

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 (Oda Kazuhiro)

近年の気候変動に伴い、局所的かつ短期的な豪雨が頻発し、それに起因する土砂災害、特に盛土のり面の崩壊が社会的な課題となっている。斜面崩壊は、その土中の水分状態に大きく支配されることから、斜面の防災・減災を考える上で、降雨浸透に伴う斜面内の水分挙動を的確に把握し、安定性を連続的に評価することが極めて重要な研究課題である。これまで、斜面の水分状態を監視するため、各種センサーを用いた現地計測技術が発展してきた。しかしながら、センサーから得られる点的な計測値のみから、斜面全体の複雑な水分分布や地下水の動態を直接的に把握し、安定性を的確に評価することは依然として困難であった。このような背景のもと、本研究では、現実世界の物理現象をサイバー空間上で忠実に再現する「デジタルツイン」の概念を、豪雨時の盛土のり面の安定性評価に適用し、その有用性を検証することを目的とした。具体的には、現地計測データと数値シミュレーションを「データ同化」という手法で融合させることにより、計測情報だけでは得られない斜面内部の物理状態を推定し、安定性評価へと展開する一連のフレームワークを提案・構築した。

研究対象は、近畿地方に位置するまさ土で構成された道路盛土のり面である。こののり面に複数の土壤水分計を深度別に設置し、降雨量と併せて連続的なモニタリングを実施した。

一方、サイバー空間における物理モデルとして、飽和・不飽和浸透流解析を用いた。この解析では、土の水分特性を表現するモデルとして van Genuchten モデルと Mualem モデルを適用した。

現実世界の計測値とサイバー空間のシミュレーションとをリアルタイムで融合させるため、データ同化手法の一つである「融合粒子フィルタ」を導入した。これにより、計測データに基づいてシミュレーションモデルが持つパラメータを逐次最適化し、現実の挙動を忠実に再現するデジタルツインの構築を試みた。

まず、構築したデジタルツインの妥当性を検証するため、体積含水率の時刻歴を実測値と比較した。その結果、データ同化シミュレーションは、計測された全ての深度において、降雨に応答した体積含水率の急激な上昇からその後の遞減に至る過程を良好に再現した。このことから、本モデルが現実の斜面の「デジタルレプリカ」として適切に機能し得ることが確認された。

次に、この妥当性が検証されたデジタルレプリカを用いて、直接には計測していない物理量である間隙水圧の空間的な分布とその経時変化を推定した。その結果、降雨の浸透に伴い、当初は不飽和状態（負の間隙水圧）であった斜面内部において、底面付近から飽和領域が拡大し、地下水位が形成・上昇していく過程が詳細に可視化された。

さらに、推定された地下水位の変動と、RTK-GNSS で別途観測されていた斜面の変状発生時期とを比較したところ、変状は地下水位がピーク付近に達した時間帯に生じていることが明らかとなった。この事実は、地下水位の上昇が斜面の不安定化に直接的に寄与したことを強く示唆している。

この不安定化のメカニズムを定量的に評価するため、無限長斜面の安定計算法に基づき、安全率の経時変化を算定した。その結果、安全率が低下する主要因が明らかになった。計算結果は、含水量の増大による斜面を滑らそうとする力（滑動力）の増大よりも、雨水浸透によるサクション（負の間隙水圧による見かけの粘着力）の消失と地下水位上昇に伴う有効応力の低下、すなわち土のせん断抵抗力（抵抗力）の急減が、安全率の低下を支配していることを明確に示した。

本研究で得られた知見は以下のように総括される。

1. 現地計測と数値シミュレーションをデータ同化により融合させたデジタルツインは、点的な計測情報から、計測されていない地下水位や間隙水圧といった空間的な物理量分布を推定・可視化することを可能とする。
2. 斜面の変状は地下水位の上昇と密接に関連しており、地下水位の上昇が不安定化の引き金となったと考えられる。
3. 安全率低下の支配的なメカニズムは、滑動力の増加ではなく、サクションの消失と有効応力の低下による抵抗力の急減である。

以上の結果を総合すると、本研究で提案したデジタルツインは、斜面内部の水分状態を詳細に把握し、安定性の変化を定量的に評価するための非常に有用なツールである。この技術は、将来の降雨予測と組み合わせることで、斜面災害の発生を予測し、効果的な防災・減災対策の立案に大きく貢献するものと期待される。