

傾斜堤の越流・透過係数の高精度化実験

高田悦子*・真期俊行**・平石哲也***・榊原 弘****

1. はじめに

現在、津波・高潮の数値計算を実施する場合、護岸や防波堤を越流する流量については、本間の越流公式を用いて算定している。本間公式は種々の断面形状を持つ模型を用いて実験を行い、その実験結果をとりまとめて作成されたものであり、不透過な堰を対象としている。一方、津波防波堤を計画する際に、湾内の海水交換を促進することを目的として、傾斜堤のような透過型の構造物とする場合がある。このような透過性構造物の津波低減効果を検討する場合、不透過な構造物を対象とした本間公式を用いて数値シミュレーションを行うことは望ましくない。しかし、透過性構造物の越流・透過流量を簡単に計算できる計算式はない。そこで、本研究では、傾斜堤の越流・透過係数を算定することを目的として、水理模型実験を実施し、津波・高潮の数値計算を実施する際に用いる越流・透過係数の高精度化を図る。

2. 水理模型実験

2.1 実験装置および実験方法

実験には、図-1 に示す幅 1.5 m、長さ 26 m の水路を用いた。この水路では、水路上流端から流した水を給水ポンプを用いて循環させることにより、水路内に流れを発生させることができる。また、水路下流端には、水位調整用ゲートが設置されており、このゲートの高さを調節すると同時にポンプの出力を調節して流量を調整することによって、水路内の水位を調節することができる。

傾斜堤模型は、図-2 に示すように、テトラポッド模型を用いて作成した。また、コア部については、碎石を用いて作成した。

実験は、図-1 に示した位置に傾斜堤模型を設置し、水位調整用ゲートとポンプ流量を調節することにより、傾斜堤模型上下流の水位を適宜変化させて実施し、模型上・下流の水位および流量を測定する。

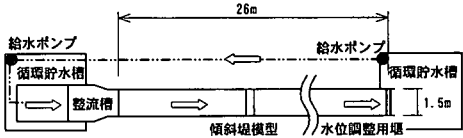


図-1 実験水路概略図

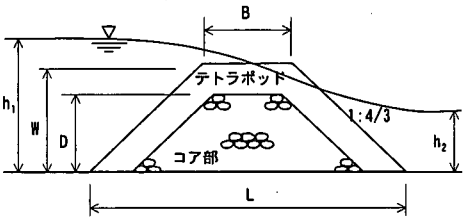


図-2 傾斜堤模型概略図

2.2 実験ケース

傾斜堤の流量公式を算定する場合、その越流・透過流量に影響を与えると考えられるパラメータは、傾斜堤およびコア部の天端高や天端幅が考えられる。そこで、本実験ではこれらのパラメータを適宜変えて実験を実施し、これらパラメータが流量に与える影響について把握するものとする。なお、テトラポッドの大きさについても変化させて実験を行い、その影響についても検討を行う。また、傾斜堤ののり面勾配は、一般的に傾斜堤で用いられる 1:4/3 とする。実験に用いる傾斜堤模型の実験ケースを表-1 に示す。表-1 のうち、天端幅 B については、傾斜堤の天端上に並べるテトラポッドの個数を変えることにより変化させる。また、コア部が越流・透過流量に与える影響を把握するため、碎石を用いて作成したコア部を遮水シートで覆って不透過性とした場合の実験についても実施している。

2.3 実験結果

実験結果の一例を図-3 に示す。図-3 は、上流側水深 h_1 を固定した場合の、下流側水深 h_2 と単位幅流量 q の関係をプロットしたものである。図-3 には、本間公式を用いて算定した単位幅流量の関係も示している。この図より、本間公式により計算した単位幅流量は、実験値に比

* 工修 国土交通省 国土技術政策総合研究所 沿岸域システム研究室
** (株)ニュージェック河川海岸部
*** 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所 波浪研究室
**** 正会員 (株)ニュージェック河川海岸部

表一 実験ケース一覧

テトラポッド 重 量	防波堤高 W(m)	コア部		天端幅	
		コア天端高 D(m)	透過・ 不透透	B(m)	テトラポッド 個 数
6.3 ton	0.27	0.20		0.118	3 個
	0.26	0.19			
	0.26	0.15			
	0.26	0.13			
10.0 ton	0.27	0.20		0.138	3 個
	0.26	0.19			
12.5 ton	0.27	0.20	透過	0.150	3 個
	0.26	0.15			
	0.26	0.13			
	0.26	0.19			
	0.26	0.17	不透透	0.198	4 個
				0.246	5 個
				0.150	3 個
				0.150	3 個
	0.22	0.15		0.198	4 個
				0.246	5 個
				0.150	3 個
				0.246	5 個
	0.26	0.19		0.150	3 個
	0.22	0.15		0.246	5 個
20.0 ton	0.27	0.20	透過	0.174	3 個
	0.26	0.19			
32.0 ton	0.27	0.20	透過	0.208	3 個
	0.26	0.19			

べて小さな値となっており、本間公式を用いて傾斜堤の越流・透過流量を算定することは望ましくないことが分かる。本間公式は不透透な堰の越流公式であり、傾斜堤のように透過性の構造物の場合、構造物内を透過する流量を考慮できないため、このような結果になったものと考えられる。また、下流側水位の変化に伴う単位幅流量の変化をみると、下流側水位が小さくなり、水位差が大きくなるにつれて、流量の変化の度合いが緩やかになる。これは、水位差が大きくなると、堤頂部で射流状態が発生し、流量が下流側水位に影響を受けなくなる完全越流の状態が発生するためであると考えられる。ただし、傾斜堤は透過性の構造物であり、完全に下流側水位の影響を受けなくなることはない。そのため、不透透な堰にみられる完全越流の状態のように、流量が全く変化しないのではなく、水位差が大きくなるにつれて、若干、流量が増大している。

3. 越流・透過係数の算定

3.1 越流・透過係数の算定方法

本間公式では、完全越流・不完全越流・潜り越流の3つの越流状態に分けて台形堰の越流量を算定している。傾斜堤の場合にも、図-3にもみられるように完全越流の状態が発生しているため、完全越流・不完全越流・潜

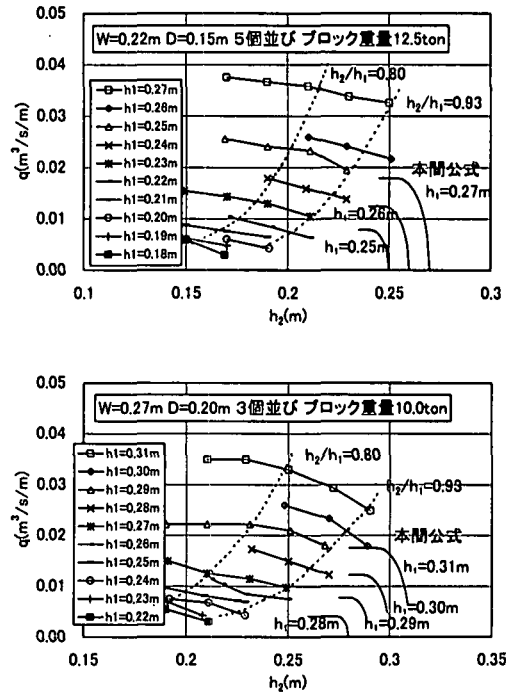


図-3 単位幅流量と水深の関係

り越流の3つの越流状態について、それぞれ越流・透過係数を算定する。まず、3つの越流状態の発生する範囲を決定する。完全な潜り越流となるのは、堰頂部で射流状態が発生しない場合である。そこで、実験の目視により越流状態を判定し、また、後述する実験公式による実験値の再現性を考慮して3つの越流状態の場合分けを行った。結果的に、各越流状態の境界値は以下のとおりとなった。なお、図-3中には、 $h_2/h_1=0.80$ および $h_2/h_1=0.93$ の関係式も示している。この図より、以下の条件により、ほぼ越流状態の判定が可能であることが分かる。

- 完全越流 $h_2/h_1 < 0.80$
- 不完全越流 $0.80 < h_2/h_1 < 0.93$
- 潜り越流 $h_2/h_1 < 0.93$

また、水位が傾斜堤天端高を越えない場合は、堰を越流するような流れの形態とならないため、水位が傾斜堤天端高を越える場合と比べて越流・透過流量の変化傾向が異なるものと考えられる。また、水位がコア部の天端高よりも低い場合についても、越流・透過流量の変化傾向が異なることが考えられる。そこで、以下に示す3つの場合に分けて越流・透過係数の算定を行う。

- a) 上流側水位がコア部天端高を越えない場合
 - b) 上流側水位がコア部天端高を越える場合
 - c) 上流側水位が天端高を越える場合
- したがって、完全越流・不完全越流・潜り越流それぞれ

れの場合について、上記 a)～c) の場合に分けて越流・透過係数の算定を行う。ただし、a) 上流側水深がコア部天端高を越えない場合については、流れの形態は堰の越流形態とはならないため、越流状態の場合分けを行わない。したがって、結局 7 つの場合に分けて越流・透過係数を算定する。

3.2 上流側水位がコア部天端高を越えない場合

上流側水位がコア部の天端高よりも小さい場合は、傾斜堤内を透過する流量のみを評価すれば良いものと考えられる。そこで、透過堤によるエネルギー損失を考慮して、式(1)を用いて透過流量を算定する。なお、式(1)中の係数については、実験値を従属変数として相関解析を実施して決定した。

$$q = 0.487 \sqrt{\frac{d}{l}} \frac{h_1 + h_2}{2} \sqrt{\Delta h} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 d はテトラポッドの 1 個の高さ、 l は図-4 に示す平均流水長であり、式(2)で計算される。

$$l = \sqrt{\left\{ L - \left(\frac{m_1 h_1}{2} + \frac{m_2 h_2}{2} \right) \right\}^2 + \left(\frac{h_1 - h_2}{2} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

なお、 m_1 および m_2 は上流側および下流側の傾斜堤ののり面勾配である。

3.3 上流側水位が傾斜堤天端高を越える場合

上流側水位が傾斜堤天端高を越える場合には、天端を越流する流量と、傾斜堤内を透過する流量が存在する。そこで、傾斜堤内の透過によるエネルギー損失と、傾斜堤天端を越えて越流する流量を考慮して、式(3)によって、越流・透過係数を算定するものとする。式(3)は完全越流の場合の算定式であり、係数は実験値を従属変数として多重相関解析を実施して決定した。

$$\left. \begin{aligned} q &= C_1 h_1 \sqrt{h_1} + C_2 \frac{h_1 + h_2}{2} \sqrt{\Delta h} \\ C_1 &= 0.652 \frac{h_1 - W}{W} - 0.078 \\ C_2 &= 1.296 \sqrt{\frac{d}{l}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

同様に潜り越流の場合の算定式を求めると次式のようなになる。

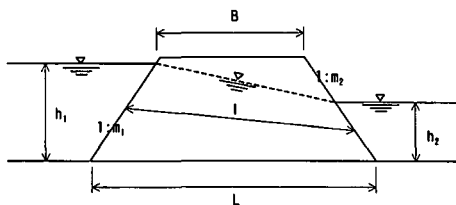


図-4 平均流水長

$$\left. \begin{aligned} q &= C_1 \frac{h_1 + h_2}{2} \sqrt{\Delta h} + C_2 \frac{h_1 + h_2}{2} \sqrt{\Delta h} \\ C_1 &= 2.348 \frac{h_1 - W}{W} - 0.528 \\ C_2 &= 2.476 \sqrt{\frac{d}{l}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(3)および式(4)の右辺第 1 項は台形堰を越流する流量に相当する項、第 2 項は傾斜堤内を透過する流量に相当する項である。

また、不完全越流の場合は、流量が $h_2/h_1=0.80$ の時に式(3)、 $h_2/h_1=0.93$ の時に式(4)から求められる流量に等しくなるように、式(3)および式(4)を直線をつないだ次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} q &= C h_1 \sqrt{h_1} \\ C &= \alpha (h_2/h_1) + \beta \\ \alpha &= \frac{C_{\text{完}(h>W)} - C_{\text{潜}(h>W)}}{0.80 - 0.93} \\ \beta &= C_{\text{完}(h>W)} - 0.80\alpha \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $C_{\text{完}(h>W)}$ および $C_{\text{潜}(h>W)}$ は式(3)および式(4)に $h_1/h_1=0.80$ および $h_2/h_1=0.93$ の関係式を代入して計算される流量を $q = C h_1 \sqrt{h_1}$ 代入し、逆算して求められる流量係数であり、それぞれ次式のように表される。

$$\begin{aligned} C_{\text{完}(h>W)} &= 0.652 \frac{h_1 - W}{W} - 0.078 \\ &\quad + 1.296 \sqrt{\frac{d}{l}} \frac{1.0 + 0.80}{2} \sqrt{1.0 - 0.80} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{潜}(h>W)} &= \left(2.348 \frac{h_1 - W}{W} - 0.528 \right) \\ &\quad \cdot \frac{1.0 + 0.93}{2} \sqrt{1.0 - 0.93} + 2.476 \sqrt{\frac{d}{l}} \\ &\quad \cdot \frac{1.0 + 0.93}{2} \sqrt{1.0 - 0.93} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

3.4 上流側水位が傾斜堤天端高を越えない場合

水位がコア部の天端高よりも大きく、かつ傾斜堤天端高を越えない場合は、式(1)と式(3)、式(4)、式(5)を直線をつないだ次式で越流・透過流量を算定する。

完全越流の場合は、 $h_1=D$ の時に式(1)、 $h_1=W$ の時に式(3)で計算される流量に等しくなることから、次式により越流・透過流量を算定する。

$$\left. \begin{aligned} q &= C h_1 \sqrt{h_1} \\ C &= \left(C_{\text{完}(h>W)} - C_{\text{完}(h>D)} \right) \frac{h_1 - D}{W - D} + C_{\text{完}(h>D)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $C_{\text{完}(h>W)}$ は式(3)のうち、 $C_1 = -0.078$ として

計算される流量を $q = Ch_1\sqrt{h_1}$ に代入し、逆算して求められる流量係数であり、次式により表される。

$$C_{\text{完}}(h_1 > W) = -0.078 + 1.296 \sqrt{\frac{d}{l} \frac{(h_1 + h_2)/2 \cdot \sqrt{\Delta h}}{h_1 \sqrt{h_1}}} \dots\dots\dots (9)$$

また、 $C_{\text{完}}(h_1 > D)$ は式 (1) で計算される流量を $q = Ch_1\sqrt{h_1}$ に代入し、逆算して求められる流量係数であり、次式により表される。

$$C_{\text{完}}(h_1 > D) = 0.487 \sqrt{\frac{d}{l} \frac{(h_1 + h_2)/2 \cdot \sqrt{\Delta h}}{h_1 \sqrt{h_1}}} \dots\dots\dots (10)$$

潜り越流の場合も同様にして、式 (1) と式 (4) を直線をつないだ次式により越流・透過流量を算定する。

$$q = C \frac{h_1 + h_2}{2} \sqrt{\Delta h}$$

$$C = (C_{\text{潜}}(h_1 > W) - C_{\text{潜}}(h_1 > D)) \frac{h_1 - D}{W - D} + C_{\text{潜}}(h_1 > D) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 $C_{\text{完}}(h_1 > W)$ は式 (4) のうち、 $C_1 = -0.528$ として計算される流量を $q = C(h_1 + h_2)/2\sqrt{\Delta h}$ に代入し、逆算して求められる流量係数であり、次式により表される。

$$C_{\text{完}}(h_1 > W) = -0.528 + 2.476 \sqrt{\frac{d}{l}} \dots\dots\dots (12)$$

また、 $C_{\text{完}}(h_1 > D)$ は式 (1) で計算される流量を $q = C(h_1 + h_2)/2\sqrt{\Delta h}$ に代入し、逆算して求められる流量係数であり、次式により表される。

$$C_{\text{完}}(h_1 > D) = 0.487 \sqrt{\frac{d}{l}} \dots\dots\dots (13)$$

また、不完全越流の場合は、 $h_2/h_1 = 0.80$ の時に式 (8)、 $h_2/h_1 = 0.93$ の時に式 (11) で計算される流量と同じとなるように、また、 $h_1 = D$ の時に式 (1)、 $h_1 = W$ の時に式 (5) で計算される流量に等しくなるように、次式を用いて越流・透過流量を算定する。

$$\left. \begin{aligned} q &= Ch\sqrt{h_1} \\ C &= \left\{ \alpha \left(\frac{h_2}{h_1} \right) + \beta \right\} \frac{h_1 - D}{W - D} + \gamma \\ \alpha &= \frac{C_{\text{完}}''(h_1 > W) - C_{\text{潜}}''(h_1 > W)}{0.80 - 0.93} \\ \beta &= C_{\text{完}}''(h_1 > W) - 0.80\alpha - C_{\text{完}}''(h_1 > W) \\ \gamma &= C_{\text{完}}''(h_1 > D) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $C_{\text{完}}''(h_1 > W)$ は式 (3) に $h_2/h_1 = 0.80$ を代入し、 $C_1 = -0.078$ として計算される流量を $q = Ch_1\sqrt{h_1}$ に代入し、逆算して求められる流量係数であり、次式により表される。

$$C_{\text{完}}''(h_1 > W) = -0.078 + 1.296 \sqrt{\frac{d}{l} \frac{1.0 + 0.80}{2} \sqrt{1.0 - 0.80}} \dots\dots\dots (15)$$

また、 $C_{\text{潜}}''(h_1 > W)$ は式 (4) に $h_2/h_1 = 0.93$ を代入し、 $C_1 = -0.528$ として計算される流量を $q = Ch_1\sqrt{h_1}$ に代入し、逆算して求められる流量係数であり、次式により表される。

$$C_{\text{潜}}''(h_1 > W) = -0.528 \times \frac{1.0 + 0.93}{2} \sqrt{1.0 - 0.93} + 2.476 \sqrt{\frac{d}{l} \frac{1.0 + 0.93}{2} \sqrt{1.0 - 0.93}} \dots\dots\dots (16)$$

3.5 越流・透過流量の算定結果

上記の算定式を用いて計算した越流・透過流量と、実

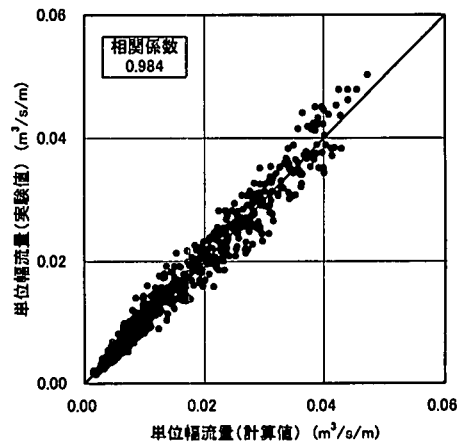


図-5 計算値と実験値の比較

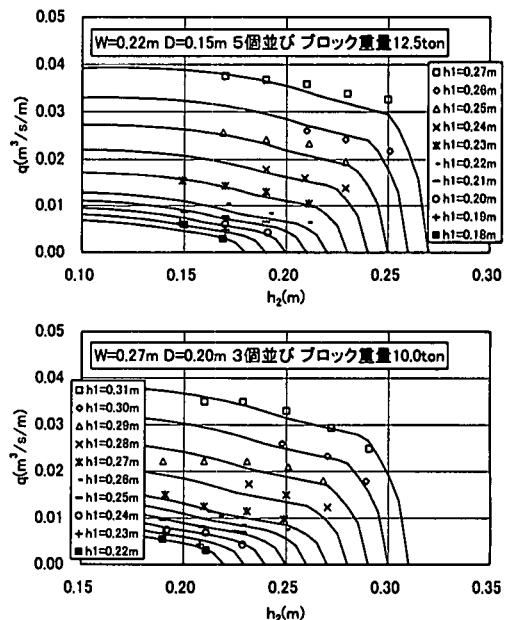


図-6 単位幅流量と水深の関係 (実験値との比較)

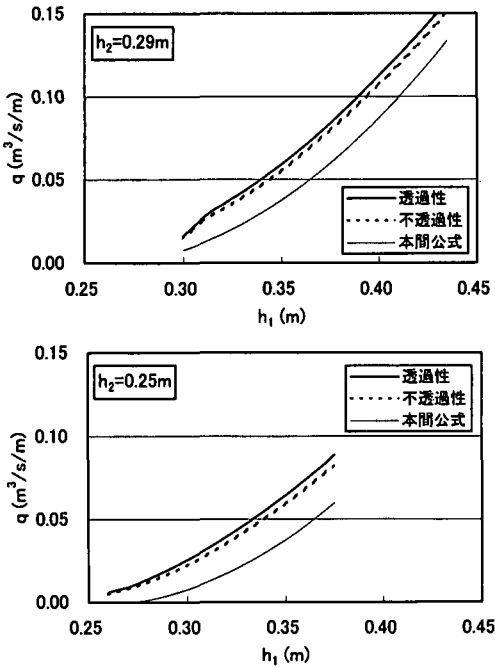


図-7 本間公式との比較

実験結果と比較したものを図-5に示す。図-5より、相関係数は0.984となっており、上記の算定式は、実験結果を良好に再現していることが分かる。また、図-6には、算定式を用いて、上流側水深 h_1 を固定して下流側水深 h_2 を変化させた場合の計算を行い、実験値と比較したものの一例を示す。図-6より、計算値は越流・透過流量の変化傾向を良く再現していることが分かる。これらの結果より、上記の算定式を用いて傾斜堤の越流・透過流量を算定できることが分かる。

4. 実験公式の比較

図-7に $W=0.27$ m, $D=0.20$ m, $B=0.15$ m (天端上テトラポッド3個並び) の条件で、上記の越流・透過流量算定式により算定した流量と、本間公式により算定した流量の比較を行ったものを示す。この図は、傾斜堤下流側の水位を固定し、上流側の水位を変化させた場合の流量の変化を示したものである。この図より、上記の越流・透過流量計算式を用いて計算した流量は、本間公式を用いて計算した越流量に比べて、かなり大きくなることが分かる。したがって、本間公式を用いて傾斜堤の津波数値シミュレーションを実施した場合、越流量を過小評価するために、津波防波堤内の最大津波高が小さく計算され、危険側の評価をすることになる。

また、本実験では、コア部を不透透にした場合の実験も実施しており、その場合の越流・透過流量算定式も上

記と同様の方法で作成している。図-7には、コア部を不透透にした場合の越流量の比較も示しており、コア部が不透透になると、 $0.002 \sim 0.007$ (m³/s/m) 程度、流量が減少することが分かる。また、上流側水位が小さくなり、流量が小さくなくても、コア部を不透透にしたことによる流量の減少量はそれほど変わらず、水位が小さいほどコア部の影響が相対的に大きくなる。これは、水位が小さいと、天端を越流する流量に比較して、傾斜堤内を透過する流量が相対的に大きくなるためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、津波・高潮の数値計算を実施する際に用いる傾斜堤の越流・透過流量公式の高精度化を図るため、水理模型実験を実施した。実験の結果、従来、数値計算に用いられてきた本間公式では、傾斜堤の越流・透過流量を過小評価することが分かった。そこで、実験結果を用いて、実験結果を良好に再現することのできる傾斜堤の越流・透過流量算定式を作成した。算定式を作成する際に、まず、本間公式と同様に越流状態により場合分けを行った。しかし、傾斜堤の場合、本間公式と同様に各越流状態につき一つの流量式で、実験結果を良好に再現することはできなかった。そこで、水位と傾斜堤諸元(天端高、コア部天端高)との関係により、さらに場合分けを行い、流量式を算定した結果、実験結果を良好に再現することができた。傾斜堤のような透過性の構造物の越流・透過流量を算定する場合に、構造物内を透過する流量の影響を考慮するために、水位と構造物諸元の関係により場合分けを行うことの有用性が示された。

しかし、本実験のように、透過性構造物の越流・透過現象を水理模型実験により再現しようとした場合、粘性の効果が問題となってくるため、実験スケールの影響が考えられる。そこで、本論では述べなかったが、井田らの方法により本実験の粒径レイノルズ数を概算したところ、 $10^3 \sim 10^4$ のオーダーとなり、実験スケールの影響が含まれている可能性があることが分かった。また、本研究で提案した実験公式は、限られた実験ケースの実験結果を基にしたものである。したがって、今後、実験スケールの影響も含め、さらに検討を進めていく必要があるものと考えられる。

参考文献

- 井田康夫・森松芳隆・安井陽平 (2000): 直立透過堤における実験スケールと透過特性, 海洋開発論文集, 第16巻, pp.475-480.
- 本間 仁(1940): 低越流堰堤の流量係数(第一編), 土木学会誌, 第26巻第6号.
- 本間 仁(1940): 低越流堰堤の流量係数(第二編), 土木学会誌, 第26巻第9号.