

水平河床長が砂防構造物への作用荷重に及ぼす低減効果の検討

防衛大学校 ○宮原 邑太 堀口 俊行

1. はじめに

砂防堰堤は土石流の捕捉や調節機能を持つ構造物である。砂防堰堤の破損は下流部への被害につながる可能性があるため、土石流の衝突に対し十分な耐力を有する必要がある。しかし、実際には土石流の直撃による破損事例がいくつか確認されている。そのため現行の計画では、外力条件が厳しくなる場合には、砂防堰堤を勾配の緩い流下・堆積区間に設置することが望ましいとされている¹⁾。

ところで、堆積区間に流入した土石流は、底面摩擦が増大することで運動量を失い堆積過程へと転ずることは広く知られている²⁾。これは、堆積区間（平衡勾配以下の勾配）流入後の運動量の減少による衝突荷重の低減を示唆するものである。しかし、この荷重低減効果について定性的に評価された研究³⁾はあるが、定量的に評価した事例はあまり見られない。

そこで本研究は、対策工上流側に存在する堆積区間を模した水平河床の長さが土石流荷重に与える影響について実験的に検討するものである。

2. 実験方法

本実験では、対策工上流側に設けた水平河床が土石流荷重に及ぼす影響を検証するために、図-1に示す実験装置を用いた。装置は、土石流が発生・流下する流下部、勾配変化後の水平河床部、および荷重計測装置の3つで構成される。流下部の長さは3,500 mm、勾配は15°とし、下流側で勾配0°の水平河床部に接続させた。本実験では、水平河床の長さ（水平距離） $l_h = 0, 100, 200, 300$ mmの4条件に設定した。この水平距離 l_h を主要なパラメータとし、水平河床部の下流端に荷重計測装置を設置した。荷重計測装置の上流側には、高さ200 mm、幅290 mmの透過型捕捉面を設置し、流下してきた土石流を捕捉させた。荷重の計測は、捕捉面の下流側に設置した圧縮ロードセルを用いて行った。

土石流の礫モデルとして、礫径の異なる4種類（25-20, 20-15, 15-10, 10-5 mm）の固化石炭灰（比重1.9、内部摩擦角は25°程度）を使用した。これらの礫を総容積 $20 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ となるように混合し、流下部の上流に台形状に配置した。この礫塊の上流から流量 4.9×10^{-3} 、 $6.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ の2通りの流水を定常供給することで、表-1に示す2種類の土石流を発生させた。

実験ケースは、水平距離 l_h の4条件と流量の2条件を組み合わせた計8ケースとした。

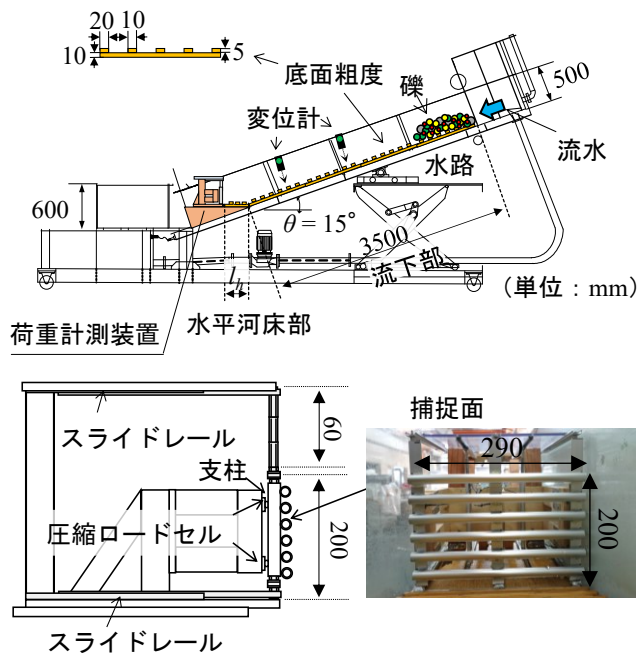


図-1 実験装置

表-1 土石流諸元

流量 Q (m^3/s)	流速 v (m/s)	流動深 h (m)
4.9×10^{-3}	1.1	65
6.6×10^{-3}	1.3	65

3. 荷重計測結果

異なる水平河床、流量に対する実験の結果、図-2に示す荷重の時刻歴応答を得られた。各波形ともに水平距離の延長に伴い顕著に変化している。水平距離の延長に伴う計測波形の最大荷重の変化を整理すると図-3となる。流量の大小により値は異なるものの、共通して水平距離の延長に伴い最大荷重が減少していることが確認できる。水平距離 $l_h = 0$ mmから300 mmにかけての減少量は約30 Nであった。次に、各流量の水平距離0 mmからの最大荷重の低減比率（任意の水平距離 l_h での最大荷重 $F_{\text{max-}l_h} / l_h = 0$ mmでの最大荷重 $F_{\text{max-}0}$ ）をまとめると図-4（図中のプロットは各回の平均値）の関係が得られた。流量の大小により低減比率に差が出ることを確認され、水平距離 l_h のみでは荷重低減を定量的に評価し得ないことが示された。

4. 荷重低減の定量的評価

最大荷重の減少は水平河床流入後の運動量の減少によるものと考えられる。そこで、運動量の損失を定量的に評価するための指標として、以下に示す土石流の

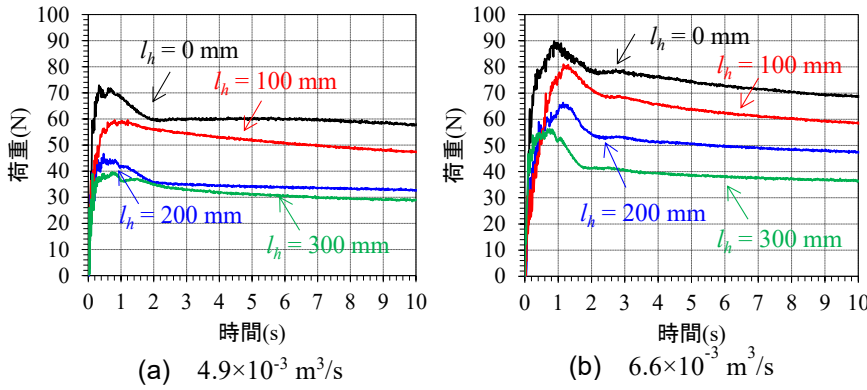


図-2 荷重時刻歴応答

停止距離の推定式²⁾を用いることとした。

$$l_{max} = \frac{\left\{ v_u \cos(\theta_u - \theta) \left(1 + \frac{((\sigma - \rho)c_{du}k_a + \rho) \cos \theta_u g h_u}{2((\sigma - \rho)c_{du} + \rho) v_u^2} \right) \right\}^2}{\frac{(\sigma - \rho)g c_{du} k_a \cos \theta \tan \phi_b}{(\sigma - \rho)c_{du} + \rho} - g \sin \theta} \quad (1)$$

ここで、添字 u は可変勾配上流側の物性値であることを示しており、 v は流速、 θ は河床勾配、 c_d は土砂濃度、 k_a は主働土圧係数、 ρ は水の単位体積質量、 σ 破礫の単位体積質量、 h は流動深、 g は重力加速度、 ϕ_b は底面摩擦角である。

本実験条件における停止距離 l_{max} を計算すると、流量 4.9×10^{-3} で $l_{max-4.9} = 1.3$ m/s, 6.6×10^{-3} m³/s で $l_{max-6.6} = 1.6$ m/s となる。 l_{max} を基準とした、水平距離 l_h との距離比 l_h / l_{max} と最大荷重比 F_{max-lh} / F_{max-0} の関係を整理したものが図-5 (図中のプロットは各回の平均値) である。 F_{max-lh} / F_{max-0} は l_h / l_{max} の増加に伴い、両流量とも概ね同様の傾向で減少していることが確認できる。各実験結果に対する回帰曲線 (図中破線) は式(2)のように l_h / l_{max} の二乗との関係となった。

$$\frac{F_{max-lh}}{F_{max-0}} = \left(\frac{l_h}{l_{max}} - 1 \right)^2 \quad (2)$$

つまり、 l_h / l_{max} は水平河床流入から停止までに有効な総運動量の減少率に対応するものであると考える。式(2)は、これまで定性的な理解に留まっていた堆積区間の荷重低減効果を定量的に評価するための足掛かりとなる可能性がある。

5. まとめ

実験の結果、対策工上流側の水平河床は土石流荷重を効果的に低減することが認められた。この際、土石流の停止距離を基準指標とした運動量の減少率を評価することで、最大荷重の低減効果を定量的に評価できる可能性が示された。

謝辞

本研究は、令和7年度一般財団法人砂防地すべり技術センターの研究助成を受けた。ここに謝意を表す。

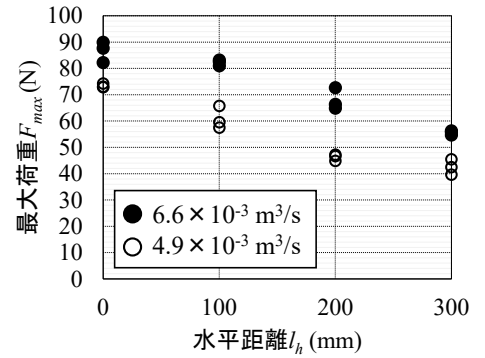


図-3 最大荷重の推移

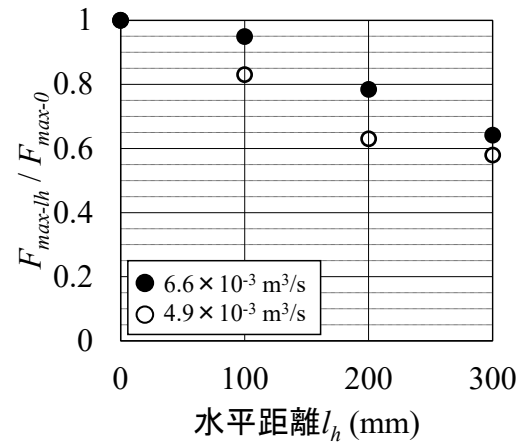


図-4 荷重低減率と水平距離の関係

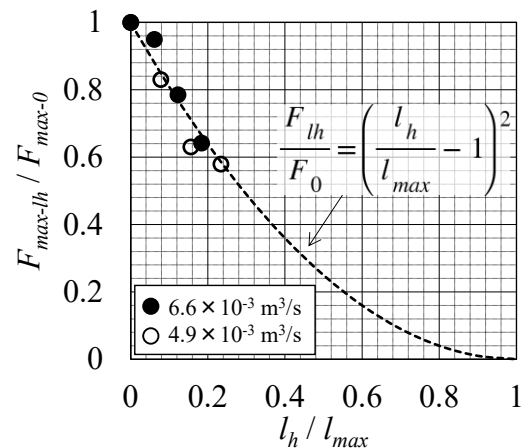


図-5 荷重低減率と距離比の関係

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 国総研資料第904号, 2016.
- 2) 高橋保, 吉田等：土石流の停止・堆積機構に関する研究(1)－勾配の急変による堆積－, 京都大学防災研究年報. Vol.22, B-22, pp.315-328, 1979.
- 3) Sun, X., Chen, M., Bi, Y., Zheng, L., Che, C., Xu, A., Tian, Z. and Jiang, Z.: Protective effects of baffles with different positions, row spacings, heights on debris flow impact, Journal of Mountain Science, Vol.21, No.7, pp.2352-2367, 2024.