

II-14

越流堤の水理機能に関する研究

北海道開発局開発土木研究所 正員 村上 泰啓

北海道開発局開発土木研究所 正員 渡邊 康玄

1、目的

石狩川中流部に計画・建設が進められている砂川遊水地は法面が緩勾配斜面で構成される越流堤を持つ。越流堤の越流係数については本間の研究が有名であるが、今回検討対象の越流堤斜面勾配が本間の研究で用いた斜面勾配条件から大きく離れていることから $1/12.5$ 縮尺の越流堤抽出模型を制作し、種々の流量条件、水位条件を与え、水位、流速等を測定し、越流係数を算出した。ここでは緩勾配斜面で構成される越流堤の水理特性とマコーマック法による射流域を含む一次元水路での水位計算について報告するものである。

2、実験装置

図-1に実験に用いた越流堤断面を示す。実験装置は上流側からJIS B8302に準拠した四角堰を取り付けた量水槽部、上流減勢ポンド、越流堤抽出模型水路部、下流減勢ポンド部に別れている。上下流のポンドを取り付けた理由は量水槽から模型水路に水を直接流下させた場合、堰からの流水の勢いが強すぎ十分減勢されないまま模型水路に水が流入していくため、このために速度水頭が大きくなり上下流の水位差で越流係数を評価しようとする場合に速度水頭が無視できなくなる問題を極力回避しようとしたものである。模型水路は耐水処理を施した合板側壁と透明アクリル板側壁により構成され、水路幅は1mである。越流堤本体は木枠に固定し側壁間に設置した後、継目をシーリングして水密性を確保した。実験に用いた断面は図-2に示す2タイプである。

Aタイプは上流側斜面勾配が $1/10$ 、Bタイプは上流側斜面勾配が $1/40.2$ である。下流側斜面勾配は2タイプ共 $1/10$ となっている。

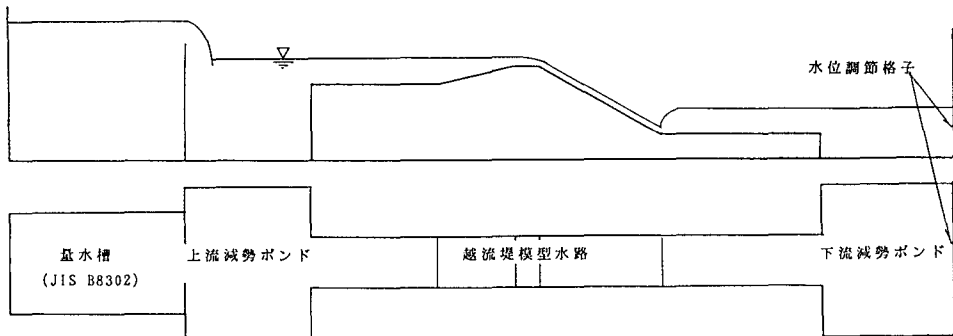


図-1 実験装置

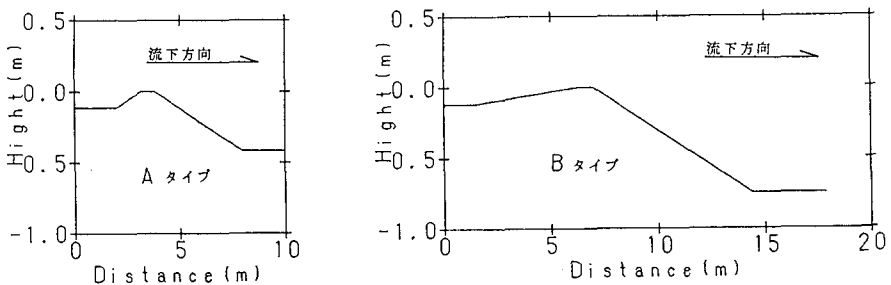


図-2 越流堤タイプ

Hydraulic Mechanism of Overflow on the Weir

by Yasuhiro MURAKAMI, Yasuharu WATANABE

3. 実験

(1)、実験条件

本間の研究によれば越流状態は次の3タイプに分けられる。

①、完全越流 $Q = C_0 B (H_1^3)^{0.5} \dots \dots \dots (1)$

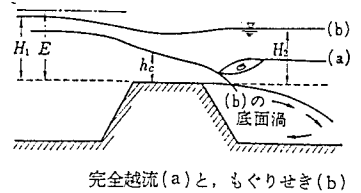
越流した水が射流となって流下するもの

②、不完全越流 $Q = (\alpha H_2 / H_1 + \beta) B (H_1^3)^{0.5} \dots \dots \dots (2)$

下流側水位が高くなり流下する射流部が表面渦でおおわれてしまうもの

③、潜り越流 $Q = C' B H_2 (H_1 - H_2)^{0.5} \dots \dots \dots (3)$

射流部を生じないもの



完全越流(a)と、もぐりせき(b)

ここでは上下流の水位差によって①～③のどの越流状態になるかを確認しつつ与えた流量ごとに水位条件を設定した。実験条件を表-1に示す。測定項目は上下流の減勢タンク水位、水路内の水面形、流速、の3項目である。水位はポイントゲージ、流速は小型流速計を使用した。

4. 実験結果

図-3は上流水位 H_1 と流量 Q についてプロットしたものである。黒丸はBタイプ、白丸はAタイプを表している。上流側の越流堤斜面勾配がAに比べ緩いBは流下能力的にAよりも若干高いことが確認される。

また図-3の曲線の回帰式を(1)式とすれば完全越流係数 C_0 を最小自乗法により求める事ができる。

Aタイプの $C_0 = 1.564$

Bタイプの $C_0 = 1.595$

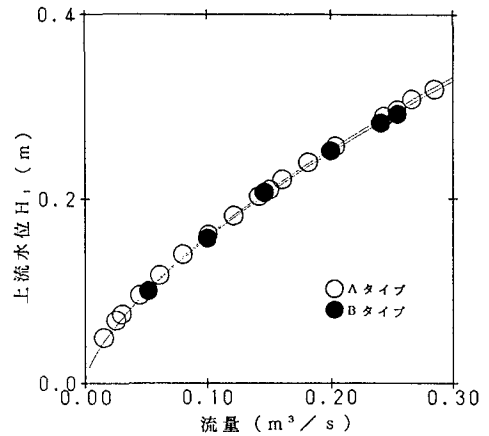


図-3 上流水位～流量

図-4は完全越流係数 C_0 ～上下流の水位比 H_2/H_1 をプロットしたものである。A、Bタイプとも H_2/H_1 の値が0.9付近まで越流堤頂に射流がみられ、完全越流の状態を維持していることが確認された。また通減部の形状を最小自乗法により試算し、参考式として次式を得た。

$$C' = -C_0 / 0.1^{3.5} (H_2/H_1 - 0.9)^{3.5} + C_0 \quad (0.9 \leq H_2/H_1 \leq 1.0) \quad \dots \dots \dots (4)$$

図-4には上式がプロットされている。参考式は通減部をほぼ再現しているものと思われる。本間の報告では通減部を直線で近似しているが、高次式で近似したほうがより適合性が高いものと思われる。

本間の用いた断面形においてももっとも緩傾斜の条件では完全越流の境界が0.6、不完全越流の境界が0.7であったことから、A、Bタイプの様な緩勾配斜面を有する越流堤においては完全越流の範囲が広い事が理解できる。またBタイプの場合Aタイプよりも越流係数の通減が若干遅れることから上流側の越流堤斜面

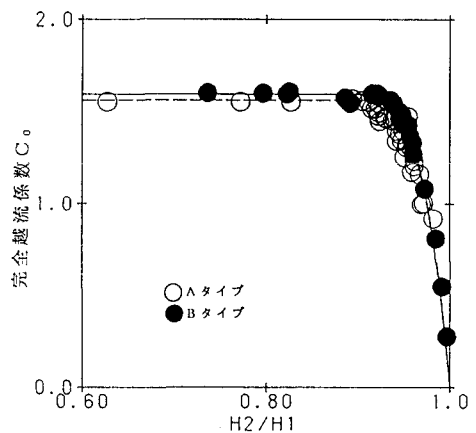


図-4 $H_2/H_1 \sim C_0$

勾配が小さいほど越流係数の通減が遅くなるものと推定される。

次に(3)式の右辺と流量の関係を図-5にプロットした。もぐり越流係数 C' は図中の傾きであるから最小自乗法によりつぎの値を求めた。

$$\begin{aligned} \text{Aタイプの} C' &= 5.938 \\ \text{Bタイプの} C' &= 6.645 \end{aligned}$$

5、A、Bタイプの越流公式の試算

実験を通して得られた越流係数からA、Bタイプの越流堤における越流公式を次に示す。

$$\begin{aligned} \text{完全越流 A } Q &= 1.564 B (H_1^3)^{0.5} \\ \text{B } Q &= 1.595 B (H_1^3)^{0.5} \\ &\dots\dots\dots (5) \\ \text{もぐり越流 A } Q &= 5.938 B H_2 (H_1 - H_2)^{0.5} \\ \text{B } Q &= 6.645 B H_2 (H_1 - H_2)^{0.5} \\ &\dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

本間の報告によれば下流側の斜面勾配が緩くなれば不完全越流の範囲が狭まる事が示されている。今回実験に用いたA、B断面の越流状態の観察から判断して、不完全越流の領域はほとんど無かったものと推定される。

図-6に本間が求めた越流公式の適用範囲を示し、今回用いた2タイプの越流堤形状の条件を併せて示してある。完全越流の条件が下流側勾配が緩傾斜になるにつれて拡大し、不完全、潜りの領域は次第に狭まってくる事が理解される。また本間は完全越流ともぐり越流の領域が H_2/H_1 値で2/3を中心として漸近する図を描いているが、実際には図-6に示されるように越流堤下流勾配により領域が変化しているものと推定できる。

5、考察

図-7は完全越流係数と上流水深 H_1 と堤高の比をプロットしてある。既往文献(例えば水理公式集)においては完全越流係数が上流水深 H_1 と堤高の比の一次式で表されているが、今回用いた緩傾斜越流堤では一定値をとることがわかる。完全越流係数の取扱いが緩傾斜堤では固定値をとる点に注意を要する。

また、緩傾斜越流堤において完全越流の領域が H_2/H_1 値で0.9付近まで広がっており、もぐり越流へは不完全越流をほとんど生じないまま遷移することが把握された。これは下流側斜面勾配が小さいため当初から推定されていたが、図-6に示された領域区分にプロットしたことで確認できた。また上流側越流勾配は緩勾配であるほうが導水され易いということが出来る。今後、本間の実験ケースとの補完の意味での比較が十分でないため、さらに検討を進めていく必要がある。

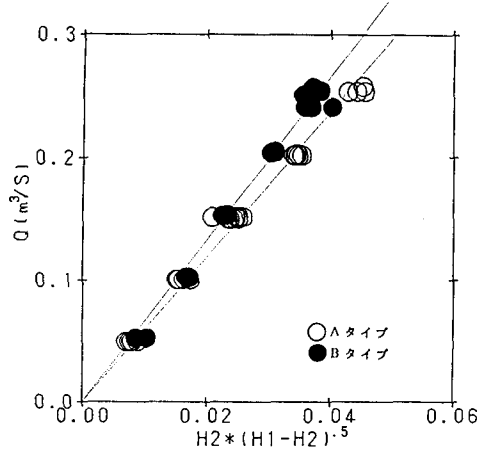


図-5 $Q \sim H_2 (H_1 - H_2)^{0.5}$

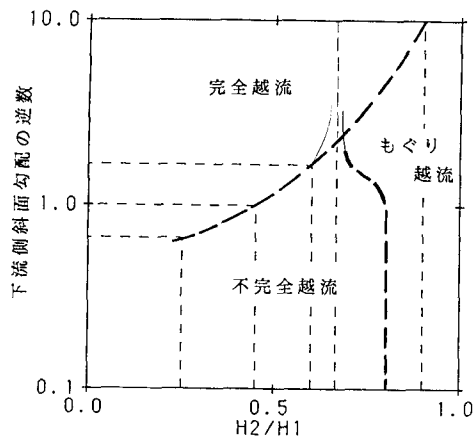


図-6 下流斜面勾配～上下流水深比

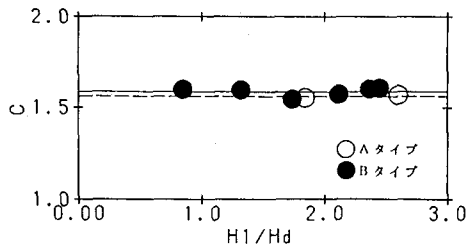


図-7 $C_0 \sim H_1/H_d$

7. 一次元MacCormack²⁾法による流れの計算

射流域を含む一次元水路の計算手法については渡邊の研究³⁾があるがここではMacCormack法を用いた射流域を含む一次元水路における水面形計算を行った。MacCormack法は衝撃波を含む現象の計算に適しているといわれている。跳水は一種の衝撃波であり越流堤を流下した水の挙動を理解するためにもMacCormack法による数値計算は有効であると考えられる。

一次元流れの連続の式および運動方程式は次式で表す。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = s \quad \dots \dots \dots (2)$$

上式中、

$$\left. \begin{aligned} H &= h \\ U &= u h \\ F &= u^2 h + g h^3 / 2 \\ S &= g H (S_0 - S_f) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 x は流下方向距離、 h は水深、 u は流速、 g は重力加速度、 ϵ は乱流粘性係数、 S_0 は水路勾配、 S_f は摩擦勾配でManningの粗度係数を用いて次式で与える。

$$S_f = \frac{n^2 U^2}{H^{10/3}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

MacCormack法とは時間依存差分法的一种で空間および時間方向に2次の精度を有する差分スキームである。通常の差分が(5)式に示す様に一次精度であるのに対し、MacCormack法による差分スキームでは(6)式により差分格子点前後での修正子を考慮しているため衝撃波の計算において精度が高いといわれている。

(予測子段階)

$$U_i^p = U_i(t) - \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_i - E_{i-1}) + \Delta t S_i \quad \dots \dots \dots (5)$$

(修正子段階)

$$U_i(t + \Delta t) = \frac{1}{2} \{ U_i(t) + U_i^p - \frac{\Delta t}{\Delta x} (E_{i+1}^p - E_i^p) + \Delta t S_i \} \quad \dots \dots (6)$$

ただし、

$$U = \begin{pmatrix} H \\ U \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} U \\ F \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ S \end{pmatrix} \quad \dots \dots \dots (7)$$

であり、下付き添え字 i は空間(x 軸)方向の格子点番号を、上付き添え字 p は(5)式の形式で求められる予測子段階の値であることを示す。また、 Δx および Δt はそれぞれ x および t 方向の計算きざみ幅である。

計算は適当な初期条件(この場合は定常流なので、物理的な意味における初期条件ではなく、計算上の初期推定値)のもとに定常状態になるまで計算を繰り返す。境界条件は下流端で水位を一定に、上流端では各時間ステップにおいて所定の流量になるように流速を調整する。

乱流粘性係数 ϵ およびManningの粗度係数 n は時間空間的に一定として、それぞれ $\epsilon = 0.001$ 、 $n = 0.01$ とした。計算に用いた Δt は各時間ステップにおいて次式のCFL条件を満たすようにそのつど計算して与えた

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|u| + \sqrt{(gh) + 2\epsilon/\Delta x}} \quad \dots \dots \dots (8)$$

図-8に今回用いた実験ケースの条件を与えて計算した結果をプロットしてある。文献3)の手法では斜流末端で解が不安定化する場合があったがMacCormack法を用いた手法では安定した解が得られている。しかしながら、全部の実験ケースに対して十分なシミュレーションが行えなかったため、MacCormack法の有効性についてはまだ評価の分かれるところである。よって今後より多くのシミュレーションを実施し、MacCormack法を用いた計算手法の精度向上をはかる必要がある。

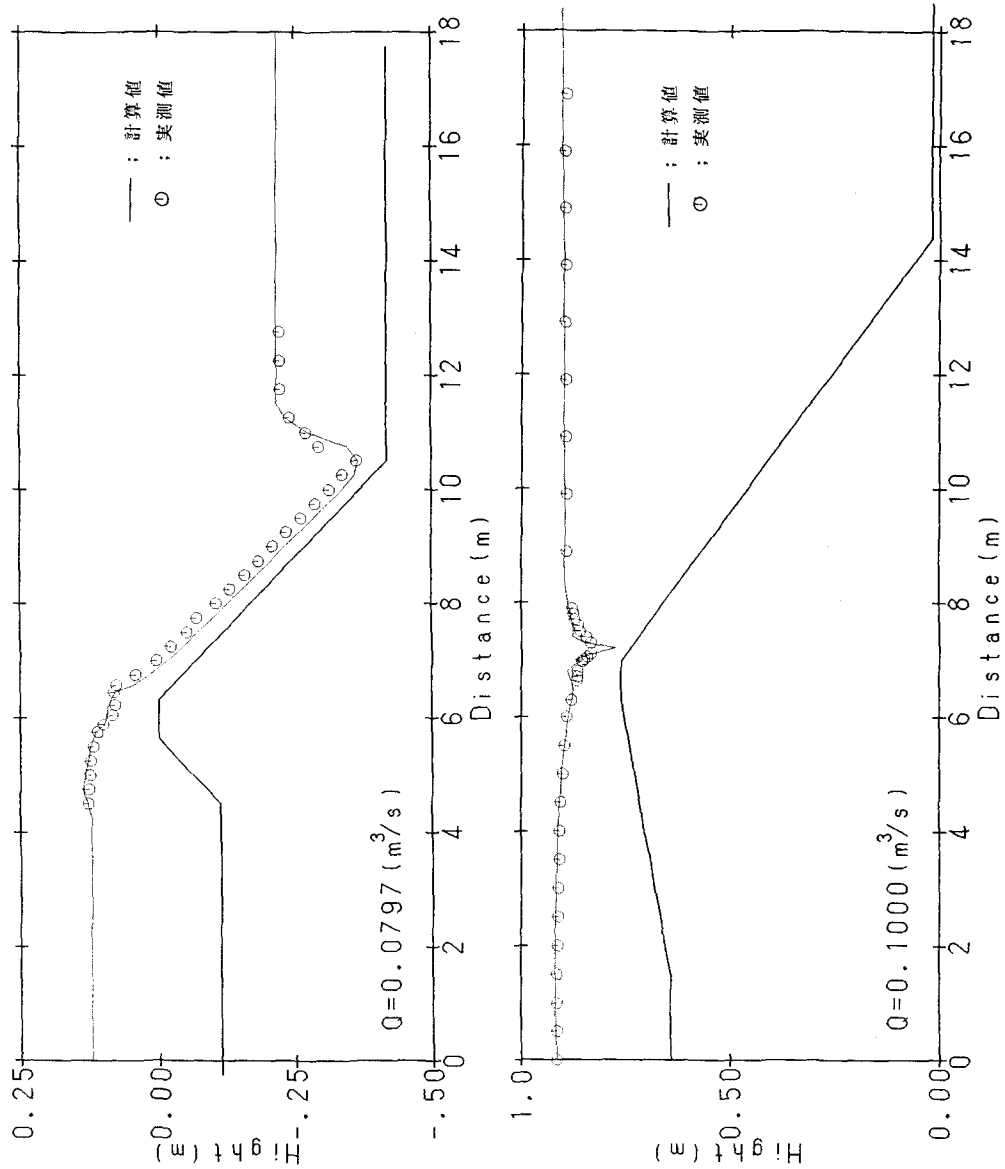


図-8 MacCormack法を用いた一次元水路の水面計算結果

参考文献

- 1) 本間 仁: 低越流堰堤の流量係数、土木学会誌、第26巻、6号p635~645、9号p849~862、1940
- 2) 日本機械学会 編: 流れの数値シミュレーション、p106
- 3) 渡邊 康玄: 常射流混在流れの河床変動計算、第32回北海道開発局技術研究発表会

表-1 実験条件一覧表

TYPE - A				TYPE - B							
case	Q (m ³ /S)	H2/H1	状態	case	Q (m ³ /S)	H2/H1	状態	case	Q (m ³ /S)	H2/H1	状態
1	0.05123	0.7966	完全	1	0.01504	-6.290	完全	27	0.15151	0.9415	潜り
2	0.05229	0.9198	潜り	2	0.02942	-4.079	完全	28	0.15162	0.9469	潜り
3	0.05221	0.9969	潜り	3	0.04408	-2.712	完全	29	0.15172	0.9585	潜り
4	0.09995	0.8230	完全	4	0.06061	-2.028	完全	30	0.15172	0.9691	潜り
5	0.10221	0.9214	潜り	5	0.07971	-1.532	完全	31	0.20205	0.9295	潜り
6	0.10221	0.9914	潜り	6	0.10061	-1.072	完全	32	0.20323	0.9412	潜り
7	0.14618	0.8717	完全	7	0.12161	-0.726	完全	33	0.20205	0.9497	潜り
8	0.15354	0.9446	潜り	8	0.14187	-0.712	完全	34	0.20205	0.9181	潜り
9	0.15279	0.9854	潜り	9	0.16058	-0.510	完全	35	0.20205	0.9107	潜り
10	0.19971	0.8855	完全	10	0.18173	-0.317	完全	36	0.25351	0.9283	潜り
11	0.20511	0.9452	潜り	11	0.20335	-0.360	完全	37	0.25351	0.9212	潜り
12	0.20405	0.9726	潜り	12	0.24310	-0.105	完全	38	0.25770	0.9144	潜り
13	0.25427	0.8248	完全	13	0.26651	-0.103	完全	39	0.25351	0.9036	潜り
14	0.25427	0.9384	潜り	14	0.28533	-0.023	完全	40	0.25402	0.8932	潜り
15	0.25693	0.9599	潜り	15	0.02488	-3.402	完全	41	0.15000	0.9719	潜り
16	0.24073	0.7363	完全	16	0.04943	0.9229	潜り	42	0.15000	0.9615	潜り
17	0.24098	0.9149	潜り	17	0.04935	0.9448	潜り	43	0.15000	0.9534	潜り
18	0.24111	0.9346	潜り	18	0.04935	0.9520	潜り	44	0.15000	0.9394	潜り
19	0.24123	0.9445	潜り	19	0.04920	0.9614	潜り	45	0.15000	0.9202	潜り
20	0.24098	0.9484	潜り	20	0.04935	0.9824	潜り	46	0.15000	0.8268	完全
21	0.25049	0.9483	潜り	21	0.10042	0.9218	潜り	47	0.15000	0.7721	完全
22	0.25061	0.9550	潜り	22	0.10042	0.9369	潜り	48	0.15000	0.6275	完全
23	0.25112	0.9566	潜り	23	0.10042	0.9484	潜り				
24	0.24086	0.9603	潜り	24	0.10023	0.9581	潜り				
25	0.24073	0.4814	完全	25	0.10042	0.9673	潜り				
26	0.24597	0.9515	潜り	26	0.15151	0.9548	潜り				