

リスクを指標とするのり面安定性の 評価モデルの構築

西日本高速道路エンジニアリング関西株式会社 ○上出 定幸 1*

京都大学大学院 工学研究科 大津 宏康 2*

水文技術コンサルタント株式会社 高橋 健二 3*

By Sadayuki KAMIDE, Hiroyasu OHTSU and Kenji TAKAHASHI

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。道路等に隣接する斜面の崩壊は、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、降雨を対象とした斜面崩壊に着目し、斜面崩壊に伴う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斜面に適用し、そのリスク評価結果に基づく、斜面補強の優先順位付けの基礎資料として事例についても示すものとする。

【キーワード】斜面、降雨、地下水位、浸透、破壊

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では、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。

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. 斜面アセットマネジメントにおける評価手法

(1) リスク評価のためのパラメータ

リスク評価のためのパラメータは、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、のり面の破壊に対する項目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を適用し、のり面破壊に伴う復旧費用等の経済的な損失を表-1に示す各パラメータを基に算定した。

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(斜面勾配、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)
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

*1 技術顧問 075-658-2420

*2 工学研究科都市社会工学専攻 教授 075-383-3260

*3 水文技術部 043-298-7515

(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で用いて評価した。

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

3. 斜面アセットマネジメントにおける評価手法の構築

(1) 検討手順

本研究におけるリスク評価法に基づく、優先順位付け等の検討手順を図-1に示した。同図に示すとおり、実際の降雨データを基に、タンクモデル法により降雨ハザードの到来に伴う斜面内の地下水位変動を算定し、各降雨ハザードにおける条件付き斜面破壊確率、および年間破壊確率を算定する。

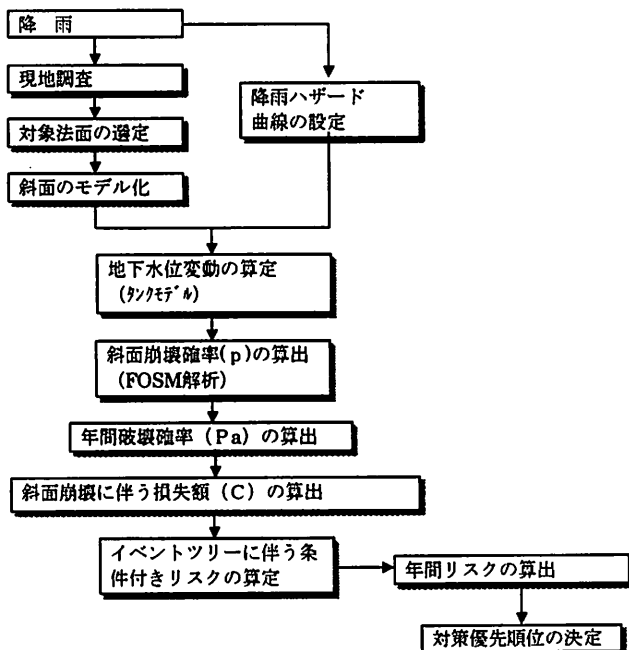


図-1 リスク評価を指標とするのり面安定性の評価モデルの検討フロー

さらに、崩壊シナリオを考慮して斜面崩壊に伴う損失額を合積し、年間リスクを指標として優先順位を設定する。

(2) 降雨時の斜面における安定性評価

降雨時の斜面崩壊は、斜面内の地下水挙動と有限斜面の安定問題として評価されることが多く、斜面の破壊判定の基準となる性能関数は、降雨による斜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。

$$Q = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H} \right) \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \theta} + \frac{c}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \theta \cos \theta} - 1 \quad (1)$$

ここに、 γ_w は水の単位体積重量、 γ は土の単位体積重量、 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。本研究における降雨時のリスクは、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。さらに、 $X = c$ 、および $Y = \tan \varphi$ とすると、式(1)に示す性能関数 Q は次式(2)のように表わされる。

$$Q = a_0 + a_1 X + a_2 Y \quad (2)$$

$$a_0 = -1$$

$$a_1 = \frac{c}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \theta \cos \theta}$$

$$a_2 = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H} \right) \cdot \frac{1}{\tan \theta}$$

式(2)は、確率変数 X 、および Y に対して係数 $a_0 \sim a_2$ が定数となることから、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)により条件付き破壊確率 $p_{f(a)}$ を算定している。なお、この解析条件についての詳細は文献3)を参照されたい。

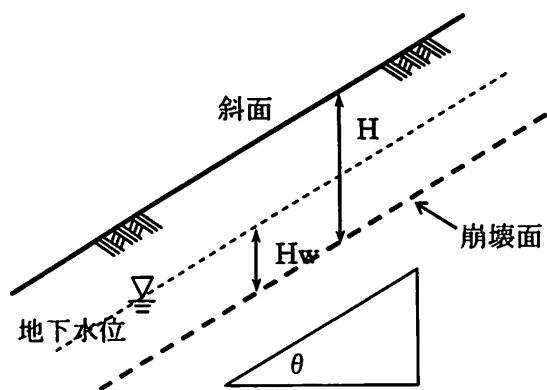


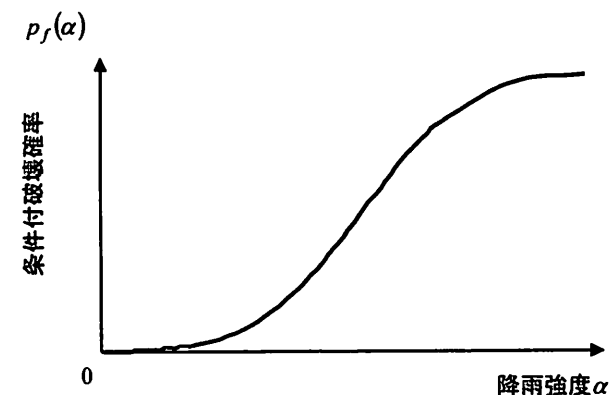
図-2 直線すべり（表層すべり）の性能関数

(3) 年間破壊確率

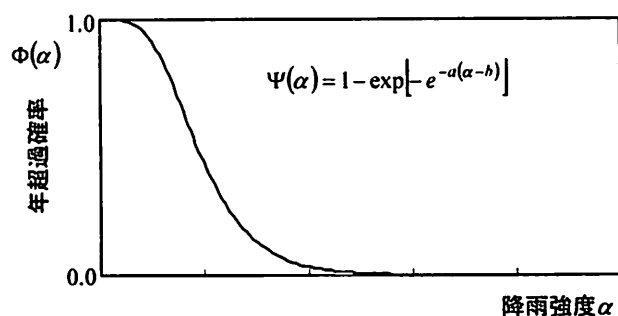
年間破壊確率 p_a は、図-3に示すように降雨強度と条件付破壊確率を関係付けるフラジリティ曲線と降雨強度の年超過確率を現す降雨ハザード曲線を、次式(3)に示すように合積することにより算定される。

$$p_a = \int_0^{\infty} p_f(\alpha) \frac{\partial \Psi(\alpha)}{\partial \alpha} d\alpha \quad (3)$$

ここで、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(4)に示すように表される。



(a) フラジリティ曲線



(b) 降雨ハザード曲線

図-3 年間破壊確率の算定手順

$$\Psi(\alpha) = 1 - \exp\{-e^{-a(\alpha-b)}\} \quad (4)$$

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き設定される定数である。式(3)に示す数値積分は、近似的に次式に示す関係により算定される。

$$p_a = \int_0^{\infty} p_f(\alpha) \frac{\partial \Psi(\alpha)}{\partial \alpha} d\alpha = \sum_{j=1}^{\infty} p_i(\alpha_j) [\Psi(\alpha_{j+1}) - \Psi(\alpha_j)] \quad (5)$$

なお、式(5)の右辺 $p_i(\alpha_j) [\Psi(\alpha_{j+1}) - \Psi(\alpha_j)]$ は、図-3に示すように年間破壊確率密度を表す。年間破壊確率 p_a は、年間破壊確率密度曲線と水平軸で囲まれる面積に相当する。

(4) 斜面内の地下水位変動予測

本研究ではタンクモデルの考え方を適用し、評価対象のり面における降雨時の地下水位の変動を予測した。

a) 3連タンクモデル

n 連タンクモデルは図-4に示すとおり、降雨と流出応答をモデル化する2段タンクよりなる1次元タンクとこの1次元タンクが上部のタンク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連1次元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主要な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、1次元タンクモデルが斜面の上部、中間部、下部に連結するモデルで

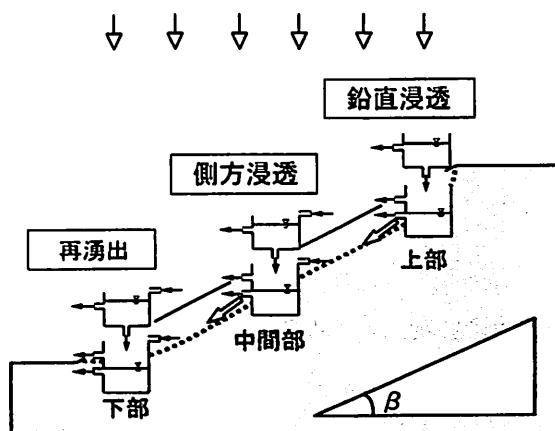
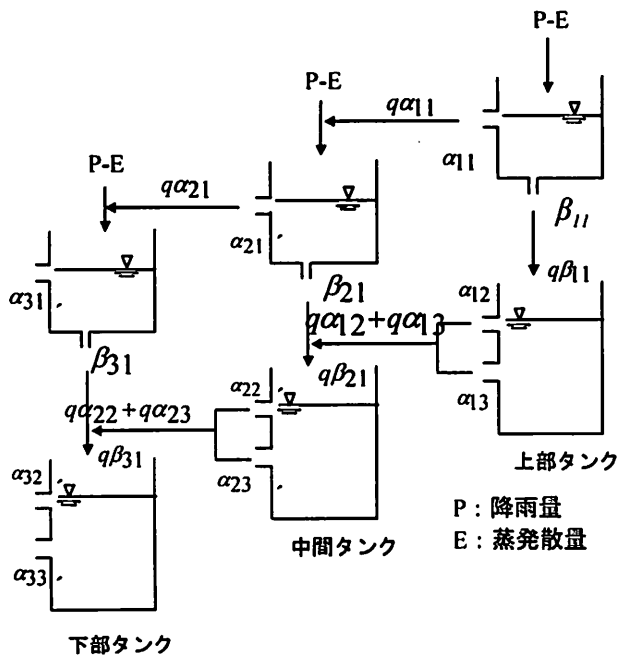


図-4 3連1次元タンクモデルの構造



図－５ タンクモデルにおける上部～下部
タンクの連結方法

あり、図－５に示す通り上部タンクの上段タンク流出 $q\alpha_{11}$ は、そのまま中間部の上段タンクに降雨が加算されて $(P-E)+q\alpha_{11}$ として流入する。

また、上部タンクの下段タンクの地下水量は、中間部タンクの上段タンクにおける β_{21} 孔からの浸透量に加えて下段タンクに流入する。

$$q\beta_{21} = \beta_{21}(h_{20} - R_{21})e^{-\theta_{21}t} + (q\alpha_{12} + q\alpha_{13}) \quad (5)$$

同様に下部タンクについても、中間タンクの $q\alpha_{21}$ は、 $(P-E)+q\alpha_{21}$ として下部タンクの上段に流入し、下段タンクの地下水量は次式より求める。

$$q\alpha_{31} = \beta_{31}(h_{30} - R_{31})e^{-\theta_{31}t} + (q\alpha_{22} + q\alpha_{23}) \quad (6)$$

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4）を参照されたい。

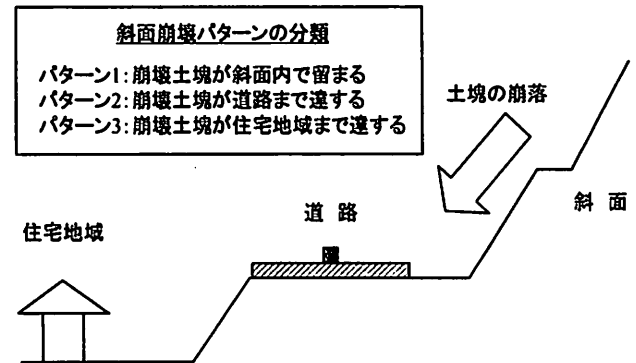
4. 年間損失期待値（年間リスク）の算定

(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

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



図－６ 斜面崩壊パターン

破壊の発生確率と被災の影響度を評価する手法がある。本研究では、このイベントツリーに被害予測を組み込むことで、豪雨等のハザードに対するリスクを評価する。さらに、道路斜面の破壊を考えた場合、想定される被災状況は図－６、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斜面崩壊に伴う被災シナリオはイベントツリー（ETと略す）を用いて作成する。なお、崩壊の形態に分類し、切土・自然斜面と盛土斜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の分類は、表－４に示すおりであり、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、その斜面崩壊に伴う損失額を次式(7)、(8)から算出する。

$$\begin{aligned} \text{事業者損失} &= \text{通行車両、搭乗者に対する損失}(C1) \\ &+ \text{崩壊土の撤去、復旧費用}(C2) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{利用者損失}(C3) = \text{迂回損失(時間費用＋走行費用)}$$

$$\text{損失額}(Ci) = C1 + C2 + C3 \quad (8)$$

図－７はイベントツリーを用いた被災シナリオの発生確率の算定法を示した。同図は被災シナリオに準じた各フェーズと斜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－８には斜面

表－４ 各被害シナリオの発生に伴う損失の分類

No.	被害シナリオ	対応策	事業者損失		利用者損失
			原形復旧費	補償費	迂回走行損失
1	無被害	必要無	—	—	—
2	斜面内の土塊崩落	原形復旧	○	—	—
3	道路まで土塊崩落 通行者車両への被災無	原形復旧 / 通行止	○	—	○
4	道路まで土塊崩落 通行者車両への被災有	原形復旧 / 通行止 運転者への補償	○	○	○
5	住宅地域まで土砂崩落 住宅への被災無	原形復旧 / 通行止	○	—	○
6	住宅地域まで土砂崩落 住宅への被災有	原形復旧 / 通行止 住宅への補償	○	○	○
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	原形復旧 / 通行止 運転者への補償	○	○	○
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	原形復旧 / 通行止 運転者への補償 住宅への補償	○	○	○

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。

5. 解析事例

ここでは近畿圏における高速道路斜面における既道路防災点検結果から抽出された要注意(Aランク斜面)と評価されている斜面から10斜面を抽出し、各斜面について、年間リスクを指標として対策優先順位を検討した。

(1) 対象法面の選定

表－５には10箇所の斜面を抽出し、加えて各斜面における被災シナリオの分類を示している。同表によれば10箇所の斜面のうち、E道、F道、G道、およびI道が斜面崩落に伴って近傍民家への被災が推定される斜面に相当する。

表－５ 検討斜面における推定被災シナリオ

検討斜面 (近畿管内)	斜面長 (m)	道路 被災	住宅 被災	道路被災 +住宅被災
A道 KP 68.3	125	○	—	—
B道 KP 10.6	200	○	—	—
C道 KP 20.9	340	○	—	—
D道 KP 8.6	15	○	—	—
E道 KP 11.5	210	○	○	○
F道 KP 998	80	○	○	○
G道 KP 16.3	80	○	○	○
H道 KP 93.0	200	○	—	—
I道 KP 0.5	120	○	○	○
J道 KP 10.8	140	○	—	—

	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	Risk	単位	
					原形復旧費	補償費	迂回走行損失	plcx1		
No	0.90	パターン1		p_1 0.9000	0	0	0	0.000	U	
Yes	0.10		0.60	p_2 0.0600	1	0	0	0.060	U	
		パターン2	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	No	0.10	p_5 0.0072	15	0	20	0.252	U
			0.80	p_6 0.0008	15	200	20	0.188	U	
			Yes	0.10	p_7 0.0018	15	100	20	0.243	U
			0.20	p_8 0.0002	15	300	20	0.067	U	
			Yes	0.10	p_9 0.0002	15	300	20	0.067	U
Σ				p_i 1.0000				Risk: 2.010	U	

図－７ ETによる被害シナリオの発生確率の算定

	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	パターン1		1	無被害	p_1 0.900			
Yes	0.10		0.60	2	斜面内の土塊崩落	p_2 0.060			
			パターン2	No	3	道路まで土塊崩落 通行者車両への被災無	p_3 0.024		
				0.80					
			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		
		パターン3	No	5	住宅地域まで土砂崩落 住宅への被災無	p_5 0.007			
	0.10		0.80		0.90				
			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		No		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	p_7 0.002
		0.20	0.90						
			Yes	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			
			0.10						
				Σ	p_i	1.000			

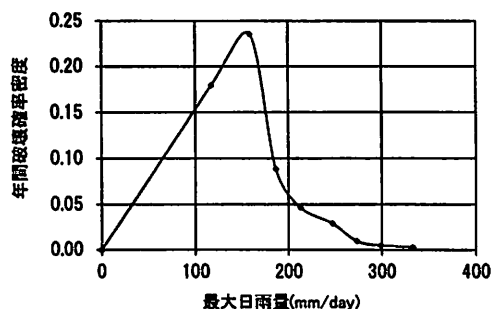
図－８ ETによるリスク(損失期待値)の算定

(2) 検討結果、および考察

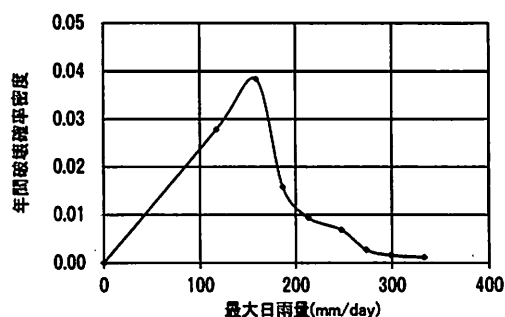
降雨ハザードの発生確率に伴う年間破壊確率密度の計算例を図-9に示す。同図には G 道(KP16.3), および H 道(KP93.0)を例として, 想定ハザードレベルごとに得られた年間破壊確率密度を示している。両斜面とも 150mm/day 付近の降雨量において破壊確率密度の最大値を示し, G 道(KP16.3)が H 道(KP93.0)に比べて破壊確率が高いことが算定されている。なお, 他の抽出した 8 斜面においても, 最大確率密度 0.03~0.35 であり, 同様の傾向を示している。

また, 図-10には G 道における降雨ハザードの到来に伴う斜面内の地下水位変動 (H_w), 平均安全率 (FS), および条件付き破壊確率 ($p_{f(x)}$)を示している。同図の左図は降雨確率 0.200 ($W=1/5$), 右図が 0.002 ($W=1/500$) のケースである。同斜面では降雨ハザードの到来とともに, 斜面内の地下水位上昇, 安全率の低下, 条件付き破壊確率の増加が認められている。さらに, 表-5に示した被災シナリオの分類を基に, 本研究において選定した 10 斜面における降雨ハザードに伴う条件付きリスクカーブを図-11に示した。同図によれば, 年間リスクが大きく, 対策優先順位の高い斜面としては, B 道 (KP 10.6), C 道 (KP 20.9), E 道 (KP11.5) などが挙げられる。

他方, 優先順位の低い, リスクの少ない斜面としては, H 道 (KP 93.0), I 道 (KP 0.5) などが挙げられる。したがって, 降雨ハザードの発生確率, 斜面の安定性, および斜面崩壊に伴う被災シナリオを基に算定された年間リスクを指標とすることで, 対策等の優先順位の評価が可能と判断できる。



a) G 道における年間破壊確率 $P_f=0.598$



b) H 道における年間破壊確率 $P_f=0.108$

図-9 検討斜面における年間破壊確率の比較

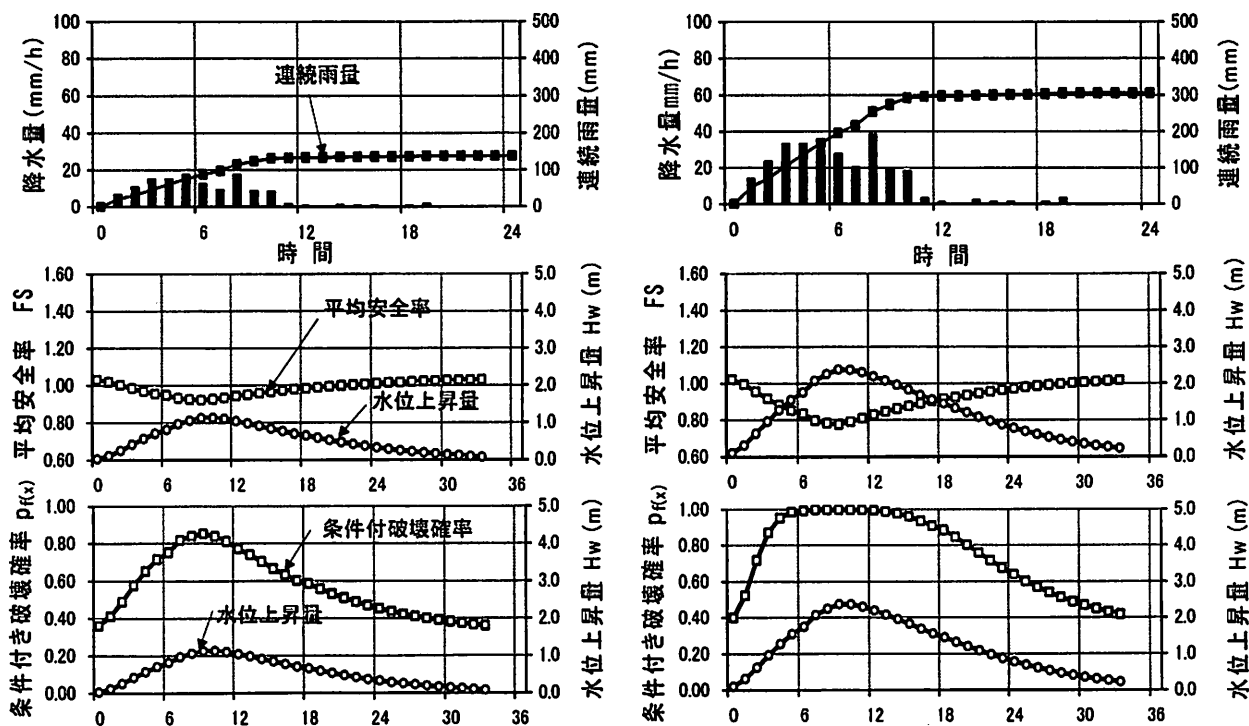
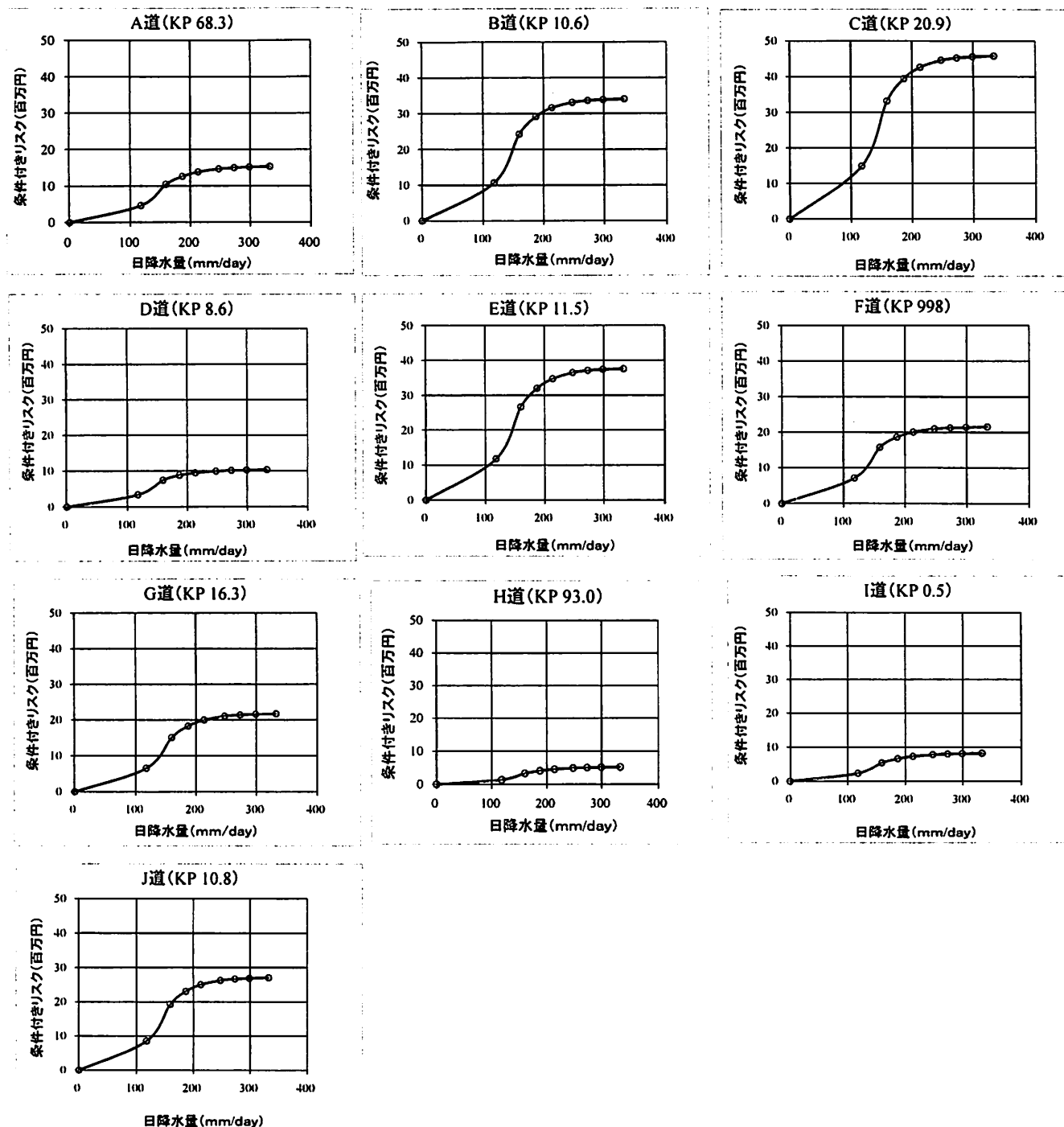


図-10 検討斜面 (H 道) における斜面内水位変化と条件付き破壊確率の比較



図－１１ 検討 10 斜面における条件付きリスクの比較

6. 結論

(1)本研究では、リスクマネジメント手法を用いて各斜面が抱える危険度をリスクと言う指標で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。しかしながら、本検討で評価された対策優先順位は、道路管理者が斜面維持管理を行う際の判断材料のひとつとして提供されるものであり、実際の防災対策に関しては他の観点も踏まえて総合的に判断する必要がある。

(2)本研究では、斜面・法面が抱えるリスクを定量的に評価（リスク＝損失額）しているが、過去の崩壊事例データが少ないため、解析を実施して斜面崩壊確率を算出している。仮に、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、タンクモデルの考え方を適用し、地下水位変動の予測を行った。その際、降雨量として

は検討斜面内の降雨に対してのみ行っており、沢地形など後背地を抱える斜面についてはリスクを過小評価している。

(4)本研究において対策実施の優先度が高いと評価された斜面に対し、費用対効果を考慮したリスク評価を行っている。

他方、対策工等の経年的な性能低下を含めて将来的な安定性に対する対応の場合、期待ライフサイクルコスト LCC を判定指標とする必要があり、年間リスクに基づく累積リスク(社会的割引率を考慮する必要)を算出し、対策無しの場合と対策工を実施した場合の総コストの経時変化を比較することで対策実施の判断を含めたリスク評価が可能となる。

【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クマネジメント手法に関する提案, 土木学会論文集, No.658/VI-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/VI-51, pp.123-134, 2001.
- 3) 大津宏康, 大西有三, 西山哲, 竹山雄一郎: 岩盤崩落による社会経済的損失を考慮したリスク評価に関する研究, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.207-218, 2002.
- 4) 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.
- 5) 榎明潔: 降雨時の斜面表層崩壊, 土と基礎, No.49-7, pp.17-20, 2001.
- 6) 菅原正巳: 流出解析法, 共立出版, 1972.

Development of Slope Stability Evaluation Model Based on Risk Evaluation Indices

By Sadayuki KAMIDE, Hiroyasu OHTSU 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. As a matter of course, however, it is practically and economically unfeasible to work on a number of hazardous areas on slopes at once. 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.