海岸・港湾構造物用の新しい被覆ブロックの開発と環境性能

錦織和紀郎[1]・堺孝司[2]・瀧本聖吾[3]・昇悟志[4]

[1]工修 (株)不動テトラ ブロック環境事業本部(〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2)
[2]正会員 工博 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科(〒761-0396 香川県高松市林町2217-20)
[3]正会員 工修 (株)不動テトラ ブロック環境事業本部(〒651-0084 兵庫県神戸市中央区磯辺通2-2-3)
[4](株)不動テトラ 技術開発統轄部総合技術研究所(〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)

近年，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おり，海岸・港湾構造物に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．一方，コンクリート構造物の建設においては，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は少なくないため，環境に与える負荷の評価が重要となってきている．このような背景に基づき，構造強度および耐波安定性に優れ，かつ経済的な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．また，コンクリートブロックを用いた海岸構造物の建設における環境負荷を算定し，開発したブロックは，構造物の建設において環境負荷を低減する技術であることを明らかにした．

キーワード：コンクリートブロック,インベントリ解析,環境負荷,耐波安定性,海岸構造物

１．はじめに

四方を海に囲まれた我が国は長い海岸線を有しており，国土保全や沿岸域の利用性確保は重要な課題である．そのため，来襲する波浪や漂砂を制御する多くの海岸・港湾構造物の建設が推進されている．また，近年は海岸・港湾構造物に来襲する波が厳しくなってきており，使用されるコンクリートブロックにも高波浪の来襲に耐え得る高い構造強度と耐波安定性や経済性が従来にも増して求められている．

一方，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は少なくない．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，および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，構造強度，耐波安定性および経済性に優れる新しい被覆ブロックを開発した．また，構造形式やブロック種別を変化させて一般的な海岸構造物の試設計を実施し，材料の製造からブロック製作，構造物建設の一連の工程におけるCO_2等の排出量（環境負荷）を算定した．その結果，従来の被覆ブロックとの比較において，新しい被覆ブロックは，構造物の建設において環境負荷を低減できる技術であること，およびブロックの主たる性能の１つである耐波安定性は，環境負荷に対しても重要な要素であること等を明らかにした．

２．新しい被覆ブロックの開発

(1)ブロックの形状

開発した新しい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[1)]を基に，最適な開口部の開口率，配置等を検討して決定したものである．

開発における最大の着目点は耐波安定性の向上であるが，それを達成するためには作用する鉛直波力（揚圧力）の低減，あるいは抵抗力（ブロック重量）の増加の２通りの方法が考えられる．本開発では経済性の向上も考慮したブロックの薄型化（材料の低減）を前提とし，ブロックに開口部を設けて効率的に揚圧力を低減させることに成功した．

(2)耐波安定性

開発した被覆ブロックの耐波安定性を調べるため，様々な海岸・港湾構造物に用いた場合を対象に水理模型実験（安定実験）を実施した．以下では，人工リーフの被覆材に使用した場合について述べる．

a)実験条件および実験方法

実験条件を**表-1**に，実験断面を**図-2**に示す．ブロックを現地で4t型とすると実験縮尺は1/52であり，フルードの相似則に従い各物理量の模型量と現地量の関係は次のようになる．ここで，添え字mは模型量，pは現地量を表す．

・長さ：Lm/Lp = 1/52（寸法，波高等）
・時間：Tm/Tp = $(1/52)^{1/2}$ = 1/7.21（周期等）
・質量：Mm/Mp = $(1/52)^{3}$= 1/140608

実験では，不規則波（有義波周期$T_{1/3}$=1.5s，2.0s）を作用させてブロックの挙動を観察し，各種波浪条件に対するブロックの安定限界（被災の生じない限界）を明らかにした．

b)実験結果

実験結果より定めた安定数Nsの設計値を**図-3**に示す．図の横軸は天端上水深Rと設計有義波高$H_{1/3}$の比であり，一般に$R/H_{1/3}$が大きくなるにつれて安定数Nsも増加する．また，ブロックの所要質量M（被災の生じない質量）は，安定数Nsを用いてブレブナー･ドネリー式（式(1)）により求められるが，安定数Nsの3乗に反比例するため，安定数Nsの大きいブロックは耐波安定性に優れる．

$$M = \frac{\rho_r \cdot H_{1/3}^{\ 3}}{Ns^3 (S_r - 1)^3} \qquad (1)$$

ここで，ρr：コンクリート密度，ρw：海水の密度，Sr：コンクリートの海水に対する比重(=ρr/ρw)，$H_{1/3}$：法先水深における設計有義波高である．

また，**図-3**には従来の各種被覆ブロックの安定数Nsの範囲を併記しているが，新しい被覆ブロックの安定数Nsは従来の被覆ブロックの1.4～2.0倍である．すなわち，新しい被覆ブロックは従来の被覆ブロックと比較して著しく耐波安定性が向上し，同一の設計条件に対して1/3～1/8の質量で安定性を確保できる．

３．環境性能の評価

(1)海岸構造物の試設計

a)試設計の概要

新しい被覆ブロックの環境性能を評価するため，構造形式，使用ブロックおよび構造諸元を変化させて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Kt（換算沖波波高Ho'に対する構造物透過後の伝達波高Htの比）が同等となる構造諸元とした．

b)試設計１

検討においては，まず構造形式および使用ブロック（離岸堤（**図-4**），人工リーフ（**図-5**））による比較を行った．ここで，離岸堤には代表的な四脚の消波ブロック，人工リーフには被覆ブロックとして今回開発した新しい被覆ブロックおよび従来の被覆ブロックの２種類を用いた．

図-1　新しい被覆ブロック

表-1　実験条件

		模型量	現地量
構造条件	法先水深h	25cm	13m
	ブロック天端上水深R	0～10cm	0～5.2m
	天端幅B	100cm	52m
	法面勾配	1:2	
	海底勾配	1/30	
波浪条件	有義波周期$T_{1/3}$	1.5s,2.0s	10.8s,14.4s
ブロック	質量M	29.3g	4.1t
	基本長L	4.5cm	2.34m

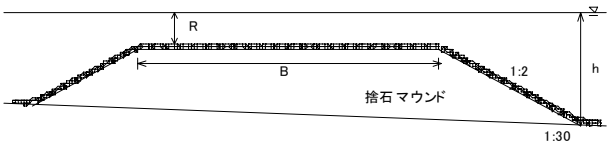


図-2　実験断面

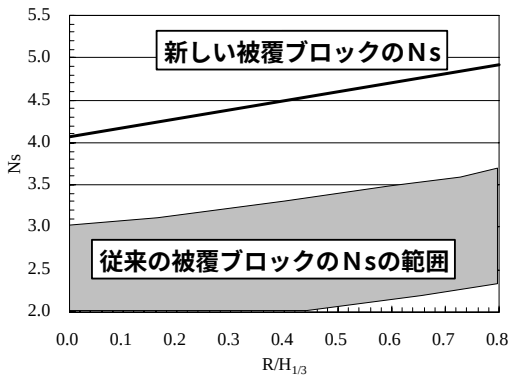


図-3　実験結果

試設計の条件および結果を**表-2**に示す．ここで，離岸堤の場合，天端幅Ｂを7.5m，天端高ｈｃを2.0mとして波高伝達率Ｋｔを田中[2]による捨石傾斜堤の波高伝達率算定図より求めると，Ｋｔ＝0.34となる．一方，人工リーフの場合は，天端上水深Ｒを1.8mとして波高伝達率Ｋｔが離岸堤と同等となる天端幅Ｂを同算定図より求めると，Ｂ＝34.8mとなる．

なお，ブロックのｔ型は，設計波高$H_{1/3}$＝4.5mに対して安定性を確保できるものである．

c)試設計２

試設計１ではブロックのｔ型を固定して比較を行ったが，質量が所要質量以上であれば，更に大型のブロックでも使用することができる．そこで，安定性の観点からは過大設計となるが，人工リーフの断面は試設計１のまま変えず，被覆ブロックのｔ型を大きくしていき，環境に与える影響を調べた．

d)試設計３

次に，波高伝達率Ｋｔが0.34の一定となるように天端上水深Ｒおよび天端幅Ｂを変化させた設計を実施した．設計条件は，試設計１と同様である．

試設計の結果として，天端上水深Ｒと天端幅Ｂの関係を**図-6**に，設計波高$H_{1/3}$＝4.5mに対する被覆ブロックの所要質量を**図-7**に示す．**図-7**より，新しい被覆ブロックの所要質量は0.9～1.7ｔ（従来の被覆ブロックの1/8～1/4）であり，ここでも極めて優れた耐波安定性を有することが判る．

(2)環境負荷の算定方法

a)対象物質および算定の範囲

環境負荷の算定においては，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，前者としてCO_2，後者としてSOx，NOxおよびばいじんを対象とした．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－8**に示す．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程に関わる使用機械，船舶等から排出される物質の量を求めている．

b)算定方法

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)[3](以下指針）に示される各種エネルギーや材料製造工程等の原単位データを使用した．また，指針に記載されていない項目（捨石製造，ブロック施工等）については，施工機械が消費する軽油，重油等の燃料の量を算出し，それらを基にエネルギー原単位を用いて各排出量を算定した．

なお，材料等の運搬距離は，生コン：10km，鉄筋：50km，型枠：100kmに設定した．

表-2　試設計１の条件および結果

構造形式		離岸堤	人工リーフ
ブロック		消波ブロック 12.5t型	新しい被覆ブロック4t型 従来の被覆ブロック8t型
構造条件	設置水深	-5.20m	
	潮位	H.H.W.L+1.30m	
	天端高	hc＝2.0m	R＝1.8m
	天端幅	B＝7.5m	B＝34.8m
波浪条件	周期	$T_{1/3}$＝12.0s	
	換算沖波波高	Ho'＝7.5m	
	堤前波高	$H_{1/3}$＝4.50m	
波高伝達率		Kt＝0.34	

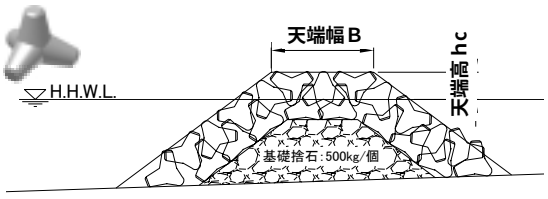


図-4　消波ブロックを用いた離岸堤

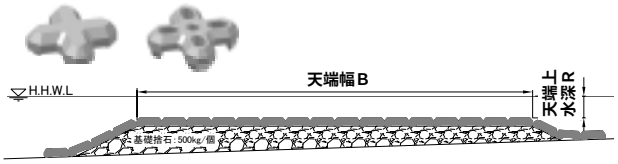


図-5　被覆ブロックを用いた人工リーフ

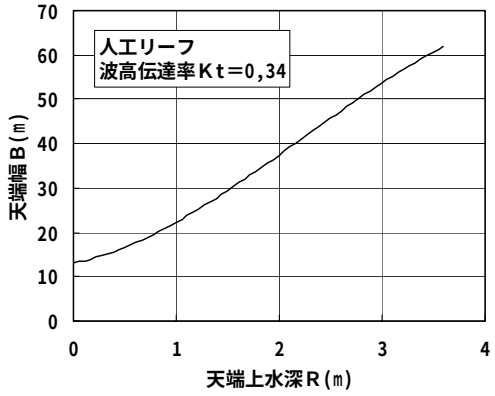


図-6　天端上水深と天端幅の関係（試設計３）

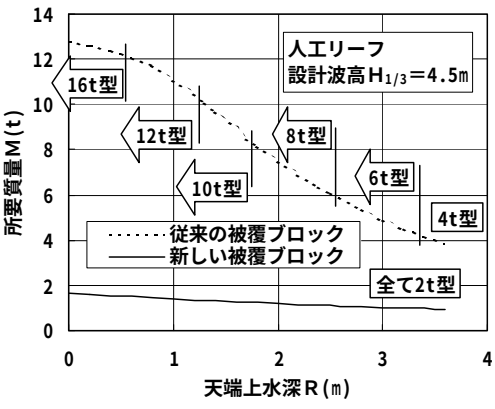


図-7　天端上水深と所要質量の関係（試設計３）

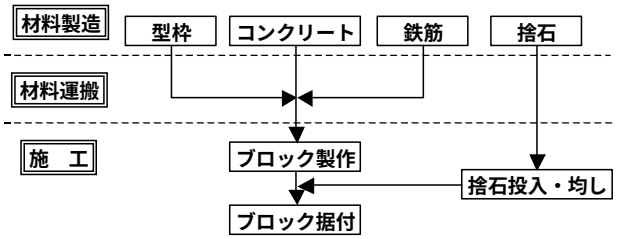


図-8　施工フローおよび環境負荷算定の範囲

(3)環境負荷の算定結果（試設計１）

試設計１による海岸構造物を建設する際に排出される各種物質の排出量を**図-9**に示す（施工延長1m当り）．

a)CO_2排出量

図-9より，構造形式で比較すると，離岸堤に比べ人工リーフの方がCO_2の排出量が少ないことが判る．特に，新しい被覆ブロックを用いた場合は離岸堤と比べてCO_2の排出量は約45%であり，低減が著しい．これは，CO_2の排出量がコンクリートの製造に由来するところが大きいことによる．すなわち，被覆ブロックは消波ブロックに比べて使用するコンクリート量が少なく，新しい被覆ブロックは更に使用量が少ない．そのため，新しい被覆ブロックを用いることにより，CO_2の排出量低減に関して極めて高い効果が得られる．

b)SOx排出量

SOxは，離岸堤の場合に最も排出量が少ない．SOxの排出量は材料，特に捨石の運搬による船舶等からの排出が支配的であり，離岸堤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，人工リーフ同士で比較すると，コンクリートの使用量が少ないことと，耐波安定性が高くブロックが小型で作業船舶も小型となる（施工時のSOx排出量が少ない）ため，SOxの排出量は新しい被覆ブロックを用いた場合の方がやや少ない．しかしながら，SOxの排出量に支配的な捨石運搬の量が同等であることから，両者の排出量はほぼ同程度である．

c)NOx排出量

NOxも，SOxと同様材料運搬による船舶等からの排出が多く，離岸堤の場合に最も排出量が少ない．但し，SOxの場合に比べて施工時の排出量が比較的多くなるため，その面では作業船舶が小型で良い新しい被覆ブロックは，施工におけるNOxの排出量が少ない．

d)ばいじん排出量

ばいじんは，施工時の排出量が最も多い．そのため，作業船舶が小型で良い新しい被覆ブロックを用いた場合に最も排出量は低減される．

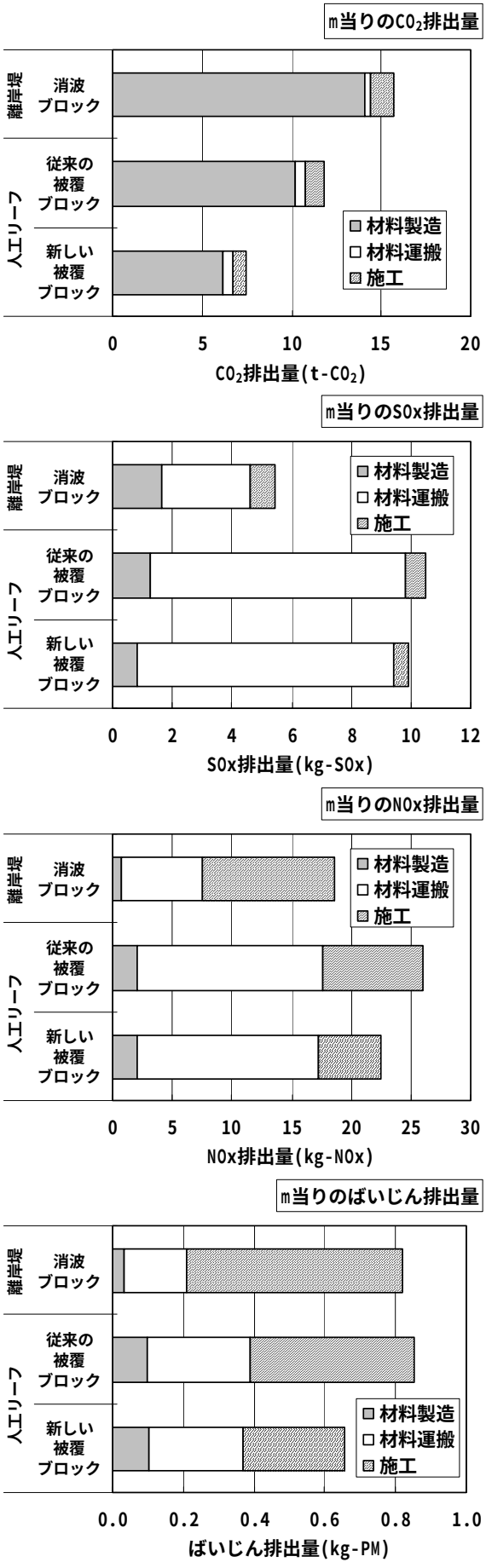


図-9　環境負荷の算定結果（試設計１）

(4)環境負荷の算定結果（試設計２）

a)環境負荷の算定結果

試設計１の断面でブロックのｔ型を変化させ，環境に及ぼす影響を調べたものが**図-10**である．

なお，従来の被覆ブロックは8t型以上で安定であるが，傾向を見るため，参考として6t型以下の結果も図示している．

図-10より，環境負荷に及ぼすブロックの質量の影響は，物質ごとに傾向が異なることが判る．

まず，CO_2の排出量は，ブロックの質量の増大に伴い増加する．また，ブロックごとに比較すると，新しい被覆ブロックを用いた場合の排出量が少ない．これらは，CO_2が材料製造工程において最も排出されることから，コンクリートの使用量の違いによる．

次に，SOxについては，CO_2とは逆にブロックの質量の増大に伴い排出総量が若干減少する．これは，捨石運搬量の差が現れたものである．すなわち，ｔ型が大きいほどブロック厚が高くなる分捨石が減ることが影響している．

また，NOxおよびばいじんの場合は，4t前後の質量で排出量が最小となる．これらの物質は比較的施工時における排出が多く，ブロックの個数と作業船舶の大小が影響する．したがって，4t前後以下の場合は作業船舶は小型であるもののブロックの個数が多くなり，一方4t前後以上の場合は作業船舶が大型になって排出量が増える．

b)耐波安定性の重要性

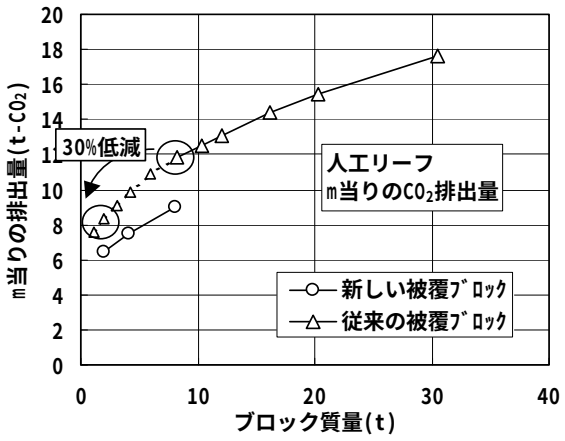
CO_2のように，ブロックの質量の増大に伴い排出量が増える場合は，特にブロックの耐波安定性の効果が顕著に現れる．ブロックは安定性を確保できる質量以上であれば大型でも使用することが可能であり，耐波安定性が高いということは選択できる質量の範囲が広くなることと同義であるためである．

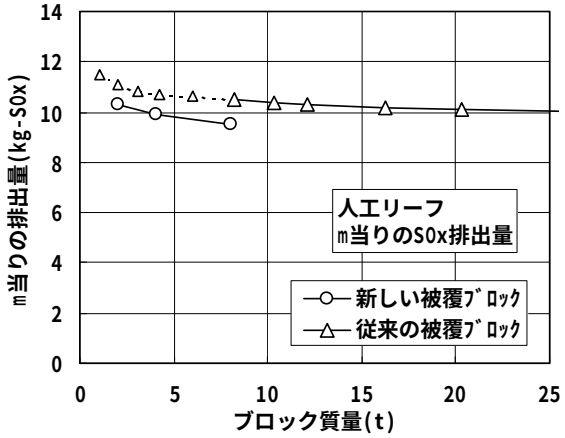
例えば，従来の被覆ブロックは耐波安定性がそれほど高くないため，このケースでは8t型以上しか使用することができないが，仮に新しい被覆ブロックと同等の耐波安定性を有していれば2t型を適用することができる．その場合，CO_2の排出量は約30%低減される．すなわち，新しい被覆ブロックが持つ高い耐波安定性を環境の観点で見ると，CO_2の排出量を約30%低減する技術に等しいと言える．

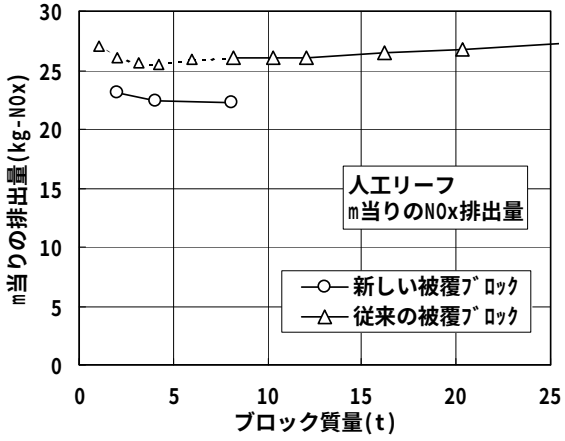
(5)環境負荷の算定結果（試設計３）

a)環境負荷の算定結果

試設計３による同一の消波機能を有する人工リーフの構造諸元（天端上水深Ｒで代表）と排出される各種物質の量の関係を**図-11**に示す（施工延長1m当







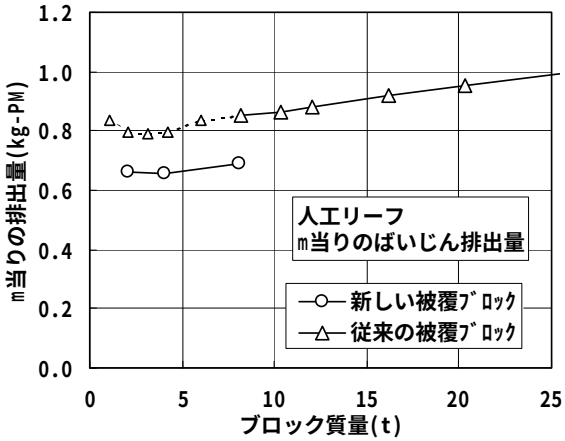


図-10　ブロック質量の影響（試設計２）

り）．ここで，耐波安定性の高い新しい被覆ブロックは，全てのケースで2t型を使用することができる．一方，従来の被覆ブロックは4t型～16t型であり，天端上水深の増加に伴いｔ型は段階的に減少する．

なお，図中従来の被覆ブロックのデータが不連続になっている箇所は，ｔ型の変わる条件に相当している．

図-11より，試設計３においても，新しい被覆ブロックを用いた場合，従来の被覆ブロックによる場合と比べて，何れの物質とも排出量が低減されていることが判る．

また，新しい被覆ブロックの場合は安定性が高いため全ケース2t型であるが，天端上水深の増加（すなわち天端幅の増加）に伴いCO_2の排出量が増加する（天端上水深＝0mで排出量が最小）．これは，天端上水深の増加による断面高の減少よりも天端幅の増加による影響で構造断面が大きくなり，コンクリートの使用量も増大するためである．

一方，従来の被覆ブロックの場合，天端上水深が0.6mの条件でCO_2の排出量が最小となっている．これは，天端上水深の増加に伴う構造断面の増大とブロック質量の減少（試設計２で明らかにした傾向）の両者の影響により，最小値が存在したことによるものと考えられる．

したがって，従来の被覆ブロックにより施工する場合，消波機能を満足する天端上水深と天端幅の組合せは無数にあるが，CO_2の排出量低減への配慮を念頭に置くのならば，構造諸元に最適解が存在すると言える．

次に，SOxの場合は新しい被覆ブロックを用いた場合と従来の被覆ブロックによる場合で，排出量にほとんど差が見られない．これは，SOxの排出量に最も影響するのが捨石の運搬であり，両者で差が出ないためである．また，CO_2のような最小値は存在せず，構造断面が最も小さくなる（捨石量最小）天端上水深＝0mの場合に排出量が最小となる．

NOxおよびばいじんは同様の傾向を呈しており，CO_2ほど明確ではない最小値が存在する（天端上水深Ｒ＝0.6m）．先に述べたように，これらの物質は比較的施工時における排出が多く（**図-9**参照），ブロックの個数と作業船舶の大小が影響する．したがって，そのバランスにより最大，最小が存在したものと考えられる．

b)設計における環境負荷への配慮

人工リーフの設計においては，所定の消波機能（波高伝達率）を満たす構造諸元（主として天端上水深と天端幅）および被覆ブロックの所要質量が検

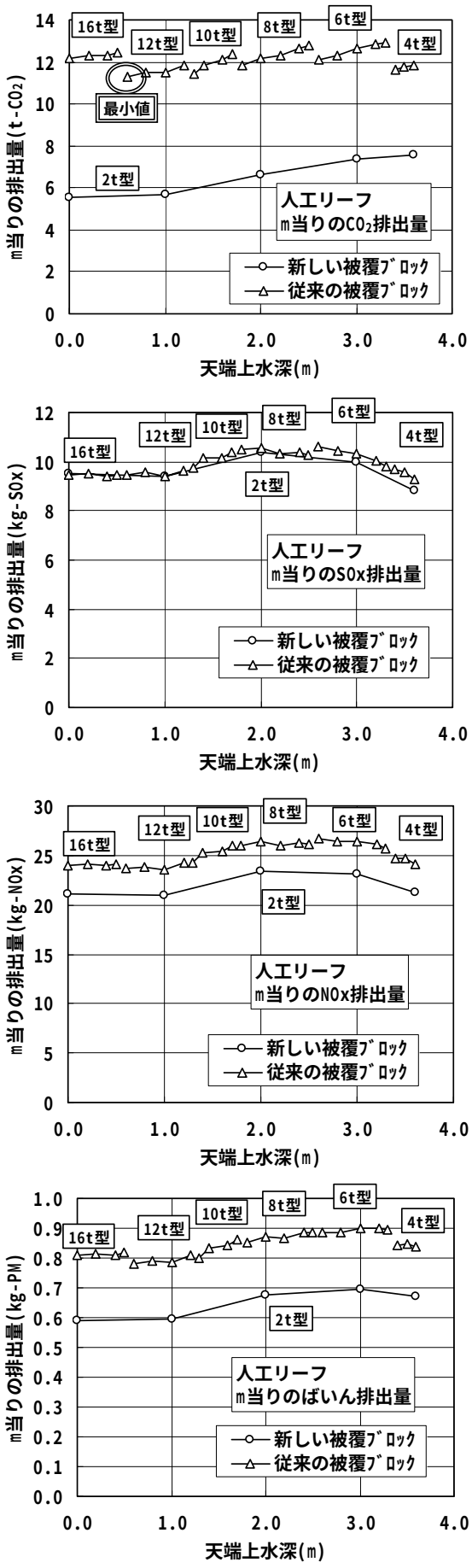


図-11　構造諸元の影響（試設計３）

討される．構造諸元については，船舶航行の安全性確保や海域の平面的な利用性を考慮して決定されることもあるが，このような制約がない場合は，天端上水深と天端幅には無数の組合せが存在する．

しかしながら，上述のCO_2のような排出量が最小となる構造諸元が存在する場合には，その選択を行うべきである．今後，ますますこのような考えに基づく設計が重要となるものと考えられる．

(6)環境への影響の総合評価

以上，新しい被覆ブロックを用いることにより，海岸構造物の建設においてCO_2の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を明らかにした．

しかしながら，大気汚染物質については必ずしも同様の傾向とは言えず，着目する要因により異なる結果となった．

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-3**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上げた[4]．この手法に従い試設計の結果を基にEco-pointを算定し，**図-9**～**図-11**の形式で図示すると**図-12**～**図-14**が得られる．

図-12より，離岸堤と従来の被覆ブロックによる人工リーフの場合のEco-pointはほぼ同等であるが，新しい被覆ブロックを用いた人工リーフの場合には，約24%小さな値となる．また，同一の構造諸元の場合，ブロックの質量に対してEco-pointは単調増加する（**図-13**）．

構造諸元の影響については，質量が一定であれば（**図-14**中新しい被覆ブロック）天端上水深＝0m，すなわち断面が最小となる場合にEco-pointも最小となる．一方，従来の被覆ブロックのように安定限界に応じてブロックの質量が変わる場合，天端上水深＝0.6mの条件においてEco-pointに最小値が存在する．

以上のように，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，新しい被覆ブロックの使用により環境負荷を著しく低減できることが明らかとなった．また，総合的に見た場合にも，ブロックの耐波安定性は，環境への負荷低減において重要な性能である．

表-3　重み付け係数Eco-factor

環境負荷項目	CO_2	SOx	NOx	ばいじん
Eco-factor(UBP/g)	0.2	53	67	110

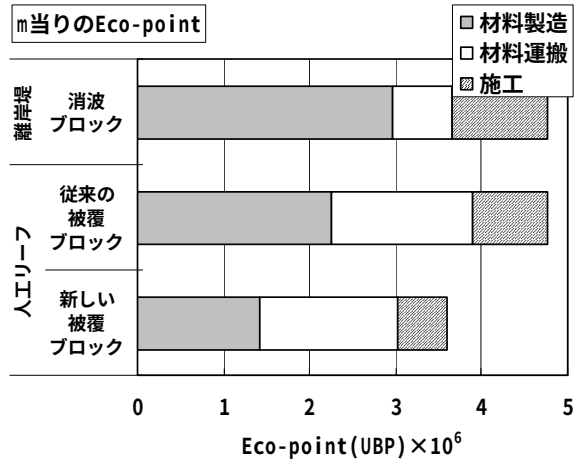


図-12　環境負荷の算定結果（Eco-point）

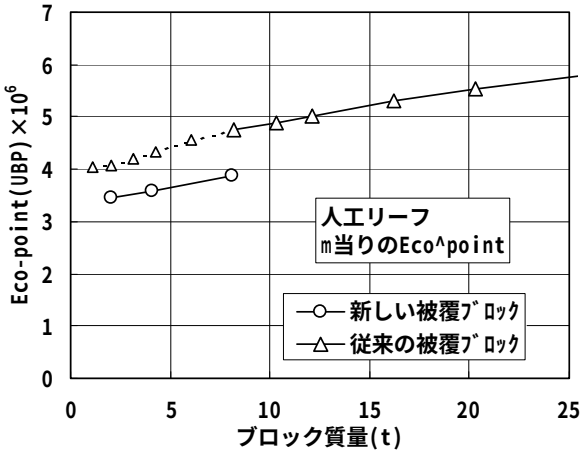


図-13　ブロック質量の影響（Eco-point）

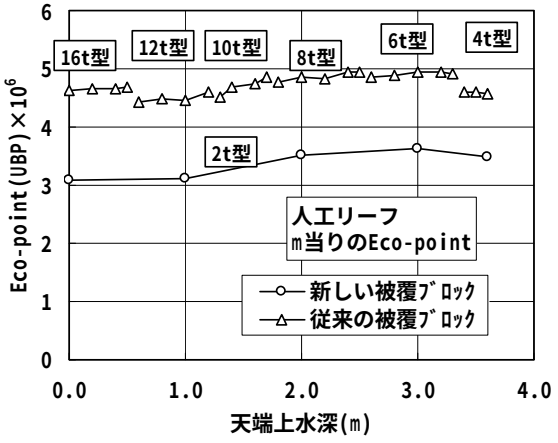


図-14　構造諸元の影響（Eco-point）

４．結論

海岸・港湾構造物用の新しい被覆ブロックの開発について述べるとともに，海岸構造物の試設計を行い，構造物の建設に伴う環境への影響を評価した．主要な結論は，次の通りである．

(1) 開発した新しい被覆ブロックは，極めて高い耐波安定性を有する．人工リーフの被覆材に用いた場合，同一の設計条件下において，従来の被覆ブロックの1/3～1/8の質量で安定性を確保できる．
(2) 海岸構造物の建設において，新しい被覆ブロックを使用することにより，CO_2の排出量の低減等に関して高い効果が得られる．
(3) 構造物の断面が同一の場合，使用するブロックのｔ型が大きくなるほどCO_2の排出量が増大する．したがって，ブロックの重要な性能の１つである耐波安定性は，環境負荷の観点からも重要な要素である．
(4) 人工リーフの設計において，特に制約がなければ，設計上所定の消波機能を満たす天端上水深と天端幅には無数の組合せが存在する．しかしながら，環境負荷の低減を考慮すると，その組合せの中には，CO_2の排出量が最小となる最適な構造諸元が存在する．

参考文献

1) 浜口正志，久保田真一，松本朗，半沢稔，山本方人：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．
2) 田中則男：天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について，第23回海岸工学講演会論文集，pp.152-157，1976．
3) 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．
4) 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．