

水中放流と高波浪による海底洗掘の新しい対策工 SPAC の提案

The New Countermeasure SPAC against Seabed Scour due to Submerged Discharge and Large Waves

清水隆夫*・佐々木明**・氏家久芳**

Takao.Shimizu, Akira.Sasaki and Hisayosi.Ujiie

The new countermeasure SPAC, Spreading Armor Coat, against seabed scour due to submerged discharge and large waves was proposed based on hydraulic model experiments. The SPAC restrains expansion of scour hole by means of the minimum replacement of the seabed with riprapping in front of the outlet of submerged discharge. The necessary amount of the riprapping rocks was determined by the empirical model that the rocks would cover the upstream slope of the scour hole in the form of a single layer.

Keywords: scour, submerged discharge, wave, riprapping

1. はじめに

火力発電所・原子力発電所の温排水を効率よく希釈する方法として高速水中放流がある。放水口前面が砂質海底であっても内湾のように波の静かなところであれば、放水口の先の海底が放水流によって洗掘されるだけである。しかし、外洋臨海発電所においては高波浪の来襲によって洗掘が加速され、放水構造物などの安定性に問題が生じる恐れがある。そこで、一般にはコンクリート版などで放水口前面の海底を被覆することが考えられるが、それだけで十分とは言えない。

本研究では被覆工に放水流と高波浪を同時に作用させる2次元の移動床水理実験を行い洗掘対策を検討した。まず、被覆工の崩壊過程を明らかにし、その結果を踏まえて各種対策工を比較・検討した。そして、合理的な新しい洗掘対策工を提案した。

2. 放水口前面の海底洗掘対策の問題点

尾崎ら(1987)によれば海洋構造物の洗掘防止工は表-1のように分類される。即ち、a. 海底面被覆工、b. 導流・減勢工、ならびにc. 基礎根固工の3つに大別される。これらは主として波による防波堤・護岸脚部の洗掘、あるいは潮汐流・河川流による橋脚まわりの洗掘についての対策である。これに対して、臨海発電所の

放水口前面は波浪によって動き易くなった海底の砂が上流側からの土砂供給がない放水流によって持ち去られるという苛酷な条件にある。また、温排水を効率良く希釈しなければならないので、放水流やこれに合流する連行流を妨げる導流工や減勢工が使えない。そのため、放水口前面の海底をコンクリート版などで被覆するのが最も確実な方法と考えられる。ところが、水中放流では図-1に示した牛島・清水(1990)の3次元乱流モデルによる計算例のように放水口からかなり離れてもなかなか流速が低減しないので、洗掘が生じる範囲全体を被覆しようとするに非常にコストがかかる。従って、被覆工を途中で打ち切りたい訳だが、そうすると当然ながら被覆工先端の安定性が問題となる。

そこで、まず流下方向の被覆延長が短い被覆工が放水流と高波浪によってどのように被災するかを実験した。

3. 実験方法

実験には図-2に示した造波水路を用いた。水路は長さ35.2m、深さ1m、幅70cmである。造波装置は電

表-1 海洋構造物の洗掘対策工の分類(尾崎ら;1987)

a. 海底面被覆工	透水性	—	フィルター材料: 砕石, コンクリートブロック, 砂袋, 端籠, 粗朶
	不透水性	—	剛性材料: P.C板, 水中コンクリート 撓み性材料: アスファルトマット, 合成繊維シート, コンクリート詰マット
b. 導流・減勢工	本体付設型	—	: カラー, 減勢網, ASD, SDD, GFD
	隔離型	—	: 人工海藻, 古タイヤ, 砂袋
c. 基礎根固工	—	本体付設型	: カラー, スカート, 撓石

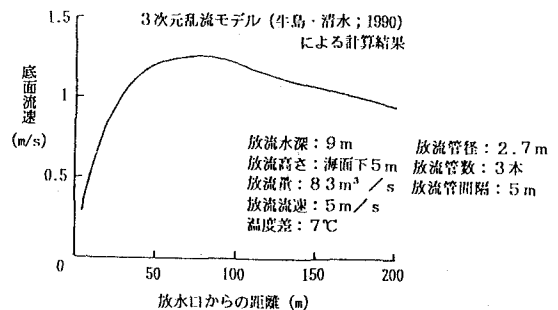


図-1 高速水中放流による底面流速の計算例

* 正会員 電力中央研究所 水理部 (270-11 我孫子市我孫子1646)

** 正会員 東北電力 電力技術研究所 土木研究室

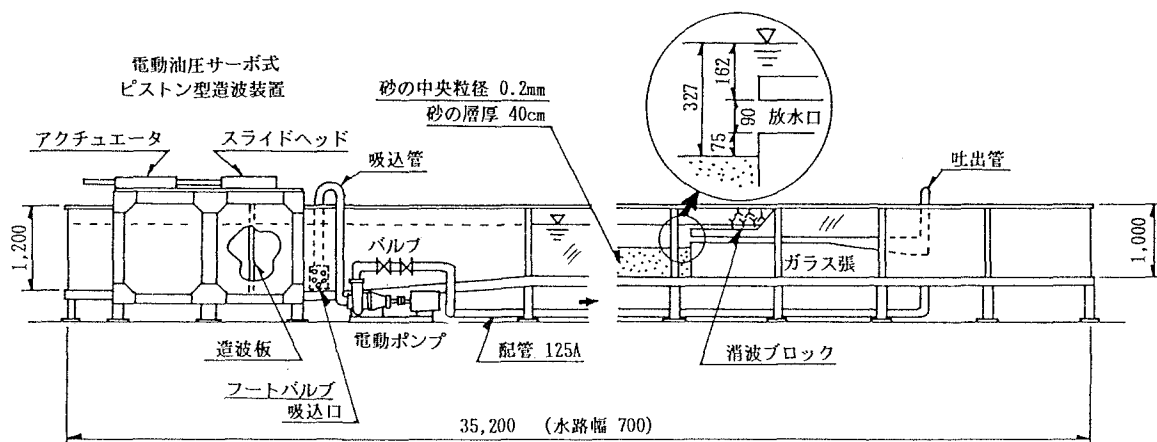


図-2 実験に使用した造波水路と放水口の模型

気油圧サーボ駆動のピストン式である。この造波水路に電動ポンプ、開閉弁、配管系を取り付けて放水流が循環するようにした。吸い込み口は造波装置の前で水路壁をまたいで配管して設けた。吸い込み管には波への影響を少なくするために流線型のカバーを取り付けた。吐き出し口としては造波装置と反対側の水路端に模型放水口を設けた。放水口の幅は水路幅と同じ 70cm、高さは 9cm である。放水口前面には長さ約 6m に亘って中央粒径 0.2mm の砂を厚さ 40cm、放水口の下 7.5cm の高さまで敷き、水を放水口の上 16.7cm まで入れて実験した。従って放水口前面の水深は 32.7cm である。放水口の出口流速は 97cm/s とした。これは水深 32.7cm の場合平均流速 26.6cm/s にあたる。高波浪としては周期 1.8s 波高 13cm の規則波 A と周期 2.2s 波高 20cm の規則波 B の 2 種類を用いた。以上の実験スケールは砂の粒径のみを除いて現地の 1/30 程度の縮尺にあたる。波高は容量式波高計、流速は電磁流速計、砂面変動はガラス面からの目視によって測定した。

4. 被覆工の崩壊過程

放水口前面に 13.3cm × 13.3cm 厚さ 3.3cm のコンクリート版を 10 列敷き、放水流と高波浪を作用させた。

図-3 に放水流だけを作用させた場合の 12 時間後の洗掘形状を示した。被覆工先端から先の砂面が洗掘されているが、被覆工のコンクリート版にはさしたる沈下や傾動は見られない。

図-4 には放水流に加えて規則波 A を同時に作用させた場合の同じく 12 時間後の洗掘形状を示した。洗掘深さは流れだけの場合と大差ないが、洗掘の広がりが大きく、特に上流側へも洗掘が進んで被覆工先端から 5 列目までのコンクリート版が沈下・傾動している。このように、放水流だけの場合と高波浪が加わった場合で結果が異なるのは被覆工先端に生じる渦が原因となっている。

図-5 に被覆工先端で観察された渦による洗掘のメカニズムを模式的に示した。まず、波の谷が被覆工先端を

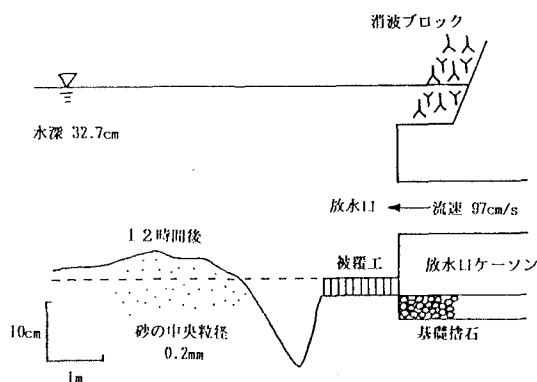


図-3 放水流のみによる洗掘の実験結果

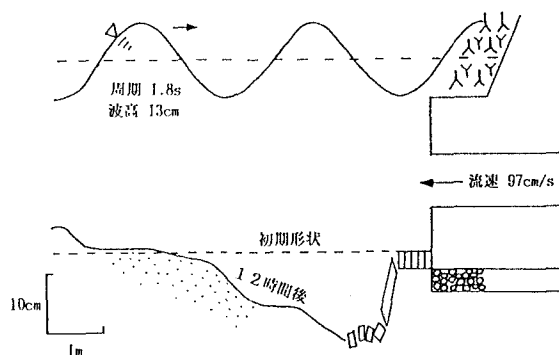


図-4 放水流と高波浪による被覆工の崩壊（実験結果）

通過するとき波による振動流の向きが放水流の向きと一致してコンクリート版の端部に渦が発生して激しく砂を巻き上げる。つづいて、波の峰が被覆工先端にさしかかると波の振動流の向きはさきほどとは逆になり、底面付近の流れはコンクリート版の端部にぶつかって上方へ吹き上がる。渦に取り込まれた砂も一緒に吹き上げられ、放水流に乗って下流遠方へと吹き流されていく。こうしてコンクリート版の下流側が渦によって洗掘されるとコンクリート版が沈下・傾動し、隣の版との間に隙間が生じ、ここから砂が吸い出されて、次々とコンクリート版が沈下・傾動していく。

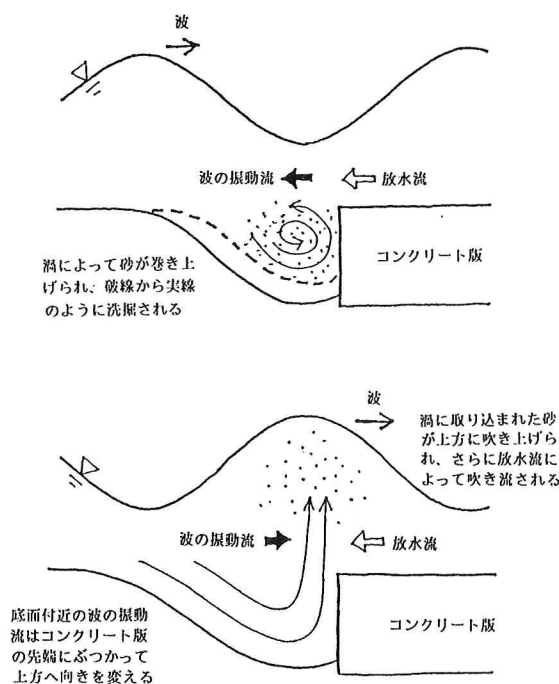


図-5 渦による被覆工先端の洗掘メカニズム

5. 洗掘対策の比較

上述の知見を踏まえ、放水流と高波浪が同時に作用しても洗掘が放水口に向かって進行するのを抑止するために被覆工先端を安定化する方法として次の3つを実験によって比較・検討した。

- 1) 被覆工先端のコンクリート版を厚くする。
- 2) 被覆工先端に矢板壁を打ち込む。
- 3) 被覆工先端を捨石で保護する。

図-6に被覆工先端に厚さ 8.3cmと厚くしたコンクリート版を並べ、放水流と規則波Bを同時に作用させた場合の 3.5時間後の様子を写した写真を示した。厚くしたコンクリート版のその厚み分だけ砂面がすっかり洗掘され、2列目のコンクリート版まで傾動が始まっている。

図-7には被覆工先端に矢板を打ち込み、放水流と規則波Aを同時に作用させた場合の 20 時間後の洗掘形状を破線で、これにつづけて放水流と規則波Bをさらに5時間作用させた場合の洗掘形状を実線で示した。矢板前面が深く洗掘されているのがわかる。このように片側だけに土圧がかかった状態で波の作用を受ければ実際の矢板は持ちこたえられない。

このように、コンクリート版を厚くしても、矢板を打ち込んでも図-5に示した渦が発達しながら洗掘するのでいちごこになってしまう。

図-8には被覆工の先端部分の海底を粒径 1.7cmの捨石で置き換え、放水流と規則波Bを同時に作用させた場合の 18 時間後の洗掘形状を示した。砂面はやはり大きく洗掘されているが、捨石の先端部分が洗掘斜面に拡がってこれを被覆している。また、洗掘が始まる位置での

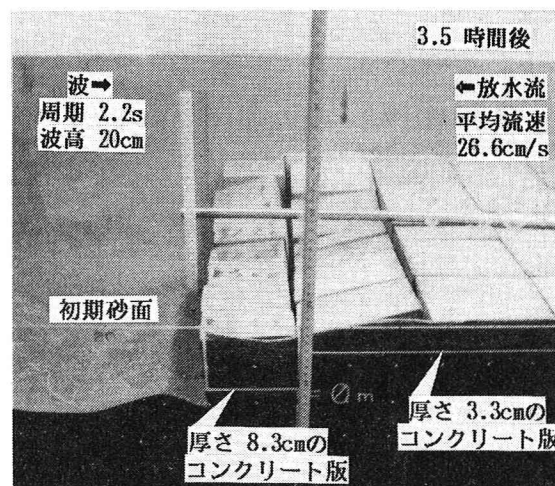


図-6 被覆工を厚くした場合の実験結果

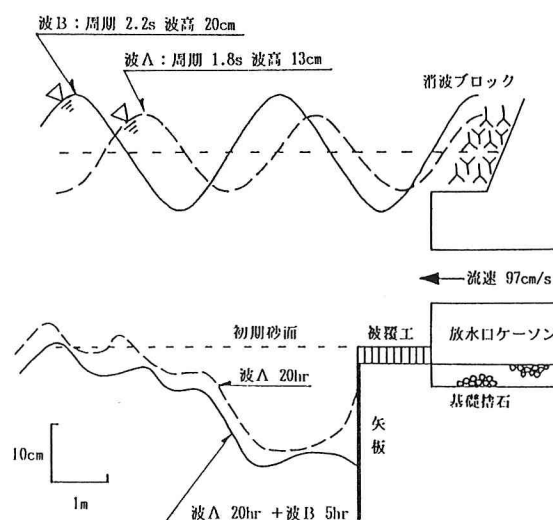


図-7 被覆工先端に矢板を打ち込んだ場合の実験結果

捨石面の形状が滑らかで、図-5のような渦の発生がない。これを図-4と比較すると図-8の方が波高が大きく作用時間も長いのに被覆工先端が効果的に保護されているのがわかる。

6. 新しい対策工SPACの提案

以上の検討結果を踏まえて著者らは被覆工先端前面の海底を捨石で置換する方法を新たな洗掘対策として提案する。こうすると、放水流と高波浪の作用を受けて捨石が洗掘孔の上流側斜面に拡がってせんくつの進行を効果的に抑制することができる。

著者らはこのように捨石が砂面に拡がってアーマコートを形成するこの対策工を Spreading Armor Coat (SPAC) と命名した。アーマコートは河床の表面が粗い礫に覆われる現象であるが、最近では湖岸に発達する舌状砂州についてもアーマコートの形成が認められており、これを利用した海浜の安定化も検討されている。(宇

多ら；1987)

SPAC捨石の所要重量 W は捨石マウンドの耐波浪所要重量を与える長谷川・鹿島(1990)の式(1)を用い、底面流速を放水流の流速 U_c と波の振動流の U_w の和として与えることにより求められよう。

$$W = \frac{\gamma (U_c + U_w)^6}{g \text{ Frc}^6} \quad (1)$$

ここで、 γ は捨石の単位体積重量、 g は重力加速度、 Frc は実験定数で捨石の場合 1.90 である。

SAPCの捨石の所要置換量は図-8のように捨石が上流側の洗掘斜面をほぼ一層で被覆することから、それに見合った量として決められる。つまり、図-9に示したモデルを考える。まず、SPACの施工部分を深さ D で浚渫する。浚渫斜面の勾配 $\tan \beta$ は約 $1/3$ である。ここに、粒径 d の捨石を投入してSPACを構成する。SPACは被覆工先端との接続部(長さ r)と展開部(長さ L)とからなる。接続部の長さ r は構造上捨石の粒径 d の5倍程度は必要であろう。放水流と高波浪を受けると深さ Z で洗掘され、SPACの展開部は洗掘斜面に一層で展開する。洗掘斜面の勾配 α は約 20° である。洗掘深さ Z は牛島・清水(1990)の手法で予測できる。

SPAC展開部の長さ L は以下の式で求まる。

$$\frac{1}{2(\cot \alpha + \cot \beta)} L^2 + \frac{d \operatorname{cosec} \alpha}{\cot \alpha + \cot \beta} L - Z d \operatorname{cosec} \alpha = 0 \quad (2)$$

ただし、 $L \leq D(\cot \alpha + \cot \beta)$

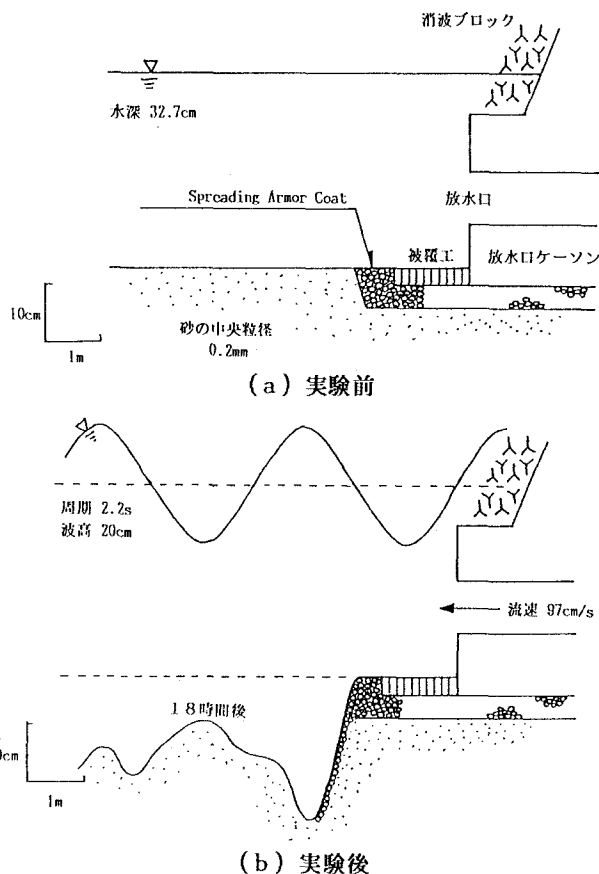


図-8 被覆工先端を捨石で保護した場合の実験結果

$$L = \frac{D}{2} (\cot \alpha + \cot \beta) + \frac{d}{D} (Z - D) \operatorname{cosec} \alpha \quad (3)$$

ただし、 $L > D(\cot \alpha + \cot \beta)$

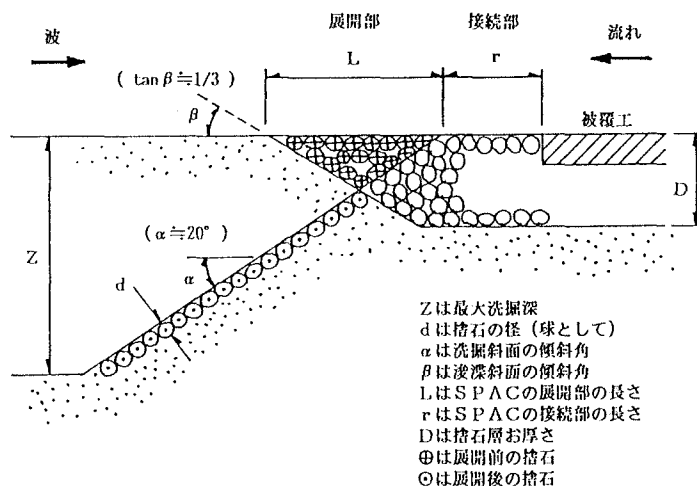


図-9 SPACの捨石所要量を求めるモデル

図-10に $Z=40\text{cm}$, $D=10.7\text{cm}$, $d=1.7\text{cm}$ の場合の実験結果を示した。初期形状は放水流によってSPACの先が既に洗掘されたものとして与えた。これに、水深 32.7cm での平均流速 26.6cm/s の放水流と周期 2.2s 波高 20cm の規則波を同時に 60 時間作用させた。図には初期形状、 8 時間後、 30 時間後ならびに 60 時間後の形状を示した。洗掘が進むと砂が洗掘斜面の法先に溜まるが、現地スケールでは砂の粒径がもっと細かいのでここに溜まることなく流下するものと考えられる。そこで、 8 時間後の時点で図中の斜線部分の砂を除去した。図中の破線は式(2)に基づく予想展開斜面である。黒い三角形はSPACの先端の移動を示している。洗掘の進行に伴ってSPACの先端が延びて、 30 時間後には洗掘斜面全体に展開している。そのとき、SPACの形状は予想展開斜面に良く一致しており、図-9ならびに式(2), (3)のモデルの妥当性が認められる。また、 30 時間後から 60 時間後まではほとんど変化しておらず、SPACに覆われた洗掘斜面が安定であることがわかる。

尾崎(1980)によれば混合粒径砂礫中の中央粒径より小さい粒子は大きい粒子に遮蔽され、中央粒径の粒子が移動限界に達するまで安定である。アーマコートが安定

なのはそのためである。SPACの場合は捨石と砂の間の粒径が抜けているので、捨石と捨石の間から砂が吸い出される可能性がある。したがって、実際の施工にあたっては式(1)で決まる親石よりも小さい石を目潰し石として混ぜて投入することが望ましい。

8. まとめ

海底被覆工に放水流と高波浪を作用させる2次元の移動床実験を行い、合理的な新しい洗掘対策工を提案した。主な結論は以下の通りである。

- 1) 放水流のみの場合被覆工の先端前面が洗掘されるだけだが、放水流に高波浪が加わると被覆工が崩壊して洗掘が放水口に向かって進行する。
- 2) 被覆工の崩壊はコンクリート版の下流端に生じる渦ならびに版と版の隙間からの砂の吸い出しが原因となって起る。
- 3) 新たな洗掘対策として被覆工先端前面の海底を捨石で置換する方法を提案した。この対策工は次の2つのメカニズムによって洗掘の進行を効果的に抑止する。
 - a) 捨石が被覆工と洗掘孔を滑らかに接続するので渦が発生しない。
 - b) 捨石が洗掘斜面に広がってこれを被覆する。

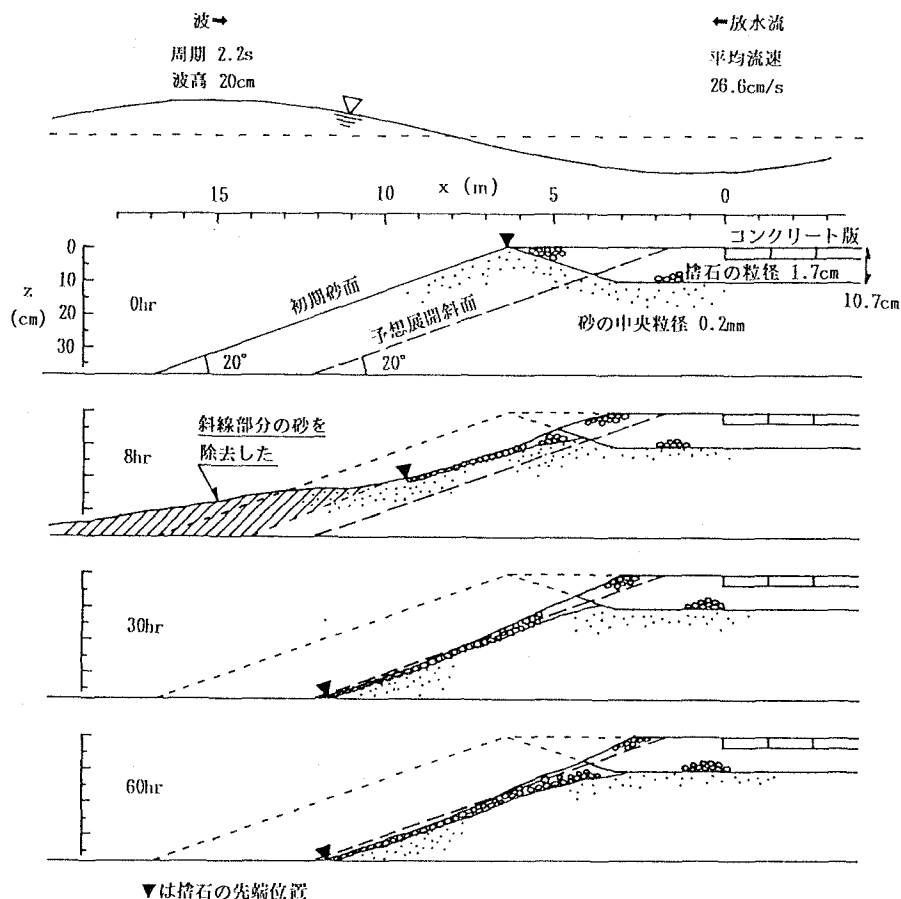


図-10 SPAC設計法の妥当性を確認した実験結果

この対策工を河川におけるアーマコートにちなんで
Spreading Armor Coat (SPAC) と命名した。

- 4) SPACに用いる捨石の所要重量は放水流の底面流速と波浪の底面振動流速の和で評価できる。
 - 5) SPACに用いる捨石の所要置換量は捨石が洗掘斜面を1層で被覆するとの仮定に基づいたモデルによって評価できる。
 - 6) SPACは捨石が海底洗掘に伴って移動することを最初から想定し、その移動した状態で洗掘の進行を食い止めるという斬新な設計思想に基づいており、非常に経済的な洗掘対策が可能となる。
- 今後は以下の点について検討を続けたい。

- 1) SPACの平面形状
- 2) SPAC目潰し石の大きさ、必要量、混入方法

最後に、実験を担当された株式会社東北開発コンサルタントの佐藤啓二氏に謝意を表す。

参考文献

- 牛島 省・清水隆夫(1990)：乱流モデルを用いた温排水水中放流による海底洗掘の予測，海岸工学論文集，第37巻，pp.389-393.
- 宇多高明・酒井佳治・竹測 勉(1987)：アーマコートによる安定海浜の形成，第34回海岸工学講演会論文集，pp.421-425.
- 尾崎 晃・鴻上雄三・田崎邦男・中野 浩・小川明久(1987)：洗掘防止工の現状と海底面被覆工の波力に対する安定性，第34回海岸工学講演会論文集，pp.416-420.
- 尾崎幸男(1980)：水流による河床砂礫の移動と流路形態とに関する水理学的研究，中央大学博士論文，190p. .
- 長谷川寛・鹿島遼一(1990)：連係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，pp.293-298.