

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、その背後からの流水作用に対する強度と被災特性に関して検討した。すなわち、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を想定した実験を行い、護岸材料の一部が流失する限界の流量を求め、低水路水位との関係を示すとともに、それを越える洪水流量が作用した場合の護岸上の最大洗掘量を運動量保存則を用いて評価した。

2. 実験の概要

実験は、全長10m、幅1m、高さ0.35m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の丸鋼棒を直線上に5段並べ立て、それらのほぼ天端の長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。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、護岸の方向角 θ 及び下流端水位をパラメータとして、護岸上の栗石覆い工や河床砂、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 を求めた（Aシリーズ）。低水路の水位は、水路下流端に設置された傾斜堰によって制御し、堰高 H は2.0、5.5及び10cmの3通りとした。さらに、洪水時における護岸周辺の河床変動特性を検討するために、 $W=5.5\text{cm}$ の場合について流量 $Q=5\text{ l/s}$ 及び 7 l/s を通水し、護岸被災後（通水後30分）の水面形及び河床形状を詳細に計測した（Bシリーズ）。

3. 実験結果及び考察

3.1 護岸材料の流送に対する限界流量と洪水時の護岸材料の変動特性

図-2は、各実験条件における限界流量 Q_c と護岸延長 $L_r=B/\sin\theta$ との関係を示したものである。図より、下流部低水路の水位が低い程（高水敷との水位差が大きい程）限界流量 Q_c は小さくなるのが明らかである。また、水路下流端の堰の高さが等しい場合、護岸延長 L_r が大きい程、即ち水路軸に対する護岸延長の角度 θ が小さい程限界流量 Q_c は大きくなる。これは、低水路の水位が高水敷の高さと同程度以下の場合には、詰め杭前面で落差による鉛直方向の流れが顕著になり、水路中央部での平面的な流向は詰め杭の延長方向に対して直角方向に向くので護岸上での流路幅は護岸延長にほぼ等しくなると考えられ、河床に作用する流体力に関連する単位幅流量が、見掛け上護岸延長 L_r に反比例するためである。

護岸上の水位についてみると、いずれの θ に対しても、水路下流端の堰高が $W=2\text{cm}$ の場合には、護岸上の流れは全体的に射流であって、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、水位は護岸形状と同様の階段状の変化を示す¹⁾。低水路の水位が高水敷と同程度になると、最上段の詰め杭前面で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するため、水位は一旦落ち込むがその後すぐに回復し、水位変化は小さい。その下部では、剥離に伴う渦が卓越し、これが限界時には覆い工を移動させる要因となると考えられる。

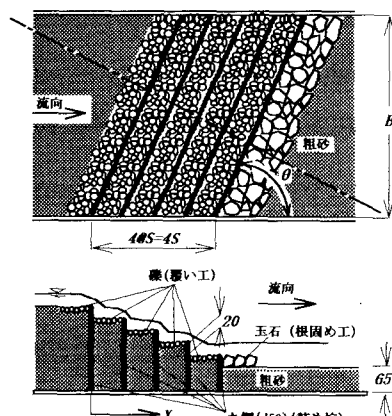


図-1 護岸模型

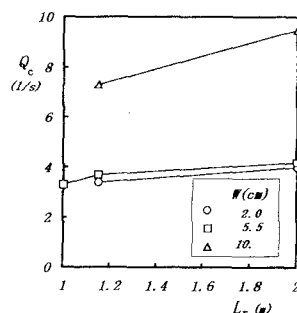


図-2 護岸延長と限界流量の関係

図-3は、 $\theta = 90^\circ, 60^\circ$ 及び 30° の各護岸模型に対して、流量 $Q=7l/s$ 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 $q=Q/L_p$ 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 θ が小さくなる程、即ち 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。

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いを図示すれば、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を台形と仮定すれば、重力項 G は次式で表せる。

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

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、

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

となり、(2)～(4)式を(1)式に代入すると次式を得る。

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

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。 h_t を限界水深 h_c に等しいと仮定し、護岸最上段の洗掘に対して $q U_1 \sin \alpha / g h_t$ と $(Z_m/2h_t + 1) Z_m / h_t$ の関係を図示すれば、図-5のようである。図より、両者はほぼ線形関係にあつて $c_v=2.6$ となり、Hoffmansの結果ともほぼ一致する。

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、河床砂や護岸材料が移動しない限界の流量を求め、護岸の傾斜角 θ や低水路の水位との関係を示した。さらに、洪水時においては、主流水脈がほぼ鉛直に落下する最上段及び2列目詰め杭の前面が護岸強度上の最も弱点となりうることを指摘するとともに、運動量解析法を用いて最大洗掘深の評価式を導出した。

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，pp.557-564，1995。
- 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。

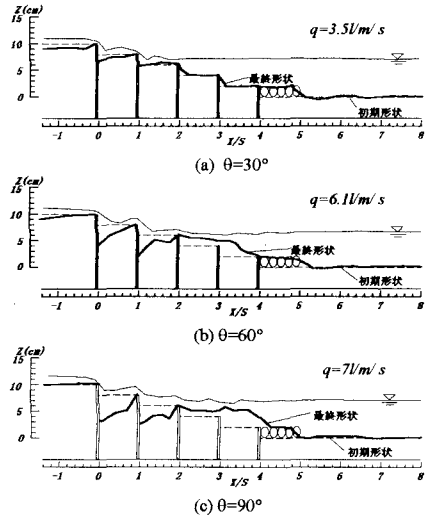


図-3 被災後の河床の縦断形状

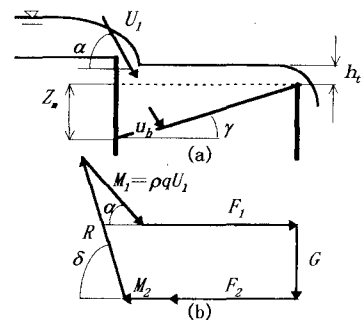


図-4 Control Volume と運動量の釣合い
($Z_m/2h_t + 1$) Z_m/h_t

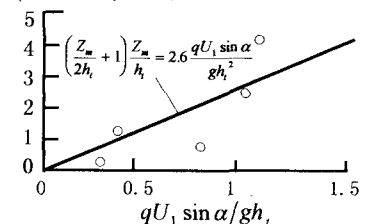


図-5 単位幅流量と最大洗掘深の関係