

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

神山 勉*・鹿島遼一*・窪 泰浩**

1. 結 論

著者らは消波ブロックの安定限界を越える波浪に対して、防波機能を維持し多少の変形を許容する設計法が成立する可能性を示し、こうした設計法的人工島式立地発電所防波護岸への適用性を検討した(鹿島ら, 1992; 関本ら 1992; 鹿島ら, 1993 a; 1993 b)。これまでは断面2次元実験に基づき、消波工の変形量を評価し、設計波を越える波浪(耐力検討波と呼ぶことにする)に対する消波工の変形が一気に進むものではなく構造耐力を有することを確認した。また、機能維持の観点から消波工の変形に伴う越波特性を検討してきた。

本研究では、越波量評価結果に基づいて決定した越波排水路の断面形状(神山ら, 1994)を対象に人工島模型を用いた平面実験を行い、越波の空間的な分布や越波排水路の排水機能を確認する。また、護岸隅角部や防波堤堤頭部などの消波ブロックは直線部のそれらに比べ不安定であるため、直線部のブロック重量を割増した消波ブロックを設置する例が多い。しかし、本研究では設計波に対して実績のあるブロックの中で最大重量のものを使用する必要があるため、重量の割増しが困難である。そこで、このような制約の下での隅角部の消波ブロックの安定性を検討する。

2. 実験装置と実験条件

実験は図-1に示す長さ35m, 幅45m, 深さ1.1mの多方向不規則波水槽を用いて行った。この造波水槽は幅0.40cmの低反射制御方式ピストン型造波機48台を備えている。本システムでの造波方法は、人工島背後の波浪場と海浜流場に関する実験と同じである(池野ら, 1993)。一般に多方向不規則波の所要の特性を有する領域は限られる。そこで、図-1に示すように人工島模型の片側半分の領域を越波量の測定範囲とし、人工島側面から1/4の位置が造波機中心に位置するように模型を設置した。直入射の場合には片側の導波板が人工島の一片に接し、斜め入射では導波板が人工島のほぼ中心に達する。

人工島の大きさは現地換算で沿岸方向の長さ1000m, 岸沖に幅500mで、沖側護岸水深 $h=22.5$ mを想定した。100年確率波を設計波とし沖波波高10m, 周期16sと設定した。人工島長さ l と水深22.5mでの波長 $L_{1/3}=223.5$ mとの比は $l/L_{1/3}=4.47$ で相対的に長いので、越波量測定範囲の反対側の隅角部からの回折波が越波測定範囲に及ぼす影響は無視できるものと考えられる。

沖側防波護岸の模型を図-2に示す。模型縮尺は1/88.1である。護岸水深での設計波高 H_b は現地換算値で $H_b=10.3$ mであり、所要ブロック重量 W は法面勾配を1/2とした場合に $W=80$ tで、模型値は0.118kgになる。表層2層をテトラポッド約13,000個で被覆した。コア材には捨石を用いた。パラペット天端高さ、防潮壁位置、高さは断面2次元実験に基づいて決定した(神山ら, 1994)。

実験では図-3に示す位置でパラペット前面の越波水

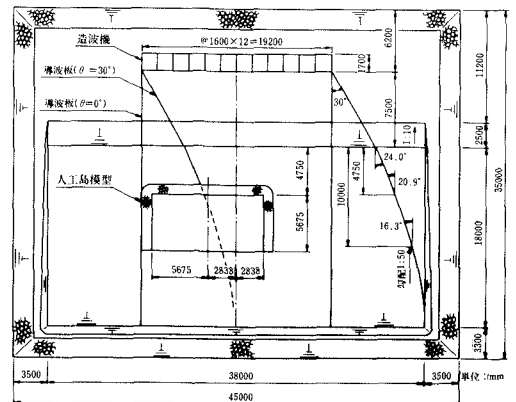


図-1 実験水槽と人工島模型の平面図

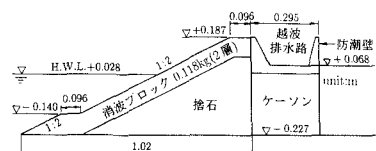


図-2 防波護岸模型の断面形状(模型縮尺1/88.1)

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所

** 東京電力(株) 原子力建設部

位と越波排水路内の水位変動をそれぞれ波高計 10 台用いて測定した。水路幅は 0.295 m である。同時に防潮壁背後への越波水の飛散距離を変色紙を用いて測定した。さらに、**図-4** に示す奥行き 0.295 m × 幅 0.58 m × 深さ 0.255 m の越波升 10 個を 2 列に設置し、越波排水路内と防潮壁背後への越波量の沿岸方向分布を分離して測定した。後列の越波升には高さ 50 cm の壁を立てて飛散越波水を集めた。

消波工の変形量は**図-5** に示す隅角部 90 度の範囲を 22.5 度間隔で放射状線上に 5 測線、沖側護岸の 1 測線、側面護岸の 2 測線の合計 8 測線について、タッチ式砂面計 4 台を用いて初期断面と作用波数 250, 500, 1000, 3000 波時に測深した。測深間隔は $\Delta s = 2$ cm である。本研究では変形量を Van der Meer (1987) の “damage level *S*” で表わすが、変形を被害とみなさないで *S* を変形レベルとよぶ。*S* は $S = A/D_{n50}^2$ で定義される。ここに、*A* は侵食面積、 $D_{n50} = (W/\gamma_r)^{1/3}$ 、 γ_r は消波ブロックの単位体積重量である。

実験条件を表-1 に示す。直入射（主波向 $\theta = 0^\circ$ ）の多方向不規則波と一方向不規則波、さらに斜め入射（ $\theta = 30^\circ$ ）の一方向不規則波の 3 種類を選択した。耐力検討波

表-1 実験条件（模型縮尺 1/88.1）

入射波件	CASE	主波向 θ (deg)	水深	波高 $H_{1/3}$ (cm)	周期 $T_{1/3}$ (s)	波高比 H/H_D
多方向不規則波 $S_{max} = 25$	A1	0	造波水深 60cm	11.31	1.64	0.97
	A2			12.52	1.65	1.07
	A3			13.52	1.65	1.16
	A4			13.89	1.66	1.19
	A5			14.52	1.66	1.24
	A6			15.06	1.68	1.29
一方向不規則波 $S_{max} = \infty$	B1	0	防波護岸設置水深 25.5cm	11.27	1.67	0.96
	B2			12.48	1.68	1.07
	B3			13.58	1.72	1.16
	B4			13.96	1.72	1.19
	B5			14.34	1.72	1.23
一方向不規則波 $S_{max} = \infty$	C1	30		11.11	1.67	0.95
	C2			12.28	1.68	1.05
	C3			13.33	1.69	1.14
	C4			13.78	1.72	1.18
	C5			14.38	1.74	1.23

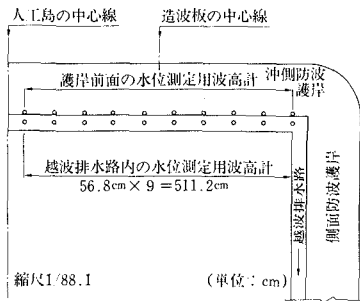


図-3 越波水位と越波排水路内の水位の測定

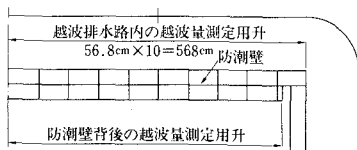


図-4 沿岸方向の越波流量の測定

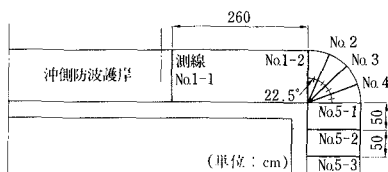


図-5 消波工隅角部での変形量の測線

は沖波設計波高の 1.5 倍の波高 15 m を設定した。防波護岸水深での耐力検討波高は 12.8 m であり、設計波高 $H_D = 10.3$ m の 1.24 倍になる。越波量に関しては設計波高から耐力検討波高までの 5 ~ 6 段階、消波工の変形は設計波高と耐力検討波高の 2 種類について行った。

3. 越波特性

図-6 に護岸設置水深での進行波高の沿岸分布を示す。斜め入射の一方向不規則波の場合を除き、越波量測定範囲内の波高は平均値 $\pm 10\%$ 程度の範囲に収まった。斜め入射の一方向不規則波では越波量測定範囲の左端が導波板に近いので変動が他に比べて若干大きい。導波板近傍での波高変動は重複波の影響である。さらに越波量測定範囲に限って波高を変えて波高分布を確認した。

測定範囲全域の平均越波流量を 3 種類の波浪条件と比較し**図-7** に示した。同一波高のもとでは直入射の一方向不規則波の越波流量が最も大きく、直入射の多方向不規則波、斜め入射の一方向不規則波の順となった。本実験の被覆層を消波ブロック 2 層とした結果は、消波工全体が消波ブロックの断面 2 次元実験結果(横山ら, 1994) に比べ越波流量が大きくなった。これは本実験のほうが消波工の透過性が低く遡上し易くなったためである。耐力検討波高では平均越波流量は約 $0.15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ であった。また、防潮壁背後への平均越波流量は設計波高で約 $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、耐力検討波高では約 $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ であった。

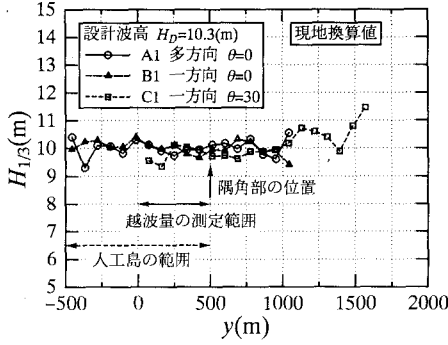


図-6 波の種類別の進行波高の沿岸方向分布

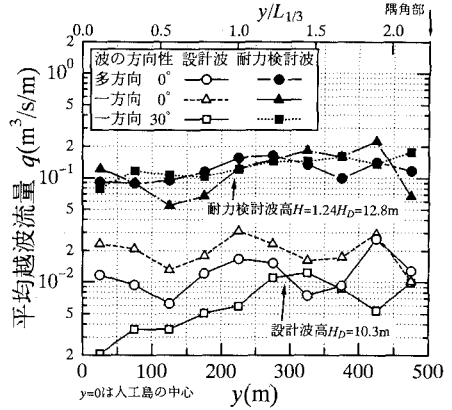


図-8 平均越波流量の沿岸方向分布

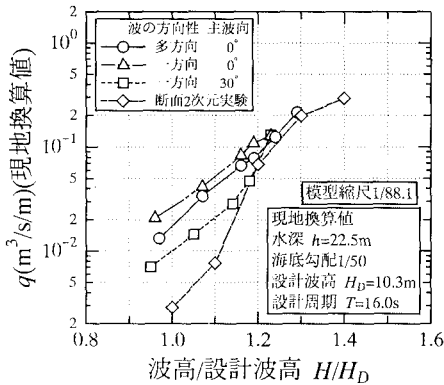


図-7 入射波の方向性による平均越波流量の比較

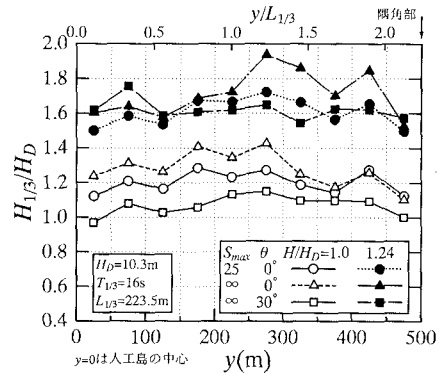


図-9 越波波高の沿岸方向分布

平均越波流量の沿岸方向分布を図-8に示す。平均越波流量は沿岸方向に変動する。直入射の一方不規則波では、隅角部に最も近い場所で越波流量が小さいが、隅角部周辺での変化が大きい。人工島中心部に向かうにしたがって越波流量は変動しながら一定値に漸近する。斜め入射の一方不規則波では、隅角部に最も近い場所の越波流量が大きく、人工島の中心に向って変動しながら減少する。この傾向は $H/H_D=1.0$ の結果に最も顕著に現れた。直入射の多方向不規則波は両者の中間的な変化を示している。このような平均越波流量の沿岸方向分布は、隅角部からの回折波の波高分布に支配される。図-9に越波波高の沿岸方向分布を示す。直入射の一方不規則波の場合が回折効果が顕著である。多方向不規則波では方向分散性の影響で回折波成分の位相がずれ重複波高が減少し、越波流量の空間的な分布が平滑化される。以上の結果は島堤周辺の回折図(合田ら, 1971)の傾向と一致した。

直入射の一方不規則波の越波と異なり多方向不規則波による越波は空間的に時間差がある。人工島の中心付近測定点を基準にとり越波水位の相関係数の沿岸分布を図-10に示した。一方不規則波の越波水位の相関係数

が0.9以上であるのに対して、多方向不規則波では相関係数が基準点から離れるにしたがって急激に減少する。また、波高が大きくなると相関係数の減少の程度が大きい。これは碎波の影響である。斜め入射の一方不規則波の相関係数は多方向不規則波より減少し、また波高が小さい方が低い。これらは負の相関が強いことを意味する。

越波水位の相互相関関数を図-11に示す。多方向不規則波の越波水位の相互相関関数はタイムラグが長くなるにしたがって、また距離が離れるにしたがって相関が低下する傾向が明瞭に表れた。直入射の一方不規則波では図-10の実線の結果と一致し、斜め入射の一方不規則波では、周期の $\sin \theta$ 倍だけ位相差が生じる。定量的に評価し越波排水路の合理的な設計へ反映する必要がある。

図-12は多方向不規則波の耐力検討波高の作用時の越波排水路内の水位変動の一例である。越波した水量が設定した防潮壁の高さを越えることが確認された。設計波高においては、排水路内の最大水位は数10 cm、耐力検討波高においては3~4 m程度であり、充分に

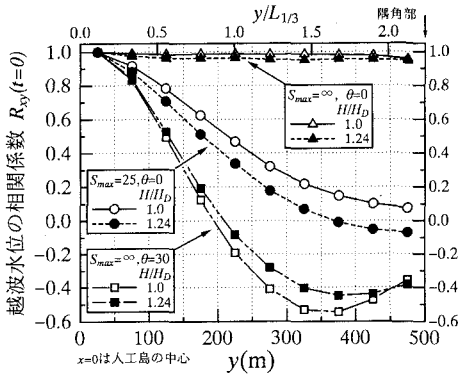


図-10 越波水位の相関係数の沿岸方向分布

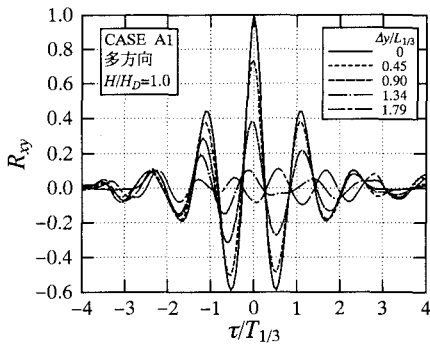


図-11 多方向不規則波による越波水位の相互相関関数

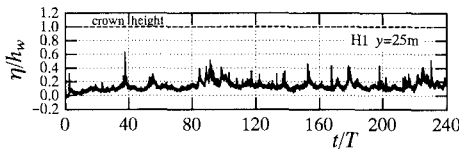
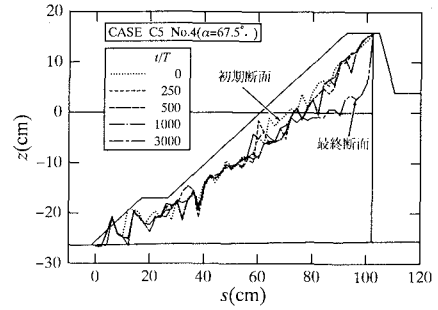


図-12 越波排水路内の水位変動(CASE A5, $H_D/H_D=1.24$)

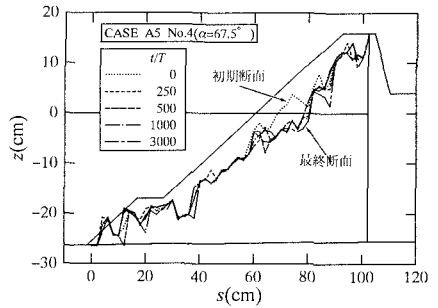
排水できることが確認できた。

4. 防波護岸の変形形状

図-13は耐力検討波による隅角部の消波工の変形形状の一例を示す。図-13(a)の多方向不規則波では静水面近傍の侵食に留まった。図-13(b)の斜め入射の一方方向不規則波の変形が最も顕著で、静水面上のブロック2層分が完全になくなりコア材が現れた。ブロックはいずれの場合も岸側へ落下した。図-13に対応する変形レベルSの経時変化を図-14に示す。図-14(a)の結果はこれまでの2次元実験結果と同様に、波作用初期で消波ブロックの移動が顕著で、その後変形速度が緩やかになった。図-14(b)の傾向はこれとは異なり、 $t/T=$



(a) CASE A5 ($H/H_D=1.24$, $S_{max}=25$, $\theta=0^\circ$)



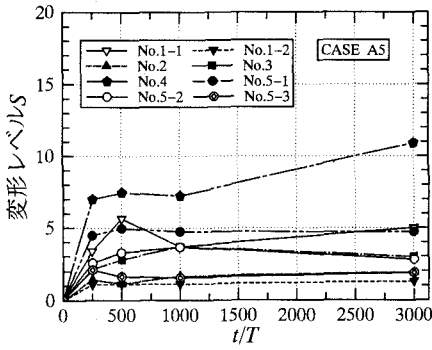
(b) CASE C5 ($H/H_D=1.24$, $S_{max}=\infty$, $\theta=30^\circ$)

図-13 隅角部における消波工の変形形状

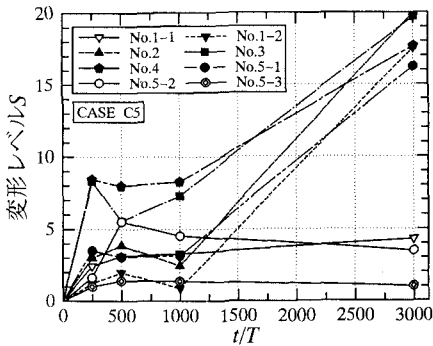
2500~3000で変形が急激に進行した。変形レベルは最終的に約20に達した。

図-15に $t/T=3000$ での変形レベルSの比較を示す。設計波高のもとでは、変形レベルSは多方向不規則波の場合が最大で $S=5$ 、その他では $S=2\sim3$ 程度であった。耐力検討波に対しては、多方向不規則波で測線 No. 4 (67.5°)で $S=11$ と断面2次元実験結果(鹿島ら1993a)の $S=5$ より大きくなった。直入射の一方方向不規則波では測線 No. 3 (45°)と No. 5 (90°)で $S=10$ とほぼ同程度であった。斜め入射の耐力検討波に対しては、 $t/T=3000$ で $S=20$ であり被覆層2層厚さの変形量に留まった。いずれの場合も隅角部での変形が最も顕著で、沖側護岸の変形は僅かであり、側面護岸の変形もほとんどなかった。

人工島護岸の主要な部分である沖側防波護岸の安定性に関しては、断面2次元実験での基礎的な検討結果により変形量が評価でき、さらに実際の断面形状について検討を加えた(鹿島ら, 1994)。隅角部については、設計波高に対しては僅かではあるが変形が生じ、現行設計の安定概念を満たさなかった。本実験は隅角部のケーソンを直角に接続し消波工の曲率が最も厳しい条件で行った。曲率半径を大きくする。法面勾配を緩やかにする、高比重ブロックを使用する等の対策が今後の検討課題である。



(a) CASE A5 ($H/H_D=1.24, S_{max}=25, \theta=0^\circ$)



(b) CASE C5 ($H/H_D=1.24, S_{max}=\infty, \theta=30^\circ$)

図-14 変形レベルの経時変化

5. 結 論

人工島式立地発電所の防波護岸を対象に平面実験を行い検討を加えた。本研究の結論は以下の通りである。

- 1) 同一波高の下では、直入射の一方方向不規則波より多方向不規則波の平均越波流量のほうが小さい。
- 2) 平均越波流量は人工島隅角部の回折波の影響で沿岸方向に変化し、隅角部から中心に向かって変動しながら減少する。
- 3) 沿岸方向の越波水位の相関係数は、直入射の一方方向不規則波ではほぼ一定であるが、多方向不規則波では相関が急激に減少し、越波の非同時性が高くなる。波高が大きくなり、砕波を含むと相関が低くなる。
- 4) 設計波作用時の隅角部の変形レベルは $S=3\sim 5$ 、耐力検討波では直入射の多方向と一方方向不規則波で $S=10$ 程度であった。斜め入射の一方方向不規則波でも $S=20$ で、機能維持を確保できる変形量に留まった。

本実験で模型消波ブロックを使用するに当たり、日本テトラポッド(株)松岡道男氏には便宜を図って頂きま

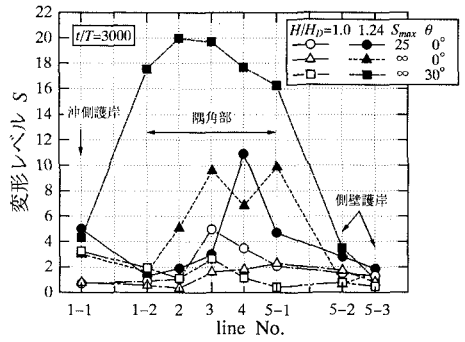


図-15 変形レベルSの比較 ($t/T=3000$)

した。また、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り、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)土木技術開発 下田隆男氏と(株)CRS 下村一氏、田山英樹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・鹿島遼一・松山昌史・榊山 勉・窪 泰浩 (1993): 人工島式発電所背後の波浪場・海浜流場に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 621-625.

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・清水琢三・国栖広志・関本恒浩・京谷 修 (1993a): 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.

鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修 (1993b): 安定限界を越える不規則波浪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.

鹿島遼一・榊山 勉・清水琢三・関本恒浩・京谷 修 (1994): 消波工の変形量の時間変化の予測と変形に及ぼすコアの影響, 海岸工学論文集, 第41巻 (印刷中).

合田良実・吉村知司・伊藤正彦 (1971): 島堤による波の回折とおよび反射に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第10巻, 第2号, pp. 3-52.

榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩 (1994): 人工島式立地発電所への越波量評価に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 661-665.

関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷 修・鹿島遼一 (1992): 人工島防波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.

Van der Meer, J.W. (1987): Stability of breakwater armour layers design formulae, Coastal Engineering, 11, pp. 219-239.