

広頂堤の越波について

浜 村 和 馬* ・ 五 明 美智男**
余 錫 平*** ・ 富 樫 宏 由***

Rate of Wave Overtopping Broad-Crested Dikes

by

Kazuma HAMAMURA*, Michio GOMYO**
Xiping YU*** and Hiroyoshi TOGASHI***

A semi-empirical method for estimating the rate of wave overtopping broad-crested coastal dikes is established following the application of the standard formulas for the coefficient of discharge of broad-crested weirs. Careful measurements are also made in laboratory to verify the results predicted by the proposed semi-empirical method. It is found that agreement between predictions and experiments is satisfactorily good if the wave height is moderate. However, the prediction losses accuracy for relatively high waves. This is considered to be owing to the omission of the inertia effects in the semi-empirical formulas.

1. はじめに

海のウォーターフロント計画において、従来、防災上の安全性と建設上の経済性が強調され、この両面の折衷を中心に全体計画を展開する場合が多かった。しかし、自然環境との協調が大きくクローズアップされている今日では、従来の安全性と経済性に加わって、景観の視点からも含めた海岸の親水性も重視されるようになった。こうした背景で、低天端、つまり、高波浪時に一定の浸水を認める形式の海岸堤防が多く採用される傾向にある。一方、浸水形式の海岸堤防の設計に際して、堤防に波が衝突して遡上し、堤体の背後に流れ込むという越波の現象について、従来よりさらに正確な認識が要求されることは言うまでもない。換言すれば、越波を正確に把握しなければ、耐波特性に優れた構造で、なおかつ水辺に触れやすく、さらに最小限の建設費で施工できる海岸堤防、つまり安全面、親水面、経済面のすべてが考慮された海岸堤防を設計す

るのは困難なこととなる。

海岸構造物の越波に関して今まで多くの研究が行われ、種々の経験式・半経験式が提案されてきた。その代表的なものに高田(例えば、高田, 1977)と吉川・椎貝・河野(1967)の研究が挙げられる。高田(1977)の研究では、構造物前面において仮に波が自由に遡上し、遡上波が構造物の実際の天端を超える部分があれば、それに相当する水の量が越波量に等しいと考えた。一方、吉川・椎貝・河野(1967)は堰の越流理論を応用して、越波量を構造物前面の水位変動から求める方法を提案した。

本研究においては、吉川・椎貝・河野(1967)の手法を用い、広頂堰の越流理論より広頂堤の越波量算定式の誘導を試みる。また、小型水槽を用いて水理実験を行い、越波算定式の結果を実験値と比較することによって、その妥当性を検討する。

平成8年10月21日受理

* 大学院修士課程社会開発工学専攻

** 東亜建設工業(株)技術研究所

*** 社会開発工学科

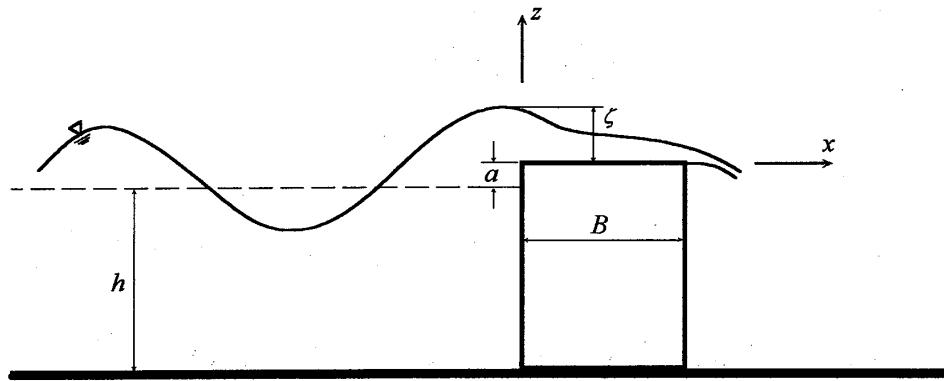


図-1 広頂堤の越波概念図

2. 越波量の計算法

2.1 越波量公式

図-1 に低天端広頂堤の越波を示すものである。問題の単純化を図るため、堤体の断面を矩形とし、堤体前面の静水深が一様であると仮定する。また、堤体に進む波が規則波のみを考える。堤頂が波の最大打ち上げ高さよりも高ければ、堤体の前面で完全重複波が形成され、越波量が下限の0となることは容易に想像できる。一方、堤頂が平均海面よりも低く設定することが実務上考えられないので、堤頂が平均水面と同じ高さにある場合の越波量が越波量の上限として差し支えない。

堤体前面の領域で完全重複波が形成される場合を考えると、堤体前面における瞬時水位が、堤頂を基準とすれば、以下のように表される。

$$\zeta(t) = -a + H \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad (1)$$

ただし、 H は堤体に接近する波の波高、 T は波の周期、 a は堤頂と静水面との鉛直距離、 t は時間を表す。 $\zeta(t)$ は任意時刻における堤体前面の可能最高水位と言う。越波が発生しない場合、これは実際の水位となるが、越波が発生すれば、実際の水位はこれより多少低くなることが推測できる。堤体前面の可能最高水位 $\zeta(t)$ の最大値は可能最大越波高さと言い、本研究においては R で表す。式(1)より、

$$R = H - a \quad (2)$$

吉川・椎貝・河野(1967)と同様に、任意時刻における単位幅の越波流量を q とし、堰の流量公式を用いて、 q を該当時刻における堤体前面の水位 ζ で以下のように表す。

$$q(t) = \begin{cases} c(t) \sqrt{2g} [\zeta(t)]^{3/2} & (\zeta \geq 0) \\ 0 & (\zeta < 0) \end{cases} \quad (3)$$

ただし、 g は重力加速度、 C は流量係数である。流量係数は堤体前面の瞬時水位にも関係するので、一般的に時間によって変化するものとして考えた方がより適切である。 $q(t)$ を1周期 ($0 \leq t < T$) にわたって積分することによって一周期当りの単位幅越波量 Q が求められる。

$$Q = \int_0^T q(t) dt = \sqrt{2g} \int_{t_0}^{T/2-t_0} C(t) [\zeta(t)]^{3/2} dt \quad (4)$$

ここに、 t_0 を以下のように定義すれば、積分範囲 $[t_0, T/2-t_0]$ は $\zeta \geq 0$ の範囲を表すことが簡単に証明できる。

$$t_0 = \frac{T}{2\pi} \sin^{-1} \frac{a}{H} \quad (5)$$

2.2 流量係数

広頂堤の流量係数について、古くから数多くの研究が行われてきたが、流れの非定常性を無視したものが

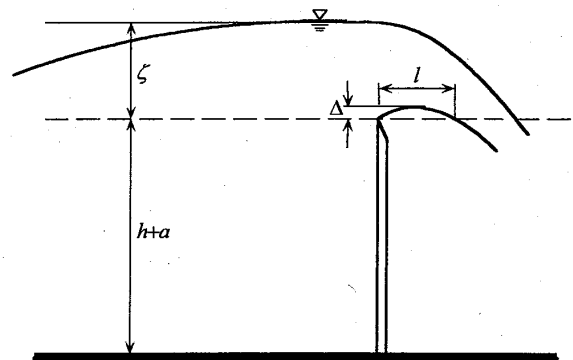


図-2 刀形堰の越流概念図

ほとんどであるため、越波に無条件で適用できるものはないに等しい。しかし、吉川・椎貝・河野(1967)によれば、越波計算に定常流の条件で得られた流量係数を用いてもある程度良好な結果が得られることが分かっている。そこで本研究においても、吉川・芦田・土屋(1960)が得られた広頂堰の流量係数を適用し、広頂堤の越波量計算式(4)を完結させる。

吉川・芦田・土屋(1960)によると、広頂堰の流量係数 C は同じ水流条件下の刃形堰流量係数 C_0 を修正して得られる。修正係数 α は刃形堰の場合に下側ナップが堤頂面と交わる水平到達距離 ℓ (図-2) と堤頂幅 B との比によって決められる。つまり、

$$C = \alpha C_0 \quad (6)$$

ただし、

$$\alpha = \begin{cases} 0.787 & r < 0.3 \\ 1 - 0.213(1.3 - r)^{3/2} & 0.3 \leq r < 1.3 \\ 1.0 & 1.3 \leq r \end{cases} \quad (7)$$

また、 $r = \ell/B$ 。一方、刃形堰の流量係数は以下のように提案されている(例えば、吉川・芦田・土屋, 1960)。

$$C_0 = \left(2.1980 - 0.0402 \frac{\xi - \Delta}{h + a + \Delta} \left(1 - \frac{\Delta}{\xi} \right)^{3/2} \right) \quad (8)$$

ただし、 Δ は刃形堰の場合の下側ナップの上昇量(図-2)である。 $\xi/(h+a)$ の値が0.5を超えないことを条件に、 ℓ は下式のように ξ に比例することが分かる。

$$\ell = 0.66\xi \quad (9)$$

また、 Δ は一般的に堤体前面の水位および接近流速の両パラメータとも関係するが、通常の場合その値が小さく、従って C_0 に対する影響も相対的に小さいため、以下のような近似的関数とすることもできる。

$$\Delta = 0.1125\xi \quad (10)$$

式(1)、(6)および(5)を(4)に代入して数値積分を行えば(例えばシンプソン法を用いて)、既知の波浪条件

での越波量 Q が容易に計算できる。計算結果は、以下の水槽実験で得られたデータと比較しながら、第4節で示す。

3. 水槽実験

3.1 実験装置

水槽実験は東亜建設工業株式会社技術研究所の実験室で行われた。図-3に実験装置の概略が示されている。水槽は長さ25m、幅30cm、高さ60cmの小型のものである。水槽の側壁にガラス面が用いられており、水槽内で発生する波や水面の状況が容易に観測できるようになっている。また底面は鉄製の床路である。水槽の一端に吸収式造波システムが取り付けられ、発生可能な波の周期は0.4~4.0s、波高は0~15cmとなっている。

モデル堤体(長さ29cm×幅30cm×高さ35cm)はプラスチック製のもので、底面および両側面が完全に固定され、その背後を締め切って集水柵とした。水位を計測するための波高計は容量式波高計を4本用い、1本目を造波板から5mの位置に設置し、20cmの間隔で2本目を設置した。さらにに造波板から16mの位置に3本目、同様に20cmの間隔で4本目を設置した。堤体は4本目の波高計の直後に設置した。堤体前面の水位変化は波高計3および4の記録から得られた。また、越波量については、集水柵内にポイントゲージを設置することにより水位を計測し水量に換算する方法を採用した。

3.2 実験条件

実験水深は35cmである。波の周期は、実際の浸水性堤防の設置条件や実験装置の性能を含めて総合的に考慮した上で、1.0s、1.4sおよび1.8sに予め定められた。波高は3~16cmの範囲内において、各周期毎に6つの値に変化させた。

堤体の高さについては、基本堤体(長さ29cm×幅30cm×高さ35cm)の上に高さ5cmのブロック(長さ

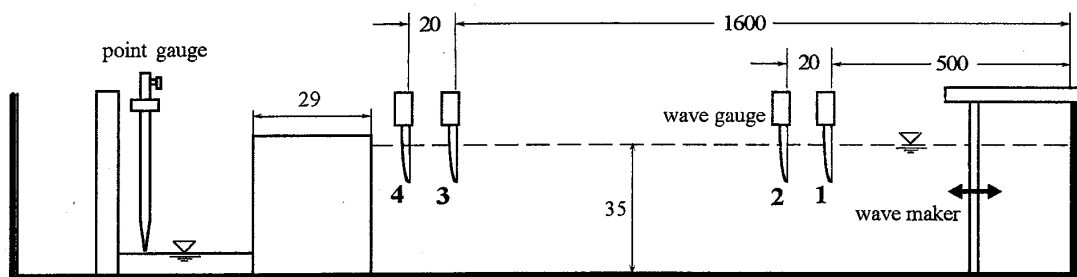


図-3 実験装置の概略図

と幅は基本堤体と同じ)を実験ケース毎に積んでいく方法で、35cm、40cm および 45cm の 3 ケースとした。

3. 3 実験方法

正確な越波量を計測するため、堤体上面に仕切りを

立て計測時間以外の越波を防ぐ。計測時間の開始と同時に仕切りをとり、計測時間終了と同時に再び仕切りを閉じる。ストップウォッチで計測時間を測る。集波数は目測に基づいてカウントする。1 波当たりの越波量は堤体後部に設けた集水桝における長さとの積に、

表-1 堤体前面における最大越波高さ R と越波流量 Q の実験値

$a(\text{cm})$	0		5		10	
$T(\text{s})$	$R(\text{cm})$	$Q(\text{cm}^2)$	$R(\text{cm})$	$Q(\text{cm}^2)$	$R(\text{cm})$	$Q(\text{cm}^2)$
1.00	3.36	25.02	4.33	0.00	4.32	0.00
	4.89	39.95	6.43	2.00	6.57	0.00
	6.78	67.99	8.29	12.68	9.45	0.00
	9.43	84.46	13.25	25.60	12.28	2.70
	11.00	116.44	13.08	41.63	14.68	11.68
	12.97	122.92	16.36	49.75	16.54	14.38
1.40	3.27	34.84	4.35	0.00	3.91	0.00
	4.67	60.07	6.46	1.48	6.16	0.00
	6.35	96.11	8.53	19.60	8.92	0.00
	8.37	131.88	10.98	46.88	11.94	5.93
	9.51	151.58	13.34	73.83	13.59	20.23
	14.54	208.87	18.15	110.96	15.86	39.61
1.80	4.37	45.42	4.12	0.00	4.47	0.00
	4.76	69.25	6.20	3.64	6.82	0.00
	6.50	127.28	7.03	27.65	9.68	0.00
	8.19	172.84	8.97	64.29	12.34	6.74
	9.88	220.24	13.78	114.05	14.23	25.67
	10.98	276.29	16.40	144.44	16.73	49.19

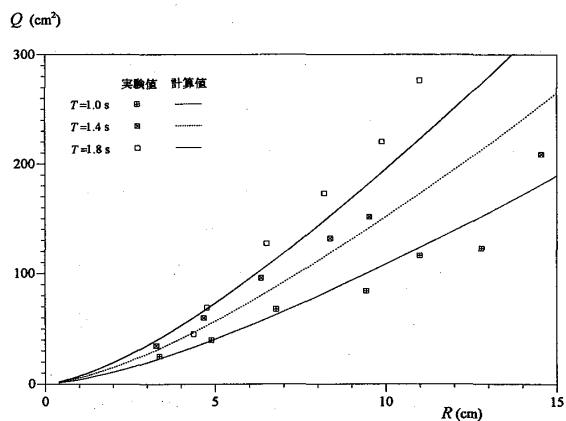


図-4 越波量の計算値と実験値の比較 ($a=0$)

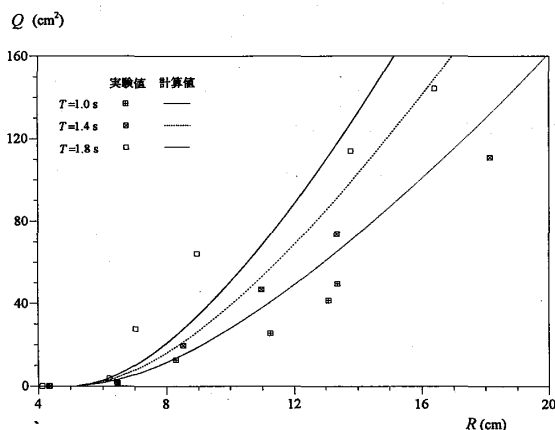


図-5 越波量の計算値と実験値の比較 ($a=5\text{cm}$)

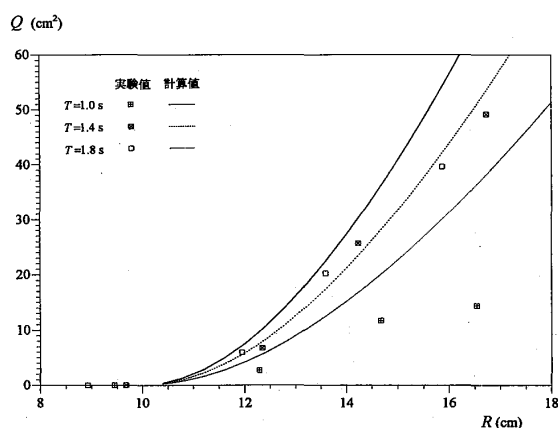


図-6 越波量の計算値と実験値の比較 ($a=10\text{cm}$)

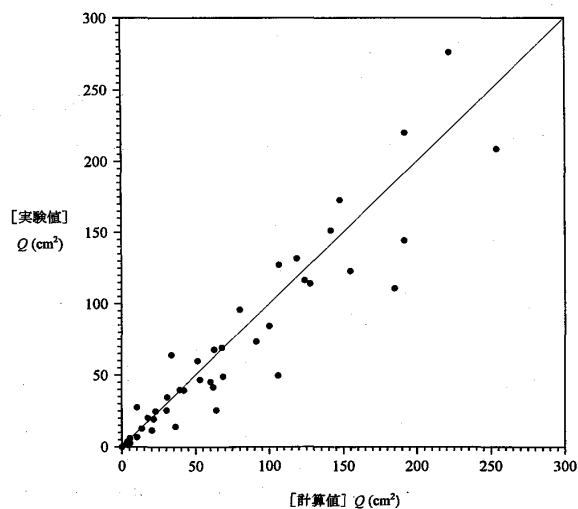


図-7 越波量の計算値と実験値の相関関係

ポイントゲージで計測した水深の値を乗けた値を、先に述べた集波数で除したものをそのデータとする。

4. 広頂堤の越波量

表-1 は異なった 3 種類の堤体高さに対して、波の周期を 1.0s, 1.4s および 1.8s とした条件で観測された堤体前面の最大越波高さ R および越波量 Q の実験結果をまとめたものである。当然ながら、最大越波高さ R が堤頂を越えないケースでは越波量 Q が 0 となる。また表-1 に基づいて、最大越波高さがほぼ同じであっても、周期の長い波の場合に対して平均越波流量 (Q/T) が大きくなることは容易に確認できる。これは瞬時越波流量が水位に比例しないことによる結果として解釈できる。

図-4～6 には式(4)を用いた越波量の計算値と水槽実験で得られたデータとの比較を示している。また、図-7 には計算結果と実験結果との相関関係も示されている。越波現象の複雑性および小型水槽実験の精度をも考慮して全体的に言えば、計算値と実験値がよく一致している。しかし、堤体に接近する波が高くなると、計算値が実験値より大きくなる傾向が見られる。また、堤頂の平均海面からの突出が大きくなるほど計算値と実験値との不一致性も相対的に顕著になると言える。越波算定式の算定結果が必ずしも実験データと一致しない原因としていくつ挙げられるが、波と構造物との衝突に伴う打上げの影響で、越波現象に対して本研究で用いられた堰の越流理論の適用性はもっとも検討しなくてはならない点であると思われる。また、本研究で提案された越波算定式において、波の非定常性が無視されたため、波の非定常性が顕著になる場合、つまり、波の周期が小さくなるあるいは波高が大きくなる場合に対して、計算に大きな誤差が生じることが予想できる。実際にこの傾向は、図-6 等からも読取れる。

5. おわりに

広頂堰の越流理論に基づいて広頂堤の越波量算定方法を提案した。提案した越波量算定式を小型水槽実験によって検証した結果、一定の条件に対してその有用性が確認された。しかし一方、堤体に接近する波が高くなると、計算値が実験値より大きくなる傾向が確認され、また、堤頂の平均海面からの突出が大きくなるほど計算値と実験値との不一致性も相対的に顕著になることも分かった。今後さらに精度のよい越波算定方法を検討する際、波の非定常性をも含めて考える必要があることは明らかとなった。

参考文献

- 1) 高田 彰(1977): うち上げおよび越波, 第13回水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, B-2-1～B-2-18.
- 2) 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫(1967): 海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1), 第14回海岸工学講演会論文集, 118～122.
- 3) 吉川秀夫・芦田和男・土屋昭彦(1960): 幅厚ぜきの流量係数に関する研究, 土木研究所報告, 123～137.