大規模地震による宅地斜面の崩壊範囲の評価 一建築禁止距離の規制式の改良に向けて一

秦 吉弥1・常田 賢一2

¹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 ²フェロー会員 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

近年,大規模地震により宅地造成斜面が崩壊し,住家が転落・転落寸前となるなどの深刻な被害が報告 されている.一般的に,斜面上に住家などの建物を築造する際,がけ条例によって,ある一定の高さを有 する斜面には,建築禁止距離の規制が適用される.しかしながら,がけ条例による規制の適用内外に関わ らず,宅地造成斜面の深刻な被害が発生しており,建築禁止距離の規制式に関する新たな提案が必要であ る.そこで本稿では,造成宅地の被災斜面を対象にした崩壊範囲に関する再現解析を行い,再現解析で得 られた知見に基づいたパラメトリックスタディを実施することで,建築禁止距離の規制式に関する新提案 を行った結果について報告する.

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

1. はじめに

近年,我が国では,2011年東北地方太平洋沖地震をは じめとした大規模地震による強震動の作用により,盛土 構造物の被災や自然斜面の崩壊などの地盤災害が顕在化 しており,その対策が急務となっている.

盛土構造物に対しては、これまで、安全率による地震 時に盛土がすべり破壊を起こすか否かの判定¹,および Newmark法^{1,2,3}などを用いた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⁴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、斜面上の構造物(住家等)の地震に よる斜面崩壊後の機能持続性を踏まえた斜面の崩壊範囲 の評価⁵も必要となる.

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^のと呼ぶ)に基づく 建築禁止距離に関する規定が存在するものの,その規定 の多くは,1969年~1982年の我が国における地震や降雨 などによる斜面崩壊実績に基づいており^つ,近年の被災 実績が十分に取り入れられていないのが現状である.

上記の背景を踏まえ本稿では、まず、既往の大規模地

震による強震動の作用によって,住家の基礎部分にまで 崩壊の範囲が進行した宅地造成斜面(以後,対象斜面と 呼ぶ)を取り上げ,大規模地震時における斜面崩壊範囲 の評価に関する再現解析⁸⁰を行った結果について報告・ レビューを行う.次に,再現解析(以後,ケーススタデ ィと呼ぶ)により得られた知見を踏まえて,数多くのモ デル斜面を設定することで,斜面崩壊範囲に関するパラ メトリックスタディを実施した.最後に,ケーススタデ ィおよびパラメトリックスタディにより得られた結果に 基づき,現行のがけ条例による建築禁止距離の問題点を 明らかにするとともに,建築禁止距離の規制式に関する 新たな提案を行った.

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、がけ条例による 規定が存在する.平出・田村⁶は、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⁶を参考に、が け条例中の建物を築造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・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、対象から除外している. 図-2および図-3は、45都道府県のがけ条例の内容を整 理した結果である.具体的には、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:図-2参照)に着目して7タイプに分類した.ここに、 斜面高さHは2mまたは3mを超える場合を、斜面傾斜角 は30度を超える場合を規定対象としているものが多い.

図-3に示すとおり、建築禁止距離Lに関しては、斜面 高さHの2倍とする規制(タイプ1)が最も多く、全体の 69%(31/45)を占めている.しかしながら、写真-1および 表-1に示すように、がけ条例が適用される斜面だけでな く、適用されない斜面においても、住家の基礎部分にま で斜面崩壊が進行しているケースが著者らによって報告 されており⁸、建築禁止距離Lに関する新たな提案の必要 性が示唆される.

3. 斜面崩壊範囲の評価

(1) ケーススタディ

本研究では、以下に示す8つの対象斜面において斜面 崩壊範囲に着目したケーススタディを実施している.

- ・福島市伏拝あさひ台 : 2011年東北地方太平洋沖地震^{8),10),11),12)}
- ・仙台市青葉区西花苑 : 2011年東北地方太平洋沖地震^{8,10,13})
- ・山元町太陽=ュータウン : 2011年東北地方太平洋沖地震^{8,14,15})
- ·一関市舘=ュータウン : 2011年東北地方太平洋沖地震^{8,16}
- ・長岡市高町団地
- :2004年新潟県中越地震^{8,10,17)}
- ・呉市両城 : 2001年芸予地震^{8,10,18,19}
- ・神戸市東灘区住吉山手:1995年兵庫県南部地震^{9,20)}
- ・釧路市緑ヶ岡団地 : 1993年釧路沖地震⁸⁾²¹⁾

本章では、上記8つのケーススタディの中から福島市 伏拝あさひ台団地における既往の評価事例(Case_1:表-1参照)^{&10,11)}を紹介する.福島市あさひ台の団地内にお ける宅地造成斜面(以後、対象斜面と呼ぶ)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(a)**



図-2 がけ条例による建築禁止距離の規制に関する現状

に示すような大規模な斜面崩壊が発生20した.

図-4は、対象斜面の平面図に対して、旧地形の等高線 (点線表示)およびすべり土塊の主要滑動方向(N100°W) についても同時に示している.さらに、図-5には、主要 滑動方向における対象斜面の2次元モデル²³⁾を示す.図-5 に示すように、対象斜面は、斜面高さが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 るがけ条例が適用されない斜面である.しかしながら、 図-4および図-5に示すように、斜面崩壊範囲は、法尻付 近から約70.2m(西側すべり面痕跡)ならびに約85.9m(東 側すべり面痕跡)のところまで及んでいる.その結果、 写真-1に示すように、斜面崩壊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.

図-6に対象斜面における安定解析の結果(臨界すべり 円の探査結果)を示す.斜面安定解析は修正フェレニウ ス法²⁴)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.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¹²に基づいて,野田ほかの経験式²⁵ に基づき水平震度k_Hを0.292と概算^{20,31}した.次に、造成 盛土の単位体積重量γ_iおよびせん断強度定数(粘着力c, 内部摩擦角øは、土質試験結果³²に基づき,γ=16.87 kN/m³, c=29kPa, ø=14.8deg.と設定した.最後に、地下 水位³²は、ボーリング調査結果により地表面下3mの位置 にとした.



図-1 斜面崩壊範囲の評価の重要性に関する模式図



検討ケース	Case_1	Case_2	Case_3	Case_4	Case_5	Case_6	Case_7	Case_8
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	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	1995年兵庫県 南部地震	1993年 釧路沖地震
被災地点	福島市伏拝 あさひ台団地	仙台市西花苑	山元町 太陽 ニュータウン	ー関市 舘ニュータウン	長岡市 高町団地	呉市両城	神戸市東灘区 住吉山手	釧路市 緑ヶ岡団地
斜面高さH [m]	30	44	15.8	9.4	8.2	3.8	5.8	12.6
斜面勾配 1:s	1:1.7,1:2.0	1:2.1	1:4.3,1:3.2	1:2.1	1:3.2	1:0.68	1:1.53	1:1.62
がけ条例の規制の有無	なし	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり
建築禁止距離 [m]	—	—	—	—	—	3.86	13.1	4.79
(実績)崩壊範囲R [m]	(85.9)	7.3	8.8	7.7	26.7	5.2	23.4	9.8
推定範囲 $(-次)E_1[m]$	79.7	3.9	3.6	1.5	16.4	3.4	14.0	6.5
推定精度(一次) E_1/R	0.93	0.53	0.41	0.19	0.61	0.65	0.60	0.66
推定範囲(二次)E ₂ [m]	85.6	7.1	8.8	8.0	22.9, 29.8	5.7	21.8	9.8
推定精度(二次) E_2/R	1.00	0.97	1.00	1.04	0.86, 1.12	1.10	0.93	1.00

表-1 ケーススタディによる斜面崩壊範囲の評価結果^{8,9)}の一覧





図-6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-4参照) 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、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の痕跡状況(図-4参照) 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³³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-6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、修 正フェレニウス法²⁴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k₄は考慮していない. 図-6には、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につい ても同時に示している.図-6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85.6 m(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と比較的良い一致を示している.

(2) 崩壊範囲の推定に向けた分析・知見

3.(1)と同様のアプローチを,他の7つの宅地造成斜面 にも適用^{8,99}し,斜面崩壊範囲の評価結果をまとめたもの が表-1である.対象斜面の崩壊実績に対して,一次すべ りのみを考慮した解析では崩壊範囲を十分に評価できて おらず,その精度も低く,ばらつきが大きくなっている. 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.

すなわちこれらの知見は、二次すべりに相当する臨界 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.

4. 建築禁止距離の規制に関する新たな提案

(1) 感度分析

まず、3.で述べたケーススタディにより得られた知見 に基づき、斜面崩壊範囲に影響を及ぼすことが予想され るパラメータとして、図-7に示すように、①斜面高さH、 ②表層地盤の層厚 H_1 (標高:高)、③表層地盤の層厚 H_2 (標 高:低)、④法面と基盤面の水平方向の最短距離D、⑤法 面勾配 $1:s_1$ (標高:高)、⑥法面勾配 $1:s_2$ (標高:低)、⑦傾斜 基盤勾配 $1:k_1$ (標高:高)、⑧傾斜基盤勾配 $1:k_2$ (標高:低)、 ⑨単位体積重量 χ 、⑩内部摩擦角 ϕ 、⑪粘着力c、⑫水平 震度 k_{H1} (本震(一次すべり))、⑬水平震度 k_{H2} (余震等(二次 すべり))の計13種類のパラメータを選定した.そして、 選定した13種類のパラメータのうち、斜面崩壊範囲に対 して特に大きな影響を及ぼすことが予想されるパラメー タを抽出するための感度分析^{34,35)}を行った.

次に、感度分析に使用したパラメータの値とその変動 範囲を表-2に示す.変動範囲については、7つのケース スタディの実績⁸⁰⁹に基づいて設定した.具体的には、各 パラメータが中央値(表-2において灰色でハッチングさ れた値)により構築される斜面モデルを基本ケース(以後、 基本斜面モデルと呼ぶ)として、基本斜面モデルに対し て1種類のパラメータを1段階毎に変化させ、パラメータ の変化が斜面崩壊範囲に及ぼす影響を、全11種類のパラ メータについて検討を行った. 例えば、斜面高さHを変 化させたケースでは、表-2に示すように、24mを中央値 として3mから45mまで7つの検討ケースを設けた(その際、 斜面高さH以外のパラメータはいずれも中央値を採用し た). なお、斜面勾配1:sと傾斜基盤勾配1:kの感度分析の ケースついては、斜面内における勾配変化の影響を無視 (すなわち、 $s_1=s_2$ ならびに $k_1=k_2$ としている). また、二次 すべりによる斜面崩壊範囲の計算するにあたり、余震の 影響を考慮しないケース($k_{H2}=0.00$)と余震を考慮するケ ース($k_{H1}=k_{H2}$)の2パターンを検討内容に加えた.

最後に、斜面崩壊範囲の推定方法については、8つの ケーススタディにおいて採用した方法(3.参照)と同様に、 修正フェレニウス法²⁴⁾を用いた円弧すべり解析を実施し、 一次すべりならびに二次すべりによる斜面崩壊範囲を計 48ケースについて推定した.図-8は、斜面高さHの2倍で 表される2H(最も採用実績が多いタイプ1による規制式 に基づくがけ条例による建築禁止距離:図-2および図-3 参照)に対して、計48ケースによる斜面崩壊範囲の推定 値をプロットしたものである.

図-8に示すように、斜面高さHを変化させたケースお よび法面勾配1:sを変化させたケースでは、斜面崩壊範 囲の推定値は非常に大きく変動しているのに対し、斜面 高さHと法面勾配1:s以外のパラメータを変化させたケー スでは、斜面崩壊範囲の推定値の変化は僅かであること

表-2 感度分析に使用するパラメータの値とその変動範囲

① 斜面高さH [m]		3	10	1	17	24	3	1	38	45
② 層厚(高)H ₁ [m]		0		2		4		6		8
③ 層厚(低)H ₂ [m]		0		2		4		6		8
④ 水平最短距	巨離 D [m]	-4.0	-2.6	-1	1.3	0.0	4	.0	8.0	12.0
⑤斜面勾配(高)1:s1		0.7	1.1	1	.6	2.0	2	.7	3.3	4.0
⑥斜面勾配(低)1:s ₂		0.7	1.1	1	.6	2.0	2.	.7	3.3	4.0
⑦斜面勾配(高)1:k1		0.0	1.7	3	.4	5.0	5.	.5	6.0	6.5
⑧斜面勾配(低)1:k2		0.0	1.7	3	.4	5.0	5	.5	6.0	6.5
⑨単位体積重量 γ _t [kN/m ³]		15		16		17		18		19
⑩ 内部摩擦角 ϕ [度]		14.0		20.5		27.0		33.5		40.0
 11) 粘着力 c [kPa] 		0.0 7.:		7.5	15.0		22.5		30.0	
⑫ 水平震度	(一次すべり) k _{H1}	0.22		0.25		0.28		0.31		0.34
⑬ 水平震度	(二次・余震なし) k _{H2}					0.00				
	(二次·余震考慮) k _{H2}	0.22		0.25		0.28		0.31		0.34
斜面崩壊範囲の推定距離										
							•			
					-		Ϋ́			



図-7 パラメトリックスタディにおいて考慮した斜面形状



が読み取れる. すなわちこれは, 斜面崩壊範囲に比較的 大きな影響を及ぼすパラメータは, 斜面高さHならびに 法面勾配1.sであることを示唆するものである. よって, 後述するパラメトリックスタディの実施にあたっては, 斜面高さH, 法面勾配1.s, および傾斜基盤勾配1.k(斜面 勾配1.sと傾斜基盤勾配1.kの相関性を勘案して採用)の計 3つのパラメータに着目した検討³⁰を行うこととした.

(2) パラメトリックスタディの条件

4.(1)で得られた結果を踏まえ、パラメトリックスタデ ィを実施するにあたり、斜面モデルの形状に関して再度 詳細な検討を行った.8つのケーススタディにおいても、 斜面勾配1:sや傾斜基盤勾配1:kが,法面の途中で変化し ている斜面モデルと、法面の途中で変化せず勾配一定の 斜面モデルが見受けられることから、本節では、法面の 途中で勾配が変化するケース($s_1 \neq s_2$, $k_1 \neq k_2$)と,法面の途 中で変化せず勾配一定のケース($s_1 = s_2, k_1 = k_2$)の2パター ンを採用した(図-7参照).具体的には、勾配一定のケー ス $(s_1 = s_2, k_1 = k_2)$ では、感度分析(4.(1)参照)と同様に、8 つのケーススタディの実績に基づいて8つのパラメータ (斜面高さH,斜面勾配1:s,傾斜基盤勾配1:k)の変動範囲 を設定し、表-2に示す全ての組合せについて検討を行っ た. 一方で、勾配を変化させるケース(sits, kitk)では、 siおよびsoの値は1.1, 2.0, 3.3の3ケース, kiおよびkoの値は 3.4,5.5,6.5の3ケースについてそれぞれ検討を行った.

斜面崩壊範囲の推定方法は、上述した8つのケースス タディや感度分析と同様である.その結果、勾配を変化 させるケース($s_1 \neq s_2$, $k_1 \neq k_2$)では206ケース、勾配一定のケ ース($s_1 = s_2$, $k_1 = k_2$)では256ケースについて検討を行い、 感度分析の48ケース(4.(1)参照)を合わせると、計510ケ ースについて斜面崩壊範囲の推定値を得ることができた.

(3) パラメトリックスタディの結果

図-9(a), (b), (c), (d)は,がけ条例による建築禁止距離(タ イプ1:図-9(a)参照,タイプ2:図-9(b)参照,タイプ3: 図-9(c)参照,タイプ4:図-9(d)参照)に対して,全510ケ ースによる斜面崩壊範囲の推定値をプロットしたもので ある.図-9の図中には、45度の角度を有する基準直線 (以後,45度線と呼ぶ)も同時に示しており、45度線より も下側にプロットされているケースについては安全側 (すなわち、斜面崩壊範囲の推定値が建築禁止距離を下 回っている),一方で,45度線よりも上側にプロットさ れているケースについては危険側(すなわち,斜面崩壊 範囲の推定値が建築禁止距離を上回っている)であるこ とを意味している. 図-9に示すように、がけ条例による 建築禁止距離の規制式において法勾配の影響が考慮され ていないタイプ1~4では、45度線よりも上側にプロット される傾向、すなわち危険側に斜面崩壊範囲を評価する 傾向があることが読み取れる.

図-9(e), (f), (g)は,がけ条例による建築禁止距離(タイ プ5:図-9(e)参照,タイプ6:図-9(f)参照,タイプ7:図-9(g)参照)に対して,全510ケースによる斜面崩壊範囲の 推定値をプロットしたものである.その際,現行のがけ 条例による規制式を用いて建築禁止距離を計算する際, 勾配を変化させた206ケースについては, $s_1 \ge s_2$ の平均値 を法面勾配1:sの値として採用している.

図-9(e), (f), (g)と図-9(a), (b), (c), (d)を比較すると,図-9(e), (f)、(g)のほうが斜面崩壊範囲の推定値が45度線付近に分 布する傾向が強いことが読み取れる. これは、がけ条例 による建築禁止距離の規制式において斜面勾配1sの影 響(斜面幅H×sの影響)を考慮することで、斜面崩壊範囲 の推定精度が向上することを示唆するものである. しか しながら、タイプ5の規制式では安全側に崩壊範囲を評 価する傾向が強く(図-9(e)参照)、タイプ6の規制式では 危険側に崩壊範囲を評価する傾向が強く(図-9(f)参照), タイプ7の規制式では安全側だけでなく危険側にも評価 する傾向があり(図-9(g)参照),いずれにしても、現行の がけ条例による建築禁止距離の規制式(タイプ1~7)の適 用では、斜面崩壊範囲を十分な精度でかつ安全側に評価 することができない³⁰ことが,ケーススタディによる分 析結果(3.(2)参照)だけでなく、本節におけるパラメトリ ックスタディによる分析結果においても確認できる.

(4) 規制式に関する新提案

上述した現行のがけ条例による建築禁止距離の規制式 に関する現状と問題点を踏まえ、本節では、建築禁止距 離の規制式に関する新たな提案^{30,39)}を行う.図-9(h)は、 本研究において提案する建築禁止距離の規制式に対して、 全510ケースによる斜面崩壊範囲の推定値をプロットし



図-9 現行のがけ条例による建築禁止距離(図-3参照)の問題点(同図(a)~(g))と、本研究における規制に関する新提案式(同図(h))

たものである.具体的には,建築禁止距離[m]の規制に 関する新提案式は,次式で表される.

 $L[m] = 0.6 \times H + 0.9 \times H \times s + 9.1$ (1)

(1)式は、全510ケースによる斜面崩壊範囲の推定値を 包絡し、なおかつ(1)式と推定値の差異が最小になるよ うに、試行錯誤の結果、定式化したものであり、現行の がけ条例による建築禁止距離の規制式と同様に、斜面高 さHが3m以上の宅地造成斜面が対象となる.

図-9(h)には、8つのケーススタディのうち、斜面崩壊 範囲が最大であった福島市伏拝あさひ台団地(Case_1: 3.(1)参照)と最小であった呉市両城(Case_6)での崩壊範 囲の実績値(85.9mおよび5.2m:表-1参照)についても同時 にプロットしている.ここに、被災実績を有する範囲の 45度線については実線、被災実績を有していない(いわ ゆる外挿による)範囲の45度線については破線でそれぞ れ記載している.

なお、全てのケースにおいて本研究における提案式の 適用が必ずしも最適というわけではなく、施工資料等に より対象とする宅地造成斜面の詳細(斜面形状や土質特 性など)が既知である場合には、3.で述べたケーススタ ディと同様に、一次すべりと二次すべりの影響を考慮し た斜面安定計算を行い、大規模地震による斜面崩壊範囲 を直接推定することが望ましい.

5. まとめ

本研究では、大規模地震による造成宅地の被災斜面を対象にした斜面崩壊範囲に関する再現解析から得られた

知見に基づいてパラメトリックスタディを実施し,建築 禁止距離の規制式について新たな定式化を行った.以下 に得られた知見を示す.

- (1) がけ条例が適用され建築禁止距離の規定を満足している斜面,ならびに法勾配1:1.73よりも緩勾配であるためがけ条例が適用されていない斜面においても、大規模地震の強震動の作用による斜面崩壊範囲は、 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に至る結果となっている.
- (2) 一次すべりのみの検討では、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1割程度の誤差 で再現できていることから、大規模地震における斜 面崩壊範囲の評価では、一次すべりだけでなく二次 すべりの影響についても同時に考慮する必要がある。
- (3) 斜面崩壊範囲に比較的大きな影響を及ぼすパラメー タは斜面高さおよび法面勾配であり、現行のがけ条 例による建築禁止距離の規制式において、斜面勾配 の影響(斜面幅の影響)を考慮することで、斜面崩壊 範囲の推定精度が向上する傾向はあるものの、現行 の規制式により斜面崩壊範囲を十分な精度でかつ安 全側に評価することはできない。
- (4) 建築禁止距離の規制に関する新たな提案式は、

$L[m] = 0.6 \times H + 0.9 \times H \times s + 9.1$

で表すことができ,現行の規制式と比較して斜面崩 壊範囲を精度良く推定することが可能である.ただ し,この提案式は,現行式と同様に斜面高さ3m以 上の宅地造成斜面が対象となり,特に,被災実績 (斜面崩壊範囲:5.2~85.9m)の中に含まれない宅地 造成斜面を対象とする場合には、適用に留意する必要がある.なお、施工資料等により宅地造成斜面の 詳細が既知である場合には、一次すべりと二次すべ りの影響を同時に考慮した斜面安定計算を行い、斜 面崩壊範囲を直接評価するのが望ましい.

今後は、ケーススタディの数を増やしていくことによって、本稿での提案式の精度を高めていきたいと考えている.

謝辞: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. 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. 黒 田修一氏((株)エイト日本技術開発)には、神戸市東灘区 住吉山手における貴重な既存資料を提供していただきま した. 平出務主任研究員(建築研究所)には、がけ条例に よる建築禁止距離の規定に関する背景・現状について情 報提供していただきました. (一財)防災研究協会若手研 究者研究助成「大規模地震時における宅地造成斜面の崩 壊範囲の評価手法に関する新提案〜崖条例による建築禁 止距離の適切な設定のために~」の一部を使用しました. 本研究の遂行にあたり、谷本隆介氏・魚谷真基氏・駒井 尚子氏(ともに大阪大学大学院工学研究科)にご協力いた だきました. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会:道路土工一盛土工指針, 310p., 2010.
- Newmark, N. M.: Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, *Fifth Rankin Lecture*, *Geotechnique*, Vol. 15, No.2, pp.139-160, 1965.
- 3) 舘山勝, 龍岡文夫, 古関潤一, 堀井克己: 盛土の耐 震設計法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.12, No.4, pp.7-12, 1998.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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 発表会講演概要集,No.5, pp.9-10, 2006.
- 建設省河川局砂防部傾斜地保全課,建設省土木研究 所急傾斜地崩壊研究室:がけ崩れ災害実態について (昭和 53 年~57 年)[資料編],土木研究所資料,第 2016号,pp.1-19,1983.
- 駒井尚子,秦吉弥,常田賢一:ケーススタディに基づく大規模地震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,土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.I_304-322, 2014.

- 9) 駒井尚子,秦吉弥,常田賢一:大規模地震による宅 地造成斜面の崩壊範囲に関する事後評価とその推定 式,第 53 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp.166-167,2014.
- 10) 駒井尚子,秦吉弥,常田賢一,魚谷真基: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,第 33 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No.2-455, 2013.
- 11) 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, Paper No.A0004, 2013.
- 12) 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.
- (13) 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.
- 14) 駒井尚子,秦吉弥,常田賢一:2011 年東北地方太平 洋沖地震における宅地造成斜面の崩壊範囲の評価に 関する基礎的検討,日本地震工学会第 10 回年次大会 梗概集, pp.435-436,2013.
- 15) 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.
- 16) 秦吉弥,中村晋,駒井尚子,常田賢一:経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2008 年岩手・宮城内陸地震および 2011 年東北地方太平洋地震における一関市舘ニュータウンでの強震波形の評価,土木学会論文集 A1, Vol.70, No.4, pp.I 357-368, 2014.
- 17) 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,No.4-1, pp.117-122, 2013.
- 18) 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―2001 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.
- 19) 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—2001 年芸予地震に よって被災した宅地造成地を例として一,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.
- 20) 秦吉弥,駒井尚子,常田賢一,魚谷真基:常時微動 H/V スペクトルに基づく宅地造成斜面に作用した強 震動の事後評価―1995 年兵庫県南部地震によって被 災した神戸市の造成宅地を例として―,第 53 回日本 地すべり学会研究発表会講演集,pp.164-165,2014.
- 21) 秦吉弥,駒井尚子,常田賢一,佐藤京:釧路市緑ヶ 岡団地における地盤震動特性および強震動の評価, 日本地震工学会第 10 回年次大会梗概集,pp.347-348 2013.
- 22) 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,および液状化一,地盤工学ジャー ナル, Vol.7, No.1, pp.91-101, 2012.

- 23) 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.
- 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.
- 25) 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.
- 26) 輔信捷三,柳原和憲,松井保,鳥居剛,黒田修一: 兵庫県南部地震における被災盛土の動的安定性に関 する研究,第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, pp.941-944, 1997.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) Hyodo, M., Orense, R.P., Noda, S., Furukawa, S. and Furui, T.: Slope failures in residential land on valley fills in Yamamoto town, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.5, pp. 975-986, 2012.
- 31) 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.
- 32) 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*, Paper No.1352, Lisbon, Portugal, 2012.

- 33) 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.
- 34) 駒井尚子,秦吉弥,常田賢一:大規模地震による宅 地造成斜面の崩壊実績に基づく建築禁止距離に関す る新たな提案,地盤工学会特別シンポジウム一東日 本大震災を乗り越えて一発表論文集,pp.385-393, 2014.
- 35) 秦吉弥,駒井尚子:大規模地震による宅地造成斜面 の崩壊範囲の評価—がけ条例による建築禁止距離の 改良に向けて—,平成 26 年度近畿地方整備局研究発 表会論文集,防災・保全部門 No.10, 2014.
- 36) Komai, S., Hata, Y. and Tokida, K.: A new determination of forbidden distance for house construction due to a largescale earthquake, *Proc. of 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper No.493, Istanbul, Turkey, 2014.
- 37) 駒井尚子, 秦吉弥, 常田賢一: 大規模地震による宅 地造成斜面の崩壊範囲の評価とその応用, 平成 26 年 度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, Paper No.0309, 2014.
- 38) 駒井尚子,秦吉弥,常田賢一:大規模地震による宅 地造成斜面の崩壊範囲の評価~がけ条例による建築 禁止距離に関する新提案~,第49回地盤工学研究発 表会講演概要集,No.836, pp.1671-1672, 2014.
- 39) 駒井尚子,秦吉弥,常田賢一:大規模地震による宅 地造成斜面の崩壊実績に基づく建築禁止距離に関す る新たな提案,土木学会第68回年次学術講演会講演 概要集,No.III-290, pp.579-580, 2014.

EVALUATION OF FAILURE RANGE AT A RESIDENTIAL FILL SLOPE DUE TO A LARGE SCALE EARTHQUAKE — A NEW PROPOSAL OF REGULATION OF FORBIDDEN DISTANCE FOR HOUSE CONSTRUCTION CLOSE TO A SLOPE —

Yoshiya HATA and Ken-ichi TOKIDA

Serious damage to slopes has been reported frequently as a result of the major earthquakes that have occurred in recent years in Japan. At present, Prefectural Ordinance for Enforcement in the Building Standards Act called 'Ordinance Concerning Cliff' has regulations on forbidden distance for house construction close to a slope. However, it was found that residential fill slopes have been failed due to the past large-scale earthquakes regardless of the application references of the present Ordinance Concerning Cliff. That has suggested that the determination of a new regulation is required. In this paper, we first simulated failure range of residential fill slopes due to the past large-scale earthquakes. Parametric study with a lot of artificial slopes was then carried out based on findings obtained from the simulation results of slope failure range. Finally, based on the results of the parametric study, we proposed a new regulation equation for slope failure range.