

豪雨に対する 斜面崩壊地の浸透流解析

SUBSURFACE FLOW ANALYSIS OF LANDSLIDE AREA FOR HEAVY RAIN

鈴木 雄太郎¹・真野 明²
Yutaro SUZUKI and Akira MANO

¹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)

²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)

This study is the foundation to predict a slope failure generation. The prediction of a slope failure needs the subsurface flow simulation. The purpose of this study is to propose a simplified two-dimensional infiltration model of landslide area, considering the unsaturated hydraulic conductivity and the slope of the impermeable layer, by which we can analyze the subsurface flow in the direction of the slope and the normal direction to the slope at the same time. To verify the proposed model, it is applied to the slope failure that actually occurred in Fukushima in August, 1998. The result is that the proposed model can almost accurately predict the time of slope failure generation, and this implies that the model has prospects of the prediction of a slope failure.

Key Words : slope failure, Richards equation, two-dimensional infiltration model

1. はじめに

日本の開発地域の多くは、豪雨、融雪、地震などによって悲惨な斜面災害を引き起こす可能性があり、斜面災害予測の研究が重要視されている。斜面崩壊を起こす原因を明らかにすることは困難であるが、一般には幾つかの要因が同時に働いたためと考えられる。その中で降雨が主要な原因となる斜面崩壊は、降雨が浸透し地下水位の上昇にともなう間隙水圧の作用によるものと考えられる。

従来、豪雨による斜面崩壊の評価において、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、不透水層の位置や勾配によっても土壌の飽和時間に相違が生じて、斜面崩壊の仕方に影響が現れるはずである。従って、土壌雨量指数の値だけでは一概に災害発生を予測することはできない。

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滑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。

そこで本研究では豪雨時における斜面崩壊発生予測の基礎的な研究として、土壌中の透水係数と不透水層の勾配を考慮した斜面浸透流モデルを実際の崩壊地に適用し、浸透流解析を行った。その対象は1998年に南東北・北関東を襲った集中豪雨により発生した福島県西郷村の斜面崩壊である。本モデルでは、二次元の土中水分の連続式をそのまま差分展開して計算することにより、二次元の水分移動過程を連続的に表現している。

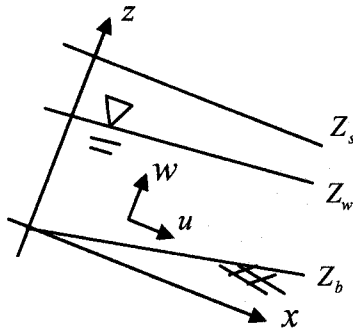


図-1 座標系

2. 浸透流モデル

斜面に降った雨は浸透層が不飽和であるとき、降雨強度が浸透速度より小さければ浸透し、降雨強度が浸透速度を上回れば浸透しきれない分が地表流となって流下する。一般的な場合において降雨強度は浸透速度よりも小さいので、降雨はすぐに浸透し、早い地中流、すなわち中間流となって斜面下方に流下することとなる。また、斜面の浸透層中の水深が浸透層厚さに達したとき、つまり浸透層が飽和したときに地中への浸透はなくなり、中間流から地表への浸出が起きやすくなる。地表に浸出したものは表面流として流下する。

地表面での z 方向の水分移動速度を w_s とし、 w_s を表面における水の移動速度で分解すると、

$$w_s = -i_s \downarrow + w_e \uparrow + w_g \uparrow \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i_s \downarrow : \text{地表降雨浸透速度} \\ i_s = \begin{cases} i_{s \max} & r_s > i_{s \max} \\ r_s & r_s < i_{s \max} \end{cases} \\ r_s : \text{降雨強度, } i_{s \max} : \text{最大浸透速度} \\ w_e \uparrow : \text{地表蒸発速度} \\ w_g \uparrow : \text{地下水湧出速度} \end{array} \right.$$

となる。豪雨時の浸透を考える時、 $w_e \uparrow$ は小さいので無視することにする。

地表面における実現象では降雨が表層部でごく薄く溜まるが、それが短時間のうちに土壤中に浸透することから、本モデルでは地表における境界条件として最大浸透速度 $i_{s \max}$ には飽和透水係数の値を与え計算する。また、浸透層中の下部には傾斜を持った不透水層が存在する。

地表面の位置を Z_s 、地下水面の位置を Z_w 、不透水層の位置を Z_b とし、座標軸を図-1のように地表面と平行に x 軸、それと垂直に z 軸をとり、 (x, z) 方向の流速を (u, w) 、土壌水分含水率を θ で表すと、土中の微小区間における水分連続式は以下に示す(2)式になる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2)$$

この(2)式を解くことによって土壤中の水分移動を解析

することができる。また、圧力水頭を ψ 、地表面の勾配を β で表すと、任意の地点でのピエゾ水頭 ϕ は次式で表される。

$$\phi = \psi - x \sin \beta + z \cos \beta \quad (3)$$

よって不飽和透水係数を K_z とすると、流速 (u, w) は Darcy 則を用いて次式で表される。

$$u = -K_z \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \beta \right) \quad (4)$$

$$w = -K_z \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \beta \right) \quad (5)$$

土壌中の圧力水頭分布が分かると、Darcy 則から流速分布が求められ、それによって土壌中の水分移動過程を知ることができる。そこで飽和域では静水圧分布を与え、不飽和域では(4)、(5)の Darcy 則を拡張し(2)の連続式と組み合わせた次の Richards の式より圧力水頭を求める。

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_z \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \beta \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + \cos \beta \right) \right] \quad (6)$$

有効飽和度 S_e 、不飽和透水係数 $K_z(\psi)$ には van Genuchten³⁾ の表示法(7)、(8)を用いる。

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha \psi)^n]^{1-1/n}} \quad \psi > 0 \quad (\text{不飽和時}) \quad (7)$$

$$K_z(\psi) = K_{so} S_e^\gamma \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (8)$$

ここで $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ 、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小体積含水率、 α 、 n は土壌特性を表す定数、 K_{so} は飽和透水係数、 $m = 1 - 1/n$ ($n > 1.0$) である。ここでほとんどの土壌で $\gamma = 0.5$ を与えることでよい結果が得られることが知られているため、 $\gamma = 0.5$ として計算を行う。なお、自然丘陵地斜面において $\psi(\theta)$ 、 $K(\theta)$ は一様ではないため現地調査によって求めることが理想であるが、本モデルでは研究の第一段階として土壌構造を単純化し、既存の式に現地調査報告から得られたパラメータを与え計算する。

式(6)を時間に関して前進差分、空間に関して中央差分を用いて差分化し、陽解法で解く。従来、不飽和浸透計算では陰解法が用いられているが⁴⁾、本研究では計算時間短縮のために陽解法を用いたので若干計算が不安定になる可能性がある。

下流端の境界条件は、

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

とすることで、位置水頭差によって水分が流下するようにする。

3. 福島県南部における斜面崩壊

1998年8月26日から31日にかけて北日本の広い範囲に

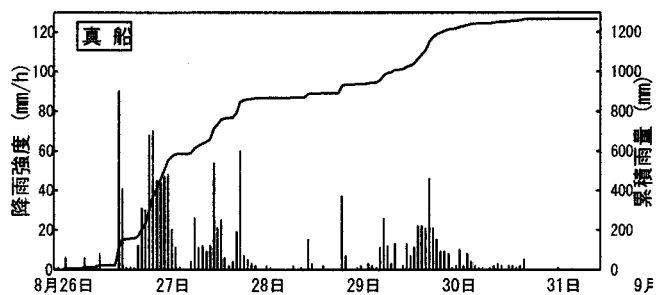


図-2 真船における降雨記録

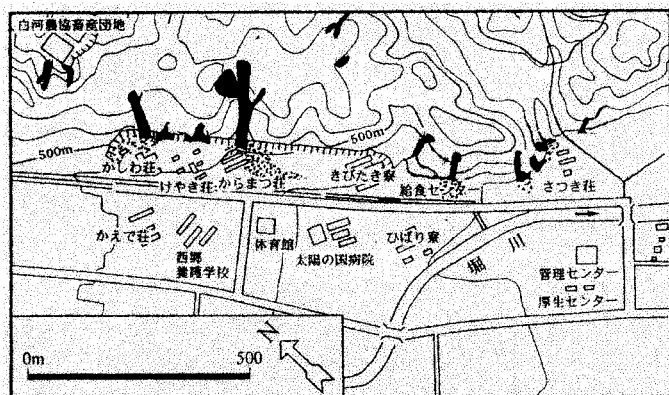


図-3 斜面崩壊分布図 (丸井⁶⁾による)

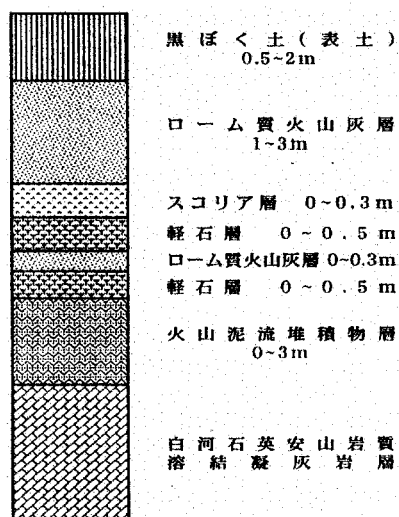


図-4 地質模式柱状図 (梅村⁷⁾による)

強い雨があり、特に福島県西白河郡西郷村の真船では時間降雨量が90mm/h、6日間の総降雨量が1260mmに達する記録的な集中豪雨となった。この豪雨により西郷村は多くの斜面崩壊や土石流に見舞われ、隣接する大信村を含めて家屋の全壊15棟、死者8名の被害を受けた⁷⁾。真船雨量観測所における降雨強度と累積雨量の時系列を図-2に示す。

真船における降雨記録によれば、26日17時から18時に今回の豪雨で最大の時間降雨量90mm/hを記録した後、27日夜半から約5時間にわたって40mm/h以上の豪雨が継続している。その最中、累積雨量が500mmに達する27日午前4時30分頃、西郷村の社会福祉事業団施設「太陽の

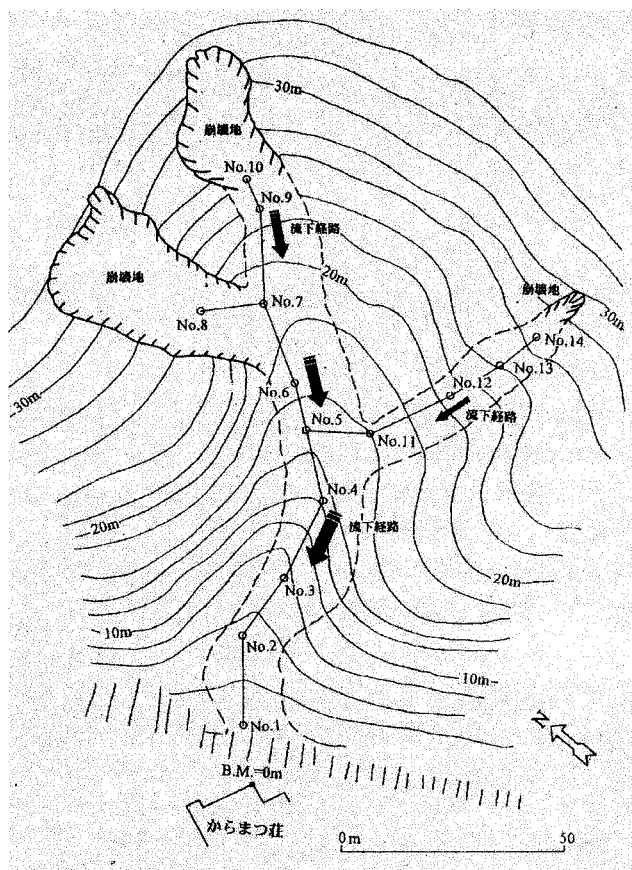


図-5 からまつ荘裏山崩壊地平面図 (梅村⁷⁾による)

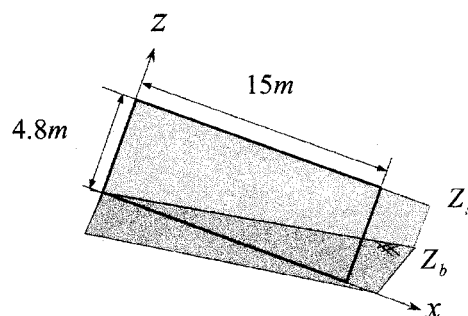


図-6 崩壊地の解析対象範囲

国」からまつ荘裏山では比較的大規模の斜面崩壊が生じた。丸井⁶⁾による「太陽の国」周辺の崩壊分布図を図-3に示す。

西郷村には比高10~100m程度の丘陵地が広がる。この地域の地質は「白河石」と呼ばれる新第三紀の白河石英安山岩質溶結凝灰岩を基岩に那須火山群起原の火山泥流堆積物が分布し、それを軽石、スコリア、ロームの火山噴出物が覆う。図-4に「太陽の国」で梅村⁷⁾により観察された地質模式柱状図を示す。

今回の豪雨による斜面崩壊は、緩勾配の斜面で、特に谷頭部や山腹のわずかに凹地形を呈する斜面において多発していることが一つの特徴である。からまつ荘裏山の崩壊も斜面勾配約15~25°の緩やかな場所で、谷頭部の凹地形を呈する斜面で発生している。また、パイプ

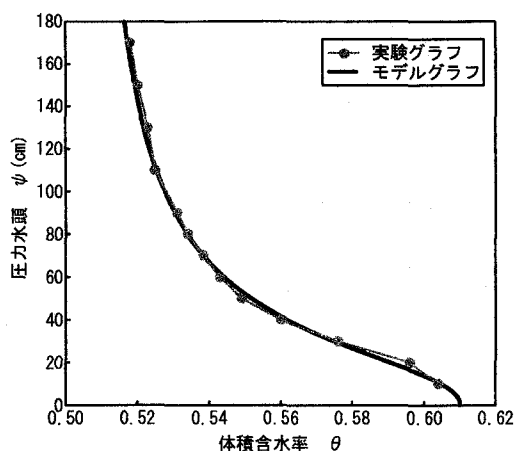


図-7 体積含水率と圧力水頭の関係 (小田ら⁵⁾ による)

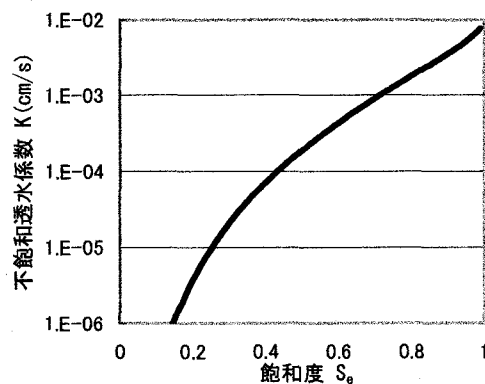


図-8 飽和度と透水係数の関係

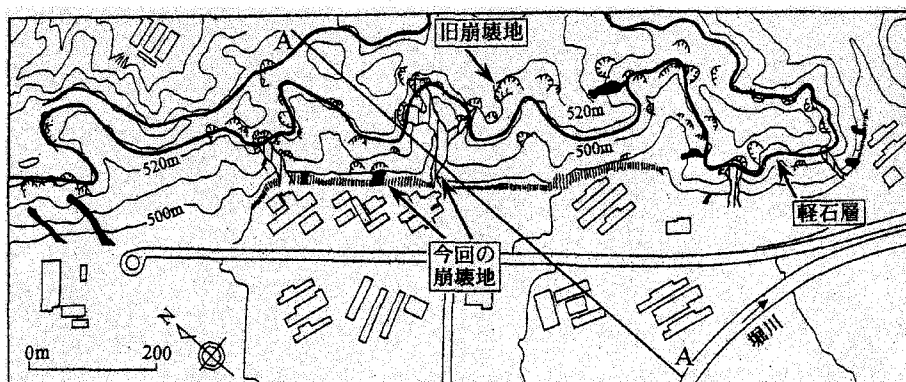


図-9 「太陽の国」周辺の崩壊地跡と軽石層の分布 (梅村ら⁷⁾ による)

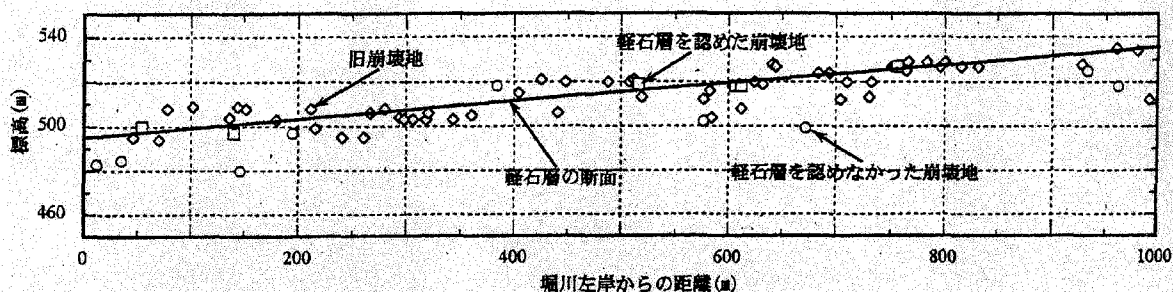


図-10 図-9におけるA-A断面の崩壊地跡と軽石層の関係 (梅村ら⁷⁾ による)

ローの穴が多数存在していた。以上のことは井口⁸⁾により確認されている。従ってパイプフローにより不透水面境界付近の取り扱いに注意が必要である。

4. 斜面崩壊地への適用

2. で提案されたモデルについて実際の斜面崩壊地に適用することによって、それが実現象をどの程度再現できるか検証する。

(1) 解析対象範囲

先に述べたように、福島県西郷村「太陽の国」裏山

では比較的大規模の斜面崩壊が発生した。図-5からまつ荘裏山崩壊地の平面図を示す。からまつ荘の北東側斜面には谷地形の1つが発達しており、崩壊はこの谷の上部3箇所が発生した。このうち中央部の崩壊地を対象に浸透流解析を行う。図-5で示される中央部の崩壊地において谷地形の方向に断面を切り取り、図-6のような x 軸方向に15m、 z 軸方向に4.8mの二次元空間を考える。

(2) 計算条件

dt を時間メッシュサイズ、 dx 、 dz を空間メッシュサイズとすると、空間を $dx=75\text{cm}$ 、 $dz=24\text{cm}$ のメッシュに区切り、 $dt=1$ 秒で計算を行った。計算は8月26日午前

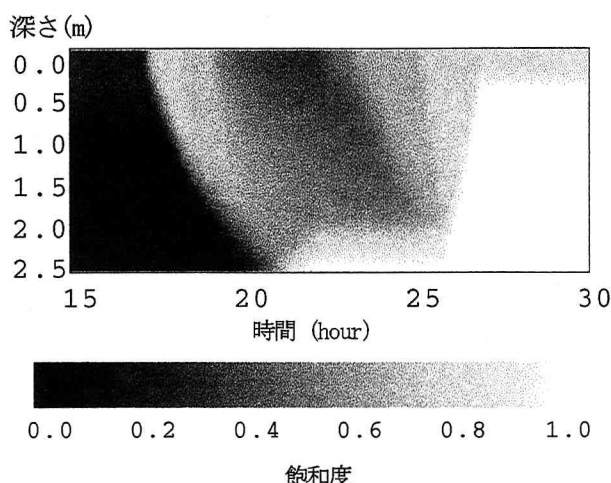


図-11 崩壊地における飽和度変化グラフ

0時を開始時間とし、31日までの144時間行った。

解析対象域は狭い範囲であるため一様に雨が降っているものと仮定し、降雨データは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。

「太陽の国」周辺では表土である黒ボク土が厚く堆積し、また崩壊土砂には黒ボク土が多く存在していたという報告があり、黒ボク土が崩壊の主要な原因であると見られている⁷⁾。しかし、実際には黒ボク土よりも透水係数が大きなローム質火山灰層、スコリア層も崩壊土壌に含まれていた。小田ら⁵⁾より黒ボク土、ローム質火山灰層、スコリア層の透水係数はそれぞれ $1.85 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、 $1.76 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $2.05 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ と求められているのでそれらを考慮し、本モデルでは $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ という透水係数を一様に与えた。図-7に小田ら⁵⁾による体積含水率と圧力水頭の関係グラフを示す。このグラフに合うようにモデルのパラメータを決定し、流域全体で一様とした。このとき(7)、(8)式を用いて得られた $K_z - S_e$ 曲線を図-8に示す。

図-5の中央部の崩壊前の等高線から地表面勾配を 15° と決定した。図-4の地質模式柱状図で地表からの深さ約2~4mに軽石層が存在する。この層は 10^{-5} cm/s の飽和透水係数を持ち、事実上の不透水層と考えられる。梅村ら⁷⁾の調査報告には、「太陽の国」裏山には軽石層はstrikeがほぼE-W、dipがN-Sに 3° 程度で分布しているとある。梅村ら⁷⁾による軽石層の分布図を図-9、崩壊地跡と軽石層の関係を図-10に示す。この図を用いて解析対象域での不透水層の勾配を 3° と決定した。

初期土壌水分は地表面と垂直な方向に

$$\phi = \psi + z = 0 \quad (10)$$

を満たすように分布させ、さらに地表面と平行な方向に

$$\psi = \text{const} \quad (11)$$

を満たすように分布させた。ここで、 ϕ ：ピエゾ水頭、 ψ ：圧力水頭、 z ：位置水頭である。

5. 結果と考察

図-11に崩壊地の一地点($x=12.75\text{m}$)における15時間分(計算開始15時間後から30時間後まで)の飽和度の変化グラフを示し、図-12に崩壊地付近における飽和度の二次元分布グラフを時系列的に示す。

図-2の真船の降雨記録では8月26日17時に今回の豪雨における最大降雨強度である 90mm/h を記録している。これは計算開始17時間後にあたり、図-11ではその降雨によって飽和度の高い浸潤線が降下していることが確認できる。最大降雨強度のあと3時間ほど降雨は小康状態となり、この間に 90mm/h の降雨が浸透していくが、完全に浸透しきれていないため浸透層の上層の飽和度が高くなっている。26日22時(計算開始22時間後)に雨が再び降り始め、平均 40mm/h の雨が数時間にわたり降る。飽和度が増している上の降雨であるため、地表面から飽和に近い浸潤線が降下していく様子が確認できる。からまつ荘裏山の崩壊は8月27日4時頃発生したと報告があり、これは計算開始約27時間後に相当する。図-11において27時間後に地下水位が初めて地表面に達していることが分かる。

図-12を見ると、19時間後には 90mm/h の雨が地表面近くで浸透している様子が分かる。本モデルでは降雨を空間的に一様に与えているため、降雨が浸透し始めの頃は地表面と平行に浸潤線が表れている。24時間後には、 90mm/h の雨が不透水層まで浸透し土壌全体の飽和度が上昇しているところで、22時間後から降り始めた第二の雨帯によって地表面近くの飽和度が上昇していることが分かる。本モデルでは、降雨強度換算で土壌に 360mm/h の透水係数を与えているが x 方向の動水勾配が小さいために、不飽和域に拡張されたダルシー則から x 方向の流速が z 方向のそれよりも小さくなる。従って不飽和層では斜面と垂直方向の水の流れが卓越し、地表面と不透水面との距離が近い下流のほうから地下水面が形成されるために、26時間後に下流側の不透水面上に現れた白い部分を飽和層とみなすと地下水流が上流側に向かうように見える。そして27時間後に飽和域が地表面に達している。これらの結果よりこの崩壊は、第一の非常に強い雨により土壌全体の飽和度が上昇し、次いで第二群の強い雨帯により飽和に近い浸潤線が降下し、地下水面に達していることにより地下水位が急激に上昇し、土中の間隙水圧が増大した事によって発生したと推定される。さらに、崩壊土砂は高い流動性を帯びていたことからほぼ飽和の状態での滑り開始と考えられ、本解析による地滑り予測の可能性を示している。

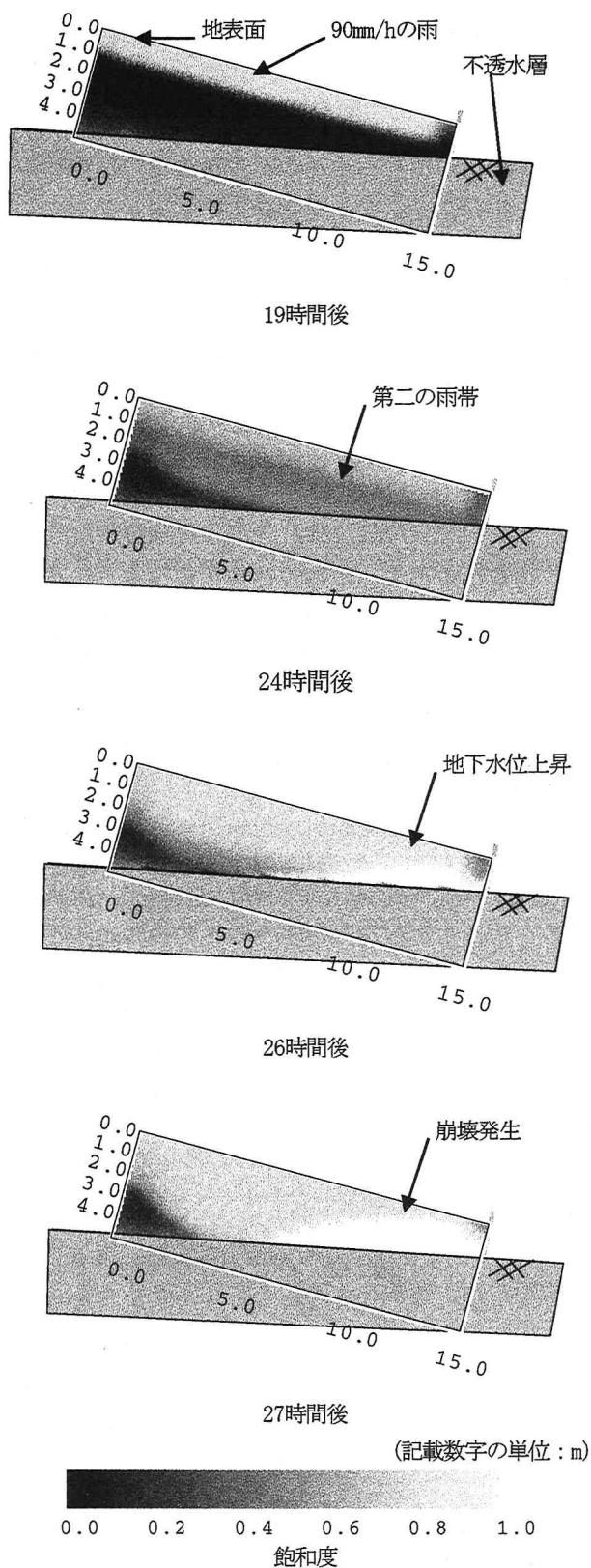


図-12 崩壊地付近における飽和度二次元分布

6. 結論

本モデルでは、二次元のRichards式をそのまま差分展開することにより浸透流解析を行っているが、浸透

層が飽和する時刻は実際の崩壊時刻とよく一致しており、地滑り予測に対する有用性を示唆している。本モデルは不飽和浸透だけでなく、透水係数や不透水層の勾配による効果をよく表しており、斜面における浸透流解析に有効である。

福島県西郷村「太陽の国」からまつ荘裏山の斜面崩壊の原因は、強い雨が数時間降り続いたことによって飽和度の高い浸潤線が降下し地下水位の急上昇により間隙水圧が増大したことであり、そのときの地中水の挙動を解析した。

今回は飽和透水係数を土壌全体で一様として計算したが、実際は土壌中に存在する地層ごとに透水性が異なるためそれぞれ違った透水係数で計算する必要がある。また対象とした崩壊は谷頭部の集水性が高い場所で発生しているため、周辺からの側方流入も考慮しなければならない。従って地表面における境界条件の見直しとともに、地層ごとの透水性を考慮した水分移動の解析と奥行き方向の地形効果も考慮に入れた三次元浸透モデルの開発が今後の課題である。

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, pp. 59-82, 2000.
- 3) 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.
- 4) 横尾善之・風間聡・澤本正樹: 流域土壌の透水性と基底流量の長期的変動特性に関する数値実験, 水工学論文集, 第45巻, pp. 331-336, 2001.
- 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年度科学研究補助金(基盤研究(B)(1))研究成果報告書, pp. 163-181, 1999.
- 6) 丸井英明: 1998年福島県南部の集中豪雨による土砂崩壊, 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. 197-209, 1999.
- 7) 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年度科学研究補助金(基盤研究(B)(1))研究成果報告書, pp. 182-196, 1999.
- 8) 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.

(2002. 9. 30受付)