

不飽和地盤での雨量・温度・サクシヨンの計測と 北村モデルによる浸透・蒸発挙動のモデル化

IN SITU MEASUREMENT OF UNSATURATED SOIL AND MODELING FOR HEAT TRANSFER AND SEEPAGE

松崎陽介¹・宮本裕二²・北村良介³

Yohsuke MATSUZAKI, Yuji MIYAMOTO, Ryosuke KITAMURA

¹鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)
E-mail: k1539006@kadai.jp

²鹿児島県始良・伊佐地域振興局建設部 (〒899-5212 鹿児島県始良郡加治木町諏訪町 12)
E-mail: miyamoto-yuujii@pref.kagoshima.lg.jp

³鹿児島大学工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)
E-mail: kitamura@oce.kagoshima-u.ac.jp

Key Words: *in situ measurement, suction, heat transfer, unsaturated-saturated permeability coefficient*

1. はじめに

温暖化の影響と考えられる干ばつ, 豪雨, 台風等による自然災害が世界各地で発生している. 日本においてもここ 10 年余 温暖化が影響していると推測される豪雨災害が各地で発生している¹⁾ 松尾ら²⁾は降雨による斜面崩壊を予測するためのシステムを提案した. 本システムは現地で計測される雨量, 地中温度を入力データとして計算されるサクシヨンより斜面の安定性を評価しようとするものである. 本システムにおける雨水の地盤への浸透挙動の解析には KITA-RP モデル³⁾を用いている.

本論文では, 鹿児島県始良郡蒲生町での現地計測システムの計測結果と宮本ら⁴⁾が提案している KITA-RP モデルを用いた伝熱・浸透モデルによる数値実験を比較・検討することにより提案モデルが実地盤の伝熱・浸透挙動

を定量的に評価できることを明らかにしている.

2. 現地計測装置

図-1 は現地計測装置の概略図である. 現地計測装置設置の目的は, 原位置における地盤内の浸透・蒸発挙動を把握することである. 本装置の基本構成は間隙水圧 (サクシヨン) を計測するテンシオメーター (20,40,60,80cm の深さに計 4 本), 転倒ます式雨量計, 温度計 (0,10,20,30,cm の深さに計 4 本) である. 計測データは, 携帯電話を介して研究室のパソコンに回収されている. テンシオメーターのセンサ・水タンク部の防水, 温度変化抑制の目的から断熱カップで覆い保護している. 表-1 に現地地盤の土質特性を示す.

図-2 は鹿児島県始良郡蒲生町での計測結果である.

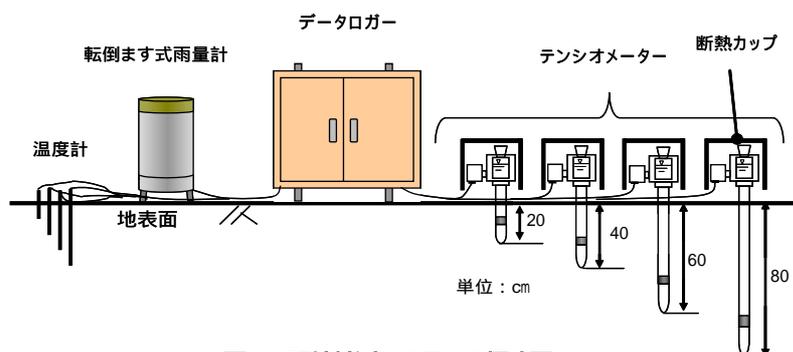


図-1 現地計測システムの概略図

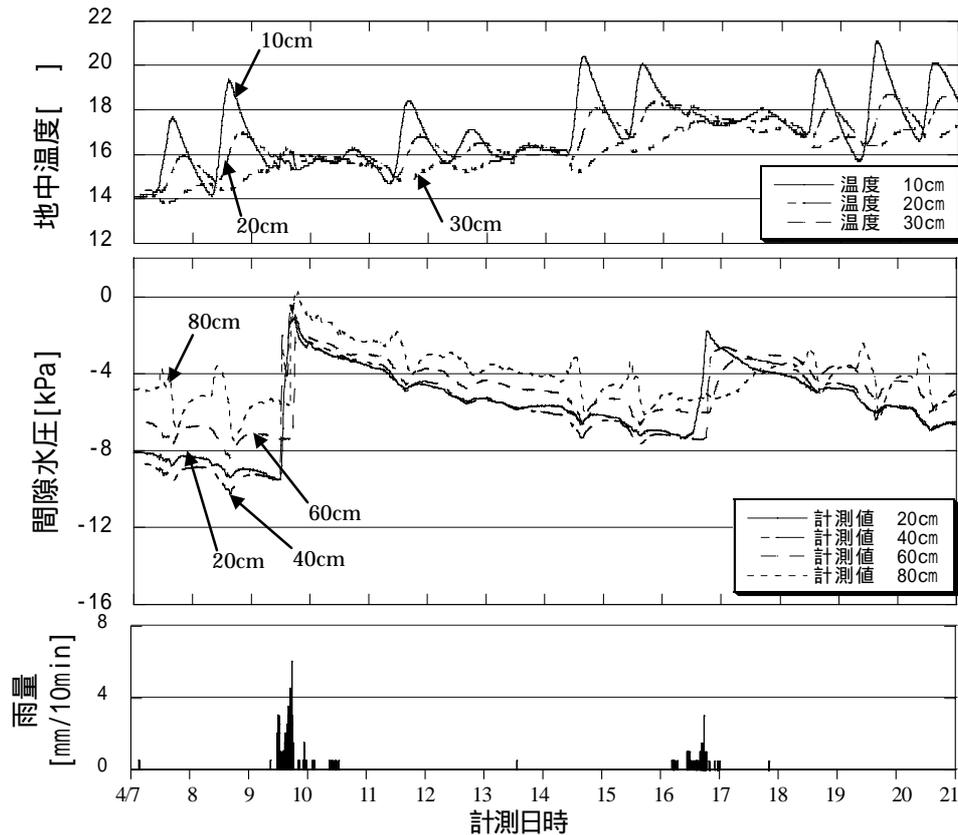


図-2 現地計測結果 (2008/4/7 0:00~2008/4/21 0:00)

表-1 現地の土質特性

土粒子密度 [g/cm ³]	湿潤密度 [g/cm ³]	乾燥密度 [g/cm ³]	間隙比	自然含水比 [%]
2.66	1.47	1.17	1.27	25.3

温度データは，地表面からの深さが浅いほど日周期的な気温変化の影響が大きく見られる．また，各深さで温度変化に位相の違いが見られる．

4月9日，16日の降雨により地表面からの深さが浅い深さ20cmのほうから間隙水圧が上昇し，間隙水圧の最大が深さ80cmで0.2kPaである．無降雨期間では各深さで間隙水圧が徐々に減少している．これは，日射や植生によって間隙水が地表面から蒸発していることや，間隙水の鉛直上方向への移動が考えられる．また，無降雨時に間隙水圧が日周期的に変動しているが，これは地中温度の変化に対応している．

3. 数値力学モデル

(1) KITA-RP モデル⁴⁾

図-3(a)は数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-3(b)のように間隙部分を管径 D ，傾き β の

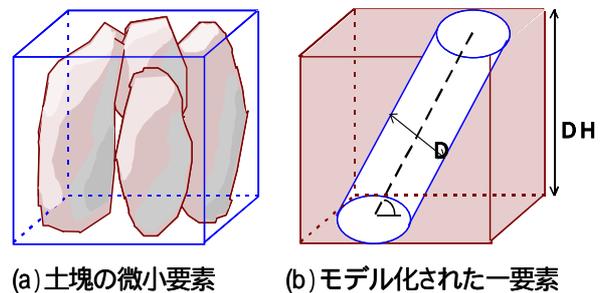


図-3 KITA-RP モデル⁴⁾

円管に，土粒子実質部分を円管以外の不透水部分にモデル化した．図-3(b)に示すモデルに力学的・確率的考察を加えることによって，土塊の間隙比 e ，体積含水率 θ ，サクシオン s - 関係，不飽和飽和透水係数 k_w - 関係が次のように導かれる．

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

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

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

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

ここに、 V_p : 円管の体積、 DH : 素体積高さ、 V_s : 素体積全体の体積、 $P_d(D)$: 管径 D の確率密度関数、 $P_d(\theta)$: 円管の傾きの確率密度関数、 h_c : 圧力水頭、 T_s : 表面長力、 θ : 毛細管と水の接触角、 μ_w : 水の粘性係数、 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) 伝熱・浸透モデル

宮本ら³⁾が提案している現地を想定した鉛直一次元での地盤の蒸発を考慮した伝熱・浸透挙動の数値力学モデルにより数値実験を行った。実地盤に対応した模式図を図-4に示す。

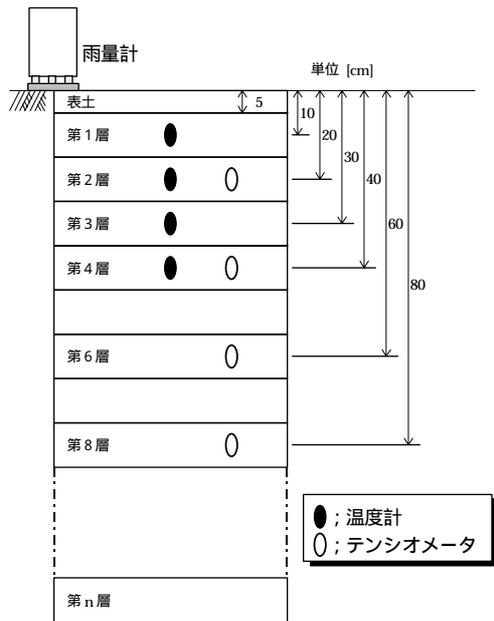


図-4 鉛直一次元地盤の模式図

数値実験手順のフローチャートを図-5に示し、各項目について説明する。

表-2の地盤条件を入力する。初期値として、現地での計測温度を入力する。深さ40cm以深の層では、深さ40cmと同温を入力する。また、サクシオンの初期値として現地計測データを与え、その他の深さの各層では、20cmのサクシオンから間隙水が移動しない動水勾配を計算し、飽和領域の間隙水圧は静水圧とする。北村モデルより水分特性曲線を算定し、各層の飽和度を計算する。地表面は熱移動および降雨浸透、蒸発による排水が可能であり条件に応じて設定する。

現地計測の雨量、深さ10cmの温度を与える。

熱伝導率は飽和度、間隙比から換算、熱流量は熱伝導方程式、間隙流体の移動量により各層毎に計算する。

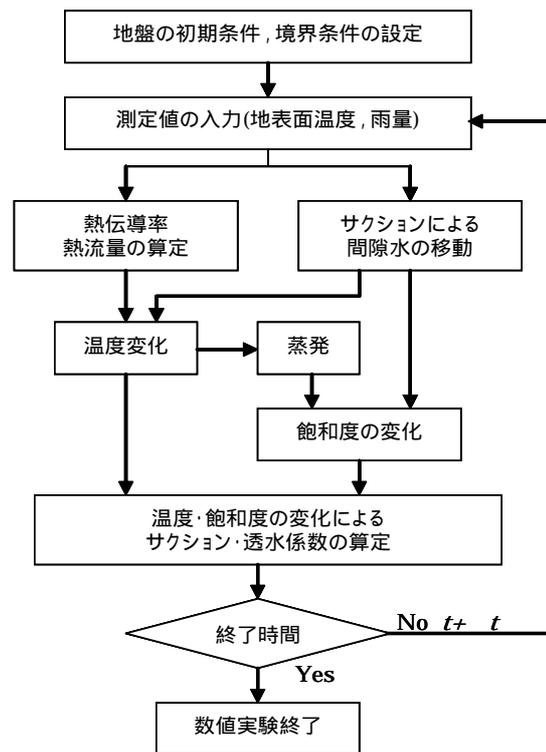


図-5 数値実験手順のフローチャート

表-2 地盤条件

層数	30
面積 [cm ²]	100
層厚 [cm]	10
間隙比	0.90
土粒子の密度 [g/cm ³]	2.66
土粒子の比熱 [J/(g・K)]	0.8
土粒子の熱伝導率 [W/(m・K)]	0.15

各層の温度、飽和度と間隙モデルによりサクシオン、透水係数を算定し、ダルシー則に従って間隙流体の移動量を算定する。

温度変化は、熱伝導率、温度の異なる層間での間隙流体の移動による温度変化を計算する。

潜熱による蒸発モデル⁴⁾により蒸発量を算定する。

$$\Delta V_w = \frac{q_{pt}}{\rho_w \cdot Q_w} \quad (5)$$

ここに、 V_w : 蒸発量、 Q_w : 蒸発潜熱、 q_{pt} : 日射の地表面への熱流量

サクシオンおよび蒸発による間隙流体の移動後による各層の飽和度を算定する。

上に示した、により計算した各層の温度・飽和度の変化を重ね合わせてサクシオン、透水係数を計算する。

4. 実験結果

図-6 に粒径加積曲線の実験値と KITA-RP モデルによる計算値を示す。計算値は最小二乗法を用いた回帰分析後の近似曲線を表示している。図-7 に水分特性曲線の保水性試験(水頭法)で得られた実験結果と計算結果を示す。図より実験結果と計算結果はほとんど一致していると判断できる。図-8 に体積含水率 - 不飽和・飽和透水係数の関係を示す。飽和透水試験から得られた一つの実験データしかないため計算結果との比較が困難である。今後、不飽和透水試験を実施して不飽和透水係数の実験データを得ると共に実験値と計算値を再度検討する必要がある。

図-9 は、図-2 に示す 2008 年 4 月の現地計測結果に対応する伝熱・浸透モデルによる数値解析結果である。深さ 20cm, 30cm の温度変化は地表面に近いほど大きく、日周期的な変動を示しており、各深さで位相が数時間程度ずれている。これは各層で温度差による熱の移動が起きているためである。間隙水圧は、降雨時に深さが浅いほうから上昇している。これは、降雨により地表面から鉛直下方向に間隙水が移動しているためである。無降雨期間では間隙水圧は各深さで徐々に減少していき、深さ 80cm が最大となっている。

図-10 に降雨前後の現地計測結果と伝熱・浸透モデルによる数値解析結果の間隙水圧の比較を示す。降雨時の間隙水圧の増加(正の方向)について、どの深さにおいても計算結果が計測結果より変化が大きいことがわかる。また、降雨終了後の間隙水圧の減少(負の方向:サクシヨンの回復)についても計算結果が計測結果より変化が大きい。これは、図-8 の透水試験結果と同様に不飽和・飽和透水係数の計算値が実地盤の値より大きいことが推測される。無降雨時の計測結果には日周期による間隙水圧の変動が見られ、テンシオメーターによる測定誤差⁶⁾も含まれるが、温度の日周期の変化と対応しており日射や植生による蒸発散であると考えられる。

図-10(a)と図-10(b)は、降雨強度の違いによる間隙水圧の挙動を比較している。図-10(a)(降雨強度が強い場合)では、降雨直後の間隙水圧が計測結果では深さ 80cm が最大となっているが、計算結果では深さ 20cm が最大となっている。これは、伝熱・浸透モデルでは鉛直一次元

方向の蒸発・浸透が考慮されているが、実地盤では、現地の地盤状況にもよるが、水平方向からの間隙水の流入・流出があるためだと考えられる。図-10(b)(降雨強度が弱い場合)では、計算結果が計測結果より変化が大きいが、各深さでほぼ同じ挙動を示している。

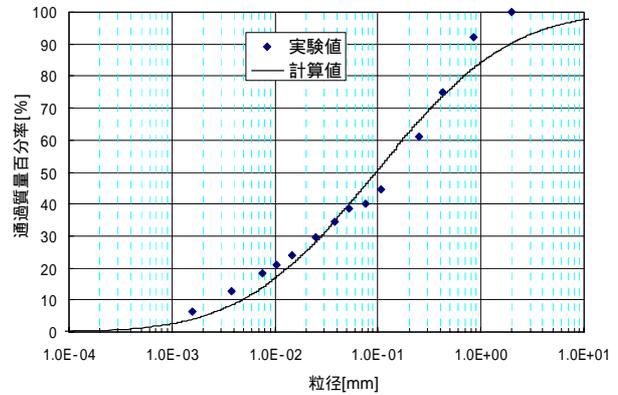


図-6 粒径加積曲線(アカホヤ)

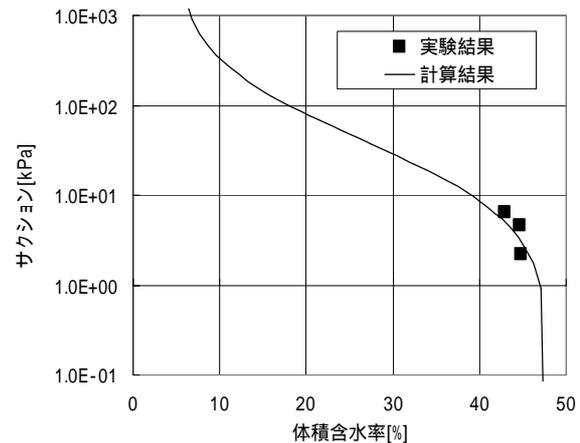


図-7 s-h 関係(水分特性曲線)

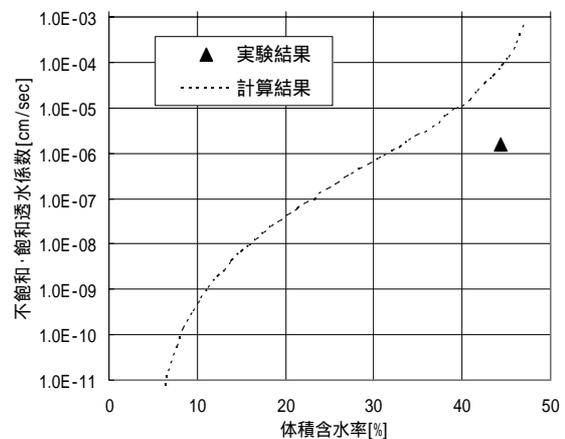


図-8 k_r - 関係

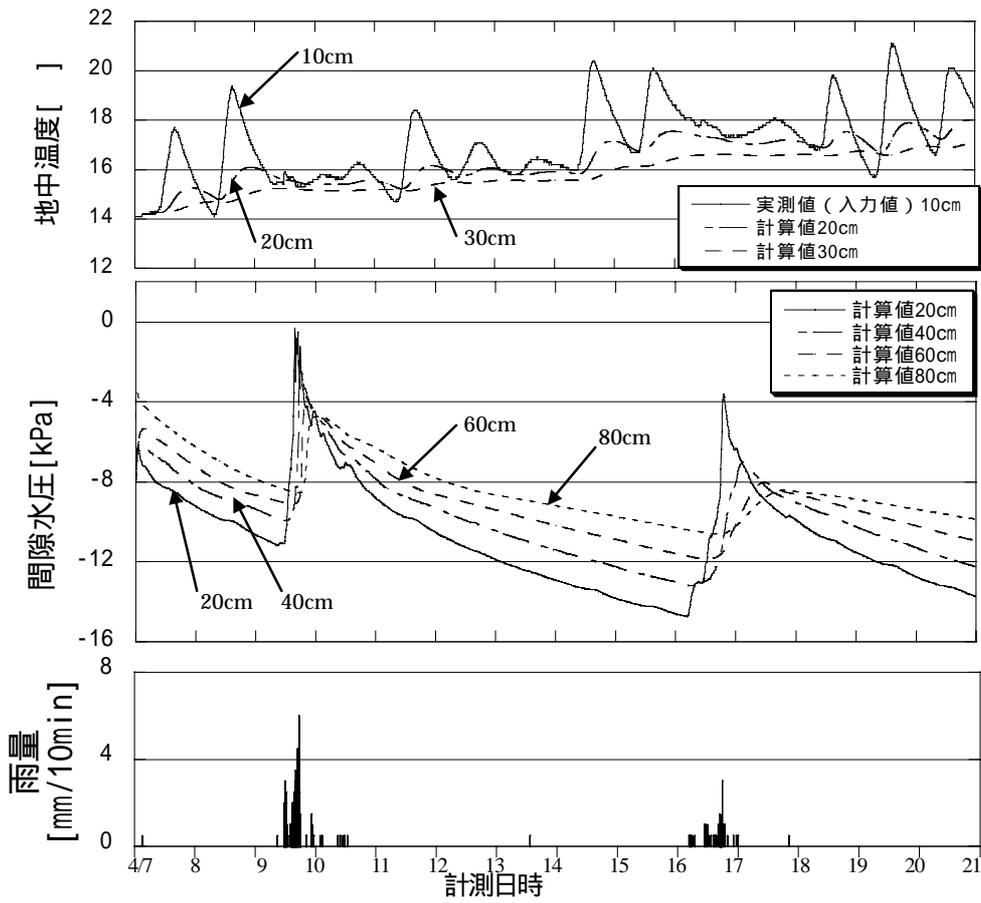
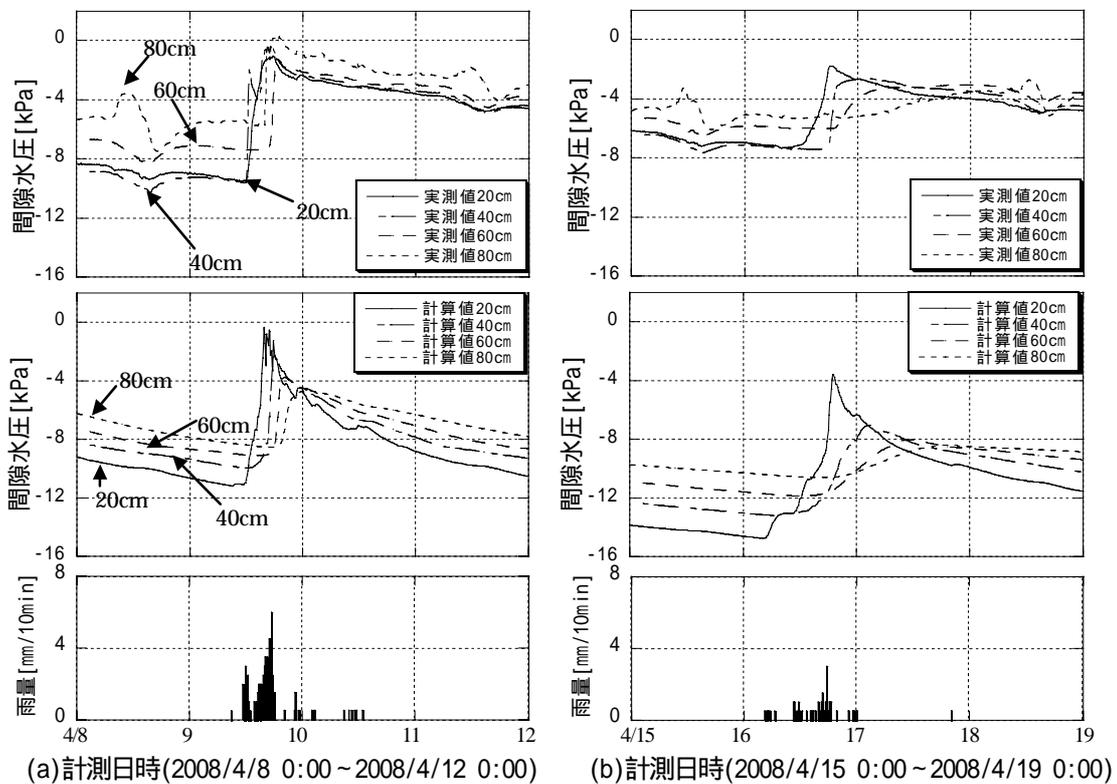


図-9 数値実験結果 (2008/4/7 0:00~2008/4/21 0:00)



(a)計測日時(2008/4/8 0:00~2008/4/12 0:00)

(b)計測日時(2008/4/15 0:00~2008/4/19 0:00)

図-10 間隙水圧の実測値と計算値の比較

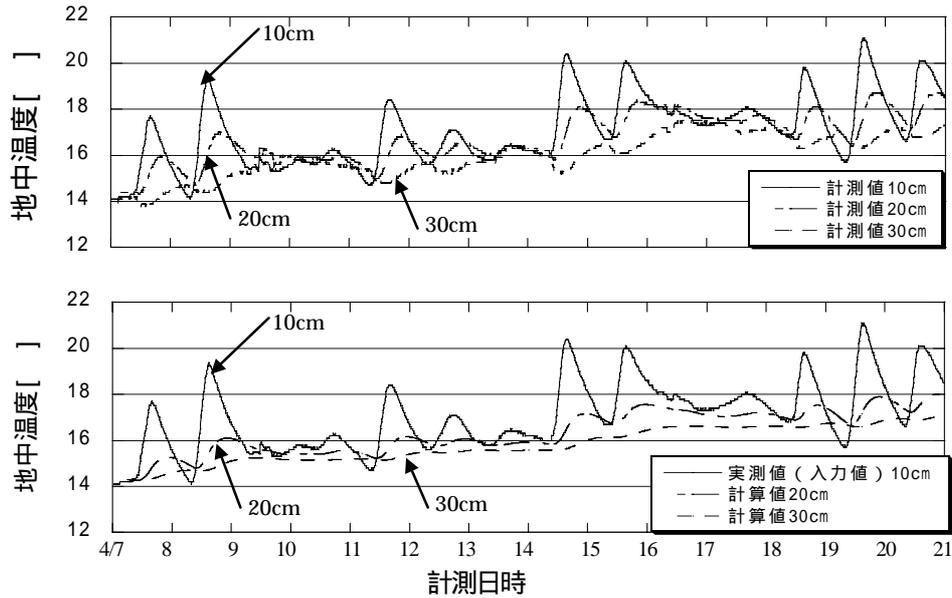


図-11 温度の実測値と計算値の比較 (2008/4/7 0:00~2008/4/21 0:00)

図-11 は地中温度の現地計測結果と数値解析結果の比較を示す。図-11 より計測結果と計算結果はほぼ一致していることがわかる。これより、本モデルが地盤の伝熱・浸透挙動をほぼ定量的に評価できていることがわかる。

5. おわりに

本論文では、現地計測システムにより実地盤の雨水浸透挙動及び温度を経時的に把握する共に不飽和地盤での北村モデルを用いた伝熱・浸透挙動のモデル化及び数値実験について現地計測結果と比較し、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した。今後は、数値力学モデルの精度の向上、斜面崩壊予知の適用等への活用を検討していきたいと考えている。

謝辞：本研究に対し、科研費（基盤（A））の援助をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 北村良介：総説 降雨時の斜面モニタリングと崩壊予測技術の現状，土と基礎，Vol.55, No.9，pp.1-3, 2007.
- 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（日本自然災害学会誌），第21巻1号，pp.25-33，2002.
- 3) 北村良介：地圏シミュレーター構想と北村モデル，第63回土木学会年次学術講演会（部）2008。（印刷中）.
- 4) K. Sako and R. Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol. 46, No. 5, pp. 595-604, 2006.
- 5) 宮本裕二・酒匂一成・島田龍郎・北村良介：不飽和シラス地盤での蒸発を考慮した伝熱・浸透挙動のモデル化，土木学会応用力学論文集，Vol.5，pp.481-490，2002.
- 6) 宮本裕二・北村良介：テンシオメーターによるサクシオン計測誤差に関する一考察，土木学会第53回年次学術講演会概要集共通セッション，pp.2-3，1998.

(2008. 5. 16 受付)