

大規模地震時による宅地造成斜面の崩壊範囲の評価に関する基礎的検討

駒井 尚子¹・秦 吉弥²・常田 賢一³・魚谷 真基⁴

¹ 学生会員 大阪大学 工学部 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: skomai@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³ 正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴ 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: muotani@civil.eng.osaka-u.ac.jp

盛土構造物の耐震設計法においては、地震時におけるすべり破壊の有無の判定あるいは地震後における残留変形量などの評価に主眼をおいたものとなっており、斜面の崩壊範囲については検討の対象となっていない。一方で、自然斜面は耐震設計の対象ではないが、各都道府県のがけ条例による建築禁止範囲に関する規定が存在する。そこで本研究では、既往の大規模地震により崩壊した宅地造成斜面を対象として、法肩から天端におけるすべり面の位置までの水平距離に着目した基礎的な検討を行った。その結果、一次すべりのみの定義では、崩壊実績を十分に再現することができず、一次すべりだけでなく二次すべりについても同時に考慮する必要性が高いことなどがわかった。

Key Words : *ground motion, stability assessment, slope failure, slip surface, secondary slip*

1. はじめに

日本は世界有数の山岳国であり、国土面積の約7割が山地や丘陵地で占められていることから、急傾斜地における盛土や自然斜面が数多く見受けられる。さらに日本は、世界有数の地震国でもあり、宅地盛土、道路盛土、鉄道盛土および河川堤防などの盛土構造物の被災や自然斜面の崩壊がしばしば発生している。

盛土構造物に対しては、これまで、円弧すべり法に震度法を適用した手法によって簡易に地震時の安定性が検討されてきた¹⁾。1995年兵庫県南部地震以降では、性能照査の概念が取り入れられ、安全率ではなくNewmark法²⁾や弾塑性FEM解析³⁾などの手法を用いて直接、盛土の残留変位量等を照査する設計⁴⁾が行われている。すなわち、地震時における盛土がすべり破壊を起こすか否かの判定、および地震後における盛土の残留変形量(滑動変位量や沈下量など：図-1参照)に主眼をおいた検討はなされているが、斜面崩壊範囲については、これまで十分な検討がなされていない。しかしながら、既存斜面の耐震診断等を考えると、被災の可能性についての評価だけでなく、斜面崩壊範囲の評価^{5,6)}も必要であろう。

一方、自然斜面等に対しては、耐震設計の対象とはなっていないが、各都道府県の建築基準法に関する条例中のがけに関する条文(以後、がけ条例⁷⁾と呼ぶ)による建築禁止距離に関する規定が存在する。凸型形状を有する斜面では既往の地震において斜面崩壊事例が多いという既往の報告⁸⁾を勘案すれば、地震時における斜面のすべり破壊がどの程度の範囲にまで進行する可能性があるのかを推定し、対策を施すことは非常に重要である。

この点に関して秦ほか^{5,6,9,10)}は、2009年駿河湾を震源とする地震で被災した東名高速道路の盛土斜面、および2001年芸予地震で被災した呉市両城の造成斜面を対象として、地盤強度のバラツキを考慮したモンテカルロシミュレーション(MCS)を実施し、地震時における斜面の崩壊範囲の評価指標として最大すべり面を提案している。しかしながら、限られた数(僅か2つの事例)のケーススタディに基づいた提案であること、いずれもスラブ内地震を対象としており内陸地殻内地震やプレート境界地震を対象としていないこと、設計実務においてMCSの実施は煩雑となる可能性も残されていること、などを勘案すれば、地震時における斜面崩壊範囲の評価についてこれまで十分な検討が行われているとは言い難い。

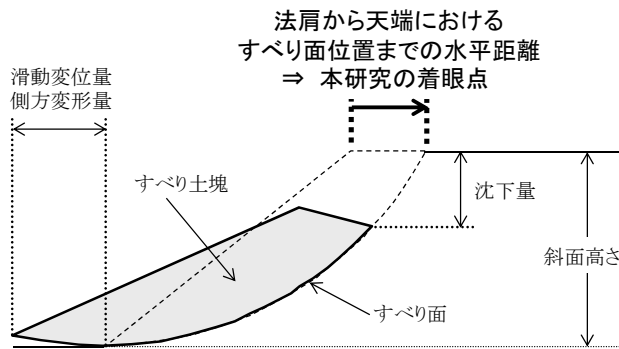


図-1 斜面崩壊範囲の評価の重要性⁵⁾⁶⁾

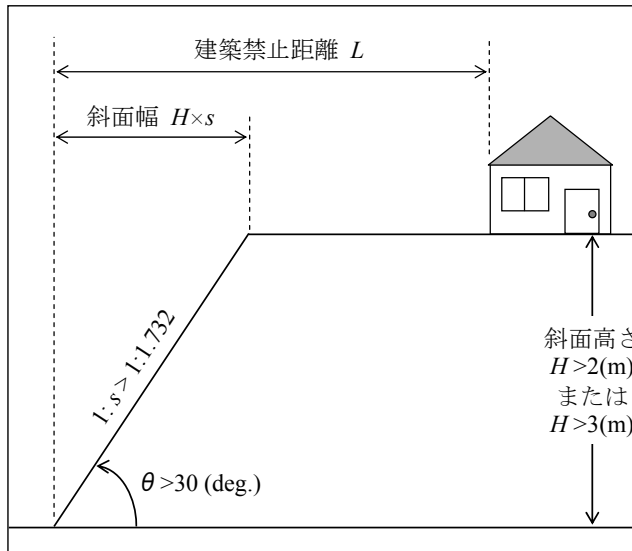


図-2 日本国内における建築禁止距離に関するがけ条例の概略

上記の背景を踏まえ本稿では、まず、住家の基礎部分にまで斜面崩壊の範囲が進行している4つのケーススタディ(2011年東北地方太平洋沖地震によって被災した仙台市青葉区西花苑¹¹⁾¹²⁾・福島市伏拝あさひ台団地¹³⁾¹⁴⁾、2004年新潟県中越地震によって被災した長岡市高町団地¹⁵⁾¹⁶⁾、2001年芸予地震によって被災した呉市両城¹⁷⁾¹⁸⁾の宅地造成斜面(以後、対象斜面と呼ぶ))を設定した。そして、本震時ならびに本震後における円弧すべりを想定した斜面安定解析を実施し、図-1に示すように、法肩から天端におけるすべり面の位置までの水平距離(以後、斜面崩壊範囲と呼ぶ)と、被災実績を比較することで、地震時における斜面崩壊範囲の評価に関する基礎的な検討を行った結果について述べる。

2. がけ条例による建築禁止距離

住家を含む建築物の敷地については、建築基準法第19条第4項において「建築物ががけ崩れ等による被害を受けるおそれのある場合においては、擁壁の設置その他安全上適当な処置を講じなければならない」と規定されて

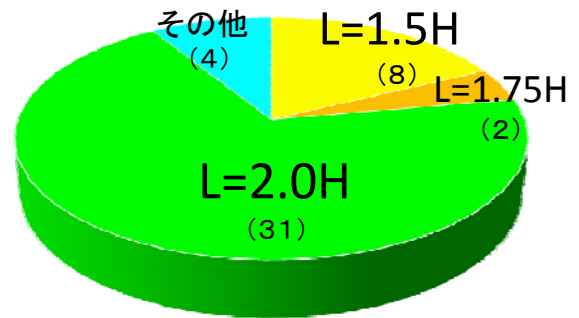


図-3 建築禁止距離の設定現状に関する分類

タイプ1		L=2.0H	
愛知県	石川県	宮城県	静岡県
秋田県	岩手県	宮崎県	栃木県
福井県	香川県	奈良県	東京都
福岡県	鹿児島県	新潟県	富山県
福島県	神奈川県	大分県	和歌山県
群馬県	高知県	岡山県	山形県
北海道	京都府	埼玉県	山梨県
茨城県	三重県	滋賀県	
タイプ2		L=1.75H	
愛媛県		徳島県	
タイプ3		L=1.5H	
熊本県	沖縄県	島根県	山口県
長崎県	佐賀県	鳥取県	千葉県
タイプ4		L=1.7H	
		広島県	
タイプ5		L=H+Hs	
		青森県	
タイプ6		L=H+0.5Hs	
		岐阜県	
タイプ7		L=1.5H+0.5Hs	
		兵庫県	

いる。平出・田村⁷⁾は、日本国内における各都道府県の建築基準に関する条例中のがけに関する条文(いわゆる、がけ条例)における具体的な制限の規定の概略について取り纏めを行い、報告している。本稿では、平出・田村の報告⁷⁾を参考に、がけ条例中の建築物を建築する場合の天端における法尻からの水平距離の規定に着目した整理を行った。なお、長野県および大阪府については、建築基準に関する条例中に該当する条文が存在しないため、検討対象から除外している。

図-2は、45都道府県のがけ条例の内容を整理した結果である。図-2に示すとおり、がけ条例中の建築物を建築する場合の水平距離L(以後、建築禁止距離Lと呼ぶ)に着目して7タイプに分類・整理した。ここに、崖の高さH(斜面高さ)および崖の角度θ(斜面法勾配)に対する規定が若干異なっている同じタイプに分類されていることに留意されたい。ここに、崖の高さHは2mまたは3mを超える場合を、崖の角度θは水平面に対して30degを超える場合を規定対象としているものが多い。図-3には、図-2を参考に、がけ条例による建築禁止距離の設定現状をさらに分類・整理したものを示す。

図-2および図-3に示すとおり、建築禁止距離Lに関し



写真-1 地すべり頭部の崩落崖下方からの被災状況³⁾⁴⁾



写真-2 地すべり末端部の住宅地に迫る流出土砂³⁾⁴⁾



図-4 対象斜面周辺の地形状況(1931年)



図-5 対象斜面周辺の地形状況(2008年)

て法尻を始点として崖の高さの2倍とする規定(タイプ1)が最も多く、全体の69%(31/45)を占めている。なお、タイプ1は、他のタイプのがけ条例と比較して、最も安全側の評価となる。また、法尻からの距離 L により規定されているケース(タイプ1～4)が全体の93%(42/45)を占めており、法尻からの距離により規定されているケース(タイプ5)や崖の中央からの水平距離により規定されているケース(タイプ6, 7)も見受けられる。図-2に示すように、1.で紹介した4つのケーススタディのうち、西花苑(宮城県)・あさひ台団地(福島県)・高町団地(新潟県)についてはタイプ1、両城(広島県)についてはタイプ4による規定がそれぞれ適用されることが読み取れる。

さらに、現在のがけ条例による規定は、図-2に示すタイプ5, 6, 7を除いて、崖の角度 θ が30度を超える場合という前提条件は存在するものの、がけ条例における建築禁止距離に関する規制の数式上(図-2および図-3参照)では、法勾配、傾斜基盤、表層厚(基盤～地表)、当該斜面に作用する地震力(水平震度等)の影響などが十分に考慮されていないと言い換えることができる。

3. 仙台市青葉区西花苑での斜面崩壊

(1) 被災概要

釜井¹¹⁾によれば、青葉区西花苑1丁目の対象斜面では、2011年東北地方太平洋沖地震の強震動の作用により、写真-1および写真-2に示すように、地すべり頭部では住宅4棟が巻き込まれ崖下方へ住家が転落寸前となったほか、地すべり末端部では流出土砂が住宅地にまで迫る被害となった。村尾ほか¹²⁾によれば、対象斜面では、地すべり地形が認められることから、地盤変動の発生域は、地すべり地形の再滑動域であると考えられている。また、秦ほか¹³⁾は、図-4および図-5に示すように、地すべり頭部であった箇所は切土され、住宅地の平坦部分の一部となっていることを指摘しており、2011年東北地方太平洋沖地震の強震動の作用によって、地すべりの中腹から末端部にかけて盛土された造成地盤が変動し、土砂流出に至ったと考えられている。

図-6は、東西方向(A—A'測線：図-5参照)における断面図であるが、対象斜面は、高さが44mおよび法勾配が1:2.14となっており、2.で述べた宮城県におけるがけ条例の適用範囲からは外れている。しかしながら、地震による斜面崩壊の範囲が法尻から約7.3mのところまで及んでおり(図-6参照)、写真-1に示すように、住家の基礎部分がえぐられているのが確認できる。

(2) 崩壊範囲の評価

図-6には、対象斜面に作用した水平震度を考慮した斜

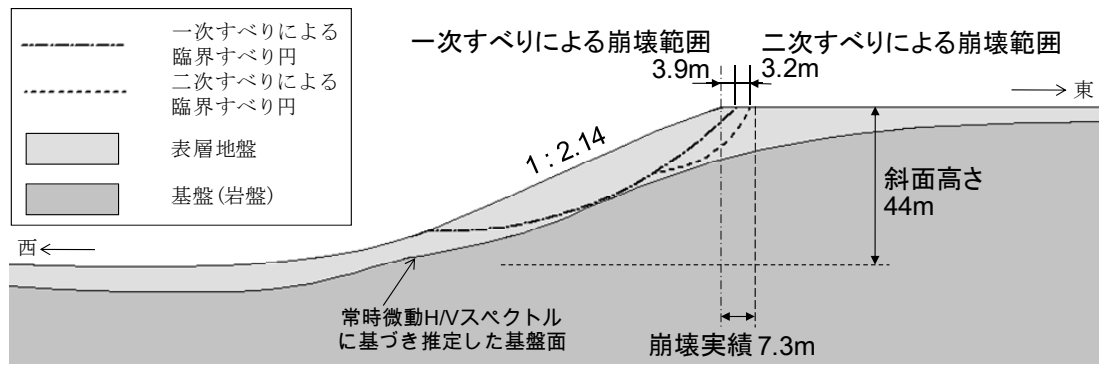


図-6 一次すべりおよび二次すべりによる斜面崩壊範囲の評価（仙台市青葉区西花苑）

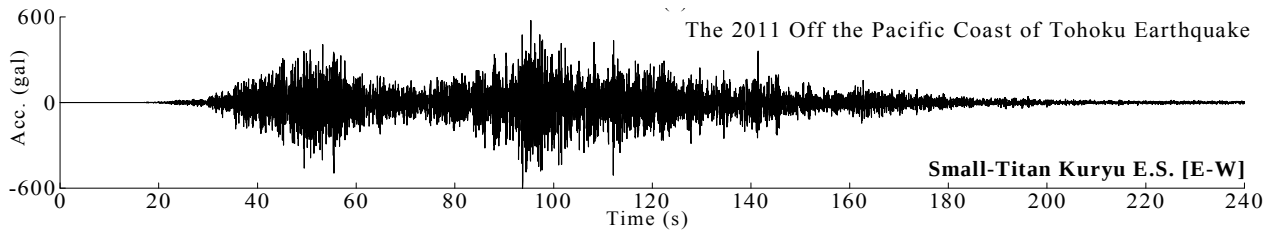


図-7 2011年東北地方太平洋沖地震における青葉区西花苑での推定地震動の加速度時刻歴¹⁹⁾

面安定解析の結果(臨界すべり円の探索結果)についても同時に示しており、水平震度を考慮したフェレニウス法²⁰⁾に基づく円弧すべり解析を実施することで、臨界すべり円の抽出を行った¹⁹⁾。

対象斜面サイトで行われた臨時地震観測の結果によれば、対象斜面に作用した本震時の地震動は、Small-Titan 栗生小学校における本震時の観測地震動(図-7参照)と同等程度であったと報告¹⁹⁾されており、当該地震動に野田ほかの経験式²¹⁾を適用²²⁾²³⁾²⁴⁾²⁵⁾して、本震時における水平震度を $k_H=0.29$ と概算した。

解析の際に必要な表層付近の地盤特性¹⁹⁾は、被災した宅地周辺での土質材料による三軸CD試験結果に基づき、単位体積重量 $\gamma=17.5\text{kN/m}^3$ 、粘着力 $c=14\text{kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi=32\text{deg}$ とそれぞれ設定した。傾斜基盤の形状(表層地盤の層厚)は、B—B'測線(図-5参照)において高密度の常時微動計測を行い、常時微動H/Vスペクトルに対する理論H/Vスペクトルの整合性²⁶⁾を踏まえて評価した。

図-6に示すように、法肩から天端における臨界すべり面位置(一次すべり位置)までの水平距離に着目すると、その距離は3.9mとなり、崩壊実績である7.3mとは整合性がとれていないものの、本震直後に崩壊範囲は、写真-1に示すような住家の基礎部分まで及んでいなかったという周辺住民から得たヒアリング結果に基づけば、この解析結果は一定の信憑性を有しているものと考えられる。また、本震後に斜面崩壊がさらに進行した可能性が高いため、本研究では、二次すべり²⁷⁾を考慮した斜面安定解析を連続的に実施した。

具体的には、上述した本震時における臨界すべり円による斜面崩壊(一次すべり)に起因したすべり土塊を全て

除去した状態で、フェレニウス法に基づく円弧すべり解析を実施することで、臨界すべり円の抽出を行った。地盤特性は本震時の解析と同様であり、水平震度 k_H については考慮していない。図-6に示すように、法肩から天端における臨界すべり面位置(二次すべり位置)までの水平距離に着目すると、その距離は7.1m(3.9m+3.2m)となり、崩壊実績である7.3mと比較的良好一致を示す結果となった。

4. 福島市あさひ台団地での斜面崩壊

(1) 被災概要

中村ほか¹³⁾¹⁴⁾によれば、福島市あさひ台団地(図-8参照)の対象斜面では、2011年東北地方太平洋沖地震の強震動の作用により、宅地造成盛土の斜面が崩壊し、崩落した土砂が国道4号線に流出したために、道路の通行機能が不全となるなどの深刻な被害が発生した。

図-9は、対象斜面の平面図に旧地形の等高線(点線で表示)を重ね合わせたもの²⁸⁾である。また図-9には、すべり土塊の主要な滑動方向(N100°W)についても同時に示している。さらに図-10には、N100°W方向における対象斜面の2次元モデル²⁹⁾を示す。

あさひ台団地は、昭和40年代に丘陵地を切盛して造成が行われた宅地であるが、対象斜面は、高さが30m、法勾配が1:1.7および1:2.0となっており、2.で述べた福島県におけるがけ条例の適用範囲からは外れている。しかしながら、図-9および図-10に示すように、地震による斜面崩壊の範囲が法尻付近から約70.2m(西側すべり面痕跡



図-8 福島市伏拝あさひ台地

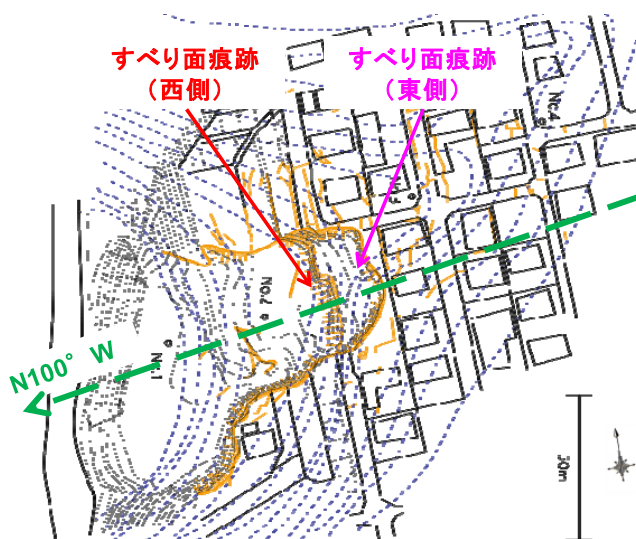


図-9 旧地形の等高線を重ねた対象斜面の平面図²⁸⁾



写真-3 福島市伏拝の宅地造成盛土の被災状況(1)



写真-4 福島市伏拝の宅地造成盛土の被災状況(2)

）および約85.9m(東側すべり面痕跡)のところまで及んでいる。さらに、写真-3および写真-4に示すように、斜面崩壊の範囲が住家の基礎部分にまで及び、住家が転落する深刻な被災となっているのが確認できる。

(2) 崩壊範囲の評価

図-11および図-12に対象斜面における安定解析の結果(臨界すべり円の探索結果)を示す。斜面安定解析はフェレニウス法²⁹⁾に基づく円弧すべり解析であり、臨界すべり円の抽出を行った³⁰⁾。まず、水平震度は、本震時における対象斜面での推定地震動³¹⁾(図-13参照)に基づいて、野田ほかの経験式²¹⁾を用いて水平震度 k_H を概算すると、0.292となる。次に、造成盛土の単位体積重量 γ は、中村との私信³²⁾に基づき 16.87kN/m^3 とした。さらに、せん断強度定数 (c, ϕ) は、造成盛土の土質材料による定体積一面せん断試験(CU条件)の結果³³⁾に基づき、粘着力 $c=29\text{kPa}$ および内部摩擦角 $\phi=14.8\text{deg}$ とそれぞれ設定した。最後に、地下水位は、地表面下3m付近で確認されてお

り、ボーリング調査でもこれ以深では含水量が非常に多い状態にあったことから、盛土内の地下水位は被災前も同様に高かったことが想定³⁴⁾されるため、図-10に示すように設定した。

図-11に示すように、法尻から天端における臨界すべり面位置(一次すべり位置)までの水平距離に着目すると、79.7mと推定され、この推定距離は、崩壊範囲の実績値である85.9mとは整合性がとれていないように見受けられる。しかしながら、対象斜面の被災平面図(図-9参照)に示すように、地表部におけるすべり面の痕跡は西側と東側でそれぞれ確認できることや、本震直後には住家の基礎部分にまで崩壊が進行していなかったという住民からのヒアリング結果に基づけば、上記の結果は一定の信憑性を有しているものと考えられる。

また、地表部におけるすべり面(東側)の痕跡状況(図-9参照)を踏まえると、本震後に斜面崩壊がさらに進行した可能性が高いため、本研究では二次すべり²⁷⁾を考慮した斜面安定解析を連続的に実施した。具体的には、図-

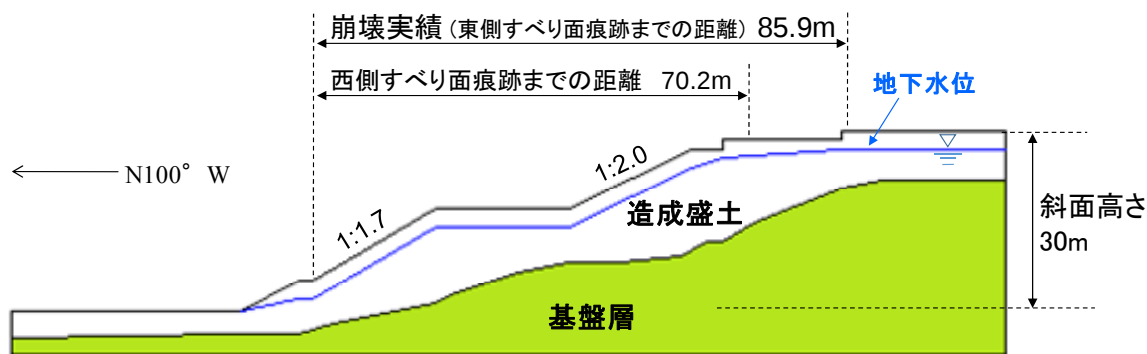


図-10 N100°W方向における対象斜面の2次元モデル²⁹⁾

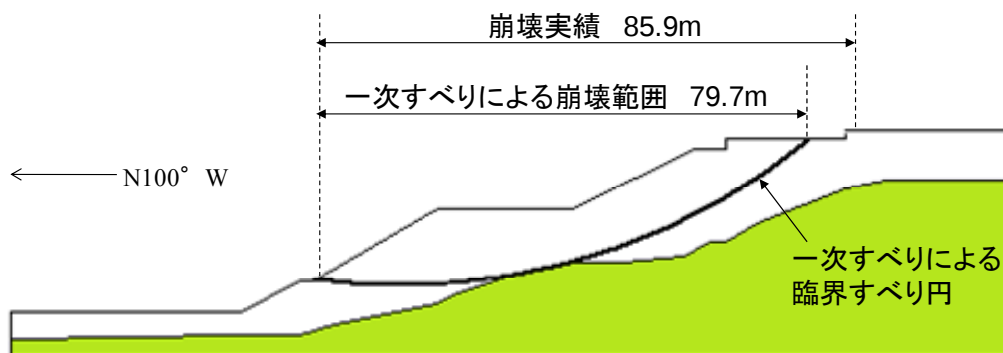


図-11 対象斜面における安定解析の結果（一次すべり）

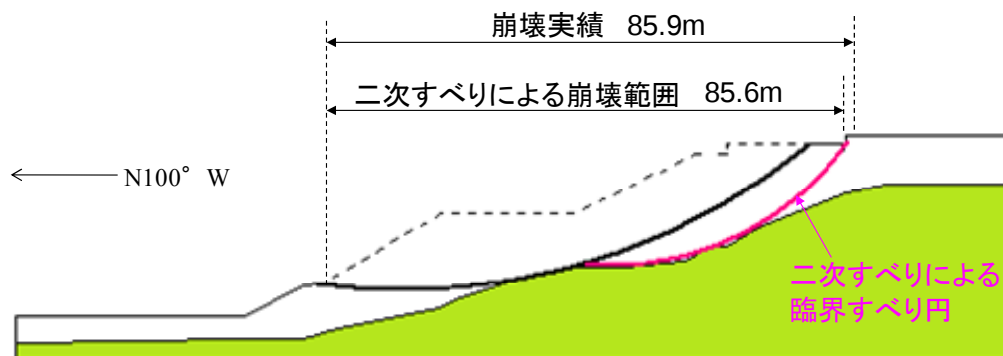


図-12 対象斜面における安定解析の結果（二次すべり）

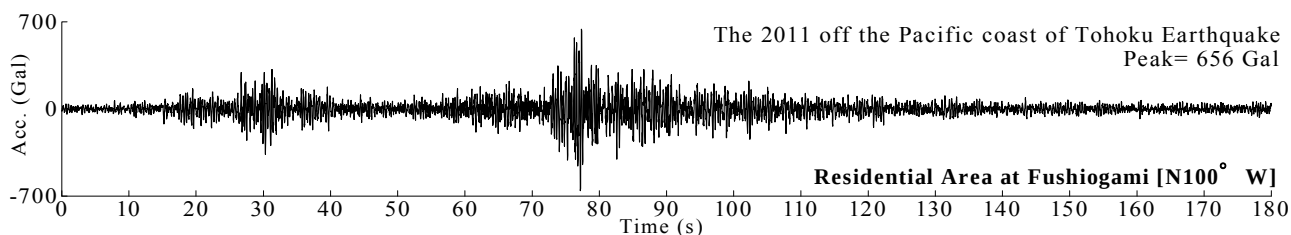


図-13 2011年東北地方太平洋沖地震における福島市伏拝あさひ台団地での推定地震動の加速度時刻歴³⁰⁾

11で示した本震時における臨界すべり円による斜面崩壊(一次すべり)に起因したすべり土塊を全て除去した状態で、フェレニウス法に基づく円弧すべり解析を実施することで、臨界すべり円の抽出を行った。地盤特性は本震時の解析と同様であり、水平震度 k_{H1} は考慮していない。

図-12は、法尻から天端における臨界すべり面位置(二次すべり位置)までの水平距離を算定した結果である。

図-12に示すとおり、一次すべりならびに二次すべりに基づく崩壊範囲の推定距離は、85.6m(79.7m+5.9m)とな

り、若干過小に評価しているものの、崩壊実績である85.9mとほぼ一致する結果となった。

5. 長岡市高町団地での斜面崩壊

(1) 被災概要

2004年新潟県中越地震による高町団地の被災^{15),16)}は、盛土部に作られた外周道路とそれに沿った住宅に集中的

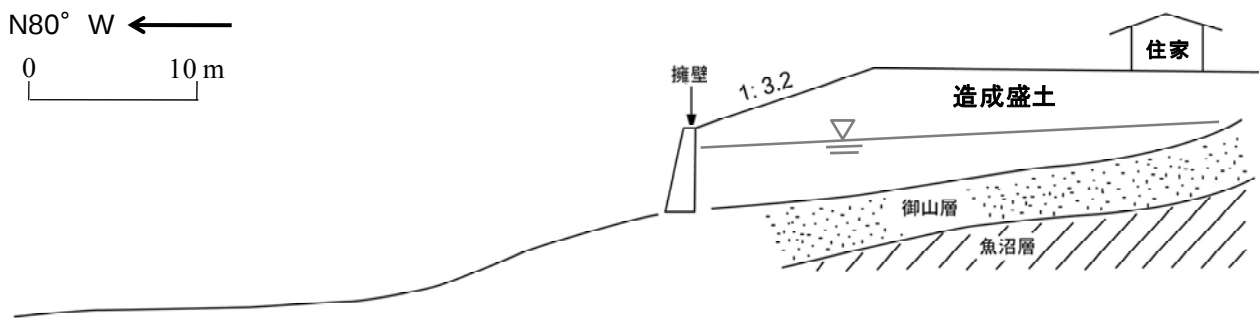


図-14 被災前の対象斜面の状況（文献16,36）をもとに作成

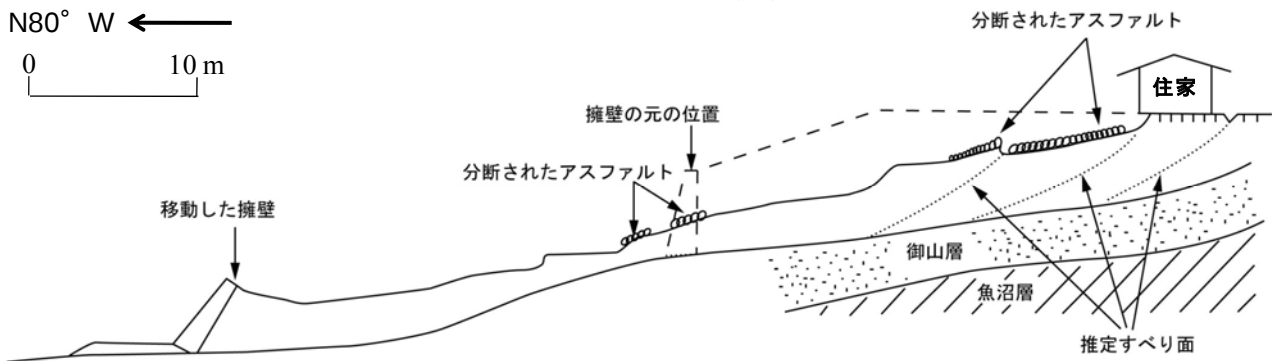


図-15 被災後の対象斜面の状況（文献16）をもとに作成



写真-5 盛土斜面崩壊の範囲が住家の基礎部分にまで及ぶ2004年新潟県中越地震による高町団地の被災状況¹⁶⁾

に発生した。図-14および図-15には、南西部の外周道路における被災前および被災後の解析対象断面¹⁶⁾を示す。対象断面は、旧地形は深い谷地形であり、本震により崩壊に至ったことが確認されている。

図-14に示すように、対象斜面モデルでは、斜面高さが8.2m(ただし、擁壁を含む)、法勾配が1:3.2となっており、2.で述べた新潟県におけるがけ条例の適用範囲からは外れている。しかしながら、写真-5および図-15に示すように、斜面崩壊の範囲が住家の基礎部分にまで及ぶ大規模な被災となっており、詳細検討の必要性が示唆される。

(2) 崩壊範囲の評価

図-16、図-17、図-18に対象斜面における安定解析の結果(臨界すべり円の探索結果)を示す。斜面安定解析はフェレニウス法³⁰⁾に基づく円弧すべり解析であり、臨界すべり円の抽出を行った³⁵⁾。まず、対象斜面サイトで行われた臨時地震観測の結果によれば、対象斜面とKiK-net長岡(周辺の既存観測点)では、サイト特性が非常に類似していることが報告³⁵⁾されており、対象斜面に作用した地震動は、KiK-net長岡における観測地震動(図-19参照)と同等程度であったと見なすことができる。よって、KiK-net長岡での観測地震動(本震時および最大余震時)に野田ほかの経験式²¹⁾を適用して、本震時に対象斜面に作用

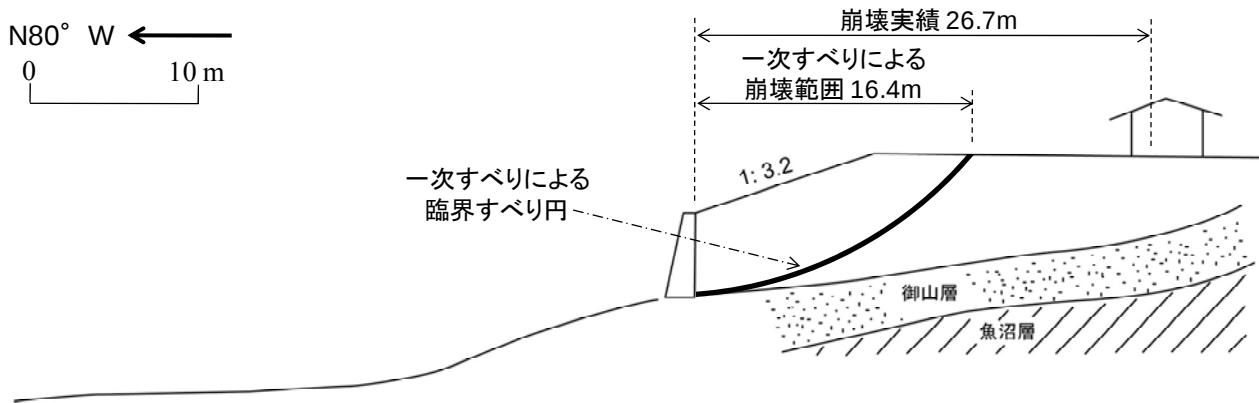


図-16 一次すべりによる斜面崩壊範囲の評価(水平震度 $k_H=0.288$)

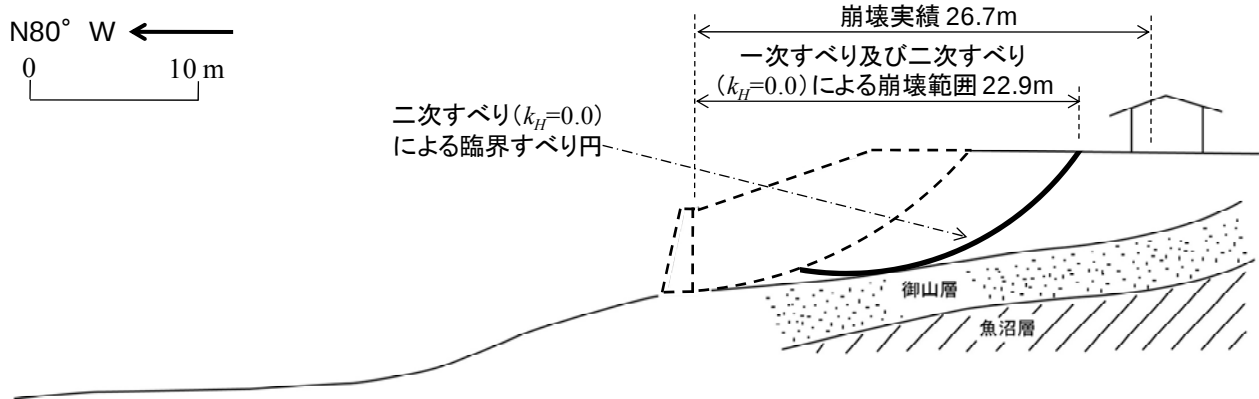


図-17 二次すべりによる斜面崩壊範囲の評価(水平震度を考慮しないケース($k_H=0.0$))

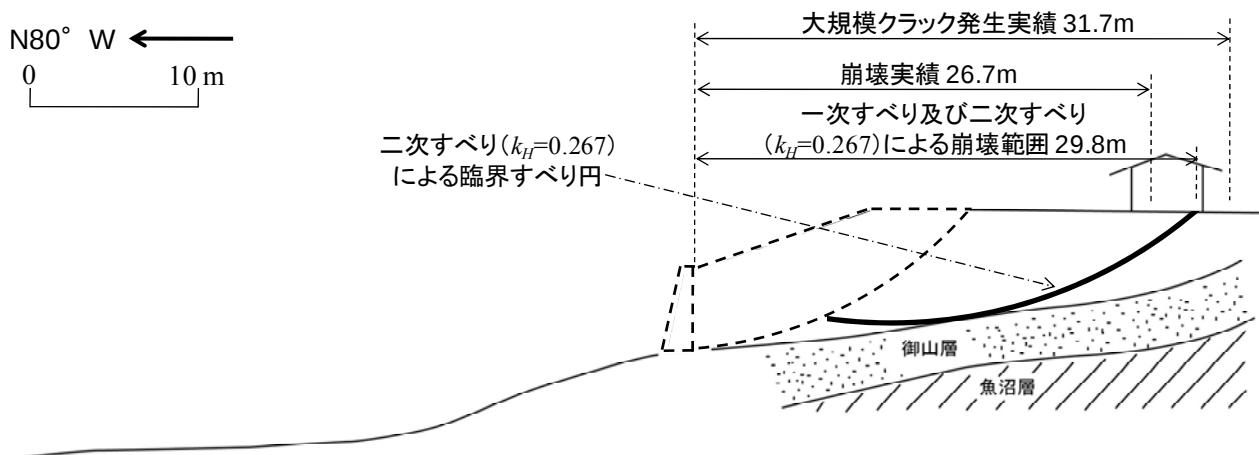


図-18 二次すべりによる斜面崩壊範囲の評価(水平震度を考慮しないケース($k_H=0.267$))

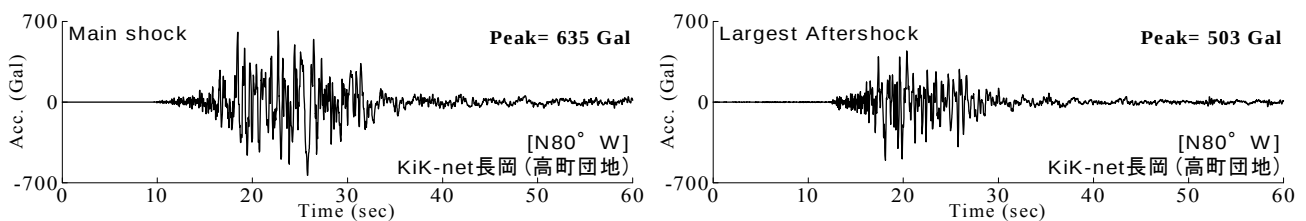


図-19 2004年新潟県中越地震における高町団地での推定地震動の加速度時刻歴³⁵⁾

した水平震度 k_H について、 $k_H=0.288$ (本震時)および $k_H=0.267$ (最大余震時)と概算した。

次に、造成盛土の単位体積重量 γ は、既往の高町団地の動的解析による入力物性値³⁶⁾を参考に、 $\gamma=16.17$

kN/m^3 (地下水位以浅)および $\gamma_f=18.42\text{kN/m}^3$ (地下水位以深)とした。さらに、せん断強度定数(c, ϕ)は、造成盛土の土質材料(不攪乱試料)による繰返し非排水三軸試験の結果³⁷⁾に基づき、粘着力 $c'=0\text{kPa}$ および内部摩擦角 $\phi=36.9$

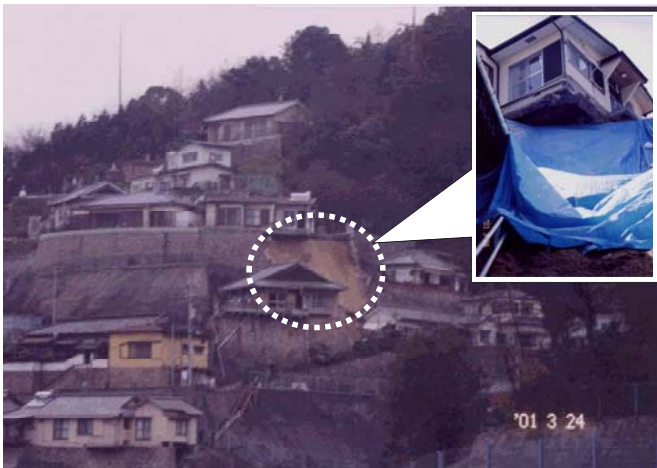


写真-6 呉市両城の対象斜面の被災状況¹⁸⁾

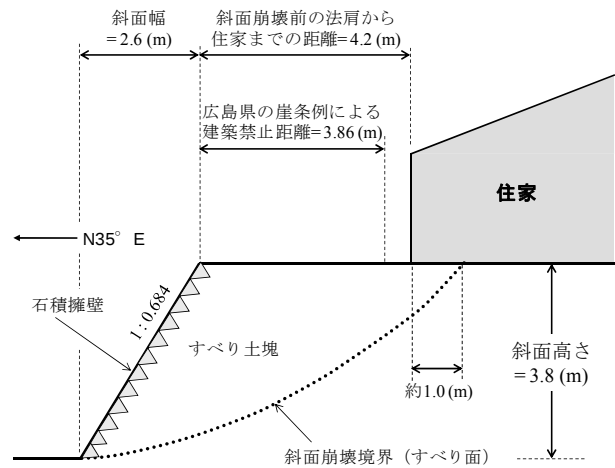


図-20 対象斜面の被災概略図(断面図)

degとそれぞれ設定した。最後に、地下水位は、高町団地での動的解析の実績³⁶⁾を参考に、図-14に示すように設定した。

図-16に示すように、法尻から天端における臨界すべり面位置(一次すべり位置)までの水平距離に着目すると、16.4mと推定され、この推定距離は、崩壊範囲の実績値である26.7mとは非常に大きな差異がある。しかしながら、本震直後には住家の基礎部分にまで崩壊が進行していなかったという住民からのヒアリング結果に基づけば、上記の結果は一定の信憑性を有しているものと考えられる。また、本震後に斜面崩壊がさらに進行した可能性が高いため、本研究では、二次すべり²⁷⁾を考慮した斜面安定解析を連続的に実施した。

具体的には、図-17および図-18に示すように、上述した本震時における臨界すべり円による斜面崩壊(一次すべり)に起因したすべり土塊を全て除去した状態で、フェレニウス法に基づく円弧すべり解析を実施することで、臨界すべり円の抽出を行った。地盤特性は本震時の解析と同様であり、水平震度 k_H については、3.(2)および4.(2)において得られた知見に基づき水平震度を考慮しないケース($k_H=0.0$)、および最大余震(本震後約7分後に発生した地震：2004/10/23 18:03 Mj6.3)による水平震度を考慮するケース($k_H=0.267$)の2種類を設定した。

図-17に示すように、二次すべりにおいて水平震度を考慮しないケース($k_H=0.0$)では、法肩から天端における臨界すべり面位置(二次すべり位置)までの水平距離に着目すると、その距離は22.9mとなり、崩壊実績(26.7m)に対する再現性はそれほど高くない。一方で、図-18に示すように、二次すべりにおいて最大余震による水平震度を考慮するケース($k_H=0.267$)では、斜面崩壊範囲の推定距離は29.8mとなり、崩壊実績(26.7m)を3.1m上回る結果となった。しかしながら、大規模クラックの発生位置(図-14参照)までの距離(31.7m)を基準として考えると、

推定距離との差は1.9mとなり、推定精度が向上し、安全側の評価結果が得られた。

6. 呉市両城での斜面崩壊

(1) 被災概要

2001年芸予地震の強震動の作用により、広島県では、数多くの斜面災害が発生した¹⁷⁾。県内の中でも急傾斜地に住宅が密集した斜面都市である呉市では、宅地造成地の被害が深刻であったことが報告¹⁸⁾されている。写真-6に2001年芸予地震の強震動の作用によって被災した呉市両城の対象斜面の被災状況を示す。写真-6は本震当日に、写真-6の中の拡大写真は本震発生2日後に、それぞれ撮影されたもので、住家の基礎部分にまで斜面崩壊の範囲が及んでいるのが読み取れる。

図-20は、写真-6で示した対象斜面の崩壊前の断面図^{9),10)}である。この対象斜面は、ほぼすべて石積擁壁によって覆われており、斜面高さ H が3.8m、法勾配1:1sが1:0.684(=55.6deg)となっており、がけ条例の規制対象となる。崩壊前の住家から斜面法肩までの直線距離は4.2mであり、2.で述べた広島県におけるがけ条例に基づく建築禁止距離となる3.86mを上回っているにもかかわらず、最終的な斜面崩壊の範囲が法肩から約5.2mのところまで及んでおり、住家の基礎部分が1m程度えぐられており、詳細検討の必要性が示唆される。

(2) 崩壊範囲の評価

斜面安定解析は、フェレニウス法²⁰⁾に基づく円弧すべり解析であり、臨界すべり円の抽出を行った³⁸⁾。ここに、図-20で示したとおり、対象斜面の崩壊面は円弧に近い形状を有していることから、解析においても円弧すべりを想定することとした。また対象斜面は、崩壊範囲が大

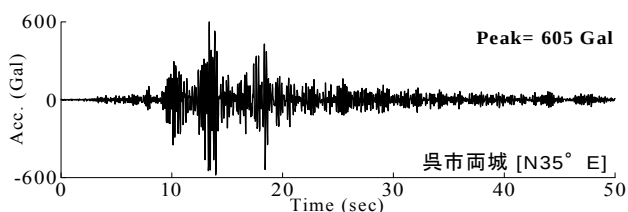


図-21 2001年芸予地震における呉市両城の対象斜面での推定地震動の加速度時刻歴³⁹⁾

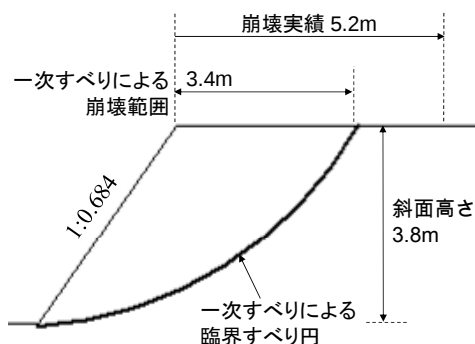


図-22 一次すべりによる崩壊範囲の評価

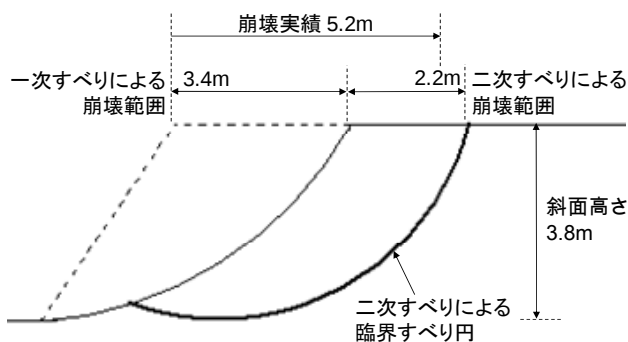


図-23 二次すべりによる崩壊範囲の評価

きいため、地震時において石積擁壁による影響は比較的小さく、解析においては安全側の評価結果となるよう、石積擁壁を考慮していない。さらに石積擁壁がない場合には、法先崩壊よりも法肩を含んだ法面上方の部分的崩壊が発生し易いが、ここでは崩壊実績(実崩壊面)に習い、一次すべりでは法尻を通る円弧すべり(法先崩壊)を想定した解析を行った。

水平震度 k_H は、対象斜面に作用した推定地震動³⁹⁾(図-21参照)に野田ほかの経験式²⁰⁾を適用することで、 $k_H=0.284$ と設定した。一方で、解析の際に必要なとなる斜面内の地盤特性は、対象斜面近傍から採取した不攪乱試料による三軸CD試験結果に基づき、単位体積重量 $\gamma=18.8\text{kN/m}^3$ 、粘着力 $c=25.4\text{kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi=28.5\text{deg}$ とそれぞれ設定した。

図-22に対象斜面に作用した水平震度を考慮した斜面安定解析の結果(臨界すべり円の探索結果)を示す。図-22に示すように、法肩から天端における臨界すべり面位置(一次すべり位置)までの水平距離に着目すると、そ

の距離は3.4mとなり、崩壊実績である5.2mとは整合性がとれていないものの、本震直後に斜面崩壊の範囲は、写真-6に示すような住家の基礎部分まで及んでいなかったという周辺住民から得たヒアリング結果に基づけば、この解析結果は一定の信憑性を有しているものと考えられる。また、本震後に斜面崩壊がさらに進行した可能性が高いため、本研究では、二次すべり²⁷⁾を考慮した斜面安定解析を連続的に実施した。

具体的には、図-22で示した本震時における臨界すべり円による斜面崩壊(一次すべり)に起因したすべり土塊を全て除去した状態で、フェレニウス法に基づく円弧すべり解析を実施することで、臨界すべり円の抽出を行った。地盤特性は本震時の解析と同様であり、水平震度 k_H については考慮していない。

法肩から天端における臨界すべり面位置(二次すべり位置)までの水平距離に着目した結果を図-23に示す。一次すべりならびに二次すべりに基づく崩壊範囲の推定距離は5.6m(3.4m+2.2m)となり、若干過大に評価しているものの、崩壊実績である5.2mと比較的良好一致を示しているのが読み取れる。

7. 斜面崩壊範囲の推定に向けた分析・総括

表-1は、3、4、5、6で述べたケーススタディの結果を一覧に取り纏めたものである。以下、表-1に挙げた項目順を参考に、得られた知見について述べる。

(1) 斜面の諸元・強度定数

表-1に示すように、斜面高、法勾配、基盤勾配、表層厚といった斜面の形状に関して一様な傾向を見出すことはできない。また、砂質土や粘性土を主体に構成された斜面であり、高町団地での斜面崩壊を除く3つのケーススタディでは、粘着力を有しているのが読み取れる。

2で述べたとおり、がけ条例では、崖の高さ H として2mまたは3mを超える場合を規制対象としており、4つのケーススタディはいずれも規制範囲に含まれている。しかしながら、崖の角度 θ については、水平面に対して30度を超える場合(法勾配1:1.73よりも急勾配)をがけ条例では規定しているものの、呉市両城での斜面崩壊を除く3つのケーススタディでは、いずれも1:1.73よりも緩勾配となっており、今後の斜面崩壊範囲の推定に向けた分析では、比較的緩勾配の斜面についても検討対象とする必要性が示唆される。

(2) 想定地震

表-1に示すように、被災要因となった地震のタイプは

表-1 ケーススタディに基づく斜面崩壊範囲の評価に関する総括

サイト名	宮城県仙台市 青葉区西花苑	福島県福島市 伏拝あさひ台団地	新潟県長岡市 高町団地	広島県呉市 両城2丁目
土工種別	地すべり地形	盛土	盛土	不明
斜面高H0 (m)	44	30	8.2	3.8
法勾配 1:s	1:2.1	1:1.7, 1:2.0	1:3.2	1:0.68
基盤勾配 1:k	1:3.5	1:3.6, 1:2.3	1:6.0	—
表層厚H1(法尻) (m)	6.3	8.0	4.9	—
表層厚H2(法肩) (m)	13.6	8.7	7.4	3.8
1:s/1:k	1.63	2.1, 1.2	1.88	—
H1/H0	0.14	0.27	0.60	—
H2/H0	0.31	0.29	0.90	1.00
がけ条例の規制対象	なし	なし	なし	あり
がけ条例規制範囲C (m)	—	—	—	3.86
単位体積重量(kN/m ³)	17.5	16.9	16.2, 18.4	18.8
粘着力(kPa)	14	29	0	25.4
内部摩擦角 (deg.)	32	14.8	36.9	28.5
被災地震名	2011年東北地方 太平洋沖地震	2011年東北地方 太平洋沖地震	2004年新潟県 中越地震	2001年芸予地震
マグニチュード	Mw9.0	Mw9.0	Mj6.8	Mj6.7
地震タイプ	プレート境界	プレート境界	内陸地殻内	スラブ内
(本震)最大加速度 (Gal)	676	656	635	605
余震の考慮	なし	なし	あり	なし
(余震)最大加速度 (Gal)	—	—	503	—
崩壊範囲R (m)	7.3	85.9	26.7	5.2
R/H0	0.17	2.86	3.26	1.37
R/C	—	—	—	1.35
(本震)評価水平震度	0.29	0.29	0.29	0.28
推定範囲(一次)E1 (m)	3.9	79.7	16.4	3.4
推定精度(一次)E1/R	0.53	0.93	0.61	0.65
(余震)評価水平震度	—	—	—, 0.27	—
推定範囲(二次)E2 (m)	7.1	85.6	22.9, 29.8	5.6
推定精度(二次)E2/R	0.97	1.00	0.86, 1.12	1.08

まちまちとなっていることが読み取れる。これは言い換えれば、本稿では、野田ほかの経験式²¹⁾を用いて水平震度を概算しているが、この経験式がプレート境界地震、内陸地殻内地震、スラブ内地震において適用できる可能性が示唆される。さらに、対象斜面に作用した本震時における最大加速度PGAは、いずれも600gal程度となっており、今後の斜面崩壊範囲の推定に向けた分析では、地震のタイプに関わらず、本震時の地震力(水平震度)をほぼ一定の値として取り扱いできる可能性がある。ただし、高町団地での斜面崩壊において得られた知見のとおり、本震と同程度の規模の余震が発生し、対象斜面に影響を及ぼす可能性がある場合には、本震時ならびに余震時の

地震力(水平震度)を同時に評価する必要性が示唆される。

(3) 崩壊範囲の評価

表-1に示すように、斜面高さ(図-2および図-3で示したとおり、がけ条例による建築禁止距離を規制する際の変数)に対する崩壊実績の割合には、明瞭な傾向が確認できない。また、6.で述べた呉市両城の斜面崩壊のみががけ条例による規制対象となっているが、建築禁止距離を上回る崩壊実績を示している。

さらに、崩壊実績に対して、一次すべりのみを考慮した解析では、十分な精度で崩壊範囲を評価できていないことが読み取れる。しかしながら、一次すべりだけでな

く二次すべりを同時に考慮することで、崩壊範囲をいずれも1割程度の誤差で再現できているのが読み取れる。すなわちこれは、二次すべりによる臨界すべり円に達するまで斜面崩壊が進行する可能性が高く、大規模地震時における斜面崩壊範囲の評価では、一次すべりだけでなく二次すべりについても同時に考慮する必要性が高いことを示唆するものである。

8. まとめ

本研究では、既往の大規模地震で被災した宅地造成地における斜面崩壊を取り上げ、地震時における斜面崩壊範囲に着目した基礎的な検討を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 各都道府県のがけ条例の適用範囲外(法勾配1:1.73よりも緩勾配)であるにも関わらず、仙台市青葉区西花苑、福島市伏拝あさひ台団地、長岡市高町団地における斜面崩壊範囲は、住家の基礎部分にまで及び、住家は転落寸前もしくは転落する結果となった。
- (2) 広島県のがけ条例による建築禁止距離を満足しているにも関わらず、呉市両城の斜面崩壊範囲は、住家の基礎部分にまで及ぶ結果となった。
- (3) 上記(1)および(2)の被災要因となった地震のタイプは、プレート境界地震、内陸地殻内地震、スラブ内地震とそれぞれまちまちであるものの、対象斜面に作用した本震時における最大加速度PGAは、いずれも600gal程度である。
- (4) 一次すべりのみの定義では、対象斜面の崩壊実績を十分に再現することができず、二次すべりの影響を考慮することによって、崩壊実績を良好に再現することから、大規模地震時における斜面崩壊範囲の評価では、一次すべりだけでなく二次すべりについても同時に考慮する必要がある。
- (5) 一次すべりに基づく斜面崩壊範囲の評価では本震による水平震度を考慮し、二次すべりに基づく斜面崩壊範囲の評価では水平震度を無視することで、一定の精度で斜面崩壊範囲の評価可能である。ただし、長町団地での斜面崩壊の実績を踏まえれば、本震と同程度の規模の余震が発生し、対象斜面に影響を及ぼす可能性がある場合には、本震ならびに余震による地震力(水平震度)を同時に評価する必要がある。

今後は、他の大規模地震で被災した他の宅地造成斜面(たとえば、2011年東北地方太平洋沖地震によって被災した一関市舘ニュータウン⁴⁰⁾⁴¹⁾・山元町太陽ニュータウン²⁵⁾⁴²⁾⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾、2001年鳥取県西部地震によって被災した法勝寺中学校の造成斜面⁴⁶⁾⁴⁷⁾、1993年釧路沖地震によって

被災した釧路市緑ヶ岡⁴⁸⁾⁴⁹⁾についても同様の検討を行い、得られた知見を踏まえて、大規模地震時における斜面崩壊範囲の評価手法に関する新たな提案を行っていく予定である。

謝辞：釜井俊孝教授(京都大学防災研究所)には、仙台市青葉区西花苑における現地調査で得られた貴重な情報を提供していただきました。また、中村晋教授(日本大学工学部土木工学科)には、福島市伏拝あさひ台団地における貴重な資料ならびに有意義なご意見をいただきました。さらに、長岡市高町団地および呉市両城の住民の皆様には、現地踏査の実施などにおいて多大なるご支援をいただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) たとえば、(公社)日本道路協会：道路土工一のり面工・斜面安定工指針，1999。
- 2) Newmark, N. M.: Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, *Fifth Rankin Lecture, Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 3) Hata, Y., Ichii, K. and Nozu, A.: Three-dimensional non-linear FEM analysis of a seismic induced crack at an airport runway, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.42, pp.105-118, ELSEVIER, 2012.
- 4) たとえば、(公社)日本道路協会：道路土工一盛土工指針，2010。
- 5) Hata, Y., Ichii, K. and Tokida, K.: A probabilistic evaluation of the size of earthquake induced slope failure for an embankment, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, Vol.6, No.2, pp.73-88, Taylor & Francis, 2012.
- 6) 秦吉弥，一井康二，常田賢一：モンテカルロシミュレーションを用いた地震時における斜面崩壊範囲の評価，第13回日本地震工学シンポジウム論文集，日本地震工学会，pp.3410-3417, 2010。
- 7) 平出務，田村昌仁：建築物の敷地に関する技術基準類の現状—その2がけ条例，第41回地盤工学研究発表会発表講演集，No.5, pp.9-10, 2006。
- 8) たとえば，沖村孝，鳥居宣之，伊井政司：兵庫県南部地震による山腹斜面崩壊の実態，土地造成工学研究施設報告，No.13, pp.147-167, 1995。
- 9) 秦吉弥，一井康二，土田孝，加納誠二：現場データを用いた地震時における斜面の崩壊範囲に関する検討，第42回地盤工学研究発表会講演概要集，No.917, pp.1827-1828, 2007。
- 10) 秦吉弥，一井康二，土田孝：地震時における斜面の崩壊範囲に関する一考察，土木学会論文集 C，Vol.63, No.3, pp.677-690, 2007。
- 11) 釜井俊孝：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震によって発生した造成地盤の地すべり，自然災害科学(東日本大震災速報)，Vol.30, No.2, pp.193-197, 2011。
- 12) 村尾英彦，釜井俊孝，太田英将：地震による都市域斜面災害—2011年東北地方太平洋沖地震を例として—，応用地質，Vol.53, No.6, pp.292-301, 2013。
- 13) 中村晋：福島県中通り地区およびいわき地区の地盤災害，地盤工学会誌，Vol.59, No.6, pp.44-47, 2011。

- 14) 仙頭紀明, 中村晋, 佐々木章夫, 長谷川昌彦, 熊井直也: 福島市伏拝の造成盛土の崩壊とその復旧, 地盤工学会誌, Vol.61, No.4, pp.18-21, 2013.
- 15) 大塚悟: 宅地の被害, 平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告書, (公社)土木学会新潟県中越地震被害調査特別委員会編, pp.216-226, 2006.
- 16) 安井賢, 尾上篤生: 高町団地, (公社)地盤工学会 2004 年新潟県中越地震災害調査委員会委員会報告書, pp.248-255, 2007.
- 17) Kano, S., Sasaki, Y., Hata, Y.: Seismic response of ridge during the Geiyo Earthquake in 2001, *Proc. of the 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp.901-908, Barkley, U.S.A., 2004.
- 18) Kano, S., Kimura, A., Yokoi, Y. and Hata, Y.: A study on seismic damage to ridges in Kure during the Geiyo Earthquake in 2001, *Proc. of International Conference on Civil and Environmental Engineering 2004*, pp.53-62, Hiroshima, Japan, 2004.
- 19) 秦吉弥, 駒井尚子, 常田賢一, 魚谷真基: 2011 年東北地方太平洋沖地震における仙台市青葉区西花苑での斜面崩壊, 地盤工学会誌, Vol.61, No.9, pp.14-17, 2013.
- 20) Fellenius, W.: Calculation of the stability of earth dams, *Transactions of 2nd Congress on Large dams*, Vol.4, pp.445-462, Washington, U.S.A., 1936.
- 21) 野田節男, 上部達生, 千葉忠樹: 重力式岸壁の震度と地盤加速度, 港湾技術研究所報告, Vol.14, No.4, pp.67-111, 1975.
- 22) 鳥居剛, 黒田修一, 松井保: 震度法における盛土の限界水平震度と地盤加速度の関係について, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, pp.1041-1044, 2001.
- 23) 濱崎英作, 宮城豊彦, 竹内則雄, 大西有三: 簡易 RBSM 三次元試行球面すべり面法を用いた造成地盛土斜面の地震被害評価法, 日本地すべり学会誌, Vol.43, No.5, pp.251-258, 2007.
- 24) 岡村未対, 重松慎哉: 山岳道路盛土のブロック積擁壁の地震時安定性評価法, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.4, pp.770-775, 2008.
- 25) 野田翔兵, 兵動正幸, 古川智, 古居俊彦: 火山灰土による谷埋め盛土の崩壊およびその非排水繰返しせん断強度, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.5, pp.163-179, 2012.
- 26) 秦吉弥, 野津厚, 一井康二, 丸山喜久, 酒井久和: 我孫子市布佐地区における地盤震動特性の評価, 第 9 回地盤工学会関東支部発表会 (Geo-Kanto 2012) 発表講演集, Vol.9, No.A0023, 2012.
- 27) 常田賢一, 須山翔太, 寺西弘一: 道路盛土の二次すべりを考慮した耐震安定性の評価法に関する考察, 第 55 回地盤工学シンポジウム平成 22 年度論文集, 地盤工学会, pp.161-166, 2010.
- 28) 中村晋, 仙頭紀明, 阿部慶太, 秦吉弥, 野津厚: 2011 年東北地方太平洋沖地震による造成盛土の崩壊挙動解析, 強震継続時間が長い地震動に対する土木構造物の耐震性評価シンポジウム論文集, 土木学会, pp.39-42, 2012.
- 29) Nakamura, S., Hata, Y., Abe, K., Shinoda, M. and Nozu, A.: Study for clarifying the failure mechanism of reclaimed land at Fukushima city by use of the estimated strong earthquake motion during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering (15th WCEE)*, Paper No.1352, Lisbon, Portugal, 2012.
- 30) 駒井尚子, 秦吉弥, 常田賢一: 2011 年東北地方太平洋沖地震における福島市伏拝あさひ台団地での斜面崩壊範囲の評価, 第 10 回地盤工学会関東支部発表会 (Geo-Kanto 2013) 発表講演集, Vol.10, No.A0004, 2013.
- 31) 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 地盤非線形応答時のサイト増幅特性の評価—2011 年東北地方太平洋沖地震による福島市の造成盛土崩壊地点での地震動の推定—, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.139-149, 2012.
- 32) 中村晋教授 (日本大学工学部土木工学科) との私信
- 33) 中村晋, 仙頭紀明, 阿部慶太, 秦吉弥, 野津厚: 2011 年東北地方太平洋沖地震による福島市あさひ台団地の造成盛土の崩壊挙動, 第 47 回地盤工学研究発表会講演概要集, No.692, pp.1375-1376, 2012.
- 34) 中村晋, 仙頭紀明, 梅村順, 大塚悟, 豊田浩史: 2011 年東北地方太平洋沖地震による福島県中通りおよびいわき地域における地盤災害—造成盛土や自然斜面の崩壊と変状, および液化化—, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.91-101, 2012.
- 35) 駒井尚子, 秦吉弥, 常田賢一: 2004 年新潟県中越地震における高町団地での強震動と斜面崩壊範囲の評価, *Kansai Geo-Symposium 2013 講演論文集*, 地盤工学会, 2013. (Accepted)
- 36) 沖村孝, 鳥居宣之, 大藪剛士: 長岡市高町団地における宅地盛土の被害原因に関する解析的検討, 第 41 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.1057, pp.2113-2114, 2006.
- 37) 好井健太, 大塚悟, 佐藤啓介, 高原利幸: 中越地震における高町団地の盛土崩壊地の土質特性, 第 42 回地盤工学研究発表会発表講演集, No.909, pp.1811-1812, 2007.
- 38) 駒井尚子, 秦吉弥, 常田賢一, 一井康二: 崖条例による建築禁止距離を踏まえた地震時における斜面崩壊範囲の評価—2011 年芸予地震によって被災した宅地造成地を例として—, 第 52 回日本地すべり学会研究発表会講演集, No.1-11, pp.20-21, 2013.
- 39) 秦吉弥, 駒井尚子, 常田賢一, 一井康二: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に基づく強震波形の評価—2011 年芸予地震によって被災した宅地造成地を例として—, 第 52 回日本地すべり学会研究発表会講演集, No.1-12, pp.22-23, 2013.
- 40) 橋本隆雄: 2011 年東北地方太平洋沖地震による館ニュータウン大規模盛土滑動崩落被害の原因分析, 土木学会論文集 A1 (地震工学論文集 32), Vol.69, No.4, pp.I_148-I_160, 2013.
- 41) 秦吉弥, 中村晋, 駒井尚子, 魚谷真基, 常田賢一: 特性化震源モデルに基づく既往の大規模地震における一関市館ニュータウンでの地震動の評価, 第 33 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, 2013. (this issue)
- 42) 若井明彦: 宮城県内の造成宅地の盛土被災事例と無被害の補強土壁, ジオシンセティックス情報誌, Vol.27, No.3, pp.11-15, 2011.
- 43) 兵動正幸, 鈴木素之, 野田翔兵, 古川智, 岸田健太

朗：東日本大震災地盤工学会中国支部調査団報告—谷埋め盛土の被災状況—，地盤と建設，Vol.29, No.1, pp.179-186, 2012.

- 44) Hyodo, M., Orense, R., Noda, S., Furukawa, S., Furui, T.: Mechanism of slope failures in residential land on fill during Great East Japan Earthquake, *Proc. of the International Conference Symposium in Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.937-948, Tokyo, Japan, 2012.
- 45) 秦吉弥，野津厚，常田賢一：2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した盛土での余震観測と地震動の評価，日本地震工学会論文集，Vol.13, No.3, pp.56-59, 2013.
- 46) 橋本隆雄，宮島昌克，富澤元：鳥取県西部地震による西伯町法勝寺中学校の斜面崩壊メカニズムの考察，

第 26 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，pp.565-568, 2001.

- 47) 秦吉弥，駒井尚子，野口竜也，香川敬生，古川愛子：2000 年鳥取県西部地震における自治体震度観測点での強震波形の評価とその応用，日本地震工学会大会—2013 梗概集，Vol.10, 2013. (Submitted)
- 48) 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，地盤工学会，pp.231-275, 1994.
- 49) 秦吉弥，佐藤京，駒井尚子，常田賢一：釧路市緑ヶ岡団地における地盤震動特性の評価，日本地震工学会大会—2013 梗概集，Vol.10, 2013. (Submitted)

(2013. 9. 19 受付)

PRELIMINARY STUDY ON EVALUATION OF FAILURE RANGE AT RESIDENTIAL FILL SLOPES DAMAGED BY THE PAST LARGE SCALE EARTHQUAKES

Shoko KOMAI, Yoshiya HATA, Ken-ichi TOKIDA and Masaki UOTANI

Aseismic design method of residential fill slope concerns only the safety factor, residual displacement, and travelling distance; however, the estimation of the range of slope failures is necessary to make a safety regulations for construction of residential houses close to a slope. Based on slope stability analysis for 4 case histories in the past large scale earthquakes, the range of slope failures due to the earthquakes were investigated. The results was summarized as source material to determine a rational criteria for the range of slope failures in the future study.