# 斜面表層部における雨水浸透の

# 原位置計測結果に基づく研究

## 平成 24 年 2 月 22 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

益田 浩

## 要旨

近年日本において,気候変動の一環ととらえられる局所的・短時間・ 高強度の集中豪雨,いわゆるゲリラ豪雨が多発し,それに伴う斜面災 害の発生頻度が増加しつつある.

豪雨による斜面災害に対する防災体制としては,時間降雨量と累積 降雨量を組み合わせた限界降雨包絡線を用いて通行規制を行う方法が 適用されてきた.しかし,ゲリラ豪雨がこれまで日本でほとんど観測 されていなかったことから,従来の時間降雨および累積降雨を判断指 標に用いることは必ずしも適切でないことが想定される.したがって, ゲリラ豪雨のような短期間集中豪雨が発生した際の,降雨浸透挙動と 斜面の安定性を適切に評価することが喫緊の課題である.

そこで、ゲリラ豪雨とスコールの降雨特性の類似性に着目し、カセ サート大学(タイ)との共同プロジェクトとしてタイ・ナコンナヨッ クにおいて降雨の斜面内部への浸透特性の原位置計測を、2007年9月 より実施してきた.

本研究では,原位置計測結果をもとにして得られる原位置における 土壌水分特性曲線の考察を行う.次に,得られた水分特性曲線もとに, 斜面の中腹部を対象に不飽和浸透流解析を実施することで,斜面表層 部における雨水浸透に関する考察を行う.さらに,蒸発散が斜面表層 部の浸透水の挙動に与える影響の検討を行う.

また,斜面表層部の浸透特性を反映した新しい土砂災害早期警戒体制の手法の検討を行う上では,すべり面付近への降雨の先行履歴効果の評価が必要となる.このことを踏まえ,新しく提案している修正先行履歴降雨指標 MAPIの適用性について検討を行う.

i

## 目次

| 目 次                           | ii  |
|-------------------------------|-----|
| 第1章 序論                        | . 1 |
| 1.1 研究の背景                     | . 1 |
| 1.2 研究の目的                     | . 1 |
| 1.3 本論文の構成                    | . 2 |
| 第2章 既往の研究                     | . 3 |
| 2.1 原位置計測                     | . 3 |
| 2.2 土壤水分特性曲線                  | . 4 |
| 2.3 室内試験結果                    | . 4 |
| 2.4 不飽和浸透特性                   | . 5 |
| 2.5 降雨履歴効果の検討                 | . 7 |
| 第3章 原位置計測                     | . 9 |
| 3.1 原位置斜面における土壌水分特性曲線に関する検討   | . 9 |
| 3.1.1 原位置斜面中腹部の土壌水分特性曲線       | . 9 |
| 3.1.2 土壤水分特性曲線の比較             | 11  |
| 3.2 全水頭からみる不飽和帯水分挙動           | 12  |
| <b>3.2.1</b> GL-1.0m以深の全水頭の挙動 | 13  |
| 3.2.2 蒸発散が浸透挙動に及ぼす影響          | 14  |
| 3.2.3 斜面内部での浸透挙動              | 16  |
| 第4章 不飽和浸透流解析                  | 17  |
| 4.1 van Genuchten式へのフィッティング   | 17  |
| 4.2 解析モデルの生成                  | 17  |
| 4.3 境界条件・初期条件の設定              | 18  |
| 4.4 解析結果と考察                   | 18  |
| 4.4.1 透水係数の検討                 | 18  |
| 4.4.2 解析結果                    | 19  |
| 第5章 改良先行履歴降雨指標MAPIに関する検討      | 22  |
| 5.1 先行履歴降雨指標 APIの概要           | 22  |
| 5.2 改良先行履歴降雨指標 MAPIの算定        | 23  |

|     | 5.2.1  | 改良   | 先行。   | 履歴   | 降雨指   | ₿標M. | API0 | り概要   | Ę.  |      |      |      | •••• | ••••        |      |       | 23 |
|-----|--------|------|-------|------|-------|------|------|-------|-----|------|------|------|------|-------------|------|-------|----|
|     | 5.2.2  | 既往   | の MAI | PIのi | 適 用 結 | 〒果   |      | ••••• |     |      |      |      | •••• | ••••        |      |       | 24 |
| 5.3 | 3 MAPI | と AP | Iの比   | 1較.  |       |      |      | ••••• |     |      |      |      | •••• | • • • • • • |      |       | 25 |
| 5.4 | 4 MAPI | と深   | 部の    | 間隙」  | 王の挙   | き動と  | : の柞 | 日関    |     |      |      |      | •••• |             |      |       | 25 |
| 5.5 | 5 斜面   | 表層   | 部の    | 水収き  | 支に関   | する   | 考察   | 荟     |     |      |      |      | •••• |             |      |       | 27 |
| 第6  | 5章 結   | ⊧論≵  | さよて   | び今往  | 後の月   | 展望   | •••• | ••••• | ••• | •••• | •••• | •••• | •••• | ••••        | •••• | ••••• | 29 |
| 6.2 | 1 本研   | 究の   | まと    | め    | ••••• |      |      | ••••  |     |      |      |      |      | ••••        |      |       | 29 |
| 6.2 | 2 今後   | の課   | 題     |      |       |      |      |       |     |      |      |      |      |             |      |       | 30 |

| 参 | 考 | 文献   | •••  | • • • • • | •••• | •••• | • • • • • | •••• | •••• | ••••    | • • • • • | • • • • • | • • • • • • | •••• | • • • • • • • | ••••  | ••••  | ••••• | •••• | • • • • • • | ••••  | 31 |
|---|---|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|---------|-----------|-----------|-------------|------|---------------|-------|-------|-------|------|-------------|-------|----|
| 謝 | 辞 | •••• | •••• | • • • • • | •••• | •••• | ••••      | •••• | •••• | • • • • | ••••      | ••••      | • • • • • • | •••• | • • • • • • • | ••••• | ••••• | ••••  | •••• | •••••       | ••••• | 32 |

## 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

近年,地球温暖化に伴う気候変動の一環ととらえられる局所的・短時間・高強 度の集中豪雨,いわゆるゲリラ豪雨が多発しており,それに伴う斜面災害の発生 頻度が増加しつつある.日本の地形的特色として,国土の大部分が急峻な地形か らなり,住宅地や道路が斜面に近接している場合が多いため,斜面災害時の被害 が拡大する可能性が高く,人的にも経済的にも被害が大きくなる傾向にある.

従来,豪雨による斜面災害に対する防災体制としては,図 1.1 に示すように, いわゆるスネークカーブと呼ばれる時間降雨量と累積降雨量(あるいは連続降雨 量)を組み合わせた限界降雨包絡線を用いて通行規制を行う方法が適用されてき た<sup>1)</sup>.しかし,ゲリラ豪雨がこれまで日本においてほとんど観測されていなかっ たことから,既往の時間降雨および累積降雨を判断指標に用いることは必ずしも 適切ではないことが想定される.ゲリラ豪雨のような短期間集中豪雨が発生した 場合,累積降雨量が少ないにも関わらず斜面崩壊が発生する場合があり,限界降 雨包絡線において警戒態勢を発令することが不可能となる.そこで,降雨量のみ ではなく,斜面における降雨浸透特性を反映した新しい土砂災害早期警戒体制を 検討することが喫緊の課題となる.そのため,短期間集中豪雨到来時の,斜面崩 壊の要因となる雨水の地盤内への浸透特性を検討する必要がある.

## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、ゲリラ豪雨を対象として集中豪雨に起因する斜面崩壊の主要 因となる斜面表層部の雨水浸透挙動を明らかにし、新しい土砂災害早期警戒体制 の指標を提案することである.しかし、ゲリラ豪雨は局所的に発生するために、 日本において原位置計測を実施することは困難であると考えられる.

上述した課題に対処するため、大津ら<sup>2)</sup>はゲリラ豪雨の短期間に降雨が集中す る降雨特性と、熱帯性気候でのスコールの降雨特性の類似性に着目した.熱帯性 気候の国においては雨季にあらゆる箇所でスコールが頻繁に発生している.そこ で、ゲリラ豪雨が発生した際の斜面内部への雨水浸透メカニズムの解明を目的と

し、カセサート大学(タイ)との共同プロジェクトとしてタイ・ナコンナヨック において豪雨の斜面内部への浸透に関する原位置計測を、2007年9月より実施し てきた.

本研究では,原位置計測結果をもとにして得られる原位置における土壌水分特 性曲線と,原位置サンプリング試料を用いた室内試験より得られる土壌水分特性 曲線を比較することで,実斜面での土壌水分特性についての考察を行う.そして, 求めた土壌水分特性曲線を van Genuchten 式などによりモデル化を行い,飽和-不飽和浸透流解析を行うことで,降雨浸透過程の予測を行う.本研究では,斜面 表層部の不飽和領域における降雨時の浸透挙動を再現することを目的として飽和 - 不飽和浸透流解析を行う. その解析結果を示すとともに,考察を加える.

また,斜面表層部の浸透挙動と降雨の先行履歴効果を検討することにより,土 砂災害早期警戒体制を考える上では,すべり面付近における降雨の先行履歴効果 を考慮する必要があると推察できる.このことを踏まえて,新しく提案されてい る改良先行履歴降雨指標 MAPI に関してその適用性の検討を行う.

## **1.3** 本論文の構成

本論文の構成は全6章からなる.

第1章において本研究の背景・目的ついて述べた.

第2章において,既往の研究を紹介するとともに,本研究で行う不飽和浸透流 解析の基本概念となる不飽和浸透特性・土壌水分特性曲線について述べる.

第3章では、まず、原位置計測によって得られた結果をもとに、原位置の斜面 中腹部における土壌水分特性について考察する.また、蒸発散が斜面内部の浸透 挙動に与える影響についての考察も行う.

第4章では、タイの原位置計測によって得られた結果をもとに、実施した不飽 和浸透流解析の結果を示すとともに、考察を加える.

第5章において、MAPI に関する検討を行い、MAPI と先行履歴降雨指標 API の特性から斜面深部への雨水の浸透する割合について検討を行う.

そして最後に、第6章において、本研究の結論と今後の展望を示す.

## 第2章 既往の研究

本章では,降雨時における雨水浸透挙動および豪雨に対する土砂災害早期警戒 体制に関する既往の研究を紹介し,本研究の位置づけについて述べる.

## 2.1 原位置計測

本研究において対象とする斜面は図 2.1 に示すタイ・バンコクの北東約 100 km の地点に位置するナコンナヨックの道路脇斜面で,2004 年 8 月に集中豪雨によっ て崩壊が発生し,これを埋め戻した斜面である.この斜面を対象に,2007 年 9 月 から原位置計測を行っている.計測機器に関する断面図,および平面図を図 2.2 および図 2.3 に示す.図に示すように当該斜面では,土壤水分計,テンシオメー タ,水位計および雨量計を設置して,それぞれ体積含水率,間隙圧,表面流出量, および降雨量を計測している.

当該斜面の地質は、図 2.4 に示すように、崩壊露頭面にはラテライトが確認され、中生代ジュラ紀から白亜紀流紋岩(SiO2 含有量 70%以上の火山岩)の風化帯からなっている. ラテライトとは赤色の風化土であり、鉄・アルミニウムの水酸化物からなり、乾季・雨季が規則的に交替する熱帯性気候地域に広く分布している. このように流紋岩の岩盤斜面が風化して粘土化した状況は、図 2.5 の模式図に示すように、節理を有する流紋岩質の岩盤が、熱帯性気候の高温多湿環境に晒された上に、乾季・雨季で乾湿の繰り返し、および植生の影響を受け表層付近が風化して粘土化したものと推察される. また、斜面表層の特徴としては、ほぼ全域が 50~60cm の雑草で覆われている.

これまでに、Ohtsuら<sup>3)</sup>は斜面崩壊の1つである不飽和領域における浅層崩壊に 着目し、降雨時における雨水の流出浸透挙動を予測する手法として、不飽和領域 を考慮した拡張型マルチタンクモデルを提案してきた.そして、Hotta<sup>4)</sup>らにより 改良が行われ、様々な知見が得られている.以下に、原位置斜面に関する得られ た知見の一部を示す.

・集中豪雨が発生する場合,斜面において表面流が卓越し,流出比の最大値が 0.8 程度になり,斜面表面の浸食の要因となる.

・降雨量の増加に伴い、斜面内部への浸透比が 0.1 から 0.2 程度に収束する.

・斜面不飽和領域における浸透は、鉛直方向が卓越している.

既往の研究により、豪雨時の斜面の水収支に関して、浸透と流出にまわる雨水の 割合の把握がされている.

本研究では、地中に浸透した雨水の挙動について検討を行う.また、既往の研 究で得られた知見に基づいて不飽和浸透流解析の条件設定を行う.

## 2.2 土壤水分特性曲線

土壌水分特性曲線(Soil Water Characteristic Curve:以下,SWCC)は体積含 水率とサクションの関係から算定され,不飽和土の保水特性を評価することがで きる.図 2.6 は,一般的に用いられているSWCCの模式図である.同図に示すよう に,不飽和領域における体積含水率とサクションの関係は,排水過程と吸水過程 でヒステリシスを描くことが知られている<sup>5)6)</sup>.

飽和からの排水過程,残留体積含水率からの吸水過程で得られる曲線をそれぞ れ主排水曲線,主吸水曲線と呼ぶ.また,任意の水分量から排水,もしくは吸水 によって得られた水分特性曲線を走査曲線と呼ぶ.

SWCC は、土のコンシステンシーと密接な関係が有り、試料によって異なる曲線とされている.また粒度分布から SWCC を求める試みもなされており、土性を 手がかりとした SWCC の定量化が盛んに行われてきた.SWCC を関数で表すこと により、離散的な測定データを連続的な曲線で表すことができ、数値計算を行う 場合に、非常に有用となる.

本研究では、原位置計測結果によって描かれる SWCC の特徴について考察を行う.また、計測データを用いて SWCC の関数モデルの1つである van Genuchten 式のパラメータを求め、求めたパラメータを用いて浸透流解析を行うことにより、降雨浸透現象の把握を試みる.

## 2.3 室内試験結果

不飽和領域における SWCC および地盤の強度定数を求めるために,当該サイト における乱さない供試体のサンプリング試料から,乾湿試験及び一面せん断試験 が実施されている.室内試験によって得られた当該斜面の力学特性を表 2.1 に示 す. また, 透水特性については, 表層部の飽和透水係数は, 10<sup>-5</sup>~10<sup>-6</sup>cm/sec である.

また、図 2.7<sup>7)</sup>に斜面中腹部GL-0.6m、GL-1.0mおよび法尻部GL-0.6m、GL-1.0m における粒径加積曲線を示す. なお、土の粒径にはふるい分だけでは分析できな い細粒分が多く含まれているため、ふるい分け分析及びストークスの法則に基づ く水沈降分析によって粒度分析を行っている. 粒度分析は斜面法尻GL-0.6m以外、 平均粒径D50 が約 0.03mm以下であることから斜面を構成している地質は細粒分 が卓越していると判断される. また、図 2.8<sup>7)</sup>に三角座標による分類を示す. この 結果から、中腹部GL-0.6mは礫まじり砂質細粒土、中腹部GL-1.0mは砂質細粒土, 法尻部GL-0.6mは粘性土砂質礫,法尻部GL-1.0mは砂礫まじり細粒土で構成されて いると推定される.

当該サイトにおいて,流紋岩の強風化帯に属する斜面中腹部,及び法尻部 GL-0.6m~GL-1.0mの試料から算定された SWCCの回帰曲線を図 2.9 に示す.各々 の SWCC から,サクションの増加に従って体積含水率が減少している傾向が確認 できる.また,前述したように当該斜面の地質は粘性土によって構成され,それ ぞれの SWCC は保水性が比較的高いことを示している.日本における各種地盤で の試験結果と比較すると,当該サイトで得られた排水過程の SWCC は,図 2.10 に示すように,日本における赤ぼくおよび黒ぼくでの特性とほぼ同等であると判 断される.また図 2.11 に法尻部 GL-0.6m,GL-1.0m における土試料を示す.これ らから深度が深くなるにともない,粘土化が進行し団粒化が顕著になり透水性が 低下すると推察できる.

以上の結果から、当該サイトの地盤特性は、力学的・水理学的な地盤定数の比較から、火山岩系の岩盤が風化して、崩壊土塊が斜面表面に堆積した日本における斜面とほぼ同等であると推察される.

## 2.4 不飽和浸透特性

不飽和浸透流解析を行う際には飽和透水係数,比貯留係数,不飽和特性(SWCC, 比透水係数)などを設定する必要がある. 飽和領域では飽和透水係数,比貯留係 数の設定が必要となるが,不飽和領域では不飽和特性が必要となる.本研究では, 不飽和浸透特性の SWCC を式 2.1 の van Genuchten 式により設定する.

$$Se = \frac{1}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m}$$
(2.1)

ここに, *a*, *n*, *m* は形状パラメータであり, *n*, *m* は無次元, *a* は圧力水頭 *h* を 逆数にした次元を持つ.また, *Se* は次式で定義する有効飽和度である.

$$Se = \frac{\theta - \theta r}{\theta s - \theta r}$$
(2.2)

ここに、 θrは残留体積含水率であり、 θsは飽和体積含水率である.また、nと m を次式で関係付けることにより、S 字型の水分特性曲線を表現することが可能 となる.

$$m = 1 - \frac{1}{n} \tag{2.3}$$

本研究では、不飽和浸透特性を設定するために、原位置計測により得られた体 積含水率とサクションのデータを用いて van Genuchten 式へのフィッティングを 行う.そして、フィッティングにより得られたパラメータ a, n と残留体積含水 率及び飽和体積含水率を用いて解析を行う.

また,不飽和特性の比透水係数は,有効飽和度を用いて以下の式で示される.

$$k_{r} = Se^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^{m} \right]^{2}$$
(2.4)

ここに, m は式 2.3 における実験係数である.

このように、van Genuchten 式によって比飽和透水係数の値を算出することができ、土壌中の水分移動を解析することができる.

## 2.5 降雨履歴効果の検討

土砂災害早期警戒体制については,現在,一般的に以下の流れで行われている. 図 1.1 に示すように,時間降雨と累積降雨量(連続降雨量を用いた例もある)を 組み合わせた,いわゆるスネークカーブに基づき限界降雨曲線が管理値として設 定されることが一般的である.この場合,一雨を対象とするものであるが,後続 する降雨がスコールのような短期間・高強度降雨の場合には,後続降雨のみを対 象とした限界降雨曲線よりも小さい雨量で斜面崩壊が発生することが示唆される. 先行降雨の影響で,斜面内部の体積含水率が高まっている場合,つまり地盤内の 水分貯留量が高い場合には,対象とする降雨の累積降雨量が微小な場合にも,豪 雨発生直後に斜面崩壊が発生する危険性が指摘されている.

近年,日本では,降雨の先行履歴効果を考慮した土砂災害早期警戒体制の手法 として,砂防部局では実効雨量を用いた手法,気象庁では土壌雨量指数<sup>8)</sup>を用い た手法を採用するようになっている.

実効雨量は土砂災害の発生に及ぼす先行降雨の影響を考慮した累加雨量のこ とで,最新の雨量の影響を大きく,過去の雨量ほど小さく反映している.ここで, 実効雨量は半減期を用いて,式 2.6 で算出される.

$$R_{t} = r_{t} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{n} \cdot r_{t-n}$$

$$a_{n} = 0.5^{n/T}$$
(2.5)

ここに, *R*<sub>t</sub> [mm]は時刻tの実効雨量, *r*<sub>t</sub> [mm/hr]は時刻tの時間雨量, *a*<sub>n</sub>は減少係数, および*T*[hr]は半減期を示す.ここで,実効雨量への影響を考慮して,減少係数 0.004以上になる期間が目安となる.

Soralump<sup>9)</sup>は斜面崩壊において降雨の先行履歴効果を考慮するため,第5章で 説明する先行履歴降雨指標(Antecedent Precipitation Index:以下, API)を用いた 早期警戒体制を提案している.

Soralumpが提案したAPIを用いた手法は、タイで計測されているのが日雨量のみであるため、評価する観測値として日雨量を用いている.しかし、ゲリラ豪雨や

スコールの場合,短時間に高強度の降雨が集中する.そのため,Ohtsu<sup>10)</sup>は日雨 量を用いて通行規制等の判断を行うことは適切でないと考え,改良先行履歴降雨 指標(Modified Antecedent Precipitation Index:以下,MAPI)を提案している.

MAPIは、原位置計測結果をもとにして、評価する観測値に 10 分間雨量を用い るとともに、地盤内の地表から深さ 1.0m までの水分貯留量の減衰を考慮してい る.10 分間雨量を用いることで、ゲリラ豪雨の短時間に高強度の降雨が発生する という特性を加味することができ、リアルタイムで情報を提供することも可能と 考えられる.

そこで,本研究では,斜面表層部の浸透挙動に関する考察を行うことにより,MAPI の早期警戒体制への適用性について検討を行う.

## 第3章 原位置計測

本章ではまず,斜面中腹部における計測結果をもとに得られる SWCC と室内試験結果によって得られた SWCC の比較を行うことで,原位置の SWCC の特徴について検討する.次いで,斜面中腹部における地中への雨水浸透挙動についての考察を述べる.

## 3.1 原位置斜面における土壌水分特性曲線に関する検討

本節では,斜面中腹部のSWCCの原位置計測結果を示すとともに,考察を行う.

## 3.1.1 原位置斜面中腹部の土壤水分特性曲線

図 3.1 に,原位置計測により得られた SWCC を示す.2010 年 9 月~11 月の期間 に計測された深さ 0.2mのサクションと体積含水率の値を使用している. 同図か ら,原位置の SWCC は,サクションの値が 0kPa に近い低サクション領域に集中 していることがわかる.この特徴がみられる理由について考察を行う.

計測期間は降雨が頻繁に発生する雨季である.図 3.2 に,2010 年 9 月 26 日に 降雨が発生してから、後続する 8 降雨期間における SWCC を示す.図中の①は、 9月 26 日の降雨前の SWCC の位置である.降雨が発生すると、体積含水率一定の もとサクションのみ減少する.そして、サクションがほぼ 0 kPa の値となると、 サクションがほぼ一定のまま体積含水率が上昇する.その後、②に至るまで体積 含水率の減少に伴いサクションも回復していく.この挙動はインクビン効果によ るものであり、吸水過程と排水過程の曲線にヒステリシスが確認できる.続いて、 ②の位置で次の降雨が発生するためサクションが減少し、体積含水率が上昇した のち、再び体積含水率の減少に伴いサクションが増加していく.

このように、降雨により減少したサクションが無降雨期間に大きく回復してい く途中に、次の降雨が発生することで、吸水過程となる.この吸排水の繰り返し により、サクションが大きく回復することがないまま、飽和に近い低サクション 領域において細かい挙動を示すと考えられる.

また,後続する降雨の発生までの時間間隔が長い場合は,同図の 10 月 3 日から 10 月 12 日かけての,③から④に示すように,サクションが大きく回復される. そして,サクションが大きく回復した後の発生した降雨により,体積含水率一定でサクションのみ減少する挙動がみうけられる.このように,原位置計測によって得られた SWCC は,低サクション領域で降雨が発生した場合は細かい挙動を示し,高サクション領域で降雨が発生した場合は,インクビン効果によりヒステリシスを描くような SWCC となると推察できる.

続いて、図 3.3 に吸水過程における SWCC を示す.前述した通り、SWCC は低サ クション領域において細かい挙動となっている.この細かい挙動を示す部分は、 図 2.6 における、飽和体積含水率に近い低サクション領域である.図 3.3 に示す ように、ほぼ 0kPa に近い低サクションにある擬似的飽和状態において、体積含水 率が増加している.通常、飽和状態になると体積含水率は変化しない.しかし、 低サクション領域での吸水過程ないし飽和に近い領域において体積含水率が変化 しているため、何らかの変化が起こっているものと考えられる.以下で、この変 化について考察を加える.

まず、体積含水率と飽和度との間には以下の関係が成り立つ.

$$\theta = n \cdot Sr \tag{3.1}$$

ここに, θは体積含水率, nは間隙率, Srは飽和度を示す. 飽和に近い領域, つまり, 飽和度が1に近い領域において体積含水率が大きく変化しているということは, 間隙率 nの値が変化していることがいえる.

また,不飽和土に対する有効応力式は以下に示す Bishop の有効応力式が一般的である.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + xs \tag{3.2}$$

ここに,  $\sigma'$ は有効応力,  $\sigma$ は全応力,  $u_a$ は間隙空気圧, sはサクション, xは 0 $\leq x \leq 1$  となるパラメータで, 飽和のときは x=1 で Terzaghi の有効応力式と一致する. Terzaghi の有効応力式を以下に示す.

$$\sigma = \sigma' - u_w \tag{3.3}$$

ここに、 u<sub>w</sub>は間隙水圧である. また,以下に応力ひずみ関係式を示す.

$$\sigma' = E\varepsilon \tag{3.4}$$

Eはヤング率, εはひずみであり, 土質力学においては圧縮を正とする.

低サクション領域において飽和度が高くなるにつれ、間隙水圧は大きくなって いく.そして、サクションが OkPa に近づき擬似的な飽和状態となれば、飽和土の 力学特性である式 3.3 が成り立つと推察できる.  $u_w$ の増加に伴い、 $\sigma'$ は減少して いく. $\sigma'$ の減少に伴い式 3.4 により、 $\varepsilon$ は減少していく.つまり、膨張を表わし ている.一般に、土骨格の体積が膨張すると、間隙率が大きくなり、体積含水率 は減少するが、飽和状態における原位置の SWCC では、体積含水率は増加してい る.これは、飽和状態にあるため、大きくなった間隙に土壌水が流れ込んで埋め ることで、体積含水率が増加したものと推察される.

図 3.4 に、原位置計測結果によって得られた排水過程の SWCC を示す. 図のように、排水過程においても、0~10kPa の低サクション領域に集中している. 図 3.5 に、図 3.4 に示したうちの、0~6kPa の低サクション領域における挙動を示す. 図に示すように、排水過程の低サクション領域においては、体積含水率は細かい変動を示しながら、サクションが増加している. 飽和に近い低サクション領域において式 3.3 に示す Terzaghi の有効応力式を考える. 排水過程に入り、u<sub>w</sub>が減少していくと、それに伴い σ'は増加していく. σ'の増加に伴い式 3.4 により、εは増加していく. つまり、土骨格の体積圧縮を表わしている. 体積圧縮が起こると体積含水率は増加すると推察されるが、原位置の SWCC では体積含水率の増加は確認できない. これは、0~5kPa の低サクション領域では、擬似的な飽和状態であると推察すると、土骨格が圧縮され間隙率が小さくなった場合においても、擬似的な飽和状態は変わらないため、体積含水率に変化がみられないと考えられる.

## 3.1.2 土壤水分特性曲線の比較

図 3.6 に、室内試験結果によって得られた SWCC と原位置で計測されたデータ

から得られた SWCC の比較を示す. 図中の波線が,室内試験結果による SWCC であり,体積含水率が 45%付近で集中しているものが,原位置計測結果による SWCC である. 図に示すように,室内試験結果による SWCC と比べ,原位置計測結果による SWCC は,体積含水率の変動が小さくなっている. 原位置の SWCC は,乾湿の繰り返しによりヒステリシスが小さくなるために,図のように勾配が大きくなる.

前述したように、SWCC は排水過程と吸水過程で異なる曲線を描き、ヒステリシスの性質を示す.よって、同じサクションのもとで異なる水分量の状態が存在する.そして、同じサクションのもとでも水分量が違う場合には、それぞれの間隙水の分布状態は異なる.図 3.7 に示すように、排水過程にある土ではバルク水が多く存在し、吸水過程にある土ではメニスカス水が多く存在すると考えられる. 排水の際にある程度大きなサクションが載荷されるまでは土粒子間のメニスカス水のみではなく、バルク水が残留するため、体積含水率が大きくなりヒステリシスが生じると考えられる.

ヒステリシスが小さくなる場合の間隙水の挙動についての考察を行う.先に述 べたように,排水過程においてバルク水が残留するためにヒステリシスが生じる ことを考慮すると,吸水過程と排水過程での土中水の存在形態が同じであれば, ヒステリシスは生じないものと考えられる.吸水された水の大部分がメニスカス 水となる場合,排水過程でもメニスカス水が脱水されていると考えられる.そし てその後の吸水過程でも,吸水された水はメニスカス水として蓄積されていくも のと考えられる.このように,吸水された水の大部分がメニスカス水となると, 排水過程でもメニスカス水が脱水され,その結果ヒステリシスは小さくなる.

原位置の斜面では,吸排水過程の繰り返しにより,メニスカス水が卓越する水 分保持状態をしていると推察できる.

## 3.2 全水頭からみる不飽和帯水分挙動

タイ・ナコンナヨックではその気候的特徴から,蒸発散量が大きく,蒸発散が 斜面内の水分挙動に与える影響が大きいものと推察される.本章では,原位置計 測で得られた結果をもとに,原位置斜面内部の浸透挙動の考察を行う.

## 3.2.1 GL-1.0m以深の全水頭の挙動

まず,雨季・乾季を併せた長期的な視点から,GL-1.0m以深の浸透挙動について検討を行う.

図 3.8 に全計測期間である 2008 年 5 月 10 日から 2011 年 8 月 31 日の, 原位置 斜面中腹部 3 深度(GL-1.0m, -1.5m, -2.15m)の全水頭を示す. 全水頭は計測され た間隙圧をもとに, 深さ-1.0m を位置水頭の基準面として算出した. 同図に示す ように,毎日のように降雨が発生している雨季においては,無降雨期間が短いた めに全水頭に大きな減少がみられないが,無降雨期間が続く乾季に入ると,全水 頭の大幅な減少がみられる. この全水頭の大きな減少は,蒸発散により地盤内の 水分が失われたことで,間隙圧が減少したことによるものと推察される.

ここで、全水頭の大小関係に着目する.水は、全水頭の大きいほうから小さい ほうに向かって流れるので、深度ごとの全水頭から斜面内の浸透した土壌水の挙 動を検討することが可能となる.

同図に示すように、雨季においては、全水頭は GL-1.0m, -1.5m, -2.15m と深度 を増すごとに減少していく. このことは、GL-1.0m の以深において、深部への雨 水の浸透が卓越していることを表している.

次に、2008年の乾季に着目する.乾季に入り無降雨期間が続くにつれ、全水頭 が減少していく.これは、降雨による雨水の供給が無くなり、間隙圧が減少する ためである.図に示すように、雨季の際には GL-1.0m の全水頭が最も大きく、 GL-2.15mの全水頭が最も小さい.しかし、無降雨期間が続くにつれ、全水頭の差 は減少していき、やがて、GL-2.15m の全水頭が GL-1.5m の全水頭よりも大きく なる.より詳細にみるために、全水頭と深度との相関を図 3.9 に示す.図に示す ように、11 月 18 日の全水頭は深い程小さく、深部への浸透が確認できる.しか し、11 月 30 日においては GL-1.0m の全水頭が GL-1.5m の全水頭よりも小さくな り、12 月 15 日では、GL-2.15m が最も大きい.このことは、無降雨期間が続くに つれ、上向きの水分挙動となっていることを表しており、熱帯性気候特有の蒸発 散の影響が深部まで及んでいるものと推察される.

図 3.8(b)に示すように、2010年の雨季から乾季に移った際にも、全水頭の減少が確認される.しかし、3深度の全水頭は概ね同じ値となっている.これは、2008年に比べ 2010年においては無降雨期間が短く、蒸発散の影響により上向きの流れ

が生じる前に降雨が発生したためであると考えられる.

以上より、GL-1.0m以深では、無降雨期間が続くことにより、蒸発散の影響が 深部まで及び、斜面内の水分挙動に変化がみられる.しかし、GL-1.0m以深の全 水頭が等しくなるまでには、少なくとも約 20 日間の無降雨期間が続く必要がある. これは、計測期間において、GL-1.0mの全水頭がそれ以深の全水頭よりも小さく なるまでの期間が最も短いのが、2008年 11 月 8 日から 11 月 29 日であることを 踏まえている.つまり、降雨の間隔が 20 日よりも短い場合は、蒸発散の影響は深 部まで及ばないものと推察される.また、本研究の目的は、早期警戒体制への指 標の検討であり、そのためにも、雨季のような降雨が集中する期間における、蒸 発散の影響を考慮する必要がある.そこで、次節において、降雨の間隔が短い場 合の蒸発散の影響について検討する.

## 3.2.2 蒸発散が浸透挙動に及ぼす影響

前節より、GL-1.0m以深において、雨季・乾季で斜面内水分の流れる向きが 長時間をかけて変化することがいえる.しかし、地表面近くでは、より降雨と 蒸発散の影響を受けやすいと推察できる.本節では、雨季・乾季という長期的 な視点ではなく、一雨ごとの短期的な視点で斜面内の浸透挙動を検討する.具 体的には、地表面付近の一雨ごとの全水頭変動をみることで、蒸発散が浸透挙 動に及ぼす影響について検討する.

地表面付近の水の流れは、降水、蒸発散の繰り返しにより上向き、下向きの流 れを繰り返す.蒸発散による土壌水の移動は、地中のある深さまでしか及ばず、 その深さでは下に示すダルシー式における水分ポテンシャル勾配が0となり、水 分フラックスもゼロとなることから、そこをゼロフラックス面<sup>11)</sup>と呼ばれている. すなわち、水の動きが無くなる面である.

$$q = -k \left( \frac{\partial \varphi_m}{\partial z} + 1 \right)$$
(3.5)

ここに、qは水分フラックス、kは透水係数、 $\varphi_m$ はマトリックポテンシャル、zは基準面からの高さである.

図 3.10 は,2010 年 9 月 2 日から 11 月 25 日にかけて斜面中腹部において計測 された GL-0.2m,-0.4m,-0.6m の間隙圧から,全水頭をグラフにしたものである. 図に示すように,最も表層に近い GL-0.2m の全水頭の減少がところどころ確認さ れる.これらはいずれも,降雨が終了し無降雨期間に入っている場合である.図 3.11 は,図 3.10 のうち GL-0.2m の全水頭の減少が見られる一雨前後の,深度 (GL-0.2,-0.4,-0.6,-1.0,-1.5,-2.15m)と全水頭の相関を示すものである.GL-0.2, -0.4,-0.6m の間隙圧は 10 分間ごとの計測データがあり GL-1.0,-1.5,-2.15m の 間隙圧は 1 日ごとに計測されたものである.

図 3.11(a)について、9月 20日の 4:10 から 4:30 の間に降雨があり、その後 9月 26日まで無降雨期間が続いている期間の全水頭と深度の相関を示す.まず、地表 に近い GL-0.2m および GL-0.4m の全水頭について、降雨直後の 4:40 の GL-0.2m の全水頭が最も大きくなっている.その後、時間経過とともに全水頭は減少して いき、22日 8:00 と 20:00 の間を境に深さ方向への全水頭の勾配が負から正へ変化 している.水の流れは、全水頭の大きいところから小さいところに向かって流れ る.つまり、この期間を境に、地表付近の土壌水の挙動が、下向きの浸透流れか ら上向きの水分挙動に変化していることを表している.GL-0.6m に関しては、全 水頭は小さな変動しかみられず、GL-1.0m 以深の全水頭に関しては、ほぼ一定で あり、深さを増すにつれて全水頭は小さくなっている.すなわち、GL-1.0m 以深 では下向きの浸透による流れが卓越していることがわかる.

図 3.11(b)に、10月25日と11月20日の降雨の間の無降雨期間の深度と全水頭の相関を示す.図 3.11(a)と同様に、地表面に近いGL-0.6mまでの深さにおいて時間経過とともに全水頭の減少が顕著に確認できる.10月25日においては地表面からGL-1.0mまで水頭差は無いが、11月20日まで地表面に近い深度ほど蒸発散の影響により、上向きの水分挙動が卓越していく.そして、11月20日の降雨に伴い、再び全水頭は大きくなる.また、GL-1.0m以深においては深さを増すにつれて全水頭が小さくなり、深部への浸透が卓越していることがわかる.

以上を踏まえると、GL-0.6m~-1.0mの区間で、浸透した雨水の動水勾配の上下の向きが変化すると判断できる.また、図 3.9に示す計測期間において GL-0.2m、 -0.4m、-0.6mの全水頭が等しくなるまでの経過時間は、およそ2日~3日間であることがわかる.つまり、一旦降雨が発生すると地表面から深部に向かって雨水が浸透しはじめる.そして、降雨が終了した後は深部への浸透と蒸発散により、

地表面付近の水分は減少する.また,GL-0.6m以深では,上から雨水が供給され, 水分量が増加する.およそ2日が経過した頃に,GL-0.2mからGL-0.6mにおいて 全水頭の差がなくなり,水分移動が一時滞る.そしてその後は,蒸発散の影響に より上向きの水分挙動が卓越するものと推察される.

## 3.2.3 斜面内部での浸透挙動

図 3.12,および図 3.13 に降雨日以降の1日間隔の斜面内部の間隙圧と体積含水率の,深度との相関を示す.図 3.12 に示すように、9月18日の降雨があった翌日19日に GL-1.5mの間隙圧は4kPaまで上昇し、その後減少していく.GL-2.15mの間隙圧は、18日は-1kPaの値にあったものが19日は3kPa、20日には4kPaとなる.以上のように、深さ方向に時間遅れを伴いながら、GL-1.5m、-2.15mの間隙 圧が正圧まで上昇している.つまり、雨水の浸透がGL-2.15mの深部までおよんでいるといえる.

また、図 3.13より、降雨から日がたつにつれ、各深度の体積含水率は減少していることが確認できる.これより、地表面から GL-1.0m までの斜面内の水分が減少していることが推察できる.

前節より,原位置計測サイトの中腹部では,降雨後において深さ 0.6mより浅い部分は蒸発散の影響を受け上向きの水分挙動が卓越し,深さ 1.0mを通過する水は,そのまま深部へ浸透することがいえる.

以上を踏まえると、斜面表層部の深さ 0m~1.0mの区間の土壌水の挙動につい て、表面からは蒸発散によって、深部へは浸透によって、上下両面へ土壌水が移 動している状態にあると考えられる.しかし、タイ・ナコンナヨックの亜熱帯気 候と日本の気候とは大きく異なり、日本における蒸発散量は少ない.したがって、 日本においては蒸発散が斜面内の土壌水挙動に及ぼす影響は小さく、土壌水の移 動が見られない面がより地表面に近づくものと推察される.

## 第4章 不飽和浸透流解析

本章では、斜面表層部の不飽和領域における降雨時の浸透挙動を再現することを目的として実施した飽和 - 不飽和浸透流解析の検討結果について述べる.

## 4.1 van Genuchten式へのフィッティング

van Genuchten式へのフィッティングは、「SWRC Fit - 土壌水分特性曲線の非線 形回帰プログラム-」<sup>12)</sup>を使用して行う.同プログラムは、モデルの特性に応じ て自動的にパラメータの初期値を定めて非線形回帰計算により最適パラメータが 計算されるようなプログラムである.フィッティングの対象とするデータは,2010 年 9~11月の期間に計測されたGL-0.2mの計測結果、及び室内試験結果とする. 表 4.1 に、フィッティング結果を示す.

前述したように、SWCC には吸水過程と排水過程では異なる経路をとるヒステ リシスと呼ばれるものがある. 不飽和浸透流解析を行う際にはヒステリシスの考 慮が必要となるが、本解析においてはヒステリシスを考慮した SWCC を設定する ことができない. また、蒸発散量の設定が困難であるために、排水過程の浸透挙 動を適切に再現できない. そこで、本研究においてはまず吸水過程における降雨 浸透挙動の把握を目的とする. そのため、実現象における吸水過程に相当する部 分の SWCC を対象に van Genuchten 式へのフィッティングを行い、吸水過程を表 すパラメータを使用する.

## 4.2 解析モデルの生成

解析の対象とするのは原位置斜面の中腹部の表層領域とする.既往の研究<sup>4)</sup>よ り,原位置斜面中腹部の表層領域では,降雨時に鉛直1次元浸透が卓越している という知見が得られている.よって,解析モデルは図4.1に示すように鉛直1次 元モデルとしている.原位置における計測深度を考慮し,解析モデルは地表面か ら深さ3mまでを対象としている.また,原位置計測サイトは1度崩壊した斜面を 再び埋め戻した斜面であり,均質な斜面である.そのため,解析モデルの物性値 は一様な物性値としている. 解析メッシュは,原位置計測を行っている地表面からの深度との関係を考慮し, 表面から深さ 0.6m までを 0.1m ごとに区切り, 1.0m から 3.0m までを 0.5m ごとに 区切るものとした.

## 4.3 境界条件・初期条件の設定

解析を行う際には、一旦定常解析を行い、得られた結果を非定常解析の初期値 として扱う.定常解析の境界条件として、上端の圧力水頭を 0cm、下端を流量 0 の不透水層とする.これは、過去のすべり面が地表から 2~3mの深さにあり、そ のすべり面付近で浸透した雨水が貯まっていると推察されることを考慮したもの である.また、地表面からの深さ 20cm、40cm、60cm に原位置で計測された降雨 30 分前の圧力水頭値を設定し、定常解析を行った.

非定常解析では、下端は不透水層境界のまま、上端を降雨浸透境界として、原 位置で計測された降雨強度と同様の降雨を設定する.降雨ケースは5ケースとし、 設定する降雨条件を図 4.2 に示す.また、降雨のモデル内への浸透係数は 0.2 と する.この値は、第2章で述べたように、既往の研究より、原位置計測サイトに スコールが発生した場合に流出比と浸透比は 0.7~0.8 および 0.1~0.2 に収束する という結果に基づいている.

解析時間は9時間とし,降雨は解析開始から30分後に発生するように設定する. 解析ケースは,水分特性曲線,降雨条件,初期条件の与え方を変化させて実施した.本節では,解析により得られた降雨に対する圧力水頭の挙動から,解析が原位置で計測された実現象を再現できているかを検討する.

## 4.4 解析結果と考察

## 4.4.1 透水係数の検討

本節では、透水係数による影響を検討する.前述したように、原位置斜面における飽和透水係数は,既往の室内試験によっておよそ 1.0×10<sup>-5</sup>~1.0×10<sup>-6</sup>(cm/sec)であるとされている.以上を踏まえた上で、図 4.3 に、2010 年 9 月 2 日の物性値と降雨ケースにおいて、透水係数を変化させて行った解析結果を示す.図に示す

ように,透水係数を 5.0×10<sup>-5</sup> (cm/sec)とした解析結果は,GL-0.2m,-0.4m,-0.6m のどの深度にも圧力水頭の変動がみられる.そして,透水係数が小さくなるにつ れ,圧力水頭の変動は小さくなっていき,透水係数を 1.0×10<sup>-6</sup> (cm/sec)とする解 析結果は,GL-0.2mの圧力水頭の変動が 7cm程度しかみられない.圧力水頭を 1.0 ×10<sup>-4</sup> (cm/sec)とした場合は,透水性が大きくなり,過剰に圧力水頭が上昇してし まう結果となる.また,他の降雨ケースにおいても同様な結果となる.

以上を踏まえ,透水係数を 5.0×10<sup>-5</sup>(cm/sec)として解析を行うものとする.

## 4.4.2 解析結果

解析結果を図 4.4 および図 4.5 に示す. 図は, 原位置計測により得られた van Genuchten 式のパラメータのうち, 2010 年 9 月 2 日の物性値を使用して行った解析結果である. これは, 他の物性値でも大きな差異はなく, その中でも 9 月 2 日の物性値は実現象により近い挙動を示しているためである.

まず、図 4.4 は、降雨前サクションが低サクション領域にある場合の解析結果で ある.降雨が開始する前に圧力水頭が変動しているのは、設定した3深度 (GL-0.2m, -0.4m, -0.6m)の圧力水頭の初期値が、非平衡状態の値であるために、 初めの時間帯にその影響が残っているものである.降雨前サクションが低い場合 の圧力挙動については、深度ごとに時間遅れを伴って圧力が上昇することが解析 においても再現できている.しかし、図に示すうように実現象においては圧力水 頭が降雨に対して敏感に反応し、急に上昇しているが、解析結果はいずれもゆる やかな圧力水頭の上昇挙動となっている.このことは、実現象における急激な圧 力水頭の上昇は、雨水が浸透することによって水分が上昇したためではなく、閉 塞された封入空気により圧力が増加したものと考えると、妥当な結果であるとい える.つまり、解析では、体積含水率の変動から雨水の浸透を表しているために、 急激な圧力の上昇を再現できないものと推察される.

図 4.5 には,降雨前にサクションが比較的高い場合に関する解析結果である.この場合は,降雨に対しても圧力水頭の変化が微小であるか,変化が見られないという結果になった.これは,設定した不飽和浸透特性では,解析で高サクション領域における雨水浸透を表現できないものと推察できる.

そこで,SWCCの形状が解析結果に及ぼす影響を検討することを目的として,図

4.6 に示すような 4 種類のSWCCを不飽和特性として解析を行い,その結果の比較 を行う.それぞれ,原位置計測,室内試験(排水過程)および室内試験(吸水過程)<sup>13)</sup> によって得られたSWCCである.それぞれのSWCCの勾配が異なるが,この勾配を 比水分容量といい,次式で示す.

$$C = \frac{d\theta}{ds} \tag{4.1}$$

ここに、Cを比水分容量、θを体積含水率、sをサクションである.図4.6においては、比水分容量が大きいと勾配は小さくなり、逆に比水分容量が小さくなると 勾配は大きくなる.

図中の青色の SWCC が示す実測値(2010年9月2日)の SWCC による解析結果は, 先に図 4.5 に示した.他の3種類の SWCC を不飽和特性として行った解析結果を 図 4.7 および図 4.8 に示す.

まず、図 4.7 に示す 9 月 26 日の降雨ケースで行った解析結果を対象として検討 を行う.図 4.7(a)に示すように、室内試験(吸水過程)による SWCC を不飽和特性 とした場合は、図 4.5 に示した実測値の SWCC の結果と同様に、圧力水頭にほと んど変動がみられない.図 4.7(b)および図 4.7(c)に示す結果では、いずれも-0.2m の深さの圧力水頭は上昇している.そのうち、図 4.7(c)に示す室内試験(排水過 程)GL-0.6m の不飽和特性の結果の方が、降雨に対する圧力水頭の反応が早く、実 現象に近いと判断できる.このような結果となった理由について、SWCC の形状 を踏まえて考察を行う.9月 26 日の降雨ケースでは、-0.2m の深さの圧力水頭の 初期値は、-220cm である.図 4.6 に示すように、圧力水頭に変動が見られなかっ た実測値の SWCC と室内試験(吸水過程)の SWCC は、いずれもサクションが 100~500cm の範囲では体積含水率の変動が小さい.それに対して、室内試験(排 水過程)の GL-0.6m および GL-1.0m の SWCC は、サクションが 100~500cm の範囲 で体積含水率の変動が、先述の 2 つの SWCC と比較して大きく、比水分容量が大 きいことが確認できる.

続いて、図 4.8 に示す 11 月 20 日の降雨ケースで行った解析結果を対象として 検討を行う.図 4.8(a)および図 4.8(b)に示す結果は、図 4.5 に示した実測値の SWCC の結果と同様に、圧力水頭にほとんど変動がみられない. 11 月 20 日の降雨ケー

スでは,-0.2mの深さの圧力水頭の初期値が-710cmと,大きな負圧となっている. 図 4.6 に示すように,実測値,室内試験(吸水過程)及び室内試験(排水過程)GL-1.0m の SWCC は、サクションが 700cm 付近ではほぼ勾配が大きく、体積含水率の変動 がみられないため、降雨に対して圧力水頭が変動しなかったものと推察される. また、図 4.8(c)に示した室内試験(排水過程)GL-0.6m の SWCC はサクションが 700cm 付近の値であっても、比水分容量が大きく勾配が小さく、体積含水率の変 動が大きい. そのため、圧力水頭に変動が見られると推察できる.

以上より、本解析においては、設定する SWCC が高サクション領域において体 積含水率の変動が小さく比水分容量が小さい場合、降雨前のサクションが高い斜 面への雨水浸透を表すことができないものと推察できる.また、圧力水頭に変動 が見られる場合にも、降雨に対して急激に圧力水頭が上昇する実現象に比べると、 解析結果の圧力水頭はゆるやかな上昇を示す.この圧力の急な増加は閉塞封入空 気によるもので、水分の増加によるものではないと考えられる.つまり、原位置 計測から得られた SWCC のような、体積含水率がほぼ一定でサクションが減少す るような SWCC となると推察できる.しかし、前述のように、比水分容量が大き く、体積含水率の変動が大きい SWCC でなければ、高サクション領域における浸 透を解析で表すことができない.つまり、高サクション領域において降雨があっ た場合に間隙圧が急激に増加する挙動は、解析において再現することが困難であ ると推察される.

このことから、今後の解析を行う際には、圧力水頭の急な増加を再現すること は困難であることを考慮したうえで、初期値の負圧に対して適切な SWCC の設定 が必要となる.

## 第5章 改良先行履歴降雨指標MAPIに関する検討

2.5 で前述したように、ゲリラ豪雨を考慮した新しい土砂災害早期警戒体制の 指標を提案するためには、降雨の先行履歴効果を適切に評価することが必要である.

本章では,第3章で得られた知見をもとに,大津らが提案した改良先行履歴降 雨指標 MAPIの適用性について検討を行う.つづいて,MAPIと APIの低減率の 性質から,深部へ浸透する雨水の割合について検討を行う.

## 5.1 先行履歴降雨指標 APIの概要

本研究で原位置計測を行っているタイでは、降雨の先行履歴効果を考慮した降雨指標 APIを用いた早期警戒体制を提案している. APIの式を以下に示す.

$$API_t = (K_t \times API_{t-1}) + P_t \tag{5.1}$$

ここに、 $API_{t}$ [mm]および $API_{t-1}$ [mm]は、それぞれある日t、およびその 1 日前時 点t-1 での先行履歴降雨指標を、 $K_{t}$ は低減率、 $P_{t}$ [mm/day]はその日の日雨量を表 す. 右辺第1項は、先行降雨の影響で斜面内部の体積含水率が高まっていること を表現するものである.低減率 $K_{t}$ は、日本において適用されている実効雨量の減 少係数 $a_{n}$ と本質的には等価である.低減率 $K_{t}$ の具体的な式を以下に示す.

$$K_t = EXT(-E_t / W_m)$$
(5.2)

ここに,  $E_t$ はソーンスウエイト法(Thornthwaite, 1948)<sup>14)</sup>により求められた日可 能蒸発量であり,月ごとの平均値である.  $W_m$ は蒸発により消散される最大土壌水 分量である.  $K_t$ はGL-0.1mの蒸発量を考慮して得られた値であり,降雨後の蒸発 による水分の消散を考慮している.  $K_t$ は月ごとの平均値であり、表 5.1に値を示 す.

Soralump が API を提案する背景は,図 5.1 を用いて以下のように要約される.

限界降雨包絡線といった既存の理論では、図 5.1(a)に示すように、降雨の開始を 点 O としてスネーク曲線を描く.しかし、先行降雨があり斜面内の水分量が高ま っている場合には、同図に示すように、土砂災害発生危険基準線に到達する前に 斜面崩壊が生じた例がある.この問題を解決するために、API という概念を導入 して、図 5.1(b)に示すように、降雨の開始を点 O から点 S に移行することで、降 雨の先行履歴効果を考慮している.

## 5.2 改良先行履歴降雨指標 MAPIの算定

本節ではまず, MAPIの概要を述べた後に, MAPIの原位置計測結果への適用結 果について説明する.

## 5.2.1 改良先行履歴降雨指標 MAPIの概要

APIの概念は、降雨の先行履歴効果を定量的に表現する上で有効であると推察 される.しかし、考慮する観測値が日雨量であることから、リアルタイムで情報 を提供することができない.そこで、原位置計測結果をもとにして、評価する観 測値に 10 分間雨量を用いるとともに、低減率K<sub>1</sub>を斜面内部への浸透量を反映し て算定した、MAPIを提案する.MAPIは、式 5.3 により算定される.

$$MAPI_{t} = (K_{t}^{*} \times MAPI_{t-1}) + P_{t}$$
(5.3)

ここに, *MAPI*<sub>t</sub>[mm]はある時刻tにおける改良先行履歴降雨指標, *MAPI*<sub>t-1</sub>[mm]は その時刻tから最も近い過去の降雨時点t-1 における改良先行履歴降雨指標, K<sup>\*</sup><sub>t</sub> は低減率, P<sub>t</sub>[mm/10min]は 10 分間雨量を表す.

低減率 K<sup>\*</sup>, は斜面内部への浸透量の減衰を考慮しており, 算出式を以下に示す.

$$K_t^* = \frac{S_n}{S_f}$$

$$S_n = Y_n - Y_S \qquad S_f = Y_f - Y_S$$
(5.4)

ここに、*S<sub>f</sub>*[mm]は降雨終了時の残存浸透量、*S<sub>n</sub>*[mm]は次回降雨前の残存浸透量、 *Y<sub>s</sub>*[mm]、*Y<sub>f</sub>*[mm],および*Y<sub>n</sub>*[mm]はそれぞれ降雨開始時、降雨終了時、および次 回降雨開始前の水分貯留量を表す. 図 5.2 に水分貯留量の時系列変化を示す. 水 分貯留量は地表面からGL-1.0mまでを考慮しており、計測された体積含水率を用 いて算出している.

図 5.3 に,式 5.4 によって算定された低減率 K<sup>\*</sup><sub>t</sub> と経過時間の関係を示す.これ は,2008 年及び 2010 年の計測結果により算出したものである.図は時間経過に 伴い,降雨履歴の影響がなくなっていることを示唆している.以下に曲線の回帰 式を示す.

$$K_t^* = 6.381 \times 10^{-8} t^2 - 5.437 \times 10^{-4} t + 1.000$$
(5.5)

ここで、 $t[\min]$ は経過時間を表す. 図 5.3 示すように、低減率 $K_t^*$ は経過時間 2880 分、つまり 48時間以上経過すると 0 よりも小さくなり、降雨の先行履歴効果は消 滅していると判断できる. そこで、経過時間が 2880 分以上である場合、 $K_t^*=0$ とする. また、降雨期間中については、 $K_t^*=1$ とする.

## 5.2.2 既往のMAPIの適用結果

図 5.4 に法尻部における間隙圧の挙動を示す.図 5.4(a)には 10 分間雨量と、図 5.4(b)には式 5.3、式 5.4 により算定した MAPIと併せて示す.法尻部に着目して いるのは、法尻部では MAPIの値が大きくなると、間隙圧が正圧となり、斜面の 安定性を検討する上で危険であると捉えたためである. MAPI との比較対象とし て、6 時間連続雨量と 12 時間連続雨量を用いる.図 5.4(b)に示すように、間隙圧 の変動と MAPIの推移に類似性が見られる.また、図 5.4(a)に示すように、最大 10 分間雨量が 10mmを越える降雨が観測されたとき、間隙圧が正圧となる.しか し、9/3 の 22:00 前後の降雨は、最大 10 分間雨量が 5mm 程度かつ累積降雨量も少 ないにも関わらず、間隙圧が正圧となる.これは、先行降雨の影響で地盤内の水 分貯留量が多かったために、サクションがあまり回復しておらず、降雨強度の小 さい降雨でも間隙圧が正圧となったと推察される.連続雨量は、対象降雨の前に 12 時間以上の無降雨により、連続雨量がリセットしているために 0mm から始ま

っており,先行降雨の影響が反映できていない.それに対して,MAPIは,対象 降雨の開始時刻における値が上に移行しており,先行降雨履歴を反映している. つまり,地盤内の水分量が多い状態を MAPIにより表現することが可能であると 推察される.

## 5.3 MAPIとAPIの比較

図 5.5 に, API と MAPI の比較を示す. 図は 2008 年の計測結果を用いて,式 5.1~ 式 5.4 より算定したものであり, API は 1 日間隔, MAPI は 10 分間隔で算定して いる. 図に示すように, API と MAPI の増減の様子に類似性がみうけられる. ま た, API の値が, MAPI の値よりも大きくなる. この理由について,以下のような 理由が考えられる. API の低減率 K<sub>i</sub>は,蒸発の影響により GL-0.1m から失われた 水分量を考慮しているが, MAPI の低減率 K<sup>\*</sup> は,地表面から GL-1.0m までの水 分貯留量を考慮することにより,蒸発散と深部への浸透の両方により失われる水 分量を考慮している. つまり, API は斜面内の, MAPI は地表面から GL-1.0m の 間の区間の,降雨の先行履歴効果を評価しているといえる. このため, MAPI の 方が API よりも小さい値となると推察される.

図 5.5(b)において,9/23 で MAPIの値は 0mm となっているが,APIの値は 120mm であり,9/26 においても API は 0mm にはならない.これは,地表面~GL-1.0m の区間においては,降雨の先行履歴の影響は残っていないが,斜面内には降雨の 先行履歴効果が残っていることを示唆している.つまり,API の値より,9/23~9/26 では,GL-1.0m より深い部分において,降雨の先行履歴効果が残っているものと推察される.

## 5.4 MAPI と深部の間隙圧の挙動との相関

本節では、 MAPIと深部の間隙圧の挙動との相関をみることで、深部への降雨の履歴効果について検討する.そして、その結果を踏まえた上で、 MAPI の土砂 災害早期警戒体制への適用性を検討する.

前述したように、原位置計測サイトの斜面は、2004年8月に集中豪雨によって崩壊が発生し、これを埋め戻した斜面である.この崩壊時のすべり面の深さは

2~3m である.また,図 5.6 に GL-1.0m, -1.5m, -2.15m の間隙圧の変動を示す. 図に示すように,間隙圧はそれぞれ,降雨に伴い,0kPa 付近まで上昇している. また,乾季に入り無降雨期間が長く続くと間隙圧は減少するが,無降雨期間が長 く続かない場合は,間隙圧はほぼ 0kPa のまま大きな変動がみられない.このこと は,埋め戻した後も過去のすべり面の付近に地質境界があり,透水性の違いによ って,浸透した水が貯留されることを示唆している.以上より,原位置斜面のす べり面は,2m以深であることが推察できる.しかし,MAPIの低減率 K<sub>i</sub>\* は,地 表から GL-1.0m までの水分貯留量を考慮している.つまり,斜面崩壊のすべり面 が GL-1.0m までの水分貯留量を考慮している.こまた,低減率 K<sub>i</sub>\* は,前述したように,降雨後 2880 分,つまり 2 日経過すると 0 となり先行降雨の 影響は無くなるとされている.しかし,ナコンナヨックのすべり面は GL-1.0m よ りも深い部分にあるため,降雨終了時から 2 日後に -1.0m より浅い部分の先行降 雨の影響が無くなった場合でも,すべり面付近には先行降雨の影響が残っている 可能性がある.

そこで、MAPI がすべり面に近い深部への降雨の先行履歴効果を評価できているかの検討が必要であると考え、MAPI と深部の間隙圧の変動との相関の検討を行う.

図 5.7 に 2008 年 5 月 1 8 日から 6 月 1 日までの,降雨量と GL-1.0m,-1.5m,-2.15m の間隙圧と MAPIの変動を示す. この計測期間では, 5 月 19 日と 5 月 29 日に 10 分間最大雨量がそれぞれ 20mm, 13mm を越える高強度降雨が観測されている. 図 5.7(a)に示すように,間隙圧は変動が小さく, MAPI との類似性が見られない. ま た,図 5.7(b)において,高強度降雨があった 5 月 19 日と 5 月 29 日の翌日の間隙 圧が上昇していることが確認できる.これは,降雨終了から 1 日が経過する間に, 降雨の浸透の影響が深部まで及んでいることを示唆している.

続いて,2008年9月1日から9月25日を対象とした計測結果を図 5.8 に示す. 図 5.8(a)に示すように、9月11日から9月15日にかけて MAPI が 200mm 近い値 となる.これは、この期間に非常に弱い降雨が継続的に降り続いたためである. しかし,間隙圧は0kPa 近くまで増加するが、正圧とはならない.MAPI が高い値を 示していることは、表層からGL-1.0m までの土壌水分量が高くなっていることを 表しているが、深部の間隙圧の増加量が小さいことから、深部へは降雨の影響が 強く及んでいないと推察される.

続いて、9月18日と9月19日に、それぞれ高強度降雨が降った後の間隙圧に 着目する、9月19日のGL-1.5m,-2.15mの間隙圧は正圧を示しており、その後の9 月23日までGL-2.15mは正圧を示す.これは、斜面の安定性を考える上で危険な 状態であることを示している.この期間で間隙圧が正圧となった理由についての 考察を以下に述べる.まず、図 5.8(b)に示すように、降雨前9月18日の間隙圧は、 どの深度もともに0kPa近くの値をとることから、深部の土壌水分量が多い状態で あったと推察される.これは、9月11日から9月15日、9月15日から9月17 日の期間の MAPIの値が大きいことを踏まえると、表層部に保持されていた多く の水分が、MAPIの減少とともに深部へ浸透してきたことにより、水分量が増加 したためであると推察される.また、発生した降雨が高強度降雨であったために、 深部への浸透が早く、正圧となったものと推察される.

以上より,斜面内の水分量が高まっている状態で,高強度降雨が発生した場合 に深部の間隙圧が正圧となるといえる.また,MAPIの値が大きい場合,MAPIが 減少した後は深部の水分量が高いと推察はできるが,適切に深部への先行降雨の 影響を評価できていない.したがって,MAPIでは,地表面~GL-1.0mの先行降 雨の影響は考慮することができるが,すべり面付近への先行降雨の影響は考慮す ることができないといえる.

以上を踏まえると、土砂災害早期警戒体制の指標を考えるならば、すべり面に 近い GL-1.0m 以深の土壌水分状態に関する先行降雨履歴を考慮する必要がある.

前述したように、MAPI は地表面から GL-1.0m までの先行降雨履歴を適切に評価することができる. この MAPI の特徴を踏まえ、次節において、GL-1.0m よりすべり面に近い深部への雨水の浸透について考察を行い、MAPI を改良する足掛かりとする所存である.

## 5.5 斜面表層部の水収支に関する考察

本節では、APIと MAPIの低減率から、斜面表層部の GL-1.0m までの水収支に 関する検討を行う.そして、GL-1.0m より深部へ浸透する雨水の割合を算定する.

APIの低減率 K, は,1日が経過した時の,蒸発によって斜面から失われた水分の割合を表している.これを用いて,1日が経過した時の,降雨量のうち蒸発にまわる斜面内の水分の割合は1-K,で表すことができる.一方,MAPIの低減率 K,\*

は、5.2.1 示したように地表から GL-1.0m の区間における蒸発散と地下への浸透 による水分の消散を考慮している. K<sup>\*</sup> を用いることで、降雨により斜面へ浸透 した水分の、蒸発散と GL-1.0m 以深への浸透により失った水分の割合を1-K<sup>\*</sup> と して表すことができる.

以上を踏まえると、APIと MAPIの低減率から、浸透した水分のうち GL-1.0m よりも深部へ浸透する水分の割合は、以下の式に表すことができる.

$$(1-K_t)-(1-K_t^*)=K_t-K_t^*$$
 (5.6)

ここで,降雨終了時から1日が経過した時のK<sup>\*</sup>の値は,式5.5のtにt=1440を 代入することで、およそ 0.36 という値となる.これより、降雨後、1日の時間が 経過した際に,浸透した水分の約36%が,地表からGL-1.0mまでの区間に保持さ れているといえる.また,タイ・ナコンナヨックにおいて K,の値は表 5.1 に示 すように 0.7~0.8 の範囲でおおよその値をとる.これは、1日に蒸発によって、全 降雨量のおよそ 20~30%が, 地表面から消散していることを表している. 以上を 踏まえると、式 5.6の値は、0.34~0.44の範囲となる. つまり、降雨後、1日の時 間が経過した際に,斜面内へ浸透した雨水のおよそ 34~44%が,GL-1.0mの深さを 通過して深部へ浸透していくことが推察される.また,1 日経過した際の表層領 域には浸透水の約36%が保水されているため、もしこの時、降雨が追って発生し た場合、表層領域が乾いている場合に比べ後続する降雨水の深部への浸透は早く なると推察される.これは、浸透した雨水は一部不飽和帯へ供給されながら浸透 しており、飽和度が高い程、不飽和帯へ供給される量が少なくなるという考えに 基づいての考察である.また,先行降雨の影響ですべり面付近の水分量が高くな っている場合に、追って発生した降雨の深部への浸透が起こると、間隙水圧の上 昇が進み、表層崩壊しやすいものと推察できる.

このことから、斜面の安定性を考える上では、深部と地表面付近の両方の、先 行降雨履歴を同時に考慮する必要があると考えられる.そのためにも、すべり面 に近い深部の土壌水分量の把握が必要である.

## 第6章 結論および今後の展望

本章では,前章までに示した原位置計測により得られた土壌水分特性曲線,不 飽和浸透流解析,斜面内の浸透挙動,および MAPI の適用性に関する考察のまと めを行う.最後に,今後の課題に繋げるものとする.

## 6.1 本研究のまとめ

- 1) 原位置計測により得られた土壌水分特性曲線には以下に示す 2 つの特徴がある.
  - ・乾湿の繰り返しによりヒステリシスが小さくなる。

・雨季においては降雨間隔が短く、低サクション領域に集中している.

ヒステリシスが生じるのは、土中の間隙を満たすバルク水が、排水の際に間隙に残留するためである.吸水された水の大部分がメニスカス水となると仮定した場合、排水過程でもメニスカス水が脱水され、その結果ヒステリシスが小さくなる.原位置の斜面における水分保持状態は、乾湿の繰り返しにより、メニスカス水が卓越している状態になっていると推察される.

2) GL-0.6mより地表面に近い領域は、降雨中および降雨終了後は深部への浸透が起こっているが、時間経過にともない蒸発散の影響を受け、およそ2日が経過すると上向きの水分挙動が卓越する.GL-1.0m以深は、20日間近い無降雨期間が続くと、蒸発散の影響が及ぶが、無降雨期間が20日に満たない場合、GL-1.0mを通過する水は、そのまま深部へ浸透をするということがいえる.

3) 不飽和浸透流解析により得られた知見を以下に示す.

・実現象における急激な圧力水頭の上昇は、雨水の浸透によって水分が上昇したためではなく、閉塞された封入空気により圧力が増加したものであり、解析では、体積含水率の変動から雨水の浸透を表しているために、急激な圧力の上昇を再現できないものと推察される。

・実測値による SWCC では高サクション領域にある場合,雨水の浸透は表現で
 きず,地盤内の初期の負圧に対応した SWCC の設定が必要である.

4) MAPI は地表から GL-1.0m までの降雨の先行履歴効果を適切に評価している.

しかし, すべり面は GL-2.0m~-3.0m のさらに深い部分にあり, すべり面付近の 降雨の先行履歴効果を適切に評価できているとはいえない. したがって, MAPI を土砂災害早期警戒体の指標に用いるのは適切ではなく, すべり面付近への先 行降雨の影響を考慮した指標が必要である.

5) MAPIと APIの低減率から、タイ・ナコンナヨックの計測斜面において、降雨 終了時から1日が経過した際に地表面からGL-1.0m区間に保水される水分量は、 斜面へ浸透した水の約36%である.また、GL-1.0mを通過して深部へ流れる浸 透雨水の割合は34%~44%と推定できる.このように、深部までの地盤の保水 状態が高まることで、追って発生する降雨の深部へ及ぶ影響が大きくなるもの と推察される.

## 6.2 今後の課題

本研究における課題および今後の展望について以下に示す.

不飽和浸透流解析において,本研究では吸水過程のみを対象として,降雨中の 浸透挙動について実現象との比較・検討を行った.今回得られた知見をもとに, 今後,物性値の改良を行い,再現性を高めたモデルを使用して,降雨条件や先行 降雨の影響を考慮した場合の浸透挙動の把握を目指す.また,降雨終了後に対す る解析を行う為に,適切な蒸発散条件の設定を行うことが課題である.

また、本研究では、全水頭の勾配より、蒸発散による影響が及ぶ深度を推定し たが、この結果はタイ・ナコンナヨックの原位置斜面における結果である.原位 置は亜熱帯地域の灼熱状態にあるために、日本とは蒸発散の影響も異なるものと 推察できる.今後、日本における蒸発散が斜面内の水分挙動に与える影響を検討 する必要がある.

さらに,新しい土砂災害早期警戒体制を検討する上では,MAPI では考慮する ことができなかった,すべり面に近い領域を考慮する必要がある.そして,MAPI と併せて議論することにより,早期警戒体制への適用性を検討する所存である. また,日本の早期警戒体制への適用を目的とし,日本の気候,および,土性の違 いを考慮した降雨の先行履歴効果の適切な評価をすることが,今後の課題である.

## 参考文献

- 杉山友康,布川修:降雨時の斜面崩壊危険度と鉄道における運転規制,土と 基礎, Vol.55, No.9, pp.14-16, 2007.
- 2) 大津宏康,堀田洋平,高橋健二,中村一樹,新村知也: 熱帯性豪雨(スコール) に起因する斜面降雨浸透に関する原位置モニタリング,地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2009 論文集, pp.1-6, 2009.
- Ohtsu, H., Hotta, Y., Takahashi, K. and Nakamura, K.: A Study on Applicability of Modified Multi-Tank Model for Unsaturated Soil Slope, Proceedings of EIT-JSCE Joint Seminar on Rock Engineering 2008, pp.184-191, 2008.
- Hotta Yohei: Evaluation of Unsaturated Soil Slope Stability against Heavy Rainfall Using Modified Multi-Tank Model System, Master's thesis of Kyoto University, 2009.
- 5) Elrick, D.E., and Bowman, D.H.: Note on an improved apparatus for soil moisture flow measurement, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 28, pp.450-453, 1964.
- 6) 軽部大蔵,加藤正司,浜田耕一,本田道織:不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について,土木学会論文集,No.535/Ⅲ-34, pp.83~92, 1996.
- Nimura Tomonari: A Study on Runoff-Infiltration Characteristics of the Weathered Soil Slope caused by a Squall, Master's thesis of Kyoto University, pp.27, 2010
- 8) 岡田憲治:土壤雨量指数,測候時報, 69-5, pp.67-100, 2001.
- Soralump, S.: Landslide Risk Management in Thailand using API model, Proceeding of EIT-JSCE Joint International Symposium, pp.42-81, 2009.
- Hiroyasu OHTSU: Geotechnical Infranstructure Asset Management-Field Monitoring in Nakhon Nayok, Thailand-, 気候変動下のアジア諸国における豪 雨に起因する斜面崩壊に関する研究集会, p47-56, 2011.
- J D COOPER: Measuement of moisture fluxes in unsaturated soil in Thetford Forest, 1980.
- 12) 関勝寿:数値計算言語 Octave による土壌水分特性曲線の非線形回帰プログラム J. Jpn. Soc.Soil Phys. 土壌の物理性, No.105, pp.67~78, 2007.
- 13) Jotisankasa, A. and Mairaing, W.: Suction-monitored direct shear testing of

residual soils from landslid-prone areas, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.136, No.3, pp.533-537, 2010. 14) 新井正:気候区分における水文要素-その歴史的展開-,地球環境研究, Vol.7, 2005.
#### 謝辞

最後に,本研究を進めるにあたりご協力いただいた方々に感謝の意を表したい と思います.

京都大学工学研究科・大津宏康教授には、ご多忙の中幾度も研究を進めていく 上で常に的確なご助言をして頂き、また、研究に対する姿勢や土木技術者として の心構えから教えて下さり、時に厳しくも常に温かいご指導をして頂きましたこ とを、大変感謝致します.また、研究面以外においても、参考になるお話しを数 多くして頂き、研究を通して精進していきたいという気持ちを持つことができま した.厚くお礼申しあげます.

京都大学工学研究科・木元小百合准教授には,副査を務めて頂き,的確なご指摘を頂きました.心から感謝致します.

京都大学工学研究科・塩谷智基准教授には、日ごろから励ましの言葉をおかけ 下さり、多くのご支援を頂きましたことを大変感謝致します.

京都大学工学研究科・稲積真哉助教には,解析を行うにあたり,非常に丁寧に ご指導頂き,大変お世話になりました.心よりお礼申し上げます.

水文技術コンサルタント株式会社・高橋健二氏,応用地質株式会社・矢部満氏 には、本研究に関する会議の際に、大変勉強をさせて頂き、研究に対する高い意 欲を持って取り組むことができました.深く感謝致します.

伊藤宏美秘書には、日々の研究生活を様々な面でサポートして頂き、研究に打ち込む環境を整えて頂きましたことに大変感謝致します.また、大津研究室の諸 先輩方には、研究面のみならず、生活面においても親切にして頂き、非常に充実 した研究生活を送ることができました.また、同回生の方々のおかげで、切磋琢 磨しながら研究に励むことができました.

皆様方の支えにより、多くの貴重な経験をさせて頂き、この一年間を有意義な ものとすることができました.大変ありがとうございました.

最後に,大学で充実した学生生活を送る機会を与えて下さり,サポートしてい ただいた両親に,心から感謝の意を表します.

33

# 表2.1 力学特性

| 斜面傾斜角[°]                      | 27.65 | 間隙比         | 1.05 |
|-------------------------------|-------|-------------|------|
| 土の単位体積重量 [kN/m <sup>3</sup> ] | 17.66 | 有効粘着力 [kPa] | 14.5 |
| _ 土粒子密度 [g/cm <sup>3</sup> ]  | 2.71  | 有効内部摩擦角[°]  | 33.9 |
| 乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]     | 1.33  |             |      |

|                | θs    | θr       | α     | n    | R <sup>2</sup> |
|----------------|-------|----------|-------|------|----------------|
| 2010/9/2       | 0.449 | 0.431    | 0.084 | 4.19 | 0.834          |
| 2010/9/7       | 0.462 | 0.410    | 0.849 | 1.16 | 0.821          |
| 2010/9/20      | 0.458 | 0.429    | 5.586 | 1.18 | 0.903          |
| 2010/9/26      | 0.459 | 0.436    | 0.348 | 1.51 | 0.875          |
| 2010/11/20     | 0.446 | 0.431    | 0.011 | 3.91 | 0.594          |
| 吸水過程           |       |          |       |      |                |
| 2010/9/2       | 0.451 | 0.419    | 0.072 | 1.99 | 0.730          |
| 2010/9/7       | 0.456 | 0.176    | 0.014 | 8.15 | 0.974          |
| 2010/9/20      | 0.459 | 0.429    | 5.586 | 1.18 | 0.903          |
| 2010/9/26      | 0.458 | 0.439    | 0.320 | 16.8 | 0.951          |
| 2010/11/20     | 0.442 | 0.430    | 0.004 | 475  | 0.339          |
| 室内試験(dry)      |       |          |       |      |                |
| No.1 GL-0.6m   | 0.564 | 1.60E-07 | 0.002 | 1.29 | 0.993          |
| No.2 GL-0.6m   | 0.554 | 4.09E-06 | 0.004 | 1.15 | 0.989          |
| No.2 GL-1.0m   | 0.494 | 7.97E-06 | 0.011 | 1.15 | 0.991          |
| No.3 GL-0.6m   | 0.488 | 8.47E-05 | 0.003 | 1.45 | 0.824          |
| No.3 GL-1.0m   | 0.565 | 0.437    | 0.004 | 8.90 | 0.908          |
| No.3 GL-1.0m.2 | 0.510 | 0.359    | 0.026 | 2.45 | 0.904          |
| 室内試験(wet)      | 0.474 | 0.322    | 0.123 | 1.41 | 0.999          |

## 表4.1 van Genuchten式へのフィッティング結果

## 表5.1 タイ・ナコンナヨックの低減率Kt

| 月  | Kt     |
|----|--------|
| 1  | 0.7269 |
| 2  | 0.7456 |
| 3  | 0.7201 |
| 4  | 0.7283 |
| 5  | 0.7490 |
| 6  | 0.7885 |
| 7  | 0.7930 |
| 8  | 0.8012 |
| 9  | 0.7999 |
| 10 | 0.7937 |
| 11 | 0.7651 |
| 12 | 0.7460 |



図1.1 現状の土砂災害早期警戒体制一例



図2.1 タイ・ナコンナヨック計測サイト



#### 図2.2 斜面断面図



図2.3 斜面計器平面図



図2.4 原位置モニタリングサイトの露頭



図2.5 岩盤(流紋岩)斜面の風化過程 模式図





#### 図2.7 粒径加積曲線



図2.8 三角座標による分類



図2.9 室内試験結果により得られたSWCC



参考文献; 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 内田佳子; 各種土質材料の水分特性曲線 に着目した集中豪雨による河川堤防や河岸の脆弱性簡易評価

日本の各種地盤での試験結果の比較(b)原位置サンプリング試料に対する結果 (a)

図2.10 土壌水分特性曲線の比較



団粒化が顕著

## 透水性低下

図2.11 斜面法尻部の各進度における土試料



図3.1 原位置計測により得られたSWCC(2010/9/2~2010/11/25)



図3.2 原位置計測により得られたSWCC(2010/9/26~2010/10/12)



図3.3 原位置計測により得られたSWCC(吸水過程)







図3.5 原位置計測により得られたSWCC(排水過程)低サクション領域にお ける挙動



### 図3.6 原位置計測によって得られたSWCCと室内試験によって 得られたSWCCの比較



 $u_a$ :間隙空気

図3.7 土粒子まわりの間隙水の挙動



図3.8 中腹部の全水頭の挙動



図 3.9 深度と全水頭の相関 (2008年 乾季)



図3.10 中腹部の全水頭の変動



図3.11 深度-全水頭の相関



図3.12 深度-間隙圧の相関



図3.13 深度-体積含水率の相関



図4.1 解析モデル・メッシュ生成



#### 図4.2 降雨条件





図4.4 解析結果(降雨前サクションが低サクションである場合)



### 図4.5 解析結果 (降雨前サクションが高サクションである場合)



図4.6 SWCCの比較



図4.7 解析結果(9/26の降雨ケース)

-0.4m

-0.6m





### (a) 限界降雨包絡線を用いた早期警戒体制



(b) 提案手法

図5.1 早期警戒体制の比較



8/27 1:00 ~ 8/27 8:20

地盤内水分貯留量 : 降雨終了時の残存浸透量: 次回降雨前の残存浸透量:

$$Y = \sum_{i=1}^{6} D_i \cdot \theta_i$$
$$S_f = Y_f - Y_s$$
$$S_n = Y_n - Y_s$$

Y<sub>s</sub>:降雨開始時の水分貯留量 Y<sub>f</sub>:降雨終了時の水分貯留量 Y<sub>n</sub>:次回降雨前の水分貯留量

### 図5.2 地盤内水分貯留量の時系列変化



図5.3 **低減率K<sub>t</sub>\*の算出式** 





図5.4 法尻部における間隙圧の変動(9/1 22:00~9/4 15:00)







図5.6 間隙圧(2008/5/10~2011/8/31)




間隙圧(kPa)



(b) 深度と間隙圧の相関(08/9/17~9/24)



図5.8 MAPIと深部の間隙圧の相関(2008/9/1~9/25)