

不飽和しらす地盤への間隙モデルの適用

Application of mechanical model for voids to unsaturated Shirasu ground

宮本裕二*・城本一義**・北村良介***

Yuji MIYAMOTO, Kazuyoshi JOUMOTO and Ryosuke KITAMURA

*学生員 工修 鹿児島大学大学院理工学研究科博士後期課程システム情報工学専攻
(〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

**正会員 鹿児島大学技官 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

***正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

In the southern part of Kyushu Island, Japan, slope failures often occur due to heavy rainfalls when it is rainy season (from June to September). The most part of slope failure are classified as the surface slip failure whose depth is commonly less than 1 m. The phase change of pore-fluid in soil with the change of temperature and humidity in atmosphere should be investigated to make clear the mechanism of surface slip failure because the phase change is deeply related to the change of effective stress in soil near the surface ground. In this paper the in-situ measuring system of suction and temperature in soil is explained and the obtained measuring data are shown. Then the numerical model is proposed to simulate the mechanical behavior of unsaturated soil and then the numerical experiment is carried out to prove the validity of proposed model by using obtained data.

Key Words ; model for voids, heat transfer, unsaturated-saturated permeability coefficient, suction, numerical experiment

1. まえがき

鹿児島県本土を含む南九州には、火砕流堆積物の非溶結部であるしらすを含む地盤が広く分布している。鹿児島のように日射の強い地域では、地盤工学の諸問題を取り扱う場合、地盤の熱的性質を考慮する必要がある。

例えば、降雨によるしらす斜面の崩壊は、表層すべり型が大半である¹⁾。表層すべり型の斜面崩壊の直接的原因是、多量の降雨によって地盤内へ雨水が浸透し、力学的平衡状態が保たれなくなったことにある。しかし、そのような状態に至る以前に地盤は雨水の浸透、日射による温度変化や間隙水の蒸発を繰り返している。このようなプロセスは地盤内の有効応力の変化を生じさせ、不飽和状態の土塊内に繰り返し荷重を与え、疲労破壊のような現象を生じさせているものと定性的には考えられる。したがって、不飽和土の力学特性を明らかにし、しらす地盤でしばしば発生する斜面崩壊、土石流の発生機構を解明するには不飽和土中の伝熱・浸透挙動の定量的評価が必要である。

本論文では、伝熱・浸透挙動について若干の考察を行い、現地計測結果に適應できる不飽和・飽和地盤に関する数値力

学モデルの提案を試み、それを用いた数値実験を行っている。すなわち、実際に測定した降雨、温度データを用いて、提案したモデルが実地盤の伝熱・浸透挙動を定量的に評価できる見込みを明らかにしている。

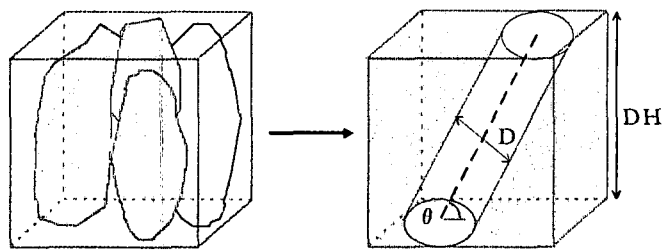
2. 不飽和土の伝熱・浸透挙動のモデル化

地盤の伝熱形態には、熱伝導、対流熱伝達、輻射が考えられる。しかし、地盤内では輻射による伝熱は他と比較して微小であるので、地盤内の伝熱は熱伝導と間隙流体の移動による対流熱伝達によるものとする²⁾。本節では、サクションによる間隙水の移動と熱伝導を考える。

2. 1 間隙モデルによる水分保持特性の評価

地盤内の間隙流体の移動を定量的に評価するためには、土の水分保持特性を知る必要がある。水分保持特性は、土の含水量とそれに対応する p F 値、透水係数、透気係数の関係を示すものである。北村らは、土の浸透特性を土粒子レベルから検討するために間隙モデル³⁾を提案している。間隙モデルは、図-1(a)に示すような土粒子数個を含むような地盤内

の一要素を図-1(b)に示す管径D、傾きθの円管（間隙流体が移動する部分）とそれ以外（間隙流体が移動できない部分）に分けた素体積と呼ばれる要素に置き換えたものである。管径D、傾きθを確率変数とし、若干の確率論的考察を加えることにより間隙比eと水分保持特性の指標である体積含水率W_v、pF値、不飽和・飽和透水係数k_w、透気係数k_aが次式により求めることができる。



(a) 土粒子数個の土塊 (b) 間隙のモデル化
図-1 間隙モデル

$$e = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} P_d(D) P_c(\theta) d\theta dD \quad (1)$$

$$W_v = \frac{1}{1 + e} \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} P_d(D) P_c(\theta) d\theta dD \quad (2)$$

$$pF = \log_{10} h_c = \log_{10} \left(\frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\gamma_w \cdot d} \right) \quad (3)$$

$$k_w = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\pi \cdot \gamma_w \cdot D^3 \sin \theta}{128 \mu (D/\sin \theta + DH/\tan \theta)} P_d(D) P_c(\theta) d\theta dD \quad (4)$$

$$k_a = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\pi \cdot \gamma_a \cdot D^3 \sin \theta}{128 \mu (D/\sin \theta + DH/\tan \theta)} P_d(D) P_c(\theta) d\theta dD \quad (5)$$

ここに、 V_p ：円管の体積、
 V_e ：図-1で示される直方体の体積、
 $P_d(D)$ ：Dの確率密度関数、
 $P_c(\theta)$ ：θの確率密度関数、
 DH ：図-1で示される直方体の高さ、
 d ：間隙水を保持する最大管径、
 T_s ：水の表面張力、
 α ：管と水の接触角、
 γ_w ：水の単位体積重量、
 γ_a ：空気の単位体積重量、
 μ_w ：水の粘性係数、
 μ_a ：空気の粘性係数、
 h_c ：毛管上昇高さ。

表-1の入力値の決定法について説明する。素体積高さDHは試料の粒度分布を対数正規分布と仮定したときの平均(D₅₀)程度を用いる。また、管径の分布は対数正規分布を

仮定し、その平均は粒径分布を対数正規分布としたときの平均の1/10～1/2程度、変動係数は粒径分布のそれと等しいと仮定し、入力値を求めている。円管の傾きは土粒子の接点角分布と等しいと仮定し、五角形分布を採用している。よって、間隙モデルの入力値は物理的に意味のあるパラメータであるといえる。表-1の入力値を用いて、式(1)～式(5)より水分保持特性を計算した。図-2に間隙モデルによる計算結果と阿部による実験結果⁴⁾を示す。pF値は、計算値と実験値がほぼ一致している。透水係数は、実験値では飽和状態から不飽和状態へ移行する高飽和度領域で急激に変化しているのに対して、間隙モデルによる計算値では、その傾向がみられない。透気係数は、含水状態が低い領域でほぼ一致している。しかし、実験値では透気係数の急激な変化が飽和度70%前後であるのに対して、間隙モデルによる計算値は実験値より高い飽和度で変化している。透水・透気特性に若干の違いがみられるものの、間隙モデルは土の水分保持特性を定量的に評価できると考察される。

表-1 間隙モデルの入力値（豊浦砂）

試料	豊浦砂
素体積高さ DH [cm]	1.0 × 10 ²
管径 D の平均 μ _D [cm]	5.54 × 10 ⁻³
管径 D の標準偏差 σ _D [cm]	2.74 × 10 ⁻³
管傾 θ の p.d.f. の最低高さ	0.159
土粒子と水の接点角 α [°]	0.00

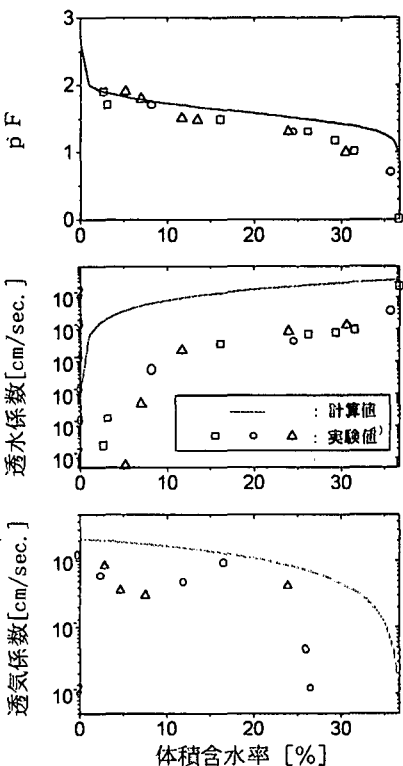


図-2 水分特性曲線

2. 2 熱伝導

熱伝導とは、物質の移動なしに熱が高温部から低温部へと伝達される現象であり、熱流量は単位厚さ[1m]当たり、単位温度[1K]の差があるとき、単位面積[1m²]を通して流れる単

位時間[s]当たりの熱量[J/(s・m・K)=W/(m・K)]を用いて表すことができる。そして、対象とする土塊の熱伝導率がわかれば熱伝導による熱の移動が次式により表される。

$$q_i = \lambda_i \cdot \Delta T \cdot \frac{A}{h} \quad (6)$$

ここに、 q_i ：熱流量，
 λ_i ：熱伝導率，
 ΔT ：2点間の温度差，
 A ：面積，
 h ：2点間の距離。

しかし、土は土粒子（固相）、水（液相）、空気（気相）により構成されるため、温度、含水比、間隙比等の地盤状態の変動に伴い熱伝導率も変化する。よって、北村らは室内試験⁵⁾および土の熱伝導のモデル化⁶⁾により土の熱伝導率を検討し、式（6）を次式のように修正した。

$$q_i = \lambda_i \cdot \Delta T \cdot \frac{A_i}{h}$$

$$q_i = \sum q_i (= q_{\text{soil particle}} + q_{\text{water}} + q_{\text{air}}) \quad (7)$$

($i = \text{soil particle, water, air}$)

ここに、 q_i ：各相(土粒子、水、空気)の熱流量，
 λ_i ：各相の熱伝導率，
 A_i ：各相の面積。

3. 現地計測および数値実験

3. 1 サクション、温度の現地計測⁷⁾

地盤表層部の雨水の浸透挙動および温度変化を測定するため、鹿児島県内に現地計測システム(図-3)を設置した。

本論文では、鹿児島県伊集院町の地山しらす切土平坦部での測定結果を示す。現地計測システムは、サクションを測定するテンシオメーター(深さ 20, 40, 60, 80[cm])、温度計(深

さ 10, 20, 30, 40[cm])、雨量計および自動計測したデータを記録するデータロガーからなる。サクションおよび雨量計の計測結果は、電話回線によりデータ回収を行っている。また、温度計測結果は、月に1回現地に赴き、ノートパソコンにより回収する。計測結果の一例を図-4に示す。計測結果より、地盤温度は地表面に近いほど周期的に大きく変動し、深さ方向に位相ずれが生じていることが分かる。圧力水頭は、雨水の浸透によりサクションが減少し、晴天時にサクションが徐々に回復していることが分かる。

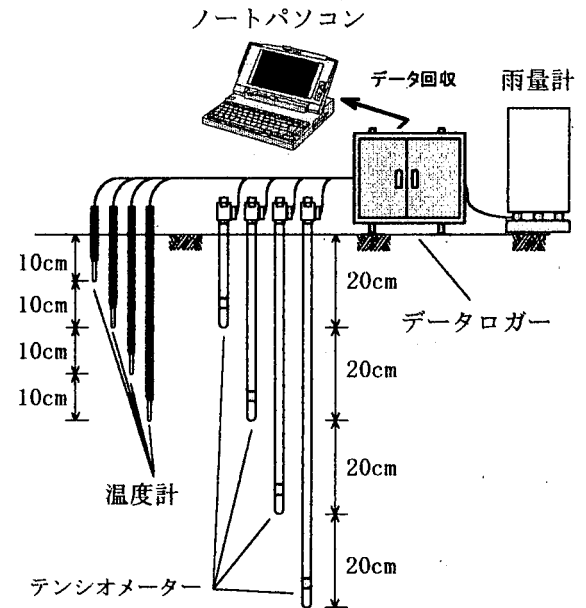


図-3 現地計測システム概略図

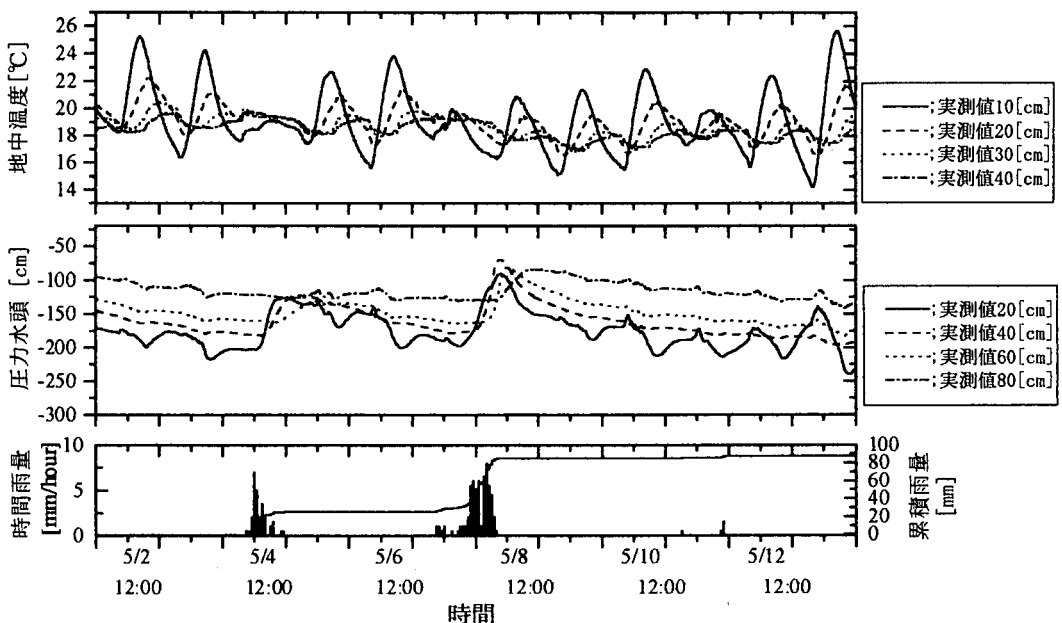


図-4 現地計測結果(1996年鹿児島県日置郡妙円寺)

3. 2 数値実験

先に提案した熱伝導と水分保持特性のモデルより現地を想定した鉛直1次元での地盤の伝熱・浸透現象のモデル化を行い数値実験を行う。実地盤に対応した模式図および地盤条件をそれぞれ図-5、表-2に示す。数値実験の手順を図-6のフローチャートを示し、各項目について説明する。

- ①表-2に示した地盤の諸物理量を入力する。初期値として、現地計測データの初期温度を入力する。計測データの無い40[cm]より以深は、40[cm]と同じ温度を入力する。また初期値として20[cm]の圧力水頭を与え20[cm]の圧力水頭から間隙水が移動しない動水勾配（隣接する層の全水頭差が0）を各層計算し、サクシオンが生じない飽和領域では、圧力水頭は静水圧と仮定する。式（2）、（3）を用いて体積含水率を計算する。鉛直1次元の地盤を想定し、横方向への熱、間隙流体の移動はない。地表面では蒸発量を考慮せず、雨水の流入のみを与える。熱の移動に関しては断熱とし、間隙流体の移動は上下面とも非排水とする。
- ②現地計測で得られた、雨量および深さ10[cm]の温度のデータを入力値として用いる。

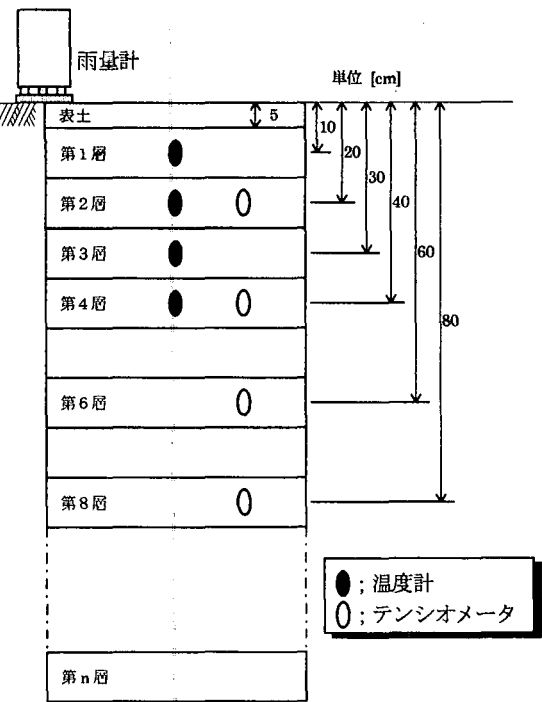


図-5 モデル化した地盤の模式図

表-2 地盤条件

層数	30
層の面積	100 [cm ²]
層の厚さ	10 [cm]
土粒子の密度	2.401[g/cm ³]
土粒子の比熱	0.8 [J/(g・K)]
土粒子の熱伝導率	1.5 [J/(m・K)]

- ③熱流量は式（7）を用いて各層毎に計算する。熱伝導による熱流量の算定に必要な各相（土粒子、水、空気）の断面積換算は、飽和度、間隙比より仮定した。
- ④温度変化 ΔT は次式で計算する。
$$\Delta T = q / (c \cdot \rho \cdot V) \tag{8}$$
ここに、 q ；熱流量、 c ；比熱、 ρ ；密度、 V ；体積。
- ⑤各層の温度、体積含水率を考慮し、式（3）を用いて圧力水頭を算定し、隣接する層で圧力水頭、位置水頭により動水勾配を決定する。また、式（4）、（5）を用いて透水係数、透気係数を計算し、ダルシー則に従って間隙流体の移動を検討する。
- ⑥間隙流体の移動後の体積含水率を計算する。
- ⑦上に示した③、④、⑤、⑥により計算した各層の温度変化、体積含水率の変化を重ね合わせて、式（2）～（5）を用いてサクシオン、透水係数、透気係数を計算する。

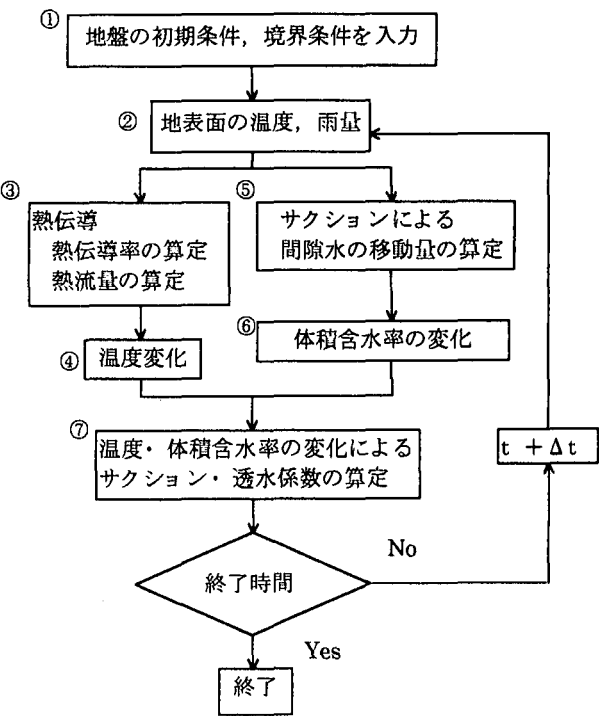


図-6 数値実験手順のフローチャート

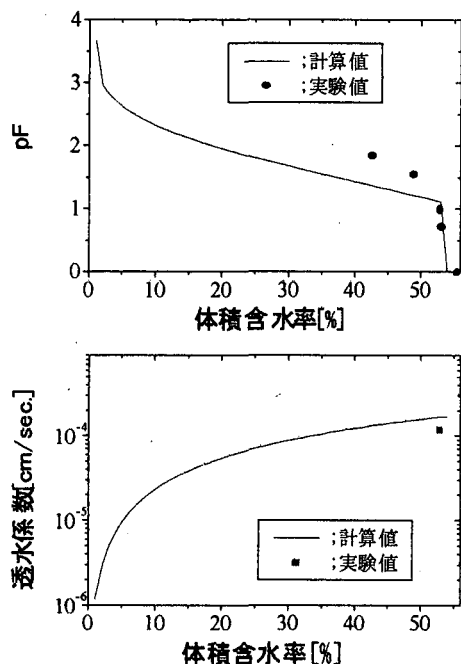
採取試料の室内試験によって得られた諸物性を表-3に示す。そして、表-4の間隙モデルの入力値を用いて数値実験により得られた水分保持特性（20[℃]）および現地試料を用いた保水性試験および透水試験の結果を図-7に示す。表-4の入力値は表-1の場合と同様にしらすの粒径分布から決定した。また、図-7の透水係数の実測値は飽和透水係数である。

表-3 採取試料の諸物性値

試料	しらす
密度	2.401 [g/cm ³]
間隙比	1.287
含水比	18.90 [%]
飽和透水係数	1.17*10 ⁻⁴ [cm/s]

表－４ 間隙モデルの入力値（しらす）

試料	しらす	
素体積高さ DH [cm]		1.0×10^3
管径 D の平均 μ_D [cm]		1.0×10^{-4}
管径 D の標準偏差 σ_D [cm]		5.0×10^{-4}
管傾 θ の p.d.f. の最低高さ		0.159
土粒子と水の接点角 α [°]		0.00



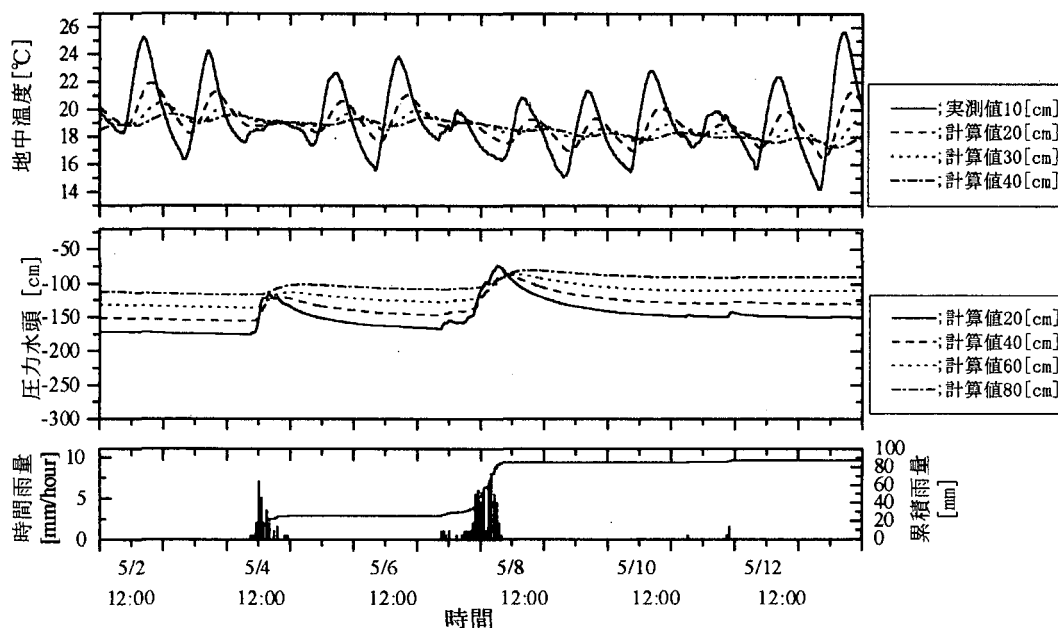
図－７ しらすの水分特性曲線

3. 3 実験結果

図－８は、図－４に示す 1996 年 5 月の現地計測結果に対応する数値実験結果である。図－４と図－８を比較すると、圧力水頭、温度ともほぼ同様の傾向を示していることが分かる。

降雨前後の実測値と計算値の圧力水頭変化を図－９に示す。実測値、数値実験による計算値ともに深さ方向に徐々に雨水が浸透し、20,40,60,80[cm]の順に圧力水頭が変化している。降雨後の圧力水頭の回復は、現地計測結果が徐々に大きくなっていくのに対し、計算値のサクションの回復が小さく、雨水が蓄積される傾向にある。現地計測と数値実験結果の差異の原因として、数値実験では上方からの雨量の流入のみを考慮し、下方・側方での非排水条件を仮定していること。鉛直一次元の熱伝導、浸透挙動であること、表層での熱輸送を考慮せず、深さ 10 cm の温度を入力値として用いていることなどが考えられる。

また図－１０に地中温度の実測値と計算値の比較を示す。これより、実測値と計算値ともほぼ一致しているが降雨時に若干ずれがあることがわかる。以上より、本モデルが実地盤の伝熱、浸透挙動をほぼ定量的に評価できることが明らかとなった。



図－８ 数値実験結果（1996 年鹿児島県日置郡妙円寺）

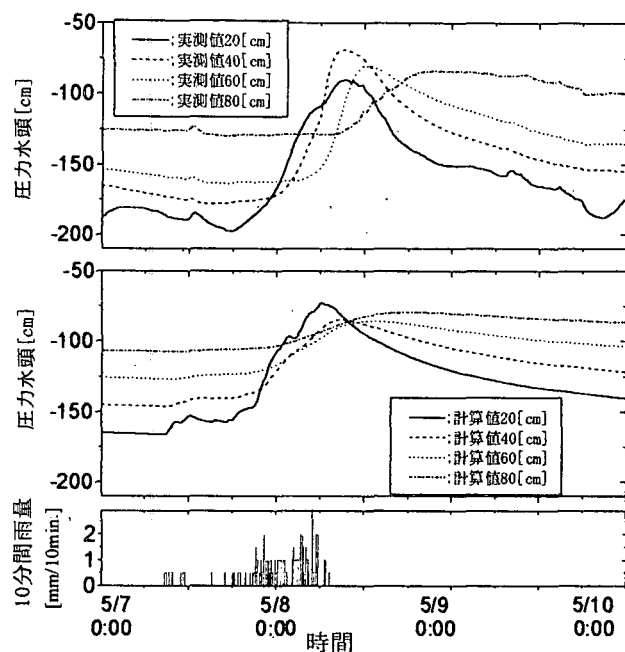


図-9 圧力水頭の比較

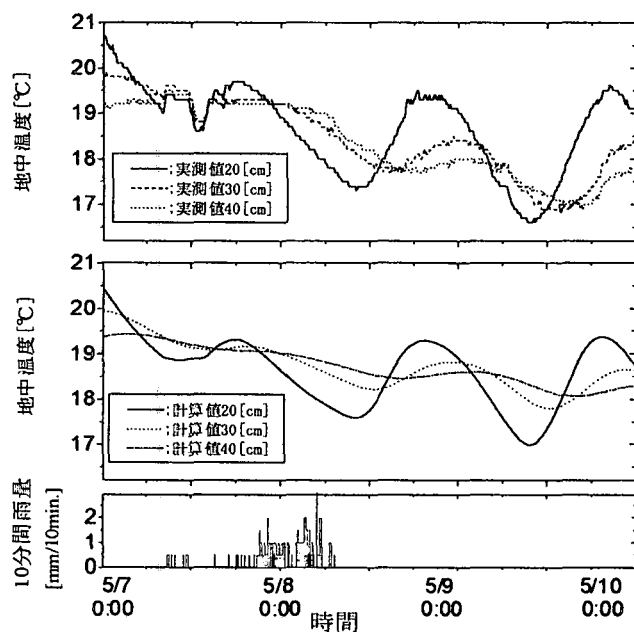


図-10 地中温度の比較

4. あとがき

南九州しらす地帯の地盤は、夏の強い太陽光線、梅雨時期・台風襲来時の強風と降雨にさらされ、それらは、地盤の力学特性に大きな影響を与えているものと考えられる。すなわち、不飽和土の浸透特性、土の伝熱現象の解明が本質的な問題であることがわかる。本論文では、伝熱・浸透挙動を解明するため、現地計測結果に適用できる不飽和・飽和地盤に関する数値力学モデルの提案とそれを用いた数値実験を行った。現地計測結果および現地盤をモデル化した数値実験により、日々刻々と変化する地盤環境の伝熱・浸透現象を定量的に評価できることを明らかにした。今後は、現地計測データの蓄積とともにモデルの改良を行い、斜面崩壊の予知への適用を考えている。

謝辞；

本研究は科研費（基盤(B), NO.09555153, 代表：北村）の援助をいただいた。また平成8年度鹿児島大学地域共同研究センター客員教授の阿部廣史先生（（株）中部地質）から貴重な助言をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 下川悦郎，地頭菌隆；'93 鹿児島豪雨災害を考える一斜面災害を中心にしてー，砂防学会鹿児島豪雨災害特別シンポジウム実行委員会，pp.31-32，1994。
- 2) 土壌物理研究会編；土の物理学ー土質力学の基礎ー，森北出版，pp.279-293，1979。
- 3) Kitamura R. et al. ; A numerical model for seepage through unsaturated soil, Soils and foundations , vol.38 , No.4 , pp.261-265 , 1998。
- 4) 阿部廣史；不飽和土の力学特性の評価方法に関する実験的研究，東京大学学位申請論文，pp.265-272，1994。
- 5) 宮本裕二，北村良介；不飽和土の熱拡散率測定と伝熱に関する一考察，平成8年度土木学会西部支部研究発表会，1997。
- 6) 北村良介，宮本裕二；熱を考慮した不飽和土の数値力学モデルの提案，不飽和地盤の透水に関わる諸問題シンポジウム発表論文集，pp.201-208，1996。
- 7) 宮本裕二，北村良介，井料達生，佐藤公洋；しらす地盤における伝熱，浸透挙動の現地計測とその一考察，第15回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.43-44，1996。

(1999年4月23日受付)