

# 斜面の浸透特性を考慮した 豪雨時の斜面安定解析法の開発

## SLOPE STABILITY ANALYSIS CONSIDERING SEEPAGE PROPERTY OF SLOPE

大塚 悟<sup>1</sup>・山下 良<sup>2</sup>・池本 宏文<sup>3</sup>

Satoru OHTSUKA, Ryo YAMASHITA and Hirofumi IKEMOTO

<sup>1</sup>長岡技術科学大学 環境・建設系 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

<sup>2</sup>長岡技術科学大学 大学院工学研究科建設工学専攻 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

<sup>3</sup>東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木 2-2-6)

### 1. はじめに

豪雨時の斜面安定性評価において雨水の斜面への浸透の評価は不可欠である。しかし、斜面は通常地下水面が形成されており、地下水面上部には不飽和領域が存在する。不飽和領域の存在は雨水の浸透だけでなく、地盤の強度変形特性にも大きな影響を与える。有効応力に基づく地盤力学では土粒子骨格と水との連成解析によって地盤の変形挙動が表されるが、不飽和土においては未だどのような連成解析を行うか、用いる構成関係を含めて理論的枠組みが確立されていない。しかし、斜面の安定性評価においては不飽和・飽和浸透解析による圧力水頭を斜面安定解析に適用する完全排水条件の解析によって斜面の破壊を比較的良く説明できることが八木ら<sup>1)</sup>によって示されている。

本研究は豪雨時の斜面安定性評価の精度向上を目的に、不飽和・飽和浸透解析と剛塑性有限要素法による斜面安定解析手法の開発を試みた。本安定解析手法は従来の極限つりあいに基づく解析に対して、不静定問題やすべり面形状の仮定などの問題がないため、三次元問題などの解析に適している。有限要素法に基づく解析は時間コストが高いが、3次元的地形・地質や降雨履歴を安定性評価に取り込むことができることから、斜面安定性のきめ細かな検討が可能になる。

### 2. 豪雨時における斜面安定解析

#### (1) 解析概要

不飽和・飽和浸透解析と斜面安定解析を連成させることにより豪雨時における斜面安定性評価を行なう。不飽和・飽和浸透解析では不飽和土の浸透特性について van Genuchten が提案するモデル<sup>2)</sup>を用いて斜面内の圧力水

頭を求める。本論文では得られた圧力水頭をもとにして、飽和領域と不飽和領域に分割して斜面の地盤強度を評価して剛塑性有限要素法による斜面安定解析を実施する。

#### (2) 不飽和・飽和土の強度モデル

飽和領域は式(1)の有効応力に基づいて完全排水条件による安定解析を行う。間隙水圧  $u_w$  は不飽和・飽和浸透解析から得られる圧力水頭  $\phi (=u_w/\gamma_w)$  を適用する。

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

飽和領域の強度には有効応力に基づくドラッカー・プラグー型の関数を適用する。他方、不飽和領域では有効応力を定義できないことから全応力による解析を行う。飽和領域と異なり、地盤強度はサクシオンによって生じる強度の増加分を考える必要がある。軽部ら<sup>3)</sup>はサクシオンによって生じる等方圧縮応力をサクシオン応力  $p_s$  と定義し、次式を提案している。

$$p_s = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} s \quad (2)$$

ここに、 $S_r$  は飽和度で  $S_{r0}$  は吸着水が占める残留飽和度、 $s$  はサクシオンであり  $s = u_a - u_w$  である。 $u_a$  は空気圧を表す。加藤ら<sup>4)</sup>はサクシオン応力を用いて不飽和土の粘着力を次のように提案している。

$$c = p_s \tan \phi_{net} \quad (3)$$

ここに、 $\phi_{net}$  は基底応力に基づくせん断抵抗角である。van Genuchten モデルを用いると粘着力は次式のようにサクシオンの関数として表される<sup>4)</sup>。

$$c = \left\{ 1 + (\alpha \cdot s)^n \right\}^{-1/n} \cdot \tan \phi_{net} \cdot s \quad (4)$$

本解析手法では、 $\phi_{net} = \phi'$  として、式(4)を用いる。

### (3) 剛塑性有限要素法による斜面安定解析

剛塑性有限要素法による斜面安定解析手法は大塚ら<sup>5)</sup>により詳述されている。本論文では斜面を不飽和領域と飽和領域に分けて全応力解析と有効応力解析を行う。全応力解析については文献<sup>5)</sup>に示されていることから、有効応力解析に用いる剛塑性有限要素法の基礎方程式を以下に示すこととする。

降伏関数には有効応力に関するドラッカー・プラグ型<sup>6)</sup>の標準的な関数を適用する。斜面安定解析は強度の低減率を用いて安全率を定義することから、次式のように降伏関数を安全率  $F_s$  の関数とする。

$$f(\sigma', F_s) = \frac{\alpha}{F_s} I_1' + \sqrt{J_2} - \frac{k}{F_s} = 0 \quad (5)$$

ここに、 $k$  および  $\alpha$  は強度定数を表す。関連流れ則を用いると降伏関数から塑性ひずみ速度  $\dot{\epsilon} (= \dot{\epsilon}^p)$  の運動学的条件が得られる。

$$h(\dot{\epsilon}, F_s) = \dot{\epsilon}_v - \frac{3(\alpha/F_s)}{\sqrt{3(\alpha/F_s)^2 + 1/2}} \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_v - \beta \dot{\epsilon},$$

$$\text{ここに } \beta \equiv \frac{3(\alpha/F_s)}{\sqrt{3(\alpha/F_s)^2 + 1/2}}, \quad \dot{\epsilon} \equiv \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \dot{\epsilon}} \quad (6)$$

ペナルティ定数  $\kappa$  を用いて上記の運動学的条件を取り入れると、斜面安定解析に用いる剛塑性構成式は次式のよう<sup>7)</sup>に与えられる。

$$\sigma' = \frac{1}{F_s} \frac{k - 3(\alpha/F_s)\kappa(\dot{\epsilon}_v - \beta\dot{\epsilon})}{\sqrt{3(\alpha/F_s)^2 + 1/2}} \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} + \kappa(\dot{\epsilon}_v - \beta\dot{\epsilon})\mathbf{I} \quad (7)$$

他方、斜面内の間隙水圧は浸透力として作用することから、斜面の物体力に加えて浸透力を変位速度の制約条件に導入する。最終的な方程式を力のつりあい式の弱形式で表すと以下ようになる。

$$\int_V \left[ \frac{k - 3(\alpha/F_s)\kappa(\dot{\epsilon}_v - \beta\dot{\epsilon})}{\sqrt{3(\alpha/F_s)^2 + 1/2}} \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} + \kappa(\dot{\epsilon}_v - \beta\dot{\epsilon})\mathbf{I} \right] \cdot \delta \dot{\epsilon} \, dv + \mu \left( \int_V \mathbf{b} \cdot \dot{\mathbf{u}} \, dv - \int_V u_w \dot{\epsilon}_v \, dv - 1 \right) \left( \int_V \mathbf{b} \cdot \delta \dot{\mathbf{u}} \, dv - \int_V u_w \delta \dot{\epsilon}_v \, dv \right) = 0 \quad (8)$$

ここに  $\mu$  はペナルティ定数であり、斜面の安全率は上式を変位速度  $\dot{\mathbf{u}}$  に関して解くことにより次式から求められる。

$$F_s = \mu \left( \int_V \mathbf{b} \cdot \dot{\mathbf{u}} \, dv - \int_V u_w \dot{\epsilon}_v \, dv - 1 \right) \quad (9)$$

しかし、式(7)の構成関係は安全率の関数であることから、任意の安全率  $F_s$  を初期値として仮定して、式(8)、(9)から得られる  $F_s$  を用いて安全率  $F_s$  を更新する、繰り返し計算が必要になる。

### 3. 豪雨時における斜面安定解析

#### (1) 降雨強度による斜面の安定性

斜面勾配  $25^\circ$  の斜面 (図-1) に対して豪雨時の安定性変化の事例解析を行う。地盤材料にはローム質砂を想定して van Genuchten のパラメーターは  $\alpha = 2.761 \text{ m}^{-1}$ ,  $n = 3.022$ ,  $K_s = 6.383 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  を用いる<sup>6)</sup>。水分特性曲線は図-2に示す通りである。ここに、 $K_s$  は斜面の飽和透水係数である。また、地盤定数は  $\phi' = 25.0^\circ$ ,  $\gamma = 15.0 \text{ kN/m}^3$  として、飽和土の粘着力  $c'$  には解析の安定化のために  $0.01 \text{ kPa}$  を用いた。なお、地盤の両側面および底面は不透水境界とし、降雨強度  $10, 20, 30, 40, 50 \text{ mm/hr}$  の降雨を斜面の地表面全域に降らせることとする。

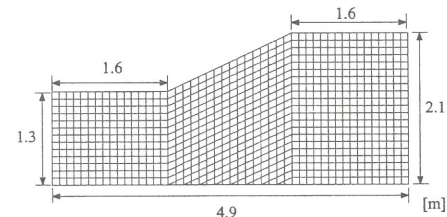


図-1 有限要素メッシュ

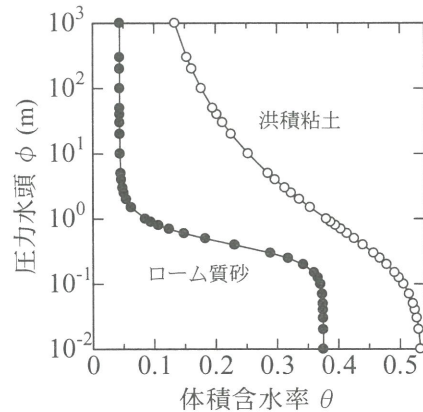


図-2 水分特性曲線

図-3は降雨強度  $30 \text{ mm/hr}$  における圧力水頭分布とひずみ速度分布を示したものである。図は破壊時におけるひずみ速度のノルム (大きさ) を示しており、斜面崩壊時の運動機構すなわち、破壊形態を表す。初期状態では地下水位の低いことから、斜面内部の深い位置にて滑動する崩壊形態となっている。2時間後になると地下水位の上昇に伴って斜面先の崩壊へと破壊形態が移行している。3時間後には (定常浸透状態でもほぼ同じ) 斜面先における小崩壊が発生しており、地下水面以下の斜面先にすべりが発生している。ここで注意すべきは図の破壊形態は強度を低減させた際に起こり得る破壊形態を表しており、安全率が  $1$  を下回らないと現実には崩壊が生じない。解析事例は地下水面下の飽和領域において斜面崩壊が発生しており、飽和化に伴う有効応力の減少が崩壊の主因と言える。



図-4は安全率の時間変化を示したものである。降雨強度が $30\text{mm/hr}$ では、およそ2.4時間で安全率が1.0に到達して崩壊することが分かる。また、安全率の経時変化は2時間を境として曲線の形状が上に凸から下に凸へ変化する。

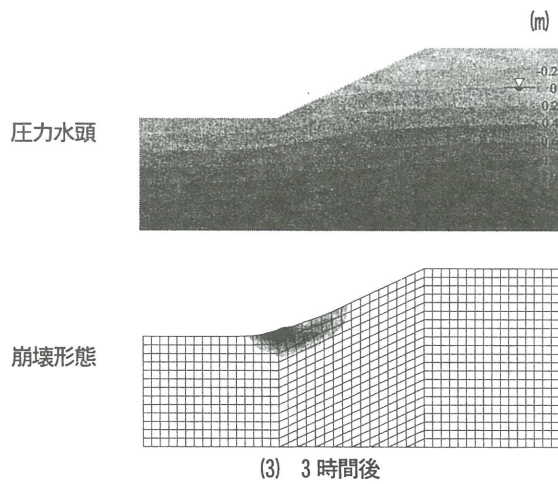
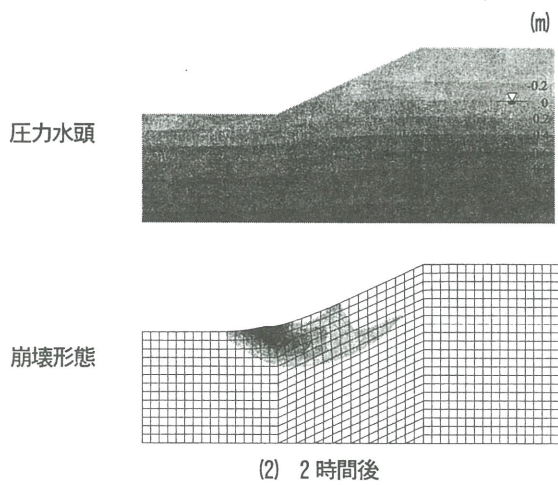
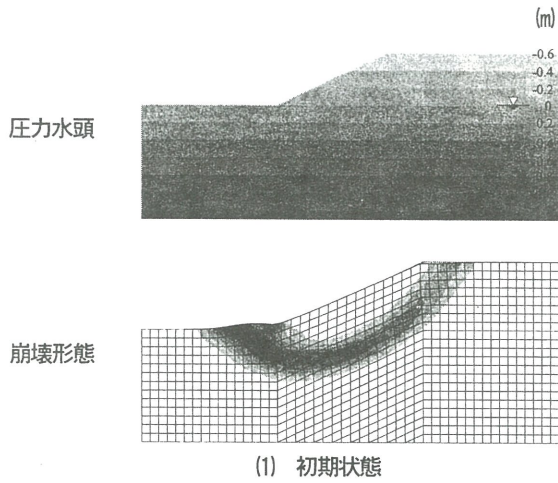


図-3 圧力水頭および崩壊形態  
( $30\text{mm/hr}$ , ローム質砂)

ている。一方、崩壊形態の変化も2時間後より生じていることから、崩壊形態の変化と安全率経時変化曲線の形状には対応関係があるように思われる。また、降雨強度 $10\text{mm/hr}$ では最も地下水位が上昇する定常状態にて安全率が1.0を上回っていることから、斜面崩壊は生じない。

図-5は各降雨強度における崩壊形態の差を示したものである。降雨強度が $10\text{mm/hr}$ では図-4のように安全率の経時変化に大きな変化が見られない。崩壊形態は初期状態から定常浸透に至るまで斜面内の深い位置にてすべりが発生する崩壊形態となっている。これに対して、降雨強度 $40\text{mm/hr}$ ではおよそ1時間を境として、崩壊モードが斜面内の崩壊形態から斜面先の崩壊形態へと変化し、同時に安全率の経時変化曲線の勾配・形状も変化していた。図-4の事例では、 $Fs=1$ での斜面の崩壊形態がいずれも斜面先での小崩壊と得られた。実際の崩壊事例では局所的な崩壊に起因して斜面が進行性破壊を生じて広域に崩壊する事例も多く報告されており、解析にて得られたのり先での局所崩壊は実際の斜面の崩壊における1次

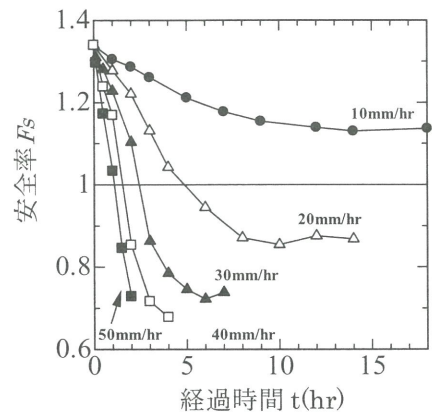


図-4 安全率の時間変化

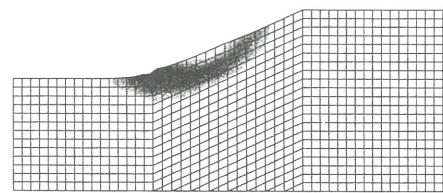
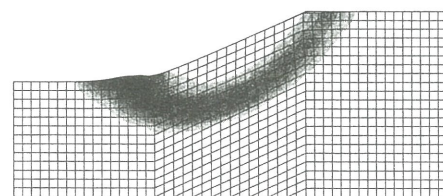


図-5 各降雨強度におけるひずみ速度分布 (4時間後)

崩壊を表している可能性がある。斜面の安定性は初期崩壊に支配されることから、解析で得られた小崩壊時の安全率は工学的に重要であると考えられる。

図-6は、降雨により斜面内の間隙圧が定常状態に到達した際の降雨強度と安全率の関係について示したもので降雨強度を対数で表している。このように、対数で示した降雨強度と安全率はおおよそ線形関係にあり、この図からある斜面にどの程度の降雨強度の雨が降ると斜面が崩壊するか簡易的に予測される。

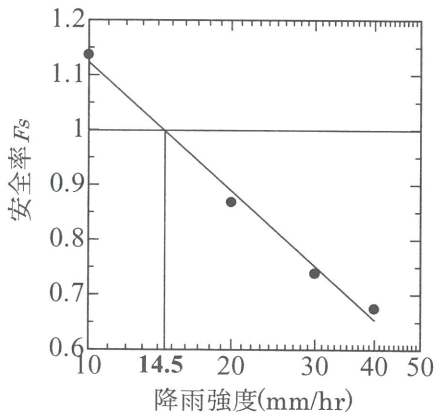


図-6 降雨強度と安全率の関係

## (2) 土質による斜面の安定性

斜面の土質が豪雨時の斜面安定に与える影響について調べる。洪積粘土を念頭に水理特性を  $\alpha=4.76m^{-1}$ ,  $n=1.248$ ,  $\theta_s=0.535$ ,  $\theta_r=0.078$ ,  $K_s=5.000 \times 10^{-3} cm/s$  のように設定する<sup>6)</sup> (図-2)。また、斜面は図-1の有限要素メッシュを用い、降雨強度は  $30mm/hr$  とした。

図-7に洪積粘土の降雨強度  $30mm/hr$  における圧力水頭と崩壊形態を示した。斜面の崩壊傾向はローム質砂と同様に自由水面の上昇に従い斜面先にて崩壊する崩壊形態となった。しかし、細部を見ると1時間後では自由水面がほとんど上昇していないにもかかわらず、斜面先から表層付近にて崩壊している。洪積粘土の飽和透水係数はローム質砂と同程度であるが、図-2に示すように貯留性(保水性)はローム質砂に比べて高いために表層付近での貯留による圧力水頭分布の変化が生じて、自由水面が低い位置にもかかわらず斜面先での崩壊を生じたと考えられる。しかし、時間が経過すると崩壊形態は2時間30分より斜面内の全体破壊から斜面先破壊へと変化しており、この傾向はローム質砂とよく似ている。しかし、ローム質砂との強度分布の差異により斜面の表層が比較的広範囲に崩壊する傾向となった。

図-8は洪積粘土とローム質砂における安全率の経時変化の比較を示す。全体を通して洪積粘土の方が安全率は低く、ローム質砂の斜面に対して早く崩壊する結果となった。洪積粘土はローム質砂に対して貯留性(保水性)が高いためにサクシオンによる粘着力が小さい。そのた

めに斜面全体の安全率が低下することに起因すると考えられる。

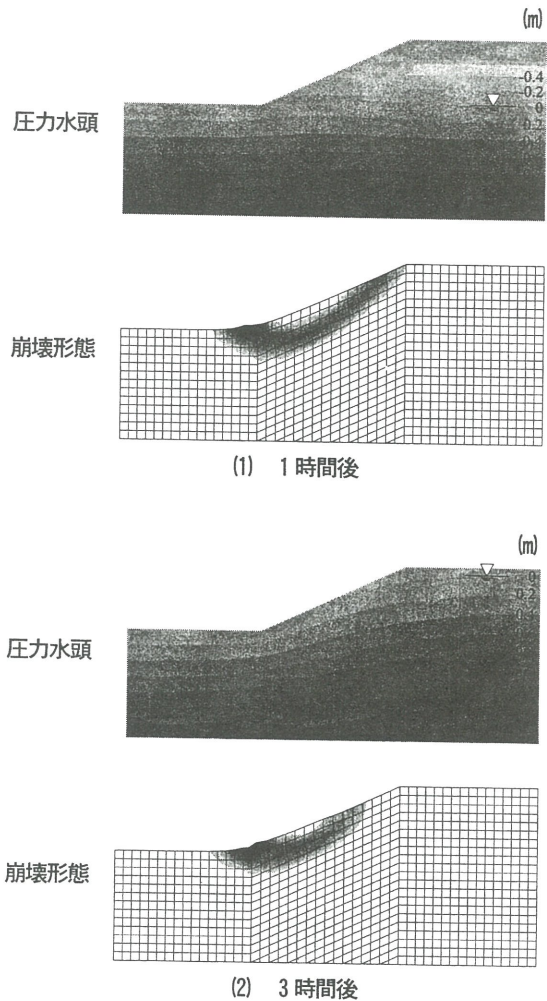


図-7 圧力水頭および崩壊形態 ( $30mm/hr$ , 洪積粘土)

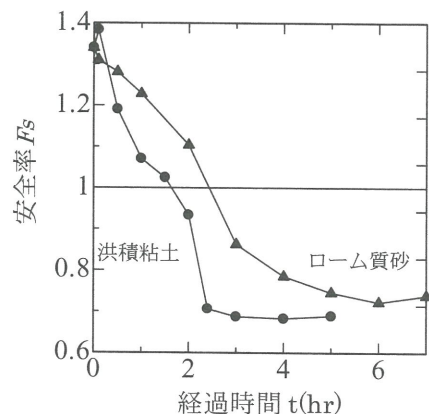


図-8 洪積粘土とローム質砂の安全率の時間変化 (降雨強度  $30mm/hr$ )



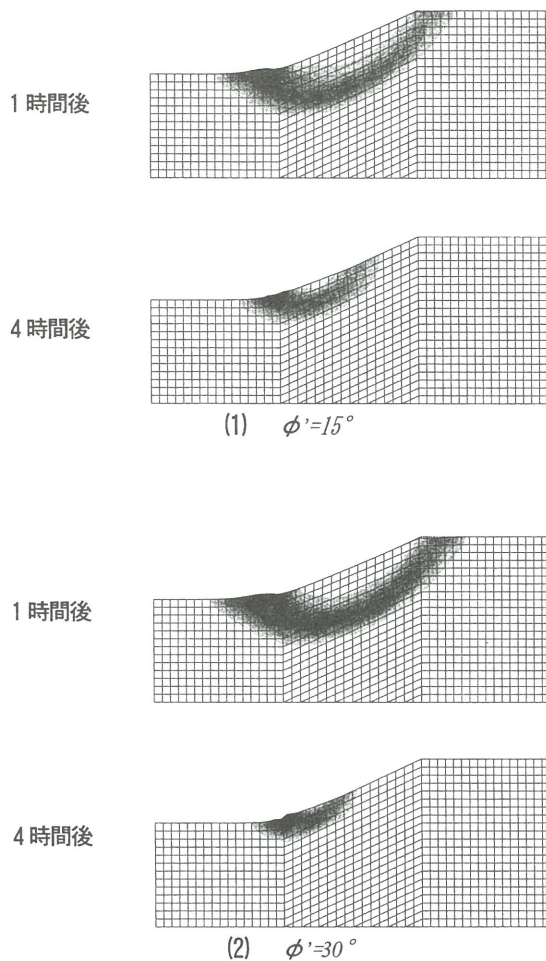


図-9 せん断抵抗角による斜面の崩壊形態

次に強度定数による豪雨時の斜面安定性の差異について検討する。図-1の斜面を対象に、解析条件はローム質砂の事例解析と同様の条件とする。せん断抵抗角（ダイレイタンス角）を $15 \sim 30^\circ$ のように変化して解析を行った。降雨強度 $30\text{mm/hr}$ に対する斜面の崩壊形態を図-9に示す。時間の経過による斜面の崩壊形態の推移は、せん断抵抗角によらずにほぼ同じような傾向が見られる。しかし、せん断抵抗角が大きいものほどすべり破壊が浅い位置にて発生する傾向が見られる。これは、粘着力にくらべてせん断抵抗角によるせん断抵抗力が大きいため深層崩壊が起こりにくく、斜面の表層において破壊する崩壊形態になったと考えられる。

図-10はせん断抵抗角を変化させた際の安全率の時間変化を示したものである。せん断抵抗角が大きいほど斜面の地盤強度が大きいため安全率は大きくなっている。また、図-8と同様に崩壊モードが変化すると安全率の曲線の勾配や形状が変化する傾向が観察される。せん断抵抗角が大きいほど短い時間において斜面内の崩壊形態から斜面先の崩壊形態へと変化する結果となった。

### (3) 斜面の表層崩壊事例

豪雨時における斜面崩壊は浅層崩壊が多いことから、斜面表層部の風化層を想定した図-11の斜面に対して降雨時の安全率を求める。解析条件はローム質砂の事例解析と同様の条件を用いる。降雨強度 $30\text{mm/hr}$ に設定する。

図-12は圧力水頭および崩壊形態図である。地下水面は雨水の浸透に伴い斜面内にて上昇するが、2時間後では地下水位の上昇は未だ少なく、風化層全体が崩壊する破壊形態となっている。しかし、4時間後から斜面内の圧力水頭が定常状態に至る時には地下水位の上昇に伴い、崩壊形態が斜面先にて発生する小崩壊へと変化している。斜面形状が変化しても崩壊は地下水面以下の斜面先にて発生しており、斜面崩壊の発生は地盤の飽和化に伴う粘着力の喪失と有効応力の減少が大きな原因であることが分かる。また、斜面は図-1に比べて層厚が薄いために飽和化し易く、浸潤面の形成も容易であることから、崩壊に至るまでの時間は短くなる。

図-13は安全率の時間変化を示している。3時間後に曲線の勾配が大きく変化しており、図-12に示すような崩壊形態の変化が生じている。また、斜面崩壊は降雨開始からおおよそ2時間経過したところで発生している。このことから、図の事例では必ずしも斜面の飽和領域にて斜面崩壊が生じたのではなく、不飽和領域での破壊が生じており、飽和度の上昇に伴うせん断強度の低下が崩壊に寄与していることが分かる。図中に降雨強度 $10, 30, 50\text{mm/hr}$ における安全率の時間変化を示している。この斜面においては降雨強度が $10\text{mm/hr}$ でも降雨開始おおよそ15時間後に崩壊が発生している。また、 $50\text{mm/hr}$ ではおおよそ1時間後と短い時間で崩壊した。

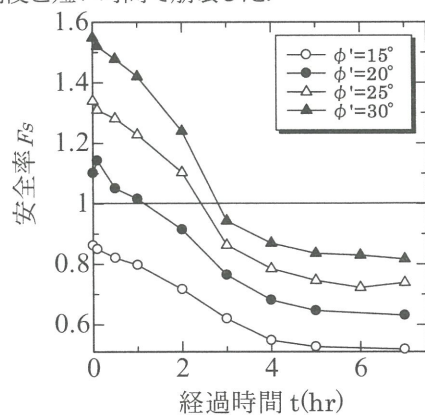


図-10 せん断抵抗角による安全率経時変化の比較

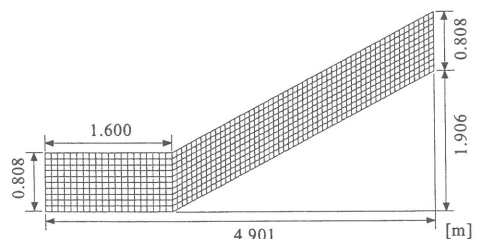


図-11 表層での風化帯を考慮した事例

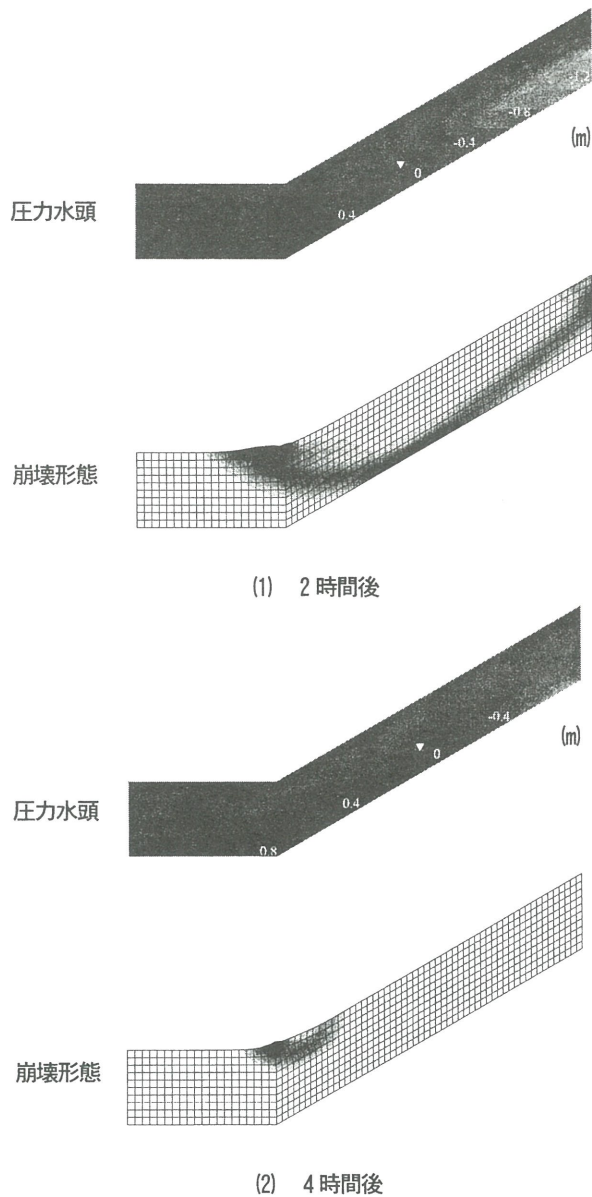


図-12 圧力水頭および崩壊形態

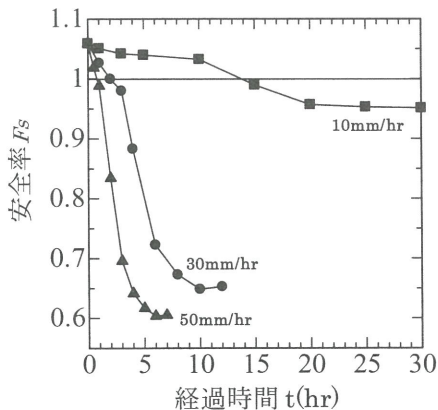


図-13 安全率の時間変化 (降雨強度 30mm/hr)

#### 4. 結論

不飽和・飽和浸透解析と剛塑性有限要素法による安定解析を組み合わせる豪雨時の斜面安定解析法を開発した。地下水面上部の不飽和領域についてはサクションによる強度増加を考慮した全応力解析を、地下水面以下の飽和領域では有効応力解析を実施した。以下に本研究で得られた結論を箇条書きにする。

- (1) 降雨強度を変化させた事例解析より、降雨強度による斜面の安定性の経時変化を本解析手法により合理的に評価できた。
- (2) 斜面の可能な破壊形態は初期状態では深層崩壊であるのに対して、降雨の浸透に伴う斜面の飽和度の変化や地下水位の上昇を反映して浅層崩壊、とりわけ斜面先での小崩壊が生じた。斜面先での小崩壊は斜面の進行性破壊を誘起することから、工学的には小崩壊に対する安全率が重要であると考えられる。
- (3) 斜面の地質によって崩壊形態は変化するが、水理条件の及ぼす影響は大きい。貯留性の高い地盤の場合には表層崩壊を起こし易い。
- (4) 斜面の崩壊機構は地形・地質や降雨条件に左右される。解析事例では斜面表面に風化層を設置した場合に崩壊領域に飽和領域と不飽和領域が混在する結果が得られた。どちらが破壊機構により影響を与えるのか判断できないが、不飽和領域でのせん断破壊の評価は重要である。

#### 参考文献

- 1) 八木則男・矢田部龍一・山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊，土木学会論文報告集，第330号，pp.107-114，1983。
- 2) van Genuchten, M.T. : A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am.J, pp.892-898,1980.
- 3) 軽部大蔵・加藤正司・勝山潤一：不飽和カオリンの有効応力と力学定数，土木学会論文集，第370号，pp.179-188，1986。
- 4) 加藤正司・吉村優治・河井克之・寸田亘：不飽和土の一軸圧縮試験時の強度特性に及ぼすサクションの影響，土木学会論文集，No.687/Ⅲ-56，pp.201-218，2001。
- 5) 大塚悟・宮田善郁・池本宏文・岩部司：剛塑性有限要素法による斜面安定解析，地すべり，Vol.38，No.3，pp.75-83，2001。
- 6) 蔡飛・鵜飼恵三：飽和・不飽和浸透流解析による降雨時斜面崩壊の予測可能性に関する考察，地盤工学会四国支部，豪雨時の斜面崩壊のメカニズムと予測に関する論文集，pp.23-26，2001。

(2004. 6. 18 受付)