

動態観測にもとづいた切土のり面の排水量と降雨量の関係の時系列モデリング

秋田大学 学生会員 ○相原 航 正会員 荻野 俊寛
 東日本高速道路(株) 非会員 宮越 信 非会員 荒川 大悟
 奥山ボーリング(株) 正会員 藤井 登 非会員 深澤 勇気

1. 背景

近年、降雨の量や強度の変化によってのり面崩壊の頻度が増加している。のり面崩壊の発生には各のり面が潜在的に有している崩壊に対する健全度と崩壊を誘発する降雨の二つの要因が関係していると考えられる。本報告は、降雨時ののり面からの排水量によって、のり面健全度を評価することを念頭に、状態空間モデルを用いて時系列モデルを構築し、代表的なりのり面に対し動態観測データをあてはめた結果を報告する。

2. のり面の動態観測

本研究で対象としたのり面は、日東道酒田河辺線15.6KPにある切土のり面である。のり面の平面図を図-1に示す。こののり面は過去に崩壊履歴があり、のり面の一部(赤色部分、面積4439m²)に降った雨はのり面の第1小段にある排水溝へと流入する構造となっている。この部分を対象に動態観測を実施した。

計測項目は降雨量および排水溝の水位であり、降雨量は雨量計によって、水位は排水溝下流に設置した水圧計によって計測した。これらの観測値は機器を通して1時間ごとのデータが得られる。動態観測は2021年の3月21日から同年11月30日まで行われた。本報告では期間中、比較的降雨数が多かった10~11月のデータを対象とする。

代表的な動態観測結果を図-2に示す。10月にはまとまった雨が5回ほどみられ、最大雨量は1時間当たり10.5mm、最大水位は126mmであった。11月には数日間続くような大きくまとまった雨が1回みられ、それ以外は大きな雨はみられず、最大雨量は1時間当たり10.5mm、最大水位は154mmであった。

動態観測の結果を総合すると、雨量と合わせて水位の上昇がみられるも水位はすぐに低下することから、降水があっても素早く排水が行われていると考えられる。なお、図2の水位データは、無降水時にも0になっていない。この要因としては、観測点下流に落ち葉が堆積し、流出の妨げになったためと考えられる。

3. 提案する時系列モデル

本研究で提案する切土法面からの排水量を表すモデルを図-3に示す。動態観測の結果から、排水溝には短期的な流出が見られるため、2段タンクモデルを想定した。第1タンクより流出した水量が排水溝(第2タンク)に流れ込むことで、排水溝に水位が発生するようなモデルになっている。排水溝には落ち葉や土砂による詰まりが発生することから流出係数と流出高さを設定した。本研究では、このタンクモデルに状態空間モデルを組み合わせた。タンクモデルにおける貯留量、流量を状態空間モデルの状態量と考えれば、第1タンクについて、貯留量、流出量、浸透量は以下のように表すことができる。

$$s_1[i] = s_1[i-1] - (q_1[i-1] + z_1[i-1]) + \text{Rain}[i] \quad (1)$$

$$q_1[i] = \begin{cases} a_1(s_1[i] - l_1) & (s_1[i] - l_1 > 0) \\ 0 & (s_1[i] - l_1 \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$z_1[i] = b_1(s_1[i]) \quad (3)$$

ここに、 s_1 は水位、 q_1 は流出量、 z_1 は浸透量、 l_1 は流出孔高さ、 a_1 は流出係数、 b_1 は浸透係数、 Rain は1時間あたりの降雨量である。また、2段目の排水溝を表すタンクについては、式(4)、式(5)で表した。

$$s_2[i] = s_2[i-1] - q_2[i-1] + q_1[i-1]/\alpha \quad (4)$$

$$q_2[i] = \begin{cases} a_2(s_2[i] - l_2) & (s_2[i] - l_2 > 0) \\ 0 & (s_2[i] - l_2 \leq 0) \end{cases} \quad (5)$$

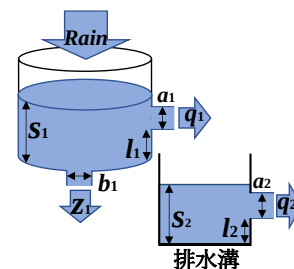


図-3 提案するタンクモデルの概略図

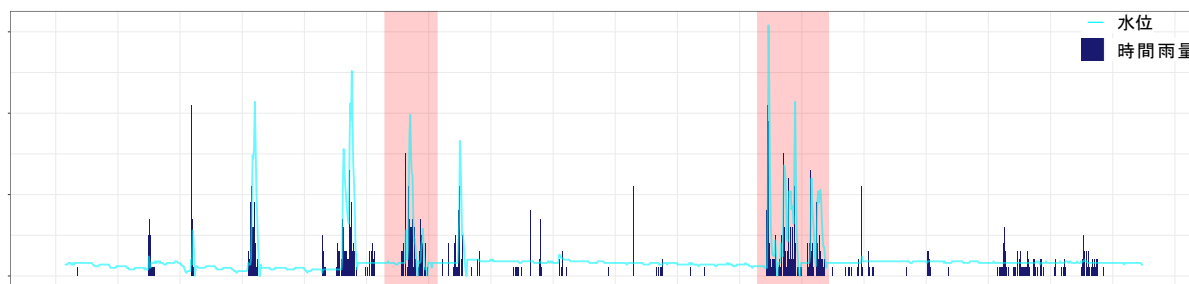


図-2 動態観測の結果

キーワード 状態空間モデル タンクモデル ベイズ統計

連絡先 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 TEL 018-889-2364

ここに、 α はのり面と排水溝のタンクの断面比、 s_2 は水位、 q_2 は流出量、 a_2 は流出係数、 l_2 は流出孔高さである。

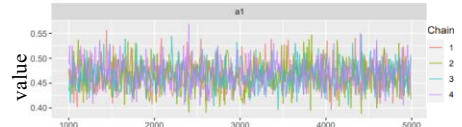
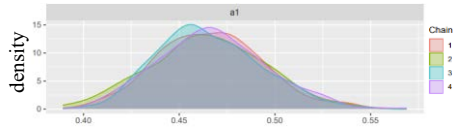
一方、観測値は排水溝の水位であり、これは第二タンクの貯留量 s_2 に観測誤差を加えたものとする。したがって、観測方程式は式(1)~式(5)により得られた s_2 が排水溝の水位を表す真の状態とし、式(6)のように表した。

$$H[i] = \text{student.t}(4, s_2[i], \sigma_h) \quad (6)$$

ここに、 H は観測された水位、 σ_h は観測値と推定された真の水位との誤差の標準偏差である。観測値誤差は、自由度が 4、平均が s_2 、標準偏差 σ_h の Student_t 分布に従うものとした。この分布は標準正規分布に比べて裾が長く、平均から大きく外れるような値の影響を考慮した分布である。また、パラメータ推定の収束をよくするために弱情報事前分布を用いた。弱情報事前分布には、一般的なタンクモデルのパラメータおよび観測の結果を参考に、Student_t 分布を利用し表-1 のよう各パラメータに与えた。ここに、 v は自由度、 m は平均、 σ は標準偏差である。

表-1 弱情報事前分布のパラメータ

	v	m	σ
l_1	4	15	10
l_2	4	10	5
a_1	4	0.5	0.4
a_2	4	1	0.5
b_1	4	0.1	0.05

図-4 推定した a_1 のトレースプロット図-5 推定した a_1 の確率密度

4. 観測値の当てはめによるパラメータ推定

のり面のパラメータ推定には MCMC 法(マルコフ連鎖モンテカルロ法)を用いた。あるデータに対して MCMC サンプルングを行うことで、事前分布と尤度分布から事後分布をシミュレートしパラメータの推定ができる。サンプリング数は 5000 とし、初めの 1000 回分のサンプリング数をウォームアップ期間として解析結果から省いている。図-4 に MCMC によって得られた代表的なパラメータとして a_1 のトレースプロットを、図-5 に確率密度を示す。各 chain のトレースプロットの軌道、および確率密度はほとんどが一致しており、パラメータが十分収束していることがわかる。

確率密度のピークの位置と裾の広がりからパラメータの推定値およびベイズ信頼区間を得ることができる。各パラメータの平均値、2.5%、50%、97.5%の分位点および $\hat{R}$ を表-2 に示す。

得られたタンクのパラメータの各パラメータをみると、浸透係数 b_1 に対し流出係数 a_1 が大きいことから、第 1 タンク水位が流出孔よりも大幅に高くなるような雨が発生した場合、排水溝への流出量が浸透量よりも大きくなると考えられる。また、観測値と推定値の誤差のばらつきを表す σ_h は 1.6 と小さいことから、モデルによる排水溝の水位は観測値との誤差が小さいと考えられる。また l_2 は約 8mm 程度と推定され、排水溝内の落ち葉や土砂の堆積を表している。

次に、期間中、目立った降雨が確認された区間(図-2 の赤色部)における排水溝の観測水位と雨量および推定された水位 s_2 を図-6 に示す。両図の赤色部は s_2 の 95%信頼区間で、赤線は 50%分位点である。推定された s_2 はおおむね観測値と類似の挙動を示し、降雨に対して敏感に反応している。しかしながら、ピーク時においていくつかの観測値は s_2 の 95%ベイズ信用区間からはずれており、かならずしもピーク時の水位を予測できていない。また、無降雨時の水面の観測値は落ち葉や土砂の堆積によって時間変化しているが、 s_2 は第 2 タンクの流出孔高さを表すパラメータ l_2 が時間によらず一定として推定しているため、時間変化しない。これらの点を改善することにより、本モデルによって降雨時ののり面からの排水量がより高精度に予測が可能になると考えられる。

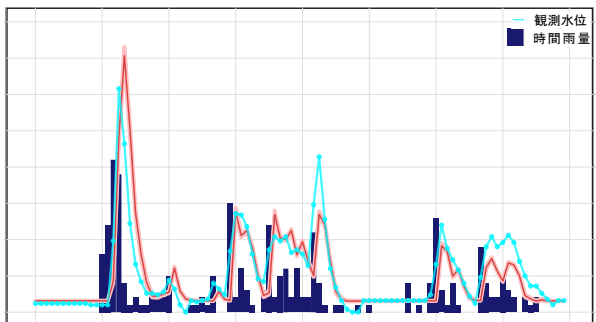
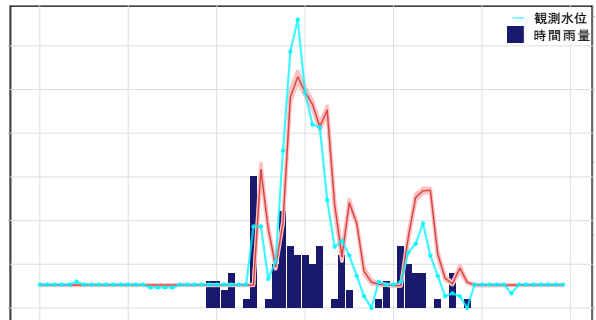
5. 結論

降雨時ののり面からの排水量によってのり面健全度を評価することを念頭に、タンクモデルと状態空間モデルを組み合わせたモデルを構築し、動態観測データをあてはめた。モデルの各パラメータおよび排水溝の水位を推定した結果、ピーク時の水位や誤差の区間に改善の余地はあるものの、提案モデルがおおむね水位の挙動を表現可能であることが確かめられた。

【参考文献】1) 鈴木ら：高速道路点検履歴にもとづいた時系列モデルによるのり面の健全度評価，土木学会東北支部技術研究発表会，2020。2) 佐野ら：のり面の健全度評価のための高速道路点検履歴の特徴抽出，土木学会東北支部技術研究発表会，2020。

表-2 各パラメータの推定値

	平均	2.5%	50%	97.5%	$\hat{R}$
l_1	8.40	8.26	8.40	8.50	1.00
l_2	7.84	7.73	7.84	7.95	1.00
a_1	0.47	0.42	0.47	0.52	1.00
a_2	0.76	0.69	0.76	0.83	1.00
b_1	0.09	0.08	0.09	0.09	1.00
α	0.044	0.039	0.044	0.049	1.00
σ_h	1.62	1.53	1.62	1.71	1.00

図-6 観測値の時系列と提案モデルによる予測の比較
(上：10/19～10/21，下：11/9～11/12)