

地震による斜面災害復旧への リスクマネジメントの適用

粕谷 悠紀1・善 功企2・陳 光斉3・笠間 清伸4

 ¹九州大学大学院工学府建設システム工学専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館1110号室) E-mail:bousai6@civil.kyushu-u.ac.jp
²九州大学教授 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館11階1128号室) E-mail:zen@civil.kyushu-u.ac.jp
³九州大学助教授 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館11階1127号室) E-mail:chen@civil.kyushu-u.ac.jp
⁴九州大学助手 大学院工学研究院(〒819-0395 福岡市西区元岡744番地ウエスト2号館11階111号室) E-mail:kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

急峻な山地や崖地が多いわが国の地形条件に加えて、都市近郊に存在する傾斜地の高度利用が進展して いることから、鉄道路線や山岳地帯で土砂災害による被害が多発するという現状がある.そこで本文は、 リスク工学の観点から地震と降雨を誘因とする局所的な土砂災害の危険度評価を行った.対象斜面は、福 岡県西方沖地震で被災した志賀海神社北地区の斜面を選定した.崩壊した斜面を構成する地層から判断す ると規模の異なる3つの斜面崩壊が懸念されたため、リスク分析により対策箇所の優先順位付けを行い、 合理的な復旧対策事業を進めるための理論的裏づけを与えるとともに、復旧対策工の妥当性を検証するこ とを目的とした.また、地震と降雨の複合影響を考慮した斜面災害のコスト次元でのリスクを算出した.

Key Words : Earthquake, rainfall, slope stability, ground water level

1. はじめに

2005年3月20日(日)午前10時53分頃,福岡県西方沖 の海底を震源とするマグニチュード7.0の地震が発生し た.震源地から近い志賀島ではさまざまな地区で被害を 受け,その中でも志賀海神社北地区で大規模な斜面崩壊 が発生した.図-1に震源地と志賀島の位置関係を示す.

崩壊斜面の下方の島を周回する道路は、長い期間通行 止めとなっていたが、2006年の10月18日に志賀島循環 道路は復旧した.復旧に1年半もの期間を要したのは、 その後の余震や豪雨によって大規模な斜面崩壊が発生す る可能性が懸念されていたことによる.潜在的な崩壊斜 面の崩壊規模においては、いくつかのケースが考えられ ている.対策費用は、想定した崩壊規模によって数億円 から数十億円まで大きく異なる.しかし、現状として地 盤情報のばらつきや不確実性が存在するので、斜面崩壊 の規模を正確に推定することは大変難しいとされている.

そこで本研究は、より合理的な復旧対策工を実施する ために、リスクマネジメント理論を適用した.斜面災害 リスクマネジメントは、従来の斜面安定解析と比べて、



図-1 2005年福岡県西方沖地震と志賀島の位置

①地盤のばらつきや不確実性、②斜面崩壊誘因とする地 震や降雨等のハザードの発生可能性、③斜面崩壊が発生 した時の経済損失の大きさなどを考慮して、斜面崩壊確 率と経済損失の積をリスクとして評価し、リスク対便益 分析により最適な対策を策定できるという利点がある. リスク対便益分析には、対策工事費とリスクの大きさと を比較し、妥当な対策規模や復旧計画を提案した.



図-3 断面モデルおよび可能な潜在崩壊規模

表-1 地盤のパラメーター (平均値)

パラメーター	風化岩(基盤)	風化土	亀裂風化岩	弱風化岩
単位体積重量: $\gamma_{t}(kN/m^{3})$	22	18	21	24
飽和重量:γ _{sat} (kN/m³)	23	19	22	25
ヤング係数:E(MPa)	600	20	30	600
ポアソン比: <i>v</i>	0.3	0.35	0.3	0.25
粘着力:c(kPa)	1,000	5	50	150
内部摩擦角:¢(°)	37	23	35	40

2. 評価手法

本文で定義するリスク(年間の損失期待値)は,被害形態iの年間における発生確率 P_i , iに起因する経済損失額の大きさ C_i とし,次式で定義した.

$$R = \sum_{i} P_{i} \times C_{i} \tag{1}$$

リスク指標の特徴として、コスト次元で斜面崩壊の影響 を評価できる. 福岡西方沖地震で被災した志賀海神社北 地区の斜面を対象とし、図-2のフローに沿って地震およ び降雨を誘因とした斜面崩壊のリスクを算出する. 志賀 海神社北地区の断面モデルは、図-3のように4層構造で あった.

すべり面は(小規模の表層崩壊,中規模の中層崩壊, 大規模の深層崩壊)を想定した.崩壊形態は,すべり面 を各地層の境界と想定する複合すべりとし,計算手法は, 日本道路協会「道路土工のり面・斜面安定工指針」を適 用した.地質および地盤調査結果に基づき,**表-1**のよう に地盤パラメーターの平均値を選定した¹⁾.平均値を用 いて計算した表層,中層および深層崩壊の安全率は,そ れぞれ1.12, 1.61, 2.14となった.しかし,将来の地震



や豪雨などの影響,地盤強度のばらつきや不確実性を考 慮すると、いずれのケースも崩壊する可能性を否定でき ない.

3. 確率分析

3.1 地震を誘因とした斜面崩壊

斜面崩壊の誘因外力である地震の年超過確率は,石川 ²が提案する地震ハザード曲線(図-4)を回帰近似して使 用した.

地盤のばらつきや不確実性を考慮して、地震による斜 面の条件付崩壊確率を算出した.地盤強度のばらつきは、 表-1 に示す平均値に 30%の変動係数を有する正規分布 で仮定した.条件付崩壊確率の計算では、まず最初に、 逆計算により安全率が1となる cと φの関係を表すクリ ティカル曲線を算出し、1000 回のモンテカルロ・シミ ュレーションで得た cと φから、条件付崩壊確率を算出 した.3 ケースの潜在崩壊規模における地震を誘因とし たフラジリティ曲線を図-5 に示す.

ここで、フラジリティ曲線とは、誘因外力に対する斜面の条件付崩壊確率のことである. 図-5 から、誘因外力となる地震加速度が大きくなるにつれて、斜面の条件



付崩壊確率は大きくなった.また,求めた3ケースのフ ラジリティ曲線から,崩壊規模が小さいほど崩壊確率が 大きくなることが明らかになった.

3.2 降雨を誘因とした斜面崩壊

福岡管区気象台における年間の降水量資料(1961~2005年)を用いて、岩井法によって算出した年間の日最 大降水量と年超過確率の関係をプロットし、近似曲線を 求めて、降雨ハザード曲線とした(図-6).

本研究は、降雨によって地下水位が上昇することにより間隙水圧が増加するため、有効応力が減少し、せん断力が弱まることで崩壊を引き起こすというプロセスを仮定した.一般的には、降雨に伴う雨水浸透により地盤強度が弱まり、自重が増加したりすることで崩壊すると言われている.そこで、地表面からの雨水浸透による崩壊するプロセスは、地下水位が上昇することによる崩壊するプロセスに置き換えることが出来る.なぜなら、斜面および崩壊領域の降雨に伴う自重の増加は等しく、飽和率も等しいからである.

図-3に示す断面モデルに地表面から平行な地下水位線 を想定した.解析ケースとして、地下水なし、地表面か





ら20m下,10m下,5m下および斜面全体が飽和状態とする 5ケースを検討した.地震時と同様に,地盤定数(*c*, *φ*) を正規分布と仮定し,条件付崩壊確率を1000回のモンテ カルロ・シミュレーションによって算出し,図-7の降雨 を誘因とした3ケースのフラジリティ曲線を求めた.

図-7から、表層崩壊の発生確率が一番大きく、深層崩壊の発生確率が非常に小さいことが明らかになった.また、表層崩壊に注目すると、地震時のフラジリティ曲線は、地震加速度の増加に伴いなだらかな曲線となったが、降雨時のフラジリティ曲線は、地下水位線の上昇に伴いほぼ直線になった.地下水位が地表面付近まで上昇すると、表層崩壊が発生する危険性が極めて高いことも明らかになった.

3.3 降雨および地震を誘因とした斜面崩壊

石川が提案した福岡地区の地震ハザード曲線に、福岡 管区気象台の降水量資料を考慮して算出し、ハザード曲 線とした.一例として、地震と降雨の両者を誘因とした 中層崩壊の5ケースのハザード曲線を図-8に示す.図-8 から、地下水位が上昇するにつれてハザードの発生確率 は小さくなった.



図-11 年間崩壊確率の結果

地盤定数(*c*, *\phi*)を正規分布と仮定し,条件付崩壊確 率を1000回のモンテカルロ・シミュレーションによって 算出した.一例として,降雨および地震を考慮した中層 崩壊の地震加速度を変動させたフラジリティ曲線を図-9 に示す.

図-9から、地下水位が上昇するにつれてフラジリティ 曲線は上側に移動し、崩壊しやすいことがわかった.ま た、表層崩壊と深層崩壊においても同様な結果が得られ た.但し、地下水位が地表面付近まで上昇しても深層崩 壊が発生する条件付確率は0.3以下だった.

図-10は、一例として、降雨および地震を考慮した中 層崩壊の地下水位を変動させたフラジリティ曲線を示す. 図-10から、地震加速度が増加するにつれてフラジリティ曲線は上側に移動し、崩壊しやすいことがわかった. また、地震加速度が大きくなるにつれて、条件付崩壊確 率の増加率が小さくなった.

3.4 年間の斜面崩壊確率

地震および降雨の発生確率曲線と、条件付崩壊確率を 用いて合積することにより、年間崩壊確率を算出した.



図-12 中層斜面崩壊のDDAシミュレーション結果

以下に算出式を示す.

$$P = \int_0^\infty p_a \left(-\frac{dP(a)}{da}\right) da \tag{2}$$

ここで、 P_a :条件付崩壊確率、-dP(a)/da:誘因

外力の発生確率である.ただし、降雨による評価手法として、解析ケース(地下水なし、地表面から平行に20m下、10m下、5m下、斜面全体が飽和状態)の発生確率を それぞれ1.0、0.6、0.35、0.2、0.1と仮定して重み付計 算を行った.志賀海神社北地区のモデル斜面における3 ケースの年間崩壊確率の結果を図-11に示す.

図-11の注目すべき点は、年間崩壊確率は地震時より も降雨時の方が高いことである.これは、地震時と降雨 時では誘因外力に対しての斜面崩壊の確率はほぼ等しい が、福岡では地震に比べて降雨の発生確率が非常に高い ためである.また、崩壊規模が小さいほど年間崩壊確率 は大きくなった.地震&降雨時に着目すると、3ケース における崩壊発生の期待周期は、表層崩壊:約2年、中 層崩壊:約7年、深層崩壊:約50年となっている.

4. 被害分析

斜面崩壊による土砂災害の経済損失は通常以下の項目 で評価する.

- (1) 土砂撤去·修復費用C₁
- (2) 迂回時間·走行費用損失C₂
- (3) 残土処理損失 C3,
- (4) 車両・搭乗者に対する損失C₄

これらの経済損失額の推定には崩壊土砂量, 堆積分 布などの情報が必要である.本研究はDDA³を用いて, 各ケースの斜面崩壊シミュレーションを行い, 必要なデ ータを推定した.一例として, 中層崩壊のDDAシミュ レーションによる斜面崩壊後の土砂分布状況を図-11 に 示す.

DDAの結果より,道路の上方斜面区間[A],道路区 間[B]および道路下方区間[C]に堆積する土砂量を計算す

表2	推定し	た3ケー	・スの経済損失	(単位:	百万円)
----	-----	------	---------	------	------

損失項目	表層崩壊	中層崩壊	深層崩壊
撤去•修復費用 C ₁	146.1	984.6	1557.9
迂回費用損失 C ₂	82.5	180.8	333.7
残土処理損失 C ₃	7.9	18.3	40.0
車両、搭乗者損失C₄	95.5	95.5	95.5
被害額合計	331.9	1279.2	2027.1



図-13 中層崩壊のリスク曲線



図-14 3ケースの年間リスク結果

る.尚,2次元のDDAの計算結果より3次元の斜面崩 壊土砂量の推定には、次式を用いて算定した.

$$V = \frac{S}{S_1} V_1 \tag{3}$$

ここで、S:予想した崩壊斜面の断面積、 S_1 :今回の 地震で既崩壊した部分の面積、 V_1 :今回の地震によっ て既崩壊した崩壊土砂量であり、約 11,900m³と推定され ている。各モデルに対して推定された崩壊土砂量は、表 層崩壊:10,740m³、中層崩壊:72,400m³、深層崩壊: 114,550m³となった。

推定した経済損失額の内訳を表-2 に示す.対象となる志賀島の斜面においては、下方を周回する道路は有料道路ではないため、料金収入損失 C_5 をゼロとした.ま

た、壊れる構造物もないので、営業収入損失 C_6 、構造 物被災損失 C_7 もゼロとした. **表**-2 から、損失額で占 める割合は、撤去・修復費用が最大となった. 表層崩壊 による損失の約 3.3 億円に対して、中層崩壊による損失 はその約 4 倍、深層崩壊による損失はその約 7 倍となっ た.

5. リスク分析

5. 1 リスク曲線の算出

リスク曲線は、縦軸に対象地域での災害の誘因外力の 発生確率、横軸に誘因外力による想定被害額からなる. リスク曲線で囲まれる面積は、年間の損失期待値(年間 リスク)を表す.一例として、地震と降雨の両者を誘因 とした中層崩壊のリスク曲線を図-13に示す.

図-13から、地下水位が上昇するにつれてリスク曲線 は右側に移動した.リスク曲線が右側に移動すると、囲 まれる面積も増大し、年間リスクも増大することを意味 する.

5. 2 年間リスクの算出

次に、崩壊規模の比較を行うため、年間リスクを算出 した.リスク曲線から求めた3ケースの年間リスクの結 果を図-14に示す.図-14から、3ケースの年間リスクは 地震時よりも降雨時の方が大きくなった.崩壊規模ごと に比較すると、深層崩壊の年間リスクが最小となった. これは、経済損失額は3ケースの中で最大であるが、斜 面が崩壊する確率が非常に小さいからである.このため、 深層崩壊は対策対象外と推定できる.

また,表層崩壊と中層崩壊の年間リスクはほぼ等しく なった.リスクの結果から見れば,表層崩壊と中層崩壊 の対策優先度は判断しがたいが,崩壊発生の期待周期か ら,表層崩壊を最優先すべきであると考えられる.しか し,復旧計画に中層崩壊までを取り込む必要があるかは 慎重に検討する必要がある.

志賀海神社北地区の復旧計画は、2006年の10月18日を 以って終了している.実際に行われた志賀海神社北地区 の崩壊斜面に対する復旧計画は、主に表層崩壊を想定し た対策で、一部は中層崩壊を想定した対策である.

一般に、斜面が有するコスト次元の資産は、原子力発 電所や高層ビルなどに比べて低いため、どこまで対策を 行うかは慎重に検討する必要がある.また、今回のリス ク評価には、社会や政治への影響力を考慮していないた め、リスク分析の便益にはこれらの影響を考慮する必要 がある.

6. おわりに

本文では、志賀海神社北地区の崩壊斜面について規模 の異なる3つの崩壊規模を想定し、降雨および地震を誘 因とした斜面崩壊に関するリスクマネジメントを行った. 降雨を誘因とする斜面崩壊の評価手法として、想定した モデル斜面にいくつかの地下水位線を仮定し、地震と降 雨の複合影響を検討した.以下に結論を述べる.(1)斜 面崩壊の年間崩壊確率は、崩壊規模が小さいほど崩壊し やすい.(2)斜面崩壊が与える経済損失は、崩壊土砂の 堆積分布と崩壊土砂量の影響を強く受けるため、崩壊規 模に比例することが明らかになった.(3)求めた年間リ スクの結果から、対策箇所は表層崩壊と中層崩壊最優先 すべきであることが明らかになった.

今後の課題として、①降雨による斜面崩壊を考慮する 場合、崩壊斜面に想定した地下水位線と実際の降雨によ って生じる地下水位の妥当性を明らかにすることが挙げ られる.すなわち、崩壊斜面における元々の地下水位の 位置が明らかになっていない、降雨に伴いどのくらい地 下水位が上昇するか明らかになっていないのが現状である. ②実際に行われた志賀海神社北地区の崩壊斜面に対する復旧対策により,斜面の条件付崩壊確率や年間リスクがどのくらい低減できるか明確でないため,今後検討する必要がある.

謝辞:本研究は,環境省地球環境研究総合推進費(S-4)による成果の一部である.

<参考文献>

- 土木学会西部支部福岡県西方沖地震被害調査団「2005年福岡 県西方沖地震被害調査報告書」, pp. 79, 2005.
- 2) 石川祐:確率論的想定地震と低頻度巨大外力評価への応用 に関する研究,京都大学学位論文,1998.
- 3) 大西有三, 陳光斉: 不連続変形法DDAによる岩盤シミュレーション, 日本材料学会, pp. 329-333, 1999.
- 伊藤正純:自然災害リスクを考慮した斜面設計手法に関する研究,京都大学修士論文,2000.

(2007.4.6 受付)

APPLICATION OF RISK MANAGEMENT IN THE LANDSLIDE RESTORETION BY EARTHQUAKE

Yuki Kasuya, Kouki Zen, Guangqi Chen and Kiyonobu Kasama

Because of the infrastructure development in mountainous area close to urban area and the geographical characteristics of Japan such as the presence of many steep slopes, a number of slope disasters have been occurred at railway and road located in mountainous area. In this paper, the risk of slope disaster due to earthquake and rainfall is evaluated form the viewpoint of risk engineering. The object slope in this study is a slope at the north area in Shikanoshima, Fukuoka city damaged by the 2005 Fukuoka-ken Seiho-oki earthquake literally. The purpose of this study is to determine the priority area for countermeasure against slope failure in three areas having different failure depth predicted by the geotechnical profile in damaged area and to verify the effectiveness of selected countermeasure considering the supportive explanation in terms of cost benefit. Moreover, the risk representing as cost diminution is calculated considering the multiple effects of earthquake and rainfall.