

地震による大規模宅地盛土地すべりの 変動メカニズム

15310129

平成15年度～平成17年度科学研究費補助金
(基盤研究 (B)) 研究成果報告書

平成 18 年 3 月

研究代表者 釜井俊孝

京都大学防災研究所 助教授

目次

はしがき	1
I. 都市化と斜面災害の関係史	
1. 都市と斜面	3
2. 郊外の拡大と斜面災害	4
3. 郊外の地質と斜面災害 —南関東の事例—	8
4. 地下水環境から見た都市の斜面災害	12
5. 斜面災害が発生する場所 —都市内部型の場合—	15
II. 谷埋め盛土地すべりの実態とメカニズム	
1. 実態	18
2. 谷埋め盛土地すべりのメカニズム	29
III. 「崖つぶち」の実態	37
IV. リスクの評価	
1. リスクマネジメントは可能か？	40
2. 経験的予測とハザードマップ	42
V. 住宅基礎としての斜面 —斜面と建築—	
1. 斜面住宅の時代	66
2. 斜面と建築	67
3. 宅地造成と行政	70
終わりに	71
参考文献	71
資料	73

はしがき

高度経済成長期において、政策的に誘導された大都市への人口集中は、郊外に向かう宅地開発圧力となり、新たな斜面災害のリスクを増大させた。1978年宮城県沖地震、1993年釧路沖地震、1995年兵庫県南部地震等、都市に被害を与えた地震では、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、大規模に変動（地すべり）した。そこで、学際的かつ体系的なアプローチによって宅地盛土型地すべりの変動メカニズムを解明し、大縮尺（1/1万～）の高精度ハザードマップの作成と対策工法の開発へ道を開くことを目的として、本研究が行われた。災害の研究の最終目的は、学理の追求によって安全な社会の構築に寄与する事である。その点で、本研究の成果の一部が、第164国会（平成18年3月）における「宅地造成等の規制に関する法律」の改正（例えば、“造成宅地防災区域”の新設）に生かされ、政府による新たな宅地耐震化推進事業創設の契機になった事は、望外の喜びである。今後も本研究の成果をベースにして、この種の災害の軽減が図られる事を期待してやまない。

研究組織

研究代表者：釜井俊孝（京都大学防災研究所 助教授）
研究分担者：関口秀雄（京都大学防災研究所 教授）
研究分担者：松波孝治（京都大学防災研究所 助教授）
研究分担者：太田英将（太田ジオリサーチ・代表取締役）平成15-16年
（研究協力者：榎田充哉）平成17年

交付決定額（配分額：全て直接経費）

平成15年度	8,200	(千円)
平成16年度	4,200	(千円)
平成17年度	2,900	(千円)
総計	15,300	(千円)

(1) 学会誌等

Yamaguchi, Tanaka, Odajima, T. Kamai, and Tsuchida, Detection of a landslide movement as geometric misregistration in image matching of SPOT HRV data of two different dates, Int. J. Remote Sensing, Vol.24, No.18, pp.3523-3534, 2003.

釜井俊孝・守隨・笠原・小林, 地震時における大規模盛土斜面の不安定化予測, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 5, pp. 29-39, 2004.

郷・笠原・釜井俊孝, 地震時谷埋め盛土斜面の変形に関する振動台模型実験, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 5, pp. 40-47, 2004

釜井俊孝・守隨, 2001 年芸予地震による呉市都市域の斜面災害, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, No. 5, pp. 78-83, 2004

釜井俊孝・守隨, 都市造成地盤のハザードマップ, 測量, Vol.57, No.6, pp.38-42, 2004.

Wen-Wang・釜井俊孝・守隨, 1999 年集集地震による台湾中部都市域の斜面災害, 応用地質, Vol.44, No.6, pp. 367-374, 2004.

Sidle, T. Kamai, and Trandafir, Evaluating landslide damage during the 2004 Chuetsu earthquake, Niigata, Japan, EOS, Vol.86, No.13, pp.133,136, 2005.

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.

釜井俊孝・Trandafir・村尾, 2004 年新潟県中越地震による郊外住宅地の斜面災害, 宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム論文集, pp.17-24, 2005.

若井・釜井俊孝・鶴飼, 高町団地における盛土崩壊事例の有限要素シミュレーション, 宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム論文集, pp.25-30, 2005.

(2) 口頭発表

釜井俊孝・Trandafir・村尾, 2004 年新潟県中越地震による郊外住宅地の斜面災害, 宅地地盤の安全性と性能評価に関するシンポジウム, 2005.

(3) 出版物

地盤工学会, 地盤調査の方法と解説 (4.1 地表地質調査), 889 (45-53) p., 2004

地すべりに関する地形地質用語委員会, 地すべり 地形地質的認識と用語, 日本地すべり学会, 318 p., 2004.

「知っておきたい斜面のはなし Q & A」編集委員会, 知っておきたい斜面のはなし Q & A 斜面と暮らす, 土木学会, 291 p., 2005.

I. 都市化と斜面災害の関係史

1. 都市と斜面

人間は大昔から都市を造ってきた。われわれは集まって住む動物なのである。都市にはそのための仕組みとして、道路、水道、下水道、電気、ガスなどの公共施設があるが、当然ながら住宅及びその基礎地盤こそが最も重要な都市構成要素である。都市と斜面と聞いて不思議に思うかも知れないが、多くの都市は平野から台地、丘陵地に展開されているので、大都市には意外に多くの斜面があり、われわれは斜面とつきあいながら生活している。したがって、広義の都市機能の維持管理が不適當であると、斜面災害が発生する。都市の斜面災害は、発生する場所によって、開発の前線である外縁部に発生するもの（都市外縁型）と、成熟した内部で発生するもの（都市内部型）に大きく二分することができる（図1）。

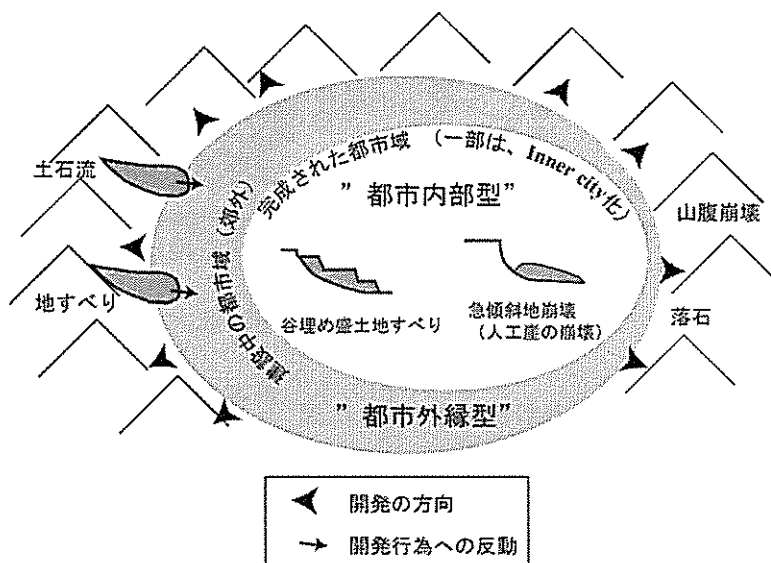


図1 都市の斜面災害

前者は、土砂移動現象（地すべりや土石流など）として山際で発生する災害であり、本質的には山地・丘陵地における自然現象である。一方後者は、いわば都市開発の鬼子として生み出された災害であり、そこには都市における斜面の問題を凝縮された形で見ることができる。

すなわち、都市の斜面災害は自然現象と社会経済現象がクロスオーバーする所に発生する現象であると言える。そこで最初に、都市化と斜面災害の歴史を簡単に振り返ってみたい。

ち”は、この頃には現在まで続く大都市の普遍的な風景である。

2. 2 高度経済成長期以後

都市域で発生する崖崩れが、自然災害として広く認識されるようになったのは、日本では1950年代中頃のことである。それ以前は、大河川の破堤・氾濫というもっと深刻な問題があった上に、中小都市では斜面に接した土地や低湿地などには市街地はあまり広がっていなかった。この崖崩れが拡大した時期は、いわゆる高度経済成長期に当たる。この頃、都

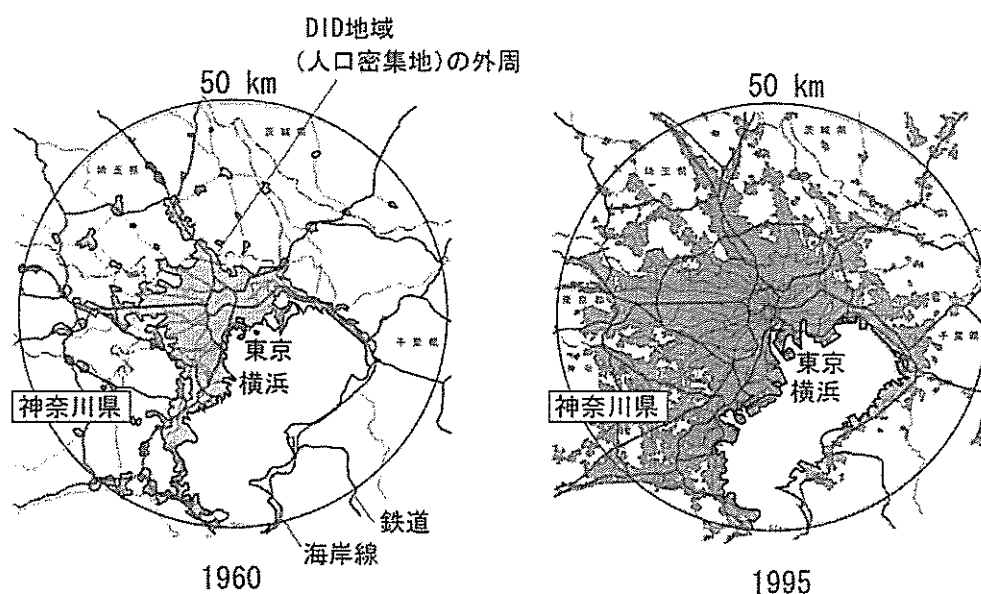


図3 首都圏におけるDID地域の拡大

市では人口の集中による住宅需要の急速な増加、周辺の農村では、里山の荒廃・放置が進んで開発可能な土地が膨大に生み出されていた。すなわち、需要と供給が合致した結果、都市周辺の農村において大規模な開発を行う条件が整った訳である。図3は、1960年と1995年における人口集中域（DID地区：4000人/km²の基本単位区が隣接し、それらの地域の人口が5000人以上である地区）の分布を示している（国土庁、1999）。この図を見れば、この期間、人口集中域（=住宅密集地）が、東京西南部から神奈川県東部の地域で郊外に大きく拡大したことがわかる。この地域では、こうした急速な都市域の拡大とともに、顕著な

斜面災害が頻発した。比較的記録が調っている神奈川県側について見ると、斜面災害の発生件数は、1958年ごろから増加する傾向にあり、1966年6月の台風4号、1974年7月の台風8号によってそれぞれ1000箇所以上の斜面崩壊・崖崩れが発生して大きな災害を引き起こされた。また、1982年9月の台風18号の際には、横浜市だけで470箇所の斜面崩壊・崖崩れが発生している。

こうした都市の膨張と斜面災害の増加がパラレルとなる現象は、他の都市においても認められる。特に、鹿児島市はその顕著な例である。鹿児島市はシラスという崩れやすい非溶結の火砕流堆積物でできた台地（カルデラの内壁）と鹿児島湾との間の狭小な沖積低地上に位置している。平地が狭いため、崖の近くまで家屋が建っており、梅雨や台風の豪雨によって斜面災害が繰り返し発生してきた。このことから、災害の発生には自然条件の影響

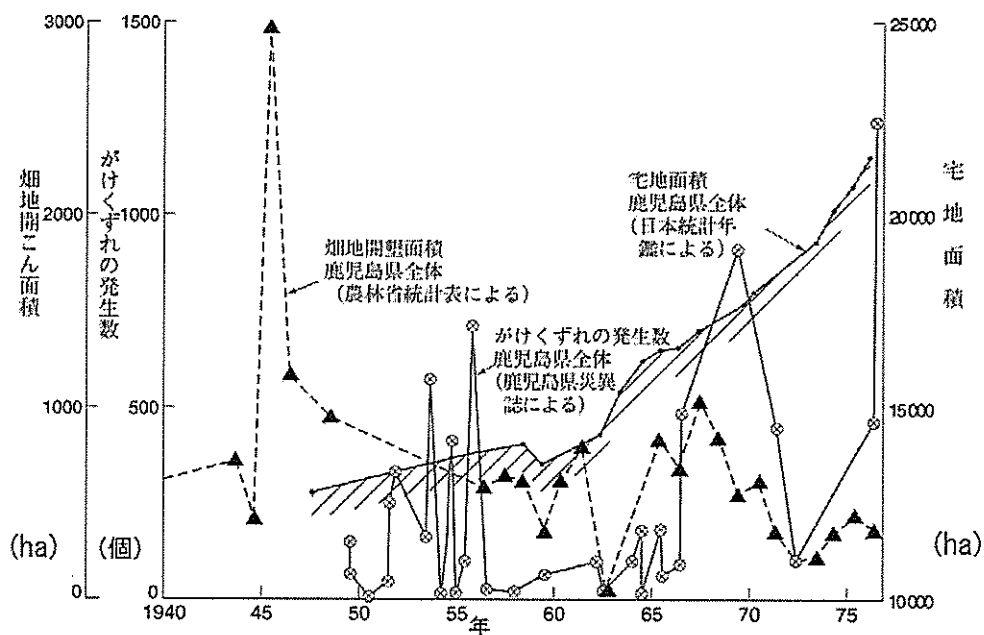


図4 鹿児島市における崖崩れ発生件数・開墾面積・宅地面積の推移(岩松ほか、1982)

が最も支配的であるとも考えられる。しかし、詳しく見ると、鹿児島市におけるシラスの崖崩れ発生件数は、郡部からの人口の流入が顕著になった1965年以降に増加している傾向が認められる(岩松ほか、1982)。すなわち、鹿児島市における斜面災害の増加は、もともと災害の発生しやすい自然条件と都市の発展が不幸にもシンクロナイズした結果であり、

原因としては、脆弱な地盤と気象条件に加え、都市開発の影響を考える必要があると言える。

2.3 ニュータウン開発と斜面災害

都市への人口の集中は、産業構造の変化によって多くの工場労働者やホワイトカラーが必要とされたからである。彼らは1960年代～1970年代には、膨大な数の核家族を誕生させ、いわゆる郊外一戸建て需要の担い手となった。政府も住宅政策によって持ち家を推進しましたが、これには、冷戦構造という国際政治の状況も背景にあった。いわゆる、住宅の55年体制である。アメリカで戦後建設された典型的の中流家庭向けニュータウンとしては、レヴィットタウンが有名であるが、開発者のエイブラム・レヴィットは自分の仕事の意義について、“誰でも自分の土地と家を持てば共産主義者にはならない”と明確に語っている。レヴィットタウンの手法（パッケージ化による住宅の大量生産）は我が国でも盛んに研究・模倣され、一部は東急多摩田園都市の開発に応用されている。



図5 レヴィットタウンの空中写真

レヴィットタウンの様なニュータウンを建設するためには広大な土地が必要であった（図5）。アメリカでは容易でも、我が国ではこれが難問である。しかしちょうどその頃、薪炭から化石燃料への燃料革命、化学肥料への肥料革命および農業の機械化により、弥生時代以来、人為

的持続的に維持されてきた里山の重要性が無くなりつつあった。いわゆる、エネルギー革命である。この結果、単に広い土地でしか無くなった里山に、1970年代以降、多くの郊外型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

良くて眺めの良い環境を作るためには、人工的に広い平坦地を確保する必要があるが、その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(図6)。これは、結果的に膨大なリスクを市街地に発生させた。実際、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が、その後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地震災害が続いている。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年体制の遺産と言えるかも知れない。

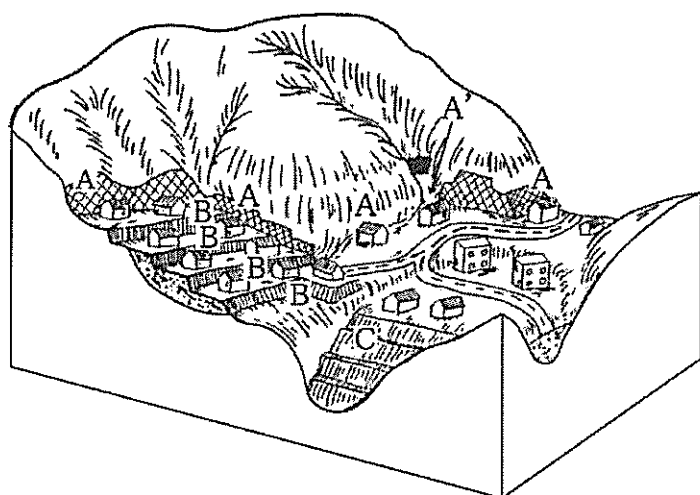


図6 都市における人工斜面(田村, 2005)

3. 郊外の地質と斜面災害 —南関東の事例—

郊外の拡大と共に斜面災害が拡大した原因は、都市開発だけではない。郊外の台地・丘陵地が「新しい=柔らかい=弱い地層」から形成されていたことや、表層に地下水が集まりやすい環境であったことも、大きな原因の一つと思われる。ニュータウンの谷埋め盛土地すべりは、その存在を行政が認識してから日が浅いため詳しい統計が無いが、崖崩れに関

しては多くの資料が蓄積されている。以下では比較的データが揃っている南関東の事例を辿ってみよう。

3. 1 横浜の崖崩れ

既に述べたように、高度経済成長期の横浜では崖崩れが頻発した。図7は、横浜市内で発生した約2000カ所の崩壊事例（位置が明確なもの）を地質別に整理したグラフである。その結果、崖崩れ地点の地層として最も多いのが、上総層群（34%）であり、次いで関東ローム（25%）、相模層群（22%）であることがわかる。台地の崖崩れというと真っ先に関東ロームを連想しがちであるが、意外に他の地層でも崩壊が多数発生していることがわかる。南関東では、崖の下部（土台）を作る上総層群（深海の泥岩）を覆って崖の中腹に相模層群（海進期の砂や泥）、さらにそれを覆って崖の最上部には関東ロームというのが典型的な崖の構成である。したがって、上記の崩壊と地質の関係は、まさに崖の斜面に露出している地層を素直に表現した結果に他ならないと考えることができる。

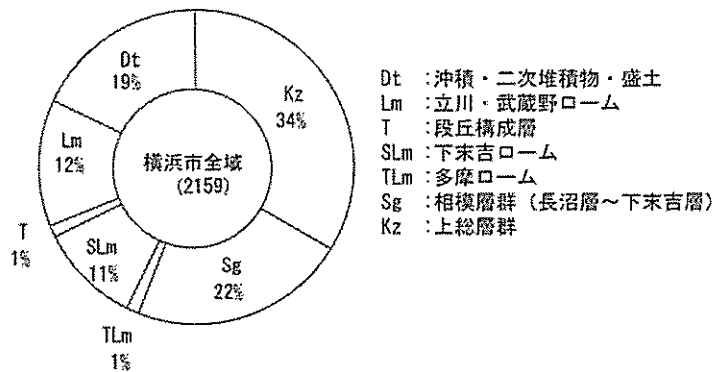


図7 横浜市における崖崩れと地質の関係

関東ロームや相模層群の砂は、手で触っても崩れるほど柔らかいので、崩壊が発生するのは当然であるが、上総層群の泥岩は軟岩とは言え、一応、岩石に分類される地盤である。したがって、崩壊は表面付近の極めて風化した部分

に限られると考えられる。実際に崩壊が多く発生した地層は、中里層や上星川層と呼ばれる塊状泥岩を主体とする地層であった。こうした塊状の泥岩では、風化や応力解放によって崖に平行な分離面が形成される事が多く、豪雨時にそうした軟弱な表層が滑落するため

と考えられる。同様なパターンは、やや遅れて、横須賀市や湘南地域の逗子層分布地域より顕著に再現された。

また、興味深いのは、二次堆積物や盛土の崩壊も多い点で、総数の約2割に達している。関東ロームは、乱されると強度を著しく低下させる性質があるので、斜面上に引っかかっている関東ローム起源の二次堆積物は、最も危険な斜面崩壊予備物質と言える。実際、1966年（昭和41年）6月の台風4号豪雨による横浜の崖崩れ災害（崩壊約600箇所、死者27名）では、崩壊した地層のほとんどが関東ロームや下末吉層（砂層、泥層）起源の二次堆積物であり、関東ロームそのものが崩壊した事例はむしろ少なかったことが報告されている（田中・羽田野、1966）。また、多くの崩壊には、パイピング（地下水の噴き出し）の痕跡が認められ、当然ながら地下水の役割も大きかった事がわかっている。また、この災害では、凹地に人工的に形成された盛土が、多量の地下水とともに滑り出す、“地すべり流動型”とも言うべき現象も認められた。このように、都市の崖崩れ災害では、しばしば二次堆積物や盛土という“尋常でない”地層が“尋常でない”災害の主演となることがある。

3. 2 湘南の変貌 -1970年代～1980年代における鎌倉・逗子・横須賀地域の崖崩れ-

鎌倉・逗子

横浜市周辺にやや（約5年）遅れて、1960年代半ばから湘南の鎌倉市・逗子市の周辺でも斜面崩壊が頻繁に発生するようになった。隣接する横須賀市周辺で崩壊数が急増するのは、まだ少し後なので、ほぼ東京を中心とする同心円の外側に向かって都市開発と災害の波が押し寄せていたことがわかる。しかし、鎌倉市・逗子市は、比較的初期に開発が進んだいわば「山の手の飛び地」だったので、地域的に見ると、災害の年代的な経過は横浜地域と似ている。この地域では、1965年以降、旧市域から外側の丘陵地に向かって斜面災害の発生範囲が拡大し、その傾向は1970年代終わりまで続いた。湘南を歌った加山雄三の曲、”

君といつまでも” がヒットしたのは 1965 年であるが、この頃は、まさに開発のベクトルが鎌倉市の郊外へ向い、郊外で新興の団地が出来ていく時期だった。崩壊の分布図を見ると、新たに建設された道路の切り土斜面が崩壊する例が多かったらしく、道路に沿って分布する崩壊が多いようである。しかし、1980 年代になると、横浜市周辺と同様、斜面災害の郊外への拡大が一段落し、災害は再び旧市街地の内部で多発する様になる。これも横浜と同様、都市の再開発による結果と考えられる。

しかし、この地域で崩壊に関与した地層は、横浜とはかなり異なっていた。関東ロームに関連した崩壊は少なく、鎌倉市では、過去の斜面災害事例の約半数、逗子市では約四分の三が逗子層の分布域で発生している。逗子層は厚い塊状泥岩を主体とする上総層群に属する地層（中新統）で、中里層、上星川層と同じく、風化すると崖に平行な分離面（シートジョイント）が形成され、薄く剥がれやすくなる。こうした斜面で人工的な崖を形成すると、しばしば末端部を切り土することになり、不安定な斜面が形成されて豪雨によって崩壊に至る。こうした災害は、やや遅れて本格化した横須賀市の発展過程においても、より鮮明に認められた。

横須賀

1972 年には田中角栄著「日本列島改造論」がベストセラーとなり、丘陵地・台地の開発は更に加速されたが、さすがに 70 年代の後半になると、横浜や湘南（鎌倉、逗子）等、いわゆる先進開発地域では斜面災害の増加率が鈍って来る。一方、これらの地域と入れ替わるように隣接地域、特に横須賀市における斜面災害が急増した。1974 年（昭和 49 年）7 月、台風 8 号によって刺激された梅雨前線の活動による豪雨（横須賀市で 238mm）により、横須賀市では 1564 カ所の斜面崩壊が発生しました。このうちのかなりの部分が、シートジョイントに支配された逗子層泥岩の表層すべりであった。シートジョイントは、自然に形成される場合もありますが、切り土斜面が風化した場合に典型的に認められる。1987 年の千

葉県東方沖地震の際に発生した上総丘陵の斜面崩壊の中にも、シートジョイントにより地山から分離された泥岩（上総層群上部：下部更新統、逗子層よりも新しい）の崩壊が多く認められた。1974年の横須賀災害では、崩壊の多発地域は主として逗子層の分布域であり、同時に横須賀湾に近い都市地域に重なっている。これは、自然条件（シートジョイント）と、軍港以来の歴史を持ち、集約的な土地利用が行われた横須賀市の社会条件（住宅の密集）が重なった結果であるとも考えられる。

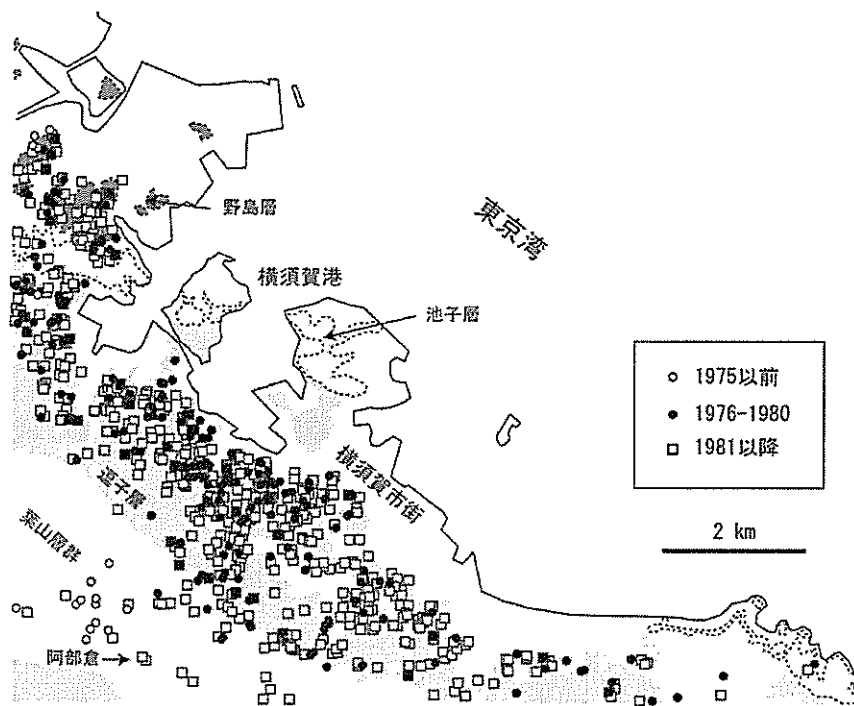


図 8 横須賀市における斜面崩壊の分布

4. 地下水環境から見た都市の斜面災害

都市化という現象を“水の流れ”から見ると、人工構造物による被覆や表層地盤の転圧（堅く締め固めること）によって“不浸透域が増大する現象”であるということになる。自然の丘陵地が宅地化（都市化）されると、不浸透域に降った雨のほぼ全量が都市斜面を流れて排水路に流れ込み、洪水流量が増大する。つまり、洪水が発生しやすくなる。こう

したタイプの洪水（内水氾濫）は、1970年代以降しばしば発生し、やがて“都市型洪水”

とも呼ばれるようになった。したがって、表面水につ

いて見ると、都市斜面はただの通り道に過ぎなくなっ

た。しかし、豪雨の際には、一度に大量の表面水が斜

面を流れることから、何らかの原因（例えば、道路の

老朽化による亀裂）で急激な浸透が発生すれば、災害

に直結することになる。図9は、平成14年8月10日

に呉市で発生した災害のメカニズムである。擁壁の裏

側に埋め込まれた以前の路盤がキャップとなり、浸透

した表面水が被圧水化して擁壁を押し出した事が、災

害の原因と考えられる。

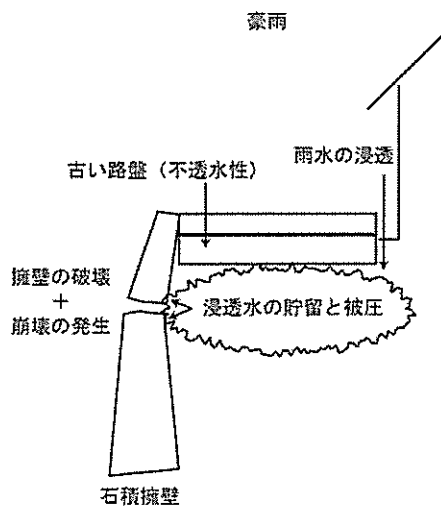


図9 都市斜面における豪雨災害の例（呉）

都市化以前の郊外では、崖からの湧水を集めて流れている中小河川が数多く存在した。例

えば、東京の武蔵野台地を刻む野川はその代表的な例である。野川の周辺では、“ハケ”と

呼ばれる崖下の湧水地を中心に独特の文化と環境が育まれていた。また、大阪でも天王寺

七坂と呼ばれる上町台地西縁の崖に湧水が点在し、江

戸時代には貴重な水源として使われていた。現在でも、

四天王寺境内の亀井や新清水寺の玉出の滝（大阪市内

唯一の滝、写真1）にその名残を見ることができる。

一般に地下水は帯水層中をゆっくりと流れています

が、その中でも局所的に流れやすい“水みち”と呼ば

れる小さな経路があると言われている。したがって、

崖の湧水点は“水みち”の露頭と考えられるのである。

水みちは、井戸や樹木（雑木林）によって強制的に汲

み上げられることによっても成長し、維持される。また、

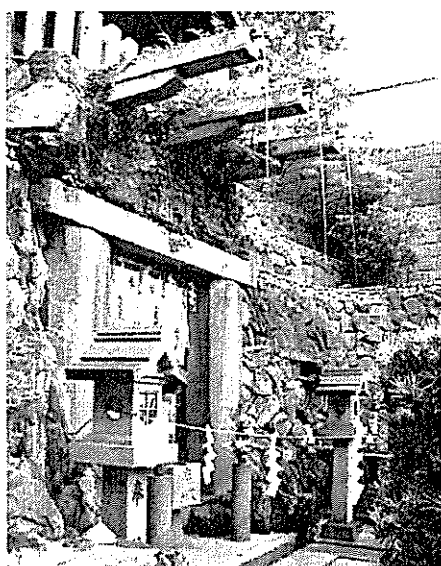


写真1 玉出の滝

豪雨の際には、地下水の地上への出口となり、その過程で斜面崩壊を発生させることもある。都市化以前の生活とは、そうした水みち（地下水）の影響下での暮らしでもあった。

しかし、近代化（都市化）によって、地表が改変され、井戸が使用されなくなると、水みちが破壊されて湧水も減少していった。不浸透域の拡大によって、雨水の地下浸透が大幅に減少したことも重要な原因のひとつである。横浜北部（青葉区、緑区、都筑区、港北区）では、1983年に確認されていた湧水187箇所が、わずか9年後の1992年には約半数に減少したという記録もある²⁾。また、地下構造物の増加もその傾向に拍車をかけた。前述の大阪天王寺の湧水群も地下鉄谷町線の建設によってほとんどが無くなってしまった。地下水の水質汚染も深刻であり、湧水に象徴される都市の地下水文化と環境は危機的な状況にあると言える。

このように都市化によって、われわれを取り巻く地下水環境は悪化したが、地下水そのものが無くなる事は無い。地上で見えなくなった地下水（湧水）は、地下の下水道や地下鉄、地下街に流れ込んでいると考えられる。その結果、地下水位を上昇させ、浮力で地下駅が変形するなど、地下構造物にも予想外の悪影響が発生している。

一方、斜面の造成地の地下には水道管と下水管が網の目の様に埋まっており、人工の涵養源と排水路を利用した地下水系が出来上がっている。特に、谷埋め盛土を建設すると、周囲よりも水位を低下させていた谷が消滅するため、地下水位が上昇する傾向が見られる。もちろん、下水管による排水が行われるが、谷埋め盛土自体が広域の地下水流動系に対する強力な集・排水システムなので、通常の排水計画では不十分な場合もありえる。更に、水道の本管は多くは元の谷筋に沿って埋設されており、地盤も悪いことから、水道からの漏水量は、通常の場合に比べて多いと思われる。そうしたわけで、現実の古い谷埋め盛土では、盛土内部の浅い位置に地下水位が形成されている事が普通である。地震時には谷埋め盛土が滑って災害を引き起こすことが頻繁に発生するが、その主要な原因のひとつは、盛土内部に地下水が溜まりやすいことだと思われる。

5. 斜面災害が発生する場所 -都市内部型の場合-

郊外の拡大に伴って増加した崖崩れには、都市の外縁部での現象が相当数含まれていたと考えられる。それ故、地質等の自然条件との関連が明確であった。しかし、最近の数回の地震では、完成された都市域の内部において主に人工の造成地盤に関連した斜面災害が発生している。これらは、純粹に都市の産物と言えるかも知れない。具体的には、谷埋め盛土における地すべりの変動と崖っぷちにおける崩壊である。

谷埋め盛土の地すべりは、1978年宮城県沖地震をきっかけに広く知られるようになった。1995年兵庫県南部地震では、平野部の激しい被害の前に震んでしまった感もあるが、台地・丘陵地の住宅地では谷埋め盛土に関連した災害が多く発生した。そのうち、仁川と宝塚の2箇所では崩壊土砂が流動化し、仁川では死傷者が出た。しかし、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。個々の地点の被害は比較的軽微であったが、地域全体では相当な数の住宅とライフラインが破壊されたため、地震後の生活復興に重大な支障が生じた。実際、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いけれども、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。

谷埋め盛土地すべりは、西宮市から神戸市にかけての地域に最も濃い密度で発生した。この地域はわが国では最も早い時期に開発された郊外で、第二次世界大戦以前からモダニズム文化が花開いた場所でもある。例えば、西宮市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（図10）。すなわち、開発の初期段階では、沖積低

地に続く谷の内部（谷床）は宅地に転用されることはなかった。しかし、この地域がいわゆる高級住宅地になるとともに、上記の様な悪条件の場所にも住宅（谷埋め盛土）が進入し、結局最後には、そうした場所が選択的に被災した。

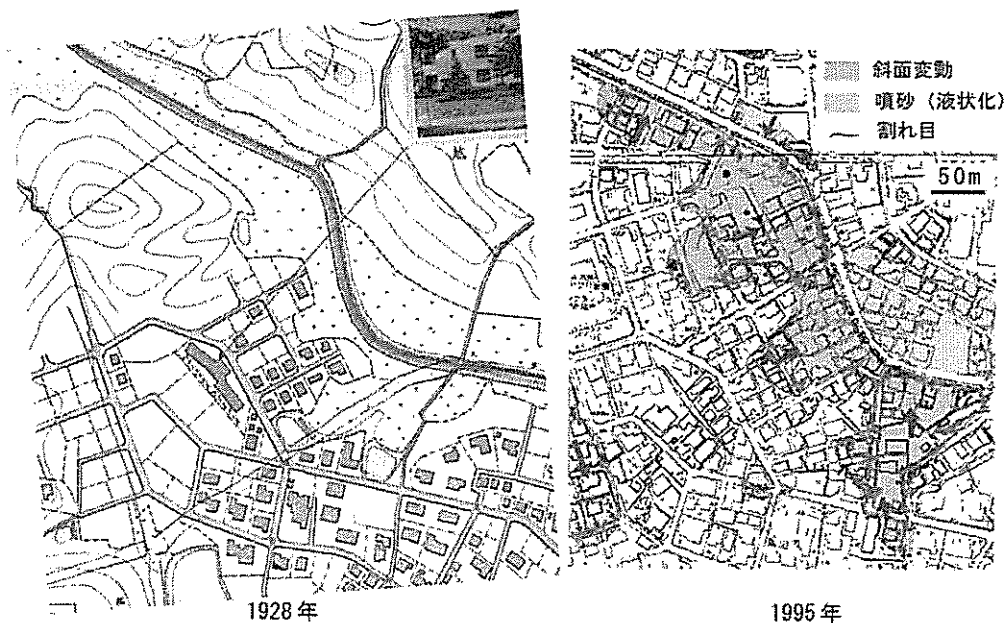


図 10 夙川の開発と兵庫県南部地震による被災範囲

2004年4月2日、東京の西品川において、小規模な斜面崩壊が発生した（写真2）。直接の原因は建設工事の僅かな震動であったので特殊な問題として処理されたが、周辺地域には同様な危険な斜面が存在し、やや強い震動があれば広範囲に崩壊が発生する可能性がある。この地域は、目黒川河岸の斜面に当たるが、斜面保護施設が老朽化し、限界状態（バランス状態）にある斜面の上に住宅が密集する典型的な“崖っぷち”が形成されている。この崖っぷちには、台地の主要帯水層である武蔵野礫層が斜面に露出しているため、斜面下部の堆積物や盛土の中には地下水が豊富に含まれている。実際に、JR 大崎駅前の駐輪場の崖では、地下水が恒常的に湧出している状況が観察される。また、目黒川では他の関東平野を流れる中小河川と同様、後氷期におけるソリフラクションの影響で兩岸の斜面の傾斜が著しく異なるため、兩岸で異なるタイプの“崖っぷち”が成立している。すなわち、“崖っぷち”の災害は、人工地形改変と自然条件の両方の側面を持った典型的な都市型斜面災害であると言える。



写真 2 西品川の斜面崩壊

都市の“崖っぶち”は、1950年代には豪雨による斜面災害の舞台であったが、地震による被災例はあまり多く無い。2002年芸予地震による呉市中心部や2004年新潟中越地震による長岡市郊外の事例が知られているが、1997年兵庫県南部地震ではあまり発生しなかった。これは、阪神間の“崖っぶち”の多くに急傾斜地対策事業に

よる立派な斜面保護施設が建設されていたためであると考えられる。しかし、東京や大阪ではこうした事業の対象から外れた危険な古い“崖っぶち”が多数残されていると考えられ、次の地震ではこうした場所で広範囲に災害が発生する可能性がある。

それでは、谷埋め盛土と“崖っぶち”で予想される災害とは具体的にはどのようなものだろうか？ 次に、個別の問題について詳しく見てみよう。

II. 谷埋め盛土地すべりの実態とメカニズム

1. 実態

災害を減らすためには、その実態の解明が最初になされる必要があるが、頻繁に発生している割には具体的なデータは意外に少ないのが現状である。今後は組織的にデータの収集を行う必要がある。

『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調べてみると、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ので、谷埋め盛土が占める面積の大きいことがわかる（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

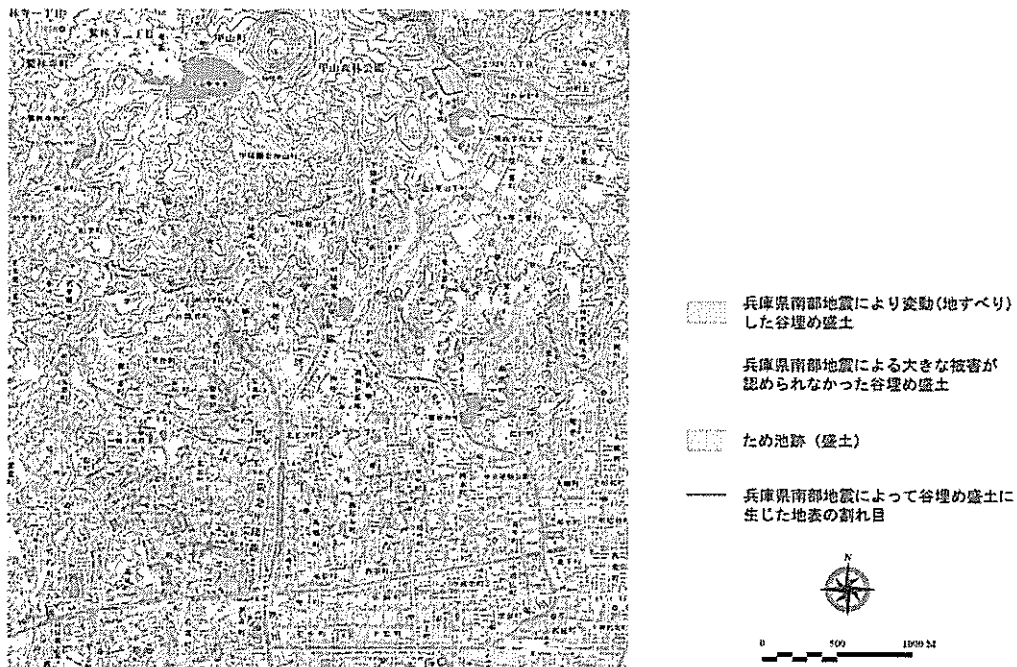


図 11 兵庫県南部地震による谷埋め盛土地すべりの分布(西宮)

あった(図11)。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)。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

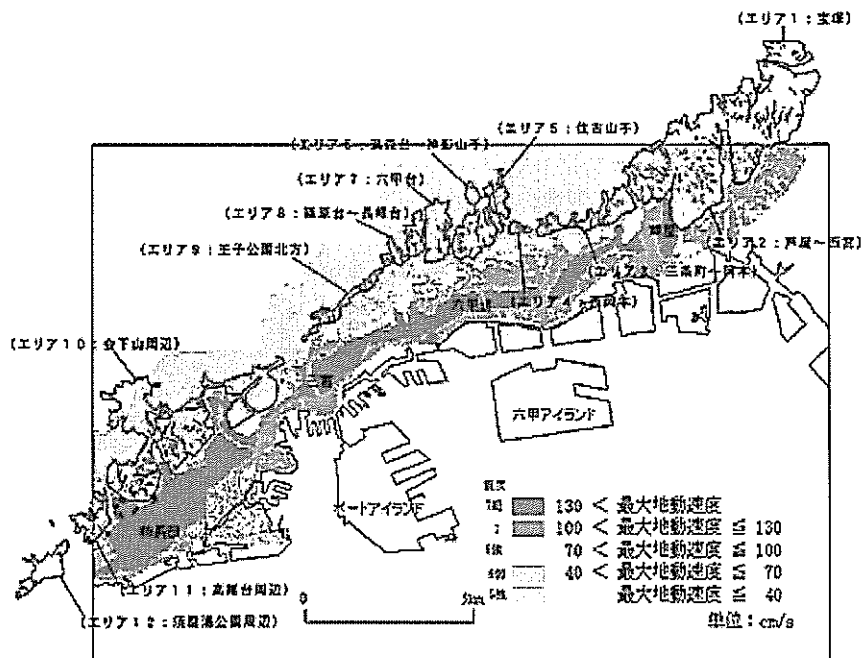


図 12 兵庫県南部地震による谷埋め盛土地すべりと震度の分布

付近から顕著になってくる災害であると言える（図12）。

『谷埋め盛土の形状』

谷埋め盛土地すべりを調査してみると、意外にその形状が被害の有無に影響を与えていることがわかってきた。

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。

長さ

谷埋め盛土のすべりの場合、変動ユニットが比較的明確に認められるので、長さを定義することが可能である。兵庫県南部地震における谷埋め盛土すべりでは、最頻値は長さ 50～150mであった。しかし、一個の谷埋め盛土は変動ユニットよりも長いので、変動しなかった谷埋め盛土については長さを定義することが困難である。したがって、谷埋め盛土の長さは、変動を判別する際の有効なパラメーターとする事は難しい。

体積（面積）

体積及び面積は、盛土の質量を規定し、慣性力に関連すると考えられる。したがって、谷埋め盛土の変動（運動）を規定する重要なパラメーターであると考えられるが、盛土の長さと同様、非変動群のパラメーターの推定において、確実性に乏しいのが現状である。

しかし、兵庫県南部地震における変動群においては、明瞭な傾向があり、大部分が面積 10000 m²以下、体積で 50000m³以下でした。すなわち、地すべりとしては、比較的小規模な変動ユニットが多かったと言える。

厚さ

宮城県沖地震では、盛土の厚さ（深さ）が、造成地における家屋の被害率に影響を与えた。すなわち、主として 1970 年代後半以降の大規模造成地では、盛土厚が 5m よりも浅い

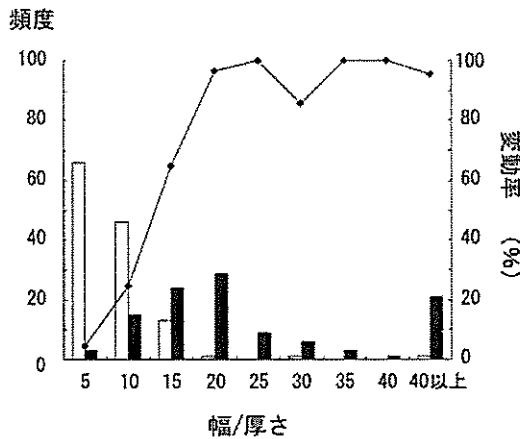
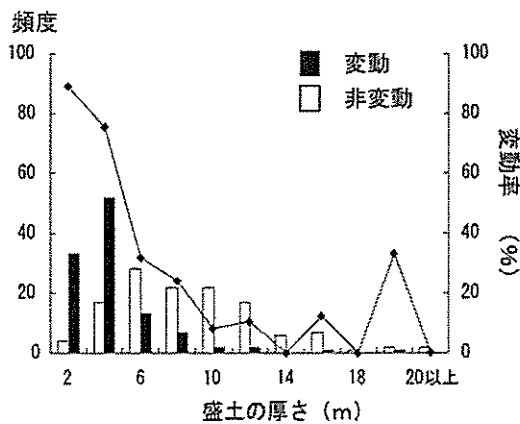


図 13 盛土被災率と厚さ、幅・厚さ比

部分で被害が発生した（浅田、1994）。被害が発生した部分は、主として切り土盛土の境界部分であったので、両者の震動モードも違いが被害の発生をもたらした事は否定できない。一方、粗放的なミニ開発が多かった小規模造成地の場合は、盛土が厚いほど被害の発生率が増加する傾向が見られた。一方、兵庫県南部地震では、変動しなかった谷埋め盛土において、厚さの最頻値が 3～6m であるのに対し、変動した盛土においては、盛土厚が薄いほど変動しやすく、最頻値は 0～3m であった（図 13）。阪神地域の古い盛土は大部分が、浅田の分類による小規模造成地に該当する。したがって、変動の発生し易さに及ぼす厚さの影響は、宮城県沖地震と兵庫県南部地震とでは傾向が逆である。これは、両地域における盛土の材料に大きな違いがあるためと考えられる。

すなわち、仙台市における盛土の材料である軟岩（新第三系の泥岩、砂岩、凝灰岩）は、スレーキング（乾湿繰り返しによる分解、細粒化、粘土化）しやすい物質であり、こうし

た材料で構築された盛土は、造成後、通常とは逆に強度を低下させる場合がある。宮城県沖地震における谷埋め盛土の被災率が、年代が古くなるにつれて顕著に大きくなる傾向は、こうした盛土材料の性質を反映している可能性があると思われる。これに対し、阪神地域における盛土材料は、マサ土と大阪層群の砂質土が主体となっており、マサ土は、花崗岩の風化土であり、粘土分を多く含む場合もあるが、砂質土としての性質を示す場合が多い材料である。こうした材料では、動的特性（液状化特性）や液状化後のすべり易さ（再凝固特性）等が変動に直接影響を与えると考えられ、上記の盛土の厚さと変動割合（被害率）の傾向の相違は、材料の違いを反映した、変動メカニズムの相違に起因している可能性がある。

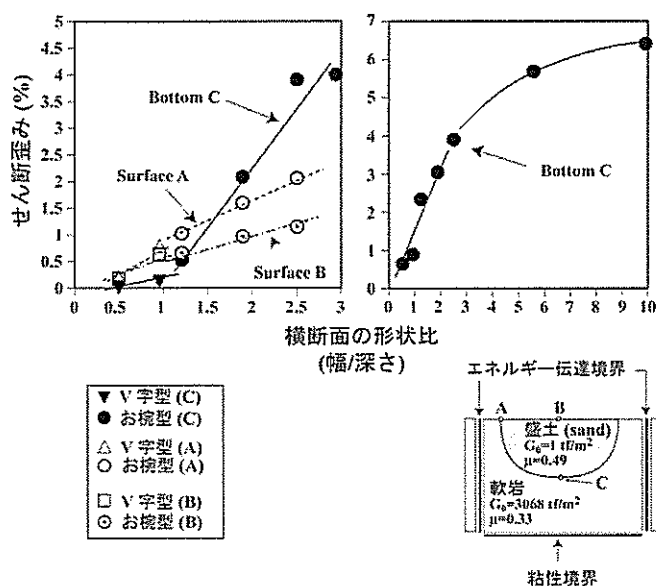
底面の横断形状

兵庫県南部地震では、神戸市西岡本等、比較的大きな強度(N 値 10~15)を持った盛土にもかかわらず、地震時に大きく変動したケースが見られた。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と思われる。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ところ、幅/深さ比は災害の発生の有無に大きな影響を与えていることがわかった(図 13)。このことは様々な具体的事例によっても裏付けられる。例えば、神戸市森北町や芦屋市三条町の谷埋め盛土は大きく変動したが、隣接する神戸市甲南台の谷埋め盛土には変動が認められなかった。両者の地盤強度には大きな差は無く、様々な要因のうち盛土底面の形状に本質的な相違が認められる。すなわち、変動した神戸市市森北町や芦屋市三条町の盛土では、横断形状がお椀型であったのに対し、甲南台の盛土底面の形状はV字型であった。この事から、変動の有無には、側面の拘束や摩擦の影響が大きいことが予想される。

こうした、横断形状、特に縦横比が変動しやすさに及ぼす影響は、簡単な地震応答解析

(FLUSH)によっても確認することができる(図14)。すなわち、谷埋め盛土横断面における縦横比と谷埋め盛土底面及び地表面(谷埋め盛土中央と側部)におけるせん断歪みの関係から以下の事柄が判明している。

- (1) せん断歪みは、縦横比の影響を強く受ける。幅/深さ比が大きいほど、すなわち幅が深さに比べて広い形ほど、せん断歪みが増加する。
- (2) 底面の歪みは、幅/深さ比が1.2の付近から急増し、幅/深さ比が1.5以上では、底面の歪みが表面の歪みを上回っている。
- (3) 地表部では、側部の歪みが中央部の歪みを上回っている。



すなわち、お椀型の横断面形状の盛土ほど、発生するせん断ひずみが大きく、底面で破壊が起きやすく、変動が大規模になりやすいことがわかる。森北町と甲南台の谷埋め盛土に見られた変動規模の相違は、こうした谷埋め盛土形状の効果によって説明することができる。

図14 地震応答解析の結果

底面勾配

谷埋め盛土の底面勾配が、比較的(盛土としては)急な場合、盛土の変動が全般的な崩壊現象に発展することがある。兵庫県南部地震における西宮市仁川の地すべり(高速流動性崩壊)が、この実例である。谷埋め盛土の底面勾配は、盛土の部位によって著しく異なり、一般に頭部や側部では高角であるし、末端部では緩いのが普通である。そこで、盛土の中央部において最深部を通る縦断勾配を、谷埋め盛土の平均谷底傾斜と定義した。この

定義による谷埋め盛土の底面勾配（平均谷底傾斜）は、盛土形成以前に存在した谷底の勾配に他ならない。

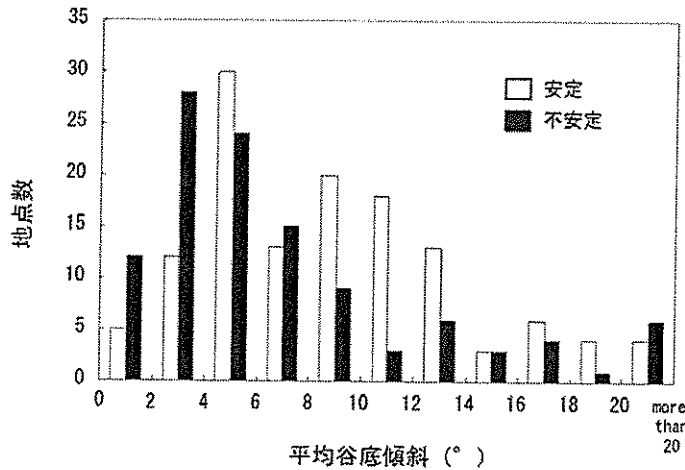


図 15 盛土被災率と谷底傾斜

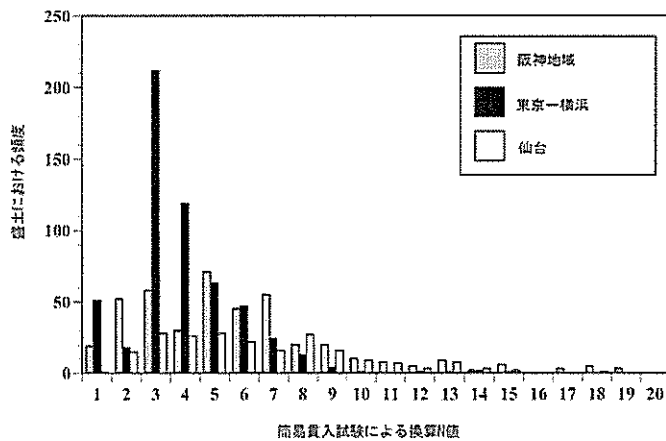
兵庫県南部地震において、平均谷底傾斜の頻度分布をみると、変動した事例と変動しなかった事例では最頻値が異なる。変動した事例の平均谷底傾斜は、変動しなかった事例に比べ、より低角側の頻度が大きいという特徴がある（図 15）。区分毎に変動した事例数を全数で

除した値（変動割合）を見ても、その大きさは平均谷底傾斜が 20° 以下の領域では、角度の増加と共にほぼ一様に低下する。すなわち、平均谷底傾斜が緩い盛土ほど、変動した割合が高かったことになるが、これは物理法則に反する。恐らく、谷底の傾斜が他の要因、特に地形・地質的要因に影響されていることを反映していると考えられる。このことは、谷埋め盛土の地すべりを説明する場合、通常の二次元縦断面だけでの議論では不十分であることを示していると考えられる。

『盛土長軸の方向』

谷埋め盛土の変動が、主として地震によって発生する以上、震動の方向と変動の有無は関連すると考えられる。谷埋め盛土は、一般に長軸方向（盛土形成以前の谷の方向）に移動するので、震動の卓越する向きが長軸方向と一致した場合、変動する割合が大きくなるはずである。しかし、兵庫県南部地震の事例では、北に六甲山、南に海岸線がある関係で、そもそも南向きの谷を埋めた事例が全体の約 70%と極端に多く、他の方向に長軸を持つ盛

土が少ない事が特徴である。つまり、変動の割合と盛土長軸方向の関係は不明瞭になりやすいと言える。ただし、北を 0° として4象限に区分した場合、変動した盛土の数では、第3象限 ($135^\circ - 225^\circ$) が約66%を占め、最も多くなる。逆に変動した割合で見ると、第1象限 ($-45^\circ - 45^\circ$) に属する盛土が、60%を占めて最も多くなる。ただし、第1象限のデータ数は少なく、わずか5例に過ぎないため、注意が必要である。阪神地域では、兵庫県南部地震の卓越震動方向は、地下の断層に直交する方向、すなわち、ほぼ北北東-南南西と考えられるので、南北に長軸を持つ谷埋め盛土が変動した傾向は、事前の予想と一致している。



『盛土の強度』

1978年の宮城県沖地震の直後、変動した谷埋め盛土の地盤調査が行われ、N値が測定されている(浅田、1994)。その頻度分布を見ると、多くの地点でN値の最頻値は10以下であり、特に1950年代後半-1960年代にかけて造成された地区の盛土の強度は低く、最頻値が2-3と極めて軟弱な地盤であったことがわかっている。ワーカビリティの点からは、むしろこうした極めて低いN値の盛土を造成することの方が難

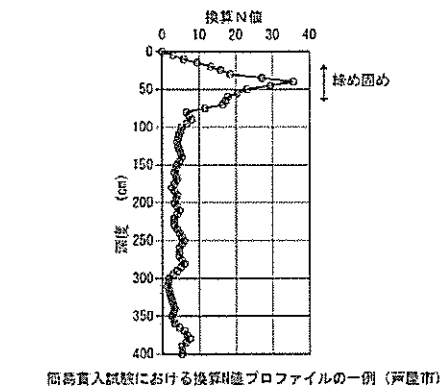


図 16 盛土の強度分布

しいので、多分もともとの(造成直後の)地盤強度は調査時点よりも高く、盛土材(軟岩の岩塊)の地下でのスレーキングの結果、造成後に現在の強度にまで低下したと考えられ

る（浅田、1994）。また、1970年代に作られた盛土は、最頻値が6-9とやや締まってはいるが、軟弱な地盤であることには変わりがない。したがって、こうした盛土の軟弱さが、被害の原因であったことは容易に推測される。しかし、被害の無かった盛土については詳細な調査が行われていないので、谷埋め盛土の変動に及ぼす地盤強度の影響については十分な検討が行われていなかった。

そこで、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16）。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。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、中一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多く見られた。
- (3) 結局、地震時に移動した谷埋め盛土と移動しなかった盛土間の強度に、有意な相違は認められなかった。
- (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ました。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。

一方、阪神地区の谷埋め盛土について高精度表面波探査を行い、二次元のS波速度断面構造を検討した。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波速度を求めてヒストグラムを作成し、最頻値をその盛土のS波速度の代表値とした。これと兵庫県南部地震における変動・非変動事例の関係を調べた所、通常のVsの範囲では有意な相関は認められ無かった(図17)。N値分布と同様の傾向である。

以上の事実から、宅地造成地の谷埋め盛土の品質は、地域を問わず劣悪である場合が多いことがわかる。もちろん、変形の大きさに盛土の品質が影響していたことは否定でき無いが、変動の有無を左右するほどの本質的要因では無いと思われる。

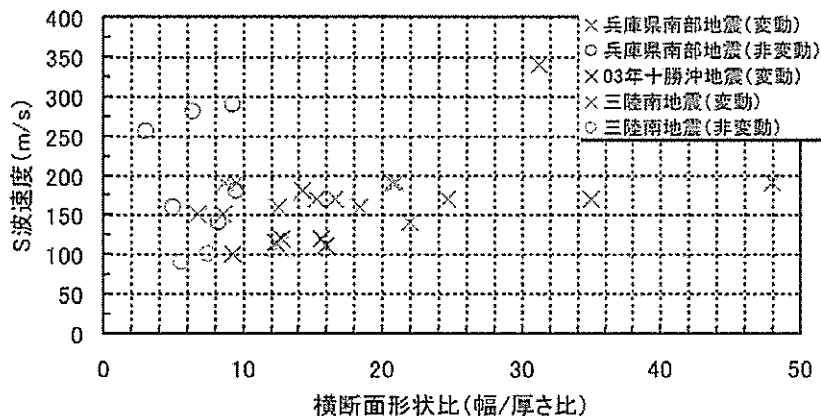


図 17 盛土のS波速度と横断面形状比の関係

『地下水』

地下水流動系と盛土内部の地下水

盛土内の地下水の存在は不安定化の原因となるので、通常は構築時に暗渠等が設置され、人工的な地下水排除が計画される。しかし多くの場合、その排水能力は不足し、盛土の内部に地下水が貯留される事になっているようである。宮城県沖地震後の調査では、多くの

変動した盛土において、浅い位置に地下水位が確認され、しばしば復旧工事の一環として、地下水排除工が行われた。谷埋め盛土内部に貯留する地下水の涵養源としては、住宅の庭からの雨水の浸透、上下水道管からの漏水等、旧谷壁からの自然湧水等が考えられる。このうち、最後の自然湧水は重要である。一般に人工地形改変による谷埋めを行うと、水位ポテンシャルの制限床となっていた谷が消滅するため、地下水位は広域的な地下水流動の影響によって、谷が形成される以前のレベルに回復しようとする。このプロセスが順調に行われると、地表から浅い深度に地下水面が観察されることになる。さらに、盛土材の透水係数は、地山よりも大きい場合が多いので、谷埋め盛土は広域的な地下水流動系の中で、“水みち”の役割を果たすようになり、地下水を集めることになる。こうした“水みち”の周辺では、何らかの理由によって地下水の流速が早くなると、細粒分の溶脱が起きることがある。盛土構築後、相当長期間経っているにも関わらず、盛土の沈下が発生することがあるのは、このためであると考えられる。

兵庫県南部地震においても、変動した谷埋め盛土を調査すると、しばしば浅い位置に地下水位が確認された。これらの地下水位は地表面か約1～7mと浅く、地下水位の存在が確認された盛土の分布は、ほぼ大阪層群の砂層・礫層の分布域に一致していた。これらの更新統（大阪層群）の砂層・礫層は、この地域における浅い地下水の主要な帯水層であるので、地下水は、盛土形成以前の旧谷筋に存在する湧水点から涵養される割合が多いと推測される。また、谷埋め盛土の形成以前に、溜め池であった所が変動した場合が多く認められた。溜め池は、谷の出口を締め切って作られたものが多く、やはり谷の中の湧水によって涵養されていた場合が多かったと考えられる。

地下水位と平均谷底傾斜

谷底の傾斜は地下水位を規定する要因でもあるので、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が、阪神地

域、東京西南部・横浜、仙台の谷埋め盛土 2 2 例では実際にそうした傾向が確認されている (図 18)。

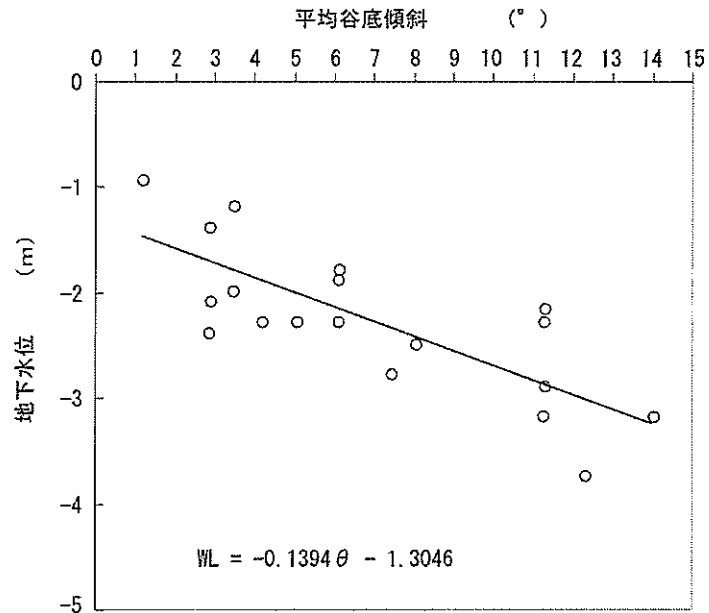


図 18 谷埋め盛土の地下水位と谷底傾斜の関係

2. 谷埋め盛土地すべりのメカニズム

盛土上の地震動と間隙水圧

谷埋め盛土の変動が、“すべり”なのか、単なる“塑性変形”なのかは難しい問題である。恐らくその両者である可能性が高いと思われるが、盛土の底面に極めて軟弱な薄層が存在すること、盛土の上部は比較的締まっていて堅いこと、側部や頭部に明瞭なずれが見られること、変位量が数mと大きい場合が多いこと等から、“すべり”の要素が大きいと考えた方が良い。しかし、どちらにしる、既に述べた様な盛土の形状と変動の有無の関係から、この現象が谷埋め盛土の三次元構造に強く支配されていることは、ほぼ間違いが無いこと

であると思われる。

谷埋め盛土の底部に存在する飽和した軟弱な薄層は、地震時には真っ先に破壊すると考えられるので、有力な“すべり面”の候補である。この部分を含んで盛土の下部は地下水で飽和している場合が多く、地震時には間隙水圧の上昇による急速な破壊が発生する可能性が考えられる。盛土の厚さが薄い場合には、部分的に液状化する可能性もある。この点をデータに基づいて議論するためには、実際の盛土上の地震動と間隙水圧の変動を観測する必要がある。しかし、宅地盛土の地震応答、間隙水圧応答の観測事例は極めてまれである。地盤の非線形応答に至る強震事例そのものが数十年に1回という事象であると同時に、山の手の造成地には強震計及び間隙水圧計がほとんど設置されていないためである。そこで、2005年2月以降、東京都南部に観測点を設置し、首都圏中心部の関東ローム台地において、強震動と間隙水圧の連続観測を行っている(現在も継続中)。

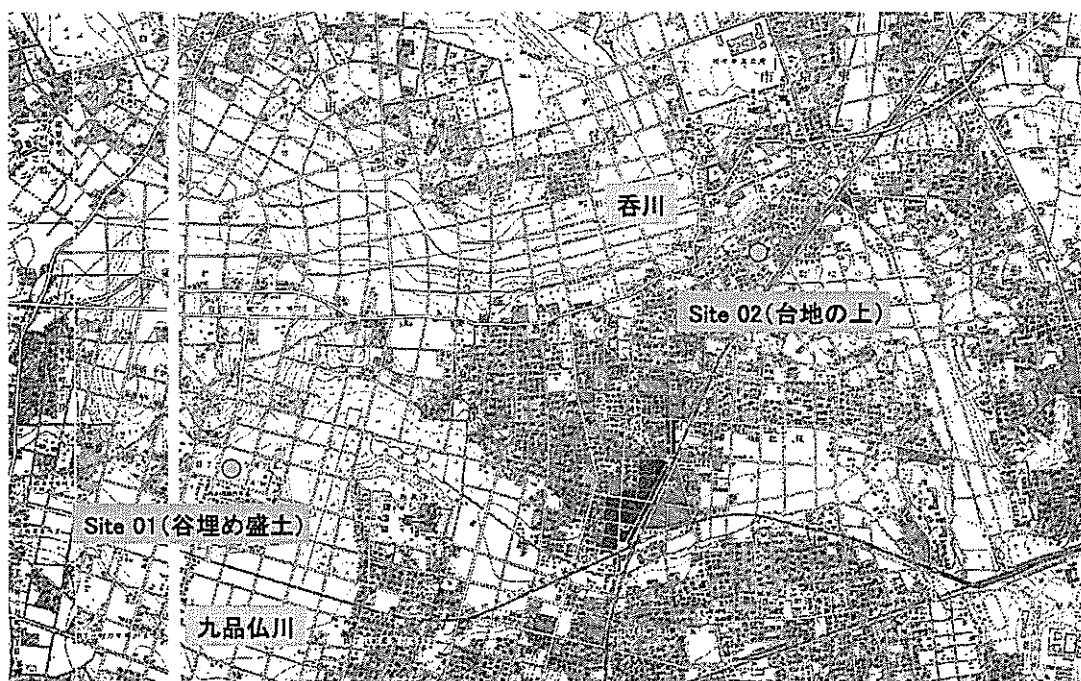


図 19 東京西南部の谷埋め盛土における強震動観測点

観測点は、東京都南部の目黒区中根 (Site02:強震動) と世田谷区等々力 (Site01:強震

動、間隙水圧) である(図 19)。両観測点間の距離は約 2km と近く、地震動の震源からの距離減衰はほぼ無視できる。中根観測点は標高約 35m の武蔵野台地上、等々力観測点は中根観測点から続く武蔵野台地に付属する谷埋め盛土上に位置する。等々力観測点は地表から約 9m まで軟弱な盛土及び自然谷埋め堆積物であり、旧谷底には武蔵野礫層が確認されている。地下水位は地表面下約 3m である。

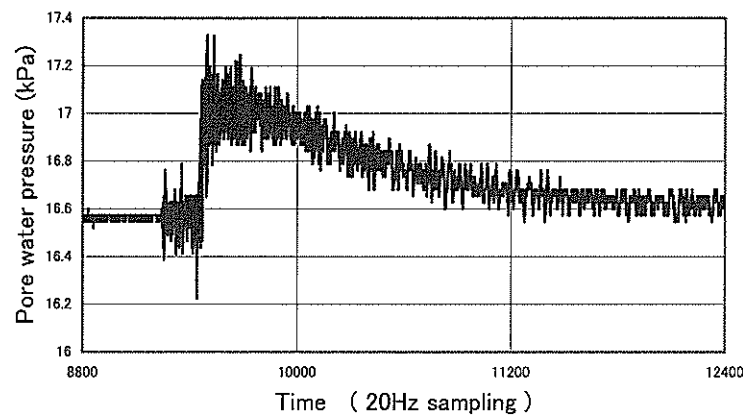


図 20 千葉県北西部地震による間隙水圧応答

研究期間中の最大の強震動は 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、中根観測点で 104cm/s/s、等々力観測点で 57cm/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 20)。これは、間隙水圧応答が弾性レベルに止まっていた比較的小さい地震 (例えば、2005 年 2 月 16 日の地震、2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震) 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事と対照的である。

千葉県北西部地震における応答を詳しく検討するため、FLUSH による地震応答解析を行った (図 21)。弾性パラメータ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 依存性は土研式を参考に求めた。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。

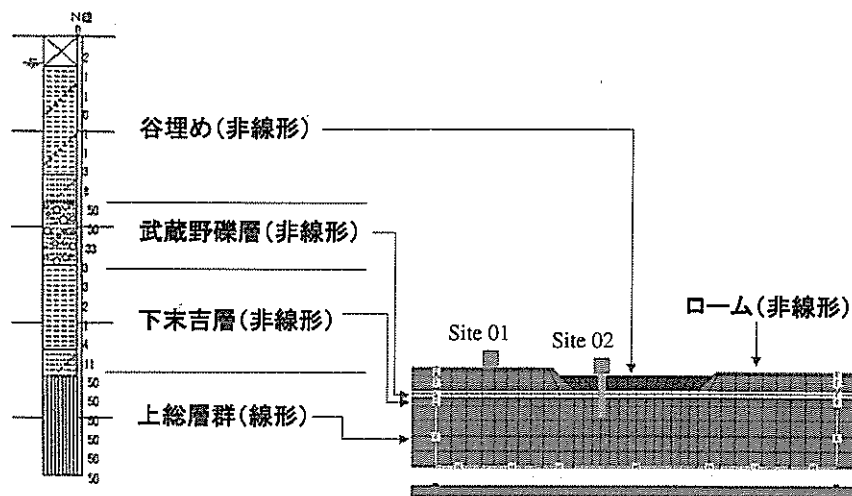


図 21 応答解析のモデル

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(図 22)。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。すなわち、大規模な地震においては谷埋め盛土での地震動はむしろ減衰し、底面付近での間隙水圧は急速に上昇して破壊に至ると予想される。今回及び既往の研究による間隙水圧の上昇量と地動速度の関係を基に試算した結果では、盛土の厚さが 4m 、地下水位が地表面下 2m の場合、 $15\sim 28\text{cm/s}$ 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(図 23)。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と考えらる。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。すなわち、観測と解析の結果は、谷埋め盛土の変動現象が盛土全体の“すべり”であるとする説を支持し、単純な塑性変形とする仮説にとっては都合が悪い結果となっている。

また、非線形応答すなわち盛土における減衰の影響が大きい事は、現実には正確な把握が

難しい減衰率 η の歪み γ 依存性が、結果に大きな影響を及ぼすことを示唆する結果である。すなわち、谷埋め盛土の被害予測を FEM 変形解析で行うには、相当綿密な現地試験・サンプリングと室内試験を行う必要がある点に留意すると共に、実際の観測例を増やして不確実性を減らす努力が必要である。

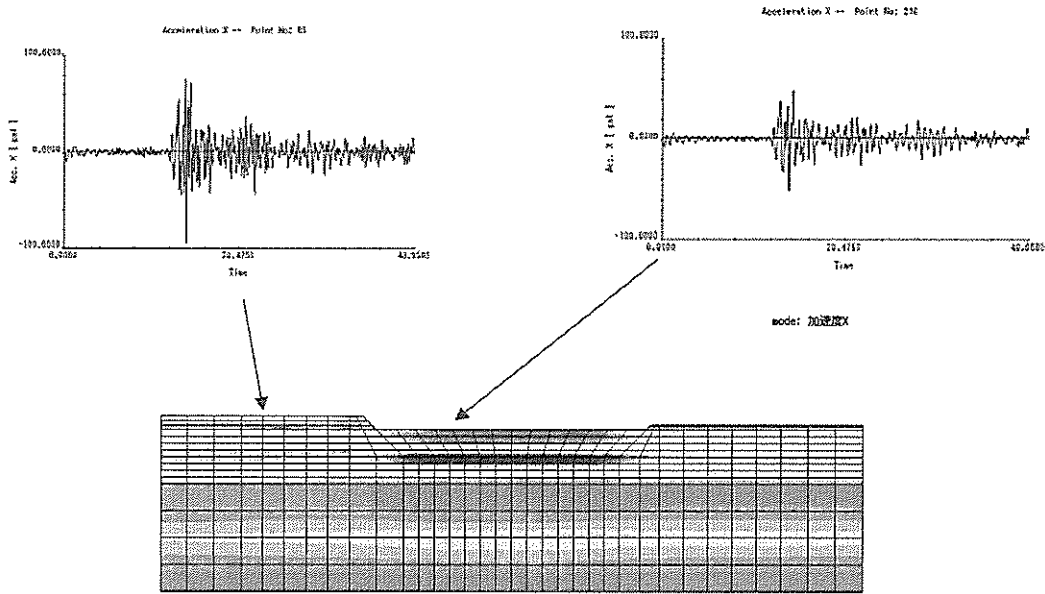


図 22 応答解析の結果

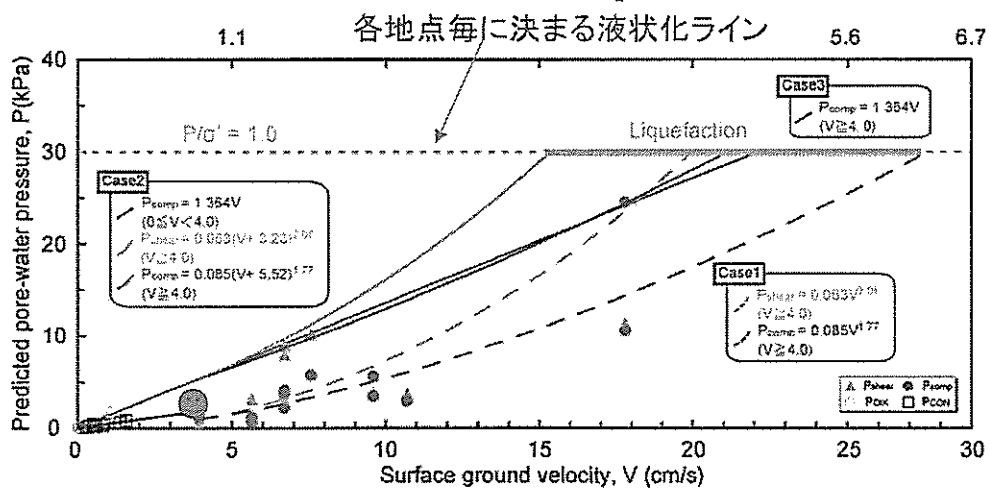


図 23 地動速度と間隙水圧の上昇量 (郷, 2005 を修正加筆)

ローラースライダーモデル

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入り交じって分布していた。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には三次元効果により変動を抑制するメカニズムが強く働いたとする立場（三次元効果説）である。これまでのわれわれの調査では、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。むしろ、盛土の強度は変動例と非変動例で違いが見られなかった。この事から、後者の立場での説明を試みてみたい。

簡単のために、谷埋め盛土の変動を“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、“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。遊園地の滑り台がヒントにな

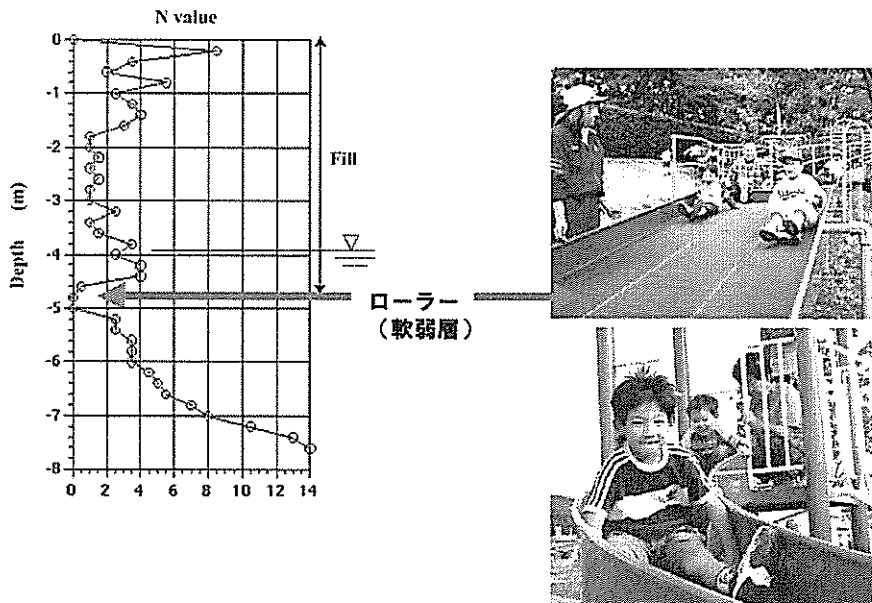


図 24 遊園地のローラースライダーのアナロジー

っているからである（図 24）。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。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を行った（図 25）。その結果、側面の強度の取り方にもよるが、このモデルによって兵庫県南部地震による盛土の変動・非変動をほぼ説明（区別）出来ることがわかった（図 26）。また、二次元の安定計算では、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

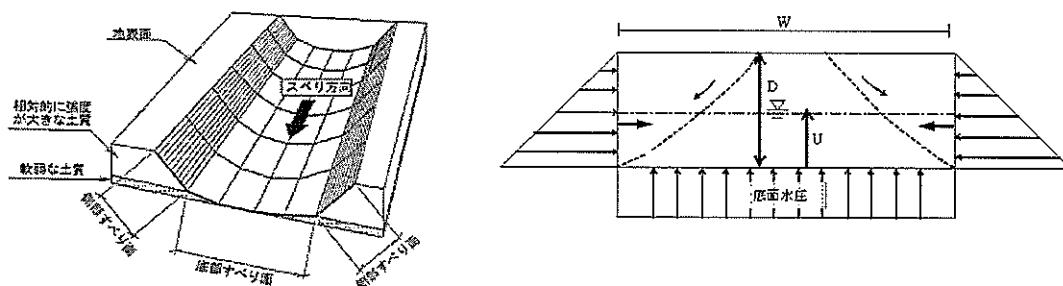
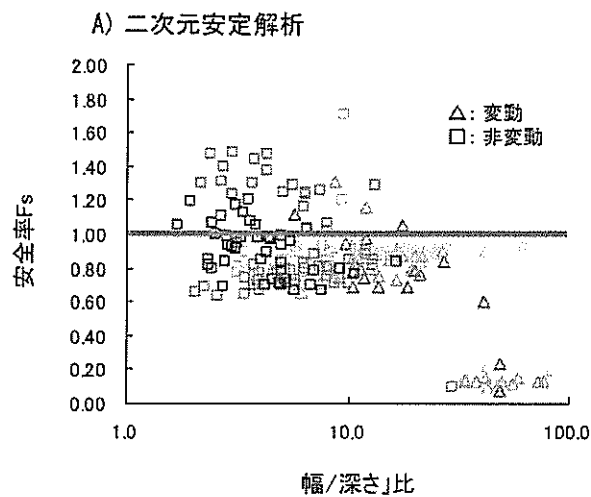


図 25 太田・榎田によるローラースライダーモデルの定式化

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。



B) 準三次元安定解析（太田・榎田モデル）

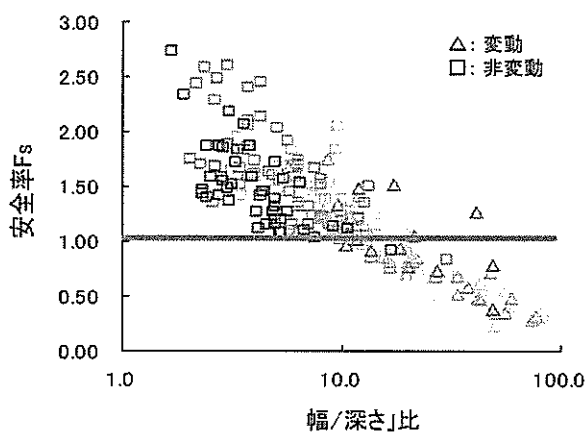


図 26 二つの安定解析法の比較

Ⅲ. 「崖っぷち」の実態

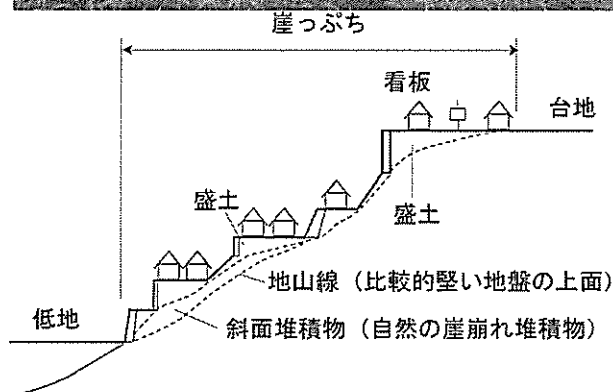


図 27 “崖っぷち”の定義

ここ数年、芸予地震による呉市中心部の災害、新潟県中越地震による長岡市郊外(高町団地)の災害、及び福岡県西方沖地震による玄海島の災害等、地震による急斜面の崩壊が頻発している。これらの災害の特徴は、人の手によって改変が進んだ比較的急な斜面で発生し、斜面防護施設があったにもかかわらず災害に結びついた点である。その点では、擁壁等の維持管理の問題として簡単に片付けられそうであるが、実際に調べてみると被災した擁壁等の背後には谷頭部を埋めた谷埋め盛土や地山から張り出した片盛土が存在

することが多く、この意味では宅地盛土地盤の問題とのとらえ方も可能である。更に、開発以前に崖に露出していた地層から豊富な地下水が流出している場合もある。このような、都市の住宅地に分布する自然の斜面とも人工斜面とも確かには判定し兼ねる急斜面を“崖っぷち”と呼ぶことにすると、都市の内部には崩壊予備斜面として多くの“崖っぷち”が存在し、上記の地震災害は、これらはの潜在的危険性が顕在化したものであると考えられる(図 27)。

“崖っぷち”は、開発の記録も曖昧な比較的古い住宅地に多く、大都市の都心部に広く分布している。大部分は斜面にへばり付いた古い盛土を主体とする小規模宅地の集合体であるが、過去数十年にわたる開発の結果、様々な年代、様々な様式の人工構造物(盛土、擁壁等)と斜面の自然

地盤(地形、地質、地下水等)が渾然と雑じり合って存在している。これらの斜面は、自然斜面を対象とする急傾斜地崩壊対策法では対策が取れない場合が多く、行政による点検さえ行われなため、危険な斜面住宅地がそのまま取り残されている場合が多いと考えられる。特に、東京・大阪等の大都市都心域に分布する造成宅地の大半は、民間主体で古い時代に造成され、耐震設計がされていない。内閣府中央防災会議によれば、首都直下地震による都心部での震度は6強に達すると予想されるが、その際には斜面上の密集した住宅地で人的被害も含めて甚大な被害が発生すると考えられる。このようなことから、想定される首都圏直下地震に対し、地盤の特性や地盤関連技術を駆使した被害想定や復旧方法、防災対策などを進める必要があると考えられる。

“崖っぷち”が地震時に危険な理由としては、第一に崖際で地震動が増幅される現象があげられる。凸部や出っ張りでは、波のエネルギーが集中するので、一般に他の場所よりも大きな地震動になるからである。これは、大きな机を揺すったとき、机の上のペン立てが大きく揺れるのと同じ現象で、地震の地形効果と呼ばれている。斜面における地震計測があまり行われていないので、この現象が実際に確かめられる事はほとんど無いが、新潟県中越地震の際に余震の観測を行ったところ、崖際の地形効果を確認することが出来た。この時は、小規模で卓越周波数の高い地震(つまり普通は増幅しにくい地震)であったにもかかわらず、崖際の地表加速度は平坦地の記録に比べて約2倍、地表速度は約1.3倍であった(図18)。

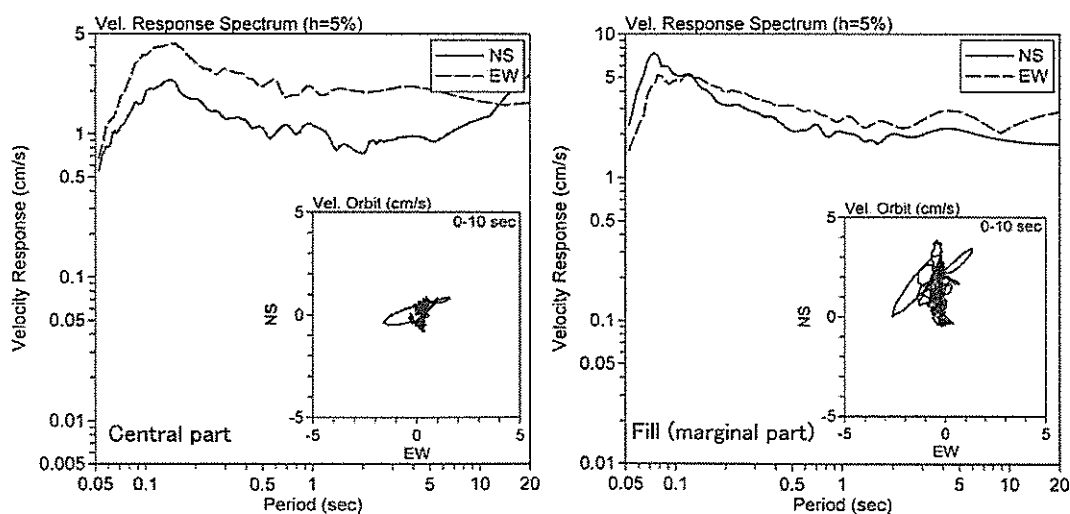


図 28 “崖っぷち”(右)における地震動の増幅(中越地震の余震、高町団地)。

さらに、“崖っぷち”が危険な第二の理由は、崖際にへばりつく盛土の存在である。これは主に人間の欲望がなせる業であるが、崖際の平坦地を少しでも増やそうとして、崖の上部に突き出るように形成された盛土（腹付盛土）がしばしば見られる。当然、こうした盛土を支えるために擁壁等が必要となるが、盛土の底面が急傾斜である上に、上述のように“崖っぷち”で増幅された地震動により盛土全体が変動し、擁壁に加わる土圧が設計値に比べて過大となる場合もあると考えられる。この場合、盛土は擁壁もろとも（しばしば住宅もろとも）すべる事になる。2004年新潟県中越地震で発生した長岡市高町団地の崩壊はこうした現象であった（図29）。

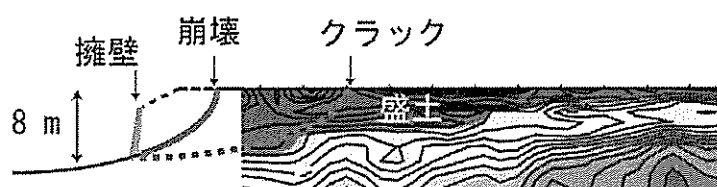


図 29 中越地震で崩壊した“崖っぷち”盛土のS波速度

“崖っぷち”における腹付盛土の崩壊のメカニズムは、谷埋め盛土地すべりに比べて単純で、三次元効果はあまり強くないと思われる。したが

って、盛土の形や強度等の境界条件が設定できれば、安定度は二次元断面上で通常行っている方法で評価する事が可能であると思われる。しかし、谷埋め盛土のように盛土の分布に地形的特徴が無いので、境界条件を設定することは容易では無い。したがって、“崖っぷち”の安定度評価を行うには、まず、実態の調査を行い、“崖っぷちマップ”を作成する必要がある。しかし、そうした地道な調査事例はまだほとんど無いのが実情である。

IV. リスクの評価

1. リスクマネジメントは可能か？

リスクという言葉の語源には諸説があつて、もともとは“海面の下の岩礁（航海の危険）”（ギリシャ語）、“勇気を持って試みる”（イタリア語）等の意味であつた。その後、17世紀頃から保険市場での危険性を表す言葉として使われるようになり、フランス語を経て18世紀には英語に定着した。もともとは、経済用語なので“損失額”の概念を意味の外延として含んでいる。リスクが現代的な意味でわれわれの社会に広がったのは、何と云つても金融工学（マネーゲーム）が個人の生活の中にも入り込むようになってからである。金融工学では、リスクと不確実性（利益もしくは損失の）は共に将来の変動が不確定な現象であると考えますが、リスクはその変動が何らかの数学モデルで記述可能であるという点で、不確実性とは異なる概念である。つまり、リスクは確率、統計モデルにより、ある幅の中で予測することが可能な損失の可能性のことであると言える。

一方、リスクと縁の深い言葉として“ハザード”があります。もともとは、“al zahr “、サイコロを振るといふ意味のアラビア語であつた。英語に定着したのはリスクよりも古く、しばしばシェイクスピアの作品中で使われている。もともとは、“（何かに）賭ける”という意味でしたが、“やがて”賭け事“の本質である”危険（な状態）“や”災害“の意味に転じた。つまり、リスクとハザードは、意味がいつの間にか、すりかわってしまったわけである。

さて、リスクを評価したいわけであるが、その手法には様々なものがある。下駄を投げて天気を予想するのも、要因を適当に点数化して高得点のものから危ないと判断するのも一種のリスク評価である。しかし、そうした手法が常に有効とは限らない。リスク評価法そのものも、一定のリスクを負っていると考えるべきである。そこでここでは、比較的リスクが少ない（つまり、簡便で一般的な）、リスク予測法として“リスクカーブ法”を紹介

したい。

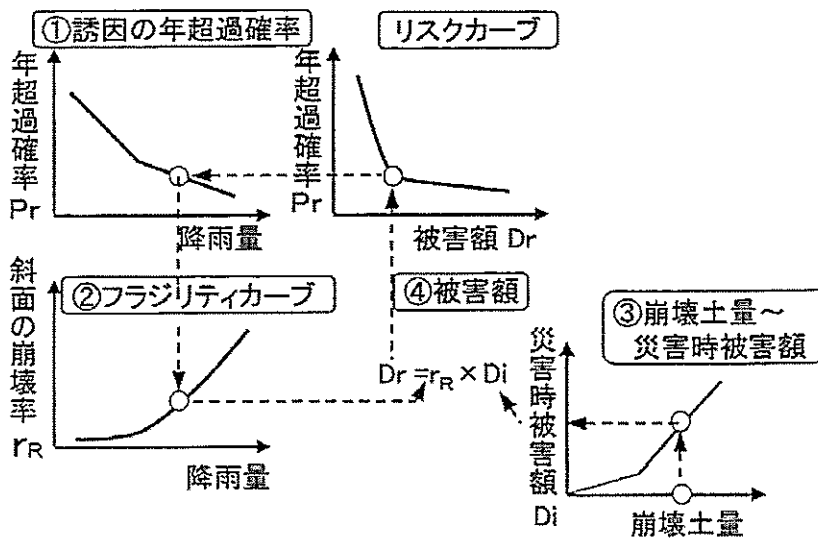


図 30 リスクマネジメントの方法

リスクカーブとは、被害額 (D_r) を横軸とし、その金額に対応する発生確率 (年超過確率) を縦軸にとったカーブですが、これを求めることが、リスクカーブ法の当面の目標となる。実はこの“カーブ”という所がポイントで、非線形の関係をうまく処理しているところが、この方法の強力な所以である。

リスクカーブは、図 30 に示すように、①ハザードカーブ、②フラジリティカーブ、③損失・ハザード指標関係 (カーブ) の三種のカーブ相互の関係から求める。ここで、ハザードカーブとは、災害を発生させる誘因 (地震や降雨) の発生確率を誘因の大きさ順に並べたものである。これにより、ある大きさのトリガーに対する年超過発生確率が求まる。フラジリティカーブは、トリガーの大きさ (横軸) に対して、どの程度の割合で対象とする災害が起きるかを縦軸に示したものである。縦軸は、例えば谷埋め盛土斜面の崩壊発生率 (崩壊盛土数/全盛土数) 等を取る。フラジリティカーブと上記のハザードカーブとは、横軸が共にトリガーの大きさなので、結局、この二つのカーブから、特定のトリガー (地震や降雨) に対する災害の発生率 (r_R) が求まる。

次に、何らかの指標を導入して、災害が発生した場合の被害額を算定する。例えば、谷埋め盛土のすべりでは、被害額は被害を受ける住宅の数に比例し、盛土の面積が広ければ住宅の数も多く、被害も大きいと考えられるので、盛土の面積（ハザード指標）と被害額の間関係を求めてグラフにする。ここで、ある場所（地点、地域）に注目すると、その場所で災害が発生した場合の被害額（ D_i ）が決まる。

さて、特定のトリガーに対応して上記の被害額（ D_i ）が発生する確率は、上記の発生率（ r_R ）であると考えられるから、特定のトリガーに対応する被害額の期待値（ D_r ）は、 $D_r = r_R \times D_i$ で求まる。そして、この D_r を年超過確率に対して並べなおしたものが、イベントカーブであり、これを滑らかに修正したものがリスクカーブということになる。リスクカーブはデータさえあれば、任意の条件で任意の地域、路線、地点毎に描けるので、例えば、対策前と後のリスクカーブの変化（対策後のカーブは原点側に移動）から、斜面对策の効果を評価することも可能である。

長々とリスク評価の説明をしてきた。斜面災害科学は危険性そのものを扱う分野なので、もともとリスクとの相性は良いと言える。最近では様々な種類のハザードマップ（災害の危険性を示した地図）が、実際に作られる様になった。しかし、現代的なリスクマネジメントの手法が、具体的な斜面防災の研究や調査・対策に使われることは、今はまだ一般的では無いようである。これは、ハード的対策に至る現在の工学の体系とリスクマネジメントの手法が、やや異なる学問的土壌の上で発展してきたことと無縁では無いと思われる。しかし、今後は限られた予算を有効に活用するためにも、リスクの客観化が必要となるので、両者が深いレベルで融合する日も近いと思われる。

2. 経験的予測とハザードマップ

谷埋め盛土についても“崖っぷち”についても、そのフラジリティカーブは未完成なので、都市の斜面災害について、本格的なリスクマネジメントを行うのは難しい状況であ

る。そこでより経験的な予測を試みたい。実際、これらの災害は、造成地盤でしか起きないので、造成地盤の分布を示すだけでも立派な予測であると言える。しかし、実際には造成地盤の全てが斜面ではないし、全ての斜面が危険なわけでもない。したがって、斜面の危険度ランクがわかれば、より実用的な予測を行う事ができる。さらに、その予測の結果を地図に表現すれば、それは一種のハザードマップと言える。

斜面の危険度を判定するには、何らかの安定計算をして決定論的に判定する方法（解析的方法）と経験（事例）を基に何らかの基準を作って判定する方法（経験的方法）、及びリスク解析の理論に基づいて判定する方法（半経験的方法）が考えられる。しかし、安定計算をするためには地盤に関する詳細な情報を面的に収集する必要があり、そのうえ、谷斜面災害のメカニズムが良くわかっていなければならない。こうしたデータをそろえるのは大変で、また谷埋め盛土型地すべりに関してはその変動メカニズムが、意外に複雑であることがわかってきた。したがって、現時点では解析的方法はあまり実用的でないと考えられる。また、半経験的手法では、多くの地震災害事例に基づくフラジリティカーブが必要であるが、地震の事例が少ないことから、この方法はまだ有効ではない。したがって、現時点で予測を行い、ハザードマップを作成するには、事例解析に基づく経験的手法に頼ることになる。

2. 1 判別分析（数量化Ⅱ類）によるハザードマップ

少なくとも、比較的データが豊富な谷埋め盛土に関しては、過去の地震災害を調査し、変動（地すべり）した盛土と変動しなかった盛土を比較する事が可能である。その結果、両者には形態的相違があることがわかってきた。特に、盛土の厚さ、つまり埋められた谷の深さと横断面の縦横比（厚さと幅の比）の影響が顕著で、薄く幅の広い盛土で変動する割合が大きくなる傾向がある。地下水の状況や造成年代など、判別に有効と思われる要因は他にも考えられるので、それらを組み合わせることにより予測の精度を上げることが可

地震時斜面災害予測図（谷埋め盛土地盤）
 ～ 東京西南部 ～ 横浜北部 ～

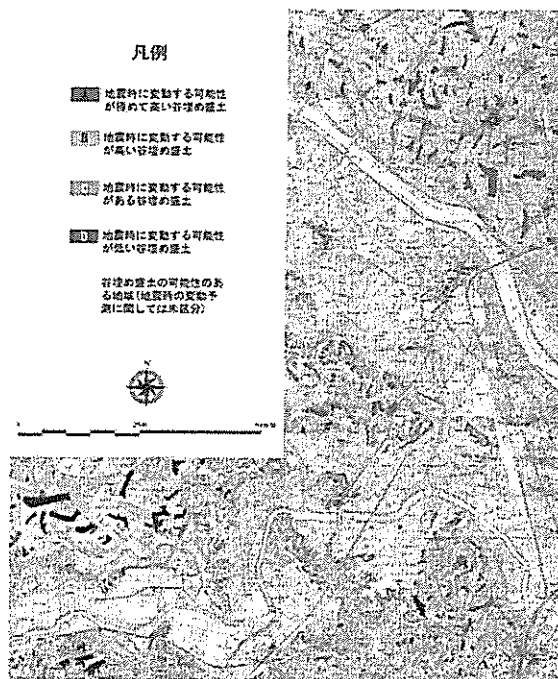


図 31 数量化法によるハザードマップ
 「東京西南部・横浜北部」

を計算することが出来る。したがって、まだ災害が発生していない地域でも、要因とトリガーがカテゴリースコアを算出した集団と同様であると仮定すれば、個々の谷埋め盛土の採点を行い、変動・非変動の判定を行うことが可能である。そうして作成した東京西南部～横浜北部にかけてのハザードマップの一例を示す（図 31）。

2. 2 ニューラルネット解析によるハザードマップ

“変動”の定義

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

能である。そのための比較的簡単な手法として、多変量解析（判別分析）が良く用いられている。もちろん、データが質的である場合は数量化して解析を行うことになる（数量化Ⅱ類）。

要因の組み合わせを色々と工夫して、兵庫県南部地震による阪神間の被災事例に上記の方法を適用したところ、変動群（地すべりした事例）と非変動群（安定であった事例）を上手く分けることができた。これは、いわば要因が変動に与える影響を採点（重み付け）したことになり、得られたカテゴリースコア（要因の採点結果）を使って個々の地点ごとの採点表（サンプルスコア）

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、非変動の二分法とした。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見出すことができる。こうした変動事例では、何らかの“被害”が顕著に発生していると考えられ、広域においてこれらを抽出することは、防災上の意義が大きいと考えられる。

予測モデル

人工的に作られた造成地盤では、地盤の性質に自然地盤ほどのバリエーションが無いと考えられる。したがって、要因の特徴において、解析群と認識群の間で大きな差異は無いと考えられる。しかし、同じ地震は2度と発生しないので、上記の様な多変量解析を用いた予測法は、事実上適用可能な地震が限定されることになる。また、数量化法の場合、要因のカテゴリー区分（グループ分類）を試行錯誤的に行う必要があり、解析が恣意的なものになる危険性もある。その点、非線形予測手法であるニューラルネットワーク解析では、簡便性を保持しながら同時に上記の問題点を解決し、高精度の予測を行うことが可能であ

る。

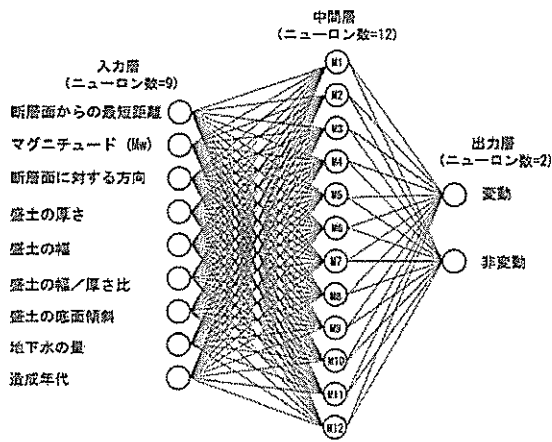


図 32 ニューラルネットワークのモデル

そこで、ニューラルネットワーク変動予測モデルを作成し、予測を試みた。ニューラルネットワークは脳の中の神経細胞(ニューロン)とその繋がり=ネットワークをモデル化した人工知能(AI)の一つである。ニューラルネットワークの特徴の一つは学習と自己組織化能力を持っている点である。すなわち、ニューラルネットワークは外部環境に合う様に自分自身を変化さ

せて適応することが可能である。ニューラルネットワークはニューロンの連結の仕方によって階層型ネットワークと相互結合型ネットワークに区分される。階層型ネットワークは層状に並べられたニューロン間を前の層から次の層へ方向にのみ信号が伝わり、入力信号に対して出力信号が一意的に定まる。本研究では相互結合型ネットワークを用いないので、階層型ネットワークをニューラルネットワークと呼ぶことにする。任意のパターンの識別には、最低3層(入力層、中間層、出力層)あれば可能であることが知られているため、本研究においても3層のニューラルネットワークを使用した。

ニューラルネットモデルの具体的解法として、ここではバックプロパゲーション法(Back Propagation: BP法)を採用した。BP法は矛盾を含むデータセットであっても誤差を最小とするネットワークモデルを構築することが可能である。BP法のネットワークは、入力層、中間層、出力層それぞれの層間ではニューロンは密接に結合しているが、同じ層内のニューロン間は結合していない(図32)。図33は、BP法の計算過程を示している(白木ほか、1998)。入力層に展開された学習パターンは中間層から出力層へ伝わり、出力層で出力値 O と教師値 D (実際の結果)が比較される。そして出力値 O と教師値 D 間の誤差 E が最小と

なるように結合重み W 、 V やしきい値 S を調整することによって学習が行われる。誤差 E は、出力値 O の関数であり、また出力値 O は中間層と出力層間の結合重み V の関数であるから、誤差 E を最小にするためには結合重み V による誤差 E の偏微分に比例した量だけ、結合重み V を変化させれば良い。このときの比例係数を学習率 α と呼ぶ。入力層と中間層間の結合重み W の更新も同様に行う。このように誤差の減少のための信号が出力層から入力層へ伝えられることから、BP 法は誤差逆伝播法とも呼ばれている。

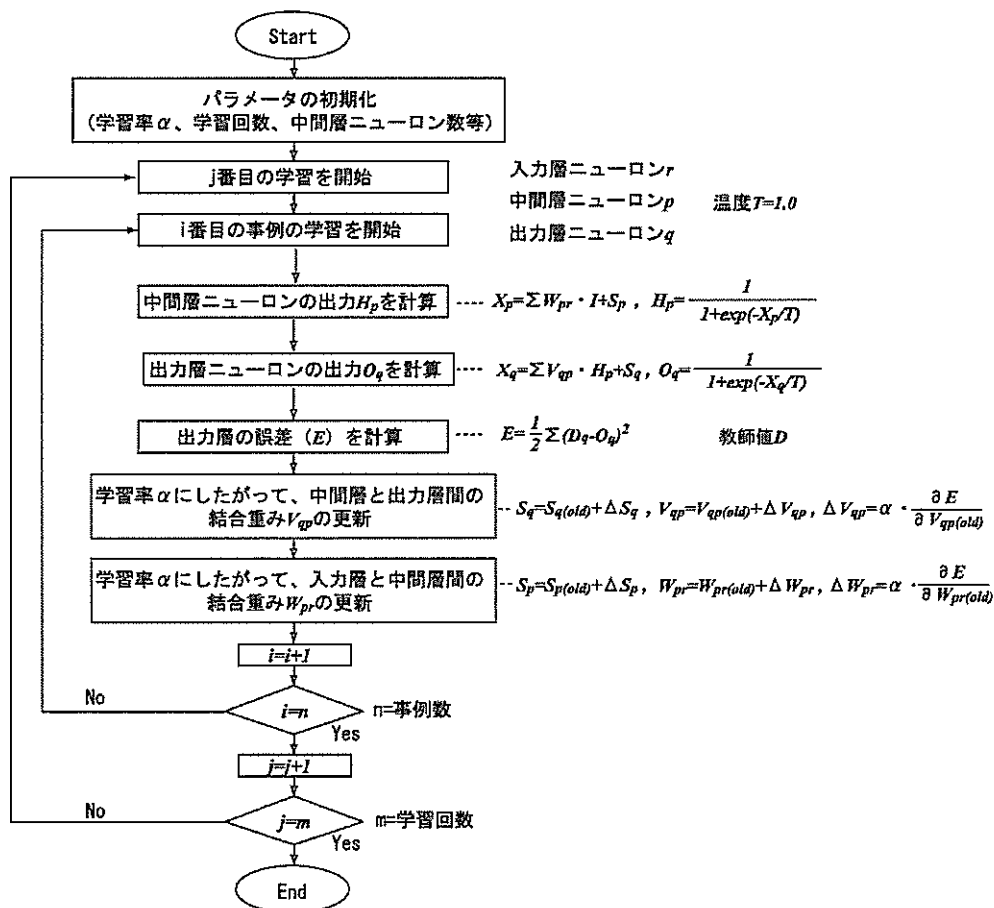


図 33 BP 法のアルゴリズム

解析に用いる要因とデータセット

1) 要因

Kamai et. al. (2000) 及び釜井ほか (2002) は兵庫県南部地震、宮城県沖地震の事例をもとに、谷埋め盛土の変動に関する様々な素因について解析した。その結果、変動・非変動事例の判別において盛土の形状、地下水、形成年代に関する6要因に素因としての有意性が認められた。そこで本研究では、これらに誘因としての震動特性に関連する「断層面からの最短距離」、「モーメントマグニチュード」、「断層面に対する方向」の3要因を加え、以下の9個の要因でニューラルネットワークを構成することにした。盛土の形状については繰り返しになるが、以下にこれらの要因の特徴を簡単に述べる。

①断層面からの最短距離

谷埋め盛土の変動に影響を及ぼすと考えられる最大速度の距離減衰についてはいくつかの実験式が提案されている(例えば、Midorikawa, 1994)。そうした式のパラメータは、主に距離とマグニチュードである。距離については震央距離、震源距離、断層からの距離、断層面からの最短距離と様々である。震央距離や震源距離はデータの作成が容易であるが、直下型地震のように被害域が震源断層に近い場合、点震源からの距離では被害の実態を正しく表現できない可能性がある。さらに今回は、使用するデータに直下型地震の兵庫県南部地震の事例が多い。これらのことから、今回は距離減衰の影響を表現する要因として、断層面からの最短距離を使用する。この結果、兵庫県南部地震における事例の大半が、断層面から7km以内の震源域に含まれることになる。

また、断層から離れるにつれて、最大速度が減衰すると同時に、周波数特性(卓越周期等)も変化する。したがって、この要因は、距離による卓越周期等の周波数特性の変化についても陰に表現していると考えられる。

②モーメントマグニチュード

距離に関する要因として断層面からの最短距離を採用しているため、マグニチュードに関してもモーメントマグニチュード (Mw) を使用する。

③断層面に対する方向

断層面から盛土の長軸がどの方向であったかを計算し、要因として使用した。実際には断層の走向と長軸方向の内積 (\cos (断層の走向と長軸方向がなす角) の絶対値) を用いた。兵庫県南部地震では、震源域において断層直交成分の地震動 (速度、振幅) が卓越していた (地盤工学会、1996)。長軸すなわち斜面方向が断層に対してどの方向であったかは、盛土の揺れに影響を与えたと考えられる。

④盛土の厚さ

盛土の形状を記述する基本的パラメータの一つであり、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。

⑤盛土の幅

盛土の形状を記述する基本的なパラメータとして使用する。一般に幅が広ければ側方拘束の影響が弱まるため、変動が発生しやすいと考えられる。兵庫県南部地震ではこの傾向が明瞭に認められた。

⑥盛土の幅/厚さ比

盛土の横断形状を記述する基本的無次元数である。谷埋め盛土の厚さ (= 谷の深さ) に対して幅の広い盛土と幅の狭い盛土とでは、被害の程度が異なるという経験的事実から導入した。既に述べたように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。兵庫県南部地震ではこの傾向が明瞭であり、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。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。

幅/厚さ比は盛土底面の形状に強く関連し、幅/厚さ比が小さいほど谷（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。

⑦盛土の底面傾斜

盛土の形状を記述する基本的なパラメータとして使用する。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。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。このことは、非線形予測手法の必要性を示唆するものと考えられる。

⑧地下水の量

谷埋め盛土の内部にはしばしば地下水が貯留されており、変動の有無に影響を与える要因と考えられる。しかし、地下水位の情報を定量的に把握できる地点は限られている。そこで、開発以前の土地利用状況（水田か畑か等）や溜め池の有無、湧水の有無に関する情報をもとに、地下水の量が豊富か少ないかを推定し解析に使用した。解析においては、地下水に乏しい場合を 0、豊富な場合を 1 として入力データとした。兵庫県南部地震の事例では、地下水位が低く盛土底面以下（入力値 0）と判定された地点の変動率は、約 9%（4/46 箇所）であったのに対し、地下水位が高く盛り土中に形成されていると判定された場合（入

力値 1) の変動率は、約 54% (113/210 箇所) であり、顕著な相違が見られた。

⑨造成年代

宅地造成に関する法令・規則の多くが、1965 年～1975 年にかけて整備された。こうした、規制の状況は谷埋め盛土の品質に影響を及ぼしたと考えられる。そこで、造成年代を 1975 年以前と以後に区分し解析に使用した。解析においては、1974 年以前の造成の場合を 0、1975 年以後の造成の場合を 1 として入力データとした。兵庫県南部地震の事例では、1974 年以前に造成された盛土 (入力値 0) の変動率は、約 47% (104/222 箇所) であったのに対し、1975 年以降に造成された盛土 (入力値 1) の変動率は、約 35% (12/34 箇所) であった。阪神間の都市域では、1970 年代までに開発が一段落しているため母集団の規模に違いがあるが、1974 年以前に造成された盛土の変動率は、それ以後に造成された盛土よりもやや高いといえる。

上記の様に地形に関する要因においては変動・非変動事例間に相違が認められ、しかもデータの収集が容易である。これに対し、盛土の換算 N 値 (簡易貫入試験の結果を標準貫入試験に換算した値) は連続した頻度分布を示し、強度は全体に軟弱である。さらに、変動しなかった盛土でも表層部を除いて強度が極めて低い事例がしばしば認められた。すなわち、少なくとも現時点の調査結果では、谷埋め盛土の N 値は、非変動事例も含めて母集団全体で値が低いため、変動と非変動を識別する上で有効な指標とは言えない。さらに広域に多数分布する全ての盛土において、N 値の収集は現実に困難である。したがって、ここでは N 値を要因として使用しなかった。

2) データセット

上記の要因を全て含んだデータセットを以下の 2 種類用意した。

①過去の地震による変動・非変動事例

兵庫県南部地震による神戸市長田区一京都府向日市の事例（256、うち変動事例 117）、宮城県沖地震による仙台都市域の事例（53、うち変動事例 10）、釧路沖地震による釧路市の事例（4、うち変動事例 2）を収集した。図-5 に各地震の推定断層の位置、震央、モーメントマグニチュードを示す。

谷埋め盛土の形状に関するデータセットの作成方法は、釜井ほか（2002）と同様である。すなわち、各地域における 1 万分の 1 旧版地形図（開発以前の地形図）を収集し、数値化して DEM（数値地形モデル）を作成し、現在の地形図から作成した DEM と GIS 上で重ね合わせ、差分を取って谷埋め盛土の概略の位置と形状を把握した。その際、地図のゆがみによる誤差や数値化の際の誤差等は手作業と現地調査によって補正した。この作業によって、地域内の幅約 30m 以上の大規模な谷埋め盛土を、ほぼ全数について把握することが可能である。データセットは、変動、非変動に関わらず原則として認定できた地域内の全ての谷埋め盛土について作成し、変動事例数に比べて非変動事例が少ない場合は、探索範囲を広げて変動事例と非変動事例の割合がほぼ同等となるようにデータの収集を行った。非変動事例の盛土において、盛土の縦断方向の長さに関しては周囲の変動事例から推定した。ただし、解析において縦断方向の長さに関連する要因を使用していないので、この推定における誤差の影響は大きくないと考えられる。

②首都圏南部地域の谷埋め盛土

首都圏南部の 1/1 万地形図、「自由が丘」「武蔵小杉」「鶴見」「新横浜」の範囲（東京都目黒区一横浜市港北区）に分布する谷埋め盛土（総数 360 箇所）を収集した。データセットの作成方法は、過去の地震による変動・非変動事例と同様である。作成したデータセットによって、この地域の大規模な谷埋め盛土は、ほぼ網羅されている。

ニューラルネットワークによる予測モデルの構成

モデルの性質を左右するパラメータとして、学習回数、中間層ニューロンの数と学習率がある。表-1 に使用したパラメータのセットを示す。全ての解析で学習回数は 5000 回、中間層ニューロンの数は 12、学習率は 0.15 とした。

学習回数は少なすぎると誤差が大きく、多すぎると過学習となってやはり誤差が拡大する（汎化能力の低下）。学習回数に対する誤差の変化を観察したところ、5000 回付近では平均二乗誤差 (E) の変化が安定し約 3% と最も小さいため、今回のモデルでは 5000 回の学習を行うこととした。

中間ニューロン数が少なすぎる場合と同様に多すぎる場合でも学習が困難になる場合があるため、最適な中間層ニューロン数の決定はモデルの性能を左右する重要な要因である。中間層ニューロン数が多くなると結合の総数は飛躍的に増加するが、データ数（今回は事例数）には限りがあるので中間層ニューロン数が少ない方がモデルとしての学習能力が高いと考えられる。しかし、中間層ニューロン数の決定法には明確な一般的手法がないため、通常は多めの数から検討を始め、徐々に中間ニューロン数を減らして最適な条件を見つける試行錯誤的方法が取られている（伊藤ほか、1997）。そこで今回は、中間層ニューロンの数を 15 から 9 まで変化させ、5000 回学習時における平均二乗誤差 (E) が増加し始める直前の中間層ニューロン数 12 をモデルの中間層ニューロン数として採用した。

ニューラルネットワークにおける結合重みの更新率を学習率と呼び、通常は 0.05~0.2 の範囲で定義する（伊藤、1999）。本研究では学習率を 0.1、0.12、0.15、0.2 と変化させ、5000 回学習時における平均二乗誤差 (E) が最小であった学習率 0.15 を採用した。

出力層には変動・非変動のそれぞれに対応するニューロンを 2 個設定した。すなわち、変動と判定される場合は変動ニューロンの出力が 1 に、非変動ニューロンの出力が 0 になるように設定した。

ニューラルネットワークの学習結果

過去の地震による変動・非変動事例を全て学習データとした解析(すなわちデータ数 314)について、表 1 に入力層ニューロンと中間層ニューロン間の結合重みと結合重みの二乗和、及びしきい値を示す。入力層ニューロンと中間層ニューロン間の結合重みの二乗和は、入力要因の影響力を平均的に表す尺度である。表 1 に示すように、寄与率(各要因の結合重み二乗和/結合重み二乗和の合計)は「盛土の厚さ」で最も大きく、「断層面に対する方向」、「盛土の幅」、「盛土の幅/厚さ比」、「断層面からの最短距離」、「盛土の底面傾斜」、「モーメントマグニチュード(Mw)」、「地下水の量」、「造成年代」の順に低下する。上位 5 位までの寄与率の合計は約 80%であり、これらの誘因に関連する要因(断層面に対する方向、最短距離)と盛土の規模と形状に関連する要因(厚さ、幅、幅/厚さ比)が支配的要因であると考えられる。

表 1 入力層ニューロンと中間層ニューロン間の関係

	断層面からの最短距離	Mw	断層面に対する方向	盛土の厚さ	盛土の幅	盛土の幅/厚さ比	盛土の底面傾斜	地下水の量	造成年代	しきい値
M-1	-1.53	-2.07	0.40	-0.15	-0.38	-1.15	-0.68	2.08	-1.34	1.41
M-2	-2.04	-2.21	11.40	-6.36	-13.14	-2.93	1.36	2.01	0.61	6.95
M-3	8.38	-11.81	10.99	-29.19	-4.52	8.35	-15.60	-1.78	6.03	7.59
M-4	-20.32	-13.44	6.09	-31.00	30.35	16.55	-7.04	8.09	-6.28	-6.25
M-5	3.57	2.32	-23.46	-3.56	8.09	2.82	2.70	13.02	2.05	3.79
M-6	-3.62	-1.23	4.90	6.01	7.18	-5.68	3.48	7.47	-8.08	-3.90
M-7	-14.51	-7.72	17.10	-25.52	-8.85	8.84	6.31	2.79	-0.06	-12.09
M-8	-0.79	-1.23	2.98	0.78	1.29	0.51	-0.01	1.34	-0.41	2.14
M-9	-0.43	-0.31	22.30	6.39	6.40	8.24	-7.88	-1.88	2.31	-2.94
M-10	12.56	2.75	-11.39	-16.22	1.38	9.73	19.11	4.26	0.84	2.93
M-11	-11.93	16.15	10.94	6.21	-13.26	-1.18	20.14	0.71	1.00	-3.72
M-12	-16.27	-5.03	-9.05	28.25	-3.45	-24.97	-0.04	6.35	-9.78	1.45
結合重みの二乗和	1297.24	690.92	1993.43	3895.11	1530.00	1300.57	1187.93	378.64	279.46	
寄与率(%)	10.5	5.6	16.1	29.9	12.4	10.5	9.6	3.1	2.3	

表 2 は、本研究で行ったニューラルネットワークによる解析結果を全て示している。一部を非学習データ、残りを学習データとしてモデルの性能をチェックした解析(精度評価試験)の結果も含まれる。314 地点の全事例について学習した結果、305 事例で正解が得られ、正解率(適合率)は約 97%であった。釜井ほか(2002)の多変量解析(数量化Ⅱ類)による予測モデルでは正解率の上限は約 86%であり、約 10%上昇した。二値判別問題としても高い正解率と言える。

地震事例別では、兵庫県南部地震で、約 97% (256 事例)、宮城県沖地震で約 96% (54

事例)、釧路沖地震で 100% (4 事例) となった。不正解となった事例は、全体で 9 事例と少ないが、実際には変動した事例を非変動事例と判定した場合が約 67%と過半数を占めており、やや危険側に外れる傾向が認められる。

表2 モデルによる学習と予測の成績

		学習		予測(認識)	
		全体	精度評価試験	精度評価試験	
正解率(適合率)(%) 及び (正解数/総数)	全体	97.1 (305/314)	95.3 (204/214)	92.0 (92/100)	
	地震別	兵庫県南部地震	97.3 (249/256)	95.1 (174/183)	94.5 (69/73)
		宮城県沖地震	96.3 (52/54)	96.3 (26/27)	85.2 (23/27)
		釧路沖地震	100 (4/4)	100 (4/4)	-

予測モデルの評価

1) 要因の感度解析

ニューラルネット法はいわば非線形重回帰分析とも考えられるが、BP法による結合重みの探索結果は、線形解析の場合と異なり式の形で書き下すことが困難である。この結果、入力と出力の関係がブラックボックスとなっており、入力値の変化が出力にどのように影響を与えているかが直感的にわかりにくいという欠点を有している。そこで、各要因と出力値の関係を見るため、他の要因を固定しながらその要因を変化させる感度解析(シミュレーション)を行った。ただし、入力が連続値でない⑧地下水の量と⑨造成年代は感度解析の対象とはしなかった。

感度解析はデータセットの出力が変動、非変動とされるグループ毎におこなった。対象要因以外の要因は代表値(=平均値)に固定し、対象要因の入力値を少しずつ変化させ、出力値の変化を調べた。この場合の出力値は、ある要因が単独で出力に及ぼす影響の大きさを測る尺度と考えられ、通常の結果と区別するため、確信度と定義する。変動、非変動と対立する出力に対する変化を調べているので、対象とした入力要因がモデルに対して大きな影響を与えている場合は、入力値の変化に応じて出力が大きく変化し、出力(確

信度) の変化は一方が増加すれば一方が減少するという様に相互に補完的な傾向となる。

ただし、こうした方法で行った感度解析は多次元空間に非線形的に存在する現象を二次元に投影して観察しているわけであり、要因相互の関係について調べているわけではない。したがって、現象の全体を把握しているわけではない点に注意が必要である。図 34 は要因毎の感度解析の結果である。X軸は各要因の入力値、Y軸は、出力値(確信度)である。以下に各要因について述べる。それぞれに合理的な解釈が可能であり、物理的に矛盾する要因は見られない。

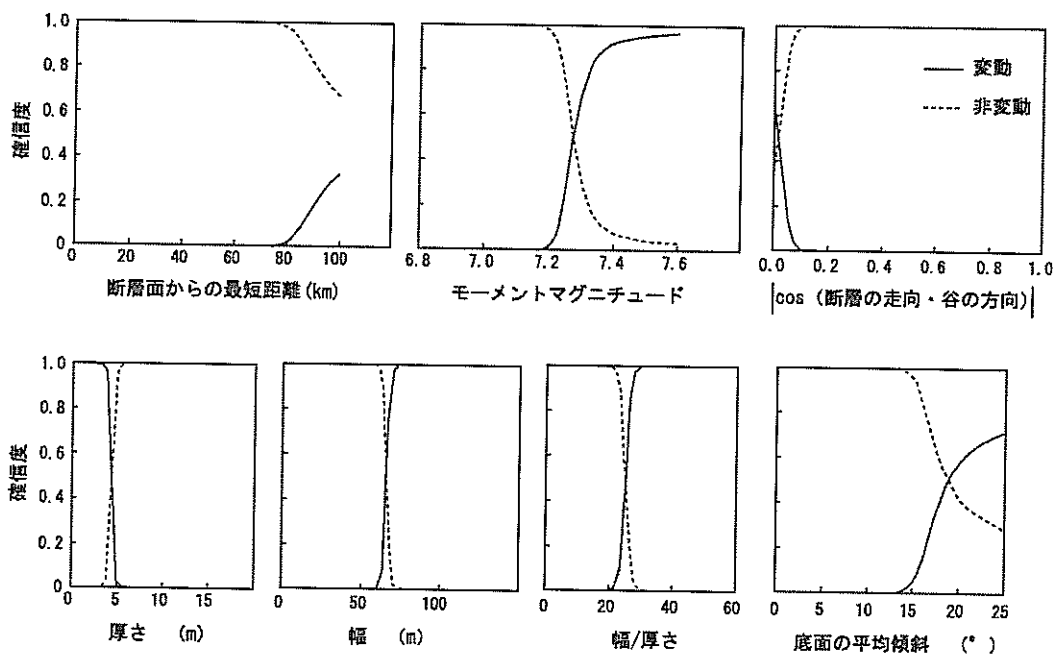


図 34 要因の感度分析結果

①断層面からの最短距離

断層に近い領域では、距離は出力にほとんど影響を与えない。しかし 70 km よりも遠い領域では、変動しやすさが増加する傾向にある。これらは、直下型地震としての兵庫県南部地震、プレート型地震としての宮城県沖地震、釧路沖地震の事例の学習効果であると考

えられる。地震としての事例数が少ないため個々の地震の特性が強調されている可能性があるが、上記の傾向は最大速度の距離減衰、及び盛土の固有周期と震動の卓越周期の影響と見ることも可能である。

すなわち、兵庫県南部地震に様な直下型地震では震源域の最大速度が大きく、全域ではほぼ飽和しているので変動は距離に関係なく多数発生する。一方、震源が遠いプレート型地震場合、最大速度の絶対値は減衰するものの、速度スペクトルで見ると長周期側に大きなパワーを持つ震動が発生することがある。1978年宮城県沖地震はその一例であった（宮城県、1980）。谷埋め盛土の固有周期は通常の地盤よりも長いのが普通であるから、こうした震動は、固有周期の長い谷埋め盛土では不安定化する要因となると考えられる。

②モーメントマグニチュード

7.2よりも大きくなると変動しやすさが急速に増加する。これは、宮城県沖地震、釧路沖地震の事例の学習効果であると考えられる。規模の大きいプレート型地震では震源が遠いにも関わらず谷埋め盛土で被害が出ることがある。②モーメントマグニチュードの傾向は①断層面からの最短距離とともに、こうしたプレート型地震の影響を表現することが可能である。

③断層面に対する方向

断層面に対して直交方向（内積=0）に長軸を持つ盛土が変動しやすい。直交方向から外れるにつれて変動しにくくなり、長軸が10度（0.18）以上斜交すると方向の影響は見られなくなる。

断層近傍では断層の走向と直交する方向の震動が卓越するので、谷埋め盛土の長軸が断層と直交する方向にある場合、強い震動が盛土全体を滑らす方向に作用すると考えられる。

④盛土の厚さ

厚さが薄くなるほど変動しやすく、5mを越えると変動しにくくなる。単位体積重量は盛土毎に大きく変化しないと想定されるので、盛土の厚さは盛土全体の質量と底面に対する

上載荷重の影響を表していると考えられる。上記の傾向は、盛土の質量が小さいものほど良く動くことを示している。

⑤盛土の幅

幅が広くなるほど変動しやすい。幅が 60m よりも狭い場合は変動しにくい。幅の広い方が、側面の拘束の影響が小さくなり変動しやすくなると考えられる。

⑥盛土の幅/厚さ比

幅/厚さの比が大きいほど変動しやすい。盛土側面の抵抗を考えると、幅に対して薄い盛土の方が、側面抵抗が小さいと考えられる。

⑦盛土の底面傾斜

底面傾斜が緩い領域では、傾斜は出力にほとんど影響を与えない。しかし 15 度よりもよりも急な領域では、変動しやすさが増加する。底面傾斜が急な方が底面のせん断応力が増加するので、合理的な結果と考えられる。底面傾斜のモデルに対する寄与率は約 10% (全体の 6 位) とあまり高くない。しかし、兵庫県南部地震の事例では、傾斜が増加するにつれて変動率は緩やかに減少し、感度分析の結果とは矛盾する傾向が得られている。既に述べたように、現実の事例において形状に関する要因 (厚さ、幅、底面傾斜) は、互いに独立でない可能性が高い。したがって、こうした非線形性の強いデータの解析は、今回のニューラルネット解析のように全要因を用いた非線形解析によって行う必要がある。

2) 精度評価試験

比較的事例数が多い兵庫県南部地震と宮城県沖地震の事例から 100 例を認識群 (予測の対象) として引き抜き、残りを学習群として予測を行った。認識群のデータは学習に反映されないため、予測 (認識) の結果を精度の指標とすることが可能である。

学習を行った 214 事例 (314-100 事例) についての適合率 (正解率) は、全体で約 95% であり、認識群の適合率 (正解率) は全体で約 92% であった。地震別では、兵庫県南部地震

の事例についての適合率（正解率）は約 95%、宮城県沖地震の事例では約 85%であった。宮城県沖地震の事例において適合率（正解率）が低下した原因としては以下の3点が考えられる。

- そもそも学習データ数が少ない。
- 形状要因の影響が兵庫県南部地震の事例ほど明瞭でない
- 地震としての性質や基盤地質を反映した開析谷の形状（＝谷埋め盛土の形状）が、データ数の多い兵庫県南部地震の事例とは異なっている。

しかし、半数の27事例を学習データに含めた予測の結果、高い確率で残りの半数を正しく判定することができた。このことから、地震や地形の地域性によって正解率にやや片寄りが見られる可能性はあるが、今回作成した予測モデルによって、谷埋め盛土の危険度に関する簡易判定が可能であると考えられる。

3) 他の事例による検証

このモデルの有効性を調べるため、2003年に発生した3つの地震（5月26日宮城県沖地震（三陸南地震）、7月26日宮城県北部地震、9月26日十勝沖地震）による災害の評価を試みた。宮城県沖地震では、築館町館下周辺の顕著な谷埋め盛土4箇所のうち、1箇所で顕著な地すべりが発生し、残りの3箇所では変動は発生しなかった。モデルの認識結果は、この結果と一致し、良好な成績である。宮城県北部地震では、矢本町大塩周辺の谷埋め盛土4箇所のうち、2箇所で顕著な変動が見られた。モデルでは、このうちの3箇所での変動が予測され、1箇所で安全側に外れる結果となった。しかし、この予測が外れた盛土を詳細に検討すると、工業団地用に大規模で入念な施工が行われた疑いがあり、周辺の谷埋め盛土とはそもそも品質が異なっていた可能性がある。十勝沖地震では札幌市清田区と釧路市緑ヶ丘の4箇所のうち、3箇所で顕著な変動が見られた。しかし、モデルでは4箇所いずれもが非変動と判定され、成績は極めて不良であった。このうち、札幌の例は、液状化によ

る不同沈下の事例であり、谷埋め盛土地すべりとして扱うには無理な被害事例である。さらに、このモデルには、そもそも十勝沖地震による札幌市、釧路市の事例のような、100 km以遠の地震による被害事例は学習データとして取り入れられていない。したがって、これらの事が判定成績不良の原因と考えられる。

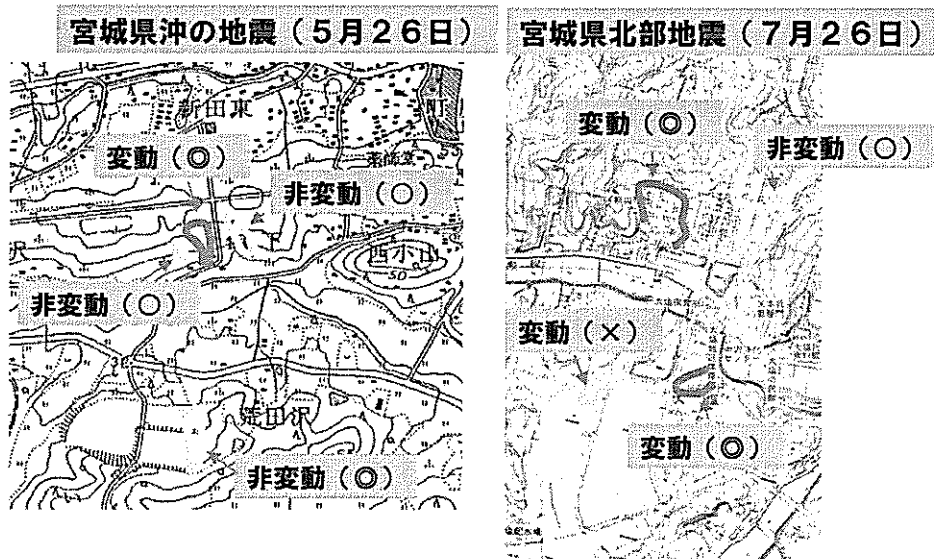


図 35 検証事例(○●: 的中、×: 外れ)

すなわち、内陸の直下型地震に対しては、この手法で予測することが可能であると言えるが、長周期の揺れを伴うプレート型地震は、事例が非常に少ないので適用することが出来ない。仮に、プレート型地震に対してこの予測手法を適用した場合、傾向としては危険側の予測を与える可能性がある。したがって、プレート型地震に対しては、盛土が滑るメカニズムを検討し、パラメトリックな解析結果に基づく予測手法を開発する必要があると考えられる。それまでの間は、潜在的危険性範囲として谷埋め盛土範囲を示しておく事が現実的対応であると言える。

予測モデルの具体的適用 ー首都圏南部における谷埋め盛土の変動予測ー

首都圏南部（1/1万地形図、「自由が丘」「武蔵小杉」「鶴見」「新横浜」の範囲）に分布する大規模な谷埋め盛土（360事例）について、釜井ほか（2002）は多変量解析（数量化Ⅱ類）を使用した変動予測を行い、予測図を作成した。この地域に分布する谷埋め盛土は、ニューラルネットワークの学習に用いた兵庫県南部地震、1978年宮城県沖地震、釧路沖地震の事例と同様、鮮新～更新統からなる台地・丘陵地の開析谷上に造成されたものであり、地質、地形条件は学習事例と類似した特徴を有している。このことは、盛土の形状、地下水に関する要因が類似していることを示唆する。さらに、図16に示したように、盛土の強度においても学習事例と大きな相違は認められず、造成の歴史的経過も阪神地域と良く似ている。すなわち、釜井ほか（2002）が検討対象とした首都圏南部に分布する谷埋め盛土は、多くの要因が今回の学習事例と総体として類似しており、今回作成したモデルの適用範囲であると考えられる。そこで、釜井ほか（2002）と同じ地点について、今回のニューラルネットワークによる予測モデルを適用し、変動・非変動の判定を行った。学習はデータセット全体（314事例）を使用し、対象地震を東京都（1997）の予測における神奈川県境直下の地震（Mw7.2）とした（図36）（損害保険料率算定会、1998）。

神奈川県境直下の地震（M=7.2）

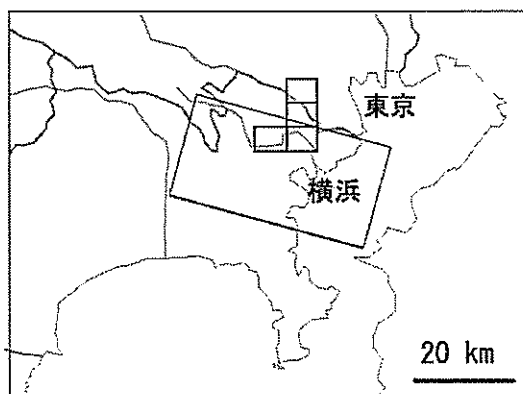


図36 危険度予測の対象とした地震

図37は、変動・非変動の判定結果とその分布を示している。釜井ほか（2002）が行った数量化Ⅱ類は、変動群と非変動群が分かれるように要因の重み（カテゴリースコア）を設定し、地点ごとに要因の採点を行う手法である。点数の合計（サンプルスコア）の正負が、それぞれ非変動と変動に対応するように設定されているが、この点は、

今回のニューラルネットワーク解析において、出力が 0 もしくは 1 で得られることと同様である。数量化Ⅱ類では、サンプルスコアの区間ごとに実際に変動（もしくは非変動）した割合を計算し、確率を定義することが可能である。誤差が無い場合、正負それぞれの確率はそれぞれ 50%であるが、釜井ほか（2002）の解析では、正負の分岐点における変動の確率が 40%であった。そこで、図 37 ではそれ以上の確率となった地点を変動として表した。

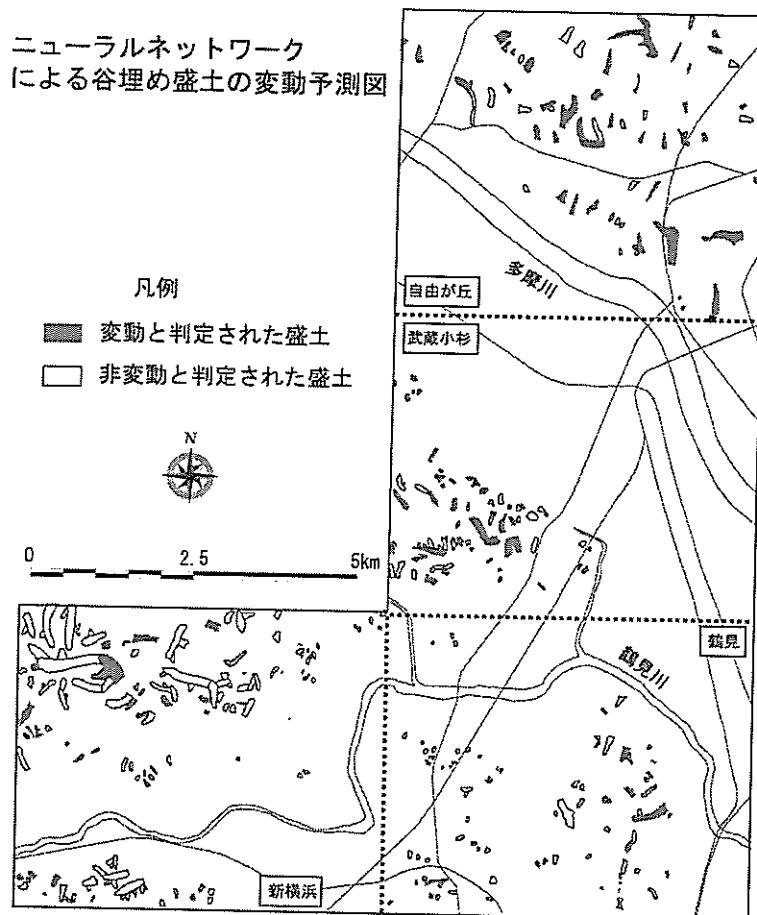


図 37 ニューラルネットワークによるハザードマップ「東京西南部・横浜北部」

今回の解析では、教師値を 0（非変動）と 1（変動）で与えているが、ニューラルネットワークからの出力は、アルゴリズムの関係で連続値となる。事例全体の約 95%（300/314 事例）の出力は、0 に近い値（0.1 以下）か、1 に近い値（0.9 以上）であったが、残りの約 5% の事例（14 例）ではその範囲を超えて 0.2 から 0.8 までの出力が得られた。この場合には、

出力層の二つのニューロン（変動、非変動）の出力を比較し、高い方の数値を結論として採用した。この処理は、結果的に出力値の 0.5 を境界値として変動・非変動を判断したことになる。

多変量解析（数量化Ⅱ類）による釜井ほか（2002）の予測と今回のニューラルネットワークによる予測は全体的には同様の傾向であり、多摩川以北に分布する武蔵野台地では変動と判定される地点が多く、多摩丘陵では少ない。首都圏南部では、一般に南西に向かうほど下位の地層が出現し、台地・丘陵地の起伏が増加する。これは、谷埋め盛土の容器である谷の形状が地形面によって変化することを意味している。すなわち、多摩川以北の武蔵野面（武蔵野台地）では底の浅い船底型の盛土が多く、多摩面（多摩丘陵）では横断形状が深い箱型の谷が多くなる。既に述べたように、盛土の形状に関する要因は、変動・非変動を分ける支配的要因の一つであり、上記の判定結果の地域性は地形面によって盛土の形状が異なることを反映した結果であると考えられる（釜井ほか、2002）。しかし、ニューラルネットワークによる予測では釜井ほか（2002）の予測に比べ、変動と判断された地点が 18%（40 箇所）減少した。特に南部の多摩丘陵での減少が著しい。これは予測に誘因（地震動）に関する要因が取り入れられた結果、変動についてより精度高く判定されたためであると考えられる。

2. 3 ハザードマップの利用と問題

都市の造成地盤は膨大な面積を占めるので、その全ての斜面について詳細な調査と安定解析を行うことは困難である。ここで示したハザードマップは相対的に危険な斜面を洗い出し、調査・対策の優先順位を決めるのに役立つと思われる。また、災害時の避難・救援経路（主要道路）の安全を事前に確認する作業にも利用できるはずである。

多変量解析（数量化Ⅱ類）による予測の問題点の多くは、非線形性の強い現象をデータの線形性を前提とする手法（多変量解析）でやや強引に解析することから発生した問題と

考えられる。これに対し非線形予測法であるニューラルネットによる予測では、上記のような問題は発生しにくい。正解率（精度）の向上（約 10%の増加）、及び感度解析結果の合理的な傾向は、このことを裏付けていると考えられる。

しかし、今回の結果については以下の様な課題も残されている。

- ①学習に用いた地震の数が依然として少ないので、データの収集を継続し、他地区への適用に際して精度の向上を図る必要がある。
- ②予測の汎用性をより高めるためには、震動特性を予測モデルの学習要因に取り込むことが必要である。しかし、事例解析で様々な地震のパターンに応じたデータを収集するには限界がある。したがって、室内モデル実験やシミュレーション、現地観測を行い、予測モデルを補強する必要がある。
- ③これまでの検討では地盤強度は変動・非変動に対するコントラストが弱いので、解析要因に用いていない。しかし、この傾向は簡易貫入試験の調査可能深度である 5m以浅で認められたものであり、盛土の厚さを考えると調査深度が盛土の基底に達していない場合も多いと考えられる。盛土基盤まで調査が行われた一部の盛土では、下底部に極めて軟弱な部分（自沈）が存在することが判明しており、地盤強度に関しては簡便な評価法によって、更に多くのデータを収集し、要因として取り入れる努力が必要であると考えられる。
- ④都市域の斜面には多くの防災施設等の人工構造物が存在する。これまでの解析ではこれらの影響は無視しているため、地点によっては判定を誤る可能性がある。今後の修正点として考慮する必要がある。
- ⑤変動する可能性が高いと判断された地点については、安定解析を含む詳細な解析が必要である。しかし、事例解析から明らかなように谷埋め盛土の変動は、縦断面の力学バランスに基づく単純な二次元解析からは判断できない現象である。今回の解析結果においても、盛土長軸（盛土以前の谷の延長方向）の断層面に対する方向が、変動の有無に影響

響を及ぼすことが判明した。したがって、今後の変動メカニズムの議論は少なくとも三次元問題として行う必要がある。

しかし、都市の造成地盤は谷埋め盛土だけでは無い。むしろ、都心の“崖っぷち”では台地の縁に張り付いて崖と一体となっているような盛土が多いと思われる。例えば、2004年4月1日に東京の西品川で発生した崖崩れは、そうした場所で発生した。こうした“崖っぷち”の造成地盤は小規模で分布に規則性があまり無いので、基本的な分布図を作成するにも詳細な現地調査が必要である。こうしたタイプの造成地盤について、どの様にハザードマップ（崖っぷちマップ）を作っていくかは今後の問題であるが、一つ確かなことは、その過程において行政が果たす役割は大きいということである。大縮尺の旧版地図や宅地造成時の申請記録等、ハザードマップを作成する上で有用な情報は、行政が保有している場合が多いからである。すなわち、都市造成地盤のハザードマップの作成は、行政の意識が問われる問題でもある。

V. 住宅基礎としての斜面 —斜面と建築—

1. 斜面住宅の時代

これまで、斜面を災害の観点からのみとらえてきた。しかし、われわれは斜面を積極的に利用してきた歴史も有している。例えば、“坂”は斜面と人の関係史の象徴でもある。われわれは、昔から斜面を“坂”に造成して、道路や住宅地として利用してきた。事実、東京の坂道には江戸以来の由緒・来歴のあるものが多く、都心においても坂の周りには落ち着いた（やや古い）住宅が立ち並んでいる光景をしばしば目にすることができる。こうした起伏に富んだ町並みは、下町（町屋）から山の手（武家地）にかけて展開された都市計画によって作られた。同様に大阪の上町台地西縁の天王寺七坂は、大阪の歴史と文化にとって重要な舞台であった（写真3）。住宅よりも寺院等の公共施設が多かったようであるが、有名な料亭“浮真瀬（うきむせ）”のように、江戸、明治、大正を通じて大阪の文化センタ



写真 3 大阪天王寺の口縄坂

一のような役割を果たした建物も坂に面して建てられていた。

一方、第二次大戦後、郊外の開発が進むにつれて、多くの住宅が、斜面を大規模に造成した地盤に建てられるようになった（写真 4）。漠然とした概念としての“山の手”範囲はどんどん南西に移動し、バブル景気の頃には多摩川を越えて横浜市北部に達した。この地域を“第四山の手”という言い方もある。こうした新しい山の手では膨大な数の住宅が斜面に建てられている。つまり、われわれは、斜面を積極的に居住の場として利用し、斜面住宅が当たり前となった、史上初めての時代（斜面住宅大量生産の時代）に遭遇している。



写真 4 大量生産された斜面住宅(西宮)

2. 斜面と建築

住宅は安全に快適に美しく作られる必要があるが、それらをバランスさせることは容易では無い。例えば、デザインの観点から見ると、斜面はユニークな形の住宅、つまり良いデザインを生む可能性を持った場所である。多少工費は高くなるが、意匠的には積極的に

利用が図られるべき場所であると言える。住人にとって見晴らしが良いという事は、見上げられる視線を意識する建物を作るということに通じるのかも知れない。しかし、安全に斜面に住むためには、斜面の土圧、すべり、沈下の問題を解決しなければならないのも事実である。そうした場所では、多少無骨でも頑丈なデザインの方が効率の良い場合が多い。同様に、環境に与える付加を最小限にしようとすれば安全性やデザイン性と対立する場合も出てくるに違い無い。斜面は地盤という制約条件の中で環境的にも意匠的にも優れた建物をつくるという真の意味のデザインセンスが問われる場所でもある。

また、どの場所にどういう建物を建てるかという土地利用、建築計画も重要である。具体的な事例として、兵庫県南部地震の際の芦屋市東芦屋や神戸市森北八丁目に分布する谷埋め盛土の例があげられる。これらの盛土では、周囲の谷埋め盛土に比べて被害が軽微であった。盛土強度、形状等の変動要因は被害を受けた盛土と大差が無いのであるが、盛土の上に建っていた建物に違いがあった。すなわち、被災しなかった谷埋め盛土では、谷埋め盛土の中央部から下部にかけて、大規模なマンション群が建設されていたのである。恐らく、地震時にはこれらのマンションの基礎が抵抗体として働いたため、盛土の動きが抑制されたものと考えられる。西宮市豊楽町の様に滑ってしまった盛土でも、末端がマンションに当たって止まった例も見られる。このことは、将来の対策として計画的な構造物の配置が選択肢としてあり得ることを示している。

一方、最近では斜面と建築をめぐる新たな問題も発生している。1994年の建築基準法の改正で、地下室（3分の1の壁が地下に接していれば“地下室”）は容積率に入れなくてもよいということになった。この措置は本来、一般住宅による土地利用の有効化を目的としていましたが、一部のマンション建設・販売業者がこの条項を利用し、斜面に接したマンションの建設を始めた。すなわち、斜面の部分は地下室とされるので、斜面の下から基礎を立ち上げて、例えば“地上3階、地下6階”、実質的には9階という奇妙なマンションが出現するようになった。当然、こうした建物は周囲の景観（谷底から見上げると巨大な

壁に他ならない) や環境 (斜面は住宅地に残された貴重な緑地でもある) を悪化させるので、周辺住民との摩擦が各地で生じている。最近では、わざわざ谷埋め盛土を作った後に、それに接して谷の出口にマンションを建設するという行為も見られる。この場合、マンションは通常の土圧に加えて、盛土内部の水圧、すべり土圧も受けることになるので、環境・景観問題に加えて強度上の問題点も抱えることになる。そこで、いくつかの自治体では条例を施行し、地下室マンションの規制に乗り出している。

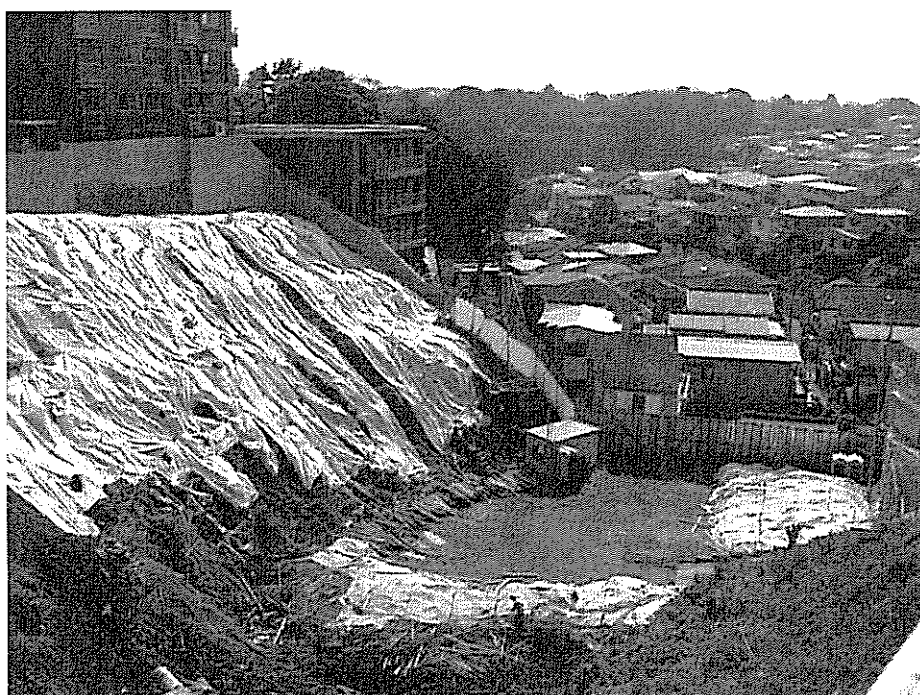


写真 5 地下室マンションの建設予定地 (横浜)

始まりの頃のモダニズム住宅は、“人間の感覚が物質と対話する官能的な手触り”として提唱された。しかし、現在では“住宅とは住むための商品である”ということになった。しかし、若い頃“住宅とは住むための機械である”と言った建築家も、晩年には風土との対話を試みている。建築は単なる無機的な物質の集合体ではなくて、土地の記憶 (ゲニウス・ロキ) を表現する景観の一部でもあるはずである。豊かで、快適で、安全な斜面住宅を供給するという建築本来の目的を達成するための、新たな住宅設計思想が望まれている。

3. 宅地造成と行政

わが国の現行の地盤災害関連法規は、主として集中豪雨等による土砂流出災害への対応を目的として制度化されている。それは、それぞれの法律がどのような災害を契機として制定されたかを見てもよくわかる。例えば、「地すべり等防止法」（昭和33年）は、昭和32年の集中豪雨で熊本、長崎、新潟各県で発生した地すべり災害が契機であった。「宅地造成等規制法」（昭和37年）は、昭和36年の集中豪雨で神奈川県、兵庫県の宅地造成地で発生した崖崩れに対処するものであった。「急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律」（昭和44年）は、昭和42年の集中豪雨で広島県、兵庫県等で発生した自然斜面の崖崩れ災害が契機であった。また、最近制定された「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」（平成13年）は平成11年の広島市、呉市の災害を契機としている。

このような経緯から、宅地の防災基準は基本的に崖崩れに対応する基準であり、30度以上の崖を生じる場合に擁壁等によって崩壊防止の措置をとることが主たる内容である。しかし、谷埋め盛土の地すべりはこれらの法律が想定していない現象であり、新たな対応が必要とされていた。

そこで平成18年3月、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を柱とした「宅地造成等規制法」の改正が行われた。同時に、宅地盛土の耐震化推進事業の創設と耐震化を対象とした減税措置も導入され、平成18年はまさに谷埋め盛土耐震化元年となると思われる。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。過去、宅地の問題を民対民の問題として介入を避けてきた行政の姿勢に比べて大きな方向転換であり、勇気ある決断として後世に評価される施策であると思われる。

終わりに

我が国における都市域の斜面災害の背景は、都市人口の増大が大きな要因であった。しかし、都市人口の増大は我が国だけではなく世界的な現象でもある。1950年、人口が1000万人を超える都市は、ニューヨークだけであった。しかし、2015年にその数は21都市に達し、1950年に7つしかなかった人口500万～1000万の都市圏は、2015年には37に達すると予想されている。こうした都市の発達、インフラストラクチャーの未発達な開発途上国で著しく、農村人口が総人口の2/3を占めるアジアとアフリカでは、2025年までには農村から都市への人口移動によって都市人口が過半に達すると予想されている。まさに第二次大戦後の我が国と同じ道をこれらの国々は辿ろうとしている。人類の歴史上、未曾有の都市居住の時代に突入しつつあるわけで、これは同時に都市域の斜面災害の急増を招くと予想される。我が国の経験は、世界中の都市で減災対策に生かすことができると考えられる。

参考文献

- アクロス編集部(1987)：「東京」の侵略—首都改造計画は何を生むのか， p. 213.
- 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.
- 郷 隆之(2005)：強震動の間隙水圧上昇による飽和—不飽和地盤の不安定化機構， 京都大学博士論文， 153p.
- 阪神間モダニズム展実行委員会 (1997)：阪神間モダニズム， 244p.
- 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.
- 伊藤則夫・白木 渡・安田 登 (1997)：階層型ニューラルネットワークの構造最適化に関する研究， 第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集， pp. 135-140.
- 伊藤則夫 (1999)：自己組織化ニューラルネットワークを用いた地盤特性値の空間分布推定手法に関する研究， 金沢大学大学院自然研究科博士論文， pp. 98-99.
- 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 (2004) : 都市造成地盤のハザードマップ, 測量, Vol.57, No.6, pp.38-42.
- 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.
- Midorikawa, S. (1993):Preliminary analysis for attenuation of peak ground velocity on stiff site, Proc. Int. Workshop on strong motion data, vol.2, pp. 39-48.
- 宮城県 (1980) : '78 宮城県沖地震災害の教訓 -実態と課題-, 406 p.
- (社) 地盤工学会 (1996) : 強震記録, 阪神・淡路大震災調査報告書 (解説編), pp.108-122.
- 損害保険料率算定会 (1998) : 地震被害想定資料集, 地震保険調査報告28.
- 白木 渡・松保重之・宮下英明・伊藤則夫 (1998) : 自己組織化特徴マップ (SOM) による斜面崩壊予測システム, 構造工学論文集, vol. 44A, pp. 453-459.
- 田村俊和(2005) : 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.
- 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.
- 安原正也 (1997) : 都市の地下水に今なにが起きているのか, 地質ニュース 513, pp. 11-19.
- 横浜北部湧き水探偵団(1998) : 『横浜丘の手湧水マップ』.

資料



地震による都市域の斜面災害

京大防災研・釜井俊孝

どこにでもある都市のありふれた問題

都市は「ほぼ同じ所」に「集まって」「持続的」に住む仕組み。

一部の大都市（東京、大阪）では、近世以前から人工斜面が形成

1920年代に関西で住宅地の拡大が始まる（阪神間モダニズムの時代）

高度経済成長期（1950年代半ば～1970年代初め）に加速

千里ニュータウン（1962年入居開始）

多摩ニュータウン（1971年入居開始）

幾多の災害が郊外で発生し、その時は反省

しかし、現在も都市は膨張を続けると共に、内部では老朽化が進行している

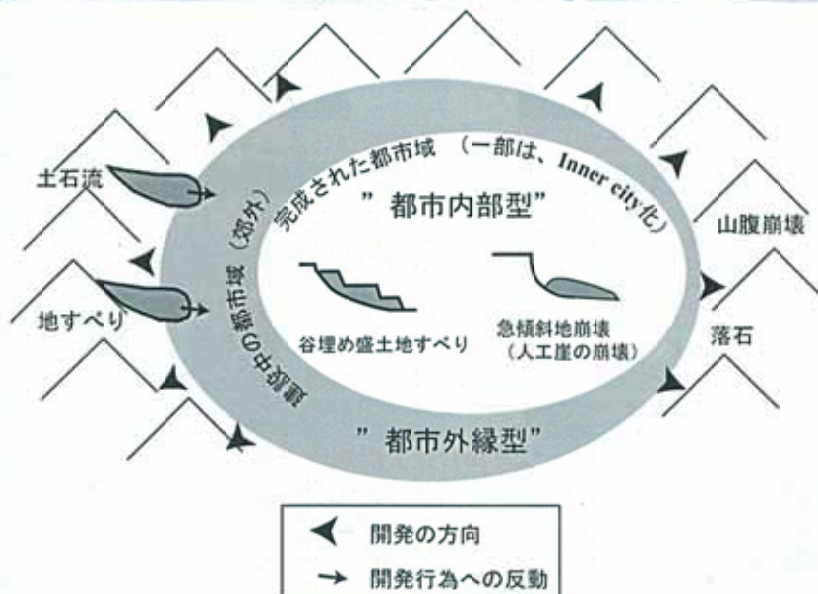
Slope Conservation by DPRI

都市域を襲う地震 — 斜面災害の主要な要因 —

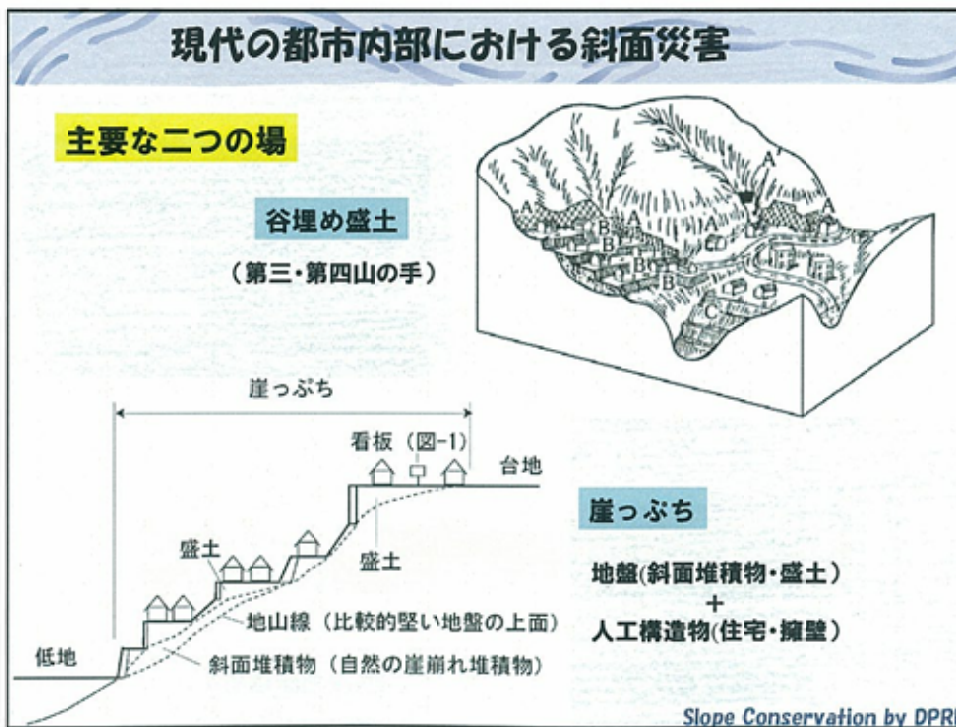
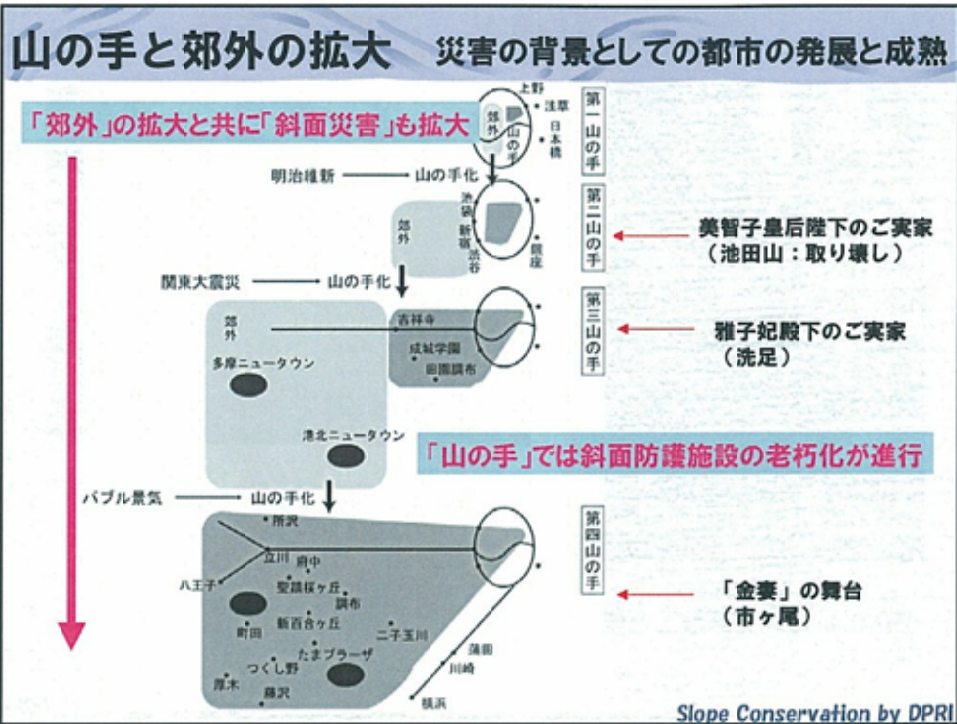
- 1978年宮城県沖地震
- 1987年千葉県東方沖地震
- 1995年兵庫県南部地震
- 1999年集集地震（台湾）
- 2001年芸予地震
- 2003年宮城県沖地震（5月26日）
- 2003年宮城県北部地震（7月26日）
- 2003年十勝沖地震（9月26日）
- 2004年新潟県中越地震
- 2005年福岡県西方沖地震

Slope Conservation by DPRI

都市の斜面災害の2つのタイプ



Slope Conservation by DPRI



「崖っぷち」の災害 ー西品川の例ー



工事のわずかな振動で崩壊
(2004年4月2日)

老朽化した斜面保護工と建築

Slope Conservation by DPRI

谷埋め盛土の問題

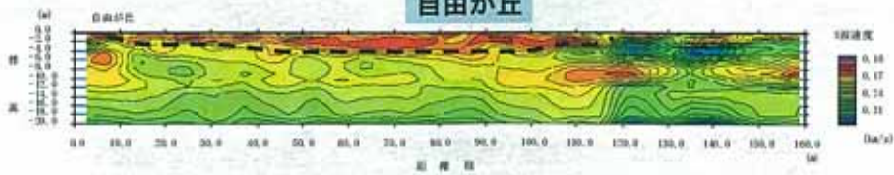


宅地ブーム 1962年2月下旬 横浜市周辺で



横浜市

自由が丘

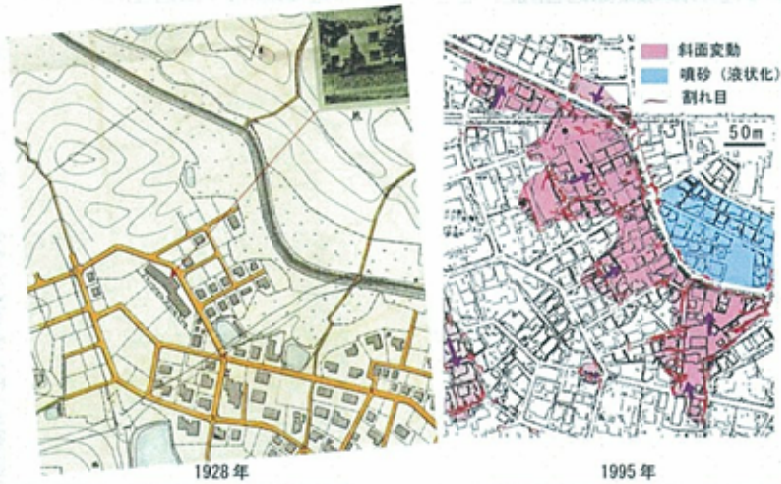


「丘」であるからには、「谷」もあった。そもそも駅は谷の中。

Slope Conservation by DPRI

問題の社会・経済的側面—高級住宅地「夙川」の災害—

ブランド化する宅地、ますます増える災害要因



大神土地の広告チラシから

Slope Conservation by DPRI

本日の目次

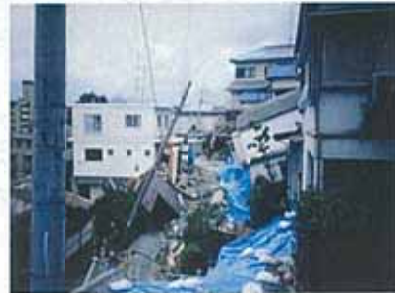
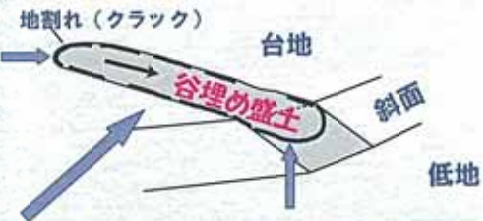
1. 地震による都市域の斜面災害の事例
2. メカニズムの検討
3. 発生（非発生）予測

Slope Conservation by DPRI

兵庫県南部地震—谷埋め盛土地すべり—

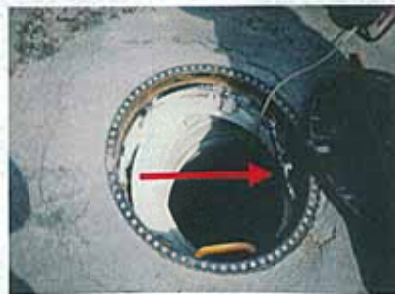


- 地すべり移動体を形成
- わずかな立地の違いが被災を左右した



Slope Conservation by DPRI

被害の状況



Slope Conservation by DPRI

谷埋め盛土地すべりの分布



- 多数の宅地盛土斜面が動いた（住宅地の斜面災害の約7割）。
- 急斜面は損害軽微（対策が進んでいた）。

- 高濃度降雨地域により震動(地すべり)した宅地の盛土
- 高濃度降雨地域による洪水や被害が認められなかった宅地の盛土
- 大雨地帯(盛土)
- 高濃度降雨地域によって宅地の盛土に生じた地帯の影の注

- まれに流動化して人命が失われる（仁川）。

○Inventory調査

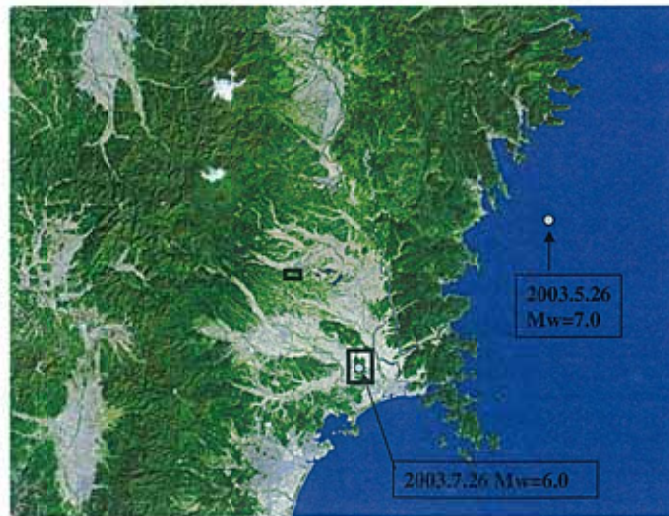
- 発生・非発生地点の特徴は？



- 分布図の範囲
- 震災の帯（震度7の地域）
- 大きく変動し
- 変動しなかった・あまり変動しなかった盛土

Slope Conservation by DPRI

2003年宮城県北部地震災害



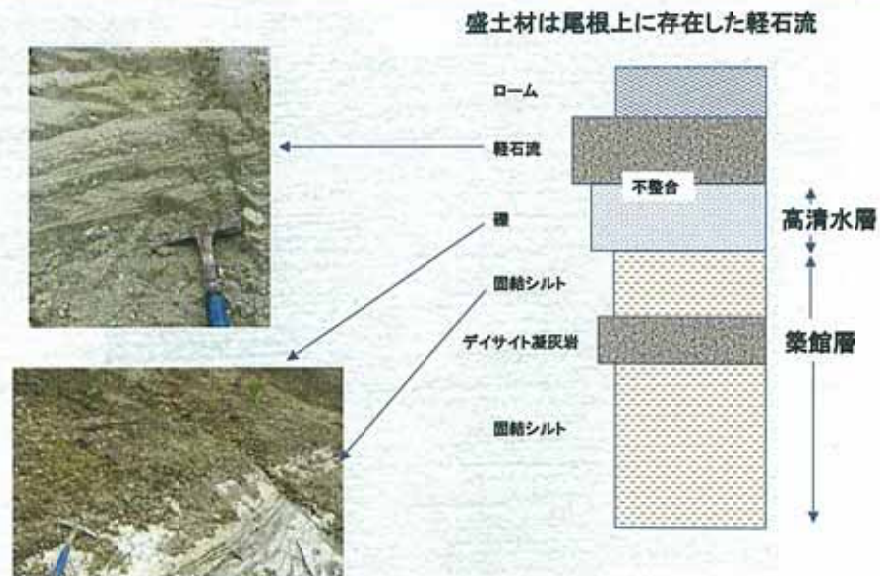
Slope Conservation by DPRI

5月26日の地震による築館町館下の崩壊



Slope Conservation by DPRI

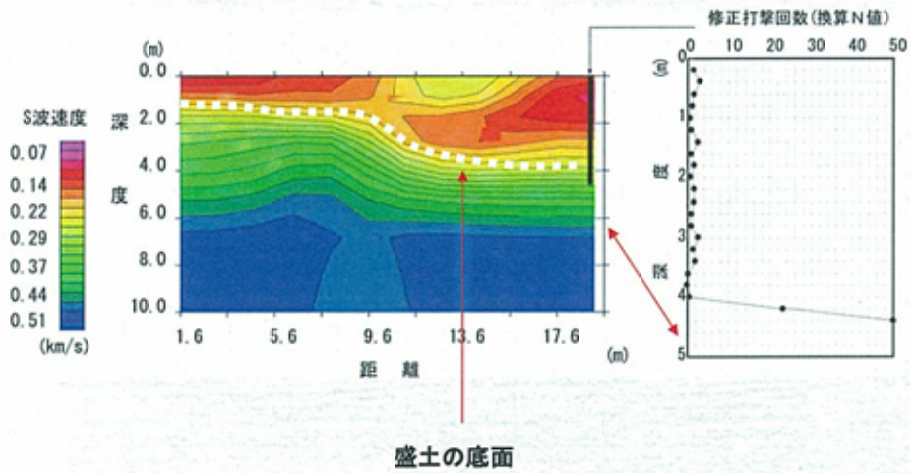
崩壊地付近の層序



Slope Conservation by DPRI

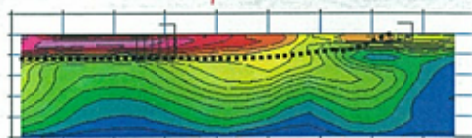
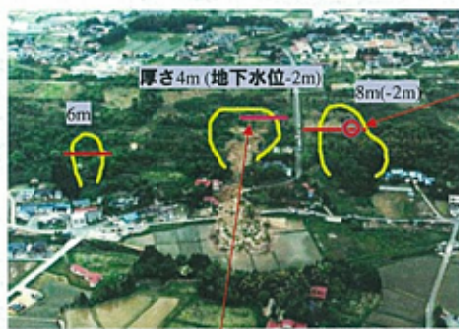
崩壊源背後の（谷埋め盛土の）地質構造

S波速度 縦断面(谷方向)

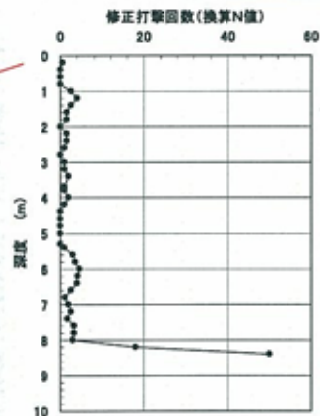


Slope Conservation by DPRI

崩れなかった、隣の盛土



S波速度 横断面(谷の横断)



盛土の強度は同じ
地下水位もほぼ同じ
盛土が厚い(谷が深い)

Slope Conservation by DPRI

崩れなかった、正面の盛土



旧谷底以下に切り込まれた造成地
 地下水位が低い
 盛土が大規模で厚い
 盛土の強度がやや高い

Slope Conservation by DPRI

1978年宮城県沖地震でも類似の現象

教訓は活かされていたか？



仙台市緑が丘3丁目

Slope Conservation by DPRI

7月26日の地震による旭山丘陵の斜面崩壊



砂取り場（切り土斜面）の跡で発生した崩壊が多い

ほとんどが、人工の斜面で発生した

数は少ないが流動性崩壊も発生

凡例

- 崖崩れ（人工切土斜面）
- 崖崩れ（自然斜面）
- 人工盛土斜面の崩壊
- 橋梁及び道路の損傷
- ⋯ 奥の細道（推定）

4 km

Slope Conservation by DPRI

流動性崩壊(西猿田)

崩壊土砂が水を多く含み、流動化したので、移動距離が増加した



Slope Conservation by DPRI

わざわざ田園地帯に造られた「崖っぷち」の崩壊

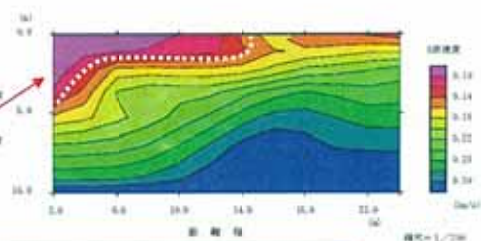


S波速度の遅い地層（つまり緩い、水を含む盛土）が斜面に引っかかっていた

同様な崩壊は他にも数箇所が発生した

旧地表面（盛土の下底）。地下水が流出した痕跡

谷の側面に擦り付ける様な盛土



同様な斜面は都市にも存在する。擁壁があるから今まで露見していない。

Slope Conservation by DPRI

住宅造成地（大塩地区）の被害（定番の谷埋め盛土）



オリジナルな地形（谷）

造成以前の谷の位置



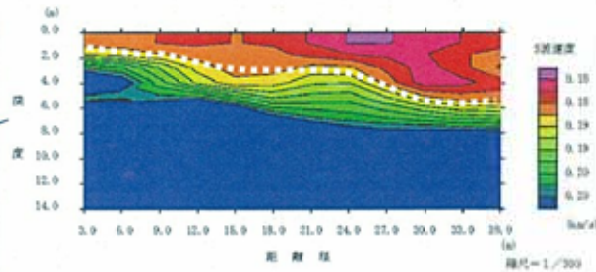
谷を埋めて造成された住宅地（谷埋め盛土）

ブルーシートの部分に被害が集中

Slope Conservation by DPRI

被害を受けた谷埋め盛土の特徴

動いた（被害を受けた）谷埋め盛土と動かなかった（被害が少なかった）盛土が混在



造成以前の谷の横断（西翼）

幅の広い谷の形状

Slope Conservation by DPRI

谷埋め盛土末端での被害



擁壁の変形（前へせり出したため背後が沈下）

ようするに大きい土圧を受けた

地すべり移動体の土圧が作用？

中越地震ではより激しい例を見る事になった



Slope Conservation by DPRI

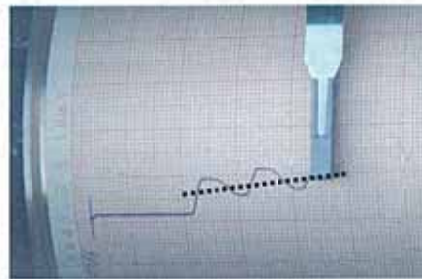
地震後も変動はしばらく継続



擁壁背後のテンションクラック（谷埋め盛土の地すべりの頭部？）

9月半ばでも余効的変動が継続
（末端部の圧縮）

土の剛性は回復しているはず
なので、地すべりに運動？



Slope Conservation by DPRI

2003年十勝沖地震による札幌・釧路都市域の斜面災害

“長周期の震動を与える”プレート型地震の例として貴重

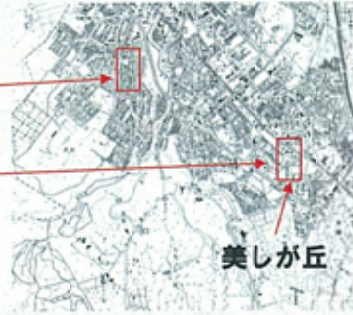


Slope Conservation by DPRI

札幌の被害



造成以前



美しが丘

噴砂（液状化）、沈下、クラック、側方流動（部分的）
谷埋め盛土の部分で発生

Slope Conservation by DPRI

「美しが丘」で起きた美しくない災害



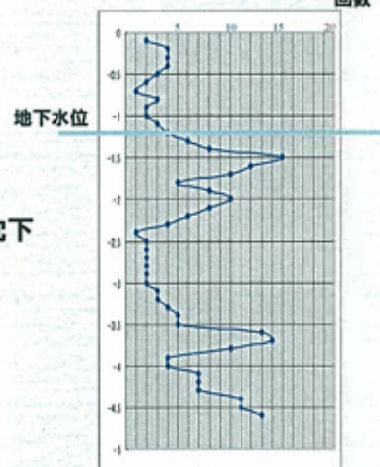
不同沈下



噴砂

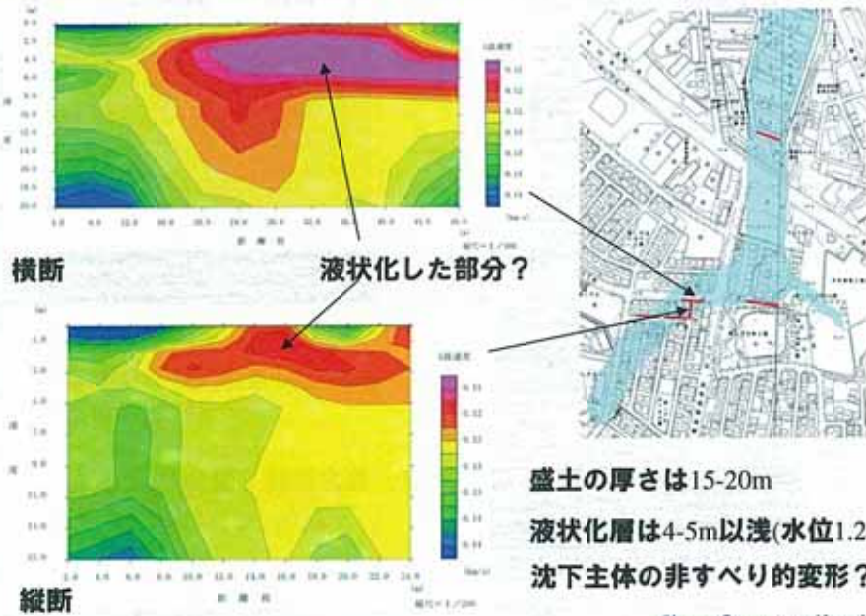
簡易貫入試験

回数



Slope Conservation by DPRI

大規模な谷埋めの一部分が液状化



Slope Conservation by DPRI

釧路の被害: 広く薄く、しかし多様



釧路層(更新統の湖成堆積物)と火山噴出物が作る台地を開発。低地は泥炭地

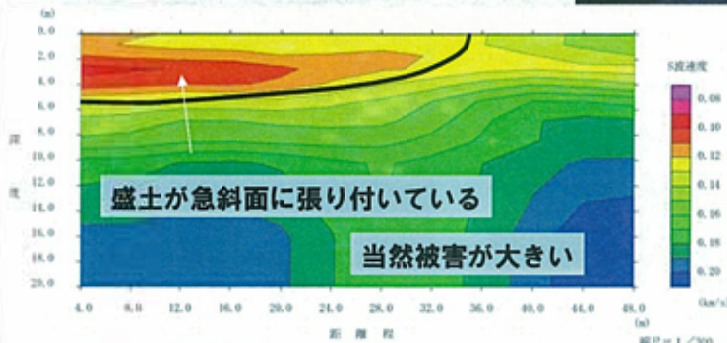
広く薄く、1993年と同様な被害

Slope Conservation by DPRI

繰り返される「崖っぶち」での災害



1993年にも同様に被害を受けた



Slope Conservation by DPRI

「緑が丘」の谷埋め盛土



1993年釧路沖地震
(釧路市緑が丘6丁目)

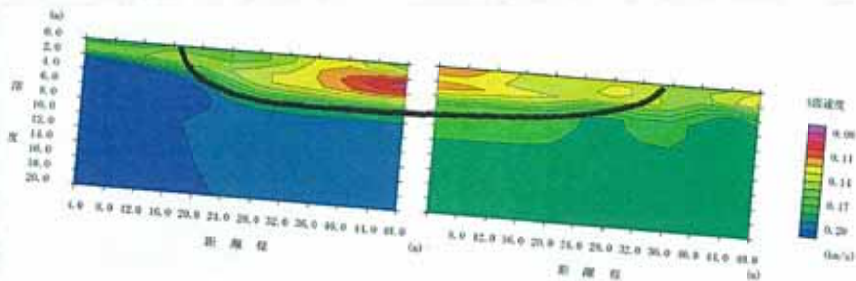
2003年釧路沖地震
(釧路市緑が丘)

地すべりの変動



Slope Conservation by DPRI

谷埋め盛土（緩斜面に発生したブロック的運動）



Slope Conservation by DPRI

地すべり上では、住宅基礎がズレるほど激しい震動



基礎が水平にせん断された

地すべりブロック上では住宅に
深刻なダメージ

Slope Conservation by DPRI

新潟県中越地震による長岡都市域の斜面災害



第四紀内陸盆地

活断層

新第三系山地+地すべり

人口20万人、新潟県第二の都市

東部の郊外は60年代から、西部の長岡ニュータウンは70年代からバブル期に開発

都市域の地すべりは、ほぼバブル期以前の開発地で発生した

Slope Conservation by DPRI

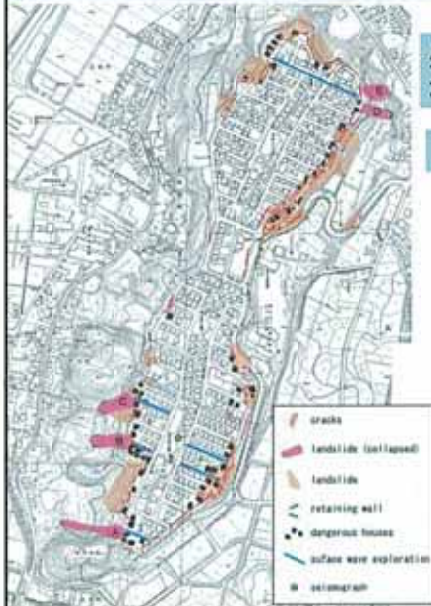
2004年新潟県中越地震による高町団地の災害—ある崖つぶち災害—



団地の周縁部（主として盛土）が浅くすべった。特に谷頭を埋めた部分（底面傾斜が急な谷埋め盛土）の部分で顕著だった。

Slope Conservation by DPRI

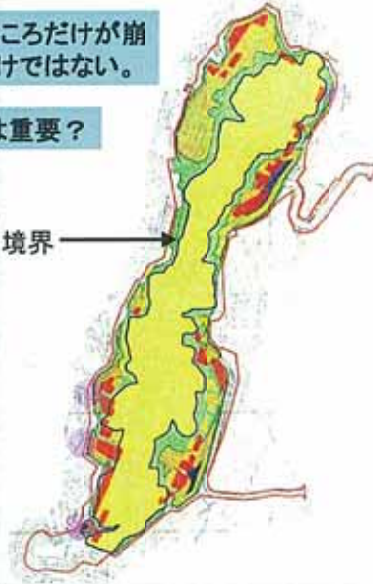
高町団地における盛土の分布



盛土の厚いところだけが崩壊しているわけではない。

盛土の厚さは重要？

切り盛り境界



Slope Conservation by DPRI

盛土と擁壁



泥・シルト・砂・礫、
(一部、凝灰岩)

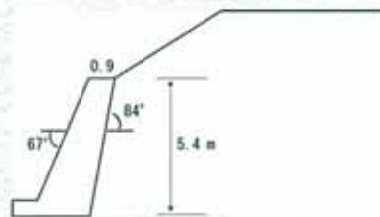
魚沼層(地山)



高町(谷埋め盛土)



地下水の染み出し



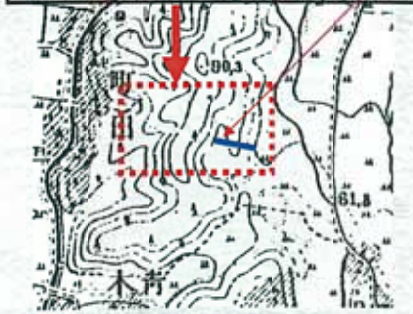
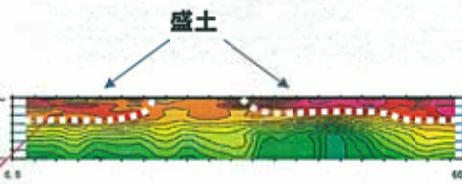
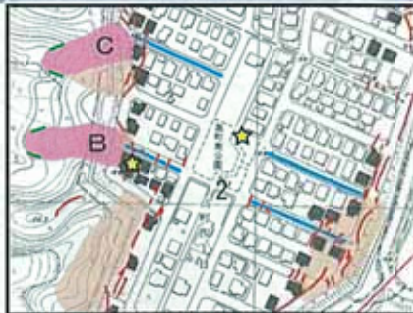
Slope Conservation by DPRI

崖っぶちの崩壊（崩壊B）



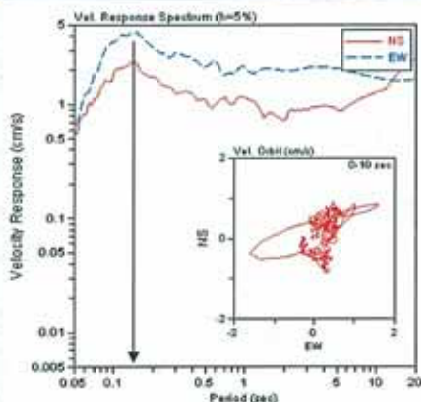
Slope Conservation by DPRI

南部(意外に複雑な台地の内部構造)

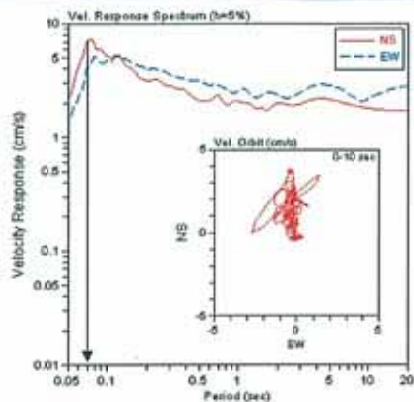


Slope Conservation by DPRI

余震の観測（12月17日）



地山（団地中央の公園）



周縁部の盛土（崩壊Bの背後）

地山に対する盛土の増幅比は、加速度で約1.8、速度で約1.3倍

非常に短い周期が卓越（地震の規模が小さい、直下型）

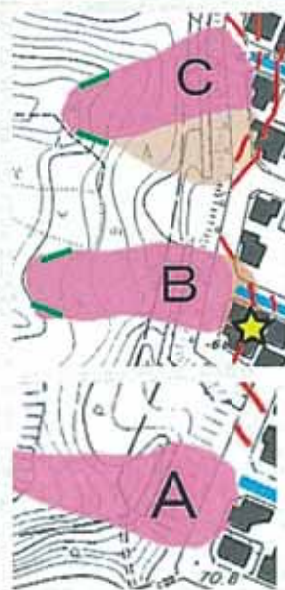
盛土の方が卓越周期が短い（地形の効果？）

Slope Conservation by DPRI

被害が軽微な谷埋め盛土



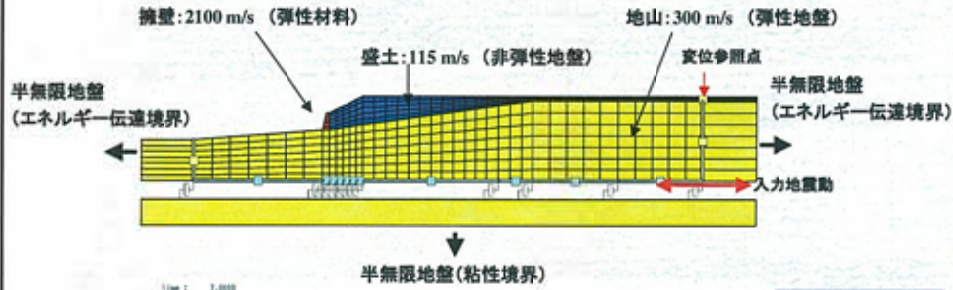
何が違う？



クラックは出現したが
崩壊しなかった例

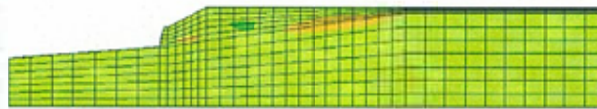
Slope Conservation by DPRI

等価線形解析 (FLUSH)



崩壊B
 (最大盛土厚=8 m)

せん断ひずみの分布 (最大約1.5%)
 7~8秒



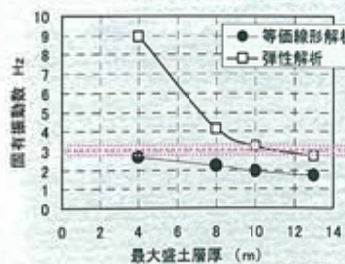
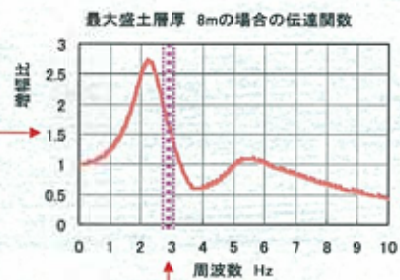
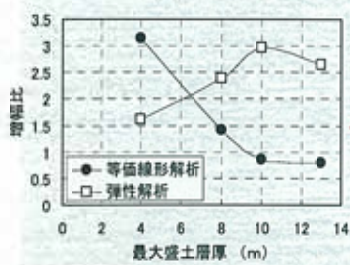
せん断ひずみ

浅い部分で発生し、すべり面に沿って深部へ伝播。中央部のすべり面付近に集中する。

つまり、地震時のすべりに対抗する擁壁が必要だった

reservation by DPRI

宅地地盤の被害における振動特性の効果



つまり、今回の地震は浅い(小さい)盛土に厳しい揺れだった。だから、薄い部分でも崩壊? もしも、より長周期成分の強い地震だったら?

長岡付近における本震の卓越振動数 \approx 3 Hz

Slope Conservation by DPRI

乙吉町、鶴ヶ丘団地の被害



Aでは谷埋め盛土地すべり

Bでは再活動型地すべり



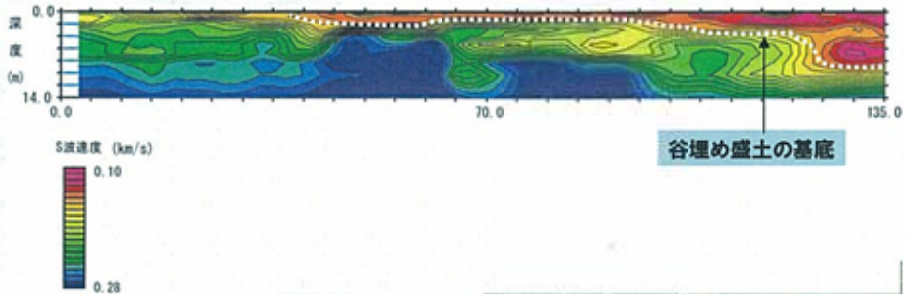
Slope Conservation by DPRI

谷埋め盛土の被害



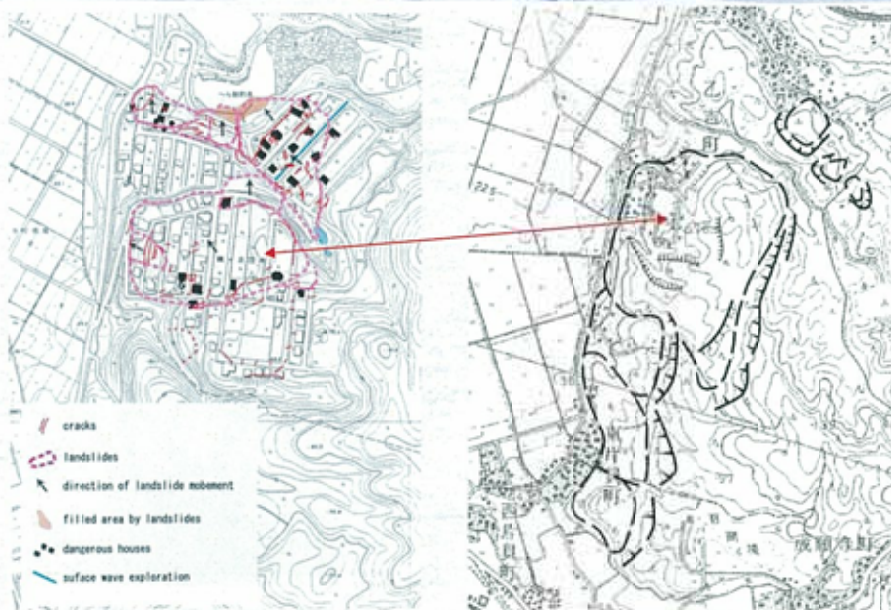
Slope Conservation by DPRI

谷埋め盛土の内部構造と被害



Slope Conservation by DPRI

丘陵斜面の地すべり地形と被害



Slope Conservation by DPRI

地すべりの再活動？

連続性の良いテンションゾーン



再活動した地すべりの頭部？

Slope Conservation by DPRI

長岡ニュータウン（陽光台一丁目）の被害

震源から遠くても被害が出る

ただし、液状化による沈下(十勝沖地震による札幌と同じ)

厚い谷埋め盛土



Slope Conservation by DPRI

海外でも都市は埋もれている

“系統発生”する都市域の斜面災害

都市への人口集中は世界的な現象。

アジアの大都市域では、高度成長期の日本と同様な開発が行われている。

やがて、都市域で斜面災害が頻繁に発生すると予想される



Slope Conservation by DPRI

1999年集集地震

車平営における人工地形改変と被害

谷の出口



Slope Conservation by DPRI

建物の被害



この部分にあった建物は倒壊

谷埋め盛り土の中心部へ
地盤が移動。建物が基礎ごと
引きずられて変形



Slope Conservation by DPRI

2. メカニズムの検討

斜面はどの様に揺れるのか？

どこまで揺れたら壊れるのか？

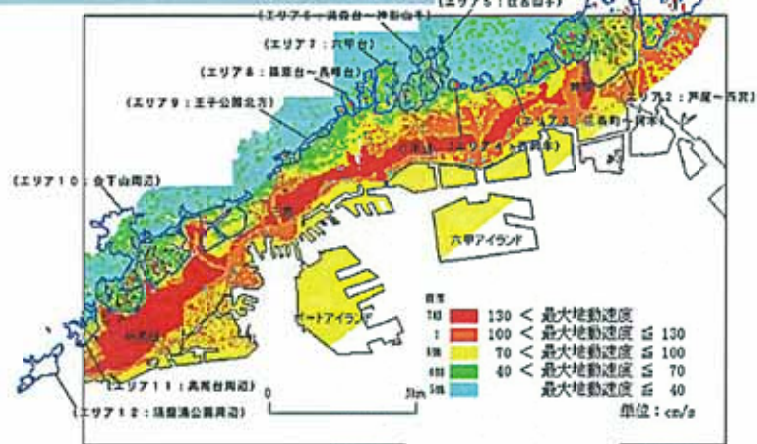
滑りなのか、塑性変形なのか？

Slope Conservation by DPRI

谷埋め盛土が被災する震動は？

震度5強で谷埋め盛土全体の4% 震度6強で40% 震度6強で62%が被災

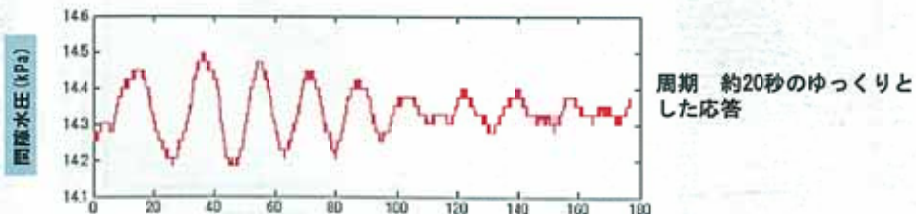
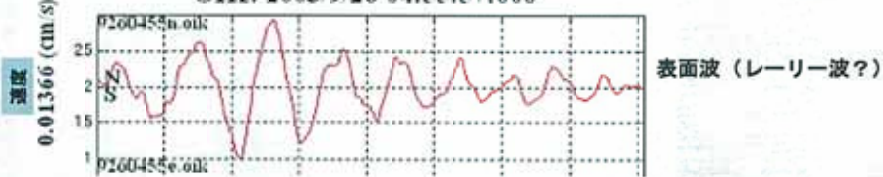
震度6付近、40cm/sぐらいから顕著になる災害



Slope Conservation by DPRI

2003年十勝沖地震（和歌山観測点）

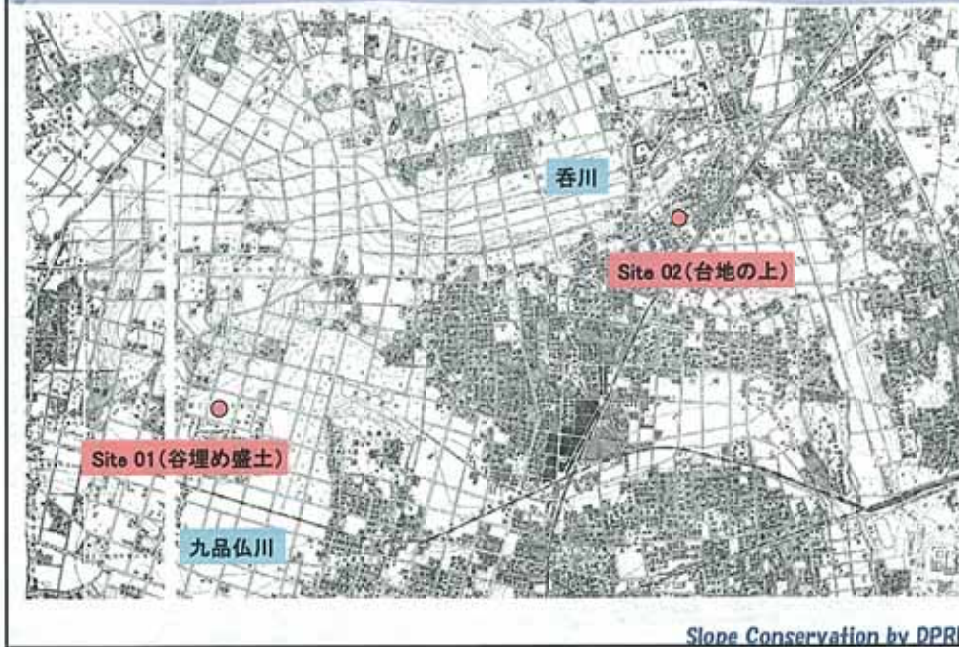
OIK: 2003/9/26 04:55:57:000



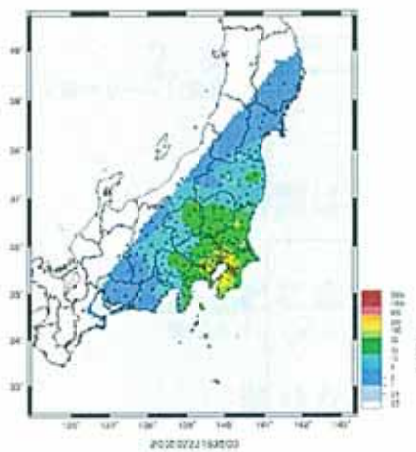
低周波数の地震と良く一致する？

Slope Conservation by DPRI

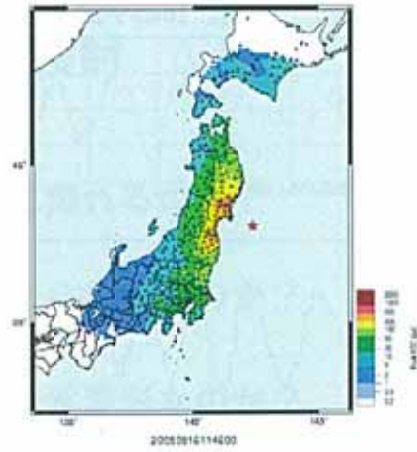
東京観測点の位置



「東京」で観測された主な地震



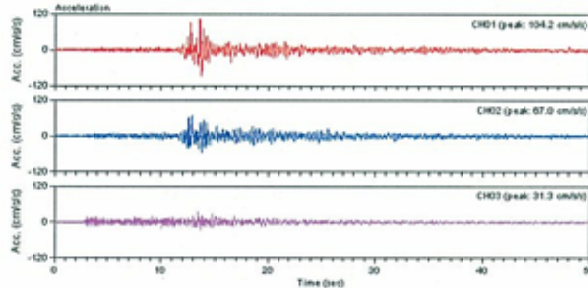
千葉県北西部地震 (M5.7)
(2005年7月23日)



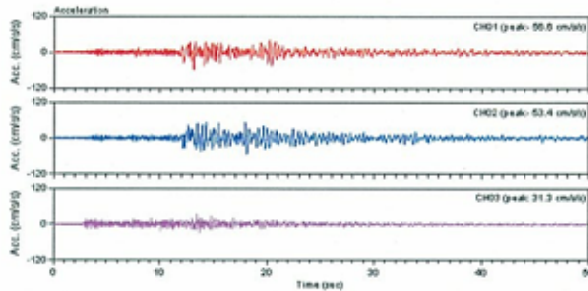
宮城県沖地震 (M7.2)
(2005年8月16日)

Slope Conservation by DPRI

千葉県北西部地震による加速度記録



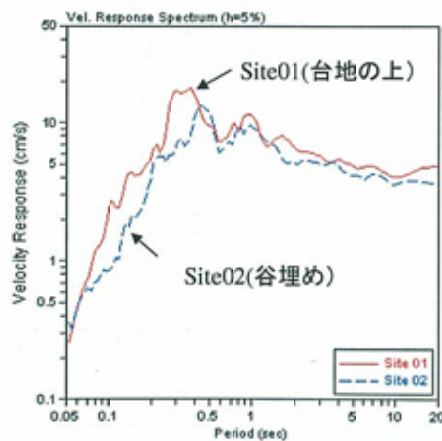
Site 01 台地の上



Site 02 谷埋め

Slope Conservation by DPRI

千葉県北西部地震による速度応答スペクトル

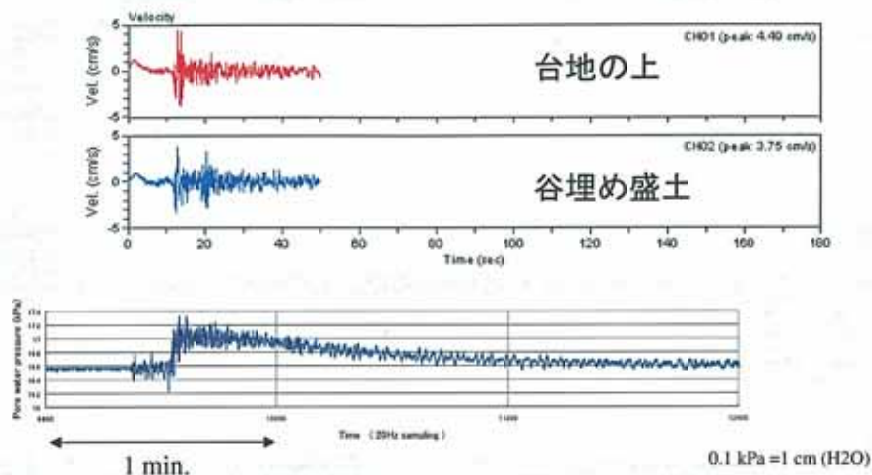


周期0.3-0.5秒(2-3Hz)に
やや幅の狭いピーク

応答の大きさは、
台地の上 > 谷埋め

Slope Conservation by DPRI

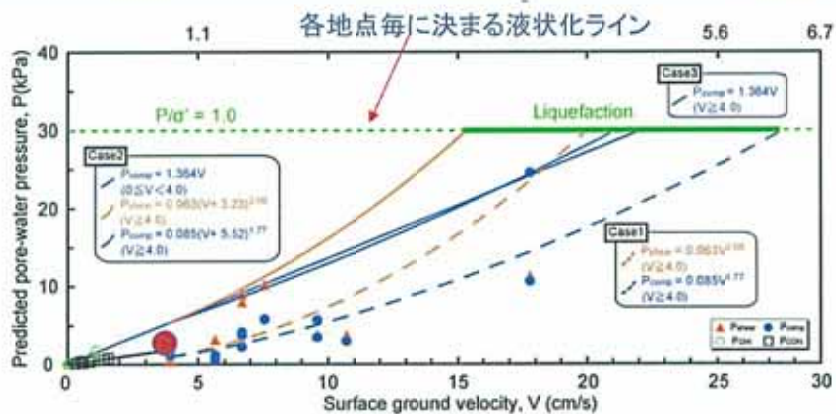
千葉県北西部地震の速度記録と間隙水圧応答



谷埋め盛土中の間隙水圧に見られた非線形応答(ただし、小さい)

Slope Conservation by DPRI

応用例 - 谷埋め盛土地すべりの予測に役立つか？ -

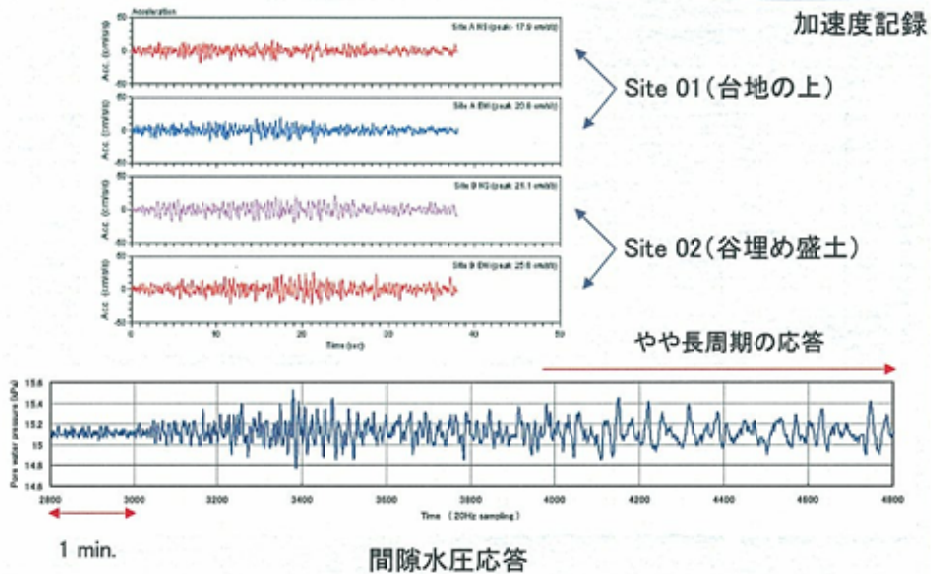


観測された間隙水圧の上昇量は、過去の例と矛盾しない

この例では、危険な盛土 = 「15 cm/s以上の速度が出現する地域に分布する形状が不利な盛土」

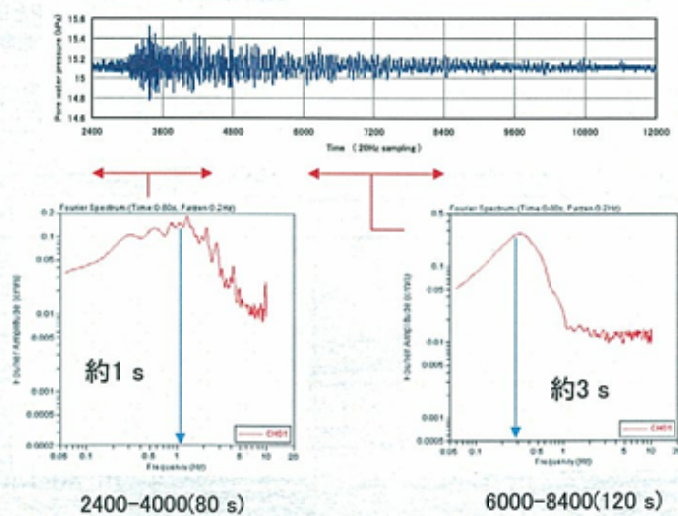
Slope Conservation by DPRI

宮城県沖地震による加速度記録と間隙水圧応答



Slope Conservation by DPRI

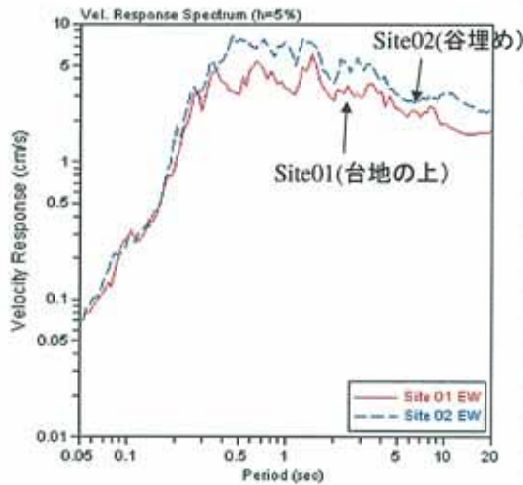
宮城県沖地震による間隙水圧応答



応答周期が延びている。非線形化しかかった？

Slope Conservation by DPRI

宮城県沖地震による速度応答スペクトル

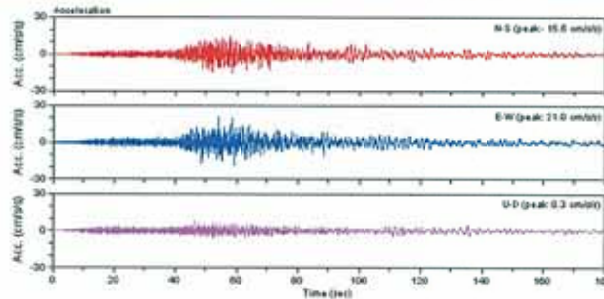


周期0.4-1.6秒(0.6-2.5Hz)に
やや幅の広いピーク

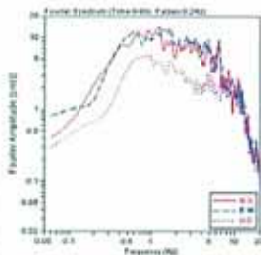
応答の大きさは、
台地の上 < 谷埋め

Slope Conservation by DPRI

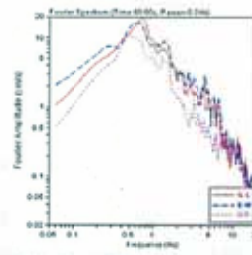
宮城県沖地震による加速度記録 (K-NET 新宿)



自前の観測とほぼ同じ
応答特性(地震計は正
常)



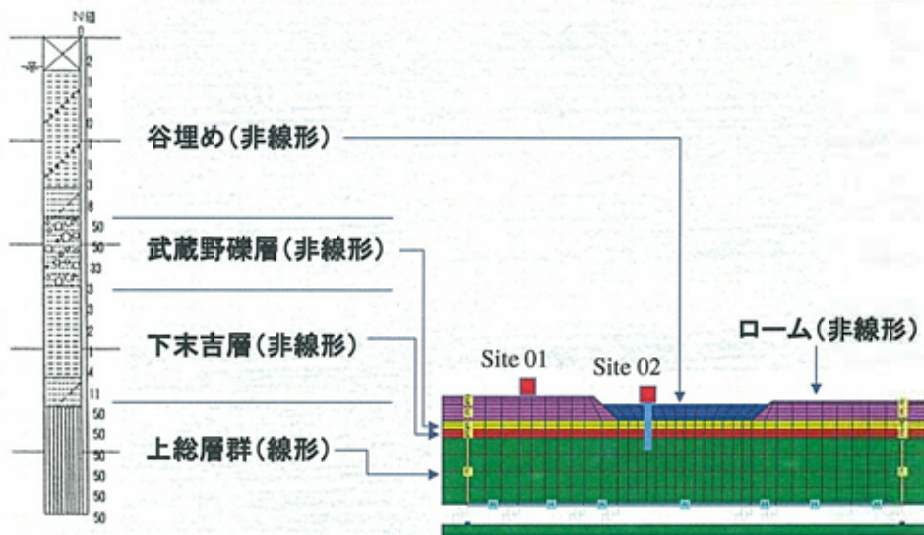
0-80 s



80-140 s

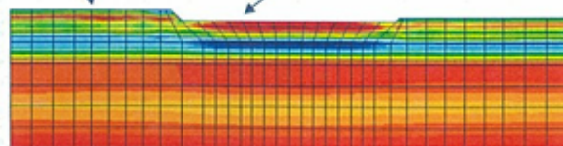
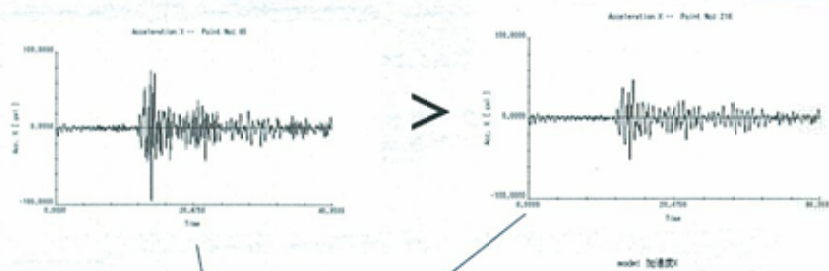
Slope Conservation by DPRI

地盤と解析モデル



Slope Conservation by DPRI

千葉県北西部地震（基盤への入力=50gal）



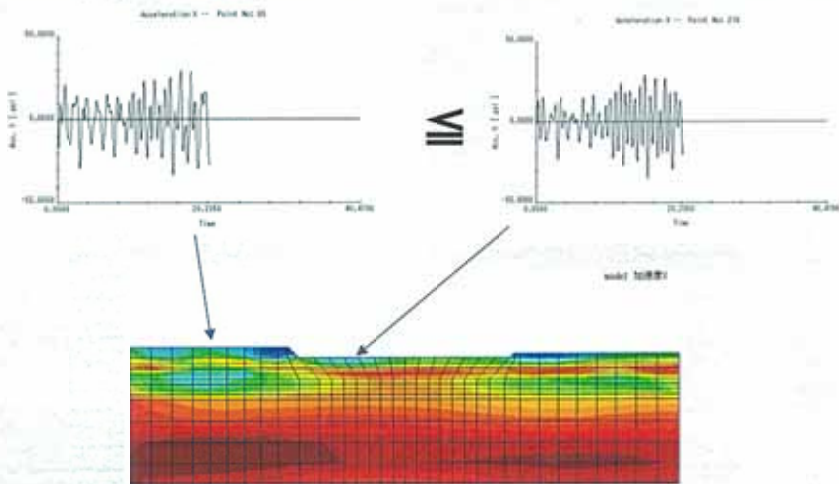
青いほど大きい

現実とほぼ同じ加速度応答が再現できた

谷埋め盛土の内部では加速度は減衰

Slope Conservation by DPRI

宮城県沖地震（基盤への入力=10 gal）



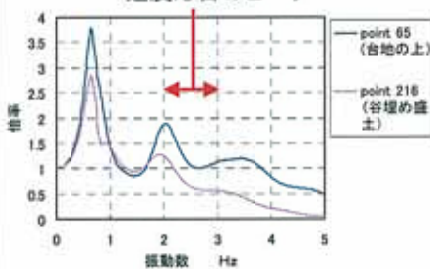
現実とほぼ同じ加速度応答が再現できた

谷埋め盛土と台地(地山)の加速度はほぼ同じ

Slope Conservation by DPRI

伝達関数と速度応答の関係

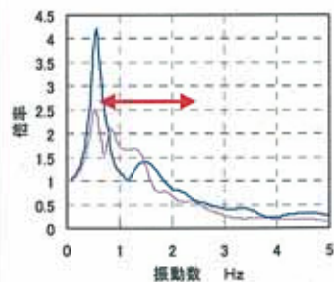
速度応答のピーク



「やや強い地震では、台地>谷埋めとなるケースが多い」ことを予想させる結果

千葉県北西部地震

全体に 台地>谷埋め



宮城県沖地震

地震動の範囲では 台地≒谷埋め

Slope Conservation by DPRI

これまでの観測結果とその解析でわかったこと

- 厚さが10m程度の谷埋め盛土の場合、震動が谷埋め盛土で増幅されるケースよりも、「台地の上>谷埋め盛土」になる可能性の方が大きい。
- 特に、非線形応答が顕著になると減衰が大きくなり、上記の傾向が強調される。
- 単純な塑性変形説には不利な証拠。「間隙水圧上昇→液状化→すべり」のシナリオが現実味をおびてきた。

したがって、

- 谷埋め盛土の大変形には、破壊と地すべりが深く関与している(谷埋め盛土地すべりの定義)。
- そのためには、谷埋め盛土の強度が低いことが必要→現実の谷埋め盛土の V_s は200 m/s以下なので条件は満たされている。
- 液状化の発生の発生は、谷埋め盛土地すべり必要十分条件？

○崖っぶちの震動は大きい (中越地震での観測結果と一致する)

Slope Conservation by DPRI

3. 発生 (非発生) 予測

3.1 経験的な予測

3.2 安定解析 (経験からの脱却)

Slope Conservation by DPRI

3.1 経験的な予測

データが最も豊富な谷埋め盛土なら可能

しかし、数が多い。そこで出来るだけ、簡単に広域に災害発生予測（出来ればマッピング）を行い、次の地震に備えたい

そのためには、地盤物性は敢えて後回し

しかし、地震（トリガー）の特性は取り込みたい

従来の統計解析（数量化法を含む）では、ここがネック

使える地震の数は少ない（データ数の問題）

非線形教師付学習 ニューラルネットワークの可能性

Slope Conservation by DPRI

谷埋め盛土の変動予測手法の開発

同じ地域に分布する谷埋め盛土でも、変動したものと変動しなかったものがある。両者を区別したい

なぜか、V字谷では被害が少なかった

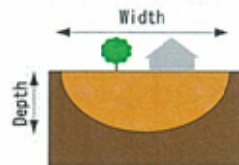
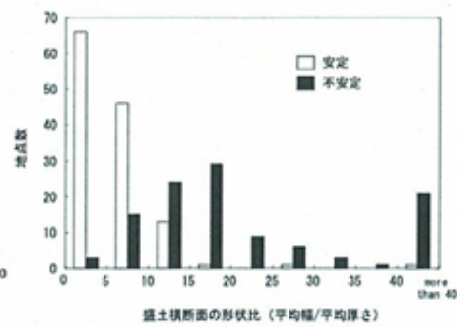
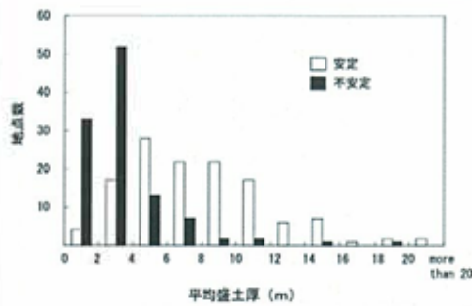
揺れ方、すべり方を規定した？

側面の摩擦が強く影響？



Slope Conservation by DPRI

谷の地形(盛土の形状)



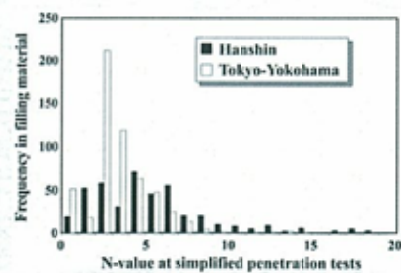
○ 浅くて幅が広いほど良く動く

Slope Conservation by DPRI

統計解析(数量化II類)による確率予測のプロセス

ステップ1 変動の分布を調べて要因を分析する

ステップ2 要因を絞り込む
 ——地盤強度(使用しなかった)——
 盛土の形状
 地下水の状況
 形成年代 等



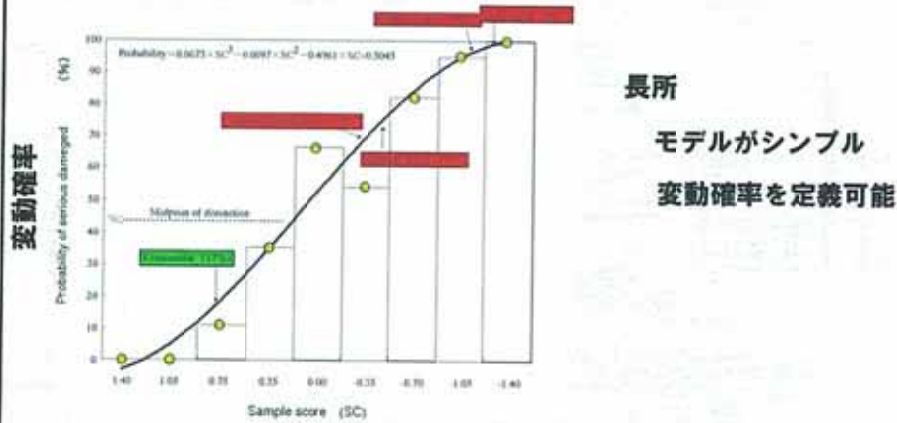
ステップ3 カテゴリーに区分し、変動・非変動事例が最もうまく分離できるようにカテゴリースコアを計算

ステップ4 各地点の条件に対応するカテゴリースコアを集計し、サンプルスコアを計算

ステップ5 既存のサンプルスコアと変動率の関係から変動確率を計算

Slope Conservation by DPRI

数量化法（区分的線形解析）の長所と欠点



長所

モデルがシンプル
変動確率を定義可能

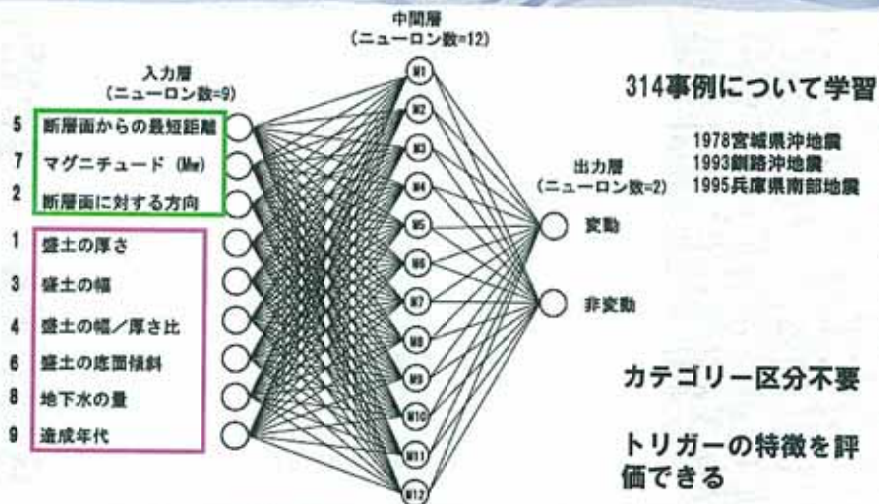
欠点

カテゴリ区分が必要（恣意的になりやすい）

トリガー（地震）の特徴を取り入れにくい

Slope Conservation by DPRI

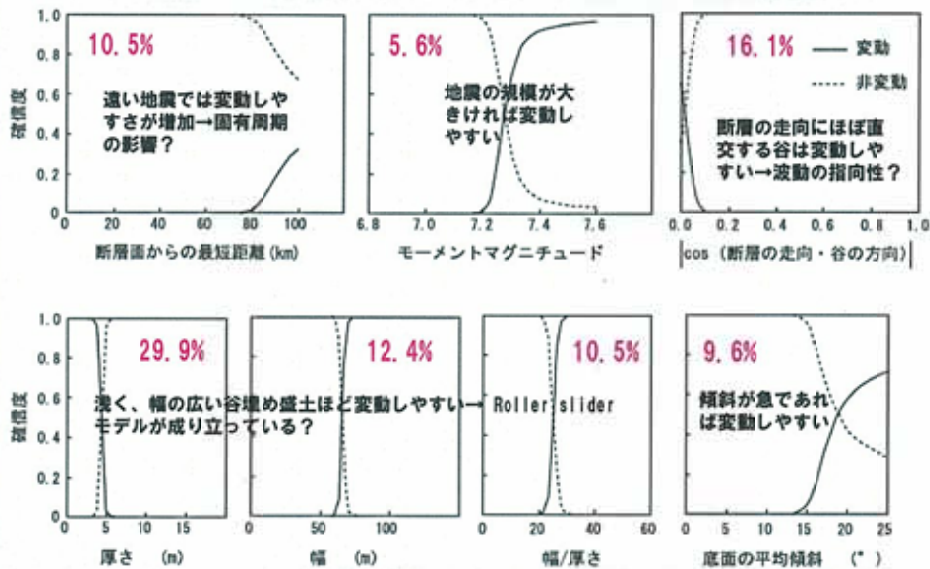
ニューラルネットワークモデル（非線形解析）



精度評価試験（わざと学習させなかったデータの判別）でも高い正解率（約92%）

Slope Conservation by DPRI

感度試験（一種のシミュレーション）



Slope Conservation by DPRI

2003年の地震によるチェック

宮城県沖の地震（5月26日）

宮城県北部地震（7月26日）



学習データ314例では
正解率95%

認識データとした宮城県北部の二つの地震災害では、7勝1敗（ひいき目？）

しかし、十勝沖地震（プレート型地震）では0勝4敗（不安定化したのに“安定”と判定）。つまり、全ての地震に有効では無い。学習させていないパターン（遠方の巨大地震等）や異なる現象（液状化による沈下等）には無力（当たり前）

○メカニズムを考慮する必要性

Slope Conservation by DPRI

予測モデルの適用



神奈川県境直下の地震 (M=7.2)

1万分の1地形図「自由が丘」、「武蔵小杉」、「鶴見」、「新横浜」の範囲

目黒、世田谷区～横浜市北部

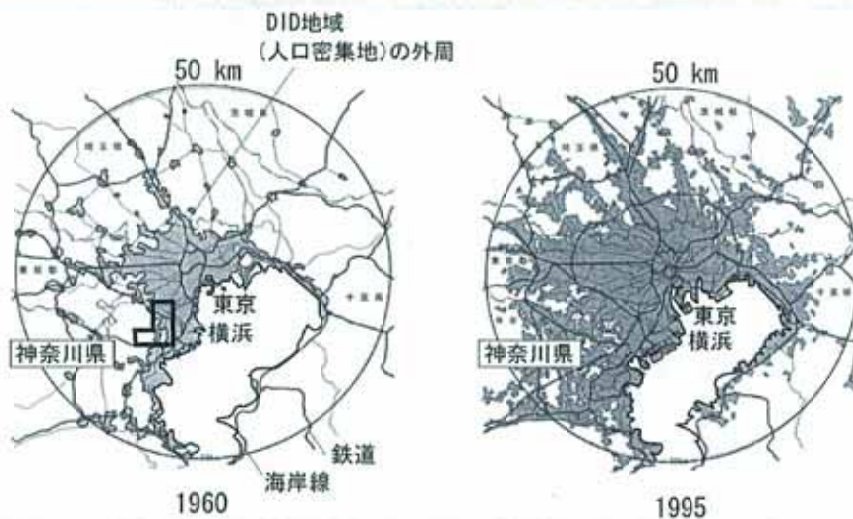
東急東横線沿線の360箇所の谷埋め盛土



東京都 (1997) の予測における「神奈川県境直下の地震」を想定

Slope Conservation by DPRI

東京・横浜の発展



都市と田園の境界 (郊外) に位置していた予測地域は、
現在では都市域 (住宅密集地)

Slope Conservation by DPRI

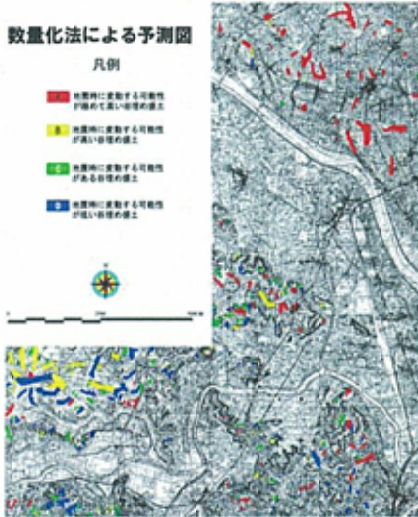
宅地（盛土）地盤の地震時危険度予測マップ

地震時斜面災害予測図（谷埋め盛土地盤）
- 東京西南部 ~ 横浜北部 -

数値化法による予測図

凡例

- 地震時に変動する可能性が極めて高い谷埋め盛土
- 地震時に変動する可能性が高い谷埋め盛土
- 地震時に変動する可能性がある谷埋め盛土
- 地震時に変動する可能性が低い谷埋め盛土



ニューラルネットワークによる谷埋め盛土の変動予測図

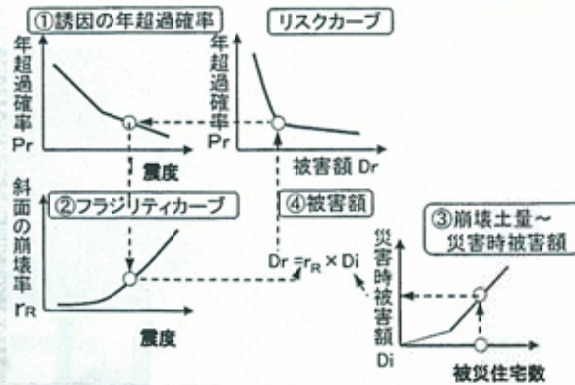
凡例

- 変動と判定された盛土
- 非変動と判定された盛土



Slope Conservation by DPRI

いつかは、やりたいリスクマネジメント



- ある確率で発生する地震の大きさ(例えば、震度6)に対応する谷埋め盛土すべりの発生率(r_R)を求める
- ある地域の盛土(の総数)による災害時被害額(D_i)を何らかの指標(例えば住宅軒数)を基準に求める
- 上記の谷埋め盛土すべりの発生率(r_R)と災害時被害額(D_i)をかけて、ある確率に対する被害額(D_r)を求める
- 上記の過程を繰り返して、リスクカーブを作っておけば、地震の発生確率毎の被害額が推定できる

Slope Conservation by DPRI

3.2 安定解析（経験からの脱却）

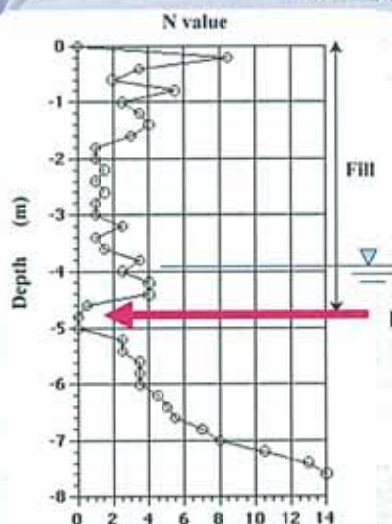
一見「常識はずれな」調査結果は何を意味するか？
（なぜ、浅くて幅が広い盛土が滑りやすかったのか？）

現象を説明しうるモデルの提案「事実学ぶ」

簡便な解析による変動・非変動の分離

Slope Conservation by DPRI

Roller slider モデル



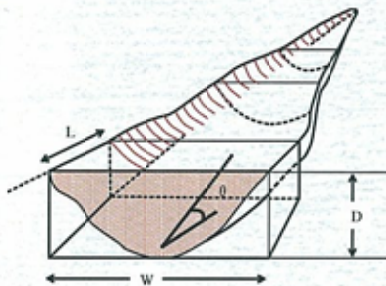
○多くの谷埋め盛土の底部には、
（超）軟弱層が存在

Slope Conservation by DPRI

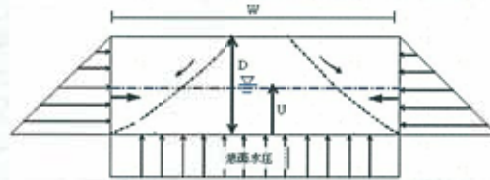
地すべり学会による解析（太田・榎田モデル）の可能性



太田 (2004)



榎田による定式化



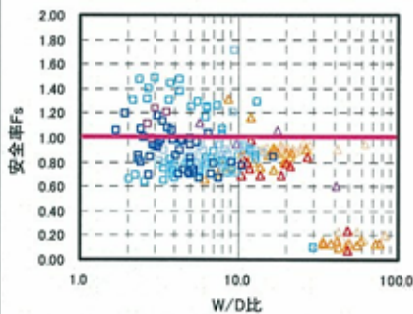
弁当箱モデルで単純化

側面拘束の影響を土圧と関連付けて表現

土圧の起源は？

Slope Conservation by DPR

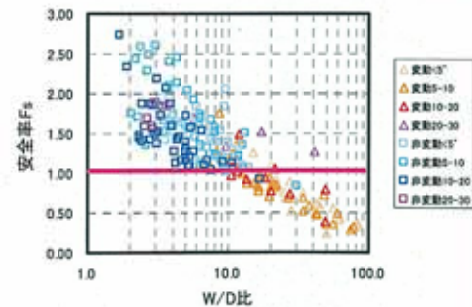
地すべり学会法は調査結果（特に滑らなかった事例）を説明可能



通常の二次元安定解析

変動・非変動の分離が出来ない
不合理な結果

地すべり学会法(太田・榎田モデル)
変動・非変動の分離に“一応”成功
側部抵抗を評価する事の重要性を示す



問題の本質 — 社会システム上の欠陥? —



ルールに問題があったのなら、
ルールの変更は可能か？

(高町団地)

Slope Conservation by DPRI

これまでのルールの背景—住宅と家族の55年体制—



太いゴムホースを机にたたきつけ「やる気、やる気」と懇々と説く社員。士気を鼓舞するためという—1989年6月、神奈川県で

戦後の米国文化の象徴としてのレヴィットタウン（現在のニュータウン）
「誰でも自分の家と土地を持てば共産主義者にはならない」（レヴィット）

オートメーションシステムによる安価な住宅の大量供給

わが国では「エネルギー革命による里山管理の放棄」と「高度経済成長」
によって助長された（企業戦士と専業主婦の家）。

Slope Conservation by DPRI

「宅造法の改正」と「宅地耐震化推進事業の創設」

昭和37年制定以来の初めての改正（平成18年10月施行）

「宅地造成工事区域」外であっても危険と判断されれば、都道府県知事は「造成宅地防災区域」をスポット的に指定できる。改善命令等の強制力のある措置をとることも可能。その前提として、ハザードマップを作成し、危険地域の抽出と対策の必要性を住民に説明。

対策を行う場合、

調査費用の補助金：自治体に対して補助率1/3

対策費の補助金：国から自治体へ1/4（自治体が同額を支出）

住民の負担分については、税の軽減措置

ここでも護送船団方式が崩壊し、55年体制が終結。

宅地の地盤についても個別にリスクを負わねばならない時代が到来。

今年（平成18年）は民度が試される、宅地耐震化元年。

Slope Conservation by DPRI

まとめと今後の問題

都市内部には、谷埋め盛土地すべりと崖つぶちの問題が存在する。

都市の斜面災害は、重層的な都市の構造を反映した現象であり、これが、多くの地震で繰り返し発生した理由。重層性は都市の本質そのものだから、これからも発生する。

谷埋め盛土の簡便な予測については解答（予測手法）が得られつつあるが、さらに現実には、簡便で安価な対策工法の開発が必要。そのためには？

その他の都市の斜面安定問題。例えば、大規模な深い盛土の沈下、崖つぶちの崩壊問題の理解にも歴史的視点が必要。例えば、近世城郭遺構、坂道、古墳。

恐らく、個別の問題については解決策が得られるが、本質を理解するには総合化する手法が必要。例えば、地盤の特性と土地利用史を統合した“崖つぶちマップ”の可能性は？

結局、全ての問題を包含する広域、総合的災害危険度評価が必要である

Slope Conservation by DPRI