

II-276

高水敷からの帰還流による多自然型栗石護岸上の洗掘に関する考察

明石工業高等専門学校専攻科 学生員 ○森田 佳宏
 明石工業高等専門学校 正 員 神田 佳一
 岐阜大学工学部 正 員 藤田裕一郎

1. はじめに

栗石覆い工と詰め杭による階段状多自然型低水護岸を対象とし、護岸上流部で高水敷に達した流水が護岸上を直角及び斜め方向に流下する場合に生じる詰め杭前面の局所洗掘について実験を行い、その結果に基づいて、護岸延長上の単位幅流量と最大洗掘深との関係係を運動量解析から導くとともに、現地スケールの実験を含む他の実験データを用いて検証し、その有用性について検討した。

2. 実験の概要

実験は、全長10m、幅1mの長方形断面水路を用いて行い、その中央部に図-1に示すような法勾配5割の階段状護岸模型を、その延長方向が水路中心軸に対して、それぞれ $\theta=90^\circ$ 、 60° 及び 30° の角度を持つように設置した。護岸模型は、詰め杭を模した直径5mmの丸鋼棒を所定の長さに切断して直線上に5段並べ立て、それらのほぼ天端高さまで河床砂と同じ平均粒径 $d_m=1.8\text{mm}$ の粗砂を充填し、さらに各段表面に覆い工として $d_m=7.5\text{mm}$ の礫を2層敷き詰めたものである。各小段の高さは $H=2\text{cm}$ 、長さは $S=10\text{cm}$ とした。また、護岸の前面には、 $d_m=26\text{mm}$ の玉石で模擬した根固め工を設置した。

実験はまず、各護岸の方向角 θ に対して、護岸上の栗石覆工や河床砂、根固め工の一部が流水の作用によって移動し護岸が変形する限界の流量 Q_c を求め、それを越える $Q=5\text{ l/s}$ 及び 7 l/s の流量条件のもとで、護岸周辺の水面形、護岸材料の流送過程及び通水後30分の河床形状を詳細に計測した。低水路部の水位は、水路下流端の傾斜堰によって上から2段目の小段河床の高さに等しくなるように調整された。実験条件を表-1に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 護岸詰め杭前面の洗掘形状

図-2及び3は、 $\theta=90^\circ$ 、 60° 及び 30° の各護岸模型に対して、それぞれ流量 $Q=5\text{ l/s}$ 及び 7 l/s を30分間通水した後の護岸周辺部における水路中心線上の水面形と河床の縦断形状を示したものである。図には、単位護岸延長当りの流量 $q=Q/(B/\sin\theta)$ の値も併記している。いずれの場合も護岸の変形が最も顕著な箇所は、最上列及び上から2列目の詰め杭前面であって、洗掘量は単位護岸延長流量 q の値が小さい程減少している。 $\theta=30^\circ$ については覆い工の剥離よりもその下部の河床砂の吸い出し現象が顕著に見られた。 $\theta=60^\circ$ 及び 90° の場合、流水の落ち込みが顕著な護岸2段目の法覆い工の一部が剥離してその下部の河床砂が吸い出され、最上段の詰め杭前面にはほぼ三角形断面の洗掘穴が形成される。2列目の詰め杭前面においても同様な洗掘穴が発達していて、越流直下の護岸材料の流失に対する危険度が最も高いことを示唆している。一方、水面形についてみると、いずれの θ に対しても水位が低水路部のそれよりも高い最上段及び2段目のステップ上では、各ステップを越流した流れが詰め杭前面でほぼ垂直に落下し、水位は護岸の初期形状と同様の階段状の変化を示す¹⁾。その下流部では主流水脈が護岸から剥離し、ほぼ水平に流下して弱い波状跳水を形成している。

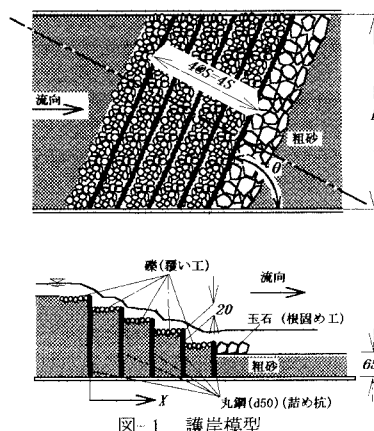
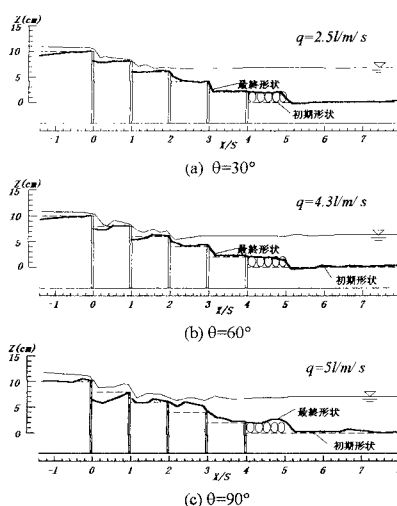


図-1 護岸模型

図-2 被災後の河床の縦断形状 ($Q=5\text{ l/s}$)

3.2 護岸上の最大洗掘量の評価

詰め杭前面の洗掘穴を図-4 (a)に示すように洗掘深 Z_m と斜面勾配 γ で三角形に近似し、段落ち部における運動量の釣合を図示すれば、図-4 (b)のようである。すなわち、護岸延長上の単位幅流量 q に対する鉛直方向の運動量方程式は次のように表せる。

$$-G + R \sin \delta - \rho q U_1 \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

ステップ最下流端の水深を h_t とし、詰め杭間の小段上のControl Volumeを台形と仮定し、重力項 G は次式で表す。

$$G = \rho g A = \rho g Z_m \left(\frac{Z_m}{2} + h_t \right) \cot \gamma \quad (2)$$

一方、ベクトル R は、洗掘穴下流斜面上に作用する流体力と考え、その水平方向成分を斜面上の底面流速 u_b を用いて次式で表す。

$$R \cos \delta = \lambda \rho u_b^2 L = \lambda \rho u_b^2 Z_m \cot \gamma \quad (3)$$

ここで、 L は斜面長、 λ は抗力係数である。 u_b は、 $h_t < Z_m$ としてWhittaker・Schleissの式²⁾を用いると、

$$u_b = c_v U_1 \sqrt{h_t \sin \gamma / Z_m} \quad (4)$$

となり、(2)～(4)式を(1)式に代入すると次式を得る。

$$\left(\frac{Z_m}{2h_t} + 1 \right) \frac{Z_m}{h_t} = \left(\lambda c_v^2 \tan \delta - \tan \gamma \right) \frac{q U_1 \sin \alpha}{g h_t^2} = c_v \frac{q U_1 \sin \alpha}{g h_t^2} \quad (5)$$

ここで、 c_v は河床砂及び河床近傍の流れ特性に依存すると考えられるが、Plunging Jetを対象としたHoffmansの解析³⁾によれば、砂粒径 $d_m = 1.8 \text{ mm}$ に対して、 $c_v = 2.7$ である。図-5は、実験結果から h_t を限界水深 h_c に等しいと仮定し、最上段詰め杭前面の洗掘に対して $q U_1 \sin \alpha / g h_t$ と $(Z_m/2h_t + 1) Z_m / h_t$ の関係を図示したものである。図より、両者はほぼ線形関係にあって、比例係数は $c_v = 2.6$ となり、Hoffmansの結果ともほぼ一致する。この値を用い、Borman³⁾、Rajaratnam⁴⁾、Schoklitsch³⁾らの実験結果に対して(5)式を適用した検証結果を示せば、図-6のようである。最大洗掘深 Z_m の計算結果は、実測値とよく対応しており、本解析の有用性が認められる。

4. おわりに

本研究では、高水敷からの流水の作用に対する階段状多自然型低水護岸工の水理特性について実験的検討を行い、主流水脈がほぼ鉛直に落下する最上列及び2列目詰め杭の前面において、局所洗掘が発達し、護岸強度上の最も弱点となりうることを指摘した。その結果に基づき、三角形近似した洗掘穴内において運動量解析法を適用して詰め杭前面の最大洗掘深の評価式を導いた。今後さらに、護岸上に作用する流体力の定量的評価を行いたい。

参考文献

- 1) 藤田・澤井・神田：多自然型護岸周辺の流れ特性に関する実験，水工学論文集，第39巻，1995。
- 2) Whittaker・Schleiss：Scour related to energy dissipaters for high head structures, 1984。
- 3) Hoffmans：Scour due to plunging jets, W-DWW-94-302, Ministry of Transport Public Works Water Management, 1994。
- 4) Rajaratnam：Erosion by plane turbulent jets, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.19, No.4, 1981。

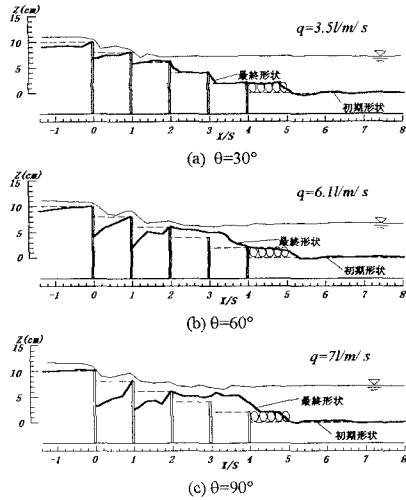


図3 被災後の河床の縦断形状 ($Q = 7 \text{ l/s}$)

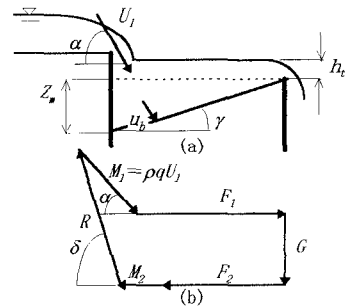


図-4 Control Volume と運動量の釣合い

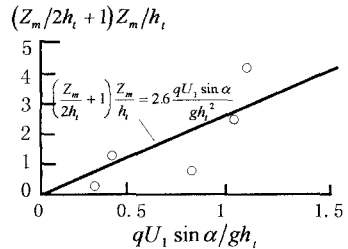


図-5 単位幅流量と最大洗掘深の関係

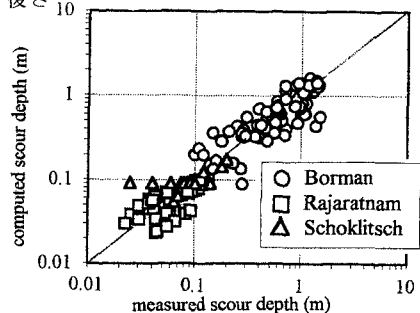


図-6 最大洗掘深の実測値と計算値の比較