

# 消波ブロック被覆堤における消波工の変形過程に関する実験的検討

## An Experimental Study on Deformation of Wave-Dissipating Concrete Blocks Covering Caisson Breakwaters

久保田真一<sup>1</sup>・山本方人<sup>2</sup>・松本 朗<sup>1</sup>・半沢 稔<sup>3</sup>

Shin-ichi KUBOTA, Masato YAMAMOTO, Akira MATSUMOTO and Minoru HANZAWA

The purpose of this study is to investigate the deformation characteristics of wave-dissipating concrete blocks covering caisson breakwaters. Examples of actual deformation were examined to obtain knowledge on the features. The study suggested that the relative crown height of the breakwater affected the deformation of the wave-dissipating concrete blocks. A series of hydraulic stability tests was conducted to investigate the deformation characteristics. The test results show that deformation of wave-dissipating concrete blocks is different between low and high crown conditions.

### 1. はじめに

構造物の設計法においては、性能設計体系への移行が進められており、海岸及び港湾構造物においても性能設計に関連した種々の研究が行われている。こうした中、防波堤の主要な形式である混成堤については、ケーソンの滑動量を考慮した設計法（例えば下迫ら,1998）が確立されてきているものの、消波ブロック被覆堤に関しては未だ検討の余地が残されている。性能設計では、構造物の被害とそれに伴う機能劣化を適切に予測することが必要であり、消波ブロック被覆堤においては消波工の変形過程の予測・評価が必須である。既往の研究では、消波ブロックの被災を考慮する場合、その被災形態は一律であるとして、被災を全て天端の沈下で置き換える手法（例えば山縣ら,2002）がとられている。しかしながら、消波工の被災形態は、波浪条件や堤体の構造条件等で異なるものと考えられ、消波工の変形過程のより適切なモデル化が必要である。

本研究では、消波ブロック被覆堤における消波工の被災形態を把握するとともに、その変形過程を定量的に把握することを目的として、被災事例調査および系統的な水理模型実験を実施した。

### 2. 被災事例の収集および解析

#### (1) 被災事例の収集

消波ブロックの被災形態を把握するために、消波ブロック被覆堤の被災事例を収集、整理した。主要港湾における防波堤の被災に関する全体的な調査は、被災防波堤集覧（北島ら, 1968; 武山ら, 1975; 服部ら, 1984; 宮井

ら, 1993）としてとりまとめられており、掲載されている全被災例（254例）の中から該当事例を収集して、被災前後の断面図を比較することで、消波ブロックの被災形態を把握することとした。また、波浪条件および構造条件と消波ブロックの被災形態を関連付けることで、消波工断面の変形に影響を及ぼすと考えられる要因について考察した。

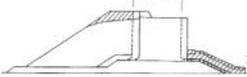
解析対象として収集したのは、被災前後の断面図が示されているもので、潮位を含めた被災時の波浪条件が明確な事例である。収集した事例を表-1に示す。同一の時化による同一港湾での被災であっても、構造条件が異なる断面や被災形態が異なる断面については各々の断面を解析対象とすることとした。その結果、計15断面を収集した。

表-1 収集事例

No.	地区名称	被災年月日	集覧発刊年
1	中の作港	S46.9.11-13	1975
2	留萌港(A-A 断面)	S53.11.19-20	1984
3	留萌港(B-B 断面)	S53.11.19-20	1984
4	留萌港(C-C 断面)	S53.11.19-20	1984
5	鴛泊港	S57.10.24-25	1984
6	むつ小川原港	S57.3.21-24	1984
7	八戸港	S55.12.23-24	1984
8	久慈港	S57.3.21-22	1984
9	鼠ヶ関港	S55.10.26-28	1984
10	小名浜港	S56.8.22-23	1984
11	鹿島港(A-A 断面)	S55.12.24-25	1984
12	鹿島港(B-B 断面)	S55.12.24-25	1984
13	上屋永田港	S57.8.26	1984
14	鴛泊港	S61.3.16-18	1993
15	渡嘉敷港	S62.8.29-30	1993

1 正会員 工修 (株)不動テトラ 総合技術研究所  
2 正会員 工博 (株)不動テトラ 総合技術研究所長  
3 正会員 工修 (株)不動テトラ ブロック環境事業本部

表-2 消波工の被災形態

パターン	消波工の被災状況	該当事例 No.
I	主に天端付近が被災  No.14 鴛泊港	7
		8
		12
		14
		(計4事例)
II	主に法面が被災  No.6 むつ小川原港	1
		3
		4
		5
		6
		9
		11
		(計7事例)
III	天端および法面が被災  No.13 上屋永田港	2
		10
		13
		15
		(計4事例)

(2) 消波工の被災形態

収集した事例の被災断面図より、消波工の被災形態を分類したところ、表-2に示す3つのパターンに大別された。パターンIは主に消波工天端付近で被災が生じている場合(4事例)、パターンIIは主に消波工法面で被災が生じている場合(7事例)、パターンIIIは消波工天端および法面の両方で被害が生じている場合(4事例)である。

(3) 波浪および堤体の構造条件と被災形態の関係

鹿島ら(1986)は、直立堤・混成堤被覆材の被災事例を被災時相対波高(被災時有意波高の消波ブロック安定限界波高に対する比)で整理しており、被災事例は被災時相対波高が1.0付近に集中していることを指摘している。図-1に被災時相対波高をパターン毎に示す。図中には、各パターンの平均値も実線で示した。鹿島らの指摘と同様に、被災時相対波高は、1.0付近に集中しているのが分かる。各パターンの平均値を比較すると、パターンIとパターンIIIは同程度の値であり、パターンIIの値が相対的に小さい。このことから、被災時相対波高が大きくなるにつれ、被災形態がパターンIIからパターンIあるいはパターンIIIへと変化することが想定される。図-2に被災時相対天端高(被災時水位から消波工天端までの距離を被災時波高で除した値)をパターン毎に示す。被災時相対天端高は、約0.2から0.9の範囲に分布している。各パターンの平均値を比較すると、パターンIIが大きくパターンIおよびパターンIIIの値が小さい。被災時相対天端高が大きい場合はパターンIIの被災形態となり、被災時相対天端高が小さくなるにつれパターンIあるいはパターンIIIの被災形態となる。すなわち、被災時相対天端高が大きいと法面が、小さいと天端が被災する傾向を

示唆している。そこで、以降の水理模型実験においては、設計相対天端高 $h_c/H_D$ ( $h_c$ :実験時水位から消波工天端までの距離、 $H_D$ :消波ブロックの安定限界波高)が異なる断面を対象とすることとした。

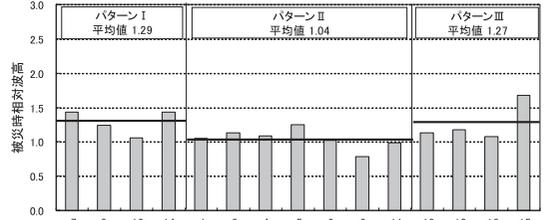


図-1 被災時相対波高

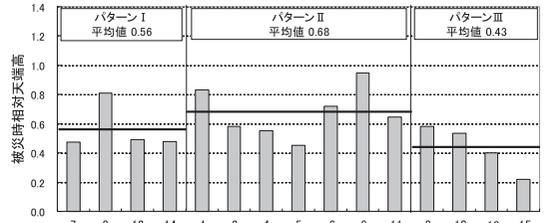


図-2 被災時相対天端高

3. 水理模型実験

(1) 実験条件

二次元造波水路(長さ50m、幅1.0m、高さ1.5m)内の勾配1/30のモルタル床上に、消波ブロック被覆堤模型を設置して行った。設計相対天端高 $h_c/H_D$ が0.39, 0.60, 1.03の3種類の堤体(堤体A, 堤体B, 堤体C)を実験対象とした。実験断面図の一例を図-3に、実験条件を表-3に示す。消波ブロックはテトラポッドを使用した。

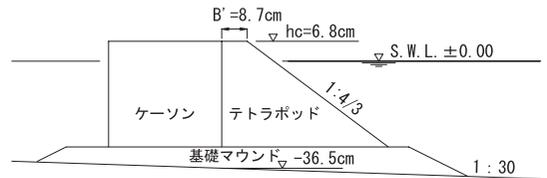


図-3 実験断面図 ( $h_c/H_D=0.60$ )

(2) 実験方法

入射波( $H_{1/3}$ )として $H_D$ を下回る波から大きく越える波まで作用させた( $H_{1/3}/H_D \approx 0.9, 1.0, 1.2, 1.5, 1.9$ )。同一波高ランクの波の作用は約1000波とし、消波工を積み替えることなく、順次波高を上げていくこととした。途中250波毎に、断面形状の計測を行った。測定箇所の一例を図-4に示す。岸沖方向に12測線とし、測線の間隔を $2D_n$ (代表径の2倍)とした。測点は、消波工の大規模な変形もとらえるために基礎マウンドの法先にいたるま

表-3 実験条件

	堤体 A	堤体 B	堤体 C
設計相対天端高 $h_c/H_D$	0.39	0.60	1.03
水深 $h$	36.5cm		
天端高 $h_c$	4.4cm	6.8cm	11.6cm
天端幅 $B'$	8.7cm		
使用ブロック	テトラポッド		
質量 $M$	124.3g		
密度 $\rho_r$	2.352g/cm <sup>3</sup>		
代表径 $D_n (= (M/\rho_r)^{1/3})$	3.75cm		
安定限界波高 $H_D$	11.3cm		
不規則波	修正 Bretschneider - 光易型スペクトル		
周期 $T_{1/3}$	1.87s		
波高 $H_{1/3}$	9.8cm ~ 22.0cm		

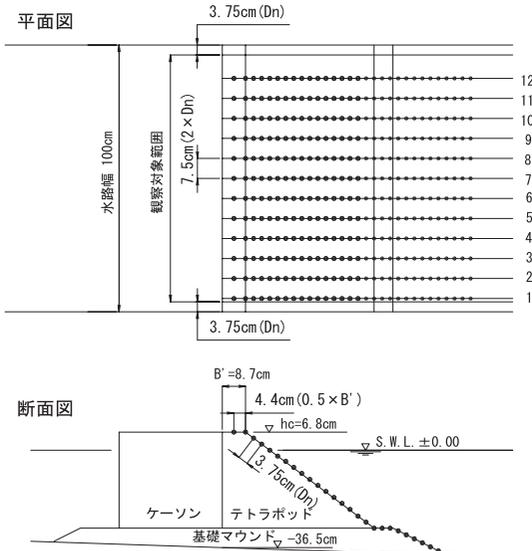


図-4 消波工断面測定位置 (堤体B,  $h_c/H_D=0.60$ )

での広範囲に設けた。測点の間隔は、消波工天端で  $0.5B'$  とし、それ以外は  $D_n$  とした。測定は、タッチセンサー式砂面計を用いて行った。

(3) 実験結果

$H_{1/3}/H_D=1.0$  程度までは、被害が局部的に生じるが、被害ブロック個数は少なく顕著な断面変形は生じなかった。 $H_{1/3}/H_D=1.22$  より断面変化が明瞭となり、波高ランクが上がるにつれ、横断方向に平均的な断面変形が生じた。 $H_{1/3}/H_D=1.94$  に至ると、著しい断面の変形が観察された。図-5から図-7に各波高ランクの波を1000波作用させた後の消波工の断面形状を堤体毎に示す。ここでは、12側線の平均値を示した。波高ランクの増大に伴い、消波工

の変形が進行する状況をよく捉えていることが分かる。

以降において、各波高ランクにおける入射波高  $H_{1/3}$  を用いて算出される  $h_c/H_{1/3}$  を相対天端高と称する。表-4に各波高ランクに対応した相対天端高を示す。断面変形が明瞭となる  $H_{1/3}/H_D=1.22$  では、各堤体の相対天端高が、図-2に示した被災時相対天端高の分布範囲 (0.2~0.9) とほぼ一致している。そこで、被災事例との関連を検討するために、 $H_{1/3}/H_D=1.2$  における堤体A ( $h_c/H_{1/3}=0.32$ ) と堤体C ( $h_c/H_{1/3}=0.84$ ) の断面形状に着目することとした。

各々の堤体の断面形状および初期断面からの鉛直方向の変位を図-8、図-9に示す。図中には初期断面の形状を白線で示している。鉛直変位は  $D_n$  で無次元化し、横軸は相対水平距離  $x/B'$  ( $x$ : ケーソン直立壁からの水平距離,  $B'$ : 消波工の天端幅) で示した。堤体Aは、消波工天端が沈下しており、沈下の範囲が  $x/B'=1.5$  程度まで及んでいる。堤体Cは、消波工の法肩位置で沈下が生じているが、天端中央は沈下していない。しかしながら、法面の沈下は、 $x/B'=4.0$  程度まで及んでおり、堤体Aより広範

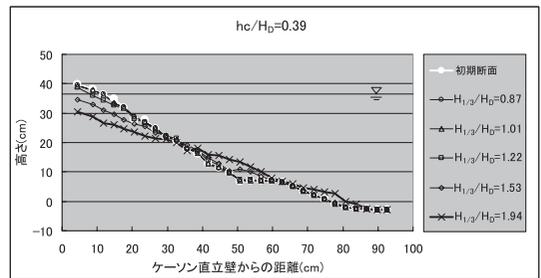


図-5 消波工の断面形状 (堤体A,  $h_c/H_D=0.39$ )

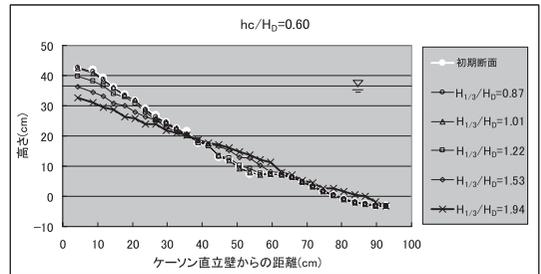


図-6 消波工の断面形状 (堤体B,  $h_c/H_D=0.60$ )

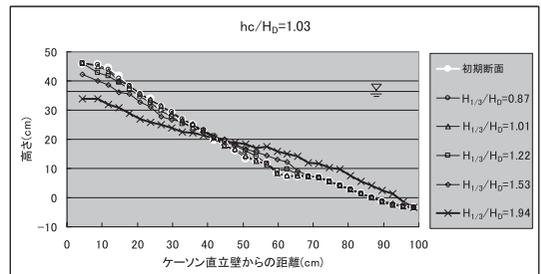


図-7 消波工の断面形状 (堤体C,  $h_c/H_D=1.03$ )

表-4 相対天端高 ( $h_c/H_{1/3}$ ) の変化

$H_{1/3}/H_D$	$h_c/H_{1/3}$		
	堤体A ( $h_c/H_D=0.39$ )	堤体B ( $h_c/H_D=0.60$ )	堤体C ( $h_c/H_D=1.03$ )
0.87	0.45	0.69	1.18
1.01	0.39	0.59	1.02
1.22	0.32	0.49	0.84
1.53	0.25	0.39	0.67
1.94	0.20	0.31	0.53

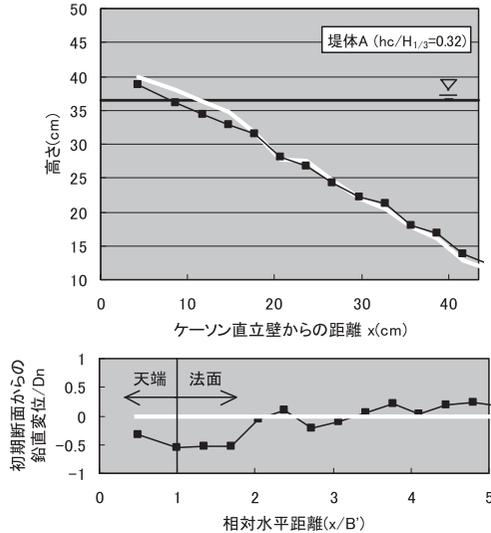


図-8 断面形状および鉛直変位 (堤体A,  $h_c/H_{1/3}=0.32$ )

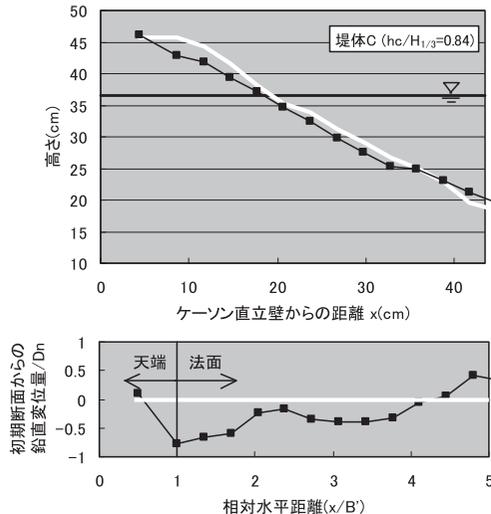


図-9 断面形状および鉛直変位 (堤体C,  $h_c/H_{1/3}=0.84$ )

図で法面が変形していることが分かる。こうした変形の状況は、被災時相対天端高が大きいと法面が、小さいと天端が被災する被災事例の傾向と概ね一致している。

#### 4. 消波工の変形過程の評価

##### (1) 変形過程の評価方法

被災事例および水理模型実験の結果を踏まえ、天端の沈下および法面の変形の程度を把握することとし、図-10に示す天端沈下率 $\eta'/h_c$ と水平減少率 $l'/l_0$ を定義した。水理模型実験で取得した断面形状のデータに基づき、天端沈下率および水平減少率を算出し、消波工の変形過程の定量的な評価を試みた。

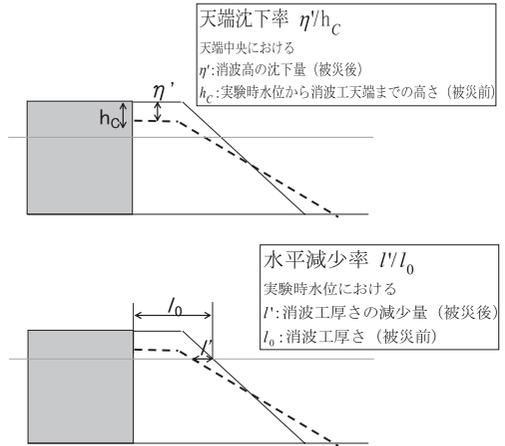


図-10 天端沈下率および水平減少率

##### (2) 波数と消波工の変形の関係

標準的な設計相対天端高である堤体B ( $h_c/H_D=0.60$ )における波数と天端沈下率および水平減少率の関係を図-11に示す。天端沈下率および水平減少率ともに、12測線の平均値を示している。各値とも $H_{1/3}/H_D$ が1以下ではほとんど変化しておらず、顕著な断面変化は生じていないことが分かる。 $H_{1/3}/H_D$ が1.22で変化が生じ始めるが、その際、最初の250波で天端の沈下や法面の変形が起こり、その後1000波までは、断面の変形が進行していない。 $H_{1/3}/H_D$ が1.53以上では、波数の増加に伴い断面の変形が進行していることが分かる。こうした傾向は、堤体A、堤体Cとも同様であった。

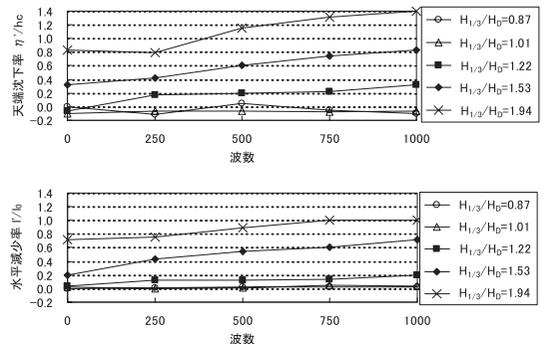


図-11 波数と天端沈下率および水平減少率の関係

(3) 水平減少率と天端沈下率の関係

図-12から図-14に水平減少率と天端沈下率の関係を堤体毎に示す. 天端沈下率および水平減少率ともに, 12測線の平均値を示している. 図中には, 近似直線もあわせて示した. 入射波高 $H_{1/3}$ の増加に伴い, 水平減少率および天端沈下率ともに増加しており, 同じ水平減少率の場合, 設計相対天端高が小さいほど天端沈下率が大きくなる傾向が分かる. この傾向は, 被災事例の傾向と符合するものである.

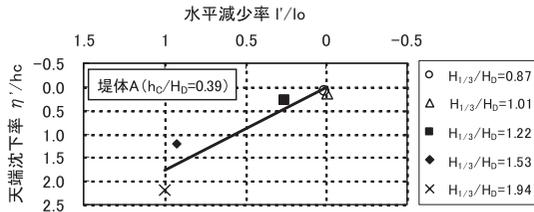


図-12 水平減少率と天端沈下率の関係 (堤体A,  $h_C/H_D=0.39$ )

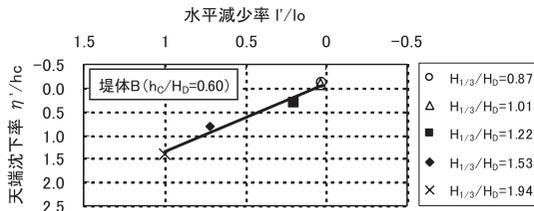


図-13 水平減少率と天端沈下率の関係 (堤体B,  $h_C/H_D=0.60$ )

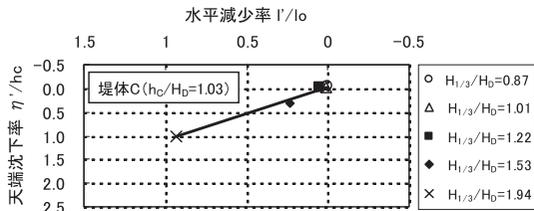


図-14 水平減少率と天端沈下率の関係 (堤体C,  $h_C/H_D=1.03$ )

5. 結語

本研究では, 消波ブロック被覆堤における消波工の被災形態および変形過程を把握することを目的として, 被災事例調査および水理模型実験を実施した. 主要な結論は以下のとおりである.

①消波ブロック被覆堤における消波工の被災形態は, 主

に消波工天端付近で被災が生じている場合, 主に消波工法面で被災が生じている場合, 消波工天端および消波工法面の両方で被災が生じている場合の3パターンに大別される.

②被災事例より, 被災時相対天端高に応じて消波工の被災形態が異なることが示唆された. 水理模型実験において, 相対天端高 $h_C/H_{1/3}$ が大きいと法面が, 小さいと天端が被災する傾向を把握した.

③設計相対天端高 $h_C/H_D$ の異なる消波工の変形過程を水平減少率および天端沈下率を用いて評価した. 同じ水平減少率の場合, 設計相対天端高が小さいほど天端沈下率が大きくなる.

今後, 本研究の成果をもとに, より実現象に即した消波工変形を反映させて, ケーソン作用波力の変化を検討していくことによって, 消波ブロック被覆堤の性能設計の高度化が図れるものと考えられる.

謝辞: 本研究の実施にあたり, (独法) 港湾空港技術研究所耐波研究室の水谷雅裕室長, 有川太郎主任研究官, 関克己特別研究員, 京都大学防災研究所の間瀬肇教授, 安田誠弘助教, パシフィックコンサルタンツ (株) の辻尾大樹技師から貴重なご助言を頂いた. ここに記して謝意を表します.

参考文献

鹿島遼一・今泉正次・戸田泰和 (1986) : 被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性, 第33回海講論文集, pp. 626-630.  
 北島昭一・中野拓治・堀井修身・柿崎秀作・降旗健一・花木芳雄 (1968) : 防波堤被災集覧, 港研資料, No.58, 239 p.  
 下迫健一郎・高橋重雄 (1998) : 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港研報告, Vol.37, No.3, pp. 3-30.  
 武山秀夫・仲山種清 (1975) : 防波堤被災集覧 (その2), 港研資料, No.200, 255 p.  
 服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一 (1984) : 防波堤被災集覧 (その3), 港研資料, No.485, 281 p.  
 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹 (1993) : 防波堤被災集覧 (その4), 港研資料, No.765, 248 p.  
 山縣延文・西原考美・中山政勝・上原幸生・富安良一・半沢稔 (2002) : 災害に強い港湾構造物の考察, 海工論文集, 第49巻, pp. 916-920.