

環境共生型防波堤の取り組み

八十島義浩¹・細野 衛¹

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

那覇港の浦添第一防波堤の北側延伸区間をモデルケースとして、サンゴを主体とした「環境共生型防波堤」の断面形状、平面配置を検討した。検討にあたっては、構造物本来の性能を満足させることを前提として、サンゴをはじめとする生物の生息に配慮するため、過去の沖縄総合事務局における環境共生の取り組みで得られた知見等を踏まえて複数の要素技術を盛り込んだ。また、これらの要素技術のうち、既に実施事例があるものについては定量的な目標、事例が無いものについては定性的な目標を立案し、目標の達成状況を確認するためのモニタリング調査計画を検討した。

キーワード 環境共生型防波堤、サンゴ、生物的要求性能、モニタリング調査

1. はじめに

沖縄総合事務局開発建設部では、沖縄県の日本復帰以来、「サンゴ礁と共生する港湾」を目指した港湾整備を推進してきた。1990年の調査において、防波堤等の港湾構造物に高被度のサンゴ群集が分布していることが確認され（森田ら、1992）¹⁾、これを受け港湾構造物が有するサンゴ群集の成育場としての機能に着目し、1990年代以降、那覇港他で種々共生技術の開発を行ってきた。

また、那覇港港湾計画（2003）ではサンゴをはじめとする多様な生物の生息・生育場の保全を図るため、浦添ふ頭地区に海域環境保全ゾーンが位置付けられ、施設整備に当たっては可能な限りサンゴ着生促進に配慮することとしている。

一方近年では、各種メディアにおいてサンゴの話題が頻繁に扱われるようになり、一般市民のサンゴに関する認識や保全・再生・創出への要請も高まっている。

このような背景のもと、那覇港の浦添第一防波堤の北側延伸区間（約3,100m）をモデルケースとして、サンゴ着生を主体とした「環境共生型防波堤」の取り組みを進めており、ここでは主に試験施工区間（約200m）の構造断面の検討について報告を行うものである。

2. サンゴと環境条件

那覇港周辺海域のサンゴ群集は、1998年に広範囲にわたる高水温による白化現象の影響を受け、大きく衰退した。現在はその回復過程にあり、10年経過した2008年現

在では被度が50%を越える場所もある（図-1）。



図-1 防波堤上のサンゴ（2008.8）

サンゴの成長に影響を及ぼす環境条件としては、水温の他に、波浪、流速、光量、水質、生物間の競合等があり、これらの条件の違いにより、サンゴ群集の発達および回復状況が異なると考えられる。例えば、消波ブロック被覆堤の場合、港外側には傾斜面が形成されていることから、サンゴは成育に必要な光を受けやすい。また、外海に面しているため、水質は港内側よりもサンゴにとって好ましい条件であることが多い。

このようなことから、環境共生型防波堤の検討にあたっては、サンゴと環境条件の関係を考慮して、サンゴが成育しやすい条件「生物的要求性能」を防波堤の構造に可能な限り取り入れることが基本的な考え方となる。

3. 対象海域及び構造物

図-2に対象海域を示す。

対象構造物である那覇港の浦添第一防波堤は、将来、3,110m延伸される予定である。このうち既設構造物から200mまでを試験施工区間として設定した。

「那覇港（浦添ふ頭地区）港湾整備に伴う海域環境保全マニュアル」（那覇港管理組合、2006）²⁾では、当該地区防波堤等の構造物の整備にあたっては、サンゴ等生物への配慮として海水交換型、凹凸表面形状等の工法を採用することとしている。

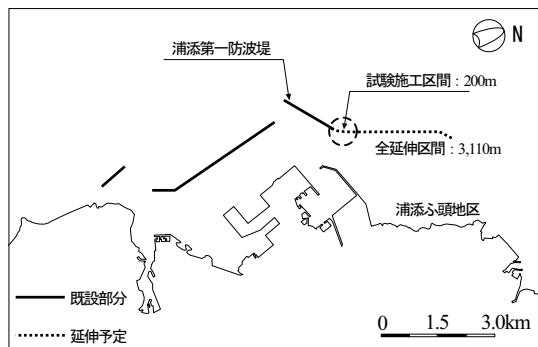


図-2 対象海域

4. 環境共生型防波堤の検討

(1) 全区間における平面配置・断面イメージの検討

環境共生型防波堤検討委員会（2004～2008）において、目標とするサンゴ着生面積の実現に向けた検討を行った。

港湾計画上埠頭用地として消失する浦添ふ頭地区の天然礁におけるサンゴ面積（平成18年度現在約58,000㎡）を算出し、これと同等のサンゴ面積を環境共生型防波堤によって確保することを目標とし、種々の構造断面を検討した。図-3に平面配置の考え方を示す。

サンゴ着生面積の目標値を満足させる環境共生型防波堤の配置の考え方として、環境共生型防波堤（A）では背面に公共バースが控えていることから防波機能を重視し

て六角ケーソン型に、環境共生型防波堤（B）ではコアハビタットとしての機能を期待して幅広い浅場の造成が可能なサンゴ成長型を採用することとした（図-4）。

さらに、防波堤形式別のサンゴ着生面積を求め、表-1のとおり目標値である58,000㎡を確保するための環境共生型防波堤（A）、（B）の必要延長について検討した。

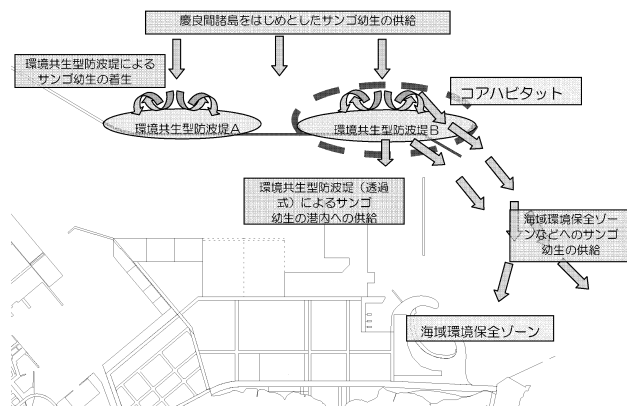


図-3 平面配置の考え方

表-1 目標を満足するための構造形式別延長

区間	構造形式	サンゴ面積 (m ² /m)	必要延長 (m)	サンゴ面積 (m ²)
A	六角ケーソン型	19.5	700	13,650
B	サンゴ成長型	86.9	400	34,760
その他	上部斜面堤	4.8	2,010	9,648
合計			3,110	58,058

表-1のサンゴ着生面積は、サンゴの生物相が安定している既設防波堤における水深別のサンゴ被度を採用し、構造物の表面積に乗じた値である。

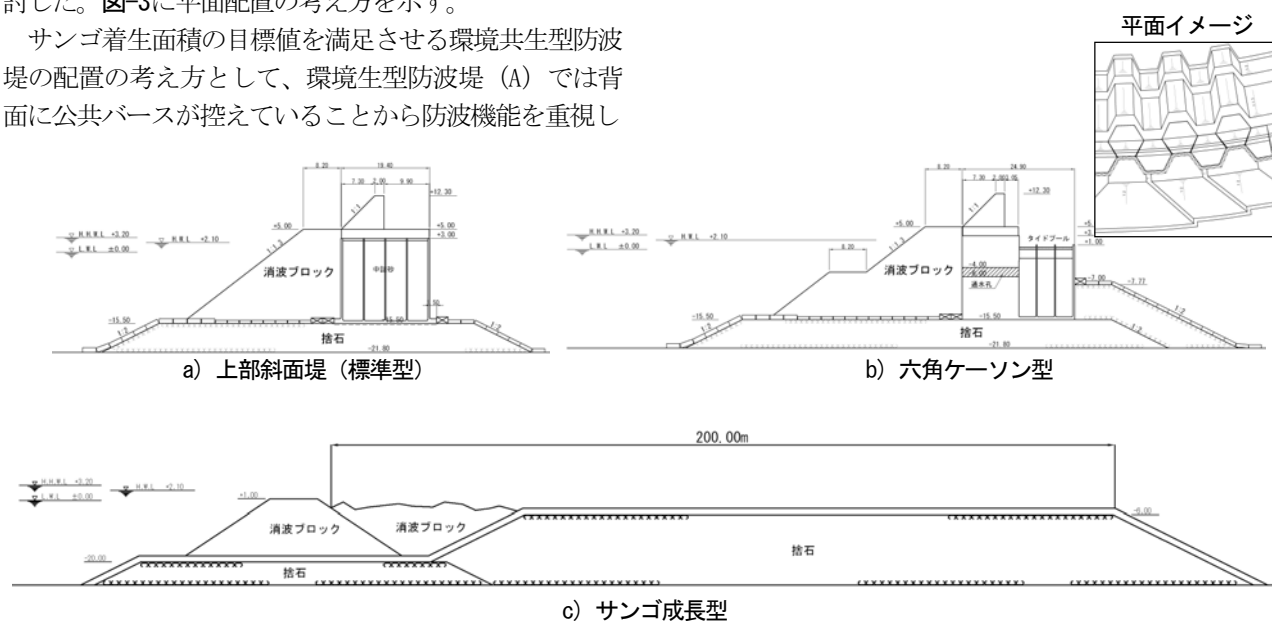


図-4 環境共生型防波堤の断面イメージ

各構造形式の特徴（概要）を下記に示す。また、六角ケーソンについては、その効果のイメージを図-5に示す。

○上部斜面堤（図-4 a））

- ・従来より採用されている断面であり、これを標準型の防波堤と位置付けた。サンゴ着生面積は小さいものの、最も安価である。また、防波機能、施工性についても実績が多数ある。

○六角ケーソン型（図-4 b））

- ・生物生息状況：ケーソンを岸沖方向にずらして凹凸に配列することにより、天然礁の地形のような入り組んだ地形が創造できると考えられる（国土交通省監修、2003）²⁾。天然礁の礁縁部は、複雑に入り組んだ地形となっており、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、海水流動条件等の物理環境が異なるため、サンゴをはじめそれぞれの環境に適応した多様な生物が生息している。これらのことから、ケーソン凹凸配置により天然礁の地形を模すことで、基盤面の複雑化による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といったサンゴの育成環境の向上が期待される。
- ・防波機能：ケーソン堤であり波は遮蔽される。
- ・施工性：施工手順は単純であるが、ケーソン製作期間は多少長くなり、捨石・被覆ブロックが入り組んだ形状となり複雑になるため、海上作業期間は長くなる。

○サンゴ成長型（図-4 c））

- ・生物生息状況：幅広い浅場の整備により礁池部（イノー）が再現でき、光条件等に有利なサンゴのコアハビタットとなり得る。透過タイプであり、港内へのサンゴ幼生の供給が期待できる。
- ・防波機能：他の形式に比べて波浪透過量が大きくなる。
- ・施工性：前面消波部と背後部の段階施工となり、施工は煩雑となり施工期間も長い。

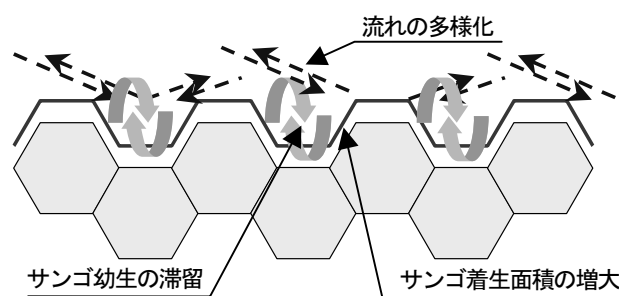


図-5 六角ケーソン（ケーソン凹凸配置）の効果イメージ

(2) 試験施工区間の検討

a) 試験区と対照区の設定

試験施工区間では、背面に公共バースが控えていることから六角ケーソン型を採用することとした。また、六角ケーソン型の効果を比較・評価するため、標準型である上部斜面堤を対照区として採用し、延長200mのうち試験区140m、対照区60mの配置とした。

b) 試験区における要素技術の選定

試験施工区間では、試験区と対照区との比較・評価により、要素技術の効果及び対象海域における要素技術の適用性の判断を目的としている。試験区での検討の結果、サンゴ着生効果が大きいもの、すなわち適用性の高い要素技術については、本施工区間においても採用することが考えられる。また、適用性が低いと判断された要素技術については、本施工区間で採用しないか、改善策を講じて採用することを再検討する。

表-2に沖縄総合事務局管内での実績等を踏まえ、試験区での検討を試みた各要素技術の環境共生機能の概要、図-6に適用箇所のイメージをそれぞれ示す。

表-2 採用した要素技術とその概要

技術区分	要素技術名		環境共生機能
基質投入	(A)	消波工の小段設置 小段付消波工	防波堤港外側の消波ブロックの法線に小段を設置して浅場面積を増やしてサンゴの育成場所の拡大を図る。
	(B)	マウンドのかさ上げ 港内浅場造成	防波堤港内側のマウンドをかさ上げて浅場面積を増やしてサンゴの育成場所の拡大を図る。
物理環境の多様化	(C)	ケーソンの凹凸配置 六角ケーソン	天然礁におけるリーフエッジを模し凹凸状にケーソン（六角式）を配置し、法線を複雑化させてサンゴ礁の再生を図る。
	(D)	エコシステム式 海域環境保全工法 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。
海水交換の促進	(E)	有孔ケーソン 海水交換型防波堤	港外側から港内側への海水交換や海水流入を促進させて港内側の環境変化を図る。
表面加工	(F)	ブロックの凹凸加工 エコブロック式	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。
	(G)	ケーソン直立壁の凹凸加工 表面加工（スリック（幼生）トラップ）	防波堤の岸側の直立壁に突起や棚を設けて、サンゴ等の着生場所の確保を図る。

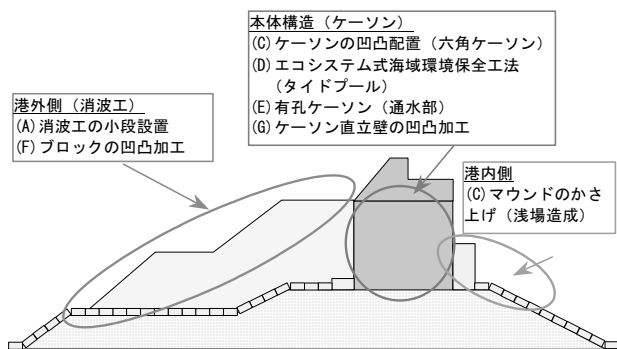


図-6 要素技術の適用箇所のイメージ

c) 要素技術の導入水深等の考え方

サンゴはサンゴ礁生態系の重要な基礎生産者であり、サンゴが増えることで他のサンゴ礁生物も増加すると期待される。したがって、2でも述べたように、選定した要素技術の機能を効果的に発現させるためには、サンゴの成育しやすい条件を整えることがポイントとなる。下記に、要素技術の導入水深の考え方として、対象海域における過去のモニタリング調査結果を基に検討した、

(A) 消波工の小段設置、(F) ブロックの凹凸加工の例を示す。

○(A) 消波工の小段設置

浦添第一防波堤の港外側で継続的に行われているモニタリング調査結果の水深別のサンゴの被度を参考にした。

図-7より、サンゴの被度はD.L. -5m以浅においてD.L. -7m以深よりも著しく高く、D.L. -5m以浅ではほとんど差違がみられない。このことと、小段の設置水深が深いほど構造物の安定性が高く経済的である点に配慮して、本要素技術を適用する水深条件をD.L. -5mと設定した。

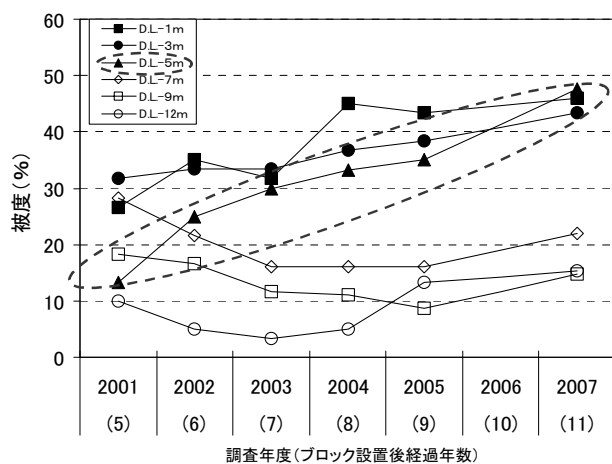


図-7 水深別のサンゴ被度の経年変化
(浦添第一防波堤港外側)

○(F) ブロックの凹凸加工

那覇防波堤の港外側に設置しているエコブロックを参考にした。

エコブロックはサンゴの着生促進を目的として、さま

ざまな幅・深さの凹凸加工が施されたものであり、既に那覇港の那覇防波堤でその有効性が確認されている（例えば、三宅ら、2006）³⁾。凹凸の深さは「粗度大：10mm」、「粗度中：5mm」、「粗度小：2mm」、「粗度無：無加工（対照区）」で実験しその効果が検証されている。なお、代表的な凹凸仕上げ状況を図-8に、構造物導入8年後のサンゴ着生状況を図-9に示す。

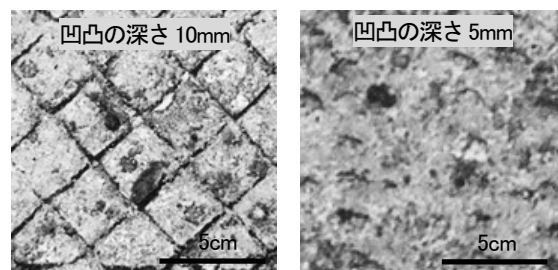
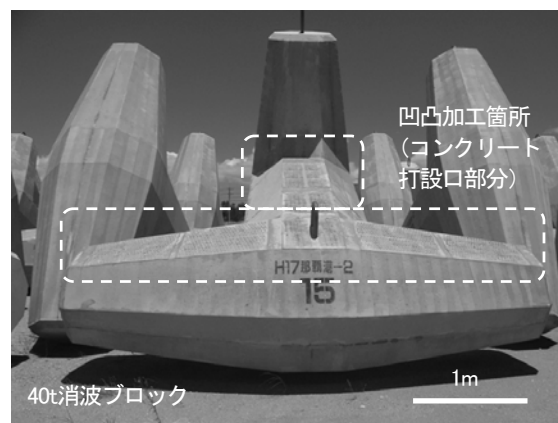


図-8 ブロックの凹凸加工のイメージ（エコブロック）

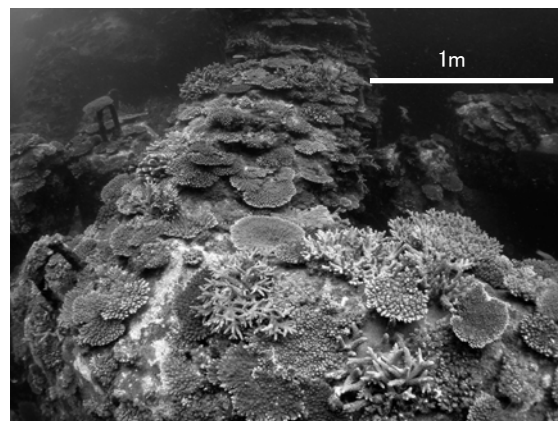
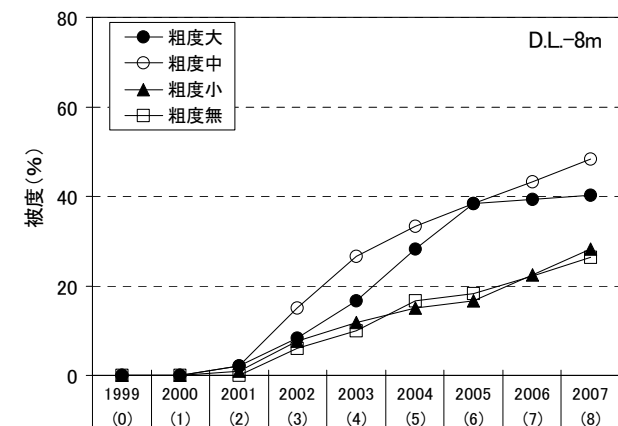
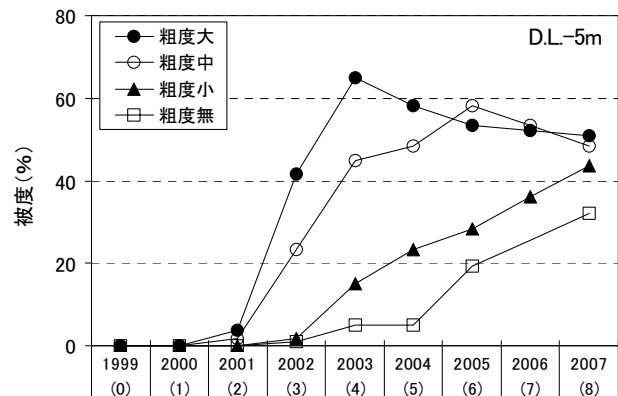
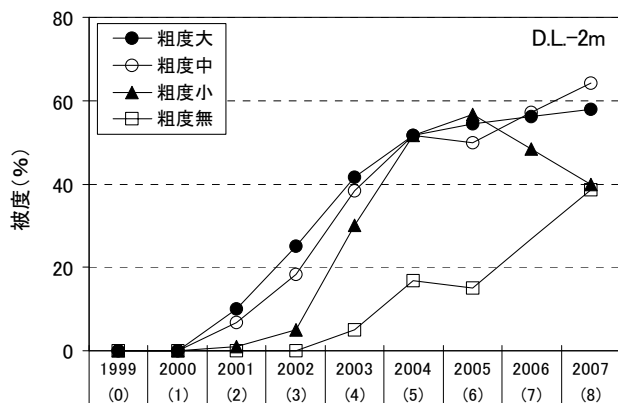


図-9 サンゴ成育イメージ（エコブロック、8年後）

サンゴ着生・成育促進効果は、粗度（凹凸の規模）だけでなく、ブロックの設置水深によっても異なる。

図-10より、粗度別、水深別の被度について8年目の結果をみると、D.L. -2m、-5m、-8mとも粗度小（2mm）の効果は小さく、粗度中（5mm）、粗度大（10mm）で効果が大きい。また、粗度小は、D.L. -8mではほとんど効果がみられない。したがって、本要素技術の適用にあたって、凹凸の規模は粗度中、粗度大とすることにした。



粗度小：2mm、粗度中：5mm、粗度大：10mm、粗度無：無加工

図-10 粗度別水深別の被度変化（エコブロック、那覇防波堤）

○その他の要素技術

その他の要素技術についても、沖縄総合事務局管内外での調査データを参考に、サンゴの成育に適すると考えられる水深や形状について検討した。

(B) マウンドのかさ上げ

港内側への設置であるものの、図-7に示す港外側と同様のサンゴ着生・成育特性であることを期待して、D.L. -5mに導入することを基本とした。

(C) ケーソンの凹凸配置

浦添ふ頭地区の天然礁のリーフエッジ周辺に形成される櫛の歯状地形の幅が、10～20m程度、大きいもので30m程度であることから、20m前後の凹凸幅が形成されるよう配置することとした。

(D) エコシステム式海域環境保全工法（タイドプール）

宮古島でサンゴの着生・成育促進効果が確認されたタカセガイ中間育成礁の事例（安藤ら、2008）⁴⁾を参考に、干潮時にタイドプールが形成されるようプールの底面水深をD.L. ±0m～0.5m、天端高さを底面+0.5mとすることを基本とした。

(E) 有孔ケーソン

浦添第一防波堤のケーソン目地付近にサンゴが比較的多く成育していたことを参考に、施工上可能な幅として、0.5m幅の通水孔を設けることとした。なお、別途サンゴの流速と被度の関係を検討した結果からは、平均流速が20cm/s前後の場所でサンゴの被度が高かった。水理模型実験により通常波では、通水孔を0.5m幅とした場合、港外から港内に向かって20cm/s程度の流れが発生することが確認されており、サンゴの効果的な着生・成育が期待される。

(G) ケーソン直立壁の凹凸加工

浦添第一防波堤での実験結果（柴田ら、2004）⁵⁾を参考に、凹凸の規模（粗度）を10mm、30mmとすることにした。

図-11に（A）～（G）の要素技術を盛り込んだ環境共生型防波堤のイメージを示す。

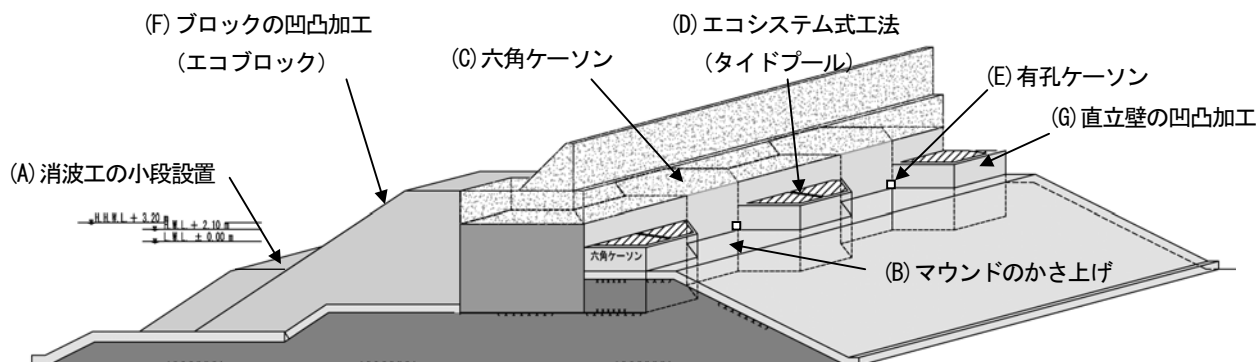


図-11 六角ケーソンを主体とした環境共生型防波堤のイメージ（試験区）

5. モニタリング調査の考え方

(1) 目標及び指標（評価方法）

a) 試験区全体

試験区全体としては、表-1で示したサンゴ面積の目標を満足するために、期待する六角ケーソン型の単位延長当たりのサンゴ面積が19.5m²/mであることから、140mで2,730m²のサンゴ面積となることを目標とした。なお、サンゴ面積は、調査で得られたサンゴ被度の値を構造物の表面積に乘じることで算出する。

b) 要素技術別

要素技術別としては、那覇港にて実績のあるものについては定量的な目標を、実績の無いものについては定性的な目標を設定した。

例えば、(F) ブロックの凹凸加工の場合、過去の調査データより概ね導入後7～8年程度でサンゴ被度が安定し、60%前後の被度となることからそれを目標とした。実績の無い(C) ケーソンの凹凸配置については、生物の多様性の向上などが期待されるため、面的かつ広範囲に調査したサンゴや魚類の種類数を対照区である通常の消波ブロック法面と比較し、対照区よりも生物の種類数が増えることなどを目標とした。

(2) 調査方法

調査方法については、基本的に沖縄の港湾におけるサンゴ礁調査の手引き（沖縄総合事務局、2007）⁶⁾に基づいて整理した。

(3) 調査期間

調査期間とは、環境共生型防波堤の機能を最終的に評価するにあたって必要と考えられる年数である。

本検討では、暫定的に那覇港の防波堤における生物相の遷移が安定する期間が6～8年間であること（国土交通省監修、2007）⁷⁾を踏まえて「6～8年間」を設定した。一方、六角ケーソン型のように施工事例が無い場合には、モニタリング調査の動向を見ながら安定期まで調査を実施する予定である。

6. まとめ及び今後の課題

過去の沖縄総合事務局における環境共生の取り組みで得られた知見等を踏まえ浦添第一防波堤における「環境共生型防波堤」の構造等について検討を行った。今後は本施工に向け下記の検討を行う予定である。

- ・六角ケーソン型は特殊な構造形式であることから堤体の安定性等について水理模型実験で確認する必要がある。
- ・設定した目標の達成状況をモニタリング調査で検証し、本格施工区間の事業に向けた課題と対応策を検討する必要がある。

本取り組みでの成果が沖縄で将来施工される港湾構造物に標準的に取り入れられ、サンゴと共生する港湾の実現を期待する。

謝辞：本検討を遂行するにあたり、ご協力頂いた方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 森田ら（1992）：サンゴの人工構造物への着生状況、海岸工学論文集、Vol.39、pp.1001-1005。
- 2) 那覇港管理組合（2006）：那覇港（浦添ふ頭地区）港湾整備に伴う海域環境保全マニュアル、48p。
- 3) 三宅ら（2006）：人工構造物の表面加工によるサンゴ群集着生促進効果の評価、海岸工学論文集、Vol.53、pp.1106-1110。
- 4) 安藤ら（2008）：サンゴ増殖礁の開発を目的としたタカセガイ中間育成礁による検証実験、海洋開発論文集、Vol.24、pp.813-818。
- 5) 柴田ら（2004）：防波堤直立壁の表面形状が与えるサンゴの着生効果、日本サンゴ礁学会第7回大会要旨集、p.26。
- 6) 沖縄総合事務局開発建設部（2007）：沖縄の港湾におけるサンゴ礁調査の手引き、143p。
- 7) 国土交通省港湾局 監修（2007）：順応的管理による海辺の自然再生、294