

斜面の浸透特性を考慮した斜面安定解析手法の開発

防災設計工学研究室 池本 宏文
指導教官 大塚 悟

1. はじめに

豪雨時における斜面崩壊は斜面表層部を覆っている風化層が崩壊する浅層崩壊が多い。その崩壊は緩急遷移点や不透水層の影響により、斜面内部の飽和化が進行し、間隙水圧の上昇が原因となり発生する。また、崩壊形態は1次的な小崩壊をはじめとして斜面上部へ崩壊が進行する進行性の崩壊が多い。本研究ではこのような豪雨時における斜面崩壊挙動を解析的に表現し、斜面の安全率を求めることで崩壊予測を行うことを目的としている。

本研究では大きく3点のことに取り組んでいる。1点目として、地盤の極限状態を直接求める剛塑性有限要素法を用いて3次元斜面安定解析を行い、不均質な自然斜面の崩壊形態を解析的に表現する。2点目として不飽和・飽和浸透解析を非定常問題として行うことで、斜面の浸透特性を解析的に求める。そして、最後に斜面安定解析と不飽和・飽和浸透解析を連成させることで豪雨時における斜面安定解析を行なう。

2. 斜面安定解析

昨年度までに、本研究室では、Lagrange法を用いて2次元斜面安定解析手法が開発されている。この方法では、剛性マトリクスの性質から、帯行列化が出来ないため、演算に時間を要していた。そこで、本研究では有限要素離散化手法にPenalty法を用いることで、演算の高速化を図り3次元斜面安定解析手法の開発を行った。Penalty法では、剛性マトリクスの帯行列化が可能のため、計算速度が大幅に向上された。

解析は、基盤の上に強度の低い風化層が覆った図1の自然斜面のモデルを用いて行った。地盤定数は逆解析ならびに概略調査から求めた表1の値を使用した。また、Aの断面において2次元解析を行い、3次元解析の結果との比較を行った。

図2は解析より求まるひずみ速度分布を示したもので、崩壊形態は崩壊事例で見られるようなお椀型のすべり形態となった。安全率は0.79と1.0を下回る結果となったが、これは地盤定数の設定に問題があったと考えられる。

表1 地盤定数

	(°)	C (kN/m ²)	t (kN/m ³)
風化層	17.6	24.5	15.58
基盤	20.0	98.0	26.46

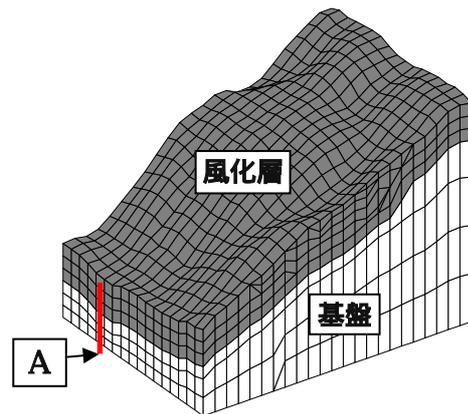


図1 自然斜面有限要素メッシュ

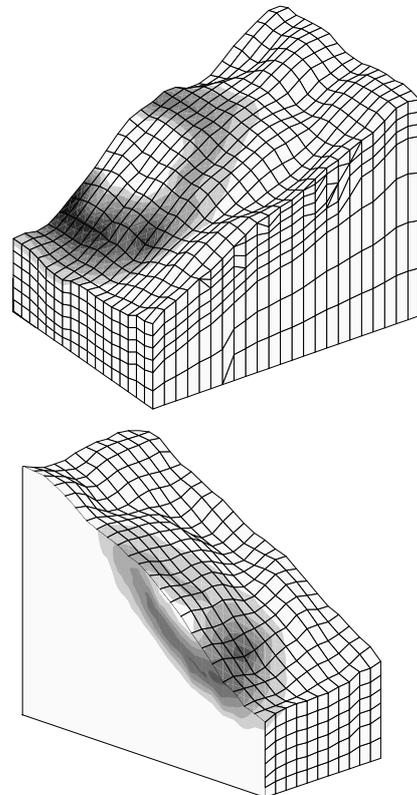


図2 ひずみ速度分布図

図3はA断面における2次元ならびに3次元解析より求まるすべり形態を比較したものである。2次元のすべり線は3次元のものに比べて深い位置にて発生しており、安全率も2次元解析では0.74と3次元解析の結果よりも小さな値となった。これは、2次元解析では奥行き方向が拘束され、上下が可動な境界であるため、すべりが深い位置にて発生し、安全率が低くなったと考えられる。

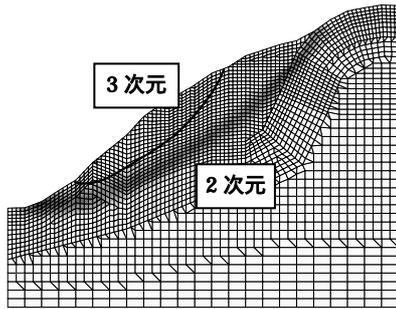


図3 A断面における崩壊形態

3. 不飽和飽和浸透解析

図4は体積含水率と圧力水頭の関係を示したものであり、この曲線は水分特性曲線と呼ばれる。両者の関係は曲線関係にあり、試料により異なる曲線形状を示す。不飽和土における透水係数はこの体積含水率によって変化することから、不飽和・飽和浸透解析では体積含水率の変化に応じた解析となる。

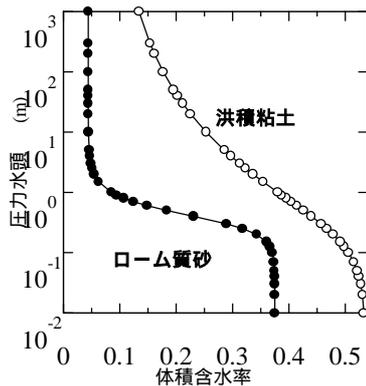


図4 水分特性曲線

不飽和・飽和浸透解析の一番の難点は境界条件の設定といえる。図5のような浸潤面を有する斜面では、通常、浸潤面上を圧力水頭=0とする圧力境界、そして、地下水位より上は降雨の流入とする流入境界として取り扱う。この境界

では地下水位の変動により境界の変換を考慮する必要があり、地下水位が上下するような問題は解析が困難となる。また、流入境界における流入量は斜面内部の水分状態によって異なり、すべての降雨が斜面内部に浸透するとは限らない。本解析では流入出量を制御することで境界上の流入出量・圧力水頭を解析的に表現している。

図5、図6は各節点における流入出量の変化および圧力水頭の時間変化を示している。初期の条件では斜面先の位置に地下水面があったものが、定常状態では降雨に伴い点Fの下まで上昇している。以下に、各節点の流入出量と圧力水頭の挙動をまとめる。

A・B・C

流入出量 終始を通して流出しており、緩急遷移点である斜面先のBにおいて流出量が最大となる。

圧力水頭 浸潤面のため圧力水頭は0mである。

D・E

流入出量 地下水位が節点に達することで流入から流出へと変化する。

圧力水頭 地下水位が節点に達することで浸潤面になるため圧力水頭が負であったものが0mとなる。

F

流入出量 流入出量は一定の流量 $0.5\text{m}^3/\text{hr}$ で流入する

圧力水頭 圧力水頭は定常状態に至るまで一定の負圧となる

このように、境界上における流入出量および圧力水頭がうまく表現されており、本解析では合理的な解析が行われている。

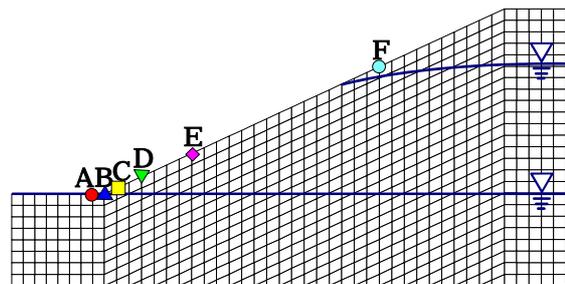


図5 境界上の節点

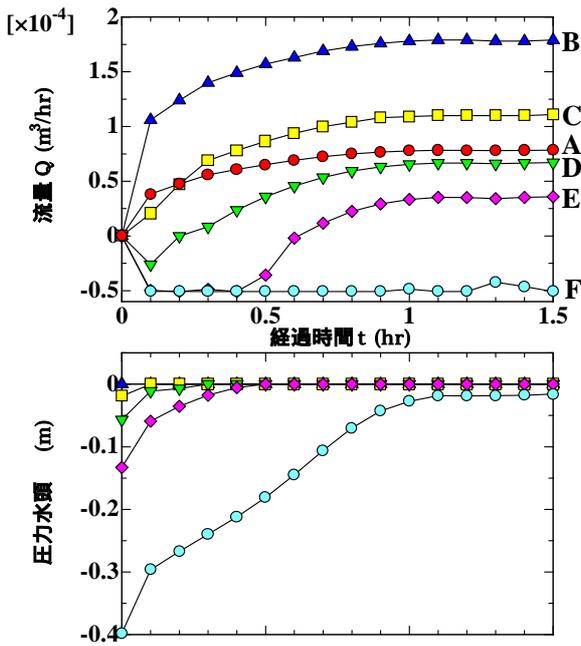


図 6 流入出量と圧力水頭の変化

図 7 はローム質砂を用いて、降雨強度を 10mm/hr、50mm/hr と変化させて解析を行った結果であり、定常状態における圧力水頭分布を示している。降雨強度 10mm/hr では 5 時間後に、50mm/hr では 2 時間後に定常状態に至っており、強度の高いほど短い時間にて定常状態に達している。また、降雨強度の大きいものほど、地下水位は高い位置にて定常状態に達している。

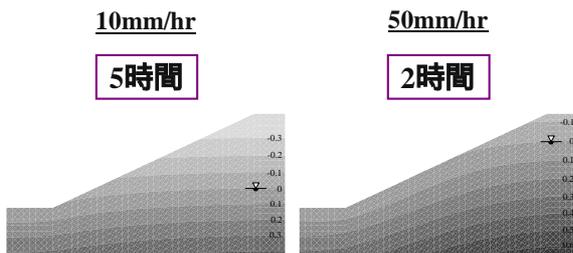


図 7 降雨強度の影響

図 8 は異なる試料を用いて、降雨強度 10mm/hr において解析したもので、降雨開始 1 時間後の圧力水頭分布を示している。洪積粘土では斜面の浸透能以上の降雨強度であるため、斜面表層部において飽和化進行し、内部には周りよりも圧力が低い負圧帯が形成されている。しかし、ローム質砂は透水性が高いため、そのような現象は見られない。本解析では、このよ

うな異なる解析条件においても、合理的な解析が行われており、斜面の浸透特性をうまく表現できている。

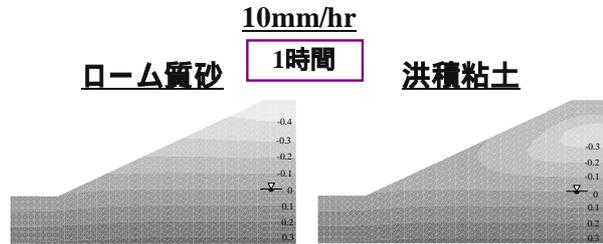


図 8 試料の影響

4. 豪雨時における斜面安定解析

豪雨時における斜面安定解析は不飽和・飽和浸透解析により斜面内の間隙水圧を求め、その間隙水圧をもとにして、飽和領域と不飽和領域を分けて安定解析を行う。飽和領域は有効応力の原理、式(1)に基づいて有効応力解析を行う。

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

不飽和領域はサクションによって生じる強度の増加分を加藤ら¹⁾が提案している式(2)に基づき、粘着力の増分として取り扱い、全応力解析を行う。

$$c = p_s \tan \phi_{net} \quad (2)$$

ここに、 ϕ_{net} は基底応力に基づく内部摩擦角で実用上は ϕ_{net}' としてもよい。

解析は降雨強度、試料、地盤定数、斜面形状を変化させて、それぞれが斜面の安定性に与える影響を調べる。解析には斜面勾配 25° の斜面(図 9)を用いて、試料にはローム質砂を使用した。また、地盤定数は $\gamma = 25.0 \text{ kPa}$ 、 $\gamma_s = 15.0 \text{ kN/m}^3$ 、 c' は飽和度であるので 0.01 kPa を用いた。

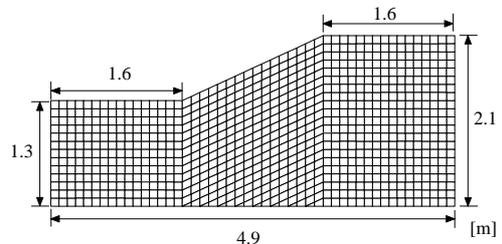


図 9 有限要素メッシュ

降雨強度
剛塑性有限要素法では斜面の極限状態を直接

求めるために、一回の計算で現在の斜面が有する安全率と崩壊形態が得られる。そのため、真の崩壊は安全率が1.0の時点で発生するもので、1.0を上回っている状態では非崩壊を意味する。

図10は降雨強度30mm/hrにおける圧力水頭分布と崩壊形態図を示したものである。初期状態から1時間後では地下水位の上昇は少なく、崩壊形態は斜面内部の深い位置にてすべ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い、斜面先の崩壊へと形態が移行している。3時間から定常状態(7時間後)にかけては、斜面先における小崩壊が発生しており、地下水面から斜面先の範囲においてすべりが発生している。崩壊は地下水面下の飽和領域において発生していることから、小崩壊の原因は飽和化に伴う、有効応力の減少とサクシオンによって生じる粘着力の喪失であると考えられる。

図11は安全率の時間変化を示したものである。およそ2.4時間で安全率が1.0となり崩壊している。また、この曲線は、2時間を境として曲線の形状が変化しており、崩壊形態の変化も2時間により変化していることから、崩壊形態の変化と安全率の曲線の形状には対応関係があると考えられる。

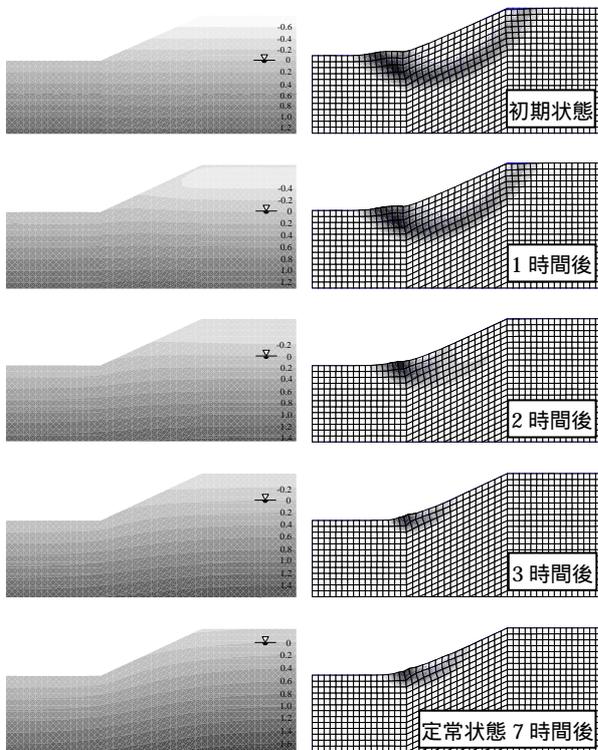


図10 圧力水頭分および崩壊形態図(30mm/hr)

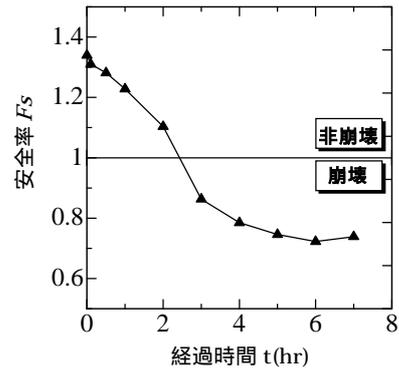


図11 安全率の時間変化(30mm/hr)

図12は降雨強度を変化させて解析を行ったときの安全率の時間変化を示したものである。降雨強度10mm/hrでは定常状態においても安全率が1.0を上回っているため崩壊は生じない。また、降雨強度20mm/hr以降では、降雨強度が高くなるにつれて、より短い時間において崩壊に至っている。

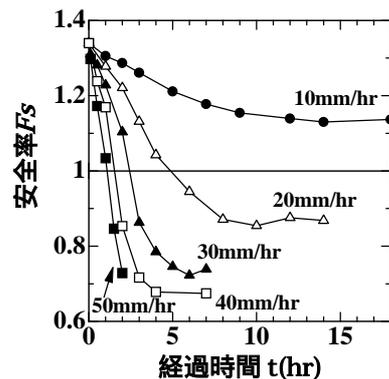


図12 降雨強度の時間変化

図13は横軸に経過時間、縦軸に降雨強度をとり、崩壊・非崩壊を表したもので、曲線は各降雨強度の最短の崩壊時間を連ねている。曲線の傾向は風間が自然斜面の崩壊・非崩壊の実例から導いた曲線の形状によく似ており、自然斜面では根茎や斜面の幾何形状、地質の違い等があるため一概に言えないが、挙動の傾向自体はうまく表現できていると思われる。この図より、降雨強度と降雨の継続時間の関係から崩壊予測を行うことが可能である。

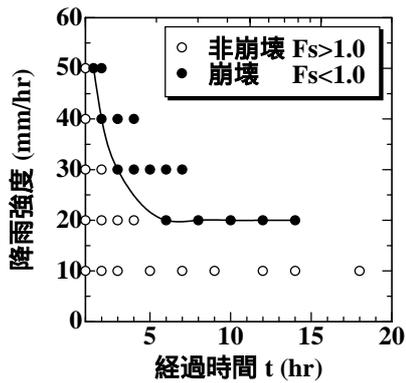


図 13 降雨強度に伴う崩壊・非崩壊

試料

ローム質砂の他に保水性が高い洪積粘土を用いて解析を行った。降雨強度は 30mm/hr とし、地盤定数は と同様のものを用いた。

図 14 は各時間ステップにおける圧力水頭分布および、ひずみ速度分布・破壊形態図を示している。崩壊は 1 時間を境にして斜面内部の崩壊形態から斜面表層の崩壊へと変化している。この形態はローム質砂のような斜面先の小崩壊ではなく、広範囲において表層部が崩壊する形態となっている。これは、洪積粘土が保水性の高い試料であるため、斜面の飽和化に従いサクシオンにより生じる粘着力が小さくなり、表層部での崩壊が発生したと考えられる。

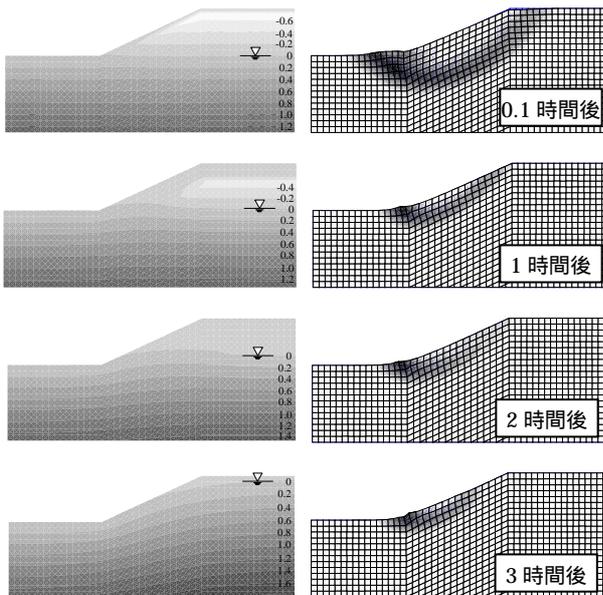


図 14 圧力水頭分および崩壊形態図(異なる試料)

図 15 は洪積粘土とローム質砂の安全率の比較を行ったもので、全体を通して洪積粘土の安全率が低い値となっており、洪積粘土では 1.5 時間あまりで崩壊に至っている。これは、洪積粘土は貯留性（保水性）が高いため、サクシオンによって生じる粘着力の増分は小さく、ローム質砂に比べて短い時間にて崩壊したと考えられる。

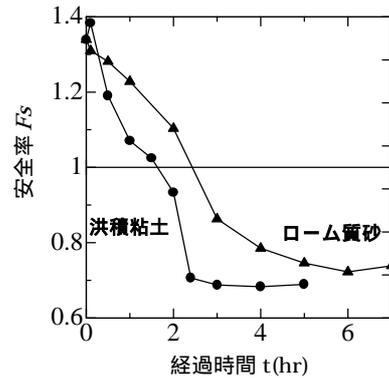
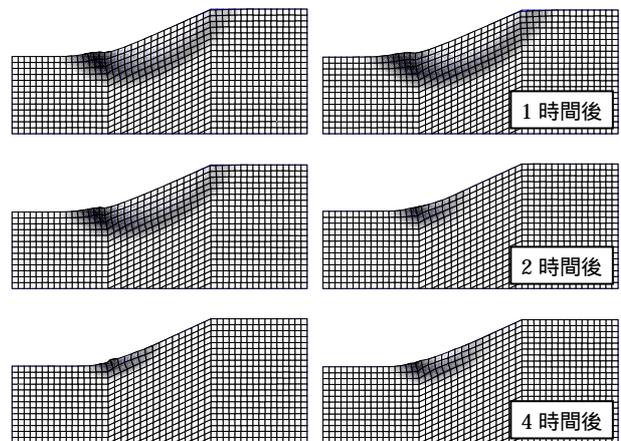


図 15 安全率の時間変化(異なる試料)

地盤定数

解析は有効応力表示のせん断抵抗 τ' を 15 ~ 30kPa まで 5kPa ずつ変化させて行う。試料はローム質砂、降雨強度は 30mm/hr を用いている。

図 16 は $\phi' = 15, 30^\circ$ における崩壊形態の変化である。 ϕ' の大きい斜面ほど、短い時間において崩壊形態が変化し、すべりが浅い位置にて発生している。これは、 c' に比べて、 ϕ' が相対的に大きいため、 c' の効果が小さくなり、斜面の表層においてすべるような崩壊形態になったと考えられる。



(a) $\phi' = 15^\circ$ (b) $\phi' = 30^\circ$

図 16 崩壊形態図(異なる ϕ')

図 17 は安全率の時間変化を示したものである。'の大きいものほど強度が高いため、安全率の曲線は全体的に高くなっている。また、'=15°では4時間、'=30°では2時間において崩壊形態および曲線の形状が変化している。

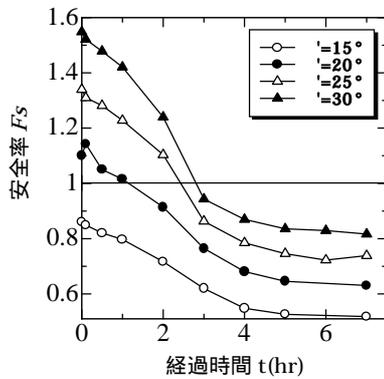


図 17 安全率の時間変化(異なる ')

斜面形状

豪雨時における斜面崩壊は浅層崩壊が多いため、斜面表層部の風化層を想定した図 18 の斜面を用いて解析を行う。試料および地盤定数は同様のものを用いる。

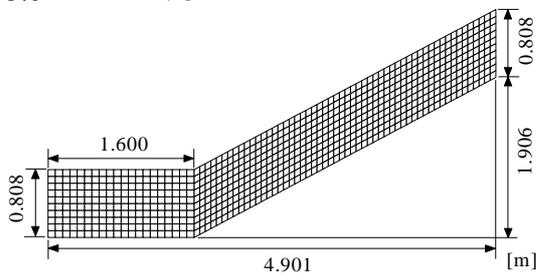


図 18 豪雨時斜面安定有限要素メッシュ

図 19 は圧力水頭分布および崩壊形態である。初期状態では斜面先にあった地下水面は雨水の浸透に伴い、斜面に沿って上昇している。2時間後では地下水位の上昇は少なく、崩壊形態は風化層全体がすべる崩壊形態となっているが、4時間から定常状態に至るまでは、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、地下水面から斜面先において発生しており、小崩壊の発生は飽和化に伴う、有効応力の減少と粘着力の喪失が大きな原因であることが分かる。また、斜面は図 9 に比べて層厚が薄いため、飽和化しやすく、浸潤面の形成も容易であるから、崩壊に至るまでの時間は短くなる。

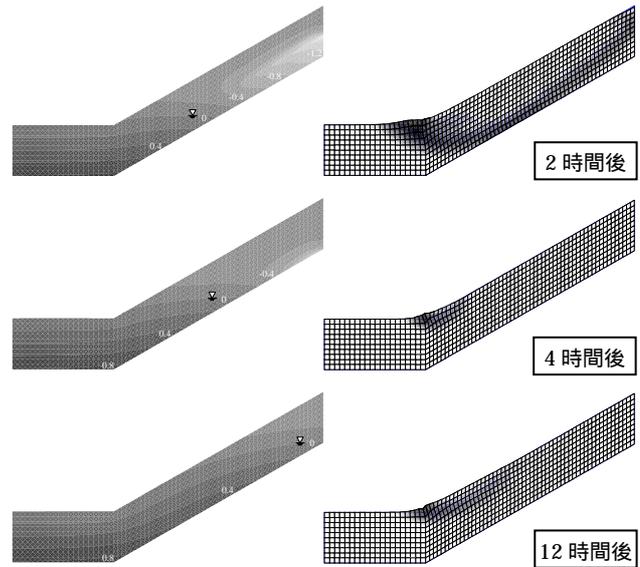


図 19 圧力水頭分布および崩壊形態

5. 結論

本研究で行ったことを箇条書きにする

3次元自然斜面安定解析を行い、崩壊事例で見られるお椀型のすべり形態が得られ、解析手法の妥当性が確認できた。

不飽和・飽和浸透解析では、圧力境界と流出境界を同時に扱う境界条件を作成し、斜面における浸透現象を解析的に表現した。

豪雨時における斜面崩壊挙動を解析的に表現した。斜面先の小崩壊は、飽和化に伴う、有効応力の減少と粘着力の喪失が大きな原因であることを解析的に求めた。また、崩壊形態の変化と安全率の曲線の形状には対応関係があることが分かった。安全率の時間変化と降雨強度の関係から斜面崩壊予測が可能であることを解析により求めた。さらに、浅層崩壊を想定した解析では層厚が薄いため、斜面は飽和化しやすくなり、崩壊に至るまでの時間が短くなることが分かった。

参考文献

- 1) 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ヨンの影響，土木工学論文集，No.687/-56，pp.201-218，2001