

降雨時の斜面崩壊に対する予知システムに関する研究

RESEARCH ON DISASTER PREDICTION SYSTEM FOR SLOPE FAILURES DUE TO RAINFALL

酒匂一成¹・北村良介²・深川良一³

Kazunari SAKO, Ryosuke KITAMURA, Ryoichi FUKAGAWA

¹立命館大学 COE 推進機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

²鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

³立命館大学 理工学部 環境都市学系 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

1. はじめに

近年, 地球温暖化に伴い, 世界的な規模で気候の変化(異常豪雨, 早魃など)が発生している. 日本各地においても梅雨期や台風来襲期に局地的な集中豪雨が発生し, 斜面崩壊や崩壊土砂が土石流となって流下し, 災害が発生している. そのため, 降雨時の斜面崩壊の予知・予測手法, 斜面モニタリング技術および防災システムの開発に関する研究に対して多くの注目が集まっている.

そこで, 北村らは南九州シラス地帯における土地災害予知システムの開発を行い, 数値力学モデルとモニタリング技術を有機的に結びつけた降雨時の斜面崩壊予知システムの提案を行っている¹⁾. 立命館大学では, 21世紀COEプログラム「文化遺産を核とした歴史都市の防災研究拠点」において代替性のない文化遺産を持つ歴史都市を自然災害から保全するための地震や降雨などによる自然災害(斜面崩壊, 火事や洪水など)に対する防災システムの開発を目指しており, 北村らの手法を京都市内の斜面に対して適用することを検討している.

本研究では, 降雨時の斜面崩壊を予知するためのシステムについての説明を行う. また, 鹿児島県曾於郡輝北町の国道504号沿いの切土法面における数値計算結果と現地計測結果の比較を行い, 本システムの妥当性について検討を行う.

2. 斜面崩壊予知システムの概略

北村らは, 南九州シラス地帯における土地災害予知システムの開発を行い, 数値力学モデルとモニタリング技術を有機的に結びつけた降雨時の斜面崩壊予知システムの提案を行っている¹⁾. 図-1は, 斜面崩壊予知システムを示すフローチャートである²⁾. 予知は通常「どこで(場

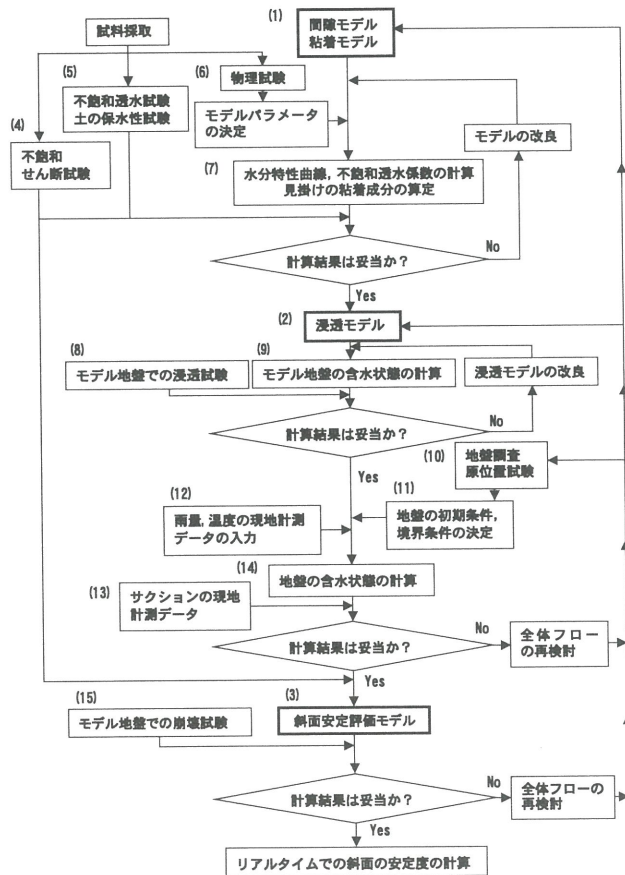


図-1 斜面崩壊予知システム (研究段階)

所)」、「いつ(時間)」、「どのような(規模)」斜面崩壊が発生するかを事前に知ることを意味しているが, 本システムで目指している予知はその中の時間と規模のみであり, 崩壊が予想される危険斜面(場所)は予め特定し, 降雨により時々刻々と変化する斜面の安定性を定量的に評価するということを目指している. また, 本システムは, 斜面崩壊は雨水の浸透による崩壊土塊自重の増加, 土中の飽和度の増加に伴うせん断強度パラメータの1つ

である見掛けの粘着成分の減少や飽和領域における浸透力の増加等によって生じる力学現象であるという認識に立ち、斜面を構成する土質材料の力学特性を正しく把握できれば一意的に崩壊を予知することができるという考え方に立脚している。

本システムは、主に5つの項目、1)攪乱や不攪乱土に関する室内土質試験、2)数値力学モデル、3)室内浸透・崩壊土槽試験、4)現地計測ならびに5)原位置試験・地盤調査から構成されている。

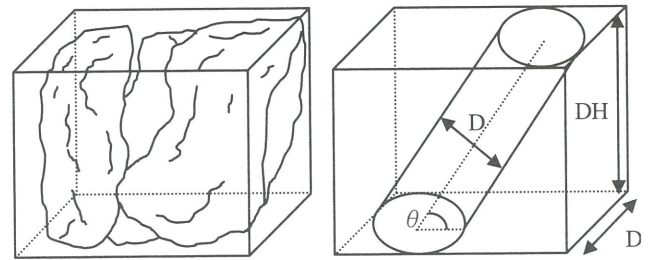
室内土質試験の結果は、モデルの入力パラメータの決定や数値力学モデルの妥当性の検討に用いられる。数値力学モデルは本システムの骨格を成しており、間隙モデル³⁾、粘着モデル⁴⁾、浸透モデルや斜面安定評価モデルがある。間隙モデルから水分特性曲線や飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係、粘着モデルから降雨による斜面崩壊の原因の一つである飽和度の変化に伴う見掛けの粘着成分の変化が計算される。浸透モデルでは間隙モデルの結果を用いて有限要素法による2次元不飽和浸透解析を行っている。斜面安定評価モデルでは非円弧すべり面に対する安定解析手法(Janbu法)を用いた安定解析および崩壊確率⁵⁾の計算を行っている。現地計測では、現地のサクシオン、雨量や地中温度の計測を行っており、その結果は2次元浸透解析の初期条件(初期の含水分布や地中温度分布)や境界条件(降雨条件)の決定やモデルの妥当性の検討に用いられる。室内浸透・崩壊土槽試験は、浸透モデルや斜面安定解析モデルの妥当性の検討のために行われる。地盤調査・原位置試験は、計算の初期条件や境界条件の決定及び潜在すべり面の同定のために行われる。以上に示した斜面崩壊予知システムにより、降雨に対し、リアルタイムで斜面の安定度の計算ができる。

3. 数値力学モデル

本節では、本システムの骨格を成す数値力学モデルについて説明を行う。

(1) 間隙モデル

北村らは、不飽和土中の間隙水の浸透挙動を計算するための数値力学モデル(以降、間隙モデルと称す)を提案している。図-2(a)は、2,3個の土粒子からなる土塊の一要素を示したものであり、これを図-2(b)のように間隙部分を管径D、傾きθの円管に、土粒子実質部分を円管以外の不透水性の個体に分けてモデル化した。モデル化されたものを間隙モデルと称し、図-2(b)のモデル化された一要素を素体積と呼ぶ。間隙部分の複雑な構造を表現するため、円管の管径D及び傾きθを確率変数とみなし、それらの確率密度関数を導入する。土粒子レベルでの力学的・確率論的考察により間隙比e、体積含水率



(a) 土塊の微小要素 (b) モデル化された一要素

図-2 間隙のモデル化

W_v 、サクシオン s_u や不飽和・飽和透水係数 k が次式のように導かれ、水分特性曲線や飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係が得られる。

$$e = \int \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (1)$$

$$W_v = \frac{e(d)}{1+e} = \frac{1}{1+e} \int \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (2)$$

$$s_u = \gamma_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (3)$$

$$k = \int \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\pi \gamma_w D^3 \sin \theta}{128 \mu (D/\sin \theta + DH/\tan \theta)} P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (4)$$

ここに、 V_p : 円管の体積、 V_e : 素体積全体の体積、 DH : 素体積高さ、 T_s : 水の表面張力、 μ : 水の粘性係数、 α : 毛細管と水の接触角、 γ_w : 水の単位体積重量、 d : 間隙水を保持する円管の最大管径。

(2) 粘着モデル

粘着モデルは、飽和度の変化に伴う見掛けの粘着成分の変化を計算するモデルである。一般に、雨水が浸透することによって、飽和度が上昇し、見掛けの粘着成分 c が減少すると言われている。この現象は、粒子間力の効果による見掛けの粘着成分 c_l によるものと考えられる。そこで、粒子間力に起因する見掛けの粘着成分 c_l に着目し、粒子間力 F_i を用いて力学的及び確率論的考察に基づき、粒子間力に起因する見掛けの粘着成分 c_l を次式のよ

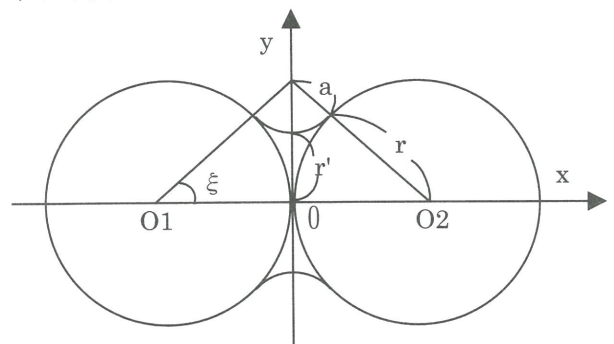


図-3 2粒子モデル

ように導いた。

$$c_1 = \frac{\pi}{4 \cdot (\pi - 2)} \cdot \vec{F}_i \cdot N_c \cdot \tan \phi \quad (5)$$

ここに、 \vec{F}_i ：粒子間力、 ϕ ：内部摩擦角、 N_c ：単位面積当たりの粒子接点数。

式(5)中の粒子間力は、図-3に示す2粒子モデルの表面張力やサクシヨンの効果を考慮し、次式で求められる。

$$F_i = 2 \cdot \pi \cdot r' \cdot T_s + \pi \cdot r'^2 \cdot s_u \quad (6)$$

ここに、 F_i ：粒子間力、 T_s ：表面張力、 s_u ：サクシヨン(= $u_a - u_w$)、 r' ：メニスカスの曲率半径。

(3) 浸透モデル

浸透モデルでは、間隙モデルの結果を用いて有限要素法による2次元不飽和浸透解析を行い、降雨浸透や地下水変動などによる地盤内飽和度(又は、間隙水圧)分布の変化を時系列で求めている。

(4) 斜面安定解析モデル

斜面安定解析モデルでは、非円弧すべり面に対する安定解析手法(Janbu法)を用いて安定解析を行っている。安全率 F_j は次式で表される。

$$F_j = \frac{\sum \left[\frac{c \cdot b + (W - \Delta V - U \cos \alpha) \tan \phi}{\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi / F_j} \right]}{\sum \{ \Delta E + (W - \Delta V) \tan \alpha \}} \quad (7)$$

ここに、 c ：見掛けの粘着成分、 b ：スライス幅、 W ：スライス自重、 ΔV ：スライス間力、 U ：スライス底面に働く間隙水圧の合力、 α ：潜在すべり面が水平面となす角度、 ΔE ：スライス側面に働く間隙水圧の合力の差、 ϕ ：内部摩擦角、 F_j ：安全率。

(5) 崩壊確率

浸透モデルと粘着モデルを安定解析手法に組み合わせることで、間隙水の浸透に伴う斜面の安全率を計算することが可能となる。また、せん断強度パラメータ(見掛けの粘着成分 c と内部摩擦角 ϕ) は試料の採取方法に伴う乱れ、試料採取場所の違いや室内せん断試験の精度によって不確定性を有していると考えられる。すなわち、せん断強度パラメータ c 、 ϕ を二次元正規分布に従う独立した2つの確率変数とみなし、不確定性を考慮した安定性の定量的評価指標として崩壊確率の導入を試みてい

る⁹⁾。そこで、確率変数を(c 、 ϕ)とし、次式に示す二次元正規分布を用いる。

$$f(c, \phi) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_\phi\sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{c-\mu_c}{\sigma_c} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{c-\mu_c}{\sigma_c} \right) \left(\frac{\phi-\mu_\phi}{\sigma_\phi} \right) + \left(\frac{\phi-\mu_\phi}{\sigma_\phi} \right)^2 \right\} \right] \quad (8)$$

ここに、 μ_c ：見掛けの粘着成分 c の平均、 σ_c ：見掛けの粘着成分 c の標準偏差、 μ_ϕ ：内部摩擦角 ϕ の平均、 σ_ϕ ：内部摩擦角 ϕ の標準偏差、 ρ ：相関係数($\rho=0$)。

次にJanbuの式で $F_j=1$ となるとき c_f 、 ϕ_f 関係を求める。 $F_j=1$ として式(7)を整理すると次式が得られる。

$$c_f = \frac{\sum \{ \Delta E + (W - \Delta V) \tan \alpha \}}{\sum \left[\frac{b / (\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi_f)}{\sum \left\{ \frac{(W - \Delta V - U \cos \alpha) \tan \phi_f}{\cos^2 \alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi_f} \right\}} \right]} \quad (9)$$

ここに、 c_f ： $F_j=1$ のときの見掛けの粘着成分、 ϕ_f ： $F_j=1$ の時の内部摩擦角。

式(8)の二次元正規分布と式(9)で得られる c_f 、 ϕ_f 関係から崩壊確率 P_f が次式のように算定される。

$$P_f = \int \int f(c, \phi) d\phi dc \quad (10)$$

4. 現地計測結果による数値力学モデルの検証

(1) 現地計測システム

図-4は、現地計測システムの概略を示す⁶⁾。基本的な現地計測システムは、テンシオメータ(20, 40, 60, 80cmの深さに計4本)、転倒ます式雨量計、温度計(気温、地中温度)とデータロガーから構成される。

現地計測は、鹿児島県曾於郡輝北町の鹿児島県大隅土木事務所が管轄する国道504号沿いの切土法面において行った。図-5は、国道504号沿いの切土法面の地層断面図である。切土法面は、上層から赤ホヤおよび火山灰質砂、極軟質シラス、軟質シラス、そして中硬質シラスが堆積しているシラス法面である。現地計測システムは、

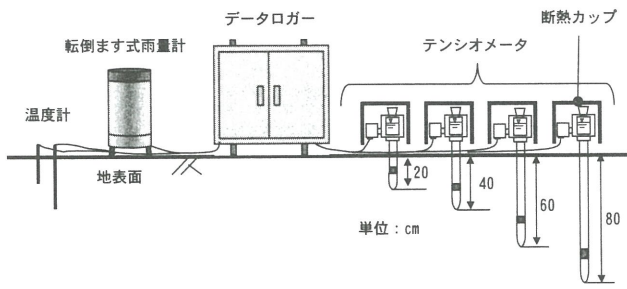


図-4 現地計測システム概略⁶⁾

斜面上端の赤ホヤおよび火山灰質砂の層に設置している。

(2) モデルパラメータ，解析領域の決定

鹿児島県曾於郡輝北町の国道504号沿いの道路法面における地盤調査やサンプリング試料の室内土質試験によって得られた結果を基に，解析領域・境界条件やモデルパラメータの具体値を決定した方法について説明する。

図-5に示す各地層の土質材料に対して，室内土質試験がなされている。表-1に各試料に対する間隙モデルおよび粘着モデルに適用した入力パラメータを示す。図-6に解析領域を示す。境界条件は，国道部分，底面と側面を非排水条件とし，地表面部分に降雨条件を与えている。初期条件は，現地計測結果から決定した。

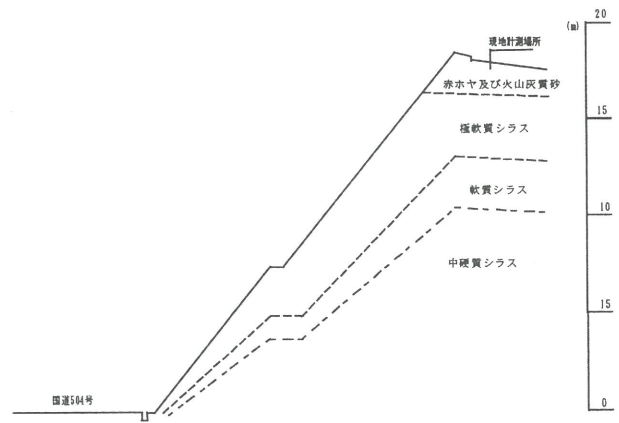


図-5 国道504号沿いの切土法面の地層断面図

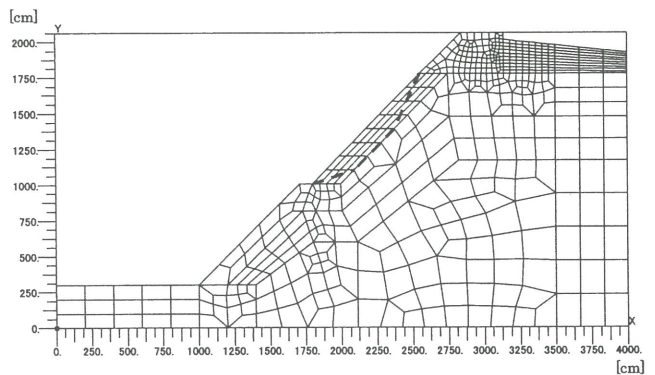


図-6 解析領域

(3) 間隙モデルと粘着モデルの計算結果

表-1に示されるデータを用いて間隙モデルおよび粘着モデルの計算を行った。

図-7に赤ホヤおよび火山灰質砂，図-8に極軟質シラスに関する間隙モデルから得られた水分特性曲線と飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を示す。図-7と図-8の水分特性曲線において，同じ飽和度において計算結果のサクションは実験結果よりも小さくなっていることがわかる。また，飽和度-不飽和・飽和透水係数において，実験結果に比べ，計算結果は数オーダー過大に評価されてい

ることがわかる。一方，間隙モデルの改良⁷⁾を行った後の計算結果は，水分特性曲線および飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係に関して実験結果とほぼ一致していることがわかる。但し，飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係において実験結果が飽和透水試験から得られた1点しかないため，不飽和領域におけるモデルの妥当性検討ができていない。

今後，高飽和度および低飽和度領域において，間隙モデルの改良が必要である。

図-9は，極軟質シラスに関する粘着モデルから得られ

表-1 間隙モデルおよび粘着モデルに用いた入力パラメータ

試料	輝北 (赤ホヤ, 火山灰質砂)	輝北 (極軟質シラス)	輝北 (軟質シラス)	輝北 (中硬質シラス)
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.731	2.628	2.535	2.456
水の表面張力 (N/m) (水温15℃時)	73.48×10 ⁻³	73.48×10 ⁻³	73.48×10 ⁻³	73.48×10 ⁻³
水の粘性係数 (Pa・s) (水温15℃時)	1.138×10 ⁻³	1.138×10 ⁻³	1.138×10 ⁻³	1.138×10 ⁻³
分割数	360	360	360	360
円管の傾きθのp. d. f.の最低高さ _c	0.159	0.159	0.159	0.159
間隙比	3.458	1.463	1.601	1.304
見掛けの粘着成分 (kPa)	39.4 (含水比85.4%)	36.9 (含水比50.9%)	34.5 (含水比16.8%)	-
内部摩擦角 (°)	24.8 (含水比85.4%)	36.0 (含水比50.9%)	38.7 (含水比16.8%)	-
①通過質量百分率 (%)	100.0	100.0	100.0	100.0
②通過質量百分率 (%)	98.6	98.2	97.5	95.9
③通過質量百分率 (%)	95.5	95.8	93.8	91.8
④通過質量百分率 (%)	88.5	91.2	82.0	84.3
⑤通過質量百分率 (%)	71.0	86.1	69.3	70.2
⑥通過質量百分率 (%)	66.3	74.4	58.2	56.6
⑦通過質量百分率 (%)	64.2	63.0	40.3	47.4
⑧通過質量百分率 (%)	55.8	46.0	34.6	32.5
⑨通過質量百分率 (%)	39.2	41.4	32.0	27.6
⑩通過質量百分率 (%)	26.7	37.9	30.3	25.1
⑪通過質量百分率 (%)	22.5	35.3	27.9	21.5
⑫通過質量百分率 (%)	18.3	32.7	25.1	16.5
⑬通過質量百分率 (%)	14.2	30.1	22.4	12.8
⑭通過質量百分率 (%)	9.2	27.4	21.0	10.4
⑮通過質量百分率 (%)	-	24.8	18.3	9.1
⑯通過質量百分率 (%)	-	20.9	12.9	6.7
⑰通過質量百分率 (%)	-	14.4	-	4.2

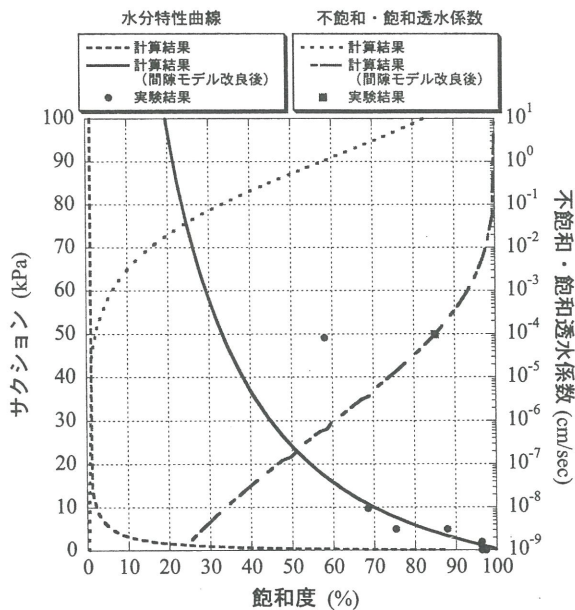


図-7 水分特性曲線と飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係
(赤ホヤおよび火山灰質砂)

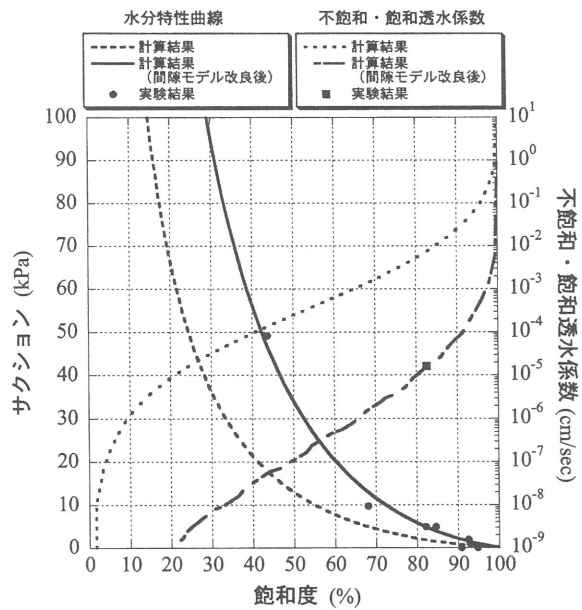


図-8 水分特性曲線と飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係
(極軟質シラス)

た結果を示しており、飽和度-見掛けの粘着成分の関係を表している。図より、飽和度が増加することにより、見掛けの粘着成分が低下することがわかる。粘着モデルの計算結果を斜面安定評価モデルに用いることで降雨時の斜面の不安定化を表現することができる。

(4) 浸透モデルの計算結果

浸透解析における解析領域は、図-6 に示されている。図-10 は、2次元浸透解析を行った結果と2001年9月2日の現地計測結果を比較したものであり、雨量-間隙水圧の時系列変化を示したものである。降雨条件については、2001年9月2日の計測データを用いた。また、2001年9月2日午前0時0分に計測された深さ20、40、60、80cmの間隙水圧データをもとに初期条件を決定した。今回は、解析領域内の初期条件を間隙水圧-5.4kPaで一様なものとした。境界条件は、国道部分、底面と側面を非排水条件とし、地表面部分に降雨条件を与えている。

図-10 (A) における計算結果は、図-7 と図-8 の間隙モデル改良後の水分特性曲線および飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係を用いて得られたものである。図より、実測結果は降雨により浅い方から順に間隙水圧が増加していく様子が見られるが、計算結果は全ての深さの間隙水圧が急激に増加している。また、計算結果では間隙水圧の増加量が実測結果に比べ、非常に大きい。これは、図-7 と図-8 からわかるように高飽和度領域における不飽和・飽和透水係数の値が非常に大きいためと言える。また、高飽和度領域における不飽和・飽和透水係数に関して、赤ホヤおよび火山灰質砂の値に比べ、極軟質シラスの透水係数が小さくなっているため、層の境界付近に間隙水が溜まりやすくなり、間隙水圧の値が正の圧力を示したと考えられる。

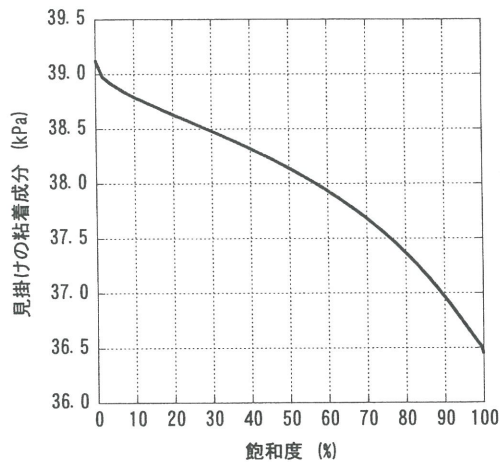


図-9 飽和度-見掛けの粘着成分の関係
(極軟質シラス)

また、図-10 (B) における計算結果は、透水係数に、図-8 の間隙モデル改良後の飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係において実験結果で頭打ちにしたものを用いた。図より、計算結果は20cmの深さの間隙水圧のみが増加していることがわかる。これは、頭打ちにした透水係数が実地盤における透水係数よりも小さくなったためと考えられる。よって、室内土質試験で得られた透水係数について再検討する必要があると考えられる。

今後、モデルの改良、初期条件、境界条件、降雨条件の与え方、解析領域の要素の大きさや室内土質試験の結果と実地盤における値との整合性についてより深く検討していく必要があると考えられる。

(5) 斜面安定評価モデル

図-6 に示す解析領域において2次元浸透解析を行った後、図中に示される想定した潜在すべり面において Janbu

法を用いて安定解析および崩壊確率の計算を行った。

2次元浸透解析の結果として、図-10(A)の結果を用いた。また、安定解析を行う斜面部分の土質は、極軟質シラスであり、粘着モデルから得られる飽和度の変化に対する見掛けの粘着成分の変化は、図-9に示される。また、崩壊確率の計算に用いる見掛けの粘着成分 c の標準偏差 σ_c を 0.2kPa, 内部摩擦角 ϕ の標準偏差 σ_ϕ を 2.0° と設定した。

図-11に、降雨に伴う斜面の安全率・崩壊確率の時系列変化の結果を示す。図-10と図-11から降雨により土中の間隙水圧が増加するに伴い斜面の安全率が減少していくことがわかる。また、安全率が大きいため、崩壊確率は0.0%となっている。

安全率や崩壊確率の結果の信頼性を高めるためには、より正確な潜在すべり面の同定、せん断強度パラメータの決定を行う必要があり、適切な地盤調査、原位置試験および室内土質試験の実施も必要である。

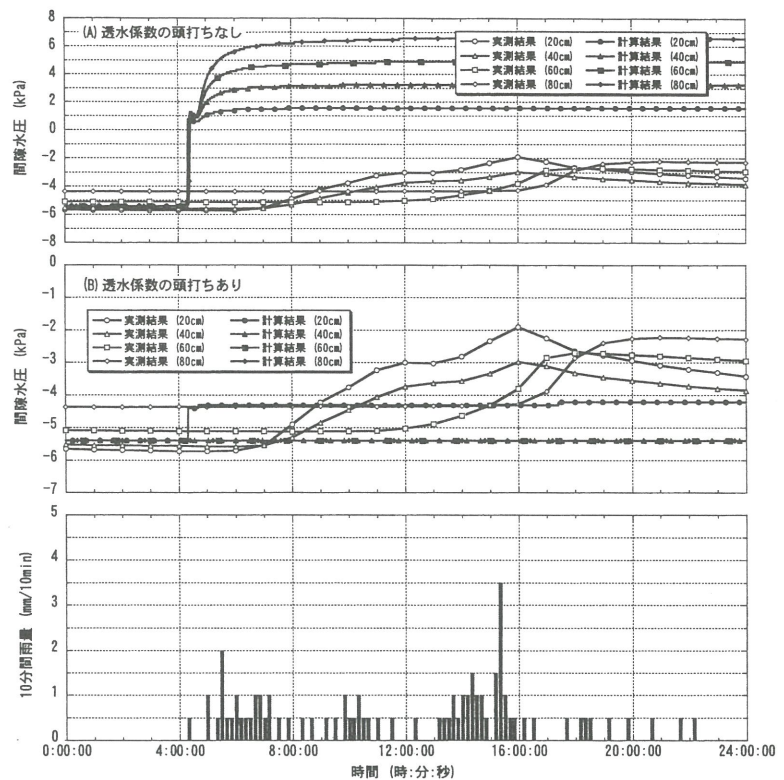


図-10 雨量および間隙水圧の時系列変化

5. おわりに

本論文では、降雨時の斜面崩壊の予知システムについて説明を行った。本システムは、斜面モニタリング技術と数値力学モデルを有機的に結びつけたものであり、一般的な地盤調査、原位置試験や室内土質試験の結果を用いて降雨に対する斜面の安定性を定量的に評価することができる。

今後、数値力学モデルの改良および妥当性の検討、地盤調査、原位置試験及び室内土質試験の精度の向上を行うことにより精度の高いシステムの開発が可能と考える。

本研究の一部に対して科研費(基盤(B), No.13450196, 代表:北村良介)の援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1)北村良介ら：南九州シラス地帯における土地災害予知システムの開発，平成12-14年度科学研究費補助金(地域連携推進研究費(2))研究成果報告書(課題番号:12792009)，pp.199-201，2003。
- 2)松尾和昌，酒匂一成，北村良介：斜面崩壊予知戦略-南九州シラス地帯を例として-，自然災害科学，21巻1号，pp.25-33，2002。
- 3)R. Kitamura, S. Fukuhara, K. Uemura, G. Kisanuki and M. Seyama 1998. A numerical model for seepage through unsaturated soil, Soils

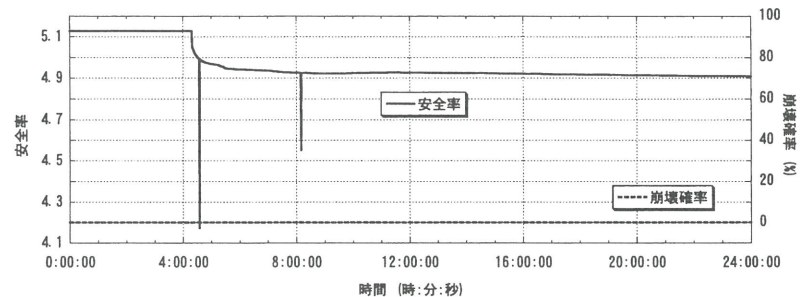


図-11 安全率および崩壊確率の時系列変化

and Foundations, Vol.38, No.4, pp.261-265.

- 4) K. Sako, R. Kitamura, M. Yamada 2001. A consideration on effective cohesion of unsaturated sandy soil, POWDERS AND GRAINS 2001, pp.39-42.
- 5) K. Sako, K. Araki and R. Kitamura 2003. RESEARCH ON PROBABILISTIC ESTIMATION OF SHEAR STRENGTH PARAMETERS FOR SLOPE STABILITY ANALYSIS, Proc. of THE SINO-JAPANESE SYMPOSIUM ON GEOTECHNICAL ENGINEERING, GEOTECHNICAL ENGINEERING IN URBAN CONSTRUCTION, pp.320-325.
- 6)北村良介，川井田実，阿部廣史，城本一義，寺地卓也：砂質土地盤でのサクシヨンの現地計測システムの開発，土木学会論文集 No.652 III-51, pp.287-292, 2000.
- 7) K. Sako and R. Kitamura: Water retention and flow mechanism in unsaturated soil, Proc. of THE 2ND ASIAN CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, UNSAT-ASIA2003, pp.345-350, 2003.

(2004. 6. 18 受付)