

バイパストンネルにおける耐摩耗設計に向けた三角・四角棧粗度の比較解析 Comparative Analysis of Triangular and Square Strip Roughness for Abrasion-Resistant Design in Sediment Bypass Tunnels

○呉 許剣・山上 路生・松本 知将・角 哲也

○Xujian WU・Michio SANJOU・Kazumasa MATSUMOTO・Tetsuya SUMI

This study investigates the self-lining mechanism of sediment deposition between strip roughness elements as a measure to mitigate abrasion in sediment bypass tunnels (SBT). Systematic flume experiments were conducted by varying roughness intervals, flow discharge, channel slopes, and roughness element shape to analyze flow structures and sediment deposition characteristics. Image-based measurements quantified sediment coverage rates, revealing the conditions under which self-lining successfully achieved full surface coverage. Particle Image Velocimetry (PIV) analysis identified strong downward flows in regions of reduced flow depth, contributing to sediment transport and deposition patterns. At high Froude numbers, sweep flows disrupted sediment stability, while optimal roughness configurations facilitated effective sediment retention and surface protection. These findings offer practical insights into designing abrasion-resistant SBT surfaces through self-lining techniques.

1. はじめに

近年、土砂バイパストンネル（Sediment Bypass Tunnel, SBT）はダム堆砂対策として広く導入されているが、洪水時に流入する砂礫による底面摩耗が深刻な課題となっている。その対策として、棧粗度間への土砂堆積を利用して底面を保護する「セルフライニング」と呼ばれる手法が提案されている^{1), 2)}。しかし、粗度形状の違いが流れ場および土砂堆積特性に及ぼす影響については十分に解明されていない。本研究では、三角柱・四角柱棧粗度を有する開水路流れの平均流・土砂堆積過程の比較を通じ、粗度形状がセルフライニング過程に及ぼす影響について検討する。

2. 実験方法

本研究では、全長 4 m・幅 0.20 m の可変勾配水路を用い、助走区間 (0–1 m) 下流に棧粗度を一定間隔 λ で配置した粗度領域 (1–4 m) を設けた。計測は水路上流端から 3 m 下流地点で実施した。粗度形状の影響を比較するため、三角柱および四角柱の 2 種類の棧粗度を対象とした。いずれも粗度高さは $d = 1 \text{ cm}$ とした (図-1)。

清水条件および土砂投入後の静的平衡状態の流れ場に対して PIV 流速計測を行い、棧粗度近傍の時間平均流速場を取得した。また、ガラスビーズ ($d_p = 1 \text{ mm}$) を水路上流端から投入する土砂投入実験を実施し、粗度間の土砂堆積過程および底面被覆率を画像解析により評価した。本研究では水路勾配と流量を変化させ、フルード数の異なる

3 通りの射流条件 ($Fr = 2.80, 3.03, 3.92$) に設定した。また、各水理条件について相対粗度間隔を 3 通り ($\lambda/d = 3, 5, 10$) に変化させた。

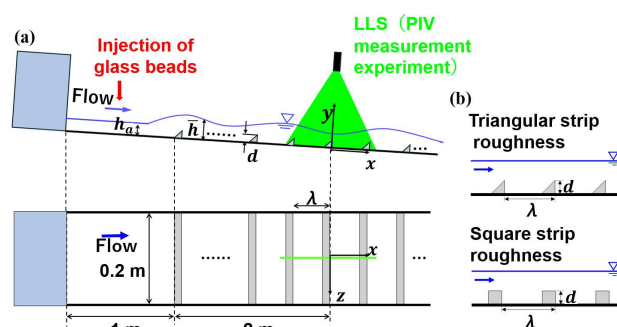


図-1 実験装置図 ((a)PIV 計測および土砂投入実験, (b) 棧粗度形状の概要)

3. 結果と考察

3.1 清水条件における粗度近傍の平均流構造

清水条件下における PIV 計測結果より、棧粗度の形状によって粗度近傍の平均流構造が大きく異なることが確認された (図-2)。三角柱粗度では、粗度頂部付近から底面に向かう強い下降流が形成され、水深変化も顕著であった。一方、四角柱粗度では、粗度背後に再循環渦を伴う安定した後流領域が形成され、上昇流・下降流は比較的弱く、水面形も平坦であった。これらの結果は、粗度形状による後流構造の変化が、後述する土砂堆積特性に影響を及ぼす可能性を示唆している。

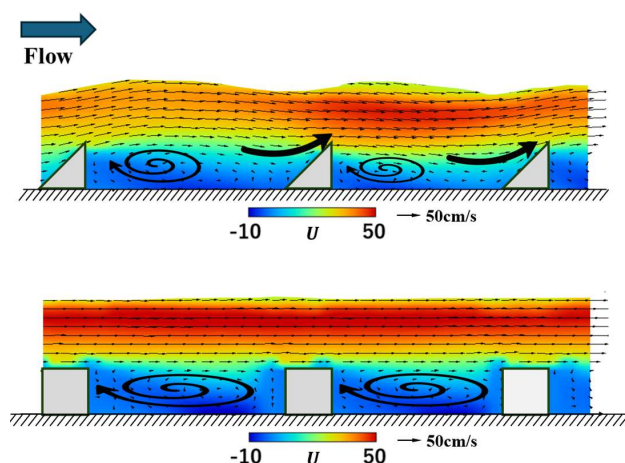


図-2 清水条件における三角柱・四角柱粗度近傍の時間平均主流速の縦断面コンター図 ($Fr = 3.03$, $\lambda/d = 5$)

3.2 静的平衡状態における粗度近傍の平均流構造

給砂停止後、堆積層が安定した静的平衡状態における粗度近傍の平均流構造を図-3に示す。三角柱粗度では、粗度頂部付近から堆積層表面に向かって下降流が維持され、堆積面近傍での流れの局所変化が比較的大きいことから、堆積砂が再移動しやすい流れ場が形成される。このため、堆積した砂の再流失が生じやすい傾向が認められた。

一方、四角柱粗度では、水面起伏が小さく、粗度背後に形成される下降流は底面にまで達していないため、堆積層の洗堀が生じにくいものと予想される。また、粗度前面が主流方向に対して垂直であることから、三角柱粗度の場合に見られるような上昇流は発生せず、粗度間に堆積した土砂が流出しにくい流れ場となっている。その結果、堆積層は安定して維持され、四角柱粗度の静的平衡状態における最終的な底面被覆率 (coverage rate) は約 57% となり、三角柱粗度に比べて約 10% 高い値を示した。これらの結果からも、静的平衡状態においても粗度形状によって平均流構造および土砂堆積特性が変化することが示唆される。

3.3 粗度形状による土砂堆積特性への影響

図-4に三角柱粗度および四角柱粗度近傍における平均流構造と土砂堆積特性の模式図を示す。三角柱粗度では、粗度要素上流側に再付着する下降流や粗度斜面に沿った上昇流が発達し、粗度前面付近で土砂堆積が阻害される傾向が確認された。その結果、粗度間に堆積した土砂が再流出し、土砂供給量が少ない条件下では局所的な洗堀が生じやすい。一方、四角柱粗度では、粗度背後に再循環渦を伴う後流領域が形成されるが、粗度上から

の下降流が底面に直接作用しにくい。その結果、土砂濃度の低い条件下でも堆積層が安定して維持される。

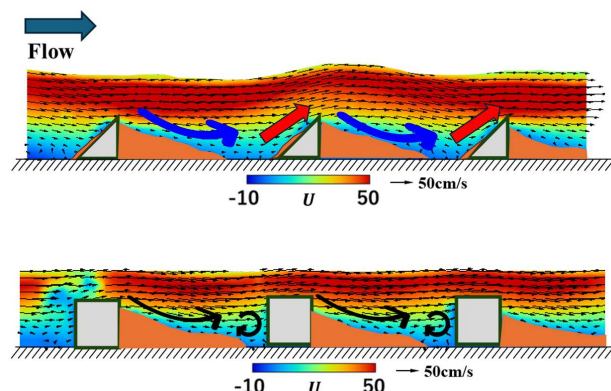
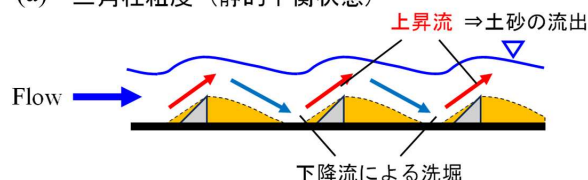


図-3 静的平衡時の三角柱・四角柱粗度近傍の時間平均主流速の縦断面コンター図 ($Fr = 3.03$, $\lambda/d = 5$)

(a) 三角柱粗度 (静的平衡状態)



(b) 四角柱粗度 (静的平衡状態)

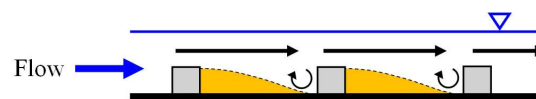


図-4 三角柱・四角柱粗度近傍の平均流・土砂堆積特性の模式図 ($\lambda/d = 5$)

4. まとめ

本研究の結果から、水深の小さい射流条件では三角柱粗度よりも四角柱粗度の方がセルフライニングの安定性に優れることが示唆される。ただし、本研究は通水初期に相当する条件を対象としており、今後は相対水深や流量条件、ならびに粒径分布の影響について検討する必要がある。

REFERENCES

- 1) 高須修二, 須田孝行, 古城一郎: セルフライニング排砂路の抵抗と流砂量, 土木技術資料, Vol. 32-1, pp. 35-40, 1990.
- 2) 呉許剣, 山上路生, 岡本隆明, 松本知将, 小柴孝太, 角哲也: 三角柱粗度間での砂のセルフライニングによる摩耗対策に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 81(16), 24-16140, 2025.