

大波浪海域における異形ブロックの 波浪安定性に関する水理模型実験

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT ON THE STABILITY OF CONCRETE BLOCKS IN THE SEVERE WAVE CONDITIONS

堀田 治¹・中山政勝²・上原幸生³・平石哲也⁴・丸山晴広⁵・長谷川巖⁶

Osamu HORITA, Masakatsu NAKAYAMA, Kousei UEHARA, Tetsuya HIRAISHI, Haruhiro MARUYAMA
and Iwao HASEGAWA

¹国土交通省 九州地方整備局 宮崎港湾空港工事事務所 (〒880-0858 宮崎市港一丁目16番地)

²正会員 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-8504 下関市竹崎町4-6-1)

³国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 (〒750-8504 下関市東竹崎町4-6-1)

⁴正会員 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所海洋・水工部波浪研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部 波浪研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 株式会社エコー 沿岸デザイン本部 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町10-35)

The breakwater in Hososhima Port will be built in the high wave area where significant wave height of offshore wave reaches 13m. With the popular wave dissipating block whose K_D value is 8 and slope gradient is 1:4/3, the calculated result of the minimum mass by Hudson's formula exceeds 200 tons. Concerning the enlargement of the block and application of the high specific gravity block, the three-dimensional hydraulic model experiment was carried out in the plane water tank with the multiple direction random wave generator. Both multiple and one-dimensional random waves were generated and those results were compared to clear the characteristics of one-dimensional experiments.

Key Words : concrete block, multi-directional random waves, hydraulic model experiment, sloping top breakwater covered with wave-dissipating blocks

1. はじめに

宮崎県細島港の沖合いに南沖防波堤(600m)と北沖防波堤(750m)の建設を予定している。この沖防波堤は、設計沖波の有義波高が13mに及ぶ大波浪海域に建設するため、 K_D 値が8.3、斜面勾配1:4/3($Ns^3=K_D \cdot \cot \alpha=11.1$)の一般的な消波ブロックでは、ハドソン式による所要質量の算定結果が200tを超えるものとなる。そこで、 K_D 値が20(非碎波では25)、斜面勾配が1:1.5($Ns^3=K_D \cdot \cot \alpha=30.0$)のドロスを適用することとした。ただし、安定性の高いドロスを適用する場合にも、標準部における所要質量の算定結果が70tを超え、ドロスの既存の最大サイズ50t型でも安定性の確保が困難であると考えられた。また、堤頭部においてはさらに所要質量が大き

くなることから、南沖防波堤を対象としての高比重ブロックの適用やブロックの大型化を考慮し、水理模型実験による消波ブロック及び被覆ブロックの安定性を検討した。

沖防波堤設置位置の水深は、概ね30m以上であるが、一部に水深が10m程度の浅瀬部分が含まれる。

このような複雑な海底地形上での現象を把握するため、三次元水理模型実験とし、現地の波浪条件にできるだけ近い条件とするために多方向不規則波を適用した。一般的に、これまでの模型実験は一方向不規則波で実施されているため、一方向不規則波の実験も実施し、多方向不規則波との比較を行った。

2. 実験条件と実験方法

(1) 実験条件

水理模型実験は、幅 0.5m の造波板 60 枚を組み合わせた多方向不規則波の発生が可能な造波装置を有する、幅 22.8m×長さ 46.0m×高さ 1.0m の平面水槽で実施した。50 年確率波の有義波高が 13m を超える条件であり、防波堤の延長も 600m と長いため、模型縮尺は 1/100 とした。

実験波向は設計波向である SE と、SE に次いで沖波波高が大きい ESE の 2 波向とした。別途実施したエネルギー平衡方程式による波浪変形計算により、地盤高が -50m に相当する造波機前面の波高は、SE で $H_{1/3}=12.3\text{m}$ ($T_{1/3}=14.5\text{s}$)、ESE で $H_{1/3}=12.1\text{m}$ ($T_{1/3}=14.3\text{s}$)、造波機前面の波向は、N から E 回りの角度として、SE で 122.5° 、ESE で 107.5° とした。作用波浪は $S_{max}=10$ で Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを有する多方向不規則波とした。消波ブロックや被覆ブロックの安定性を検討する実験であるので、波作用波数は 1000 波とした。実験潮位は、消波ブロックの安定性を検証した実験ケースでは H.W.L. (D.L.+2.3m) とし、被覆ブロックを対象としたケースでは L.W.L. (D.L.+0.21m) とした。

海底地形は複雑で、防波堤法線上と 60m 沖側の地盤高は図-1 のとおりである。横軸は防波堤法線の北側端部からの距離で、600m 位置が南側の端部になる。防波堤への到達波高が約 12m であるので、60m 沖側は $5H_{1/3}$ 沖側に相当する。浅瀬は北側堤頭部付近にあり、周辺の地盤高は -30m 以下であるが、最も浅い部分では -10m 程度となっている。

南沖防波堤の防波堤配置のイメージは図-2 のとおりである。図中の番号 1 から 21 はケーソン番号で、

番号 1 の堤頭函の標準断面は図-3、番号 2 から 4 の浅瀬部の標準断面は図-4、番号 5 から 12 の標準部の標準断面は図-5 のとおりである。このように、南沖防波堤は消波ブロック被覆式上部斜面堤である。上部斜面堤を採択した理由は、施工途中の消波ブロックで被覆されていない状態において、直立壁のケーソンでは滑動に対する安定性を確保できないためである。ケーソンおよび上部工の形状は、別途実施した二次元実験の結果により決定したもので、上部斜面堤の斜面下端高は D.L.-1.5m であり、L.W.L. の水位 D.L.+0.21m より低い。また、消波ブロックの天端高は D.L.+3.2m で、H.W.L. の D.L.+2.3m より 0.9m 高い。上部工の天端高 D.L.+9.0m は、消波ブロックで被覆した完成断面における波高伝達率が 0.2 となる条件である。なお、図-3 から図-5 は模型実験用の断面図であるので、現地適用の断面とは細かい部分で相違がある。

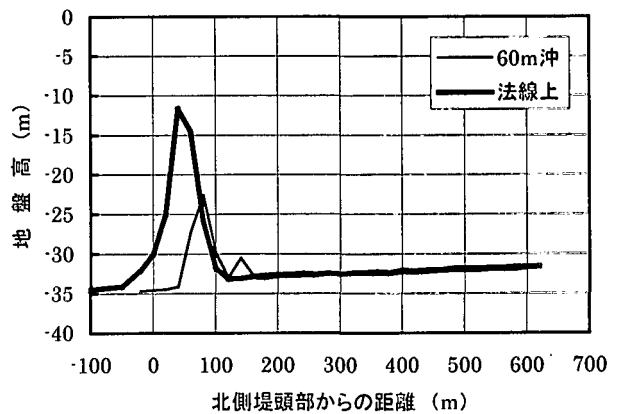


図-1 防波堤法線上と 60m 沖側の地盤高

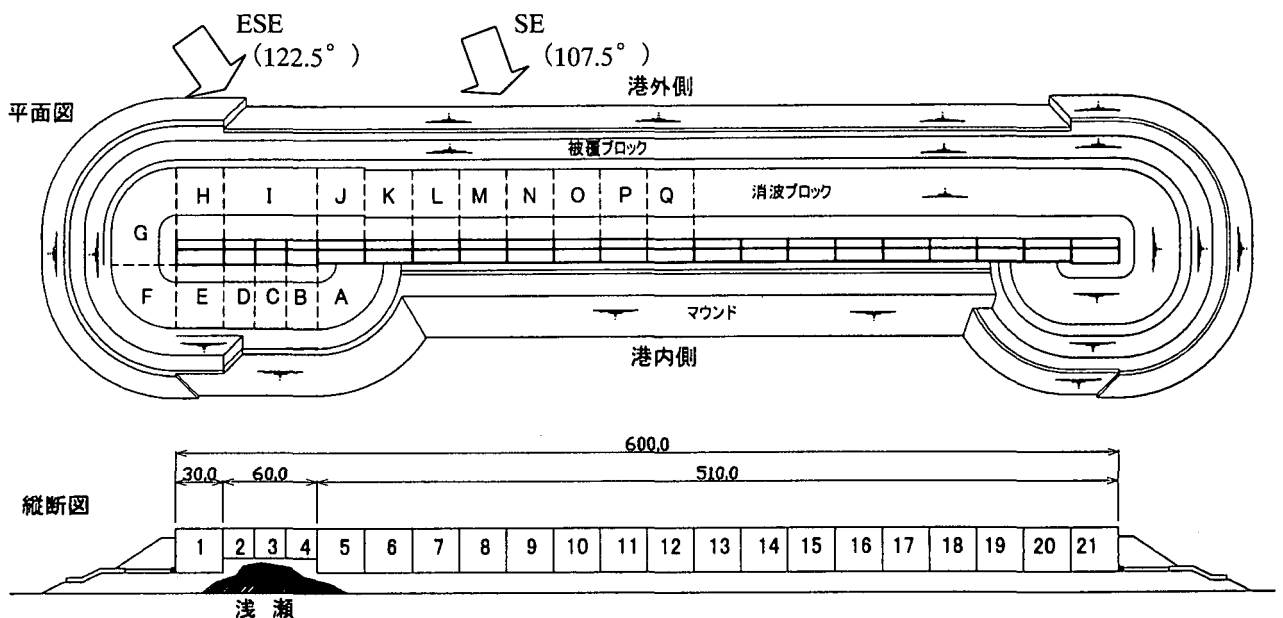


図-2 消波ブロック安定性確認対象区間とエリア名

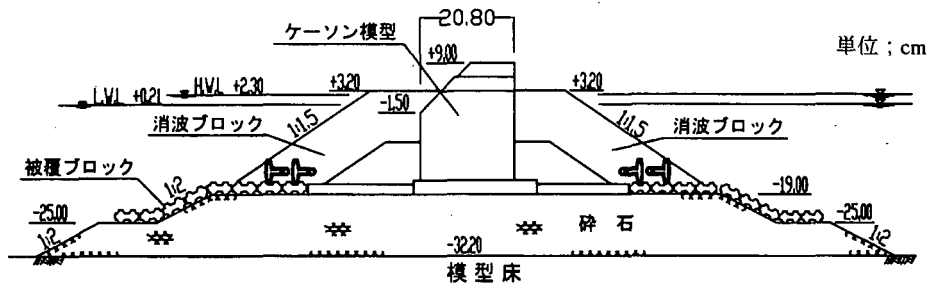


図-3 堤頭函標準断面図 (実験断面)

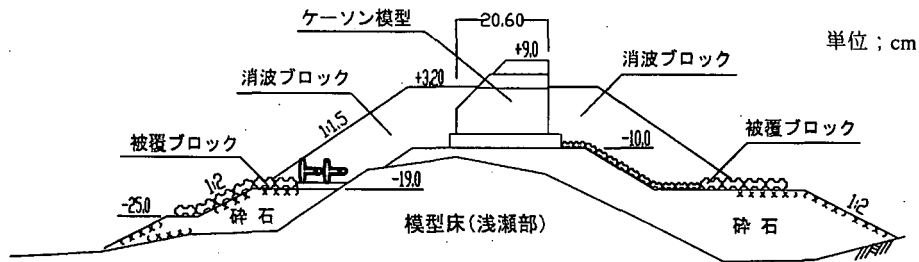


図-4 浅瀬部の標準断面図 (実験断面)

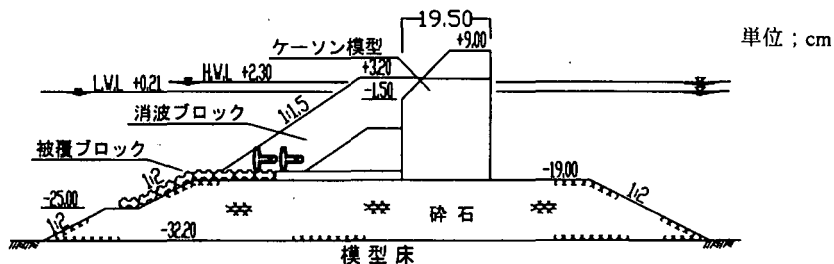


図-5 標準部の標準断面図 (実験断面)

表-1 実験に適用した消波ブロック (ドロス) のサイズと比重

エリア名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
代表距離 (m)	105.0	80.0	60.0	40.0	15.0	-21.4	-21.4	15.0	60.0	105.0	135.0	165.0	195.0	225.0	255.0	285.0	315.0
80t型	2.36	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	○	○	×			
	2.6		○	○		○			○	○	○						
50t型	2.36						×	×	×					○	○	○	○
	2.5						×	×	×								
	2.6					×	○		×	×	○	○	○	○	○	○	○
	2.7	○	○	×	○	○		×									

マウンドは現地換算で1t/個程度に相当する質量の砕石で整形し、木製のケーソン模型を載せた。ケーソン模型内には鉛を詰めて、実験中にケーソンが滑動しないようにした。消波ブロックと被覆ブロックの模型はモルタル製のものを使用した。

図-2に示したAからQは、消波ブロックの安定性を検証したエリアである。各エリアにおいて、表-1に○印と×印をつけた条件の消波ブロックに対して、消波ブロック安定実験を実施した。○印と×印の違いについては後述する。

消波ブロックとして適用したドロスは、現状では50t型が最大サイズであるが、50t型では安定性が不足することが予想されたため、ブロックメーカーに実現の可能性を確認した上で80t型のドロスについ

ても実験を行った。80t型は50t型と相似形で、ブロックの高さを6.08mとした。なお、大型のドロスではブロックの折損が懸念されるため、折損対策として現地ではブロック内に鉄筋を入れるものとし、通常比重を2.36とした。実験は高比重ブロックについても実施した。

被覆ブロックの安定性を確認する実験では、堤頭函港外側のエリアHと、港内側のエリアAからEにおいて、小段部のマウンド形状や被覆ブロックのサイズを変更する実験を実施した。

(2) 実験方法

防波堤模型設置後に、50年確率波の80%の波高、90%の波高、50年確率波と3段階の波作用を行った。

波作用波数は1000波ずつである。50年確率波の80%や90%の波高で消波ブロックや被覆ブロックが移動してもブロックの積み直しは行わず、80%波高から50年確率波までの移動数の累積値を、対象範囲内のブロックの総数で割って被害率を求めた。

消波ブロックや被覆ブロックは波作用中に目視観察を行うと共に、波作用後も移動の有無を確認した。波作用後に移動の確認がしやすいように、消波ブロックの表面に着色を行った。波浪測定には容量式波高計を使用し、波作用開始3分後から約500波のデータ収集を行った。

3. 実験結果

(1) 防波堤法線上の波高

防波堤を設置しない通過波の状態における防波堤法線上の有義波高は図-6のとおりである。図中には防波堤法線上の地盤高も示してあるが、地盤高が高い浅瀬部の波高が、地盤高が低い部分よりも大きくなっている。地盤高が低い200mと350m位置の有義波高の平均値はSEで12.1m, ESEで12.0mであるのに対し、浅瀬上ではSEで12.8m, ESEで12.5mであるので、波高の増大率は約5%である。前述のとおり造波機前面波高はSEで12.3m, ESEで12.1mであるので、地盤高が低い部分では造波機前面よりわずかに低い波高となっているのに対し、浅瀬上では造波機前面よりやや波高が大きくなっている。このように、浅瀬部分では急激な水深変化によって波高が増大するので、消波ブロックや被覆ブロックの安定性に対して厳しい条件となる可能性が伺える。

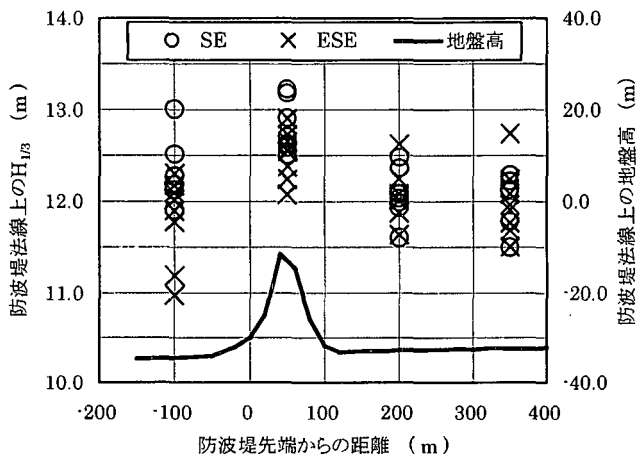


図-6 防波堤法線上の波高分布

(2) 多方向波と一方向波の比較

図-7は、防波堤を設置しない通過波の状態における防波堤法線上の有義波高を、多方向不規則波と一方向不規則波で比較したものである。図-6でも示したように防波堤先端から+50m位置の浅瀬部の波高が大きい傾向が現れている。多方向波と一方向波の

波高の分布は実線で示した1:1の線をはさんで分布しており、両者の波高はほぼ同等である。ただし、各地点の分布を個別に見ると、図中に楕円で示したようにやや横長の分布になっている。つまり、造波機前面波高は同じであっても、一方向波と比べて多方向波のほうが浅瀬周辺での波高の変動が大きく、その影響が浅瀬から離れた部分にも及んでいる。この結果は、高山ほか²⁾に示されている、多方向波の方向分散性のために、一方向波よりも多方向波のほうが孤立した浅瀬周辺における波高変化の領域が広がる効果によるものと考えられる。

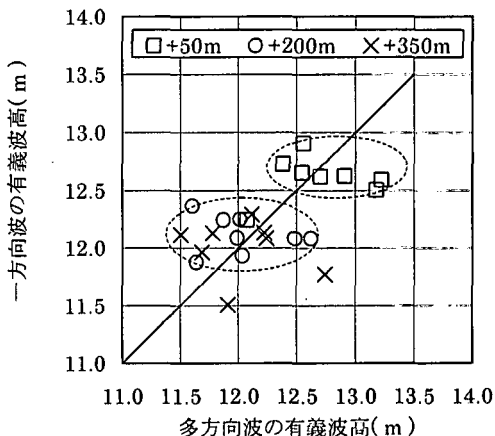


図-7 多方向波と一方向波の $H_{1/3}$ の比較

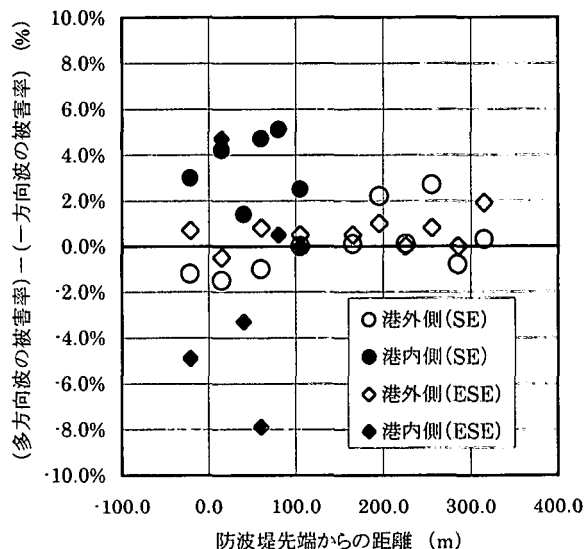


図-8 多方向波と一方向波の消波ブロック被害率の比較

防波堤を設置した状態での消波ブロックの被害率を、多方向波と一方向波で比較すると図-8のとおりである。縦軸は(多方向波の被害率) - (一方向波の被害率)としてあるので、正の値は多方向波のほうが被害率の大きい条件であることを示す。図-8を見ると、全体の傾向としては正の値が多い、つまり多方向波のほうが被害率の大きい結果である。ただし、◆印で示した堤頭部港内側にESE波向が作用する場合には、一方向波の被害率が大きい結果となっ

ている。これは、前掲図-2を見ると明らかなように、ESEのほうが防波堤法線に対する波の入射角が浅い（より斜めに入射する）ため、防波堤背後における波や流れが厳しくなる。したがって、単一波向で定常的に防波堤背後に影響を与える一方向波のほうが、ESEの場合に港内側で消波ブロックの被害率が大きくなったものである。逆に、SEの場合には防波堤法線に対して直角に近い角度で入射するので、ESEより防波堤背後に波や流れの影響が及び難い。そこで、防波堤法線に対して浅い角度で入射する波向が含まれる多方向波のほうが、単一波向の一方向波よりも被害率が大きくなっている。

以上のように、多方向波と一方向波では消波ブロックの安定性に違いがあることが明らかとなった。どちらの被害率が大きくなるかは場所によって異なるが、港外側においては多方向波のほうが被害率が大きくなる傾向にある。榊山ほか³⁾は多方向不規則波と一方向不規則波の越波特性と耐波特性を比較検討している。本報告とは検討目的が異なるので、堤幹部における被覆材の安定性の比較について直接的な記述は見られないが、直角入射の場合に一方向波より多方向波のほうが消波工の変形が大きいこと、一方向波では直角入射より30°の斜め入射のほうが消波工の変形が大きいことが図面から読み取れる。榊山ほか³⁾の報告において、直角入射の場合に一方向波よりも多方向波のほうが被覆材が不安定であったのは、多方向波は方向分散によって斜め入射の波が含まれていたためと考えられる。富田ほか⁴⁾は一方向波で入射角の違いによる消波ブロックの安定性を比較しており、入射角38°より65°のほうが、23°より50°のほうが被害率が大きいことが示されている。これらの報告と我々の実験結果から、直角入射よりも斜め入射のほうが、また一方向波よりは多方向波のほうが、堤幹部の消波ブロック質量の検討手法として適切であり、直角入射の二次元実験で検討すると消波ブロックの安定性を過大評価してしまう可能性があると考えられる。ただし、三次元実験は水槽規模や発生可能波高などの制約から模型縮尺が小さくなることが多いので、縮尺効果と言う観点からは二次元実験のほうが有利であろう。

(3) 消波ブロックの安定限界条件

前掲表-1に示した条件で消波ブロックの安定実験を実施した。表中の○印は被害率の目標値を満足できた条件、×印は満足できなかった条件である。なお、被害率の目標値は、港外側のエリアHからQ（図-2参照）では3%、防波堤先端側と港内側のエリアAからGでは5%とした。港外側の被害率の目標値を港内側より厳しくしたのは、港外側で消波ブロックが移動すると、防波堤本体（ケーソン）に及ぼす影響が大きいためである。

消波ブロックの安定実験結果から安定限界条件を

抽出し、式(1)に示す安定数 N_s 値を用いたハドソン式⁵⁾により、安定限界の N_s 値を求めた結果が図-9である。 M は適用したブロックの質量(t)、 ρ_r は消波ブロックの密度(t/m^3)、 S_r は消波ブロックの水に対する比重である。 H は波高(m)であり、模型実験で測定した通過波としての有義波高を適用した。

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (1)$$

図-9を見ると、防波堤先端からの距離が250m以上の地盤高が低く、かつ堤頭部の影響を受けない部分における N_s 値は3.33である。この結果は、実験に適用した消波ブロックのカタログに示されている非碎波の K_D 値25と斜面勾配1:1.5を適用して、式(2)によって求めた N_s 値3.3と一致している。つまり、堤幹部においては一般的な安定数を適用することができる。これに対し、浅瀬上の港外側においては実験結果による N_s 値が2.6未満となっており、カタログに示されている碎波の場合の N_s 値20を適用して式(2)で求めた N_s 値3.1より明らかに厳しい条件であることがわかる。

$$N_s^3 = K_D \cot \alpha \quad (2)$$

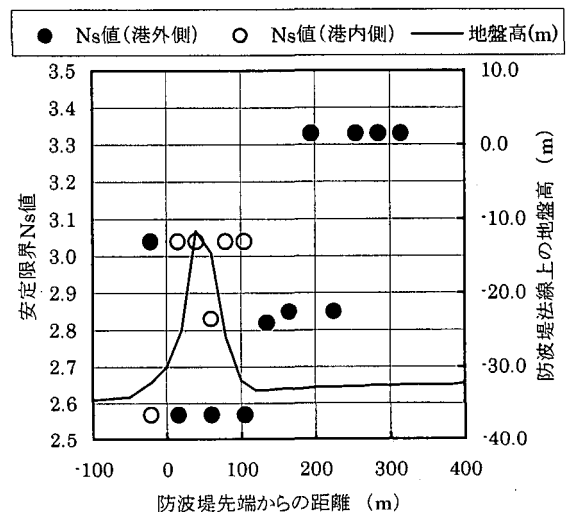


図-9 実験結果による安定限界 N_s 値

実験の結果、防波堤中央付近で堤頭部の影響を受けず、浅瀬からも離れている場所においては、50t型の通常比重消波ブロックで被害率の目標値を満足できることが明らかとなった。しかし、堤頭部であり、浅瀬の影響も受ける部分においては、消波ブロックのサイズを80t型とし、さらに比重が2.6の高比重ブロックにしないと安定性を確保できなかった。80t型で比重2.6の消波ブロックと同等の安定性が得られると考えられる通常比重ブロックの質量を、前掲の式(1)で検討すると135tとなる。50t型通常比重

の消波ブロックの実質量は51.42tであるので、堤頭部における所要質量が標準部の2.6倍である。堤頭部における消波ブロックの所要質量が、技術上の基準⁵⁾に示されている1.5倍を大きく上回ったのは、実験対象とした堤頭部は浅瀬でもあるので、通常の堤頭部よりも複雑な波浪場となったことによると考えられる。

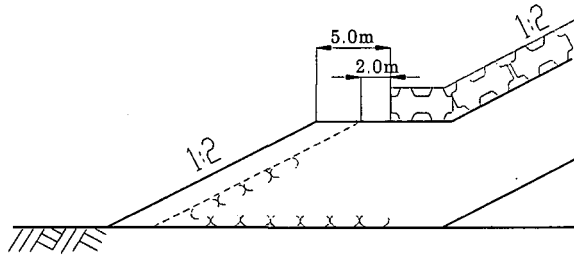


図-10 被覆ブロック先端の小段部におけるマウンド幅

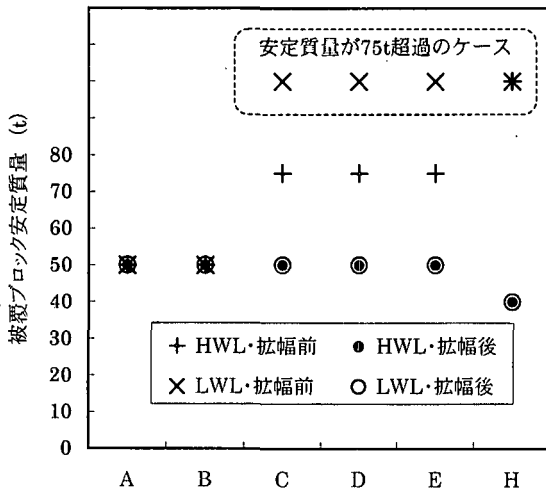


図-11 小段拡幅前後の被覆ブロック被害率の比較

(4) 被覆ブロックの先端処理

細島港の沖防波堤は、波浪条件が極めて厳しいために、被覆ブロックの安定性を得ることが困難であった。特に、堤頭部の港外側においては、図-10に示す被覆ブロックの法先位置（小段部）において、被覆ブロックのサイズを75t型としても被覆ブロックが飛ばされた。三次元実験であるので水面下の被覆ブロックの挙動を目視で詳細に確認することはできなかったが、被覆ブロックは波が打ち寄せの際に被覆ブロック先端の直立面から渦流れが発生して基礎石が洗掘され、被覆ブロックがめくれ上がるように見受けられた。そこで、被覆ブロックの直立面に流れが作用しにくくなるように、小段部のマウンド幅を当初の2.0mから5.0mに拡幅して実験を行うと、拡幅前には75t型でも不安定であったところが、40t型で安定する結果となった。防波堤の背後側においても75t型の被覆ブロックで不安定な場合があったので、港外側と同様にマウンド小段の水平部を拡幅する実験を実施した。結果は図-11のとおりで、防

波堤背後のエリアAからE(図-2参照)においても、マウンドの拡幅により、拡幅前よりも小さい質量の被覆ブロックで安定条件を得ることができた。ただし、50年確率波作用時には拡幅したマウンドの肩が若干崩れることを許容する必要がある。

4. まとめ

この実験によって得られた結果をまとめると、下記のとおりである。

- ①多方向不規則波のほうが一方向不規則波よりも浅瀬周辺での波高の変動が大きい。これは多方向波の方向分散性によると考えられる。
- ②防波堤前面（港外側）においては、一方向不規則波を作用させた場合よりも多方向不規則波のほうが消波ブロックの被害率が大きかった。この結果から、模型縮尺が同じであれば、直角入射で実施する二次元実験よりも、多方向不規則波を適用した三次元実験で消波ブロックの安定条件を検討するほうが、より安全な設計に結びつく可能性が考えられる。
- ③水深が急激に変わる浅瀬上に設置される堤頭部においては、堤幹部の2.6倍相当の大きな消波ブロックの適用が必要となった。
- ④マウンド小段の水平部の幅をやや広くすることが、被覆ブロック先端部の安定性向上に有効であることがわかった。ただし、拡幅したマウンドの肩が崩れることは許容する必要がある。

ここに示したように、浅瀬を含む大波浪海域に建設する防波堤の異形ブロックの安定性について検討を行った。今後も、施工途中の消波ブロックでの被覆が不完全な状態での異形ブロックの安定性の確認や、より経済的な条件の検討を続ける予定である。

参考文献

- 1)高橋重雄：ブロックはなぜ動く、－被覆石や消波ブロックに働く波力と安定性－、波となぎさ、第135号、1997 AUTUMN, pp.45-49、港湾海岸防災協議会
- 2)高山知司・池田直太・小杉宣史：多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験、港湾技術研究所報告、第30巻、第1号、1991年、pp.69-136、運輸省港湾技術研究所
- 3)榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩：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、1994年、pp.656-660.
- 4)富田孝史・河合尚男・海原敏明・平石哲也：隅角部を有する消波ブロック被覆式護岸の多方向不規則波による越波特性とブロックの安定性、海岸工学論文集、第47巻、2000年、pp.886-890.
- 5)日本港湾協会：港湾構造物の技術上の基準・同解説、平成11年4月