Ⅱ－39 越流堰堤下流の洗掘防止について（第１報）
―― 中空４脚ブロックを用いた護床区間の算定 ――

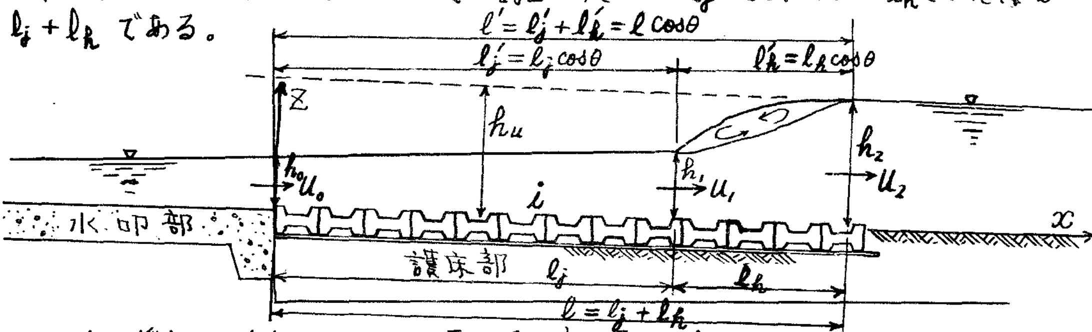
大阪市立大学 工学部 正員 工博 永井莊七郎
大阪市立大学大学院 学生員 ○高田彰

1．まえがき

越流堰堤下流の水叩あるいは水門下流の水叩の設計においては堰堤下流の河床の洗掘を防止するために種々な形状の水叩とその必要な長さ，および護床工或は阻柱，減勢池などを十分検討しなければならない。筆者らの研究は最近各地で使用されるようになった中空４脚ブロック（Hollow Square）を護床工に用いた場合の河床の保護区間の長さを求めることである。水平および傾斜する水叩下流の護床区間の算定には (1) 水叩或は護床区間で跳水を起す場合，(2) もぐり流出（潜流）になる場合，の２つに大別される。今回は第１報として (1) の場合に中空４脚ブロックを用いた保護区間の長さの算定について述べる。

2．跳水を起こす場合の河床の保護区間

堰堤あるいは水門下部を流下して来た射流の始端水深 h_0 が，下流の常流水深 h_2 に対応する跳水の共軛水深 h_1 より小さければ射流が露出し，その射流は河床の摩擦抵抗などによってエネルギーを減衰し，水深を漸増して h_1 になったところで跳水を起こす。この場合の河床の保護区間は h_0 から h_1 に至るまでの露出射流の長さ l_j と跳水の長さ l_h を加えた $l = l_j + l_h$ である。



2・1 緩勾配斜面における露出射流の長さ l_j

物部博士の堰上げ背水公式の求め方を応用すれば l_j は次式で示される。

$$l_j = \frac{\alpha R_u^{\frac{4}{3}}}{g n^2} \sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{1}{r(t+2)-2} \left\{ Z_1^{r(t+2)-2} - Z_0^{r(t+2)-2} \right\} \right] - \frac{h_u}{i} \sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{1}{r(t+2)+1} \left\{ Z_1^{r(t+2)+1} - Z_0^{r(t+2)+1} \right\} \right]$$

式中（$\alpha \fallingdotseq 1.02 \sim 1.1$，$n$：マンニングの粗度係数，$Z_1 = \dfrac{h_1}{h_u}$，$Z_0 = \dfrac{h_0}{h_u}$，
h_u：l_j 区間の等速流水深，B：水路幅，
$R_u = \dfrac{B}{b} h_u^{(1-k)}$，$\log h_u = \left(\dfrac{3}{5-2k}\right) \log\left\{ n\left(\dfrac{b}{B}\right)^{\frac{2}{3}} \dfrac{g}{i^{\frac{1}{2}}} \right\}$，$t = \dfrac{4}{3}(1-k)$，
$b = \dfrac{2h_1 + B}{h_1^k}$，$k = \log\left(\dfrac{2h_1 + B}{2h_0 + B}\right) \dfrac{1}{\log\left(\dfrac{h_1}{h_0}\right)}$，）

水深に比べて水路幅の大きい矩形断面水路の場合には $\dfrac{b}{B} \fallingdotseq 1$，$t = \dfrac{4}{3}(1-k) \fallingdotseq \dfrac{4}{3}$，

$R \doteqdot h$ とおくことが出来るから前式は次の如くになる。

$$l_j = \frac{\alpha h_u^{\frac{4}{3}}}{g n^2} \sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{3}{10r-6} \left\{ Z_1^{\frac{10}{3}r-2} - Z_0^{\frac{10}{3}r-2} \right\} \right] - \frac{h_u}{i} \sum_{r=1}^{\infty} \left[\frac{3}{10r+3} \left\{ Z_1^{\frac{10}{3}r+1} - Z_0^{\frac{10}{3}r+1} \right\} \right]$$

2・2 水平床（$i=0$）における露出射流の長さ l_j

不等速流の運動方程式 $i - \frac{dh}{dx} = \alpha \frac{d}{dx}\left(\frac{U_m^2}{2g}\right) + \frac{n^2 U_m^2}{R^{\frac{4}{3}}}$ より求めると l_j は次式で示される。

$$l_j = \left(\frac{B}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \frac{1}{n^2 q^2} \left\{ \frac{3\alpha q^2}{4(1-k)g} \left(h_1^{\frac{4}{3}(1-k)} - h_0^{\frac{4}{3}(1-k)} \right) - \frac{3}{4(1-k)+9} \left(h_1^{\frac{4(1-k)+9}{3}} - h_0^{\frac{4(1-k)+9}{3}} \right) \right\}$$

式中の B, b, k などの記号は前述と同様である。q は単位幅流量，

水深に比べて水路幅の大きい矩形断面の場合は前述と同様にして次式で示される。

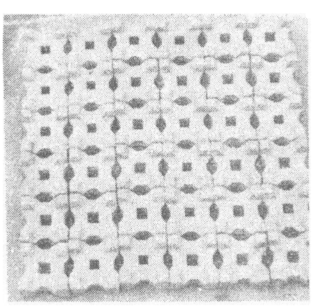
$$l_j = \frac{1}{n^2 q^2} \left\{ \frac{3\alpha q^2}{4g} \left(h_1^{\frac{4}{3}} - h_0^{\frac{4}{3}} \right) - \frac{3}{13} \left(h_1^{\frac{13}{3}} - h_0^{\frac{13}{3}} \right) \right\}$$

以上より露出射流の長さ l_j を求めることが出来るが，式中の n の値は護床工の種類によってきまる。今まで護床工として十字ブロックなどが使用されて来たが，それらの粗度係数は実測あるいは実験によって求められたものではなく，ただ経験的に大体の目安をつけているようである。筆者らは護床工として中空4脚ブロックを用いた場合の粗度係数 n_H を実験によって求めた。

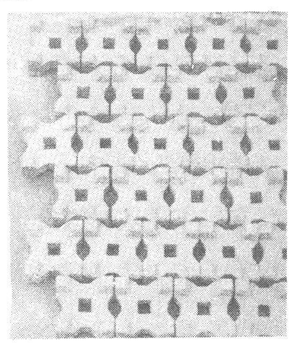
2・3 中空4脚ブロック（Hollow Square）の粗度係数 n_H，

2・3・1 ブロックの配置方法

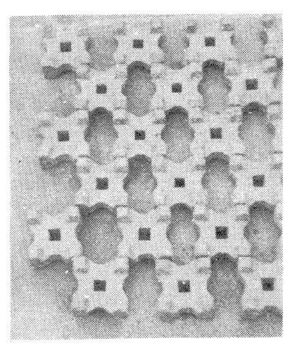
このブロックを根固および護床工に用いる場合は (1) 並列配置（写真－1），(2) 千鳥配置（写真－2），(3) 格子配置（写真－3）の3通りの並べ方がある。



写真－1 並列配置



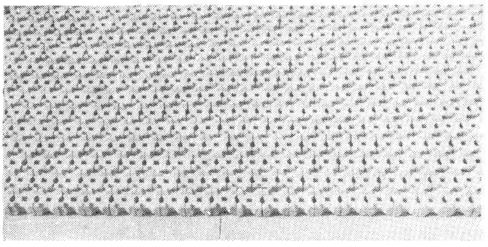
写真－2 千鳥配置



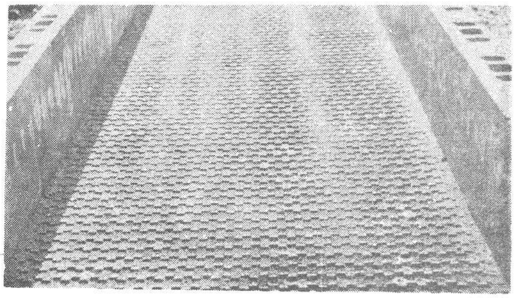
写真－3 格子配置

根固および護床工として必要な条件は一般に (1) 粗度係数が大きいこと，(2) 洗掘を防止するとともに局部的洗掘に対して可撓性であること，(3) 副流の発達を抑制し，土砂礫の堆積が多いこと，(4) 接続下流の河床が洗掘されないこと，(5) 流水に対して安定で耐久力があること，などであるがこれらのことを考慮して中空4脚ブロックでは並列配置および千鳥配置を採用した。実験ではこれらの配置について固定床および移動床（水準を使用，比重 約2.2）にして行った。写真－4は砂を流す前の千鳥配置の状態を示し，

写真－5 は移動床の実験後の砂の堆積状況を示す。



写真－4，実験前（千鳥配置）



写真－5，実験後の砂の堆積状況（千鳥配置）

2・3・2 粗度係数の算定式

平均流速式はマンニング式 $U_m = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$ を用いた。しかし実験では正確に水路勾配に一致した水面勾配が得られなかったので不等速流の運動方程式から誘導した次式でマンニングの粗度係数 n を算定した。

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}}}{U_m} \sqrt{I \mp \frac{\alpha Q^2 B}{g A^3}(I - i)}$$

（水深が下流に減少するとき（－）を用いる。
〃　増大　〃　（＋）　〃　）

式中
A：流水断面積
B：水路幅（≒1.5 m）
Q：実験流量
I：水面勾配
i：水路勾配（≒$\frac{1}{1100}$）

このようにして求められた粗度係数 n は側壁の影響が入った合成粗度係数（等値粗度係数）であるので，中空4脚ブロックだけの粗度係数 n_H は次式で求めた。

$$n = \left(\frac{B n_H^{\frac{3}{2}} + 2h n_s^{\frac{3}{2}}}{B + 2h} \right)^{\frac{2}{3}}$$

式中 n_s：側壁の粗度係数
（モルタルの $n_s = 0.011$ とする。）

2・3・3 粗度係数の実験結果

2トンブロックの $\frac{1}{25}$ のアルミ製のブロック（比重 2.7）を用いた。実験開水路は幅 1.5 m × 高さ 0.5 m × 長さ約 30 m，水路勾配 $i \doteqdot \frac{1}{1100}$（側壁は防水モルタルブロック積にしてモルタルで表面を仕上げ，床はモルタル塗である。）で行い，流量は $Q = 5.5$ l/s ～ 100.4 l/s，水深は $h = 2.8$ cm ～ 15.1 cm，流速は $U_m = 11$ cm/s ～ 46 cm/s，Froude 数は $F_r = 0.02 \sim 0.18$ である。以上のような流況のもとで実験を行ったが平均して固定床の並列配置の粗度係数は $(n_{H_1})_m = 0.018$，千鳥配置では $(n_{H_2})_m = 0.023$ であって千鳥配置の方が大きい値を得た。また移動床において行った結果，並列配置では $(n_{H_1})_m = 0.017$，千鳥配置では $(n_{H_2})_m = 0.021$ なる値を得た。これは固定床の場合の粗度係数より約 7.7 % 減少することを示している。

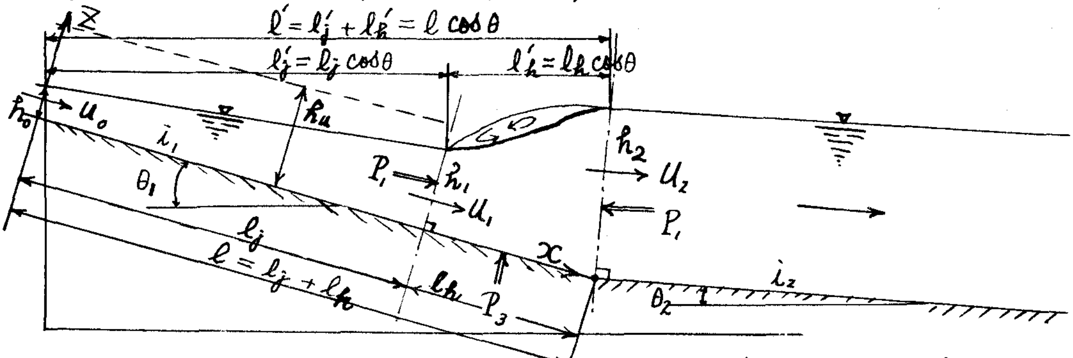
2・3・4 中空4脚ブロック，の実物（0.5 トン ～ 15 トン）の粗度係数

Froude の相似率から $\frac{n_m}{n_p} = S^{\frac{1}{6}}$（$n_m$：模型の粗度係数，$n_p$：実物の粗度係数，$S$：模型の縮尺）なる関係が導かれる。従って実験に用いたブロックは2トンの $\frac{1}{25}$ の模型であるので実物の粗度係数 n_p は $n_p = \left(\frac{1}{25}\right)^{-\frac{1}{6}} \times n_m \doteqdot 1.71\, n_m$ となる。同様にして縮尺を変えれば2トン以外の重量のブロックについての粗度係数 n_p

が求められる。そこで 0.5トン～15.0トン のブロックについて求めたのが次の表である。

ブロック1個の重量 W（比重2.3）	中空4脚ブロックの実物の粗度係数 $(n_H)_p$			
	固定床 $(n_H)_p$		移動床 $(n_H)_p$	
	並列配置	千鳥配置	並列配置	千鳥配置
0.5 トン	0.029	0.037	0.027	0.033
1.0 〃	0.030	0.038	0.028	0.034
2.0 〃	0.031	0.039	0.029	0.036
4.0 〃	0.032	0.041	0.030	0.037
5.0 〃	0.032	0.041	0.030	0.038
8.0 〃	0.033	0.043	0.031	0.039
10.0 〃	0.034	0.043	0.031	0.039
12.0 〃	0.034	0.043	0.031	0.040
15.0 〃	0.035	0.044	0.032	0.040

3．跳水の対応（共軛）水深の計算



図のように複合斜面 i_1, i_2 $(i_1 > i_2)$ において第1斜面 i_1 の下流端で生ずる跳水について考えると，衝力方程式から次式が得られる。

$$\alpha^3 - \left(\cos\theta_2\cdot\cos(\theta_1+\theta_2)\cdot\sec\theta_1 + 2{F_2'}^2\cdot\cos(\theta_1-\theta_2)\cdot\sec\theta_1\right)\alpha + 2{F_2'}^2\sec\theta_1 = 0$$

式中 $\alpha = \dfrac{h_1}{h_2}$, ${F_2'}^2 = \dfrac{u_2^2}{g h_2}$

この式より，θ_1, θ_2 の値の取り方によって次のような種々な場合の関係式が得られる。

i) $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ ‥‥‥ 単一斜面上の跳水

$$\alpha^3 - (\cos 2\theta + 2F_2^2\sec\theta)\alpha + 2F_2^2\sec\theta = 0$$

ii) $\theta_2 = 0$ ‥‥‥‥‥ 傾斜面から水平面に移る所で起こる跳水

$$\alpha^3 - (1 + 2F_2^2)\alpha + 2F_2^2\sec\theta_1 = 0$$

iii) $\theta_1 = \theta_2 = 0$ ‥‥‥ 水平床上の跳水

$$(\alpha-1)(\alpha^2+\alpha-2F_2^2) = 0 \quad \therefore\ \alpha = \frac{h_2}{h_1} = \frac{-1+\sqrt{1+8F_2^2}}{2}$$