

兵庫県南部地震による宅地地盤被害と 各種要因との関係分析

沖村 孝¹・二木幹夫²・岡本敦³・南部光広⁴

¹正会員 理博 神戸大学 都市安全研究センター (〒657-0013 神戸市灘区六甲台町 1-1)

²工博 建設省 建築研究所 (〒305-0802 茨城県つくば市立原 1)

³建設省 建設経済局 (〒100-0013 東京都千代田区霞が関 2-1-3)

⁴正会員 工修 応用地質(株) 関西事業本部 (〒564-0062 大阪府吹田市垂水町 2-36-27)

本論文では、地震による宅地地盤被害を対象として、兵庫県南部地震による被害を述べるとともに各種要因との関係を分析し、被害原因について考察を行った。さらに、変状のあった代表的な箇所での安定解析を実施し、水平震度と安全率との関係について分析を行った。その結果、地震による被害発生の原因と地震時に作用した安定解析上の水平震度の大きさについて概ね推定することができた。

Key Words : earthquake, housing lots, slope failure, flow failure, stability analysis, horizontal seismic intensity

1. まえがき

兵庫県南部地震では宅地地盤においても面的な広がりをもって地盤に変状が見られた区域(「地盤変状箇所」と称す)が出現し、これらの区域では、引張りクラックや段差を伴うクラックが発生し、盛土の末端部では崩壊や押出し、地下水の浸みだし等が見られた。さらに、宅地や道路は互いに位置関係がズレたり、地表面が大きく波打ち、電柱が傾いたりした。これらの区域に建つ多くの建物は全壊～半壊状態となり、周囲の被災状況に比べると明瞭な差異が認められている。

既往文献等においては、被害の見られた箇所について個別に調査を行い、考察を加えられたものもあるが、これらの被害実態について全体としてまとめられたものは少ない。全体の傾向をまとめたものとしては、(社)地盤工学会の阪神大震災調査委員会の調査報告書¹⁾、釜井ら²⁾が都市域の斜面変動として全体をまとめたもの、沖村ら³⁾が神戸市内の被害についてまとめたものなどがあるが、被害箇所全体を必ずしも網羅していない。本論文では、地震発生後に実施された現地調査結果をもとに、これら被害実態の全体を詳細に取りまとめるとともに、各種要因との関係を分析して、地盤変状発生の特徴を考察する。あわ

せて、変状のあった代表的な箇所について、安定解析を実施し、震度の大きさと安全率との関係を分析する。

2. 過去の地震による宅地盛土地盤の被害

過去の地震被害報告¹⁾⁴⁾⁵⁾によると、宅地造成地においては切土斜面の被害がほとんどなく、大半は盛土斜面の被害である。これまで発生した地震のうち、被害が激しかったのは兵庫県南部地震と宮城県沖地震によるものであるが、釧路沖地震、北海道東方沖地震などでも被害は発生している。これらの地震で生じた宅地造成地での被害形態は、西ら⁶⁾によると表-1に示すように大きく4つのパターンに分類されている。

パターンⅠは宮城県沖地震で多く見られた例であり、旧の谷筋もしくは山麓部に堆積していた崖錐堆積物や崩積土、強風化土上に盛土したために、地震時にこれらがすべり面となって変状、崩壊が発生したケースである。兵庫県南部地震においてもこの種の変状は発生しているが、図-1に示すように変状の範囲が狭く、のり面内もしくはそれに近接する宅地を数宅地巻き込んだものが大半である。

パターンⅡは盛土材が地震時に液状化を起こしたケー

表-1 地震による被害形態と特徴^{1), 4) ~ 8)}

	模 式 図	特 徴
I		旧の谷筋もしくは山麓部に堆積していた崖錐や崩積土、強風化土上に盛土したために、地震時にこれらがすべり面となって変状、崩壊が発生したケース。宮城県沖地震で多く見られた。盛土材下部の岩塊が地下水の侵入などにより脆弱したことも一因に挙げられる。
II		盛土材が砂質土主体であり、盛土内に地下水が存在していたため、地下水位面下の材料が地震時に液状化を起こし、盛土自体が流動性の破壊を起こしたケース。すべり面が面ではなく厚みを持ったゾーンである可能性が高い。
III		兵庫県南部地震で多く見られた変状パターンである。盛土層およびその下位に分布する緩い崖錐 (砂質土主体) が液状化を起こし、地盤が傾斜していたために流動性の変状が生じたケース。移動量は大きいところで2~3mに達している。図にはすべり面を破線で記入しているが、明確なすべり面ではなく、崖錐全体もしくは一部が流動を起こして下方へ移動したと思われる。
IV		軟弱な旧湿地部に盛土されていたため、地震時に地震動の増幅が激しく、盛土自体がそれに耐えきれずすべり破壊を起こしたケース。盛土部にも地下水位が存在したために盛土自体の強度が弱かったこと、軟弱な層が側方流動を起こしたことも原因として考えられる。

スであり、宮城県沖地震や釧路沖地震の宅地や道路で見られた例である。

パターンⅢは兵庫県南部地震で多く見られた変状パターンである。盛土層およびその下位に分布する緩い崖錐 (砂質土主体) が液状化を起こし、地盤が傾斜していたために流動したケースである。移動量は大きいところで2~3mに達している。地下水位の高いのが特徴的であり、盛土厚が比較的薄く、古い時代に造成された宅地で多く発生している。

パターンⅣは北海道東方沖地震の際、湿地帯に造成された宅地で発生したケースであり、軟弱地盤上に盛土したために地震動が増幅し、盛土自体がそれに耐えきれずに変状を起こしたケースである。盛土部にも地下水位が存在したために盛土自体の強度が弱かったこと、軟弱な層が側方流動を起こしたことも原因と考えられる。

このように地震による宅地被害は大きく4つのパターンに

分類されているが、兵庫県南部地震ではパターンⅢの変状が数多く見られたことが他の地震による被害とは相違している。

3. 兵庫県南部地震による宅地地盤の被害

(1) 地盤変状箇所分布

これまで各機関がまとめた調査結果によると、兵庫県南部地震によって発生した地盤変状区域は56区域であるが、このうち一つの区域に複数のブロックで変状のあった箇所があるので、箇所数としては全体として65箇所となっている。

変状の形態としては、表-1中パターンⅢに示されているような宅盤面に変状が発生したものと、図-1に示すようにのり面とそれに近接する数宅地程度で変状が留まっているものにと大別される。後述するように、これらは現地盤

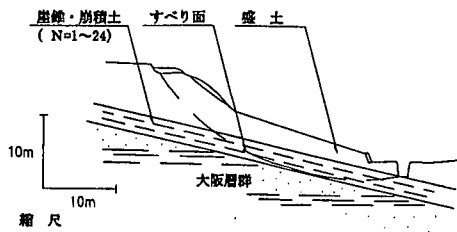


図-1 のり面変状箇所の代表事例¹⁾

表-2 変状箇所の地域別内訳

地 域	宅盤変状箇所(箇所)	のり面変状箇所(箇所)
神戸市	14	18
西宮市	25	3
芦屋市	2	0
明石市	0	2
宝塚市	0	1
合 計	41	24

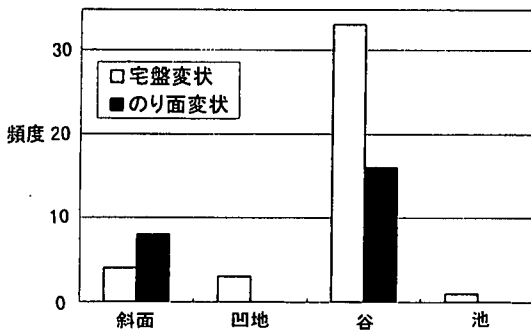


図-2 変状箇所の旧地形

の傾斜角、変状の形態、地下水位の位置等に差が認められるため、それぞれを宅盤変状、のり面変状と呼び、別個に分けて各種データを集計、分析することとした。

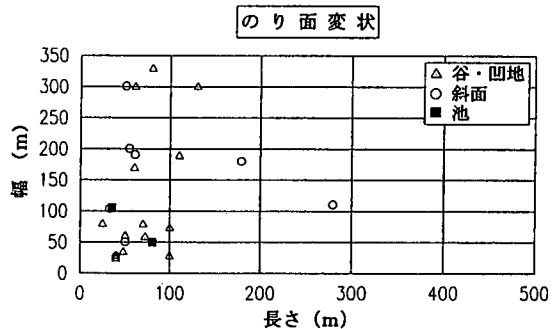
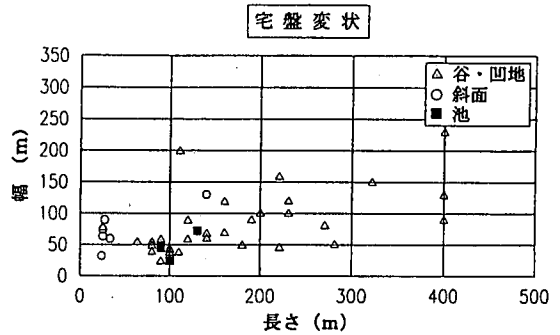
変状区域の地区別内訳を表-2に示す。宅盤変状とのり面変状の箇所別内訳では、宅盤変状が41箇所、のり面変状が24箇所であった。変状は、六甲山南麓～東麓にかけての大阪層群や高位～中位段丘層の造成地で数多く発生している。これらの造成地は早い時期から開発が行われたところである。

被害状況の詳細な把握にあたっては、調査資料だけでは判断できない面が多かったため、現地踏査を行い、本論文ではそれらの結果も踏まえて、取りまとめた。変状の状況については、のり面変状箇所24箇所のうち9箇所でのり面崩壊、残りの15箇所ではクラックやのり面の押し出しが見られた。一方、宅盤変状については、表-1のⅢ

表-3 地盤変状箇所直下の地質別内訳

地 質	箇 所 数	
	宅盤変状	のり面変状
段丘堆積層	4(0)	3(0)
大阪層群	34(17)	14(3)
神戸層群	3(0)	0(0)
花崗岩、有馬層群、丹波層群	0(0)	7(3)

注) ()内の値は盛土直下に崖錐が分布しているところである。



(注) 長さは移動方向の水平距離、幅は直交する方向の水平距離

図-3 変状箇所の平面形状

に示すように宅盤内のブロックが移動し、ブロック末端部では噴砂や地盤の盛り上がりなどが見られた。

(2) 変状区域の表層地質

表-3に示すように宅盤変状、のり面変状とも盛土直下の地質は大阪層群が圧倒的に多い。これは、六甲山南麓～東麓の大阪層群分布域は立地条件が良い上、大きな切盛を行わずに造成できるなど、開発に適した地域であったためと考えられる。同表によると宅盤では、41箇所のうち17箇所で、のり面では24箇所のうち6箇所で盛土直下に崖錐を薄く挟んでいる。さらに、この崖錐が分布するのは、大半が大阪層群分布域であり、段丘堆積層分布域では存在していない。このことは、大阪層群を構成するのが、主として砂、粘土であり、降雨や河川水によって侵食されやすい土質であるため、谷筋に侵食された土砂が

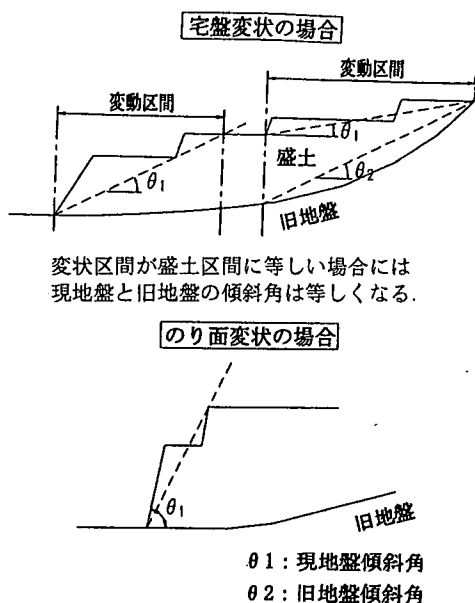


図-4 地盤傾斜角算定方法

堆積しているところの多いことも関係している。

(3) 旧地形との関係

地盤被害の発生と旧地形との関係を調べると、図-2に示すように宅盤変状では41箇所のうち33箇所が、のり面変状では24箇所のうち16箇所が旧谷地形の盛土で発生している。ここで谷地形としたのは、旧地形が谷地形のところを盛土したところのうち、谷縦断方向の盛土長さ(水平距離)を L 、谷末端部における横断方向の盛土幅を B として、 $B/L \leq 2$ を谷地形とし、それ以上のものは凹地形とした。一方、旧斜面上に盛土したところでは、宅盤変状が4箇所と少ないのに対して、のり面変状は24箇所中8箇所と多くなっている。

次に変状箇所の平面的な形状を、長さ(移動方向)と幅(移動と直角方向)で表すと図-3に見られるように宅盤変状箇所とのり面変状箇所とでそれぞれ特徴が認められる。すなわち、宅盤変状は旧谷地形のところに集中し、被災形状は縦型(移動方向に長い)が多いのに対して、のり面変状は横型(移動直角方向に長い)が多く、旧地形としては谷に限らずいろいろなところで発生していることがわかる。

(4) 地盤傾斜角との関係

地盤傾斜角については、ボーリング資料のある49箇所について現地盤と旧地盤の両方の傾斜角を求めた。図-4に傾斜角算定方法を示したが、盛土下部の旧地盤傾斜角についてはボーリング資料と旧地形図より求めた。

図-5は現地盤と旧地盤の傾斜角の関係を示したものである。同図によると現地盤については宅盤変状で10°

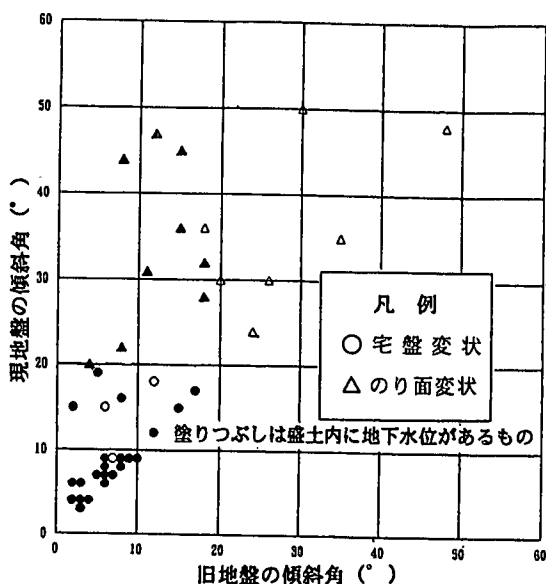


図-5 旧地盤と現地盤との傾斜角関係

未満のところが多いのに対して、のり面変状箇所では、すべてが20°以上となっている。一方、旧地盤については、図-2に示したように両変状とも谷地形のところが多いのを反映して、傾斜が20°未満のところが多い。

図-4に示すように地盤変状が盛土区域全体に発生していれば、現地盤と旧地盤の傾斜角が近くなるのに対して、盛土域末端部寄りに変状箇所が発生していれば、図-5における1:1の関係より上側に離れてプロットされることになる。同図を見るとのり面変状は1:1の関係より上側にプロットされており、被害が盛土域の末端部寄りに発生していることがわかる。同図中で現地盤の傾斜角が30°以上のところについては、古い時代に造られた石積み擁壁が数段設けられているところが多く、それら全体を巻き込む状態ですべり破壊的な変状が発生しているところが多い。一方、宅盤変状は1:1の線上かもしくはその近くにプロットされることが多く、変状長が長いことも相伴って、盛土区域全域にわたって発生しているところが多い。

図-5中、黒印(●)は盛土内に地下水位が存在することを示している。のり面変状では、旧地盤の傾斜角が20°以上になると、盛土内に地下水位の存在しないところがほとんどであった。これに対して、旧地盤の傾斜角が20°未満のところでは、ほとんどの箇所において地下水位が存在しており、地下水位の存在と地盤変状との関係が深くなる可能性を示唆している。

宅盤変状箇所は、旧地盤の傾斜角が20°未満と緩く、盛土内に地下水位の存在するところがほとんどであり、地下水の存在が変状発生の大きな要因となっていることが推察される。

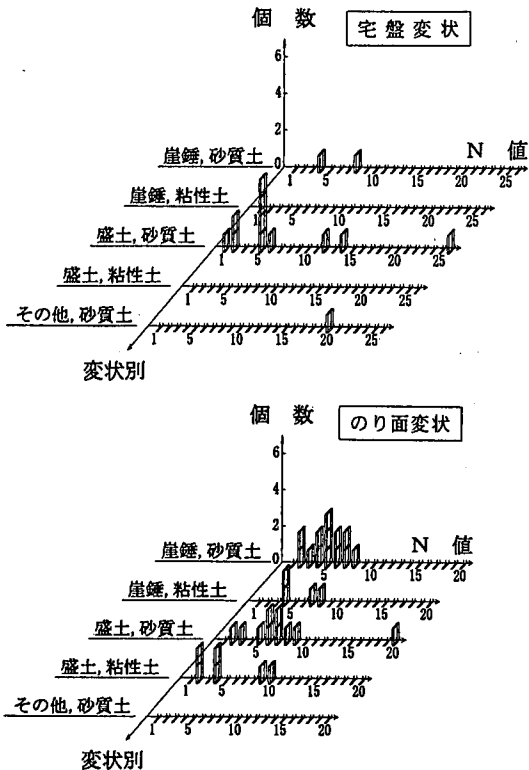


図-6 変動ゾーンもしくは想定すべり面における土質とN値との関係

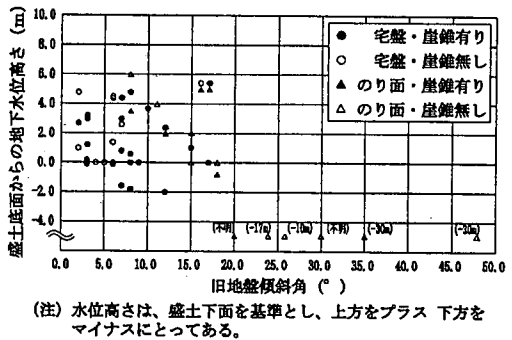
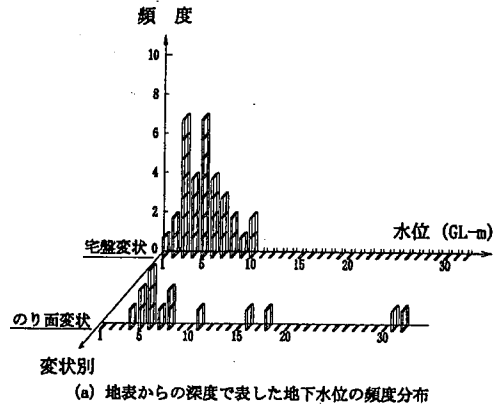
(5) 変状面のN値特性

宅盤変状では地盤の流動化に伴って変状が発生している箇所が多い。このようなところでは、すべり面に該当するゾーンにある程度幅があるものと思われるが、そこでのN値分布を土質別に集計した。また、のり面変状についてはすべり面が想定されているので、すべり面上下1mの範囲内にあるN値とその深度の土質を集計した。一つの変状箇所でも複数本のボーリングデータがある場合は、平均値を採用した。収集したデータ数は、地盤変状箇所65箇所のうち48箇所である。

地盤調査の結果を図-6に示す。同図から変動ゾーンもしくは想定すべり面付近の地質は、崖錐と盛土が半々を占めていることが分かる。ここで両層の地質境界にすべり面が存在する場合には、N値の小さい方の地質を選択した。同図によると盛土、崖錐とも砂質土のところが多く、N値はほとんどが10以下となっている。この傾向は宅盤変状でさらに強くなり、ほとんどすべてのN値が10以下である。これに対して、のり面変状では一部N値が10以上のところも存在している。

(6) 地下水位との関係

図-7はボーリング資料から得られた地下水位について、水位の頻度分布および地盤傾斜角との関係を示したもの



(注) 水位高さは、盛土下面を基準とし、上方をプラス 下方をマイナスにとつてある。

(b) 盛土底面からの地下水位高さ旧地盤傾斜角の関係

図-7 地盤変状箇所の地下水位

である。図-7(a)図から、変状発生箇所の地下水位は比較的浅く、特に宅盤変状箇所においてはGL-5m以浅が多いことがわかる。(b)図によると盛土底面からの地下水位高さは、旧地盤傾斜角と関係があり、旧地盤の傾斜が急になる程地下水位高さが低くなる傾向を示している。また、旧地盤の傾斜角が20°以上になると、盛土内に地下水が存在しなくてものり面変状が発生している。一方、旧地盤の傾斜が緩いところでは、地下水が帯水しやすく、排水対策が重要なことを示している。すなわち、排水対策が十分でなければ、盛土内に地下水位が上昇し、地盤変状の発生する可能性が高くなることを示唆している。

図-8は、ボーリング資料から読みとった変動ゾーンの中心面および想定すべり面までの深度と、地下水位の関係を示したものである。同図で1:1の関係より上側のデータは、変動ゾーンもしくは想定すべり面に地下水が存在していたことを示している。地下水位は降雨状況によって変化するので、被災時の状況を再現しているとは限らないが、同図から地盤変状のあった箇所のほとんどは、地下水が変状土塊中にあったことがわかる。

(7) のり高および盛土厚との関係

図-9はのり面変状箇所ののり勾配とのり高の関係を示したもの。これを見ると、図中にハッチで示した傾

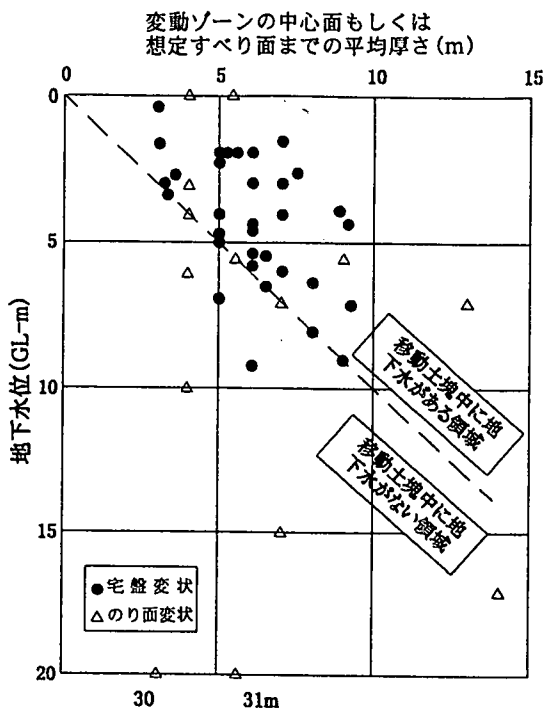
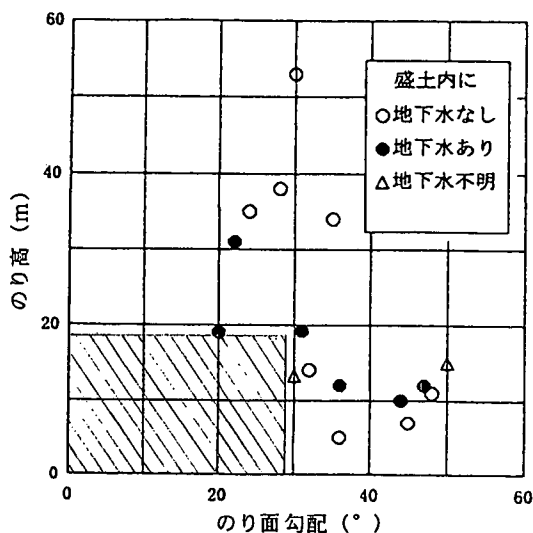


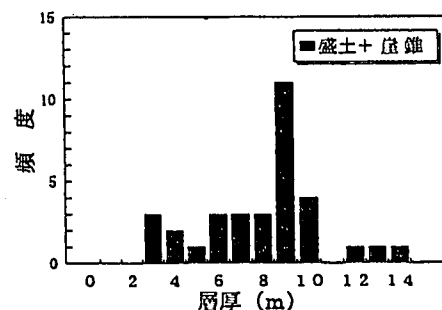
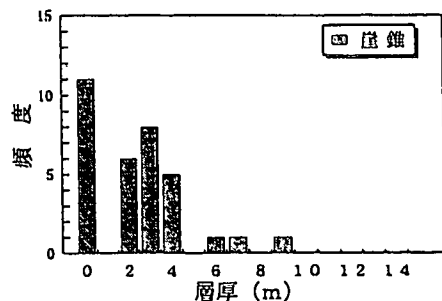
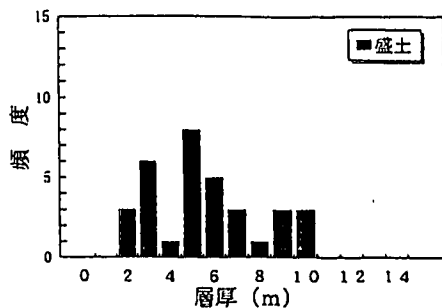
図-8 想定すべり面の深度と地下水位の関係



(注) ハッチの部分には変状箇所がないことを示している。

図-9 のり面変状箇所におけるのり面勾配とのり高との関係

域、すなわちのり高19m未満で、かつのり勾配30°未満ののり面では被害が発生していない。このことは、早い時期より宅地化された造成地においても、のり勾配が30°未満(1:1.8以上)であれば、通常盛土高($H \leq 15\text{m}$)のところでは被害が発生していないことを示している。一般に盛土高が15m以上になると、高盛土の扱いになり、改訂後の宅地防災マニュアル⁷⁾では、必要に応じて地震時の検討を行うこととなっているが、同図はこのことを裏づけ



宅盤変状箇所(33箇所)のボーリング結果を集計したもの

図-10 盛土および崖錐の層厚分布

る結果となっている。

図-10は、宅盤変状箇所のボーリング資料から、盛土と崖錐の厚さについて頻度分布をとったものである。盛土の平均層厚は5m、崖錐層厚は2m~4mで両地層を合計すると層厚は6m~10mのところが多い。このことは、盛土層が10m以上になると、盛土内に多少地下水位が上昇しても、地表面からの深度が大きいために、地盤の流動化が起りにくいものに対して、盛土厚の薄いところでは全般に地下水位が浅くなるため、地盤の流動化が起りやすいとも考えられる。

(8)地震外力との関係

図-11は地盤変状の移動方向を方位10°ごとにとり、変状箇所数とその面積を集計したものである。箇所数で見ても変状箇所の面積で見ても、方位に対し一定の傾向が認められる。すなわち、六甲山南~東麓には東北東-西南西方向に断層が分布しているが、変状の発生は、断層方向である東北東-西南西方向と、その直角方向であ

る北北西—南南東方向に集中しているのがわかる。六甲山南～東麓の地域では、これらの方向の傾斜地盤が数多く存在することにも関連するが、変状発生箇所が東北東の方向と南南東の方向にかなり集中しているのは、地震動の大きさとも関連する可能性が高い。一般に横ずれ断層運動に伴うS波は、断層面の方向とその直角方向に卓越することが知られており⁸⁾、これらの方向の傾斜地盤では大きな地震外力を受けた可能性も考えられる。

4. 地盤変状の分析

(1) 検討箇所の抽出

3章で兵庫県南部地震による地盤変状箇所は、大きく宅盤変状とりの面変状に分けられ、それぞれで特徴の異なることを述べた。ここでは従来から用いられている安定解析手法を用いて、地盤にどの程度の大きさの慣性力が作用したかを検討する。検討箇所としては、宅盤変状とりの面変状の代表的な箇所を合わせて7箇所抽出した。宅盤変状箇所については、変状末端部で噴砂や地盤の盛上がりが見られ、液状化の発生したところが多いが、一部地下水位が低く、噴砂等も認められず、液状化発生の可能性が低いところもあったので、可能性の高いところと比べるために、このような箇所も上記7箇所中に含めて検討した。

(2) 震度法安定計算による安定性の評価

a) 検討項目

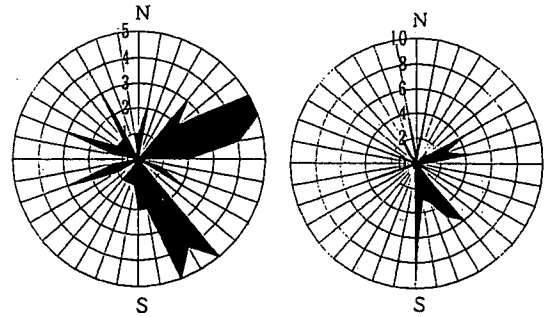
円弧すべり面もしくは複合すべり面を想定した震度法安定計算により安全率を求め、被害との関係について考察した。なお、土質定数については、ボーリング等の地質調査結果から既往文献資料¹²⁾に基づいて推定した。

兵庫県南部地震による地盤変状箇所のうち、盛土末端部で噴砂や盛り上がりが見られたところについては、既往文献^{2), 9)～11)}によっても、地下水面下の盛土や崖錐の砂質土層が地震動によって液状化を起こした可能性のあることが指摘されている。このことより、本検討では、液状化発生の可能性が高いところと、そうでないところを比較することによって、液状化発生による間げき水圧上昇量の推定を試みる。

b) 安定計算式

安定計算式として、ほとんどの指針・基準等で円弧すべり面を仮定した修正フェレニウス法や複合すべり面を仮定した簡便法を採用している場合が多く、本検討でもこれに従った。

地震力については、「宅地防災マニュアル」⁷⁾や「道路土工のり面工・斜面安定工指針」¹³⁾に示されているように、すべり土塊を一つのブロックとして考え、土塊に働く水平震度のみを考慮する。すなわち、安定計算式において、



(a) 変状箇所の分布

(b) 変状面積の分布

図-11 移動方向別にみた変状箇所の分布

水平震度に相当する地震時慣性力が各スライスの重心位置に作用するものとして、滑動モーメントの増大を考えるとともに、各スライスのすべり面上に働く有効垂直応力を減じ、抵抗モーメントを少なくするものである。以下に円弧すべり面による場合の計算式を示す。

$$F_s = \frac{r \sum [C \cdot \ell + \{W \cos \alpha - U \cdot \ell - k_h \cdot W \sin \alpha\} \tan \phi]}{\sum (r \cdot W \sin \alpha + k_h \cdot W \cdot h)} \quad (1)$$

ここに; F_s : 安全率(地震時)

r : すべり面の半径

W : 各分割片の単位長さ重量

U : 各分割片のすべり面上に働く間げき水圧

k_h : 設計水平震度

α : 各分割片のすべり面の中心とすべり面を円弧とする円の中心とを結ぶ直線が鉛直線となす角度

h : 各分割片のすべり面を円弧とする円の中心と各分割片の重心との鉛直距離

ℓ : 各分割片のすべり面の長さ

ϕ : 土の内部摩擦角

C : 土の粘着力

c) 計算条件

(i) 土質定数(強度定数等)

強度定数等については、土質、N値を参考にして、参考文献¹²⁾に示されている一般的な値などから推定した。

(ii) 地下水位

地震発生時の地下水位は確認されていないため、ここでは復旧時の地盤調査時に確認された水位を用いた。

(iii) 地震力

安定計算に用いる水平震度(k_h)は、最大加速度に応じて一義的に定めることはできないため、ここでは k_h を 0.1 ずつ小さくしていき、安全率が 1.0 以下となった時点で計算を終了した。

被 害 タイプ		地点番号 No	安全率						限界震度 k _M	
			k _h =0.0	k _h =0.1	k _h =0.2	k _h =0.3	k _h =0.4	k _h =0.5		
宅盤 変状	液状化発生の 可能性が高い ところ	Ⅰ	①	3.647	2.074	1.440	1.097	0.883	－	0.35
			②	3.641	1.908	1.281	0.958	0.761	－	0.29
			③	4.412	2.412	1.653	1.254	1.007	0.840	0.41
	液状化発生の可 可能性が低いところ	Ⅱ	④	3.205	1.611	1.070	0.798	0.633	－	0.22
			⑤	3.725	2.008	1.369	1.034	0.829	－	0.32

円弧すべり（修正フェレニウス法）

被 害 タイプ		地点番号 No	安全率						限界震度 k _M	
			k _h =0.0	k _h =0.1	k _h =0.2	k _h =0.3	k _h =0.4	k _h =0.5		
のり面 変状	液状化発生の可 能性が低いところ	Ⅲ	⑥	1.774	1.464	1.231	1.050	0.906	0.788	0.34
			⑦	1.630	1.312	1.094	0.933	0.809	－	0.26

（注）表中の(k_h)は計算に用いる水平震度を表しており、限界震度(k_M)は安全率が1.0となる場合の水平震度を表している。

d) 安定計算結果

安定計算結果を、表－4 および図－12～15 に示す。なお、表－4 に示す限界震度(k_M)とは、図－15 から安全率1.0になるときの水平震度を読みとった値である。

(i) 限界震度

表－4 より各箇所での限界震度は以下の通りである。

I. 宅盤変状（液状化発生の可能性が高いところ）

（複合すべり） $k_M=0.29\sim0.41$

II. 宅盤変状（液状化発生の可能性が低いところ）

（複合すべり） $k_M=0.22\sim0.32$

III. のり面変状（液状化発生の可能性が低いところ）

（円弧すべり） $k_M=0.26\sim0.34$

I の宅盤変状で、液状化発生の可能性が高いところの限界震度が大きくなっているのは、地震時の過剰間げき水圧を考慮していないためである。II、III のケースは液状化発生の可能性が低い箇所であり、過剰間げき水圧が大きく生じていないと判断されるため、求められた水平震度は実際に作用した値に近いと推察される。II の限界震度を見ると $k_M=0.22\sim0.32$ であり、地点によっては多少の過剰間げき水圧が発生した可能性も考えられるので、このことを考慮すると、実際に作用した水平震度は、上記の値よりも小さく判断すべきものと思われる。一方、III のケースでは盛土高さが高く、現地盤の傾斜も急であるために、地震動がそれよりも多少増幅された可能性がある。

また、表－1 のパターン I は宮城県沖地震による宅地被害例⁴⁾である。この例に対しても西ら⁶⁾が盛土、崖錐等の土質定数を既往の設計指針より推定し、安定解析を行っている。計算結果は図－16⁶⁾に示す通りであるが、それによると $k_M=0.20\sim0.24$ が限界震度となっている。

同地区の推定地表面水平最大加速度は、国井ら¹⁴⁾によると 350gal 程度である。ここで震度と加速度との関係については、下記に示すように野田・上部の式¹⁵⁾がある。

$$k_h = (\alpha/g)^{1/3} \quad (2)$$

ここに、 k_h ：水平震度

α ：地表面加速度

g ：重力加速度

式(2)を用いて水平加速度 350gal に相当する k_h を求めると 0.24 となる。一般に地中部では地表面より地震動の増幅率が小さいと考えられるので、実際に作用した k_h は、この値よりも小さく、上述した $k_M=0.20\sim0.24$ の平均的な値に近いものと推察される。

兵庫県南部地震においては地盤変状が発生している丘陵地での地震動観測データがほとんどないため、実際に作用した地震動の詳細は不明である。このことより、建物被害との関係より地震動の推定を試みる。参考文献¹⁶⁾に示されている図は、建設省建築研究所が作成した建物被害状況図であり、この図に示されている建物被災率より地盤変状箇所の震度を旧来の震度階級表(1949年制定)に基づいて求めると震度 V～VI となる。同階級表によると震度 V は、加速度が 80～250gal、震度 VI が 250～400gal に相当している。一方、土岐らが示している断層最短距離から地表面加速度を推定する方法¹⁷⁾により、N ①～⑦地点の地表面水平最大加速度を推定すると概ね 400～600gal となる。両者の値には少し開きはあるが、地中部においては地表面より地震動が小さくなっている可能性があることを考慮すると地盤変状箇所で作動した地中部地震動は、大きくても 400gal 程度ではないかと推察される。この値を式(2)に代入し、 k_h を求めると 0.25 となり、上記で求めたタイプ II の限界震度の範ちゅうに入るとともにタイプ III の下限値に近い値を示すことになる。

以上の結果より、実際に作用した水平震度を仮に $k_h=0.25$ として I の3事例について、複合すべりでの安全率を求めると $F_s=1.17\sim1.40$ となる。実際にはこの3事例でも変状が発生していることから、計算上は安全率がそれぞれ 1.0 以下になる。この安全率の低下量より、変動ゾーン全域にわたる過剰間げき水圧発生に伴うせん断抵抗力

層 番 号	単位体積重量 (tf/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (tf/m ²)
盛 土	1.900	25.00	2.00
崖 錐	1.900	25.00	0.00

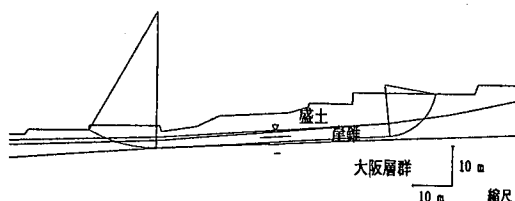


図-12 安定解析断面 (宅盤変状 (液状化発生の可能性が高いところ: 地点番号 No. ②))

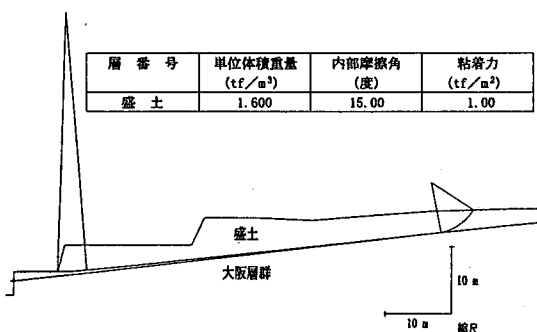


図-13 安定解析断面 (宅盤変状 (液状化発生の可能性が低いところ: 地点番号 No. ⑤))

層 番 号	単位体積重量 (tf/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (tf/m ²)
盛 土	1.800	15.00	3.00
崖 錐	2.000	35.00	0.00

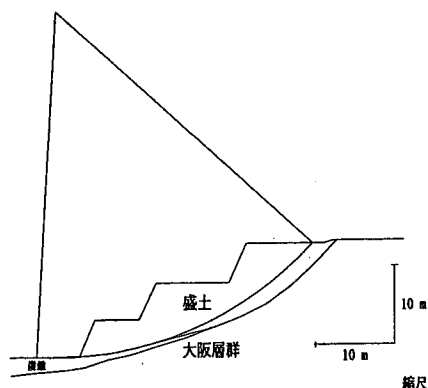


図-14 安定解析断面 (のり面変状 (液状化発生の可能性が高いところ: 地点番号 No. ⑦))

の低下率を求めると、 $0.17/1.17 \sim 0.40/1.40 = 0.15 \sim 0.3$ となる。すなわち、液状化発生によって間げき水圧が上昇し、すべり面 (変動ゾーン) における強度が15%~30%低下したことによって、変状が発生したことに対応する。

図-12、13に示すように、宅盤の変状箇所は同じ厚さで長さの長いものが多い。直線すべりの状態に近いので、

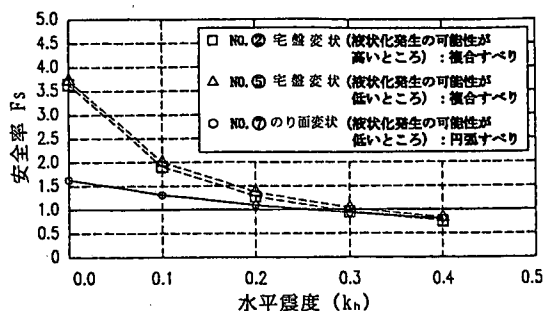


図-15 水平震度と安全率の関係

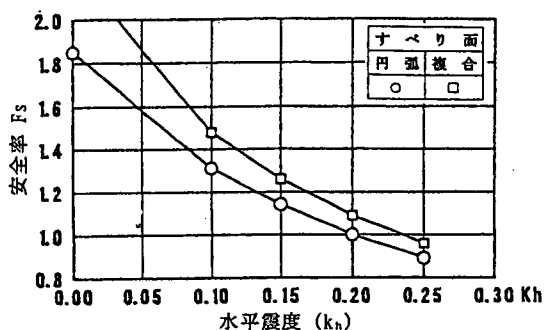


図-16 水平震度(k_h)と安全率(F_s)関係⁸⁾

すべり面の深度を仮に GL-7mとし、地盤の湿潤単位体積重量(γ)を 1.9tf/m^3 (18.6kN/m^3), 水中単位体積重量(γ')を 1.0tf/m^3 (9.8kN/m^3), 地下水位を平均的に GL-3m, 土の内部摩擦角を ϕ , 粘着力を 0tf/m^2 (0kPa), すべり面の傾斜角を 10° とするとすべり面における有効垂直応力(σ')は

$$\sigma' = (1.9 \times 3 + 1.0 \times 4) \cos 10^\circ = 9.6\text{tf/m}^2 \text{ (94.1kPa)}$$

となる。地盤抵抗力は $\sigma' \tan \phi$ となるので、これが15%~30%低下するということは、 σ' が $9.6 \times (0.7 \sim 0.85) = 6.7 \sim 8.2\text{tf/m}^2$ ($65.7 \sim 80.4\text{kPa}$) になるということである。すなわち、間げき水圧が $9.6 - (6.7 \sim 8.2) = 2.9 \sim 1.4\text{m}$ 上昇した場合に相当する。換言すれば、1.4~2.9mの過剰間げき水圧が発生したことになる。ちなみに表-1のパターンⅢの図でも示されているように、地下水位の浅い変状ゾーン末端部において、噴砂や地盤の盛り上がりが確認されており、このことを裏づける結果となっている。

(ii) 震度による安全率低下割合

図-17は、地震時安全率の常時安全率に対する比を縦軸にとり、震度に対する安全率の低下傾向を示したものである。これによれば宅盤変状では、常時の安全率が大きいものの、震度に対する安全率の低下割合が大きい。例えば、震度0.25に対する地震時安全率は、のり面変状で常時の安全率の0.65倍程度に低下するが、宅盤変状 (液状化発生の可能性が低いところ) では、0.3倍程度まで低下している。二木¹⁸⁾も同様な検討を行い、斜面傾斜

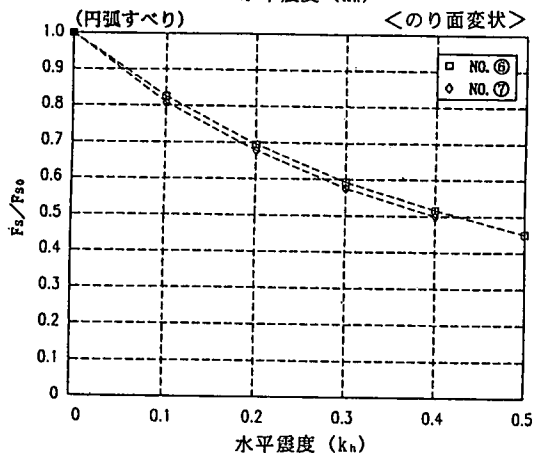
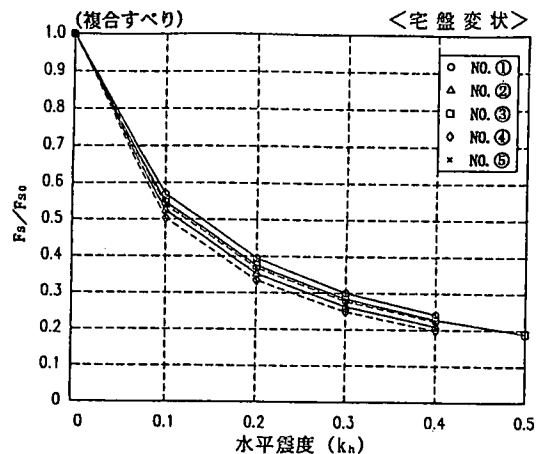


図-17 震度と安全率低下割合との関係

角が緩くなるほど、地震時の安全率低下割合が大きくなることを示している。これらのことは、すべり面(変動ゾーン)勾配が緩く、常時の安全率が大きい宅盤の場合においても、地震時における検討が必要であることを暗示している。

(iii) 地下水位の影響

宅盤変状では、盛土中に地下水位が確認されている事例が多い。図-18は、宅盤変状で液状化発生の可能性が高い箇所を例にして、地下水位を低下させた場合の安全率を試算した結果である。水位有は、既往調査で確認された地下水位を設定した場合であり、水位無は、盛土内の地下水位を完全に排水した場合を想定した場合である。なお、ここで求めた水位有の安全率は、液状化発生による水頭上昇を考慮していない値である。同図より、地下水位がなければ限界震度が0.29→0.37と大きくなっていることがわかる。二木¹⁸⁾や前島ら¹⁹⁾も他の箇所において同様な計算を行い、地下水位の高低が安全率に大きく影響することを示している。今回計算を行った地点においては、液状化が発生した可能性が高く、実際に作用した震度としては、 $k_h=0.29$ よりも小さかったものと推察されるため、地下水がなければ、地震時においても安全率は大き

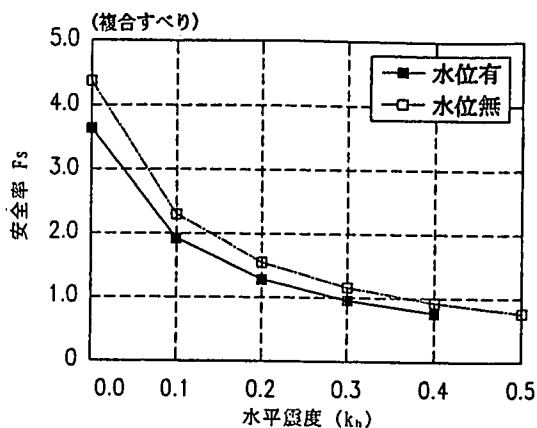


図-18 水平震度と安全率の関係

く、宅地は安定した状態であることがわかる。

5. まとめ

本論文では、兵庫県南部地震において、宅地地盤に発生した地盤変状の実態ならびに各種要因との関係を分析するとともに、変状の起こった代表箇所について安定解析を実施し、実際に作用したと思われる震度を推定し、その震度を用いた検討を行った。得られた結果をまとめると以下のようである。

(1) 地盤変状の特徴ならびに原因に対する考察

(i) 宅盤変状に対する考察

宅盤変状の特徴をまとめると以下のようになる。

- ① 現地盤の傾斜は 10° 未満のところが多い。
- ② 地下水位は平均GL-5mと浅く、変動ゾーン内に地下水位が存在していた。
- ③ 宅盤変状箇所の盛土厚は平均5mであり、変状箇所の約4割は盛土直下に崖錐が分布していた。両地層とも変動の可能性がある地層であり、両層を合わせて考えると、概ね6m~10mの層厚で被災していた。
- ④ 崖錐は主として旧地盤の谷部に堆積しており、砂質土が主体となっている。これらの地層は、ほとんど地下水に満たされていた。
- ⑤ 流動化した変動ゾーンに着目すると、流動化したゾーンは地下水位面下の盛土あるいは崖錐層内に存在している。N値は概ね10以下であった。

以上のことから、宅盤変状箇所の特徴は、変状が緩傾斜面でしかも盛土厚があまり厚くないところで発生していることである。斜面安定の問題としてとらえると、急斜面・高盛土で被害がないのは一見矛盾して見える。これは、今回被災した古い造成地には急な地形が少ないことも関連しているが、今回分析したように急地形には、地下水

がないことなどが原因していると考えられる。すなわち、今回の被害は、地下水位の高い、緩傾斜な場所において、盛土あるいは崖錐の緩い地盤(N 値 <10)が、激しい地震外力を受けて液化化し、緩くても傾斜があるため地盤が流動化し、その結果、地すべりのような宅盤変状に至ったところが多かったものと推察される。これを示す根拠として、宅盤変状の生じたところの末端部で噴砂が認められたところが何箇所か存在した。

(ii) のり面変状に対する考察

のり面変状の特徴をまとめると以下のようになる。

- ① 分析対象の24箇所のうち、9箇所でのり面崩壊が見られ、残りの15箇所でクラックやのり面の押し出しが見られた。
- ② 想定すべり面の N 値は、概ね10以下であるが、一部で $N=12\sim20$ を示すところもある。
- ③ 変状のあった箇所のうち、旧地盤の傾斜角が 20° 以上のところでは盛土内に地下水位の存在しないところがほとんどであった。これに対して旧地盤傾斜角が 20° 未満のところではほとんどにおいて盛土内に地下水位が存在しており、地下水位の存在と地盤変状との関係が深くなる可能性を示唆している。
- ④ のり高15m未満で、のり面の角度が 30° 未満のところでは、変状が発生していなかった。これは「宅地防災マニュアル」^{7,20)}や「道路土工のり面工・斜面安定工指針」⁹⁾に示されている標準盛土勾配(のり高15m以下)の範囲内の形状である。

以上の特徴から、のり面変状については、盛土内に地下水位が存在していなくても変状の発生しているところがあり、のり高が高くなって地震動が増幅されたことやのり面を構成する盛土地盤の強度が小さいことにより、変状が発生したものと推察される。

一方、のり高が15m以下の法面については、「宅地防災マニュアル」、「道路土工のり面工・斜面安定工指針」の基準を満たしていれば、兵庫県南部地震による強い地震外力を受けても十分安定は保たれていたと考えられる。

(2) 安定解析による作用震度の検討

ボーリング調査資料を参考にして、土質定数等を設定し、各タイプの代表的な事例を対象に、震度法による安定解析を行った。その結果は以下の通りである。

(i) 宅盤変状

- ① 宅盤変状での実被害形状は、ほとんどが複合すべり形状である。
- ② 液化化発生の可能性が低いところでの安定計算結果では、限界震度が $0.22\sim0.32$ であった。一方、宅盤変状箇所で地震動推定値より求めた値は大きくても $k_h=0.25$ 程度であり、上記値の範囲に入っている。このことより実際に作用した水平震度は最大で

$k_h=0.25$ 前後の値ではないかと推察される。

- ③ $k_h=0.25$ と仮定して、液化化発生の可能性が高いところでの間げき水圧上昇に伴う地盤のせん断抵抗力低下率を求めてみると $15\sim30\%$ となった。これはすべり面深度を $GL-7m$ 、地下水位を $GL-3m$ とすると、 $1.4m\sim2.9m$ の水頭上昇に相当し、変状ゾーン末端部において噴砂や盛り上がり現象が起こっていることと一致している。

(ii) のり面変状

- ① 実被害の形状はほぼ円弧状であり、計算で求めた最小安全率の円弧とはほぼ一致している。
- ② のり面変状のところでは、液化化発生の可能性が低いところが多く、このようなところでの安定解析より求めた限界震度が $0.26\sim0.34$ と宅盤変状(液化化発生の可能性が低いところ)に比べると多少大きい値となっている。これには、のり面変状箇所の盛土高さが宅盤変状箇所に比べると高く、現地盤の傾斜も急であるために、地震動が多少増幅されたことによる可能性が考えられ、このことを考慮に入れると、標準地盤での水平震度としては、宅盤変状箇所と同じく、最大で $k_h=0.25$ 前後の値ではないかと推察される。

謝辞: 本論文をまとめるにあたって、御指導ならびに資料提供をいただきました建設省建設経済局宅地課民間宅地指導室、住宅・都市整備公団都市開発事業部工事課、兵庫県都市住宅部建築指導課、神戸市建設局総務部宅地開発指導課の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会阪神大震災調査委員会編: 阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)、(社)地盤工学会、pp.315-322, 1996。
- 2) 釜井俊孝, 鈴木清文, 磯部一洋, 山川和美, 神保光昭, 佐藤拓二: 兵庫県南部地震による都市域の斜面変動について、兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告書、地すべり学会、pp.33-47, 1995。
- 3) 沖村孝, 片山政和: 宅地地盤被害の分布と特徴、神戸大学都市安全研究センター、被害メカニズム解析と復興に関する論文シリーズ、Vol.2-2, Sep.No.8, 1997。
- 4) 河上房義, 浅田秋江, 柳沢栄司: 宮城県沖地震における盛土の被害、土と基礎、Vol.26, No.12, pp. 25-31, 1978。
- 5) 武田寛, 和泉孝夫, 坂本容: 1994年北海道東方沖地震による住宅地、ライフラインの被害、土と基礎、Vol.43, No.4, pp.15-18, 1995。
- 6) 西勝, 吉田信之, 藤村等, 中山学, 南部光広, 斜面の地震防災研究委員会: 地震時斜面被害事例に対する一考察、第17回日本自然災害学会学術講演会講演集、pp. 7-8, 1998。

- 9) (社)地盤工学会阪神大震災調査委員会:阪神・淡路大震災調査報告書(解説), (社)地盤工学会, pp.263-283, 1996.
- 10) (財)建設工学研究所:阪神大震災被害状況調査報告書(概要版), (財)建設工学研究所, pp.104-108, 1995.
- 11) 神戸大学工学部建設学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団:神戸大学工学部兵庫県南部地震緊急被害調査報告書(第2報), 神戸大学, pp.182-183, 1995.
- 12) 日本道路公団:設計要領第一集土工・舗装・排水・造園, (財)道路厚生会, pp.28-29, 1983.
- 13) (社)日本道路協会:道路土工のり面工・斜面安定工指針, 丸善(株), pp.141-160, 1986.
- 14) 国井隆弘, 荏本孝久:1978年6月宮城県沖地震による墓石調査による最大加速度の推定, 総合都市研究, 第5号, pp.103-114, 1978.
- 15) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹:重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol.14-4, pp.67-111, 1975.
- 16) 建設省建築研究所:平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告書, 建物被害状況図-全壊率・全建物・街区別-, 1995.
- 17) 土岐憲三, 後藤洋三, 江尻謙嗣, 澤田純男:兵庫県南部地震の震源特性と地盤震動特性, 土木学会誌, Vol.80, No.9, pp.32-43, 1995.
- 18) 二木幹夫:住宅基礎と宅地地盤における教訓, 基礎工, Vol.24, No.11, pp.17-21, 1996.
- 19) 前島千穂, 二木幹夫, 佐藤雅宏:1995年兵庫県南部地震による芦屋市三条の造成宅地盛土被害の安定解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.809-810, 1996.
- 20) 宅地防災研究全編集:宅地防災マニュアルの解説[解説編I], (株)ぎょうせい, pp.63-64, 1989.

(1998. 10. 16 受付)

INVESTIGATION FOR RELATIONSHIP BETWEEN DAMAGES TO HOUSING LOTS BY THE HYOGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE AND VARIOUS FACTORS

Takashi OKIMURA, Mikio FUTAKI, Atsushi OKAMOTO and Mitsuhiro NAMBU

This paper deals with the relationship between damages at housing lots by the Hyogoken-Nambu earthquake and various factors. we have instituted stability analysis at representative sites, and have investigated the relationship between horizontal seismic intensity and safety factor. As a result, the cause of damages by the earthquake and the level of horizontal seismic intensity were revealed roughly.