## 原位置計測および浸透流解析による 斜面安定性評価に関する一考察

福岡 知弥1\*・宮崎 祐輔1・小山 倫史2・藤本 将光3・藤原 照幸4・岸田 潔1

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂C1)
<sup>2</sup>関西大学 社会安全学部(〒569-1098大阪府高槻市白梅町7-1)
<sup>3</sup>立命館大学 理工学部(〒525-8577 滋賀県草津市野路東一丁目1-1)
<sup>4</sup>地域地盤環境研究所(〒540-0008大阪市中央区大手前二丁目1-2)
\*E-mail: fukuoka.tomoya.87z@st.kyoto-u.ac.jp

筆者らは道路斜面に施される対策工効果を土砂災害危険基準線(CL)に組み込むため,浸透流解析及び円 弧すべり解析を組み合わせた斜面安定解析を行っているが,実際の現地の地盤内の水分状況を把握し,事 前通行規制基準を考案することが望ましい.計測結果と浸透流解析結果の比較から,飽和度上昇時の応答 は計測結果とよく一致するが,飽和度下降速度は実測より解析の方が速いことが分かった.そのため,浸 透流解析と円弧すべり解析を組み合わせた本手法により道路用CLを作成する場合,降雨後の安全率の回 復速度が危険側に評価されている可能性があると考えられる.

Key Words : in situ measurement, seepage flow analysis, soil moisture, evaluation of reinforced slope

#### 1. はじめに

一般国道の事前通行規制を高度化するため,斜面内の 水分量を考慮可能な土砂災害警戒情報のコンセプトを用 いることが検討されている<sup>1)-3)</sup>.土砂災害警戒情報は, 土壌雨量指数と 60 分間積算雨量により描かれるスネー ク曲線と,土砂災害発生危険基準線(CL)との関係から 発令される情報である.土砂災害発生危険基準線は自然 斜面を対象として設定されている.一方,道路斜面には 対策工が施されているため,この対策工効果を土砂災害 発生危険基準線に組み込み,更新する必要がある.更新 手法の一つとして,年月を要しない点において優れてい る数値解析を用いた更新手法が挙げられる.筆者ら<sup>40</sup>は, 浸透流解析および円弧すべり解析を組み合わせた斜面安 定解析により,土砂災害発生危険基準線の更新を検討し ている.しかし,現地の地盤内の水分状況を把握したう えで,通行規制基準を考案することが望ましい.

今回,解析対象とした国道9号観音峠地区の道路斜面 においては、実際の地盤内の降雨浸透挙動を確認するた め、地下水位、降雨量、土壌水分量をそれぞれ計測して いる.そのため、検討した解析モデル上での降雨浸透挙 動と、計測から得られる実際の地盤内の降雨浸透挙動の 比較・検討が可能である.

本研究では、計測開始以降に確認された降雨イベント

を用い,実測と解析手法による地盤内の降雨浸透挙動を 比較し,これらの違いが斜面安定性評価に及ぼす影響を 考察した.

#### 2. 原位置計測と解析条件

#### (1)現場の地質的特徴と斜面の地質区分

本研究で対象とした斜面は,京都府国道9号南丹市園 部町上小崎〜船井郡京丹波町新水戸の異常気象時通行規 制区間内(総延長4.0 km)に含まれる斜面である.この 規制区間の通行規制基準は連続雨量で230 mmであり, 解除基準については2 mmh以下の降雨が3時間以上継続 した場合である.斜面に対しては,重力式擁壁やのり枠 工などによる対策工が施されている.

本研究で対象とした斜面の地質区分を図-1に示す.こ の斜面は、近畿地方に広く分布する丹波層群と呼ばれる 地質帯に含まれており、石炭紀からジュラ紀にかけての 堆積岩岩盤からなる.対象斜面内の地層は、地表面側か ら崖錐性堆積物層と頁岩層の2層から構成されており、 崖錐性堆積物層は巨大なチャート転石が混入している. 以後、この崖錐性堆積物層を表層土と呼ぶ.また、頁岩 層はCL級岩盤に分類されている.表層土の深度は、地 点によって1.0 mから4.5 mと大きく異なっており、表層 土以深は頁岩層となっている.

#### (2)原位置計測

近年の技術発展に伴い、斜面の現地計測およびその計 測データのリアルタイムでのモニタリングが可能となっ てきている.降雨に伴う通行規制を検討する際、現地の 地盤内の水分挙動を把握することは非常に重要である. また、原位置計測結果を反映して、通行規制基準・解除 基準を考案していくことが望ましい.

本研究で対象とする京都府国道9号沿いの斜面は,近 畿地方を代表する地質帯に含まれている.そのため,本 地点の計測結果から近畿地方の広域的範囲での水分挙動 の参考が可能であるため,地盤内水分挙動把握のため斜 面モニタリングが実施されている.計測モニタリングで は,雨量,土壌水分,地下水位の変動を捉えるためのシ ステム構築が行われている.

雨量、土壌水分量、地下水位の計測機器の位置関係を 図-1および図-2に示す.これまでの時間降雨を降雨強度 とする雨量計では、短時間に多量に降る雨の斜面安定性 への評価を的確に行えない可能性があり、斜面安定性を 評価する際は、リアルタイムでの降雨強度の観測も必要 とされる. そのため、本研究で対象とした斜面では、転 倒枡雨量計ではなく打刻型雨量計を導入している. 打刻 型雨量計は、転倒ます型雨量センサーにおいて所定の水 量(ここでは0.5 mm)の降雨が定量される毎に、ますの 転倒時刻を記録するものである.雨量計は、斜面上部と 山道との間に設置されている. 土壌水分量は、斜面上の 2地点(K-2地点とK-3地点)でそれぞれ,設置深度GL-0.3 m, GL-0.6 m, GL-1.0 mにおいて設置されている4種類の 土壤水分計 EC-5 (Decagon Devices Inc.製), WD-3 (株式会社 A·R·P製), ML3 (Delta-T Devices Ltd.製), CS655 (Campbell Scientific Ltd.製)によって観測されている. これらの計測 機器の計測原理はEC-5, WD-3, ML3, CS655, いずれも, 誘 電率水分計である.今回,4種類の土壌水分計が設置さ れているが、設置深度GL-1.0 mを観測しているのはML3 のみであるため、ML3を比較対象とした. ただし、K-2 地点設置深度GL-0.3 mは2020年9月時点で計測開始前であ った.地下水位は、斜面上の1地点で水位観測孔を用い て、設置深度GL-1.5 mで観測を行っている、土壌水分計 では、飽和状態に到達した際、その後の地下水位の変動 を観測できないため、水位観測孔による地下水の計測が 行われている.

#### (3)解析条件

#### a) 飽和・不飽和浸透流解析における支配方程式

飽和・不飽和浸透流解析の支配方程式は,以下の連続 式(1)とダルシー則(2)から導かれる式を不飽和領域まで 拡張した式(3)である.



$$-\frac{\partial\rho v_i}{\partial x_i} - \rho q = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_r n) \tag{1}$$

$$a_i = K_{ij} \frac{\partial n}{\partial x_i}$$
(2)

 $\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_r(\theta) \left( K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_i} + K_{i2}^s \right) \right\} - q = \{ \alpha S_s + \beta c(\psi) \} \frac{\partial \psi}{\partial t} (3)$ ここで, *i*=1,2(1:*x*,2:*y*),*ρ*:密度, *v*:流速, *q*:シンク/ ソース項, *S<sub>r</sub>*:飽和度, *n*:間隙率, *K*:透水係数, *h*:全水頭, *θ*:体積含水率, *ψ*:圧力水頭, *S<sub>s</sub>*:比貯留 係数, *c*(*ψ*):比水分容量, *α*:飽和領域=1,不飽和領域 =0, *β*:飽和領域=0,不飽和領域=1である.

#### b) 斜面モデルと境界条件および初期条件

本解析における解析モデルの作成では、両端および底面からの影響を考慮して、幅38m、高さ25mの領域を対象とし、図-1に示すように、解析モデルの地質区分、土質・岩質および地下水位を決定した.

解析モデルのメッシュ(要素総数1310,節点総数1401) および境界条件を図-3に示す.解析モデルの境界条件は, 水位観測孔により地下水面が観測されているため,斜面 上部の側線部に全水頭21.0m,下部側線部に全水頭5.25m, 重力式擁壁背面とその下部に全水頭6.30mの水頭固定境 界を設定した.斜面表面と路盤面状には降雨境界を設定 した.ここで,降雨境界とは境界上の節点に対し降雨強 度より求めた雨量を流量固定として与えるものである.



	表-1	地盤パラメータ	
地盤		表層土	頁岩層
透水係数[m/s]		5.0×10 <sup>5</sup>	5.0×10 <sup>8</sup>

地表面の節点が不飽和状態(圧力水頭 $\varphi < 0$ )の場合に は降雨強度を流量とし、地表面の節点が飽和状態(圧力 水頭 $\varphi = 0$ )の場合には流入を防ぐ条件となっている. また、斜面下部にはのり枠工が、重力式擁壁内には排水 工が存在するため、斜面表面の一部と擁壁内の空洞部分 には浸出面境界を設定した.ここで、浸出面境界とは境 界が水面以下になった場合に、圧力水頭を0とする境界 である.道路側方の擁壁表面と斜面底面は不透水境界と した.

本研究で実施した浸透流解析における初期条件は,計 測結果から得られる斜面内の飽和度をもとに設定した. ここで,計測によって得られる飽和度(土壌水分量)を 直接解析斜面内に与えることはできないため,一定の降 雨を与えおおむね計測値と合うように初期の飽和度を与 える.原位置計測で述べたように,対象とした斜面では 計測機器ML3によって5点の飽和度が計測されている. この計測5点の位置と対応する解析モデル上の地点の飽 和度が近い状態から解析を行った.ここで,原位置計測 では斜面内の面的な飽和度はわからないものの,5地点 が計測状態と近い状態であれば斜面全体も同様に計測値 と近い値であるとし,また,5地点のすべてが一致しな い場合は,転石や動物等の影響を受けづらいと考えられ る深部の値が一致することを優先とした.

#### c) 地盤物性値

本解析で用いた地盤パラメータを表-1に示す.表層土 においては、定水位透水試験が行われているため、その 結果から表層土の飽和透水係数を5.0×10<sup>5</sup> m/sとした. 一 方, 頁岩層の飽和透水係数は, 透水係数が低いと予想さ れるため、文献の値を参考に5.0×108 m/sとした5. また、 本解析で用いた不飽和浸透特性を図-4に示す.一般的に は、不飽和浸透特性は要素試験をもとに設定するという ことを行わない、本解析でも同様に、要素試験を行わず 既往文献をもとに設定する.本研究では、表層土につい ての不飽和特性に関する試験を行っていない. 表層土に 関しては、李ら<sup>®</sup>の研究に基づき、図-4 (a)のように設定 した. 李らは, 既往の文献より Carsel and Parrish<sup>7</sup>と van Genuchten<sup>81,9</sup>が求めたパラメータを基礎データとして, 地盤材料の透水係数で分類し、不飽和浸透特性を設定し ている.本研究では、この不飽和浸透特性の関係をもと に設定する.また、頁岩層(CL級岩盤)については、 図-4 (b)のようにWu, et al.<sup>10</sup>の論文をもとに直線関係で設 定した.

#### 3. 結果と考察

本解析では、斜面内の降雨浸透挙動について解析と実 測の応答を比較することを目的としている.そのため、 本研究では、原位置計測の開始以降で斜面内の降雨が十 分浸透すると考えられる降雨イベントに着目することと した.ここで、降雨イベントとは、降雨の開始前後にお いて無効降雨時間が24時間以上継続したものを指す.そ こで、雨量計の降雨データと土壌水分計の応答を確認し、 斜面内に降雨が浸透したと考えられる2020年9月24日か ら27日までに発生した2 mm/hを超える降雨イベントを抽 出した.この降雨イベントについて、土壌水分実測と解 析手法による地盤内の降雨浸透挙動の違いを検討した. 本期間では、9月25日から25日夜までの連続した降雨と9 月26日夕方の降雨の2つの降雨が発生した.以後、9月25 日から25日夜までの降雨を1回目の降雨、9月26日夕方の 降雨を2回目の降雨とする.

図-5に、本降雨でのK-2地点及びK-3地点の土壌水分量 の計測結果と浸透流解析結果による斜面内の飽和度の経 時変化を示す.ここで、K-2地点の設置深度GL-0.3 mの 土壌水分計については、設置前の電圧値を示しているた め、考察から除くこととする.なお、今回、計測および 解析において地下水の変動は見られなかった.

1回目の降雨では、計測結果と浸透流解析結果に多少の差はあるものの、降雨の開始に伴って飽和度が立ち上がるタイミングが一致していることが確認できる.これは、斜面内の飽和度の初期状態を計測結果に基づき設定



したことで、降雨開始時の雨水の浸透状況が再現できているためと考えられる.本研究以前では、浸透流解析の初期条件は降雨情報のみを用いて設定していたが、実際の解析開始時の地盤内の飽和度分布は不明であった.本 解析のように、初期状態を土壌水分量の計測結果から設定しいくことが非常に重要であると考えられる.

また,計測結果では深さ方向に進むにつれ,降雨による地盤の飽和度の上昇タイミングが遅れている.この点から,本研究で対象としている斜面では降雨に伴って表層土表面から降雨が浸透し,斜面深さ方向に進行することで斜面内の飽和度が上昇していくことがわかる.浸透流解析結果においても,K-2地点とK-3地点ともに,深さ方向に進むにつれ飽和度の上昇タイミングが遅れていることが確認でき,降雨の地中への浸透は比較的モデル化できていると考えられる.

1回目の降雨に伴う飽和度の上昇タイミングは一致している一方,計測結果と浸透流解析結果ともにK-2地点とK-3地点それぞれで飽和度の上昇タイミングは異なっ

ている. K-2地点では,設置深度GL-0.6m,GL-1.0mと深さ 方向に進んでいくにつれ上昇タイミングは遅くなるもの の,3深度での上昇タイミングの差は小さい.一方,K-3 地点では,設置深度GL-0.3m,GL-0.6m,GL-1.0mと深さ方 向に進んでいくにつれ飽和度の上昇タイミングは大きく 遅れていることがわかる.

図-6に降雨開始直後の土壌水分計設置地点付近の流速 ベクトルを示す.対象斜面においては,表層土は透水性 が高い一方,表層土下の頁岩層は透水性が低い.そのた め,地表面より浸透した降雨は表層土と頁岩層の境界以 深は浸透することなく,斜面下方へと流下していく.流 速ベクトル図でも,境界部分において斜面下方への流速 が確認できる.また,表層土の層厚は約1.0 mから約4.5 mと幅広く分布している.K-2地点では,表層土が狭ま っていく地点に位置している一方,K-3地点は表層土の 層厚が広い地点に位置している.K-2地点は,表層土が 狭まっていく地点であるため,表層土間で斜面上方から の降雨が流れ込むことによって斜面内の飽和度上昇速度



が速いと考えられる.このように、1回目の降雨でのK-2 地点とK-3地点の飽和度上昇タイミングの差異は、斜面 の形状および表層土と頁岩層の透水性の違いによる斜面 内の降雨の浸透に起因する.

以上述べたように、今回の解析モデルにおいては、1 回目の降雨開始時およびその直後の地盤内の飽和度の変 化挙動の傾向はおおむね一致している.そのため、降雨 開始時とその直後は、浸透流解析を用いて斜面の地盤内 の降雨浸透挙動を評価することが可能であり、その浸透 流解析による飽和度分布を用いた斜面安定性評価が可能 であると考えられる.

一方,飽和度の計測結果と浸透流解析結果の違いとし て,降雨に対するそれぞれの反応性が見て取れる.浸透 流解析結果において,特に表層付近では,降雨の有無や 降雨量の変化に対する飽和度の応答が鋭敏である.一方, 原位置計測結果による斜面内飽和度の挙動は,降雨の発 生に伴う飽和度の上昇後,降雨が停止しても停止直後に 飽和度が急激に低下することなく,緩やかに減少してい ることがわかる.浸透流解析は解析条件で述べた支配方 程式に基づいて実行されている.そのため,降雨の有無 や降雨量変化から受ける影響が大きいと考えられる.ま た,土の不飽和浸透特性も計測結果と浸透流解析結果の 違いに起因する.今回は,解析上で設定された表層土の 保水性よりも,実斜面の保水性が大きかったと考えられ る. そのため,浸透流解析は計測結果に比べて,保水性 が小さく,降雨の減少および停止後に地中へ浸透した降 雨が斜面下方へ早く流下していったと考えられる.

また、降雨に対する反応性の違いの一つとして、2回 目の降雨に対する浸透流解析結果と 計測結果の違いも 挙げられる. 先ほど、1回目の降雨においては、計測結 果と浸透流解析結果の飽和度の上昇タイミングは比較的 一致していることが分かった.一方,2回目の降雨にお いて、表層十の浅層部分では、浸透流解析結果では飽和 度が大きく上昇している一方、計測結果においては、ほ とんど飽和度の変化は見られない.この違いは、2回目 の降雨開始時の飽和度の状態にあると考えられる. 図-5 より、計測結果においては、1回目の降雨による飽和度 上昇後, 飽和度はほぼ変化しないまま, 2回目の降雨を 迎えている、そのため、1回目の降雨後に各地点は飽和 度の減少が緩やかなまま、2回目の降雨が発生しており、 それ以上降雨が地層内へと浸透しずらい状態となってい る. そのため、飽和度の上昇が起きなかったと考えらえ る.一方,浸透流解析結果においては、降雨に対する鋭 敏な反応性から、1回目の降雨停止後に飽和度は低下し ている. そのため、2回目の降雨を迎えるときは、降雨 の地層への浸透性が高い状態であったため、2回目の降 雨によって飽和度が大きく変化したと考えられる.

原位置計測結果と浸透流解析結果を比較することで, 本研究の対象斜面において、降雨開始時とその直後にお いては、浸透流解析は地盤内の降雨浸透挙動の傾向を再 現できている.一方,降雨停止後の地盤内の水分挙動に は違いが生じるている.これら、降雨の前後における飽 和度挙動の違いは、浸透流解析結果を用いて行われる円 弧すべり解析を踏まえた斜面安定性評価<sup>11)</sup>に影響を及ぼ す. 降雨開始時とその直後は、飽和度挙動の傾向が一致 しているため、浸透流解析と円弧すべり解析に基づく本 手法による斜面安定性評価は、実測の斜面内の降雨浸透 挙動を考慮できていると言える.一方,降雨停止後,浸 透流解析においては飽和度下降速度が計測結果よりも速 い. そのため、浸透流解析結果を用いて斜面の安定性評 価を行うと実際の斜面状況よりも安全率の回復を早く判 定する結果となり、 危険側の評価をする可能性があると 考えられる.以上から本研究で対象としている斜面では、 降雨開始時とその直後における斜面安定性評価は浸透流 解析と円弧すべり解析を組み合わせて行うことが可能で ある一方、安全側の評価のため浸透特性の改善が必要と 考えられる.

#### 4. おわりに

本研究では、斜面上での降雨の原位置計測結果と浸透

流解析結果を比較し、地盤内の降雨の浸透挙動の差異か らそれぞれの斜面安定性評価を検討した.まず,降雨開 始時とその直後は計測結果と浸透流解析結果の飽和度上 昇タイミングは比較的一致していた. これは, 浸透流解 析の初期状態を計測結果をもとに設定したことで、1回 目の降雨発生時の降雨の浸透状態を再現できたためと考 えられる. また、2地点間の深度方向の飽和度上昇のタ イミングの違いは斜面の形状に起因するものと考えられ る.一方,降雨停止後は、計測結果では飽和度の低下は 生じないが、浸透流解析上では飽和度の急速な低下が特 に表層付近で見られた. これは、実斜面と解析モデルの 保水性の違いに起因すると考えられる。以上の比較結果 より、浸透流解析結果をもとに斜面安定性評価を実施し たとき、降雨開始時とその直後は実斜面の安定状況を再 現できる一方、降雨停止後は飽和度が実斜面よりも早く 低下するため、実際よりも安全率の回復を早く判定する 可能性があることが分かった.

謝辞:本研究は,新都市社会技術融合創造研究会プロジェクト(土壤水分を考慮した斜面監視システムの実装) の一部として実施された.記して謝意を表す.また,国 土交通省近畿地方整備局道路部の中川佳正様,国土交通 省近畿地方整備局京都国道事務所の尾下嘉春様にもご協 力を頂いた.記して謝意を表す.

#### 参考文献

- 小山倫史:降雨特性に応じた道路通行規制のあり方に関 する研究 研究成果報告書,国土交通省近畿地方整備局, 新都市社会技術融合創造研究会,2016.
- 2) 小山倫史,藤本将光,渡邊義裕,徳永 博,倉岡千都,

小林猛嗣,丸木義文,中井卓巳,安藤貴志:国道沿い斜 面を対象とした数値解析と実効雨量を組み合わせた雨量 通行規制基準の提案,土木学会第70回年次学術講演会講 演概要集, pp.449-450,2015.

- 鳥居宜之:事前通行規制区間の解除のあり方に関する研究 研究成果報告書,国土交通省近畿地方整備局,新都市社会技術融合創造研究会,2018.
- 4) 福岡知弥,宮崎祐輔,小山倫史,藤原照幸,岸田 潔: 道路斜面の対策工による土砂災害警戒基準線の更新を目 的としてた浸透流解析,地盤工学研究発表会,2021.
- 5) 土木学会:岩盤斜面の安定解析と計測, pp.87, 110, 116, 1994.
- 6) 李 圭太、小山倫史、大西有三、古川秀明、小林猛嗣: 越流を考慮した河川堤防の浸透破壊に対する応力―浸透 連成解析、地盤工学ジャーナル、Vol4,No.1,pp.1-9,2008.
- Carsel, R. F. and Parrish, R. S.: Developing Joint Probability Distribution of Soil Water Reetention Characteristics, *Water Resourr. Res.*, Vol.24, pp.755-769, 1988.
- Van Genuchten, M. Th.: A Closed-form Equation for Predictinf the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Sci. Ami. J.*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- Van Genuchten, M. Th. and D. R. Nielsen: On Describing and Predicting the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, *Ann. Geophys.*, Vol.3, pp.615-638, 1985.
- Wu, Y. S., Pan, L., and Pruess, K.: A Physically Based Approach for Modeling Multiphase Fractured Porous Media, *Advances in Water Resources*, 27(9), pp.875-887, 2004.
- 福岡知弥,宮崎祐輔,小山倫史,藤原照幸,中川佳正, 尾下嘉春,岸田 潔:浸透流解析と円弧滑り解析による 斜面対策工の評価と土砂災害危険基準線の一考察,原稿 受理,印刷中.

### DISCUSSION OF EVALUATION OF SLOPE STABILITY COMPARING IN SITU MEASUREMENT AND SEEPAGE FLOW ANALYSIS

# Tomoya FUKUOKA, Yusuke MIYAZAKI, Tomofumi KOYAMA, Masamitsu FUJIMOTO, Teruyuki FUJIWARA, Kiyoshi KISHIDA

The authors have conducted slope stability analysis using a combination of seepage flow analysis and circular slip surface analysis to incorporate the effects of reinforced slopes into Critical Line (CL). It is advisable to grasp soil moisture in the ground, and in this study, soil moisture was compared between measured and analytical methods. From the comparison, it is found that the response at the rise of saturation is in good agreement, but the rate of fall of saturation is faster in analytical results than in measured results. Therefore, it is considered that the recovery speed of the safety factor after rainfall may be evaluated to be on the dangerous by this meth, which is a combination of seepage flow analysis and circular slip analysis.