

人工島防波護岸の短時間越波特性について

関本恒浩* ・ 国栖広志**・ 清水琢三***
京谷 修****・ 鹿島遼一*****

1. はじめに

近年、沖合人工島構想の実現に向けて建設技術の基礎的研究が実施されている(鹿島ら, 1988). 人工島建設の技術的要請の一つに, 設計波を超えるような希に見る高波浪が来襲した場合であっても, 越波に対して背後地が十分安全であることがあげられる. 特に人工島においては短時間であっても過度の越波が発生すると壊滅的な被害へと至る可能性がある.

現在, 越波量の算定は合田ら(1975)が不規則波実験と越波計算に基づいて作成した, 来襲波浪が作用した全時間に対する平均的な越波量を与える越波流量の推定図表を用いて行われている. 一方, 木村ら(1981, 1982)は波高の Grouping 特性を考慮した短時間越波流量の概念を提案するとともに, 排水対策と敷地内の安全性について検討を行っている. また, 井上ら(1989)は不規則波浪の1波ごとの越波量を測定することによって最大越波量が平均越波量の5~10倍, 条件によっては20倍程度にも達することを示し, 越波排水設備の設計に当たっては最大越波流量に対しても考慮すべきであるとしている. このように, 護岸や堤防の天端高の設計において, 比較的短時間の越波量に対する検討が重要であり, 特に人工島の建設に際してはその必要性が増大するものと考えられる.

本研究は, 短時間越波流量特性を系統的に検討することを目的に, 越波の連続量測定装置を新たに考案しその有効性を検討するとともに, この装置を用いて比較的水深の深い護岸条件における瞬間越波流量の越波量特性について波群特性の影響を含め検討した.

2. 水理実験

実験に用いた水槽は, 長さ34m, 幅5m, 高さ1.2mのコンクリート製一部ガラス張り水槽であり, 水槽の一端には幅5mの不規則波造波機が設置されている. 実

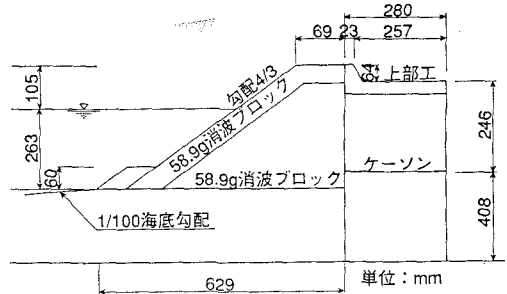


図-1 実験に用いた護岸模型の緒元

験にはこの水槽の一部を仕切って幅60cmの水路を作成して用いた. 水路の造波機側2mの範囲は仕切りを設けておらず, 堤体からの反射波をここからの回折によって逃し, 再反射の影響を極力少なくするようにした.

本研究では, 護岸形状は直立堤および前面消波ブロック被覆堤の2形式を対象に実験を実施した. 実験に用いた護岸模型は図-1に示すように, 人工島の防波護岸を念頭においてケーソン模型を用いた. 模型の緒元は, 天端高10.5cm, 堤脚水深26.3cm, 堤体幅28.0cmであり, 海底勾配は1/100とした. また, 護岸前面を被覆する消波ブロックはテトラポッドを用い, 天端幅はブロック2個並び, 法面勾配を1:4/3とした.

実験不規則波としては式(1)に示すWallops型スペクトルを目標スペクトルとし, スペクトルの形状母数 $m=3, 5, 9$ の3種類を用いて波群性の違いによる越波特性を検討した.

$$S(f) = \beta H_{1/3}^3 T_p^{(1-m)} f^{-m} \exp \left[-\frac{m}{4} (T_p f)^4 \right] \quad \dots (1)$$

ここに,

$$\beta \cong \frac{0.06238 m^{(m-1)/4}}{4^{(m-5)/4} \Gamma[(m-1)/4]} [1 + 0.7458(m+2)^{-1.057}] \quad \dots (2)$$

$$T_p \cong \frac{T_{1/3}}{1 - 0.283(m-1.5)^{-0.684}} \quad \dots (3)$$

ただし, Γ はガンマ関数であり, m は形状母数である. 実験波は目標有義波周期1.73秒で一定とし, 波高で無次元化した天端高を $hc/H_{1/3} = 0.84, 0.91, 1.12, 1.35, 1.68$ の5種類に変化させた. また, 作用波数は約500

* 正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所 第一研究開発室
** 正会員 工修 五洋建設株式会社 土木設計部
*** 正会員 工修 東京電力株式会社 原子力建設部 土木建築課
**** 正会員 工修 電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
***** 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 第一研究開発室

表-1 実験波の諸元

No.	m	沖波			通過波					
		H_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{max}	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$\bar{f}_1$	$\bar{f}_2$	GF
3-1		9.2	6.1	1.77	9.5	6.9	1.94	0.77	7.42	0.59
3-2		10.3	7.3	1.74	10.9	8.1	1.94	0.79	7.48	0.58
3-3	3	12.1	8.7	1.75	12.4	9.5	1.97	0.81	7.57	0.54
3-4		13.9	10.4	1.78	15.2	10.8	1.96	0.89	7.63	0.52
3-5		19.6	14.0	1.79	19.0	14.4	1.93	0.76	6.77	0.49
5-1		11.0	6.7	1.79	11.6	6.8	1.81	0.80	11.08	0.67
5-2		12.9	8.0	1.80	13.0	7.9	1.81	0.75	10.25	0.61
5-3	5	15.6	10.0	1.93	16.8	10.4	1.85	0.96	9.85	0.56
5-4		18.5	11.5	1.79	14.8	11.6	1.89	0.96	8.65	0.48
5-5		25.1	15.7	1.78	18.8	15.1	1.93	0.85	7.64	0.40
9-1		9.4	6.6	1.78	9.7	6.4	1.82	1.32	13.32	0.64
9-2		11.9	8.2	1.76	11.7	8.0	1.79	1.14	11.93	0.62
9-3	9	15.4	10.1	1.78	17.2	10.1	1.87	1.64	16.99	0.58
9-4		17.2	11.7	1.76	18.3	11.8	1.88	1.31	13.08	0.57
9-5		22.7	15.6	1.77	18.8	15.6	1.89	1.14	8.41	0.44

波とした。なお、消波ブロック被覆堤形式の護岸についてはスペクトルの形状母数 $m=9$ のとき、波高が $hc/H_{1/3}=0.84$ のみの条件で実施した。実験に用いた不規則波の諸元を表-1に示す。

有義波高を閾値としたときの平均連長 $\bar{f}_1$ と連の繰返し長さ $\bar{f}_2$ はスペクトルの形状母数 m が大きくなるほど、つまりスペクトル幅が狭くなるほど大きくなり Grouping がすすむことがわかる。ただし、Groupiness Factor (GF) については、 $m=5$ と 9 では顕著な違いが見られなかった。また実験中の碎波の状況は、 m の値によらず、無次元天端高 ($hc/H_{1/3}$) が 1.35, 1.68 の場合については波高の大きな波が時々碎波する程度であるが、0.84, 0.96 の場合については堤体前面で常時はげしい碎波が見られた。波群特性もこれに伴って変化し、無次元天端高が 0.84, 0.96 の場合は波群化が減少している。

なお、護岸の越波量は次に示す越波量測定装置を用いて計測した。

3. 越波量測定装置

越波量測定装置は図-2に示すように、4本のロードセルで吊された鋼製水路と鋼製水路出口に設けられた刃型堰の越流水深を計測するためのサーボ式波高計からなっている。越波量は、式(4)に示すとおり、鋼製水路内における水の

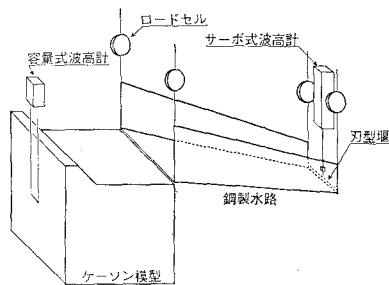


図-2 越波量測定装置

重量 $W(t)$ の単位時間当りの変化量と水路から出ていく流量 $q'(t)$ の和から瞬間越波流量 $q(t)$ の経時変化を求めた。

$$q(t) = \frac{dW(t)}{dt} + q'(t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、ケーソン前面には容量式波高計を設置して堤体前面における水位波形を観測し、越波量測定装置から得られた越波量の時系列波形との比較により1波ごとの越波量を求めた。なお、刃型堰の検定は規則波を用いて事前に行い堰の越流係数を求めた。

図-3は、瞬間越波流量の時系列波形と護岸前面における水位の同時記録例を示したものであり、堤体前面の水位記録には堤体天端高さの位置を合わせて示している。水位がこの閾値を超えたときに越波が生じていることが確認できる。また、瞬間越波量の波形はケーソン上を伝播した後のものであるため、段波状の波形となっている。

図-4は規則波および不規則波を用いて短時間越波量測定装置による平均越波流量の測定結果と越波マスによ

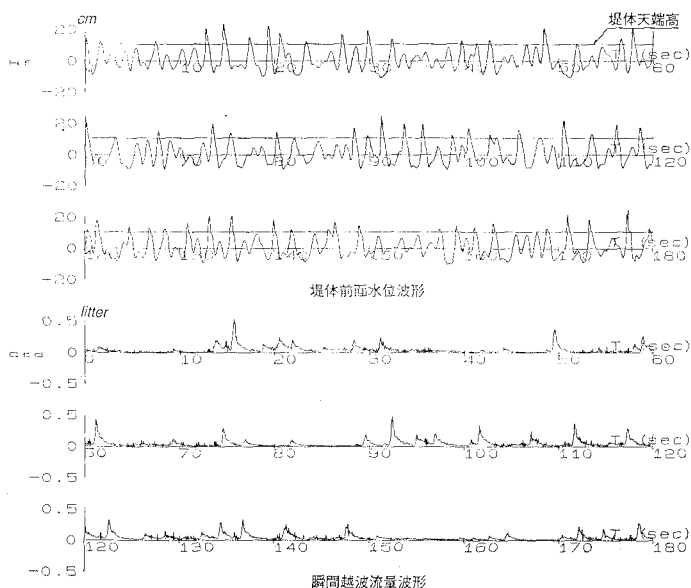


図-3 瞬間越波流量の時系列波形の一例（直立堤形式）

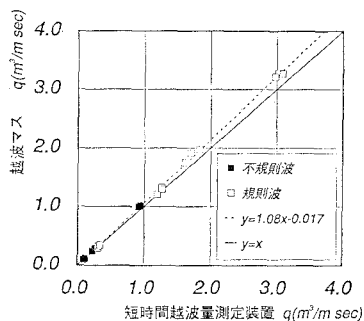
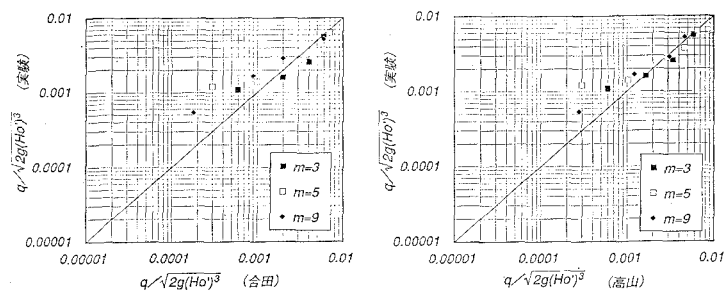


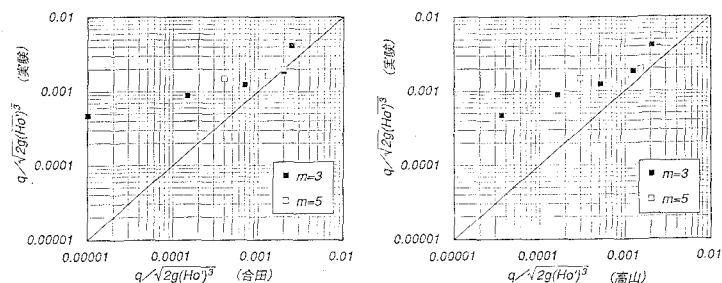
図-4 越波流量の検定結果



(a) 合田 (1975) の推定法との比較

(b) 高山 (1982) の推定法との比較

図-5 平均越波流量の推定値と実験値の比較 (直立堤形式)



(a) 合田 (1975) の推定法との比較

(b) 高山 (1982) の推定法との比較

図-6 平均越波流量の推定値と実験値の比較 (消波ブロック被覆堤形式)

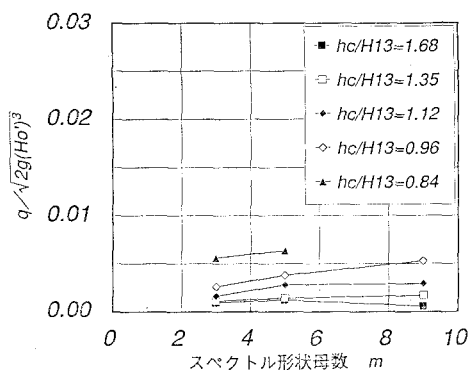
る平均越波流量の測定結果を比較したものである。両者には若干のずれは見られるものの直線性は非常によくほぼ一対一対応しており、比較的精度よく越波量を計測できることがわかる。ただし本越波流量計は、越流堰によって流出量を測定しているため、越流量が非常に小さくなると、堰近傍の水の表面張力によって越流水深計測誤差が大きくなるため越波流量の測定精度は多少低下する。

4. 平均越波流量

まず、従来から検討されている平均越波流量の特性について波群の効果(スペクトル幅の効果)を中心に検討を行った。

図-5 は直立堤形式の護岸を対象に無次元平均越波流量について合田(1975)および高山(1982a, b)による推定値と実験値を比較したものである。両推定法とも推定値と実験値との対応は良好で、特に越波量の大きいところで両者の対応はよくなっている。一方、越波量の小さいところでは実験値の方が2~3倍程度大きめの値を示しているが、合田による算定精度の範囲内と考えられる。ただし、実験値の推定値からのずれが系統的に大きいことから単なる実験値のばらつきだけとは考えにくく、前述の計測器の計測精度の影響があるものと考えられる。

図-6 は消波ブロック被覆堤形式の護岸の無次元越波流量について合田および高山の推定値と比較したものである。直立堤形式にくらべ越波量の小さいところで実験値が推定値より大きくなっている。従来の実験(合田, 1975; 高山, 1982a, b)でも消波ブロック被覆形式の護岸の越波量の方が直立堤形式の護岸の越波量よりも実験値のばらつきが大きい結果となっていることから、このことがある程度説明できる。ただし、ここでも前述の越波量測定装置の測定精度の影響が多少あるものと考えら

図-7 スペクトルの形状母数 m と無次元越波量の関係

れる。

図-7 はスペクトルの形状母数 m と無次元平均越波量の関係を直立堤形式の護岸について示したものである。これによると無次元元端高が0.96のときに m が大きくなるにつれ、つまりスペクトル幅が狭くなるにしたがい無次元越波量が増える傾向にあるように見えるが、全体的には平均越波流量におよぼすスペクトル幅の影響は小さいものと考えられる。ここには示していないが消波ブロック被覆堤形式の護岸の場合もほぼ同様であった。

5. 短時間越波特性

井上ら(1989)は不規則波による越波の特性として、

最高波が来襲したときの1波当たりの越波量は、平均越波量の5~10倍であり、大きいものでは20倍に達することを報告している。人工島の防波護岸の越波を考えると、このような短時間の越波に対する安全性の検討を実施しておく必要がある。特に越波排水路を設計する際には井上らの指摘のように1波の越波流量に注意することは勿論のこと、木村(1982)が指摘するように数波の高波が連続して来襲したときにおいても十分な排水能力を有する必要がある。そこで、ここでは1波群中における1波間の平均越波流量のみならず、3波間および5波間の平均越波流量の最大値についても整理を行った。ここでは、瞬間越波量の時間波形のうちある代表周期 n 波分(n は1, 3および5)の時間における平均越波流量が最大となる区間を抽出し、 n 波平均越波流量の最大値とした。つまり代表周期を T とすると瞬間越波波形の nT 間の移動平均をとり、この移動平均値の最大値を n 波平均越波流量の最大値とした。なお、越波は比較的波高の大きい領域を対象とした現象であることから、ここでは代表周期としては有義波周期を採用した。また、これらを短時間越波流量と呼ぶことにする。

図-8は、図-7と同様にスペクトルの形状母数 m と短時間越波流量の関係を直立堤形式の護岸について示したものである。なお、図中のシンボルは、図-7と同じである。短時間越波流量は天端高の低いケース(波高の大きいケース)と高いケース(波高の小さいケース)を除き、スペクトル幅が狭くなるにしたがって、いいかえ

れば波群化が進むにしたがって大きくなっていることがわかる。これは、最高波高の出現特性と係わっており、関本ら(1990)が指摘したように、波群化が進むにしたがって大きな最高波高の出現確率が高くなることによると考えられる。波高の大きいケースでは、沖波のスペクトル形状が狭くても波の伝播に伴って、碎波が顕著となることにより、堤体前面での最高波高が小さくなるため、越波量の増加傾向がにぶるものと思われる。波群特性と短時間越波流量の関係は、1波、3波および5波平均のいずれも同様な傾向を示した。なお、平均越波流量としては1波平均越波流量が最も大きい、総越波量自体は5波平均の方が多いことに注意する必要がある。

次に、井上らにならって、最大越波流量と平均越波流量との関係を調べた。図-9は横軸に無次元天端高をとって最大越波流量と平均越波流量との比をスペクトル幅をパラメタとして調べたものである。まず1波平均越波流量の最大値に着目すると、井上らの実験結果と同様に5~12倍程度となっている。また、波群化の進んだ波の方がこの比も大きくなっていることがわかる。さらに、この関係は天端高と波高の比に依存しており、無次元天端高で1.1~1.4の範囲、つまり天端高が比較的低くかつ波高があまり大きくなく碎波の十分進行していない条件のときにこの比は増加傾向を示している。3波および5波平均越波流量についても同様の傾向が見られるが、ピークの発生する位置は1波平均に比べ無次元天端高の低いところとなっている。3波平均越波流量の場合でこ

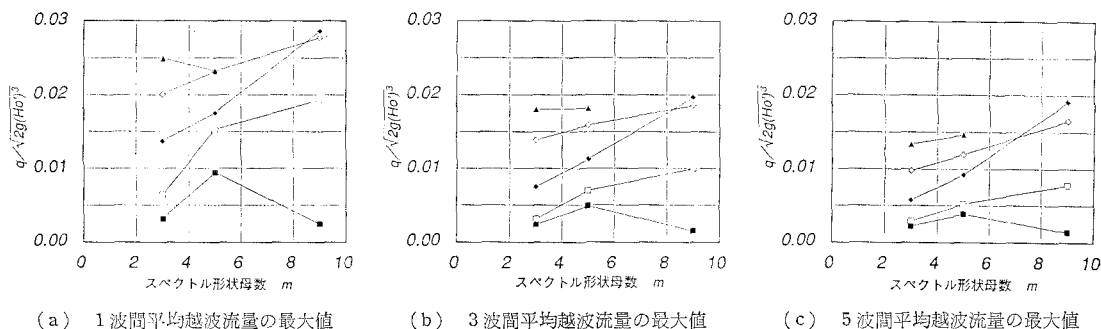


図-8 スペクトルの形流母数と短時間越波量の関係

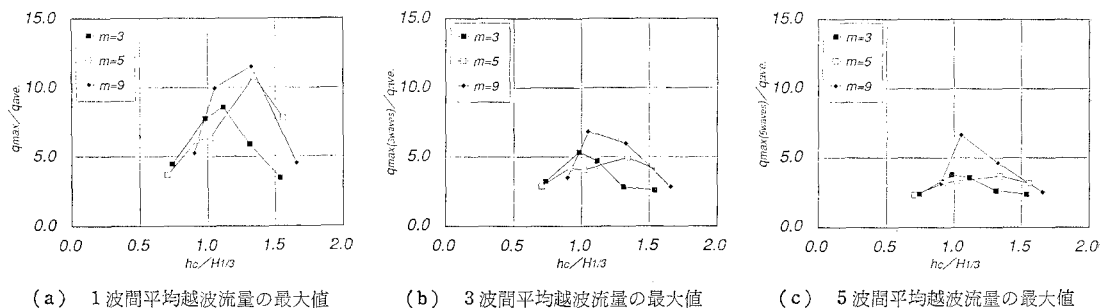


図-9 短時間越波量と平均越波量の関係

の比は3~7程度, 5波平均でも2~7となった。以上のことから碎波条件と天端高の条件を考慮し, 短時間越波量と平均越波量の比がピーク付近とならないような条件に設定すれば, 経済的な設計ができるものと考えられる。

6. おわりに

短時間越波量と波群特性に着目した越波に関する不規則波実験を実施し, 波群と越波量の関係について検討を行った。その結果, 越波には波群の及ぼす影響が大きく, 特に短時間越波流量に対しては波群の及ぼす影響が顕著であることを確認した。

水深の比較的大きい地点に建設される人工島は, 碎波による波高の限定を受けにくいいため, かなり大きな波浪の来襲する可能性がある。したがって, 防波護岸の越波排水施設を設計するにあたっては, 平均越波流量や短時間越波流量などを用いた現行設計法に基づく設計を行うとともに, 確率的な手法を用いた安全性の評価が必要となってくるものと思われる。

現行設計法に短時間越波流量を考慮する場合においては, 本研究で検討したように波群の効果を考慮する必要がある。また, 確率概念による安全性の評価手法についてはすでに木村ら(1981, 1982)が波群の効果まで取り込んだ手法を提案している。ただし, 図-3 からもわかるように, 越波は堤体前面における水位変動と直接的に関係しており堤体前面におけるサーフビートのような平均水位の変動も含めた取り扱いが必要となるものと思われる。しかしながら, 木村らの手法には平均水位が変動する現象は考慮されていないため, このような平均水位の変動が有意となる場合にはこれを考慮する必要がある。

また, 大水深域では波の方向分散性が大きく, 平面的な越波排水計画をたてるために波の多方向不規則性を考慮する必要がある。木村らも簡易的な多方向不規則波と

しての取扱方を提案しているが, 実際には護岸法線上における越波の同時生起性の問題などがあり, これらを含めた取り扱いが必要となろう。

今後は, 越波に関する実験をさらに広い実験条件について実施し, 波群特性まで考慮した越波流量算定手法を確立していくとともに, 人工島防波護岸の越波排水路の設計法について検討し, 設計手法の確立を目指すつもりである。

最後に, 本研究を進めるに当たり, 土木学会原子力委員会海域分科会(主査 合田 良実 横浜国立大学教授), 同対波浪設計 WG(主査 西村 仁嗣 筑波大学教授)の主査ならびに委員, メンバーの各位には数多くの貴重な助言を賜りましたここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 井上雅夫・島田広昭・殿最浩司(1989): 不規則波における越波量の出現分布特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 618-622.
- 鹿島遼一・高階實雄・島田真行・今泉正次・植田和哉(1988): 沖合人工島外郭施設の設計の考え方について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 602-606.
- 木村 晃・瀬山 明・山田敏彦(1981): 不規則波の短時間越波量の確率特性, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 335-338.
- 木村 晃・瀬山 明(1982): 越波の排水能力と浸水災害の発生確率について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 375-379.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊(1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.
- 関本恒治・梶岡亮行・今井澄雄・寺田賢二(1990): 波群特性を考慮した最高波高の出現確率に関する研究, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 111-115.
- 高山知司・永井紀彦・菊池 治・西田一彦・関口忠志(1982a): 各種消波護岸の越波流量特性, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 370-374.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982b): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp. 151-205.