

多様な生物環境を創造する新型人工リーフの安定性および 水産効果に関する研究

齋藤正文*・綿貫 啓**・錦織和紀郎***

1. はじめに

一般に, 人工リーフは水深数 m の浅場に設置されることが多い。ここは太陽光が入射し, 光合成を行う海藻類が繁茂する水深帯でもある。藻場ではそれらを餌料にし, 生息空間とする動物も蟄集する。ホンダワラ類, ワカメ, 大型フジツボ類, カキ等が優占する藻場では, 付着動物の多様性も大きく(小笹ら, 1995), 多くの魚介類が蟄集し, 沿岸域の生態系を保全する上でその重要性は大きい。このような背景から, 人工リーフにも水産協調機能が要望されるようになってきた。

しかしながら, 従来の捨石や被覆ブロック形式の人工リーフは, 天端面が単調かつ同一水深となり, 人工リーフ周辺の生物相は単調となる。そこで, 浜口ら(1991)は高い消波性能・安定したマウンド被覆機能に加え, 水産協調機能を併せ持つ新型人工リーフ被覆構造体を開発した(図-1)。この構造体は前部ユニット(10.25 t), 後部ユニット(6.02 t)からなり, 岸沖方向に相互にかみ合わせ構造体全体で高い安定性を発揮する。さらに構築された堤体の天端は, 山型の粗度を形成し, 擾乱効果が高く, 消波を促進する。また, ユニット内の大きな空隙によって太陽光をユニットから捨石マウンド上まで取り込むことができ, 捨石マウンド上から海藻が着生することなど, 生物学的にも多くの特徴を持つ。そこで, 本研究では, 水理学的, 生物学的に従来の人工リーフにはない

特徴を数多く持っている本構造体について, 水理実験に基づく安定性の評価方法および現地生物調査による水産効果について詳細に検討した。

2. 安定性

2.1 水理模型実験

a) 実験目的

一般に, 消波ブロックや根固ブロックは, 波力の増加に対して単体重量を増加させることによって安定を確保する。一方, 本構造体は波力の増加に対しては単体重量を増すのではなく, 前部ユニットの列数を増加させて構造体全体で安定を保つ, 従来にない全く新しい機構を有している。したがって, 単体重量を扱った土研式(宇多ら, 1988, 1990, 全国海岸協会, 1992)や安定数 N_s 式は適用できない。また, 没水・透過型, さらにユニット列数の増減によっても波力の作用形態は異なることから既存の波力評価式も適用できない。そこで, 不規則波を中心とした系統的な実験を行い, 所要列数によって構造体全体で安定性を確保する設計方法を確立することを目的として実験を行った。

b) 実験条件

水理実験は(株)テトラ環境技術センター内の2次元水路(長さ: 50 m, 幅: 1 m, 高さ: 1.3 m)を用い, 1/30 一樣勾配斜面上に 500 kg 相当の捨石でマウンドを構築し, 新型人工リーフ被覆構造体による人工リーフを設置して行った。実験断面図は図-2 に示す通りである。主な変動条件は, マウンド設置水深 h , ユニット天端水深 R , 天端幅 B すなわちユニット列数 n である。初めに波力実験を行い, ユニットに作用する波力の特性を把握した。次に列数 n を種々変化させた滑動実験を行い, 所要列数の算定方法を導いた。実験条件は表-1 に示す通りである。なお, 入射波高は設置水深(マウンド法先位置)

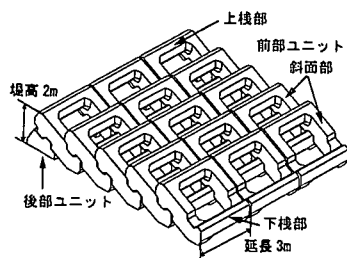


図-1 新型人工リーフ被覆構造体

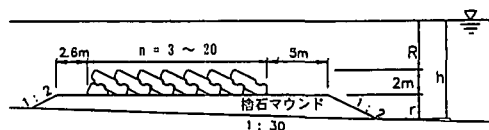


図-2 実験断面図

* 正会員 工修 (株)テトラ 土木本部土木技術部
** 正会員 工修 (株)テトラ 環境事業本部商品開発室
*** 工修 (株)テトラ 環境事業本部技術部

表-1 主な実験条件 (現地量)

実験シリーズ	波力実験	滑動実験
設置水深 h (m)	4~8	8, 16
天端上水深 R (m)	0~4	0~3
マウンド厚 γ (m)	2	6~14
ユニット列数 n	5, 7	3~20
$T_{1/3}$ (s)	10, 14	10, 14
$H_{1/3}$ (m)	1.0~4.0	2.1~8.2
実験スケール	1/20	1/40

での波高である。

2.2 実験結果と考察

a) 波力実験

図-3は、ユニット5列を一体としたときの、構造体全体に作用する波力の時系列の一例を示している。設置水深 $h=8$ m, 天端上水深 $R=4$ m の条件で、 $T_{1/3}=14$ s, $H_{1/3}=6$ m の波浪を作用させた時の計測開始から 30 s (現地規模換算量) 間の時系列波形である。図は上から最前列ユニット直前での水位、全体に作用する水平波力、鉛直波力、および滑動合成波力となっている。ここで、滑動合成波力は、水平岸向き方向波力を F_H , 鉛直上向き方向波力を F_V , 摩擦係数を μ とすると、 $F_s = F_H + \mu F_V$ と表される。

図より、水平波力は堤体前面水位にほぼ追従していることが分かる。それに対して、鉛直波力は水平波力よりもわずかに早く正のピークを迎え、その後すぐに負のピークを迎えることが分かる。この間堤体前面水位および水平力は正である。このことから、斜面に作用する波力の鉛直成分 (下向き) と揚圧力が相殺していると考えられる。

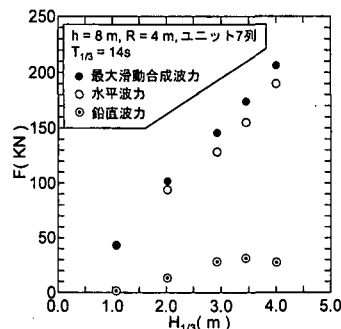


図-4 滑動合成波力最大時の水平・鉛直波力

図-4は、 $h=8$ m, $R=4$ m, ユニット7列を一体としたときの構造体全体に作用する滑動合成波力最大時の水平波力および鉛直波力の一例である。図から分かるように、鉛直波力は水平波力と比較して最大でも1/5程度であり、非常に小さいことが明らかとなった。これは、前部ユニットが斜面部を有することによる効果と考えられる。すなわち、水平波力の一部を斜面下向き方向へ転化させ、鉛直波力と相殺していると考えられる。このことから本構造体の安定性は水平波力のみを考慮し、これと構造体の自重による抵抗力のつり合いにより評価することとした。

b) 滑動実験

滑動実験では、構造体全体が現地量で10 cm以上岸方向へ移動した場合を滑動と定義した。波力の検討結果より、構造体全体の安定性は、水平波力を外力として、水中自重に摩擦係数を乗じた滑動抵抗力との釣り合いによって評価できる。抵抗力 f は、

$$f = \left\{ nM_F \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{CF}} \right) + M_R \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{CR}} \right) \right\} g \mu \quad \cdots (1)$$

で表せる。ここで、

M_F : 前部ユニットの質量 10.25 t, n は列数

M_R : 後部ユニットの質量 6.02 t

ρ_{CF} : 前部ユニットの密度 (2.37 t/m³)

ρ_{CR} : 後部ユニットの密度 (2.35 t/m³)

ρ_0 : 海水の密度 (1.03 t/m³)

μ : ユニットと捨石との摩擦係数 (0.6)

g : 重力加速度 (9.8 m/s²)

である。抵抗力と水平波力が釣り合う状態が安定限界であるから、 $\rho_0 g H_{1/3} A_H$ で無次元化すると、

$$\frac{\left\{ nM_F \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{CF}} \right) + M_R \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{CR}} \right) \right\} \mu}{\rho_0 A_H H_{1/3}} = K_n \quad \cdots (2)$$

が得られる。これ以後、 K_n を波力係数と称して説明する。ここで、

A_H : 水平方向支配面積 (堤高2.0m×延長3.0m=6.0m²)

$H_{1/3}$: 有義波高 (m)

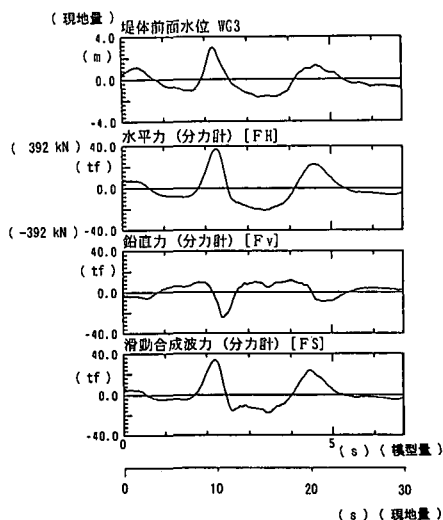


図-3 構造体全体に作用する波力の時系列

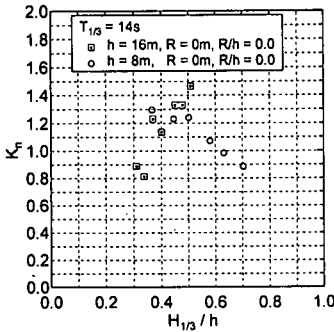


図-5 波高水深比に対する波力係数

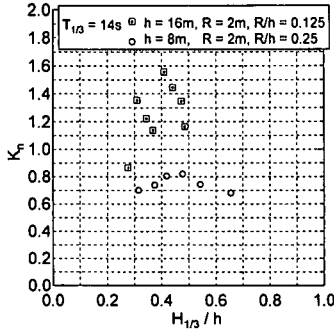


図-6 波力係数に対する天端上水深の影響

であり、ユニットの質量等の値を代入すると、

$$n = 1.78 K_n H_{1/3} - 0.583 \quad \cdots \cdots (3)$$

となり、波高に対する列数は波力係数 K_n ごとに異なる傾きの直線で表すことができる。

波高水深比 $H_{1/3}/h$ に対して滑動限界時の波力係数を天端上水深と設置水深の比 R/h をパラメータとして整理した一例が図-5である。これは、 $T_{1/3}=14$ s の $h=8$ m, 16 m の $R=0$ m のケースである。この図から分かるように、 K_n は碎波の影響を大きく受け、 $H_{1/3}/h$ が 0.4~0.6 の範囲でピークとなることが明らかとなった。このことは碎波寸前の波、もしくは碎波する波が構造体全体に作用するときに波力は最も厳しくなるが、波高がさらに大きくなり碎波後の波が作用する場合は、波力係数は減少することを示している。このことを列数で考えれば、碎波するまでは列数の増加傾向は大きいですが、碎波のピークから碎波後の波が作用する場合は、列数の増加傾向は鈍化することを意味する。

また、図-6は $T_{1/3}=14$ s の $h=8$ m, 16 m の $R=2$ m のケースである。この図より天端上水深 ($R=2$ m) が同じでも、設置水深が異なれば、波力係数のピークは異なることが確認できる。すなわち波力係数は天端上水深の絶対値ではなく、天端上水深と設置水深の比 R/h によって支配され、 R/h が大きくなると波力係数 K_n が小さくなることが確認できた。このことは、設置水深に比べて天端上水深が大きい場合は、列数を低減できることを意味

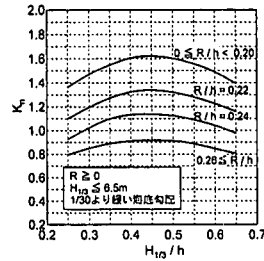


図-7 波力係数 K_n 算定図

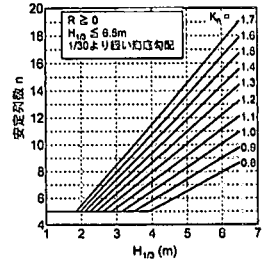


図-8 列数算定図

する。

2.3 所要列数による設計方法

a) 所要列数算定図

以上の結果より、新型人工リーフ被覆構造の所要列数の算定方法として図-7および図-8を提案する。すなわち、設計条件より R/h および $H_{1/3}/h$ から、図-7によって K_n を求め、図-8から K_n に該当する直線を用いて対象とする波高に対して所要列数を求める方法である。ここで図-8の直線群は、(3)式でパラメータとなる波力係数 K_n の値を変化させたものである。

b) 列数算定図適用範囲

今回実験を行っていない範囲、すなわち $H_{1/3}/h < 0.25$, $H_{1/3}/h > 0.65$ の範囲では、実用上それぞれ $H_{1/3}/h = 0.25$, $H_{1/3}/h = 0.65$ の K_n を用いることで安全設計となる。同様の理由で海底勾配も 1/30 より緩い勾配に適用できるものである。

図-9は、 $T_{1/3}=14$ s の $h=8$ m, 16 m の $R=0$ m のケースについて、累積滑動量が 40 cm 以上生じたケースを、波高に対する各列数の被害状況として示している。図から分かるように、 $H_{1/3} > 6.5$ m の範囲では、中間から後方のユニットがホゾから外れるような被害が生じた。また、4列以下の列数では滑動に加えて最前列ユニットがホゾから外れるような被害が見られ、こうした被害形態は滑動とは異なり、大規模な被害につながる可能性があるため、設計波高は $H_{1/3} \leq 6.5$ m, 最小列数は5列とした。

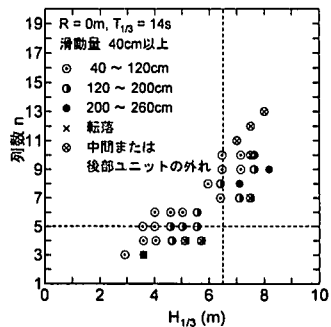


図-9 列数と被害の関係

3. 水産効果

3.1 調査目的

本構造体の生物調査は、北海道太平洋側の胆振海岸の潜堤を対象に調査を実施し、同水深に設置された根固ブロックと比較して、大型海藻であるミツイシコンブ等が大量に着生することが判明した。しかしながら、高天端潜堤であるため海藻の着生できる範囲が限定され、植生が比較的単純であったことから、付着海藻の種類が少なく、多様な海藻相ではなかった。そこで、施工後2年を経過した北海道の日本海側に位置する鬼鹿漁港と紀伊水道に面する徳島県中林漁港において生物調査を実施し、このユニットの、部材ごとの海藻の種類を明らかにすることにした。

3.2 北海道留萌郡鬼鹿漁港

a) 調査方法

北海道の鬼鹿漁港に隣接して、人工ビーチが造成され、浚渫砂の砂止め潜堤として、天端水深-1.0 mの人工リーフが平成10年夏期に施工された(図-10)。施工後2年目の平成12年7月に潜水による目視観察を実施した。調査では、人工リーフの代表的な植生を示すユニットを選定し、各部材ごとに着生している主要な付着生物の被度(%)を測定し、写真撮影を実施した。

b) 調査結果

人工リーフは砂に覆われることなく、海藻類が着生していた。観察対象としたユニットは、沿岸方向のほぼ中央で、沖側から3列目とした。海藻類は10種類以上が観察され、優占する付着生物の被度調査結果は表-2に示す通りであり、この表には基盤上を覆う浮泥の被度も示している。なお、着生状況の模式図を図-11に示す。

表-2、図-11に示すように、天端面を中心にリシリコンブの着生が見られ、特に長さ1~2 mのリシリコンブは天端面の稜角部に多かった。なお、表には示していないが、2年目(平成10年群)と見られる肉厚の大型のリシリコンブが比較的多く着生していた。斜面部では、ホンダワラ類のフシシジモクが多く、平坦な面に分布していた。下棧および捨石面では、イギス科や無節サンゴモ等の小型の紅藻が優占した。捨石面でも小型の紅藻類となっている。動物ではイワフジツボや巻貝類は上棧や斜面に多く、下棧や捨石面では少ない。浮泥は波浪による影響の強い天端面では少なく、捨石面でやや高い。

流れが小さく浮泥が溜まりやすい捨石面では小型紅藻が優占する傾向にある。また、天端面等に大型海藻が付着すると、その陰になり、弱い光で生育できる紅藻が残るものと考えられる。下棧部分よりも下方ではイワフジツボも少なく、冬季には漂砂等の影響で大型の海藻が着生しにくいことが推察される。

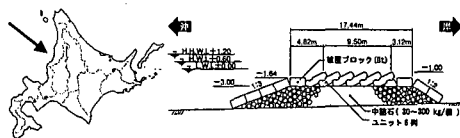


図-10 鬼鹿漁港位置図および断面図

表-2 主な付着生物の被度(%)
(鬼鹿漁港, 平成12年7月)

	種 名	上棧部	斜面部	下棧部	捨石面
珪藻	付着珪藻	10	5	+	+
緑藻	アオサ属	10	+		
褐藻	フシシジモク リシリコンブ	20 40	30 10	10 10	
紅藻	イギス科 無節サンゴモ	+	+	10 30	30 40
動物	イワフジツボ カイメン 巻貝類	40 + (21)	30 + (6)	+	+
	浮 泥	+	+	+	10

(注) + : 被度 5%未満, 動物の()内数字は個体数

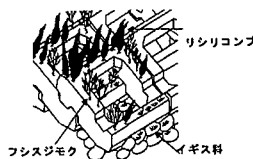


図-11 海藻の着生状況(鬼鹿漁港)

3.3 徳島県阿南市中林漁港

a) 調査方法

徳島県阿南市中林漁港海岸は海水浴場として利用されており、侵食対策として図-12に示す人工リーフが平成10年12月に施工された。潮位差が大きいことから、天端水深も-0.6 mと小さい。

生物調査は施工後1年半の平成12年7月に行った。ここでも、代表的な植生のユニットを選定し、各部材ごとに海藻類の被度を測定した。また、調査時に遭遇した魚類を潜水ノートに記載した。

b) 調査結果

砂浜に施工された人工リーフであるが、砂に埋没することなく海藻類の着生が見られた。観察対象として、沖側から2列目のユニットを選定した。主な付着生物の優占種の被度を表-3に示す。上棧部では短命なフクロノリが優占し、ホンダワラ類の幼体は斜面部、さらに下棧部で多い。ホンダワラ類の入植場所はユニットの平坦な面に多い。また、斜面部、下棧部、捨石面では大型褐藻類のカジメが入植していた。カジメはまだ小型であったが、カジメの付着部位は稜角部とユニットの内側の面が多い傾向にあった。動物ではイワフジツボとカンザシゴカイが多く、捨石面では浮泥の影響で動物が少ない。人工リーフでは巻貝等の食植動物の入植が少ない。

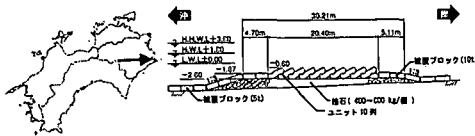


図-12 中林漁港位置図および断面図

表-3 主な付着生物の被度(%)
(中林漁港, 平成12年7月)

	種名	上棧部	斜面部	下棧部	捨石面
珪藻	付着珪藻	20	5	+	+
緑藻	アオサ属	+	+	+	
褐藻	フクロノリ ホンダワラ類(幼体) カジメ	50	10 30 10	5 80 10	+ 5
紅藻	無節サンゴモ	+	+	+	30
動物	イワフジツボ カンザシゴカイ	30	40 10	30 20	+ +
	浮泥		+	5	30

(注) + : 被度 5%未満

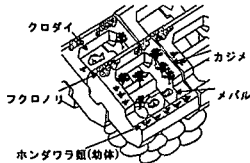


図-13 海藻の着生状況 (中林漁港)

なお、人工リーフは施工が12月以降であったことから、カジメの成熟期を過ぎており、今回観察されたカジメは1年後の平成11年の秋に入植した1年目の個体であると考えられる。カジメは褐藻類でも比較的深所を好むので、捨石面にも着生が見られた。今後、ホンダワラ類が繁茂すると、光の競合で捨石面のカジメは衰退する可能性もある。

砂浜地帯なので岩礁性魚類はほとんど見られないが、ユニットの間隙中には、クロダイ、メジナ、メバル、アイナメ等の岩礁性魚類が蟄集していた。特に、メジナは10~20個体が群をなし、ユニットの空間を生息場にしていった。クロダイは2~3個体が1つの単位となって、ユニットの大きな開口部を中心に観察された。

3.4 海藻類の着生傾向

以上の調査結果から、各部材ごとに優占する海藻が異なり、多様な生物相が形成されていることが確認された。天端水深が深い場合にはコンブ科の海藻が着生し、特に稜角部を中心に分布する。奥田(1985)はホンダワラ類の幼胚が斜面をころがることを観察しているが、当ユニットのように1:2に傾斜している勾配でも優占できることが判った。また、ユニットの開口部が大きく、捨石面まで太陽光が入射した。捨石面は漂砂の影響を受け、

海藻類の着生はさほど多くはない。中林漁港では、ホンダワラ類が繁茂した場合に、捨石面のカジメが生育しているか、さらに観察が必要である。

4. 結 論

前部ユニットおよび後部ユニットから構築され、前部ユニットの列数を増減させることによって、構造体全体として安定を保つ新しい人工リーフ被覆構造体の波力実験、滑動実験を行った。また、この構造体の水産効果を把握することを目的とし、施工後2年目の潜水生物調査を行った。主な結論は以下に示す通りである。

(1) 構造体全体に作用する鉛直波力は水平波力と比較して非常に小さいことが明らかとなり、本構造体の安定性は水平波力と構造体の自重による抵抗力のつり合いによって評価できる。

(2) 波高水深比 $H_{1/3}/h$ に対して滑動限界時の波力係数 $K_n (= f/\rho_0 g A_n H_{1/3})$ を、天端水深と設置水深の比 R/h をパラメータとして整理した K_n は碎波の影響を大きく受け、 $H_{1/3}/h$ が0.4~0.6の範囲でピークとなることが明らかとなった。また、 R/h が大きいときは、 K_n は減少することも明らかとなった。

(3) 新型人工リーフ被覆構造体所要列数の算定方法として図-7および図-8を提案する。すなわち、図-7より R/h および $H_{1/3}/h$ の条件から K_n を求め、図-8からその K_n に該当する直線を用いて対象とする波高に対して所要列数を求めるものである。

(4) 鬼鹿漁港では施工2年目の調査でユニットの上棧と斜面部にリシリコンブ、フシシジモク等の着生が見られ、下棧にはイギス科等が優占した(図-11)。中林漁港海岸ではホンダワラ類の幼体と1年目のカジメの入植を確認した。ユニットの空隙内には、クロダイ、メジナ等の岩礁性の魚類が蟄集していた(図-13)。以上のように各部材ごとに優占する海藻が異なり、多様な生物相を形成することが確認された。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第2696号, 79 p.
- 宇多高明・小俣 篤・斎藤友信 (1990): 人工リーフ被覆材の所用重量算定法, 土木研究所資料, 第2893号, 48 p.
- 奥田武男 (1985): ホンダワラ類における幼胚の入手と着生機構, 月刊海洋科学, vol. 17, No. 1, pp. 38-44.
- 小笹博昭・村上和男・浅井 正・綿貫 啓・山本秀一・中瀬浩太 (1995): 多様性指数を用いた波高・構造物形式別の付着生物群集の評価, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1216-1220.
- 全国海岸協会 (1992): 人工リーフ設計の手引き, 94 p.
- 浜口敬知・綿貫 啓・長谷川実・野口正昭 (1991): 水産協調型港堤の開発, 平成3年度日本水産工学会学術講演会論文集, pp. 67-68.