

環境共生型新構造防波堤の開発

與那嶺和史¹・野瀬晴生¹

¹那覇港湾・空港整備事務所（〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-6-11）

浦添第一防波堤の北側延伸区間に環境共生型新構造防波堤を適用するため、水理模型実験によって水理特性を把握し、耐波設計手法を検討した。対象とした防波堤構造は、六角形のケーソンと上部斜面堤を組み合わせた「六角ケーソン堤」である。水理模型実験を実施したことで、各部材に作用する波力のピーク時刻には位相差があること、ケーソン目地部の部材にも波力が作用すること、港外側ケーソンの上部斜面に作用する波圧分布は合田波圧と大きく異なること、港外側ケーソンに作用する揚圧力は台形分布であることなどの水理特性を把握することができた。この把握した水理特性を基に耐波設計手法等を決定した。

キーワード 環境共生型防波堤、六角ケーソン、上部斜面堤、耐波設計手法、水理模型実験

1. はじめに

近年、社会資本整備において環境への配慮が特に強く求められており、今後の港湾整備においても、これまでに以上に周辺環境に配慮した整備手法が強く求められている。

このような社会的背景の中で、図-1の破線部に示す那覇港浦添第一防波堤の北側延伸区間においては、本来の防波堤機能の他にサンゴ着生促進機能を付加した「環境共生型防波堤」として整備する予定である。北側延伸区間3,110mのうち、200mの試験施工区間には、新構造となる六角ケーソン堤を採用し、整備後のモニタリングにより環境共生機能を確認することとしている。

本検討では、水理模型実験により六角ケーソン堤の水理特性を把握し、水理特性を考慮した設計手法を確立することを目的とした。

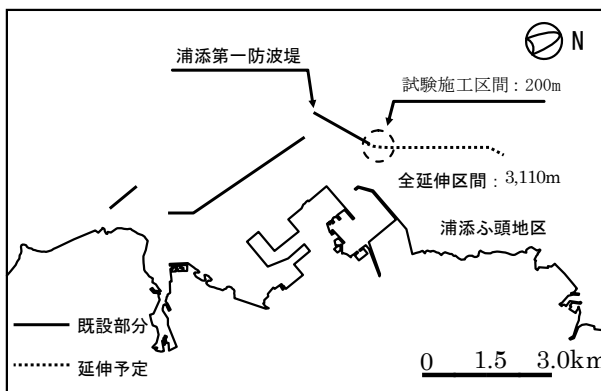


図-1 検討対象施設の位置図

2. 六角ケーソン堤の設計思想

天然サンゴ礁の礁縁部は、複雑に入り組んだ凹凸形状になっており、突出した部分と入江の部分とでは岩盤上における光条件、波浪条件、海水の流動条件等の物理環境が異なる。環境共生型防波堤は、このような天然サンゴ礁の礁縁部と同様の物理環境を創生してサンゴの育成環境を向上させるため、凹凸形状を設計に取入れることにした。その凹凸形状を確保する方策として、ケーソンを六角形状とした六角ケーソン堤を採用した。図-2に示すように、六角ケーソンの配置により形成される凹凸形状により、基盤面を複雑化させ、サンゴ等生息面積の増大、流況の複雑化によるサンゴ幼生の滞留時間の増加、それらに伴う生物共生効果の拡大等を期待している。その他にも、図-3、表-1に示すような、これまでのサンゴ調査の知見を踏まえた様々な要素技術も合わせて導入していく予定である。

以上のような要素技術を設計に取り入れることで、六角ケーソン堤は、従来型防波堤に比べ約 1.85 倍のサンゴの着生が期待できる構造となっている。

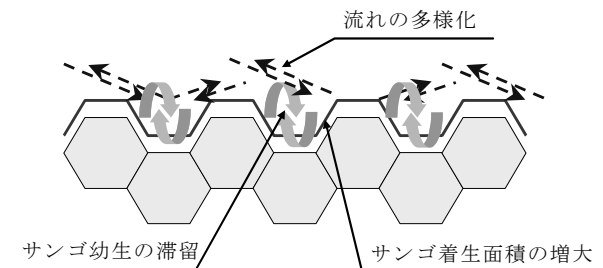


図-2 ケーソン凹凸配置の効果イメージ

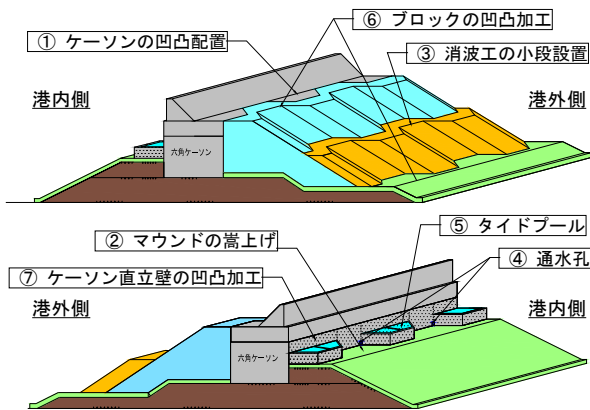


図-3 六角ケーソン堤の外形及び環境共生の要素技術

表-1 採用した要素技術と期待する効果

	要素技術名	環境共生機能（期待する効果）
①	ケーソンの凹凸配置	天然礁のリーフエッジを模して凹凸状にケーソンを配置し、法線を複雑化させてサンゴ礁の育成を図る。
②	マウンドの嵩上げ	防波堤港内側マウンドの嵩上げにより浅場面積を増やし、サンゴの育成場所の拡大を図る。
③	消波工の小段設置	防波堤港外側の消波ブロック断面に小段を設置し、浅場面積を増やしてサンゴの育成場所の拡大を図る。
④	有孔ケーソン（通水孔）	港外側から港内側への海水流入を促進させて港内側の環境変化を図る。
⑤	タイドプール	隔壁の高さを平均潮位付近として干潮時にも海水を充満させる構造とし、海生生物の生息促進を図る。
⑥	ブロックの凹凸加工	消波ブロック、被覆ブロック等の構造物の表面に凹凸加工を施し、サンゴ等の着生促進を図る。
⑦	ケーソン直立壁の凹凸加工	防波堤岸側の直立壁に突起や棚を設け、サンゴ等の着生場所の確保を図る。

3. 検討課題と課題解決方法

六角ケーソン堤は、六角ケーソンと上部斜面堤を組み合わせた新しい構造であり、設計手法が確立されていない。そこで基本設計では、上部斜面堤や一般的な防波堤に対する設計方法を適用して、防波堤断面を決定した。具体的には表-2のとおりである。

表-2 既存設計方法を適用した基本設計手法

対象項目	設計手法
上部工天端高	$H.W.L.+1.0H_{1/3}$ ($h_c/H_{1/3}=1.0$)
作用波力	施工時断面：細山田ら ¹⁾ 完成時断面：佐藤ら ²⁾
直立部 波圧受圧面	港外側直角方向への投影面積 港外側ケーソン：正面＋側面 港内側ケーソン：正面
上部斜面波力	水平波力と鉛直波力に成分分解
揚圧力	前趾端が P_u で後趾端が 0 の三角形分布
消波ブロック	ハドソン式を適用
被覆ブロック	ブロック会社の安定数算定図を適用

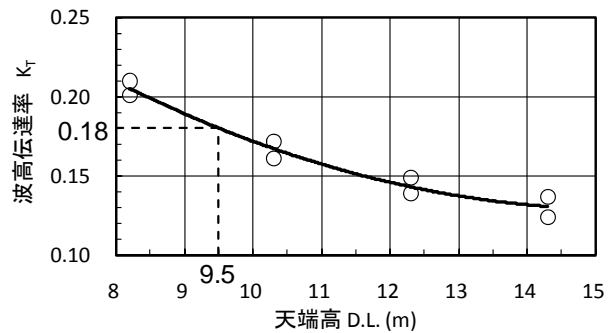


図-4 天端高と波高伝達率の関係

このように既存の設計手法を適用した基本設計には、六角ケーソン固有の形状に起因する要素は含まれていない。すなわち、①上部工の所要天端高、②波力、③消波・被覆ブロックの所要質量、について適切な設計手法を確立することが課題である。そこで、長さ 50m、幅 1.0m、高さ 1.5m の 2 次元水路で模型縮尺 1/47.5 の水理模型実験を実施して六角ケーソン堤の水理特性を把握し、設計手法を確立するものとした。

4. 上部工天端高の検討

当該防波堤の既設区間の波高伝達率 K_T が 0.18 であることから、試験区間も波高伝達率の目標値を 0.18 とした。この波高伝達率を満足する限界天端高を決定するために、天端高を 4 種類に変更した伝達波実験を実施した。伝達波実験の波浪条件は 50 年確率波、潮位条件は H.W.L.とした。

上部工の天端高と波高伝達率 K_T の関係は図-4 のとおりであり、 $K_T=0.18$ を満足する所要天端高は D.L.+9.5m（相対天端高 $h_c/H_{1/3}=0.73$ ）であることがわかった。

5. 波圧・波力の検討

六角ケーソン堤に作用する波力に関する耐波設計手法の検討フローは図-5のとおりである。以下に検討の内容を示す。

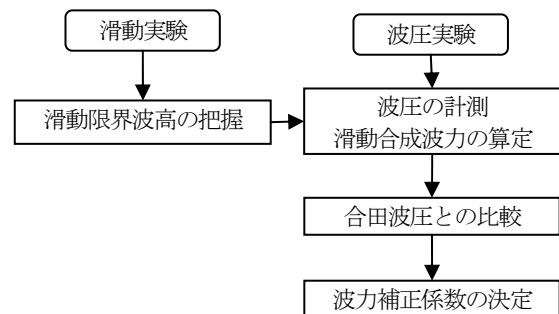


図-5 波力に関する設計手法の検討フロー

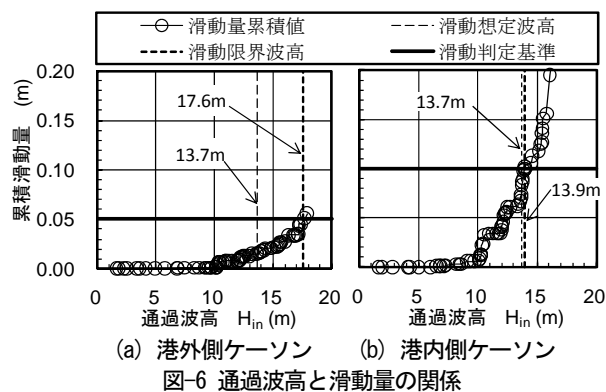


図-6 通過波高と滑動量の関係

(1) 滑動限界波高の把握

基本設計の波力算定方法で想定した波力が発生する波高を調べるために、滑動実験を実施した。図-6は滑動実験における通過波高と累積滑動量の関係を表したものである。基本設計では滑動限界波力が発生する波高を13.7mと算定していたが、実際には港外側ケーソンが17.6m、港内側ケーソンが13.9mであることがわかった。

(2) 波圧の計測

六角ケーソン堤に作用する波圧特性を把握するため、港外側ケーソン、港内側ケーソンともに、図-7に示す12地点で波圧を計測した。代表的な波圧波形とその滑動合成波力を図-8、9に示す。滑動合成波力とは、直立部正面、側面、底面および上部斜面に作用する堤体全体の波圧合力である。

図-8、9より、各点に作用する波圧がピークとなる時刻には差があることがわかる。そこで六角ケーソン堤の滑動安定性を検討する際には、滑動合成波力が最大となる時刻の各部材の波圧を適用することにした。

また、図-9より、港外側ケーソンに隠れている港内側ケーソンの側面にも波圧が作用しており、その波圧強度は、正面の半分程度である。基本設計では目地部には波圧が作用しないと考えていたが、波圧実験によって目地部に作用する波圧も考慮する必要があることがわかった。

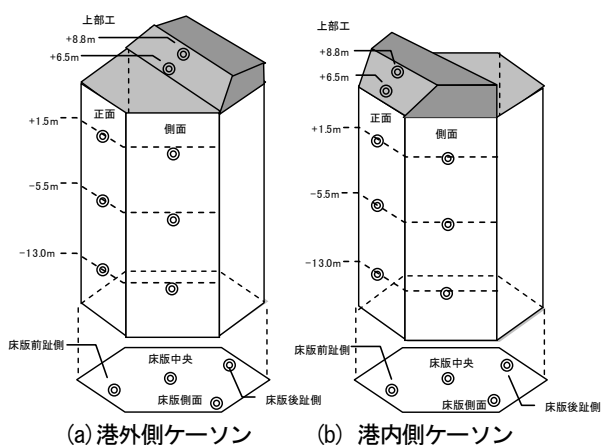


図-7 波圧計測位置

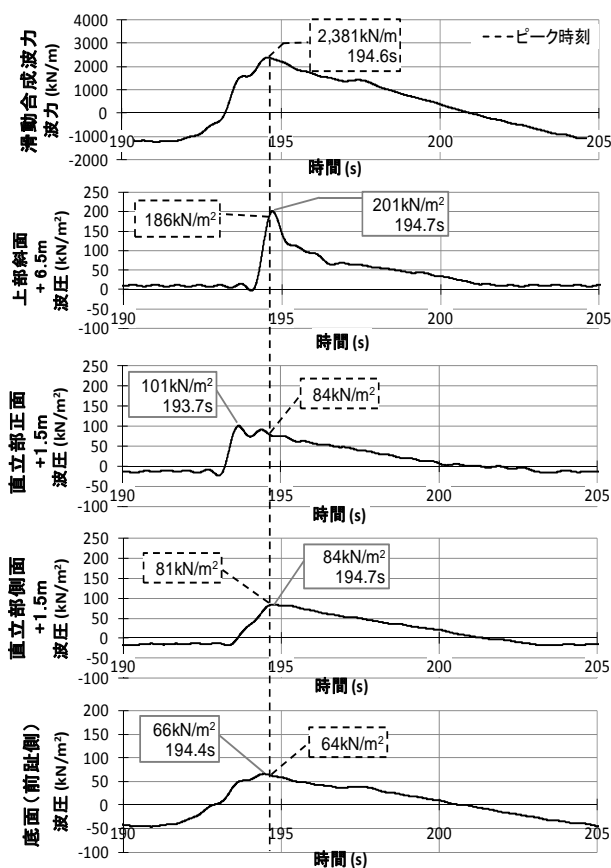


図-8 滑動合成波力と各点波圧の時系列波形

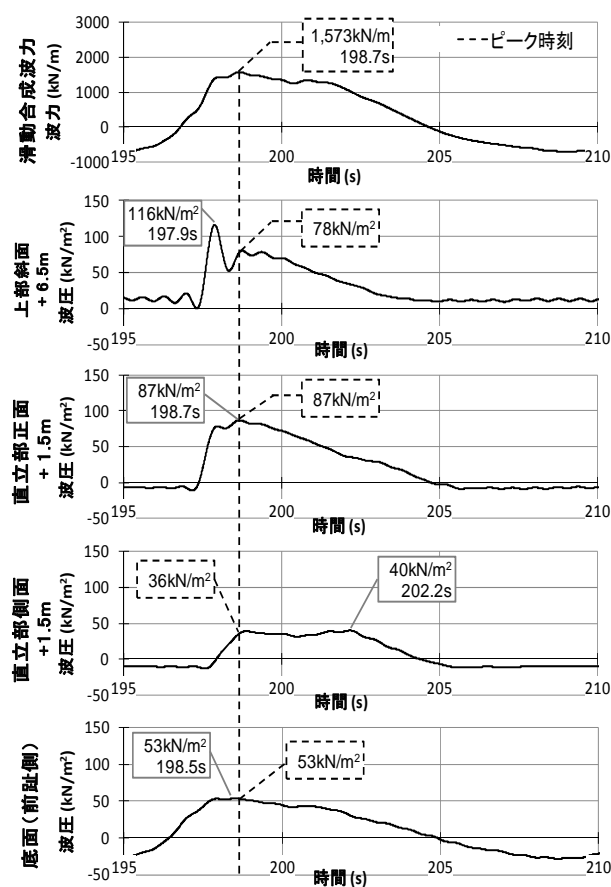


図-9 滑動合成波力と各点波圧の時系列波形

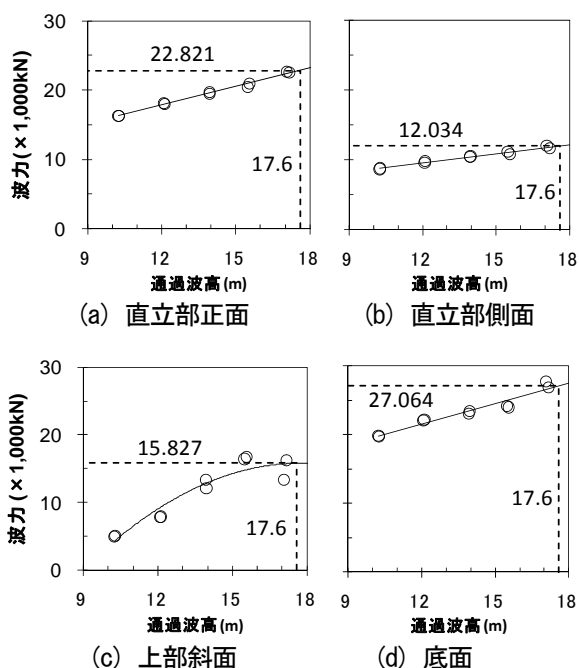


図-10 滑動限界波高に対する各部材の波力（港外側）

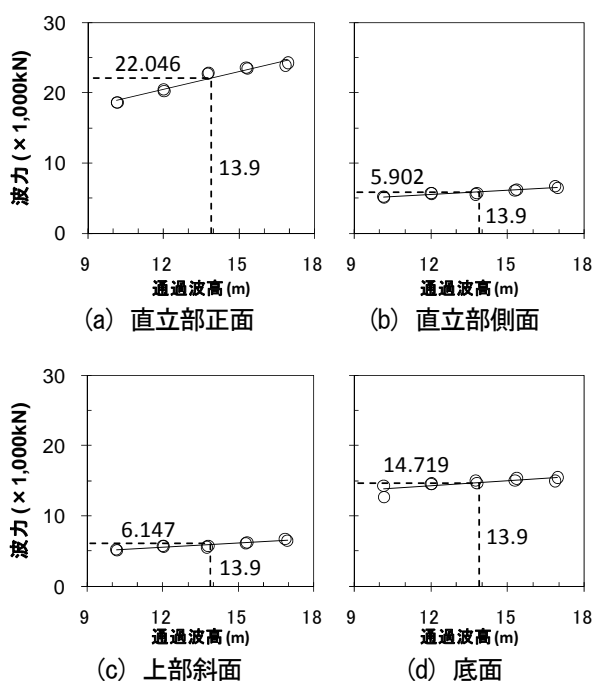


図-11 滑動限界波高に対する各部材の波力（港内側）

次に、実験波高と波力の関係を図-10, 11 に示す。同図を基に、滑動限界波高に対する各部材の波力を推定した。

(3) 合田波圧との比較

各部材について、実験で計測した波圧と合田波圧³⁾（港湾施設技術基準の波圧算定式）との比較を行った。

a) 直立部正面

滑動合成波力最大時と同時刻に、直立部正面に作用する波圧強度を図-12 に示す。この図に示した実験波圧は、滑動限界波高に対する波圧強度を推定した値である。分

布形状は合田波圧とほぼ等しく、波圧強度は若干小さい。

b) 直立部側面

滑動合成波力最大時と同時刻に、直立部側面に作用する波圧強度を図-13 に示す。直立部正面と同様に、実験波圧は滑動限界波高に対する波圧強度を推定した値である。分布形状は合田波圧とほぼ同じである。波圧強度は、港外側ケーソンは値が若干小さく、港内側ケーソンは合田波圧の半分以下である。

c) 上部斜面

滑動合成波力最大時と同時刻に、上部斜面に作用する波圧強度を図-14 に示す。港内側の分布形状は合田波圧³⁾とほぼ同じであり、波圧強度は若干大きい。港外側の上部斜面に作用する波圧は、合田波圧と分布形状が大きく異なる。

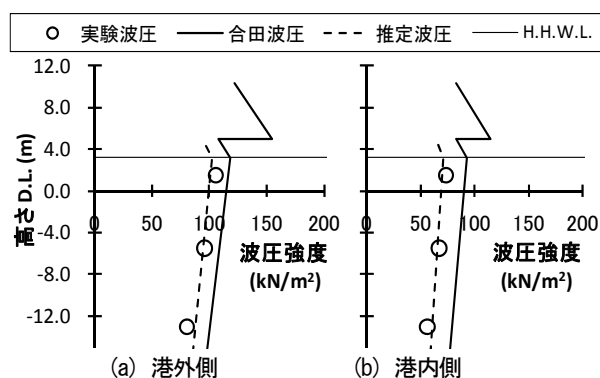


図-12 実験波圧と合田波圧の比較（直立部正面）

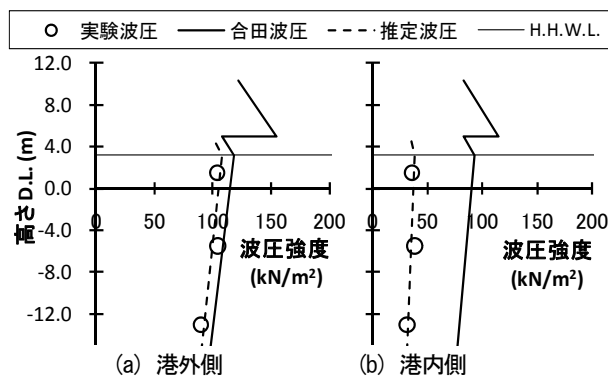


図-13 実験波圧と合田波圧の比較（直立部側面）

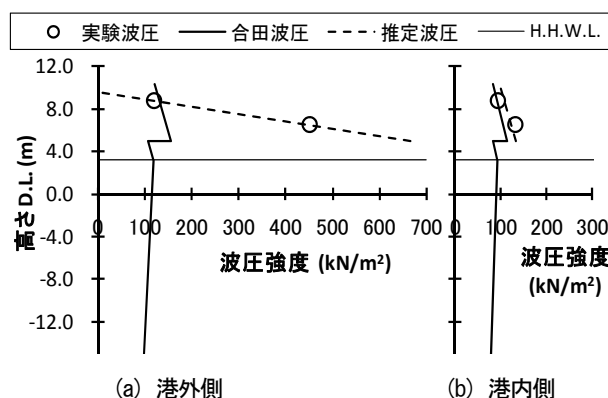


図-14 実験波圧と合田波圧の比較（上部斜面）

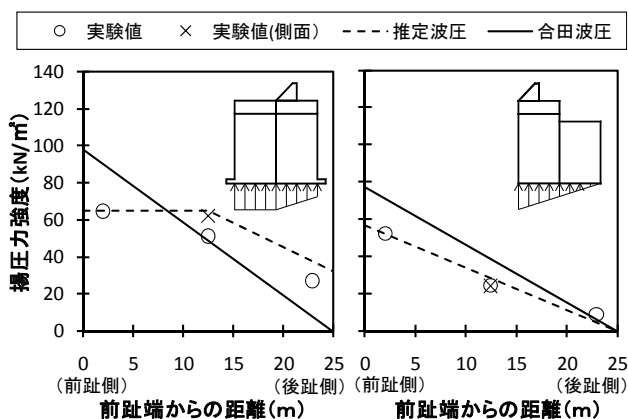


図-15 実験波圧と合田波圧の比較（底面）

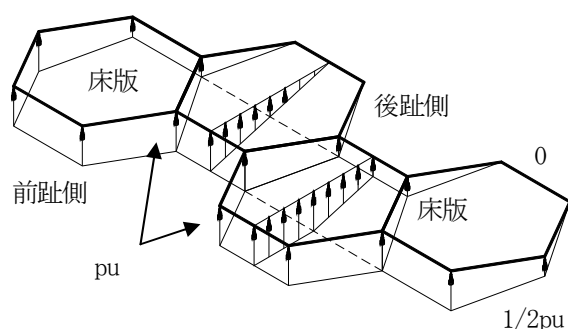


図-16 六角ケーソン堤の揚圧力分布の概念図

d) 底面（揚圧力）

滑動合成波力最大時と同時刻に作用する揚圧力強度を図-15に示す。

港外側に作用する揚圧力は、前趾側から中央部まではほぼ一定の揚圧力が作用し、後趾側に向かって漸減している。また後趾側の揚圧力強度は0ではなく、前趾側に作用する揚圧力強度の半分程度である。そのため港外側の揚圧力分布は台形分布であり、基本設計で想定した三角形分布と異なることが明らかになった。

港内側に作用する揚圧力は、大きさは異なるけれども、合田波圧と同様に前趾側から後趾側に向かって漸減する三角形分布であった。

以上のことから、港外側と港内側に作用する時刻の同時性を考慮した揚圧力分布を図-16に示すようにモデル化した。六角ケーソンに作用する揚圧力の分布形状は合田波圧との相関傾向が確認できる。

e) 実験波圧と合田波圧の比較のまとめ

以上のように、港外側ケーソンの上部斜面を除く各部材に作用する波圧分布形状は、合田波圧との相関傾向が確認できることから、表-3に示す補正係数を用いて波圧強度を評価算出する方法を、耐波設計手法に採用した。

港外側ケーソンの上部斜面については、波圧分布形状が大きく異なるので、合田波圧に補正係数を乗じて波圧強度を評価することができない。そこで、波高に比例す

表-3 波力算定へ用いる補正係数

		実験値 (A)	合田式 (B)	補正係数 (A/B)
直立部正面 (kN)	港外側	27,842	32,001	0.87
	港内側	19,400	25,246	0.77
直立部側面 (kN)	港外側	29,363	31,948	0.92
	港内側	10,388	25,204	0.41
上部斜面 (kN)	港外側	19,309	9,345	-
	港内側	5,409	4,606	1.17
底面 (kN/m²)	港外側	64.7	98.1	0.66
	港内側	52.4	71.3	0.73

$$p(z) = B(z) \rho g H_D \quad (1a)$$

$$B(z) = 3.86(1 - (z - h_c')/4.6) \quad (1b)$$

る $\rho g H$ に係数を乗じて式(1a)により波圧強度を評価することにした。ここに、 ρ :水の密度(kg/m^3)、 g :重力加速度(m/s^2)、 H_D :設計波高(m)、 z :静水面からの高さ(m)、 h_c' :静水面からの上部斜面下端高さ(m)である。

6. 消波・被覆ブロックの耐波安定性の検討

(1) 消波ブロックの耐波安定性の検討

ブロック安定実験は、ハドソン式に基いて決定した規格の消波ブロックを用い実施した。波高を5段階に徐々に大きくし、設計波高を作用させた後の消波ブロックの状況を図-17(a)に示す。消波ブロックが消波工の法尻や沖側に飛散している状況がわかる。このケースの被災度 N_0 は0.86であり、許容被災度の0.3を大きく超えた。

消波ブロックの移動が多い箇所は、消波工の凸部から凹部に向かう法線方向の斜面部である。消波工は港外側に向かつては標準勾配の1:1.3であるが、凸部から凹部に向かう法線方向の斜面勾配は1:0.7の急勾配となっている。この部分の勾配を標準勾配程度に緩くすることで、消波ブロックのかみ合わせが高まり消波ブロックの安定性が高まる可能性が考えられる。

表-4 消波ブロックの安定実験結果

対象断面	港外側断面		港内側断面
ブロック規格	ブロックA 100t型	ブロックB 120t型	ブロックA 100t型
潮位	H. W. L.		
被災度 N_0	0.86	1.80	0.25
許容被災度	0.3		
判定	OUT	OUT	OK



(a) 港外側 (b) 港内側
図-17 ブロック安定実験の波作用後の状況

表-5 港外側被覆ブロックの安定実験結果

対象断面	港外側断面		港内側断面
ブロック規格	12t型		
潮位	H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.
被害率 D (%)	22.3	24.3	30.0
許容被害率 (%)	1.0		
判定	OUT	OUT	OUT

(2) 被覆ブロックの耐波安定性の検討

a) 港外側被覆ブロック

図-17(a)の港外側被覆ブロックに着目すると、法肩部の被覆ブロックが飛散している様子がわかる。港外側被覆ブロックの被害率は表-5 に示すとおり許容被害率の1%を大きく超えている。

港外側被覆ブロックの安定性を向上させるためには、マウンド法肩の凹凸を緩くすることが考えられる。その他には、マウンドに小段をつけてマウンド法肩の水深を大きくすること、凹型部のマウンド水平部を広くして凸型部と凹型部のマウンド法肩を直線形状とすることによって港外側被覆ブロックの安定性を高められると想定している。

b) 港内側被覆ブロック

六角ケーソン堤の港内側マウンドは、環境共生機能向上のために嵩上げを行っている。このマウンドの被覆材の所要質量を決定する設計手法がないので、港外側被覆ブロックの所要質量算定結果と同じ規格である12t型の被覆ブロックを適用して、ブロック安定実験を実施した。

表-6 港内側被覆ブロックの安定実験結果

対象断面	港外側			港内側
ブロック規格	12t型			
潮位	H.W.L.			
天端高	-3m	-5m	-7m	-5m
被害率 D (%)	9.9	4.8	0.0	0.0
許容被害率 (%)	1.0			
判定	OUT	OUT	OK	OK

マウンド被覆材の天端高-5mの条件で、波高を5段階に大きくする実験で設計波高を作用させた後の状況は図-17(b)のとおりである。港外側ケーソンの背後において、被覆ブロックが多く移動している。しかし、港内側ケーソンの背後では被覆ブロックの移動が見られない。嵩上げ高を変更した場合の被害率は表-6 のとおりである。天端高が低いほど被害が少なく、港外側断面の-7m および港内側断面の-5mの天端高において被害は無い。

港内側被覆ブロックの安定性を満たすためには、ブロックの大型化が必要である。また、天端高-3mの断面の試験施工区間への適用は、モニタリング計画も考慮して再検討が必要である。

7. まとめ

水理模型実験で把握した六角ケーソン堤の水理特性に基いて決定した耐波設計手法は、表-7 のとおりである。

表-7 水理模型実験結果を考慮した耐波設計手法

対象項目	設計手法
上部工天端高	$H.W.L.+0.73H_{1/3}$ ($h_r/H_{1/3}=0.73$)
作用波力 (含:上部斜面)	各部材に作用する波力の位相差を考慮して波力補正係数を決定
直立部 波圧受圧面	壁面直角波力を法線直角成分に変換 港外側ケーソン: 正面+側面 港内側ケーソン: 正面+側面
揚圧力	港外側ケーソン: 前趾端から中央が P_u で後趾端が $1/2P_u$ の台形分布 港内側ケーソン: 前趾端が P_u で後趾端が0の三角形分布
消波ブロック	法線方向の斜面勾配を緩くするなどの対策を検討する必要がある
被覆ブロック	モニタリング計画を含めて再検討する

8. 今後の検討課題

今回の検討結果では、消波ブロックおよび被覆ブロックの安定性が確保できなかった。そのため、ブロックの安定性を向上させるための対策（消波ブロックの緩勾配化、被覆ブロックの大型化等）を引き続き検討していく予定である。

参考文献

- 佐藤孝夫, 山懸延文, 古川正美, 高橋重雄, 細山田得三: 消波ブロック被覆上部斜面堤の水理特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 556-560, 1992年
- 細山田得三, 高橋重雄, 谷本勝利: 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 706-710, 1994年
- 合田良美: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, 1973年
- 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 837-840, 2007年