

フレア護岸の設計, 製作, 施工

DESIGN, MANUFACTURE AND CONSTRUCTION OF THE FLARING SHAPED SEAWALL

竹鼻直人¹・濱崎義弘²・奥村昌好³・片岡保人⁴・里一太⁵

Naoto TAKEHANA, Yoshihiro HAMAZAKI, Masayoshi OKUMURA, Yasuto KATAOKA, and
Kazuta SATO

¹正会員 工修 (株)神戸製鋼所 鋼構造本部 構造技術部 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島41)

²正会員 工修 (株)神戸製鋼所 鋼構造本部 監理室 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島41)

³正会員 工修 (株)神戸製鋼所 鋼構造本部 構造技術部 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島41)

⁴正会員 工博 (株)神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

⁵新栄建設株式会社 (〒737-1316 広島県呉市倉橋町11953番地)

Flaring shaped Seawall was adopted as the Osako port in Kurahashi-cho for the first time in the country in consideration of low height, scene nature, preservation of sands, and economical efficiency, etc. The height of flaring shaped seawall was decided to be +6.0m using the wave overtopping rate presumption diagram of it. Although we conducted the two-dimensional wave tank model in the proposal section and the wave overtopping rate($0.0002\text{m}^3/\text{m/s}$) checked that it was 1/50 of the permissible value, the breaking wave pressure became large shockingly, it was about five times the Goda equation wave pressure. Structure of flaring shaped seawall was made into the composite construction of steel and concrete. The structure design was performed in finite-element analysis by making this shockingly breaking wave load into static load and was able to be designed rationally. Since composite structure was adopted, construction of flaring shaped seawall was able to be performed very easily.

Key Words : *Flaring Shaped Seawall, wave overtopping rate, breaking wave pressure
composite structure, finite-element analysis, construction*

1. はじめに

外洋に面した空港や発電所などの重要施設や、臨海部の汀線に沿って建設される道路用護岸や住宅地に要求される機能の中で、特に重要なもののひとつに越波阻止性能がある。著者らは新形式護岸であるフレア護岸を提案し、研究開発を進め、水理実験によって越波阻止機能や作用波圧を明らかにしてきた^{1)~3)}。また、設計の容易性を考慮し、直立護岸や消波ブロック被覆護岸の設計に使われている越波流量推定線図⁴⁾を作成した⁵⁾。さらに、経済的に施工するため捨石上にフレア護岸を設置した場合の水理特性を水槽実験によって確認してきた⁶⁾。

今回、国内で初めて広島県倉橋町大迫港の高潮対策事業として、フレア護岸が採用された。構造形式を決めるための大きな要因は、低天端、景観性、砂浜の保全、経済性などであった。フレア護岸の他に消波ブロック被覆護岸、離岸堤などの構造形式が比較検討され、これらの

要求事項を満足する工法としてフレア護岸が採用されることとなった。

そこで、本研究では同港に適用されたフレア護岸の形状設計法、構造設計法および現地施工状況について報告する。まず、先に提案した越波流量推定線図を基に、必要天端高を求め、安定計算等から基本形状を決定する。

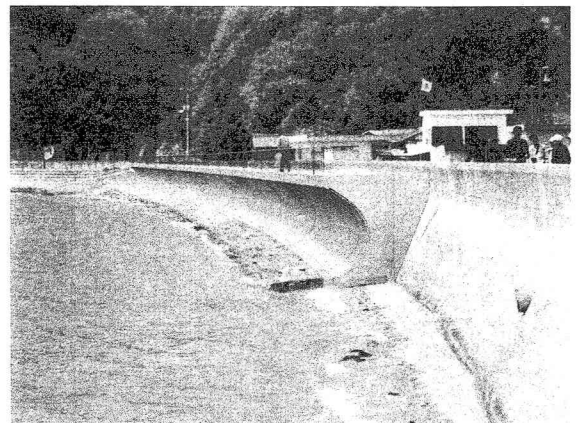


図-1 フレア護岸のイメージ図

次に、水槽実験により越波性能の確認、護岸に作用する波圧の把握などを行う。さらに、構造設計においては軽量かつ耐衝撃性に優れた鋼・コンクリート合成構造を適用し、波圧を考慮した耐波設計を行う。最後に、現地の施工状況について説明する。

2. 形状設計

(1) 設計フロー

図-2に、フレア護岸の設計フローを示す。従来工法(直立護岸、消波ブロック被覆護岸)とほぼ同じ流れで越波流量推定線図を用いて設計ができることが分かる。ただし、断面形状を最終的に決定する際には、水槽実験による性能確認を行った。

(2) 設計条件

倉橋町大迫港の設計潮位はMx. H. W. L+4. 5m, 換算沖波

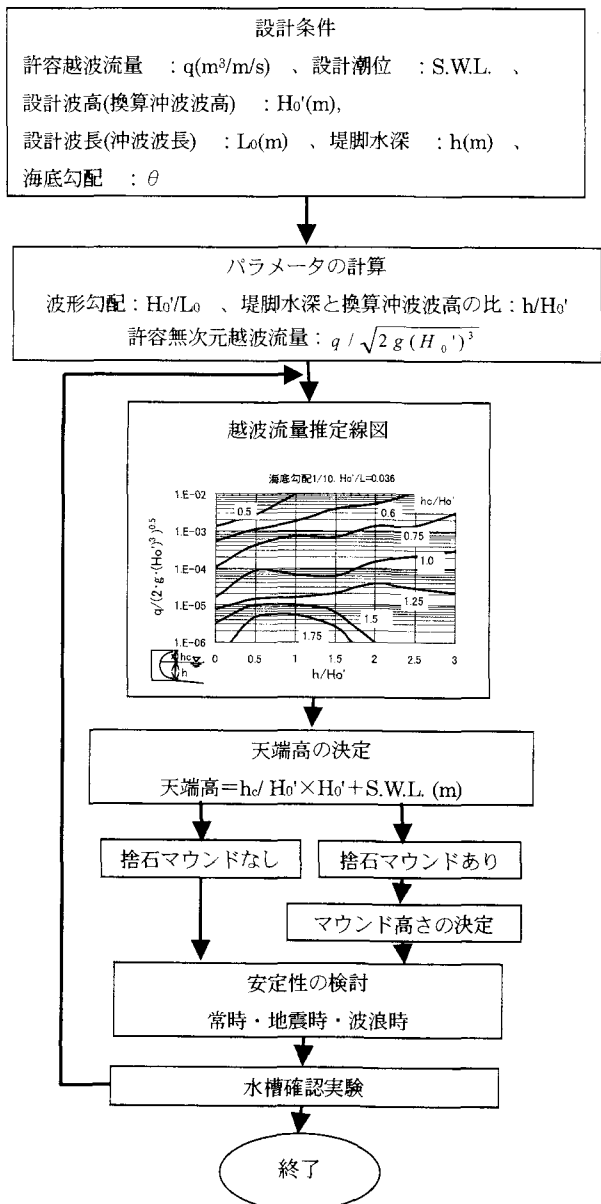


図-2 フレア護岸の設計フロー

波高1. 86m, 沖波周期5. 22s, 沖波波長42. 51m, 海底勾配1/10で、許容越波流量は0. 01m³/m/sである。詳細な設計条件を、表-1に示す。

表-1 設計条件

潮位	Mx. H. W. L	+4. 50m
	H. W. L	+3. 33m
	L. W. L	+0. 55m
残留水位	R. W. L	+1. 48m
波浪条件	換算沖波波高 H_0'	1. 86m
	沖波周期 T_0	5. 22s
	沖波波長 L_0	42. 51m
	許容越波流量	0. 01m³/m/s
海底勾配		1/10
原地盤高		+1. 5m
設計震度		0. 12

(3) 断面の決定

上記の設計条件を用いて、図-2に示した設計フローに従って天端高を決めるためのパラメーターの値を以下のとおりに求める。

$$\text{堤脚水深 } h = 3.0\text{m} \quad (1)$$

$$\text{波形勾配 } H_0'/L_0 = 0.044 \quad (2)$$

$$\text{堤脚水深と換算沖波波高との比 } h/H_0' = 1.61 \quad (3)$$

許容無次元越波流量

$$q/\sqrt{2g(H_0')^3} = 8.90 \times 10^{-4} \quad (4)$$

波形勾配が0. 044であることから、天端高を決めるために使用したフレア護岸の越波流量推定線図は、海底勾配1/10で波形勾配0. 036のそれとした。図-3に、その越波流量推定線図を示す。

堤脚水深と換算沖波波高との比 $h/H_0'=1.61$ と許容無次元越波流量 $q/\sqrt{2g(H_0')^3}=8.90 \times 10^{-4}$ の関係で、図-3より、海水面から天端までの高さ h_c/H_0' を求めると以下ようになった。

$$h_c/H_0' = 0.75 \quad (5)$$

従って、海水面から天端までの高さ h_c は、

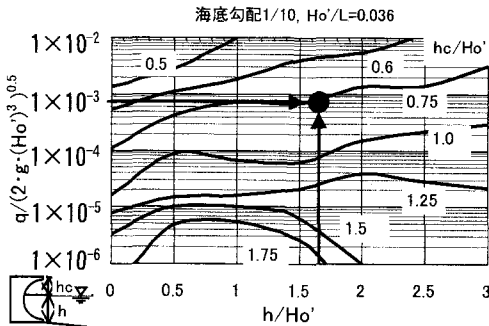


図-3 越波流量推定線図
(波形勾配0. 036, 海底勾配1/10)

$$h_c = 1.4m \quad (6)$$

となり、フレア護岸の天端高さを+6.0mとした。

図-4に、フレア護岸の標準断面図を示す。

同様の方法で、港湾の基準⁴⁾に掲載されている直立護岸と消波ブロック被覆護岸の越波流量推定線図から天端高さを求めた結果を、表-2にまとめた。この結果より、フレア護岸は、直立護岸より1.5m、消波ブロック被覆護岸より0.4m低くできることが分かる。

次に、完成時の安定について検討を行った。検討ケースは以下に示す通りである。

- ① 潮位：H. W. L. 常時・地震時
- ② 潮位：L. W. L. 常時・地震時
- ③ 潮位：H. W. L. 引き波時
- ④ 潮位：Mx. H. W. L. 引き波時

各ケースにおける、安定計算のまとめを表-3に示す。この結果から、断面が決定した条件は、潮位H. W. L.における地震時の滑動であることがわかる。

(4) 確認実験

水理実験は、2次元吸収制御式造波水槽（長さ30m、高

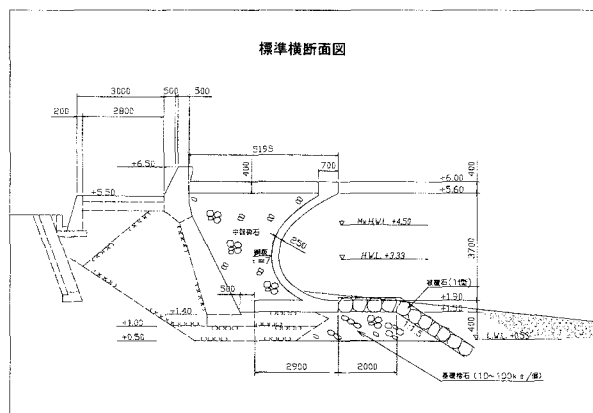


図-4 標準断面図

表-2 各構造物の天端高さ

構造物	フレア護岸	直立護岸	消波ブロック被覆護岸
天端高さ	+6.0m	+7.5m	+6.4m

表-3 完成時の安定計算

	常時 (L. W. L.)	地震時 (L. W. L.)	引き波時 (Mx. H. W. L.)
滑動	2.513 > 1.20	1.488 > 1.00	2.085 > 1.20
転倒	5.030 > 1.20	2.699 > 1.10	4.914 > 1.20
端趾圧 (kN/m ²)	57.439 < 600	87.787 < 600	55.045 < 600
	常時 (H. W. L.)	地震時 (H. W. L.)	引き波時 (H. W. L.)
滑動	2.230 > 1.20	1.229 > 1.00	1.894 > 1.20
転倒	4.296 > 1.20	2.240 > 1.10	4.204 > 1.20
端趾圧 (kN/m ²)	47.644 < 600	87.085 < 600	59.344 < 600

さ1.2m、幅0.6m)中に1/10海底勾配を模擬した不透過斜面を設置し、その斜面上に捨石マウンドおよび被覆石、フレア護岸モデルを置いて行った。図-5に実験概要を示す。不規則波により越波流量を計測した。不規則波は修正Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを基準とした。規則波により波圧を測定した。この時の波浪条件は、表-4に示す。

越波流量の結果は、表-5に示す。実験の越波流量は、許容越波流量の約1/50になっていることが分かる。これは設計条件の波形勾配が0.044であるが、断面決定に使用した越波流量線図の波形勾配が、0.036であったことが大きな要因と考えられる。

波圧の測定については、潮位および波高をパラメータとした実験を行ない波圧が最大となる条件を探した。その結果、波圧が最大になるときの潮位はMx. H. W. L.で、波高は設計波高 $H_{max}=3.2m$ よりも少し小さい3.0mの時であった。その実験結果の波圧を現地に換算した波圧を図-6に示す。比較のため、設計波高による合田式波圧を併記した。フレア護岸に作用する波圧は合田式設計波圧の約5倍になっている。この波圧は、護岸直前で碎波が起るることによる衝撃的な波圧である。

表-4 波浪条件

検討潮位	Mx.H.W.L. +4.50m
設計波高	$H_{max}=3.2m$
周期	5.22s

表-5 越波流量

実験による現地換算 越波流量(m ³ /m/s)	許容越波流量 (m ³ /m/s)
0.0002	0.01

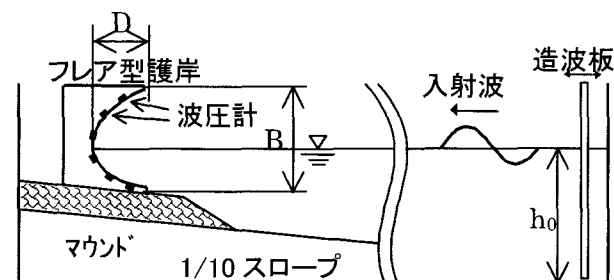


図-5 実験状況の概要

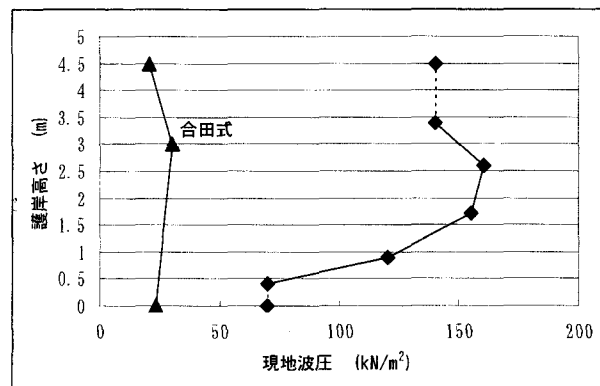


図-6 実験結果による現地波圧

5) 衝撃波圧による安定性の検討

フレア護岸は前面形状が特異な円弧になっているため押し波波力による鉛直力が作用すると考えられる。そこで、フレア護岸が採用されるにあたり十分な安全性を検討しておく必要があるため、衝撃砕波波力が作用した時に堤体が浮上らないことを検討する。その時の波力は、図-6に示した実験で測定された衝撃的な波力を考慮する。この時、堤体の上部と下部には波圧計がなかったため、図-6の点線で示したように上下端部で測定された波圧がそのまま作用するとした。

表-6に、フレア前面形状を考慮した場合の、水平波力・鉛直波力を示す。約90kN/mの鉛直上方への力が作用している。そこで、波力による鉛直力と揚圧力を考慮して、浮上がりの安定を検討した。その時、揚圧力は合田式設計波圧の揚圧力を採用した。ここで、 V_D は堤体に作用する鉛直下向きの力を表し、 V_U は鉛直上向きの力を表す。表-7に、安定計算の結果を示す。安全率1.2以上を確保しており、安全であると判断した。

3. 構造設計

(1) 設計荷重

フレア護岸の構造は、図-6で示したように衝撃砕波波力が作用するため、耐衝撃性に優れた鋼・コンクリートの合成構造を採用した。さらに、合成構造はプレファブ化が可能で、フレア護岸の現地施工の容易性も考慮した。設計手法は、鋼殻部については許容応力度法を、コンクリート部には限界状態設計法を採用した。波力に関し

ては、防波堤同様疲労時の検討も行った。表-8に、設計荷重を示す。

設計において、フレア前面の特異な円弧形状の効果を反映するため有限要素法を利用、底版部は通常のケーソンと同様のモーメント表を用いて行った。

鋼殻部の防食は腐食代を考慮した。背後の鋼殻部は、海上土中部とし、腐食速度0.03mm/年、耐用年数30年で0.9mmの腐食代とした。なお、鋼殻とコンクリートの接合構造は、ハイブリッドケーソンと同様にスタッド構造とした。

(2) 耐波設計

フレア護岸には、実験から衝撃砕波波力が作用することがわかっている。下迫らは⁷⁾、配筋計算等に用いる、いわゆる部材波力については、波圧の衝撃性を考慮すれば、実験波圧をそのまま静的荷重として設計することは過大設計となることを指摘している。しかしながら、衝撃的な波力の扱いが明確になっていないことや初めて採用されるフレア護岸の安全性も考慮に入れて、今回の設計では、現地条件に対応した水理模型実験で計測された図-6の実験波圧を静的荷重として、有限要素解析を行うことによって部材力を求めた⁸⁾。

図-7に、今回設計で用いた有限要素分割図を示す。

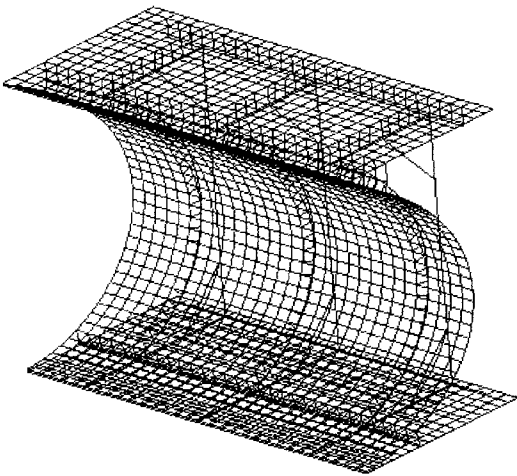


図-7 有限要素分割図

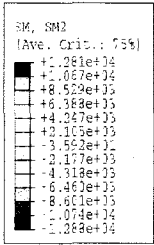


図-8 法線方向軸まわりモーメントコンタ図
(衝撃波圧作用時)

表-6 実験波圧による波力成分

水平波力(kN/m)	鉛直波力(kN/m)
587.7	88.3(上向)

表-7 浮上がりの安定計算

	V_D (kN/m)	V_U (kN/m)
壁体重量	188.378	
浮力	-41.823	
波圧による鉛直力		88.32
揚圧力		31.806
合計	146.555	120.126
浮上り		
安全率 F		許容値
146.555/120.126 =	1.22	>1.20

表-8 設計荷重

No.	状態	限界状態	設計潮位
1	常時	使用限界	L.W.L
2	常時	終局限界	L.W.L
3	地震時	終局限界	L.W.L
4	地震時	終局限界	H.W.L
5	引き波時	終局限界	Mx.H.W.L
6	押し波時	使用限界	Mx.H.W.L
7	押し波時	終局限界	Mx.H.W.L
8	押し波時	疲労限界	Mx.H.W.L

図-8には、衝撃碎波波力を作用させた時の法線平行方向を軸としたフレア部のモーメントコンタ図を示す。フレア部の下部が大きな正曲げが発生しており、同時にせん断力も大きくなることが分かったため、フレア部の下部は鉄筋ピッチを密にし、ずれ止めスタッドピッチも細かくすることとした。

4. 現地施工

(1) 工事概要

広島県倉橋町大迫港は、過去に2度(1999年, 2004年)大きな台風による高潮の被害を受けているところであり、それに対する対策が必要とされている。

フレア護岸を設置する総延長は約400mで、平成16年度から平成19年度にかけて整備する計画となっている。今回は、平成16年度の工事分である約100mについて記述することとした。図-9に、倉橋町大迫港のフレア護岸計画図を示す。

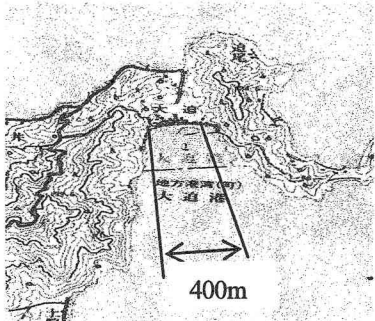


図-9 倉橋町大迫港平面図

(2) 鋼殻製作・現地施工

製作・現地施工の手順は、以下のとおりである。

- ① 鋼殻工場製作
- ② 現地近くのコンクリート打設ヤードへの輸送
- ③ コンクリート工
- ④ 基礎工
- ⑤ ヤードから現地へのフレアブロックの輸送・据付
- ⑥ 裏込め工
- ⑦ 被覆石工
- ⑧ 上部工
- ⑨ 完成

図-10に、延長約100m分の概略延べ工程を示す。

現地は、陸上部の背後が非常に狭いことと現地への道路が狭いため、フレアブロックの据付は海上施工とした。

場所	工種	1ヶ月	2ヶ月	3ヶ月	4ヶ月	5ヶ月	6ヶ月
工場	鋼殻製作						
ヤード	コンクリート打設						
現地	基礎工						
	輸送・据付						
	裏込め工						
	上部工						

図-10 平成16年度概略延べ工程(約100m)

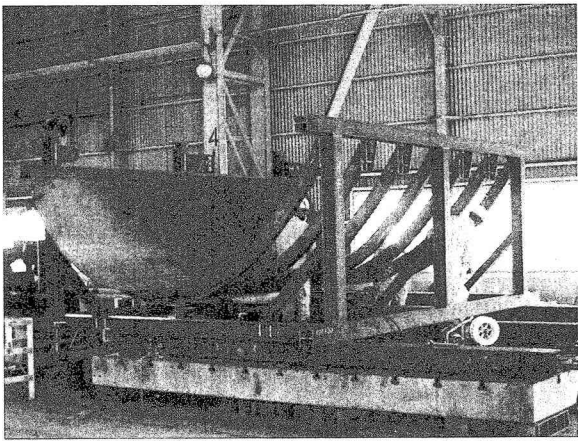


写真-1 鋼殻製作

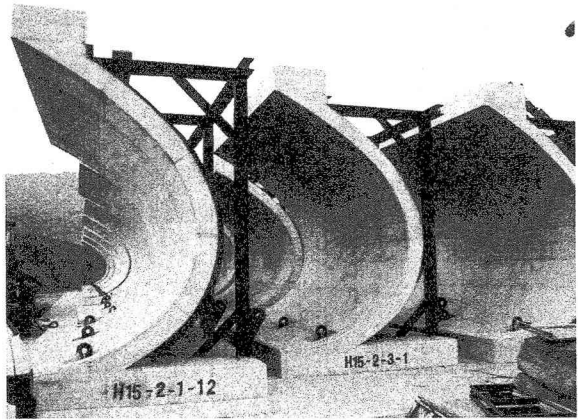


写真-2 フレアブロック(コンクリート打設)

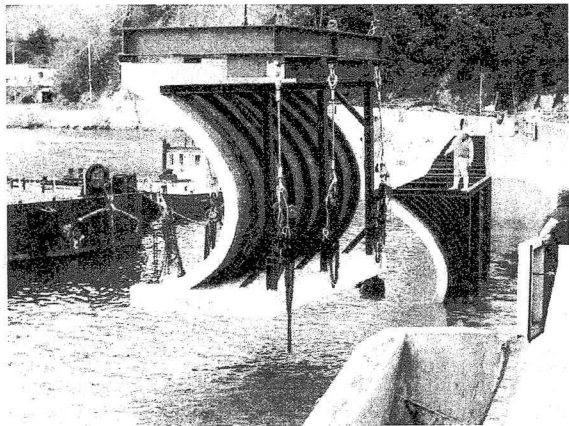


写真-3 フレアブロック据付

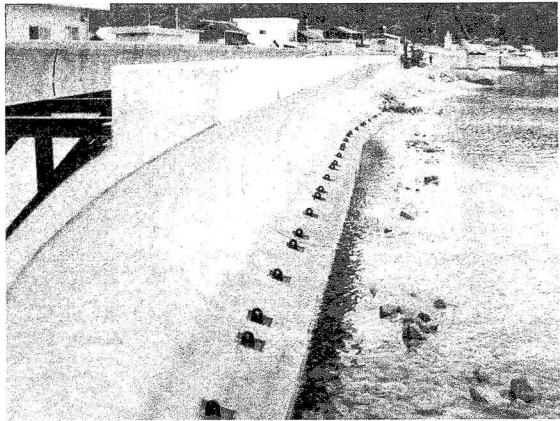


写真-4 フレアブロック据付完了

標準のフレアブロックは長さ6m、重量は作業性等を考慮して約50tとしているため、特別な施工機械は必要とせず160tクレーン付台船で輸送・据付が可能であった。通常のL型ブロックと比較しても、同等の容易さであった。実際、約100m分の据付作業は短期間で終了した。

写真-1は工場での鋼殻製作状況を、写真-2はヤードでのコンクリート打設後のフレアブロック完成状況を、写真-3は現地でのフレアブロック据付状況を、写真-4は延長約100m分の据付完了状況を示す。

5. 結論

今回、フレア護岸の設計・製作・施工を通して、以下のようなことが分かった。

(1) 形状設計について

2次元水理模型実験によって求めたフレア護岸の越波流量推定線図を用いて決めた倉橋町大迫港フレア護岸の天端高さは、+6.0mとなった。

(2) 水理実験について

天端高さ+6.0mのフレア護岸提案断面のモデルを作成した2次元水理模型実験の結果、越波流量は $0.0002\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ で、許容越波流量 $0.01\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ の約1/50となった。堤体に作用する波圧は、最大で合田式設計波圧の約5倍の衝撃的な波圧となりうるということが分かった。

(3) 構造設計について

衝撃的な波圧が作用することとプレファブ化によって現地施工を容易にするため鋼/コンクリート合成構造を採用した。フレア護岸の前面は特異な円弧形状をしているため、設計には有限要素法を用いた、さらに2次元水理模型実験より求めた衝撃的な波圧を静的荷重として有限要素解析を行った結果、前面下部に大きな応力が発生することが分かり、合成構造を合理的に設計することができた。

(4) 施工について

鋼/コンクリート合成構造とすることで軽量化が可能となり、施工性は良好で20箇約100m分のフレアブロックの据付は短期間で終了した。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、倉橋町、(株)エイトコンサルタントには多くの貴重なご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上啓介，入江功，上久保祐志：非越波型防波護岸の護岸天端高さ と作用波圧について，海岸工学論文集第43巻，pp. 776-780，1996。
- 2) 市川靖生，片岡保人，竹鼻直人，濱崎義弘，入江功，村上啓介：フレア型護岸の道路護岸への適用に関する基礎的検討，海洋開発論文集Vol. 16，pp. 251-256，2000。
- 3) 片岡保人，市川靖生，榊原健男，竹鼻直人，塙洋二，入江功：フレア型護岸の不規則波による水理特性の検討，海洋開発論文集Vol. 17，pp. 61-66，2001。
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999。
- 5) 竹鼻直人，濱崎義弘，市川靖生，橋野藤彦，片岡保人，塙洋二：新型防波護岸(フレア護岸)の天端高さ設計手法，神戸製鋼技報Vol. 53 No. 1，pp. 75-79，2003。
- 6) 市川靖生，片岡保人，竹鼻直人，榊原健男，入江功，村上啓介：フレア護岸の水理特性におよぼすマウンドの影響，海洋開発論文集，Vol. 17，pp. 725-730，2002。
- 7) 下迫健一郎，高橋重雄，斉藤祐一，M. Muttray，H. Oumeraci，細川泰廣：高基混成堤の水理特性および耐波安定性に関する大型模型実験，海岸工学論文集，第44巻，pp. 826-830，1997。
- 8) 山本泰司，木村克俊，田端恵士，北原繁志，二ノ宮清志，佐藤典之：北海道森港における消波型高基混成堤の設計と施工，海岸工学論文集，第51巻，pp. 781-785，2004。