熱・浸透連成解析の適用による道路健全性評価手法の開発

関西大学　正会員　大西　有三
国道交通省近畿地方整備局和歌山河川国道事務所　西野　直均
アーステック東洋　正会員　○中井　卓巳
国際航業　田中　貴人
水文技術コンサルタント　正会員　高橋　健二

１．はじめに

道路斜面の豪雨時の健全性を評価する指標は，降雨量にはじまり，変位量・地下水位・湧水量・土壌水分量等多岐にわたる．本論文では，究極的な指標として「ばらまき型」地中温度の計測により，簡易で網羅的な斜面健全性評価が可能になるとして，システムの開発と検証を行った．斜面上部に設置した監視システムで，不飽和内の地中温度，土壌水分量の動態を観測し，降雨浸透動態挙動を基本的資料とした地中温度に着目した監視・評価システムとすることで，豪雨時における斜面の安定性評価の実証実験を行った．

２．実証実験の概要

実証実験は国道 42 号線に面した斜面で実施した．**図-1** に示すように，既往斜面が不安定化した法肩分で地中温度・土壌水分を計測しインターネットを通じてホームページで関係者がリアルタイムで閲覧可能なシステムとした．**写真-1** に計測部とデータロガー/モバイル回線部の設置状況を載せた．

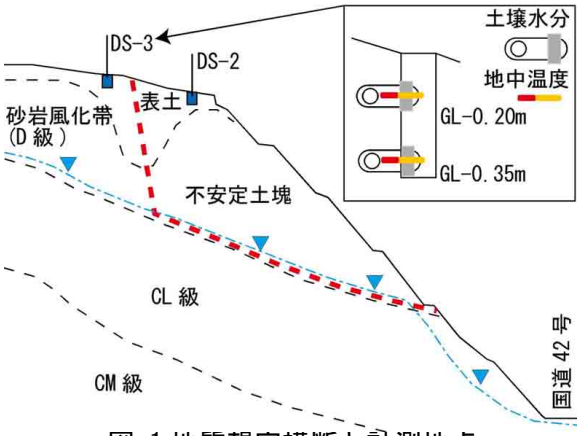

図-1 地質想定横断と計測地点

写真-1 計測器設置状況

３．熱・浸透連成解析を適用した計測の適用性実証

数値解析法により再現性を解明した．解析には，不飽和浸透-熱連成解析を使用した．土壌の熱物性は間隙率を考慮し，固体部と液体部の伝導率と熱容量を合成することで等価熱伝導率と等価熱容量を求め，熱伝導率は帯水層部と不透水層部，熱分散は近似分散長として流速と乗じることで熱分散率を表現した．また，熱分散率は帯水層部の等価熱伝導率の和を帯水層の見掛け熱伝導率として分散を考慮し，以下の保存則をベースに有限要素法により計算した．質量保存則は**式-1**，運動量保存則は**式-2**，エネルギー保存則は**式-3** に示す．

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^{\ \alpha} E_\alpha\right)=\varepsilon_\alpha \rho^\alpha Q_\rho^\alpha \qquad \text{式-1}$$

$$v_i^\delta+\frac{k_{ij}^\alpha}{\varepsilon_\alpha \mu^\alpha}\left[\frac{\partial p^\alpha}{\partial x_j}-\rho^\alpha g_j\right]=0 \qquad \text{式-2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha E_\alpha\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\varepsilon_\alpha \rho^\alpha v_i^{\ \alpha} E_\alpha\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(j_{iT}^\alpha\right)=\varepsilon_\alpha \rho^\alpha Q_T^\alpha \qquad \text{式-3}$$

ここに，ε：間隙率，ρ：密度，v：流体速度，k_{ij}：浸透テンソル，μ：粘性係数，p：圧力，g：重力加速度，Q ：質量発生項 ，E：内部エネルギー 、j_{iT}：熱フラックス，Q_T ：熱量発生項で表される．

４．解析結果

(1) 入力降雨波形と解析モデル

キーワード　降雨浸透，土壌水分移動，地中温度，熱・浸透連成挙動，斜面安定
連絡先　〒601-1374　京都市伏見区醍醐西大路町 44-32　(株)アーステック東洋　ＴＥＬ075-575-2233

2016 年 7 月以降の計測データのうち，本解析における検討期間は 9/18～9/22 の 4 日間とし，同期間中には 40mm/h を超える集中降雨も確認され，解析に適用した入力降雨波形は，時刻歴付き降雨強度を入力降雨値とした．**図-2** には法面表層から 0.5m×0.8mの解析モデル領域を示し，地表面に降雨境界条件を設定しており，表は計測値と同定後の熱，浸透のパラメータを示す．

(2) 計測値による検証計算

図-3 には連成解析による降雨時の地中温度と土壌水分量変化を示した．最上段は降雨強度，中～下段は斜面表面から深さ 0.35mまでの深度毎の土壌水分量と地中温度を示す．土壌水分量は，9/20 の降雨で 10%程度の増加が発生し，浅層ほど降雨波形に準じ，0.35m 深さでは降雨波形は緩慢な変動として伝播されている．透水性が大きい場合は急激な増加はないが，地下深部への水分移動が盛んになっていることが予測され，下方まで累積降雨は関与し，先行降雨が重要な評価基準となる．

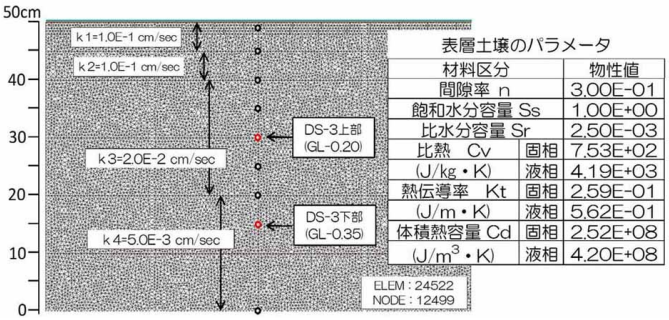

図-2 解析モデルと固相・液相の物性値

図-4 は地中温度と土壌水分量の解析値と計測値の比較を示す．最上段は降雨強度であり，上層位置（0.20m）と下層位置（0.35m）での地中温度，および上層位置と下層位置における土壌水分量を比較して示す．両計測値とも，降雨前の平衡状態から降雨発生と伴に地中温度の低下と土壌水分量の増加が認められ，現況の浸透過程を再現している．

さらに，0.20mと 0.35mの深度特性も再現されており，表層崩壊等の浅層における降雨浸透挙動が地中温度，および土壌水分量で把握できる可能性が推察できた．

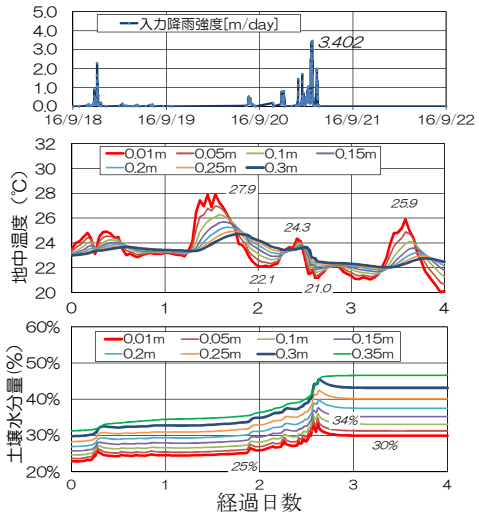

図-3 降雨時の土壌水分量と地中温度

5．まとめ

(1) 斜面安定性につながる降雨浸透挙動について考察するため，熱・水分流動連成モデルを定式化し，実斜面に適用した．その結果，熱・水分の同時移動を表現できることが示された．

(2) 豪雨時の地中温度と土壌水の移動の関係によると，表層土壌中のさまざまな地中温度変化は，土壌の保水形態にもとづく水の移動形態を反映したものである．現場計測データでの定量的な再現性が確認され，降雨浸透挙動に関する有効性も認められた．

(3) 斜面の勾配が雨水浸透特性に与える影響、および降雨波形の違いが地盤の雨水浸透特性に与える影響についても調べる必要がある．この際，降雨強度変化の時間微分の変化量としての降雨加速度の概念を用いることが有効であると考えられる．

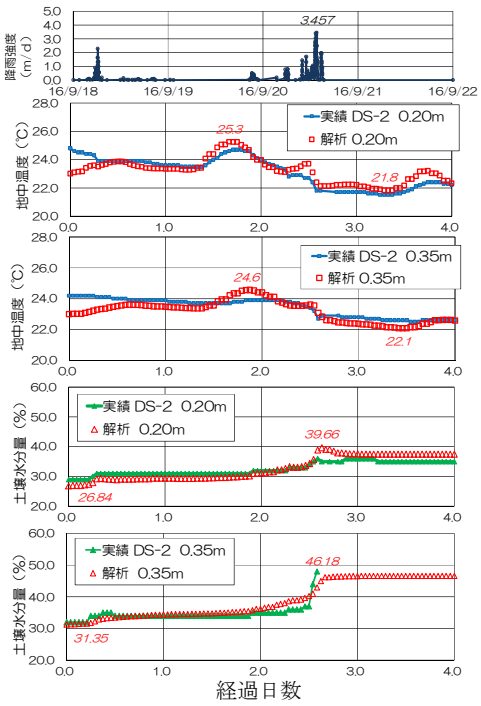

図-4 地中温度と土壌水分の観測値と計算値の比較

参考文献

1) Van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil. Sci. Soc. Am. J. pp892-898.