

# 自然斜面の土壌水分状態に関するタンクモデル法による解析値と 土壌水分計による実測値の比較検討

タンクモデル 土壌水分計 体積含水率 早稲田大学 学生会員 ○DU NI 早稲田大学 学生会員 岡崎 啓一朗  
早稲田大学 学生会員 西山 柁克 早稲田大学 国際会員 赤木 寛一  
東京地下鉄株式会社 国際会員 小西 真治

## 1. はじめに

近年、集中豪雨による土砂崩れが各地で報告されており、被害を最小限とするための備えが必要となり、関連する研究が急がれている。著者らはタンクモデル法と剛塑性有限要素法を組み合わせた斜面の安定性の評価<sup>1)</sup>を行ってきた。その中で、タンクモデル法で得られる貯留高の結果をそのまま斜面内に貯留する水の量であると仮定してきたが、貯留高の結果をそのまま適用できるかは疑問が残る。そこで、降雨強度や期間が異なる複数の降雨イベントを対象として、実斜面で土壌水分計を設置して地盤内の体積含水率を計測し、解析値のタンクモデル貯留高から求めた体積含水率との比較を行い、地盤内水分量の予測におけるタンクモデル法適用の妥当性を検証した。

## 2. 対象斜面位置と土壌水分計の設置状況

著者らは早稲田大学本庄高等学院敷地内の斜面において土壌水分計を 3 メートルおきに計 3 本設置し、土壌内の水分量の現地モニタリングを実施した。大雨による斜面崩壊が発生しやすい箇所として、斜面の傾斜が急な箇所(傾斜角 30 度以上)、傾斜が突然急になる箇所(遷急点)を持つ斜面、また、集水しやすい地形条件として、谷型の斜面、上方に広い緩傾斜地がある斜面が挙げられる。これらの要因から、計測対象斜面として、埼玉県の土砂災害特別警戒区域に存在する斜面を選定した。図-1 に、計測対象斜面位置を示す。

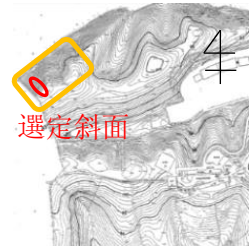


図-1 斜面位置

## 3. 3 連直列タンクモデル

### (a) タンクモデル法による流出解析

タンクモデルは菅原<sup>2)</sup>が提案したモデルを用いた。直列に並べられた各タンクには、側面に流出孔、底面に浸透孔が設けられており、流出孔・浸透孔の係数や流出孔の高さ、数を適切に決定すれば地下水を含めた河川流量を再現できる可能性が高い。しかし、流域特性によってタンクモデルの構造や同定するパラメータの数が異なるため、対象地域ごとにモデルの同定を行う必要がある。また、1つの降雨イベントで決定したモデルでは、流域特性を正しく表現できていないとは言えず、タンクモデルパラメータの同定には複数の降雨流量データから決定することが必要である。本研究では、小山川を対象流域と設定し、複数の洪水イベントを対象にタンクモデル法による流出解析を実施した。

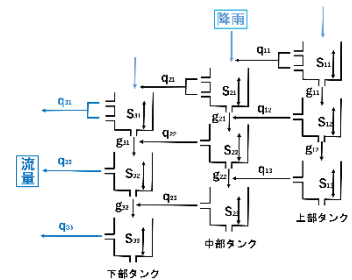


図-2-3 直列タンクモデル

### (b) タンクモデルの概要

本研究では、図-2 に示すとおり、3 連直列タンクモデルを斜面の上部、中部、下部に対応させ、雨水の鉛直・側方浸透による斜面高低に応じた斜面内の含水状態の違いを考慮できるようにした。斜面上部の 3 連直列タンクモデル(上部タンク)が基点となり、中部タンク、下部タンクと順に連結している。上部タンクの流出は、中部タンクに浸透水として加算され流入する。中部タンクからの流出も同様に下部タンクへ流入する。

### (c) タンクモデルを用いた体積含水率の推定

3 連直列タンクモデルは、気象庁の土壌雨量指数の計算に使用されている。また、タンクモデル法における 1, 2 段階目タンクに貯留する水位の合計は、土石流の発生タイミングとよい相関性が見られることが報告されている。<sup>3)</sup>これより、タンクモデル法で得られる貯留高は表層の水分量を表現しているものと考えられるため、図-3 に示すようにタンクモデルと斜面を重ね合わせたモデルを作成した。ここでは、貯留高を用いて表層の体積含水率を式(1)のように表す。

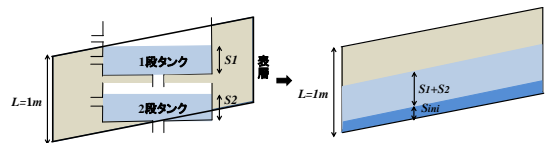


図-3 斜面とタンクモデルの対応関係

$$\theta = \frac{S_1 + S_2}{L} + \theta_{ini} = \frac{S_1 + S_2 + S_{ini}}{L} \quad (1)$$

ここに、 $S_1, S_2$ :各段タンクの貯留高、 $\theta_{ini}$ :初期体積含水率  
 $S_{ini}$ :初期体積含水率に対応する貯留高 (mm)、 $L$ :表層の層厚 (mm)

## 4. 流出解析

### (a) 小山川の流域と水位観測所

小山川の流域及び対象斜面位置、水位観測所である栗崎大橋観測所の位置関係を図-4 に示す。流域図より算定した小山川の流域面積は 40.5km<sup>2</sup>である。

### (b) アメダスと流域平均雨量の算定方法

小山川流域でのアメダスは寄居観測所と藤岡観測所が大半を占めている。また、これらの観測所の影響範囲は小山川流域を左岸側と右岸側でほぼ二分割していると考えられることから、流域平均雨量は寄居観測所と藤岡観測所の雨量の算術平均によって求めるものとする。



図-4 小山川流域図

(c) タンクモデルパラメータの同定までの流れ

タンクモデルのパラメータ同定までのフローチャートを図-5 に示す。

i) 洪水イベントの抽出

洪水イベントの抽出は埼玉県総合治水事務所より頂いた水位データから水位の変動が大きい時間帯を選定し、抽出した。小山川の定常時の水位は 58.3m 程度であり、洪水イベントを抽出する際に、59m 以上の水位が観測された時間帯は全期間を通して非常に少なかった。そこで、59m 以上もしくはその付近の水位となっている洪水イベントを解析対象とし、定常時の水位が変動する約 5 時間前を解析の開始時間として設定した。そして、水位が再びほぼ一定（定常状態）になるまでをイベントの対象期間とした。なお、抽出した洪水イベントの時間ごとの水位を流量に変換する上では、H-Q 曲線を用いた。

ii) 降雨イベントの抽出

降雨イベントは「一雨降雨」を基準とする。その定義は次の 3 つである。1) 0.5(mm/h) 以上の降雨が降り始めた時間を降雨開始時間とする 2) 一連の降雨は 6 時間以上の無降水状態を伴わないものとする 3) 累積の降水量が 10mm 以上であること。

iii) 降雨分類

藤本ら<sup>4)</sup>によると、タンクモデルのパラメータ設定においてパラメータの標準偏差と総降雨量の有意な傾向は見られなかった。よって、今回は総降雨量には着目せずに、降雨パターンを考慮することで、降雨の分類を考える。図-6 に代表的な降雨パターンの図を示す。

図-6 に示すように、代表的な降雨パターンは 6 つある。図-6 の降雨パターングラフは、対象の「一雨降雨」期間において、その連続降雨時間を 5 つの時間帯に均等に分割し、各時間帯における平均降雨量をその時間帯の降雨量として考え、5 つの時間帯における降雨量をパターン図化しているものである。そこで、アメダスの降雨データから、これらのどのパターンに該当するか検証する。そして、それぞれの降雨パターンにおけるタンクモデルのパラメータを同定した。

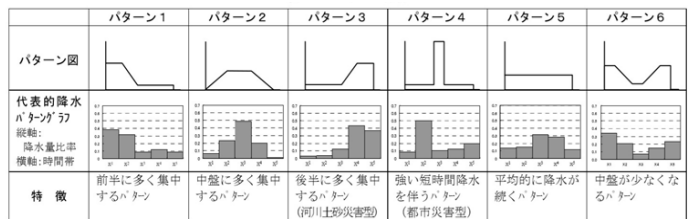


図-6 降雨パターンの分類図<sup>4)</sup>

(d) パラメータの同定条件

降雨パターンで分類された各降雨イベントを対象として流出解析を行った。なお、パラメータ同定の際、吉田<sup>5)</sup>が示した実測流量と解析流量の合致率 $E$ と相関係数 $r$ をそれぞれ算出し、定量的に値が合致しているかを検討した。

$$E = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_s - Q_a)^2}}{Q_{total}} \quad (2)$$

$Q_{total}$ : 実測流量の総和  $Q_s$ : 解析流量  $Q_a$ : 実測流量

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_s - \bar{Q}_s)(Q_a - \bar{Q}_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_s - \bar{Q}_s)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_a - \bar{Q}_a)^2}} \quad (3)$$

以上の 2 つの式に加え、流量のピーク値及びピーク時間に着目し、解析値と実測値に大きな差が発生しないように注意し、パラメータを設定した。

(e) パラメータの同定結果

以下に高い合致率と相関係数を得た洪水イベントにおける実測流量と解析流量の比較図を示す。なお、第 1 タンクについては表層の早期の流出を表すために流出孔を 2 つ設定し、それぞれのパラメータを  $h1, a1, h2, a2$  とした。ここで、 $h$  は流出孔の高さ、 $a$  は流出係数、 $b$  は浸透係数を示す。

i) 降雨パターン 1 (前半に降雨が集中しているパターン)

図-7 に示すように、パターン 1 においては、全 4 洪水イベント中、2 つに対して非常に高い合致率及び相関係数を得ることができた。今回 2008 年 6 月の比較図を示した。2008 年 6 月の合致率は 0.98, 相関係数は 0.97 である。立ち上がりからピーク値にかけて解析流量は実測流量の挙動をよく捉えることができています。一方で立ち下りの部分においては、解析流量の方が実測流量よりも小さくなる傾向が見られた。

表 1 パターン 1 のタンクモデル定数

第 1 タンク		第 2 タンク		第 3 タンク	
h2 (mm)	15	h3	10	h4	1
a2 (1/h)	0.07	a3	0.04	a4	0.03
h1 (mm)	0.1				
a1 (1/h)	0.01				
b1 (1/h)	0.6	b2	0.5	b3	0.03

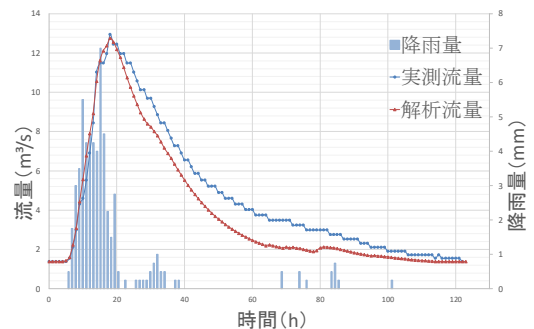


図-7 降雨パターン 1 の実測と解析の流量

ii) 降雨パターン 2 (中盤に多く集中するパターン)

図-8 に示すように、パターン 2 においては全 4 イベント中の 2 つにおいて高い合致率と相関係数を得られた。立ち上がりからピークにかけて非常に良く解析流量と実測流量が一致している 2008 年 4 月の降雨イベントでは、合致率は 0.95、相関係数 0.80 であり、パターン 1 と同様に立ち下がり部分において解析流量の方が実測流量よりも小さくなっている。

表 2 パターン 2 のタンクモデル定数

第 1 タンク		第 2 タンク		第 3 タンク	
h2 (mm)	20	h3	25	h4	20
a2 (1/h)	0.03	a3	0.05	a4	0.04
h1 (mm)	15				
a1 (1/h)	0.5				
b1 (1/h)	0.8	b2	0.08	b3	0.04

iii) パターン 3 (後半に多く集中するパターン)

図-9 に示すように、パターン 3 においては全 8 イベント中の 2 イベントにおいて高い相関係数と合致率を得た。今回 2008 年 6 月の比較図を示した。2008 年 6 月の降雨では、合致率が 0.95、相関係数も 0.95 である。パターン 3 においては、立ち下がり部分において実測流量よりも解析流量の方が大きく出るという結果が得られた。これは前半の少ない降雨量から立ち上がりを示すために浸透係数を小さくしていることから、前半からの降り続きによって後半のピーク時に、タンク内に貯留した降雨が側孔から流出しているためと考えられる。

表 3 パターン 3 のタンクモデル定数

第 1 タンク		第 2 タンク		第 3 タンク	
h2 (mm)	14	h3	12	h4	5
a2 (1/h)	0.05	a3	0.03	a4	0.02
h1 (mm)	2				
a1 (1/h)	0.04				
b1 (1/h)	0.15	b2	0.12	b3	0.01

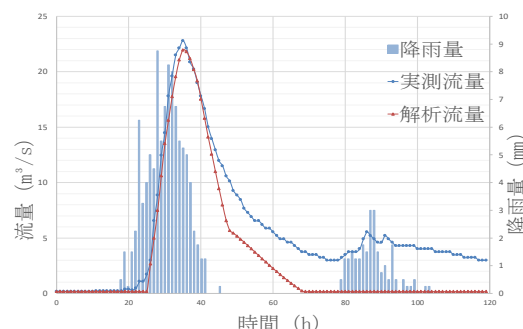


図-8 降雨パターン 2 の実測と解析の流量

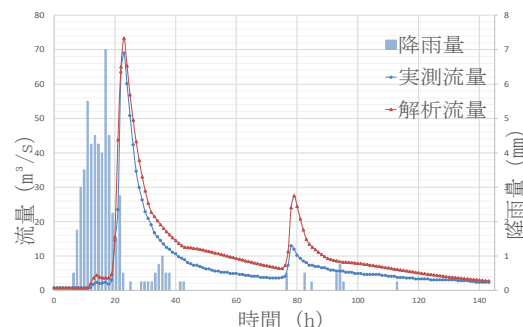


図-9 降雨パターン 3 の実測と解析の流量

パターン 4 から 6 は該当降雨イベントが少ないことからパラメータを同定することができなかった。

今回、代表的な 6 つの降雨パターンの内 3 つにおいてパラメータの同定を行った。それぞれのパラメータの傾向としては、パターン 1, 2 とパターン 3 の浸透係数以外に有意な傾向の差が見られない結果となった。

また、合致率 E は解析値が実測値をあまり追えていなく、結果として精度が良くない場合においても値として高く出てしまうことから、パラメータ同定の指標としては有用性が低いと考えられる。一方で相関係数においては有用であるが、ピーク値及びピーク時間の一致を捉えることができない場合があることから、相関係数と同時にピーク時間及びピーク流量に関して個別に評価していくことが必要であると考えられる。

5. 本庄斜面における体積含水率の実測値とタンクモデルによる解析値の比較

(a) 土壌水分計のキャリブレーション

今回土壌水分計によって計測された電圧を体積含水率に換算する上で、式(4)の換算式<sup>6)</sup>を用いた。

$$\theta = 81.3V - 40.4 \quad (4)$$

ここに  $\theta$ : 体積含水率(%),  $V$ : 電圧(v)である。

式(4)は電圧の適用範囲は  $0.736 \leq V \leq 0.864$  であり、体積含水率  $\theta$  は  $19.4 \leq \theta \leq 29.9$  である。しかし、これより低い電圧も観測されたため、適用範囲外においても、式(4)を用いて体積含水率  $\theta$  を求めたことにも留意されたい。

(b) 体積含水率の実測値と解析値の比較結果

各パラメータの妥当性を検証するため、2018 年 3 月から 6 月までの降雨イベントを対象に実測値と解析値の比較検討を行った。なお、初期体積含水率  $\theta_{ini}$  は降雨前の実測値を参照して任意に設定した。

図-10 に 2018.6.10 (後半型) の降雨イベントにおける降雨量と各タンクからの流出高の関係及び、体積含水率の実測値と解析値の比較図を示す。また図-11 に 2018.5.12 のイベントにおける図-10 と同様の比較図を示す。なお、図-11 の降雨イベントに関しては、降雨パターングラフに明確な特徴がなかったため、分類不可としている。

複数の降雨イベントに対して、それぞれのパラメータを適用して比較検討した結果として、図-10, 11 に示すようにパラメータ 3 を適用した場合、タンクモデル解析による流出量の上部・中部・下部の流出の違いを表現でき、降雨量の変動に伴い流出量も変動し、その挙動を追えていることから、3 連直列タンクモデルでの解析の意義を見出せた。これは前述したとおり、当パラメータが他のパラメータに比べて、浸透係数が小さく流出孔の高さが低いいため、流出しやすいパラメ



一たであったことが理由として考えられる。加えて、図-10, 11 に示す通り、体積含水率の挙動に関しては、解析値は実測値よりも全体的に低い値となり、挙動を追うことができていない。図-10 に関しては、降雨量が少ない時から体積含水率の実測値は大きくなっていることから、アメダスでは捉えられていない、局地的な降雨が対象斜面付近で発生し、実測値と解析値の挙動の乖離の原因になっていると考えられる。また、図-11 においては、ピーク値について実測値と解析値の挙動は類似していると考えられるが、実測値よりも低い値となっている。これは、タンクモデルは流域全体を対象としていることから、局地的な体積含水率の敏感な変動を捉えきることができていないことによると考えられる。

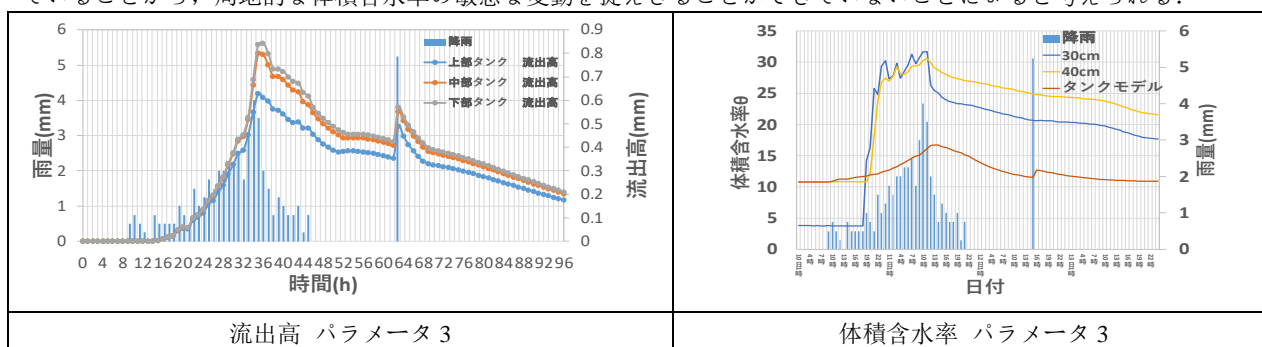


図-10 2018.6.10 (後半型) の比較図 ( $\theta_{mi}=11.0$ )

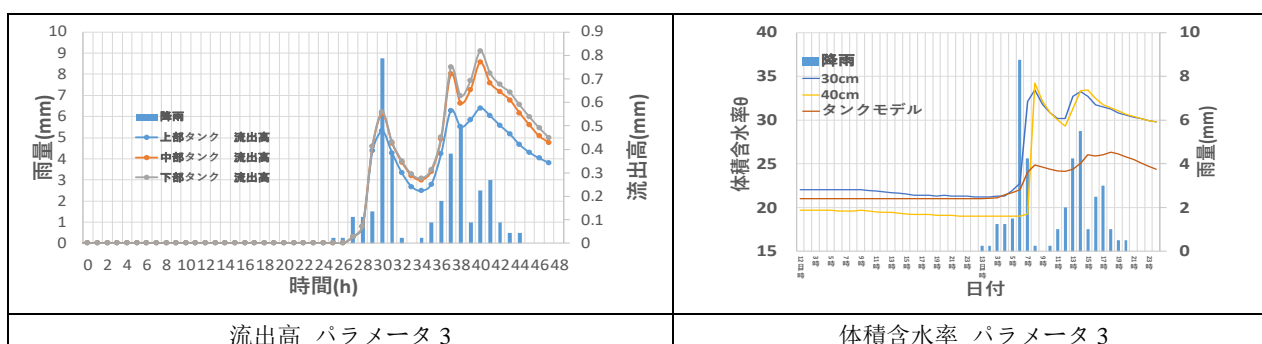


図-11 2018.5.12 (降雨パターン分類不可) の比較図 ( $\theta_{mi}=21.0$ )

## 6. おわりに

体積含水率の解析値に関して、時間ごとの実測値を捉えることは難しく、分類した各降雨パターンとそれぞれのパラメータの有意な相関性は見られなかった。これには以下の理由が考えられる。河川の流域には市街地と山間部が存在するが、市街地では自然土壌が乏しいため、降雨後に雨水は地面には浸透せず、貯留効果はないと考えられる。つまり、雨水は水路などを伝って河川へすぐに流出すると想定される。小山川の流域内では市街地の割合が大きい。従って、降雨時に河川の流量が増えたものの多くは市街地からの流入によるものであり、山間部あるいは市街地付近の斜面からの流入による流量増加は比較的少ないと考えられる。従って、流出解析で同定した全てのパラメータは市街地エリアに適用できるものであり、自然斜面にそのまま適用した場合、実際の斜面内の雨水の浸透・流出挙動とは差異が生まれると考えられる。

また、タンクモデルの流出高の結果から、降雨量の増減に伴って流出高も同様に反応しているにも関わらず、体積含水率に関しては実測値に比べて解析値は上がり切れていない。従って、貯留高を体積含水率に変換する際に用いる式(1)の改善が必要であると考える。今後は、今回検討できなかった降雨パターンの降雨イベントでの体積含水率の比較も行い、式の改善に向けて検討を重ねていきたい。

## 参考文献

- 1) 安藤悠, 竹内佳成, 小西真治, 赤木寛一: 盛土斜面を対象としたタンクモデル法を用いた降雨時の斜面安定解析, 第 51 回地盤工学研究発表会, pp.1985-1986, 2016
- 2) 菅原正巳: 流出解析法, 共立出版, 1972
- 3) 道上正規, 小島英司: 集中豪雨によるがけ崩れの発生予測に関する研究, 鳥取大学工学部研究報告, 第 12 巻, 第 1 号, pp.167-178, 1981
- 4) 藤本雄大, 手計太一, 佐藤研一, 平野文昭: 複数の評価指標によるタンクモデルパラメータの最適化に関する検討, 土木学会西部支部研究発表会, pp.167-168, 2008
- 5) 吉田稔彦: タンクモデルを用いた流出解析, URL: [http://www.apptec.co.jp/technical\\_report/pdf/vol11/treport\\_vol\\_11-06.pdf](http://www.apptec.co.jp/technical_report/pdf/vol11/treport_vol_11-06.pdf), 最終閲覧: 2018.8.24
- 6) 西山柁克, 竹内佳成, 岡崎啓一朗, 赤木寛一, 小西真治: 土壌水分計の測定対象土壌を用いたキャリブレーションについて, 第 14 回地盤工学会関東支部発表会, 2017 年 11 月