

(別紙2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 課題番号 第8号
2. 研究課題名 都市域に分布する宅地谷埋め盛土地盤の耐震性評価法の高度化
3. 研究期間 平成19年度～平成21年度
4. 代表者及び研究代表者, 分担研究者

代表者	(代表者氏名)	(所属機関・職名)
研究代表者	釜井俊孝	京都大学防災研究所・教授
分担研究者	関口秀雄	京都大学防災研究所・教授

5. 補助金交付総額 16,860,000 円

6. 研究・技術開発の目的

大都市の地震災害では、谷埋め盛土の変動（すべり）によって、宅地やライフラインが被害を受けると予想される。このため、政府・自治体による対策が始められようとしている。一方、事例分析に基づく簡便な予測法は開発されたが、盛土の変動実態やメカニズムには不明な点が多い。そこで、地盤構造・特性に関する一連の調査と解析を行い、地域防災警戒システムに役立つ、より高度な予測手法の開発を行う。

7. 研究・技術開発の内容と成果

- 7.1 本研究の背景

高度成長期以降、大都市域には多くの谷埋め盛土が造成され、主に宅地として利用されている。兵庫県南部地震等、都市域で発生した地震の際には、大規模な宅地谷埋め盛土が数多く変動し、住宅に被害を及ぼしてきた。これらの現象は、土塊の流動性が高い場合は「土砂流動」や「側方流動」と呼ばれている。しかし、変動した事例の多くは、顕著な水平変位を伴う流動性の低い移動体の変動であり、運動の形態としてはむしろ地すべりに類似していた。したがって、こうした盛土の変動を、ここでは「谷埋め盛土の地すべり」と呼ぶことにする。本研究では、こうした谷埋め盛土の地すべりの実態をとりまとめると共に、変動の原因と現象のモデル化について検討した。

- 7.2 既往の災害事例

表1は、住宅地の盛土地盤を地すべりの的に変形・変動させた災害に関する最近のリストである。谷埋め盛土の地すべりの変動に限定した公式の統計は存在しないため、実際にはここに挙げた以上の地点で災害が発生していると考えられる。しかし、これによると地震による谷埋め盛土の地すべりは、都市における地震被害の一部として、ほぼ毎回のよう発生していることがわかる（井口, 1995）。このうち、1978年の宮城県沖地震、1993年の釧路沖地震、1995年の兵庫県南部地震においては、比較的多数の変動事例が得られている（浅田, 1982, 千葉, 1996, 柳澤ほか, 1993, Kamai et. al., 2000, 釜井ほか, 2002）。その多くはクラックや沈下等の地表変状の性質から、移動体（変動ユニット）中に頭部、側部、末端部を識別することが可能であり、全体が地すべりとして変動したと考えられる事例である。実際にその一部は、宮城県沖地震の際の寿山団地や兵庫県南部地震による仁川の崩

壊の様子土塊の内部が液状化し、崩壊土砂が長距離を流動した。その他の大部分の事例では拘束条件や人工構造物、地下水位等の制約により、全般的な流動には発展しなかった。しかし、こうした非流動的な変動においても多くの住宅が損傷しており、このタイプの災害が地域社会に与えた影響は大きく、谷埋め盛土の地すべりは防災上重要な斜面災害のタイプであると考えられる。また、最近では豪雨災害においても、谷埋め盛土の変動が発生し、場合によっては死者が出る状況が続いている。これらの事例の多くは、盛土の排水不良が原因であると考えられ、災害の背景として谷埋め盛土における排水施設の設計、施工上の問題点が存在すると考えられる。

表 1 谷埋め盛土の地すべりが発生した災害

発生年	月日	災害の名称	場所	発生箇所数	備考
「地震による災害」					
1968	5.16	十勝沖地震	青森県名川町剣吉(中学校)	1	崩壊(死者4)
1978	6.12	宮城県沖地震	仙台市、白石市(現、仙台市白石区)	10	沈下のみによる被害は除外
1987	12.17	千葉県東方沖地震	長南町長南(中学校)	1	噴砂
1993	1.15	釧路沖地震	釧路市	7	
1994	10.4	北海道東方沖地震	中標津町	2	
1995	1.17	兵庫県南部地震	神戸市、芦屋市、西宮市、宝塚市	139	死者34
2003	5.26	三陸沖地震	築館町館下	1	
2003	7.26	宮城県北部地震	矢本町、鳴瀬町	4	農地を含む
2003	9.26	十勝沖地震	釧路市	2	
2004	10.23	新潟県中越地震	長岡市郊外	10(長岡市のみ)	高町団地を含む
2007	3.25	能登半島沖地震	能登有料道路	11	崩壊箇所のみ
2007	7.16	新潟県中越沖地震	柏崎市、刈羽村	10	内、腹付け盛土5箇所
「降雨による災害」					
2003	7.1	長期間の降雨	大分県日田市三和	1	緩斜面の農地が流動化(死者1)
2005	9.7	台風14号	山陽自動車道(岩国市)	1	崩壊(死者3)
2006	6.12	長期間の降雨	那覇市首里鳥堀町	1	腹付け盛土の地すべり
2006	7.19	集中豪雨	福井市中野	1	崩壊(死者2)
2006	7.24	集中豪雨	山陰自動車道(松江市玉湯)	1	一部崩壊、避難

7.3 被害の発生率と誘因の大きさ

谷埋め盛土の地すべりに関しては頻繁に発生している割に具体的なデータは少ない。しかし、既往のデータに本研究の成果を加えた事により、以下の諸点が判明した。

『被害の発生率』

阪神間及び神戸地域では面積比で全造成地内の10.3%が、盛土であると推定される。さらに、盛土全体の83%が谷埋め盛土であるので、全造成地、すなわち台地丘陵地に展開している市街地のほぼ8.5%が谷埋め盛土であり、谷埋め盛土が占める面積の大きいことがわかる。さらに、兵庫県南部地震では谷埋め盛土の被災地面積は、造成地全体の3.2%、全盛土の中の31% (ため池の跡地を加えると49%)、谷埋め盛土の中の38%であった。こうした分析が可能なのは兵庫県南部地震だけなのでどれだけ一般性があるかはわからないが、経験的に全造成地面積(低地を除く市街地)の数%で被害が発生する可能性があると言える。

『震度との関係』

兵庫県南部地震以降、強震観測網が整備されたが、谷埋め盛土の上で地震動が観測された例は多くない(ほとんど無い)。そこで、周囲の地山の地震動から震度と発生率の関係

を推定した。兵庫県南部地震では、丘陵地を造成した場所の最大震度は震度6強であった。この地域での谷埋め盛土の被災率を見ると、箇所数では震度5強で全谷埋め盛土の4%、震度6弱では40%、震度6強では62%が被災した。また面積比では、震度5強で1%、震度6弱では39%、震度6強では68%が被災し、ため池を埋め立てた盛土は全箇所が被災したことがわかっている。したがって、谷埋め盛土の地すべりは震度6付近、最大速度では40cm/s付近から顕著になってくる災害であると言える。

『谷埋め盛土における地震動・間隙水圧観測』

谷埋め盛土上と周辺の地山とでは、震動の状況が異なると考えられるが、実際の観測データはほとんど存在しなかった。そこで、本研究では東京都南西部において、谷埋め盛土上（等々力観測点）と地山（中根観測点）の地表地震動と谷埋め盛土中の間隙水圧の観測を実施した。観測開始以降、盛土上で記録されたM4以上の地震は、9回発生した。これらについて、加速度増幅率を「盛土上の最大加速度／地山上の最大加速度」と定義し、観測点からの震源距離、震央距離との関係を調べた。すなわち、震源、震央が観測点から離れるほど、増幅率は増加し、震央距離が40km以下の地震では増幅率が1以下となり、逆に60km以遠の地震では増幅率は1を上回る事が判明した。

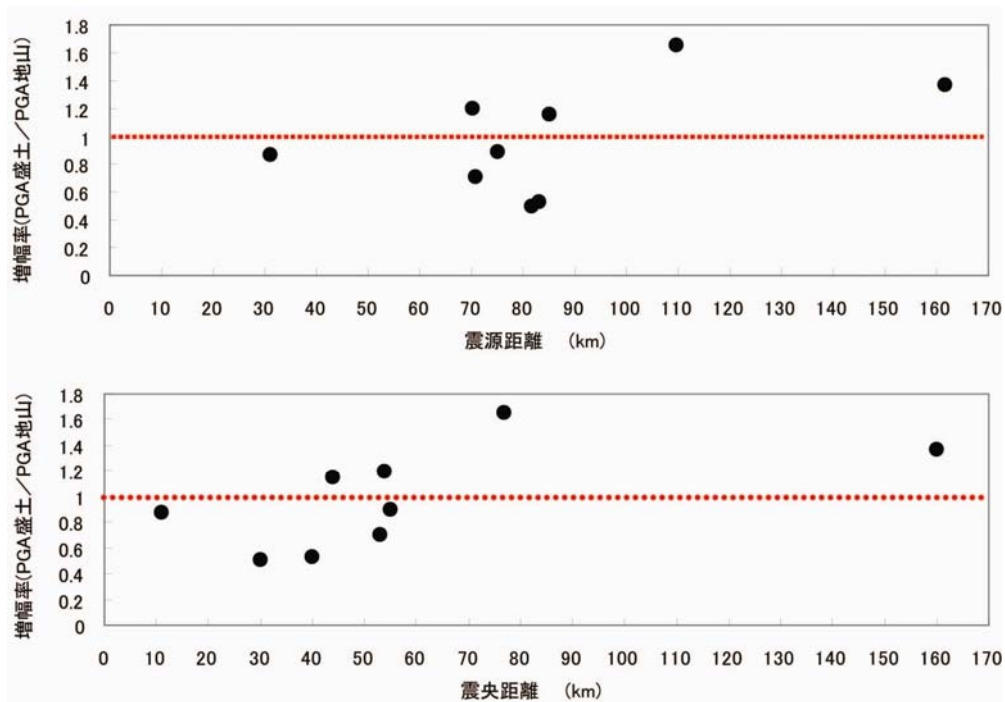


図 1 増幅率と震源・震央距離の関係

地震の規模がほぼ同様で、地震のタイプも似ていることから、図1の関係は単純に長周期成分の影響と見ることが可能である。すなわち、一般に、比較的柔らかい谷埋め盛土は、周囲の地山に比べて、長い固有周期を持っていると考えられる。一方、地震動の短周期成分が減衰する遠い地震では、相対的に長周期成分が多く含まれる様になるので、固有周期の長い谷埋め盛土は良く揺れる事になる。上記の観測結果は、こうした推定を裏付ける結

果である。図2に、代表的事例として2005年千葉県北西部地震（M6.0）と2009年駿河湾沖の地震（M7.2）において観測された速度応答スペクトル、図3に千葉県北西部地震における間隙水圧応答を示す。

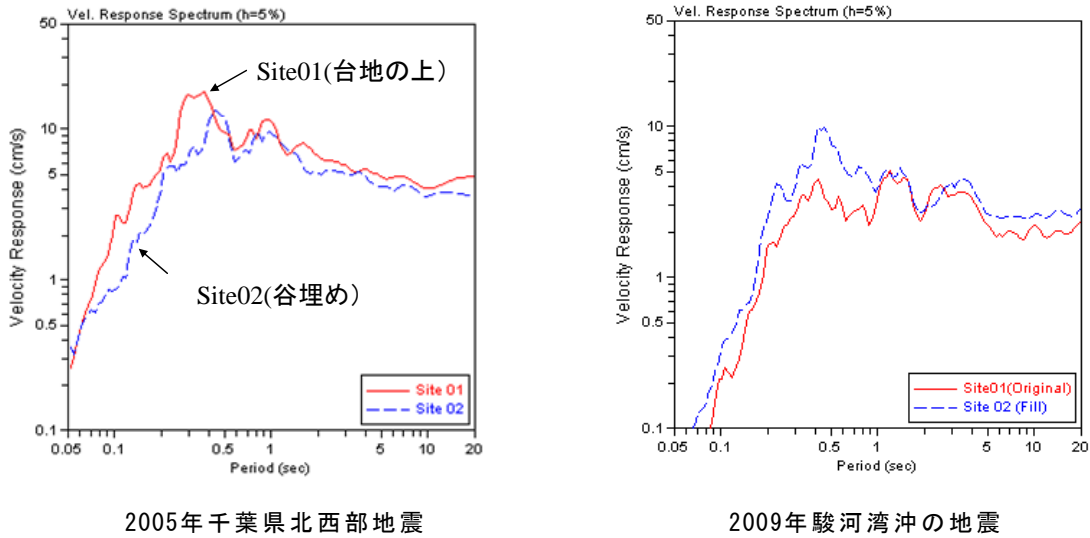


図2 顕著な地震動に対する速度応答スペクトル

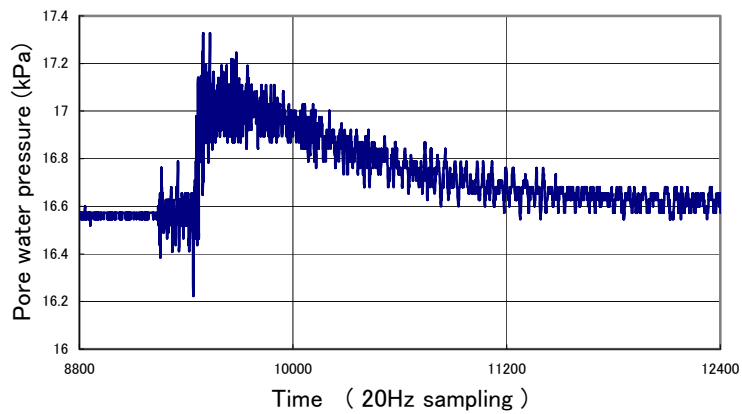


図3 千葉県北西部地震による間隙水圧応答

駿河湾沖の地震では、図3の様な非線形応答は見られなかった。千葉県北西部地震の速度応答の方が大きく、10cm/sを若干超えているので、この付近がこの盛土における非線形化の閾値である可能性が高い。

『有限要素法による地震応答解析』

地震動・間隙水圧観測の結果は、予想される地震動の性質によって、谷埋め盛土の被害程度が変わる事を示唆している。そこで詳しく検討するため、FLUSHによる地震応答解析を行った。弾性係数は表面波探査によって求めたS波速度とN値を元に推定した。せん断剛性Gと減衰率 η の歪み γ 依存性は動的変形特性に関する実測値（不攪乱試料についての繰り返し三軸圧縮試験結果）を使用した。入力波形は、中根観測点のNS波形を使用し、台地地表部で同等の加速度が得られるように最大振幅を調整した。解析の結果、谷埋め盛土上の等々力の観測点では加速度が減衰する現象を再現する事ができた。また、台地上で10cm/s/s程度の応答となる小規模な地震では、谷埋め盛土での減衰が発生しない事も確認した。

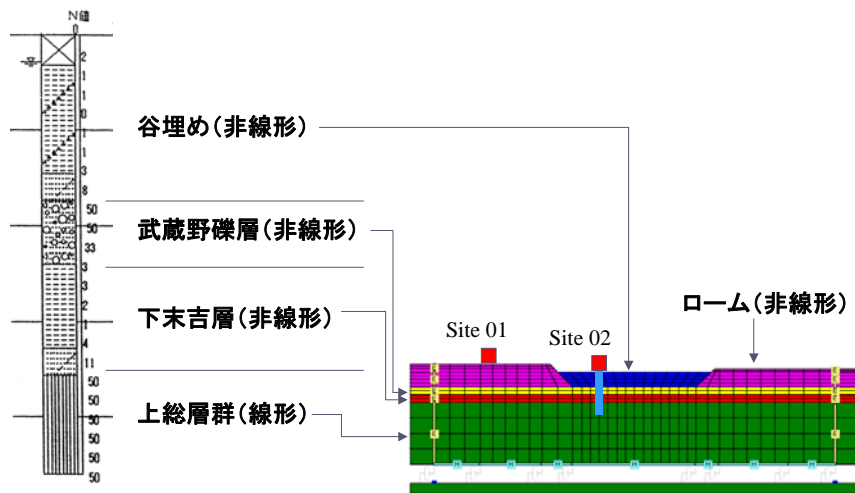


図4 応答解析のモデル

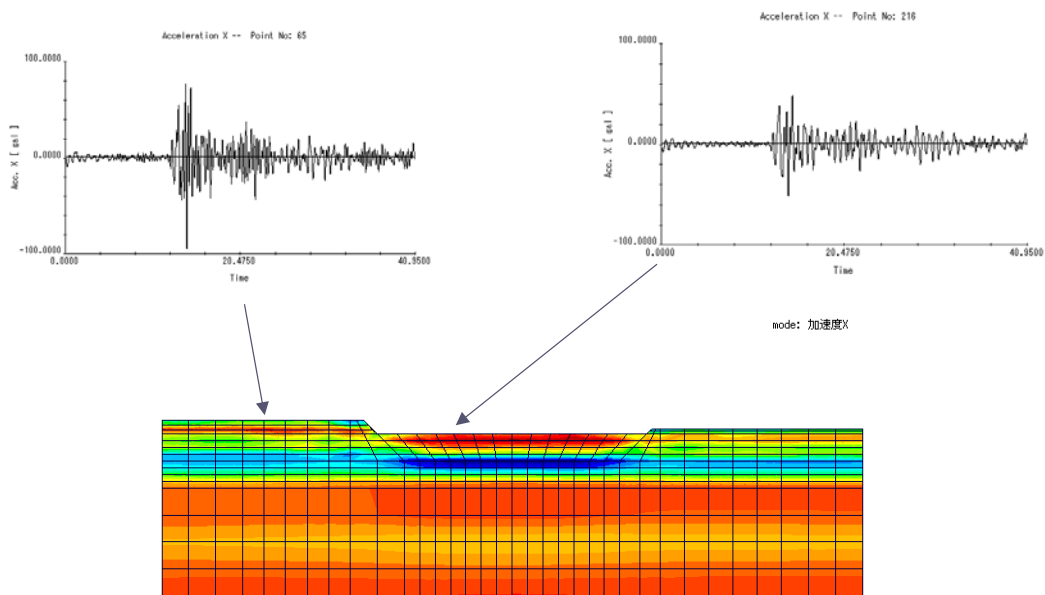
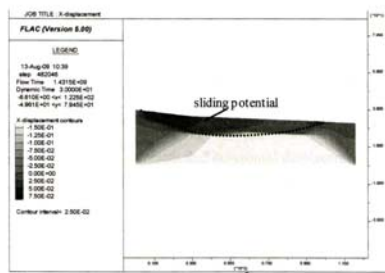
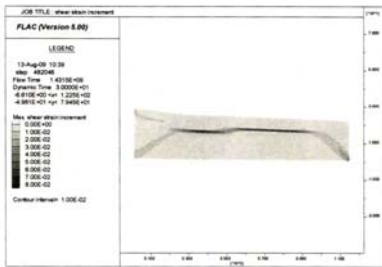
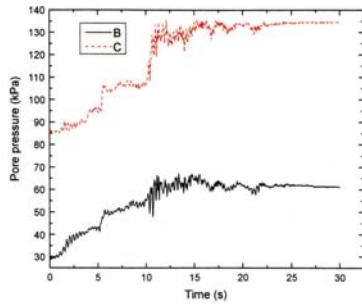


図5 千葉県北西部地震波形を入力した場合の最大加速度。赤色系ほど小さい



『有限差分法による地震応答解析（長周期成分が影響したと考えられる谷埋め盛土被害の解析）』

盛土地表最大加速度が 100gal を超える様な強震では、非線形状態に達する過剰間隙水圧の上昇が確認され、この結果は、大規模な地震においては谷埋め盛土での地震動は減衰するが、底面付近での間隙水圧は急速に上昇して破壊に至る事を示唆している。

そこで、兵庫県南部地震の際、震源域から離れているにも関わらず、長周期成分の影響によって孤立的に（飛び地状に）被害が発生した京都市浄土寺地区の盛土の調査と解析(有限差分法コード FLAC による有効応力解析)を行った。解析では、約 100/s/s の基盤入力に対して、谷埋め盛土地表面の加速度応答が現実とほぼ同様のレベル（約 200/s/s）になる状況が再現できた。間隙水圧は、盛土底面で急激に上昇し、その周辺に明確なシアバンドが形成され、地すべり的な移動体の発達が認められた。この事は、谷埋め盛土の変動現象が盛土全体の“すべり”であるとするこれまでの解釈を支持すると考えられる。

図6 有限差分法による応答解析（浄土寺地区）
 上：間隙水圧応答（B:盛土中央部 C:盛土底面）
 中：最大せん断ひずみ増分 下：x 方向変位

7.4 被災した谷埋め盛土の特徴

『変動ユニットの認定』

谷埋め盛土の地すべり変動の有無は、原則として現地踏査による判定に従っている。すなわち、踏査の段階で視認される程度の地表変状の組み合わせを基に、変形が比較的顕著であり、同時に地すべり移動体(変動ユニット)が認定される場合を変動事例(地すべり)、それ以外を非変動事例と判定した。一部の事例の様に過去の文献をもとに検討を行う場合は、踏査結果のわかる図面や写真をもとに判断した。したがって、切り盛り境界等の地表部にクラックが形成された場合でも、斜面方向に地すべり移動体(変動ユニット)が認定できず単なる盛土の沈下と判断される場合は、変動事例(地すべり)から除外した。

今回の地表踏査では、地域全体が網羅的に調査されている。したがって、地表踏査結果は、広域に分布する谷埋め盛土地すべりの現時点における最も信頼しうる情報源であると考えられる。しかし、地表踏査によって変動の有無を判定する場合、基準を数値等で明確にすることは困難である。そのため、広域に多数分布する盛土を同じ精度で分類するためには、変動のランク区分はできるだけ単純なことが望ましい。そこで今回は、最も単純に、変動、非変動の二分割とした。踏査に熟練すれば、地域内に分布する多数の谷埋め盛土の中から、上記の“変動事例”を抜き出すことは難しくない。したがって、それらを除外した“非変動事例”も現実的には比較的容易に発見することができる。

『強度(堅さ)』

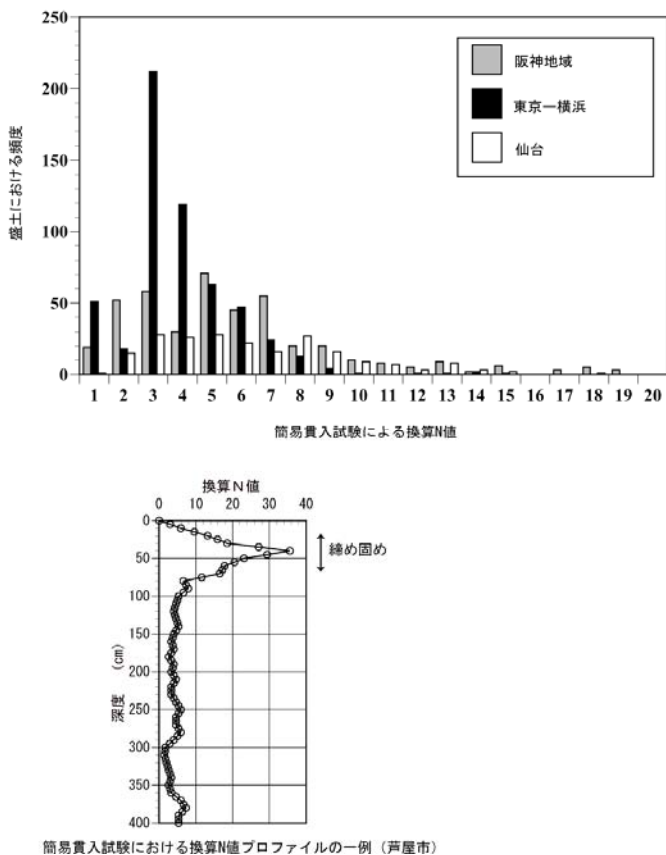


図 7 盛土の強度分布

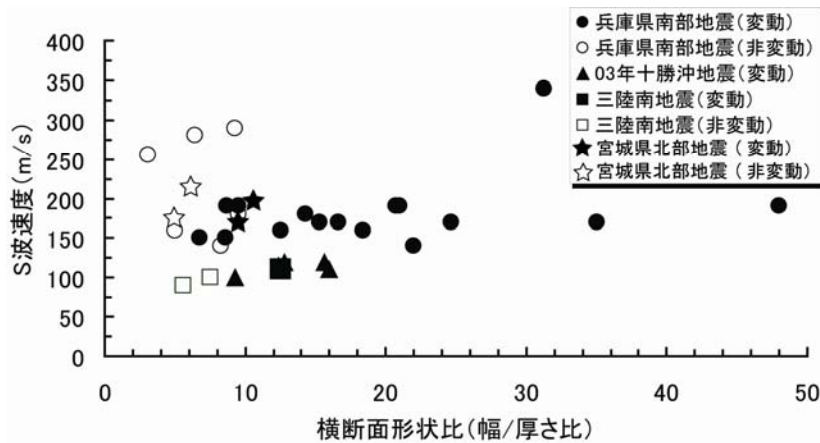
兵庫県南部地震後、阪神、仙台及び東京西南部・横浜の約 60 地点で主として簡易貫入試験(土研式貫入試験)による地盤強度を測定した(図 7)。比較対照のため、阪神と仙台では変動しなかった盛土でも調査を行った。標準貫入試験と簡易貫入試験による手法の影響を見るため、宮城県沖地震後に調査された盛土と同じ地点を調べたところ、換算 N 値の最頻値は 3-5 であった。つまり簡易貫入試験の結果は、標準貫入試験とほぼ同様かやや低い値を与えていることがわかる。結局、阪神、仙台、東京西南部・横浜の谷埋め盛土の N 値分布の特徴は、以下の様であった。

- (1) 盛土の換算 N 値は阪神間地域で 2~7、東京西南部・横浜地域で 3~4。仙台地域では上記の様に 3~5 と軟弱である。盛土の材料は、阪神間地域(マサ主体)、東京西南部・横浜地域(ローム主体)、仙台地域(泥岩)では大きく異なっているにも関わらず、盛土としての強度にはあまり差が無いと言える。

- (2) 盛土の上部は転圧によって比較的高い換算 N 値(強度)となるが、中~底部にかけての換算 N 値は低下する傾向が見られた。つまり、表面は固く見えても内部は柔らかい場合が一般的である。特に、盛土の底面付近で錘が自沈する等、軟弱な例が多く認められた。盛土以前の谷底に堆積していた堆積物が十分に除去されていないか、地下水による細粒分の溶脱を疑わせる結果であると考えられる。
- (3) 地震時に変動しなかった盛土の N 値は、変動した盛土の値に比べてやや分散が大きいが、明確な相違は認められない。
- (4) しばしば、谷埋め盛土の底面に高含水比で強度の低い層が確認された。この部分は恐らく盛土以前の旧地表部か、地下水の流動によって細粒分が洗い流された盛土の底部であると考えられる。

図 8 は、底面の傾斜がほぼ同様(5 度以内)で、盛土の厚さが 10m 以内の条件で集めた谷埋め盛土の S 波速度 (Vs) と横断面形状比との関係である。すなわち、阪神地区の谷埋め盛土 22 例、築館町地域(三陸南地震の被災地)の 3 例、矢本町地域(宮城県北部地震の被災地)4 例、札幌釧路地域(十勝沖地震の被災地)5 例、合計 34 例について高精度表面波探査を行い、S 波速度断面構造を描いて盛土部分を特定した。それぞれの谷埋め盛土の S

波速度は盛土の場所によって異なっているため、盛土部分を 2m 間隔のグリッドに区分し、各グリッド毎の S 波速度を求め、その最頻値、すなわち、最大の面積を占める S 波速度の階級（10m/s ごとに区分）を、その盛土における S 波速度の代表値とした。これより、1 例を除いて被害事例の V_s は 100~200m/s の範囲に集中していることが読み取れる。これに対し、無被害事例では分散がやや大きく、100~300m/s とより広い範囲に分布している。ただし、 V_s が 250m/s 以上の盛土は 3 例のみなので、これらを例外とすれば、被害、無被害事例間に V_s の違いは見られない。この傾向は、簡易貫入試験の結果（N 値分布）と同様である。



以上の諸点は、宅地造成地の谷埋め盛土では、高品質の盛土が例外的であり、むしろ一般的には劣悪であることを示唆する結果でもある。すなわち、盛土の強度（堅さ）は、全体に一樣に低いので、谷埋め盛土の地すべりの発生を左右するほどの本質的要因になりえなかった可能性が高い。

図8 谷埋め盛土のS波速度・横断面形状比関係

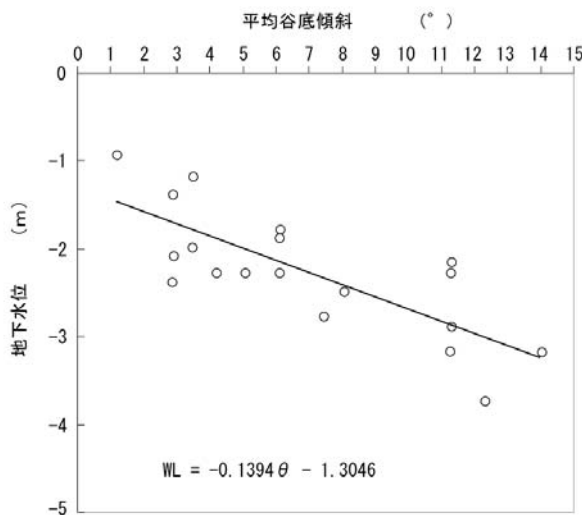


図9 谷埋め盛土の地下水位と谷底傾斜の関係

『地下水』

宅地として造成された谷埋め盛土には暗渠等の排水施設が設置されているはずであるが、実際には盛土内部に地下水が浸入している事例が認められる。特に、盛土の底面付近に地下水が存在する事例が多く、これらの地下水は常時においてもしばしば被圧されている。一方、谷底の傾斜は地下水位を規定する要因でもあるので、こうした谷埋め盛土内の地下水位は、底面の平均傾斜の影響を受けていると考えられる。すなわち、底面の平均傾斜が急であるほど、地下水の流動ポテンシャルは大きくなり地下水位が低くなることが予想される。実際に簡易貫入試験孔を使って求めた地下水位の調査結果では、

阪神地域、東京西南部・横浜、仙台の谷埋め盛土 22 例でそうした傾向が確認されている（図 9）。

本研究では、上記の傾向を確認するため、水頭高さ、傾斜、透水係数を変化させた多くのモデルについて FEM による定常地下水浸透流解析を行った。図 10 に解析モデルと定数を変化させた範囲を示す。その結果、最高地下水位（最も浅い地下水位）は、谷埋め盛土底面の傾斜と逆対数相関の関係にあり、底面傾斜が緩いほど浅い位置に地下水位（圧力水頭=0 の線）が形成される事が判明した。また、地下水位の深さには、透水係数の影響は小さく、厚さ 10m 程度の谷埋め盛土の場合、透水係数を 6 オーダー変化させても地下水位の変化は 1m 以内であることが判明した（図 11）。これまで、谷埋め盛土中の地下水位の推定には、図 9 の線形関係式が用いられてきた。しかし今回、地下水位は、当初の水頭高さと有効ポテンシャル長さの関数であることが明らかとなり、これまでの図 9 の線形関係式の成立範囲が限定的であることが明らかになった。そこで新たに、水頭損失率（実際の水頭高さ / 当初水頭高さ）を定義し、過去の実測値を包含する形で、より広い水頭範囲に対応した予測式を提案した（図 12）。

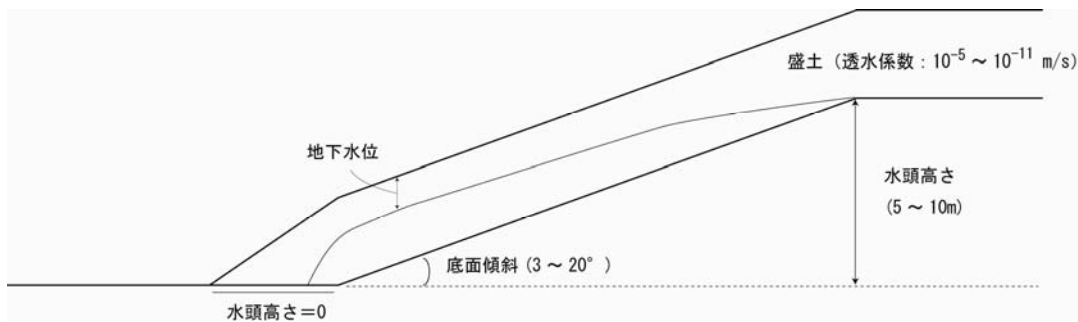


図 10 地下水浸透流解析のモデル

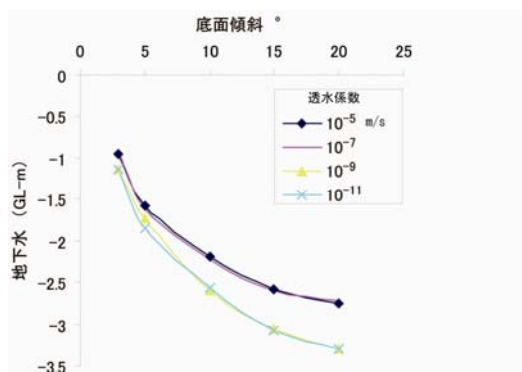


図 11 水頭高さ=10mの場合の地下水位と底面傾斜の関係

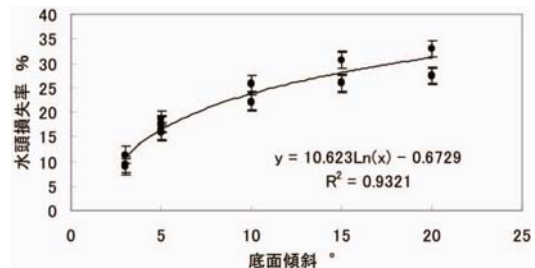


図 12 水頭損失率と底面傾斜の関係。
エラーバーは標準偏差

『形態的特徴』

これまでに発生した谷埋め盛土の地すべりは、盛土の厚さ、横断面形状比（幅／厚さ）、底面勾配について、以下の様な比較的顕著な形態的特徴が指摘されている。

形状パラメーターの取り方

盛土の三次元形状を扱うためには、何らかの数値で代表させるのが便利であるが、一つの尺度で表すのは難しい。そこで様々なパラメーターの組み合わせで表現することになる。例えば、深さ（厚さ）、幅、長さ、体積（面積）、地表面の傾斜、底面勾配、及びこれら相互の比である。しかし、これらのパラメーターは、当然、計測位置によって変化するので、体積（面積）以外のパラメーターでは、計測位置を原則として盛土の中心部と定義しておく。この結果、例えば、形状パラメーターとしての深さは、盛土の最大深さに相当する場合が多い。

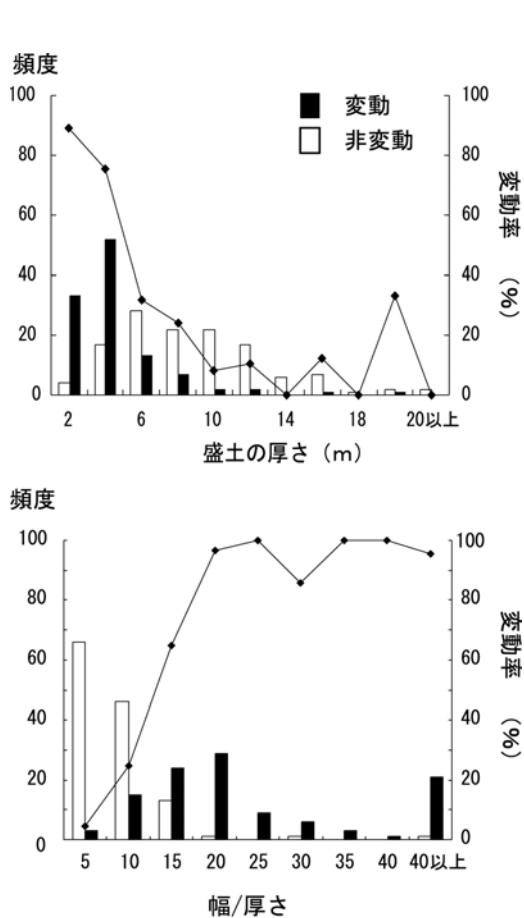


図13 盛土の変動率と厚さ、横断面形状比（幅／厚さ）

厚さ

盛土の厚さは、盛土の形状を記述する基本的パラメーターの一つであり、盛土の質量に関連することから変動の有無に大きな影響を及ぼす要因と考えられる。図13上は、兵庫県南部地震における谷埋め盛土の変動・非変動事例について、盛土の形状に関するパラメーターのヒストグラムと変動率（変動事例数÷ヒストグラム横軸の各区分での総数）を示している。谷埋め盛土の変動率は盛土が厚くなるにつれて低下し、盛土厚が薄いほど変動しやすい傾向が明瞭に認められた。

ここで示した盛土の厚さは、新旧地形図を比較した結果を簡易貫入試験によって補い、決定した。しかし、簡易貫入試験の到達深度は最大5mと浅く、この試験では盛土の底が確認できていない場合も多い。そこで、高精度表面波探査結果を基に、盛土の厚さを検討した。その結果、新旧地形図のデータと高精度表面波探査結果が揃っている25例（兵庫県南部地震と十勝沖地震の事例）のうち、60%にあたる15例は、上記2つの方法によって推定した厚さの相違が、2m以内に収まっていた。したがって、手法そのものの誤差や探査地点が自由に選べない問題点を考慮すれば、2つの手法による厚さの推定結果は比較的良い一致を見せていると考えられる。

しかし、高精度表面波探査のサンプル数が限られている事も事実である。そこで、分散が異なる平均値の差の検定（t検定）によって、高精度表面波探査から推定した盛土の厚さが、地すべり群と非地すべり群の間で異なっているかを検討した。その結果、有意水準1%未満で両者が等しいという帰無仮説は棄却され、

両群の平均値は有意に異なっていると判定された。

横断面形状比（幅／厚さ）

兵庫県南部地震では、盛土自体は比較的大きな強度(N値10～15)を有しているにもかかわらず、地震時に大きく変動した事例が見られた。このことは、こうした谷埋め盛土においては、しばしば盛土底面をすべり面とする、すべり破壊が発生したことを示唆している。底面におけるすべり破壊には、底面の形状が大きな影響を与えるので、盛土底面の形状の代表値として、盛土中央部における幅/深さ比をとり、変動率との関係を調べた。その結果、兵庫県南部地震では変動率との間に顕著な傾向が認められた。すなわち、幅/厚さ比が20以下の領域では、谷埋め盛土の変動率は幅/厚さ比が大きくなるにつれて増加した(図13下)。一方、幅/厚さ比が25以上の領域では、非変動事例がほとんど見られなくなるため、変動率は80%以上でほぼ一定となる。区分毎のデータ数は少ないが、変動事例と非変動事例の幅/厚さ比の分布は異なっており、最頻値が変動事例では20前後であるのに対し、非変動事例では5以下である。

この横断面形状比は、三次元的なすべりを考えた場合の側面の抵抗を表現すると考えられるが、谷埋め盛土の底面には軟弱な地盤が残されていることが多く、盛土側面の抵抗は変動の有無に大きな影響を及ぼす要因と考えられる。また、一般的な谷地形を考えると、横断面形状比が小さいほど谷（盛土底面）の横断形状はV字型に近く、幅/厚さ比が大きいほど谷の横断形状は皿形・お椀型に近くなる。このことと、谷埋め盛土の変動率は盛土が厚くなるにつれて低下し、変動した盛土の大部分が6m以下であったことから、変動事例の多くは底の浅いお椀型～皿形の横断形状をした盛土であったと考えられる。

高精度表面波探査において、完全に谷を横断する測線の設定は、現地での制約から難しい。したがって、谷埋め盛土の幅に関する情報を検証する事は難しい作業である。そこで、

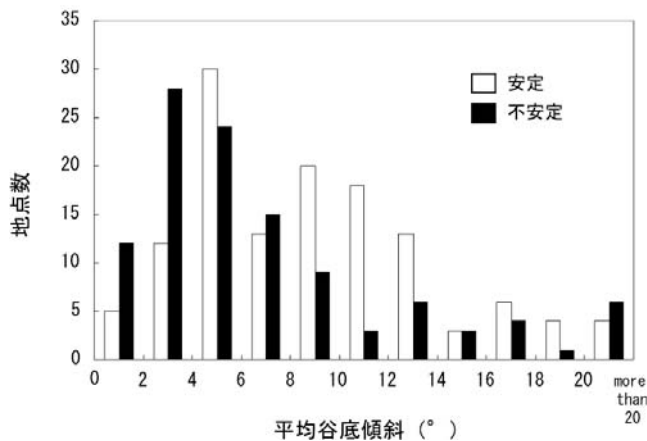


図14 盛土の変動率と平均谷底傾

やすいと考えられるが、兵庫県南部地震の事例では、その傾向が認められなかった(図14)。逆に、データのバラツキによる10～14度付近の急激な低下を除けば、全体に傾斜が増加するにつれて変動率は漸減している。これは、形状に関する要因（厚さ，幅，底面傾斜）が互いに独立でないため、他の支配的要因（変動の有無に強く影響を及ぼす要因）によるバイアスが発生しているためと考えられる。例えば、底の浅いお椀型～皿形の横断形状をした谷（横断面形状比が大きい）は、比較的海岸線に近い地域に分布するため、細長いV字

厚さに関する検証結果と従来法（新旧地形図の対比、現地踏査による推定）による幅の推定を基に、新たに横断面形状比を算出し、地すべり群と非地すべり群間の有意性の検定を行った。その結果、有意水準1%未満で両者が等しいという帰無仮説は棄却され、両群の平均値は有意に異なっていると判定された。

盛土の底面傾斜（平均谷底傾斜）

傾斜は底面の部位によって異なるため、谷中央の最深部を通る縦断勾配を底面傾斜として定義した。一般に底面の傾斜が急であれば変動が発生し

型の谷（横断面形状比が小さい）よりも谷の勾配は緩いと考えられる。このことは、こうしたパラメーターを使用した予測において、非線形予測手法の必要性を示唆するものと考えられる。

7.5 変動の有無を説明するモデルと予測

『ローラースライダーモデル』

兵庫県南部地震では、変動（地すべり）が発生した谷埋め盛土と発生しなかった盛土が、空間的に入り交じって分布していた。地域的に粗密はあるが、変動した谷埋め盛土の面積比は、上述のように約40%に達しており、ほぼ同時期に同じように造成された谷埋め盛土群において、被害の有無が分かれた。しかし、上述のように盛土の強度（堅さ）及び地下水状況の調査結果を考慮すると、地すべりの原因を単純に施工の問題（締め固め不足）に帰することは難しく、またそうするには、変動した盛土があまりに多く、不自然である。しかし一方、上記の分布パターンは、見方を変えれば、約60%の変動しなかった谷埋め盛土には何らかの変動を抑制するメカニズムが働いたことを示していると考えられる。ここでは、そうした抑制メカニズムに関する一つの仮説として、側部拘束効果（三次元効果説）について議論する。

簡単のために、谷埋め盛土の変動を剛体的な“すべり”であるとする。また、三次元的な形状を考えて、変動時には底面の強度が大きく低下するものとする。したがって、“すべり”が発生するかどうかは、側部がせん断されるかどうかでほぼ決まるということになる。このモデルをわれわれは、“ローラースライダーモデル”と名付けた（図15）。遊園地の滑り台がヒントになっているからである。例えば、手すりに手や足が届かないほど幅が広い滑り台を想像して欲しい。そうした滑り台では滑らないようにする事がとても難しい。一方、幅が狭く足や手を突っ張れる場合は、人は滑らないでいることが容易に出来る。この場合、突っ張っている手や足は盛土上部の不飽和層、お尻の下のツルツルの部分は盛土下部のすべり面（液状化層または破壊面）ということになる。実際の盛土における側部抵抗も、薄く幅の広い盛土（横断面形状比が大きい盛土）に比べて、厚く幅の狭い盛土（横断

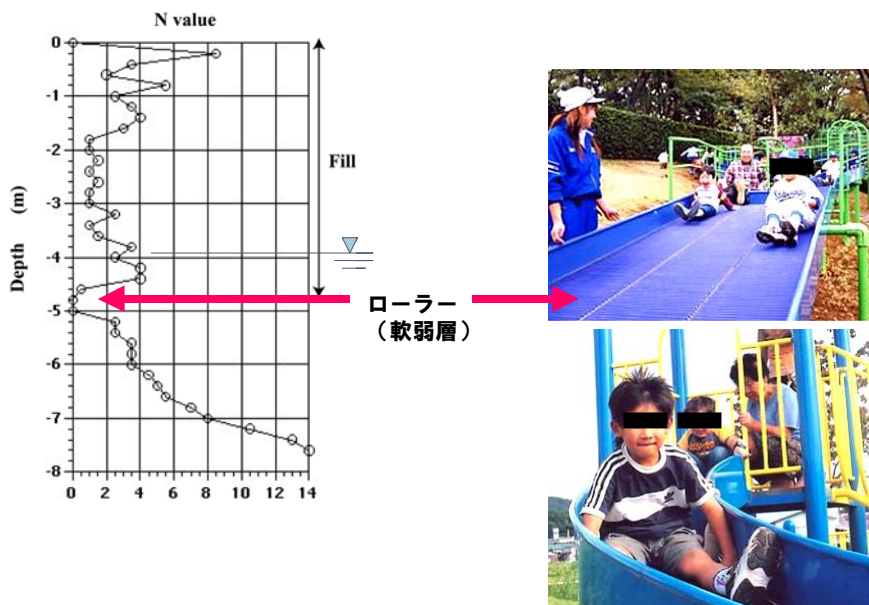


図15 遊園地におけるローラースライダーのアナロジー（ローラーの存在）

面形状比が小さい盛土)では大きいと考えられるので、底面のせん断抵抗が大幅に低下する条件下(強震下では、ほとんどの谷埋め盛土が該当する)では、こうしたローラースライダー的な状況が生まれると考えられる。

ただし、ここでは説明を簡単にするために地震力を一定と仮定している点に注意が必要である。すなわち、実際には、地震応答自身(人の重さ)も盛土の形(滑り台)や物性(人の腕力)の影響を受けて複雑に変化する。つまり、側面拘束の影響を本格的に議論するためには、盛土と地震力の相互作用も含めて検討する必要がある事は言うまでもない。すなわち、このアナロジーは、“薄くて幅の広い盛土ほど滑りやすかった”という経験的事実を、側部拘束の影響と結びつけて説明する場合の第一次近似として有効であると考えられるべきであろう。

『三次元安定解析による感度分析』

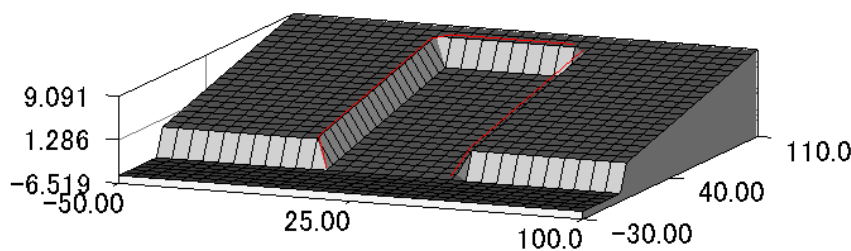


図16 三次元安定解析のモデル (幅50m, 深さ5mの例)

ローラースライダーモデルは、現象を説明する際の概念モデルであるので、その有効性は力学的に検証される必要がある。そこで、三次元安定解析による感

度分析を行った。解析手法は、修正 Hovland 法、簡易 Janbu 法、簡易 RBSM 法(濱崎ほか2006)を用いた。モデルは、図16に示すように、底面のすべり面傾斜は 5° 、頭部と側部は 60° とした。地下水位は、各ケースとも地下水位以下の要素割合が一定となるように、先端ですべり面が地上に出る位置と、頭部滑落崖上で高さの半分に相当する位置を結んで設定した。力学定数は、急傾斜の頭部と側部では、 $c=5\text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=20^\circ$ とし、Case1:底面の強度が0($c=0\text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=0^\circ$)、Case2:底面の強度が小さい($c=5\text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=0^\circ$)、Case3

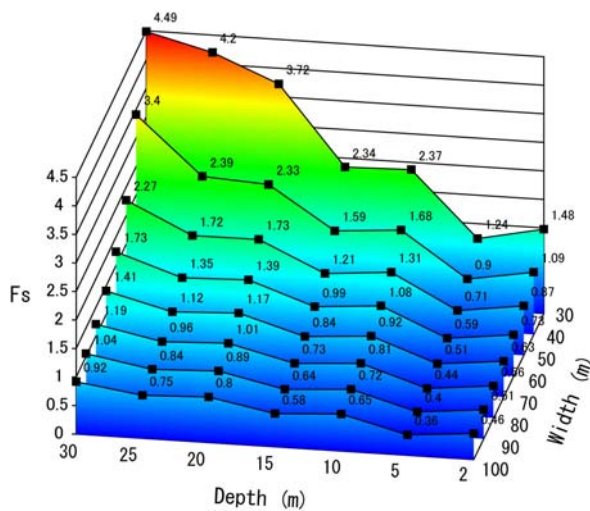


図17 幅・深さ・安全率の関係
Case1 (底面で $c=0\text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=0^\circ$)

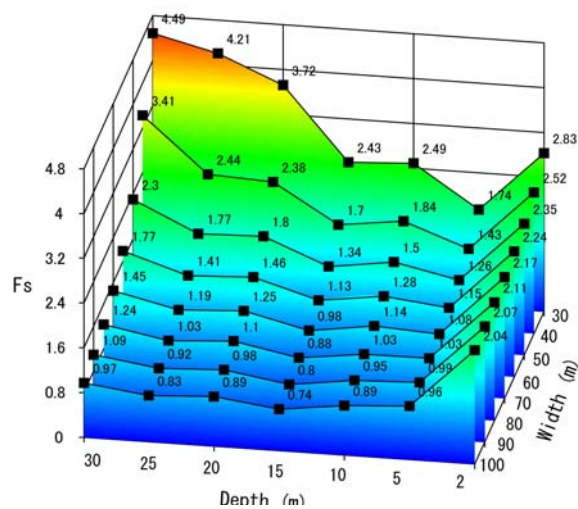


図18 幅・深さ・安全率の関係
Case2 (底面で $c=5\text{ kN/m}^2$ 、 $\phi=0^\circ$)

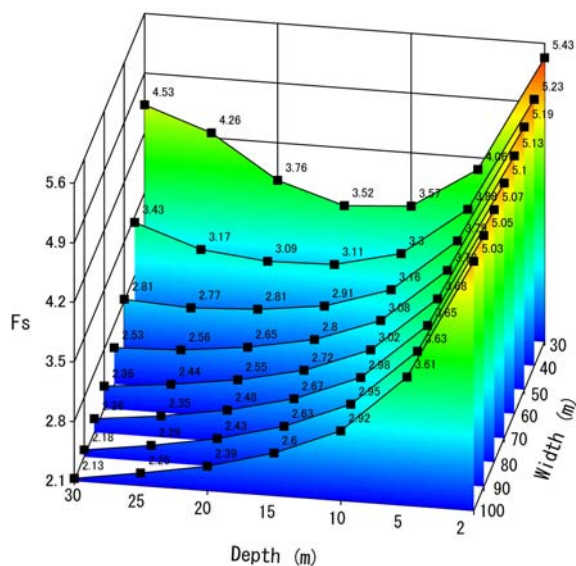


図19 幅・深さ・安全率の関係

Case3 (底面で $c=5 \text{ kN/m}^2$, $\phi=20^\circ$)

い 2m の場合は、逆に安全率が高くなっている。また、幅が広くなると、安全率に及ぼす深さの影響があまり見られなくなる。これに対し、Case3 では、他のケースとは全く異なる傾向であり、幅が広く、深い盛土ほど、安全率が低くなった。底面にローラーが存在しないこのケースでは、単純な二次元解析と同様の傾向となったと考えられる。

すなわち、ローラースライダーモデルが成り立つ条件 (Case1, Case2) でのみ、実際の現象と一致する傾向が見られた。この事は、谷埋め盛土地すべりの安定性が、主として、盛土底面の強度 (ローラーの存在) と三次元形状によって、支配される事を示唆するものである。

一方、上記の結果を幅/深さ比で整理し、図 20、21、22 に示した。Case1 では、幅/深さ比の増加に対して、安全率は最初、急激に減少し、幅/深さ比が約 10 を超えるとほぼ一定となる。Case2 では、最初に安全率が減少するのは同様であるが、安全率の極小値を与える幅/深さ比が存在し、その値は幅の広い盛土ほど大きい。一方、Case3 では、最も幅/深さ比の小さいケースを除くと、幅/深さ比の増加に対して安全率も上昇し、Case1 とは逆の傾向となる。

一般に、側面のせん断抵抗がせん断抵抗の総和に占める割合は、幅/深さ比が増加するにつれて、相対的に減少する。一方、Case2 や Case3 の様に、底面に強度が存在する場合、幅/深さ比が増加するにつれて、底面のせん断抵抗が全体に占める割合は、相対的に増加する。その結果、後者の影響が大きくなると、幅/深さ比が大きい領域では、安全率が上昇する場合があります。Case2 の様に安全率の極小値を与える幅/深さ比が存在する事になる。

上記の結果は、簡易 Janbu 法による解析結果であるが、他の解析手法 (修正 Hovland 法、簡易 RBSM 法) でも、基本的にはほぼ同様の傾向が見られた。しかし、修正 Hovland 法の場合は、簡易 Janbu 法や簡易 RBSM 法を用いた場合に比べて、安全率の変化に及ぼすローラースライダー効果が不明瞭である。これは、簡易 Janbu 法と簡易 RBSM 法では水平方向のスライス間力を考慮しているのに対し、修正 Hovland 法では全てのスライス間力を無視しているためと考えられる。

: 底面の強度が大きく、頭部・側部と同等 ($c=5 \text{ kN/m}^2$, $\phi=20^\circ$) の 3 ケースを設定した。今回の様な感度分析では、安全率の絶対値には意味が無く、変化の傾向が重要である。しかし、極限平衡法では、地震力は物体力として考慮されるに過ぎないため、地震力は無視した。解析プログラムには、ADCALC 3D (アドバンテクノロジー) を用いた。

図 17, 18, 19 は、簡易 Janbu 法による解析結果であり、安全率と幅、深さの関係を示している。Case1 では、幅が広く、浅い (薄く) ものほど安全率が低くなっており、実際の現象と一致する。また、幅の影響 (安全率の変化) は、深さが深いほど大きい。

一方、Case2 でも、全体の傾向は、Case1 と同様である。しかし、深さが著しく浅い

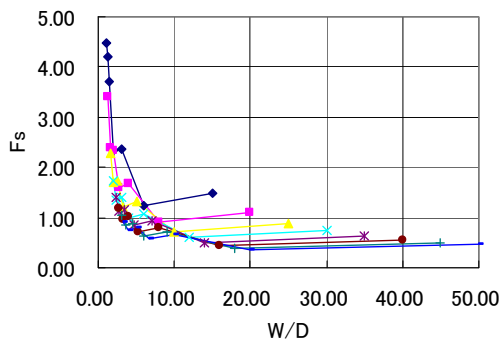


図20 幅／深さ比と安全率の関係
Case1 (底面で $c=0$ kN/m², $\phi=0^\circ$)

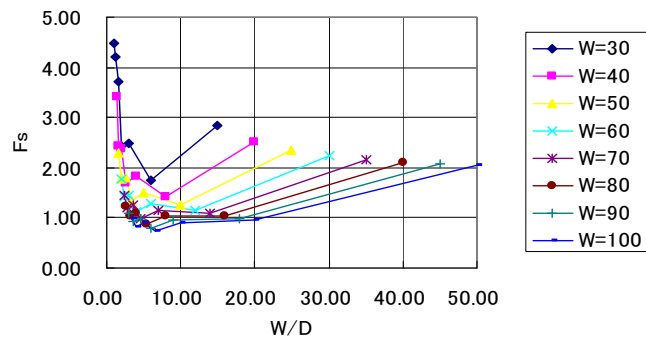


図21 幅／深さ比と安全率の関係
Case2 (底面で $c=5$ kN/m², $\phi=0^\circ$)

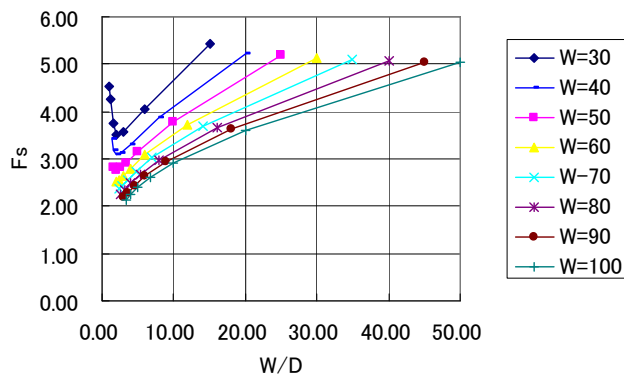


図22 幅／深さ比と安全率の関係
Case3 (底面で $c=5$ kN/m², $\phi=20^\circ$)

『現実の盛土に関する三次元解析』

兵庫県南部地震によって変動した盛土としなかった（被害が目視できないほど小さい）盛土について、三次元モデルを作成し、安定解析を行った（29事例）。その結果、変動しなかった盛土が不安定となる限界震度は、約 0.25～0.3 である事が判明した。これは、最大加速度(PGA)に換算すると 450～700gal に相当する（野田らの式からの換算）。この結果は、兵庫県南部地震で観測された最大加速度が約 1G であった事を考えると、妥当な値といえる。ガイドラインでは、外力の設定が困難である事から二次元安定解析を推奨したが、この成果はより現実的な三次元安定解析の積極的な利用に道を開くものとして評価される。

『簡易な予測手法の提案』

上記のローラースライダーモデルに立脚すれば、谷埋め盛土の地すべりの発生を、主として盛土の形態的特徴をもとに、極めて簡易に行う事ができる。すなわち、形態的特徴や地下水状況、誘因(地震)の特徴等を説明変数とした多変量解析手法によって、谷埋め盛土の被害・無被害の判別が可能である。その際の解析方法としては、単純な判別分析（線形モデル）に比べて、ニューラルネットワーク等の非線形モデルの方が、概ね良好な中率が得られることが判明している。また、こうした判定に基づくハザードマップも既に作成

されている（釜井ほか，2004）。

力学的評価としては、本来は三次元解析が望ましい。しかし、多数の地点を簡単に評価するには、三次元解析は、必ずしも現実的ではないと考えられる。そうした場合は、ローラースライダーモデルを取り入れた二次元解析（国土地理院の統計的側部抵抗モデルなど）による評価が有効である。

7.6 研究成果のまとめ

以上、本研究の成果とその位置づけについて述べた。平成19年度～21年度における本研究の成果をまとめると表2の様である。これにより、谷埋め盛土の安定性評価に支配的な影響を及ぼす複数の要因に関する検討が進展した。すなわち、谷埋め盛土がどう揺れるか（地震応答）、間隙水圧の上昇はどの程度かが初めて明らかにされ、長周期成分の影響の存在と大きさが判明した。また、従来概念モデルに止まっていたローラースライダーモデル（側部抵抗を考慮するモデル）が3次元解析でも実証されたことにより、これを基礎にした国土地理院法（統計的側部抵抗モデル）の有効性が示された。さらに、地下水位推定法の改良も試み、新たな推定式を提案した。以上の成果は、谷埋め盛土の安定性評価におけるいくつかの問題点を解消しうるものであり、当該分野の技術開発において貴重な基礎データを提供するものと期待される。

表2 各年度における主な成果

	実態の解明	耐震性評価法の改良
平成19年度	<ul style="list-style-type: none"> ・地震動・間隙水圧の観測施設設置 ・谷埋め盛土の地盤構造調査 ・中越沖地震による谷埋め盛土被害の調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・単純な形状の三次元安定計算 ・二次元地震応答解析
平成20年度	<ul style="list-style-type: none"> ・地震動・間隙水圧の観測施設整備 ・谷埋め盛土地盤のサンプリングと動的変形性・透水性の把握 ・岩手宮城内陸地震による谷埋め盛土被害の調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・実際の被害・無被害事例の三次元安定計算 ・谷埋め盛土を含む領域を対象とした三次元地震応答解析
平成21年度	<ul style="list-style-type: none"> ・地震動・間隙水圧の観測継続 ・谷埋め盛土における地震動増幅特性の実態解明（これまでの観測結果のとりまとめ） ・長周期成分が影響したと考えられる谷埋め盛土被害の解析 	<ul style="list-style-type: none"> ・ガイドライン法における問題点の抽出 ・地下水浸透流解析（FEM）に基づく、盛土内地下水位予測式の提案 ・効果的な対策工の提案

参考文献

- 浅田秋江（1982）：宅地造成地盤の地震時危険の予測法と防止工法に関する研究，土質工学会論文報告集，22-4，pp.191-202.
- 千葉則行（1995）：1978年宮城県沖地震による地すべり・斜面崩壊について，兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究委員会報告書，地すべり学会，pp. 203-217.
- 濱崎英作・竹内則雄・大西有三(2006)：三次元斜面安定問題に対する簡易離散化極限解析法の開発，地すべり学会誌，Vol.42，No.5,pp.9-17.
- 井口 隆（1995）：谷埋盛土における地震時地すべりの事例と若干の考察，兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究委員会報告書，地すべり学会，pp. 101-117.
- 釜井俊孝・鈴木清文・磯部一洋（1995）：1995年兵庫県南部地震による阪神都市地域の斜面災害，応用地質，36，pp.47-50.
- 釜井俊孝・鈴木清文・磯部一洋（1995）：兵庫県南部地震による都市地域の地すべり，地質ニュース 486，pp.21-23.
- 釜井俊孝・鈴木清文・磯部一洋（1996）：平成7年兵庫県南部地震による都市域の斜面変動，地調月報，47-2/3，175-200.
- KAMAI,T., KOBAYASHI,Y & SHUZUI, H.(1999):Slope instability of large embankments in residential areas caused by the Hyougoken-nanbu Earthquake, 1995, Slope Stability Engineering (Proc. Int. Symp. Slope Stability Engineering), pp.565-570, A.A.Balkema.
- KAMAI, T., KOBAYASHI, Y, JINBO, C. & SHUZUI, H. (2000) :Earthquake risk assessments of fill-slope instability in urban residential areas in Japan, Landslides (Proc. 8th Int. Symp. Landslide), pp.801-806, Thomas Telford.
- 釜井俊孝・守隨治雄（2002）：斜面防災都市，理工図書，200p.
- 釜井俊孝・守隨治雄・笠原亮一・小林慶之（2004）：地震時における大規模宅地盛土斜面の不安定化予測，地すべり学会誌，Vol.40，No.5(157),pp.29-39.
- 釜井俊孝(2005)：2004年新潟県中越地震による都市域の斜面災害，応用地質，46-3,pp.138-144
- 柳澤栄司・安田 進・吉田 望・若松加寿江（1993）：住宅地の被害，1993年釧路沖地震・能登半島沖地震災害調査報告書，土質工学会，pp. 231-275.

8. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
戸建住宅の敷地選びー斜面災害の視点からー，建築技術，687，pp.88-90.	2007.4.1	(株)建築技術	釜井俊孝
盛土の被害事例，地質と調査「谷埋め盛土の耐震化」，114，pp.11-15.	2007.12.10	土木春秋社	釜井俊孝
1596年慶長伏見地震による古墳の地すべり，応用地質，48(6)，pp.285-298	2008.2.10	応用地質学会	釜井俊孝・寒川旭・守隨治雄

Earthquake risk assessment of artificial fill slope in urban residential region, Proc. 2 nd Mlaysia-Japan Symp. on Geohazards and Geoenvironmental Engineering, pp.171-180	2008.11.20	National University of Malaysia and Kyoto University	Toshitaka KAMAI
平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震による斜面災害，自然災害科学,27-2, pp.189-198	2008.8.31	日本自然災害学会	釜井俊孝
Landslides in urban region induced by recent earthquake in Japan ,Proc.Inter. Conf. Disaster Prevention Technology and Mitigation Education, Keynote Speech, Yunlin, Taiwan.	2008.9.25	雲林国立科技大学	Toshitaka KAMAI
盛土の被害実態と調査，平成21年度宅地造成設計・施工研修テキスト， 75 p.	2009.5	（財）全国建設研修センター	釜井俊孝
初級講座 「地すべり」，地盤工学会誌, 57-9, pp.45-51	2009.9	地盤工学会	釜井俊孝

9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類，番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
なし				

10. 成果の実用化の見通し

本研究の成果は、総プロ「高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発（テーマ2 地盤の脆弱性把握のための開発）」で開発された、宅地谷埋め盛土の簡易診断システムの開発に生かされる事が期待される。

11. その他

(注)

1. 用紙の大きさは、日本工業規格で定めるA列4とし、縦位置左綴とすること。
各項目の記入にあたっては、数字、図表等を用いて詳細に説明すること。記入量に応じて、適宜、欄を引き伸ばして差し支えない。
2. 「課題番号」について
交付決定通知に示された課題番号を記入すること。
3. 「研究課題名」について
平成 年度建設技術研究開発費補助金交付申請書に記載した研究課題名を記入すること。
4. 「研究期間」について
当該研究課題について補助金が交付された期間（年度）を記入すること。
5. 「代表者及び研究代表者、分担研究者」について
 - (1) 「代表者は1人又は1法人を記入すること。研究代表者は1人を記入すること。分担研究者は、研究に参加している者全てを記入すること。
 - (2) 研究組織の変更により代表者又は研究代表者を交替している場合は、交替後の研究者名を記入すること。
6. 「7. 研究・技術開発の内容と成果」について
 - (1) 当該研究期間に行った研究によって得られた成果を、各年度の交付申請書の「研究・技術開発の目的及び目標」「本年度の実施計画」と対比させてわかりやすく記入すること。
 - (2) 主要な研究方法、手段等の経過を詳細に記入すること。
7. 「8. 研究成果の刊行に関する一覧表」について
 - (1) 記入した書籍又は雑誌については、その刊行物又は別刷り一部を添付すること。
8. 「9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況」
 - (1) 説明上必要な書類を、適宜、添付すること。
9. 「10. 成果の実用化の見通し」について
 - (1) 研究・技術開発の成果による実用化について、具体的な計画がある場合にはその内容を記載すること。