

(技術資料)

フレア護岸の設計・製作・施工

Design, Manufacture and Construction of “Flare-shaped Seawall”



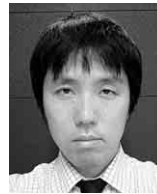
竹鼻直人*
Naoto TAKEHANA



荻野 啓*(工博)
Dr. Kei OGINO



沼田 克*
Katsu NUMATA



木地健太郎*
Kentaro KIJII



片岡保人***(工博)
Dr. Yasuto KATAOKA



山田岳史***(工博)
Dr. Takeshi YAMADA

“Flare-shaped Seawall” was adopted in Hiroshima for the first time in Japan. The reasons for the adoption include its low height, scenic nature, preservation of beach-sand and economic efficiency. The height of the seawall was selected to be +6.0m based on a wave-overtopping-rate presumption diagram. A two-dimensional wave tank model test was conducted for confirmation. The seawalls are constructed from a composite of steel and concrete. Finite-element analysis was performed for their structure design. Construction of “Flare-shaped Seawall” was proved to be easy because of the use of composite structure.

まえがき = 外洋に面した空港、発電所などの重要施設用護岸や、臨海部の汀(てい)線に沿って建設される道路用護岸や住宅地用護岸に要求される機能の中で、とくに重要なものの一つに越波阻止性能がある。この要求に対して当社は、新形式護岸であるフレア護岸を提案してきた。フレア護岸は、護岸上面が大きく沖に張出した独特な円弧形状により、波を滑らかに押返すことができるため、低天端でありながら越波を大幅に低減できる特長を有している。また、機能面では、天端上を遊歩道や公園、道路拡幅などに利用することが可能である。さらに、前面水域の消失を少なくし、親水性領域を確保できるといった利点も有している。

過去に、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、設計を簡便にするため、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⁾のフレア用を作成した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⁾。

そして2004年、広島県呉市倉橋町大迫港(以下、大迫港という)の高潮対策事業において国内で初めてフレア護岸が採用された(図1)。構造形式を決めるための主要な要素は、低天端、景観性、砂浜の保全、経済性などであった。フレア護岸のほか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。

そこで本稿では、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。



図1 フレア護岸の設置状況
Fig. 1 Installation of flare-shaped seawall

1. 形状設計

1.1 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。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。

1.2 設計条件

大迫港の設計潮位は Mx.H.W.L + 4.50m、換算沖波波高 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。

1.3 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の値を以下のとおり求める。

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

*機械エンジニアリングカンパニー エンジニアリング事業部 鉄構・砂防部 **技術開発本部 機械研究所

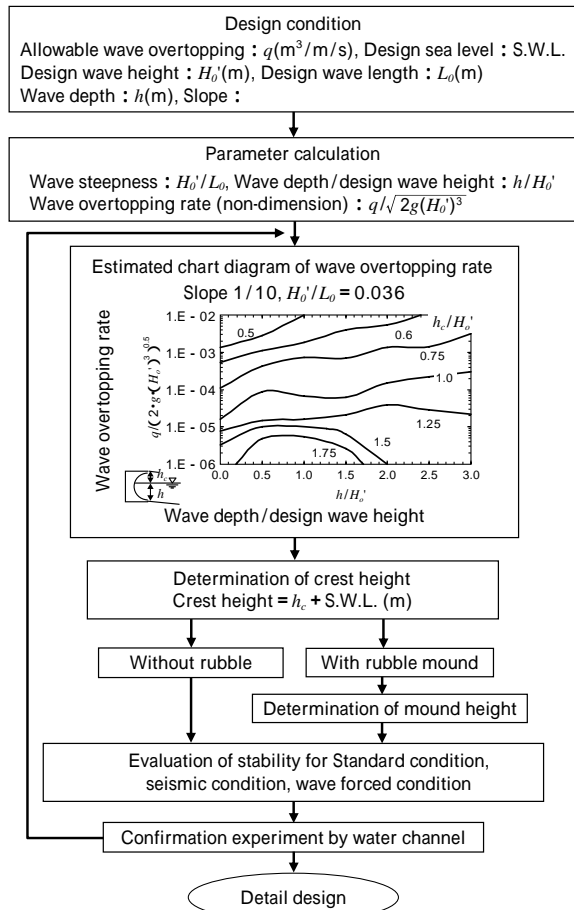


図2 フレア護岸の設計フロー
Fig. 2 Design flow chart

表1 設計条件
Table 1 Design condition

Design sea level	Mx.H.W.L	+4.50m
	H.W.L	+3.33m
	L.W.L	+0.55m
Residual sea level	R.W.L	+1.48m
Wave condition	Design wave height : H_0'	1.86m
	Periodic offshore wave : T_0	5.22s
	Offshore wave length : L_0	42.51m
	Allowable wave overtopping rate	0.01m ³ /m/s
Slope		1/10
Foundation level		+1.5m
Design earthquake intensity		0.12

波形勾配 : $H_0'/L_0 = 0.044$ (2)

堤脚水深と換算沖波波高との比 :
 $h/H_0' = 1.61$ (3)

許容無次元越波流量 :
 $q/\sqrt{2g(H_0')^3} = 8.90 \times 10^{-4}$ (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の海底勾配と波形勾配は、それぞれ1/10, 0.036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。

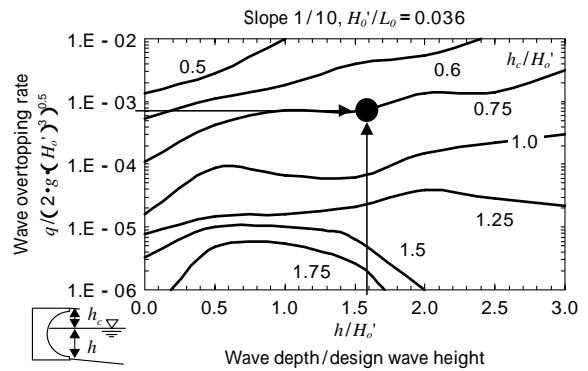


図3 越波流量推定線図 (波形勾配 0.036, 海底勾配 1/10)
Fig. 3 Estimated chart diagram of wave overtopping rate (Wave steepness : 0.036, Slope : 1/10)

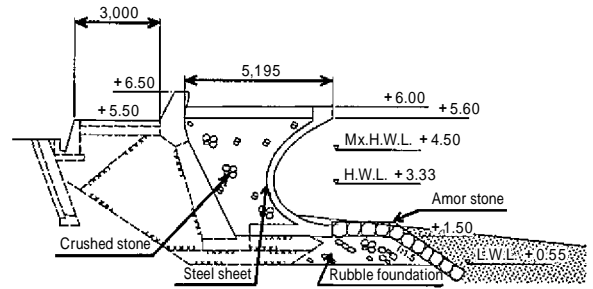


図4 標準断面図
Fig. 4 Cross section view

表2 各構造物の天端高さ
Table 2 Crest height of each seawalls

Seawall	Flare-shaped seawall	Vertical seawall	Seawall covered with wave-breaking blocks
Crest height	+6.0m	+7.5m	+6.4m

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

したがって、海水面から天端までの高さ h_c は、

$$h_c = 1.4(\text{m}) \dots\dots\dots(6)$$

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に示す。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天端高さを低くできることが分る。

つぎに、完成時の安定について6通りの検討を行った。

潮位 : H.W.L, 常時・地震時

潮位 : L.W.L, 常時・地震時

潮位 : H.W.L, 引波時

潮位 : Mx.H.W.L, 引波時

各ケースにおける安定計算を表3にまとめて示した。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分る。

1.4 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

表3 完成時の安定計算

Table 3 Evaluation of stability for each conditions

	Standard condition (L.W.L.)	Seismic condition (L.W.L.)	Backrush condition (Mx.H.W.L.)
Sliding	2.513 > 1.20	1.488 > 1.00	2.085 > 1.20
Overturning	5.030 > 1.20	2.699 > 1.10	4.914 > 1.20
Toe pressure of upright section (kN/m ²)	57.439 < 600	87.787 < 600	55.045 < 600
	Standard condition (H.W.L.)	Seismic condition (H.W.L.)	Backrush condition (H.W.L.)
Sliding	2.230 > 1.20	1.229 > 1.00	1.894 > 1.20
Overturning	4.296 > 1.20	2.240 > 1.10	4.204 > 1.20
Toe pressure of upright section (kN/m ²)	47.644 < 600	87.085 < 600	59.344 < 600

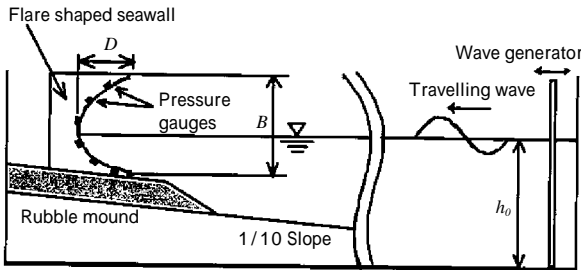


図5 実験状況の概要

Fig. 5 Equipment of experiment

表4 波浪条件

Table 4 Wave condition

Design sea level	Mx.H.W.L +4.50m
Design wave height	$H_{max} = 3.2m$
Periodic offshore wave	5.22s

表5 越波流量

Table 5 Wave overtopping rate (m³/m/s)

Experimental wave overtopping rate	Allowable wave overtopping rate
0.0002	0.01

は、修正 Bretschneider - 光易型の周波数スペクトルを基準とした。また、波圧は規則波により測定した。この時の波浪条件を表4に示す。

越波流量の結果を表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。

波圧の測定では、潮位および波高をパラメータとした実験を行い、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ものを図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ことによる衝撃的な波圧である。

1.5 衝撃波圧による安定性の検討

フレア護岸は前面形状が独特な円弧になっているた

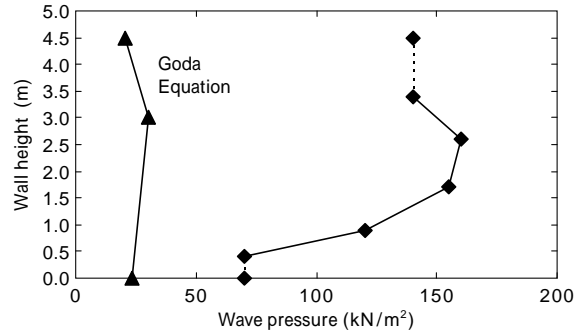


図6 実験結果に基づく現地換算波圧

Fig. 6 Measured wave pressures

表6 実験波圧による波力成分

Table 6 Wave force components (kN/m)

Horizontal wave force	Vertical wave force (upward)
587.7	88.3

表7 浮上りの安定計算

Table 7 Evaluation of stability for uplift force

	V_D (kN/m)	V_U (kN/m)
Deadweight	188.378	
Buoyancy	-41.823	
Vertical wave force		88.32
Uplift force		31.806
Total	146.555	120.126
Uplift		
Safety factor (V_D/V_U)	Allowable safety factor	
1.22	> 1.20	

め、押波波力による鉛直力が作用する。そこで、フレア護岸を採用するにあたり、十分な安全性を検討しておく必要があるため、衝撃碎波波力が作用した時に堤体が浮上らないことを検討した。その時の波力は、実験で測定された衝撃的な波力(図6)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仮定した。

フレア前面形状を考慮した場合の水平波力および鉛直波力を表6に示す。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(合田式設計波圧の揚圧力を採用)を考慮して浮上りの安定を検討した。表7に安定計算の結果を示す。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。安全率(V_D/V_U)は1.2以上を確保しており、安全であると判断した。

2. 構造設計

2.1 設計荷重

フレア護岸の構造は、図6で示したような衝撃碎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あるため、フレア護岸の現地施工を容易にし、工期短縮に寄与することが可能となる。

設計手法は、鋼殻部に対し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。

部材設計においては、フレア前面の独特な円弧形状の効果を効率的に精度よく把握するため有限要素法を利用した。また、底板部の設計では通常のケーソンと同様のモーメント表を用いた。

鋼殻部の防食に対して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続構造は、ハイブリッドケーソンと同様にスタッド構造とした。

2.2 耐波設計

実験から、フレア護岸には衝撃砕波波力が作用することが分っている。配筋計算などに用いるいわゆる部材波力について、下迫らは⁷⁾、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と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与え、有限要素解析を行った。図 7 に有限要素分割図を示す。

この解析により部材力が求められた⁸⁾。衝撃砕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図 8 に示す。フレア部の下部に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

表 8 設計荷重
Table 8 Design forces

No.	Condition	Limit state design	Design sea level
1	Standard	Serviceability	L.W.L
2	Standard	Ultimate	L.W.L
3	Seismic	Ultimate	L.W.L
4	Seismic	Ultimate	H.W.L
5	Backrush	Ultimate	Mx.H.W.L
6	Wave	Serviceability	Mx.H.W.L
7	Wave	Ultimate	Mx.H.W.L
8	Wave	Fatigue	Mx.H.W.L

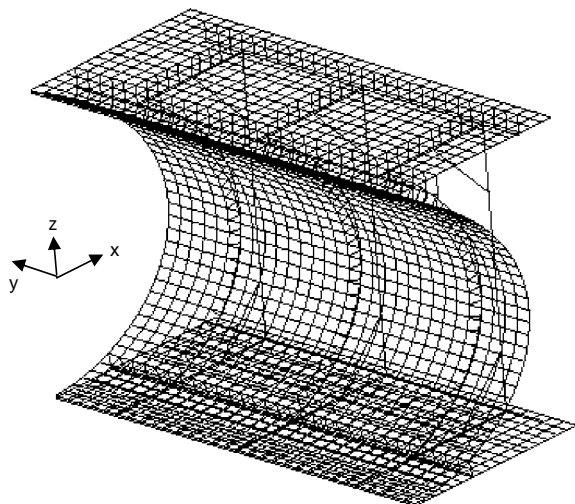


図 7 有限要素分割図
Fig. 7 FEM model

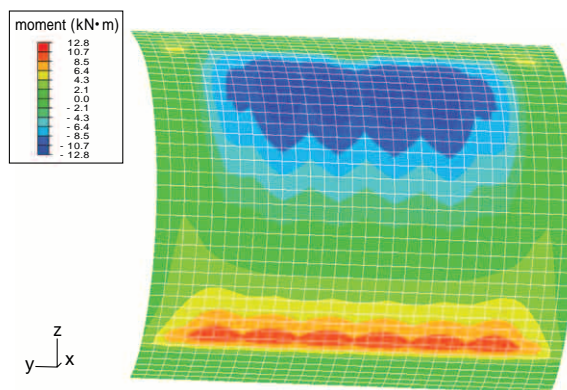


図 8 衝撃波圧作用時の法線方向軸まわりモーメントコンタ図
Fig. 8 Contour of moment

ことが分ったため、フレア部の下部は鉄筋ピッチを密にし、ずれ止めのスタッドピッチも細かくすることとした。

3. 現地施工

3.1 工事概要

大迫港は、1999 年と 2004 年の二度にわたって大きな台風による高潮の被害を受けており、高潮対策が必要とされていた。

フレア護岸を設置する沿岸の総延長は約 400m であり(図 9)、2005 年度から 2007 年度にかけて全体が整備された。

3.2 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。また、延長 100m 分の概略延べ工程を図 10 に示す。

鋼殻工場製作(図 11)

現地近くのコンクリート打設ヤードへの鋼殻の輸送
コンクリート工(図 12)

基礎工

ヤードから現地へのフレアブロックの輸送・据付(図 13)

裏込め工

被覆石工

上部工

完成(図 14)

現地は、陸上部の背後が非常に狭いうえに現地への道

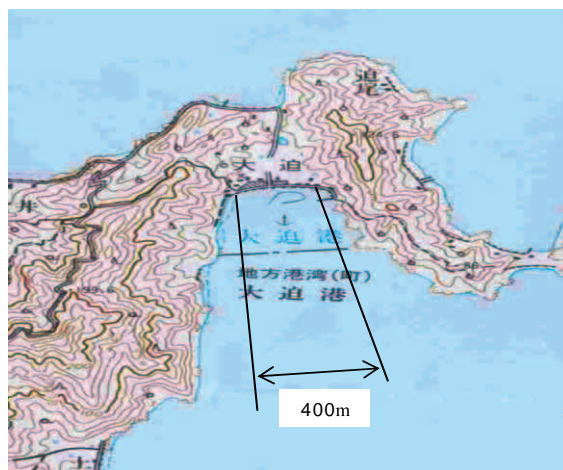


図 9 呉市倉橋町大迫港における施工区域
Fig. 9 Construction area in ODOMARI port

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	コンクリート工				■		
現地	基礎工			■			
	輸送・据付					■	
	裏込め工					■	
	上部工						■

図10 概略延べ工程（延長100m）
Fig.10 Outline of process (distance 100m)



図11 鋼殻製作
Fig.11 Manufacturing of steel shell

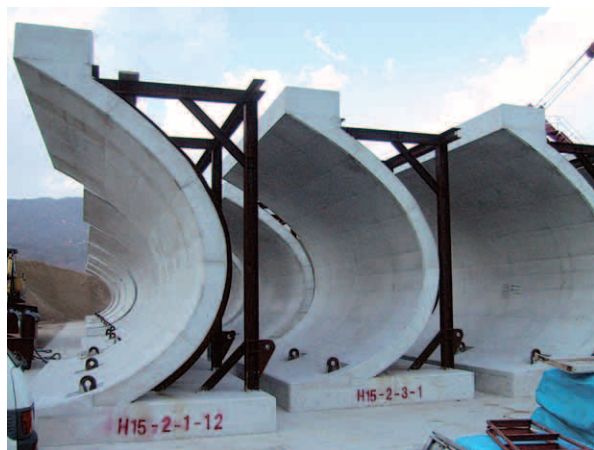


図12 フレアブロック（コンクリート打設）
Fig.12 Manufacturing of flare-shaped blocks



図13 フレアブロック据付
Fig.13 Installation of flare-shaped blocks



図14 完成
Fig.14 Completion

路も狭かったため、フレアブロックの据付は海上施工とした。標準のフレアブロックは長さ6m、重量は作業性を考慮して約50tとしている。このため、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型ブロックと同等の容易さであり、実際、約100m分の据付作業は短期間で終了した。

4. 国道10号線高崎山地区での施工例

本工事は、国道10号線の別府 - 大分間拡幅工事に合せ、高崎山地区において2007年度より進めているものである。図15に高崎山地区の断面図を示すが、本工事の特徴は、高崎山の麓であるため海底面が急峻で水深が深いことである。そのため、3章で述べた大迫港の場合と異なり、フレアの上部だけを杭に被せる構造とした。この上部フレア護岸構造により直立護岸より約4m天端高を低くでき、工費を大幅に削減できるが、それが本工法の採用の決め手となった。図16に上部フレアブロックの据付、図17に上部フレアブロックの設置状況を示す。また、実際の海でフレア護岸が波を返している様子を図18に示す。これは、施工中に台風が来た時に撮影したものである。

このように、今後もいろいろな現地条件にあったフレア護岸を提案し、拡販していきたいと考える。

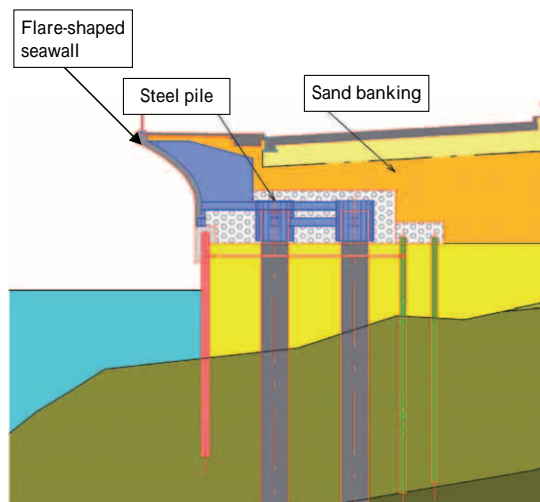


図15 標準断面図（高崎山地区）
Fig.15 Cross section view in TAKASAKIYAMA



図16 上部フレアブロックの据付
Fig.16 Installation of upper flare-shaped block

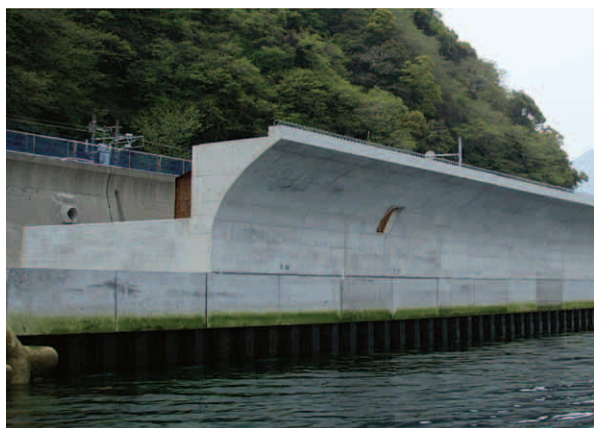


図17 上部フレアブロックの据付完了
Fig.17 After installation of upper flare-shaped blocks



図18 波返しの様子(別府 - 大分国道にて)
Fig. 18 Reflection on high waves

むすび=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った。

- (1) 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ることにより、許容越波流量を満足するフレア護岸の天端高さを求めることが可能であることが分った。
- (2) フレア護岸提案断面のモデルを用いた2次元水理模型実験の結果、越波流量は許容越波流量を十分に満足していることが分った。ただし、堤体に作用する波圧は、合田式設計波圧の最大約5倍の衝撃的な波圧となりうるということが分った。
- (3) 衝撃的な波圧が作用すること、および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独特な円弧形状を有しているため、構造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) 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函・約100m分のフレアブロックの据付は短期間で終了した。
- (5) フレア護岸のような防波護岸はほかにはない構造であり、海岸護岸分野でのオンリーワン製品である。

本論文をまとめるにあたり、呉市倉橋町、(株)エイトコンサルタントには多くの貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 村上啓介ほか：海岸工学論文集，第43巻(1996) pp.776-780.
- 2) 市川靖生ほか：海洋開発論文集，Vol.16(2000) pp.251-256.
- 3) 片岡保人ほか：海洋開発論文集，Vol.17(2001) pp.61-66.
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，(1999)，日本港湾協会。
- 5) 竹鼻直人ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.53, No.1(2003) pp.75-79.
- 6) 市川靖生ほか：海洋開発論文集，Vol.17(2002) pp.725-730.
- 7) 下迫健一郎ほか：海岸工学論文集，第44巻(1997) pp.826-830.
- 8) 山本泰司ほか：海岸工学論文集，第51巻(2004) pp.781-785.