

体積含水率の現地計測から地下水位の推定におけるサイバーフィジカルシステムの有用性

大阪産業大学 ○小田 和広
大阪大学 小泉 圭吾
鹿児島大学 伊藤 真一

1. はじめに

サイバーフィジカルシステムとは、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、社会的課題の解決を図るものとされている。この考え方を斜面防災に適用してみれば、各種センサによって計測される実物の現象（フィジカル空間）とシミュレーション（サイバー空間）を同期させることである。本研究では、サイバーフィジカルシステムの適用事例を通じ、そのメリットを明らかにする。

2. 検討対象事例

本研究では、近畿地方に存在する道路沿いの主にまき土で構成された盛土の法面を研究の対象とした¹⁾。この盛土では平成30年7月豪雨時に変状が観察された。本盛土には、土壌水分計、傾斜計、雨量計、RTK-GNSS、水位計が設置されている。このうち、土壌水分計は地表面からそれぞれ深度40cm、80cmおよび100cmに設置されている。本研究では土壌水分計による体積含水率、雨量計による雨量を使用するので、これらの計測値によってフィジカル空間を表すこととなる。

3. 解析手法

サイバー空間となるシミュレーションには赤井らの方法に基づく飽和不飽和浸透流解析を適用する²⁾。解析では水分特性曲線モデルとして、van Genuchtenモデル、また、不飽和透水係数モデルとして Mualemモデルを用いる。

現地計測（フィジカル空間）とシミュレーション（サイバー空間）を融合させる手法としてデータ同化を用いる。データ同化は、計測値にシミュレーション結果が整合するようにモデル（解析パラメータや境界条件など）を修正する手法である。つまり、本研究におけるフィジカル空間とサイバー空間の融合とは、計測が行われる毎に、計測値に適合するようにデー

タ同化手法によってシミュレーションモデルを修正することを指す。なお、本研究では、データ同化手法の中でも極めて取り扱いが容易な融合粒子フィルタ（MPF）を用いる²⁾。

4. 解析モデル

図-1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。地層区分は土壌水分計の設置位置を勘案して行った。また、地下水位の発生と消失を再現するため、浸透係数を用いた排水境界条件によって解析モデル底面の境界をモデル化した²⁾。

5. データ同化結果の妥当性

図-2は計測深度がそれぞれ40cm、80cmおよび100cmの体積含水率の経時変化における計測値とデータ同化結果の比較を示している。図中、実線が計測値、破

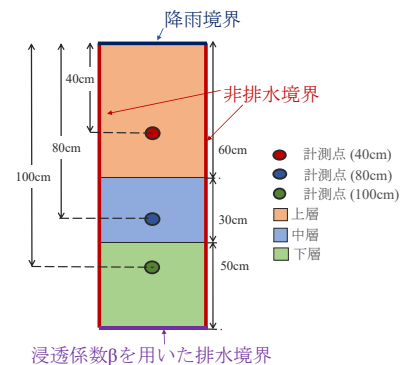


図-1 解析モデル

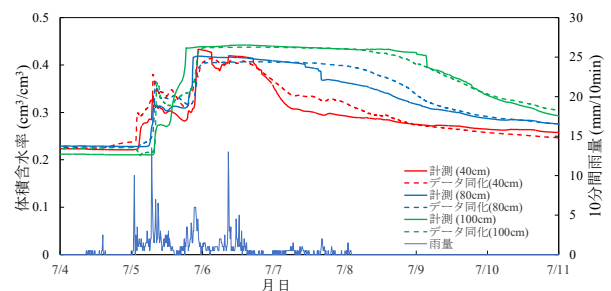


図-2 体積含水率の経時変化に計測値とデータ同化結果の比較

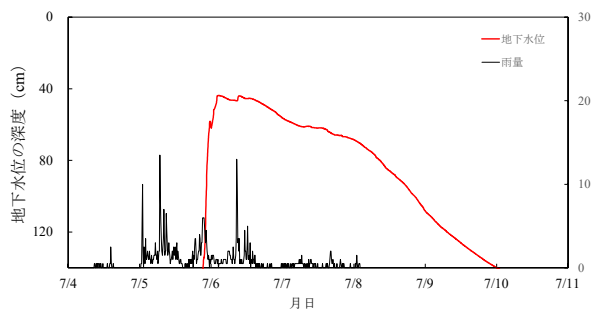


図-3 データ同化結果と実測値の平均絶対誤差とデータ同化間隔の関係

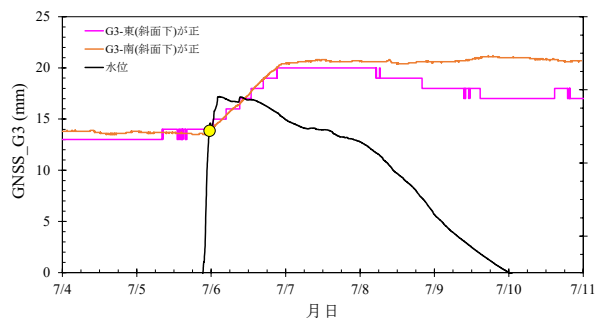


図-4 地下水位と変状の経時変化

線がデータ同化解析の結果である。いずれの深度においても体積含水率が一旦上昇し、その後、一時的に増加が止まる。さらに、体積含水率はピークに達した後、ほぼ平衡状態になった後、時間の経過とともに徐々に減少する。そのような現場計測の挙動をデータ同化結果は適切に再現できている。

6. 推定された地下水位の挙動と変状との関係

サイバーフィジカルシステムのメリットとして、計測していない物理量（本研究では、地下水位）を推定できることが挙げられる。図-3 はデータ同化結果から推定される地下水位の経時変化を示している。地下水位は7/5の深夜に発生し、その後、急激に上昇する。7/6の早朝にピーク値の約40cmの深度に達する。その後、7/6の夕刻までその水位を保った後、時間の経過とともに単調に地下水位は低下している。なお、この盛土の地下水位は約18mの深度にあり、降雨期間中ほとんど変動が無かった。したがって、今回発生が推定された地下水は局所的に発生したものである。図-4 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からやや離れた地点に設置されたRTK-GNSSによって得られた。地下水位が地表面から約60cmに達すると変状が生じている（●）。つまり、地下水位の上昇による有効

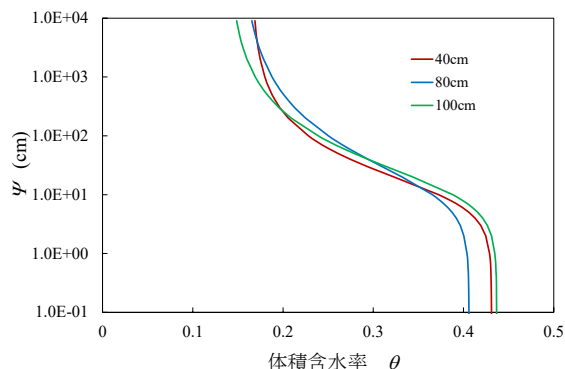


図-5 推定された水分特性曲線

応力の減少がのり面の不安定化をもたらした結果、変状が生じたと考えられる。なお、変状は24時間連続して生じているようにみえるが、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³⁾。

7. 水分特性曲線の推定

図-5 は推定された水分特性曲線を示している。水分特性曲線を得るためには保水性試験が必要となるが、データ同化を適用すれば計測が行われる毎に決定できる。なお、逆解析によっても水分特性曲線を同定することは可能であるが、粒子フィルタを適用する方が再現性の高い水分特性曲線を得ることができる⁴⁾。

5. まとめ

本研究では、平成30年7月豪雨時に変状が観察された道路盛土の現地計測にサイバーフィジカルシステムを適用し、そのメリットを明らかにした。それは、現地計測が行われなかった地下水位の推定や水分特性曲線の同定である。

参考文献

- 1) 堤浩志ほか：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，pp.1769-1770，2019。
- 2) 伊藤真一他：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，Vol.76, No.1, 52-66, 2020。
- 3) 小田和広他：体積含水率の現地計測に対するデータ同化に基づく地下水位挙動の推定，第57回地盤工学研究発表会，（投稿中），2022。
- 4) 伊藤真一他：現地計測結果に基づく土壌水分特性パラメータ同定に対する粒子フィルタの適用性，土木学会論文集C 第72(4) 354-367, 2016。