

1995 年兵庫県南部地震における被害宅地盛土の地震応答解析と被害分析

橋本隆雄¹・宮島昌克²・富沢 元³

¹ 千代田コンサルタント東京支店 (〒114-0024 東京都北区西ヶ原3-57-5)

E-mail: t-hashi@chiyoda-ec.co.jp

² 金沢大学工学部教授 (〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

³ 石川県土木部 (〒920-0850 石川県金沢市鞍月町1-1)

E-mail: tomizawa@pref.ishikawa.jp

兵庫県南部地震は、宅地擁壁・盛土に多くの被害をもたらした。本論文では、この地震において変状を生じた宅地盛土 39 箇所を対象に、FEM による動的応答解析を行ない、それによって得られた結果から被害メカニズムを考察する。解析結果より、応答加速度やせん断ひずみが増大している箇所と地盤のクラック、沈下、すべり崩壊等による被害を生じている箇所がほぼ一致しており、ある程度この解析により被害状況を再現できることが明らかとなった。

Key Words : the 1995 hyogoken-nambu earthquake, residential land, slope failure, FEM analysis, earthquake damage

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震は、宅地擁壁・盛土に多くの被害をもたらした。盛土の耐震設計は、通常、震度法によってなされるが、大規模で重要な盛土では、FEM やニューマーク法などの動的応答解析も行なわれる。震度法だけでは分からない盛土の挙動を再現できるという点において、このような解析法は兵庫県南部地震以降、特に注目を集めている。しかし、解析によって得られた値が実際の被害とどのように結びつくかは、未解明な部分が多いというのが現状である。このような現状を踏まえ、実際に被害のあった箇所を動的応答解析法で解析することで、被害の要因を分析することは、今後の盛土の耐震設計を行なう上で非常に重要であると考えられる。

本論文では、このような視点から、兵庫県南部地震において変状を生じた宅地盛土 39 箇所を対象に、FEM による動的応答解析を行ない、それによって得られた結果から被害メカニズムを考察する。その際、まず、宅地は盛土であるため場所毎の物性値のバラツキが特に大きいと、物性値は場所毎のボーリング調査データ¹⁾を用いた。入力波形は、39 箇所の地盤毎で異なっていたものと考えられるが、得られている波形が少ないことから神戸大学での岩盤地点観測波形が基盤に入った場合を仮定した。そして、応答加速度やせん断ひずみなどの解析結果が、被害状

況をどの程度説明できるか、被害の生じた要因が何であったのかについての検討を行なう。さらに宅地盛土が持つ振動数応答関数にも着目し、盛土の地形と応答の関係を分析する。

2. 解析条件

(1) 解析の方法

ここで用いる動的応答解析法について述べる。通常盛土の耐震設計は震度法によってなされるが、大規模で重要な盛土では、有限要素法 (FEM) による応答解析が行なわれる。応答解析の手法として、2 次元有限要素解析法 (FLUSH) を用いる。以下にこれらの手法の概要を示す。

盛土斜面の動的解析では、地盤条件や境界条件が複雑となることから有限要素法 (FEM) による 2 次元解析が用いられることが多い。実務では、周波数応答解析法である FLUSH が用いられてきており、本研究でも FLUSH を用いる。以下にその概要を示す²⁾。

FLUSH は、周波数領域で応答を求めそれを時間領域に変換することによって解を求める手法である。また FLUSH は全応力解析であるため、間隙水圧を独立したパラメータとして解析過程で考慮していない。しかし、伝達境界を用いることで逸散減衰を考慮で

きるので、破壊現象を除き地盤の応答解析に広く用いられている。したがって、FLUSH は液状化による大規模な変形を表現できないが、汎用性が高く、実際の設計にも用いられてきたことからこれを用いた。応答解析は、入力地震動の引き戻し計算も行った。また、土のひずみ依存による強度の非線形性は等価線形化手法により解析し、繰り返し計算のたびに前回の計算で生じたせん断ひずみの最大値の65%のせん断ひずみに対応するせん断弾性定数 G 、減衰定数 h の値を用いて収束計算を行なった。次式に示すように最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ の65%を等価平均ひずみ γ_e として、これより定まるせん断弾性定数 G 、減衰定数 h を周波数に依存することなく一律に適用した。

$$\gamma_e = 0.65 \gamma_{\max} \quad (2)$$

(2)物性値

本論文で用いる物性値について示す。対象とした39箇所の宅地盛土は全てボーリングデータと断面図が得られていることから、この値をもとに、資料を参考にして以下のように物性値を決定する。

1)単位体積重量の設定

単位体積重量は表-1を参考に設定した³⁾。

表-1 盛土の単位体積重量³⁾

種類		状態	単位体積重量 γ_t (t/m^3)
盛土	礫および砂礫 混じり砂	締固めたもの	2.0
	砂	粒度の良いもの	2.0
		粒度の悪いもの	1.9
	砂質土	締固めたもの	1.9
	粘性土	締固めたもの	1.8

2)せん断波速度 V_s の設定

盛土及び旧表土層の V_s は N 値と V_s (m/s) の一般的な関係式より求めた。以下に式⁴⁾を示す。

$$V_s = 100 \cdot N^{1/3} \quad (\text{粘土、粘性土})$$

$$V_s = 80 \cdot N^{1/3} \quad (\text{砂質土、砂礫、砂岩})$$

3)初期せん断弾性係数 G_0 の設定

初期せん断弾性係数 G_0 は、単位体積重量 γ_t とせん断波速度 V_s との一般的な関係式⁵⁾より求めた。以下に式を示す。

$$G_0 = (\gamma_t / g) \cdot V_s^2$$

4) $G/G_0 \sim \gamma$ の関係、 $h \sim \gamma$ の関係

盛土及び旧表土のせん断剛性率のひずみ依存性 ($G/G_0 \sim \gamma$ の関係) と減衰定数のひずみ依存性 ($h \sim \gamma$ の関係) は図-1に示すように既存資料⁶⁾に土質別に図示された値の平均を採用した。

(3)波形

波形は兵庫県南部地震で、神戸大学で観測された加速度波形のEW成分を用いた。図-2に波形を示す。

被害箇所は神戸市を中心として広域に分布しており、実被害のあった地盤に発生した波形はその地盤ごとで異なっていたものと考えられる。しかし、今回の地震においては、得られている波形が少なく、各々の地盤の実際の波形を入力することは不可能である。以上のことから、本研究では、今回のような短周期波形の地震が発生したときに、宅地盛土がどのような応答加速度分布やせん断ひずみの分布を示すかを検証することを目的として解析を行なった。

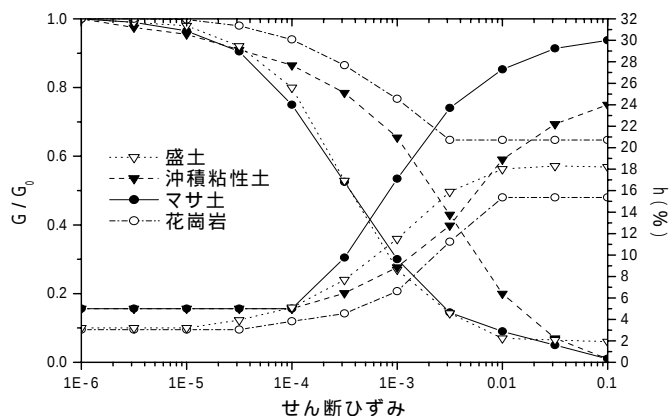


図-1 動的物性値のひずみ依存性の関係⁶⁾

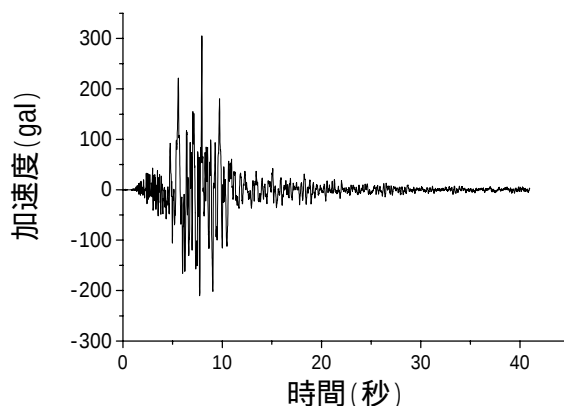


図-2 神戸大学での観測波形EW成分

3. 解析結果

対象地は図-3に示す39箇所¹⁾であったが、それぞれの箇所は表-2に示す3つのタイプに分類することができる。そこで、解析結果においても、主にその3つのタイプ別に考察を行なうこととした。それぞれの結果を図-4～図-9に示す。なお、各図に示した太線は、地震直後に行われた現地調査により明らかとなったすべり線を示している。

(1)地盤タイプA

地盤タイプAは谷筋を埋める形で盛土した地域に発生しており、旧谷地形に沿って発生したものである。また、変状域の幅に対し斜面方向の長さが長く、盛土下部には連続性の良い沖積層が分布する場合が多い地盤である。

図-4(a)、図-5(a)に示す応答加速度図において、

多少の違いはあるが、全体的に地表面に平行な分布を示しているものが多い。また、どのモデルも盛土層と基盤層との間や盛土層と沖積層との間で加速度が増幅している。

図-4(b)、図-5(b)に示すせん断ひずみ図を見ると、緩やかな斜面に対してほぼ平行にかつ連続的に大きなひずみが得られている。層の境界部でのひずみの増大は加速度のそれよりも顕著に現われている。この傾向は今回解析を行なったタイプ A の地盤ではどの地盤でも確実に現れている傾向であり、このように大きく表れたひずみが地すべりを発生させていることが考えられる。

地盤タイプ A における盛土や沖積層の N 値は比較的小さな値を示している。すなわち、このような基盤層と表層の層間の剛性の差が、地盤変状に大きく関与しているものと考えられる。地盤にほぼ平行に層間で大きな複合すべりが起こり、円弧というよりも巨大な皿型の土塊となって地盤崩壊が起こったものと考えられる。

(2)地盤タイプ B

地盤タイプ B は段丘崖切盛型の盛土で幅の広い谷ののり面や沖積平野に接する段丘斜面を切盛した地域に発生したものである。変状域の幅は斜面方向に対して広く、盛土下部には崩積土が分布していることが特徴である。また変状土塊の基底の形状はほぼ円弧である。図-6(a)、図-7(a)に示す応答加速度の分布において表面付近で 600gal を超える加速度の大きいところでは、すべり崩壊が生じている。また基盤から地表に向かって一様に増幅しているものが多く、ほぼすべての地盤において盛土のり肩部分で最も大きな応答加速度を示した。

図-6(b)、図-7(b)に示すせん断ひずみの分布を見るとタイプ A 同様に層と層の間でひずみが増幅しているが、タイプ A ほど顕著には現れない結果となった。また、ひずみの分布も層間で一様ではなく、斜面や盛土の下部の沖積層で比較的大きなひずみを得られていることもタイプ B の特徴といえる。タイプ B では、その比較的大きな応答加速度によって地表に小さな亀裂や変状が生ずるとともに、盛土下部の沖積層のひずみによって、約 80~140m にわたって地盤全体がすべり崩壊したのと考えられる。

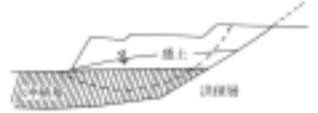
(3)地盤タイプ C

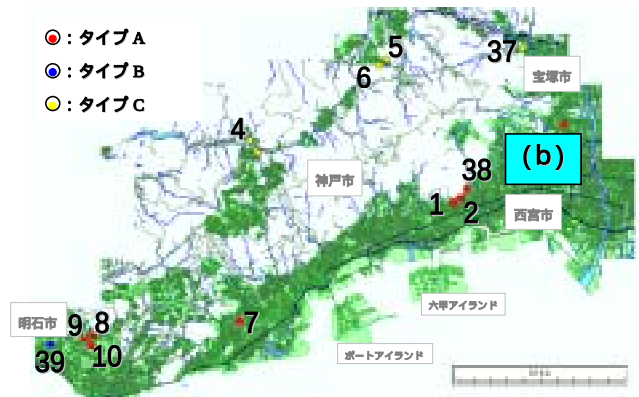
地盤タイプ C は丘陵切盛型の盛土で丘陵地の斜面を切盛した地域に発生し、盛土の斜面が変形するとともに盛土の下部が崖錐や岩盤であることが特徴である。

タイプ C は、図-8(a)、図-9(a)に示すように応答加速度では 600gal を超えるものが多く見られ、とくに表層で急激に増大しているものが多いことが特徴である。この理由としては、表層部分の増幅(図-8(a))と地形効果(図-9(a))と考えられる。図-8(b)、図-9(b)に示すひずみにおいても加速度と同様に、ある部分で大きなひずみが表れたものが多かった。

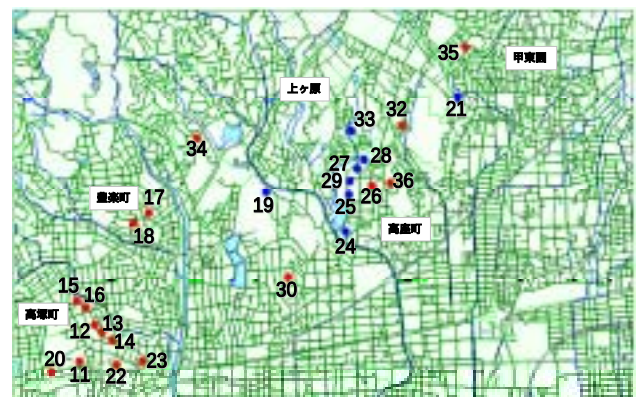
地盤タイプ C における急斜面と岩盤と盛土部分の S 波速度の違いによって、加速度がある部分に集中し崩壊が起こったと考えられる。

表-2 各地盤タイプ別盛土被害形態の分類

タイプ	断面模式図	該当地点
A (谷筋盛土型)		1, 2, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 26, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 38
B (段丘崖切盛型)		19, 21, 24, 25, 27, 28, 29, 33, 39
C (丘陵切盛型)		3, 4, 5, 6, 37



(a) 広域位置図

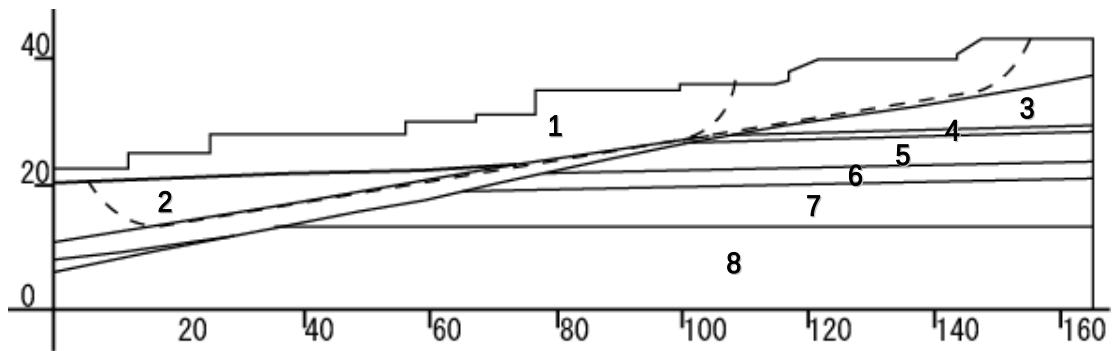


(b) 西宮市詳細図

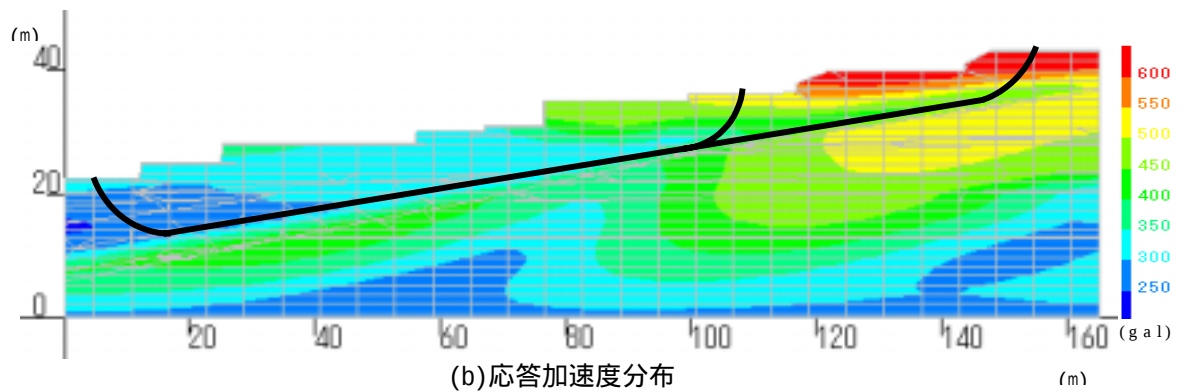
図-3 兵庫県南部地震被害による盛土被害箇所

表-3 物性値の設定

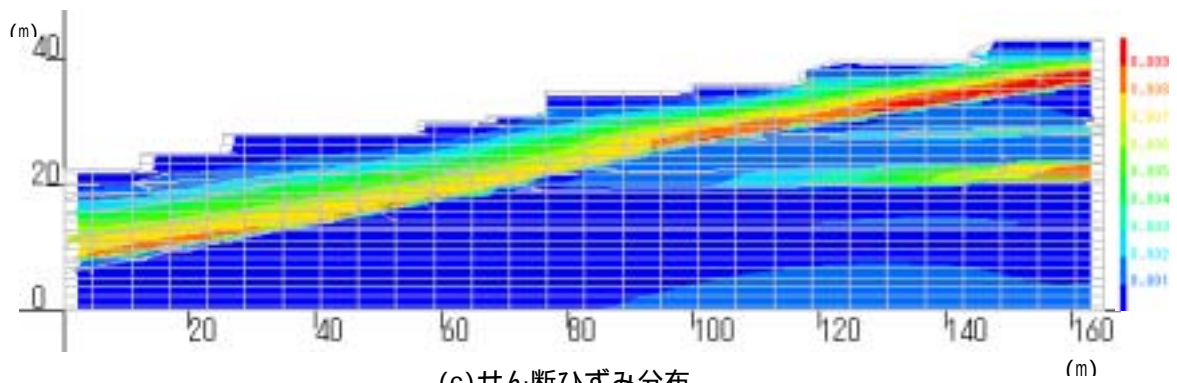
	1.盛土 (B)	2.沖積 層(Ac)	大阪層群					
			3.(0c)	4.(0s)	5.(0c)	6.(0s)	7.(0c)	8.(0s)
N値	10	5	27	60	15.4	60	36	60
$\gamma t(t f / m^3)$	1.9	1.7	1.6	1.8	1.7	1.9	1.8	2.1
$V_s(m/s)$	172	171	300	313	249	313	330	313
ポワソン比 ν	0.45	0.45	0.4	0.4	0.35	0.35	0.3	0.3
$G_0(t f / m^2)$	56210	49710	144000	176344	105402	186141	196020	205735



(a)解析断面図



(b)応答加速度分布

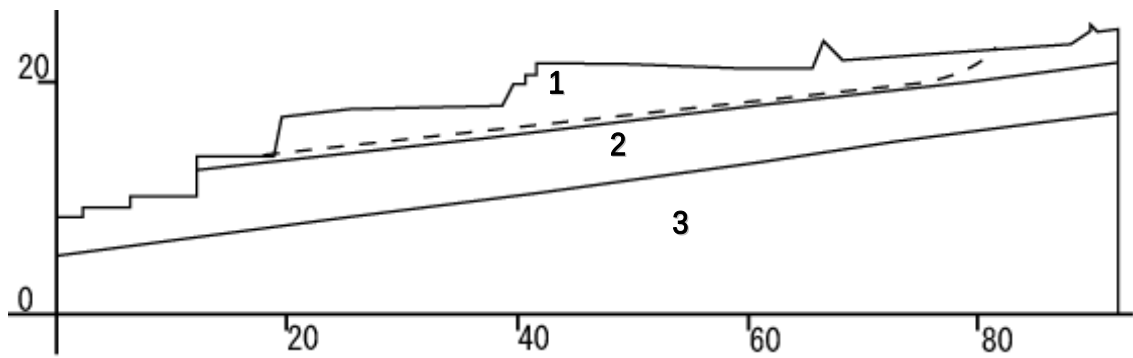


(c)せん断ひずみ分布

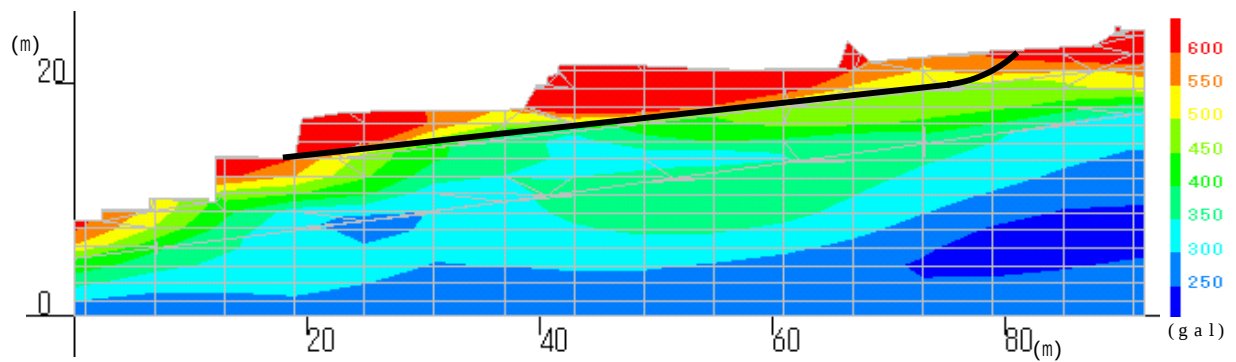
図-4 タイプAの応答加速度分布とせん断ひずみ分布
(神戸市垂水区多聞台1丁目の被害)

表-4 物性値の設定

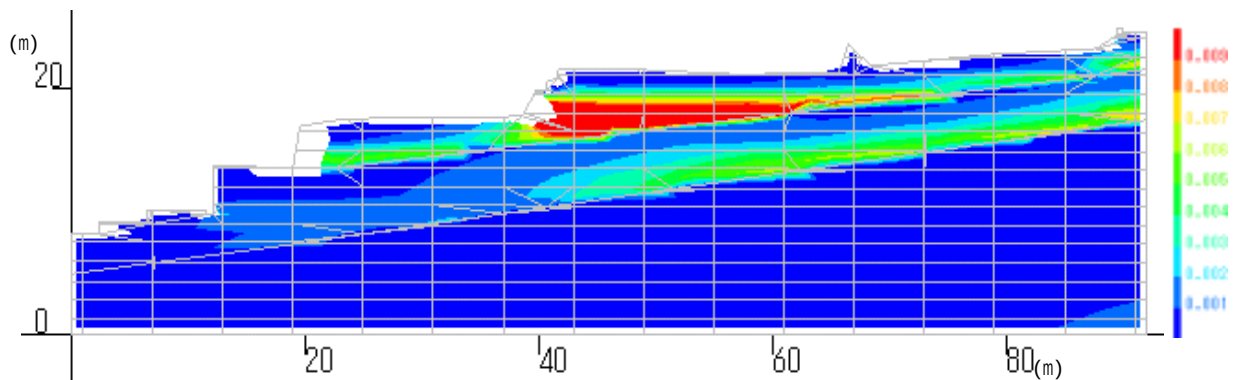
	1. 崖錐	2. シルト 岩	3. 砂岩～ 礫岩
N値	8.06	22.61	37.18
γ_t (t f / m ³)	1.6	2	2
Vs(m/s)	160.4	226.22	267.01
ポワソン比 ν	0.4	0.4	0.25
G_0 (t f / m ²)	41165.1	102351	142589
初期減衰定数 h_0	0.05	0.05	0.05



(a) 解析断面図

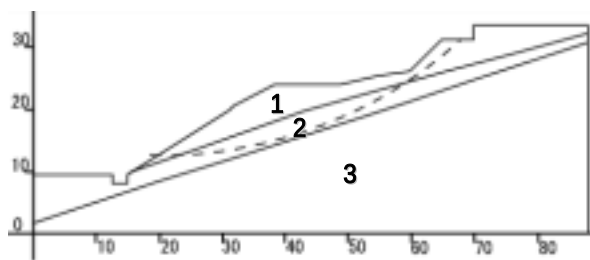


(b) 応答加速度分布



(c) せん断ひずみ分布

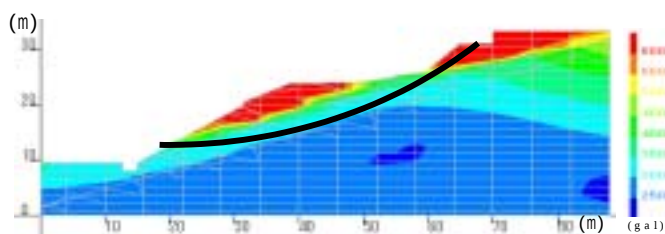
図-5 タイプAの応答加速度分布とせん断ひずみ分布
(西宮市愛宕山5番地区の被害)



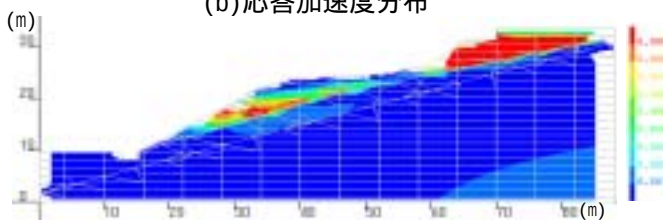
(a) 解析断面図

表-5 物性値の設定

	礫混り砂質土		3. 半固結砂岩
	1	2	
N値	5	30	50
γ_t (t f / m ³)	2	2	2.1
Vs(m/s)	137	249	295
ポワソン比 ν	0.4	0.4	0.25
G_0 (tf / m ²)	37538	124002	182753
初期減衰定数 h_0	0.02	0.02	0.03

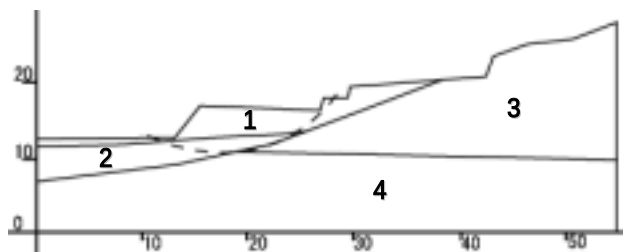


(b) 応答加速度分布



(c) せん断ひずみ分布

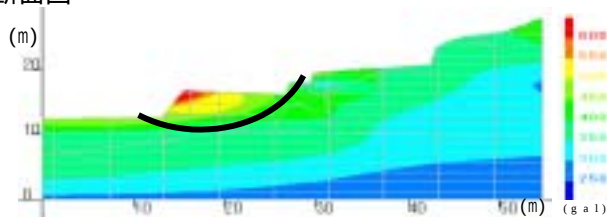
図-6 タイプBの応答加速度分布とせん断ひずみ分布
(西宮市門戸西町の被害)



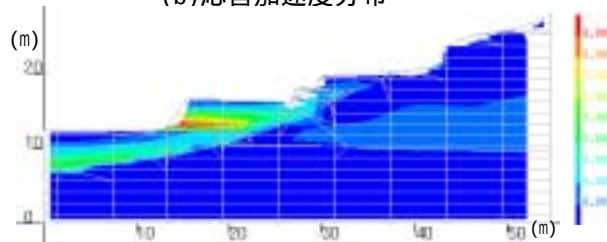
(a) 解析断面図

表-6 物性値の設定

	1. 盛土	2. 沖積層	大阪層群	
			3. (0g ~ 0s)	4. (0s ~ 0c)
N値	2	6	47	60
γ_t (t f / m ³)	1.9	1.7	2.1	2.1
Vs(m/s)	101	145	289	313
ポワソン比 ν	0.49	0.45	0.4	0.35
G_0 (tf / m ²)	19382	35743	175394	205735
初期減衰定数 h_0	0.05	0.05	0.05	0.03

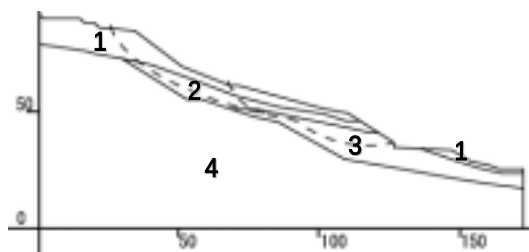


(b) 応答加速度分布



(c) せん断ひずみ分布

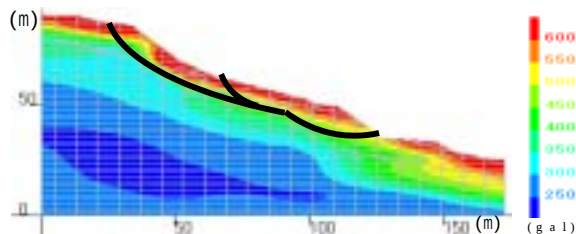
図-7 タイプBの応答加速度分布とせん断ひずみ分布
(西宮市高座町1番の被害)



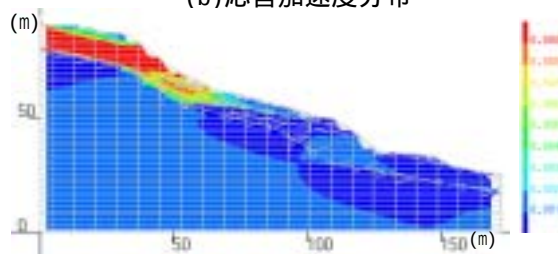
(a) 解析断面図

表-7 物性値の設定

	1. 崖錐層 (Dt1)	2. 強風化 溶結凝灰 岩(Wt1)	3. 風化溶 結凝灰岩 (Wt2)	4. 溶結凝 灰岩(Wt3)
N値	14	22	60	60
γ_t (t f / m ³)	1.9	2	2.1	2.1
Vs(m/s)	192	224	313	313
ポワソン比 ν	0.35	0.3	0.3	0.3
G_o (tf / m ²)	70042	100352	205735	205735
初期減衰定数 h_o	0.02	0.03	0.03	0.03

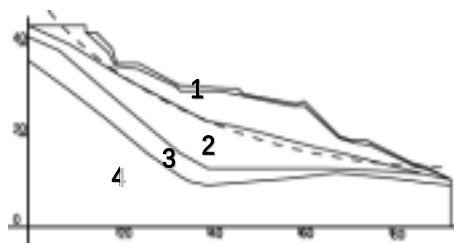


(b) 応答加速度分布



(c) セン断ひずみ分布

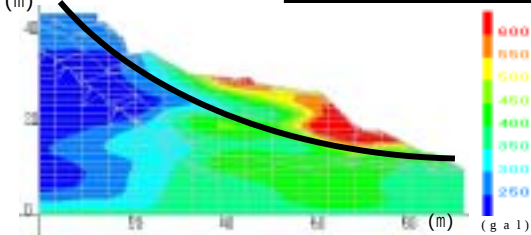
図-8 タイプCの応答加速度分布とせん断ひずみ分布
(神戸市北区有馬町 a の被害)



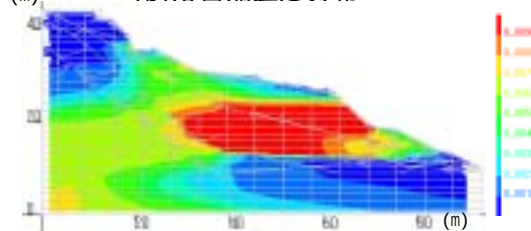
(a) 解析断面図 (m)

表-8 物性値の設定

	1. 崖錐性 堆積物 (Dt1)	2. 強風化 溶結凝灰 岩(Wt1)	3. 風化溶 結凝灰岩 (Wt2)	4. 溶結凝 灰岩(Wt3)
N値	6	16	50	60
γ_t (t f / m ³)	1.9	2	2.1	2.1
Vs(m/s)	145	202	295	313
ポワソン比 ν	0.4	0.4	0.25	0.3
G_o (tf / m ²)	39948	81608	182753	205735
初期減衰定数 h_o	0.02	0.02	0.03	0.03



(b) 応答加速度分布



(c) セン断ひずみ分布

図-9 タイプCの応答加速度分布とせん断ひずみ分布
(神戸市北区有馬町 b の被害)

4. おわりに

本論文では、被災した宅地盛土を対象として動的応答解析を行ない、各地盤タイプの特徴をみるとともに、地盤の固有振動数の特性に関する検討を行った。本論文で得られた結論を以下に述べる。

(1) 地盤タイプ A

谷筋を埋める型に発生し、連続的に沖積層が分布する地盤タイプ A における応答加速度分布およびせん断ひずみ分布は、層に平行に連続的に分布するものが多かった。特に層の境界部でのひずみの増大は顕著であり、地盤崩壊には基盤層と表層の層間の剛性の差が大きく関与しているものと考えられる。層にほぼ平行に大きなすべりが起こり、巨大な皿型の土塊となって地盤崩壊が起こったものと考えられる。

(2) 地盤タイプ B

盛土下部に沖積層が分布する地盤タイプ B における応答加速度の分布は、基盤から地表に向かって一様に増幅しているものが多く、盛土ののり肩部で最大応答加速度を示した。この型の地盤は、大きな応答加速度によって地表に小さな亀裂や変状が生ずるとともに、盛土下部の沖積層のひずみによって、地盤全体がすべり崩壊したものと考えられる。

(3) 地盤タイプ C

固い岩盤上に丘陵を切盛した地域に発生した地盤タイプ C は、表層部分の増幅と地形効果が考えられる。また、地盤が持つ振動数応答関数に注目することで、地盤が持つ固有振動数と地震波の相関が応答加速度に大きな影響を及ぼしていることも分かった。これらの地震応答解析を行うことにより、震度法では分かりづらかった応答加速度やせん断ひずみの大きさからすべり面の深さと大きさを推定し、複合すべり解析の予測が可能になると考えられる。これらの解析を通して、地形効果が大きく、急峻なおり面天端付近には緑地・公園等を配置し、建築物を建てないことの重要性が再認識できた。

今後新たに宅地造成をする際には、各地盤タイプに対応した以下のような対策が必要となる。

地盤タイプ A

沖積層を剥ぎ取らずに盛土したことが主原因となった小規模複合すべりと見られる。沖積層を剥ぎ取り盛土箇所は段切り、水抜きを十分行って盛土することが望ましい。

地盤タイプ B

段丘の崖部分の切盛土に発生した円弧すべり、崖崩壊と見られる表土を剥ぎ下部沖積層の軟弱な部分を十分調査する。また、地下水の浸出部及び軟弱層と固結層の互層のところなどは特に入念に暗渠排水を設置し切盛境のすべりに留意しながら段切り盛土を行う。

地盤タイプ C

特に地下水の集中する谷を中心に土質調査を行い、谷部入口は谷止め擁壁を中段部は大形及び小形埋設工を、また谷底部は、礫岩等による暗渠排水を設置する。断層破碎帯などの対策を行いながら大きな円弧すべりを発生させないよう切盛土工を行う。地形によっては仮の防災調整池を随所に設け、鉄砲水の発生を防止することも大切である。

参考文献

- 1) 住宅・都市整備公団応用地質株式会社：造成宅地の耐震設計に関する基礎検討調査報告書，1997.3.
- 2) 富士通：WINDOWS 版 2 次元 FEM 地盤解析支援システム 動的解析・理論マニュアル
- 3) 日本道路公団：設計要領，第 1 集，pp.28，1983.4
- 4) 日本道路公団：道路橋示方書（V 耐震設計編）・同解説，pp.43，1996.12.
- 5) 土田 肇，井合 進：建設技術者のための耐震工学，(株)山海堂，pp.91，1991.5.
- 6) 土田 肇，井合 進：建設技術者のための耐震工学，(株)山海堂，pp.94～95，1991.5.

(2003. 7. 1. 受付)

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS AND ACTUAL DAMAGE TO SLOPE OF RESIDENTIAL LANDS IN THE 1995 HYOGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE

This paper is focusing on damage to slope of residential lands. Extensive damage to the slope was occurred in the 1995 Hyogoken-nambu Earthquake. We collected the data concerned with the failure modes and ground conditions in each damage. Thirty-nine damaged sites of slope were calculated by using FEM dynamic analysis and studied the failure mechanism of each sites by using the results. A relatively good agreement between the actual damage and results of analysis was obtained.