

海中林の造成基盤設計について

Structural Design of Artificial Foundation for Kelp Bed

長谷川 寛*, 平口博丸**, 寺脇利信*, 川崎保夫*
H. Hasegawa, H. Hirakuchi, T. Terawaki and Y. Kawasaki

The authors have been examining the effectiveness of an artificial foundation for kelp bed at a sandy sea bottom off the west coast of Miura Peninsula, central Japan. This paper aims at showing a structural design method of artificial foundations for kelp bed. In this paper, described are the design wave condition according to wind wave prediction in this sea area, the structure of the artificial substratum foundation based on hydraulic model experiments and surface form of an artificial algal substratum suitable for adhesion of zoospore found out in a series of tests both in the field and laboratory.

Keywords: kelp bed, artificial foundation, wave condition, hydraulic experiment, structural design

1. まえがき

近年、臨海発電所周辺に地域と協調して活用できる海浜造成や藻場造成などによる好適な海域環境を創造する技術の開発に取り組んでいる。その一環として、外海に面した三浦半島西岸の秋谷地先海域において、アラメやカジメなどの海藻を対象とした海中林基盤を1989年10月に造成し、施工後の基盤状況および海中林の成育状態の追跡調査を実施中である。本報は当海域の設計波条件、模型実験による基盤の断面構造の選定および海藻の基盤への付着に関する現場実験による基盤の表面形状について検討した結果にもとづき、砂質海底における海中林基盤の設計方法について述べるものである。

2. 藻場基盤設計の方針

海中林の造成場所は事前の生物調査の結果から、相模湾に位置した三浦半島西岸の秋谷地先海域(図-1)とした。海中林の基盤設計の検討フローを図-2に示す。最初に、秋谷地先海域の設計波を数値計算により推定し、次にこの設計波と二次元水理実験結果から、基盤材重量および基盤高などの基盤構造を決定した。これらの基盤構造の設計に際して、基盤材の重量は基盤自身に作用する波力と海藻に作用する波力の和以上とし、基盤が波浪に対して顕著な変形および洗掘をしない構造とすること、および基盤高は海藻の成育を妨げないように基盤上への砂の堆積量が少なくなる高さにすること、を基本方針とした。また、基盤表面については回流水槽による基盤表面形状に対する遊走子(海藻のたね)の付着量を測定し、遊走子が最も付着しやすい表面形状を実験的に求め、基盤表面の形状設計に取り入れた。最後に、このようにして作成した海中林基盤の設計案に対して、実規模に近い模型を用いた移動床実験を実施し、基盤の安定性、洗掘および堆砂などが顕著でないことを確認した。

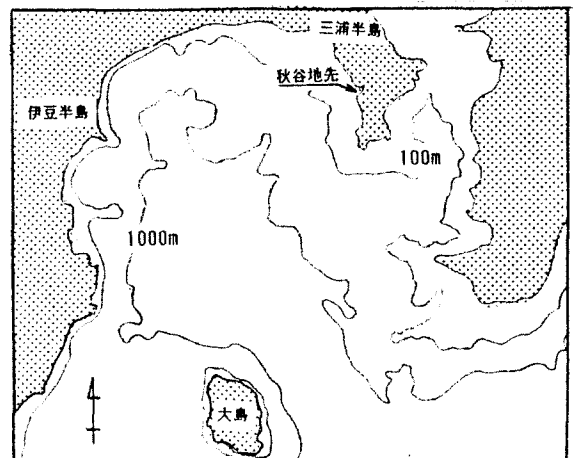


図-1 海中林の施工場所(秋谷地先海域)

3. 波浪推算による設計波の検討

(1) 外洋波(伊豆大島沖)の推定

他の海岸構造物と同様に、長期間の観測波浪データを基にして設計波を決定した。そこで、秋谷地先の南方約70km沖に位置する波浮港外の水深50mにおいて気象庁が実施している波浪観測データを用いることとした。図-3は波浮港の観測資料から最近14年間の異常波浪の観測データに基づいて波高の未超過確率を求めたものである。

* 電力中央研究所 我孫子研究所 (270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

** 正会員 電力中央研究所 我孫子研究所

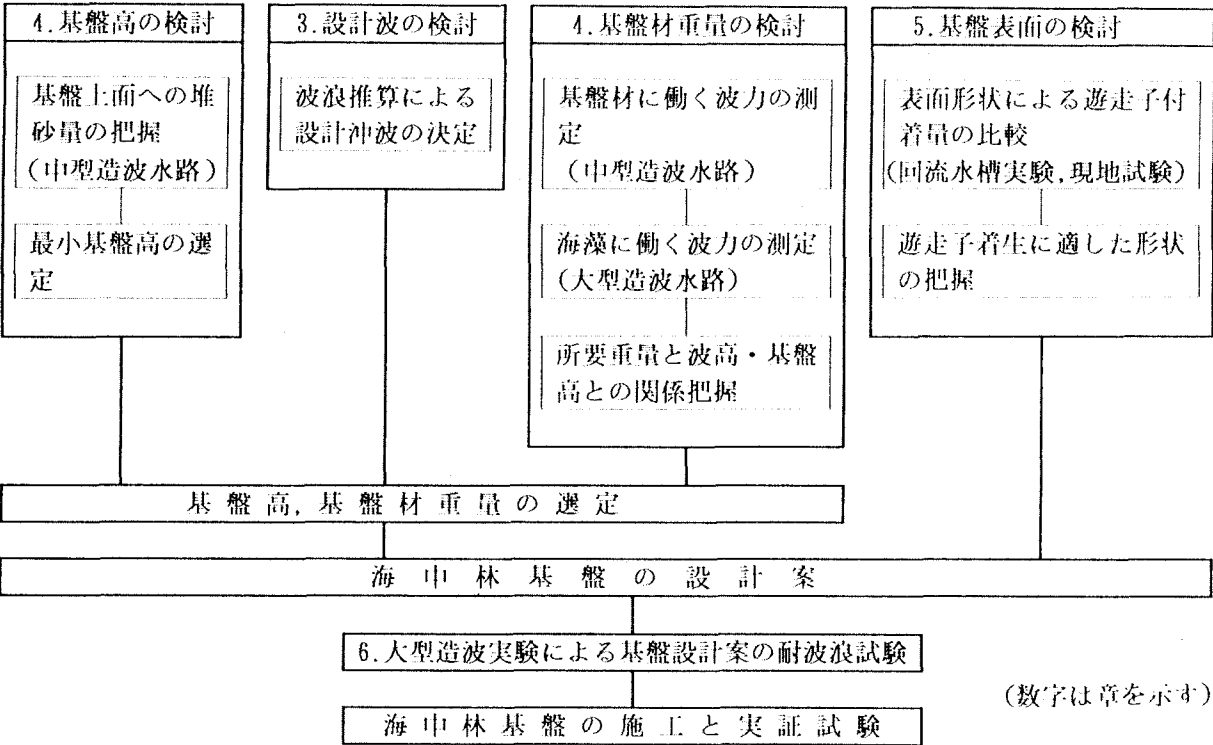


図 2 藻場基盤設計の方針と検討手順

海中林造成基盤の使用年数が比較的短いことを考慮して、10年確率波浪を採用するものとし、図-3から波浮港における設計波高は有義波 $H_{1/3}=7.6\text{ m}$ とした。対応する周期については、図-4に示す波高と周期の相関から有義周期 $T_{1/3}=11.5\text{ s}$ とした。

一方、秋谷海域から外洋を見通した場合、南西の方向には伊豆半島が、南東には三浦半島が、南南東には伊豆大島が存在しているため、地形による波の遮蔽効果を方向分散法により検討した¹⁾。その結果、秋谷沖の波高は波浮港での波向がSの時に最も高くなることが判った。
(2)秋谷地点沖合の設計波

波浮港の異常波浪発生時と対応する伊豆大島測候所での平均風速観測値から10年確率風速は約 25.0 m/s と推定した。この大島での確率風速を海面上10mの風速に等しいものと考え、相模湾内での波浪の発達量を評価した。表-1は、波浮港の10年確率波に地形の遮蔽効果および湾内での波の発達を考慮し、秋谷沖合の波浪を波向き別に評価したものである。この表より10年確率の沖波としては、SおよびSSWの波浪が最も大きく、 $H_{1/3}=6.2\text{ m}$ 、 $T_{1/3}=11.8\text{ sec}$ となることが判った。

4. 海中林基盤構造の検討

4.1 水理模型実験

(1) 基盤の耐波浪実験

実験は、図-5に示す中型造波水路(長さ77 m、高さ1.2m、幅0.9m)を用いて模型縮尺1/25程度の固定床による基盤構造の耐波浪実験を実施した。この実験では基盤の高さが水深の0.85、0.75、0.54、0.45に対して、波(周期は2.0s、2.4s、2.8sの3ケース)が砕波するかある

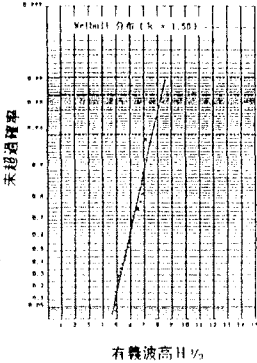


図-3 波高の未超過確率と再現期間

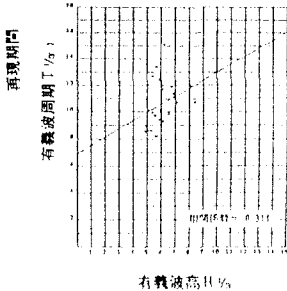


図-4 波高と周期の相関

表-1 秋谷地点の沖合波浪(10年確率波)の推定結果

検 討 項 目		SSSE	S	SSW	SW
波浮港での	$H_{1/3}(\text{m})$	7.62			
10年確率波	$T_{1/3}(\text{s})$	11.5			
の推定結果	S_{max}	10			
地形による	波高比	0.669	0.739	0.707	0.590
遮蔽効果を	$H_{1/3}(\text{m})$	5.10	5.63	5.39	4.50
考慮した値	$T_{1/3}(\text{s})$	11.5	11.5	11.5	11.5
港内での波	吹送距離(km)	21.99	41.52	55.29	58.19
の発達条件	風速(m/s)	25.2	25.2	25.2	25.2
秋谷地点の	$H_{1/3}(\text{m})$	5.48	6.21	6.20	5.59
沖合い波浪	$T_{1/3}(\text{s})$	11.6	11.7	11.8	11.8
推定結果	S_{max}	25	25	25	25

いは基盤が被災するまで規則波を作用させ、基盤材の安定限界重量を得た。海中林の基盤材は表面が平坦で後述する表面形状の加工がしやすいシーサップブロックを採用し、基盤の波力の低減と海藻の生息密度を高くすることも考慮して表面の開孔率を10%とした。

基盤断面については図-6に示すように捨石マウンドの上面および斜面を被覆する（完全被覆）構造とした。この実験では、一様水深部の入射波と基盤上の通過波は容量式波高計で、また、基盤上の底面軌道流速はプローブの直径が5 cmの電磁流速計で測定した。基盤の安定性については次の基準に従って目視で判定した。

- (a) 安定：基盤材は全く動かない。
- (b) 微動：基盤材がかすかに動く。
- (c) 動揺：基盤材が上下方向に大きく動く。
- (d) 被災：基盤材が元の位置から移動する。

(2) 基盤の洗掘・埋没実験

基盤高の検討は耐波浪実験と同様の模型を用いた移動床（中央粒径 $d_{50}=0.16\text{mm}$ ）実験を行い、基盤全体の洗掘が少ない基盤断面構造および基盤上への堆砂が少なくなる基盤高を把握した。この実験では有義周期 $T_{1/3}=2.8\text{s}$ 、有義波高 $H_{1/3}=12\text{cm}$ の不規則波を作用させ、内径5 mmのサイフォン管を用いて基盤上方の浮遊砂濃度を求めた。その時の採水時の管内流速は $1.0\text{m/s}\sim 1.2\text{m/s}$ である。

(3) 藻体に作用する波力実験

海中林基盤材の所要重量は海藻が受ける波力と基盤材が受ける波力の和を考慮して決める必要がある。そのため、海藻が受ける波力については大型造波水路による実規模の実験を行い測定した。実験はアラメおよびカジメを秋谷地先で採集し、付着器を切り離して葉面積を測定した後、造波水路に張力計を介して固定した。波力は、張力計により鉛直および水平方向の2成分波力を測定し、それらを合成して求めた。なお、水路の耐塩性および排水処理の事情から、実験には淡水を用い、海藻1個体についての実験時間を約1時間以内とした。

4.2 実験結果と考察

(1) 基盤の耐波浪安定重量

傾斜防波堤混成堤マウンドや根固被覆工の被覆材の波浪に対する所要重量は前者がハドソンの式、後者がブレブナ・ドネリー式で与えられるが、海中林などのように海底に設置した被覆材の所要重量については算定式が明確でない。したがって、海中林の設計では、流れに対する被覆石の所要重量を与える米国のShore Protection Manual²⁾の算定式を変形して、式(1)で評価することにする。

$$W = \frac{\gamma_r \cdot U^6}{g^3 \cdot Fr^6} \quad (1)$$

式(1)の流速 U は(2)式で与え、波高 H は微小振

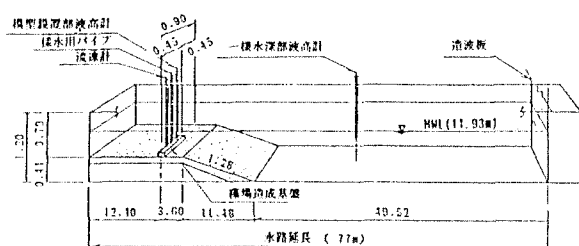


図-5 中型造波水路の概要

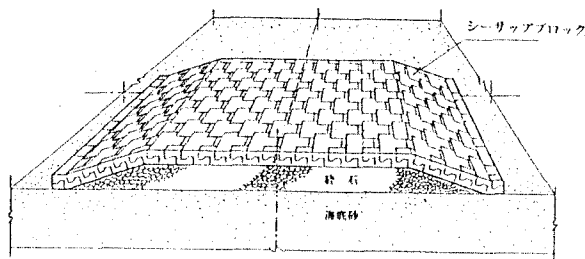


図-6 シーサップブロックと基盤構造

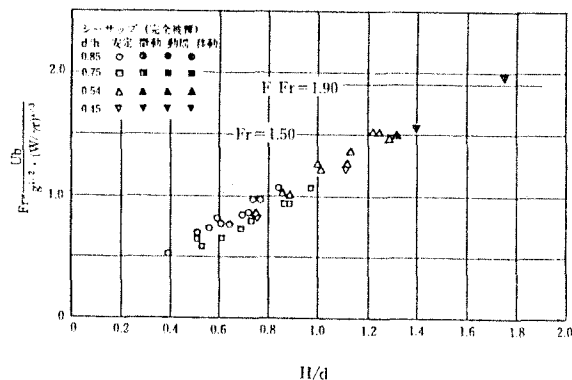


図-7 シーサップ（完全被覆）の安定係数

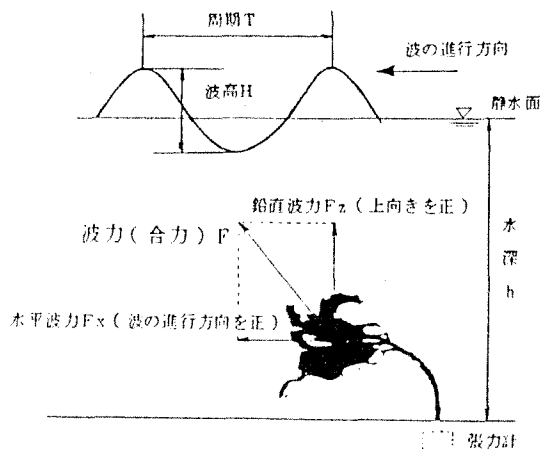


図-8 (a) 海藻に働く波力模式図

幅波理論による浅水変形で推定することとする。

$$U = \frac{\pi H}{T \cdot \sinh(2\pi d/L)} \tag{2}$$

ここに、 W ：重量、 γ_r ：基盤材の単位体積重量、 H ：設置地点の波高、 U ：基盤材上の軌道流速、 g ：重力の加速度、 Fr ：基盤の安定係数、 d ：基盤上面の水深、 L ：設置地点の水深 d における波長である。

耐波浪実験から式（１）により得た安定係数 Fr と基盤の安定性をプロットした結果を図－７に示す。これによると、シーサップ完全被覆の場合、動揺と移動の境界が約 $Fr=1.9$ と判断される。これより、シーサップ完全被覆の安定限界係数を $Fr=1.9$ として、基盤の所要重量を算定することにする。なお、同様の実験から求めた被覆石や方塊などの安定限界係数はそれぞれ $Fr=1.9$ 、 $Fr=1.15$ であった³⁾。

(2) 基盤高の検討

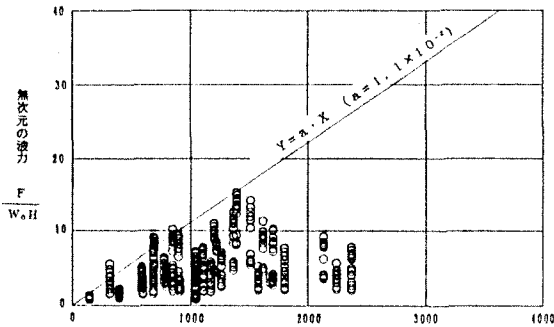
秋谷地先海域におけるアラメとカジメの砂面からの高さ（比高）と海藻の育成状況との関係を調査した。その結果、比高が大きい場所では海藻の育成密度が高く砂の被度が低かった。また、砂面の変動はアラメ区付近で30cm程度であったが、安全をみて2倍の変動とすると60cmとなる。砂層厚が50cm程度の場合では、最大50cm沈下すると考えると、基盤が埋没しないようにするためには、1.1 m以上の基盤高が必要となる⁴⁾。一方、前述の中型造波水路での基盤の高さに対する浮遊砂濃度および基盤上への堆砂量の実験から、基盤の高さが4 cm（現地換算1 m）の場合では基盤上に砂の堆積があり、8 cm（現地換算2 m）以上の場合には堆積が見られなかった。以上のことから、アラメ区（水深4 m）、カジメ区（水深11 m）とも基盤の高さを約 1.8 mにすることにした。

(3) 海藻に作用する波力

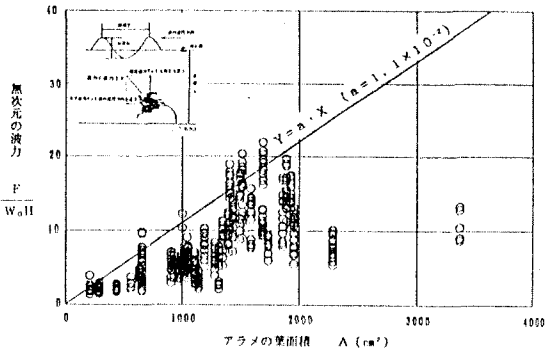
アラメに作用する波力の実験結果を図－８に示す。この図によると、海藻が受ける波力は葉面積2,000cm²程度までは、葉面積に比例するが、それ以上ではほぼ一定値となる。最大波力の包絡線の傾きはアラメとカジメとも、ほぼ同程度であった。従って、両種に作用する最大波力は、（３）式で与えられ、その波力は防波堤に作用する波力の150分の1程度である。また、海藻は水平方向に強く波力を受け、鉛直波力 F_z と水平波力 F_x の比はアラメ、カジメとも 1/5と測定された。

$$\begin{aligned} F &= 2.2 \times 10^{-3} \cdot W_0 \cdot H_{\max} \cdot \Delta k \\ F_z &= 1/5 \cdot F \\ W_k &= F_z \cdot n \end{aligned} \tag{3}$$

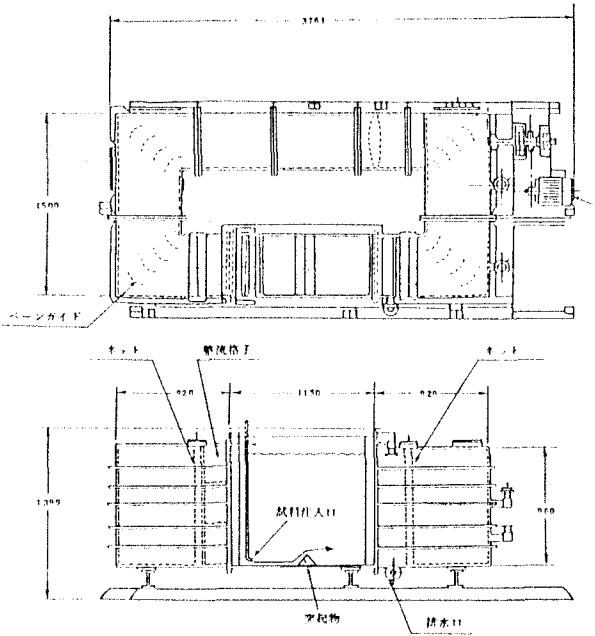
ここに、 F ：海藻の水平波力、 W_0 ：海水の単位体積重量、 $H_{\max}$ ：最大波高、 F_z ：海藻に作用する鉛直波力、 W_k ：単位面積当りの海藻の鉛直波力、 Δk ：海藻の葉面積、 n ：海藻の生息密度である。



図－８ (b) カジメに働く波力



図－８ (c) アラメに働く波力



図－９ 回流試験装置の概要

表－２ 海中林基盤が受ける波力

区域	基盤高 r(m)	種類	表面積 (m ²)	基盤波力 We(lonf)	海藻波力 Wk(lonf)	基盤＋海藻 We＋Wk(lonf)
水深11m		2.1on型	2.0	0.25	0.20	0.45
(カジメ区)	2.0m	4.1on型	3.0	0.25	0.30	0.55

一方、小田和湾における海藻の群落調査⁵⁾から、アラメの生息密度は41本/m²、葉面積は0.93m²/本、カジメの生息密度は93本/m²、葉面積は0.06m²/本との調査結果を得ている。したがって、これらの値を(3)式に代入することにより、海藻が基盤を引っ張る鉛直波力を算定することができる。

(4) 基盤材重量の選定

上記(1)および(3)項の結果を踏まえて、基盤材の所要重量を決めた。表-2は水深11mのカジメ区に対して、基盤の高さを2mとしたシーサップ2トン型、4トン型に加わる基盤の波力および海藻の波力を計算したものである。これによると、海中林の基盤重量は0.5トン程度で設計波に対して耐えられるが、数トン程度までは大きいブロックの方が工事費が安くなることから、アラメ区、カジメ区ともシーサップは4トン型を採用することにした。

5. 基盤の表面形状

5.1 海藻の遊走子付着実験

実験に用いた装置は、水温および流速をそれぞれ10～30℃、5～50cm/sにコントロールできる回流水路(図-9)を用いた。水路底面には各種形状の突起物を固定し、その前面、上面および背面に、着生した遊走子を計数するための1mm方眼のスライドガラスを埋め込んだ。

実験に供試した遊走子は、秋谷地先海域からアラメ・カジメの成熟母藻を採取し、子葉斑の認められる側葉を濾過海水で良く洗浄して、室内において50～70分乾燥後、濾過海水中に30～60分間入れ放しさせ、遊走子密度が約5000万個/ℓになるように濾過海水で調製した。遊走子液を流し終えた5分後に水流を止め、スライドガラス上の遊走子の着生部位とその密度を調べた。なお、この実験は、水温は20℃、流速は3、5、10、および15cm/sの4段階、突起物の角度については、30、45、60、90、120度の6ケースとして行ったものである。

5.2 結果と考察

突起物の角度と遊走子の着生部位および密度について調べた結果(流速5cm/sの場合)を図-10、図-11に示す。遊走子着生密度は突起物の背面、上面では低く前面(上流側)で高く、また、突起物の角度と遊走子の平均着生密度(突起物の前面)との間には、角度120度までの範囲でほぼ比例関係にあることが判った。

平均着生密度と流速の関係は、図-12に示すように流速の増大とともに急激に低下し、かつ、流速の増大は突起物の角度の効果のも失わせることが明らかとなった。秋谷地先海域での流速頻度は大部分が5cm/s以下と遅いことから、基盤上に突起物を付けることによりアラメ、カジメの遊走子付着密度を高めることができると考えられる。

6. 海中林基盤の実規模実験

6.1 実規模水理実験

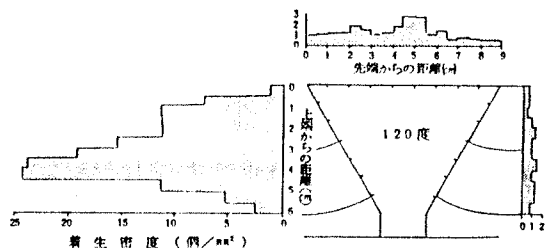
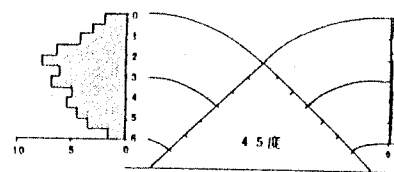


図-10 遊走子の着生部位および密度

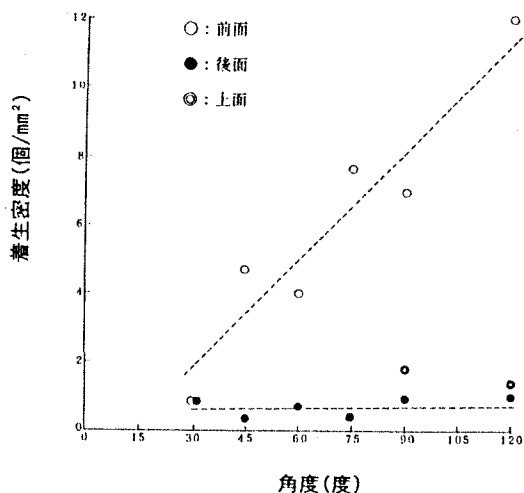


図-11 突起物の角度と着生密度との関係

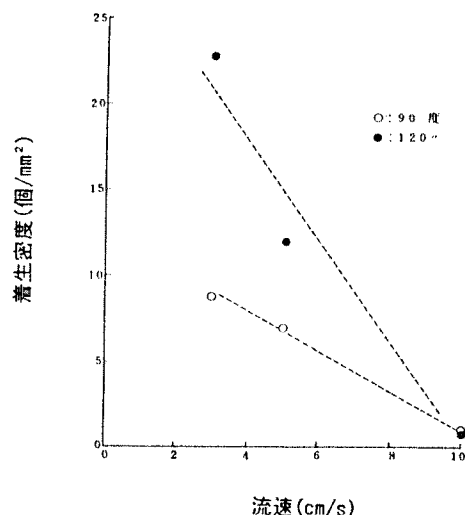


図-12 流速と着生密度との関係

以上の検討により得られた海中林基盤の設計案に対し、大型模型を用いて設計波に対する基盤の安定性および基盤の非洗掘、非埋没を確認した。確認試験は大型造波水路（長さ205m、高さ6.0m、幅3.4m）を用い模型縮尺1/5程度の実規模実験を実施した。

水路内には中央粒径 $d_{50}=0.27\text{mm}$ の砂の海底上に10 Kgfのシーサップブロック（現地換算4トン）で海中林の基盤を作り、基盤の耐波浪実験と洗掘・堆砂実験を実施した。基盤の安定性は、基盤が見えないため、個々のブロック上に取り付けた傾動センサーにより判定した。確認試験の潮位は、小田和湾のさく望平均満潮位（H.W.L.+1.5m）、洗掘・堆砂実験では平均潮位（M.W.L.+0.93m）の水位とした。

表－3は3章の波浪推算より求めた、カジメを対象とした水深11m地点およびアラムを対象とした水深4m地点の波浪推算結果であるが、基盤の耐波浪実験では10年確率による設計波、洗掘・堆砂実験では底質移動を生じ易い、比較的に出現頻度が高い、長周期の高波浪を用いることとした。

6.2 実験結果と考察

実規模波浪による耐波浪実験から、シーサップ4トン型の藻場基盤は設計波および最も波力の強い規則波の碎波波高に対しても安定であることを確認した。洗掘・堆砂実験から中型造波実験と同様に設計案の基盤高（現地換算約1.8m）では、基盤上の砂の堆積および基盤法先の顕著な洗掘も生じなかった。

以上の検討結果から、秋谷海域に施工する海中林の基盤構造は図－13のように設計した。

7. まとめ

藻場基盤の洗掘・埋没実験から以下の知見を得た。

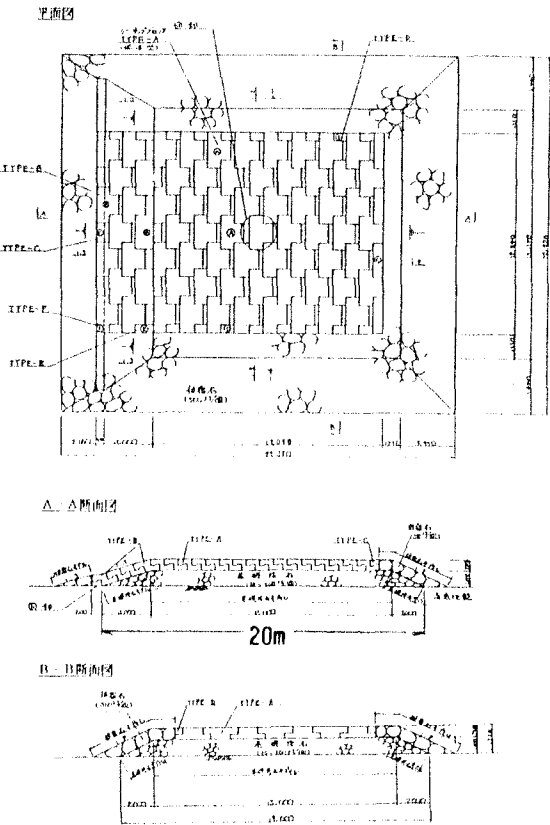
- (1) 設計波：秋谷地先の設計波は波向がS、有義波高 $H_{1/3}=6.2\text{m}$ 、周期 $T_{1/3}=11.7\text{s}$ となった。
- (2) 基盤材の所要重量：設計波に対してのシーサップブロックの所要重量は0.5トンと試算された。
- (3) 基盤の断面構造：設計波に対して、基盤が安定であり、かつ、基盤の埋没および基盤上への砂のはい上がりが少ない高さは約1.8mとなった。
- (4) 基盤の表面形状：仰角90度以上のオーバハンクした形状の突起物側面は海藻の遊走子着生密度を高くし、海藻の生残率を高める効果がある。

参考文献

- 1) 川崎保夫、寺脇利信、長谷川寛、平口博丸ら：海中林造成技術の実証－第3報 三浦半島西部における造成技術－、電力中央研究所研究報告U91023、37pp.、1991.
- 2) SHORE PROTECTION MANUAL:U.S.ARM COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER、1984、VOLUME II、PP249～253
- 3) 長谷川寛、鹿島達一：連繋性のある新型緩傾斜護岸ブロックの開発、海洋開発論文集、Vol.6、1990、pp.293-298
- 4) 寺脇利信、川崎保夫、本多正樹ら：海中林造成技術の実証－第2報 三浦半島西部でのアラムおよびカジメの生態と成育特性－、電力中央研究所研究報告U91022、69pp.、1991.
- 5) 寺脇利信：海中林造成技術の基礎的検討－第2報 カジメ幼体の入植と人工基盤の表面形状、電力中央研究所研究報告U88037、26pp.、1988.

表－3 実規模実験に用いた設計波

海中林設置位置	設計波(10年確率波)				長周期波		
	水深	周期	有義波	最高波	周期	有義波	最高波
h(m)	T(s)	$H_{1/3}$ (m)	H_{max} (m)	T(s)	$H_{1/3}$ (m)	H_{max} (m)	
カジメ1	11.0	12.0	4.85	8.04	14.4	3.30	5.93
〃 3	10.4	11.8	4.54	7.58	13.9	2.96	5.33
目標値	11.0	11.5	4.85	8.04	14.0	3.0	5.6
アラム2	3.9	12.3	3.61	4.70	14.6	3.38	4.54
〃 4	3.5	12.2	3.38	4.42	14.5	3.20	4.21
目標値	4.0	11.5	3.61	4.70	14.0	3.0	4.4



図－13 海中林基盤の設計案