

○外狩麻子(JR 東日本) 島村 誠(JR 東日本)

山口英俊(SWR)

上石陽一(エムアイユー)

## 1. はじめに

より精度の高い判断基準に基づく安全性の確保と公共交通機関としての鉄道の安定輸送を、適切なバランスで成立させることを目標として、降雨時の斜面・のり面安定性の評価方法や運転規制指標への新たな要素の組み込みを試みている。本研究では、降雨時安全性の評価方法への新しい要素として、土中水の挙動に着目している。すなわち、降雨時に土中水が如何なる挙動をし、その過程で、土構造物内でどのような分布を呈することで不安定化が増長するのかを、時系列変化として把握することがターゲットとなる。そこで、鉄道盛土において土中水を測定し、実現象の把握を開始している<sup>1)</sup>。この実測土中水データを利用して、場と時間という系の展開を図るために、降雨応答モデルによる土中水挙動予測解析手法を開発した。ここでは、この新しい解析手法について報告する。

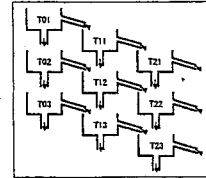


図1 SDTMの概念

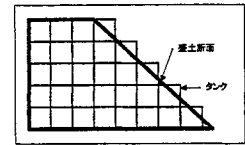


図2 盛土断面への適用

## 2. SDTMによる降雨応答モデルリング

実測された土中水データは、その測定点付近での土性(保水性・透水性等)や降雨浸入の境界との位置関係などを素因として、降雨という誘因に対して応答している。この降雨に対する土中水応答を表現するモデルを構築することは、①点データであった実測結果を、2次元以上の空間へ展開することを可能にし、②現在までの経験降雨だけでなく、未経験の降雨に対する土中水応答を推定することを可能にする。このように、降雨応答の推定を適切な精度で行うことができれば、降雨時斜面安定性を時系列で推定することが可能となる。本研究では、従来のタンクモデルの概念を基にして、新たに空間分布タンクモデル(Spatially Distributed Tank Model. 以下略して、SDTM)を構築した<sup>2)</sup>。

SDTMは、タンクを縦方向と横方向に多段数並べ、対象領域を図1のように仮想表現することができる。タンク内部の貯留またはタンク間を移動する未知数を土中水としているため、解析自体が、流出といった飽和流ではなく、不飽和流を数値算定していくこととなる。各タンクを割り当てた領域での土の物性(=土性; 保水性、透水性)は、タンクの横穴流出係数、横穴高さ、及び下穴流出係数として表現される。SDTMの主な特徴としては、①空間分布型であること、②モデリングの対象を不飽和領域に拡大していること、及び③非線形バルブを有するタンクであること、である。以下に、各特徴の概略を述べる。

### 2.1 空間配置モデリング

図1のように横・縦方向にタンクを多段数並べることによって、2次元空間での領域単位(図2の四角形の枠)の位置関係をモデル化に取り入れることができる。図2の□で示した領域単位は、ある種類のタンク1つで表現される部分のことを指す。このため、タンクそのものには明確な長さの次元がなく、対象とするその領域単位の長さの次元については、間接的にタンクの非線形バルブのパラメータとして表現されることになる。この点が、対象域を厳密に離散化する有限要素法の要素に関する概念とは異なり、SDTMのフレキシブル性から生じるメリットとなる。

割り当てた領域単位の物性や浸潤・浸透現象を適切に表現するために、主に3つの種類のタンク; 表面タンク・表土タンク・土砂タンクを考案した。表土タンクと土砂タンクは、それぞれに表土・内部構成土の役割を果たすタンクであり、流出機能として、図3に示すように下方流出・水平流出・毛管流出を持つ。表面タンクは、地表面の植生層など地表面境界より上の空間を表現し、降雨を直接受けとり、降雨の内部への浸透量を調整する役割をもつ。このため、表面タンクは、毛管流出機能を持たず、水平流出にて地表面上を流れる水を、

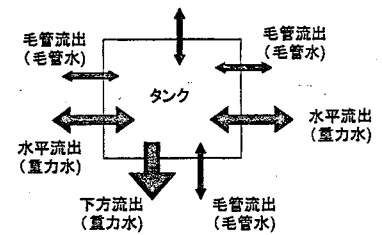


図3 タンクの流出機能

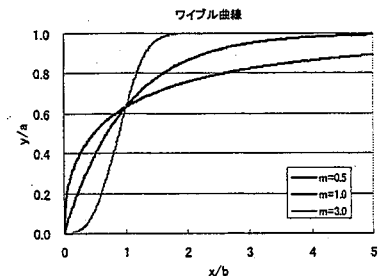


図4 ワイブル指数関数

下方流出にて内部への浸潤・浸透する水を、また貯留によって植生層への付着水などを表現することができる。

## 2.2 ワイブル指数関数による流出曲線

SDTM では流出係数を非線形関数で表現して、非線形バルブによる流出機能を提案している。不飽和領域では、土中水が土の間隙内でどのような状態で存在しているかというステータスによって、その挙動・移動が異なる。これを、吸着水・毛管水・重力水の各相での流出特性を、各相の境界を仮想的に変曲点で表現した多線分の関数にて適用させた方法を試みた<sup>2)</sup>。多線分の関数は、任意に流出曲線を微小に変化させながら実測データに近似させていくことのできる利点があるが、フィッティングの手続きとして、アルゴリズムを明確に確定できない欠点がある。そこで、比較的柔軟に対応(追従)のできるワイブル指数関数を適用する；

$$y = a \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^m} \right\} \quad \dots(1)$$

ここで、 $m$ : 任意のパラメータ、 $a, b$ : 正の定数である。 $y/a$  で規準化した曲線を図4に示す。また、SDTMはタンク同様に、一定量以下の土中水の場合は流出されずに貯留されるので、 $y=0$  when  $x \leq x_0$ , 式(1) when  $x > x_0$ , ここで  $x_0$ : タンクの貯留となる。

## 2.3 蒸散機能の検討

SDTMによって降雨による土中水応答をサーチする対象としては、雨期がメインとなるが、前降雨からの無降雨期間の条件によって、地中内部での土中水分布状態は大いに変わり、次降雨の応答に初期条件として影響を及ぼすことも確認されている<sup>2)</sup>。そこで、SDTMの土を表現するタンク(表土タンク、土砂タンク)に、蒸散に相当する機能を付加することを試みた。植物の根系の存在する深さから土中水が吸収されて、植物体を經由して地表より上の空間(大気)へ放出されることを、実現象として想定した。これを表現するために、一定の深さ位置のタンクに対して、気象情報に応じて、上部のタンクの存在に関わらず、表面タンクの外側に土中水が流出(すなわち、解析対象外へ消失)するバルブを設定した。

蒸散強度をコントロールする外部情報として、日照時間と気温について検討した。図5に、日照時間と気温の変化に対する降雨と土中水応答の時系列対応を示す。図5中の2つ目の降雨後は日照時間がカウントされているにもかかわらず、蒸散作用によると思われる土中水変動が認められない。これに対して、気温は25°C以下に留まっていたため、変化のオン・オフの相関が気温の方が良好と判断し、蒸散機能のバルブを調節するパラメータとした。

## 3. 実測データとSDTM土中水応答解析結果の比較

土中水観測を実施している鉄道盛土を2次元断面にてSDTMによる仮想空間へのモデリングを行い、図6のような配置モデリングとした。前述した蒸散機能を付加したタンクを適用した応答解析を実施し、2003年7月の観測データと比較した土中水応答解析結果は、図7のようになった。シミュレーションとしての再現性は高く、無降雨期間の土中水の減少過程に対しても、比較的良好な追従性を示している。

## 4. 今後の課題

タンクの各流出曲線の形状やワイブル指数関数のパラメータ設定について、今後は、地盤工学的な解釈と理論的展開が必要であると考えている。

[参考文献] 1)外狩・島村:斜面安定性評価のための鉄道沿線における土中水分観測,平成15年度砂防研究発表概要集,2003, 2)外狩ら:非線形バルブを用いた降雨応答モデルの構築,平成16年度砂防研究発表概要集,2003

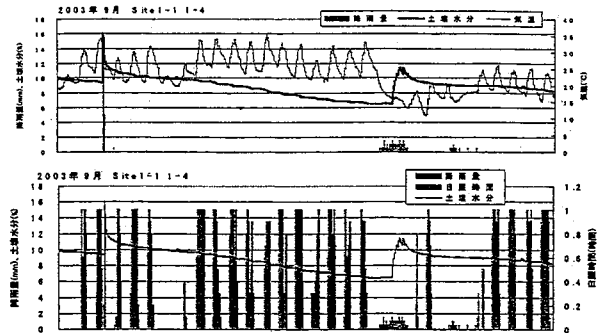


図5 気象及び日照の土中水応答への影響

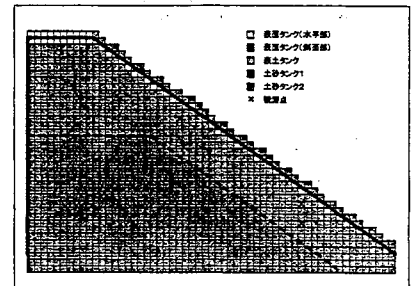


図6 盛土断面モデル

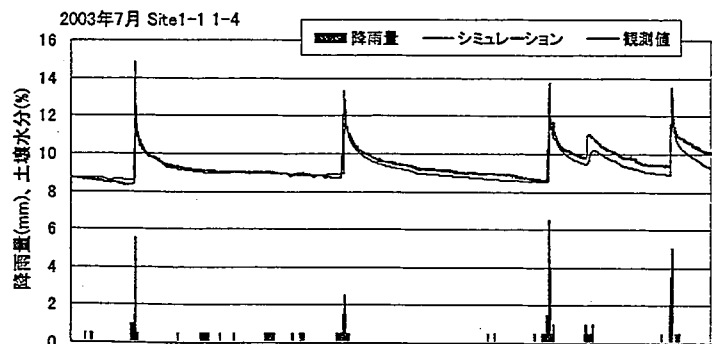


図7 SDTMによる解析結果:2003年7月実測,盛土下方30cm深