

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方法の提案

A Cyber-Physical Systems Approach to Slope Stability Assessment During Heavy Rainfall

小田 和広 (Oda Kazuhiro)

1. 研究の背景と目的

サイバーフィジカルシステム（CPS）は急速に普及してきた概念である。CPS は現実空間のレプリカをコンピュータ上に構築し、レプリカを使ったシミュレーションを行い、その結果を現実空間にフィードバックすることによって問題を解決する。大義には、現実空間は構造物のようなものであっても、天気のような現象であって良い。本論文では、斜面での雨水浸透問題に CPS を適用し、数時間先の斜面の安全率を推定することを試みている。

2. 解析対象斜面

本研究では、近畿地方に位置する道路沿いの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。研究対象の盛土は主にまさ土で構成されている。本盛土には、雨水浸透によるのり面の健全性を把握するために、土壤水分計、傾斜計、雨量計、RTK-GNSS を設置した。このうち、土壤水分計は地表面から深度 40cm、80cm および 100cm にそれぞれ設置した。また、雨量計も計測地点に設置した。いずれも計測間隔は 10 分である。

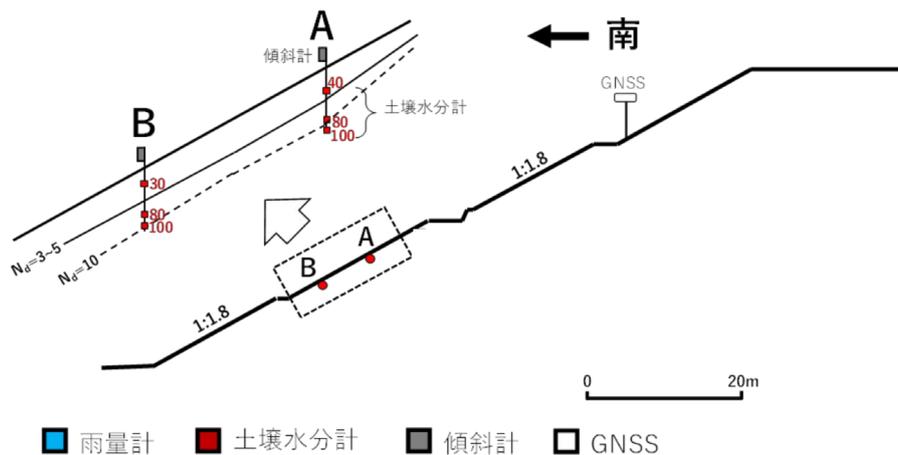


図-1 土壤水分センサ設置状況¹⁾に加筆

3. データ同化解析手法の概要

本研究では、雨水浸透シミュレーションモデル²⁾として赤井らの方法に基づく飽和不飽和浸透流解析を用いた。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 モデルを用いた。それぞれを式(1)および(2)に示す。

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) = \left\{ 1 + (-\alpha \psi)^n \right\}^{-1/n} \quad (1)$$

$$k = k_s \times S_e^{0.5} \left\{ 1 - (1 - S_e^{n/n-1})^{1-1/n} \right\}^2 \quad (2)$$

ここに、 S_e : 有効飽和度、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率、 k_s : 飽和透水係数、 α 、 n : パラメータ、 k : 透水係数、 Ψ : 土壌水分吸引水頭である。データ同化手法として、融合粒子フィルタ (MPF) を用いる。

4. 解析ケース

表-1 は解析ケースを示している。CASE-A はデータ同化である。CASE-D は 7/5 の 20:00 までデータ同化を行った後、その後はデータ同化を行わず、シミュレーションのみを実施する。

表-1 解析ケース

CASE-A	データ同化	-
CASE-D	予測	7/5 20:00

5. データ同化および予測解析結果

図-2 はデータ同化結果を示している。図中には雨量計で計測された現地の 10 分雨量を併せて示している。データ同化結果は計測値とよく一致していることから、解析モデルの同定が適切に行われた。

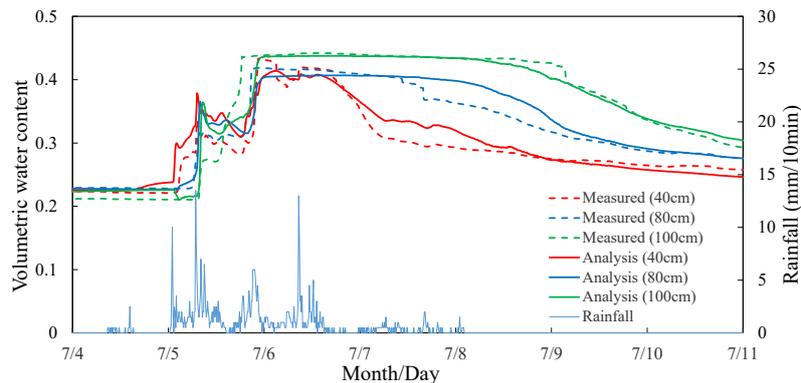


図-2 データ同化結果

図-3 は CASE-D における体積含水率の予測結果を示している。7/6 の約 0:00～約 4:00 における深度 40cm における体積含水率は、予測結果の方が計測値よりもかなり小さい。このことは、実際は深度 40cm 程度にまで達している地下水位を予測結果は過小評価し

ていることを示している。

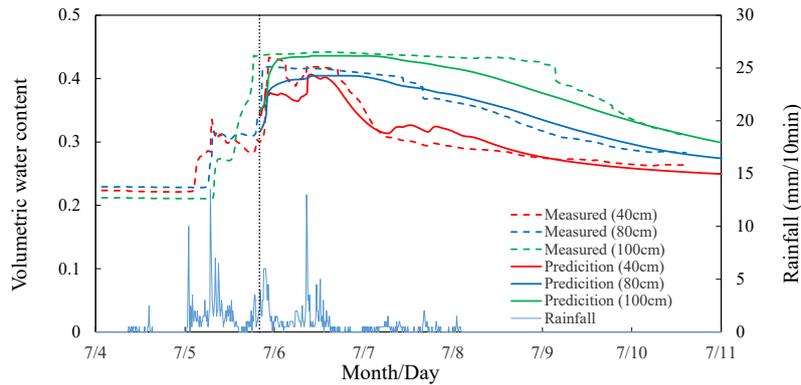


図-3 体積含水率の経時変化(CASE-D)

図-4 は推定された地下水位を示している。7/5の19:00頃に深度140cmに地下水位が達し、7/6の1:00頃に深度約45cmのピークに達する。これに対しCASE-Dでは同時刻において約63cmであり、20cm程度の差がある。

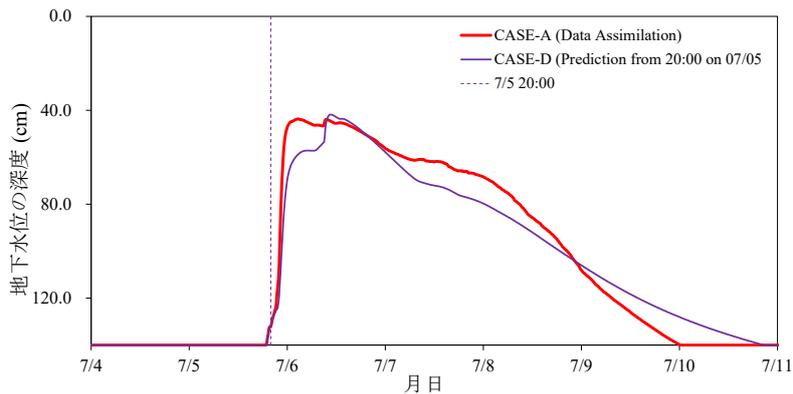


図-4 推定された地下水位の経時変化

図-5 は地下水位と変状の経時変化を併せて示している³⁾。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。変状は7/6の午前零時頃に生じており、地下水位がピークに至った時間とほぼ対応している。

図-6 はCASE-Aにおける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。表-2は土の単位体積重量の計算に用いた各層の間隙比を示している。間隙比はCASE-Aにおける飽和体積含水率の事後分布の平均値を用いた。また、土粒子密度は 2.68g/cm^3 と仮定した。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。最後に、土の内部摩擦角と粘着力はそれぞれ、 36° と 0.0gf/cm^2 とした。図-5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

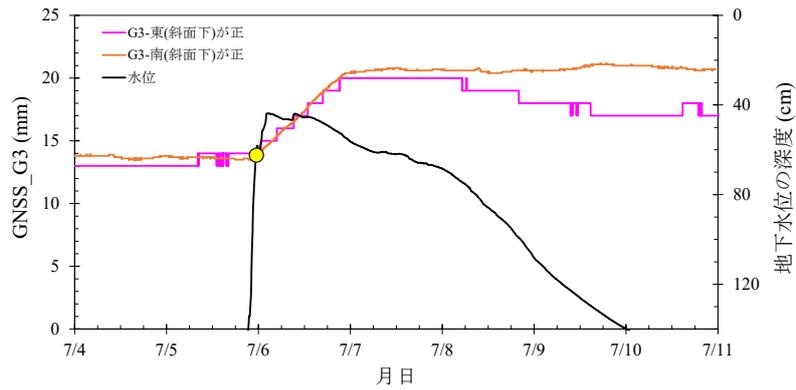


図-5 地下水位とRTK-GNSSによる変状の経時変化

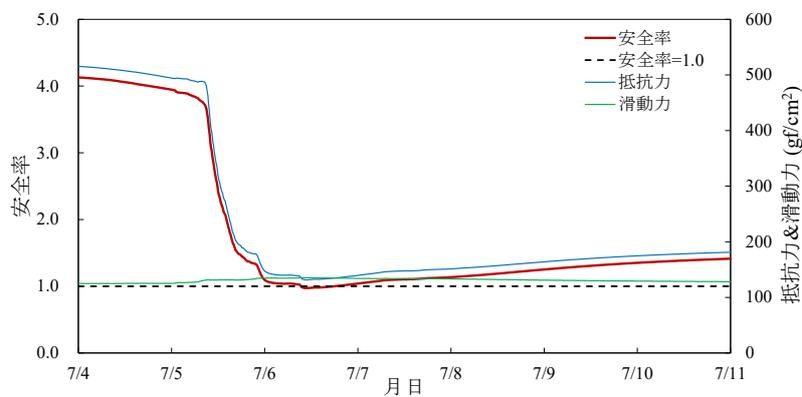


図-6 安全率の時間変化(CASE-A)

表-2 間隙比

上層	中層	下層
0.43	0.41	0.44

た. なお, 粘着力を $0.0\text{gf}/\text{cm}^2$ 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たかったためである. したがって, 研究対象の盛土が 36° の内部摩擦角と $0.0\text{gf}/\text{cm}^2$ 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-2 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ジョンの急激な減少が起こったためである. 抵抗力の現象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.

図-7 は CASE-D における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. 図-6 と殆ど違いがない. つまり, 図-4 に示す 7/6 の午前零時頃の地下水位の違いは安全率の計算において余り大きな影響を与えない. したがって, 現状の解析精度でも盛土の安定性を十分予測出来ることと考えられる.

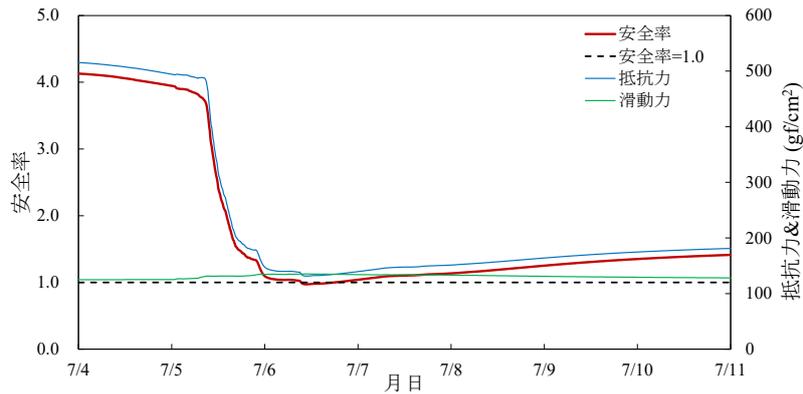


図-7 安全率の時間変化 (CASE-D)

6. まとめ

本研究を通じ、データ同化によって同定されたシミュレーションモデルによって、4hr程度先の盛土のり面の安全率を予測出来ることが示唆された。

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) 伊藤真一ほか：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，Vol.76，No.1，pp.52-66，2020.
- 3) 小田和ほか：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発表講演集，2022.