있는 세가지 방법을 현장응용 사례를 통하여 제시하고 있다. 첫 번째 방법은 이미 언급한 바 속도 및 밀도 검층에서 얻게 되는 ρ_b 와 Δt_p (혹은 V_P 와 속도)를 식(6)에 바로 대입하여 산출하는 것으로서 그 결과는 그림의 세 번째 부분에 나타나 있다. 또 다른 두가지 방법은 텔레뷰어 진폭치와 ρ_b 나 Δt_p 를 연관시킴으로써 실질적인 암석강도를 구하는 것으로서 그 결과는

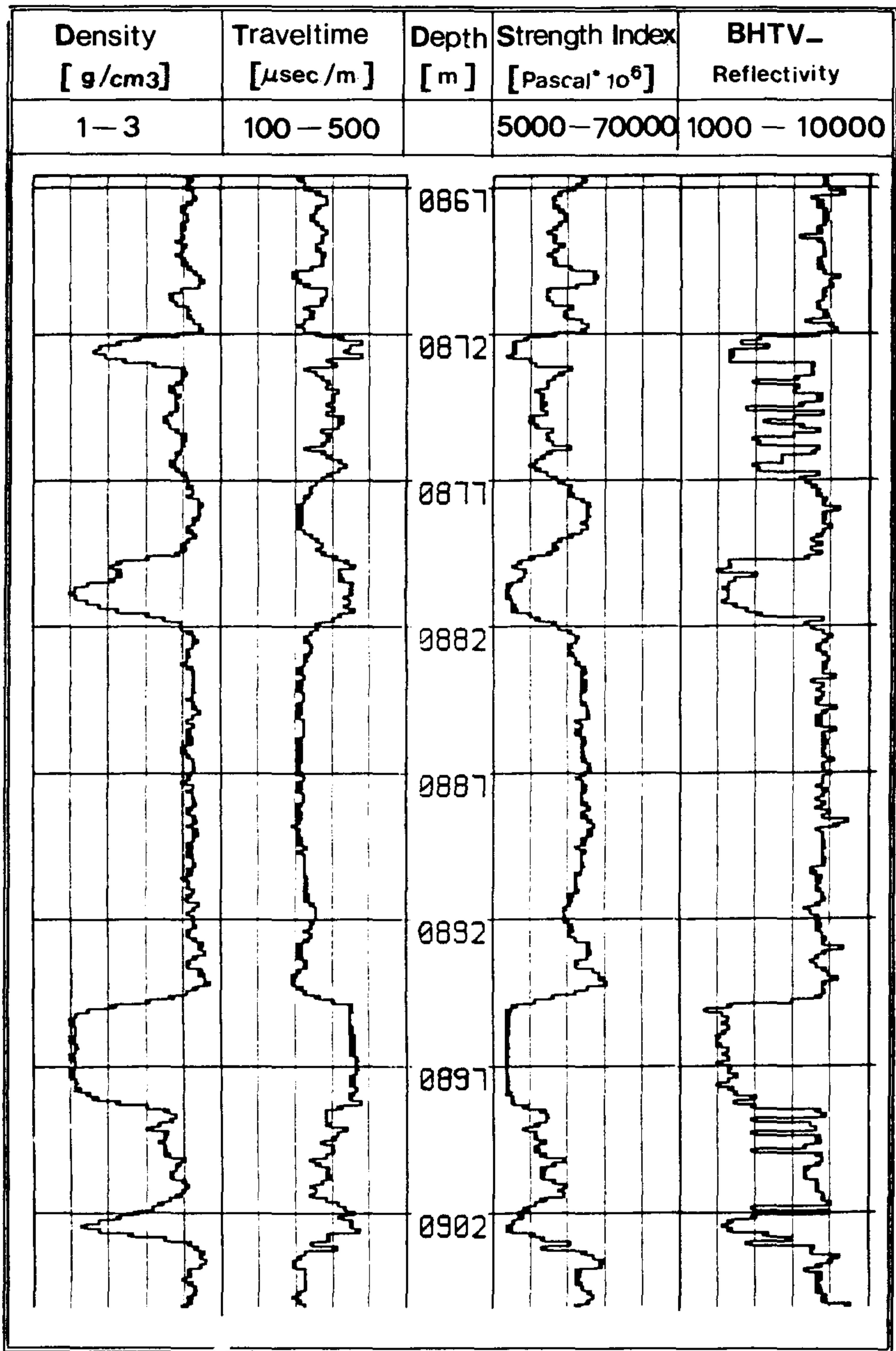


Fig. 19. Comparison of Televiwer rock strength (the fourth trace) with the real rock strength (the third trace) derived from the density log (the first trace) and the sonic log (the second trace).

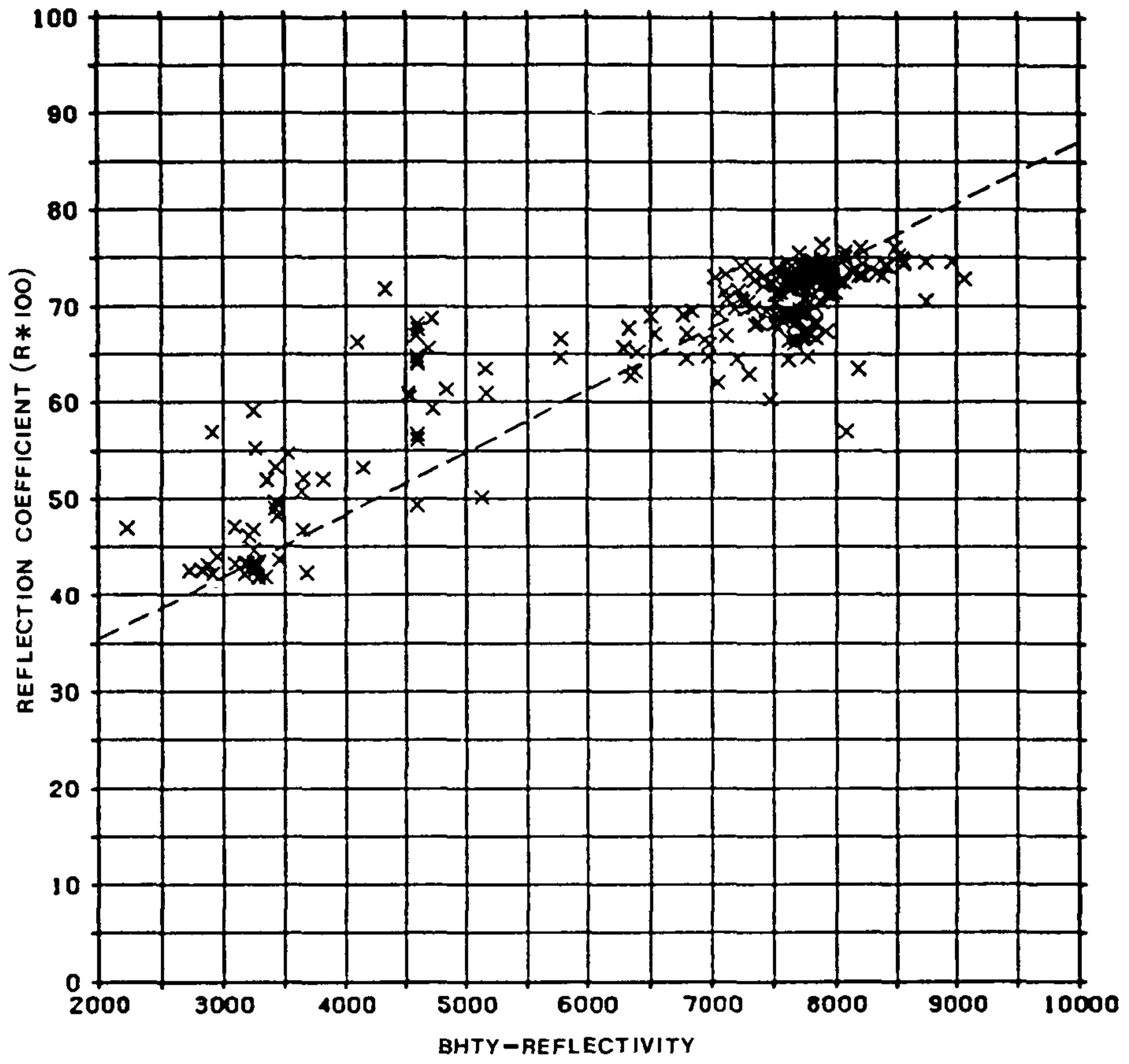


Fig. 20. Crossplot of Televiwer reflectivity and acoustic reflection coefficient

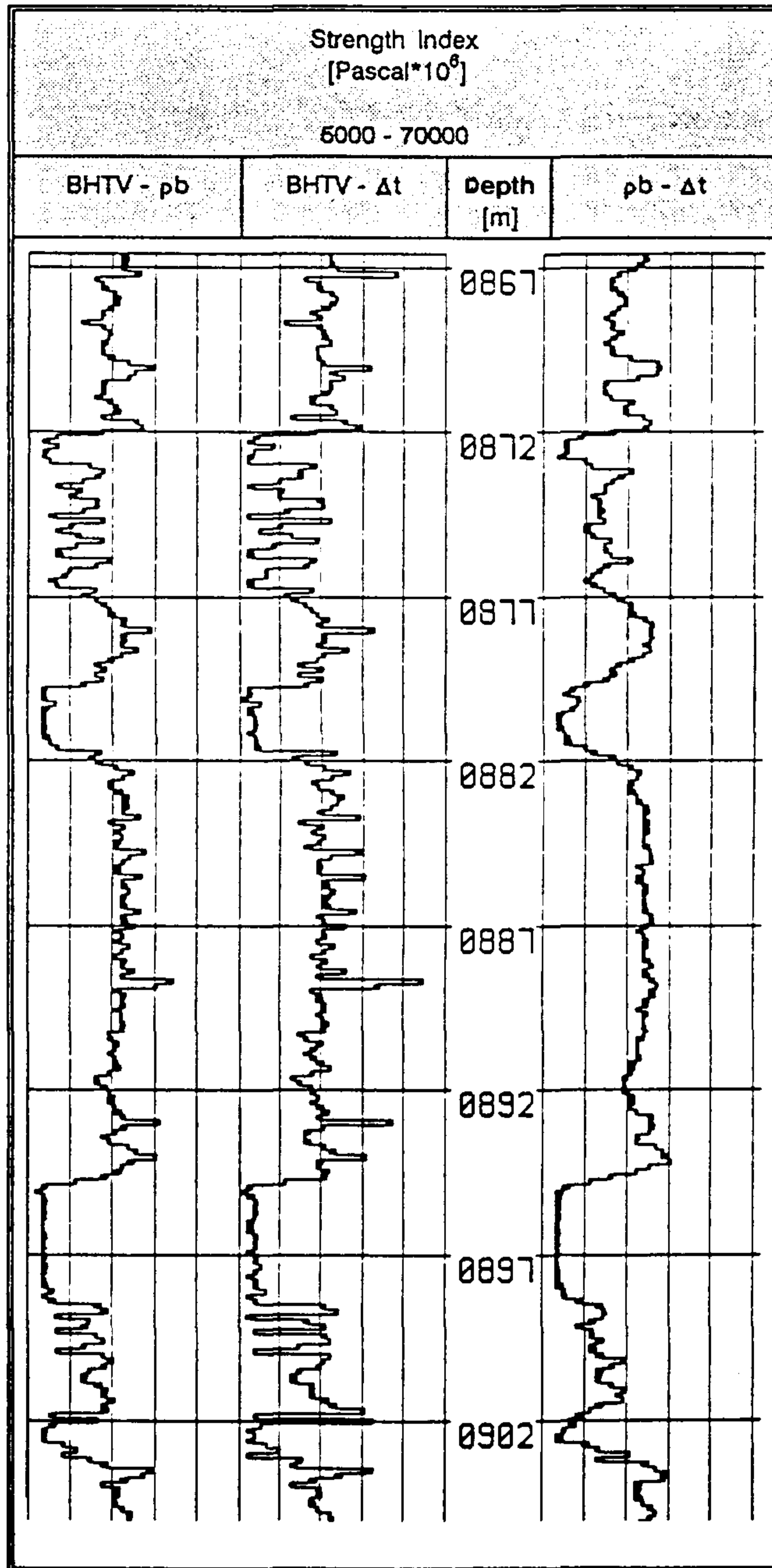


Fig. 21. Comparison of the behaviour of the rock strength derived from three different combinations of measuring procedures.

그림의 첫번째 및 두번째 부분에 나타나 있다. 상기 세가지 실질강도치의 변화를 상호 비교하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 강도의 전반적인 변화는 상호 훌륭한 대조를 보여주고 있다.
- 텔레뷰어와 연관되어 산출된 암석강도는 박층에 대해 보다 높은 분해능을 나타내고 있다.
- $\rho_b - \Delta t$ 강도 변화는 텔레뷰어와 연관되어 산출된 것(BHTV- ρ_b 혹은 BHTV- Δt)을 smoothing한 양상을 보여주고 있다. 이는 바로 속도 및 밀도 검층에 의한 측정치가 일정 구간내(예: 1000mm)의 평균치를 나타내는 반면 텔레뷰어 강도치는 각 spot(예: 4m×4m)에 대한 강도치가 그대로 반영되기 때문이다. 예를 들면, 단층 충전물 1cm 두께에 대한 정확한 강도치는 $\rho_b - \Delta t$ 에 의해 구해질 수 없다고 보아야 할 것이다. 이러한 측면에서 고려한다면, 텔레뷰어를 단독으로 응용하였을 경우, 비록 그로 인한 강도치가 실질적인 값에는 바로 대응될 수 없다고 하더라도, 가장 바람직한 상대적인 강도변화가 구해질 수 있다는 것이 된다.

Fig. 22는 국내 청양군 실험 시추공(약 100m)을 대상으로 산출된 순수한 텔레뷰어 암석강도를 나타내고 있다. 여기서 나타낸 암석강도치는 상수배화(scaling)이전이기 때문에 실질적인 강도치에 대응될 수 없다. 그러나 강도변화 측면에서는 높은 분해능을 보여주고 있음을 볼 수 있다. 천부 구간에서는 강도가 점차 높아지고 있으며 심도 약 20m부터는 거의 일정한 강도를 유지하고 있다. 여기서 강도하락이 첨예하게 나타난 것은 대부분 단층 충전물에 의해 유래되고 있음이 입증되고 있다(오른쪽 그림 arrow plot 참조). 참고로 본 텔레뷰어 탐사에서는 도합 621개의 지질구조 자료(567개 절

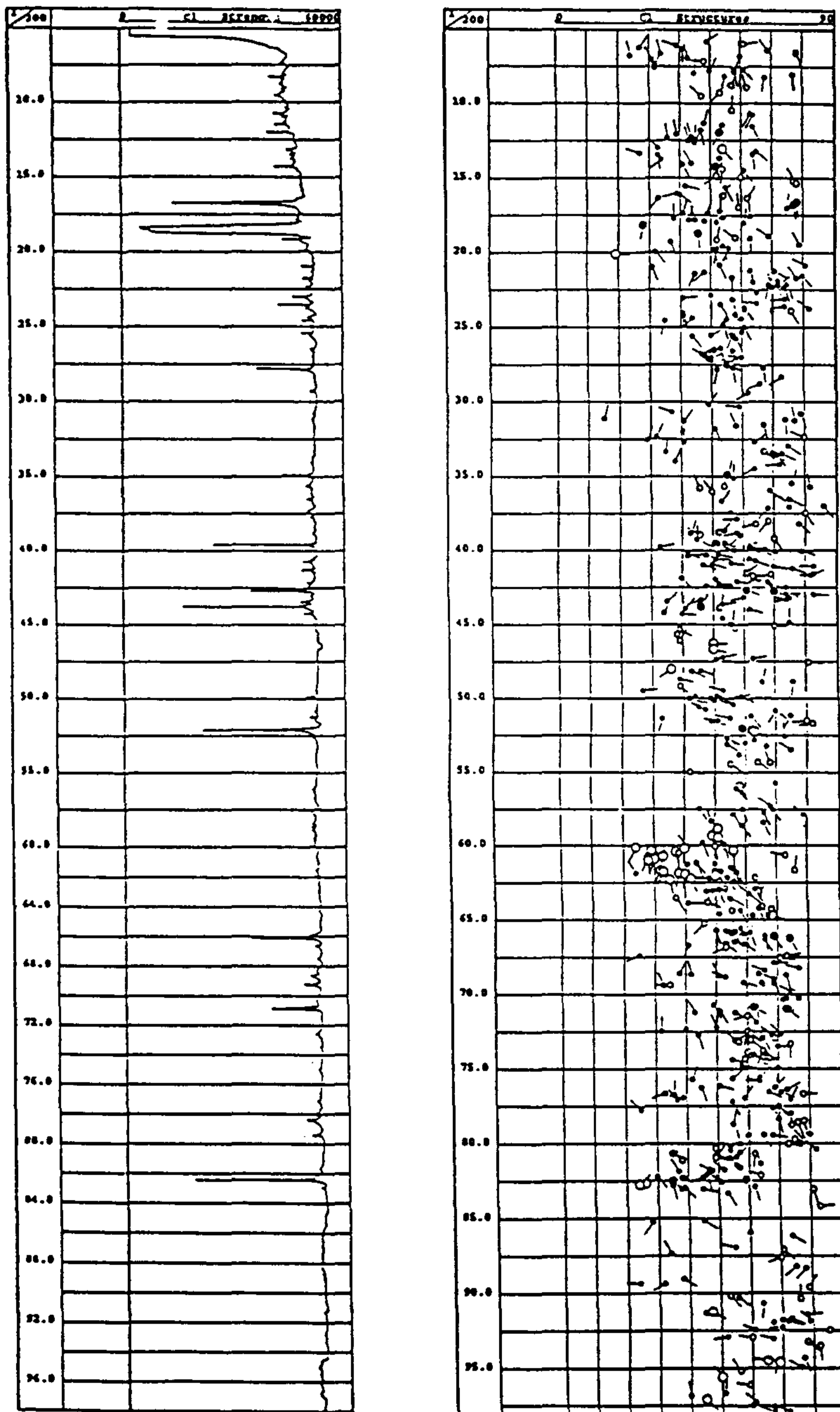


Fig. 22. Televiewer rock strength (left side) was evaluated from the amplitude image measured at the study site Cheongyang, Korea. The abrupt variation of the rock strength is well matched to the tectonic elements (faults in general) shown in the arrow plot (right side).

리, 20개 단층, 34개 암층경계면)가 얻게 되었으며 이들은 그 나름대로 암석 강도에 영향을 준 것이라 할 수 있다.

Fig. 23은 국내 경기도 평택군의 변성암 지역에서 얻게된 텔레뷰어 암석 강도를 시추주상도와 비교하여 나타내고 있다. 여기서 암석강도 scaling(상수배)은 심도 약 35m 주위의 코아에 의한 암층강도 실험치에 의해 이루어졌다. 강도변화 오른쪽에는 단층분석 결과가 참고로 대조되고 있다. 여기서 실선 및 점선은 단층의 경사방향을 양분하여($-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$, $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ or $-90^{\circ} \sim -45^{\circ}$) 나타낸 것이며 각각의 경사각은 그대로 표현되고 있다. 전체적으로 단층이 존재하는 곳에 강도의 큰 하락이 관찰되고 있으며 그 정도는 단층의 폭 및 충전물에 의해 달라지고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 24는 동일지역(평택군)의 또 다른 시추공에서 관찰된 텔레뷰어 암석 강도를 보여주고 있다. 이번에는 steel casing(심도 약 10m)의 강도를 약 $1200(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 로 가정함으로써(화살표로 표시) 모든 텔레뷰어 강도를 대응하게 하였다. 연암 내의 강도변화는 대단히 복잡하게 나타나고 있으며 동시에 단층이 발달된 심도에서 강도의 급격한 변화가 관찰된다. 그런데, 심도 구간 약 21m~23m 및 29m~31m의 암석강도는 비록 그 구간에서 괄목할 만한 단층이 존재하지 않음에도 불구하고 균등하면서 대단히 낮게 나타나고 있다. 이는 바로 이 구간에서 상대적으로 대단히 연약한 박층이 협재되고 있음을 나타내는 것이 된다. 이러한 고분해능 강도변화는 Fig. 25에 나타낸 토모그래피 측정 데이터에서도 여실히 반영되고 있다. 즉, 발생원 시추공 WB2의 연약한 박층(심도 약 29m~31m, 화살표로 표시)에서 생성된 탄성파가 수평으로 전달되어 수신기 시추공 WB6의 수신기 번호 20~22 사이에도달할 경우 급격한 주파수의 변화(Fig. 25(b)에서 별표 화살표로 표시)가 관찰되는 것은, 수신기 시추공의 암반 상태(경암)가 아닌, 바로 발생원 시추공의 상기 연약한 박층에 의해 비롯된 것이라 할 수 있다. 참고로, 별표로 표

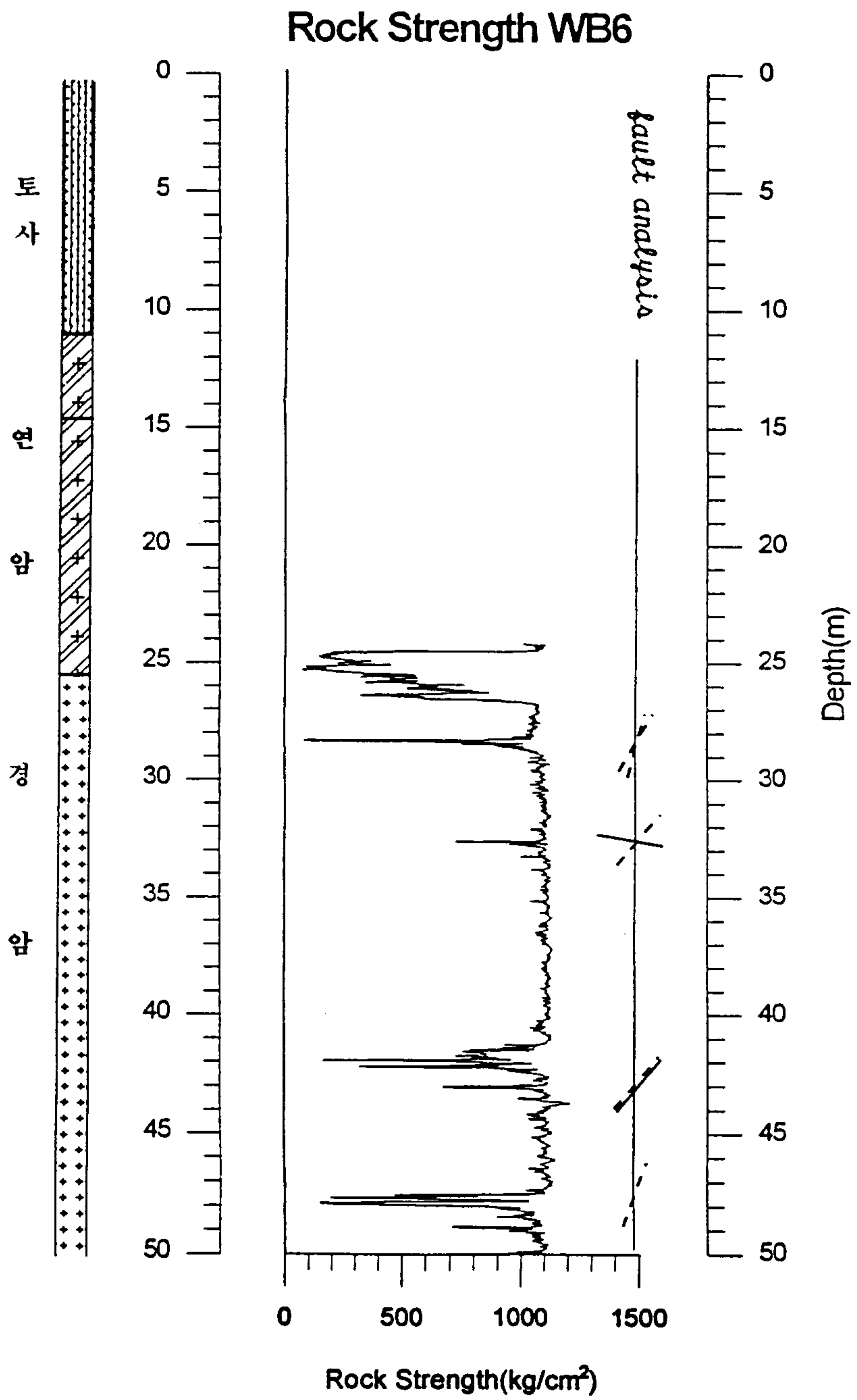


Fig. 23. Televiwer rock strength measured at the survey area Pyongtaek, Korea. The rock strength was scaled by core measurement.

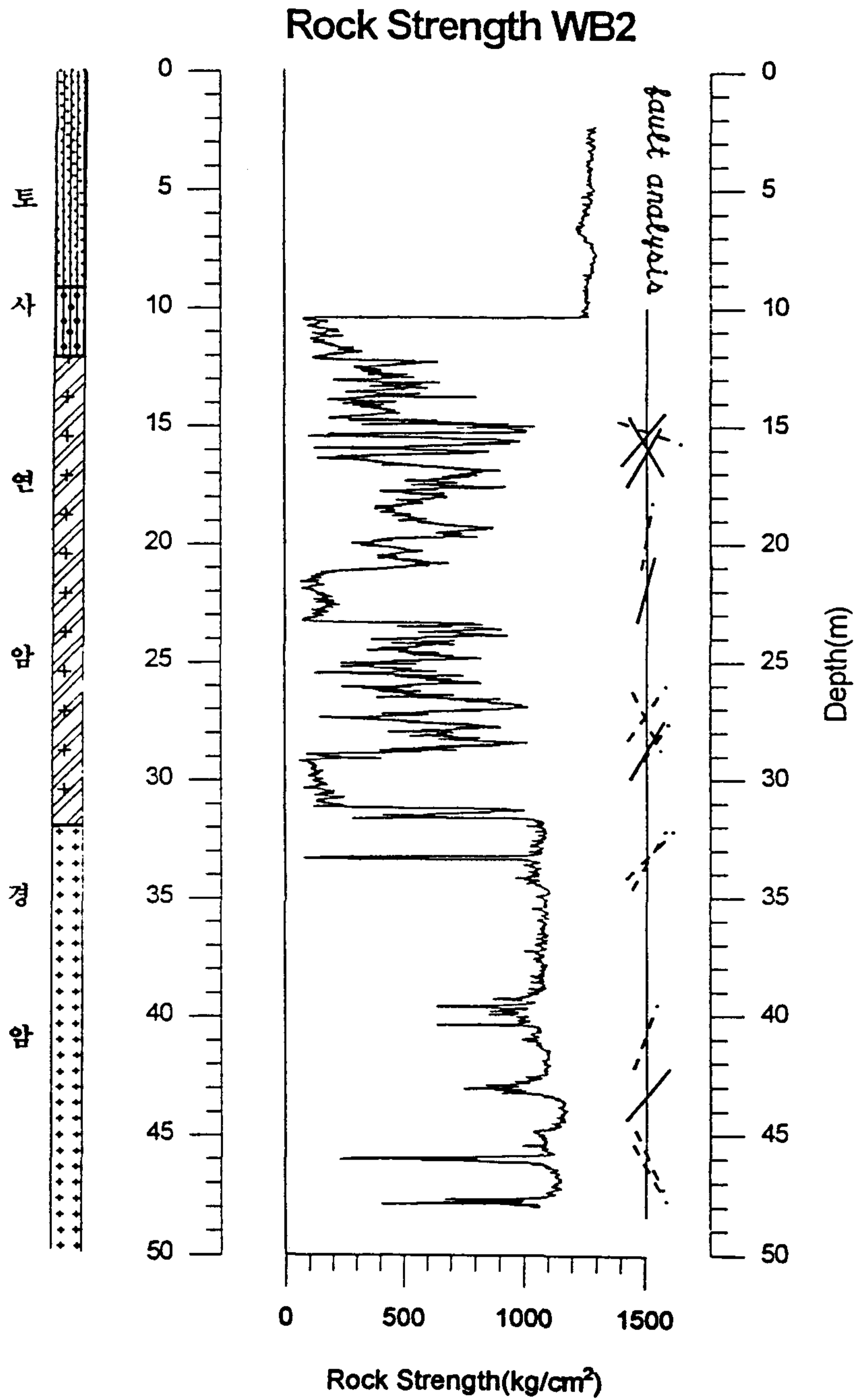


Fig. 24. Televiwer rock strength measured at the survey area Pyongtaek, Korea. The rock strength was scaled by assuming the strength of the steel casing.

Geometry for Tomographic Analysis

Westsea Survey No. : 425

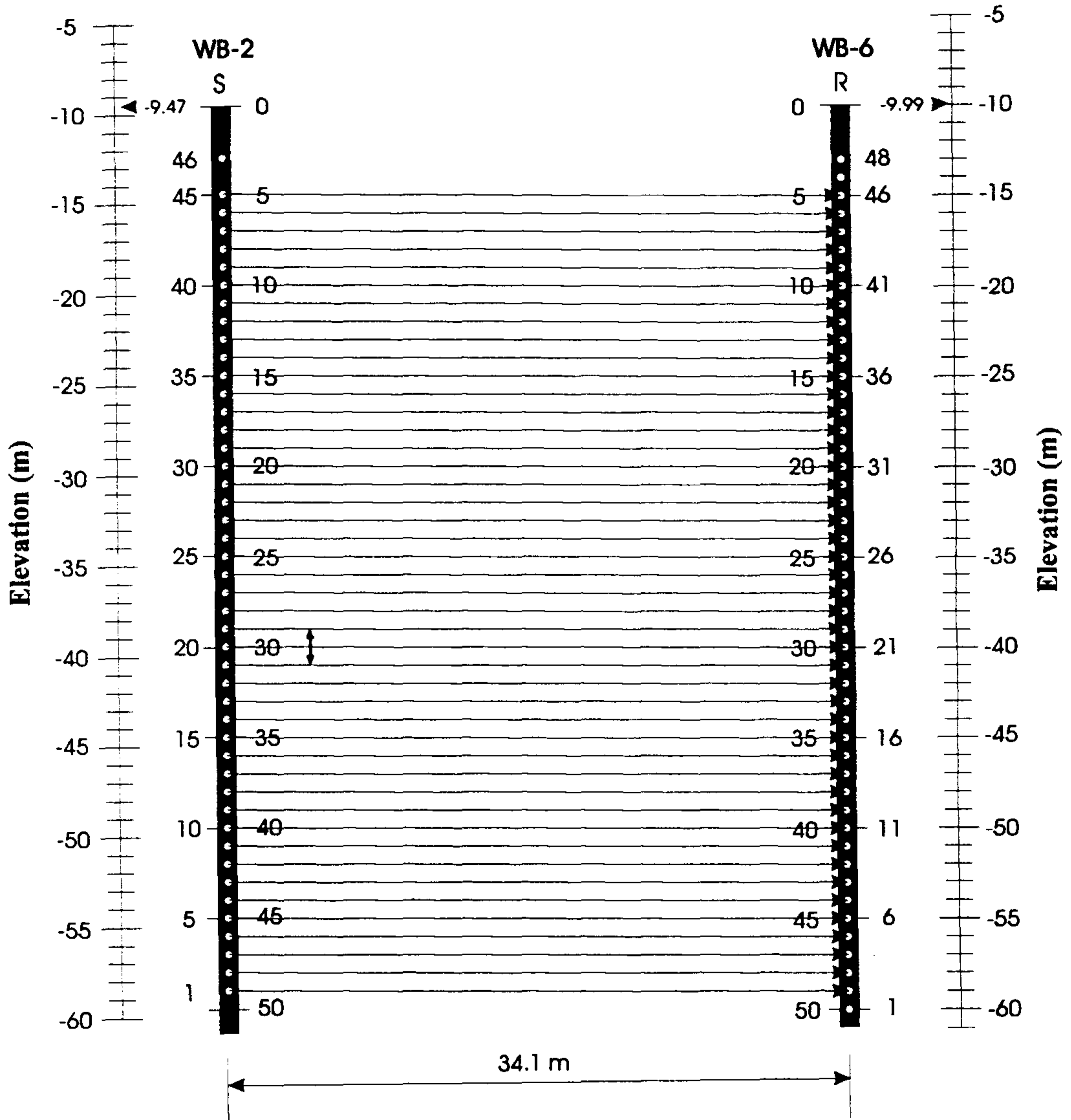


Fig. 25. Crosshole tomography.

(a) All ray paths perpendicular to the borehole axis are shown.

West Sea Sur425 (normalized by trace max.)
S(WB2) - R(WB6), S No.= 1-45, R No.= 2-46

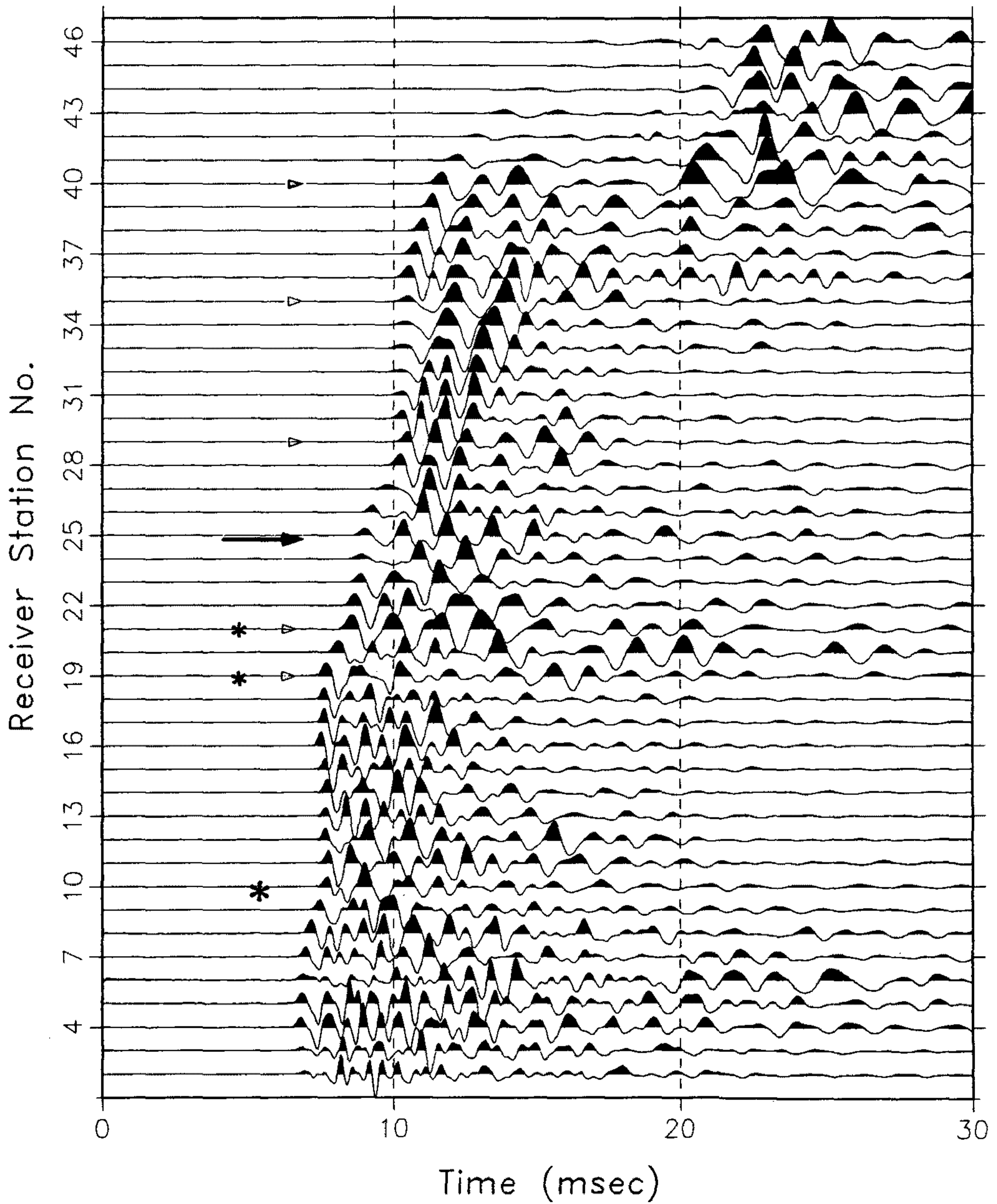


Fig. 25. (continued).

(b) Crosshole data derived from the measuring procedure in (a).

시된 주위에 탄성과 도달주시가 늦어지고 있습은 무엇보다 그 심도에서(상기 시추공들) 발달된 단층으로 인해 암석강도가 크게 하락된 데 있으며, 수진기 번호 25에 인접하여(화살표로 표시) 수진기 시추공의 경암 상부경계가 인식되고 있다.

끝으로 Fig. 26은 서울 강남의 변성암 지대에서 지반상태 파악을 위해 조사된 텔레뷰어 암석강도를 나타내고 있다. 심도 약 36m~50m 사이에 강도가 거의 균등하게 하락하고 있습이 관찰되고 있으며 그 주위 시추 코아를 대상으로 측정된 일축강도치가 훌륭하게 대조되고 있다.

공간적인 개념의 in-situ 암석강도는 모든 토목분야 지반조사에서 대단히 바람직한 매개변수이다. 특히, 텔레뷰어 암석강도는 그 자체 고유의 고분해능 측정기능에 의해 강도의 변화를 정확하게 묘사하기 때문에 협재된 박층의 분리, 단층충전물의 강도측정 및 암층 경계면 규명에 이르기까지 폭넓은 응용성이 기대되는 것이다. 더구나 steel casing 등을 이용한 상수배(scaling factor)추정은 텔레뷰어 암석강도에 따라 실질적인 의미를 부여할 수 있게 되기 때문에 그의 기여도는 더욱 배가되는 것이다.

4. 공경 검층(caliper log)

지각에 존재하는 응력장 분포는 흔히 시추공 내부 모양의 변형을 조사함으로써 판단된다. 텔레뷰어 주시치는 시추공 단면 중심에서 공벽에 이르는 거리(단면이 원형일 경우는 반경에 해당함)를 구할 수 있는 기본자료가 되기 때문에 이에 대한 도면화는 바로 고분해능(144 혹은 288 다리를 갖는) 공경검층(caliper logging) 기능을 대변하는 것이 된다. Fig. 27(a)는 주어진

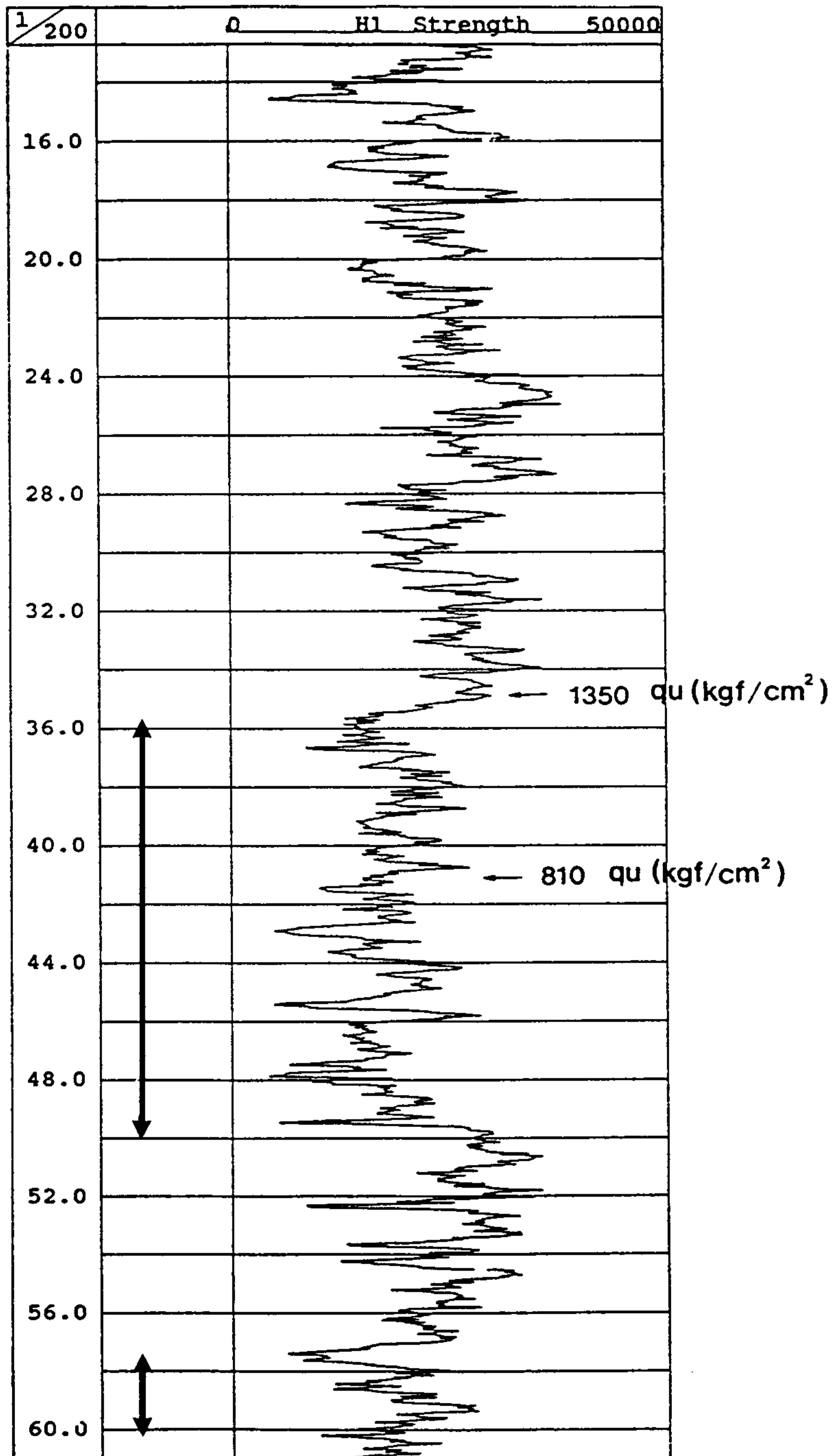


Fig. 26. Televiwer rock strength measured at the survey area Kangnam, Seoul.

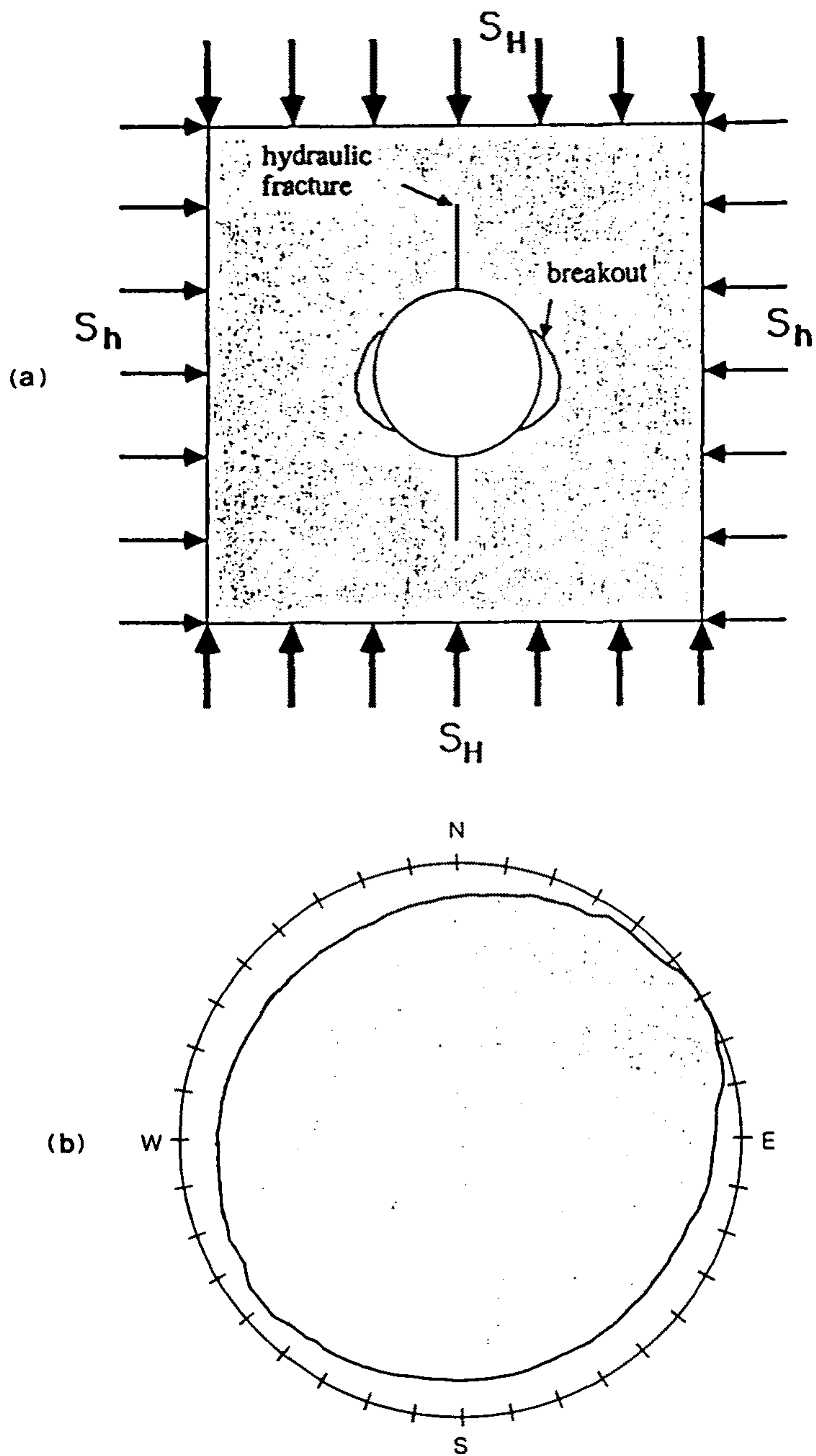


Fig. 27. Study of rock stress field.

(a) Illustration of the stress concentration around a vertical borehole in a elastic body subject to the most compressive and least compressive far field stresses S_H and S_h , respectively.

(b) Example of borehole cross section showing breakouts.

최대 및 최소 응력(S_H 및 S_h)하에서 시추공 단면이 최소응력 S_h 방향으로 늘어지는 상태(breakout)를 나타내고 있다. 여기서 표시된 hydraulic fracture는 시추과정에서 생성되는 절리를 의미한다. Fig.27(b)는 하나의 실례로서 시추공 내벽 단면을 나타내고 있으며 여기에는 breakout 현상이 뚜렷이 관찰된다. Fig. 27(c)에는 서로 다른 응력이 작용할 경우 생성되는 절리면의 형성과정을 나타내고 있다.

Fig. 28은 시추공(경기도 평택군 소재) 심도 구간 39.5m~43m 내 10cm 간격을 둔 내벽 단면을 동심원상으로 나타내고 있다. 시추공은 rotary drill에 의해 천공되었기 때문인지 근원적으로 내벽의 원형상태는 잘 유지되고 있으며 부분적으로 공벽의 허물어짐이 관찰되고 있다. 전체적으로 응력장의 분포는 균형을 이루고 있다고 할 수 있다. 이번에는(Fig. 29 참조) 동일 지역의 또 다른 시추공(rotary drill 천공)의 내벽 상태를 증첩하여 나타내고 있다. 비록, 내벽의 요철상태가 국부적으로 인식되고 있으나 내벽의 전반적인 원형상태는 훌륭하게 유지되고 있다. Fig. 30은 고성능 시추기(T-4 drill)에 의해 인천 도심지에 천공된 6 inch 시추공의 내벽상태를 구간별로 나타내고 있다. 시추공 내벽은 상당한 거칠음을 보내주고 있으며 또한 Televiwer logger가 측정시 다소 시추공 중심을 이탈하였음이 관찰되고 있다. 그러나, 내벽은 전반적으로 원형을 보여주고 있다. 다음은 rotary drill에 의해 천공된 또 다른 시추공(경기도 평택군 소재)의 내벽 상태를 보여주고 있다(Fig. 31 참조). 대체로 단층 및 절리에 의해 공벽 내부가 국부적으로 허물어지고 있음이 인식된다. Fig. 32는 서울 강남지역 변성암 지대에서 crawler drill에 의해 천공된 시추공(직경 100mm)의 내벽상태를 보여주고 있다. 천공중 내벽이 전반적으로 허물어졌음이 인식되며 동시에 텔레뷰어 logger가 시추공 중심으로부터 크게 이탈되고 있었음이 관찰되고 있다. 그

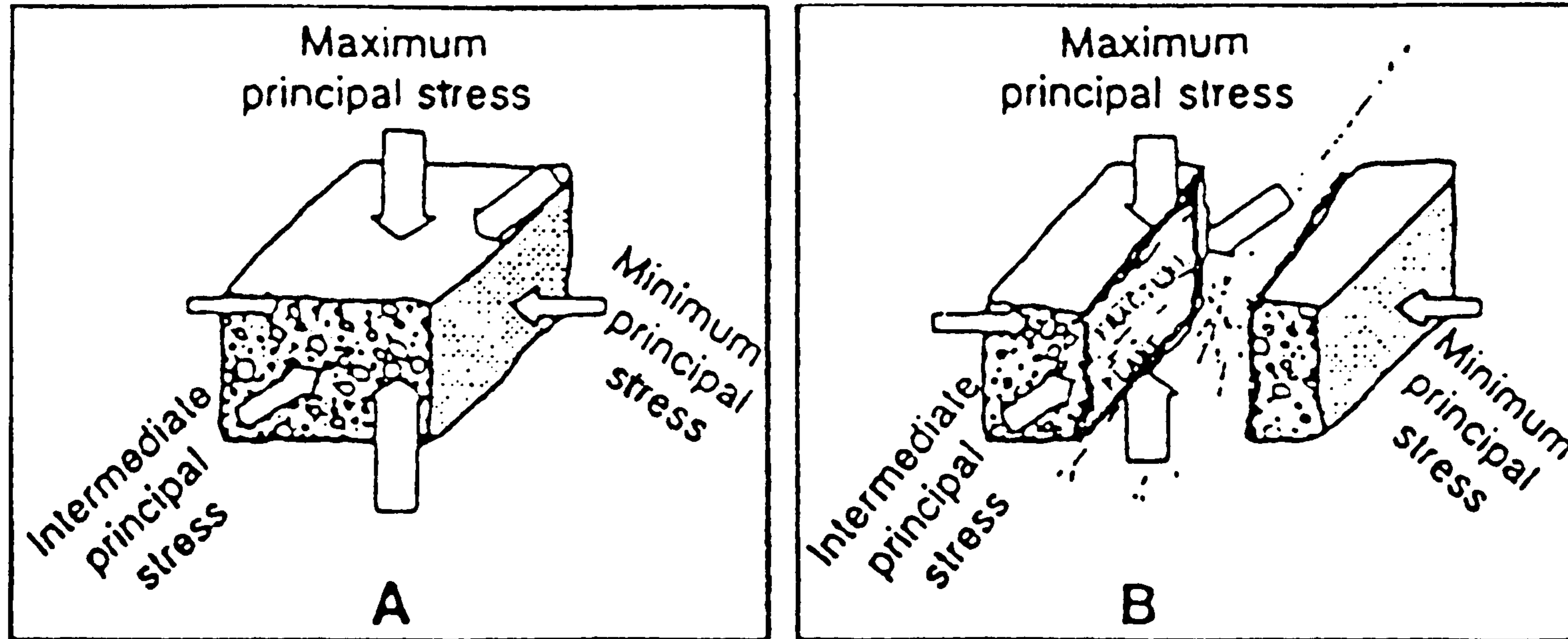
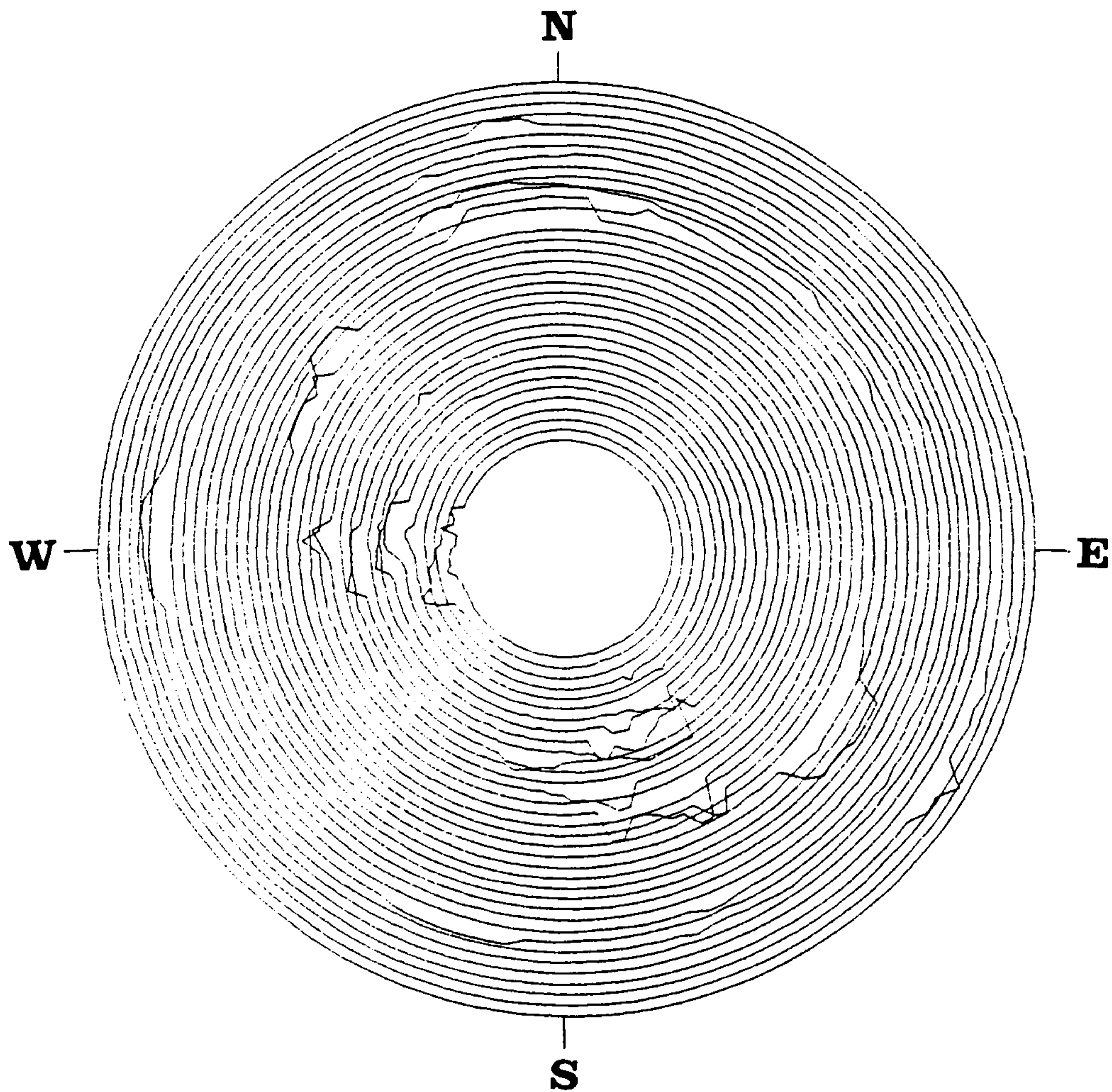


Fig. 27. (continued).

(c) Rock broken by a differential stress system (from Miller, 1977).

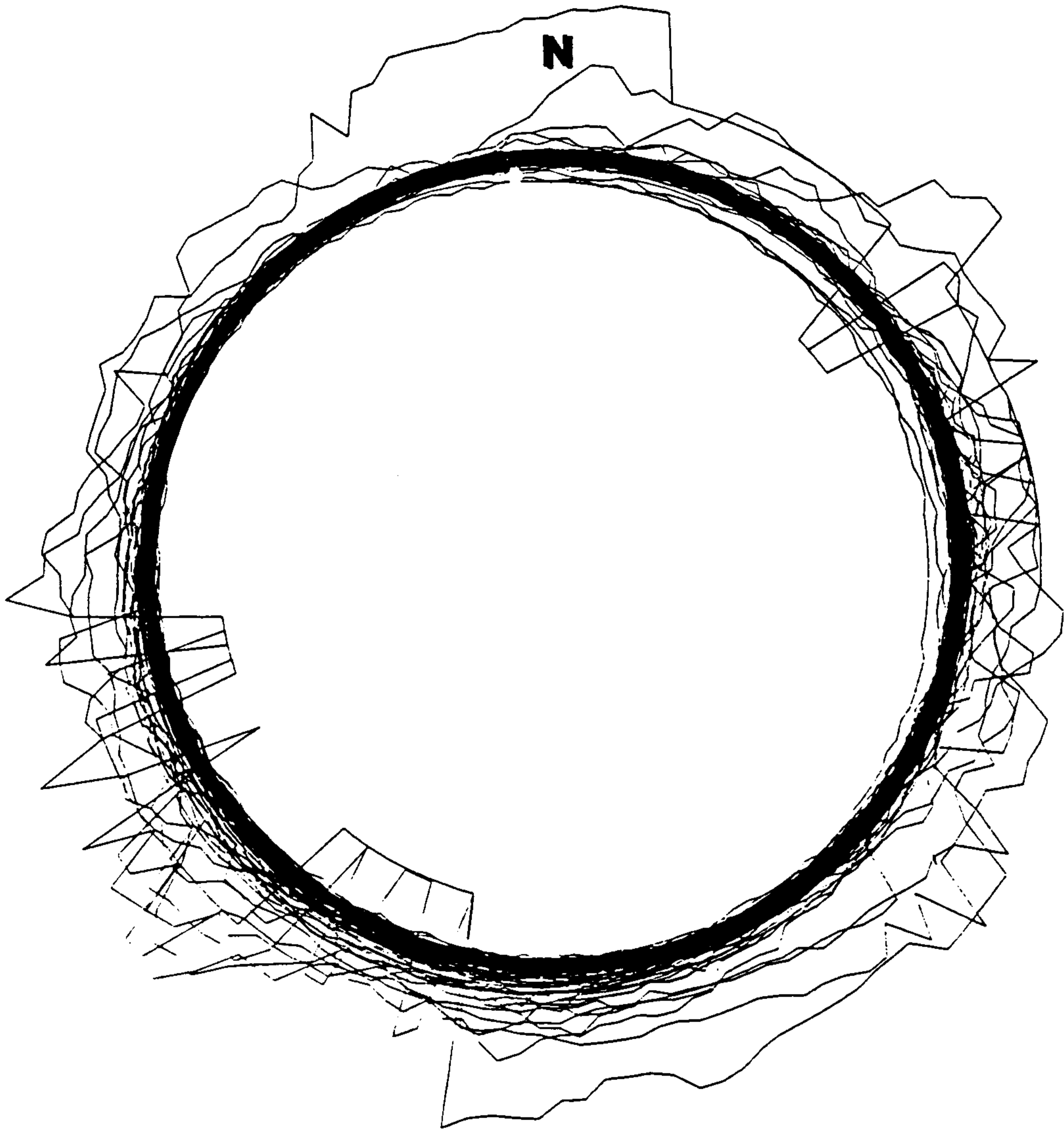
A : Differential compressive stress resolved into principal stress axes.

B : Fracture plane develops parallel to the maximum and intermediate stress axes.



Hole WB1 : 39.5 ~ 43m

Fig. 28. Circular cross sections of 32 depth intervals(10cm) taken from the Televiwer traveltime image measured in the survey area Pyongtaek, Korea. Cross sections at greater depth are nested inside those at shallower depths. The borehole was made by rotary drill and its diameter is 76mm. On this plot certain features like fractures can be observed. However, the picture shows no apparent breakouts.



Wb3 Caliper Log (depth 20 ~ 30 m, every 10cm)

Fig. 29. Circular cross sections of 100 depth intervals(10cm) taken from the Televiewer traveltime image measured in the survey area Pyongtaek, Korea. The borehole was made by rotary drill (bit size 76mm). Certain features like fractures and roughness can be observed. However there are no significant breakouts.

H1

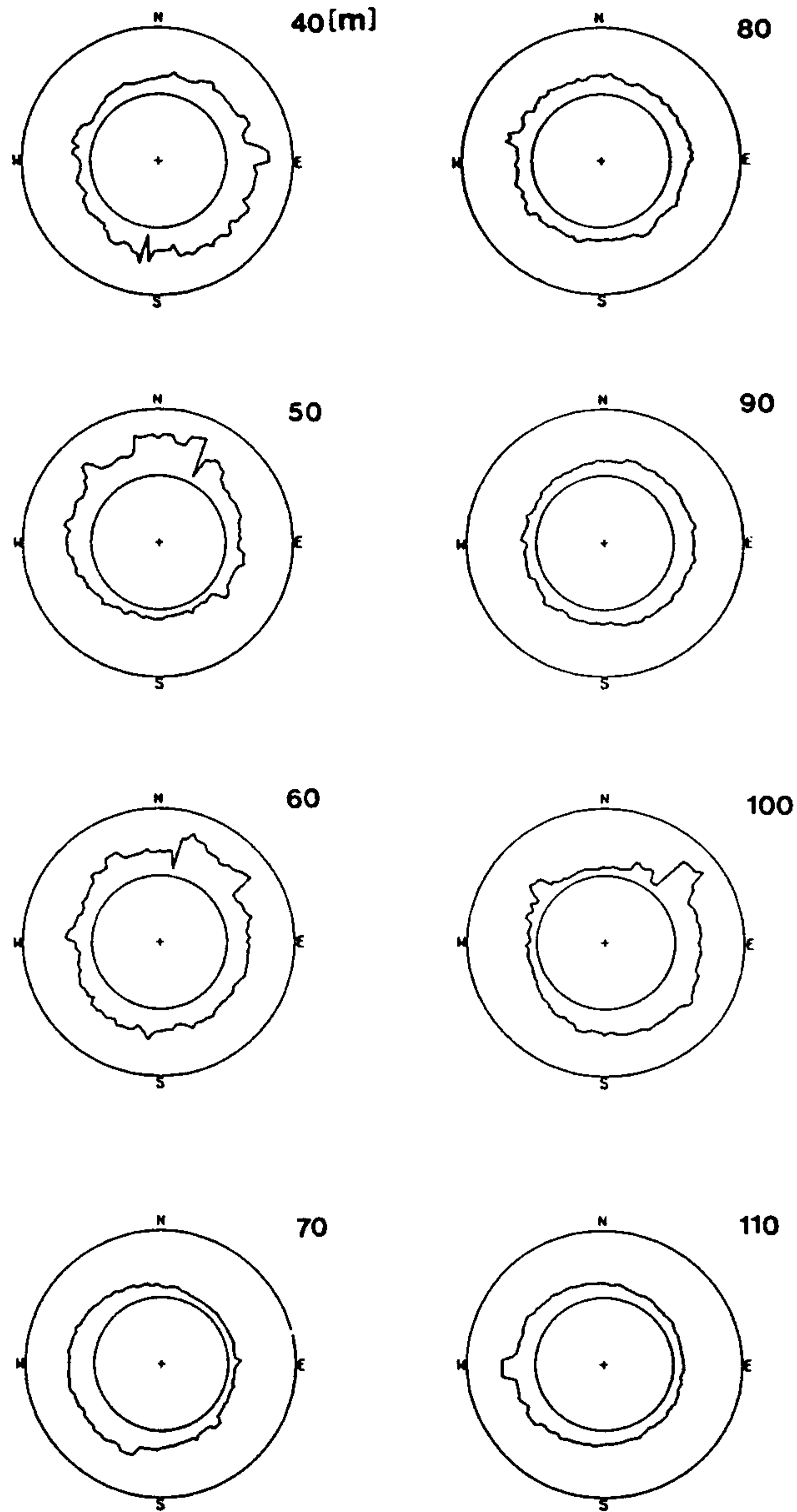


Fig. 30. Borehole cross sections for 8 depth intervals(10m) derived from the Televiwer traveltime image measured in the survey area Inchon, Korea. The borehole was made by T-4 drill (bit size 150mm). Certain features like fractures and zones of roughness can be observed. Shown is also the Televiwer not centered in the hole during logging.

Hole Wb1

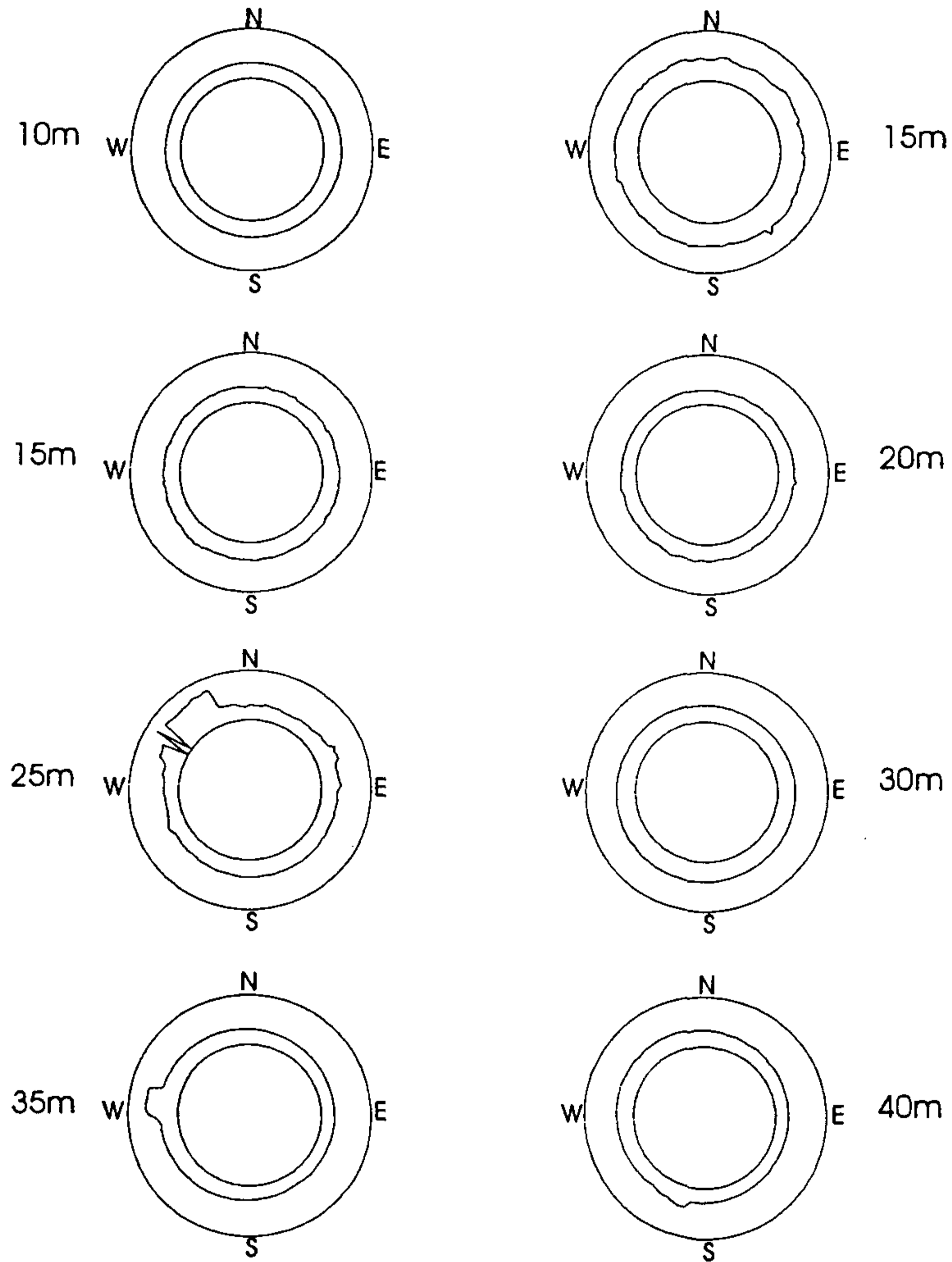


Fig. 31. Borehole cross sections for 8 depth intervals(5m) derived from the Televiwer travelttime image measured in the survey area Pyongtaek, Korea. The borehole was made by rotary drill (bit size 76mm).

CALIPER CROSS SECTION

H-1

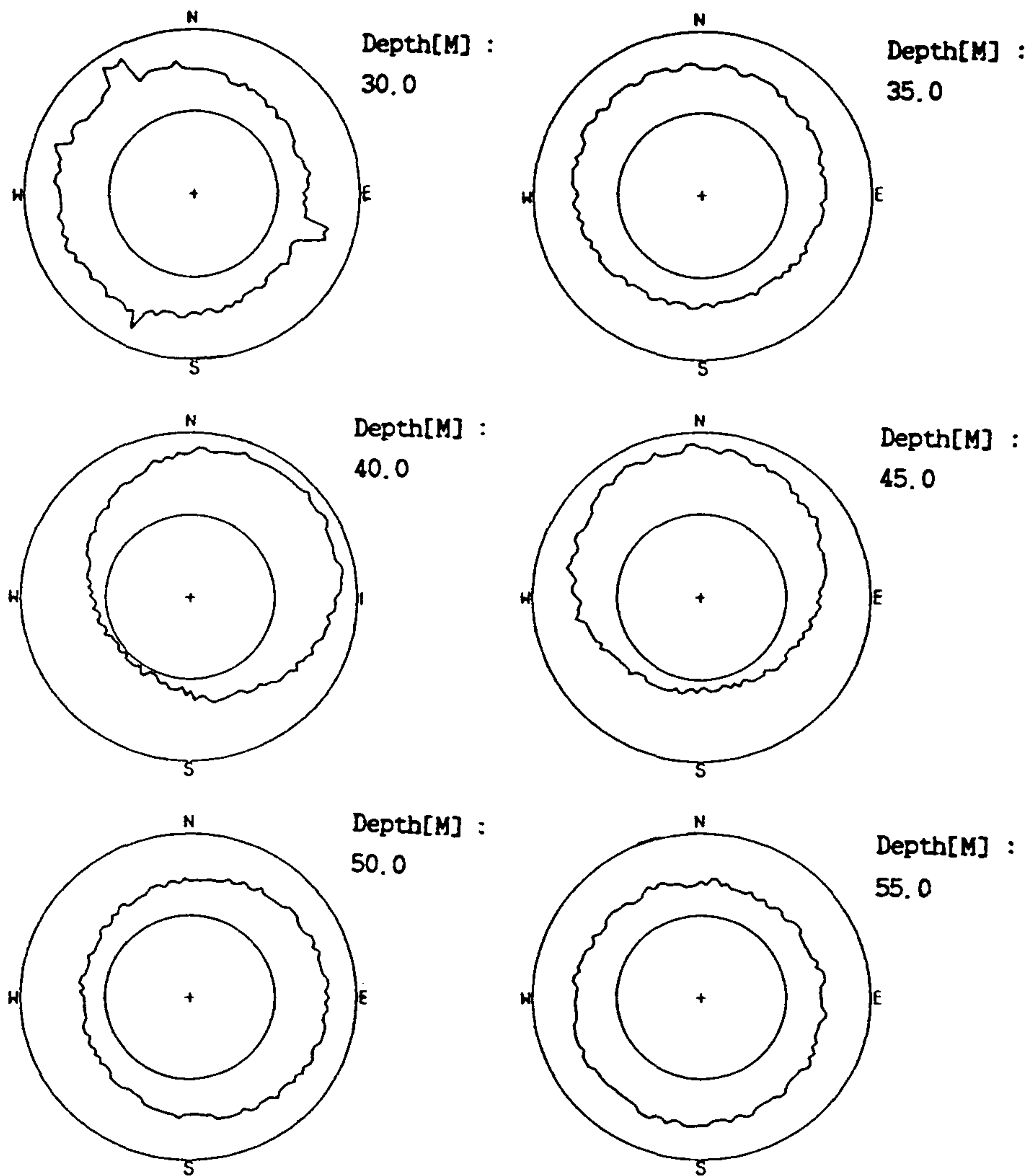


Fig. 32. Borehole cross sections for 6 depth intervals(5m) derived from the Televierer traveltime image measured in the survey area Kangnam, Seoul. The borehole was made by crawler drill (bit size 100mm). Shown is the Televierer not centered in the borehole during logging. Certain features like fractures and zone of roughness can be observed

러나, 시추공 내벽은 원형을 나타내고 있다. 끝으로, Fig. 33은 텔레뷰어 주시 이미지로부터 시추공 내벽 전면 및 후면에 대한 내벽상태를 입체화하여 나타낼 수도 있음을 보여주고 있다.

5. 자력 탐사(magnetometer 기능)

텔레뷰어 응용에서 초음파 빔이 방사되는 방향을 정확히 포착한다는 것은 기본이 되며 이를 위한 orientation tool(제 2 장 3절 참조)은 텔레뷰어 검층기의 주된 성분이 되고 있다. Orientation tool은 Flux-gate 자력계(magnetometer)(민경덕 외, 1986)로 구성되어 있기 때문에 시추공 주위 자기 이상에 대한 측정이 가능하다. 텔레뷰어 응용에서 부차적으로 얻게 되는 이러한 기능은 때에 따라 유용하게 활용(예: 금속광산)될 것으로 본다. 텔레뷰어 측정시 logger가 시추공 내에서 회전되는 것은 불가피하다. Fig. 34는 소위 이러한 회전 편차에 대한 성분기록(MagX, MagY, MagZ)에 해당하며 그로부터 현장에서 관찰되는 측정데이터(텔레뷰어 이미지)가 자북을 기준으로 재정돈되는 것이다(제 2 장 6절 참조). 그림의 네번째 기록은 각 성분기록으로부터 산출되는 전자력(total intensity)을 나타내고 있다.

6. 시추공 편차 검층(inclinometer 기능)

Inclinometer는 일반적으로 그 내부에 가속계(accelerometer)로 구성되어 물체의 변형(deformation)이나 진행방향(orientation control)을 정확히 측정하는 기능을 갖고 있다. 본 텔레뷰어 logger에 내장된 orientation tool에도

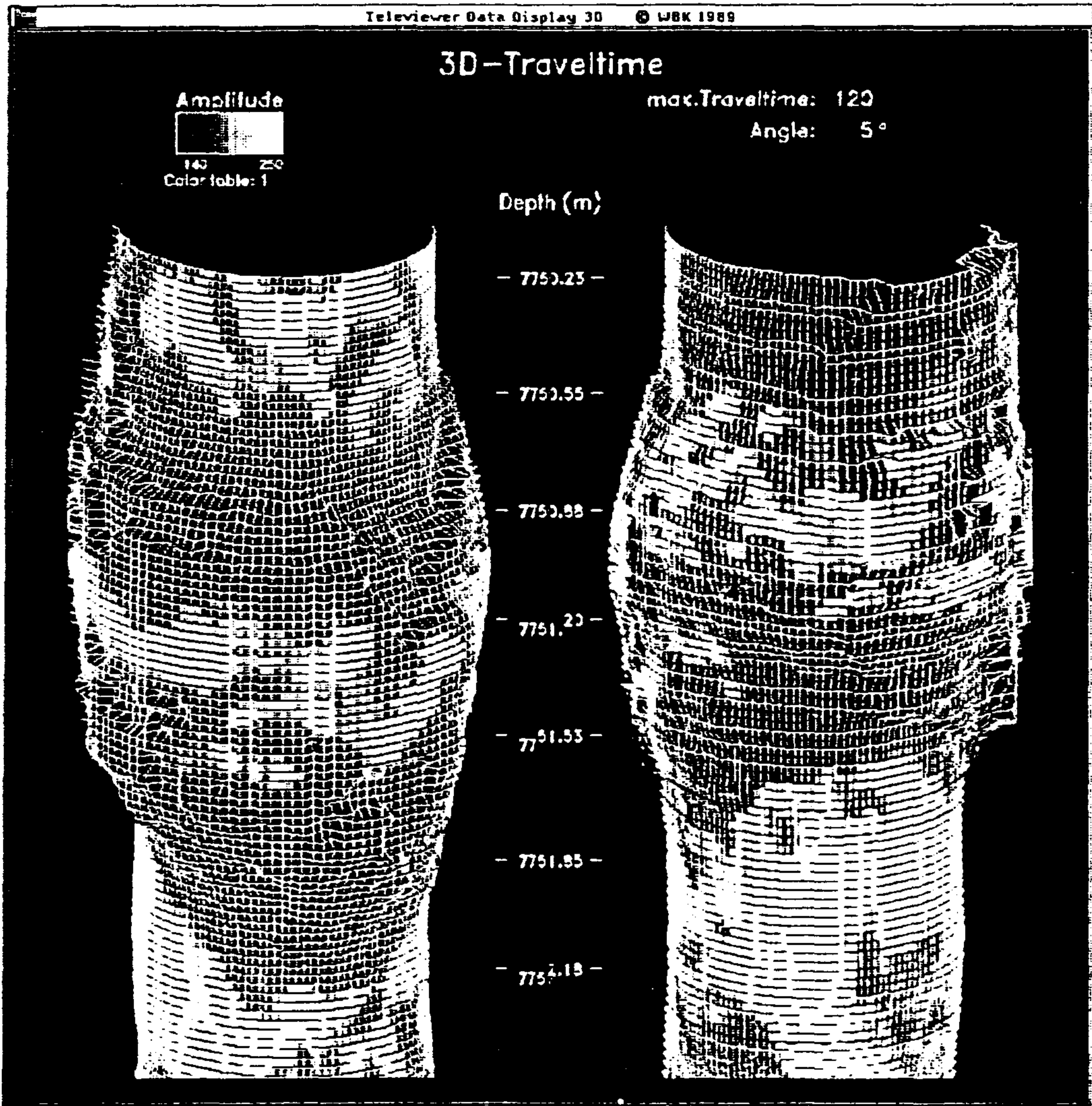


Fig. 33. 3-D plot of borehole shape derived from the Televiewer image.

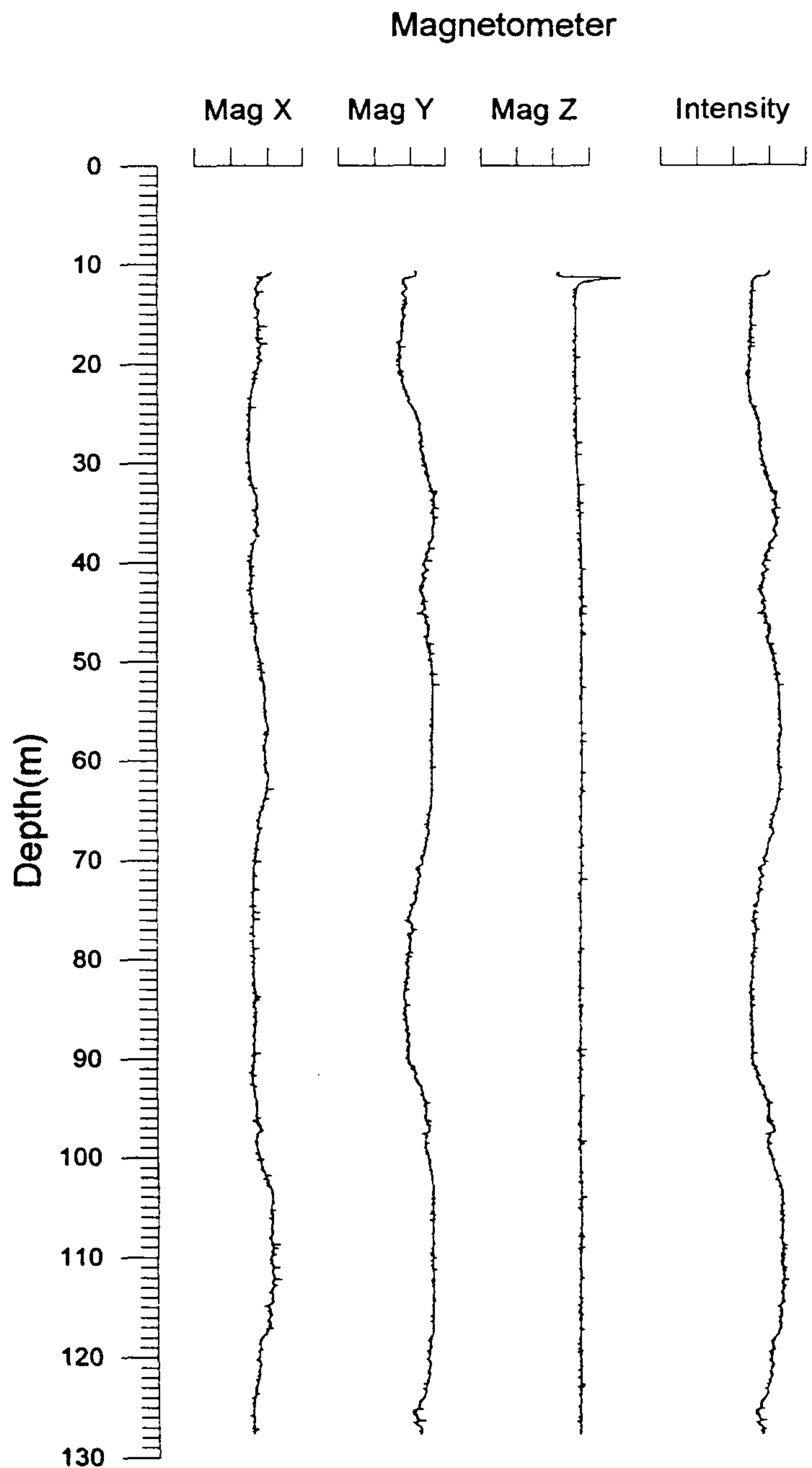


Fig. 34. Example of Televiwer magnetometer (Flux-gate magnetometer) measurement in the survey area Inchon, Korea. The direction of the ultrasonic beam can be determined by the magnetometer. In addition, the total intensity can be also evaluated by the three components.

inclinometer가 장착되어 있어 역시 시추공의 휨 상태를 파악할 수 있다. Fig. 35~37은 국내 텔레뷰어 응용에서 뒤따른 시추공 연직상태 조사결과를 보여주고 있다. 그림의 왼쪽 부분은 가속성분(IncX, IncY)을 나타내며 그로부터 시추공 진로를 추적한 결과는 그림의 오른쪽 부분에 표현되고 있다. 이러한 정보는 우선 텔레뷰어 측정 후 데이터 교정(김중열 외, 1993)을 위한 기본 자료가 되고 있으며 나아가서 토모그래피 주시 역산과정 내지 해석에서도 대단히 바람직한 자료(김중열과 김유성, 1995)인 것이다.

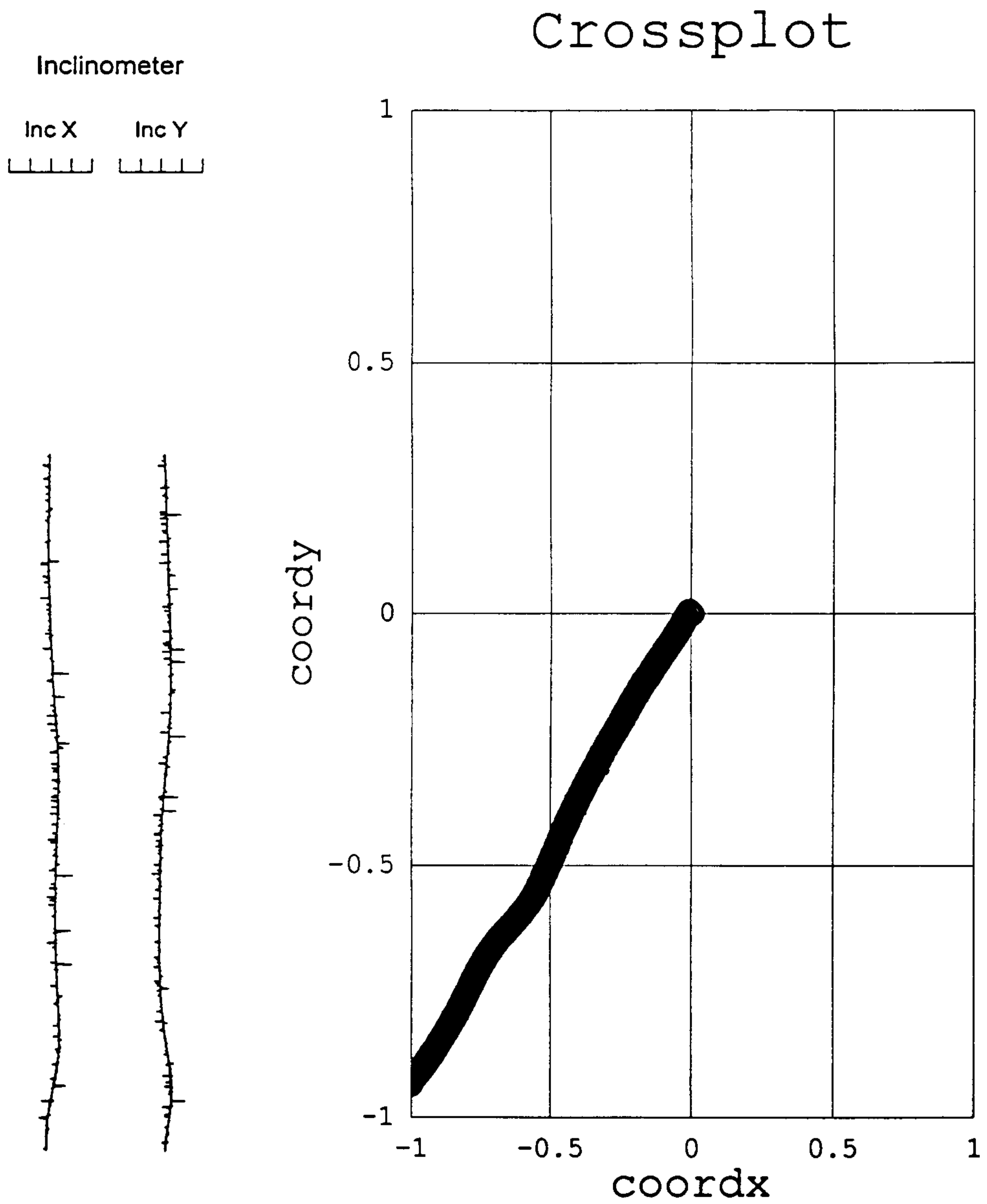


Fig. 35. Example of the Televier inclinometer measurements for investigating the borehole deviation in the survey area Pyeongtaek, Korea. The borehole depth is about 50m.

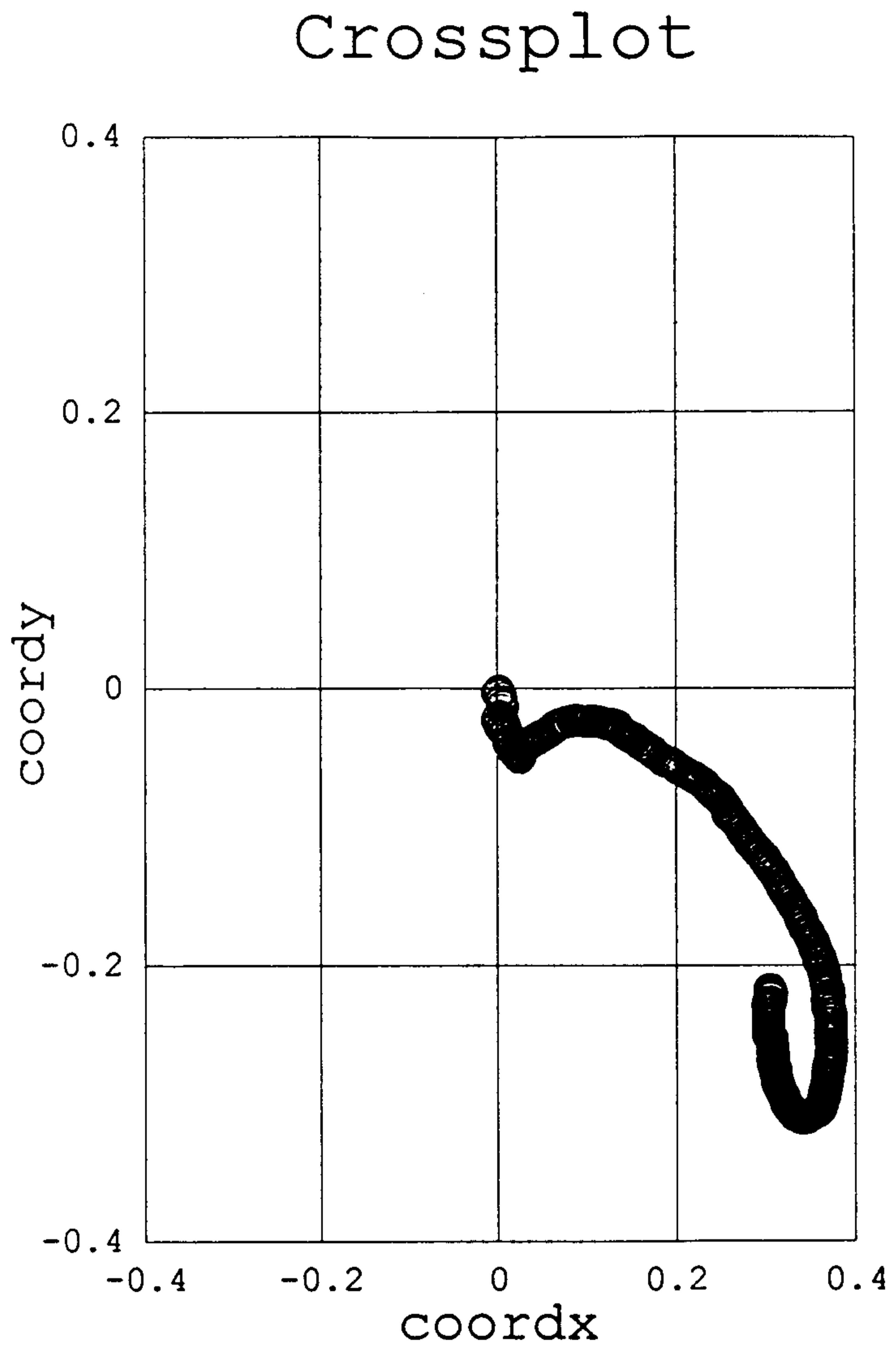
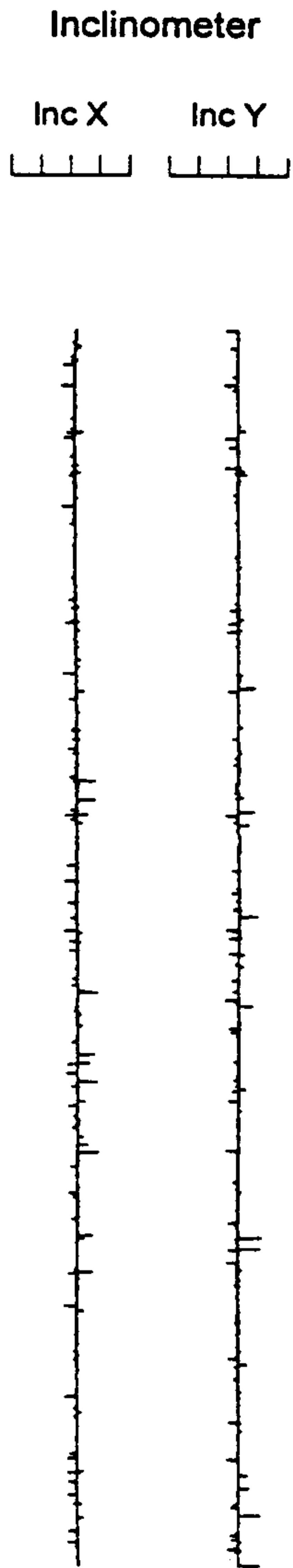


Fig. 36. Example of the Televiwer inclinometer measurements for investigating the borehole deviation in the survey area Pyeongtaek, Korea. The borehole depth is about 50m.

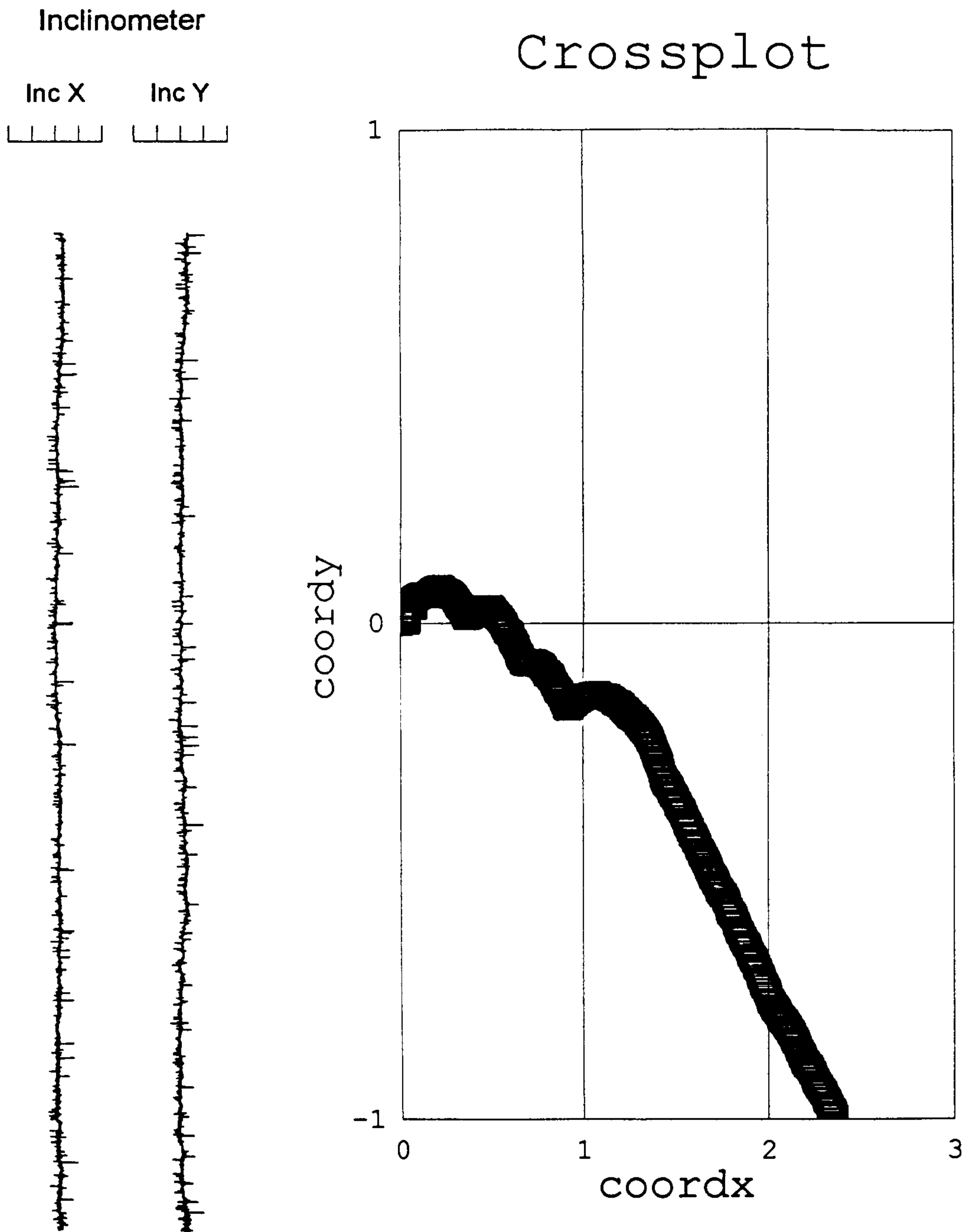


Fig. 37. Example of the Televiwer inclinometer measurements for investigating the borehole deviation in the survey area Inchon, Korea. The borehole depth is about 130m.

제 5 절 응용분야 및 기대효과

앞절에서 요약된 주요 텔레뷰어 기능들은 암반구조 연구를 위한 필수적인 기본자료를 제시하고 있음을 밝히고 있다. 우선 단층 및 절리 규명에서만 보더라도 지금까지는 시추공 내에서 레이다 및 탄성파를 이용하거나 혹은 시추공 내시경 및 sonic log 등 단지 간접적인 방법에 의해 정보가 추출되었기 때문에 암반구조에 대한 그들의 연계성이 크게 떨어지고 있음을 흔히 볼 수 있다. 예를 들면, 지하수 유동 문제나 각종 폐기물 저장에서 대두되는 용질 유동 문제에서는 무엇보다 암반내 절리(단층 포함)상태에 대한 정량적인 분석이 요구되는 것이다. 역시, 절취사면 문제나 지반침하 문제에서도 불연속면에 대한 정확한 파악(경사방향, 경사각, 충전물질 등)이 선제조건이 되고 있다.

대형건물 지반조사에서는 흔히 암석강도 분포가 조사의 최종 목표가 될 수도 있다. 그런데, 이에 대한 국내 기술 정보는 거의 실험실 분석자료(예: 코어에 의한 일축강도)에 의존하기 때문에 무엇보다 실질적인 암석강도에 대한 연계성 문제가 제기되고 있는 것이다. 이러한 측면에서 텔레뷰어 암석강도는 우선 in-situ 암석강도를 대변하고 있을 뿐만 아니라 나아가서 연속적으로 측정될 수 있기 때문에 그 결과 자체가 지반상태에 대한 전반적인 경향을 훌륭하게 대변할 수 있는 것이다. Fig. 38에는 텔레뷰어 탐사결과가 그대로 반영될 수 있는 주요 응용분야를 보여주고 있다. 모든 토목공사 지반조사에서 암반분류(예: Q-system, RMR)는 기본이 되며 여기에는 절리에 대한 정확한 정보가 요구된다. 한편, 콘크리트 구조물(예: 댐) 부식상태, casing 내벽상태 및 암반의 응력상태 등도 텔레뷰어 응용을 통해 쉽게 파악될 수 있는 또 다른 기대효과가 되는 것이다.

본 절에서는 상기 응용분야에서 국내 텔레뷰어 응용기술이 실용화될 수

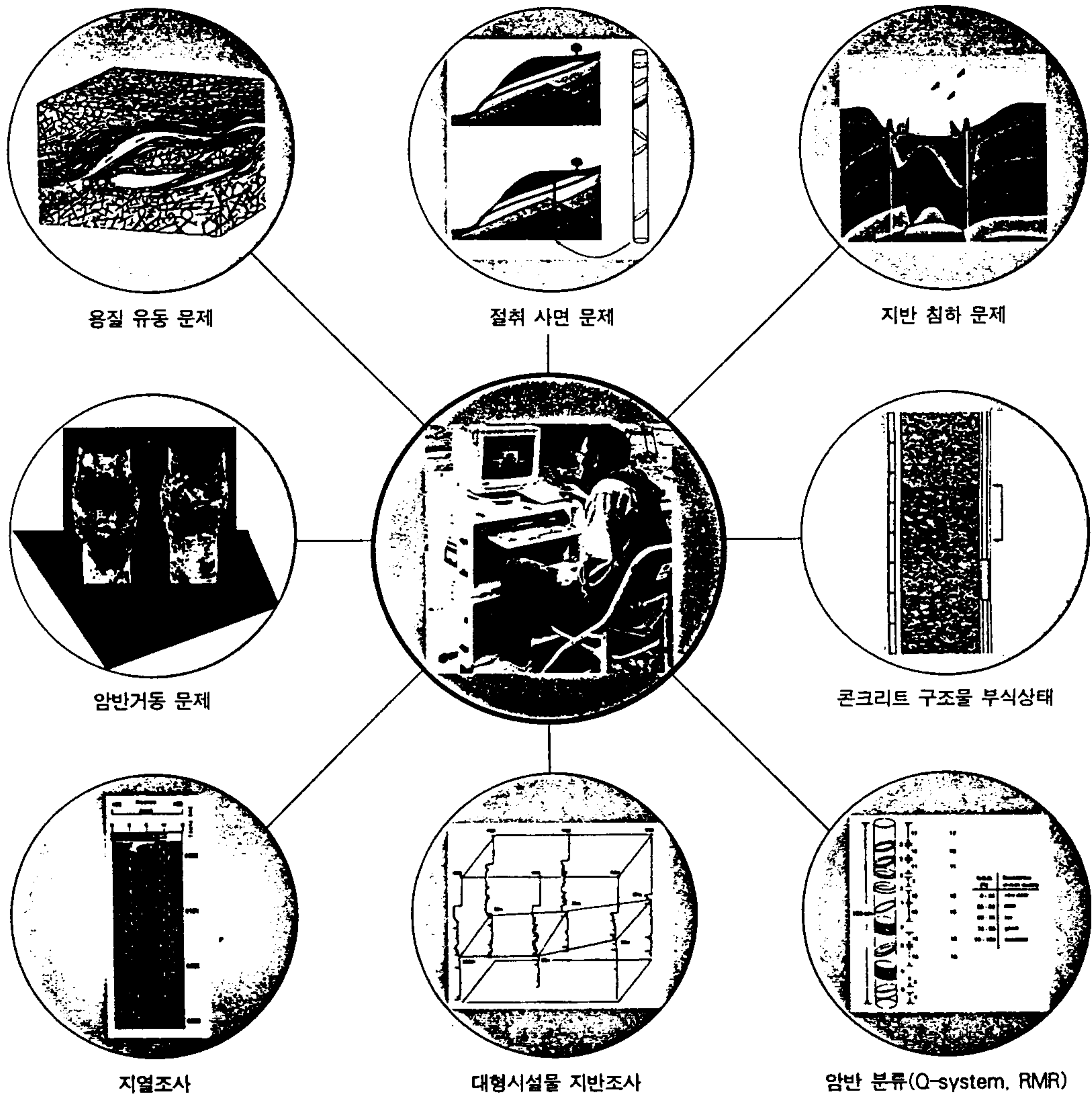


Fig. 38. Televiewer can be applied to diverse geotechnical problems, based on detailed evaluation of tectonic elements (layering, fracturing and faulting of the rock) and in-situ rock strength, to the landsliding in road and railroad construction, to the fluid-flow in waste deposit sites and contaminated areas, to the foundation, to the subsidence problems, to the description of geothermal reservoirs, to the determination of the direction of the stress field, and to the inspection of casing and concrete for corrosion, defect.

있는 잠재력을 보여주고 있다.

1. 절취사면 설계 및 안정성 평가

국내에는 산악지대가 많기 때문에 각종 도로를 신설할 경우 곳곳에서 산을 절개해야 함이 불가피하게 되며 그로 인해 암반이 노출된 소위 절개 사면을 형성하게 된다. 여기서 인위적인 절개는 기존 암반의 응력 상태에서 상호간의 균형을 잃게 하여 사면에 노출된 암괴는 중력에 의한 평형 상태를 유지하지 못하게 할 수 있다. 이 때에는 암괴의 거동력(driving force)이 저항력(resisting force)을 이겨내어 여러가지 형태의 사면 파괴 즉, 평면 파괴(plane failure), 썰기 파괴(wedge failure), 전도 파괴(toppling failure) 및 원형 파괴(circular failure) 등을 유발하게 된다(Fig. 39 참조). 이러한 암반 사면의 일반적인 파괴 형태는 토사 사면의 경우와는 달리 주로 암반 내에 형성된 불연속면(절리, 단층, 층리 등)에 의해 좌우되기 때문에 그의 안정성은 무엇보다 암반의 절리 구조에 근거하여 설계(구배 결정, 사면의 주향, 보강 공법 선정)되어야 함이 바람직한 것이다. 이수곤(1990)은 국내 암반 사면의 바람직한 절취 설계 및 안정성 평가를 위해서는 다음과 같은 조사 내용이 고려되어야 한다고 주장하였다.

- ① 절리 방향 (orientation)
- ② 절리 간격 (spacing)
- ③ 절리의 연속성 (persistence)
- ④ 절리 굴곡 (roughness)
- ⑤ 절리면의 강도 (wall strength) : rock strength

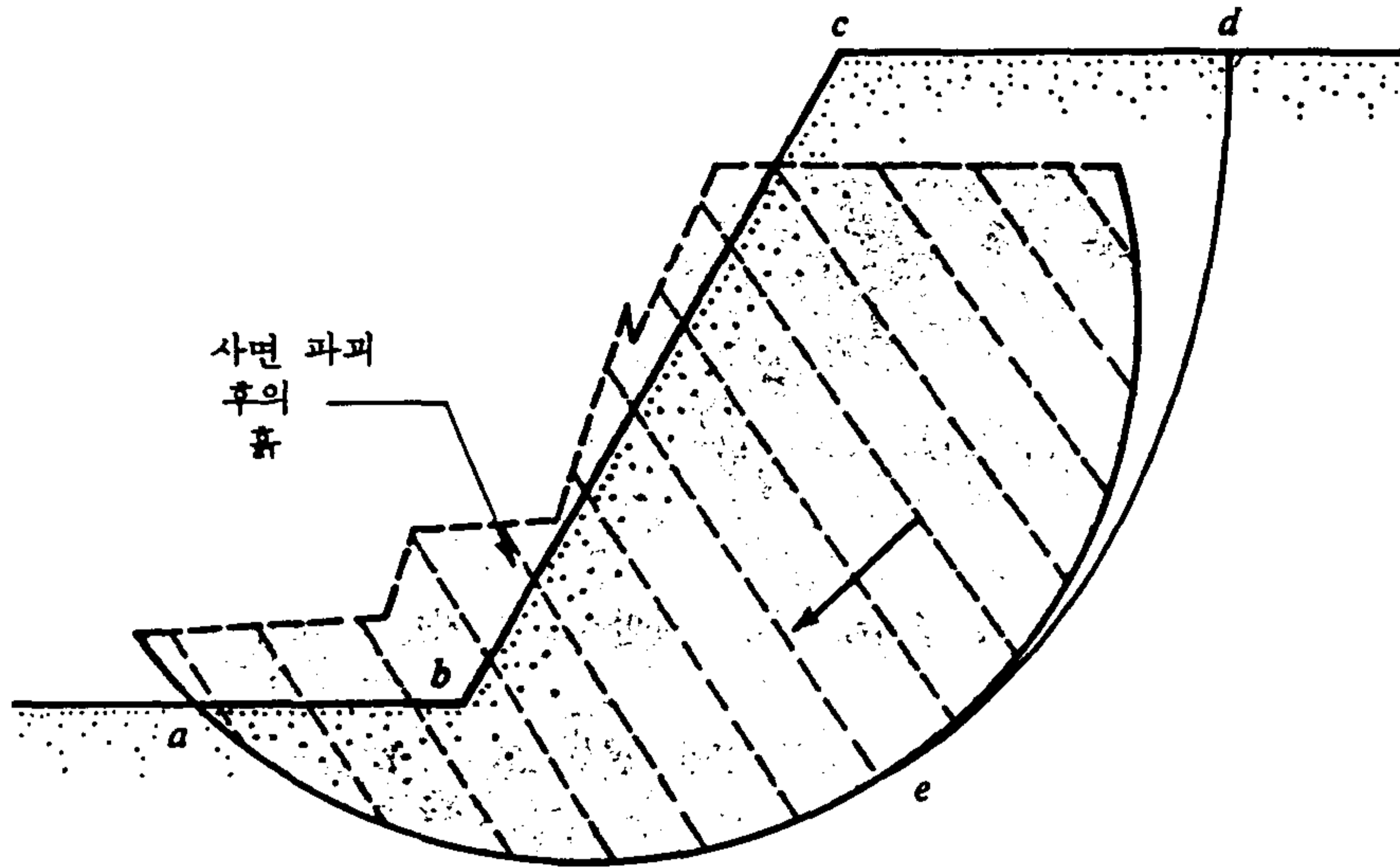


Fig. 39. Slope failure in overburden soil, waste rock or heavily fractured rock with no identifiable structural pattern.

- ⑥ 절리의 틈새 (aperture)
- ⑦ 절리 충전 물질 (filling)
- ⑧ 절리면의 투수 (seepage)
- ⑨ 절리의 종류수 (number of sets)
- ⑩ 암괴의 크기 (block size)
- ⑪ 단층 충전 물질

이미 언급한 바 상기 매개변수들은 단 한번의 텔레뷰어 측정에 의해 고분해능으로 구해질 수 있을 뿐만 아니라 나아가서 암반 내의 응력 상태 (rock stress field), 암석 강도 및 박층의 물성에 대한 정보도 부차적으로 제시될 수 있기 때문에 텔레뷰어는 절취 사면 안정성 조사, 설계 및 시공 대책을 위한 핵심 요소 기술로서 간주되는 것이다.

Fig. 40은 평면 파괴가 유발될 수 있는 암반 상태를 나타내고 있다. 화살표로 표시된 위치에 단층이 경사를 띠고 동시에 점토가 단층면을 따라 협재되어 있을 경우 그 상부 암괴는 절개로 인하여 단층면을 따라 도로 방향으로 미끄러질 가능성이 높다. 텔레뷰어 탐사는 여기서 단층의 경사 방향 및 경사각, 단층 충전물의 두께 및 강도, 심도에 따른 강도 변화, 박층의 존재 등에 대한 정확한 정보를 제시하게 되는 것이다.

Fig. 41은 서울 외곽 순환고속도로 사업수행에서 사면 절취가 이루어진 전경을 나타내고 있으며 사면 절취후 도로를 향한 암반 거동이 확연하게 인식되고 있을 뿐만 아니라 그로 인한 큰 폭의 절리면들이 도처에 발달되고 있었다. 따라서 이곳에는 사면 안정성을 위한 재 시공이 불가피하게 되었으며 이를 위해 우선 ① 암반 거동이 일어날 수 있는 지질구조적인 요인 및 그 범위, ② 절리의 심도 및 발달 상태가 사전에 파악되어야 하였다. 당시 (1993. 5.), 국내 텔레뷰어 기술은 개발 단계이었기 때문에 차선책으로 탄성

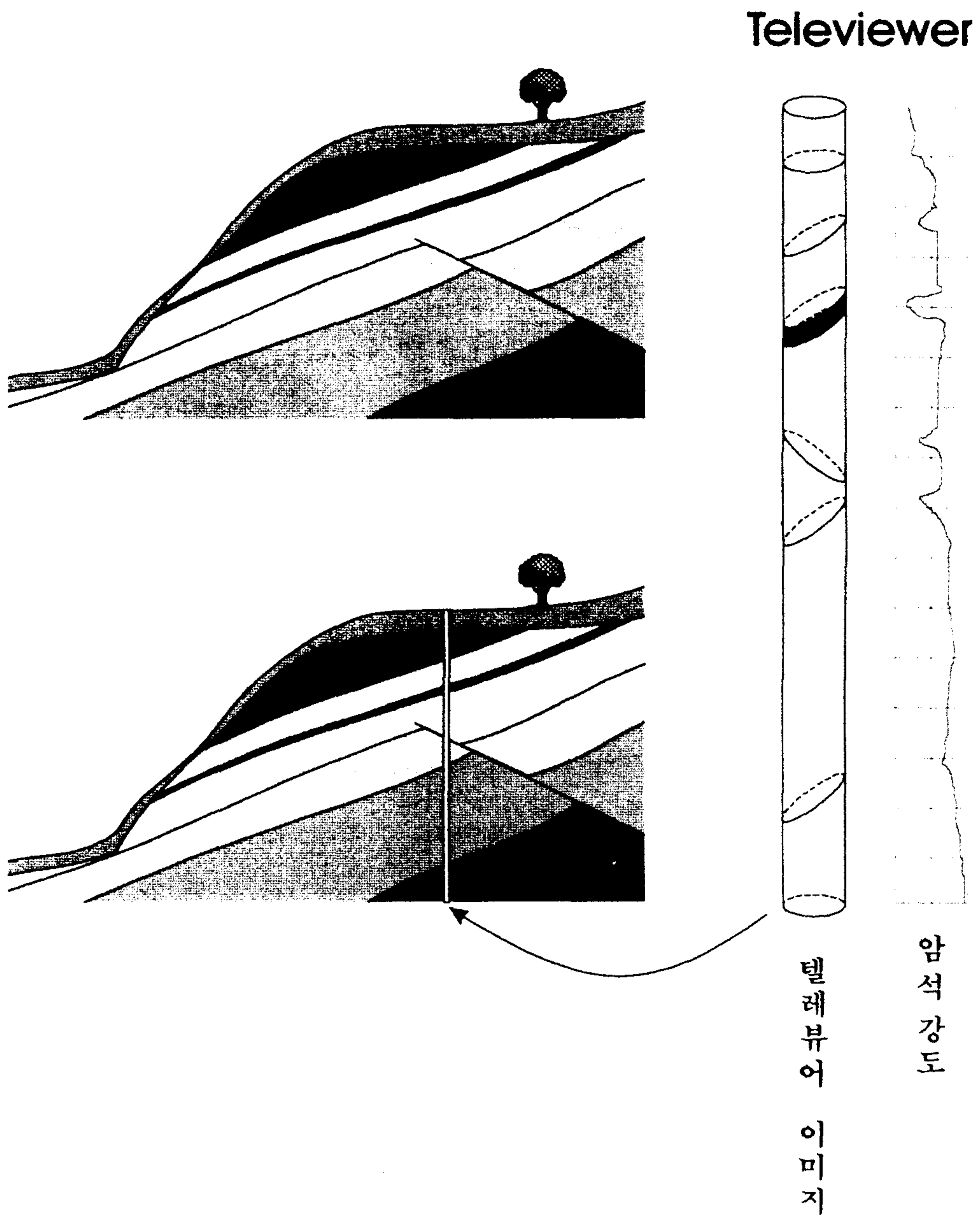


Fig. 40. Plane failure in rock due to the filled(e.g. clay) discontinuity.

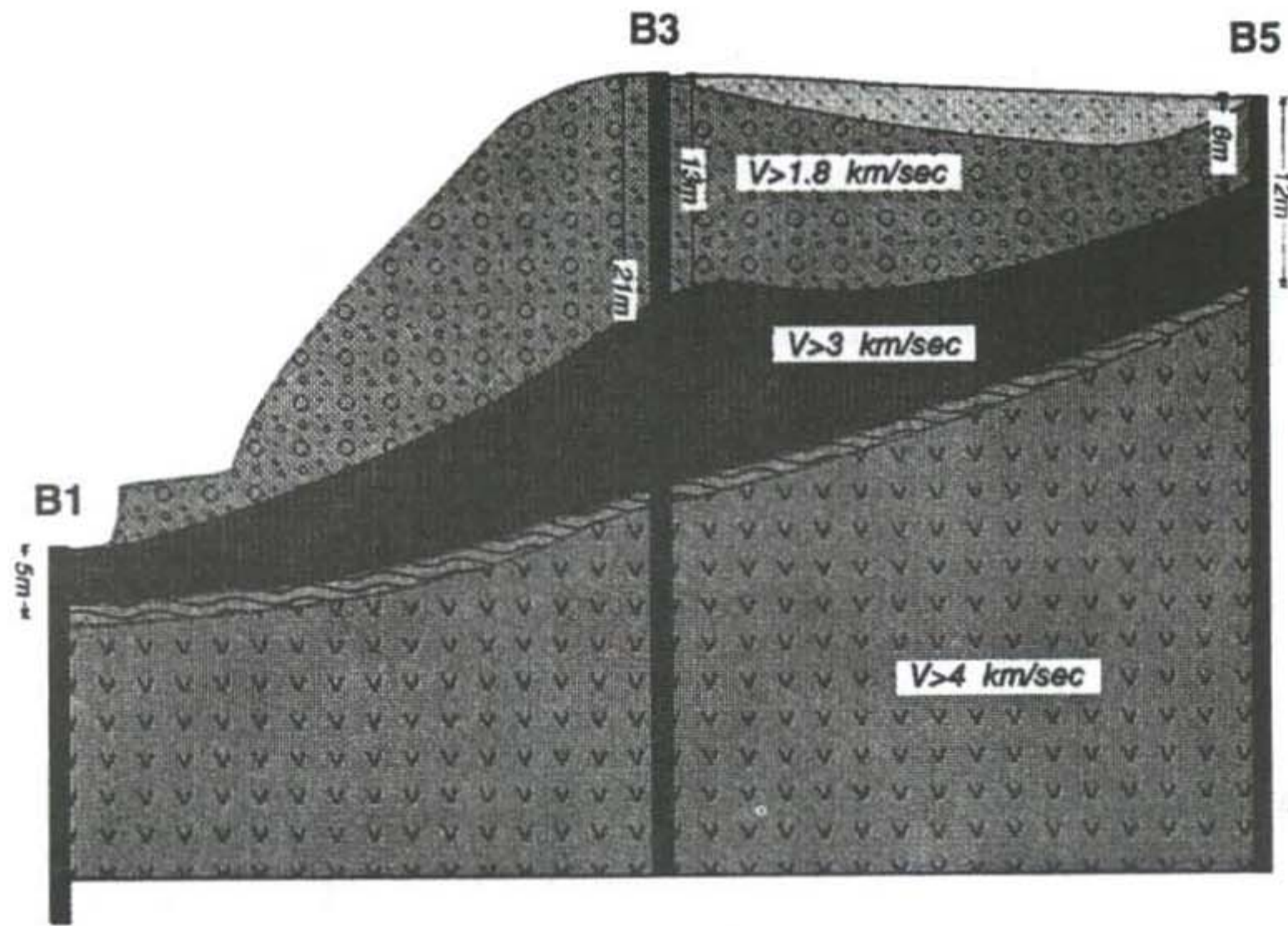


Fig. 41. Example of rock sliding due to the filled discontinuity. Outlook of Pangyo survey area. Severe large cracks in the cut-out area are clearly shown.

파 토모그래피가 지반조사를 위해 응용되었다. Fig. 42는 토모그램을 바탕으로 작성된 해석단면도를 보여주고 있다. 그림의 윗부분은 도로에 연직되는 단면을, 아랫부분은 도로와 평행하는 단면을 나타내고 있으며 그 결과는 다음과 같이 요약되었다. ① 기반암과 그 상부암층(풍화암)사이에는 저속을 띤 박층이 인식되며 상부 암괴는 그 면을 따라 미끄러지고 있는 것으로 사료되었다. ② 지표에서 관찰되는 대부분의 절리들은 단지 기반암 상부경계면까지 연장되고 있었다. ③ 사면을 향한 기반암 경계면의 경사는 약 16° 가 되며 도로에 평행한 지질 단면은 다소 오목한 형태를 띠고 있다. 따라서 기반암 상부 암층은 하부로 이동되면서 측면으로부터 횡압력이 작용되어 Fig. 43에서 나타난 바 특이한 절리의 발달이 관찰된 것이다(참고로 Fig. 43에는 토모그래피 탐사 시추공 위치(B1~B5)가 표시되고 있다). 이러한 특이한 지반상태 파악은 토모그래피 기법에 의해 훌륭히 달성되었다고 할 수 있겠으나 그 이면에는 다양한 보조탐사(예: VSP: vertical seismic profiling) 및 전산처리 기법과 그에 대한 풍부한 경험이 요구되었을 뿐만 아니라 부분적으로는 해석의 어려움이 수반되었다. 따라서, 본 사면 안정성 지반조사에서는 텔레뷰어가 보다 정확하고 바람직한 정보를 제시할 것으로 사료되며 더구나 탐사 경비 및 시간 측면에서도 효율적으로 대처할 수 있는 것이다. 다음은 텔레뷰어에 의해 인식된 절리 및 단층들로부터 작성된 rose diagram 및 평사투영법(polar projection)만으로도(제 6 절 참조) 실제로 사면 설계 및 안정성 평가에 어느 정도 기여할 수 있는가를 몇가지 사례로서 나타내고 있다.

Fig. 44 및 45는 하나의 국내 현장 응용 사례로서 서울 강남지역 서로 다른 두개의 시추공의 심도 약 50m에 이르는 암반에 대한 절리 발달 상태를 rose diagram과 평사투영법에 의한 극점으로 나타내었다. Fig. 44에는 대체로 절리가 급경사를 이루면서 상호 반대 방향으로 기대고 있으며, Fig.

Geological Interpretation of
Cross-section B1-B3-B5



Geological Interpretation of
Cross-section B2-B3-B4

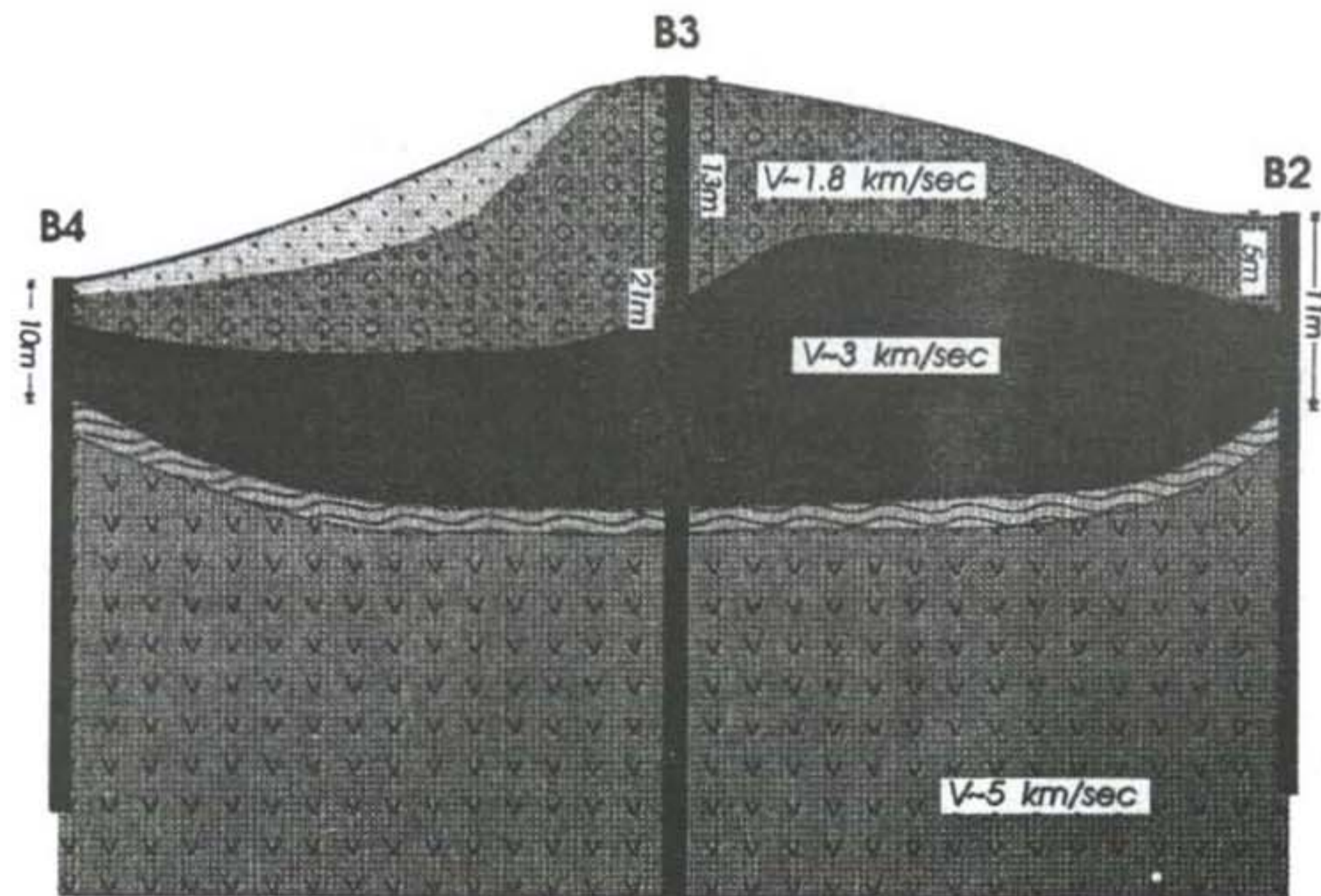


Fig. 42. Sliding type of wedge failure. Interpreted geological cross-section of borehole H1-B3-B5 and B4-B3-B2 area, Pangyo.

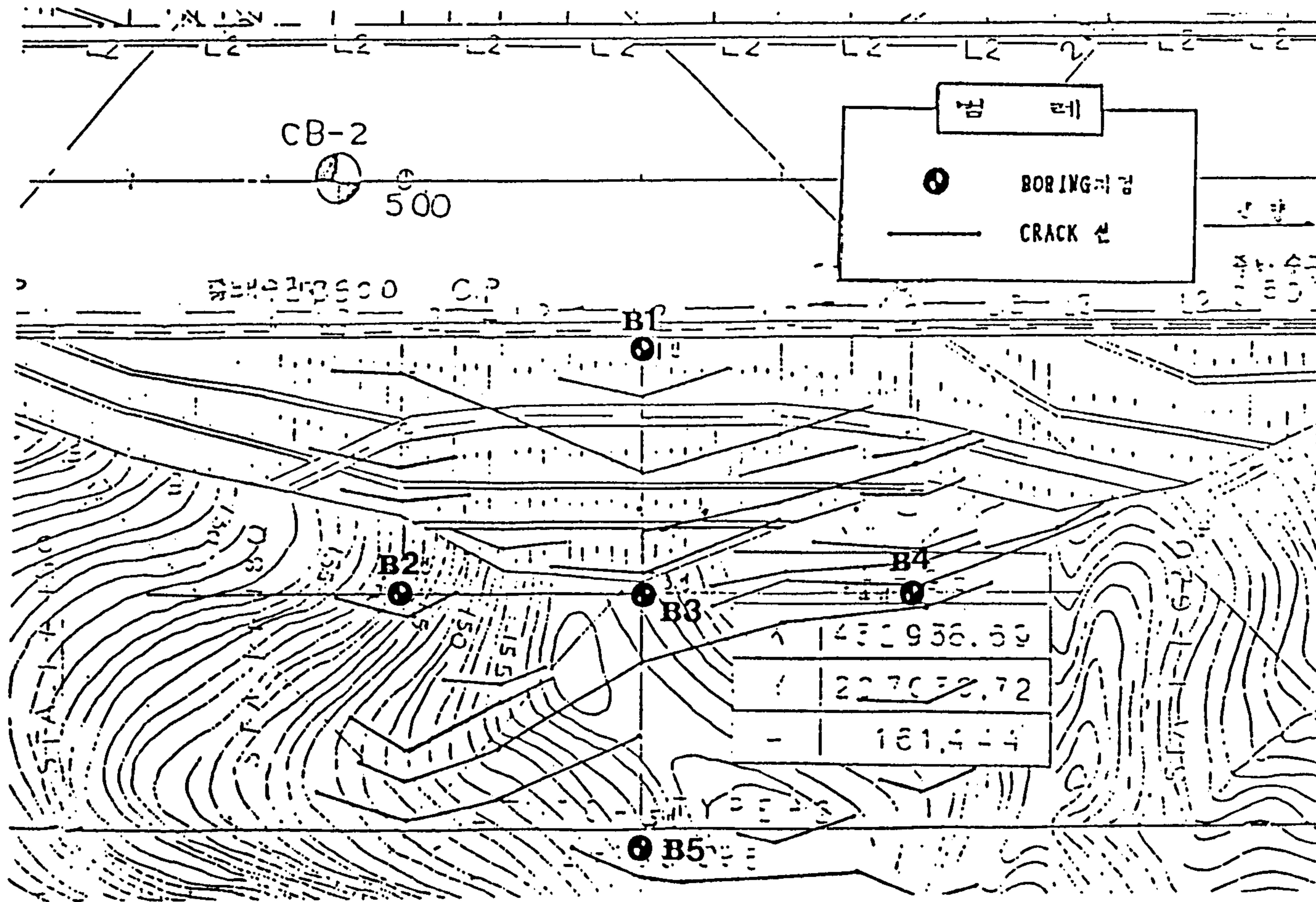
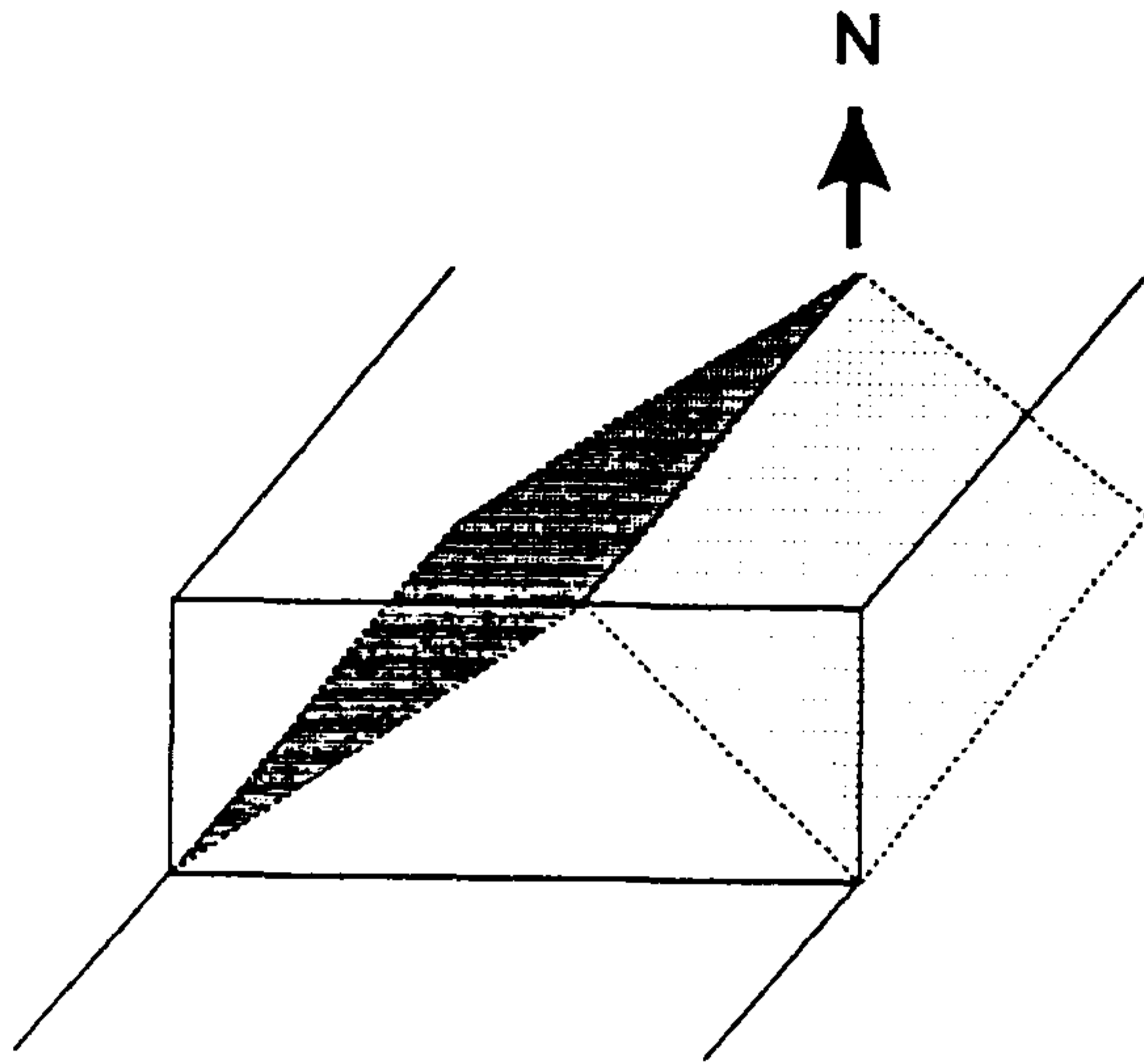


Fig. 43. Plane map of cracks in Pangyo survey area.



ROSE DIAGRAM

POLAR PROJECTION

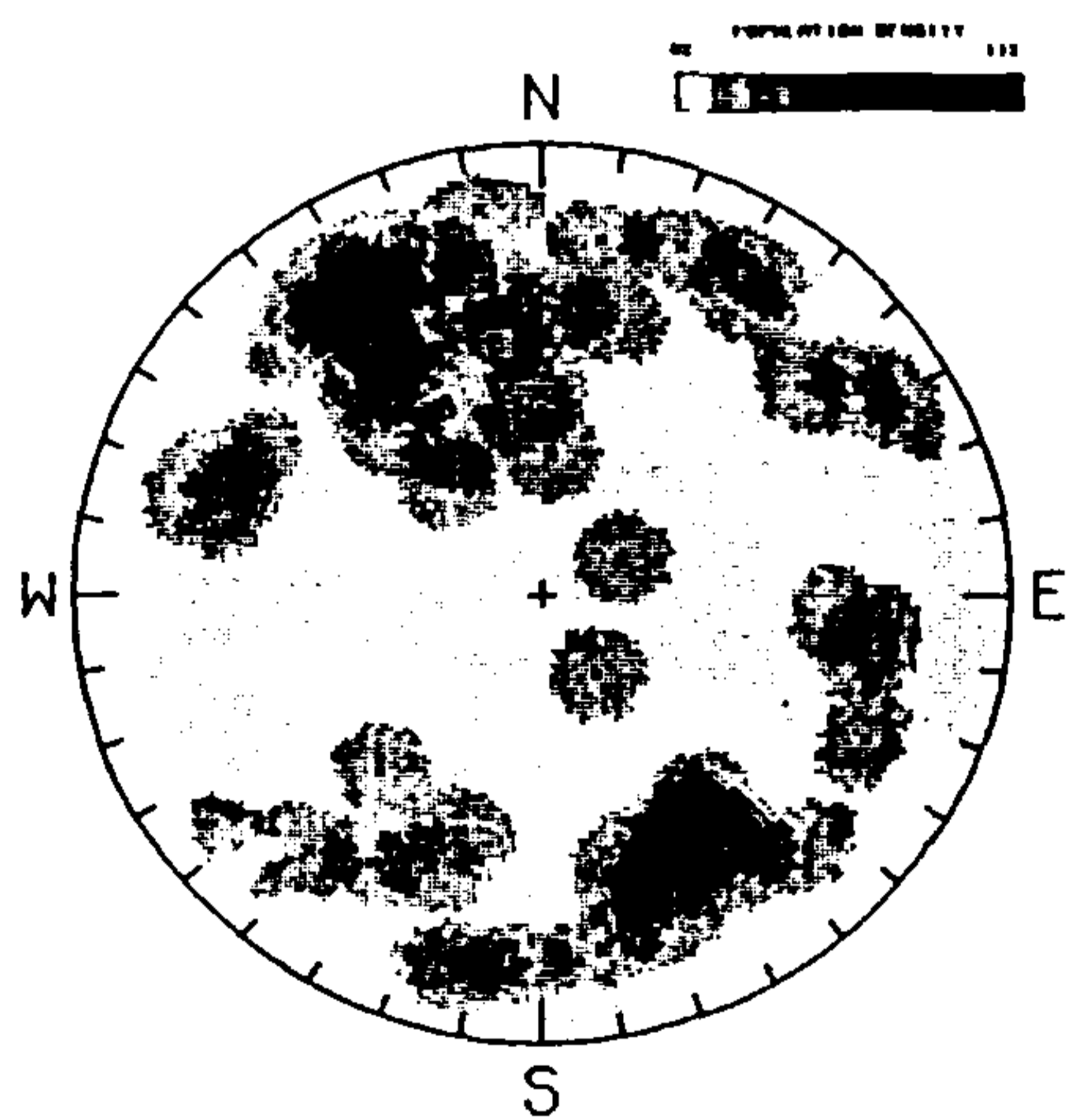
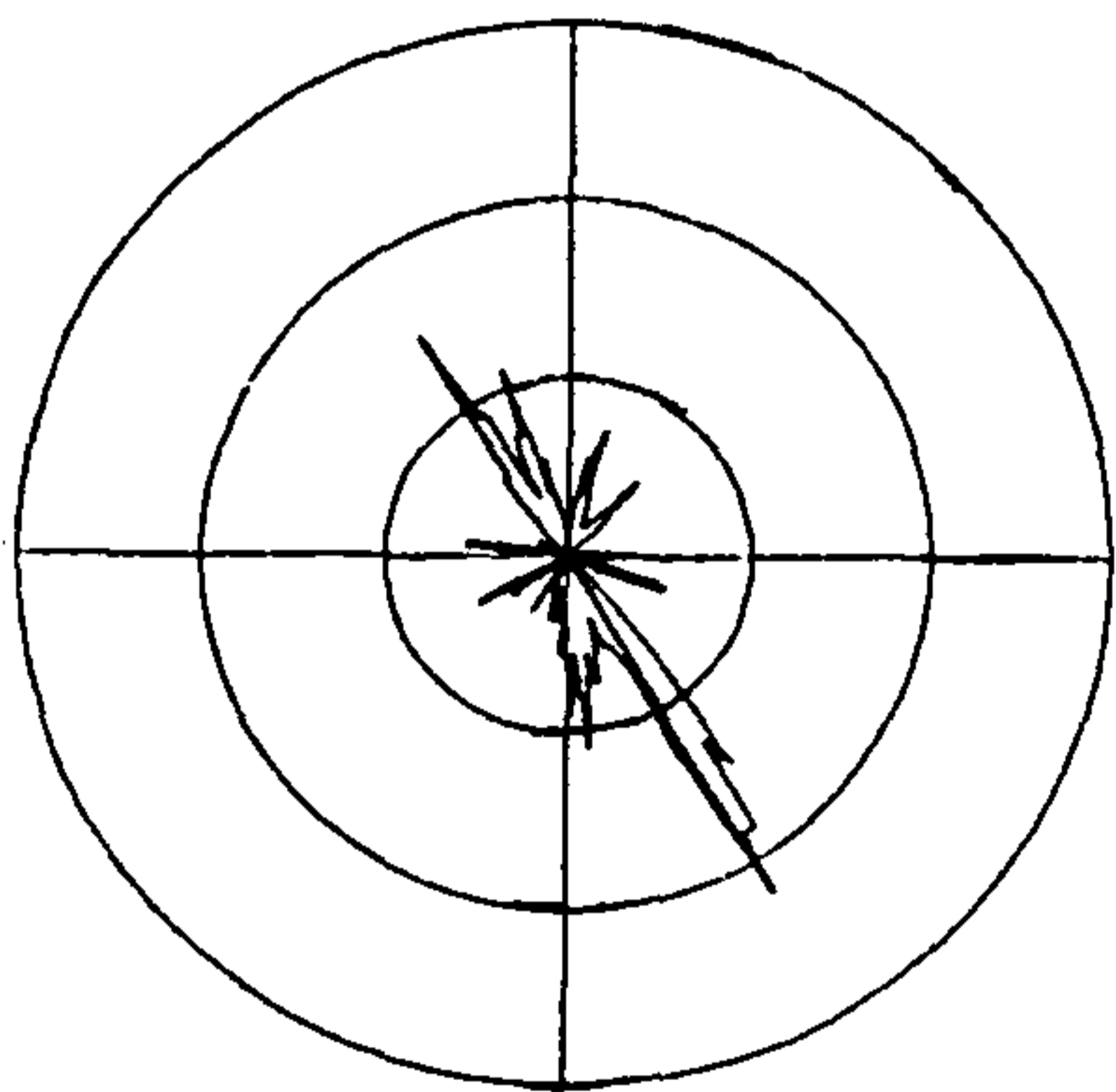
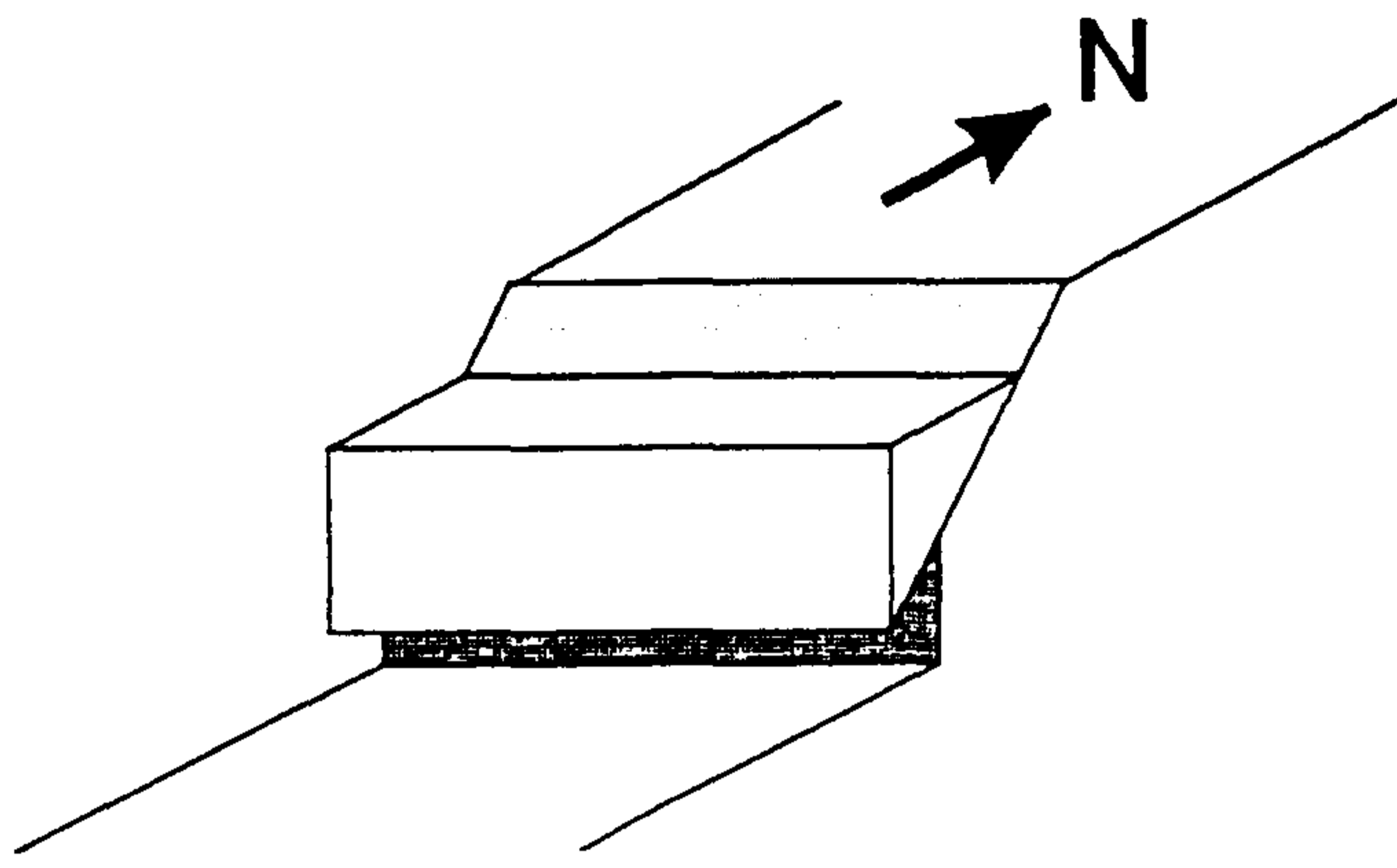


Fig. 44. Example of grouping of surveyed (in Kangnam, Seoul) discontinuities into families and determination of the most frequent dip direction and dip angles.



ROSE DIAGRAM

POLAR PROJECTION

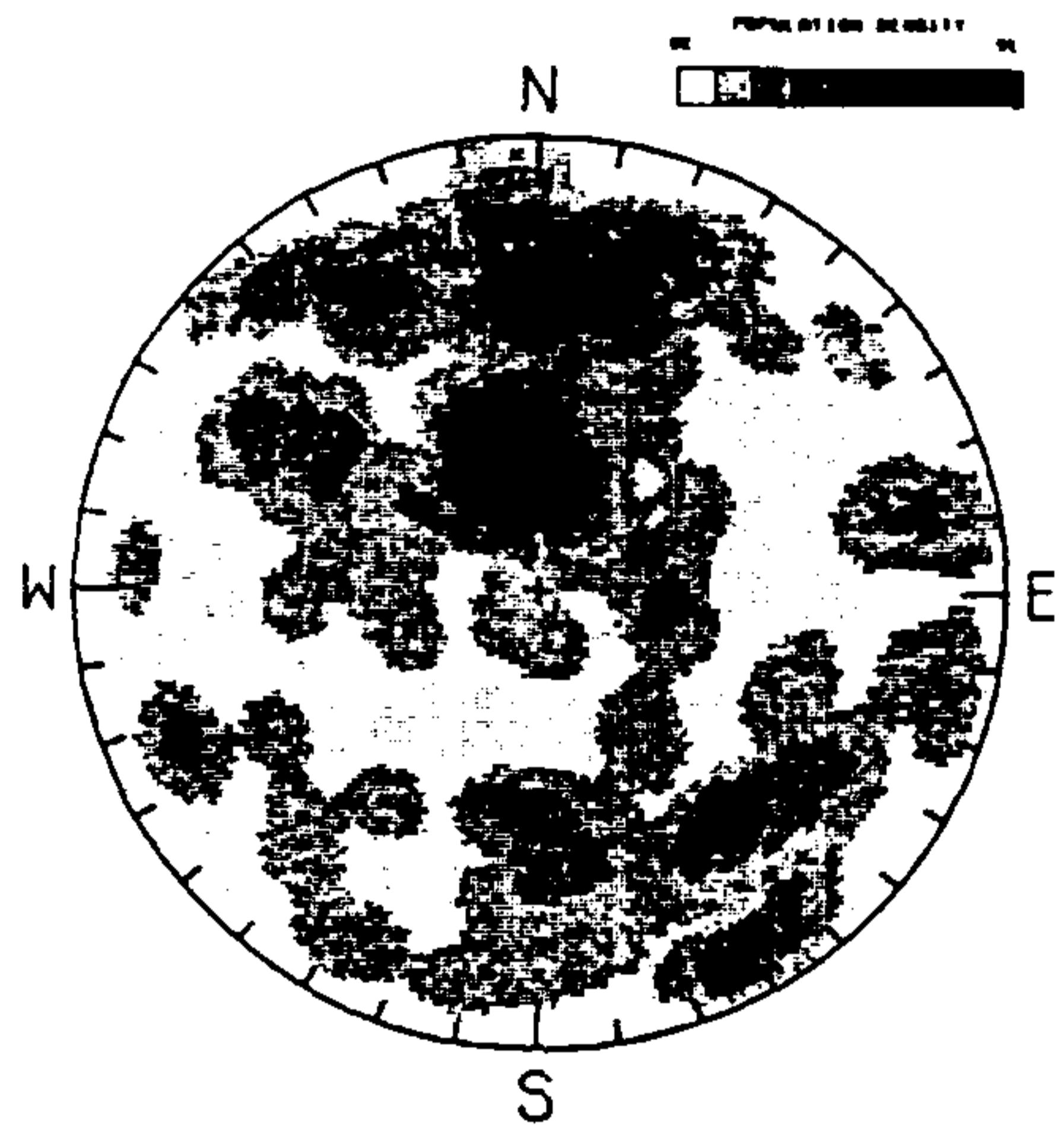
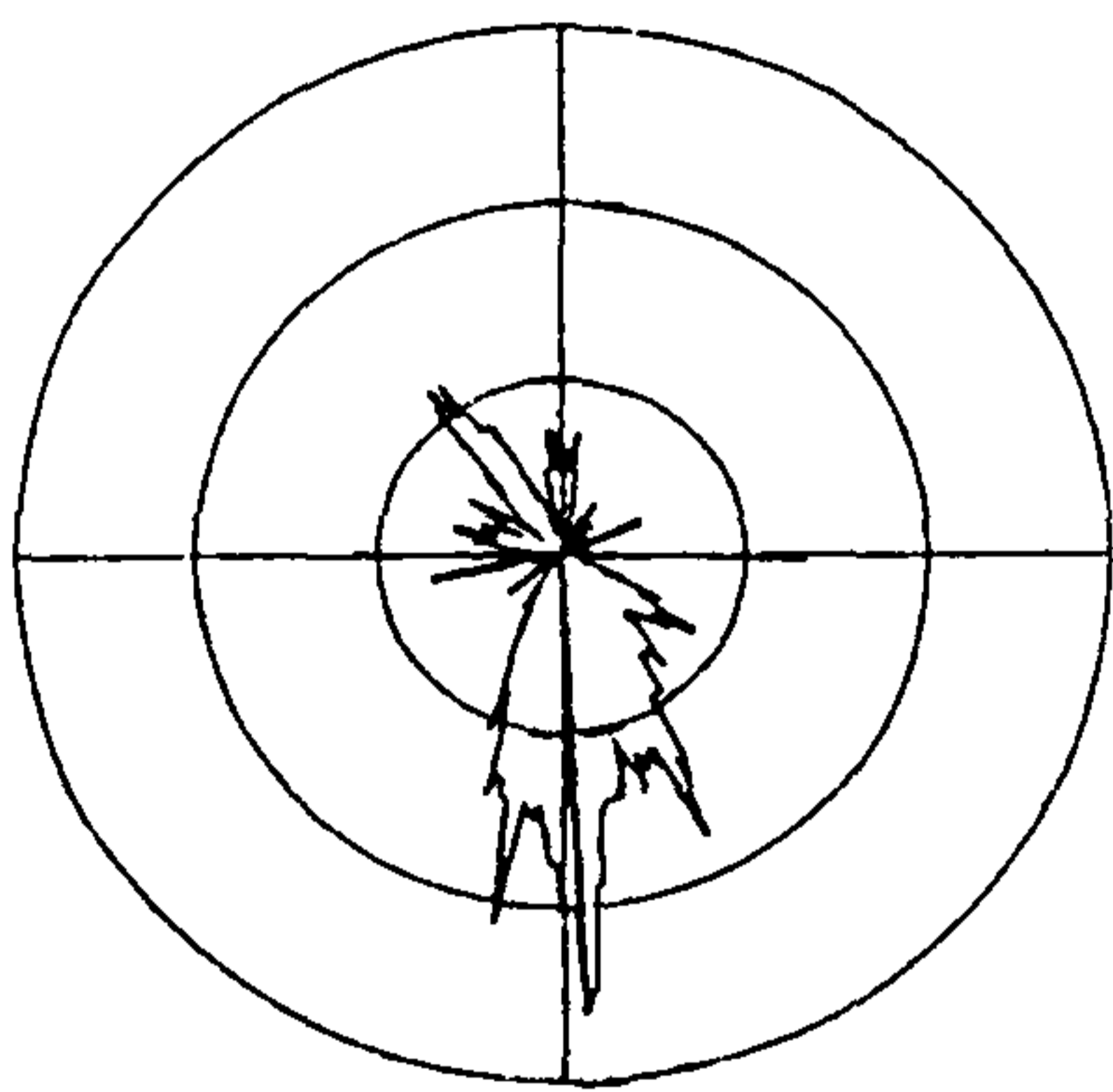


Fig. 45. Example of grouping of surveyed (in Kangnam, Seoul) discontinuities into families and determination of the most frequent dip direction and dip angles.

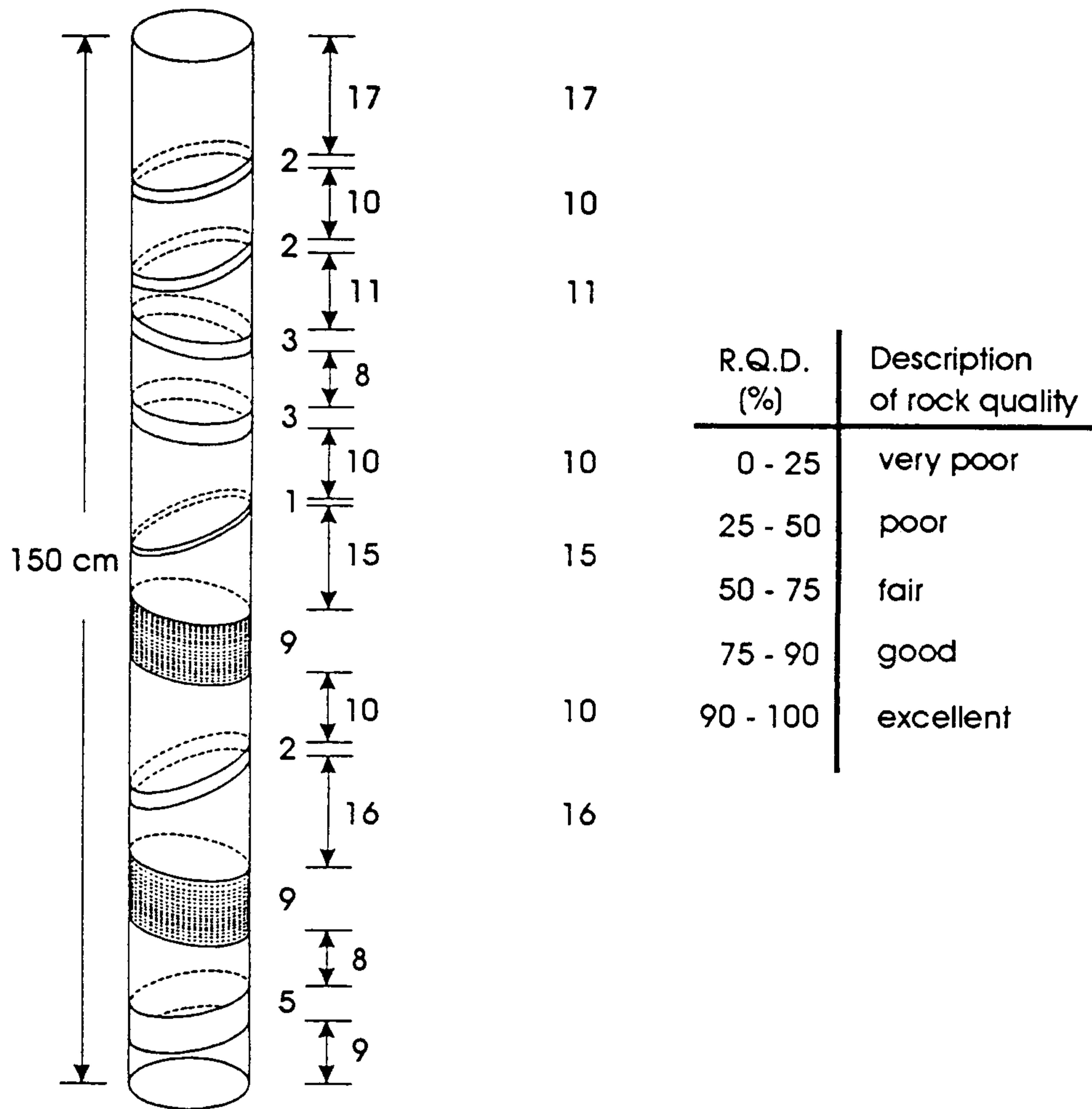
45의 경우는 거의 한 방향인 북쪽으로 급경사를 이루고 있는 절리가 발달하고 있음을 보여주고 있다.

2. 암질 지수 RQD (Rock Quality Designation)

RQD는 채취된 시추 코어로부터 현지 암반의 공학적 구분에 사용되는 수치로서 계측이 용이하고 또한 암반의 물성치와도 상당한 연관성을 찾을 수 있기 때문에 널리 사용된다. Deere(1966)는 RQD를 다음과 같이 정의하였다. 즉, 다이아몬드 비트로 double core barrel을 사용하여 NX 비트(코어 직경 약 53mm) 이상으로 규정한 후 그로부터 채취된 코어 중 길이가 10cm 이상되는 부분의 합을 전체 길이에 대한 백분율로 표시한 수치이다(Fig. 46 참조).

상기 RQD 정의는 바로 암반의 절리 두께, 절리 간격, 절리 방향, 파쇄대 두께 등과 직접적으로 연관된다. 따라서 텔레뷰어 데이터는 바로 이들에 대한 모든 정보를 내포하고 있기 때문에 RQD 산출을 위한 기본 자료를 제시할 수 있게 된다. 그러나, 텔레뷰어에 의한 RQD와 실제치와의 연계성은 아직까지 여러면에서 연구되어야 할 과제로 남아 있다. 참고로 Fig. 47은 발체된 텔레뷰어 데이터로부터 RQD를 추출하는 하나의 분석 과정을 보여주고 있다.

좌측으로부터 첫번째 그림은 모든 절리 및 단층면을 입체적(3D)으로 보여주고 있으며 이들에 대한 2차원 표현은 두번째 그림에 나타나 있다. 네번째 그림은 1m 내에 관찰되는 절리 내지 단층의 갯수를 도면화한 것으로써 이는 지질구조학 및 토목지질에서 흔히 대두되는 내용이다. 세번째 그림은 만약 절리 및 단층면이 수평이라고 가정하였을 때 산출되는 RQD 를



114 cm 89 cm

Core recovery = 76 %

R.Q.D. = 59 %

Rock quality : Fair

Fig. 46. Principle of rock quality designation based indirectly on the number of fractures and the amount of softening or alteration in the rock mass as observed in the rock cores from a drill hole.

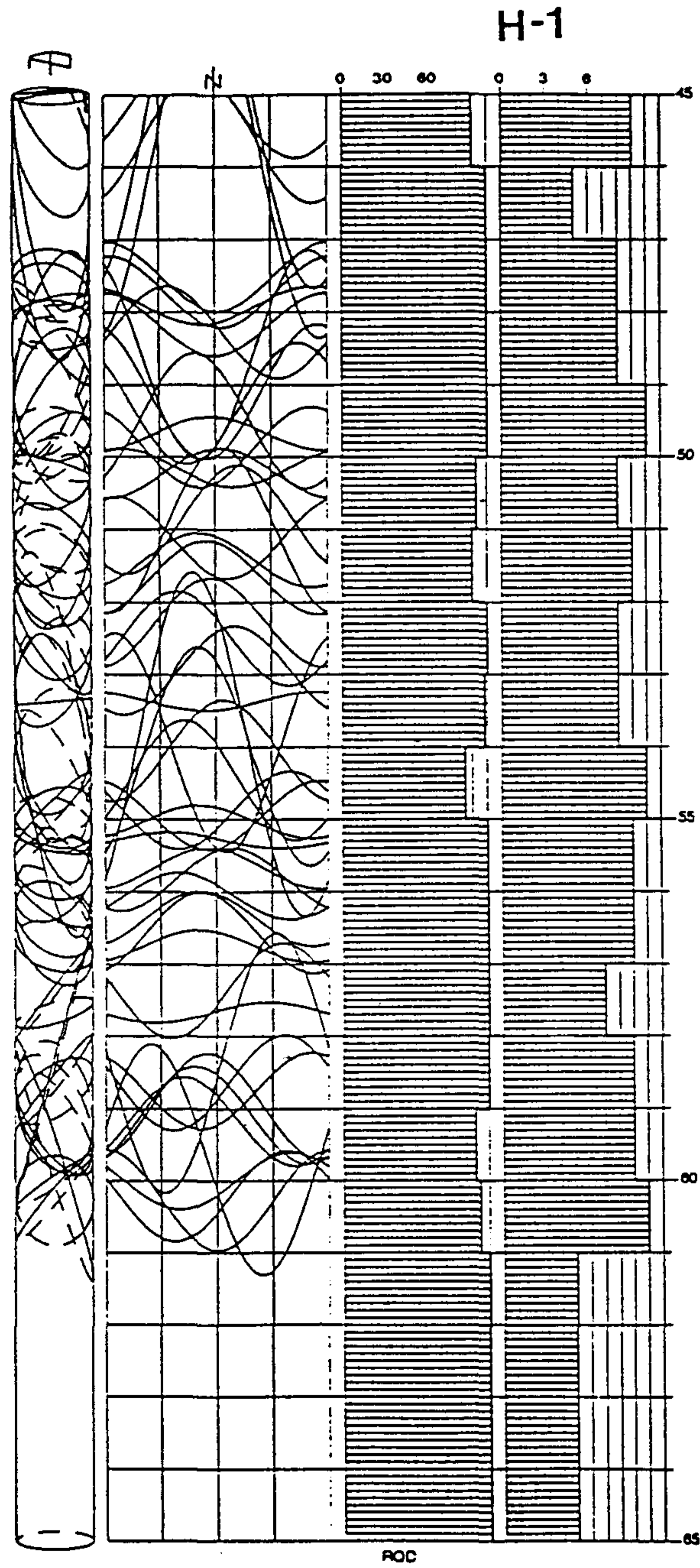


Fig. 47. Display of the structural data extracted from the acoustical image of the borehole wall measured in the survey area Kangnam, Seoul.
 From left to right : 3-dimensional view, planar view, RQC, number of structural data.

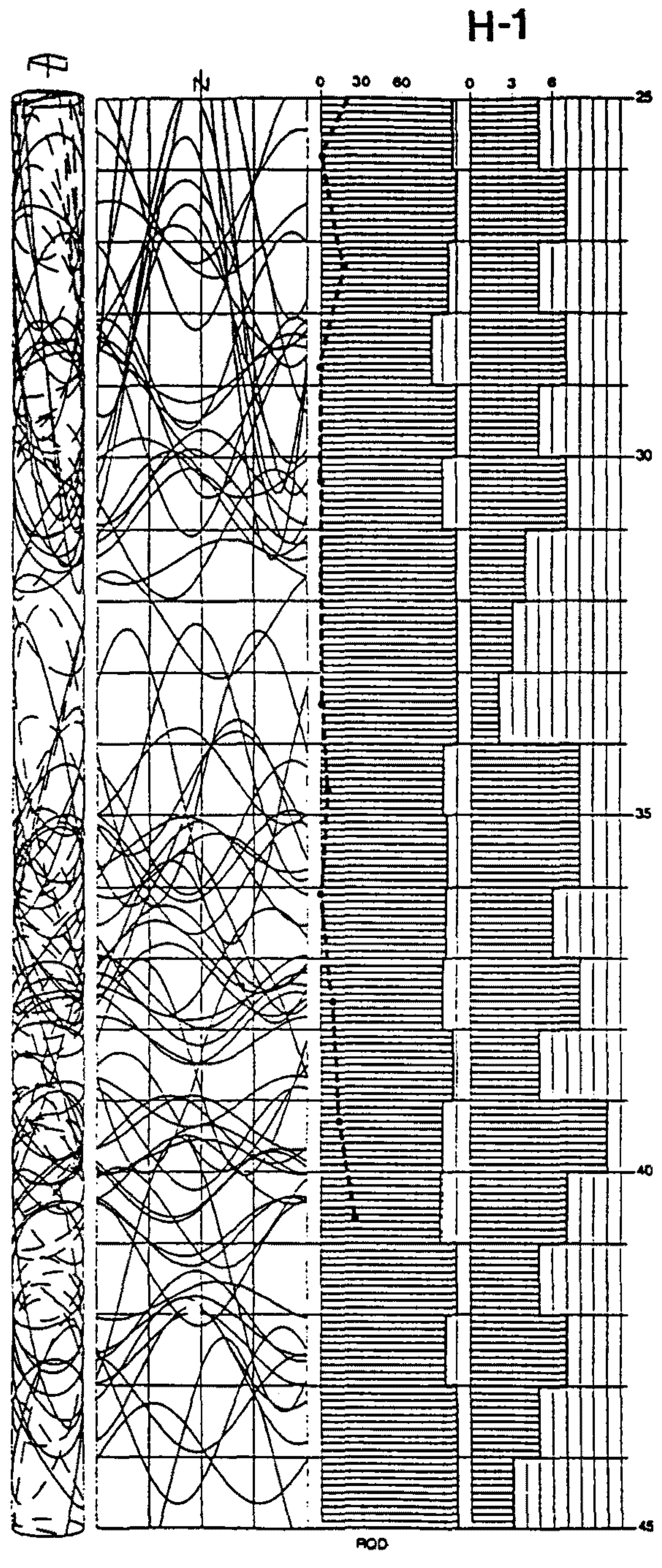


Fig. 47. (continued).

나타내고 있다. 여기서서는 전체적으로 대단히 높은 RQD를 보여주고 있다. 이에 대한 개략적인 계산은 다음과 같다. 시추공 H-1에서 관찰된 tectonic elements의 수는 185개 이며 해당되는 시추공 심도 구간은 $60\text{m} - 13\text{m} = 47\text{m}$ 이기 때문에 m당 평균 절리(단층 포함) 수는 약 3.9개 즉, 평균 20cm 간격으로 절리가 존재하는 경우가 되는 것이다. 따라서 상기 RQD 값은 전반적으로 높게 나타난 것이다. 그러나 이들 대부분의 절리들은 큰 경사를 띠고 동시에 다양한 방향을 갖고 있기 때문에 실질적으로 RQD 산출을 위해 고려될 수 있는 시추 코어 구간은 훨씬 작게되는 것이다. 더구나 RQD에는 암석 강도도 잠정적으로 영향을 주고 있기 때문에 실질적인 RQD는 세번째 그림에서 점선으로 나타내고 있는 바 대단히 낮은 값을 보여주고 있다.

3. 암반 분류

토목·암반구조물 건설의 계획부터 시공에 이르기까지 암반 분류는 토목·암반구조물의 경제성 및 안정성에 중대한 영향을 주게 된다. 암반 분류는 대체로 암반의 내하성 및 투수성에 따라 등급을 줌으로써 이루어지며 여기서 암반의 내하성을 나타내는 대표적인 척도는 암반의 변형계수, 강도, 정 탄성계수 및 전단강도 등이며 투수성을 지배하는 지질 요인으로는 암석 그 자체의 공극, 틈 밀도 및 협재물의 상황 등이 된다. 일반적으로 분류 기준으로 되는 암반의 특성 요소인 분류 요소도 구조물의 종류, 규모 및 중요성에 따라 달리 하며 따라서 터널이나 절취 사면 및 댐 공사 등의 각 분야에서는 각자 독자적인 분류법이 연구되어 사용되고 있는 실정이다. 다음에 소개하는 암반 분류는 외국에서 터널을 대상으로 한 것으로써 대체로 암반

의 절리 구조에 중점을 두고 있다.

1) Q-system

NGI (Norwegian Geotechnical Institute)의 Barton, Lien 및 Lunde는 6가지 매개변수에 점수를 부여하여 암질을 평가하였다.

$$Q = (RQD/J_n) \cdot (J_r \times J_a) \cdot (J_w/SRF)$$

RQD : Rock Quality Designation (0 ~ 100 %)

J_n : Joint Set Number (0.5 ~ 20)

J_r : Joint Roughness Number (4 ~ 1)

J_a : Joint Alteration Number (0.75 ~ 12)

J_w : 절리간의 간극수에 의한 감소 계수 (1 ~ 0.05)

SRF : 응력 감소 계수 (1 ~ 20)

상기 암반 분류법을 분석하면 6가지 매개변수 중 5개가 절리와 상관됨을 알 수 있다. 따라서 텔레뷰어 데이터는 바로 Q-system 암반 분류법을 위한 주요 기초 자료로 간주되는 것이다.

2) RMR (Rock Mass Rating)

남아프리카 Bieniawski는 암반을 평가하는 방법으로 다음 6가지 매개변수에 평가 기준을 설정하여(강대우, 1994 참조) 분류하였다.

- ① 신선한 암반에서의 단층 압축 강도
- ② RQD
- ③ 절리 간격
- ④ 절리 상태
- ⑤ 지하수 상태
- ⑥ 절리의 주향과 경사

상기 매개변수 중 ⑥은 단지 텔레뷰어 기법에 의해서만 가능하다고 할 수 있으며 그외 ②, ③, ④ 도 고분해능으로 구할 수 있다.

4. 용질 유동

암반내 지하수 유동은 석유 비축시설이나 원자력 폐기물 저장시설에서 상호 기본적인 개념 상의 차이점은 있으나 두 시설의 효과적인 설계, 건설 및 운영을 위해서 근본이 된다는 공통점을 보여주고 있다. 즉, 지하 유류 비축시설에서는 지하수를 이용하여 저장 물질을 지하 공동으로부터의 누출을 방지하는 데 있으며, 이에 반하여 폐기물 저장시설은 지하수 유동 현상을 정확히 파악함으로써 방사성 물질의 유동을 최대한 격리시키는 것이다. 여기서 두 시설의 안정성을 기할 수 있는 부지 선정이 미흡할 경우에는 상기 기본적인 개념에 의거 수벽(water curtain)이나 공학적 방벽(engineering barrier)을 통해서 그들 각자의 기능을 보강하게 되는 것이다.

Fig. 48은 암반내 형성된 절리 구조를 하나의 보기로서 나타내고 있다. 실제로 암반 내에는 많은 절리와 단층 및 공동이 형성되어 지하수나 용질

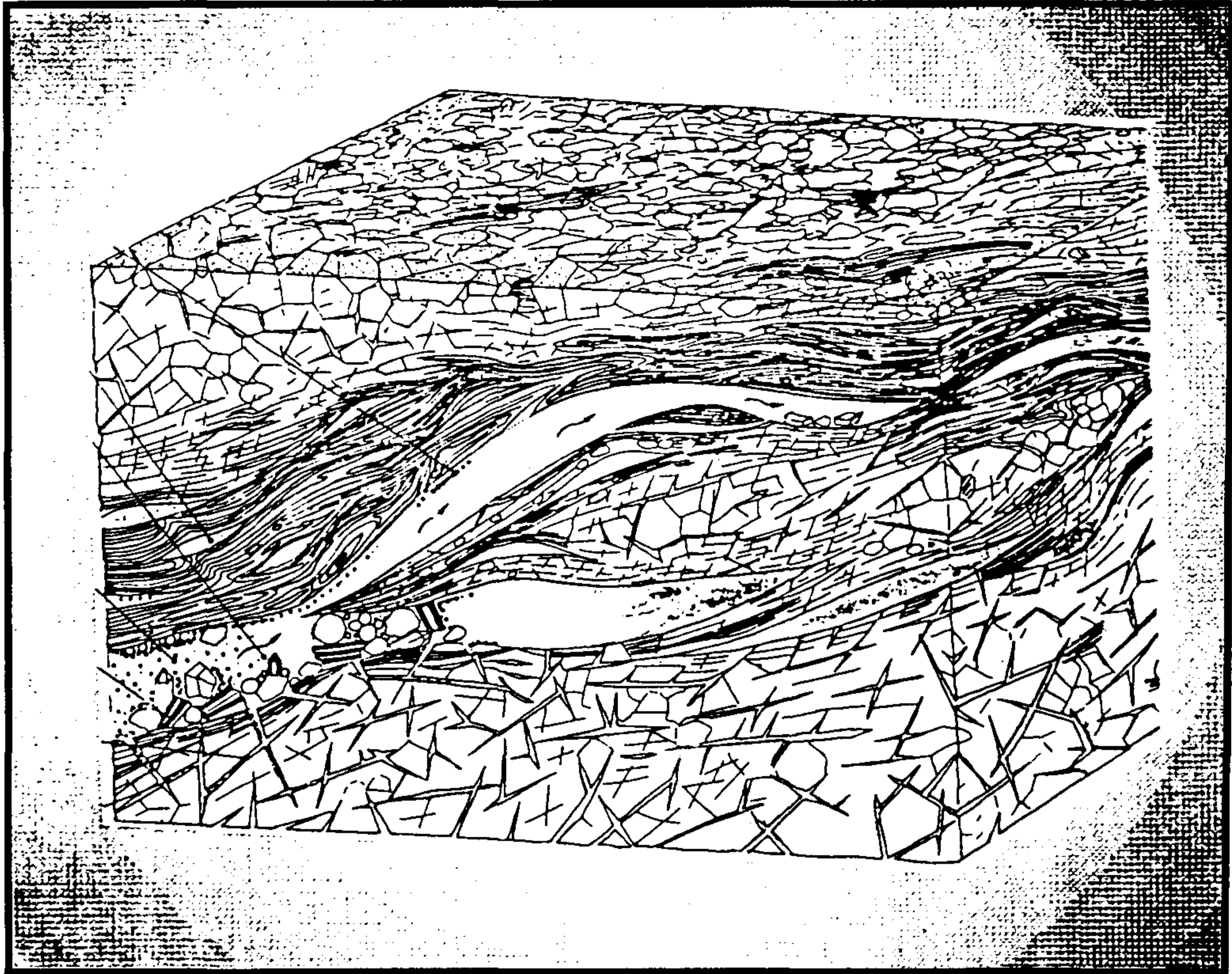


Fig. 48. Schematic representation of the transport processes in fractured granite (after Frick et.al, 1988). In the case of crystalline rocks, geosphere transport occurs mainly along fractures. Compared with flowing water, dissolved materials are transported considerably more slowly.

(예: 가스, 방사능 물질)의 유동을 위한 통로가 되고 있다. 그러나 모든 불연속면이 유동 체계에 기여한다고는 할 수 없다. 터널이나 갱도 굴착시 단층이나 공동으로부터 집중적인 용수 현상이 발생하는 것은 흔히 관찰되고 있는 것이며 때에 따라 파쇄대나 특별한 절리 구조(예: 수직 절리)에서도 많은 양의 물이 흘러나오고 있음도 경험하고 있다.

최근 국내에서도 암반 지하수 유동에 대한 다각적인 연구가 진행되고 있다. 그러나 그에 따른 해석 기술은 무엇보다 극히 미흡한 조사 자료로 인하여 해석된 유동 체계에 대한 신뢰성을 크게 잃게하고 있는 실정이다. 이러한 즘, 이미 요약한 텔레뷰어의 제반 기능은 암반 유동 문제에 효율적으로 대처될 수 있는 기본 자료를 제공 할 수 있을 뿐만 아니라 향후 이 분야에 대한 연구 활성화에 크게 기여할 것이 약속되는 것이다.

5. 지반 침하

지하에 공동이 생성되면 기존의 암반 응력상태는 평형을 잃게 되고 그 이후의 새로운 응력분포 형성과정은 자연적으로 공동을 메울려는 경향으로 진전하게 된다. 이러한 과정이 지표면에 인접하여 진행된다면 지표면이 하락하는 즉, 지반침하 현상이 유발될 수 있는 것이다. 지반 침하는 시간적 및 공간적 측면에서 그 유형을 크게 달리하고 있으며 여기에는 대체로 공동의 크기 및 발달 상태, 공동 상부의 지질구보 및 암반상태가 주요 요인으로 대두되고 있다. 지금까지 관찰되고 있는 지반침하 유형은 크게 sink-hole형과 trough형으로 대별된다. Sink-hole은 대부분 그 규모는 작으나 시간적으로 급격히 발생하며 이러한 침하는 때에 따라 인위적인 요인으로 가속화될 수 있다. 1993년 구포 기차전복사고를 유발한 지표 함몰은 바로 인위적인 터

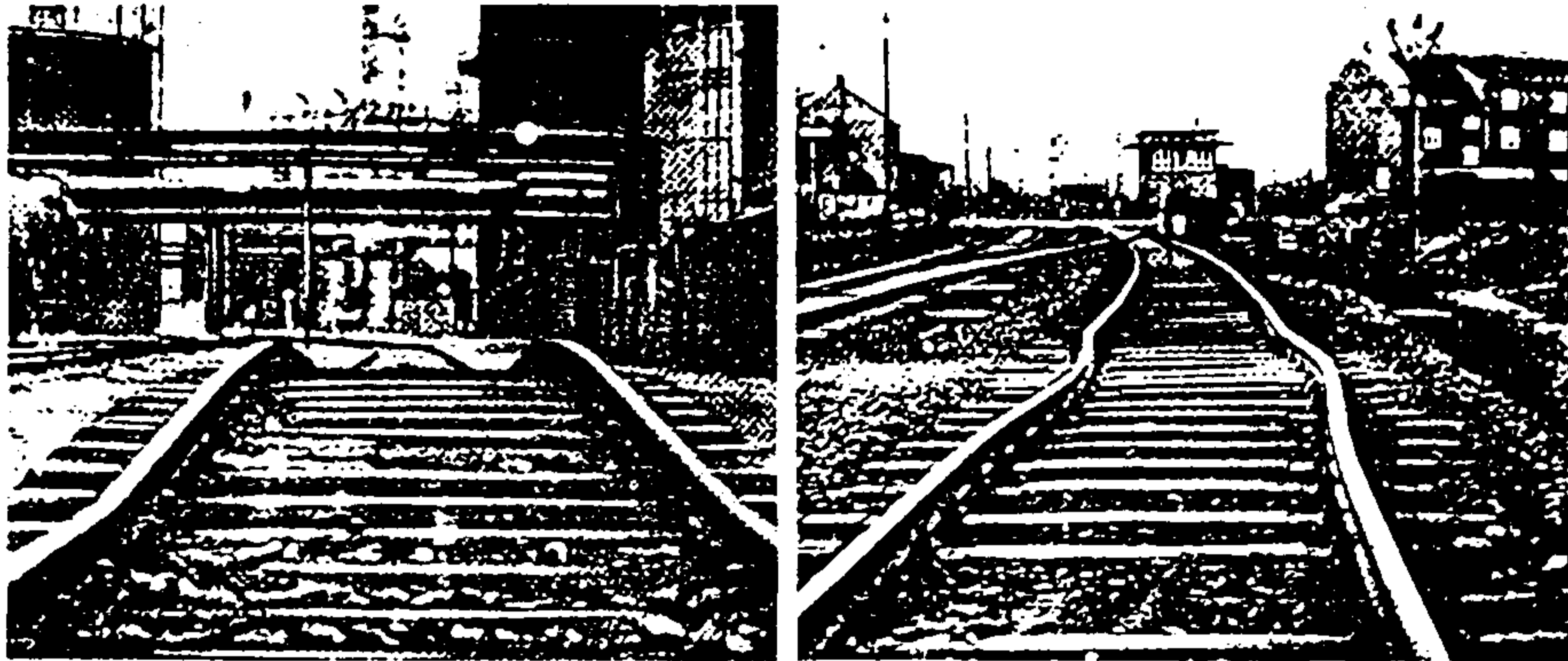
널 굴착에 의해 급격히 발생한 일종의 sink-hole 지반침하라 할 수 있겠다. 한편, trough형은 공간적으로 넓은 범위에서 서서히 일어나는 지반침하를 말하며 그로 인한 침하 규모는 대체로 작다. 물론, 이러한 침하가 곧 인명 피해를 초래할 수는 없겠으나 이에 대처하기 위한 재산상의 손실은 오히려 막대할 수도 있는 것이다. Fig. 49는 일종의 trough형 지반침하 과정을 하나의 보기로써 나타내고 있다. 만약 침하가 발전하면 침하 중심부에는 거의 수직 방향으로, 침하 가장자리에는 횡압력이 작용되어 지표면의 압축(compression)내지 신장(extension)이 일어나게 된다. 이러한 침하 과정을 이해하기 위해서는 일별하여 지하공동의 크기 및 그 상부의 암반의 거동 내지 지질구조에 대한 정보가 요구된다. Fig. 50은 침하로 인해 지표 내지 지표에 인접한 시설물(예: 가스파이프)들이 여러가지 형태로 파손되고 있음을 보여주고 있다. 여기서 (g)~(i)는 광산지대에서 흔히 관찰되는 sink-hole형 지반침하를 나타내고 있다.

국내 지반침하를 유발하는 지하 공동의 대표적인 대상은 채굴적이다. 최근, 국내 대부분의 탄광이 폐쇄됨에 따라 탄광지역에는 수많은 채굴적이 산재되어 있다. 특히, 탄층의 연장 상태는 국내 지질의 복잡성으로 인하여 크게 일관성을 잃고 있으며 또한 지금까지의 채탄 방식이 충전식이기 보다는 거의 붕락식에 의존하였기 때문에 채굴적 형태는 매우 다양하고 더구나 불리한 지질 여건(단층 및 절리의 발달, 탄층의 급경사 등)은 무엇보다 지반 침하를 유발할 수 있는 소지를 크게 마련하는 것이 되는 것이다. 이러한 현실은 국내 금속광산에서도 예외는 아니다. 지하 공동의 또 다른 주요 대상은 터널이다. 사회간접자본 사업에 따른 제반 터널 공사(예: 지하철, 전력구, 고속도로 및 철도)는 대부분 지표에 인접하여 시공되기 때문에 크고 작은 지반침하를 초래함은 불가피하다고 할 수 있으며 특히 도심지 공사에서는 흔히 심각한 민원을 불러 일으키고 있는 실정이다. 최근 마스크를 통



Fig. 49. Mining Subsidence Engineering.

The cavity artificially created underground by tunneling or the extraction of minerals removes the natural support from the overlying strata. As a result, successive layers of rock bend under the influence of gravity, until finally the movement reaches the upper earth surface. The soft layers of earth moving downwards and sideways towards the syncline axis are also compressed at the center of trough and extended at its margins.



(a) compression(vertical)

(b) compression(lateral)



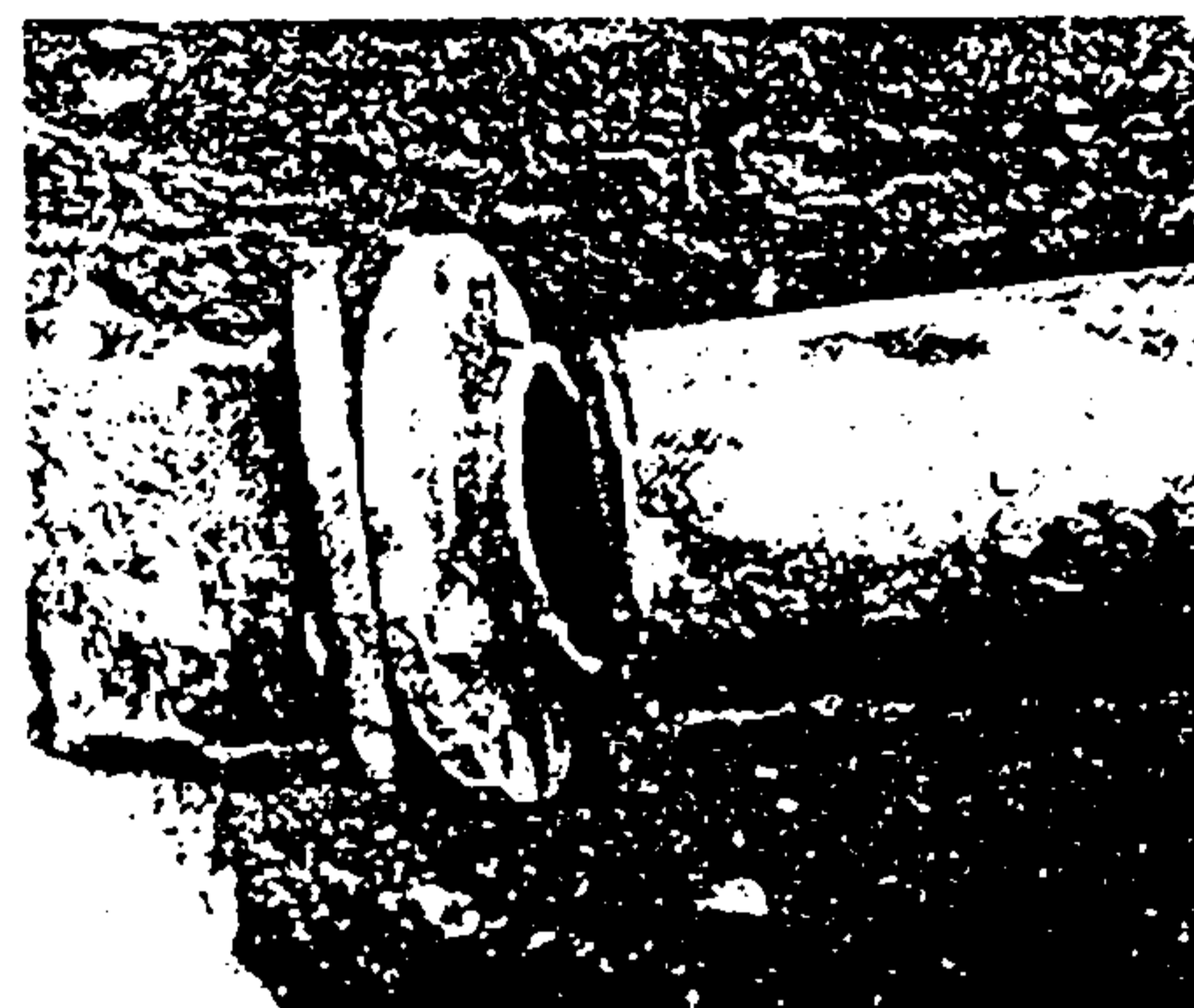
← (c)
extension



(d) →
compression



(e) compression



(f) extension

Fig. 50. Examples of subsidence damage (after Kratzsch, 1983).

(a),(b) Damage to railway tracks : vertical distortion, lateral distortion

(c),(d) Damage to streets. (e),(f) Damage to pipes laid in the ground.



(g) sink-hole type subsidence



(h) sink-hole type subsidence



(i) sink-hole type subsidence



(j) wide tension crack

Fig. 50. (continued).

해 보도된 바 있는 많은 양의 아파트 및 시설물의 기울어짐도 일종의 trough형 지반침하에 기인된다고 할 수 있으며 여기에는 무엇보다 체계적이며 근원적인 대처 방안이 안정성 제고를 위해 보다 절실히 요구되는 것이다.

선진국에서는 이미 30여년 전 지반침하 문제가 제기되었으나 국내에서는 1993년 구포 기차전복사고 및 부평 공원묘지 붕락사고가 바로 도심지 내에서 발생하여 막대한 인명 및 재산 피해를 초래함으로써 드디어 지반침하가 심각한 사회 문제로 대두되게 되었다. 당시 제기된 국가적인 연구과제 내용은 대체로 “국내 기간시설물(특히, 철도 및 지하철)하부 지하 공동 존재 여부 및 지반침하 예상지역 조사 및 대처 방안”으로써 한국자원연구소는 국내 최초로 태백지역을 중심으로 한 일차적인 연구 결실을 낳게 하였다(권광수 외, 1995).

지금까지 국제학계에서 발표된 다양한 지반침하 이론은 단지 단순화된 모형에 근거하고 있기 때문에 그의 응용성은 국내에서 기대되기 어렵다. 반면, 고도로 발달된 수치해석법(예: FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua))은 임의의 모형에도 적용될 수 있을 뿐만 아니라 지반침하에 대한 점진적인 과정을 나타낼 수 있는 큰 장점을 갖고 있다. 비록, 상기 프로그램 운용에는 초기치 및 경계치 설정 이외에도 방대한 기본 자료(예: 채굴적의 형태, 지질구조)가 요구되고 있으나 그래도 국내 지질의 복잡성에 비추어 그의 실효성은 크게 촉구되고 있는 실정이다. 따라서 국내 지반침하 문제에 보다 현실적으로 접근하기 위한 당면 과제는 우선 지질조사 자료에 대한 정확성을 극대화하는데 있으며 이를 위한 적절한 물리탐사 기법의 응용은 하나의 핵심 요소기술로서 재삼 강조되어야 할 것으로 보고 있다.

다음은 최근 국내에서 발생한 몇가지 지반침하 사례를 소개하고 있다. Fig. 51은 1993년 5월 부평 공원묘지에서 발생한 지반침하 사고현장을 나타

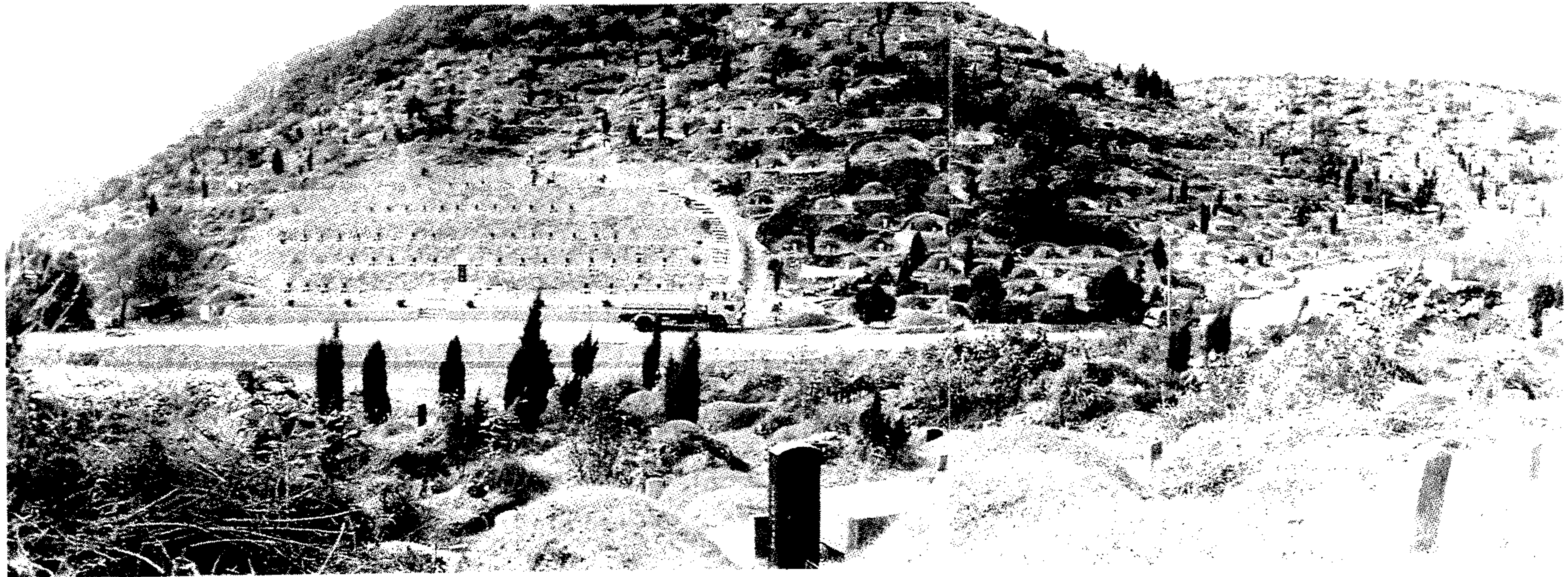


Fig. 51. Scene from ground subsidence in Bupyong civil cemetery.
Left: subsided area (the second survey area), right: the first survey area.

내고 있다. 그림에서는 이미 복구된 상태(왼쪽부분 반원형태)를 보여주고 있으며 지반침하로 인해 훼손된 묘지 면적은 약 200m^2 (심도 약 10m 붕락)에 달한다. 이 일대는 지난 10여년 전까지만해도 국내 최대 은광산(영풍광업소) 지역으로서 지하에는 많은 채굴적(충전 및 미충전)이 산재하고 있다. 1995년 5월 인천시 북구 부평동에 위치한 작은 하천에서 소규모 지반(약 $5\text{m} \times 1.5\text{m}$)이 약 8m 침하한 사고(전형적인 sink-hole형)가 발생하였다(Fig. 52 참조). 다행히도 침하가 하천 내에서 일어났기 때문에 그로 인한 인명 및 재산 피해는 발생하지 않았다. Fig. 53은 본 침하 지역 하부 채굴적에 대한 평면도를 나타내고 있다. 여기에는 지표로부터 약 20m 간격으로 갱도 및 채굴적이 불규칙하게 분포되고 있음을 볼 수 있다. 침하의 규모 및 위치가 바로 지표 지질조사에서 관찰될 수 있는 단층(경사각 약 70°)에 접하고 있음에 비추어 우선 단층에 협재된 파쇄대가 단층면을 따라 붕락된 것으로 추정되었으며 나아가서 관찰된 침하 정도(약 8m)는 상당한 크기의 채굴 공동이 주위에 존재하고 있음도 시사하는 것이 되었다. 시추 조사에 의하면 시추공 H1 및 H3(Fig. 53 참조)에서 각각 40m level 및 60m level의 갱도가 존재하고 있음이 확인되었다.

Fig. 54는 1993년 부평 공원묘지 함몰사고(화살표로 표시, 채굴적 번호 #2) 직후 재조사된 “부평광산 채굴적 단면도”를 보여주고 있다. 여기서 이번 소하천 침하지역은 채굴적 번호 #9-1(원으로 표시)에 해당한다. 그런데 그림의 왼쪽부분 남북을 횡단하는 국도를 따라 현재 지하철이 건설 중에 있으며 그 연변에는 채굴적들이(#13, #12, #11, #14) 인접되고 있다. 한편, Fig. 55에 나타낸 부평광산 광구권 영역을 고려하면 현재 공사중인 지하철 노선은 그 중앙부를 통과하게 되는 것이다.

본 부평지역이 지반침하 우려가 큰 것으로 판단되는 주요 원인은 다음과 같이 요약될 수 있다.



Fig. 52. Subsided area within a streamlet near Bupyong civil cemetery.

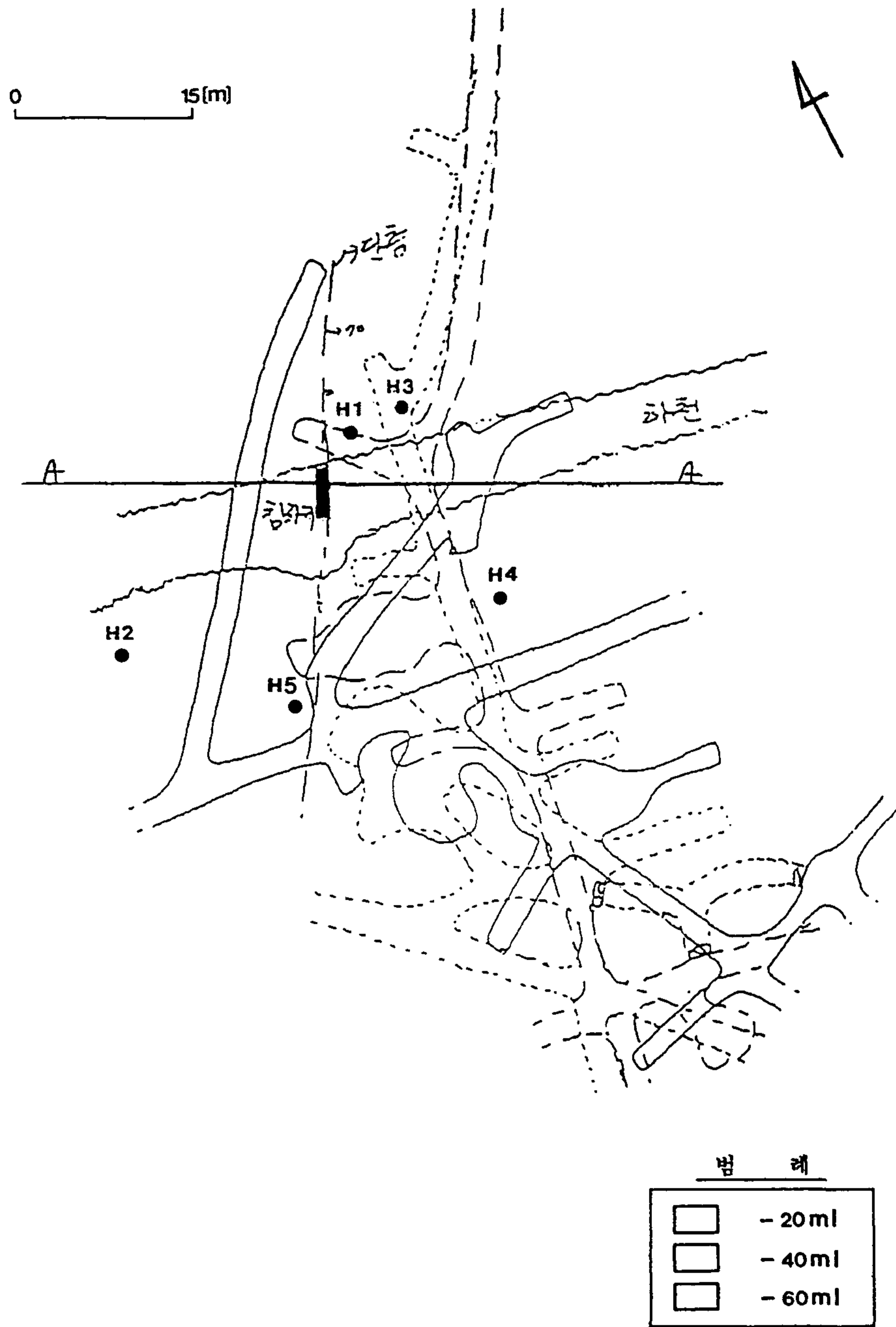


Fig. 53. Sink-hole type ground subsidence near Bupyong civil cemetery. Borehole locations (H2, H3) for geotomography underlaid by three levels of exploited area in Bupyong (abandoned) mine are shown.

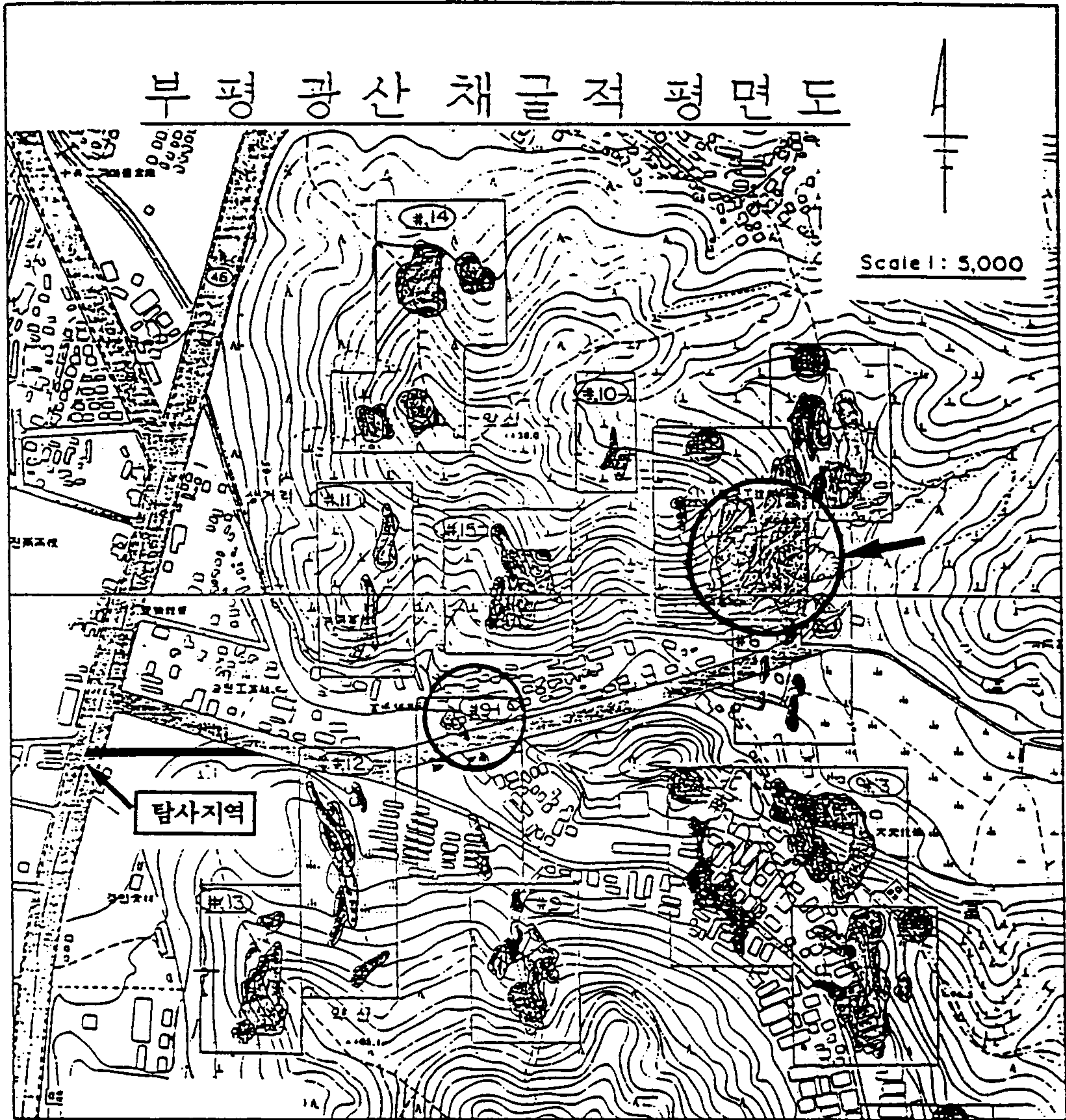


Fig. 54. Plane view of excavated areas in Bupyeong abandoned mine.
 Subsided areas are indicated with circles (excavation No. #2, #9-1).

- ① Fig. 54에서 보여준 채굴적 평면도는 단지 영풍산업이 1972년 광구권을 얻어 1991년 폐광되기까지 그동안 산재하고 있었던 충전 및 미충전 채굴적 분포를 나타내고 있다. 그러나, 이 지역은 그 이전 일제시대부터 1972년에 이르러 금속광산으로서 채광되어 왔음이 밝혀지고 있다. 그런데 이에 따른 채굴적 도면은 전해지지 않고 있다는 점이다.
- ② 본 지역에서 조사된 단층 및 dyke가 대체로 급경사를 보여주고 있다는 것은 바로 지반침하를 유발할 수 있는 가능성을 높혀주고 있다.
- ③ 각 채굴 지역의 채굴적이 좁은 간격으로 층을 이루고 있는 점, 큰 규모의 채굴적이 많다는 점, 채굴적에서 부분적으로 급경사를 띤 광맥을 따라 채굴되었다는 점 등도 침하를 유발할 여건을 마련하는 것이다.

지난 2년간 본 지역에서의 두차례 지반침하와 또한 상기 지적인 침하 우려는 이미 언급한 지하철 노선 문제에까지 파급되었으며 더구나 노선을 가로지르는 갱도가 있다는 제보는 무엇보다 노선 하부에 채굴적들이 연장되고 있을 가능성도 시사하는 것이 될 수 있기 때문에 이미 시공되고 있는 지하철 공사 자체의 타당성 여부도 논란의 대상이 되고 있는 실정이다.

지반침하 안정성 문제에 접근하기 위해서는 이미 언급한 바 지하공동 상부 지질구조 특히, 단층 및 절리의 크기, 주향 및 경사에 대한 정확한 정보가 주어져야 하며 더구나 지반침하 수치해석법 프로그램 운용에서는 무엇보다 텔레뷰어에 의한 방대한 자료가 입력 데이터로 반영됨이 바람직한 것이다.

6. 대형구조물 지반조사

암반의 공학적 특성으로서 암반의 변형성, 강도 및 투수성은 불연속면(단층 및 절리)의 발달 상태와 밀접한 관계가 있다. 즉, 불연속면의 경사 방향, 크기, 거칠음, 개구성 등은 암반의 변형 방향, 전단 강도, 내부 마찰각, 투수성 등에 직접적인 영향을 미치게 되는 것이다. 암반 내 미세한 절리들이 조밀하게 형성되면 그 만큼 탄성을 잃게 되며(탄성파속도 저하) 동시에 강도의 하락을 초래한다. 신생대 제3기 퇴적암의 연질암은 구성 입자의 결합력이 약하기 때문에 암반의 변형성은 대체로 암석 내부의 변형성에 의해 지배된다. 반면, 화강암 내지 화성변성암에서의 견고한 암반의 변형성은 거의 불연속면의 존재에 의해 영향을 받게 되는 것이다. 특히, 암반의 투수성은 거의 불연속성의 투수성에 의해 좌우된다. 그러나, 지하수 유동은 불연속면 전체에 균등하게 흐르고 있는 것이 아니라 일부 절리면내에서 선택적으로 흐르는 소위 채널 경로를 보여주고 있음이 알려지고 있다. 상기 암반의 공학적 특성은 무엇보다 대형 구조물 지반상태 파악을 위해 알아 두어야 할 주요 조사 내용이 되는 것이다. 최근, 국내 대도시의 빌딩 고층화에 따라 지하 시설을 위한 노천 굴착은 점차 심부화되고 있다. 따라서 굴착 시공에는 자연히 주위 건물 안정성에 대한 민원이 발생할 가능성이 많으며 더구나 대형 빌딩의 안정성 제고를 위해서도 철저한 지반상태 파악은 불가피한 것이다. 이에 대한 텔레뷰어 응용은 암반 내 절리 구조를 정확하게 규명하기 때문에 노천 굴착을 위한 시공성 향상(예: 발파 시공)은 물론 지반 안정성 평가에도 상당한 기여를 할 수 있게 되는 것이다.

한편, 텔레뷰어 암석 강도는 모든 불연속면의 형상이 고려된 강도를 나타내고 동시에 연속적인 in-situ 측정치이기 때문에 그 자체로서도 지반 상태를 훌륭히 대변할 수 있다. Fig. 56은 하나의 응용 실례로써 서울 강남지

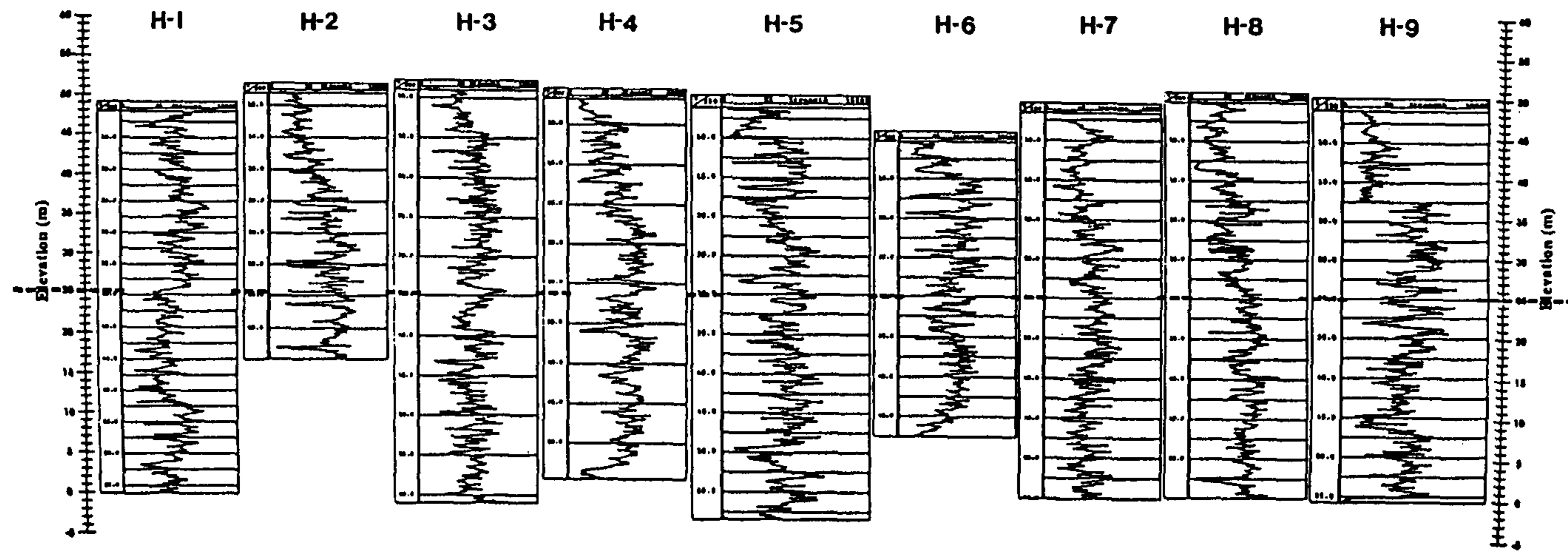


Fig. 56. Evaluated rock strength from the neighbouring boreholes in the survey area Kangnam, Seoul.

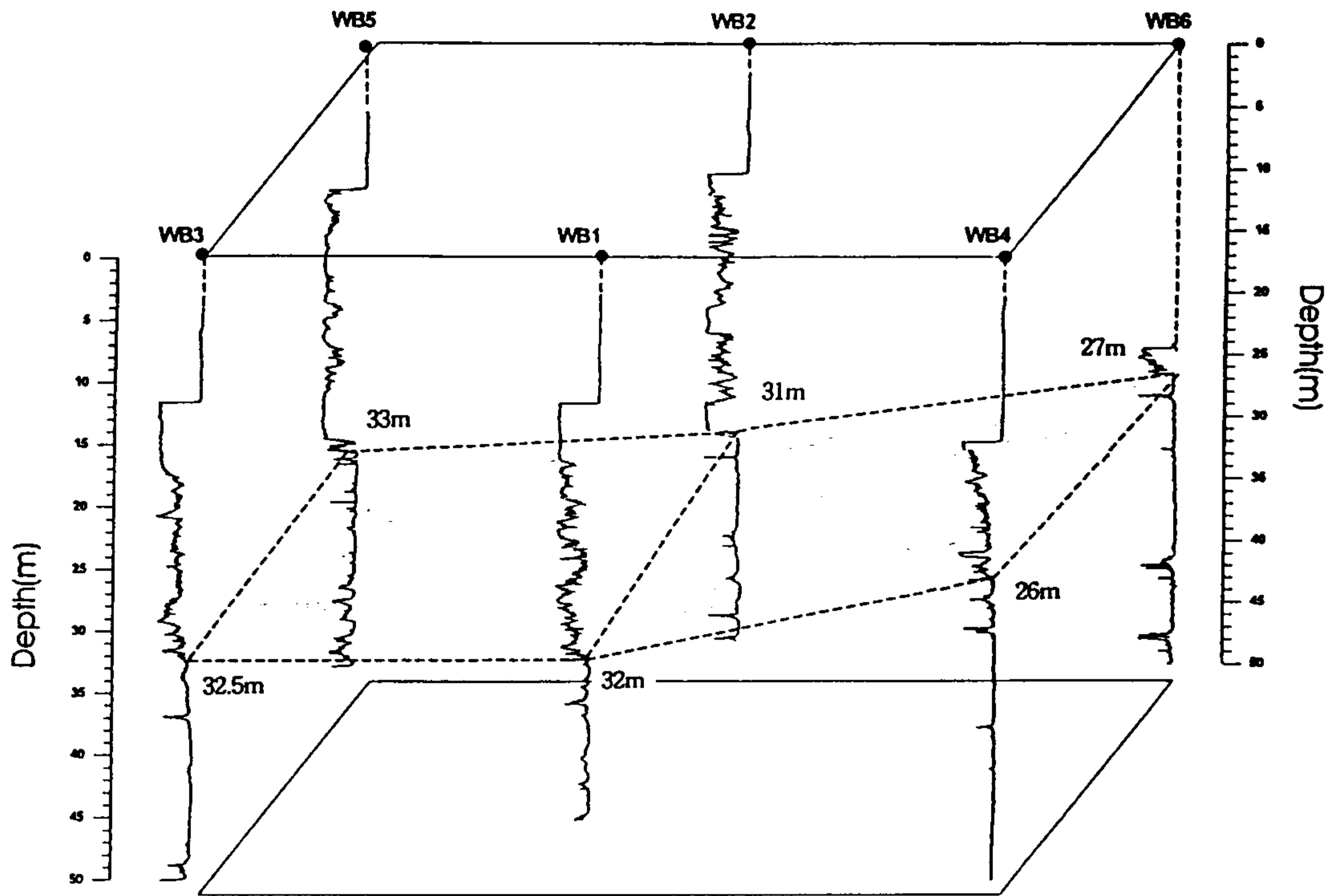


Fig. 57. Evaluated rock strength from the neighbouring boreholes in the survey area Pyongtaek, Korea.

역 대형구조물 지반조사를 위해 천공된 도합 9개의 시추공에서 관찰된 암석 강도를 상호 대조하고 있다. 단층이 존재하는 심도에서는 강도의 예민한 반응(강도의 급강하)이 인식되고 있었다. 시추공 H-2에서는 심도가 깊어짐에 따라 강도가 점차 높아지고 있으며 이러한 경향은 시추공 H-4, H-5 및 H-8에서도 다소 인식되고 있다. 반면, 시추공 H-6 및 H-7 하부에는 암석 강도가 상대적으로 약하게 나타나고 있음이 관찰되었다. 만약 E.L. 25m 기준(그림에서 점선으로 표시)이 흥미 대상이 된다면 시추공 H-1 및 H-6 하부에서는 바로 그곳에서 강도가 크게 떨어진 구간이 놓여 있게 되는 것이다. 이러한 강도 약화 구간은 토모그래피 단면측정에서도 훌륭하게 인식되었다.

Fig. 57은 또 다른 응용 사례(경기도 평택군)를 보여주고 있다. 이번에는 시추공 6개에 대한 암석강도 변화를 시추공 위치에 따라 배열한 후 강도치 850 kg/cm^2 를 상회하는 경계면을 입체화 하였다.

7. 기 타

시추공이 casing된 상태는 우선 시추공의 휨, logger centralization, 시추공 단면의 휨, 시추공 내 매질 등으로 인해 발생하는 제반 문제가 배제된 경우이기 때문에 이는 바로 텔레뷰어 응용을 위한 이상적인 조건이 된다. 따라서 그의 분해능은 대단히 높다. Fig. 58은 일본 남부 지열탐사를 위해 시추공 casing한 상태를 검증한 결과이다. Casing관은 짧은 일자 모양으로 무수히 많이 천공되었기 때문에 그의 형태가 텔레뷰어 데이터에서 훌륭하게 재현되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 59는 서울 강남지역의 텔레뷰어 측정 과정에서 인식된 결과를 보여주고 있다. 심도 약 7.2m에서 보여준 진폭 및

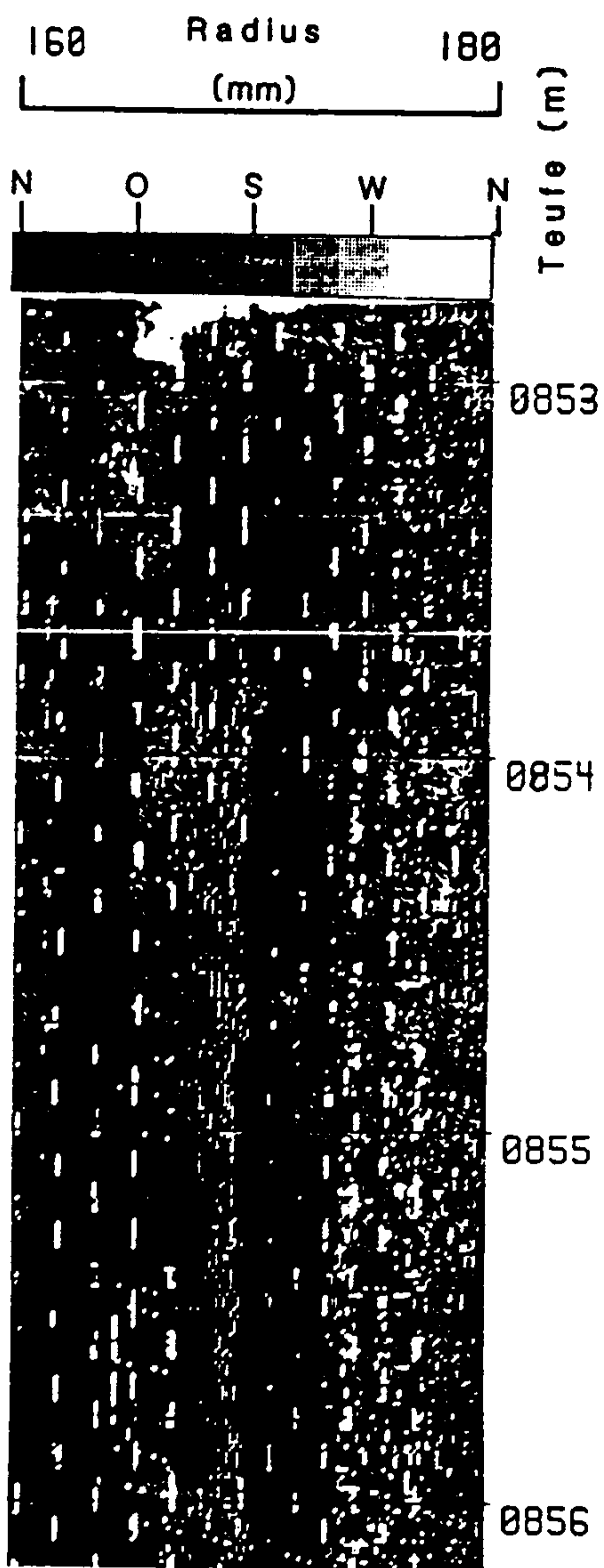


Fig. 58. Televiwer amplitude image of perforated casing in the geothermal production well.

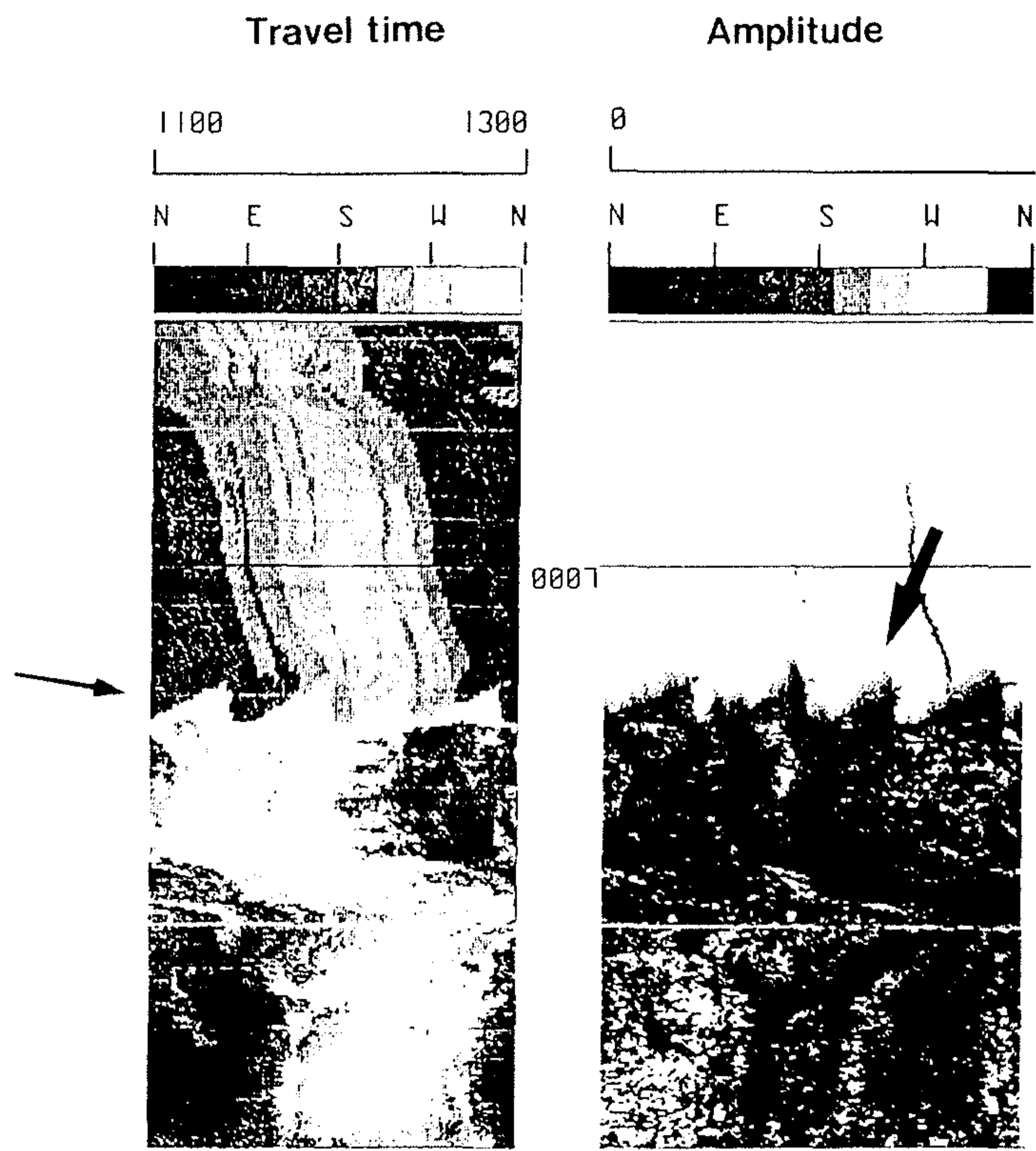


Fig. 59. Televiwer images of casing end.

주시 이미지는 요철 모양의 특이한 형태가 관찰되었으며 이는 그 이후 casing 하부가 쇠기 모양으로 절단되었기 때문에(그림 아랫부분) 비롯된 것임이 밝혀졌다.

텔레뷰어가 터널공사의 안정성 내지 경제성을 위해 기여할 수 있는 부분은 다음과 같다.

- 터널 입구 및 출구에서 암반 철취 구배 설정은 사면 안정성 측면에서 절리에 대한 제반 정보를 요구한다.
- 터널 굴착 과정에서 굴착 크기에 대한 절리발달 간격의 비율은 암반의 파괴와 변형에 중요한 요인이 된다.
- 터널 시공의 기초 지질조사로서 암반 분류법 즉, Q-system 및 RMR은 무엇보다 절리상태 파악에 근거를 두고 있다.
- 절리에 대한 정보는 막장 발파 설계의 효율성을 크게 높일 수 있다.
- 국내에서 빈번히 발생한 우발적인 터널 붕락사고들은 많은 경우 단층 및 절리에 의한 유수 문제로 유발되었다. 이러한 사고들은 선진 보링시 텔레뷰어 분석결과에 의해 사전 대처될 수 있다.

국내에서 최근 큰 선호도를 보여주고 암반 생수나 온천수의 흐름은 바로 암반 내의 절리 구조와 직접적으로 연관되기 때문에 여기서 텔레뷰어의 응용성은 재론할 여지가 없다. 한편, 텔레뷰어는 전방 땅굴탐지에서도 그의 응용성이 기대된다. 즉, 자연적(지질학적 변천 과정)인 절리 구조와 터널 굴착에 의해 2차적으로 생성된 절리 상태는 쉽게 식별될 수 있기 때문이다.

텔레뷰어 기술 개발은 일찌기 탄층의 주향 및 경사와 탄층의 발달 상태(탄층의 두께 및 주위 암석의 물성)를 규명하기 위해 크게 촉진된 바 있으며, 최근에는 일반 광물탐사에도 그의 응용이 확대되고 있다. 한편, 텔레뷰

어 측정 데이터는 채취된 시추 코어 정돈을 위해서도 활용되고 있는 실정이다.

제 6 절 전산처리 과정

본 절에서는 단지 주요 전산처리 과정을 국내외 다양한 응용 사례를 통하여 단계적으로 보여주고 있다. 각 기법에 대한 이론적인 배경은 본 과제 3차년도 보고서(1993)에서 찾을 수 있다.

① Magnetometer 측정 데이터에 의한 텔레뷰어 이미지(진폭 및 주시)의 교정

Fig. 60(a)는 측정과정에서 영상에 나타나는 텔레뷰어 이미지를 나타내고 있으며 Fig. 60(b)는 magnetometer 데이터에 의해 정북을 기준으로 교정된 진폭 및 주시 이미지를 보여주고 있다. 각 절리에 대한 sine curve는 이전과 비교하여 뚜렷한 위상차(예: 약 29m에서 인식되는 두개의 절리)를 보여주고 있다.

② 이미지 분해능 향상

텔레뷰어 이미지를 크게 저하시킬 수 있는 주요 원인은 다음과 같다.

- decentralization
- 시추공의 휨
- 시추공 벽의 거칠음

텔레뷰어 caliper 기능은 logger 측과 시추공 측사이의 이탈 상태와 또한 시추공 벽의 거칠음에 대한 정보를 제공하며 텔레뷰어 inclinometer 기능은 시추공의 휨과 그에 따른 decentralization에 대한 정도를 가능하게 한다. Decentralization 효과는 대체로 넓은 방사각 범위에서 일관성을 띤 분해능

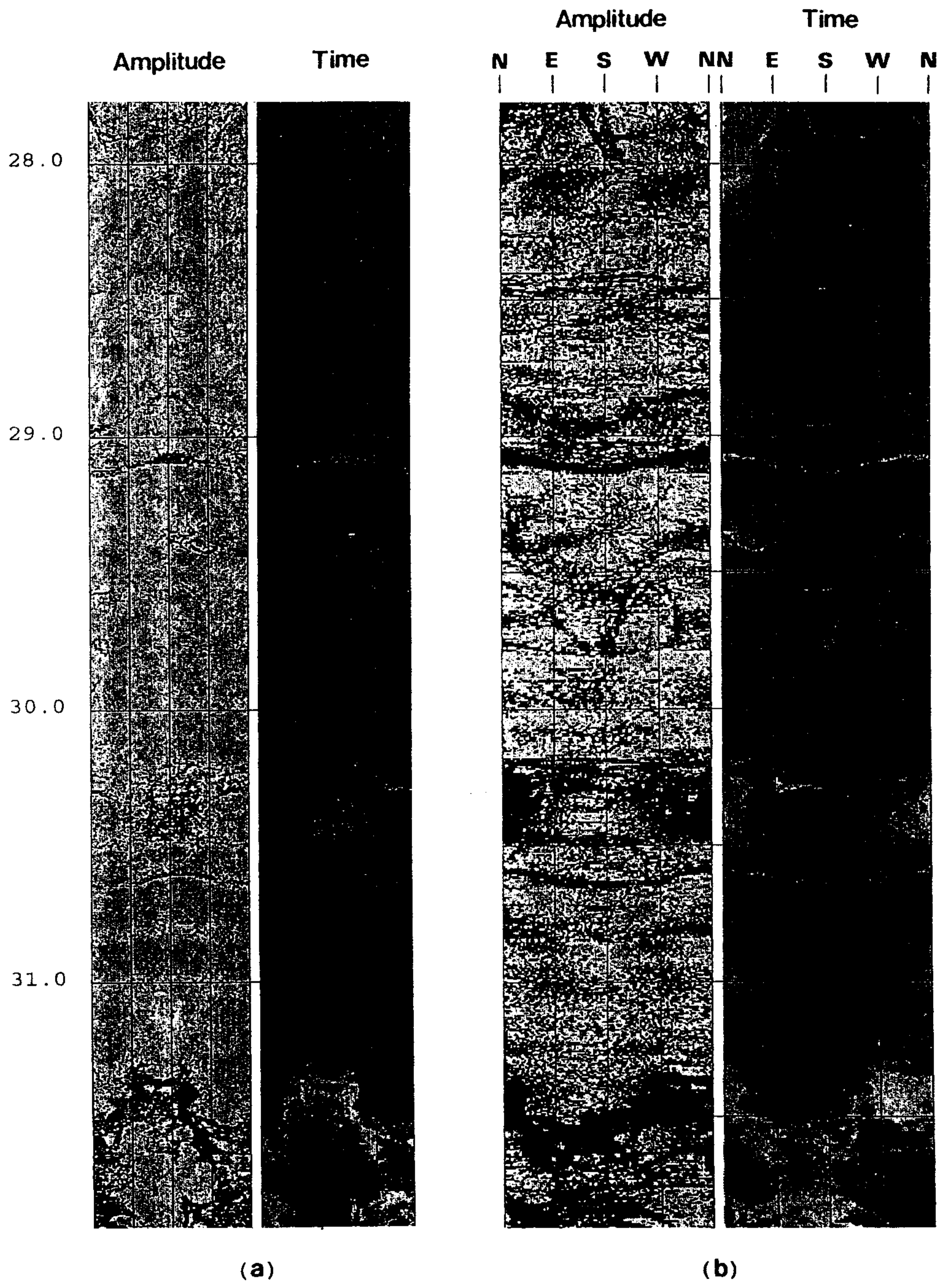


Fig. 60. Example of orientation of the Televier images (raw data). The raw images should be oriented to a fixed direction, magnetic north or the high side of the borehole.

저하로 나타난다. 하나의 보기로서 Fig. 61(a)는 독일 dam-site 콘크리트 구조물에서 얻게 된 진폭이미지를 보여주고 있으며 여기에는 decentralization 효과가 여실히 관찰되고 있다. 이에 대한 데이터 교정(김중열 외, 1993) 후의 진폭이미지(Fig. 61(b))에서는 자갈 및 모래의 분포 상태 뿐만 아니라 구조물 내의 절리 발달 상태(예: 화살표로 표시된 절리)도 선명하게 관찰되고 있다. 시추공 벽의 거칠음은 시추 과정에서 공벽이 부분적으로 파열되어 Fig. 62(a)에서 나타난 바 진폭이미지의 분해능을 국부적으로 크게 저하할 수 있다. 이러한 경우에는 caliper 및 inclinometer 데이터에 의해 진폭이미지의 질을 향상시킬 수 있다(Fig. 62(b) 참조).

③ 절리, 단층 및 암층경계면 및 그들의 도면화

상기 데이터 교정이 종료되면 진폭이미지로부터 절리, 단층 및 암층 경계면을 발체하여 각각에 대한 경사 방향 및 경사각을 도면화하게 된다. Fig. 63은 하나의 보기(시추공 H-2, 서울 강남지역)로서 심도 약 34m~38.3m에 대한 분석 결과를 도면화하고 있다. 이 구간에는 도합 7개의 sine curve가 인식되며 그 중 심도 약 35.3m, 37m는 단층이 형성된 것으로 판단된다. 각 sine curve의 위상 및 진폭은 식 (3)~(5)에 의해 절리 및 단층면의 경사 방향 및 경사각을 대변하여 그 결과는 소위 arrow plot(화살머리: 경사각, 화살방향: 경사방향)로 나타내고 있다.

④ 암석강도 산출

텔레뷰어 응용에서 얻게되는 주요 성과 중의 하나는 무엇보다 진폭 이미지 및 발체된 지질구조 자료들로부터 암층의 강도를 추출할 수 있다는 데 있다. 비록 그의 수치가 절대치는 아니라 하더라도 암석 강도의 상대적인 비교는 훌륭하게 관찰할 수 있는 것이다. 하나의 보기로써 Fig. 64는 계

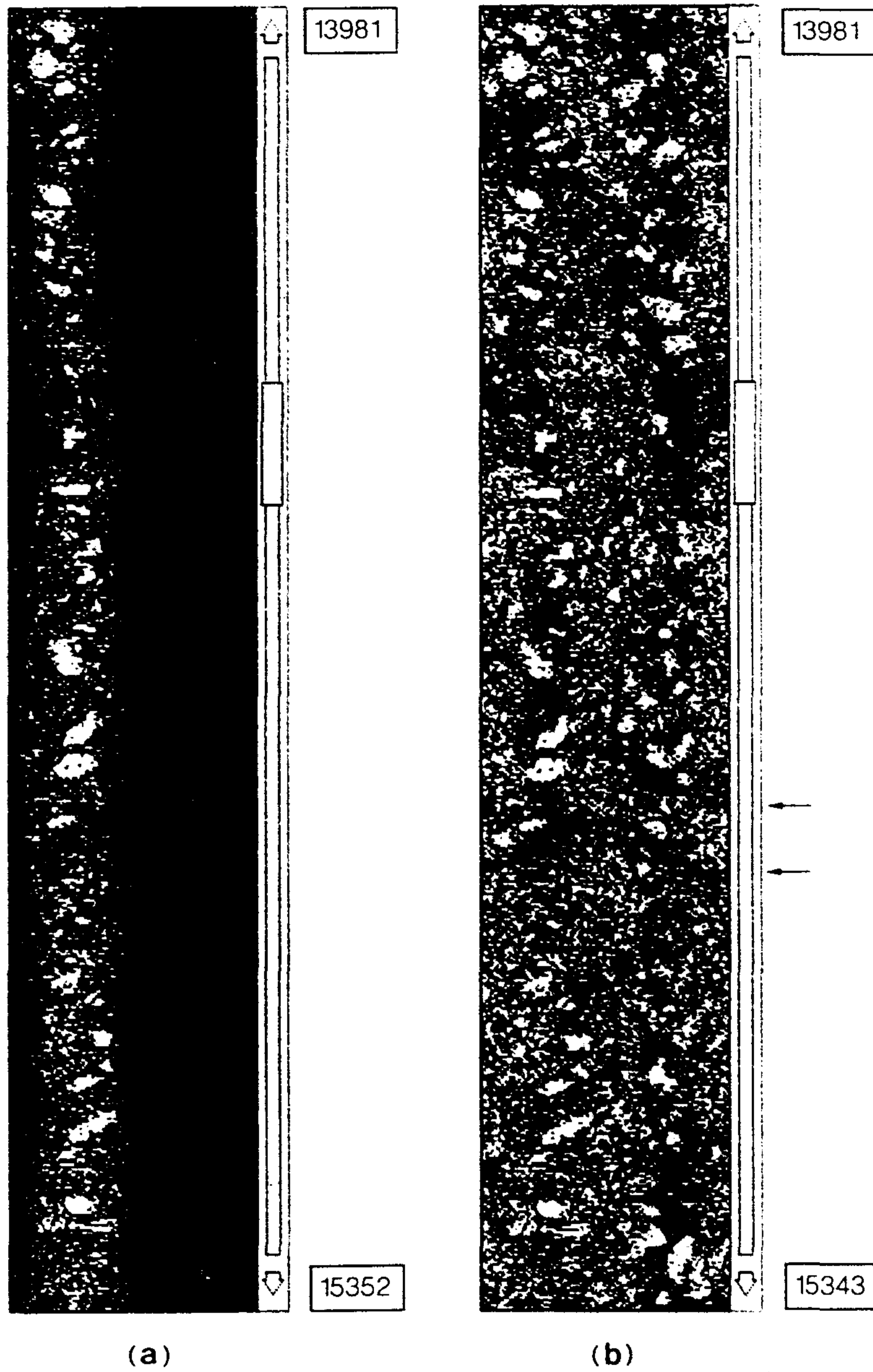


Fig. 61. Example of correction of Televue image.

(a) Due to the high decentralization the amplitude (image) changes considerably one scan around the borehole.

(b) Due to the removal of the effects of decentralization the texture of the concrete, fractures and some nearly vertical fractures are now clearly visible.

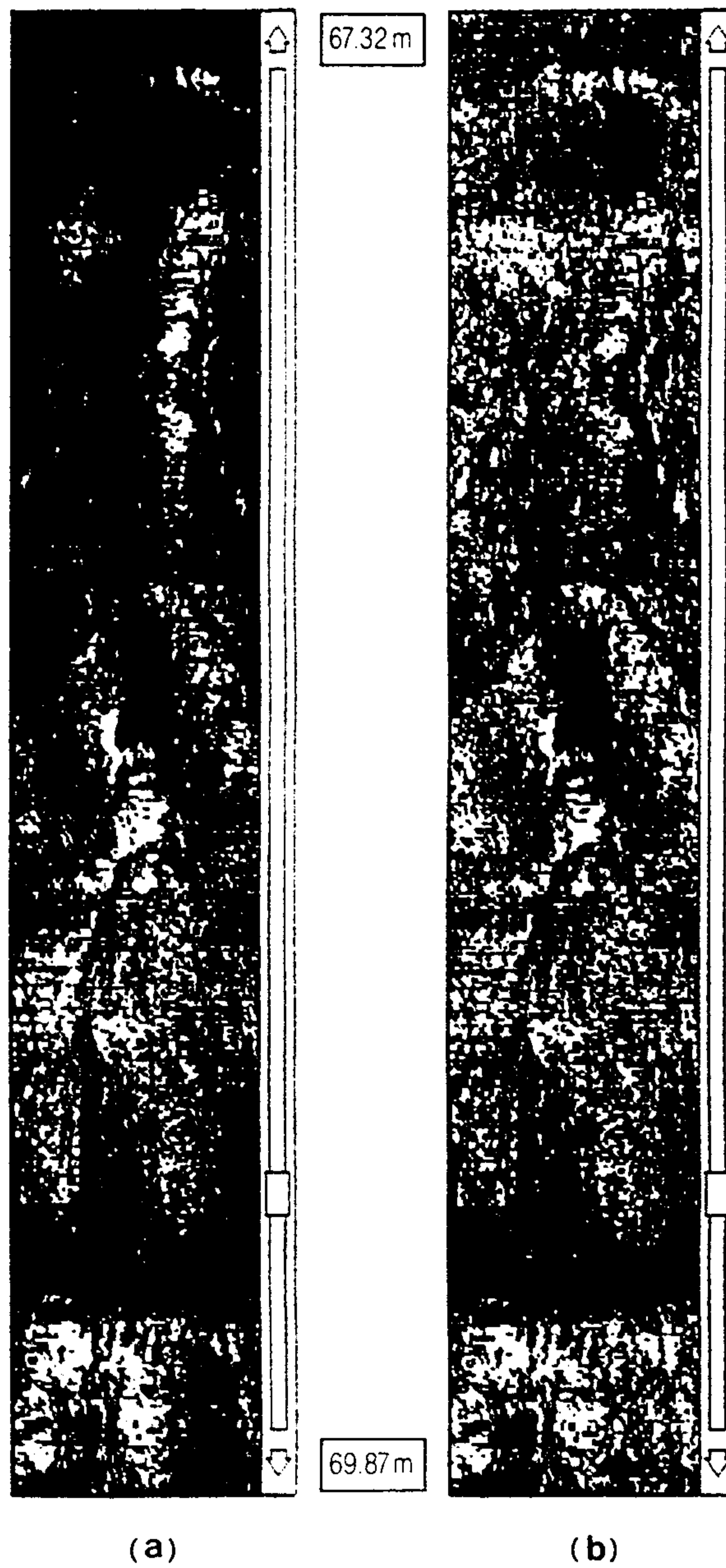


Fig. 62. Example of correction of Televiewer image.
(a) The image quality was much degraded by irregular borehole conditions.
(b) The image quality was much improved by application of a dynamic normalization process.

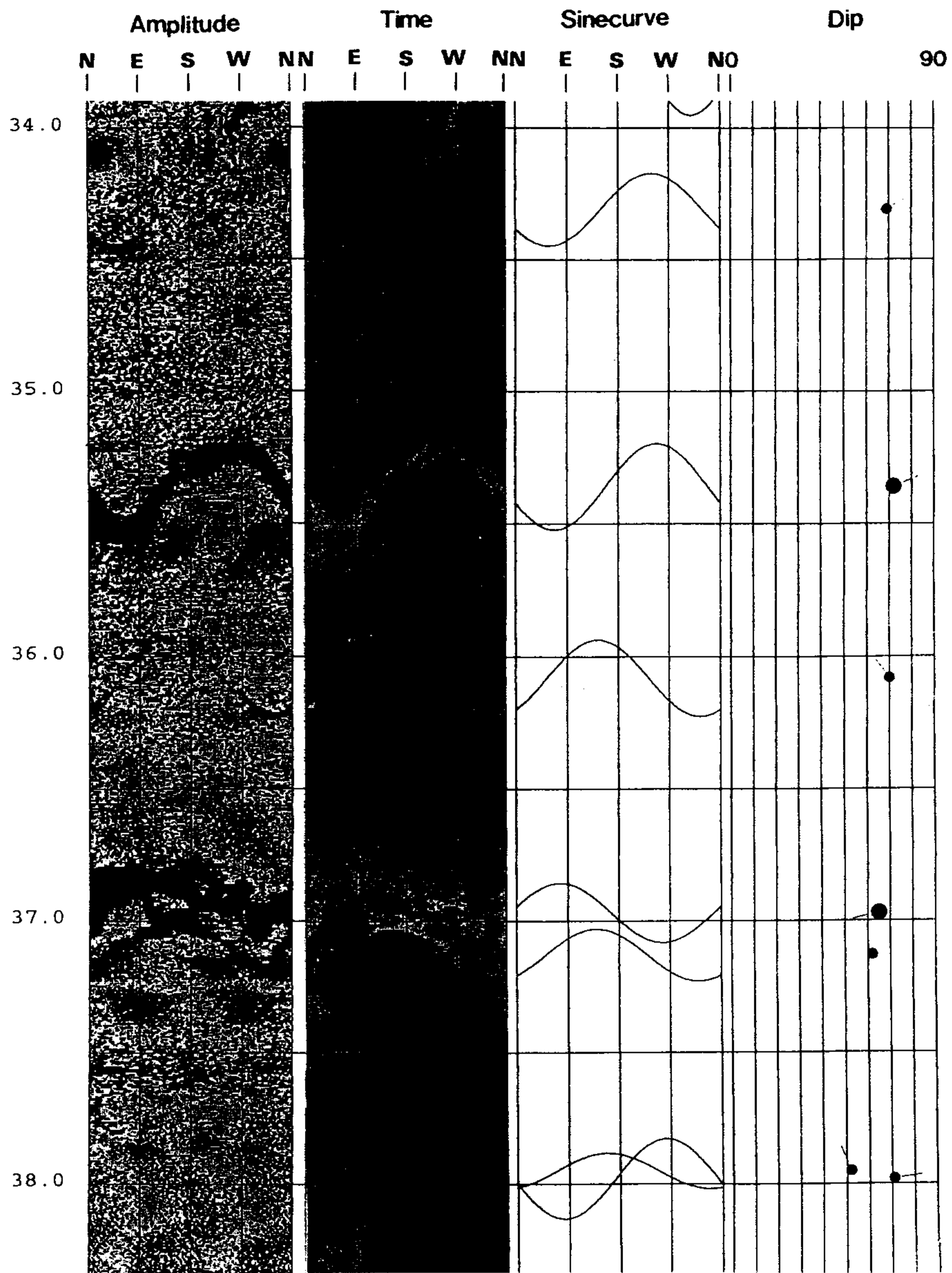


Fig. 63. Extraction of tectonic elements from the Televue images. As soon as three points are tracked along one structural feature, the corresponding sinusoid is calculated and displayed directly on the image. By this way the proper tracking is checked and can be corrected before the final decision is made. A classification of the structural feature can be chosen from a user defined menu and displayed e.g. as an arrow plot.

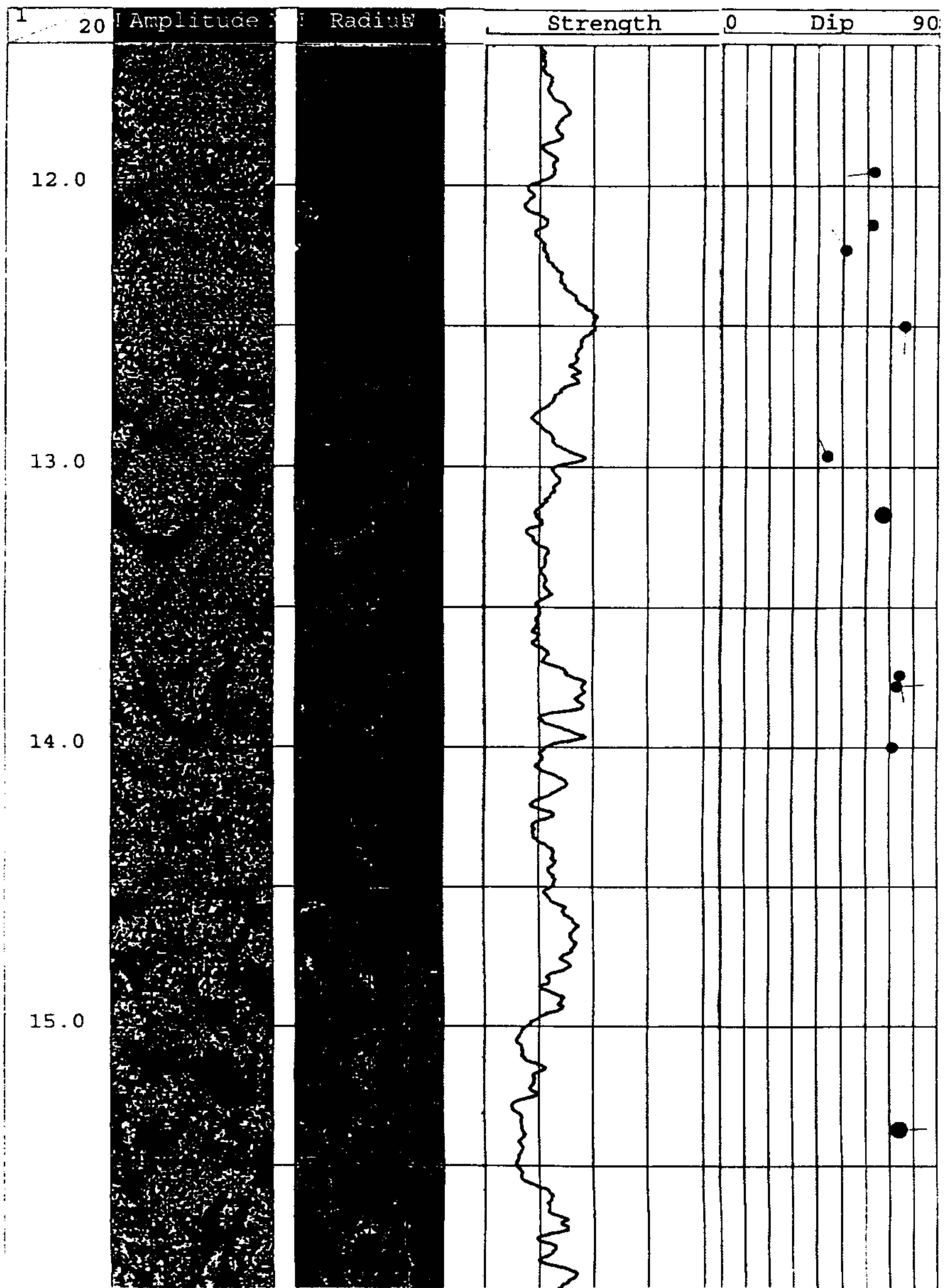


Fig. 64. Deviation of the strength of the rock is very important in all geotechnical logging. A fuzzy classification was applied to derive the amplitude image one amplitude trace. The result is contrasted with the images. The rock strength can be abruptly varied especially due to the faults.

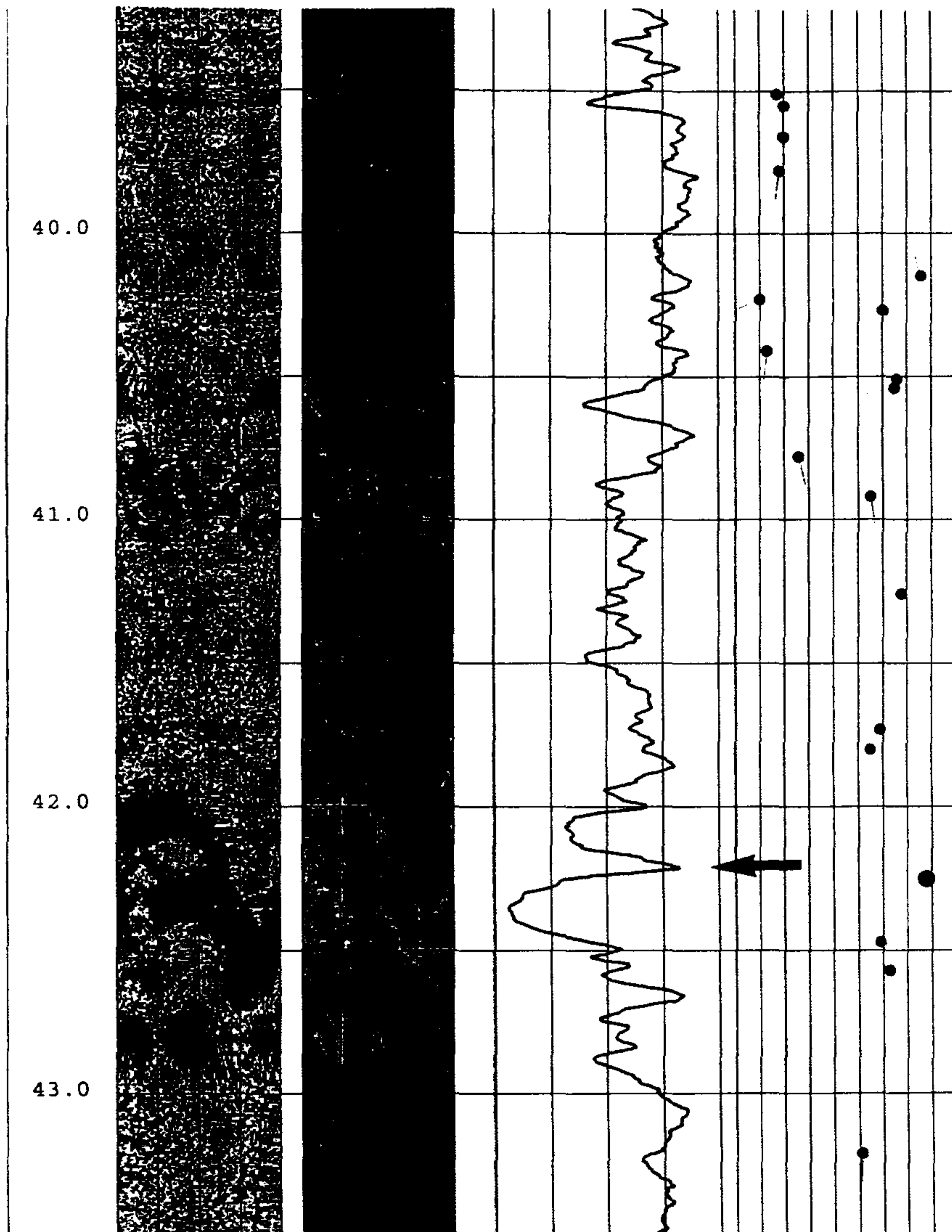


Fig. 64. (continued).

산된 암석강도(서울 강남지역 시추공 H-2)를 텔레뷰어 이미지와 대조하고 있다. 심도 약 12.2m까지는 낮은 강도를 보여주면서 약 50m 구간에는 다소 강도가 높아지고 있다. 그러나 그 이하 13m~13.7m 구간, 특히 15m~15.6m 구간에는 시추공 벽이 크게 파열되고 있음이 주시이미지에서 현저하게 관찰되며 그에 따라 암석강도도 상대적으로 낮은 수치를 보여주고 있다. 반면, 심도 약 40m 이하는 전반적으로 높은 강도를 나타내고 있으나 단층이 발달한 주위(화살표 표시)에서는 강도가 크게 떨어지고 있음이 관찰된다.

⑤ Rose diagram 및 평사투영법

현장 지질조사에서 얻게되는 방대한 양의 tectonic elements(예: 단층면, 절리면, 지층경계면의 주향 및 경사, 습곡축)는 흔히 rose diagram이나 평사투영법에 의해 표현되고 그로부터 탐사지역에 대한 전반적인 지질구조를 판단하고 있다. 본 software package는 텔레뷰어 이미지로부터 얻게되는 모든 정보를 rose diagram이나 평사투영법에 따라 표현하는 기능을 갖고 있다. Fig. 65는 독일 남부 시추공 심도 1600m~1920m 사이에서 관찰된 모든 절리(단층 및 암층경계면 포함)에 대한 경사 방향을 빈도에 따라 적절히 교정하여 나타낸 rose diagram을 보여주고 있다. 대부분의 절리들은 크게 두개의 방향을 나타내고 있으며 더구나 그들은 상호 반대방향을 띠고 있음이 관찰된다. Fig. 66에는 각 절리에 대한 경사각을 평사투영법에 의해 극점으로 나타내고 있다(여기서 원점은 경사각 0° 이며 원둘레는 경사각이 90° 가 된다). 극점들의 분포는 대체로 두개의 좁은 영역에서 밀집된 특징적인 형태를 보여주고 있다. 참고로, 투영된 결과를 표현하는 방법에는 equal area projection과 equal angle projection이 있으나 이의 선정은 대체로 사용자의 취향에 달려 있다. Fig. 66에는 두가지 표현법을 명시하고 있다.

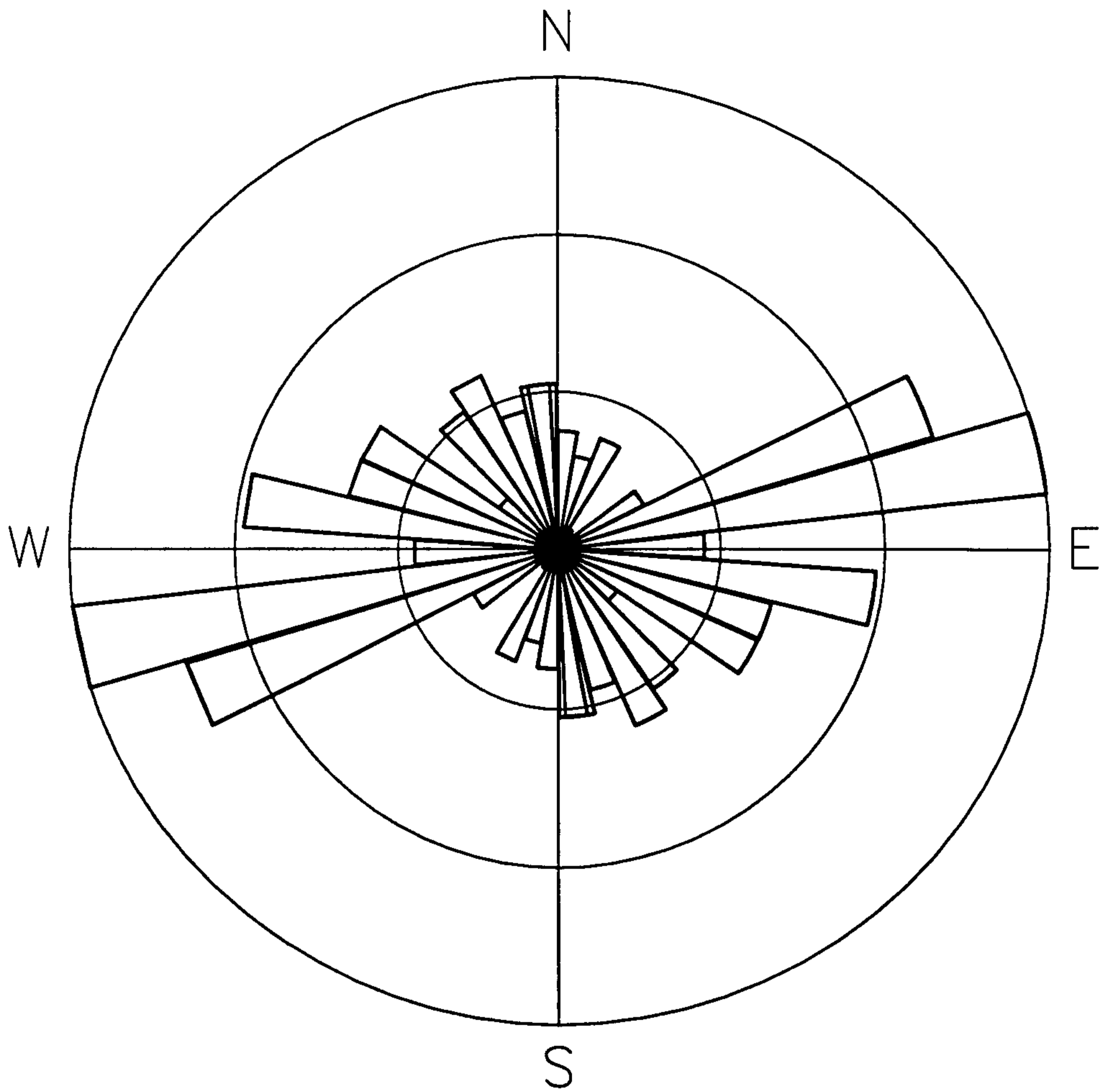


Fig. 65. Presentation of dip direction of all extracted tectonic elements in a rose diagram.

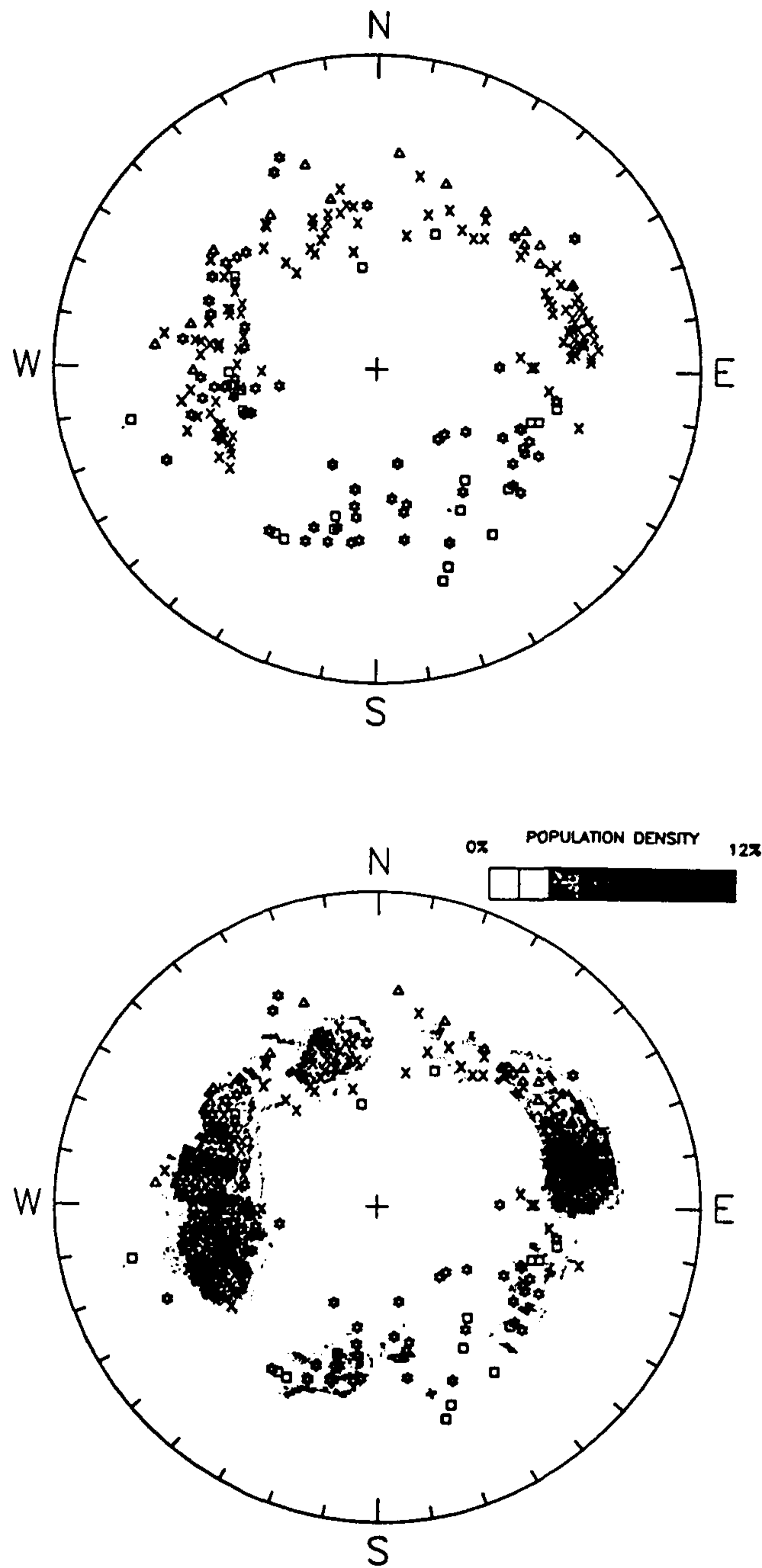


Fig. 66. Presentation of dip of all extracted tectonic elements in a polar (stereographic) projection.
 Up : area-equal projection, down : area-equal projection.

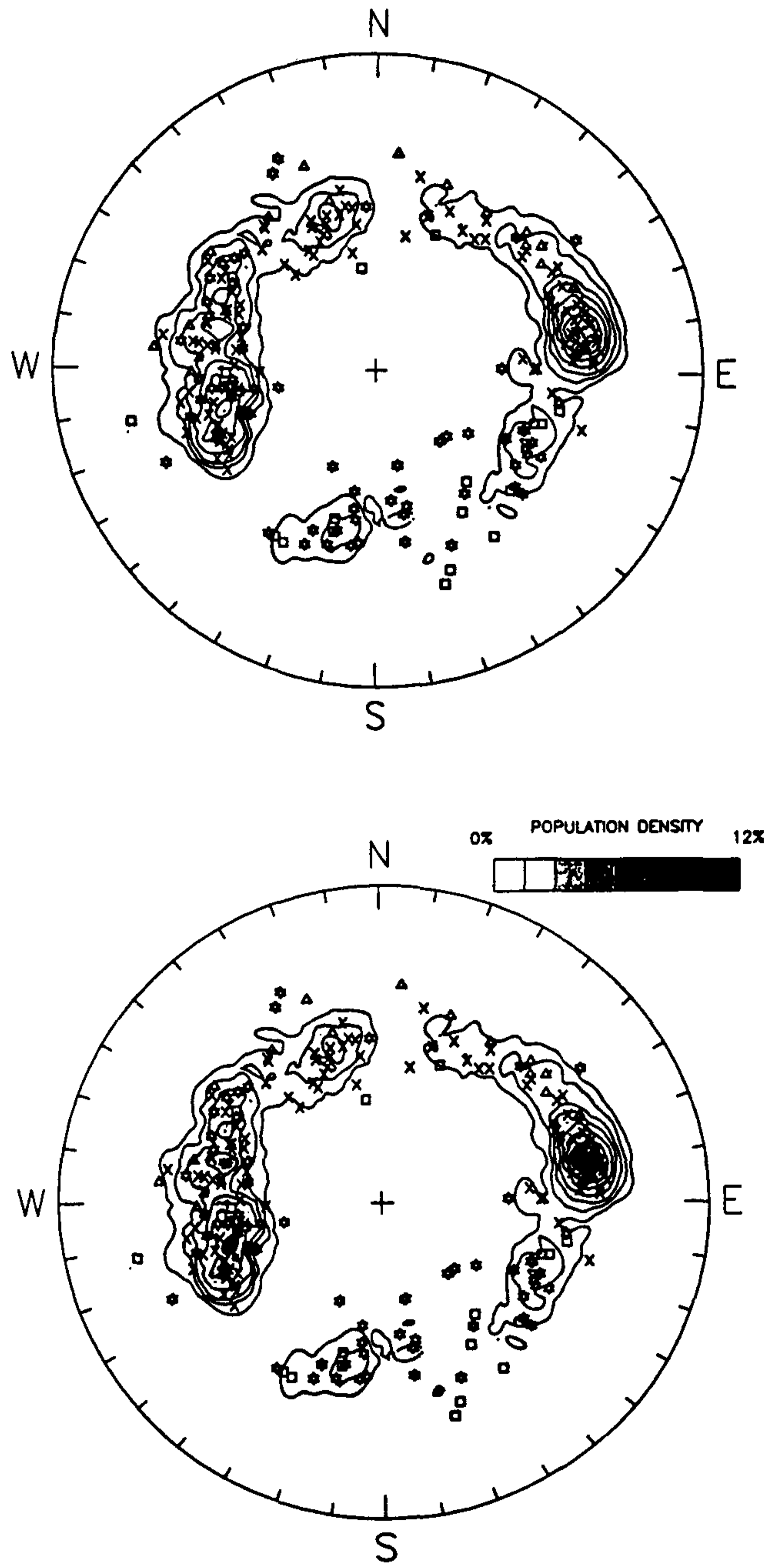


Fig. 66. (continued).
Up : area-equal, down : area-equal.

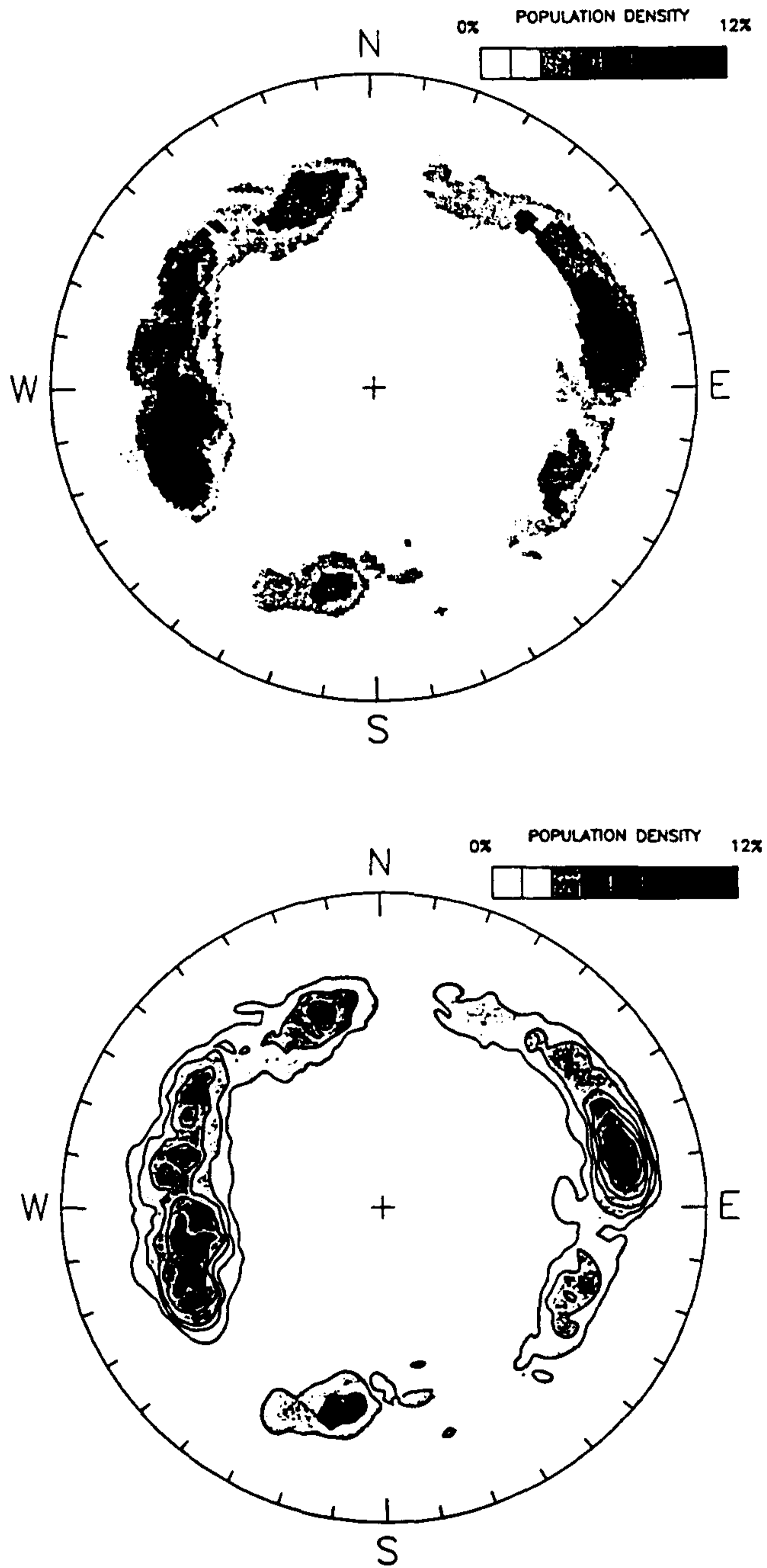


Fig. 66. (continued).
 Up : angle-equal, down : angle-equal.

상기 기본 전산처리 이외에도 텔레뷰어 데이터는 주어진 탐사 목적을 위해서 혹은 탐사 결과에 대한 이해를 돕기 위한 여러가지 도면화 기법이 별도로 개발되어 활용되고 있다. 다음은 이에 대한 주요 전산처리 과정을 요약하고 있다.

- 암반의 응력 상태를 조사하기 위한 고분해능 공경 단면(caliper cross section)의 도면화 (Fig. 28~Fig. 33 참조)
- 시추공 편차 내지 시추 진행도를 도면화(Fig. 35~37 참조)
- Magnetometer 및 inclinometer 성분 기록 도면화
- 절리 발달 상태의 입체화 (Fig. 47 참조)
- 지질구조 자료(단층, 절리 및 암층경계면)를 바라보는 방향에 따라 도면화 (Fig. 75, 76 참조)

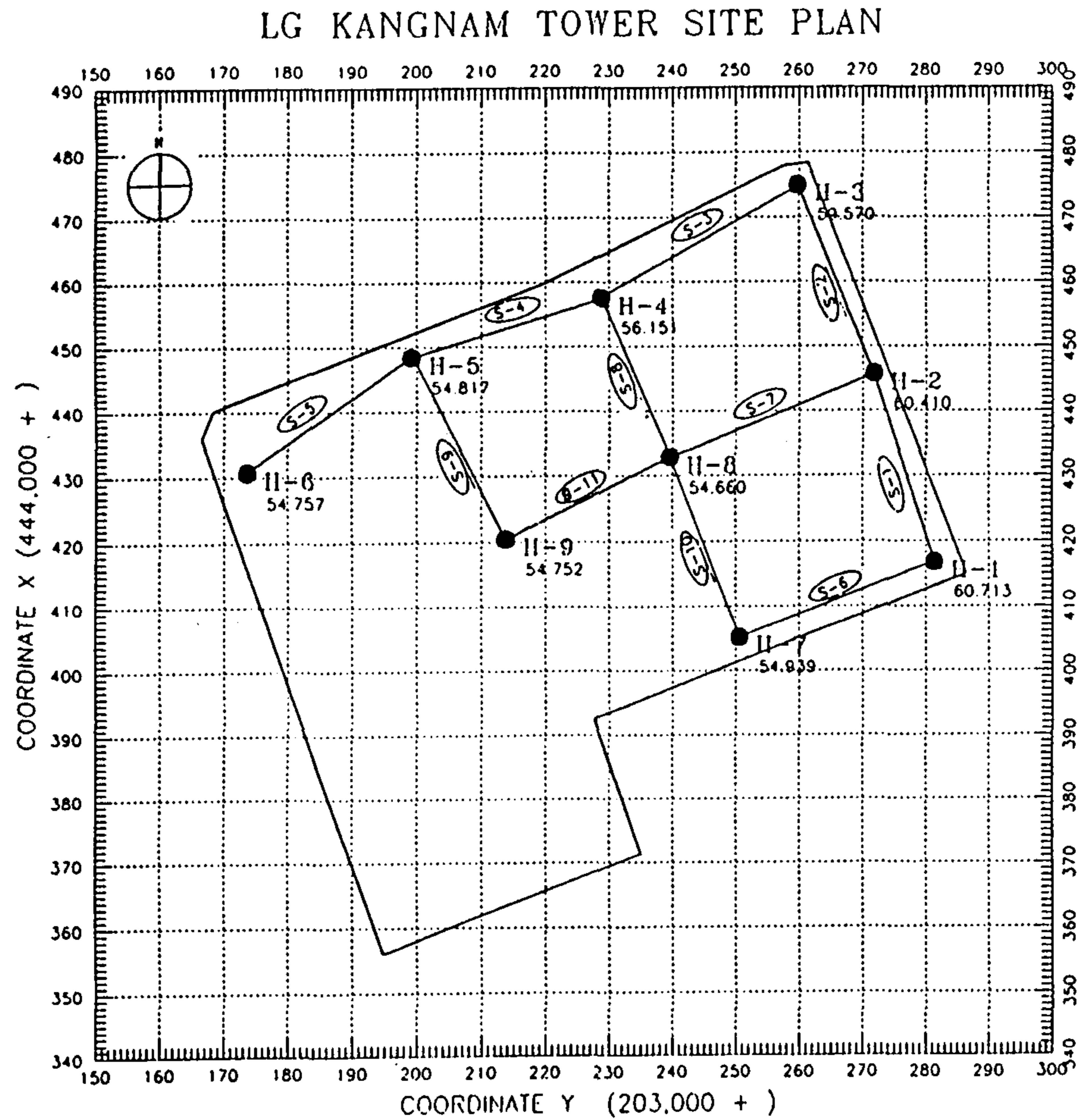
제 7 절 텔레뷰어 현장응용 성공사례

본 절에서는 텔레뷰어가 여러가지 형태의 시추공을 대상으로 응용되어 국내 최초로 대단히 바람직한 결실을 거두게된 몇가지 성공 사례를 소개하고 있다. 흥미 대상이 된 시추공 형태는 ① crawler drill에 의해 천공된 직경 약 100mm 시추공, ② 고성능 착암기 T-4에 의한 직경 약 200mm(8 inch) 시추공, ③ rotary drill에 의해 천공된 LX 규격(직경 약 76mm) 시추공이다. 물론, rotary drill에 의한 시추공의 내벽 상태는 다른 것(T-4 혹은 crawler drill)과 비교하여 상대적으로 양호(반반함)하기 때문에 그로부터 양질의 데이터를 얻게될 것으로 기대된다.

1. 대형빌딩 지반조사

Fig. 67은 텔레뷰어 응용을 위한 탐사 시추공(H1~H9)의 위치, 시추공 심도 및 각 시추공간 거리를 나타내고 있다. 여기에는 대형빌딩 건축을 위한 심부 터파기 공사가 계획되어 있다. 따라서 본 탐사의 목적은 이 지역 하부의 지반 상태를 사전에 정확히 파악함으로써 계획된 터파기 공사 범위에 대한 타당한 판단(예: 공법 선정)은 물론 신축할 대형 빌딩의 안정성 제고에 기여하고자 함이었다. 본 보고서에는 단지 시추공 H-9 및 H-5에 대한 텔레뷰어 탐사 결과만 요약하고 있다.

Fig. 68은 시추공 H-9의 심도 구간 약 17m~31.3m에 대한, Fig. 69는 시추공 H-5의 심도 구간 약 15m~32.2m에 대한 텔레뷰어 이미지를 나타내고 있다. 각 시추공은 crawler drill에 의해 천공(직경 약 100mm)되었기 때



● H- TELE VIEWER

○ S- GEOTOMOGRAPHY

SECTION DATA

SECTION NO.	HORIZONTAL LENGTH (m)
S-1	30.46
S-2	31.54
S-3	35.56
S-4	30.98
S-5	31.10
S-6	32.95
S-7	34.68
S-8	27.02
S-9	31.48
S-10	29.74
S-11	28.60

HOLE DATA

HOLE NO.	COORDINATES		ELEV. (M)
	X	Y	
H-1	444,416.847	203,281.394	60.713
H-2	444,445.762	203,271.820	60.410
H-3	444,474.950	203,259.856	59.570
H-4	444,457.585	203,228.826	56.151
H-5	444,448.470	203,199.234	54.817
H-6	444,430.669	203,173.692	54.757
H-7	444,405.165	203,250.589	54.939
H-8	444,432.822	203,239.647	54.660
H-9	444,420.520	203,213.831	54.752

Fig. 67. Borehole locations for the Televier measurement in the survey area Kangnam, Seoul.

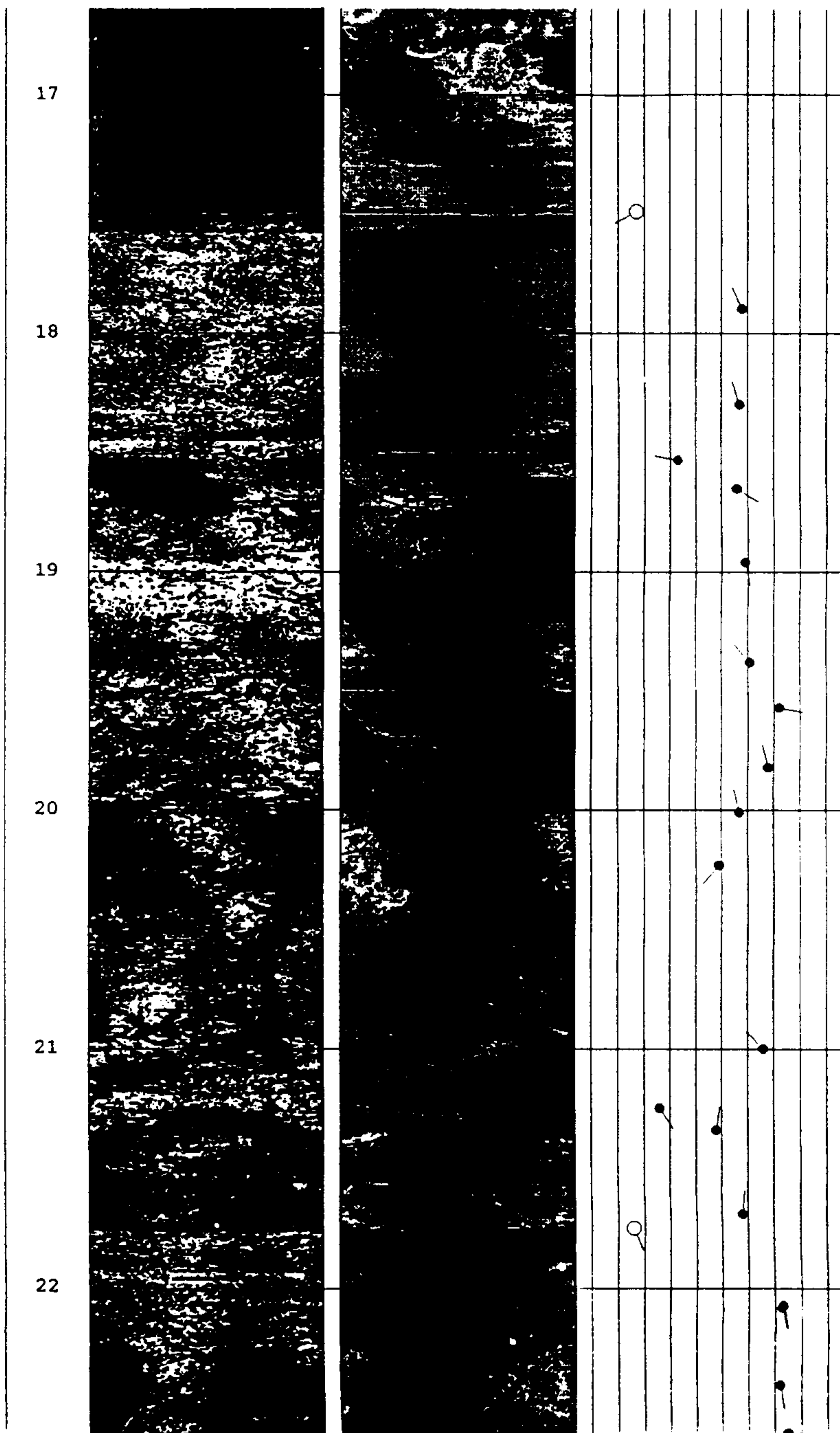


Fig. 68. Televiwer image log measured in the survey area (borehole H-9) Kangnam, Seoul. Left : amplitude image, middle : travelttime image, right : arrow plot for the tectonic elements.

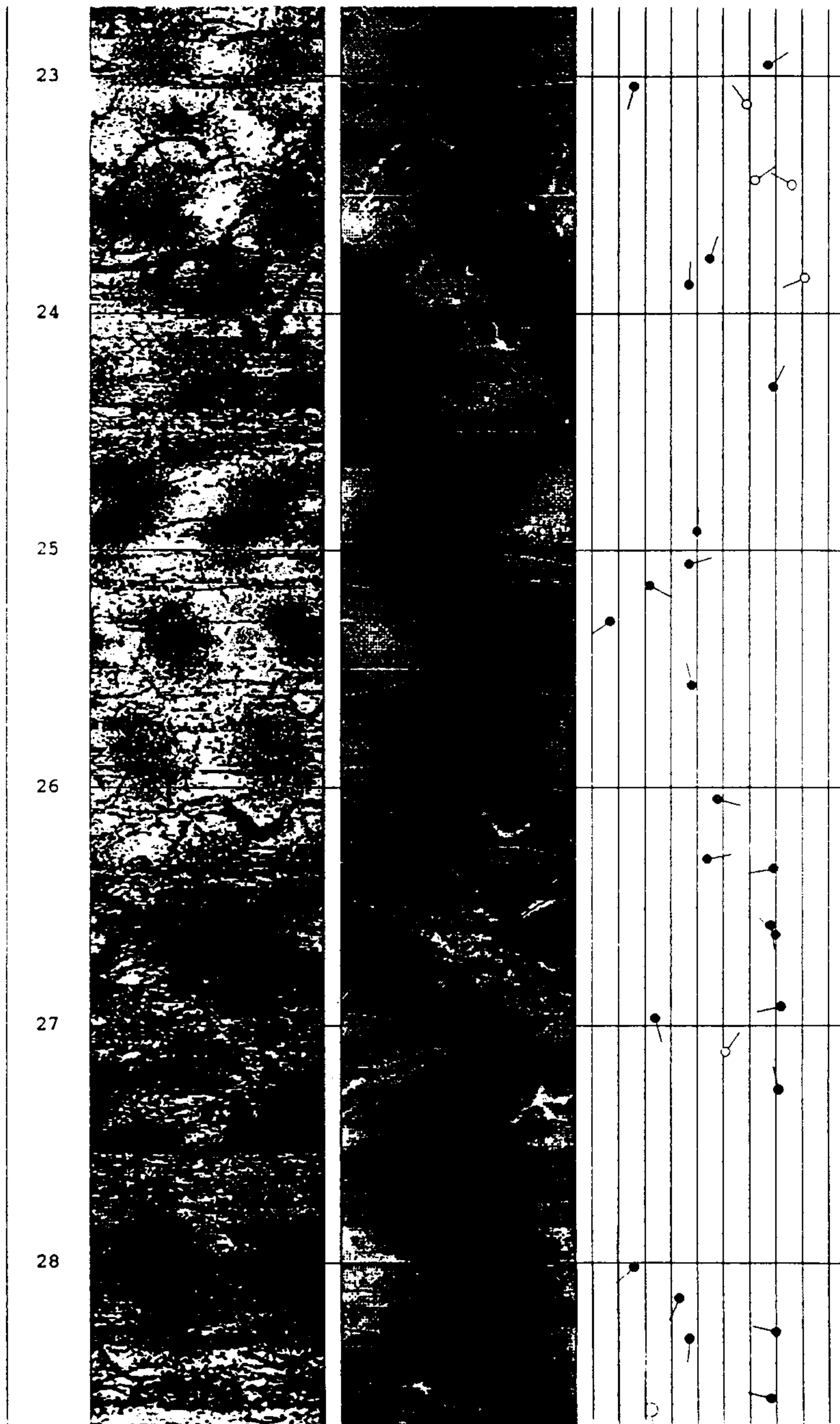


Fig. 68. (continued).

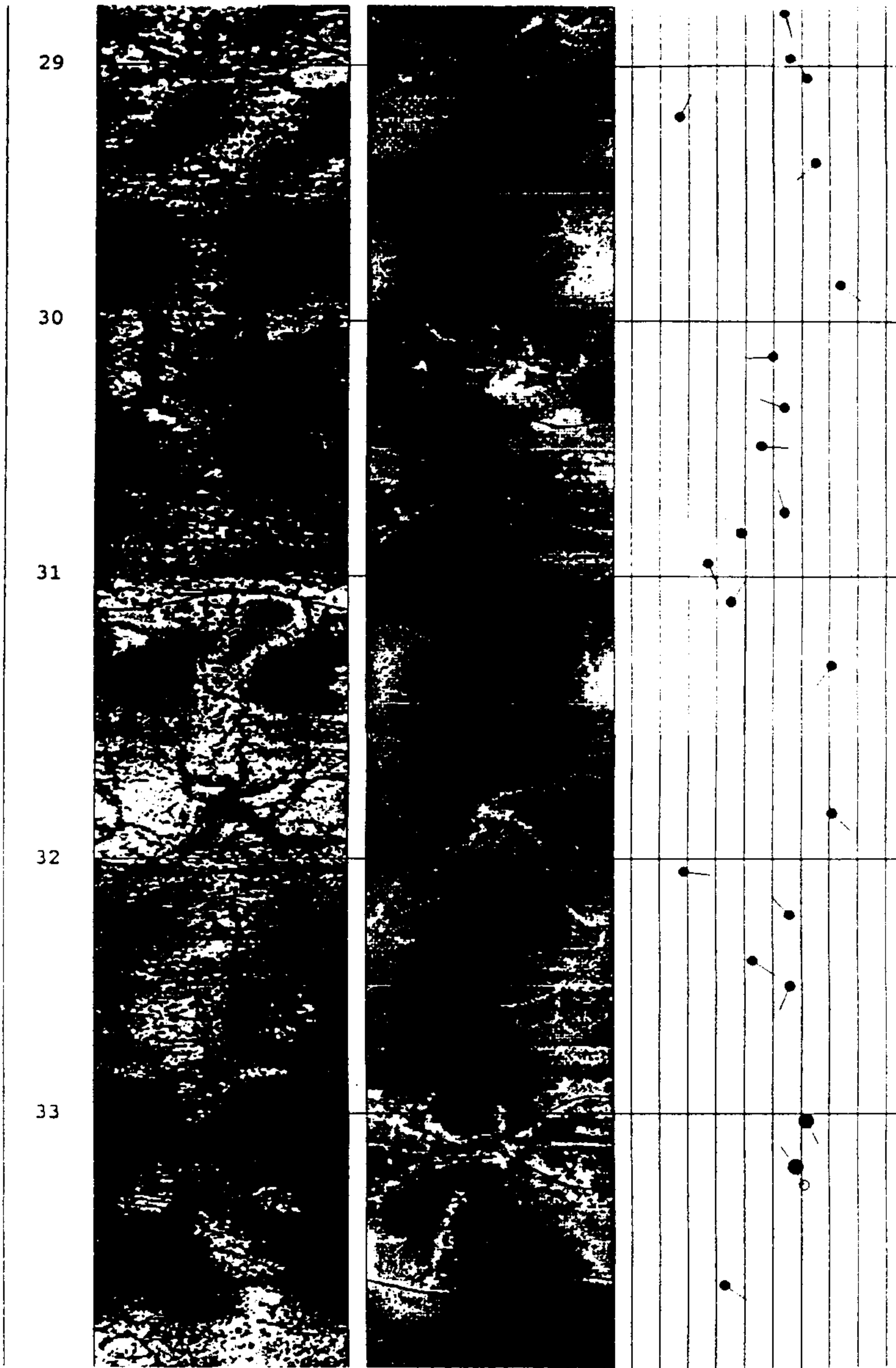


Fig. 68. (continued).

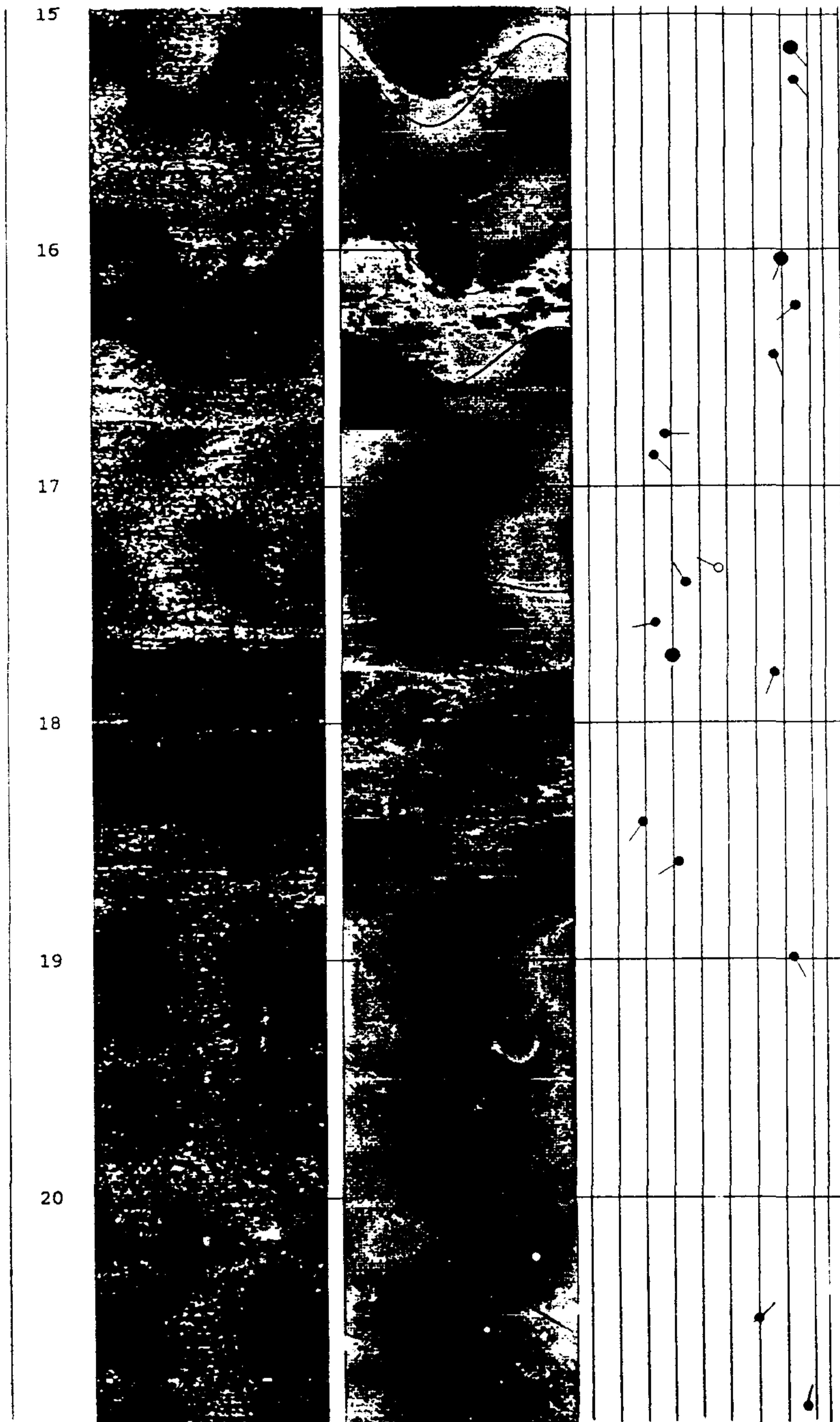


Fig. 69. Televiwer image log measured in the survey area (borehole H-5) Kangnam, Seoul. Left : amplitude image, middle : traveltime image, right : arrow plot for the tectonic elements.

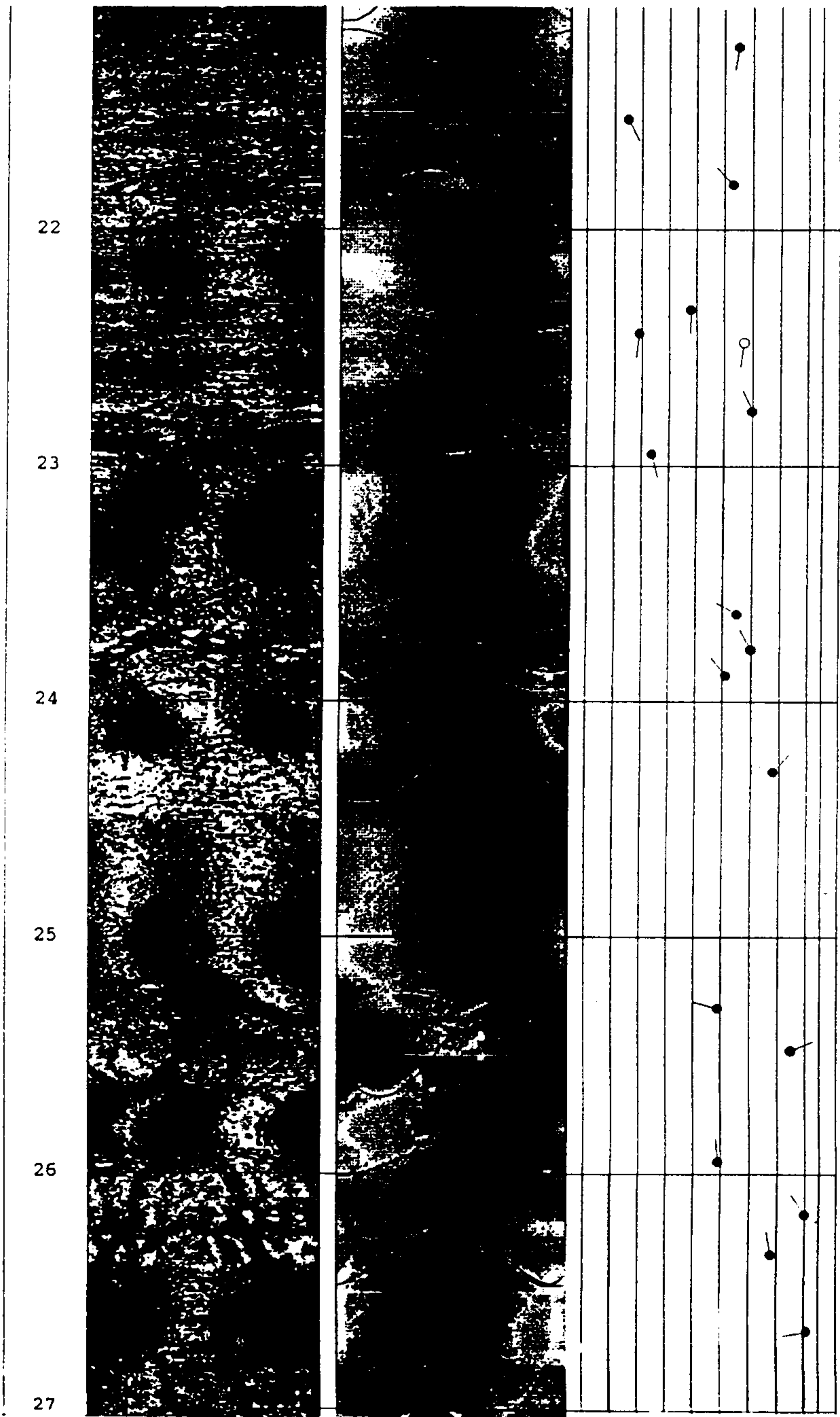


Fig. 69. (continued).

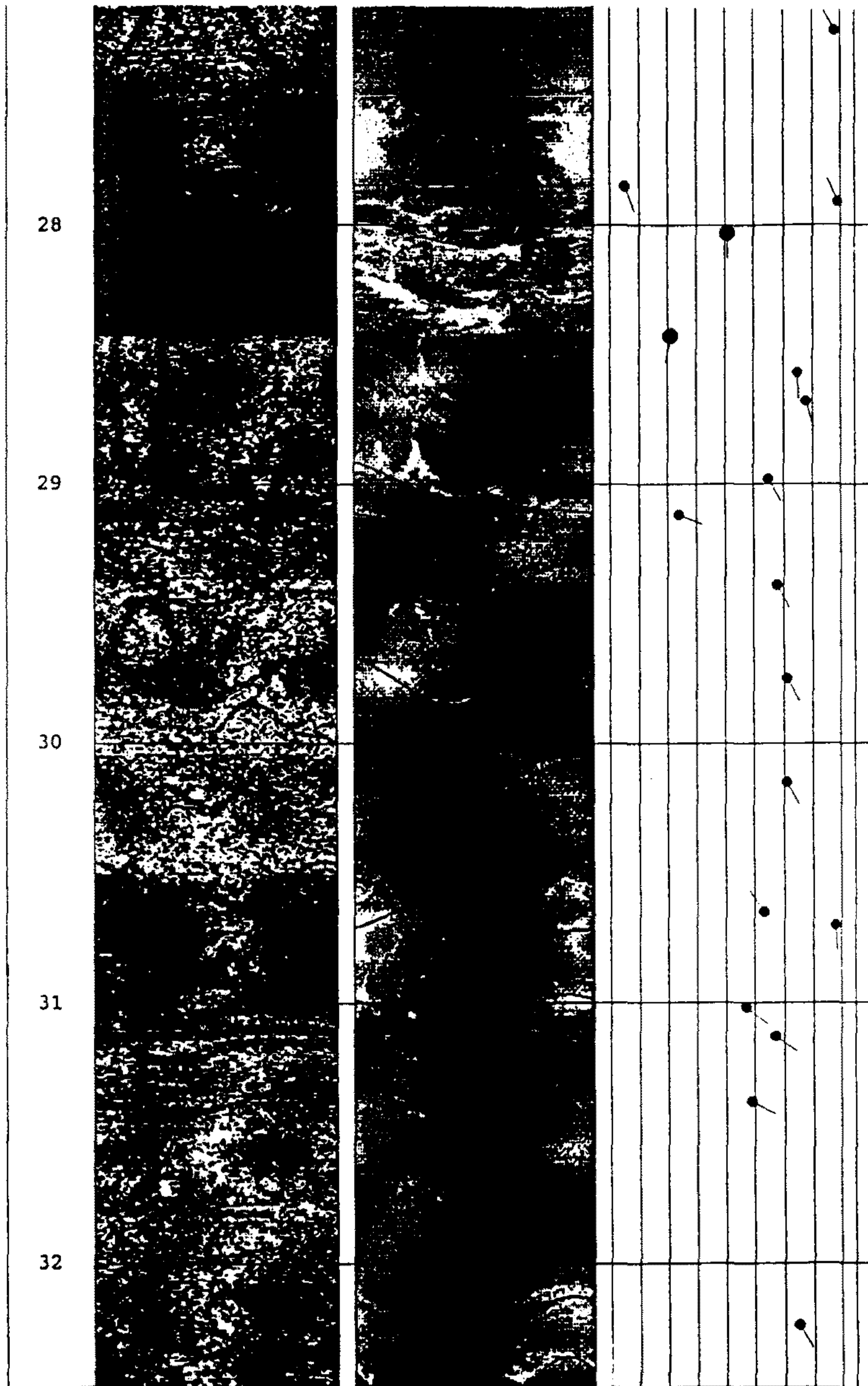


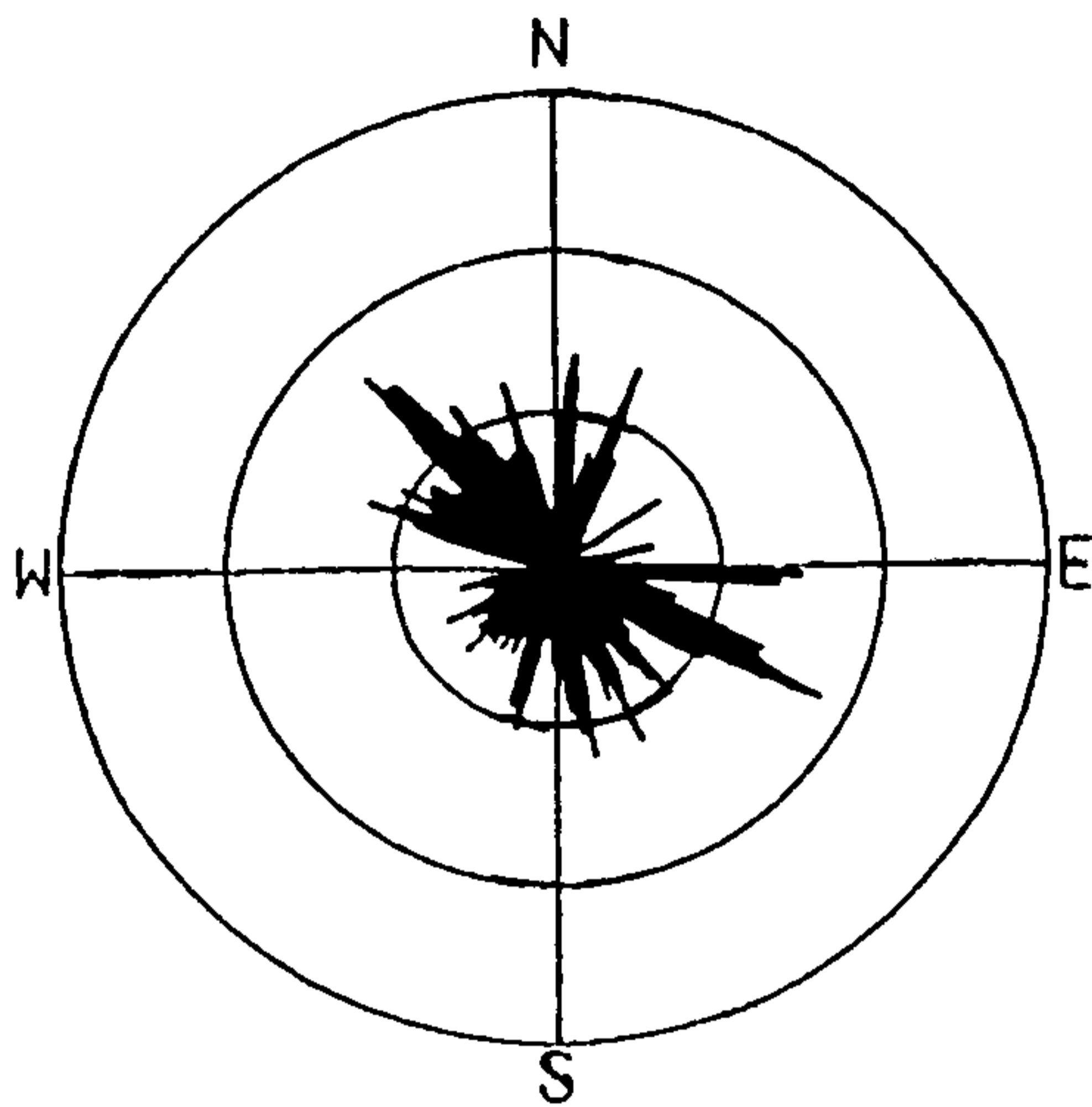
Fig. 69. (continued).

문에 시추공 내벽은 대체로 거칠은 상태였다. 따라서, 그림에 나타낸 이미지는 이미 테이타 교정(제 6 절 참조)이 끝난 상태이다. 전체적으로 내벽의 거칠음이 관찰되고 있으나 단층, 절리 및 암층 경계는 뚜렷이 인식되고 있다. 참고로, 상기 각 시추공의 전 구간(약 50m)에 대한 기본 전산처리 결과는 다음과 같이 요약된다.

자료명 시추공	Tectonic elements			시추공		응력장	Logger의 회전도
	절리	단층	암층 경계	연직상태	내벽상태		
H-9	154	8	4	양호(다소휨)	거칠다	균형	크다 (전체 구간)
H-5	158	10	1	양호(다소휨)	거칠다	균형	작다 (전체 구간)

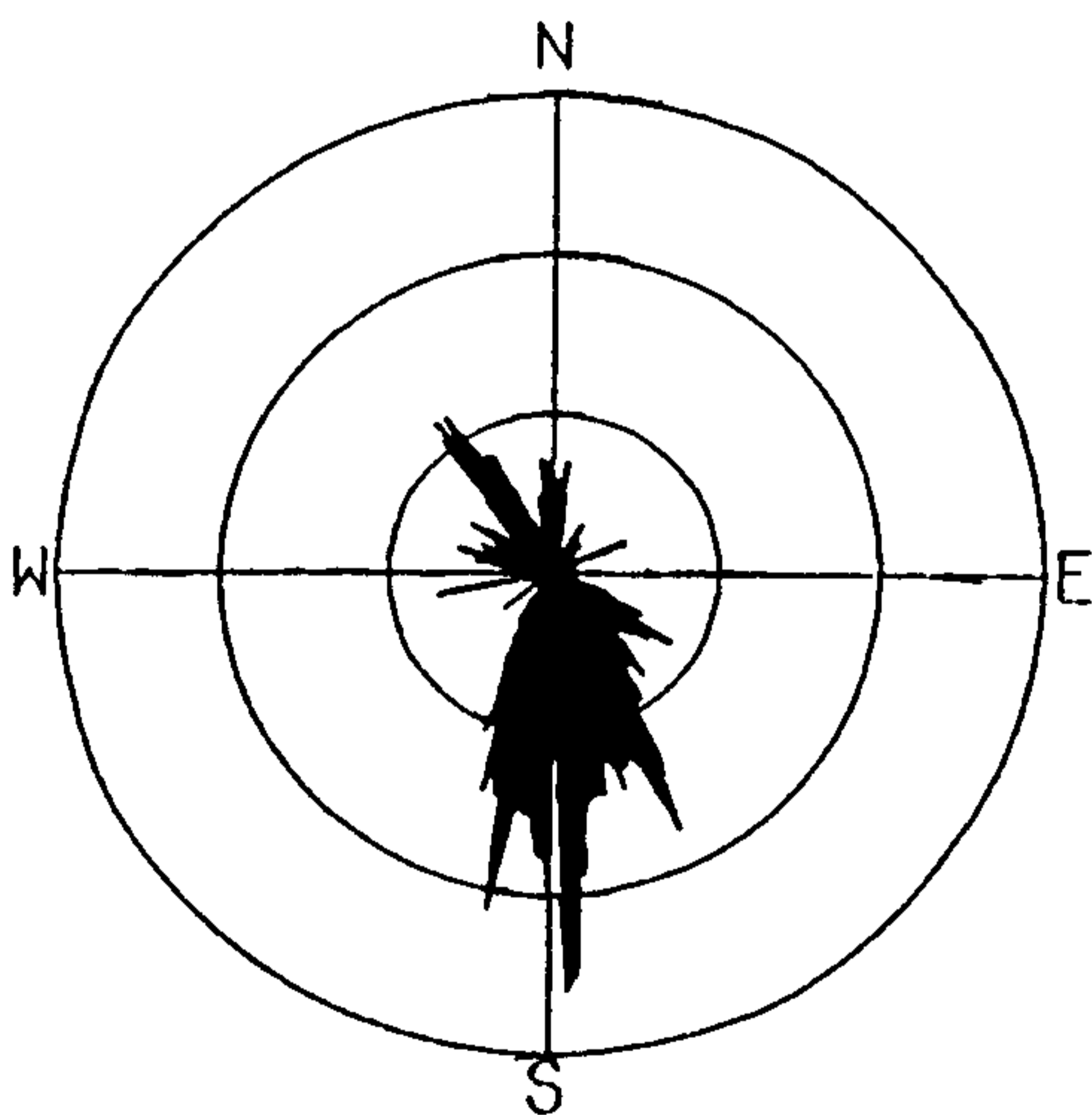
본 탐사 지역의 천부 지질은 대체로 선캠브리안 변성암 기반암에 해당되기 때문에 상당한 절리의 발달이 관찰되었다. Fig. 70 및 71은 상기 발체된 모든 지질구조 자료를 통계학적으로 처리한 후 그들의 경사방향은 rose diagram으로, 경사각은 평사투영법에 의해 표현하고 있다. 나아가서 Fig. 72에는 심도 약 30m이하 약 10m 간격으로 구분하여 절리의 방향을 나타내고 있다. Rose diagram 관찰에서는 시추공 H-9에서 H-5로 접근함에 따라 절리들이 대체로 하나의 방향으로 모아지고 있으며 또한 그들의 경사각 분포도 특히, 심도가 깊어질 경우 한곳으로 집중되는 양상을 보여주고 있다. Fig. 73은 arrow plot에 의해 각 시추공에서 인식된 모든 단층, 절리 및 암층경계면의 경사 방향 및 경사각을 보여주고 있으며 이에 사용된 암석강도 변화는 Fig. 74에 나타내고 있다. 대체로 암석 강도는 단층이 발달한 구간에서 크게 약화되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 75 및 76은 시추공 단면에 연직인 방향으로 바로 보았을 때 관찰되는 단층 및 암층경계면의 경사 방향

ROSE DIAGRAM



H-9

Depth[m] :
6.7-55.2

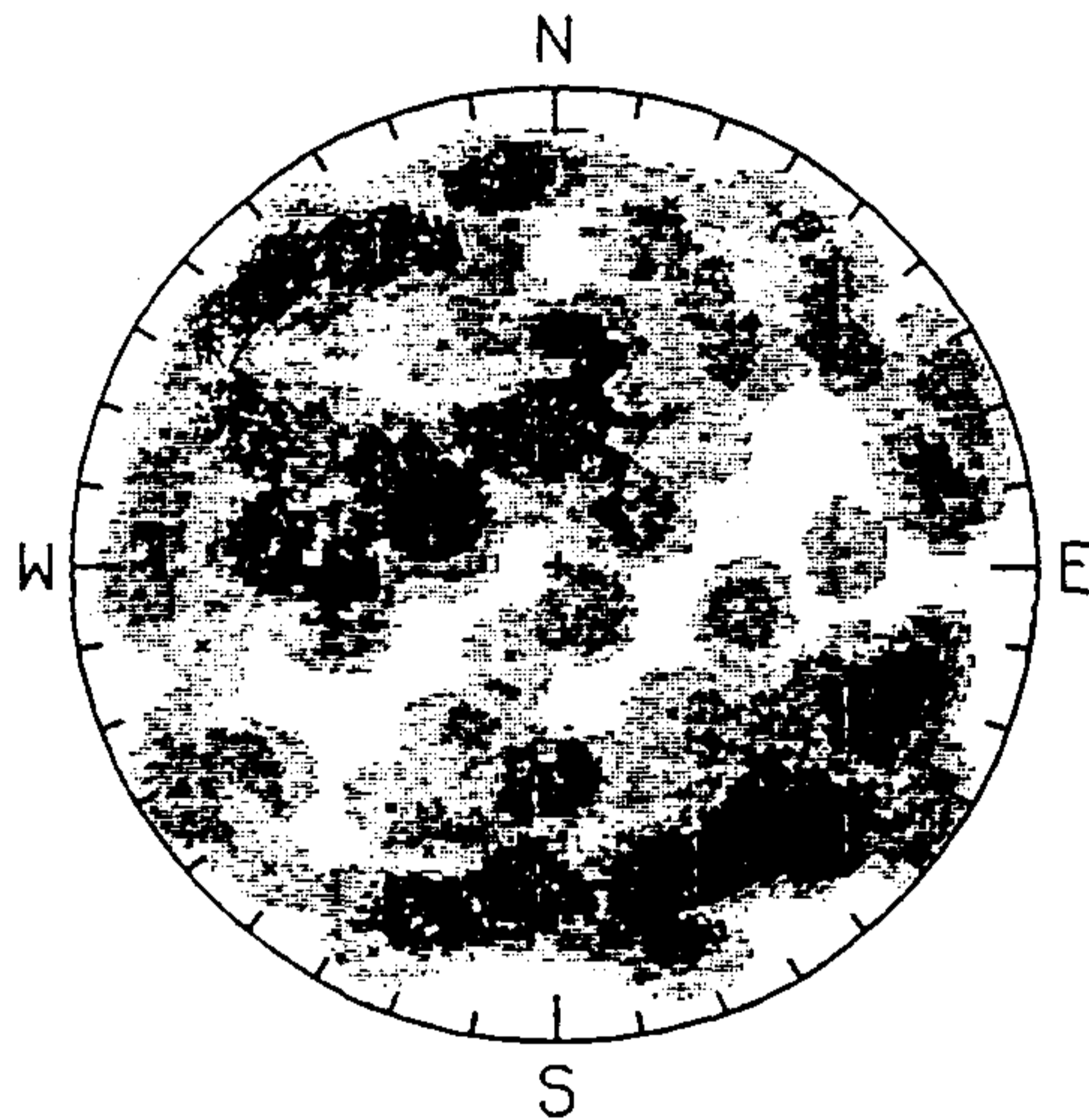


H-5

Depth[m] :
6.5-58.6

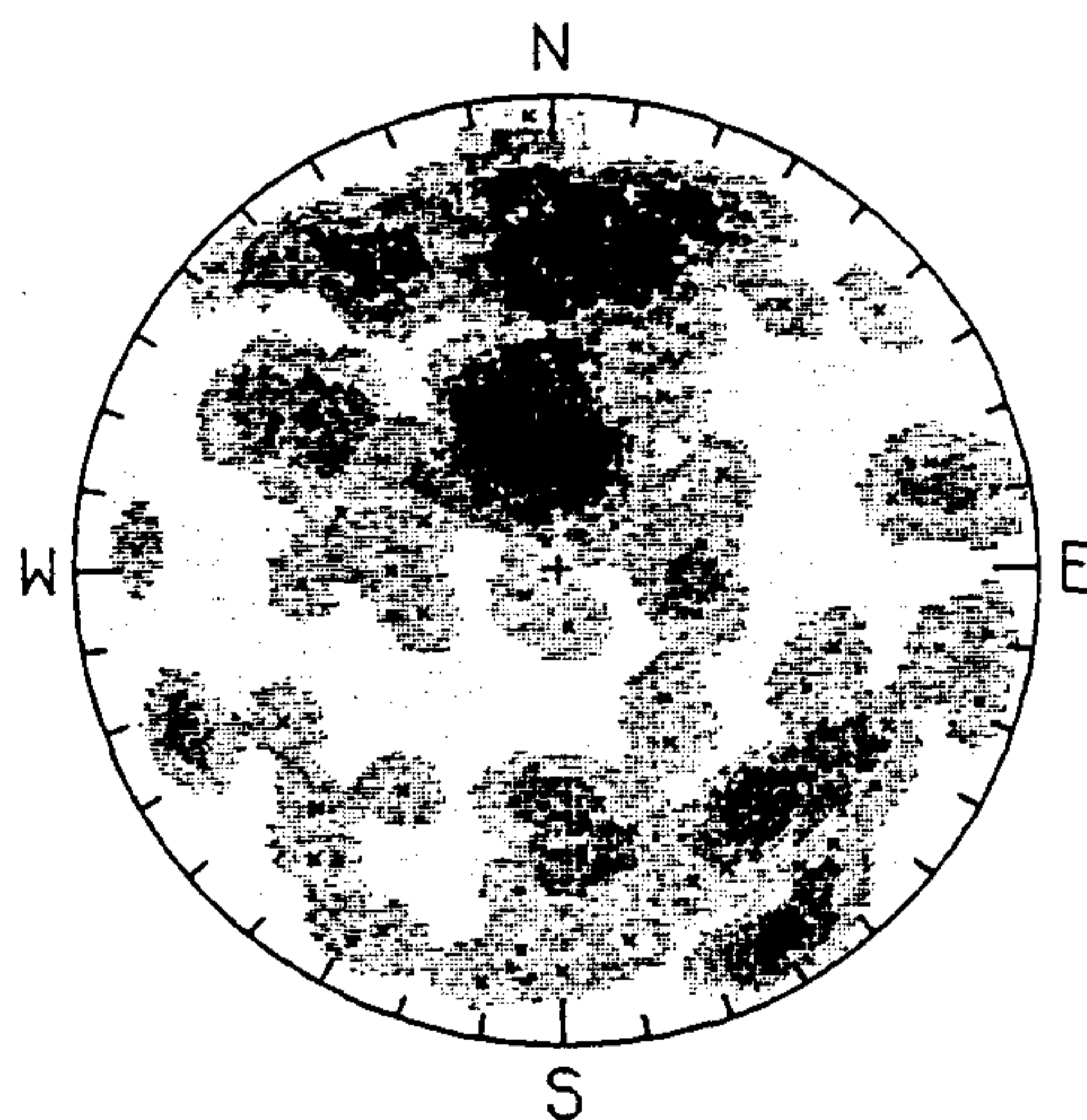
Fig. 70. Representation of dip directions of all extracted tectonic elements measured in the survey area (borehole H-9, H-5) Kangnam, Seoul

POLAR PROJECTION



H-9

Depth[m] :
6.7-55.2



H-5

Depth[m] :
6.5-58.6

Fig. 71. Representation of dip angles of all extracted tectonic elements measured in the survey area (borehole H-9, H-5) Kangnam, Seoul

ROSE DIAGRAM

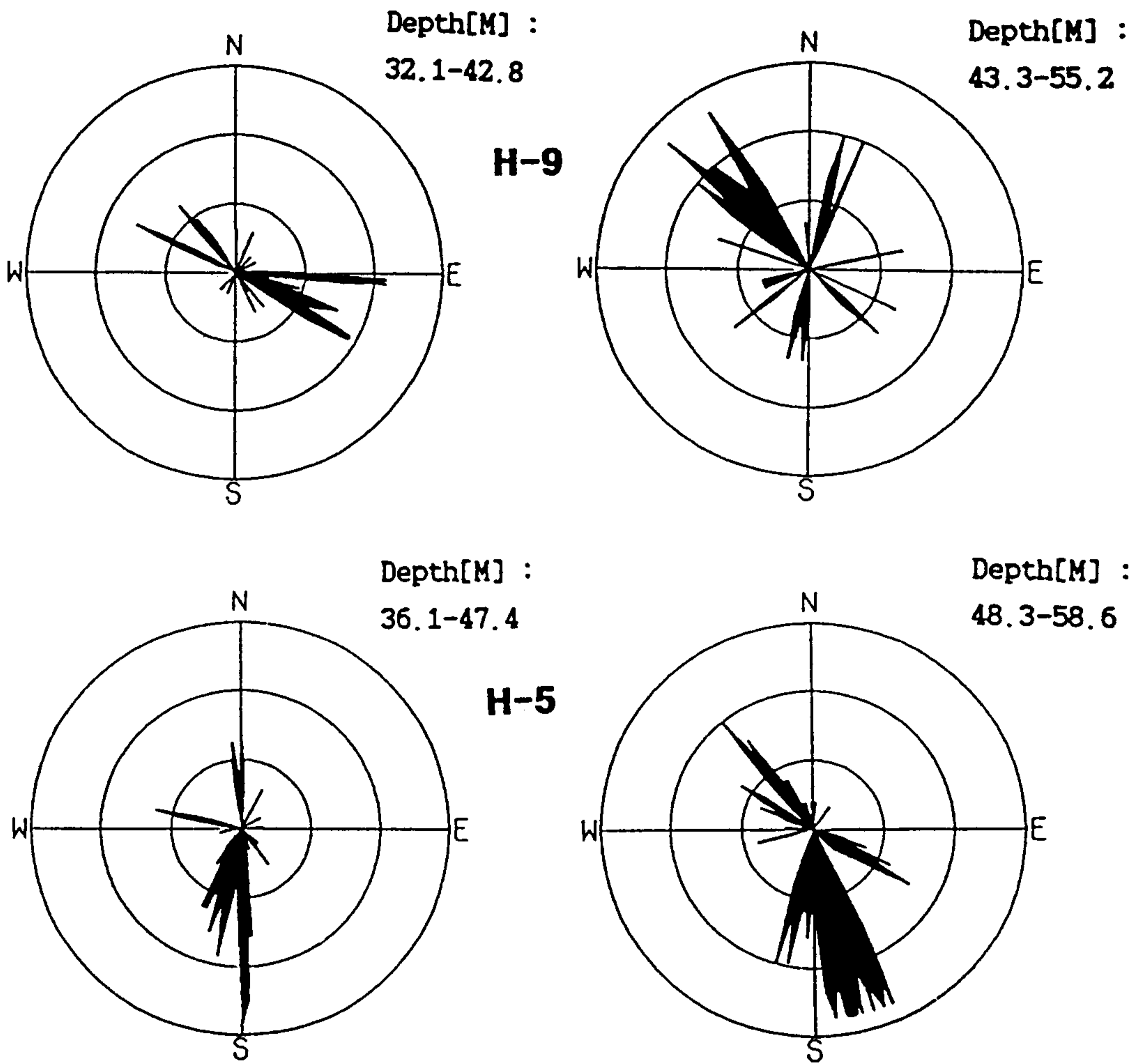


Fig. 72. Representation of dip directions of all extracted tectonic elements within the user defined depth intervals.

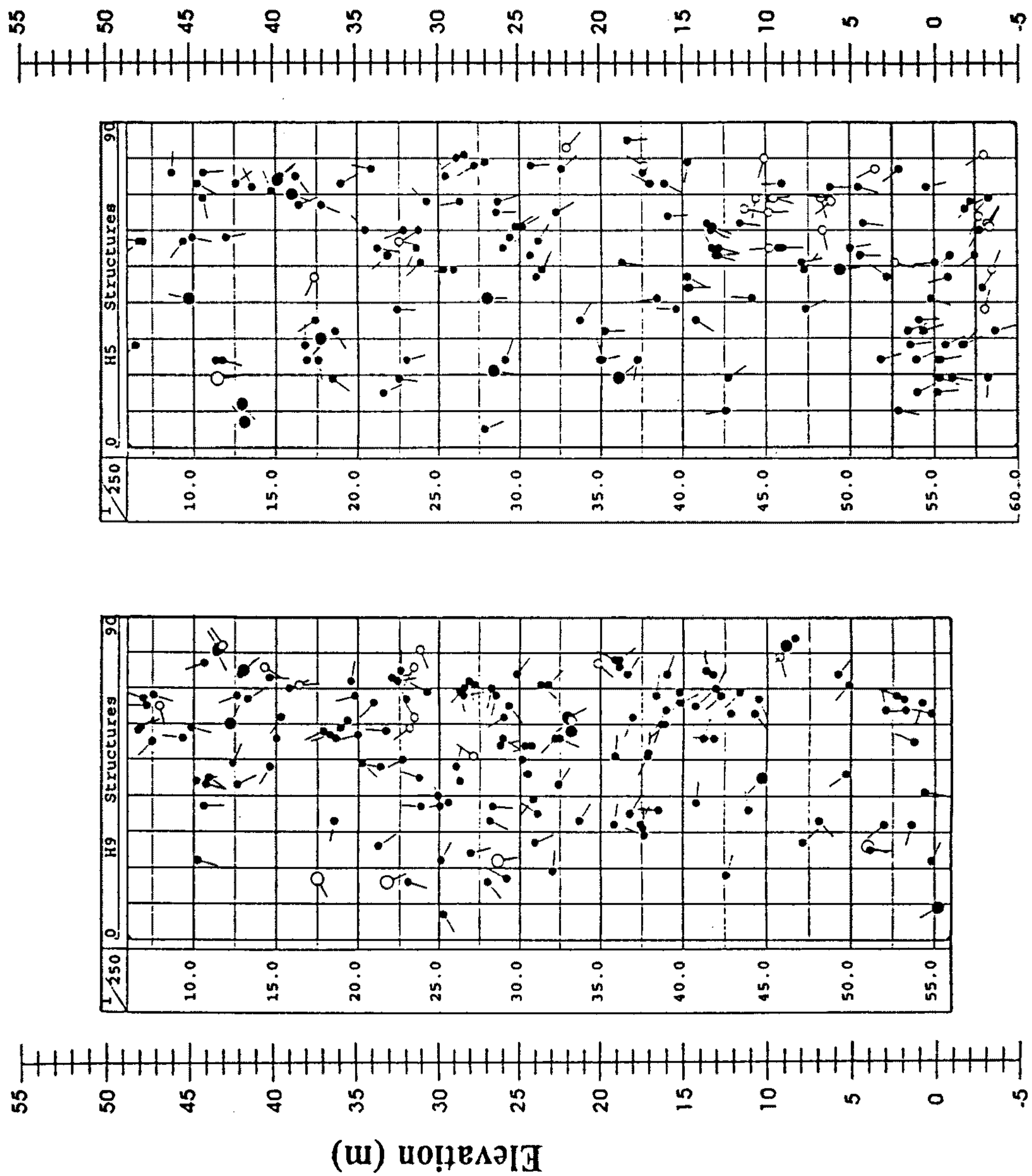


Fig. 73. All tectonic elements derived from the borehole H-9, H-5 are contrasted in the arrow plots.

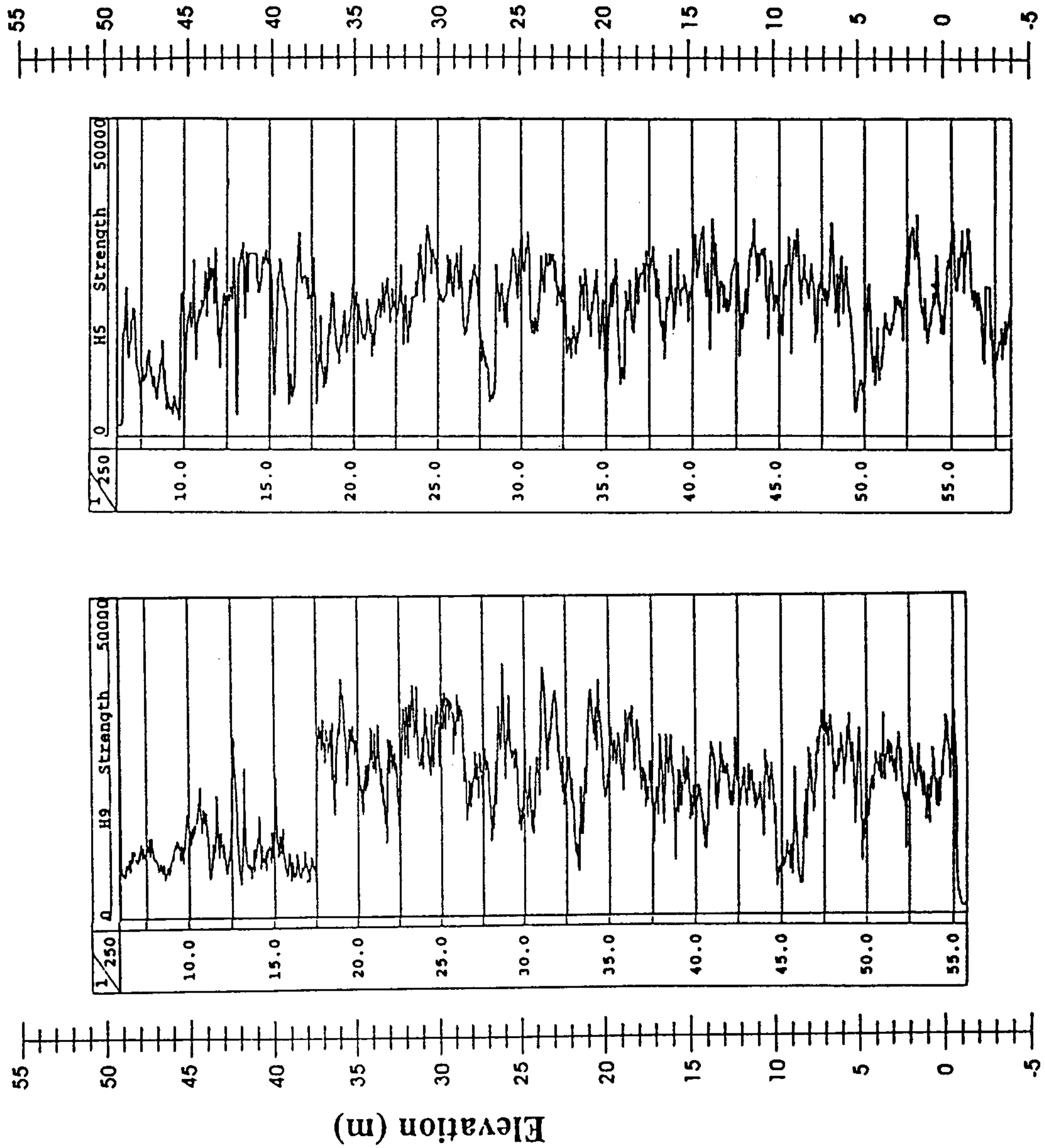


Fig. 74. Shown is the Televiwer rock strength derived from the borehole H-9, H-5.

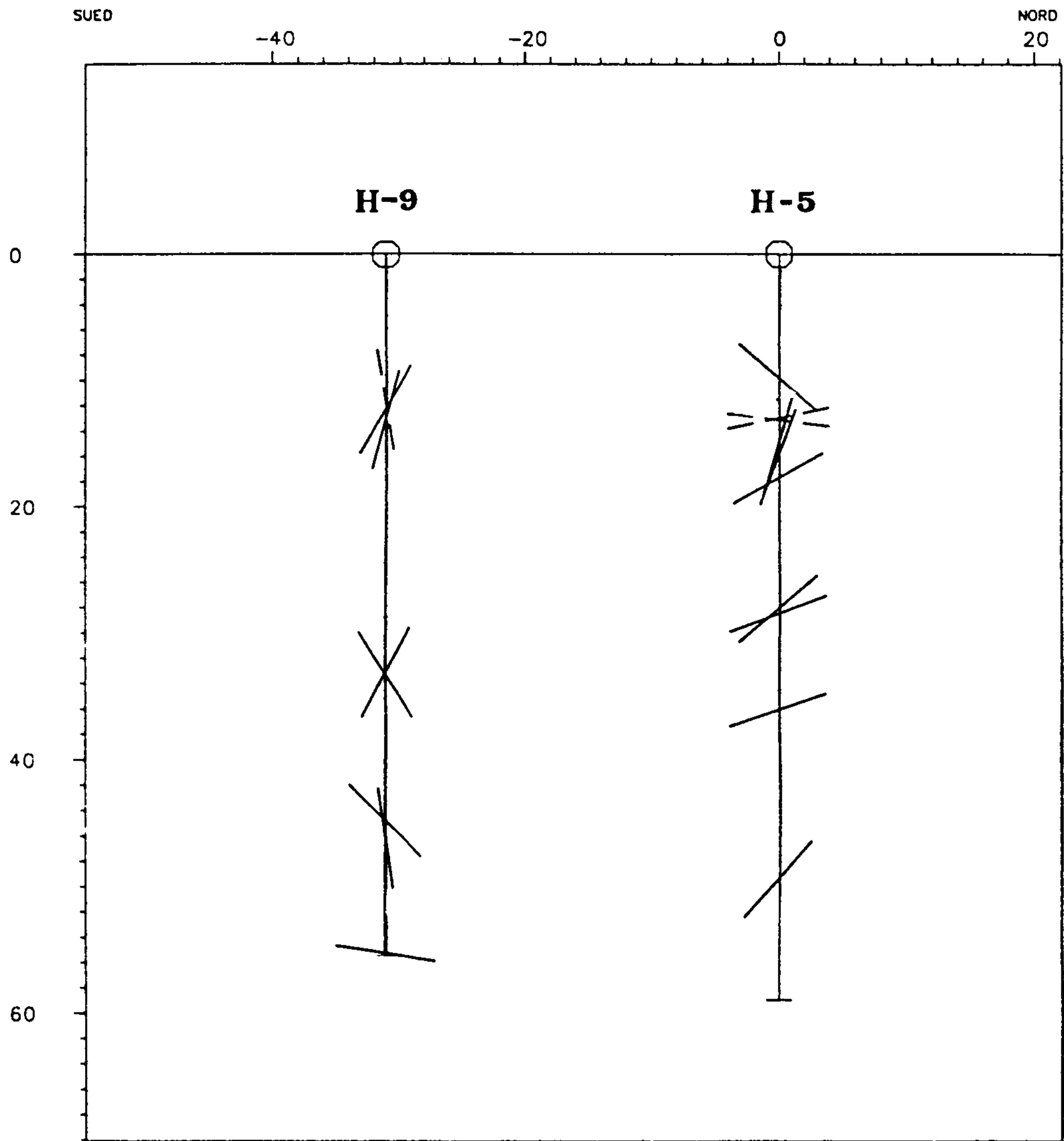


Fig. 75. Plan view of fault analysis showing dip and dip direction. Solid line corresponds to the dip direction ranging within $\pm 45^\circ$ from the cross section (H-9 ~ H-5), otherwise dotted line.

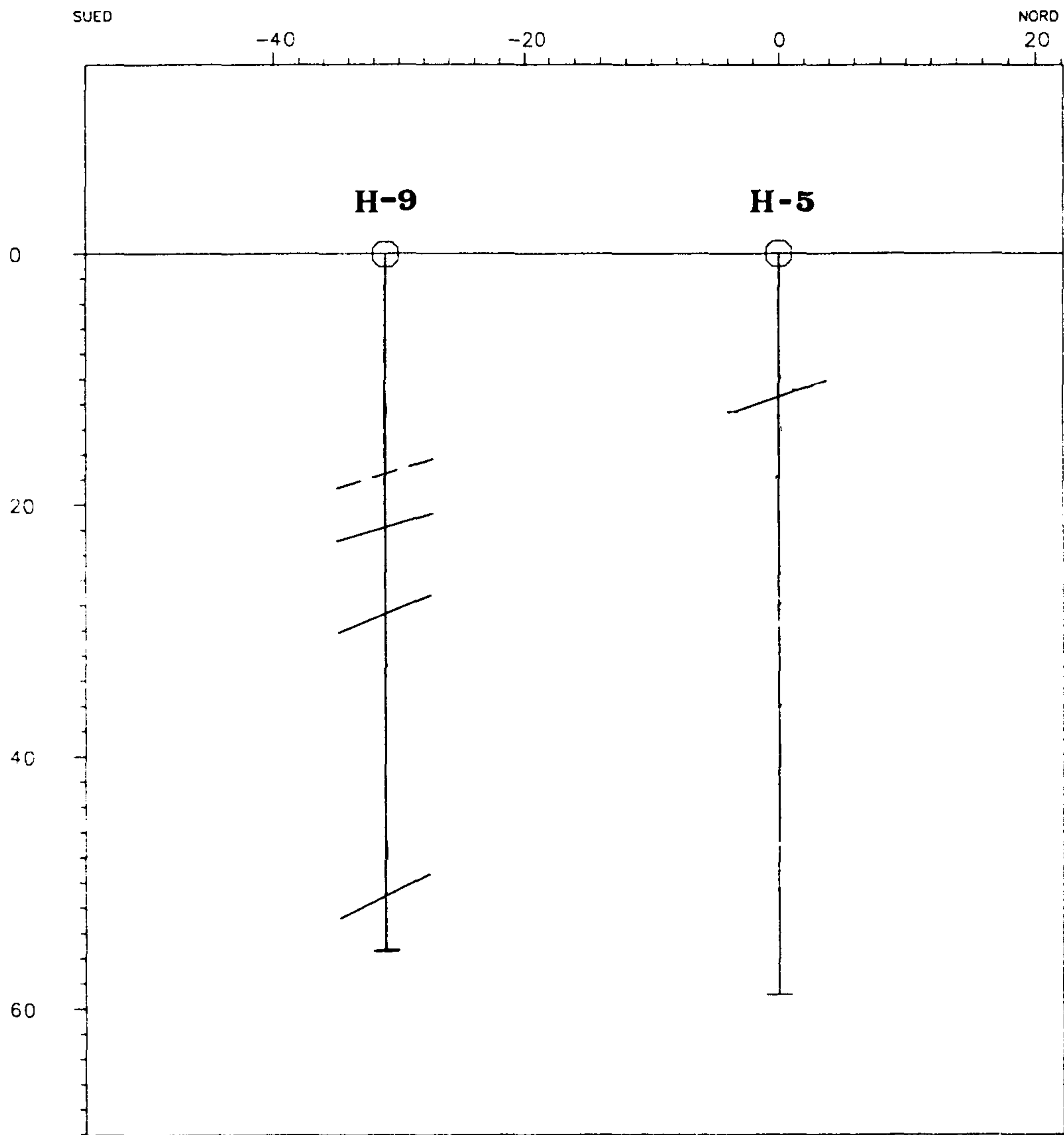


Fig. 76. Plan view of layer boundary analysis showing dip and dip direction. Solid line corresponds to the dip direction ranging within $\pm 45^\circ$ from the cross section (H-9 ~ H-5), otherwise dotted line.

및 경사각을 나타내고 있다. 여기서 실선은 시추공 H-5로부터 시추공 H-9에 이르는 축을 기준으로 좌우 45° 범위내에 속하는 경사 방향을 표현하고 있으며 대체로 일관성을 띠고 있으나 반면 단층 발달 상태는 대단히 불규칙하게 나타나고 있다.

끝으로 Fig. 77 및 78은 각 시추공에서 관찰된 모든 tectonic elements를 rose 및 pole diagram에 의해 일괄적으로 나타내고 있다. 시추공 H-5에서 H-3에 이르는 부분 및 시추공 H-7~H-4사이에는 대체로 지향성을 띤 절리 방향을 보여주고 있습과 동시 그들의 경사각 분포도 큰 각을 보이면서 밀집된 형태를 나타내고 있다. 반면, 시추공 H-6에서 H-9, H-8, H-2에 이르기까지는 절리들의 방향이 크게 일관성을 잃고 있으며 그에 따라 그들의 경사각도 산발적인 분포를 보여주고 있다.

2. 인천 지하철공사 지반조사

본 탐사지역의 지질은 대체로 선캠브리안 편마암류와 중생대 쥐라기 화성암류로 구성되어 있다(서규식, 1985). 암편은 주로 유문암(rhyolite)이며 쥐라기에 형성된 것으로 사료되는(관입형) 용결응회암이 박층으로 관찰되고 있다. 여기서 용결응회암의 성분은 유리질이거나 석영으로 구성된 관계로 풍화에 비교적 강한 양상을 보여주고 있다. 한편, 이 지역에서 관찰되는 염기성 맥암(흔히 1~2m 두께)은 대체로 남북 방향의 단층면을 따라 관입되었으며 그 후에 발생한 단층운동에 의해 파쇄되었거나 변위된 양상도 관찰되고 있다. 텔레뷰어응용을 위한 탐사 시추공 H1, H2, H3은 지하철노선 연변을 따라 거의 일직선 상에 놓여 있으며 각 시추공간의 거리는 H1~H2 : 31.4m, H2~H3 : 35.4m이다. 모든 시추공들은 T-4 고성능 착정기에 의해 천공되었으며 그들의 심도, 공경 및 outcasing 상태는 다음과 같다.

LG KANGNAM TOWER SITE PLAN

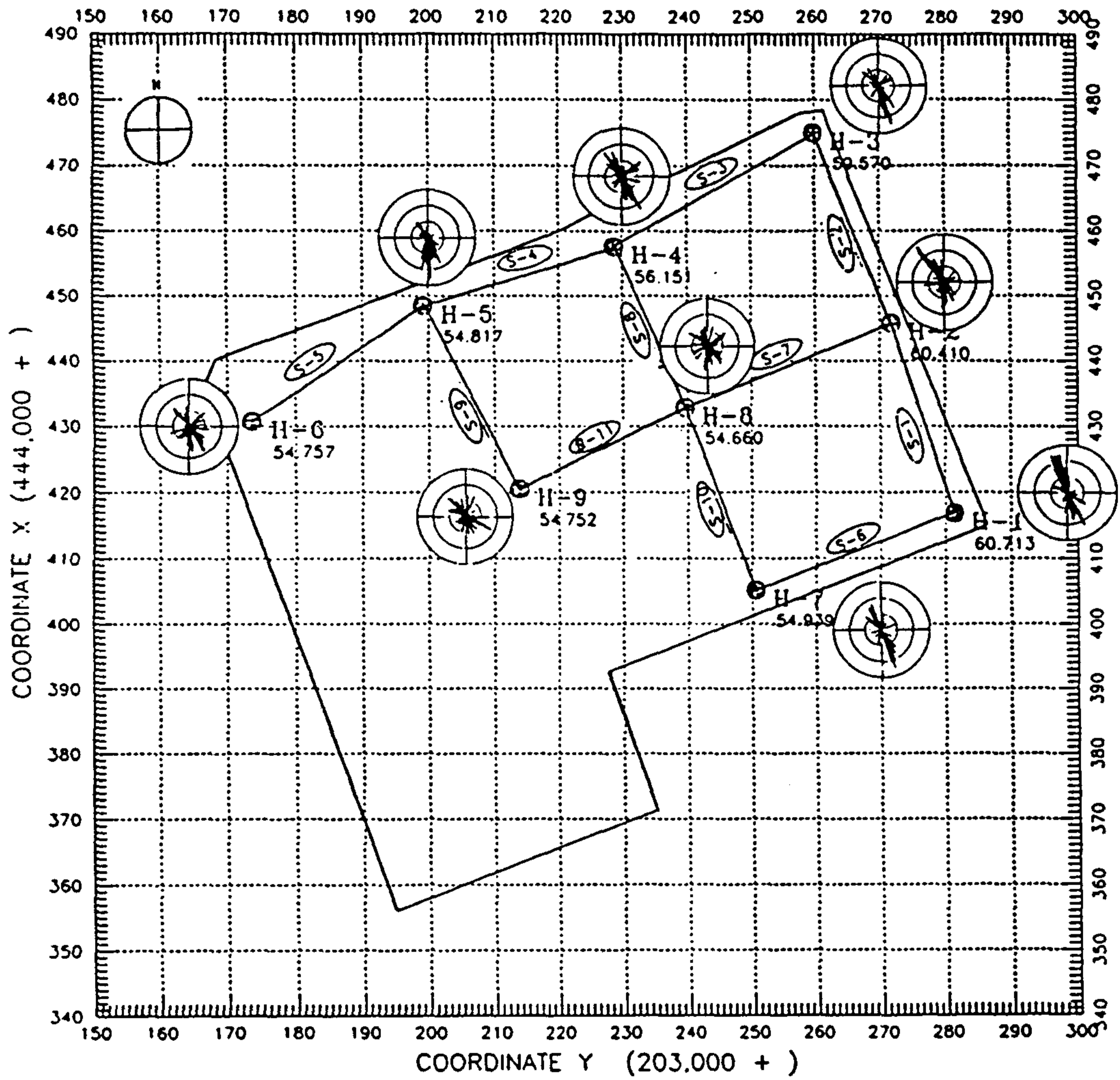


Fig. 77. Rose diagrams showing dip direction.

LG KANGNAM TOWER SITE PLAN

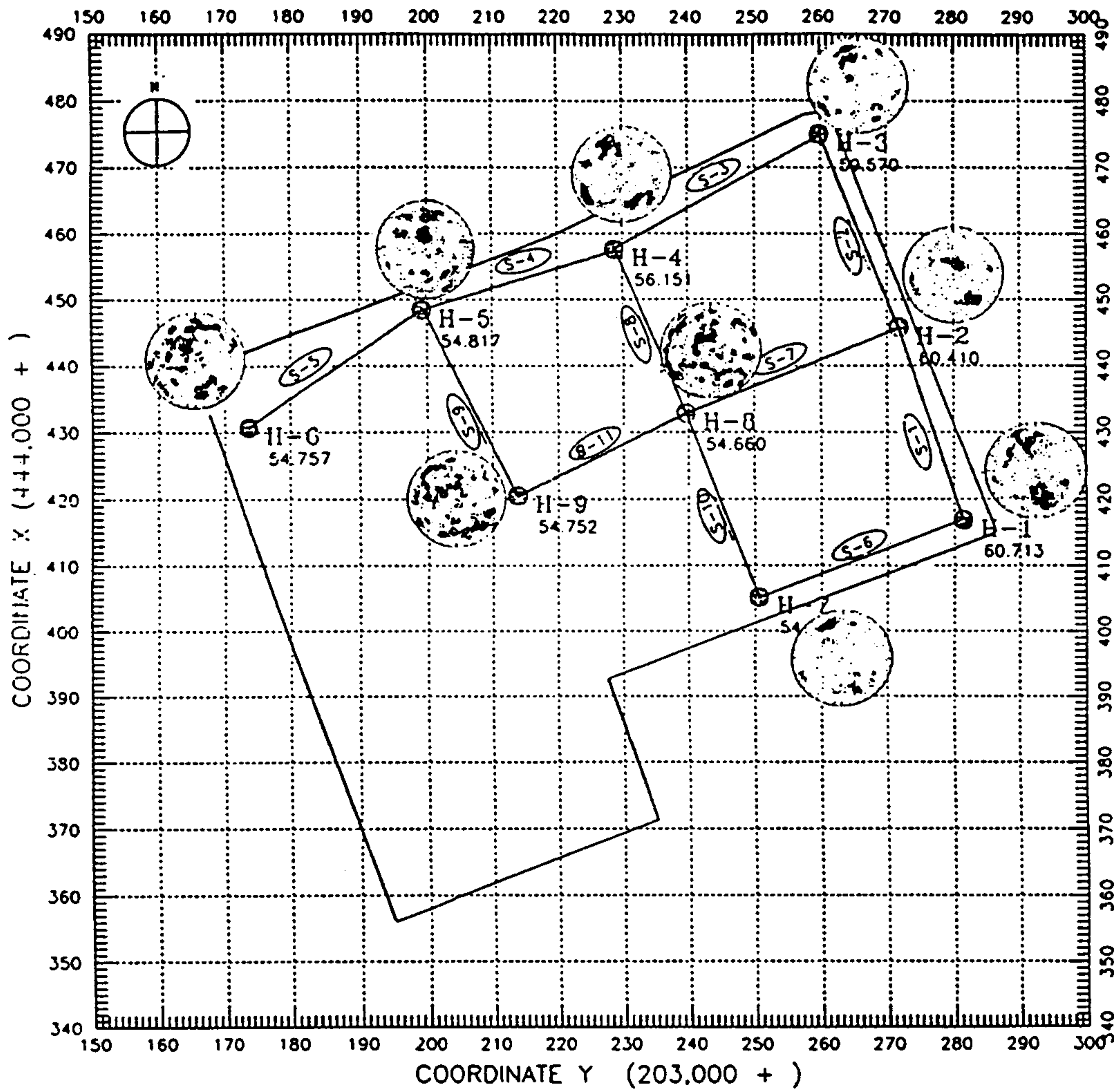


Fig. 78. Pole diagrams showing dip angle.

	심 도	공 경 (inch)	casing (inch)	outcasing 심도
H1	133 m	29.2 m 상부 8 하부 6	4	12 m
H2	132 m	8	4	12 m
H3	135 m	6	4	12 m

본 탐사의 주된 목적 중 하나는 지하철이 지나가는 주위(심도 약 50m 구간) 암반 상태를 정확하게 파악함으로써 시공의 효율성을 높임은 물론 시설물의 안정성도 최대한 도모하고자 하는 데 있었다. 이를 위해 제기된 텔레뷰어의 주요 조사 내용은 다음과 같다.

- 단층 및 절리의 발달 상태
- 암석강도 변화
- 암층 상태

Fig. 79~Fig. 81은 시추공 H1~H3의 천부 구간에 대한 텔레뷰어 이미지 및 arrow plot를 보여주고 있다. 이번에는 시추공의 규격이 이전보다도 큰 6 inch~8 inch에 달하고 더구나 T-4 고성능 측정기에 의해 시추되었기 때문에 시추공 내벽 상태가 불규칙(거칠음)한 것은 불가피하다고 할 수 있다. 전체적으로 시추공 내벽이 시추 도중 도처에서 파열되고 있음을 볼 수 있으며 특히 연암 구간에서는 더욱 그러하다. 한편, 이번 텔레뷰어 이미지 분석 결과는 이전과는 또 다른 특징을 보여주고 있다.

- 전체적으로 절리 및 단층의 발달 빈도는 대단히 적다.
- 강도가 상대적으로 대단히 큰 박층들이 곳곳에서 인식되며 (예:

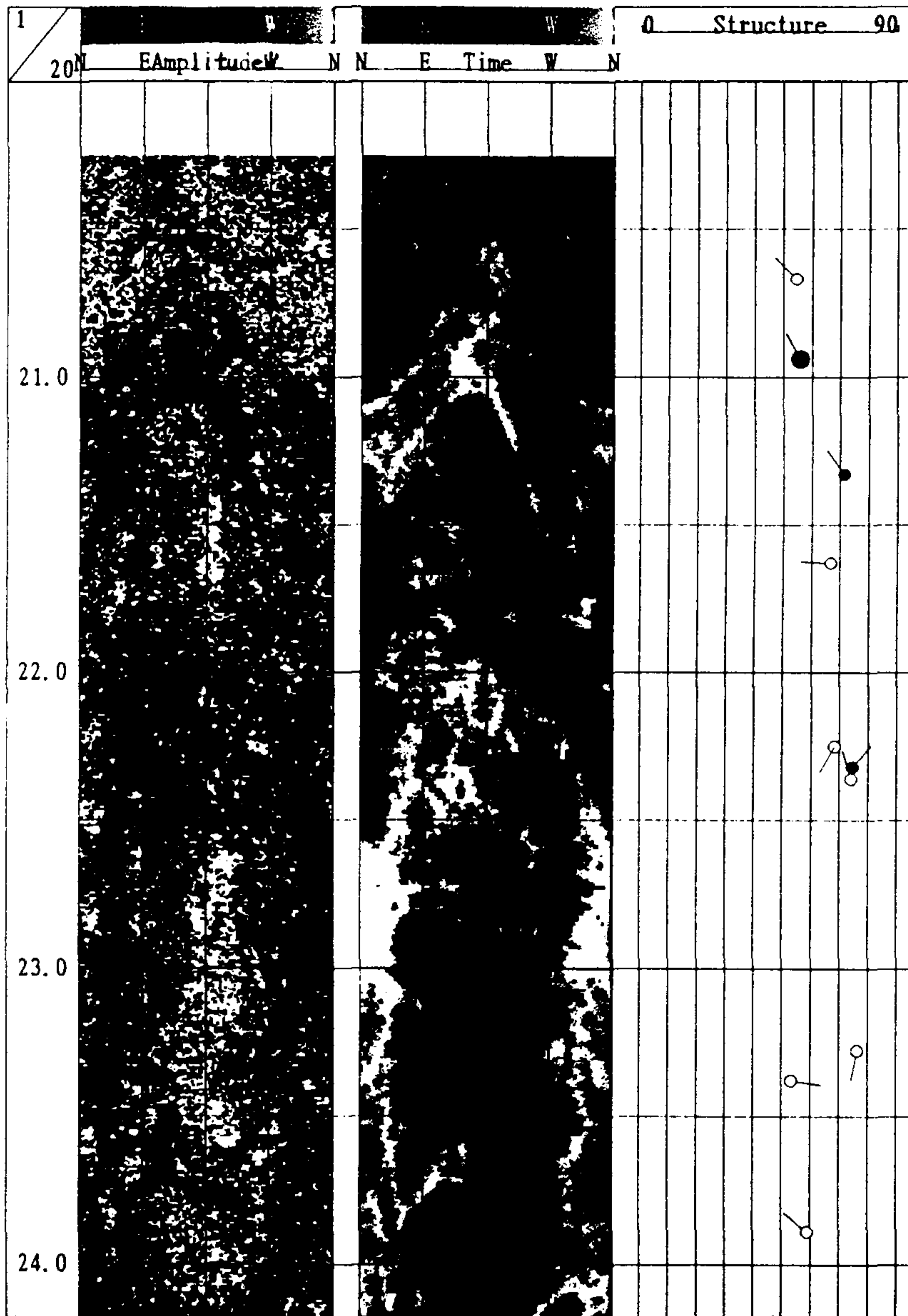


Fig. 79. Televiewer image log measured in the survey area (borehole H1) of Incheon subway construction. Left : amplitude image, middle : traveltime image, right : arrow plot for the tectonic elements.

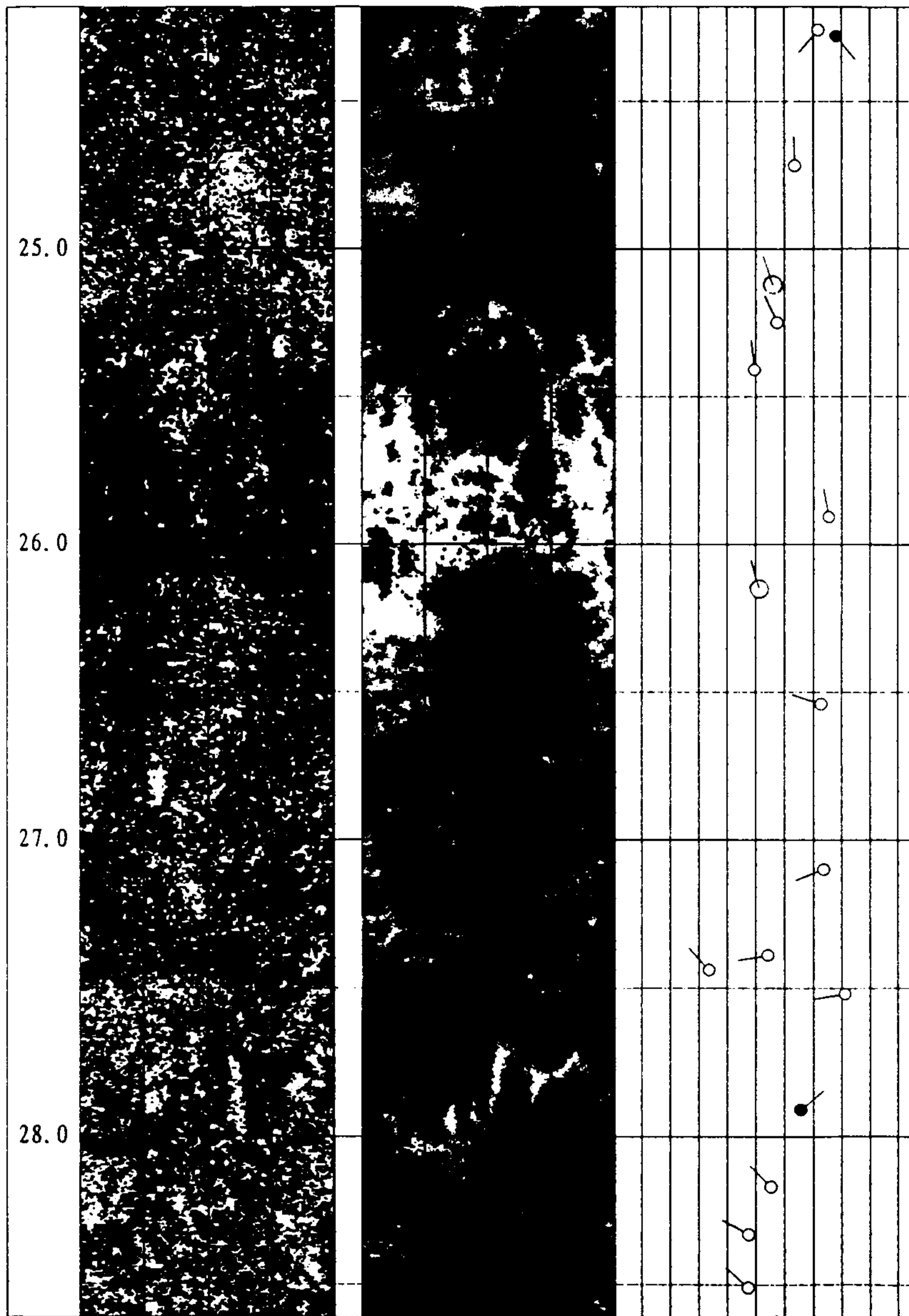


Fig. 79. (continued).

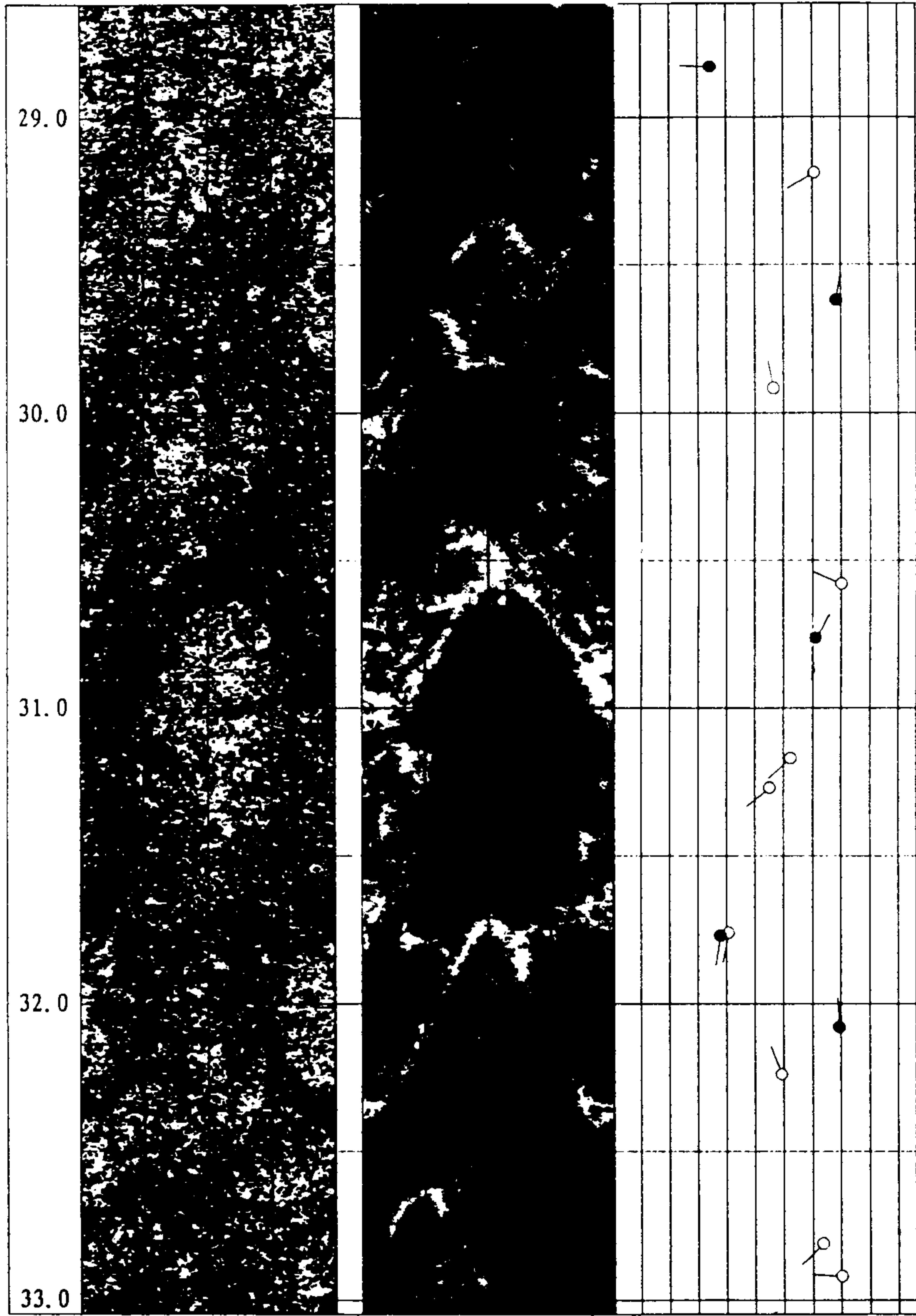


Fig. 79. (continued).

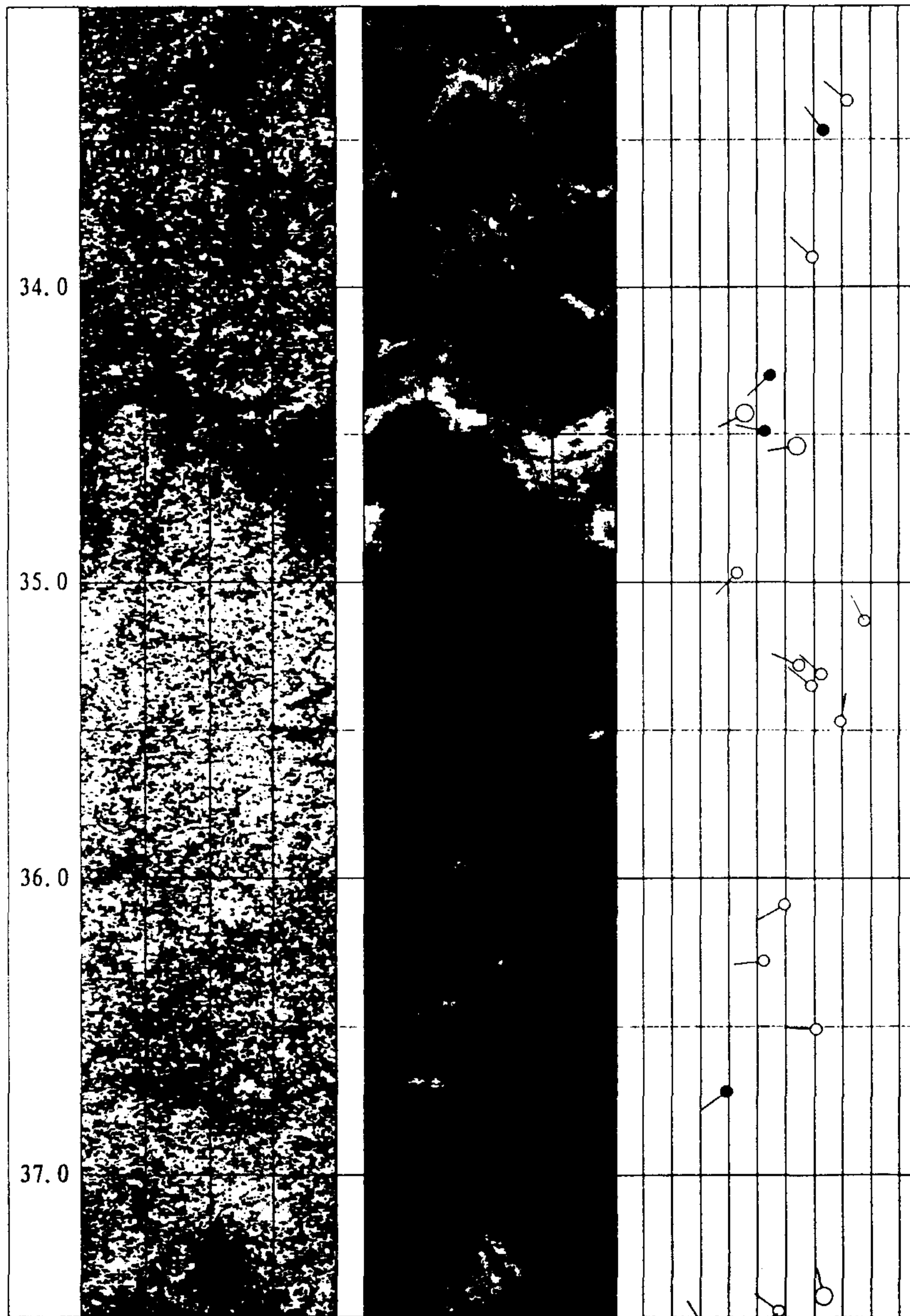


Fig. 79. (continued).

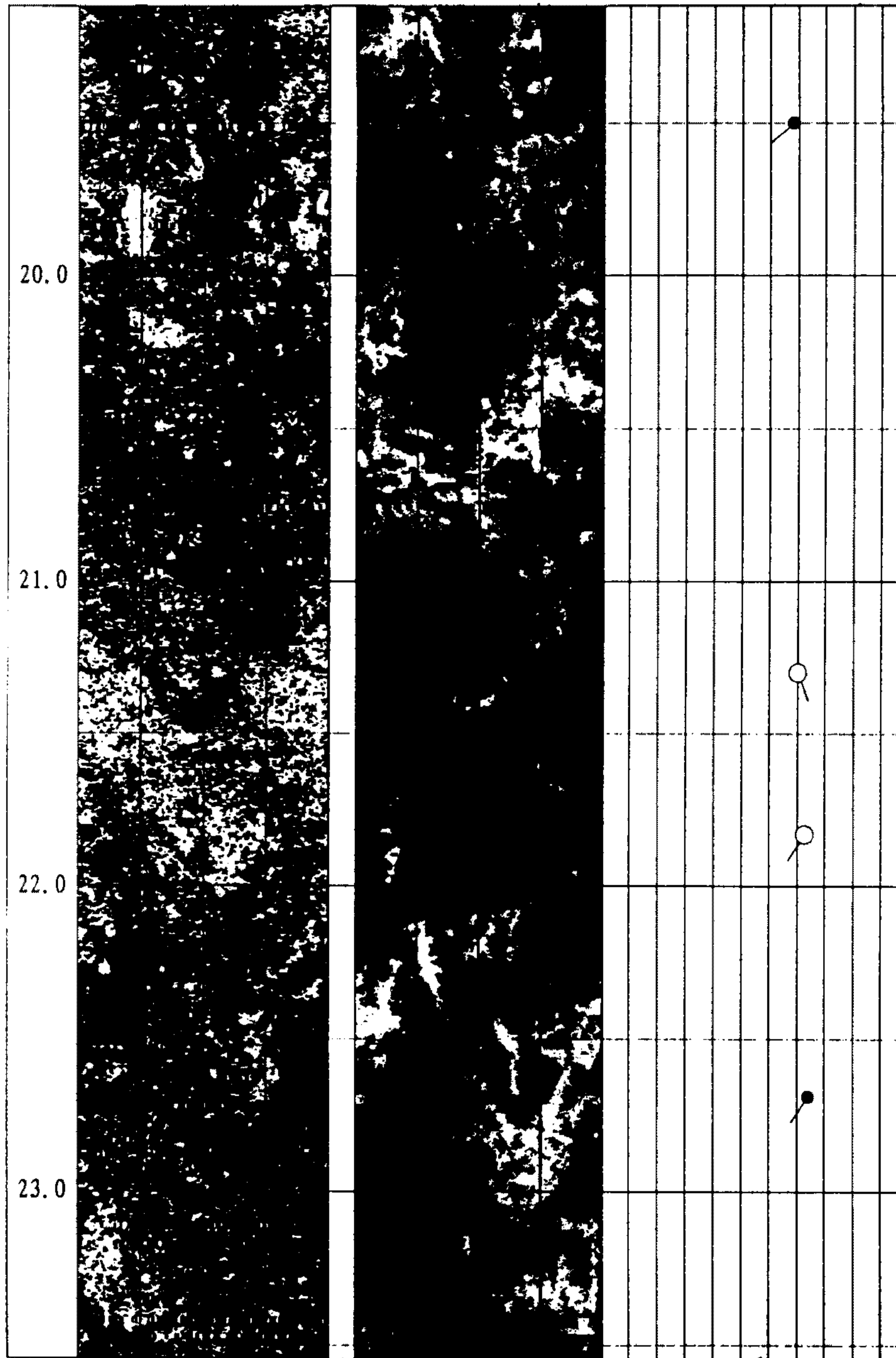


Fig. 80. Televiewer image log measured in the survey area (borehole H2) of Incheon subway construction. Left : amplitude image, middle : traveltime image, right : arrow plot for the tectonic elements.

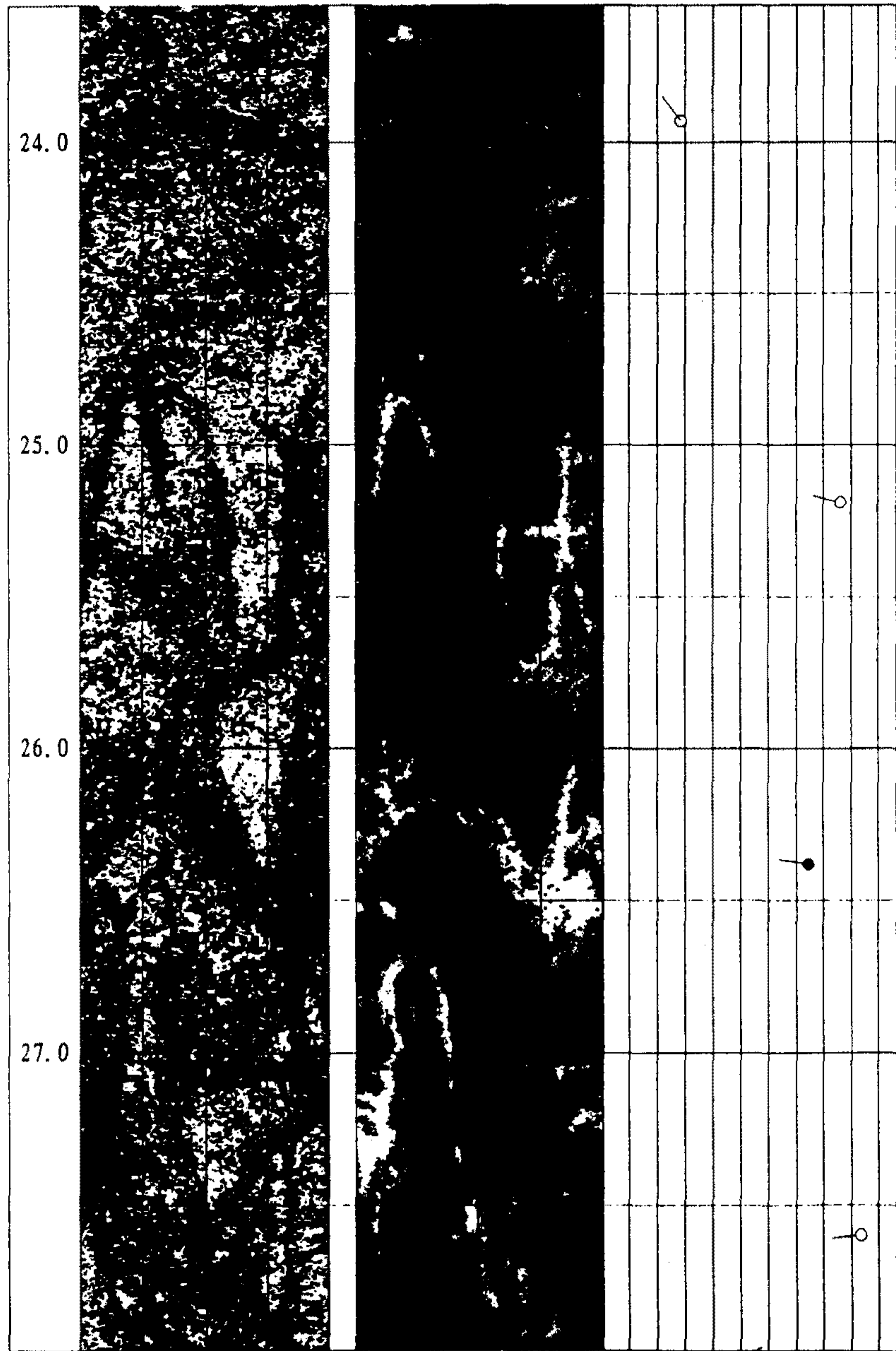


Fig. 80. (continued).

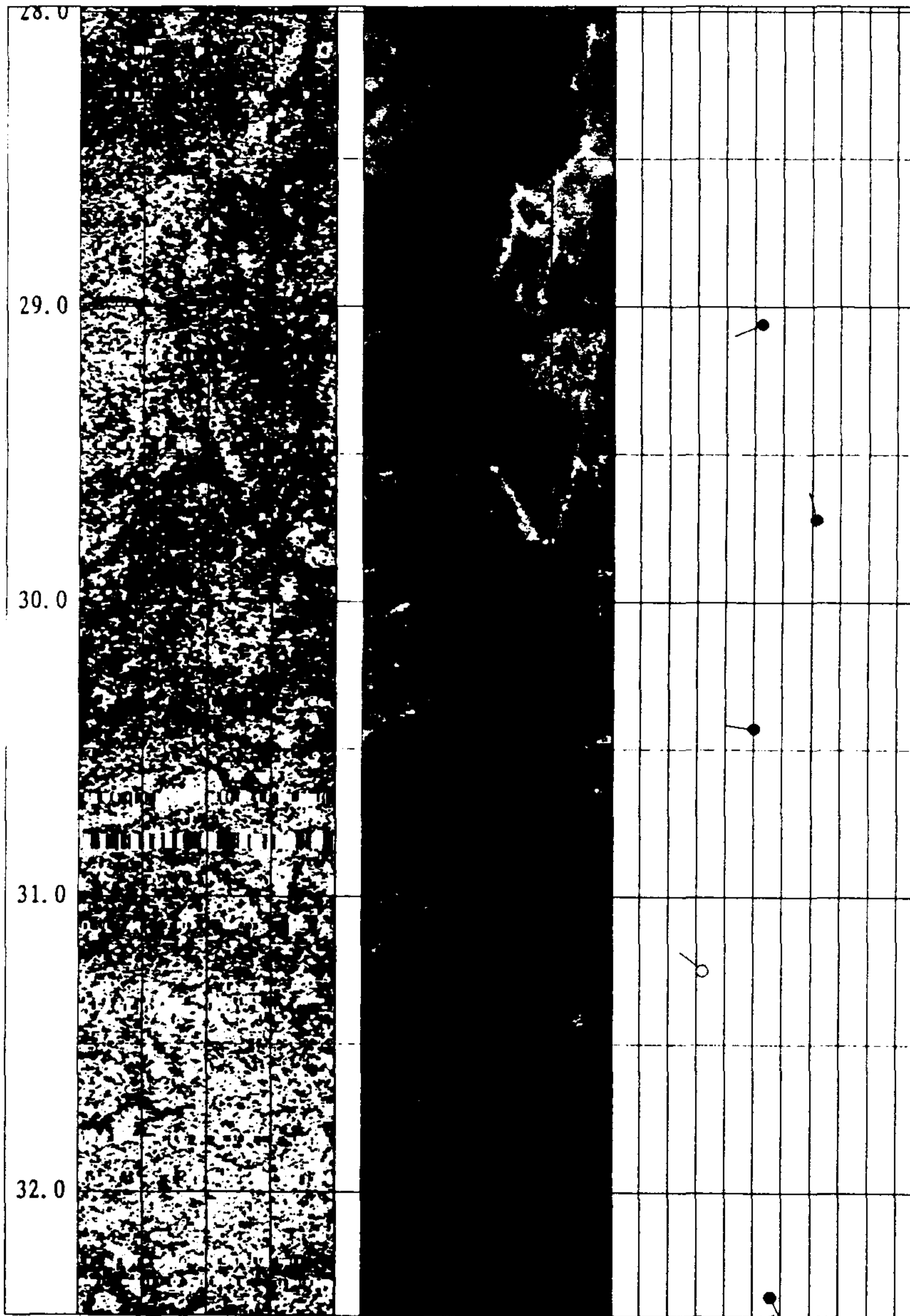


Fig. 80. (continued).

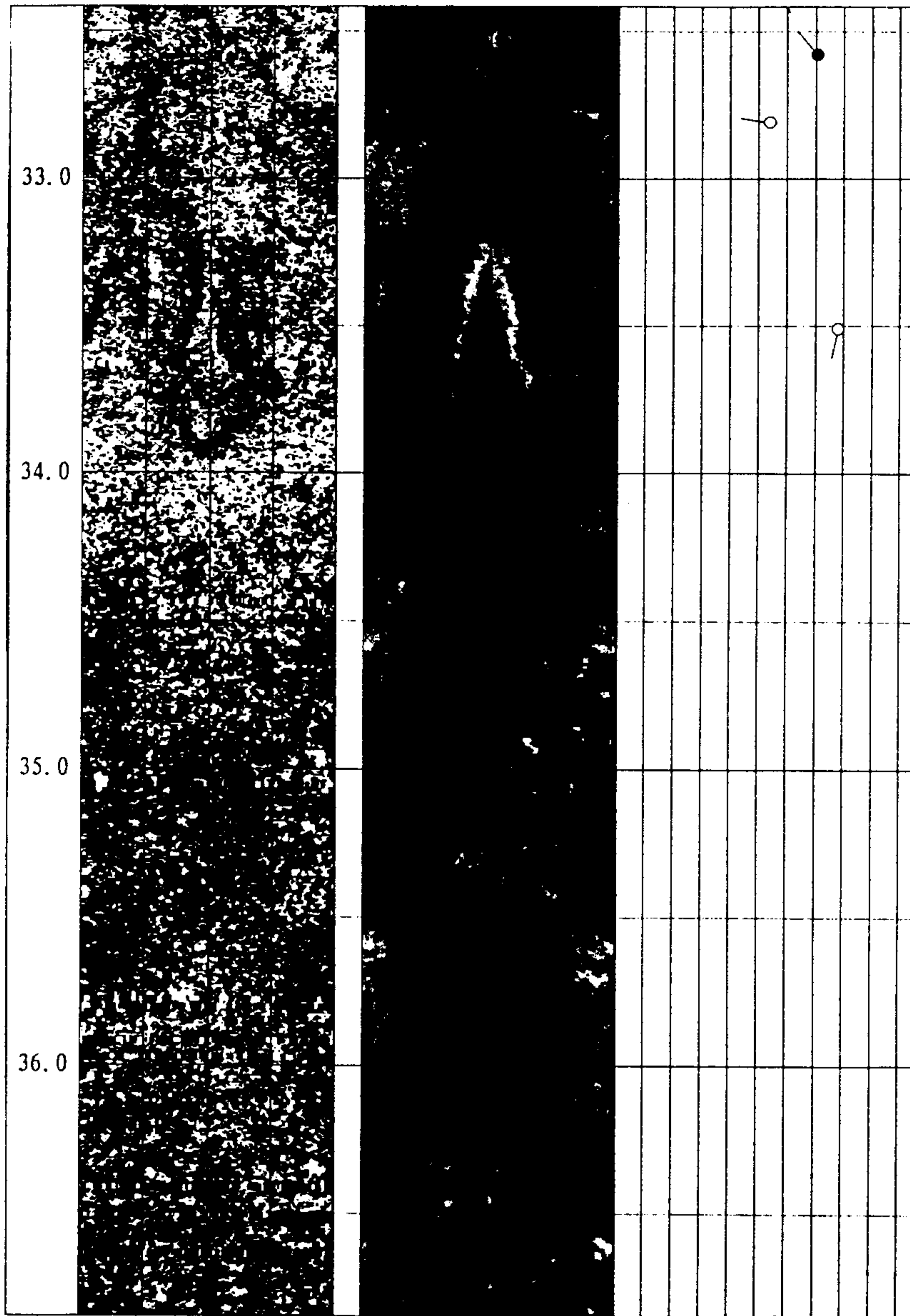


Fig. 80. (continued).

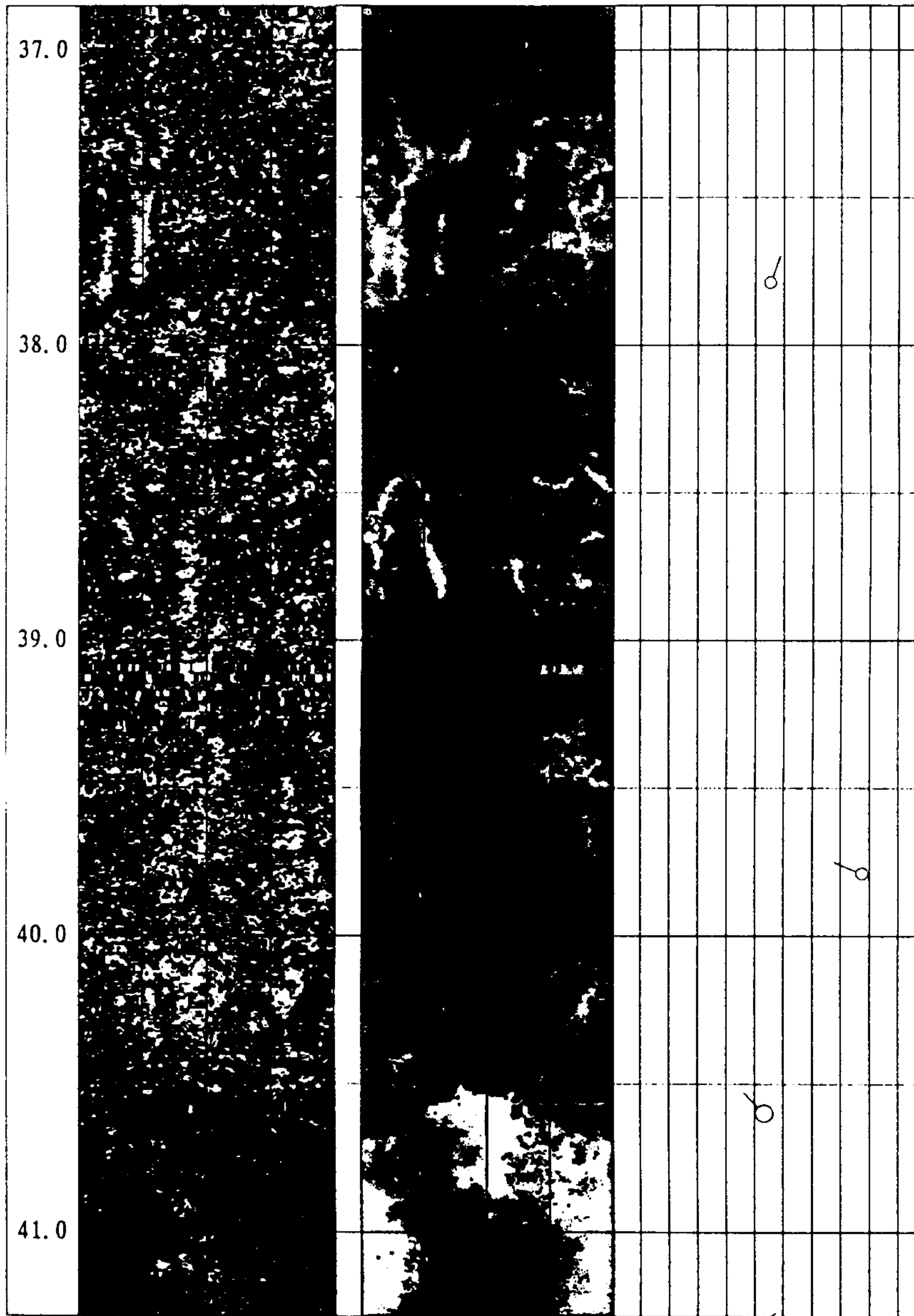


Fig. 80. (continued).

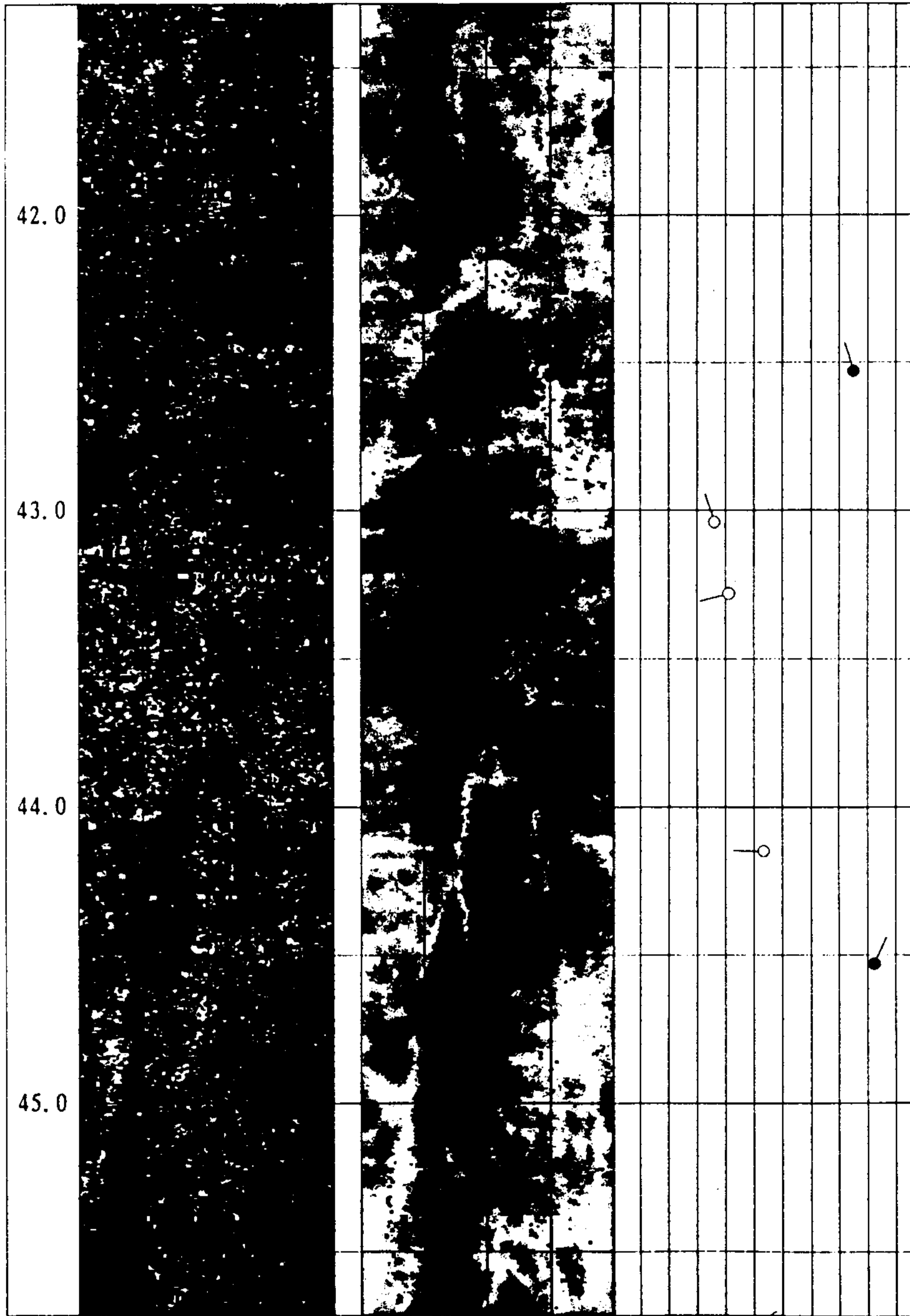


Fig. 80. (continued).

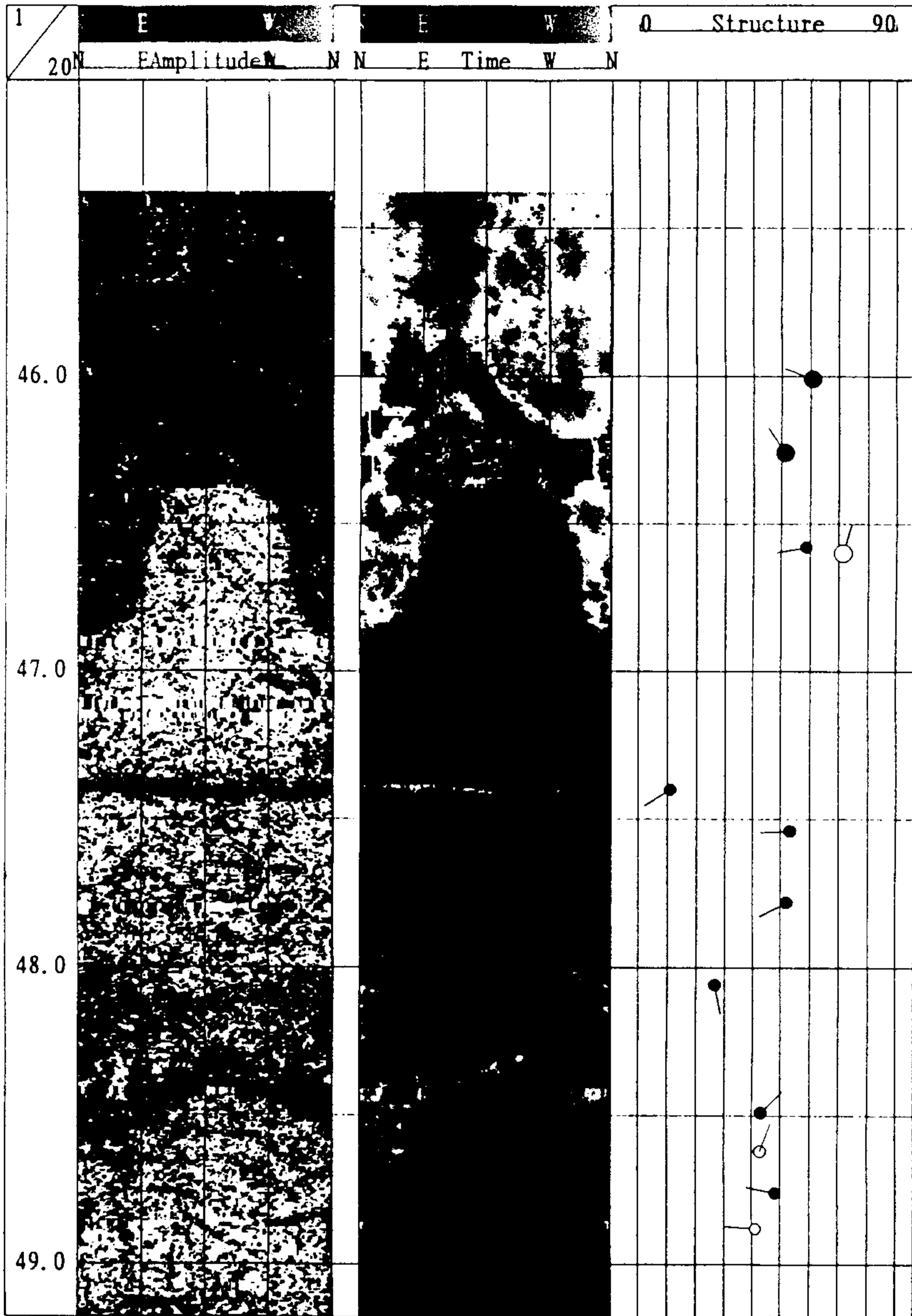


Fig. 80. (continued).

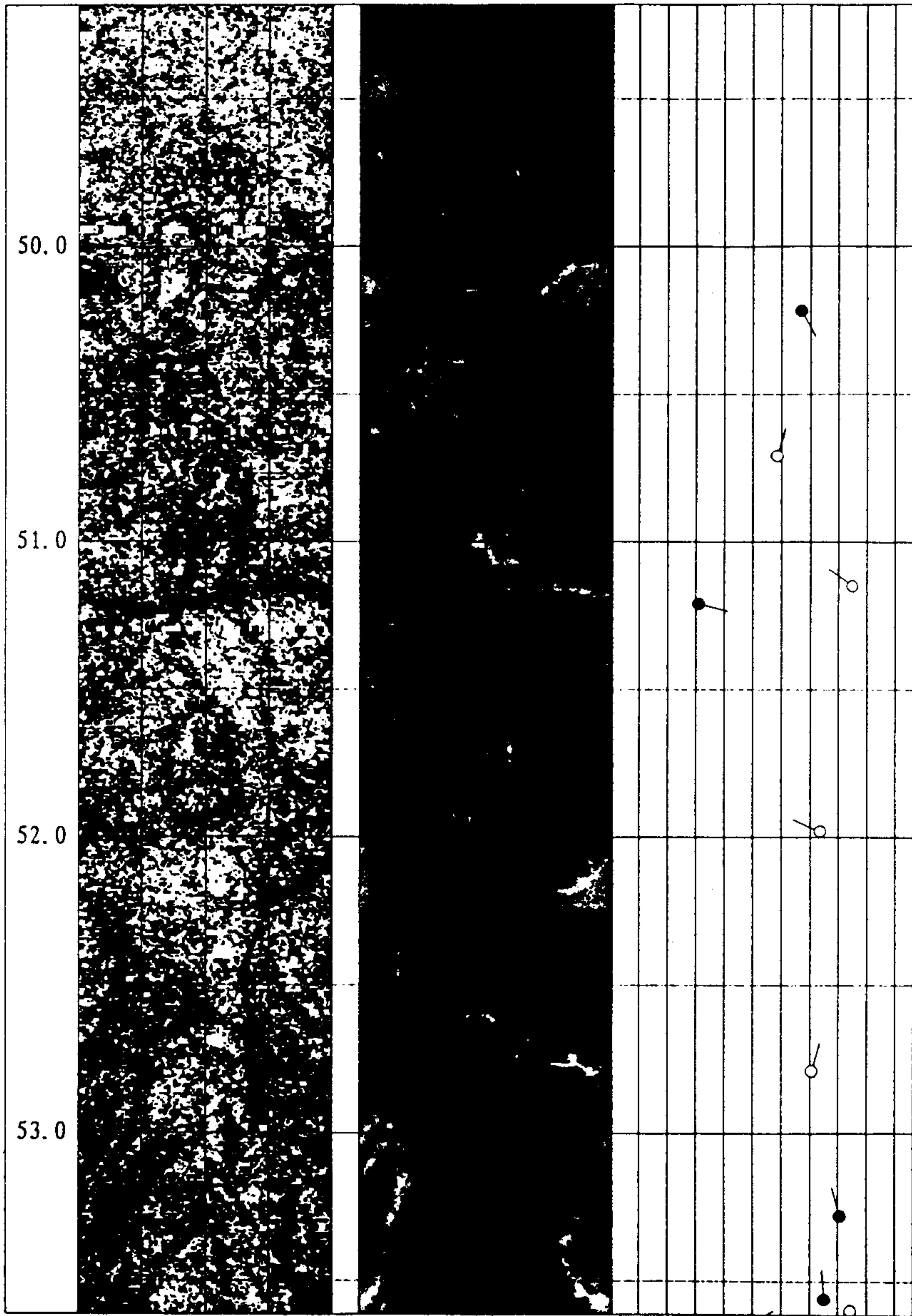


Fig. 80. (continued).

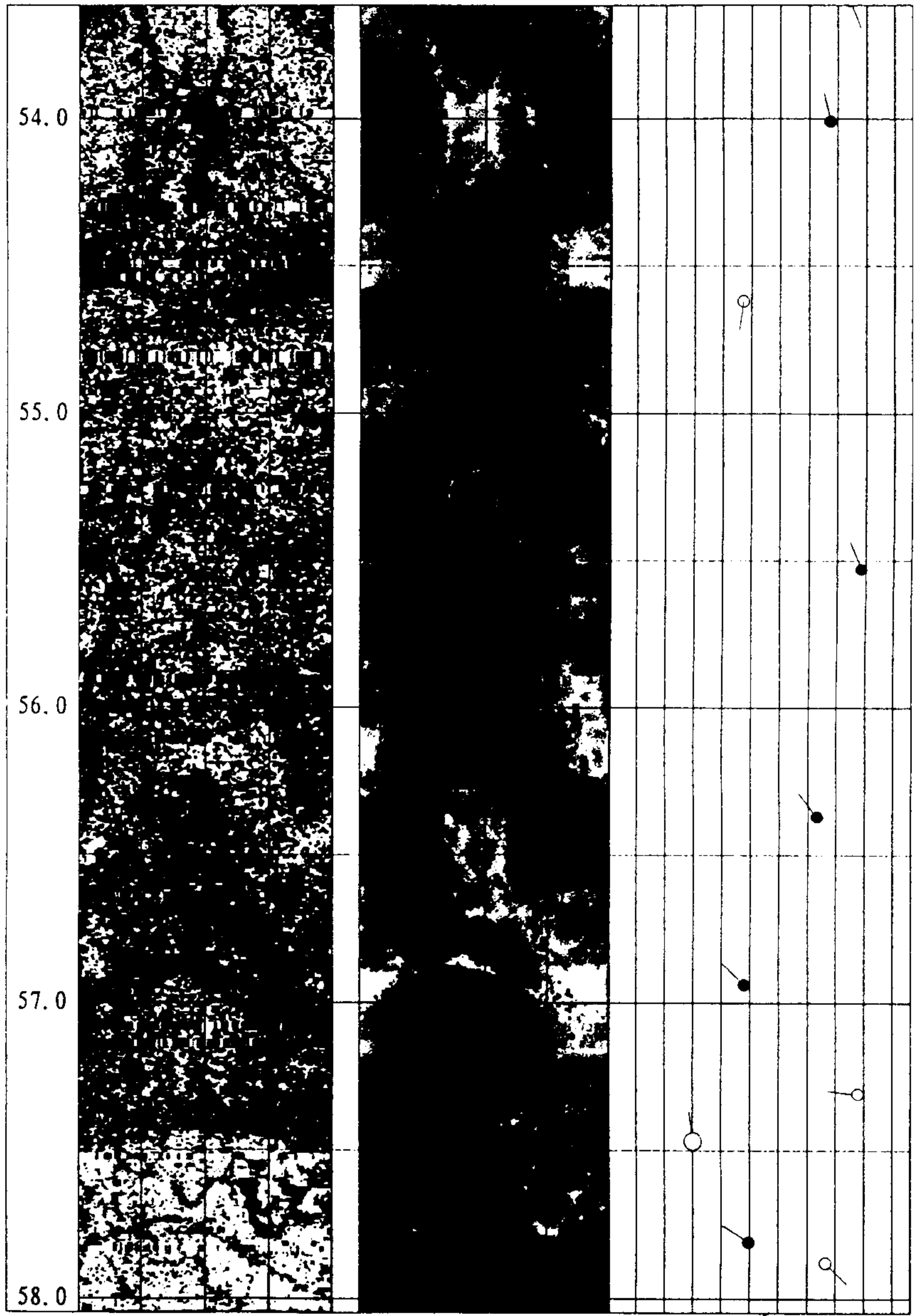


Fig. 80. (continued).

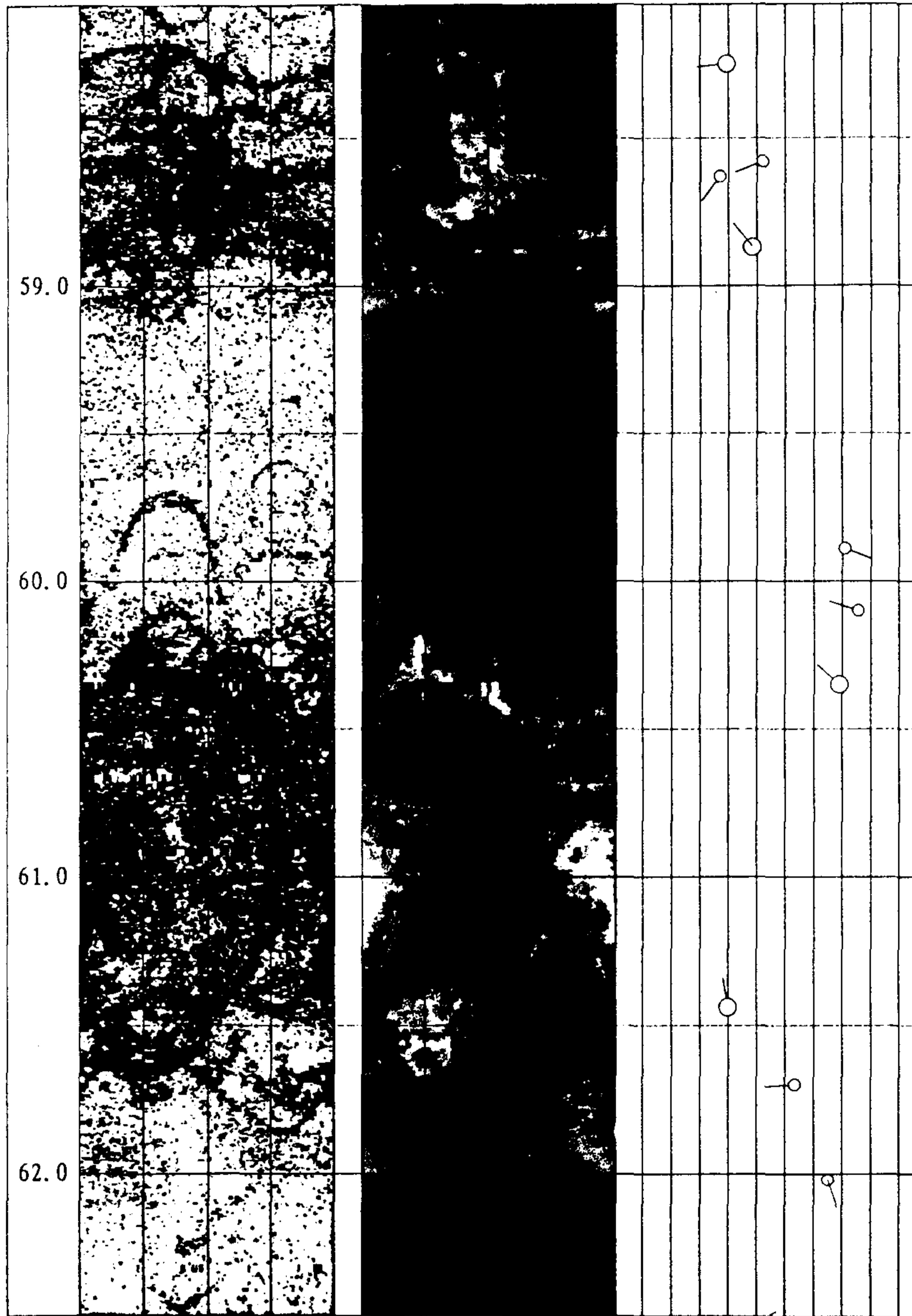


Fig. 80. (continued).

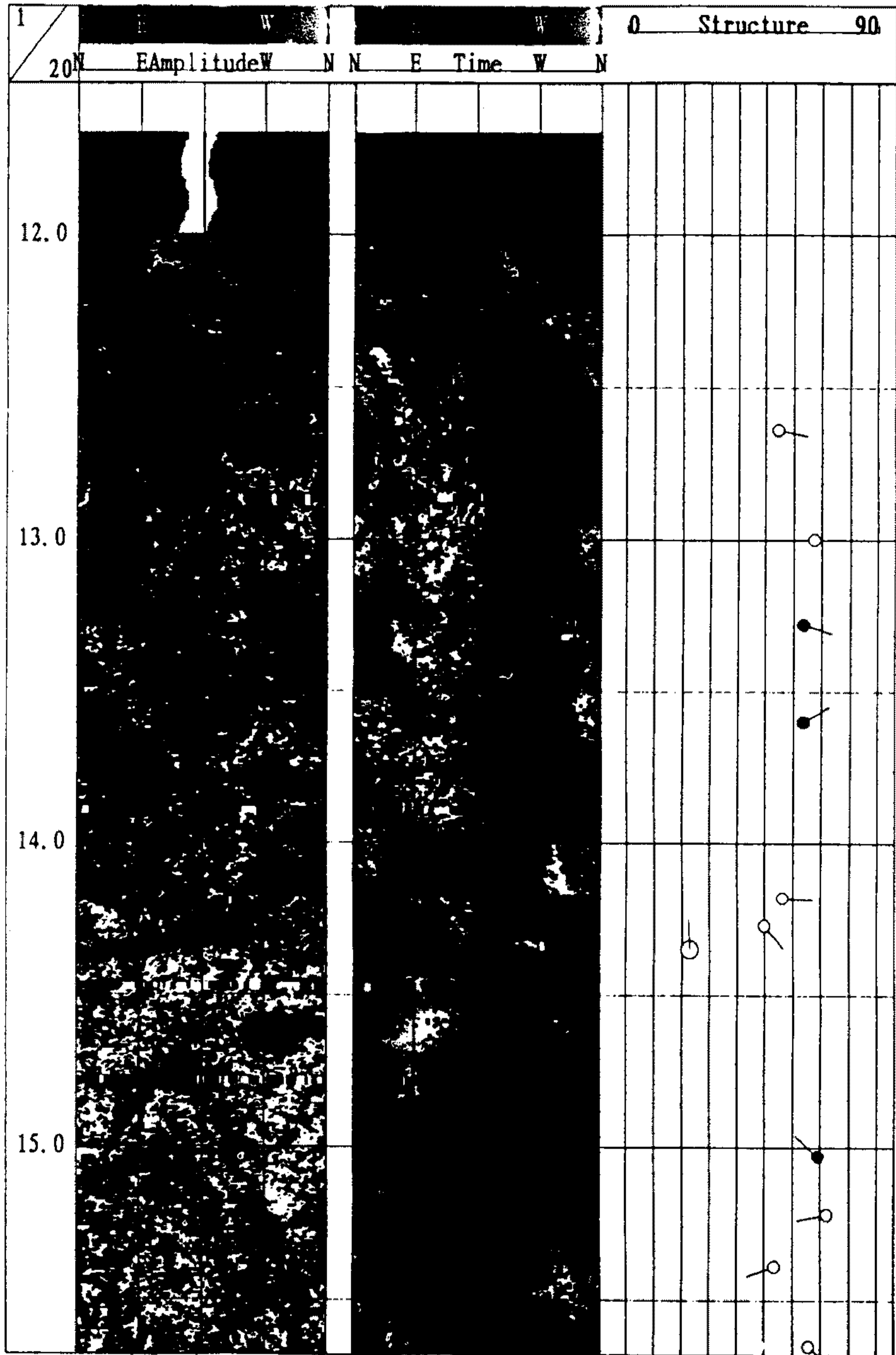


Fig. 81. Televiwer image log measured in the survey area (borehole H3) of Incheon subway construction. Left : amplitude image, middle : traveltime image, right : arrow plot for the tectonic elements.

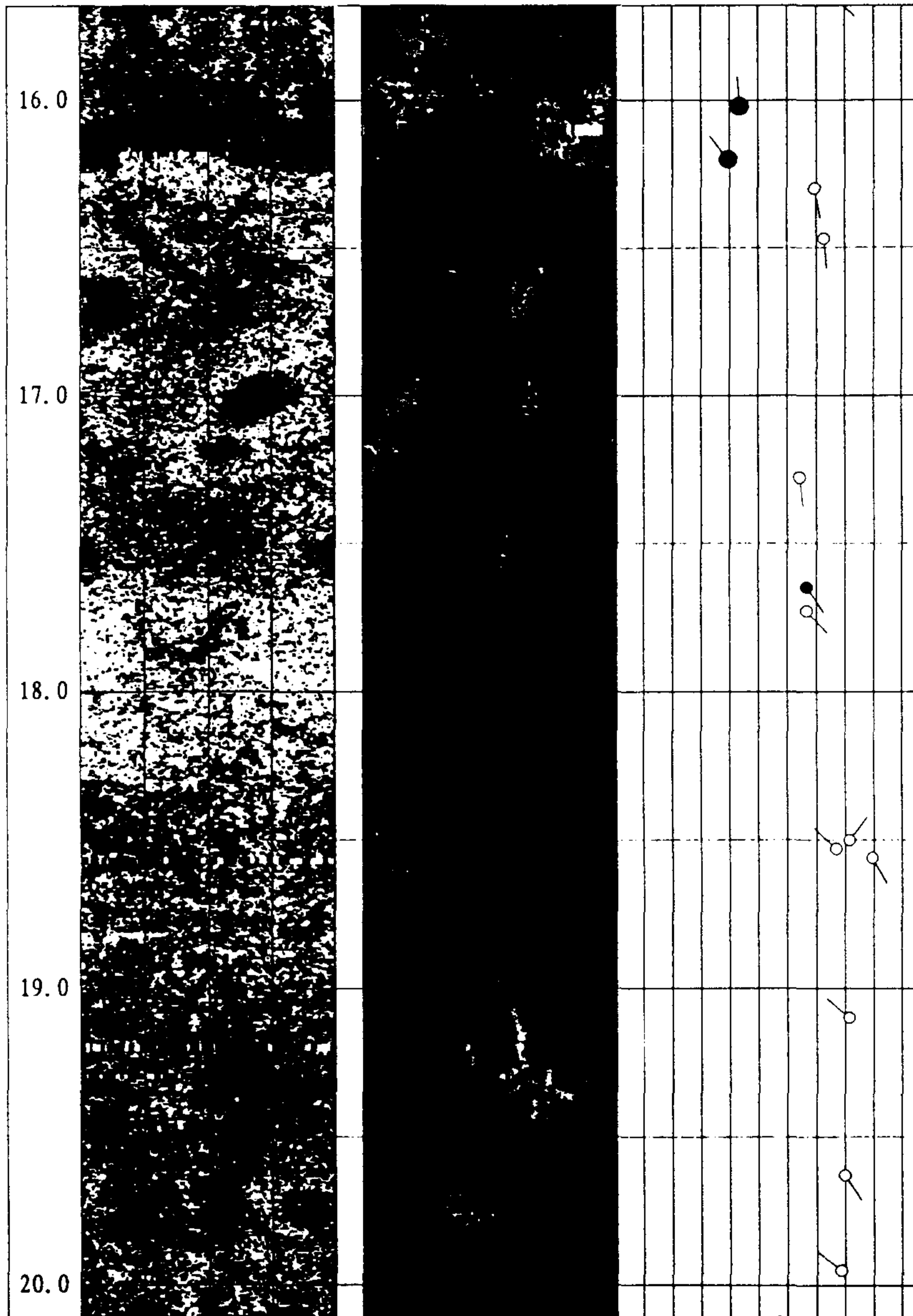


Fig. 81. (continued).

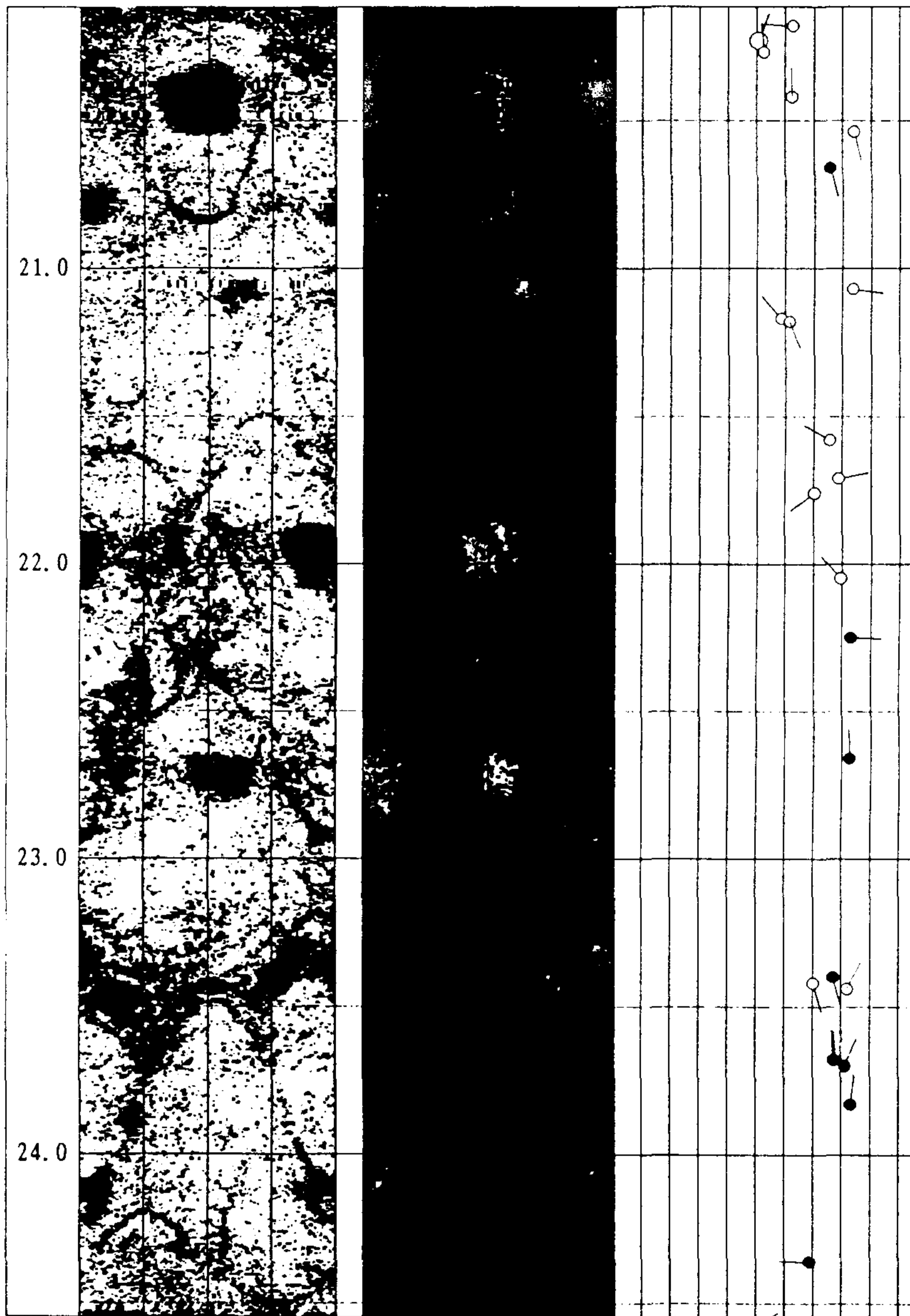


Fig. 81. (continued).

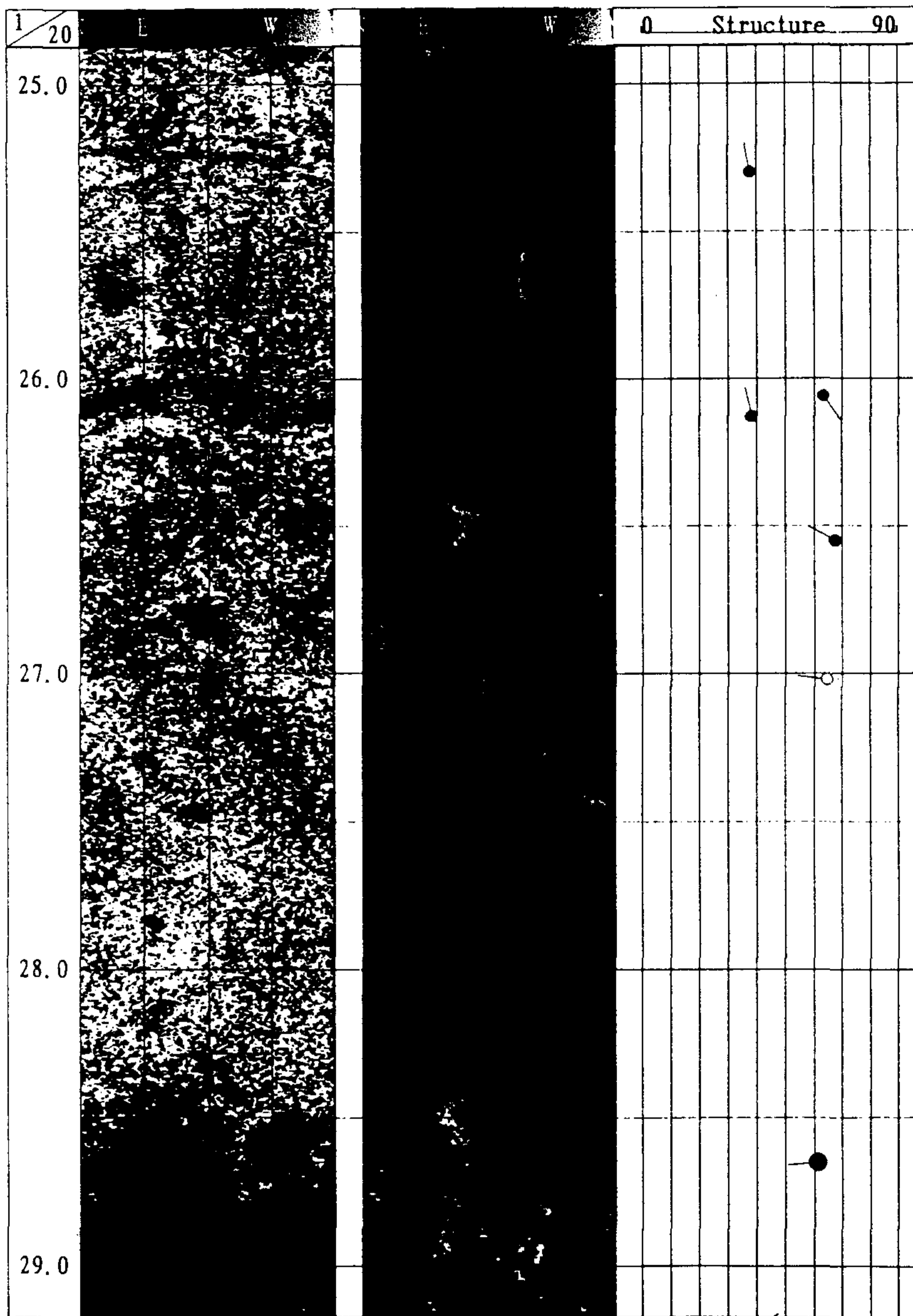


Fig. 81. (continued).

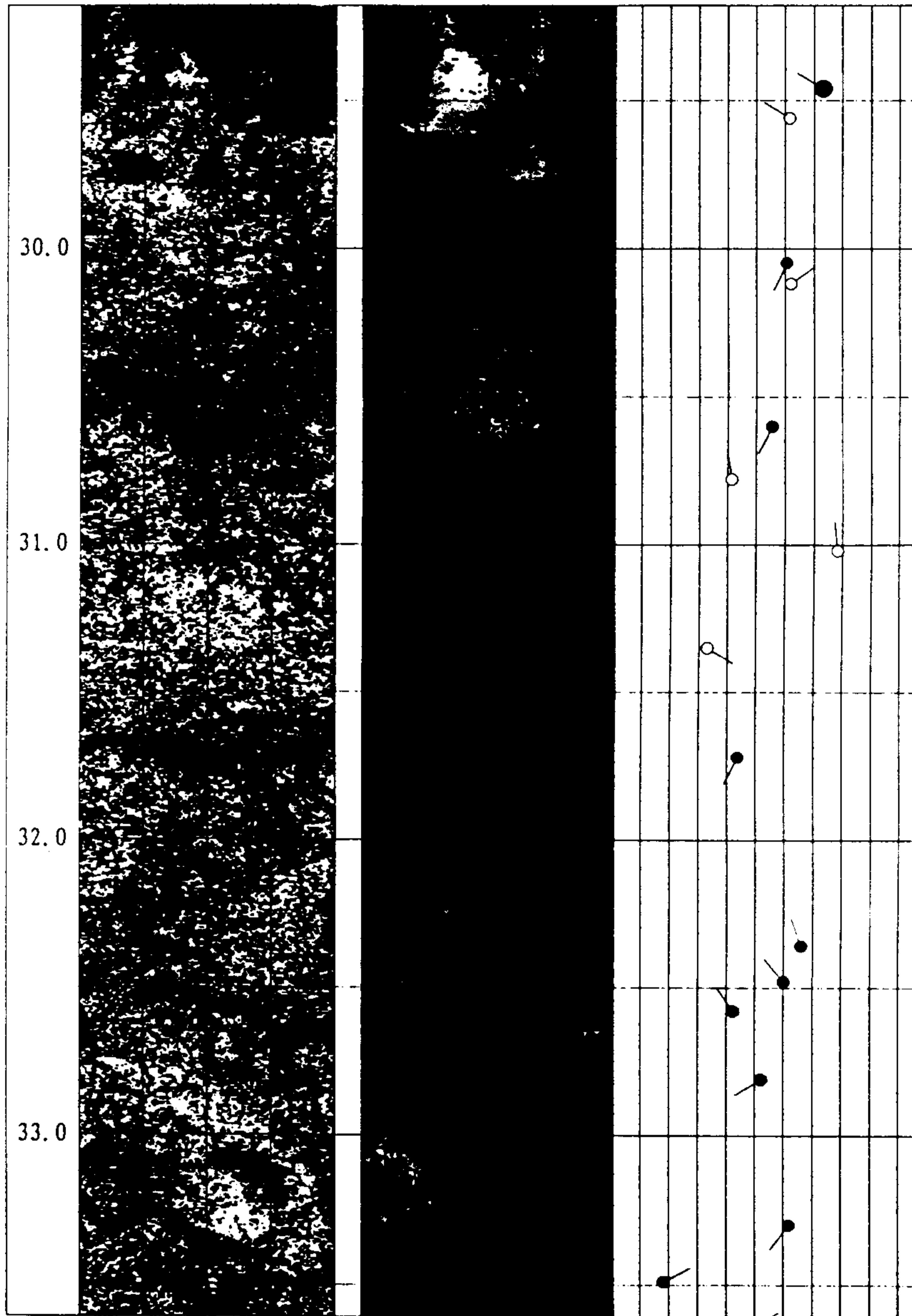


Fig. 81. (continued).

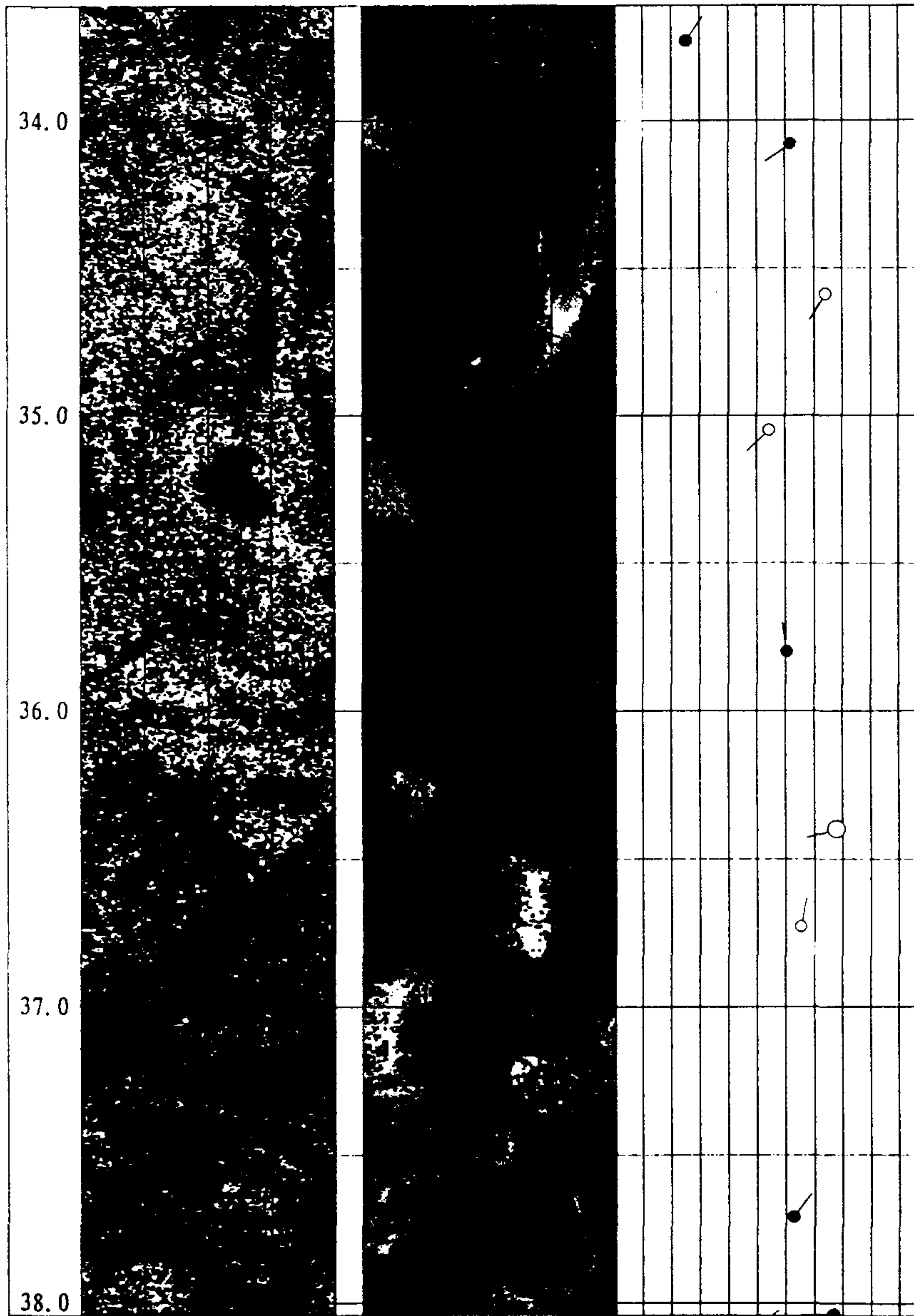


Fig. 81. (continued).

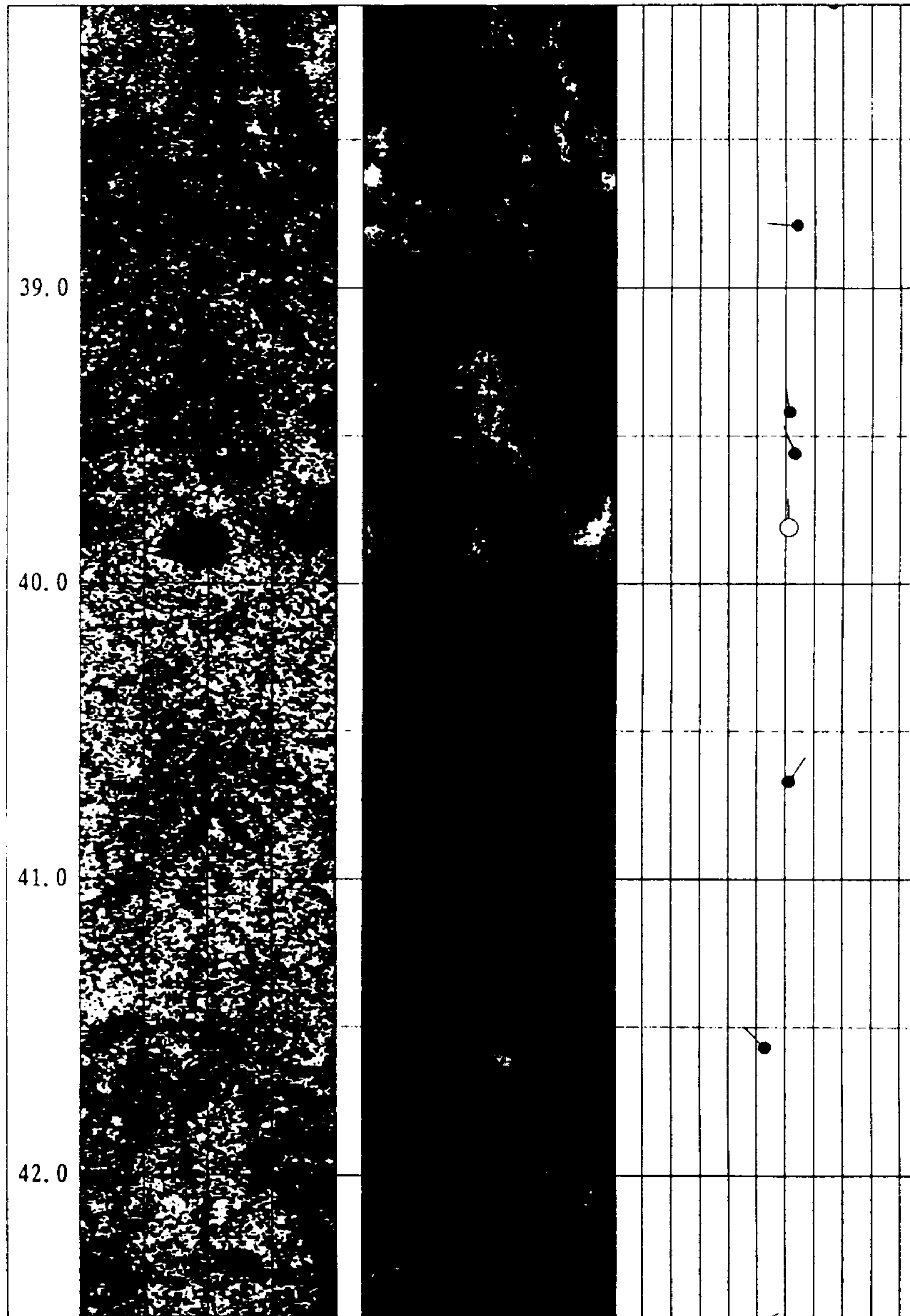


Fig. 81. (continued).

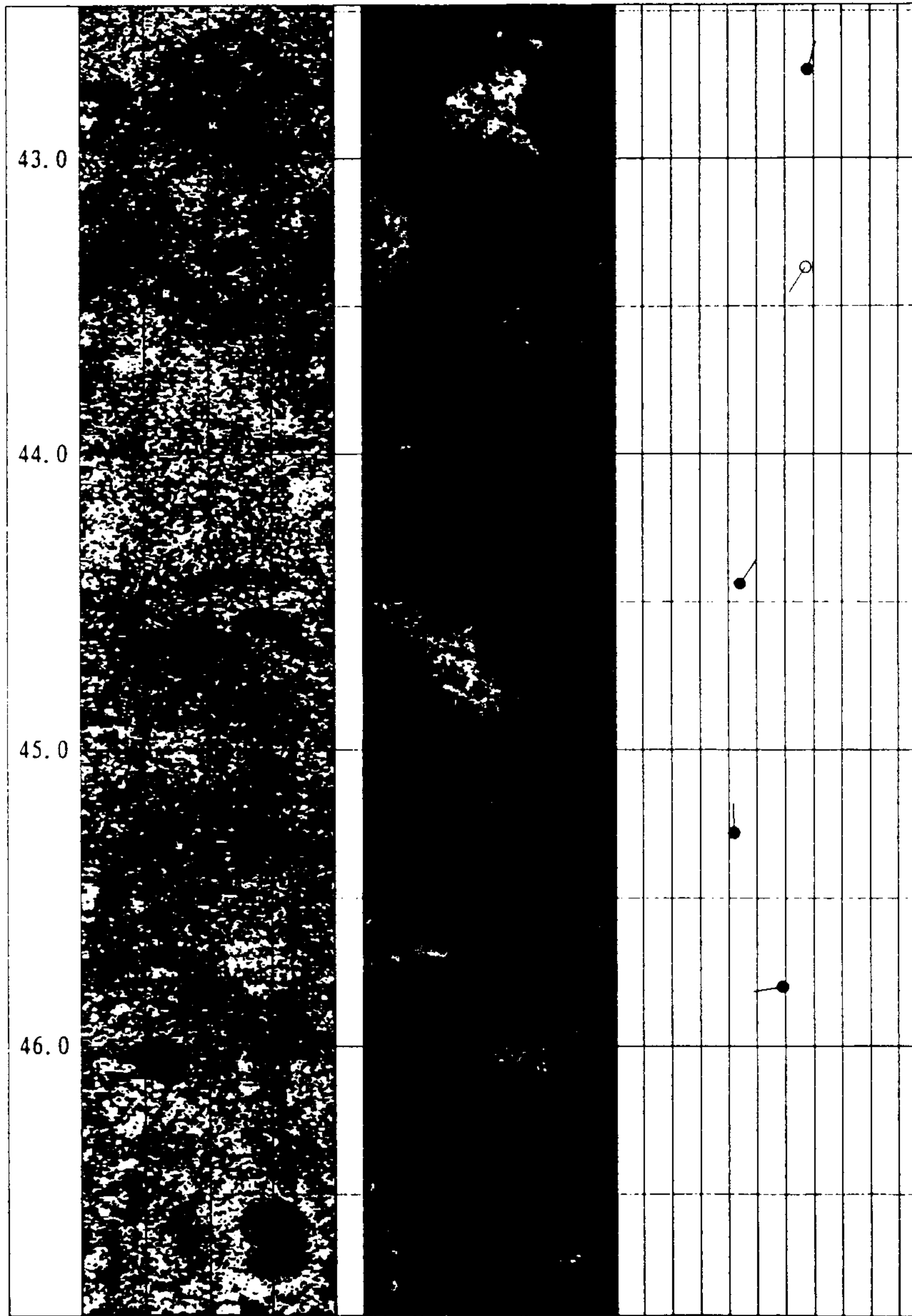


Fig. 81. (continued).

Fig. 80의 심도 59m~60.1m) 또한 강도가 상대적으로 낮은 연암 박층이 경암 내에 협재되고 있음도 관찰된다.

- 전체적으로 암석의 강도는 균등하게 나타나고 있다.

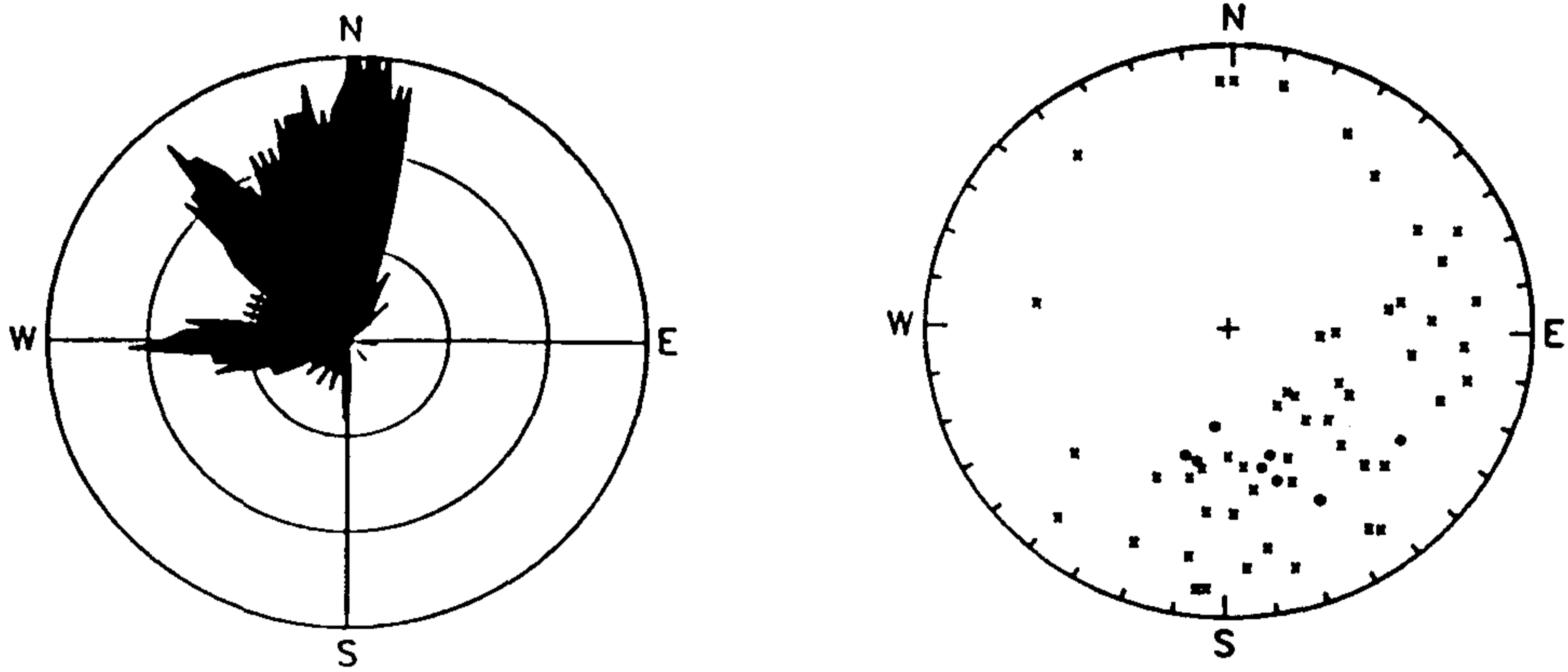
Fig. 82~Fig. 84는 이전과 유사하게 각 시추공의 심도 구간별 rose 및 pole diagram을 나타내고 있다. 특히, 본 지하철 터널공사에서는 무엇보다 단층의 발달 상태를 사전에 정확하게 파악하는 것이 유수 문제나 붕락사고 예방을 위해 대단히 바람직한 것이다. Fig. 85는 단지 단층에 대한 정보를 취하여 그들이 H1~H3 축선단면을 연직으로 바라보았을 경우 관찰되는 경사 및 경사 방향을 나타내고 있다. 여기서 실선은 H1~H3 축선을 기준으로 좌우 45°(방위각) 범위 내에 있을 경우이며 점선은 그외 방위각 범위에 속할 경우이다. 단층은 터널 심도구간에 비추어 단지 시추공 H3에서만 인식되고 있다. 정확한 단층 심도는 약 29m이며 그의 경사각은 60°, 경사방향은 280°, 두께는 약 35cm이다. 또 다른 단층은 심도 약 16m에서 경사 33°, 경사방향 357°를 띠면서 약 15cm 폭을 갖고 있다.

본 탐사지역 천부지질은 이미 텔레뷰어 이미지 분석 과정에서 밝혀진 다양한 강도를 갖는 박층들이 호상을 이루고 있음을 보여주었다. Fig. 86은 H1~H3 축선 단면을 연직으로 바라보았을 때 관찰되는 주요 암층의 경사 방향 및 경사각을 심도에 따라 나타내고 있다. 이를 위해 입력된 암층경계는 토목분야에서 일반적으로 구분하는 경계면(연암, 경암 등)이외에도 지질학적 측면에서 분류하는 경계면(예: 박층)도 포함되고 있다. 여기서 특기할 점은 박층 내지 암층들이 대체로 큰 경사를 나타내고 있다는 것이다.

Fig. 87~89는 각 시추공의 텔레뷰어 이미지로부터 산출된 암석강도 변화를 나타내고 있다. 비록 여기에 제시된 암석강도가 실제 강도치를 대변할 수 없으나 강도의 상대적인 변화는 대단히 정확하게 표현되고 있다.

H 1

(12.8m-29.9m)



(30.6m-49.1m)

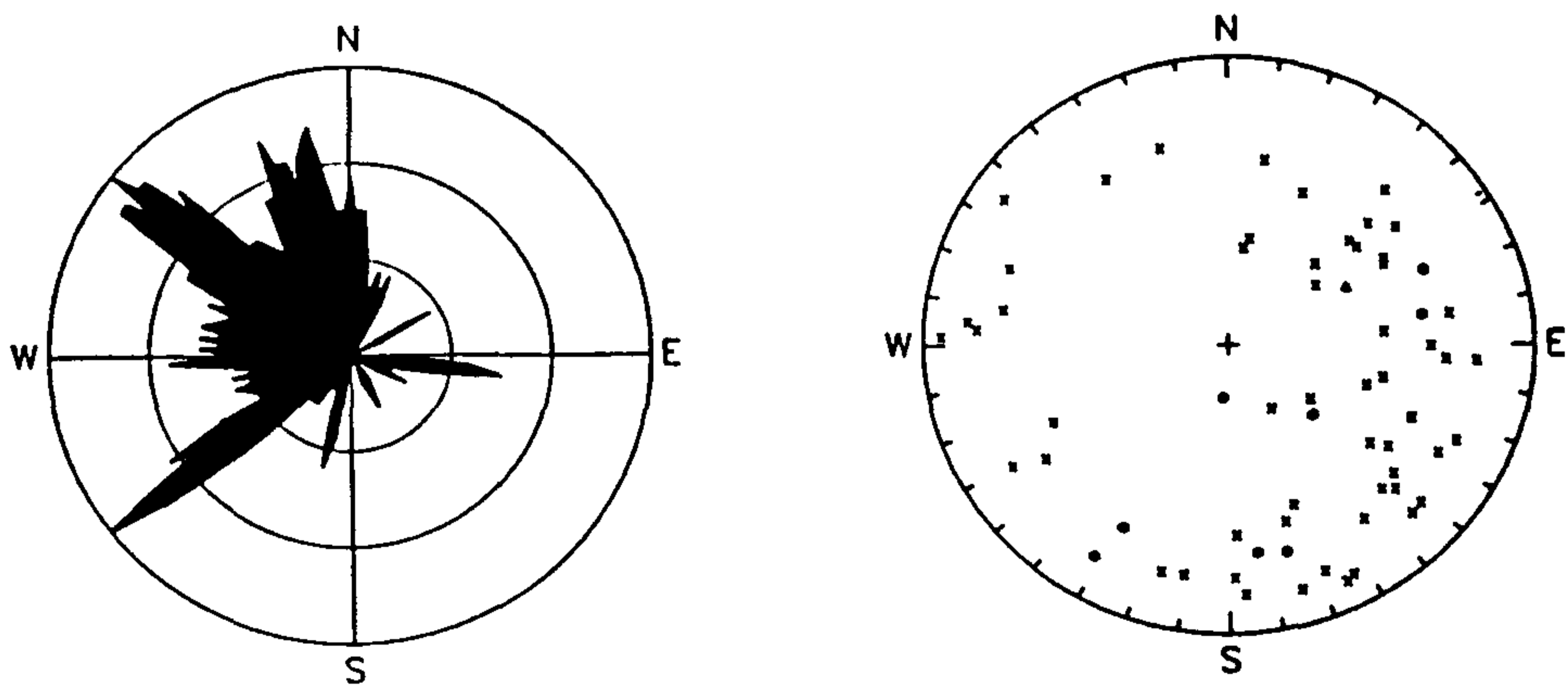
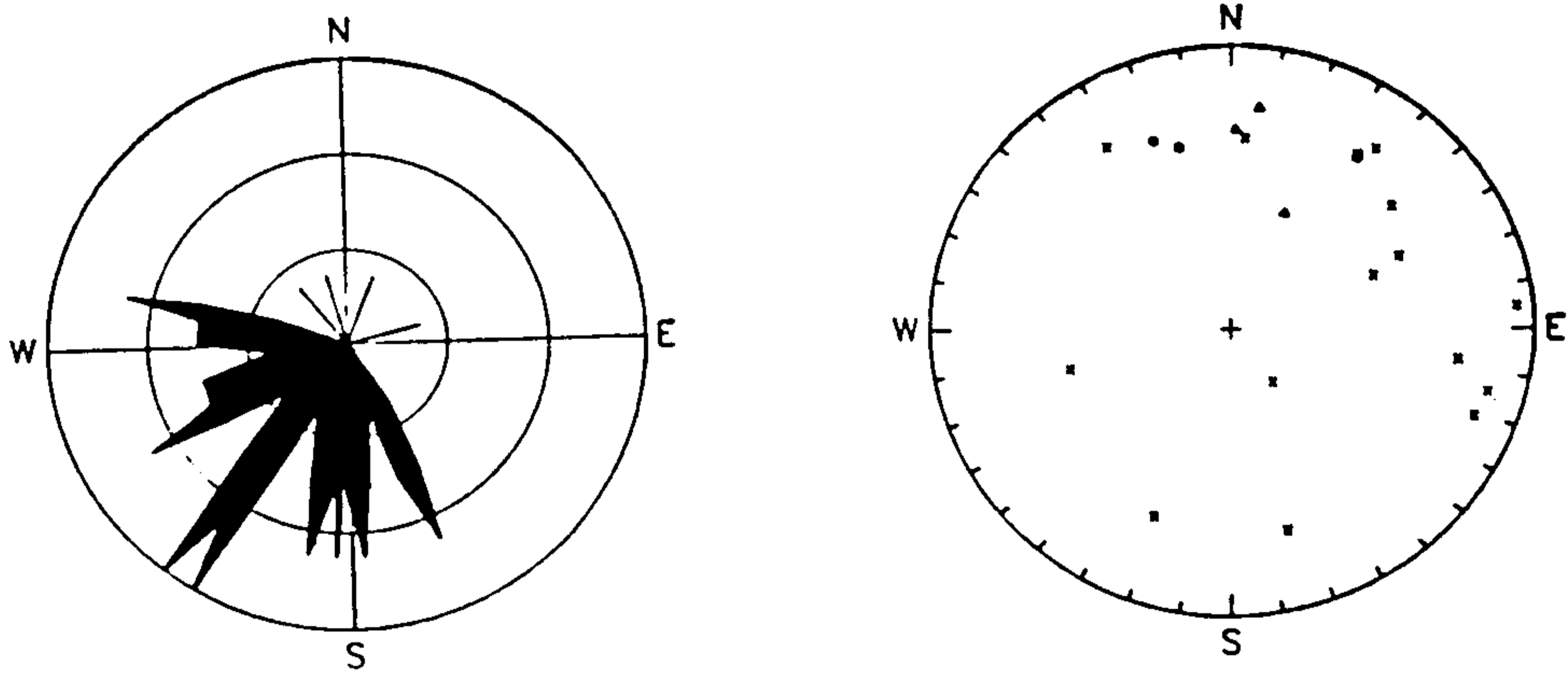


Fig. 82. Rose and pole diagrams for the tectonic elements of two depth intervals in borehole H1.

H 2

(11.6m-29.7m)



(30.4m-48.9m)

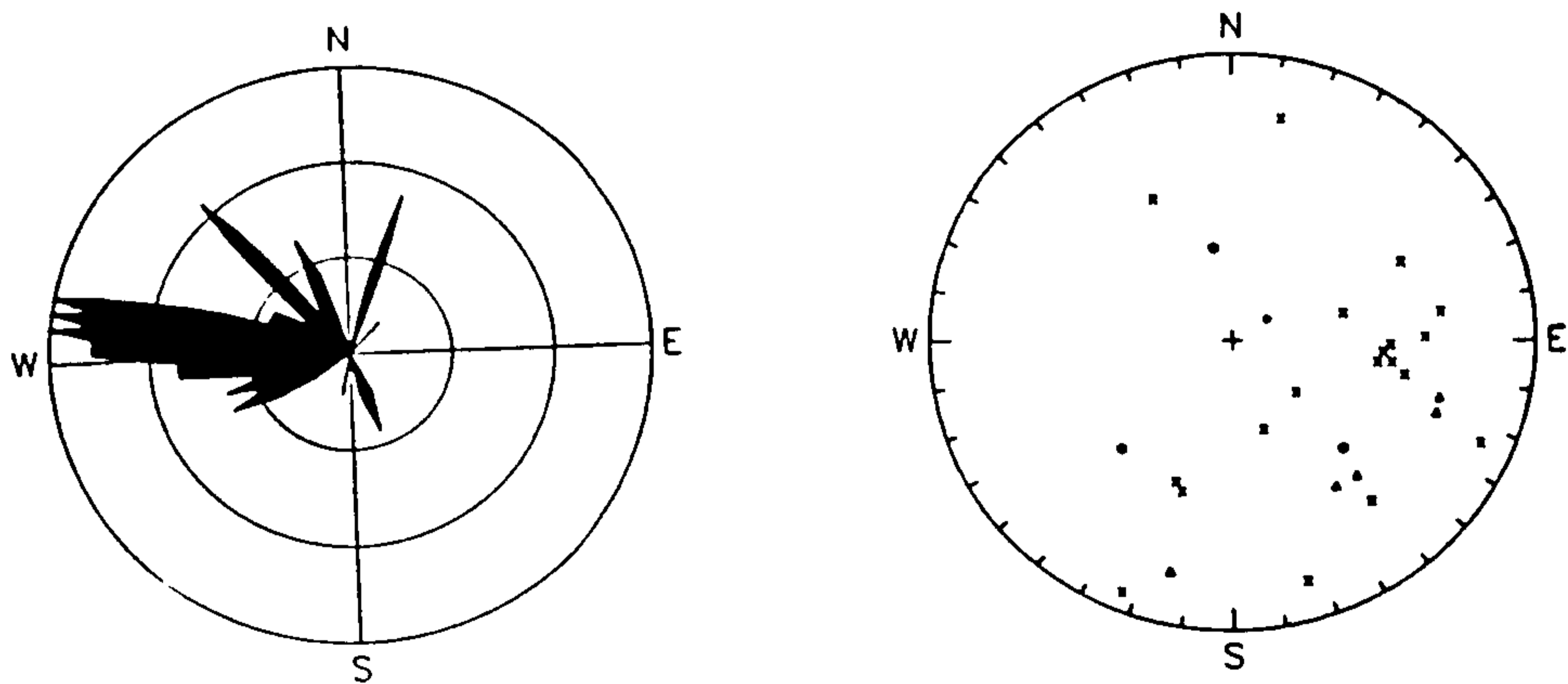
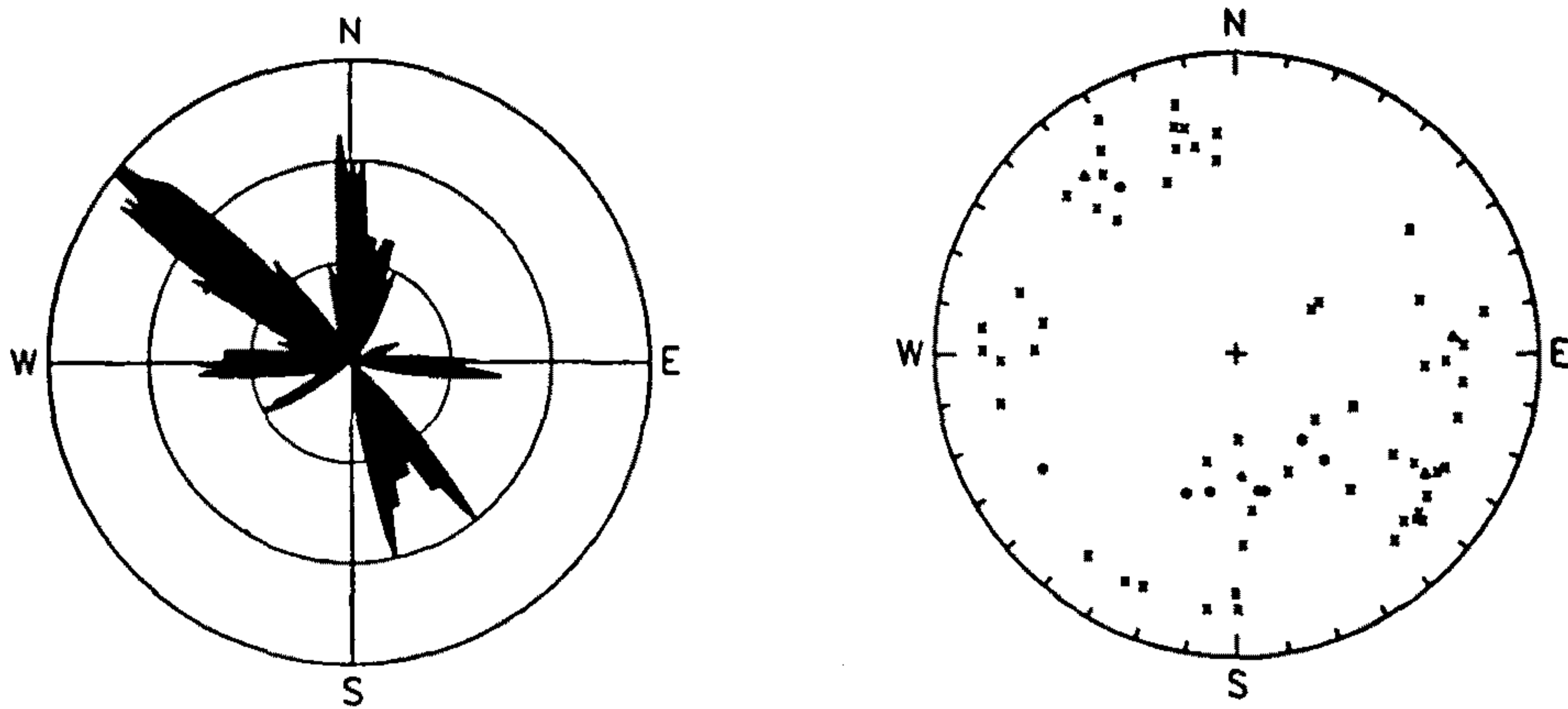


Fig. 83. Rose and pole diagrams for the tectonic elements of two depth intervals in borehole H2.

H 3

(12.6m-29.6m)



(30.1m-49.5m)

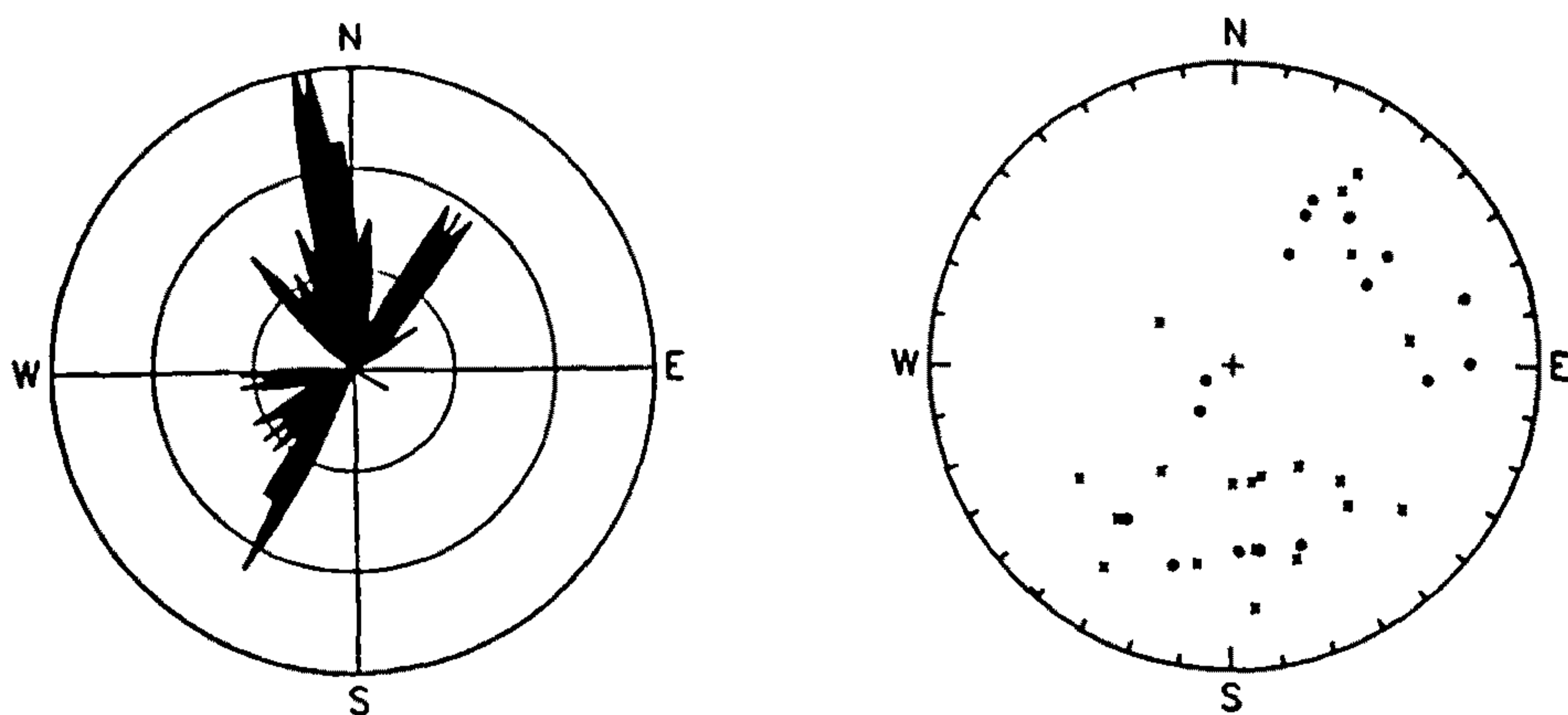


Fig. 84. Rose and pole diagrams for the tectonic elements of two depth intervals in borehole H3.

FAULT ANALYSIS

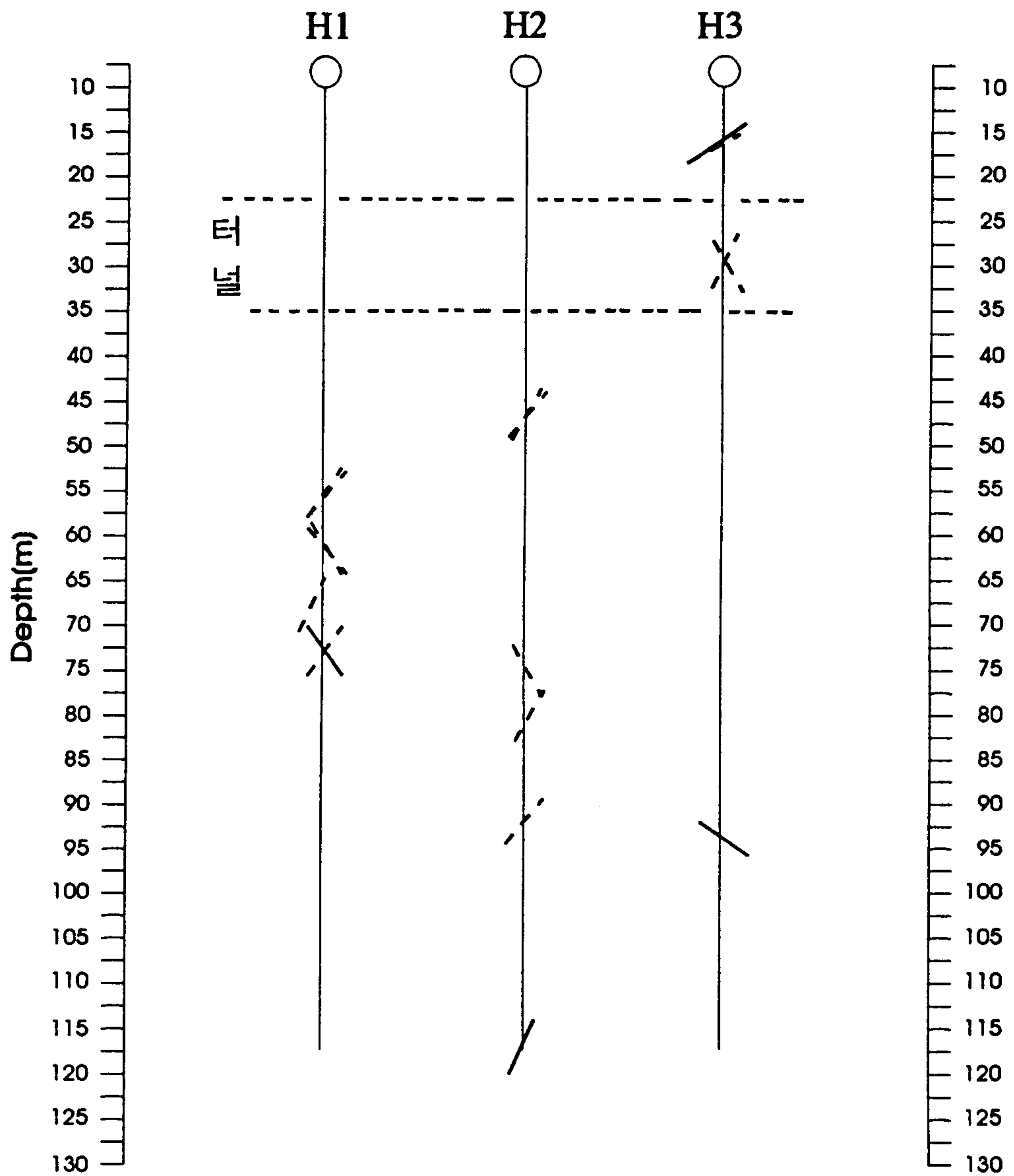


Fig. 85. Plan view of fault analysis showing dip and dip direction. Solid line corresponds to the dip direction ranging within $\pm 45^\circ$ from the cross section (H-1 ~ H-3), otherwise dotted line.

LAYER BOUNDARY ANALYSIS

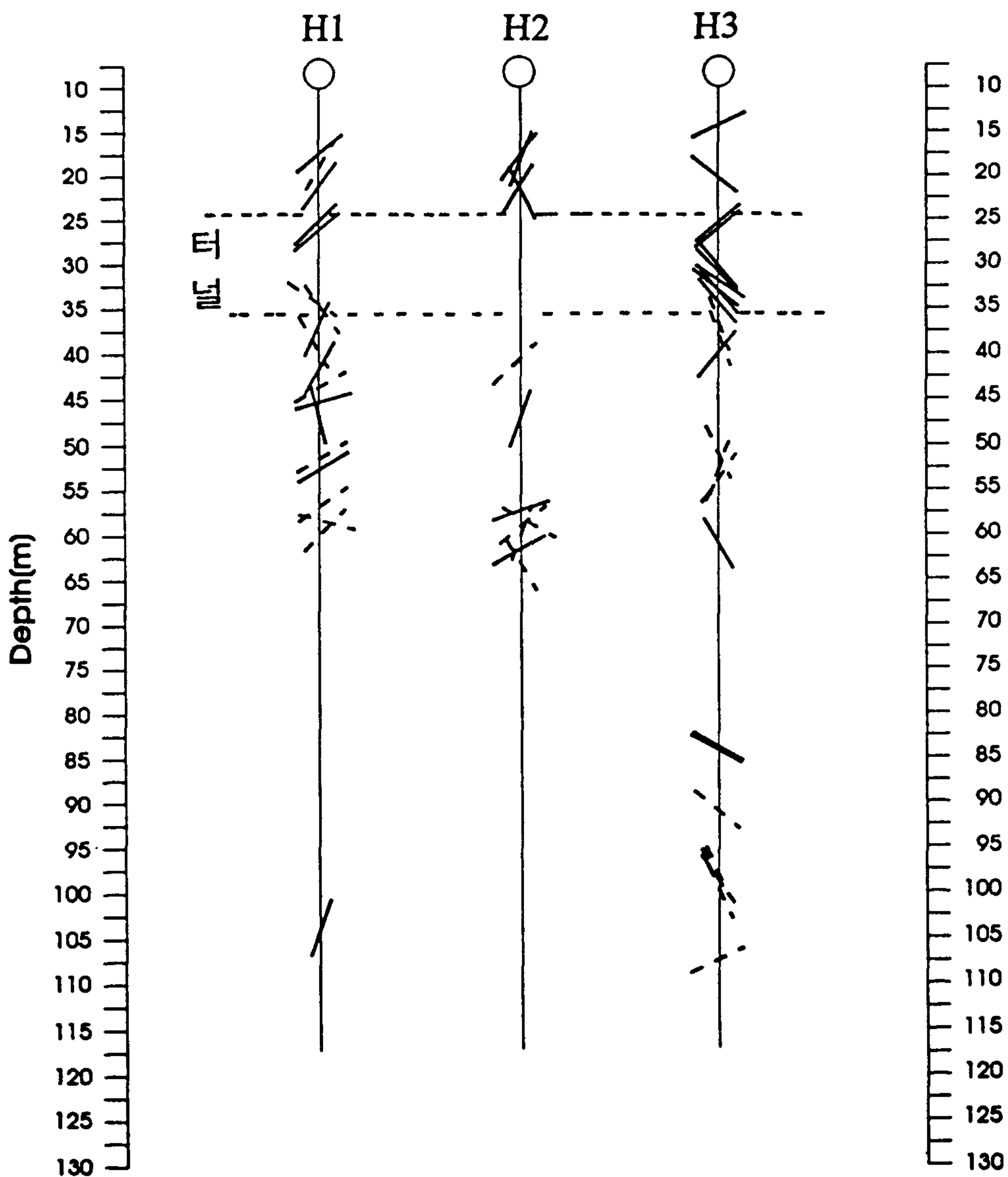


Fig. 86. Plan view of layer boundary analysis showing dip and dip direction. Solid line corresponds to the dip direction ranging within $\pm 45^\circ$ from the cross section (H-1 ~ H-3), otherwise dotted line.

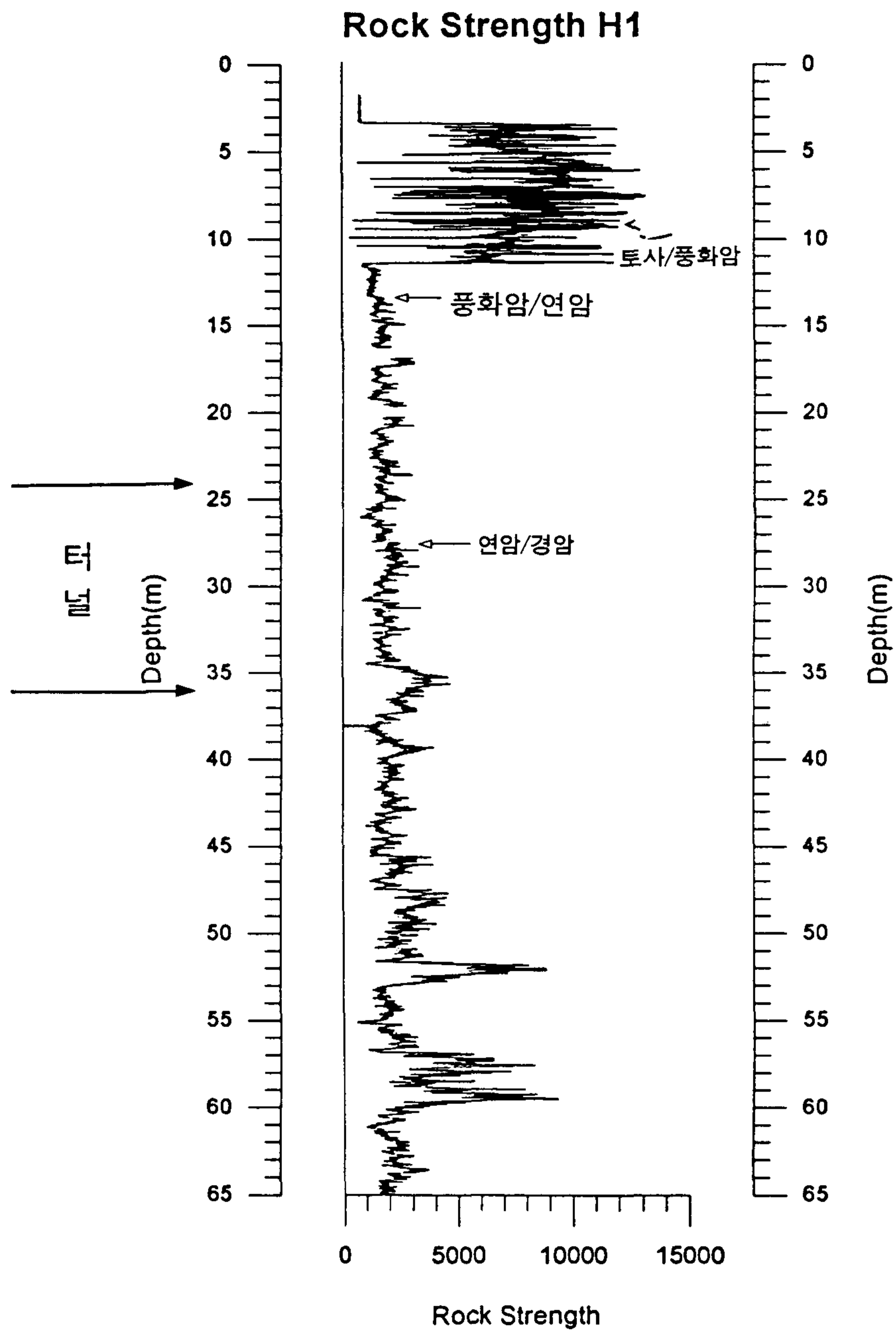


Fig. 87. Shown is the Televiwer rock strength derived from the borehole H1 in the survey area of Incheon subway construction.

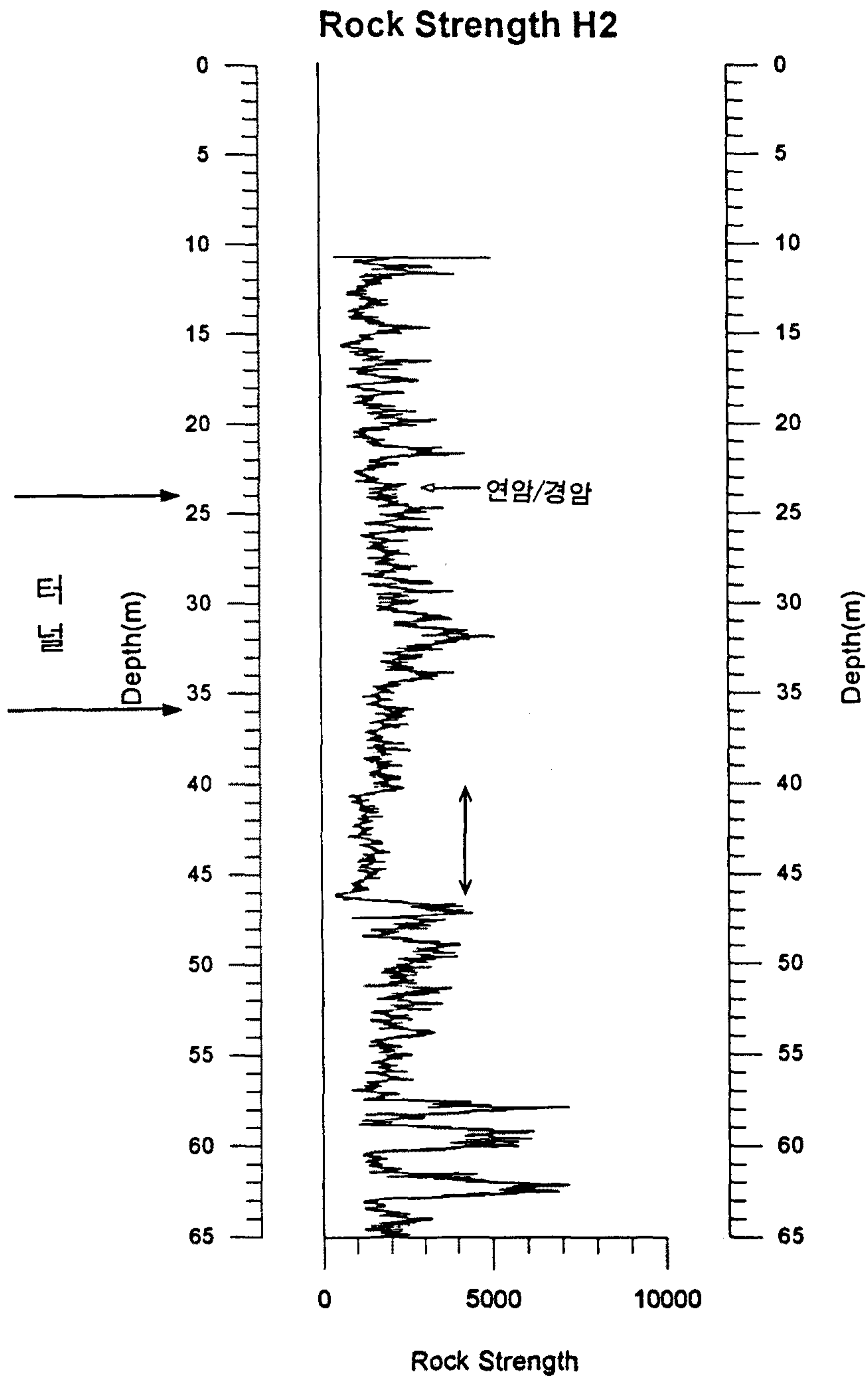


Fig. 88. Shown is the Televiewer rock strength derived from the borehole H2 in the survey area of Incheon subway construction.

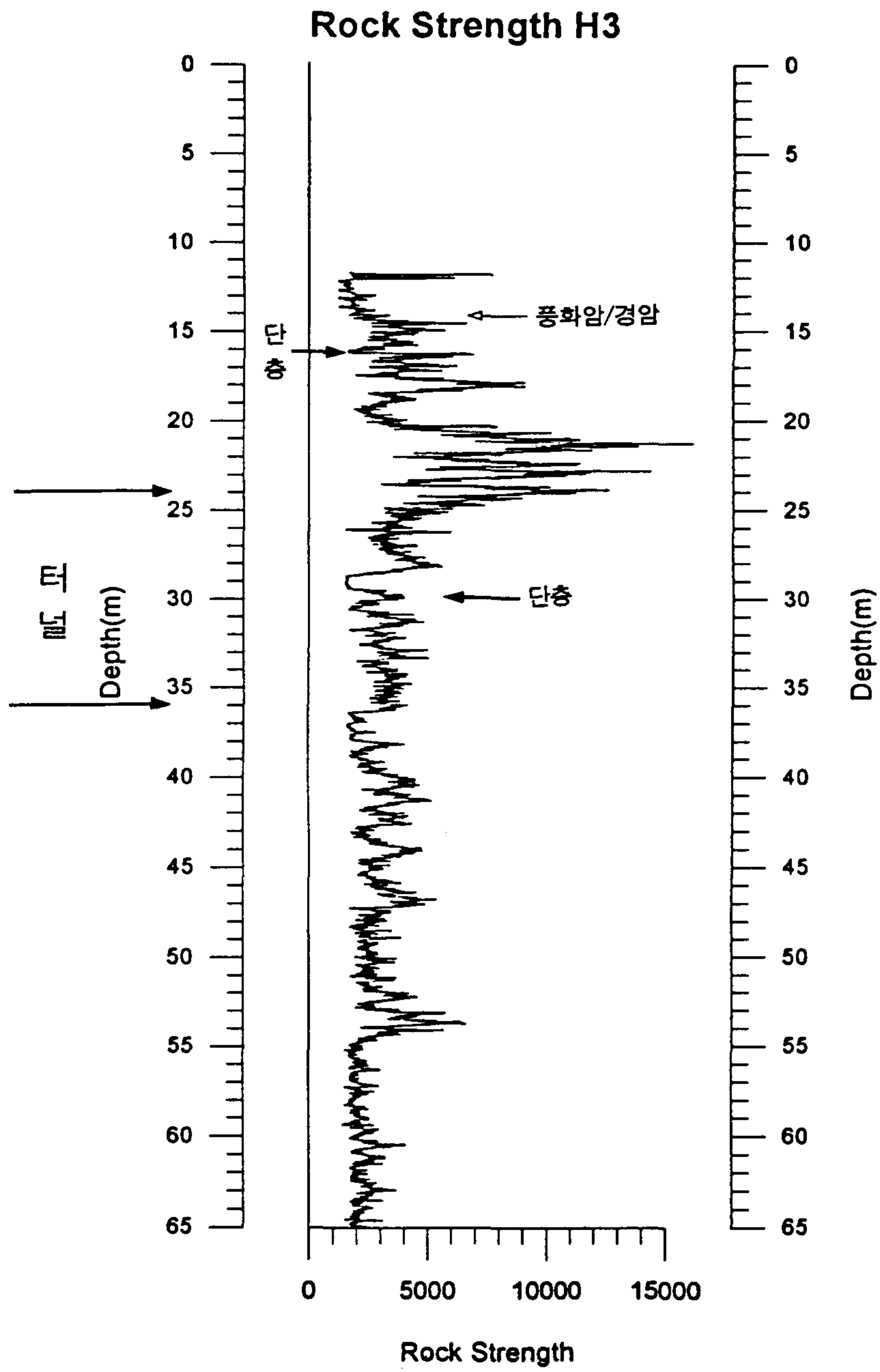


Fig. 89. Shown is the Televiwer rock strength derived from the borehole H3 in the survey area of Incheon subway construction.

Fig. 87에서 심도 약 11m까지는 steel casing에 의한 강도 반응이다. 심도 약 50m~60m 구간에는 상대적으로 강도가 대단히 큰 박층들이 존재하고 있으며 이를 기준으로 한 상부 암반의 강도는 대단히 낮게 나타나고 있다. 심도 약 36m 주위에도 주위보다 강도가 높은 박층이 존재하고 있음이 관찰된다(Fig. 79 참조). 만약, 연암/경암 경계를 강도 변화에 비추어 심도 약 27.5m로 둔다면 연암과 경암의 강도차는 미소하다. 반면, 경암의 강도변화 폭은 상대적으로 대단히 크게 된다. 연암층 내에도 강도의 하락이 박층으로 관찰되고 있다. 예를 들면, 심도 약 26m 주위에는 약 1m 폭의 연약한(거의 풍화암에 준하는) 박층이 텔레뷰어 이미지에서도 관찰되고 있다. 반면, 심도 약 17m 및 20m 주위에도 약 1m 폭의 경암에 준하는 박층이 인식되고 있다. 경암에서도 심도 약 31m 및 34m 주위에 역시 약 1m 폭에 달하는 연암에 준하는 박층이 관찰되고 있다. 즉, 터널 구간(심도 약 24m~36m) 및 그 주위에는 박층들이 호상을 이루고 있음을 볼 수 있다. 그러나 그들간의 암석강도차가 미소하기 때문에 터널공사에서 그만큼 위험이 떨어지게 될 것으로 사료된다.

시추공 H2에 대한 암석강도 분석결과(Fig. 88 참조)에서도 역시 호상을 띤 박층이 관찰되고 있다. 강도변화 측면에서 연암/경암 경계는 심도 약 23m로 추정되며 그 상부층 연암 내에서도 경암에 준하는 여러 개의 박층이 인식되고 있다. 한편, 경암 내에서도 심도 약 40.5m~46m 구간에는 연암층이 확연하게 관찰되고 있으며 이러한 층은 탄성과 전달 측면에서도 뚜렷하게 구분된다. 일반적으로 호상을 이루는 박층들 간의 강도차가 크면 클수록 상호 전단력을 잃게 되어 박층의 분리가 쉽게 일어나게 된다. 시추공 H2의 경우 터널 상단과 연암/경암 경계면 간의 폭은 불과 1~2m에 불과하다. 그러나, 경계면에 인접한 박층이 큰 경사를 나타낸다면 그에 따른 위험 정도는 때에 따라 달리 할 수도 있겠다.

Fig. 89에 나타낸 시추공 H3의 암석강도는 이전과는 전혀 다른 양상을 보여주고 있다. 풍화암에 이어 바로 경암이 이어지고 있으며 터널상단 상부암반은 터널구간 내의 것보다 상대적으로 높은 강도를 나타내고 있으며 더구나 그 중에서도 큰 폭의 강도차를 보여주는 박층들이 호상으로 협재되고 있음을 볼 수 있다. 한편, 터널하부 암반상태는 심도가 깊어질수록 암석강도는 점차 하락하는 특이한 양상을 보여주고 있다.

끝으로, Fig. 90은 텔레뷰어 이미지 및 암석강도 분포에 의해 세분화된 암층 발달상태를 나타내고 있다. 여기서 경암은 강도 측면에서 상당한 차이를 보여주고 있기 때문에 편의상 이를 다시 경암, 중경암, 극경암으로 세분화하였다. 반면, 연암도 다시 연암, 강연암으로 구분하였다. 전체적으로 박층을 띤 암층들이 호상을 이루고 있음을 볼 수 있다. 화살표로 표시한 풍화암, 연암, 경암 구분은 토모그래피 단면측정 결과에 의해 보완된 후 판단된 것이다.

3. 경기도 평택군 대형구조물 시설 지반조사

대형 구조물 시설을 위한 면적은 약 34m × 74m이며 여기에서 터파기 공사가 계획되었다. 탐사를 위한 시추공 WB1~WB6은 대체로 터파기 공사 면적 가장자리에 위치하고 있으며 그들은 rotary drill(LX 규격)에 의해 심도 약 50m까지 시추되었다. 시추 과정에는 용수 현상이 도처에서 관찰되었으며 경암상부 지층 발달상태는 거의 일관성을 잃고 있었다. 본 탐사지역의 지질은 여러차례 지각변동을 받은 소위 복잡형 변성암으로 간주되고 있기 때문에 그에 따른 특이한 지질상태(예: 박층의 호상구조)나 단층 및 절리

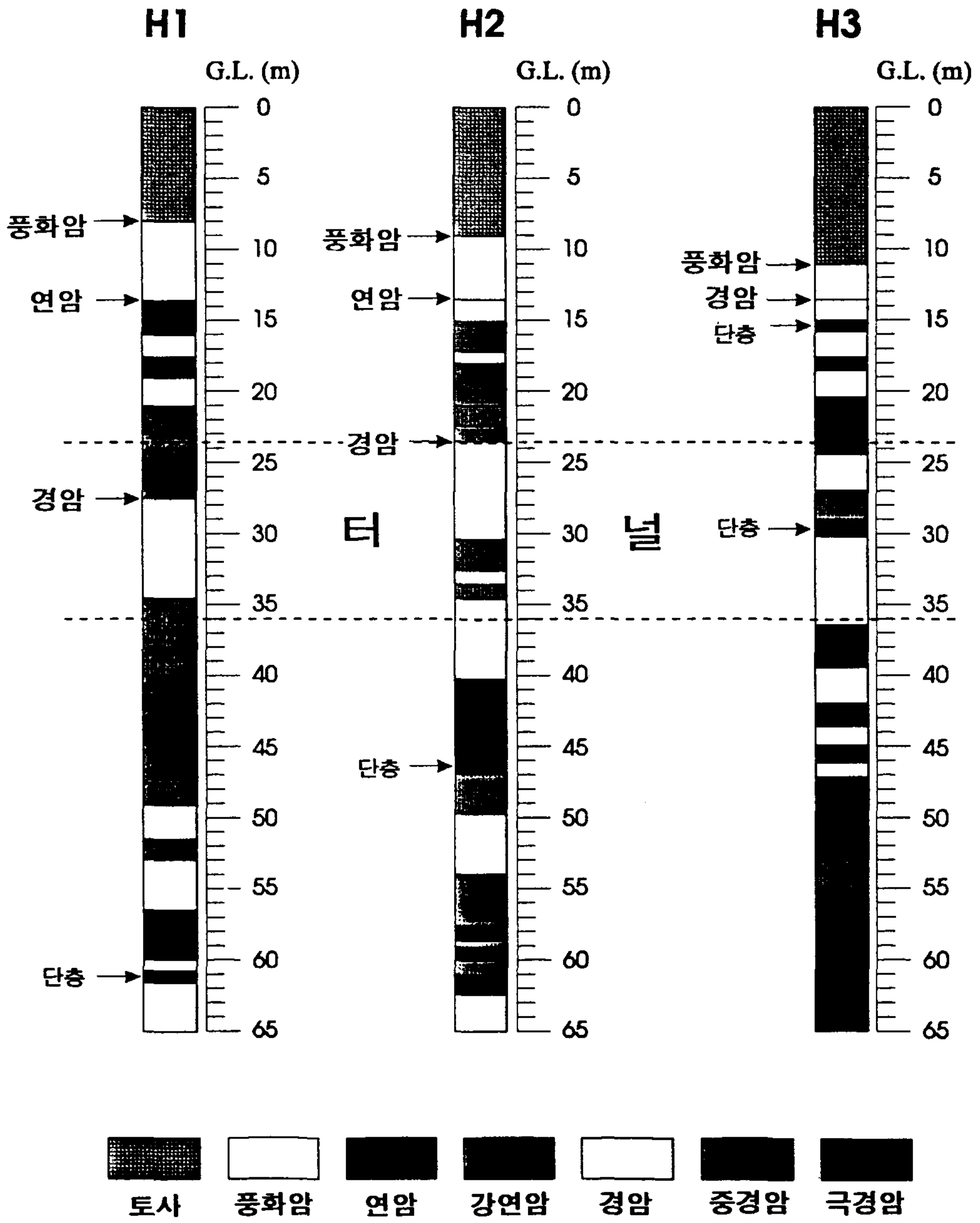


Fig. 90. Plot of the layer boundaries derived from the layer boundary analysis and the Televiewer image log.

의 발달이 기대된다. 따라서 본 탐사의 목적은 지반 상태를 정확하게 파악함으로써 터파기 공사 설계(예: 터파기 심도 판단) 및 시공을 위한 바람직한 기초자료를 제시하는 데 있었다. 여기서 텔레뷰어 응용을 통하여 기대되는 주요 지반정보는 다음과 같다.

- 단층 및 절리의 발달 상태(정확한 방향: 경사각 및 크기)
- 용수의 출처 및 경로 파악
- 연속적인 in-situ 암석 강도

Fig. 91은 단지 시추공 WB5에서 얻어진 텔레뷰어 측정데이터(raw data)를 전산처리 후 그 결과를 진폭 및 주시 이미지, 암석강도, arrow plot로 나타내고 있다. 이번에는 시추공이 rotary drill에 의해 천공되었기 때문에 이미지의 분해능은 대단히 높게 나타나고 있다. 진폭 및 주시 이미지에서 수평축 길이는 실제로 약 $24\text{cm}(11.6\text{cm} \times \pi)$ 에 해당한다. 따라서 수직축의 실제 척도는 수평축 척도와 비교하여 약 3배 정도 압축되고 있기 때문에 본 이미지에서 보이는 sine curve의 진폭은 약 3배 확대하여 가늠되어야 한다. 일반적으로 sine curve는 주로 진폭이미지에서 관찰되며 이러한 curve가 주시이미지에도 인식되면 절리 및 단층 내의 충전 상태가 추정된다. 심도 약 11.8m 주위가 밝은 색깔로 보이는 것은 steel casing에 기인되며 그로부터 casing의 강도도 추정된다. casing이 끝나는 심도로부터 짙은 색깔의 진폭이 관찰되는 것은 그곳의 암반이 실제로 연약함을 상대적으로 나타내는 것이 되겠다. 이러한 짙은 색깔은 심도 약 32m에 이르기까지 계속되며 그로부터는 색깔의 급격한 차이를 보여주고 있다. 심도 약 12.5m 주위에는 예를 들어 상당한 두께의 단층면이 뚜렷이 관찰되며 그 곳에서 암석강도도 하락되고 있음을 볼 수 있다. 그러나, 그 이하에는 단층이 인식되지 않고 있

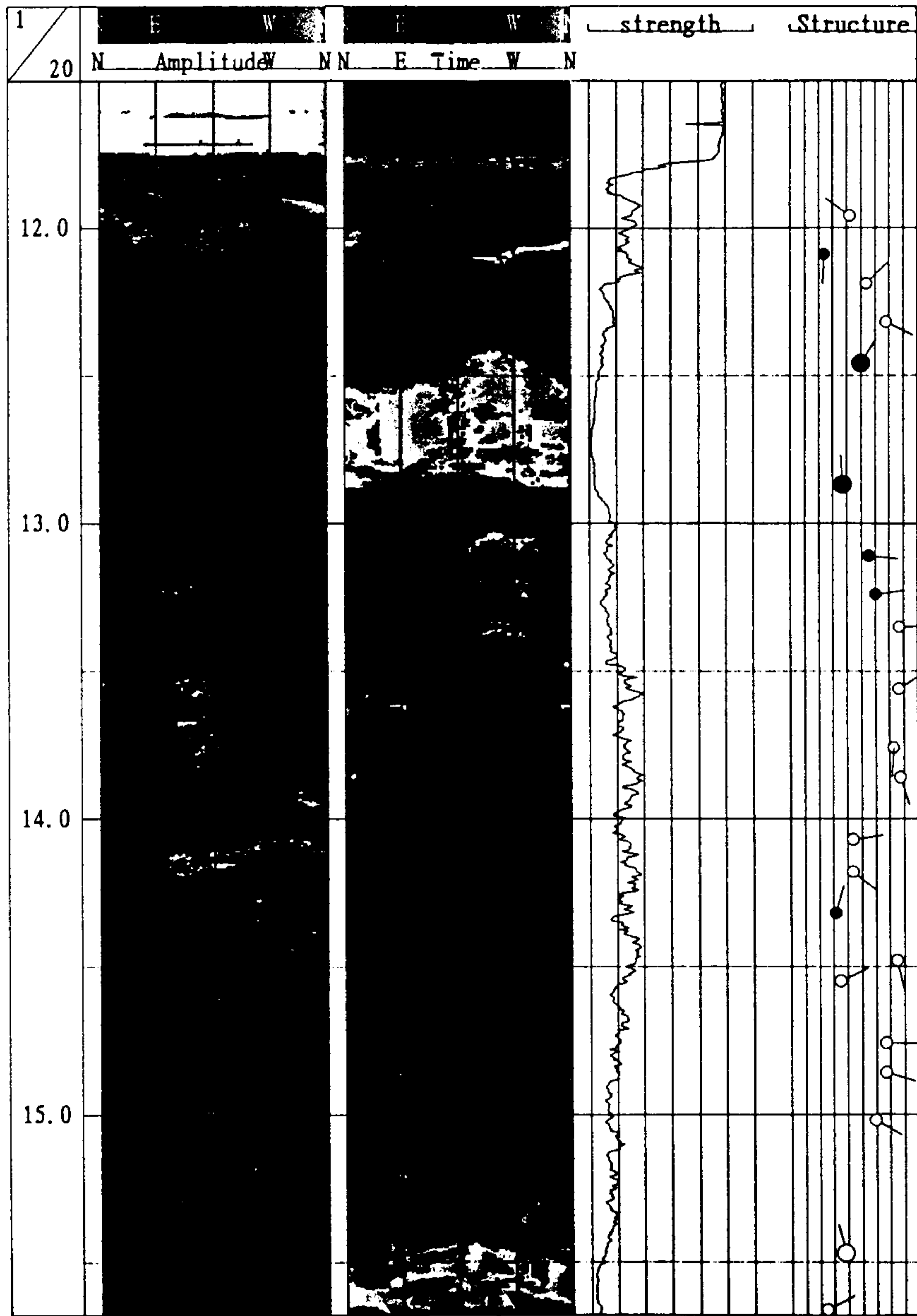


Fig. 91. Televiwer image log measured in the survey area (borehole WB5) Pyongtaek, Korea. From left ro right, amplitude image, traveltime image, rock strength, arrow plot.

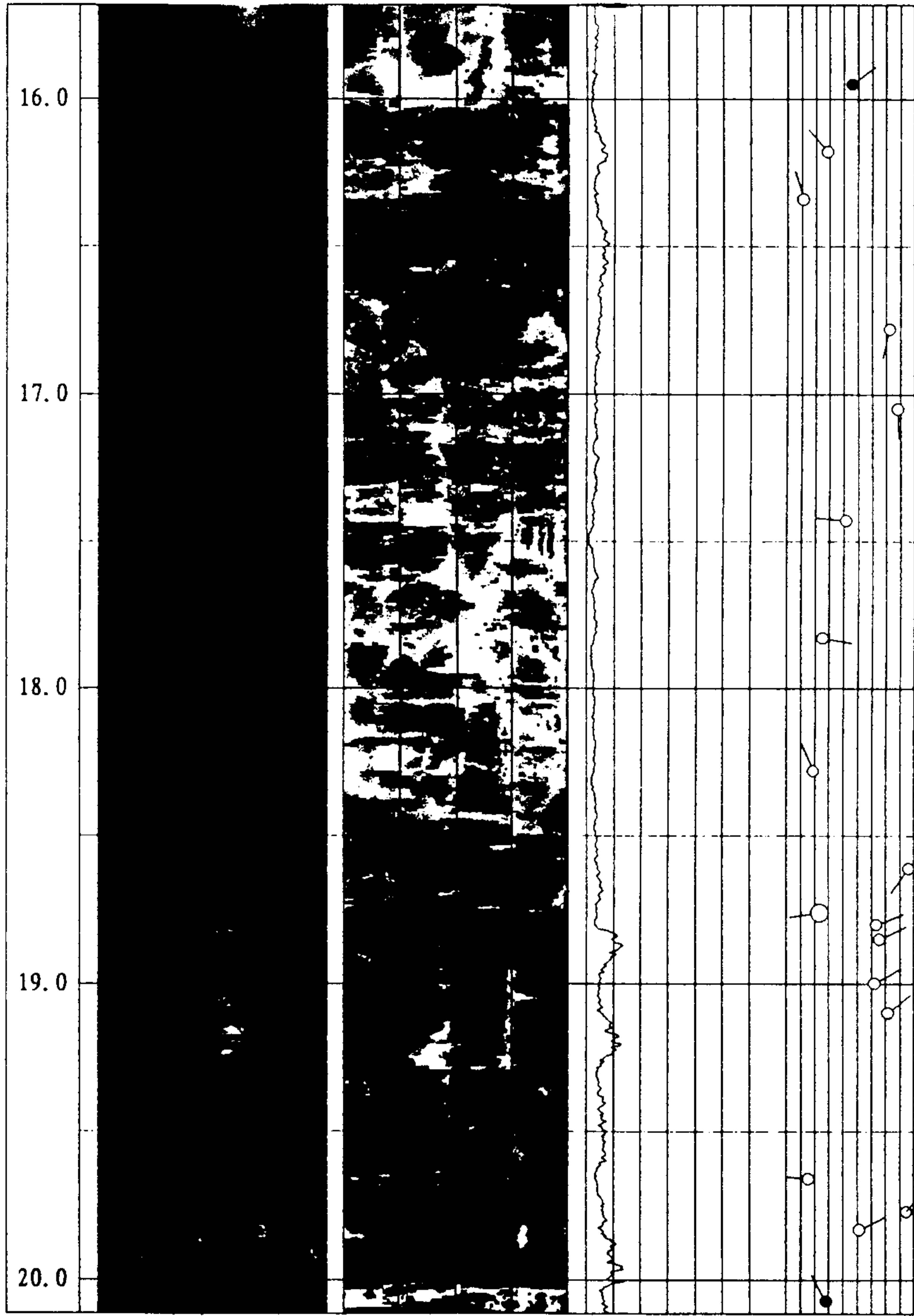


Fig. 91. (continued).

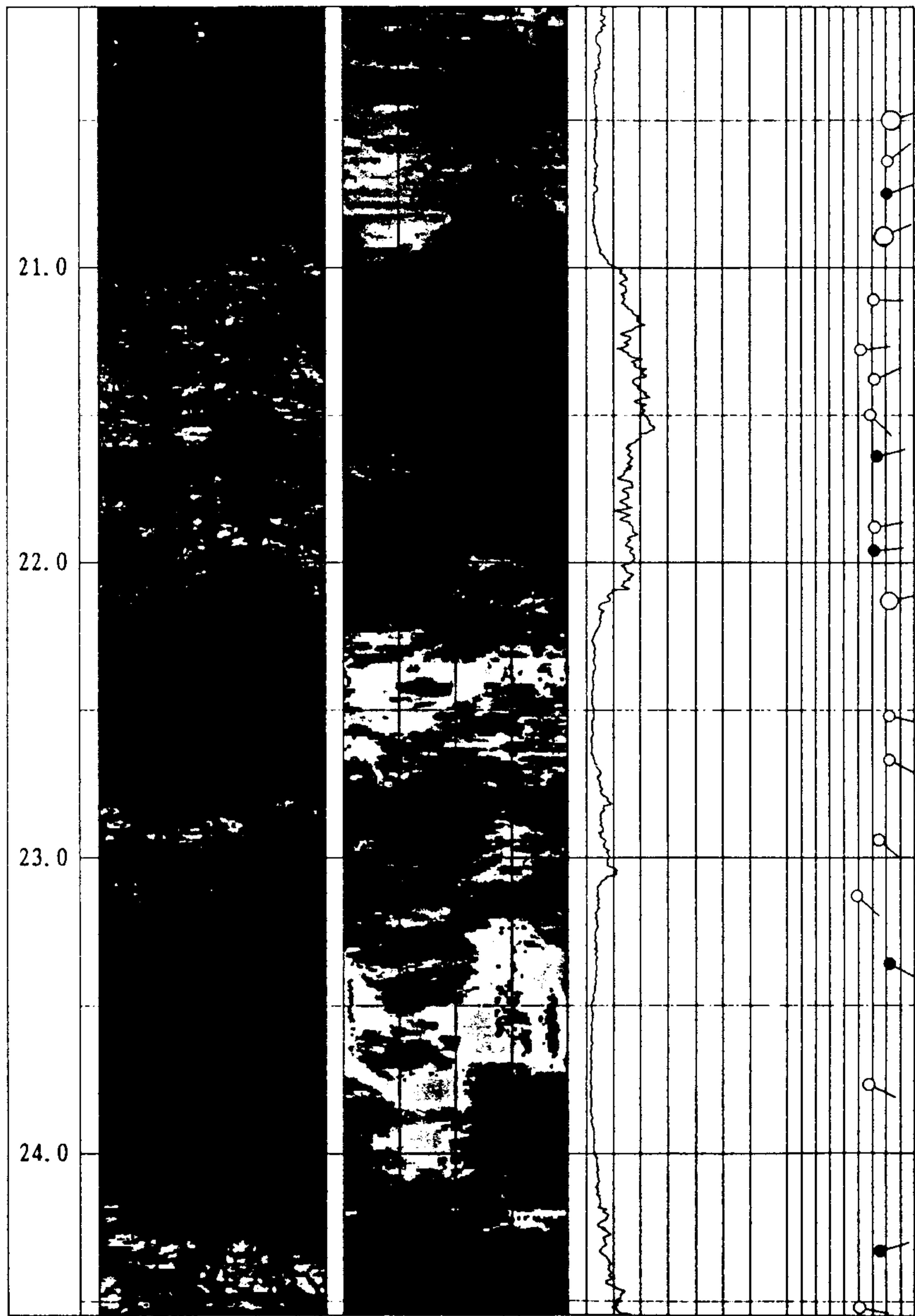


Fig. 91. (continued).

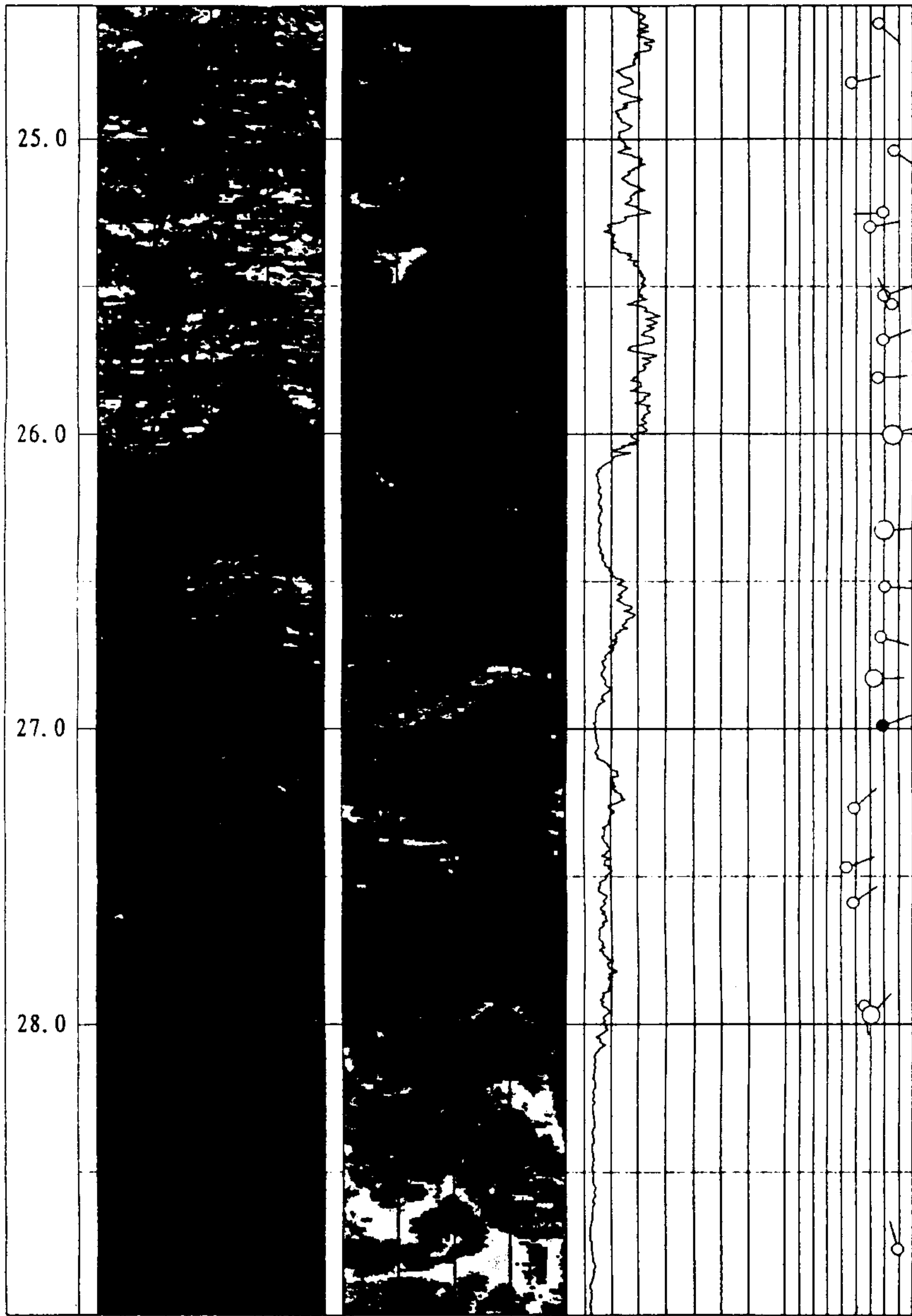


Fig. 91. (continued).

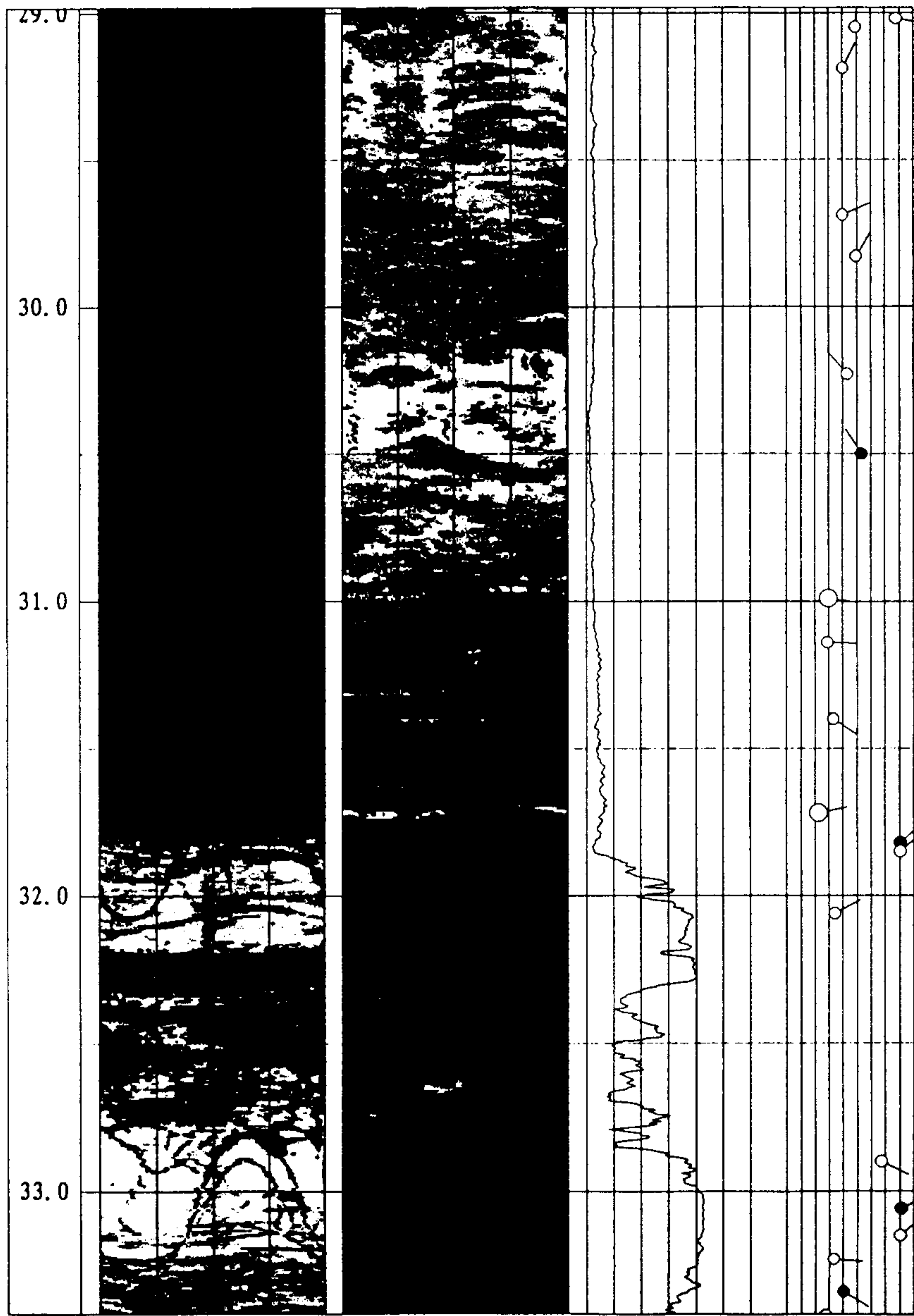


Fig. 91. (continued).

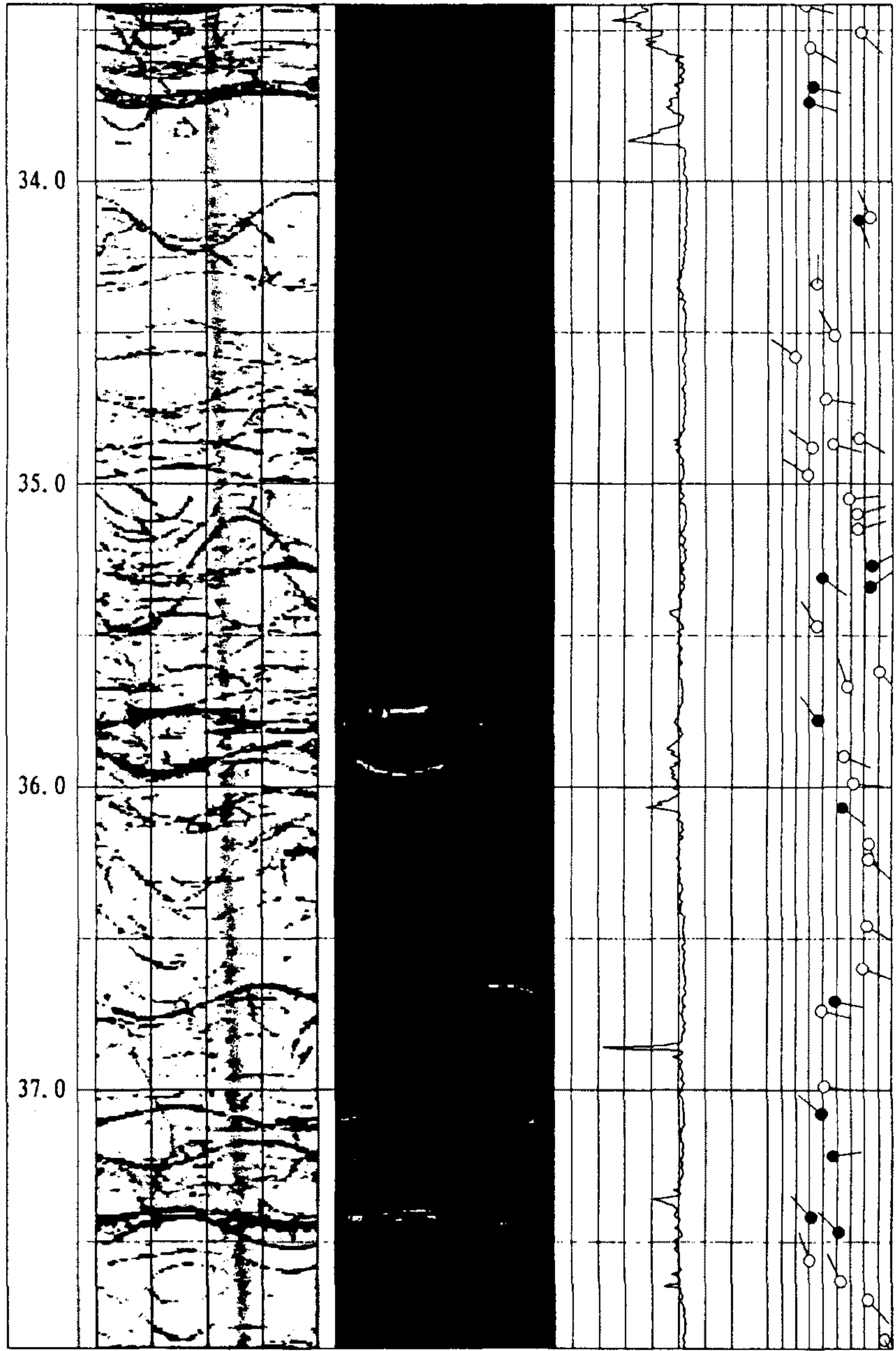


Fig. 91. (continued).

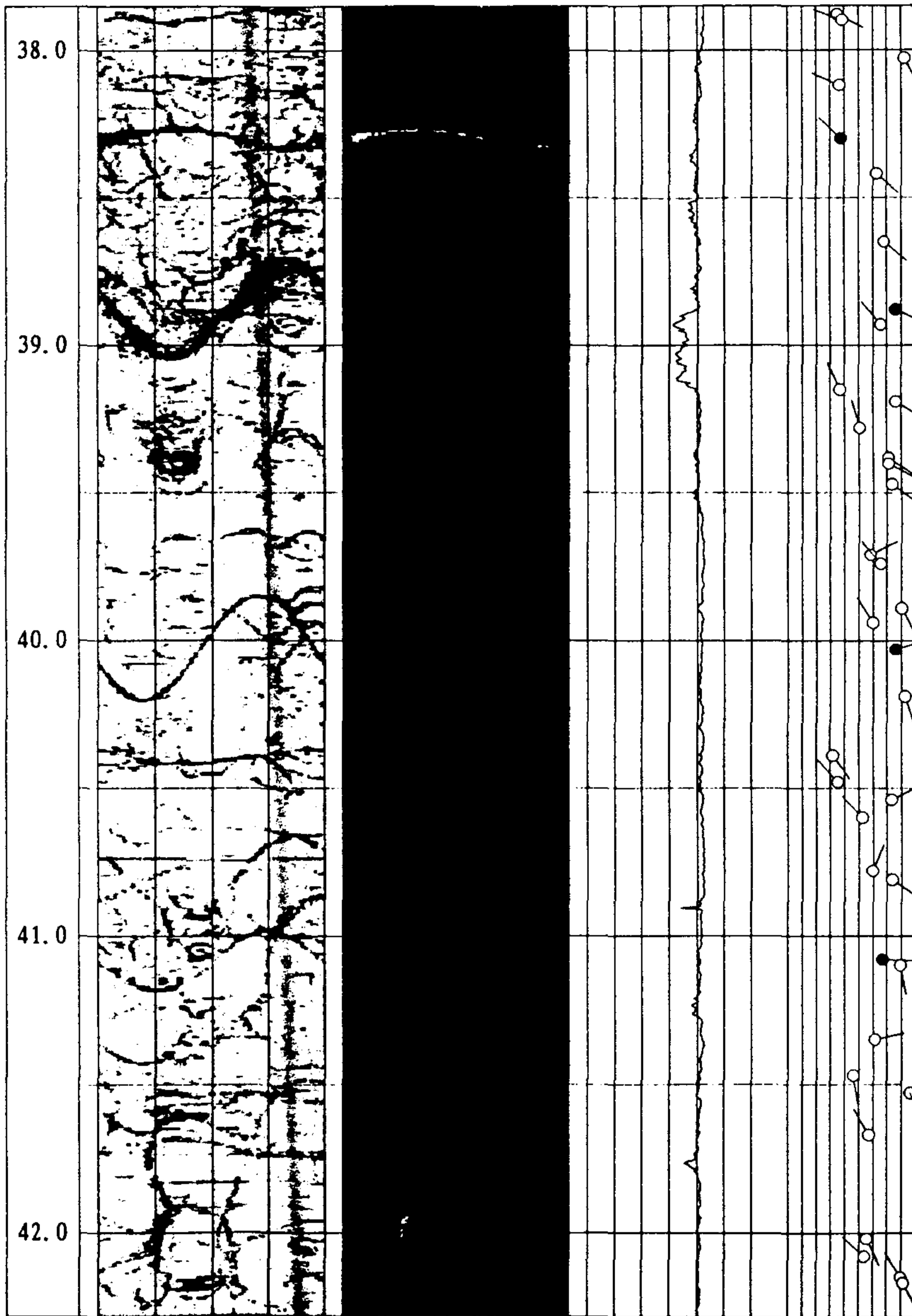


Fig. 91. (continued).

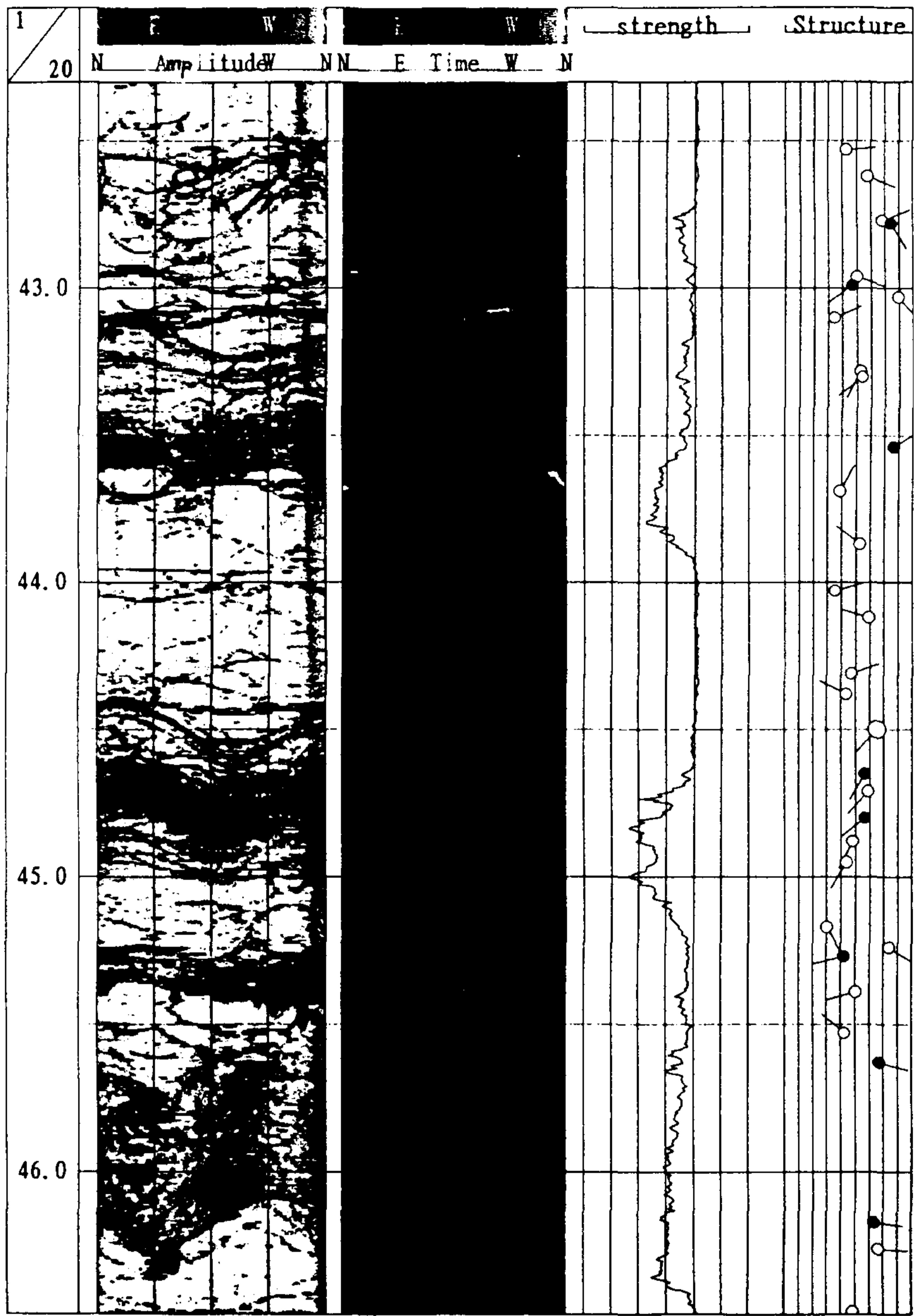


Fig. 91. (continued).

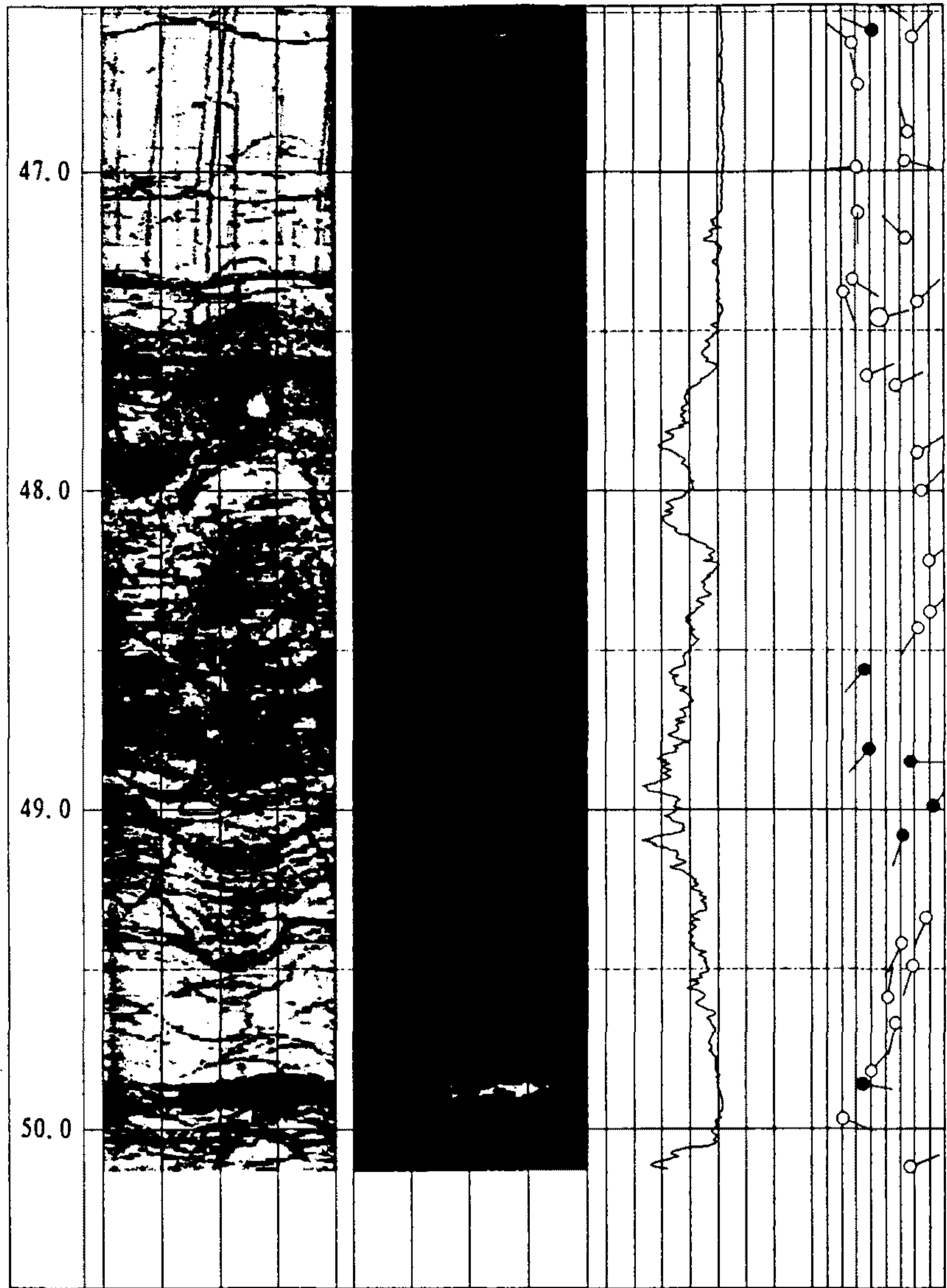


Fig. 91. (continued).

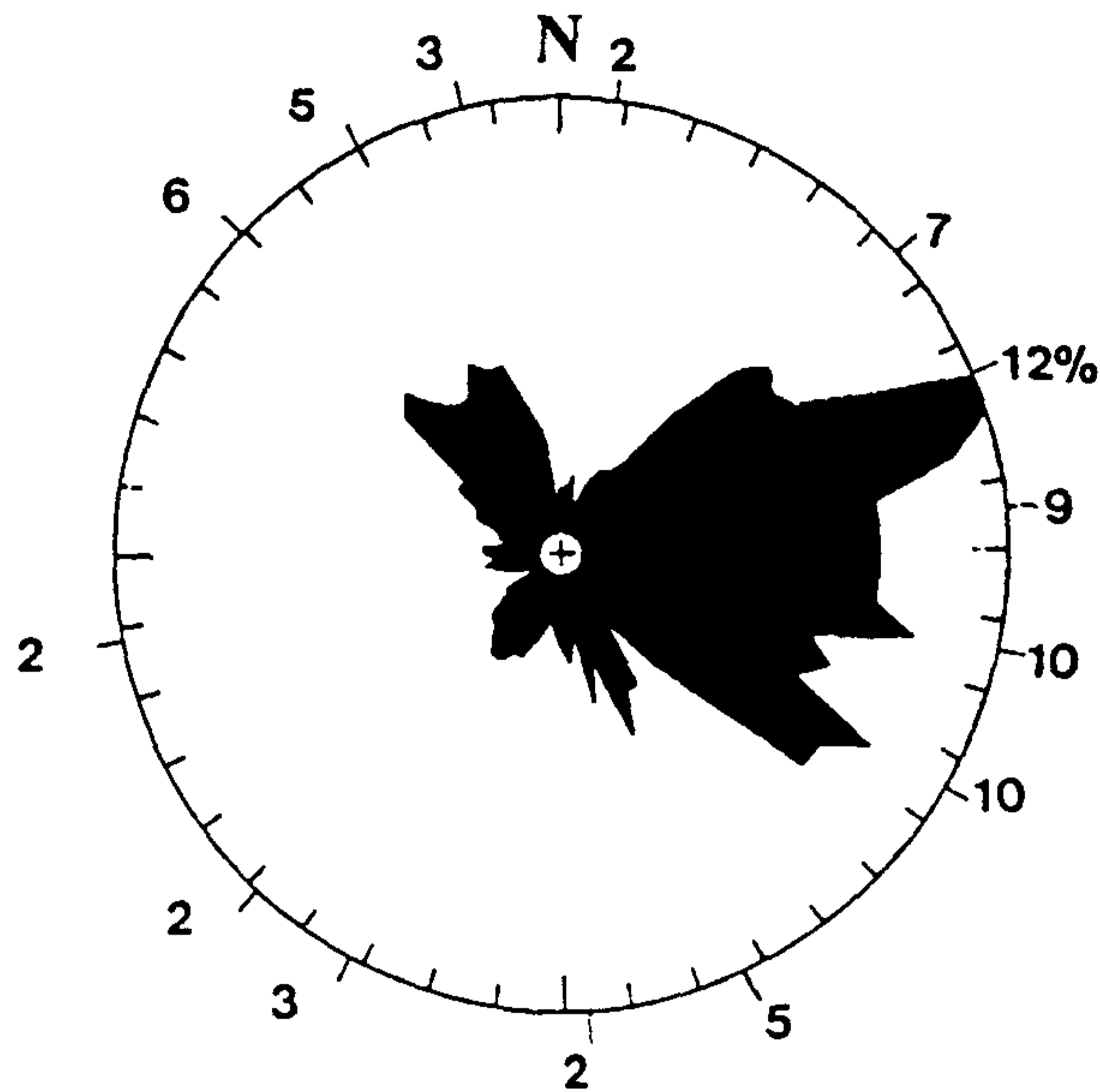
다. 심도 약 32m를 경계로 연암/경암이 구분될 수 있으며 경암 내에서는 많은 양의 절리들이 뚜렷이 관찰되고 있다. 이미지 관찰에 의하면 경암 상부 연암은 대단히 연약한 것으로 판단되고 있다.

이미 언급한 바 암반 내에 형성된 단층 및 절리는 물이 흐를 수 있는 주요 통로가 된다. 특히 단층은 그 주위가 파쇄되고 또한 파쇄된 폭이 대체로 크기 때문에 유수 현상을 쉽게 불러 일으키게 되며, 더구나 암반의 불연속면으로써 암반 거동을 유발할 수 있는 요인(암반 전단력의 하락)이 되고 있다. 이번 이미지 분석과정에서 또 다른 특이한 점은 심도 약 16.5m~20m 구간에서 수직 절리가 관찰되고 있다는 것이며 동시에 그 곳은 시추과정에서 확인된 바 훌륭한 수로(용수 현상)가 되고 있다는 데 있다.

본 이미지로부터 인식된 지질구조 자료는 도합 246개(단층: 2, 암층경계면: 13, 절리: 231)에 달한다. Fig. 92는 상기 자료에 대한 경사 방향을 빈번도에 따라 적절히 조정하여 표현된 rose diagram을 나타내고 있다. 일별하여 전반적으로 지향되는 경사 방향은 뚜렷이 인식되며 그에 따른 경사각은 별도로 아래 도표에 빈번도와 함께 명시되고 있다. 그런데, 터파기 공사에서는 오히려 좁은 심도 구간에서의 rose diagram이 보다 바람직한 정보가 될 수 있다. Fig. 93은 전체 심도 구간을 4 등분하여 각 구간에서 표현되는 rose diagram을 상호 대별하고 있다. 대체로 경암 구간에서는 상호 직교하는 절리 방향으로 상반되고 있으며 그 상부 구간은 거의 동일 방향을 지향하는 지질구조를 나타내고 있다. 이러한 구체적인 지질구조 정보는 수로 문제나 연약 지반 보강을 위한 그라우팅 공사에 대체될 수 있는 바람직한 기본 자료가 될 것으로 사료된다.

이미 이론에서 밝혀진 바 텔레뷰어 암석강도치가 실제 강도치에 이르기 위해서는 소위 scaling factor(상구배)가 구해져야 한다. 그런데, 본 텔레뷰어 탐사에서는 모든 시추공의 규격(LX) 및 표토층 outcasing이 동일하였기

Borehole WB5

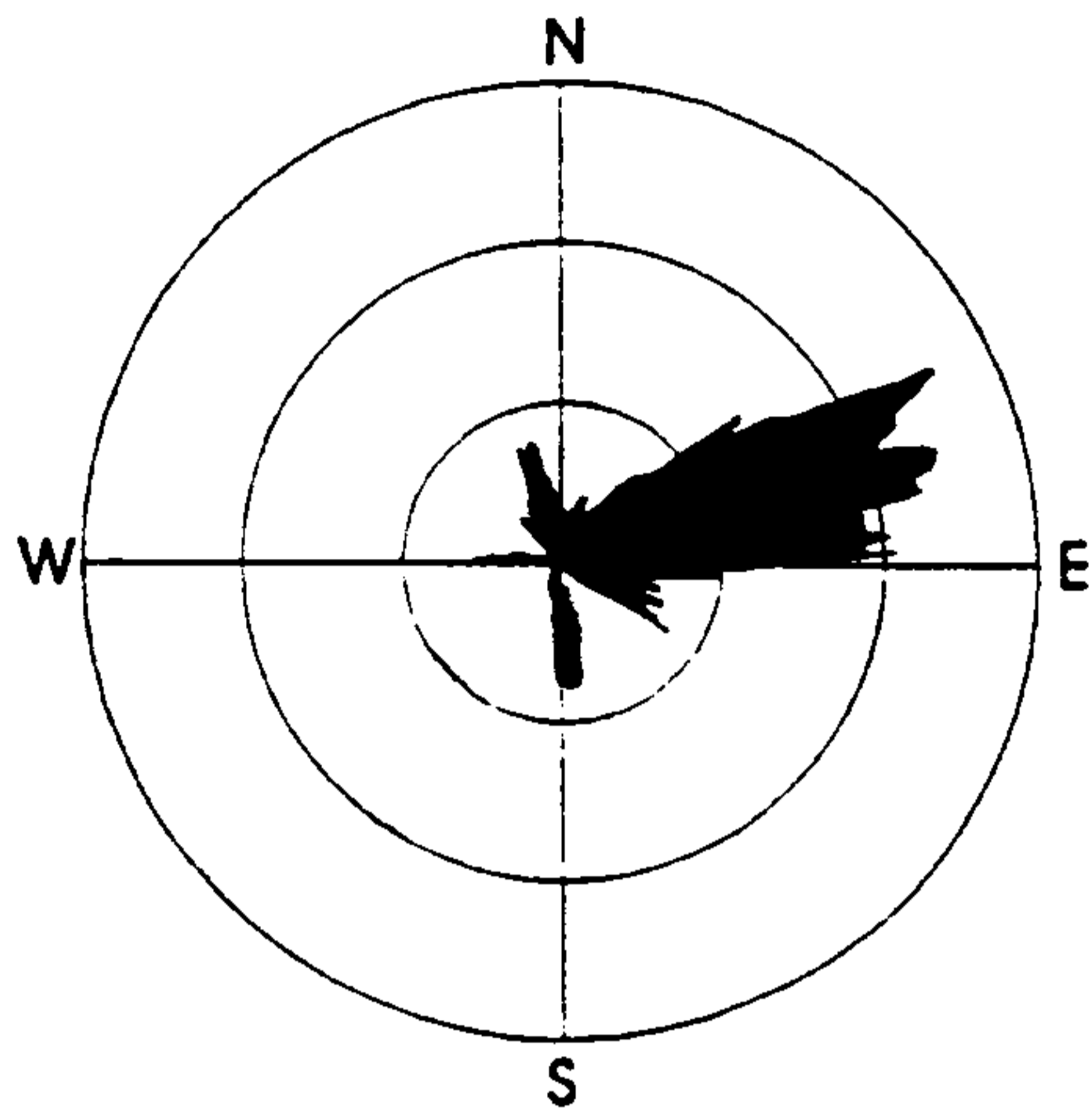


Elements	%	Dip direction	Dip angle
30	12.2	75	65
24	9.8	114	55
24	9.8	134	67
21	8.6	94	65
18	7.3	55	77
14	5.7	349	50
13	5.3	370	56
12	4.9	173	77
7	2.9	232	67
7	2.9	386	49
6	2.4	196	59
5	2.0	248	57
4	1.6	9	47
4	1.6	288	52
Total elements : 245			

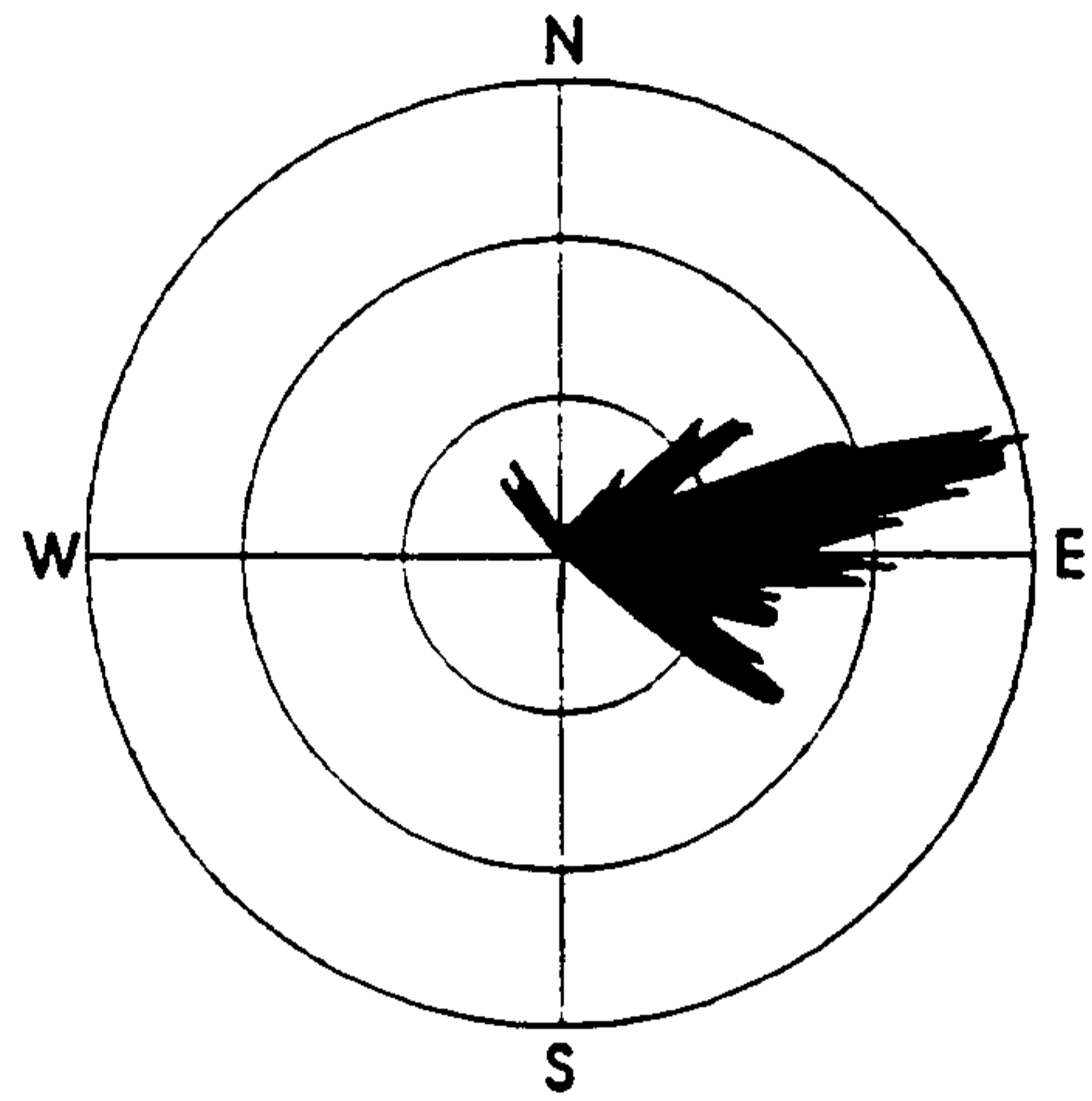
Fig. 92. Representation of dip directions of all extracted tectonic elements derived from the borehole WB5.

시추공 WB5

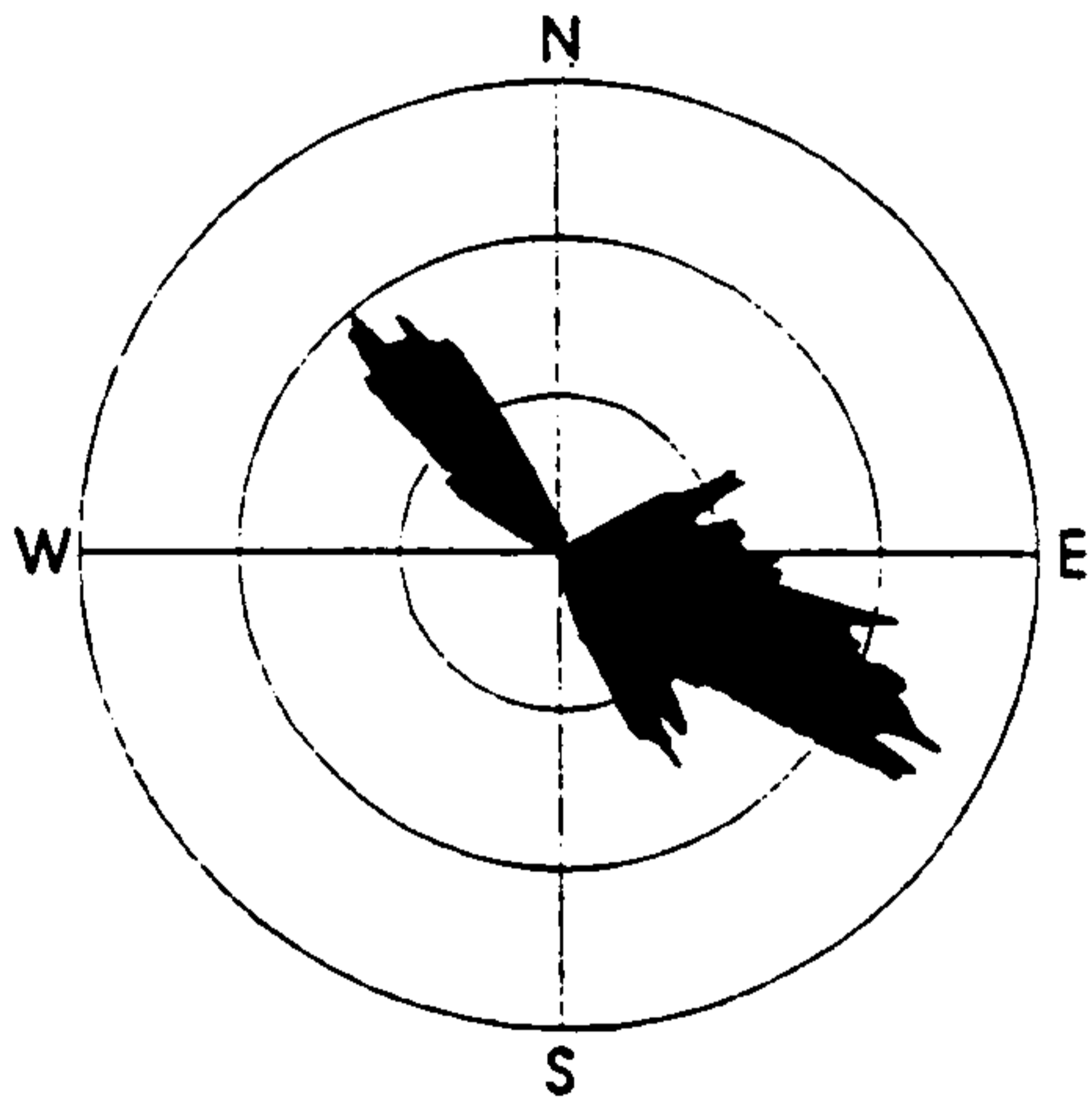
심도구간(m)



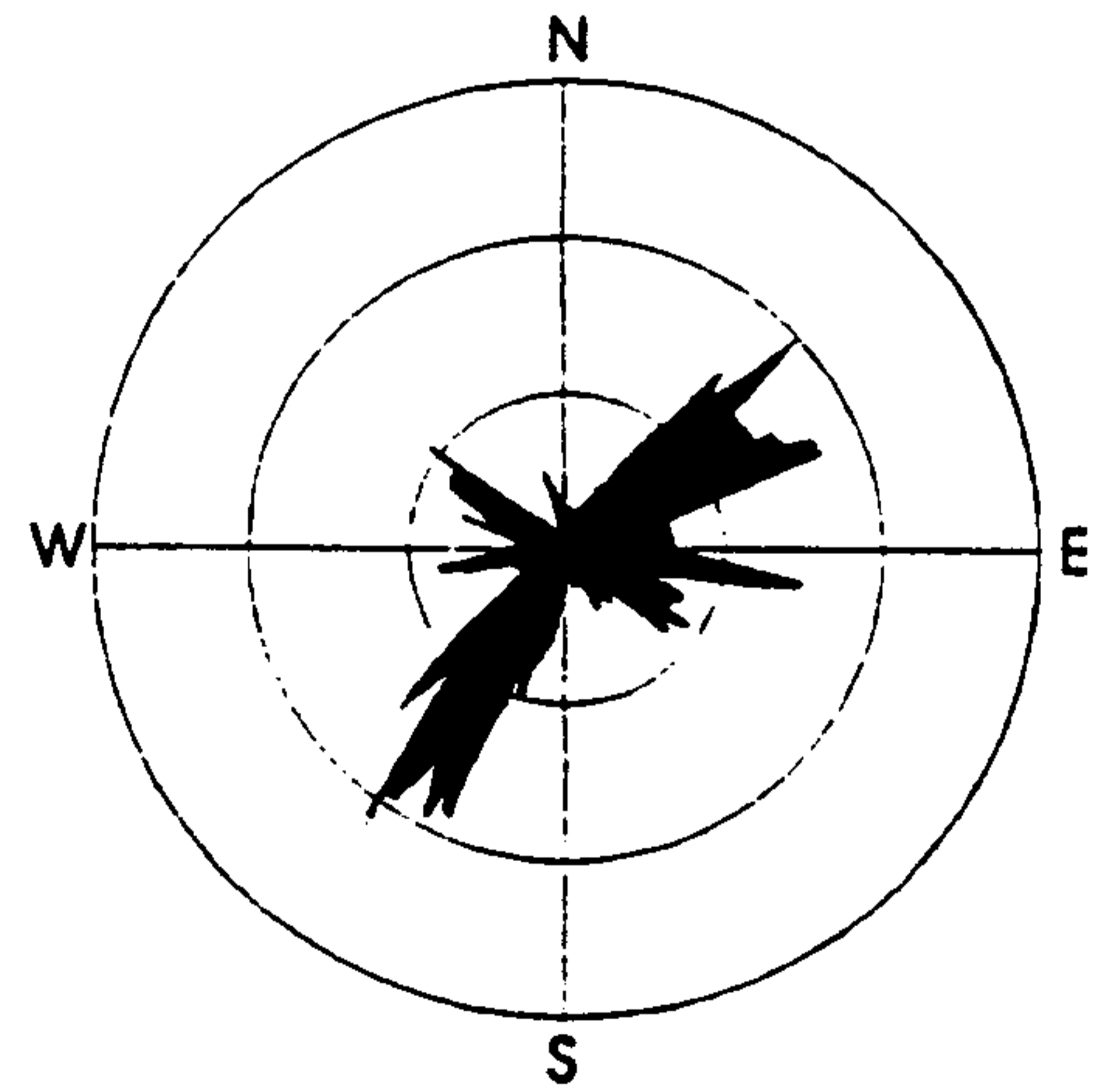
11.96 - 21.95



22.13 - 32.06



32.90 - 42.99



43.03 - 50.12

Fig. 93. Representation of dip directions of all extracted tectonic elements within the user defined depth intervals.

때문에 우선 모든 시추공에서 얻게된 텔레뷰어 강도치가 상대적으로 비교할 수 있게 되었으며 나아가서 steel casing의 강도치 내지 코어로부터 추정된 일축 강도치에 의해 거의 타당한 scaling factor를 유추할 수 있게 되었다. Fig. 94는 시추공 WB5의 진폭이미지로부터 산출된 암석강도를 나타내고 있다. 지표로부터 약 11.5m까지는 outcasing구간이기 때문에 대단히 높은 암석강도치가 관찰되며 그 이후에는 강도가 급격히 하락되고 있다. 비교 효과를 높이기 위하여 강도변화 우측에는 단층분석 결과가 대별되고 동시에 좌측에는 시추 주상도가 대조되고 있다. 화살표로 표시된 심도는 강도변화 측면에서 경암상부 경계(시추 주상도와도 거의 일치하고 있음)에 대응되며 그로부터 강도는 대체로 균등하게 나타나고 있다. 본 분석 결과에서 주목할 점은 ① 연암 내에서도 심도에 따른 강도의 큰 변화가 높은 분해능으로 관찰되고 있으며 ② 암석강도는 전반적으로 대단히 낮게 나타나고 있는 반면 상대적으로 강도가 높은 박층이 내재하고 있다는 데 있다. 참고로 시추 주상도 바로 우측에는 수직 절리가 관찰된 구간을 표시하였다.

4. 대구 지하철공사 지반조사

지하철공사에서 단층 및 절리에 대한 정확한 정보는 암반 분류(Q-system, RMR)나 유수문제 및 효율적인 발파 작업 등에 직접적인 기여를 할 수 있다. 본 탐사의 주된 목적은 텔레뷰어 기법에 의해 우선 암반 내에 형성된 불연속면에 대한 정확한 경사 방향 및 경사각은 물론 암반의 강도도 산출함으로써 지하철공사의 설계 및 시공을 위한 바람직한 기본 자료를 제시하고자 하는 데 있다.

Fig. 95는 대구 지하철공사 노선 일부 현장 구간 내에 위치한 시추공

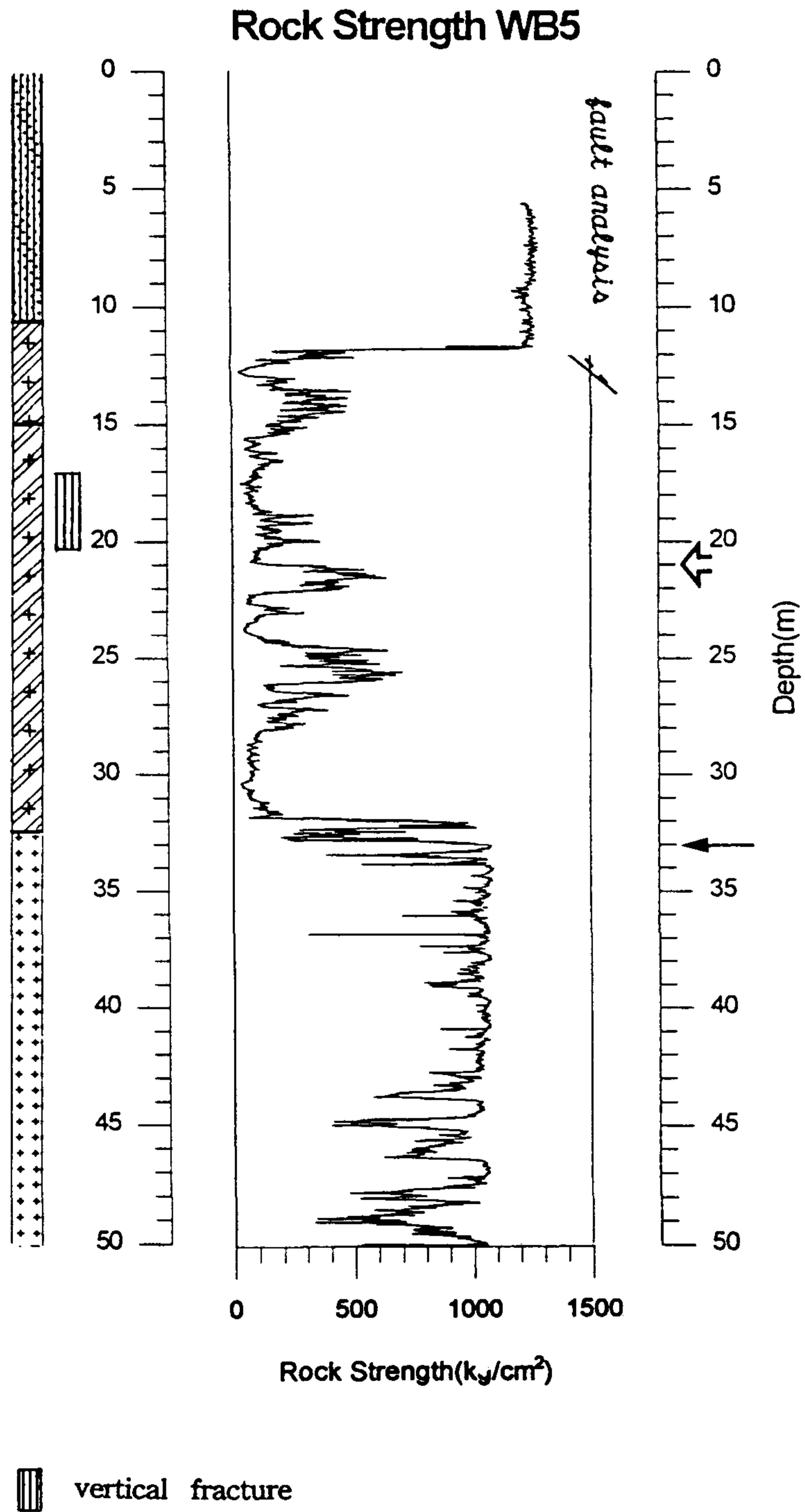


Fig. 94. Shown is the Televiwer rock strength derived from the borehole WB5.

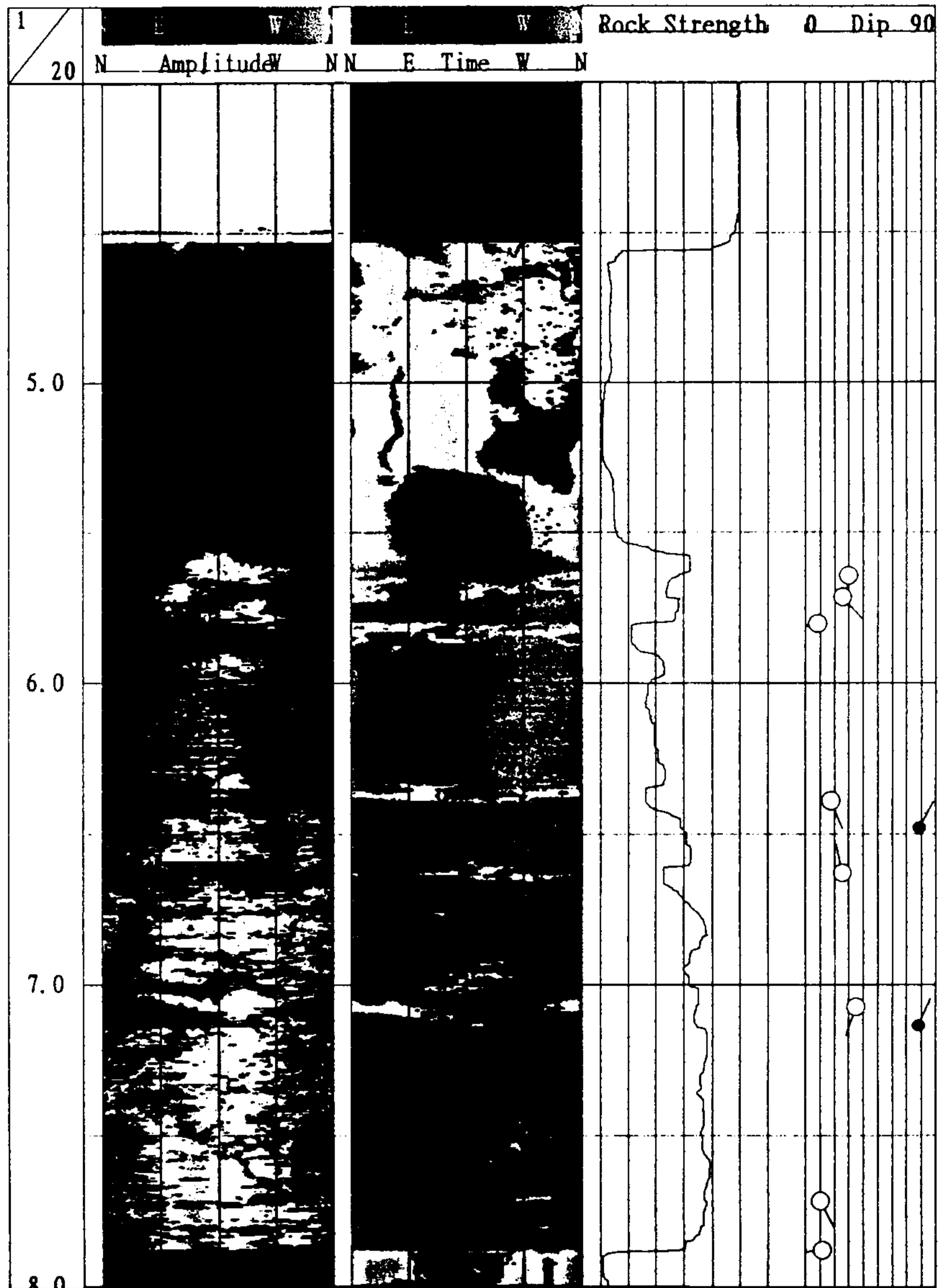


Fig. 95. Televiwer image log measured in the survey area (borehole BH9-1) Daegu, Korea. From left to right, amplitude image, traveltime image, rock strength, arrow plot.

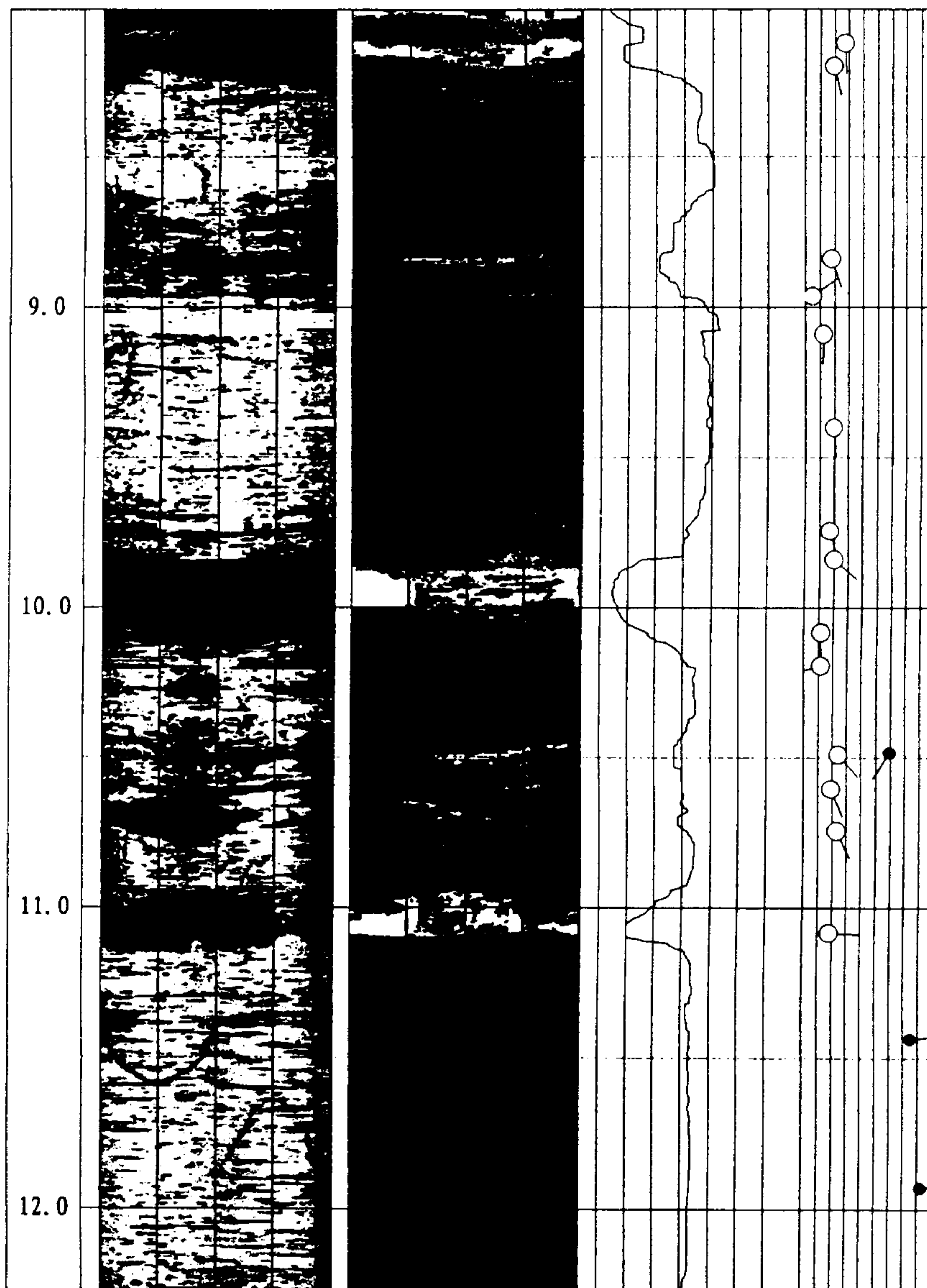


Fig. 95. (continued).

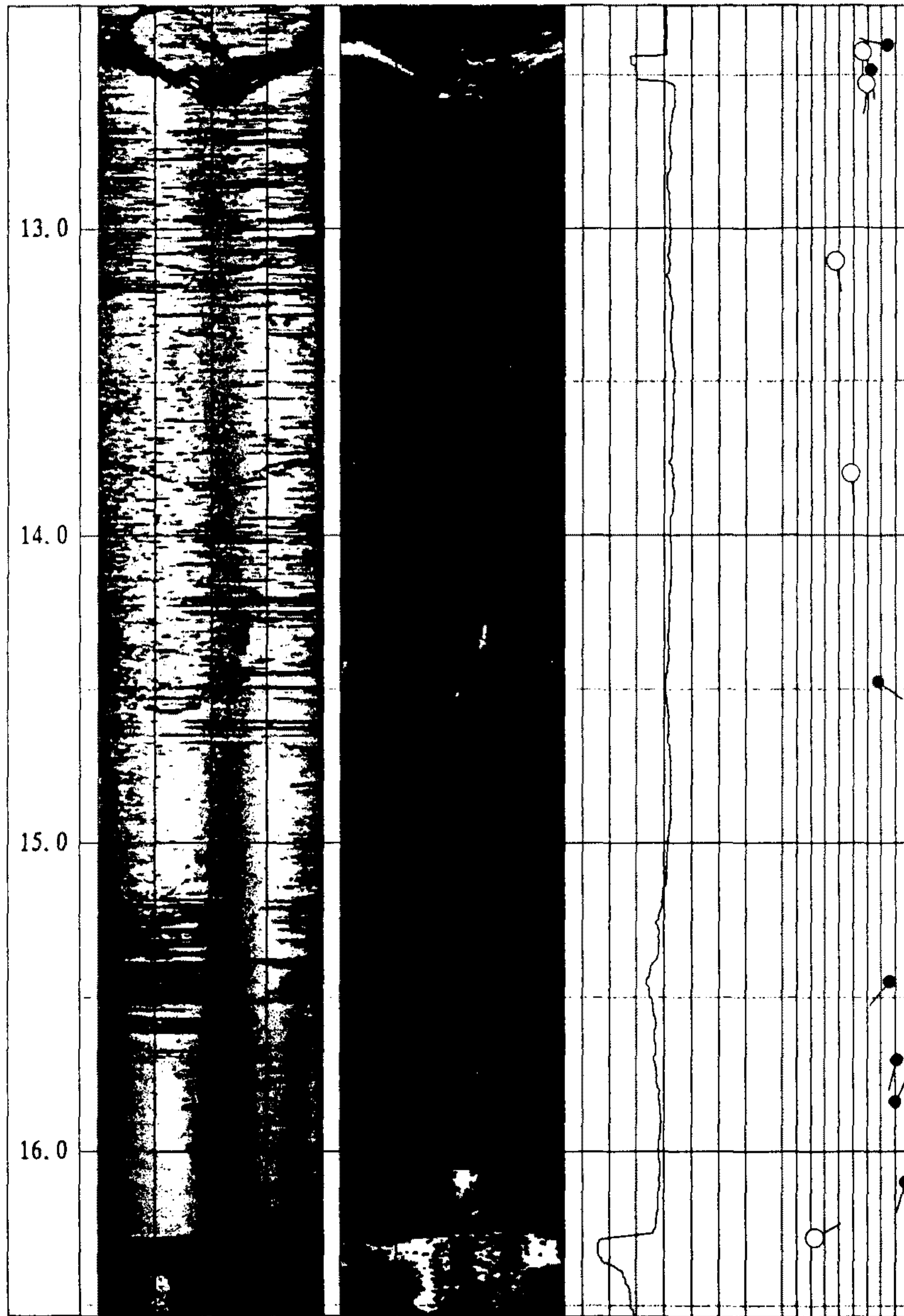


Fig. 95. (continued).

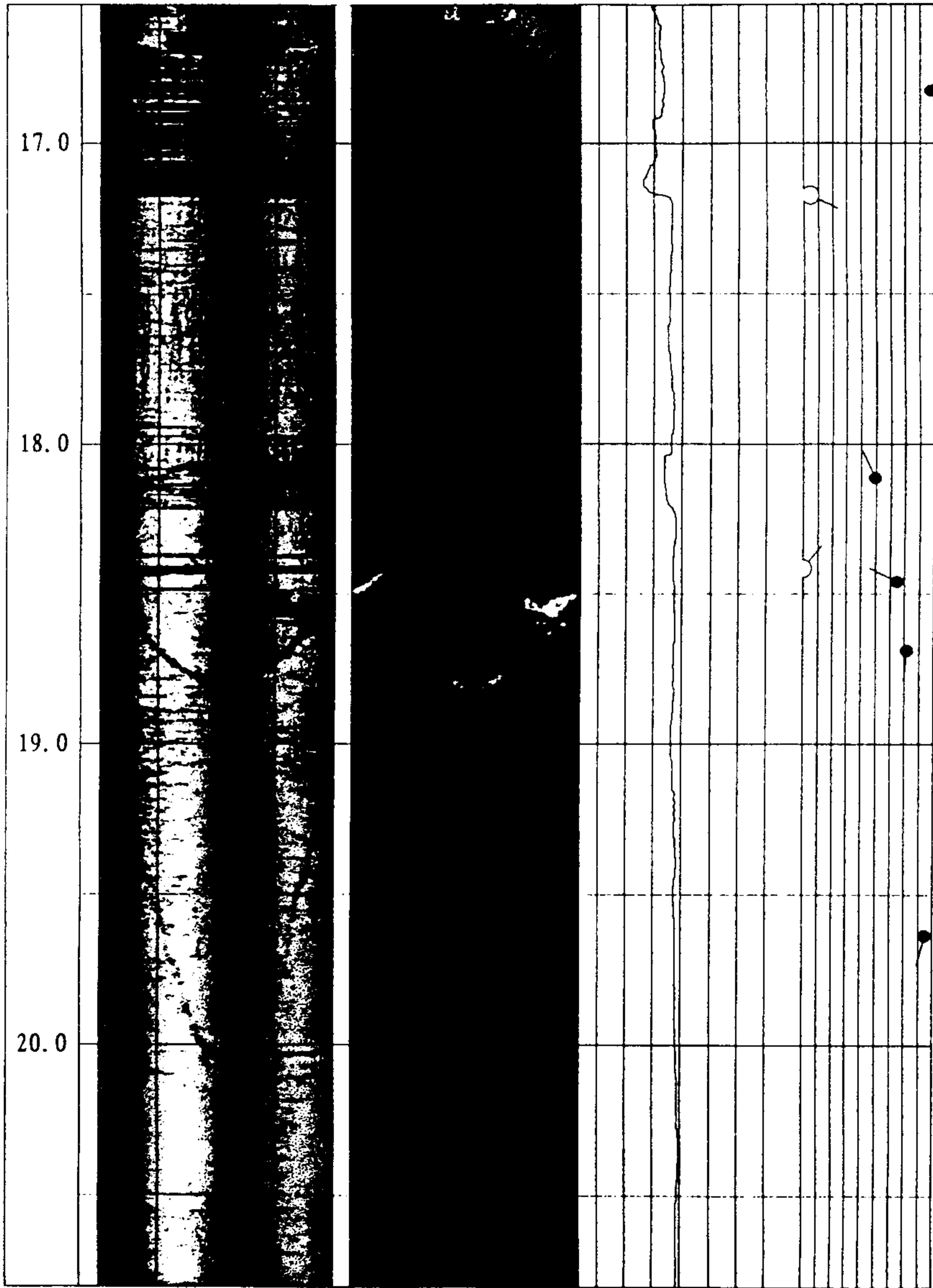


Fig. 95. (continued).

BH 9-1에 대한 텔레뷰어 이미지를 보여주고 있다. 탐사 시추공(LX 규격)은 rotary core drill에 의해 심도 약 32m까지 천공되었다. 대체로 절리가 있는 곳에는 미소의 강도 변화가 관찰된다. 인식되는 절리의 수는 일반 국내 지반상태에 비추어 대단히 적다. 반면, 거의 수평에 가까운 층리들이 훌륭하게 발달되어 있으며 특히 천부에는(심도 약 17m 미만) 연약한 매질(예: 점토)이 각 층리에 협재되고 있는 것으로 판단된다. 한편, 본 탐사 심도구간에서 단층은 인식되지 않고 있으며 곳에 따라 미세 절리 내에 석영질이 결정화된 흔적(심도 약 12m 화살표로 표시)도 관찰되고 있다. 전체적으로 암반상태는 양호하다.

Fig. 96은 또 다른 현장 구간 내에 위치한 시추공 B-7에 대한 텔레뷰어 이미지를 나타내고 있다. 이번에도 탐사 시추공(LX 규격)은 rotary drill에 의해 천공되었다. 본 이미지에서도 퇴적 상태(층리 및 엽리)는 훌륭하게 인식되고 있다. 그런데, 산출된 강도는 심도 약 13.5m에서 급격히 하락한 후 심도 약 15m부터는 서서히 강도의 약화가 관찰되고 있다. 이러한 현상은 단순히 암반에 의해 초래되었다기 보다는 오히려 시추공 내 매질(보통의 경우는 물)에 의해 초음파의 에너지가 크게 약화되었다는 데 있다고 할 수 있다. 즉, 시추공 내 물이 이질적인 매질에 의해 혼탁된 것으로 판단된다. 이미지에 의하면, 심도 약 27m 하부는 이질적인 매질(예: 폐수, mud)이 침전된 형태를 보여주고, 심도 약 27m~14m 구간에는 혼탁된 상태로 간주될 수 있다. 이러한 현장탐사 실례는 바로 텔레뷰어가 시추공 내 매질의 물성 파악에도 기여할 수 있음을 입증하는 것이기도 하였다.

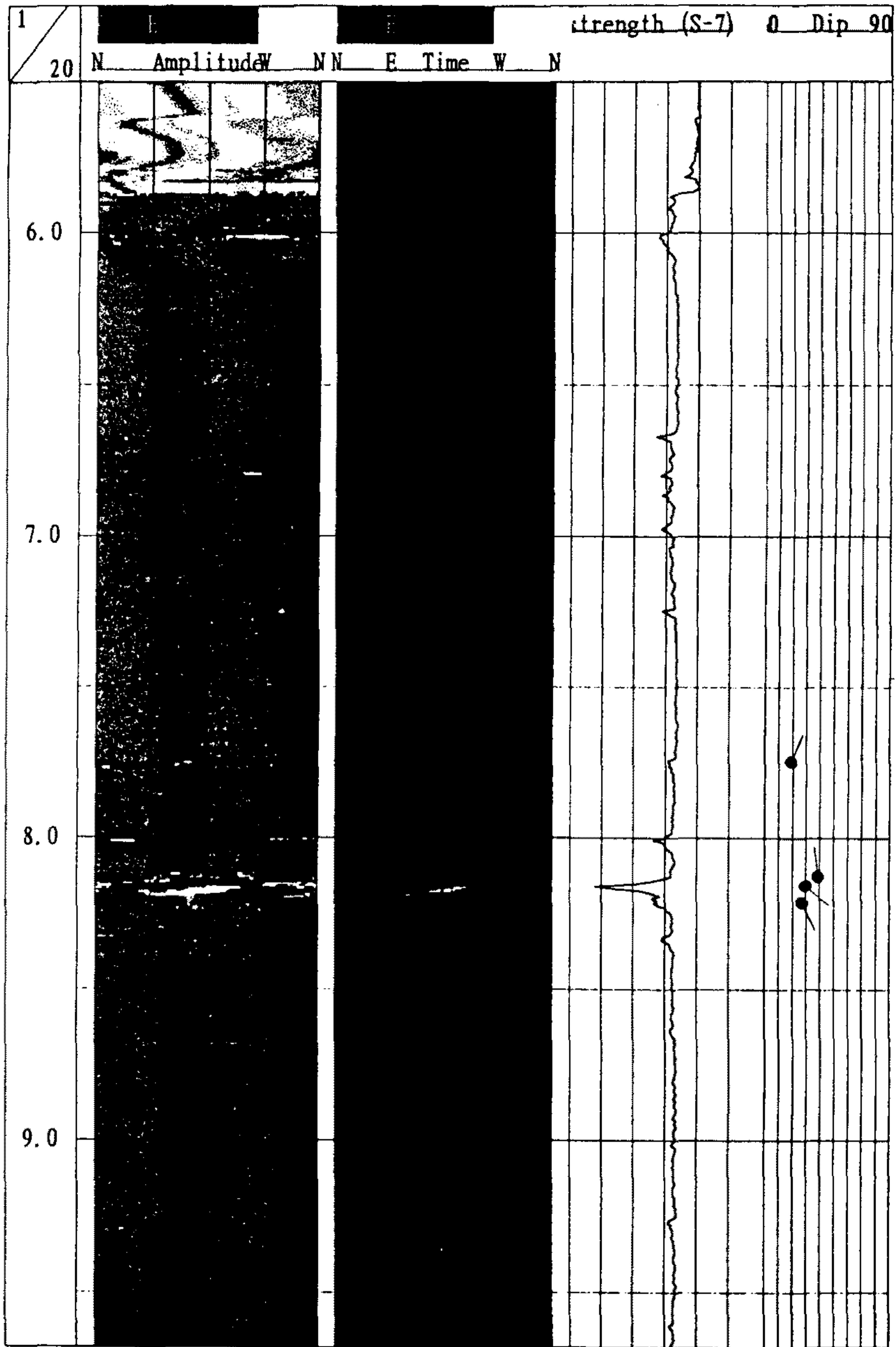


Fig. 96. Televiwer image log measured in the survey area (borehole B-7) Taegu, Korea. From left to right, amplitude image, traveltime image, rock strength, arrow plot.

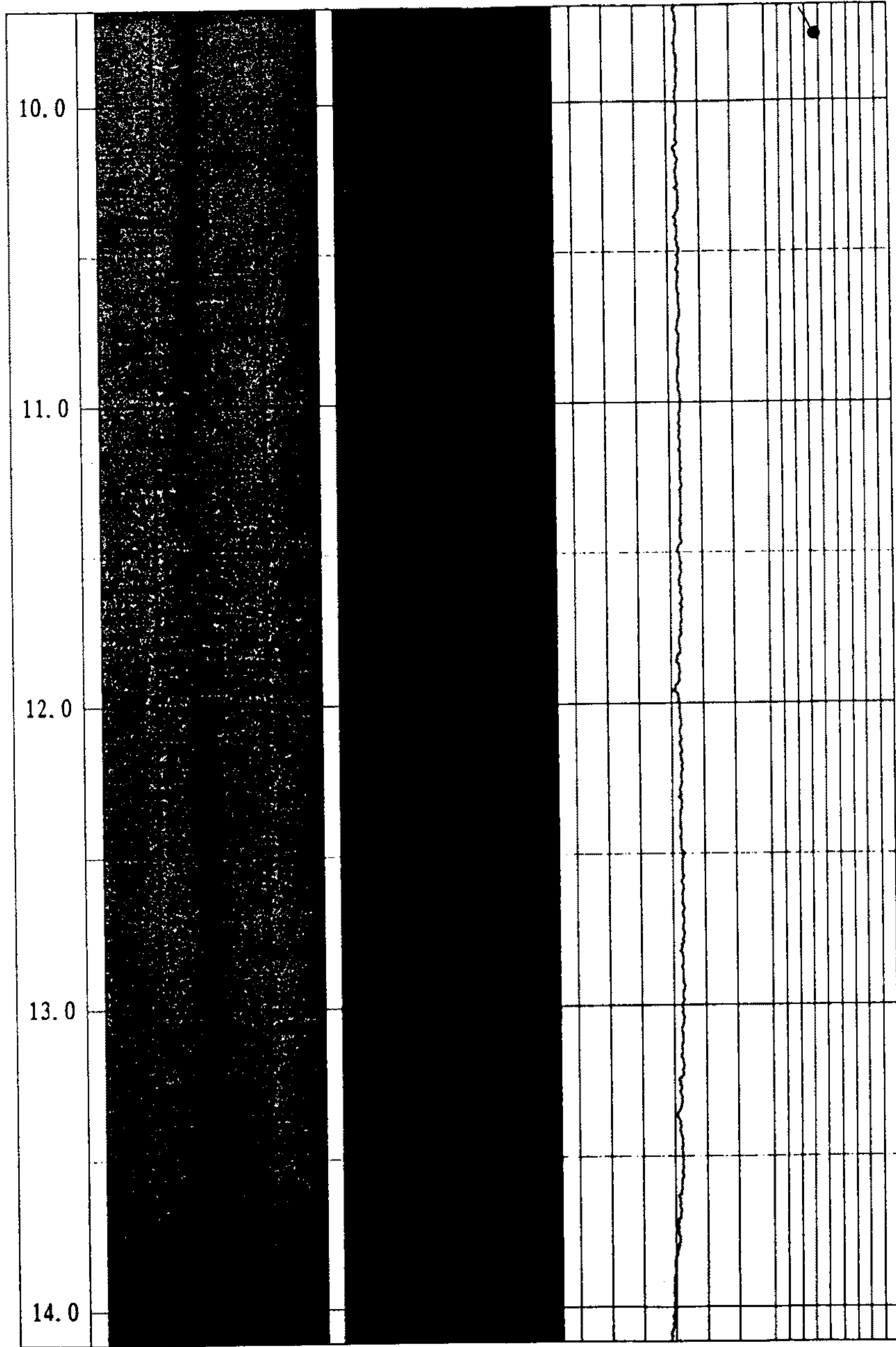


Fig. 96. (continued).

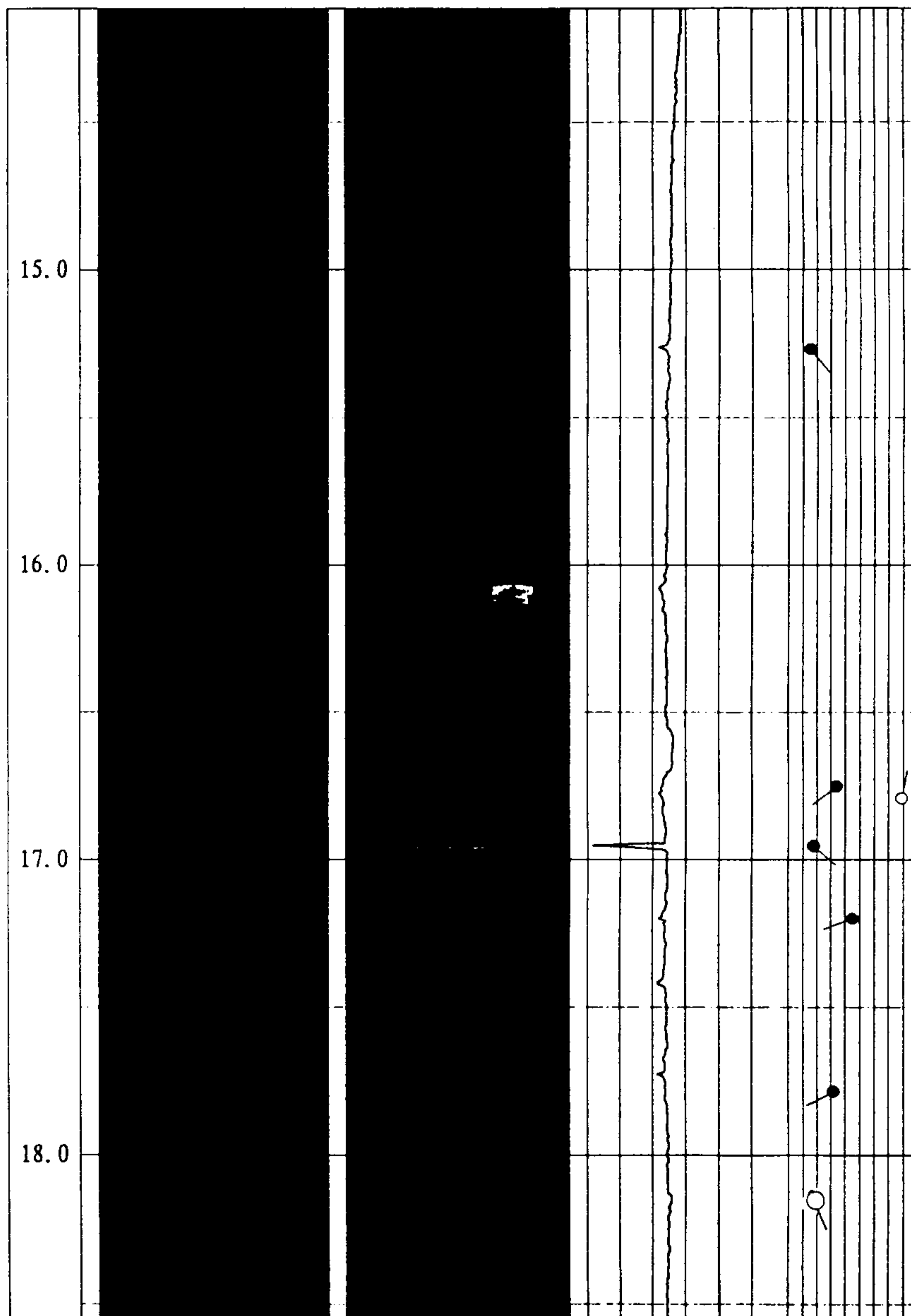


Fig. 96. (continued).

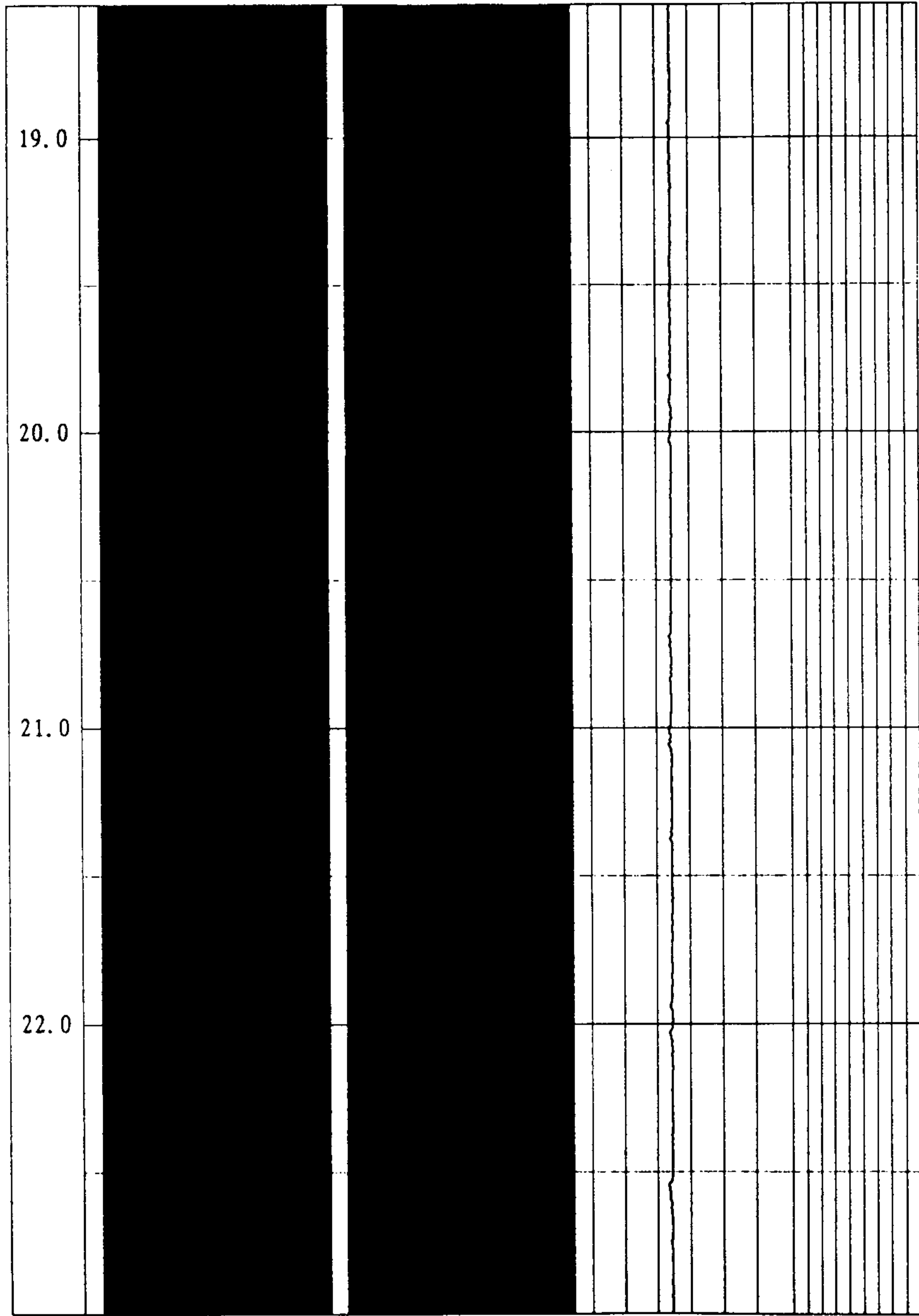


Fig. 96. (continued).

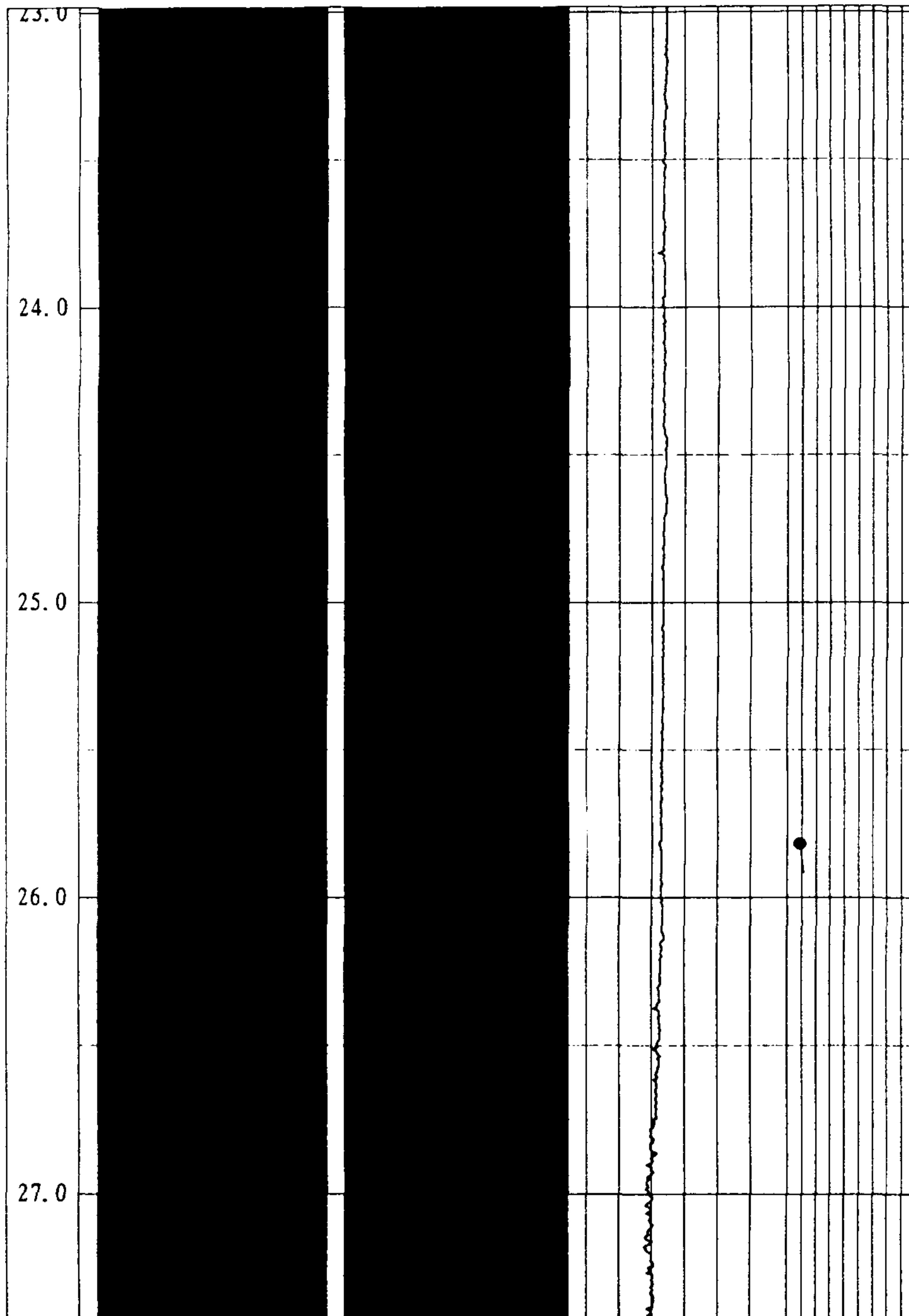


Fig. 96. (continued).

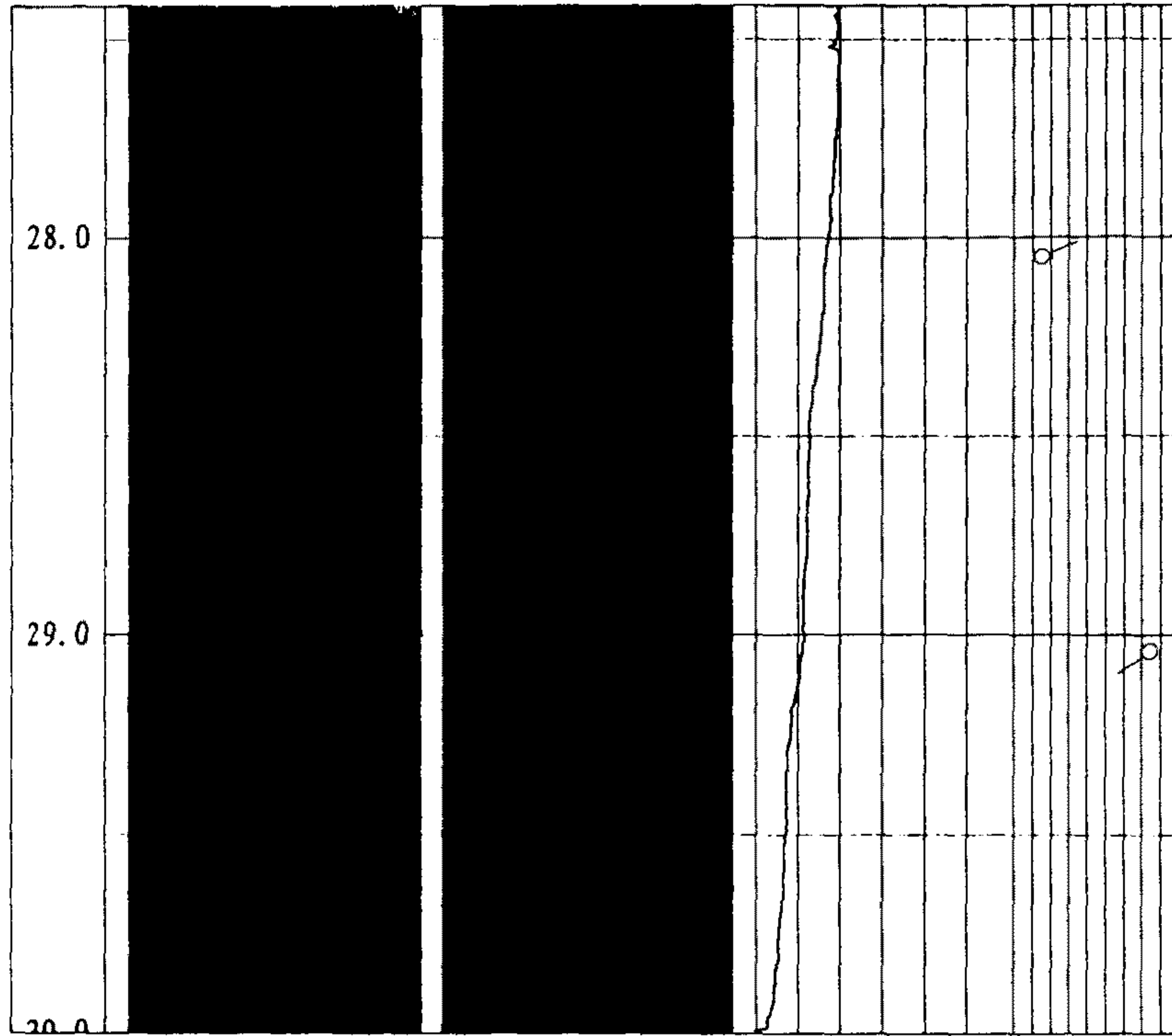


Fig. 96. (continued).

제 3 장 탄성파 토모그래피의 응용

제 1 절 개 요

본 과제 최종 목표중의 하나는 탄성파 토모그래피의 기술을 국내에 정착(토착화)하게 하여 국내 지반조사의 선진화를 크게 진작시키는 데 있었다. 이에 대응하여, 국내에서 주어진 대단히 불리한 탐사여건과 복잡한 지질상태는 그에 대처될 수 있는 별도의 응용기술 및 전산처리 기법의 개발을 요구하게 되었다. 즉, 토모그래피의 국내 실용화를 위해서는 무엇보다 풍부한 현장실험을 통하여 다음에 제시된 여러가지 문제에 어느정도 효율적으로 대처할 수 있었는가에 달려있다고 할 수 있었다.

- ① 토모그래피의 응용이 지상 혹은 지하(예: 갱도, 터널)에서 이루어질 경우 그의 응용 기법은 상호 크게 달라진다. 갱내 탐사에서는 우선 모든 측정기능이 주어진 불리한 여건(습도, 온도, 내구성)을 극복해야 하는 문제가 제기된다.
- ② 토모그래피가 대도시 도심지에서 응용될 경우 소위 도심지 소음(예: 자동차에 의한 진동)을 극복하면서 바람직한 측정데이터를 얻을 수 있는가?
- ③ 탐사현장이 산악지대일 경우에도 토모그래피 단면 측정이 용이하게 수행될 수 있는가?
- ④ 시추공-시추공 토모그래피가 응용될 수 있는 최대 및 최소 시추공 간격은 탐사대상(예: 화성 변성암)에 비추어 어느 정도인가?
- ⑤ 토모그래피에 의해 탄성파 파장보다 다소 작은 불균질 매질(예: 터널

혹은 갱도)의 탐지가 가능한가?

- ⑥ 폭발성 발생원(explosive source: 예: detonator)은 탄성과 발생원으로서 가장 바람직한 발생원이다. 이러한 발생원이 국내 독자적인 기술 개발로써 실용화할 수 있는가?
- ⑦ 탐사대상이 연약퇴적층(예: 부산지역)일 경우 토모그래피의 응용 한계는 어떠한가?
- ⑧ 시추공 수신장치로서 국내 탐사여건에 현실적으로 부합되어 널리 활용될 수 있는 것은 무엇인가?
- ⑨ 단면 측정시간을 최소화할 수 있는 측정시스템의 개발
- ⑩ 전산처리시간을 최소화할 수 있는 다양한 software 개발

상기 제시된 문제들은 근원적으로 측정 및 전산처리 시스템의 고도화와 동시에 풍부한 현장경험에 의해 극복될 수 있다. 토모그래피 응용에서 가장 난제가 되며 또한 측정데이터의 질에 큰 영향을 주는 것은 시추공 발생원이라 할 수 있겠다. 본 과제 수행 초기에는 주로 낙하형 발생원(weight drop source)개발에 중점을 두어 하나의 새로운 시추공 발생원 “도방”을 개발하기에 이르렀다. 그의 응용성이 비록 단지 경암을 대상으로 P파 이외에도 S파를 효율적으로 발생할 수 있다는 데 있었으나 반면, 연약암반에서는 그의 기능이 급격히 하락하고 또한 장치 운용의 비효율성은 탐사 경제성 측면에서 근원적인 응용 한계를 드러내게 되었다. 이러한 개발노력에 병행하여 당소에서는 (주)한화와 공동으로 국내 최초의 탄성파탐사 전용뇌관 개발을 추진하게 되었으며 그의 실용성은 1993년 구포 기차전복사고 지반조사에서 입증하게 되었다. 당해년도(최종년도)에서는 당소-한화-DMT 연구소 공동으로 세계 최초의 다중발파 시스템이 개발되어(제 3 절 참조) 시추공 발파의 일관성은 물론 탐사시간을 크게 단축할 수 있는 계기를 마련할 수

있게 되었다.

시추공 수신장치로는 본 과제수행 초기 각 수신점(수진점 간격 1m)에 두개의 교차하는 수신기가 장착된 도합 24개 수신기들로 구성된(24채널 기록) 장치(“알아리”명명)가 개발되어 여러차례 토모그래피 탐사를 위해 활용되었다. 이러한 형의 수신장치는 아직까지도 주어진 탐사목적에 따라 그의 응용성을 찾을 수 있다. 그러나, 일반적인 토모그래피 응용을 위해서는 그의 하중으로 인한 운용의 불편함과 또한 수신 범위가 단지 12m에 불과하기 때문에 탐사의 효율성이 기대에 미치지 못하였다. 그 이후 24개의 고성능 hydrophone(일종의 acceleration geophone)이 장착된(1m 간격) 새로운 수신장치(“줄주리”명명)가 제작되어 탐사시간을 근원적으로 단축시킬 수 있었을 뿐만 아니라 대부분의 토모그래피 응용에서 바람직한 데이터를 얻을 수 있게 되었다. 본 과제 당해년도에는 다시 48개 hydrophone이 장착된 줄주리가 제작되어 탐사의 효율성이 다시 배가되는 효과를 거두게 되었다(제 2 절 참조).

상기 시추공 발생원 및 수신장치의 연이은 개발에 부응하여 측정장치도 여러차례 새로운 변모를 하였으며 또한 날로 급증한 데이터양을 처리하기 위한 전산처리 시스템도 그동안 많은 발전을 하게 되었다(제 2 절 참조).

본 과제 수행 1차년도에는 탐사대상으로서 주로 갯내에서 구사될 수 있는 토모그래피 기술개발에 역점을 두었었다. 그 결과 갯내의 대단히 불리한 탐사여건(예: 습도, 운반)을 극복할 수 있는 장비의 보완이 이루어져 성공적인 토모그래피 현장실험을 수행할 수 있었다. 그러나, 광산업의 급격한 사양화로 인해 더 이상 갯내 토모그래피의 활용성은 기대될 수 없었다. 반면, 지상에서 응용될 수 있는 토모그래피 기술개발은 상당한 진전을 보게 되어 절취사면 설계를 위한 지반조사, 구포기차 전복사고 원인 지반조사, 부평공원 붕락사고 안정성 평가를 위한 지반조사, 도시철도 터널시공을 위한

지반조사, 터널 및 땅굴탐지에서 괄목할만한 현장응용 성공사례를 낳게 되었다. 한편, 이러한 성공사례 이면에는 우선 단면측정 결과(2차원)들의 입체화(3차원)를 위한 제반 전산처리 기법, 소규모 불균질 매질에 대한 탐지가능성 및 단면 크기(최대 및 최소)에 대한 토모그래피 응용 한계성 연구가 필연적으로 수반되어 국내 토모그래피의 실용화가 더욱 촉구된 것이다. 당해년도(최종년도)에도 역시 다양한 현장실습을 통하여 우선 연약퇴적층(예: 부산지역 지질구조)을 대상으로 한 토모그래피 분해능 연구에 중점을 두었으며 동시에 대형건물 지반조사에서의 토모그래피 역할을 토목설계 매개변수 산출 측면에서 구체화하고 있다(제 4절 참조).

제 2 절 측정시스템의 고도화

탄성파 토모그래피 측정은 탄성파를 발생시켜 그에 의한 진동을 수신기에서 감지하기 때문에 지하철 공사, 대형구조물 건설 등을 위한 토목공사가 진행중인 현장에서는 측정기간 동안 진동을 유발시키는 공사는 때에 따라 중단되어야 할 경우가 발생한다. 이러한 측면에서 만약 탐사기간이 길어지면 질수록 그만큼 공사의 공기는 늦어지고 동시에 그에 따른 막대한 공사비의 손실이 가중되는 것이다. 따라서, 측정시스템의 고도화는 무엇보다 탐사기간을 최소화하는 차원에서 고려되어야 하며, 그에 따른 세부 내용은 다음과 같다.

- 탐사 장비의 축소화로 인한 운반 및 운영의 효율성을 높이고 동시에 완벽한 modular design에 의해 장비의 내구성을 극대화한다.
- 기존의 24채널 수신장치를 48채널 장치로 확대하여 많은 경우 탐사 시간을 거의 절반으로 단축하게 한다.
- A/D 장치면에서도 24채널에서 48채널로 확장되면서 동시에 방수, 충격 및 전기적인 잡음에 대한 보완과 또한 A/D 분해능의 향상을 도모한다.
- 기존의 단발 발파장치에서 다중발파 시스템(제 3 절 참조)으로 발전되면서 보다 일관성을 띤 탄성파를 발생하고 동시에 탐사 시간을 크게 단축하게 한다.
- 데이터 제어장치 및 운영 software의 대폭적인 보완을 통해 신속한 데이터 전송, 데이터 저장의 다양화(예: SEG format), 데이터 질을 검증하는 기능 및 영상화 내지 도면화의 기능을 근원적으로 확대하게 한다.

다음은 구·신 A/D 장치에 대한 비교를 도표로써 보여주고 있으며, Fig. 97에는 그들 hardware 구성을 상호 비교하고 있다.

A/D 장치 Specifications	기존의 Compact Unit	Summit Compact Unit
Number of channels	24	48
Sample interval	1/32, 1/16, ... , 2, 4 ms	1/128, 1/64, ... , 4, 8 ms
Number of samples per trace	512, 1024, 2048, 4096	512, 1024, ... , 16384
A/D resolution	16 bits	24 bits
Data format	12 bits mantissa 4bit exponent	24 bits fixed point
Weight	12 kg	13kg
Dimensions	470 x 150 x 320 mm	551 x 199 x 199 mm

본 과제 최종년도에 이르러 완성한 상기 측정시스템은 국내 어떠한 열악한 탐사현장 조건에서도 그 기능을 충분히 발휘할 수 있을 뿐만 아니라 그에 따른 측정데이터의 질은 세계적인 기술 수준에서도 크게 입증되고 있는 실정이다.

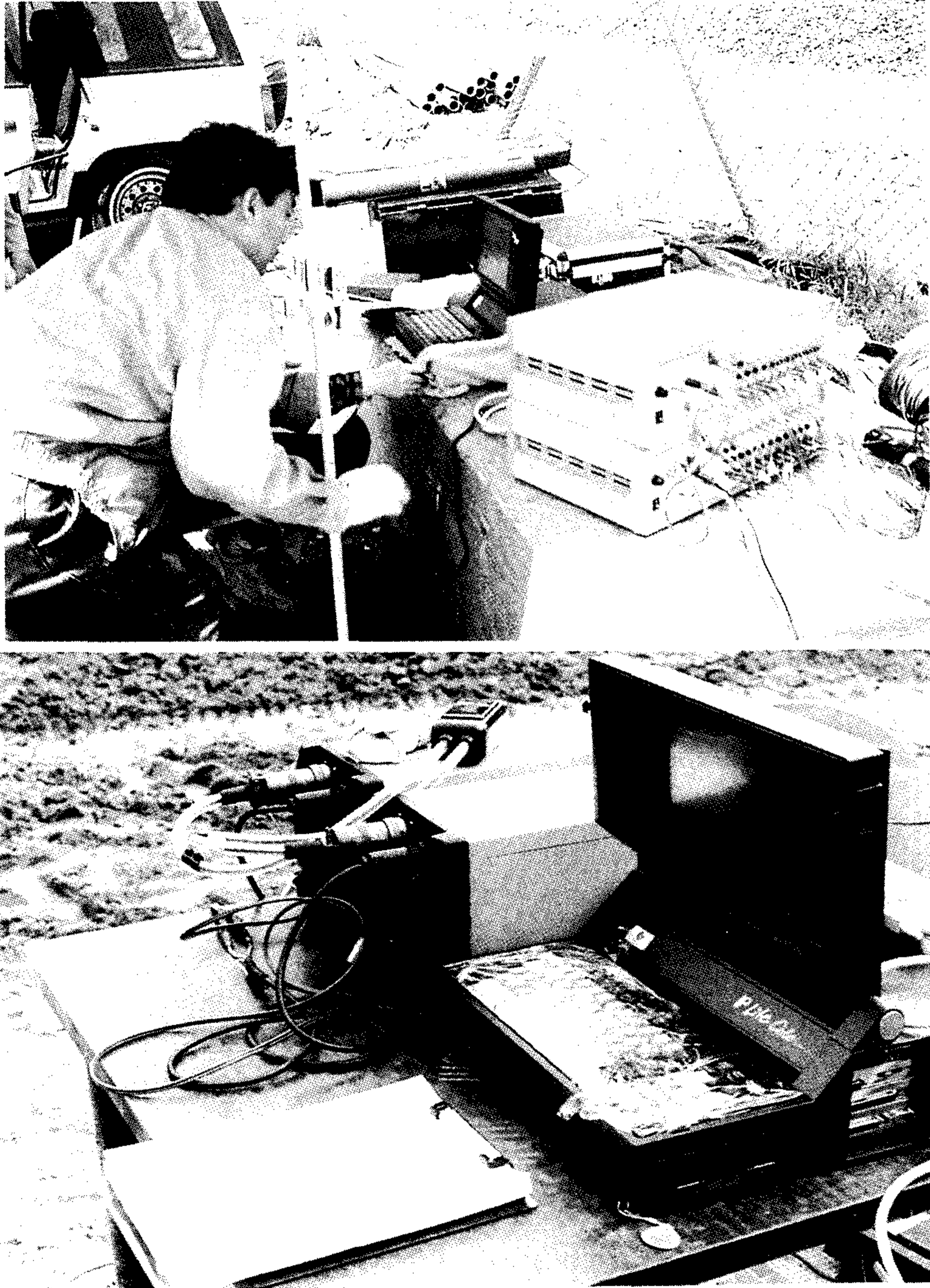


Fig. 97. Geotomographic measuring system

Upper part: old AD converter device (SEAMEX compact) with 24 DSP boards.

Lower part: new AD converter device (SUMMIT compact) with 48 DSP boards.

제 3 절 다중발파 시스템의 개발

본 과제 수행 중반기에 들어서면서 탄성파탐사 전용뇌관(seismic detonator)이 국내 독자적인 기술로서 개발됨에 따라 국내 탄성파 토모그래피 응용은 큰 전환점을 맞이하게 되었다. 이러한 뇌관 개발은 우선 좁은 시추공 내에서 탄성파 에너지를 최적으로 발생시킬 수 있게 할 뿐만 아니라 나아가서 국내 탄성파탐사 전반에 걸친 기술 개발에 큰 몫을 할 것이 약속되는 것이다. Fig. 98은 뇌관을 이용한 단발 발파장치를 보여주고 있다. 당시, 시추공 심도가 깊지 않을 경우에는 이러한 장치가 시추공 발생원으로서 효율적으로 응용되었다. 그러나, 시추공 심도가 깊어짐에 따라 그의 응용은 여러가지 또 다른 문제점을 낳게 되었다. 즉,

- 발파장치를 시추공에 삽입하고 인양하는 데 소요되는 순수한 시간은 차치하더라도 그 과정 중 모션 내지 각선의 손상 및 충격으로 인한 뇌관의 사전 발파 등으로 인해 측정의 연속성이 보장될 수 없었다.
- 뇌관이 충격 및 지전류에 대하여 다소 예민하게 반응하였기 때문에 그의 사용시에는 철저한 안전 대책이 요구되었으며(Fig. 98의 윗부분), 도심지 탐사에서는 더욱 그러하였다.

물론, 한번 삽입할 때 단발보다는 여러 개의 뇌관이 삽입되어 차례로 발파되고 동시에 상기 장치의 손상이 감소된다면 탐사시간은 크게 단축되는 효과가 기대될 것이다. 그러나, 이러한 조건을 충족시킬 수 있는 소위 다중발파 장치를 개발하기 위해서는 무엇보다 다음과 같은 기술 개발이 선제 조건이 된다.

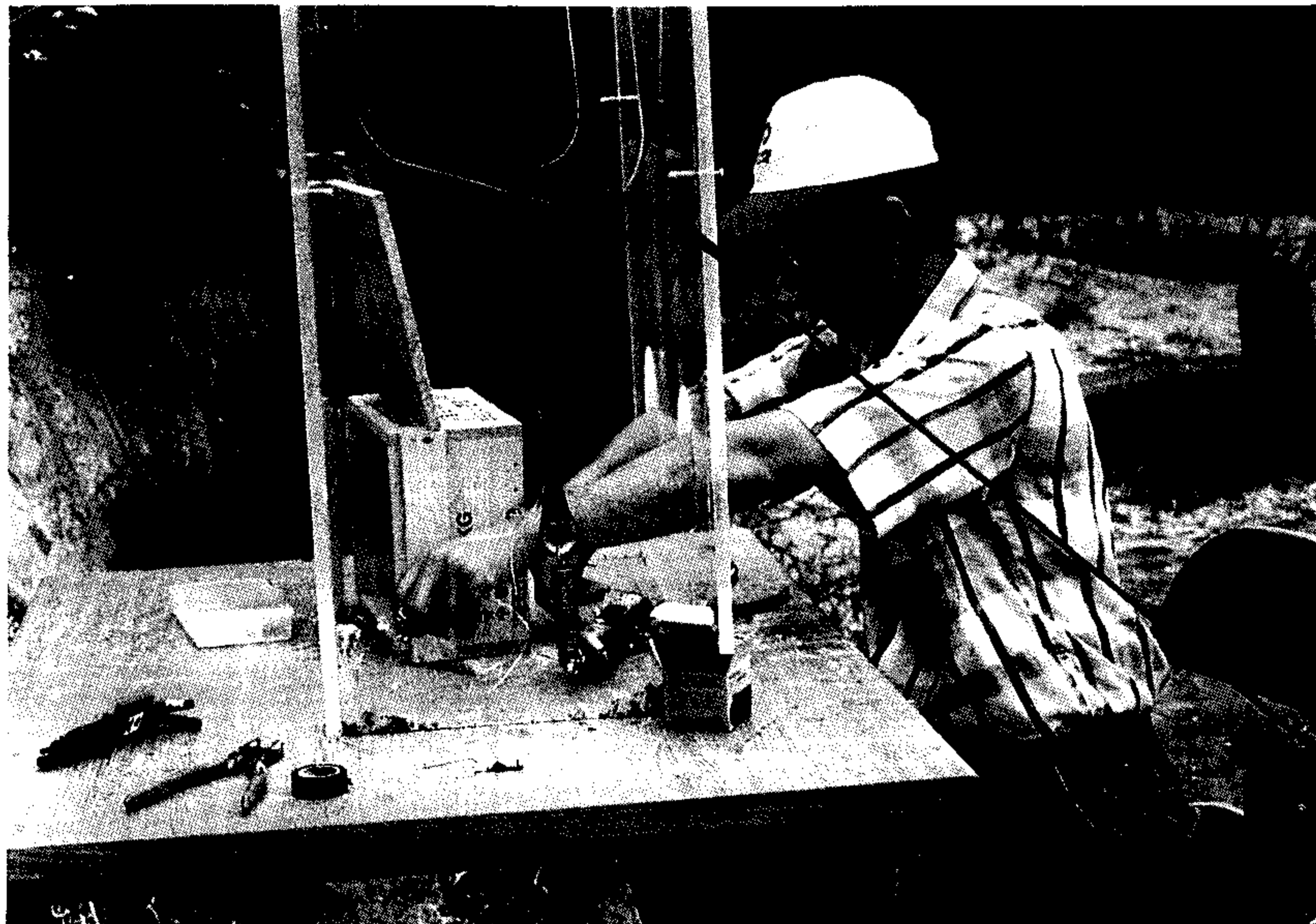


Fig. 98. Geotomographic measuring system - borehole explosive source.
The picture shows the use of a single seismic detonator developed
in Korea.

- 하나의 뇌관 발파시 차례를 기다리는 인접된 뇌관들이 충격(강력한 수압과 장치의 움직임)에 의해 동시에 발파되지 않는 소위 내압뇌관이 개발되어야 하며 동시에 그의 발파 시점이 단발뇌관의 것과 동일하게 일관성을 띠어야 한다.
- 뇌관 발파시 뇌관선 몸체의 훼손이 극소화되어야 한다.
- 뇌관의 위치 및 뇌관선의 저항치를 지상에서 자동으로 검증할 수 있는 제어 및 발전 장치가 개발되어야 한다.
- 시추공 발파장치 전체가 수동으로 인양될 수 있는 하중을 갖게 한다.

Fig. 99는 당소-한화-DMT 연구소 공동연구에 의해 개발된 다중발파 시스템의 전모를 나타내고 있다. 뇌관 모선의 마지막 부분에는 2m 간격으로 12개의 뇌관선이 모선으로부터 뇌관 연결을 위해 노출되어 있으며(아랫부분 참조) 도합 24개 전선을 피복하고 있는 모선 몸체(제작된 길이 200m, 75m)의 끝부분은 연결단자에 의해 발파제어장치(multiple shot distribution)에 부착된다(윗 그림 참조). Fig. 100은 발파제어장치가 현장에서 응용되고 있는 전경을 보여주고 있으며 그의 작동을 서술하기 위한 모식도는 Fig. 101에 나타나 있다. 발파제어장치는 크게 시추공 발파장치의 뇌관 연결상태를 점검하는 부분과 실제로 발파하는 부분(발파기)으로 구분되며 그의 작동은 1번의 전원 off, on에 의해 분리된다. 그림의 아랫부분은 모선 몸체 200m에 대한 각 뇌관 연결선의 규정된 저항치를 나타내고 있으며 그의 검증은 4번의 스위치에 의해 뇌관번호가 선정된 후 규정치와 측정치와의 비교에 의해 이루어진다.

Fig. 102의 윗부분에는 한화에서 독자적으로 개발된 내압뇌관(오른쪽 부분)과 비교 효과를 위해 독일 Nobel사가 개발한 내압뇌관(왼쪽 부분)을 상

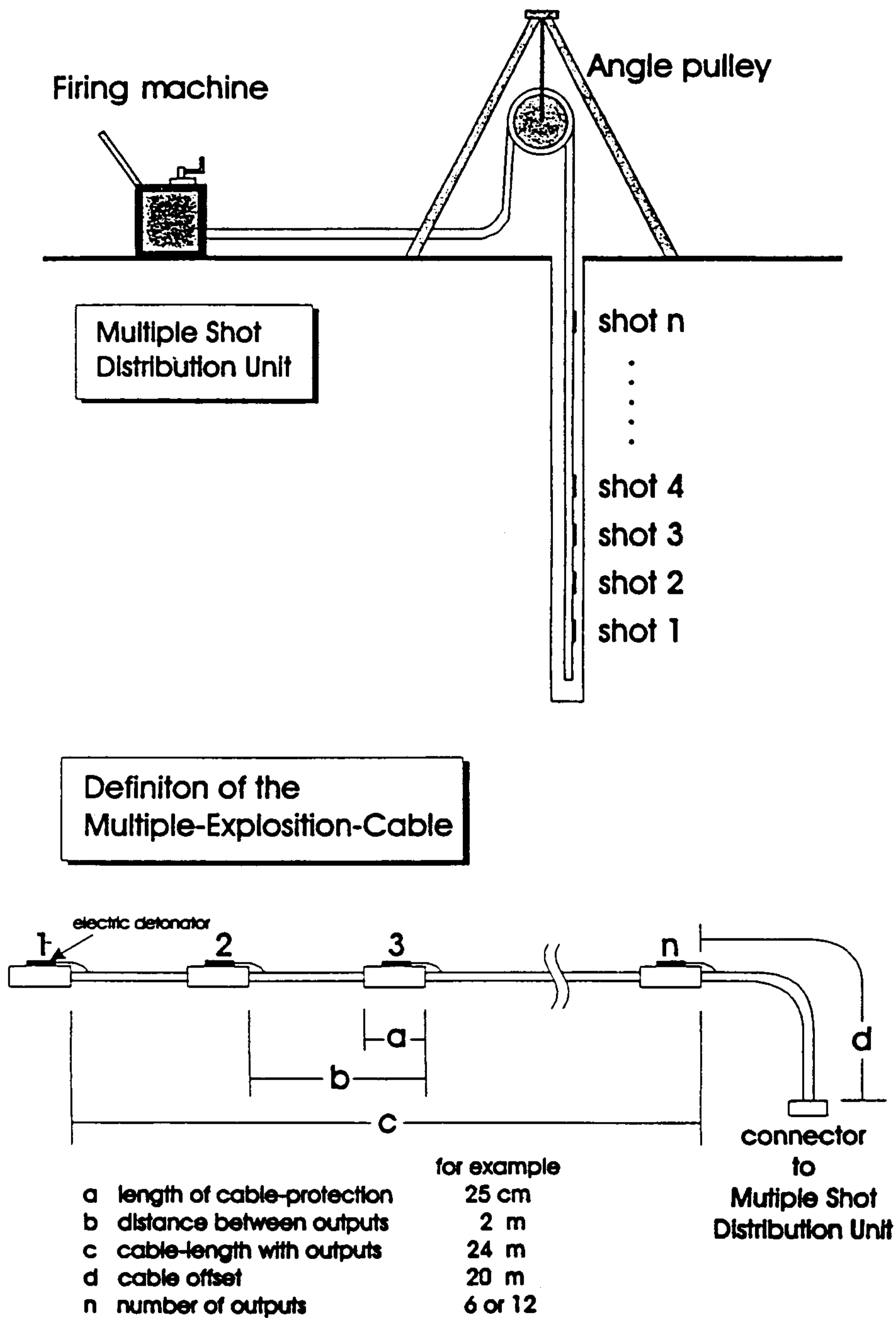
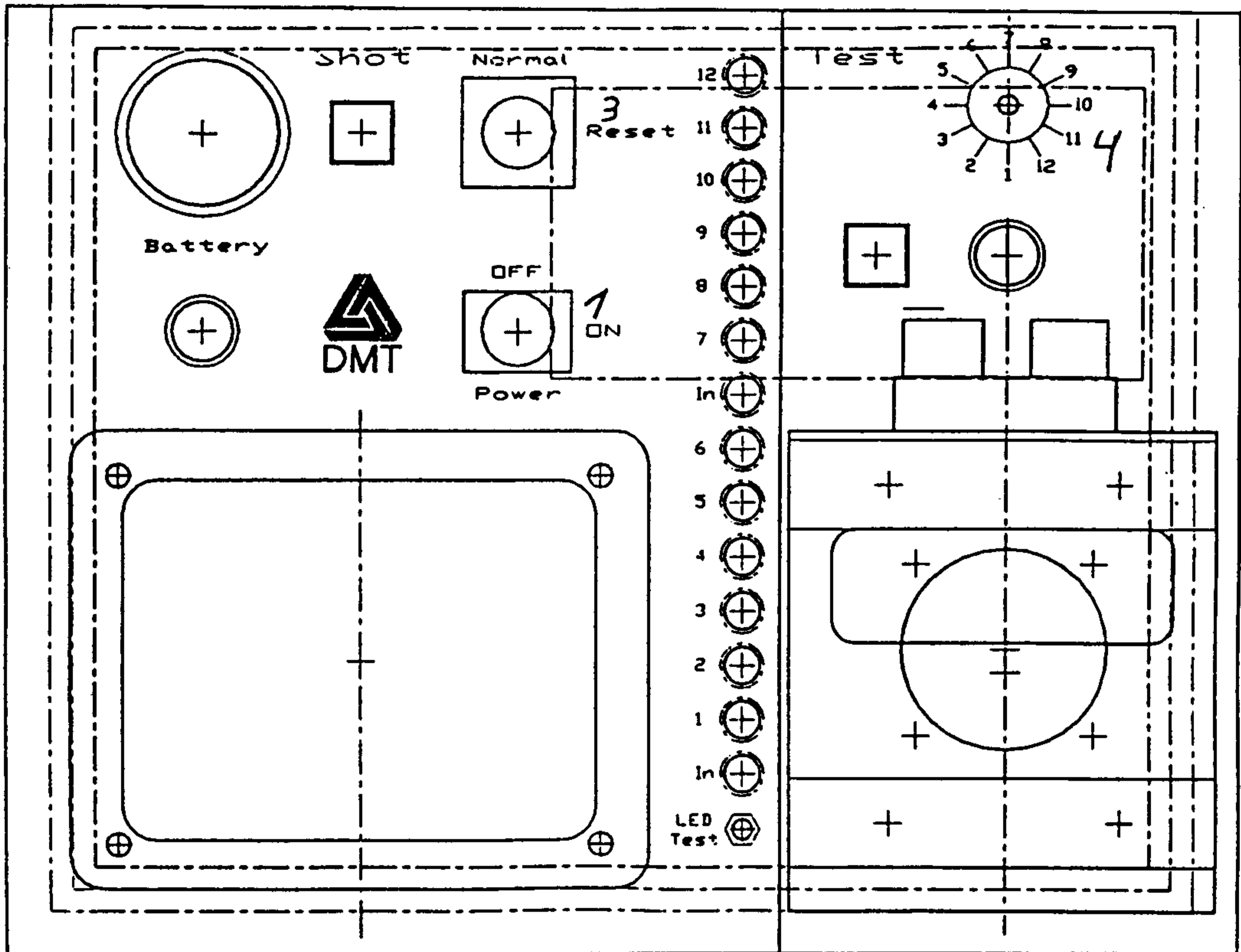


Fig. 99. Geotomographic measuring system - multiple shot borehole source. Shown is the schematic of the multiple shot borehole source developed first in Korea.



Fig. 100. Geotomographic measuring system - a blasting machine with a multiple shot distribution unit.



Shot	Short Circuit [Ohm]	with detonator [Ohm]
1	9,2	9,7
2	9,1	9,6
3	9,1	9,6
4	9,0	9,6
5	8,9	9,5
6	8,8	9,4
7	8,8	9,3
8	8,7	9,3
9	8,7	9,2
10	8,6	9,1
11	8,5	9,0
12	8,5	9,0

Fig. 101. Geotomographic measuring system.
Shown is the schematic of the blasting machine with a multiple shot distribution unit.

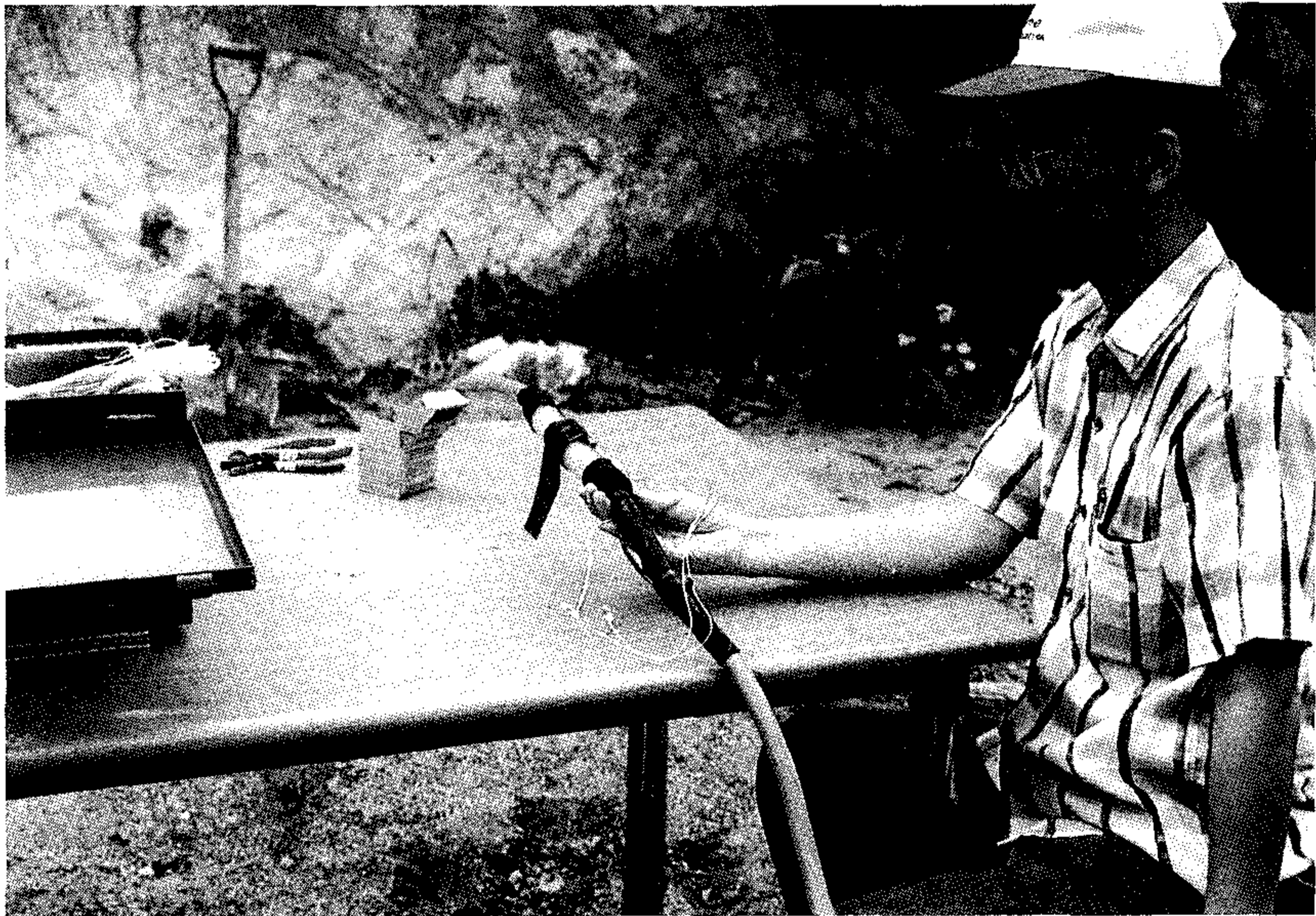
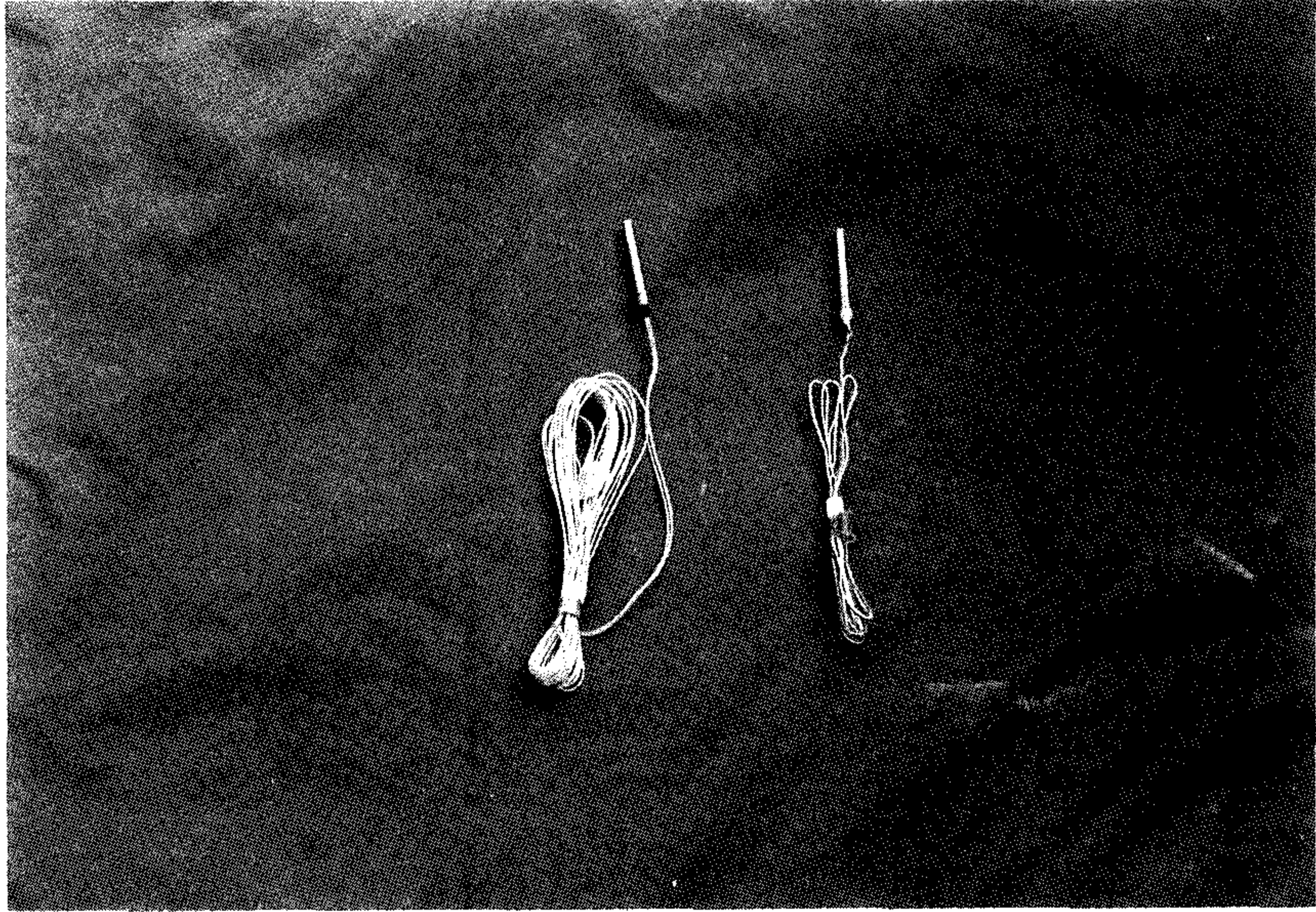


Fig. 102. Geotomographic measuring system.

Upper part: the detonator of Hanwha is compared with that of Nobel

Lower part: the detonator is connected to the multiple-explosion cable.

호 대조하고 있으며 그림의 아랫부분은 뇌관이 모선으로부터 노출된 전선과 연결된 상태를 나타내고 있다. Fig. 103은 현장실험에서 뇌관이 차례로 모체에 장착되어 시추공에 삽입되는 장면을 나타내고 있다.

다음은 실제 현장실험을 통하여 한화와 노벨의 뇌관 성능을 상호 비교하고 있다. Fig. 104에는 발생원 및 수신기 위치를 나타내고 있다. Fig. 105는 시추공 발생원으로서 한화 뇌관(1g 폭약)을 다중발파 장치에 장착하여 발파함으로써 얻어진 기록을 나타내고 있다(샘플링 간격 1/21ms, 수신장치: 줄주리). 토모그래피 측정에서 가장 중요한 트리거 시점의 일관성 및 정확성이 훌륭하게 반영되고 있다. 이번에는 이전과 동일한 측정과정에 의해 독일 노벨 뇌관(2g 폭약)이 사용되었으며 그 결과는 Fig. 106에 나타나 있다. 역시 트리거 시점의 일관성을 훌륭하게 유지되고 있다. 그러나, 다음 두가지 면에서 상호 차이가 있음을 관찰할 수 있다. 그 하나는 노벨 뇌관의 폭약이 비록 한화 뇌관보다 배가 되지만 실제 측정된 초동의 진폭(에너지)은 오히려 작게 나타나고 있다. 또 다른 하나는 트리거 시점 측면에서 노벨 뇌관은 한화 뇌관보다 3샘플($3 \times 1/20\text{ms}$) 늦게 발파되었음을 인식할 수 있다. 환원하면, 한화 뇌관이 에너지를 보다 효율적으로 방사함과 동시에 트리거 시점의 정확성 면에서도 보다 우수함을 입증하는 것이 된다. 여기서 초동의 진폭 차이는 Fig. 107에서 나타난 바 발파 후의 파괴된 뇌관 상태를 비교함으로써 유추될 수 있다. 한화 뇌관은 발파 후 뇌관 몸체 전체가 파괴되었으나(그림의 윗부분) 반면 노벨 뇌관은 단지 폭약이 장착된 부분만 파손되었다(그림의 아랫부분). 즉, 노벨 뇌관은 그의 에너지 방사가 방향성(대체로 시추공 아래 방향)을 띠고 있었기 때문에 P파 초동의 진폭이 상대적으로 낮게 관찰된 것으로 사료된다.

Fig. 108에는 다중발파 장치 개발 이전에 상용되었던 한화 뇌관(내압 뇌



Fig. 103. Geotomographic measuring system.
Shown is the operating procedure of the multiple shot borehole source.

Geometry for Multi-shot system

Test site in Incheon (sur 410)

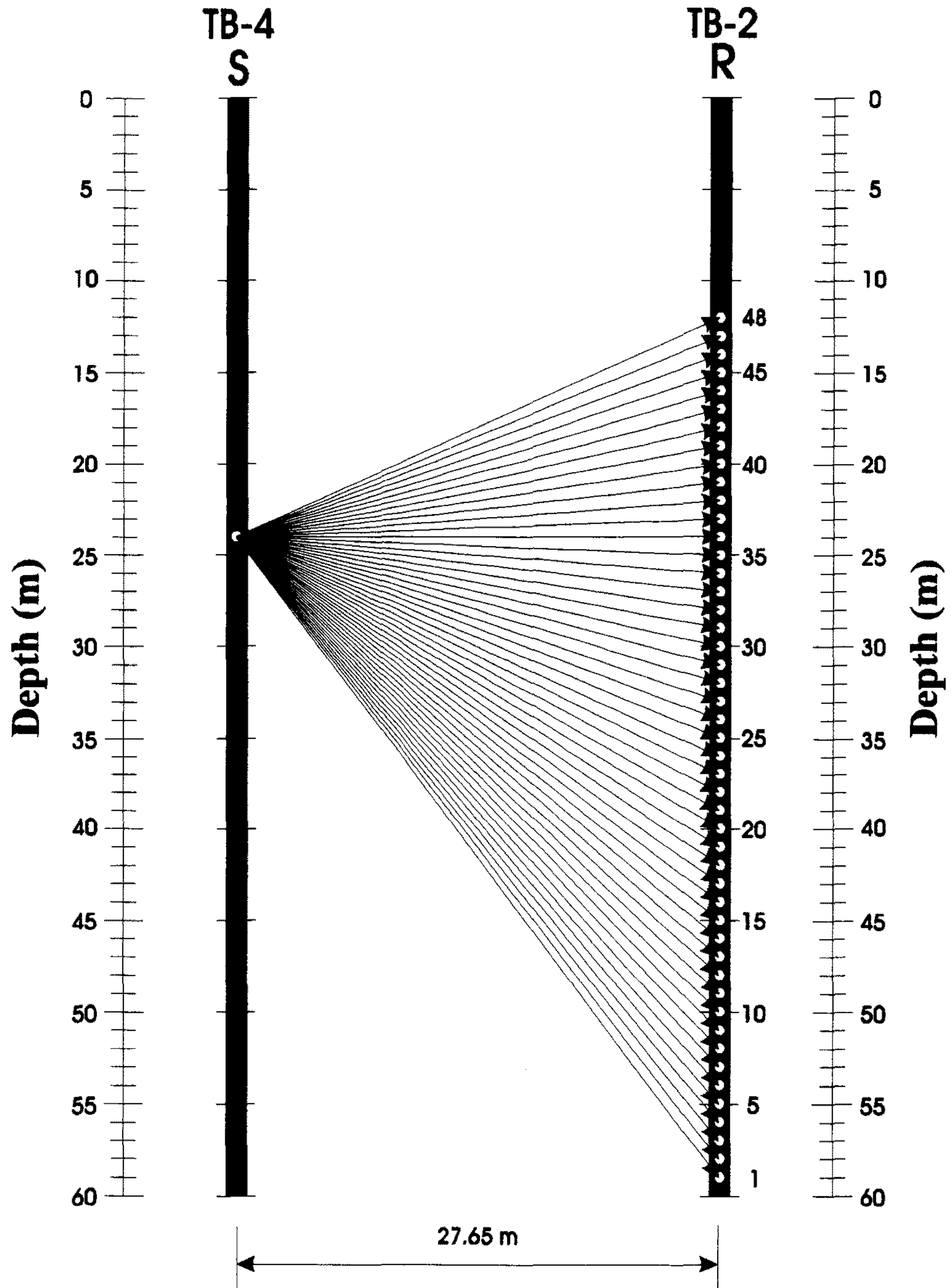
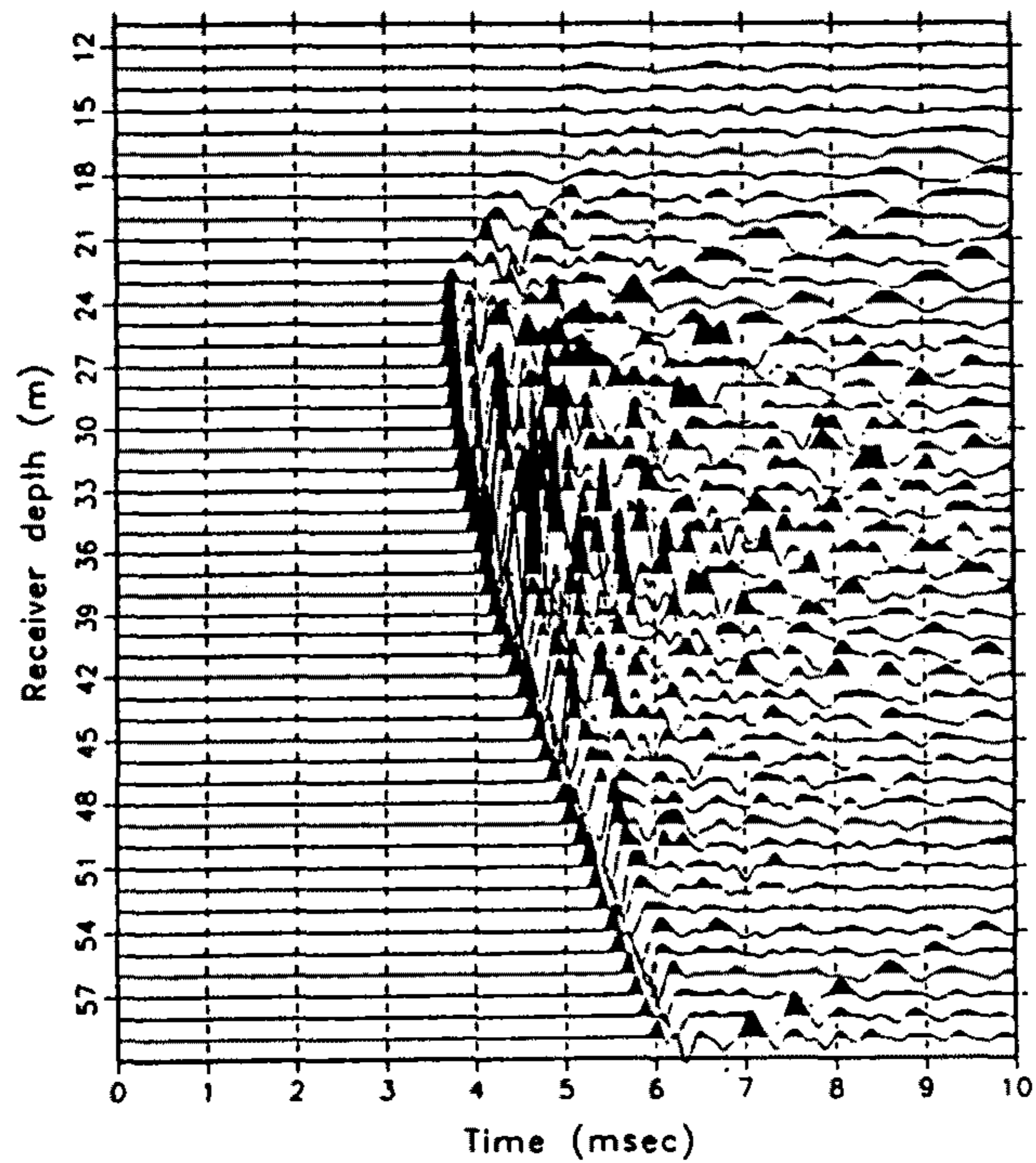


Fig. 104. Source and receiver locations for the crosshole measurement.

Test for multi-shot system (Hanwha deto. 1g: No.1)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m



Test for multi-shot system (Hanwha deto. 1g: No.2)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m

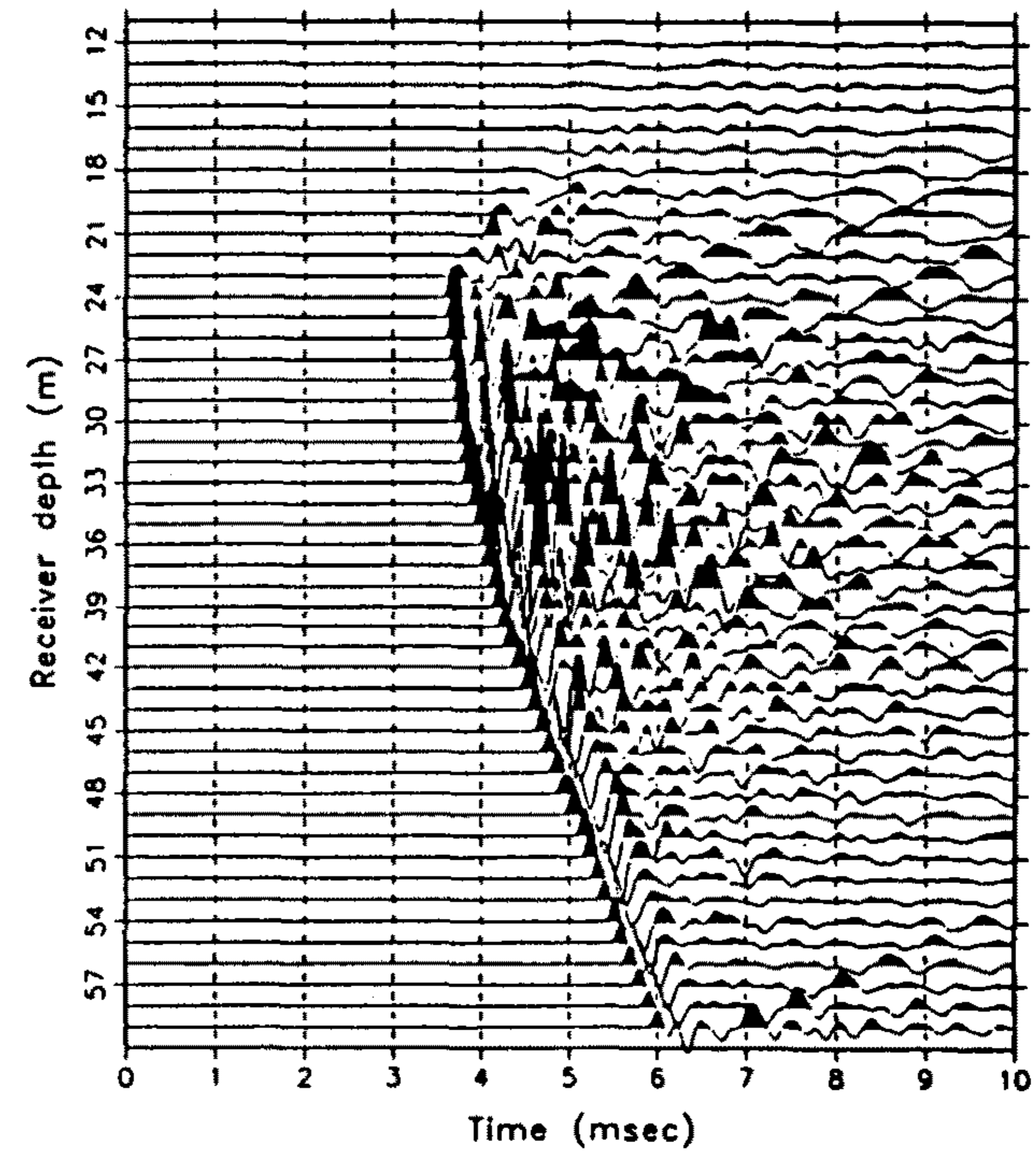
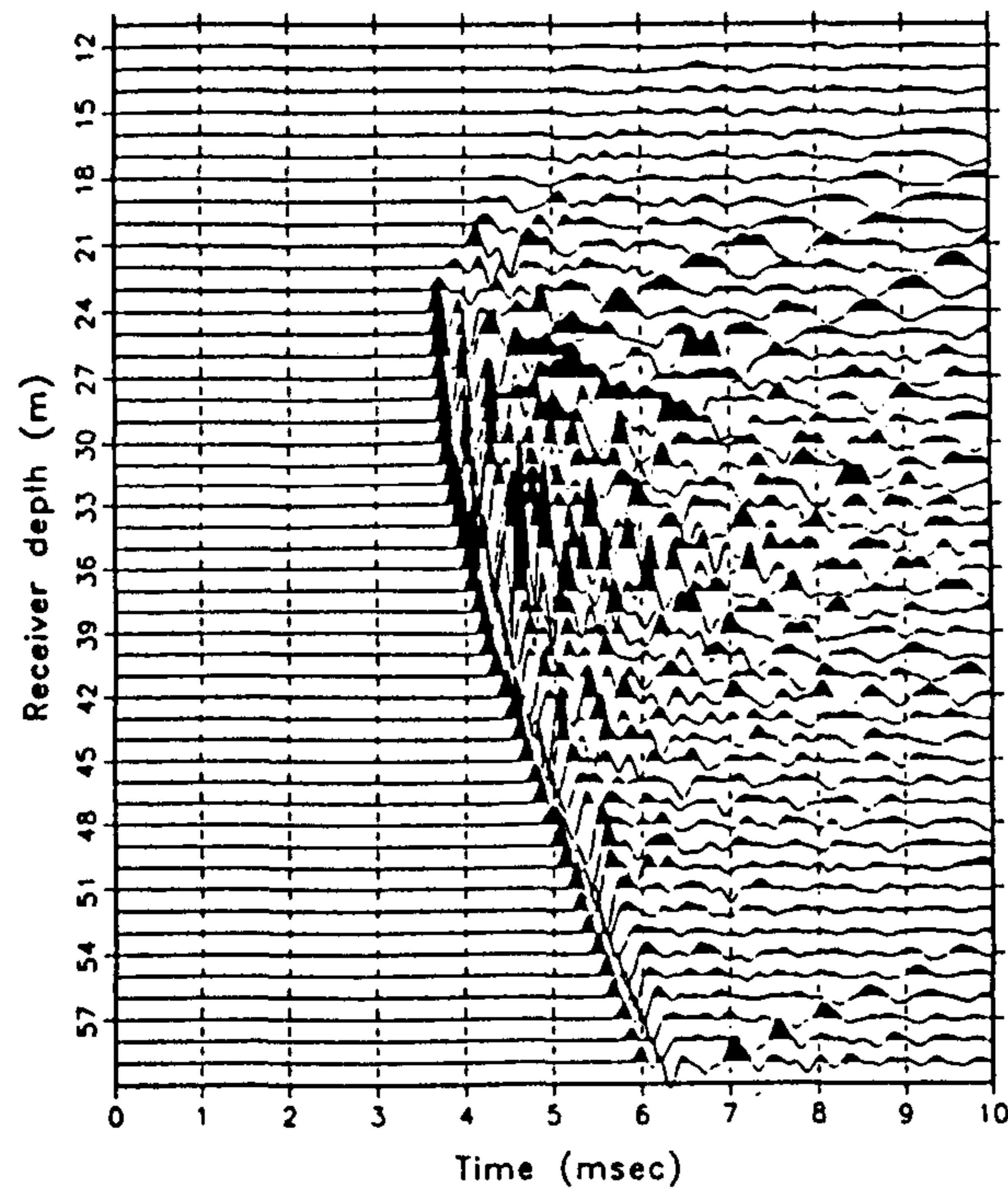


Fig. 105. Delay time and amplitude test for the new borehole seismic detonator developed by Hanwha using the multiple shot borehole source. The data show very stable time delay.

Test for multi-shot system (Hanwha deto. 1g: No.3)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m



Test for multi-shot system (Hanwha deto. 1g: No.4)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m

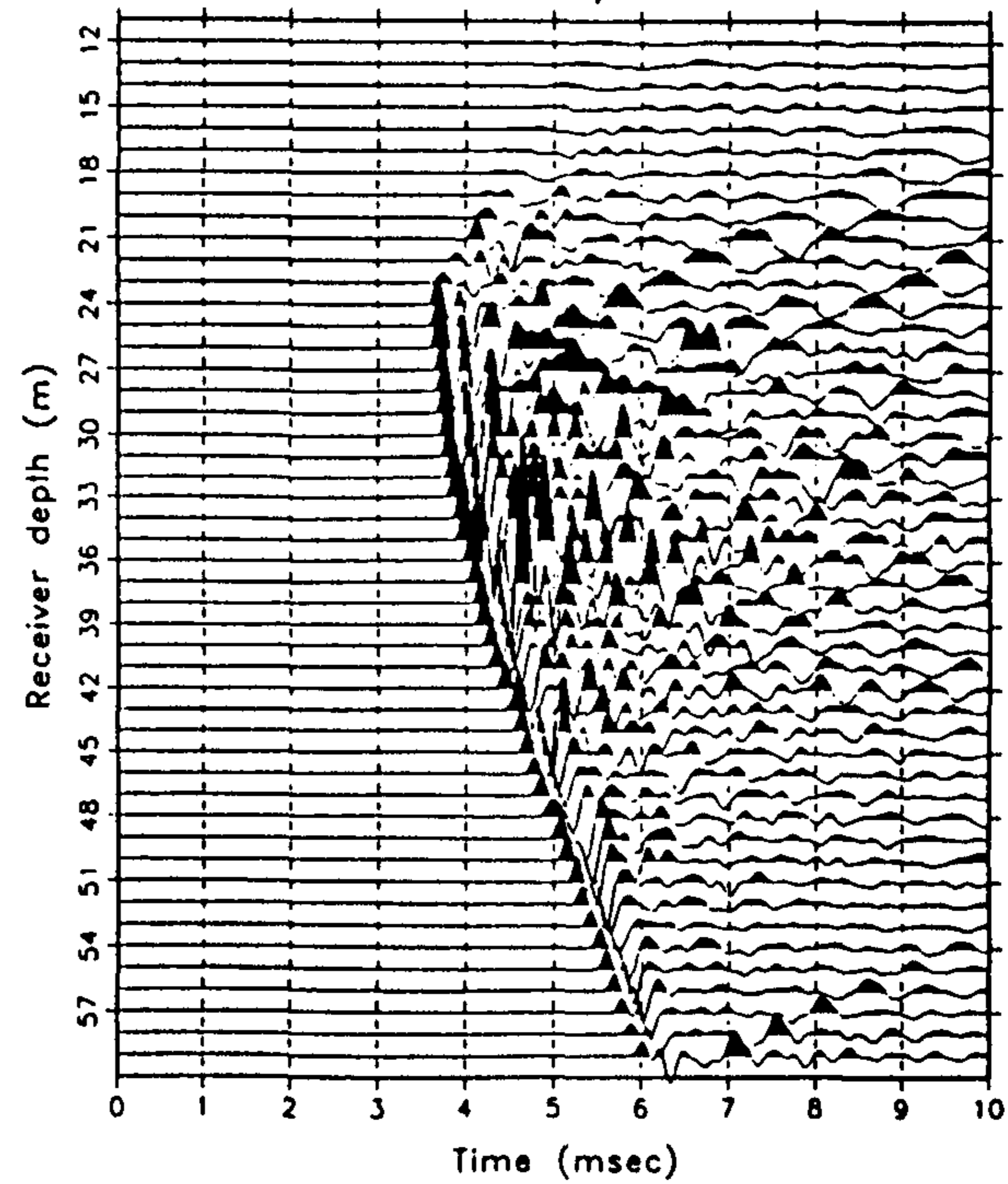
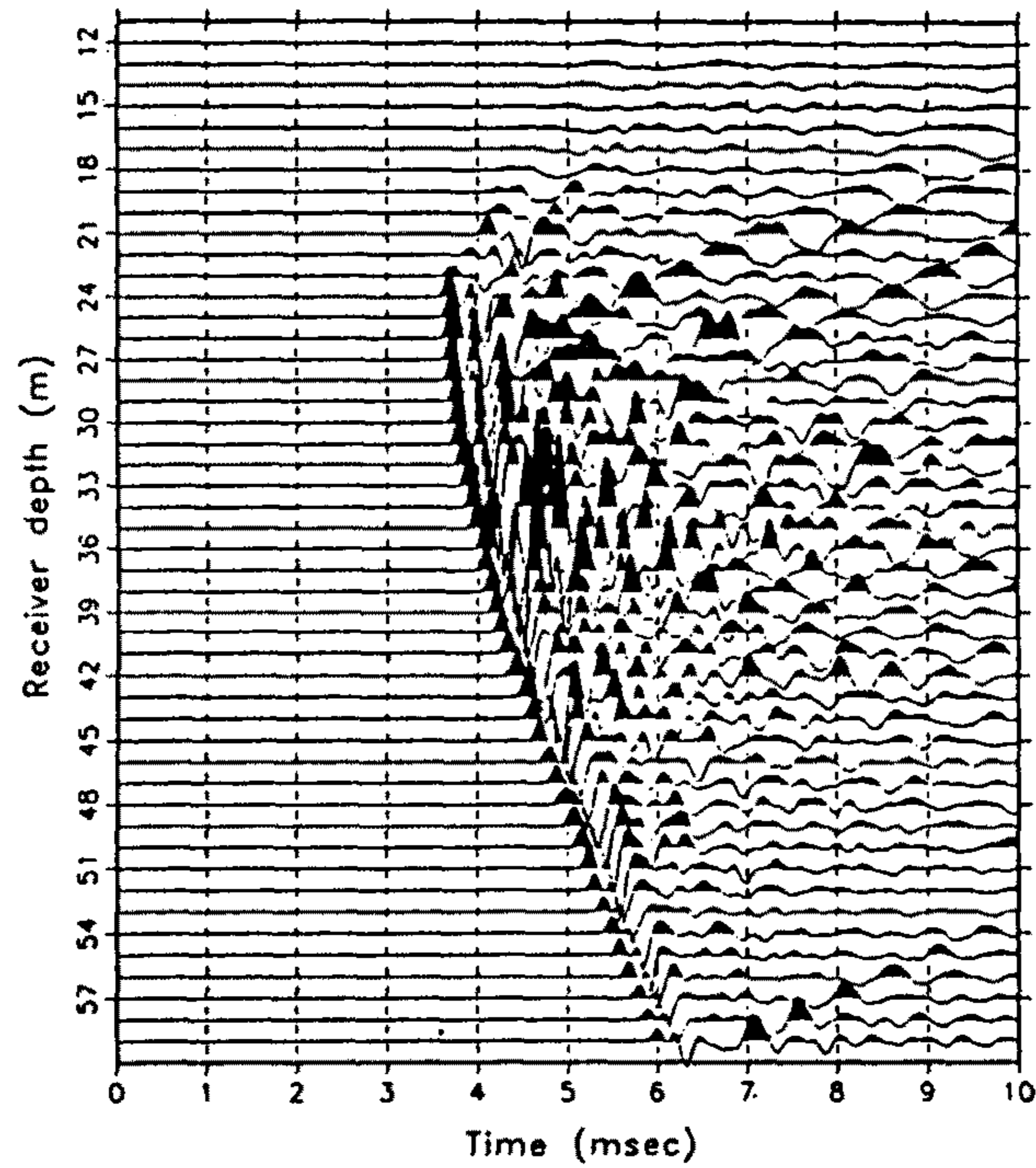


Fig. 105. (continued).

Test for multi-shot system (Hanwha deto. 1g: No.5)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m



Test for multi-shot system (Hanwha deto. 1g: No.6)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m

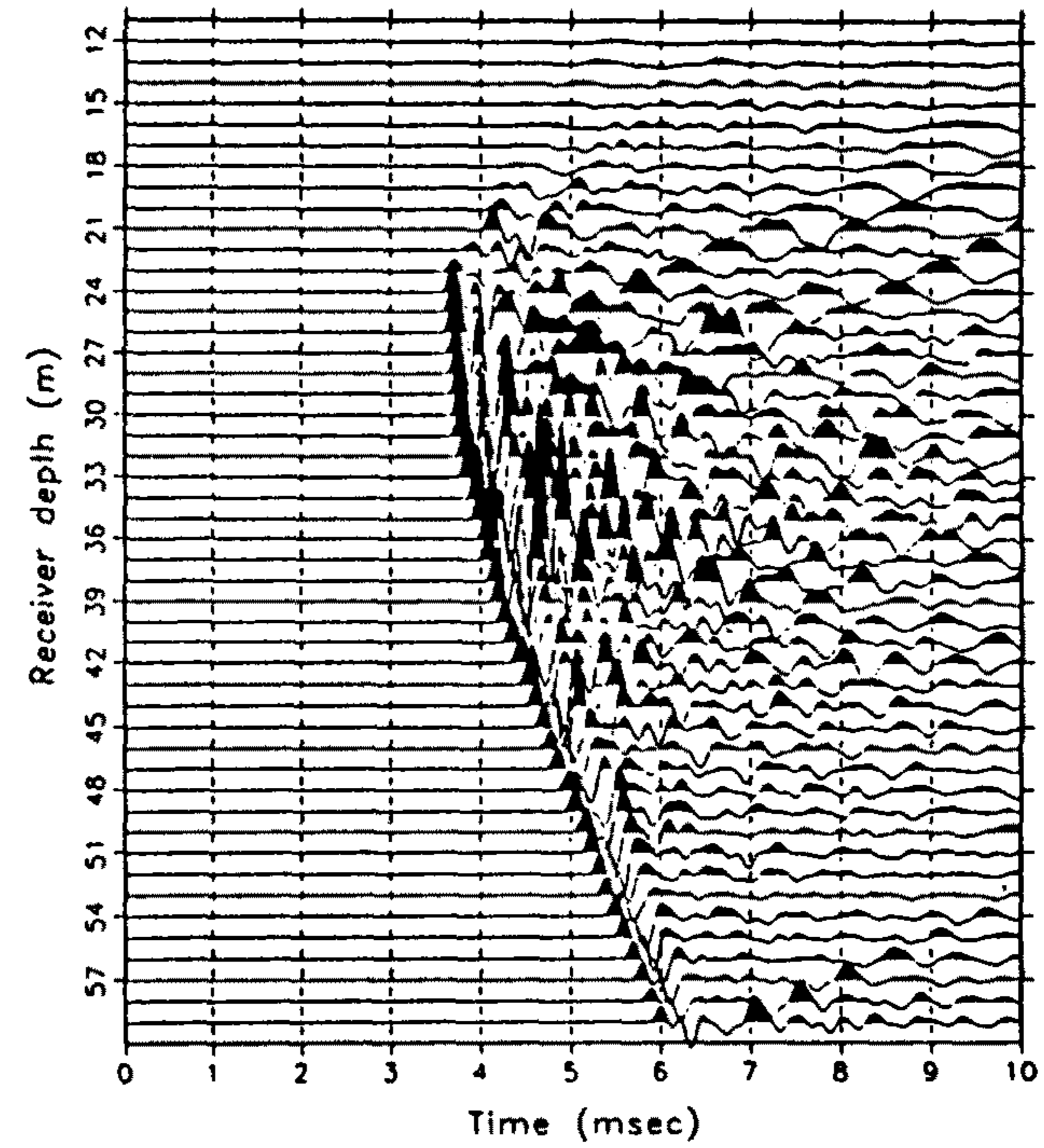
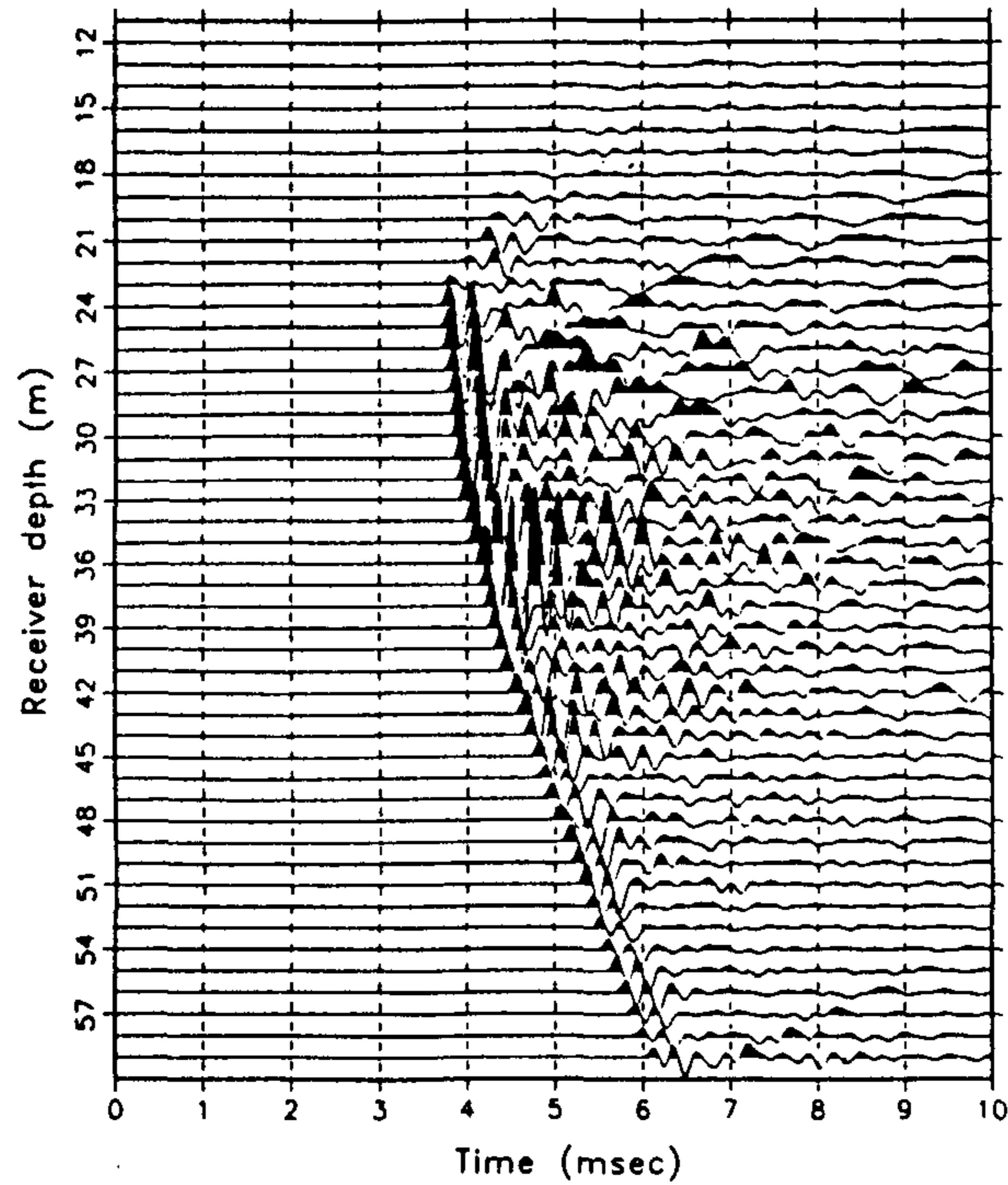


Fig. 105. (continued).

Test for multi-shot system (German deto. 2g: No.1)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m



Test for multi-shot system (German deto. 2g: No.2)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m

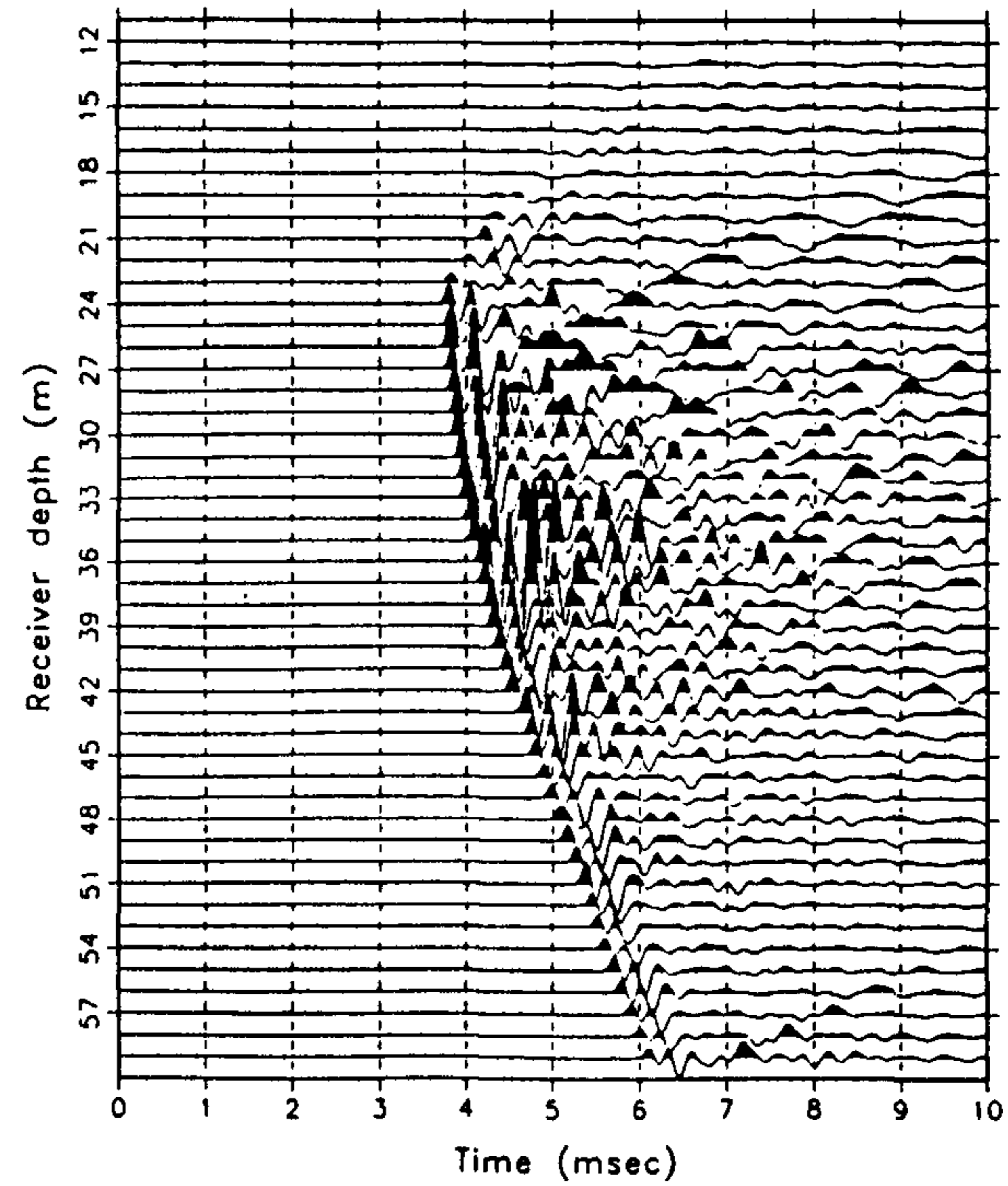
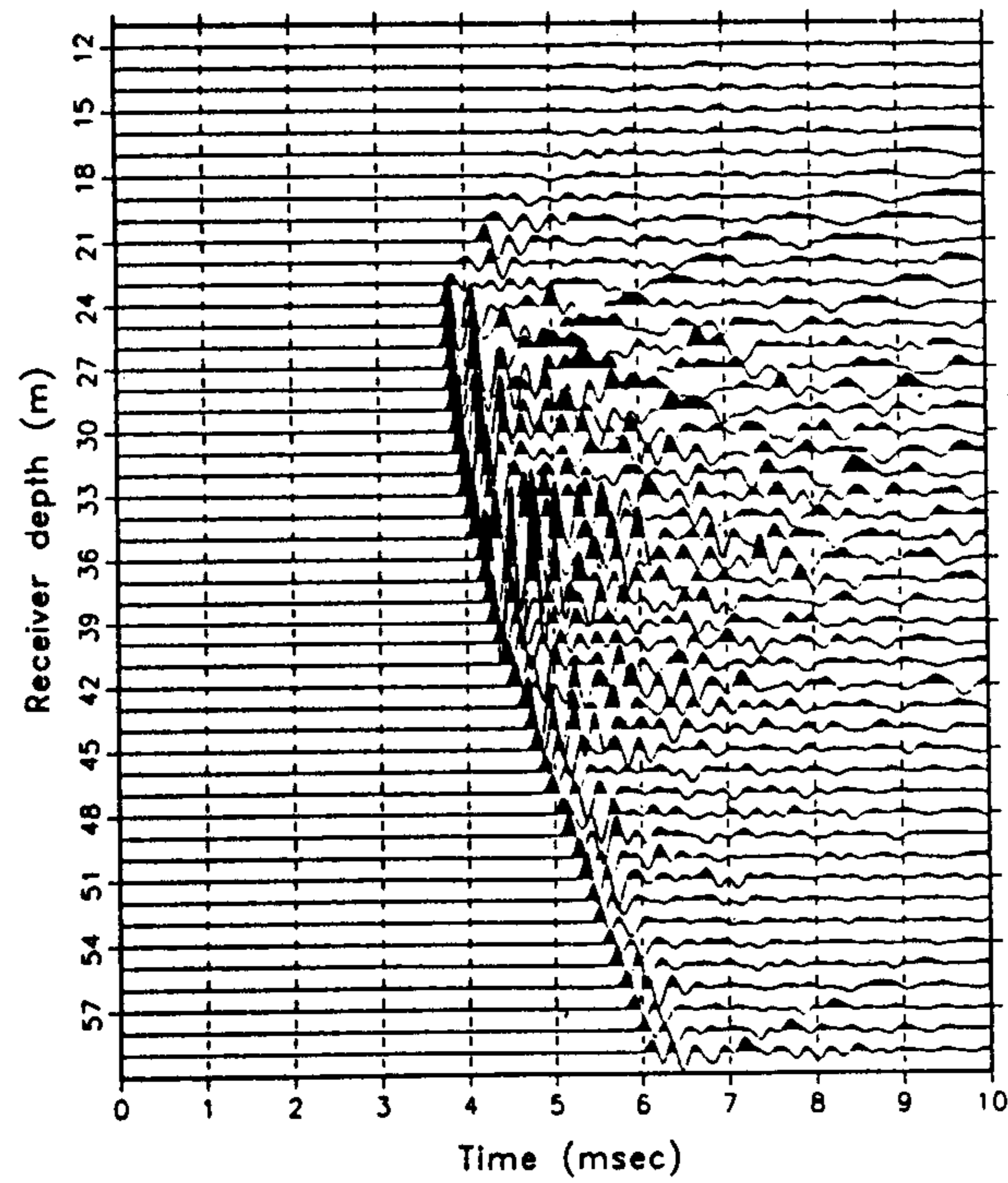


Fig. 106. Delay time and amplitude test for the new borehole seismic detonator developed by Nobel using the multiple shot borehole source. Compare with the data in Fig. 105.

Test for multi-shot system (German deto. 2g: No.3)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m



Test for multi-shot system (German deto. 2g: No.4)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m

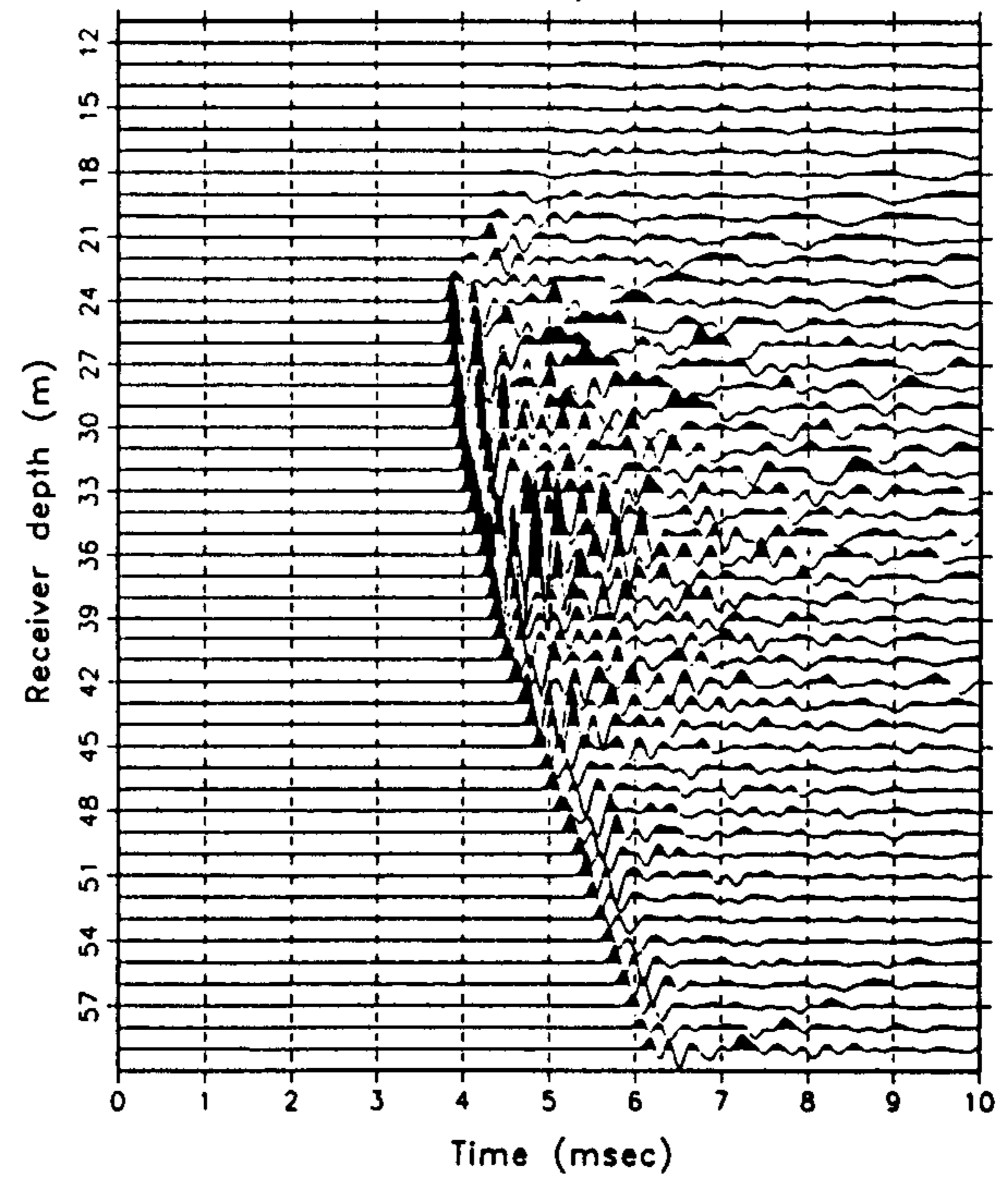
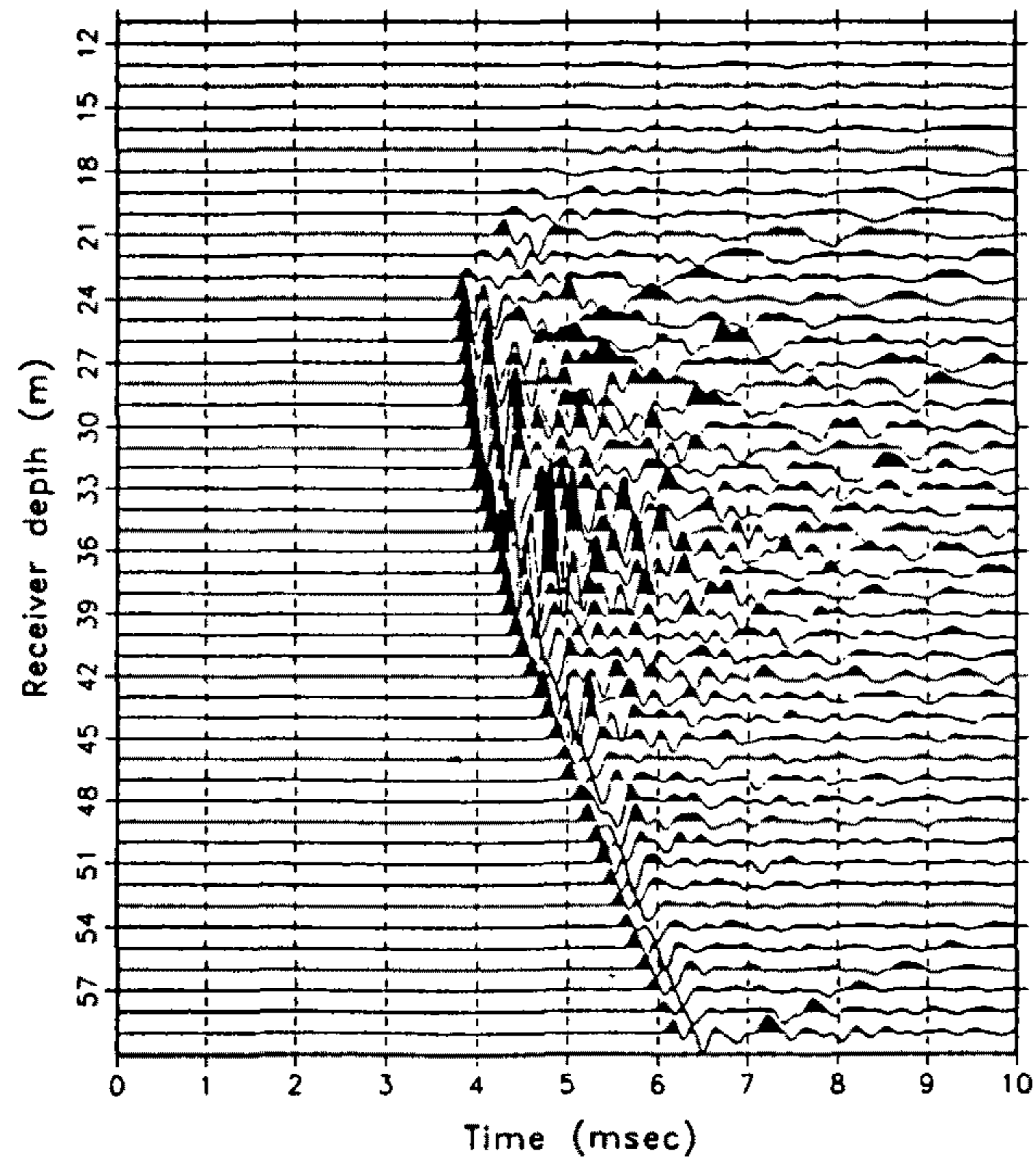


Fig. 106. (continued).

Test for multi-shot system (German deto. 2g: No.5)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m



Test for multi-shot system (German deto. 2g: No.6)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m

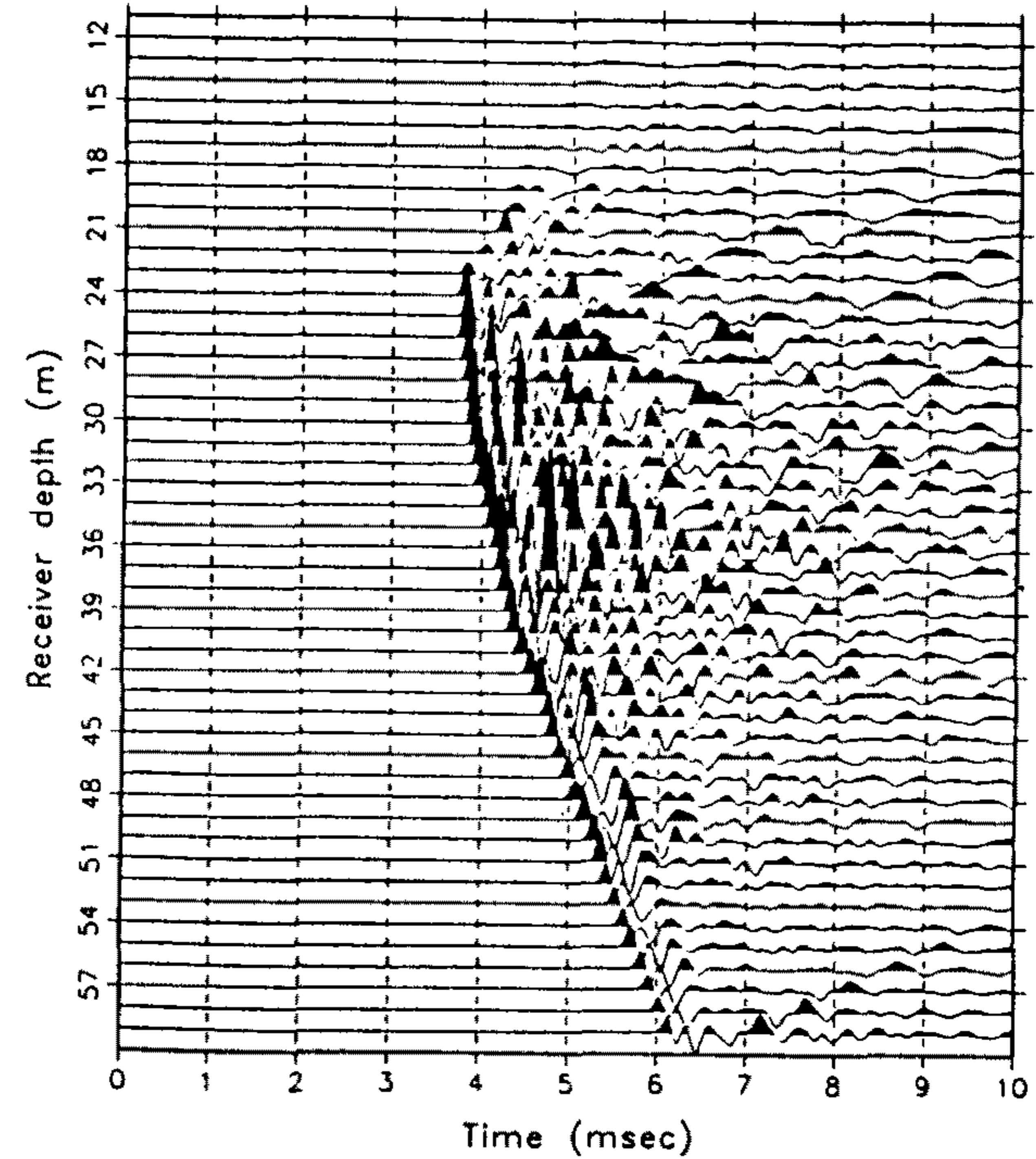


Fig. 106. (continued).

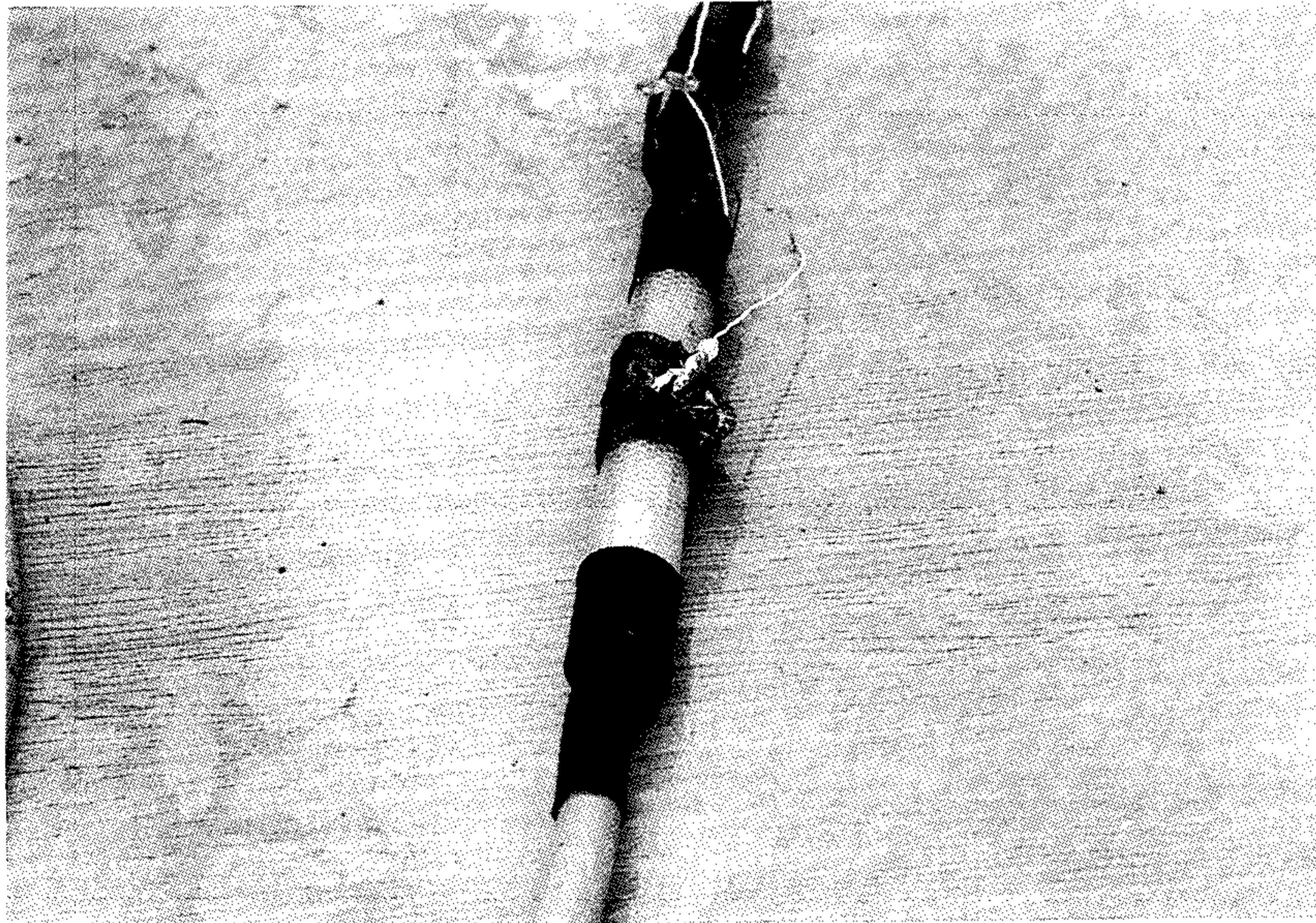
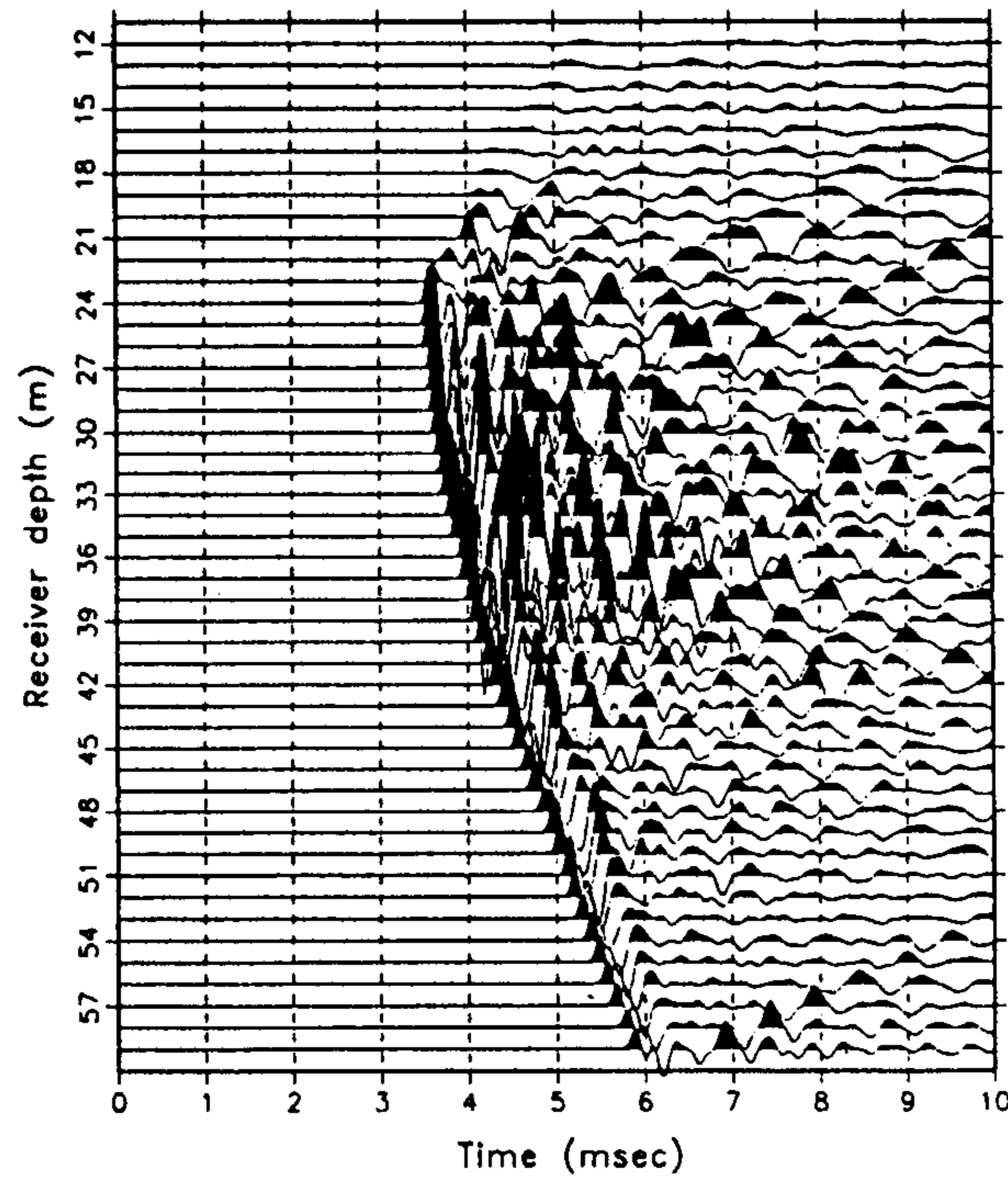


Fig. 107. Compared are the blasted detonators.
Upper part: from the Hanwha detonator.
Lower part: from the Nobel detonator.

Test for single-shot system(Hanwha deto. 1g: No.1)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m



Test for single-shot system(Hanwha deto. 1g: No.2)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m

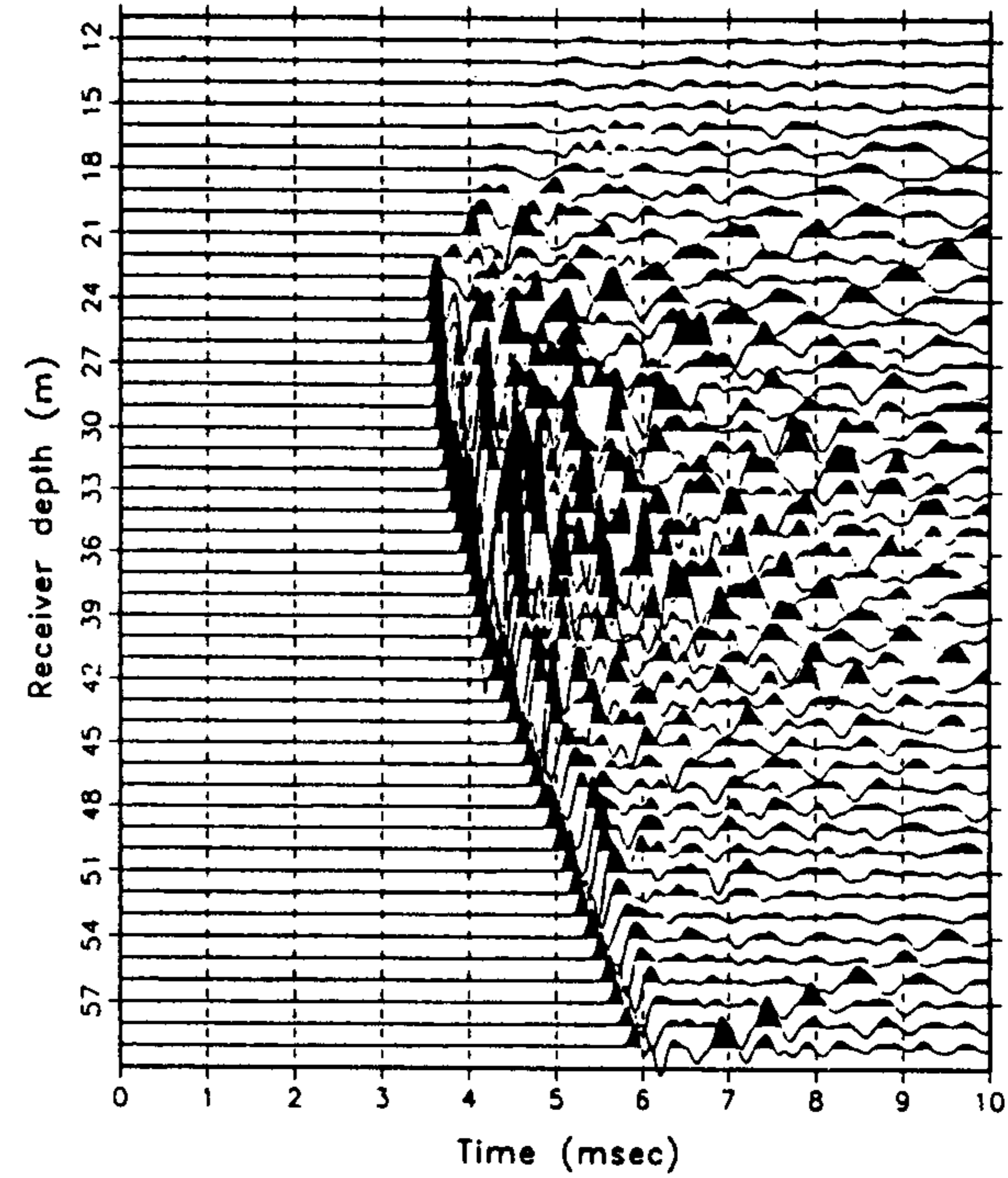
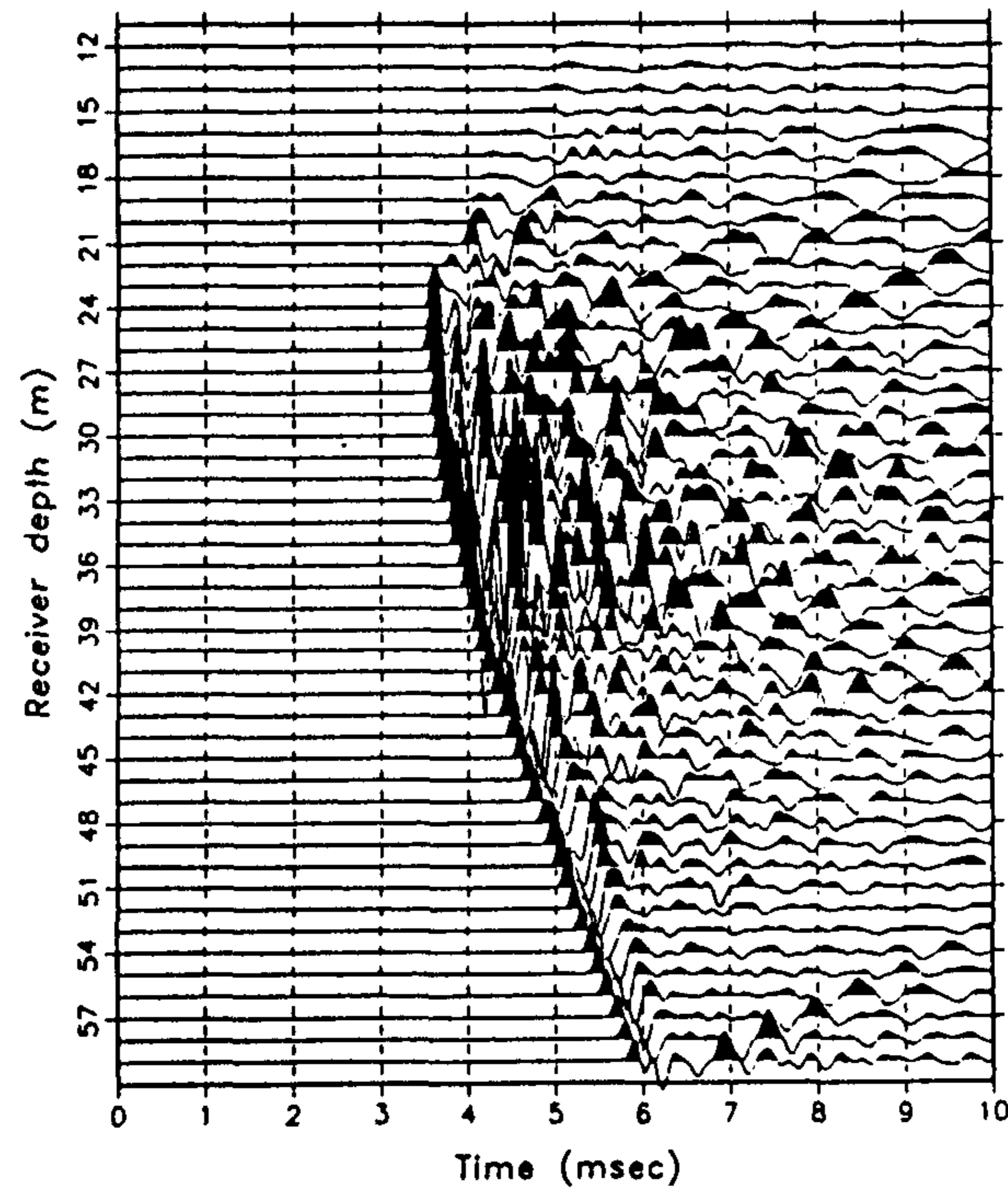


Fig. 108. Delay time and amplitude test for the old borehole seismic detonator developed by Hanwha using the single shot borehole source. Compare with the data in Fig. 105.

Test for single-shot system(Hanwha deto. 1g: No.3)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m



Test for single-shot system(Hanwha deto. 1g: No.4)
S(TB4) - R(TB2), S dep. = 24 m, R dep. = 59m - 12m

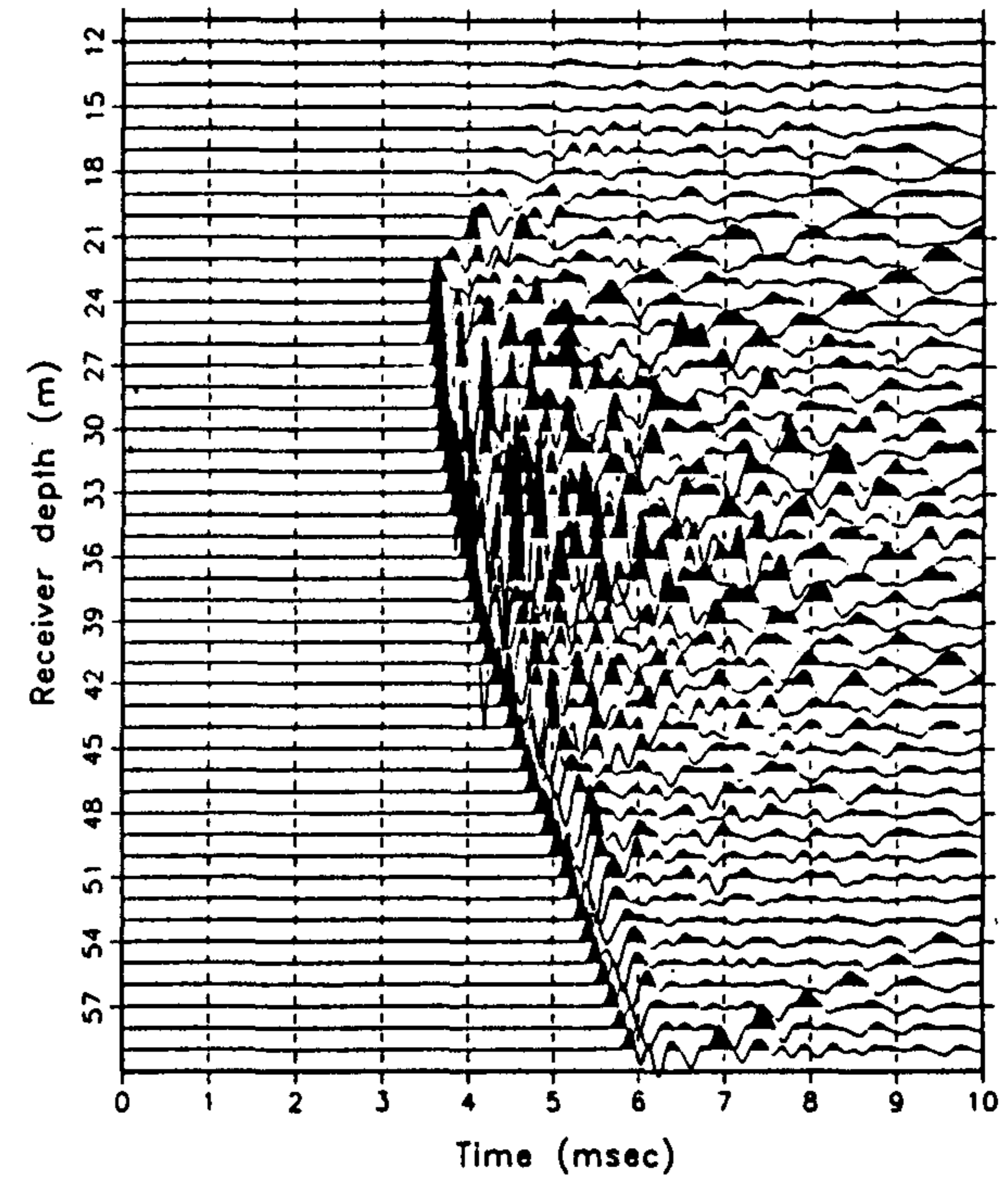


Fig. 108. (continued).

관이 아님)에 의해 초래된(단발 발파) 기록을 보여주고 있다. 이번에는 초동의 진폭이 뇌압 뇌관 + 다중발파 장치의 것보다 다소 크며 또한, 그의 초동 주기도 약 3샘플($3 \times 1/20\text{ms}$) 빠르게 나타나고 있다. 이러한 진폭 및 주시 차이는 바로 발파장치 구성이 상호 달리하고 있음에 기인된 것으로 판단된다.

Fig. 109~Fig. 111은 차례로 한화 내압뇌관 + 다중발파 장치, 노벨 내압 뇌관 + 다중발파 장치, 한화 뇌관 + 단발발파 장치에 의해 초래된 기록(Fig. 105, 106, 108)에 대한 주파수 내용을 보여주고 있다. 그 결과, 본 현장실험의 암반에서 기대되는 P파 초동의 주파수 범위(약 $1000\text{Hz} \sim 2000\text{Hz}$)에서 한화 뇌관에 의한 진폭이 노벨의 것보다 현저하게 크게 나타나고 있다.

한편, 초기에 제작된 다중발파 시스템은 여러차례 발파 후 단지 모선 몸체에서 충격에 의한 부분적인 파손을 보여주었다(Fig. 112 참조). 즉, 발파 후 뇌관위치 주위 모선몸체 내의 전선들이 크게 훼손되었으며 동시에 몸체 자체도 꼬인 상태를 나타내었다. 이러한 문제는 한화 자체의 기술진에 의해 쉽게 극복되었으며, Fig. 113에 나타낸 새로운 다중발파 시스템은 국내에서 독자적으로 완성되고 동시에 세계 기술수준에 초유의 시추공 발생원이 된 것이다.

AMPLITUDE SPECTRUM (HANWHA DETO. 1G: NO.1)
S(TB4)-R(TB2), S DEP. = 24M, R DEP. = 59M-12M

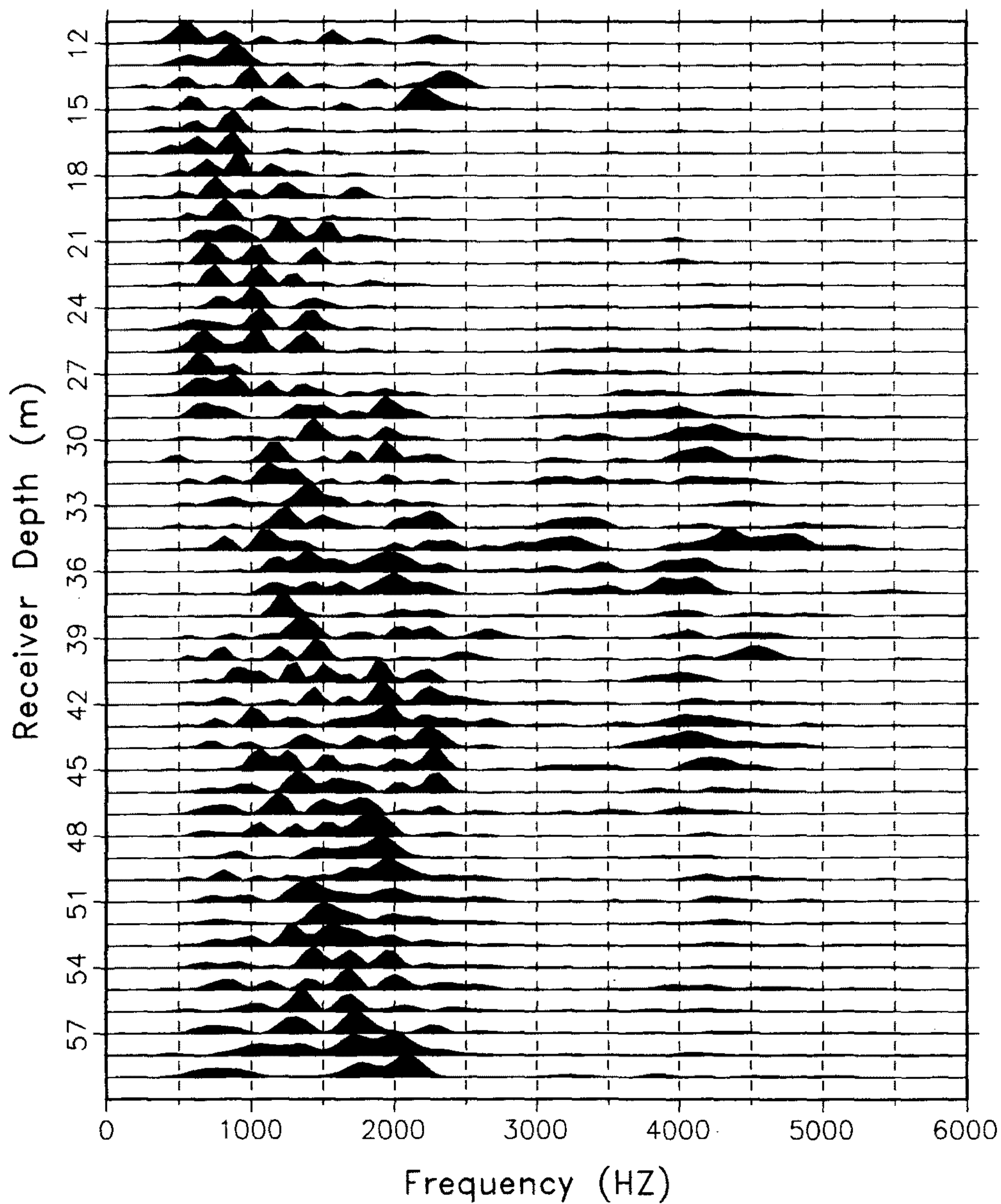


Fig. 109. Frequency content test for the Hanwha borehole seismic detonator using the multiple shot borehole source.

AMPLITUDE SPECTRUM (GERMAN DETO. 2G: NO.1)
S(TB4)-R(TB2), S DEP. = 24M, R DEP. = 59M-12M

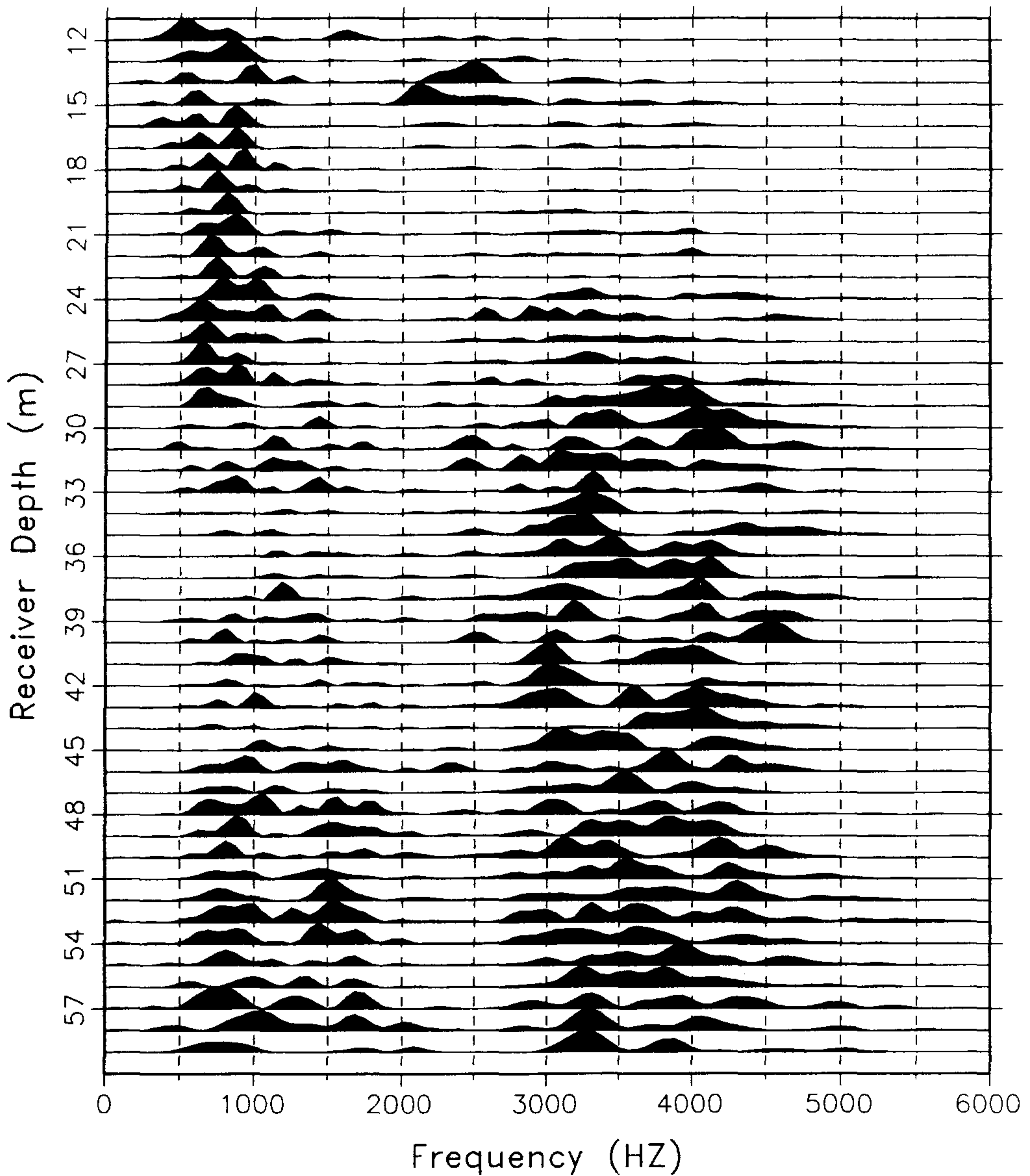


Fig. 110. Frequency content test for the Nobel borehole seismic detonator using the multiple shot borehole source. Compare with the result in Fig. 109.

AMPLITUDE SPECTRUM (HANWHA DETO. 1G: SINGLE NO.1)
S(TB4)-R(TB2), S DEP. = 24M, R DEP. = 59M-12M

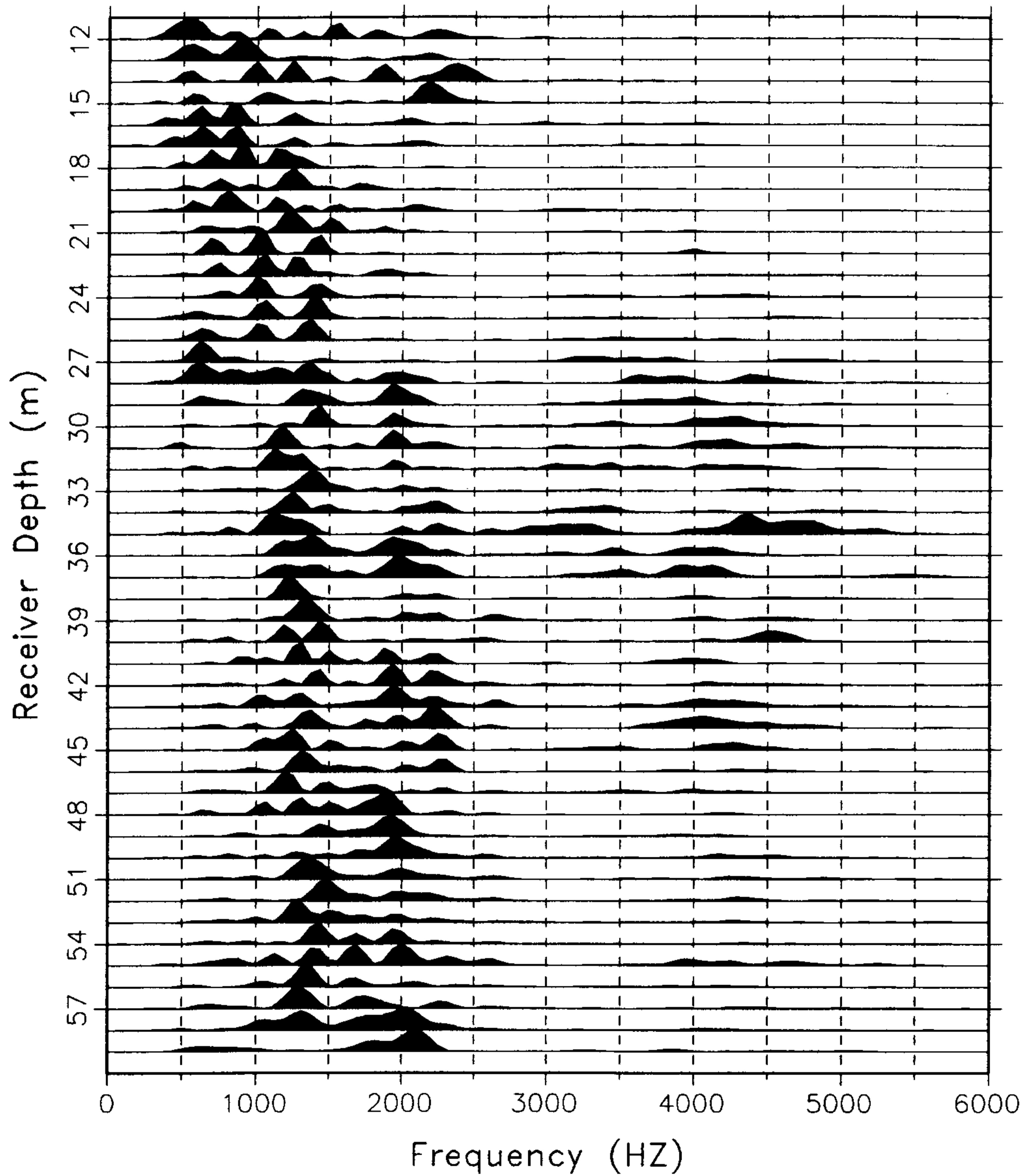


Fig. 111. Frequency content test for the Hanwha borehole seismic detonator using the single shot borehole source. Compare with the result in Fig. 109.

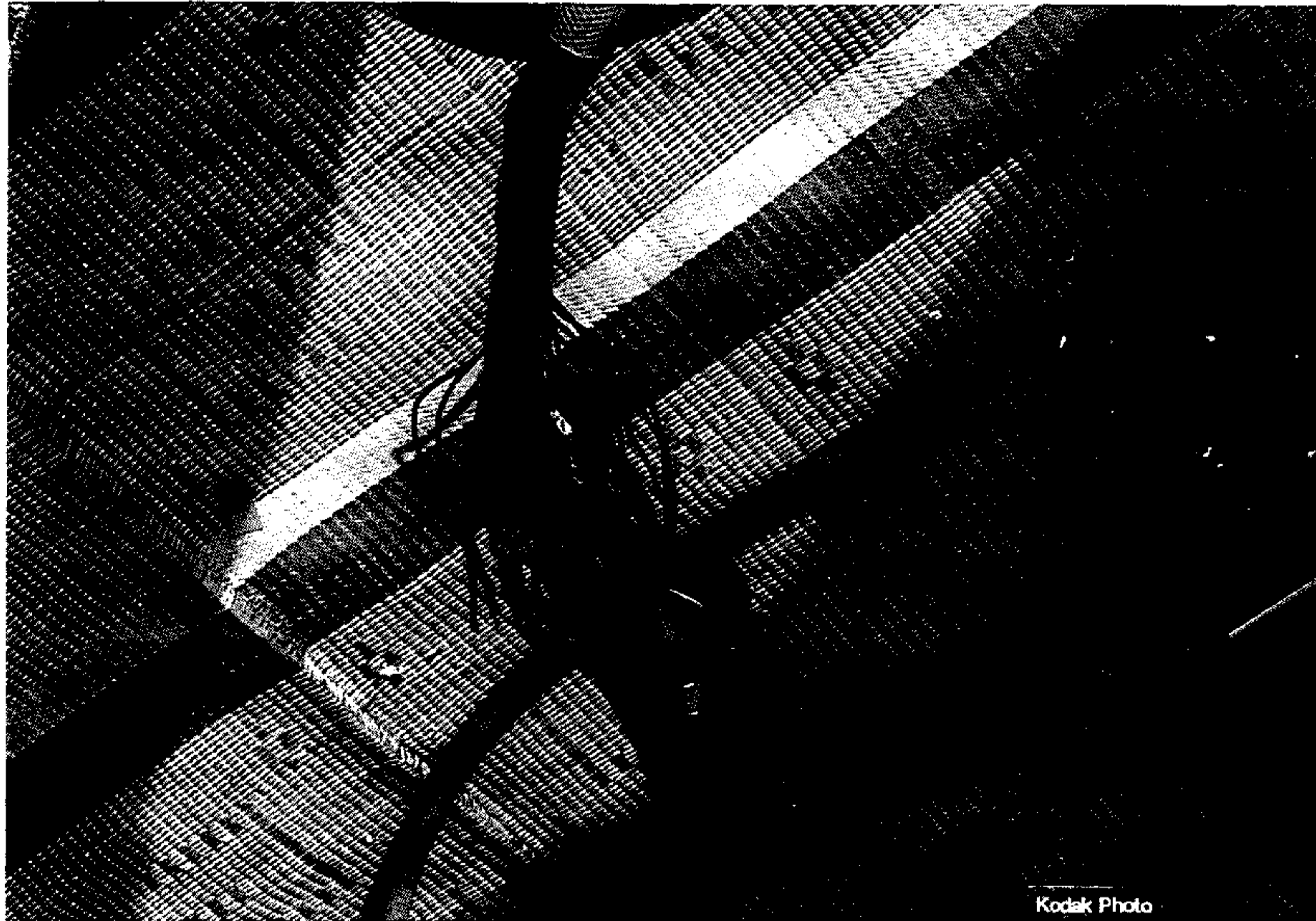


Fig. 112. Shown is the multiple-explosion cable after blasting.

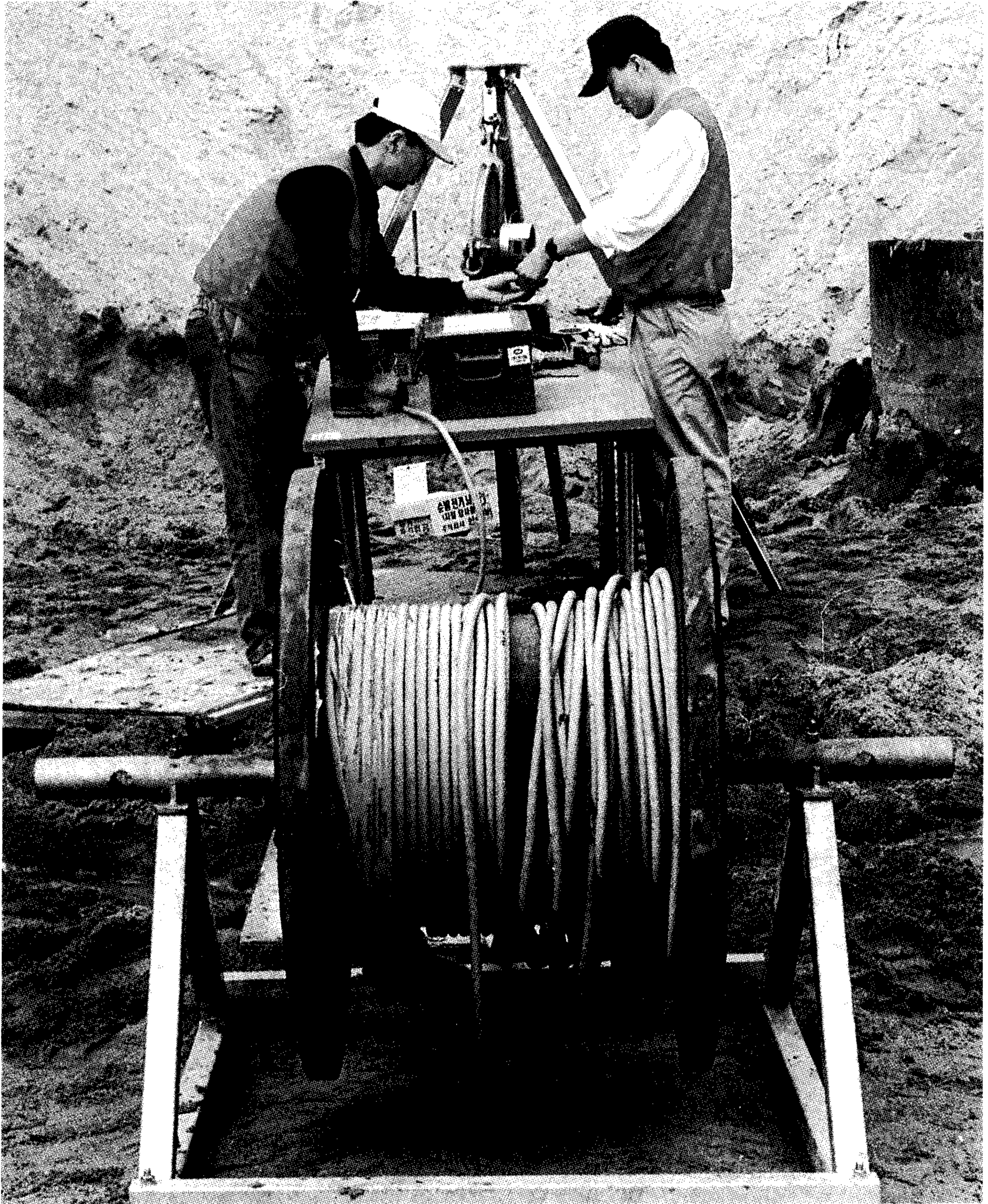


Fig. 113. Shown is the complete multiple shot borehole source modified by Hanwha.

제 4 절 현장응용 성공사례

1. 부산 전력구 터널공사 지반조사

Fig. 114는 부산광역시 전력구 공사를 위한 일부 터널진로(시추 위치가 연결되는 노선)를 나타내고 있다. 시추공 B20에서 시추공 B6에 이르는 부분은 대체로 낙동강 변에 해당하며 시추공 주위에는 다양한 공장이나 폐기물 저장지가 자리잡고 있다(Fig. 115 참조). 부산 지방의 대부분이 그러하듯이 이 지역도 더구나 강변에 위치하고 있기 때문에 대단히 연약한 지반으로 간주되고 있으며 터널 굴착(심도 약 20m~30m)을 위해서는 우선 연약지반 터널굴착에서 침단으로 알려진 실드(shield)공법이 선정되었다. 그런데, 상기 공법의 응용은 우선 공사에 따른 투입기기 및 제 설비를 위해 상당한 규모의 초기 투자가 요구되고 또한 일단 공사에 착수되면 공법의 변경이 거의 불가능하기 때문에 무엇보다 지반상태에 대한 사전 정보가 선제 조건이 되었다. 예를 들면, 실드기기의 기능면에서 굴착단면에 단단한 지반과 연약한 지반이 동시에 나타나면 그 곳에 작용되는 굴착기 힘의 분포가 달라져서 기기는 단단한 쪽으로 진행하려는 경향을 띠게 되어 그에 따른 시공성은 크게 떨어지게 되는 것이다(김성준, 1994).

따라서, 본 탐사의 목적은 이 지역 하부의 지반 상태를 사전에 정확히 파악함으로써 계획된 실드 공법에 따른 바람직한 기종의 선정 및 제반 보조공법의 검토는 물론 때에 따라 존재할 수 있는 지장물(예: 지하구조물)에 적절히 대처하여 터널 굴착의 안정성, 시공성 및 경제성을 극대화하는 데 있다. 이를 위해 탄성파 토모그래피 기술이 시도되었다.

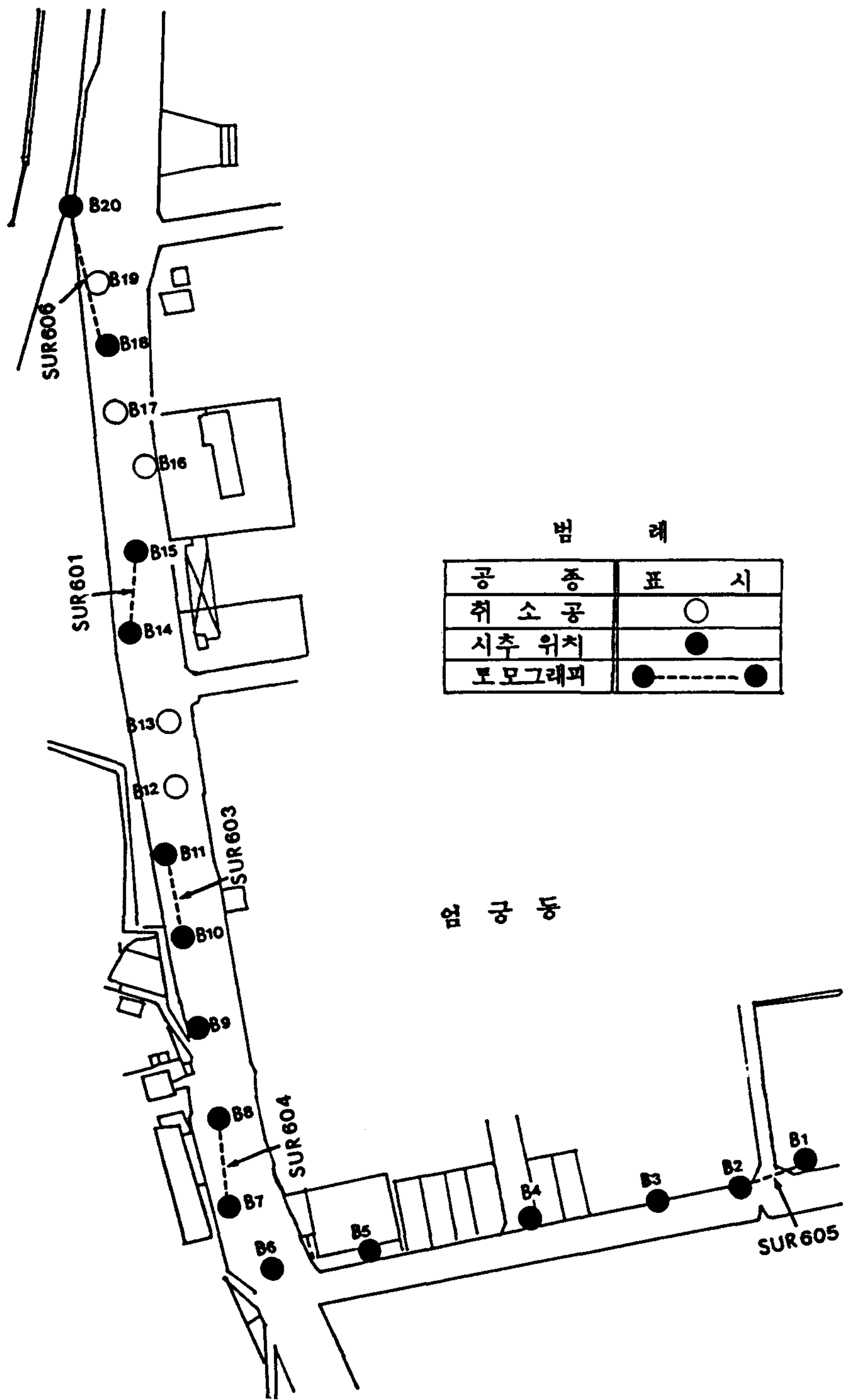


Fig. 114. Borehole locations for Eomgung geotomographic survey.

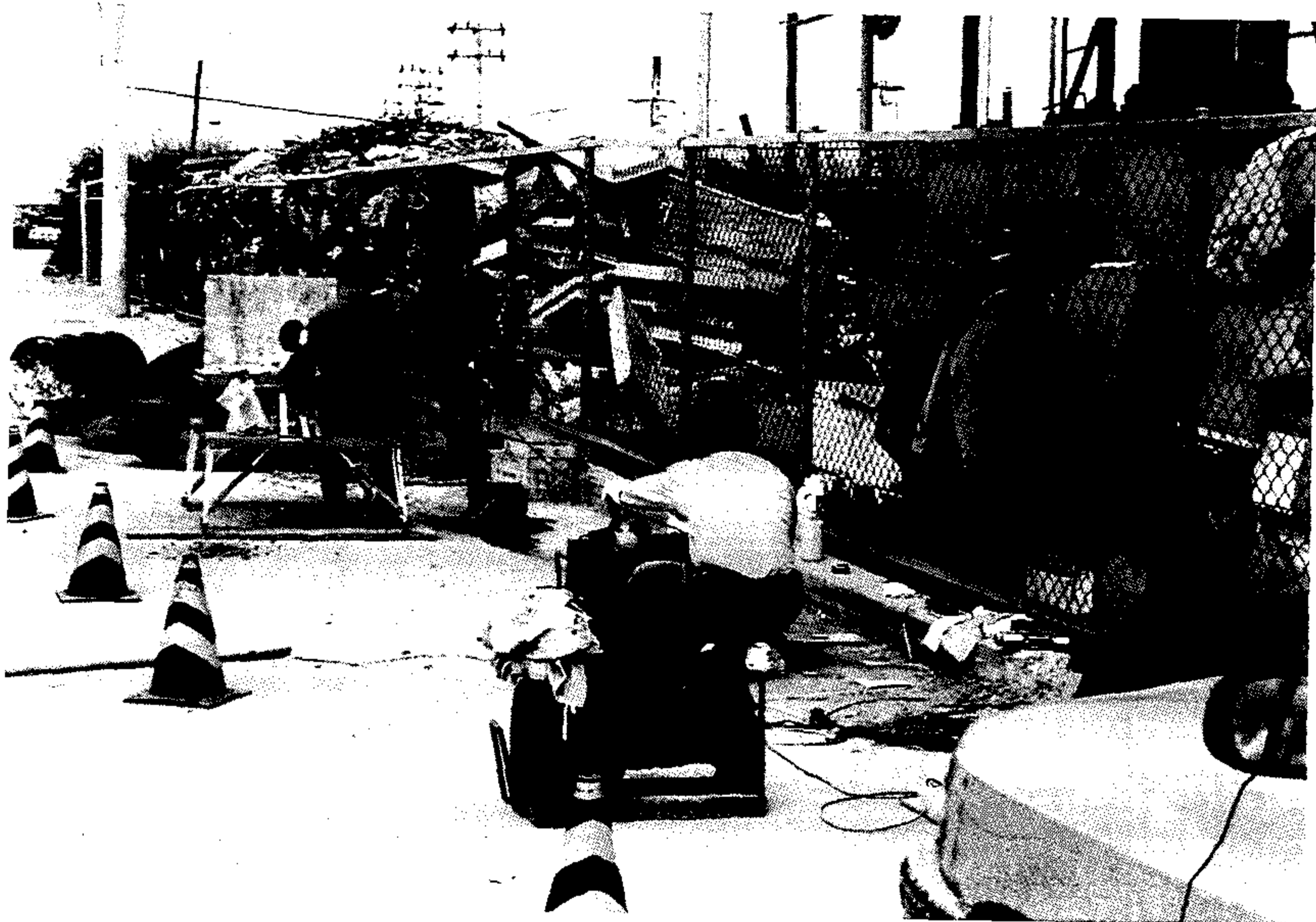


Fig. 115. Outlook of Eomgung survey area in Pusan.

다음은 토모그래피 응용을 위해 선정된 각 단면 측정의 명칭 및 시추공 번호를 요약하고 있으며

Survey No.	발생원 시추공		수진기 시추공		시추공 간격(m)
	명 칭	심도(m)	명 칭	심도(m)	
SUR 606	B18	65.0	B20	78.0	54.3
SUR 601	B15	63.5	B14	62.5	30.4
SUR 603	B11	62.5	B10	65.0	31.55
SUR 604	B8	54.5	B7	50.0	30.2
SUR 605	B2	45.0	B1	42.0	27.8

그중 본 보고서에는 단지 SUR 606 및 SUR 604에 대한 분석결과만 요약하고 있다. Fig. 116(a)는 SUR 606에 대한 발생원-수진기 배열 상태 및 시추주상도를 E.L.(Elevation Level)에 따라 대조하고 있으며 동시에 동일 E.L.에 놓여있는 발생원과 수진기 간의 파선(ray)을 나타내고 있다. (b)는 그에 따른 탄성파 기록을 보여주고 있다. 일반적인 용어로서 하나의 발생원에 대한 단일 수진기 기록을 흔히 트레이스(trace)라 부르며 여기에는 도합 46개의 트레이스가 나타나고 있다. 참고로, 데이터 분석에 대한 이해를 높이기 위해 우선 시그널(탄성파) 판단에 대한 주요 지침들을 소개하고자 한다. 발생원으로부터 수진기에 도달되는 탄성파는 대체로 다음과 같은 특성에 따라 상호 비교된다.

- 주시(도달)
- 진폭(에너지)
- 주파수 내용(고주파수 혹은 저주파수 내용)
- 기타(예: 탄성파의 중첩현상, 선두파(head wave)의 생성, 파형변화 등)

Geometry for Tomographic Analysis

Pusan Eomgung Survey No. 606

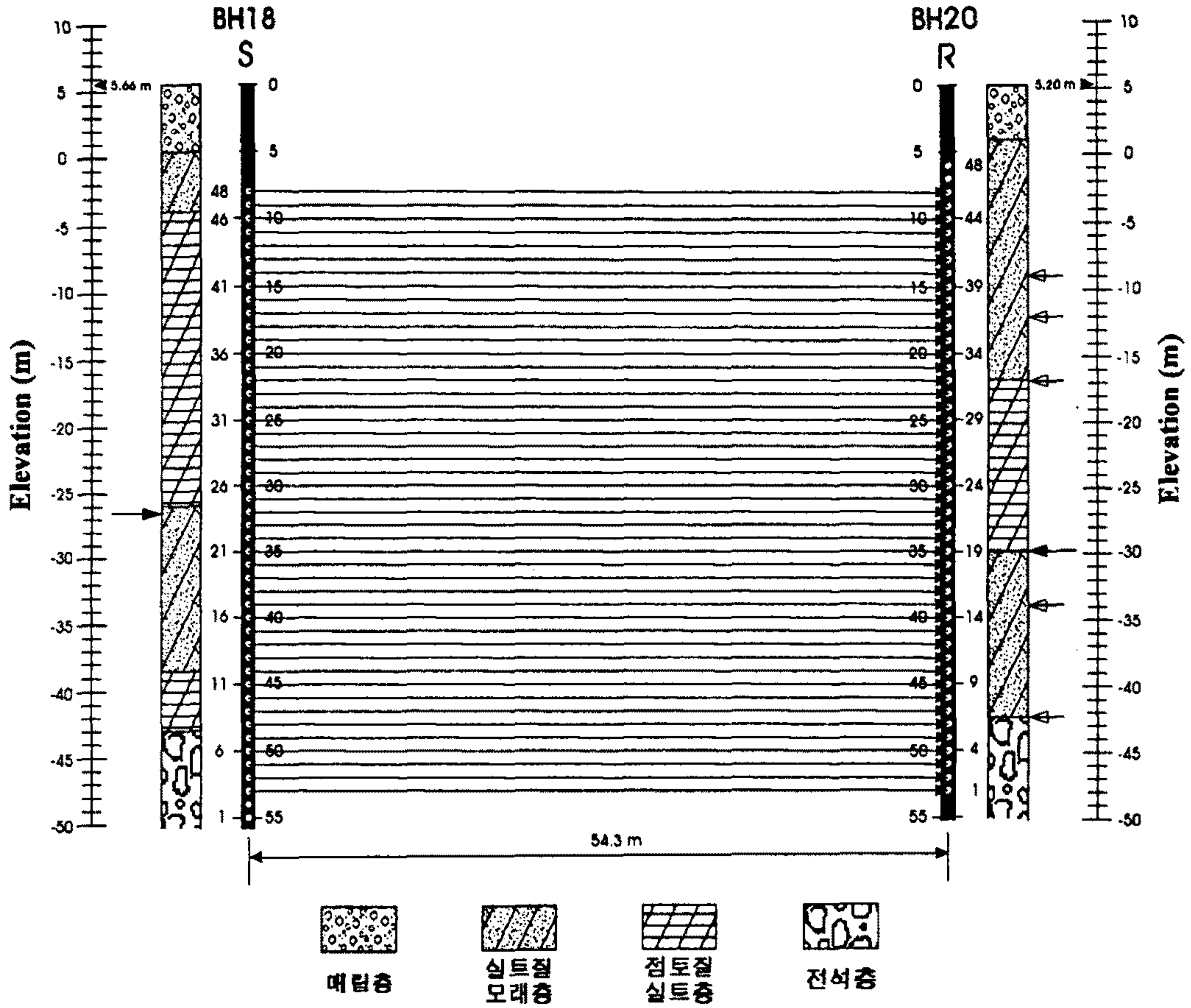


Fig. 116. Eomgung geotomographic survey.

(a) All raypaths perpendicular to the borehole axis are shown.

EomGung tomography data (Survey No. 606)
S(BH18)-R(BH20), S No.= 3-48, R No.= 1-46

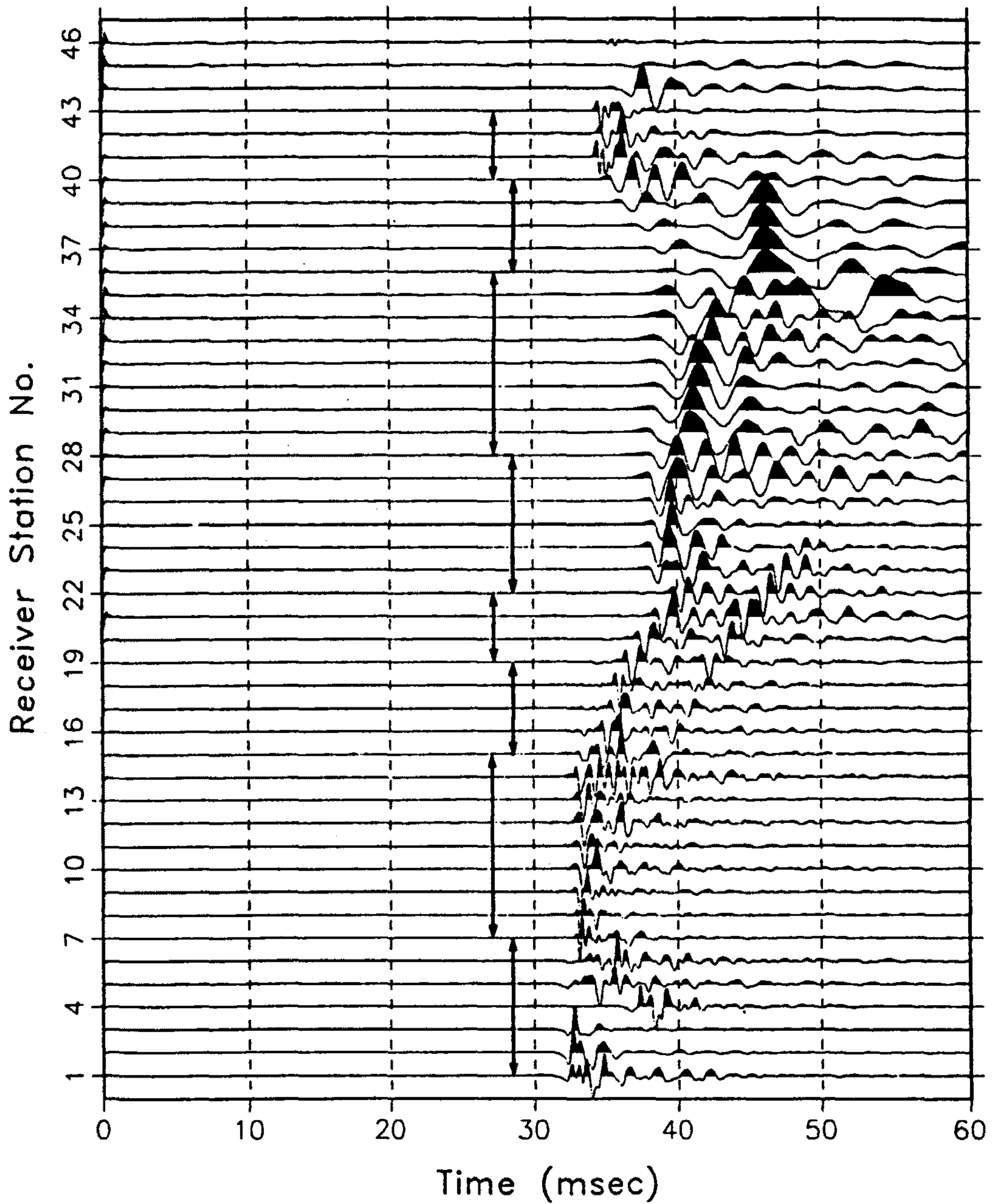


Fig. 116. (continued).

(b) Crosshole data derived from the measuring procedure in (a).

주시(travel time)는 발생원에서 생성된 탄성파가 수신기에 도달되기까지의 시간을 말하여 토모그래피 응용에서는 주로 초동의 주시를 의미한다. 예를 들면, 43번째 트레이스(Fig. 116(b)의 receiver station No. 43)의 초동 주시는 약 34ms가 되며 그로부터 주어진 발생원-수진기 간의 거리(54.3m)에 의해 파선 진로에 따른 지질의 평균 탄성파 속도는 $54.3\text{m}/34\text{ms} \approx 1600\text{ m/s}$ 가 된다. 따라서 주시는 매질의 탄성파 속도와 직접적으로 연관되고 있음을 알 수 있으며 그들의 변화는 바로 지질 상태의 변화를 의미하게 된다. Fig. 116(b)에서 보여주는 주시의 변화는 바로 각 지층의 구분(화살표로 표시)은 물론 각 지층 내의 지질 변화를 대변하는 것이 되겠다.

진폭은 전달되는 탄성파의 에너지를 가늠하는 척도가 되며 이는 바로 매질의 흡수성과 상관된다. 탄성파가 흡수될 때에는 고주파수 에너지가 매질에서 우선적으로 소멸되며 대부분의 경우 그에 따른 주시도 느리게 된다(탄성파속도 감소). 따라서 시간 영역의 진폭은 주파수 영역에서의 주파수 내용과 밀접한 관계가 있는 것이다. 예를 들면 대체로 트레이스 23~40 사이에서 보여주는 탄성파는 상대적으로 늘어진 형태(저주파수 내용)를 나타내고 있으며 이는 바로 고주파수의 에너지가 그만큼 매질에서 흡수된 것을 의미한다. 이미 언급한 바 그 구간에서는 도달되는 시그널의 주시 역시 느리게 나타나고 있다. Fig. 116(c)는 (b)에 대한 주파수 내용을 보여주고 있다. 전체적으로 지층의 심도가 깊어짐에 따라 전달되는 탄성파는 고주파수를 띠고 있음을 볼 수 있다.

탄성파 기록을 표현하는 데에는 두가지 방법이 상용되고 있다. 그 하나는 trace normalization으로써 이는 각 트레이스의 최대 진폭을 1로 두는 것이다. 따라서 여기에는 각 트레이스에서 인식되는 탄성파 진폭의 상대적인

AMPLITUDE SPECTRUM FOR HORIZONTAL RAYS (SUR606)
(S)BH18-(R)BH20,S NO.=3-48,R NO.=1-46,T.W.=10-60MS

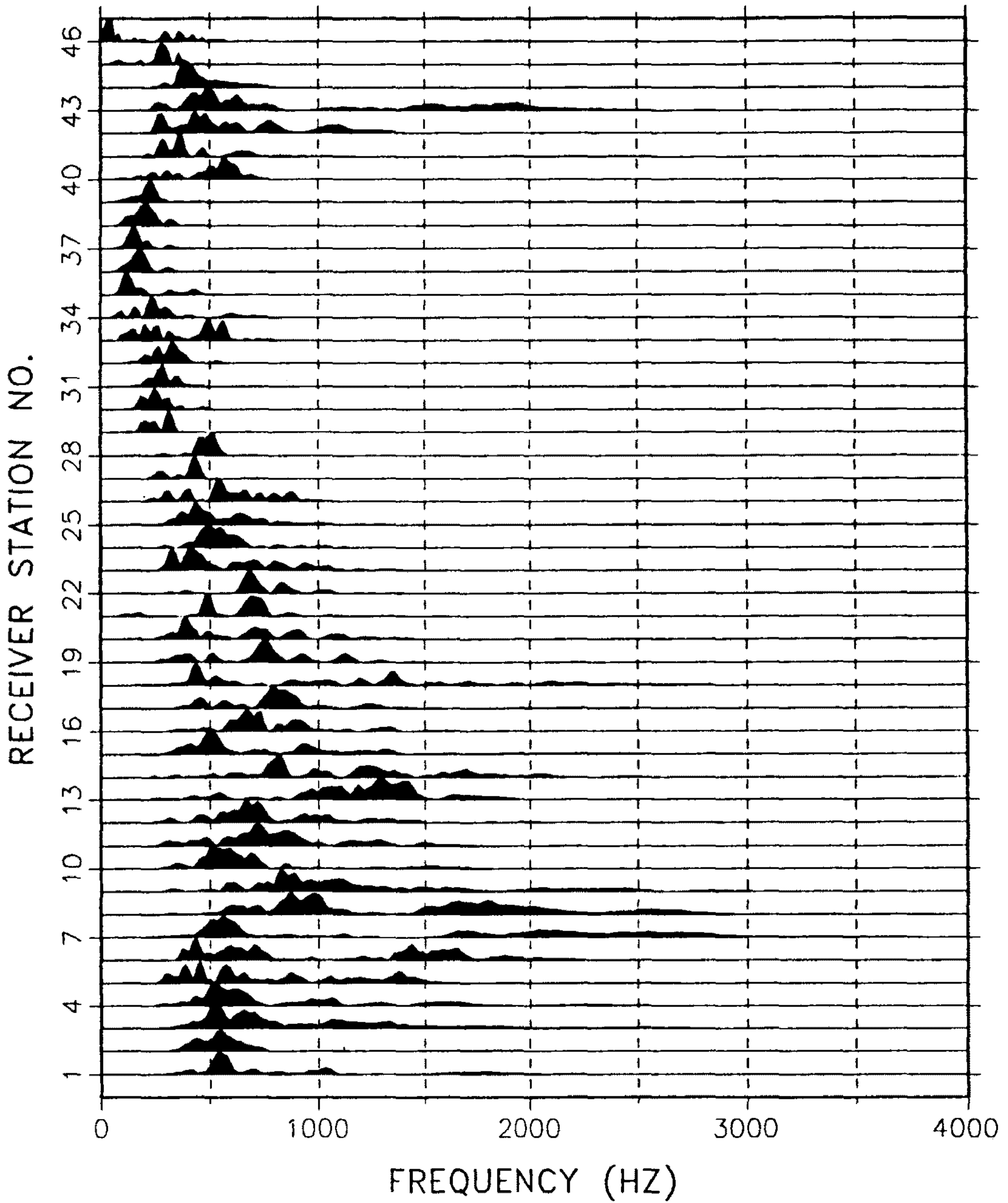


Fig. 116. (continued).
(c) Frequency content derived from the data in (b).

비교는 불가능하나 그 반면 초동 주시의 포착은 용이하다. 또 다른 방법은 전체 트레이스의 최대 진폭을 1로 두는 것(file normalization)으로써 이로부터 상대적인 진폭 변화가 쉽게 관찰된다.

이번에는 Fig. 117(a)에서 나타난 바 E.L. -18m에 놓인 탄성파 발생원 (shot No. 32)에 의해 도달되는 모든 수신기 기록을 관찰하고자 한다. 이러한 배열에서 얻게되는 기록을 학술적인 용어로 shot gather라 하며 Fig. 117(a)는 48 트레이스(혹은 채널)를 갖고 있는 shot gather를 나타내고 있다. 본 토모그래피 단면측정은 도합 48개의 shot gather를 얻는 것이 되며 그로부터 $48(\text{shots}) \times 48(\text{채널}) = 2304$ 트레이스가 지반상태 파악을 위해 활용된다. 예를 들면 Fig. 116(a)는 단지 각 shot gather로부터 단지 하나의 트레이스만을 발췌하여 나타낸 것에 불과하다. (b) 및 (c)는 shot 32에 대한 48 채널 기록(trace or file normalization)을 나타내고 있다. 일별하여 주시의 변화가 확연히 인식되고 있으며 그로부터 지층의 경계(화살표로 표시)가 쉽게 구분된다. 이 결과는 다시 Fig. 117(a)에서 화살표로 표시하여 시추 주상도와 대조되고 있다. Fig. 117(d)는 (c)에 대한 주파수 내용을 나타내고 있으며 여기에는 화살표로 표시된 경계(시추주상도에서 점토질 실트층/실트질 모래층 경계 : E.L. -30m)에서 주파수 내용의 큰 변화가 관찰되고 있다. 즉, 진폭의 상대 비교에 의해 인식된 두개의 경계면(화살표로 표시)는 탄성파 전달 측면에서 상당한 의미를 갖게되는 것이다.

지금까지의 결과를 종합하면 SUR 606 단면에서 관찰되는 주요 지질 경계면은 E.L. -16.5m, E.L. -30m, E.L. -42m에 놓여 있으며 그 중 E.L. -30m 경계면은 주시 및 주파수 내용 변화면에서 하나의 분기점이 되고 있다. 그런데, 탄성파 전달 측면에서 상기 지질변화는 부산지역 연약한 퇴적

Geometry for Tomographic Analysis

Pusan Eomgung Survey No. 606

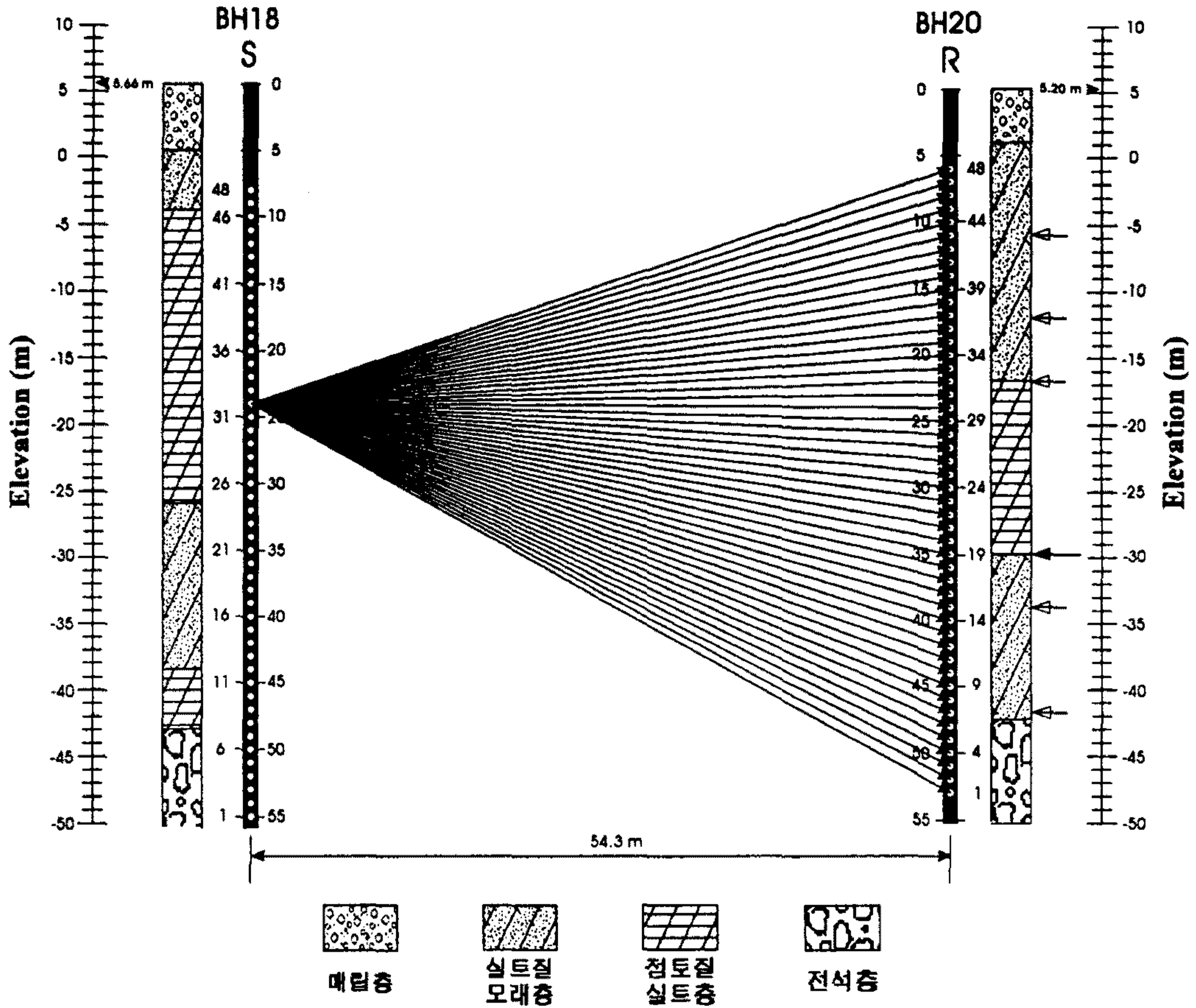


Fig. 117. Eomgung geotomographic survey.

Example of crosshole data acquired from the BH18-BH20 cross section.

(a) Source was located at shot point 32 (borehole BH18) and receiver arrangement at BH20 borehole.

EomGung Sur606 (normalizing by trace max.)
S(BH18) - R(BH20), S No.= 32, R No.= 1 - 48

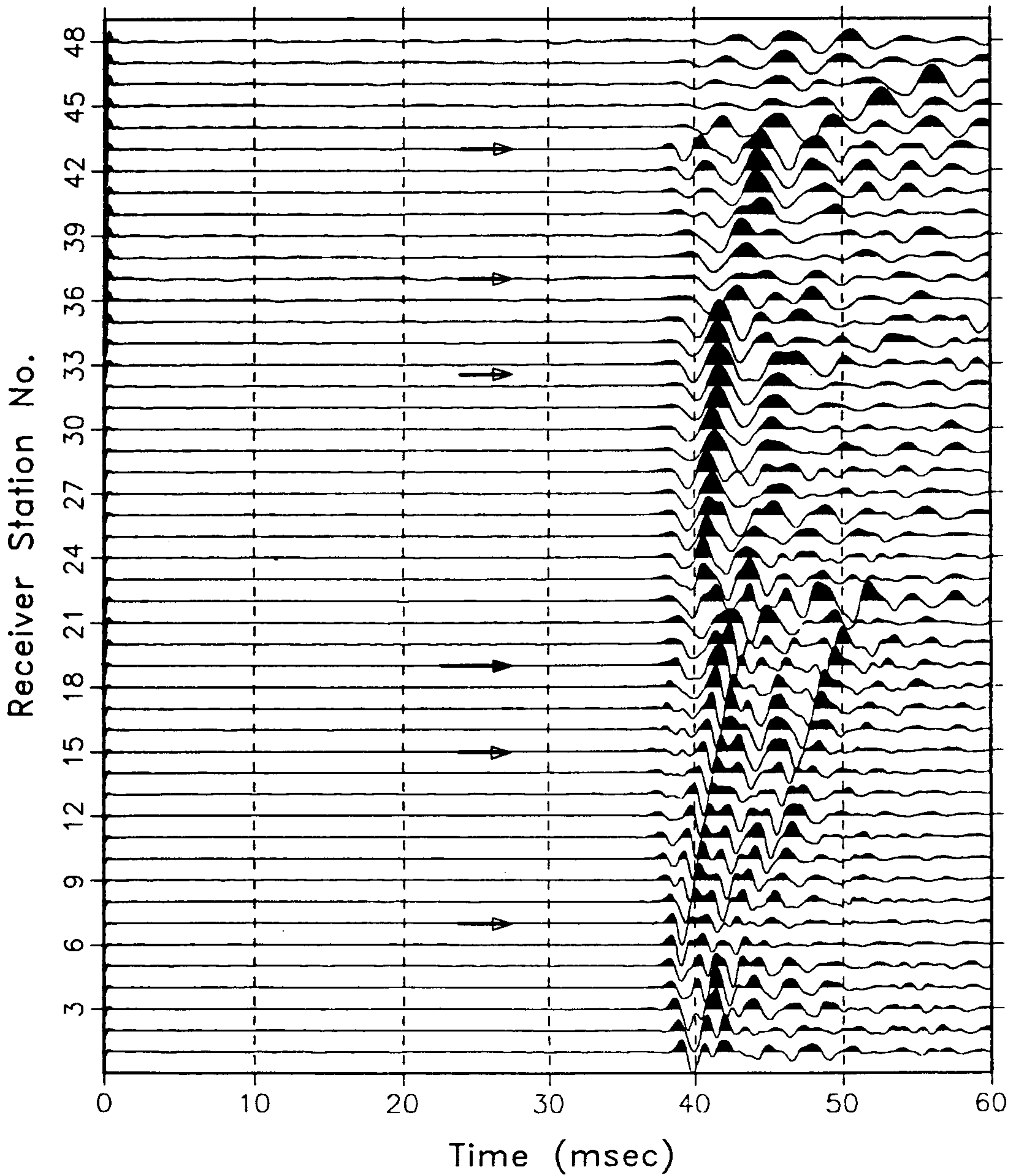


Fig. 117. (continued).
(b) Shot gather 32 (trace normalization).

EomGung tomography data (Suvey No. 606)
S(BH18) - R(BH20), S No.= 32, R No.= 1 - 48

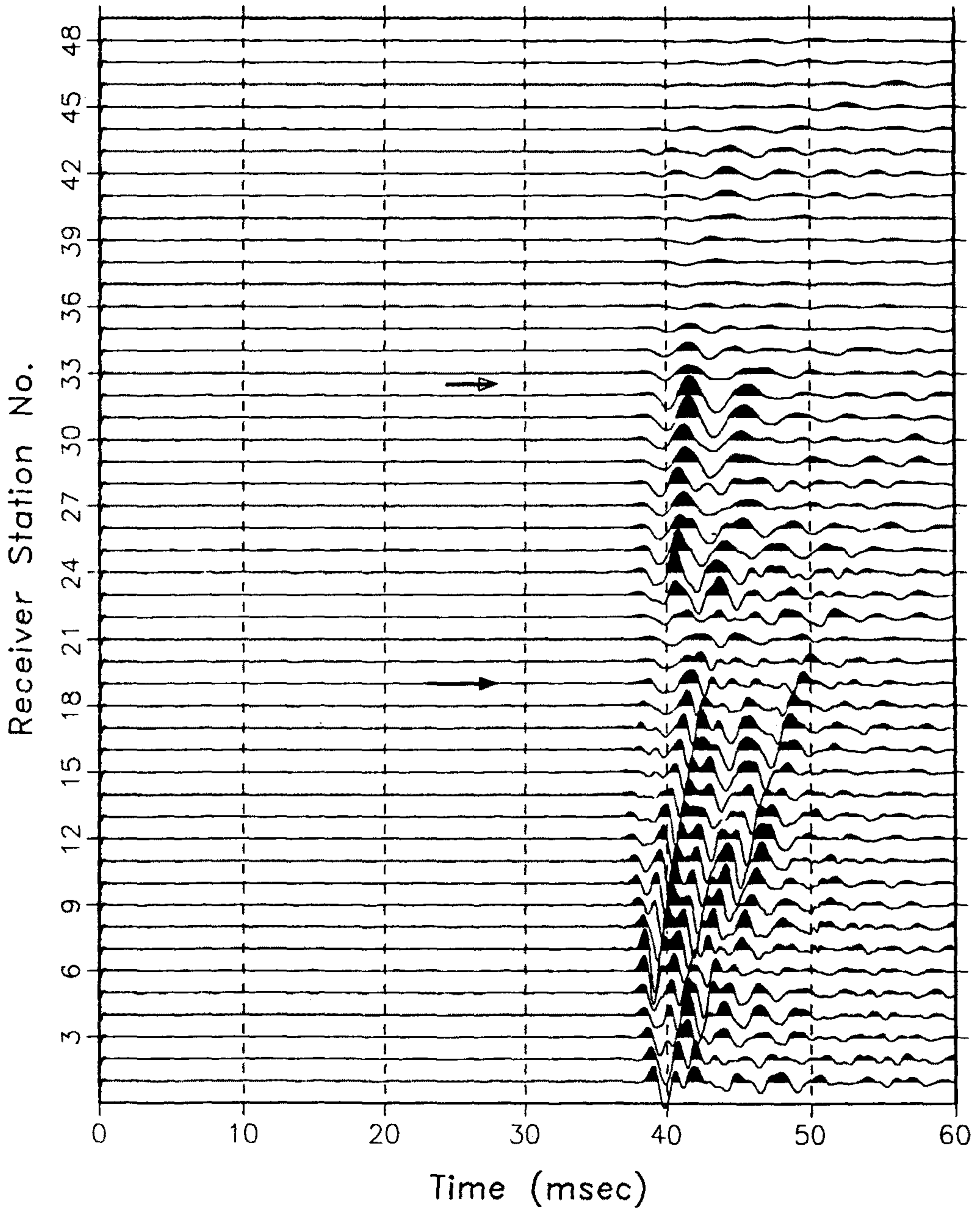


Fig. 117. (continued).
(c) Shot gather 32 (file normalization).

AMPLITUDE SPECTRUM FOR S DEPTH -18M(EL) (SUR606)
(S)BH18-(R)BH20,S NO.=32,R NO.=1-48,T.W.=10-60MS

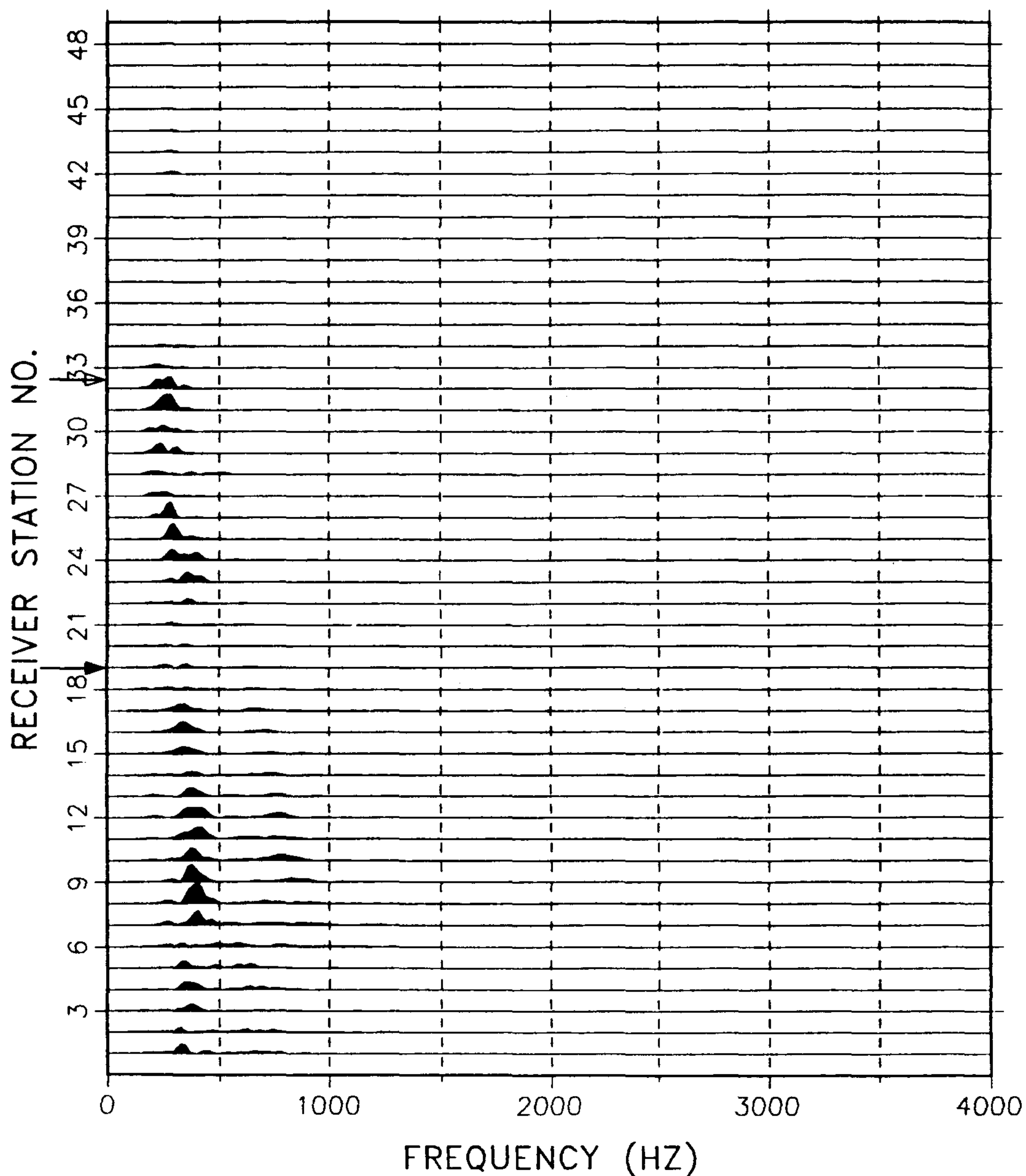


Fig. 117. (continued).

(d) Frequency content derived from the data in (c).

층에서 흔히 기대될 수 있는 것이기 때문에 터널 굴착을 위한 어떠한 장애 요소도 볼 수는 없는 것이다.

다음은 이전과 동일한 과정에 의하여 SUR 604에 대한 단면측정 데이터 분석결과를 요약하고 있다(Fig. 118 및 Fig. 119 참조). 전반적인 지층의 분리는 기대한 바 Fig. 118(b)에서 역시 뚜렷이 인식되고 있다. 그런데, 그에 따른 주시 내용(Fig. 119(c) 참조)에서는 receiver station No. 13~21 구간에서 상대적으로 고주파수를 띠고 있는 반면 그 이하 구간(receiver station No. 9~13)에서는 오히려 저주파수 내용을 보여주고 있는 것이다. 이러한 현상은 동일한 기록을 file normalization한 결과(Fig. 118(d) 및 (e) 참조)에서 보다 현저하게 나타나고 있으며 더구나 shot gather 기록(Fig. 119(b)~(e))에서는 더욱 그러하다. 여기서 주목할 또 다른 점은 Fig. 119(b)에서 나타난 바 상기 고주파수 탄성파 대역이 시추공간 지질 단면을 통과한 탄성파 도달과는 별도로 형성된 양상을 보여주고 있다는 것이며 또한 그의 에너지가 상대적으로 대단히 크다는 것이다(Fig. 119(d) 및 (e) 참조). 경험에 의하면 이러한 고주파수 탄성파는 경암(탄성파 속도가 4,000m/s 이상)에서 관찰될 수 있다. 만약 시추공 간에 견고한 안산암이 지적된 구간(E.L. -21~E.L. -31m) 내에 관입되었다고 가정한다면 그에 따른 초동의 주시는 $30.2\text{m} / 4000\text{m/s} \approx 7.6\text{ms}$ 가 된다. 그런데, 이러한 주시치는 기록(Fig. 19(b) 및 (d) 참조)에서 인식되는 값(약 20ms)과 크게 달리하고 있는 것이다. 한편, 시추공 간 거리 약 30m에서 전달된 초동의 주시가 20ms이면 그에 따른 암반의 탄성파속도는 단지 1500m/s에 불과하기 때문에 여기서는 상기 고주파수 탄성파가 기대될 수 없는 것이다. 따라서, 상기 고주파수 탄성파의 발달 상태는 더구나 이 지역의 연약한 퇴적층 지반에 비추어 더욱 이해될 수 없는 것이며 이에 대한 해명은 우선 두 시추공에 인접하여 인위적인 구조물

Geometry for Tomographic Analysis

Pusan Eomgung Survey No. 604

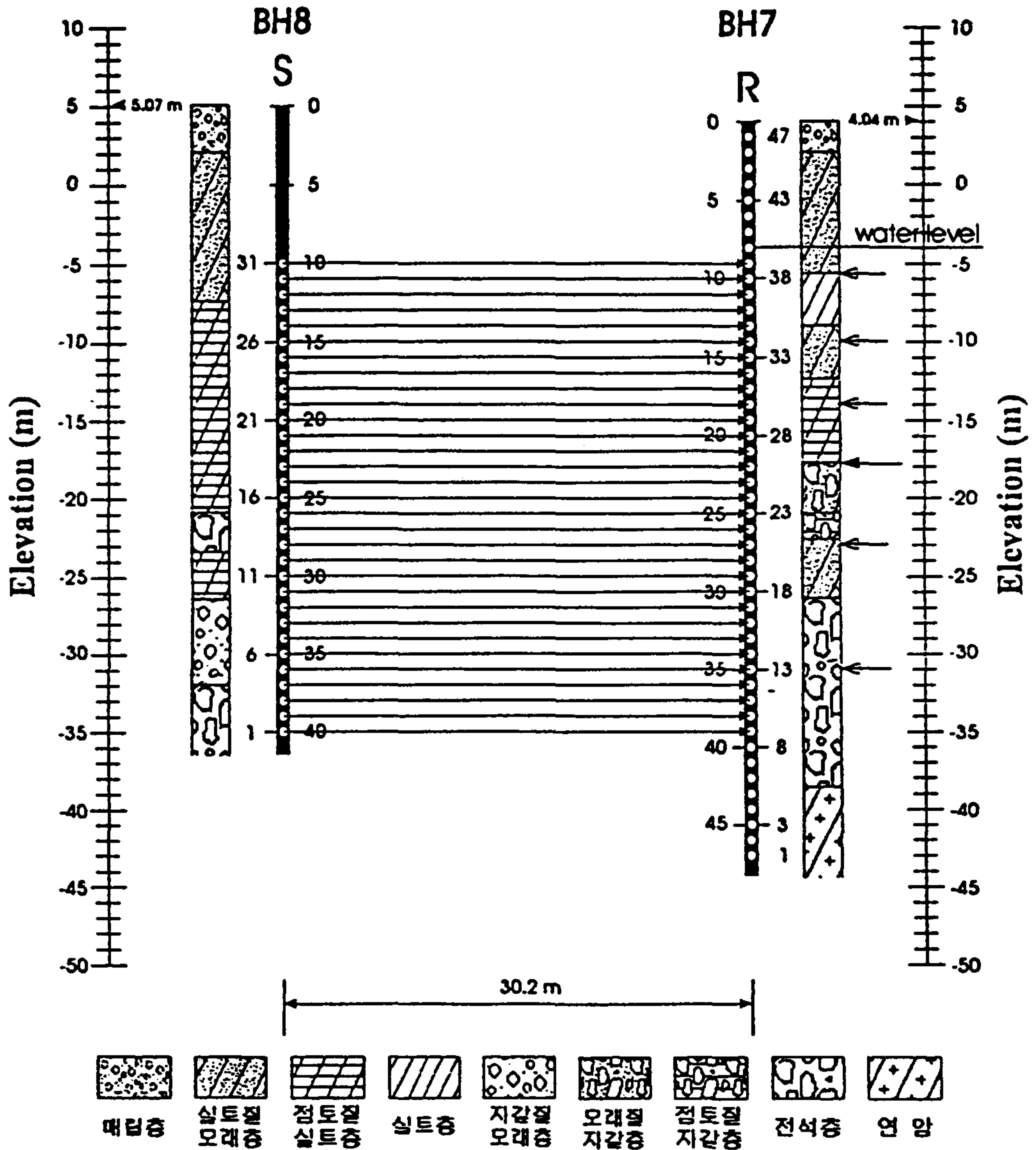


Fig. 118. Eomgung geotomographic survey.

(a) All raypaths perpendicular to the borehole axis are shown.

EomGung tomography data (Survey No. 604)
S(BH8)-R(BH7), S No.= 1-31, R No.= 9-39

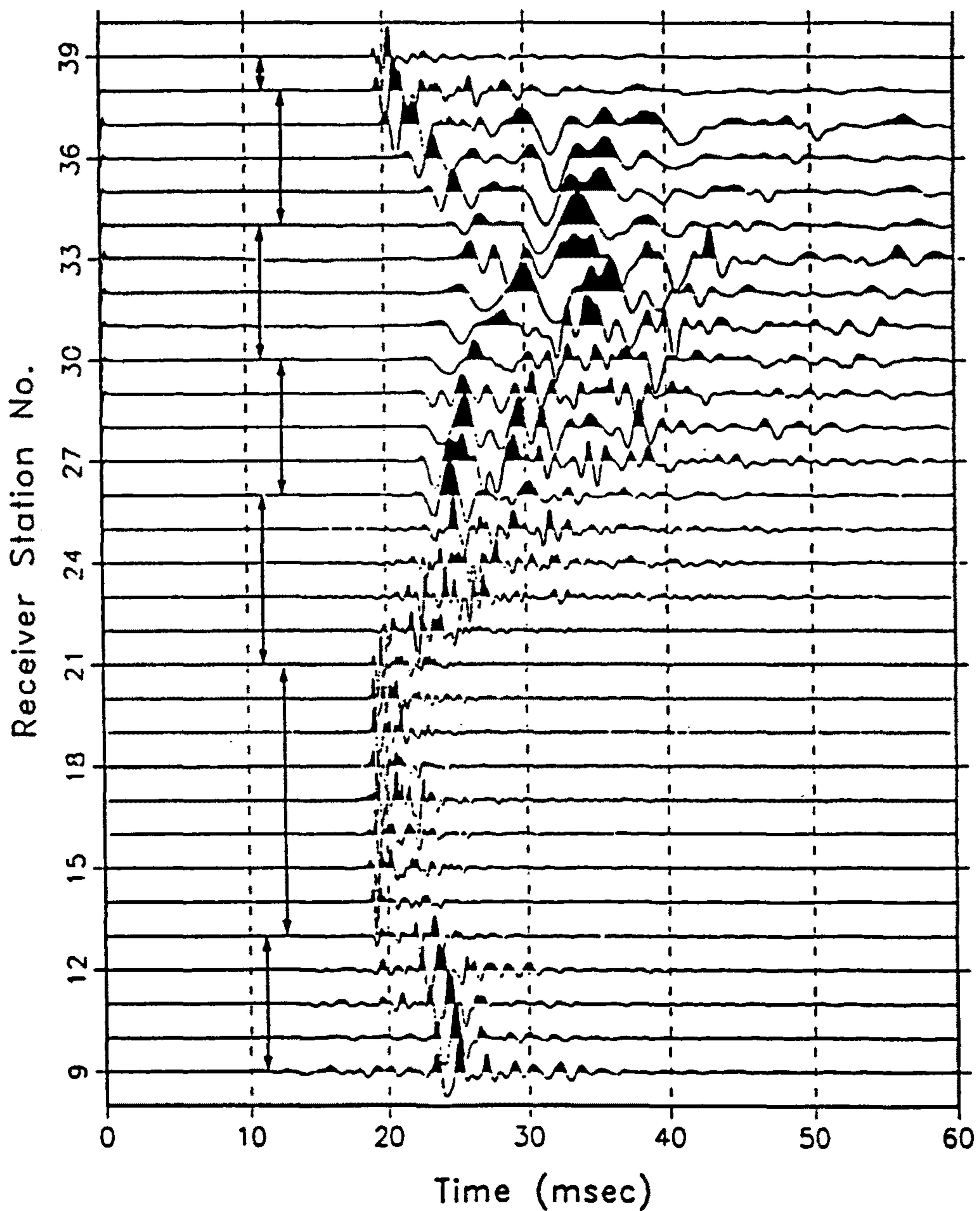


Fig. 118. (continued).
(b) Crosshole data (trace normalization) derived from the measuring procedure in (a).

AMPLITUDE SPECTRUM FOR HORIZONTAL RAYS (SUR604)
(S)BH8-(R)BH7,S NO.=1-31,R NO.=9-39,T.W.=10-50MS

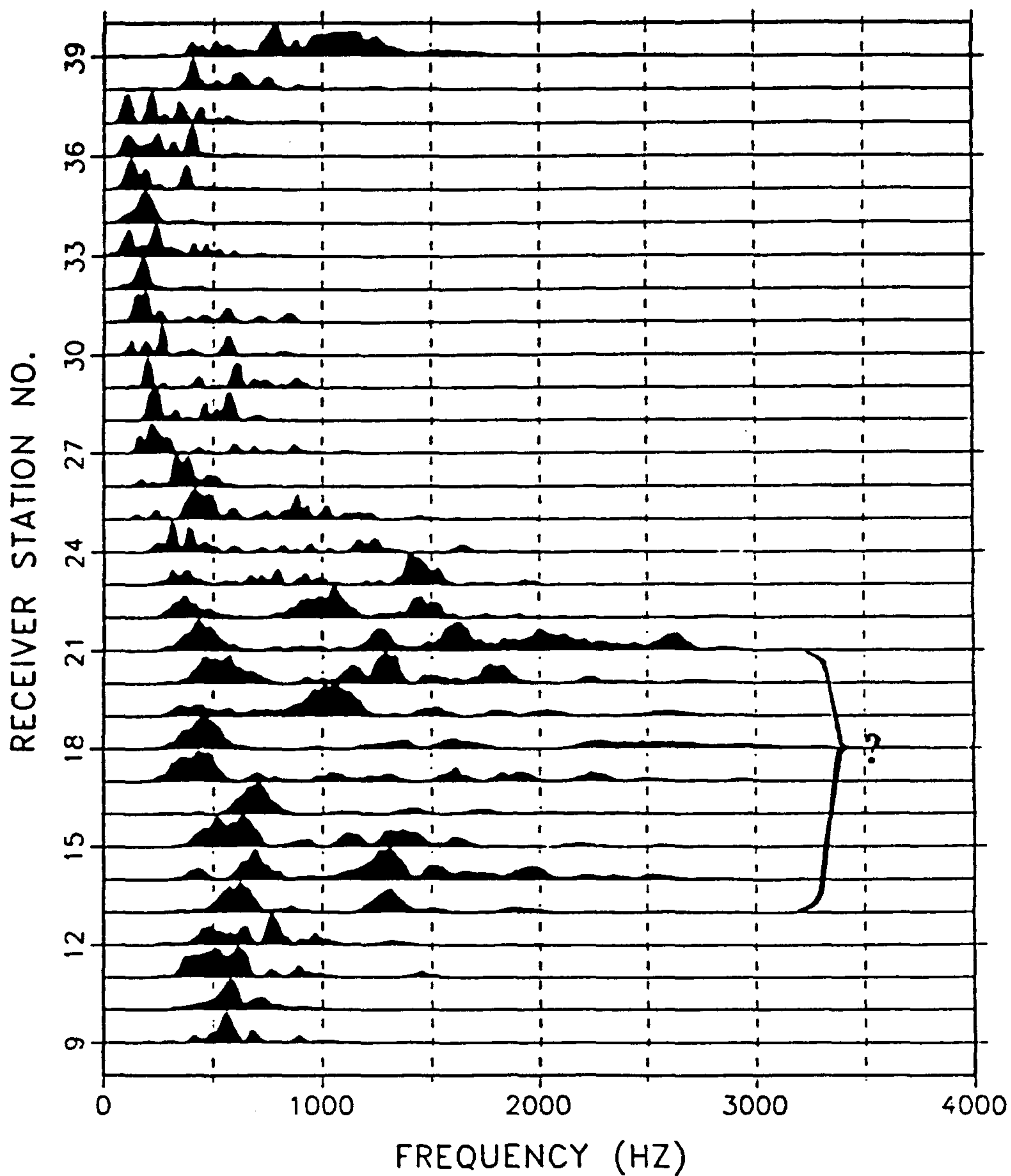


Fig. 118. (continued).

(c) Frequency content from the data in (b).

EomGung tomography data (Survey No. 601)
S(BII8)-R(BII7), S No.= 1-31, R No.= 9-39

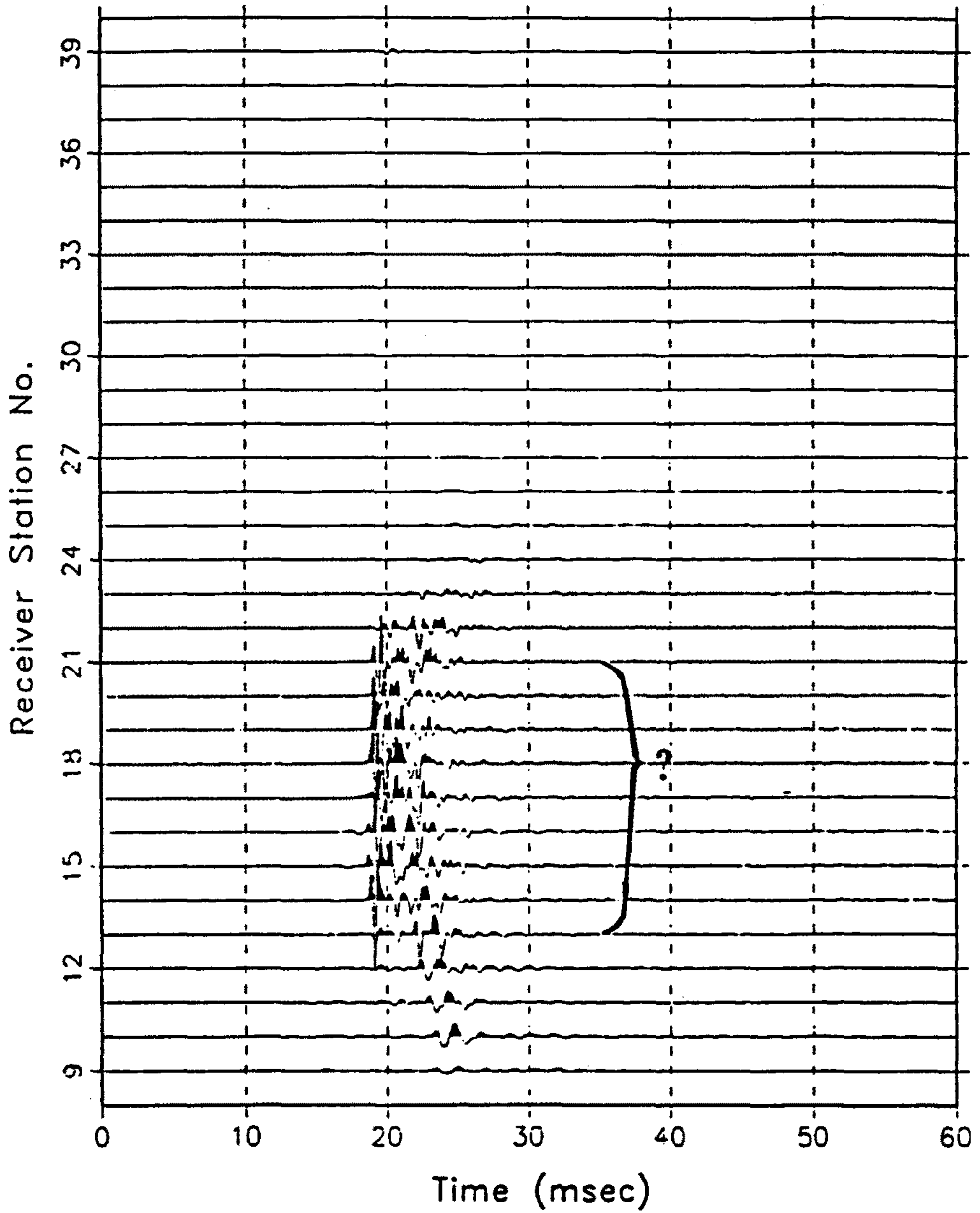


Fig. 118. (continued).

(d) Crosshole data (file normalization) derived from the measuring procedure in (a).

AMPLITUDE SPECTRUM FOR HORIZONTAL RAYS (SUR604)
(S)BH8-(R)BH7,S NO.=1-31,R NO.=9-39,T.W.=10-50MS

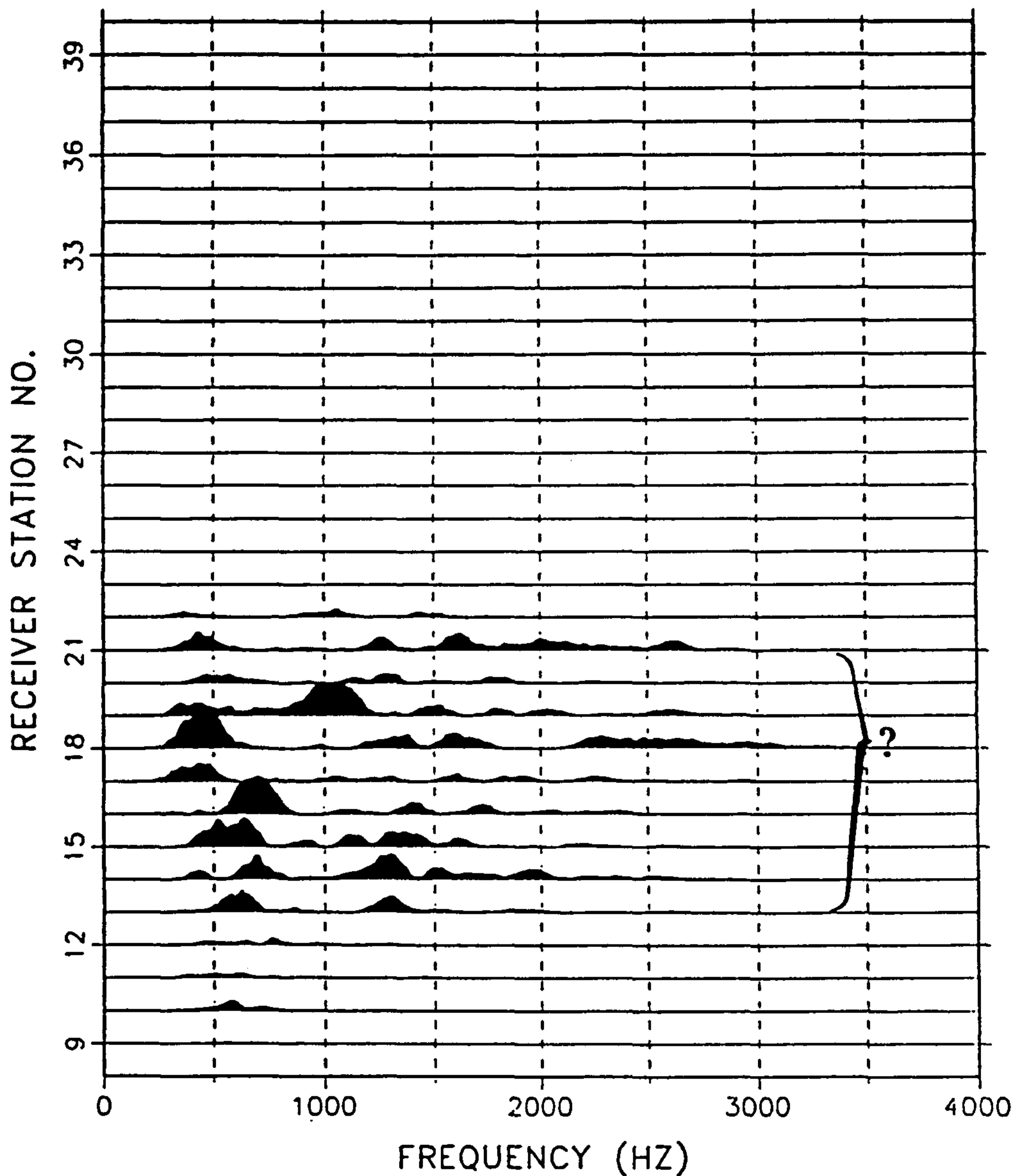


Fig. 118. (continued).

(e) Frequency content from the data in (d).

Geometry for Tomographic Analysis

Pusan Eomgung Survey No. 604

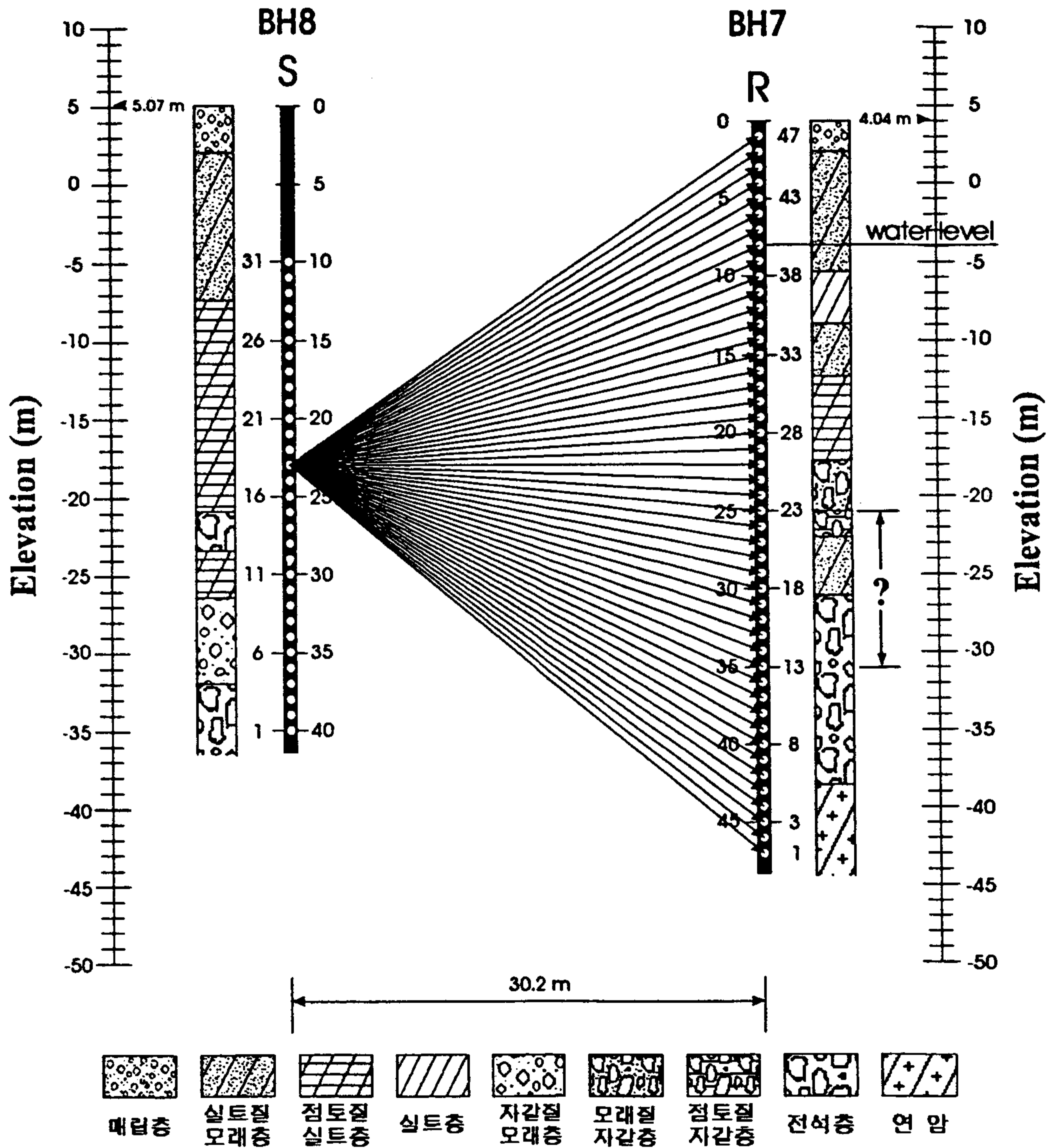


Fig. 119. Eomgung geotomographic survey.

Example of crosshole data acquired from the BH8-BH7 cross section

(a) Source was located at shot point 18 (borehole BH8) and receiver arrangement at BH7 borehole.

EomGung Sur604 (normalizing by trace max.)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 18, R No.= 1 - 47

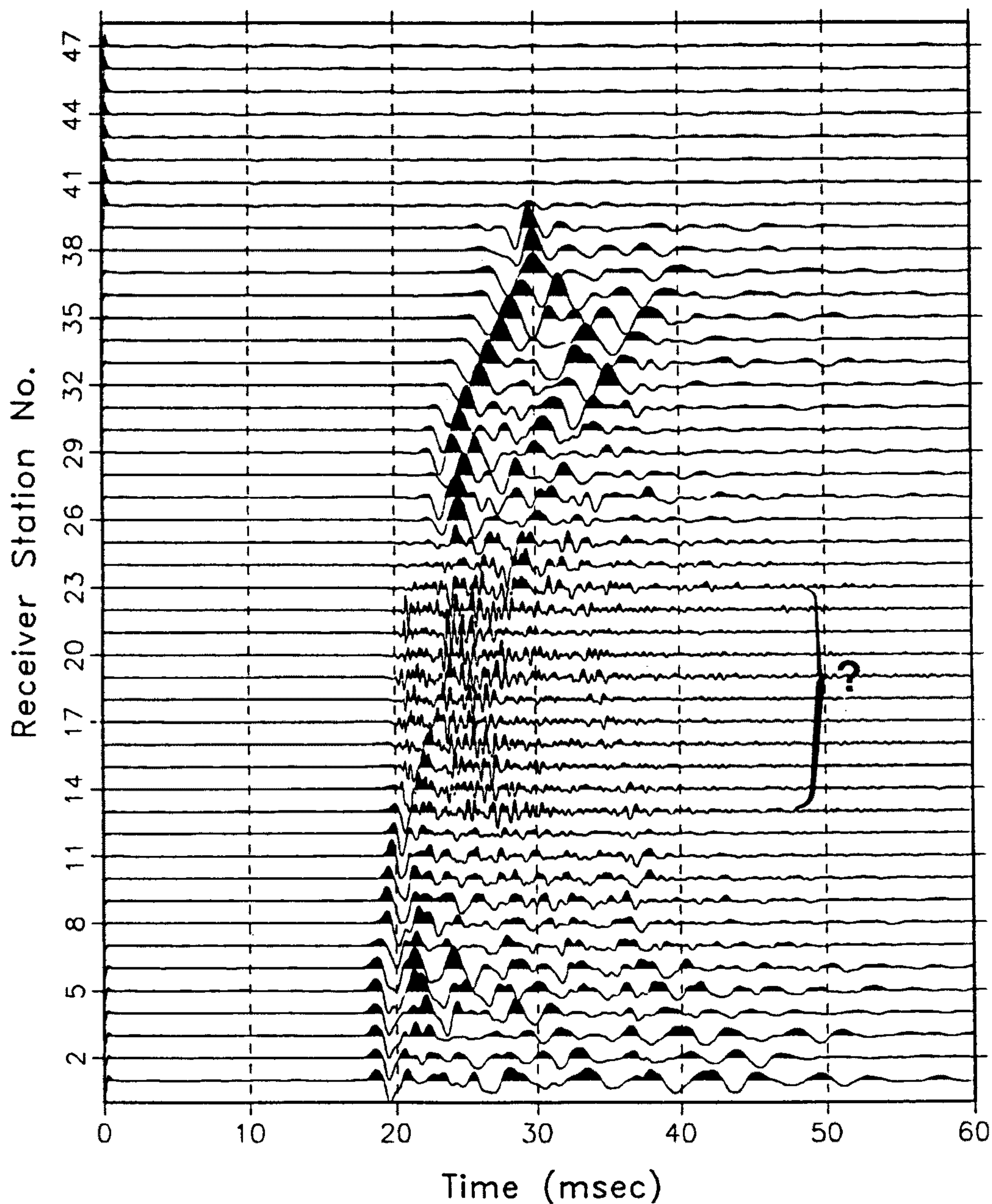


Fig. 119. (continued).

(b) Shot gather 18 (trace normalization).

AMPLITUDE SPECTRUM FOR S DEPTH -18M(EL) (SUR604)
(S)BH8-(R)BH7,S NO.=18,R NO.=1-47,T.W.=10-50MS

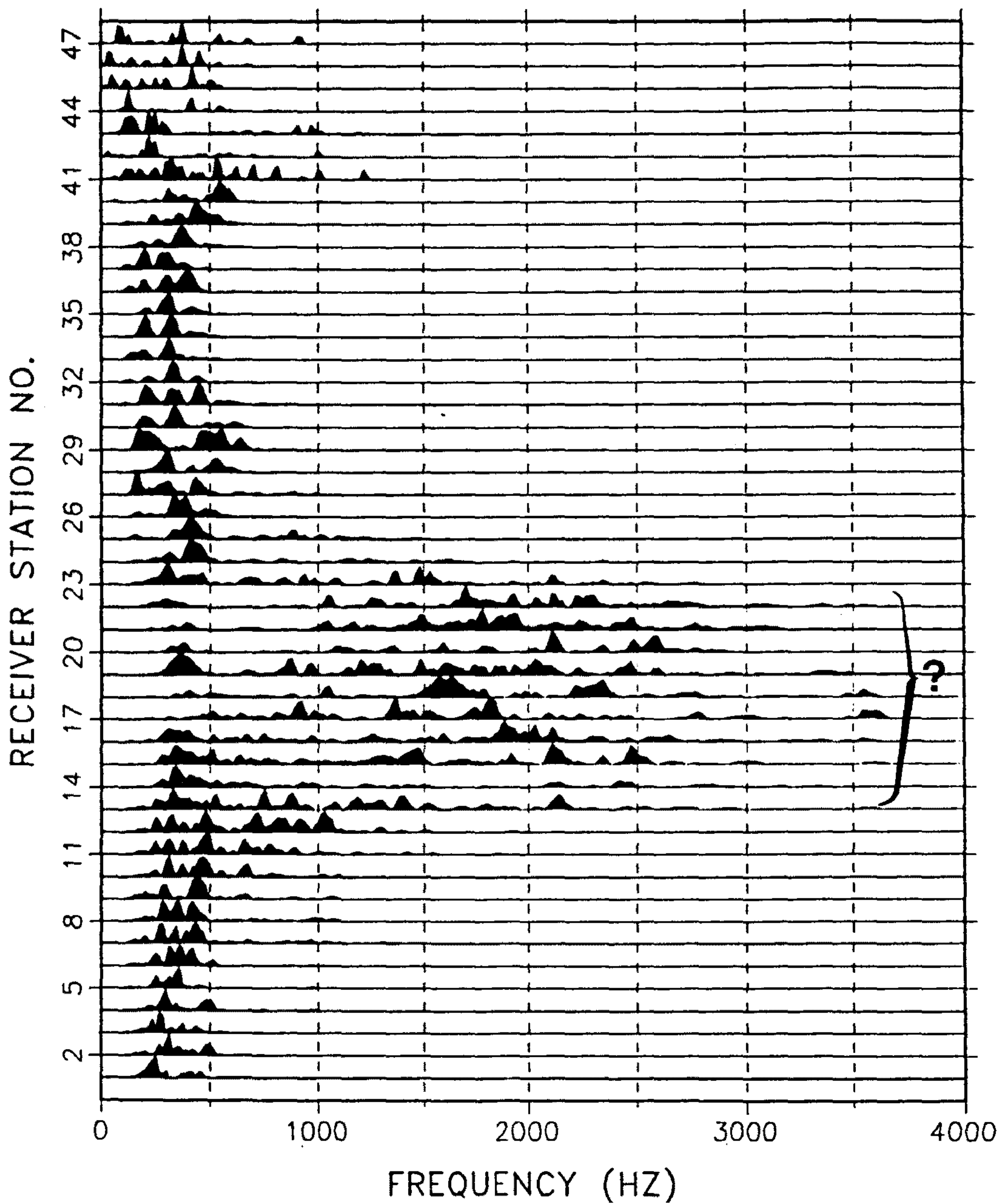


Fig. 119. (continued).
(c) Frequency content from the data in (b).

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 18, R No.= 1 - 47

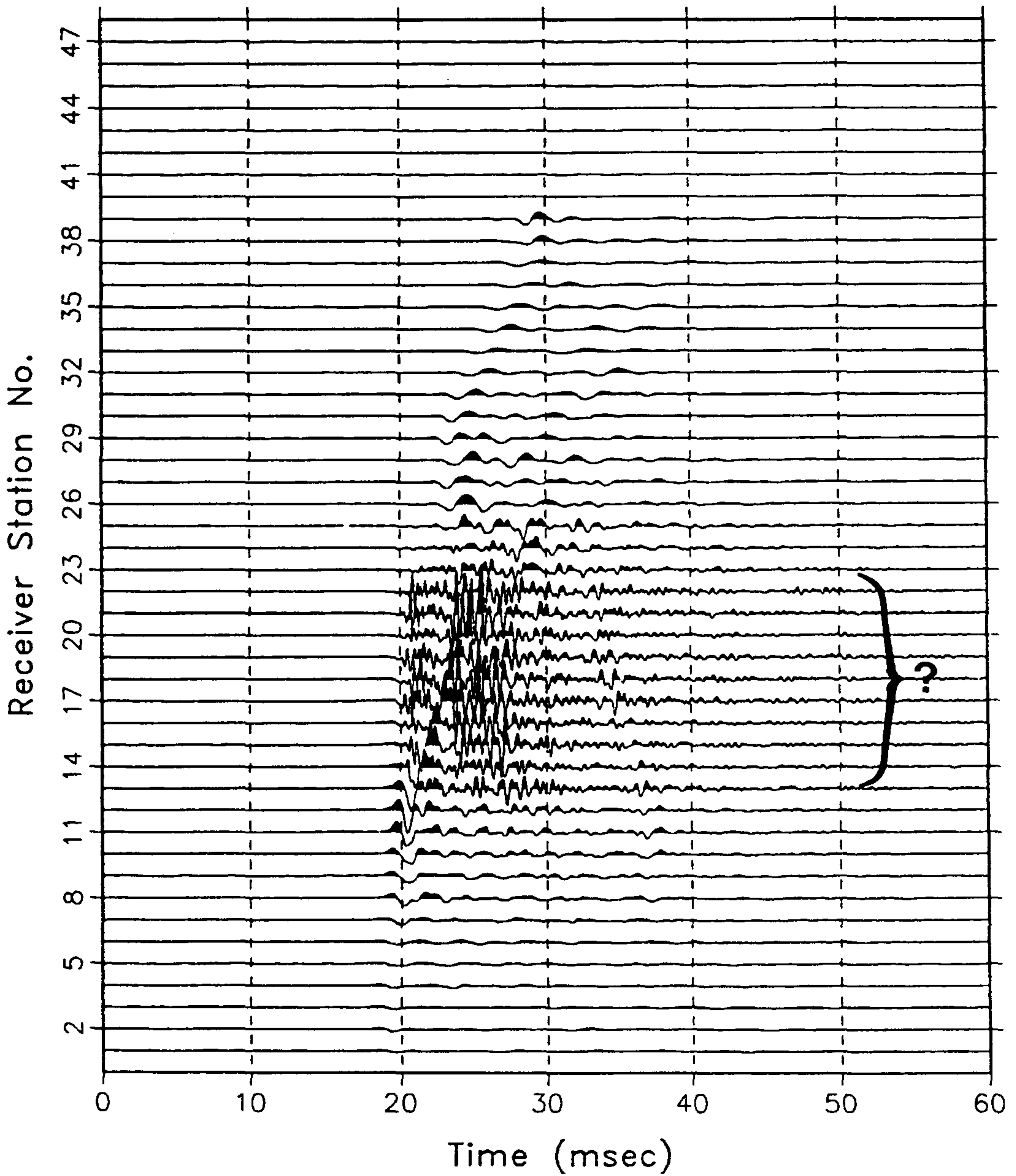


Fig. 119. (continued).
(d) Shot gather 18 (file normalization).

AMPLITUDE SPECTRUM FOR S DEPTH -18M(EL) (SUR604)
(S)BH8-(R)BH7,S NO.=18,R NO.=1-47,T.W.=10-50MS

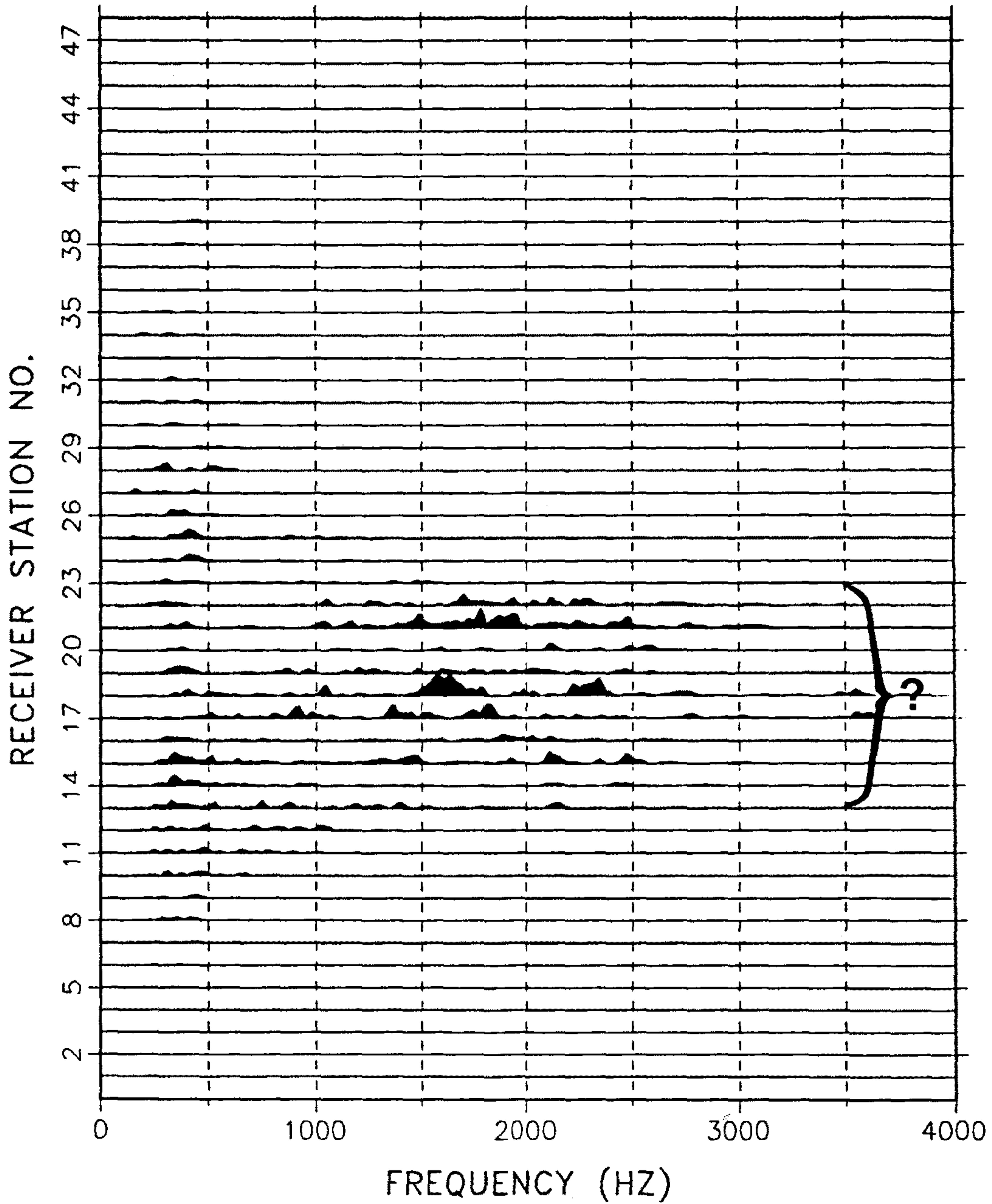


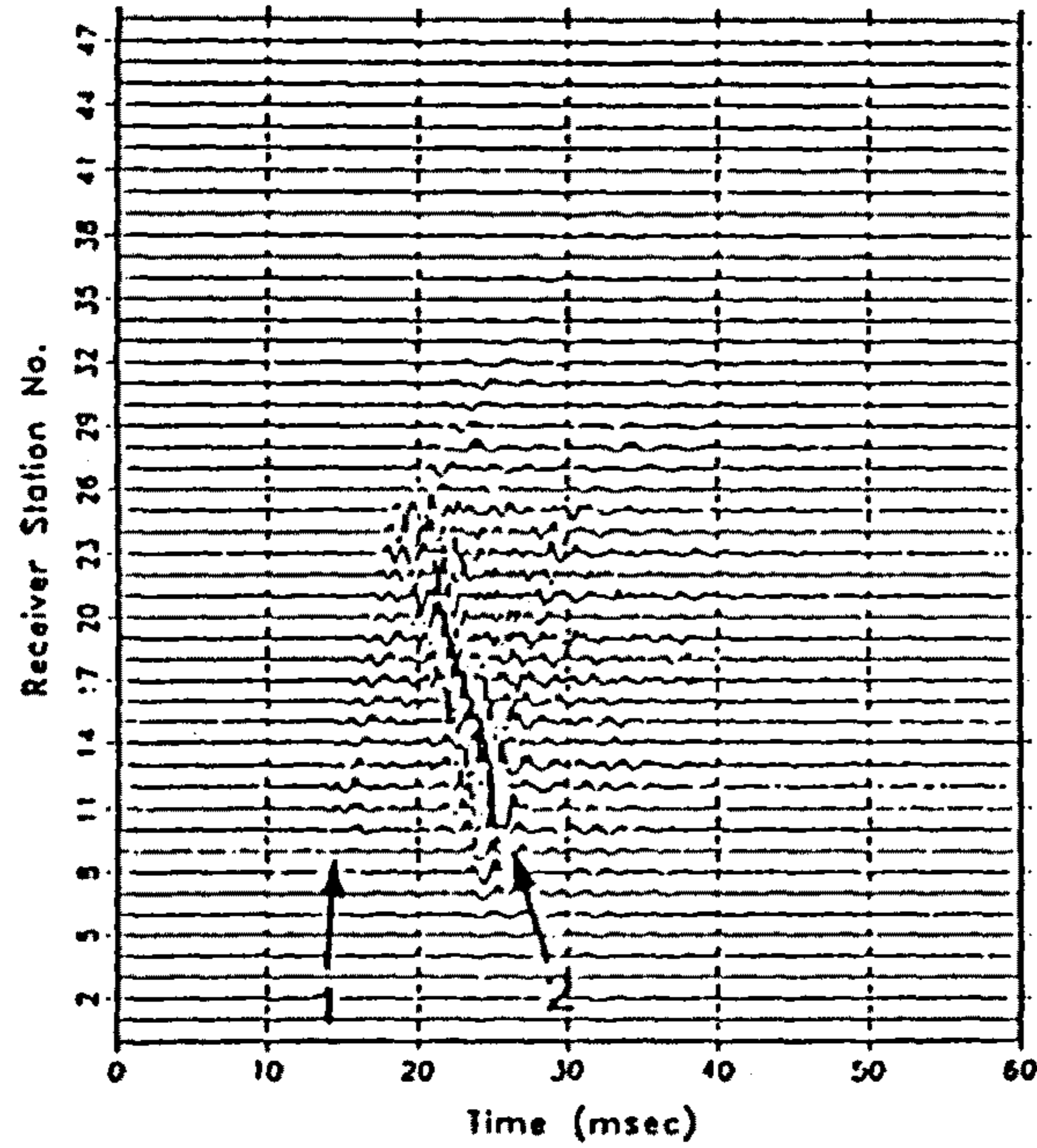
Fig. 119. (continued).

(e) Frequency content from the data in (d).

(예: 파이프관)이 형성되고 있다는 가정에 의해 가능할 것으로 보고 있다. 상기 고주파수 탄성파 발달 상태는 Fig. 120(a)~(l)에서 나타낸 바 shot 1~4, 15~18, 22~23, 30~31에 대한 48채널 기록(file normalization)에서도 관찰되고 있다. 발생원이 최하위에 위치할 경우((a) 참조)에도 이전과는 또 다른 특이한 탄성파 도달이 관찰된다. 즉, 초동의 진폭(화살표 1로 표시)이 반사파의 것(화살표 2로 표시)보다 상대적으로 작게 나타나고 있으며 이러한 현상은 발생원이 그로부터 2m 상행될 때까지 지속되고 있다. 발생원이 shot 16 위치에 다다를 경우에는 고주파수 탄성파 도달이 시추공간 퇴적층을 통과한 탄성파보다 현저하게 발달되고 있음을 볼 수 있으며 이러한 경향은 발생원이 시추공 최상단 위치에 이를 때까지도 뚜렷하게 지속되고 있는 것이다. 이번에는 상기 현상을 또 다른 전산처리 기법 즉, 대역 필터(band pass filter; 김중열 외, 1989)에 의해 분석하기로 한다. 하나의 보기로서 Fig. 121(a)에 나타낸 기록은 Fig.120(k)의 shot 30 gather를 단지 trace normalization한 결과를 보여주고 있으며 그에 따른 주파수 내용은 Fig. 121(b)에 나타나 있다. 그런데, 퇴적층을 통과한 탄성파는 Fig. 121(b) 나타낸 바 대체로 500Hz 미만의 주파수 내용을 갖고 있음을 볼 수 있다. 따라서 상기 고주파수 내용 구간에만 국한하여 500Hz 이상의 주파수 내용을 제거하면(Fig. 121(c)에서 화살표로 표시된 구간) Fig. 121(d)에서 나타난 바 퇴적층을 통과한 탄성파 도달을 그 구간에서 재현할 수 있게 되는 것이다. 이러한 분석 결과는 바로 Fig. 121(a)에서 보여준 고주파수 탄성파 도달이 시추공 주위 또 다른 별도의 매질(예: 인위적인 구조물)에 의해 유래되었다고 판단될 수 있는 것이다.

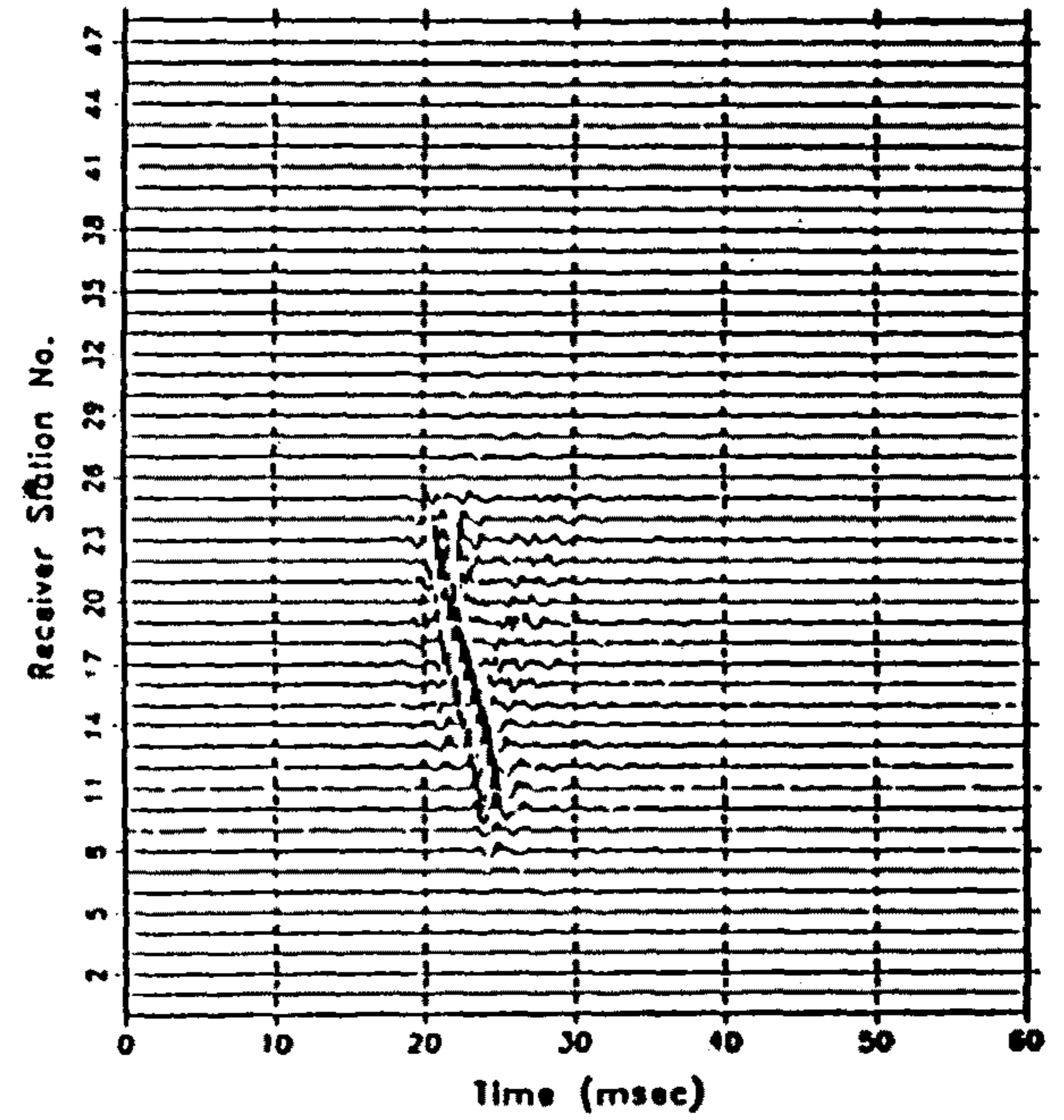
Fig. 122는 탐사측선 전체에 대한 토모그래피 탐사결과를 나타내고 있다. SUR 606에서 SUR 604에 이르는 탐사측선 하부 지질상태는 탄성파 속도

EomGung tomography data (Survey No. 604)
S(D110) - R(D117), S No.= 1, R No.= 1 - 47



(a)

EomGung tomography data (Survey No. 604)
S(D110) - R(D117), S No.= 2, R No.= 1 - 47



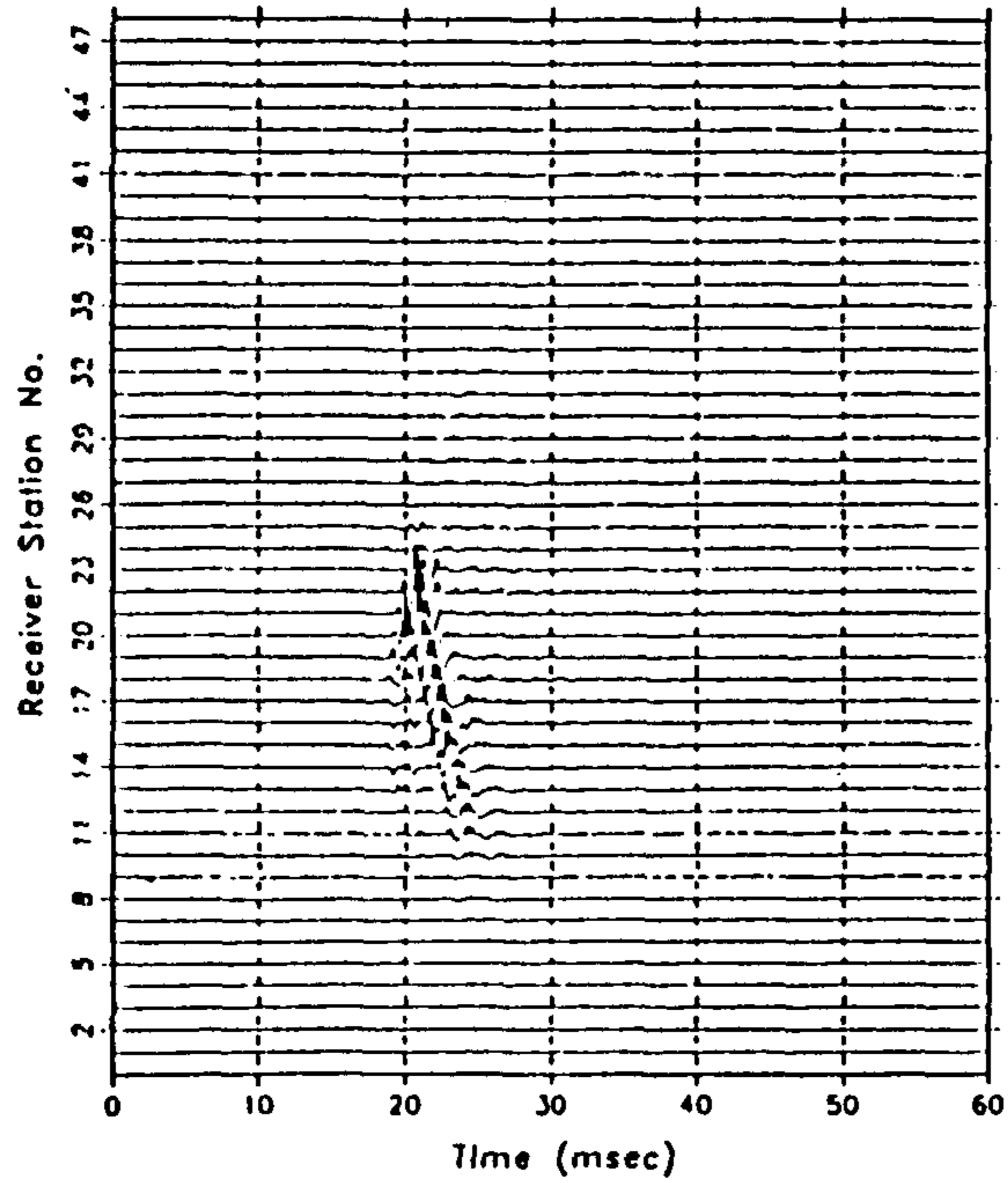
(b)

Fig. 120. Eomgung geotomographic survey.

Example of crosshole data (file normalization) acquired from the BH8-BH7 cross section.

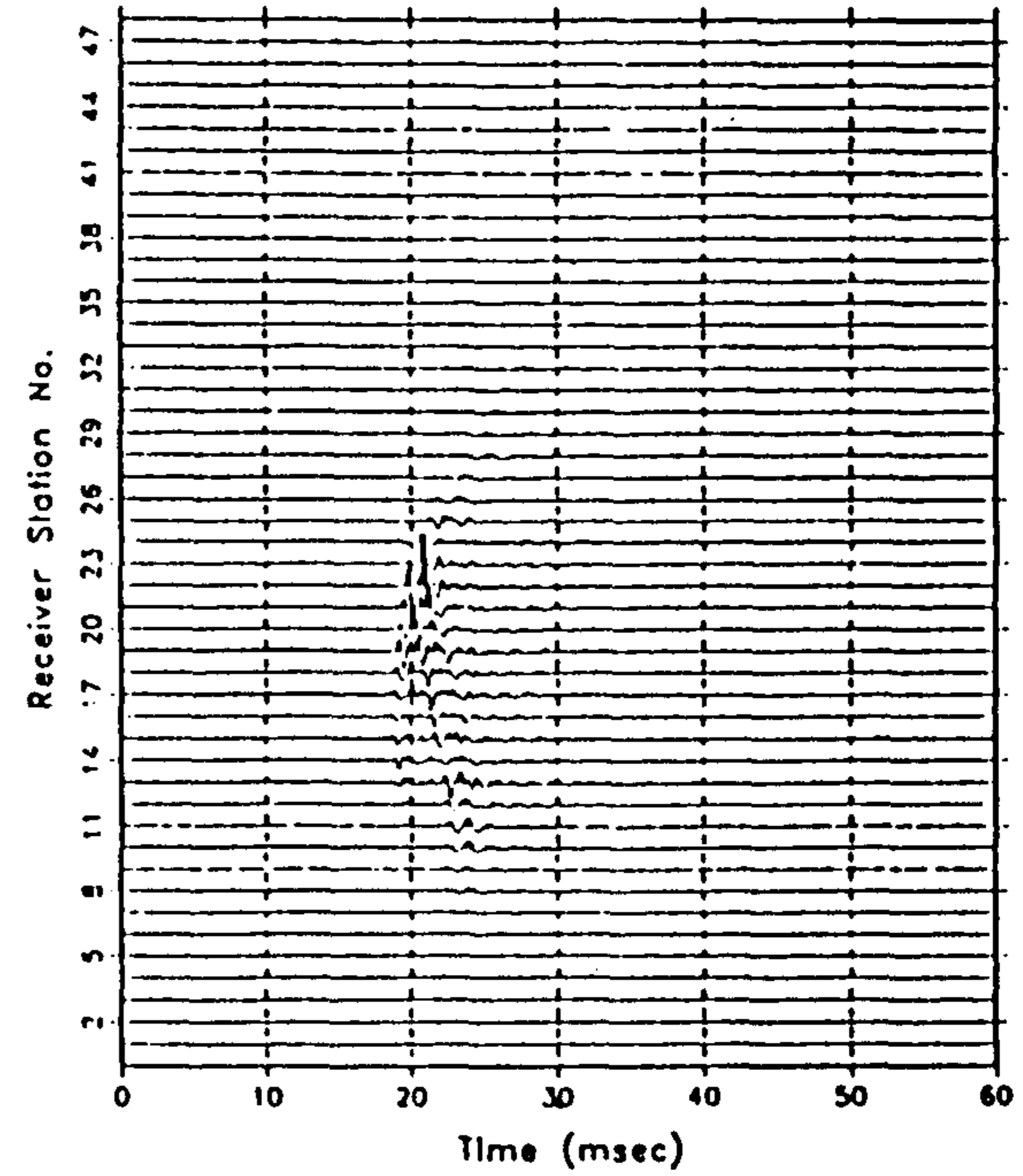
(a) shot gather 1 (b) shot gather 2.

FomGung tomography data (Survey No. 604)
S(D110) - R(D117), S No.= 3, R No.= 1 - 47



(c)

FomGung tomography data (Survey No. 604)
S(D110) - R(D117), S No.= 4, R No.= 1 - 47



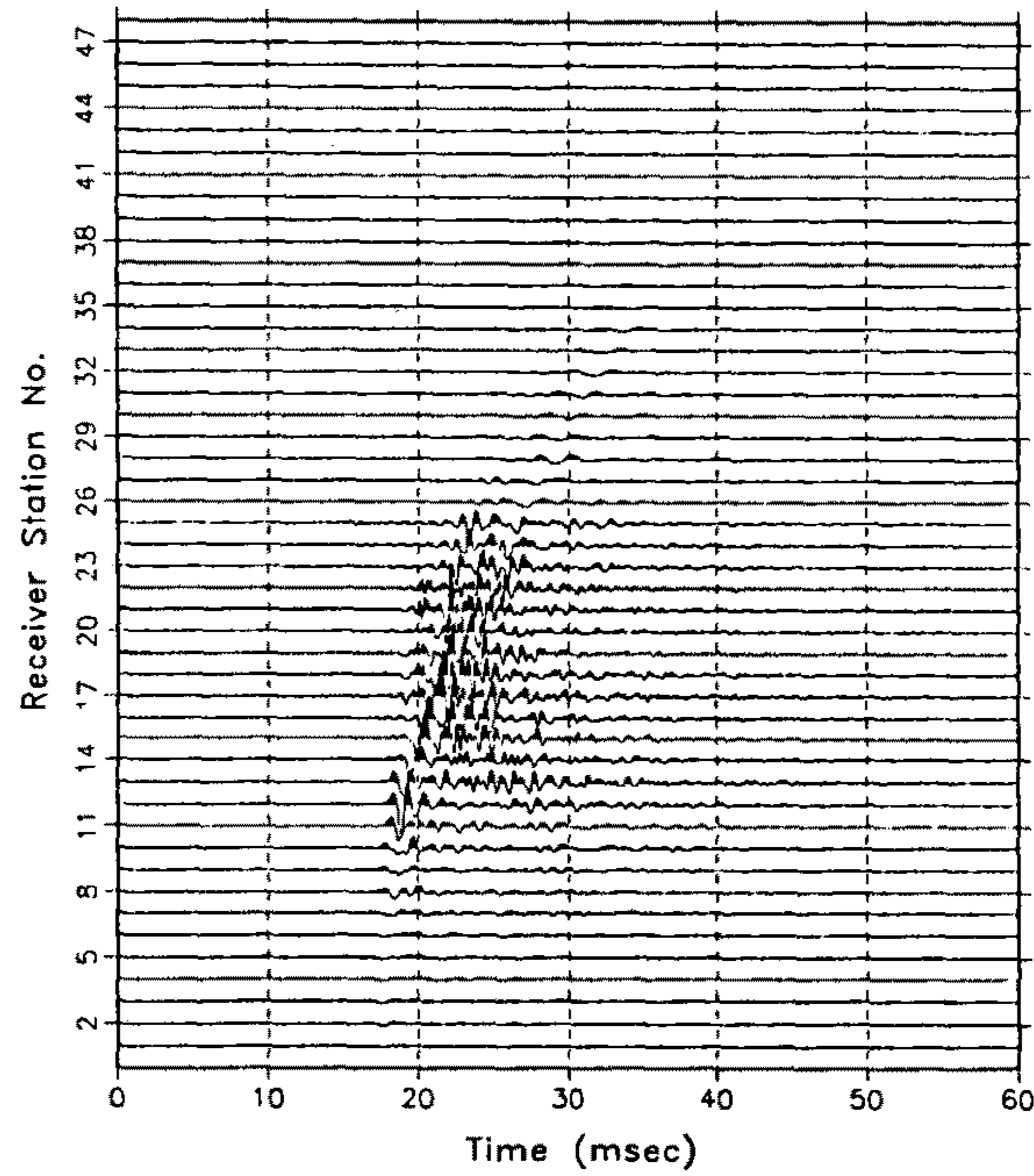
(d)

Fig. 120. (continued).

(c) shot gather 3

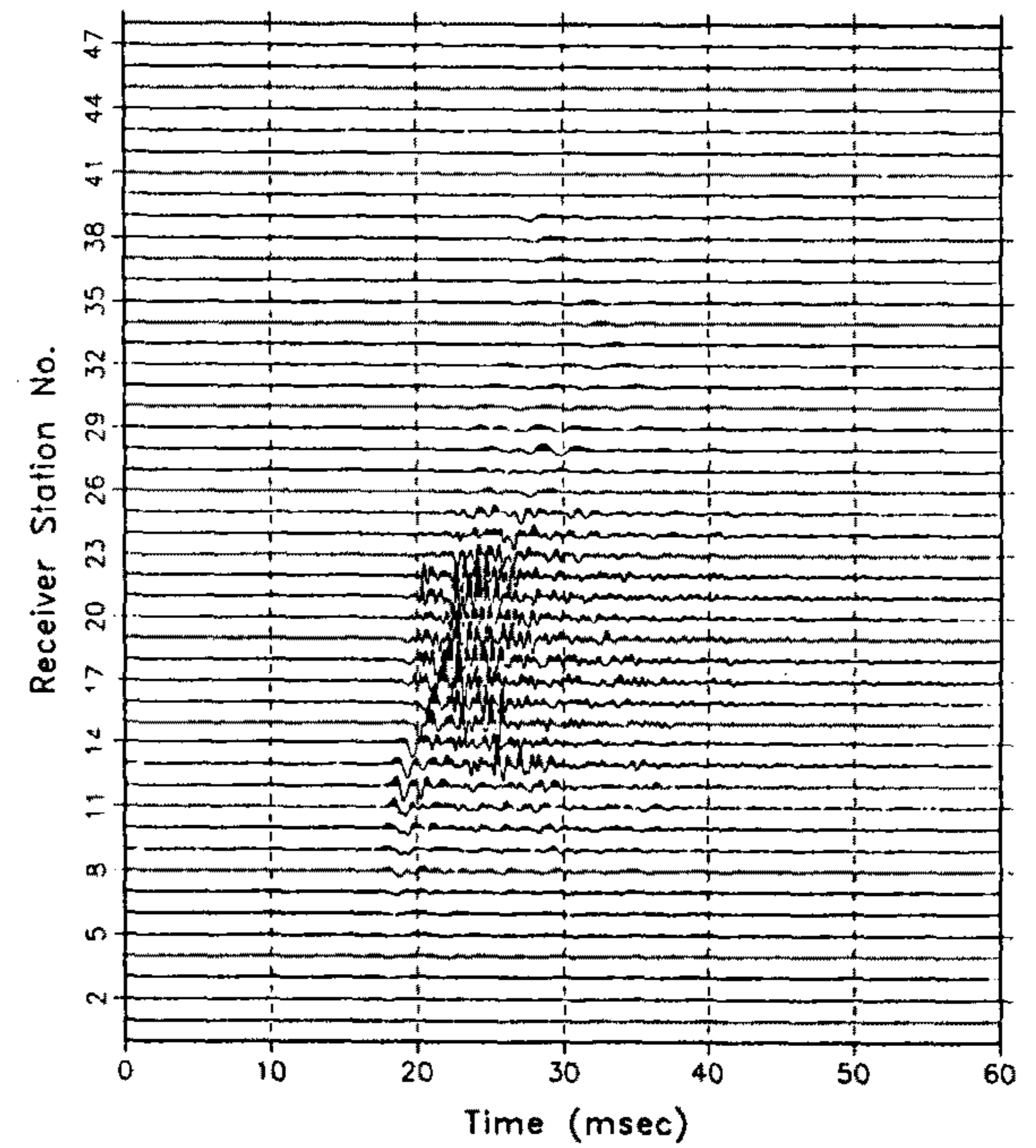
(d) shot gather 4

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 15, R No.= 1 - 47



(e)

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 16, R No.= 1 - 47



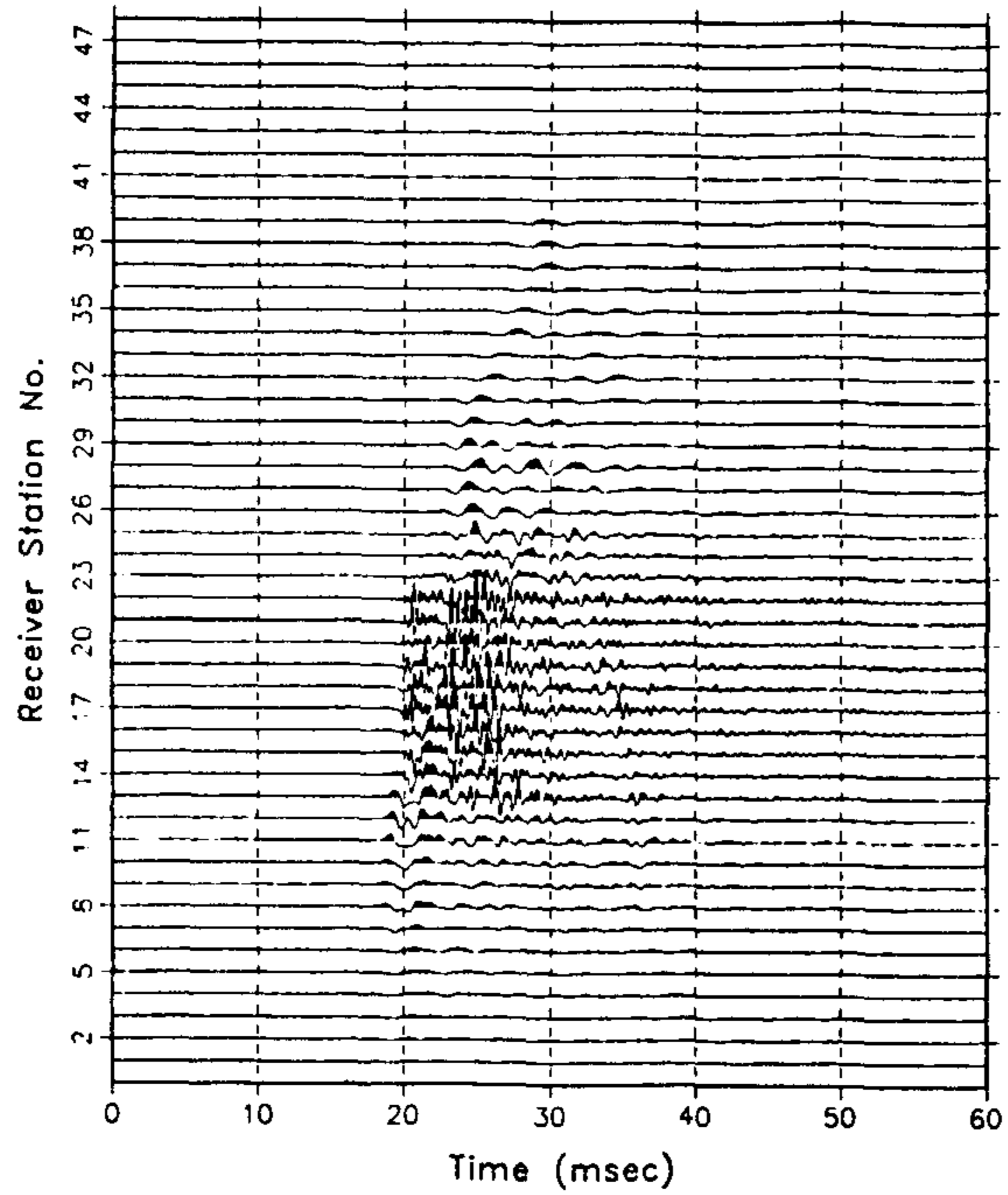
(f)

Fig. 120. (continued).

(e) shot gather 15

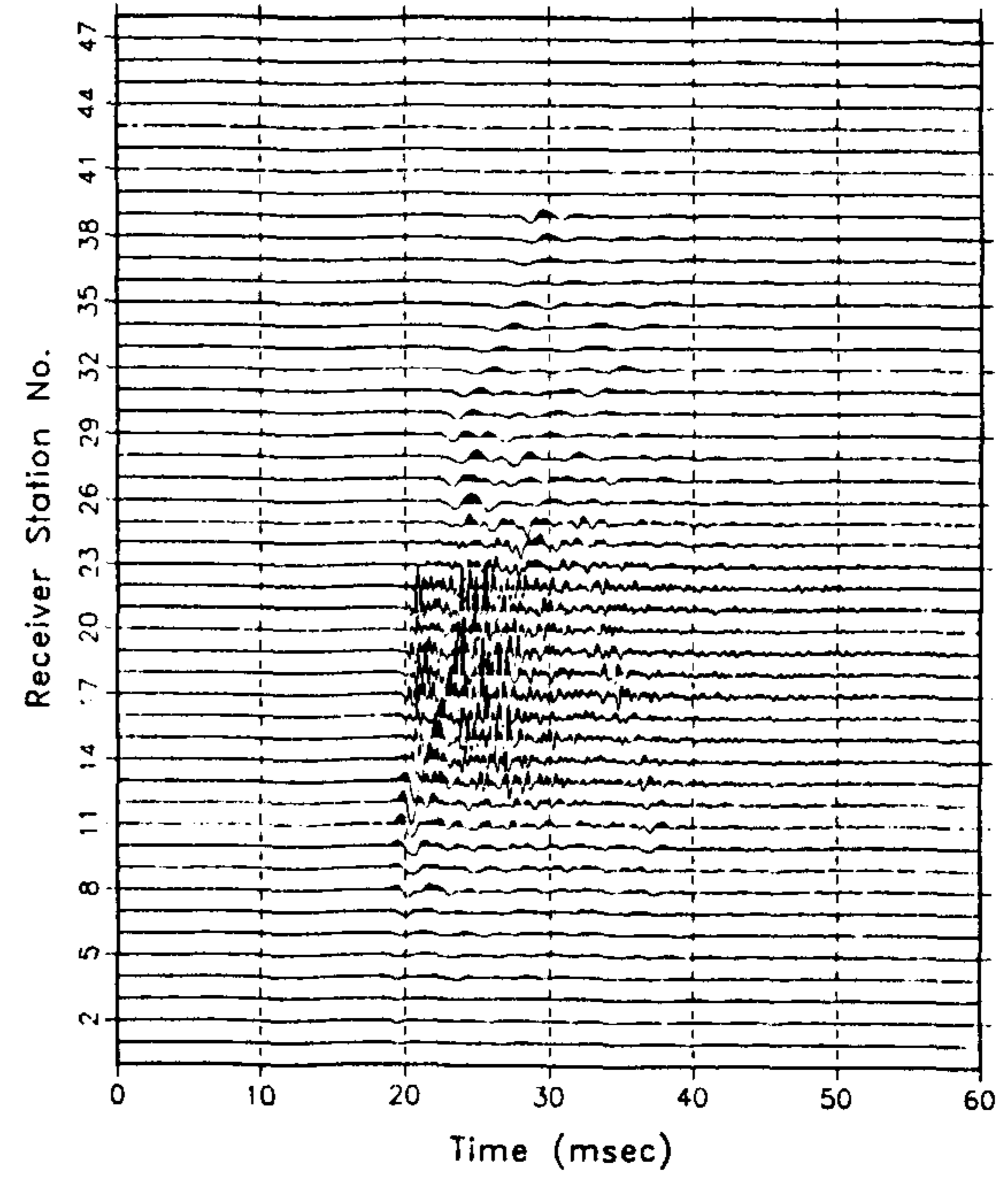
(f) shot gather 16

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 17, R No.= 1 - 47



(g)

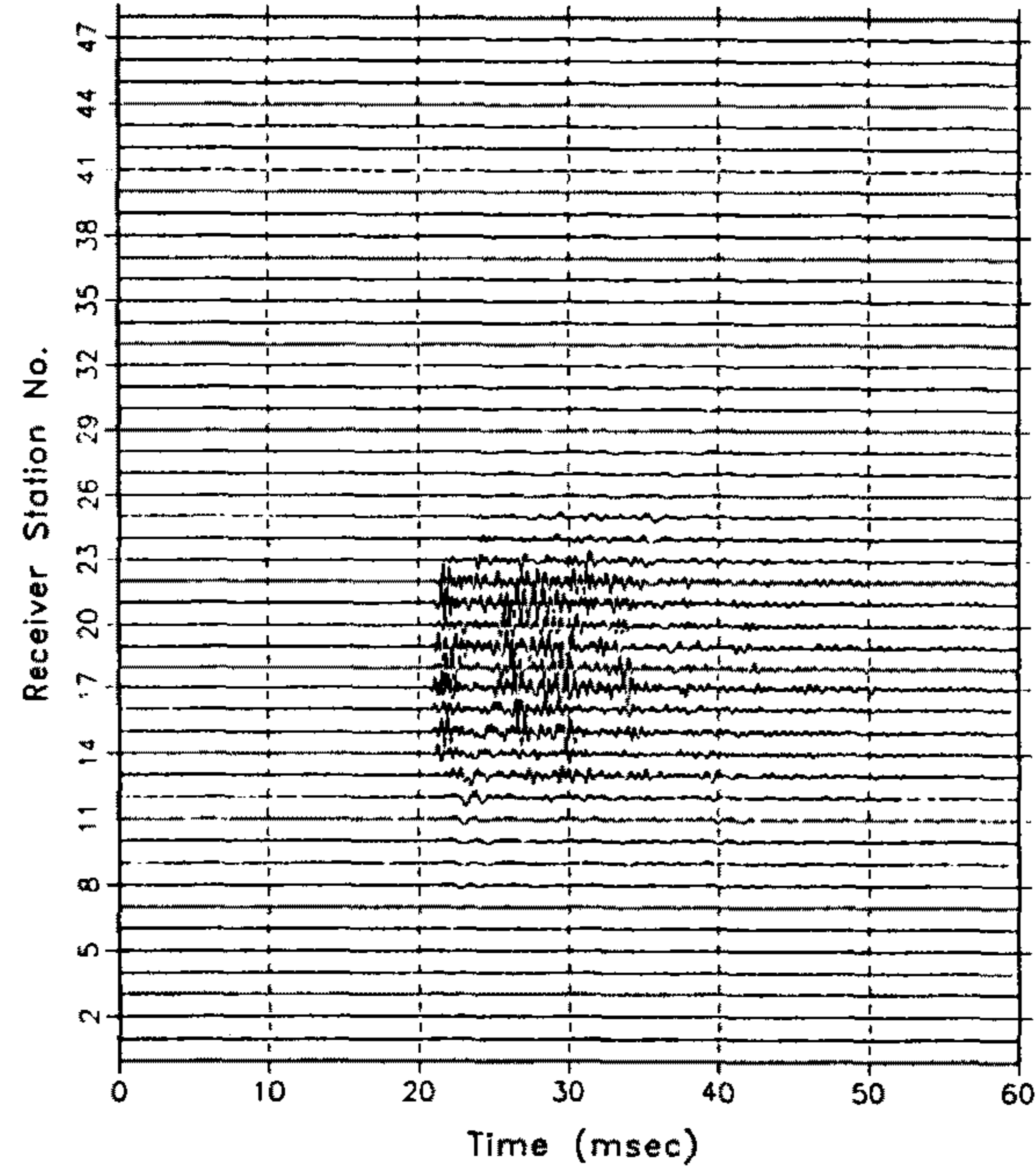
EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 18, R No.= 1 - 47



(h)

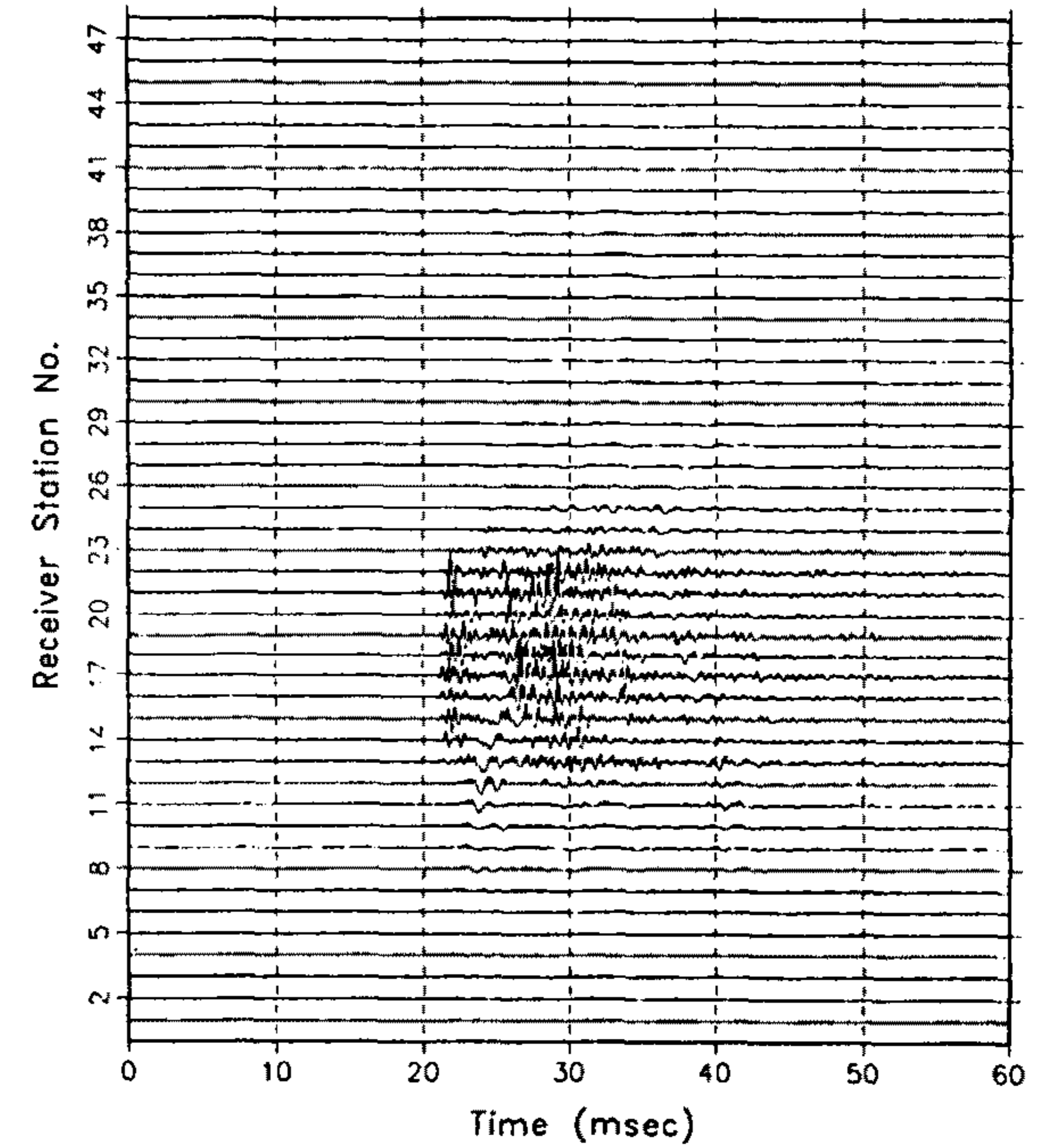
Fig. 120. (continued).
(g) shot gather 17 (h) shot gather 18

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 22, R No.= 1 - 47



(i)

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 23, R No.= 1 - 47



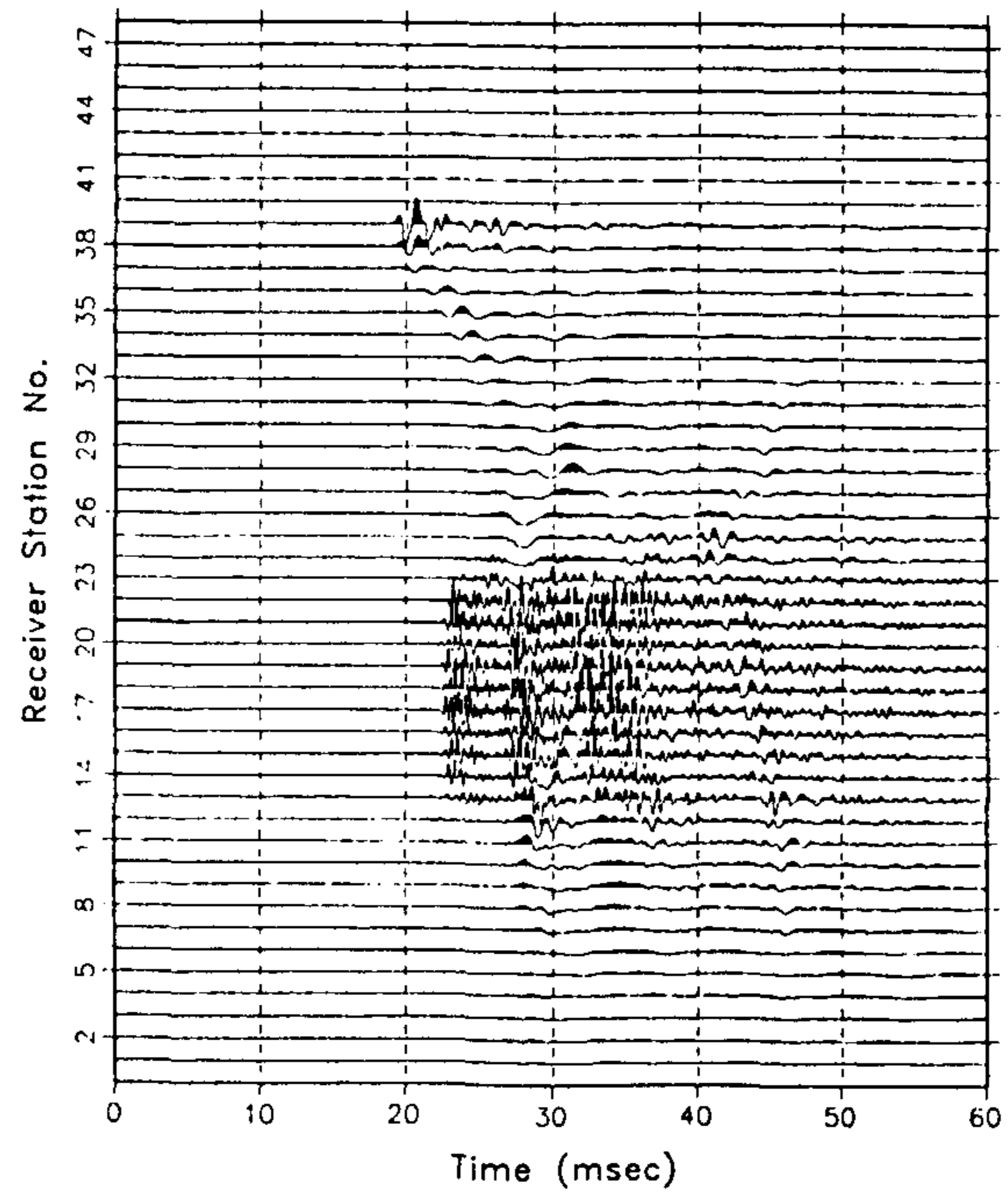
(j)

Fig. 120. (continued).

(i) shot gather 22

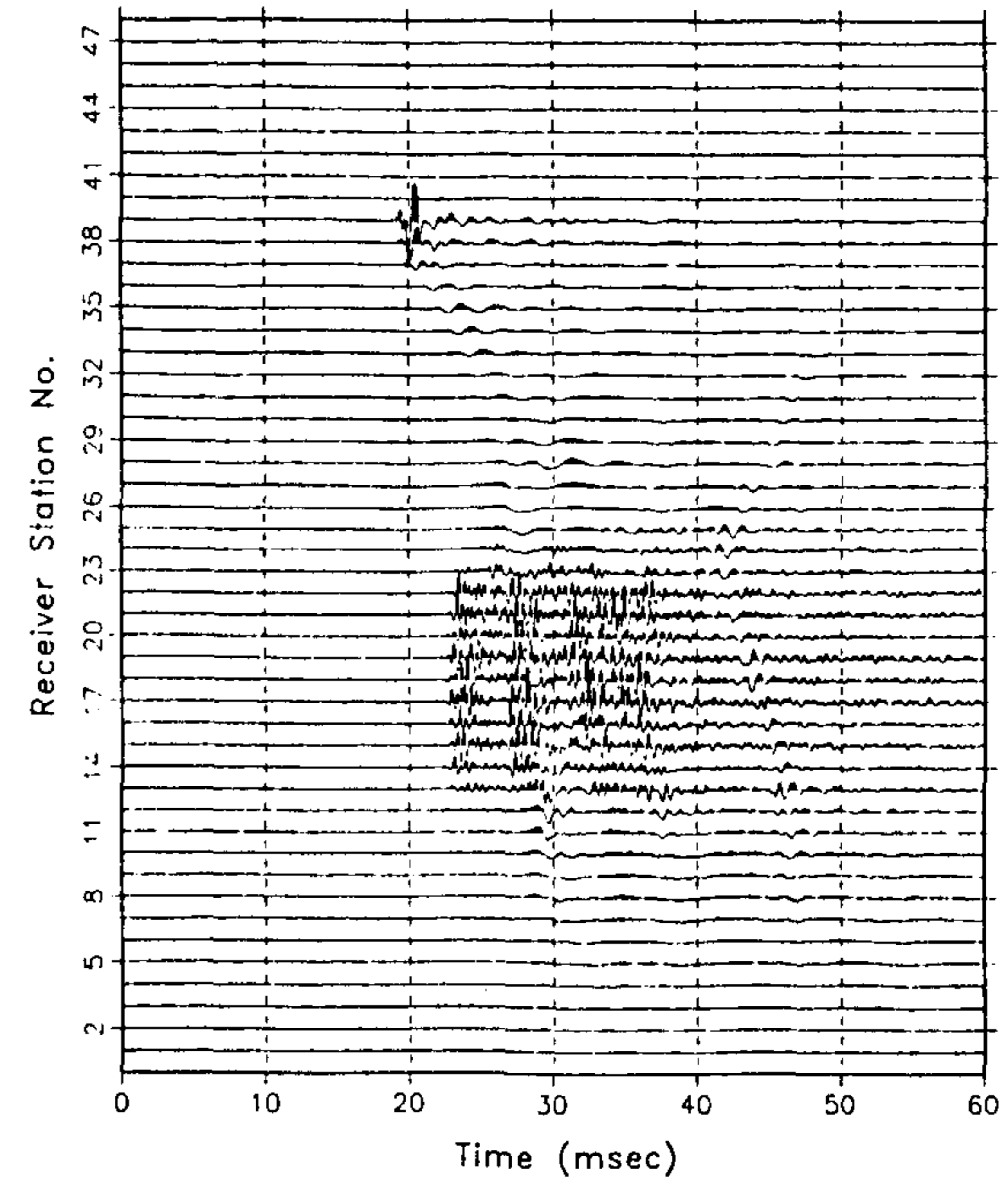
(j) shot gather 23

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 30, R No.= 1 - 47



(k)

EomGung tomography data (Suvey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 31, R No.= 1 - 47



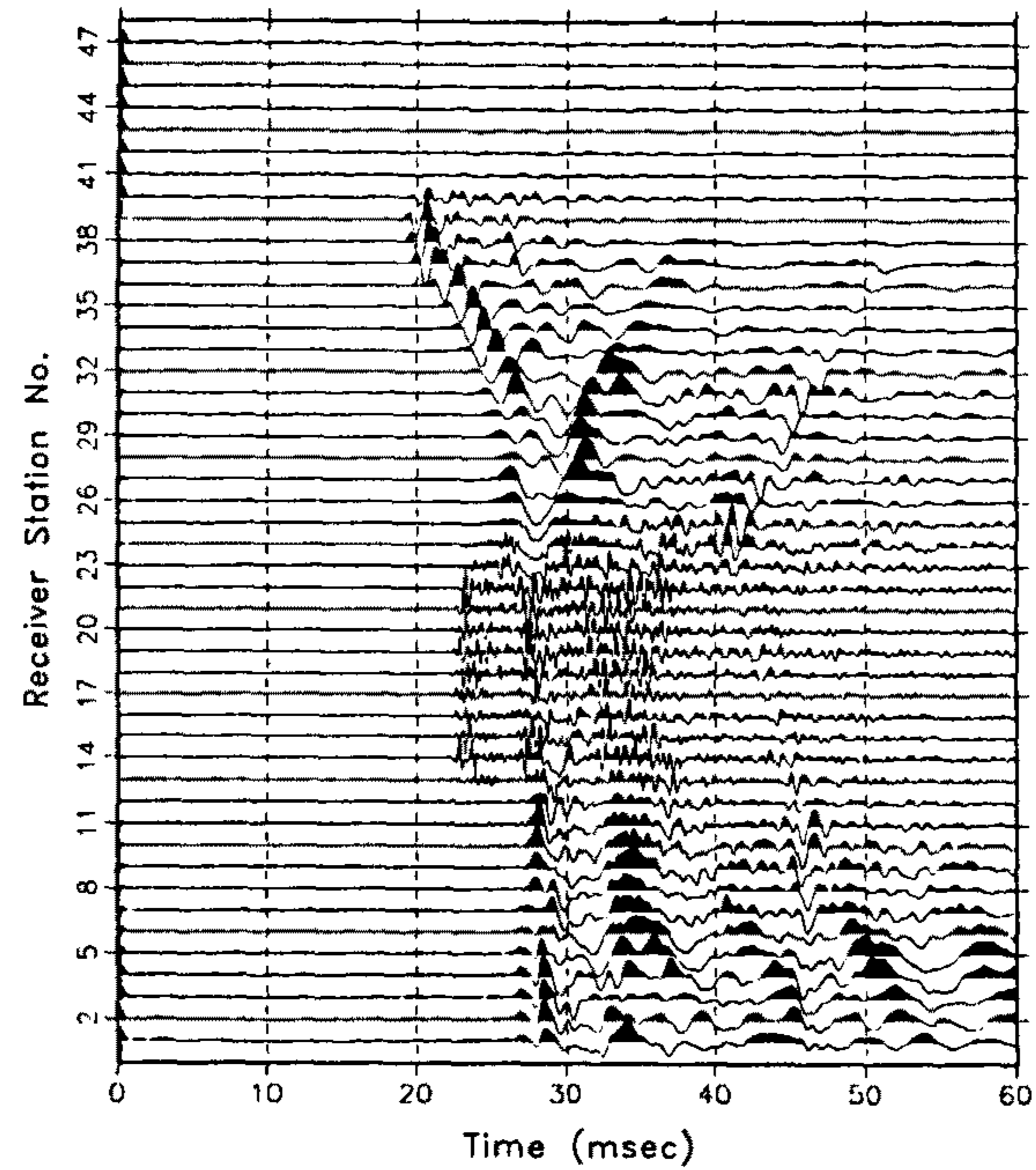
(l)

Fig. 120. (continued).

(k) shot gather 30

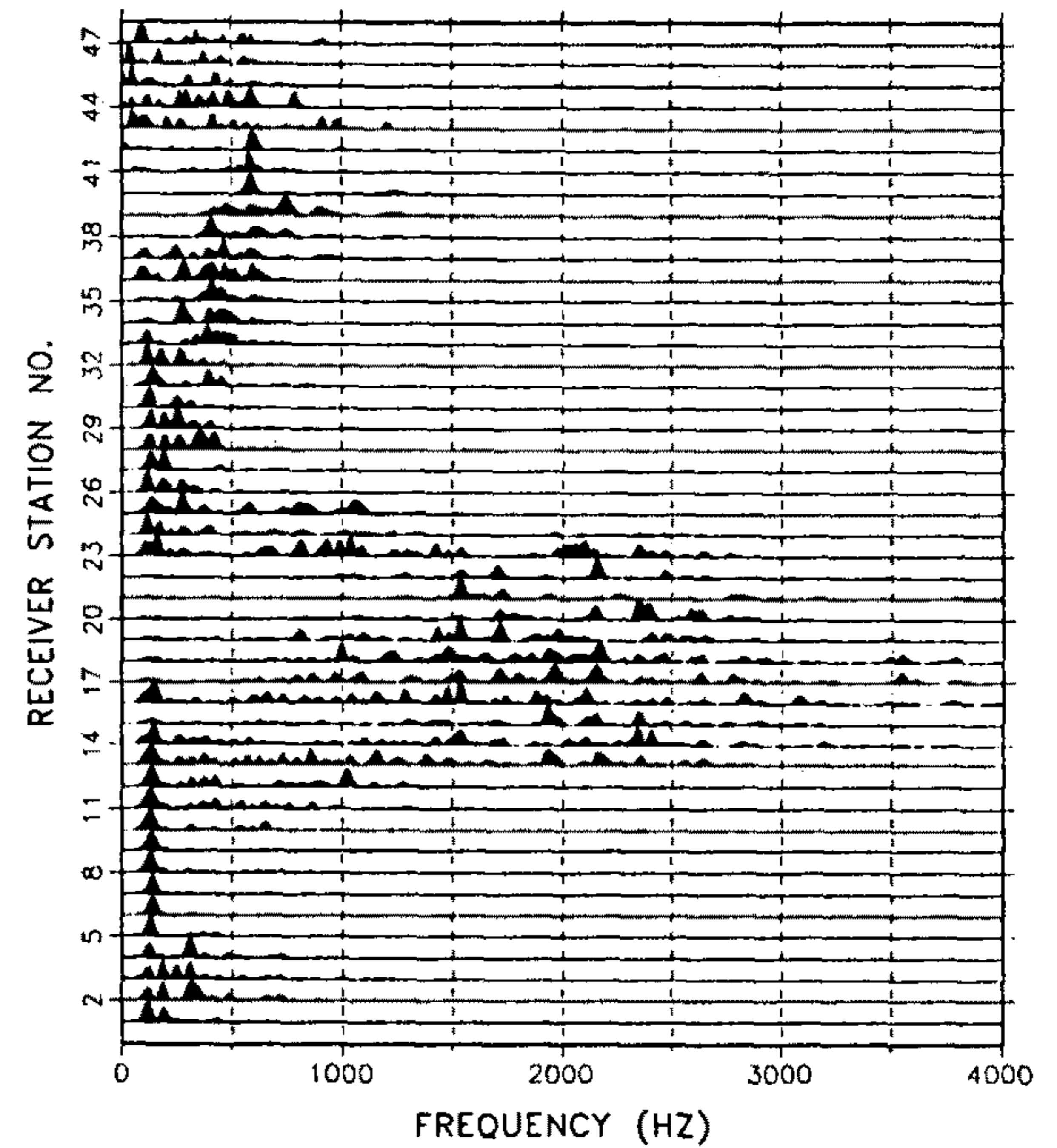
(l) shot gather 31

EomGung tomography data (Survey No. 604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 30, R No.= 1 - 47



(a)

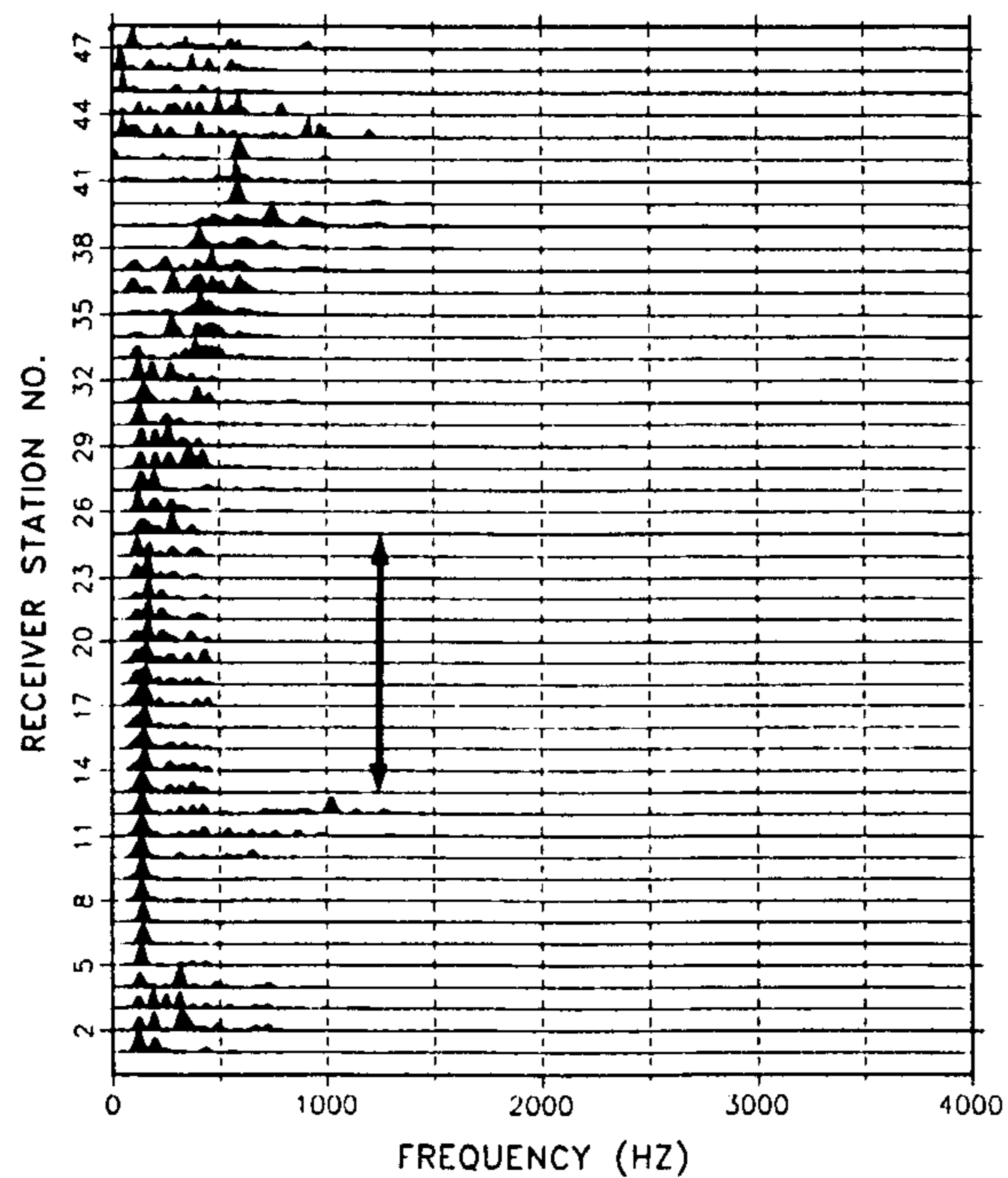
AMPLITUDE SPECTRUM (BEFORE FILTERING, SUR604)
(S)BH8-(R)BH7, S NO.= 30, T.W.= 15-50 MS



(b)

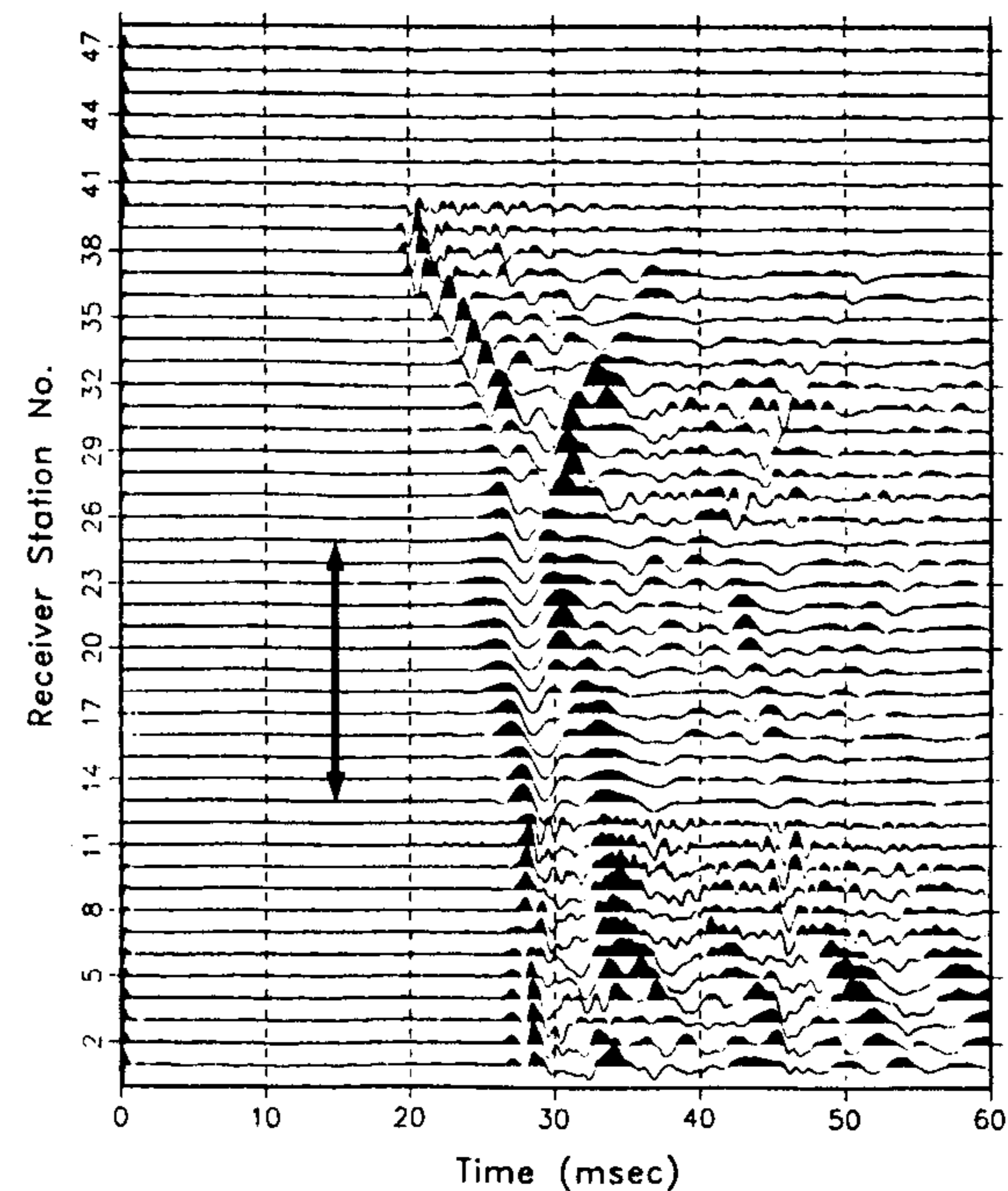
Fig. 121. Eomgung geotomographic survey.
(a) Shot gather 30 from the BH8-BH7 cross section.
(b) Frequency content from the data in (a).

AMPLITUDE SPECTRUM (AFTER FILTERING,SUR604)
(S)BH8-(R)BH7, S NO.= 30, T.W.= 15-50 MS



(c)

EomGung band-pass filtered data (Survey No.604)
S(BH8) - R(BH7), S No.= 30, R No.= 1 - 47



(d)

Fig. 121. (continued).

- (c) Frequency content after eliminating the high frequency content using bandpass (frequency range 0 Hz~1000 Hz) mapping.
- (d) Shot gather 30 derived from the frequency content in (c).

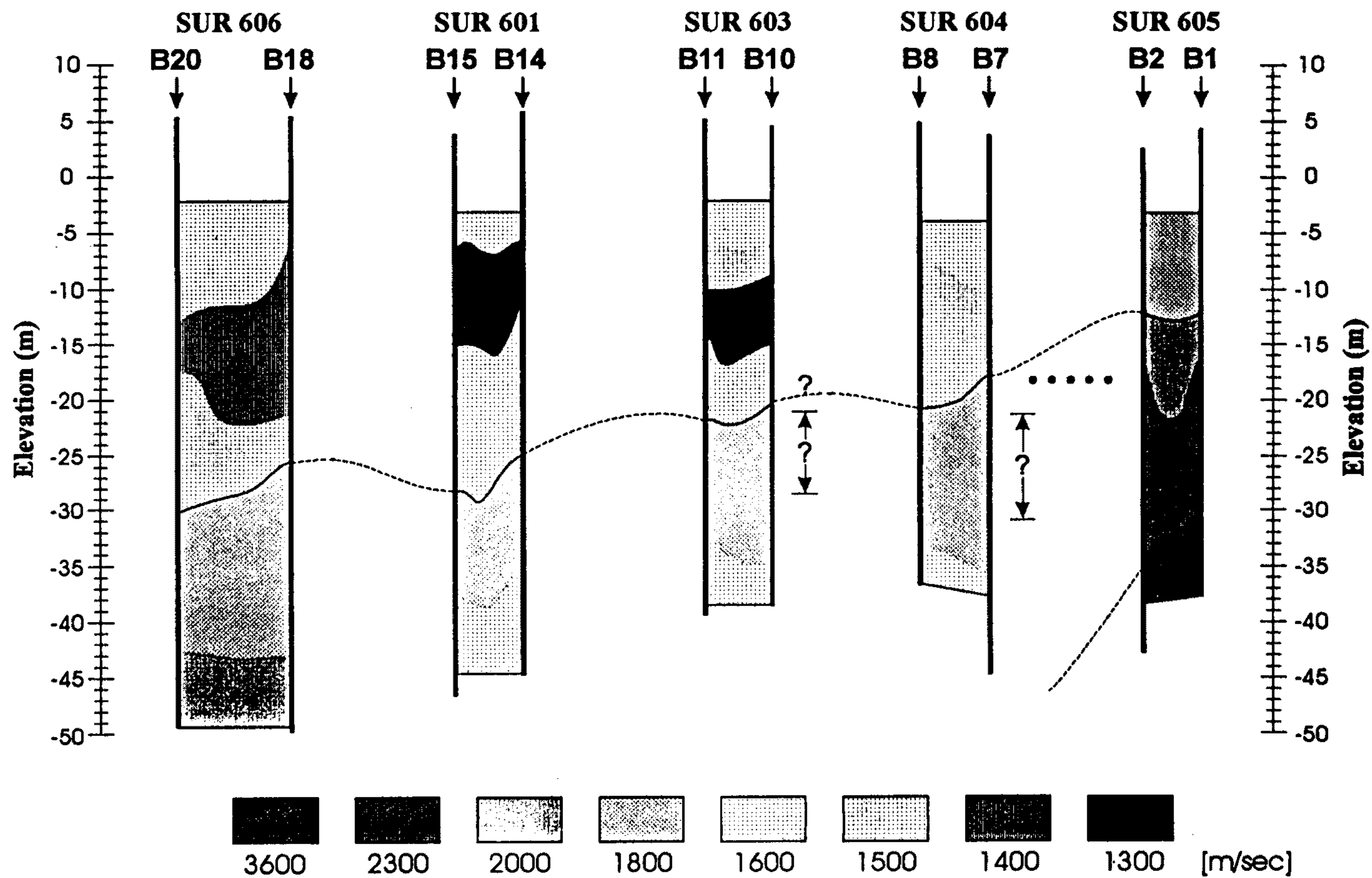


Fig. 122. Eomgung geotomographic survey.
Interpreted physical properties of rocks in the Eomgung survey area.

2000m/s 미만의 두터운 연약 퇴적층으로 구성되어 있으며 그 축선으로부터 (혹은 낙동강변으로부터) 수직방향으로 약 200m 떨어진 SUR 605하부에서는 이미 기반암이 E.L. -33m 주위까지 나타내고 있다. 퇴적층은 다시 탄성파 전달 측면에서 크게 점선으로 표시된 경계면으로 구분되고 있다. 그런데, SUR 603과 SUR 604 단면측정은 지하 일정 구간(약 E.L. -21m~E.L. -30m 구간)내에 이상대(?로 표시)가 존재할 수 있음을 시사하고 있다.

2. 부산지역 지하 매설물(콘크리트 파일) 조사

Fig. 123은 실드 공법에 의한 구포삼거리-감전충전소간 전력구 터널공사의 일부구간(터널노선: 낙동로 하부 약 12m~15m)을 나타내고 있다. 낙동로의 구포삼거리 방향 좌측에는 낙동 고수부지이며 우측에는 건물이 밀집되어 있다. 한편, 아파트 단지로부터 낙동로를 가로질러 고수부지에 이르기까지 지표에 인접한 하수관(폭 10.1m × 높이 3.4m)이 매설되어 있으며 그의 양단 부분은 포장된 아스팔트 위에서도 쉽게 인식된다(그림 아랫부분 참조). 그런데, 실드공법 응용에서 대두된 문제점은 하수관 지보를 위해 여러 개의 파일(직경 약 30cm)이 시설되어 있다는 제보에 근거하여 이들은 터널굴진 과정에서 큰 지장물이 되고 있다는 데 있는 것이다. 따라서, 우선 파일의 존재 유무, 그의 크기 및 수량에 대한 사전 파악은 터널 시공의 효율성 제고를 위해 중요한 정보가 되고 있는 주지의 사실이다.

본 탐사지역 지질에서 전달되는 탄성파의 파장은 약 4m 내외로 간주된다. 그런데, 가상된 파일의 크기는 단지 0.3m에 불과하기 때문에 단일 파일

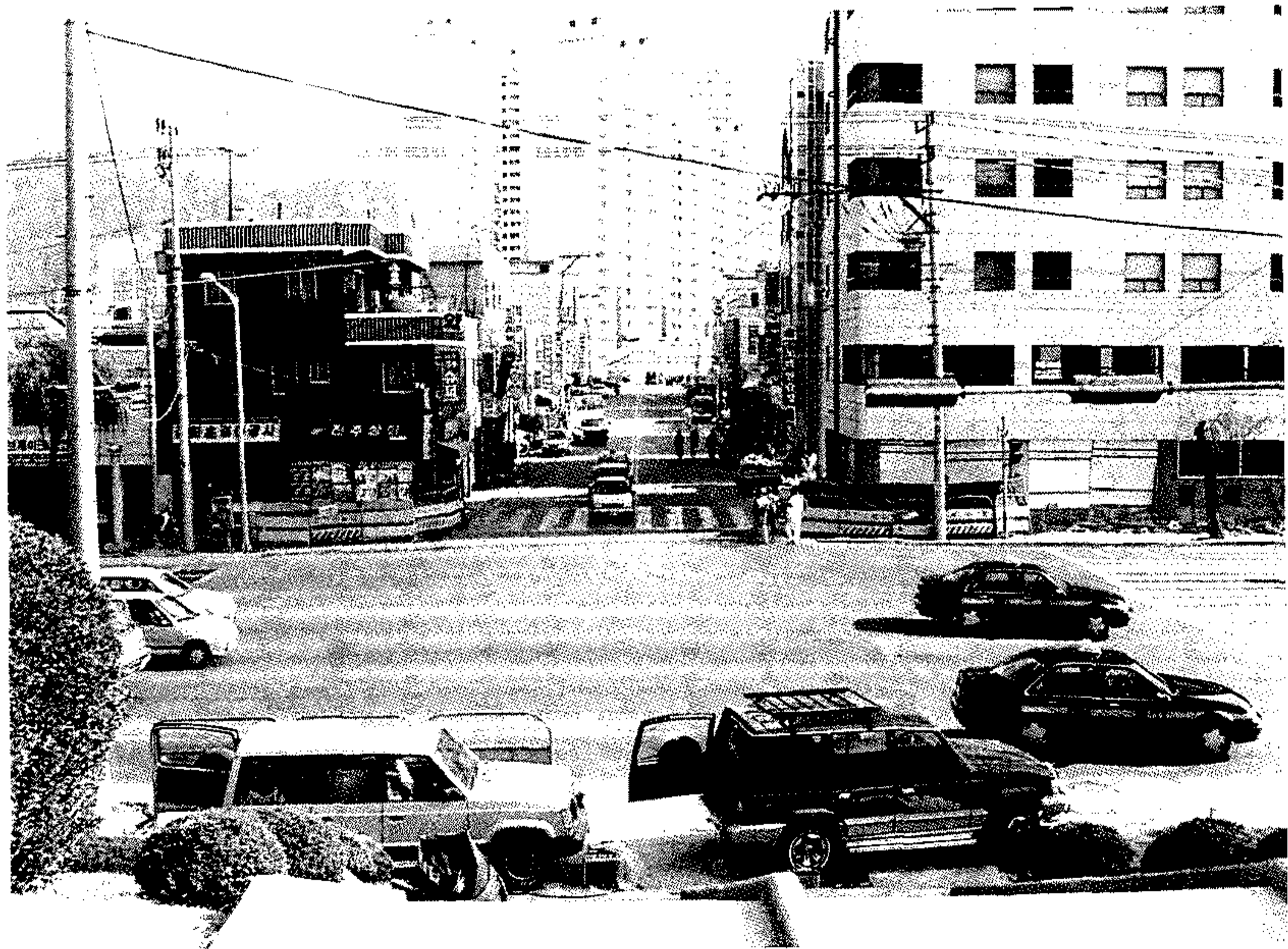


Fig. 123. Outlook of Kwaebeob survey area in Pusan.

에 대한 탐지는 우선 탄성파 파장에 비추어서도 대단히 어려운 과제가 되고 있으며 더구나 주어진 불리한 탐사여건 하에서는 더욱 그러하다. 그러나, 이러한 소규모 불균질 매질이 밀집되어 형성되고 있는 경우에는 탄성파 전달과정에서 두가지 효과가 기대될 수 있다. 즉, ① 파일에 대한 탄성파 산란 현상으로 인한 에너지의 약화와 ② 지반 보강으로 인한 탄성파속도의 증가이다.

Fig. 124는 탐사현장(부산 북구 괘법동)을 나타내고 있다. 여기에는 터널굴착이 계획된 노선(낙동로 중간부분)과 도로를 가로지르는 하수관(단면 폭 10.1m × 높이 3.4m) 및 토모그래피 탐사를 위한 4개의 시추공(B1~B4) 위치가 표시되어 있다. 본 탐사의 필요성이 대두된 주요 원인은 무엇보다 하수관 지보를 위해 여러 개의 파일(직경 약 0.3m 추정)이 하수관 하부 지하에 매설되어 있다는 제보에 따라(Fig. 125 참조) 기 추진중인 실드공법의 효율적인 운용을 위해서는 그들의 사전 제거가 불가피한 데 있었다. 따라서, 본 탐사의 목적은 우선 상기 파일의 존재 여부 및 그 심도를 규명하고 나아가서 파일의 크기를 추정하는 데 있다.

토모그래피 응용에서는 네 개의 시추공(Fig. 124 참조)에 대해 도합 여섯 개의 단면측정(B1-B2, B3-B4, B4-B2, B4-B1, B3-B1, B3-B2)이 수행되었으나(각 시추공의 심도는 약 30m), 본 보고서에서는 단지 두개의 단면측정(B1-B2 및 B3-B4)에 대한 분석 결과만 요약하고 있다.

Fig. 126은 시추공 B1, B2사이 토모그래피 단면측정 과정을 보여주고 있다. 탄성파 발생원 장치는 B1 시추공에(그림에서 S로 표시), 수신장치는 B2 시추공에(그림에서 R로 표시) 삽입되고 있으며 그들의 위치는 심도

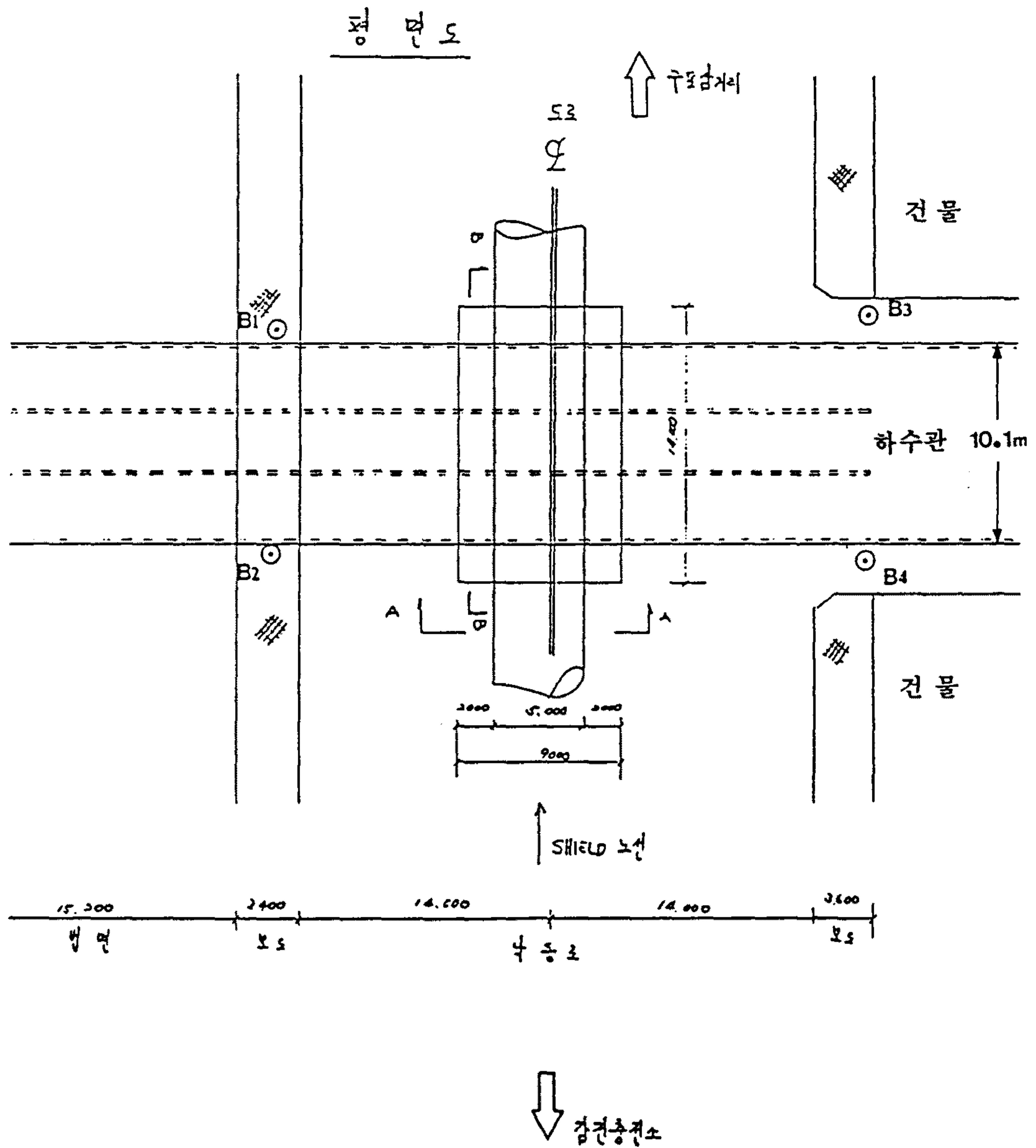


Fig. 124. Kwaebeob geotomographic survey.
 Borehole(B1~B4) locations for the geotomographic measurements.

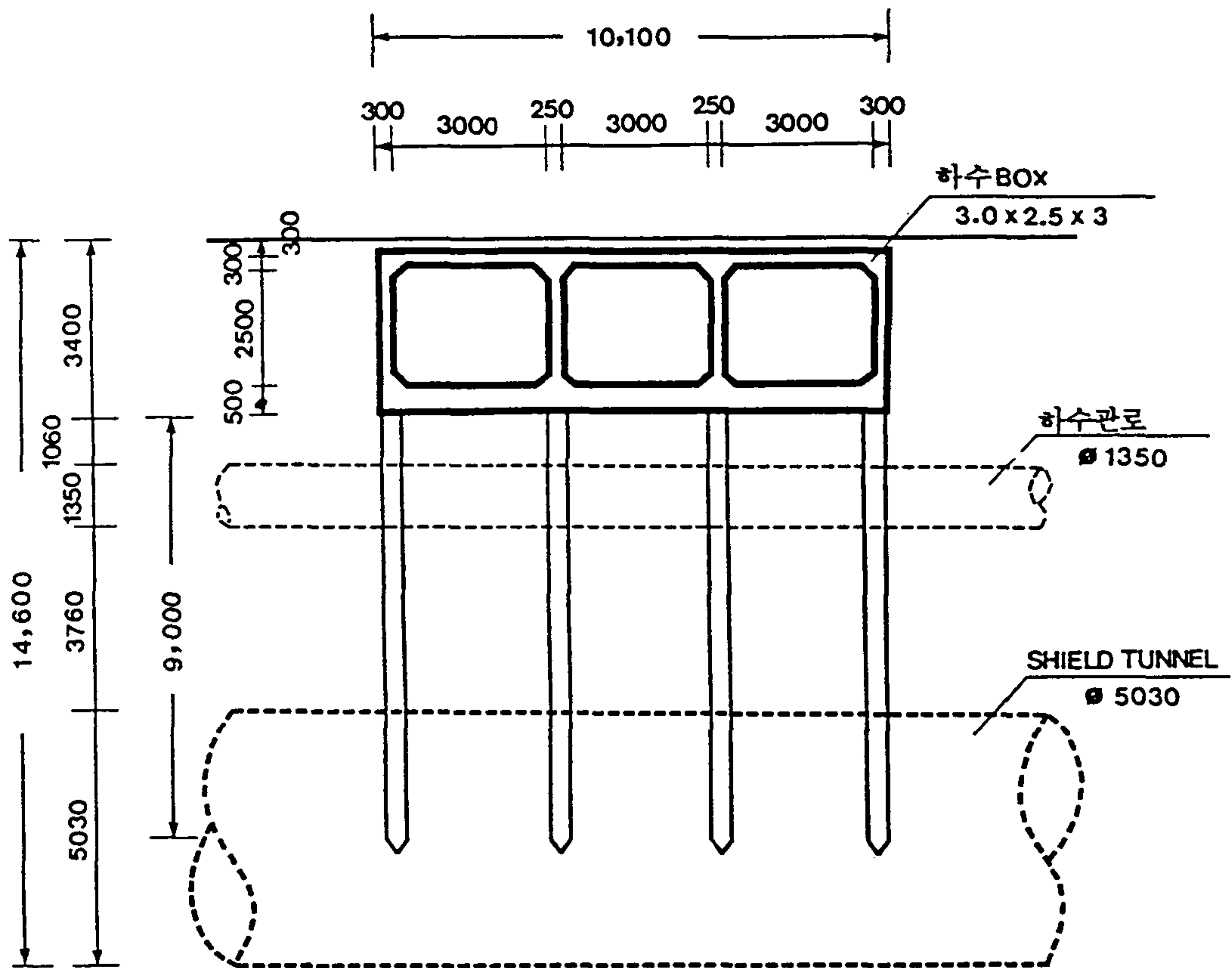


Fig. 125. Kwaebeob geotomographic survey.
Plan view of the concrete piles intersecting the shield tunnel.

Geometry for Tomographic Analysis

Pusan Kwaebeob Survey No. : 612

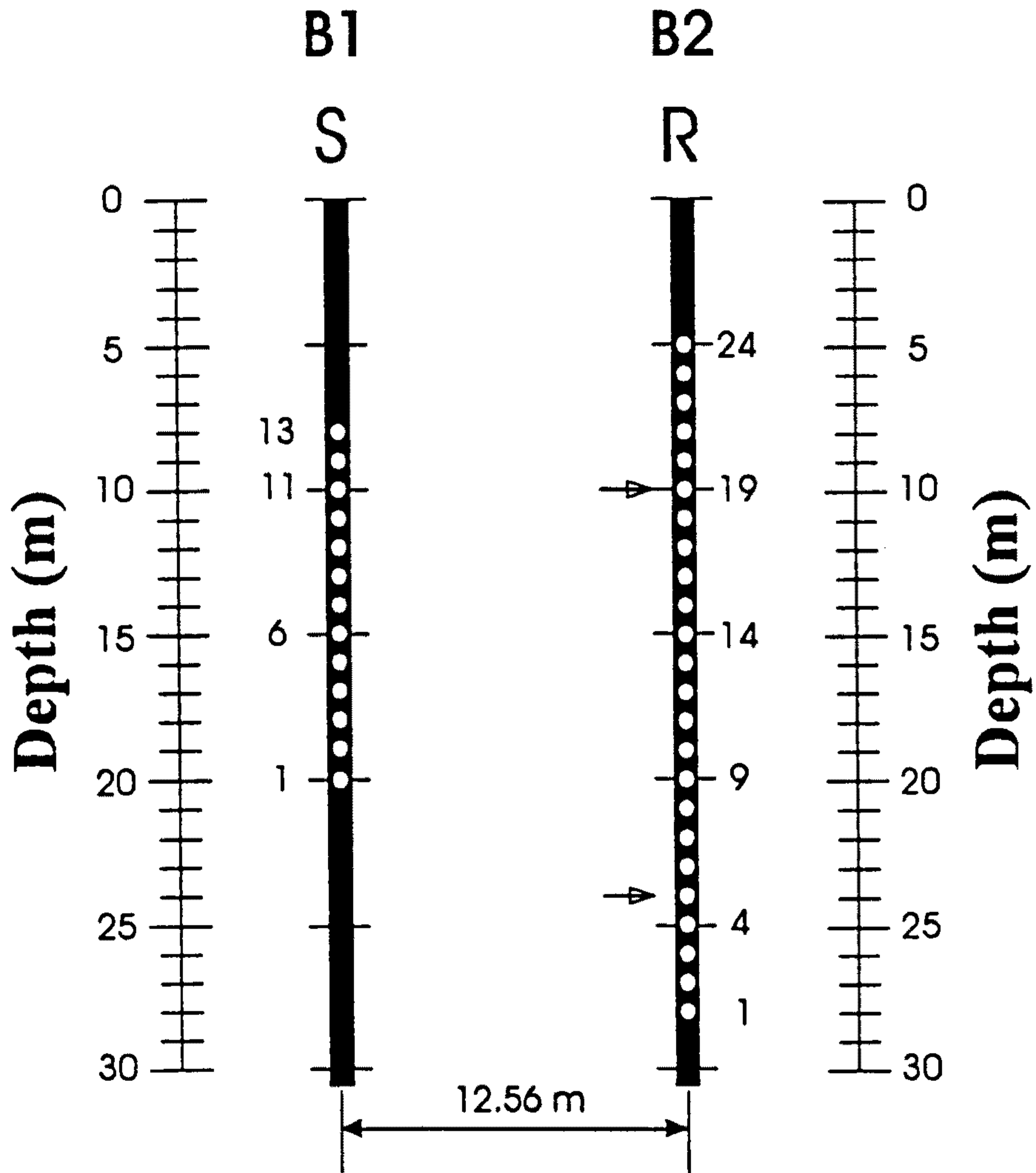


Fig. 126. Kwaebeob geotomographic survey.
Source and receiver locations for the crosshole seismic survey.

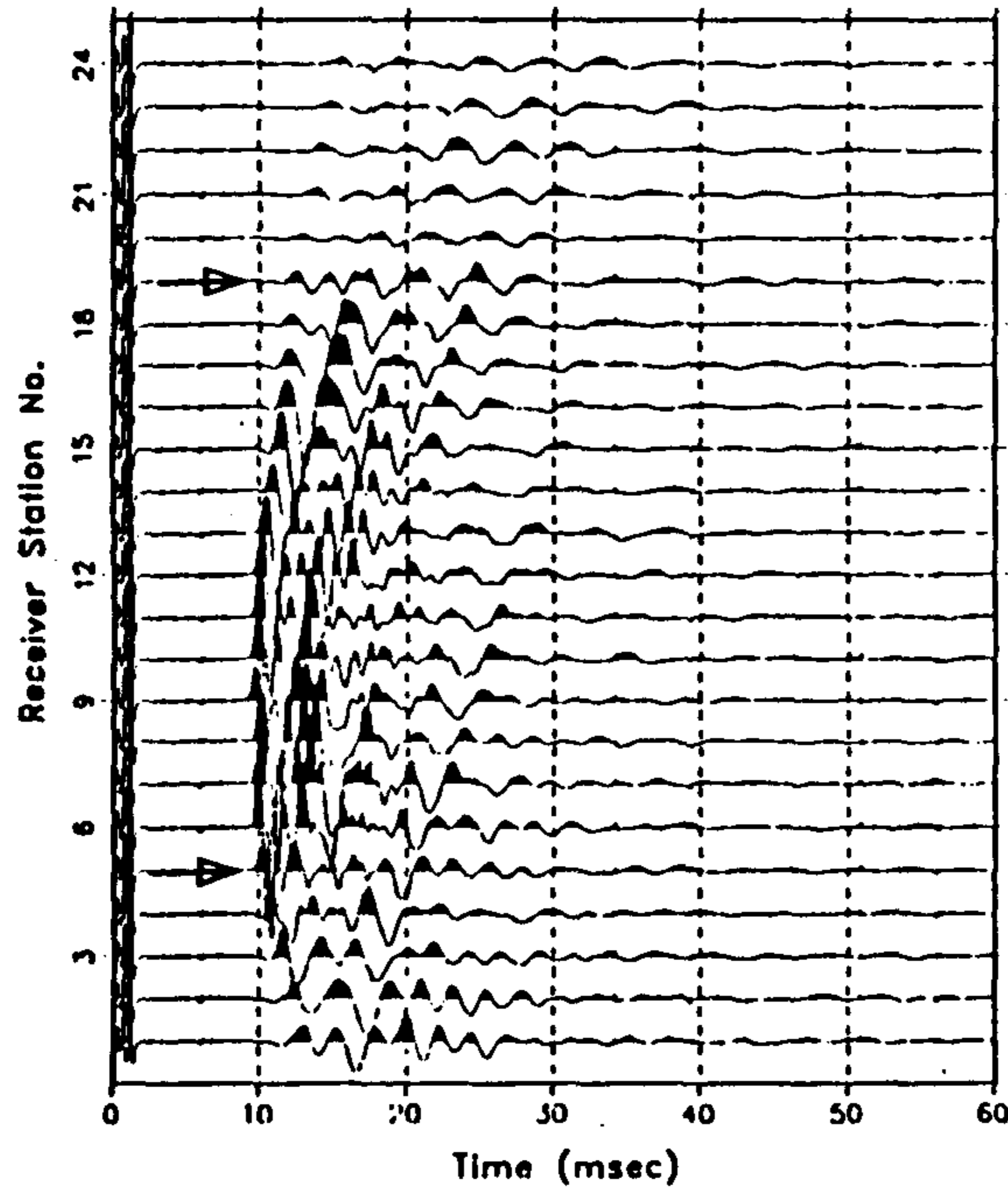
(Ground Level 기준)와 대별되고 있다. 시추공 B1은 비록 심도 30m까지 천공되었으나 그 이후 시추공 내로 점토와 유사한 매질이 유입되어 심도 20m 이하에는 발생원이 구사될 수 없었다.

Fig. 127(a)~(f)는 발생원 위치가 18m(shot No. 3)에서 1m 간격으로 상향되어 13m(shot No. 8)에 이르기까지의 각 채널 기록(24 traces)을 나타내고 있다. 즉, (a)는 shot No. 3에 대한 24채널 기록을 보여주고 있으며 그로부터 지질학적 층서 구분이 쉽게 인식된다(화살표로 표시). 그런데, 발생원 위치가 상향됨에 따라 주시 및 진폭면에서 큰 변화를 보여주는 경계면이 뚜렷하게 관찰되고 있다((e)에서 화살표로 표시). 즉, 심도 약 13m 상부에 위치한 수진기배열 범위에서는 상대적으로 낮은 진폭이 관찰되고 있을 뿐만 아니라 동시에 탄성파 주시도 다소 빠르게 나타나고 있다. 이러한 현상은 바로 다음과 같이 해석될 수 있다. 즉,

- 만약 탄성파 전달과정에서 단지 한 개의 파일만이 놓여 있다면 탄성파 에너지 약화는 대단히 미약할 것으로 기대된다. 그러나 탄성파가 여러 개의 파일을 지나갈 경우는 파일에 의한 산란 현상으로 인하여 본 탐사 기록에서 보여주는 괄목할만한 진폭 약화가 관찰될 수 있는 것이다.
- 한편, 밀집된 파일 매설은 지반을 보강하는 기능을 갖게 되며 이는 바로 탄성파속도를 높이는 효과를 초래한다.

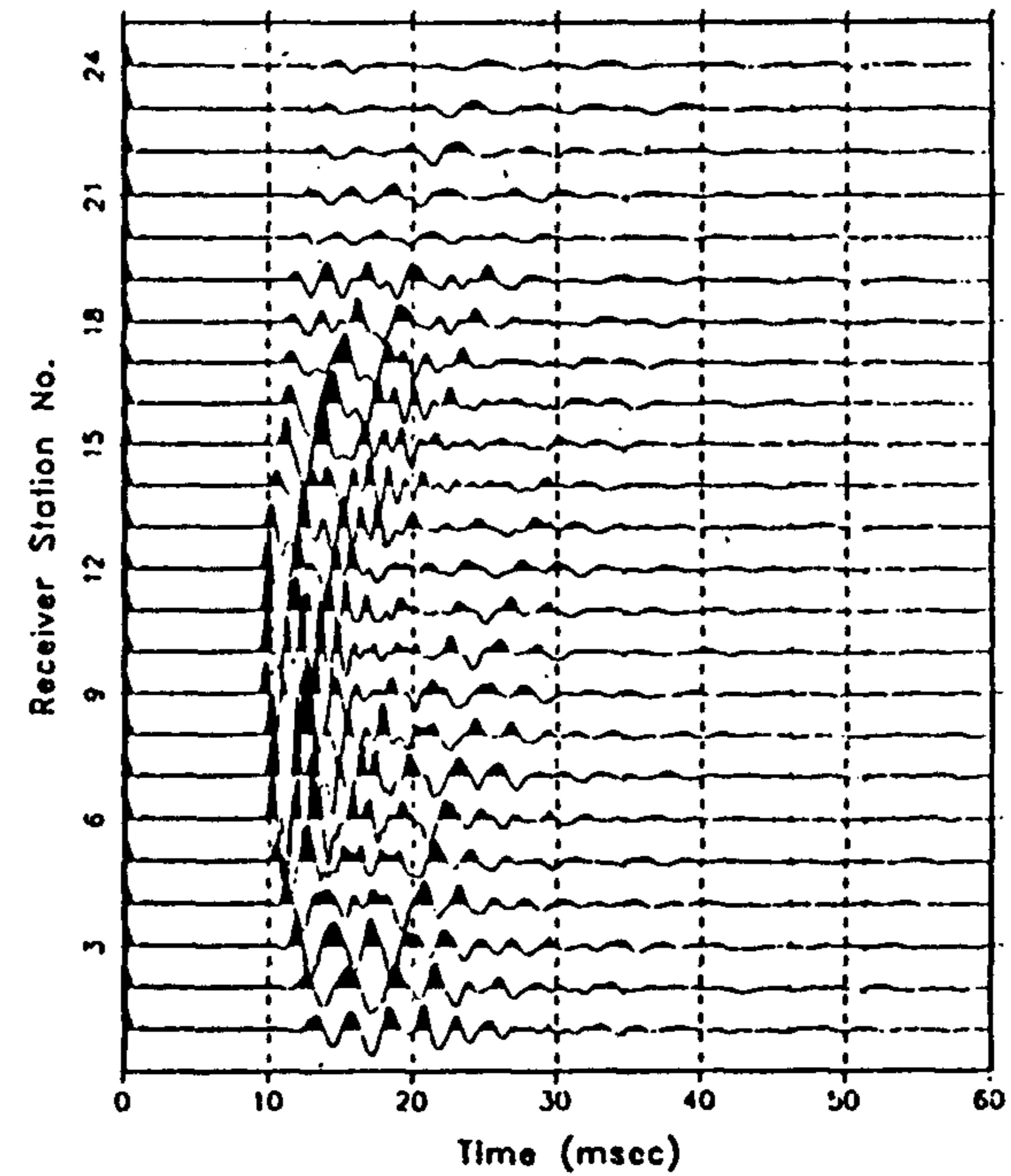
다음은 파일 하단부를 재검증하기 위하여 상기 단면 측정데이터로부터 Fig. 128에 나타난 파선들에 대응하는 기록(trace)를 발췌하여 나타냄(Fig. 129의 왼쪽부분)과 동시 그에 따른 진폭 스펙트럼(Fig. 129의 오른쪽부분)을

Kwaebeob tomography data (Survey No. 612)
S(B1) - R(B2), S No.= 3, R No.= 1 - 24



(a)

Kwaebeob tomography data (Survey No. 612)
S(B1) - R(B2), S No.= 4, R No.= 1 - 24



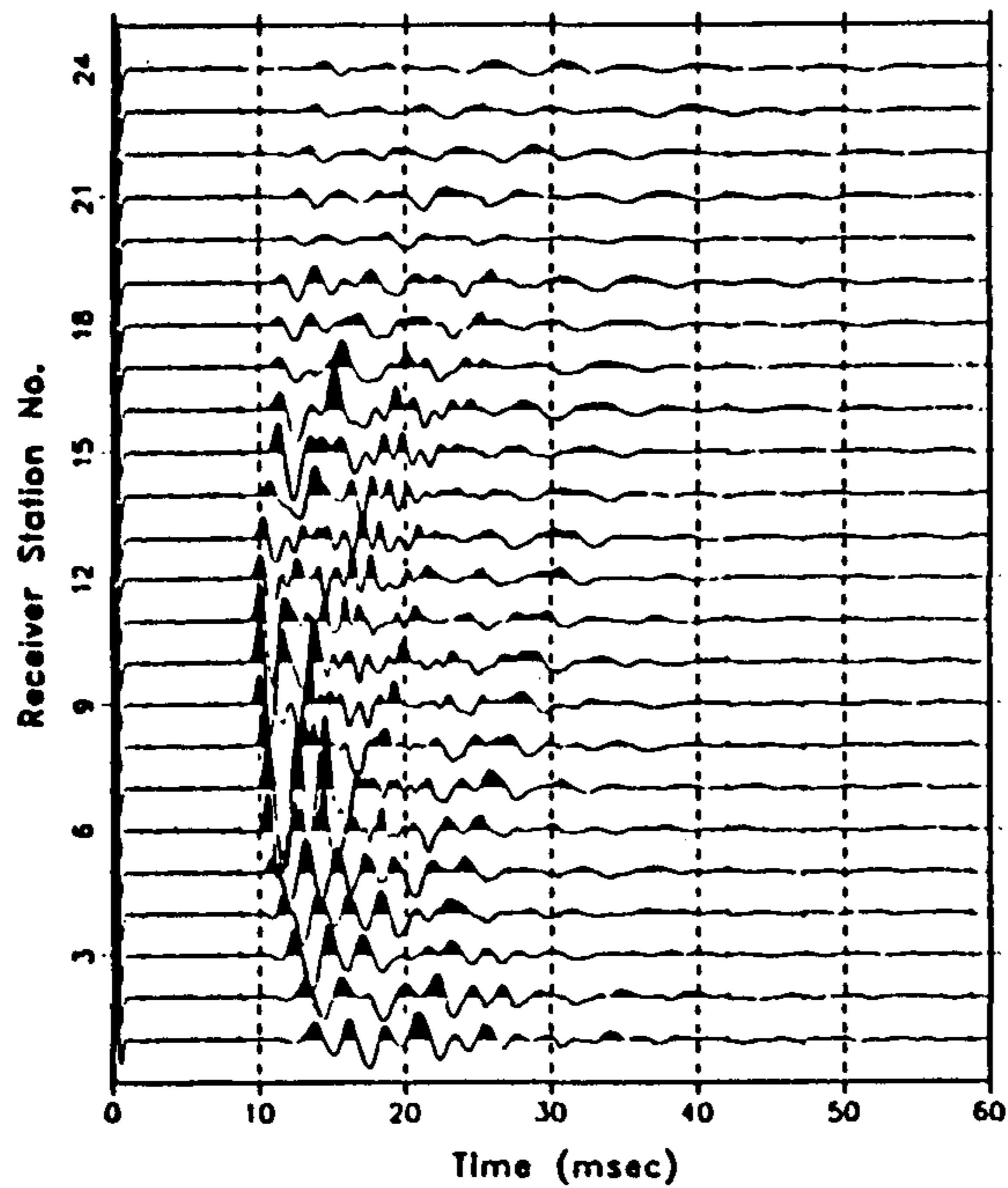
(b)

Fig. 127. Kwaebeob geotomographic survey.

Examples of crosshole data acquired from the B1-B2 cross section.

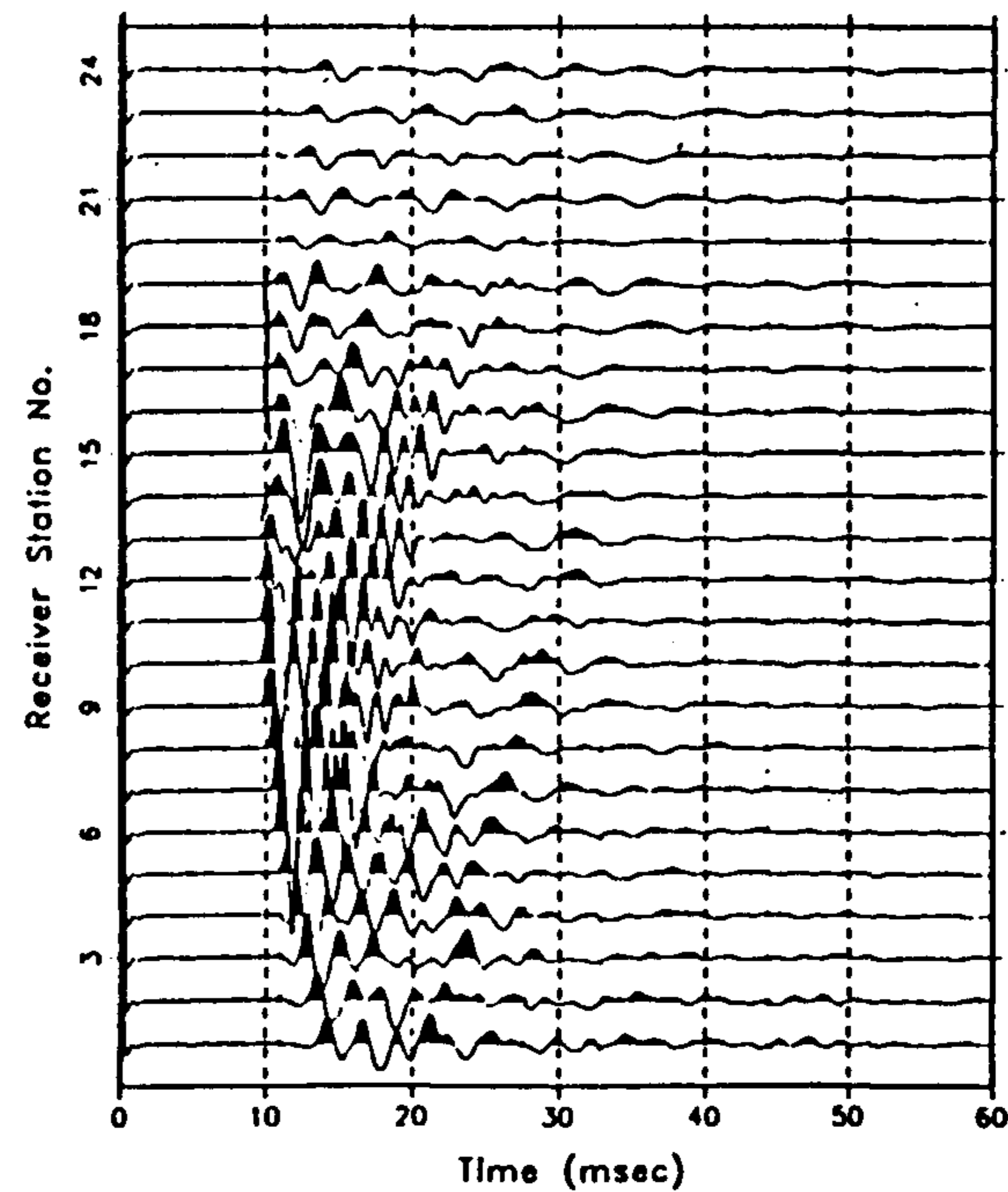
(a) shot gather 3 (b) shot gather 4.

KwaeBcob tomography data (Suvey No. 612)
S(B1) - R(B2), S No.= 5, R No.= 1 - 24



(c)

KwaeBcob tomography data (Suvey No. 612)
S(B1) - R(B2), S No.= 6, R No.= 1 - 24



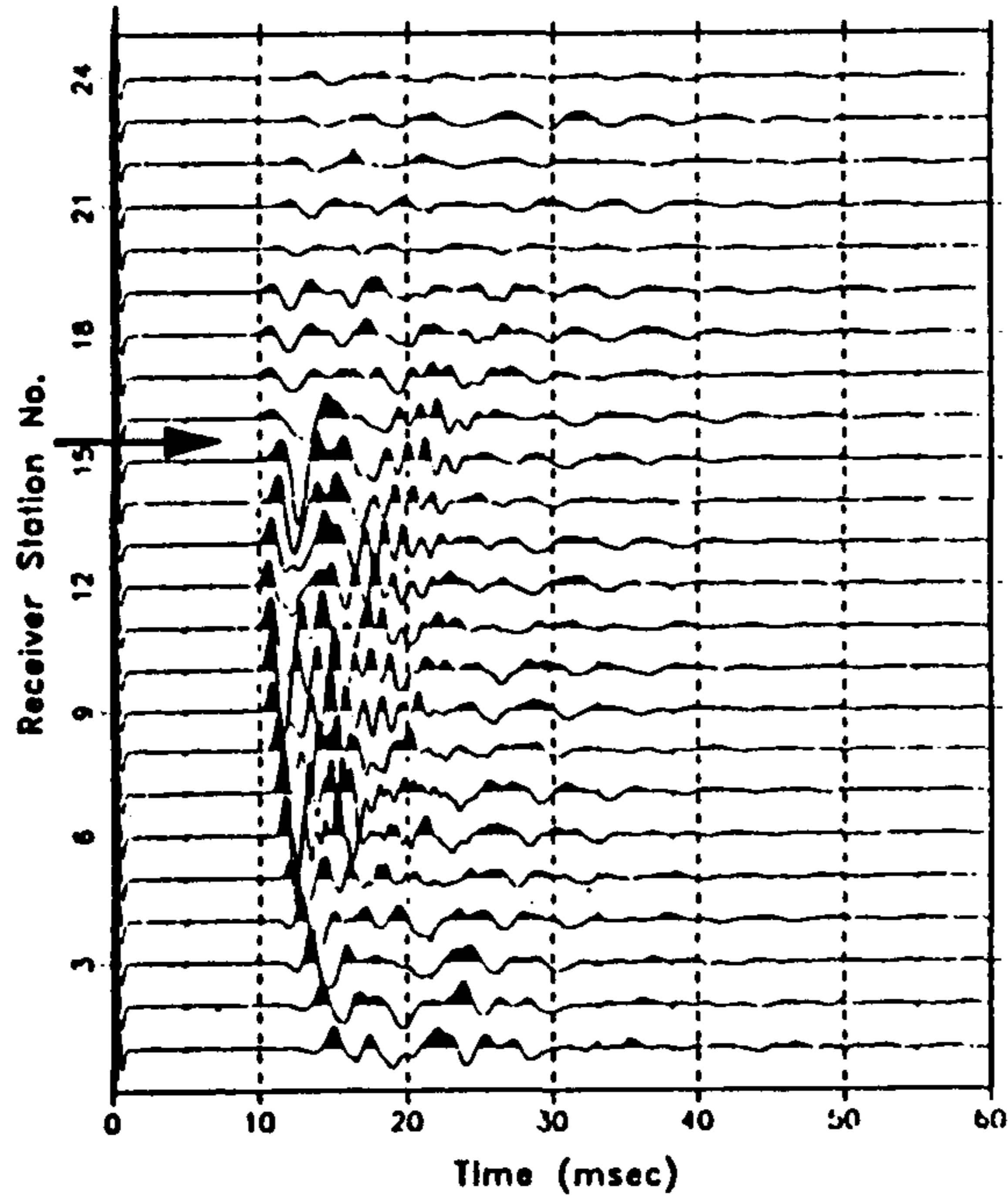
(d)

Fig. 127. (continued).

(c) shot gather 5

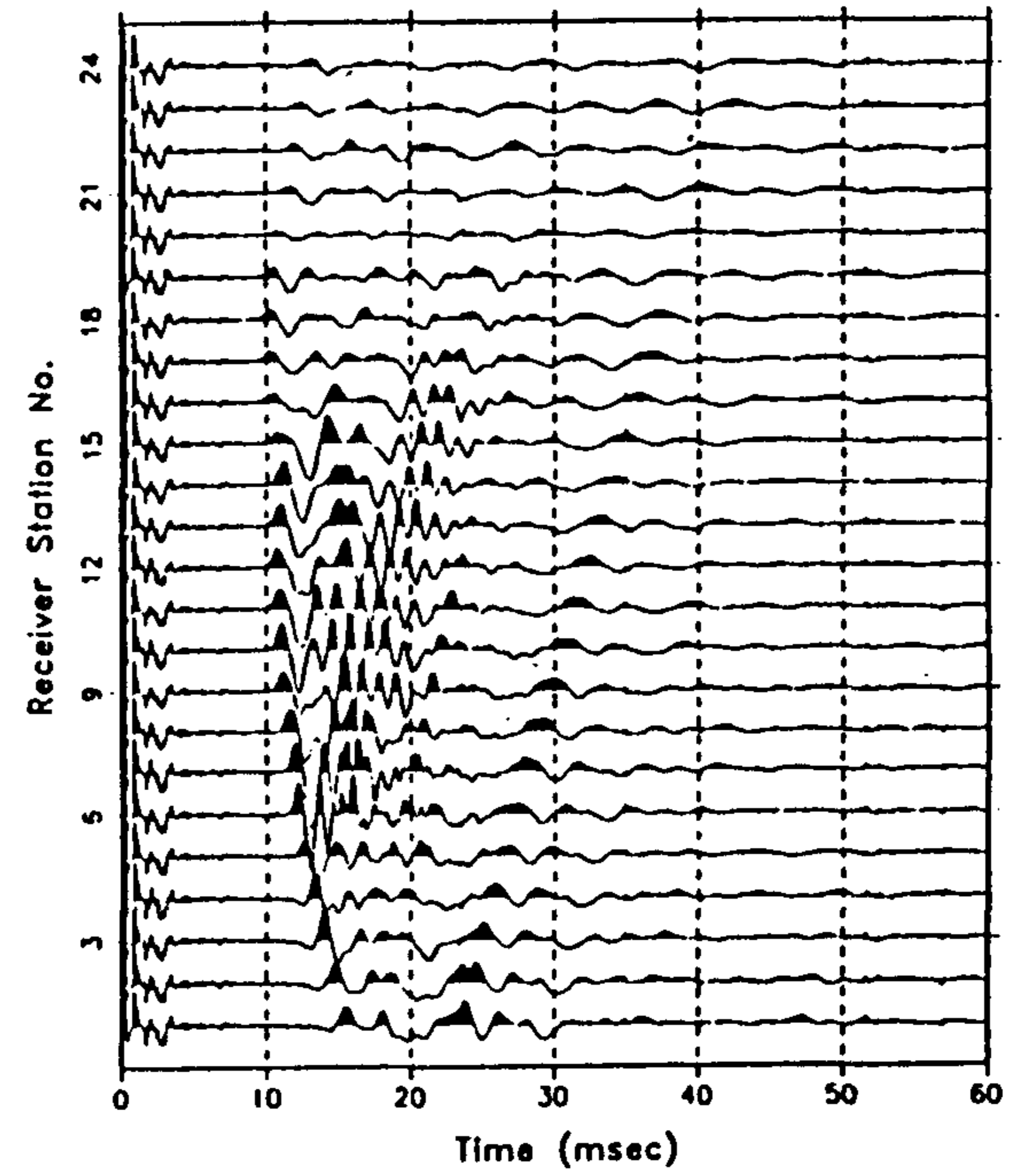
(d) shot gather 6.

Kwaebeob tomography data (Survey No. 612)
S(B1) - R(B2), S No.= 7, R No.= 1 - 24



(e)

Kwaebeob tomography data (Survey No. 612)
S(B1) - R(B2), S No.= 8, R No.= 1 - 24



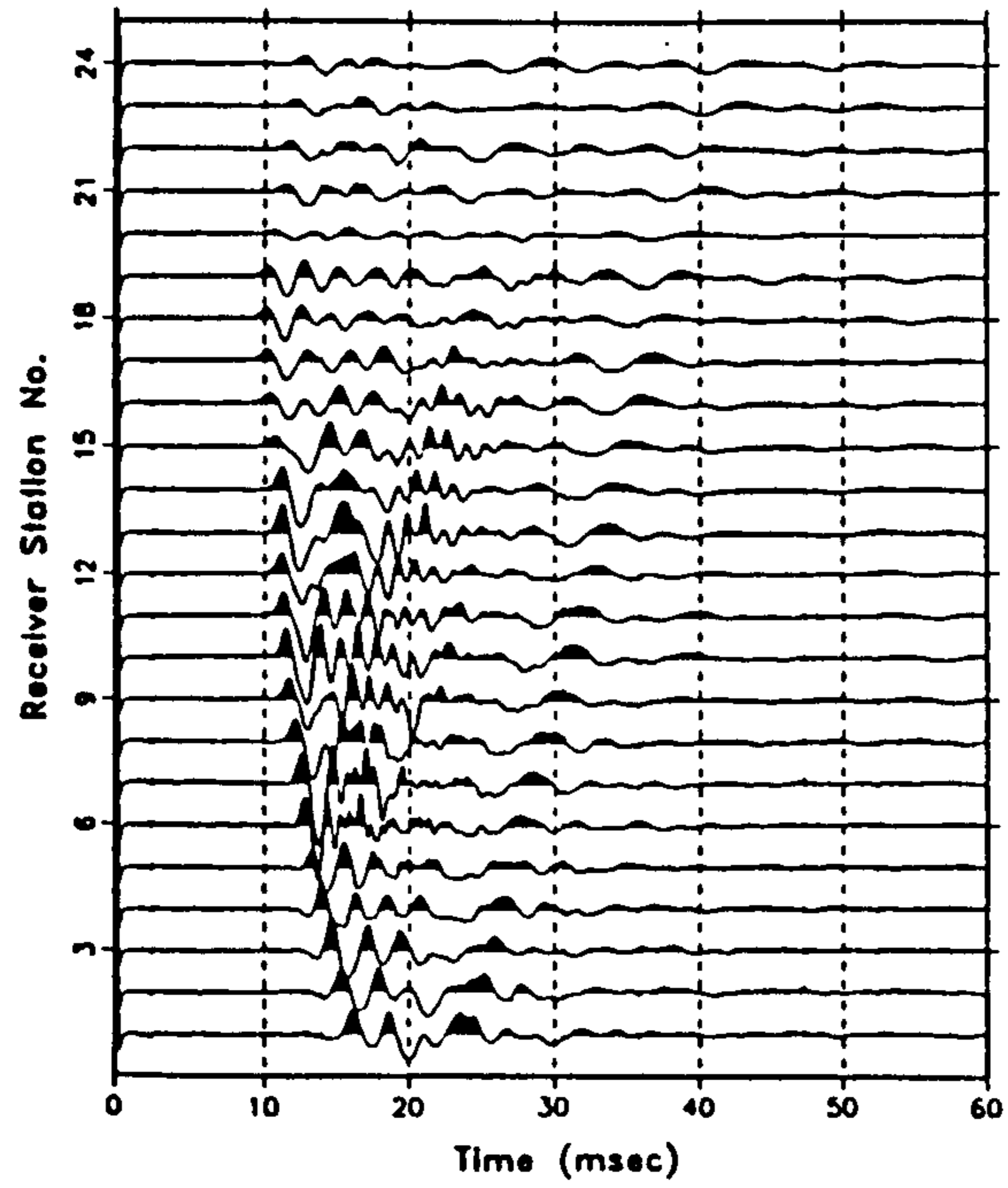
(f)

Fig. 127. (continued).

(e) shot gather 7

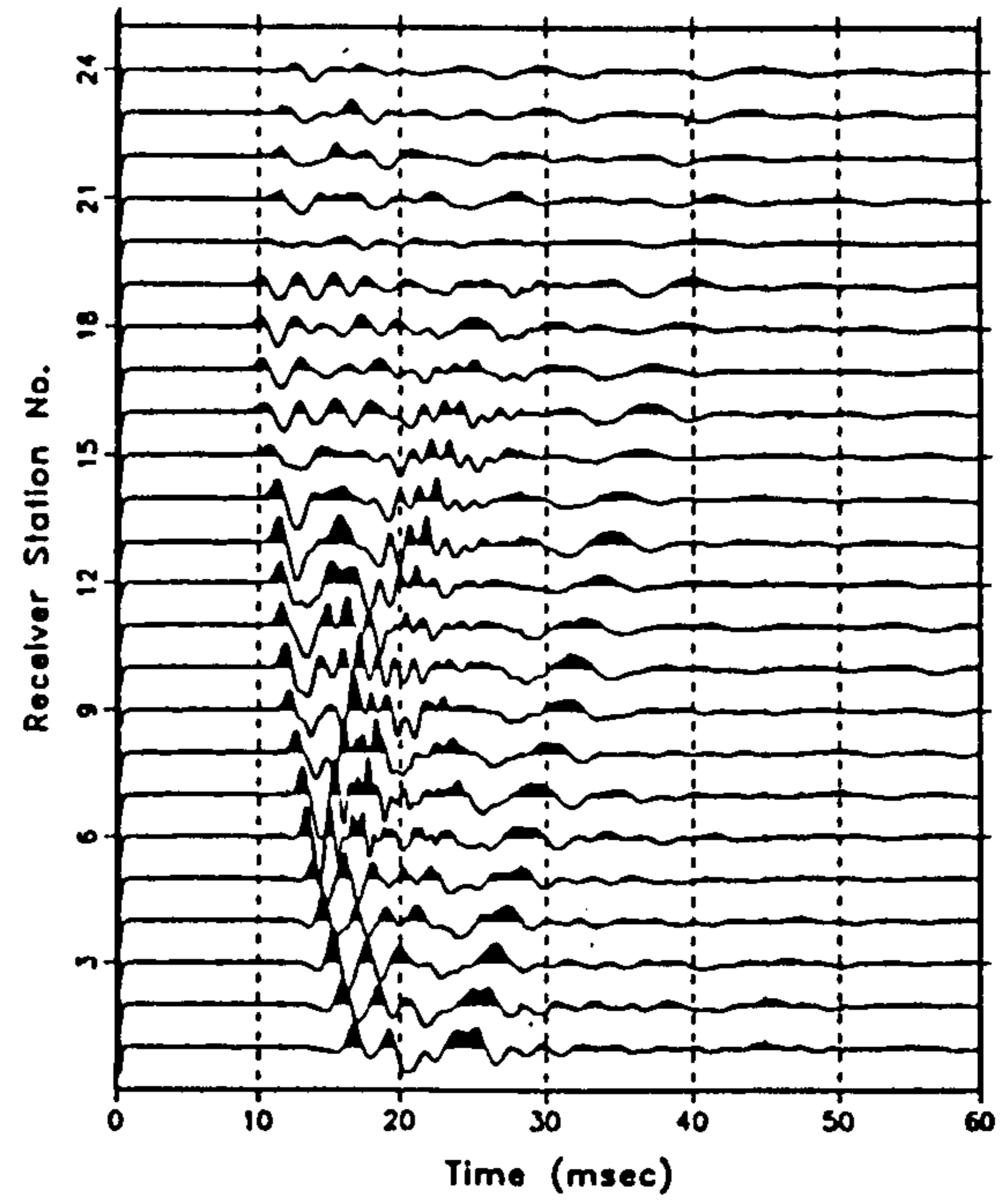
(f) shot gather 8.

KwaeBeob tomography data (Suvey No. 612)
S(B1) - R(B2), S No.= 9, R No.= 1 - 24



(g)

KwaeBeob tomography data (Suvey No. 612)
S(B1) - R(B2), S No.= 10, R No.= 1 - 24



(h)

Fig. 127. (continued).

(g) shot gather 9

(h) shot gather 10.

Geometry for Tomographic Analysis

Pusan Kwaebeob Survey No. : 612

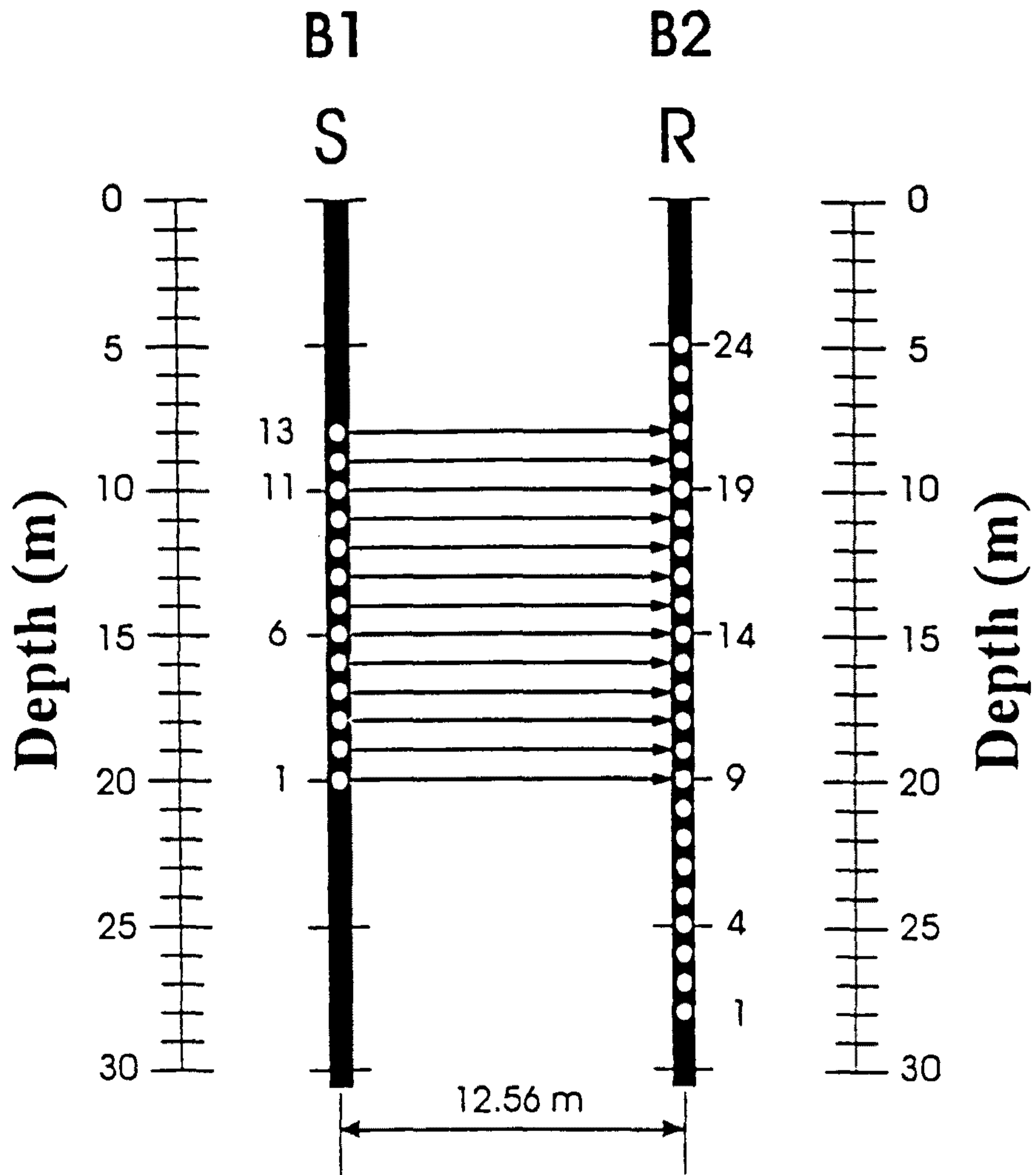


Fig. 128. Kwaebeob geotomographic survey.
Shown are all raypaths perpendicular to the borehole axis.

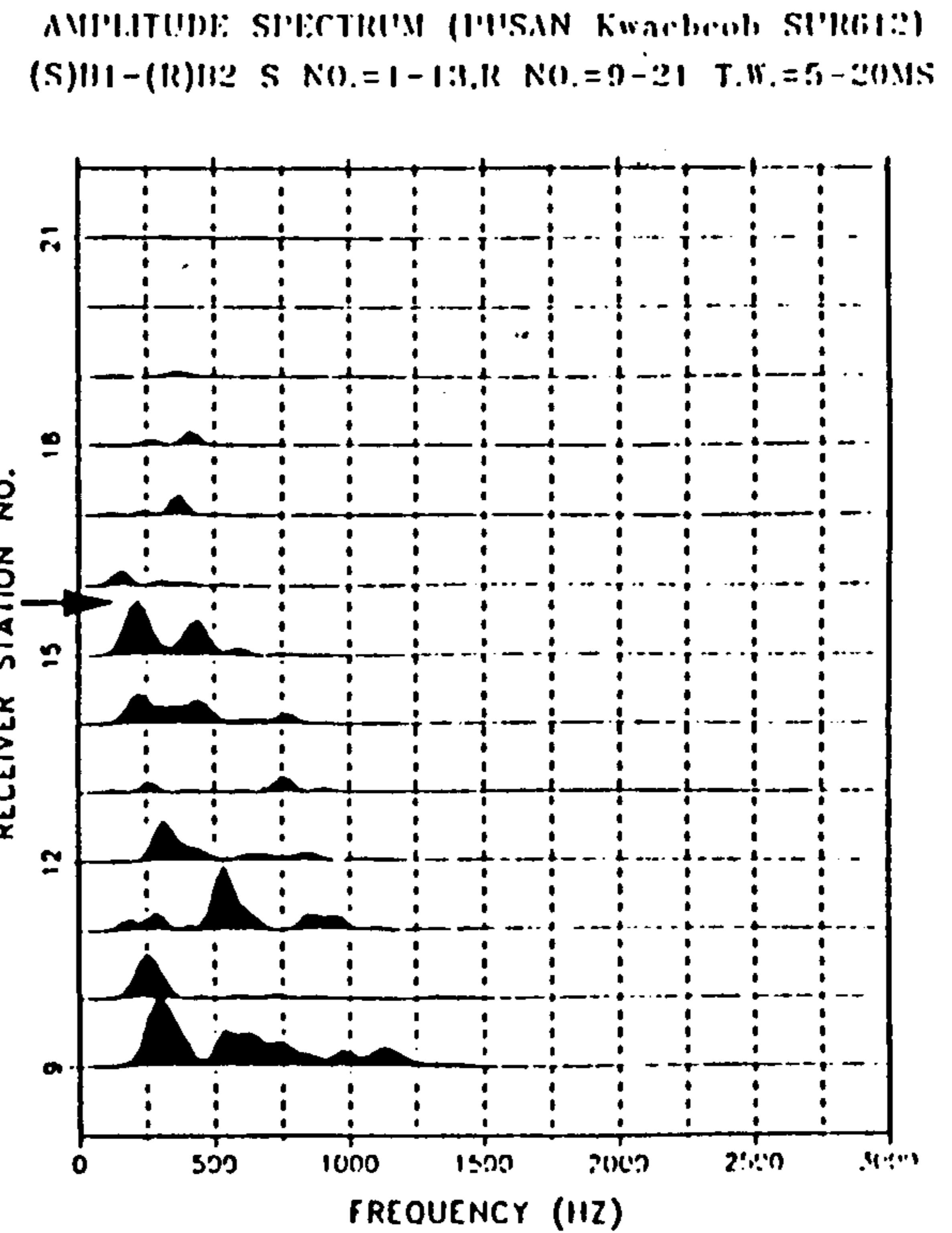
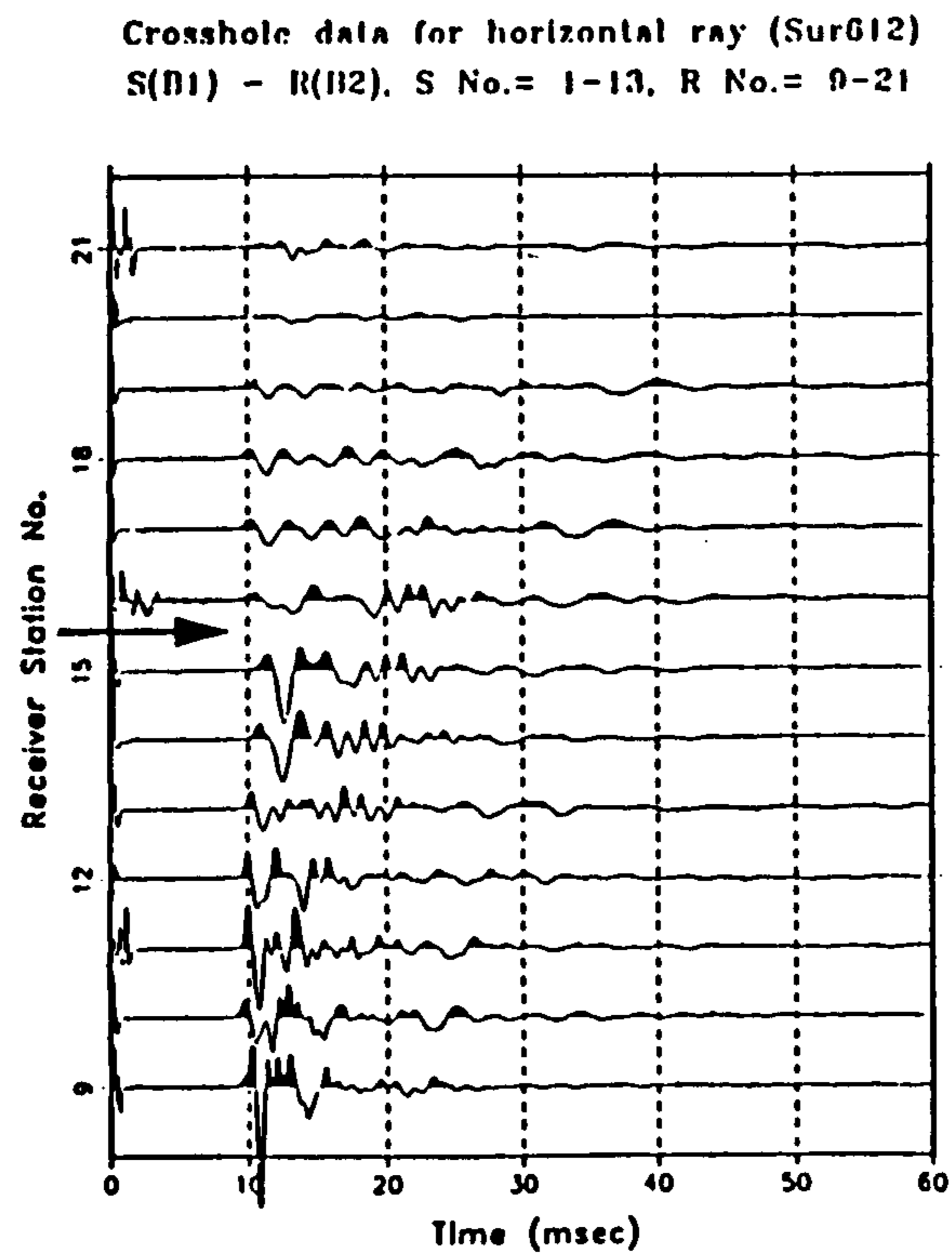


Fig. 129. Kwaebeob geotomographic survey.
Crosshole data and the corresponding frequency content derived
from the measuring procedure in Fig. 128.

상호 대별하였다. 여기에서도 수진기 번호 15~16사이에서(화살표로 표시) 진폭 및 주파수 내용의 큰 변화가 발생되고 있다.

Fig. 130은 B3-B4 단면측정을 위한 발생원 및 수진기 배열상태를 보여주고 있으며 동시에 측정데이터(raw data) 분석(예: Fig. 131(b) 참조)에 의한 지층경계면을 화살표로 나타내고 있다. 그런데 이러한 경계면은 B1-B2 단면측정에서 추정된 파일 하부 경계면(심도 약 13m)과는 별개의 것이다. 발생원이 하부에 놓여있을 경우(Fig. 131(a) 및 (b))에는 파일 하부경계면(대체로 trace No. 12 주위)에 의한 어떠한 특별한 파형의 변화가 인식되지 않고 있다. 그러나, 발생원이 상향되어 가상된 경계면 주위에 놓여 있게 되었을 때에는(shot No. 15~18) 이전과 유사한 특유의 파형변화(Fig. 131(c)에서 화살표로 표시) 내지 진폭 약화(Fig. 131(c) 및 (d) 참조)가 관찰되고 있다. 본 기록에서 더욱 주목할 점은 Fig. 132에서 화살표로 표시한 특이한 파의 도달이 인식되고 있다는 것이다. 경험에 의하면 이러한 주시적으로 거의 동일한 파의 도달은 예를 들어 시추공 B4에 인접하여 빈 파일의 존재할 경우 그로부터 유발된 탄성파가 동시에 수진기에 도달된 것으로 해석될 수 있다. 이러한 데이터 분석은 바로 파일 하단부에 대한 직접적인 정보를 제시하는 것이 된다.

Fig. 133은 본 탐사에서 얻어진 모든 데이터의 분석결과를 바탕으로 하수관 하부 지질상태를 나타내고 있다.

① 지질 경계면

탐사구간 하부 지질상태는 지질경계면(실선으로 표시)이 대체로 지표면에 평행한 하상 퇴적층을 보여주고 있다.

Geometry for Tomographic Analysis

Pusan Kwaebeob Survey No. : 618

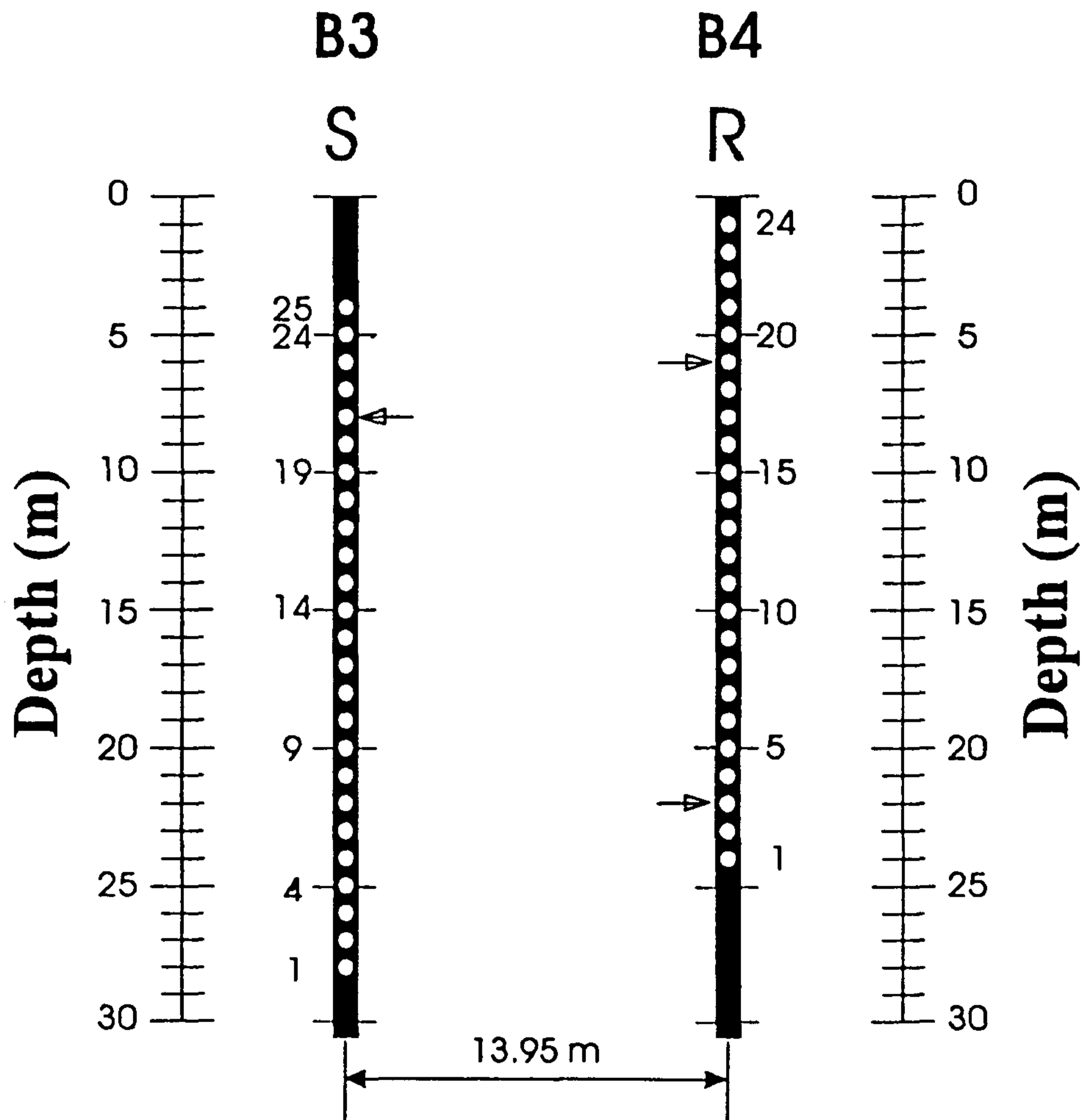
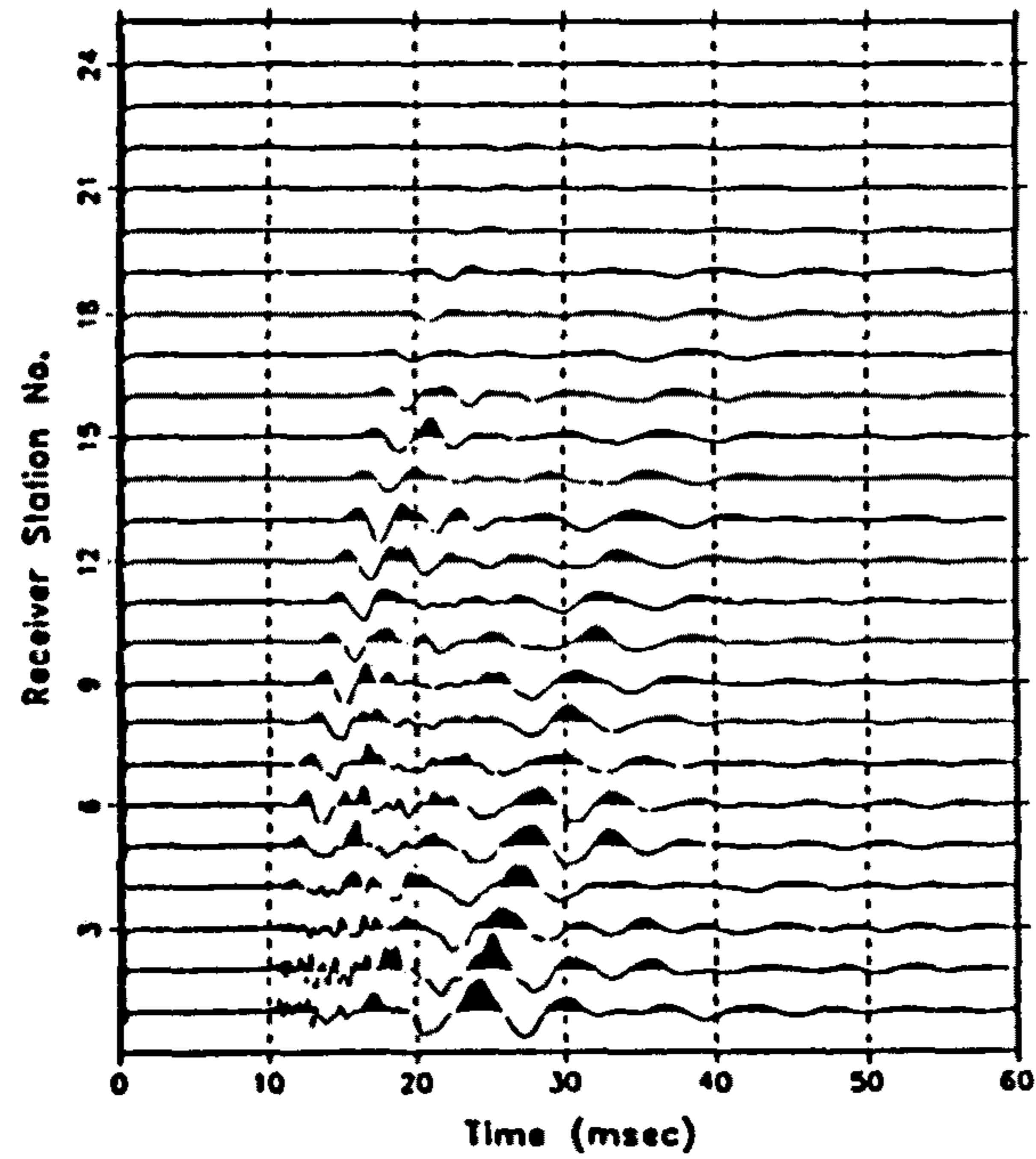


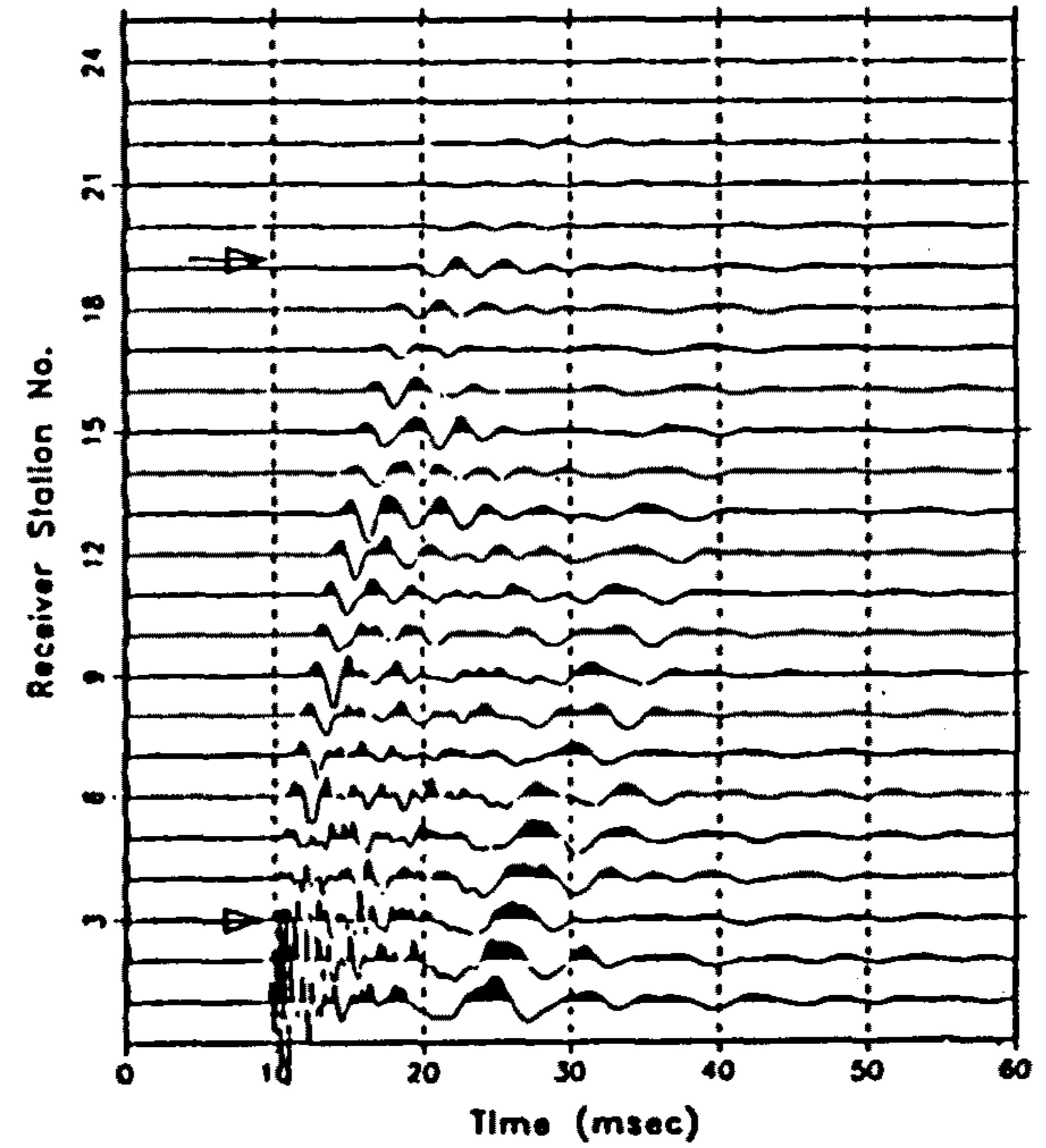
Fig. 130. Kwaebeob geotomographic survey.
Source and receiver locations for the crosshole seismic survey.

Kwaebeob tomography data (Survey No. 610)
S(03) - R(04), S No.= 4, R No.= 1 - 24



(a)

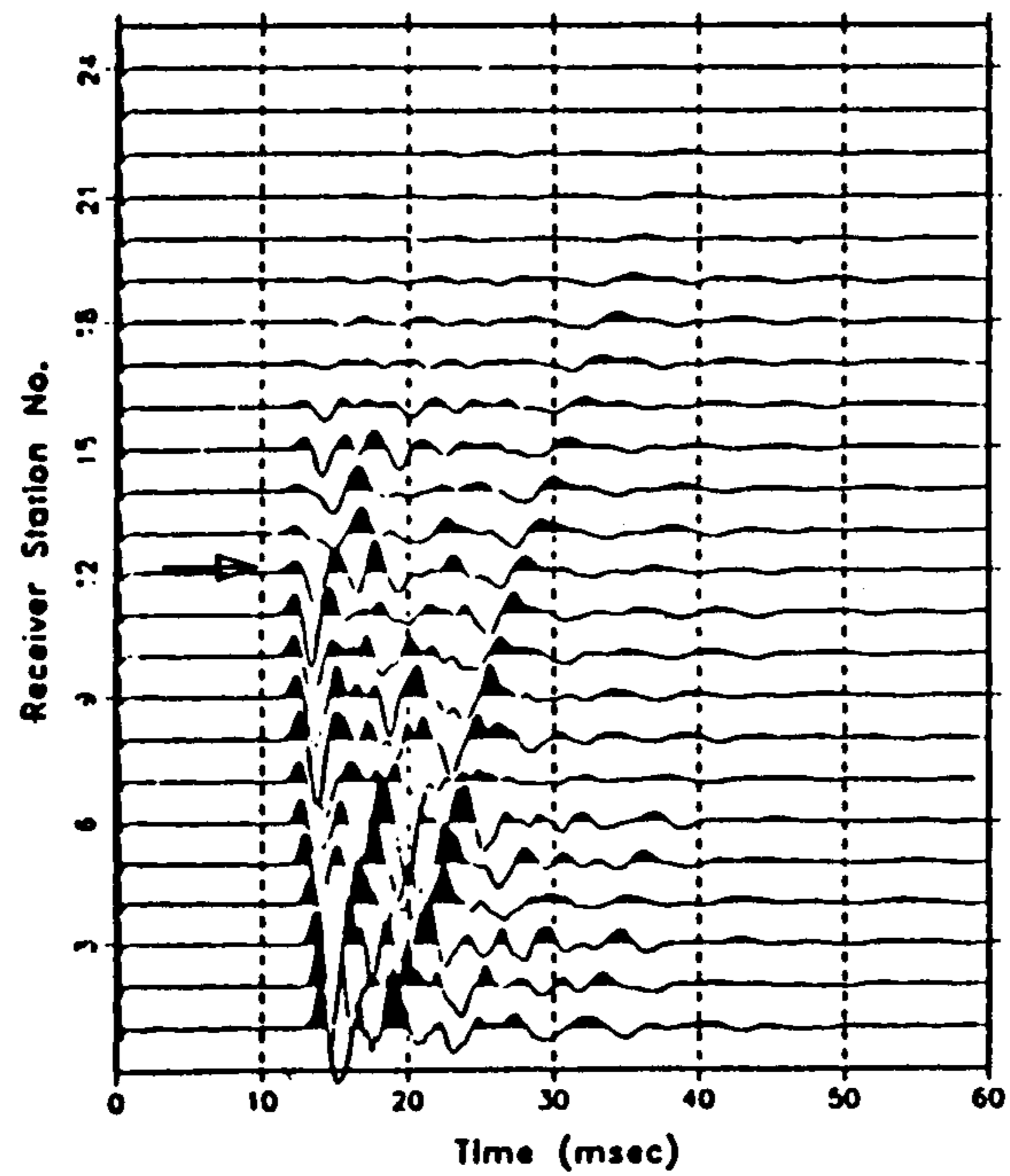
Kwaebeob tomography data (Survey No. 610)
S(03) - R(04), S No.= 5, R No.= 1 - 24



(b)

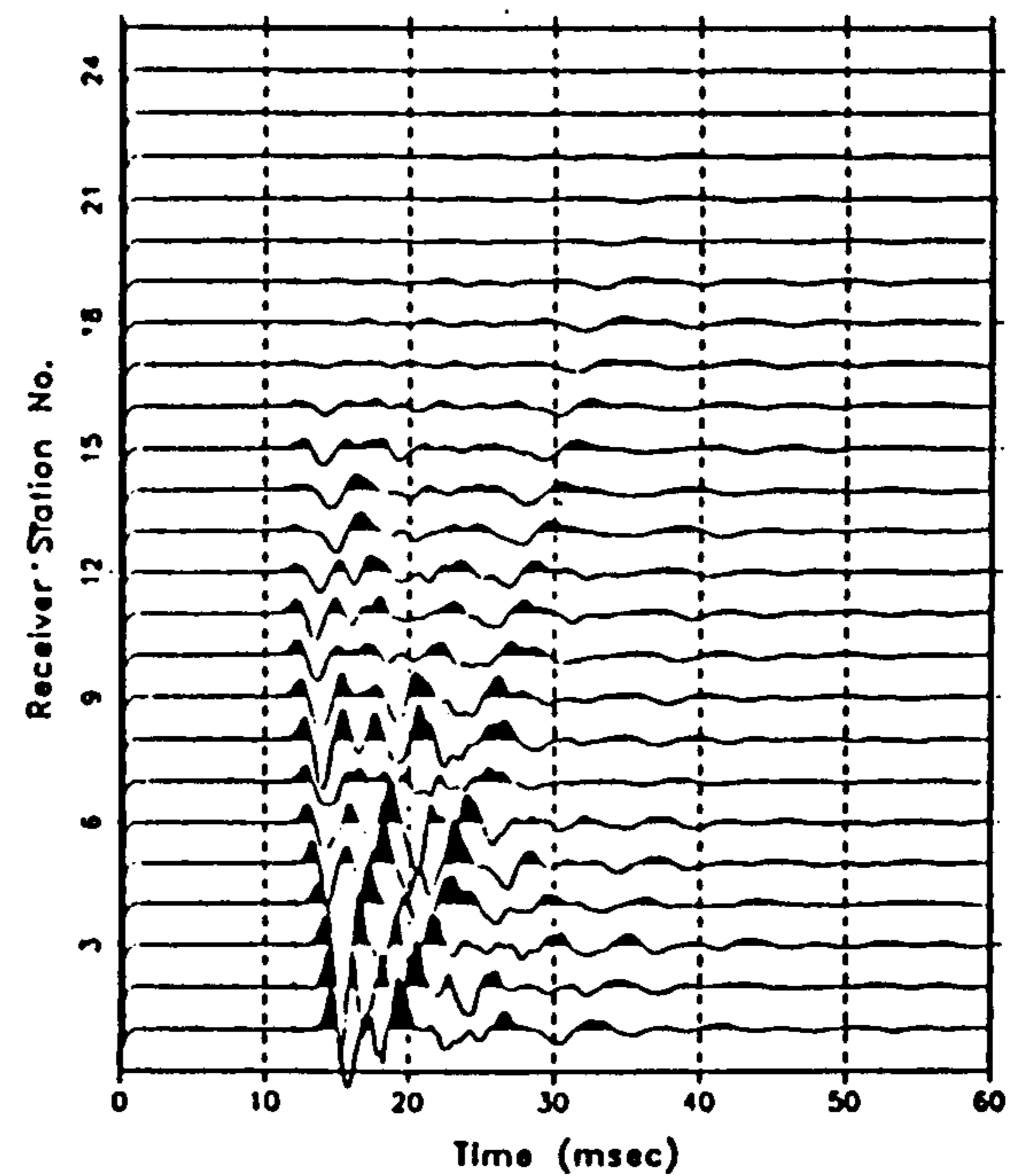
Fig. 131. Kwaebeob geotomographic survey.
(a) shot gather 4 (b) shot gather 5

Kwaefleob tomography data (Survey No. 618)
S(03) - R(04), S No.= 15, R No.= 1 - 24



(c)

Kwaefleob tomography data (Survey No. 618)
S(03) - R(04), S No.= 16, R No.= 1 - 24



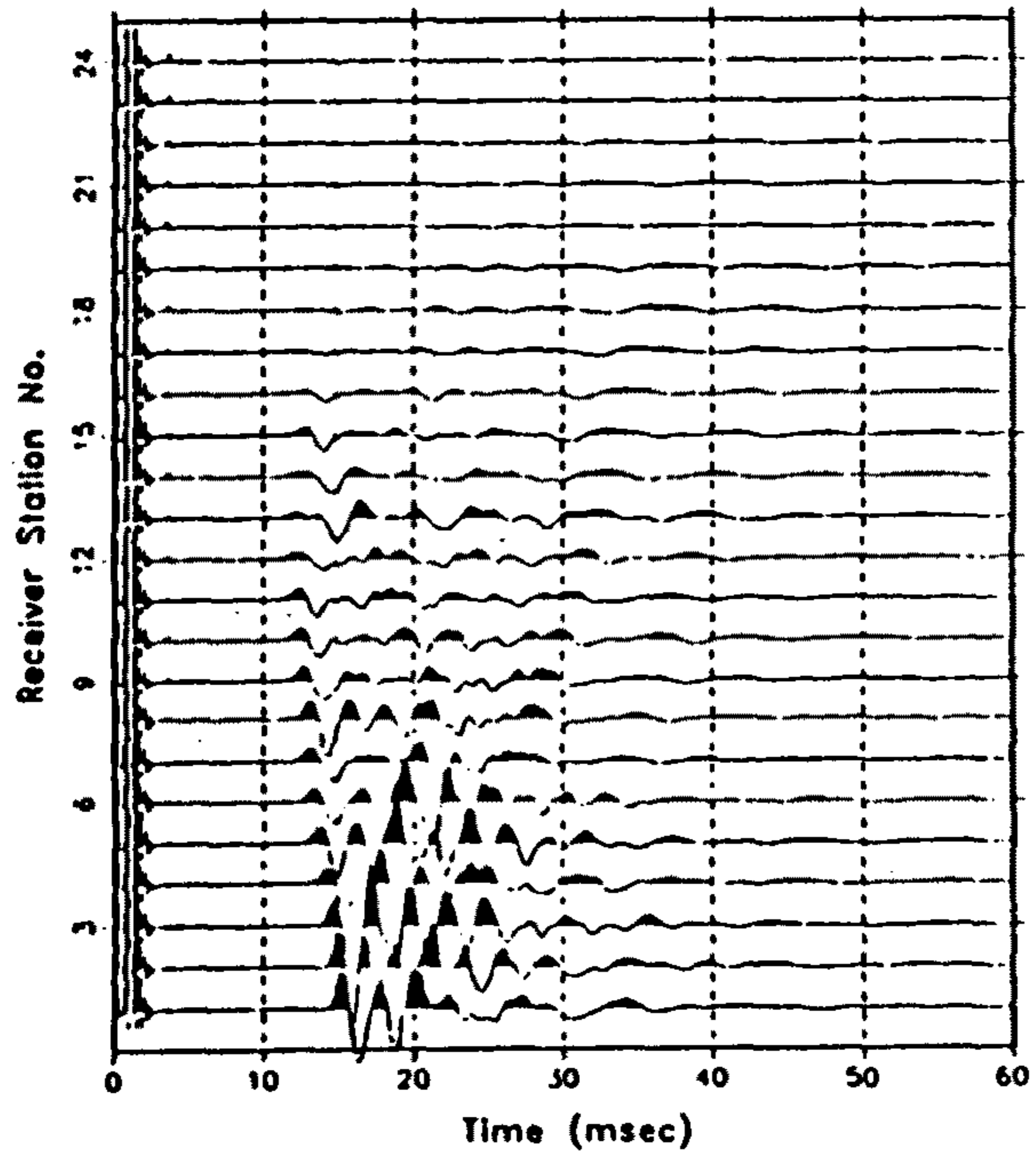
(d)

Fig. 131. (continued).

(c) shot gather 15

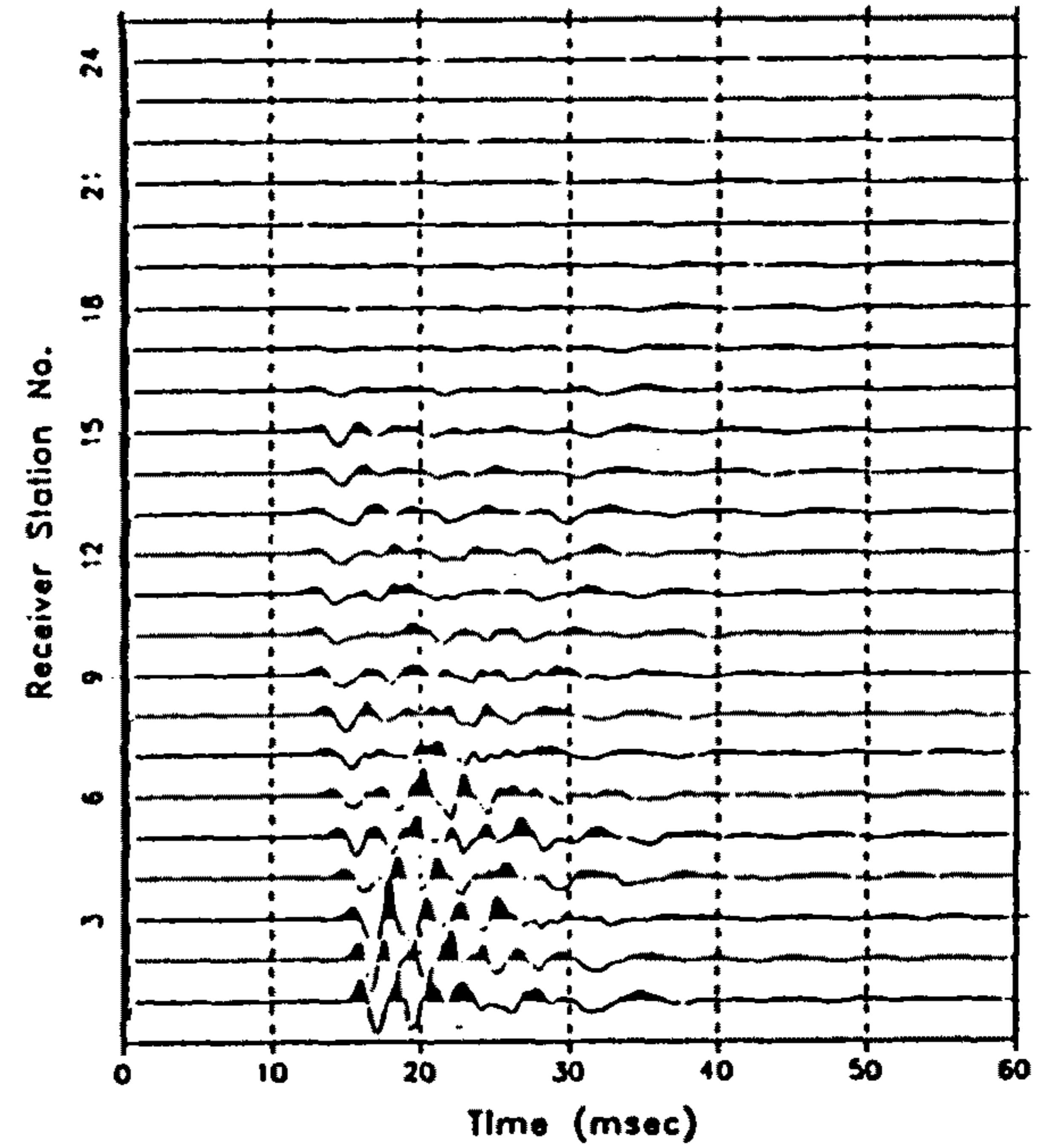
(d) shot gather 16

KwaeBeob tomography data (Survey No. 610)
S(B3) - R(B1), S No.= 17, R No.= 1 - 21



(e)

KwaeBeob tomography data (Survey No. 610)
S(B3) - R(B1), S No.= 18, R No.= 1 - 21



(f)

Fig. 131. (continued).

(e) shot gather 17

(f) shot gather 18

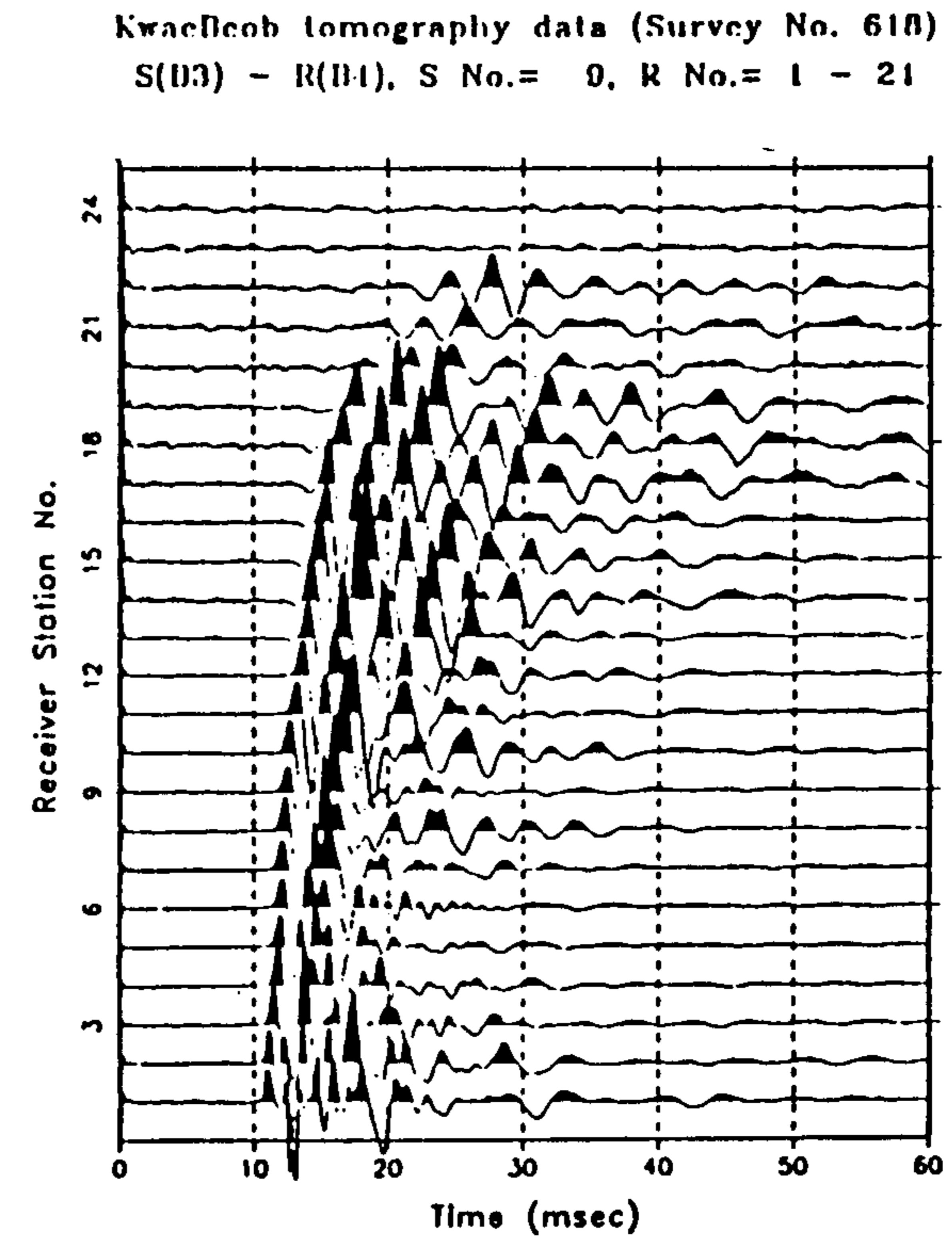
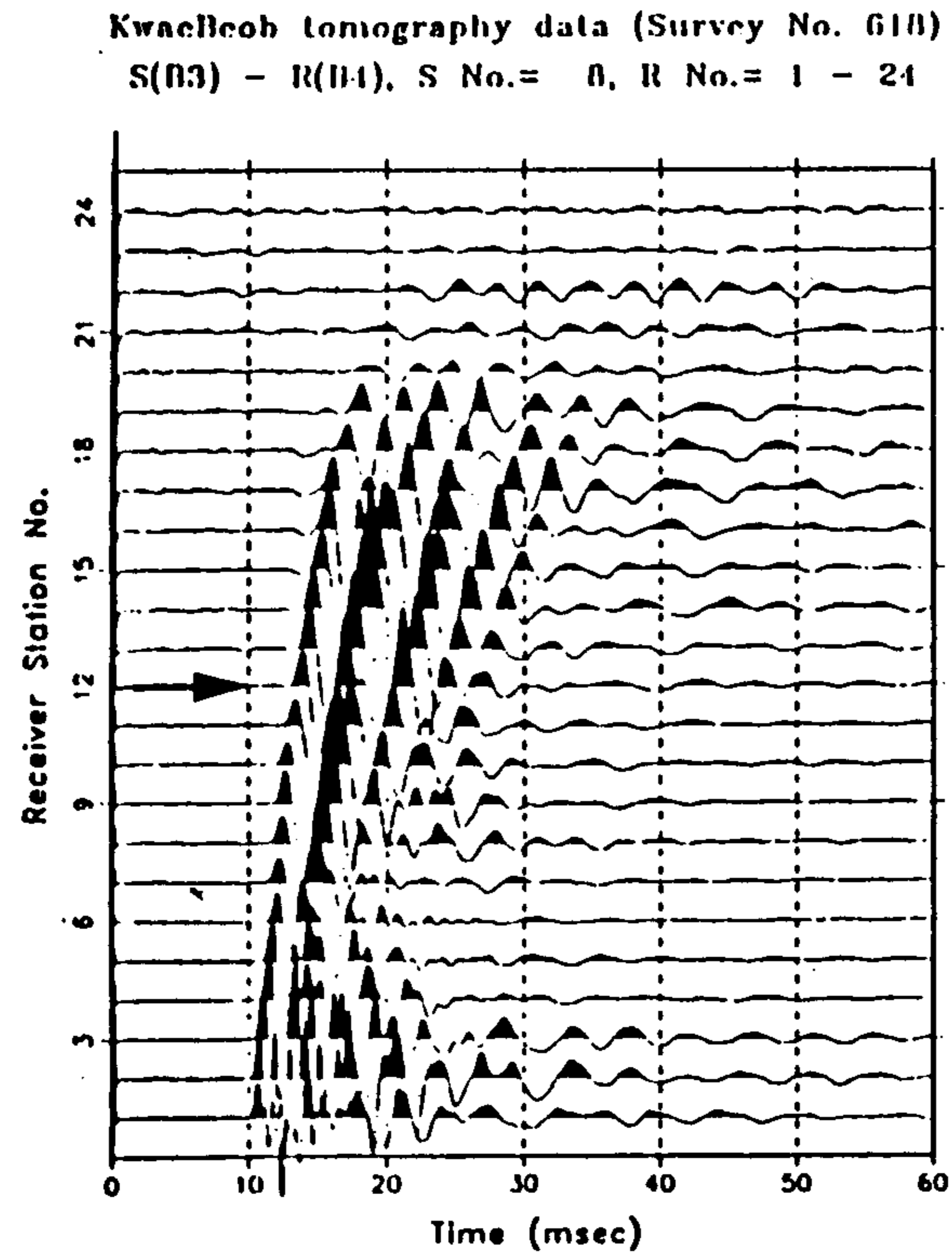


Fig. 132. Kwaebeob geotomographic survey.
Crosshole data (shot gather 8, 9) acquired from the B3-B4 cross section.

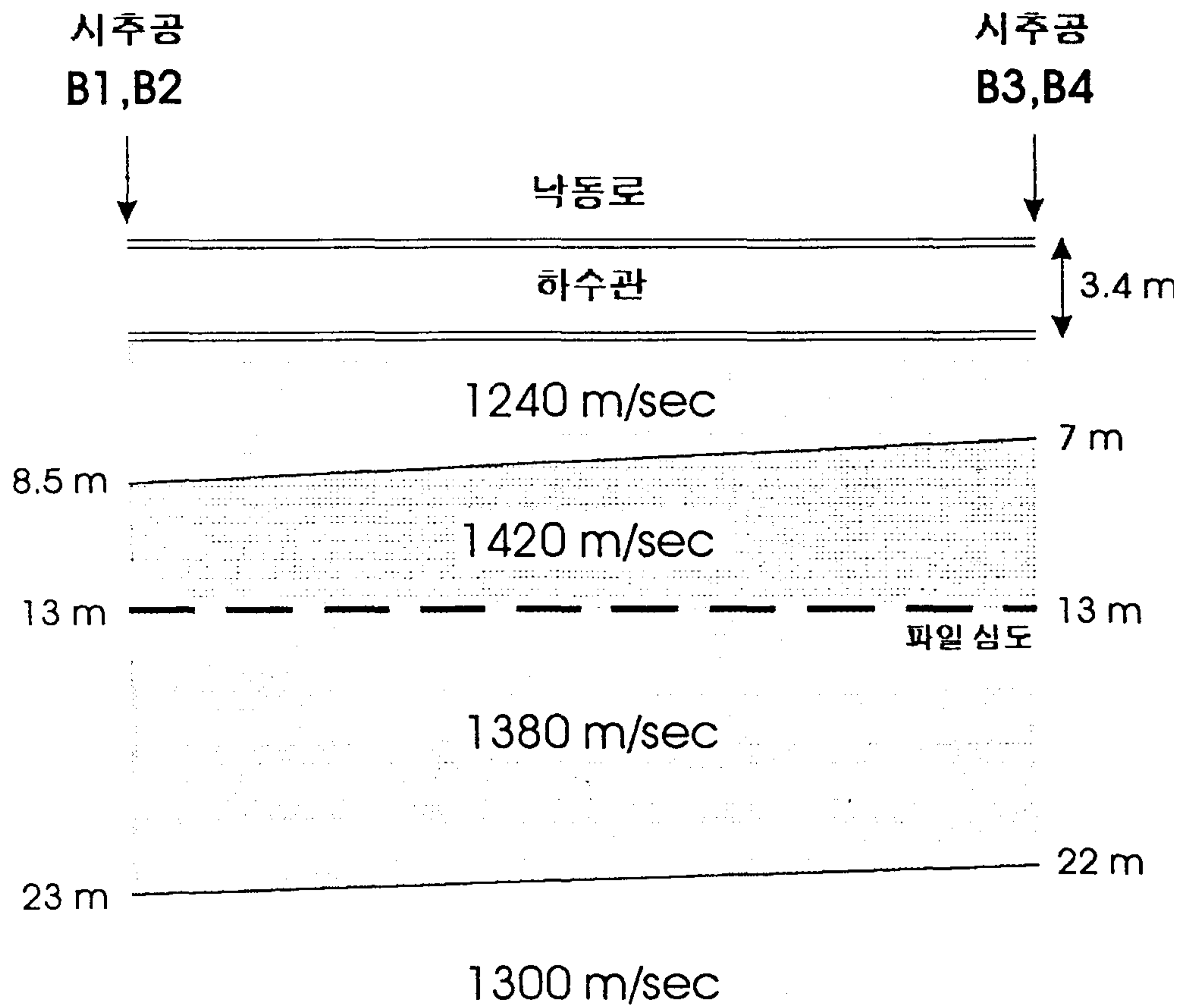


Fig. 133. Kwaebeob geotomographic survey.
 Shown are the interpreted physical properties of rocks and the estimated pile depth in the Kwaebeob survey area.

② 파일 하부 경계면 : 심도 약 13m

- 심도 13m 이하에서 전달되는 탄성파는 대체로 일관성을 띤 파형을 갖고 있다. 반면, 발생원 위치가 심도 약 13m를 경계로 상향되면 우선 수진기 시추공에 도달되는 탄성파의 에너지는 급격히 약화된다.
- 발생원이 심부로부터 심도 13m에 접근됨에 따라 수진기 시추공 심도 13m 주위에 도달되는 탄성파의 파형에 큰 변화가 관찰된다.
- B3-B4 단면측정에서는 시추공 B4에 인접한 파일에 의해 초래된 것으로 사료되는 파의 도달이 관찰된다.
- 지표면에 평행한 파선에 대한 기록에서 심도 13m를 경계로 탄성파의 진폭 및 파형의 변화가 관찰된다.

③ 파일 크기, 수량 및 간격

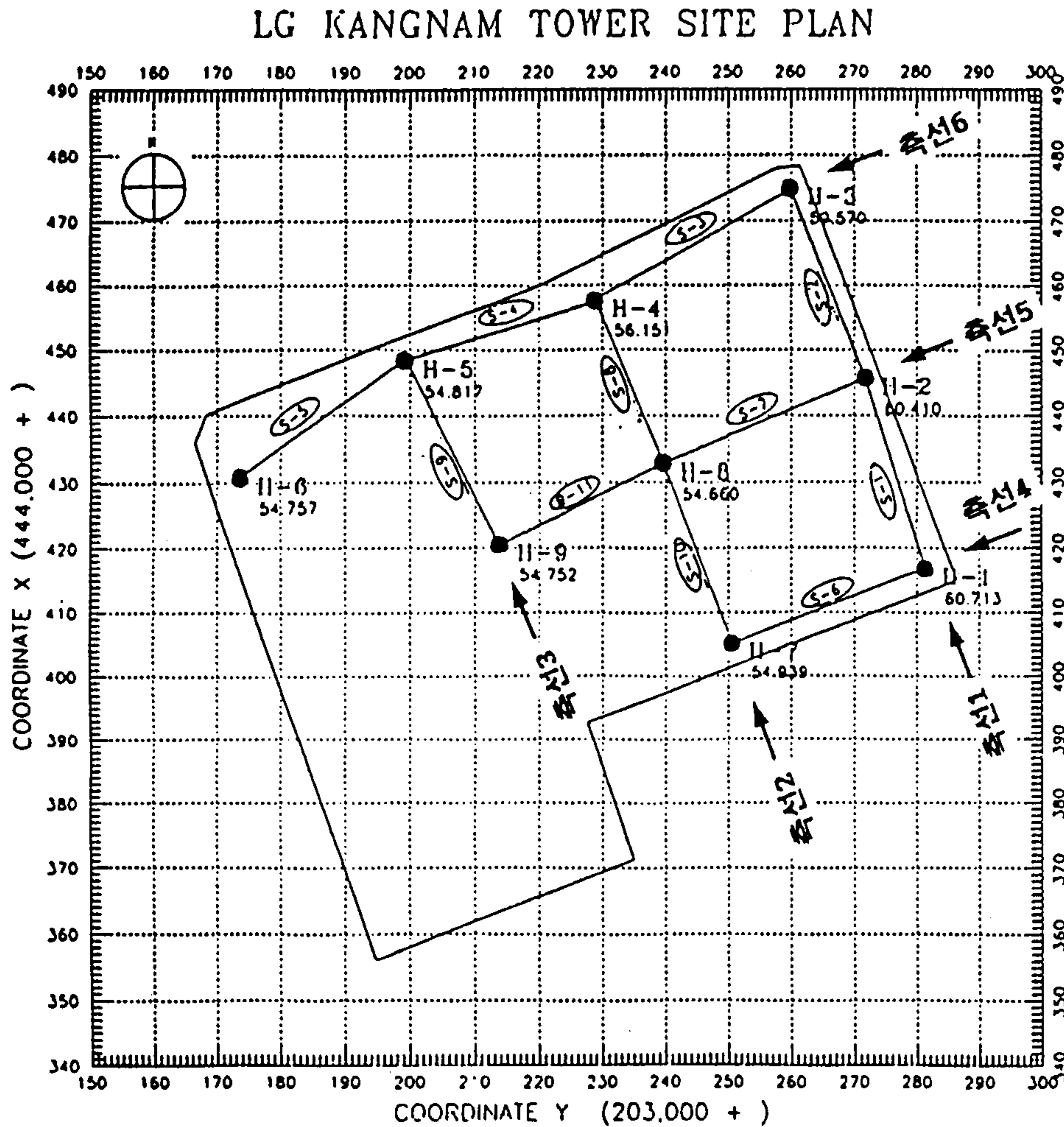
- 주어진 탐사 여건에서 파일의 크기 및 수량에 대한 직접적인 규명은 거의 불가능하다. 그러나, 측정데이터의 상대 비교 내지 경험은 어느 정도 그에 대한 바람직한 추정을 가능하게 하였다.
- 각 단면측정에서 관찰되는 탄성파의 진폭변화는 파일의 크기가 탄성파 파장(3m~5m)에 비추어 대단히 작은 것으로 판정되며 또한 파의 중첩 현상은 탄성파 전달과정에서 여러개의 파일이 놓여 있음을 시사하는 것이 된다.
- 상기 데이터 관찰 및 이에 대한 경험에 의하면 파일의 크기는 $0.5m(1/6\lambda \sim 1/10\lambda)$, λ : 탄성파 파장) 미만이 될 것으로 추정된다. 한편, 탄성파의 중첩 현상에 비추어 인접된 파일의 간격은 1λ 보다 다소 작은 2m~4m로 추정된다.

3. 대형빌딩 지반조사

토모그래피 탐사는 이미 텔레뷰어가 응용되었던 현장(Fig. 67 참조)에서 수행되었다. 본 탐사에서는 도합 11개 단면(S-1~S-11)에 대한 측정이 이루어졌다. 한편, 지반 상태를 보다 쉽게(포괄적으로) 파악하기 위하여 각 단면에 대한 토모그램을 개별적으로 제시하기 보다는 오히려 흥미가 되는 축선(축선 1~축선 6)을 선정하여(Fig. 134 참조) 그와 상관되는 각 토모그램들을 병합하여 나타내고자 하였으며 본 보고서에는 단지 축선 1에 대한 토모그래피 탐사 결과만 요약하고자 한다. 이에 앞서, 우선 본 탐사지역에서 관찰될 수 있는 주파수 내용을 살펴보기로 한다. Fig. 135는 하나의 보기(S-4 단면측정)로서 발생원이 각각 심도 약 47m 및 30m에 놓여 있게 될 경우(시추공 H-4) 측정된 48채널 기록(수진기 번호 1~48, 심도 약 52m~4m, 수진기 간격 1m) 및 그에 따른 주파수 내용을 보여주고 있다. 발생원이 심부에서 구사되었을 때는 주파수가 약 1500Hz에 달하는 탄성파 에너지가 관찰되었으나 발생원 심도가 다소 상향된 30m에서는 고주파수 에너지가 거의 소멸되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 136은 토모그래피 단면측정 과정을 파선진로에 의해 나타내고 있다. 예를 들면, 시추공 H-1, H-2 단면측정에는 발생원이 도합 32회 구사되었으며 각 발생원은 48채널 기록을 초래하였다. 즉, 본 단면측정에는 도합 $32 \times 48 = 1536$ traces에 해당하는 방대한 양의 소위 raw data가 기록되었다. 상기 단면측정으로부터 지반상태를 개략적으로 파악하기 위해서는 우선 Fig. 137에서 나타난 바 발생원과 수진기가 동일 심도에서 교신되는 탄성파의 도달을 관찰하는 것이 바람직하다. Fig. 138은 바로 단면측정 데이터로부터 Fig. 137에 해당하는 트레이스들을 발췌하여 나타내고 있다. 일별하

LG KANGNAM TOWER SITE PLAN



● TELE VIEWER

○ GEOTOMOGRAPHY

SECTION DATA

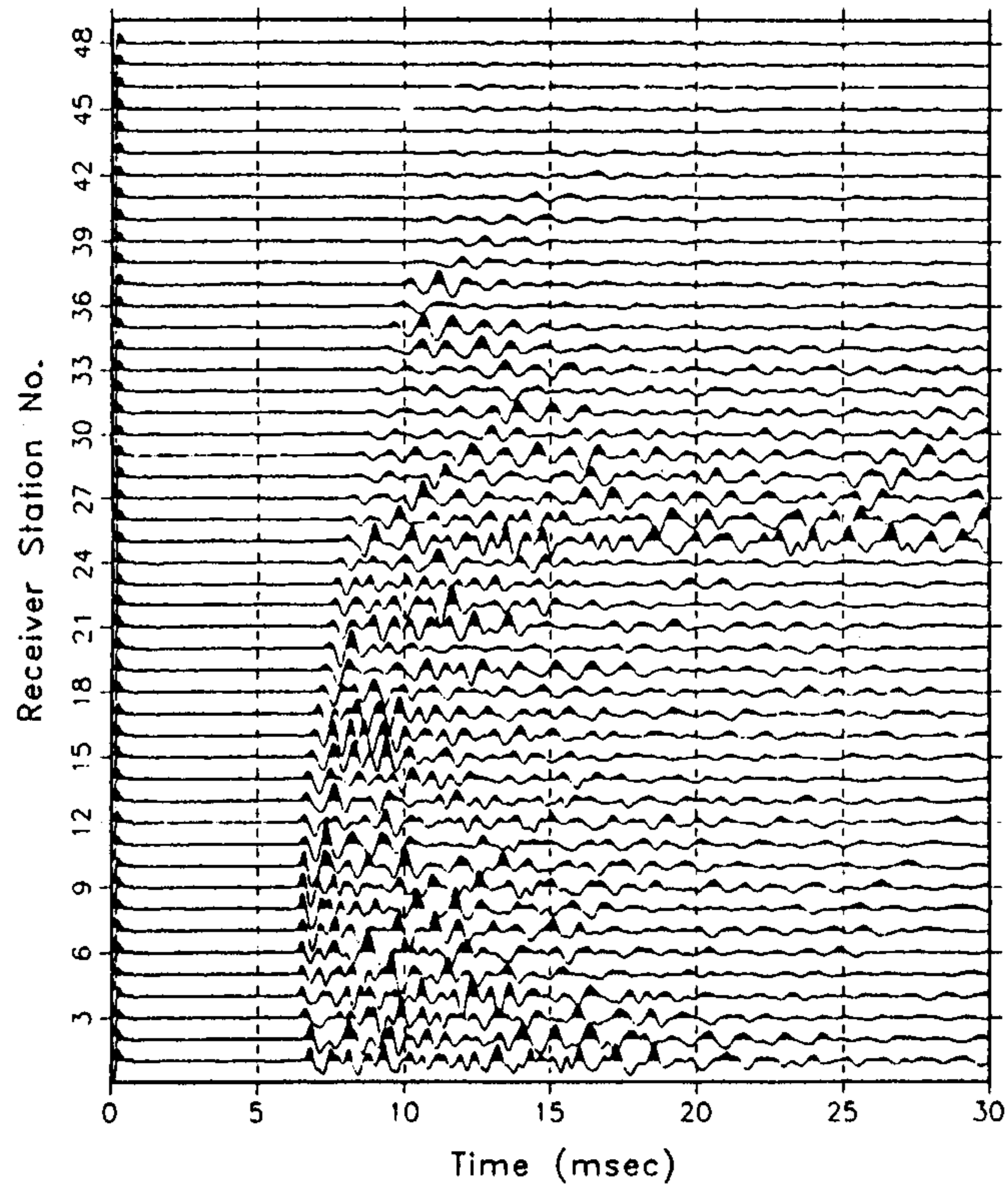
SECTION NO.	HORIZONTAL LENGTH (m)
S-1	30.46
S-2	31.54
S-3	35.56
S-4	30.98
S-5	31.10
S-6	32.95
S-7	34.68
S-8	27.02
S-9	31.48
S-10	29.74
S-11	28.60

HOLE DATA

HOLE NO.	COORDINATES		ELEV. (M)
	X	Y	
H-1	444,416.847	203,281.394	60.713
H-2	444,445.762	203,271.820	60.410
H-3	444,474.950	203,259.856	59.570
H-4	444,457.585	203,228.826	56.151
H-5	444,448.470	203,199.234	54.817
H-6	444,430.669	203,173.692	54.757
H-7	444,405.165	203,250.589	54.939
H-8	444,432.822	203,239.647	54.660
H-9	444,420.520	203,213.831	54.752

Fig. 134. Kangnam geotomographic survey.
Borehole locations for the crosshole seismic survey.

LG Building Sur151 (normalizing by trace max.)
S(H-4) - R(H-5), S No.= 7, R No.= 1 - 48



AMPLITUDE SPECTRUM (LG SUR151)
S(H-4)-R(H-5) S No.= 7, R No.= 1-48

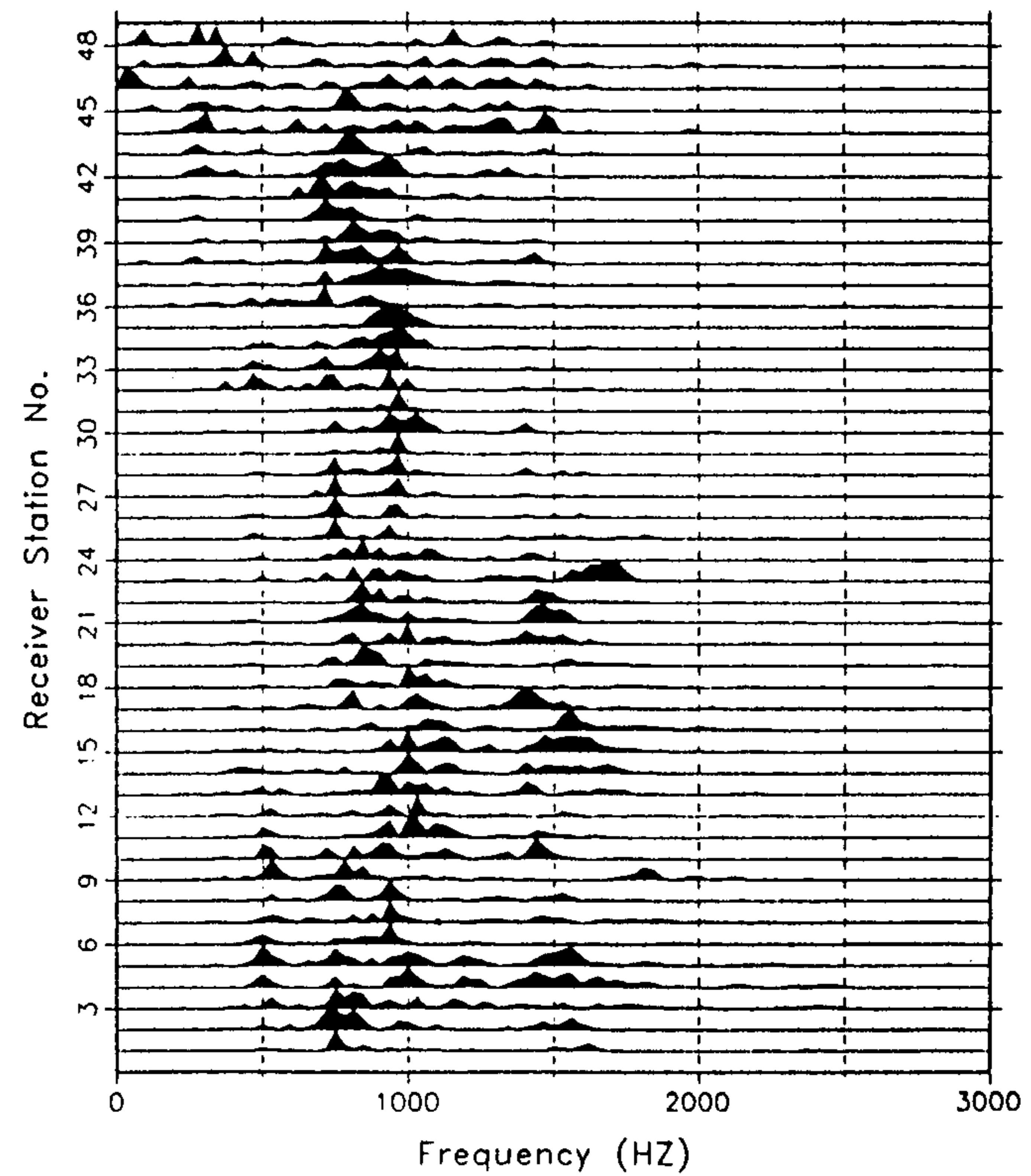
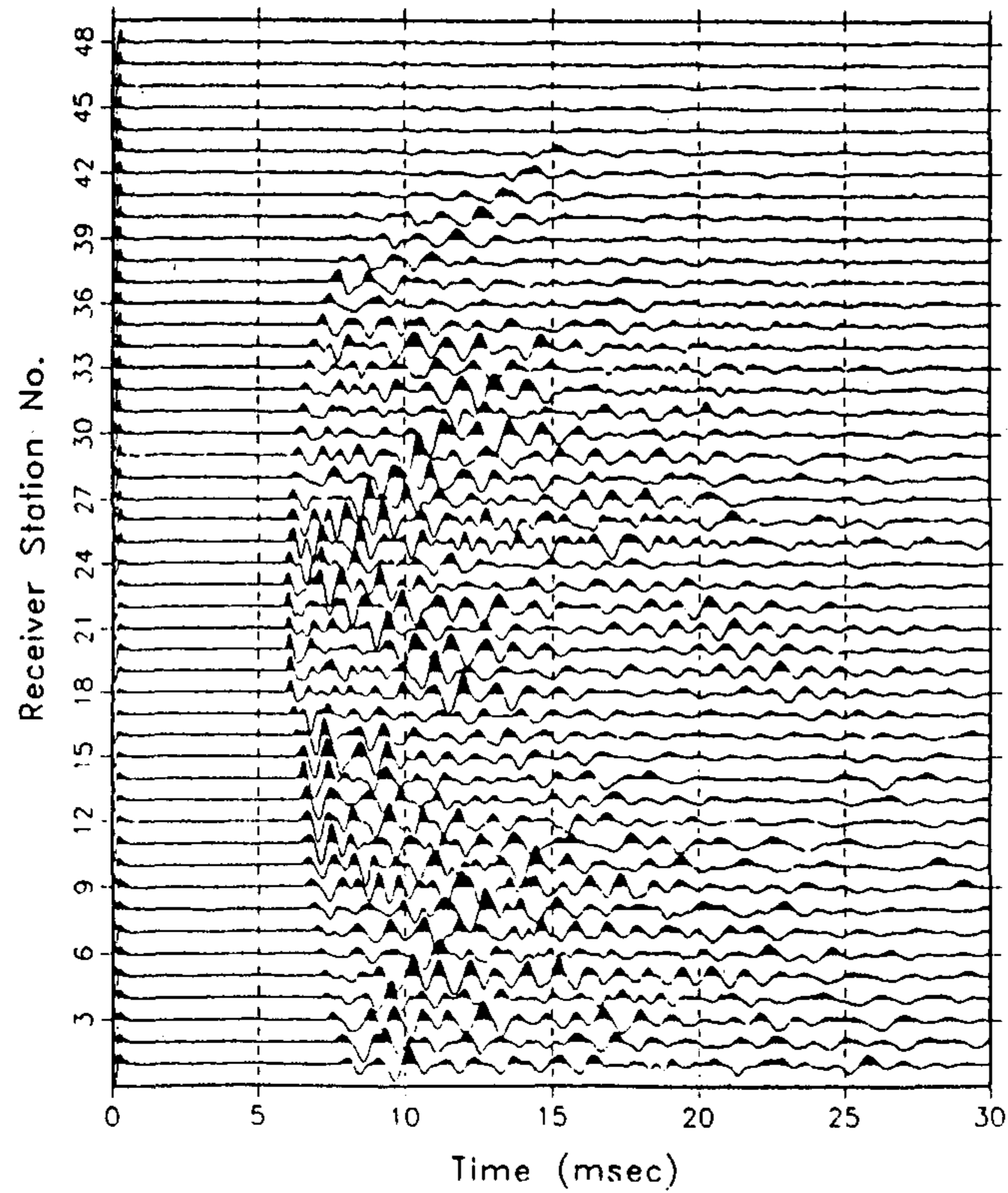


Fig. 135. Kangnam geotomographic survey.

Frequency content test from an example of crosshole data from the H-4 - H-5 cross section.

Source (shot number 7) was located at 47m(ground level) and receivers were located at 52m~4m

LG Building Sur151 (normalizing by trace max.)
S(H-4) - R(H-5), S No.= 25, R No.= 1 - 48



AMPLITUDE SPECTRUM (LG SUR151)
S(H-4)-R(H-5) S No.= 25, R No.= 1-48

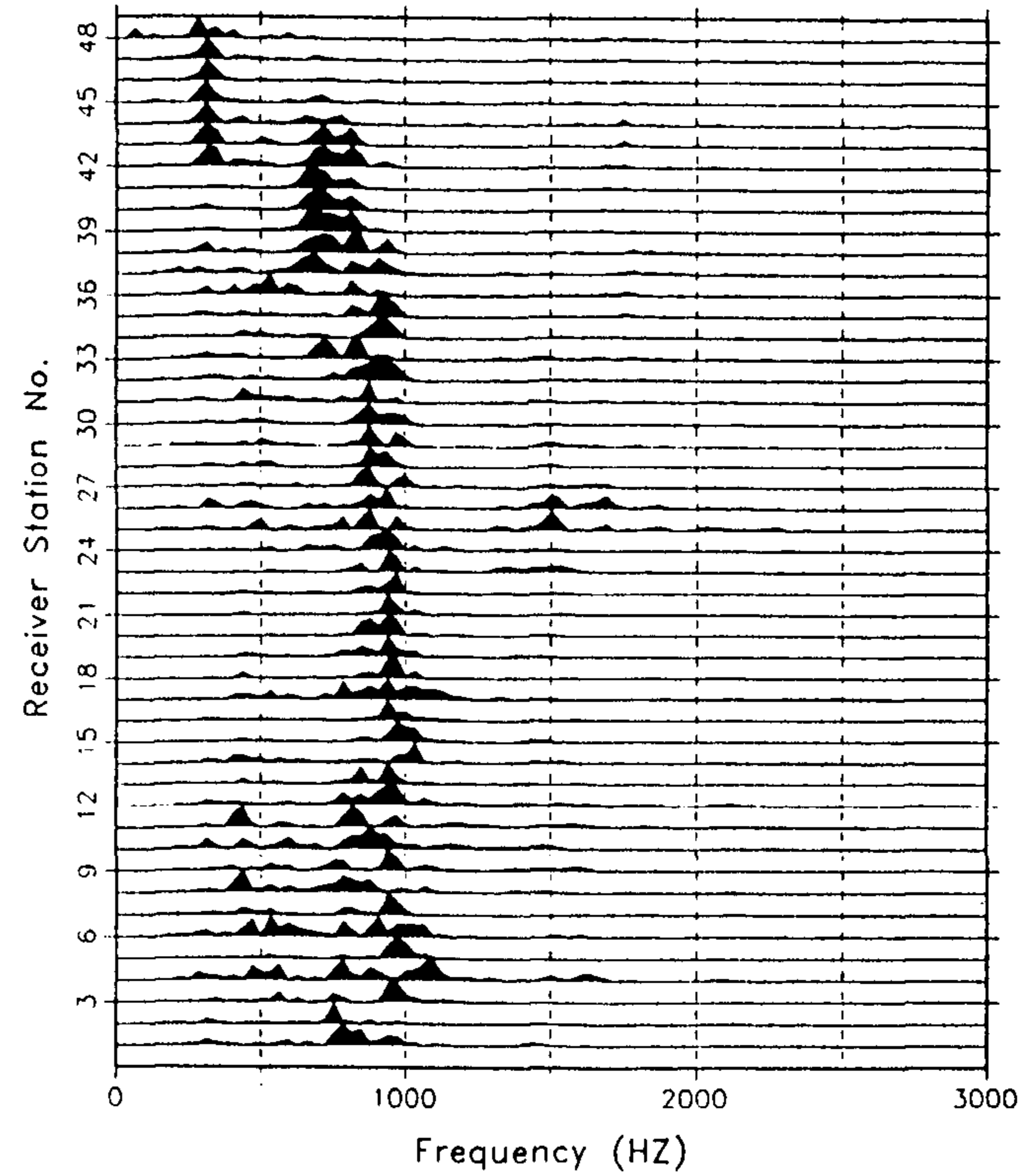


Fig. 135. (continued).

Source (shot number 25) was located at 30m (ground level) and receivers were located at 52m~4m.

Geometry for Tomographic Analysis

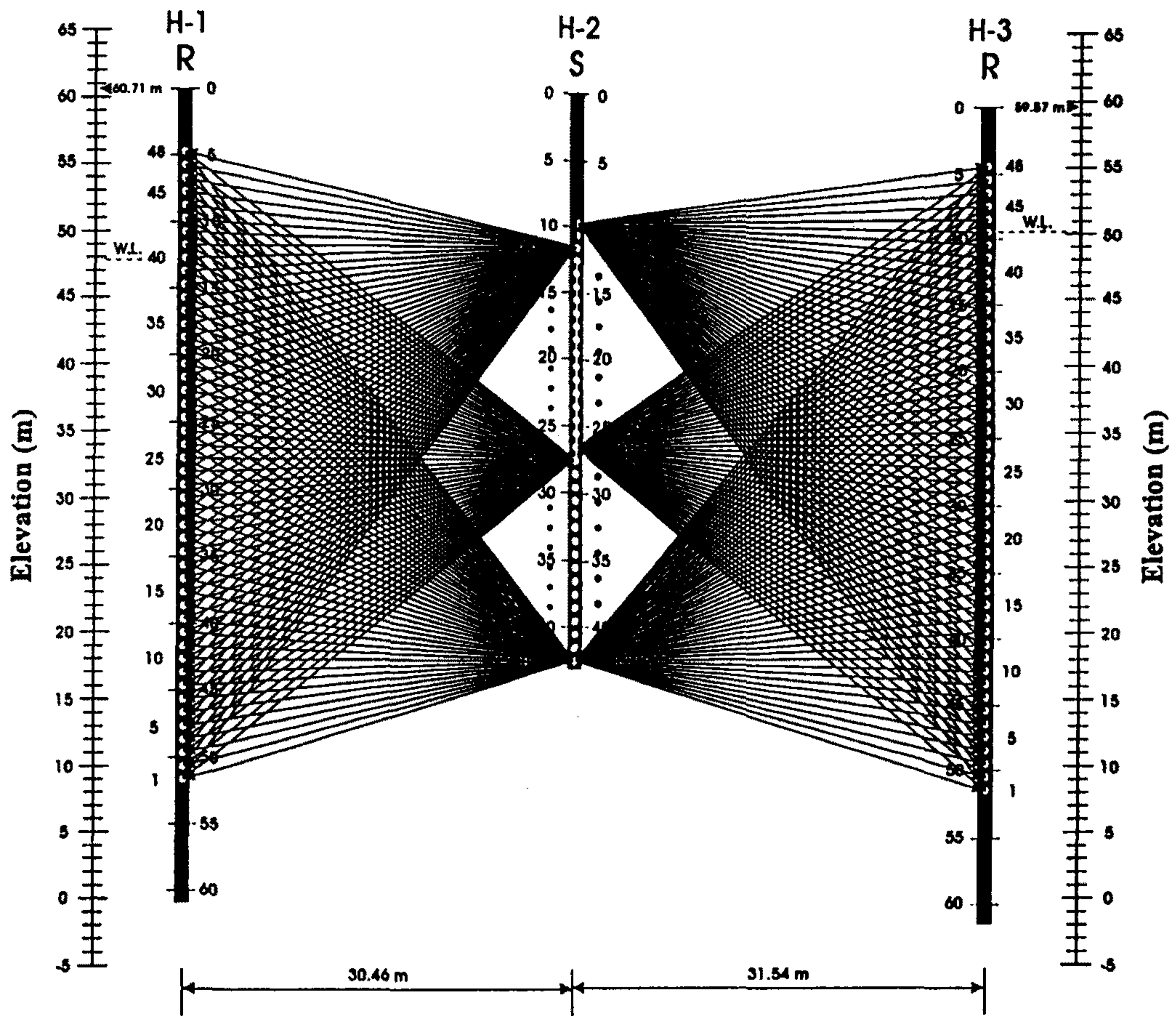


Fig. 136. Kangnam geotomographic survey.
Raypath diagrams for the geotomographic measurements.

Geometry for Tomographic Analysis

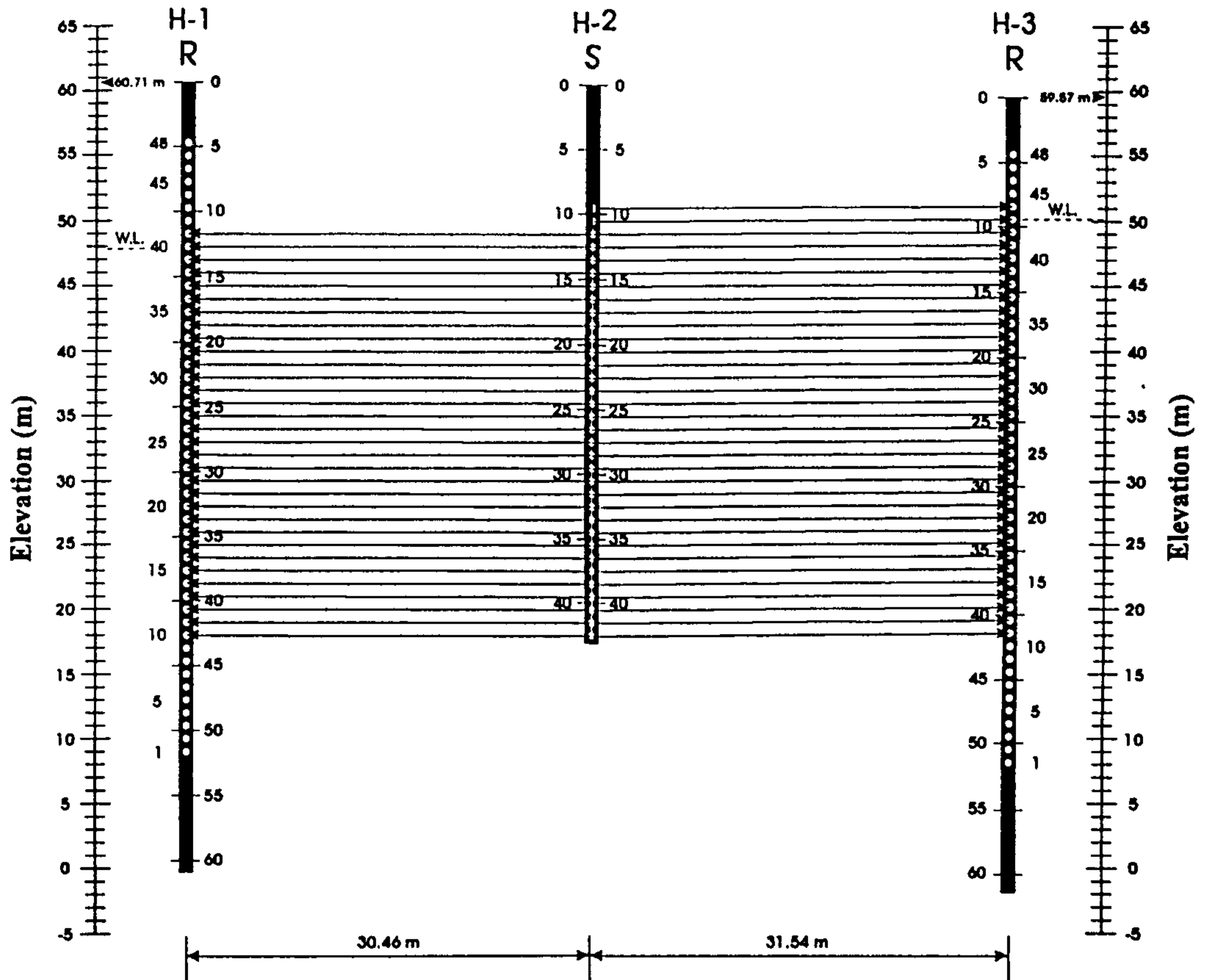
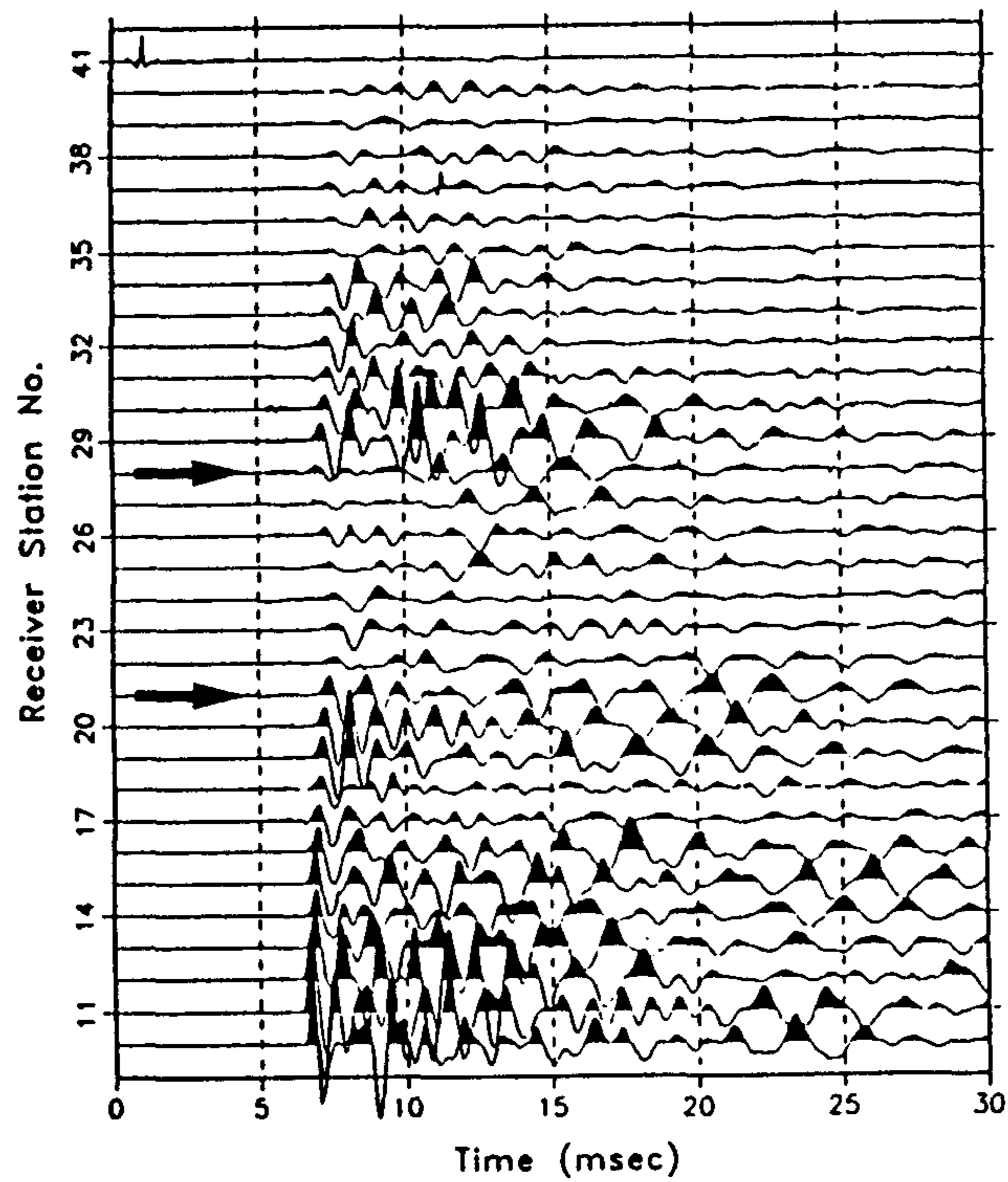


Fig. 137. Kangnam geotomographic survey.
All raypaths perpendicular to the borehole axis are shown.

LG building: Horizontal rays (Sur155, file max.)
S(H-2)-R(H-1), S No.= 1-32, R No.= 10-41



LG building: Horizontal rays (Sur154, file max.)
S(H-2)-R(H-3), S No.= 1-34, R No.= 11-44

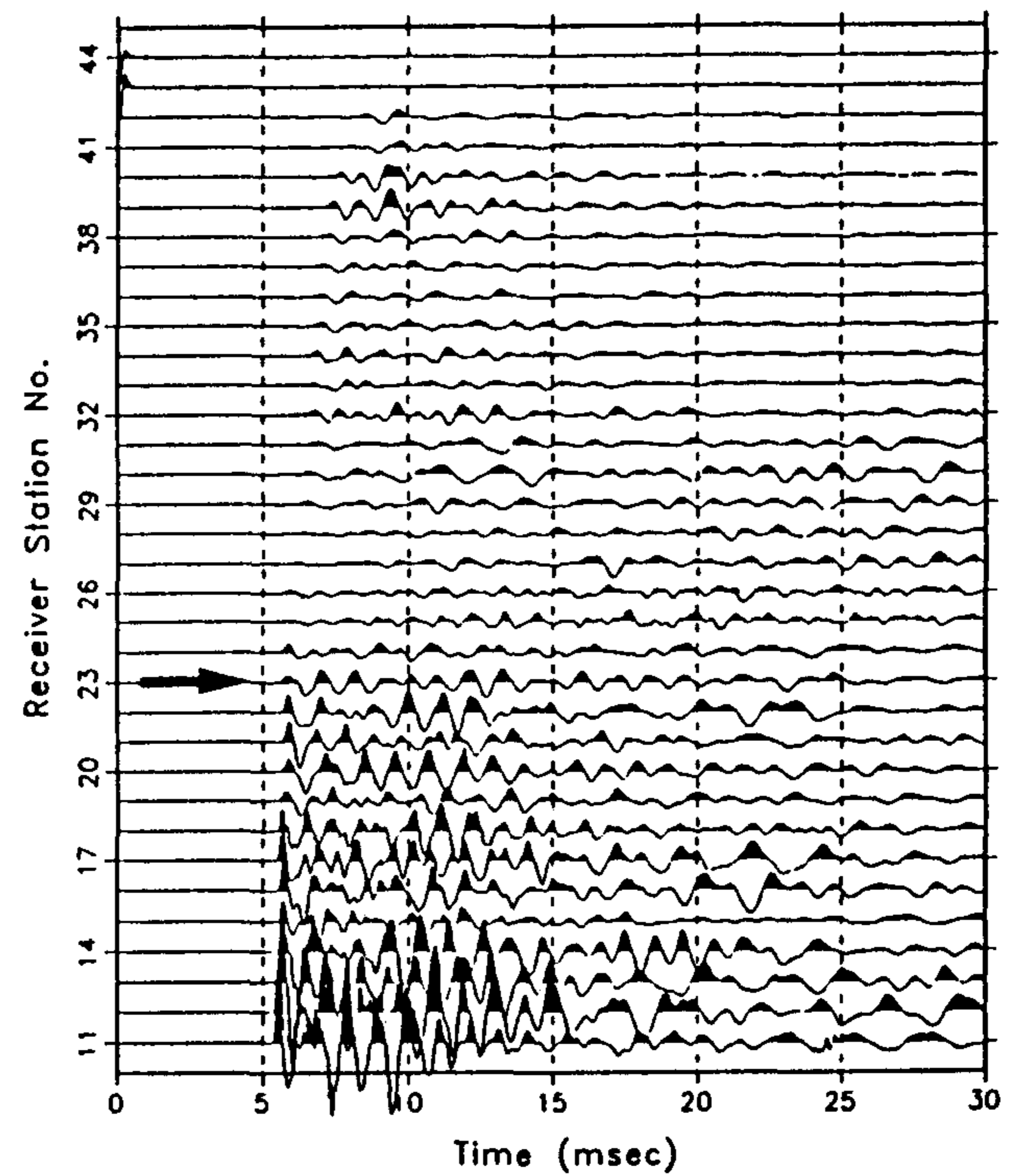


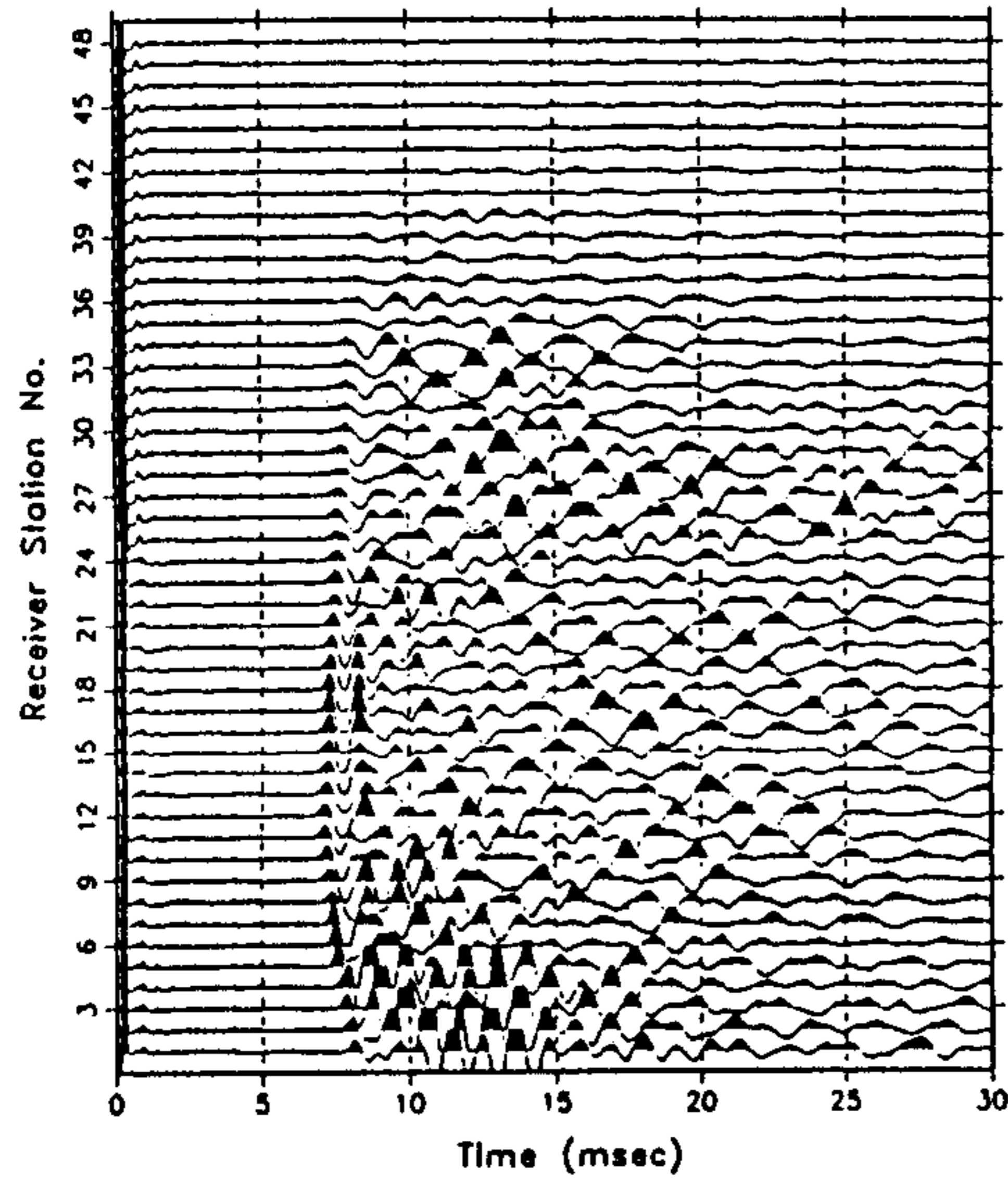
Fig. 138. Kangnam geotomographic survey.

Crosshole data derived from the measuring procedure in Fig. 137.

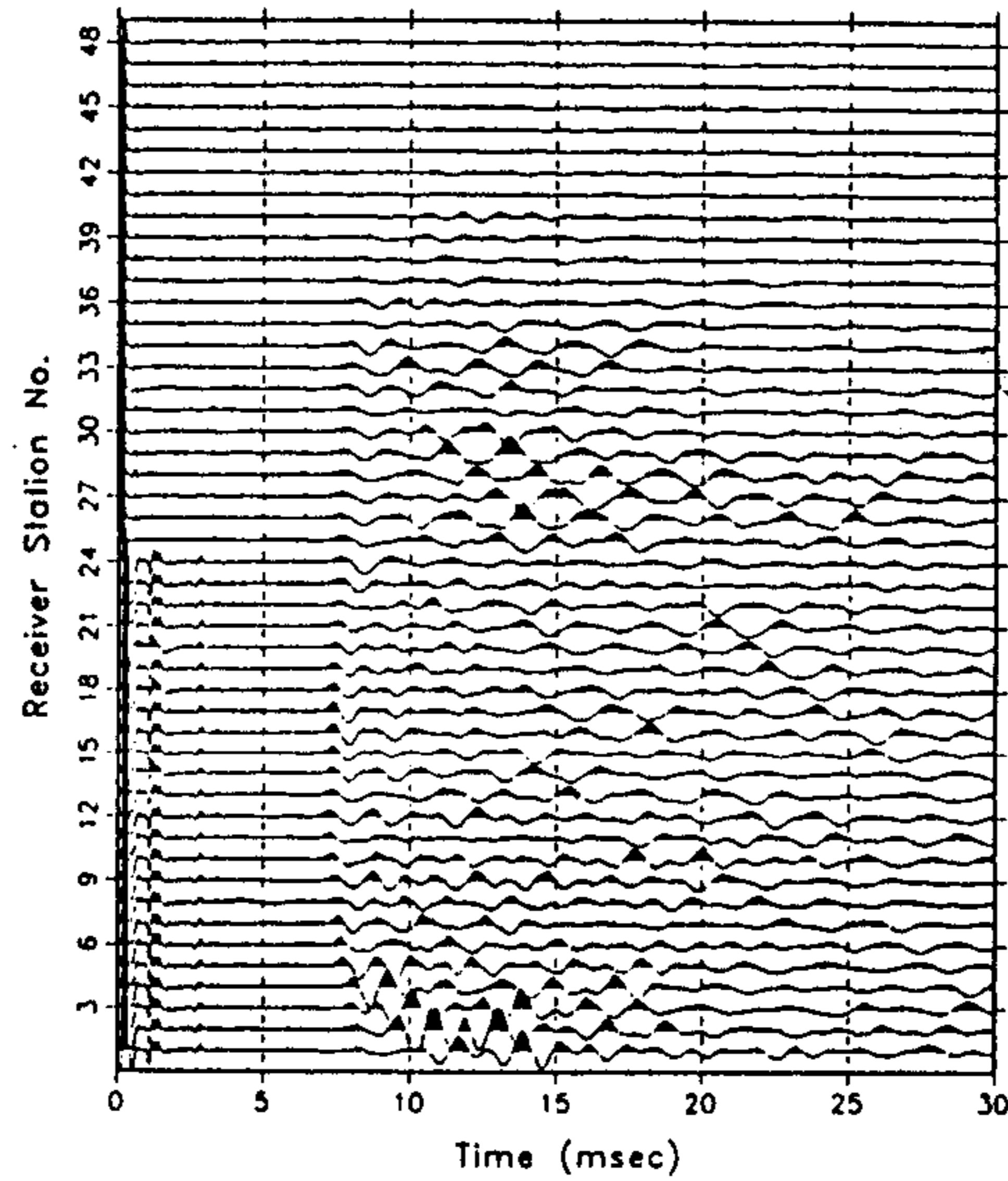
여, S-1 단면측정(그림의 왼쪽부분)에서 관찰되는 초동주시는 S-2 단면의 것(그림의 오른쪽부분)과 비교하여 전체적으로 느리게 나타나고 있다. 즉, S-1 단면의 탄성과 속도는 S-2의 것보다 낮기 때문에 암석의 탄성 상태(대부분의 경우 암석의 강도)가 상대적으로 약한 것이다. 만약, 발생원-수진기 배열 사이의 암반이 균질하다면 초동주시는 모든 채널기록에서 거의 동일하게 나타난다. 그러나, 일반적으로 암반의 강도는 심도가 깊어짐에 따라 높아지는 경향(표토층-풍화암-연암-경암-극경암 순서)을 보여주기 때문에 초동주시는 그에 따라 빨라진다. 바로 S-2 단면측정(시추공 H-2, H-3)에서 그러하다(그림의 오른쪽부분). 그런데, S-1 단면측정에서는 전체적으로 초동주시의 변화폭이 작으면 더구나 화살표로 표시된 구간(그림의 왼쪽부분)에서는 초동의 주시 및 진폭의 큰 변화가 관찰되는 것이다. 여기서 인식된 진폭 약화에서는 단층경계면에 협재된 풍화암 내지 점토가 주된 요인으로 간주된다. 그런데, S-2 단면측정에서 화살표로 표시된 경계(그림의 오른쪽부분)는 대체로 진폭을 크게 양분하고 있기 때문에 이는 바로 암층경계로 판단된다. 다음은 심도에 따른 주파수내용 변화를 살펴보기로 한다. 일반적으로 탄성과 주파수는 심도가 깊어짐에 따라 고주파수 내용을 띠게 된다. S-1 단면 경우는 심도에 따른 주파수내용 변화가 대단히 미약하게 관찰된다. 반면, S-2 단면 측정에서 깊은 심도에서 상대적으로 고주파수를 띤 탄성과 도달이 인식되고 있다. 환원하면, S-1 단면 하부의 경암 상태는 대체로 균질하나 S-2 단면에서는 경암을 다시 양분하고 있음이 인식된다는 것이다.

이번에는 발생원 기록 즉, shot gather(하나의 발생원에 대한 48채널 기록)를 관찰하기로 한다. Fig. 139는 S-1 단면측정에서 shot 12~shot 17에 대한 각각의 48채널 기록을 나타내고 있다. Shot 14 위치를 기점으로 관찰되는 탄성파의 진폭이 상대적인 변화를 보여주고 있기 때문에 우선 이 지점

LG Building Sur155 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-1), S No.= 12, R No.= 1 - 48



LG Building Sur155 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-1), S No.= 13, R No.= 1 - 48



LG Building Sur155 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-1), S No.= 14, R No.= 1 - 48

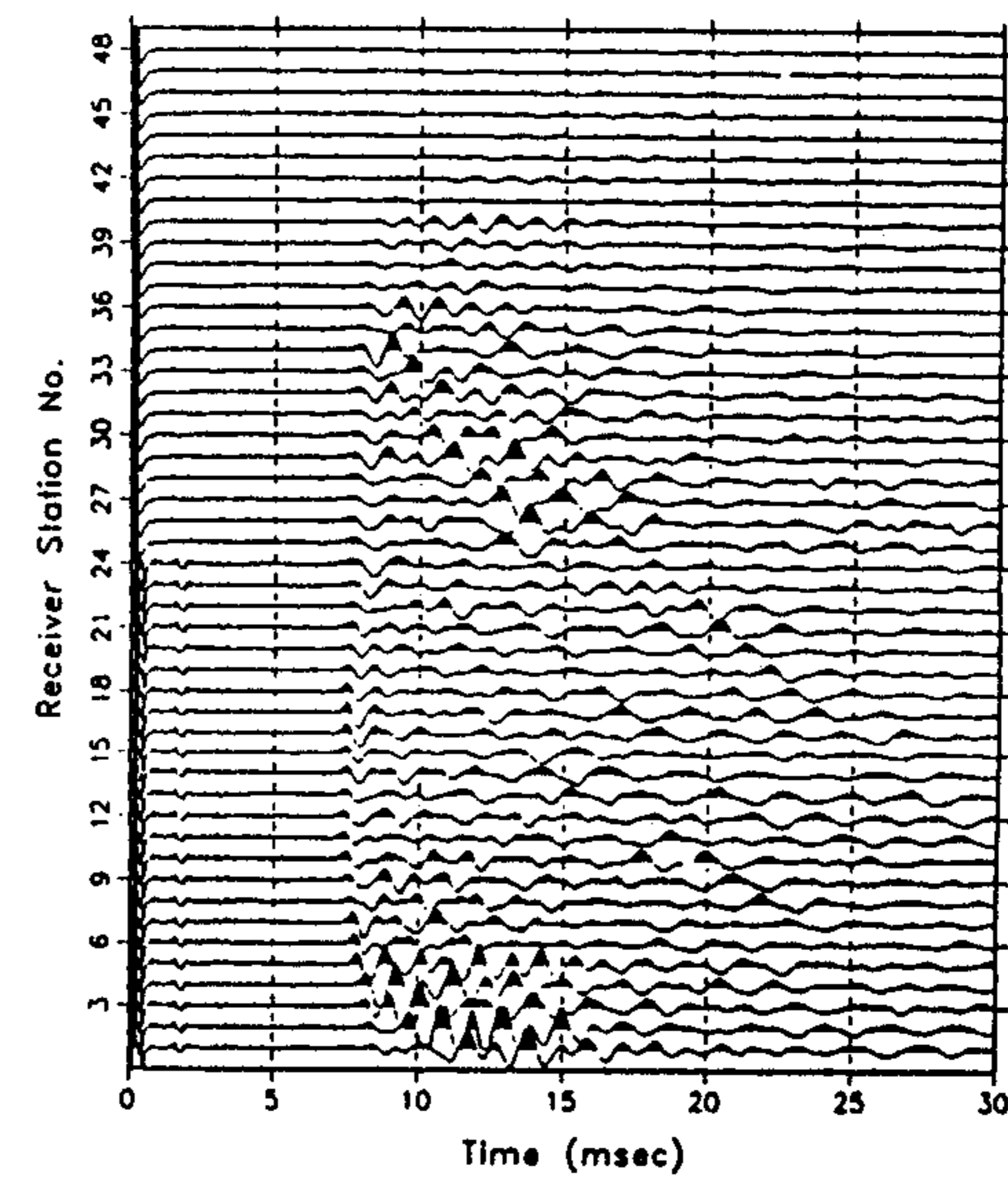
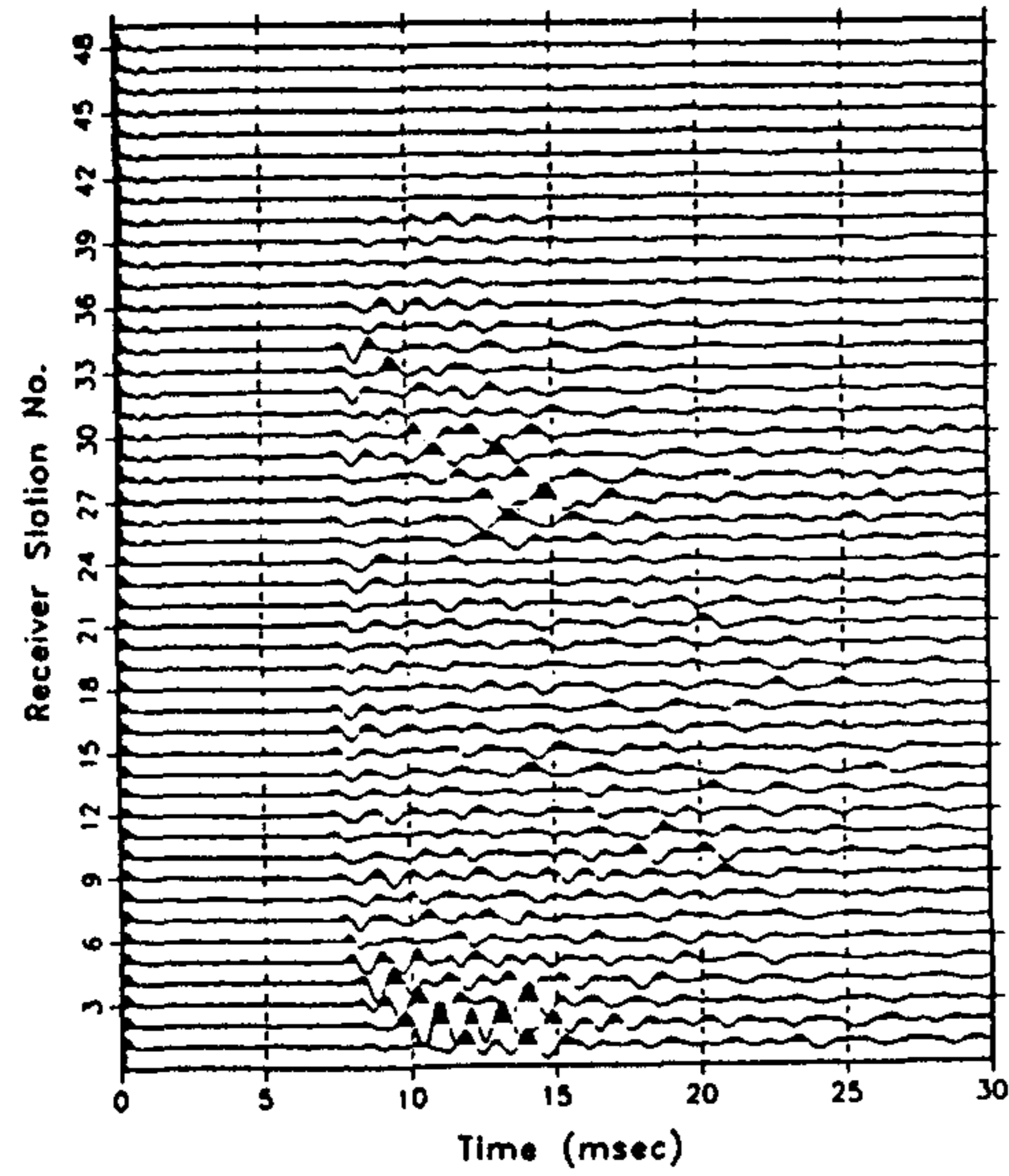


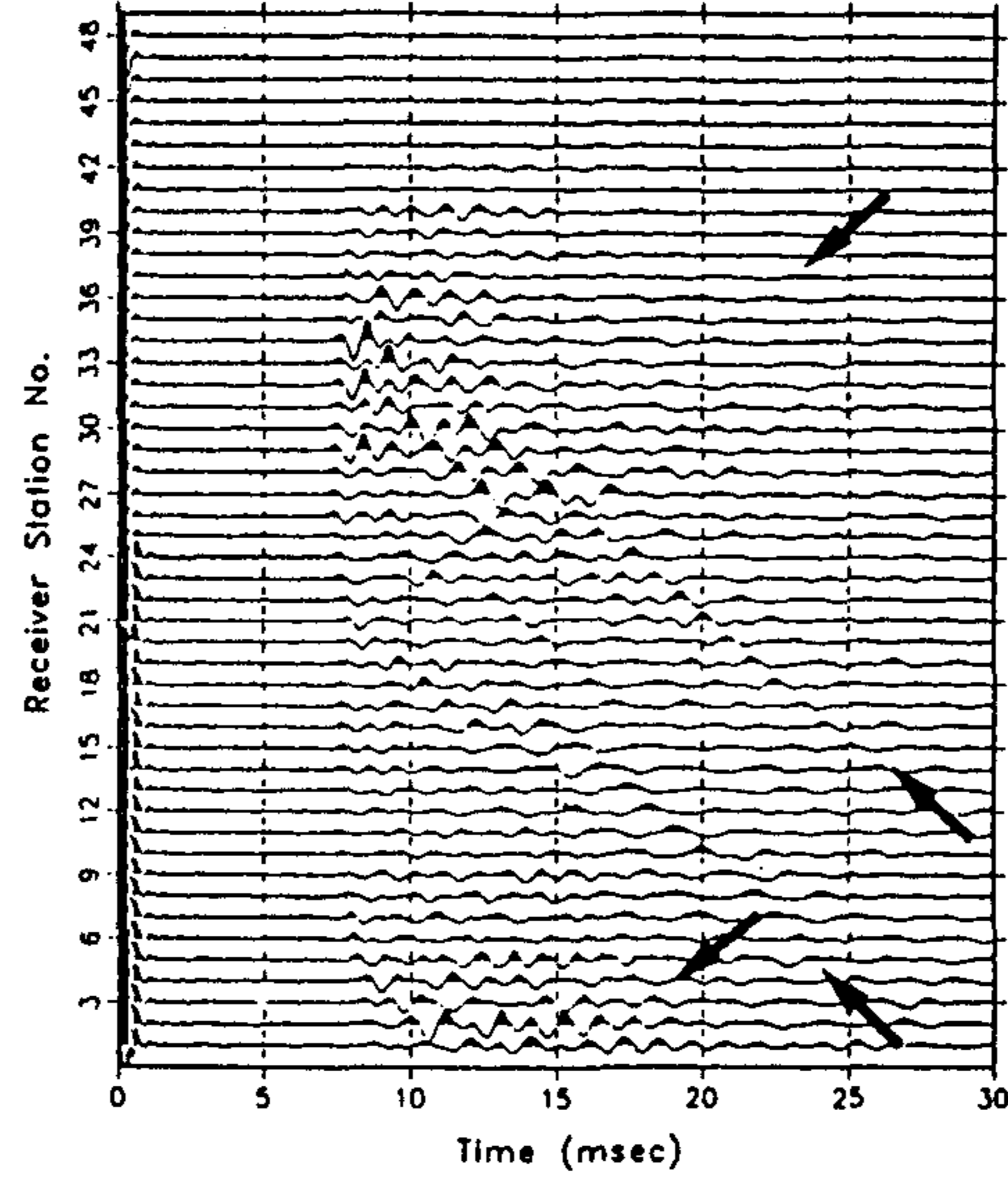
Fig. 139. Kangnam geotomographic survey.

Examples of crosshole data (shot gather 12~17) acquired from the H-2 - H-1 cross section.

LG Building Sur155 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-1), S No.= 15, R No.= 1 - 48



LG Building Sur155 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-1), S No.= 16, R No.= 1 - 48



LG Building Sur155 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-1), S No.= 17, R No.= 1 - 48

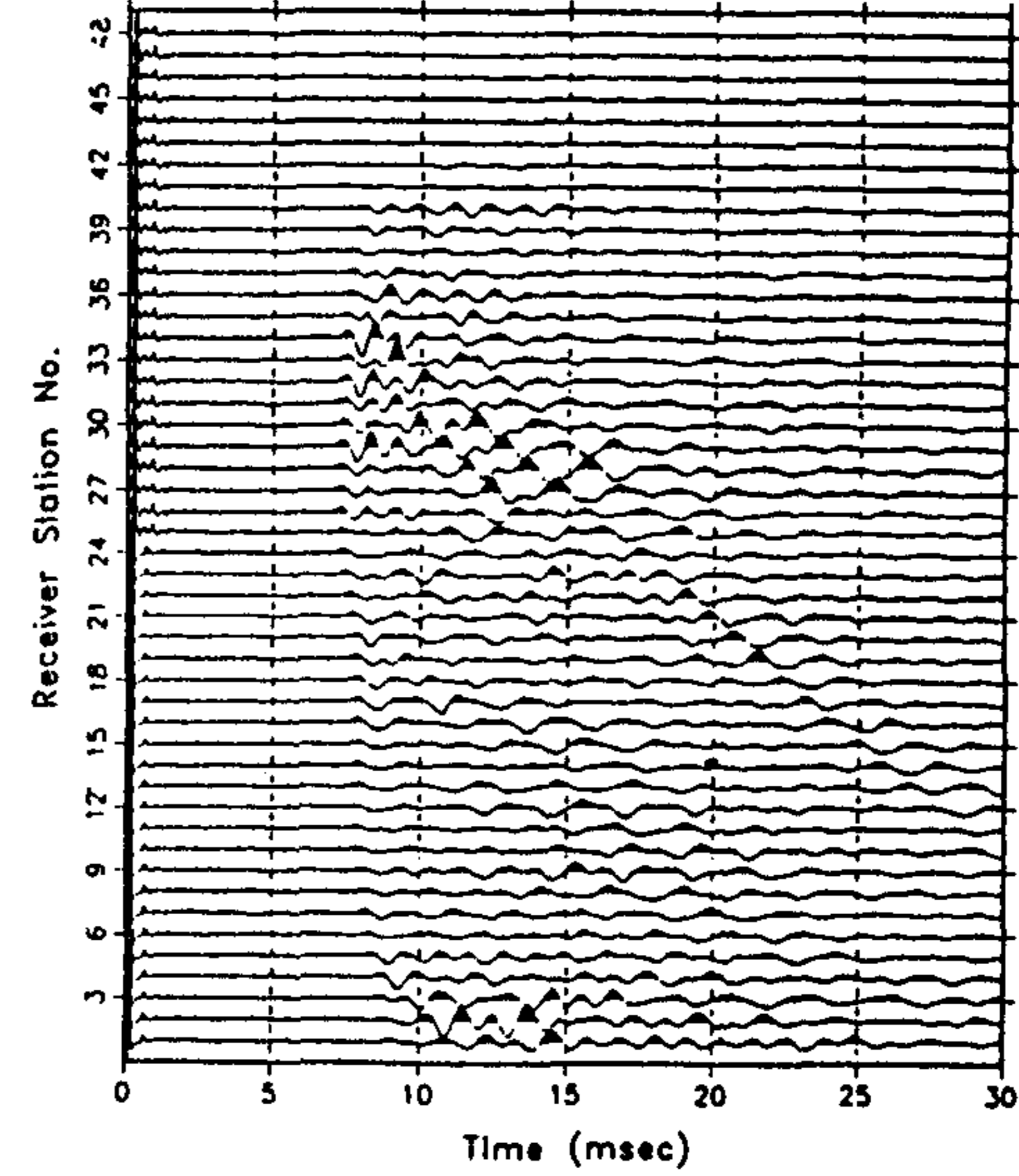


Fig. 139. (continued).

(시추공 H-2 shot 14위치)은 암층경계면으로 간주될 수 있다. 한편, shot gather 15에서는 초동주시의 변화가 대체로 수신기 번호 24 위치를 기점으로 거의 대칭을 이루고 있음을 볼 수 있다. 여기서 발생원 위치가 대체로 수신기 번호 24와 대등한 심도를 보여주고 있음을 고려한다면 이는 바로 시추공 H-1 하부 경암상태가 대체로 균질함을 시사하는 것이 되겠다. 다시 말하면, S-2 단면측정에서 경암 내에 인식된 경계면이 시추공 H-1의 시추구간에는 전혀 연장되지 않고 있다는 것이다. 다음은 본 토모그래피 단면측정 데이터에서 전반적으로 크게 발달되고 있는 특이한 탄성파 도달(예 : shot 16 gather에서 화살표로 표시)에 대해 언급하고 있다. 단층이나 절리의 벌어진 틈에 탄성파가 도달하면 그 곳이 새로운 발생원 지점이 되어 그로부터 시추공내(물) 상.하 방향으로 탄성파가 전달된다. 이러한 탄성파를 흔히 tube wave라 한다. 이때 tube wave는 수신기에 직접파로써 도달되며 동시에 물은 주위 암반보다 대단히 낮은 탄성파 속도(약 1500 m/s)를 갖고 있기 때문에 단면측정에는 tube wave가 완만한 경사를 띤 곧바른 주시변화를 나타나게 된다. 이러한 tube wave의 활발한 도달은 Fig. 140에 나타난 S-2 단면 측정데이터에서도 뚜렷이 관찰되고 있다. 여기서 상,하향 tube wave가 교차되는 지점은 바로 단층 및 절리 위치에 대한 판단기준이 되고 있으며 이로 인한 지질구조 정보는 이번 텔레뷰어 탐사결과와 정확하게 부합되고 있는 것이다.

상기 제시된 단면측정데이터는 지반상태와 연관된 초동의 진폭 및 주시, 주파수 내용, 반사파의 발달상태, tube wave의 생성등 방대한 정보를 내포하고 있으며 지금까지 서술한 분석 내용은 어디까지나 그중 일부분에 불과하다. 다음에 제시하게 될 주시역해 결과 즉, 토모그램은 단지 초동의 주시만을 발체하여 역산(inversion)함으로써 얻게되는 탄성파 속도분포인 것이다. Fig. 141은 S-1 및 S-2단면에 대한 각각의 토모그램을 병합하여 나타내고 있다. 여기서 진한 푸른색 하단부는 경암 상부 경계면에 해당하며 경암은 대체로 초록색과 주황색(붉은색)으로 양분되고 있음을 볼 수 있다.

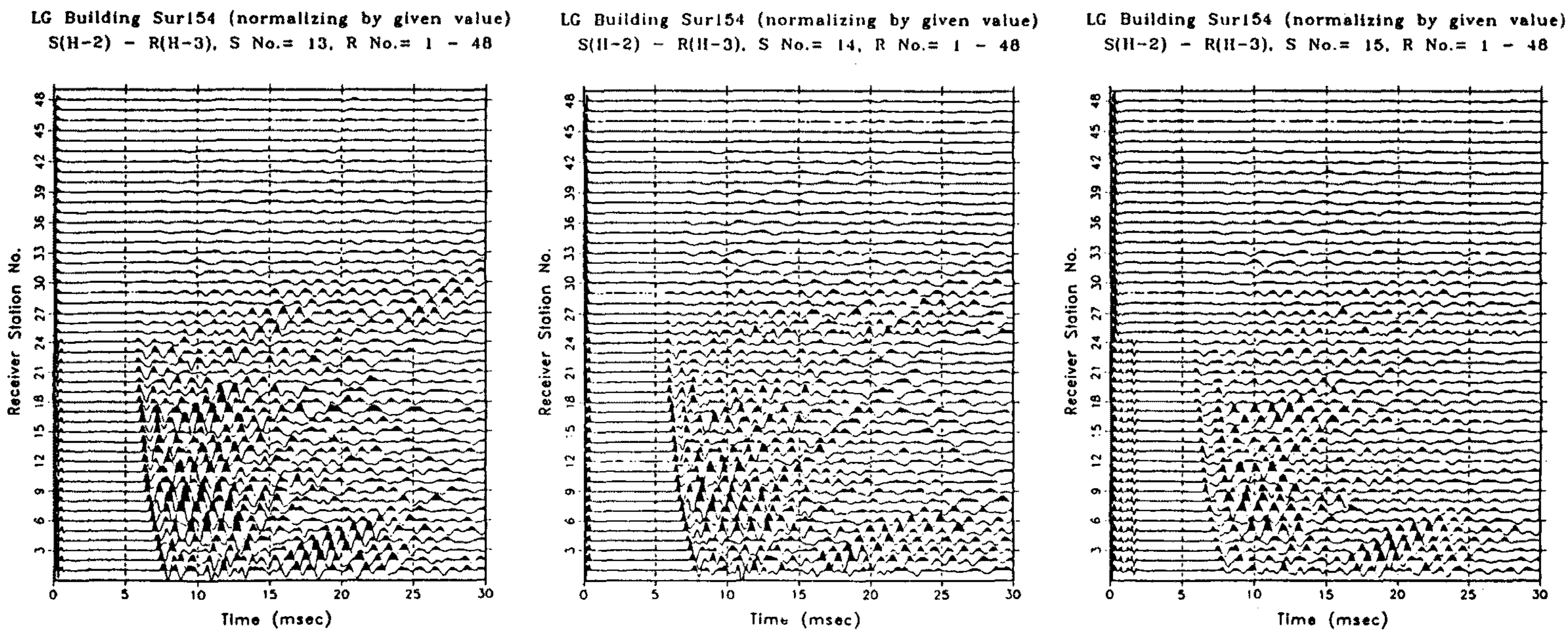
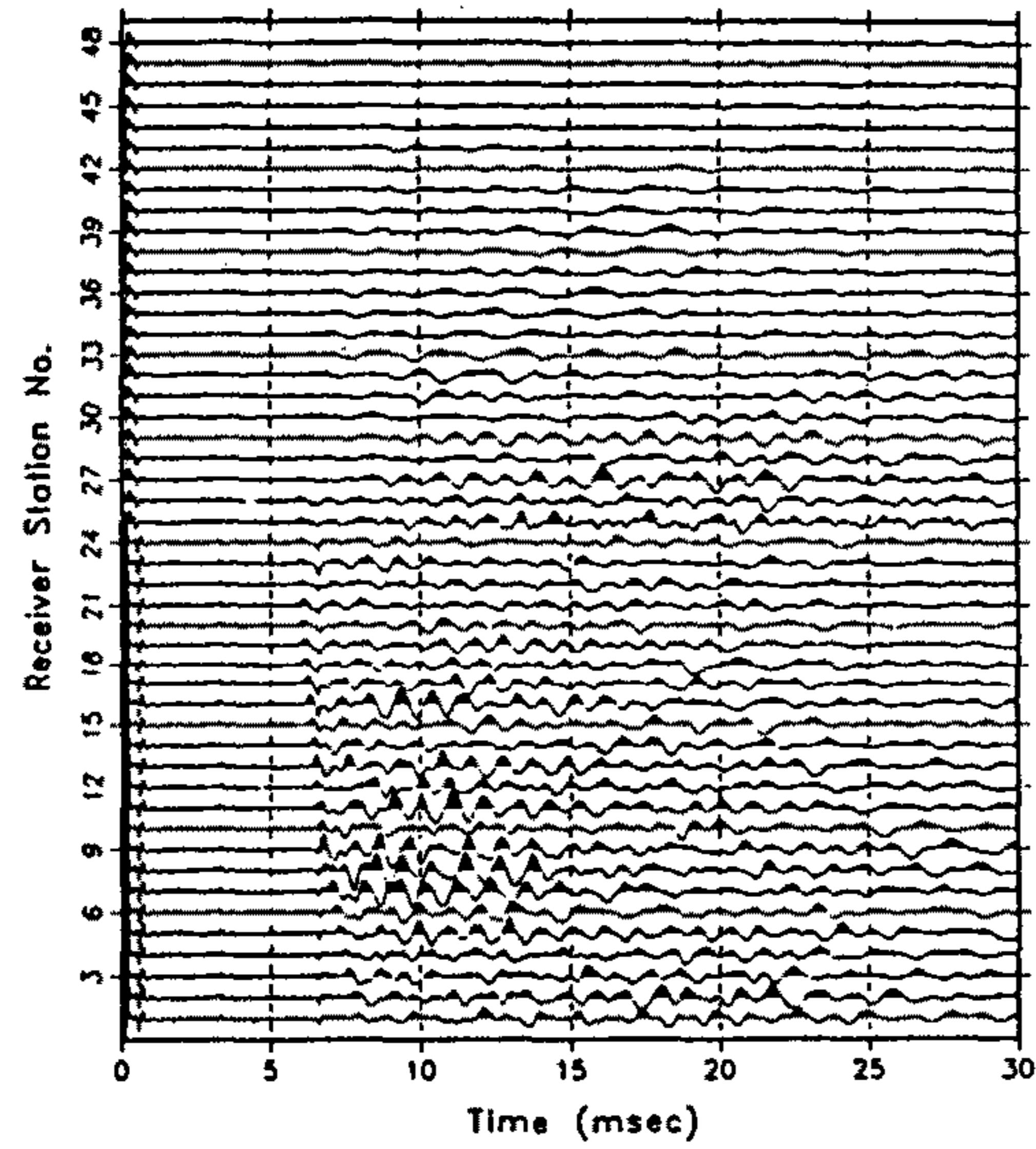
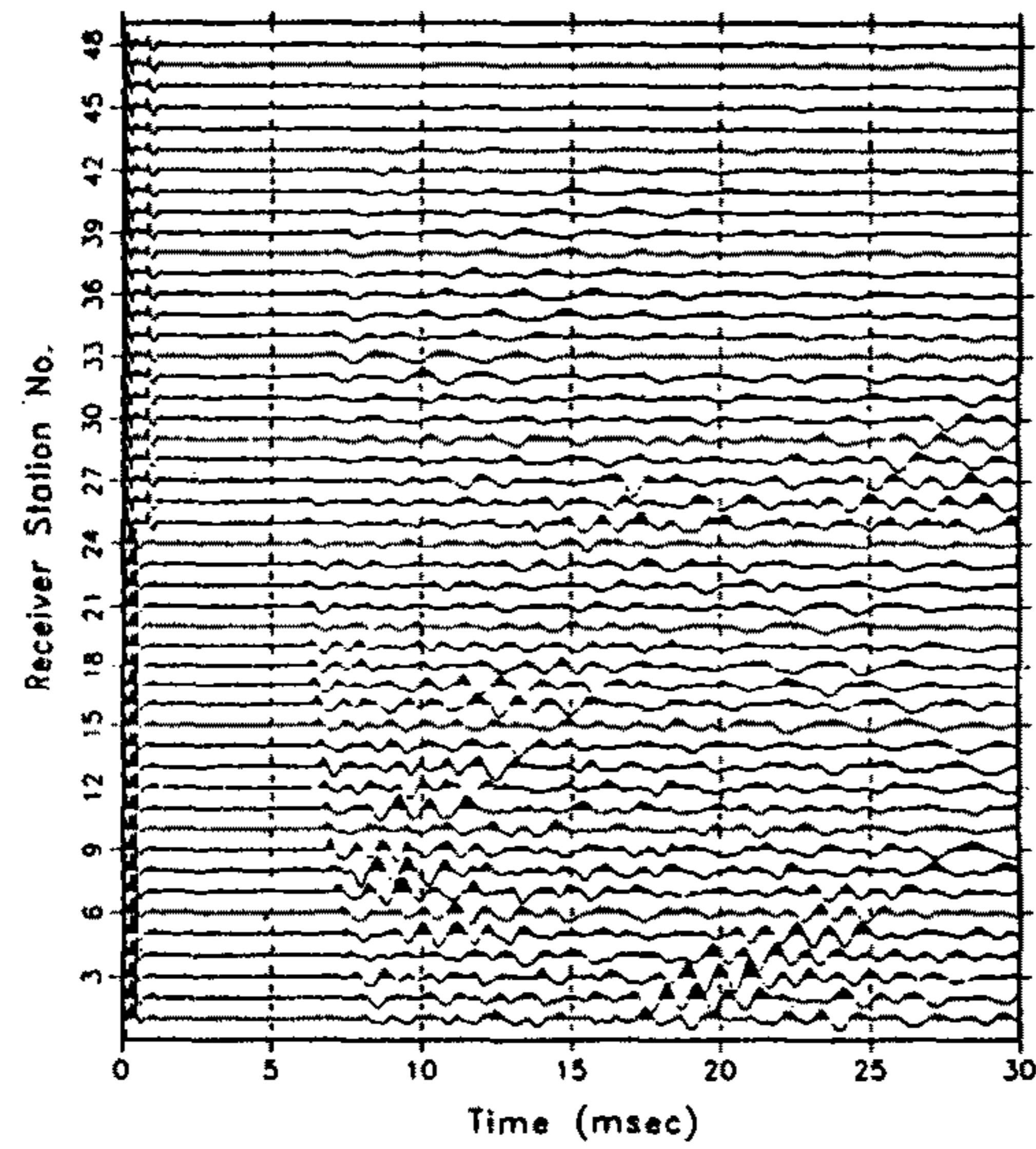


Fig. 140. Kangnam geotomographic survey.
Examples of crosshole data (shot gather 13~18) acquired form the H-2 - H-3 cross section.

LG Building Sur154 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 16, R No.= 1 - 48



LG Building Sur154 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 17, R No.= 1 - 48



LG Building Sur154 (normalizing by given value)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 18, R No.= 1 - 48

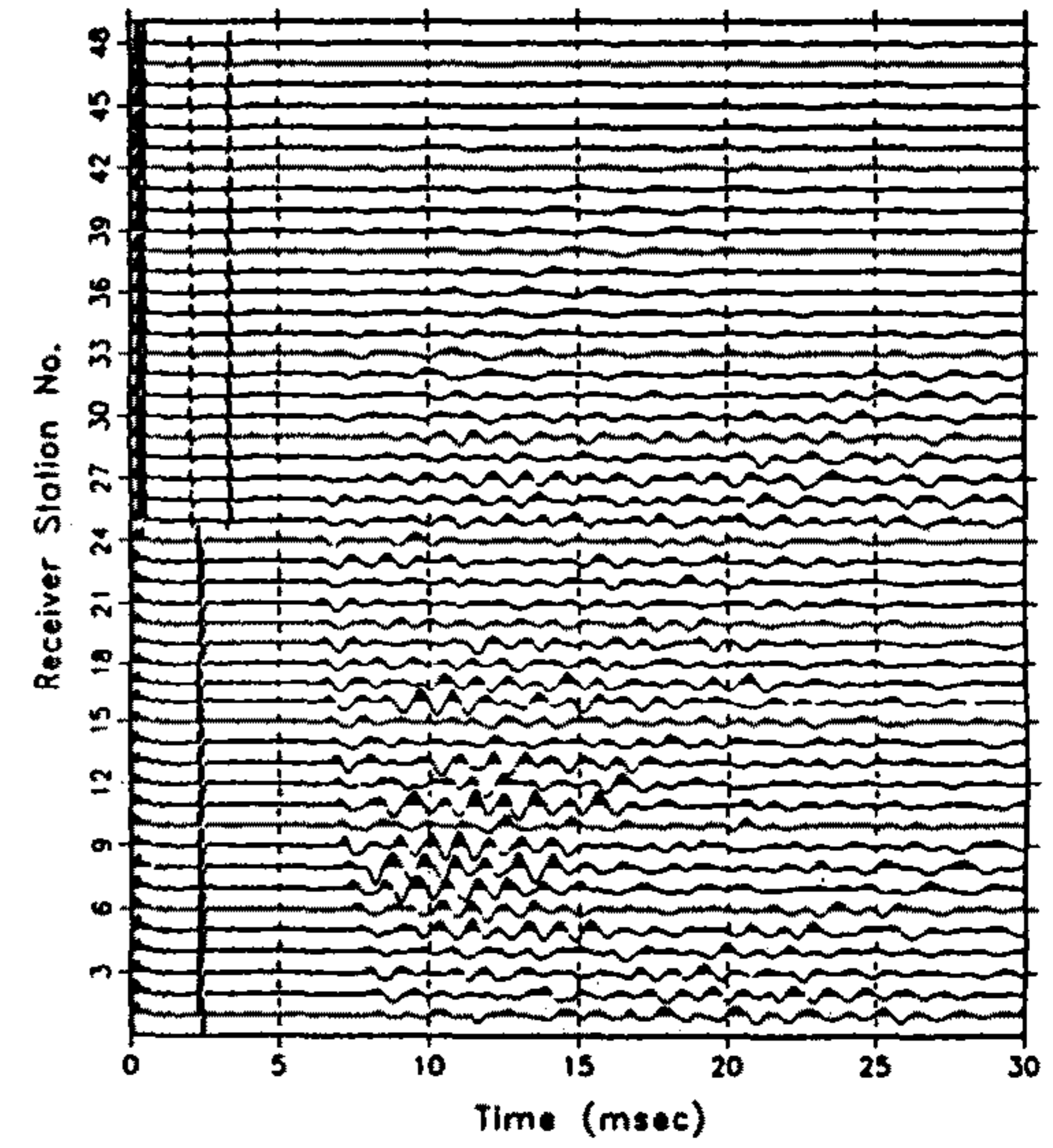


Fig. 140. (continued).

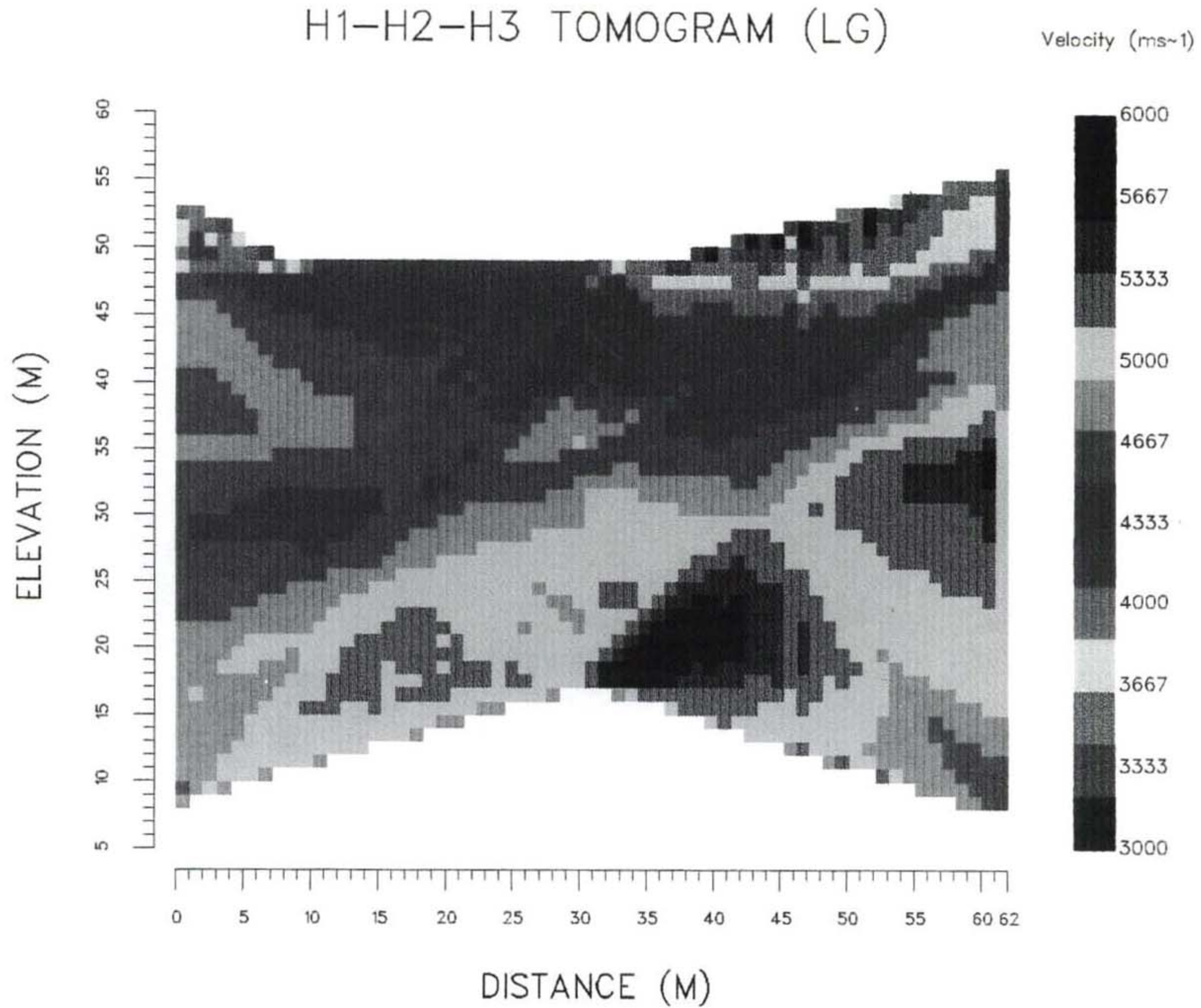


Fig. 141. Kangnam geotomographic survey.
Geotomographic velocity distribution (tomogram) of H1-H2-H3 cross section.

즉, 경암에서 탄성파 속도가 상대적으로 높은 암반은 시추공 H-3에서 H-1 방향으로 경사를 띠면서 연장되고 있다.

상기 토모그램은 지금까지 서술된 측정데이터 분석결과에 의해 보완되어 단면에 대한 해석단면도로 주어진다. Fig. 142는 바로 측선 1에 대한 해석 단면도를 나타내고 있다. 각 층에 기재된 탄성파 속도는 P파의 평균속도를 의미한다.

끝으로 Fig. 143 및 144는 모든 단면측정(도합 11개)으로부터 산출된 해석단면도에 근거하여 경암 상부경계면을 입체화한 것을 나타내고 있다. 한편, Fig. 145도 역시 상기 해석단면도에 근거하여 경암 내부 중 크게 양분하는 경계면을 보여주고 있다.

4. 인천 지하철공사 지반조사

본 탐사 지역 천부 지질은 이미 텔레뷰어에 의해 일부 밝혀진 바 있다 (제 2 장 7절 2항 참조). 이번에는 두 시추공 사이의 탄성파 전달현상을 관찰함으로써 암반 상태를 파악하고자 한다. Fig. 146은 단면측정을 위한 발생원 및 수신기 배열 상태를 하나의 보기로서 나타내고 있다. Fig. 147은 SUR 411(발생원 시추공 H1, 수신기 시추공 H2) 단면측정으로부터 선정된 발생원 기록 11, 15, 23, 29, 35를 나타내고 있다. (b)에는 약 24m에서 연암/경암의 경계(화살표로 표시)가 인식되고 또한 심도 구간 약 40m~46m에서 주위의 큰 변화 내지 진폭 약화가 관찰된다(수직 화살표로 표시). 이러한 현상은 다른 발생원 기록에서도 일관성을 띠면서 인식되고 있다. (d)에는 비록 발생원 위치가 29m임에도 불구하고 수신점 위치 약 33m(별표)에서 주위가 가장 빠르게 나타난다. 이는 바로 시추공 H2의 심도 약 33m 주위 암

**Seismic Tomographical Interpretation (P-wave velocity distribution)
H1-H2-H3 section**

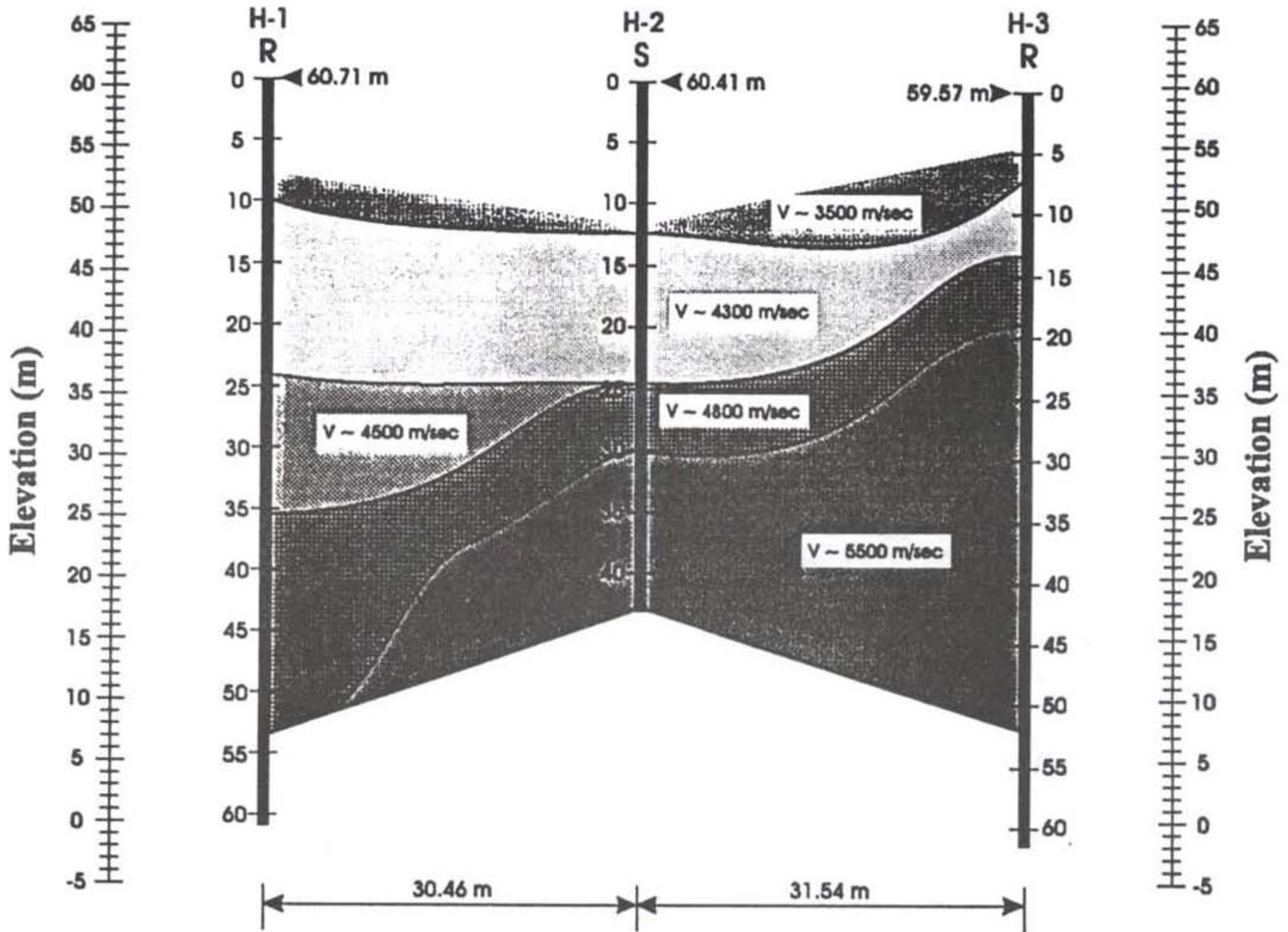


Fig. 142. Kangnam geotomographic survey. Interpreted physical properties of rocks of H1-H2-H3 cross section.

LG Kangnam Tower Site

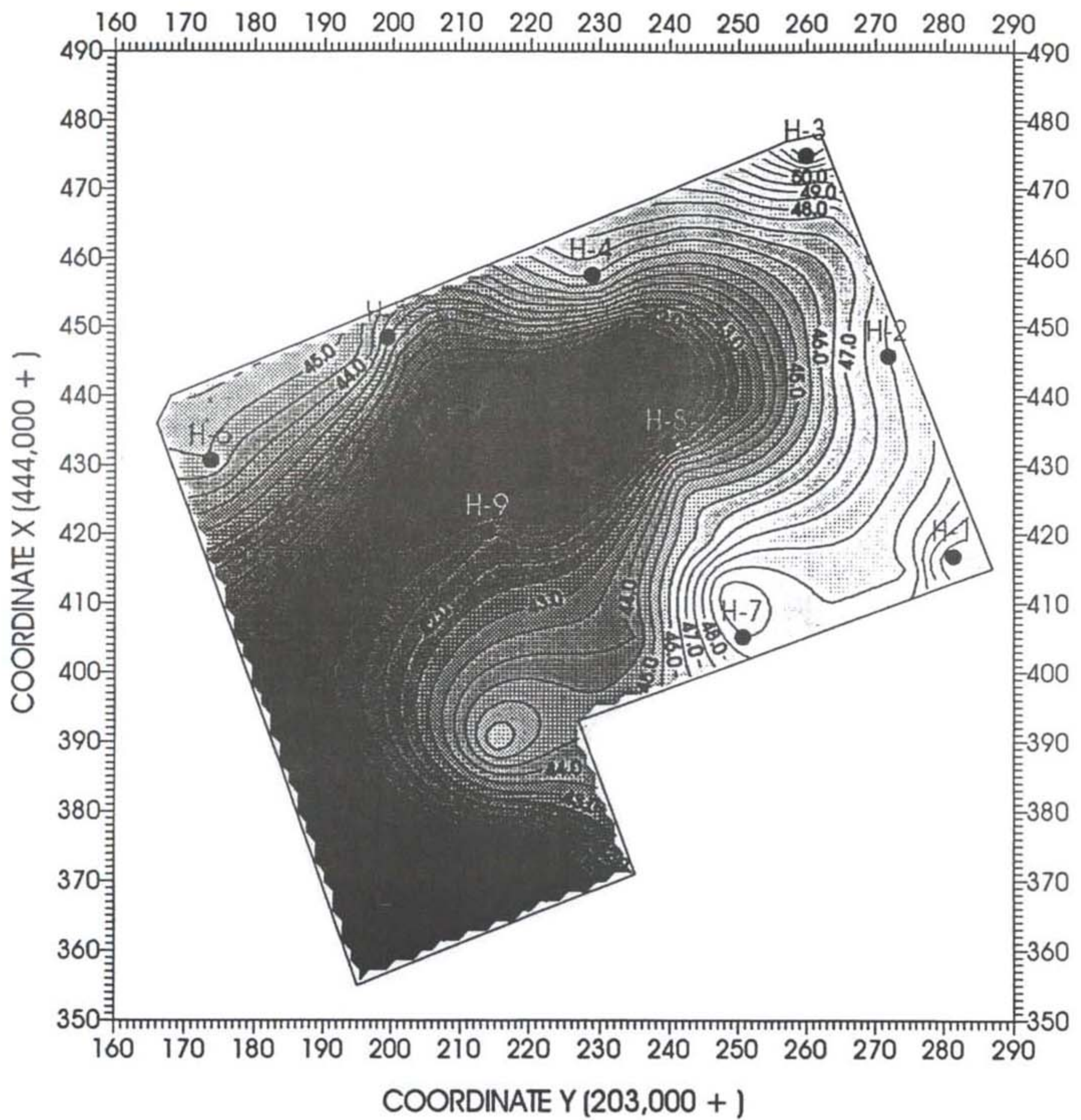


Fig. 143. Kangnam geotomographic survey. A contour display of base rock structure and the borehole locations.

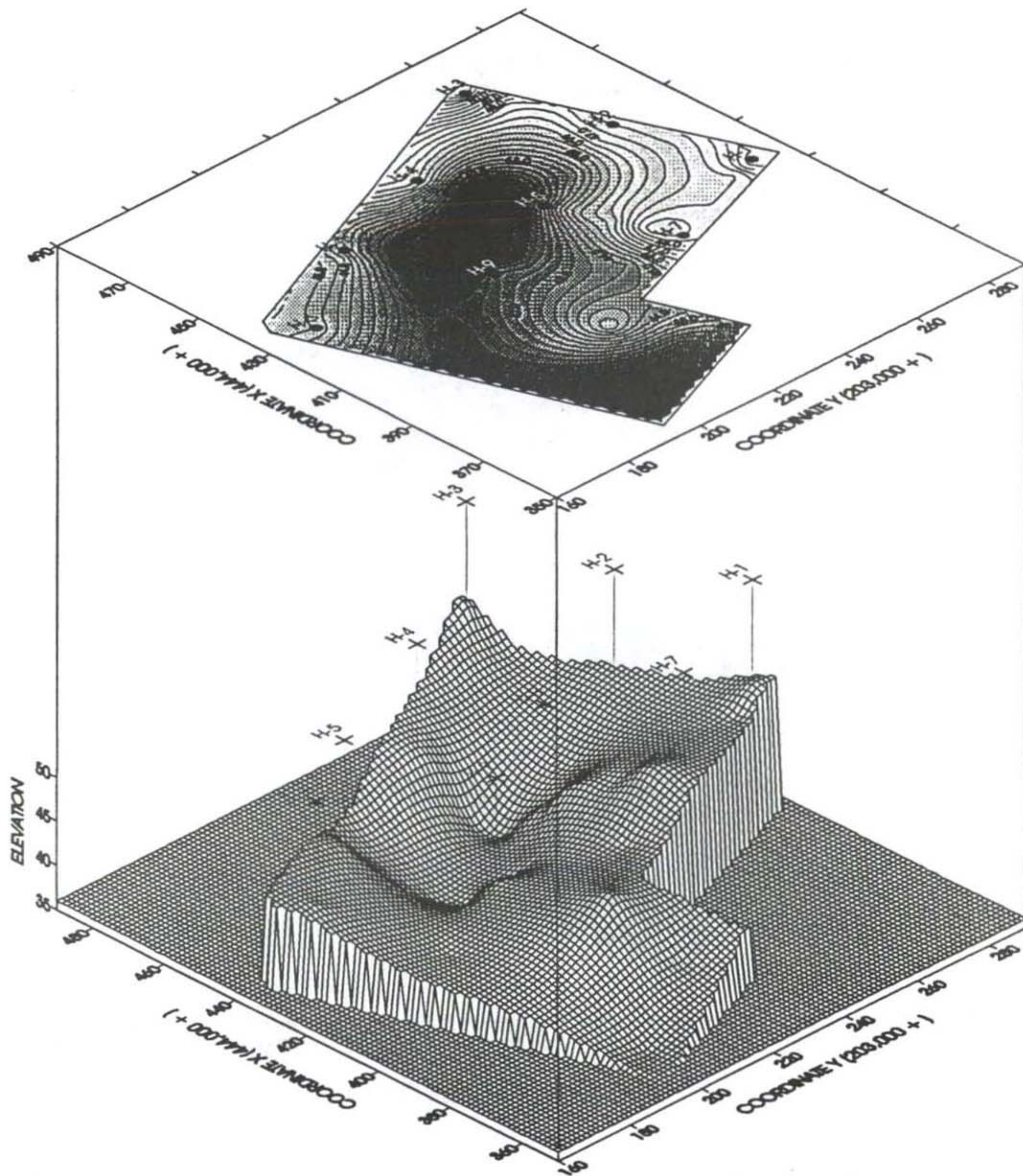


Fig. 144. Kangnam geomorphologic survey.
 A 3-dimensional topographic view of base rock structure of the Kangnam survey area.

LG Kangnam Tower Site

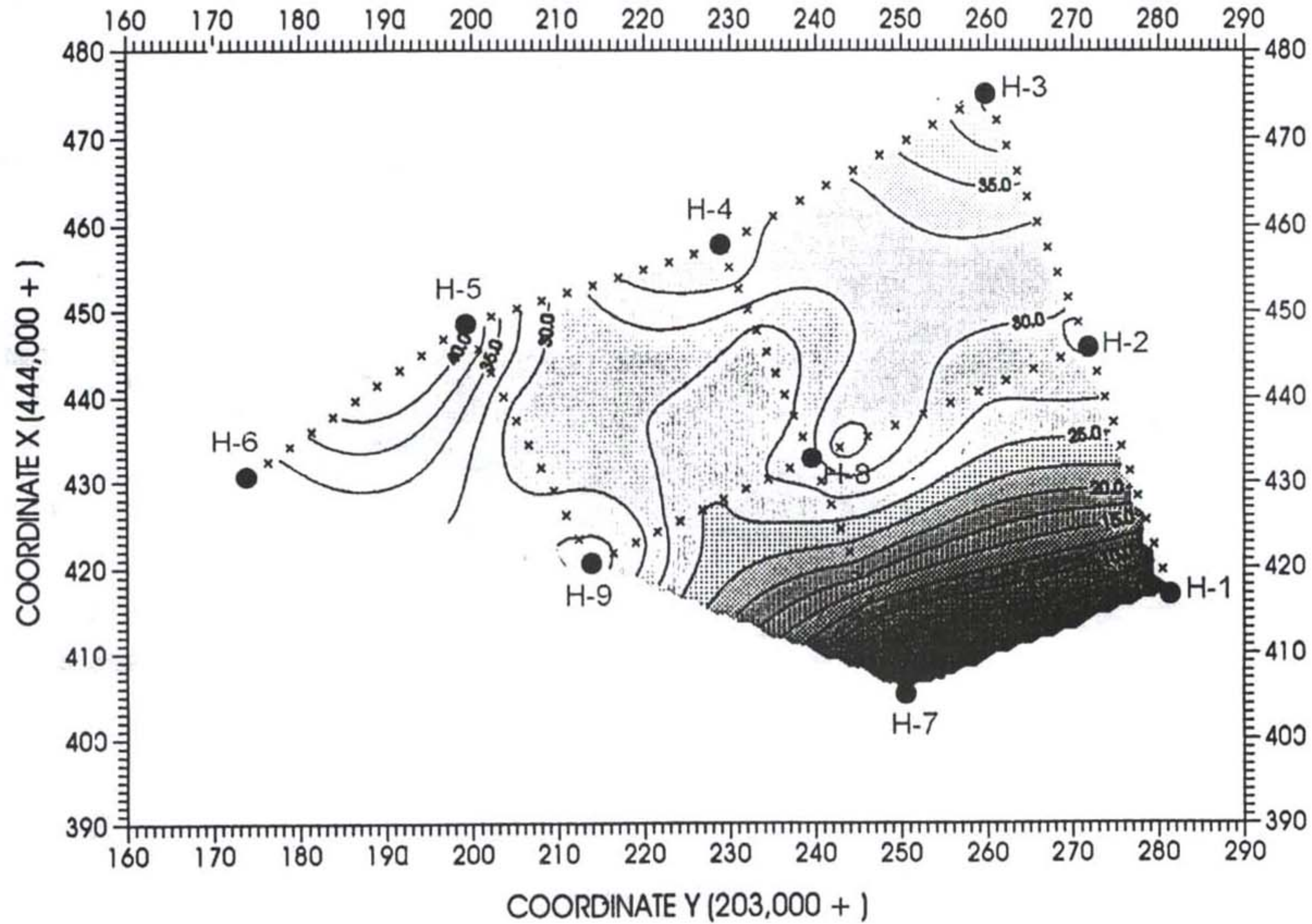


Fig. 145. Kangnam geotomographic survey.
A contour display of the intermediate base rock structure and the borehole locations

Geometry for Tomographic Analysis

Incheon Subway Site (Sur 411)

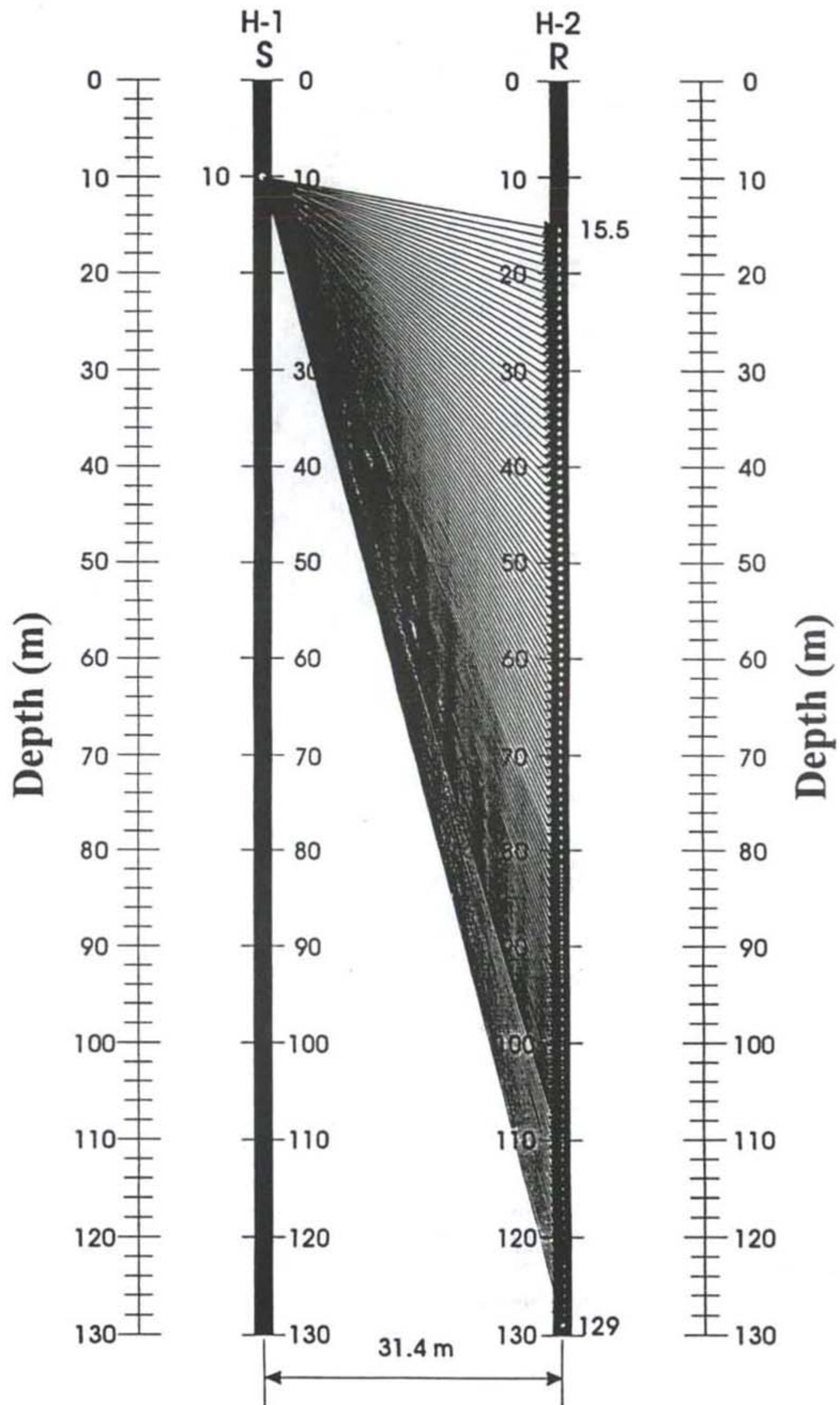


Fig. 146. Incheon subway geotomographic survey.
(a) Example of raypath diagrams for the H1-H2 crosshole measurements.

Geometry for Tomographic Analysis
Incheon Subway Site (Sur 412)

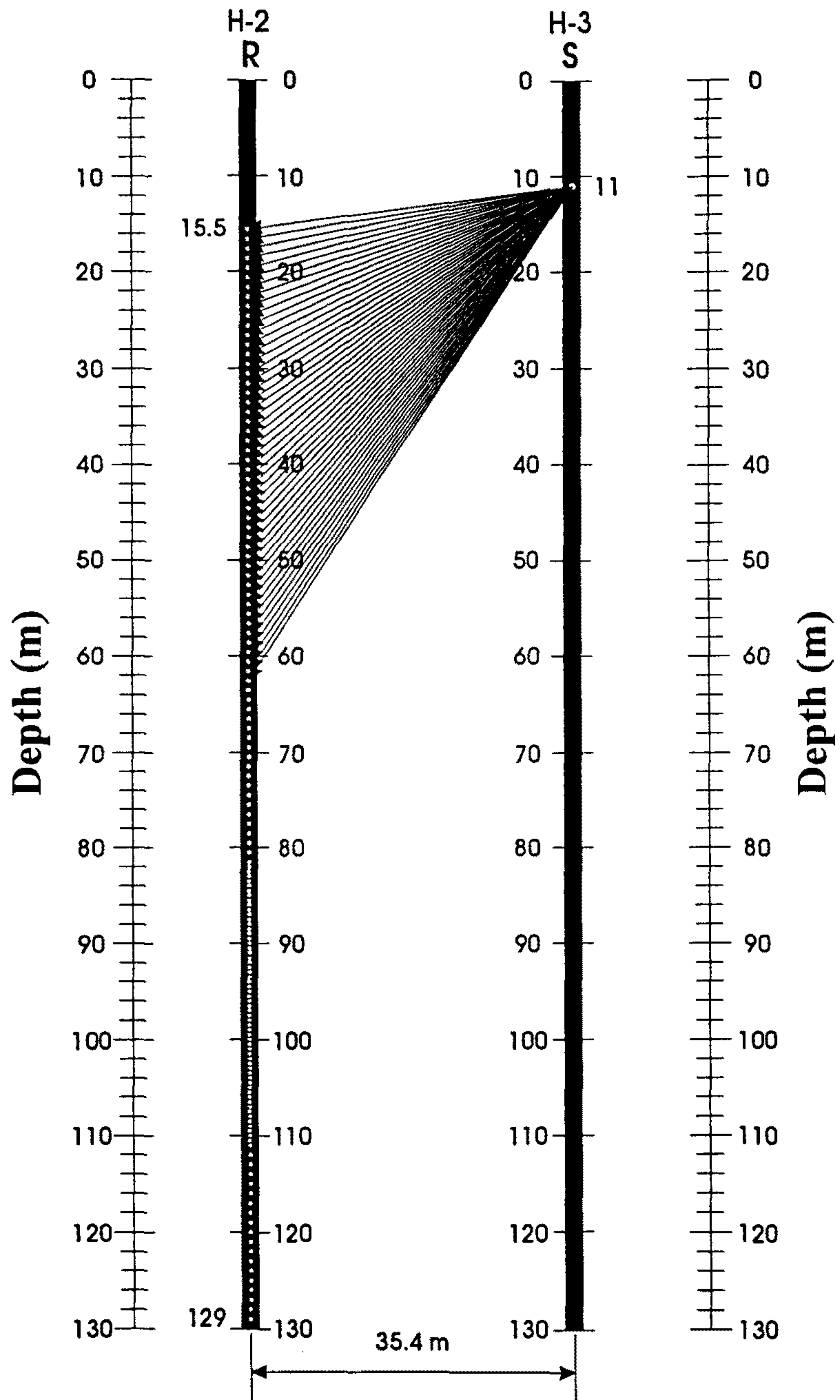


Fig. 146. (continued).
(b) Example of raypath diagrams for the H2-H3 crosshole measurements.

Incheon Subway Sur411
S(H-1) - R(H-2), S dep.= 11m

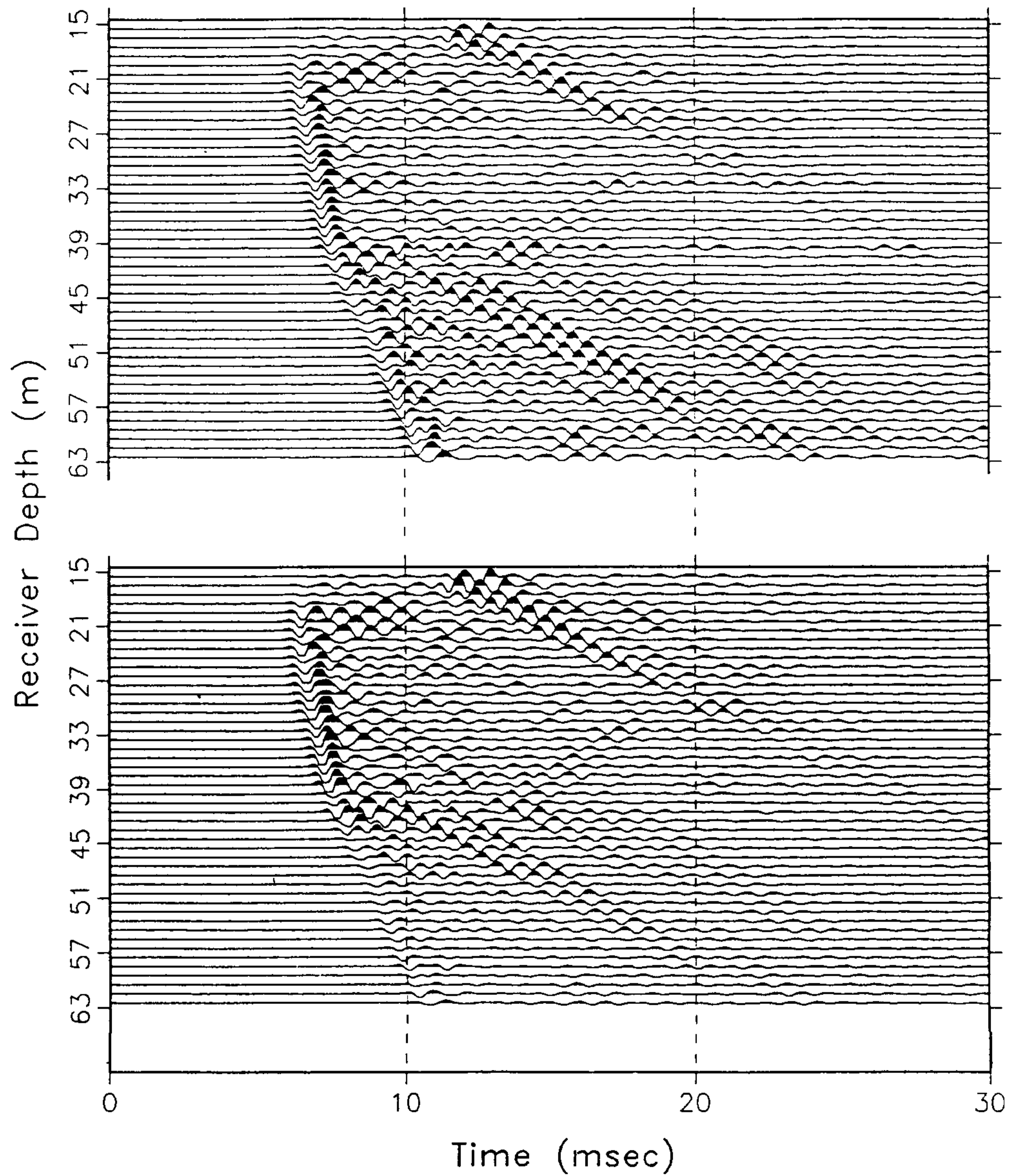


Fig. 147. Incheon subway geotomographic survey.
Example of crosshole data acquired from the H1-H2 cross section.
(a) shot gather 11.

Incheon Subway Sur411
S(H-1) - R(H-2), S dep.= 15m

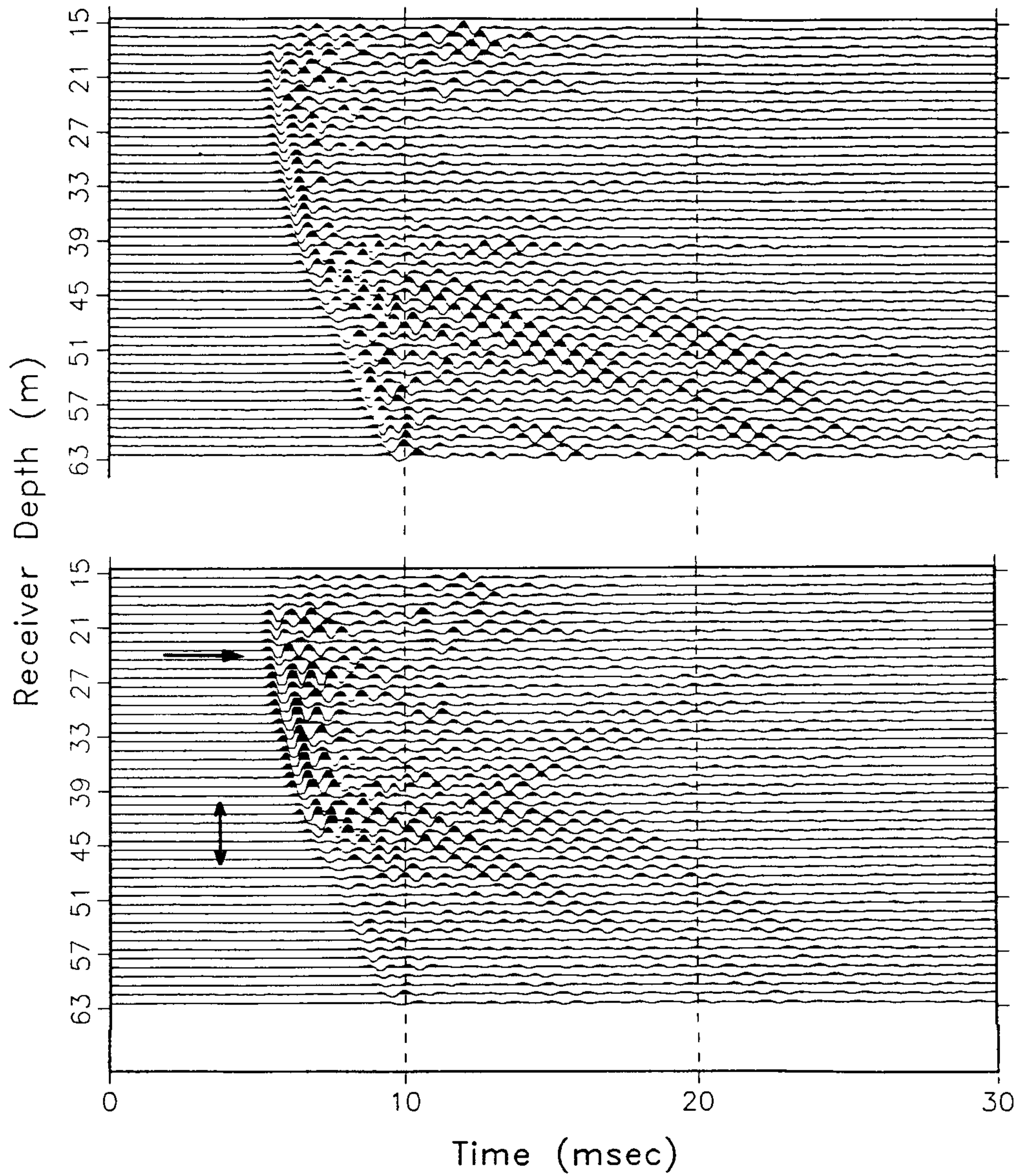


Fig. 147. (continued).
(b) shot gather 15.

Incheon Subway Sur411
S(H-1) - R(H-2), S dep.= 23m

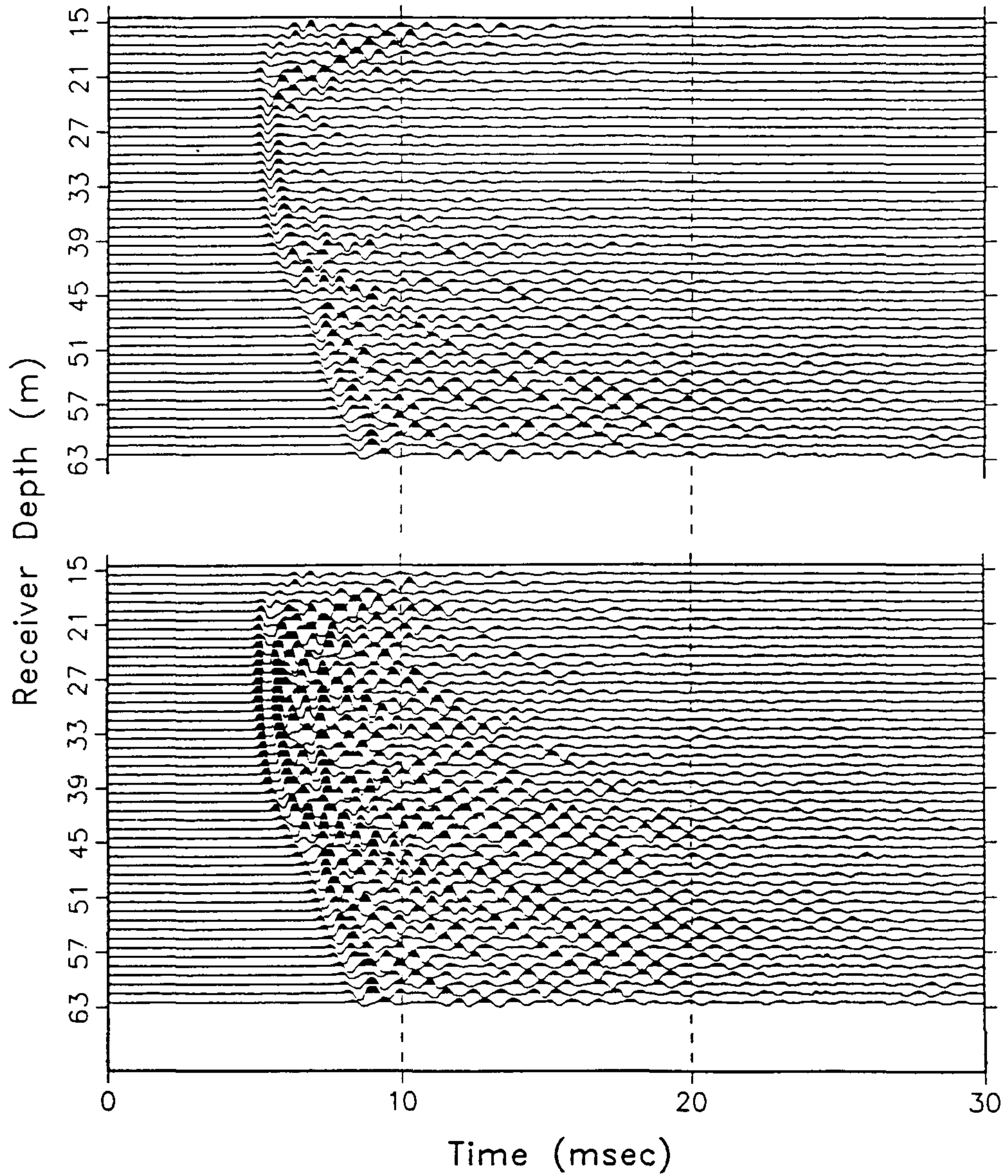


Fig. 147. (continued).
(c) shot gather 23.

Incheon Subway Sur411
S(H-1) - R(H-2), S dep.= 29m

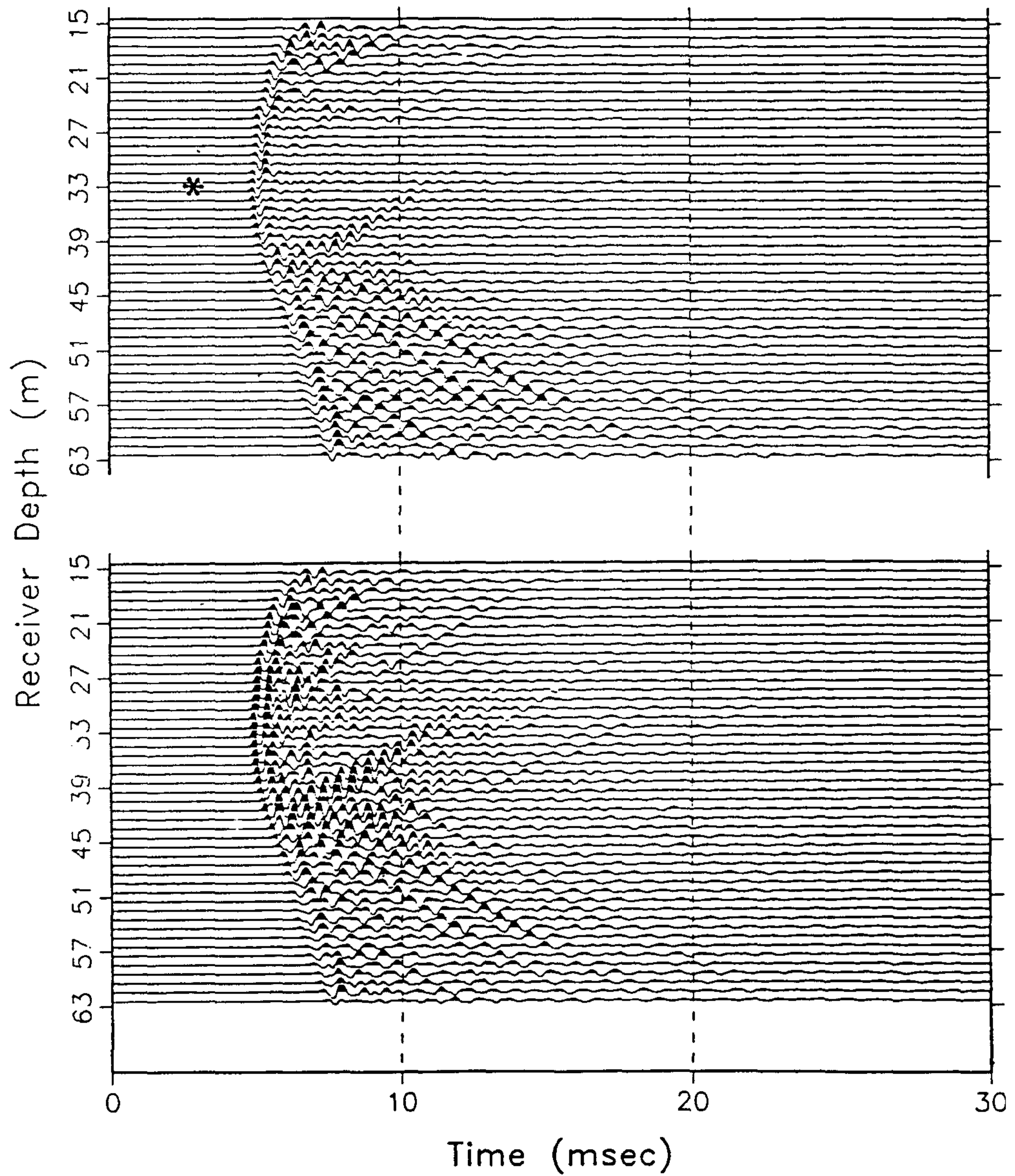


Fig. 147. (continued).
(d) shot gather 29.

Incheon Subway Sur411
S(H-1) - R(H-2), S dep.= 35m

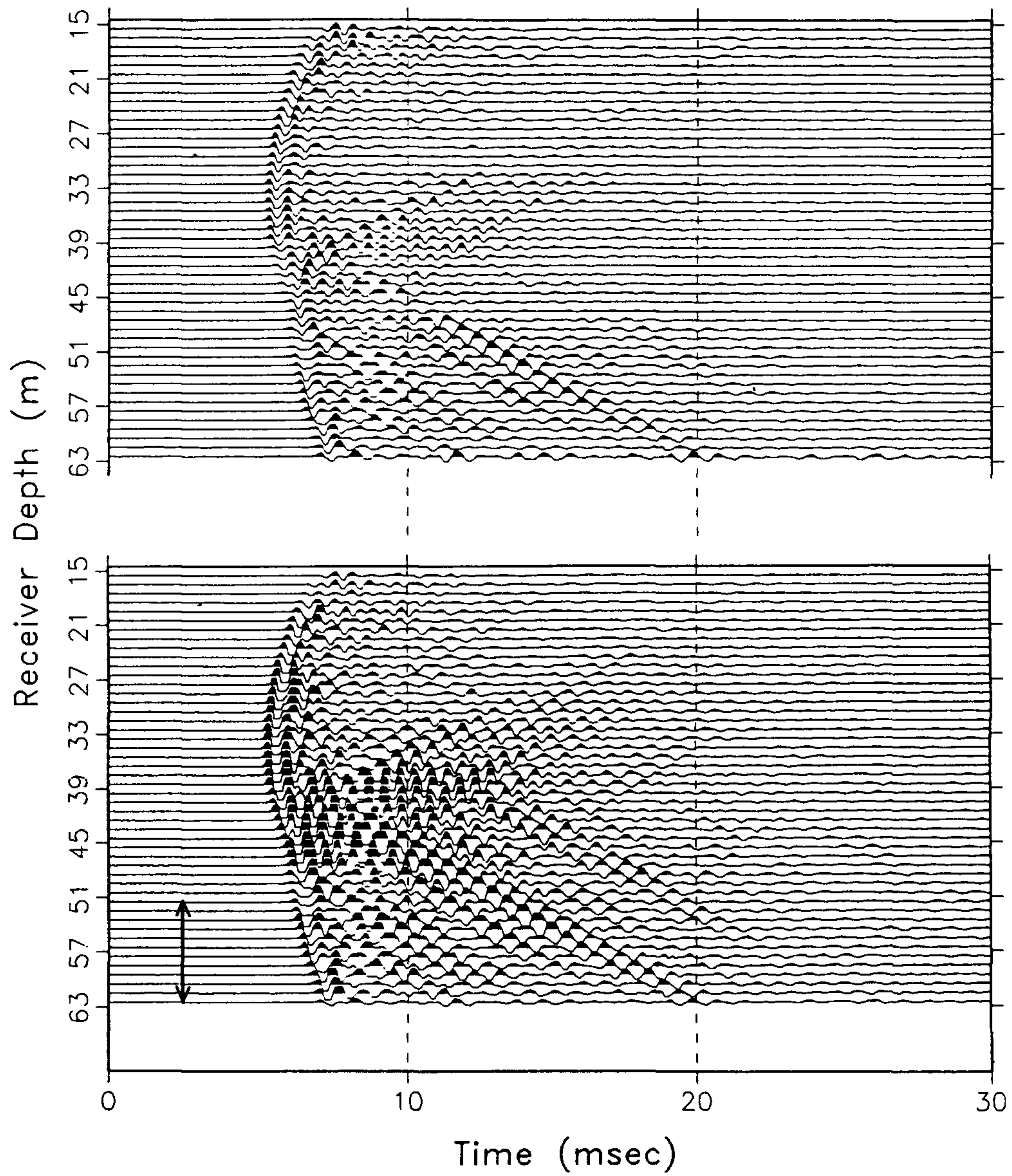


Fig. 147. (continued).
(e) shot gather 35.

반의 탄성파 속도가 상대적으로 높다는 것을 시사하는 것이 되었다. SUR 412 발생원 기록(Fig. 148 참조)에서도 이전과 유사한 결과를 보여주고 있다. 즉, (b)의 화살표로 표시된 구간은 이미 지적인 심도 구간(약 40m~46m)의 연약한 암층(암석강도에서도 뚜렷이 인식되고 있음)에 의해 탄성파의 에너지가 크게 약화된 것이다. 끝으로, (f)에는 이미 언급한 단층의 위치를 별표로 표시하고 있다.

Fig. 149 및 150은 H1-H2 및 H2-H3 단면에 대한 토모그램을 나타내고 있다. 전체적으로 연암과 경암이 완만한 굴곡을 이루면서 호상을 띠고 있음을 볼 수 있다.

끝으로 이미 언급한 바 토모그래피 탐사에서 제시되는 해석단면도는 전산처리 토모그램, 단면 측정데이터 분석 및 그에 대한 분석 경험을 바탕으로 하나의 지질학적 층서에 대한 정보를 표현하는 것이라 할 수 있다. Fig. 151은 본 탐사지역 천부 지반에 대한 H1-H2-H3 해석단면도를 나타내고 있다. 여기서 화살표로 표시된 구간은 터널 구간이다.

5. 소하천 침하 지반조사

인천시 북구 부평동 소재 소하천이 침하(Fig. 52 참조)됨에 따라 이에 대한 안정성 평가가 요구되었다. 따라서, 본 탐사의 목적은 토모그래피 기법에 의해 우선 침하지역을 가로지르는 지질 단면(시추공 H2와 H3 사이)에 대한 침하지역 하부 지반상태 즉, ① 기존 갯도주위 암반상태, ② 또 다른 채굴 공동의 존재 여부, ③ 암반의 풍화 내지 파쇄 상태를 파악하고 나아가서 그로부터 침하원인 규명을 위한 제반 정보 내지 바람직한 제안을 제시하

Incheon Subway Sur412
S(H-3) - R(H-2), S dep.= 13m

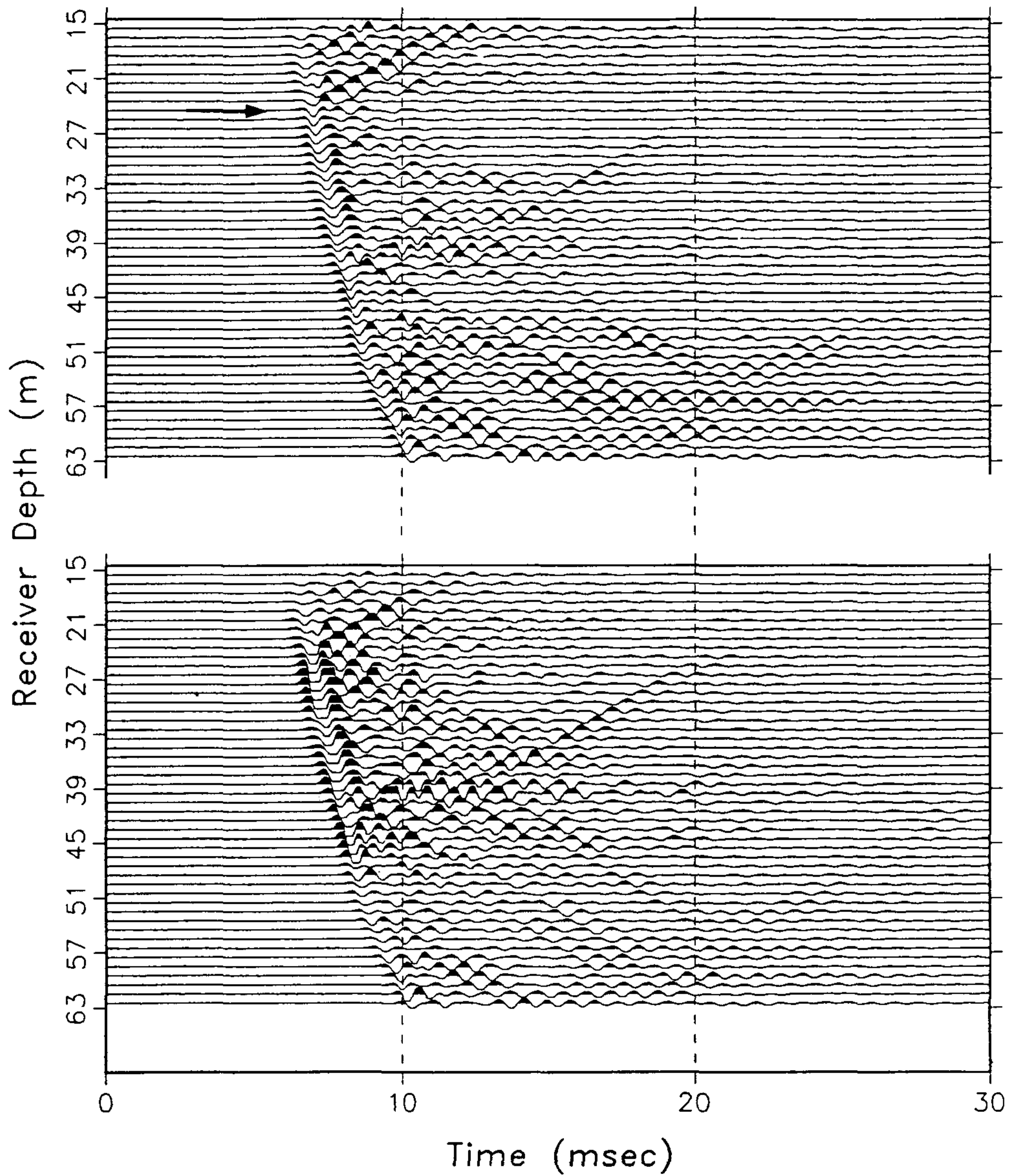


Fig. 148. Incheon subway geotomographic survey.
Example of crosshole data acquired from the H3-H2 cross section.
(a) shot gather 13.

Incheon Subway Sur412
S(H-3) - R(H-2), S dep.= 16m

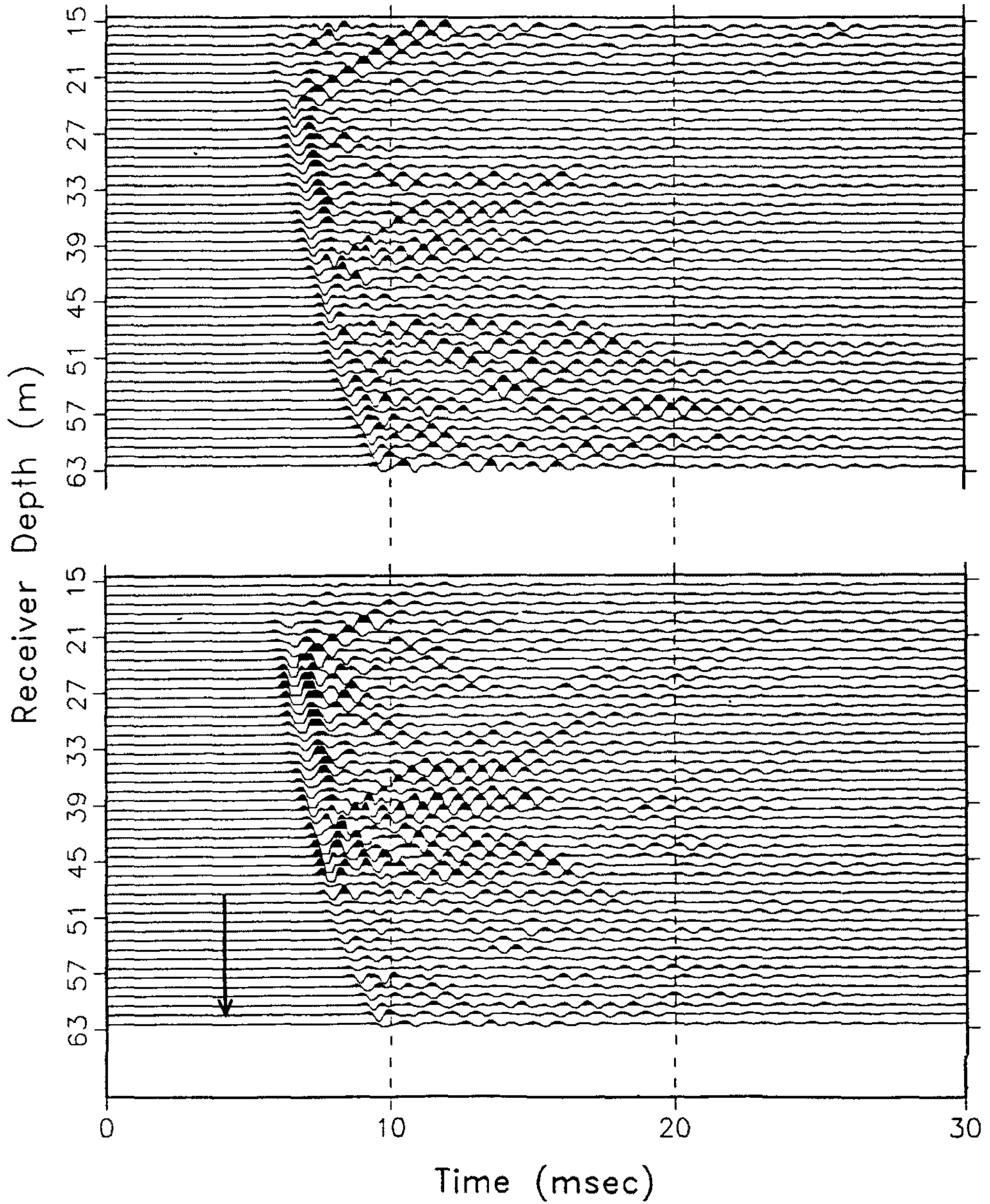


Fig. 148. (continued).
(b) shot gather 16.

Incheon Subway Sur412
S(H-3) - R(H-2), S dep.= 18m

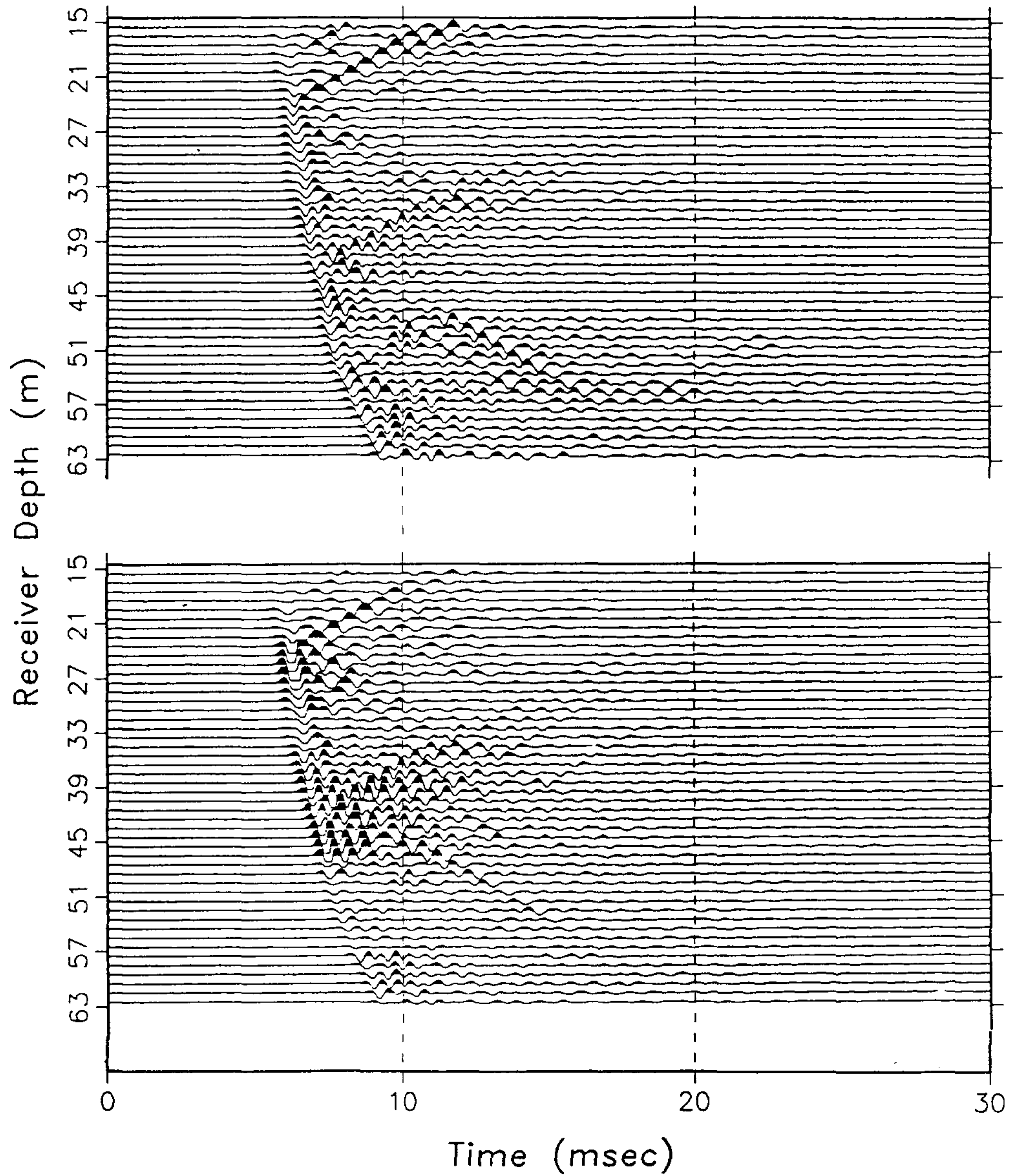


Fig. 148. (continued).
(c) shot gather 18.

Incheon Subway Sur412
S(H-3) - R(H-2), S dep.= 25m

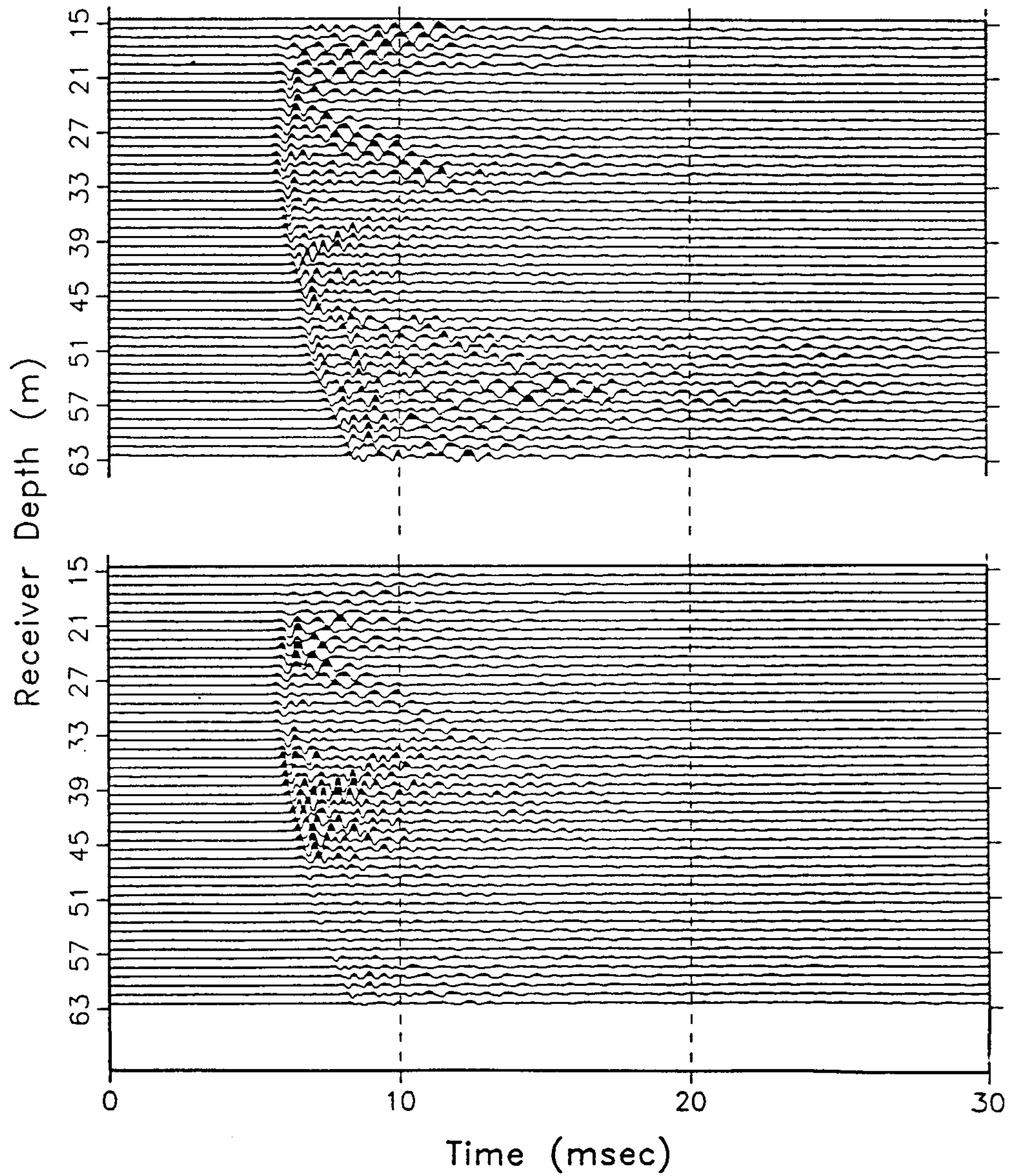


Fig. 148. (continued).
(d) shot gather 25.

Incheon Subway Sur412
S(H-3) - R(H-2), S dep.= 28m

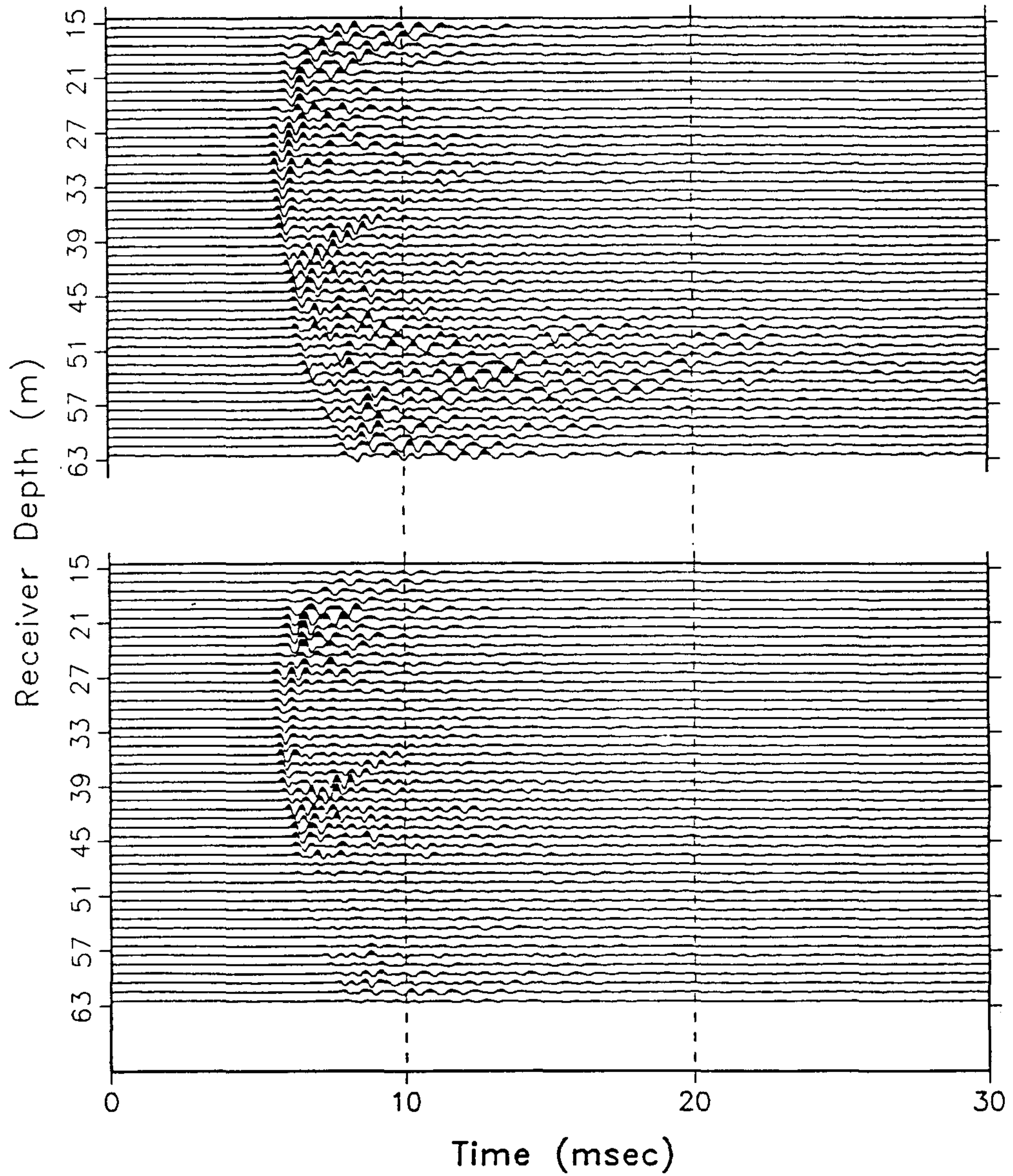


Fig. 148. (continued).
(e) shot gather 28.

Incheon Subway Sur412 (normalized by trace max.)
S(H-3) - R(H-2), S dep.= 33m, R dep.= 129-15.5m

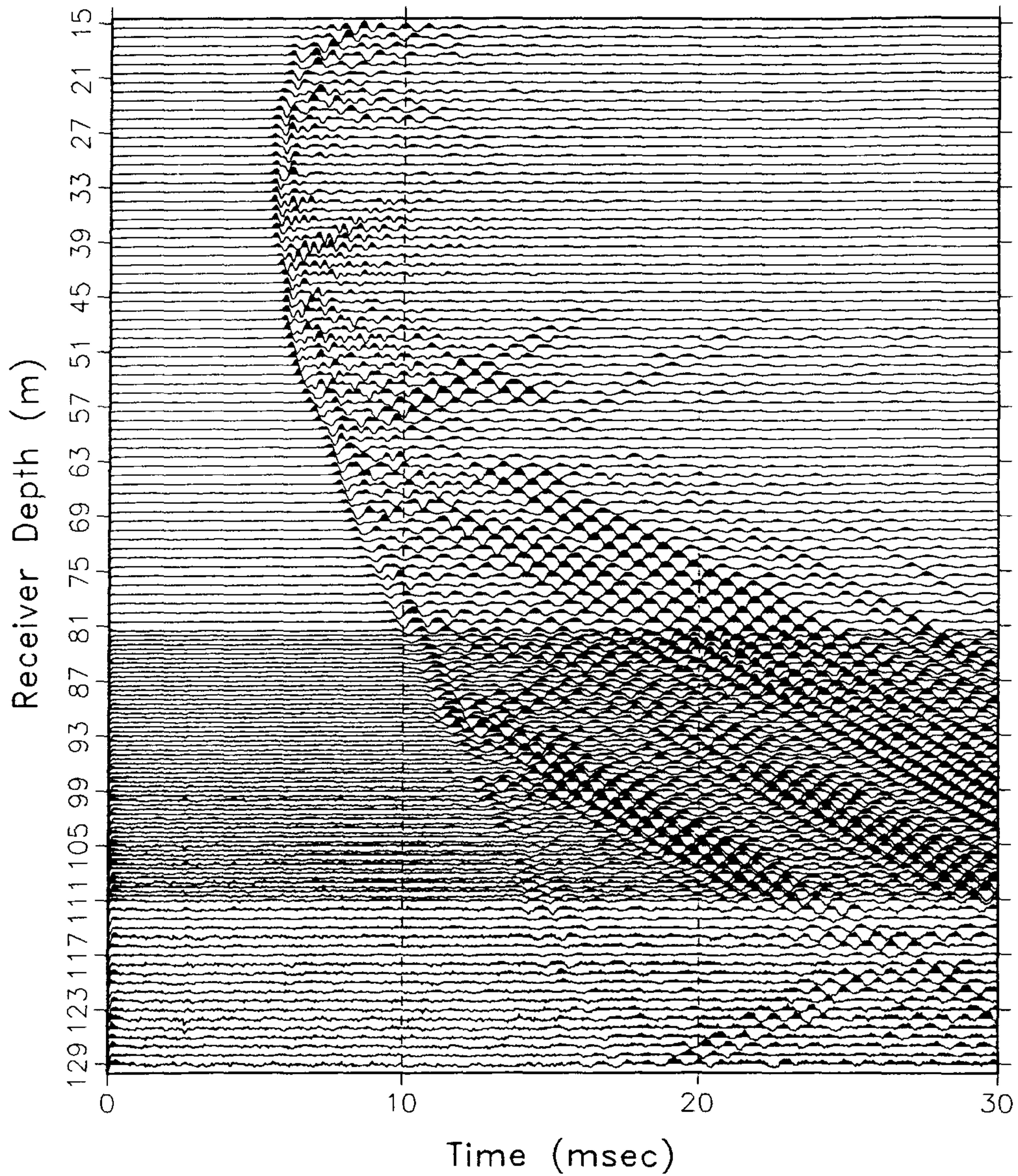


Fig. 148. (continued).
(f) shot gather 33 (trace max.).

Incheon Subway Sur412 (normalized by given value)
S(H-3) - R(H-2), S dep.= 33m, R dep.= 129-15.5m

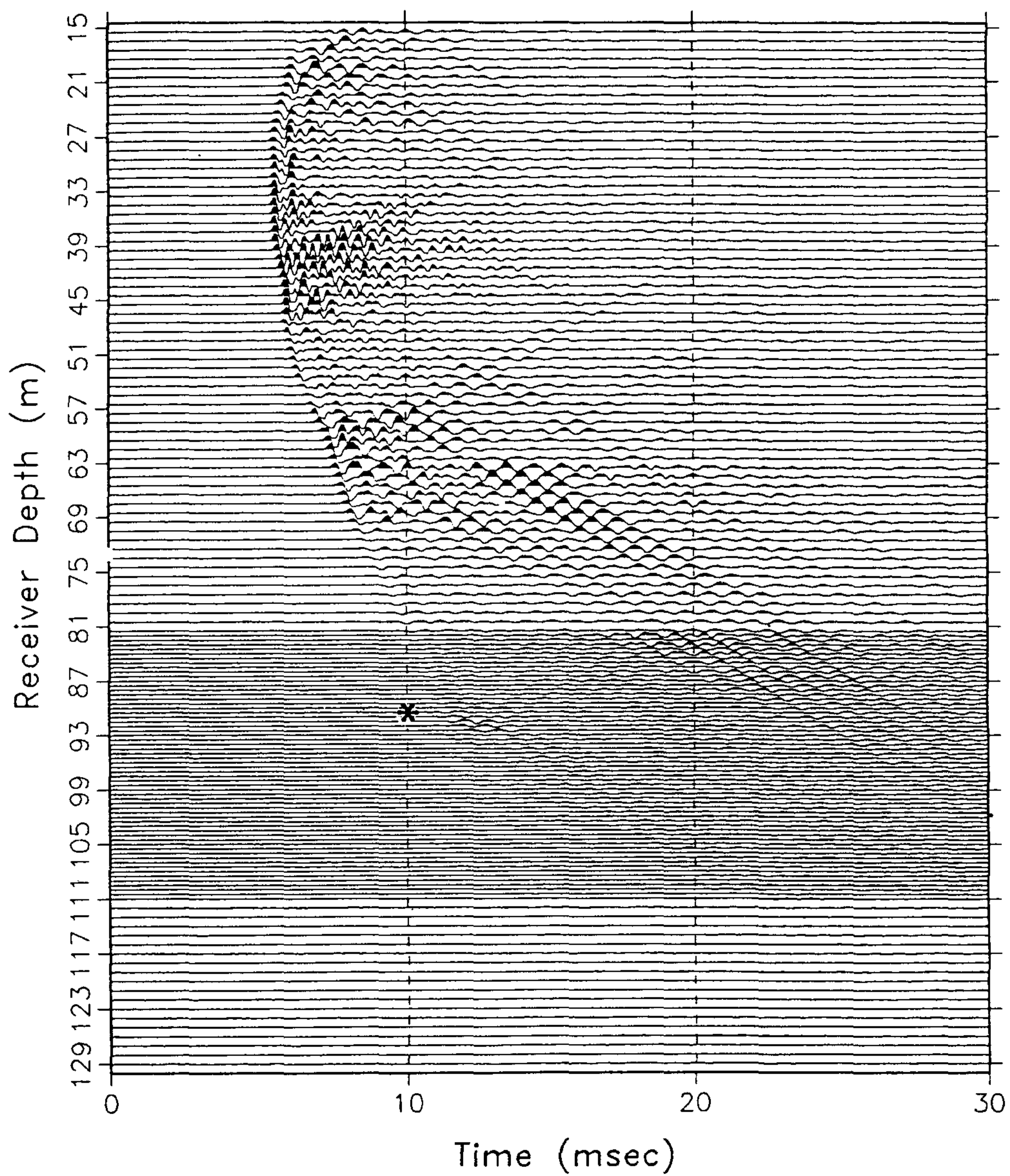


Fig. 148. (continued).
(g) shot gather 33 (given value).

H2-H3 TOMOGRAM (INCHEON)

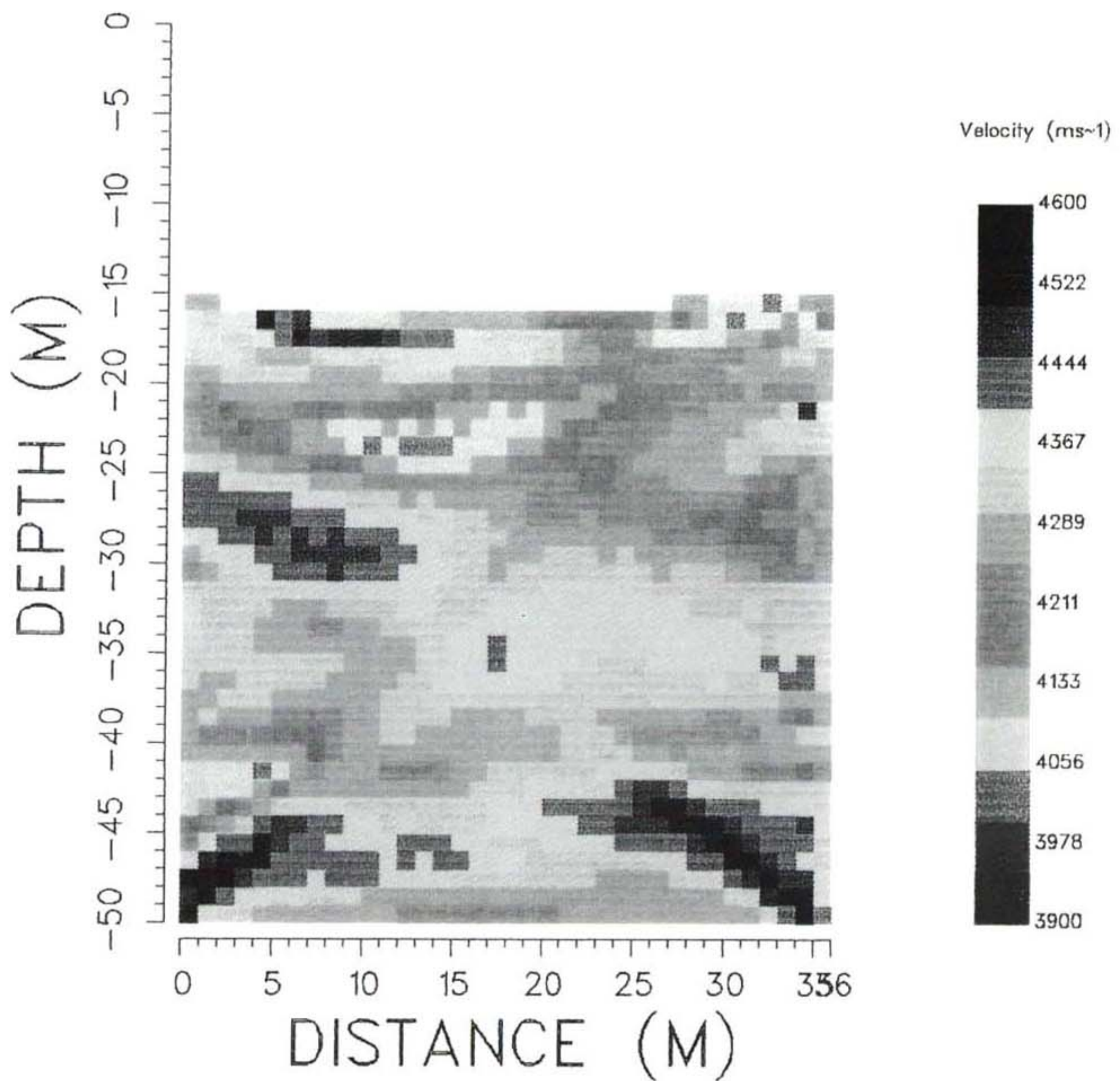


Fig. 149. Incheon subway geotomographic survey.
Geotomographic velocity distribution (tomogram) of the H1-H2 cross section.

H1-H2 TOMOGRAM (INCHEON)

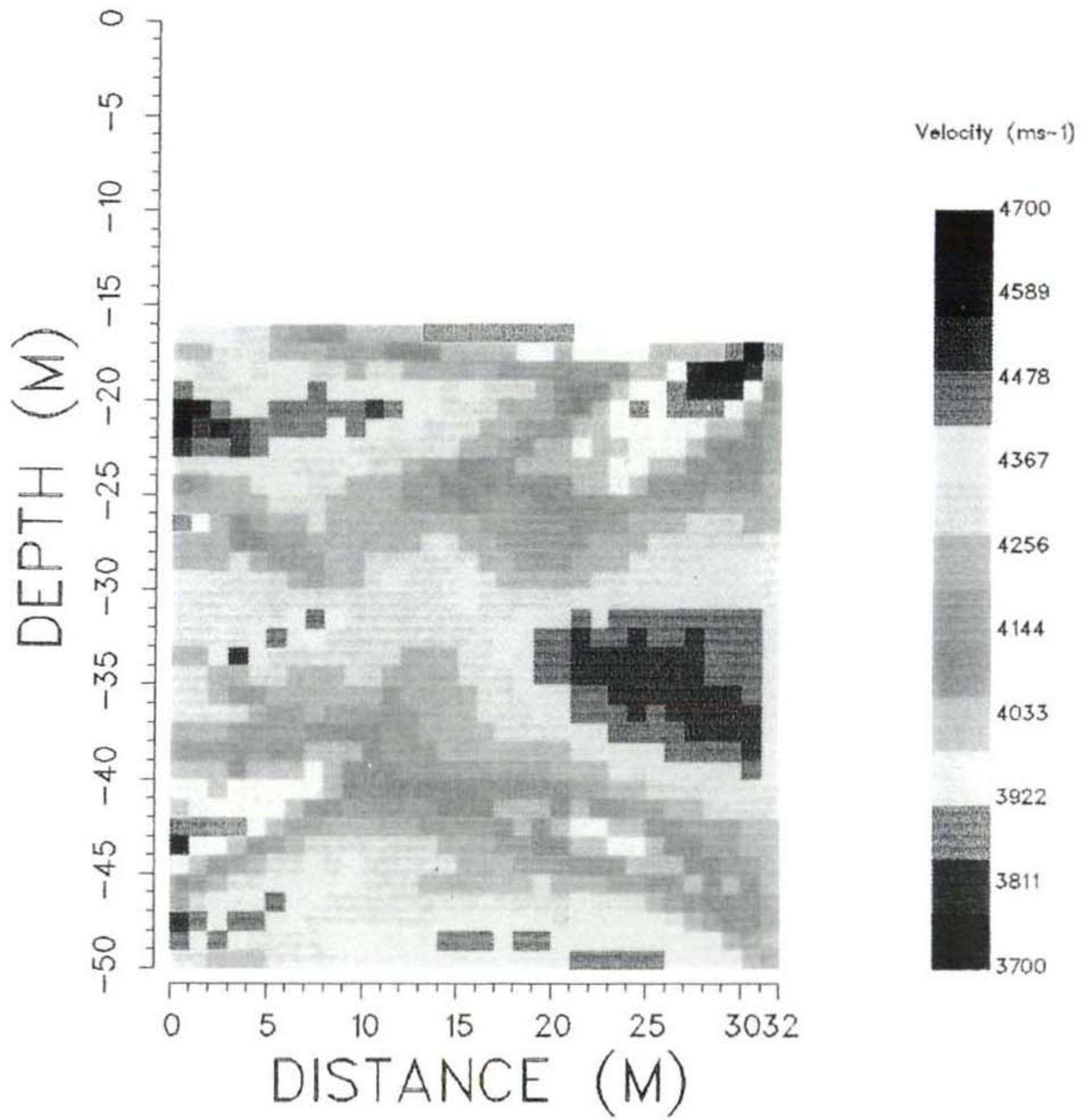


Fig. 150. Incheon subway geotomographic survey.
Geotomographic velocity distribution (tomogram) of the H2-H3 cross section.

Seismic Tomographical Interpretation (P-wave velocity distribution) H1-H2-H3 section

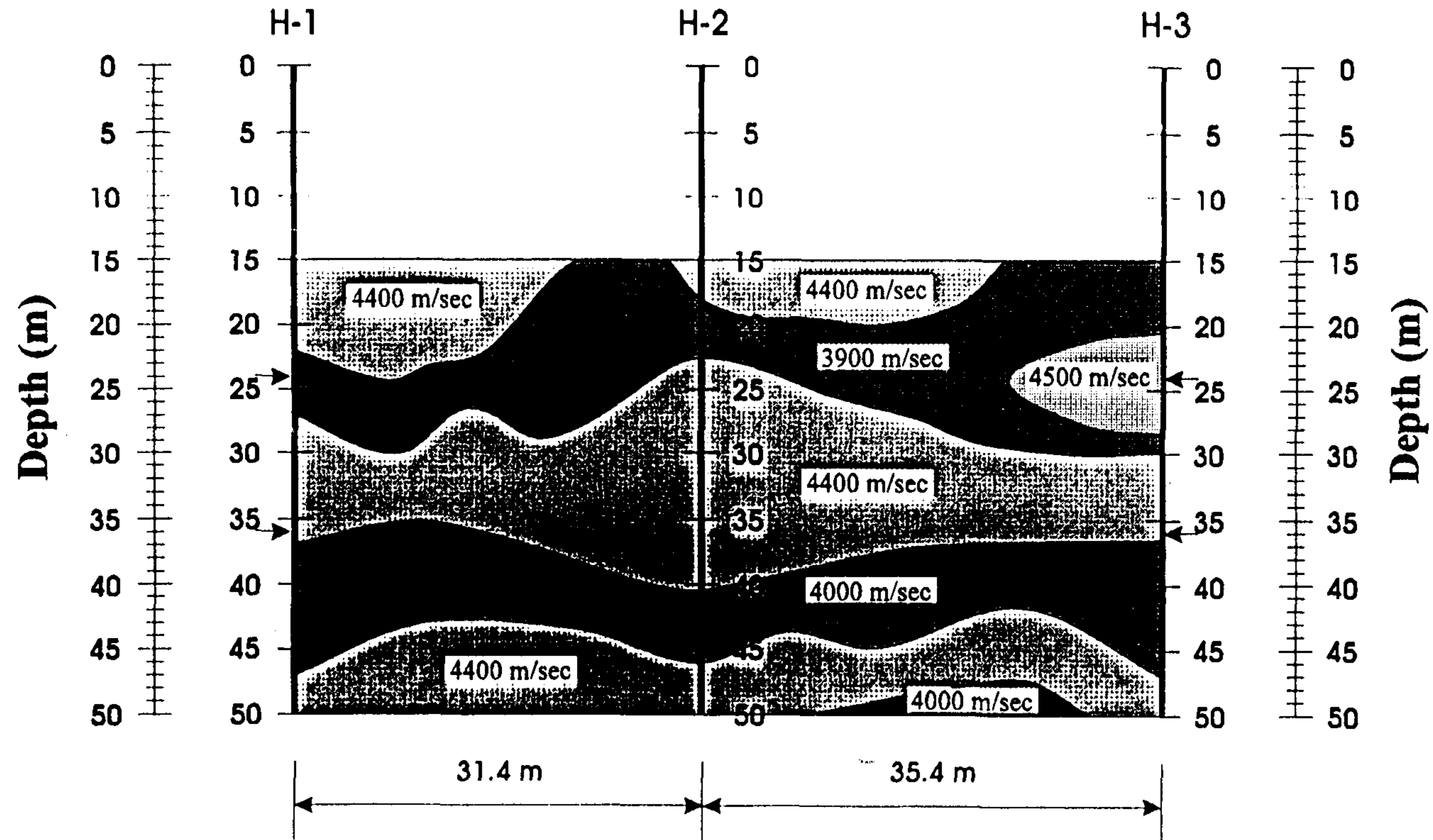


Fig. 151. Incheon subway geotomographic survey.
Interpreted physical properties of rocks of H1-H2-H3 cross section.

는 데 있었다.

Fig. 152는 단면측정 과정을 파선으로 나타내고 있다. 각 발생원에 대해 도합 96채널 기록이 얻게 되었으며 심도 11.5m~53m에서는 각 수진기 간격이 0.5m이다. Fig. 153은 shot No. 15 및 16(심도 54m 및 53m)에 대한 기록(96채널 기록)을 보여주고 있다. 여기서 화살표로 표시된 구간에는 초동의 주시 및 진폭의 변화가 인식된다. 이러한 현상은 갱도가 존재할 경우 관찰될 수 있다. Fig. 154에는 발생원 위치가 지표 방향으로 상향된 경우(shot No. 29 및 30: 심도 40m 및 39m) 측정된 기록을 나타내고 있다. 이번에는 심도 약 45m~50m 구간(화살표로 표시된 구간)에서 초동주시가 상대적으로 늦어지고 있음이 관찰된다. 이는 바로 이전의 기록(Fig. 153 참조)에 비추어 발생원 위치(심도 약 40m) 주위에 저속도 이상대가 존재하고 있음을 의미하는 것이다. 한편, 본 탐사에서 얻게된 모든 기록에서는 tube wave의 발달이 현저하게 나타나고 있다(짧은 화살표로 표시). 이러한 탄성파의 생성은 주로 수진기 시추공의 절리 내지 단층에 의해 유발된다. 따라서 상향 및 하향되는 tube wave가 상호 교차되는 위치는 역으로 수진기 시추공에서 인식되는 절리나 단층의 위치와 일치하게 되는 것이다. Fig. 155는 shot 39 및 40(심도 30m 및 29m)에 대한 기록을 나타내고 있다. 이번에는 심도 약 23m(화살표로 표시) 주위에서 초동주시의 지연 현상이 뚜렷이 관찰되고 있다. 즉, 이 부근에는 소규모 저속도 이상대가 존재하고 있다는 것이다.

Fig. 156은 초동의 주시를 발체하여 역산(inversion)함으로써 얻게된 주시역해 결과(토모그램) 즉, 탄성파속도 분포를 나타내고 있다. 시추공 H3에 인접한 약 40m level에서 갱도 형태가 재현되고 있으며 시추공 H3 바닥 약

Geometry for Tomographic Analysis

YongPung Subsidence Site (Sur 401)

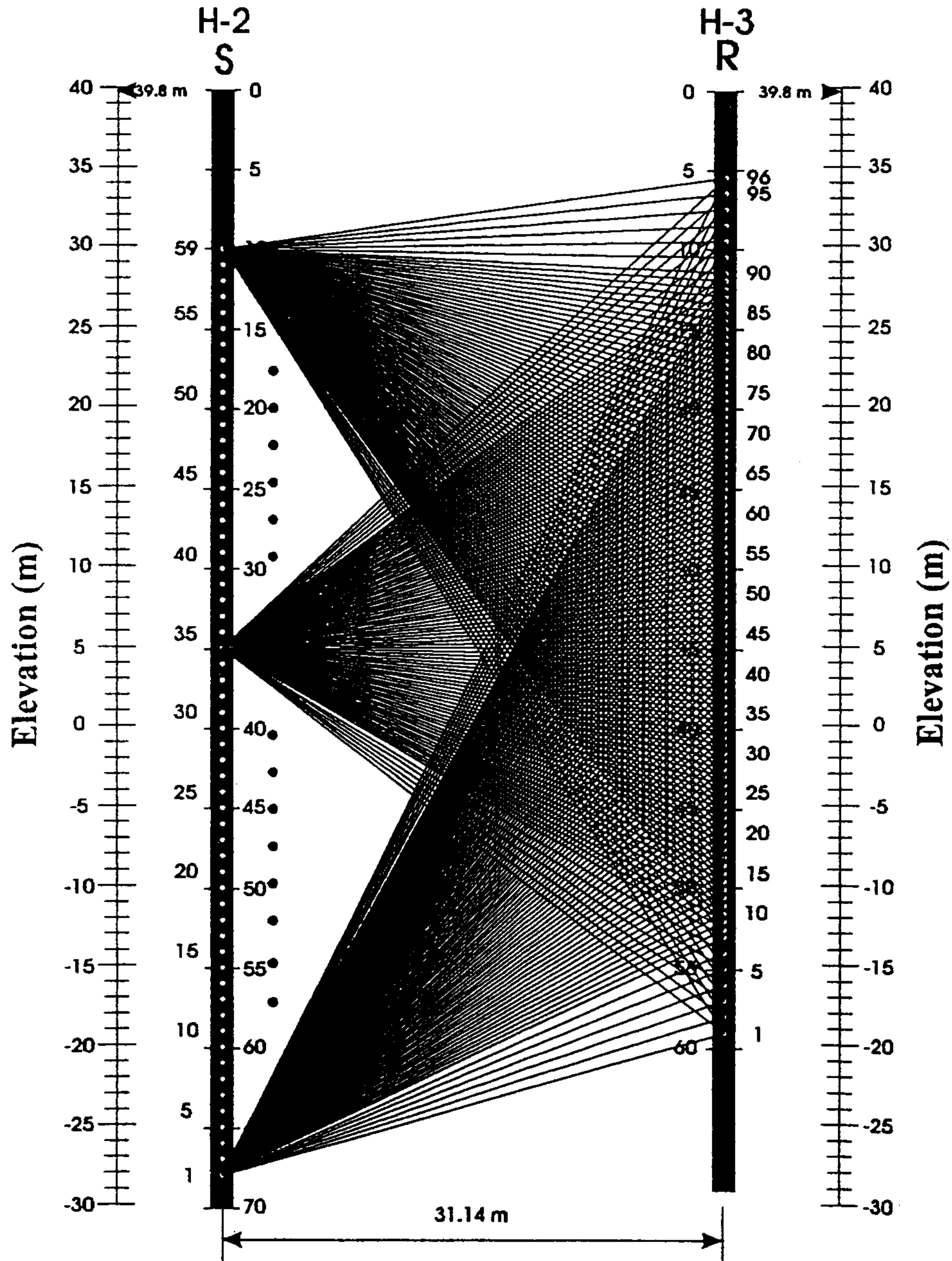
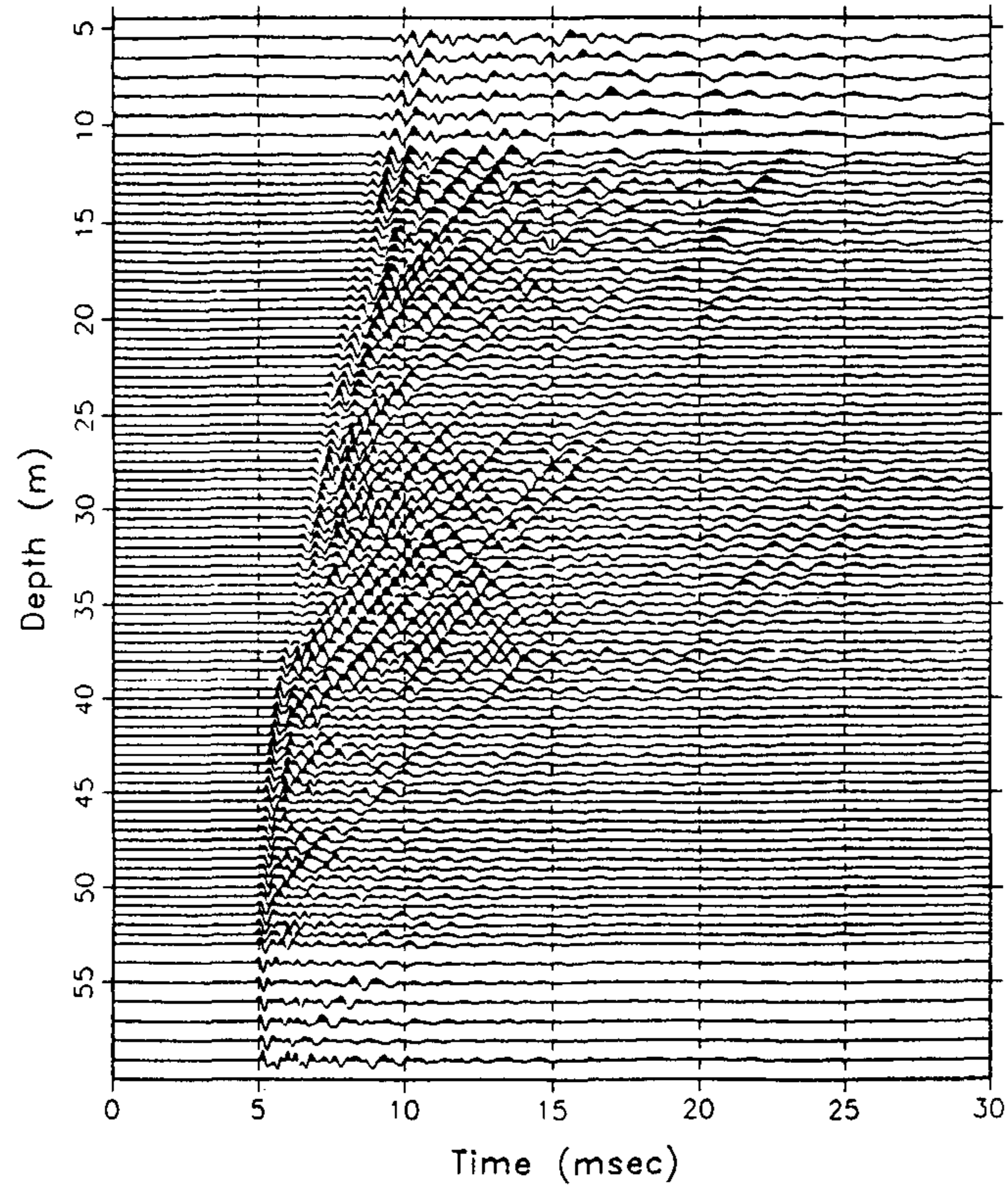


Fig. 152. Bupyong subsidence geotomographic survey.
Raypath diagram for the geotomographic measurements.

YongPung Sur401 (normalizing by trace max.)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 15, R = 59 - 5.5 m



YongPung Sur401 (normalizing by trace max.)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 16, R = 59 - 5.5 m

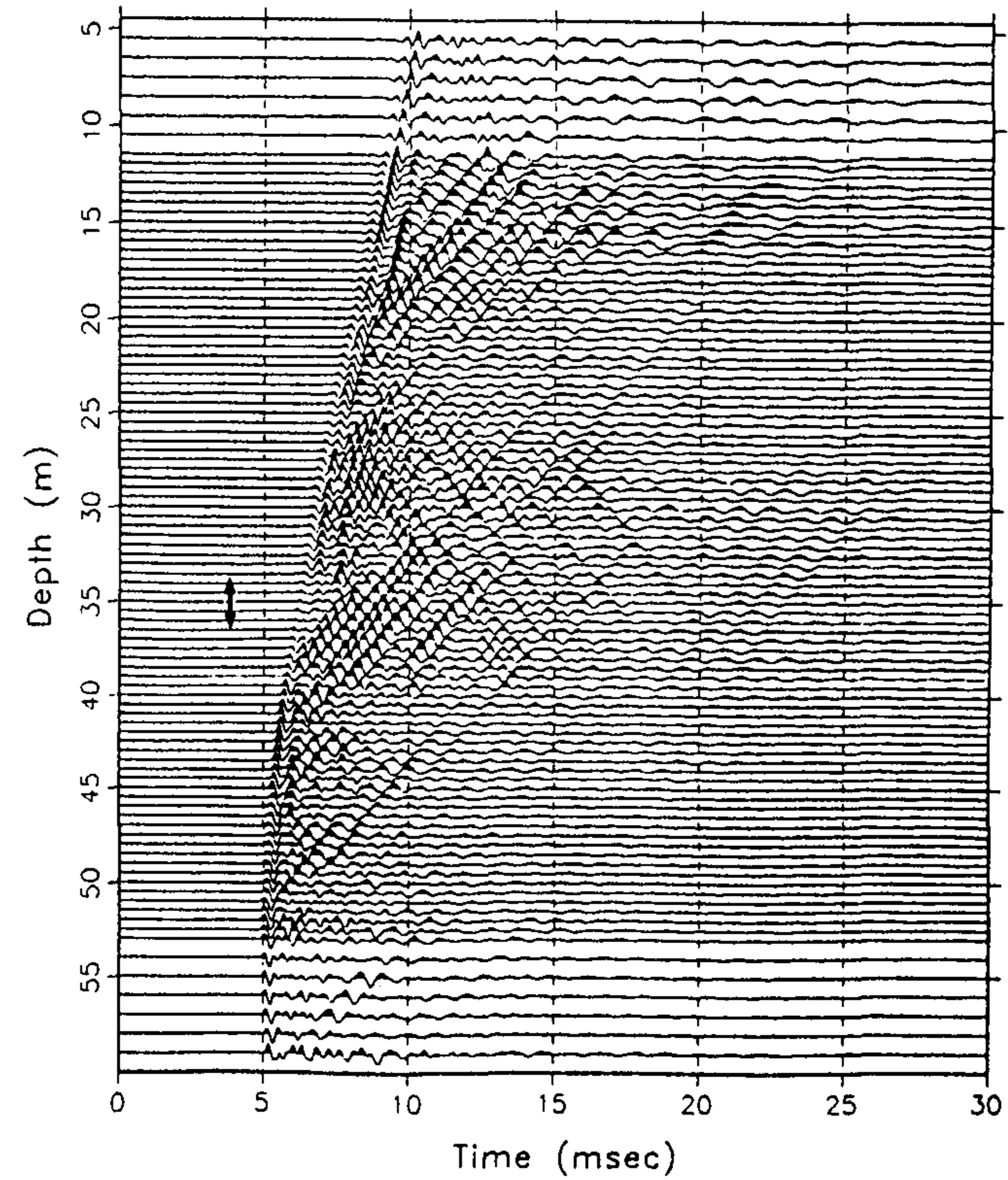
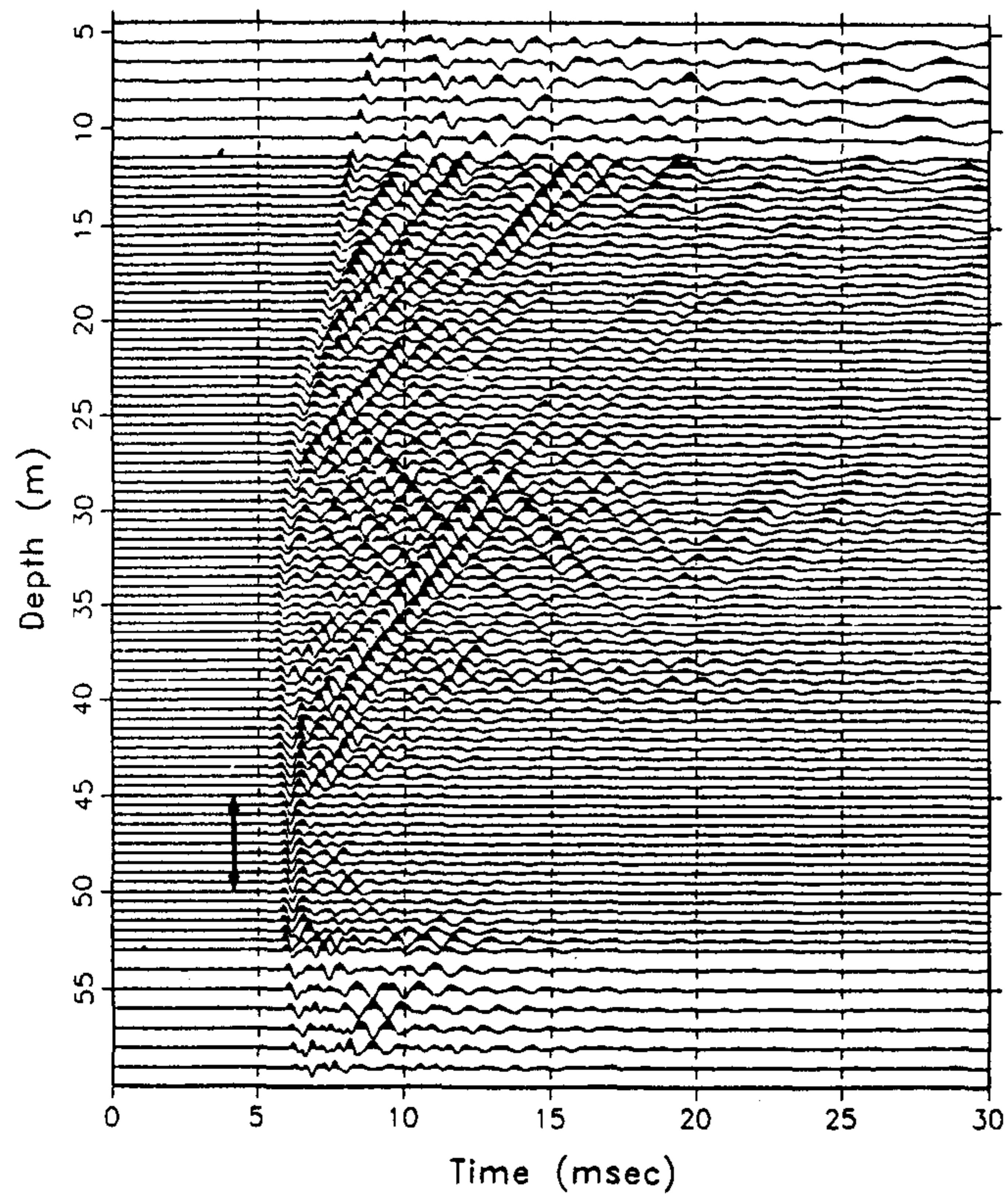


Fig. 153. Bupyong subsidence geotomographic survey.
Example of crosshole data (shot gather 15, 16) acquired from the H2-H3 cross section.

YongPung Sur401 (normalizing by trace max.)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 29, R = 59 - 5.5 m



YongPung Sur401 (normalizing by trace max.)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 30, R = 59 - 5.5 m

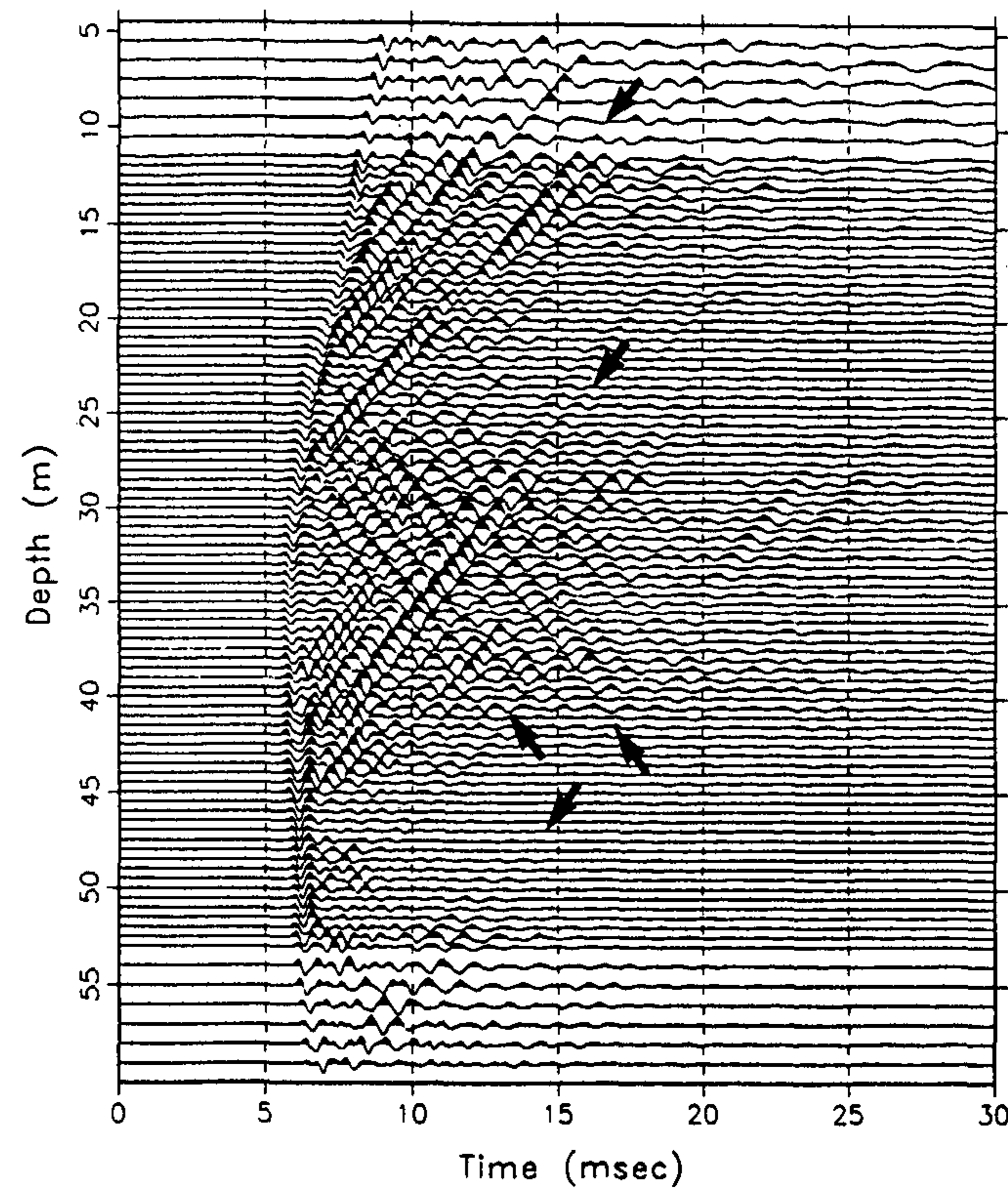
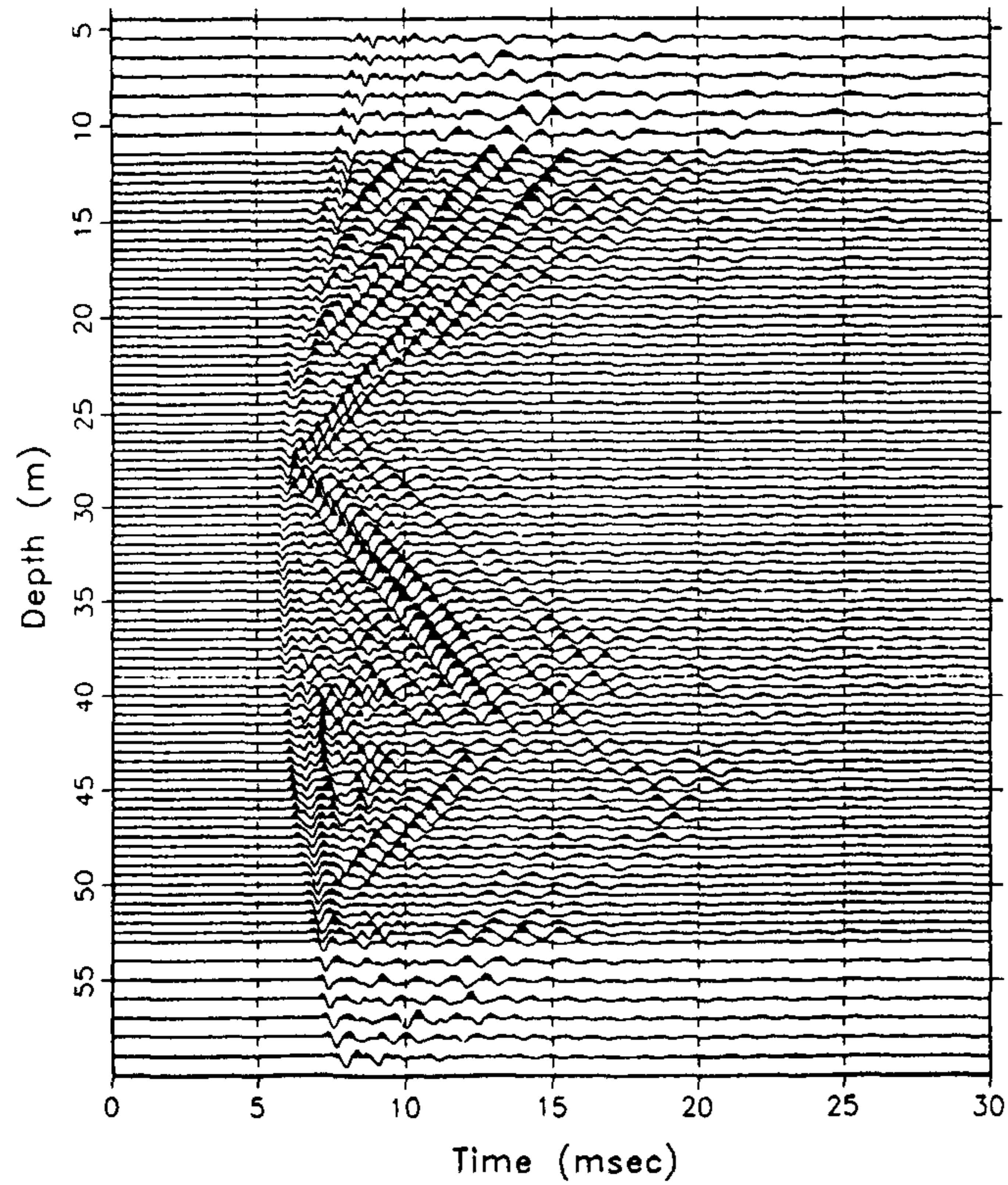


Fig. 154. Bupyong subsidence geotomographic survey.

Example of crosshole data (shot gather 29, 30) acquired from the H2-H3 cross section.

YongPung Sur401 (normalizing by trace max.)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 39, R = 59 - 5.5 m



YongPung Sur401 (normalizing by trace max.)
S(H-2) - R(H-3), S No.= 40, R = 59 - 5.5 m

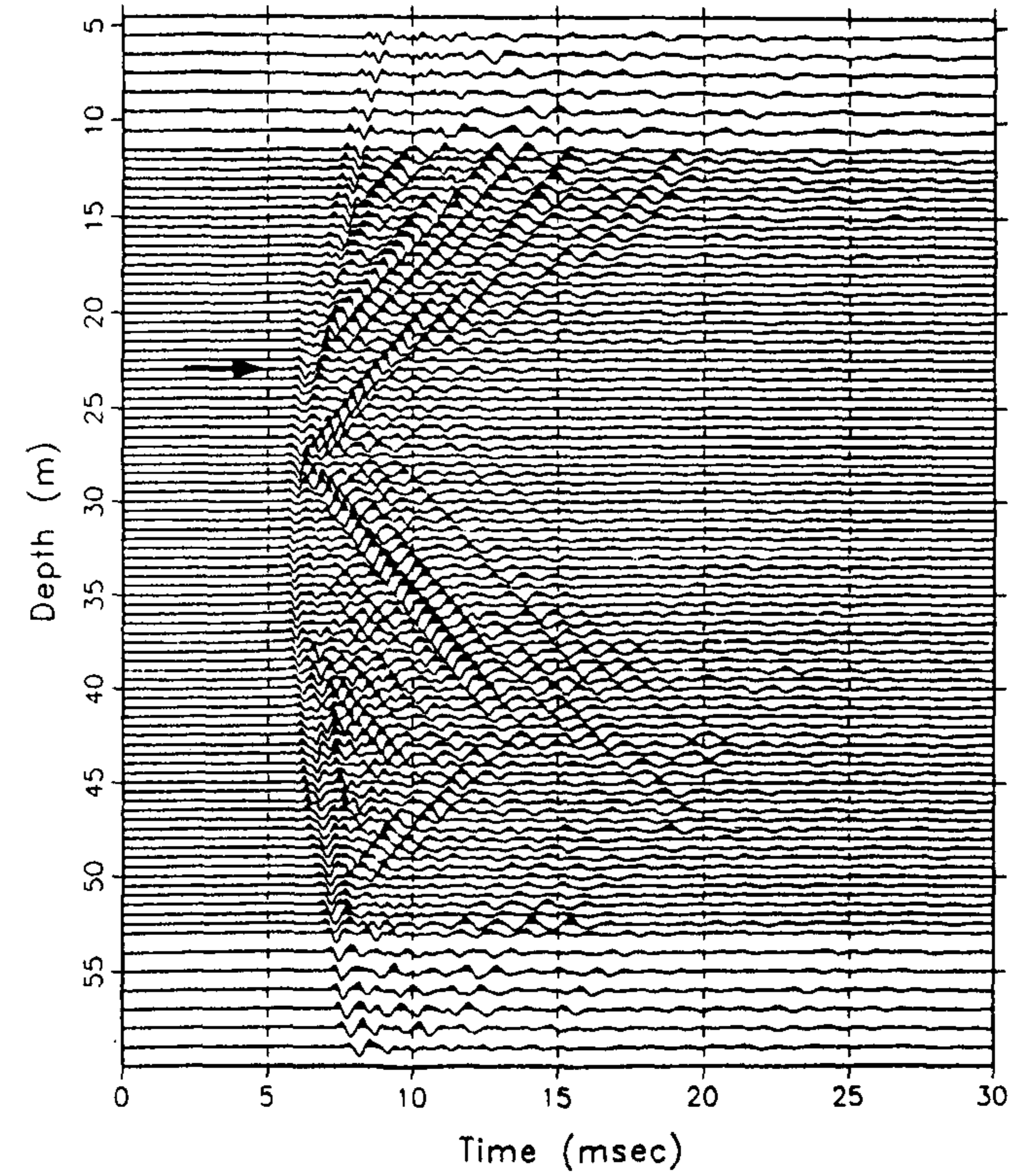


Fig. 155. Bupyong subsidence geotomographic survey.
Example of crosshole data (shot gather 39, 40) acquired from the H2-H3 cross section.

H2-H3 TOMOGRAM (YONGPUNG)

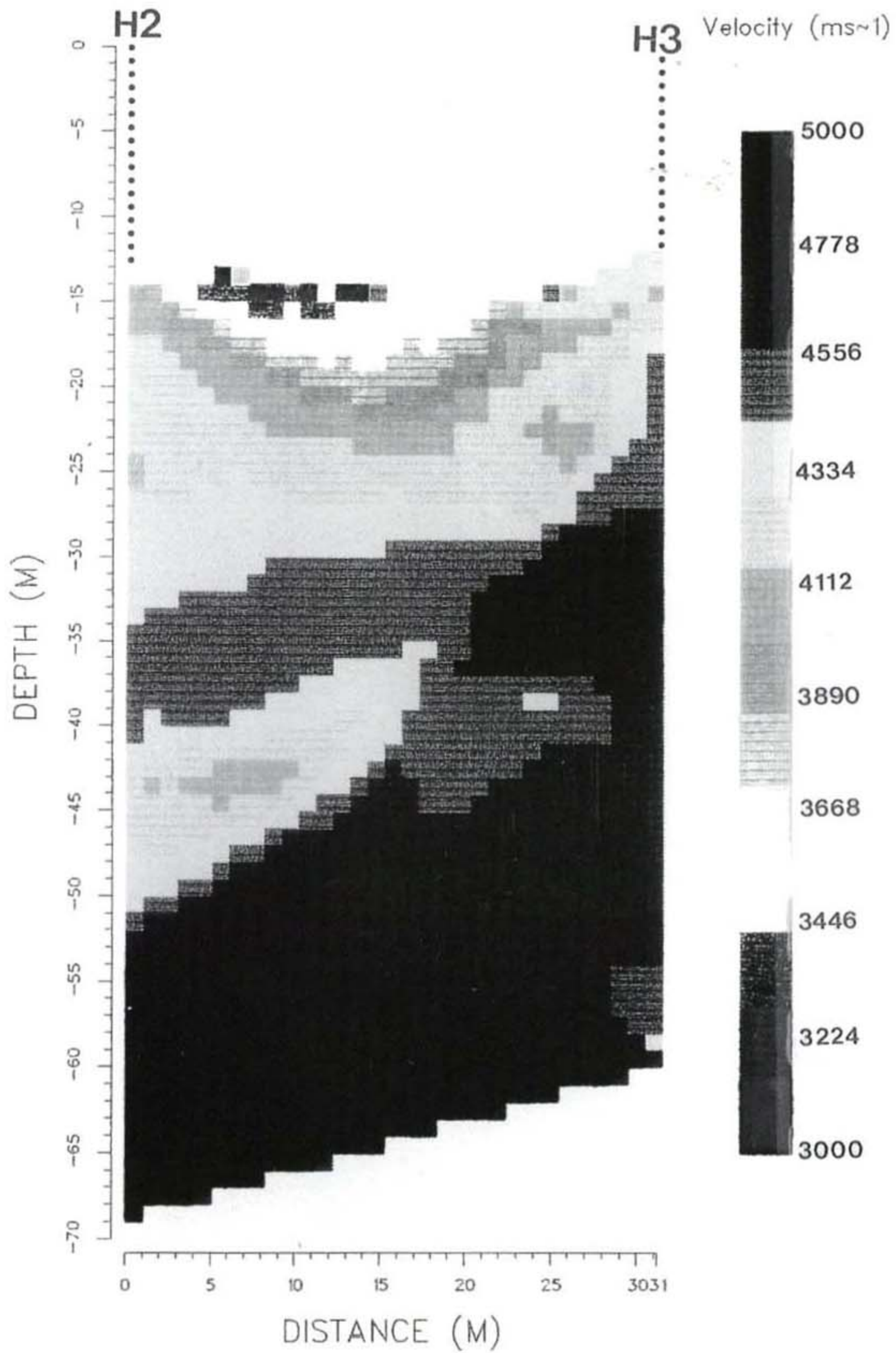


Fig. 156. Bupyong subsidence geotomographic survey. Geotomographic velocity distribution (tomogram) of the H2-H3 cross section.

60m level에는 갱도에 의해 유래된 소규모 저속도 이상대 형태가 관찰되고 있다. 본 토모그램에서 특기할 점은 무엇보다 시추공 H2 주위 약 45m level에서 시추공 H3 방향으로 완만한 경사를 띠면서 연장되고 있는 저속도 이상대가 인식되고 있다는 데 있다. 이러한 이상대는 하부 채굴적 일부가 본 측정단면에 인접될 경우 형성될 수 있다. 끝으로, Fig. 157은 측선단면(시추공 H2-H3)에 대한 해석단면도를 나타내고 있다. 각 층에 기재된 탄성파속도는 P파의 평균속도를 의미한다.

Seismic Tomographical Interpretation (P-wave velocity distribution)
 YongPung Subsidence Site (H2-H3 section)

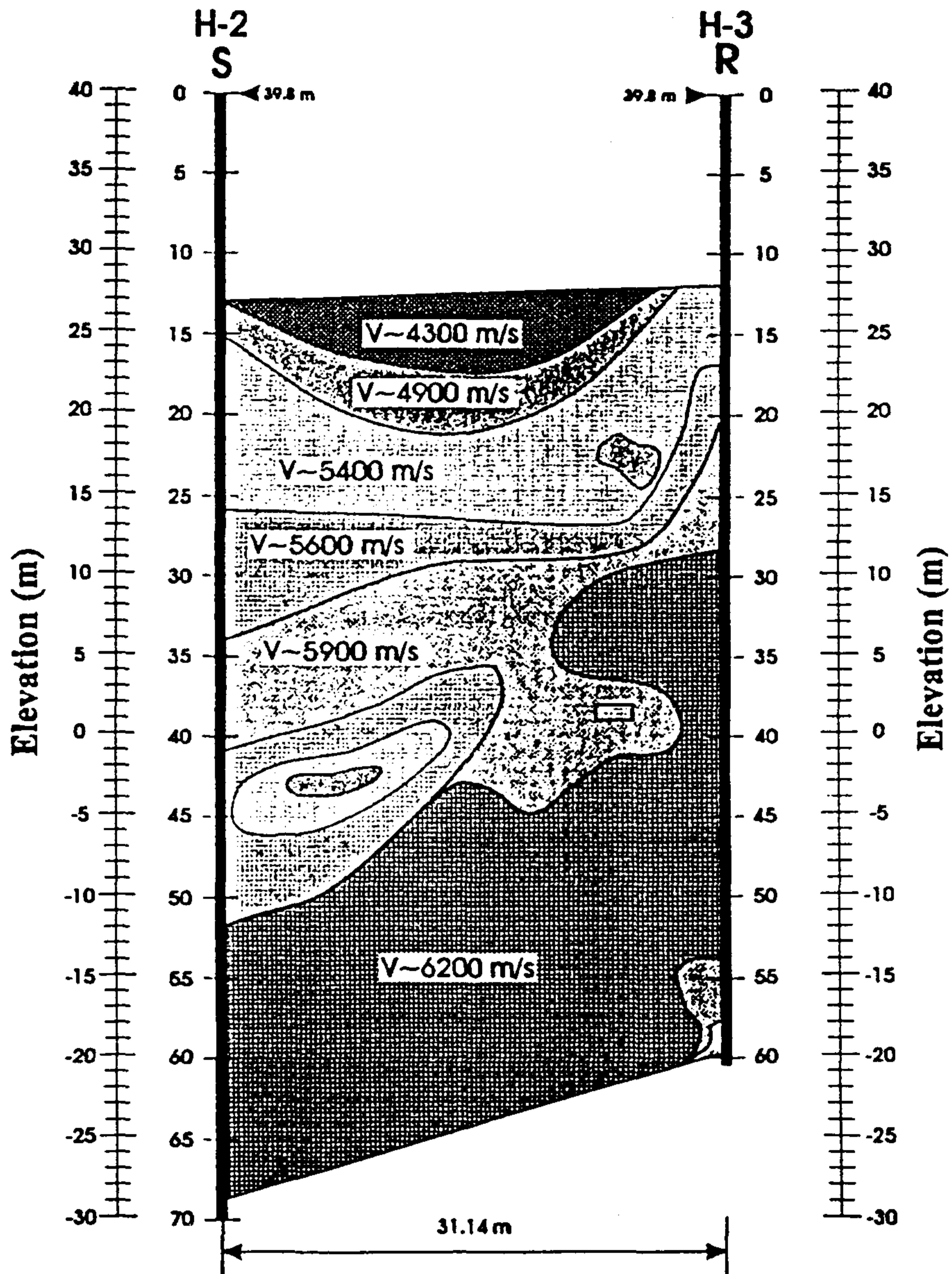


Fig. 157. Bupyong subsidence geotomographic survey.
 Interpreted physical properties of rocks of the H2-H3 cross section.

여 백

제 4 장 결언 및 제언

본 과제 최종목표는 암반구조 연구를 위한 두가지 핵심요소 기술인 탄성파 토모그래피 및 텔레뷰어 기법을 개발하고 또한 국내 실용화함으로써 자원탐사의 활성화는 물론 토목분야 지반조사의 효율성을 극대화하는 데 있었다.

한·독 국제공동 연구를 통하여 당해년도(최종년도)에 완성된 텔레뷰어 시스템 FACSIMILE-40이 현존하는 세계적인 기술수준에서 최대의 분해능을 보여주며 또한 국내 실용화를 가능하게 한 그 배후에는 무엇보다 다음과 같은 기술 개발들이 뒷바침한 데 있다고 볼 수 있다.

- 텔레뷰어 logger에 구성된 센서 기능의 혁신적인 개발성과인 transducer-lense-mirror 시스템은 transducer에서 방사되는 초음파 빔을 다시 초점화하게 하여 텔레뷰어 이미지의 분해능이 더 한층 높아질 수 있었다. 예를 들면 0.2mm에 불과한 절리 폭도 초점화된 빔에 의해 식별될 수 있게 된 것이다.
- Transducer-lense-mirror 기술 개발은 logger의 몸체 직경을 최소화(약 400mm)할 수 있는 효과를 낳게하여 LX 규격(직경 약 76mm)에서도 텔레뷰어의 응용성을 찾을 수 있게 되었다.
- 텔레뷰어 측정시스템에 구성된 각 hardware는 서로 독립되어 조립되어 있기 때문에(modular design of hardware) 시스템의 보완 내지 다른 검층기기와의 호환이 용이한다.
- 측정을 위한 ALT DMTLS의 개발은 측정데이터를 효율적으로 제어

할 수 있을 뿐만 아니라 여러 개의 서로 다른 검층기기(예: sonic, gamma log)와의 운용 내지 상호 데이터 호환을 가능하게 하였다.

- 지난 수년간 축적한 방대한 전산처리 software는 텔레뷰어 응용에 의해 반영될 수 있는 최대한의 정보를 산출하게 한다.

상기 텔레뷰어의 응용이 국내 지하철공사, 지반침하, 대형구조물 및 대형 빌딩 지반조사 등에서 바로 괄목할만한 현장응용 성공사례로 이어지게 된 큰 요인은 지금까지 국내 기술수준에서는 거의 다다를 수 없는 것으로 간주 되었으나 반면 토목설계 및 시공에서는 실질적으로 대단히 필요한 매개변수들이 텔레뷰어 현장실험을 통하여 기대 이상으로 산출될 수 있음을 입증하고 동시에 활용될 수 있었다는 데 있는 것이다. 다음은 본 과제수행 기간 동안 축적된 기술 측면에서 텔레뷰어 응용을 통하여 얻을 수 있는 주요 정보를 요약하고 있다.

- 불연속면(단층, 절리 및 암층경계면)의 정확한 경사방향 및 경사각, 불연속면의 두께 및 거칠음, 통계학적 처리 및 그의 도면화(예: rose diagram, polar projection).
- 텔레뷰어 진폭이미지 및 발체된 불연속면을 fuzzy classification에 의해 공간 개념의 연속적인 in-situ 암석강도 산출. 이러한 텔레뷰어 암석강도치는 타당한 scaling factor에 의해 실질적인 암석강도치로 전환될 수 있다.
- 텔레뷰어의 고분해능 공경검층 기능에 의해 암반의 응력 상태(rock stress field) 파악.
- 시추공 연직 상태, 자력탐사 기능, 시추코어의 정돈(자북 방향에 따른), casing 내벽상태 파악, 시추공 내 오염상태 파악, 시추공 부피

계산, 콘크리트 구조물 부식상태 파악 등.

탄성파 토모그래피는 이미 1993년 구포 기차전복사고 지반조사 이후 부평 공원묘지 붕락사고, 절취사면 안정성, 터널공사, 대형구조물 지반조사 등에서 많은 성공사례를 낳게 하였다. 특히 당해년도에 개발한 다음과 같은 주요 연구 결실 즉,

- 시추공 발생원으로서 세계 최초 다중발파 시스템의 개발
- 한번 발생원 구사에서 48채널 기록을 얻을 수 있기 위한 수신장치 및 AD장치 개발
- 측정운영 software의 보완으로 데이터 제어 기능을 향상

등과 또한 당해년도에 이룩한 여러차례의 성공사례를 통한 응용기술의 축적은 세계적인 기술수준에서 토모그래피의 국내 실용화를 더욱 촉구하였을 뿐만 아니라 탐사 시간을 크게 단축시키는 효과를 초래하였다.

상기 두개의 첨단 탄성파이용 기법은 지반조사를 위한 핵심요소 기술로서 그 자체로 독특한 응용성을 보여주고 있음이 이미 일부 토목분야에서도 알려지고 있다. 그러나, 일반 토목설계 및 시공을 위한 매개변수 산출을 위해서는 단지 하나의 방법만으로는 미흡하다고 볼 수 있다. 만약, 상기 두개의 기법들이 동시에 활용된다면 각개의 응용에 따른 취약점들이 상호 보완되어 지반조사에 대한 정확도가 더 한층 높아지고 있음을 경험하고 있다.

Abbreviation

A/D : Analog/Digital

ALT : Advanced Logic Technology

API : Application Programming Interface

BHTV : BoreHole TeleViewer

COAL : COmputer Assisted Logging

DMT : Deutsche Montan Technologie

DMTLS : Digital Multi Tool Logging System

E.L. : Elevation Level

FACSIMILE : Focussed ACoustic System to IMage the Inside of
borehoLEs and pipes

FLAC : Fast Lagrangian Analysis of Continua

NGI : Norwegian Geotechnical Institute

RMR : Rock Mass Rating

RQD : Rock Quailty Designation

TV : TeleVision

WTO : World Trade Organization

REFERENCES

- 강대우, 1994, 도심지 터널공사 발파 pattern 및 시공사례: 한국전력공사, 부산전
력구 건설사무소.
- 권광수 외, 1993, 부평광산 개발구역 안전진단 및 평가연구: 한국자원연구소, 영풍
산업주식회사.
- 권광수 외, 1995, 지하채굴에 따른 지반 안정성 평가 및 대책 연구: 기술총서
95-1, 석탄합리화사업단.
- 김성준, 1994, 도심지 shield 터널공사의 공법 및 시공(실패) 사례 소개: 한국전력
공사.
- 김중열, 구자학, 김상엽, 현혜자, 김기석, 1989, 탄층연속성 조사를 위한 채널파의
연구(II): 한국동력자원연구소, 과학기술처.
- 김중열, 장현삼, 김유성, 현혜자, 김기석, 1993, Geotomography에 의한 암반구조
연구(III): 한국자원연구소, 과학기술처.
- 김중열, 김유성, 1995, 탄성과 토모그래피 응용에서 대두되는 문제점 및 한계성:
한국자원공학회지, v. 32, p. 151-162.
- 민경덕, 서정희, 권병두, 1986, 응용지구물리학: 우성문화사.
- 서규식, 1985, 부평 은광상의 성인에 관한 연구: 서울대학교 박사학위 논문.
- 이수곤, 1990, 한국 사면 불안정현황 및 방지대책: 토지개발공사, v. 11, p.
10-23.
- 정현기, 김기석, 최종호, 김중열, 1995, 휴대용 시추공 TV검층기 개발기술: 한국자원
연구소, 과학기술처.
- Broding, R.A., 1981, Volumetric Scanning Well Logging: SPWLA 22nd Annual
Logging Symposium, Mexico.

Hinz, K., Schepers, R., 1981, Entwicklung einer Bohrlochsonde zur akustischen Abbildung der Bohrlochwand: Rahmenprogramm Rohstoffforschung, Statusseminar, 112-123, Projektleitung Rohstoffforschung der KFA Jülich GmbH im Auftrage der Bundesministerium für Forschung und Technologie.

Hinz, K., Schepers, R., 1983, SABIS - The digital version of the televiewer: SPWLA 8th European Formation Evaluation Symposium, Kap. E, London, März.

Kratzsch, H., 1983, Mining subsidence engineering: springer-Verlag.

Serra, O., 1984, Fundamentals of well-log Interpretation, The Acquisition of Logging Data: Elsevier Publication, v. 1.

Wiley, R., 1980, Borehole Televiewer - Revisited: SPWLA 21th Annual Logging Symposium Transaction, Lafayette, Louisiana, July.