

リスク評価を指標とするのり面安定性の 評価モデルの構築

上出 定幸^{1*}・大津 宏康²・田山 聡³・高橋 健二⁴

¹西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社（〒567-0032 大阪府茨木市西駅前町5-26）

²京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂4）

³西日本高速道路株式会社 関西支社 大阪技術事務所（〒565-0805 大阪府吹田市清水15-1）

⁴水文技術コンサルタント株式会社（〒261-0004 千葉県千葉市美浜区高洲1-24-2）

*E-mail: s_kamide@w-e-kansai.co.jp

豪雨は、社会インフラに重大な損失を引き起こす自然ハザードである。道路等に隣接するのり面の崩壊は、住宅地域での人身、家屋に対する被害だけでなく、道路利用者に対する機能喪失をもたらすことになる。本研究は、これまでの研究の知見に基づき、自然災害のハザード要因として、降雨を対象としたのり面崩壊により発生する社会経済学的損失の評価に基づく、リスク評価手法について提案するものである。さらに本手法を実際の近畿圏における高速道路網に隣接するのり面に適用し、そのリスク評価結果に基づく、のり面補強の優先順位付けの基礎資料としての検討事例についても示すものとする。

Key Words : risk evaluation, slope stability, rain hazard, the priority order for remedial measures

1. はじめに

近畿圏には、名神高速道路をはじめ、高速道路(10 路線)693.2km、一般有料道路(8 路線)161.0km の合計 854.2km の高速道路網が完備されている。各路線とも、我が国における関西地域の経済圏と中部地域、及び中国地域を結ぶ動脈であり、経済や社会生活に対して重要な役割を担っている。このような道路の性格から通常の交通確保はもちろんのこと、降雨時においても安全、かつ円滑な交通確保を求められており、道路としての本来の機能を最大限に発揮させることが一層必要となっている。

一方、高速道路をはじめとする国内の道路は、豪雨等の降雨ハザードをトリガーとする土砂災害が毎年の様に繰り返して発生し、これに起因する長期間の通行止めや通行規制が余儀なくされている。こうした降雨ハザードに伴う土砂災害を未然に防ぐため、補強や対策工事が優先されるべきであるが、数多くあるのり面の危険箇所に対応することは、現実的、かつ経済的に困難であることは言うまでも無い。また、のり面補強を立案することは、機能喪失に伴う損失を抑制するための投資と捉えられるため、最適なのり面補強を実施するためには、いわゆる投資対効果を考慮することが必要となる。他方、このような補強工事だけでなく、道路管理における豪雨時の通行規制などものり面に係わるリスク評価の課題である。

本研究は、こうした背景から対策優先順位の策定を含めて、危険度や社会的損失などのリスク評価を指標とするのり面安定性の評価モデルの構築を目的として実施したものである。

2. のり面のリスク評価手法

(1) リスク評価のためのパラメータ

リスク評価のための分析項目は、のり面破壊の要因とともにリスク評価法の見地からの統一した分析項目とすべきである。本研究では、降雨時におけるのり面の破壊に関する指標として、降雨の発生確率とのり面の力学的安定性から算定される年間破壊確率、およびのり面の破壊に伴う復旧費用や迂回損失等の経済的な損害指標として、事業者損失、および利用者損失とした。各項目における具体的なパラメータを表-1 に示す。

表-1 リスク評価のためのパラメータ

項目	パラメータ
年間破壊確率 p_a	幾何学的(勾配, 崩壊厚, 崩壊規模等) 力学的(粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ 等) 水理的(地下水位, 湧水状況, 降雨量等)
事業者損失 + 利用者損失 C	交通量データ(交通量, 車種分類) 迂回距離 損失原単価の整理

表-2 リスク評価における判断指標

評価対象	評価項目	判断指標
緊急な対応	優先順位付け	年間リスク： R_a
将来の対応	対策実施時期	期待ライフサイクルコスト： LCC

(2) リスク評価における判断指標

一般的にリスク評価を行う場合、その判断指標は表-2 に示すとおり、現状における危険度や対策等の優先順位付け等に係わる緊急な対応、および対策実施時期等の期待ライフサイクルコストに係わる将来的な対応に区別される。本研究では、前者の対策優先順位付け等の緊急を要する対応を想定していることから、その判断指標は年間リスクを用いて評価した。

3. のり面のリスク評価手法の構築

(1) 検討手順

図-1 にのり面のリスク評価手法の全体フローを示した。豪雨時ののり面崩壊は、のり面内の地下水挙動と有限斜面の安定問題として取り扱うことが多く、破壊判定の基準となる性能関数は、降雨によるのり面崩壊では崩壊土塊の厚さが薄い表層崩壊が多いことに着目し、図-2、および式(1)に示す代表的な破壊形態である表層すべりの性能関数を採用した。

$$Q = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H} \right) \cdot \frac{\tan \phi_d + \frac{c_d}{\gamma H}}{\tan \alpha} \cdot \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} - 1 \quad (1)$$

ここに、 γ_w は水の単位体積重量、 γ は土の単位積

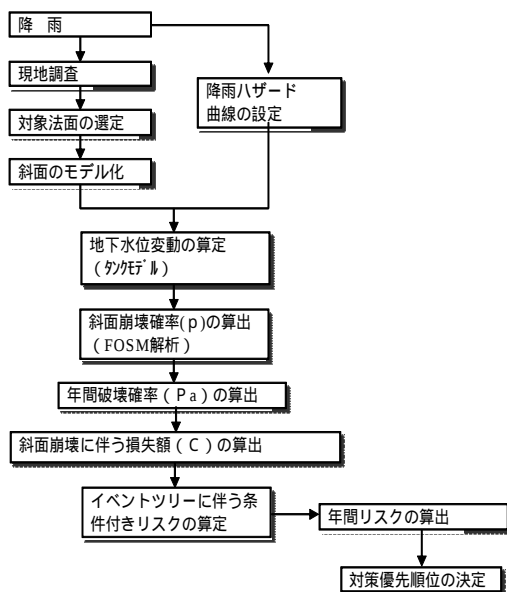


図-1 リスク評価を指標とするのり面安定性の評価モデルの検討フロー

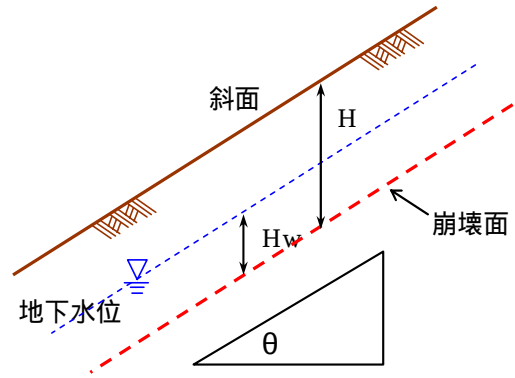


図-2 直線すべり（表層すべり）の性能関数

重量、 ϕ は内部摩擦角、 c は粘着力、また θ は無限斜面の傾斜角、 H は表層土の層厚、 H_w は表層土中の水深である。本研究における豪雨時のリスクは、式(1)に示した表層破壊モデルの性能関数と雨量特性を用いて降雨時の破壊確率 p_f により求めている。すなわち、式(1)の右辺第1項と第2項の和が、通常の確定論に基づく斜面安定解析で用いる安全率（すべり抵抗力 / すべり力）を表し、右辺に示す変数の内、土の粘着力 c 、および土の内部摩擦角 ϕ を確率変数としてモデル化する。この確率変数のモデルについては、様々な確率分布が用いられるが、ここでは正規分布を用いている。また、正規確率関数の演算として、一次近似二次モーメント法(FOSM)により条件付破壊確率 $p_{f(\alpha)}$ を算定している。この解析条件についての詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

(2) 年間破壊確率

年間破壊確率 p_a は、降雨強度 α と条件付破壊確率 $p_f(\alpha)$ を関係付ける fragility 曲線、および降雨強度の年超過確率を現す降雨ハザード曲線を次式に示すように合積することにより算定される。

$$p_a = - \int_0^{\infty} p_f(\alpha) \frac{\partial \Psi(\alpha)}{\partial \alpha} d\alpha \quad (2)$$

さらに降雨ハザード曲線はガンベル分布に従うものとしてモデル化すると、次式(3)示すように表される。

$$\Psi(\alpha) = 1 - \exp \left\{ -e^{-a(\alpha-b)} \right\} \quad (3)$$

ここに、 a および b は、アメダスデータのような過去の降雨記録に基づく設定される定数である。

(3) 斜面内の地下水位変動予測

本研究では、降雨応答解析に多用されるタンクモデルの考え方を適用し、評価対象毎ののり面における降雨時の地下水位の変動を予測する。図-3 に示すとおり、降雨と流出応答をモデル化する2段タンクがのり面上部のタンク(TANK1)を基点として、のり面高低に順じて上部、中間部、下部に連結した3

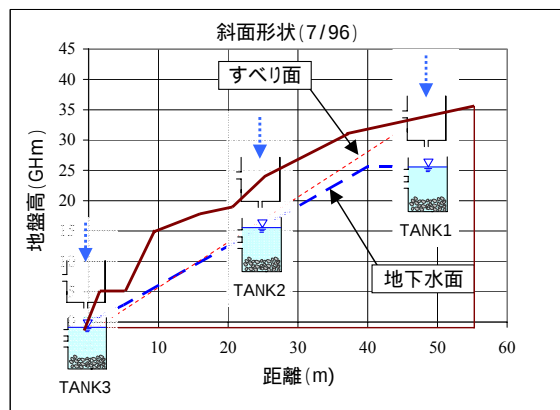


図-3 3連タンクモデルによる地下水位変動予測
(斜面 No.7/96)

連タンクモデルである．各タンクは各々のり面上部の鉛直浸透，中間部の側方浸透流，下部の高含水状態や復帰流を取り扱うことでのり面の地下水挙動についての評価が可能なモデルである．

3 連タンクモデルでは，のり面上部～下部にいたる各 1 次元タンクモデルから計算される地表水量，及び地下水量が順次，降雨（有効雨量＝降雨量－蒸発散量）を加算しながらのり面下部に流下する計算手順であり，計算式の詳細は参考文献³⁾⁵⁾を参照されたい．

4. 年間損失期待値（年間リスク）の算定

(1) 崩壊シナリオの検討

一般的に，降雨ハザードなどの条件付き破壊確率への展開方法として，イベントツリーを用いて斜面破壊の発生確率と被災の影響度を評価する手法がある．このイベントツリーに被害予測を組み込むこと

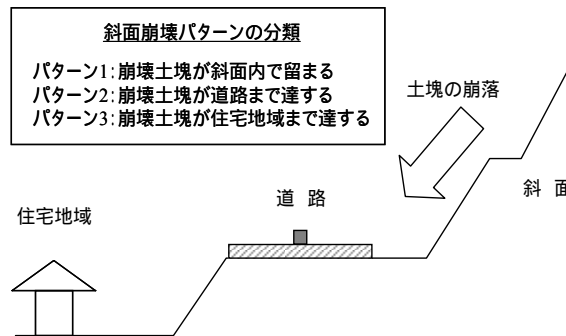


図-4 斜面崩壊パターン

表-3 斜面崩壊の被災状況

フェーズ 1	斜面の崩壊
フェーズ 2	利用者（通行車両）の被災
フェーズ 3	隣接住宅や建物等の被災

で，豪雨等のハザードに対するリスクを算定する．例えば，道路のり面の破壊を考えた場合，想定される具体的な被災状況は図-4，および表-3 に示した 3 つのフェーズと被災パターンに分類され，各フェーズを考慮したのり面崩壊に伴う被災シナリオについてイベントツリーを用いて作成する．実際には崩壊の形態に分類し，切土・自然斜面と盛土のり面の場合のイベントツリーを作成することになる．

(2) 被災イベントの整理

被災イベントに伴う損失は，図-5の被災シナリオ例に示すとおり，8種類に区分された各被災レベルや対応策に応じて事業者損失と利用者損失に区分される．本研究では崩壊による被害シナリオ（崩壊土砂の到達による通行車両への被害）を仮定し，その

	フェーズ1	フェーズ2	フェーズ3	No.	被害シナリオ	発生確率		
No	0.90			1	無被害	p_1	0.900	
Yes	0.10	パターン1		2	斜面内の土塊崩落	p_2	0.060	
		パターン2		3	道路まで土塊崩落 通行者車両への被災無	p_3	0.024	
			No 0.80		道路まで土塊崩落 通行者車両への被災有			
		パターン3	Yes 0.20	4	道路まで土塊崩落 通行者車両への被災有	p_4	0.006	
			No 0.80	No 0.90	5			住宅地域まで土砂崩落 住宅への被災無
			Yes 0.10	Yes 0.10	6	住宅地域まで土砂崩落 住宅への被災有	p_6	0.001
			Yes 0.20	No 0.90	7	住宅地域まで土砂崩落 通行者車両への被災有 住宅への被災無		
			Yes 0.10	Yes 0.10	8	住宅地域まで土砂崩落 通行者車両への被災有 住宅への被災有	p_8	0.000
						Σ	p_i	1.000

図-5 イベントツリーによる被害シナリオの展開例

	フェーズ1	フェーズ2	フェーズ3	発生確率		事業者損失		利用者損失	リスク	単位	
						原形復旧費	補償費	迂回走行損失	$p_i \times C_i$		
No	0.90	パターン1		p_1	0.9000	0	0	0	0.000	U	
Yes	0.10	0.60	パターン2	p_2	0.0600	1	0	0	0.060	U	
		0.30	No 0.80	p_3	0.0240	10	0	10	0.480	U	
			Yes 0.20	p_4	0.0060	10	100	10	0.720	U	
		パターン3									
		0.10	No 0.90	p_5	0.0072	15	0	20	0.252	U	
			0.80	Yes 0.10	p_6	0.0008	15	200	20	0.188	U
			Yes 0.20	No 0.90	p_7	0.0018	15	100	20	0.243	U
		Yes 0.10	p_8	0.0002	15	300	20	0.067	U		
Σ				p_i	1.0000			Risk:	2.010	U	

図-6 イベントツリーによるリスク（損失期待値）の算定

斜面崩壊に伴う損失額を式(4)、式(5)から算出する。

事業者損失 = 通行車両、搭乗者に対する損失(C1)
+ 崩壊土の撤去、復旧費用(C2) (4)

利用者損失(C3) = 迂回損失(時間費用 + 走行費用)
損失額 (C_i) = C1 + C2 + C3 (5)

図-5にはイベントツリーを用いた各フェーズにおける被災シナリオの発生確率の算定法を示した。被災シナリオに沿った各フェーズの流れとのり面崩壊パターンにおける計8段階の破壊確率を示している。また、図-6には斜面崩壊に伴う損失(事業者損失 + 利用者損失)を考慮した上で被災シナリオにおける損失期待値(年間リスク=破壊確率×コスト)の算定方法を示している。実際には、この算定方法に準

じて検討区間における個々ののり面条件に対して、各々被災シナリオと損失期待値を求めることになる。

5. 解析事例

(1) 評価対象のAランクのり面（96箇所）

解析事例は、近畿圏における高速道路のり面を対象とした道路防災点検の総合評価結果を基に、緊急に対策要と選定された96箇所（A道～M道：13管理区間）ののり面を評価対象とした事例である。図-7は96箇所ののり面における安定計算上の設定土質定数（ C 、 ϕ ）、および地形図等から読み取れる崩壊幅を示している。土質定数の設定は96のり面においてすべて土質等の調査が行われていないことから、試験値のないのり面では、岩質区分等を基に推定している。また、各のり面の崩壊に伴う損

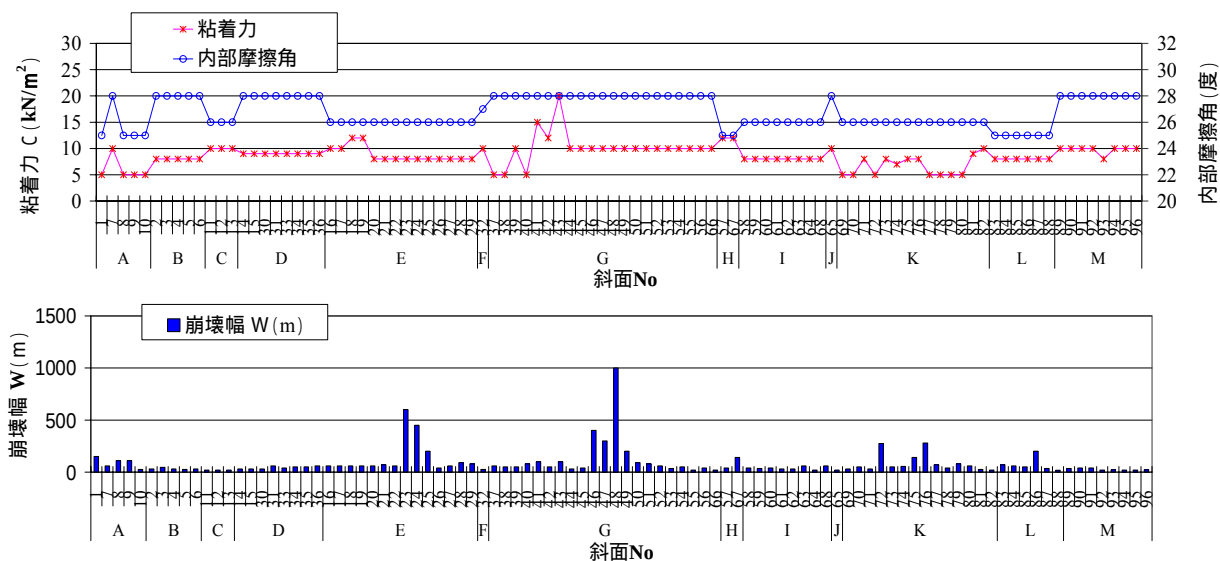


図-7 対象斜面の土質定数と崩壊規模

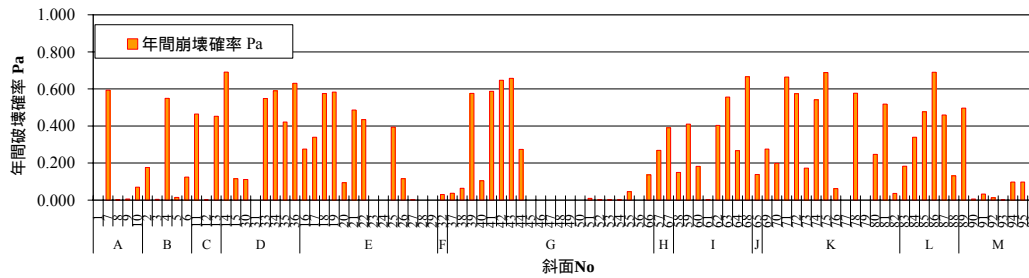


図-8 検討斜面における年間破壊確率

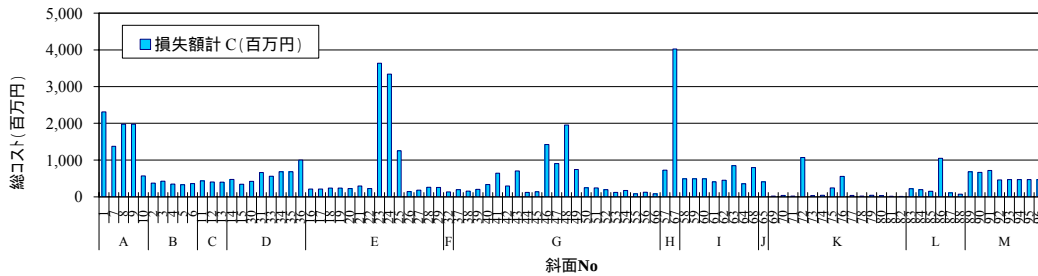


図-9 検討斜面における総コスト（百万円）

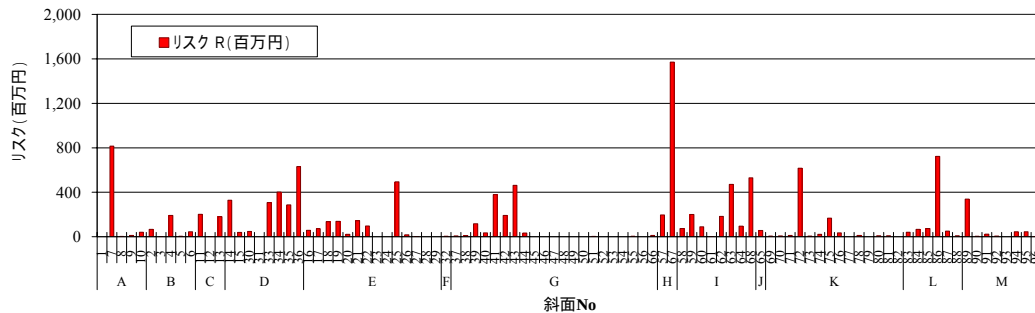


図-10 検討のり面における年間リスク（百万円）

～ 番号はリスク順位の第1位～第4位を示す。

失を算定するための各種データ（交通量，沿道状況，崩壊土砂量，崩壊に伴う迂回条件等）を分析した。

(2) 検討結果

各検討対象のり面における算定結果を図-8～図-10に示した。図-8に示した年間破壊確率（ P_a ）では、全体的に0.0～0.7に分布し、各のり面の形状や物性値に起因したバラツキが顕著であるが、年間破壊確率を指標として、各区間、各のり面における力学的な安定性の比較が可能である。例えば、G道区間をみると、のり面36～44は年間破壊確率の大きいり面が多数認められるが、45～56区間では小

さく、比較的安定したのり面が連続していることになる。同様に、図-9の総コストについても、各のり面における交通量や迂回距離により、総コストの多寡が現れている。図-10には年間破壊確率と総コストの積である年間リスクを示している。同図によると、年間リスク第1位はH道1201A612のり面であり、こののり面が最も優先されて対策が行われることを提示している。同様に、年間リスクの大きいり面について、降順の第1位～第4位までを表-4に示した。同表には降雨200mm/日（発生確率 $W=1/50$ ）における条件付きリスクを併せて示し、この順位が当該区間における対策優先順位付けに相当する。図-11には被災シナリオに応じた区間毎の条件付きリスクカーブを示している。

表-4 Aランク96のり面における条件付きリスクの第1位～第6位

対策順位	路線名	施設管理番号	降雨200mm/日の条件付きリスク（百万円）
第1位	H道	1201A612	613.1
第2位	K道	1241A049	453.1
第3位	A道	1011A607	319.3
第4位	D道	1720A607	254.7

6. 結論

(1)本研究では、のり面が抱える豪雨時の危険度について、年間リスクを指標として評価することで対策実施の優先順位等の比較を提案することができた。

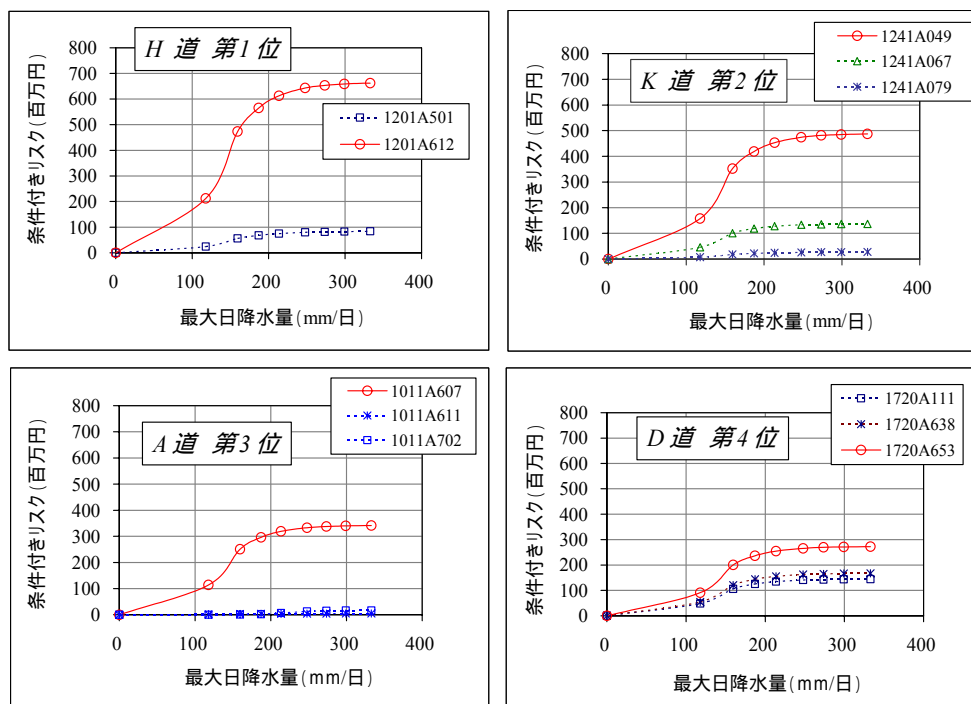


図-11 A ランク 96 のり面における条件付きリスクカーブ (第 1 位 ~ 第 4 位)

- (2)本研究では、斜面・法面が抱えるリスクを定量的に評価しているが、過去の崩壊事例データが少ないため、本研究では安定計算から斜面崩壊確率を算出している。崩壊事例データが多ければ、統計処理による崩壊確率の予測も可能である。
- (3)本研究では、対策実施の優先度が高いと評価された A ランク斜面に対し、費用対効果を考慮したリスク評価を行っている。さらに、この年間リスクに基づく経年的な累積リスクを求め、無対策と対策工を実施した場合の総コストを比較することで対策実施等のライフサイクルコスト (LCC) の判断が可能となるものと考えている。

参考文献

- 1) 大津宏康, 大西有三, 水谷守: 高速道路に近接する斜面を対象とした自然災害に対するリスクマネジメント手法に関する提案, 土木学会論文集, No.658/ -48, pp.245-254, 2000.
- 2) 大津宏康, 大西有三, 水谷守, 伊藤正純: 地震に伴う災害リスク評価に基づく斜面補強の戦略的立案方法に関する一提案, 土木学会論文集, No.679/ -51, pp.123-134, 2001.
- 3) Janrungautai Sirisin, 大津宏康, 大西有三: 斜面の降雨時リスク解析, 第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集第 3 部, pp.344-345, 2001.
- 4) 榎明潔: 降雨時の斜面表層崩壊, 土と基礎, No.49-7, pp.17-20, 2001.
- 5) 菅原正巳 (1972): 流出解析法, 共立出版.

DEVELOPMENT OF SLOPE STABILITY EVALUATION MODEL BASED ON RISK EVALUATION INDICES

Sadayuki KAMIDE, Hiroyasu OHTSU, Satoshi TAYAMA and Kenji TAKAHASHI

Expressways and other roads in the country repeatedly and nearly annually suffer earth and soil disasters triggered by rain hazards such as a torrential downpour, which inevitably results in the long-term suspension or regulation of traffic. In order to prevent such disasters caused by rain hazards, priority should be given to the implementation of reinforcement and remedial works. The present study aimed to develop a slope stability model including the prioritization of remedial measures, using risk evaluation indicators e.g. hazard level and social loss. The present study managed to present a comparative analysis in terms of such factors as the priority order for remedial measures by evaluating the hazard of slopes using risk indicators.