

被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性

鹿島 遼一*・今泉 正次**・戸田 泰和**

1. ま え が き

沖合人工島など重要構造物の外郭施設となる防波堤や防波護岸は、設計条件を多少上回る高波浪に対しても壊滅的な破壊を生じることなく、仮に多少の被災を受けても防波機能が大きく損われない構造が望ましい。この観点から、安定性の高い外郭施設設計の基礎資料を得ることを目的に、防波堤および防波護岸の波浪被災例の調査を実施した。調査対象は、設計条件を越える波浪に対し破壊進行が緩慢で、かつ修復性に優れた構造である、消波ブロックを用いた傾斜型の防波堤・防波護岸である。本検討では、できるだけ多くの被災例を収集し、それらに基づいて防波堤・防波護岸の波浪による被災の全体像を把握することを主眼としている。

2. 被災事例調査の方法

(1) 資料の収集

防波堤の被災例としては、運輸省直轄港湾の防波堤に関し、港湾技術研究所により多くの事例が紹介されている^{1)~3)}。本調査ではこれらをはじめ、国内外の港湾および海岸関係の文献、報告書および雑誌の中から被災に関する記述をリストアップした。その結果、堤体前面が消波ブロックで被覆された防波堤・防波護岸、およびそれらとほぼ類似とみなすことができる構造物で、かつ、被災断面図、被災時の波浪、海岸地形などの資料が比較的整っている被災事例は、外国の9例を含め、142例である。

用途別、構造型式別、水深別事例数を表-1に示す。本検討では防波堤、防砂堤、導流堤、突堤および離岸堤は防波堤構造物とし、防波護岸、防潮堤および堤防は防波護岸構造物に分類している。なお、背後埋立てが未施工の段階で被災した護岸は、防波堤と類似の構造物と見なして防波堤構造物に含めた。防波堤の被災事例128例に対し、護岸の事例は14例と少ない。防波堤の被災事例のうち、特に水深が深い例としてはシネス港（ポルトガル）の約50m、ビルバオ港（スペイン）の約35mな

表-1 被災事例の構造別、水深別内訳

	用途別事例数	構造型式別事例数	水深別事例数		
			m 0~10	m 10~15	m以上 15
防波堤 構造物 128例	防波堤 102	傾斜堤 53	44	6	3
	防波護岸 (背面未施工) 8				
	防砂堤 2				
	導流堤 10	直立堤・ 混成堤 75	41	27	7
	突堤 3 離岸堤 3				
防波護岸 構造物 14例	防波護岸 7	傾斜堤 3	3	0	0
	防潮堤 4	混成堤 1	1	0	0
	堤防 3	その他 (堤防・防波堤等) 10	10	0	0

どが挙げられる。また、特に大きな被災時波高としては、シネス港の $H_{1/3} \approx 8.5$ m が挙げられる⁴⁾。

(2) 被災形態・被災規模の分類

被災形態については服部ら⁵⁾の分類（表-2）が被災の主要モードをほぼ網羅していると考えられるのでこれを用いる。

被災規模については、構造物の機能にほとんど影響しない程度の被災を「小規模」、機能低下が著しい被災を「大規模」、これらの中間を「中規模」と分類し、移動、沈下、散乱については表-3に示すように被害率と規模を定義した。直立部、上部工、消波ブロックの破壊および海底地盤洗掘の被災規模の定量的な表現は困難であるため、これらについては被災状況の記述や被災断面図等

表-2 被災形態の分類

記号	被災形態
A	直立部の移動（滑動等）
A'	上部工の移動（滑動等）
B	直立部の沈下
B'	上部工の沈下
C	直立部の破壊
C'	上部工の破壊
D	被覆工の散乱、傾斜堤の被覆部の散乱
E	基礎捨石の散乱、散出、捨石式傾斜堤の捨石部の散乱
F	根固め工の散乱、移動
G	消波工の散乱、沈下、捨ブロックの散乱
H	消波ブロックの破壊
I	海底地盤の洗掘
J	その他の被災
N	不明

* 正会員 工修（財）電力中央研究所 我孫子研究所

** 正会員 工修 五洋建設（株） 土木設計部

表-3 被災規模の定義

被災形態	直立部の移動 上部工の〃 根固め工の〃	直立部の沈下 上部工の〃	消波工、被覆工、捨石、 根固め工等の散乱
定	B: 堤体、上部工、根固め工等の幅 B': 移動量 D: 被害率 = B'/B	H: 堤体、上部工の高さ H': 沈下量 D: 被害率 = H'/H	A: 消波工等の被災前断面面積 A': 散乱部断面面積 D: 被害率 = A'/A
義	小規模: $D < 0.1$ 中規模: $0.1 \leq D < 0.5$ 大規模: $D \geq 0.5$	小規模: $D < 0.1$ 中規模: $0.1 \leq D < 0.5$ 大規模: $D \geq 0.5$	小規模: $D < 10\%$ 中規模: $10\% \leq D < 50\%$ 大規模: $D \geq 50\%$

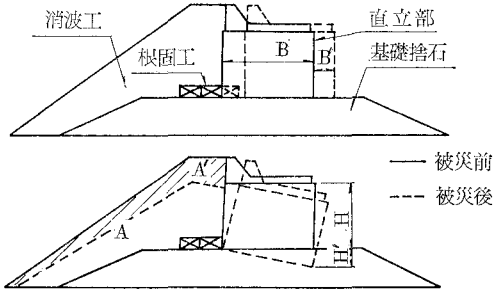


図-1 被災規模説明図

より被災の程度を判断して規模を分類した。

3. 被災形態・被災規模の特性

(1) 被災形態

波浪による被災ではどのような被災形態が生じ易いかを把握するために、被災形態ごとの相対頻度を求め図-2に示す。ここで相対頻度とは、たとえば「直立部の移動」では、直立部を有する被災事例 93 例に対する直立部の移動事例 23 例の比を表し、この場合の相対頻度は

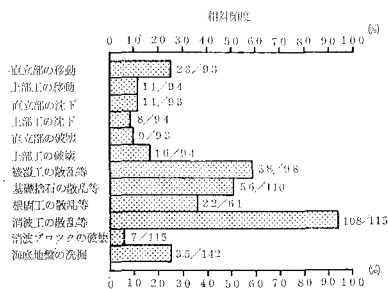
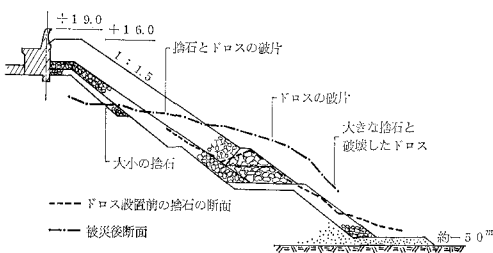


図-2 被災形態ごとの相対頻度

図-3 シネス港の被災断面⁴⁾

$23/93 \approx 25\%$ となる。図-2より、消波工の被災が約 95% と卓越している。次いで、被覆工、基礎捨石、根固め工の被災が多く、相対頻度はそれぞれ 59%, 51%, 36% を示している。このように、ブロックや石で被覆した防波堤防波護岸の波浪被災では、消波工、被覆工、捨石および根固め工の被災が多いので、以下ではこれらの被災を被覆層の被災と総称し、他の被災形態についても被覆層被災との関係で考察する。被覆層被災に次いで多いのは直立部の移動と海底地盤の洗掘であり相対頻度はそれぞれ約 25% である。

各々の被災形態が単独に生じることはまれであり、構造物が複雑になるほど複合した被災形態を示す。たとえば図-3は1978年2月に被災したシネス港防波堤の被災断面⁴⁾であるが、この事例では上部工の沈下と破壊、傾斜堤被覆部の散乱、基礎捨石の散乱、消波工の散乱、消波ブロックの破壊の被災形態が複合して生じている。

(2) 傾斜堤

傾斜堤の被災事例 56 例のうち、被災規模のわかるのは 47 事例である。これらのうち設置水深 10 m 未満では小、中、大規模の被災がそれぞれ約 5, 45, 50% である。大水深での傾斜堤の被災事例が少ないため、水深の増加に伴う被災規模の特徴は明確ではないが、15 m 以上の 2 事例はいずれも大規模被災である。

設置位置における被災時有効波高の被覆材安定限界波高に対する比を被災時相対波高と定義し、これと被災事例数の関係を図-4に示す。ここに、被覆材安定限界波高とは被覆材所要重量算定のハドソン公式により、使用重量から逆算した波高である。これに用いる K_D 値は石については $K_D = 5.1$ 、ブロックについてはカタログに示されている値とした。たとえば、テトラポットでは $K_D = 8.3$ 、六脚ブロックでは $K_D = 8.1$ などの値である。図-4より次の点が指摘できる。

i) 被災時相対波高が 1.0 以上での被災事例、すなわちハドソン公式で説明できる被災事例は全体の約 70%

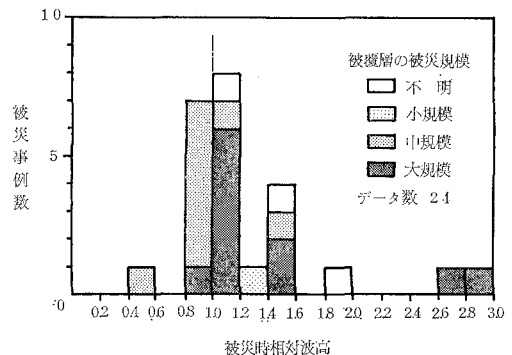


図-4 被災時相対波高と傾斜堤被災事例数の関係

である。

ii) 被災時相対波高が 1.0 未満での被災例 8 例は 1 例を除けば相対波高が 0.8~1.0 の範囲に相当する。

iii) 被災時相対波高の増大に応じて被覆層の被災規模が増加するという傾向は本調査事例では確認できず、むしろ相対波高が 1.0~1.2 の範囲でも大規模被災が多く見られる。

上記の 8 例のうち 1 例は久慈港防波堤の昭和 33 年の被災で、施工完了前の被災であり⁹⁾、6 例は河口導流堤で、そのうちの 3 例は台風による洪水で地盤の洗掘が生じたことが報告されている。また残り 1 例は栗生港防波堤の昭和 43 年の被災であるが²⁾、この防波堤はブロック積みの島堤であった。

(3) ブロック被覆直立堤および混成堤

直立堤・混成堤の被覆層被災事例のうち、波高と被覆材使用重量の明らかな事例は 32 例である。図-5 に被災時相対波高別の被災事例数を示す。図-5 より次の点が指摘できる。

- i) 被災時相対波高が 1.0 以上での被災事例は全体の 75% である。
- ii) 被災事例は被災時相対波高 1.0 付近に集中しており、相対波高が 1.0 を若干越えただけでも被覆層被災の大規模なものが見られる。
- iii) 図中の①~③を除けば、被災時相対波高の被災下限値はほぼ 0.8 程度である。

以上の指摘事項は傾斜堤の場合とほぼ同じであり、被覆層の安定性がハドソン公式でほぼ説明できること、反面、被覆層の被災規模が波高だけでは説明しきれないことを示唆している。

図-5 の①~③のうち、①、②は海底地盤の洗掘を伴う被災であり、③は局所流による被災と推定されている。①は昭和 51 年 5 月の台風 5, 6 号で被災した高知港桂浜防波堤の被災例である。この防波堤はケーソン式混成堤で、50t テトラポッドで被覆してあったが、被覆区間の先端部が集中的に被災し、20 個のテトラポッドの破壊も生じた。台風後の深浅測量の結果、現地盤がかなり変動したことが確認されている⁹⁾。

②は石狩港新港島防波堤の昭和 50 年災害である。堤体は 20t テトラポッドで被覆したケーソン式混成堤であった。ハドソン公式で算定した被災時の必要重量は 6.1t であり、使用重量より小さい。図-6 の被災断面図でも明かなように、消波工法尻部の海底地盤が 2m 程度洗掘されており、重量不足による散乱ではなく法先前面の洗掘が被災の主因と考えられる⁷⁾。

図-5 の③は亀徳港南防波堤堤頭部の昭和 53 年 7 月の災害である。当防波堤は徳之島を取り巻くリーフ上に

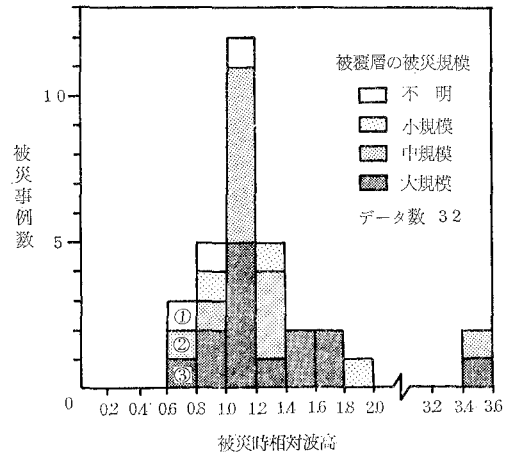


図-5 被災時相対波高と直立堤・混成堤の被覆層被災事例数の関係

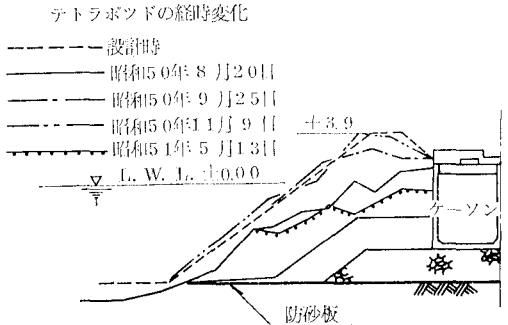


図-6 石狩港新港島防波堤の被災断面⁷⁾

設置され、堤頭部はリーフ先端部に位置する。堤頭部の構造は 50t ドロスで被覆したケーソン式混成堤である。ハドソン公式で被災時の波高から算定した必要重量は 14t であり使用重量より小さい。堤体周辺の海底はリーフが入り組んでおり、森永⁸⁾は水理実験で防波堤前面の 2 箇所の浅瀬間のくぼみに急激な流れが発生することを確認し、消波工の被災もこの局所流によると推定している。

直立堤・混成堤では、耐波機能上は直立部の被災が特に重要と考えられるため、直立部の移動・沈下について被覆層被災との関連から考察する。まず、直立堤・混成堤の被災例のうち、被覆層被災と直立部の移動・沈下が複合して生じた事例の相対頻度を図-7 に示し、次に複合被災事例について被覆層と直立部の被災規模の関係を図-8 に示す。また、被災時有意波高と設計波高の比に対する直立部の移動量の関係を図-9 に示す。これらの図より次の点を指摘できる。

- i) 複合被災が生じたのは被覆層被災事例の 32% である。残り 68% は被覆層が被災しても直立部に移動・沈下は見られない事例である。

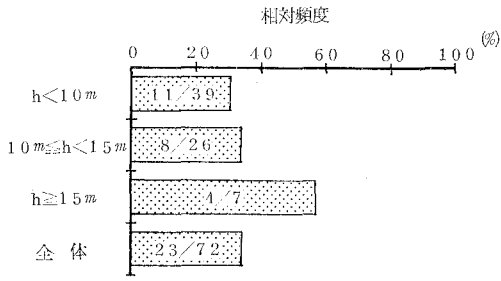


図-7 被覆層と省立部の複合被災の相対頻度

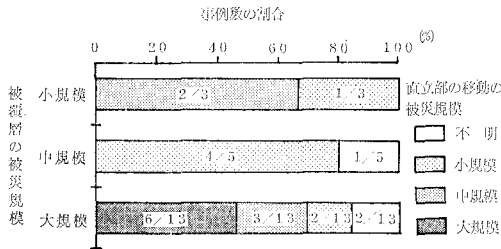


図-7 被覆層と直立部移動の被災規模

- ii) 被覆層被災の規模が大になるほど直立部の被災に大規模なものが見られる。
- iii) 被災時波高が設計波高を上回る領域で、直立部移動が生じた事例は全体の 80% 以上であり、移動量も大

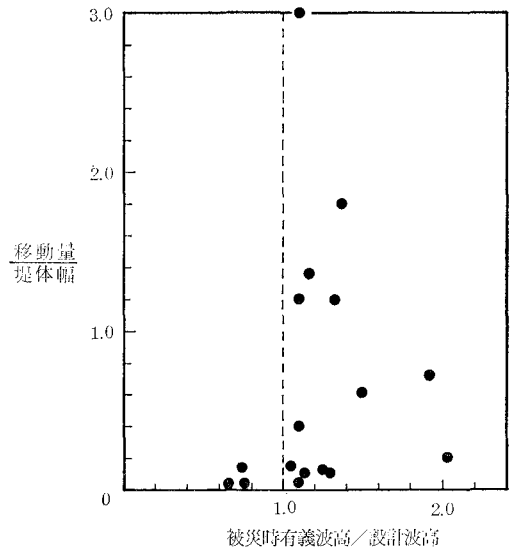


図-9 被災時波高/設計波高と直立部移動量

- きい。設計波高を下回る領域での直立部の移動は 3 例あるが、いずれも小規模な被災である。
- iv) 被災時波高/設計波高と直立部の移動量の間には明瞭な相関関係は見られない。

消波工で被覆した直立堤や混成堤の滑動には、通常消

表-4 大規模な波浪被災事例

区 分	施 設 名 称	被 災 状 況	備 考
設計波高を上まわる波浪が来襲したと考えられるもの	釧路港本港地区東外防波堤	ケーソン 1 函が 15.0 m 滑動しマウンドから落下	設計波高 $H_{1/3}=4.9$ m < 被災時波高 $H_{1/3}=5.8$ m
	飯坂港東防波堤乙部	ケーソン 3 函が大きく港内に滑動	被覆材使用重量 7.36 t < 被災時の被覆材必要重量 11.6 t
	福浦港第七防波堤	天端の変化 +2.0 m → -2.0 m	" 46.00 t < " 54.7 t
	浜田港西防波堤	" +4.2 m → -5.0 m, 本体倒壊	設計波高 $H_{1/3}=6.0$ m < 被災時波高 $H_{1/3}=8.0$ m
	神戸港長田防波堤基部	" +4.0 m → ±0.0 m	被覆材使用重量 3.68 t < 被災時の被覆材必要重量 6.1 t
	尼崎港西防波堤	" +5.4 m → +0.5 m	" 3.68 t < " 4.2 t
	大里港大里地区西防波堤幹部	" +5.0 m → ±0.0 m, 港内側へ倒壊	設計波高 $H_{1/3}=4.4$ m < 被災時波高 $H_{1/3}=6.0$ m
	沼津港外港西防波堤	ケーソン移動量 最大 9.6 m	" 4.9 m < " 5.42 m
	沼津港外港東防波堤先端部	ケーソン 1 函がマウンド外へ飛び出し転倒	" 4.9 m < " 5.42 m
	北九州港響灘埋立護岸	天端の変化 +2.6 m → -3.5 m	" 2.7 m < " 4.42 m
海底地盤の洗掘およびすべりが主因と考えられるもの	八戸海岸八太郎地区海岸堤防	本体部コンクリート張部破壊	設計波高 $H_0=6$ m < 被災時沖波高 $H_{1/3}=6.2$ m
	栗島内浦港第三防波堤	第三防波堤は全壊	洗掘された海底砂が急斜面の前面に堆積し、バランスを失った
	江津港郷田地区導流堤堤頭部	天端の変化 +1.0 m → -4.0 m	法先地盤の洗掘
吸い出しによる被災	Fort Fisher 海岸堤防 (USA)	堤防北側の各部分を激しく浸食	当該地域は、ノースカロライナ州での最大の浸食速度を示す
	長島港堤防	堤体内の中詰土砂が吸い出され空洞化	
消波工未施工部分の被災の可能性のあるもの	網代漁港第一防波堤	ケーソン 3 函が港内側に転落	被覆材使用重量 28.75 t > 被災時の被覆材必要重量 17.5 t
原因を特定できないもの	江ノ島漁港防波堤 (昭和 47 年)	堤体が延長 53.5 m にわたり倒壊	地形が岩礁で複雑であり、波の集中等があったと考えられる
	江ノ島漁港防波堤 (昭和 55 年)	延長 52 m にわたりケーソンが滑動、倒壊	"
	久慈港防波堤	堤体は原形をとどめていない	
	SINES 港防波堤 (ポルトガル)	天端の変化 +19.0 m → ±0.0 m	消波ブロックの破壊が被害を拡大

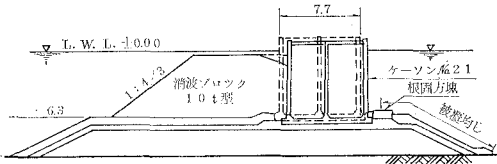


図-10 境港外港地区防波堤頭部の被災断面³⁾

波工の散乱が先行すると考えられるが、消波工の散乱より先に直立部が移動したと推定される事例も見られる。図-10に示す境港外港地区防波堤頭部は、昭和57年9月災害でケーソン9函が港内側へ最大75cm滑動し、これに伴い前面の消波工が沈下した³⁾。なお、直立部が移動し、消波ブロックが原形に近い状態で残された例としては、能代港工業用地造成護岸(施工中)の1983年日本海中部地震津波による被災が挙げられる。

4. 大規模な被災事例

天端が水面以下に低下したり、直立部が堤体幅以上に移動するような被害を受ければ、防波堤や防護護岸の機能は大きく低下し、大がかりな復旧工事が必要となる。このような大規模な被害が見られた事例は、離岸堤や突堤などの小規模な構造物の被災を除けば表-4に示す20例であり、相対頻度は図-11に示すように傾斜堤全体で19%、直立堤・混成堤で12%程度であり、全体では約15%である。これらの各々の被災例について、被災の概要と関連資料から推定した被災原因をまとめて表-4に示す。大規模な被災例のほとんどは、被災時波高が設計波高を上回った例や海底地盤の洗掘が原因と考えられる例など、被災原因が説明できる事例である。

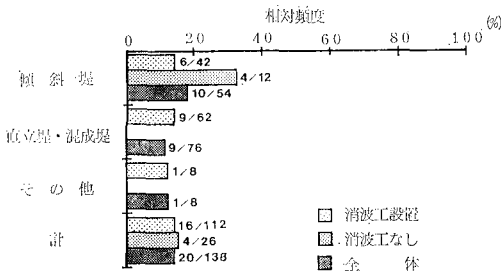


図-11 大規模な被災事例の相対頻度

5. むすび

多くの波浪被災事例を収集し、各種の集計を通して事例に共通する諸特性を把握することを試みた。主な結果をまとめると次の通りである。

- 1) 前面に消波工を有する構造物の被災は、被覆層に関連した複合被災を示すものがほとんどである。
- 2) 被覆層被災事例の約70%はハドソン公式で説明できる。残り30%の事例の大半は、被災時相対波高が0.8~1.0の範囲に入る。
- 3) 消波工で被覆した直立堤・混成堤の被災例では、被災時波高が設計波高を上回ると大規模な移動が見られるが、設計波高を下回った場合の移動量は小さい。
- 4) 機能低下を招くような大規模被災例の大半は被災理由がほぼ説明できる。

以上より、被覆層被災の発生限界については、ハドソン公式などにより、主に波高と結びつけられる。しかし、被災規模は波高で説明できない面が多々あり、大規模な被災を生じさせない観点からは、被災の進行過程をより詳細に把握することが重要である。

最後に、本研究では下記の参考文献を含め多くの貴重な被災関連資料を参照させて頂いた。末尾ながら関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) 北島昭一・中野拓治・堀井修身・柿崎秀作・降旗健一・花木芳雄：被災防波堤集覧，港湾技研資料 No. 58, 239 p., 1968.
- 2) 武山秀夫・中山種清：被災防波堤集覧(その2)，港湾技研資料 No. 200, 255 p., 1975.
- 3) 服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一：被災防波堤集覧(その3)，港湾技研資料 No. 485, 281 p., 1984.
- 4) Port Sines Investigating Panel: Failure of the breakwater at Port Sines, Portugal, ASCE, pp. 1~77, 1982, New York.
- 5) 石綿知治：テトラポット，鹿島建設技術研究所出版部，pp. 55~57, 1960.
- 6) 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所：高知港設計計算書，桂浜地区防波堤(改良)，pp. 116~123, 1981.
- 7) 川上隆三・岡忠春・福田幸司：石狩湾新港防波堤洗掘調査，第26回北海道開発局技術研究会発表論文集，pp. 1102~1113, 1982.
- 8) 森永明：鹿児島県亀徳港防波堤(南)工事について，第25回全国港湾工事報告会報告概要，pp. 177~184, 1979.