

・ 正会員 水産庁漁港漁場整備部整備課水産土木専門官
 ・ (財) 漁港漁場漁村技術研究所
 ・ (財) 漁港漁場漁村技術研究所
 ・ 正会員 工博 はこだて未来大学教授 システム情報科学部アー
 キテクト学学科
 ・ 島根県農林水産部漁港漁場整備課

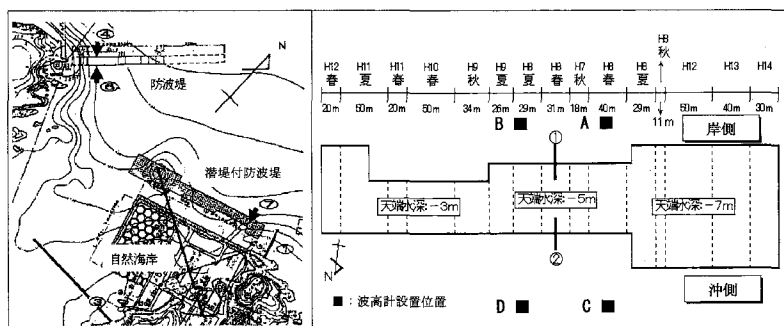


図-2 調査測線及び波浪観測点 (左：事前調査、右：モニタリング調査・波浪観測)
 ※波浪観測時において測点 A・C の背後に防波堤のケーソンは据付られていない

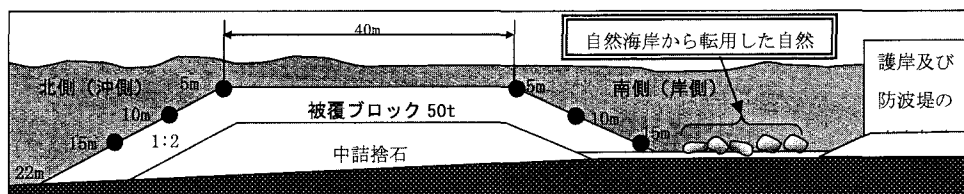


図-3 潜堤の標準断面図 (●：モニタリング調査の調査点位置)

表-1 事前調査 (自然海岸及び既設防波堤 (垂直壁)) における最優占種 (現存量第 1 位)

調査場所	調査時間	水深 5 m		水深 10 m		水深 15 m	
		種類名	現存量*	種類名	現存量*	種類名	現存量*
自然海岸 (磯浜)	H 7.10	クロメ	12,264 (89)	クロメ	6,097 (90)	クロメ	2,270 (77)
	H 7.12	クロメ	1,421 (70)	クロメ	1,574 (84)	クロメ	196 (23)
	H 8. 3	クロメ	4,070 (78)	クロメ	2,408 (72)	クロメ	2,203 (83)
	H 8. 7	クロメ	5,150 (89)	クロメ	3,009 (72)	クロメ	5,139 (92)
自然海岸 (磯浜)	H 7.10	ノコギリモク	382 (67)	カジメ属	356 (50)	カジメ	66 (34)
	H 7.12	ノコギリモク	69 (24)	カジメ	78 (62)	エツキイワノカワ	126 (78)
	H 8. 3	ウスカワカニノテ	253 (27)	カジメ	596 (45)	エツキイワノカワ	68 (45)
	H 8. 7	ノコギリモク	552 (49)	クロメ	690 (43)	コナウミウチワ	292 (66)

*現存量 (湿重量) の単位は g/m^2 , () 内は湿重量合計に対する占有率 (%)

で、年間を通して現存量が多く、クロメを中心とした安定性の高い藻場が形成されている。自然海岸における付着動物群集は年間を通して現存量が少なく、卓越した優占種が少ないことから、多様性の高い動物群集を形成している。

(2) 既設防波堤 (垂直壁)

既設防波堤における海藻群落 (表-1) は、自然海岸に比べると、年間を通して現存量が極めて少なく、群落の中心となる大型褐藻は見られない。付着動物群集は、年間を通して現存量が多く、アカフジツボ及びイタボガキ科の 2 種類が特に卓越している。

(3) 生物分布と生物生育環境因子

自然海岸では、水深 20 m 付近まで大型海藻群落が形成されており、基礎生産力を担う第 1 栄養段階の生物 (海藻) が非常に多く、高次栄養段階に属する生物の量が少

ないピラミッド状になっている。水質や光量子等は、生物生態環境基準を満足している。食害動物である魚類や底生動物による影響は特に表れていない。

また、既設の防波堤では、海藻の量は少なく、付着動物の量が多いなど、第 2 栄養段階が非常に多い状態を示し、海藻による基礎生産を介さない群集構成になっている。

4. 水理模型実験の結果

(1) 水理模型実験の内容

潜堤の設置位置及び天端水深については、中泉ら (1988) の行った規則波による波圧実験結果より概略設計し、次に、不規則波による水理模型実験を行い、潜堤による波高変化や水位上昇、反射波等並びに防波堤直立部に作用する波圧について検証した。実験は、実験縮尺を $1/36$ とし、不規則波造波水路 (長さ 100 m, 幅 1 m, 深さ

1.2 m)に堤体模型を設置して行った。実験波は、換算沖波波高が4.0 m, 周期8.0 sから、設計波(30年確率波)である波高7.8 m, 周期12.6 sを最大とする4種類とした。

(2) 波高変化及び水位上昇等

潜堤のみの場合では、潜堤部で波高が大きくなり、碎波後は潜堤背後にかけて波高が減衰している。潜堤の天端高水深が小さくなるほど、また入射波高が大きくなるほど波高伝達率は小さくなっている。このときの反射率は、概ね0.15~0.20である。次に、潜堤背後に直立部を設置すると直立部と潜堤間(遊水部)の水位上昇量は、潜堤の天端高水深が小さくなるほど、また入射波高が大きくなるほど大きくなっている。反射率は、概ね0.4~0.8の値になり、入射波高が大きくなると潜堤による碎波により低減していた。

(3) 防波堤直立部に作用する波力

直立壁面に取り付けた各波圧計の値から同時波圧合力を求め、これを作用高で除した平均波圧強度 p を入射波高(有義波高) $H_{1/3}$ で無次元化した $p/wH_{1/3}$ と潜堤の天端高水深 hc と波高 $H_{1/3}$ の比 $hc/H_{1/3}$ との関係を図-4に示す。いずれの平均波圧強度も水深波高比にかかわらず、最大平均波圧強度で $1.0wH_{1/3}$, 1/10最大平均波圧強度で $0.7wH_{1/3}$, 1/3最大平均波圧強度で $0.5wH_{1/3}$ であった。概略設計では、平均波圧強度を $1.0wH_{1/3}$ としていたが、概ね妥当であったものといえる。

5. 潜堤付防波堤の構造

事前調査の結果より、海藻の生育に適した光条件の水深帯に一致する新たな着生基盤を設けることにより、自然海岸を代表するクロメ等の大型褐藻の生育、藻場の形成が期待できるものと考えられる。また、水理模型実験の結果より、入射波に対して、潜堤の設置距離と天端高水深等を適切に設定すると、潜堤の波圧減殺効果は通常の消波ブロック被覆(平均波圧強度 $1.0wH_{1/3}$)の場合と同程度であることが明らかにされた。したがって、潜堤付防波堤にすることにより、水深15 m以浅の着生基盤を確保し、クロメ等の大型海藻の生育、藻場、水産有用

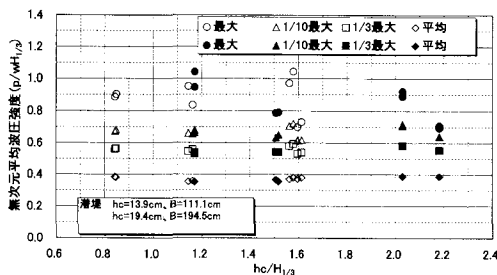


図-4 水深波高比と平均波圧強度の関係

種であるサザエ、アワビの生育場の形成を期待することとした。

6. モニタリング調査の結果

(1) 水質、波・流れ等

水温、塩分、溶存酸素、濁度、光子束密度については、事前調査の結果と特段の差異はなく、生物生息環境に支障になる値ではなかった。

潜堤の岸側と沖側における現地波浪観測では、最大有義波高3.5 m(潜堤沖側C地点、波向きは堤体にはほぼ直角)が得られた、このときの4地点の波高計の観測値から微小振幅波理論により各水深帯での最大水粒子速度を算出した結果を表-2に示す。測点A, Cは、潜堤背後の防波堤直立部が無い状態であり、潜堤の背後では、水粒子速度が2割程小さいが、測点B, Dでは、直立部からの反射波や水位上昇のため、潜堤背後で波高が大きくなり、水粒子速度が潜堤沖側の1.5~2.0倍になっている。こうした海水流動は、海藻の胞子や付着動物の幼生等の輸送過程や着生・生育に重要な影響を持つことから、生物の分布状況に大きくかかわってくるものと考えられる。

表-2 最大水粒子速度の平均値 (cm/s)

水深	測点A	測点B	測点C	測点D
海面	50.6	101.7	59.8	63.0
水深3 m	40.0	81.6	49.9	52.4
水深5 m	34.6	72.0	44.4	46.5
水深7 m	30.3	64.8	39.5	41.3
水深10 m	25.6	58.1	33.5	34.8
水深15 m	21.3	56.4	25.9	26.8
海底	20.5	55.7	16.0	16.3

(2) 大型海藻等付着生物の分布

水深5 mでは、当初は優占種(表-3)が年によって変わったが、設置後5年で優占種はクロメになり、安定する傾向を示した。水深10 mにおいては、設置後3年で優占種はクロメとなり、現存量が他の水深帯と比較して多かった。水深15 mでは、設置後2年半で優占種はクロメになった。ワカメの分布は、浅場(水深3 m~5 m)に多く、ホンダワラ類の分布は、潜堤の沖側の水深3 mの天端付近で最も多い。なお、被覆ブロックに溝を付ける等の工夫を行っていたが、溝の有無による効果の差異は認められなかった。

付着動物については、フジツボ類やイタボガキ科(ともに二枚貝類)が優占している。サザエは、潜堤の沖側での分布が多く、-3 mで最大となる傾向を示し、最深部ではほとんど見られなかった。これは、食害動物であるヒトデの分布が潜堤の岸側に集中していたことや、浅場に稚貝が多く確認されており浮遊幼生が浅場に着定しやすいためと推察される。設置後の早い時期には溝付きのブロックにおいて、溝なしブロックの約4倍のサザエの

個体数が確認されたが、その後減少し、概ね2倍前後を維持している。これは、溝の内部壁面にフジツボ類が固着することやウニ類等と生息空間が競合するためと考えられる。アワビ類は、浅場のブロックの溝内部に生息していた。サザエ・アワビは、潜堤の沖側に多く分布していた。魚類としては、マアジ、イシダイ、チャガラ、メバル等数10種類が確認され、推定現存量からみても自然海岸に近い水準に達していた。

7. 生物生育環境の創出効果に関する評価

(1) 評価の尺度

a) 大型海藻等水産有用生物の増殖効果

増殖効果については、6.(2)のとおりである。

b) 生物の種多様性

付着生物の種多様性について、大型海藻は種類数で、付着動物については種類数の他にSimpsonの多様度指数(SID)を算出して、事前調査における自然海岸及び既設防波堤と比較した。その結果、大型海藻及び付着動物の種類数は、自然海岸の値を上回っていた。付着動物の多様度指数は、設置後3年で自然海岸における多様度(15~25)の水準に達していた。

c) 生物群集の類似性

大型海藻群落の類似性については、枠取り調査結果をもとにクラスター分析を行い、類似度を算出した。この類似度の経年変化から生物群集の遷移過程を自然海岸と比較し、検討した。類似度指数が1に近いほど類似性が高いということである。その結果(表-4)、設置当初は、既設防波堤との類似性が見られたが、その後は自然海岸との類似性が高まり、水深別には、深場で約1年半、浅場では4年半で既設の直立防波堤から自然海岸へと類似度が高まることがわかった。付着動物群集の類似性については、自然海岸と既設防波堤との類似性を繰り返していた。

d) 食物連鎖から見た重量バランス

潜堤における付着生物の栄養段階別湿重量を図-5に示す。設置後2~3年を経過した時点では、自然海岸と既設防波堤の中間的な状態であったが、設置後5年では、概ね、海藻による生産を基礎とする自然海岸の栄養段階別の現存量バランスに近いといえる。

(2) 評価基準(自然海岸における生物生息状態との対比)

設置後当初は、最優占種が入れ替わる不安定な海藻群

表-3 モニタリング調査(大規模潜堤)での優占種(現存量第1位)

調査場所	調査時間	水深5m		水深10m		水深15m	
		種類名	現存量*	種類名	現存量*	種類名	現存量*
第1回	H 9. 2	ウミウチワ	498(42)	—	—	—	—
第2回	H 9. 8	ウミウチワ	328(59)	ウミウチワ	1,367(92)	ウミウチワ	112(42)
第3回	H 9.12	ウスカワカニノテ	378(36)	クロメ	415(60)	クロメ	595(78)
第4回	H 10. 5	クロメ	3,600(44)	ノコギリモク	1,170(32)	クロメ	1,051(56)
第5回	H 10. 9	ノコギリモク	1,371(49)	クロメ	1,001(44)	ウミウチワ	511(56)
第6回	H 10.12	ノコギリモク	2,186(86)	ノコギリモク	602(49)	クロメ	593(67)
第7回	H 11. 5	ワカメ	3,801(50)	クロメ	7,397(92)	クロメ	1,051(67)
第8回	H 11.12	クロメ	782(38)	クロメ	2,327(95)	クロメ	5,039(98)
第9回	H 12. 5	ワカメ	8,351(93)	クロメ	2,111(82)	クロメ	1,420(83)
第10回	H 12.11	ノコギリモク	711(62)	クロメ	3,254(90)	クロメ	1,982(85)
第11回	H 13. 5	クロメ	4,030(55)	クロメ	5,312(93)	カジメ属	305(40)
第12回	H 13.11	クロメ	3,030(84)	クロメ	5,395(96)	クロメ	1,835(75)

*現存量(湿重量)の単位はg/m²、()内は湿重量合計に対する占有率(%)

表-4 大規模潜堤における海藻群落の類似性(類似場所及び類似度指数*)

事後調査		事前調査					
潜堤		水深5m		水深10m		水深15m	
調査回次	調査時期	類似場所	類似度指数	類似場所	類似度指数	類似場所	類似度指数
第1回	H 9. 2	防波堤	0.337	—	—	—	—
第2回	H 9. 8	防波堤	0.305	なし	—	なし	—
第3回	H 9.12	防波堤	0.729	自然海岸	0.879	自然海岸	0.992
第4回	H 10. 5	自然海岸	0.752	防波堤	0.674	自然海岸	0.888
第5回	H 10. 9	防波堤	0.729	自然海岸	0.739	自然海岸	0.496
第6回	H 10.12	防波堤	0.699	防波堤	0.693	自然海岸	0.935
第7回	H 11. 5	自然海岸	0.243	自然海岸	0.988	自然海岸	0.949
第8回	H 11.12	自然海岸	0.649	自然海岸	0.982	自然海岸	0.983
第9回	H 12. 5	なし	—	自然海岸	0.989	自然海岸	0.997
第10回	H 12.11	防波堤	0.936	自然海岸	0.992	自然海岸	0.994
第11回	H 13. 5	自然海岸	0.871	自然海岸	0.986	自然海岸	0.562
第12回	H 13.11	自然海岸	0.987	自然海岸	0.984	自然海岸	0.967

*類似度指数にはKimoto(1967)の重複度(C_π)を使用

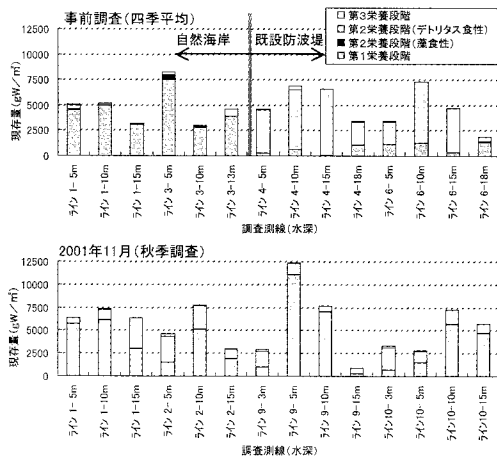


図-5 付着生物の栄養段階別湿重量

落を形成していたが、約3年経過後は、クロメを中心とした群落を形成している。また、栄養段階別重量組成や種の多様性からみても、潜堤における生態系が約3～5年の遷移過程を経て自然海岸の状態に近づいたのが確認されたことから、潜堤の海藻群落は遷移過程を経て目標像に達し、水産生物の生育環境が創出されたものと評価できる。

8. 生物生育環境と潜堤付防波堤の構造特性

潜堤背後に直立部がない状態では、クロメの株数が増加傾向を示していたが、直立部の施工後は、浅場で株数が減少傾向を示した。水理模型実験結果や現地観測結果から、防波堤直立部からの反射波による底面波浪流速(6.(1)の最大水粒子速度)の増大がクロメの着生の阻害要因になっているものと考えられる。

また、潜堤の海藻群落は遷移過程を経て自然海岸の状態に近づくが、水深による差異があり、浅場で最も遅かった。

そこで、大型海藻クロメの成熟期であり、かつ孢子の着生に影響を与える波浪が最も激しい秋季から冬季かけての現地波浪観測(浜田港, 水深51m, 1999.1～2001.12)データから月別最大波(波向NW, 沖波波高5.2m, 周期9.1s)を抽出し、エネルギー平衡方程式法による波浪変形数値計算により、自然海岸と潜堤での波高変化と底面波浪流速の変化を算定(図-6)した。なお、同時期のエネルギー平均波は、沖波波高3.9m, 周期8.1sである。一方、海藻が多く繁茂する春季の波浪については、月別最大波で沖波波高1.6m, 周期7.3s, エネルギー平均波は、沖波波高0.9m, 周期5.8sである。

大型海藻の群落形成に最も重要な時期に着目すると、潜堤に襲撃する波浪の波高は自然海岸に対して、深場で

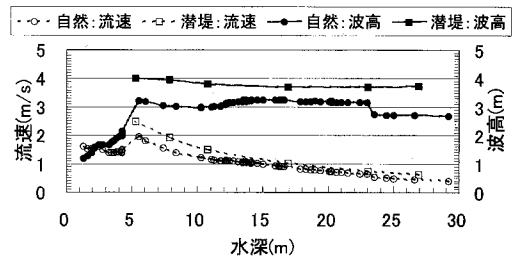
10月～12月の月別最大有義波(波向: NW, $H_0=5.18\text{m}$, $T_0=9.1\text{s}$)

図-6 自然海岸と潜堤における波高と流速の変化

は波高と底面波浪流速のいずれもそれほど差異はない。しかしながら、浅場になると潜堤上の波高と底面波浪流速は、自然海岸での値の1.3倍にも大きくなっており、この海水流動の増大が、大型海藻が着生し安定して生長するのを妨げたことにより、海藻が極相に至るまでに長い時間を要したものと考えられる。

9. まとめ

以上、海藻の生育に適した水深帯を有する潜堤は、長期にわたる遷移過程を経て、良好な自然海岸(磯浜)に近い安定した海藻群落を形成するに至り、藻場機能が発揮されたと評価できた。潜堤付防波堤は、波浪制御としての機能を有するとともに、周辺に形成されている良好な天然の藻場等と類似する生物生息環境を創出する機能を有する藻場等着生型漁港構造物といえる。このように、周辺海域の自然環境を評価基準(目標像)に設定して、対象生物の生息環境因子を分析し、阻害する要因を人為的に制御することは可能である。同様な考え方にに基づき、着生基盤となる基礎マウンドの幅を広げたものや基礎マウンド上水深を浅くしたものも現在採用されてきている。いずれの構造形式であっても、こうした機能を発揮するには、評価の尺度、基準を事前に設定し、施工中及び施工後において、モニタリングによる適宜フォローしていくことが重要であるものと考えられる。

最後に、現地調査にあたり協力頂いた総合科学株式会社の中西敬、瀬戸口喜祥の両氏に謝意を表す。

参考文献

- 佐見 誠・三橋宏次・鹿田正一・吉村直孝・勝部昌彦・寺嶋 博 (1999): 藻場造成を考慮した防波堤の効果評価, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.1161-1165.
- 中泉昌光・山本正昭・間辺本文 (1988): 潜堤付防波堤の波力に対する実験的研究, 海岸工学論文集, 第35巻, pp.632-636.
- Kimoto, S. (1967): Some quantitative analysis on the Chrysomelid fauna of the Ryukyu Archipelago, Esakia, 6, pp. 27-54.