

豪雨時の盛土のり面安定性評価における デジタルツインの有用性

AVAILABILITY OF DIGITAL TWIN FOR ASSESSING EMBANKMENT SLOPE STABILITY DURING HEAVY RAINFALL

小田和広¹・小泉圭吾²・伊藤真一³・乾徹⁴

Kazuhiro ODA, Keigo KOIZUMI, Shinichi ITO and Toru Inui

¹大阪産業大学工学部 (〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1)

E-mail: oda@ce.osaka-sandai.ac.jp

²地球観測株式会社 (〒564-0051 大阪府吹田市豊津町 8 番 10 号 201)

³立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1)

⁴大阪大学大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Key Words: slope stability, digital twin, heavy rain, numerical simulation

1. はじめに

斜面崩壊は、土中の水分状態に大きく依存する。したがって、斜面の安定性を評価するためには、斜面への雨水浸透挙動やそれによる斜面中の水分状態を把握することが重要である。それを調査する方法の開発のため、多くの現地計測が実施されている。小泉らは、各センサ間で通信を行うフルメッシュネットワークを用いた斜面監視システムの実証実験を行い、その有効性を検証した¹⁾。櫻谷らは、高速道路の斜面に対するリモート監視システムを開発した^{2),3)}。NEXCO 西日本では、高速道路の維持管理の高度化に向けて newron®(ニューロン)を開発した⁴⁾。newron® は、各種センサ機器で計測した斜面の変位や土中水分量を無線センサネットワーク技術と高速道路上の自営回線を活用して「常時状態監視(常時健全性が見える化)」を実現している。藤本らは、京都市の清水寺境内の斜面における地下水流動特性を解明するためにテンシオメータを用いて間隙水圧の現地計測を行った⁵⁾。また、檀上らは、計測された間隙水圧の長期データから清水寺境内の斜面の飽和帯を特定し、斜面崩壊予測の精度向上のための雨量指数を提案した⁶⁾。酒匂らは、斜面防災の観点から負の間隙水圧を長期多点観測するシステムの開発を

行った⁷⁾。このように、現在では斜面中の水分状態をリアルタイムかつリモートでモニタリングできる状況にある。しかしながら、計測値だけから斜面中の水分状態を直接的に把握すること、また、斜面の安定性を適確に推定することは非常に困難である。

ところで、近年、産業界ではデジタルツインが普及してきている。これは、現実世界の複雑なシステムや機械を数値シミュレーションで適切に再現し、リアルタイムでデータを取得・分析することで、予測、最適化、効率化を実現する技術の総称である。防災の分野においてもこの考えを導入したスマート防災の社会実装に向けた技術開発が行われている⁸⁾。また、海外では斜面デジタルツインの実用的なフレームワークが開発され、実際の斜面に対する適用されている⁹⁾。

本研究では、豪雨時の斜面の安定性評価にデジタルツインを適用し、その有用性について考察する。まず、斜面中の水分状態におけるデジタルツインを提案する。次に、研究の対象とした盛土のり面を紹介する。さらに、数値シミュレーションとして用いた飽和-不飽和浸透流解析と現地計測の解析モデルについても言及する。その後、現地計測結果に対するデータ同化の妥当性を検証する。データ同化シミュレーションに基づき、現地計測結果と斜面中の水

の状態との関係について考察し、雨水の浸透から地下水の形成、さらに、その上昇・下降挙動を推定する。さらに、無限長斜面の安定に基づき、のり面の安定性の評価を行う。これらを通じ、降雨と土中の水の状態との関係の推定に対するデジタルツインの有効性について考察する。

2. 斜面中の水分状態に対するデジタルツイン

図-1 は斜面中の雨水浸透の問題に対するデジタルツインを概念的に示している。フィジカル空間は現地斜面における土中の水の状態のことである。これは、土壌水分計による体積含水率やテンシオメータによる間隙水圧の計測によって把握される。ただし、計測点での計測項目以外は不明である。一方、サイバー空間である数値シミュレーションでは、斜面中の水分状態を空間的に把握できる。また、計測されていない物理量や直接的に計測できない物理量

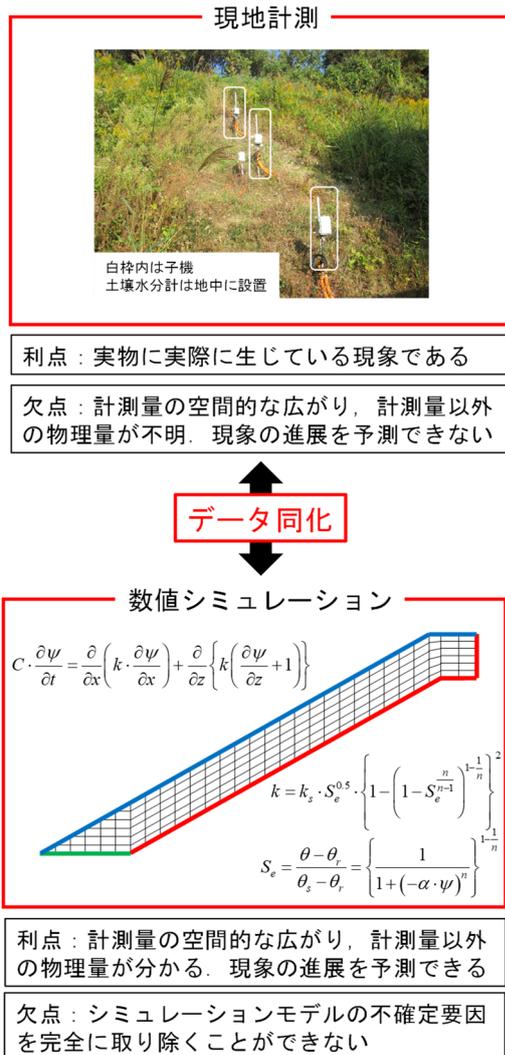


図-1 斜面の水分状況に関するデジタルツイン

も得られる。しかし、現地地盤の解析モデル化にあたって、雨水浸透挙動を支配する水分特性曲線や不飽和透水特性、また、解析モデルの境界条件の設定等に不確定要因が多数残る。このため、解析結果に全面的な信頼性をおくことが出来ない。この両者を高度に融合させ、それぞれの欠点を利点によって打ち消しあう手法がデータ同化である。つまり、計測値を再現できるようにモデルを逐次修正することによって、シミュレーション結果に対する信頼性を担保する。一方、計測されていない物理量、土中の水分状態の空間的な広がりや今後の進展などの予測についてはシミュレーション結果が現地計測を補うこととなる。現在普及しつつあるリアルタイムかつリモートのモニタリングシステムと数値シミュレーションをデータ同化によって密接に連携すれば、現在の斜面中の水分状態を把握できるだけでなく、数時間先の土中の水の状態を推定することも可能になる。すなわち、これが斜面中の水分状態に関するデジタルツインと期待される役割である。

3. 現地計測

本研究では、近畿地方の道路盛土のり面を研究の対象とした¹⁰⁾。図-2 はのり面の断面と各種センサの設置状況を示している。盛土は、主にまさ土で構成され、1:1.8 勾配の4段ののり面を持っている。現地計測は3段目ののり面で行った。土壌水分計は2カ所に設置した。それぞれの計測点において、土壌水分計は、地表面から40cm、80cm および 100cm の3深度に設置した。設置深度は簡易貫入試験のNd値を参考にして決定された。本論文では、A計測点に着目した。なお、図中には記載していないが、近接して雨量計も設置した。

図-3 は研究対象期間（2018/7/4～7/10）における日雨量を示している。研究対象とした降雨の総雨量は437.5mmであった。また、降雨の継続時間が73.5時間であり、前半は降雨量が多く後半は少ないことから、前半が強めの長雨であったと判断される。

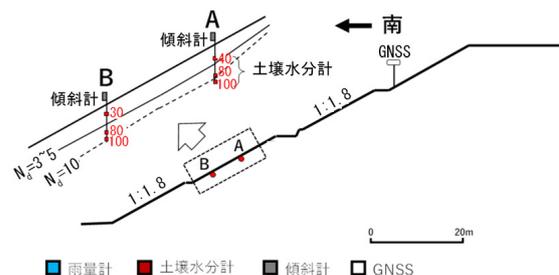


図-2 土壌水分センサ設置状況^{10)に加筆}

4. 数値シミュレーション

本研究では、シミュレーションモデルとして赤井らの方法¹¹⁾による飽和-不飽和浸透流解析を用いた。また、水分特性曲線モデルは van Genuchten モデル¹²⁾を、不飽和透水係数モデルは Mualem モデル¹³⁾を用いた。

図-4は解析モデルを示している。雨水の浸透挙動は重力による影響が支配的であることから、鉛直方向の浸透のみを考慮する一次元問題としてモデル化を行った。簡易貫入試験の結果から140cm以深の土は良く締まっており難透水層とみなせると考え、そこを排水境界とすることとした。そのため、モデル全体の大きさは140cmとした。そして、各土壌水分計の設置深度の中間を層の境界として三つの層に分割した。また、モデル上面は降雨境界とし、雨量計で計測された降雨量の全量を与えた。次に、モデル側面は非排水境界とした。最後に、モデル底面は浸透係数を導入した排水境界とした¹⁴⁾。

5. 融合粒子フィルタ

デジタルツインにおいてフィジカル空間とサー

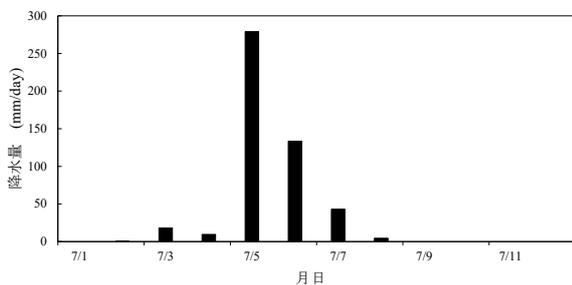


図-3 研究対象期間における降雨

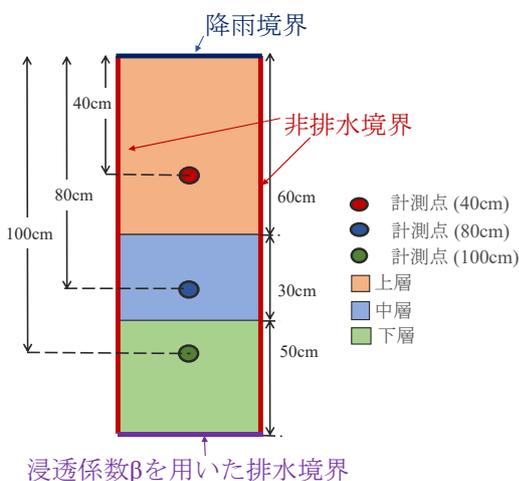


図-4 解析モデル

バー空間を密接に連携させるデータ同化は、シミュレーション結果の不確実性を排除するための非常に重要な役割を果たす。データ同化には種々の方法があるが、本研究では融合粒子フィルタを用いた¹⁵⁾。本手法は他の粒子フィルタに比較して複雑であるが、退化がほぼ起きないことやシミュレーションが現地計測結果と整合するように土壌水分パラメータを自律的に重積でき、その結果、粒子の数を少なくできることなどの優れた特徴を有している¹⁶⁾。

図-5は融合粒子フィルタのアルゴリズムを概念的に示している。融合粒子フィルタでは、粒子と呼ばれるシミュレーションを複数使い、計測値との近接度に基づいてデータ同化を行う。融合粒子フィルタでは(a)1期先予測、(b)フィルタリング、(c)リサンプリング、(d)マーキングの4つの計算ステップが繰り返される。まず、(a)1期先予測では、時刻 t における体積含水率を求めるためのシミュレーションを行う。次に、時刻 t における計測値が与えられると(b)フィルタリングが行われる。フィルタリングでは計測値との適合度に応じて粒子の重みを調整する。図中では計測値に近い粒子は大きく、遠い粒子は小さくなっている。つまり、図中の粒子の大きさは粒子の重みを表している。次の(c)リサンプリングでは、(b)フィルタリングで付けた重みに応じて粒子を復元抽出する。図では、全体が21個になるように重みに応じて粒子を復元している。そのため、重みの一番大きい玉は5個、次は4個となり、逆に重みの小さい玉は1個である。最後に(d)マーキングでは21個の粒子を3個ずつの7組にし、それぞれの組毎に土壌水分特性パラメータについて重みつき和を行う。その結果、計測値に対する適合度が高い粒子の特性が主要になるだけでなく、多様な粒子を生成できるため、アンサンブルの退化が起こり難くなる。なお、本研究では500個の粒子を用いた。表-1は解析に使用したパラメータの範囲を示している。データ同化

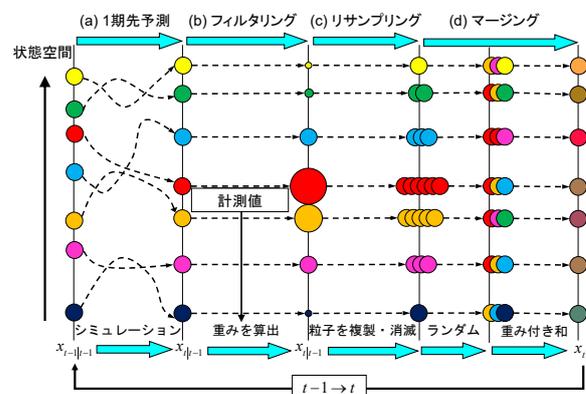


図-5 融合粒子フィルタのアルゴリズム

解析では、この範囲内で一様乱数によりランダムなパラメータの組み合わせを 500 通り作成し、それぞれの粒子の初期条件とした。パラメータの最大値と最小値は、現実的にあり得る範囲の中で、予備解析等を通じ、解析上破綻が生じないこと、解析の安定や効率、解析結果の再現性などを検証して決定した。

6. 体積含水率の再現

図-6 は計測値とデータ同化結果の比較を示している。図中、実線が現地計測値を、破線がデータ同化解析の結果を示している。なお、データ同化結果は 500 個の粒子による平均値である。データ同化シミュレーションは、40cm, 80cm および 100cm のいずれの深度における体積含水率の経時変化を概ね適切に再現できている。すなわち、シミュレーション結果は現場における斜面中の水分状態のデジタルレプリカとして適切である。

7. 斜面中の水分状態

図-7 はデータ同化結果から推定される有効飽和度の深度分布の経時変化を示している。(a)7/5の0:00では本格的な降雨の前なので有効飽和度は低く、全体的に均一である。降雨が開始すると地表面部分から雨水が浸透して行く。(b)では、雨水が浸透した部分は完全に飽和するわけではなく、有効飽和度は 0.7

程度である。深い部分は雨水浸透の影響がなく、有効飽和度はほぼ初期値のままである。(c)では、有効飽和度は 0.7 程度ではほぼ均一である。すなわち、地盤に入った雨水の分だけ底面から抜けていく擬飽和状態である。(d)~(h)までは底面部分は有効飽和度が 1.0, すなわち、飽和している。飽和した部分は時間の経過とともに上方に拡大している。この段階における降雨強度は強くないもののそれまでの降雨によって土の保水能力が低下していること、解析モデルの底面を浸透係数 β を用いた排水条件にしているため、間隙水の下方に抜ける能力が低いことによってそのような現象が生じたものと考えられる。特に、(h)では、ほとんどの部分において有効飽和度は 0.8 以上になっている。(i)では、降雨が終わりかけているので地表面部分の有効飽和度は 0.7 程度まで下がっているが、それ以外は飽和したままである。(j)では雨はほとんど止んでいるので地表面部分から有効飽和度は低下し、また、飽和している部分も徐々に下方に縮小している。

図-8 はデータ同化結果から推定される間隙水圧の深度分布の経時変化を示している。(a)~(c)までは間隙水圧は負のままであり、地下水位は形成されていない。(d)では、底面付近での間隙水圧は正、すなわち、地下水位が生じている。顕著に強い降雨がないにもかかわらず、(h)に至るまで地下水位(図中の白の部分)は上昇している。その後、(i)では地下水位は保たれ、(j)では地下水位は下がっている。

表-1 パラメータの範囲

		θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n (-)	k_s (m/s)	β (-)
上層	最大値	0.44	0.20	0.13	1.8	1.0×10^{-3}	-
	最小値	0.42	0.12	0.03	1.3	1.0×10^{-5}	-
中層	最大値	0.42	0.20	0.13	1.8	1.0×10^{-3}	-
	最小値	0.40	0.12	0.03	1.3	1.0×10^{-5}	-
下層	最大値	0.45	0.18	0.13	1.8	1.0×10^{-3}	-
	最小値	0.43	0.12	0.03	1.3	1.0×10^{-5}	-
	最大値	-	-	-	-	-	0.1
	最小値	-	-	-	-	-	0.001

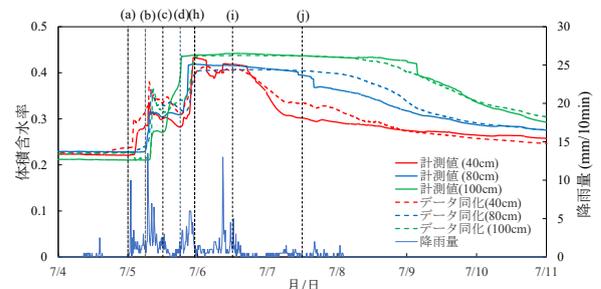


図-6 計測値とデータ同化結果の比較

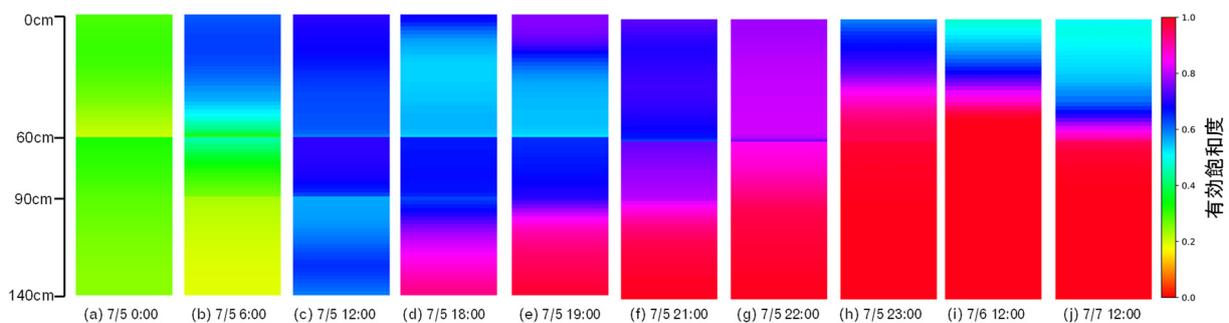


図-7 有効飽和度の深度分布の経時変化

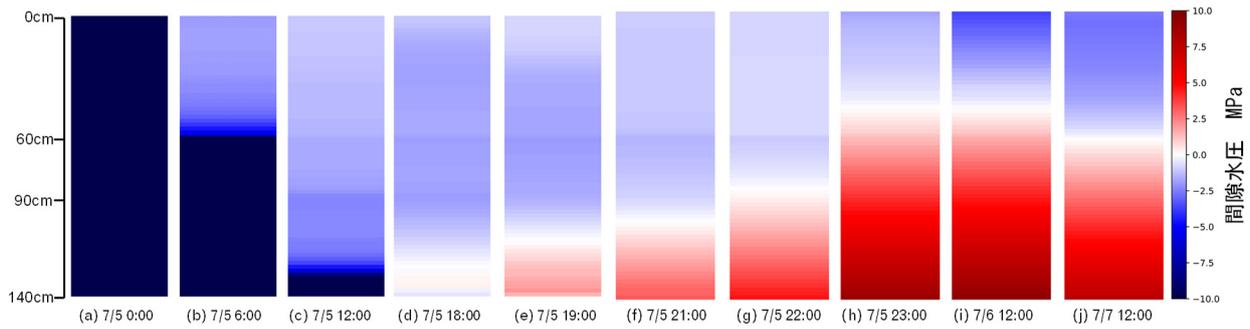


図-8 間隙水圧の深度分布の経時変化

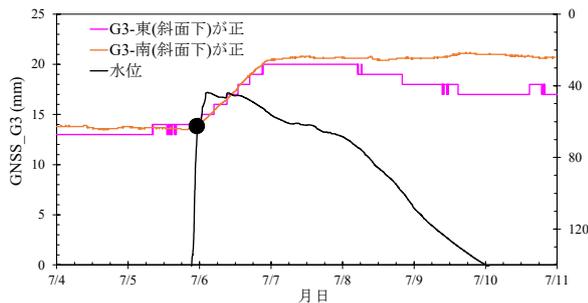


図-9 地下水位と RTK-GNSS による変状の経時変化

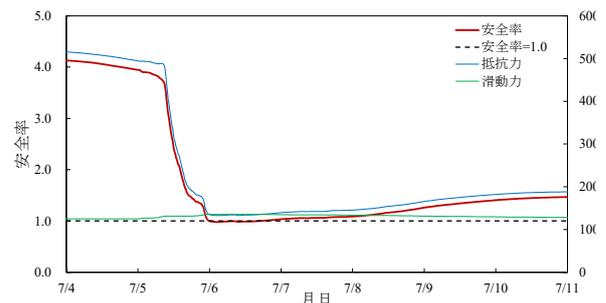


図-10 安全率の時間変化

8. 地下水位と変状との関係

図-9 は地下水位と変状の経時変化を併せて示している。変状は体積含水率の現場計測地点の近傍に設置された RTK-GNSS によって得られた 10)。地下水位が地表面から約 60cm に達すると変状が始まっている (図中の●)。つまり、地下水位の上昇による有効応力の減少がのり面の不安定化をもたらした結果変状が生じたものである。なお、変状は 24 時間連続して生じているように見えるが、これは、RTK の誤差を 24 時間分のデータを移動平均によって処理したためである。本来、変状は瞬間的に生じ、その後、変状は生じなかったと考えられる。

9. 安全率の経時変化

図-10 は無限斜面法に基づく安全率の時間変化を抵抗力、滑動力のそれらと併せて示している。安全率の計算に当たってすべり面の位置は深度 140cm とした。すべり面における有効応力に計算では地下水位と併せてサクションも考慮した。土の内部摩擦角と粘着力はそれぞれ、 36° と 0.0kPa とした。図-9 に示したように 7/6 の午前零時頃に斜面の変状が生じていることから、この時点で安全率が 1.0 に達していたと仮定した。そして、1.0 になるように内部摩擦

角と粘着力を決定した。なお、粘着力を 0.0kPa としたのは、地下水の変化が安全率に及ぼす影響をできるだけ顕著に表現しなかったためである。したがって、研究対象の盛土が 36° の内部摩擦角と 0.0kPa の粘着力を持っているというわけではない。

体積含水率の増加による単位体積重量の増加によって滑動力は増加するがその量は微々たるものである。抵抗力は 7/5 の 10:00 頃から急激に減少する。これは、図-9 から示唆されるように雨水が深度 140cm まで達し、体積含水率が増加することによってサクションの急激な減少が起こったためである。抵抗力の減少は地下水位がピークを迎えるまで継続する。その後、7/6 の 19:00 頃まではほぼ定常状態であり、それ以降は徐々に増加している。安全率は抵抗力に対する滑動力の比であるので、本研究の場合、安全率は抵抗力に強く依存した挙動となっている。

今回、近隣の斜面において変状が生じたことからそれに基づき土の強度定数を推定することができた。一方で、このような例は非常にまれである。したがって、安全率の計算においては盛土の設計時の強度定数を使うことにより、盛土のり面の安全率を推定することができる。以上の点から現地計測とその数値シミュレーションをデータ同化によって密接に連携させたデジタルツインは、豪雨時の斜面の安定性評価において非常に有用である。

10. 結論

本研究で得られた主な知見を以下に取り纏める。

1. データ同化結果から、計測されなかった地下水位や計測できない有効飽和度の空間分布を推定することができる。また、それらは図化することから斜面中の水分状態を容易に把握することができる
2. 地下水位がピーク付近に達した時に斜面の変状が生じていることから、地下水位の高まりが斜面の不安定性を高め、変状が生じたものと考えられる。
3. 無限長斜面の安定計算を適用した場合、雨水の浸透によってサクションが解放されることによって急激な安全率の低下が起こる。そして、地下水位が生じるとその傾向はさらに顕著となる。すなわち、含水量の増大による斜面を滑らそうとする力の増大ではなく、有効応力の低下による抵抗力の急減が安全率の低下を引き起こす主要因である。
4. 斜面中の水分状態に関するデジタルツインは斜面の安定性の評価において有用である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 21K04595 の助成を受けた。また、使用したデータは NEXCO 西日本より提供いただいた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 小泉圭吾・藤田行茂・平田研二・小田和広・上出定幸：土砂災害監視のための無線センサネットワークの実用化に向けた実験的研究，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.69, No. 1, 46-57, 2013.
- 2) 櫻谷慶治，藤原優，竹本将，小泉圭吾，清田有二：高速道路斜面の多目的型リアルタイム遠隔監視システムの開発—安全・安心な高速道路を目指して—，基礎工，Vol. 43, No. 11, pp. 33-36, 2015
- 3) Keiji Sakuradani, Keigo Koizumi, Kazuhiro Oda, Satoshi Tayama : DEVELOPMENT OF A SLOPE DISASTER MONITORING SYSTEM FOR EXPRESSWAY OPERATION AND MAINTENANCE CONTROL, Journal of GeoEngineering, 13(4), 189-195, 2018.
- 4) 小濱健吾：高速道路の自営回線と無線センサを活用したモニタリングシステムの開発 —NEXCO 西日本と大阪大学の産学連携—，産学官連携ジャーナル，18 巻，1 号，7-9, 2022.
- 5) 藤本将光・檀上徹・平岡伸隆・深川良一：京都市清

- 6) No. 2, 43-47, 2017.
- 7) 檀上徹・酒匂一成・藤本将光・石澤友浩・伊藤真一・深川良一：テンシオメータの計測結果を加味した雨量指標による計測斜面での斜面崩壊予測精度向上に関する検討，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.77, No. 1, 87-102, 2021.
- 8) 酒匂一成・横田裕介・里見知昭・檀上徹・深川良一：無線センサーネットワークを利用した斜面内の負の間隙水圧の長期多点計測システム，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.74, No. 2, 144-163, 2018.
- 9) 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) スマート防災ネットワークの構築 社会実装に向けた戦略及び研究開発計画 内閣府，https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip_3/keikaku/08_smartbousai.pdf (2024 年 5 月 30 日閲覧)
- 10) Xin Liu, Yu Wang, Raymond C.H. Koo, Julian S.H. Kwan: Development of a slope digital twin for predicting temporal variation of rainfall-induced slope instability using past slope performance records and monitoring data, Engineering Geology, 308, 106825, 1-17, 2022.
- 11) 堤浩志・田山聡・殿垣内正人・小西貴士・小泉圭吾：高速道路沿いのり面における平成 30 年 7 月豪雨時の土中水分計測結果の考察，第 54 回地盤工学研究発表会発表講演集，1769-1770, 2019
- 12) 赤井浩一・大西有三・西垣誠：有限要素法における飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文報告集，No.264, pp.87-95, 1977
- 13) van Genuchten, M.: Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, Research Report, No.78-WR-08, Princeton Univ., 1978
- 14) Mualem, Y.: A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resources Reserch, Vol.12, pp.513-522, 1976
- 15) 伊藤真一・小田和広・小泉圭吾・西村美紀・檀上徹・酒匂一成：融合粒子フィルタを用いた境界条件を含む浸透解析モデルの推定手法の提案，土木学会論文集 C, 76/1, 52-66, 2020
- 16) 中野慎也・上野玄太・中村和幸・樋口知之：Merging Particle Filter とその特性，統計数理, 56/2, 225-234, 2008.
- 17) 伊藤真一・小田和広・小泉圭吾・藤本彩乃・越村謙正：現地計測に基づく浸透解析モデルのデータ同化に対する融合粒子フィルタの有用性の検証，土木学会論文集 A2 (応用力学)，73/2, 45-54, 2017.

(2024. 5. 31 受付)