

年間
特集阪神淡路大震災から15年を経て
～わかったこと, わからなかったこと～
斜面災害編甲
B
第
35
号証

釜井 俊孝*

Lesson of the great Hanshin earthquake
- the impact on landslides research -

Toshitaka KAMAI*

Abstract

The earthquake-induced slope-instability that has occurred is closely related to these artificial landform changes, especially with artificial valley fills (embankments). More than 60% of the slope-instability in the Kobe-Nishinomiya urban region is in artificial valley fills caused by strong ground movements from the earthquake. However, there were no significant differences in the soil strengths of unstable and stable fill sites. Rather, differences of the shape of the fills, such as depth, width, inclination angle of the base, and cross sectional form, would seem to be the key-discriminating factors of slope instability. The results of seismic response analysis and stability analysis based on the roller slider model support the field investigation results that the intensity of earthquake motion is greater in fills that are semicircular in shape than in fills with V-shape cross-sections. Recent destructive earthquake in mountainous region caused plenty of deep-seated large-scale landslides, however, the lesson of the great Hanshin earthquake is still significant for disaster prevention in urban region because that the risk of artificial valley fill type landslides remain in the residential area.

キーワード：阪神大震災, 地すべり, 都市域, 谷埋め盛土

Key words: Great Hanshin earthquake, landslides, urban region, valley fill

1. 兵庫県南部地震で発生した斜面崩壊
1.1 前史 - モダニズムの受容と斜面災害 -
東京や大阪など大都市周辺の都市化は, 主とし

て私鉄各社による沿線の開発, 民間の土地会社による土地造成, 耕地整理・区画整理組合による宅地化, 富豪の自宅・別荘地の建設という4種類の

* 京都大学防災研究所 斜面災害研究センター
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

パターンによって進行した。関西では大阪の過密から阪神間の開発が進み、この地域に近代的な住環境と生活習慣が普及した。いわゆる阪神間モダニズムの時代である¹⁾。東京の場合、きっかけとなったのは関東大震災であった。これによって住宅地はいわゆる山手線の外側に急速に拡大し、意識の上での“山の手”が本来の千代田区や文京区の台地から渋谷区や目黒区に移動する現象が起きた。この時期の開発は、大型の土木機械がほとんど使用されず、本来平坦な土地やそのまま整地する場合がほとんどであった。その意味では、斜面災害的にはあまり問題の無かった時代と言える。しかし、その後の戦後の混乱期には、大都市では深刻な住宅難が発生し、戦前期にはあまり利用されなかった崖際や谷底にまでバラックが建並ぶ様になった。こうして災害リスクの高い“崖っぶち”が、現在まで続く大都市の普遍的な風景となった。一方、エネルギー革命と産業構造の変化を反映した都市への人口の集中結果、郊外には多くのニュータウンが誕生した。ニュータウンでは、従来型の崖地の開発とは異なり、全体としては緩やかな坂を形成するように雑壇型の住宅が配置され

ている。こうした日当たりが良く眺めの良い環境を作るためには尾根を削って谷を埋める必要があり、結果的に膨大な数の住宅が谷埋め盛土の上に配置されることになった²⁾。この結果、都市で発生する斜面災害のパターンも変化した。すなわち、1970年代の半ば頃までは、都市では急斜面で発生する崖崩れが斜面災害の主役であった。しかし、その後の地震災害（例えば、1978年宮城県沖地震、1993年釧路沖地震）では、人口密集地に形成された多数の宅地盛土（多くは谷埋め盛土）が、緩やかな勾配の地表面を保ったまま大規模に変動（地すべり）し、一カ所で多くの住宅が破壊される災害が発生している³⁻⁵⁾。かつての里山に放置されたスギが引き起こす花粉症と共に、こうした状況は住宅の55年体制の後遺症と言えるかも知れない。

1.2 斜面災害の実像

兵庫県南部地震では、数字上の被害も大きかったが、それ以上にこの地震が我が国の社会に与えた影響は深刻である。この地震以後の防災に対する住民意識の変化や市民ボランティア精神の高揚の様な、様々なレベルで見られた小さな変化の集

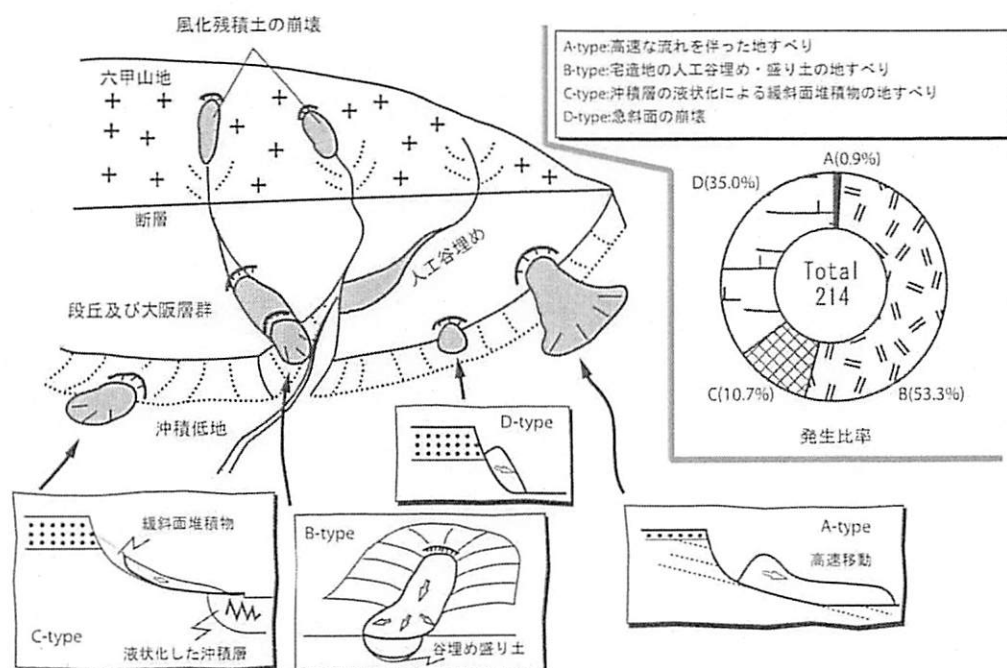


図1 阪神淡路大震災で発生した阪神間都市域における斜面災害

積は、関東大震災が江戸の残滓を一掃したように、阪神・淡路大震災以前と以後の社会を異なったものにしたのかも知れない。斜面災害の分野では、自然斜面における災害に加えて、大都市特有の問題を内包した災害がよりはっきりと顕在化したという点で、阪神淡路大震災は特筆すべき地震災害であった。図1は、阪神大震災における斜面災害の種類を示している⁷⁾。これを基に、地域的なまとまりという視点から、発生した斜面災害について見てみたい。

(1) 花崗岩山地の災害

兵庫県南部地震では、後述する住宅地で発生した谷埋め盛土の崩壊(変動)が印象的であったが、自然斜面の山腹崩壊も主に六甲山地東部を中心に748箇所が発生した。これらは風化花崗岩(マサ)の崩壊と呼ばれ、従来から豪雨等によっても発生してきたタイプの災害である。斜面崩壊が発生した場所は、以前から崩壊が見られた地点の近傍であることが多く、五助橋断層や芦屋断層等の花崗岩体を切る断層(活断層)に沿った地域に集中する傾向があった⁸⁾。また、地震動による崩壊の特徴を反映し、波(揺れ)の来た方向に向いた斜面(南南東-南)での崩壊が多かった。しかし、これらの崩壊による土砂は、六甲山中の溪流に止まったものが多く、住宅地に直接被害を及ぼしたものは少なかった。住宅地に近接した地域で、地震後の降雨等により崩壊拡大が問題になった場合もあったが、行政が素早く対応したこともあり、深刻な事態には至らなかった。

(2) 仁川の災害 - 高速で流動した盛土の地すべり (図1のA-type)

山麓の住宅地では、小規模な擁壁・石垣等の損壊を除いて、少なくとも214カ所の顕著な斜面変動(地すべり性の盛土の変動・斜面崩壊)が発生し、人命・住宅に直接的な被害を与えた⁹⁾。これら斜面変動は、段丘と沖積低地の境界部に発生し、人工地形改変(盛土・切土)に関連した現象であった。

特に、西宮市仁川では、右岸の谷壁斜面が崩壊

し、11~12万 m^3 の流動化した土砂が11戸の人家を埋積し、34名の人命を奪った。崩壊した斜面は、花崗岩山地と大阪層群分布域の境界部に位置し、アルコース質の不淘汰な砂を主とする大阪層群がつくる台地の斜面である。以前から、水道施設の建設のため、幅の広い支谷を埋め立てて、深さ約20mに達する厚い盛土が作られており、主にこの谷埋め盛土の部分が崩壊した。斜面の勾配は比較的緩く、18~20°であった。こうした緩傾斜の斜面が完全に崩壊した第一の要因として、盛土の内部が豊富な地下水で満たされていたため、盛土の内部で全般的な液状化が発生したことが指摘されている。さらに、谷埋め盛土としては長さの割に幅が広く、側方拘束が比較的緩やかだったこと、底面の傾斜が盛土としては比較的急であったことから、液状化した土砂が、高速で流動し大きな被害を与えた。また、アルコース質の砂が粒子破碎をおこし易い材料であったため、一種の非排水せん断現象が発生し、高速流動化を助長したとの指摘もある¹⁰⁾。

仁川の地すべりに類似する現象は、仁川の北、約1kmに位置する宝塚ゴルフ場でも発生した。ここでも、ゴルフ場建設のため谷頭に盛土した部分、約2~3万 m^3 が崩壊し、斜面勾配(エネルギー)の割に遠くまで土砂が到達した。ただし、早朝のゴルフ場での事例であり、大きな被害は与えていない。この崩壊では、落下した土砂の勢いによって斜面下部の平坦地(ゴルフ場の11番コース及びグリーン)に存在した谷埋め盛土が非排水せん断され、せん断抵抗が著しく減少したことが土砂の長距離移動を可能にしたと考えられている¹¹⁾。また、盛土内部の比較的固結度の低い部分が、間隙水圧の上昇によって軟質化し、順次内部から絞り出されるようにして前進を続けた様子が観察されている¹²⁾。同様な斜面内部からの弱層の絞り出し現象は、関東地震の際の根府川駅地すべりにおいても観察されている。

しかし、この地震によって、丘陵地の斜面が全般的に流動したのは上記の2例(被害は事実上、仁川だけ)のみである(ただし溜め池の崩壊を除く)。関東地震、宮城県沖地震等の顕著な地震災

害においても、類似の現象はわずか1, 2カ所で起きているに過ぎない。したがって、災害統計上、高速土砂流動性地すべりは、比較的まれな現象であると言える。恐らく、豊富な地下水の存在、土砂の流動化が発生しやすい盛土の三次元形状（底面傾斜、側方拘束条件）、及び液状化しやすい土質等の発生条件全てを満たす人工斜面は、事実上少ないことが、高速土砂流動現象の発生事例を少なくしていると考えられる。

(3) 谷埋め盛土の災害（図1のB-type）

仁川や宝塚ゴルフ場以外の200例以上の斜面変動のうち、最も多く発生したのが仁川や宝塚の高速流動性崩壊と同様の人工谷埋め・盛土に関連する地すべり（宅地造成地型）であり、全体の過半数に達している。次いで、急斜面の崩壊（崖崩れ型）が多く、約1/3を占めている。しかし、急斜面の崩壊でも、実際にすべったのは、斜面二次堆積物（自然の盛土）や人工の盛土であった事例が多い。したがって、過去の都市における斜面災害と同様、この地震においても、広い意味での盛土、つまり新

しくて、柔らかく、不安定な地層が災害の主役となったと言える。図2は、西宮地域で発生したこのタイプの地すべりの分布を示している。

被害を受けた盛土のうち、大規模なものは、ほぼ例外なく造成以前の谷を埋めて作られた谷埋め盛土であった。仁川や宝塚の斜面と異なり、多くの谷埋め盛土では、盛土の一部が変動したのみで全般的な流動には発展しなかった。拘束条件や人工構造物、地下水位等の条件が流動化に満たなかったためと考えられる。しかし、こうした谷埋め盛土の部分的な変動によっても、住宅とライフラインの破壊が起きた。それらは多数の地点で発生したため、個々の地点の被害は軽微でも地域全体では、相当な数に上り、地震後の生活復興に重大な支障を及ぼした。さらに変動した谷埋め盛土を抱える住宅地では、地震後、数年を経ても、空き地が目立つ。谷埋め盛土の変動の多くは、人命に直接的被害を及ぼすほどではなかったが、個人レベルでは多くの住民の人生に少なからぬ影響を与えたに違いない。したがって、このタイプの斜面変動が、阪神地区の地域社会全体に与えたダ

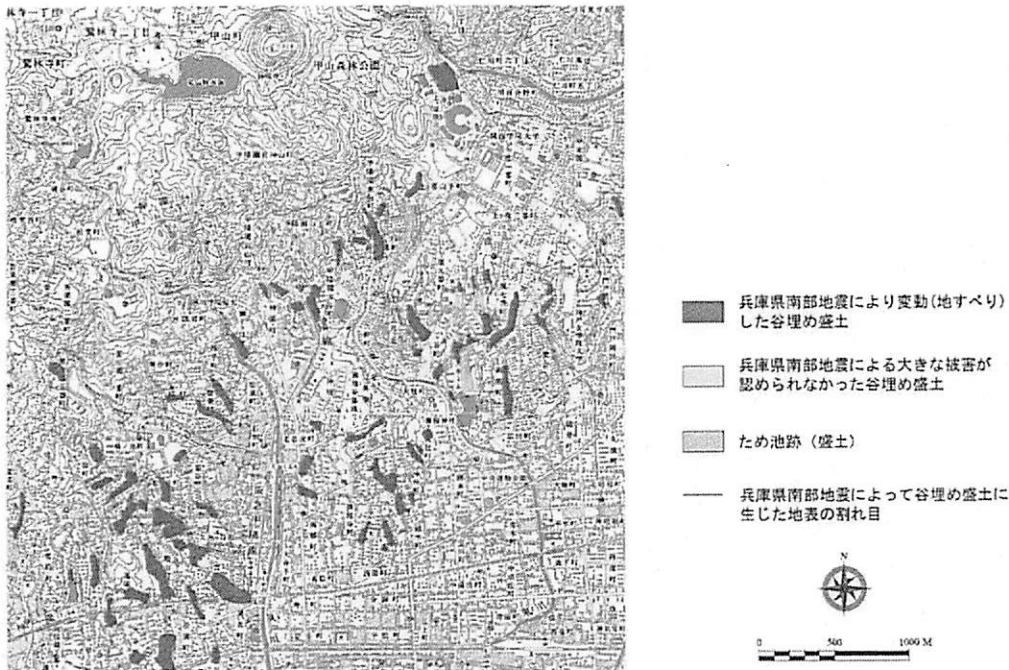


図2 阪神間都市域における谷埋め盛土の分布と兵庫県南部地震による変動域（西宮市～神戸市東部）。背景の地形図は、国土地理院数値地図25000（地図画像）で、1/2.5万地形図「宝塚」（部分）、「西宮」（部分）に相当。

メージの大きさと広がり、仁川の高速流動性崩壊の場合をむしろ上回るかも知れない。

(4) 高級住宅地の災害—内陸部で発生した液状化と盛土の地すべり— (図1のC-type)

阪急夙川駅から岩楽園口駅にかけての地域は、古くから開発された住宅地である。この地域は、内陸部ではほぼ唯一、沖積地盤の液状化が集中して発生した地域と重なっている。この地域は、段丘の開析が進んでいるため、住宅地として開発される以前は、比較的幅の広い谷が発達する地域でもあった。谷埋め盛土や斜面二次堆積物が作る緩斜面は沖積低地に緩やかに連続し、緩斜面堆積物の下部が低地を覆っている。木津山町一帯は昭和3年頃開発されたが、その際、開発業者の大神中央土地(株)が配布した“広告ちらし”が現存している。これと現在の宅地の範囲、及び1995年兵庫県南部地震による被災状況を比較すると、当初の開発範囲と現在の状況の違いが理解できる。すなわち、開発の初期段階では、沖積低地や谷の内部は宅地に転用されることはなかった。しかし、現在に至るまでの間に、こうした悪条件の場所にも住宅が進入し、結局、そうした場所が選択的に被災したことがわかる。これらの斜面変動は、沖積低地の液状化によって、低地の上に載っていた緩斜面の部分(谷埋め盛土、斜面二次堆積物)が、引きずり下ろされたことが原因で発生したものと考えられる。変動した斜面の一部では、地震後少なくとも3ヶ月間にわたり、クリープ的な動きが緩やかに継続した。木津山町におけるボーリング調査の結果では、埋没土壌が複数の層準に認められ、古い地すべり土塊の一部と考えられる大阪層群の根無しブロックを覆っている。すなわち、昭和初期の開発当初、谷として残されていた部分で、過去の斜面変動の痕跡が認められた。液状化の痕跡も兵庫県南部地震によると思われるものも含めて複数存在する。これらのことから、この斜面の安全率は、兵庫県南部地震以前から低かったと考えられる。

(5) その他の地域

武庫川よりも東側では、一部を除いて地震による被害は急速に減少する。斜面変動もそれに比例

して減少するが、宝塚市や川西市の山際では、谷埋め盛土の変動事例が点在する。また、京都(盆地西縁、樫原断層の近傍)、宇治(南陽台、黄檗断層近傍)、大津(日吉台、琵琶湖西縁断層系近傍)に至る広い範囲に、谷埋め盛土の変動事例が点在する。これらの多くは、地表の活断層の近傍に分布することから、谷埋め盛土の局所的分布は、地震動が局所的に強かった地域(異常震域)の存在を示すものと考えられる。これらの谷埋め盛土の局所的分布(異常震域)は、断層の破壊の進行方向を反映して阪神地区よりも東に分布し、神戸よりも西の地域には認められなかった。

2. 谷埋め盛土地すべり

谷埋め盛土地すべりは、過去の地震(1978年宮城県沖地震)でも発生している。しかし、阪神淡路大震災では数多くの事例が収集され、そのデータベースは谷埋め盛土地すべりの本格的な研究と対策の契機となった。

2.1 分布の特徴

(1) 被害の発生率

まず、造成地の中にどの程度の盛土があるかについて知る必要があるが、全国規模の具体的な統計は見当たらない。しかし、新旧地形図の比較から推定した結果によると、阪神間及び神戸地域では面積比で造成地内の10.3%が盛土であると推定される。このうち、造成地全体の8.5%が谷埋め盛土である(全盛土の中の83%が谷埋め盛土)。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の被災地だけなので、結果にどれだけ一般性があるかはわからない。しかし、経験的に全造成地面積の数%で被害が発生する可能性があると言える。

(2) 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)。したがって、周囲の地山

の地震動から推定するという事になる。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付近から顕著となる災害であると言える。

2.2 災害の要因とメカニズム

阪神淡路大震災以前、谷埋め盛土の災害の原因としてはただ漠然と、「(強度的に)弱い谷埋め盛土が存在し、盛土上で増幅された震動によって壊れた(変形した)」と半ば常識として信じられていた。しかし、阪神淡路大震災の経験とその後の研究によって、そうした「常識」に反する被災事例と観測結果が知られる様になり、実際の災害発生メカニズムはより複雑である事が認識されるようになった。現時点では、災害の要因とメカニズムについて、以下の様にまとめる事ができる。

(1) 盛土の強度

被災事例と無被災事例について盛土の強度を比較するため、高精度表面波探査を行った。図3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(V_s)と横断面形状比との関係である。大部分

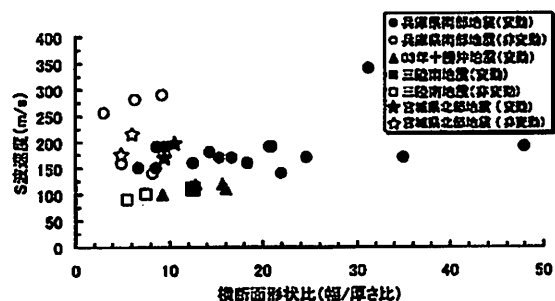


図3 谷埋め盛土のS波速度と被害発生の有無、盛土の形状の関係

は、阪神淡路大震災の事例であるが、大震災以後の地震で発生した事例も一部含んでいる。横断面における盛土のS波速度(V_s)は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、最頻値をその盛土の代表値としている。1例を除いて被災事例の V_s は100~200m/sの範囲に集中している。これに対して無被災事例では100~300m/sとより広い範囲に分布している。すなわち、平均値で見れば被災事例の V_s は無被災事例に比べて小さい傾向は認められるが、ばらつきを考慮すると無被災事例においても被災事例と同様に V_s が小さい場合がある。したがって、単純に被災事例の強度が弱かったと結論する事は出来ない。この傾向は、簡易貫入試験の結果(N値分布)によっても確かめられている。すなわち、図4より、谷埋め盛土では、転圧不足の盛土や軟弱化した盛土がむしろ一般的に存在し、そうした状況では低い盛土強度は被害発生の必要条件ではあっても十分条件とはならないことがわかる。

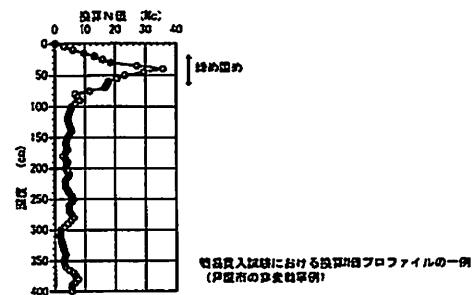
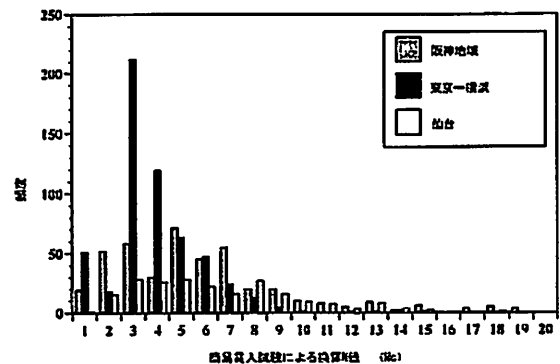


図4 簡易貫入試験による谷埋め盛土の換算N値の頻度分布と典型的な抵抗値のプロファイル

(2) 盛土上の地震動

谷埋め盛土は地震によって発生するにもかかわらず、宅地盛土における地震観測事例は極めてまれである。この点を考慮して、阪神淡路大震災以後、東京都南部で地震動の観測を継続している。観測点は、日黒区中根 (Site1) と世田谷区等々力 (Site2) である。両観測点間の距離は約 2 km と近く、地震動の震源からの距離減衰はほぼ同等である。中根観測点 (Site1) は標高約 35 m の武蔵野台地上、等々力観測点 (Site2) は中根観測点から続く武蔵野台地を開析した谷の中に位置し、厚さ約 9 m の軟弱層 (谷埋め盛土 + 沖積層) の上である。

これら観測点において、これまで観測された最大の強震動は、2005年7月23日の千葉県北西部地震 (M6.0) によるものである。最大加速度は、Site1 (台地) で 104 cm/s/s、Site2 (盛土) で 57 cm/s/s であった (いずれも NS 成分)。すなわち、谷埋め盛土上の応答が台地上の応答よりも小さかった。更に

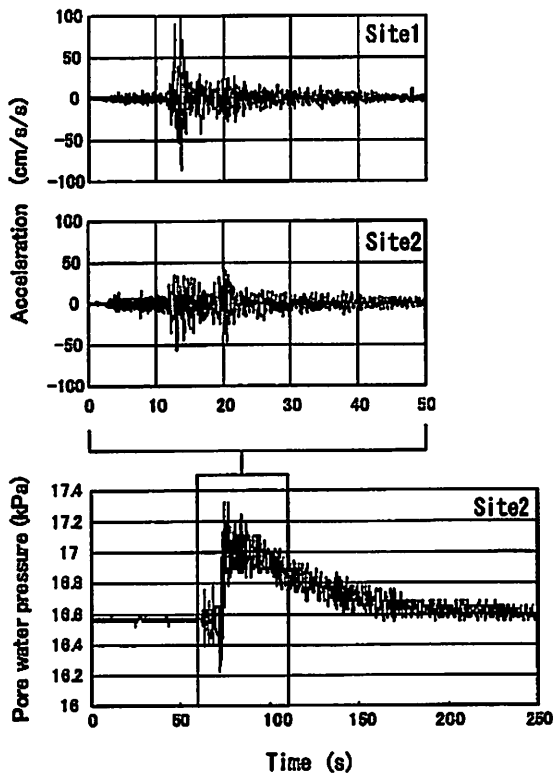


図5 千葉県北西部地震における東京南西部の加速度記録と間隙水圧応答
Site1: 地山, Site2: 谷埋め盛土

このとき、間隙水圧では典型的な非線形応答が見られた (図5下)。一方、2005年8月16日の宮城県沖地震や2009年8月11日の静岡沖地震等、観測点から遠い地震においては、等々力観測点観測点の応答は中根観測点の応答と同等かやや上回っていた (このときの間隙水圧応答は弾性範囲)。

図6は、観測開始以後、盛土上で記録された M4 以上の地震 (9個) 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示している。これより、震源、震央が観測点からの離れるほど、増幅率は増加し、震央距離が 40 km 以下の地震では増幅率が 1 以下となり、逆に 60 km 以遠の地震では増幅率は 1 を上回る事がわかる。使用した地震の規模はほぼ同様で、地震のタイプも似ていることから、これら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、一般に軟弱な谷埋め盛土では、長周期成分の影響がより強く発揮されると考えられる。

(3) 底面における間隙水圧の上昇

地震動の観測では、直下地震の様な卓越周期の短い直下型地震においては、谷埋め盛土での地震動はむしろ減衰する事が期待される。しかし、同時に間隙水圧の観測においては、底面付近で間隙水圧の急速な上昇が観測されている (図5)。一般に谷埋め盛土の下部は地下水で飽和している場合が多く、地震時には液状化による破壊が発生する

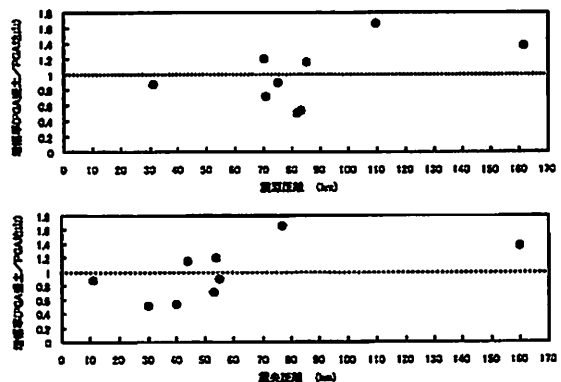


図6 M4以上の地震における最大加速度増幅率と震源・震央距離の関係

可能性が考えられる。実際、阪神淡路大震災では、いくつかの谷埋め盛土で噴砂が確認されている。この様な完全な液状化に至らない場合でも、過剰間隙水圧の急速な上昇によって、谷埋め盛土底部の飽和層が地震時に破壊する可能性は、高いと考えられる。したがって、谷埋め盛土の底面は、有力な“すべり面（層）”の候補である。

既往の研究も含めて間隙水圧の上昇量と地動速度の関係を試算した結果では、盛土の厚さが4 m、地下水位が地表面下2 mの場合、15~28cm/sの地表速度（地震動）があれば、過剰間隙水圧は有効上載圧以上となり液状化が発生すると予測される。実際には、盛土はもっと厚く、地下水位も低い場合が多いと予想されるので、底面付近で破壊が発生するためにはより大きい地震動が必要になるであろう。しかし、兵庫県南部地震の場合、地表速度が40cm/s以上であったと推定される地域で谷埋め盛土地すべりが発生していた事、底面傾

斜の緩い盛土では地下水位が高くしかも変動した割合が高くなるという統計的事実を考え合わせると、盛土下部の破壊及び部分的な液状化及びそれに引き続く“すべり”は、変動発生の有効なメカニズムの一つである。

(4) 盛土底面の形状（盛土以前の谷の形）によるコントロール

兵庫県南部地震では空間的に変動が発生した盛土と発生しなかった盛土が混在するように分布していた。これには、二つの理由が考えられる。一つは、変動が発生した盛土だけが強度が低かったか、地下水が多く貯留していたとする立場（変動盛土悪者説）、もう一つは変動しなかった盛土の方に何か変動を抑制するメカニズムが働いたとする立場（抑制メカニズム説）である。既に述べた様にこれまでの調査では、前者の立場を支持する積極的な証拠は見つかっていない。また、阪神淡

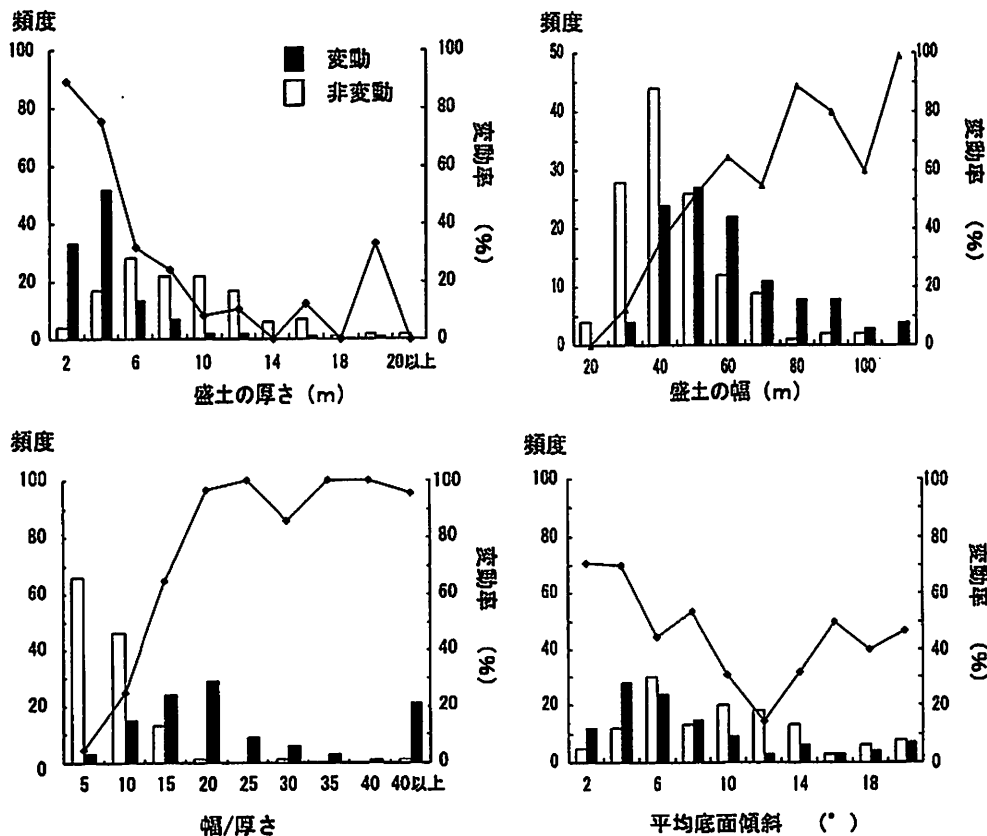


図7 阪神淡路大震災における谷埋め盛土の被害発生率と盛土の形状との関係

路大震災の事例では、谷埋め盛土の三次元形状が被害の有無に影響を与えており、変動しにくい三次元形状があるらしいことが判明している。すなわち、図7が示している様に、薄くて幅の広い谷埋め盛土において、被害発生率が高い傾向が認められた。

(5) ローラースライダーモデル

簡単のために、谷埋め盛土の変動を単純な“すべり”であるとする。また、三次元的な形状を考えて、変動時には底面付近に存在する軟弱層（すべり層）、または盛土下半部の強度が間隙水圧の上昇によって大きく低下するものとする。このような仮定を設けると、“滑り”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8)。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。実際に盛土の底面では、こうした弱層が発見される事が多く、上記の仮定は多くの現地調査によって支持されている。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、既に述べた様に地震応答自身（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、側面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。

それでは、このローラースライダーモデルは定量的にはどこまで有効であろうか？ その点を検討するため、盛土の断面を長方形に単純化し、底面の強度を側面の1/10程度とし、適当地震力と地下水位を仮定した計算が行われた¹³⁾。図9はその結果である。側面の強度の取り方にもよるが、ローラースライダーモデルを取り入れた解析法によって兵庫県南部地震による盛土の変動・非変動

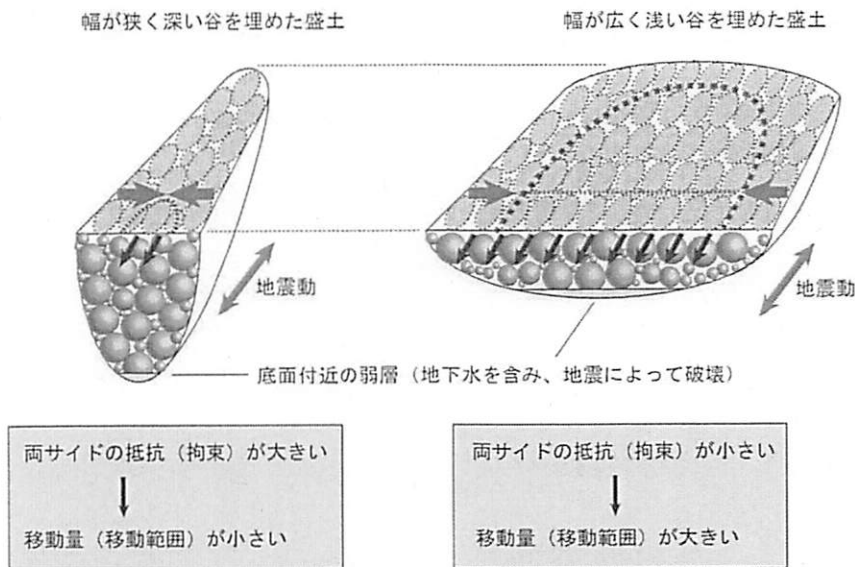


図8 ローラースライダーモデルの概念

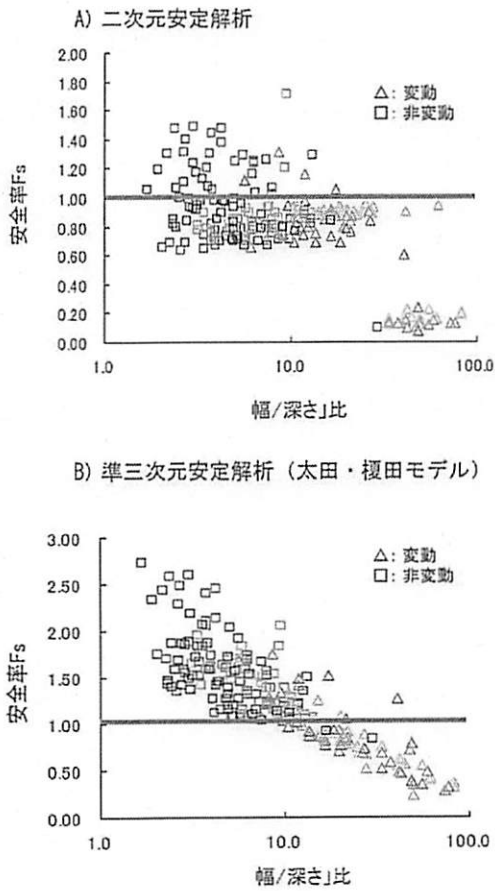


図9 ローラースライダーモデルを考慮した簡易安定計算と通常の2次元安定計算結果

をほぼ説明(区別)出来ることがわかる。また、二次元の安定計算(簡便法)では、現象(特に非変動事例)を再現できないことも判明した。もちろん、長方形断面は実際の盛土の形状とは大きく異なるし、地震力を慣性力として処理している点、変形を考慮していない点等、不十分な点もある。しかし、この計算結果はローラースライダーモデルが谷埋め盛土地すべりのメカニズムを説明する有力な(結構タフな)モデルであることを示していると考えられる。

(6) 一般の地すべり現象への拡張

ローラースライダーモデルは、谷埋め盛土という特異な場で発生する地すべりについて導入された概念モデルである。しかし、同様に側面と底面のすべり面強度が大きく異なる場合には、通常の



写真1 兵庫県南部地震における谷埋め盛土の地すべり(西宮市)。画面奥の民家と手前の道路の間(駐車場の部分)はかつて、深さ5m程度の谷であった。この谷埋め盛土は、画面の200mほど右から左へ数m移動し、画面左のマンションに当たって停止した。駐車場には、末端部の隆起に伴うクラックの発達が顕著である。ここは、現在では住宅地として使われている。

自然斜面の地すべりの変動の有無を説明しうるモデルになり得ると考えられる。例えば、軟弱な薄層をすべり面とする層面すべりでは、地すべりが発生するかどうかは、側部を構成する地層のせん断抵抗力で決まるので、谷埋め盛土地すべりと同様にすべり面が浅いほど、相対的に地すべりが発生しやすくなっている可能性がある。このように、阪神大震災における谷埋め盛土地すべりで判明した地すべり移動体の構造とメカニズムの関係は、今後、自然の地すべり研究にも大きな影響を与えようと考えられる。

2.3 対策の進展

(1) 行政による対応

谷埋め盛土は、住宅地の災害であるので、防災・減災においては行政の対応が重要である。過去のルール(法令等)に問題があったとしたら、ルールを変える事が最も根本的な対策となり得るからである。そこで、阪神淡路大震災、新潟県中越地震(写真2)を契機として、平成18年に「宅地造成等規制法」の改正が行われ、谷埋め盛土地すべり災害の軽減を目的とした規制と対策の導入が図られた。また同時に、宅地盛土の耐震化推進事業の創



写真2 新潟県中越地震による長岡市高岡団地の被害。崩壊した部分は、谷頭部の盛土である。

設と耐震化を対象とした減税措置も導入された。こうした一連の行政措置は、街区も公共財であると考えることにより、相隣関係では解決できない谷埋め盛土地すべりの減災対策に積極的に乗り出そうとするものである。これは、過去、宅地盛土の問題を民対民の問題として介入を避けてきた政府の姿勢に比べて大きな方向転換である。しかし、地方自治体のレベルでは、住民の合意形成に関して解決すべき問題点が多く、本格的な対策に至った例が少ないのが現状である。

(2) ハザードマップ

本来のハザードマップは、入力としての地震の特徴を定義した上で、谷埋め盛土地すべりの発生予測を確率的に示した地図であるべきである。しかし、宅地盛土の脆弱性カーブは未完成なので、この分野でそうした本格的なリスクマネジメントを行うのは難しい。しかし、定義上、この災害は盛土の上でしか発生しないので、住宅密集地において谷埋め盛土の分布を示すだけでも有効な予測マップであると言える。こうした地図は、宅地造成等規制法の改正に伴って新たに公表された技術ガイドラインにおいても作成が推奨されており、最近になって複数の自治体で作成されている。しかし、その公表のありかたを巡って議論があり、必ずしも有効な対策に結びついていないという問題点がある。

一方、谷埋め盛土の外形的特徴（幅深さ比等）が被害・無被害の判別に有効であるという特徴を利用し、不安定化に関して簡便に判定する手法が開発されている。解析方法は、単純な判別分析（線形モデル）¹⁴⁾ やニューラルネットワーク（非線形モデル）¹⁵⁾ であるが、概ね良好な中率が得られており、ほぼ実用レベルに達している¹⁶⁾。

(3) 対策工法

対策工法としては、地すべり対策で行われている抑制工（排水など）や抑止工（杭やアンカーなど）が考えられる。しかし、谷埋め盛土の滑動力そのものは小さいので、通常の仕様のままでは必要抑止力に対してオーバースペックである。しかも、住宅の基礎対策としては相当高額になることから、対策工事を現実には実施するには、より経済的な工法の開発が必要であった。そこで、やや肉厚の排水パイプのせん断抵抗を考慮し、簡易なアンカーや杭の様な抑止効果を期待した設計も行われるようになった。今後、より効果的な対策工法が開発されるためには、市場規模の拡大が必要である。

3. 阪神淡路大震災以後の地震時斜面災害

表1は地震による谷埋め盛土地すべりの年表である。阪神淡路大震災以前も以後も、阪神淡路大震災と同様に都市部の住宅地や自動車道路等において、谷埋め盛土地すべりは発生している¹⁷⁾。しかし、兵庫県南部地震以後、大都市に深刻な被害を与えた地震が無いことから、谷埋め盛土地すべりの斜面災害全体に占める比重は小さい。圧倒的に多く発生したのは、急峻な山地斜面での大規模な地すべり・崩壊である。

従来、わが国では地すべり等防止法の影響もあって、地すべりの範囲を自然界における種々の斜面変動に比べて狭義に解釈する傾向が強かった。事実上、粘土を主体とした再活動型地すべりを「地すべり」と呼び、山地・丘陵値における斜面変動現象の主体であるとの認識が一般的であった。そうした再活動型地すべりは、緩傾斜の斜面をゆっくりと流れ下る運動形態をとるのが普通であり、地震動によって大きく加速されるケースは

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	
1999	9. 21	台湾集集地震	台中市	2	山地の地すべり・斜面崩壊多数	
2001	3. 24	芸予地震	広島県河内町、呉市、愛媛県松山市	3		
2003	5. 26	三陸南地震	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	長岡市の住宅地（高町団地等）	10（住宅地のみ）	山地の地すべり・斜面崩壊多数	
2007	3. 25	能登半島地震	主に能登有料道路	11		
2007	7. 16	新潟県中越沖地震	柏崎市内	7	中位段丘と古砂丘の間折谷	
2008	6. 14	岩手・宮城内陸地震	築館町館下	1	山地の地すべり・斜面崩壊多数	
2009	8. 11	静岡沖地震	牧ノ原市（東名高速）	1		
		「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	那覇市首里島堀町	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	

比較的まれである。実際、新潟県中越大震災の際に被害が顕著であった山古志村においても、代表的な地すべり（例えば、虫亀地すべり）が分布する塊状黒色泥岩（地表では強く風化して粘土化）の分布域では、周辺の斜面に比べて斜面変動現象は軽微であった。阪神淡路大震災においても、淡路島津名町の高滝地すべりで地震から2日後に移動が開始されたという報告はあるものの、それは地震による広域的な地下水環境の変化が原因であり、地震動によって直接引き起こされた現象では無いとされている。

すなわち、わが国では「普通の地すべり」は地震の影響を受けにくいとされ、誘因としては融雪や集中豪雨が重要視されてきた。しかし、新潟県中越地震以後の最近の事例が示すとおり、地震による山地災害の現実、そうしたイメージとは全

く異なっていた。したがって、現時点における地震時斜面災害研究は、山地斜面で発生する大規模な地すべりに関するものが多く、阪神淡路大震災直後の状況とは大きく異なっている。しかし、阪神淡路大震災で提起された都市域の谷埋め盛土地すべりの問題は、依然としてわが国の大都市域に存在し続けている。そうした意味で、阪神淡路大震災の歴史的意義は現在も失われていない。

謝 辞

本稿で使用した事例は、多くの方々による様々なご協力を得て、調査・検討できたものである。紙数の制約から個々のお名前を挙げる事が出来ないが、寛恕を願うと共に感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 阪神間モダニズム展実行委員会：阪神間モダニズム, 244p. 1997.
- 2) 田村俊和：都市域の斜面災害はどのように変わってきましたか, 知っておきたい斜面のはなし Q & A, pp.176-177, 2005.
- 3) 井口 隆：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, 1995.
- 4) 浅田秋江：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, 1982.
- 5) 千葉則行：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, 1995.
- 6) 柳澤栄司・安田 進・吉田 望・若松加寿江：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, 1993.
- 7) 釜井俊孝・鈴木清文・磯部一洋：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, 1995.
- 8) 沖村 孝：兵庫県南部地震に伴う斜面崩壊の特性, 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.1-16, 1995.
- 9) 釜井俊孝・守随治雄：斜面防災都市, 理工図書, 200p., 2002.
- 10) 佐々恭二・福岡 浩：西宮市仁川地すべりと地震時地すべりの発生予測, 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.145-170, 1995.
- 11) 福岡 浩・佐々恭二・G. Scaracia-Mugonozza・S. Evans：宝塚ゴルフ場地すべりの運動機構について, 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.49-59, 1995.
- 12) 横山俊治・藤田 崇・菊池浩喜：1995年兵庫県南部地震で発生した宝塚ゴルフ場の斜面変動, 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.61-77, 1995.
- 13) 太田英将・榎田充哉：谷埋め盛土の地震時滑動崩落の安定計算手法, 第3回地盤工学会関東支部研究発表会発表講演集, pp.27-35, 2006.
- 14) KAMAI, T., KOBAYASHI, Y, JINBO, C. & SHUZUI, H.: Earthquake risk assessments of fill-slope instability in urban residential areas in Japan, Landslides (Proc. 8th Int. Symp. Landslide), pp.801-806, Thomas Telford, 2000.
- 15) 釜井俊孝・守随治雄・笠原亮一・小林慶之：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, 2004.
- 16) 釜井俊孝・守随治雄：都市造成地盤のハザードマップ, 測量, Vol.57, No.6, pp.38-42, 2004.
- 17) 釜井俊孝：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, 2005.

(投稿受理：平成22年4月15日)