

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of

National Institute for Land and Infrastructure Management

No.204

November 2004

地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究

内田 太郎
片岡正次郎
岩男 忠明
松尾 修
寺田 秀樹
中野 泰雄
杉浦 信男
小山内信智

A study on methodology for assessing the potential of slope failures during
earthquakes

Taro UCHIDA
Shojiro KATAOKA
Tadaaki IWAO
Osamu MATSUO
Hideki TERADA
Yasuo NAKANO
Nobuo SUGIURA
Nobutomo OSANAI

国土交通省国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究

内田太郎^{*} 片岡正次郎^{**} 岩男忠明^{*3} 松尾 修^{*4} 寺田秀樹^{*5} 中野泰雄^{*6} 杉浦信男^{*7} 小山内信智^{*8}

A study on methodology for assessing the potential of slope failures during earthquakes

Taro UCHIDA^{*}, Shojiro KATAOKA^{**}, Tadaaki IWAO^{*3}, Osamu MATSUO^{*4}, Hideki Terada^{*5}, Yasuo NAKANO^{*6},
Nobuo SUGIURA^{*7}, Nobutomo OSANAI^{*8}

概 要

本研究は、地震による斜面崩壊の危険度を斜面ごとで判定する手法を開発することを目的とし、1995年兵庫県南部地震による斜面崩壊分布に関するデータを解析した。1995年兵庫県南部地震による斜面崩壊分布を基に、斜面勾配、斜面の平均曲率、地震動の最大加速度を説明変数とし、斜面崩壊の相対的な発生危険度を評価する実務上に利用可能となるよう簡易な手法を提案した。さらに、1997年鹿児島県北西部地震、2000年神津島地震に適用し、その汎用性を確認した。

キーワード：地震、斜面崩壊危険度、数値地形情報

Synopsis

To developed a method for assessing the potential of slope failures during earthquakes, we analyzed the slope failure data caused by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. We developed a simple method to map the potential of slope failures during earthquakes using Digital Elevation Model and potential earthquake wave data. In the developed method, slope gradient, mean curvature and peak ground acceleration were used to evaluate the relative potential of slope failures. Also, we examined the applicability of the method to other past earthquakes (1997 Kagoshima-ken Hokuseibu earthquake and 2000 Kouzushima earthquakes). The analyses showed that the developed method is an useful tool for assessing the relative potential of slope failures during earthquakes.

Keywords: Earthquake, Potential of slope failure, Digital Elevation Model

^{*} 危機管理技術研究センター砂防研究室 Erosion and Sediment Control Division Research Center for Disaster Risk Management
^{**} 危機管理技術研究センター地震防災研究室主任研究官 Earthquake Disaster Prevention Division Research Center for Disaster Risk Management
^{*3} 四国地方整備局四国山地砂防事務所調査課長 Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Shikoku Regional Development Bureau (前砂防研究室)
^{*4} 独立法人土木研究所 耐震研究グループ長 Earthquake Disaster Prevention Research Group, Public Works Research Institute (前 危機管理技術研究センター地震災害研究官)
^{*5} 国土交通省砂防部保全課保全調整官 Sabo Department, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (前 砂防研究室室長)
^{*6} 中部地方整備局河川部長 Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Chubu Regional Development Bureau (前 危機管理技術研究センター長)
^{*7} 危機管理技術研究センター長 Director, Research Center for Disaster Risk Management
^{*8} 危機管理技術研究センター砂防研究室室長 Head, Erosion and Sediment Control Division Research Center for Disaster Risk Management

目次

1. はじめに	1
2. 既往文献の整理分析	3
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	10
4. 地震時崩壊危険度判定手法の汎用性の検討	
5. まとめと今後の課題	55
資料	56
資料1 地形量に関する素因データの作成	
資料2 最大速度、最大加速度の算出方法	
資料3 凹凸の表現方法に関する検討:尾根と谷の区分	
資料4 凹凸の表現方法に関する検討(2):縦断方向と横断方向の凹凸	
資料5 地質の影響の検討	
資料6 崩壊形態の差異が判別分析結果に及ぼす影響	
資料7 崩壊規模のばらつきが判別分析結果に及ぼす影響	
資料8 判別関数の関数形の検討	



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。

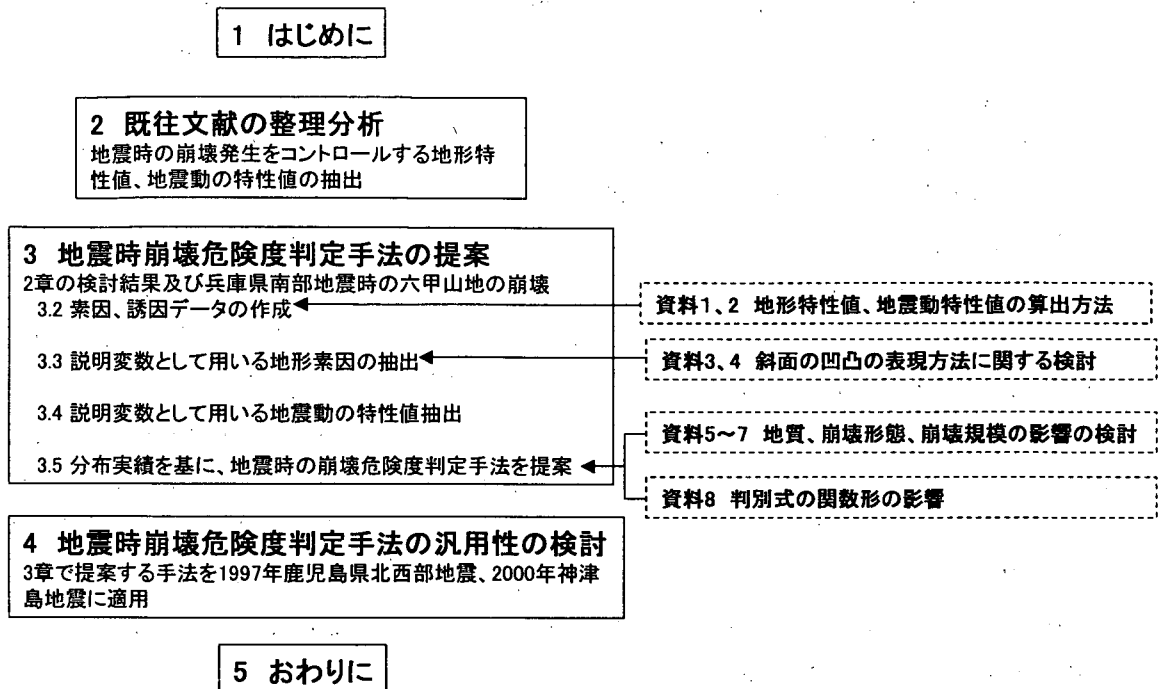


図 1.1 本資料の構成

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。

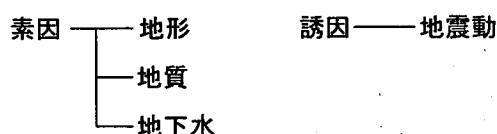


図 2.1 地震時の崩壊発生に影響を及ぼす要因

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. 48No1, 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, Vol.49, 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	西田頼郎、小橋澄治、水山高久	砂防学会誌, Vol.49, 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, Vol.34, No.3, 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変化	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値被災率と地震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。	○
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)。

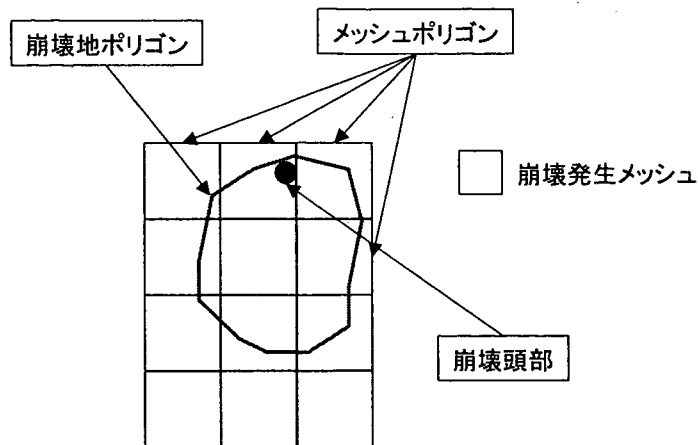


図 3.2 崩壊地メッシュデータ概念図(10mメッシュ)

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。

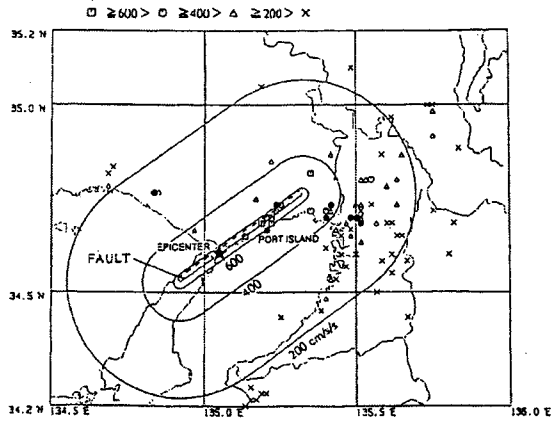


Fig. 1. Map showing the locations of the source fault and observation sites. Symbols of square, circle, triangle, and cross indicate observation sites of peak horizontal acceleration greater than 600, from 600 to 400, from 400 to 200, and less than 200 cm/s/s respectively. Solid circles indicate the 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)

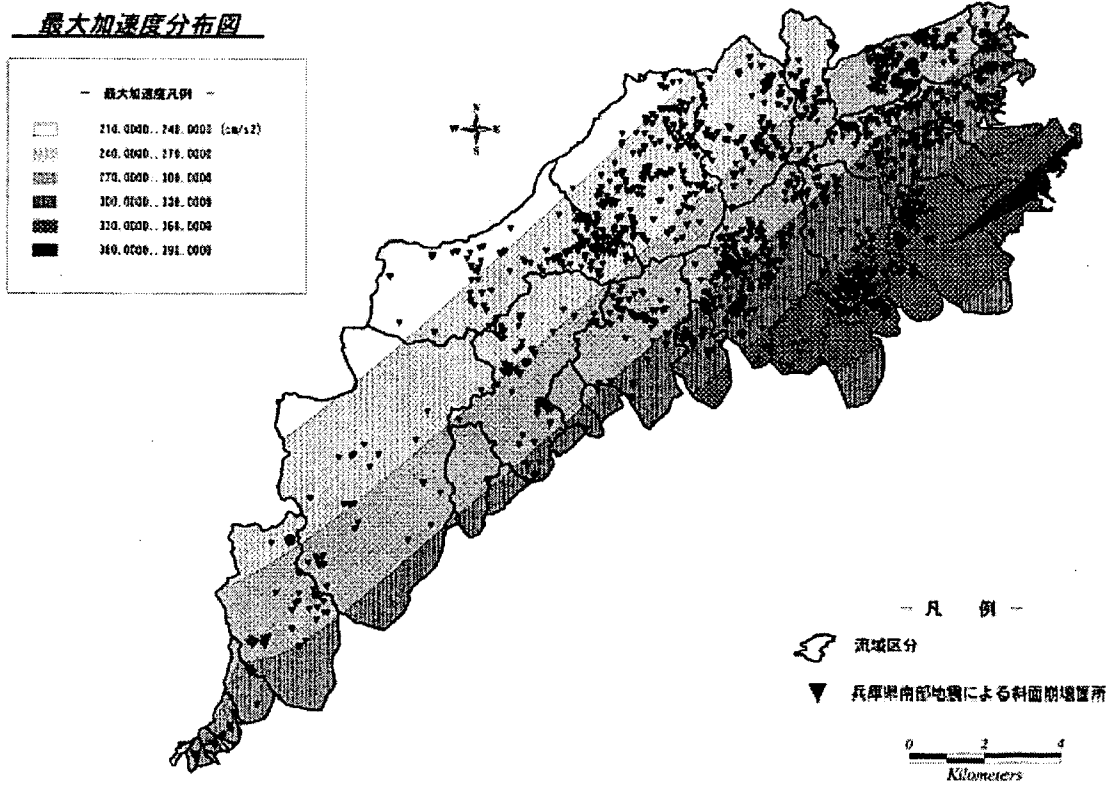


図 3.4 最大加速度の算出結果

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

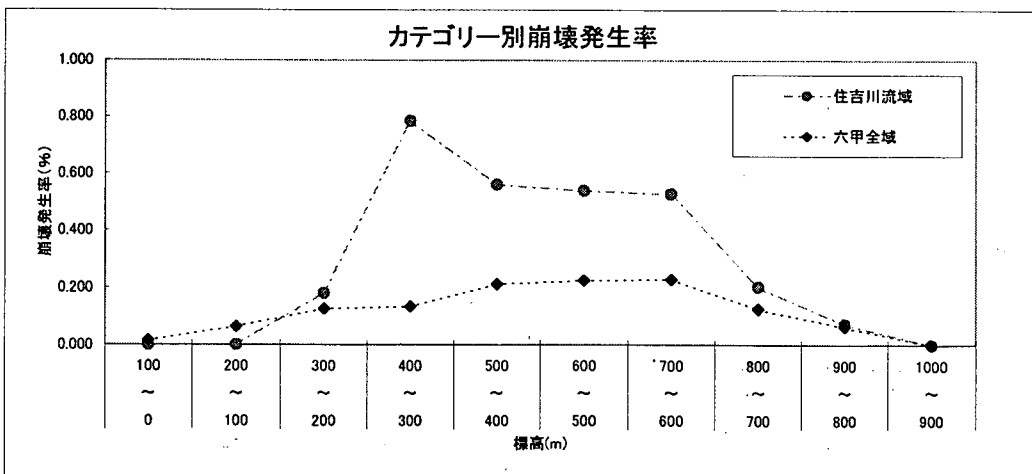
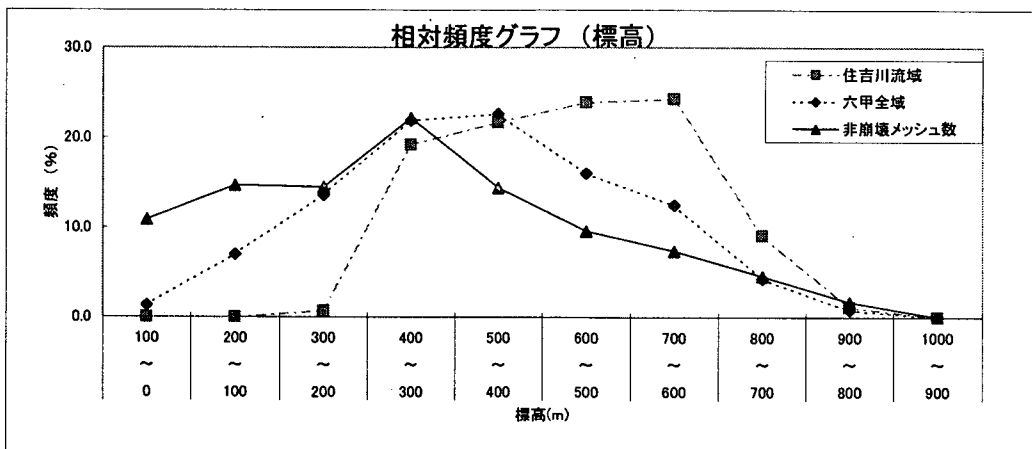


図 3.5 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(標高)

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

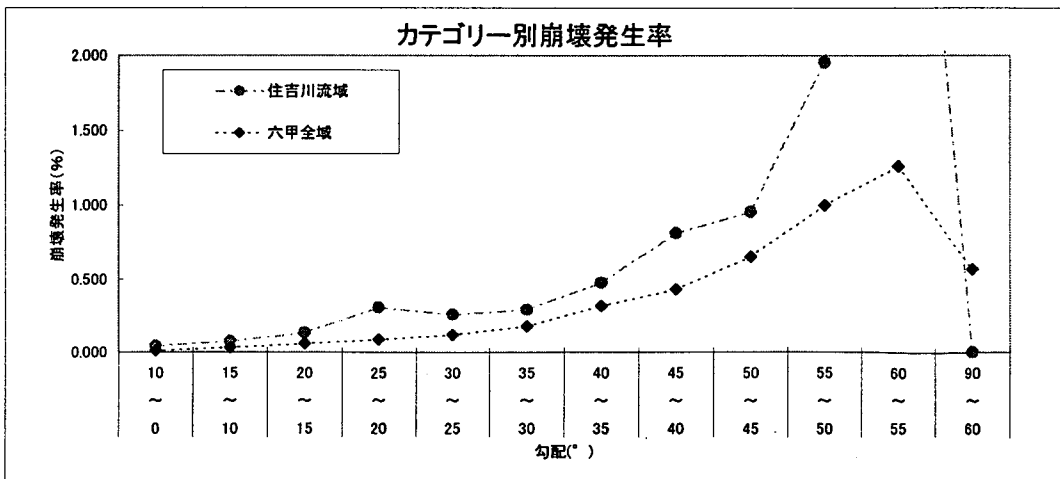
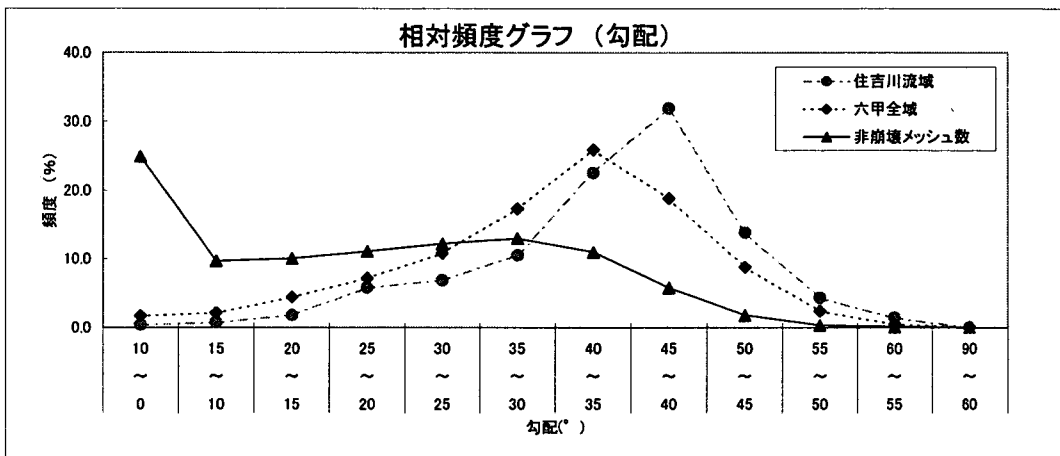


図 3.6 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(勾配)

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

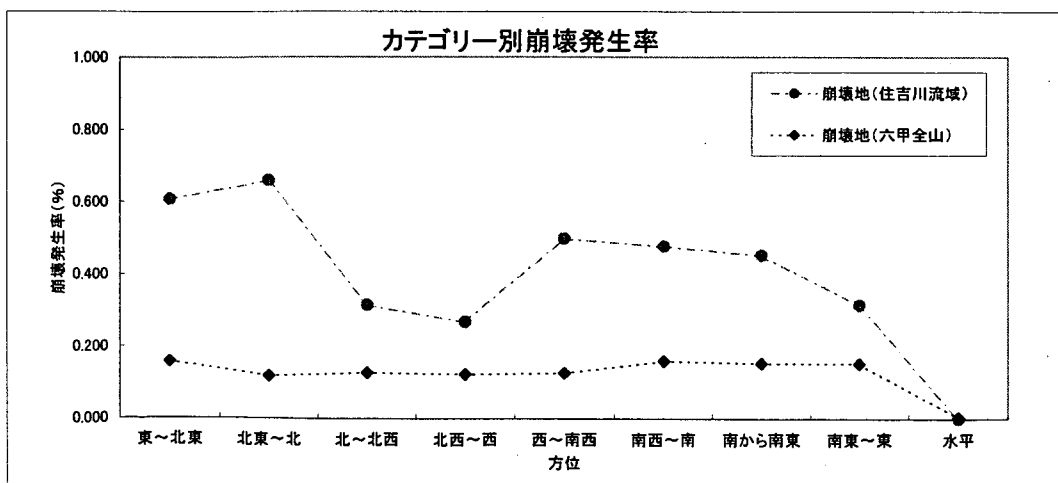
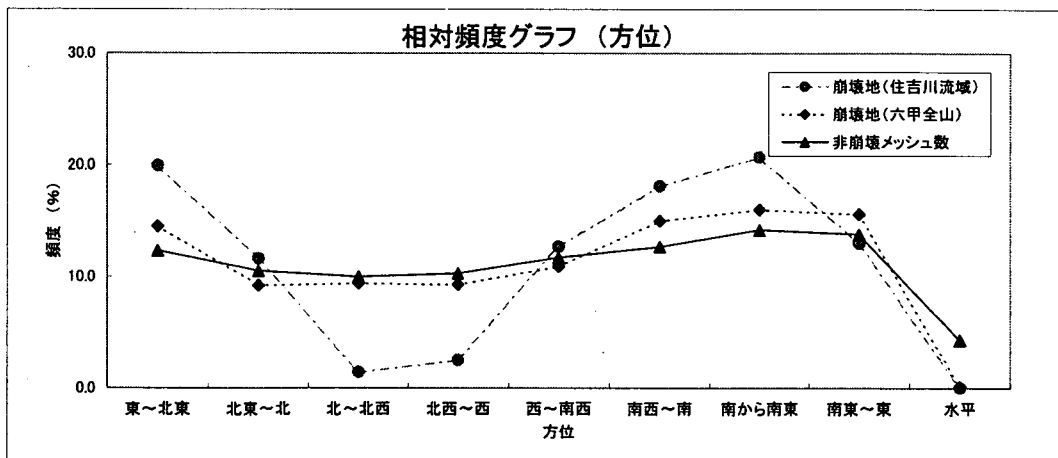


図 3.7 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(方位)

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	

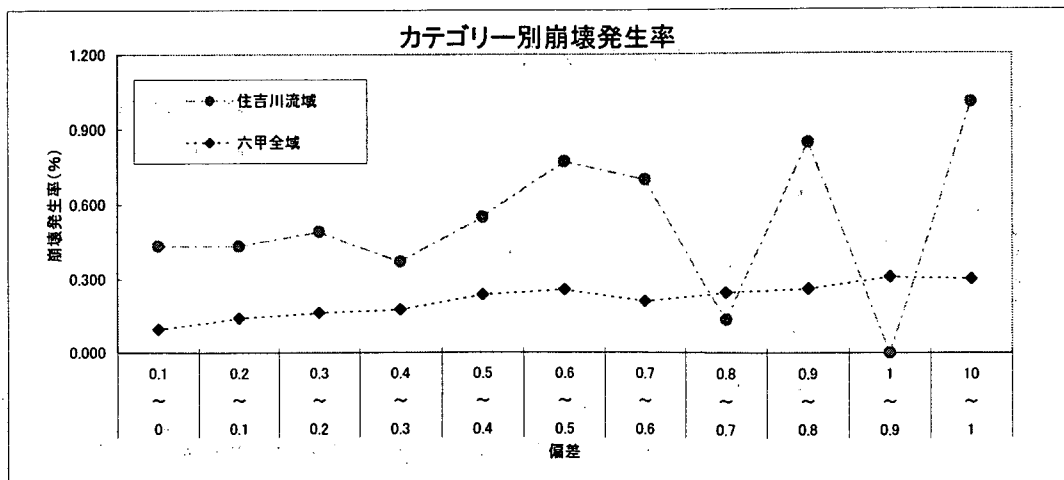
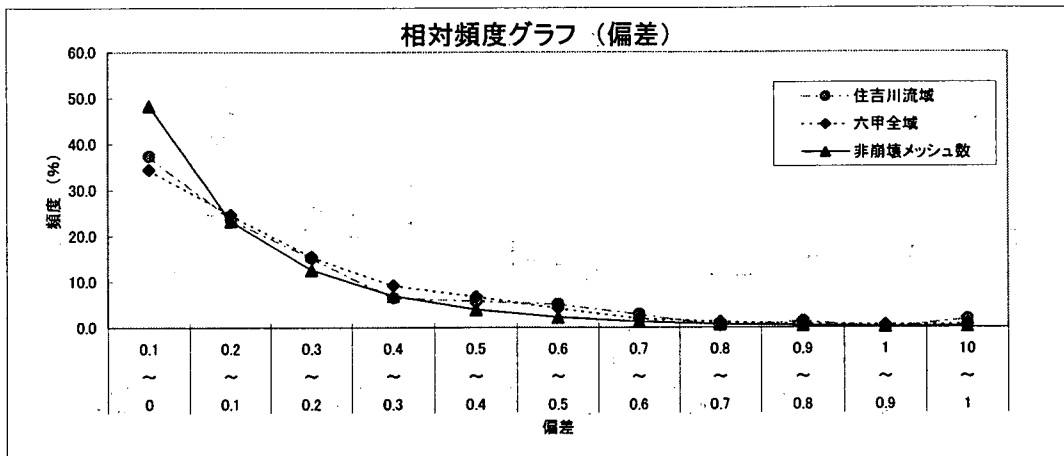


図 3.8 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(偏差)

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	
	(%)	(%)	(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 ~ -0.2	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

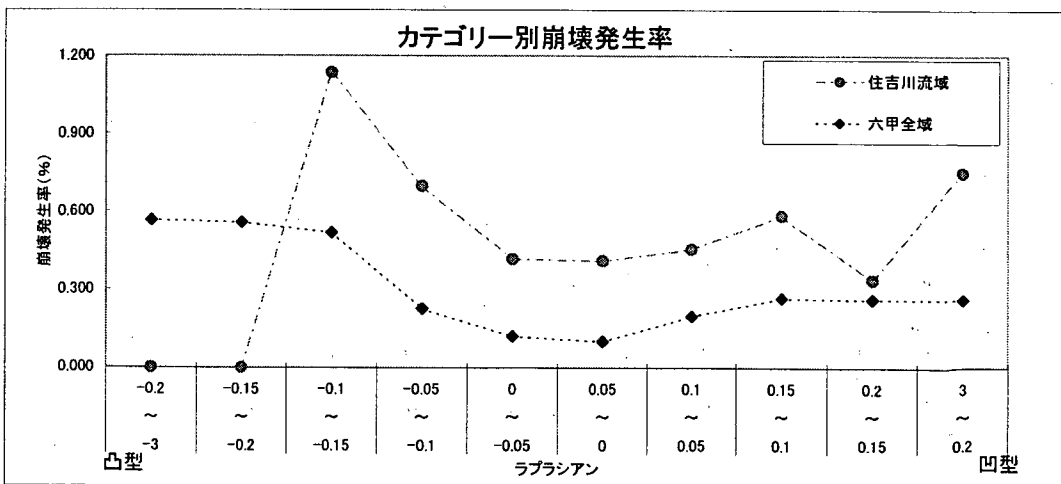
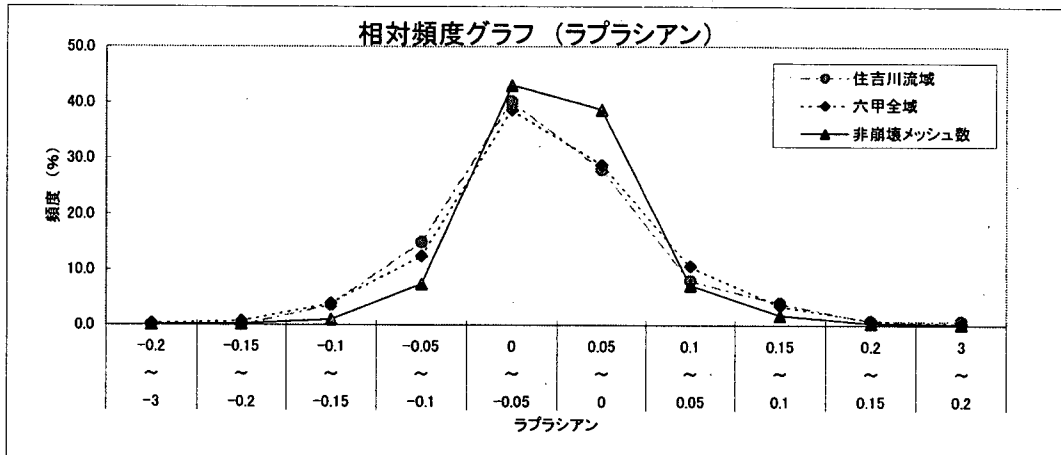


図 3.9 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(ラプラシアン)

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

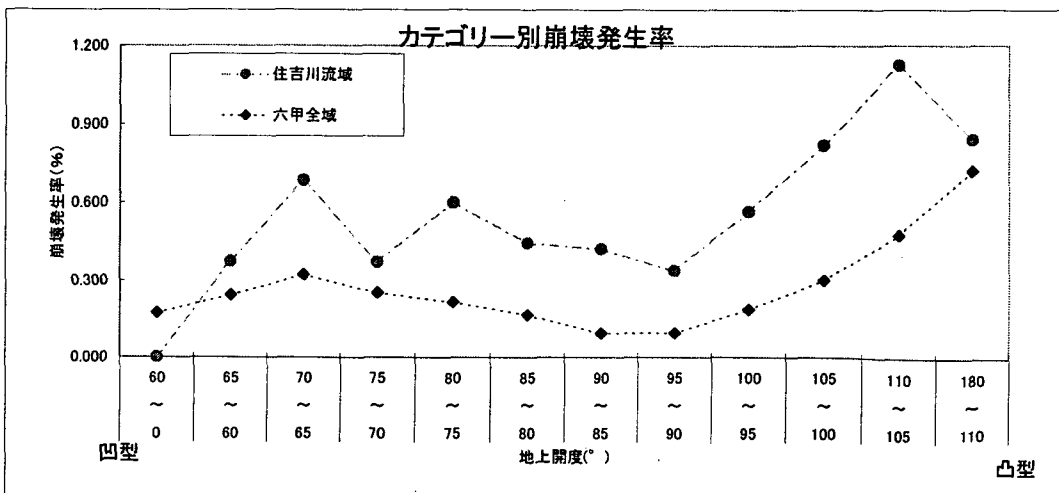
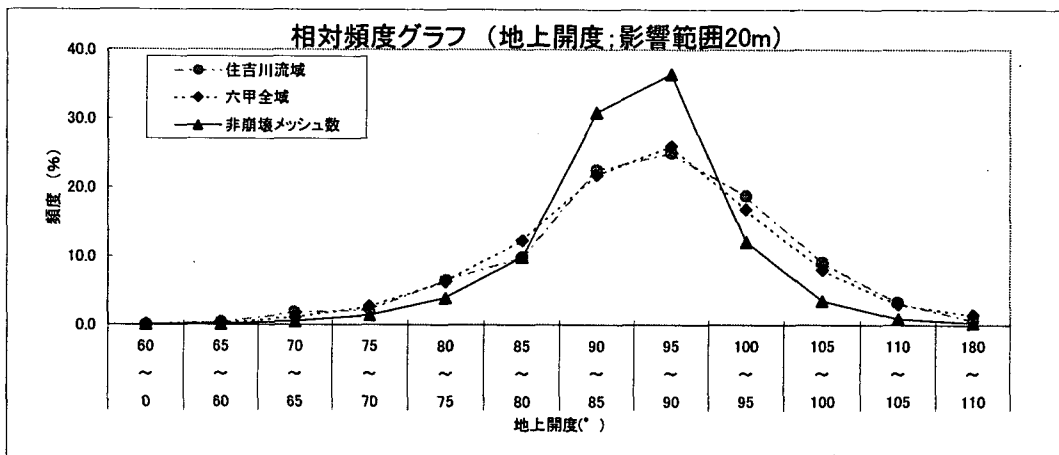


図 3.10 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(地上開度 20m)

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

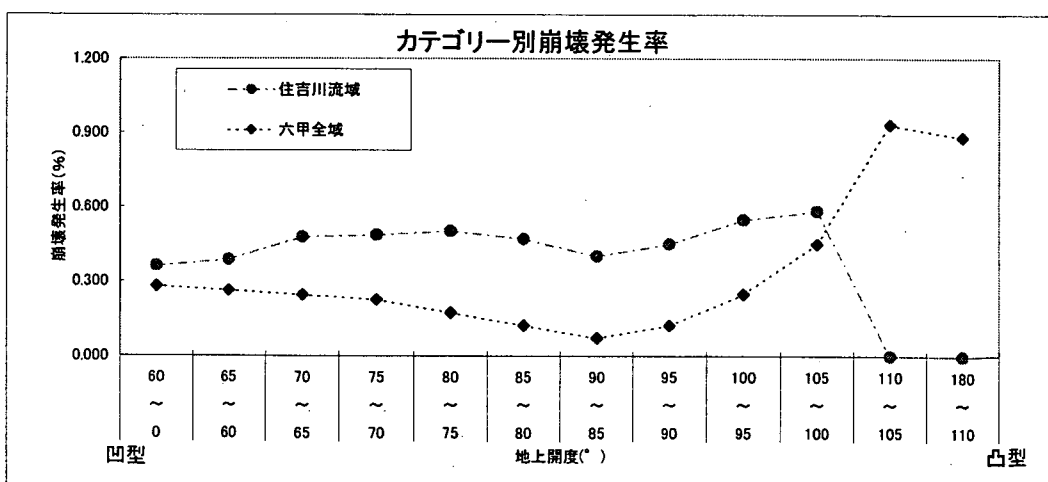
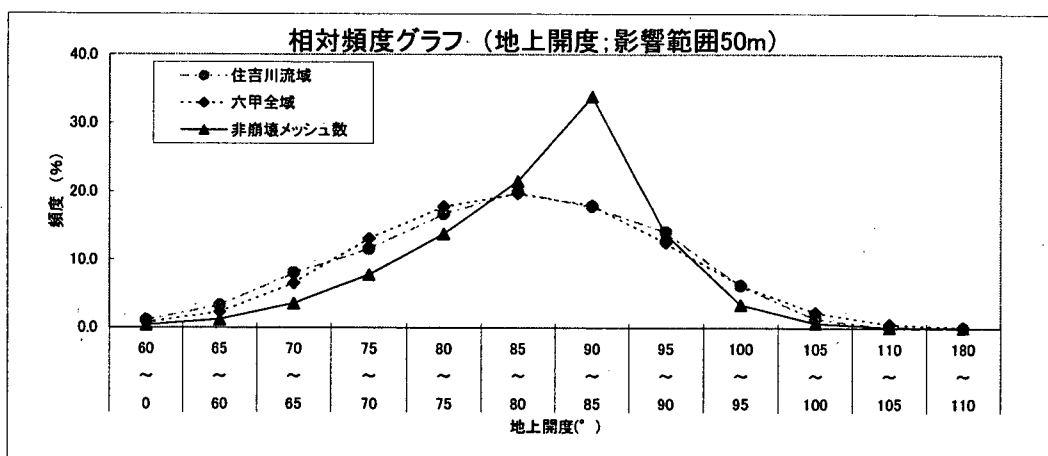


図 3.11 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(地上開度:50m)

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

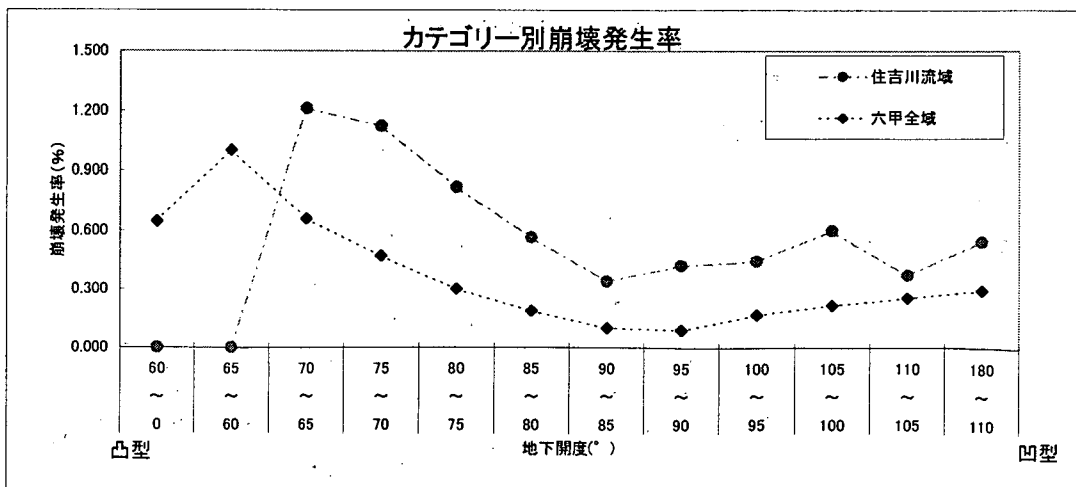
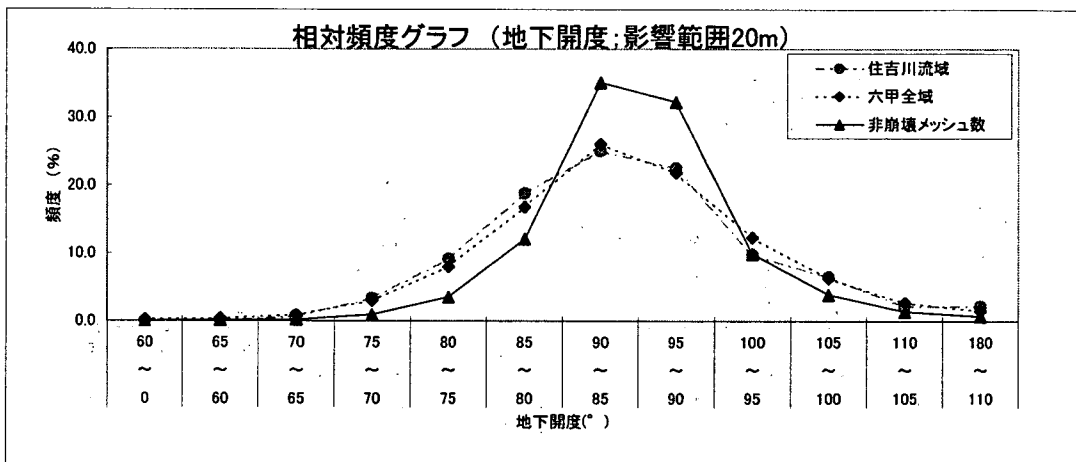


図 3.12 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(地下開度 20m)

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

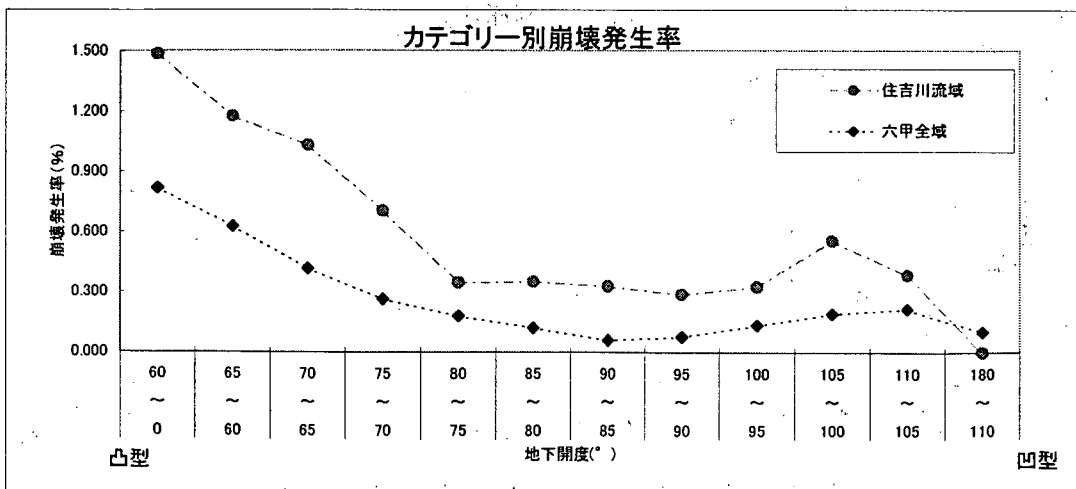
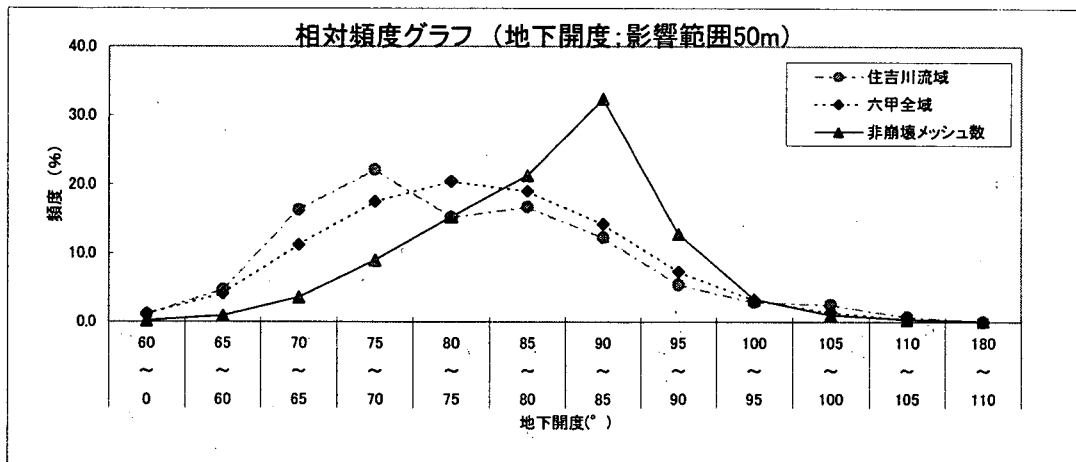


図 3.13 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(地下開度 50m)

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

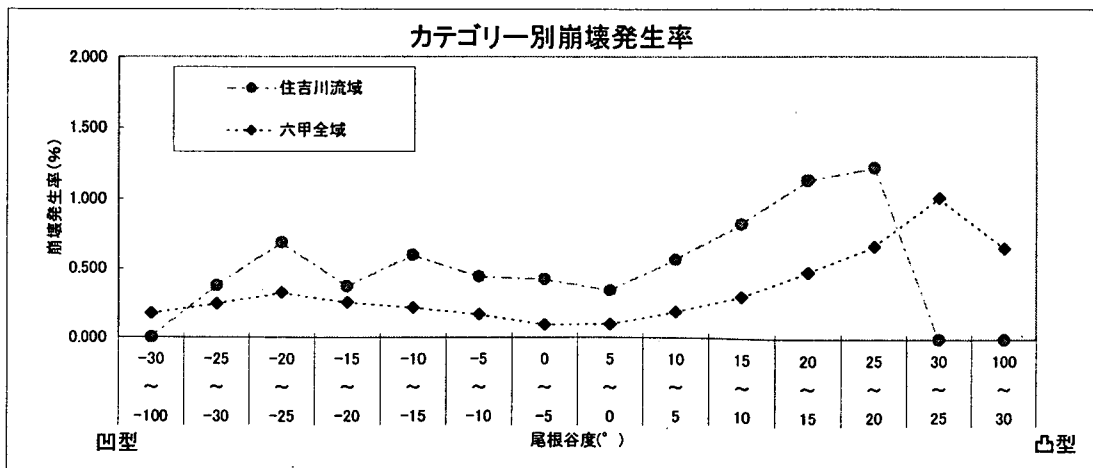
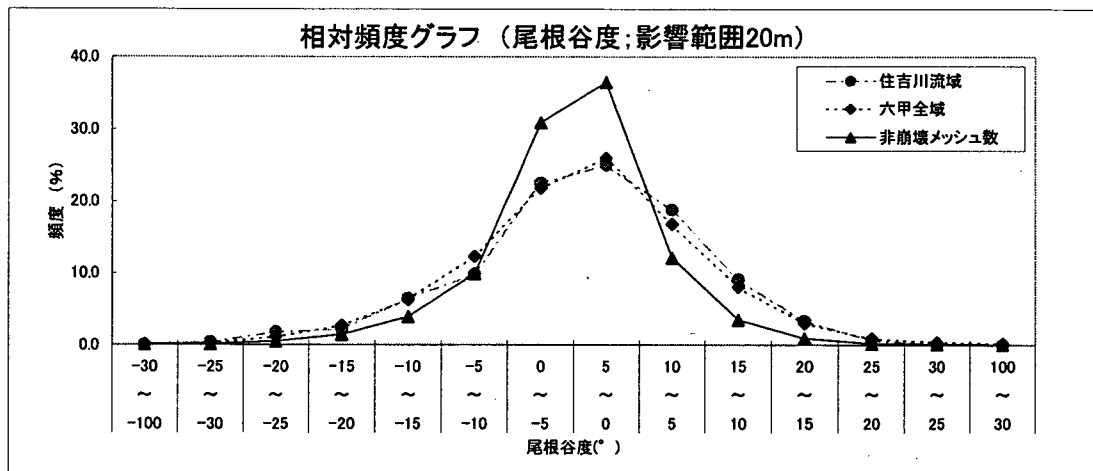


図 3.14 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(尾根谷度 20m)

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

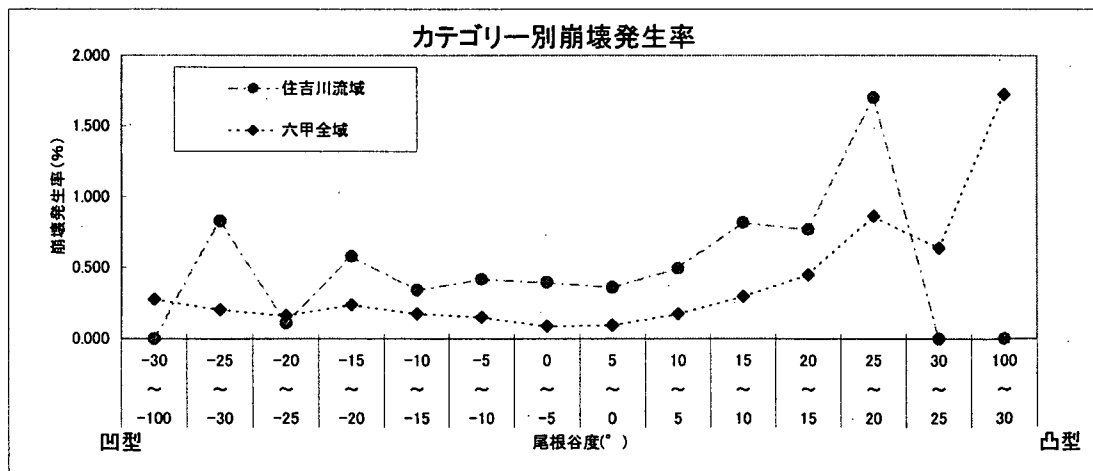
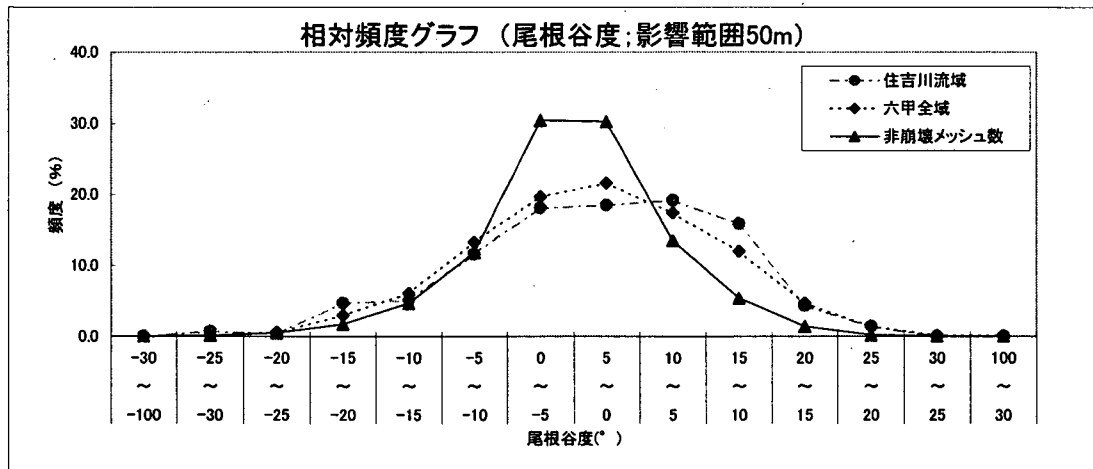


図 3.15 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(尾根谷度 50m)

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

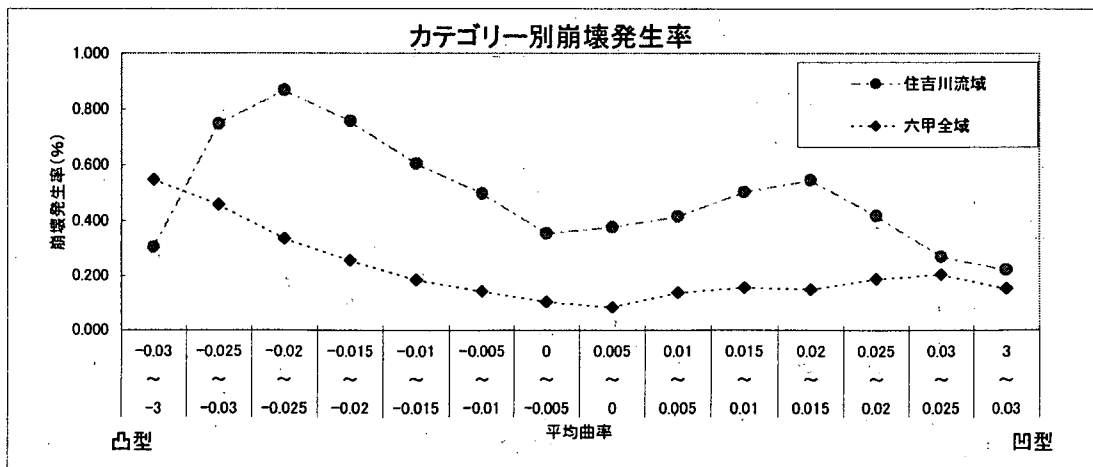
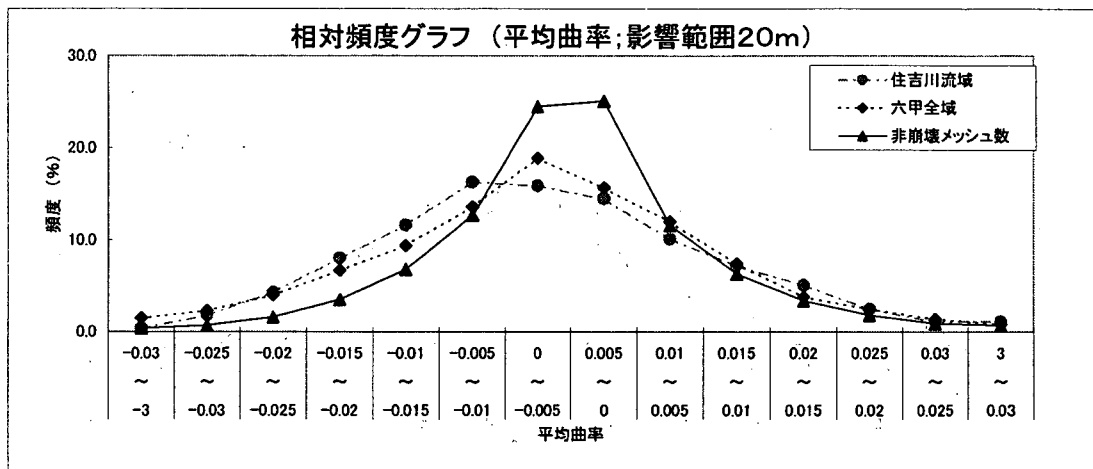


図 3.16 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(平均曲率 20m)

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 (メッシュ) (%)		六甲全域 (メッシュ) (%)		住吉川流域 (メッシュ) (%)		六甲全域 (メッシュ) (%)		住吉川 (%)	全域 (%)			
	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

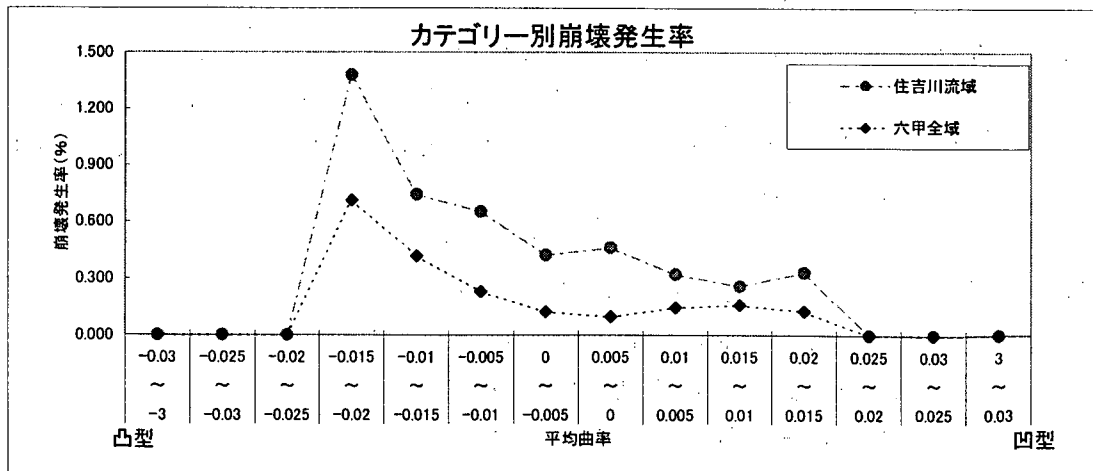
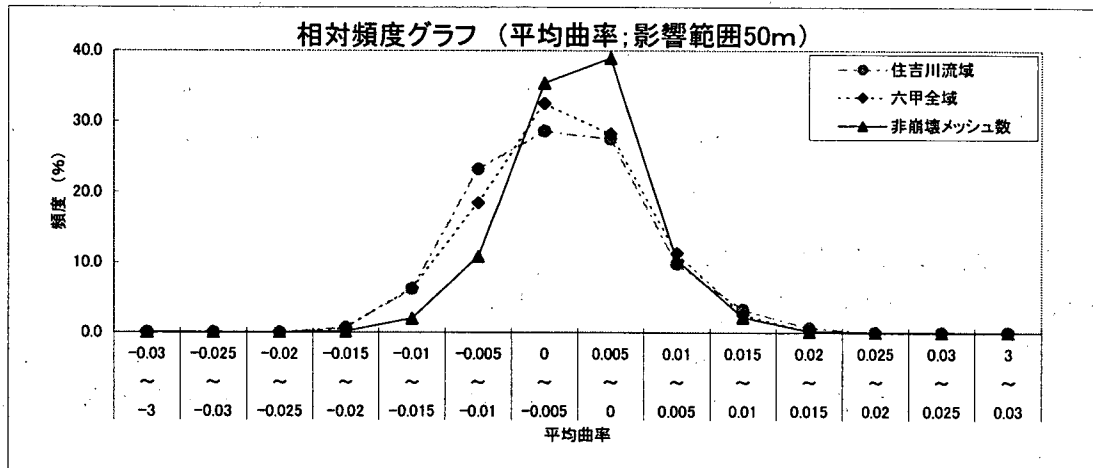


図 3.17 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(平均曲率 50m)

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いえる(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みられなかったが、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

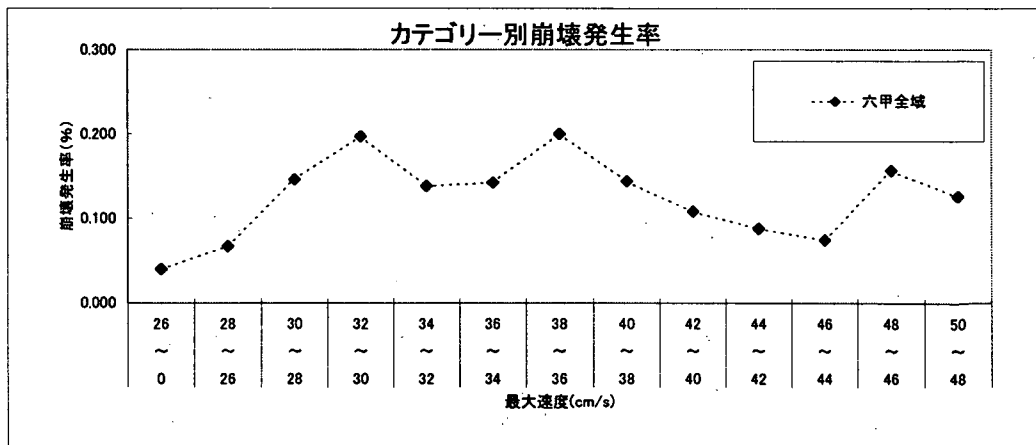
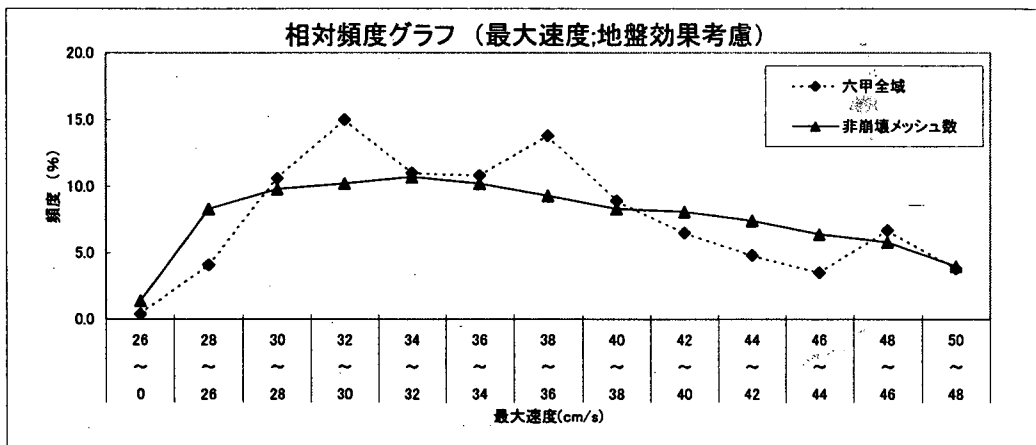


図 3.18 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(最大速度)

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	0.139
6	36 ~ 38	15,836	170,592	33	12.0	266	11.3	15,803	26.5	170,326	9.7	0.208	0.156
7	38 ~ 40	18,130	155,544	105	38.0	295	12.5	18,025	30.2	155,249	8.9	0.579	0.190
8	40 ~ 42	16,450	142,985	73	26.4	265	11.3	16,377	27.4	142,720	8.2	0.444	0.185
9	42 ~ 44	8,086	135,069	63	22.8	198	8.4	8,023	13.4	134,871	7.7	0.779	0.147
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	1.833

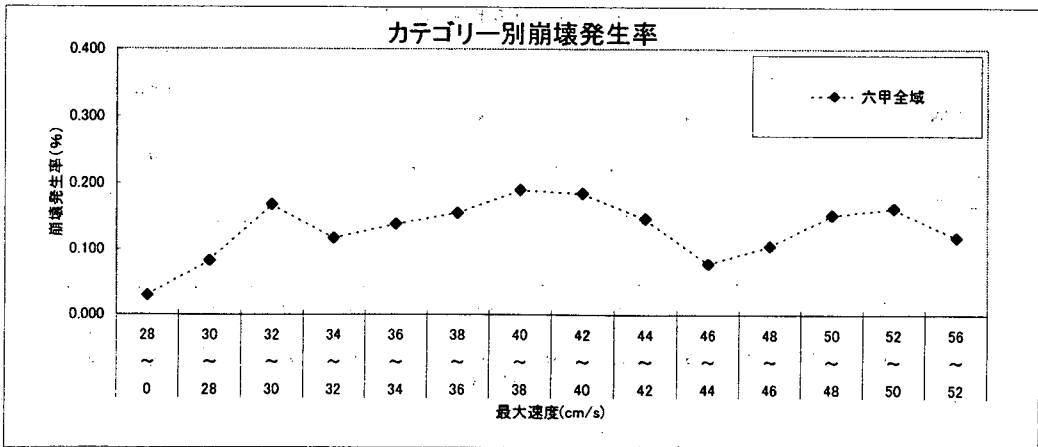
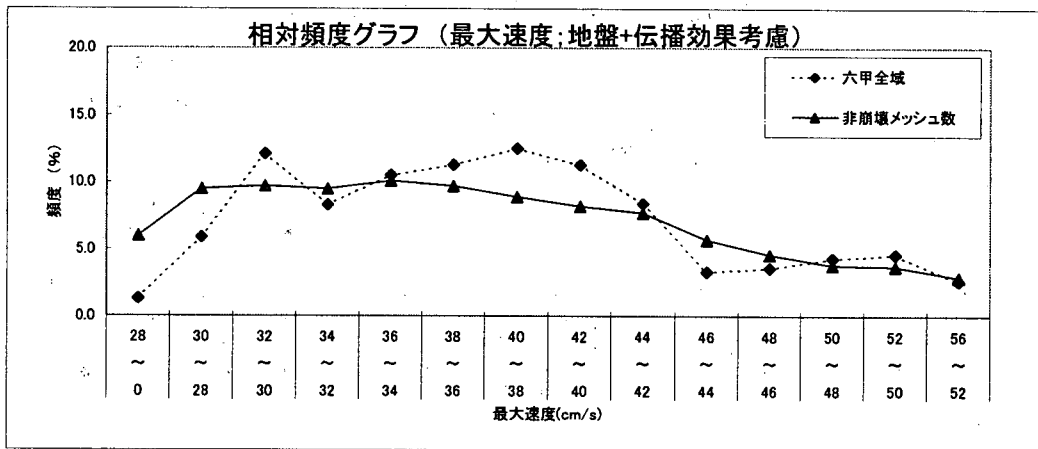


図 3.19 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(破壊伝搬効果を考慮した最大速度)

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

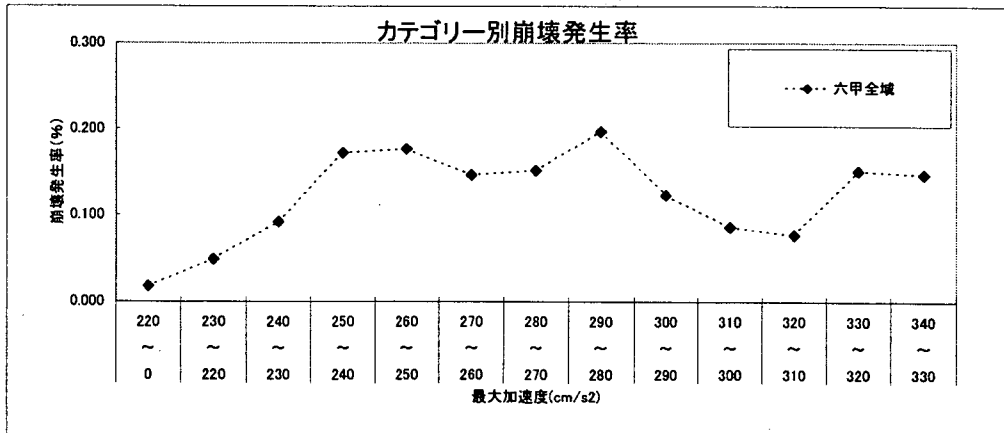
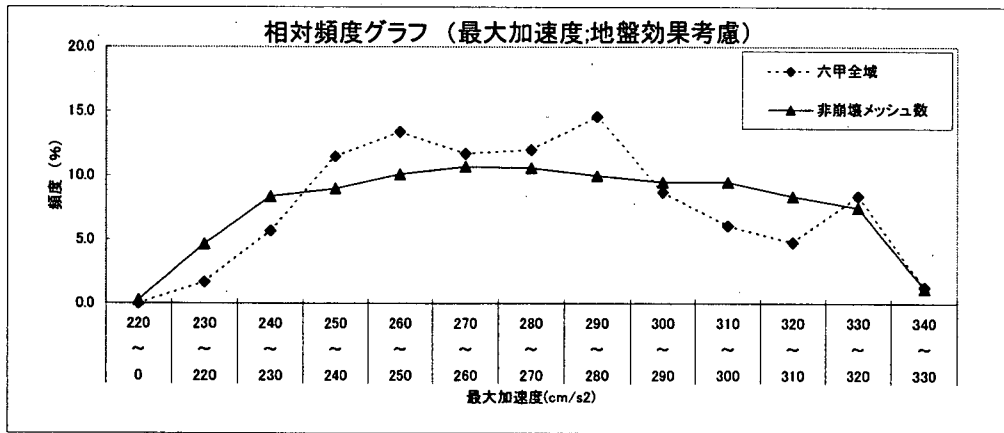


図 3.20 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(最大加速度)

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

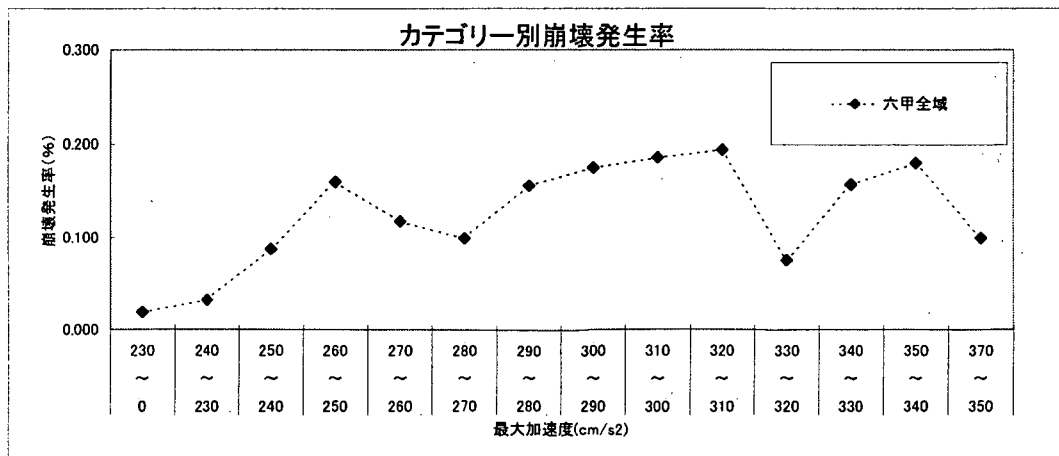
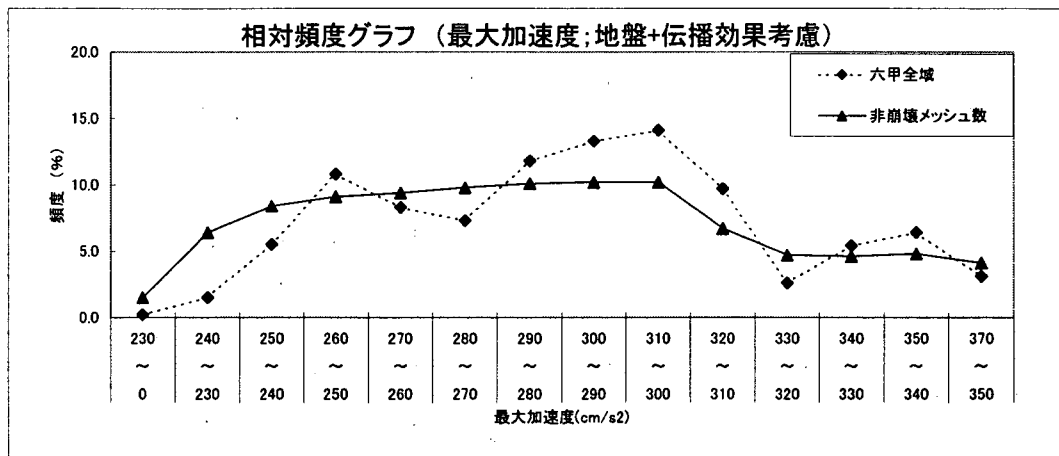


図 3.21 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(伝播効果を考慮した最大加速度)

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

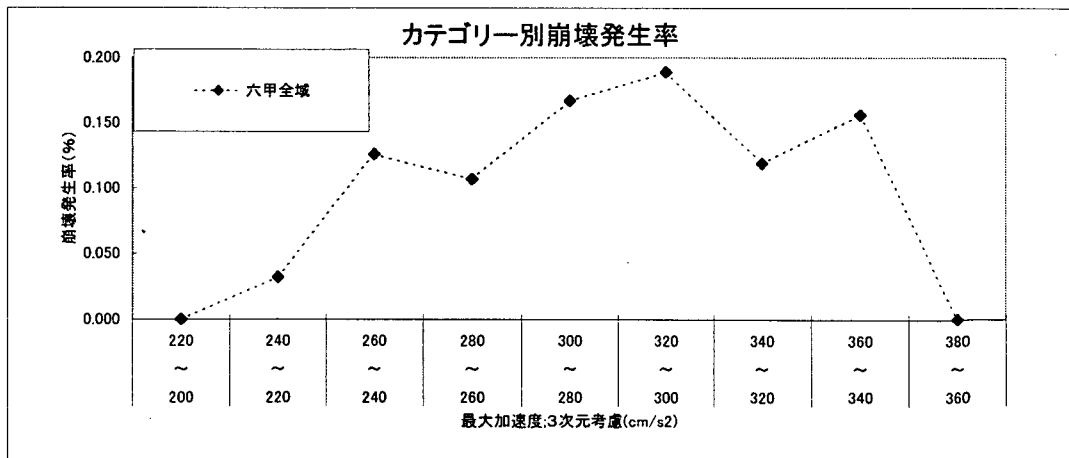
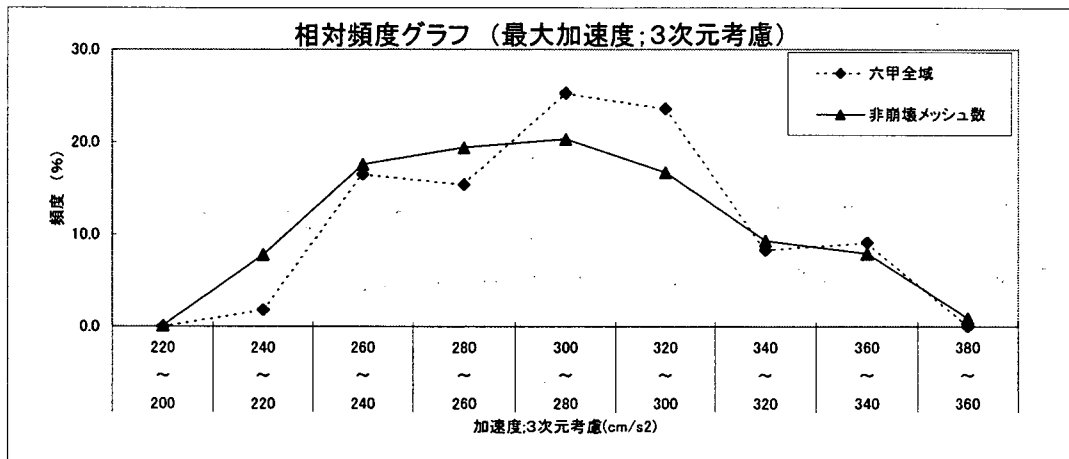


図 3.22 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(3次元,伝播効果を考慮した最大加速度)

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° ~				全数			
	全メッシュ数 (箇所)	崩壊メッシュ数 (箇所)	非崩壊メッシュ数 (箇所)	崩壊率 (%)	全メッシュ数 (箇所)	崩壊メッシュ数 (箇所)	非崩壊メッシュ数 (箇所)	崩壊率 (%)	全メッシュ数 (箇所)	崩壊メッシュ数 (箇所)	非崩壊メッシュ数 (箇所)	崩壊率 (%)	全メッシュ数 (箇所)	崩壊メッシュ数 (箇所)	非崩壊メッシュ数 (箇所)	崩壊率 (%)
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

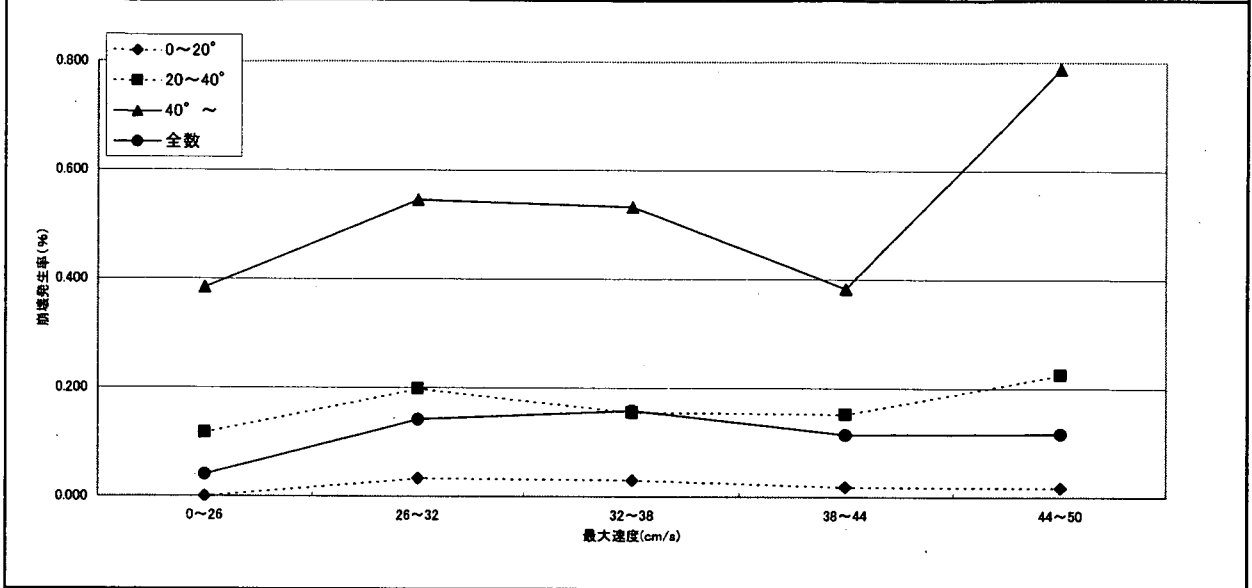


図 3.23 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(最大速度)

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

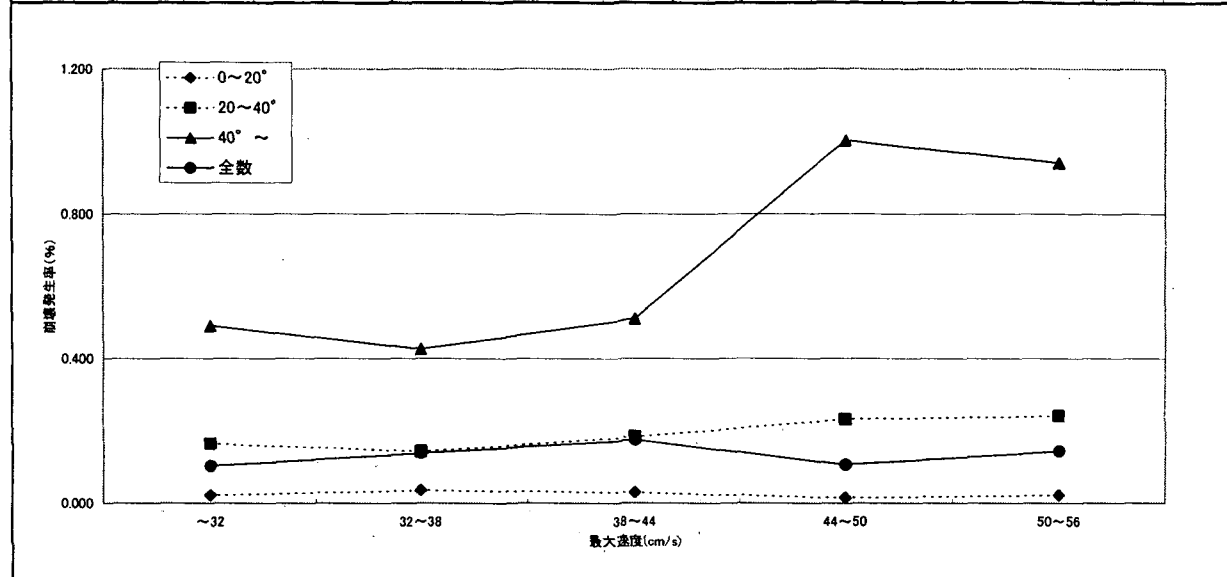


図 3.24 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(破壊伝搬効果を考慮した最大速度)

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 (箇所)	崩壊メッシュ数 (箇所)	非崩壊メッシュ数 (箇所)	崩壊率 (%)	全メッシュ数 (箇所)	崩壊メッシュ数 (箇所)	非崩壊メッシュ数 (箇所)	崩壊率 (%)	全メッシュ数 (箇所)	崩壊メッシュ数 (箇所)	非崩壊メッシュ数 (箇所)	崩壊率 (%)	全メッシュ数 (箇所)	崩壊メッシュ数 (箇所)	非崩壊メッシュ数 (箇所)	崩壊率 (%)
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

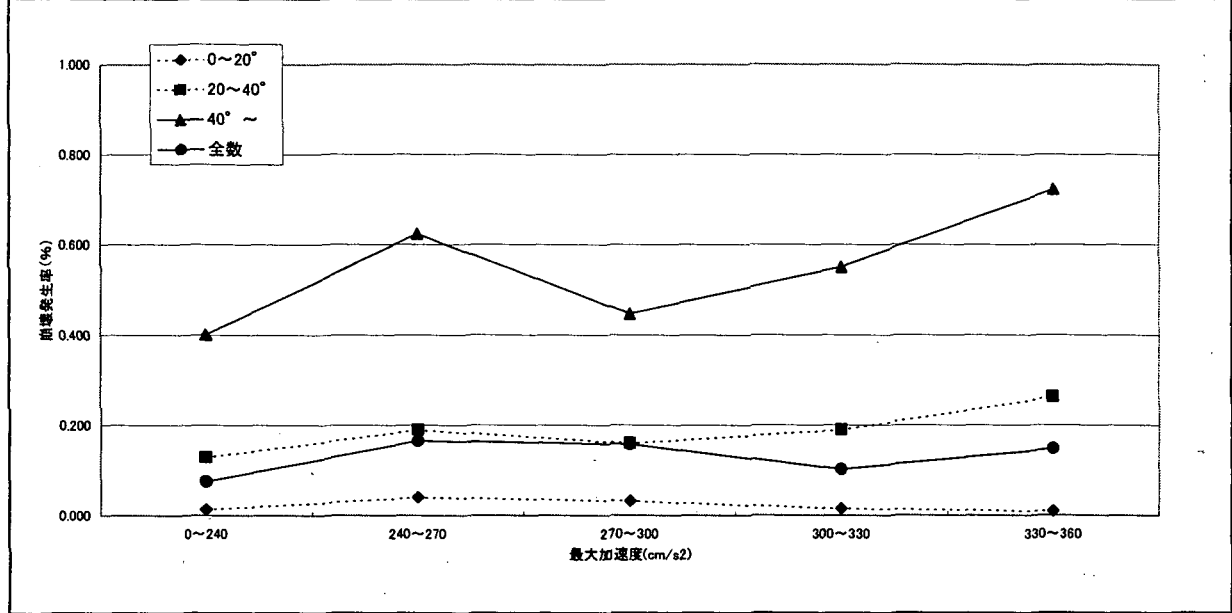


図 3.25 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(最大加速度)

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

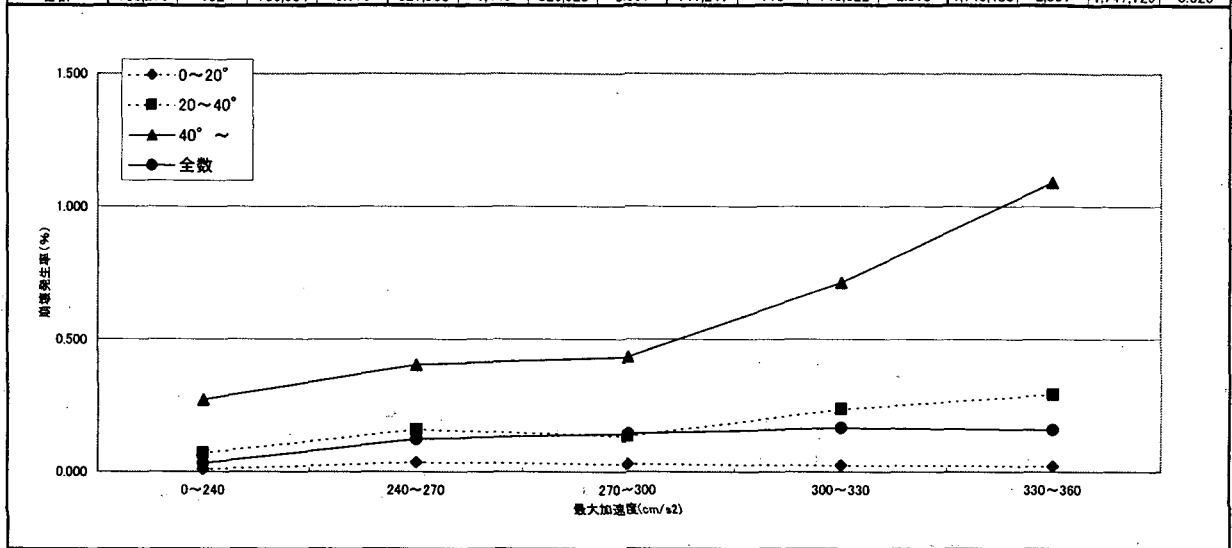


図 3.26 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(破壊伝搬効果を考慮した最大加速度)

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

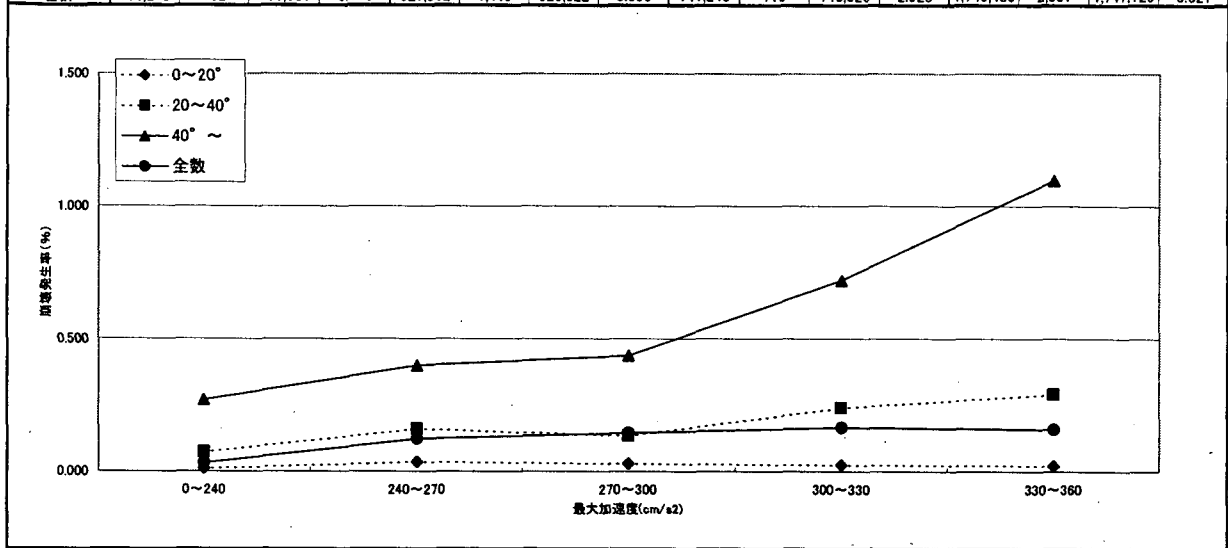


図 3.27 勾配を考慮した階級別ヒストグラムと崩壊発生率(破壊伝搬効果+3次元距離+最大加速度)

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

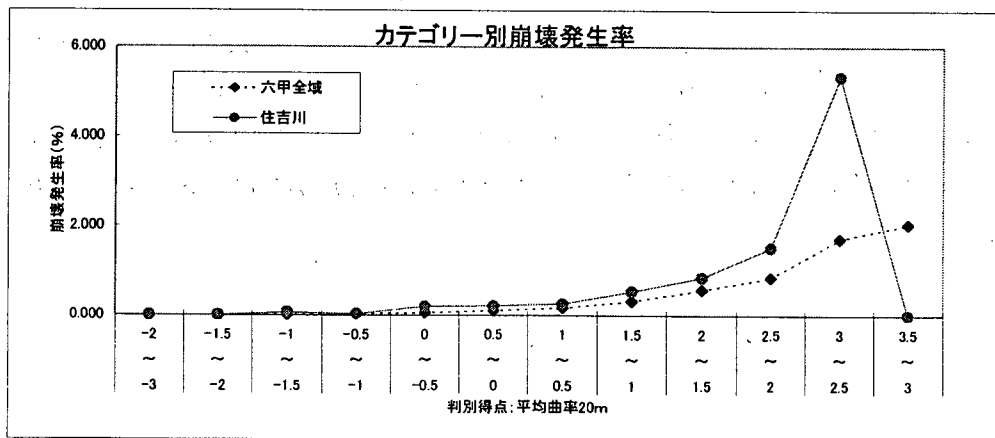
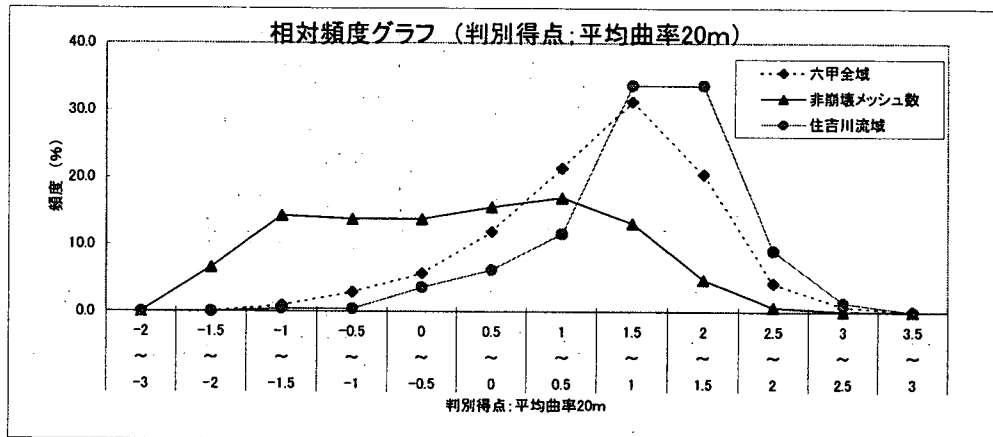


図 3.28 判別得点別ヒストグラムと崩壊発生率(平均曲率 20m)

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。

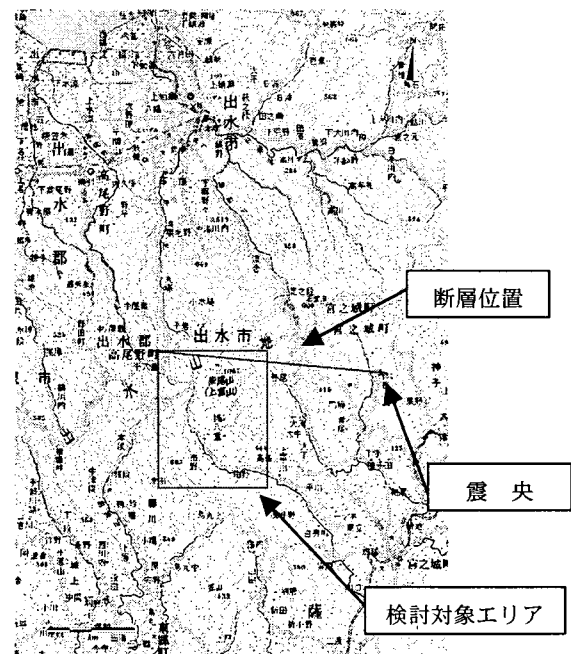


図4.1 鹿児島県北西部地震(1997年3月)の検討対象位置図

(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。

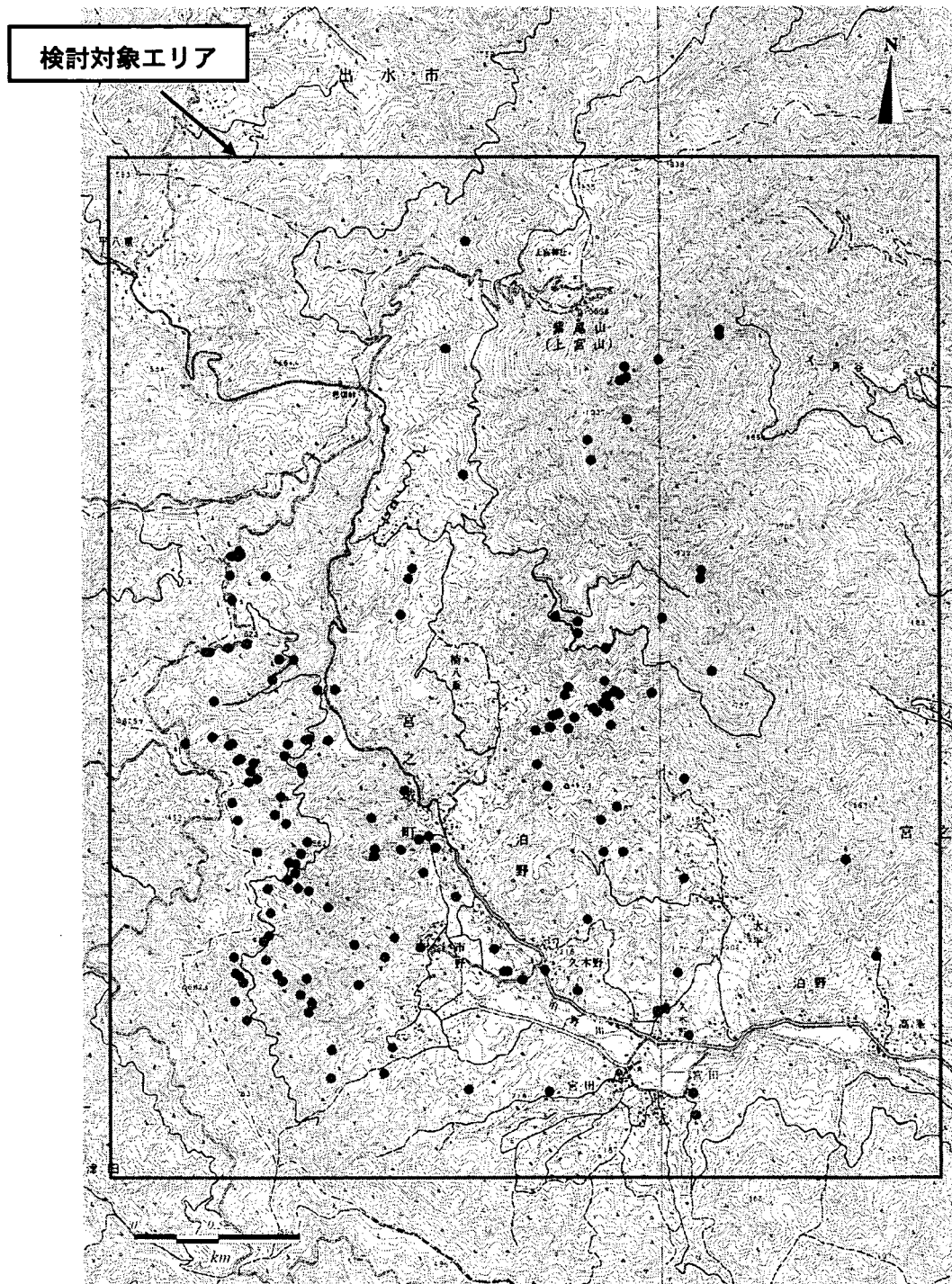


図 4.2 鹿児島県北西部地震(1997年3月)による崩壊地点(丸印)位置図

(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/ccephone.html>)。なお、検討対象は神津島全域とした

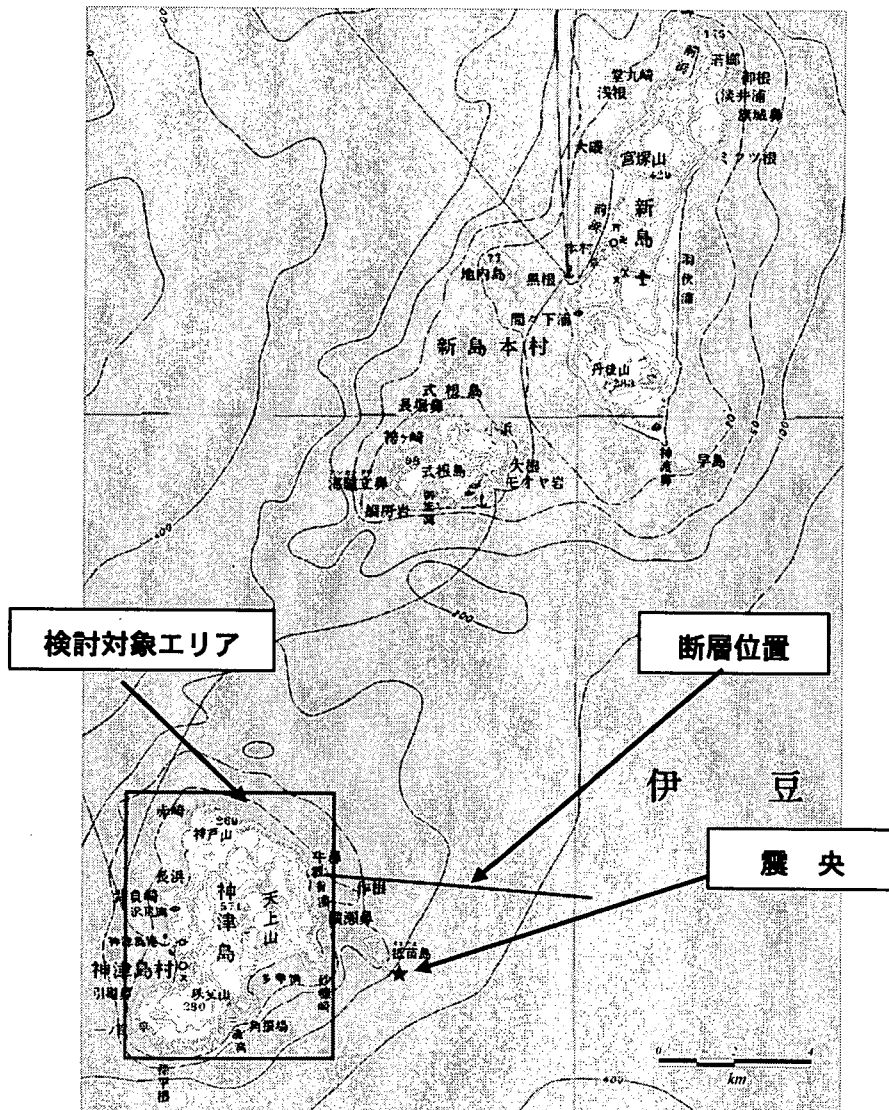


図 4.4 神津島地震(2000年7月)の検討対象位置図

(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)

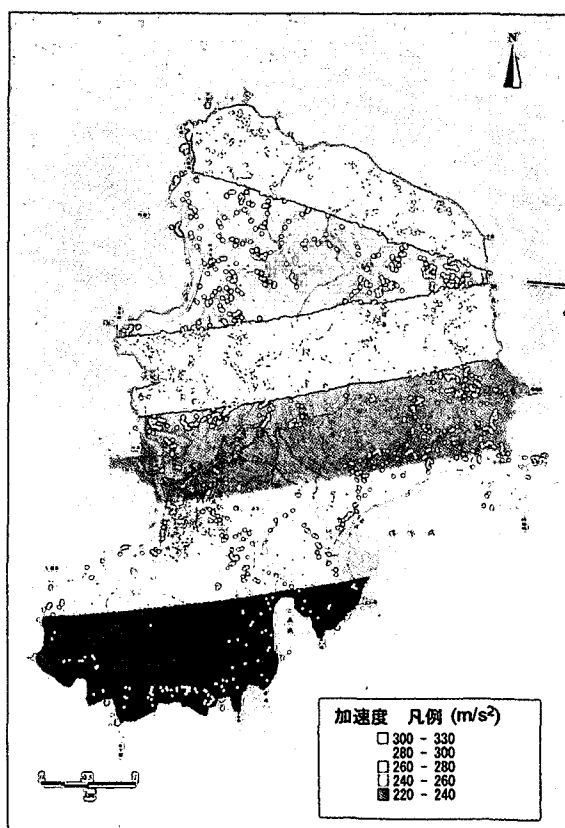


図 4.6 神津島地震(2000年7月)による最大加速度分布図

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。

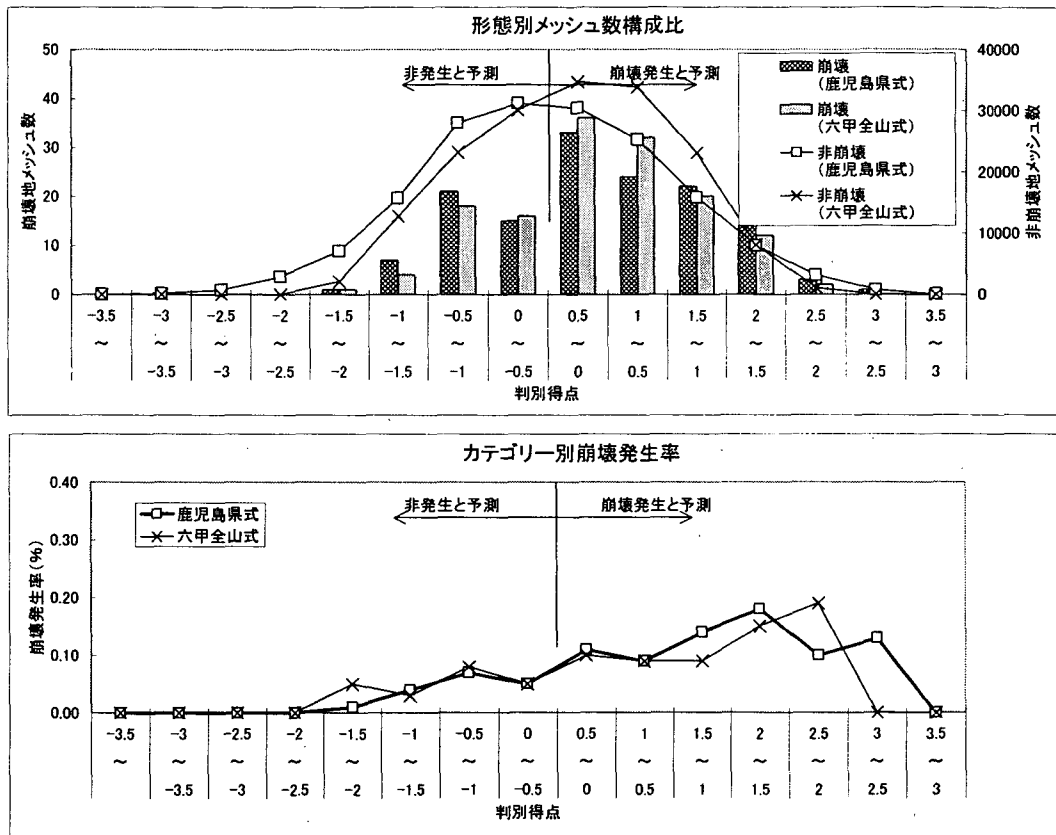


図 4.7 六甲全山式の鹿児島県北西部地震への適用と鹿児島県北西部地震の崩壊実績データに基づく判別分析による判別得点と崩壊発生率の関係

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。

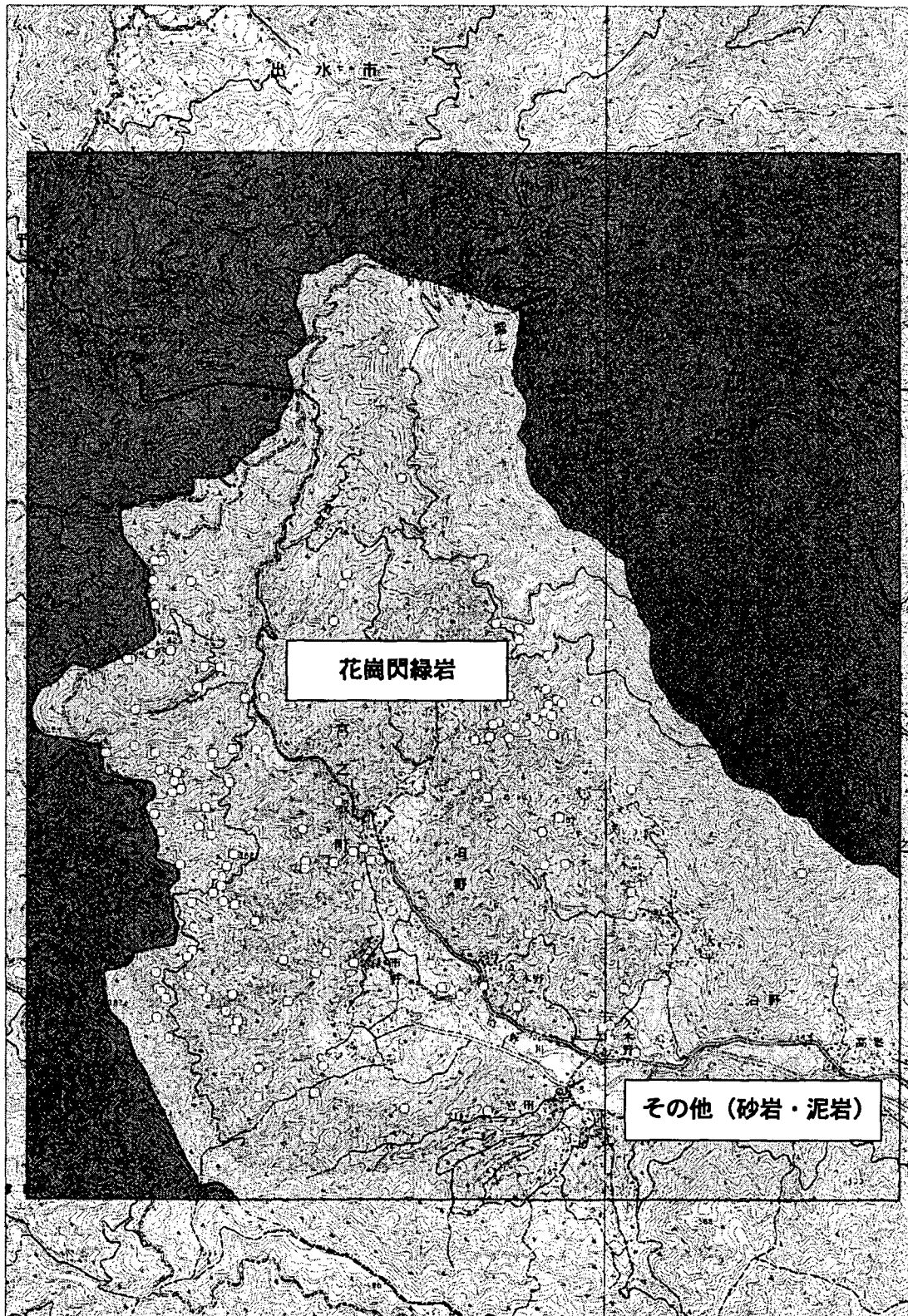


図 4.8 鹿児島県北西部地震の検討地域の地質の分布

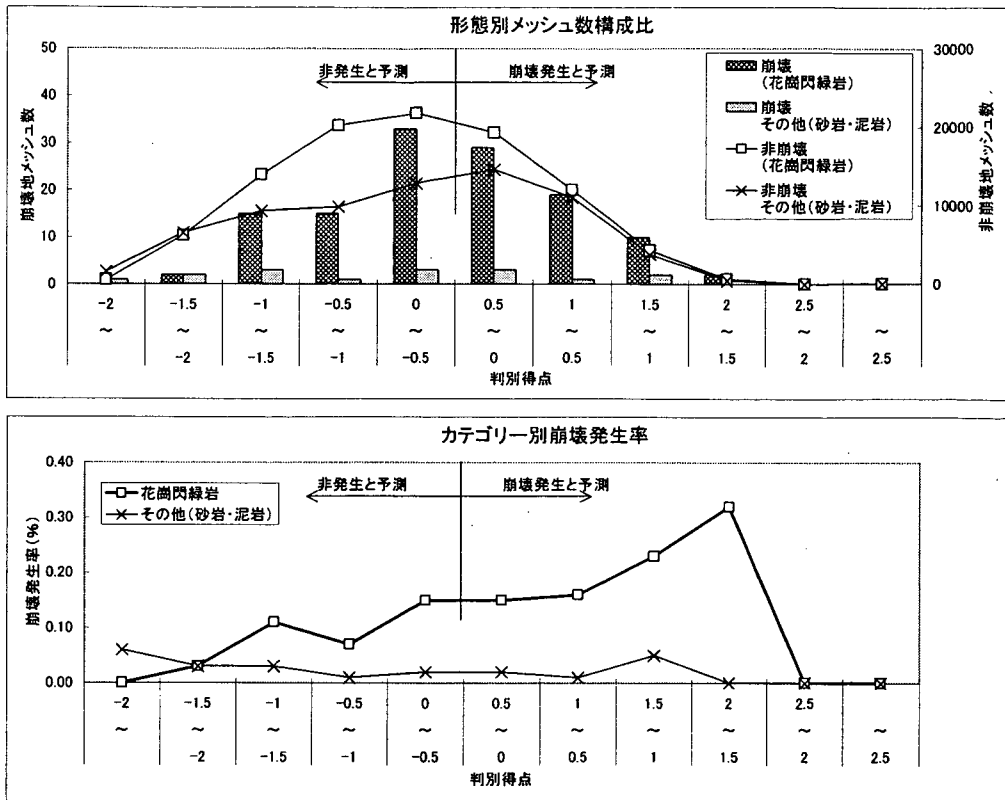


図 4.9 六甲全山式の鹿児島県北西部地震への適用結果:地質別の判別得点と崩壊発生率の関係

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		
実際の崩壊	個数	非崩壊	予測		合計
			非崩壊	崩壊	
的中率(%)	非崩壊	81050	81192	42.9	100
	崩壊	107873	109228	57.1	100
			合計	190420	190420
			分類正誤率	43.3%	

実際の崩壊	個数	非崩壊	予測		合計
			非崩壊	崩壊	
的中率(%)	非崩壊	94452	94590	50.0	100
	崩壊	94471	95830	50.0	100
			合計	190420	190420
			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。

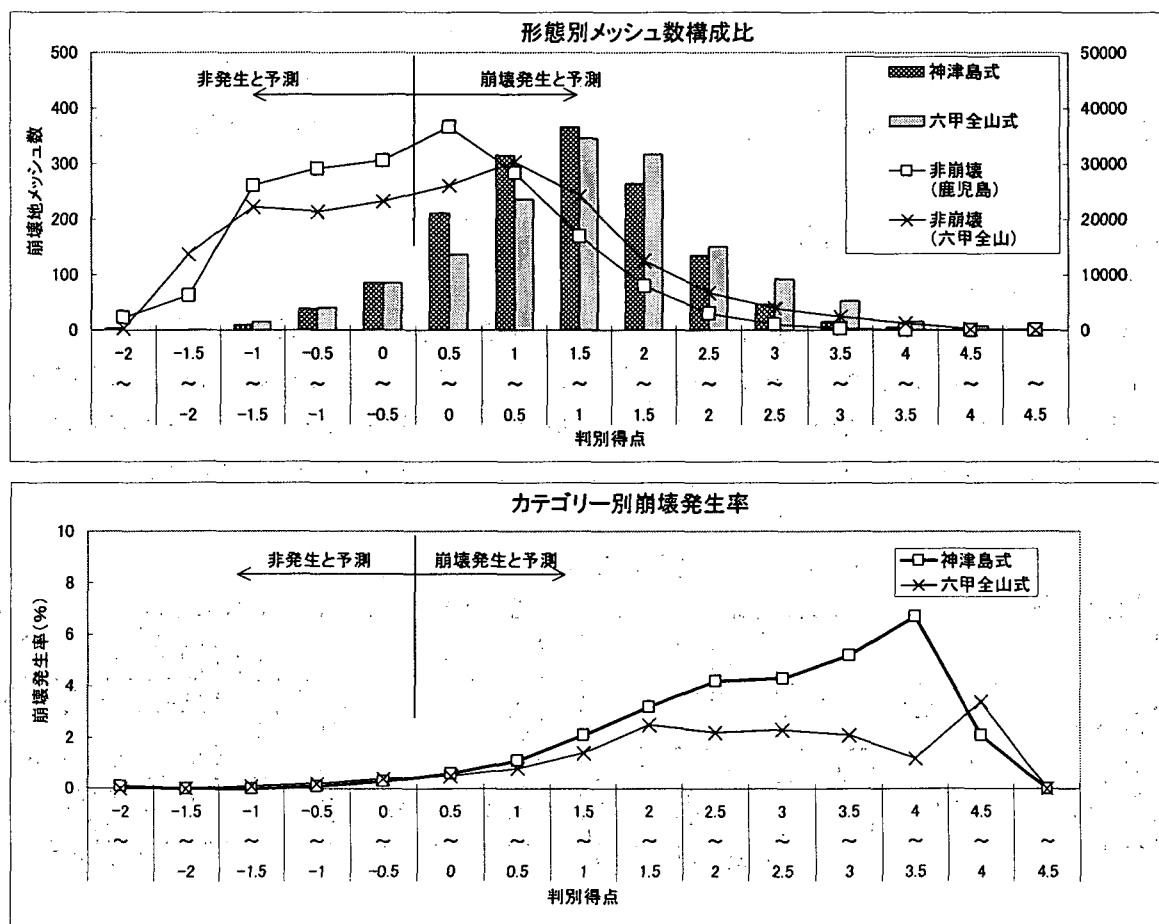


図 4.8 六甲全山式の神津島地震への適用と神津島地震の崩壊実績データに基づく判別分析による判別得点と崩壊発生率の関係

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リアン、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。

資料1 地形量に関する素因データの作成

ここでは、地形量に関する素因データの算出方法について詳述する。

A1.1 標高

各メッシュのジオイド面(疑似地球楕円体)からの鉛直方向の距離を示す量である。六甲砂防工事事務所の砂防 GIS で有するデジタルマッピングデータの 2m 間隔の等高線から TIN (Triangulated Irregular Network) モデルを作成し、当該メッシュの中心点座標の標高値を TIN モデルから取得するという方法で作成した 10m メッシュごとの標高値である。

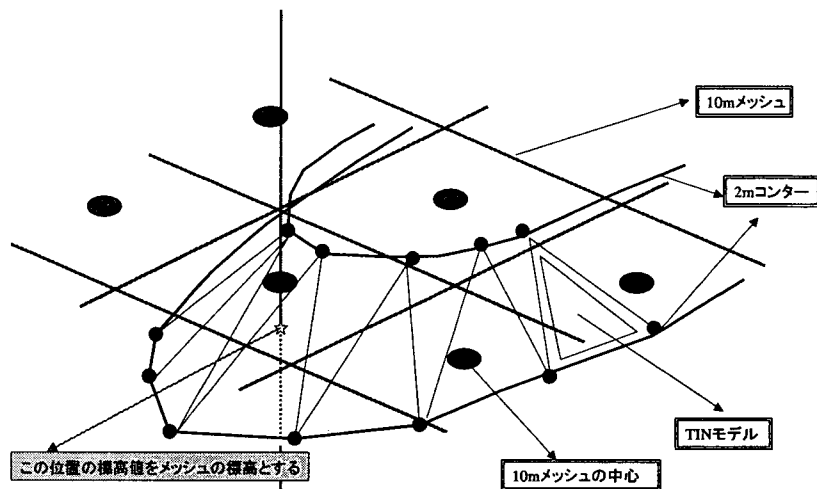


図 A1.1 標高値メッシュデータ作成概念図

A1.2 斜面勾配

各メッシュの水平面からの傾きを示す地形量である。メッシュの周囲4点からの距離が最小となるような平面(一次傾向面)を決定し、その平面の最急勾配を各メッシュの斜面勾配とした。すなわち、上記平面の方程式を A1.1 式、水平面の方程式を A1.2 式とすると、それら2つの平面がなす角が斜面勾配となり、A1.3 式で表される。

$$a_1x + b_1y + c_1z + d = 0 \quad (A1.1)$$

$$a_2x + b_2y + c_2z + d = 0 \quad (A1.2)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{a_1a_2 + b_1b_2 + c_1c_2}{\sqrt{(a_1^2 + b_1^2 + c_1^2)(a_2^2 + b_2^2 + c_2^2)}} \quad (A1.3)$$

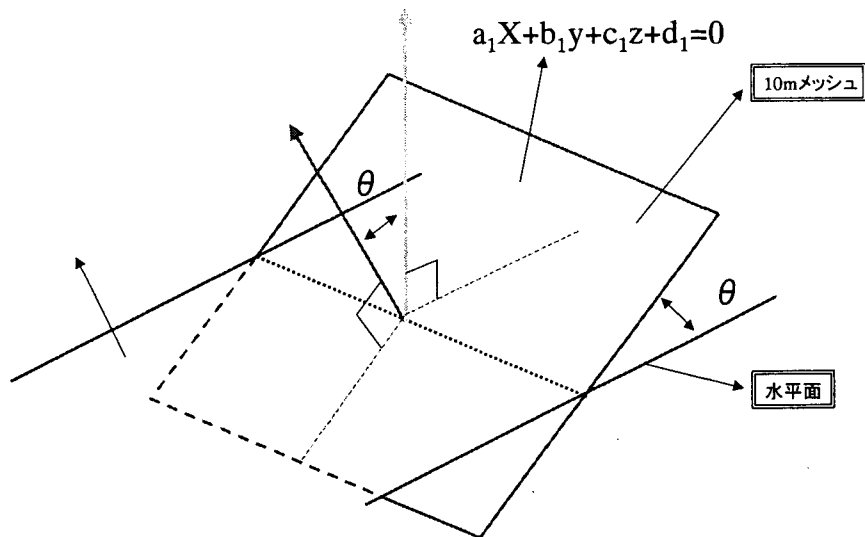


図 A1.2 斜面勾配算出概念図

A1.3 斜面方位

メッシュの周囲4点からの距離が最小となるような平面(一次傾向面)を決定し、その法線が向いている方向を東から反時計回りの角度で表した量である。

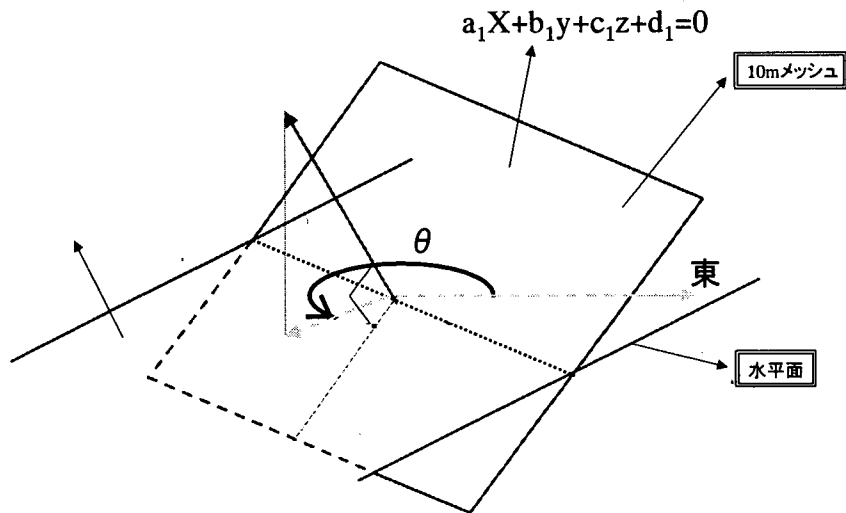


図 A1.3 方位算出概念図

A1.4 偏差

偏差(TSD)は、一次傾向面上の標高値と地形の標高値との残差の2乗和を求め、それを(格子点数-1)で割った平方根で表される。具体的には、式(A1.4)で求められる。

$$TSD = \sqrt{\frac{D_1^2 + D_2^2 + D_3^2 + D_4^2}{(4-1)}} \quad (A1.4)$$

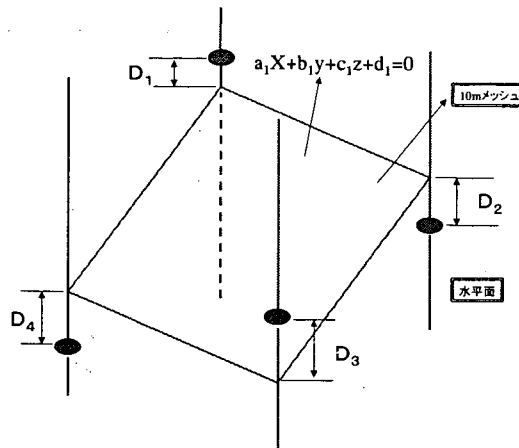


図 A1.4 偏差の算出イメージ

A1.5 ラプラシアン

ラプラシアン(LAP)は空間2次微分に基づくエッジ検出の画像処理手法として知られており、DEMに適用した場合には凹凸地形の抽出手法として知られている。周辺の4点の標高値を用いて、式 A1.5 の計算により算出される。周辺に対して凸であればマイナス、凹であればプラスの値をとる。

$$LAP = \frac{(D_1 - D_5) - (D_5 - D_2)}{d^2} + \frac{(D_3 - D_5) - (D_5 - D_4)}{d^2} \quad (A1.5)$$

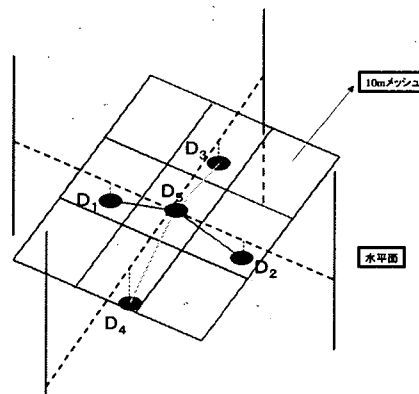


図 A1.5 ラプラシアンの算出イメージ

A1.6 地上開度

各メッシュ地点が周囲に比べて地上に突き出た度合いを数量化したものである。各要素に対し、その要素から8方向に探索し、考慮距離内で最大傾斜角を求める。8方向それぞれの最大傾斜角の平均を、天頂からの角度で表す。なお地上開度の値は考慮距離(以下では、「影響範囲」とする)に依存するため、六甲山系の尾根谷のスケールを考慮し最小メッシュ単位である 20m(8 方位を考慮するため 10mでは計算不可)と 50m範囲で計算することとした。

$$\Phi_L = \sum \phi_1 / 8 \quad (A1.6)$$

Φ_L : 地上開度

ϕ_1 : 各方位の天頂からの最大角度(地上角)

A1.7 地下開度

各要素に対し、その要素から 8 方向に探索し、考慮距離内で最小傾斜角を求める。8 方向それぞれの最小傾斜角の平均を、天頂からの角度で表す。すなわち、

$$\Psi_L = \Sigma \phi_2 / 8 \quad (\text{A1.7})$$

Ψ_L : 要素の地上開度

ϕ_2 : 各方位の鉛直下向きからの最小角度(地下角)

なお、地下開度も地上開度と同様の理由で考慮範囲 20mに加えて 50mでも計算を実施した。

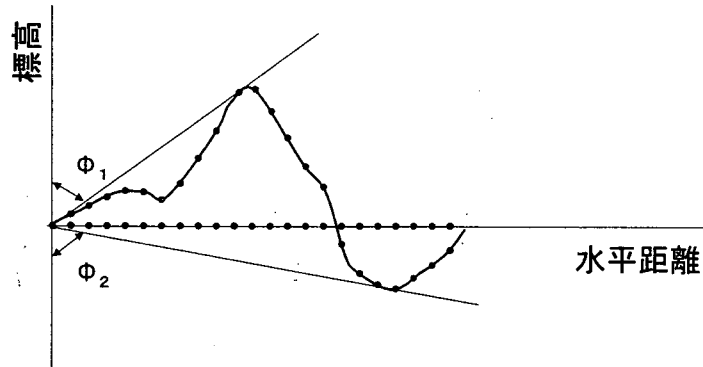


図 A1.6 地上角と地下角の概念図

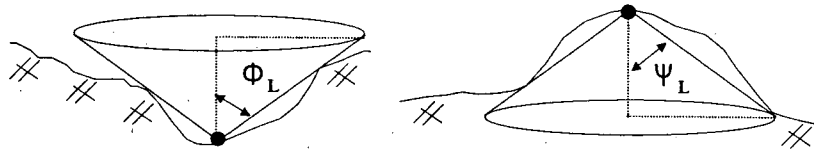


図 A1.7 地上開度・地下開度イメージ図

A1.8 平均曲率

地形の凹凸の指標として用いられるもので、曲面上のある点を通る全ての測地線(曲面上で2点間を結ぶ最短距離の曲線)の曲率の最大値と最小値の平均として定義される量である。算出方法は式 A1.8 に示すとおりである。平均曲率(H)については、メッシュサイズによる値の違いが指摘されていることから、20mに加えて、六甲山系の尾根や谷のスケールを考慮した 50m範囲でも計算を行うこととした。

$$H = \frac{h_{xx}(1+h_y^2) + h_{yy}(1+h_x^2) - 2h_x h_y h_{xy}}{2(1+h_x^2 + h_y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{A1.8})$$

$$h_x = \frac{\partial h}{\partial x} \quad h_y = \frac{\partial h}{\partial y} \quad h_{xx} = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad h_{yy} = \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \quad h_{xy} = \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y}$$

ここで、 h は標高値とする。

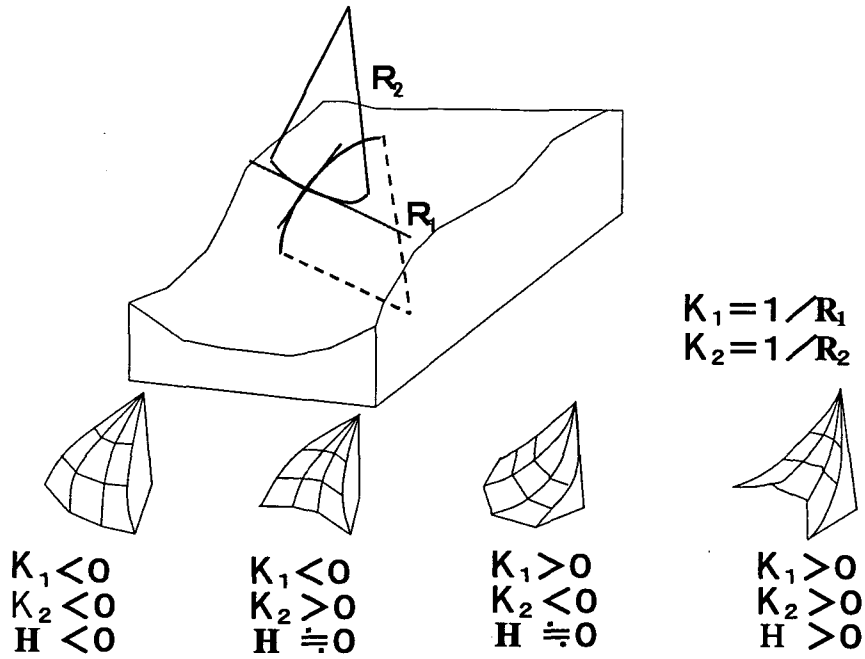


図 A1.8 平均曲率の概念図 (R_1, R_2 は曲率半径、 K_1, K_2 は曲率)

A1.9 尾根谷度

凹凸を示す地形量の中で、ラプラシアンおよび平均曲率は符号と凹凸が対応しており、正が谷型、負が尾根型、0が平坦斜面を示すが、地上開度または地下開度は平坦面と符号と凹凸が対応せず区分しにくい問題がある。そこでそれらを組み合わせた尾根谷度という地形量を導入する。尾根谷度では符号と凹凸が対応しており、正が谷型、負が尾根型、0が平坦斜面を示すこととなる。算出方法は図 A1.9 に示すとおりである。

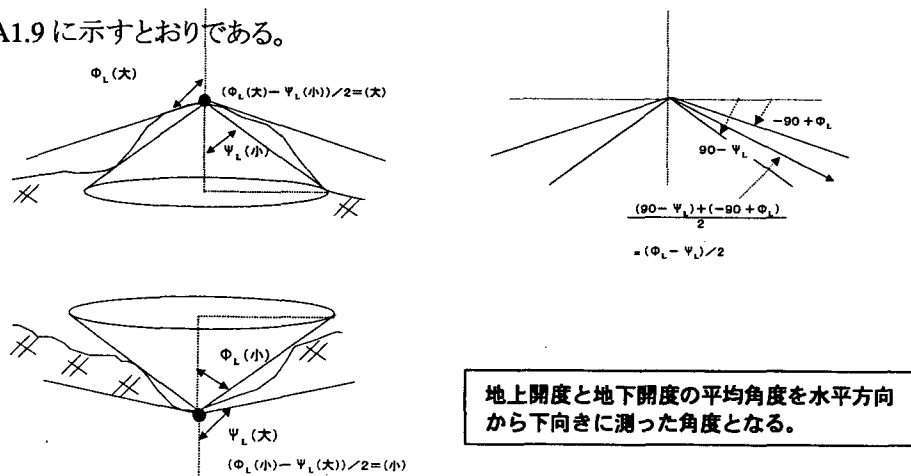


図 A1.9 尾根谷度の算出方法と概念図

資料 2 最大速度、最大加速度の算出方法

ここでは、本研究で用いた地震動強さを表す指標の算出方法を詳述する。最大速度、最大加速度とも、距離減衰式を用いて算出した。

距離減衰式は、強震記録を回帰分析することで求められ、距離、マグニチュードなど簡単なパラメータにより地震動強さを予測する手法である。距離については、震央からの距離、エネルギー等価距離、震源断層からの最短距離などが提案されているが、ここでは断層近傍の比較的強い地震動についての再現性が高いと考えられる震源断層からの最短距離をパラメータとした福島(2002)(距離減衰式の再構築と地盤増幅のモデル化、月刊地球号外 37、80-89)の手法により検討を行った。

また、破壊伝播効果を最大速度、最大加速度のそれぞれに加味した方法(司・翠川(2001)統計的グリーン関数法に基づく地震動最大振幅に対する破壊伝播効果による方位依存性の評価、日本建築学会構造系論文集 546、47-53)についても比較検討した。なお、いずれの手法においても地盤の増幅効果を考慮し補正を行っている(Midorikawa(1993) semi-empirical estimation of peak ground acceleration from large earthquakes, *Tectophysics*, 213, 287-295)。

A2.1 最大速度の算定

最大速度の算定は、Fukushima et al. (2000) (Characteristics of Observer Peak Amplitude for Strong Ground Motion from the 1995 Hyogoken Nanbu (Kobe) Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 545-565)に従い、式 A2.1 を用いた。

$$\log V' = -0.22M_w^2 + 3.94M_w - \log(R + 0.01 \times 10^{0.43M_w}) - 0.002R - 11.9 - 0.71 \times \log V_s \quad (\text{A2.1})$$

ここで、 V' :最大速度(m/s)、 M_w :モーメントマグニチュード、 R :断層からの距離(km)、 V_s :S波速度(400m/s)とする。

A2.2 最大加速度の算定

最大加速度(A')の算定は、福島・田中(1992)(新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂、地震学会講演予稿集、116 ページ)及び福島(2002)に従い、式 A2.2 を用いて算出した。

$$\log_{10} A_{org} = 0.42M_w - \log_{10}(R + 0.025 \cdot 10^{0.42M_w}) - 0.0033R + 1.22 \quad (\text{A2.2})$$

ここで、 A_{org} :最大加速度(cm/s^2)、 M_w :モーメントマグニチュード、 R :断層からの距離(km)とする。

A2.3 破壊伝播効果の算定

破壊伝播効果の算定は司・翠川(2001)に従った。式 A2.3 に、破壊伝播効果を考慮しない加速度 (A_{org}) と破壊伝播効果を考慮した加速度 (A) の関係を示した。

$$A = A_{org} 10^D \quad (A2.3)$$

ここで、 $D=C \times S$ 、 C 、 S はそれぞれ式 A2.4、A2.5 で求めた。

$$\left. \begin{aligned} C &= 0.08 \cos(6.578/3 - 2.25) + 0.03 & \text{if } x < -1.43L \\ &= 0.08 \cos(-4.6x/3L - 2.25) + 0.03 & \text{if } -1.43L \leq x \leq x_c \\ &= 0.08 \cos(4.6x/3L - 2.25) - 0.05 & \text{if } x_c < x \leq 1.14L \end{aligned} \right\} (A2.4)$$

ここで、 L : 断層の長さ、 x_c : 震央の x 座標、 x : 求める点の震央の x 座標、なお、 x 軸の方向は断層と平行の方向とする(図 A2.1)。また、 S は

$$\left. \begin{aligned} S &= 1 & \text{if } \pi/2 < \theta < 3\pi/2 \\ &= |\cos\theta| & \text{if } -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2 \end{aligned} \right\} (A2.5)$$

とする。ここで、 θ は図 A2.1 に示す角度である。

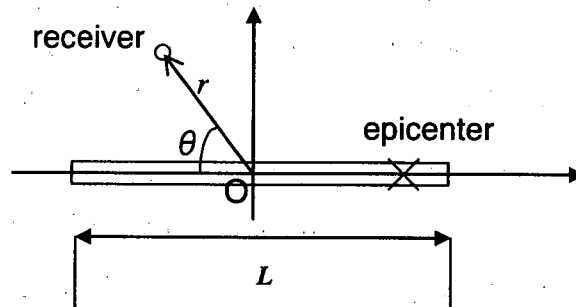


図 A2.1 θ の定義

資料3 凹凸の表現方法に関する検討:尾根と谷の区分

3章で示した凹凸を示す各地形量と崩壊発生率との関係を見ると、尾根型斜面での崩壊が最も多く、ついで谷型斜面、最も崩壊が少ないのが平坦斜面であることがわかった。このような関係がある場合、崩壊発生率と地形量の値を線形に関係づけることは困難である可能性が考えられる。そこで、ここでは、凹凸の関係を2つの線形関係として扱う方法を検討した。

A3.1 方法

はじめに、補正した凹凸を表す地形量と崩壊発生確率の関係を調べた。その上で、斜面勾配と補正した地形量を説明変数とし、崩壊の発生・非発生を目的変数とした線形判別分析を行なった。地形量の補正は、3章の検討で、比較的、有意に崩壊・非崩壊を分離できた平均曲率(影響範囲20m)及び尾根谷度(影響範囲50m)を用いて、以下2つの方法で行った。

- ① 地形量の絶対値をとる。
- ② 谷側(正)の地形量が、同様の崩壊発生率をもつ尾根側(負)の地形量となるように補正係数をかける。

A3.2 結果

単相関の検討の結果を図A3.1~A3.4に、判別分析の結果を表A3.1に示した。その結果、絶対値を考慮した場合のほうが、補正前および補正係数考慮した場合と比較して正誤率で優位となることがわかった。ただし、絶対値を考慮した場合であっても、正誤率の飛躍的な結果は得られなかった。

そこで、絶対値をとる地形的な意味づけが明確でなくでないことを考え合わせ、今回の検討(3章)では絶対値及び補正係数による補正は行わないこととしている。

表 4.1 補正前後の判別分析結果の比較

● 平均曲率(影響範囲20m)

	標準化された正準判別関数係数		正誤率
	勾配	平均曲率	
補正前	0.970	-0.244	70.7%
絶対値考慮	1.019	0.429	72.8%
補正係数考慮	0.979	-0.485	69.6%

● 尾根谷度(影響範囲50m)

	標準化された正準判別関数係数		正誤率
	勾配	尾根谷度	
補正前	0.951	0.336	69.9%
絶対値考慮	0.987	0.423	73.2%
補正係数考慮	0.942	0.543	68.8%

項目名：平均曲率絶対値(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	0.01	0.011	0	1	0.694
住吉川流域	276	0.01	0.008	0	0.05	
六甲全域	2,351	0.01	0.008	0	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	0 ~ 0.005	22,775	862,170	83	30.1	809	34.4	22,692	38.0	861,361	49.3	0.364	0.094
2	0.005 ~ 0.01	15,836	427,791	74	26.8	600	25.5	15,762	26.4	427,191	24.5	0.467	0.140
3	0.01 ~ 0.015	9,327	231,390	50	18.1	394	16.8	9,277	15.5	230,996	13.2	0.536	0.170
4	0.015 ~ 0.02	5,503	121,238	37	13.4	249	10.6	5,466	9.2	120,989	6.9	0.672	0.205
5	0.02 ~ 0.025	3,088	60,180	20	7.2	157	6.7	3,068	5.1	60,023	3.4	0.648	0.261
6	0.025 ~ 0.03	1,783	27,843	8	2.9	87	3.7	1,775	3.0	27,756	1.6	0.449	0.312
7	0.03 ~ 0.035	914	11,640	1	0.4	30	1.3	913	1.5	11,610	0.7	0.109	0.258
8	0.035 ~ 0.04	450	4,554	1	0.4	16	0.7	449	0.8	4,538	0.3	0.222	0.351
9	0.04 ~ 0.045	194	1,607	1	0.4	6	0.3	193	0.3	1,601	0.1	0.515	0.373
10	0.045 ~ 0.05	72	560			1	0.0	72	0.1	559	0.0		0.179
11	0.05 ~ 1	53	507	1	0.4	2	0.1	52	0.1	505	0.0	1.887	0.394
12													
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	5.869	2.737

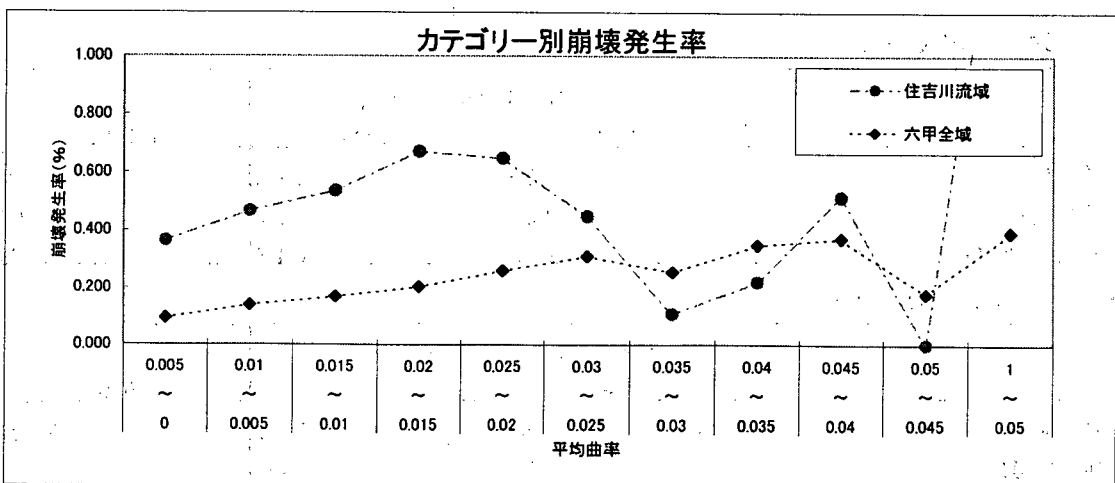
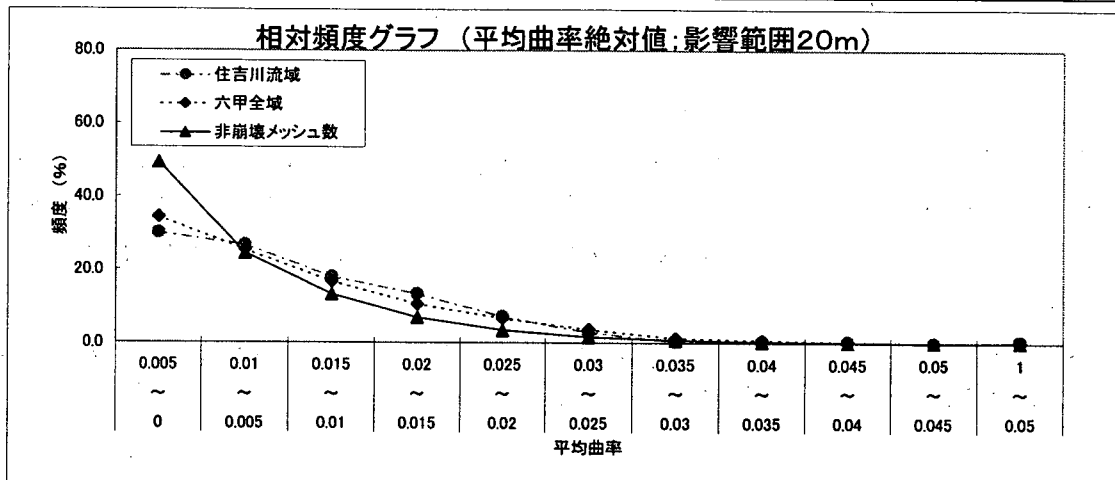


図 A3.1 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(平均曲率[影響範囲 20m:絶対値])

項目名：補正平均曲率(影響範囲20m)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値	か2乗検定
全数	1,749,480	0	0.01	-1	0	
住吉川流域	276	-0.01	0.007	-0.03	0	0.374
六甲全域	2,351	-0.01	0.008	-0.05	0	

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 (メッシュ)	(%)	六甲全域 (メッシュ)	(%)	住吉川流域 (メッシュ)	(%)	六甲全域 (メッシュ)	(%)	住吉川 (%)	全域 (%)	
	①	②	③	③/Σ③	④	④/Σ④	⑤=①-③	⑤/Σ⑤	⑥=②-④	⑥/Σ⑥	③/①	④/②	
1	-3 ~ -0.05	6	259					6	0.0	259	0.0		
2	-0.05 ~ -0.045	11	161			1	0.0	11	0.0	160	0.0		0.621
3	-0.045 ~ -0.04	25	432			2	0.1	25	0.0	430	0.0		0.463
4	-0.04 ~ -0.035	80	1,408			13	0.6	80	0.1	1,395	0.1		0.923
5	-0.035 ~ -0.03	200	4,081	1	0.4	19	0.8	199	0.3	4,062	0.2	0.500	0.466
6	-0.03 ~ -0.025	664	11,493	5	1.8	53	2.3	659	1.1	11,440	0.7	0.753	0.461
7	-0.025 ~ -0.02	1,351	27,949	12	4.3	95	4.0	1,339	2.2	27,854	1.6	0.888	0.340
8	-0.02 ~ -0.015	2,790	59,604	21	7.6	155	6.6	2,769	4.6	59,449	3.4	0.753	0.260
9	-0.015 ~ -0.01	4,906	112,763	31	11.2	210	8.9	4,875	8.2	112,553	6.4	0.632	0.186
10	-0.01 ~ -0.005	9,280	206,090	43	15.6	302	12.8	9,237	15.5	205,788	11.8	0.463	0.147
11	-0.005 ~ 0	40,682	1,325,240	163	59.1	1,501	63.8	40,519	67.8	1,323,739	75.8	0.401	0.113
12													
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	4,390	3,980

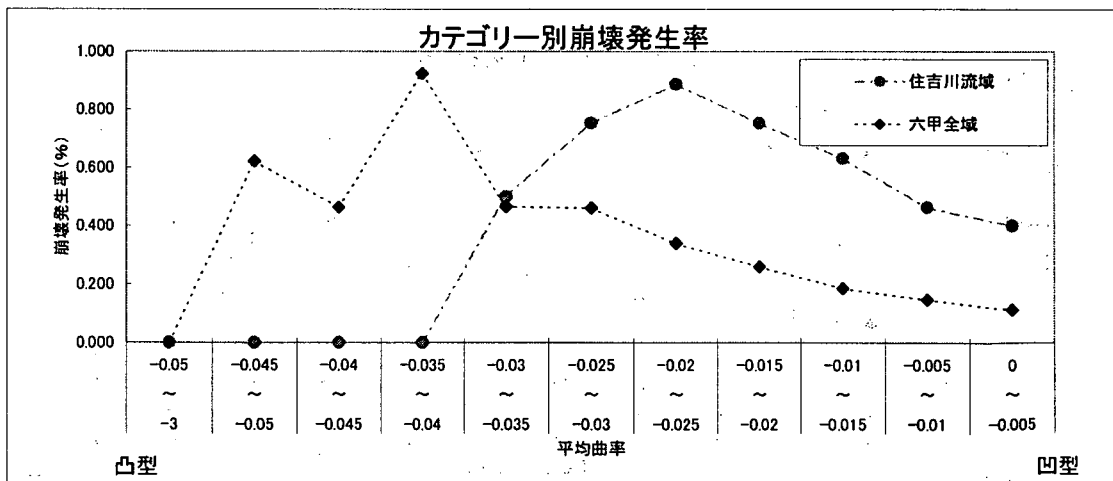
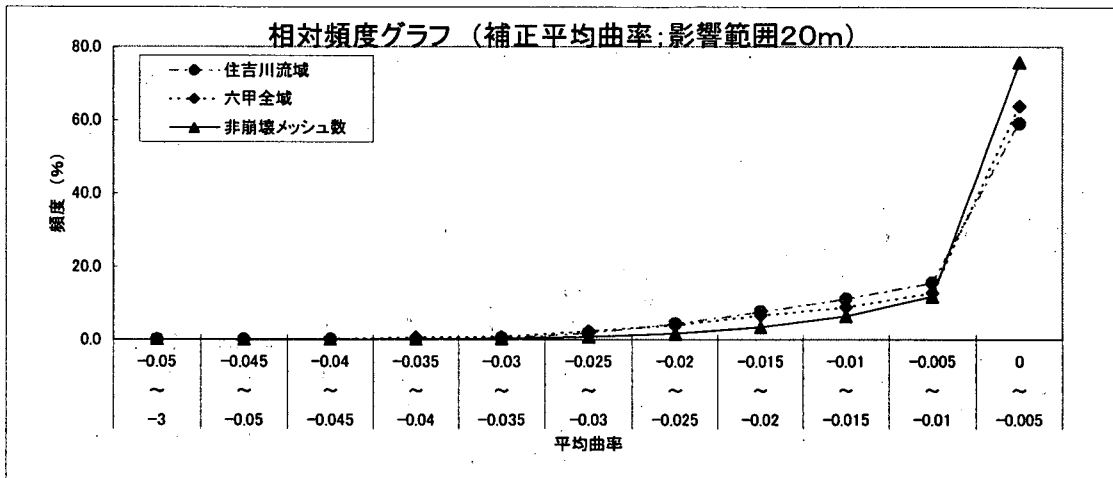


図 A3.2 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(平均曲率[影響範囲 20m:補正係数考慮])

項目名：尾谷度絶対値(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2乗検定
全数	1,749,480	4.99	4.535	0	65.47	0.453
住吉川流域	276	7.75	5.441	0.01	26.68	
六甲全域	2,351	7.27	5.441	0	35.88	

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 ~ 2	11,114	566,441	47	17.0	406	17.3	11,067	18.5	566,035	32.4	0.423	0.072
2	2 ~ 4	10,743	354,593	34	12.3	395	16.8	10,709	17.9	354,198	20.3	0.316	0.111
3	4 ~ 6	9,423	258,090	39	14.1	342	14.5	9,384	15.7	257,748	14.8	0.414	0.133
4	6 ~ 8	7,745	189,801	36	13.0	310	13.2	7,709	12.9	189,491	10.8	0.465	0.163
5	8 ~ 10	6,182	135,034	30	10.9	239	10.2	6,152	10.3	134,795	7.7	0.485	0.177
6	10 ~ 12	4,724	93,273	33	12.0	210	8.9	4,691	7.9	93,063	5.3	0.699	0.225
7	12 ~ 14	3,453	62,287	20	7.2	160	6.8	3,433	5.7	62,127	3.6	0.579	0.257
8	14 ~ 16	2,429	39,356	13	4.7	100	4.3	2,416	4.0	39,256	2.2	0.535	0.254
9	16 ~ 18	1,674	23,378	10	3.6	91	3.9	1,664	2.8	23,287	1.3	0.597	0.389
10	18 ~ 20	1,036	13,139	7	2.5	44	1.9	1,029	1.7	13,095	0.7	0.676	0.335
11	20 ~ 30	1,410	13,611	7	2.5	51	2.2	1,403	2.3	13,560	0.8	0.496	0.375
12	30 ~ 70	62	477			3	0.1	62	0.1	474	0.0		0.629
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	5.685	3.120

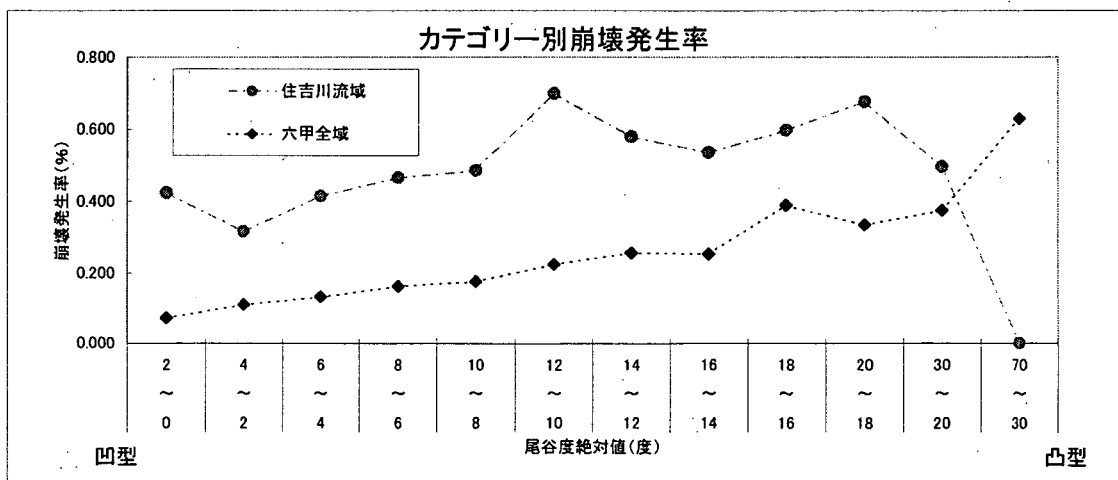
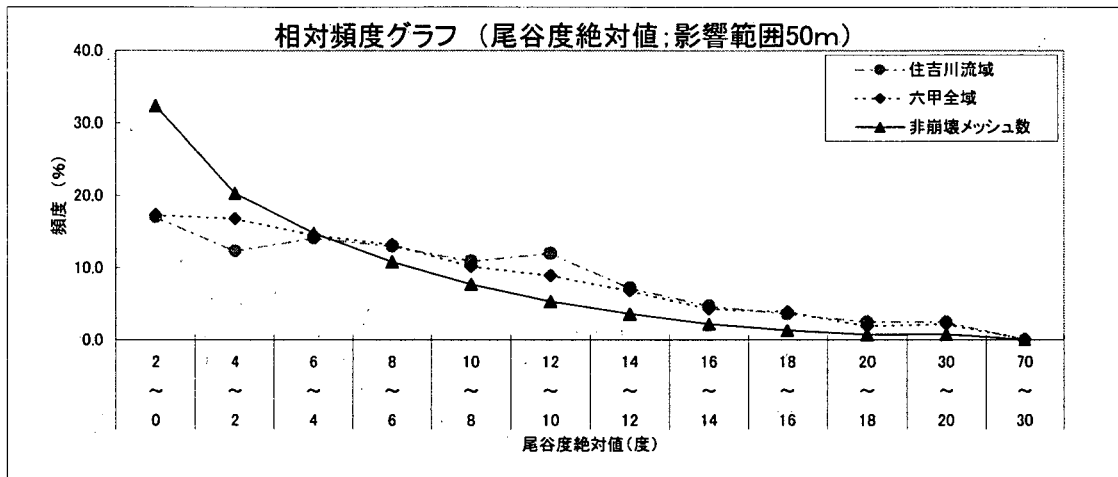


図 A3.3 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(尾根谷度[影響範囲 50m:絶対値])

項目名：補正尾谷度(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2乗検定
全数	1,749,480	3.52	3.7	0	65.47	0.389
住吉川流域	276	5.99	4.906	0.01	20.85	
六甲全域	2,351	5.57	5.071	0	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	0 ~ 2	18,196	809,667	73	26.4	674	28.7	18,123	30.3	808,993	46.3	0.401	0.083
2	2 ~ 4	13,411	386,087	49	17.8	522	22.2	13,362	22.4	385,565	22.1	0.365	0.135
3	4 ~ 6	9,492	216,201	34	12.3	316	13.4	9,458	15.8	215,885	12.4	0.358	0.146
4	6 ~ 8	6,789	130,692	38	13.8	250	10.6	6,751	11.3	130,442	7.5	0.560	0.191
5	8 ~ 10	4,579	81,140	20	7.2	156	6.6	4,559	7.6	80,984	4.6	0.437	0.192
6	10 ~ 12	2,980	52,174	26	9.4	135	5.7	2,954	4.9	52,039	3.0	0.872	0.259
7	12 ~ 14	1,997	33,515	17	6.2	119	5.1	1,980	3.3	33,396	1.9	0.851	0.355
8	14 ~ 16	1,256	19,682	6	2.2	62	2.6	1,250	2.1	19,620	1.1	0.478	0.315
9	16 ~ 18	708	10,677	6	2.2	56	2.4	702	1.2	10,621	0.6	0.847	0.524
10	18 ~ 20	324	5,346	3	1.1	24	1.0	321	0.5	5,322	0.3	0.926	0.449
11	20 ~ 30	260	4,183	4	1.4	35	1.5	256	0.4	4,148	0.2	1.538	0.837
12	30 ~ 70	3	116			2	0.1	3	0.0	114	0.0		1.724
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	7.633	5.210

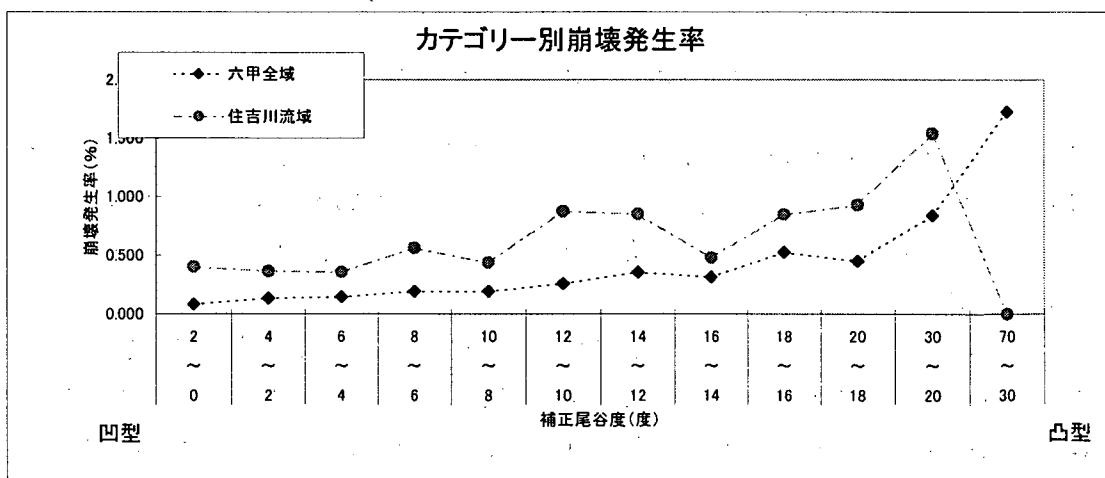
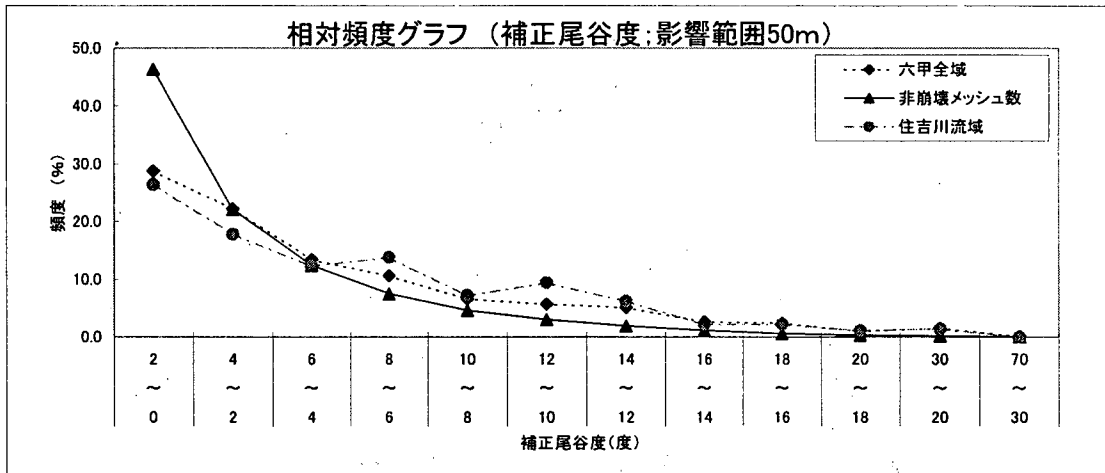


図 A3.4 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(尾根谷度[影響範囲 50m: 補正係数考慮])

資料4 凹凸の表現方法に関する検討(2):縦断方向と横断方向の凹凸

ここでは、地盤の振動には方向性が考えられるため、その増幅効果が考えられる地形の凹凸もその方向性が関係する可能性があるという点を考慮し、各メッシュの曲率を全ての方向にわたって平均して評価するのではなく、斜面最大傾斜方向の曲率(曲率 K_1 とする)とそれに直交する方向の曲率(曲率 K_2)をそれぞれ別々に評価することを考え、検討した。

A4.1 方法

曲率 K_1 、 K_2 (概念図を図 A4.1 に示した)を算出し、 K_1 、 K_2 と崩壊発生確率の関係を調べた。その上で、 K_1 、 K_2 を凹凸を表現する指標として用い、勾配、曲率 K_1 または曲率 K_2 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った。

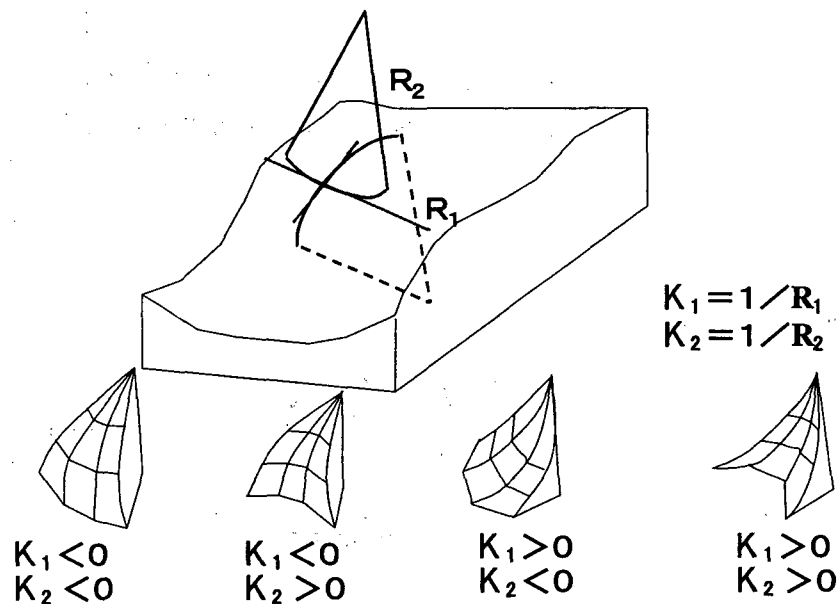
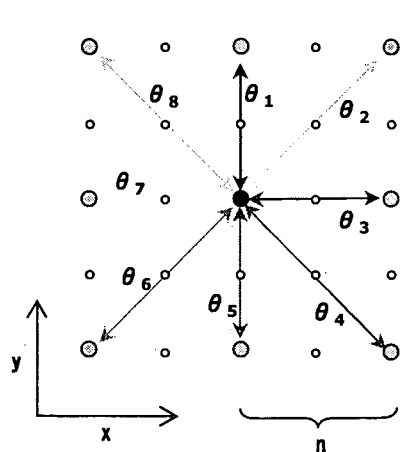


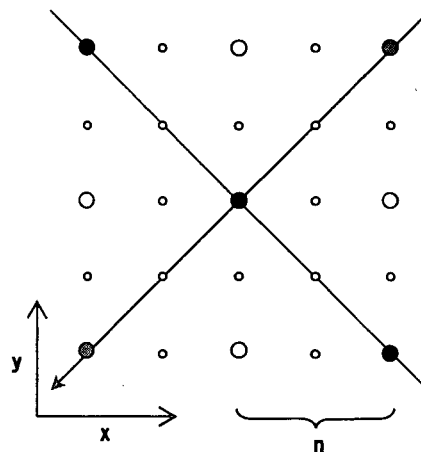
図 A4.1 曲率 K_1 、 K_2 の概念図

曲率 K_1 、 K_2 の算出において、まず、最大傾斜方向を決めた。最大傾斜方向は、対象節点の最大傾斜方向を求め、この方向を主軸方向とした。具体的には、図 A4.2 に示したように、対象節点を取り囲む 8 つの近傍節点(近傍節点間の節点数 n 個)について対象節点との傾斜角を求め、その値が最大を取る方向とする。

次に、斜面方向における曲率 K_1 、および斜面方向と直交方向における曲率 K_2 をそれぞれ求めた。具体的には、対象節点と両隣の近傍節点(主軸方向および主軸直交方向で対象節点との間に節点数 n をとる点)を通る円を考え、その円の半径をそれぞれ r_1 、 r_2 としたとき $K_1=1/r_1$ 、 $K_2=1/r_2$ とする(図 A4.3)。なお、影響範囲は 20m、50m の 2 通りとした。



● 対象節点
○ 近傍節点
○ 節点の配置
n: 近傍節点間の節点数



● 対象節点
● 近傍節点(K1)
● 近傍節点(K2)
○ 節点の配置
n: 近傍節点間の節点数

※近傍節点間の距離 $d(m) = n(\text{個}) \times \Delta d(\text{メッシュサイズ})$
斜め方向の場合は \sqrt{d}

図 A4.2 斜面方向の計算

図 A4.3 曲率の計算

A4.2 結果

曲率 K1、K2と崩壊発生確率の関係を図 A4.4～A4.7に、判別分析の結果を表 A4.1 に示した。曲率 K1、K2 を用いて判別分析を行ったが、他の地形量(平均曲率、尾根谷度)と比較し、分類正誤率の飛躍的な向上はみられなかった(表 A4. 1)。そこで、現時点では、K1、K2 については地形的な意味づけが明確でないことも勘案し、本資料では地震による斜面危険度判定手法の素因として取り扱わないこととしている。

表 A4.1 判別分析結果

case	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	
	勾配	平均曲率 (20)	平均曲率 (50)	尾根谷度 (50)	K1(20)	K1(50)	K2(20)			K2(50)
1	0.970	-0.244							54.417	70.852
2	0.935		-0.432						55.570	72.826
3	0.951			0.336					54.914	69.928
4	0.967				-0.272				54.242	72.464
5	0.954					-0.388			55.471	71.377
6	0.993						-0.108		54.318	69.203
7	0.947							-0.363	56.354	69.928

項目名：曲率K1(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	-0.05	0.05	0.374
住吉川流域	276	0	0.015	-0.05	0.05	
六甲全域	2,351	0	0.015	-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	-0.05 ~ -0.04	252	4,888	3	1.1	32	1.4	249	0.4	4,856	0.3	1.190	0.655
2	-0.04 ~ -0.03	1,095	22,299	9	3.3	74	3.1	1,086	1.8	22,225	1.3	0.822	0.332
3	-0.03 ~ -0.02	3,207	76,786	19	6.9	176	7.5	3,188	5.3	76,610	4.4	0.592	0.229
4	-0.02 ~ -0.01	6,848	192,202	29	10.5	273	11.6	6,819	11.4	191,929	11.0	0.423	0.142
5	-0.01 ~ 0	21,128	563,834	106	38.4	766	32.6	21,022	35.2	563,068	32.2	0.502	0.136
6	0 ~ 0.01	15,970	571,733	69	25.0	652	27.7	15,901	26.6	571,081	32.7	0.432	0.114
7	0.01 ~ 0.02	5,379	193,712	18	6.5	198	8.4	5,361	9.0	193,514	11.1	0.335	0.102
8	0.02 ~ 0.03	3,513	84,862	13	4.7	112	4.8	3,500	5.9	84,750	4.9	0.370	0.132
9	0.03 ~ 0.04	1,865	30,094	8	2.9	44	1.9	1,857	3.1	30,050	1.7	0.429	0.146
10	0.04 ~ 0.05	738	9,070	2	0.7	24	1.0	736	1.2	9,046	0.5	0.271	0.265
11													
12													
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	5,366	2,253

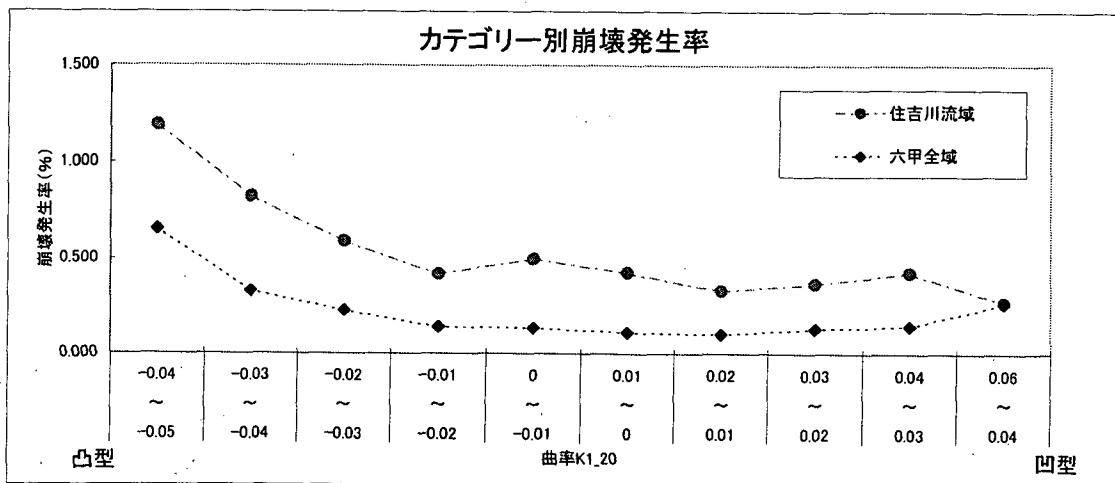
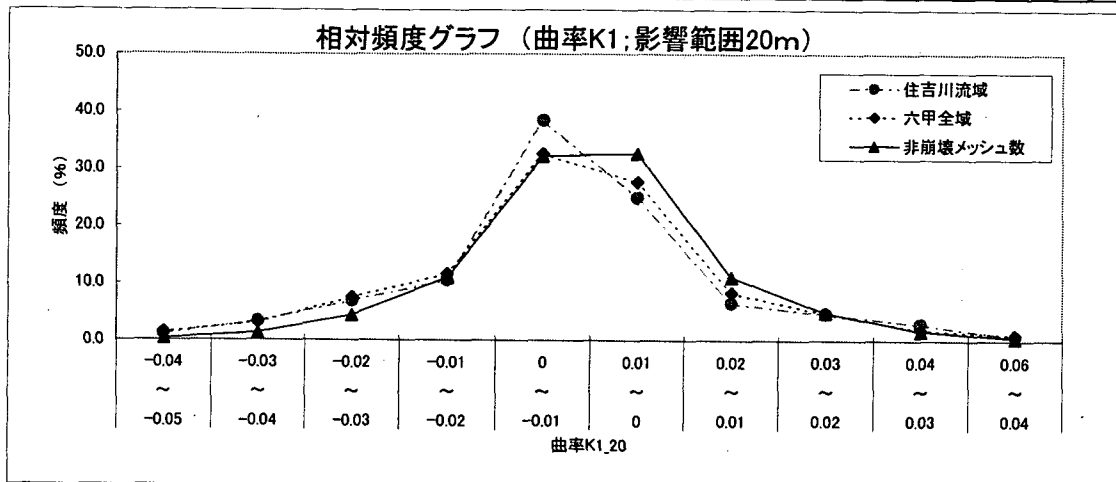


図 A4.4 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(曲率K1_20)

項目名：曲率K2(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	0.01	-0.05	0.05	0.374
住吉川流域	276	0	0.014	-0.04	0.04	
六甲全域	2,351	0	0.014	-0.05	0.04	

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	-0.05 ~ -0.04	48	925			9	0.4	48	0.1	916	0.1	0.973
2	-0.04 ~ -0.03	461	7,691	4	1.4	37	1.6	457	0.8	7,654	0.4	0.868
3	-0.03 ~ -0.02	2,856	48,212	25	9.1	164	7.0	2,831	4.7	48,048	2.8	0.875
4	-0.02 ~ -0.01	9,461	192,451	51	18.5	403	17.1	9,410	15.8	192,048	11.0	0.539
5	-0.01 ~ 0	19,226	655,050	75	27.2	646	27.5	19,151	32.1	654,404	37.5	0.390
6	0 ~ 0.01	16,666	635,037	62	22.5	634	27.0	16,604	27.8	634,403	36.3	0.372
7	0.01 ~ 0.02	7,573	155,469	39	14.1	298	12.7	7,534	12.6	155,171	8.9	0.515
8	0.02 ~ 0.03	2,736	43,810	16	5.8	129	5.5	2,720	4.6	43,681	2.5	0.585
9	0.03 ~ 0.04	821	9,406	2	0.7	25	1.1	819	1.4	9,381	0.5	0.244
10	0.04 ~ 0.05	147	1,429	2	0.7	6	0.3	145	0.2	1,423	0.1	1.361
11												
12												
13												
14												
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	5.749

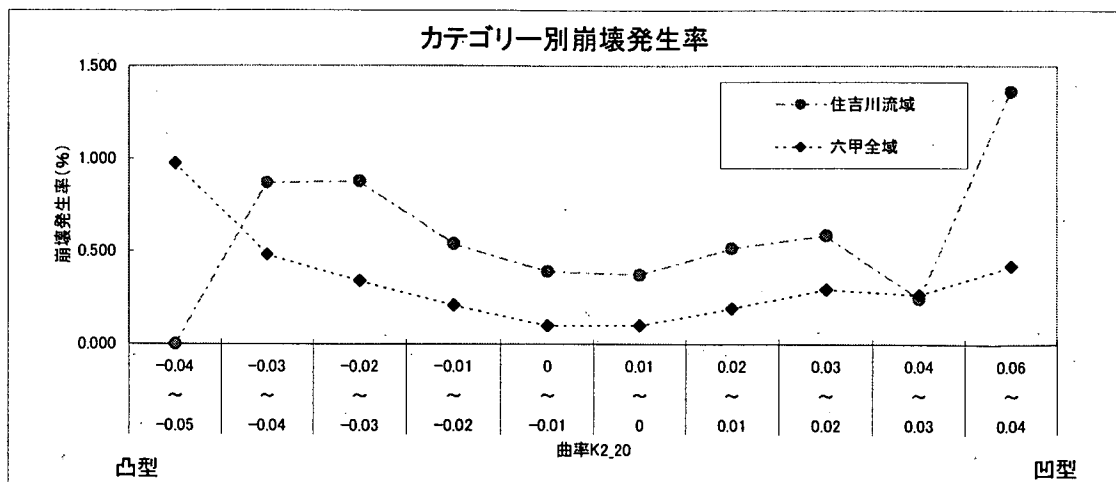
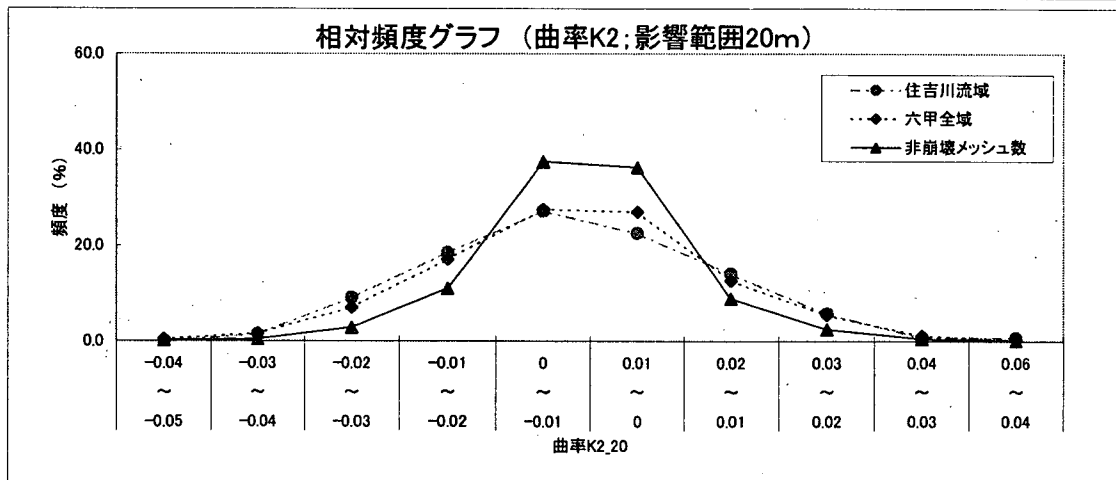


図 A4.5. 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(曲率K2_20)

項目名 : 曲率K1 (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2乗検定
全数	1,749,480	0	0.006	-0.02	0.02	0.265
住吉川流域	276	0	0.008	-0.02	0.02	
六甲全域	2,351	0	0.007	-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	-0.02 ~ -0.015	1,113	17,456	11	4.0	72	3.1	1,102	1.8	17,384	1.0	0.988	0.412
2	-0.015 ~ -0.01	4,140	78,718	27	9.8	206	8.8	4,113	6.9	78,512	4.5	0.652	0.262
3	-0.01 ~ -0.005	9,710	221,990	50	18.1	409	17.4	9,660	16.2	221,581	12.7	0.515	0.184
4	-0.005 ~ 0	16,791	504,774	77	27.9	615	26.2	16,714	28.0	504,159	28.9	0.459	0.122
5	0 ~ 0.005	13,483	580,292	59	21.4	615	26.2	13,424	22.5	579,677	33.2	0.438	0.106
6	0.005 ~ 0.01	7,586	234,520	33	12.0	283	12.0	7,553	12.6	234,237	13.4	0.435	0.121
7	0.01 ~ 0.015	5,139	88,178	13	4.7	116	4.9	5,126	8.6	88,062	5.0	0.253	0.132
8	0.015 ~ 0.02	2,033	23,552	6	2.2	35	1.5	2,027	3.4	23,517	1.3	0.295	0.149
9													
10													
11													
12													
13													
14													
合計		59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	4.035	1.488

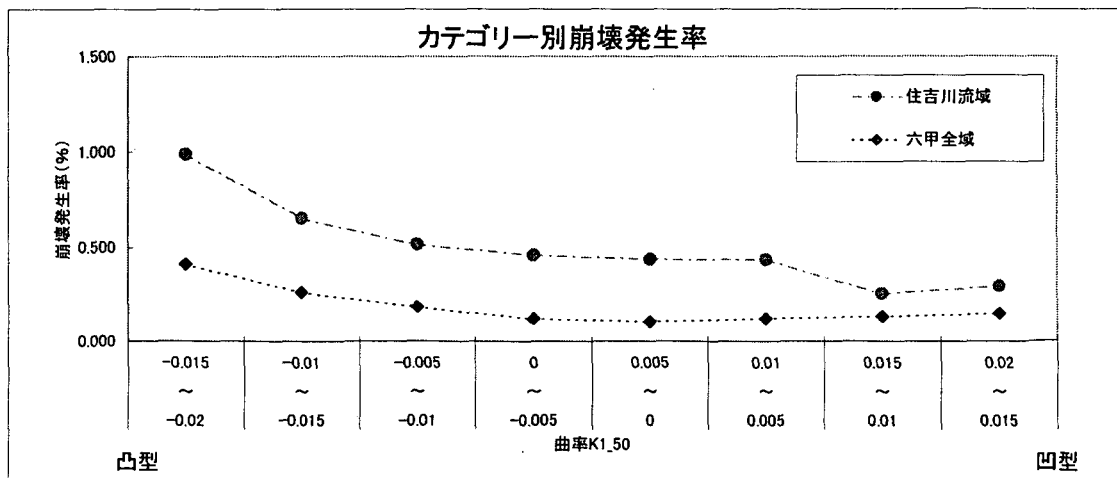
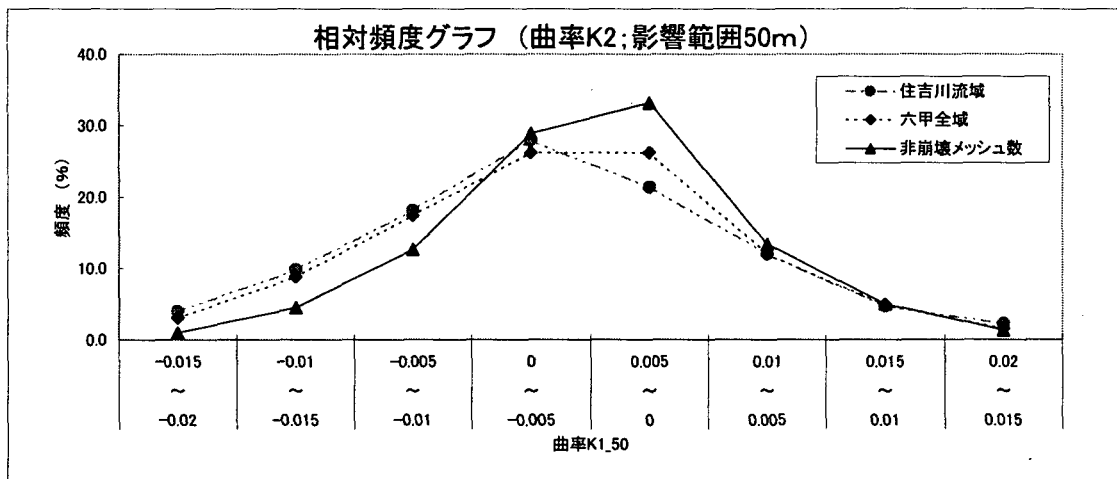


図 A4.6 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(曲率K1_50)

項目名 : 曲率K2(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	0.005	-0.02	0.02	
住吉川流域	276	0	0.007	-0.02	0.01	0.433
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 -0.02 ~ -0.015	361	4,894	6	2.2	27	1.1	355	0.6	4,867	0.3	1.662	0.552
2 -0.015 ~ -0.01	2,753	46,672	17	6.2	148	6.3	2,736	4.6	46,524	2.7	0.618	0.317
3 -0.01 ~ -0.005	9,706	196,022	68	24.6	489	20.8	9,638	16.1	195,533	11.2	0.701	0.249
4 -0.005 ~ 0	18,523	656,166	72	26.1	702	29.9	18,451	30.9	655,464	37.5	0.389	0.107
5 0 ~ 0.005	17,123	653,181	61	22.1	617	26.2	17,062	28.6	652,564	37.4	0.356	0.094
6 0.005 ~ 0.01	8,419	153,159	41	14.9	301	12.8	8,378	14.0	152,858	8.7	0.487	0.197
7 0.01 ~ 0.015	2,653	35,114	11	4.0	62	2.6	2,642	4.4	35,052	2.0	0.415	0.177
8 0.015 ~ 0.02	457	4,272			5	0.2	457	0.8	4,267	0.2		0.117
9												
10												
11												
12												
13												
14												
合計	59,995	1,749,480	276	100	2,351	100	59,719	100	1,747,129	100	4,628	1,810

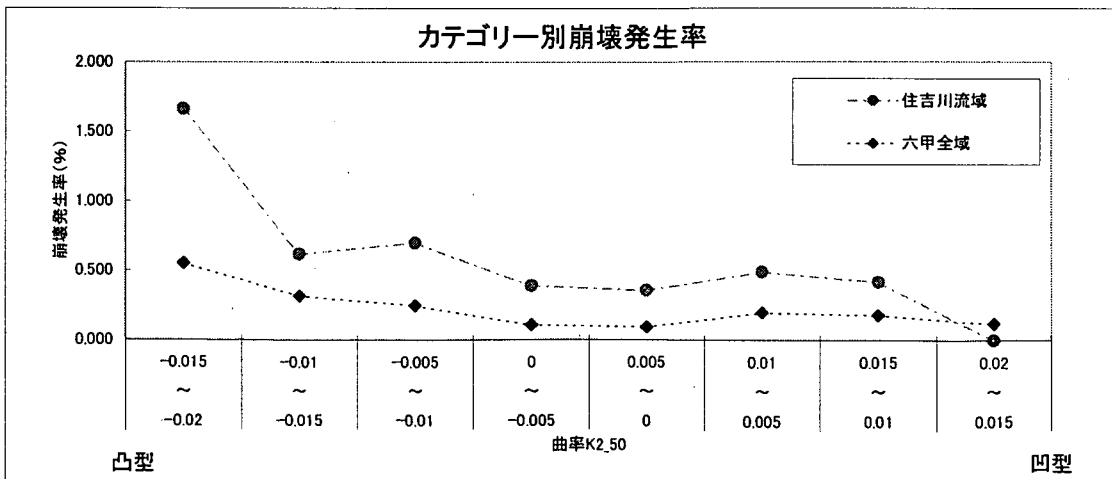
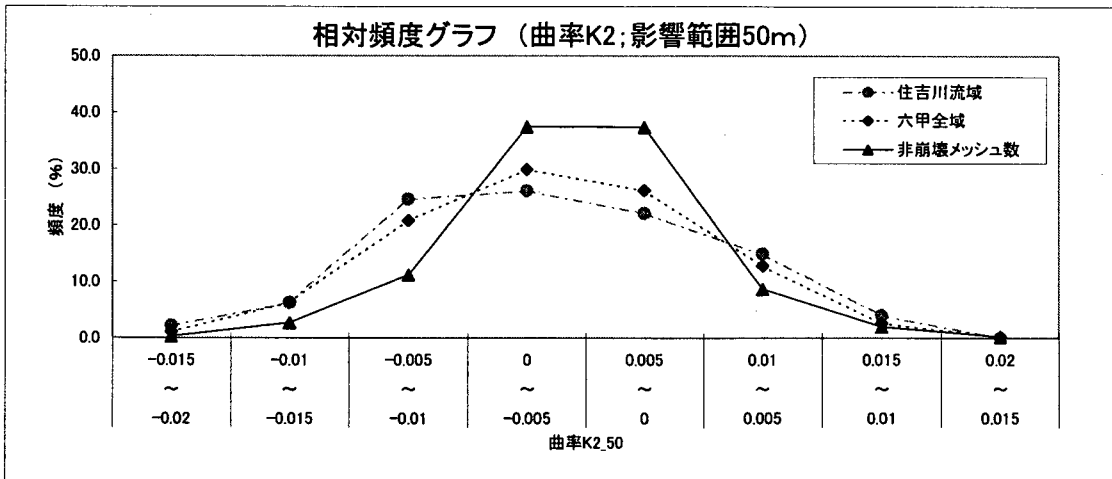


図 A4.7 階級別ヒストグラムと崩壊発生率(曲率K2_50)

資料5 地質の影響の検討

4章でも示したように、地質は崩壊発生に重要な影響を及ぼす可能性がある。そこで、3章で提案した手法の精度に及ぼす地質の分布の影響をここで検証する。

A5.1 六甲山系における地質分類

六甲山系の表層地質は、基盤岩類と被覆層とに明瞭に区分できる。基盤岩類は古生層(丹波層群)、花崗岩類、酸性岩類(有馬層群)、被覆層は第三紀中新世「神戸層群」、鮮新世～更新世「大阪層群」である。古生層は西部に点在し、六甲山地の基盤の大部分は花崗岩類により構成されている。六甲山地の西側の丘陵地帯には神戸層群が分布し、さらに西側の平野部は大阪層群の広い分布域となっている。

六甲砂防工事事務所の砂防GISでは、表層地質をデータとして保存している。このデータでは表 A5.1 に示す様に表層地質を分類しており、それぞれの範囲をポリゴンデータ(多角形面)形式の図形データとしている。

本解析では、メッシュデータごとの地質が必要となるため、図 A5.1 に示すように、メッシュの中心が含まれる表層地質の分類を各メッシュの分類とした。

表 A5.1 六甲砂防工事事務所砂防GIS表層地質データの凡例

新生代	第四紀	完新世		埋立地		
				崖錘	砂礫および礫	
		更新世	大阪層群		中・低位段丘層	砂礫、砂、シルト、粘土
					上部亜層群	砂礫、砂、シルト、粘土、火山灰
					中部亜層群	砂礫、砂、シルト、粘土、火山灰
					下部亜層群	砂礫、砂、シルト、粘土、火山灰
		新第三期	鮮新世			
			中新世	瀬戸内火山岩	甲山安山岩	無斑晶安山岩
		古第三期		神戸層群	上部累層	砂岩、礫岩、泥岩、凝灰岩
					中部累層	砂岩、礫岩、泥岩、凝灰岩
	下部累層				砂岩、礫岩、泥岩、凝灰岩	
	岩脈類			花崗斑岩、石英斑岩 安山岩、ひん岩		
	中生代	白亜紀	新世	山陽帯花崗岩類	六甲花崗岩	黒雲母花崗岩
					石切山花崗閃緑岩	花崗閃緑岩
有馬層群				金剛童子流紋岩溶岩	流紋岩質溶岩、同質火砕岩類	
				境野溶結凝灰岩	結晶質溶結凝灰岩	
				玄能池碎屑岩類	凝灰質砂岩、凝灰角礫岩	
				玉瀬溶結凝灰岩	流紋岩質多結晶溶結凝灰岩、流紋岩	
				僧川碎屑岩類	凝灰質頁岩、砂岩、礫岩	
領家新期花崗岩類				花崗岩類Ⅱ	花崗閃緑岩	
ジュラ紀			丹波層群	頁岩、頁岩・砂岩互層		

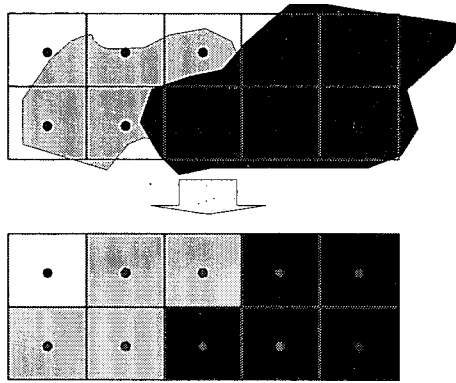


図 A5.1 表層地質メッシュデータ作成イメージ

さらに、ここでは表 A5.1 に基づき、地質と崩壊発生率との関係を概略的に把握するため、9つに再分類し、地質別の崩壊発生メッシュと非崩壊発生メッシュを算出、崩壊発生率との関係について表 A5.2 に整理した。

表 A5.2 地質別崩壊分布

地質凡例	崩壊なし	崩壊あり	全メッシュ数	崩壊発生率
崖錐・段丘	74,258	36	74,294	0.048
大阪層群	121,194	62	121,256	0.051
甲山安山岩	2,446	1	2,447	0.041
神戸層群	158,553	31	158,584	0.02
花崗岩類	942,358	1,836	944,194	0.194
有馬層群	86,050	141	86,191	0.164
領家花崗岩	148,443	35	148,478	0.024
丹波層群	33,998	27	34,025	0.079
その他	179,829	182	180,011	0.101
合計	1,747,129	2,351	1,749,480	0.134

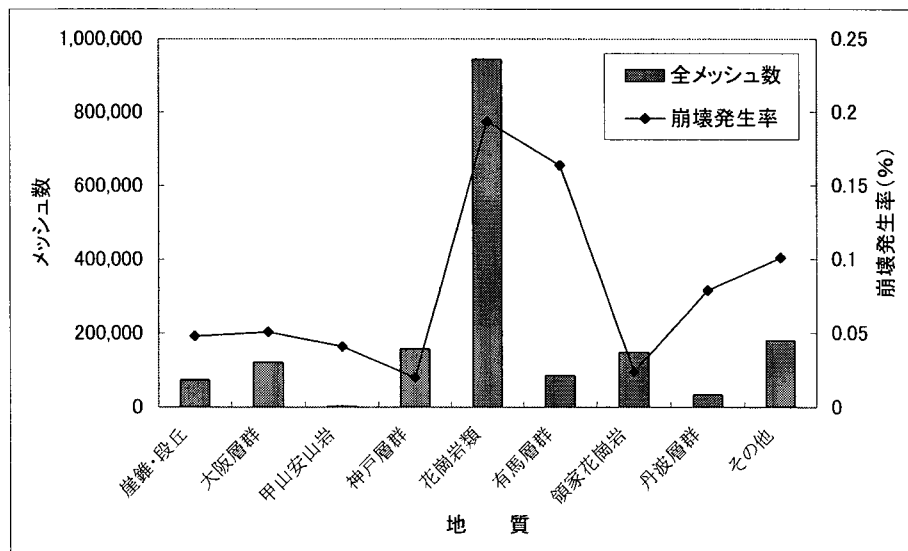


図 A5.2 地質別崩壊分布

表 A5.2 および図 A5.2 に示したように上記の 9 分類でも、依然として、地質の分布状況が狭い地質区分や、崩壊発生数が少ないものがある。そこで、統計的処理ができるよう、さらに年代、地質の性状等を加味しそれらを以下のように 5 分類することとした。またカテゴリ区分した地質分布図を図 A5.3 に示す。

[地質区分]

- ① 六甲花崗岩
- ② 布引花崗岩
- ③ 丹波層群
- ④ 有馬層群
- ⑤ その他(神戸層群, 大阪層群など)

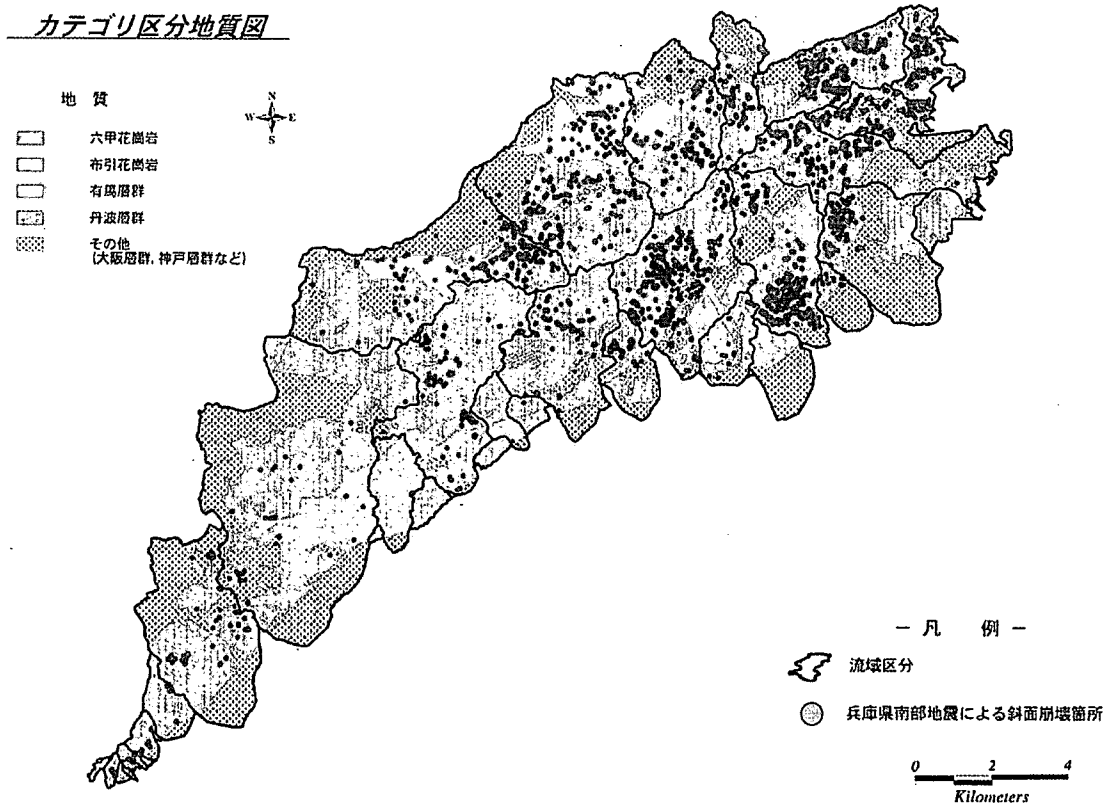


図 A5.3 カテゴリ区分地質図

A5.2 地質別判別分析結果

前節に示した地質区分に従い、地質別に判別分析を実施し正誤率および寄与率を比較し、考察した。3章の検討に従い、斜面勾配、平均曲率(影響範囲 20m)、地震加速度(破壊伝播効果考慮)を説明変数とし、崩壊の発生の有無を目的変数とした判別分析を行った。

表 A5.2 地質別判別分析結果(平均曲率使用)

・判別分析結果一覧

	標準化された正準判別関数係数			正誤率(%)
	勾配	平均曲率	地震加速度	
全データ	0.976	-0.115	0.188	78.20

・判別分析結果一覧(地質別)

	標準化された正準判別関数係数			正誤率(%)
	勾配	平均曲率	地震加速度	
六甲花崗岩	0.926	-0.170	0.332	74.62
布引花崗岩	1.000	0.096	0.184	76.60
有馬層群	0.921	-0.364	-0.046	68.57
丹波層群	0.714	-0.655	0.202	77.78
その他(大阪、神戸層群など)	0.995	0.037	0.058	81.41

その結果、

- ・ 全体的には勾配の地形量が地震崩壊に最も影響がある傾向は共通している。
- ・ 有馬層群、丹波層群では、地形量の影響が大きい。
- ・ 有馬層群、その他(大阪、神戸層群)では地震加速度の影響が小さい。

ことがわかった。この判別結果から地質別に区分し、正誤率を求めた場合、正誤率は 68%から 81%までの幅で変わることが分かった。

しかしながら、各地質の対象エリアが狭いことから、地質の違いが判別分析の精度、係数に及ぼす影響、判別得点ー崩壊発生率関係に及ぼす影響を定量的に把握することは、困難であると考えられる。すなわち、様々な地質で更なる地震時の崩壊地分布データの蓄積が必要となると考えられる。

資料 6 崩壊形態の差異が判別分析結果に及ぼす影響

地震時には様々な形態の崩壊が発生する。そこで、ここでは崩壊形態の差異が地震による崩壊危険度判定の精度に及ぼす影響を把握するため、住吉川流域の崩壊実績を用いて、線形判別得点式、分類正誤率について検討を行った。検討については、それぞれのタイプごとに危険度と崩壊実績との関係から整理した。

A6.1 崩壊データの形態別分類

六甲全山において、表 3.1 に示した資料に従い、地震時の崩壊形態を把握するため、資料整理を行った。溪流名と崩壊形態の関係を表 A6.1 に示した。

表 A6.1 崩壊形態から区分した流域の特徴

データの個数：崩壊フラグ	崩壊形態							総計
	硬質岩崩壊	マサ岩崩壊	第4紀層崩壊	中位段丘崩壊	泥質化岩崩壊	表層崩壊	(空白)	
01.夙川	92	19						111
02.宮川	8	9						17
03.芦屋川	61	207		3				271
05.天上川	7	6						13
06.住吉川	124	141		13		3	47	328
07.石屋川	7	14				15		36
08.都賀川	29	22				13		64
09.西郷川	1							1
10.新生田川	14	43				27		84
11.宇治川	2	1				1		4
12.新湊川	4	23				7		34
13.妙法寺川	11	30				10	1	52
14.千森川		5				2		7
15.一の谷川	1	6				5		12
16.二の谷川		1				8		9
18.堺川	2	7				4		13
19.船坂川	33	9	3	2	3	3	6	59
20.有馬川	117	7			9			133
21.有野川	185	57	1		4	1	8	256
22.山田川	131	50					4	185
24.仁川	131	1				10		142
25.逆瀬川	115	14	1			2		132
26.武庫川直河川	84	31				1		116
27.太多田川	188	67	14	2		3		274
総計	1347	770	19	20	16	115	66	2353

集計の結果、六甲全山の崩壊形態は硬質岩崩壊とマサ岩崩壊が多数を占めている。ここで、表 A6.2 に示したように、A:表層崩壊型、B:落石・岩崩壊型に硬質岩崩壊を(表層崩壊型以外)の 2 つに大別し、検討することとした。

表 A6.2 崩壊形態の区分

	区 分	備 考
A	表層崩壊型	マサ岩、第四紀、中位段丘、泥質化岩、表層崩壊
B	落石・岩崩壊型	硬質岩崩壊

表 A6.3 には、検討する住吉川エリアに含まれる 275 箇所の崩壊形態を示した。その結果、崩壊形態別で表層崩壊型は 136 箇所、落石・岩崩壊型は 98 箇所であった。なおここでは、標本データは、崩壊と非崩壊を同数にセットするため、対象エリアに含まれるすべての崩壊メッシュと、崩壊と同数の非崩壊メッシュを統計ソフトを用いてランダムに抽出したものとし、以下の解析を実施した。

表 A6.3 住吉エリアにおける崩壊形態別統計量

	度数	パーセント
マサ岩崩壊	131	47.6
硬質岩崩壊	98	35.6
中位段丘崩壊	3	1.1
表層崩壊	2	0.7
未記入	41	14.9
合計	275	100

A6.2 形態別判別分析

住吉川エリアにおいて、崩壊・非崩壊を判別するための線形判別得点式を求めた。ここで求めた崩壊予測式を「住吉川全部」と呼ぶこととする。なお、説明変数は3章の検討に基づき、斜面勾配、平均曲率、破壊伝播効果を考慮した最大加速度とした。さらに、崩壊タイプごとの線形判別得点式は、表層崩壊型(138個)と落石・岩崩壊型(96個)の2つの崩壊タイプに対して作成した。なお、それぞれの判別得点式を、「表層崩壊型」と「落石崩壊型」と呼ぶことにした。崩壊形態別の判別分析に用いる非崩壊メッシュのデータは、標本データを整理したときにランダム抽出した275箇所のデータを利用した。算出された係数を表A6.4に示す。

表 A6.4 住吉川エリア判別得点式

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20 m)	地震動 最大加速度	
住吉川全部	0.871	-0.286	0.515	$0.093 \times (\text{勾配}) - 23.440 \times (\text{平均曲率}) + 0.058 \times (\text{最大加速度}) - 20.856$
表層崩壊型	0.651	-0.314	0.713	$0.067 \times (\text{勾配}) - 26.818 \times (\text{平均曲率}) + 0.083 \times (\text{最大加速度}) - 27.071$
落石・岩崩壊型	0.920	-0.347	0.228	$0.093 \times (\text{勾配}) - 27.814 \times (\text{平均曲率}) + 0.025 \times (\text{最大加速度}) - 10.757$

表A6.4の判別関数係数をみると、住吉川全部と比べ、落石・岩崩壊型では斜面勾配の寄与度が高いのに対して、表層崩壊型では斜面勾配の寄与率が、落石・岩崩壊型に比べて低くなっていることがわかる。また、平均曲率には顕著な違いは見られなかった。さらに、最大加速度は表層崩壊型で寄与度が大きく、落石・岩崩壊型の寄与度が小さかった。

次に、新規に作成した判別タイプごとの判別式より求めた、判別得点別の頻度グラフを図A6.1～A6.3に示した。「住吉川全部」を用いた結果(図A6.1)を見ると、形態別メッシュ数構成比のグラフから、両タイプともに、判別得点“0”を境に、崩壊と非崩壊(棒グラフと折れ線グラフ)とで、頻度ピークが分離できていることがわかる。またカテゴリ別崩壊発生率のグラフからは、形態による明瞭な差異は見られなかった。

項目名：崩壊形態別(全部)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値
全数	550	0	1.078	-4.2	2.17
表層崩壊型	136	0.49	0.795	-2.46	1.96
落石・崩壊型	98	0.33	0.833	-2.67	2.17

レンジ区分	全数 (メッシュ) ①	非崩壊メッシュ (%) ②	崩壊メッシュ数				崩壊発生率(カテゴリ別)		
			表層崩壊型		落石・崩壊型		表層崩壊型(%) ③/①	落石・崩壊型(%) ④/①	
			(メッシュ) ③	(%) ③/Σ③	(メッシュ) ④	(%) ④/Σ④			
1	-4.5 ~ -4	1	1	0	0.0	0	0.0		
2	-4 ~ -3.5	2	2	0	0.0	0	0.0		
3	-3.5 ~ -3	8	8	0	0.0	0	0.0		
4	-3 ~ -2.5	5	4	0	0.0	1	1.0		20.0
5	-2.5 ~ -2	19	16	2	1.5	1	1.0	10.5	5.3
6	-2 ~ -1.5	12	11	0	0.0	0	0.0		
7	-1.5 ~ -1	43	32	3	2.2	5	5.1	7.0	11.6
8	-1 ~ -0.5	55	34	10	7.4	6	6.1	18.2	10.9
9	-0.5 ~ 0	91	58	18	13.2	14	14.3	19.8	15.4
10	0 ~ 0.5	119	49	32	23.5	28	28.6	26.9	23.5
11	0.5 ~ 1	111	34	32	23.5	29	29.6	28.8	26.1
12	1 ~ 1.5	64	22	31	22.8	8	8.2	48.4	12.5
13	1.5 ~ 2	18	4	8	5.9	4	4.1	44.4	22.2
14	2 ~ 2.5	2	0	0	0.0	2	2.0		100.0
14	2.5 ~ 3	0	0	0	0.0	0	0.0		
合計		550	275	136	100	98	100		

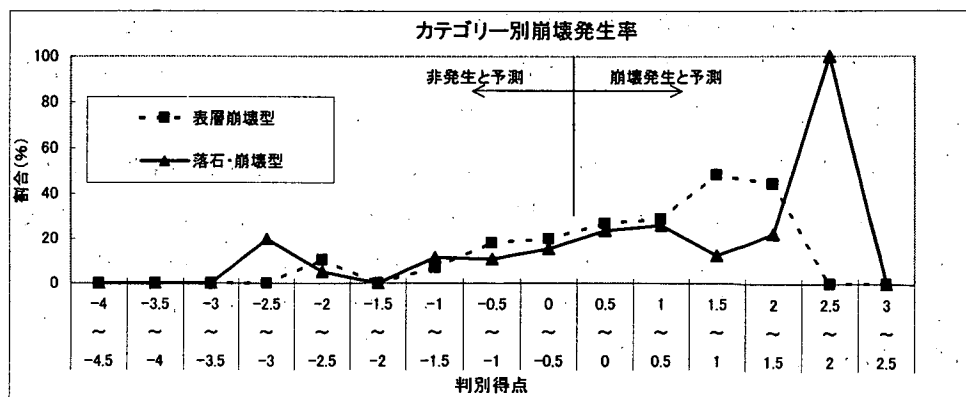
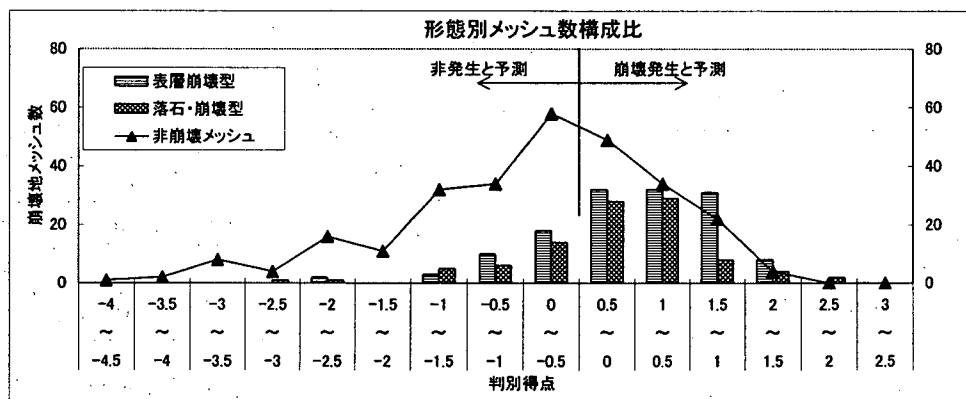


図 A6.1 住吉川の判別得点(住吉川全部)と崩壊、非崩壊メッシュの関係

項目名：崩壊形態別(表層崩壊型)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値
全数	411	0	1.085	-3.75	2.17
表層崩壊型	136	0.6	0.752	-1.69	2.17

レンジ区分		全数 (メッシュ) ①	非崩壊メッシュ (%) ②	崩壊メッシュ数				崩壊発生率(カテゴリ別)	
				表層崩壊型		落石・崩壊型		表層崩壊型(%) ③/①	落石・崩壊型(%) ④/①
				(メッシュ) ③	(%) ③/Σ③	(メッシュ) ④	(%) ④/Σ④		
1	-4.5 ~ -4	0	0	0	0.0				
2	-4 ~ -3.5	1	1	0	0.0				
3	-3.5 ~ -3	3	3	0	0.0				
4	-3 ~ -2.5	9	9	0	0.0				
5	-2.5 ~ -2	12	12	0	0.0				
6	-2 ~ -1.5	16	14	2	1.5			12.5	
7	-1.5 ~ -1	29	26	3	2.2			10.3	
8	-1 ~ -0.5	49	44	5	3.7			10.2	
9	-0.5 ~ 0	68	49	19	14.0			27.9	
10	0 ~ 0.5	67	44	23	16.9			34.3	
11	0.5 ~ 1	84	43	41	30.1			48.8	
12	1 ~ 1.5	60	27	33	24.3			55.0	
13	1.5 ~ 2	10	2	8	5.9			80.0	
14	2 ~ 2.5	3	1	2	1.5			66.7	
14	2.5 ~ 3	0	0	0	0.0				
合計		411	275	136	100				

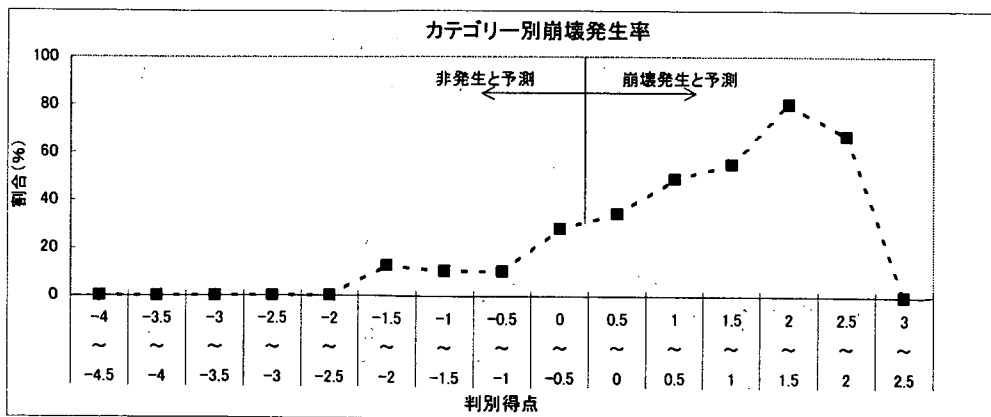
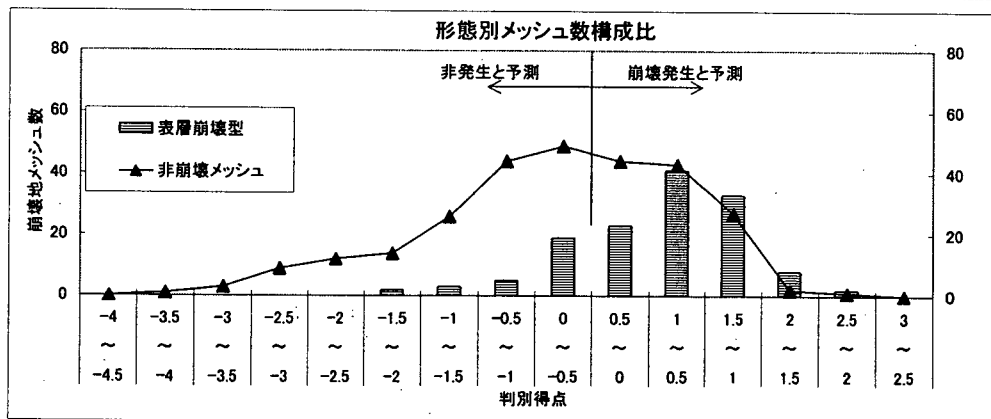


図 A6.2 住吉川の判別得点(表層崩壊型)と崩壊、非崩壊メッシュの関係

項目名：崩壊形態別(落石崩壊型)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値
全数	373	0	1.045	-3.46	2.51
落石・崩壊型	98	0.52	0.813	-2.19	2.51

レンジ区分	全数 (メッシュ) ①	非崩壊メッシュ (%) ②	崩壊メッシュ数				崩壊発生率(カテゴリ別)	
			表層崩壊型		落石・崩壊型		表層崩壊型(%) ③/①	落石・崩壊型(%) ④/①
			(メッシュ) ③	(%) ③/Σ③	(メッシュ) ④	(%) ④/Σ④		
1	-4.5 ~ -4	0	0		0	0.0		
2	-4 ~ -3.5	0	0		0	0.0		
3	-3.5 ~ -3	4	4		0	0.0		
4	-3 ~ -2.5	8	8		0	0.0		
5	-2.5 ~ -2	6	5		1	1.0		16.7
6	-2 ~ -1.5	23	20		3	3.1		13.0
7	-1.5 ~ -1	21	18		3	3.1		14.3
8	-1 ~ -0.5	34	33		1	1.0		2.9
9	-0.5 ~ 0	53	46		7	7.1		13.2
10	0 ~ 0.5	90	63		27	27.6		30.0
11	0.5 ~ 1	81	45		36	36.7		44.4
12	1 ~ 1.5	44	30		14	14.3		31.8
13	1.5 ~ 2	7	3		4	4.1		57.1
14	2 ~ 2.5	1	0		1	1.0		100.0
14	2.5 ~ 3	1	0		1	1.0		100.0
合計		373	275		98	100		

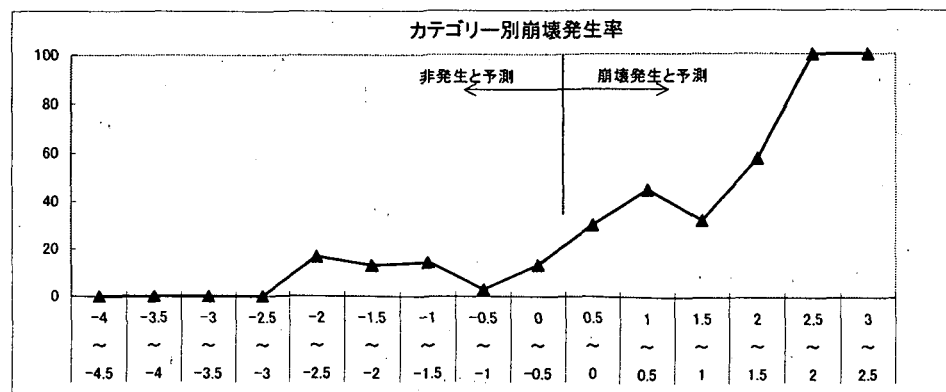
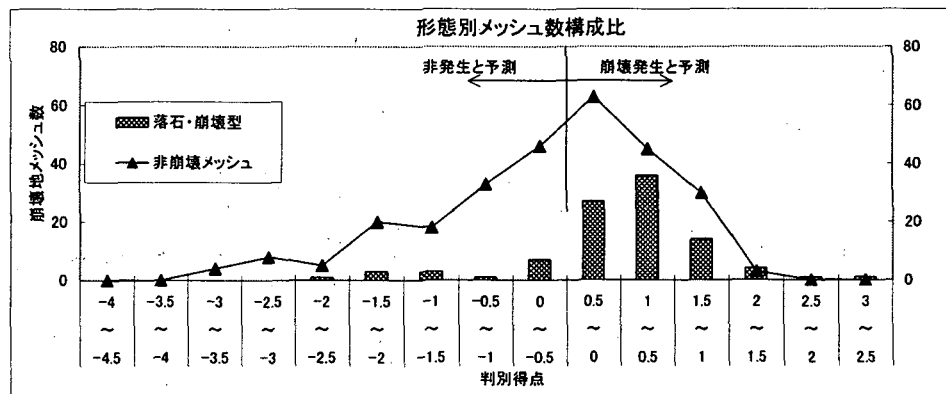


図 A6.3 住吉川の判別得点(落石崩壊型)と崩壊、非崩壊メッシュの関係

A6.3 分類正誤率の確認

ここでは、これまでの検討結果を、分類正誤率から整理した。判別解析の集計として、Case①では住吉川全域での線型判別解析結果を、Case②では表層崩壊型と落石・岩崩壊型の結果を組み合わせた場合で比較することとした(表 6.5)。なお Case②における崩壊予測の組み合わせでは、どちらか一方でも崩壊と判定されれば、崩壊と予測されたこととして取り扱うこととした。Case①と比較すると、Case②では分類正誤率が 3%程度低下しているが、実際の崩壊に対しての崩壊予測では 10%精度が向上し、最終的に 85.1%の予測が可能となる結果を示した。これより、ハザードマップ作成時には、崩壊形態別の判別式を重ね合わせることは有効である可能性が考えられ、今後、手法の精度向上に向けて検討すべき課題である。

表 A6.5 判別解析の結果

Case①:住吉川全部

			線型判別式による予測		合計
			非崩壊	崩壊	
実際の崩壊	度数	非崩壊	166	109	275
		崩壊	70	205	275
	パーセント	非崩壊	60.4	39.6	100
		崩壊	25.5	74.5	100
	合計		236	314	550

分類正誤率: 67.5 (%)

Case②表層崩壊型と落石・岩崩壊型の組み合わせ

			線型判別式による予測		合計
			非崩壊	崩壊	
実際の崩壊	度数	非崩壊	119	156	275
		崩壊	41	234	275
	パーセント	非崩壊	43.3	56.7	100
		崩壊	14.9	85.1	100
	合計		160	390	550

分類正誤率: 64.2 (%)

資料7 崩壊規模のばらつきが判別分析結果に及ぼす影響

崩壊規模にばらつきがあることが地震による斜面崩壊危険度評価の精度に及ぼす影響を把握するため、住吉川流域の崩壊実績を用いて、線形判別得点式、分類正誤率について検討を行った。

A7.1 崩壊データの規模別分類

住吉川流域の崩壊地のデータを崩壊幅から、①5m以下、②10m以下、③11m以上の3区分にタイプを分類した。図A7.1に崩壊規模別の頻度グラフを示した。

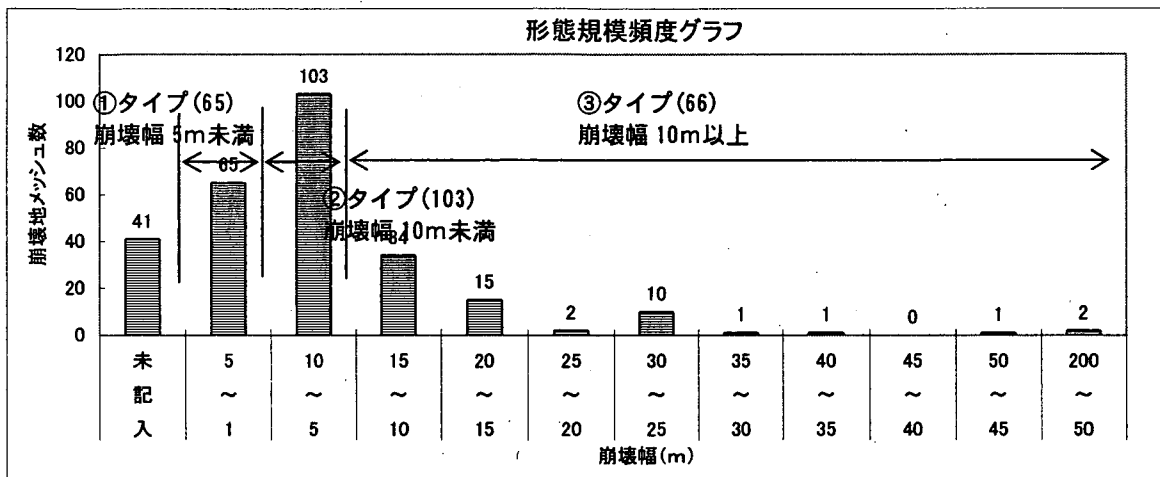


図 A7.1 住吉川エリアにおける崩壊規模別頻度グラフ

A7.2 崩壊規模別の判別得点－崩壊発生率関係

崩壊規模別の特徴を把握するため、住吉川流域での判別式(資料6参照)から判別得点を算出し、崩壊規模別の判別得点－崩壊発生率関係を図A7.2に整理した。検討の結果、それぞれの区分においても非崩壊と崩壊の頻度分布のピークをみると、いずれの崩壊規模に関しても判別得点により非崩壊と崩壊をある程度分離できていることがわかった。

また、いずれの崩壊規模に関しても、判別得点－崩壊発生率関係は判別得点の増加に従い、崩壊発生率が上昇する傾向が見られ、崩壊規模による著しい特徴はみられなかった。このことは、崩壊規模にばらつきがあることが、判別分析の精度に及ぼしている影響は小さいと考えられる。すなわち、崩壊規模の分布を考慮しても、地震による斜面崩壊発生危険度評価の精度が急激に向上することはないと考えられる。

項目名：崩壊規模別(全部)

	データ数 (箇所)	平均値	標準偏差	最小値	最大値
全数	550	0	1.08	-4.2	2.17
5m以下	65	0.54	0.75	-2.46	1.89
10m未満	103	0.35	0.86	-2.42	1.96
11m以上	66	0.42	0.8	-2.67	2.17
未記入	41	0.31	0.82	-1.69	1.61

レンジ区分		全数 (メッシュ) ①	非崩壊メッシュ (%) ②	崩壊メッシュ数				崩壊発生率(カテゴリ別)		
				5m以下 ③	10m以下 ④	11m以上 ⑤	未記入 ⑥	5m以下(%) ③/①	10m以下(%) ④/①	11m以上(%) ⑤/①
1	-4.5 ~ -4	1	1	0	0	0	0			
2	-4 ~ -3.5	2	2	0	0	0	0			
3	-3.5 ~ -3	8	8	0	0	0	0			
4	-3 ~ -2.5	5	4	0	0	1	0			20.0
5	-2.5 ~ -2	19	16	1	2	0	0	5.3	10.5	
6	-2 ~ -1.5	12	11	0	0	0	1			
7	-1.5 ~ -1	43	32	1	5	2	3	2.3	11.6	4.7
8	-1 ~ -0.5	55	34	3	9	4	5	5.5	16.4	7.3
9	-0.5 ~ 0	91	58	6	18	8	1	6.6	19.8	8.8
10	0 ~ 0.5	119	49	19	20	21	10	16.0	16.8	17.6
11	0.5 ~ 1	111	34	19	24	18	16	17.1	21.6	16.2
12	1 ~ 1.5	64	22	11	20	8	3	17.2	31.3	12.5
13	1.5 ~ 2	18	4	5	5	2	2	27.8	27.8	11.1
14	2 ~ 2.5	2	0	0	0	2	0			100.0
14	2.5 ~ 3	0	0	0	0	0	0			
合計		550	275	65	103	66	41			

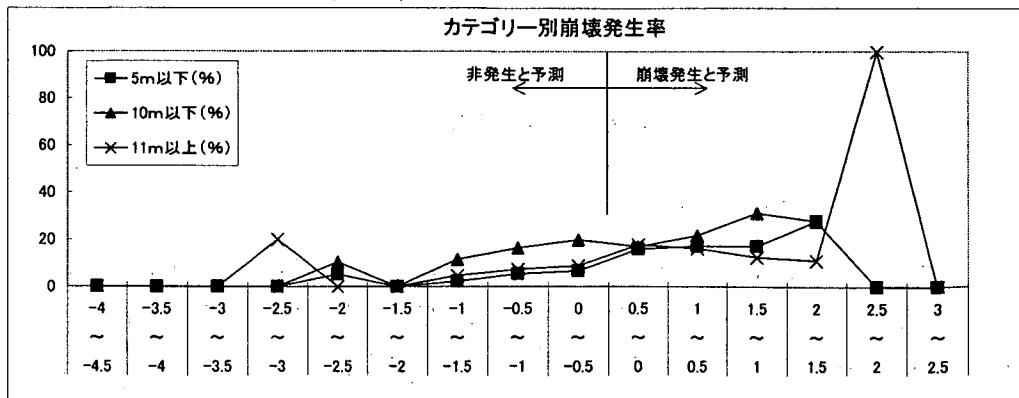
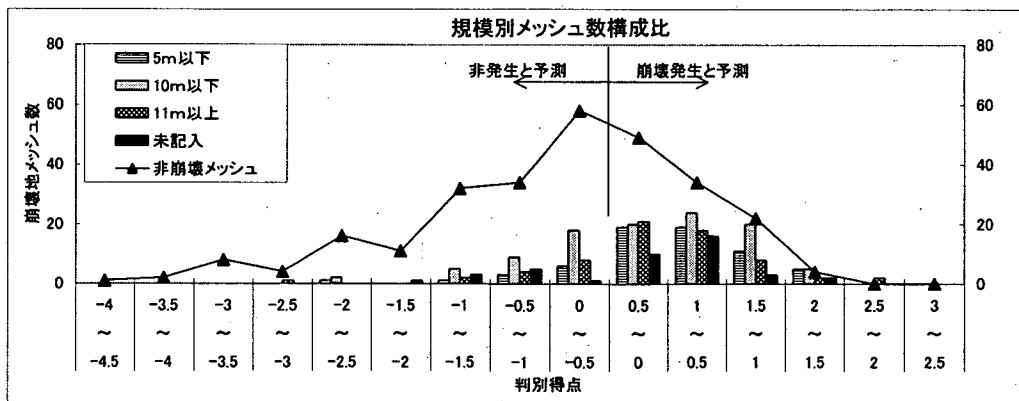


図 A7.2 崩壊規模別の判別得点ヒストグラム(住吉川エリアの判別得点式を用いた場合)

資料 8 判別関数の関数形の検討

崩壊・非崩壊の分離に際し、線形でない関数を用いる方法について検討した。関数形に関しては、マハラノビスの距離による分離手法を適用し、分類正誤率が向上しているかを考察した。

A8.1 マハラノビスの距離とは

2群以上の母集団から抽出した標本データを得て、いまどの母集団に属するか不明のサンプルデータがあるとする。このサンプルデータがどの母集団に属するか調べる方法に、判別分析がある。判別分析を実施するには、集めた標本がどの母集団に属しているのかをあらかじめ区分けしておく必要がある。区分けする方法に、線形判別式を使用する方法のほかに、マハラノビスの距離を用いる方法がある。

ここで1変量のデータA群とB群が図 A8.1 の様に分布しているとする。A群のデータは分散の大きいデータ群、B群のデータは分散の小さいデータ群である。この時所属不明のデータ x_p がある時、この所属不明のデータ x_p がA群、B群のどちらに所属するデータであるかを調べる。

標本	A群	B群
1	x_{1A}	x_{1B}
2	x_{2A}	x_{2B}
...
n	x_{nA}	x_{nB}
平均	\bar{x}_A	\bar{x}_B

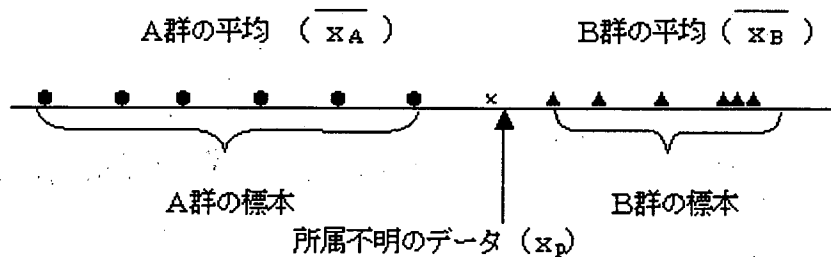


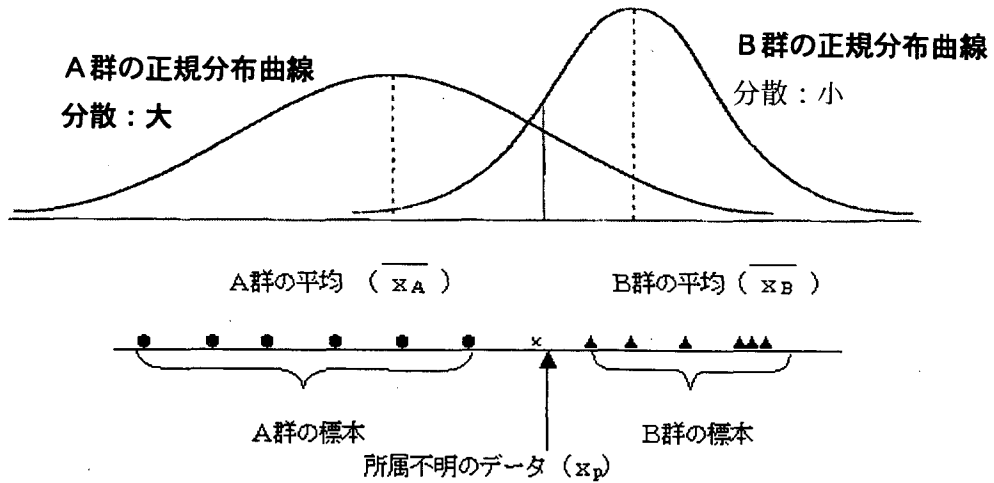
図 A8.1 1変量のデータの分布

単純に x_p からそれぞれの群の中心までの距離を見ると、

$$|x_p - \bar{x}_A| > |x_p - \bar{x}_B|$$

となり、明らかにこの x_p はB群の中心に近い。このため、この x_p はB群のデータであるように思える。しかしA群は分散の大きいデータ群であり、B群は分散の小さいデータ群である。この分散を考慮しないで、単純に距離だけでどちらの群に所属するのかを判断することはできない。この分散を考

慮した距離が「マハラノビスの距離」である。



1変量時のマハラノビスの距離を D^2 とすると、

$$D^2 = \left(\frac{\bar{x} - x}{\sigma} \right)^2 \quad \sigma : \text{標準偏差}$$

となる。このようにマハラノビスの距離では、分散の大きいデータほど小さくなり、逆に分散の小さいデータほどマハラノビスの距離は大きくなる。つまりマハラノビスの距離が等しければ、確率的には等しい位置にあることになる。

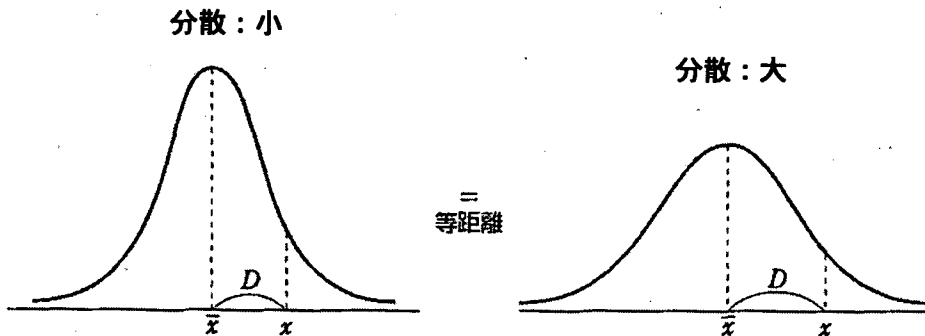


図 A8.3 マハラノビス距離と確率の関係

A群の平均を \bar{x}_A ・分散を S_A^2 、B群の平均を \bar{x}_B ・分散を S_B^2 とすると、所属不明データ x_p から、それぞれの群へのマハラノビスの距離を求めると

① x_p からA群へのマハラノビスの距離 D_A^2 は

$$D_A^2 = \left(\frac{x_p - \bar{x}_A}{S_A} \right)^2$$

② x_p からB群へのマハラノビスの距離 D_B^2 は

$$D_B^2 = \left(\frac{x_p - \bar{x}_B}{S_B} \right)^2$$

ここで、 $DA^2 < DB^2$ であれば x_p は A 群に近く、逆に $DA^2 > DB^2$ であれば x_p は、B 群に近いと判別する。

A8.2 マハラノビスの距離による判別の結果

住吉川流域でのデータを利用してマハラノビスの距離を算出し、判別予測した。なお、判別分析に用いる非崩壊メッシュのデータは、資料 6、7 と同様に、非崩壊メッシュの中から崩壊メッシュ (275 箇所) と同数のメッシュをランダムにサンプリングした。

表 A8.1 マハラノビス距離を用いた判別の結果

			マハラノビス距離による予測		合計
			非崩壊	崩壊	
実 際 の 崩 壊	度数	非崩壊	163	112	275
		崩壊	65	210	275
	パーセント	非崩壊	59.3	40.7	100
		崩壊	23.6	76.4	100
	合計		228	322	550

分類正誤率: 67.8 (%)

線型判別得点式から得られた結果およびマハラノビス距離から判定した結果とを比較した (表 A8.1)。その結果、①マハラノビス距離を利用しても、崩壊・非崩壊の判別の難しいデータがあり、精度向上の結果は得られないこと、②他地域への適応を考慮した場合、マハラノビス距離を算出する方法では、重心からの距離により所属を分類するため、過去に崩壊が発生したことがない地域には適応が難しいこと、③実際の崩壊分布をみても、勾配、平均曲率および加速度の独立変数 (3.3 および 3.4 参照) だけでは分離が難しいことから、これ以上の精度の向上は難しいと考えられる。

参考資料 多変量解析と判別分析

ここでは、「図解でわかる多変量解析 涌井良幸ほか 2001 (株)日本実業出版社」及び「すぐわかる統計用語 石村貞夫 1997 東京図書株式会社」を参照し、多変量解析及び判別分析の概要を説明する。

1. 多変量解析について

多変量解析とは複数の変数に関するデータをもとにして、これらの変数間の相互関連を分析する統計的手法の総称である。代表的な2つの方法として、「一つの変数を複数の変数で予測・説明・判別する」方法と、「複数の変数間の関係性を探る方法」がある。前者は独立変数(説明変数)と従属変数(基準変数, 目的変数)が存在し後者には存在しないが、今回の解析のように説明されるべき変数(地震時崩壊の発生・非発生)とそれを説明する変数(地形量, 地震動など)が存在する場合は前者に相当する。

さらに、それらの変数が質的データであるか量的データであるかにより手法が分類される(表 R1 参照)。量的データと質的データが混在する場合には、量的データをカテゴリ区分し質的データと見なすのが一般的である。

表 R1 多変量解析の手法

		基準変数	
		量的データ	質的データ
説明変数	量的データ	重回帰分析	判別分析
	質的データ	数量化Ⅰ類	数量化Ⅱ類

2. 判別分析による地形量の絞り込み

判別分析では、式 R1 に示すように説明変数に係数をかけ足し合わせた和が、2つのグループで、できるだけ異なるように係数を決定する。すなわち、図 R1 に示すように仮に説明変数が2つとした場合、説明変数をそれぞれ軸にとり、散布図を作成した場合に、2つのグループをできるだけうまく分離する直線Lを決定することに相当する。

$$Z = a_1x_1 + a_2x_2 + a_0 \quad \text{式 R1}$$

Z: 判別得点

a_n : 判別関数係数

x_n : 説明変数

$$r = \frac{|a_1x_1 + a_2x_2 + a_0|}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}$$

式 R2

r: 境界線からの距離

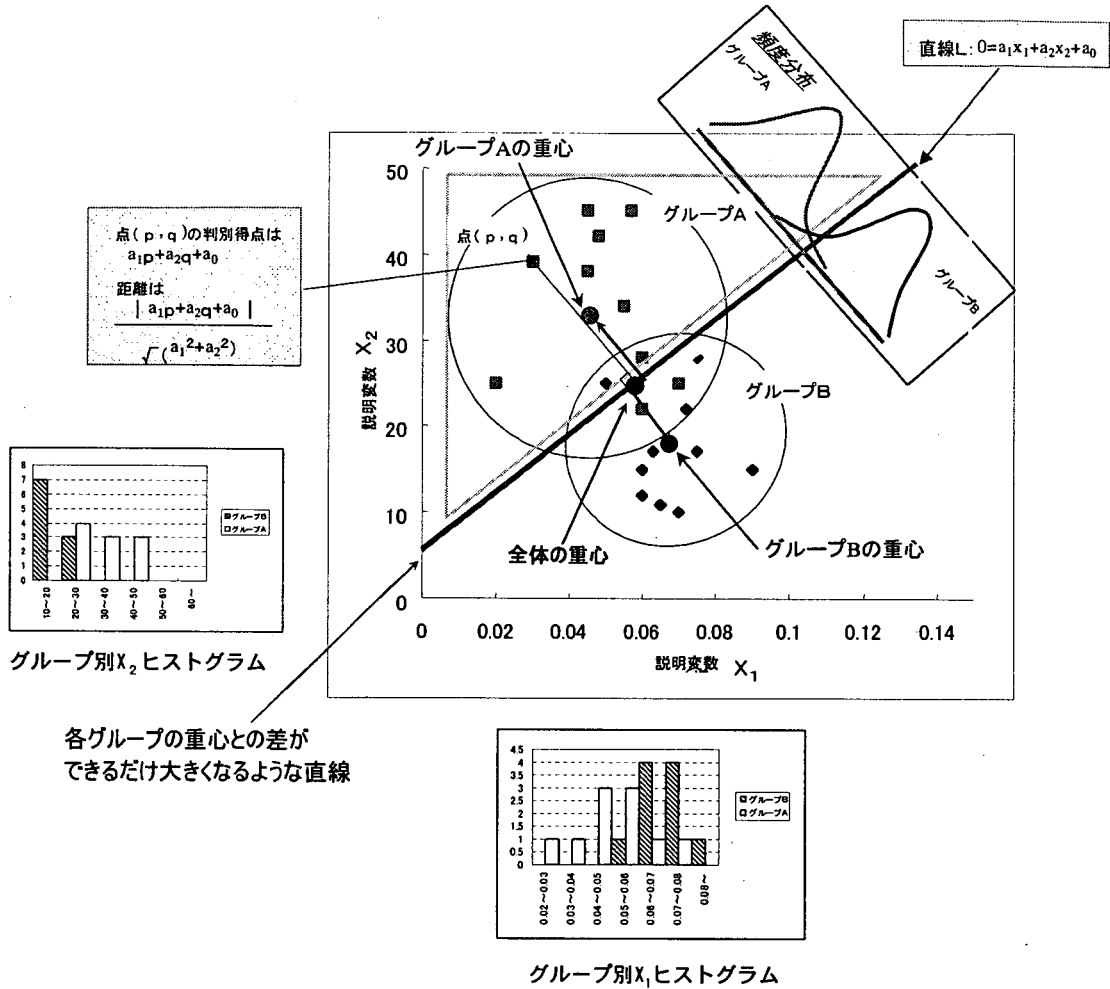


図 R1 判別分析の考え方

この際、 $a_1 < 0$ 、 $a_2 > 0$ とすると、図 R1 に示す直線より右下の領域は判別得点が負、直線より左上の領域は判別得点が正で示されるが、判別分析では判別得点が正の場合をグループA、判別得点がBの場合をグループBと判断する。なお、各点から直線Lまでの距離は、式 R2 で表されるため、判別得点は各点がグループの境界線(直線L)からどの程度離れているかを示していると考えてよい。

さらに、判別分析の結果、実際のグループAの個数を N_1 、判別分析の結果崩壊であると分類されたグループAの個数を N_2 とし、その割合を計算したもの(N_2/N_1)をグループAの分類正誤率(正答率)といい、グループBについても同様である。

また、判別関数係数の大きさは判別得点、すなわち直線L1からの距離に大きく寄与するため、判別により重要な変数であると考えられる。ただし、通常要因として与えるx1, x2の単位が異なる、すなわち軸の取り方のスケールが異なり、直接係数を比較することができない。そこで、係数を比較可能とするためには、全てのデータを標準化して判別分析を行う必要がある。データを標準化した場合の判別関数係数を標準化された正準判別関数係数とよび、この値を比較することにより変数の重要性を比較することができる。

なお、本研究では判別分析には SPSS Inc.製の統計用ソフト『SPSS』を利用した。

※ 分類正誤率(判別的中率または正答率)とは・・・

判別分析では 2 つのグループのどちらに属するか不明な灰色の領域にあるデータの判別が可能になりますが、当然判断ミスも伴う。そこで、分類正誤率という指標により、どのくらいの判断ミスがあるのかが把握できる。なお分類正誤率を判別的中率または正答率と呼ぶ文献もある。

分類正誤率は次のように定義される。

$$\text{分類正誤率} = \frac{\text{正しく判別されたデータの個数}}{\text{全データの個数}}$$

なお、本研究では以下の表のように整理した。

		判別式による予測		合計	
		崩壊なし	崩壊あり		
実際の崩壊	度数	崩壊なし	①	②	⑤=①+②
		崩壊あり	③	④	⑥=③+④
	%	崩壊なし	⑦=①/⑤	⑧=②/⑤	⑦+⑧
		崩壊あり	⑨=③/⑥	⑩=④/⑥	⑨+⑩

元のグループ化されたケースのうち分類正誤率:(①+④)/(⑤+⑥)% 個が正しく分類されました。

: 正判別
 : 誤判別

※ 標準化された正準判別関数係数とは・・・

データを標準化してから判別分析を行い、各説明変数の相関係数が最大となるように判別関数係数を算出したもの。つまり、本研究で言えば、説明変数の単位の影響を受けずに崩壊発生への寄与率を把握できる。具体的には、

標準化された判別関数係数 = 標準化されていない判別関数係数 × 標準偏差
で求める

.....

国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of N I L I M
No. 204 November 2004

編集・発行 © 国土技術政策総合研究所

.....

本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地
企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2211