

谷頭部における 地すべりポテンシャルの評価

EVALUATION OF LANDSLIDE POTENTIAL IN VALLEY HEADS

真野 明¹・鈴木 雄太郎²・市花 圭一郎³
Akira MANO, Yutaro SUZUKI and Keiichiro ICHIHANA

¹正会員 工博 東北大学教授 工学研究科付属災害制御研究センター (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²非会員 栃木県庁 (〒320-8501 栃木県宇都宮市塙田1-1-20)

³学生会員 東北大学大学院工学研究科修士課程 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

When heavy rains fall, the landslides frequently occur in valley heads. These reasons are that underground water concentrates easily and piping occurs because of groundwater discharge. This study is the basis to predict a landslide generation in valley heads. The prediction of a landslide in valley heads needs the 3D subsurface flow simulation. The purpose of this study is, first, to analyze subsurface flow in 3D considering landform, soil layers and pipe flow, and second, to evaluate the landslide potential in valley heads. We targeted the landslide that actually occurred in Fukushima in August, 1998. The result is that our model can almost accurately predict the time of landslide and piping generation, and there is a possibility that as the history of heavy rain continues, piping grows and landslide potential increases in valley heads.

Key Words : Valley Heads, Pipe Flow, 3D Subsurface Analysis, Landslide Potential

1. 序論

近年、緩斜面かつ地すべり地形を呈していない斜面での斜面災害が多発している。地すべりは豪雨、地震、融雪などにより発生し、地質、地形、地下水が複雑に絡まった現象であり、その解明は容易ではない。しかし、日本では斜面地域の開発が多数行われており、豪雨、地震、融雪などの誘因がその地域を襲えば悲惨な斜面災害を引き起こす可能性がある。そのため以前にも増して斜面災害予測の研究が重要視されている。

従来、豪雨による地すべりの評価において、崩壊地の地形効果は考慮されておらず降雨強度や降雨時間のみで評価されていた。近年気象庁が用いている土壌雨量指数は、全国を約17,000に分割した5km四方の領域ごとにレーダー・アメダス解析雨量を用いて降雨量を算出しそれをタンクモデルに適用させたときの第1段目と第2段目の貯水量からその地点の土壌水分量を推定するものである。気象庁が平成3年から平成10年までに全国で発生した約54,000件の土砂災害について、現在の数値が過去の土壌雨量指数と比較して第何位の大きさかという相対的な順位を示す「歴代順位」との関係を検

証した結果、全国では約6割の土砂災害がその市町村で歴代1位の雨で発生していること、東京都では各区市町村で歴代1位から3位までの雨でがけ崩れの9割が発生していることなど、歴代順位と土砂災害に高い相関があることが発表されている。¹⁾しかし厳密には、土壌の透水性によって浸透流の挙動が大きく変化し、不透水層の位置や地形形状によっても土壌の飽和時間に相違が生じて、地すべりの仕方に影響が現れるはずである。また透水係数や地形効果を考慮して浸透水の挙動を解析し、さらに土壌の安定解析と結びつけることにより地すべり発生時間を予測するIverson²⁾のモデルがあるが、豪雨時には適用できないという欠点がある。

谷頭部においては、斜面勾配が比較的緩い場所にもかかわらず大規模地すべりが発生し甚大な被害をもたらす可能性があり、これは谷頭部の地形形状に由来するものである。本研究では、パイピング等の確率的要因を考慮した地すべりの起こりやすさを地すべりポテンシャルと定義し、浸透流解析を行うことによってこれを評価することを目的としている。そこで1998年の南東北・北関東集中豪雨により発生した福島県西郷村「太陽の国」裏山谷頭部の地滑りを対象に浸透流解析を行い、地滑りポテンシャルを評価した。

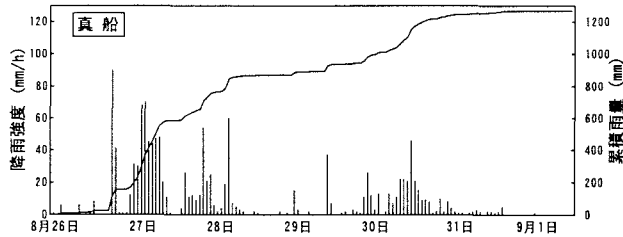


図-1 真船雨量観測所の降雨記録

2. 研究対象とする地すべり

1998年8月26日から31日にかけて南東北・北関東を襲った集中豪雨により、福島県西郷村では最大時間雨量90mm/h、総降雨量1260mmを記録した。西郷村真船における降雨記録を図-1に示す。27日午前4時30分頃に「太陽の国」からまつ荘裏山谷頭部では緩斜面にもかかわらず比較的大規模の地すべりが発生し、滑落崖や崩壊面にパイピングの穴が多数確認された。³⁾本研究ではこの地すべりが発生した谷頭部を対象に三次元浸透計算を行い、斜面の地すべりポテンシャルを評価する。解析対象地の平面図を図-2に示す。北側に二つ並んだ地すべり地形の滑落崖を含む25m×95mの範囲が解析対象域である(後図-10参照)。

3. 解析方法

(1) 支配方程式

図-3に地中の座標軸(x, y, z)の定義を示す。 Z_s : 地表面, Z_w : 地下水面, Z_b : 不透水面であり、不透水面は平面とし、 x - y 平面に一致するようにする。本モデルの支配方程式には式(1)のRichardsと式(2), (3)のvan Genuchten⁴⁾の式を用いる。ここで θ : 体積含水率, ψ : 圧力水頭, θ_s : 飽和体積含水率, θ_r : 最小体積含水率, K_{s0} : 飽和透水係数, K : 不飽和透水係数, S_e : 有効飽和度, β : 不透水面勾配, αn : 土壌定数, γ : 0.5なる定数である。

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \beta \right) \right] \quad (1)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \beta \right) \right]$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha \psi)^n \right]^m, m = 1 - 1/n \quad (2)$$

$$K(\psi) = K_{s0} S_e^\gamma \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^n \right] \quad (3)$$

(2) 計算条件

図-2のAで示した部分において小田ら⁵⁾により観測された地層分布図を図-4に示す。ここで各層の飽和透水係数と土粒子比重は小田ら⁵⁾が室内実験で得た値を示している。

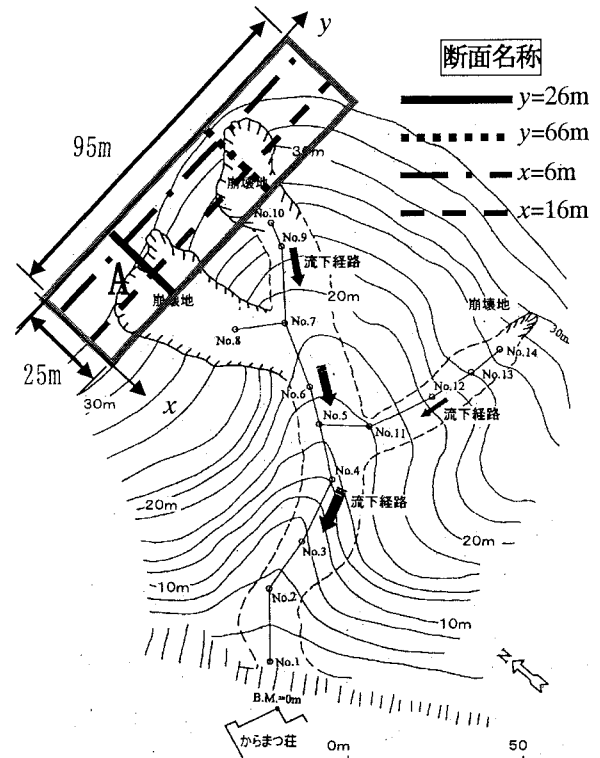


図-2 からまつ荘裏山地すべり地形平面図と解析対象域

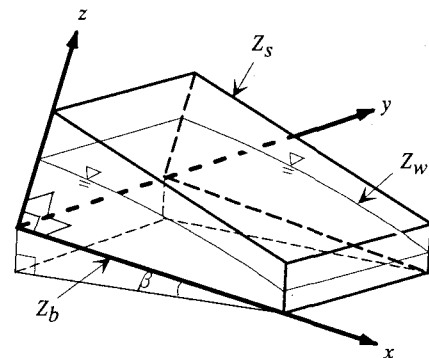


図-3 地中の座標軸の定義

a) 不透水層位の決定

図-4によると地表からの深さ約3.6mに軽石層が存在し 10^{-5} cm/sの飽和透水係数を持つため、この層は事実上の不透水層と考えられる。「太陽の国」裏山では軽石層はStrikeがほぼE-W, DipがN-SにS3°程度で分布しているとの報告がある。⁶⁾これらの情報から「太陽の国」裏山の不透水層位を決定した。

b) 降雨条件

解析対象域は狭い範囲であるため空間的に一様に雨が降っているものと仮定し、降雨データは対象崩壊地の最も近くにある真船雨量観測所によるものを使用した。また豪雨時における解析のため蒸発散は無視した。

c) モデルパラメータの決定

土壌の各層厚、透水係数、土粒子比重は図-4に示す値を不透水層と平行に与えた。ただし、スコリア層IIにはその上層のローム層IIの値を代入した。土壌パラ

深さ (m)	地表面	飽和透水係数 (cm/s)	土粒子の比重
0.0	黒ボク土	1.85×10^{-3}	2.65
0.5	ローム層Ⅰ	1.76×10^{-2}	2.71
1.3	スコリア層Ⅰ	2.05×10^{-2}	2.90
2.1	ローム層Ⅱ	2.55×10^{-3}	2.87
3.0	スコリア層Ⅱ	—	—
3.6	軽石層	1.18×10^{-5}	2.87
4.3			

図-4 地点Aにおける地層分布図

表-1 計算に用いたパラメータ

初期圧力水頭 ψ_0 (cm)	-50
x方向メッシュ数	26
y方向メッシュ数	96
z方向メッシュ数	56
x方向空間刻み幅 (cm)	100
y方向空間刻み幅 (cm)	100
z方向空間刻み幅 (cm)	10
計算時間刻み幅 (s)	1
飽和体積含水率 θ_s (cm ³ /cm ³)	0.61
最小体積含水率 θ_r (cm ³ /cm ³)	0.48
n	2.3
a	0.03
γ	0.5
不透水面勾配 β (°)	3
内部摩擦角 f (°)	26.37
粘着力 c (kPa)	20.06

メータは小田ら⁵⁾による土壌水分特性曲線に最も良く合うように $a=0.03, n=2.3$ と決定し、対象域全体で一様とした。また、土壌の内部摩擦角と粘着力は土壌の飽和度によって変化すると考えられているが、本研究ではそれらを一定としローム層Ⅱの値をすべての層に適用した。

d) 初期条件

初期圧力水頭は対象域全体で $\psi=-50$ cmとした。降雨を与えないまま12時間放置させた時点を選定し、計算開始0時間とした。表-1に示したパラメータの値を用い、8月26日午前0時から30時間分の計算を行った。

(3) 地すべりポテンシャル

地すべりポテンシャルとはパイピングを考慮した地すべりの起こりやすさを表す指標であり、以下で定義する。

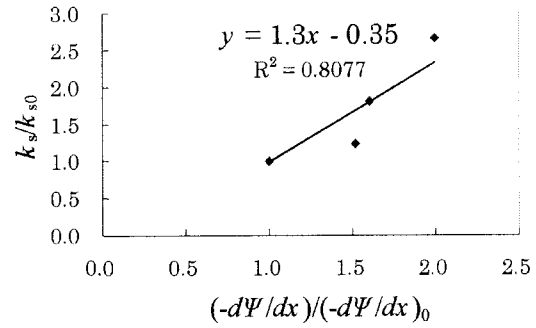


図-5 圧力勾配と透水係数の関係

$$F_r = \frac{A}{B} \quad (4)$$

ここで、 A ：地すべりを起こそうとする力の期待値、 B ：地すべりに抵抗する力の期待値である。降雨やパイピング形成などの確率的な要素が入っているため「期待値」としている。

長さ l 、管径 d の1本のパイプ中を水が層流で流れていると仮定すると、土が受ける力 F_f は次式で表される。

$$F_f = \pi d l \tau_0 \quad (5)$$

ただし τ_0 は壁面摩擦応力である。 U_0 を管路の断面平均流速とすると、摩擦抵抗係数 f と壁面摩擦応力 τ_0 との間には

$$\tau_0 = \frac{1}{8} \rho U_0^2 f \quad (6)$$

という関係が成り立つ。これを式(5)に代入すると次式になる。

$$F_f = \frac{1}{8} \rho U_0^2 f \pi d l = 8 \pi \rho \nu U_0 l \left(\because f = \frac{64}{\text{Re}} \right) \quad (7)$$

また、斜面勾配 β の傾斜地における微小体積 dV の土塊の自重の斜面方向成分 W_{slope} は次式で表せる。

$$W_{\text{slope}} = (\rho_s + \rho_w) dV \cdot g \sin \beta \quad (8)$$

式(7)、(8)より、地すべりを起こそうとする力の期待値 A は

$$A = \iiint_V (\rho_s + \rho_w) dV \cdot g \sin \beta + \sum_a 8 \pi \rho_w \nu U_0 l \quad (9)$$

と表される。一方で、地すべりに抵抗する力の期待値 B は土の内部摩擦角 f と粘着力 c を用いて次式で表せる。

$$B = \iint_{a-a'} \{c + (\sigma_n - p) \tan \varphi\} da \quad (10)$$

ここで σ_n ：すべり面に働く土塊自重の斜面法線方向応力、 p ：すべり面における間隙水圧、 a ：すべり面の面積、 a' ：パイピングが起こっている面の面積である。

(4) パイピングの考慮

不透水面のすぐ上層でパイピングが発達すると仮定し、市花ら⁷⁾の実験によって豊浦標準砂を用いて得られた図-5の関係式をパイピング層に適用する。これにより、圧力水頭変化に対応する飽和透水係数を与えること

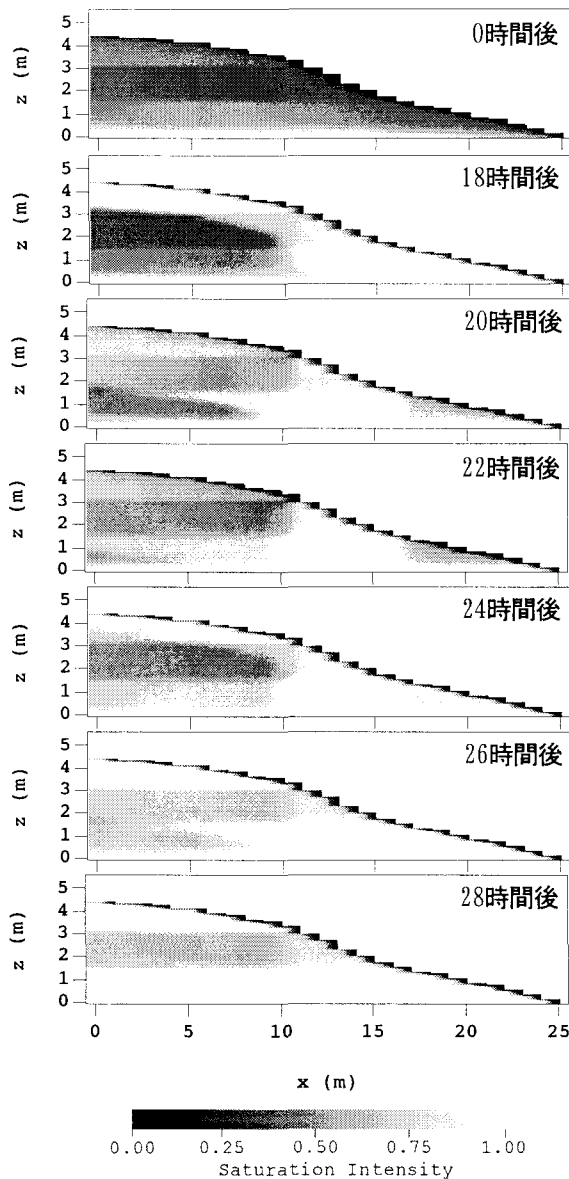


図-6 $y=26\text{m}$ 断面における飽和度分布の時系列

ができる。図-5の関係式の導入により圧力勾配が大きい地点では透水係数の増加割合が高くなる、つまりパイピングが発達するという現象をモデル化することができると考えられる。ここで k_{s0} にはローム層Ⅱの値を用いる。パイプの径はスコリア層の平均粒径 3.4mm のほぼ 10^{-1} 倍であるとの仮定の下 0.34mm とし、パイピング層の透水係数が初期値より大きくなった時点から、 y 方向の空間刻み幅 Δy あたり 10^3 本のパイプを x 軸と平行に設置した。ここで、パイプの密度は変えずにパイプ径が増大していくと考えて透水係数を大きくするものである。

4. 結果

(1) 浸透流解析

図-2における $y=26\text{m}$, $x=6\text{m}$, $x=16\text{m}$ 断面での飽和度分布の時系列を図-6～図-8に示す。

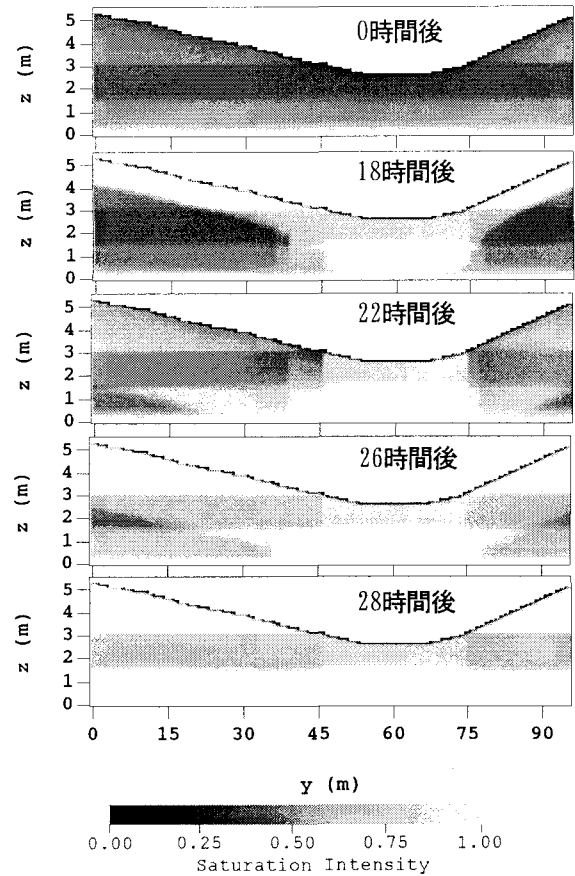


図-7 $x=6\text{m}$ 断面における飽和度分布の時系列

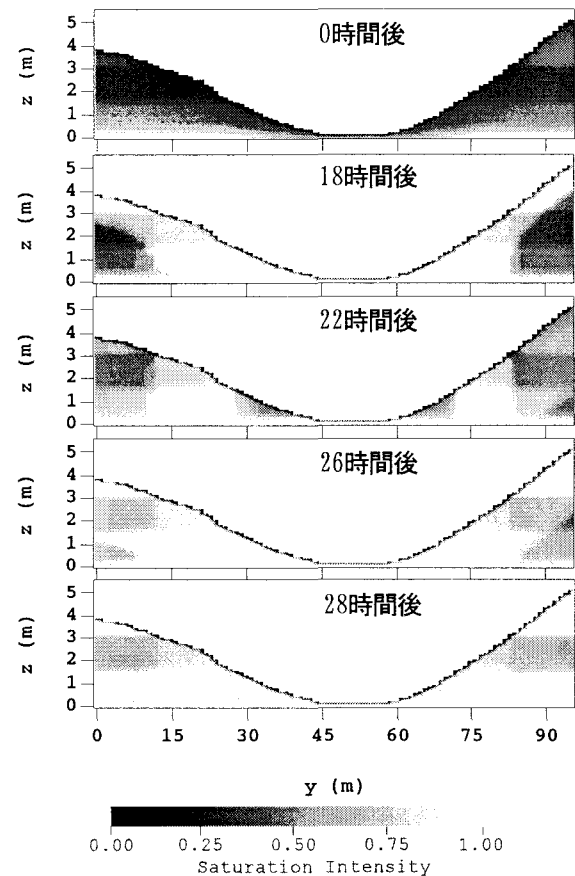


図-8 $x=16\text{m}$ 断面における飽和度分布の時系列

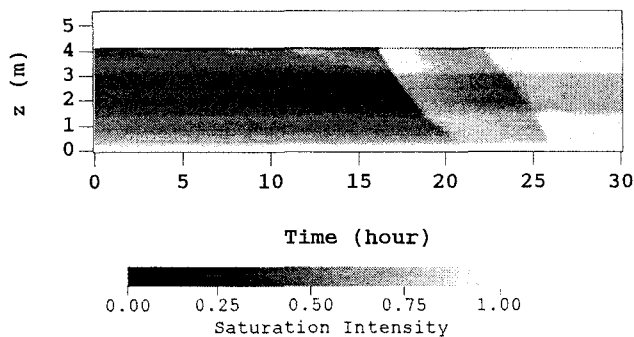


図-9 y=26m断面地すべり上流端部における飽和度変化

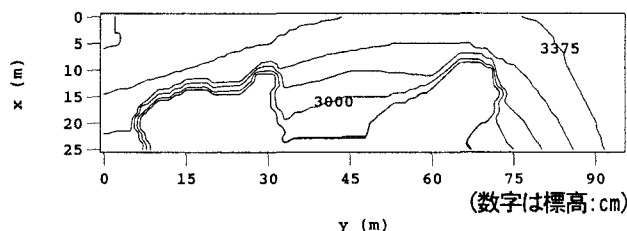


図-10 地すべり地形の標高コンタ図

降雨開始18時間後に90mm/hの降雨が地表面と平行に浸透している。図-6ではy=26m断面における地すべり面上流端部はx=14mの地点にあたり、ここではスコリア層Ⅰとローム層Ⅱの境界が露出している。透水性の低い層の上に透水性の高い層が存在する地点では透水性の低い層からの流出が増加することが報告されており、⁸⁾この地点で土壌が特に不安定になった可能性がある。その後20～22時間後まで降雨の小康状態が続くが依然として飽和度は高いままであり、降雨開始24時間後から再び平均約40mm/h程度の豪雨となっている。そのため水分が湧出する間もないまま26時間後には飽和度が一気に上昇し、z=1.5mの高さにほぼ地下水面が形成されている。地すべりが発生した時刻は降雨開始28時間30分後にあたるため、土壌全体が飽和してから数時間経過した後にはすべった可能性がある。

図-7, 8では谷中央に水分が集まっていく傾向があり、谷部の集水効果が現れている。豪雨が不飽和層に浸透していく過程において、z=1.5mの地点で水平方向にくさび形分布が見られる。これは、地表面と平行に降下した雨が透水性の高いスコリア層Ⅰを通過して透水性の低いローム層Ⅱに達し水分のたまり始める時刻が、土層厚が小さいほど早いためであると考えられる。z方向に不連続な分布が生じているのは不透水面と平行に土壌特性の異なる地層が存在するからであるが、同じ地層内でもxy方向にいくつか不連続な分布が見られる。この理由として、透水性の高い地層が露出している地点では降雨の浸透速度が周囲より大きく、早い時刻に飽和層を形成しさらに水分が入りやすくなるため、周囲の不飽和層で未だに降雨が不透水面に到達していない時刻に、一方ですでに地下水面が上方に発達すると

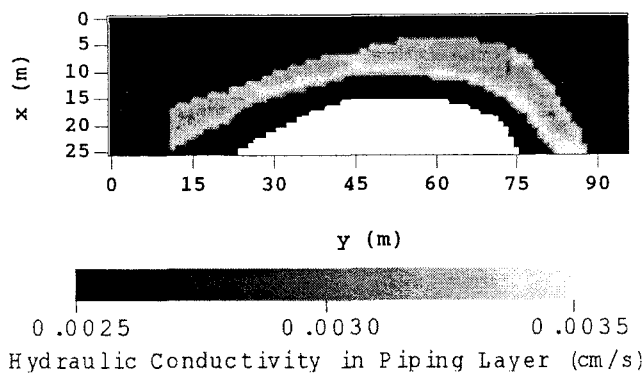


図-11 降雨開始30時間後のパイピング層における飽和透水係数分布

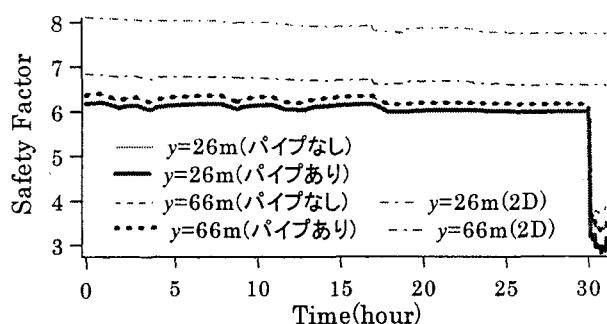


図-12 y=26m, y=66m断面における安全率

ということが考えられる。以上から、地層ごとの透水性の違いと土層厚が地中流の挙動に及ぼす影響は大きいと言える。

(2) 地すべりポテンシャルの評価

図-9にy=26m断面の地すべり上流端部における飽和度分布の時間変化を示す。図-10に地すべり地形の標高コンタ図を示し、図-11に降雨開始30時間後のパイピング層における飽和透水係数分布を示す。

図-9を見ると18時間後の90mm/hの豪雨は不透水面に達するまでに拡散してしまい、地下水面形成に直接起因するものではないことがわかる。図-11で下流の白い部分は軽石層が露出している地点であり、軽石層上にすべり面ができたと考え、図-10と見比べて二つの地すべり上流端部において透水係数が高くなっていることから、やや上流でパイピングが発達しそれが引き金となって地すべりが発生した可能性がある。

図-12ではy=26m, y=66m断面における円形滑り面法⁹⁾を用いた安全率の時間変化をパイピングを考慮した場合としない場合、さらに二次元モデルとで比較している。二次元モデルではほぼ一定値をとっているが、三次元モデルではパイプの在る無しにかかわらず30時間後に半分ほどに急減しており、集水効果が現れた結果となった。18時間後に90mm/hの豪雨が降っているが安全率はほとんど低下していないが、これは図-9のようにその時点では地下水面が形成されていないからである。

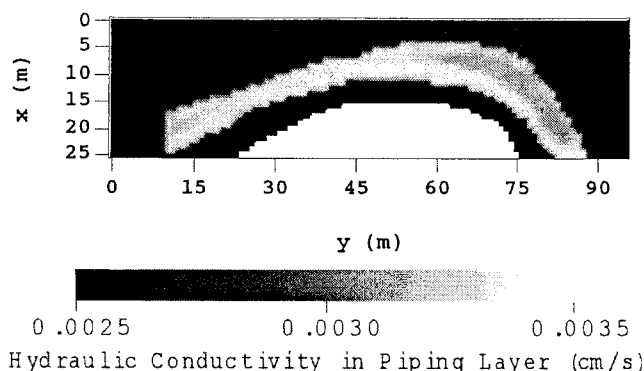


図-13 豪雨履歴2回目の飽和透水係数分布

このことから、地すべり発生は豪雨強度では一概に予測することはできず、地下水位の上昇に大きく影響されると言える。つまり、90mm/hの豪雨により飽和度が高くなった土壌に、24時間後から平均40mm/hの豪雨が降り続き地下水位が上昇したことで、飽和層において数時間水が流れたことによってパイピングが発達したことが、安全率の低下を招いたと考えられる。しかし地すべり発生時刻を過ぎても安全率が未だに3程度であるのは、「すべり面やパイプを一様に分布させる」というパイプの仮定方法に問題があると考えられるので、今後は現地実測を行い、パイプの分布を再現したい。

豪雨履歴の違いによるパイピング発達の違いを見るために、図-11の透水係数分布を初期値（豪雨履歴1回目）とし、再度同じ降雨条件で30時間計算した後のパイピング層における透水係数分布を図-13に示し、これを豪雨履歴2回目とする。豪雨履歴1回目と2回目の透水係数分布を比較すると、初期透水係数より大きくなっている範囲は変わっていないが、履歴2回目のほうがより透水係数が大きくなっている様子が分かる。従って豪雨履歴を重ねることによってパイピング層で水が通りやすくなり、結果的にパイピングの発達につながると考えられる。また、パイピング層で透水係数が大きくなっている地点の地表面には透水性の高いスコリア層Ⅰが露出していることから、この地点で降雨が早くに不透水面に到達しパイピング発達の引き金になったと考えられる。

図-14に豪雨履歴1回目と2回目の場合の地すべりポテンシャル変化を示す。これを見ると、豪雨履歴2回目は22時間を過ぎた頃に早くも地すべりポテンシャルが増大している。また、最終的な地すべりポテンシャルの値も $y=26\text{m}$ で0.34から0.39、 $y=66\text{m}$ で0.31から0.35と大きくなっていることが分かる。つまり同様の地形で同様の豪雨が発生した場合であっても、その地点の過去の豪雨履歴によるパイピングの発達状況等によって、それ以降のパイピングの発達の仕方、地すべりの発生時刻等に影響を与えるということを示唆する結果となった。従って、過去の豪雨履歴を調べることは地すべり発生予測に対して重要な手がかりとなり得ると言える。

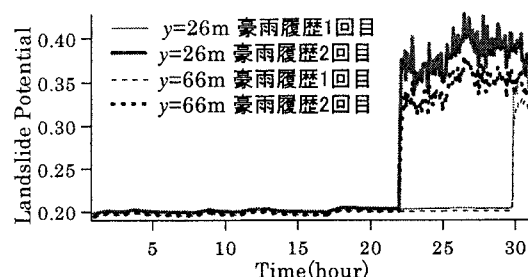


図-14 地すべりポテンシャルの時間変化

5. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 谷頭部を対象に地中流の挙動を計算できる三次元浸透流モデルを開発し、パイピングの効果を取り入れた浸透計算法、安全率の計算法を提案した。
- 2) 福島県南部の地すべり地形を対象とした解析の結果、地すべり発生時刻とほぼ同時刻に地下水面上昇とパイピング発生が見られた。
- 3) 豪雨履歴を重ねることでパイピングが発達し、地すべり危険度が増大する可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) 気象庁：http://www.kishou.go.jp/know/camp/0009.pdf.
- 2) Iverson, R.M. : LANDSLIDE TRIGGERING BY RAIN INFILTRATION, *Water Resources Research*, Vol.36, No.7, pp.1897-1910, 2000.
- 3) 井口隆：福島県南部地域における斜面崩壊の分布と特徴、1998年南東北・北関東の集中豪雨災害に関する調査研究、平成10年度科学研究補助金(基盤研究(B)(1))研究成果報告書, pp.148-162, 1999.
- 4) van Genuchten, M.Th. : A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp.892-898, 1980.
- 5) 小田匡寛・鈴木輝一・川本健：1998年南東北・北関東の集中豪雨による土砂災害の実態調査、1998年南東北・北関東の集中豪雨災害に関する調査研究、平成10年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(1))研究成果報告書, pp.163-181, 1999.
- 6) 梅村順・森房信：福島県南部で発生した土砂災害、1998年南東北・北関東の集中豪雨災害に関する調査研究、平成10年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(1))研究成果報告書, pp.182-196, 1999.
- 7) 市花圭一郎・鈴木雄太郎・山路弘人・真野明：パイピングの発達過程に関する基礎実験、東北地域災害科学研究, 第40巻, 2004.
- 8) 古田智弘・田村俊和・森脇寛：斜面での降雨-流出過程と土層の透水性との関係 -降雨装置下での実験と自然斜面での観測-, 東北地域災害科学研究, 第39巻, pp.201-206, 2003.
- 9) 河上房義：土質力学, 森北出版, pp.171-173, 1992.

(2004.9.30 受付)