

地形・森林・水文のカップリングモデルを用いた生産土砂量の降雨応答特性解析

パシフィックコンサルタンツ株式会社 ○蔭山 星、菊池 美帆、飛岡 啓之、佐々木 央、吉武 央気
近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター 竹下 航、岸本 優輝、小林 正直、高原 晃宙
京都大学防災研究所 松四 雄騎

1. はじめに

「気候変動を踏まえた砂防技術検討会」では未経験の降雨発生による生産土砂量の推定精度向上が課題として挙げられている。本稿では生産土砂量の降雨応答特性について物理モデルを利用して評価する方法を試行した。生産土砂量の降雨応答特性解析を行うためには土層厚の空間分布・土の粘着力・根系粘着力などの素因条件を適切に設定する必要がある。そこで地形に応じた土層の蓄積、除去¹⁾²⁾・森林根系による粘着力増加¹⁾³⁾・降雨発生に伴う圧力水頭の応答を考慮したカップリングモデル（図1）を用いて、生産土砂量の降雨応答特性解析を試行した。本稿では特に水文プロセスの観測・モデル化について詳述する。

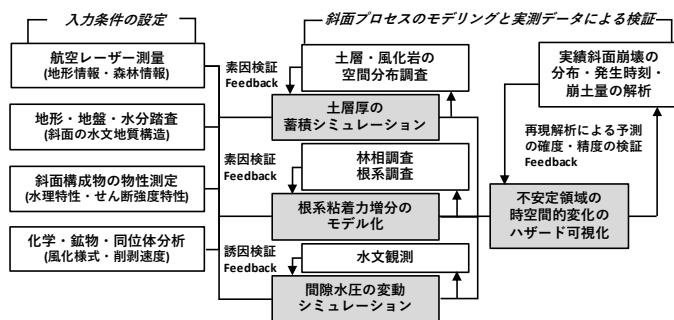


図1 解析モデルのフレームワーク

2. 水文プロセスのモニタリング及びモデル化

奈良県山辺郡山添村に位置する笠間川毛原流域（花崗岩地帯）において、テンシオメータを用いて土層内の短期的な圧力水頭の応答を5分間隔で観測した。観測期間は2024年6月24日～12月18日である。テンシオメータの設置位置を図2に示す。解析モデルを今後広域展開することを見据え、流域面積が異なる地点での圧力水頭の応答を観測

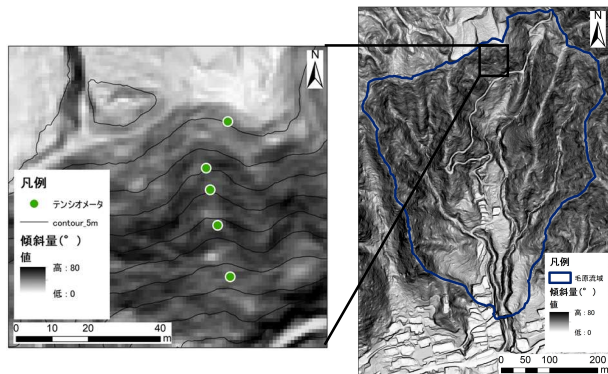


図2 テンシオメータ設置位置

した。また、テンシオメータは表層崩壊のすべり面となることが想定される土層と風化岩の境界に設置した。解析上の短期的な圧力水頭の上昇は式(1)に示す Iverson の一次元線形拡散モデル⁴⁾で評価した。式(1)の解である圧力水頭の時間変化を式(2)に示す。式(2)内の変数の設定方法を式(3)～式(6)に示す。このモデルは Richards 式の条件近似から導かれており透水係数と拡散係数のみで圧力水頭の変動を評価できる。

$$\text{鉛直一次元圧力拡散方程式：} \frac{\partial \psi}{\partial t} = D_0 \cos^2 \alpha \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\psi(t) = \psi_0 + Z \frac{I_z}{K_z} \cdot \begin{cases} [R(t^*)] : t^* \leq T^* \\ [R(t^*) - R(t^* - T^*)] : t^* > T^* \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{ここで、} R(t^*) = \sqrt{\frac{t^*}{\pi}} \exp\left(-\frac{1}{t^*}\right) - \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{1}{t^*}}\right) \quad (3)$$

$$t^* = t \hat{D} / Z^2 \quad (4), \quad T^* = T \hat{D} / Z^2 \quad (5), \quad \hat{D} = 4 D_0 \cos^2 \alpha \quad (6)$$

ψ ：圧力水頭、 t ：時間、 D_0 ：圧力拡散係数、 α ：斜面傾斜角、 Z ：深さ、 ψ_0 ：初期圧力水頭、 I_z ：降雨強度、 K_z ：透水係数

圧力水頭の観測結果に整合するように、1次元圧力拡散モデルの拡散係数・透水係数をフィッティングした結果を図3に示す。5箇所の調査地点でも同様に拡散係数・透水係数を同定した結果、両パラメータには図4に示すように相関係数が0.98であり、相関関係があることが確認され

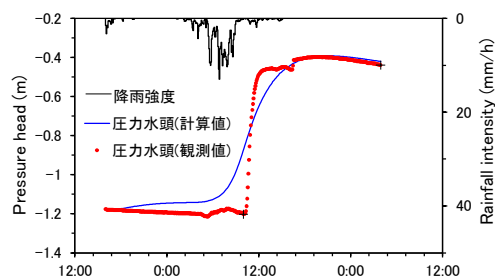


図3 圧力水頭のフィッティング結果

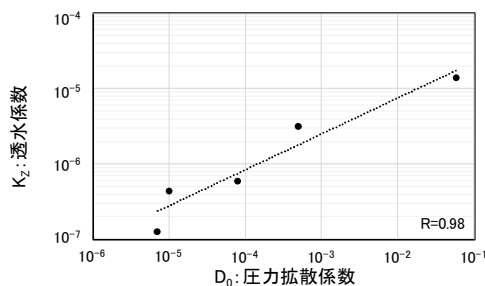


図4 拡散係数・透水係数の相関

た。そのため、この相関関係を満たすように昭和34年伊勢湾台風の崩壊面積が整合するように拡散係数・透水係数を同定した。

3. 計算条件

生産土砂量の降雨応答特性解析をする上で、拡散係数・透水係数を同定するために昭和34年伊勢湾台風を対象に再現計算を実施した。なお、土砂・洪水氾濫計算（一次元河床変動計算）における境界条件として設定する単元流域毎の生産土砂量を予測することが目的であるため、再現性の指標は崩壊面積とした。昭和34年伊勢湾台風の再現計算結果を表1に示す。崩壊面積が最も整合するcase4の拡散係数・透水係数を利用して生産土砂量の降雨応答特性解析を行った。毛原流域を含む周辺の土石流危険渓流も評価対象とした。なお、土層の蓄積、除去を考慮した土層厚の空間分布は菊池ら²⁾を、森林根系による粘着力増加は田中ら³⁾の検討結果を利用した。

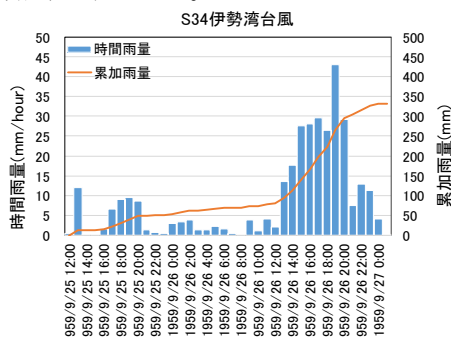


図5 昭和34年伊勢湾台風の降雨実績

表1 透水係数・圧力係数の同定結果

ケース名	水文パラメータ		毛原流域 崩壊面積率 【%】
	透水係数 【m/s】	圧力拡散係数 【m ² /s】	
case1	1.4×10^{-5}	5.7×10^{-2}	3.21
case2	4.2×10^{-5}	3.5×10^{-1}	1.52
case3	4.4×10^{-5}	3.7×10^{-1}	1.21
case4	4.5×10^{-5}	3.9×10^{-1}	0.89
昭和34年 伊勢湾 台風実績			0.79

降雨条件については昭和34年伊勢湾台風の降雨波形を用いた上で、①計画規模、②感度分析として計画規模×1.15倍に引き伸ばした2ケースを行った。

4. 計算結果

降雨規模増加に伴う生産土砂量の降雨応答特性解析を実施した結果を図6に示す。5時間雨量と生産土砂量の関

係を整理したところ、計画規模×1.15倍のケースにおける生産土砂量は計画規模の1.3倍となった。また、降雨増加に対する生産土砂量の増加量は曲線が上に凸となり始めており、生産土砂量が頭打ちする可能性が示唆された。

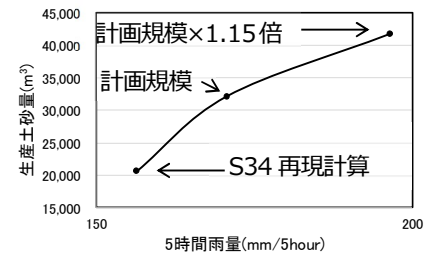


図6 降雨応答特性解析結果

5. まとめと今後の展望

調査土層厚のヒストグラムと整合する計算土層厚を設定することで、現況土層厚程度の崩壊生産土砂量のポテンシャルを表現した。この計算土層厚に対応した根系粘着力をモデル化した上で、降雨による圧力水頭上昇を評価して生産土砂量の降雨応答特性解析を行った。本稿では感度分析として計画規模×1.15倍に引き伸ばした降雨波形を用いたが、気候変動の影響を考慮して生産土砂量の降雨応答特性解析を行うためには、降水イベントの確率密度分布の変化を考慮した多数の降雨波形を用いて、降雨規模に対応する生産土砂量を評価する必要がある。

また、同定した水文パラメータは昭和34年伊勢湾台風の崩壊面積は再現できたものの、崩壊非発生イベントや他の崩壊発生イベントを再現できるかの検証はできていない。そのため、今後は同一パラメータで様々な崩壊イベント・崩壊非発生イベントを表現できるかの検証が必要である。また、観測期間中に表層崩壊が発生するような降雨規模の大きな出水イベントは発生しなかったため、今後も継続的な観測を実施し拡散係数・透水係数の精度を高める必要がある。参考文献 1)松四ら(2016):土層の生成および輸送速度の決定と土層発達シミュレーションに基づく表層崩壊発生場および崩土量の予測,地形第37巻第4号 427-453 頁 2)菊池ら(2025):土層厚の時空間変化シミュレーションに基づく土砂生産ポテンシャルの評価,令和7年度砂防学会研究発表会 3)田中ら(2025):樹木根系による付加的粘着力の空間分布を考慮した表層崩壊発生予測,令和7年度砂防学会研究発表会 4)Iverson(2000)Landslide triggering by rain infiltration,Water Resources Research,VOL36,NO7,PAGES1897-1910