

# 論文 海洋構造物用の新型被覆ブロックの構造設計と環境性能の評価

瀧本 聖吾\*1・堺 孝司\*2・錦織 和紀郎\*3・昇 悟志\*4

**要旨:** 近年, 生活空間の拡大等によって, より厳しい環境条件下での構造物の設計が要求されるようになってきている。特に, 海岸構造物への来襲波高は大きくなっており, 使用されるコンクリートブロックにも高波浪の作用に耐え得る高い構造強度と耐波安定性が求められている。そこで著者らは, 種々の実験, 解析を行い, 構造強度および耐波安定性に優れた海洋構造物用のコンクリートブロックを新しく開発した。さらに, 新型被覆ブロックや既存のブロックを海岸構造物に用いた場合の建設に伴う環境負荷を算定した。両者を比較検討することで, 新型被覆ブロックが著しく環境負荷低減できることを明らかにした。

**キーワード:** 被覆ブロック, 構造解析, FEM, 環境負荷, インベントリ分析

## 1. はじめに

近年, 海洋構造物が設置される水深帯においては来襲波高が大きくなってきており, 被災等を受け難い構造物が望まれている。このことは, コンクリートブロック(以下, ブロック)を用いた海岸構造物の場合にも同様であり, 使用されるブロックには, 高波浪の来襲にも耐え得る高い構造強度と耐波安定性に加え, 環境性能や経済性にも優れた機能が求められている。

また, コンクリート構造物の建設には多くの資源が用いられ, 材料の製造・運搬や施工に起因する温室効果ガス等の排出量も少なくない。したがって, コンクリート構造物の設計・施工等における環境負荷低減技術の開発, 並びにこれらの要素技術に基づく環境便益を評価することが極めて重要となってきている。

このような背景に基づき著者らは, 構造強度と耐波安定性に優れるとともに, 海藻の着生機能等の海域環境との親和性にも配慮した新型被覆ブロックを開発した。さらに, 一般的な海岸構造物の試設計により建設における環境負荷を算定し, 構造型式, 各種ブロック別に比較検討してその環境負荷低減に関わる有用性を評価した。

## 2. 被覆ブロックの用途

海洋構造物には機能に応じて様々な構造形式があるが, 代表的な例としては波力や反射波, 越波量低減等の目的で防波堤や護岸前面に設置される消波ブロックが挙げられる。また, 海岸構造物には捨石をマウンド状に積上げ, 平型の被覆ブロックで捨石表面を被覆する構造も多い。本研究で開発したブロックの種別は被覆ブロックであり, 人工リーフ, 防波堤の基礎マウンド, 傾斜堤等の捨石表面を被覆して, 構造物の安定性確保を目的に



写真-1 海岸構造物の例 (人工リーフ)

使用されるものである (写真-1: 人工リーフの例)。

## 3. 新型被覆ブロックの構造設計

### 3.1 新型被覆ブロックの形状

開発した新型被覆ブロックの形状を図-1に示す。この形状は, 系統的に行った水理模型実験の結果<sup>1)</sup>を基に, 開口部の開口率, 配置等の設計を行い決定したものである。4箇所(長円形開口部)と中央1箇所(円形開口部)の合計面積は, ブロック1個の支配面積(基本長L(一辺の長さ)の2乗)の19.4%になる。



図-1 新型被覆ブロックの形状

\*1 (株)不動テトラ ブロック環境事業本部技術統轄部近畿技術部 工修 (正会員)

\*2 香川大学 工学部安全システム建設工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 (株)不動テトラ ブロック環境事業本部技術統轄部 工修 (正会員)

\*4 (株)不動テトラ 技術開発統轄部総合技術研究所材料構造研究室

### 3.2 設計対象荷重

ブロックに作用する荷重は、施工時および据付後（供用時）の2通りに大別して考えることができる。ブロックは打設後所定の養生を経て製作ヤードに仮置される。その際、施工条件によっては多段積されることも多く、上載ブロックの重量が施工時の荷重となる。一方、据付後の荷重は波力と考えられる。

### 3.3 据付後（供用時）の設計荷重（波力）

#### (1) 実験方法

ブロックに作用する波力はブロックの形状毎に異なることから、波力は模型実験により測定することとした。測定は、最も大きい波力が作用する人工リーフの天端沖側端および法面最上段のブロックを対象に実施した。

波力の測定装置は木村ら<sup>2)</sup>の研究を参考に作製し（図-2）、測定対象のブロック2個（図-2中黒塗り）をひずみゲージを貼付けた測定用の薄板先端に取付けて碎石表面から僅かに浮かせた。このようにブロックが波力の作用を受けて薄板がたわむようにし、ブロックが波力を受けた際に薄板に生じるひずみを測定し、そのひずみを生じせしめる力を逆算して波力とした。一方、測定対象以外のブロックは碎石で作製したマウンドの表面に一面敷き並べ、金網等で動かさないように固定した。

#### (2) 実験縮尺および相似則

本実験では、基本長  $L=45\text{mm}$  のブロック模型を使用した。これは、4t型ブロック ( $L=2,340\text{mm}$ ) の1/52模型であり、既往の波力に関する実験的研究<sup>3)</sup>を参考に、実験縮尺を1/50程度とすることを目安に定めたものである。また、海岸工学の分野では重力が粘性力よりも卓越し、フルード則に従って実験を行うことが多い<sup>4)</sup>。フルードの相似則より各物理量の模型量と現地量の関係は式(1)ようになる。ここで、 $\lambda$ は模型縮尺、添え字mは模型量、pは現地量を示している。

- ・長さ（波高等）： $H_m/H_p=1/\lambda$
- ・時間（周期等）： $T_m/T_p=1/\lambda^{1/2}$
- ・荷重（波力等）： $F_m/F_p=1/\lambda^3$

#### (3) 実験波浪

実験波浪の周期  $T$  は1.5~2.0sec、波高  $H$  は別途実施した安定実験<sup>1)</sup>から求めた安定限界波高とし、繰返し回数は50回とした。ここでブロックは、安定性の観点より

設計耐用期間に応じた設計波に対して安定限界波高が設計波高以上となるように設計される。したがって、本実験で測定した波力は、現地の様々な条件において作用する最大の波力である。

#### (4) 実験結果

表-1に波力の測定結果を示す。また、法面最上段のブロックを対象に測定された水平岸向き波力  $F_x$  の相対度数分布を図-3に示す。図には、平均値、標準偏差および正規分布を仮定した場合に95%が超えない値(=1.199N)を併記している。表より、全体的に天端沖側端ブロックよりも法面最上段ブロックに作用する波力の方が大きいこと、水平沖向きおよび鉛直上向き波力は岸向きおよび下向き波力よりも小さいことが確認できる。

#### (5) 設計荷重

以上より、設計荷重は法面最上段ブロックに作用する水平岸向きおよび鉛直下向き波力とした。水平岸向き波力を例に詳細検討すると、95%が超えない値は1.199N、平均値は0.934Nで、これらの比は1.28である。このようなことから、本研究ではこれを安全率とみなす考え方を採り、設計に用いる波力は水平、鉛直とも測定値の平均値に1.3を乗じて与えることとした。

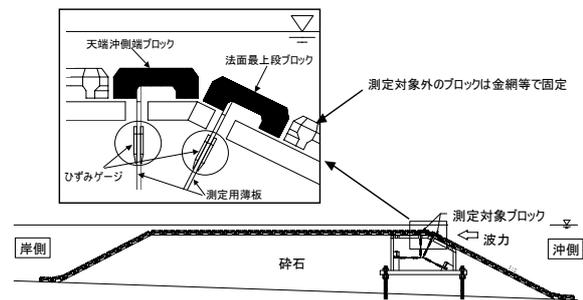


図-2 波力測定装置

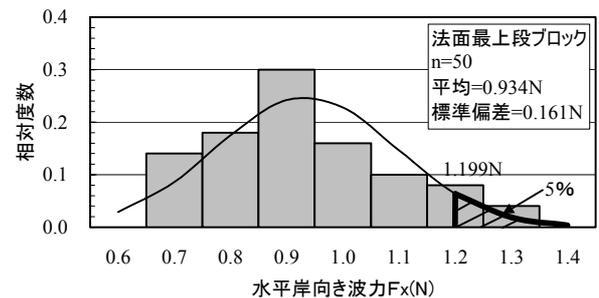


図-3 水平波力の測定結果

表-1 波力実験結果

ブロック位置	水平波力(N)		鉛直波力(N)	
	岸向き	沖向き	上向き	下向き
法面最上段	0.664~1.327	0.189~0.324	0.152~0.340	0.189~0.555
	0.934	0.232	0.217	0.291
天端沖側端	0.396~1.092	0.098~0.267	0.201~0.351	0.197~0.282
	0.566	0.157	0.276	0.223

※上段：測定値の範囲，下段：平均値

### 3.4 構造解析

#### (1) 施工時の解析

4t 型形状を対象に三次元弾性体線形 FEM により行った。解析モデルを図-4 に示す。解析対象は多段積時の最下段ブロックで、拘束条件は、支持条件の不均一性を考慮して最も構造的に厳しい条件とし、対角 2 脚の接地点を鉛直方向：拘束、水平方向：滑りとした。また、荷重は自重および上載ブロック 2 個の重量（集中荷重）とした。図-5 には、解析結果として第一主応力度（以下、主応力度）の分布を示す。図より、上面の主応力度は最大でも  $0.61\text{N/mm}^2$  と小さく、主応力度の最大は上載ブロック荷重の作用点の下面側に発生し  $2.76\text{N/mm}^2$  である。

#### (2) 据付後（供用時）の解析

解析モデルを図-6 に示す。解析対象は法面最上段ブロックで、図の位置にて鉛直方向、水平方向を拘束した。水平拘束は、岸向きの波力に対して安定となる状態をモデル化している。また、荷重は自重および波力とし、波力については模型による測定結果  $F_m$ （安全率考慮）を基に式(1)にて 4t 型に換算した値  $F_p$  を合力とする等分布荷重を作用させた。図-7 には、解析結果として主応力度の分布を示す。波力は水平方向に卓越しているため、下面側の主応力度は施工時よりも小さい。一方、水平波力は切欠部を押し広げるような荷重であることから、切欠部には最大で  $1.78\text{N/mm}^2$  の主応力度が発生している。

### 3.5 配筋設計

一般に被覆ブロックのコンクリート設計基準強度は  $18\text{N/mm}^2$  であり<sup>5)</sup>、その引張強度の特性値は  $1.58\text{N/mm}^2$  である<sup>6)</sup>。一方、発生する主応力度の最大値を部位毎にまとめると以下のものであり、上面は補強を必要としないが、下面および切欠部において補強が必要となる。

- ・ 下面 : 最大主応力度 =  $2.76\text{N/mm}^2$  → 補強要
- ・ 上面 : " =  $0.61\text{N/mm}^2$  → 補強不要
- ・ 切欠部 : " =  $1.78\text{N/mm}^2$  → 補強要

よって、鉄筋は下面を補強する下側鉄筋と切欠部を補強するハンチ筋の 2 種類とし、前者は施工時、後者は据付後の応力度の状態から鉄筋量が決まるものとした。

配筋設計においては、主応力度が最大となる検討断面（下面：図-5 の A-A 断面，切欠部：図-7 の B-B 断面）の垂直応力度（図-8）を引張側のみ積分して断面引張力  $T$  を求め、これらの力を鉄筋 (SD345) の降伏強度  $f_y=345\text{N/mm}^2$  で除して、前者を下側鉄筋、後者をハンチ筋の必要鉄筋量  $A_s$  とした（表-2）。

表-2 配筋設計の結果

鉄筋	照査時	断面力	必要鉄筋量	鉄筋径の選定
		T(kN)	$A_s(\text{mm}^2)$	
下側鉄筋	施工時	70.7	205.0	D19( $A_s=286.5\text{mm}^2$ )
ハンチ筋	据付後	22.9	66.3	D13( $A_s=126.7\text{mm}^2$ )

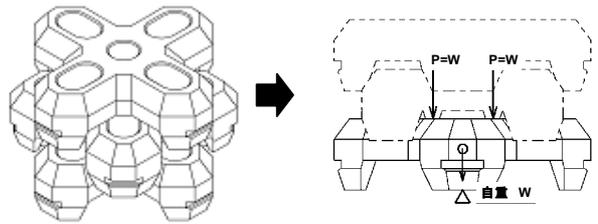


図-4 施工時の解析モデル

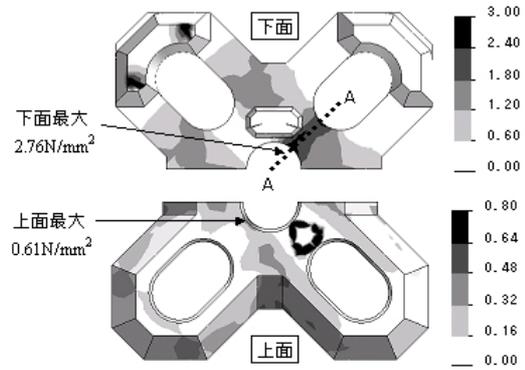


図-5 施工時の解析結果

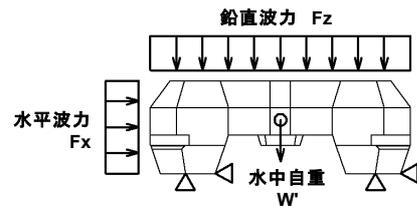


図-6 据付後の解析モデル

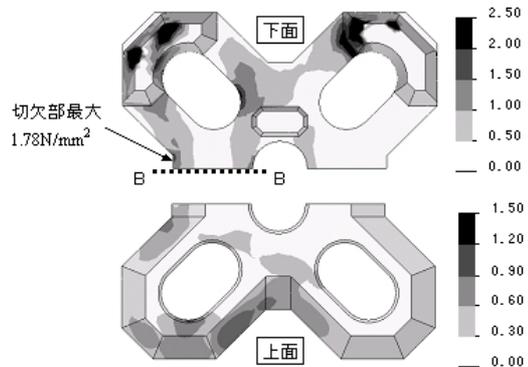


図-7 据付後の解析結果

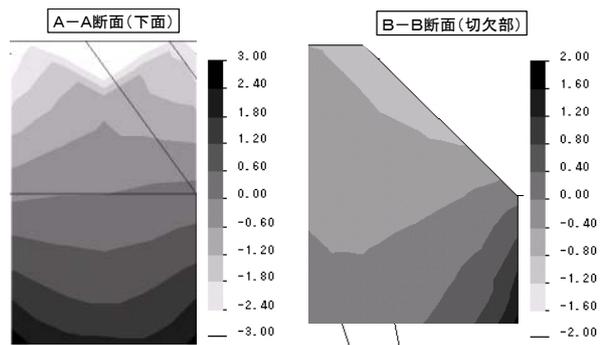


図-8 検討断面の垂直応力度

#### 4. 新型被覆ブロックの環境性能

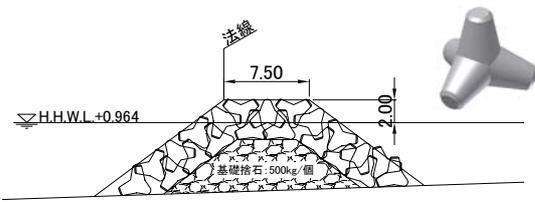
##### 4.1 海岸構造物の試設計

新型被覆ブロックの環境性能を評価するため、構造形式、各種ブロック別に海岸構造物の試設計を行った。対象構造物は波浪制御を目的とした離岸堤および人工リーフとし、波浪制御機能として波高伝達率  $K_t$  (構造物沖側前面における入射波高  $H_i$  に対する構造物透過後の伝達波高  $H_t$  の比) が同等となる構造諸元とした。ここで、一般に離岸堤 (天端が水面上) は断面の幅が比較的狭い構造でも伝達波高を低減することができ、我が国では数十年の実績がある。一方、人工リーフ (天端が水没) は、断面の幅を広くし構造物天端上で波を強制的に砕波させることにより、伝達波高を低減する構造物である。また近年では景観性、藻場造成の観点からも採用例が多い。

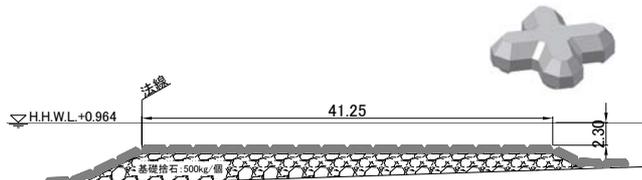
試設計の諸条件を表-3に、定めた構造物の断面を図-9に示す。これらは一般的な海岸構造物の条件である。図には、試設計に使用したブロック形状も記載している。離岸堤形式を構造 a)、人工リーフ形式を構造 b)及び構造 c)とした。構造 a)は、既存の四脚の消波ブロック (12.5t型)を用いた離岸堤で、波高伝達率  $K_t$  は 0.31 である。

表-3 試設計の条件

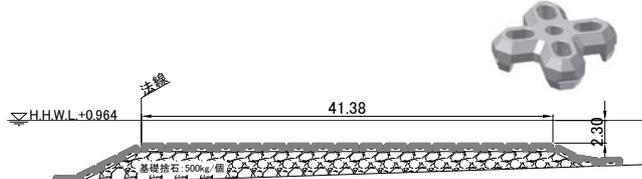
構造形式		離岸堤	人工リーフ
構造条件	設置水深: $h$ (m)	6.16	
	潮位 (m)	H.H.W.L.+0.964	
	天端高 (m)	+2.00	-2.30
波浪条件	設計波高: $H$ (m)	4.50	
	周期: $T$ (sec)	10.4	



構造 a) : 既存の消波ブロック(12.5t型)を用いた離岸堤



構造 b) : 既存の被覆ブロック(8t型)を用いた人工リーフ



構造 c) : 新型被覆ブロック(4t型)を用いた人工リーフ

図-9 試設計により定めた海岸構造物の断面図

一方、構造 b)および構造 c)は天端上水深  $R$  を 2.3m とした人工リーフで、各々被覆工に既存の被覆ブロック (8t型) および新型被覆ブロック (4t型) を用いている。これらの人工リーフの場合は、波高伝達率  $K_t$  が構造 a)と同等となるように天端幅を 40m 程度としている。

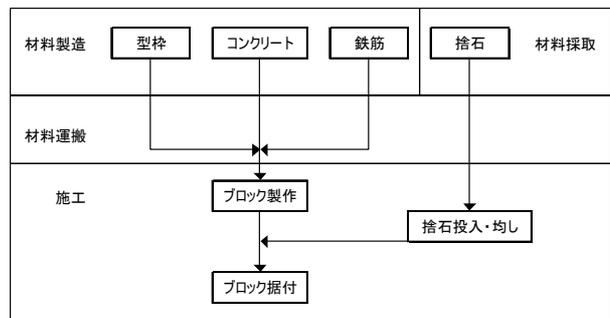
##### 4.2 環境負荷の算定方法

試設計により定めた図-9の各種海岸構造物を対象に、材料の製造・運搬や施工に起因する環境に及ぼす負荷を算定し評価した。

本研究では広域に及ぶ地球温暖化物質および大気汚染物質に着目し、温室効果ガスとして  $CO_2$ 、大気汚染物質として  $SO_x$ 、 $NO_x$  およびばいじん排出量を算定対象とした。また算定においては、材料であるコンクリートの製造や捨石の採取・それらの運搬からブロックの施工までの一連の工種、施工に関わる使用機械・船舶等から排出される環境負荷物質の排出量を求めている。

算定に用いたインベントリデータには、コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案)<sup>7)</sup> (以下、指針) に示される各種エネルギーや材料・工程の原単位データを使用し、指針に記載されていない施工機械に関わる項目等については、施工において消費される軽油、重油等の燃料の量をあらかじめ算出し、それらを基にエネルギーの原単位を用いて各排出量を算定した。これらの排出量を積み上げ法により求めた。

各種海岸構造物の施工フローおよび環境負荷の算定の対象範囲を図-10に示す。



※使用機械・船舶等も含む

図-10 施工フローおよび算定の対象範囲

##### 4.3 環境負荷の算定結果

海岸構造物の延長 100m 当りの施工に伴う各排出量の算定結果を表-4および図-11に示す。

###### (1) $CO_2$ 排出量

離岸堤 (構造 a)) に比べ、人工リーフ (構造 b), c)) の方が、 $CO_2$  排出量が低減されていることが判る。表-4より、特に新型被覆ブロックを用いた構造 c) は、構造 a)と比べて  $CO_2$  排出量が約 45%と低減効果が著しい。

また図-11より、 $CO_2$  排出量は材料製造に由来するところが大きいことが判る。被覆ブロックは消波ブロック

表-4 環境負荷量の算定結果（構造 a）との比較による）（単位：kg/延長 100m 当り）

構造名	施設名	使用ブロック	CO <sub>2</sub> 排出量	比率	SO <sub>x</sub> 排出量	比率	NO <sub>x</sub> 排出量	比率	ばいじん排出量	比率
構造a)	離岸堤	消波ブロック	1,606,843	1.00	1,374	1.00	4,931	1.00	227	1.00
構造b)	人工リーフ	被覆ブロック	1,176,464	0.73	1,975	1.44	5,780	1.17	227	1.00
構造c)	人工リーフ	新型被覆ブロック	724,228	0.45	1,721	1.25	4,405	0.89	151	0.67

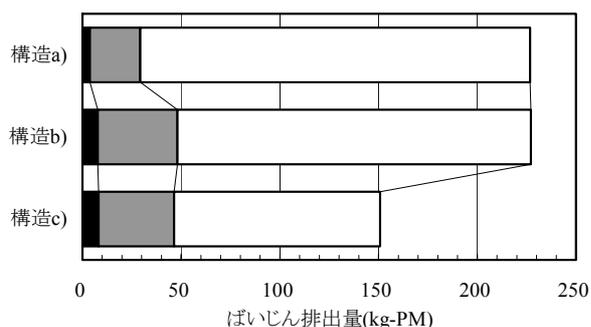
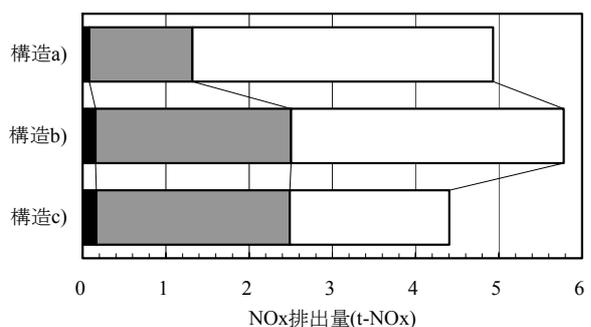
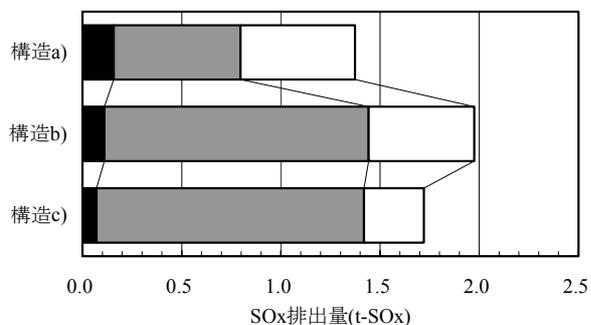
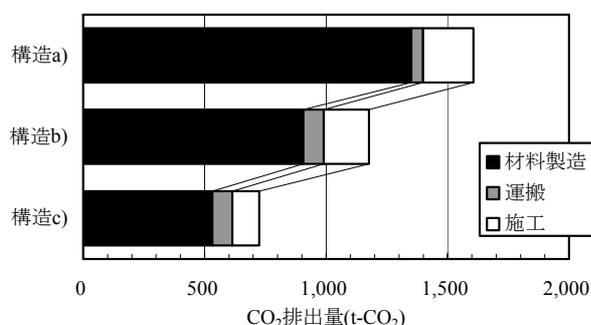


図-11 環境負荷の算定結果

に比べて使用するコンクリート量が少なく、新型被覆ブロックはさらにコンクリートの使用量が少ない。このように、新型被覆ブロックを用いることによるコンクリート量の低減は、CO<sub>2</sub>排出量低減に極めて効果大きい。

### (2) SO<sub>x</sub> 排出量

SO<sub>x</sub> は、離岸堤（構造 a）の場合に最も排出量が少ない。図-11 より、SO<sub>x</sub> 排出は材料運搬による船舶等からの排出が支配的であり、離岸堤（構造 a）は、コンクリート量が多くなる反面、捨石量が少ないためである。一方、人工リーフ（構造 b、c）で比較すると、新型被覆ブロックを用いた場合の SO<sub>x</sub> 排出量が少ない。図から、施工時の排出量が運搬に次いで多く占めており、新型被覆ブロックは、既存ブロックより軽量で安定性を確保出来るため、小型の作業船舶で施工可能であることによる。

### (3) NO<sub>x</sub> 排出量

図-11 より、NO<sub>x</sub> は施工時の排出量が多いことが判る。よって、作業船舶が小型でよい新型被覆ブロックを用いた構造 c) 場合に、最も NO<sub>x</sub> 排出量は低減される。

### (4) ばいじん排出量

同様に、ばいじんも施工時の排出量が最も多い。そのため、作業船舶が小型でよい新型被覆ブロックを用いた構造 c) 場合に、最もばいじん排出量は低減される。

## 4.4 構造物形状の違いによる環境負荷の評価

次に、図-12 に示すような一般的な海岸構造物を対象に、設計波高 H=5m、周期 T=15sec（例えば太平洋側）および 10sec（例えば日本海側）の条件下で天端上水深 R（+が水中、-が水上）を変化させた場合の CO<sub>2</sub> 排出量の比較を行った。使用するブロックは、図-9 に示した既存の被覆ブロックおよび新型被覆ブロックである。算定法は前述した方法と同様で、波浪制御機能を同等とするため天端上水深 R に応じて天端幅 B を変化させている。

算定結果を図-13 に示す。図より、周期が長い（太平洋側）場合には、構造物の天端上水深が深くなった場合に、波高伝達率を他の構造と等しくするために天端幅を広くする必要があり。そのため、断面形状が大きくなり CO<sub>2</sub> 排出量も増加する傾向となった。一方、周期が短い（日本海側）場合には、波高伝達率に及ぼす天端上水深の影響が小さいため、断面形状に顕著な差が見られず、天端上水深を変化させて設計しても CO<sub>2</sub> 排出量には差がないことが判る。

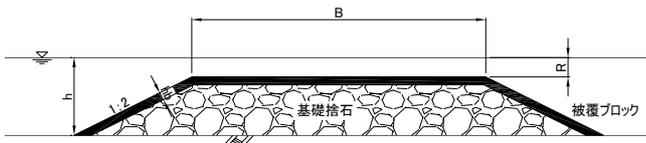


図-12 海岸構造物の検討断面図

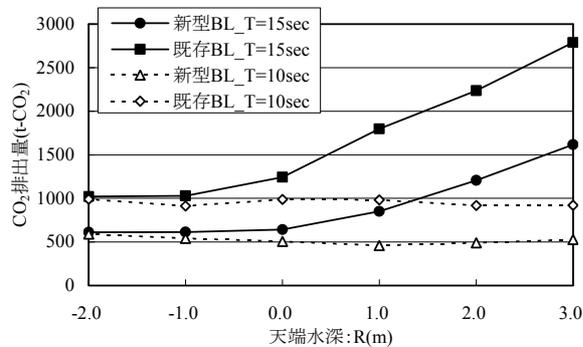


図-13 天端上水深 R と CO<sub>2</sub> 排出量

図に示すように、何れのケースにおいても、新型被覆ブロックを用いた構造の方が CO<sub>2</sub> 排出量を少なくでき、環境への負荷が低減できることを確認できた。

#### 4.5 環境への影響の総合評価

以上、新型被覆ブロックを用いた海岸構造物は、CO<sub>2</sub> 排出量を大幅に低減でき、地球温暖化という課題に対しては著しい効果があることが明らかになった。しかしながら、図-11 に示すように、大気汚染物質については構造形式、各種ブロック別の差が小さい結果となった。

このように、環境への影響を評価するに当たっては、着目する要因により結果が異なることとなる。そこでこれらを総合的に評価できる単一の指標による検討を行った。その一例として、表-5 に示す重み付け係数 Eco-factor を用いて、環境負荷要因から直接単一指標 Eco-point を算出する手法を採り上げる<sup>8)</sup>。

この手法に従い、表-4 の結果を基に Eco-point を算定すると図-14 が得られる。図より、離岸堤（構造 a）と人工リーフ（構造 b）の場合の Eco-point はほぼ同等であるが、新型被覆ブロックを用いた人工リーフ（構造 c）の場合には、約 27% 小さな値となる。このように、海岸構造物の建設における環境への影響を総合的に評価した場合にも、新型被覆ブロックの使用により環境負荷を低減できることが明らかとなった。

#### 5. 結論

(1) 耐波安定性および構造強度に優れた被覆ブロックを開発した。構造強度の検討においては、波力実験を行って設計荷重を定めた上で FEM による構造解析を実施し、高波浪の作用下においても十分な構造強度を確保した。

表-5 重み付け係数 Eco-factor

環境負荷項目	CO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	ばいじん
Eco-factor(UBP/g)	0.2	53	67	110

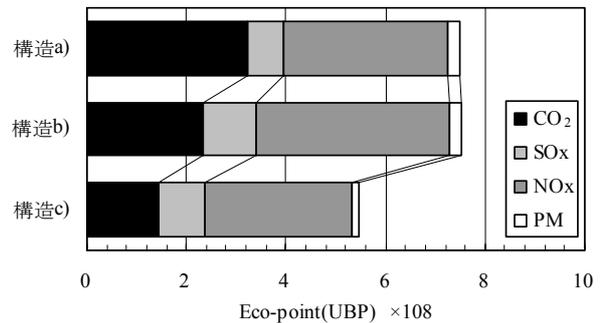


図-14 総合的な環境への影響評価結果

- (2) 海岸構造物の建設において、新型被覆ブロックを用いることにより、CO<sub>2</sub> 排出量を大幅に低減できる。一方、大気汚染物質については環境負荷項目毎に異なる結果であったが、同構造（人工リーフ）で比較した場合に、新型被覆ブロックを用いた方がどの項目も排出量が少ない。
- (3) CO<sub>2</sub> および各大気汚染物質を対象に、重み付け係数 Eco-factor を用いて、単一指標 Eco-point を算出した。その結果、離岸堤と既存ブロックによる人工リーフの Eco-point は同等であったが、新型被覆ブロックを用いた構造では、それらより約 27% 小さな値となり、総合的に評価した場合にも環境負荷を低減できることが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 浜口正志ほか：大きな開口部を有する新しい被覆ブロックの開発と人工リーフへの適用，海岸工学論文集第 54 巻，pp.961-965，2007.10
- 2) 木村晃ほか：人工リーフ被覆ブロックの被災確率について，海岸工学論文集第 43 巻，pp.816-820，1996.10
- 3) 塩見雅樹ほか：消波ブロック不連続部の波力増大による防波堤の被災とその対策に関する研究，海岸工学論文集第 41 巻，pp.791-795，1994.10
- 4) 榎木亨：環境圏の新しい海岸工学，pp.579-582，1999.8
- 5) （社）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.445-447，2007.7
- 6) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書設計編，pp.65-71，2008.3
- 7) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，pp.14-16，2005.11
- 8) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その 2），コンクリート技術シリーズ，pp.41-57，2004.9