

地震時における斜面の簡易信頼性評価法 に関する基礎的研究

酒井 久和¹・奥村 誠²・塩飽 拓司³・香川 敬生⁴・長谷川 浩一⁵・
澤田 純男⁶・多々納 裕一⁷

¹正会員 広島工業大学教授 工学部建築工学科 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅2-1-1)
E-mail: h-sakai@cc.it-hiroshima.ac.jp

²正会員 東北大学教授 東北アジア研究センター (〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1)
E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

³非会員 大林組 大阪本店建築事業部 (〒540-8584 大阪市中央区北浜東4-33)
E-mail: shiwaku.takushi@obayashi.co.jp

⁴正会員 鳥取大学大学院教授 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)
E-mail: kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

⁵非会員 OYOインターナショナル 地震防災部 (〒112-0002 東京都文京区小石川1-1-17)
E-mail: hasegawa@oyointer.com

⁶正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁷正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail: tatano@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

本研究では、広域な道路ネットワークの地震による途絶確率を把握する目的で、斜面の崩壊確率の簡易的な算定手法の提案を行った。国土交通省から提供を受けた六甲全山の地形データ、1995年兵庫県南部地震の斜面崩壊領域データ、地表面加速度データなどをもとに、全斜面から補強斜面を除外した。斜面の勾配、平均曲率、地表面最大加速度を説明変数としたロジスティック回帰分析とともに、平均曲率を除いた回帰分析も行った。その結果、斜面の勾配、地表面最大加速度に基づく斜面の崩壊確率の推定式が、兵庫県南部地震における実崩壊状況と整合し、実用化の可能性を有することが確かめられた。

Key Words : *logistics regression analysis ,slope, collapse ratio, earthquake , digital elevation model*

1. はじめに

被害地震が発生するたびに、道路などのライフラインが被害を受けているが、2011年東北地方太平洋沖地震、2004年新潟県中越地震では、多大な損傷を受けた東北自動車道、関越自動車道が、早期に復旧したことが遠方からの緊急車両の流入に大いに役立った。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震では、津波や地盤沈下が主要因として道路が被災し、2004年の新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2008年岩手・宮城内陸地震などの近年の被害地震では、橋梁被害、斜面崩壊、道路盛土被害

により道路ネットワークが途絶し、孤立集落が発生した。これらの地震による道路ネットワークの途絶は、医療、救出、緊急物資などの緊急車両の通行が制限され、地震により被災した住民がさらに厳しい状況下におかれることとなった。そのため、各種自治体では道路ネットワークを確保するために道路の耐震補強などの地震対策を強化している^(例:1),2),3)。

しかし、今日の限られた予算内で道路の地震対策を行うには限界があり、現在の多くの自治体で採用されている重要路線の耐震化の他に、被災確率の小さなルートを重点的に補強することが効果的であると考える。そのた

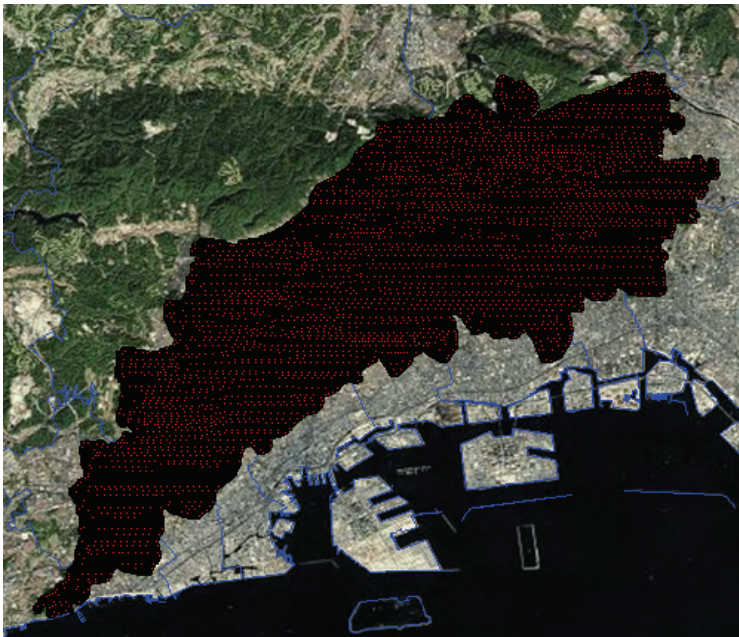


図-1 検討対象領域(六甲全山)

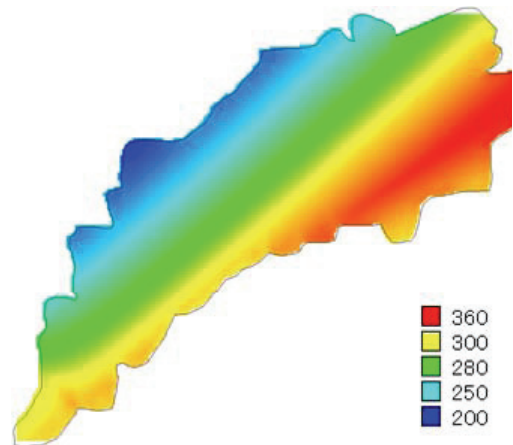


図-2 六甲全山のPGA (Gal)

めには、想定地震において、道路の被災確率を把握する必要がある。

広域な道路盛土、斜面などの危険度を研究した事例は少なくない。本研究では、それらのうち、斜面を対象に地震時の被災確率を評価するが、広域的に入手容易なデータに基づいて斜面の地震時の危険性を評価する手法も数種提案されている。松岡、翠川⁴⁾は、1974年伊豆半島沖地震、1978年伊豆大島近海地震、1978年宮城県沖地震、1984年長野県西部地震、1987年千葉県東方沖地震の5地震の被害データに基づいて、斜面崩壊に大きな影響を与えるものとして、最大地動速度、地盤の傾斜度、地形分類、堆積物の4要因(アイテム)を抽出し、重回帰分析により3段階の危険度を提案している。内田ら⁵⁾は、国土地理院の高密度な数値標高モデル(DEM: Digital Elevation Model)を用いて、地震時の斜面崩壊の危険度を1995年兵庫県南部地震の際の六甲山全山の被害と、斜面勾配、平均曲率、最大加速度データとの関係から線形判別関数を用いた簡易手法を提案している。さらに、小山内ら⁶⁾は2004年新潟県中越地震、長谷川ら⁷⁾は2007年新潟県中越沖地震に適用し、内田らの手法の有用性を示している。しかし、内田らの線形判別関数では、そもそも判別値が正の値で崩壊、負で非崩壊と判別されるもので、崩壊斜面の9割は崩壊と判定されるものの、地震時の斜面崩壊率が小さいために、崩壊と判定されているものの中の非崩壊の斜面は5割余り存在し、全体的中率は49%に留まっている。また、判別式から直接的に崩壊率が得られるのではなく、判別値と既往地震の被害率の関係から斜面の被害を求めることになるため、斜面の脆弱性評価関数は階段状の不連続性を示すことになる。そこで本研究では、斜面の崩壊、非崩壊の2

値の質的な目的変数を、被災確率としての量的変数として予測するロジスティックモデルで評価する。

2. 検討方法

(1) 検討データ

本研究では、内田らの兵庫県南部地震における六甲山全斜面の地形、地表面最大加速度(PGA)データおよび崩壊ポリゴンデータ^{5,8)}を基に研究を進める。ただし、内田らの平均曲率データには、99%が-0.03~0.03の範囲内にあるにもかかわらず、1.00の値を示す特異なデータが存在していたため信頼性の観点から除去した。まず、崩壊ポリゴンデータからMapInfoを用いて崩壊、非崩壊メッシュの判別を行う。この際、メッシュに崩壊領域が含まれたものを崩壊メッシュと判定する。次に、全斜面の地形データには自然斜面と補強斜面のデータの両方が含まれているため、自然斜面の崩壊確率を求めるのに不要な補強斜面を抽出する。具体的には、兵庫県神戸県民局神戸土木事務所公園砂防課の神戸市の六甲全山(灘区、東灘区、中央区、長田区、須磨区、兵庫区、北区一部、垂水区一部)における斜面補強工事記録⁹⁾、同課の阪神・淡路大震災被害箇所図¹⁰⁾、地盤工学会の阪神淡路大震災調査報告¹¹⁾、Googlemapの衛星写真に基づいて補強エリアを特定し、全斜面データから除外する。ちなみに10m×10mの全約170万メッシュのうち、崩壊メッシュは約1万5千、崩壊メッシュは補強メッシュは2,111であった。(図-1参照)

地震動データのPGAの平面分布を図-2に示す。この地震動は、Fukushima and Irikuraの断層モデル¹²⁾に福島、

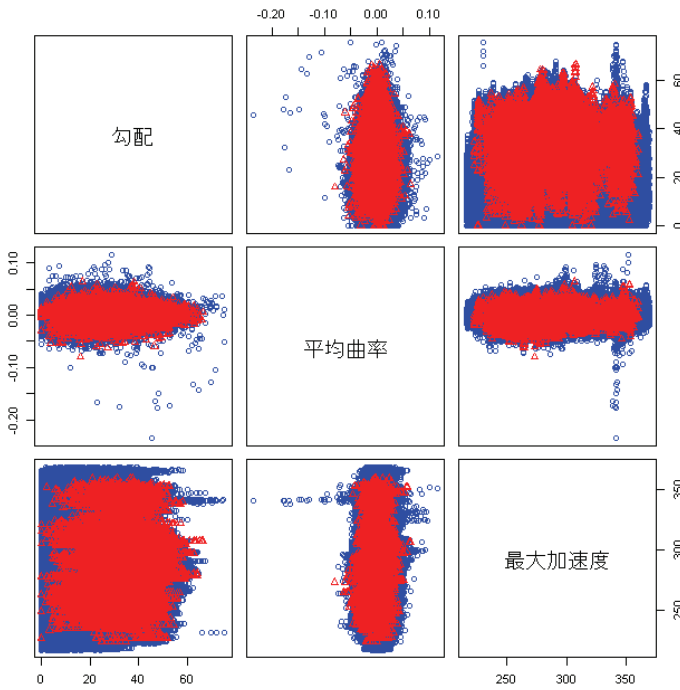


図-3 説明変数データの散布図 (○: 非崩壊, △: 崩壊)

表-1 回帰分析ケースにおける説明変数

| | 勾配 | 平均曲率 | PGA |
|-------|----|------|-----|
| Case1 | ○ | ○ | ○ |
| Case2 | ○ | — | ○ |

田中の距離減衰式¹³⁾, 司, 翠川の破壊伝播効果¹⁴⁾, 翠川の地盤の増幅効果¹⁵⁾を考慮されたものである. 図-2より, 六甲全山ではPGAは約200~400Galの範囲内で北西方向にPGAが小さくなる傾向があり, 東側の東灘区, 芦屋市, 西宮市の山間部で大きなPGAが作用していることが示されている.

検討データ(斜面勾配, 平均曲率, PGA)の散布図を図-3に示す. 図-3より, 一見すると崩壊データが斜面勾配が小さく, PGAが小さい領域でも分布しており, 逆に勾配が大きく, PGAが大きい領域でも非崩壊のデータが存在することが分かる. これは本データに斜面の地盤状態や集水地形状況など, 斜面崩壊に影響が大きいと考えられている要素が含まれていないこと, PGAが簡易な距離減衰式で算定されていることに起因すると考えられる. しかしながら, 本研究では, 広域な斜面崩壊分布を求めるにあたっては, 前述のように容易に入手可能なデータをもとにすることが実用面で重要であると考え, 上記の3つの説明変数を採用する.

(2) ロジスティック回帰分析

本研究のロジスティック回帰分析では, 斜面の崩壊率を斜面勾配, 平均曲率, PGAの説明変数群で評価する. 評価式を式(1)に示す. ロジスティック回帰分析の詳細

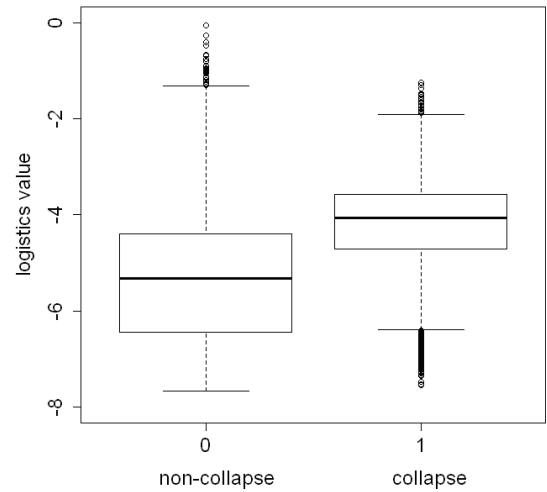


図-4 箱ひげ図 (Case1)

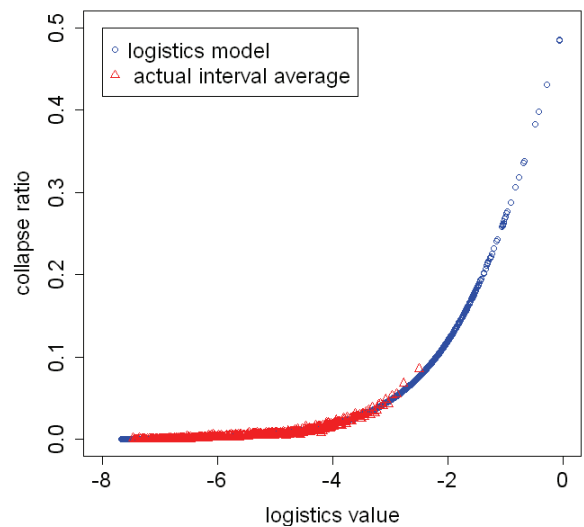


図-5 ロジット値と斜面崩壊率の関係 (Case1)

については, 文献16)を参照されたい.

$$p(x) = \frac{1}{1 + \exp\{-(b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n)\}} \quad (1)$$

ここに, $p(x)$ は, 崩壊確率, b_n は偏回帰係数, x_n は説明変数を意味する.

説明変数として, 内田らが地形要因の分析を経て採用した斜面勾配, 平均曲率, PGAだけでなく, 平均曲率を除いたケースについても分析を行う. ただし, 統計解析には, 統計ソフトウェア R^{17),18)}を使用した. 分析ケースを表-1に示す.

表-2 ロジスティックモデルの偏回帰係数と有意水準 (Case1)

| | 係数 | 有意水準 |
|------|--------|----------|
| 定数 | -7.90 | 2e-16 |
| 勾配 | 0.090 | 2e-16 |
| 平均曲率 | -6.70 | 1.25e-15 |
| PGA | 0.0019 | 1.01e-11 |

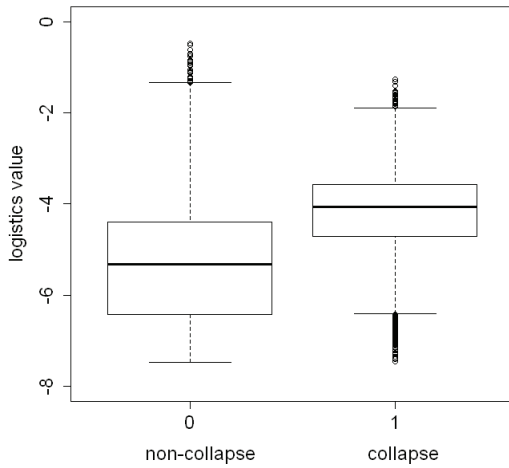


図-6 箱ひげ図 (Case2)

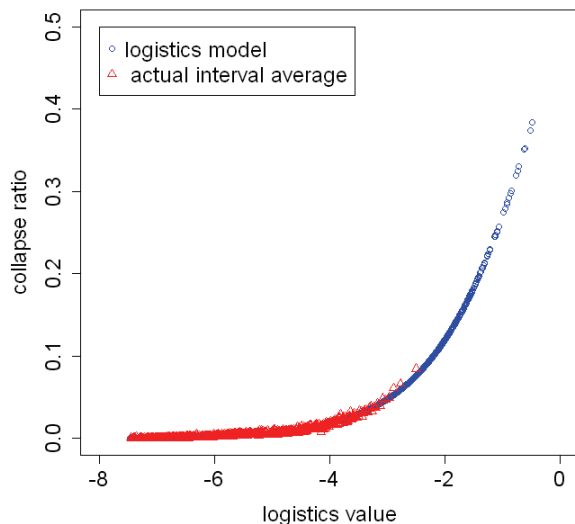


図-7 ロジット値と斜面崩壊率の関係 (Case2)

表-3 ロジスティックモデルの偏回帰係数と有意水準 (Case2)

| | 係数 | 有意水準 |
|-----|--------|---------|
| 定数 | -7.89 | 2e-16 |
| 勾配 | 0.090 | 2e-16 |
| PGA | 0.0019 | 1.3e-11 |

3. 分析結果

(1) Case1

内田らの提案手法で採用された説明変数 (勾配, 平均曲率, PGA) を用いて, ロジスティック回帰分析を行う。

得られた箱ひげ図, ロジット値と斜面崩壊率の関係, 有意水準を図-4, 図-5, 表-2に示す。ただし, 図-5中の赤三角の実際の斜面の崩壊率は, ロジット値を大小順に並べ替えた後 500 等分し, その範囲内での崩壊斜面数と全斜面数との比であり, その際のロジット値はその範囲内での平均値である。

図-4より非崩壊のデータで崩壊データよりもロジット値が大きな外れ値は存在するが, 非崩壊の第3四分位点が崩壊の中央値より小さく, 両者の箱の重なりも小さい。すなわち非崩壊のデータの少なくとも 3/4 は崩壊データの中央値よりも小さなロジット値を示しており, 崩壊, 非崩壊データのロジット値の分布が大きく異なっている。また, 図-5より, 斜面崩壊のロジスティックモデルによる推定式 (図中の青丸が各データの算定値) が, 実際の被害率と比較して非常に高精度であることが分かる。ただし, ロジット値を小さい方から 200 分割したデータの最大の崩壊率は約 1 割であり, また, プロット図-4の非崩壊, 崩壊データの外れ値から分かるように, 図-5のロジスティック値の相対的に大きな-1 以上の領域は, 全て非崩壊のデータとなっている。偏回帰係数については, 表-2より斜面勾配と PGA の係数が正の値となっており, 実現象と整合した符号となっている。平均曲率の偏回帰係数は負であるが, これは水平, 鉛直方向とも凸型の斜面である方が崩壊率が高いことを意味する。

(2) Case2

平均曲率は地形の凹凸の指標として用いられ, DEM を使用して容易に算定は可能であるが, 自治体^(例えば19),20)で広く使用されている危険個所のカルテには定量的な診断項目に含まれていない。そのため, 地震時の斜面崩壊に最も影響の強い要因として, 斜面勾配とPGAを用いて回帰分析を行う。得られた回帰分析結果と偏回帰係数, 有意水準を図-6, 図-7, 表-3に示す。

図-6より, 非崩壊と崩壊のデータの分布状況は, Case1と同様に非崩壊の第3四分位が崩壊の中央値より小さく, 両者の箱の重なりも小さい。また, 図-7においても, Case1と傾向はほとんど変わらず, ロジスティックモデルの推定式は実崩壊確率とよく整合している。その他, ロジスティック値を200分割したデータの最大の崩壊率が1割程度であり, ロジスティック値が-1 以上領域は非崩壊データが占めることなど, Case1とほぼ同様の傾向が見られる。また, 表-3より, 勾配, PGA, 定数の偏回帰係数がCase1と同値であり, これらのロジスティック値に対する影響度が平均局率を説明変数として採用しない場合と変わらないことが分かる。

前述のように, Case1とCase2の分析結果を比較して, 説明変数として平均曲率採用することによる効果が顕著に見られないことから, 本研究では少ない説明変数のケ

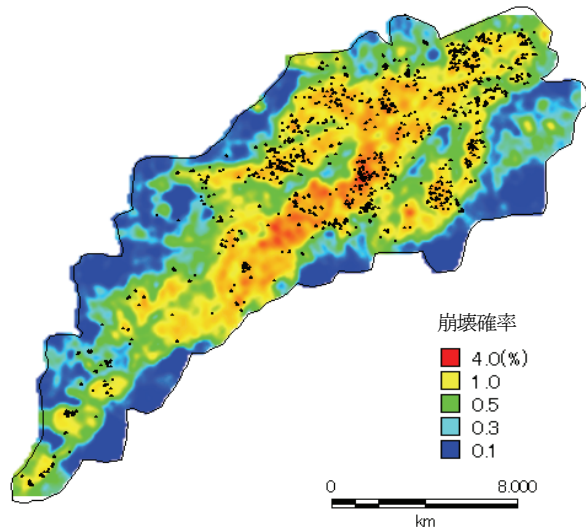


図-8 回帰分析の崩壊確率と崩壊箇所図 (Case2)

ース, Case2 (斜面勾配, PGA) を推奨する。

ここで, 本推定手法の適用性を検証する目的で, Case2のリスク評価式により求められた崩壊確率を基に分布図を作成し, 兵庫県南部地震の斜面崩壊領域と照らし合わせて, 評価式の妥当性を確認する。斜面崩壊確率分布マップと崩壊領域をプロットし図-8に示す。

図より, 崩壊を示す領域がロジスティックモデルによる崩壊確率の小さいエリアにはほとんど見られず, 崩壊確率の大きな暖色系のエリアに分布していることから, 推定結果が実被害と整合していると考えられる。ただし, 図中の緑と寒色系のエリアについては, 地震動指標が主に距離減衰式に基づいて求められていることから, 1%未満の精度を議論できないことを記しておく。

4. まとめ

本研究では, 六甲山全地形データ, 崩壊領域ポリゴンデータ (多角形の面データ) を基に, 斜面崩壊, 非崩壊を判別し, ロジスティックモデルを用いて, 兵庫県南部地震における六甲全山の自然斜面崩壊リスク評価方法の検討を行った。その結果, 容易が入手可能な地形データとして斜面勾配と地表面最大加速度 (PGA) を用いた下記の評価式により, 兵庫県南部地震の崩壊エリアと整合した結果が得られることが確かめられた。

$$p = \frac{1}{1 + \exp\{-(-7.89 + 0.09\text{Ang} + 0.0019\text{PGA})\}} \quad (2)$$

ここに, p : 崩壊確率

Ang: 斜面の勾配(deg.)

PGA: 地表面加速度 (Gal)

今後, 他の地域や地震被害についても本手法の妥当性を検証し, 想定地震に対する斜面の崩壊確率算定手法として, 実問題に適用したいと考える。

謝辞: 本研究で使用した地形データ, 斜面の崩壊データ等は, 近畿地方整備局六甲砂防事務所, 国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室から提供を受けた。また, 本研究は, 土木学会リスク評価に基づく道路構造物・ネットワークの耐震設計に関する合同研究小委員会 (多々納裕一, 澤田純男委員長) の研究活動の一環として実施した。委員各位には研究を進めるにあたり, 貴重な意見, 助言を頂いた。ここに関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 鹿児島県: 孤立化集落対策マニュアル, 2007.
- 2) 青森県県土整備部: 防災公共について, 2011.
- 3) 愛媛県土木部: 社会資本総合整備計画, 2012.
- 4) 松岡昌志, 翠川三郎: 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集, No.474, pp.59-66, 1995.
- 5) 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: 地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究, 国総研資料, No.204, 2004.
- 6) 小山内信智, 内田太郎, 野呂智之, 山本悟, 小野田敏, 高山陶子, 戸村健太郎: 既往崩壊事例から作成した地震時斜面崩壊発生危険度評価手法の新潟県中越地震への適用, 砂防学会誌, Vol.59, pp.60-65, 2007.
- 7) Hasegawa, S., Dahal, R. K., Nishimura, T., Nonomura, A., and Yamanaka, M.: DEM-Based Analysis of Earthquake-Induced Shallow Landslide Susceptibility, *Geotechnical and Geological Engineering*, pp.419-430, Vol.27, Issue 3, 2009.
- 8) 国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所: 六甲山系の斜面崩壊地判読図, 1995~1999.
- 9) 兵庫県神戸県民局神戸土木事務所公園砂防課, 神戸市斜面補強工事記録
- 10) 兵庫県神戸県民局神戸土木事務所公園砂防課, 阪神・淡路大震災被災箇所図, 1997.
- 11) 地盤工学会: 阪神淡路大震災被害報告書, 1997.
- 12) Fukushima, Y. and Irikura, K.: Attenuation characteristics of peak ground motions in the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, *Journal of Physics of the Earth*, No.45, pp.135-146, 1997.
- 13) 福島美光, 田中貞二: 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 1992 年秋季大会講演予稿集, p.116, 1992.
- 14) 司宏俊, 翠川三郎: 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, No.546, pp.47-53, 2001.

- 15)Midorikawa, S. : A Study of Site Amplification Effects on Ground Motions in Santiago Chile, *Tectonophysics*, Vol. 218, No. 1-3, pp. 273-280, 1993.
- 16)丹後俊郎, 山岡和枝, 高木晴良: ロジスティック回帰分析 —SAS を利用した統計解析の実際—, 朝倉書店, 1996.
- 17)青木繁信: R による統計解析, オーム社, 2009.
- 18)山田剛史, 杉澤武俊, 村井潤一郎: R による優しい統計学, オーム社, 2008.
- 19)埼玉県: 埼玉県地震被害想定調査報告書, 2011.
- 20)福岡県: 福岡県地震に関する防災アセスメント調査報告書, 2012.
- (2012. 11. 6 受付, 2013. 2. 1 修正, 2013. 2. 23 受理)

A FUNDAMENTAL STUDY ON SIMPLIFIED METHOD FOR CALCULATING EARTHQUAKE-INDUCED SLOPE COLLAPSE RATIO

Hisakazu SAKAI, Makoto OKUMURA, Takushi SHIWAKU, Takao KAGAWA, Koichi HASEGAWA, Sumio SAWADA and Yuichi TATANO

We proposed a simplified method for calculating seismic slope collapse ratio in order to grasp disruption ratios of a broadband traffic network during a scenario earthquake. The used data are geography, slope failure areas and peak ground acceleration (PGA) etc. of whole Mt. Rokko during the 1995 Hyogoken nambu earthquake. We eliminated data on reinforced slope from them by scrutinizing construction reports etc. Logistic regression analysis using two data, angle of slope and PGA as the explanatory variable was conducted as well as that using three data, angle and average curvature of slope and PGA. The calculated ratios are correlated highly with areas of collapsed slopes during the earthquake. The result indicates the proposed method has a possibility for calculating earthquake-induced slope failure ratio.