

安定限界を越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

鹿島遼一*・柳山勉*・松山昌史*
関本恒浩**・京谷修***

1. 結 論

著者らは沖合人工島の外郭施設の設計について提案された、構造耐力を考慮した設計の考え方(鹿島ら, 1988; 鹿島・阿部, 1992)に基づいて、消波ブロックの安定限界波高を越える波浪に対して、護岸の消波工の変形と機能の低下が一気に進むものではないことを水理実験により明らかにし、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た(鹿島ら, 1992, 以下前報と呼ぶ)。この概念は、通常の設計波に対しては現行の設計法を満足し、それを越える極めて希な外力に対しては、消波工の多少の変形は許容し、人工島に要求される最小限の機能を維持するとするものである。前報では、規則波ならびに不規則波実験により基礎的な検討を加えた。本研究では、人工島式立地発電所の防波護岸を念頭に置き、この設計法の概念に基づき、安定限界を超えた波浪による人工島防波護岸の消波工の変形ならびに変形に伴う越波の変化について、不規則波を用いて詳細な実験を行い検討を加え、設計法の適用性を評価する。また、大型模型実験を実施し、不規則波に対する変形、越波に及ぼす実験スケール効果を調べ、定量的な検討を加える。

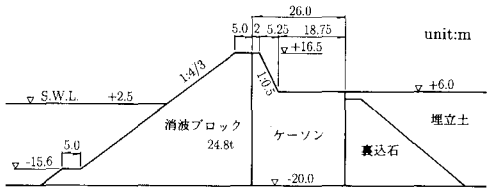
2. 実験方法と実験条件

実験方法は前報と基本的に同じである。本研究では、沖波波高 $H_0=10\text{ m}$ 、周期 $T=16\text{ s}$ の基本設計波(以下現地換算値で示す)を想定し実験を実施した。防波護岸設置水深 $h=22.5\text{ m}$ における有義波高は合田(1990)の不規則波砕波を伴う波高計算方法により進行波高 $H_{1/3}=10.3\text{ m}$ を得た。この進行波高に対して、許容平均越波流量を $q=0.05\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ となるように護岸天端高さ h_c を定め $h_c=14\text{ m}$ とした(前報の天端高さは $h_c=9.0\text{ m}$)。図一1に今回対象とした消波ブロック被覆ケーソン式護岸を現地換算値で示した。

表一1に実験条件を示す。実験は、中型模型実験(縮尺 $\lambda=1/87.5$)と大型模型実験($\lambda=1/15.4$)の2種類行っ

た。消波工の変形を検討するに当たっては、変形を生じさせ易い条件を設定するために、使用可能な消波ブロックと造波能力を考慮し、消波ブロック重量 W に対してハドソン式から算定される波高 H_D (ここでは算定限界波高と呼ぶ)の2倍程度の波が作用できる条件を設定した結果、現地換算で波高 $H_D=6.86\text{ m}$ と重量 $W=24.8\text{ t}$ を採用した(中型模型: $W=36.8\text{ g}$, 大型模型: $W=6.8\text{ kg}$)。ただし、 K_D 値としては非砕波時の値 10.2(海岸保全施設設計便覧, 1969)を用いた。

中型実験では周期 $T_{1/3}=12, 16, 20\text{ s}$ の3種類、算定限界波高 H_D の最大2倍までの波高について、また大型実験では周期 $T=16\text{ s}$ の1種類、最大1.7倍までの波高について実験を行った。



図一1 実験に用いた防波護岸断面(現地換算値)

表一1 実験条件

		原型値	大型模型	中型模型
縮 尺 λ		1.0	1/15.4	1/87.5
基 本 設計波	波高 $H_{1/3}(\text{m})$	10.0	0.65	0.114
	周期 $T_{1/3}(\text{s})$	16.0	4.08	1.71
防 波 護 岸	法先水深 $h(\text{m})$	22.5	1.46	0.257
	天端高 $h_c(\text{m})$	14.0	0.91	0.16
進行波高 $H_{1/3}(\text{m})$		10.3	0.669	0.118
消波ブロック重量 W		24.8 t	6.8 kg	36.8 g
防波護岸斜面勾配		3/4		
算定限界波高 $H_D(\text{m})$		6.86	0.445	0.079
実 験 波	波高 $H_{1/3}(\text{m})$	(1.0~2.0) H_D	(1.0~1.7) H_D	(1.0~2.0) H_D
	周期 $T_{1/3}(\text{s})$	12, 16, 20	4.08	1.28, 1.71, 2.14
	スペクトル形状	Wallopis 型スペクトル母数 $m=5(B-M)$, 11		
海底勾配		1/100		

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所
** 正会員 工修 五洋建設(株)技術研究所
*** 正会員 東京電力(株)原子力建設部

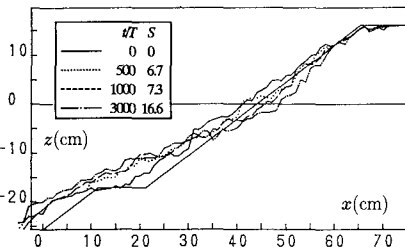
消波工の変形過程と変形に伴う越波量の変化を調べるために、消波工の断面形状を波の作用 250 波毎に測定するとともにブロックの移動個数を数えた。変形量は van der Meer (1988) が捨石堤に対して導入した damage level $S=A/D_{n50}^2$ を用いた(本研究では変形を被害とみなさないで S を変形レベルと呼ぶことにする)。ここに、 A は侵食面積、 $D_{n50}=(W/\gamma_r)^{1/3}$ はブロックの代表長さである。変形レベル S は幅 D_{n50} 当たりの消波ブロックの移動個数を示すものである。

越波量に関しては、中型実験では一波毎の越波流量を計測して最大越波流量と平均越波流量を算出し、大型実験では平均越波流量を測定した。中型実験での短時間越波流量は、前報では関本ら (1992) の方法で測定したが、本実験では越波量が少ないため、4 台のロードセルで支持したアクリル製水槽全体の水の重量 $W(t)$ の単位時間当たりの変化量 $dW(t)/dt$ から越波流量 $q(t)$ の経時変化を求め、ケーソン前面の容量式波高計より得られる水面波形と越波の対比により 1 波毎の越波流量を得た。

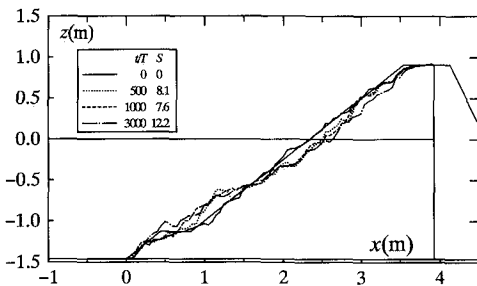
3. 実験結果と考察

3.1 消波工の変形特性

図-2 に中型、大型実験における断面変形の経時変化の 1 例として、算定限界波高 H_b の 1.6 倍 ($H/H_b=1.6$) の波高を作用させた場合の消波工の変形状況を示した。図中には波作用波数 t/T とその時点での変形レベル S の値を同時に示した。波高比 $H/H_b=1.6$ を 3000 波作用



(a) 中型模型実験結果 ($W=0.0368$ kg, $\lambda=1/87.5$)



(b) 大型模型実験結果 ($W=6.8$ kg, $\lambda=1/15.4$)

図-2 護岸消波工の変形過程 ($H/H_b=1.6$)

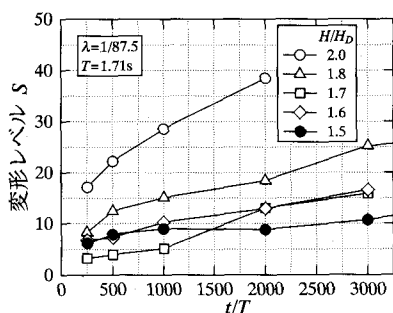
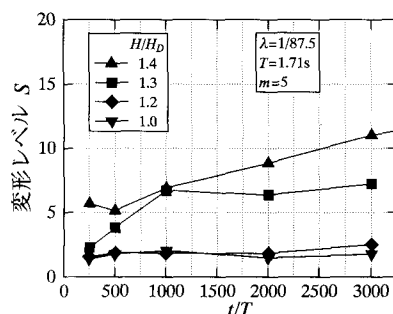
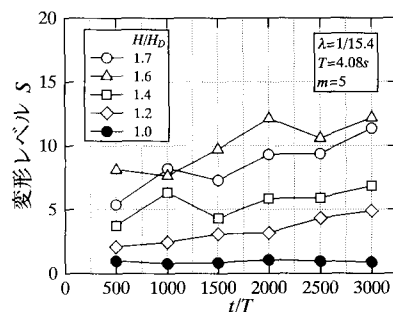
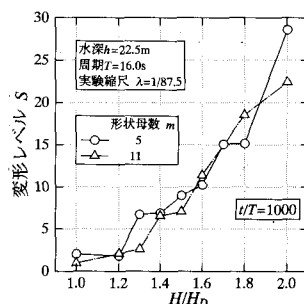
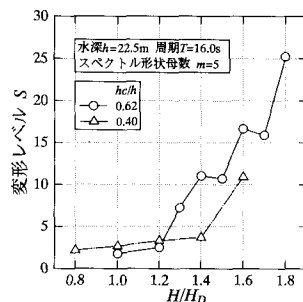
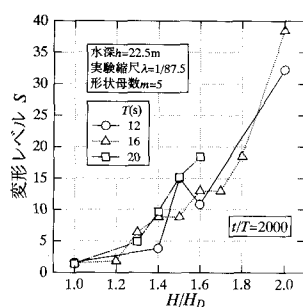
させた結果、(a) 中型実験結果では変形レベル $S=16$ 、(b) 大型実験では $S=12$ であった。この波高条件のもとでは越波はするものの、防波護岸の天端が高いためにパラペット前面の消波ブロックが移動することはなく、静水面近傍の消波ブロックの移動が生じた。その結果、安定な S 字型の断面形状 (Bruun・Johannesson, 1976) に変形した。しかし、中型実験の波高比 $H/H_b=2$ のケースでは法肩のブロックが転落し、変形後の断面は直線的になり、前報の天端が低い場合と同様の結果を得た。

図-3 に変形レベル S の経時変化を示した。中型実験結果は波高比 $H/H_b=1.0\sim 1.4$ の範囲と $1.5\sim 2.0$ の範囲に分けて、大型実験結果は波高比 $H/H_b=1.0\sim 1.7$ の 5 ケースをまとめて示した。算定限界波高を作用させたケース ($H/H_b=1.0$) では波作用初期に消波ブロックが移動し、その後ほとんど移動しない。このことは算定限界波高が概ねブロックの移動限界を示しているといえる。これより大きい波高では、全体的に波の作用とともに変形が進行し、変形速度は波高の増加にしたがって大きくなった。また、時間の経過とともに変形速度は減少する。波高が小さい場合には変形速度が減少する時間は早い。図-3(a) の波高比 $H/H_b=2.0$ の結果に顕著にみられるようにほぼ直線的に変形が進行する場合もある。波高 $H/H_b=1.4$ のケースでは時間の経過とともに緩やかではあるが変形レベルは増加し、最大 $t/T=7000$ でも平衡断面は確認できなかった。なお、作用波数が 3000 波に到達する以前でも被覆層 2 層まで変形が到達した場合には実験を終了した。また、被覆層 2 層厚さまで変形が到達するときの S の値はほぼ 20~25 であった。

図-4 は中型模型実験の結果の波作用時間 $t/T=1000$ における変形レベル S と波高比 H/H_b との関係を示したものである。ただし、波形状母数 $m=5$ と $m=11$ の両者について示した。これより波高の増加にしたがって変形レベルは連続的に増加する傾向がみられる。また、この他の周期 $T=12$ s と $T=20$ s の中型実験結果ならびに大型実験の周期 $T=16$ s の結果を含めて、形状母数 m による変形レベル S の差は認められなかった。

図-5 は変形レベルと波高との関係に及ぼす天端高さの影響を示したものである。天端の低い条件での不規則波ならびに図には示していないが規則波実験結果では、図-5 にみられるように、ある波高を境に変形レベルが急激に増加する関係が得られたが、今回の実験結果では波高の増大に伴う変形レベルの増加は連続的である。

Hudson 式には周期の効果が考慮されていないが、少なくとも捨石の安定性には周期の違いが、変形特性に寄与することが van der Meer (1988) によって指摘されている。そこで変形レベルに及ぼす周期の影響を調べた。図-6 は $t/T=2000$ における波高と変形レベルの関係を

(a) 中型模型実験, 波高比 $H/H_D = 1.5 \sim 2.0$ (b) 中型模型実験, 波高比 $H/H_D = 1.0 \sim 1.4$ (c) 大型模型実験, 波高比 $H/H_D = 1.0 \sim 1.7$ 図-3 変形レベル S の経時変化図-4 波高比 H/H_D と変形レベル S との関係 ($\lambda = 1/87.5$)図-5 変形に及ぼす先端高さの影響 ($\lambda = 1/87.5$)図-6 変形に及ぼす周期の影響 ($\lambda = 1/87.5$)

周期別に示したものである。波高により若干の変動があるものの、同一の波高比のもとでは、周期が長くなるにしたがい変形レベルが大きくなる傾向にある。この傾向は、形状母数 $m=11$ の結果や他の作用時間においても同様であることから、変形レベルを定量的に評価しようとする場合、周期の効果を無視することはできない。

4. 変形に伴う越波特性

構造耐力を考慮する設計概念においては、機能維持の確保を前提にしている。防波護岸に関しては、消波工の変形にともなう越波流量の変化を把握し、機能維持を検討する必要がある。

図-7 に変形レベル S と平均越波流量 q との関係を示

した。変形レベル、越波流量とも波高の大きさに依存する。図-7(a)の中型実験結果では、各波高の条件のもとで変形レベル S が増加するにしたがって平均越波流量 q が増大することが明瞭に現れている。特に、変形レベルが小さい5~10程度のところでの増加率が著しい。これは、変形レベル S が小さいところは作用波高が小さいものが多く、越波量自体が少ないためで、この範囲では消波工の法面勾配の変化によって平均越波流量が変化しやすいことを示している。初期の平均越波流量に比べて、消波工の変形により約2倍に増加している。

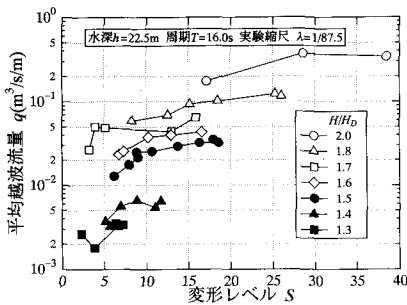
一方、図-7(b)の大型実験の結果では変形量が小さいために、全体的には平均越波流量の顕著な変化はみられない。変形に伴う平均越波流量の明瞭な増加傾向がみら

れたのは $m=11$, $H=1.4H_D$ のケースで、平均越波流量が $0.02 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ から約 2 倍に増加した。その他のケースでは変形にともない約 50 % の範囲内の変動が生じた。

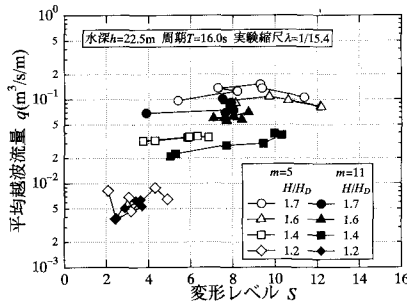
図-8 は中型実験の最大越波流量 $q_{\max}$ と変形レベル S との関係を示したものである。最大越波流量は平均越波流量の 10 倍から 100 倍のオーダーである。図より最大越波流量 $q_{\max}$ が $q_{\max} < 1 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$ の範囲では、変形レベル S の増大による $q_{\max}$ の変化率が大きいことがわかる。 $q_{\max}$ が大きい場合には変形レベルが大きくなっても $q_{\max}$ の変化率は小さい。消波工の変形による最大越波流量の増加率は、平均越波流量と同程度である。

5. 実験スケール効果

図-9 に変形レベル S に及ぼす実験スケール効果を示



(a) 中型実験結果



(b) 大型実験結果

図-7 変形にともなう平均越波流量 q の変化

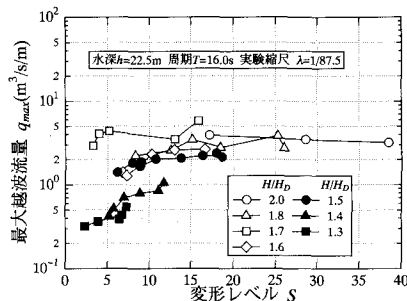


図-8 変形にともなう最大越波流量 $q_{\max}$ の変化

した。図中には前報で得られた天端高さの低い場合の規則波実験結果も示した。算定限界波高に近い波高の場合 ($H/H_D=1.0, 1.2$) には大型、中型実験に差が顕著ではなく、van der Meer (1988) の捨石堤の結果と一致した。波高が大きくなると変形レベル S に顕著な差が生じ、大型模型実験の結果のほうが変形量が小さくなった。天端高さの低い条件での規則波の結果は波高比がシフトしているものと同じ傾向を示している。

図-10 は消波工の変形の進行が少ない波作用時間 $t/T=0\sim 250$ 間における平均越波流量について 2 種類のスケールの実験結果を比較したものである。いずれの波高条件の結果とも平均越波流量に関しては大型実験結果のほうが 4 倍から 10 倍大きくなっている。一般的に越波流量のデータの変動が大きいことが認識されている。本実験結果の無次元越波流量 $q/\sqrt{2g(H_D)^3}$ は $10^{-4}\sim 10^{-3}$ のオーダーであり、合田 (1990) によれば越波流量の推定値に対する真値の想定範囲は 0.2~5 倍である。図中の大型、中型実験結果の違いは、想定範囲と同程度か若干大きい。時間の経過とともに平均越波流量が増加したが、これは測定値の誤差範囲内での変動ではなく、断面形状の変化にともなう越波流量の変化である。このような越波流量の測定精度を考えれば、同図の大型実験と中型実験の差は有意な量であるものと考えられる。大型実験のほうが大きめであることは、規則波の実験結果(鹿島ら, 1992)と一致する。消波ブロック被覆層内の波動運動における抗力に実験スケール効果があることは、これまでの反射率、透過率、消波ブロックの安定性さらに消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果に関する研究で報告されている (島田ら, 1986; 榊山・鹿島, 1990)。この抗力の影響は越波流量にも当然影響するものと考えられる。

消波工の変形量とは逆に越波流量は小スケールの実験結果をフルード則にしたがって現地換算すると過小評価となる。防波護岸の越波量の実験スケール効果の及ぶ限界レイノルズ数に関しては検討されていない。安定性に及ぼすスケール効果の限界レイノルズ数は、不規則波実験では $R_{NC}=(W/\gamma_r)^{1/3}\sqrt{gH}/\nu=3\times 10^4$ (van der Meer, 1988), 規則波に対して $R_{NC}=(3\sim 5)\times 10^5$ が提案されている (Thomsen ら, 1972; 島田ら, 1986)。大型実験では $W=6.8 \text{ kg}$, $H=H_D=0.445 \text{ m}$ であり, $R_N=4\times 10^5$ である。これは van der Meer の不規則波の限界レイノルズ数より 1 オーダー大きい。一方、中型実験では $W=0.0368 \text{ kg}$, $H=H_D=0.114 \text{ m}$ で, $R_N=3.4\times 10^4$ で、限界レイノルズ数にほぼ一致しているが、変形量、越波流量ともスケール効果があることは、van der Meer の限界レイノルズ数では説明できなく、限界レイノルズ数がより大きい可能性がある。

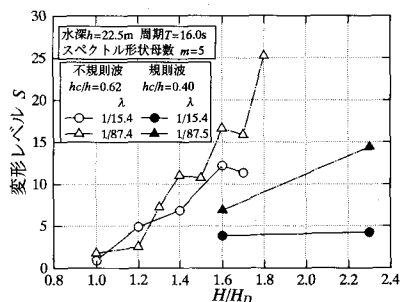


図-9 変形レベル S ($t/T=3000$) に及ぼす実験スケール効果

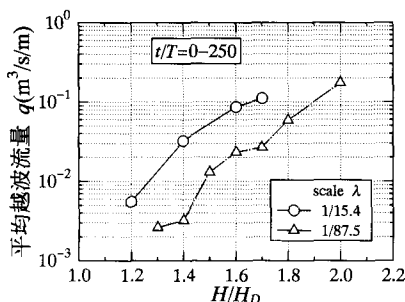


図-10 平均越波流量 ($t/T=0\sim500$) に及ぼす実験スケール効果

6. 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 算定限界波高の1.4倍程度までの波に対しては、作用時間 $t/T=3000$ 程度 (現地換算で波作用約13時間) で変形速度が緩やかになる。しかし、波高が算定限界波高の2倍程度になると変形速度は大きく、 $t/T=2000$ で変形レベル S が20を超え、変形は天端にまで達した。
- 2) 波作用時間 $t/T=3000$ (現地換算で波作用約13時間) の範囲で変形速度が緩やかになる条件の下で、消波工の変形を静水面近傍の変形に止めることが望ましい。
- 3) 変形レベル $S \approx 20$ で概ね2層被覆層厚さに達する侵食量であった。
- 4) 不規則波のスペクトル形状母数 m の違いによる変形への影響は認められなかった。
- 5) 変形レベル S の増加にともない、平均越波流量と最大越波流量は約2倍へ増加した。
- 6) 不規則波実験での変形レベルに及ぼす実験スケール効果に関しては、算定限界波高に近い波高 ($H/H_D = 1.0, 1.2$) では大型、中型実験結果に顕著な差はみられ

なかった。波高が大きくなると、大型実験の結果のほうが変形量が小さくなり、既往の規則波の結果と同じ傾向を得た。

7) 平均越波流量は大型模型実験のほうが大きくなった。この結果も既往の規則波の結果と同じ傾向である。

以上より、限界波高を超える波高による消波工の変形と越波量の変化を定量的に把握し、上記の設計法の考え方が基本的に人工島防波護岸の耐波設計法に適用可能であるものと考えられる。

最後に、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)、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

- 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.
- 鹿島遼一・阿部宣行 (1992): 沖合人工島外郭施設の耐波設計について, ウォーターフロント開発シンポジウム講演論文集, pp. 251-256.
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修 (1992): 安定限界を超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.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 333 p.
- 榊山 勉・鹿島遼一 (1989): 消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 653-657.
- 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・国柄広志・清水琢三・京谷 修・鹿島遼一 (1992): 人工島防波護岸の短期越波特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 581-585.
- Bruun, P and P. Johannesson (1976): Parameters affecting stability of rubble mound, ASCE, J. of the Waterways, Harbors, and Coastal Engineering Division, Vol. 102, No. WW2, pp. 141-164.
- Thomsen, A. L., P. E. Wohlt and A. S. Harrison (1972): Rip-rap stability on earth embankment tested in large and small scale wave tanks, CERC Technical Memorandum No. 37.
- Van der Meer, J. W. (1988): Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Doctoral thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.