

# 消波護岸の越波に関する現地観測と水理実験との比較

榊 山 勉\*・鹿 島 遼 \*\*

## 1. 緒 言

護岸の越波流量は、水理実験に基づく合田ら (1975) の越波流量算定図やこの算定図を定式化した高山ら (1982) の実験式を用いて算定している。しかし、人工島式原子力発電所の防波護岸のような重要な構造物や (鹿島ら, 1993), 上記方法の適用範囲外の条件に対しては水理実験により確認する必要がある。消波護岸の越波のように波のエネルギー減衰を伴う場合にはレイノルズ数が小さいと越波量を過小評価する (榊山ら, 1994)。実験スケール効果を検討するに当たっては、縮尺を変えた実験データに加えて現地観測データが重要な役割を果たすが、越波の現地観測例はきわめて少ない (西村・入江, 1972; 福田ら, 1973)。また、不規則波を対象にした現地越波量と水理実験結果との比較も行われていない。

そこで本研究では、既に実施した消波護岸の越波現地観測結果 (榊山ら, 1996) を比較対象に水理実験を行い、越波に及ぼす実験スケール効果について考察を加える。また、水理実験を実施するに当たっての限界レイノルズ数を提案する。

## 2. 現 地 観 測

越波現地観測の詳細については既に報告したが (榊山ら, 1996), 後述の水理実験との比較のために概略の説明を加える。現地観測は1996年1月11日から3月2日まで、図-1に示す福井港のF護岸 (総延長2350 m) のほぼ中央で、幅10 mの越波排水路を横断方向に遮蔽して長さ30 mの観測施設を建設して実施した。観測区域内に水圧センサー6台を設置して越波による水位の経時変化を測定した。施設的一端には高さ0.2 mの堰を有する長さ8 m, 幅2 mの水路を設け、堰の越流水深を水圧センサーで測定し、堰の公式から越流量を算出し、越波流量に換算した。また、入射波を水深25 mの地点で測定した。第一港湾建設局により福井港で観測されているNAWFASの波浪データ (水深21.3 m) を購入し、両者の比較も行った。両者の波浪データには大差がなかった

ので、欠測がなく反射波の影響の少ない後者を入射波として用いた。

現地観測期間中の1996年2月6日午前4時頃には有義波高  $H_{1/3}=6.11$  m, 有義波周期  $T_{1/3}=11.5$  sの高波浪を記録した。図-2にこの高波浪来襲前後の有義波高, 有義波周期ならびに越流水位と堰の越流公式から算出した1時間毎の平均越波流量の経時変化を示す。越波流量の変化には細かい変動がみられるものの、有義波高, 有義波周期の変化にはほぼ対応している。その値は、およそ  $10^{-5}$  から  $10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m の範囲である。

図-3に水圧センサーで測定した水位の経時変化の一例を示す。長さ8 mの水路端の堰の上流50 cmの位置で測定した水位を堰の越流水深として代用した。サンプル周波数は1 Hzで3週間の連続測定を繰り返した。図-3

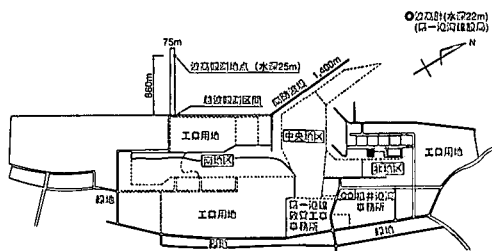


図-1 現地観測場所

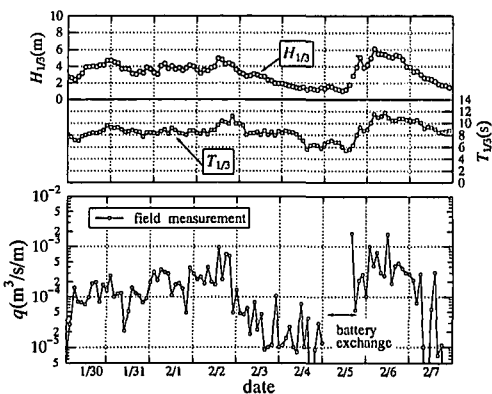


図-2 現地観測での波高と周期, 平均越波流量

\* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 水理部

\*\* 正会員 工修 (財)電力中央研究所

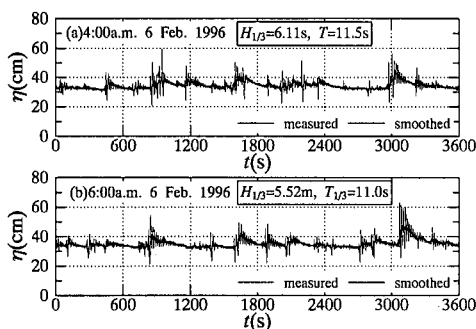


図-3 越流水位の時系列

にみられる高周波成分が越波による水位変動である。これを時間移動平均した水位を越流水深として堰の越流公式を適用した。細かくみるとこの2月6日4:00 a.m.から同6:00 a.m.にかけて有義波高、有義波周期は減少したが、越波量は後者の方が大きくなっている。福田ら(1973)は、現地観測で平均越波流量を算出するに当たって、3時間以上の平均をとれば、安定した値を与えると述べている。今回は1時間毎の平均越波流量を算出している。また、30 m 区間の観測区域は波長に比べれば小さく、現地での波の方向性と観測区間の空間スケールに起因する変動と考えられる。

### 3. 実験方法

実験は大型造波水路(長さ205 m, 深さ6.0 m, 幅3.4 m)と中型造波水路(長さ50 m, 深さ1.2 m, 幅0.9 m)を用いて模型縮尺2種類について行った。模型縮尺 $\lambda$ は前者が $\lambda=1/11.3$ , 後者が $\lambda=1/50$ である。ここでは、便宜上それぞれ1/11実験と1/50実験と呼ぶことにする。実験に用いた消波護岸断面を図-4に示す。護岸の消波ブロック(テトラポッド)の重量 $W$ は $W=16$  tfであり、1/11実験で $W=10$  kgf, 1/50実験で $W=115$  gfのブロックを使用した。この消波工断面形状には、観測地点の前面53 mの範囲内の3カ所で消波工の断面を水面近傍まで測定して得た平均的な断面を採用した。観測区間前面では消波ブロックはパラペットより低くなっていたが、観測点から離れた場所ではブロックが天端まで補充されていた。そこで、図-4中の点線に示す断面についても実験を行い、消波工の天端高さの越波量に及ぼす影響も調べた。

観測期間中に測定された波浪と越波量から、表-1に示す5種類の波浪条件を選んだ。波高と周期の相関が高かったため、波高と周期の組み合わせを数多く抽出できなかった。有義波高は最も小さい条件で $H_{1/3}=2.77$  m, 最大は前述の6.11 m, 有義波周期は7.1 sから11.8 sである。この波浪条件の範囲での平均越波流量は $2 \times 10^{-6}$

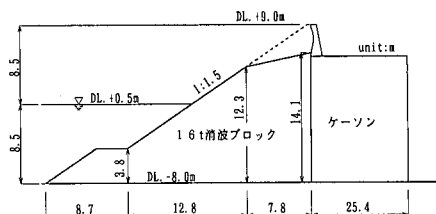


図-4 消波護岸断面図

表-1 現地観測と実験の比較の波浪条件

| Case | field meas.   |               | 1/11 test     |               | 1/50 test     |               |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|      | $H_{1/3}$ (m) | $T_{1/3}$ (s) | $H_{1/3}$ (m) | $T_{1/3}$ (s) | $H_{1/3}$ (m) | $T_{1/3}$ (s) |
| 1    | 2.77          | 7.1           | 0.245         | 2.11          | 0.055         | 1.00          |
| 2    | 4.32          | 8.9           | 0.382         | 2.65          | 0.086         | 1.26          |
| 3    | 4.96          | 9.7           | 0.439         | 2.89          | 0.099         | 1.37          |
| 4    | 5.42          | 11.8          | 0.480         | 3.51          | 0.108         | 1.67          |
| 5    | 6.11          | 11.5          | 0.540         | 3.42          | 0.122         | 1.63          |

から最大で $3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ であった。

現地データには波の方向分散性の影響を有する。一方、実験スケール効果の少ないある大きさ以上の縮尺模型を用いて2次元造波水路で実験を行うこと、さらに不規則波実験では標準的な周波数スペクトルを用いることが多いことを考慮し、現地観測結果の波形の代わりに同じ有義波高と有義波周期の組み合わせに対して異なる4種類の波形時系列を作成して越波実験を行うことにした。また、実験条件の範囲を広げるために観測結果より高波浪、長周期の波浪条件(有義波高 $H_{1/3}=4, 5, 6, 7, 8$  m, 有義波周期 $T_{1/3}=12, 14, 16$  s)について、それぞれ1種類の波形時系列を用いて実験を行った。

水位の設定においては、潮位が各波浪時間毎に確定できなかったが、日本海側の潮位偏差は高々0.5 mであるので、平均水位にこれを加え合わせて護岸地点での水深 $h$ を $h=8.0 \text{ m}+0.5 \text{ m}=8.5 \text{ m}$ とした。水位の越波量に及ぼす影響については中型模型実験でDL+0 mとDL+0.5 mの両者について行った。

波浪条件の設定は入射波高測定点( $h=21.3$  m)での有義波を現地観測結果と実験値で一致させた。この結果、1/11実験と1/50実験の護岸位置での進行波高が精度良く一致しなかったため、先行して行った1/11実験の進行波高と1/50実験の進行波高が一致するように1/50実験の造波条件を設定した。

海底地形は深淺図から読みとり、海底勾配1/40の一樣勾配とした。造波板から海底斜面の法先や護岸模型までの位置などの水路内の幾何学的な条件は2種類の模型実験で一致させた。同一の造波システムを使用し、造波信号は同じ波形を作成したが、造波板の応答特性が異なるため、造波波形を両者で完全に一致させることは容易ではない。また、風の影響は実験では取り入れていない。

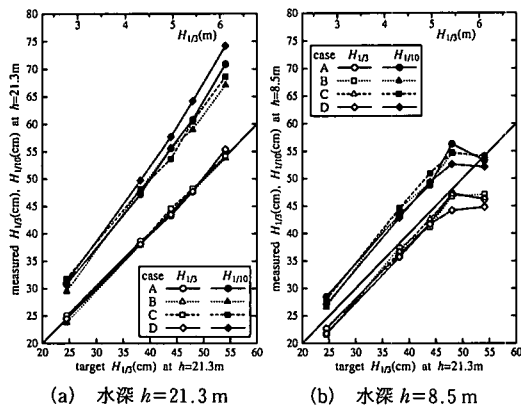


図-5 初期位相を変えた有義波高の比較

図-5は1/11実験結果について、波形の異なる4種類の波高値を比較したものである。横軸に有義波高の設定値をとり、縦軸に(a)は水深 $h=21.3$  m地点での有義波高と1/10最大波高を、(b)は水深 $h=8.5$  m地点での有義波高、1/10最大波高を示す。図-5(a)にみられるように、入射波の有義波高はほぼ一致させることができたが、波形によっては波高が大きくなるにしたがって1/10最大波高が増加する傾向がある。図-5(b)から護岸位置での進行波高は入射波高が5 mを越えると差が生じ砕波により頭打ちになる。

## 4. 実験結果

### 4.1 現地観測結果と実験結果との比較

1/11実験では、越波流量は越波升内に設置した水位計の水位上昇量から換算して求めた。1/50実験では越波量が少ない範囲ではロードセルに吊した越波升内への流入重量を、越波量が多い場合には1/11実験と同じ方法で測定した。越波実験は一波浪条件について1/11実験では2回、1/50実験では3回行った。ただし、ばらつきが大きいときには回数を増やした。

波形の違いによる越波量の時間変化の比較をCase 5( $H_{1/3}=6.11$  m,  $T_{1/3}=11.5$  s)について図-6に示した。同図にはパラペット前面に設置した波高計で測定された越波水位も示した。時系列により越波量の時間変化は異なる。特に図-6の最上段のTH:Aの時系列では、1波による越波量が支配的であり、全越波量に占める1波の最大越流量が60%にも達している。表-2と表-3に4種類の異なる波形による平均越波流量と最大値と最小値との比を示した。N.D.は越波量が小さく測定不能であったことを示す。波形による越波流量のばらつきは1.4~4倍程度であり、また特定の波形による越波量が常に大きいということもない。波高が大きいCase 4, 5の結果から、平均越波流量が現地換算値で $10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m程度であ

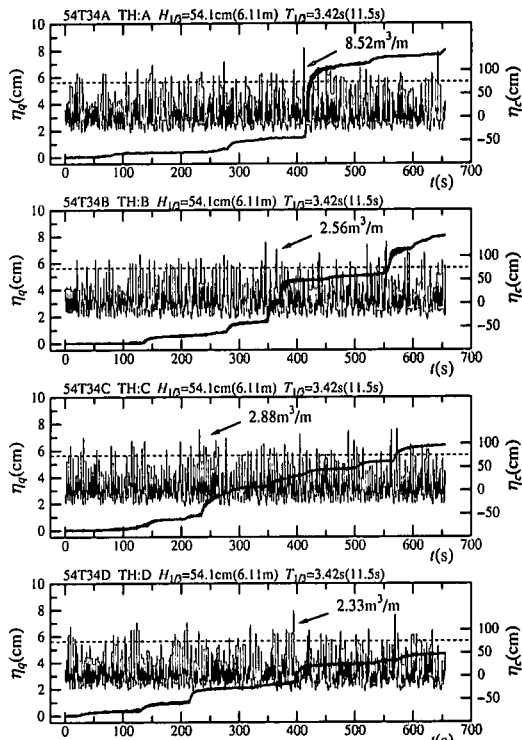


図-6 波形による越波水位と越波量の比較

れば波形により約3倍異なる。図-6中に示した最大越波量も2.3 m<sup>3</sup>/mから8.5 m<sup>3</sup>/mと約4倍異なる。

図-2に示したように観測期間中の波高と周期には強い相関がある。そこで波高と平均越波流量の関係を図-7に示した。ほぼ同一の波浪条件でも平均越波流量は波高3 m以上で1オーダーの範囲に分布していることがわかる。図-2と図-3に示したように連続して波浪条件が変化する場合においても越波流量の変動のほうが大きい。これは、現地での波の方向分散性、観測範囲の局所性などに起因するものと考えられる。

次に観測結果と2種類の実験結果との比較を図-8に示す。実験結果には異なる4種類の波形の平均値とその最大、最小値の範囲を併せて示した。また、波浪条件から高山式(1982)で算出した平均越波流量も図示した。これらの比較から、以下のことが読みとれる。

- 1/50, 1/11実験結果と高山式の結果は良く一致した。
- 観測結果は実験結果より増加率が小さい。
- 1/11実験結果の方が1/50より大きいか同程度。

図は省略するが、水位の違いによる越波流量の差は1/11実験と1/50実験との差より小さかった。

以上の結果をまとめると、2次元実験の結果は和田、高山式の算定値とほぼ一致し、かつ1オーダーの範囲で現地結果とも合っている。また高波浪時に必ずしも現地結果より小さくならない。ただし、実験で飛沫による越

表-2 波形による越波流量の比較 (1/11 実験) (現地換算値,  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

| Case | F.M.                 | A                    | B                    | C                    | D                    | mean                 | max/min |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| 1    | $2.0 \times 10^{-6}$ | N.D.                 | N.D.                 | N.D.                 | N.D.                 | N.D.                 | N.D.    |
| 2    | $2.9 \times 10^{-4}$ | $5.4 \times 10^{-5}$ | $8.9 \times 10^{-5}$ | $4.0 \times 10^{-5}$ | $1.6 \times 10^{-4}$ | $8.7 \times 10^{-5}$ | D/A=4   |
| 3    | $9.6 \times 10^{-4}$ | $5.1 \times 10^{-4}$ | $3.3 \times 10^{-4}$ | $4.0 \times 10^{-4}$ | $2.8 \times 10^{-4}$ | $3.8 \times 10^{-5}$ | A/B=1.6 |
| 4    | $3.0 \times 10^{-3}$ | $3.1 \times 10^{-3}$ | $1.9 \times 10^{-3}$ | $5.7 \times 10^{-3}$ | $1.8 \times 10^{-3}$ | $3.1 \times 10^{-3}$ | C/D=3.2 |
| 5    | $3.5 \times 10^{-3}$ | $6.2 \times 10^{-3}$ | $6.4 \times 10^{-3}$ | $5.2 \times 10^{-3}$ | $3.7 \times 10^{-3}$ | $5.4 \times 10^{-3}$ | B/D=1.7 |

表-3 波形による越波流量の比較 (1/50 実験) (現地換算値,  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ )

| Case | F.M.                 | A                    | B                    | C                    | D                    | mean                 | max/min |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| 1    | $2.0 \times 10^{-6}$ | $3.2 \times 10^{-6}$ | $3.5 \times 10^{-6}$ | $1.0 \times 10^{-5}$ | $2.4 \times 10^{-6}$ | $4.8 \times 10^{-6}$ | C/D=4   |
| 2    | $2.9 \times 10^{-4}$ | $1.0 \times 10^{-4}$ | $7.4 \times 10^{-5}$ | $1.1 \times 10^{-4}$ | $7.8 \times 10^{-5}$ | $9.0 \times 10^{-5}$ | C/B=1.4 |
| 3    | $9.6 \times 10^{-4}$ | $2.4 \times 10^{-4}$ | $5.0 \times 10^{-4}$ | $3.1 \times 10^{-4}$ | $6.4 \times 10^{-4}$ | $4.2 \times 10^{-4}$ | D/A=2.7 |
| 4    | $3.0 \times 10^{-3}$ | $3.4 \times 10^{-3}$ | $1.4 \times 10^{-3}$ | $3.6 \times 10^{-3}$ | $1.5 \times 10^{-3}$ | $2.5 \times 10^{-3}$ | C/B=2.6 |
| 5    | $3.5 \times 10^{-3}$ | $2.9 \times 10^{-3}$ | $1.1 \times 10^{-3}$ | $2.2 \times 10^{-3}$ | $2.2 \times 10^{-3}$ | $2.1 \times 10^{-3}$ | A/B=2.6 |

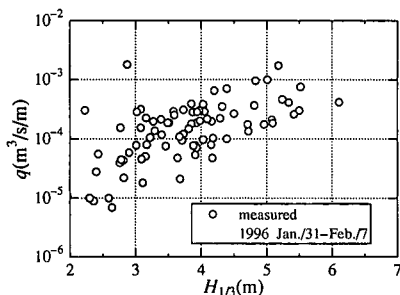


図-7 現地観測結果

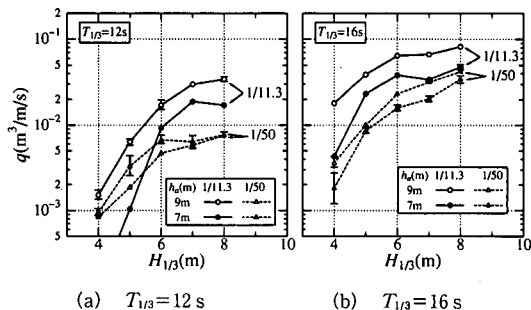


図-9 実験スケールならびに消波工天端高さの越波流量に及ぼす影響

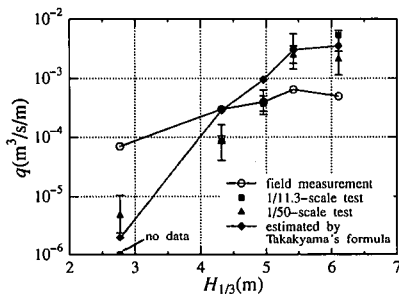


図-8 現地観測結果と実験結果との比較

波の時には現地では  $10^{-5} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  から  $10^{-4} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  であった。単一方向と多方向不規則波による越波流量の差は、上述の現地観測地と2次元実験結果ほどの差はない(神山ら, 1994b) ので、現地観測結果と実験結果との差は風の影響や測定区間の幅の影響などが考えられる。

#### 4.2 越波流量に及ぼすスケール効果

以上のように、断面2次元実験結果と現地観測結果との比較には諸々の要因が含まれ、直接的な比較は容易ではない。そこで、純粋に断面2次元実験結果を比較して実験スケール効果を調べる。図-9には2種類の消波工天端高さについて、1/11 実験と1/50 実験結果を周期別に比較した結果を示した。図-9(a)の周期  $T_{1/3}=12 \text{s}$  の波高4 m, 5 mの結果を除いたほとんどの条件のもとで

1/11 実験のほうが平均越波流量が大きくなった。図中には各測定での最大値と最小値の範囲も示したが、1/11 実験と1/50 実験との差は、ばらつきの範囲を越えており有意な差といえる。

著者らは人工島防波護岸を対象に、3種類の縮尺模型を用いて越波流量に及ぼす実験スケール効果について既に検討して(神山ら, 1994a)、レイノルズ数  $R_N$  と平均越波流量  $q$  との関係を求めている。その結果を図-10に示す。レイノルズ数  $R_N$  は次式で与えられる。

$$R_N = \frac{\sqrt{gH}(W/\gamma_r)^{1/3}}{\nu} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $H$ は波高、 $g$ ：重力加速度、 $W$ ：消波ブロック重量、 $\gamma_r$ ：消波ブロックの単位体積当たりの重量、 $\nu$ ：動粘性係数である。

図-11は1/50 実験と1/11 実験結果の周期毎に同様にレイノルズ数と平均越波流量の関係を示したものである。これらには図-10に示された  $R_N \approx 8 \times 10^4$  当たりの中間の実験結果がないが、 $R_N \approx 3 \times 10^4$  と  $R_N \approx 4 \times 10^6$  のスケールの実験結果は図-10と図-11で傾向が一致している。合田(1975)の平均越波流量の算定図の作成に使用された実験データのレイノルズ数は図-10中に矢印の範囲にある。

以上より、限界レイノルズ数として次式の値が妥当で

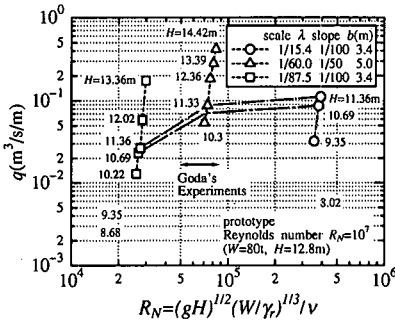


図-10 レイノルズ数と越波流量との関係 (櫛山ら, 1994)

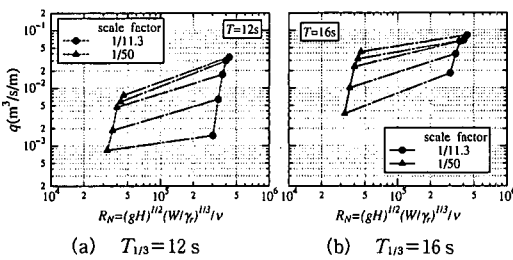


図-11 レイノルズ数と越波流量との関係

ある判断できる。この限界レイノルズ数以上で実験を行えば充分である。ただし、 $R_N \approx 5 \times 10^4$  程度の実験でもオーダーが変わるような過小評価にはならないものと考えられる。

$$\text{限界レイノルズ数 } R_N = \frac{\sqrt{gH} (W/\gamma_r)^{1/3}}{\nu} = 10^5 \quad \dots (2)$$

さらに、今回の観測の結果から越波量が飛沫程度に低いときには実験が過小評価される可能性があることに注意する必要がある。

#### 4.3 消波工の天端高さの影響

実験での観察より露出したパラベットの鉛直壁で波が顕著にはねかえされる様子が見られた。消波工をパラベット天端に一致させることにより消波効果が増加するのか、遡上効果を促進させるのか疑問が生じたので追加実験を実施した。実験に用いた消波護岸は図-4で実線で示した断面形状である。図-9の実験結果より、1/50実験の  $T=12$  sの結果以外はすべて天端高さが高いほうが越波流量が大きい。また、1/11実験のほうが天端高さの影響が顕著に現れている。この結果は護岸形状や波浪条件が異なる Sakakiyama (1995) の結果と傾向が一致した。すなわち、消波工の高さをパラベット天端高さより低くさせることにより越波の低減が計られる (海岸保全施設築造基準連絡協議会, 1987)。

## 5. 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

1. 現地観測結果の越波流量はほぼ同一の波浪条件のもとで1オーダーの範囲に分布した。この結果は、ばらつきの範囲内で実験結果と一致したが、波高による越波流量の増加率は実験結果より小さかった。
2. 2種類の模型縮尺実験の結果とも概ね高山式の計算結果と一致したが、縮尺の大きい実験結果のほうが大きめの値を示した。この傾向は有義波高と有義波周期を系統的に変えた実験においてより明瞭に確認された。
3. パラベット前面の消波ブロックの天端高さが低い方が越波流量が小さくなった。これは天端近傍の消波工は消波効果より遡上を促す幾何学的な効果の方が強いためである。
4. 今回と既往の実験スケール効果に関する検討結果から、限界レイノルズ数は  $R_N = 10^5$  で与えられる。

本研究は、電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究として実施したものである。実験には(株)八重洲土木技術センター 吉岡武男氏、嶋野三男氏と(株)CRS 稲葉大介氏、安川剛史氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 海岸保全施設築造基準連絡協議会 (1987): 海岸保全施設築造基準解説, 269 p.
- 鹿島遼一・櫛山 勉・沼水琢三・関本恒浩・京谷 修 (1993): 安定限界を超える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 686-690.
- 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.
- 櫛山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩 (1994a): 人工島式立地発電所への越波量評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 661-665.
- 櫛山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩 (1994b): 多方向不規則波に対する人工島防波護岸の越波特性と耐波特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 656-660.
- 櫛山 勉・鹿島遼一・今井雄雄・沼水琢三・片山裕之 (1996): 消波護岸への越波に関する現地観測, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp. 291-296.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港研報告, 第21巻, 第2号, pp. 151-205.
- 西村一男・入江 功 (1972): 防波護岸の越波に関する現地観測 (第1報), 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 297-301.
- 福田伸男・宇野俊泰・入江 功 (1973): 防波護岸の越波に関する現地観測 (第2報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 113-118.
- Sakakiyama, T. (1995): Wave overtopping and pressure dependent on crest elevation, Proc. Coastal Dynamics '95, ASCE, pp. 209-220.