

3. 兵庫県地震に伴う断層破碎帯近傍の斜面変形について

The Slope Deformation around Fracture Zone Caused by the Earthquake

中川 渉, 福原慶一, 岡部幸彦

Wataru Nakagawa, Keiichi Fukuhara, Yukihiro Okabe

Abstract

The middle portion of the north slope of Mt. Rokko was deformed with the Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Field observations were conducted in this slope area that was scheduled for cutting to construct the road and this gave us displacement and stress data on the slope before and after the earthquake. Based on this data, it is presumed that the following displacement took place on the slope.

- 1) The earthquake generated varying displacement between the top and bottom portion of the ground along the old landslide surface. It is presumed that the ground was loosened around the slide and the landslide segments relocated and subsided.
- 2) The surface debris from the destruction was dispersed and displaced to the free-side with the earthquake, and is thought to have deformed in a flowing pattern.
- 3) Based on the stress change and underground vertical displacement in the railway tunnel neighboring the fault, we find that the Arima groups rode on the Kobe groups along the border of the Yamada fault, to have possibly caused small displacement in the fault.

1 はじめに

平成7年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震は、淡路島北淡町より神戸市、芦屋市、西宮北東部に及ぶ幅数km、長さ40kmの帯状地域に震度7の大災害をもたらした。この帯状地域に平行した六甲山地内でも多数の崩壊が発生し、その分布や特徴が報告されている(神戸大学工学部建設学科土木系教室, 1995; 遠山等, 1995)。

奥西(1995)はこれらの斜面崩壊の形態をスランプを伴う円弧すべり、表層すべり、土砂崩壊および落石の4つに分類している。また藤田(1996)は斜面変動のタイプとして地形を丘陵地と山地に分け、山地について急斜面の表層物質が崩壊したタイプ、落石タイプ、緩傾斜がクリープ性滑動をしたタイプの3つに分けられると述べている。

今回の地震に関する多くの調査で、三田地域や泉南地域などの地すべり地域において顕著な移動が認められたとの報告はされていない。しかしながら、竹内等(1996)

はめだった移動をした地すべりとして、淡路島高滝地区の地すべりの挙動を報告している。この地すべりは基盤岩を構成する花崗岩内の水圧が上昇し、間隙水圧が上昇したため発生したと考えられている。

今回、六甲山地内の断層近傍斜面の計測中に地震が発生し、地震前後の変形データが得られた。すなわち、斜面直下の地盤中の動きを定量的に示したデータが得られ、基盤岩の挙動、既存断層の変位、地すべり面の変形、表層堆積物の変形形態が明らかとなった。

ここでは、断層破碎帯・地すべりの分布する斜面について地震前後において地盤中で計測した変位・応力測定例について報告し、斜面で発生した変形特性について考察を行う。

2 斜面周辺の地形・地質概要

ここで報告する斜面は、兵庫県南部地震の震源より約20km離れた六甲山地中央部の北側斜面に位置している。この地域には東北東-西南西方向に分布する有馬-高槻構造線上に六甲断層、射場山断層、山田断層が分布し、

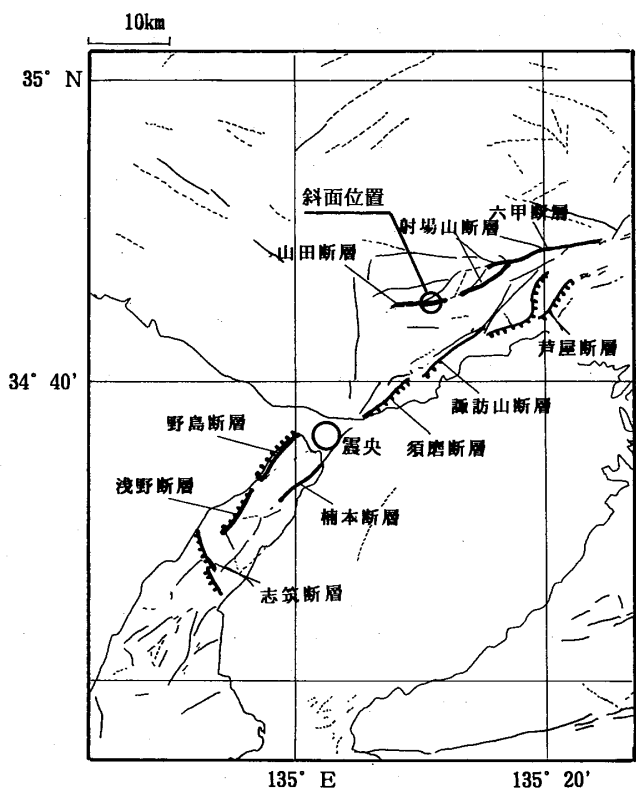


図-1 六甲断層系の主な活断層
Fig.1 Major active faults on the Rokko fault zone.

このうち対象とする斜面は山田断層直上に位置している (図-1 参照)。

山田断層が位置する斜面は、平均傾斜約 35° 、山麓斜面との比高約120mの北向き斜面で、断層は等高線に対して約 15° 斜交して東南東～西北西の走向で存在している (図-2 参照)。

山田断層は南の上盤側が北へ乗り上げた傾斜約 70° の逆断層で、断層の上盤側には中生代白亜紀の火山岩である有馬層群の凝灰岩質流紋岩が、下盤側には第三紀中新世の堆積岩である神戸層群が分布している (図-3 参照)。

この基盤岩類を層厚10m～15m程度の崩積土と地すべり堆積物が被覆している。斜面の地形面には滑落崖や舌端部の盛り上がりなどのような地すべりとしての特徴は不明瞭であるが、基盤岩類と地すべり堆積物との境界付近に地すべり粘土や層状破碎帯が連続して認められる。

3 地震時の斜面状況

対象とした斜面は、高速道路のための大規模な切土が計画されており、地すべりの発生が懸念された。断層と計画道路の交差点直下には既設鉄道トンネルが位置し、斜面下方にも鉄道車庫線が位置している。鉄道建設時において地すべり変状が生じている (図-2 参照)。その

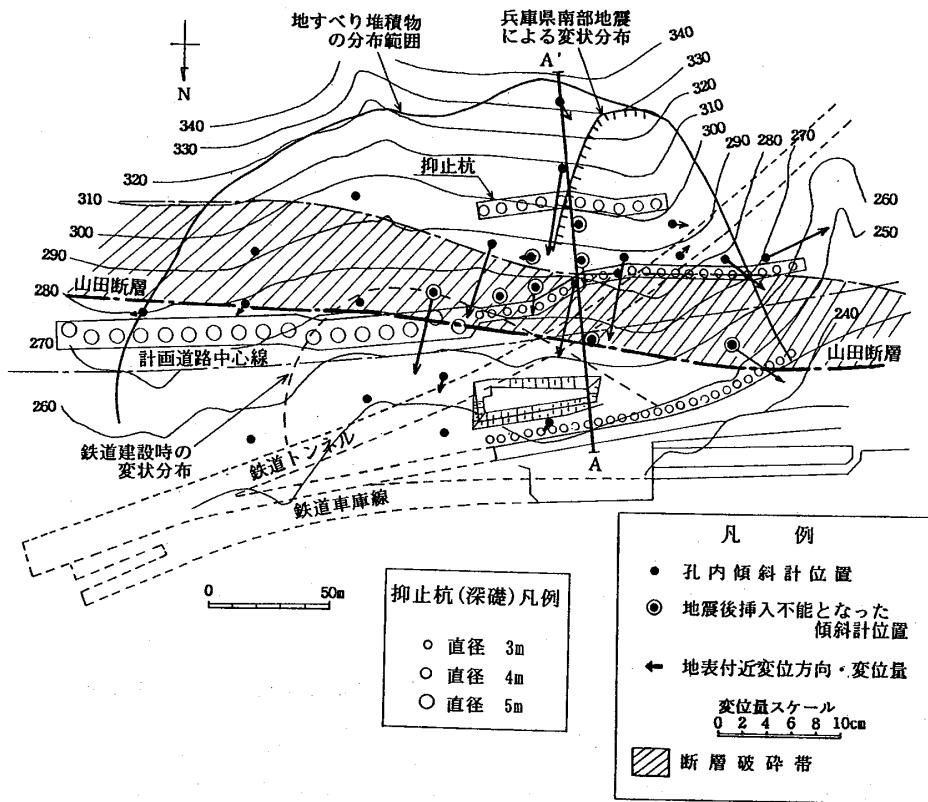


図-2 地表面の水平変位分布図
Fig.2 Map of horizontal displacements on the ground surface.

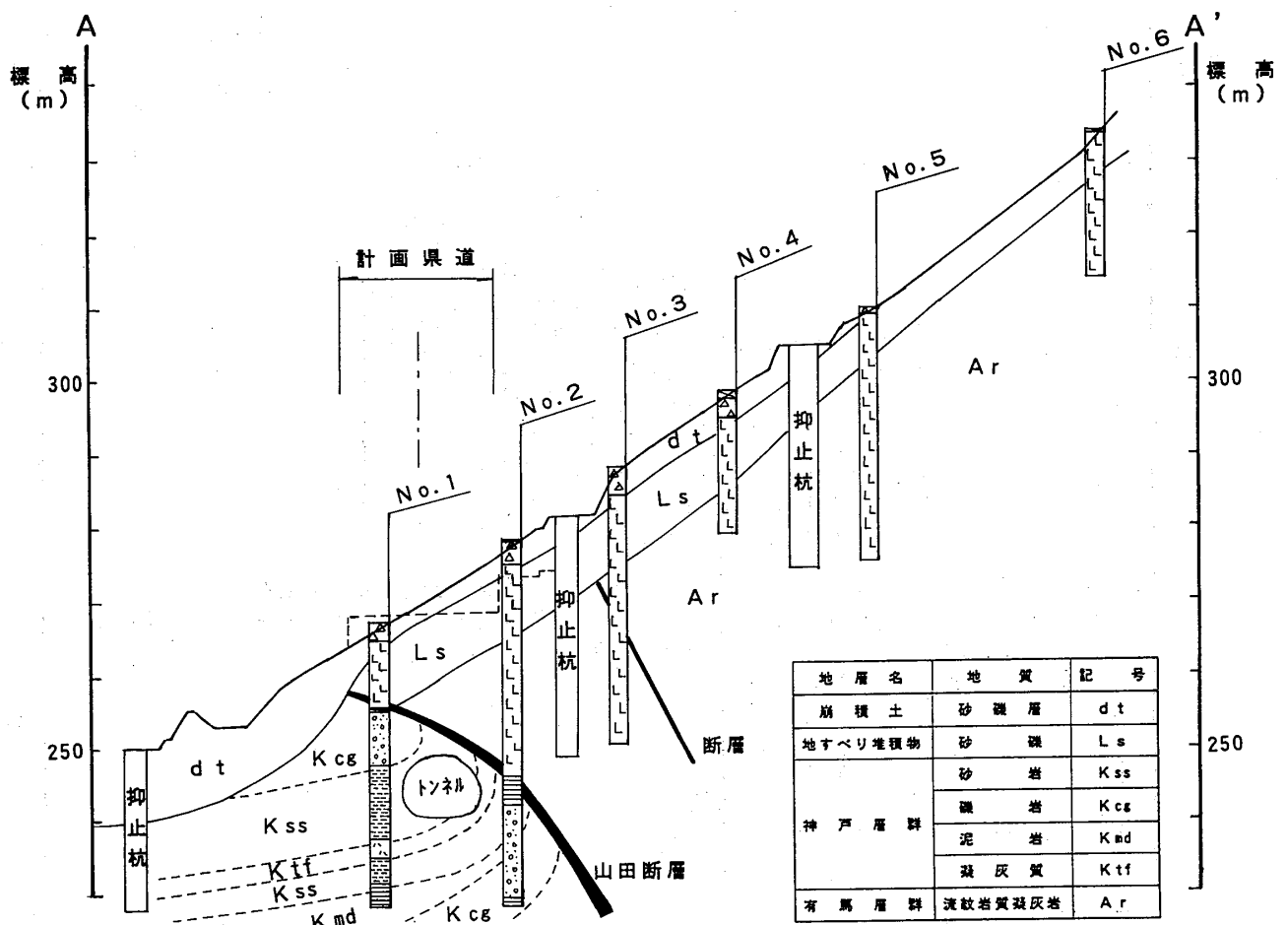


図-3 地質断面図 (A-A')
Fig.3 Geological section (A-A')

ため、切土施工により地すべりが誘発され、鉄道トンネルや鉄道車庫線に変状が生じることが懸念された。このため、対策工を実施することになり、対策工としては、土留め工を兼ねた抑止杭（深礎）ならびにアンカー工が採用された。この対策工の効果及び既設トンネル等への影響を把握するため、斜面の動態観測を実施した。

対策工の内、深礎杭の打設が約80%終了した状況において、地震が発生したものである。

4 地震前後の斜面変状・変形

地震発生後、斜面には複数の小規模な崩壊と幅60m、段差数10cmの滑落崖が確認された（図-2参照）。このため、地震前後の計測結果をもとに、地震による地盤の変形や構造物に作用した応力について考察した。

4・1 断層を含む鉛直方向の変形

兵庫県南部地震では野島断層が震源断層として活動し、余震分布や変位状況などから、須磨断層、五助橋断層、

芦屋断層などの六甲山地南部の断層が活動したと考えられている。その一方で六甲山北部に位置する有馬-高槻構造線について岡田（1995）は、「微小な変位を伴う断層」として示している。また遠山等（1995）は六甲山北部の断層が活発に活動したと述べている。

山田断層は、有馬-高槻構造線の西側に位置する。今回の計測では、山田断層を挟む形でスライディングマイクロメータが設置されており、地震による断層付近の鉛直方向の変位を計測できた。地震前後（H6.12.27～H7.1.26）の鉛直方向の累積伸縮量の変化量（図-4、表-1参照）をみると、山田断層の断層粘土（ボーリングによる見かけ上の層厚3.8m）部で14.9mmの伸びが生じ、GL-13m以浅の地すべり堆積物等で30.2mmの伸びが生じていた。断層粘土部の伸びは、平均歪みに換算すると $\epsilon=0.3\%$ であり、単位区間の最大歪みとしても $\epsilon=0.6\%$ である。セン断試験による断層粘土の破壊歪みは3%程度であり、地震により粘土は破壊していないと考えられる。

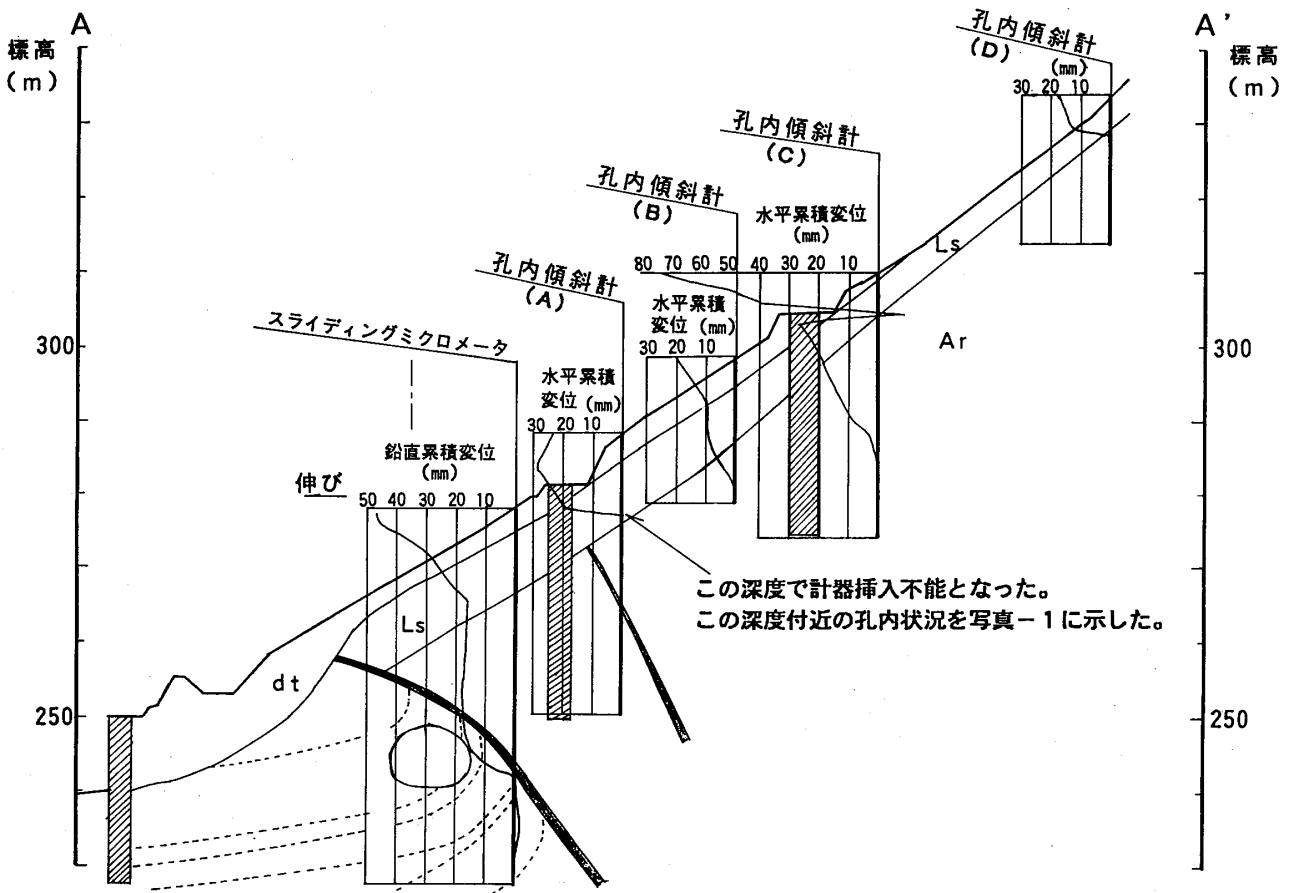


図-4 地震前後の斜面変位量分布図
 Fig. 4 Slope deformation behavior occurred by the Earthquake motion.

野島断層は、地震により延長約10km区間の地表部で、約1～2mのズレ変位を生じ(中田, 1995)、現地露頭においてその変位は1条の断層面で発生している。今回測定した位置での山田断層では、層厚3.8mの断層粘土全体に伸び変形が生じ、野島断層の変形形態とは異なっている。

断層粘土と地すべり堆積物の間に分布する断層破碎帯では、鉛直方向にはやや圧縮傾向にはあるが、ほとんど変位は見られない。

地すべり堆積物については、断層粘土と同様に層全体に伸びが発生している。

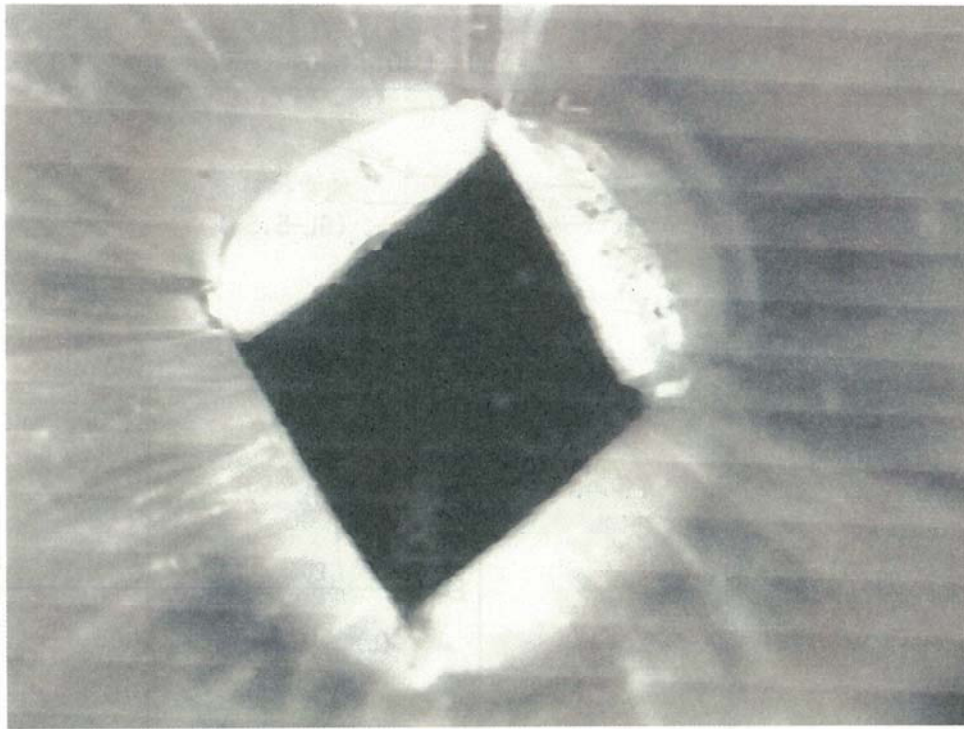
4・2 地すべり面近傍の変形

今回の地震において、物性の大きく異なる岩盤と地すべり堆積物との間にどのような地震波の伝播メカニズムが生じ、地盤変形が発生したかについては、広域的にはシミュレーション等による推定がなされている(社団法人 地盤工学会, 1996)。また、斜面規模の地震応答解析は、落合ほか(1995)の研究がある。しかしながら、

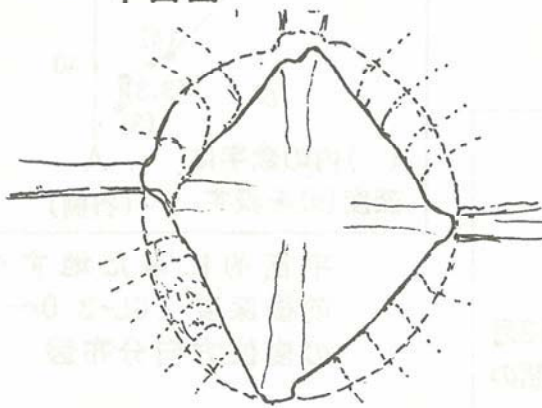
地すべり面や地層境界では実際にどのような変形を生じたかは明らかにされていない。

孔内傾斜計の測定では、地震後において、26個所の内8個所で、地すべり面深度付近でプローブの挿入が不可能になった。この、プローブの挿入不能ヶ所について、その状況を把握するため、Qスコープカメラを保孔管に挿入し観察した。保孔管の変形は、一般に観察される地すべり面のせん断変形状況とは大きく異なっており、明らかに座屈変形である(写真-1参照)。

孔内傾斜計の地震前後の累積水平変位の変化量を見ると、全体にすべり面より上部ではせん断変形を示しており、写真に示した座屈変形深度以浅でもせん断変形を示している(図-4参照)。すべり面付近の変位をみると、孔内傾斜計の測定可能箇所(図-4, C地点)でも座屈的な変形が生じている。このC地点の深度方向の変位を見ると、GL-26m付近からGL-7mまではほぼ谷川に変位しているが、GL-7mからGL-5.5mまでは谷川方向と直行するB方向に変位の向きが変わり、GL-3.5m位浅では、再び、谷川に変位している(図-5参照)。この



平面図



縦断面図

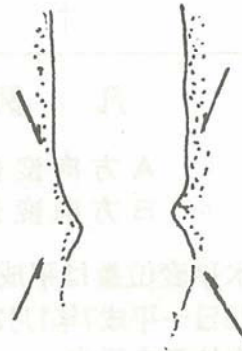


写真-1 変形した傾斜計保孔管の状況 (図-4 に位置を示した。)

Picture 1 The modified form of inclinometer casing due to Earthquake motion. (Location is indicated Fig.4)

状況は、保孔管が地すべり面付近で螺旋状に変形していることを示し、保孔管が地ねじりせん断を受けていると考えられる。

縫い地ボルト軸力計の地震前後の応力変化を見ると、地すべり面を境界にして上部では応力の変化はあまりないが、地すべり面付近では圧縮応力が約 $1000\text{kgf}/\text{cm}^2$ 増大している (図-6 参照)。

スライディングマイクロメータの観測においては、地すべり面より下部のGL-14~25m間で1.5mm圧縮している (表-1 参照)。

孔内傾斜計保孔管の座屈変形については、明確な原因は不明であるが、すべり面付近で圧縮応力が大きくなっていること及びすべり面付近でねじりが生じていることから考えると、すべり面下部の岩盤が変形している可能性もある。

4・3 崩積土と地すべり堆積物の前倒し変形

地震により斜面表面に設置していた伸縮計は断線し、礫径50cmの岩塊が数十cmも移動している現象が認められた。

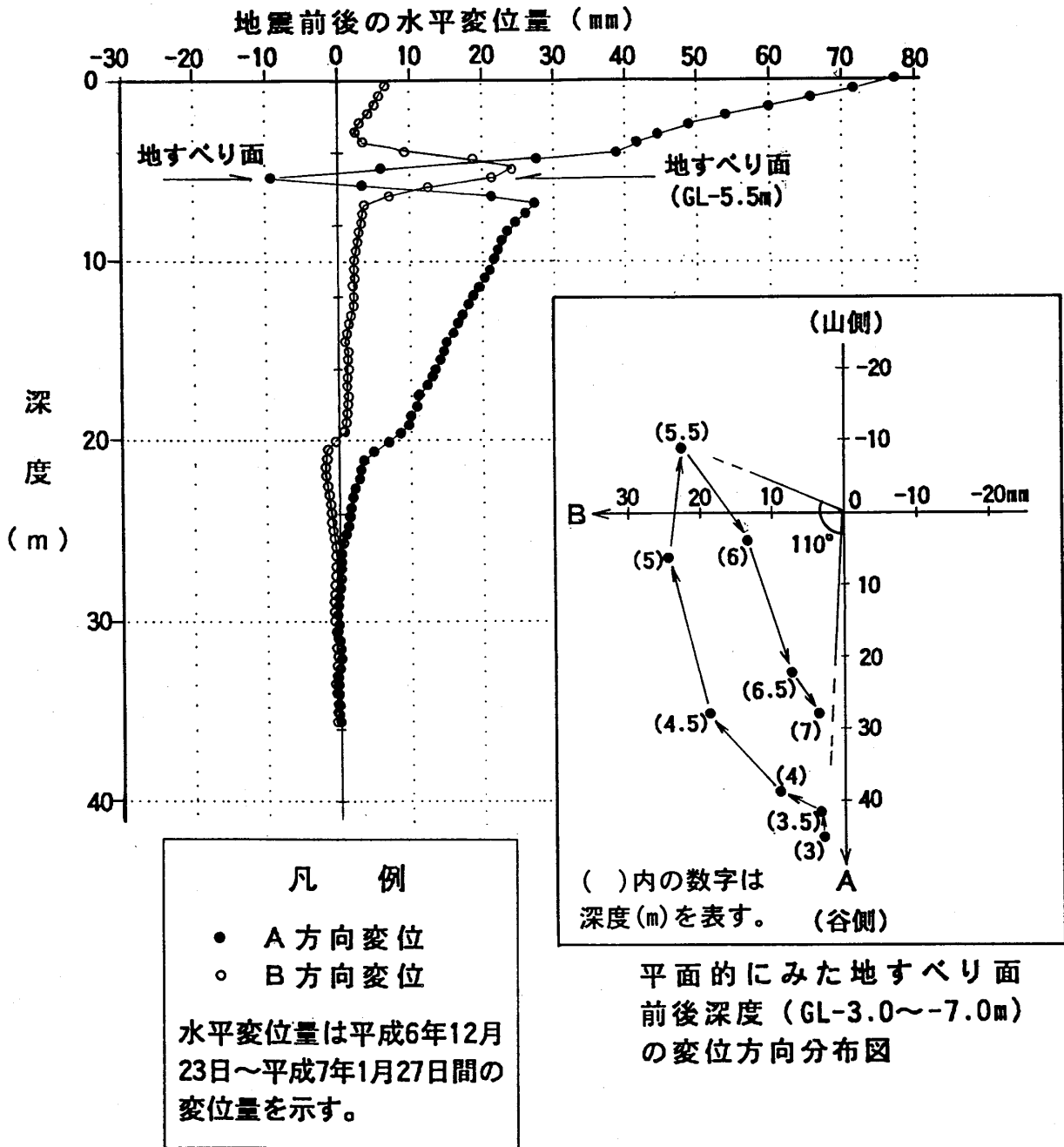


図-5 地震前後のすべり面付近の変位方向の変化 (C地点)
Fig.5 The change of transition direction around landslide surface by the earthquake motion.

孔内傾斜計による地表付近の地震前後の水平変位を見ると、崩積土と地すべり堆積物においては、抑止杭近傍を除き地表に近いほど変位の大きい前倒し的な変形が認められる (図-3, 4, 6 参照)。

地表面の傾斜計の変位量及び方向を見ると、ほとんどの地点で斜面の傾斜方向に変位している。また、地すべり範囲の中央付近で変位量が大きくなっているが、これは、崩積土と地すべり堆積物合計の厚さが地すべり範囲の中央付近で厚くなっているためと考えられる (図-2

参照)。

抑止深礎杭の鉄筋軸力についての地震前後の応力変化分布図をみると、中央部の抑止杭は、谷側も山側も深度17.5m付近で最大応力を示し、谷側で287kgf/cm²の圧縮応力、山側で735kgf/cm²の引張応力を示している。応力の分布状況からは曲げ変形の状態を示し、深礎杭頭部周辺に背後から力が作用していることが推定される。また、崩積土と地すべり堆積物の薄い斜面上部では、抑止杭に曲げ等の応力はほとんど生じていない (図-6 参

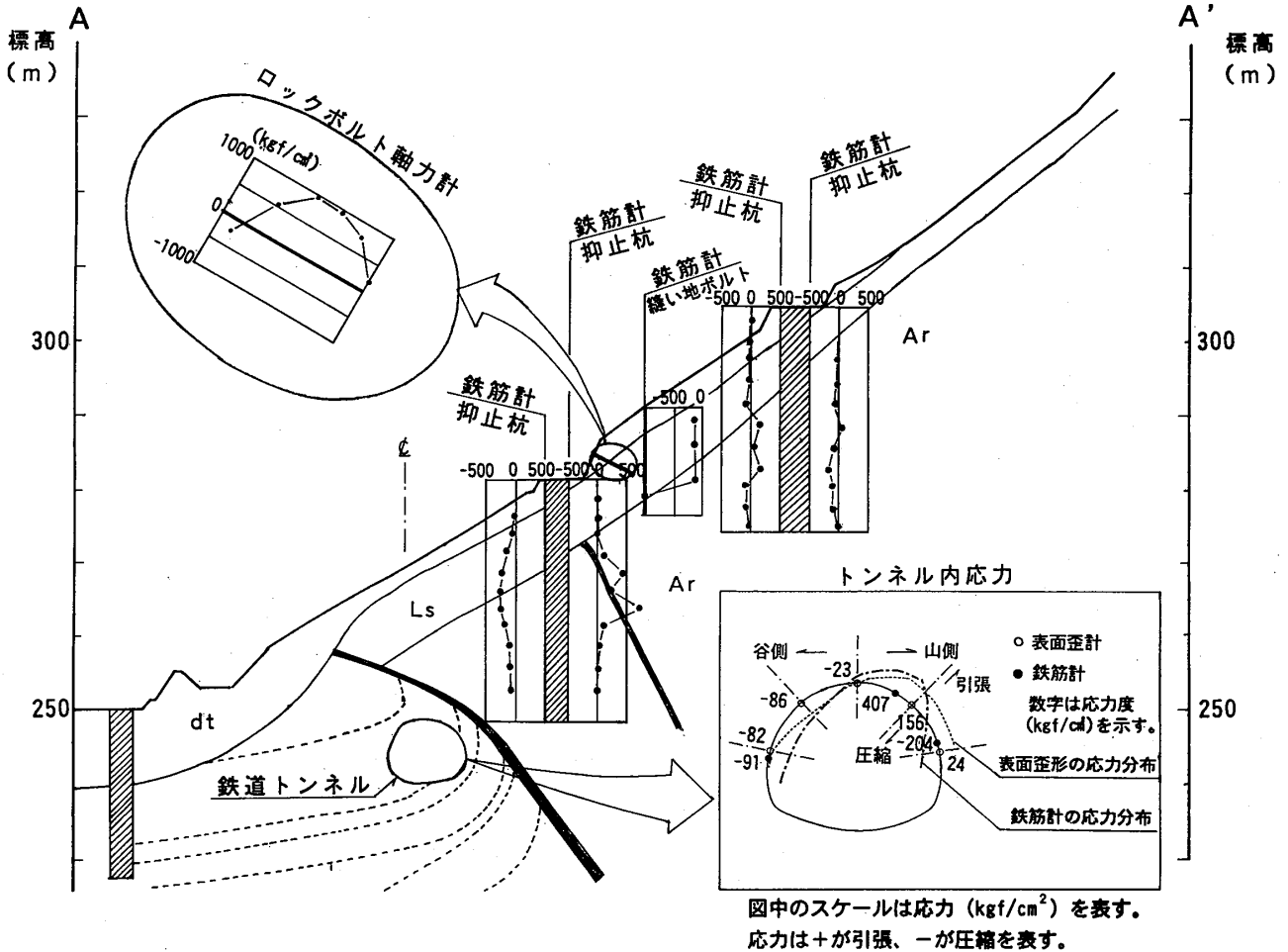


図-6 地震前後の応力変化量分布図 図中のスケールは応力 (kgf/cm²) を表す。応力は+が引張、-が圧縮を表す。
 Fig. 6 Map of the stress change inside the structural object occurred by the earthquake.

照)。

崩積土と地すべり堆積物中のロックボルト軸力計の地震前後の応力変化をみると、全体に引張応力が作用している (図-6 参照)。

これらの計測結果から判断すると、崩積土と地すべり堆積物は、地震により開放側へ発散するような状態となり、その結果谷側へ流れるような変形を示したことが考えられる。

5 斜面変形から推定される現象

兵庫県南部地震では、六甲山地内の岩盤において強震動の記録が水平・鉛直に分けて計測されているデータはほとんどないが、最も現場に近い神戸海洋気象台の加速度データ (大阪層群分布地域) は、上下動が332gal、水平動が818gal (NS)、610gal (EW) と報告されている (科学技術庁防災科学技術研究所, 1995)。

孔内傾斜計計測に認められる地すべり面付近の座屈的な変形や縫い地ボルト鉄筋計の大きな圧縮応力の作用から考えると、地震により、すべり面付近を境界として上

部と下部で異なる変位 (振動) が生じ、すべり面付近の地盤が緩み、地すべり堆積物が移動及び沈下したと考えられる。

また、表層の崩積土と地すべり堆積物は、斜面下方、水平、斜め上方への伸び変位が生じていることから、振動により開放側へ分散して広がり、流れるような変形をしたものとも考えられる。特に表層の岩塊が斜面下方へ数十cmも移動している現象は、地震力の凄さを物語っている。

鉄道トンネル内の鉄筋計や表面歪計の地震前後の応力変化を見ると、鉄道トンネルと断層との距離が最も近くなっている方向 (図-6のトンネルの右斜め上方) に引っぱり応力が生じており、トンネルが断層側から押されているものと考えられる。スライディングマイクロメータにおいては、断層粘土部で引っぱり応力が生じており、これらのことから推定すると、有馬層群が山田断層を境に神戸層群に乗り上げる形の微小な断層変位が生じた可能性も考えられる。

表-1 スライディングマイクロメータによる地震前後の深度別変位

Table 1 Vertical displacements measured by sliding micrometer before and after the earthquake.

深度 (m)	地震前後の 区間変位 (mm)	地質	変形帯区分	RQD %
1	0.185	地すべり堆積物(粘土・砂礫)	伸張帯	0
2	-0.895			0
3	-3.688			0
4	-4.799			0
5	-4.744			0
6	-3.266			0
7	-2.268			0
8	-2.042			0
9	-1.372			0
10	-1.773			0
11	-2.283			0
12	-2.581			0
13	-0.276			0
14	0.07			0
15	0.079	有馬層群(断層破碎帯) 流紋岩質凝灰	圧縮帯	0
16	0.067			0
17	0.240			0
18	0.102			0
19	0.385			11
20	0.389			26
21	-0.008			44
22	0.149			33
23	0.018			56
24	0.037			44
25	0.013	20		
26	-0.138	16		
27	-0.36	50		
28	-0.102	20		
29	-0.149	42		
30	-0.286	25		
31	-0.608	30		
32	-1.661	21		
33	-2.585	断層 粘土	伸張帯	0
34	-4.439			0
35	-6.279			11
36	-0.968			50
37	-0.156			22
38	-0.059			30
39	-0.229			56
40	-0.249			52
41	-0.079			0
42	-0.043			12
43	-0.034	35		
44	0.707	45		
45	0.191	35		
46	0.448	0		
47	0.382	30		
48	0.134	0		
		神戸層群 (砂岩・礫岩)	圧縮帯	

※- : 伸張 + : 圧縮

6 あとがき

地震により発生した変形について、地震前後の計測データを比較する事により、変形現象を次の3つに区別して述べた。

- 1) 断層粘土の伸張変形
- 2) 地すべり面近傍の座屈変形
- 3) 崩積土と地すべり堆積物の前倒し変形

これら各々の変形は、地震時に六甲山地ならびに周辺地域で発生した斜面変形を代表するものであると考える。

また、地震時に発生した現象としては、神戸層群中の層理面沿いの層状破碎帯(泥岩)がせん断変位を生じたようなデータもあり、断層破碎帯も変形した可能性もある。

今回の地震では、六甲山地内における地震の加速度データがないことから、地震力及び地震作用方向と計測結果を比較し、斜面等の変形状況がどのようにして生じたかは明らかでなかった。ここで報告した斜面は、基盤岩や地すべり堆積物等といった振動特性の異なる地質が接触し、断層や構造物(トンネル、抑止杭等)も存在するため、斜面等の変位を解明することまではできなかった。

今回の場合、地震によって傾斜計が測定不能となるほどの水平変位が生じたにもかかわらず、明瞭な地すべりが生じていないこと、滑落崖の形状が地震前の地すべり方向と異なることなどから、抑止深礎杭が斜面崩壊に対し抑止的な効果を発揮したものと考えられる。

参 考 文 献

- 遠山茂行, 中庸 充, 斉藤敬三 (1995): Association of Precise Survey & Applied Tecnology, No.61, 阪神・淡路大震災特集号, p25~p38.
- 神戸大学工学部建設学科土木系教室 (1995): 兵庫県南部地震緊急被害調査報告書 (第1報), p9~p11.
- 奥西一夫 (1996): 六甲山地の斜面崩壊災害のいくつかの特徴, 兵庫県南部地震と地形災害, 古今書院, p127~p142.
- 藤田 崇 (1996): 斜面変動, 阪神淡路大震災, 東海大学出版会, p158~p171.
- 竹内篤夫, 藤原常二, 遠山茂行 (1996): 兵庫県南部地震に伴い淡路島津名町高滝で発生した地すべりの特徴について, 防災研究所「阪神・淡路大震災研究報告書」, p236~p249.
- 科学技術庁防災科学技術研究所 (1995): 強震速報, No.46, 1995年1月17日, 平成7年(1995年)兵庫県南部地震, 強震観測事業推進連絡会議.