

安定係数による沖合防波堤消波ブロック被覆層の性能照査

平石 哲也*・服部 昌樹**・稲垣 茂樹***・鈴木 智浩***

混成堤防波堤の消波ブロックのタイプや必要質量は、従来、設計波浪条件に対応して、2次元の水理実験等から提案されているハドソン公式やプレブナー・ドネリー式から一意的に決定されてきた。ただしブロックの安定性が低下する防波堤の堤頭部においては、堤幹部よりも質量を増したブロックが使用される場合が多い。一方、最近の国際基準の導入に伴い、防波堤の消波ブロックの設計においても性能設計的な考えを導入し、安全性の向上と建設コストの削減を図る必要がある。本研究では、防波堤の目的に応じたブロック被害率を設定し、対応する安定係数を導入し、安定係数が目標値を満たすように各工区毎にブロック形式と質量を決定する設計法が示されている。

1. はじめに

港湾規模の拡大に伴い各地で水深 30 m 以上の大水深域に混成堤方式で防波堤が建設されている。大水深に建設される防波堤の場合には作用波高が大きく、波消しブロック（消波ブロック）で被覆して波力を低減し、安定性を確保する必要がある。消波ブロックの設置にあたっては、従来から二次元断面実験で設定された堤幹部での波に対する安定性をもとにして、その質量と層厚が決定されている。ただし、堤頭部や不連続な断面を有する部分には従来からの経験に基づいて、質量を増したブロックが使用されてきた。質量増加率は基準等で定められているわけではなく、経験的に 3 割程度増加させている場合が多い。

一方、技術基準の国際標準化に備えて、海洋・沿岸構造物の設計にも性能設計が導入されつつある。たとえば、高橋ら（2002）は、護岸の許容越波流量の設定において背後地の重要度に応じて高潮レベルを決定し、各レベルに対応した許容越波流量を提案している。今後は消波ブロックの質量決定にも性能設計的な考え方を導入し、安全性能の向上と建設コストの低減化を図る必要がある。すなわち、各工区毎に防波堤断面、供用期間、背後水域の重要性等を考慮した目標ブロック被害率を設定し、設定した被害率を満足する最適なブロック形状と質量を決定する手法である。この手法では、消波ブロックの性能を”許容値まで被害を受けても、防波堤の滑動を防止できるように作用波力を低減できるもの”と規定できる。本研究では、現在、設計が進められている港湾のうねり・長周期波対策防波堤をモデルとして、多方向不規則波を用いた平面模型実験を実施して、消波ブロックの安定性を把握し、性能設計的な考え方で最適ブロック質量を提案する。

まず、従来法で設定された消波ブロック被覆層の被害

率を、平面実験で工区毎に推定し、工区毎の安全性を評価する。そして、性能設計に相当する新しい考え方を導入した場合の目標被害率から決まる消波ブロック被覆層の最適安定係数を提案し、それを満足するような消波ブロック被覆層の最適配置案について、その安全性を模型実験で検証するものである。

2. モデル防波堤の構造と実験方法

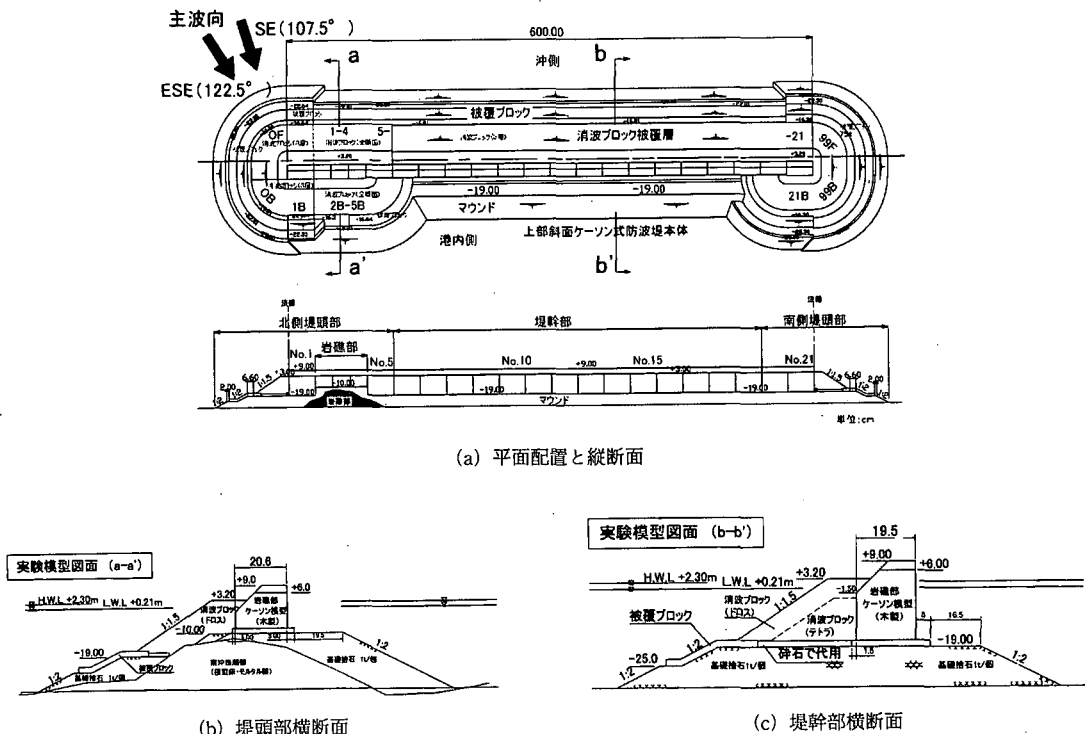
図-1(a) に対象とした大水深対応の防波堤配置状況とケーソン毎に設定した工区番号を示す。この防波堤は、外洋のうねりと長周期波を遮蔽し、港内の静穏度と荷役の安全性を向上させるために計画されており、堤幹部の設置水深は約 32 m である。防波堤全体はハの字型の配置で、南堤および北堤の総延長は、それぞれ 600 および 700 m であり、本研究では南堤の実験結果を活用した。マウンドからの長周期波の透過による影響を小さくするために、できるだけ沖合の自然岩礁や浅瀬を利用して設置場所を決定しており、南堤では、No. 2~4 のケーソン函は水深 12 m の岩礁部上に設置されている。図-1(b) および (c) は、岩礁上にケーソンを設置する防波堤の堤頭部 (a-a'断面) および水深が深い標準的な堤幹部 (b-b'断面) の断面構造を模式的に示す。ケーソン函は水平波力が小さくケーソン幅の縮小が可能な上部斜面堤とし、斜面下端が静水面以下になるように設計された斜面没水タイプである。防波堤は外洋からの風浪を遮蔽する位置にあり、作用波高は大きく、50 年確率の設計波高は 13.5 m、周期は 14.3 s である。そのため、消波ブロック被覆層の所用質量が大きく、被覆層の建設コストが多いため、安全性に配慮しながら、できるだけ建設コストを削減する必要がある。

堤頭部は、渦の発生等による洗掘を防止するために、円形の被覆層配置が採用されているが、斜め波に対してはケーソン函列がブロック層の控え壁としての機能を有しないので、堤幹部に比較してブロックの安定性は低い。また、捨て石堤の場合は堤頭部の被覆層は、多方向不規則波の作用下では、単一方向不規則波に比較して主波向

* 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部

** (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部

*** 正会員 工修 (株) エコー 沿岸デザイン本部



図一 対象とした沖合防波堤の平面配置と断面

きによっては安定性がより低下し、設計においても詳細な検討が必須である（松見ら，1996）。

表一は、波浪推算から導かれた設計波の諸元である。設計の対象波は50年の再現期間を有し、波向はSEおよびESEの2方向である。多方向不規則波を設計波として用い、周波数スペクトルは、修正 Bretschneider・光易型（合田，1987）、方向関数は、方向集中度 $S_{max}=10$ で表される光易型とした。なお、50 m 地点波高は、沖波から浅水変形を考慮して計算できる。波の作用方向は、防波堤の法線方向から反時計回りに定義すると、SEおよびESEで、それぞれ107.5および122.5°に相当する。

平面模型実験では、幅50 cmの離散型ピストンタイプ造波機60台からなる単一造波面を有する多方向不規則波造波装置を用いた。水槽の有効長を考慮して模型縮尺は1/100とし、有効造波領域（平石ら，1994）に防波堤模型の全体が含まれるように水槽内に配置した。防波堤周辺の海底地形は、水槽内全域に再現し、水深50 mまで海

底床を再現し、50 m以深は実験水槽では一様とし、水槽床に対応させた。したがって、造波機からの目標造波波高は、表一で示した50 m地点波高になる。消波ブロック被覆層は、波高が増大するにつれてロッキングを生じ、徐々に空隙が小さくなり安定性が増していく。そこで、設計波より小さい波浪が繰り返し作用して、ある程度安定な被覆層が形成された後に、設計波が作用することを考慮して、80%波高および90%波高を繰り返し作用させた後に、100%波高を造波して、消波ブロック被覆層の安定性を実験で調べた。

実験水槽内の波高分布は、あらかじめ防波堤および消波ブロック被覆層模型を設置しない状態で、海底床上の波高を防波堤設置箇所を中心に20点で測定して検討した。その結果、北側の堤頭部では岩礁浅瀬における波の屈折効果により、有義波高が堤幹部より最大で20%増大していることがわかった。また、堤幹部においても、数%の波高のばらつきが観測でき、場所的な地形の影響により同一の防波堤においても作用波高は異なることがわかった。ブロック被覆層の安定性判断や所用質量算定には、防波堤面より波高の5倍沖側での波高 H_i が使用される（合田，1977）。そこで、あらかじめ防波堤設置位置より沖側に60 m離れた測線を設定し、その測線上での波高を H_i として、対応する防波堤位置でのブロック被覆層の安定検討に用いた。

表一 防波堤に作用する設計波

潮位	主波向	有義波高	有義波周期	50 m 地点波高	
H.W.L	SE	13.5 m	14.5 s	100%	12.3 m
				90%	11.1 m
				80%	9.8 m
H.W.L	ESE	12.9 m	14.3 s	100%	12.1 m
				90%	10.9 m
				80%	9.7 m

実験では、まず堤幹部に作用する波高からハドソン公式を用いて決定されるブロック形式および質量を基準として設定した初期配置について、防波堤と消波ブロック被覆層模型を設置した後に、各波高レベルでそれぞれ1000波を作用させた。そして、設計波高を作用させてもケーソン本体は滑動および転倒しないことを確認した。ブロックの安定性は、図-2(a)に示すケーソン函毎に設定した各区間毎に被災ブロックの数を目視で観測し、各区間の消波ブロック被害率 $D(\%)$ を調べた。ブロックは、揺れ動くが、ほぼ元の位置にあるものは、ロッキングとして被害とみなさない。被害として数える形態は“移動”と“回転”である。移動は、波作用によって、元の位置からブロックの大きさの1/2以上移動したり、隣接ブロックの高さ以上に跳ね上がるもので、回転は、波作用によって45°以上回転するものである。なお、同一波高および波向で、2つの波群を作用させ、それぞれ被害率を測定した。すなわち、同一波向のケースで、3つの波高レベルについて、被害率を解析した。波高レベルを変化させるときは、積み替えを行わずに、低い波高レベルで、すでに移動したブロックも含めて、移動および回転したすべてのブロック数を用いて被害率を求めた。すなわち被害率 D は次式で求められる。

$$D = n/N \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 n は対象区間の累計の被害個数、 N は対象区間の総ブロック数である。

消波ブロック被覆層は、現地での建設コスト削減を図るため、水深が比較的深い場合には、表層の3層のみを設計波高から決まるブロックを用い、下層の中詰め部には、やや小型の異種ブロックが挿入されている区間がある。この場合は、異種ブロックの個数を次式で表層ブロックの個数に換算して、被害率を算出した。

$$N_2 = v_1 N_1 (1 - \lambda_1) / [v_2 (1 - \lambda_2)] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 v および λ は、それぞれブロック1個あたりの体積(m^3)およびブロック被覆層の空隙率を示し、添え字1および2は、中詰めおよび表層のブロックであることを示す。

図-2(b) 上段に各区間での初期のブロック配置案を示す。消波ブロック被覆層の目標被害率は、性能設計においては防波堤の重要度や構造、さらに背後水域の利用目的や点検・修理工事の難易度等を考慮して総合的に判断するものである。ただし、ここでは防波堤が満たすべき機能について詳細な検討をしていないので、従来の設計を考慮して、防波堤の堤体前面では、消波ブロックの移動が直接堤体本体の安定性に影響を与えるので、被災が起こる危険性を小さくするために、 $D=3\%$ を目標被害率とした。図-2(a)の薄着色部で示した堤頭部の先端と防波堤背後側では、消波ブロックの移動が防波堤本体の安定性には直接影響しないが、被害率が大きくなるとマウンドが洗掘されてしまうので、やや緩やかな目標値として $D=5\%$ を与えた。初期配置案では、作用波高が大きい外洋に面した防波堤で使用されているドロスタイプの消波ブロックを使用した。すでにドロスタイプの消波ブロックは、沖縄県那覇港浦添地区で使用実績があり、浦添地区よりも設計波高が大きい当該防波堤では初期提案として、50トンタイプの通常比重ドロス(比重2.36)を用いた。そして、堤頭部は堤幹部よりブロック質量を増して安定性を確保するために、80トンタイプ(80t)のドロスを用いた。

3. 安定係数の算出と性能設計による提案

性能設計では、消波ブロックの果たすべき機能として、供用年の間に所定の安定性を有し、防波堤堤体本体の滑

OF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	99F
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21	
OB	1B	2B	3B	4B	5B															20B	21B	99B

目録被害率 3% ケーソン番号

目録被害率 5%

(a) 消波ブロック被覆層の試験区間

初期値																										
OF					5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19							
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21					
OB	1B	2B	3B	4B	5B																					
											重量 比重															
											50t 2.36															
													重量 比重													
													80t 2.36													
											50t 2.6															
													80t 2.6													
提案値																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10												99F				
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	No.17	No.18	No.19	No.20	No.21					
OB	1B																					20B	21B	99B		

(b) 消波ブロックの配置(上段:初期,下段:新提案)

図-2 対象区間とブロック配置案

動や回転を許容値以下にする、ことが考えられる。したがって、防波堤の構造や供用年数、背後水域の重要度に応じて、区間毎に目標被害率を決定し、目標被害率を満たすようなブロックの構造と重量を設定する必要がある。ここでは目標被害率として図-2(a)に定めた数値を用いた。

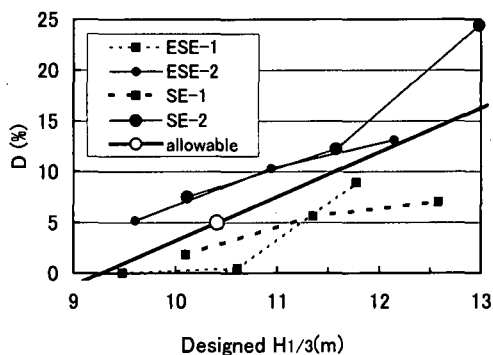
作用波高やブロック重量に係わらず、統一してブロックの安定性を示す指標として、ここでは次に示す安定係数を求めた。まず、作用波高を80%から設計波まで段階的に変化させた各波高レベルで区間毎のブロック被害率を実験で求める。なお、作用波高は、堤体より5波高分沖合で記録された有義波高である。実験結果から、各区間毎に作用波高と被害率の相関を図示し、各工区毎の目標被害率に相当する許容最大有義波高 H_m を決定する。図-3に工区毎の波高レベルと被害率 D の相関を示す。図-3(a)および(b)は、それぞれ堤頭部の0Bおよび堤幹部の工区12での相関を示す。実験は、2つの波向について2波群実施しているのので、4本の相関線が引ける。それらの値から最小二乗法で求めた相関式が図中の太い実線である。図-3(a)では、目標被害率が5%であり、白丸の位置に対応する水平軸上の値から最大許容有義波高が算出できる。図-3(b)でも同様に目標被害率3%に相当する波高レベルが決定できる。安定係数は次式で計算する。

$$N_s = (\rho_r / M(S_r - 1))^{1/3} H_m \dots\dots\dots (3)$$

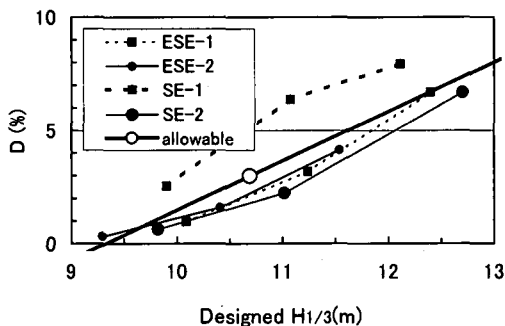
ここで、 M :ブロック質量、 ρ_r :ブロック密度、 S_r :ブロックと海水の密度比である。安定係数が他工区に比べて低い部分は、目標とする性能が満足できないので、ブロック形状と質量を再設定する。

図-4は、前述の手法で決定した各工区毎の安定係数とブロック被害率を示したものである。図-4(a)に初期提案配置による算出結果を示す。0Bや99B工区では被害率は7%を越えており、目標被害率5%を上回っている。堤幹部でも工区1～5と工区11～12等で被害率は目標値3%を越え、消波ブロック被覆層の安定性は所定の状況を満たしていない。安定係数は、全域で2～4であり、特に $N_s < 3$ の工区で被害率の突出が見られる。したがって、目標被害率を満足し、他工区に比べて著しく安定性が低下しないようにするには、全工区での安定係数を3以上にしておく必要がある。

そこで、図-2の“新提案”で示すように局所的に重量を増した消波ブロックを用いて消波ブロック被覆層の安定性を向上させることにした。ブロックタイプとしては80tより大きいブロックは施工が困難であり、80t型で安定性が不足する堤頭部には比重2.6の高比重ブロックを活用した。図-4(b)に新提案配置での被害率と安定係数を示す。図-4(a)に比べて各工区の被害率は著しく改



(a) 堤頭部 (0B)



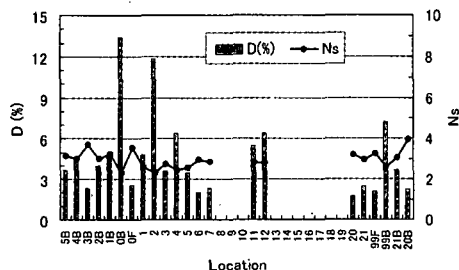
(b) 堤幹部 (12工区)

図-3 波高レベルと被害率の相関

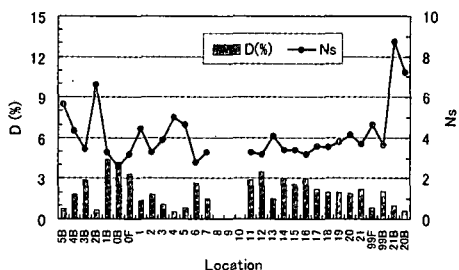
善されており、堤頭部の0F～1Bを除くとほとんどの工区で被害率は3%より小さく目標値を満たしている。安定係数は、0Bを除くと3以上に分布し、目標とした $N_s > 3$ が満足できている。

このように、安定係数の目標値を定めて所要ブロックのタイプと質量を決定すると、最も経済的に所定の性能を満足する最適配置が提案できる。図-4(b)の場合には、南側堤頭部(99F-20B)で安定係数が他工区より際だって大きくなっており、過大設計となっている可能性がある。安定係数を下げることができるので、さらなるコスト低下が期待できる。

最後に、ブロックの質量を変化させると安定係数がどの程度向上するのかを調べる目安として、異なったブロック質量で実験をした工区の被害状況から、安定係数の変化率を調べた。図-5は、ブロック質量と安定係数の相関を示し、80t通常比重ブロックのケースを1として表現している。50tおよび80tの関係は、工区11および12の平均安定係数から、80tの通常比重と高比重の関係は、工区1～4の平均安定係数の変化から導いた。図に示すように、ブロックのサイズが大きくなると、50tと80tでは2割程度安定性が向上する。ブロックの比重を



(a) 初期配置



(b) 新提案配置

図-4 工区毎の安定係数とブロック被害率

2.36 から 2.6 に増加すると、安定性は 6 割程度上昇する。実験データ数が限られているので、普遍的な結論は導くことが困難であるものの、図から消波ブロック被覆層の安定性を向上させる手法としては高比重ブロックの活用が効率的であることがわかる。

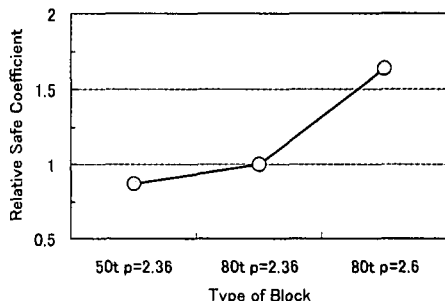


図-5 ブロック質量による安定性の変化

4. あとがき

本研究は、性能設計的な考え方を消波ブロック被覆層の設計に導入し、安定係数を用いて工区毎での消波ブロック安定性評価手法を提案した。そして、多方向不規則中波模型実験によって、高比重ブロックの活用が被覆層の安定性確保に効率的であることを示した。

参考文献

- 合田良実 (1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 86.
- 合田良実 (1987): 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 131-135.
- 高橋重雄・富田孝史・河合弘泰 (2002): 沿岸防災施設の基本的な考え方, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 931-935.
- 平石哲也・田端竹千穂 (1994): 上部斜面堤からの越波が離島港湾の静穏度に与える影響, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 701-705.
- 松見吉晴・大野賢一・家村健吾・木村 晃 (1996): 多方向不規則波浪場における堤頭部の被災特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 811-815.