

タンクモデル法による斜面の降雨時リスク評価法の研究

水文技術コンサルタント(株)

京都大学大学院

京都大学大学院

○高橋 健二^{*1}

大津 宏康^{*2}

大西 有三^{*3}

By Kenji TAKAHASHI, Hiroyasu OHTSU, Yuzo OHNISHI

豪雨は、インフラ構造物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破壊は、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破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、本手法を実際の国道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の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

モンスーン気候に属する我が国においては、台風あるいは集中豪雨等の降雨も、地震と同様に斜面破壊を引き起こす重大な自然ハザードとして認識される。いうまでもなく、斜面は一度破壊すると重大な被害を引き起こすため、斜面破壊は道路防災上の重点対策項目であり、定期的に防災点検が実施されると共に、その点検結果に基づき防災対策工事が実施されてきた。一般に、道路を管理する事業者は、その管轄する地域内に多くの斜面を管理しているため、どの斜面からどの程度の補強工事を実施するかを判定する必要がある。また、斜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、最適な斜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、道路管理における通行規制なども降雨時の斜面リスクに係わる課題である。

著者ら^{1), 2), 3)}は、これまでに道路に隣接する斜面の補強対策を対象として、地震に起因する斜面破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研究を進めてきた。降雨による斜面破壊は、地震に起因するものに比べ、1年当りでも数回の単位で発生する可能性がある。また、地震によ

る斜面破壊は、すべり・落石・トップリングと様々な形態を示すのに対して、降雨に起因する斜面破壊としては、複数の研究に示されているように崖錐層での表層すべりが卓越する。

本研究は、これまでの著者ら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破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。ここで、本研究において提案する降雨による斜面リスク評価手法の基本フローは、以下のように要約される。

- ①タンクモデルを用いた地下水位変動の算定⁵⁾
- ②地下水位変動に伴う斜面の破壊確率の算定
- ③斜面破壊に伴う社会経済学的損失（直接的損失・間接的損失）を評価したリスクの算定

このうち、タンクモデルは、従来、流出解析や広域地下水問題において適用された事例が多いが、本研究では、その基本概念を拡張し、検討対象とする地域での既往地下水観測結果に基づき、特定の斜面毎の地下水変動評価に適用するものとする。

本論文では、まず、ここで提案するタンクモデルによる斜面内の地下水位予測方法について記述し、次に、同方法を適用した斜面内水位予測、及び破壊確率算定システムからなる斜面リスク評価システムの開発とそ

*1 取締役 043-279-2311

*2 工学研究科都市環境工学専攻 助教授 075-753-5128

*3 工学研究科都市環境工学専攻 教授 075-753-5128

の適用例について示すものとする。

2. タンクモデルを用いた斜面内の地下水位変動

(1) 斜面の地下水挙動

斜面内の地下水挙動は、斜面の規模に係わらず、広義的にみて降雨浸透に起因する。降雨浸透は、斜面勾配、被覆状態、構成土壌や地質の分布と性状、含水状態、擁壁などの人工的な構造物など様々な要因に影響される。一般的には、図-1に示す通り、斜面脚部水分量が多く斜面頂部では乾燥して水分量が少ない。

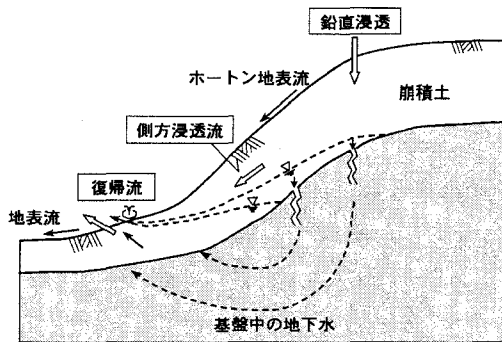


図-1 斜面における地下水流動場

また、降雨時には斜面頂部で鉛直浸透流が発生し、中間部では側方浸透流、斜面脚部では復帰流が発生する。

(2) 3連1次元タンクモデル

本研究で提案するタンクモデルは、図-2に示す通り、降雨と浸透～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^⑥、及びこの1次元タンクが、上部のタンクを基点として斜面高低に順じて中間部、下部に連結した3連1次元タンクモデルである。

したがって、各タンクのパラメータの設定により、

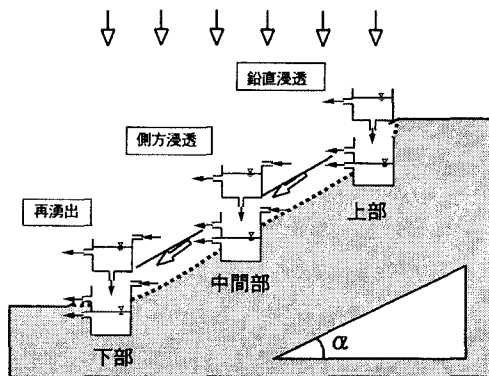


図-2 3連1次元タンクモデルの構造

斜面上部の鉛直浸透、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が可能なモデルである。

(3) タンクモデル計算式の誘導

ここでは3連1次元タンクモデルの計算式を誘導する。降雨浸透を制御する1次元タンクの上段タンクは、図-3のサフィックスを用いて以下の通り誘導する。

$h \geq H_A$, h_0 , h は P-E によるタンク内の水位 (h_0 は初期水位), H_A は流出孔の高さ, α , β は各流出孔の流出係数, t は経過時間である。

$$-\frac{dh}{dt} = (\alpha_{11} + \beta_{11}) \left(h - \frac{\alpha_{11} H_A}{\alpha_{11} + \beta_{11}} \right) \quad (1)$$

$$= (\alpha_{11} + \beta_{11}) (h - R_{11})$$

さらに、 $h - R_{11} = H$ とすれば、

$$-\frac{dh}{dt} = H(\alpha_{11} + \beta_{11}) \quad (2)$$

$$\therefore H = H_0 e^{-(\alpha_{11} + \beta_{11})t}$$

$$h - R_{11} = (h_0 - R_{11}) e^{-(\alpha_{11} + \beta_{11})t} \quad (3)$$

したがって、上段タンクの地表水量 ($q\alpha_{11}$) と地下水浸透量 ($q\beta_{11}$) は、各々のタンク係数にタンク内水位を基に、下式(4)より求める。

$$\begin{cases} q\alpha_{11} = (\theta_{11} - \beta_{11})(h_0 - H_A)e^{-(\alpha_{11} + \beta_{11})t} \\ q\beta_{11} = \beta_{11}(h_0 - R_{11})e^{-(\alpha_{11} + \beta_{11})t} \end{cases} \quad (4)$$

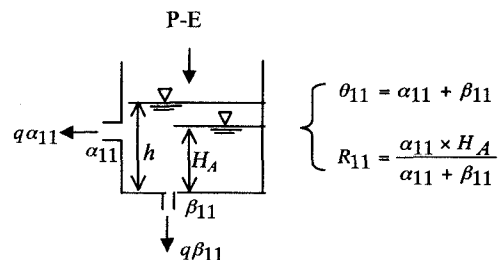


図-3 単一タンクモデルのサフィックス

次に、図-4に示す上段タンクと下段タンクから構成される1次元タンクモデルの計算式を誘導する。上段タンクからの浸透量 $q\beta_{11}$ が下段タンクに流入すると、下段タンクからの地下水量 ($q\alpha_{12} + q\alpha_{13}$) は下式(5)より求める。 h_{10} , h_{20} は各々、上下段タンク内の初期水位である。

$$q\alpha = q\alpha_{12} + q\alpha_{13}$$

$$= \theta_{12} \left\{ (h_{20} - R_{12}) + \frac{\beta_{11}(h_{10} - R_{11})}{\theta_{11} + \theta_{12}} \right\} e^{-\theta_{12}t}$$

$$- \theta_{12} \frac{\beta_{11}(h_{10} - R_{11})}{\theta_{11} + \theta_{12}} e^{-\theta_{11}t} \quad (5)$$

但し、下段タンクの h_{20} については、不圧地下水と取

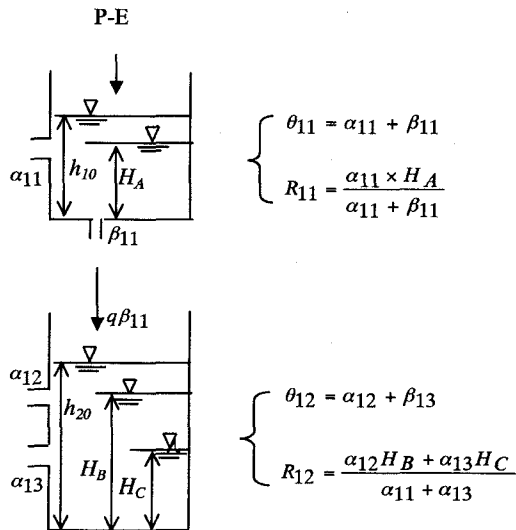


図-4 1次元タンクモデルのサフィクス

り扱うタンク構造であるため、下式(6)の通り、有効間隙率 λ を考慮した水位計算を行う。

$$h_{20} = q\alpha / \lambda \quad (6)$$

以上が1次元タンクモデルの計算式であり、3連モデルでは、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ある。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

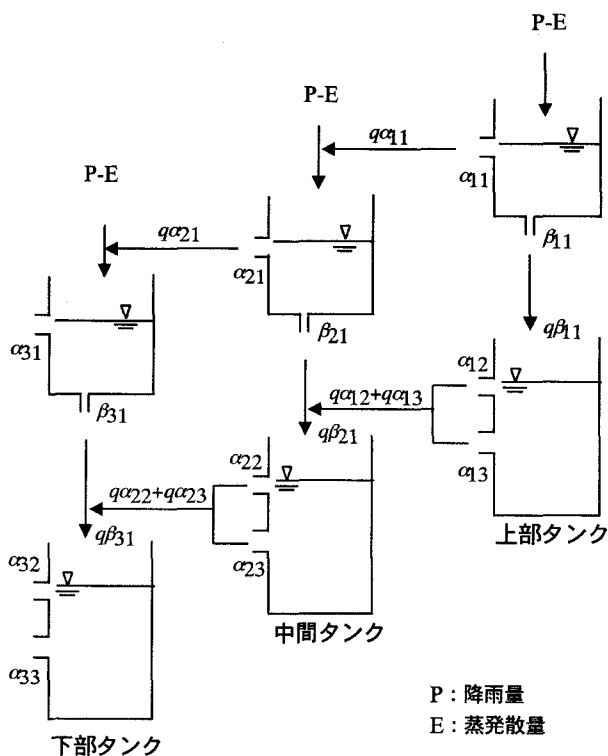


図-5 上部～下部タンクの連結方法

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。

$$q\beta_{21} = \beta_{21}(h_{20} - R_{21})e^{-\theta_{21}t} + (q\alpha_{12} + q\alpha_{13}) \quad (7)$$

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、下式(8)より求める。

$$q\alpha_{31} = \beta_{31}(h_{30} - R_{31})e^{-\theta_{31}t} + (q\alpha_{22} + q\alpha_{23}) \quad (8)$$

3連モデルでは、斜面上部～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）を加算しながら斜面下部に流下する計算式である。

(4) 斜面内の地下水位変動の算定

ここでは、既往地下水観測結果に基づいて、3連1次元タンクモデルの検証例を示す。図-6は3連モデルを実際の斜面に適用した例であり、タンクモデルによる再現水位と実測地下水位を比較している。同図によれば、2ヶ所の実測水位は、降雨開始より約5時間後から上昇し、降雨のピーク後に最大水位上昇量4.3mが発生している。更に、斜面中間部のNo.2ボーリング孔の水位と3連1次元タンクモデルの中間部タンクの地下水位が合致し、実測水位にも認められるように斜面上部の地下水位ほど降雨波形に敏感に反応している。また、降雨波形に比べて、地下水位ピークの遅延や流下に伴う斜面下部の水位上昇幅の増加が再現されている。表-1にはこの条件におけるタンクモデルパラメータを示す。斜面頂部の鉛直浸透は、上部タンクの $\beta_{11}=0.950$ に設定し、降雨量の95%が斜面内に浸透するモデルであり、実測水位とのパラメータスタディから得られた値である。

表-1 3連1次元タンクモデルのパラメータ

	係数	下部タンク	中間部タンク	上部タンク
上段タンク				
H_{01}		0mm	0mm	0mm
α_{11}		0.100	0.100	0.500
H_A		20mm	20mm	20mm
β_{11}		0.100	0.500	0.950
下段タンク				
H_{02}		0mm	0mm	0mm
α_{11}		0.160	0.050	0.080
α_{12}		0.007	0.015	0.010
H_B		110mm	200mm	60mm
H_C		0mm	0mm	0mm
λ		0.10	0.10	0.10

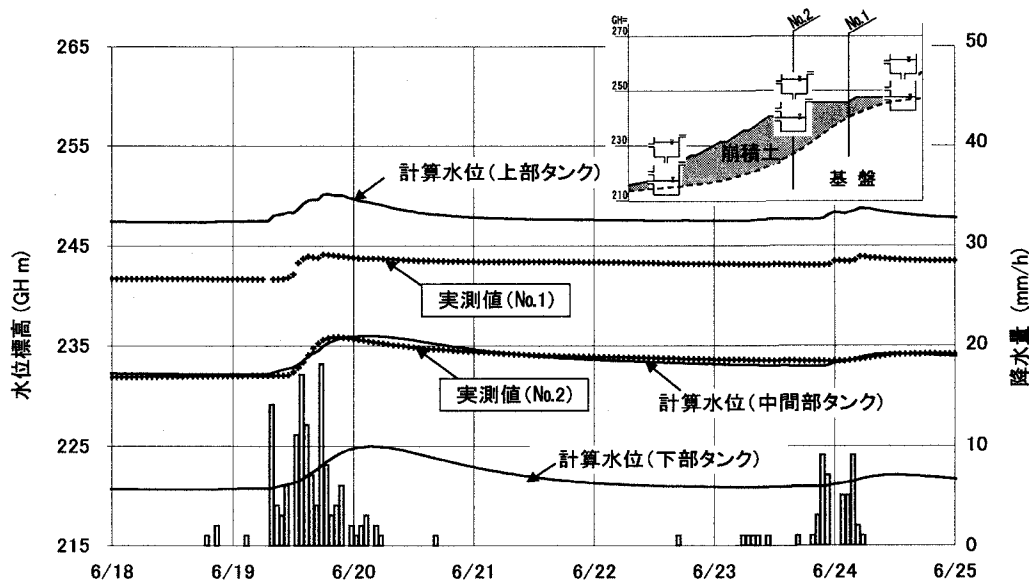


図-6 3連1次元タンクモデルによる再現水位

3. 斜面破壊評価システムの構築

(1) 降雨条件

降雨時の斜面破壊の入力に当たる降雨量は、近傍のアメダスデータ等の実測値を基に設定する。具体的には、災害履歴の降雨波形を用いて超過確率による確率年降雨を適用する手法であり、対象とする降雨の確率分布の適正化を行うためガンベル法を含めて3つの確率分布を採用している。図-7は、対象斜面近傍（離

隔 20km 以内）の3ヶ所における災害発生時の降雨波形、この降雨を含めて第1～10位までの降雨履歴図、ガンベル法による確率降雨分布を示す。

(2) 降雨時の斜面リスク評価システムの構築

本研究で提案した斜面リスク評価システムを図-8に示す。本評価システムは、定期的実施される斜面防災点検結果を基に、降雨時の地下水位を予測する斜面内水位予測システムとこの予測結果を基に、降雨時

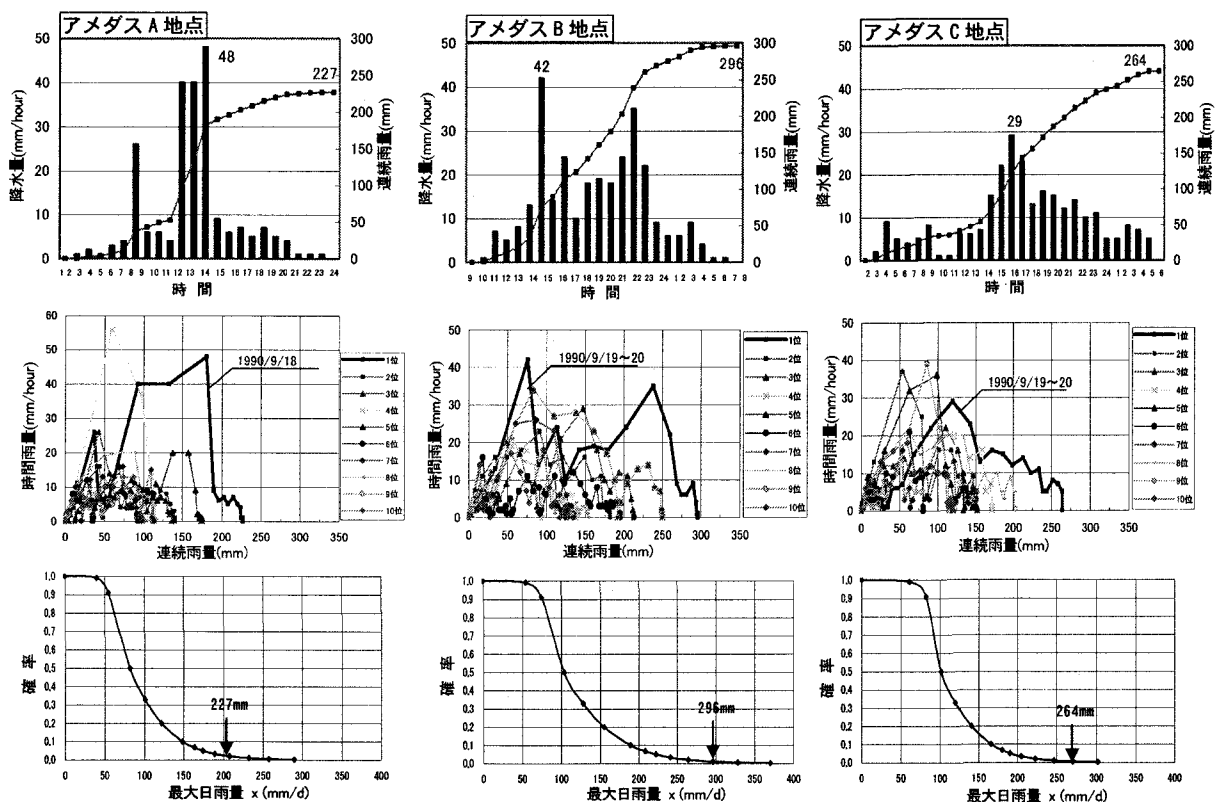


図-7 斜面近傍の降雨データと確率降雨（災害時降雨波形）

の条件付き破壊確率を求める斜面破壊確率算定システムで構成している。斜面破壊確率算定システムは、式(9)に示す長大斜面における安定解析法を援用した性能関数とし、強度係数($\tan \phi_d, Cd$)を確率変数として、これらの変動係数(標準偏差/平均値)毎に1次近似2次モーメント法(FOSM)を用いて降雨時の破壊確率 P_f を求める方法である。

$$Q = \left(1 - \frac{\gamma_w H_w}{\gamma H} \right) \cdot \frac{\tan \phi_d}{\tan \alpha} + \frac{Cd}{\gamma H} \cdot \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} - 1 \quad (9)$$

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_d は内部摩擦角、 Cd は粘着力、また α は無窮斜面の傾斜角、 H は崩積土の層厚、 H_w は斜面内水位予測システムから求められる崩積土中の水深である。なお、性能関数に適用した強度係数は、現状安全率を設定した上で、逆計算にて内部摩擦角(ϕ_d)および粘着力(Cd)を算出する。また、強度係数のばらつきは、正規分布としてモデル化する。

また、斜面内水位予測システムは、図-8に示す通り、3連1次元タンクモデルを用いて降雨時の斜面内地下水位を予測するシステムであり、本評価システム

では、観測地点、降雨波形、確率年をパラメータと降雨条件を、適宜選定できる機能を付加している。更に、近傍の観測地点が無い場合や降雨の地域性を評価する手法としてティーセン法による平均降雨算定法を組み込んでいる。図-9は、斜面内水位予測システムの出例であり、斜面に応じた入力降雨を選定した上で、検討斜面の地下水位の経時変化を予測する Excel シートである。降雨波形と地下水位経時変化の走査線に応じた地下水位分布を図化しており、検索システムにより任意斜面、あるいは任意確率降雨に対応した解析画像が出力可能である。図-10は、破壊確率算定システムの出例であり、斜面内地下水位に応じた FOSM による降雨時の破壊確率を求める Excel シートである。本システムでは、この2つの出力画像を交互に算定、編集することから斜面毎の破壊確率を算定する。

4. 本評価法による斜面の破壊確率の算定

(1) 降雨時の斜面の破壊確率

ここでは本評価システムの実施例を示す。検討対象は国道に隣接する32箇所の道路斜面である。解析例と

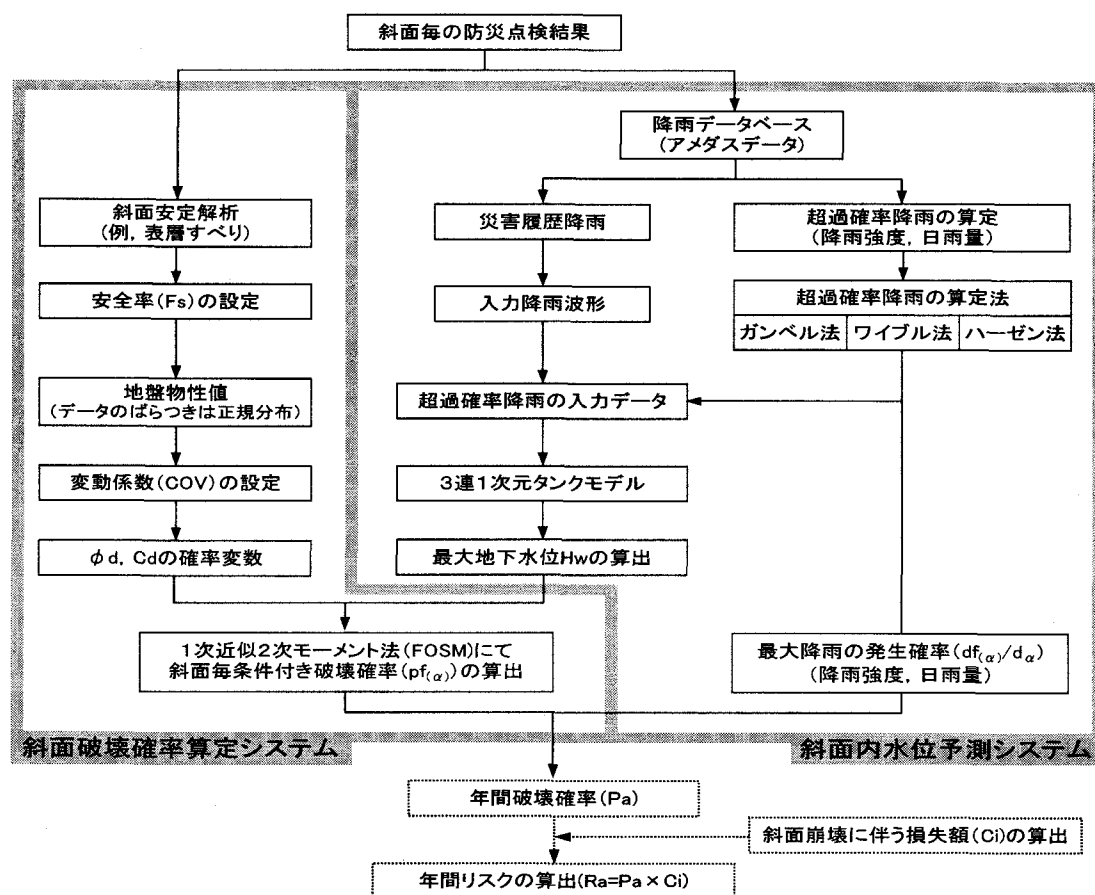


図-8 本研究における斜面リスク評価システム

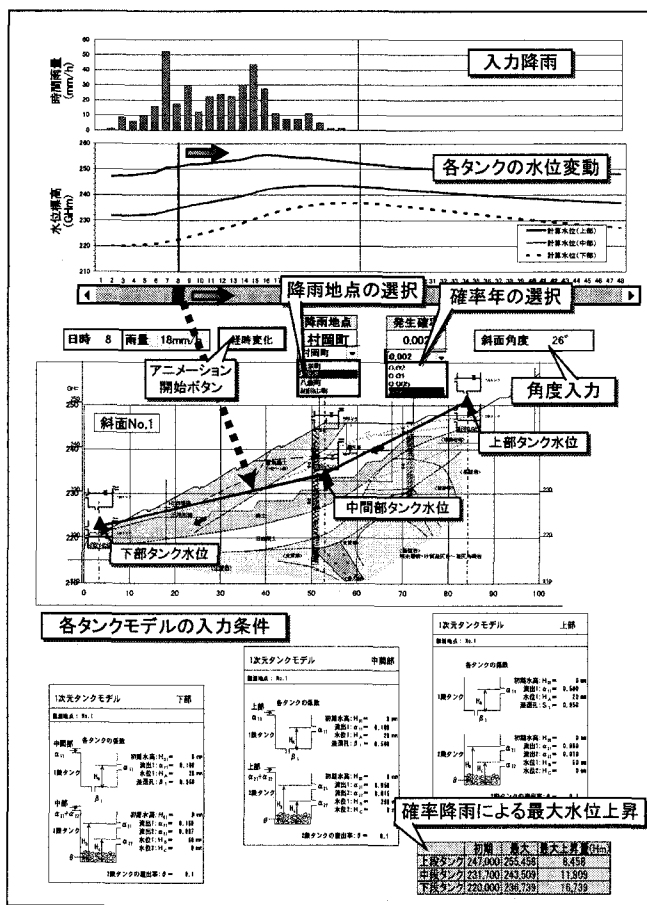


図-9 斜面内水位予測システム
(Excel シート)

して No. 13, No. 28 の 2 つの斜面における超過確率降雨が発生した場合の水位変動、及び条件付き破壊確率 $pf(x)$ を図-11 に示す。同図によれば、水位上昇に伴う破壊確率 $pf(x)$ の変化が、降雨波形に関係し、両斜面とも地下水位の上昇と破壊確率が調和的に変動する。特に、確率降雨 $W=1/100$ の場合、最大水位上昇時間より 6~7 時間前に破壊確率 $pf(x)=1.0$ に到達し、その状態が 24 時間程度継続する。また、図-12 には両斜面における $W=1/100$ の超過確率の降雨履歴図と斜面内水位、及び破壊確率 $pf(x)$ を対比して示す。この降雨履歴図は、検討対象管内における斜面災害発生時の実績降雨と同じ条件であり、解析例に示した 2 箇所の斜面において実際の災害発生を確認していないが、両斜面とも降雨終了前後に $pf(x)=1.0$ となり、降雨波形内で発生した最大時間降雨よりも累積降雨に伴って破壊確率 $pf(x)=1.0$ に到達している。

(2) 降雨による年間破壊確率

本研究システムでは、降雨による年間破壊確率は、比較的頻繁に発生する小規模な降雨から極めて稀にし

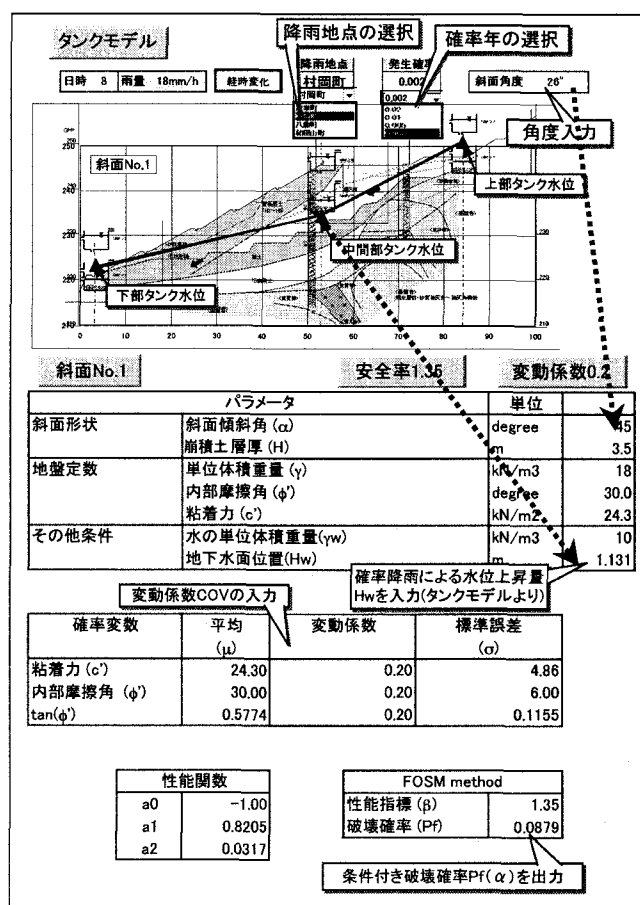


図-10 破壊確率算定システム
(Excel シート)

か発生しない豪雨までを、一年当たりにならした形で組み入れる。すなわち、式(10)に示す通り想定降雨レベルごとに得られた条件付き破壊確率 $pf(\alpha)$ に、その降雨レベルが一年間に発生する可能性を重みづけした形で合積する。

$$P_a = \int_0^{\infty} pf(\alpha) \cdot \frac{dP(\alpha)}{d\alpha} \cdot d\alpha \quad (10)$$

ここに、 $P(\alpha)$ は、降雨の発生確率、 $pf(\alpha)$ は条件付き破壊確率、 P_a は年間破壊確率である。

5. 斜面破壊時の損失額の算定

(1) 斜面破壊に伴う損失額の算出

斜面破壊に伴う損失額は、直接的損失である事業者損失と間接的な迂回路等の利用に伴う利用者損失である。本研究では、切土、自然斜面及び盛土斜面の場合ともに被害シナリオ（道路両側まで破壊+通行車両への被害）を仮定し、その斜面破壊に伴う損失額を算出した。

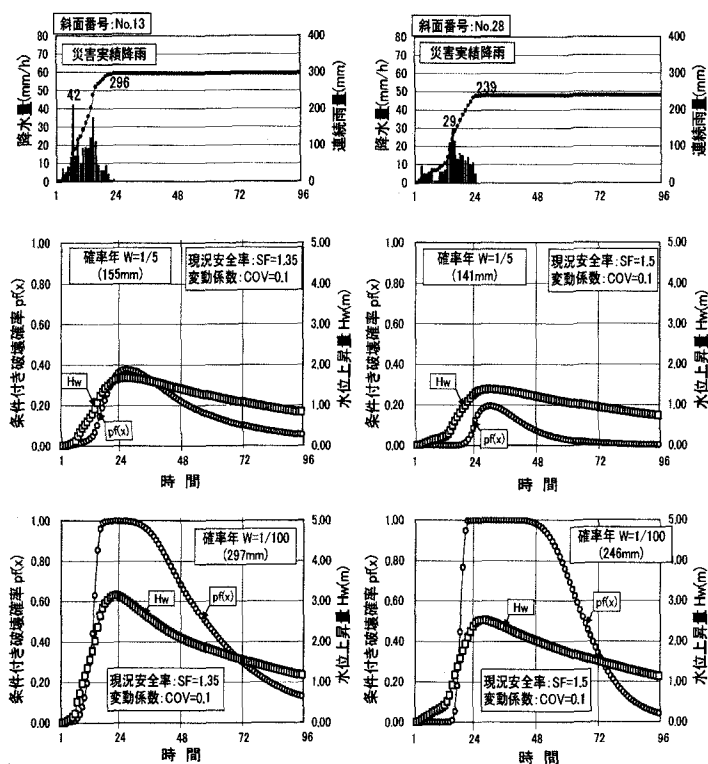


図-1 1 確率降雨における斜面内水位と条件付き破壊確率

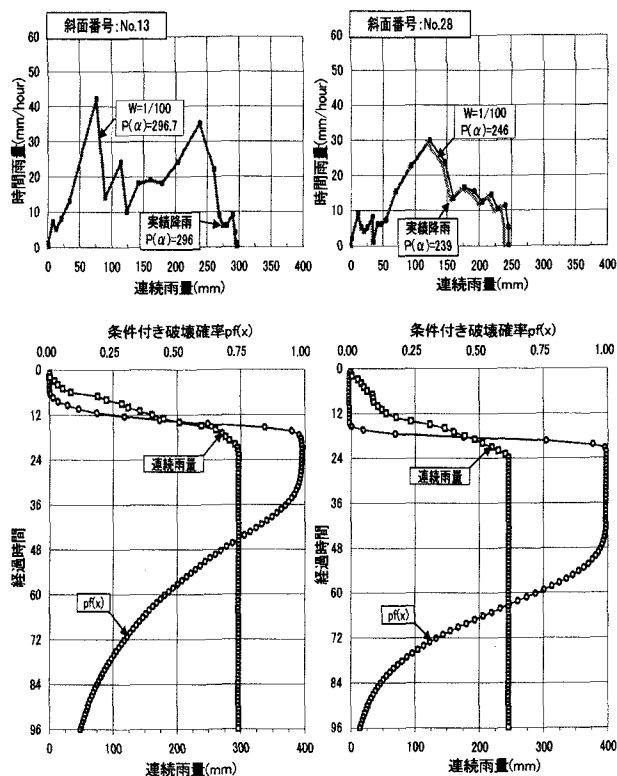


図-1 2 降雨履歴図と条件付き破壊確率

事業者損失＝通行車両，搭乗者に対する損害(C_1)＋
崩落土の撤去，復旧費用(C_2)

利用者損失(C_3)＝迂回損失（時間費用＋走行費用）

損失額(C_i)＝ $C_1 + C_2 + C_3$

また，事業者損失額の算定根拠となる斜面破壊時の崩落土量 η については，現地調査，及び地形判読により求めた．なお，各損失額についての具体的な算定方法は，既往研究⁸⁾に示されている方法を援用した．

(a) 事業者損失の算定

通行車両および搭乗者に対する損失額 C_1 は，式(11)に基づき算定する．

$$C_1 = N_c \times (C_c + nd \times C_p) \quad (11)$$

ここに， N_c は被災車両台数， C_c は 1 件当たりの物質損失額（円/台）， nd は平均乗車人数（人/台）， C_p は死亡損失額（円）を表す．また，斜面破壊後の崩落土砂の撤去，斜面の復旧に要する合計費用 C_2 は，式(12)に基づき算定する．

$$C_2 = (C_{v0} \times V + C_{A0} \times A) \times (1+b) + C_{p0} \times n_p \quad (12)$$

ここに， C_{v0} は単位体積あたりの撤去費， C_{A0} は単位面積当たりの復旧費， b は諸経費率， C_{p0} は交通整理員の一戸当たりの労務単価， n_p は交通整理員が必要な日

数を表す．

(b) 利用者損失の算定

斜面破壊により道路が通行止めになると，その道路を利用する利用者（車両）は，その道路が復旧するまでの期間，他の道路へと迂回することになる．この迂回に伴う時間・走行費用損失 C_3 は，式(13)に基づき算定する．

$$C_3 = C_{31} + C_{32} \quad (13)$$

ここに， C_{31} は時間損失の計算を表し，通行止め，及び片側交互通行時の時間損失の和， C_{32} は走行損失を表し，燃料費，オイル等の車両償却にかかる費用の増加の和として算定する．

(2) 年間リスクの算出

各斜面における年間リスクは，年間破壊確率(Pa)と損失額 (C_i) をもとに算出する．

年間リスク Ra ＝年間破壊確率 Pa × 損失額 C_i

図-1 3 には，各斜面の年間破壊確率，事業者損失，利用者損失，及びそれらを基に算出した年間リスクを対比して示した．同図によれば，年間リスク評価を基にした 32 斜面における対策実施の優先順位を決定するための根拠を示している．

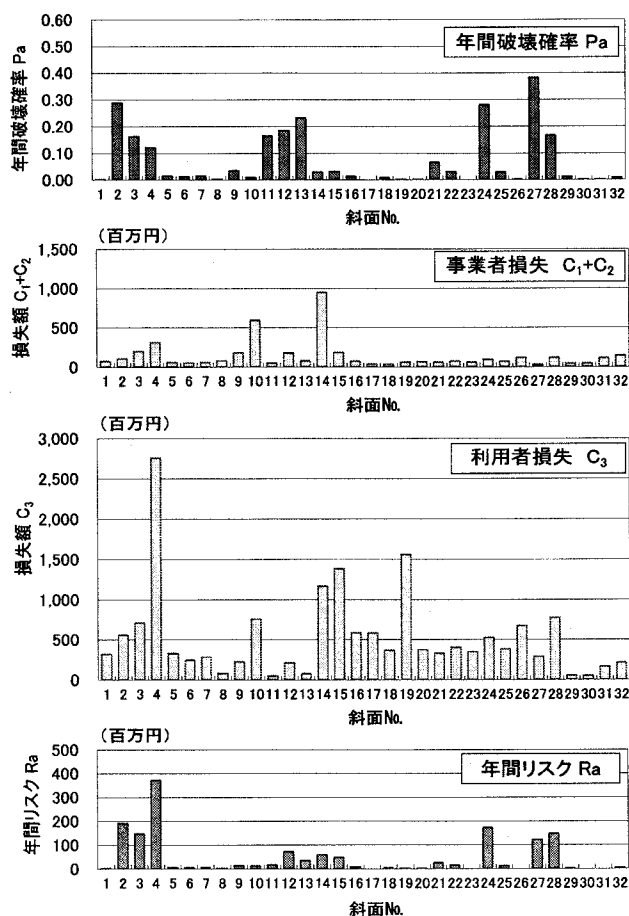


図-13 各斜面の年間リスク

6. まとめ

本研究では、降雨に起因する斜面破壊リスクの評価手法として、浸透流解析等の数値解析法に比べて、比較的簡便に、地域特性を有する降雨条件下で斜面破壊確率を算定する手法を示した。更に、この手法を援用した降雨時の斜面リスク評価システムを示した。

この評価システムは、従来の統計手法に基づく危険

度判定と異なり、個々の斜面特性(力学的、幾何学的)評価も可能であり、現状斜面の破壊確率評価だけでなく、斜面補強の優先順位付けも可能である。また、実際の降雨波形に対応した破壊確率やリスク評価も可能であり、降雨ハザードのもつ経時的变化も考慮できる評価手法である。

【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, 土木学会論文報告集, 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) 榎明潔: 降雨時の斜面表層破壊, 土と基礎, No.49-7, pp. 17-20, 2001.
- 5) 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(A), pp. 344-345, 2001.
- 6) 菅原正巳(1972): 流出解析法, 共立出版.
- 7) 国土交通省近畿地方整備局豊岡工事事務所, 9号管内法面リスクマネジメント業務報告書, 2001.
- 8) 道路投資の評価に関する研究委員会, 道路投資の評価に関する指針(案), 日本総合研究所, 1998.

RESEARCH ON THE SLOPE RISK EVALUATION DUE TO RAINFALL USING THE STORAGE TANK MODEL

Kenji TAKAHASHI, Hiroyasu OHTSU, Yuzo OHNISHI

Heavy rainfall is one of the biggest natural hazards to cause serious failure of infrastructure. The collapse of slopes along roads is a typical example, since it causes the serious damage to national life such as the loss of human lives, the interruption of road services and so on. This paper deals with risk evaluation of slopes along Japan national road, which have been classified as instable ones in preliminary inspection. Finally, the results show that the adoption of risk as an index will be recommended, since it provides comprehensive information by considering socio-economic losses caused by rainfall.