

## 野島断層上に発達した変形帯の調査結果 — 第四紀地盤地域で見られた地盤内部の断裂構造 —

(財) 電力中央研究所 谷 和夫、阿部信太郎、鈴木浩一\*  
東京工業大学 大学院 西 真幸\*\*  
川崎地質 (株) 林 泰幸\*\*\*  
(株) ダイヤコンサルタント 遠藤 理\*\*\*\*

断層の活動性を評価する時、基盤の断層を被覆する未固結な第四紀層の内部に残された変形構造が重要な手がかりとなる。1995年兵庫県南部地震では、淡路島北西部の野島断層上に斜め右横ずれ断層変位に伴う特徴的な変形帯が延長約10kmにわたって形成された。地震直後に、この地震断層沿いの第四紀層地域で地表踏査とサンディングを行い、昨年のシンポジウムでは地表面の断裂構造について報告した。その後、同じサイトで物理探査(地下レーダー法と比抵抗法)とトレンチ・ボーリング調査も行い、今回は、地盤内部の断裂構造に関する調査結果を報告する。観察された地盤内部の断裂構造は、断層運動が純粋な横ずれである場合と比較して高角度 $70^{\circ}$ ~ $90^{\circ}$ で、縦ずれの影響も強いことが判った。

### 1. はじめに

第四紀層のように地質学的に若い堆積層は固結度が低いため、地震時の断層変位がそのまま地表に断層崖として現われることは稀で、地割れ等の特徴的な変形構造が形成される。断層のトレンチ調査は、この未固結被覆層に刻まれた断層運動の痕跡を調べて、その活動度や性状などを推定するために行う。調査精度を向上させるためには、基盤の断層が地震時に運動した時に、これを被覆する未固結層にどのような変形構造が発達するかを十分に理解しなければならない。

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、淡路島北部の西海岸沿いに分布する野島断層上に、斜め右横ずれ断層変位に伴う特徴的な変形帯(地表地震断層)が延長約10kmにわたって形成された(中田 他,1995:応用地質学会,1996)。筆者等は第四紀層が分布する地域の地震断層上で観察される未固結被覆層の変形構造に注目し、地震直後より継続的に調査を行っている。地震後の数日間に行った初期

調査では、野島江崎、里、梨本の3地域で、顕著な変形構造が観察されるサイトを8地点選定し、保存期間が短い地表面の変形性状をスケッチによって記録した。さらに、その後の詳細調査のための情報収集を目的としたサンディング(コーン貫入試験)と地割れ面より採取した試料の物理試験を実施した。調査結果については、昨年度の講演会等の報告を参考にされたい(谷 他,1996ab)。

その後、同年11月に、地盤内部の概略の変形構造や基盤面の深さを調べるため、梨本①地点と野島江崎①~③地点で地下レーダー法による物理探査を実施した。さらに梨本①地点において、翌1996年1~3月に比抵抗法による物理探査とトレンチ・ボーリング調査を実施した。今回は、これらの調査を通じて、明らかとなった梨本①地点における地盤内部の断裂構造について報告する。なお、地表面の変形構造を調査した8サイトのうち、里と梨本③の2地点では地質調査所等がトレンチ調査を実施している(鈴木 他,1995:杉山 他,1996)。

キーワード: 地震断層、物理探査、トレンチ調査

\* (財) 電力中央研究所, 地質地盤部、0471-82-1181

\*\* 東京工業大学総合理工学研究科、045-922-1111

\*\*\* 川崎地質 (株)、本社開発部、03-5762-1601

\*\*\*\* (株) ダイヤコンサルタント、03-3986-5141

### 2. 調査の概要

#### (1) 調査地点

図-1に示す津名郡北淡町野島臺浦の梨本①地点で調査を実施した。変形構造が複雑過ぎず明瞭なこと、また、延長が長く断裂の3次元構造を追跡す

る空間的余裕を考慮して選定した。この地点は、地震断層のトレースが分岐する地点(里地区)から200~300m 南西に位置する小尾根の西側斜面に広がる田圃で、標高は約30m、南北に約40m、東西に10~15mの細長い形状をしている。今回の地震による断層変位量は、右横ずれ成分は0.8~0.9mだが、鉛直成分は北西側が約0.2m隆起で野島断層の全般的傾向とは逆のセンスだった。

地震直後に観察された地表面の変形構造を図-2に示す。延長が数~十数mの直線的な地割れが、左雁行状に3条発達している。この大規模な地割れ構造は変形帯に対して低角度 $7^{\circ}$ ~ $14^{\circ}$ で斜交し、模型実験の結果との対比から、横ずれ断層に特徴的なリーデルせん断と考えられる。その間には、変形帯にほぼ平行に延びる数mの地割れも観察され、その方向から低角リーデルせん断と推察される。変形帯に対して高角度( $>45^{\circ}$ )に斜交する亀裂はほとんど見られなかった。断裂以外の特徴的な変形構造としては、大規模な地割れ(リーデルせん断)が乗り移る(オフセット)する部分で沈降側に大きく膨れ上がるプレッシャー・リッジが顕著に発達していた。これらの地表面の変状は、同年10月に平坦に改修され、物理探査とトレンチ・ボーリング調査を実施するまで保存されていなかった。

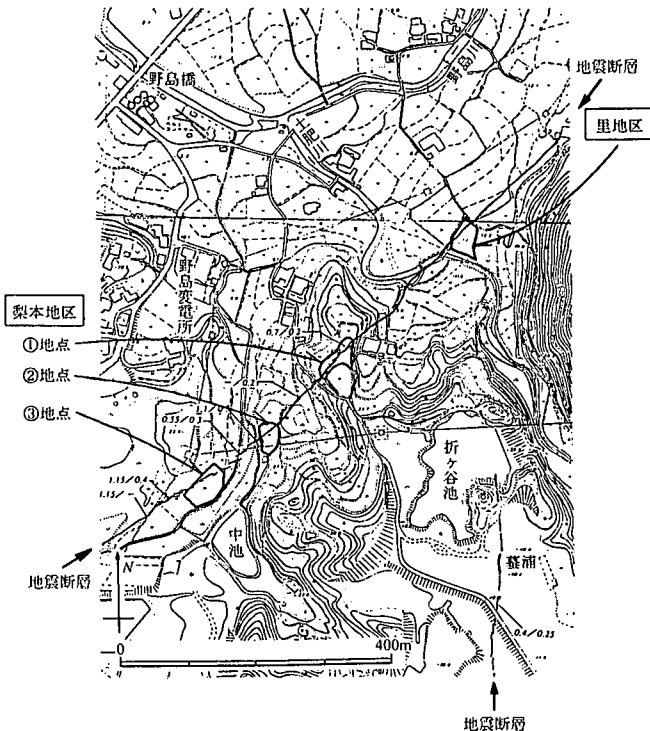


図-1 調査地点と地震断層のトレース (中田 他 (1995) に修正・加筆)

## (2) 物理探査

### (a) 地下レーダー法

図-2に示す3本の測線に沿って、パルス波(PW)と、周波数変調を行う連続波(FM-CW)を利用した2種類の地下レーダー法探査を実施した(谷他,1996c)。PWレーダー法による可探深度は高々2~3mであるが、高い分解能を有するため、地表面近傍の微細な構造を調べるのに適している。中心周波数が80MHz、150MHz、および1GHzの3種類のアンテナを用いて計測した。一方、周波数が段階的に変化(スイープ)する連続波を利用するステップ式FM-CWレーダー法は、PWレーダー法による

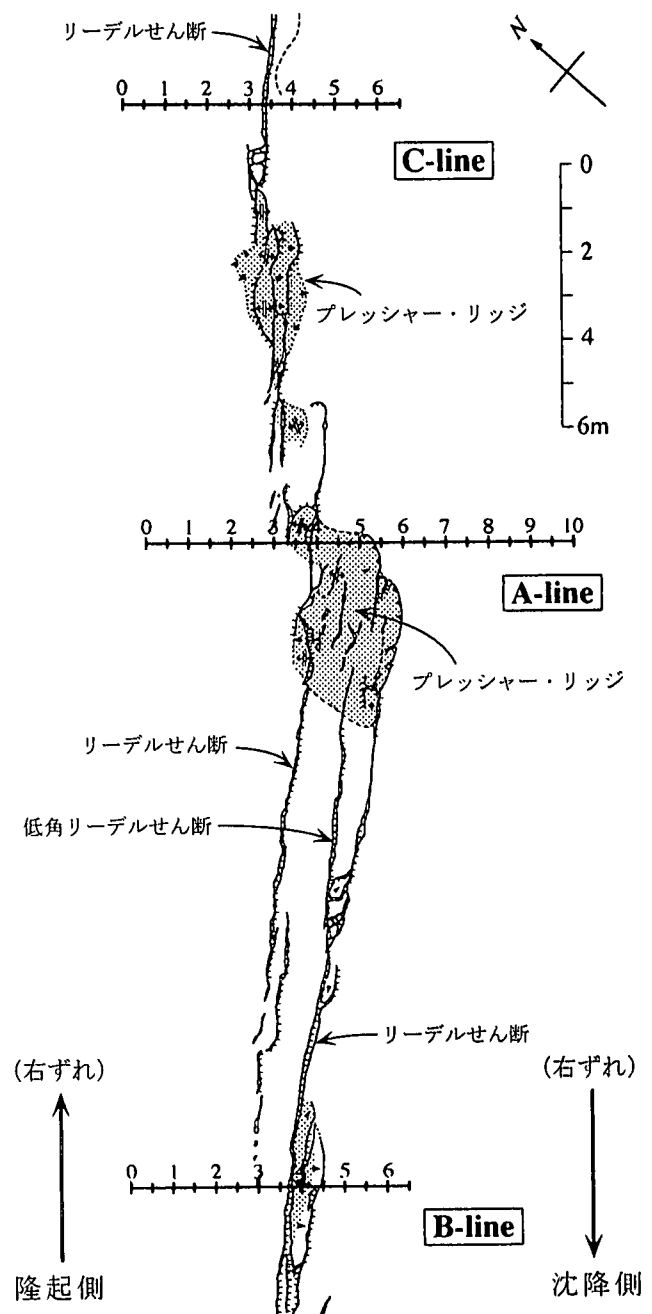


図-2 地表面の変形構造と地下レーダー探査測線

高分解能を保持し、かつ探査可能な深度を数倍に大きくすることができるのが特徴である。

(b) 比抵抗法 (鈴木 他,1996)

図-3に示すI測線に沿って延長15mの区間で探査を実施した。電極配置は、間隔0.5mのWenner法とEltran法とした。さらに、約1m北東側にずれたトレンチの法面Hで、0.5m間隔の格子状に配置した電極間でWenner法により見掛けの比抵抗も計測した。

(3) トレンチ・ボーリング調査

既に田圃は改修されていたので、まず約0.2mの耕土を剥き取って仮置きし、さらに深さ0.3~0.4mまでの床締め土を掘削した。細長い敷地を有効に利用し、工期の面からも効率的に調査を進めるため、図-3に示すように変形帯を横切る細長いトレン

チ(幅1.5~2、長さ5~7m、深さ3~4m)を同時に2~3本掘削し、スケッチを終了したものから順次埋立てるサイクルを繰返した。トレンチは合計で13本掘削し、約2mの間隔でほぼ鉛直な17の法面A~Pで観察される地質構造を縮尺1/20のスケッチで記録した。法面は、掘り鎌等で整形してそのままスケッチした後、断裂等の変形構造を顕在化させることを狙い、エアジェットと水洗いによって固結度の低い部分を流さないし剥落させて再度スケッチした。この水洗い効果は、粘着力が小さい砂礫~砂の層について非常に有効であった。

変形帯の直下にはシルト~粘土の層が各断面で観察され、その深さ方向への分布を調べるために2本のボーリングをG測線上で掘削した。図-3に示すように、1本はトレンチの法面Fと法面Gの南東端で鉛直に10m、もう1本はさらに5m南東から北西傾斜70°に長さ25m掘った。

3. 調査結果

(1) 物理探査

(a) 地下レーダー法

図-4に示すFM-CWレーダー法の解析断面図では、深さ12m程度までの反射構造を読み取ることが可能である。ほぼ水平に分布する反射波フェーズには、不連続あるいは途切れている部分が多数存在し、これを地表面から地下深度に向かってつなぐトレースを各解析断面で数条引くことができる。その多くは高角度で南東に傾斜し、特に明瞭なものは地表の変形帯ないし大規模な地割れの直下に存在する。その線形は必ずしも一定の方向に伸びず、やや蛇行する傾向も見受けられ、深さ10数mでも単一のトレースに収束していない可能性がある。

(b) 比抵抗法

I測線に沿う見掛けの比抵抗断面を図-5に示す。地表の変形帯の直下に50Ωm以下の領域が存在し、その両側が数百Ωmの地盤であることが判る。図-6は、同一地点で是石 他(1996)が実施した探査結果である。同じく断層の走向に直交する方向にとった測線の延長は50mと長く、解析領域も深さ方向に10mを超える。電極配置は、間隔1mのdipole-dipole法である。50Ωm以下の比抵抗が低い領域は、変形帯の直下から南東方向に高角度で傾斜して深

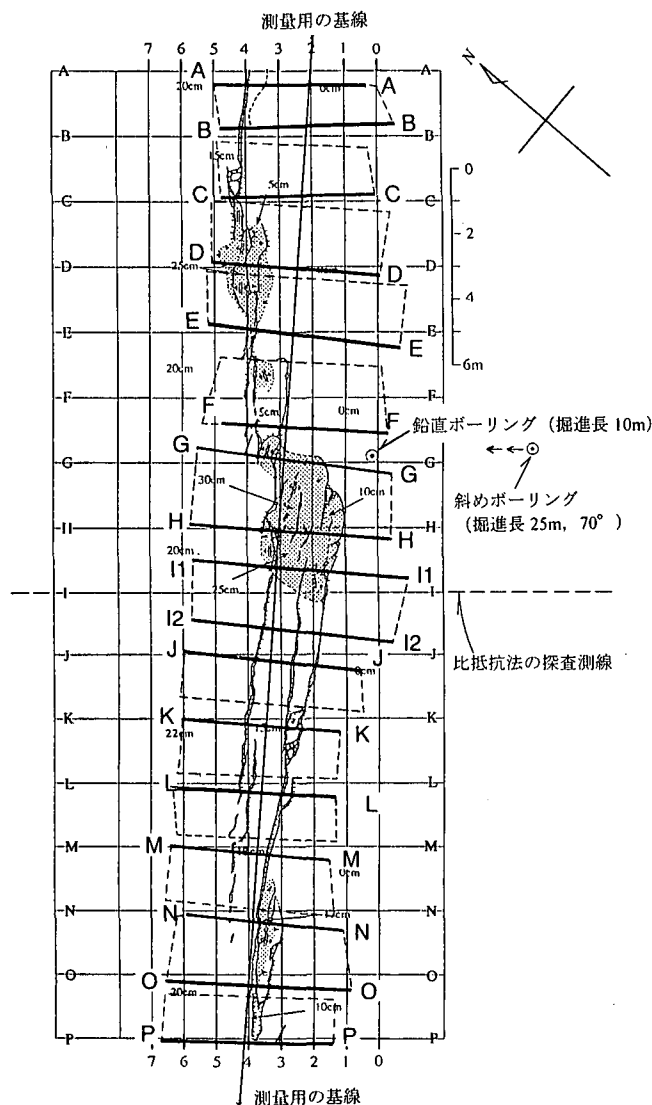


図-3 トレンチとボーリングの掘削位置と比抵抗探査の測線

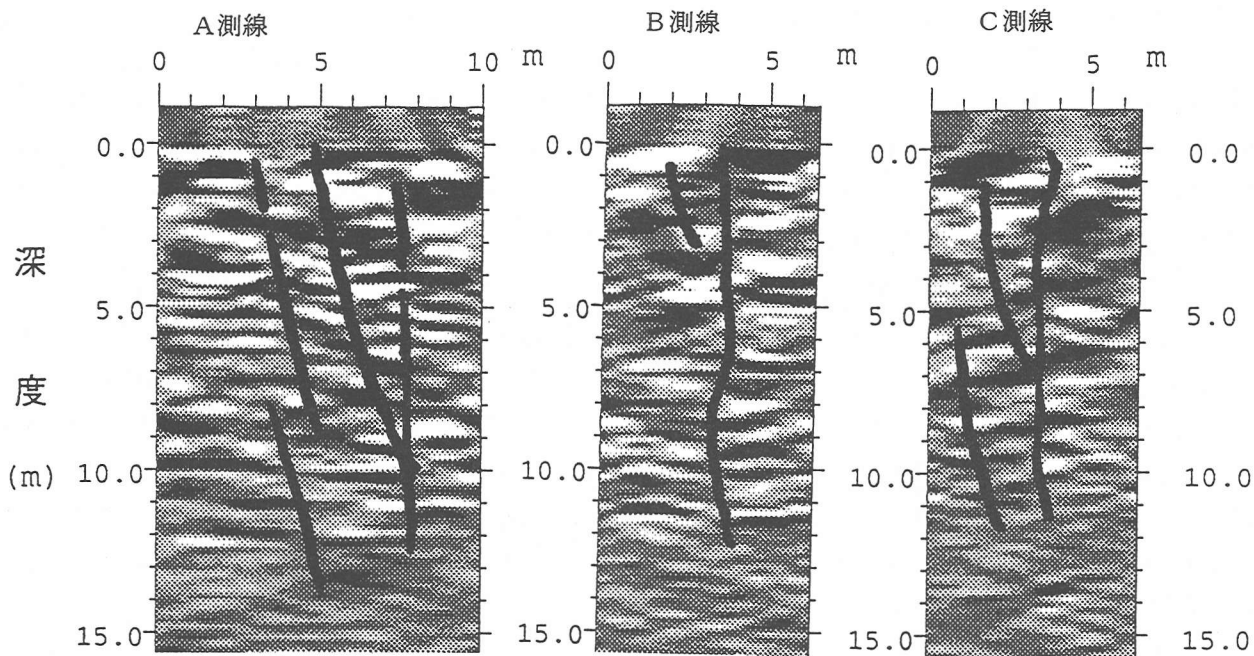


図-4 地下レーダー法の探査結果 (FM-CW 法、マルチ・チャンネル、CDP 重合)

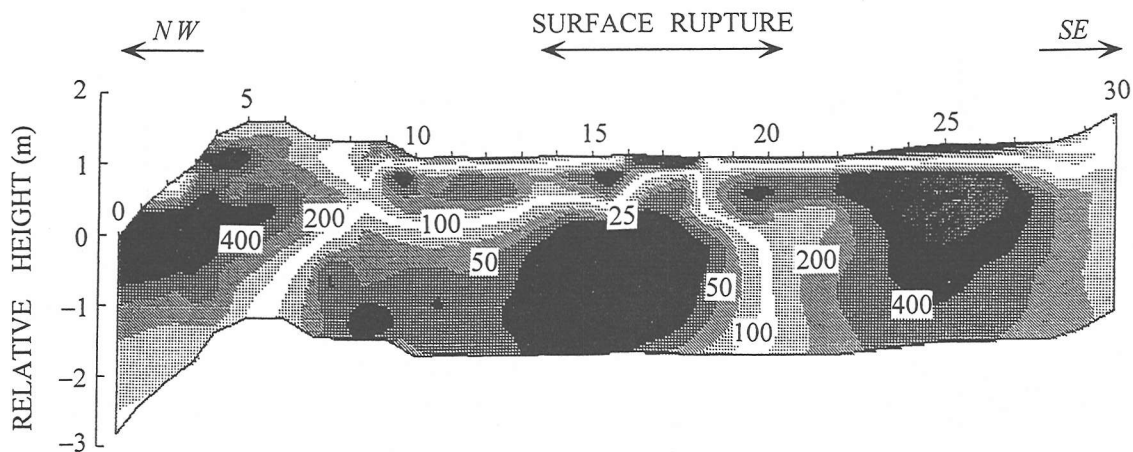


図-5 I 測線に沿う比抵抗法の探査結果

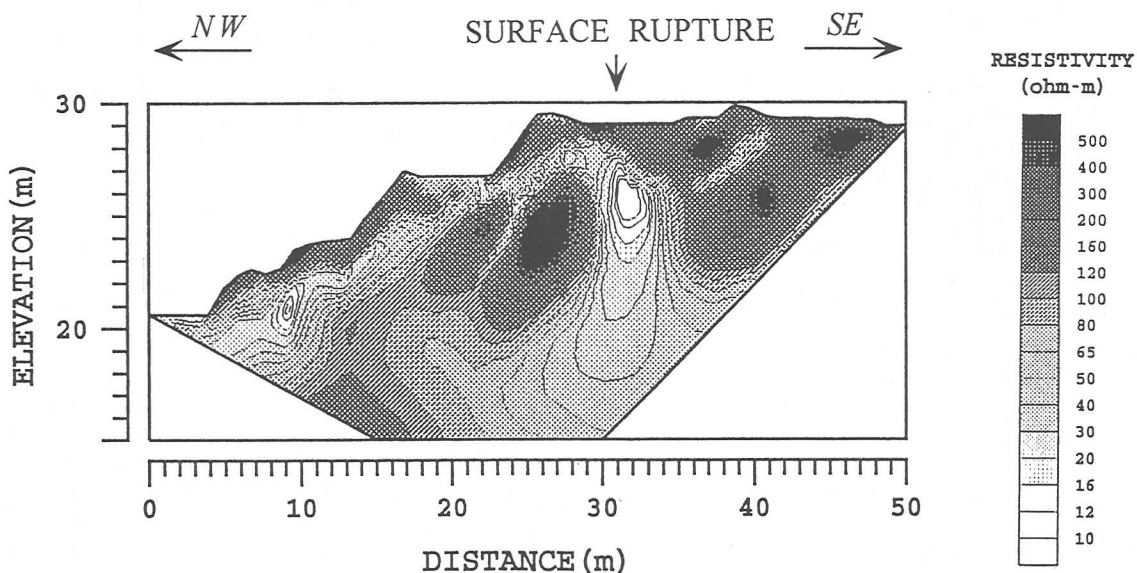


図-6 是石 他 (1996) による比抵抗法の探査結果

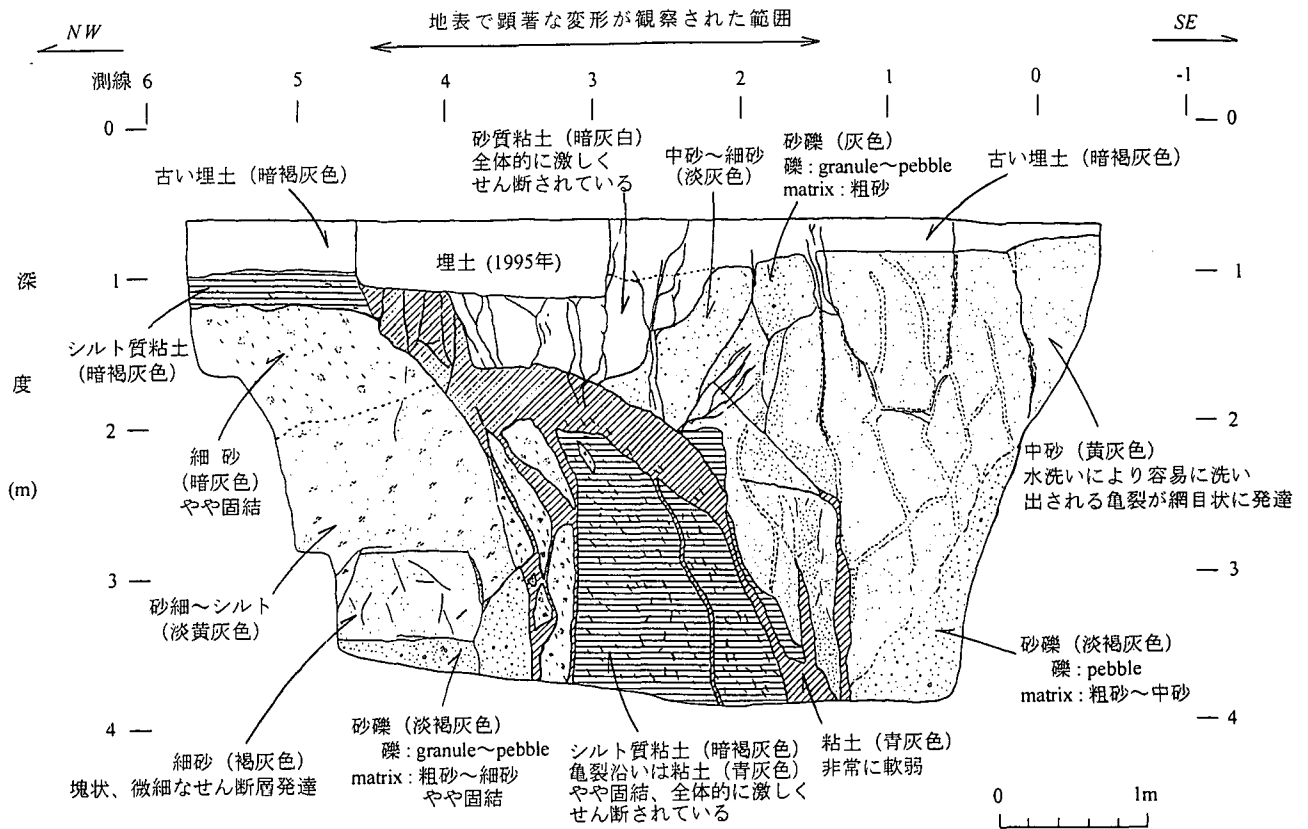


図-7 トレンチ法面のスケッチの例 (G面、水洗後)

さ数~10mまで分布することが読み取れる。高密度に電極を配置した図-5の方が、より地表近くまでこの低比抵抗領域が分布することを示すことを除いて、2つの結果は概ね調和的である。

トレンチの法面Hで計測した結果では、比抵抗値が50Ωm以下と低い領域は断層に沿って分布する激しく変形を受けたシルト~粘土の層に、数百Ωmと高い領域はその両側に分布する砂礫~砂~シルトの層に対応することが確認された(鈴木 他、1996)。したがって、この断層に沿うシルト~粘土の層は南東方向に高角度で傾斜して分布し、その幅は地表近くで3~4m、深さ数~10mでも1~2mと推測される。

## (2) トレンチ・ボーリング調査

トレンチ調査では、図-2に示す地表で観察された変形構造の地下における形態的特徴、特に断裂構造に注目した。図-7に、トレンチの法面をスケッチした例を示す。断面によって多少異なるが、全ての法面について共通して見られた地質構造は、地表の変形帯の直下にシルト~粘土の層が存在し、その両側は砂礫~砂~シルトの層よりなる。図-8に示すように、中央のシルト~粘土の層は幅1.0~2.5m

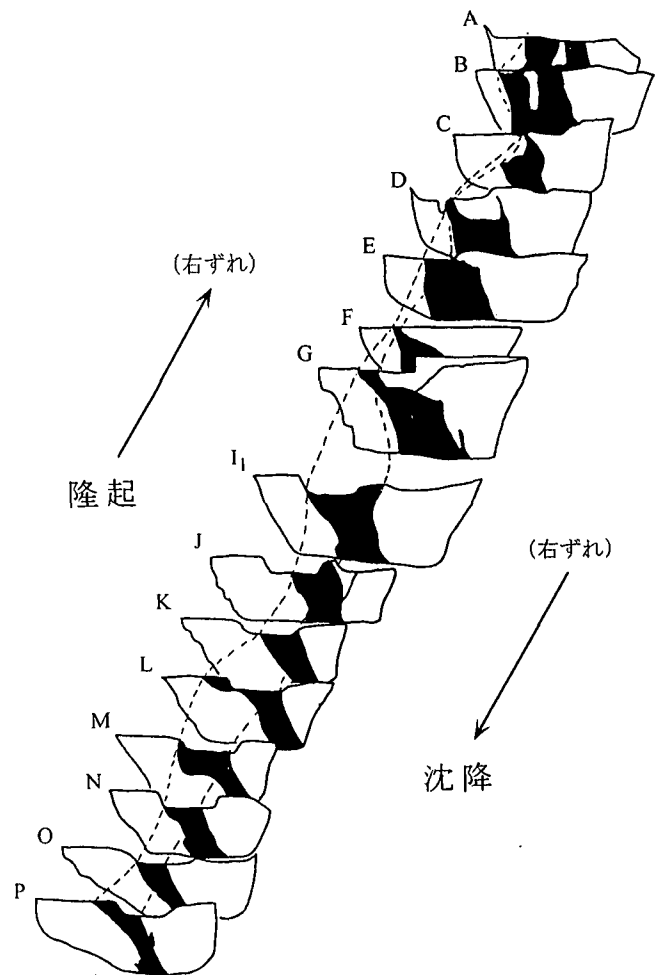


図-8 シルト~粘土層の分布形状(黒く塗った領域)

で、高角度で南東側に傾斜して分布する。部分的に砂質のブロックを含み、非常に厳しい変形を受けている。シルト層には葉片状に、粘土層には鱗片状に無数の微細な不連続面が発達し、鏡肌が確認される場合が多い。全体はやや硬質だが、各断面で非常に軟弱な粘土脈が数珠状認められる。

一方、その両側に見られる砂礫～砂～シルトの層には、対照的にそれほど激しく変形を受けた痕跡は認められない。隆起した北西側は、一般的に砂泥互層または砂礫の層より構成され、北西方向にゆるやかに傾斜する層理構造（走向 N30° ～60° E、傾斜 5° ～25° W）を有する。この北西側の地層では、トレンチの法面 K～N で小規模な正断層的センスのせん断構造が見られたが全体的にやや固結しており、今回の地震によって形成された地表面の変形帯より少しずれた位置に沿って分布している。反対側に位置する沈降した南東側は、中砂を主体とした砂礫～シルト質砂の層より構成され、どの法面でも層

理構造は確認できなかった。

今回の調査地点を含めて、里地区で分岐して小倉へ延長する地震断層は、後期鮮新統から前期更新統にあたる大阪層群の富島累層と仮屋累層が、基盤の花崗岩を厚く覆った地域に位置する（水野、1993）。梨本①地点も、この大阪層群中に地震断層が出現したケースにあたる。変形帯の直下に見られたシルト～粘土の層は、その均一な粒度組成や性状から、周辺の母岩が断層運動によって細粒化したとは考えにくく、大阪層群中の粘土層が断層運動によって取り込まれたと推察される。G 測線上のボーリング調査では、トレンチ南東端の鉛直ボーリングで深さ 8.2～8.5m に、さらに 5m 南東側に離れた 70° の斜めボーリングで深さ 11.9～12.2m に逸水を伴う破砕されたシルト質粘土の層が確認された。このシルト～粘土の層が南東側に高角度に傾斜し、かつ 10m 以深では分布範囲が狭くなることは、比抵抗法による探査結果とも調和的である。この層の起源を解明す

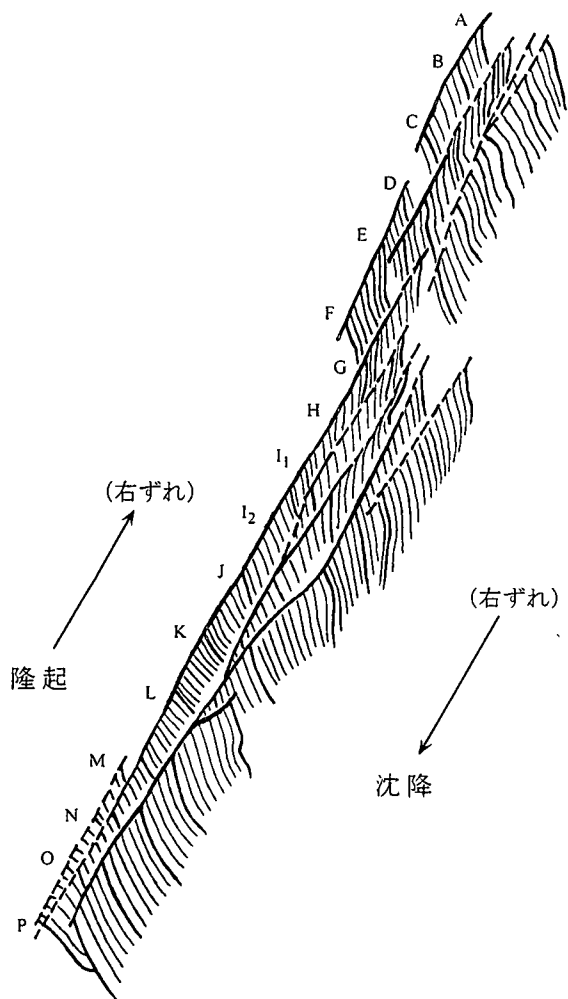


図-9 地盤内部で確認された全ての断裂構造  
(頂部が破線の構造は地表面で確認されなかった)

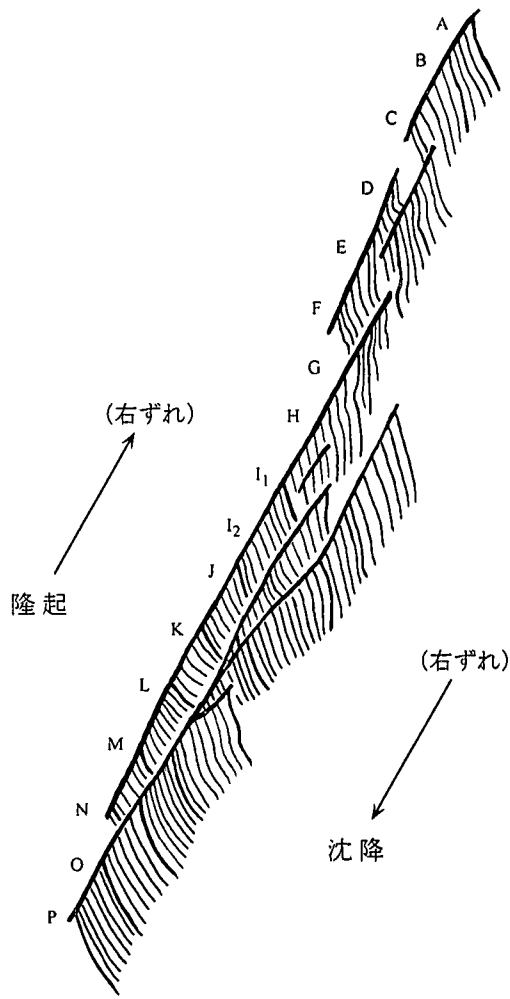


図-10 地盤内部で確認された断裂構造のうち、  
地表面の変形構造でも確認されたもの

るには、断層の分岐地点（里地区）に近く、また今回の断層運動の縦ずれセンスが野島断層の全般的な傾向と逆だったことを考慮すると、周辺の非常に複雑な地殻変動と地質構造をまず解明しなければならないだろう。

地盤の内部に発達した断裂構造については、以下に示す手順に従ってその三次元的な形態を推定した（西、1997）。まず、大きな変形を被った可能性がある線状構造を各観察断面でピックアップした。中央のシルト～粘土の層では脈状に発達した軟弱粘土が、その両側の砂礫～砂～シルトの層では水洗いによって顕在化した固結度が低い部分の中で連続性の良いトレースが候補として挙げられる。次に、地表面で観察された変形構造（図-2）と対比しながら、隣り合う観察断面の間で連続性の良いものを追跡して補間した。

このようにして推定した地盤内部の断裂構造を、南東側上方から鳥瞰したものを図-9に示す。頂部が実線で示された断裂は、図-2に示す地表面の変形構造（地割れ）に繋がる構造を意味する。一方、頂部が破線で示された断裂は、地表面では確認できなかった構造を意味する。当然のことながら、図-9に示す断裂構造の全てが、今回の地震で発達ないし運動したとは結論できない。野島断層は、地盤が推積してから何回となく活動を繰り返しており、変形帯直下に見られるシルト～粘土の層も過去に激しく攪乱を受けたと思われる性状を示す。

ただし、図-2に示す地表面で観察された変形構造は、今回の地震を引き起こした断層運動に伴うものであることは確実である。そこで、これに対比される地盤内部の断裂構造（図-9で頂部が実線で示されたもの）のみを図-10に示す。地表面で観察された左雁行配列するリーデルせん断は延長も長く、その内部構造を明瞭に判別することができる。全体的に高角度  $70^{\circ} \sim 90^{\circ}$  で南東側に傾斜し、隆起した北西側では下に凸、沈降した南東側ではやや上に凸になる傾向を示す。断層線に沿って鉛直に立てた平面の上端を振ったような形状は、乾燥砂を用いた横ずれ断層の模型実験による観察結果（谷・上田、1995）とも調和的であるが、縦ずれ変位の影響によって傾斜が急になっている。また低角リーデルせん断もリーデルせん断と同じく高角度に南東側に傾

斜し、やや波打った平面的な形状をしている。

地盤内部で確認された断裂構造の中には、今回の地震で運動したものの地表にまで連続しない断裂も考えられる。今回の地震活動で運動したことが確実な断裂構造（図-10）の延長上に存在するものは、特にその可能性が高いと考えられる。そこで、図-9に示す地盤内部の断裂構造のうち、頂部が実線の断裂（地表面まで連続する構造）の延長上に存在する頂部が破線の断裂（地表面まで連続しない構造）も加えて示したのが図-11である。推測の域を出ないが、今回の地震を起した断層運動の結果として活動ないし発達した断裂構造と考えられる。特徴的構造として、I～G 測線の間で沈降側に盛り上がったプレッシャー・リッジの下に数条の断裂がほぼ平行に発達していることが判る。

#### 4. おわりに

今回は、現地調査によって確認された地盤内部の

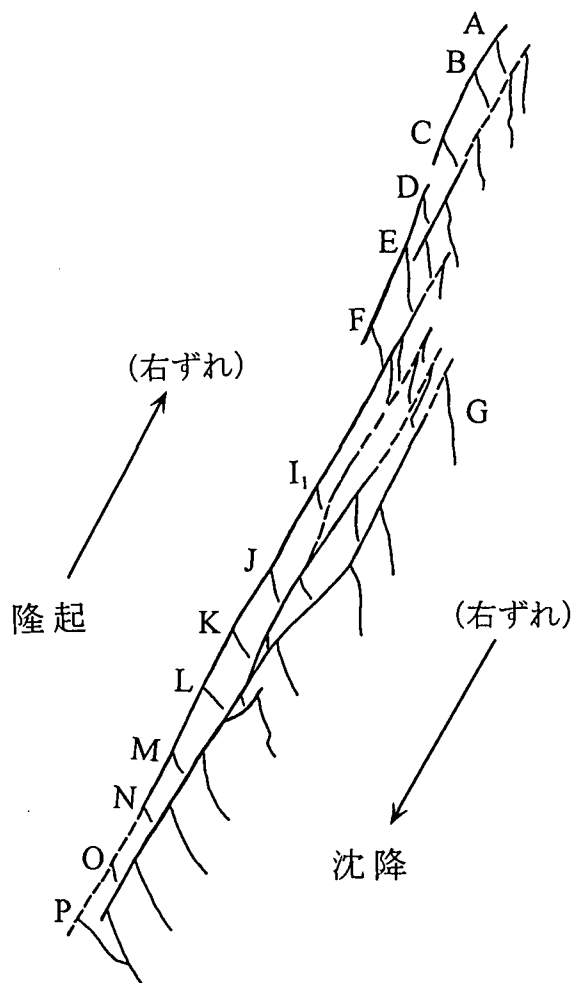


図-11 今回の地震で発達ないし運動したと推定される地盤内部の断裂構造

断裂構造の形態的特徴について報告した。今後、現地より採取した試料の力学試験を行い、平行して実施している断層模型実験の結果と併せて、現地の断裂構造を力学的に解明することを試みる。

比抵抗法による探査では(株)日本地殻調査の城森明氏、トレンチ・ボーリング調査では(株)ダイヤコンサルタントの園田玉紀、東徳衛、菅原隆の3氏、原稿・図面の整備では(株)C.R.Sの海老原愛子氏の協力を得た。末筆ながら深謝致します。

#### [参考文献]

- 1) 石康則、藤田 淳、中東秀樹、浅川真也、先名茂樹、石田孝一：活断層調査への物理探査の適用性、第94回学術講演会、物理探査学会、pp.443~447、1996年。
- 2) 水野清秀：10 淡路島、大阪層群(市原実編著)、創元社、pp.127~141、1993年。
- 3) 中田 高、蓮田 清、尾高潤一郎、坂本晃章、朝日克彦、千田 昇：1995年兵庫県南部地震の地震断層、地学雑誌、第104巻、第1号、pp.127~142、1995年。
- 4) 応用地質学会：特集 兵庫県南部地震—応用地質からの視点—、I. 地殻変動と地震断層、応用地質、第37巻、第4号、pp.5~45、1996年。
- 5) 西 真幸：断層運動による被覆層の変形構造に関する基礎的研究、東京工業大学修士論文、1997年。
- 6) 杉山雄一、寒川 旭、栗田泰夫：近畿地域における活断層発掘調査結果と今後の活断層研究戦略、第103年会学術大会、地質学会、pp.118、1996年。
- 7) 鈴木浩一、小田義也、谷 和夫、林 泰幸、城森 明：野島断層における3次元比抵抗法とステップ式連続波地下レーダー法探査—トレンチ調査地点での比抵抗測定結果—、第94回学術講演会、物理探査学会、pp.58~63、1996年。
- 8) 鈴木康弘、松田時彦、中田 高、坂本晃章、尾高潤一郎、後藤秀昭、朝日克彦、千田 昇、竹内 章、吾妻 崇、岡田篤正、中村俊夫：兵庫県南部地震の地震断層の活動歴—北淡町梨本地区でのトレンチ発掘調査(中間報告)—、「1995年1月17日兵庫県南部地震調査連絡会、日本第四紀学会、pp.33~34、1995年。
- 9) 谷 和夫、上田圭一：砂地盤内に形成されるせん断層の3次元構造のX線CTによる観察—横ずれ断層模型実験を例として—、地盤破壊の三次元的評価に関するシンポジウム、土質工学会、pp.161~168、1995年。
- 10) 谷 和夫、上田圭一、仲田洋文：基盤の斜め移動断層変位による未固結被覆層の変形構造—1995年兵庫県南部地震における野島地震断層の初期調査結果—、電力中央研究所報告、U95019、50p、1996年。
- 11) 谷 和夫、上田圭一、仲田洋文：野島断層上に発達した変形帯の調査結果—第四紀地盤地域で見られた地表面の断裂構造—、阪神・淡路大震災に関する学術講演会、土木学会、pp.29~36、1996b年。
- 12) 谷 和夫、阿部信太郎、林 泰幸：野島地震断層における地表層の変形構造の調査(地下レーダー探査法の適用)、第51回年次学術講演会、土木学会、III-A360、pp.720~721、1996c年。

## Investigation on Deformed Zone along the Nojima Fault

### — Underground Rupturing in Quaternary Ground Areas —

Kazuo Tani, Shintaro Abe, Kouichi Suzuki, Hiroyuki Hayashi and Osamu Endo

During the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, significant surface breaks occurred along a pre-existent active fault, the Nojima Fault on the northwestern coast of Awaji Island. Presented in the previous symposium were the results of preliminary investigation on the surface rupturing observed in such areas as the earthquake fault was covered with soft unconsolidated layer, Quaternary deposits. Geophysical exploration as well as trench excavation were subsequently conducted at the same sites in order to investigate the underground structures of the fault rupturing. Compared to the case of pure strike-slip faulting, the excavated rupture planes were observed to be sub-vertical demonstrating a significant influence of the dip-slip component of the fault movements.