

1 はじめに

中央防災会議において切迫性の高い東海地震発生時の斜面崩壊による被害予測が行われるなど、地震時の山腹斜面を対象とした精度の良い崩壊危険度評価手法が必要とされている。

これまで提案されてきた地震時の斜面崩壊予測手法は以下の2つに大別される。

- ① 有限要素法などを用いて3次元動的振動解析を基本とする方法(Ashford, et al. 1997; Mizuyamaら, 2002など)
- ② 既往地震時の崩壊実績から、地形、地質の要素と崩壊地分布の関係に基づく経験的手法(松岡・翠川, 1995; Caplongoら, 2002など)

①の手法は、物理的な解析手法に準拠しているため、地震による被災事例がない地域や異なる特徴を有する地震動波形による斜面の危険度評価に用いることができる可能性が高いが、地下情報が十分に得られないことなど、実務面では依然として課題がある。特に、広域を対象に計算を実施する場合、モデル作成の手間や計算時間が膨大になるなどの問題がある。

そこで、近年、①と②の中間的な手法が、①の手法を広域で用いると計算量が膨大になるなどの理由により提案されてきた。例えば、諏訪部ら(1999)、Jibsonら(2000)は、簡易な物理モデルであるNewmark法を用いて、地形、土質定数、地震動強さを説明変数とし、崩壊発生を目的変数とする地震時の斜面崩壊危険度判定式を提案した。また、安田ら(2004)は、①に示した3次元動的振動解析を用いて、斜面の地形が崩壊発生に及ぼす影響に関する関係式(1次式)を導き、斜面の危険度を評価する手法を提案した。

一方、②の手法は、GISの技術の進歩などにより、実用可能性は高いと考えられる。しかし、既存の崩壊分布実績を基に作成された手法が、他地域、または異なる特徴を有する地震動波形に有効であるかという手法の汎用性を検討する必要があるがこれまで行われてきていない。また、①の手法及び、①と②の中間的な手法においても、現時点では山地斜面に適用する場合、地下情報等が十分に得られないため、多くの場合で、地震時の崩壊実績に基づくパラメータの同定が必要となるのが現状である(例えば、安田ら(2004))。このことは、これらの手法に関しても、手法の汎用性について検討する必要があることを示している。

そこで、本研究では、地形など一般的に入手可能なデータを用い、過去の地震による斜面崩壊の実績データがない場合においても、山腹斜面の地震時の崩壊危険度を評価できる実務的な手法を開発することを目的とした。地形、地震動特性を説明変数とし、崩壊の発生、非発生を目的変数とした判別分析を用いて、地震時斜面崩壊危険度を評価する判別式を構築し、その汎用性を確認することを目的とした。

2章において既存の文献の整理を行い、地震時の崩壊発生をコントロールする地形特性値、地震動の特性値に関する情報を分析した。その結果に基づき、3章において兵庫県南部地震時の六甲山地の崩壊分布実績を用いて、地震時の崩壊危険度判定手法を提案する。なお、2章で手法を提案するにあたって、斜面の凹凸の表現方法(資料3、4)、地質の違い、崩壊形態の違い、崩

壊規模のばらつきの評価手法の精度に及ぼす影響(資料 5~7)、判別分析の関数形の影響について検討した。

その上で、4 章では手法の汎用性を確認する目的で、3 章で提案する手法を 1997 年鹿児島県北西部の地震、2000 年神津島の地震に適用を試みた。最後に、5 章において結果の整理及び今後の課題について検討した。本資料の構成を図 1.1 に示す。

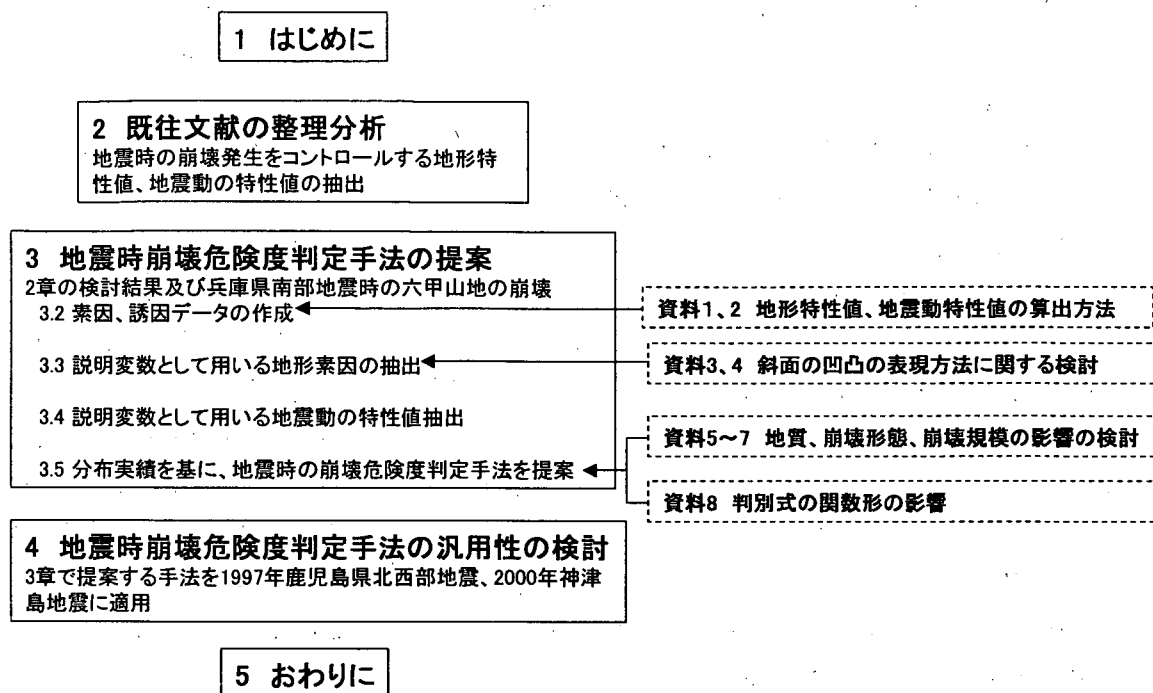


図 1.1 本資料の構成

参考文献

- Ashford S.A., Sitar N., Lysmer J., Deng N. (1997) Topographic effects on the seismic response of steep slopes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(3), 701-70
- Caplongo D, Refice A., Mankelov J. (2002) Evaluating earthquake-triggered landslide hazards at basin scale. The example of the upper Sele river valley. *Survey in Geophysics* 23, 595-625
- Jibson R.W., Harp E.L., Michael J.A. (2000) A method for producing digital probabilistic seismic landslide, *Engineering Geology*, 58, 271-289.
- 松岡昌志・翠川三郎(1995)国土数値情報を利用した地震時斜面崩壊危険度予測、日本建築学会構造系論文報告集 474, 59-66
- Mizuyama T., Natsumura K., Tsuchiya S., Takahashi M., Tang W. (2002) Evaluation of topographic effects on seismic failures of model slopes through dynamic response analysis, *Proceedings of INTERPRAEVENT 2002 in Pacific Rim*, 59-66
- 諏訪部一美・田中耕平・小倉薫(1999)地震による崩壊発生予測手法 その4、第38回地すべり学会研究発表講演集、267-270
- 安田勇次・高木洋一・土屋 智・水山高久(2004)地形指標を用いた地震時の表層崩壊発生危険度評価手法について、平成16年度砂防学会研究発表会概要集、426-427

2. 既往文献の整理分析

これまで、地震時崩壊の発生と地形・地質をはじめとした素因や震央からの距離など誘因との関係については過去にも多くの研究がなされその成果が報告されている(表 2.1)。そこで、本章では、国内の過去の研究成果から、地震による斜面崩壊に影響を及ぼすと考えられる因子を整理することを目的とする。

地震時の斜面崩壊発生に影響を及ぼす因子は素因および誘因から、以下のように分類できる(図 2.1)。ここで、素因のうち、地下水に関してはその空間分布に関するデータを得ることが現時点では困難と考え、本資料では検討から除外した。

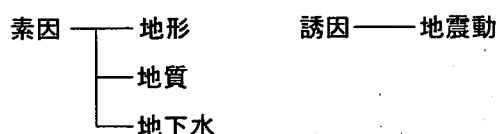


図 2.1 地震時の崩壊発生に影響を及ぼす要因

2.1 地形素因

地形要因の影響に関しても、様々な検討がなされ、近年数値地形情報(DEM)の進歩に従い、その知見も急速に集積されてきた。整理結果は表 2.2 に示した。既往の文献から、地震による斜面崩壊発生に影響を及ぼす地形素因としては、

- ① 標高
- ② 斜面勾配
- ③ 斜面方位
- ④ 偏差
- ⑤ ラプラシアン
- ⑥ 地上開度
- ⑦ 地下開度
- ⑧ 平均曲率

の 8 項目が挙げられた。それぞれの素因の模式図を資料 1 に示した。

2.2 地震時崩壊の誘因に関する文献整理

地震時崩壊の発生危険度評価を行うためには、過去の事例を参考に誘因となる地震動の特性について表 2.1 に示す文献に関する調査を行った結果(表 2.3)、地震による斜面崩壊発生に影響を及ぼす地震動誘因としては、

- ① 最大速度
- ② 最大加速度

の 2 項目が挙げられた。

表 2.1 地震による崩壊発生に関する地形要因、地震動要因に関する文献リスト

番号	年代	タイトル	著者	出典	対象事例
1	1982	地震による山地災害の特性	山口伊佐夫、川邊洋	新砂防, 35, 2, 3-15	関東、新潟、伊豆大島近海の各地震
2	1991	斜面崩壊	谷口栄一、仲野公章、本田孝夫ら	土木研究所報告, No182, p147-194	1984 長野県西部
3	1991	地震及び地震動	岩崎敏男、桑原徹郎、高橋和之	土木研究所報告, No182, p113-126	1984 長野県西部
4	1994	地震及び地震動	大塚久哲、吉見精太郎	土木研究所報告、北海道南西沖地震災害調査報告、平成5年(1993年), No194, p5-22	1993 北海道南西沖
5	1994	斜面の被害	網木亮介、蒲原潤一	土木研究所報告、北海道南西沖地震災害調査報告、平成5年(1993年), No194, p167-179	1993 北海道南西沖
6	1994	地震による斜面崩壊と地形の影響について	門間敬一、小嶋伸一	土木研究所報告 194号, pp167~180	1995 兵庫県南部
7	1995	降雨を原因とする斜面崩壊に土層厚が及ぼす影響	三森利昭、大倉陽一、落合博貴、北原暉	砂防学会誌, Vol148, No. 1, p12~23	1995 兵庫県南部
8	1995	阪神大震災による六甲山地内の土砂流出について	低引洋隆	砂防学会誌, Vol148, No. 1, p46~49	1995 兵庫県南部
9	1995	国土数値情報を利用した地震時斜面崩壊危険度予測	松岡昌志、翠川三郎	日本建築学会構造系論文集第474号, p59~66	1974 伊豆半島沖 1978 宮城県沖
10	1995	兵庫県南部地震による山地崩壊の概要	落合博貴、北原暉、三森利昭	平成7年度砂防学会研究発表会概要集 p253~256	1984 長野県西部 1995 兵庫県南部
11	1995	兵庫県南部地震による山腹崩壊	水山高久、西田顯郎	新砂防 Vol. 48, No. 1, pp38~40, 1995	1995 兵庫県南部
12	1995	山腹斜面および造成地	神戸大学工学部建設学科土木系教室 兵庫県南部地震学術調査団	兵庫県南部地震緊急被害調査報告書(第2報) p169~179	1995 兵庫県南部
13	1995	国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価	翠川三郎、松岡昌志	物理探査第48巻第6号 p519~529	1987 千葉県東方沖地震
14	1995	地震による山腹斜面崩壊機構	落合博貴	森林工学研連シンポジウム p1~14	1995 兵庫県南部
15	1995	平成7年兵庫県南部地震による山地崩壊	落合博貴、北原暉、三森利昭	新砂防 Vol. 48, No. 1, p41~45	1995 兵庫県南部
16	1996	土砂災害用データベースを活用した、兵庫県南部地震による山腹崩壊分布の解析	西田顯郎、小橋澄治、水山高久	砂防学会誌, Vol149, No. 1, p19~24	1995 兵庫県南部

表 2.1 地震による崩壊発生に関する地形要因、地震動要因に関する文献リスト (続き)

17	1996	六甲山系における地震後の降雨による崩壊地の拡大について	冨田陽子、桜井亘、中庸充	新砂防 Vol. 48, No.6, pp15~21, 1996	1995 兵庫県南部
18	1996	地震に起因した大規模土砂移動の事例調査	井上公夫、深沢浩、高野繁昭、今村隆正、石川芳治、小山西信智ら	平成8年度砂防学会研究発表会概要集 p277, 278	1986~1995年までの地震による崩壊
19	1996	兵庫県南部地震による六甲山地の斜面崩壊に関する研究	水原邦夫、三好岩生、大手桂二、諸戸順子、有川典宏	平成8年度砂防学会研究発表会概要集 p113, 114	1995 兵庫県南部
20	1997	兵庫県南部地震による六甲山地の崩壊分布	川邊洋、辻元文武、林拙郎	砂防学会誌、Vol149, No.5, p12~19	1995 兵庫県南部
21	1997	兵庫県南部地震による崩壊の現地調査結果について	桜井亘、冨田陽子、中庸充ら	H9 砂防学会研究発表会概要集、p52, 53	1995 兵庫県南部
22	1997	地震で発生した崩壊の要因分析について	中筋草人	日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 1997, 109-112, (日本応用地質学会)	1995 兵庫県南部
23	1997	数値地形モデルに基づく地震時山腹崩壊斜面の地形解析	西田顕郎、小橋澄治、水山高久	砂防学会誌、Vol149, No.6, p9~16	1995 兵庫県南部
24	1997	1995年兵庫県南部地震時に発生した六甲花崗岩地域の斜面崩壊の運動様式と機構、地すべり	横山俊治、菊山浩喜	地すべり学会、Vol134, No3, p17-24	1995 兵庫県南部
25	1997	平成9年3月~5月の鹿児島県北西部の地震による崖崩れ災害	小嶋伸一、藤澤和範、金子正則、吉松弘行、網木亮介ら	土木技術資料、Vol. 39, No. 8	1997 鹿児島県北西部
26	1997	1995年兵庫県南部地震による六甲山地の斜面崩壊の特性と経時的变化	平野昌繁、石井孝行	新砂防 Vol. 50, No. 1, pp23~32	1995 兵庫県南部
27	1997	兵庫県南部地震と六甲山系の地質構造条件	平野昌繁、波田重熙	地形第 18 巻第 3 号、p203~222	1995 兵庫県南部
28	1997	1995年兵庫県南部地震における災害の地形・地質的要因	黒木貴一、脇坂安彦	土木技術資料 39-3、p20~25	1995 兵庫県南部
29	1997	兵庫県南部地震による斜面変動のGRASGISに基づく解析	藤田崇、VenkateshRaghavan、升本真一	平成9年度砂防学会研究発表会概要集 p48, 49	1995 兵庫県南部
30	1998	兵庫県南部地震による宅地地盤被害の原因(その3) - 被災宅地と無被災宅地における動的解析例 -	沖村孝、鳥居宣之、片山政和、村上岳彦	建設工学研究所論文報告集 - 阪神・淡路大震災特集号 - , 40-B, 115-134, (建設工学研究所)	1995 兵庫県南部
31	1998	地震による斜面崩壊の地形的特徴	小嶋伸一、門間敬一	土木技術資料、Vol. 40, No. 6、p28~31	1995 兵庫県南部
32	1998	北丹後地震による斜面崩壊面積率	石川芳治、小野彩、水原邦夫	新砂防 Vol. 51, No. 4, pp27~32	1997 北丹後地震

表 2.1 地震による崩壊発生に関与する地形要因、地震動要因に関する文献リスト (続き)

33	1998	地震動による表層崩壊と土質定数の変化	諸戸順子、吉田健一、三好岩生ら	平成10年度砂防学会研究発表会概要集 p56, 57	
34	1999	兵庫県南部地震による建築構造物等価被災率と地盤特性との関係について	沖村孝、鳥居宣之、藤波宏ら	建設工学研究所論文報告集—阪神、淡路大震災特集号—, 41-B, 87-97, (建設工学研究所)	1995 兵庫県南部
35	1999	兵庫県南部地震による宅地地盤被害の原因(その4)	沖村孝、鳥居宣之、村上岳彦	建設工学研究所論文報告集—阪神、淡路大震災特集号—, 41-B, 77-86, (建設工学研究所)	1995 兵庫県南部
36	1999	開度による地形特徴の表示	横山隆三、白沢道生、菊池祐	写真測量とリモートセンシング, 38, 4, 26-34	岩手山
37	1999	兵庫県南部地震後の降雨により発生した山腹斜面崩壊について	沖村孝、鳥居宣之、永井久徳	平成11年度砂防学会研究発表会概要集 p126, 127	1995 兵庫県南部
38	2000	兵庫県南部地震による崩壊の分布について	中村浩之、土屋智、井上公夫、石川芳治	地震砂防 p83~86	1995 兵庫県南部
39	2000	地震時および地震後の降雨による斜面崩壊	沖村孝	地震と土砂移動—六甲を中心に、台湾の事例を合わせて—	1995 兵庫県南部
40	2000	地震による斜面崩壊事例の比較検討	諏訪浩	平成12年度砂防学会研究発表会概要集 p12, 13	岐阜、長野県境地震、岩手地震
41	2000	北丹後地震	中村浩之、土屋智、井上公夫、石川芳治	地震砂防 p70~76	1927 北丹後地震
42	2001	地震動強さと地形条件ならびに地震被害との関係	水谷武司	地形第22巻第2号, p185~202	1974~1995 地震データ
43	2002	地震による斜面崩壊に関する地形効果の解析的研究	松村和樹、安田勇次、水山高久、土屋智、高橋正昭、唐文東	H14 砂防学会研究発表会概要集 p206, 207	1995 兵庫県南部
44	2002	地震動による崩壊発生分布の航空写真を用いた解析	梅村善信、石橋弘光、林世郎、近藤頼慈、沼本晋也、川崎洋、土屋智ら	H14 砂防学会研究発表会概要集 p212, 213	1999 台湾集
45	2002	地震による斜面崩壊の発生予測に関するUSGS手法の適用事例	小沼佳記、土屋智、遠坂興宏ら	H14 砂防学会研究発表会概要集 p400, 401	1935 静岡
46	2002	平成13年予地震による災害の現れ方に関する考察	西村賢、海堀正博	H14 砂防学会研究発表会概要集 p322, 323	2001 荻予、2000 鳥取県西部、他1

表 2.2 地震による崩壊発生に関する地形要因に関する既存の知見

	標高		勾配		方位		斜面の凹凸		その他	
1			傾斜が30°を境にして急激に崩壊が増加する。	○						
2	標高が高くなると崩壊が減少する	×	21~28°で崩壊が多い	○	やや東向きが多い	△	平衡斜面が多い	×	平衡斜面が多い	×
3										
4										
5							凸型斜面が崩れやすい	○	凸型斜面が崩れやすい	○
6	ある標高を中心に崩壊発生率が高い。	○	勾配が大きいほど崩壊発生率が高くなる。	○	震央の反対斜面に崩壊が多い。	○	尾根側部の崩壊が多い。	○	尾根側部の崩壊が多い。	○
7										
8							尾根部で多く崩壊が発生している。	○	尾根部で多く崩壊が発生している。	○
9			傾斜度と相関がある	○						
10										
11			勾配が大きいところで崩壊が多く発生。	○			地形図を用いた解析では、凸型斜面に崩壊多く分布。	○	地形図を用いた解析では、凸型斜面に崩壊多く分布。	○
12			勾配が大きいところで崩壊が多く発生。	○	北西(北東から南西にかけて)の斜面に崩壊が多い。	○	凹凸の大きな斜面で崩壊が発生している。	○	凹凸の大きな斜面で崩壊が発生している。	○
13			傾斜度と相関がある	○						
14										
15										
16			急峻な地形に崩壊が発生している。	○	南西・北東斜面に崩壊が多い。	○				
17										
18										
19										
20	局所的に見るとはっきりした相関は見られない。	×	局所的に見るとはっきりした相関が見られない。多発している流域では、勾配が急になるほど崩壊面積率が大きくなる。	×			・局所的に見るとはっきりした相関は見られない。	×	・局所的に見るとはっきりした相関は見られない。	×
21			勾配が大きいところで崩壊が多く発生。	○						
22	標高が高いほど多い	○	急なほど崩れやすい	○						
23			5m程度のDEMを用いて計算した勾配が、崩壊の発生と相関が高い。	○			凸状地に崩壊が発生している。	○	凸状地に崩壊が発生している。	○
24										
25										
26					断層の北側で東向き斜面、断層の南側で西ないし南向き斜面が多い。	○				
27										
28										
29										
30										
31					崩壊地を含む尾根は南東方向に伸びる尾根が多い。	○	凸地形や斜面上部で発生しやすい。	○	凸地形や斜面上部で発生しやすい。	○
32			勾配が大きいところで崩壊が多く発生。	○						
33										
34										
35										
36										
37										
38										
39										
40										
41										
42										
43							凸型の程度が大きいほど残留変位が多い。	○	凸型の程度が大きいほど残留変位が多い。	○
44			傾斜角	○						
45										
46										

表 2.2 地震による崩壊発生に関与する地形要因に関する既存の知見
(続き 凹凸の表現方法について)

	ラブラシアン		偏差		地上開度		地下開度		平均曲率	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12			偏差が大きい箇所 で崩壊が発生して いる。	○						
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20	ラブラシアンと崩 壊面積率の間に相 関は見られない。	×								
21										
22										
23	・ラブラシアンは 同じ曲面でも勾配 をかえると値が変 わるため、望まし くない。	×						・25m程度のDEMで 計算した平均曲率 が崩壊発生と相関 が高い。	○	
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
36					地上開度は、地形 の凹凸を適切に反 映する手法となっ ている。		地下開度は、地形 の凹凸を適切に反 映する手法となっ ている。			
37										
38										
39										
40										
41										
42										
43								曲率が多いほど変 位が大きい	○	
44										
45										
46										

表 2.3 地震による崩壊発生に関与する地震動要因に関する既存の知見

番号	地震動に関する要因							
	震央からの距離		震源断層からの距離		最大加速度		その他	
1					標高に比例して増加する傾向にある	-	崩壊を発生させる地震加速度の下限値は、ほぼ200galと判断される	-
2	2km以内で崩壊が多い	○					断層本数が多いほど崩れやすい	○
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9							最大地動速度(c m/s)と相関がある	○
10								
11								
12								
13							最大地動速度(c m/s)と相関がある	○
14								
15								
16								
17							断層周辺に集中している	
18								
19								
20							余震分布と崩壊分布がよく対応している。	
21			震源断層からの距離と崩壊発生率の相関が見られる。	○				
22								
23								
24								
25							震央方向との相関は見られない	×
26							地震により地表変位を起こした断層近傍で崩壊が多い。	○
27								
28								
29							断層北側で多発	○
30								
31								
32			崩壊の発生は震源断層からの距離と相関が高い。	○				
33								
34	1~2kmがピーク							
35								
36								
37								
38								
39								
40								
41	相関が低い	×					地表に現れた断層からの相関が高い	○
42								
43								
44					地震発生時の最大加速度分布図(川邊・林, 2002)を利用	○		
45								
46			同じ程度の震源から離れていても計測した卓越する揺れには数倍の差がある観測所も存在した。	×			土砂移動現象が発生した方向と最大加速度の方向は一致した。	○

3. 兵庫県南部地震を対象とした地震時崩壊危険度判定手法の提案

3.1 概要

本章では、兵庫県南部地震による六甲山地における崩壊分布をもとに、地形データ及び地震動の大きさから、地震による崩壊の危険斜面を抽出する手法を検討する。はじめに、3.2 では用いるデータについて説明する。その上で、3.3、3.4 で地形、地震動に関する斜面崩壊危険度を説明する変数をそれぞれ検討する。その上で、3.5 で判定手法、3.6 でハザードマップを提案する。

3.2 データの準備

3.2.1 検討範囲

検討範囲は図 3.1 に示す 26 流域でこれを「六甲全山」とする。また、詳細な検討を行う領域として住吉川流域内の矩形のエリアを設定した(図 3.1)。これを、「住吉川」または「住吉川流域」と呼ぶ。



図 3.1 検討範囲

3.2.2 崩壊地デジタルデータ

解析に使用する崩壊地データは、平成7年兵庫県南部地震により発生した崩壊地を対象とすることとし、平成7年以降近畿地方建設局六甲砂防工事事務所により調査され、データベース化されたものを使用することとした。データの基になった調査の実施された範囲、業務名等を表 3.1 にまと

めた。さらに、資料の元になった空中写真の出典は表 3.2 にまとめた。以上の資料から、本研究では、兵庫県南部地震から1年以内に崩壊したものを、地震動の影響を強く受けて発生したものと位置づけ、検討対象の崩壊地として用いることとした。

表 3.1 六甲砂防工事事務所において実施された兵庫県南部地震後の六甲山系の崩壊地調査業務

年度	業務名	対象範囲	対象	概要
平成7年度	六甲山系土石流危険渓流不安定土砂量調査業務	六甲山系全域	地震直後に発生した崩壊	空中写真判読
平成7年度	震後崩壊地拡大追跡調査業務	六甲山系全域	平成7年度に発生した崩壊	空中写真判読
平成7年度	崩壊地拡大調査(その1)業務	六甲山系直轄対象地域(夙川～住吉川)	平成7年度に発生した崩壊	現地調査
平成7年度	崩壊地拡大調査(その2)業務	六甲山系直轄対象地域(石屋川～堺川)	平成7年度に発生した崩壊	現地調査
平成7年度	崩壊地拡大調査(その3)業務	六甲山系直轄対象地域(船坂川～山田川)	平成7年度に発生した崩壊	現地調査
平成8年度	震後崩壊地調査とりまとめ業務	(上記3業務とりまとめ)	平成7年度に発生した崩壊	とりまとめ
平成8年度	震後崩壊地拡大追跡調査業務	六甲山系直轄対象地域(22河川)	平成8年度に発生した崩壊	空中写真判読および現地調査
平成9年度	震後崩壊地調査解析業務	六甲山系補助地域(東川～太多田川)	平成7、8年度に発生した崩壊	現地調査
平成9年度	六甲山系航空写真撮影作業	六甲山系全域	平成9年度に発生した崩壊	空中写真判読および現地調査
平成10年度	震後崩壊地拡大追跡調査業務	六甲山系全域	平成10年度に発生した崩壊	空中写真判読および現地調査
平成11年度	震後崩壊地拡大追跡調査業務	六甲山系全域	平成11年度に発生した崩壊	空中写真判読および現地調査

表 3.2 表 3.1 に示した業務に用いられた崩壊地判読に使用された空中写真

撮影時期	地域	写真縮尺	撮影年月	崩壊地判読を行った業務名
地震前	宝塚市	1/10,000	平成3年9月～10月	平成7年度 六甲山系土石流危険渓流不安定土砂量調査業務
	西宮市	1/5,000	平成3年12月	〃
	芦屋市	1/12,500	平成4年6月	〃
	神戸市	1/6,000	平成3年4月	〃
地震直後	管内全域	1/8,000	平成7年1月	〃
平成7年度	管内全域	1/8,000	平成7年5月	平成7年度 震後崩壊地拡大追跡調査業務
平成7年度	管内全域	1/8,000	平成7年8～10月	〃
平成7年度	管内全域	1/8,000	平成7年12月～平成8年1月	〃
平成8年度	管内全域	1/8,000	平成8年7月	平成8年度 震後崩壊地拡大追跡調査業務
平成8年度	管内全域	1/8,000	平成8年10月～11月	〃
平成9年度	管内全域	1/8,000	平成9年12月	平成9年度 六甲山系航空写真撮影作業
平成10年度	管内全域	1/8,000	平成10年11月～12月	平成10年度 震後崩壊地拡大追跡調査業務
平成11年度	管内全域	1/8,000	平成11年	平成11年度 震後崩壊地拡大追跡調査業務

検討では、はじめに対象範囲全域をメッシュに分割し、それらのメッシュに対し要因の情報(地形素因データおよび地震誘因データ)を整理するとともに、崩壊の発生・非発生情報を付加して崩壊地デジタルデータを作成した。なお、崩壊発生メッシュは図 3.2 に示すように崩壊地ポリゴンデータ(多角形の面データ)の中で、地形等から崩壊頭部と判断される点が含まれるメッシュポリゴンとした。なお、崩壊地ポリゴンは、六甲砂防事務所が、「地震後の崩壊地拡大要因検討調査業務」の中で、崩壊地 GIS 整備に当たって作成したものを用いた。なお、同業務で用いられた元データは六甲砂防事務所が、地震直後の平成7年度から平成11年度にかけて実施した、崩壊地判読および現地確認調査結果で作成した崩壊地分布図(1/10,000)である(表 3.2)。

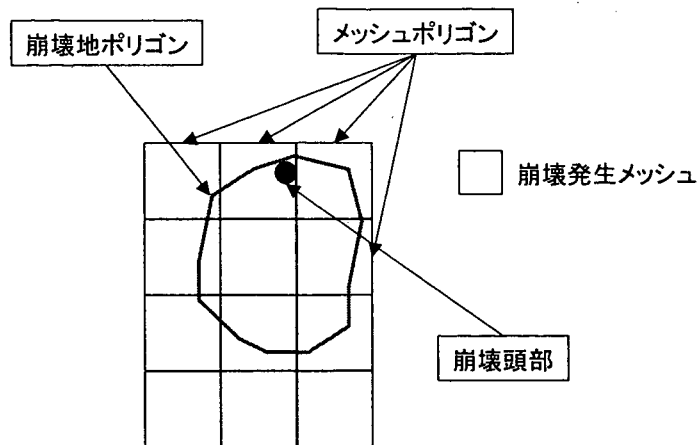


図 3.2 崩壊地メッシュデータ概念図(10mメッシュ)

3.2.4 地形

文献調査(2章)では地震時崩壊に関係する地形量として以下のものを抽出した。

- | | | |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| ① 標高 | ② 斜面勾配 | ③ 斜面方位 |
| ④ 偏差 | ⑤ ラプラシアン | ⑥ 地上開度(影響範囲 20m,50m) |
| ⑦ 地下開度(影響範囲 20m,50m) | ⑧ 平均曲率(影響範囲 20m,50m) | |

また、地上開度と地下開度を組み合わせた新たな地形量として、今までの文献では検討されていない⑨尾根谷度(影響範囲 20m,50m)を加えた9つの素因で検討することとした。これらの地形量の概念とDEMデータを用いた作成方法の詳細は資料1に示した。

3.2.5 地震動

地震動とそれによる崩壊の関係を明らかにするためには、対象地域の各場所に対して地震動の大きさを示すデータの作成を行う必要がある。ここでは、距離減衰式を用いることを基本とし、

- ① 最大速度
- ② 最大加速度
- ③ 破壊伝播効果を加味した最大速度
- ④ 破壊伝播効果を加味した最大加速度
- ⑤ 破壊伝播効果を考慮し、3次元距離を用いた最大加速度

を算出した。算出手法の詳細は、資料2にまとめた。地震動の最大速度、加速度を求める際に用いる断層位置は、Fukushima and Irikura (1997) (Attenuation Characteristics of Peak Ground Motions in the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake; *J. Phys. Earth*, 45, 135-146)から、図3.3のように仮定した。

また、最大加速度の算出結果を図3.4に示す。

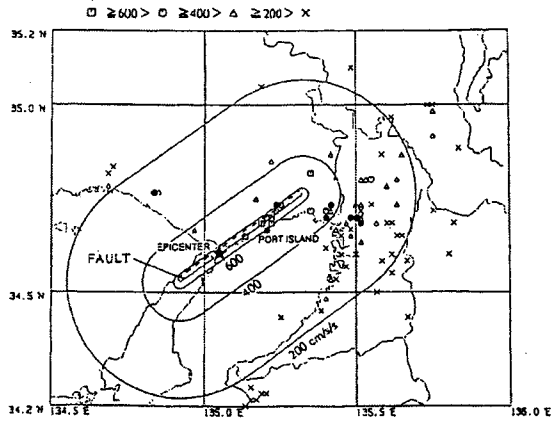


Fig. 1. Map showing the locations of the source fault and observation sites. Symbols of square, circle, triangle, and cross indicate observation sites of peak horizontal acceleration greater than 600, from 600 to 400, from 400 to 200, and less than 200 cm/s² respectively. Solid circles indicate the sites of greater peak vertical acceleration than horizontal acceleration. Contour lines indicate predicted horizontal accelerations by Fukushima and Tanaka (1992).

図 3.3 本研究で仮定した兵庫県南部地震に寄与した断層の位置 (Fukushima Y. and Irikura K. 1997 *J. Phys. Earth*, 45, 135-146 より引用)

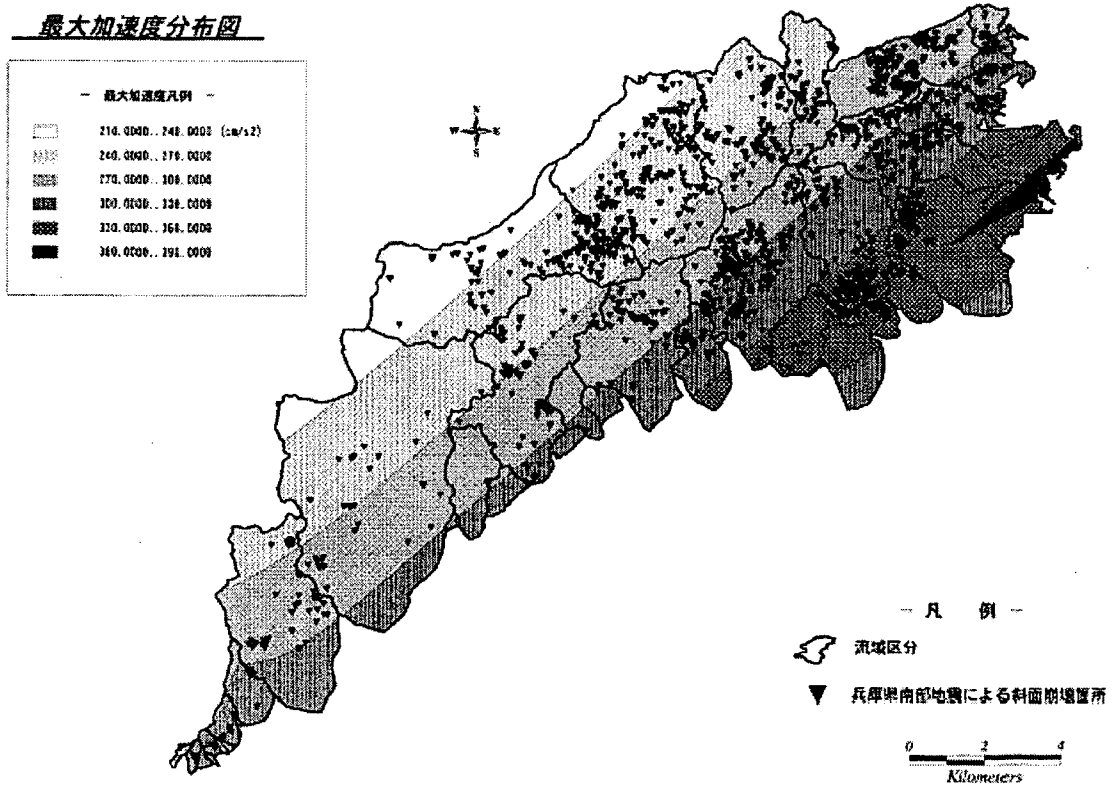


図 3.4 最大加速度の算出結果

3.3 地形要因に関する検討

3.3.1 方法

はじめに、前節で準備した各地形要因と崩壊発生の有無のデータを基に、3.3.2において各地形要因と崩壊発生率の関係を整理し、3.3.3において各地形要因間の相関関係を調べる。この2つの検討から、入力変数として使う地形要因について抽出する。その上で、多変量解析を実施、地震による斜面崩壊危険度を判定する際に入力する地形要因の組み合わせを明らかにする。

3.3.2 各地形要因と崩壊発生率の関係

検討結果を図3.5～3.17に示した。結果を箇条書きにすると以下のようになる。

- ・ 標高(図3.5)及び偏差(図3.8)、ラプラシアン(図3.9)、地上開度(図3.10、図3.11)、地下開度(図3.12、図3.13)、平均曲率(図3.14、図3.15)、尾根谷度(図3.16、図3.17)の斜面の凹凸をあらわす指標はいずれも、崩壊と非崩壊メッシュの分布状況およびピークに違いが勾配ほど明瞭ではないが見られた。
- ・ 勾配の単相関グラフから、崩壊と非崩壊メッシュの分布状況およびピークに違いが見られ、よく分離できている(図3.6)。
- ・ 方位については、崩壊と非崩壊のメッシュ間で顕著な差は見られなかった(図3.7)。
- ・ ラプラシアンは、その絶対値が大きくなるほど崩壊発生率が高くなる傾向を示した(図3.9)。
- ・ 地上開度、地下開度、尾根谷度は、影響範囲が20mの時(図3.10、図3.12、図3.16)よりも50m(図3.11、図3.13、図3.17)の方が、崩壊と非崩壊メッシュをよく分離できた。
- ・ 一方、平均曲率については、その影響範囲が20mの時(図3.15)よりも50m(図3.14)の方が、崩壊と非崩壊メッシュをよく分離できた。

項目名：標高

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ2乗検定
全数	1,749,480	354.39	201.014	2.54	930	0.389
住吉川流域	276	531.83	128.998	292.55	883.74	
六甲全域	2,351	431.85	162.115	55.43	887.63	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率	
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②
1	0 ~ 100	191,125			30	1.3			191,095	10.9		0.016
2	100 ~ 200	257,539			164	7.0			257,375	14.7		0.064
3	200 ~ 300	1,117,254,221	2	0.7	320	13.6	1,115	1.9	253,901	14.5	0.179	0.126
4	300 ~ 400	6,740,387,957	53	19.2	515	21.9	6,687	11.2	387,442	22.2	0.786	0.133
5	400 ~ 500	10,697,251,366	60	21.7	532	22.6	10,637	17.8	250,834	14.4	0.561	0.212
6	500 ~ 600	12,192,167,770	66	23.9	377	16.0	12,126	20.3	167,393	9.6	0.541	0.225
7	600 ~ 700	12,692,129,111	67	24.3	294	12.5	12,625	21.1	128,817	7.4	0.528	0.228
8	700 ~ 800	12,370,79,903	25	9.1	100	4.3	12,345	20.7	79,803	4.6	0.202	0.125
9	800 ~ 900	4,187,30,070	3	1.1	19	0.8	4,184	7.0	30,051	1.7	0.072	0.063
10	900 ~ 1000	418							418	0.0		
11												
12												
13												
14												
合計		59,995,1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	2.869	1.192

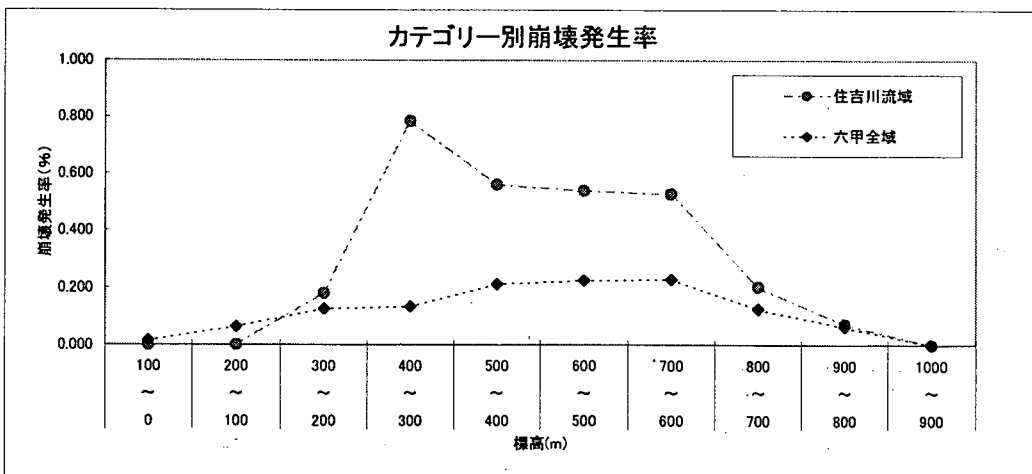
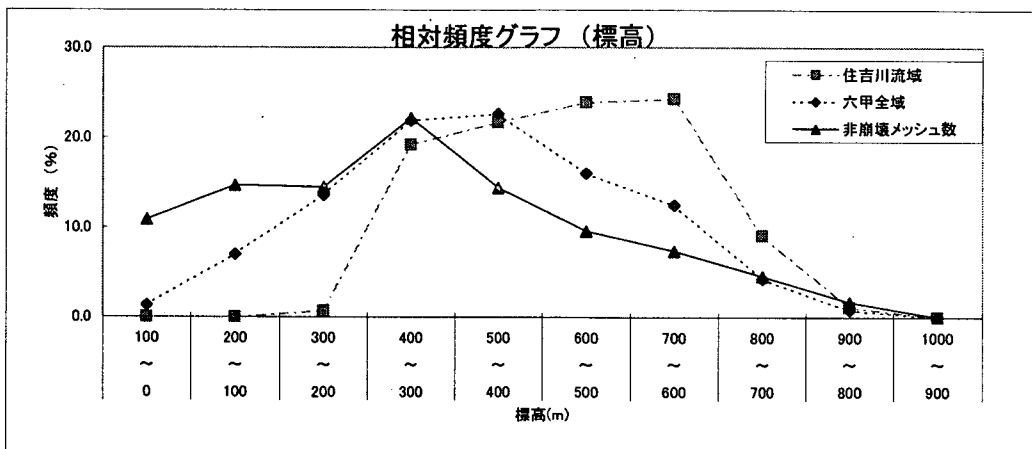


図 3.5 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(標高)

項目名：勾配

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	21.88	13.078	0	75.62	0.460
住吉川流域	276	38.56	8.413	9.91	59.73	
六甲全域	2,351	34.82	9.463	0	63.07	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	0 ~ 10	2,459	434,644	1	0.4	39	1.7	2,458	4.1	434,605	24.9	0.041	0.009
2	10 ~ 15	2,755	168,838	2	0.7	50	2.1	2,753	4.6	168,788	9.7	0.073	0.030
3	15 ~ 20	3,817	176,791	5	1.8	103	4.4	3,812	6.4	176,688	10.1	0.131	0.058
4	20 ~ 25	5,196	194,878	16	5.8	169	7.2	5,180	8.7	194,709	11.1	0.308	0.087
5	25 ~ 30	7,322	213,170	19	6.9	254	10.8	7,303	12.2	212,916	12.2	0.259	0.119
6	30 ~ 35	9,897	227,209	29	10.5	407	17.3	9,868	16.5	226,802	13.0	0.293	0.179
7	35 ~ 40	13,043	192,705	62	22.5	610	25.9	12,981	21.7	192,095	11.0	0.475	0.317
8	40 ~ 45	10,826	102,641	88	31.9	442	18.8	10,738	18.0	102,199	5.8	0.813	0.431
9	45 ~ 50	3,978	31,865	38	13.8	208	8.8	3,940	6.6	31,657	1.8	0.955	0.653
10	50 ~ 55	614	5,607	12	4.3	56	2.4	602	1.0	5,551	0.3	1.954	0.999
11	55 ~ 60	73	955	4	1.4	12	0.5	69	0.1	943	0.1	5.479	1.257
12	60 ~ 90	15	177			1	0.0	15	0.0	176	0.0		0.565
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	10.781	4.704

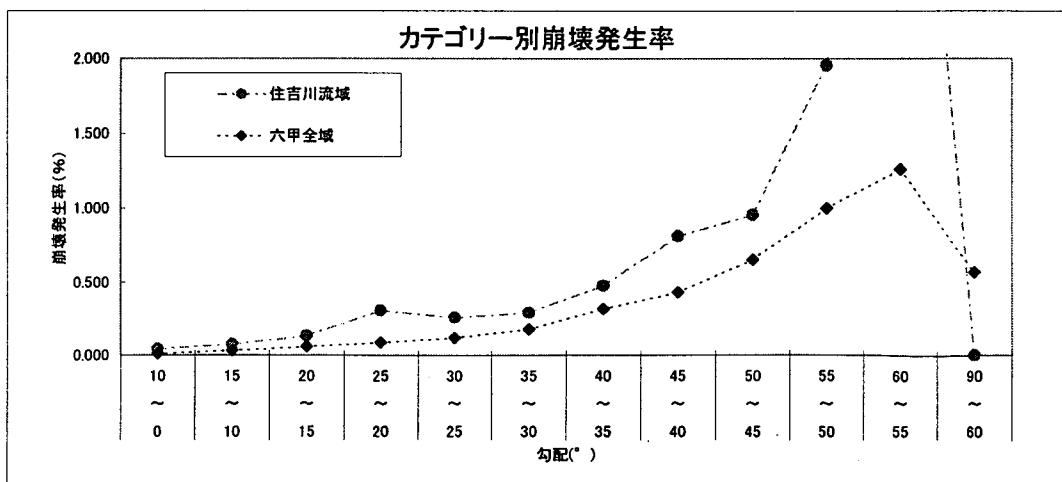
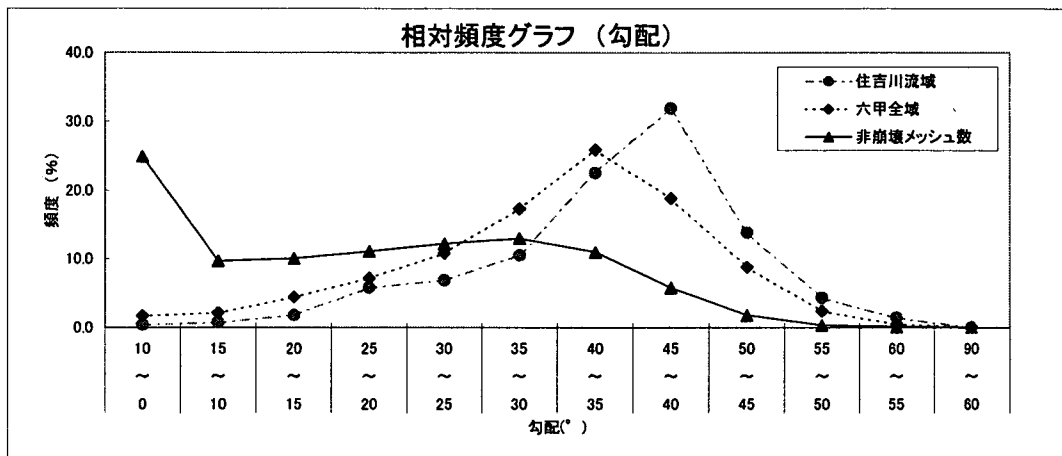


図 3.6 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(勾配)

項目名：方位

	データ数 (箇所)
全数	1,749,480
崩壊地(住吉川流域)	276
崩壊地(六甲全山)	2,351

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	崩壊地(住吉川流域)		崩壊地(六甲全山)		崩壊地(住吉川流域)		崩壊地(六甲全山)		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	(%)	(%)
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	東～北東	9,071	215,936	55	19.9	340	14.5	9,016	15.1	215,596	12.3	0.606	0.157
2	北東～北	4,871	184,163	32	11.6	216	9.2	4,839	8.1	183,947	10.5	0.657	0.117
3	北～北西	1,284	174,795	4	1.4	220	9.4	1,280	2.1	174,575	10.0	0.312	0.126
4	北西～西	2,637	180,910	7	2.5	219	9.3	2,630	4.4	180,691	10.3	0.265	0.121
5	西～南西	7,070	205,337	35	12.7	257	10.9	7,035	11.8	205,080	11.7	0.495	0.125
6	南西～南	10,542	222,743	50	18.1	353	15.0	10,492	17.6	222,390	12.7	0.474	0.158
7	南から南東	12,655	248,244	57	20.7	377	16.0	12,598	21.1	247,867	14.2	0.450	0.152
8	南東～東	11,536	241,689	36	13.0	366	15.6	11,500	19.3	241,323	13.8	0.312	0.151
9	水平	329	75,663			3	0.1	329	0.6	75,660	4.3		0.004
10													
11													
12													
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	3,571	1,111

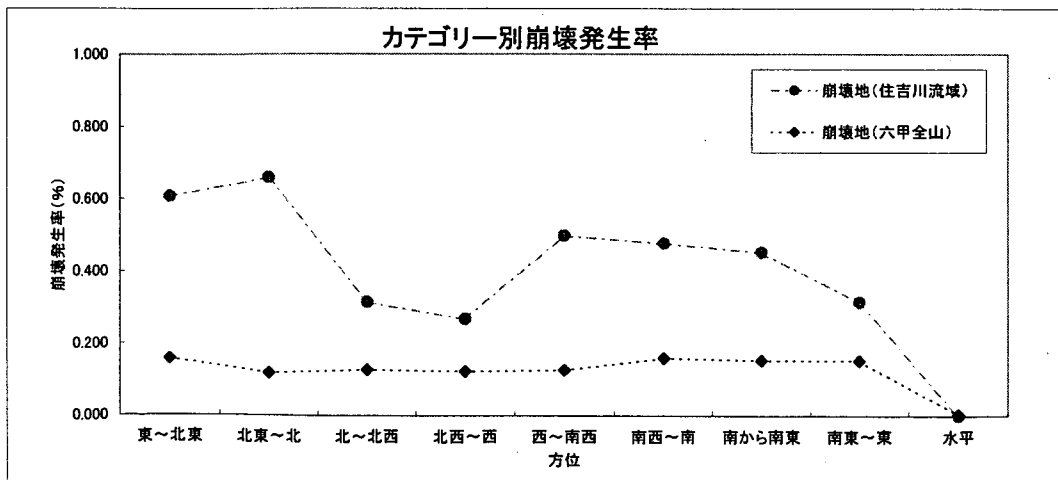
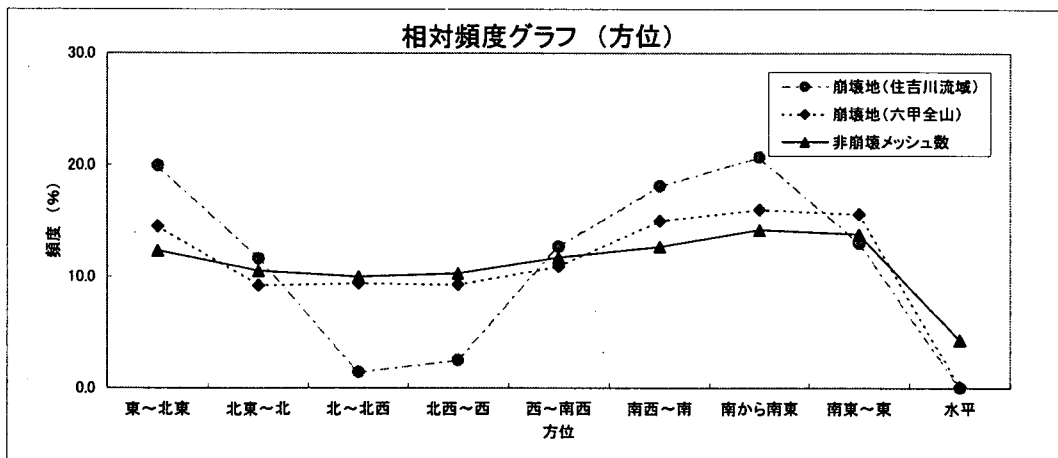


図 3.7 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(方位)

項目名：偏差

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	か2乗検定
全数	1,749,480	0.16	0.172	0	4.76	0.522
住吉川流域	276	0.22	0.229	0	1.56	
六甲全域	2,351	0.22	0.204	0	1.56	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数						非崩壊メッシュ数				崩壊発生率	
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域		
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	(%)	(%)	
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②		
1	0 ~ 0.1	23,736	844,180	103	37.3	809	34.4	23,633	39.6	843,371	48.3	0.434	0.096	
2	0.1 ~ 0.2	14,989	406,467	65	23.6	578	24.6	14,924	25.0	405,889	23.2	0.434	0.142	
3	0.2 ~ 0.3	8,518	220,465	42	15.2	364	15.5	8,476	14.2	220,101	12.6	0.493	0.165	
4	0.3 ~ 0.4	4,822	121,034	18	6.5	216	9.2	4,804	8.0	120,818	6.9	0.373	0.178	
5	0.4 ~ 0.5	2,911	67,700	16	5.8	161	6.8	2,895	4.8	67,539	3.9	0.550	0.238	
6	0.5 ~ 0.6	1,814	37,894	14	5.1	98	4.2	1,800	3.0	37,796	2.2	0.772	0.259	
7	0.6 ~ 0.7	1,145	21,910	8	2.9	46	2.0	1,137	1.9	21,864	1.3	0.699	0.210	
8	0.7 ~ 0.8	749	12,780	1	0.4	31	1.3	748	1.3	12,749	0.7	0.134	0.243	
9	0.8 ~ 0.9	475	7,380	4	1.4	19	0.8	471	0.8	7,361	0.4	0.842	0.257	
10	0.9 ~ 1	338	4,270			13	0.6	338	0.6	4,257	0.2		0.304	
11	1 ~ 10	498	5,400	5	1.8	16	0.7	493	0.8	5,384	0.3	1.004	0.296	
12														
13														
14														
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	5,735	2,388	

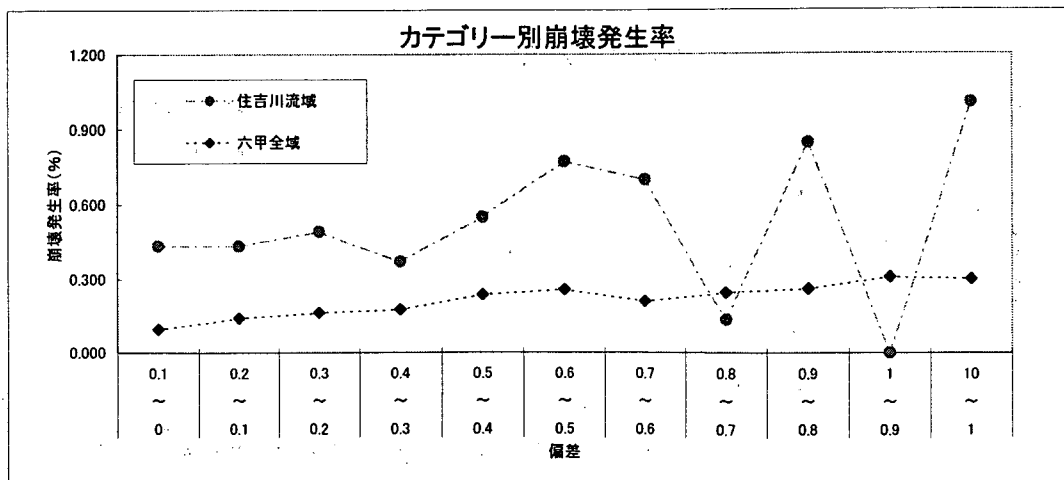
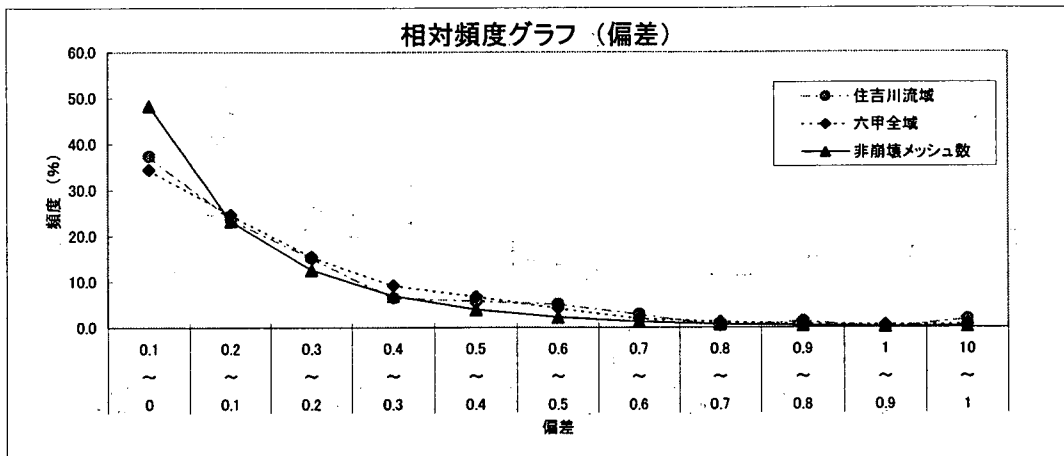


図 3.8 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(偏差)

項目名：ラプラシアン

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	0
全数	1,749,480	0	0.044	-2.93	1.88	
住吉川流域	276	-0.01	0.058	-0.14	0.24	0
六甲全域	2,351	0	0.059	-0.4	0.3	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率	
	住吉川 (%)	全域 (%)	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域
	①	②	(メッシュ) ③	(%) ③/Σ③	(メッシュ) ④	(%) ④/Σ④	(メッシュ) ⑤-①-③	(%) ⑤/Σ⑤	(メッシュ) ⑥-②-④	(%) ⑥/Σ⑥	(%) ③/①	(%) ④/②
1	-3 ~ -0.2	61, 1,415			8, 0.3		61, 0.1	1,407, 0.1				0.565
2	-0.2 ~ -0.15	123, 2,884			16, 0.7		123, 0.2	2,868, 0.2				0.555
3	-0.15 ~ -0.1	881, 17,798	10, 3.6		92, 3.9		871, 1.5	17,706, 1.0			1.135, 0.517	
4	-0.1 ~ -0.05	5,882, 129,054	41, 14.9		292, 12.4		5,841, 9.8	128,762, 7.4			0.697, 0.226	
5	-0.05 ~ 0	26,657, 754,463	111, 40.2		907, 38.6		26,546, 44.5	753,556, 43.1			0.416, 0.120	
6	0 ~ 0.05	18,789, 676,257	77, 27.9		678, 28.8		18,712, 31.3	675,579, 38.7			0.410, 0.100	
7	0.05 ~ 0.1	4,848, 126,426	22, 8.0		249, 10.6		4,826, 8.1	126,177, 7.2			0.454, 0.197	
8	0.1 ~ 0.15	1,890, 31,224	11, 4.0		83, 3.5		1,879, 3.1	31,141, 1.8			0.582, 0.266	
9	0.15 ~ 0.2	597, 7,291	2, 0.7		19, 0.8		595, 1.0	7,272, 0.4			0.335, 0.261	
10	0.2 ~ 3	267, 2,668	2, 0.7		7, 0.3		265, 0.4	2,661, 0.2			0.749, 0.262	
11												
12												
13												
14												
合計		59,995, 1,749,480	276, 100		2,351, 100		59,719, 100	1,747,129, 100			4,778, 3.069	

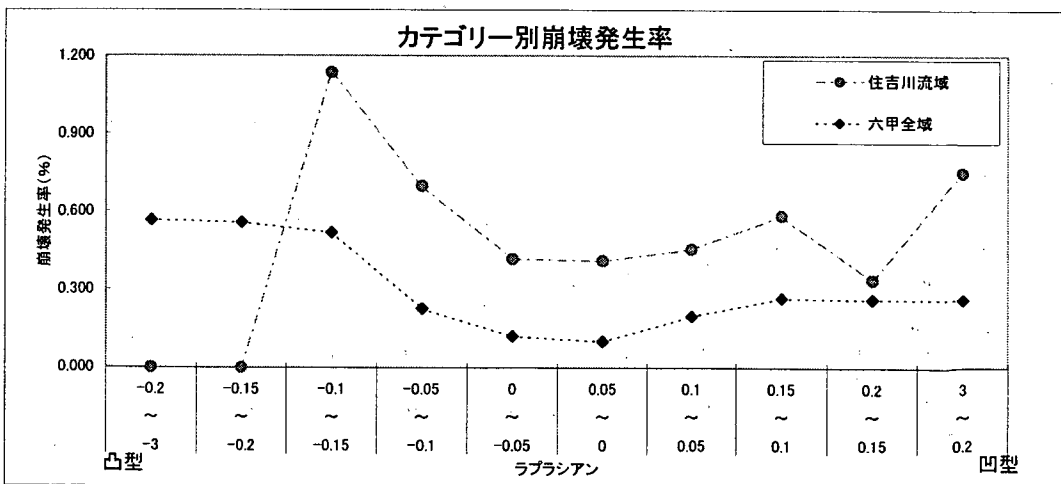
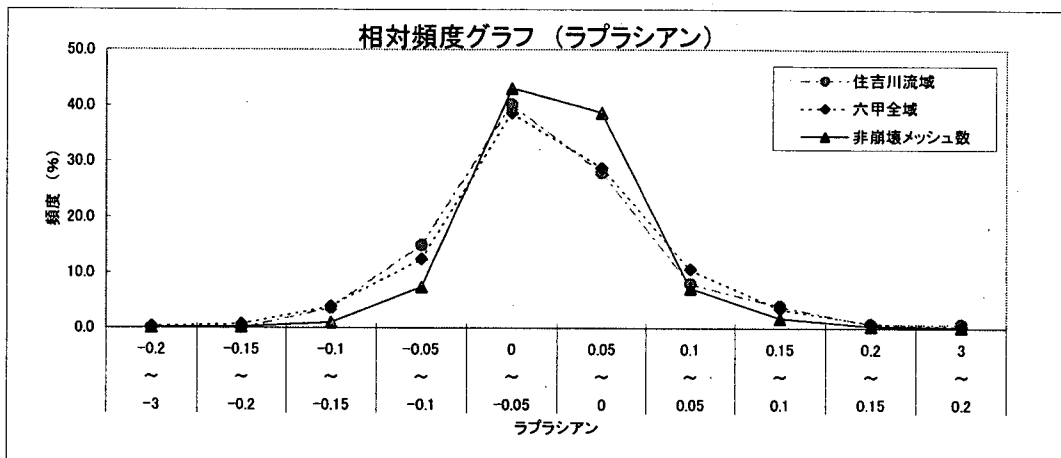


図 3.9 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(ラプラシアン)

項目名 : 地上開度(影響範囲20m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	90.1	5.298	18.6	171.15	
住吉川流域	276	90.94	8.582	61.7	111.78	0.500
六甲全域	2,351	90.76	8.677	52.07	133.87	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	(%)	(%)
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	0 ~ 60	111	1,144			2	0.1	111	0.2	1,142	0.1	0.175	
2	60 ~ 65	266	2,452	1	0.4	6	0.3	265	0.4	2,446	0.1	0.245	
3	65 ~ 70	730	8,334	5	1.8	27	1.1	725	1.2	8,307	0.5	0.324	
4	70 ~ 75	1,615	25,156	6	2.2	64	2.7	1,609	2.7	25,092	1.4	0.372	
5	75 ~ 80	3,002	68,347	18	6.5	149	6.3	2,984	5.0	68,198	3.9	0.218	
6	80 ~ 85	6,063	173,122	27	9.8	290	12.3	6,036	10.1	172,832	9.9	0.168	
7	85 ~ 90	14,638	540,533	62	22.5	512	21.8	14,576	24.4	540,021	30.9	0.095	
8	90 ~ 95	20,285	637,573	69	25.0	612	26.0	20,216	33.9	636,961	36.5	0.096	
9	95 ~ 100	9,193	211,130	52	18.8	396	16.8	9,141	15.3	210,734	12.1	0.188	
10	100 ~ 105	3,054	61,851	25	9.1	187	8.0	3,029	5.1	61,664	3.5	0.302	
11	105 ~ 110	800	14,979	9	3.3	71	3.0	791	1.3	14,908	0.9	0.474	
12	110 ~ 180	238	4,859	2	0.7	35	1.5	236	0.4	4,824	0.3	0.840	
13													
14													
合計		59,985	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	6,592	3,259

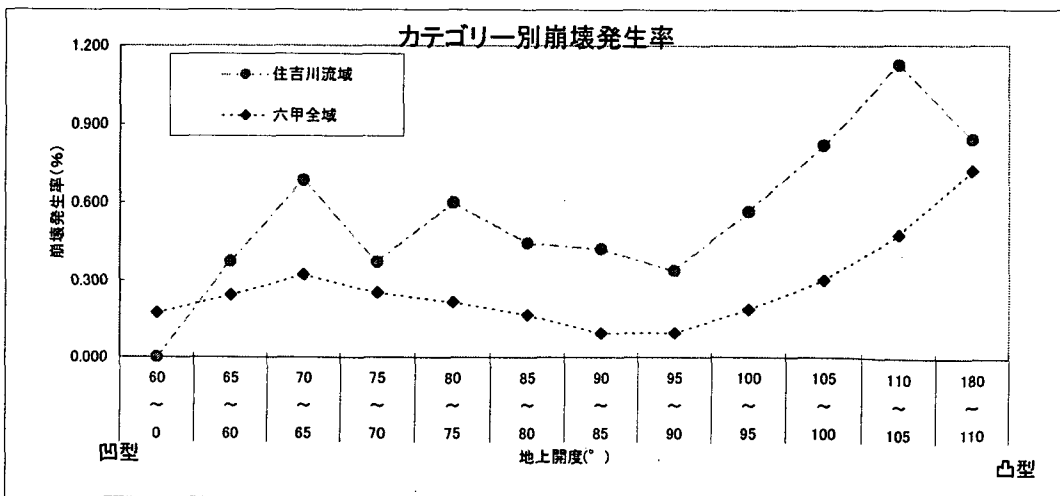
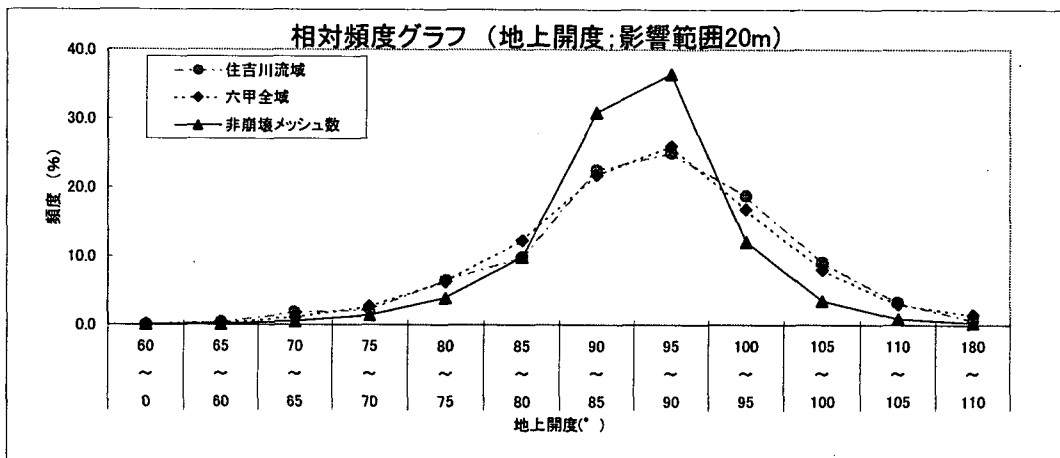


図 3.10 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(地上開度 20m)

項目名：地上開度(影響範囲50m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	83.91	8.31	18.52	139.79	0.400
住吉川流域	276	81.83	9.684	51.43	102.7	
六甲全域	2,351	82.38	9.561	40.88	114.06	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	0 ~ 60	832	6,419	3	1.1	18	0.8	829	1.4	6,401	0.4	0.361	0.280
2	60 ~ 65	2,325	20,929	9	3.3	55	2.3	2,316	3.9	20,874	1.2	0.387	0.263
3	65 ~ 70	4,616	62,538	22	8.0	153	6.5	4,594	7.7	62,385	3.6	0.477	0.245
4	70 ~ 75	6,588	135,903	32	11.6	307	13.1	6,556	11.0	135,596	7.8	0.486	0.226
5	75 ~ 80	9,172	241,835	46	16.7	418	17.8	9,126	15.3	241,417	13.8	0.502	0.173
6	80 ~ 85	11,693	376,813	55	19.9	463	19.7	11,638	19.5	376,350	21.5	0.470	0.123
7	85 ~ 90	12,233	592,518	49	17.8	424	18.0	12,184	20.4	592,094	33.9	0.401	0.072
8	90 ~ 95	8,644	239,337	39	14.1	295	12.5	8,605	14.4	239,042	13.7	0.451	0.123
9	95 ~ 100	3,100	59,586	17	6.2	148	6.3	3,083	5.2	59,438	3.4	0.548	0.248
10	100 ~ 105	686	11,765	4	1.4	53	2.3	682	1.1	11,712	0.7	0.583	0.450
11	105 ~ 110	96	1,610			15	0.6	96	0.2	1,595	0.1		0.932
12	110 ~ 180	10	227			2	0.1	10	0.0	225	0.0		0.881
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	4.666	4.016

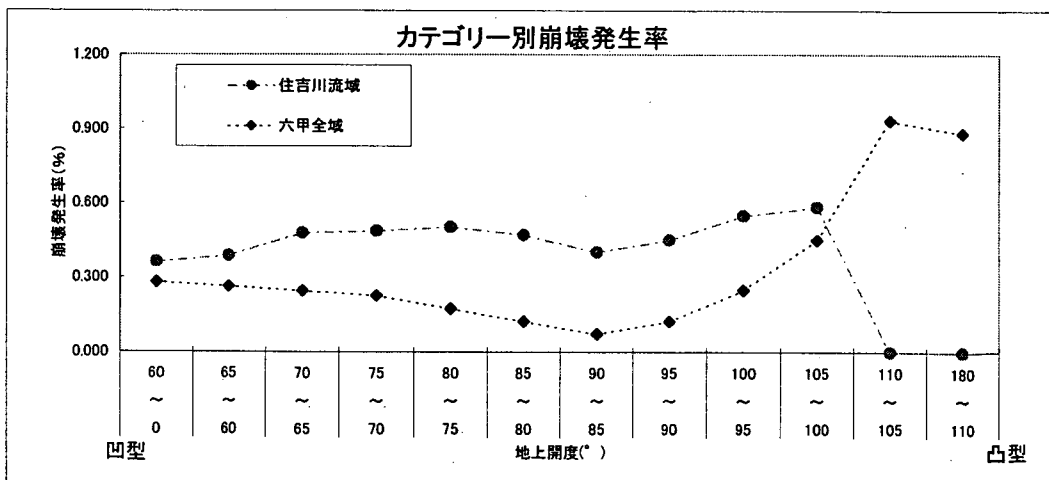
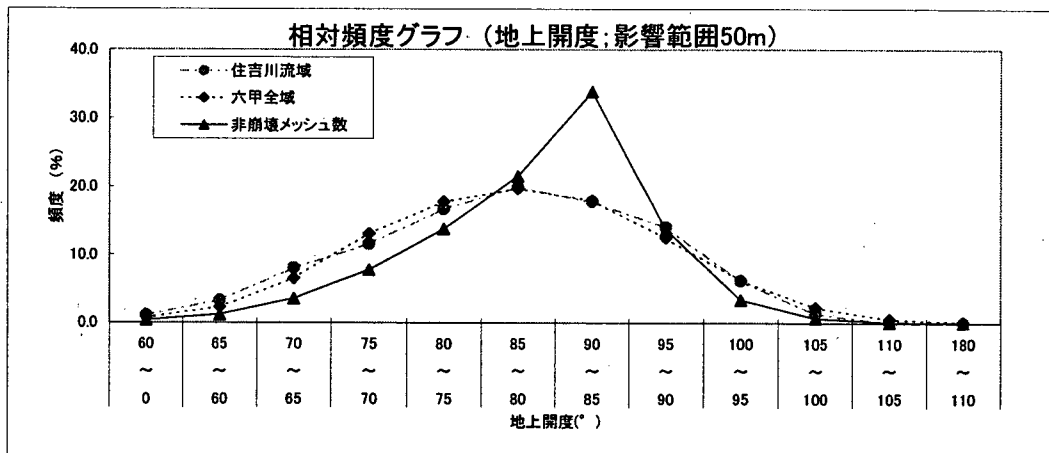


図 3.11 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(地上開度:50m)

項目名：地下開度(影響範囲20m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ2乗検定
全数	1,749,480	90.01	6.334	8.85	161.4	0.521
住吉川流域	276	89.06	8.582	68.22	118.3	
六甲全域	2,351	89.24	8.674	46.13	127.93	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	0 ~ 60	33	619			4	0.2	33	0.1	615	0.0		0.646
2	60 ~ 65	40	898			9	0.4	40	0.1	889	0.1		1.002
3	65 ~ 70	165	3,340	2	0.7	22	0.9	163	0.3	3,318	0.2	1.212	0.659
4	70 ~ 75	800	14,979	9	3.3	71	3.0	791	1.3	14,908	0.9	1.125	0.474
5	75 ~ 80	3,054	61,853	25	9.1	187	8.0	3,029	5.1	61,666	3.5	0.819	0.302
6	80 ~ 85	9,193	211,117	52	18.8	395	16.8	9,141	15.3	210,722	12.1	0.566	0.187
7	85 ~ 90	20,245	614,712	69	25.0	612	26.0	20,176	33.8	614,100	35.1	0.341	0.100
8	90 ~ 95	14,678	563,403	62	22.5	513	21.8	14,616	24.5	562,890	32.2	0.422	0.091
9	95 ~ 100	6,063	173,122	27	9.8	290	12.3	6,036	10.1	172,832	9.9	0.445	0.168
10	100 ~ 105	3,002	68,347	18	6.5	149	6.3	2,984	5.0	68,198	3.9	0.600	0.218
11	105 ~ 110	1,614	25,158	6	2.2	64	2.7	1,608	2.7	25,094	1.4	0.372	0.254
12	110 ~ 180	1,108	11,932	6	2.2	35	1.5	1,102	1.8	11,897	0.7	0.542	0.293
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	6.444	4.394

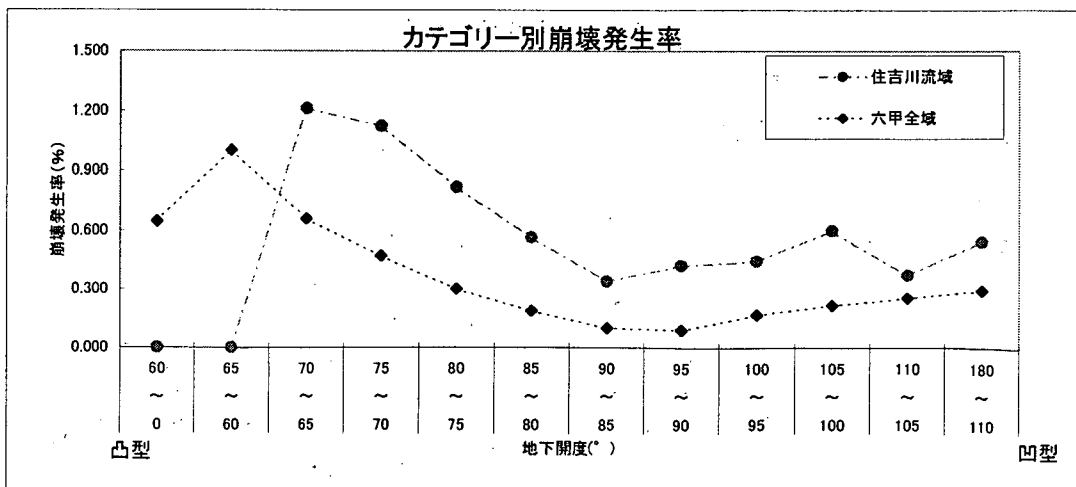
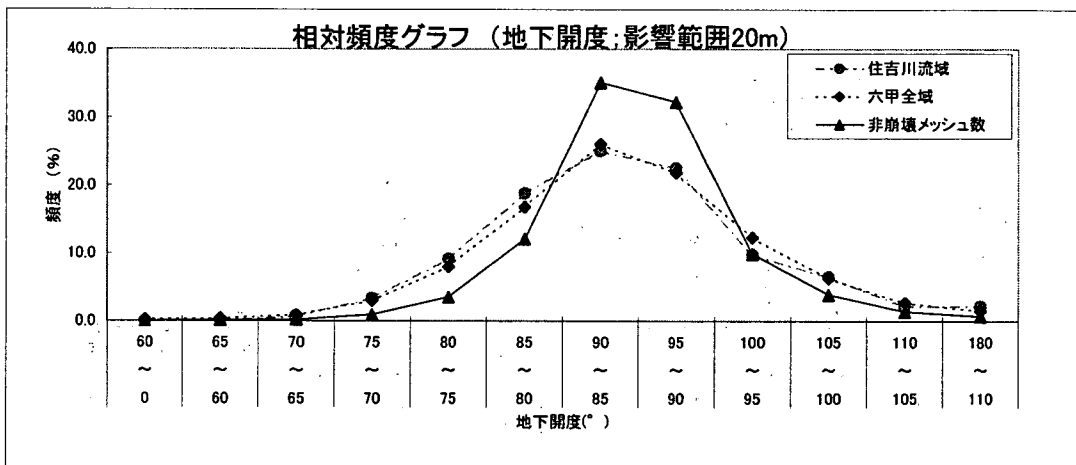


図 3.12 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(地下開度 20m)

項目名：地下開度(影響範囲50m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	83.75	8.26	8.85	125.3	0.404
住吉川流域	276	78.11	9.876	53.06	108.59	
六甲全域	2,351	79.23	9.384	43.49	112.65	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	0 ~ 60	202	3,548	3	1.1	29	1.2	199	0.3	3,519	0.2	1,485	0.817
2	60 ~ 65	1,109	15,532	13	4.7	97	4.1	1,096	1.8	15,435	0.9	1,172	0.625
3	65 ~ 70	4,382	63,489	45	16.3	263	11.2	4,337	7.3	63,226	3.6	1,027	0.414
4	70 ~ 75	8,709	156,840	61	22.1	411	17.5	8,648	14.5	156,429	9.0	0,700	0.262
5	75 ~ 80	12,255	268,295	42	15.2	479	20.4	12,213	20.5	267,816	15.3	0,343	0.179
6	80 ~ 85	13,187	372,743	46	16.7	446	19.0	13,141	22.0	372,297	21.3	0,349	0.120
7	85 ~ 90	10,439	565,591	34	12.3	333	14.2	10,405	17.4	565,258	32.4	0,326	0.059
8	90 ~ 95	5,242	222,956	15	5.4	172	7.3	5,227	8.8	222,784	12.8	0,286	0.077
9	95 ~ 100	2,464	56,909	8	2.9	76	3.2	2,456	4.1	56,833	3.3	0,325	0.134
10	100 ~ 105	1,270	17,940	7	2.5	34	1.4	1,263	2.1	17,906	1.0	0,551	0.190
11	105 ~ 110	523	4,657	2	0.7	10	0.4	521	0.9	4,647	0.3	0,382	0.215
12	110 ~ 180	213	980			1	0.0	213	0.4	979	0.1		0.102
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	6,946	3,194

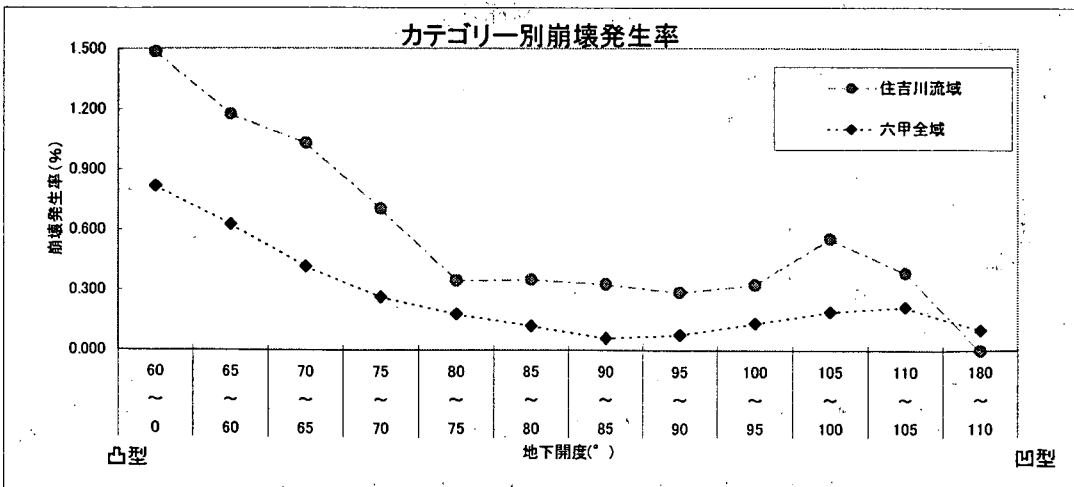
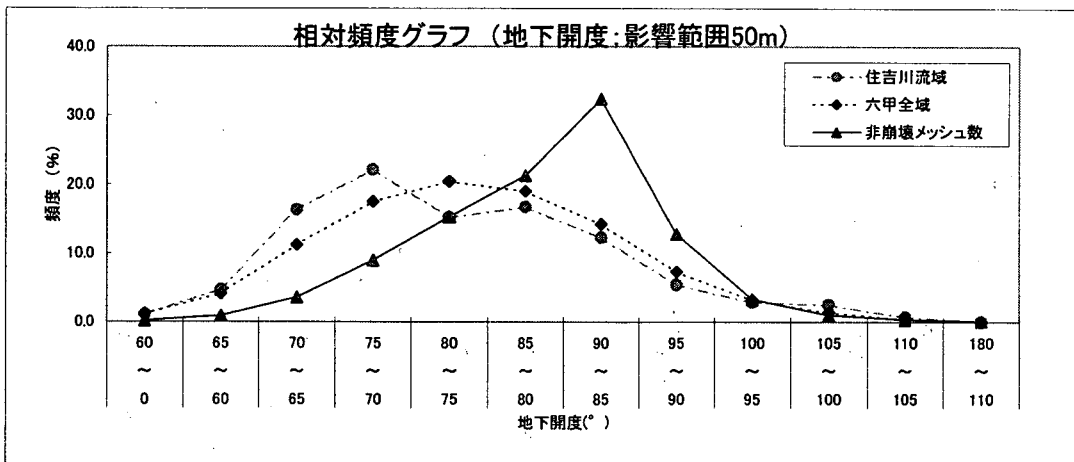


図 3.13 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(地下開度 50m)

項目名：尾根谷度(影響範囲20m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	0.02	6.243	-71.4	81.15	0.521
住吉川流域	276	0.94	8.582	-28.3	21.78	
六甲全域	2,351	0.76	8.676	-37.93	43.87	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	-100 ~ -30	111	1,144			2	0.1	111	0.2	1,142	0.1		0.175
2	-30 ~ -25	266	2,452	1	0.4	6	0.3	265	0.4	2,446	0.1	0.376	0.245
3	-25 ~ -20	730	8,334	5	1.8	27	1.1	725	1.2	8,307	0.5	0.685	0.324
4	-20 ~ -15	1,615	25,156	6	2.2	64	2.7	1,609	2.7	25,092	1.4	0.372	0.254
5	-15 ~ -10	3,002	68,347	18	6.5	149	6.3	2,984	5.0	68,198	3.9	0.600	0.218
6	-10 ~ -5	6,063	173,122	27	9.8	290	12.3	6,036	10.1	172,832	9.9	0.445	0.168
7	-5 ~ 0	14,638	540,533	62	22.5	512	21.8	14,576	24.4	540,021	30.9	0.424	0.095
8	0 ~ 5	20,285	637,573	69	25.0	612	26.0	20,216	33.9	636,961	36.5	0.340	0.096
9	5 ~ 10	9,193	211,130	52	18.8	396	16.8	9,141	15.3	210,734	12.1	0.566	0.188
10	10 ~ 15	3,054	61,853	25	9.1	187	8.0	3,029	5.1	61,666	3.5	0.819	0.302
11	15 ~ 20	800	14,979	9	3.3	71	3.0	791	1.3	14,908	0.9	1.125	0.474
12	20 ~ 25	165	3,340	2	0.7	22	0.9	163	0.3	3,318	0.2	1.212	0.659
13	25 ~ 30	40	898			9	0.4	40	0.1	889	0.1		1.002
14	30 ~ 100	33	619			4	0.2	33	0.1	615	0.0		0.646
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	6,964	4,846

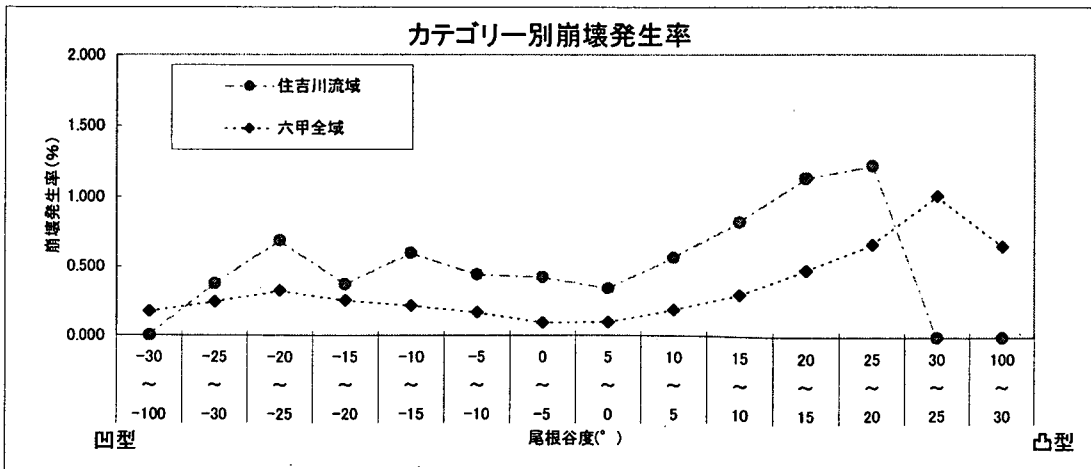
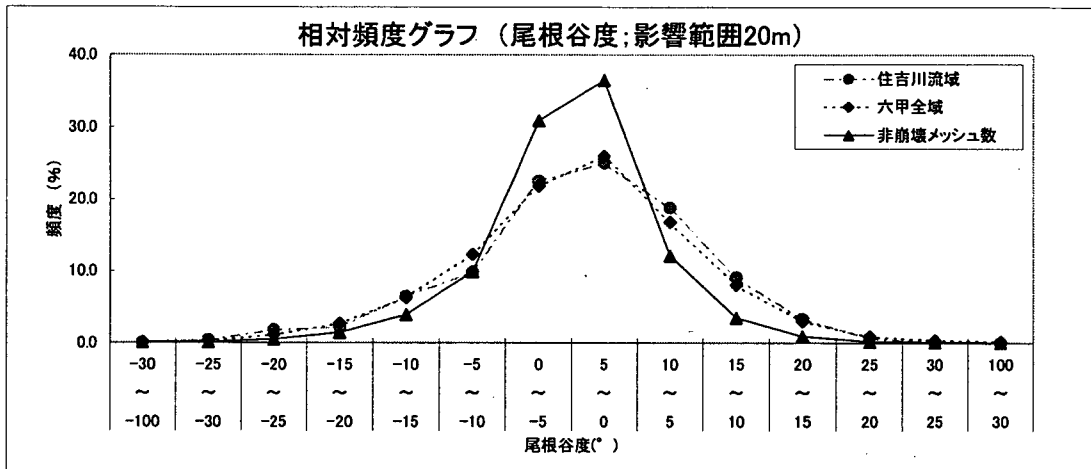


図 3.14 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(尾根谷度 20m)

項目名：尾根谷度(影響範囲50m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	0.08	6.742	-52	65.47	0.522
住吉川流域	276	1.86	9.3	-26.68	20.85	
六甲全域	2,351	1.57	8.947	-35.88	35.18	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	(%)	(%)
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	-100 ~ -30	59	361			1	0.0	59	0.1	360	0.0		0.277
2	-30 ~ -25	242	1,474	2	0.7	3	0.1	240	0.4	1,471	0.1	0.826	0.204
3	-25 ~ -20	908	7,955	1	0.4	13	0.6	907	1.5	7,942	0.5	0.110	0.163
4	-20 ~ -15	2,247	29,400	13	4.7	70	3.0	2,234	3.7	29,330	1.7	0.579	0.238
5	-15 ~ -10	4,112	82,536	14	5.1	143	6.1	4,098	6.9	82,393	4.7	0.340	0.173
6	-10 ~ -5	7,693	208,296	32	11.6	313	13.3	7,661	12.8	207,983	11.9	0.416	0.150
7	-5 ~ 0	12,681	532,404	50	18.1	463	19.7	12,631	21.2	531,941	30.4	0.394	0.087
8	0 ~ 5	14,115	527,447	51	18.5	508	21.6	14,064	23.6	526,939	30.2	0.361	0.096
9	5 ~ 10	10,718	235,820	53	19.2	408	17.4	10,665	17.9	235,412	13.5	0.494	0.173
10	10 ~ 15	5,393	94,989	44	15.9	282	12.0	5,349	9.0	94,707	5.4	0.816	0.297
11	15 ~ 20	1,564	24,500	12	4.3	110	4.7	1,552	2.6	24,390	1.4	0.767	0.449
12	20 ~ 25	235	3,711	4	1.4	32	1.4	231	0.4	3,679	0.2	1.702	0.862
13	25 ~ 30	25	471			3	0.1	25	0.0	468	0.0		0.637
14	30 ~ 100	3	116			2	0.1	3	0.0	114	0.0		1.724
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	6.805	5.530

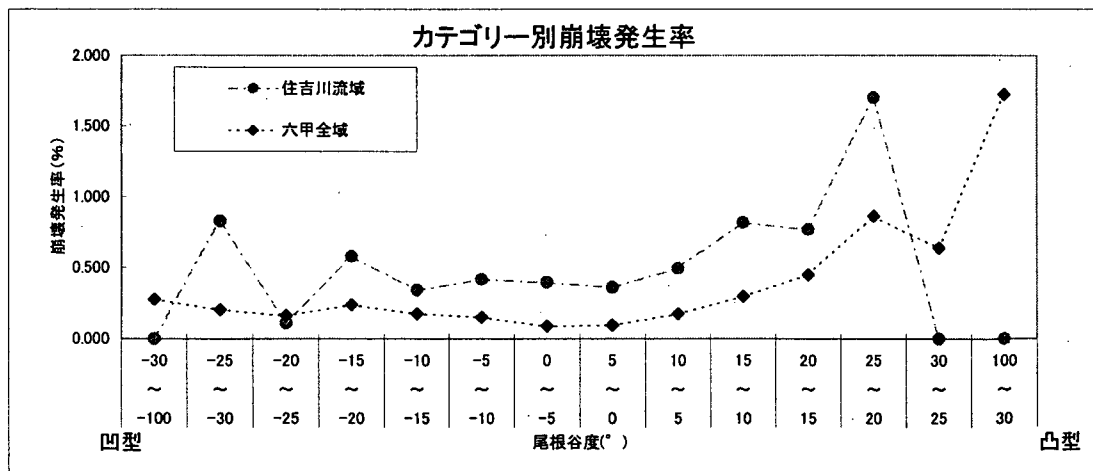
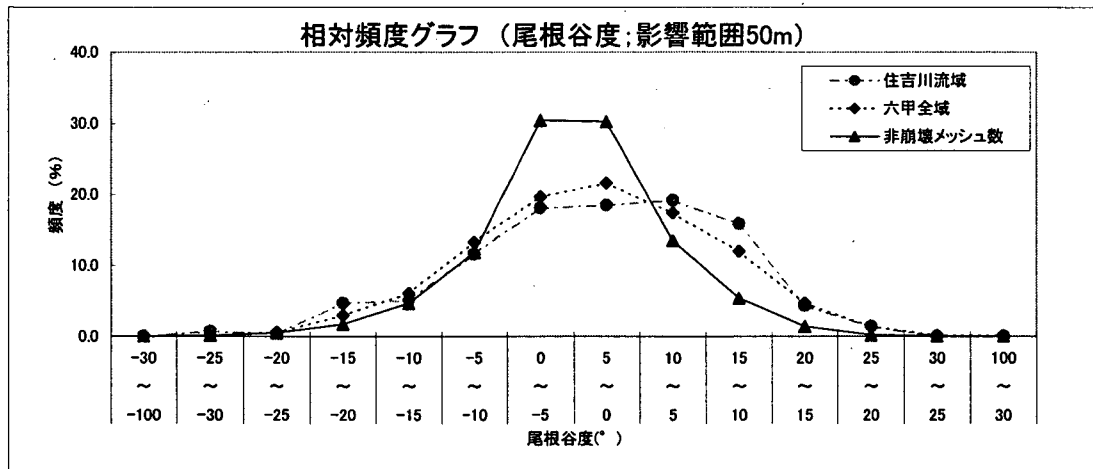


図 3.15 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(尾根谷度 50m)

項目名：平均曲率(影響範囲20m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ2乗検定
全数	1,749,480	0	0.013	-1	0.12	0.358
住吉川流域	276	0	0.013	-0.03	0.05	
六甲全域	2,351	0	0.013	-0.05	0.05	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	-3 ~ -0.03	327	6,382	1	0.4	35	1.5	326	0.5	6,347	0.4	0.306	0.548
2	-0.03 ~ -0.025	669	11,561	5	1.8	53	2.3	664	1.1	11,508	0.7	0.747	0.458
3	-0.025 ~ -0.02	1,384	28,273	12	4.3	95	4.0	1,372	2.3	28,178	1.6	0.867	0.336
4	-0.02 ~ -0.015	2,908	61,161	22	8.0	157	6.7	2,886	4.8	61,004	3.5	0.757	0.257
5	-0.015 ~ -0.01	5,297	119,295	32	11.6	222	9.4	5,265	8.8	119,073	6.8	0.604	0.186
6	-0.01 ~ -0.005	9,029	222,206	45	16.3	320	13.6	8,984	15.0	221,886	12.7	0.498	0.144
7	-0.005 ~ 0	12,401	429,348	44	15.9	445	18.9	12,357	20.7	428,903	24.5	0.355	0.104
8	0 ~ 0.005	10,591	438,778	40	14.5	369	15.7	10,551	17.7	438,409	25.1	0.378	0.084
9	0.005 ~ 0.01	6,733	202,986	28	10.1	282	12.0	6,705	11.2	202,704	11.6	0.416	0.139
10	0.01 ~ 0.015	3,965	110,452	20	7.2	173	7.4	3,945	6.6	110,279	6.3	0.504	0.157
11	0.015 ~ 0.02	2,566	59,190	14	5.1	89	3.8	2,552	4.3	59,101	3.4	0.546	0.150
12	0.02 ~ 0.025	1,673	31,437	7	2.5	59	2.5	1,666	2.8	31,378	1.8	0.418	0.188
13	0.025 ~ 0.03	1,105	16,065	3	1.1	33	1.4	1,102	1.8	16,032	0.9	0.271	0.205
14	0.03 ~ 3	1,347	12,346	3	1.1	19	0.8	1,344	2.3	12,327	0.7	0.223	0.154
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	6.890	3.110

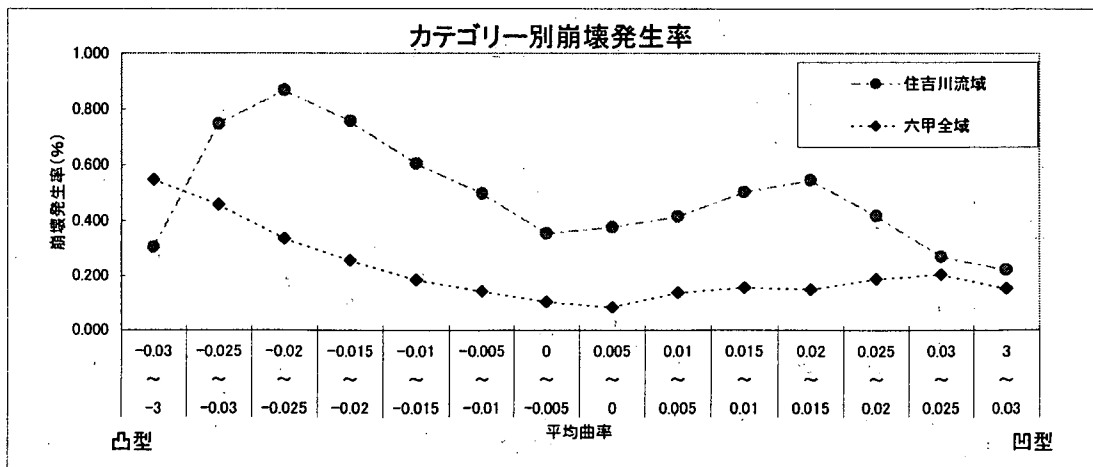
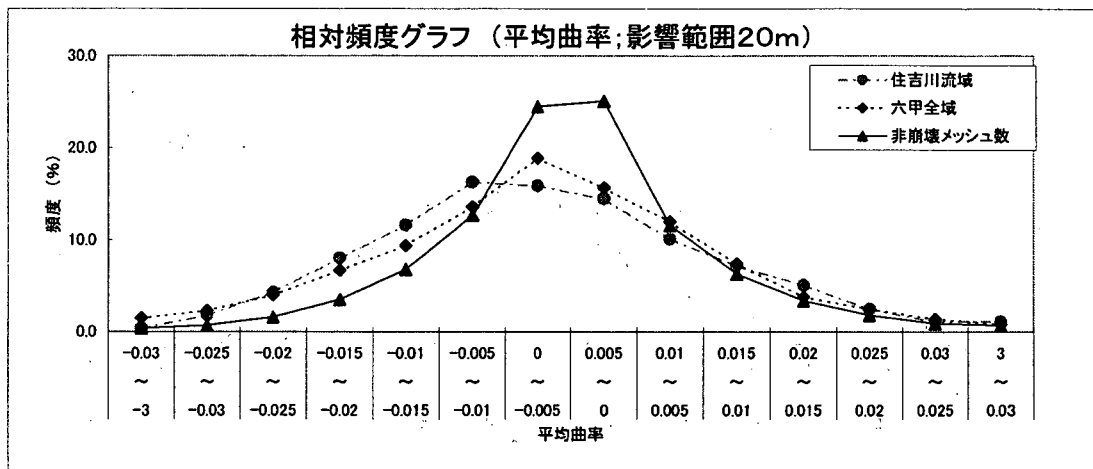


図 3.16 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(平均曲率 20m)

項目名：平均曲率(影響範囲50m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	0	0.018	-1	0.02	0.45
住吉川流域	276	0	0.006	-0.02	0.02	
六甲全域	2,351	0	0.006	-0.02	0.02	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率				
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域			
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)				
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②			
1	-3	~	-0.03												
2	-0.03	~	-0.025												
3	-0.025	~	-0.02												
4	-0.02	~	-0.015	145	2,105	2	0.7	15	0.6	143	0.2	2,090	0.1	1,379	0.713
5	-0.015	~	-0.01	2,289	35,724	17	6.2	149	6.3	2,272	3.8	35,575	2.0	0,743	0.417
6	-0.01	~	-0.005	9,807	189,006	64	23.2	433	18.4	9,743	16.3	188,573	10.8	0,653	0.229
7	-0.005	~	0	18,748	618,526	79	28.6	763	32.5	18,669	31.3	617,763	35.4	0,421	0.123
8	0	~	0.005	16,498	681,317	76	27.5	662	28.2	16,422	27.5	680,655	39.0	0,461	0.097
9	0.005	~	0.01	8,398	181,013	27	9.8	265	11.3	8,371	14.0	180,748	10.3	0,322	0.146
10	0.01	~	0.015	3,489	37,980	9	3.3	60	2.6	3,480	5.8	37,920	2.2	0,258	0.158
11	0.015	~	0.02	602	3,167	2	0.7	4	0.2	600	1.0	3,163	0.2	0,332	0.126
12	0.02	~	0.025	17	71					17	0.0	71	0.0		
13	0.025	~	0.03												
14	0.03	~	3												
合計				59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	4,569	2,009

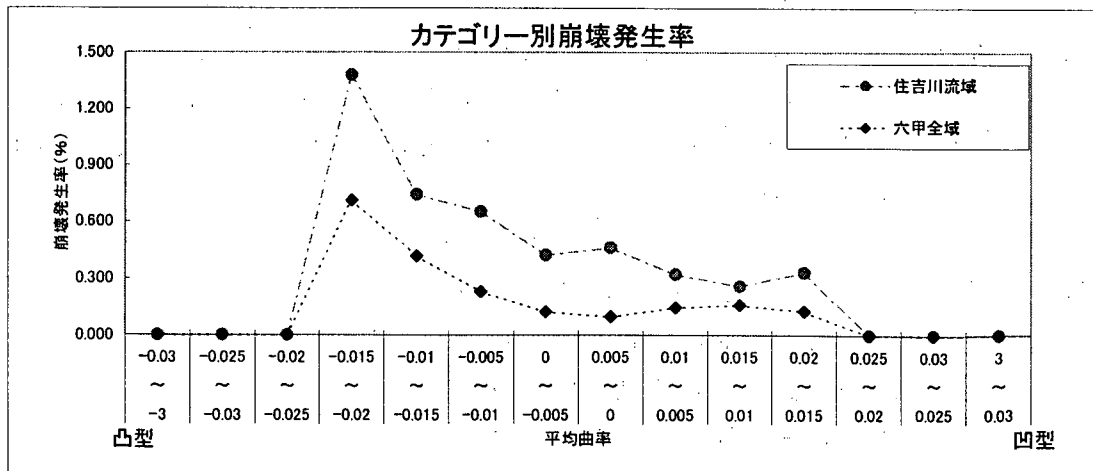
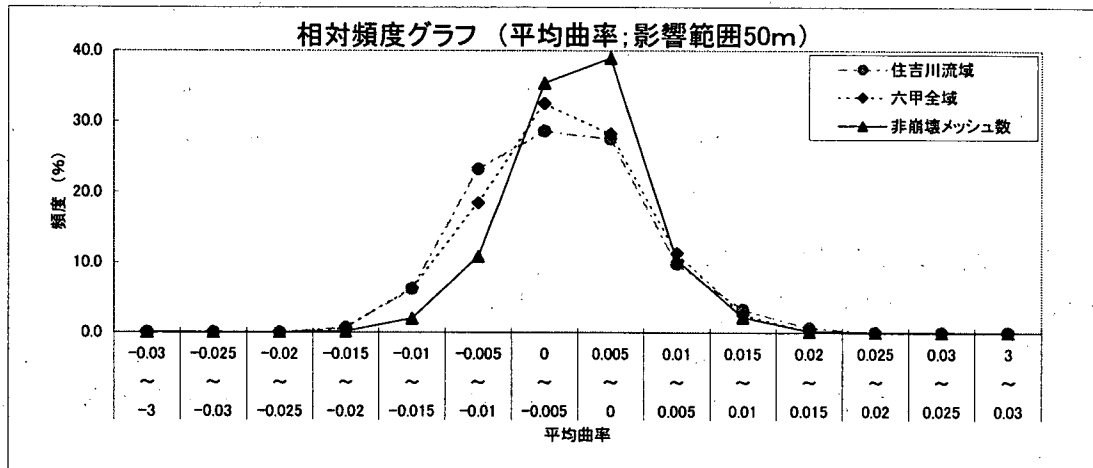


図 3.17 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(平均曲率 50m)

3.3.3 地形要因ごとの相関

住吉川流域を対象に行った地形要因に関する相関係数の検討結果を表 3.4 に示した。標高及び勾配との相関関係が高い地形要因はなかった。地形の凹凸を表す地形量(偏差、ラプラシアン、地上開度、地下開度、平均曲率、尾根谷度)の中では、偏差を除く地形量については、互いに相関関係がみられた(0.8以上の値を示した)。

表 3.4 各要因の相関係数(住吉川流域)

	標高	勾配	偏差	ラプラシ	地上20	地上50	地下20	地下50	曲率20	曲率50	尾谷20	尾谷50
標高	1.000	-0.094	-0.043	-0.069	0.078	0.153	-0.078	-0.112	-0.104	-0.164	0.078	0.142
勾配	-0.094	1.000	-0.188	-0.050	0.043	-0.206	-0.043	-0.168	-0.001	0.075	0.043	-0.026
偏差	-0.043	-0.188	1.000	0.240	-0.234	-0.238	0.234	0.176	0.236	0.190	-0.234	-0.222
ラプラシ	-0.069	-0.050	0.240	1.000	-0.982	-0.732	0.982	0.812	0.854	0.585	-0.982	-0.823
地上20	0.078	0.043	-0.234	-0.982	1.000	0.784	-1.000	-0.855	-0.909	-0.645	1.000	0.874
地上50	0.153	-0.206	-0.238	-0.732	0.784	1.000	-0.784	-0.755	-0.885	-0.898	0.784	0.940
地下20	-0.078	-0.043	0.234	0.982	-1.000	-0.784	1.000	0.855	0.909	0.645	-1.000	-0.874
地下50	-0.112	-0.168	0.176	0.812	-0.855	-0.755	0.855	1.000	0.902	0.830	-0.855	-0.933
曲率20	-0.104	-0.001	0.236	0.854	-0.909	-0.885	0.909	0.902	1.000	0.822	-0.909	-0.954
曲率50	-0.164	0.075	0.190	0.585	-0.645	-0.898	0.645	0.830	0.822	1.000	-0.645	-0.923
尾谷20	0.078	0.043	-0.234	-0.982	1.000	0.784	-1.000	-0.855	-0.909	-0.645	1.000	0.874
尾谷50	0.142	-0.026	-0.222	-0.823	0.874	0.940	-0.874	-0.933	-0.954	-0.923	0.874	1.000

3.3.4 判別分析による地形要因の抽出

3.3.2 及び 3.3.3 の結果を踏まえると以下のように結論付けられる。

- ① 3.3.2 で示したように、標高、勾配、凹凸を表す地形量(偏差、ラプラシアン、地上開度、地下開度、平均曲率)が地震時崩壊発生率と相関が見られたことから、地震時の斜面崩壊危険度を判定する入力因子の候補として挙げられる。
- ② 3.3.3 で示したように、凹凸を表す地形量は偏差を除いて互いに相関が高いので、ラプラシアン、地上開度、地下開度、平均曲率、尾根谷度の中でどれか1つを選択すべきである。

そこで、住吉川流域(3.2.1 参照)を対象に、各要因の地震時崩壊発生へ影響を評価するために、以下に示す基準変数、説明変数による判別分析を行った。結果を表 3.5 に示す。なお、判別分析の手法に関する詳細は、参考資料を参考にされたい。

【基準変数】 地震時崩壊の発生・非発生(質的データ)

【説明変数】 標高・偏差・斜面勾配・ラプラシアン(量的データ)

標高・偏差・斜面勾配・地上開度(量的データ)

標高・偏差・斜面勾配・地下開度(量的データ)

標高・偏差・斜面勾配・平均曲率(量的データ)

表 3.5 住吉川流域における判別分析の結果

	標準化された正準判別関数係数				非崩壊発生メッシュの分類正誤率	崩壊発生メッシュの分類正誤率
	標高	勾配	偏差	対象地形量		
ラブラシアン	-0.435	0.841	0.340	-0.211	58.104	76.449
地上開度(影響範囲20m)	-0.436	0.835	0.345	0.246	58.385	75.725
地上開度(影響範囲50m)	-0.450	0.901	0.377	0.340	58.864	75.000
地下開度(影響範囲20m)	-0.436	0.835	0.345	-0.246	58.385	75.725
地下開度(影響範囲50m)	-0.441	0.693	0.331	-0.475	61.270	76.087
平均曲率(影響範囲20m)	-0.439	0.828	0.361	-0.332	58.892	75.725
平均曲率(影響範囲50m)	-0.451	0.804	0.361	-0.500	61.078	76.087
尾根谷度(影響範囲20m)	-0.436	0.835	0.345	0.246	58.385	75.725
尾根谷度(影響範囲50m)	-0.448	0.811	0.367	0.422	60.113	76.812

いずれの説明変数の組合せにおいても明瞭な差が見られず、非崩壊メッシュの分類正誤率(定義は参考資料参照)は58~62%、崩壊メッシュの分類正誤率は75~77%であった(表3.5)。

また、3.3.2の検討結果は、地上開度、地下開度、尾根谷度は、影響範囲が20mの時よりも50mの方が、崩壊と非崩壊メッシュをよく分離できることを示していた。それに対し、平均曲率については、影響範囲が50mの時よりも20mの方が、崩壊と非崩壊メッシュをよく分離できた。このことは、平均曲率と地上開度、地下開度、尾根谷度で、表現する地形の特性が異なる可能性があることを示している。一方、西田ら(1997)は平均曲率により、六甲山地の崩壊発生、非発生を明瞭に分類できるとした。そこで、ここでは、平均曲率(影響半径20m)および尾根谷度(影響半径50m)を用いて六甲全山に対して、判別分析を行った。なお、尾根谷度(影響半径50m)は、影響半径が50mの方が20mより有効であった地上開度、地下開度、尾根谷度の指標のうち、①住吉川での崩壊メッシュの分類正誤率がわずかではあるが一番高かったこと、②尾根谷度は地上開度、地下開度の両方のファクターを有していること(資料2参照)から、尾根谷度を抽出した。

判別分析に用いた説明変数はCase1~3までの3ケース実施した。

Case 1 標高、勾配、偏差、凹凸を表す指標(平均曲率、尾根谷度)

Case 2 勾配、偏差、凹凸を表す指標(平均曲率、尾根谷度)

Case 3 勾配、凹凸を表す指標(平均曲率、尾根谷度)

結果を、表3.6に示す。参考のために、平均曲率(影響半径50m)を用いた結果を併記した。

表 3.6 六甲全山の判別分析の分類正誤率結果

	Case1	Case2	Case3
尾根谷度(影響範囲50m)	81.7%	81.6%	78.9%
平均曲率(影響範囲20m)	81.4%	81.4%	79.0%
平均曲率(影響範囲50m)	80.6%	80.7%	77.8%

Case 1とCase 2から、標高を説明変数としても正誤率はほとんど変わらないことがわかり、崩壊の発生・非発生を区分するに標高は大きな役割を果たさないと見える(表3.6)。さらに、Case 2とCase 3の結果から、両者の正誤率の違いが小さく、崩壊の発生・非発生を区分するに偏差の寄与は小さいと考えられる。

また、Case 3の中では、わずかではあるが平均曲率(影響範囲20m)が最も正誤率が高かった。

そこで、地震時崩壊に与える地形要因として、

- 勾配+平均曲率(影響半径 20m)

とした。

3.4 地震動に関する検討

- ① 最大速度
- ② 最大加速度
- ③ 破壊伝播効果を考慮した最大速度
- ④ 破壊伝播効果を考慮した最大加速度
- ⑤ 破壊伝播効果を考慮し、3次元距離を用いた最大加速度

の5項目について検討した。なお、破壊伝播効果の詳細は資料2に示した。図3.18～3.22に階級別崩壊発生率を示す。図3.18～3.22から、地震時崩壊の発生率は、地震動の大きさに正の相関があると考えられるが、最大速度および最大加速度共に崩壊発生率との単相関の関係からは、明瞭な正の相関関係が見られなかった。

一方、前節の結果、地震時の斜面崩壊発生には斜面勾配が大きく寄与することが示された。そこで、斜面勾配の条件を揃えて、地震動を表す5つの指標を比較することを試みた。具体的には、斜面勾配条件が $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 、 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 、 $40^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の3つの条件をもつメッシュをそれぞれ抽出し、それぞれ条件を持つメッシュのみを対象に階級別ヒストグラムおよび崩壊発生率の算出を行った。その結果を図3.23～3.27に示した。破壊伝播効果を考慮した場合としない場合について、崩壊発生率との関係を最大速度と最大加速度で確認した。破壊伝播効果を考慮しない場合では、最大速度または最大加速度と崩壊発生率の関係でグラフに折れ曲がりが見られるなど加速度の増大に伴い崩壊発生率が単調に増加する傾向が見られなかったが、破壊伝播効果を考慮することで改善され速度、加速度の増大に伴い崩壊発生率が単調に増加する傾向が得られた。次に最大速度と最大加速度を比較した場合、最大加速度の方が崩壊発生率との相関関係が高く、よく適合している結果が得られた。

また最大加速度については、3次元的な距離を考慮して断層面からの距離を算定し最大加速度を求めた。断層面からの距離に比べZ軸方向(標高)の距離が相対的に小さいため、3次元距離考慮した場合としない場合でさほど最大加速度に違いがない結果となった。そこで、より物理的な意味が明瞭な3次元的な距離を考慮して断層面からの距離を算定した加速度を斜面崩壊危険度判定手法の説明変数として用いることとする。すなわち、地震時崩壊に与える地震動要因として、

- 最大加速度(地盤補正効果+破壊伝播効果+3次元考慮)

を選定した。

項目名：最大速度、地盤効果考慮

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ2乗検定
全数	1,749,480	36.48	6.464	24.6	49.69	0.301
住吉川流域	276	38.26	1.832	33.7	41.74	
六甲全域	2,351	36.28	5.994	25.23	49.67	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	0 ~ 26	24,967			10	0.4			24,957	1.4		0.040	
2	26 ~ 28	145,590			97	4.1			145,493	8.3		0.067	
3	28 ~ 30	171,758			250	10.6			171,508	9.8		0.146	
4	30 ~ 32	179,012			352	15.0			178,660	10.2		0.197	
5	32 ~ 34	893	187,787	2	0.7	259	11.0	891	1.5	187,528	10.7	0.224	0.138
6	34 ~ 36	14,440	178,980	32	11.6	255	10.8	14,408	24.1	178,725	10.2	0.222	0.142
7	36 ~ 38	19,683	162,334	102	37.0	324	13.8	19,581	32.8	162,010	9.3	0.518	0.200
8	38 ~ 40	17,072	145,574	79	28.6	209	8.9	16,993	28.5	145,365	8.3	0.463	0.144
9	40 ~ 42	7,540	141,122	61	22.1	153	6.5	7,479	12.5	140,969	8.1	0.809	0.108
10	42 ~ 44	367	129,693			114	4.8	367	0.6	129,579	7.4		0.088
11	44 ~ 46		111,342			82	3.5			111,260	6.4		0.074
12	46 ~ 48		100,688			157	6.7			100,531	5.8		0.156
13	48 ~ 50		70,633			89	3.8			70,544	4.0		0.126
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	2,236	1,626

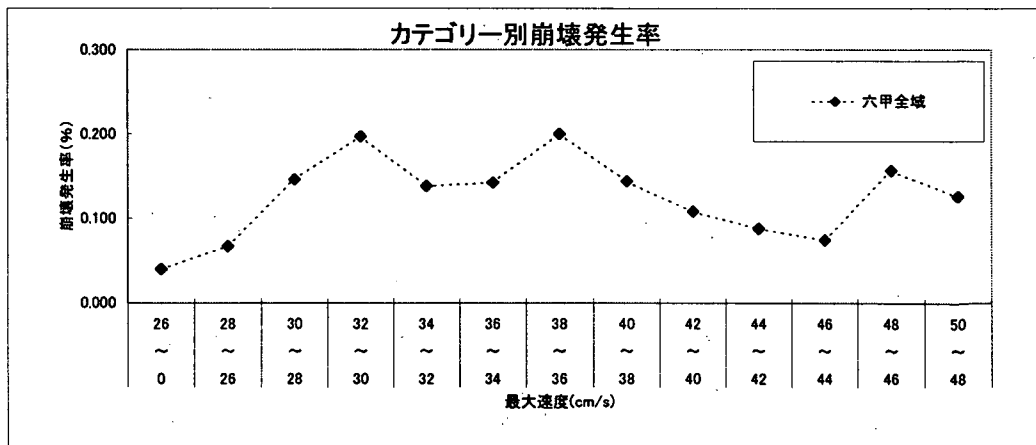
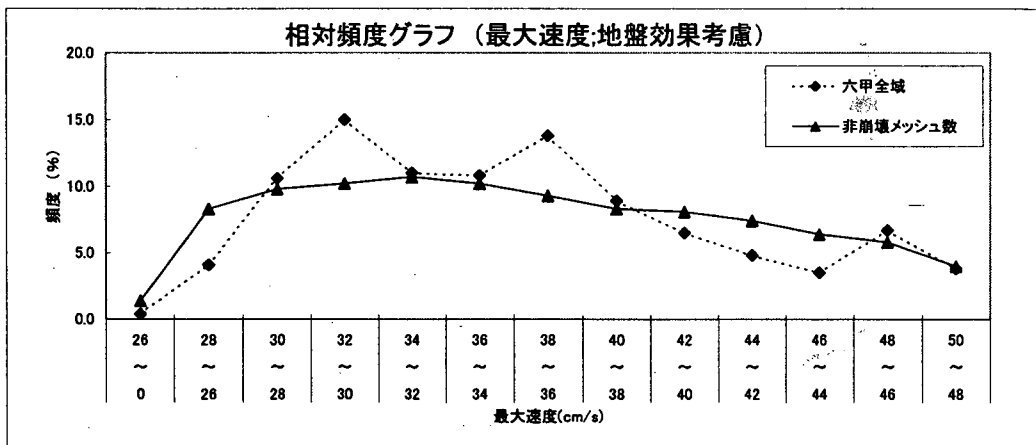


図 3.18 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(最大速度)

項目名：最大速度・地盤+伝播効果考慮

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	37.81	7.044	24.72	55.22	0.301
住吉川流域	276	40.24	1.864	35.6	43.61	
六甲全域	2,351	38.48	6.421	25.89	53.53	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率	
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②
1	0 ~ 28		104,123			30	1.3			104,093	6.0	0.029
2	28 ~ 30		165,368			138	5.9			165,230	9.5	0.083
3	30 ~ 32		169,629			285	12.1			169,344	9.7	0.168
4	32 ~ 34		166,565			196	8.3			166,369	9.5	0.118
5	34 ~ 36	1,200	176,697	2	0.7	246	10.5	1,198	2.0	176,451	10.1	0.167
6	36 ~ 38	15,836	170,592	33	12.0	266	11.3	15,803	26.5	170,326	9.7	0.208
7	38 ~ 40	18,130	155,544	105	38.0	295	12.5	18,025	30.2	155,249	8.9	0.579
8	40 ~ 42	16,450	142,985	73	26.4	265	11.3	16,377	27.4	142,720	8.2	0.444
9	42 ~ 44	8,086	135,069	63	22.8	198	8.4	8,023	13.4	134,871	7.7	0.779
10	44 ~ 46	293	99,861			78	3.3	293	0.5	99,783	5.7	0.078
11	46 ~ 48		80,256			85	3.6			80,171	4.6	0.106
12	48 ~ 50		66,633			102	4.3			66,531	3.8	0.153
13	50 ~ 52		65,447			107	4.6			65,340	3.7	0.163
14	52 ~ 56		50,711			60	2.6			50,651	2.9	0.118
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	2.177

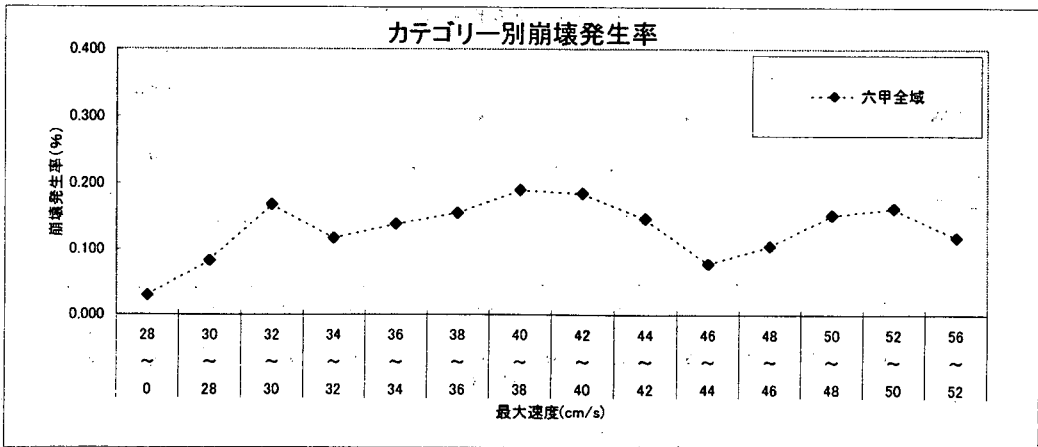
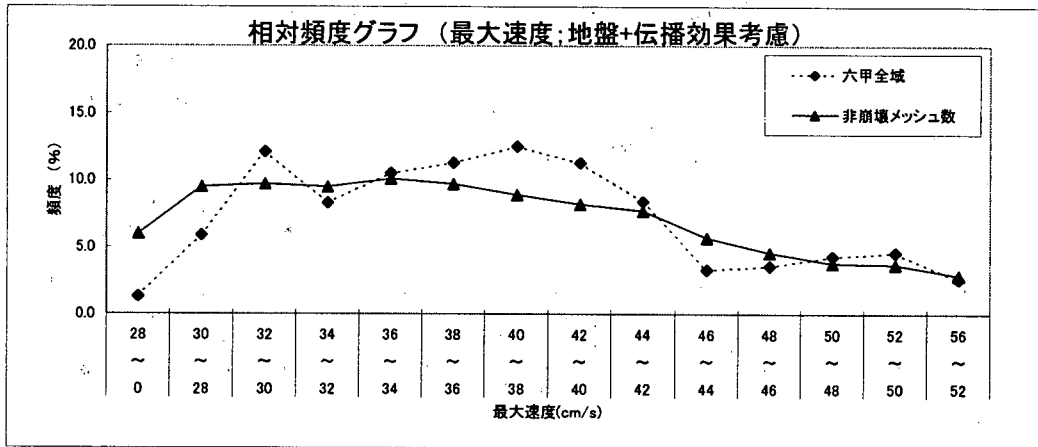


図 3.19 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(破壊伝搬効果を考慮した最大速度)

項目名：最大加速度・地盤効果考慮

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	276.5	32.452	215.55	331.92	0.383
住吉川流域	276	287.05	8.098	265.93	302	
六甲全域	2,351	276.36	27.169	219.46	331.85	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	(%)	(%)
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	0 ~ 220				1	0.0			5,569	0.3		0.018	
2	220 ~ 230				40	1.7			82,090	4.7		0.049	
3	230 ~ 240				147,535	5.7			147,400	8.4		0.092	
4	240 ~ 250				157,827	11.5			157,356	9.0		0.172	
5	250 ~ 260				177,394	13.4			177,080	10.1		0.177	
6	260 ~ 270	3,143	187,536	2	0.7	275	11.7	3,141	5.3	187,261	10.7	0.064	0.147
7	270 ~ 280	18,897	185,391	57	20.7	282	12.0	18,840	31.5	185,109	10.6	0.302	0.152
8	280 ~ 290	21,149	174,301	120	43.5	343	14.6	21,029	35.2	173,958	10.0	0.567	0.197
9	290 ~ 300	14,818	166,852	83	30.1	205	8.7	14,735	24.7	166,647	9.5	0.560	0.123
10	300 ~ 310	1,988	166,589	14	5.1	144	6.1	1,974	3.3	166,445	9.5	0.704	0.086
11	310 ~ 320		146,173			112	4.8			146,061	8.4		0.077
12	320 ~ 330		131,352			198	8.4			131,154	7.5		0.151
13	330 ~ 340		21,030			31	1.3			20,999	1.2		0.147
14	合計	59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	2.197	1.588

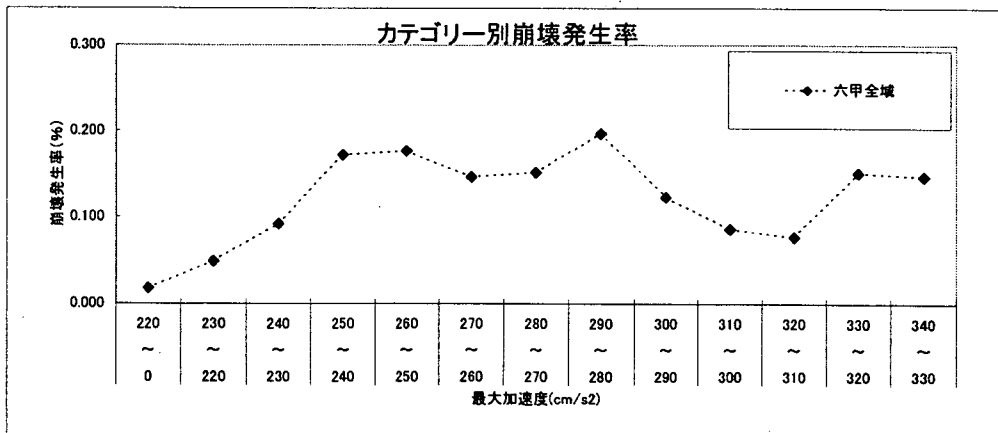
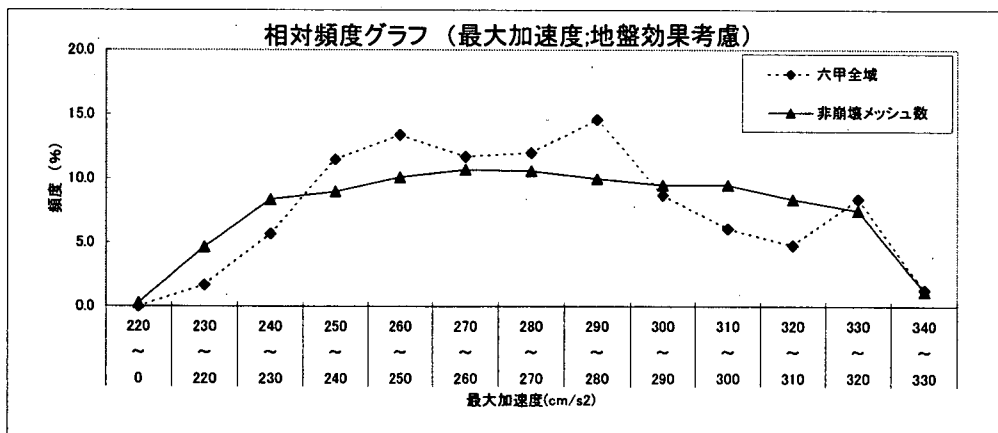


図 3.20 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(最大加速度)

項目名：最大加速度;地盤+伝播効果考慮

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	か2乗検定
全数	1,749,480	286.95	35.128	216.57	368.86	
住吉川流域	276	301.89	8.097	280.92	315.58	0.462
六甲全域	2,351	293.12	30.094	223.65	359.35	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	0 ~ 230	26,223			5	0.2			26,218	1.5		0.019	
2	230 ~ 240	111,397			36	1.5			111,361	6.4		0.032	
3	240 ~ 250	147,455			130	5.5			147,325	8.4		0.088	
4	250 ~ 260	158,894			254	10.8			158,640	9.1		0.160	
5	260 ~ 270	164,157			194	8.3			163,963	9.4		0.118	
6	270 ~ 280	171,673			171	7.3			171,502	9.8		0.100	
7	280 ~ 290	13,379	177,594	20	7.2	277	11.8	13,359	22.4	177,317	10.1	0.149	0.156
8	290 ~ 300	19,744	178,374	103	37.3	313	13.3	19,641	32.9	178,061	10.2	0.522	0.175
9	300 ~ 310	18,709	178,421	88	31.9	332	14.1	18,621	31.2	178,089	10.2	0.470	0.186
10	310 ~ 320	8,163	117,598	65	23.6	228	9.7	8,098	13.6	117,370	6.7	0.796	0.194
11	320 ~ 330		81,870			62	2.6			81,808	4.7		0.076
12	330 ~ 340		80,741			127	5.4			80,614	4.6		0.157
13	340 ~ 350		83,273			150	6.4			83,123	4.8		0.180
14	350 ~ 370		71,810			72	3.1			71,738	4.1		0.100
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	1.937	1.741

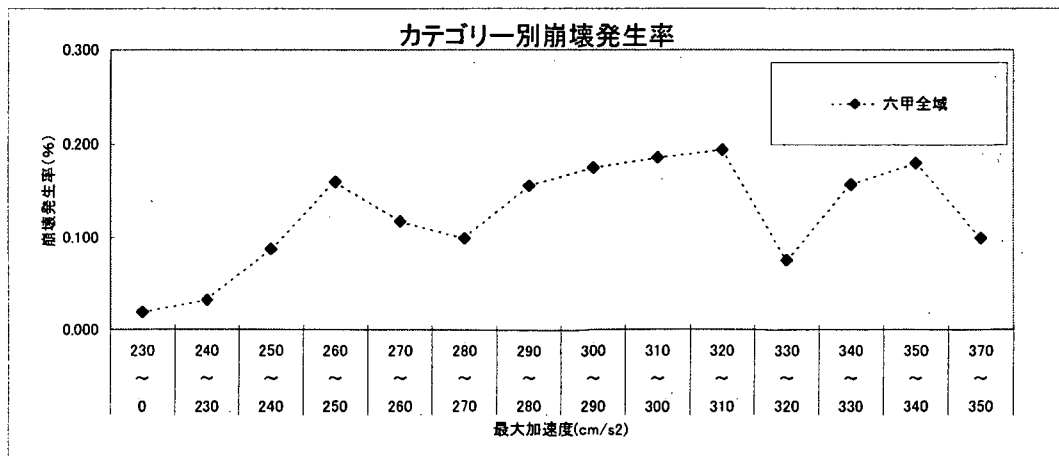
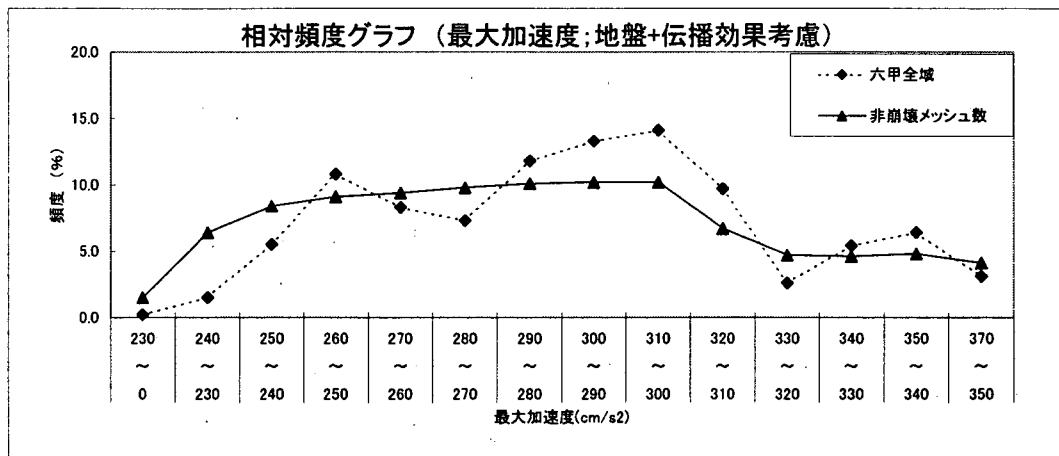


図 3.21 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(伝播効果を考慮した最大加速度)

項目名：最大加速度(3次元考慮)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カイ乗検定
全数	1,749,480	286.73	35.101	216.54	368.92	0.358
住吉川流域	276	301.47	8.194	280.33	315.4	
六甲全域	2,351	292.86	30.074	223.6	359.3	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)		
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	200 ~ 220												
2	220 ~ 240												
3	240 ~ 260												
4	260 ~ 280												
5	280 ~ 300												
6	300 ~ 320												
7	320 ~ 340												
8	340 ~ 360												
9	360 ~ 380												
10	0 ~ 0												
11													
12													
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	0.948	0.896

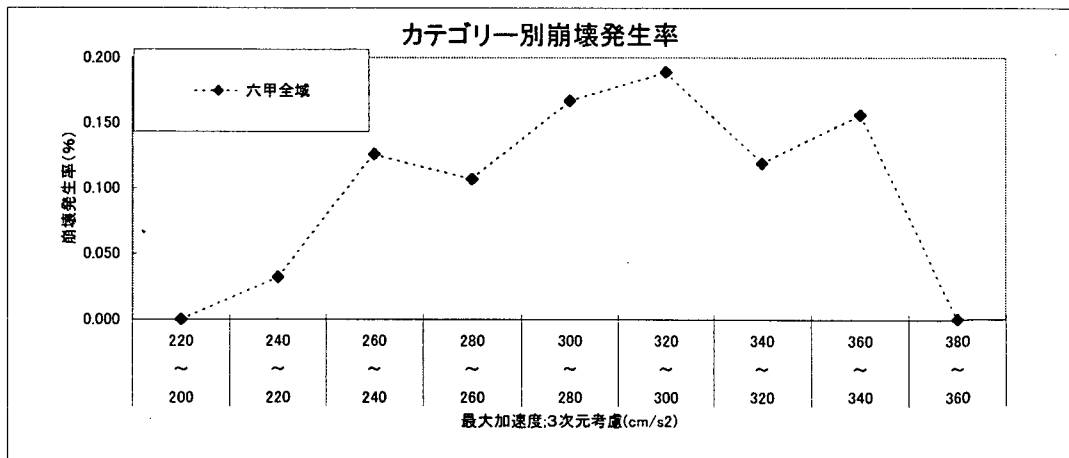
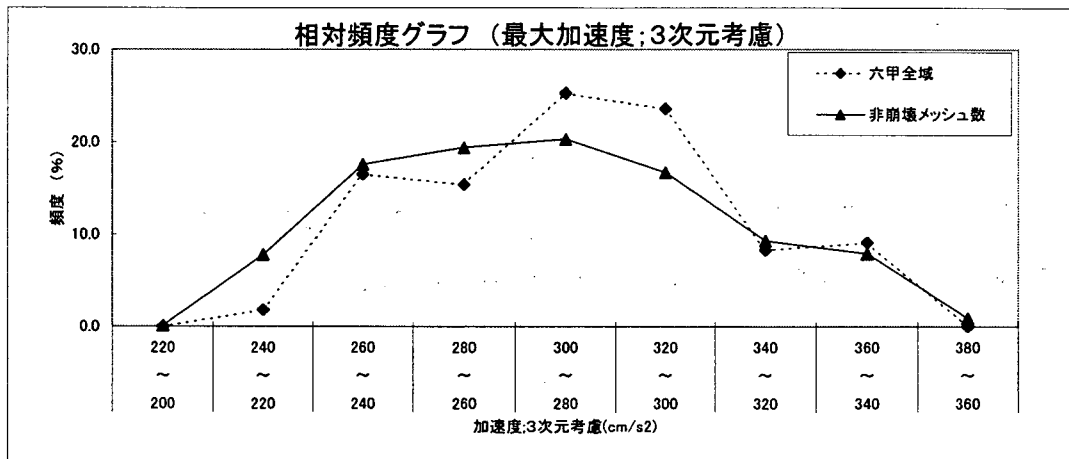


図 3.22 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(3次元,伝播効果を考慮した最大加速度)

最大速度(地盤効果考慮)

	勾配1				勾配2				勾配3				全数			
	0~20°				20~40°				40° ~							
	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率
	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)
0~26	17,596	0	17,596	0.000	6,854	8	6,846	0.117	521	2	519	0.384	24,971	10	24,961	0.040
26~32	242,077	81	241,996	0.033	221,048	437	220,611	0.198	33,237	181	33,056	0.545	496,362	699	495,663	0.141
32~38	162,760	49	162,711	0.030	307,529	476	307,053	0.155	58,814	313	58,501	0.532	529,103	838	528,265	0.158
38~44	185,720	33	185,687	0.018	191,010	291	190,719	0.152	39,655	152	39,503	0.383	416,385	476	415,909	0.114
44~50	172,123	29	172,094	0.017	101,522	228	101,294	0.225	9,014	71	8,943	0.788	282,659	328	282,331	0.116
合計	780,276	192	780,084	0.098	827,963	1,440	826,523	0.847	141,241	719	140,522	2.632	1,749,480	2,351	1,747,129	0.569

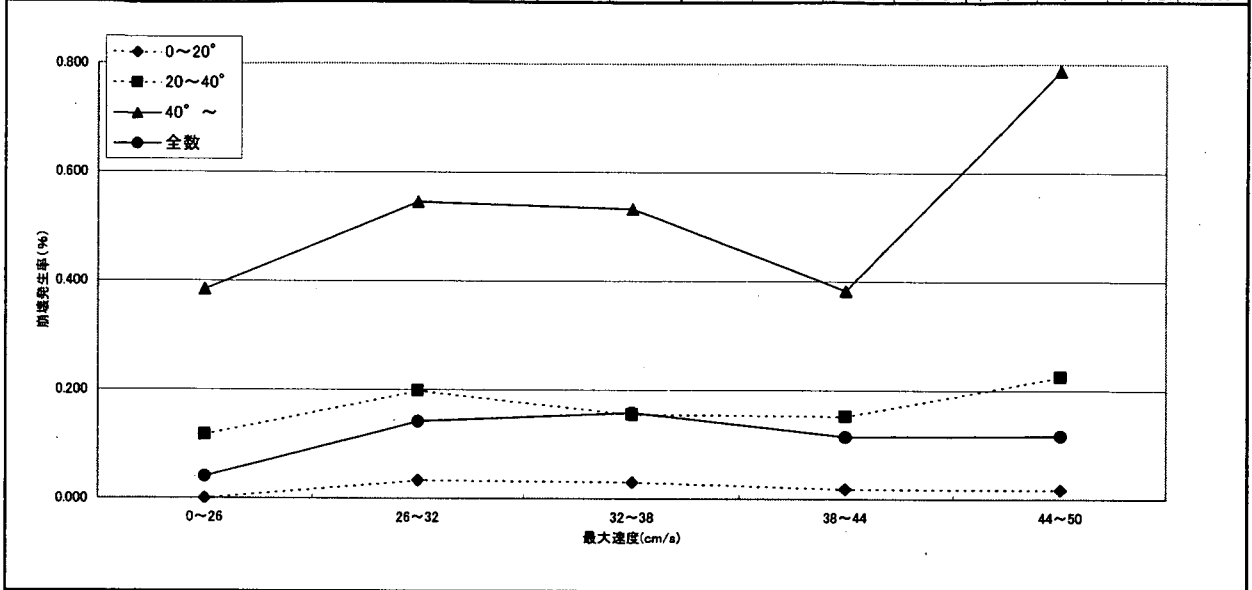


図 3.23 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(最大速度)

最大速度(地盤効果+伝播効果考慮)

	勾配1				勾配2				勾配3				全数			
	0~20°				20~40°				40° ~							
	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率
	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)
~32	241,801	53	241,748	0.022	174,676	289	174,387	0.165	22,649	111	22,538	0.490	439,126	453	438,673	0.103
32~38	168,733	60	168,673	0.036	291,812	421	291,391	0.144	53,312	227	53,085	0.426	513,857	708	513,149	0.138
38~44	141,565	41	141,524	0.029	236,970	436	236,534	0.184	55,059	281	54,778	0.510	433,594	758	432,836	0.175
44~50	164,142	24	164,118	0.015	76,323	178	76,145	0.233	6,285	63	6,222	1.002	246,750	265	246,485	0.107
50~56	64,035	14	64,021	0.022	48,182	116	48,066	0.241	3,936	37	3,899	0.940	116,153	167	115,986	0.144
合計	780,276	192	780,084	0.124	827,963	1,440	826,523	0.967	141,241	719	140,522	3.368	1,749,480	2,351	1,747,129	0.667

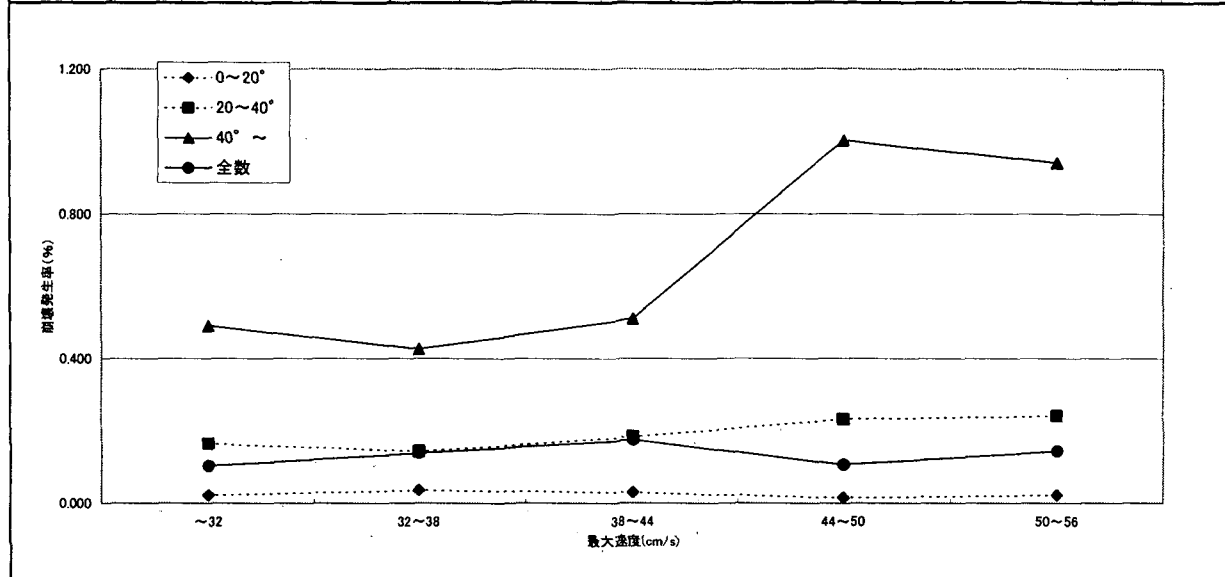


図 3.24 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(破壊伝搬効果を考慮した最大速度)

最大加速度(地盤効果考慮)

	勾配1				勾配2				勾配3				全数			
	0~20°				20~40°				40° ~							
	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率
	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)
0~240	138,291	18	138,273	0.013	84,999	110	84,889	0.129	11,962	48	11,914	0.401	235,252	176	235,076	0.075
240~270	202,900	81	202,819	0.040	279,936	531	279,405	0.190	39,726	248	39,478	0.624	522,562	860	521,702	0.165
270~300	165,296	53	165,243	0.032	291,911	467	291,444	0.160	69,330	310	69,020	0.447	526,537	830	525,707	0.158
300~330	262,500	39	262,461	0.015	162,358	309	162,049	0.190	19,255	106	19,149	0.551	444,113	454	443,659	0.102
330~360	11,289	1	11,288	0.009	8,759	23	8,736	0.263	968	7	961	0.723	21,016	31	20,985	0.148
合計	780,276	192	780,084	0.109	827,963	1,440	826,523	0.932	141,241	719	140,522	2.746	1,749,480	2,351	1,747,129	0.648

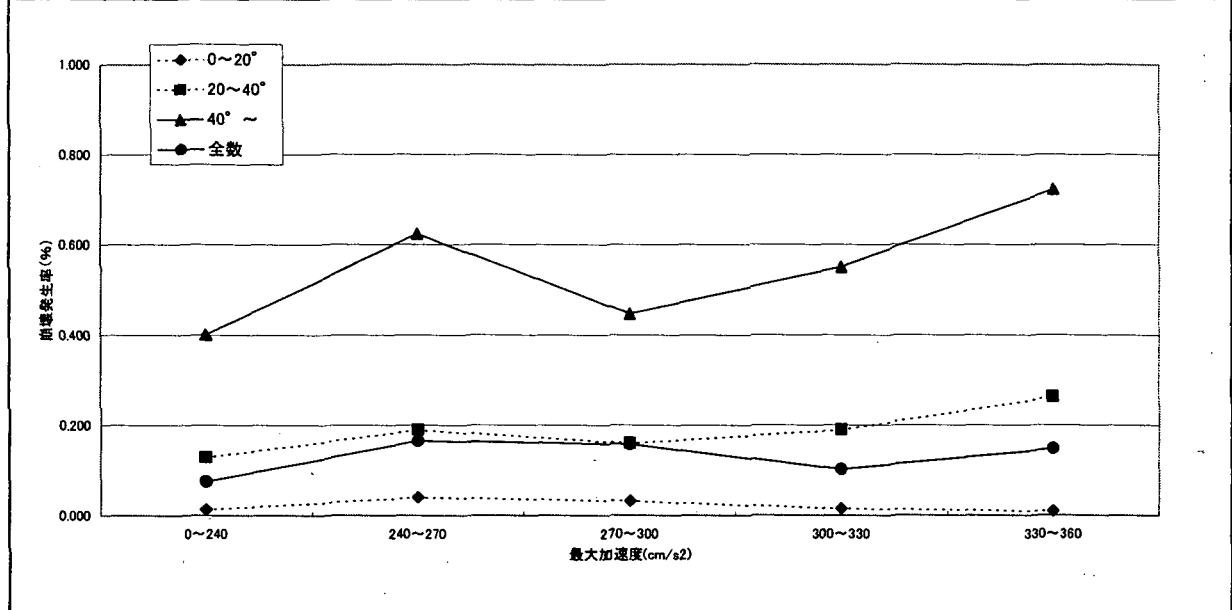


図 3.25 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(最大加速度)

最大加速度(地盤効果+伝播効果考慮)

	勾配1				勾配2				勾配3				全数			
	0~20°				20~40°				40° ~				全数			
	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率
	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)
0~240	100,308	9	100,299	0.009	34,383	24	34,359	0.070	2,941	8	2,933	0.272	137,632	41	137,591	0.030
240~270	203,410	71	203,339	0.035	233,942	373	233,569	0.159	33,163	134	33,029	0.404	470,515	578	469,937	0.123
270~300	149,866	42	149,824	0.028	308,682	411	308,271	0.134	71,087	308	70,779	0.433	527,635	761	526,874	0.144
300~330	186,249	43	186,206	0.023	164,991	389	164,602	0.236	26,643	190	26,453	0.713	377,883	622	377,261	0.165
330~360	129,706	27	129,679	0.021	83,302	243	83,059	0.292	7,241	79	7,162	1.091	220,249	349	219,900	0.158
360~	10,737	0	10,737	0.000	4,663	0	4,663	0.000	166	0	166	0.000	15,566	0	15,566	0.000
合計	780,276	192	780,084	0.116	827,963	1,440	826,523	0.891	141,241	719	140,522	2.913	1,749,480	2,351	1,747,129	0.620

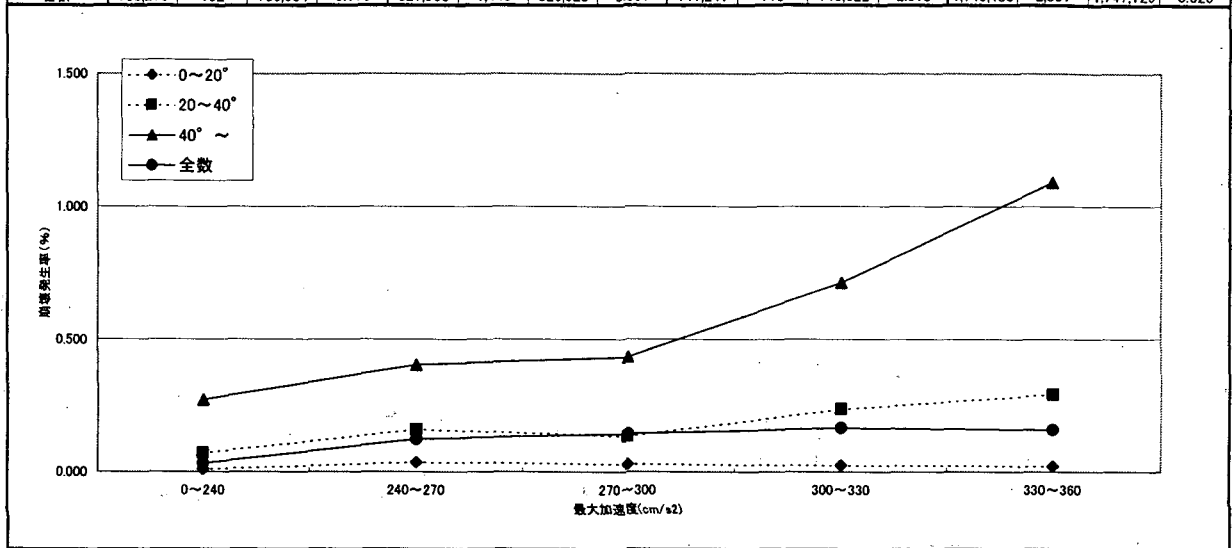


図 3.26 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(破壊伝搬効果を考慮した最大加速度)

最大加速度(地盤効果+伝播効果+3次元考慮)

	勾配1				勾配2				勾配3				全数			
	0~20°				20~40°				40° ~							
	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率	全メッシュ数	崩壊メッシュ数	非崩壊メッシュ数	崩壊率
	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)	(箇所)	(箇所)	(箇所)	(%)
0~240	101,119	10	101,109	0.010	34,710	25	34,685	0.072	2,968	8	2,960	0.270	138,797	43	138,754	0.031
240~270	204,518	70	204,448	0.034	236,395	375	236,020	0.159	33,542	134	33,408	0.399	474,455	579	473,876	0.122
270~300	148,661	42	148,619	0.028	307,319	411	306,908	0.134	71,688	313	71,375	0.437	527,668	766	526,902	0.145
300~330	186,630	43	186,587	0.023	162,447	389	162,058	0.239	25,682	185	25,497	0.720	374,759	617	374,142	0.165
330~360	128,711	27	128,684	0.021	82,475	240	82,235	0.291	7,200	79	7,121	1.097	218,386	346	218,040	0.158
360~	10,634		10,634		4,616		4,616		165		165		15,415		15,415	
合計	780,273	192	780,081	0.116	827,962	1,440	826,522	0.895	141,245	719	140,526	2.923	1,749,480	2,351	1,747,129	0.621

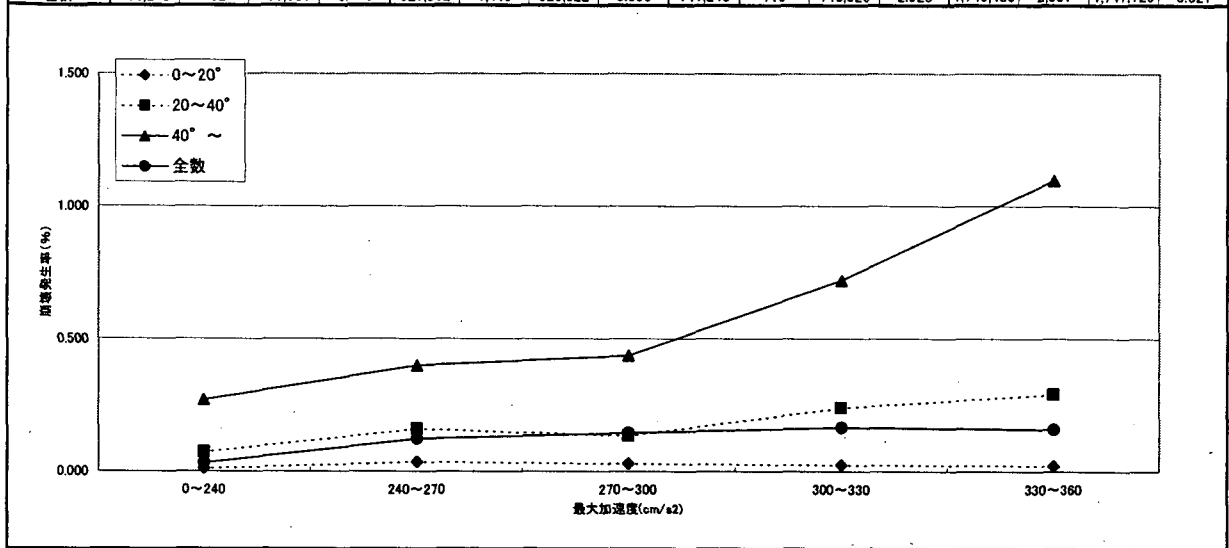


図 3.27 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(破壊伝搬効果+3次元距離+最大加速度)

3.5 地震時の斜面崩壊危険度判定手法の提案

「3.3 地形要因に関する検討」において、地震時斜面崩壊危険度を判定する説明変数として①斜面勾配、②平均曲率(影響半径 20m)を、「3.4 地震動に関する検討」においては、地震時斜面崩壊危険度を判定する説明変数として③地盤補正効果、伝播効果を考慮した 3 次元距離を用いた最大加速度を用いるのが適当であることが示された。そこで、六甲全山を対象とし、①～③を説明変数とし、崩壊の発生・非発生を目的変数とした判別分析を行い、各因子にかかる係数を決定した。その結果、以下の判別式が得られた。なお、判別分析手法については巻末の参考資料に示した。

$$F = 0.075 \times [\text{勾配}(\text{°})] - 8.9 \times [\text{平均曲率}] + 0.0056 \times [\text{最大加速度}(\text{cm/s}^2)] - 3.2 \dots\dots (式 4.1)$$

ここで、参考資料に示したように、F が正のときそのメッシュは崩壊すると判定され、F が負のときそのメッシュは崩壊しないと判定されたことになる。そこで、実際の崩壊、非崩壊と判別分析で判定した崩壊、非崩壊のメッシュ数を表 3.8 にまとめた。その結果、非崩壊メッシュ、崩壊メッシュの正誤率はそれぞれ、64.5%、78.2%であった。

表3.8 判別分析結果

			予測		合計
			非崩壊	崩壊	
実際の崩壊	個数	非崩壊	849373	897756	1747129
		崩壊	223	2127	2350
		合計	849596	899883	1749479
実際の崩壊	的中率(%)	非崩壊	48.6	51.4	100
		崩壊	9.5	90.5	100

分類正誤率 48.7%

また、標準化された正準判別関数係数は勾配、平均曲率、最大加速度でそれぞれ 0.976、-0.115、0.188 であった。このことから、勾配の寄与が大きく、地震動の最大加速度、平均曲率の順に寄与度が大きいことがわかる。

次に、判別得点ごとのヒストグラムを図 3.28 に示した。図 3.28 に示したように式 4.1 で求めた判別得点が大きくなるに従い、崩壊発生率が大きくなる傾向が見られた。判別得点-0.5～0.5 の斜面の崩壊確率は 0.05% であるのに対して、判別得点 3 以上の斜面では約 2% 以上であった。このことから、判別得点 0 と比べて、判別得点 3 以上の斜面は 40 倍以上地震時の崩壊の可能性が高いといえる。すなわち、式 4.1 で求めた判別得点から相対的な斜面崩壊発生の危険度を表すことができることがわかる。

項目名：判別得点(平均曲率20m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	カ2乗検定
全数	1,749,480	0	1	-2.53	5.4	
住吉川流域	276	1.35	0.648	-1.22	3.15	0.394
六甲全域	2,351	1.03	0.739	-1.61	3.62	

レンジ区分	メッシュ全数		崩壊メッシュ数				非崩壊メッシュ数				崩壊発生率		
	住吉川	全域	住吉川流域		六甲全域		住吉川流域		六甲全域		住吉川	全域	
	(%)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(メッシュ)	(%)	(%)	(%)	(%)
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤-①-③	⑤/Σ⑤	⑥-②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	-3 ~ -2	630								630	0.0		
2	-2 ~ -1.5	184	115,619			1	0.0	184	0.3	115,618	6.6		0.001
3	-1.5 ~ -1	1,548	250,718	1	0.4	22	0.9	1,548	2.6	250,696	14.3	0.065	0.009
4	-1 ~ -0.5	3,243	241,100	1	0.4	69	2.9	3,243	5.4	241,031	13.8	0.031	0.029
5	-0.5 ~ 0	5,089	241,510	10	3.6	134	5.7	5,085	8.5	241,376	13.8	0.197	0.055
6	0 ~ 0.5	7,783	272,822	17	6.2	280	11.9	7,777	13.0	272,542	15.6	0.218	0.103
7	0.5 ~ 1	12,204	298,367	32	11.6	503	21.4	12,192	20.4	297,864	17.0	0.262	0.169
8	1 ~ 1.5	17,265	231,302	93	33.7	736	31.3	17,231	28.8	230,566	13.2	0.539	0.318
9	1.5 ~ 2	10,946	84,056	93	33.7	483	20.5	10,912	18.2	83,573	4.8	0.850	0.575
10	2 ~ 2.5	1,647	11,991	25	9.1	102	4.3	1,638	2.7	11,889	0.7	1.518	0.851
11	2.5 ~ 3	75	1,104	4	1.4	19	0.8	74	0.1	1,085	0.1	5.333	1.721
12	3 ~ 3.5	11	98			2	0.1	11	0.0	96	0.0		2.041
13	3.5 ~ 4		28							28	0.0		
14	4 ~ 10		135							135	0.0		
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,895	100	1,747,129	100	0.460	0.134

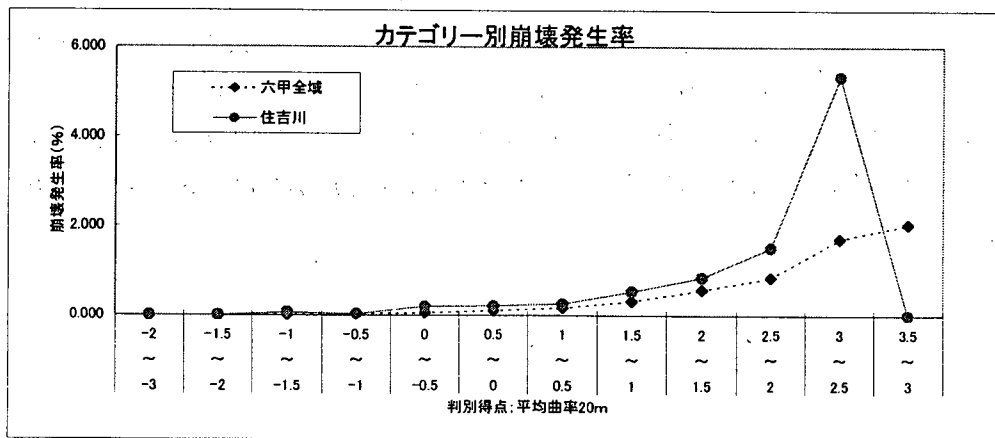
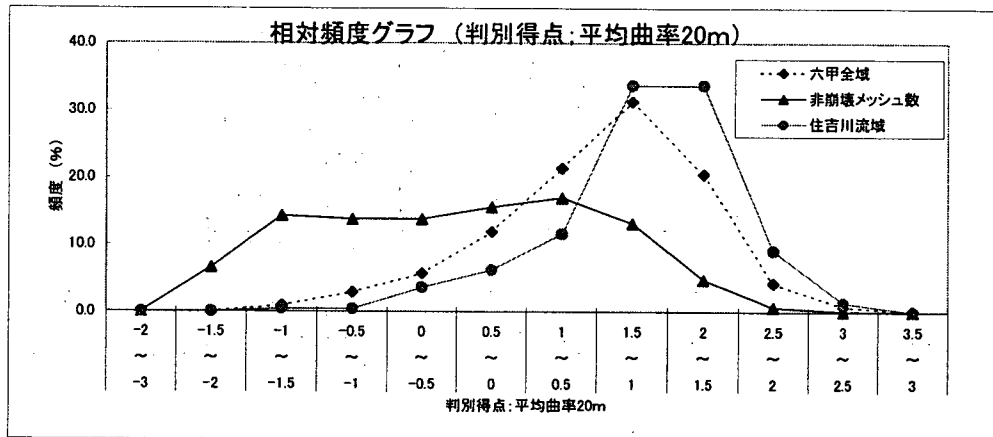


図 3.28 判別得点別ヒストグラムと崩壊発生率(平均曲率 20m)

3.6 危険度評価図(ハザードマップ)の提案

前節の結果から、提案した式 4.1 は相対的な斜面の危険度を表現するのに有効であることがわかった。そこで、ここでは、式 4.1 を用いて、六甲全山を対象に、危険度評価図の作成を試みた。危険度評価図を作成するにあたり、評価基準を表 3.9 に整理した。作成した危険度評価図を図 3.29 に示した。

表 3.9 判別得点による危険度評価基準

危険度	色	表現	判別得点	崩壊発生率
低い ↑ ↓ 高い	青	崩壊が起りにくい	-3.0~-1.5	約 0.001%以下
	水色	崩壊がやや起りにくい	-1.5~-0.5	約 0.03%以下
	緑	—	-0.5~0.5	約 0.1%以下
	黄色	崩壊がやや起りやすい	0.5~1.0	約 0.2%以下
	赤	崩壊が起りやすい	1.0~10	約 0.2%以上



図 3.29 地震時の斜面崩壊危険度評価図

4 地震時崩壊危険度判定手法の汎用性の検討

前章で提示した手法の汎用性を検討する目的で、前章で提示した判別式を他の地震による斜面崩壊分布に適用した。検討対象は、1997年以降で崩壊分布が面的に把握されている①1997年鹿児島県北西部地震(3月)、②2000年神津島地震(7月)の2地域とした。

4.1 地震の概要と勾配、平均曲率、地震動の最大加速度の算出

前章の解析にあわせて、DEMのメッシュサイズは10mとした。地形量(斜面勾配、平均曲率)は、前章同様、資料1に示した方法で算出した。平均曲率の考慮範囲は20mとした。既存資料を基に、地震動の最大加速度は破壊伝播効果を考慮した距離減衰式(3次元距離)を用いた。また、距離減衰式中の係数は六甲山地で用いたものと同じ値を用いた(資料2)。

4.1.1 鹿児島県北西部地震(1997年3月)

(1) 概要

鹿児島県北西部では1997年3月26日および5月13日にそれぞれM6.6およびM6.4の地震が発生した。地震のメカニズムは2つの地震とも北東-南西圧縮、北西-南東伸張の横ずれである。3月26日の地震はほぼ東西の余震分布を持ち、本震はそのほぼ中央で発生している。GPS連続観測によれば、この地震に伴う水平変動が近傍の観測点において見られる(参考:地震予知連絡会ホームページ <http://cais.gsi.go.jp/VOCHIREN/ccephome.html>)。本研究において検討した範囲は図4.1に示した。

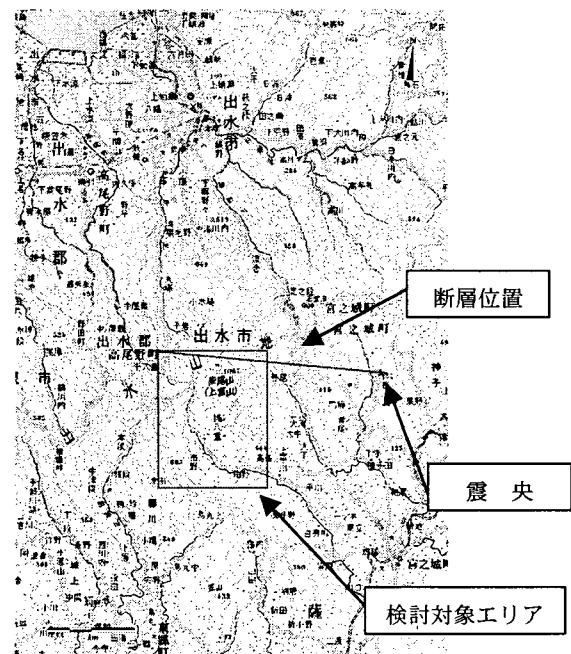


図4.1 鹿児島県北西部地震(1997年3月)の検討対象位置図

(2) 崩壊地データ

鹿児島県北西部地震により発生した崩壊地点位置図を図4.2に示した。なお、崩壊地分布は建設省土木研究所により調査されたものを用いた(「地震及び地震後降雨による斜面崩壊危険度評価手法検討業務 報告書」平成11年2建設省土木研究所 アジア航測株式会社、門間敬一・小嶋伸一・小野田敏・高山陶子(1999)「地震及び地震後降雨による斜面崩壊の発生に関わる要因の検討」、第38回地すべり学会 研究発表講演集, pp.519-522)なお、崩壊地判読に用いたれた空中写真の縮尺は1:5,000である。検討とするエリアは5×6km(30km²)、検討とするエリアは17km²、崩壊箇所は144箇所、141メッシュであった。

(3) 勾配、平均曲率の算出

北海道地図社作成の平成7年時点の10mDEM(緯度経度)から、三角形網の標高データ(TIN; Triangulated Irregular Network)を作成し、10mメッシュサイズ別の標高値(平面直角座標系)を求め、勾配および平均曲率(影響範囲 20m)とし算定した。

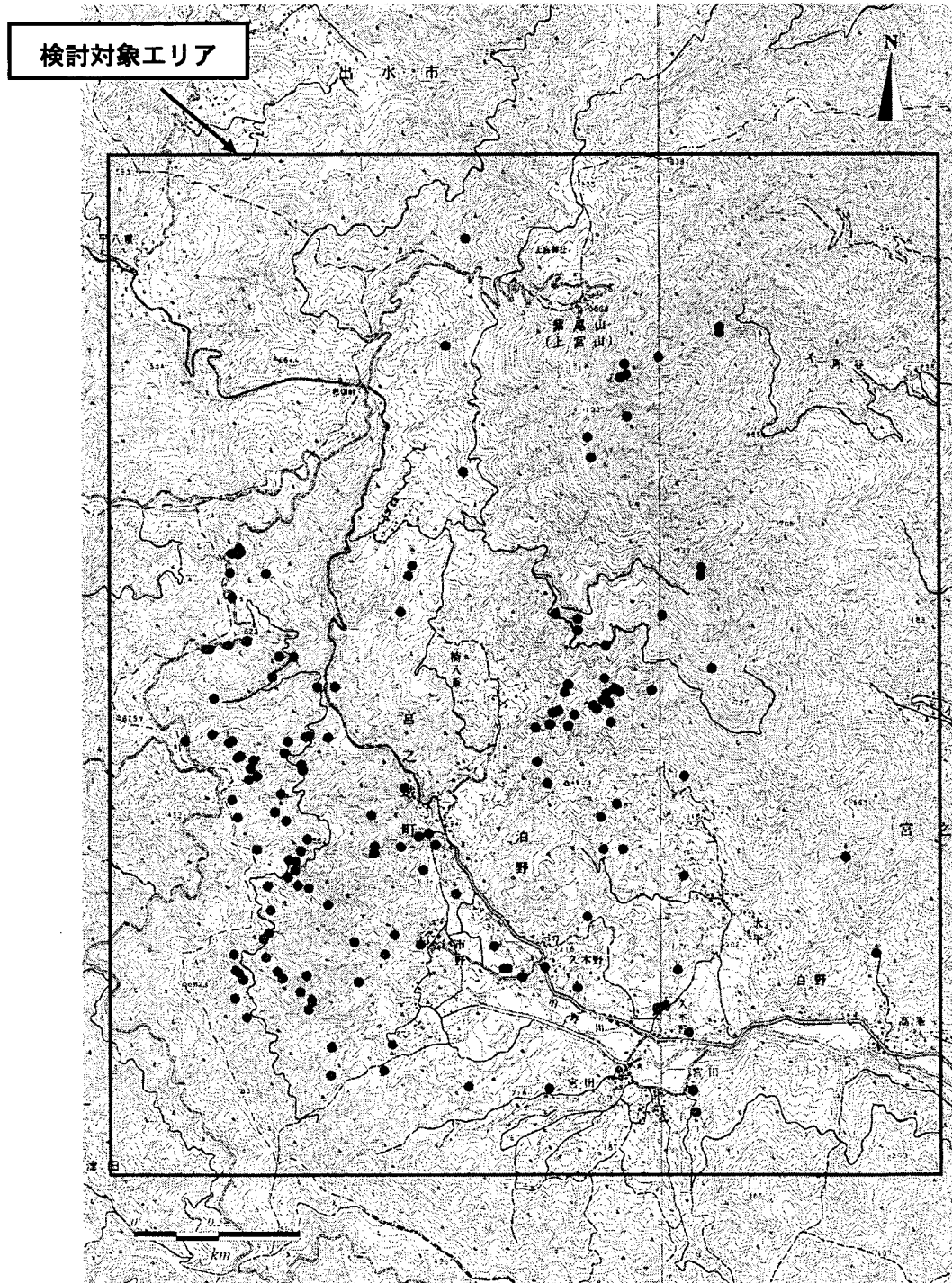


図 4.2 鹿児島県北西部地震(1997年3月)による崩壊地点(丸印)位置図

(4) 最大加速度の算出

鹿児島県北西部地震により発生した地震の最大加速度を算出するのに用いた諸元(地震予知連絡会ホームページ;<http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/JIS/125/image125/GIF/125-13.jpg>)を表 4.1 に整理した。最大加速度は、資料 2 と同じ手法を用いることにより算出することとした。算出結果を図 4.3 に示した。

表 4.1 最大加速度算定のための諸元

X1, Y1: -62777.6, -112262.0
X2, Y2 : -51807.81, -113315.4
Xec, Yec : -52067.7, -113290.2
Mw: 6.1
Ms: 10
X1, Y1: 断層の西側座標(国家座標系等平面直角座標系(旧Ⅱ系)とする)
X2, Y2: 断層の東側座標(国家座標系等平面直角座標系(旧Ⅱ系)とする)
Xec, Yec: 震央の座標(国家座標系等平面直角座標系(旧Ⅱ系)とする)
Mw: モーメントマグニチュード
Ms: メッシュサイズ(m)



図 4.3 鹿児島県北西部地震(1997年3月)による最大加速度分布図

4.1.2 神津島地震(2000年7月)

(1) 概要

2000年6月26日の夜から三宅島の西部で火山性の地震活動が始まり、活発な活動を続けながら次第に活動の中心は西方海上に移動していった。7月1日には、三宅島から西方に伸びたこの活動域の西端付近で、M6.5の地震が発生した。(参考:地震予知連絡会ホームページ <http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/ccephome.html>)。なお、検討対象は神津島全域とした

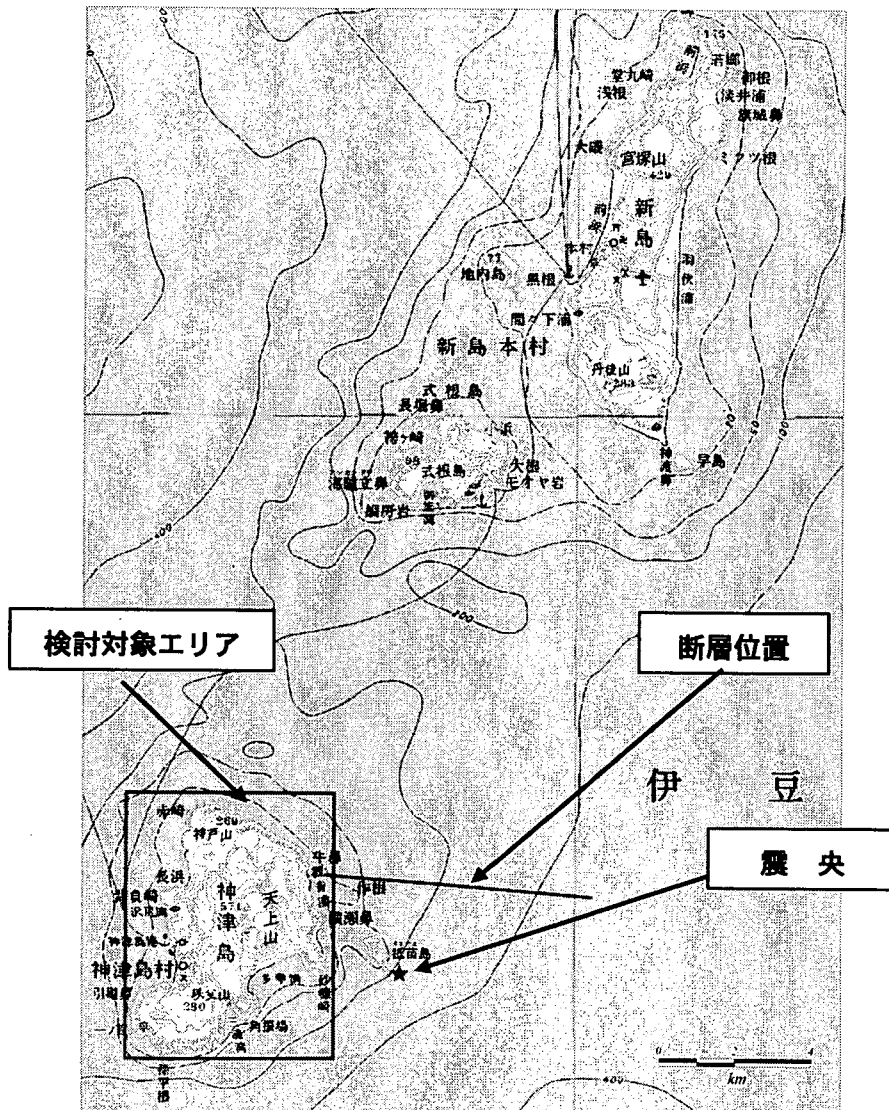


図 4.4 神津島地震(2000年7月)の検討対象位置図

(2) 崩壊地データ

神津島地震により発生した崩壊地点位置図を図 4.5 に示した。なお、崩壊地点に関しては、独立行政法人土木研究所が調査を実施したものである(「平成 12 年度 航空写真判読による神津島崩壊地分布調査業務 報告書 平成 12 年 11 月 建設省土木研究所 アジア航測株式会社」、「仲野公章・山越隆雄・山田孝・千葉達朗・近藤剛(2001):神津島における群発地震等に伴う斜面崩壊の発生特性,平成 13 年度砂防学会研究発表会概要集, pp.446-447」)。なお、崩壊地判読に用いられた空中写真の縮尺は 1:5,000 である。検討対象とするエリアは $5 \times 7.5 \text{ km}$ (37.5 km^2)、崩壊地点は 1526 箇所、1497 メッシュとした。

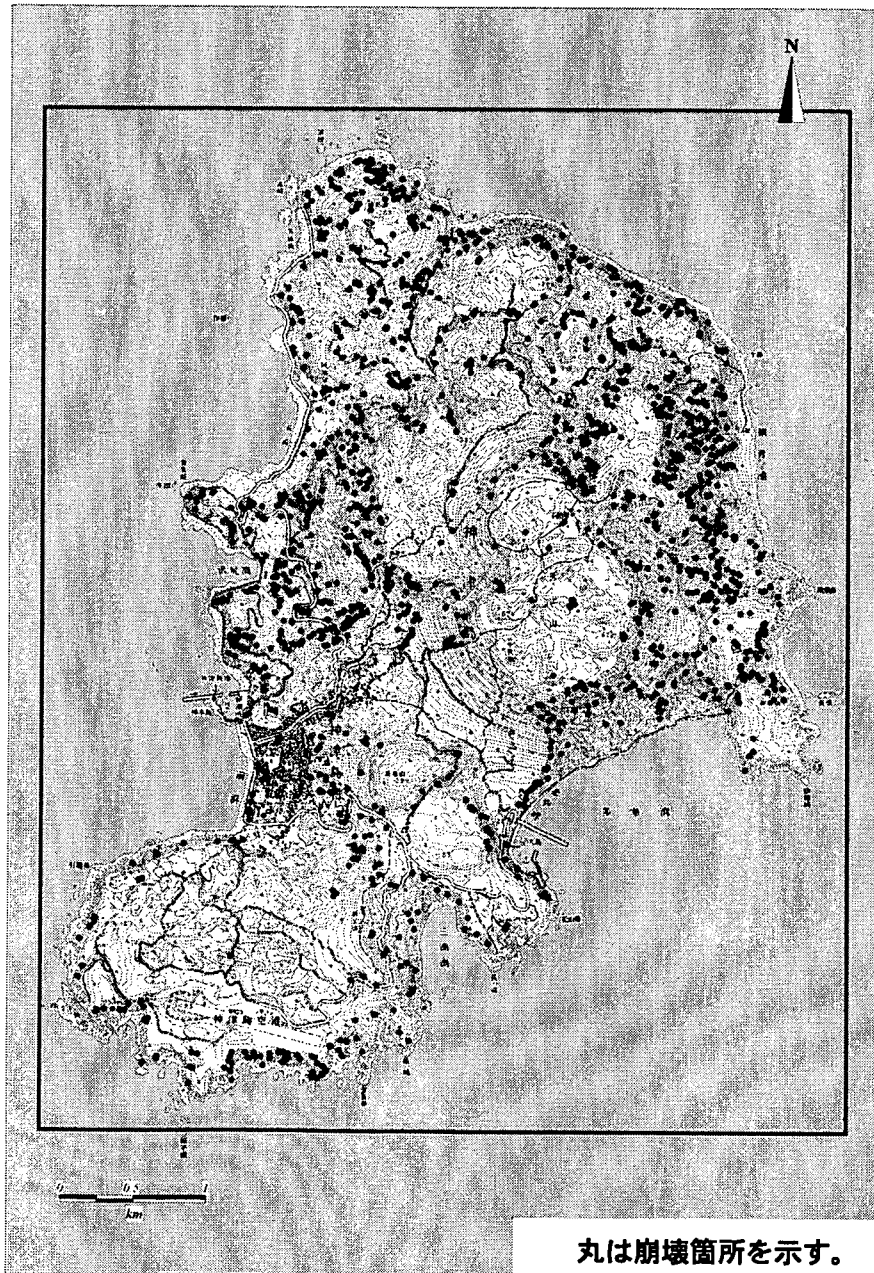


図 4.5 神津島地震(2000 年 7 月)による崩壊地点位置図

(3) 勾配、平均曲率の算出

DEM データは独立行政法人土木研究所が、1mレーザー計測データ(朝日航洋株式会社作成)を10mメッシュサイズの標高データに加工したものを利用した。

(4) 最大加速度の算出

神津島地震により発生した地震の最大加速度を算出するのに用いた諸元(地震予知情報センターホームページ;http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/000701.html)を表 4.2 に整理した。最大加速度は、資料 2 に示した手法を用いることにより算出した。

表 4.2 最大加速度算定のための諸元

X1,Y1: -60292.7, -196851.4
X2,Y2 : -53308.3, -197491.6
Xec,Yec : -58360.5, -199474.0
Mw: 6.4
Ms: 10
X1,Y1: 断層の西側座標(国家座標系等平面直角座標系(旧IX系)とする)
X2,Y2: 断層の東側座標(国家座標系等平面直角座標系(旧IX系)とする)
Xec,Yec: 震央の座標(国家座標系等平面直角座標系(旧IX系)とする)
Mw: モーメントマグニチュード
Ms: メッシュサイズ(m)

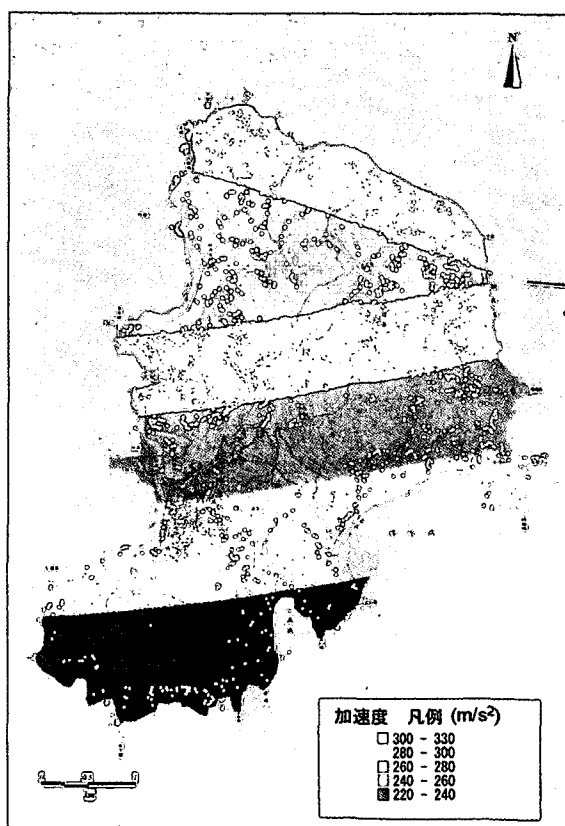


図 4.6 神津島地震(2000年7月)による最大加速度分布図

4.2 危険度評価の実施

4.2.1 方法

前章(3.5)で兵庫県南部地震による六甲山地の崩壊分布を基に提示した判別分析式(以下、六甲全山式と呼ぶ)を、図 4.2, 図 4.4 に示したエリアに適用し、危険度評価図の作成を試みた。その上で、各地震の崩壊分布を基に、入力変数(勾配、平均曲率(影響範囲 20m)、最大加速度)は六甲全山式と同じとし、判別分析を行い、係数を決める手法についても適用を試みた。また、それぞれ地震の事例を基に作成された判別式を鹿児島式、神津島式とそれぞれ呼ぶこととする。

4.2.2 鹿児島県北西部地震への適用

(1) 分類正誤率

六甲全山式を鹿児島県北西部地震に適用した場合、分類正誤率が 60.8%、また鹿児島式を適用した場合には 50.7%となった。この結果からすると、六甲全山式の適用が良いと見えるが、実際に崩壊している箇所において正しく予測できた確率に着目すると、六甲全山式では 46.8%、鹿児島式では 68.8%であり、実際に崩壊している斜面の抽出漏れが少ない方がよいとする立場からは、鹿児島式の方が有利な結果を得た。

表4.3 鹿児島県西部地震における判別分析結果

六甲全山式				鹿児島式							
		予測		合計			予測		合計		
		非崩壊	崩壊				非崩壊	崩壊			
実際の崩壊	個数	非崩壊	102952	66232	169184	実際の崩壊	個数	非崩壊	85728	83456	169184
		崩壊	75	66	141			崩壊	44	97	141
		合計	103027	66298	169325			合計	85772	83553	169325
	的中率(%)	非崩壊	60.9	39.1	100	的中率(%)	非崩壊	50.7	49.3	100	
	崩壊	53.2	46.8	100	崩壊	31.2	68.8	100			

分類正誤率 60.8% 分類正誤率 50.7%

(2) 判別分析の係数

表 4.4 に示したように、鹿児島式では、六甲全山式に比べ最大加速度の判別関数係数がマイナスの値を示している。この式の意味は、地震加速度が小さいほど崩壊が起りやすいということであるが、実現象においては加速度が強いほど崩壊が起りやすいと考えられる。地質の違いなどが影響を及ぼしている可能性が考えられる(次節参照)。勾配、平均曲率については、六甲全山式とほぼ同様の傾向を示している。

表 4.4 線型判別式の比較

Case	標準化された判別関数係数			判別得点式 F=
	勾配	平均曲率 (影響範囲20m)	地震動 最大加速度	
鹿児島式	0.846	-0.137	-0.650	$0.079 \times (\text{勾配}) - 12.21 \times (\text{平均曲率}) - 0.028 \times (\text{最大加速度}) + 4.491$
六甲全山式	0.976	-0.117	0.189	$0.075 \times (\text{勾配}) - 8.92 \times (\text{平均曲率}) + 0.006 \times (\text{最大加速度}) - 3.228$

(3) 判別得点と崩壊発生確率の関係

次に判別得点カテゴリ別の頻度グラフを図 4.7 に示した。1997 年 3 月の鹿児島県北西部地震では、六甲式を用いた場合、判別得点—崩壊発生確率に正の関係を得た。ただし判別得点が 0 より小さい場合の領域でも崩壊発生率が高く、誤判別が多い結果となった (図 4.7)。さらに、鹿児島県北西部地震時の崩壊分布データを基に作成した線形判別式(鹿児島県式)を適用したが、六甲式とほぼ同じ判別得点—崩壊発生率関係が得られた。この原因として、①崩壊地数が少ないこと、②六甲と鹿児島で崩壊地の地形特性が類似していたことなどの理由が考えられる。

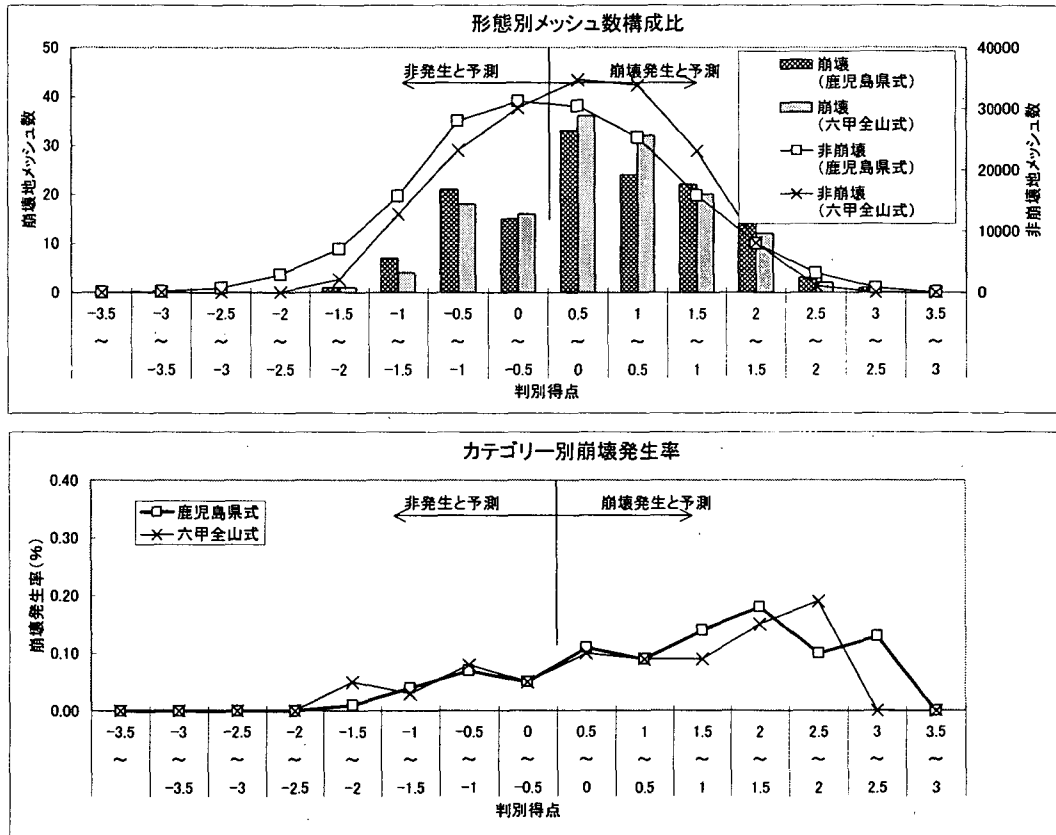


図 4.7 六甲全山式の鹿児島県北西部地震への適用と鹿児島県北西部地震の崩壊実績データに基づく判別分析による判別得点と崩壊発生率の関係

同地域は図 4.8 に示したように、花崗閃緑岩と砂岩・泥岩の堆積岩が分布している。図 4.8 に示すように、花崗閃緑岩の分布地域において、砂岩・泥岩の堆積岩の分布地域と比べて崩壊が多発している。また、図 4.9 に示すとおり、六甲全山式を用いて算出した判別得点と崩壊発生率の関係は、花崗閃緑岩と砂岩・泥岩の堆積岩の分布地域で差が見られる。すなわち、同じ判別得点のカテゴリであっても、花崗閃緑岩の分布地域では、砂岩・泥岩の堆積岩の分布地域に比べて、崩壊発生率が高い(図 4.9)。

また、図 4.8 と図 4.3 の比較から、花崗閃緑岩の分布地域では、砂岩・泥岩の堆積岩の分布地域に比べて、最大加速度が小さい。このことが、前節で見られたように、最大加速度にかかる係数が、

マイナスになった一因であると考えられる。

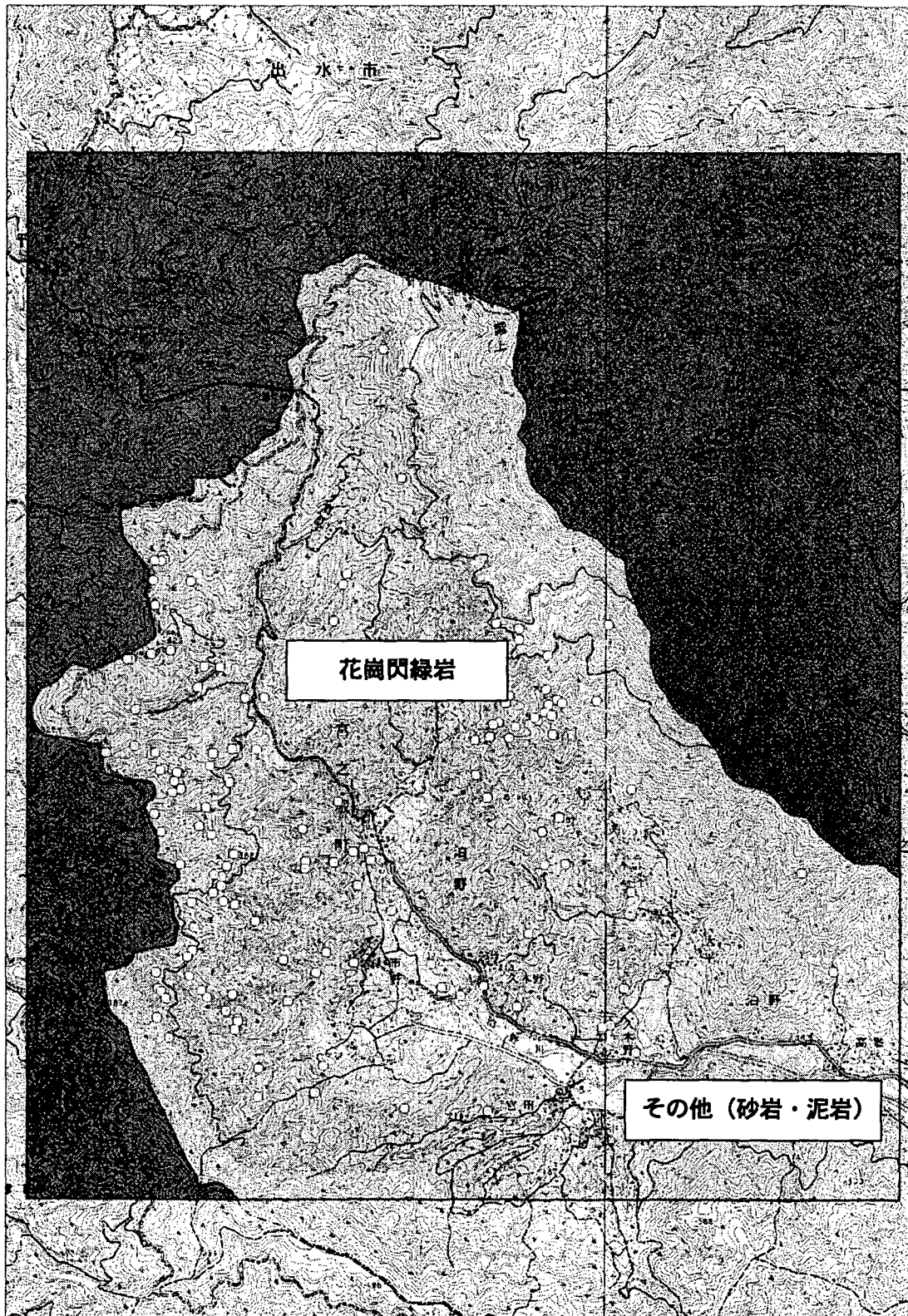


図 4.8 鹿児島県北西部地震の検討地域の地質の分布

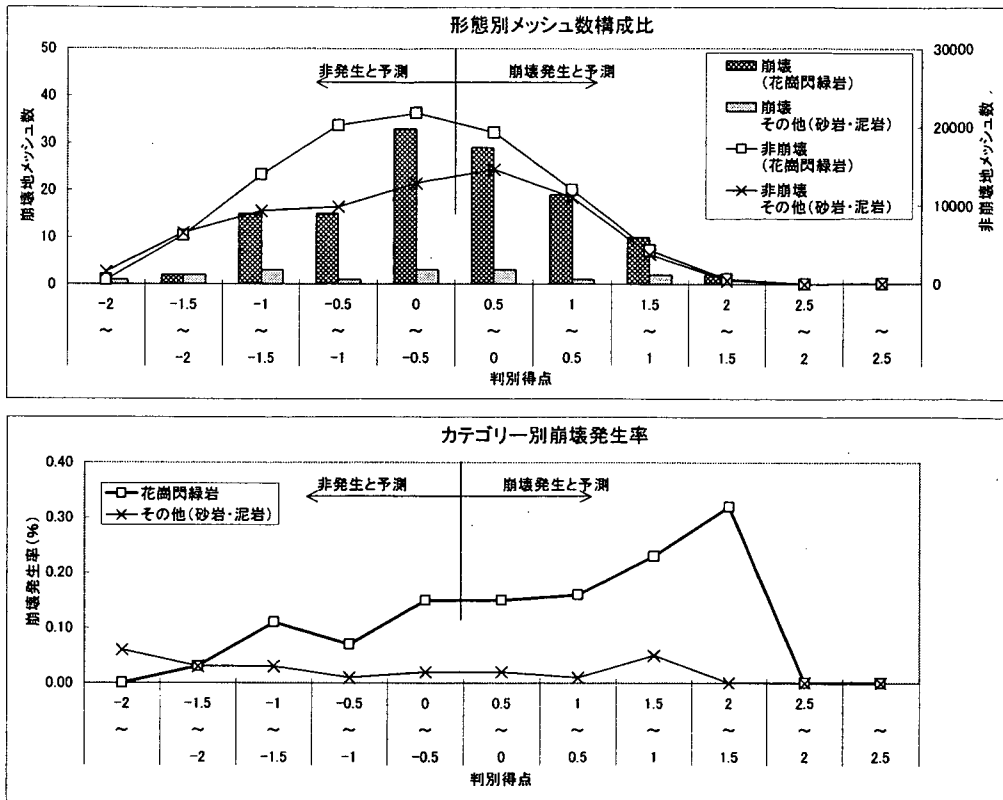


図 4.9 六甲全山式の鹿児島県北西部地震への適用結果:地質別の判別得点と崩壊発生率の関係

4.2.3 神津島地震への適用

(1) 分類正誤率

はじめに、2つの判別式から得られた結果より、分類正誤率を確認した(表 4.5)。表から、六甲全山式を神津島に適用した場合、分類正誤率が 43.3%、また神津島式を適用した場合でも、50.3%程度となった。また、実際に崩壊が起きている箇所についてのみ注目した場合、神津島においては、どちらの式を利用した場合でも、実際の崩壊箇所の 90%以上が崩壊地と予測された。

表4.5 神津島地震における判別分析結果

六甲全山式			神津島式		
		予測	予測		合計
			非崩壊	崩壊	
実際の崩壊	個数	非崩壊	81050	107873	188923
		崩壊	142	1355	1497
		合計	81192	109228	190420
	的中率(%)	非崩壊	42.9	57.1	100
	崩壊	9.5	90.5	100	

分類正誤率 43.3%

		予測	予測		合計
			非崩壊	崩壊	
実際の崩壊	個数	非崩壊	94452	94471	188923
		崩壊	138	1359	1497
		合計	94590	95830	190420
	的中率(%)	非崩壊	50.0	50.0	100
	崩壊	9.2	90.8	100	

分類正誤率 50.3%

(2) 判別分析の係数

次に、六甲全山式と神津島式について、各判別関数係数を比較した(表 4.6)。表から神津島式

では六甲全山式と比較して、判別式に与える地震加速度の寄与率はほぼ同じであるが、斜面勾配はやや寄与率が小さく、平均曲率の寄与率が高い結果が得られた。

表 4.6 線型判別式の比較

Case	標準化された判別関数係数			判別得点式 F=
	勾配	平均曲率 (影響範囲20m)	地震動 最大加速度	
六甲全山式	0.976	-0.117	0.189	$0.075 \times (\text{勾配}) - 8.92 \times (\text{平均曲率}) + 0.006 \times (\text{最大加速度}) - 3.228$
神津島式	0.665	-0.670	0.195	$0.042 \times (\text{勾配}) - 59.187 \times (\text{平均曲率}) + 0.007 \times (\text{最大加速度}) - 3.147$

(3) 判別得点と崩壊発生確率の関係

次に判別得点カテゴリ別の頻度グラフを図 4.10 に示した。2000 年7月の神津島地震においても、判別得点—崩壊発生確率に正の関係を得た。ただし、神津島地震時の崩壊分布データから作成した線形判別式(神津島式)を用いた場合に比べて、六甲全山式を用いた場合は、判別得点の増加による崩壊発生率増加の程度は小さかった。

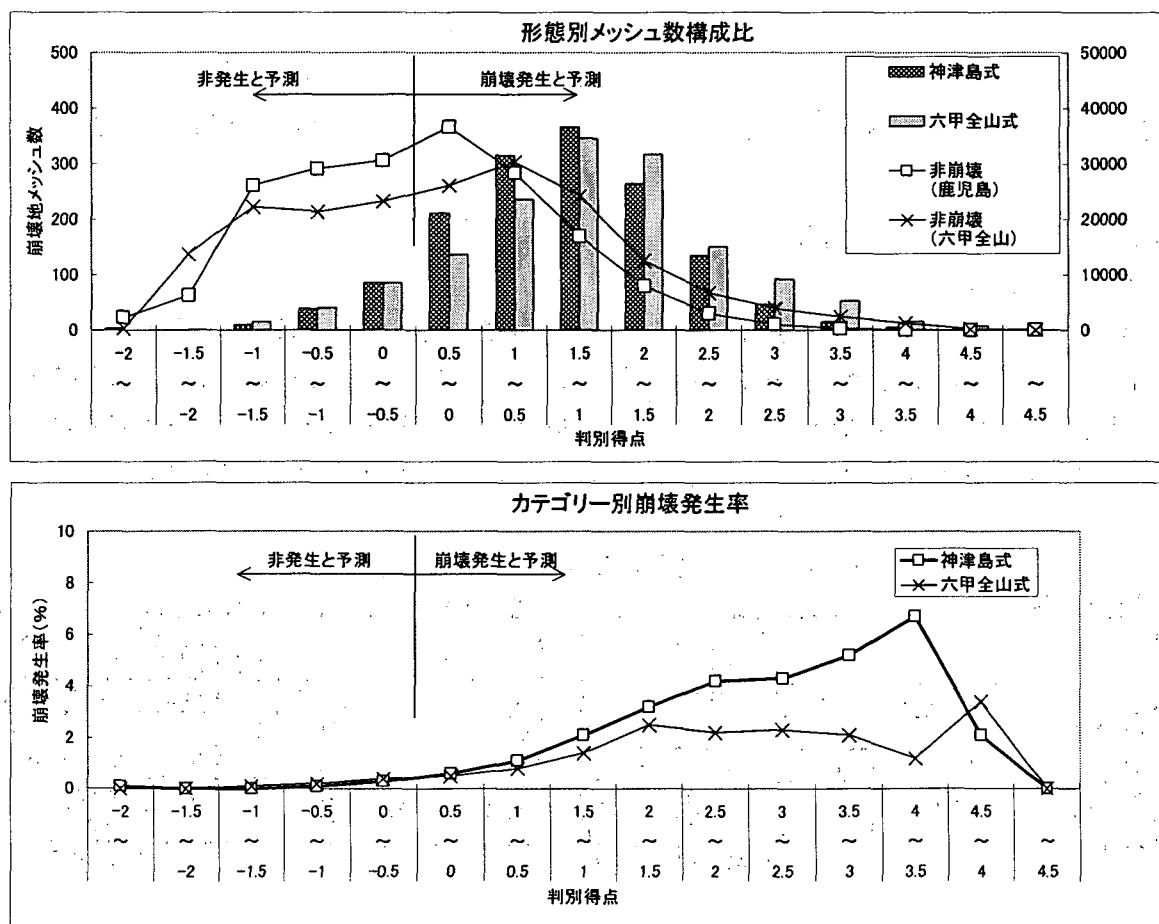


図 4.8 六甲全山式の神津島地震への適用と神津島地震の崩壊実績データに基づく判別分析による判別得点と崩壊発生率の関係

4.3 結論

3章において、兵庫県南部地震を対象に、山腹斜面の地震時崩壊危険度を評価する実務的な手法として提案した線形判別式(六甲全山式)を、鹿児島県北西部地震、神津島地震に適用した結果、地質、地震により判別得点一崩壊発生確率の関係は異なるものの、判別得点の増大にともない崩壊発生確率が増加する傾向が見られた。さらに、同じ地域であっても、地質の違いにより、判別得点一崩壊発生率関係は異なることがわかった。すなわち、地質、気候等の条件が均質と扱える領域では、相対的な斜面の危険度を評価する上で提案した手法は汎用性が高いと考えられる。ただし、多くの崩壊が発生した場合には、既往の崩壊分布データを基に線形判別式を作成した方が、評価手法の精度の点でより一層向上することが神津島の事例からは指摘できる。

5 まとめと今後の課題

本研究ではまず、兵庫県南部地震を対象に、山腹斜面の地震時崩壊危険度を評価する実務的な手法として、勾配、平均曲率、最大加速度を説明変数とした線形判別式を作成した(3章)。この際、地形の凹凸を表す指標としてラプラスアン、地上開度、地下開度、尾根谷度を線形判別式の説明変数についても検討を実施したが、わずかな差ではあったが、平均曲率が説明変数としてもっとも有効であった。また、地震動の大きさを表す指標としては最大速度より、最大加速度の方が、崩壊の発生危険度を評価する上で有効であることがわかった。

その上で、線形判別式を鹿児島県北西部地震、神津島地震に適用した結果、地質および地震により判別得点一崩壊発生確率の関係は異なるものの、判別得点の増大にともない崩壊発生確率が増加する傾向は見られた(4章)。すなわち、気候、地質が均質として扱える地域においては、相対的な斜面の危険度を評価する上で提案した手法は汎用性が高いと考えられる。ただし、多くの崩壊が発生した既往事例がある場合、既往事例を用いることによって評価手法の精度が向上することが神津島の事例からは指摘できた。

今後、より定量的に評価するために、他の地震事例への適用を試み、①地質が判別得点一崩壊発生率関係に及ぼす影響、②地震動の周期等の地震動の特性が判別得点一崩壊発生率関係に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

本研究の遂行に当たっては、アジア航測株式会社 小野田敏氏、高山陶子氏、千葉達朗氏、戸村健太郎氏の各氏に多大な協力を得た。記して謝意を表す。