

# 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

柳山 勉\*・鹿島 遼一\*・窪 泰浩\*\*

## 1. 結 論

著者らは、設計波を越える高波浪に対して防波・耐波機能を維持し、修復可能な範囲内での消波工の変形を許容する耐波設計法の人工島式立地発電所防波護岸への適用性を検討してきた(鹿島ら, 1992; 関本ら, 1992; 鹿島ら, 1993 a; 1993 b)。これまで防波護岸変形実験を実施し、護岸消波工の変形量と変形にともなう越波流量の変化を把握してきた。防波護岸を越波した水塊は越波排水路で処理する方針である。越波量のみから通水可能な断面形状を設計することは可能であるが、実際には越波排水路内での越波水のスロッシングや防潮壁を越流する問題が存在し、これらに対する安全性を確認する必要がある。また、越波に及ぼす風の影響が懸念される(高田, 1969; 池野ら, 1993)。特に、防潮壁を越えて人工島敷地内へ飛散する越波量については発電施設の安全性の面から十分な検討が必要である。

そこで本研究は、人工島防波護岸の設計法を確立するために、越波に及ぼす風の影響や越波排水路の形状(防潮壁位置や高さ)と敷地内への越波量との関係を把握するとともに、防潮壁に作用する波力を評価する。また、越波量に及ぼす実験スケール効果について検討を加える。

## 2. 実験方法と実験条件

実験は模型縮尺 1/60 と 1/22.7 の 2 種類で行った。実験条件を現地換算値とともに表-1 に示す。設計波として 100 年確率波をとることとし、沖波波高 10 m, 周期 16 s を設定した。設計波を越え、消波工の構造耐力を期待できる波浪の上限(耐力検討波とよぶことにする)を設計沖波波高の 1.5 倍の 15 m, 周期を設計波と同じ 16 s と設定し実験を進めた。防波護岸の設置水深  $h=22.5$  m での設計波高  $H_D=10.3$  m に対する消波ブロック重量  $W$  は、ハドソン式で法面勾配を 1:2 とした場合に  $W=80$  t となる。パラペット天端高さは設計波高に対して許容平均越波流量が  $q=0.05$  m<sup>3</sup>/s/m となるように合田(1985)の

越波量算定図から定めた。1/60 実験では設計波高  $H_D$  の 1.0~1.4 倍の範囲の波高を、1/22.7 実験では 1.0~1.7 倍の波高を作用させた。

中型模型実験は、越波に及ぼす風の影響や越波排水路の形状を詳細に検討するために、風洞を有する反射波吸取装置付きの 2 次元不規則波造波水路(長さ 76.5 m, 深さ 1.2 m, 幅 0.9 m)を用いて行った。これまで海底勾配は 1/100 に設定してきたが(鹿島ら, 1993), より広範囲の波高条件の下で実験を行うために海底勾配を 1/50 とした。

実験に用いた防波護岸の断面と防潮壁を図-1 に示す。越波量の測定は図-2 に示すように水路を幅方向に 3 分割し中央部に越波升を 20 個設置して行った。1 回の測定で入射波を 200 波作用させ、同一波浪条件のもとで 5 回繰り返した。5 回分の水位変化量をマンメータで測定し越波量の少ない越波柵内の水位の測定精度を上げた。

越波に及ぼす風の影響を調べるための風速は、現地換算値で平均風速  $U=50$  m/s とし、模型値換算はフルードの相似則にしたがった。縮尺 1/60 の平均風速は  $U=6.5$  m/s である。実験では防波護岸の直前まで風洞と造波水路を分離し、越波にのみ風を作用させた。熱膜式風速計 13 台を用いて、パラペット上高さ 35 cm までの 28 箇所(4 測線×高さ 7 レベル)で風速を測定した。さらに越波排水路床に作用する越波水塊の圧力を波圧計 7 台を 10

表-1 実験条件

	原型値	大型模型実験	中型模型実験
縮 尺 $\lambda$	1.0	1/15.4	1/60
設計波高 $H_{1/100}$ (m)	10.0	0.440	0.167
耐力検討波高 $H$ (m)	15.0	0.660	0.250
周期 $T_{1/10}$ (s)	16.0	3.36	2.07
防波   法先水深 $h$ (m)	22.5	0.989	0.375
護岸   天端高 $h_c$ (m)	14.0	0.616	0.233
設計進行波高 $H_D$ (m)	10.3	0.453	0.172
耐力検討波高比 $H/H_D$	1.24	1.24	1.24
消波ブロック重量 $W$	80 t	6.8 kg	0.370 kg
防波護岸斜面勾配	1/2, 3/4	1/2	1/2, 3/4
実験波高比 $H/H_D$	(1.0~1.7) $H_D$	(1.0~1.7) $H_D$	(1.0~1.4) $H_D$
海底勾配	1/15, 1/50	1/15	1/50

\* 正会員 工修 (財)電力中央研究所

\*\* 東京電力(株) 原子力建設部

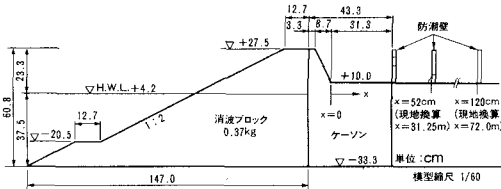


図-1 防波護岸模型の断面形状 (模型縮尺 1/60)

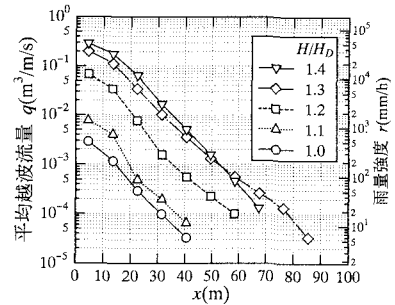


図-4 平均越波流量  $q$  と飛距離  $x$  との関係 (防潮壁なし)

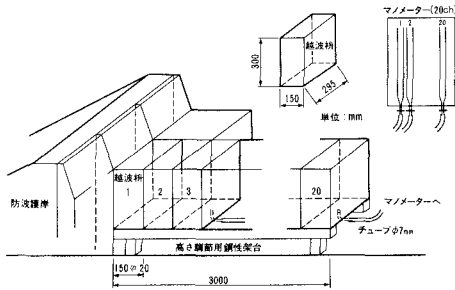


図-2 越波量の飛距離の測定方法 (縮尺 1/60)

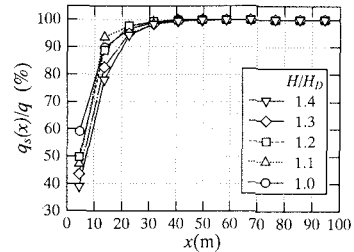


図-5 累積平均越波流量の分布 (防潮壁なし)

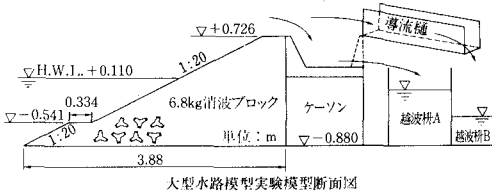


図-3 大型模型実験での越波量測定方法 (縮尺 1/22.7)

cm 間隔に設置して測定した。現地換算値で周期  $T=12, 14, 16$  s の規則波について非碎波、碎波時、碎波後の種々の波高を作用させた。越波量に関しては実験スケール効果に関する追加実験として、法面勾配 3/4 の護岸断面についても実験を行った。1/60 実験結果で得た防潮壁位置、高さや敷地内への越波流量との関係を踏まえて、大型模型を用いて確認実験を行った。実験は大型造波水路 (長さ 205 m、深さ 6.0 m、幅 3.4 m、反射波吸収機能付) を用いて行った。図-3 に実験装置を示す。防潮壁高さをパラペット天端高さとも一致させ、防潮壁位置  $x_w=18.75$  m と 31.25 m の 2 地点について、越波排水路内への越波量とこれを越える越波量を分離して測定した。同時に防潮壁に作用する越波水塊の圧力を波圧計を 7 個設置して測定した。波圧時系列を鉛直積分し、防潮壁に作用する全波力の最大値を算定した。

### 3. 中型模型実験結果

防潮壁のない条件での平均越波流量と飛距離との関係を図-4 に示す。ただし、平均越波流量は  $x$  座標で示され

る地点を通過する量を示す。設計波高 ( $H/H_D=1.0$ ) に対する許容平均越波流量は、合田の算定図から  $q=0.05$   $m^3/s/m$  であった。これに対して実験結果は  $q=3 \times 10^{-3}$   $m^3/s/m$  で設定値より小さくなった。これは合田の算定図が法面勾配 3/4 で作成されているのに対して、実験では法面勾配が 1/2 と緩いためである。最大飛距離は  $x=40$  m に達する。波高の増加にしたがって越波流量は増大するが、飛距離に関しては波高比  $H/H_D=1.3$  のほうが 1.4 より延びた。

排水対策において護岸背後に十分な幅の水遊びがとれない場合には、許容越波流量として  $10^{-3} m^3/s/m$  が 1 つの目安となる (合田, 1990)。そこで、越波量の排水範囲を 20 m 区間と仮定した場合の換算雨量強度を図-4 の右縦軸に示した。越波流量  $10^{-3} m^3/s/m$  は雨量強度 180 mm/h に相当する。人工島敷地内の排水機能を強化することにより処理できる量であるものと考えられる。

図-5 に越波流量の累積率を示す。池野ら (1993) は許容越波流量の 95% を越波排水路内に捕捉するように防潮壁位置と高さを設定した。本実験結果ではいずれの波高でも総越波量の約 95% がパラペットから 30 m 以内に捕捉された。本実験条件での設計波高の場合には越波量が小さく、相対的な捕捉率が議論ができ、この距離を敷地内への越波水による過度の浸水を防ぐための防潮壁位置の 1 つの目安ともできる。しかし、耐力検討波高を対象とした場合には、越流を防ぎかつ 95% の越波量を越波排水路で処理できても、防潮壁背後への許容越波流量

が換算雨量強度で 200 mm/h 程度となるものと考えられるため、相対的な値でなく絶対値で議論する必要がある。

越波の飛距離に及ぼす風の影響を設計波高 ( $H/H_D=1.0$ ) と耐力検討波高 ( $H/H_D=1.24$ ) について図-6 に示した。ただし、耐力検討波高の結果は波高比  $H/H_D=1.2$  と  $1.3$  の結果から内挿して求めた。図は防潮壁位置を  $x_w=31.25$  m とし、設計波高に対する許容平均越波流量  $q=0.05$  m<sup>3</sup>/s/m の 3 倍の流量を排水できる越波排水路とした場合で防潮壁高さは  $h_w=2.5$  m となる。他の波高の結果も含め、平均越波流量が  $10^{-2}$  m<sup>3</sup>/s/m 程度では風の影響はないが、 $10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m 以下では飛距離が増加した。

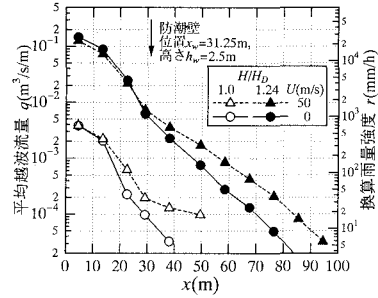


図-6 平均越波流量の飛距離に及ぼす風の影響

図-7 に防潮壁位置による越波流量の飛距離の変化を示す。防潮壁高さはパラペット高さと同じ高さ  $h_w=10.5$  m とした。位置は  $x_w=18.75$  m, 31.25 m, 72.0 m の 3 種類である。 $x_w=72.0$  m の条件は耐力検討波高 ( $H/H_D=1.24$ ) に対して、防潮壁背後への越波流量を  $10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s/m 以下にすることを確認するために行った。設計波高 ( $H/H_D=1.0$ ) では  $x_w=18.75$  m の位置でも全越波量を捉えることができる。耐力検討波高 ( $H/H_D=1.24$ ) になると防潮壁を越える越波流量は、 $x_w=18.75$  m で  $4 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m,  $x_w=31.25$  m で  $2 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m と同程度であった。防潮壁がパラペットと同じ高さの場合には、防潮壁の位置による背後への越波流量の変化は小さく、上記の位置まで幅を狭くすることができる。

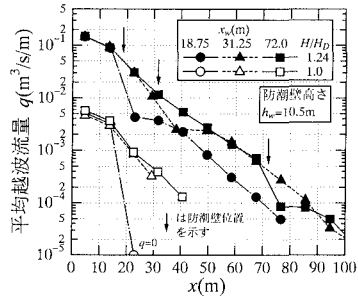


図-7 平均越波流量に及ぼすの防潮壁位置の影響

図-8 は防潮壁の高さの越波流量の飛距離に及ぼす影響を調べたものである。防潮壁の位置はケーソンの岸側端部に一致させ  $x_w=18.75$  m とした。高さは  $h_w=10.5$  m (パラペットと同じ高さ), 7.9 m (同 3/4), 5.3 m (同 1/2) の 3 種類とした。設計波 ( $H/H_D=1.0$ ) では、防潮壁高さをパラペット高さの 1/2 まで下げても防潮壁背後への越波流量を  $10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s/m 程度に抑えられ、臨海道路で高波浪時の自動車の安全通行を確保するための許容越波流量の目安である  $10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s/m (福田ら, 1973) を満たした。しかし、耐力検討波高 ( $H/H_D=1.24$ ) では、防潮壁高さがパラペット高さより低くなると防潮壁背後への越波流量が  $4 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m から  $9 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m へと倍増する。したがって防潮壁をパラペットより低くすることは好ましくない。

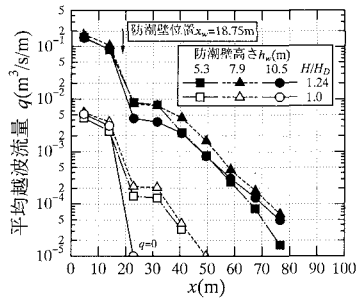


図-8 平均越波流量に及ぼす防潮壁高さの効果

防波堤への越波による打込波圧を求めた例はあるが(高橋ら, 1991), 越波量との対応は得られていない。そこで、局所的な越波流量と床版に作用する波圧との関係を把握した。実験結果を図-9 に示す。ただし、波圧は越波量測定区間で空間的に平均した波圧である。結果のばらつきが大きい。全体的な傾向は把握でき、越波流量が  $10^{-1}$  m<sup>3</sup>/s/m を越えると波圧が急激に大きくなることからわかる。防潮壁背後への越波回数の測定結果から、

瞬間越波流量が平均越波流量の 10 倍程度の  $10^{-2}$  m<sup>3</sup>/s/m 程度と考えられる。これより床版に作用する圧力は大きくとも  $p=5$  t/m<sup>2</sup> 程度とも見積もられる。この波圧に対してケーソンのコンクリート上部工は耐え得ることを確認した。

#### 4. 大型模型実験結果

図-10 に排水路内と防潮壁背後への越波流量と波高比  $H/H_D$  との関係性を縮尺 1/60 と 1/22.7 の 2 種類について示した。1/22.7 実験では防波護岸の前面約 2 波長の区間で海底勾配が 1/15 であったために進行波の波高比が  $H/H_D=1.7$  まで測定できた。設計波 ( $H/H_D=1.0$ ) に対して、排水路内への越波量と防潮壁背後への平均越波流量はそれぞれ  $q=10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m,  $q=0$  m<sup>3</sup>/s/m, 耐力検討波

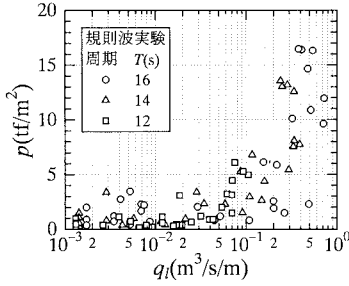


図-9 床版への作用圧力と越波流量との関係 (規則波実験)

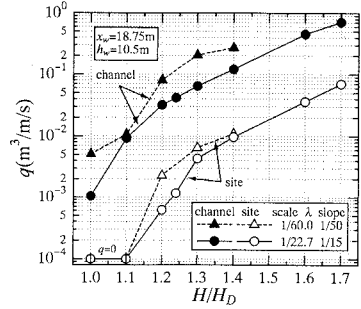


図-10 越波排水路内と防潮壁背後への平均越波流量

高 ( $H/H_0=1.24$ ) では  $q=4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$ ,  $q=10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$  であった。これらの結果は縮尺 1/60 の実験結果より小さく、海底勾配の影響によるものと考えられる。すなわち、1/50 勾配斜面では最大で設計波高の約 1.4 倍の波高の波までしか発生しなかったが、1/15 勾配では 1.7 倍の波高が生じている。同じ波高に対しても海底勾配の影響のために、越波流量に上記のような実験スケール効果の傾向とは逆の結果が生じたものと思われる。波高比が  $H/H_0=1.7$  と大きくなると防潮壁背後への越波流量は  $7 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s/m}$  に達し、越波排水路内への越波量の約 10% を占める。この条件では防潮壁を直接飛び越える様子や越流が生じた。

防潮壁に作用する流体力に関しては、規則波を用いて実験を行った。防潮壁の位置の変化による進行波高  $H$  と防潮壁に作用する水平波力  $F_x$  の関係を図-11 に示す。図には同時に得た越波流量も示した。波高が  $H=14 \text{ m}$  を越えるあたりから直接越波水塊が防潮壁に衝突し波力が急激に増加する。現地換算値で単位幅当たり作用する水平波力  $F_x$  の最大値は進行波高  $H=19.0 \text{ m}$  で生じ、防潮壁位置が  $x_w=18.75 \text{ m}$  の場合に  $F_x \approx 110 \text{ tf/m}$ ,  $x_w=31.25 \text{ m}$  では  $F_x \approx 90 \text{ tf/m}$  となった。防潮壁の位置が後退するほど波力が小さくなり、妥当な結果である。耐力検討波の進行波高は  $H_{1/3}=12.3 \text{ m}$  であり、最大波高  $H_{\text{max}}$  を進行波高の 1.8 倍と仮定すると、 $H_{\text{max}}=1.8 H_{1/3}=22.1 \text{ m}$  となる。この波高の範囲内で得られた最大波力である  $F_x \approx 110 \text{ tf/m}$  を設計外力と考えた場合、防潮壁と上部工を一体化して配筋することにより設計は可能である。

波圧の最大値の鉛直分布を図-12 に示す。越波により防潮壁には衝撃な波圧が作用する。波圧の値としては最大で約  $30 \text{ tf/m}^2$  が得られた。防潮壁を後退させた場合には ( $x_w=31.25 \text{ m}$ )、同じ波高のもとでも当然のことながら波圧は小さくなり、最大波圧は約  $23 \text{ tf/m}^2$  であった。

図-13 はこれまでに行った法的勾配 3/4 の縮尺 1/87.5 と 1/15.4 の越波実験結果 (鹿島ら, 1993a) と今回の縮尺 1/60 の法面勾配 3/4 の実験結果を、越波流量とレ

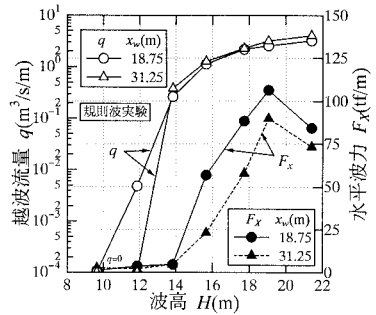


図-11 防潮壁に作用する波力と波高との関係 (規則波)

イノルズ数  $R_N$  との関係で表したものである。ただし、 $R_N=(gH)^{1/2}(W/\gamma_r)^{1/3}/\nu$ ,  $g$ : 重力加速度,  $H$ : 波高,  $\gamma_r$ : 消波ブロックの単位体積重量,  $\nu$ : 動粘性係数である。図中には越波算定図として用いられている合田ら (1975) の越波実験でのレイノルズ数の範囲もあわせて示した。今回の 1/60 実験では海底勾配とブロックの大きさ(図中では高さ  $b$  で表示) が異なる。同一波高 (フルード数一定) の下での越波流量を比較すると、レイノルズ数  $R_N$  が  $10^5$  を越えるあたりで越波流量がほぼ一定になる。一方、消波ブロックの安定性に及ぼすスケール効果の限界レイノルズ数は  $(3 \sim 5) \times 10^5$  (Thomsen ら, 1972; 島田ら, 1986) で、両者は同じオーダーである。図-10 に示した法面勾配 1/2 の結果では海底勾配が 1/50 と 1/15 の違いから、1/22.7 実験結果が大きくなった。以上の結果から大まかな比較ではあるが、レイノルズ数が  $10^5$  以上であれば越波流量に及ぼす実験スケール効果は無視できるものと思われる。

5. 結 論

人工島式立地発電所の防波護岸の越波排水路について水理実験に基づき検討を加え、発電所敷地内への越波量を評価した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 平均越波流量が  $10^{-2} \text{ m}^3/\text{s/m}$  以上では飛距離に及ぼす風の影響はなかったが、約  $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$  で飛距離が

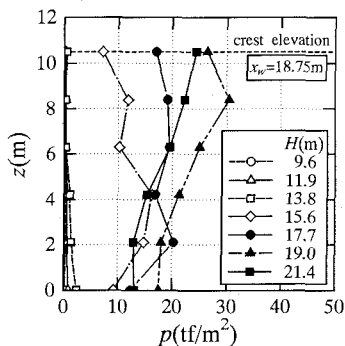


図-12 防潮壁に作用する波圧分布 ( $x_w=18.75$  m, 規則波)

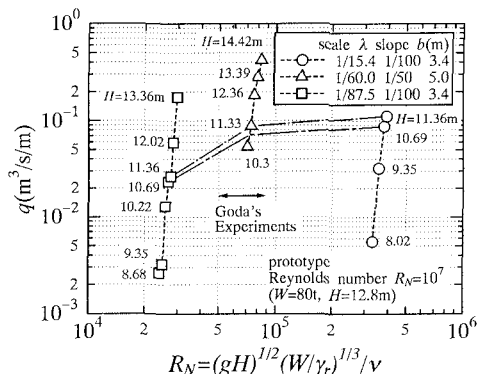


図-13 越波流量に及ぼす実験スケール効果

増えた。

2) 人工島敷地内への平均越波流量を約  $10^{-3} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  にする防潮壁の位置と高さを把握した。この越波流量は雨量強度  $180 \text{mm}/\text{h}$  に相当し(排水範囲を  $20 \text{m}$  と仮定),排水機能を強化することにより処理できる量であることがわかった。

3) 越波流量と床版に作用する圧力の関係を求め、越波流量が  $10^{-1} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  以上で波圧が急増することがわかった。

4) 耐力検討波の最大波高の範囲内で防潮壁に作用する水平波力を求めた。この外力に対してはケーソン上部工と防潮壁を一体化することにより設計が可能である。

5) 平均越波流量の実験スケール効果についてこれまでのデータをまとめ、限界レイノルズ数として  $10^5$  を得た。

風速分布の測定には日本大学堀田新太郎教授から熱膜式風速計をお借りし、便宜を図って頂きました。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の一部として実施したものである。本研究を進めるに当たり、土木学会原子力土木委員会海域分科会(主査 合田良実横浜国立大学教授),同耐波浪設計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。また,実験ならびに図面作成には(株)八重洲土木技術センター吉岡武男氏と(株)CRS千代大介氏に協力して頂きました。ここに,記して謝意を表します。

#### 参考文献

池野正明・阿部直行・鹿島遼一・渡辺 哲・岡部成光 (1993): 強

風作用下における護岸越波量の飛散距離分布特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 691-695.

鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修 (1992): 安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 671-675.

鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修 (1993a): 安定限界を越える不規則波浪に対する人工島防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.

鹿島遼一・榊山 勉・清水琢三・国栖広志・関本恒浩・京谷 修 (1993b): 不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形評価式について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 796-800.

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.

合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 267-322.

島田真行・藤本稔美・斎藤昭三・榊山 勉・平口博丸 (1986): 消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 442-445.

関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷 修・鹿島遼一 (1992): 人工島防護岸の短時間越波特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 581-585.

高田 彰 (1969): 越波の飛散分布に及ぼす風の影響(1)一風速と水平飛散分布一, 第16回海岸工学講演会講演集, pp. 277-288.

高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1991): 親水性防波堤上の越波水の運動に関する研究, 海岸工学論文集第38巻, pp. 536-540.

福田伸男・宇野俊恭・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.

Thomsen, A. L., P. E. Wohlt and A. S. Harrison (1972): Rip-rap stability on earth embankment tested in large and small scale wave tank, CERC Technical Memorandum No. 37.