

サイバーフィジカルシステムの発想による豪雨時の斜面の危険度評価

Hazard evaluation of slope in heavy rain by cyber-physical system concept

小田 和広 (Oda Kazuhiro)

1. 研究の背景と目的

最近、建設業の分野でデジタルツインが普及しつつある。それは、設計によってもたらされる BIM データによって、建設工事のあらゆる段階でデジタル上に構造物を再現するものである。立体的な目視が可能である点から非常に有用である。一方、デジタルで再現するものは必ずしも実物でなくても良い。例えば、気象予報は数値シミュレーションを気象観測と同期させることによってコンピュータ上で気象現象を再現することにより行われる。ここで、デジタルで再現するものは実物でなく、現象である。この考えに基づけば、最近普及しつつある斜面の動態モニタリングによってもたらされる観測結果を数値シミュレーションと同期させることにより、斜面中の水の状態という現象をコンピュータ上で再現できることになる。本研究では、体積含水率の現地計測結果をシミュレーションと同期させることによって得られる情報の有用性について明らかにする。

2. 解析対象斜面

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¹⁾。図-1 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。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。土壌水分計と雨量計の計測間隔はいずれも 10分である。

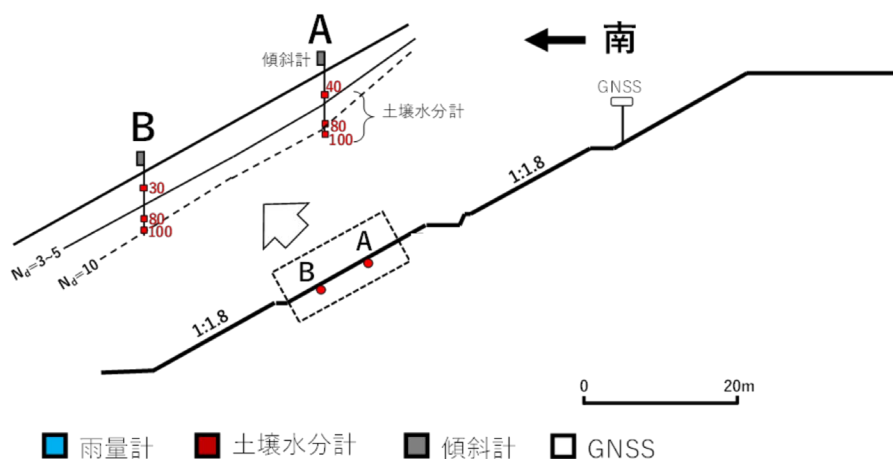


図-1 土壌水分センサ設置状況¹⁾に加筆

3. データ同化手法とシミュレーションモデル

デジタルツインには、実際に起こっている現象（フィジカル空間）の観測値と数値シミュレーション（サイバー空間）を同期させるデータ同化が不可欠である。本研究では、データ同化手法として、融合粒子フィルタ²⁾を用いた。図-2は解析モデルを示している。シミュレーションモデルとして、水分特性曲線モデルとして van Genuchten モデル、不飽和透水係数モデルとして Mualem モデルを組み込んだ飽和・不飽和浸透流解析を用いた。また、地下水位の発生を再現するために数値モデルの底面境界には部分的な排水を許容する排水境界を適用した³⁾。

4. デジタルツインの妥当性

図-3はデータ同化結果を示している。図中には現地で計測された降雨の経時変化も併せて示している。降雨の前から降雨の終了後まで現地の計測結果と周知シミュレーションの結果はほぼ一致しており、斜面中の水の状態を適切に再現できると考えられる。

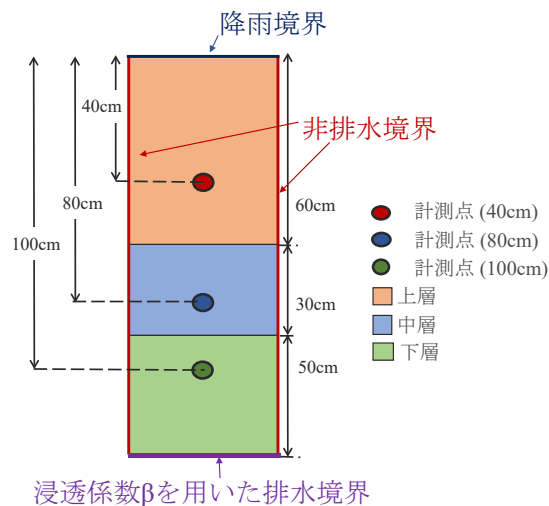


図-2 解析モデル

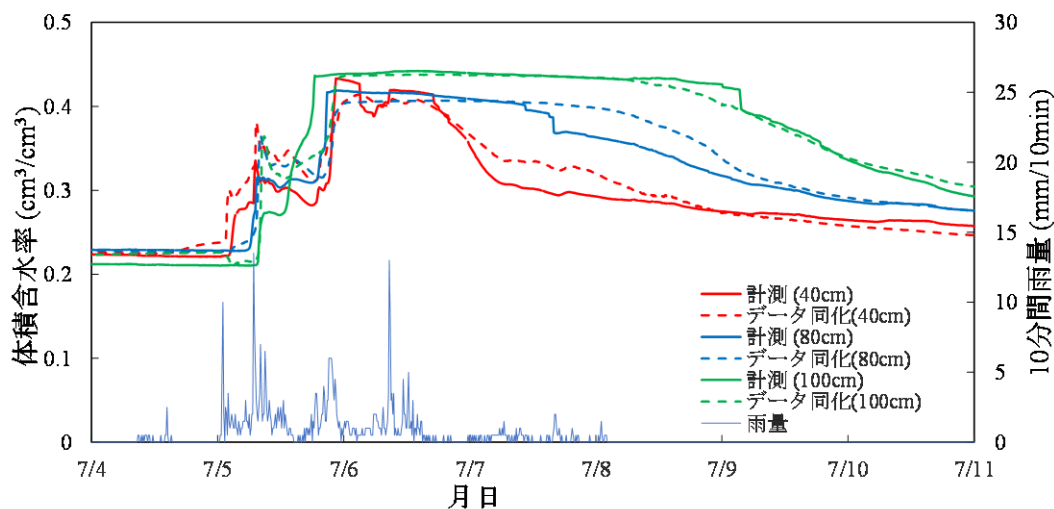


図-3 データ同化結果

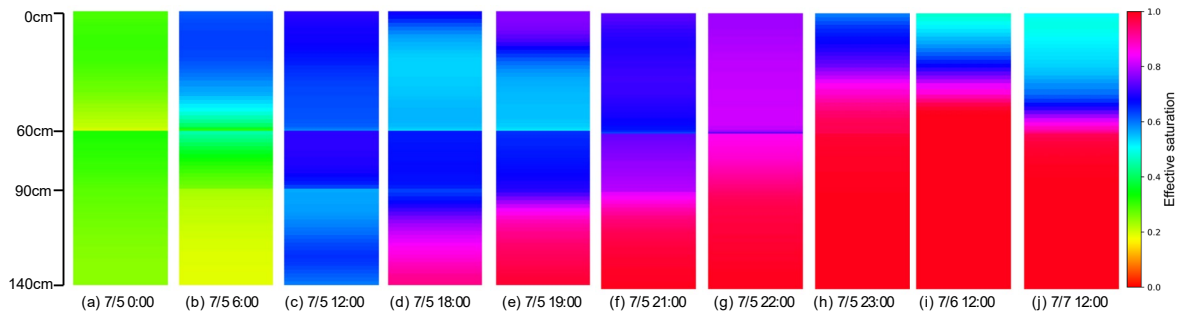


図-4 有効飽和度の深度分布の経時変化

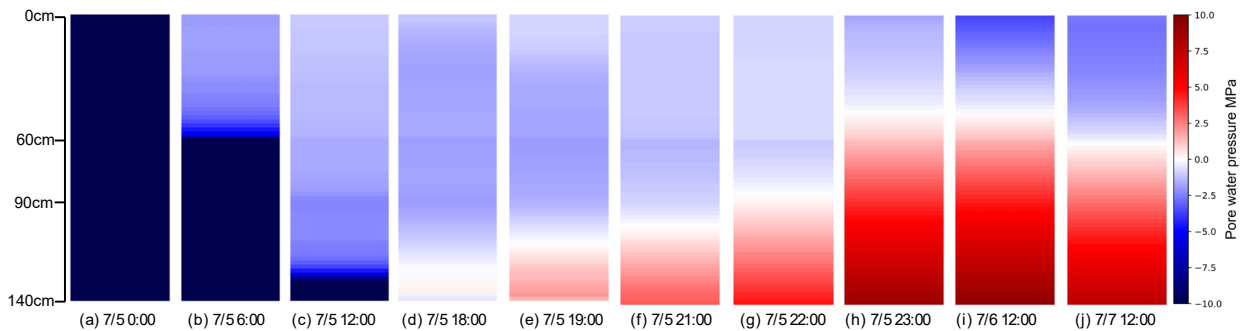


図-5 間隙水圧の深度分布の経時変化

5. デジタルツイン

図-4 は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。有効飽和度は計測によってはもたらされない。(a)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。(c)では、有効飽和度は 0.7 程度でほぼ均一である。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似飽和状態である。(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、飽和した部分は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、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。

図-5 は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。(d)の段階で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)では対象地下水位は下がっている。今回、地下水位は計測してはいないが、その発生からの経時変化を推定できた。ここで、地下水位の上昇は土の有効応力を減じさせるため、斜面の崩壊に対する安定度が低下し、危険度が高まっていることが分かる。つまり、サイバーフィジカルシステムを適用することにより、たとえ地下水位を計測していなくても地下水位の発生からその高さまで推定することが出来るため、相対的な危険度評価を行うことが出来る。

6. まとめ

本研究から、①サイファーフィジカルシステムは斜面中の水の状態にも適用出来ること。②シミュレーションにより、計測出来ない有効飽和度や計測していなかった間隙水圧を、それらの空間分布を含めて推定できることを明らかにした。

今回の研究では、実質的にはデータ同化ではあるが、リモートでのリアルタイムモニタリングシステムが開発され、運用されている現在、サイバーフィジカルシステムを導入できる準備は十分に整っている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 樋口知之：予測にいかす統計モデリングの基本，講談社，2011.
- 3) 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.