

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

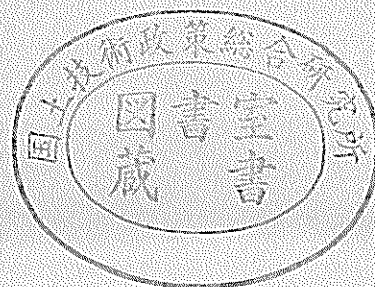
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 25

NO. 1

MAR. 1986

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告第25巻第1号

正 誤 表

ページ	欄	行	誤	正
16	左	10, 11	0なので,	等しいので, 両地点にはさまれた領域において堤体に直角方向の底質移動による土量変化は0である。したがって,
42	左	2	逆に $e_2 < \dot{0}$,	逆に $e_2 > \dot{0}$,

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第25巻 第1号 (Vol. 25, No. 1), 1986年3月 (Mar. 1986)

目 次 (CONTENTS)

1. 重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究
.....入江 功・栗山善昭・浅倉弘敏..... 3
(Study on Scour in Front of Breakwaters by Standing Waves and Protection
Methods.....Isao IRIE, Yoshiaki KURIYAMA and Hirotooshi ASAKURA)
2. 電気防食調査に基づく防食電流密度の検討横井聡之・阿部正美.....87
(Study on the Protective Current Density for Cathodic Protection based on the
Performance Surveys.....Toshiyuki YOKOI and Masami ABE)

1. 重複波による防波堤前面の海底洗掘及び その対策に関する研究

入江 功*・栗山 善昭**・浅倉 弘敏**

要 旨

重複波領域の防波堤前面の洗掘対策を検討するため、まず斜め入射波による防波堤前面の洗掘に関する三次元的移動床実験を行った。その結果、斜め入射重複波の下では、防波堤断面方向の底質移動による時間的応答性の高い地形変化と、防波堤に沿って下手側へ向かう底質移動による時間的に緩慢な地形変化とが組み合わさって、実際の地形変化が生じていることがわかった。これらの2つの機構による地形変化の洗掘に対する寄与は、波の入射角によって異なり、防波堤法線直角方向と波向とのなす角が 30° より小さいときに大きい洗掘が発生することから、防波堤断面方向の二次元的洗掘対策について実験的に調べた。

入射波の底面における水粒子速度の最大値を u_b 、底質の沈降速度を w としたとき、 $u_b/w < 10$ となるような粗粒のグラベルを用いると、重複波の下ではグラベルが節に集まる。この性質と、通常の時化時の重複波の節が混成堤式防波堤の捨石マウンドののり先に来ることを利用したグラベル敷きならし工法による洗掘対策について検討し、その有効性を確認した。さらに防波堤前面の波の反射率を低下させることによる洗掘防止効果についても調べその効果を確認した。

防波堤沿いの底質移動による洗掘の進行に対する対策については、各対策ごとに評価した。

上に述べたグラベル敷きならし工法については、中型、大型移動床実験を行い、具体的な対策を講ずる上のグラベルの量、大きさについてある程度の目安を得ることができた。

* 水工部 漂砂研究室長
** 水工部 漂砂研究室

1. Study on Scour in Front of Breakwaters by Standing Waves and Protection Methods

Isao IRIE*

Yoshiaki KURIYAMA**

Hirotoishi ASAKURA**

Synopsis

Three dimensional model experiments on the scour in front of the composite type breakwaters due to diagonal incident waves have been carried out in order to find out protection methods against scour. Actual evolution of bottom topography in front of breakwaters under diagonal standing waves were found to be the results of combined effects of two modes of bedload movements, that is, the movement perpendicular to the breakwaters with quicker time response and the movement parallel to the breakwaters with gentle time response. The degree of contribution of those two modes of bedload movement to scour depends on the direction of incident waves. The maximum scour appears when the angle between wave direction and the line perpendicular to breakwaters is less than 30 degrees, and therefore, scour due to two dimensional bedload movement perpendicular to breakwaters seems to be more significant for maximum scour. Thus, protection methods were studied experimentally for two dimensional bedload movement.

It is already known that gravels which satisfy $u_b/w < 10$, where u_b is the maximum velocity of water particles of incident waves near bottom and w is the settling velocity of gravels, tend to flock near the nodes of standing waves. Utilizing their effects as well as the fact that the toes of rubble mounds of ordinary breakwaters come near the nodes of standing waves of usual storms, the protection methods of gravel spreading were tested and their effectiveness was confirmed. The effectiveness of the protection method to decrease reflection of waves by breakwaters were also confirmed.

The countermeasures against the scour due to bedload movement parallel to the breakwaters were evaluated for each individual protection method.

Particularly, medium and large scale model experiments were carried out for above mentioned gravel spreading method and it has become possible to make a rough estimate of the condition of volume and size of gravels to be used for protection.

* Chief of Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Member of Littoral Drift Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 防波堤前面の二次元的海底洗掘	7
3. 斜め入射波による防波堤前面の三次元的海底洗掘	8
3.1 実験方法及び実験施設	8
3.2 実験ケース及び条件	11
3.3 底層平均流の平面分布	11
3.4 規則波による海底洗掘の特徴	14
3.5 不規則波による海底洗掘の特徴	38
3.6 防波堤前面の洗掘に及ぼす波向の効果	52
4. 重複波の下での底質の移動特性を利用した洗掘対策工法の実験的検討	56
4.1 洗掘対策工の特徴	56
4.2 実験施設及び実験方法	56
4.3 実験ケース	59
4.4 中型実験によるグラベルの洗掘防止効果の検討	59
4.5 周期が変化したときのグラベルの安定性の検討	69
4.6 大型実験における検討	76
5. 防波堤の反射率低減の効果	81
5.1 防波堤の反射率低減のねらい	81
5.2 実験結果	81
6. 防波堤前面の三次元的洗掘及び洗掘対策についての考察	83
7. 結 論	86
参 考 文 献	86

1. まえがき

最近では、堤内側水域の高度利用に対する要請の高まりにより、防波堤はますます長大化・大水深化の傾向にある。このように設置水深が大水深化した場合でも、ほとんどの場合防波堤の構造様式は混成堤式となっている。その理由は、この方式が波力の集中する水面付近を直立壁として波を反射し、捨石マウンドの天端を低くして波の影響を小さくするという技術的に優れた構造機能を有するためである。しかし、前面水深の増大により、防波堤前面の海底に及ぼす波の影響は減少することが期待されるにもかかわらず、前面の海底洗掘による被災例は一向に減少していない¹⁾。大水深化により防波堤の建設費が著しく増大しつつあることを考えると、前面の洗掘に対する抜本的対策が望まれるところである。

重複波が作用する場合の防波堤前面の二次元的海底洗掘については実験的検討がなされ、通常施工されている混成堤式防波堤が重複波による洗掘の影響を受けやすいことが明らかとなっている²⁾。しかし実際の防波堤のように法線に対し波が斜めから入射する場合の洗掘特性についてはまだ未解明の問題が多い。

本研究は、防波堤前面の効果的な洗掘対策を見出すため、まず斜め入射重複波による洗掘特性について実験的に調べ、すでに報告した二次元実験及び今回の三次元実験の結果にもとづいて重複波の性質を利用した洗掘対策について検討したものである。

まず固定床を用い、斜め入射重複波の下での底面に沿う平均流を染料及びフロート追跡により調べ、理論計算値と対比しつつ検討した。

次に移動床を用いて、斜め入射重複波の下での混成堤式防波堤前面の海底洗掘を調べ、二次元から三次元に移ったときの洗掘過程の相違を調べた。

最後に洗掘過程が時間的に著しく速い二次元的洗掘に対する有効な洗掘対策について中型、大型実験により検討し、堤体沿いの底質移動に係わる三次元的洗掘についても配慮しつつ洗掘対策工について考察した。

2. 防波堤前面の二次元的海底洗掘

非碎波の進行波が堤体に作用して出来る重複波の下での海底洗掘については、従来から多くの研究者により研究が行われてきた^{3), 4), 5)}。本章ではまずこれまで明らかにされている防波堤前面の重複波による海底洗掘の特徴について述べておく。

重複波の下では、波の包絡線の腹、節を境にして水粒子の運動が対称的である。したがって底質移動の結果生

ずる海底の地形変化にしても、腹、節に関して対称的な変化を示す。

波、底質の特性によって、重複波の下では、腹で洗掘し節で堆積する場合、あるいは逆に腹で堆積し節で洗掘される場合があることは、従来の研究でいくつか指摘されてきた。しかし、これらのタイプの発生限界が波と底質の特性と密接に関連していることを初めて示したのは Xie⁶⁾ であり、さらにそれらの発生機構を含めて発生限界を明らかにしたのは入江⁷⁾ らである。

入江らによれば、

- (1) 水平固定床において、底面粒子が底面摩擦の影響を受けつつ重複波の下で移動する場合には、波の有限振幅性による水粒子運動の非対称性により、底質は重複波の腹から節へ向かう方向への正味の移動を示し、節の位置に堆積する。
- (2) 底面にリップルを模擬した人工粗度をつけた固定床では、底質の移動方向は、進行波の底面における水粒子最大速度 u_0 と底質の沈降速度 w との比 u_0/w と、波の有限振幅性を示すアーセル数 $U (=HL^2/h^3, H, L, h$ はそれぞれ波高、波長、水深) により支配される。 u_0/w が大きければ、底質は底面に沿う平均流に乗って節から腹へ移動する傾向を示し、 u_0/w が小さければ逆の傾向を示す。前者が卓越する場合を L-タイプ移動型式、後者が卓越する場合を N-タイプ移動型式と呼ぶ。
- (3) 移動床においても、人工粗度をつけた水平移動床と同様の移動型式が見られる。ただし、L、N-タイプの発生限界は、 u_0/w が支配的で、 $u_0/w > 10$ の場合、L-タイプ型式により重複波の節の位置で洗掘され腹の位置で堆積する。 $u_0/w < 10$ の場合、N-タイプ洗掘型式を示し、重複波の腹と節の中間で洗掘され節の位置で堆積する。前者を L-タイプ洗掘、後者を N-タイプ洗掘と呼ぶ。

図-1は、底面にリップルを模擬した人工粗度がある固定床上の平均流を、レーザー Doppler 式流速計により測定したもので、節から腹に向かう厚い層の平均流がある。 u_0/w が大きいと、この流れに乗って移動する量が多くなり、図-2に示すように、節の位置で洗掘、腹の位置で堆積するという L-タイプ洗掘が発生する。逆に u_0/w が小さいと同図に示すように N-タイプ洗掘となる。

現地スケールの洗掘は、 $u_0/w \gg 10$ であるので、底質は図-1に示すような平均流に乗って運ばれるものと思われ、図-2に示す L-タイプ洗掘が生ずる。したがって、防波堤の捨石マウンドの長さが、 $1/4$ 波長程度であるこ

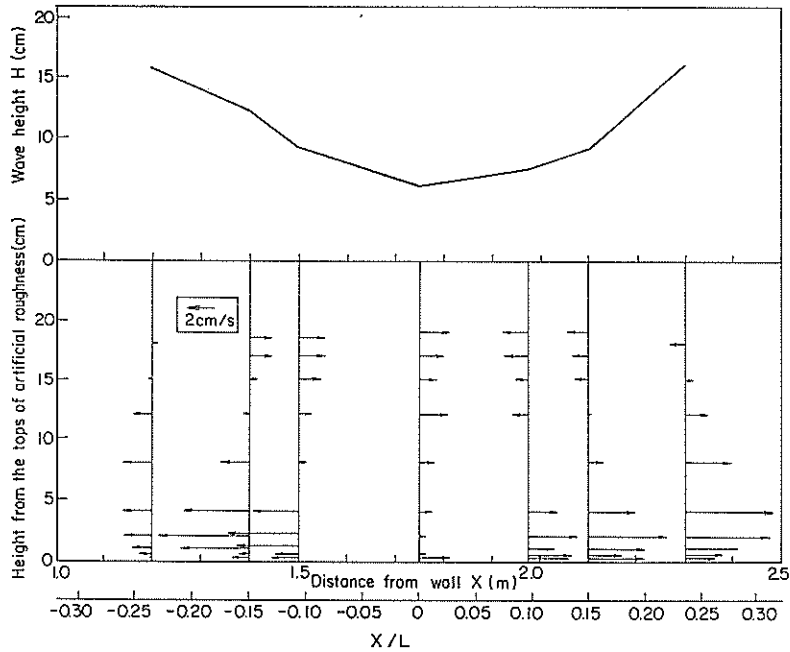


図-1 重複波による防波堤前面の平均流の分布

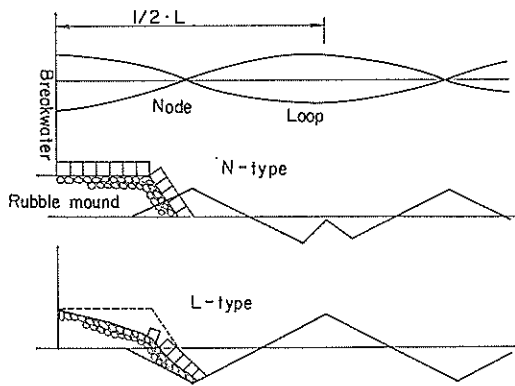


図-2 重複波による防波堤前面の海底地形変化

とを考えると、図-2の L-タイプの場合に見られるように、節の位置での海底洗掘により捨石マウンドが容易に崩壊することが考えられる。結局このような洗掘に対する対策を検討する必要があるわけであるが、実際の防波堤のように波が斜めから入射し、堤体に沿う移動成分が加わった場合にも図-2に示すような L-タイプ洗掘が発生するものかどうか不明である。そこで、移動床を用いた三次元的洗掘に関する実験を実施した。図-2に示すよ

うな L-タイプ洗掘が支配的な場の洗掘対策としては、捨石マウンドのり先に $u_b/w < 10$ となるような底質を置くことにより図-2の N-タイプ洗掘の性格をもたせ、洗掘を抜本的に防ぐこと等が考えられる。

3. 斜め入射波による防波堤前面の三次元的海底洗掘

3.1 実験方法及び実験施設

(1) 底層平均流に関する固定床実験

固定床において底層平均流を測定する実験を、図-3に示す、たて $7.5 \text{ m} \times$ よこ $14.4 \text{ m} \times$ 高さ 0.3 m の水槽で行った。実験水槽内において、造波機からの再反射を防ぐために造波機前面にはステラシートによるフィルターを設け、壁からの再反射を防ぐために防波堤下手側にステラシートによる消波工を設けた。さらに、防波堤の裏には砕石による消波工を設けた。防波堤として、長さ 6 m の木製の直立堤を用い、床面には平均流測定用にあらかじめ 10 cm 間隔でメッシュを描いておいた。

防波堤前面での底層平均流の測定には、以下の二つの方法を用いた。

① 過マンガン酸カリウムによる方法

過マンガン酸カリウムの粉末あるいは溶液を波作用中に投入し、溶出液の先端を追跡する。

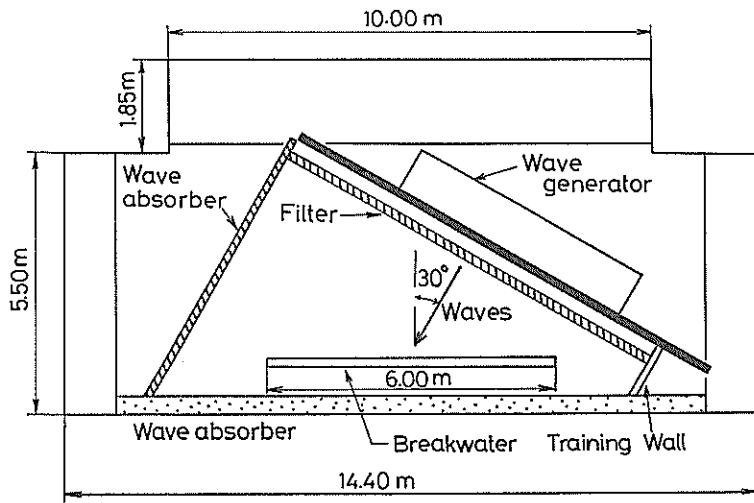


図-3 底層平均流測定に用いた平面水槽

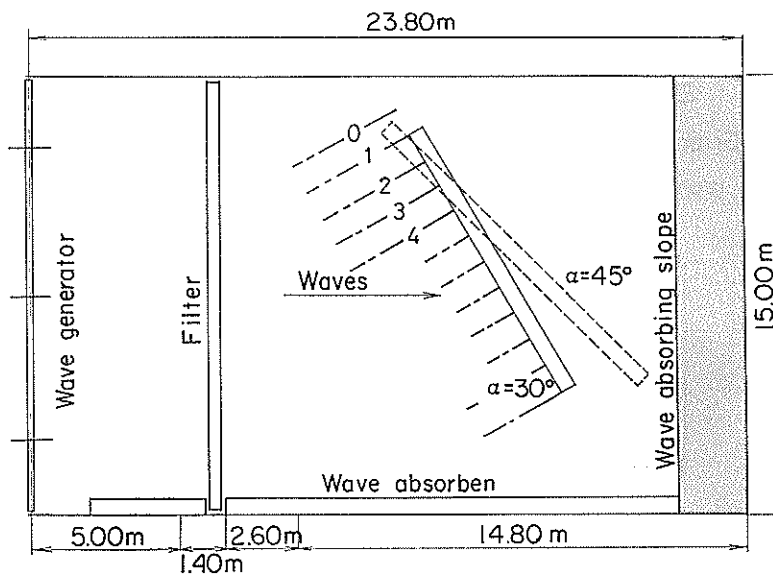


図-4 移動床模型実験用平面水槽

②フロートによる方法

ろうとアルミ粉より成る。比重が1よりわずかに大きく(1.03), 直径約3mmのフロートを波作用中に投入し, その位置を追跡する。

(2) 三次元的洗掘に関する移動床実験

斜め重複波によって生ずる海底洗掘を図-4のたて15.0m, よこ23.8m, 高さ1.0mの水槽を用いた移動

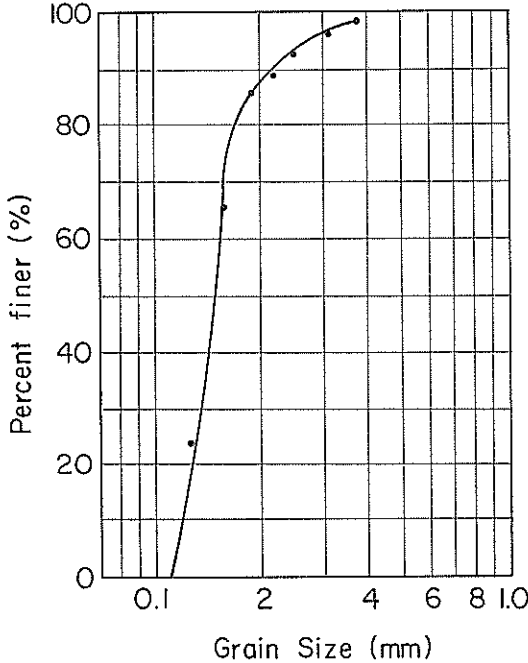


図-5 底質の粒度曲線

床実験で調べた。造波板からの再反射を防ぐために造波機前面に金網によるフィルターを設け, 側壁からの再反射を防ぐために防波堤下手側には消波工を設けた。防波堤に沿う流れを乱さないように, 防波堤下手終端と側壁との間にある程度のすき間を設けた。

底質として, 粒度分布が図-5に示される中央粒径が0.14mmの砂を選び, 水槽長手方向に1/100勾配で敷きならした。防波堤の長さは10mないし11mとし, 波向は実験条件に応じて30°ないし45°とした。本実験では, 防波堤設置水深が現地換算値で12mから17mの防波堤を対象とし, 現地の施工実績を考慮して断面を図-6のように決定した。ただし, 図-6は, 防波堤設置水深15m(現地換算値)の防波堤断面で, 図中の数字は現地換算値である。模型では, 防波堤上手先端から4mの地点での水深を15m(現地換算値)とし, 防波堤断面は, 模型縮尺1/75あるいは1/40に合わせて縮小したものをを用いた。捨石マウンドとして2~3cmの砕石を用い, フィルターには透水性のポリプロピレン製のものをを用いた。

波作用時間は計660分とし, 波作用45分後, 90分後, 180分後, 360分後, 660分後に地形測量を行い, 波作用360分から660分の間に波高測定を行った。

地形測量は, 防波堤と平行方向には1m間隔, 防波堤と直角方向には約5cm間隔で, スタッフとレベルを用いて行った。図-4中の, 一点鎖線は地形測量を行った測線を, 数字は測線番号を示している。

波高測定は, 防波堤と平行方向には1m間隔, 防波堤と直角方向には, 防波堤直前面から沖側へ向かって重複波の腹の位置, 節の位置, 腹の位置, 節の位置の各測線

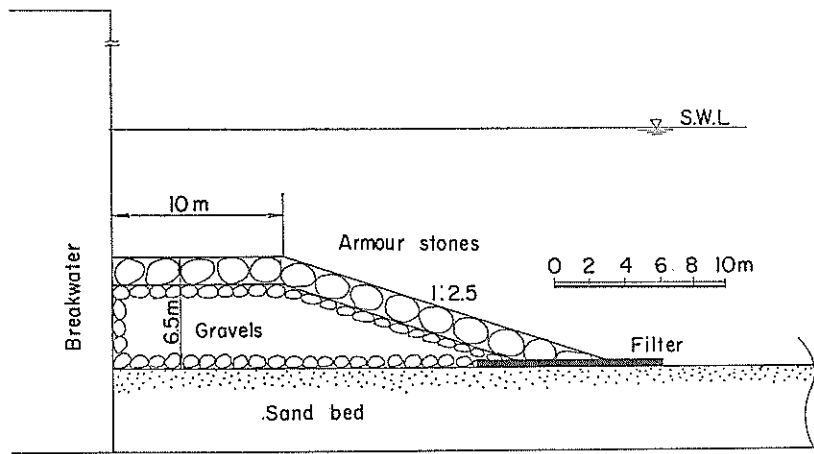


図-6 実験に用いた防波堤断面

表-1 固定床実験における実験ケース

実験ケース	波高 H (cm)	周期 T (s)	水深 h (cm)	入射角 α (°)	反射率 R	底面状態
A-1	2.5	0.92	15.0	30	1.0	滑面
A-2	2.5	0.92	15.0	30	0.7	滑面
A-3	2.5	0.92	15.0	30	1.0	人工粗度

4点ずつ行った。原則として30 cm 測定可能な容量式波高計を用いたが、波高が30 cmを越える地点では、物差しを用いて数波の平均を測定値とした。

3.2 実験ケース及び条件

固定床実験における実験ケースを表-1に、移動床実験における実験ケースを表-2に示す。表-1のケースA-3では、3 mm × 3 mm の角材を15 mm ピッチで取り付け人工粗度をつけた場合である。図-7は、移動床実験で用いた不規則波のスペクトルを示したものである。

表-2 移動床実験における実験ケース

実験ケース	縮尺 S	波高		周期		粒径 d (mm)	波向 α (°)	波の種類	w_b/w
		模型(現地) H_m (cm)	模型(現地) (H_p) (m)	模型(現地) T_m (s)	模型(現地) (T_p) (s)				
B-1	1/75	8.0	(6.0)	1.15	(10.0)	0.14	30	規則波	20.8
B-2	1/75	8.0	(6.0)	1.39	(12.0)	0.14	30	規則波	22.5
B-3	1/75	8.0	(6.0)	1.30	(11.3)	0.14	30	不規則波	23.5
B-4	1/75	8.0	(6.0)	1.30	(11.3)	0.14	45	不規則波	14.5
B-5	1/40	12.0	(4.8)	1.58	(10.0)	0.14	30	規則波	15.1
B-6	1/40	15.5	(6.2)	1.58	(10.0)	0.14	30	規則波	19.5

3.3 底層平均流の平面分布

二次元実験の結果より、現地スケールでの洗掘現象を再現すると思われる L-タイプ洗掘においては、底層平均流が防波堤前面の洗掘を支配する外力であることが明らかになった。そこで、斜め重複波の下での底層平均流特性を知ることは、三次元的洗掘を理解する上で重要であると思われるが、移動床の平面実験において底層平均流の測定を精度良く行うことは非常に困難なことである。そこで、固定床平面実験において底層平均流を測定した。

図-8は、波高2.52 cm、周期0.92 sの波を、波向30° (防波堤に直角な方向と波向線のなす角度)として作用させた (Case A-1, A-2) とき、防波堤上流端から3 mの地点で、過マンガン酸カリウムの粉末を防波堤の直角方向に数点投入し、溶出液の先端を追跡して測った底面近くの時間平均流速を示したものである。図の上二段は、反射率が1.0の場合の実験値および理論値で、下二段は、反射率が0.7の場合の実験値および理論値である。理論値は⁸⁾、実験における堤体の反射率 R と同じ値に対する境界層外縁の質量輸送速度である。これらの結果は、実験値と理論値が定性的に一致し、反射率が高いと重複波の節の位置から腹の位置へ収束しつつ下流へ向

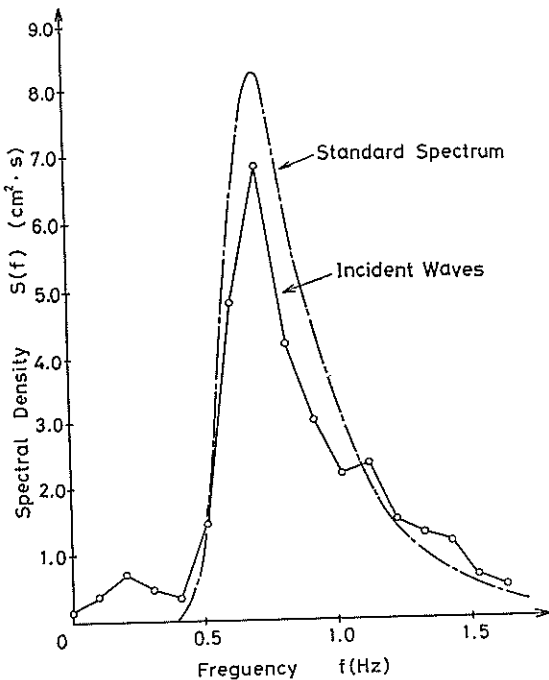


図-7 不規則波のスペクトル

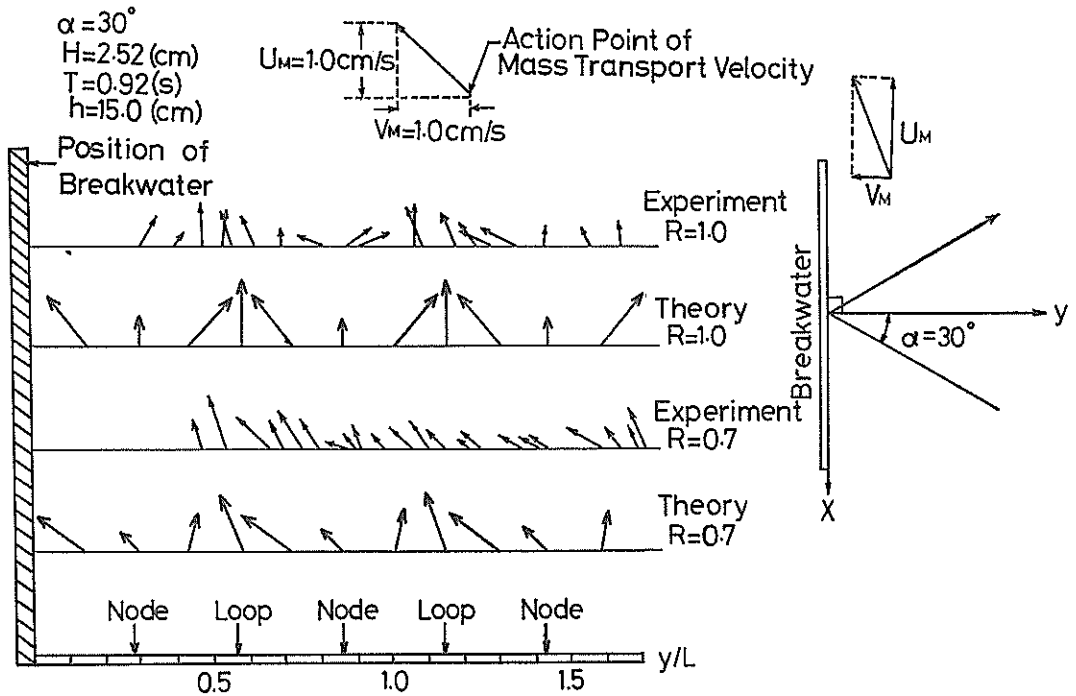


図-8 斜め入射波による防波堤前面の底層平均流 (Case A-1, A-2)

かう流れが存在し、反射率を下げると堤体へ向かう流れの成分の増すことを示している。

次に、同じ固定床平面水槽において現地の海底にできる砂れんを模倣した人工粗度をつけ、底面近くの平均流を調べた (Case A-3)。人工粗度として $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ の角材を用い、 15 mm ピッチで防波堤と平行に床面に張り付けた。写真-1は、波高 2.52 cm 、周期 0.92 s の波を波向 30° として作用させたとき、重複波の節の位置と腹の位置の中間に過マンガン酸カリウムの溶液を投入し、 15 秒間追跡した結果である。過マンガン酸カリウムの溶液が容易に拡散することを防ぐために溶液に少量のミルクを加えてある。写真-1より明らかなように、重複波の節の位置と腹の位置の中間に投入された溶液は、下手へ流れつつ重複波の腹の位置へ移動している。以上の結果より、粗度が増大しても底面近くには重複波の節の位置から腹の位置へ向かう平均流の存在していることが、確認できる。

図-9は、やはり、波高 2.52 cm 、周期 0.92 s の波を波向 30° として作用させたとき (Case A-1)、比重が 1.03 、直径が約 3 mm のフロートによって底層平均流を測定した結果を示したものである。防波堤上手先端より 1.0 m 付近から 4.0 m までの領域では、前述した重複波

の節の位置から腹の位置へ収束しつつ下手へ向かう流れが確認できる。しかし、それより下手の領域ではかなり乱れた流れとなっている。

図-10は防波堤前面の波高分布を示したものであるけれども、防波堤上手側と下手側で特に大きな差は生じていない。したがって、防波堤下手側の乱れの原因が、波高分布であるとは考えられない。

図-11は、中層平均流の測定結果を示したものである。測定には、比重 1.03 、直径約 3 mm のフロートと、 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ のスチロールを長さ 7.0 cm の水系で結んだものを用いた、水深が 15.0 cm なのでフロートは表面と底面の中間付近を移動する。図より、防波堤上手先端より 2.5 m 付近から下手終端までの領域において下手側から上手側へ向かう流れが観察される。

Hou⁹⁾らは、側壁の影響をできるだけ小さくした状態で斜め入射波による防波堤前面の流れの測定を行っている。碎波点が防波堤より沖側ではあるけれども、表層流は防波堤上手から下手へ向かう流れとなっている。すると、図-11に見られる下手から上手へ向かう中層平均流は、ある種の戻り流れであり、下手側の側壁の影響を受けたものと考えられることができる。

更に、図-11と図-9の比較を行うと、中層での戻り流

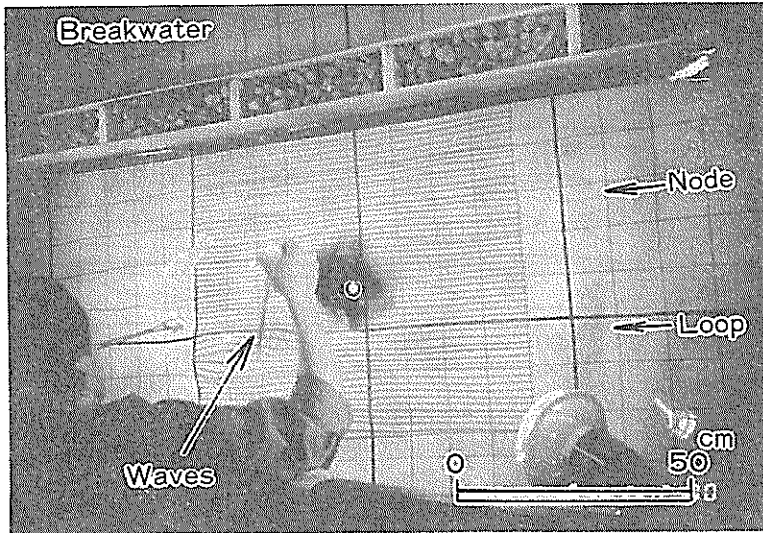


写真-1(1) 人工粗度上の底層平均流 (Case A-3)

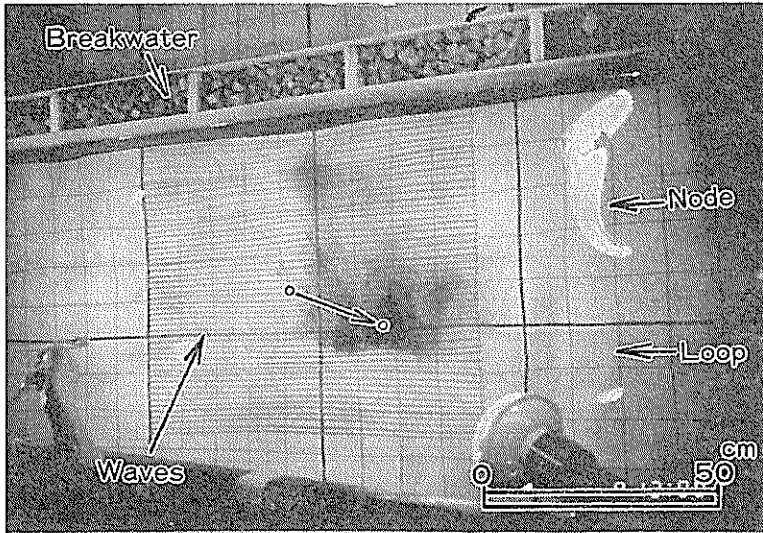


写真-1(2) 人工粗度上の底層平均流 (Case A-3)

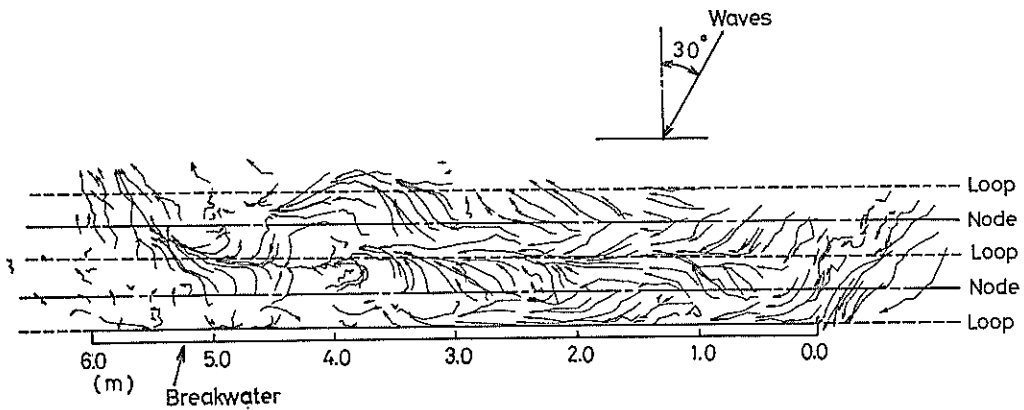


図-9 防波堤前面の底層平均流の平面分布 (Case A-1)

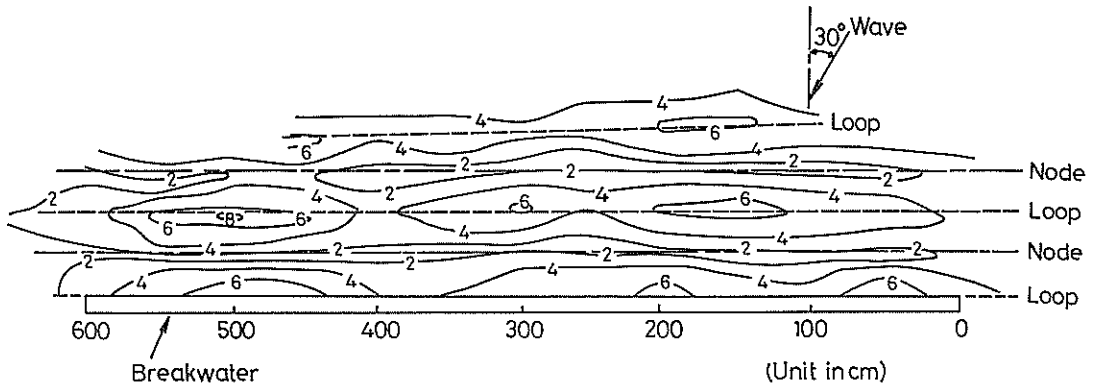


図-10 防波堤前面の波高分布 (Case A-1)

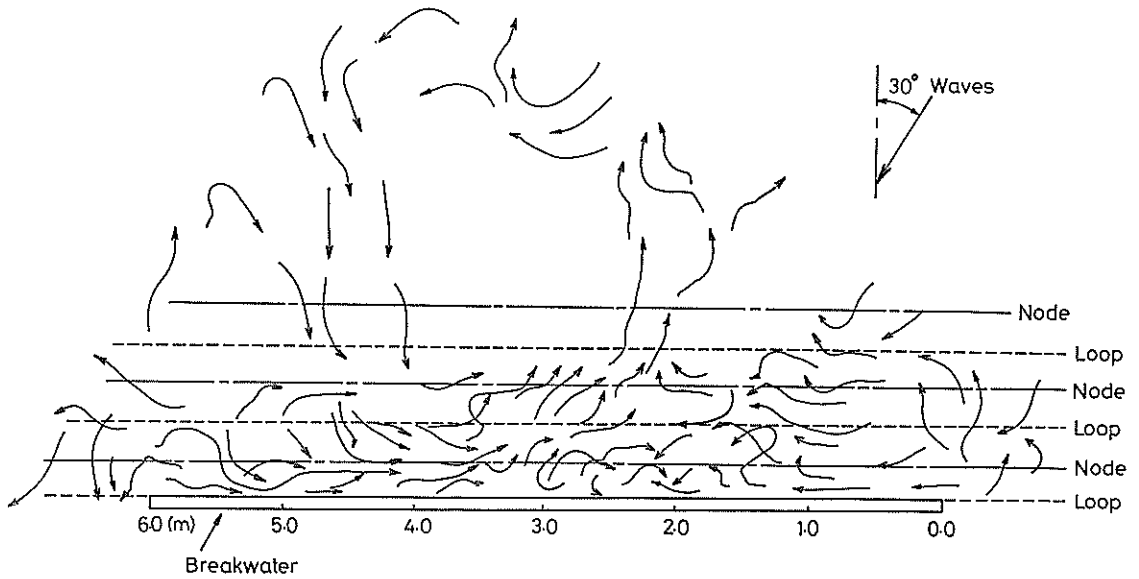


図-11 防波堤前面の中層平均流の平面分布 (Case A-1)

れの領域と、底層平均流の乱れている領域とが一致している。したがって、防波堤下手側における底層平均流の乱れも下手側の側壁の影響と考えることができる。

3.4 規則波による海底洗掘の特徴

(1) 重複波の節の位置とりの先が一致する場合 (Case B-1)

防波堤設置水深 20 cm (現地換算値 15 m) における波高が 8.0 cm (現地換算値 6.0 m)、周期が 1.15 s (現地換算値 10.0 s) の規則波を波向 30° として作用させたとき (Case B-1) の実験結果について述べる。

図-12(1), (2)は、それぞれ防波堤上手の測線-2, 3, 4

及び防波堤中央部の測線-5, 6, 7における波作用 180 分後と波作用 660 分後の、防波堤に直角方向の断面図を示したものである。防波堤上手及び中央部では、重複波の節の位置で洗掘深が大きく、L-タイプ海底地形変化の起こっていることが確認できる。

波作用 180 分後の断面と波作用 660 分後の断面を比較すると、両断面が比較的相似であることがわかる。このことは、防波堤に直角方向の海底地形変化が波作用時間の比較的少ないときに平衡状態に達し、防波堤に平行方向の海底地形変化がしばらく続くことを示していると考えられる。

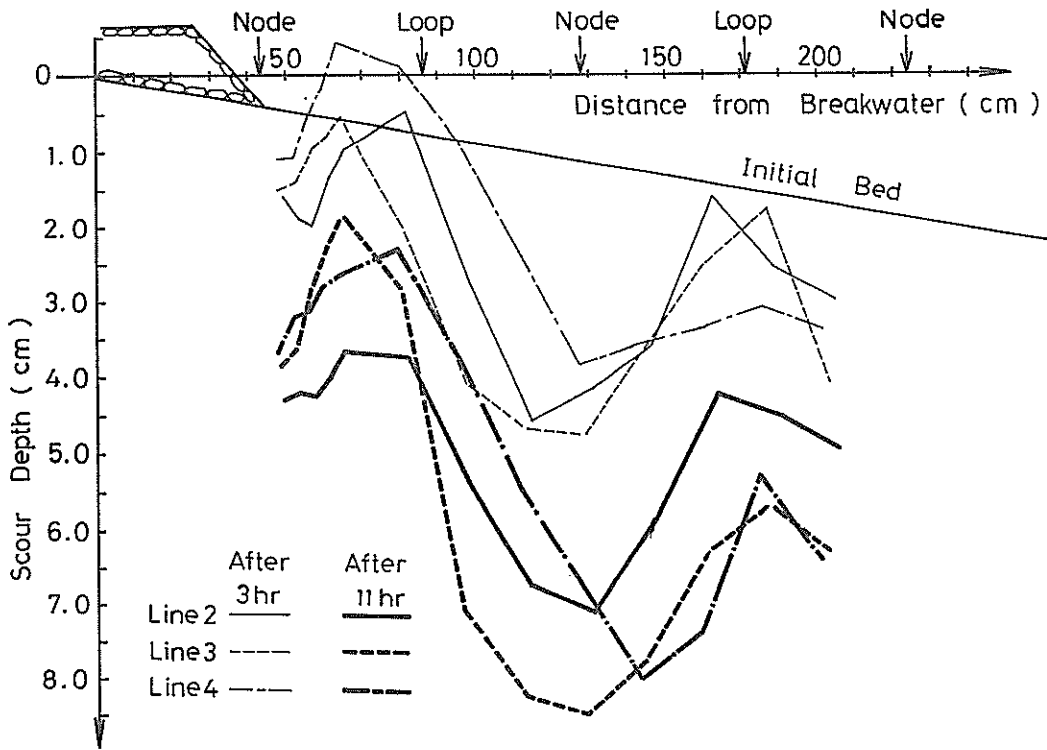


図-12 (1) 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-1, 測線-2, 3, 4)

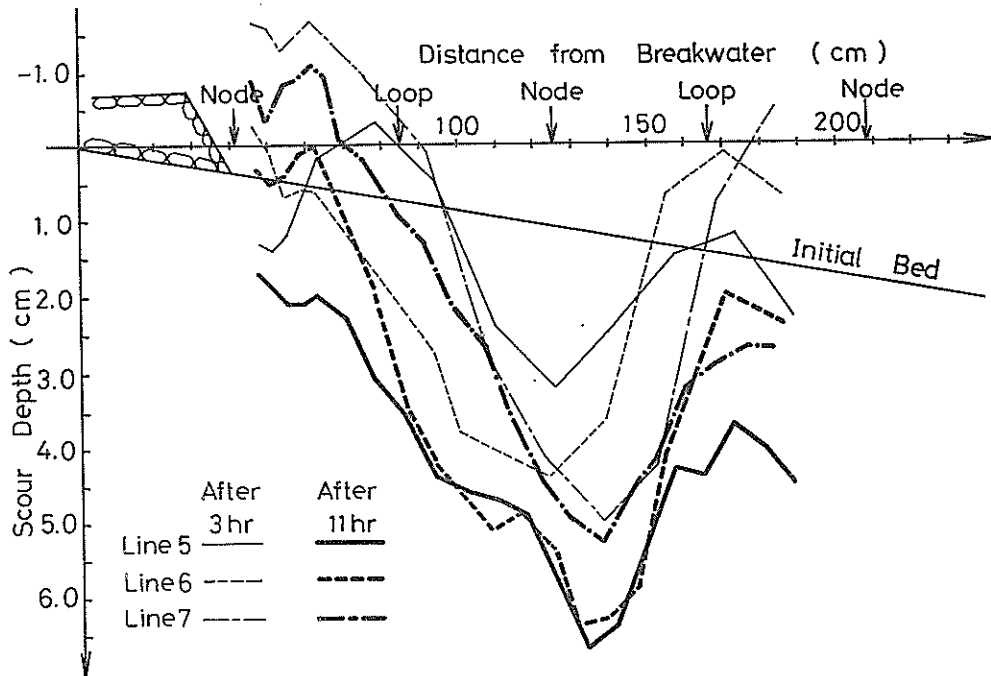


図-12 (2) 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-1, 測線-5, 6, 7)

ここで、ある測線において防波堤からの距離が y の地点の波作用 t 時間後の水深値 $h(y, t)$ と、波作用前の水深値 $h(y, 0)$ との差を、

$$h'(y, t) = h(y, t) - h(y, 0)$$

とする。ただし、水深値を正とする。防波堤から $3L/8$ 沖側の地点 (L ; 波長) から $7L/8$ 沖側の地点までの領域を考え、この領域における $h'(y, t)$ の平均値 $\bar{h}'(t)$

$$\bar{h}'(t) = \int_{\frac{3}{8}L}^{\frac{7}{8}L} h'(y, t) dy / (L/2)$$

を求める。防波堤から $3L/8$ 沖側の地点及び $7L/8$ 沖側の地点では、防波堤に直角方向の底質移動量が 0 なので、 $\bar{h}'(t)$ は、防波堤に平行方向の底質移動による海底地形変化量を表す指標と考えることができる。

一方、防波堤から $L/2$ 沖側の地点 (重複波の腹の位置) 及び $3L/4$ 沖側の地点 (重複波の節の位置) の $h'(y, t)$ と、 $\bar{h}'(t)$ との差の絶対値

$$\Delta h\left(\frac{1}{2}L, t\right) = \left| h'\left(\frac{1}{2}L, t\right) - \bar{h}'(t) \right|$$

$$\Delta h\left(\frac{3}{4}L, t\right) = \left| h'\left(\frac{3}{4}L, t\right) - \bar{h}'(t) \right|$$

を求め、これらの平均値

$$\bar{\Delta h}(t) = \left(\Delta h\left(\frac{1}{2}L, t\right) + \Delta h\left(\frac{3}{4}L, t\right) \right) / 2$$

を考える。 $\bar{\Delta h}(t)$ は、海底地形の凸凹の程度を表しており、防波堤に直角方向の底質移動による海底地形変化量

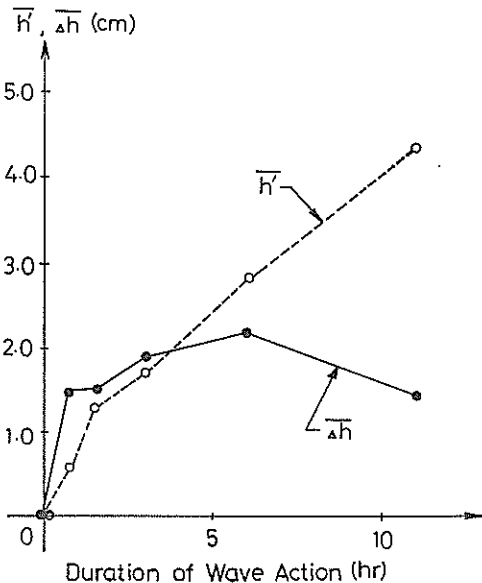


図-13 \bar{h}' と $\bar{\Delta h}$ の経時変化 (Case B-1)

を表す指標と考えることができる。

図-13に、防波堤上手の測線-2の $\bar{h}'(t)$ と $\bar{\Delta h}(t)$ の経時変化を示す。 $\bar{h}'(t)$ が直線的に増加しているのに対し、 $\bar{\Delta h}(t)$ が比較的波作用時間の少ないときに平衡状態に達している。以上の結果は、前述したように、防波堤に直角方向の海底地形変化が波作用時間の比較的少ないときに平衡状態に達し、防波堤に平行方向の海底地形変化が実験期間中、ほぼ一様に進行したことを示していると言える。

図-12において防波堤から $L/4$ 沖側の重複波の節の領域における洗掘深と、防波堤から $3L/4$ 沖側の重複波の節の領域における洗掘深を比較すると、後者のほうが大きい。マウンドの影響によって防波堤から $L/4$ 沖側の地点の洗掘深が小さくなったと考えられるけれども詳細は不明である。

図-14(1), (2)は、それぞれ防波堤から $L/4$ 沖側の重複波の節の領域における洗掘深の防波堤に沿う分布と、防波堤から $3L/4$ 沖側の重複波の節の領域における洗掘深の防波堤に沿う分布を示したものである。防波堤から $L/4$ 沖側の重複波の節の領域では、防波堤先端から 6 m の位置における堆積領域と防波堤下手側における堆積領域が特徴的である。防波堤から $3L/4$ 沖側の重複波の節の領域では、堆積領域こそないものの、防波堤先端から 8 m の位置、および防波堤下手側で洗掘深が小さくなっている。このときの波高分布は図-15 (ただし、図の上下の縮尺と左右の縮尺は異なる) に示すとおりで、重複波の節の位置における洗掘深とその重複波の節をはさむ腹の位置における波高との相関を調べたのが、図-16(1), (2)である。両図からは、波高と洗掘深との相関は認められない。さらに水位変動記録をスペクトル解析したところ長周期波の存在は認められなかった。図-17は、スペクトル解析の一例を示したもので、防波堤上手・測線-2の防波堤直前面の水位変動記録を解析したものである。

底層平均流を固定床で測定したところ、3.3に示すように、防波堤下手側において側壁の影響ではないかと考えられる流れの乱れた領域が存在していた。移動床実験においても側壁の影響が現れると考えられ、防波堤先端より 9 m ないし 10 m の地点から下手側に見られる堆積領域あるいは洗掘深の小さい領域は、これが原因と考えられる。平面水槽において今回のような移動床実験を行う際には、解析対象範囲内の側壁の影響を受ける範囲を相対的に小さくするために、防波堤を長くしたり、防波堤と側壁とのすき間を大きくするなどのくふうが必要である。

防波堤中央部に見られる堆積領域あるいは洗掘深の小

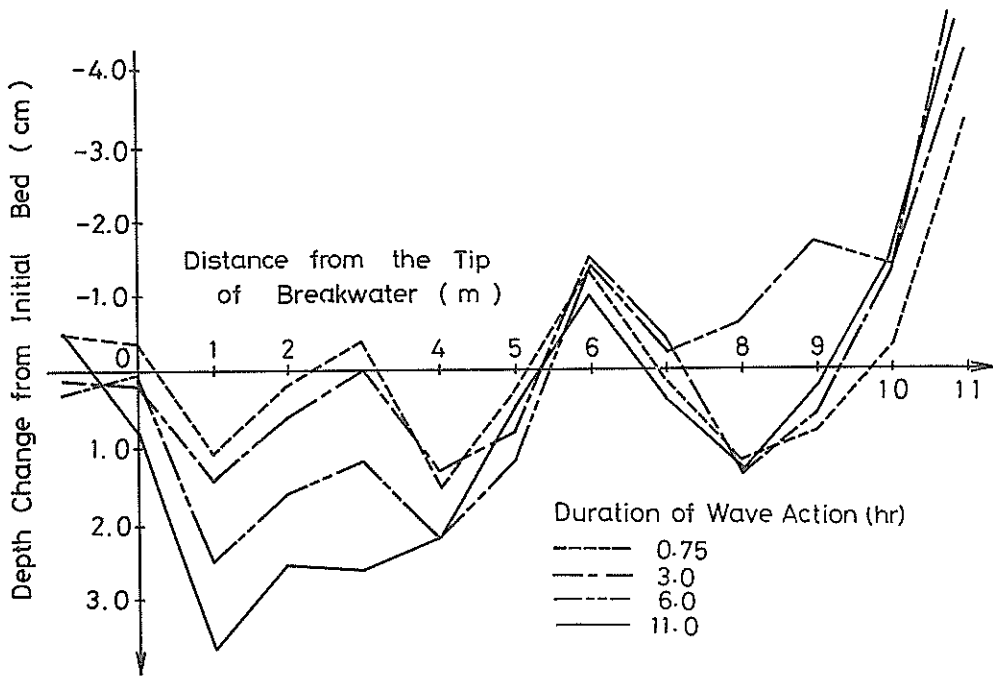


図-14 (1) 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-1, $L/4$)

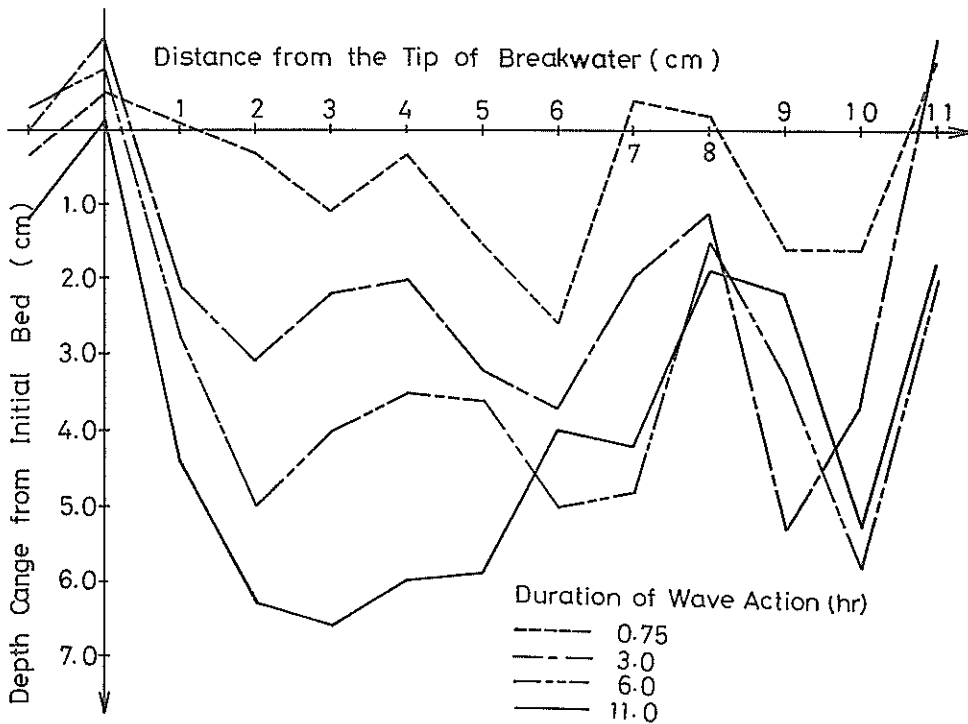


図-14 (2) 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-1, $3L/4$)

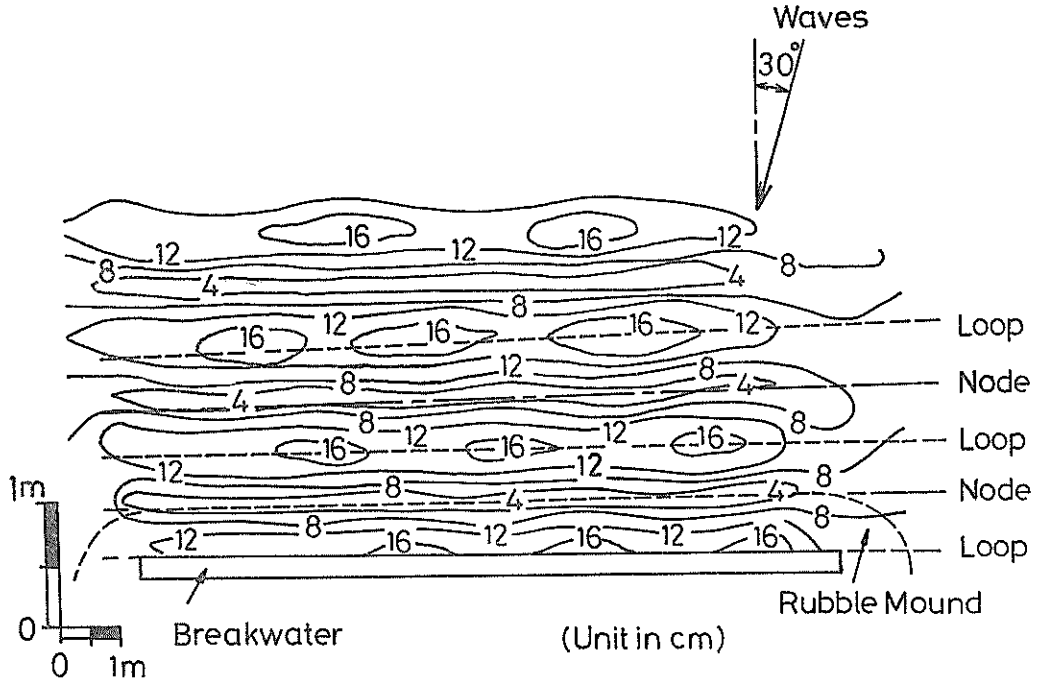


図-15 防波堤前面の波高分布 (Case B-1)

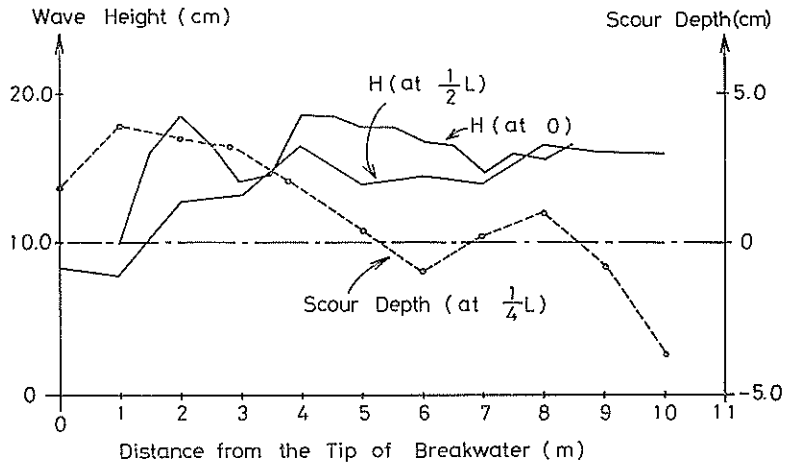


図-16 (1) 洗掘深と波高の相関 (Case B-1, $L/4$)

さい領域の発生原因は不明である。しかし、図-14(1)、(2)に見られるように、防波堤先端から、防波堤先端より8 m ないし9 m の地点までの領域において洗掘深が防波堤上手側から下手側にかけての減少する傾向は、底層平均流が底質を下手へ輸送すると力と海底勾配とが釣り合うことにより生じたものと考えられる。

図-18(1)、(2)、(3)は、それぞれ波作用45分後、180分後、660分後の地形と初期地形の水深差の分布を示したものである。波作用45分後では、洗掘領域が重複波の節の位置を中心に存在している。その後洗掘領域がふえ、波作用660分後には解析領域ほぼ全域にわたって洗掘領域となったけれども、洗掘深の大きい領域は重複波

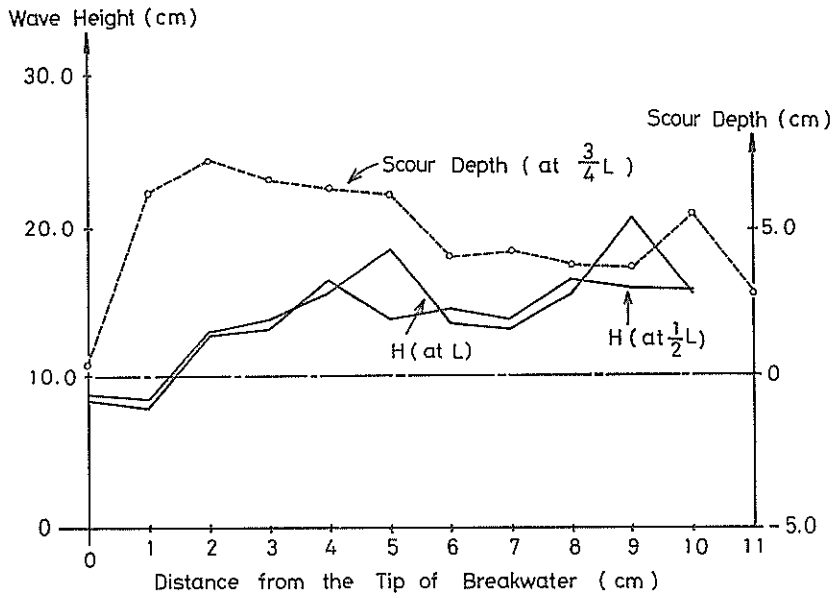


図-16 (2) 洗掘深と波高の相関 (Case B-1, $3L/4$)

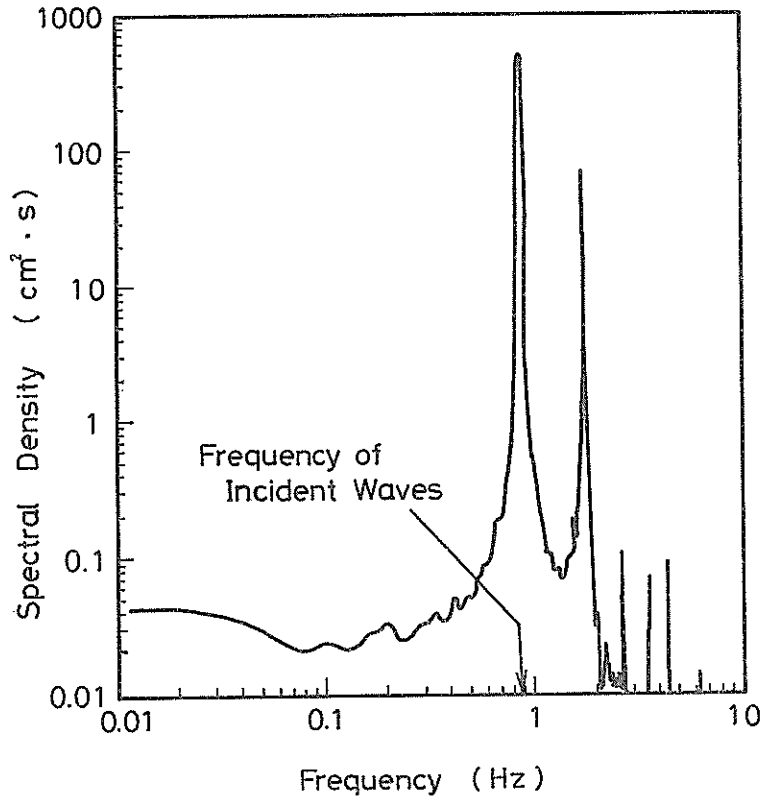


図-17 防波堤前面の水位変動のスペクトル (Case B-1, 測線-2)

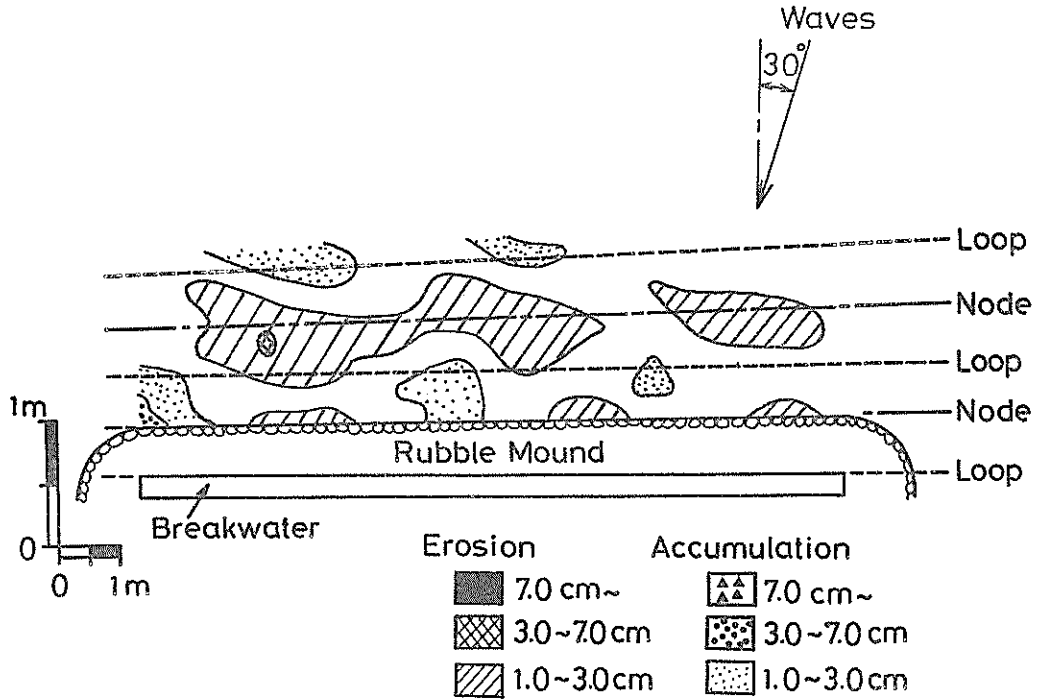


図-18 (1) 波作用 45 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-1)

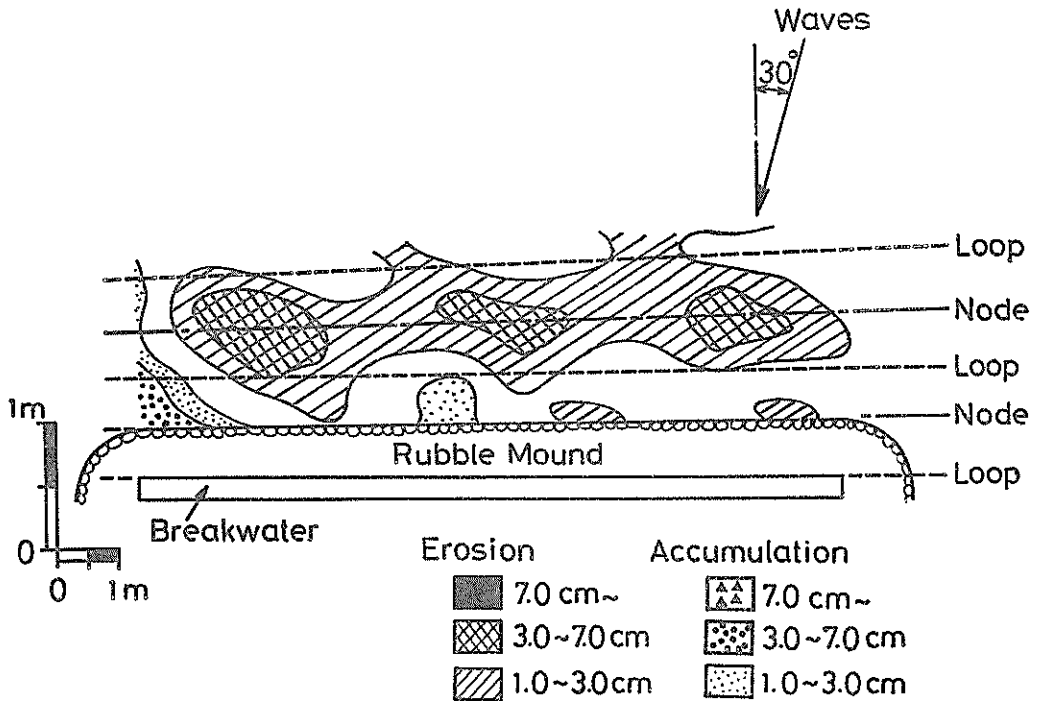


図-18 (2) 波作用 180 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-1)

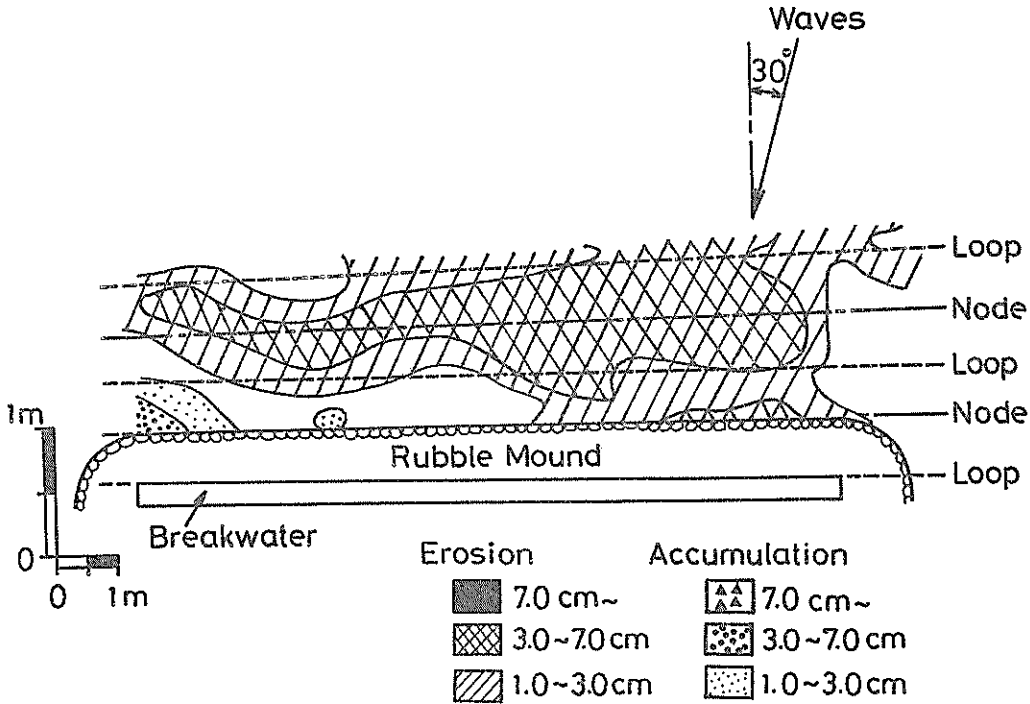


図-18 (3) 波作用 660 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-1)

の節の位置を中心に存在していることが確認できる。

この海底地形変化に経験的固有関数法⁷⁾を適用することによって、防波堤に平行方向の底質移動による地形変化と防波堤に直角方向の底質移動による地形変化に分離することを試みる。経験的固有関数法は、さまざまな原因によって生ずる海底地形変化をそれぞれ独立ないくつかの地形変化に分け、その海底地形変化を場所の関数 e_n と時間の関数 c_n の積で表現するもので、今、時系列水深データを $h(x, y, t)$ とすると

$$h(x, y, t) = \sum_n c_n(t) \times e_n(x, y)$$

と表現するものである。水深値を正としたとき、ある期間中 c_n が増加の傾向を示しているときは、 $e_n > 0$ の地点では侵食傾向を、 $e_n < 0$ の地点では堆積傾向を示している。 c_n が減少の傾向を示しているときはその逆である。

図-19(1), (2)はモード1 (寄与率 74.7%) について示したもので、(1)が時間係数 c_1 の経時変化を、(2)が経験的固有関数 e_1 の平面分布を示したものである。 c_1 が解析期間中単調増加しているので、モード1に示される海底地形変化は、 $e_1 > 0$ の領域で侵食、 $e_1 < 0$ の領域で堆

積である。 e_1 の平面分布は、図-19(2)に示すように解析領域ほぼ全域にわたって $e_1 > 0$ となっているけれども、まわりに比べて e_1 の大きい領域 (図中斜線で示した領域) は重複波の節の位置を中心に分布しており、この解析法でも L-タイプ洗掘の起こっていることがわかる。モード1では、 c_1 が指数関数的に次第に定常状態へ向かっているものの単調増加している点の特徴である。

図-20(1), (2)はモード2 (寄与率 16.2%) について示したものである。モード2では、図-20(1)に示すように時間係数 c_2 が波作用時間 180 分を境として減少の傾向から増加の傾向へ変化している。一方、 e_2 の分布を示した図-20(2)を見ると、 $e_2 < 0$ の領域は重複波の節の位置を中心に分布しており、 $e_2 > 0$ の領域は重複波の腹の位置を中心に分布している。したがって、モード2では、重複波の節の位置において初め洗掘領域であったけれどもその後堆積領域となる海底地形変化を、重複波の腹の位置において初め堆積領域であったもののその後洗掘領域となる海底地形変化を示している。

図-13では、防波堤に平行方向の底質移動による海底地形変化が解析期間中時間とともに直線的に進行しているのに対し、防波堤に直角方向の底質移動による海底地

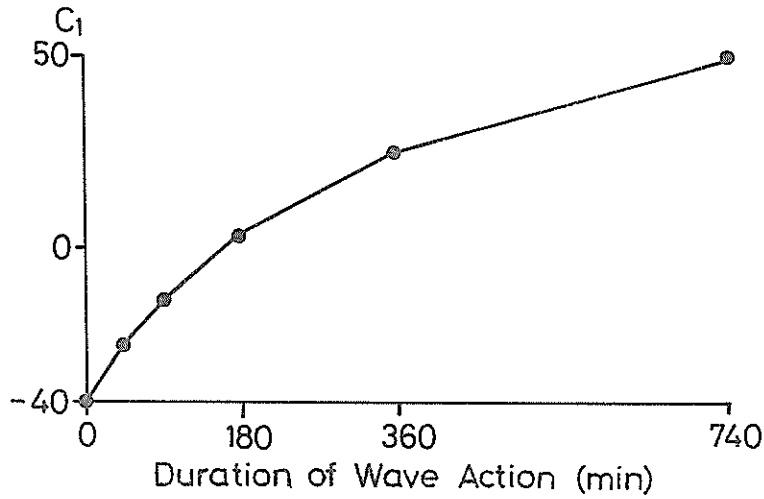


図-19 (1) c_1 の経時変化 (Case B-1)

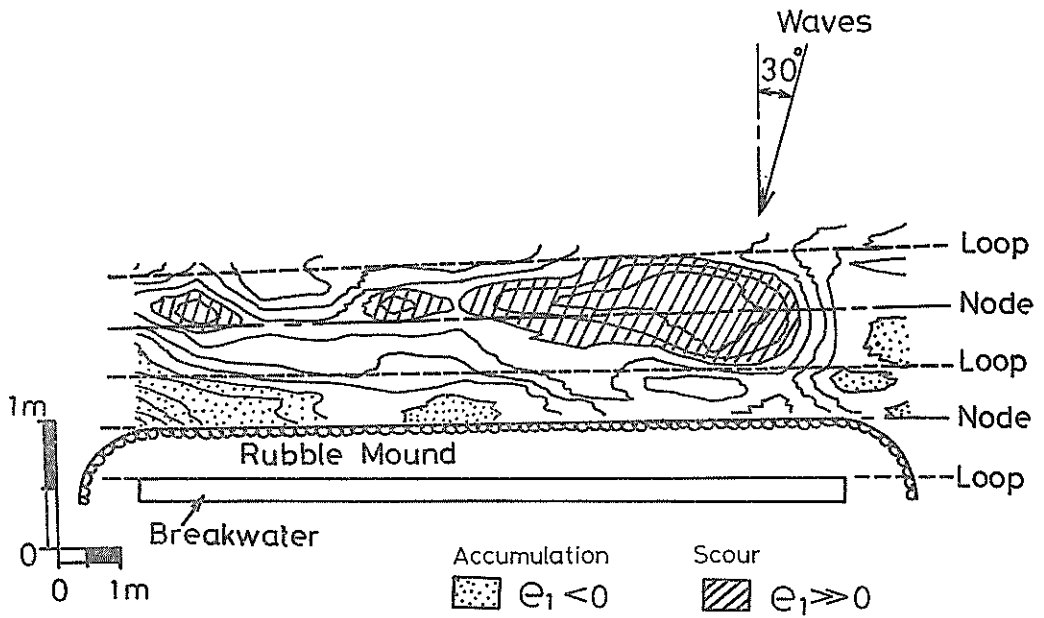


図-19 (2) e_1 の平面分布 (Case B-1)

形変化が、比較的早い時間に平衡状態に達することを示していた。この海底地形変化を模式的に示すと図-21(1)のようになる。图中、一点鎖線が防波堤に平行方向の底質移動による海底地形変化を、点線が重複波の節の位置及び腹の位置における防波堤に直角方向の底質移動による海底地形変化を示す。すると実線は一点鎖線で示され

た海底地形変化と点線で示された海底地形変化を加えた、重複波の節の位置及び腹の位置における海底地形変化を示すことになる。

この海底地形変化に対して経験的固有関数法を適用した場合をさらに模式的に示すと図-21(2)のようになる。実線は重複波の節及び腹の位置における海底地形変化を

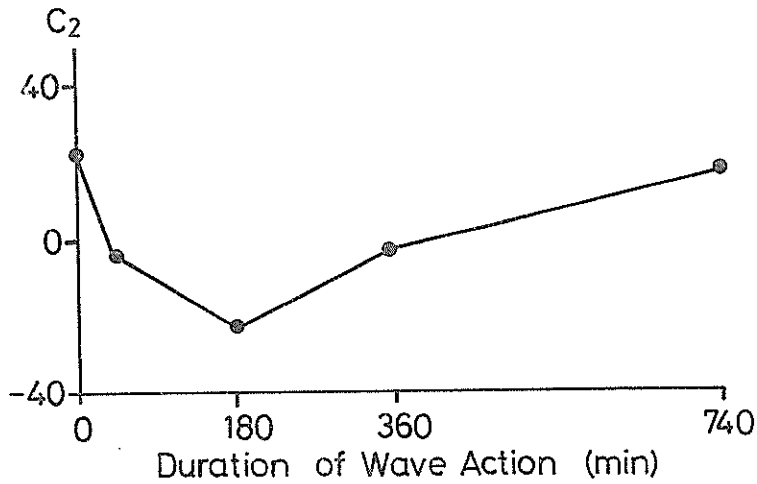


図-20 (1) c_2 の経時変化 (Case B-1)

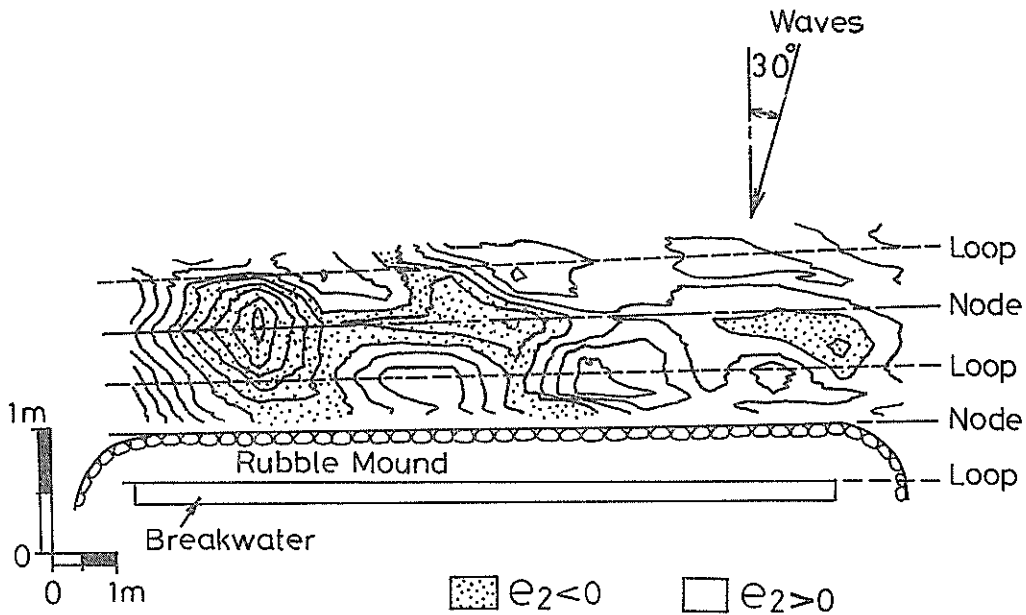


図-20 (2) e_2 の平面分布 (Case B-1)

示している。モード1では、一般的にその地点で起きている海底地形変化の平均的な変化を表すことになるので、この場合モード1は、一点鎖線で示される海底地形変化を表現すると考えられる。すると、モード2は残りの海底地形変化を表現することになるので、重複波の節の位置では初め侵食領域、後に堆積領域となり、重複波の腹の位置では初め堆積領域、後に侵食領域となる。

ここで示したモード1、モード2の現象と、図-19、図-20に示した経験的固有関数法による解析結果を比較すると、モード1に関して、図-19(1)に示す c_1 の経時変化が図-21(2)に示すように必ずしも直線ではないけれども、両者はモード1、2に関してほぼ一致する。したがって、防波堤と直角方向の底質移動による海底地形変化が比較的波作用時間の少ないときに平衡状態に達する

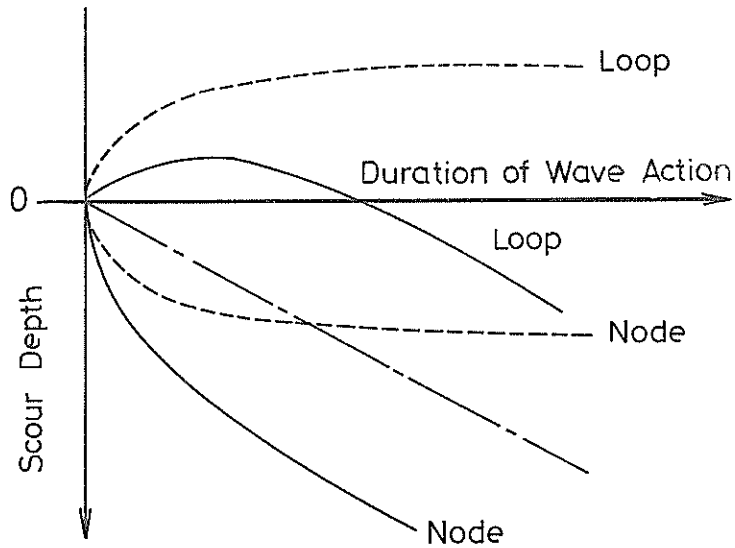


図-21 (1) 防波堤前面の海底地形変化の模式図 (その1)

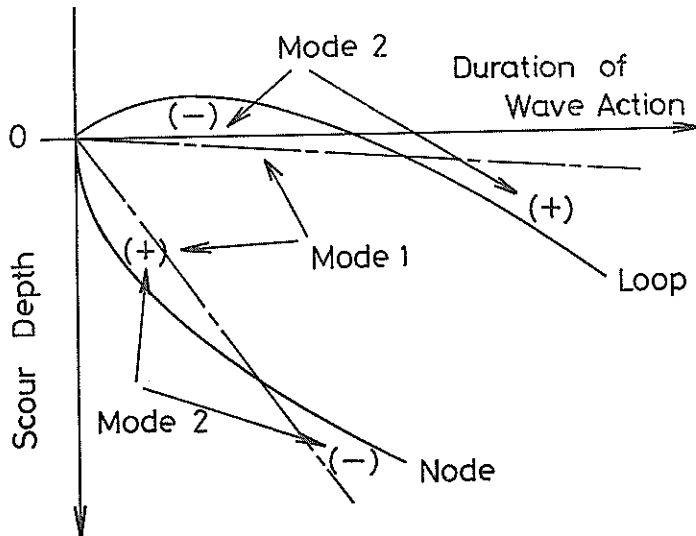


図-21 (2) 防波堤前面の海底地形変化の模式図 (その2)

のに対し、防波堤と平行方向の底質移動による海底地形変化が時間とともに直線的に進行していることが、図-19, 20に示す解析結果の原因であると考えられる。

(2) 重複波の節の位置がのり先よりやや沖側に存在する場合 (Case B-2)

防波堤設置水深 20 cm (現地換算値 15 m) における波高が 8.0 cm (現地換算値 6.0 m)、周期が 1.39 s (現地換算値 12.0 s) の規則波を波向 30° として作用させたとき

(Case B-2) の実験結果について述べる。

図-22(1), (2)は、それぞれ防波堤上手の測線-2, 3, 4及び防波堤中央部の測線-5, 6, 7における波作用 180分後と波作用 660分後の防波堤に直角方向の断面図を示したものである。図-22(1)の測線-2, 3, 4では、重複波の節の位置で洗掘深が大きく、やはり L-タイプ洗掘の起きていることがわかる。しかし、図-22(2)の測線-5, 6, 7では、防波堤から 3L/4 沖側の重複波の節の位置で

重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究

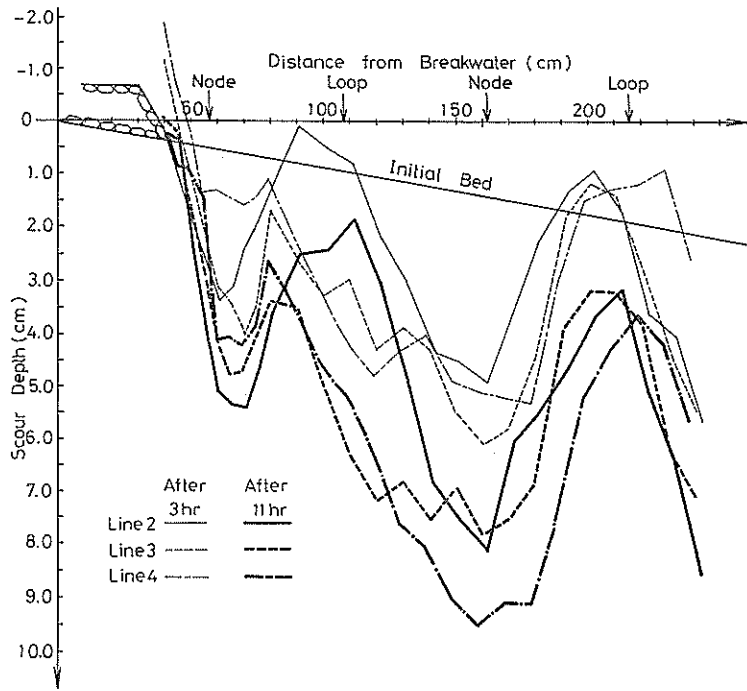


図-22 (1) 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-2, 測線-2, 3, 4)

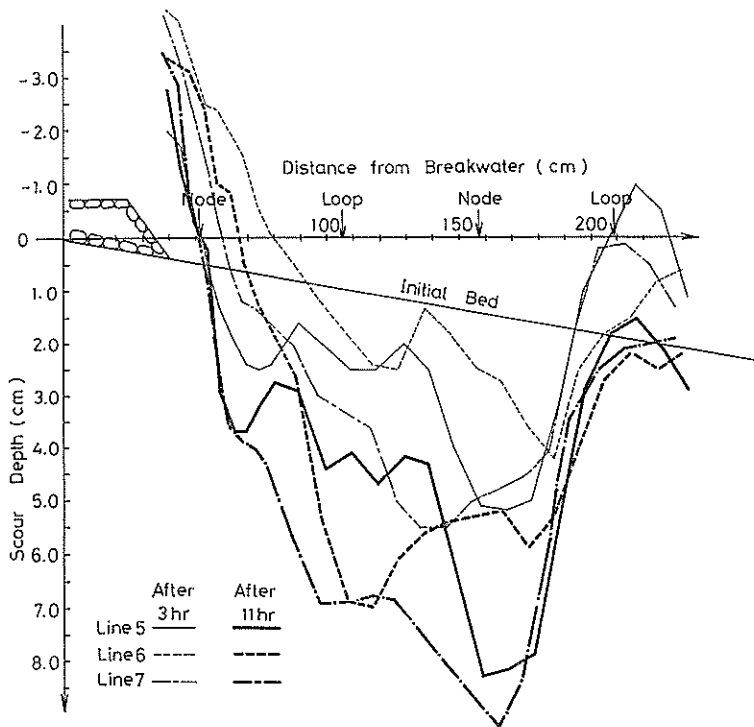


図-22 (2) 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-2, 測線-5, 6, 7)

比較的洗掘深が大きいものの、重複波の節の位置と腹の位置の地形変化の差が測線-2, 3, 4ほど明確ではない。この原因は不明である。

測線-2, 3, 4に関しては、図-22(1)に示すように波作

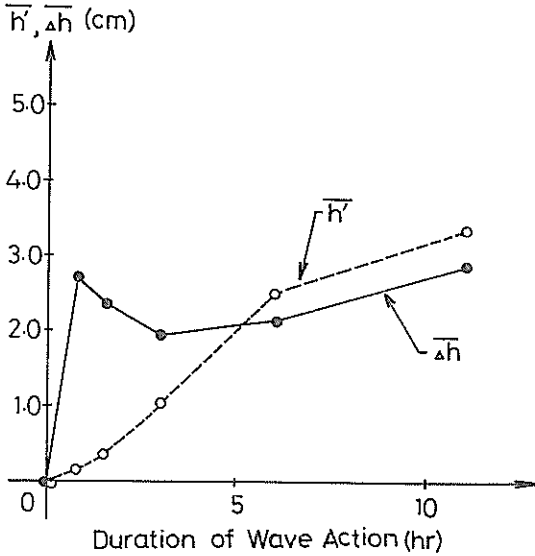


図-23 \bar{h} と $\bar{\Delta h}$ の経時変化 (Case B-2)

用 180 分後の断面と波作用 660 分後の断面はほぼ相似であり、図-23 に示す測線-2 の防波堤に平行方向の底質移動による海底地形変化量を表す指標 $\bar{h}(t)$ と防波堤に直角方向の底質移動による海底地形変化量 $\bar{\Delta h}(t)$ の経時変化も Case B-1 とほぼ同様の傾向を示している。防波堤から $L/4$ 沖側の重複波の節の領域における洗掘深と、防波堤から $3L/4$ 沖側の重複波の節における洗掘深を比較すると、やはり後者のほうが大きい。

図-24(1), (2)は、それぞれ防波堤から $L/4$ 沖側の重複波の節の領域における洗掘深の防波堤に沿う分布と、防波堤から $3L/4$ 沖側の重複波の節の領域における洗掘深の防波堤に沿う分布を示したものである。両図ともに、Case B-1 同様まわりに比べて洗掘深の小さい領域が存在している。

図-25は、防波堤前面の波高分布であり、図-26(1), (2)は、重複波の節の位置における洗掘深と、その重複波の節をはさむ腹の位置における波高との相関を調べたものである。図-26(1), (2)からは、波高と洗掘深との相関は特に認められない。

図-27は、波作用 660 分後の地形と初期地形の水深差の分布を示したものである。重複波の節の位置を中心とした領域で洗掘深が大きくなっている。

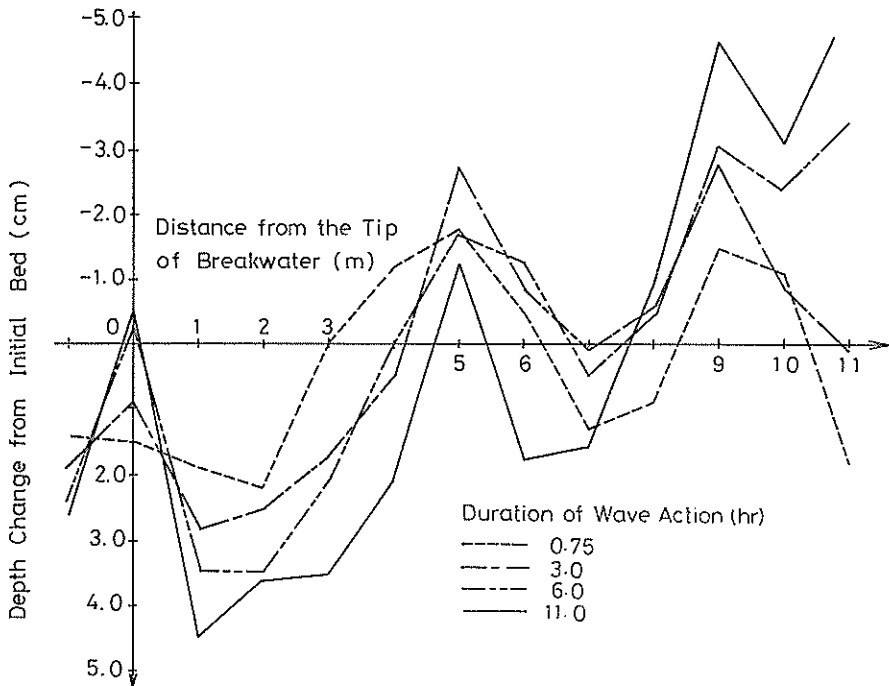


図-24 (1) 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-2, $L/4$)

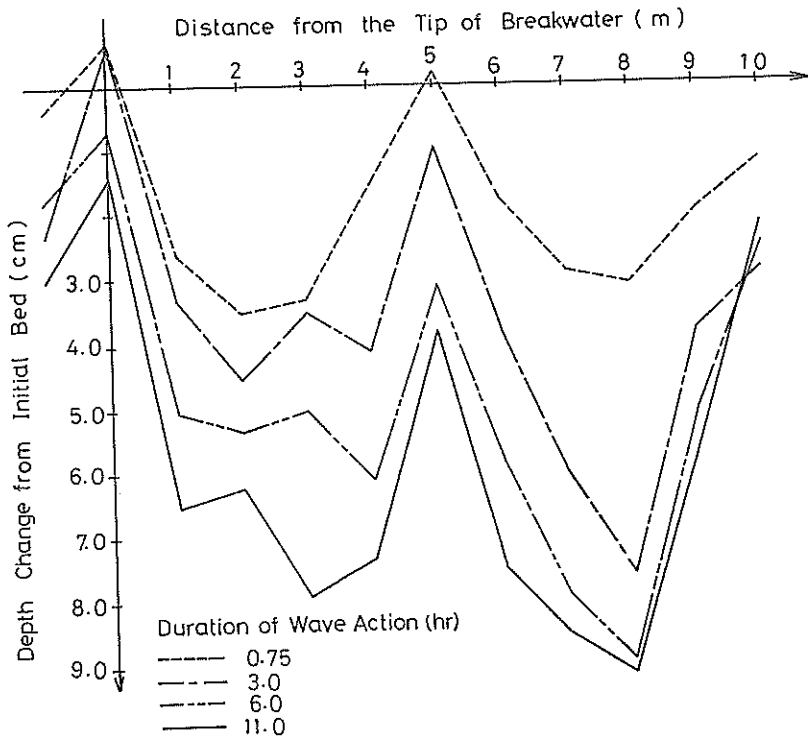


図-24 (2) 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-2, $3L/4$)

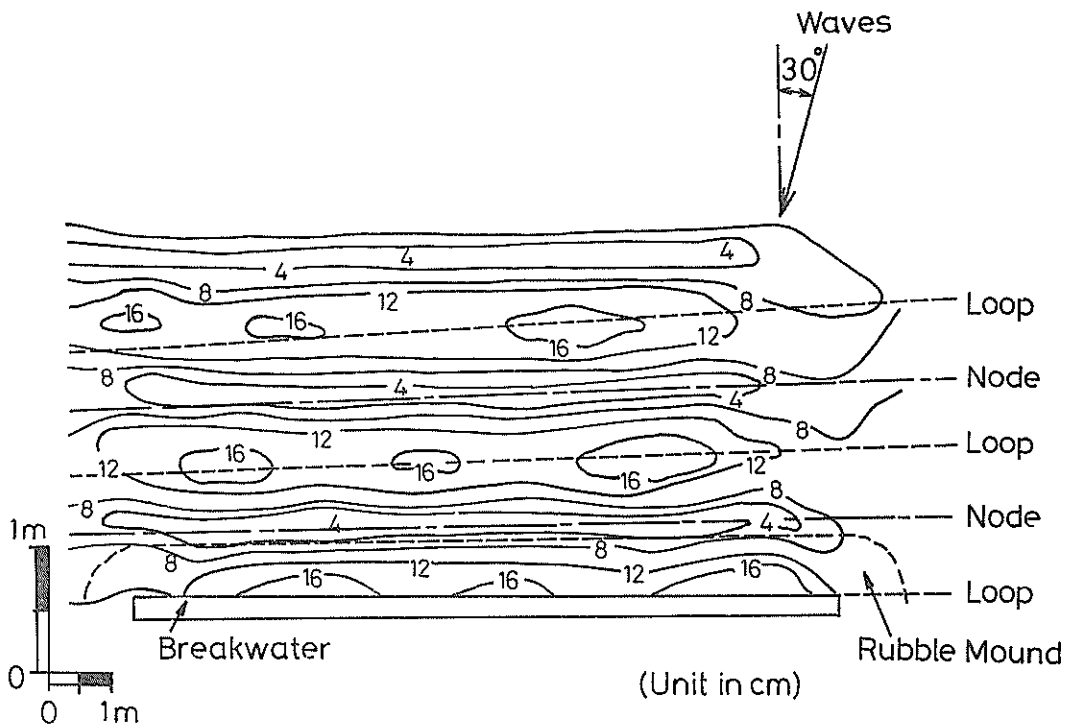


図-25 防波堤前面の波高分布 (Case B-2)

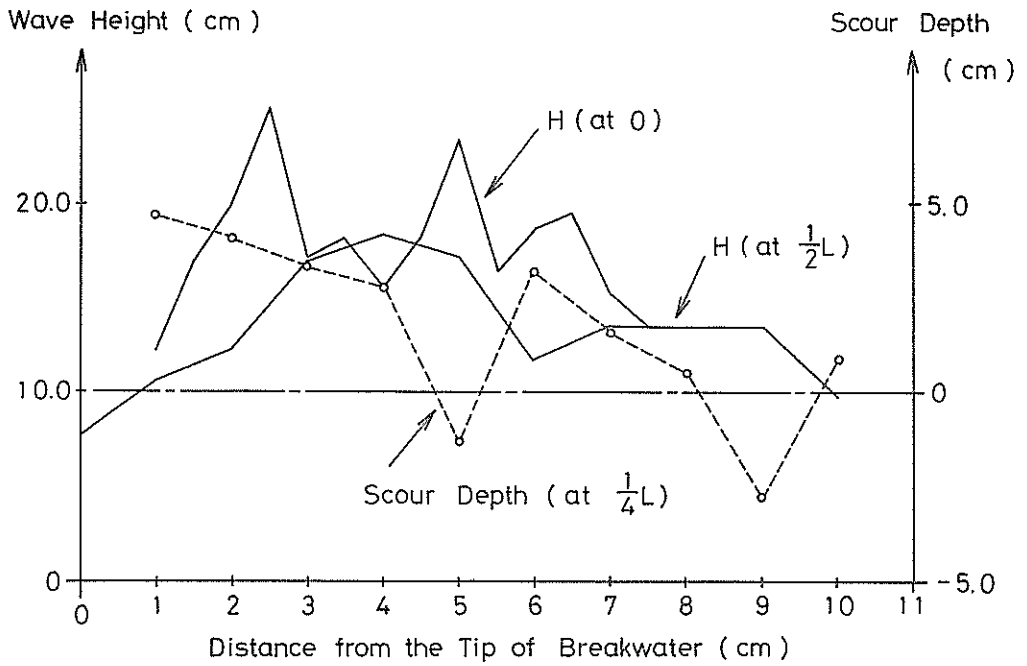


図-26 (1) 洗掘深と波高の関係 (Case B-2, $L/4$)

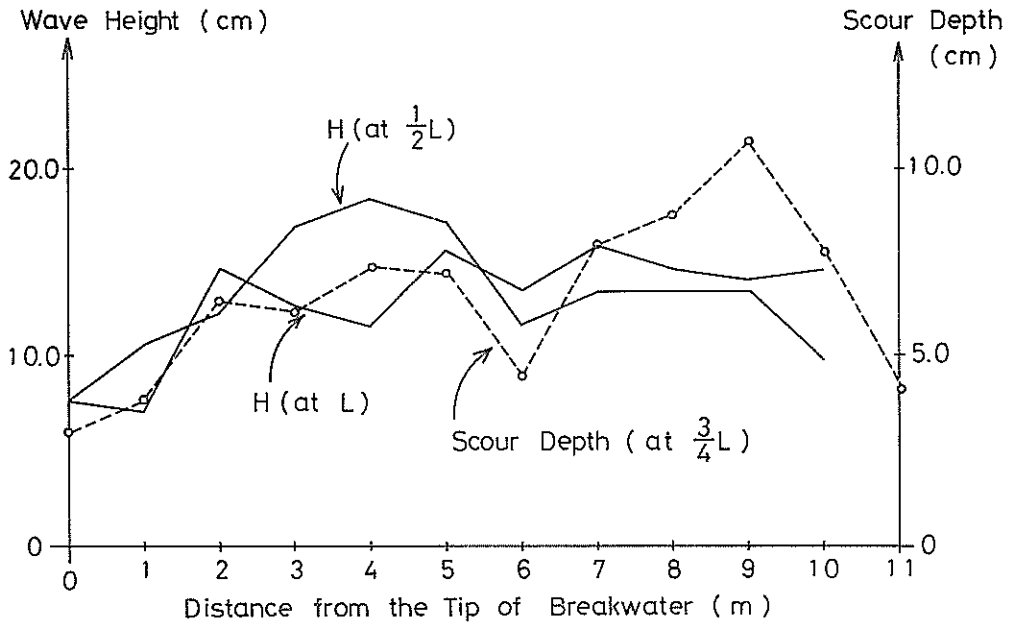


図-26 (2) 洗掘深と波高の関係 (Case B-2, $3L/4$)

図-28(1), (2), 図-29(1), (2)は経験的固有関数法による解析結果である。モード1では、図-28(1)に示すように時間係数 e_1 が平衡状態へ向かっているものの単調増加しており、図-28(2)に示す e_1 の平面分布によると、 $e_1 > 0$ の領域は解析領域ほぼ全域にわたっているものの、 e_1 の大きい領域（図中、斜線の領域）は、重複波の節の位置を中心に分布している。一方、モード2では、図-29(1)に示すように時間係数 e_2 が波作用時間 645 分を境に減少傾向から増加傾向に変化しており、図-29(2)に示す e_2 の平面分布によると、Case B-1 ほど傾向ははっきりしていないものの、 $e_2 < 0$ の領域が重複波の節の位置を中心に分布しており、 $e_2 > 0$ の領域が重複波の腹の位置を中心に分布している。Case B-2 における経験的固有関

数法による解析結果は、Case B-1 同様、モード1では解析領域全域にわたって洗掘となる海底地形変化を、モード2では重複波の節の位置で初め洗掘その後堆積となる海底地形変化を、重複波の腹の位置で初め堆積その後洗掘となる海底地形変化を示している。

図-30は、Case B-1 と Case B-2 の測線-2, 3, 4において、波作用 660 分後の地形と初期地形の差を示したものである。縦軸は洗掘深を堤体設置水深における波高で無次元化しており、横軸は防波堤からの距離を波長で無次元化してある。のり先に注目すると、Case B-1 では洗掘領域となっているのに対して Case B-2 では堆積領域となっている。これは、重複波の節の位置とのり先の位置との関係によると考えられる。すなわち、Case

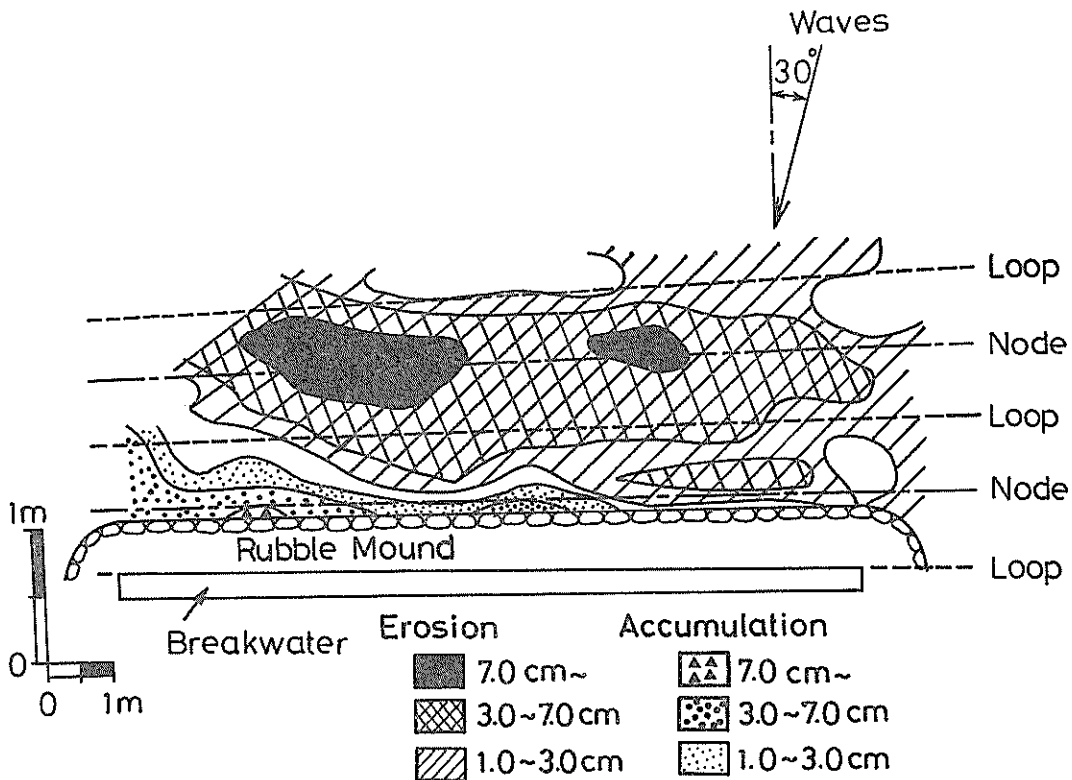


図-27 波作用 660 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-2)

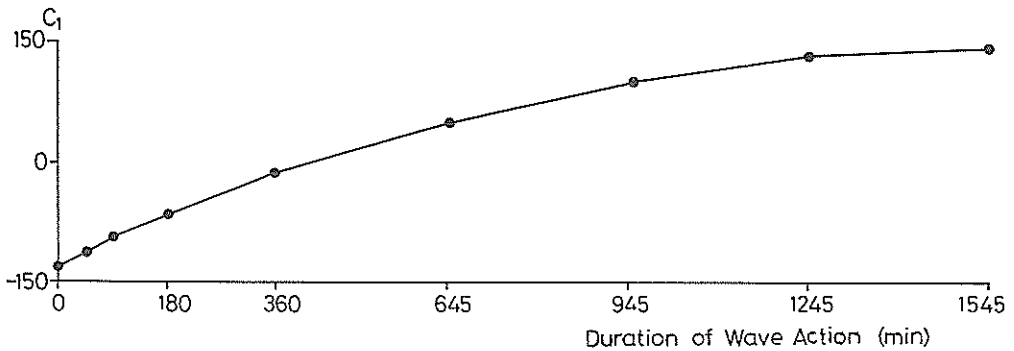


図-28 (1) c_1 の経時変化 (Case B-2)

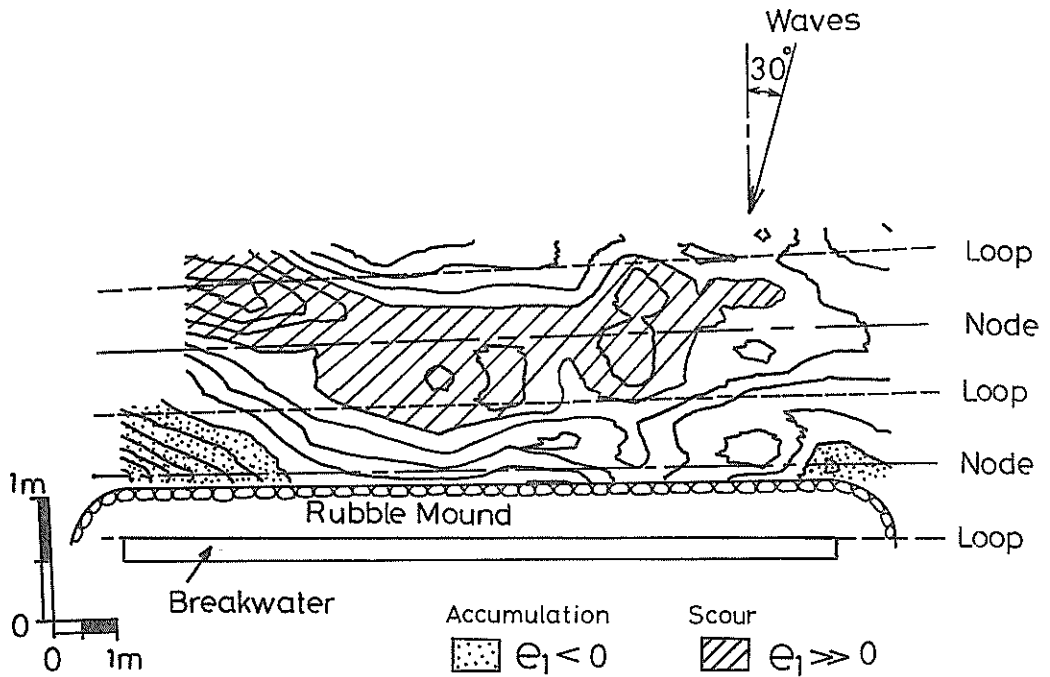


図-28 (2) e_1 の平面分布 (Case B-2)

B-1では重複波の節の位置がのり先よりも堤体寄りにあるため底層平均流はのり先から沖へ向かっており、のり先の底質はこの流れによってほとんど沖へ運び去られる。しかし、Case B-2では、のり先が重複波の節の位置より堤体側にあるため、重複波の節からのり先までの間にある底質はのり先のほうへ移動する。よって、Case B-2ではのり先が堆積領域になったと考えられる。

(3) 模型縮尺を大きくした場合 (Case B-5, Case B-6)

防波堤設置水深 20 cm (現地換算値 15.0 m) における波高が 12.0 cm (現地換算値 4.8 m), 周期が 1.58 s (現地換算値 10.0 s) の規則波を波向 30° として作用させたとき (Case B-5) の実験結果, 及び波高が 15.5 cm (現地換算値 6.2 m), 周期が 1.58 s (現地換算値 10.0 s) の規則波を波向 30° として作用させたとき (Case B-6) の実験結果について述べる。

両ケースとも模型縮尺が 1/40 で、Case B-1, Case B-2 に比べると大縮尺となっている。図-31は Case B-5

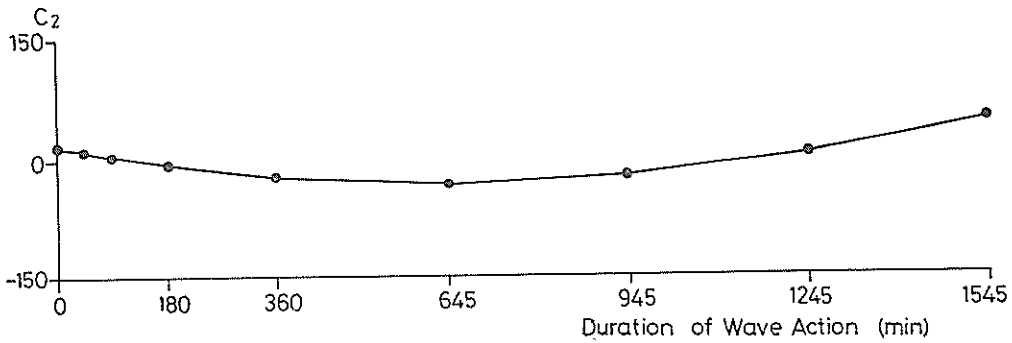


図-29 (1) c_2 の経時変化 (Case B-2)

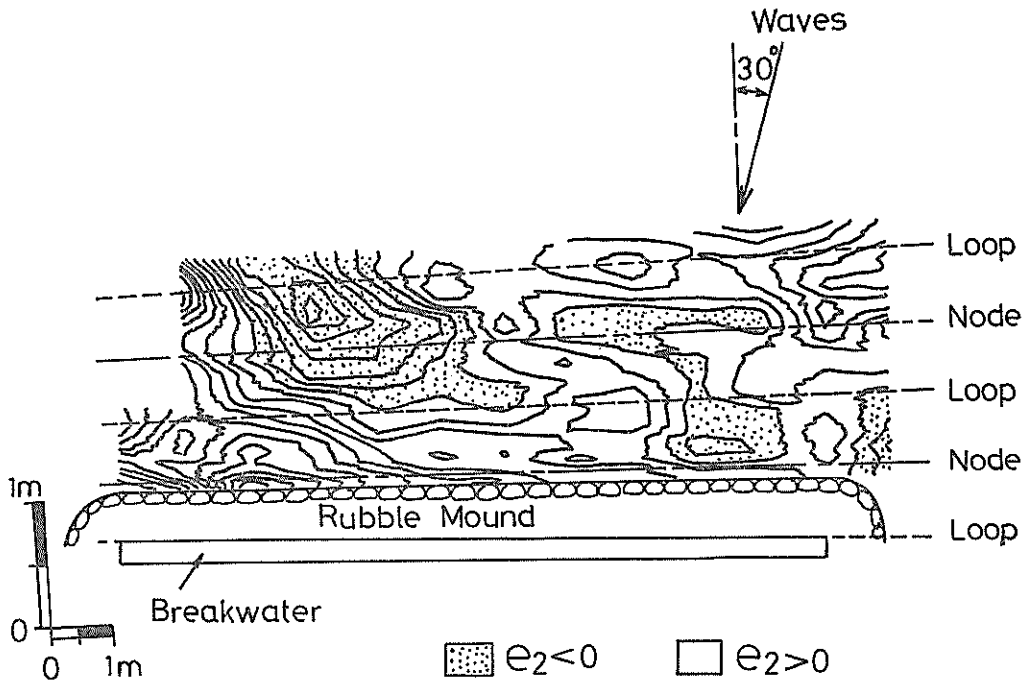


図-29 (2) e_2 の平面分布 (Case B-2)

における防波堤上手の測線-2, 3における波作用180分後と波作用660分後の防波堤に直角方向の断面図を示したものである。防波堤より $L/4$ 沖側の重複波の節の位置よりやや沖側の位置、および防波堤より $3L/4$ 沖側の重複波の節の位置よりやや岸側の位置で洗掘が発生している。

図-32は、防波堤から $L/4$ の位置における洗掘深の防波堤に沿う分布を示しており、図-33は、波作用660分後の地形と初期地形の水深差の分布を示している。両図

より Case B-5 では、Case B-1, Case B-2 に比べて防波堤下手の堆積領域の多いことがわかる。縮尺を大きくすることにより、底質の移動も著しくなり、側壁の影響をより大きく受けたことが原因と考えられる。図-33では、防波堤先端より堤体沿いに3mの区間は、Lタイプ断面変形が明瞭に見られ、写真-2に見られるような洗掘による捨石マウンドの崩壊が再現されている。しかし、それより下手側ではこのような明瞭なパターンとはなっておらず規則波を用いることの困難さを示している。

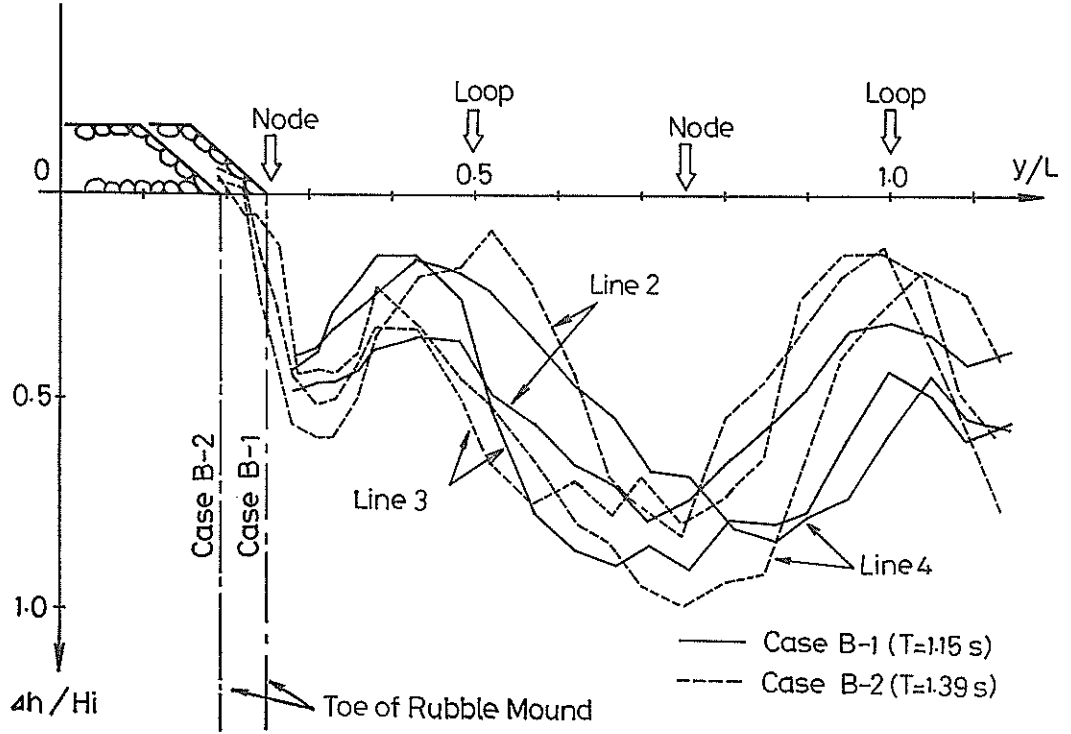


図-30 周期の違いによる海底地形変化の相違 (Case B-1 と Case B-2)

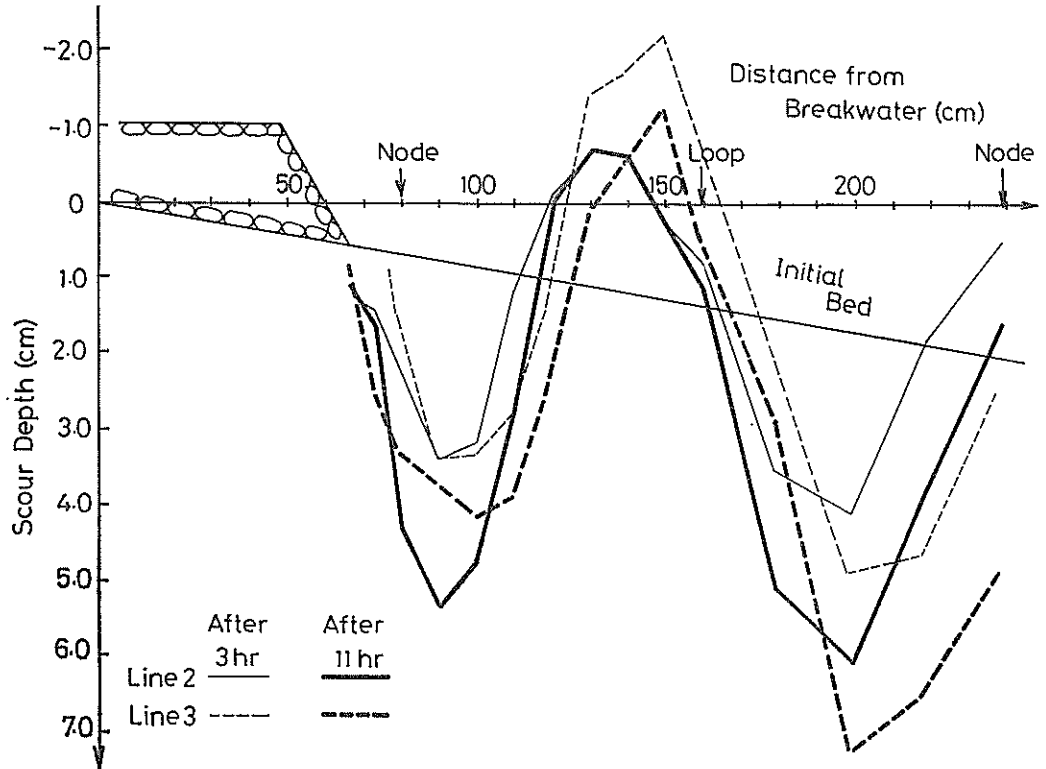


図-31 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-5, 測線-2, 3)

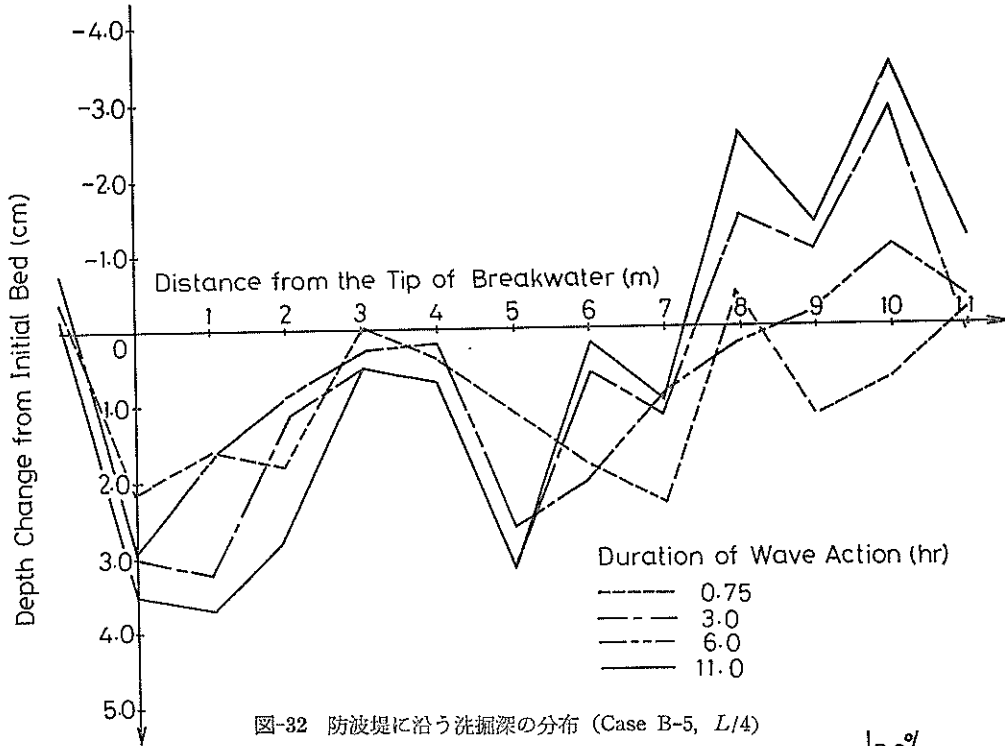


図-32 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-5, $L/4$)

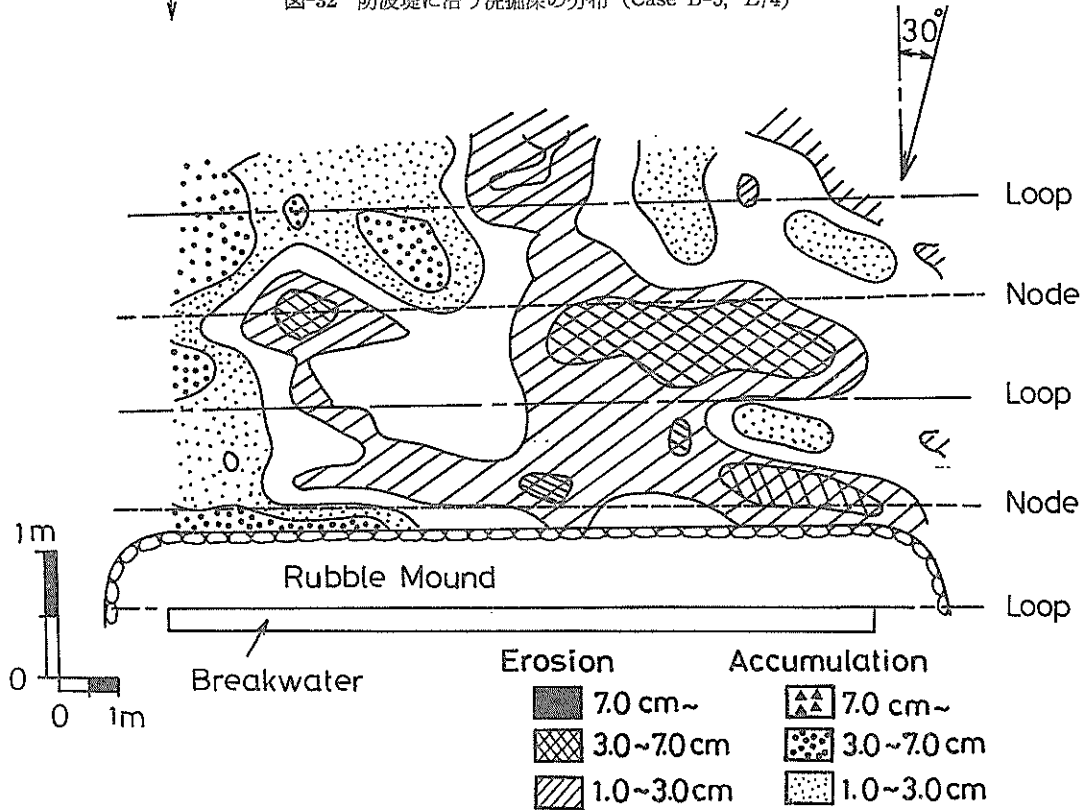


図-33 波作用 660 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-5)

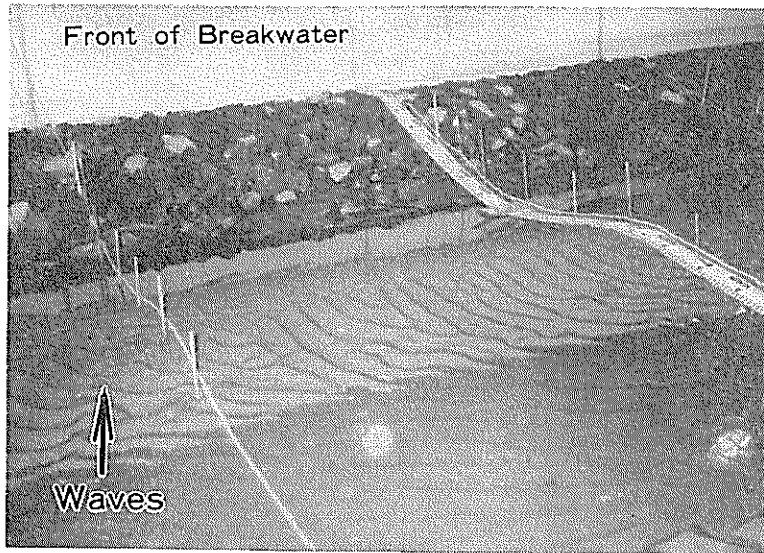


写真-2 防波堤上手におけるのり先洗掘状況 (Case B-5, 測線-2, 3)

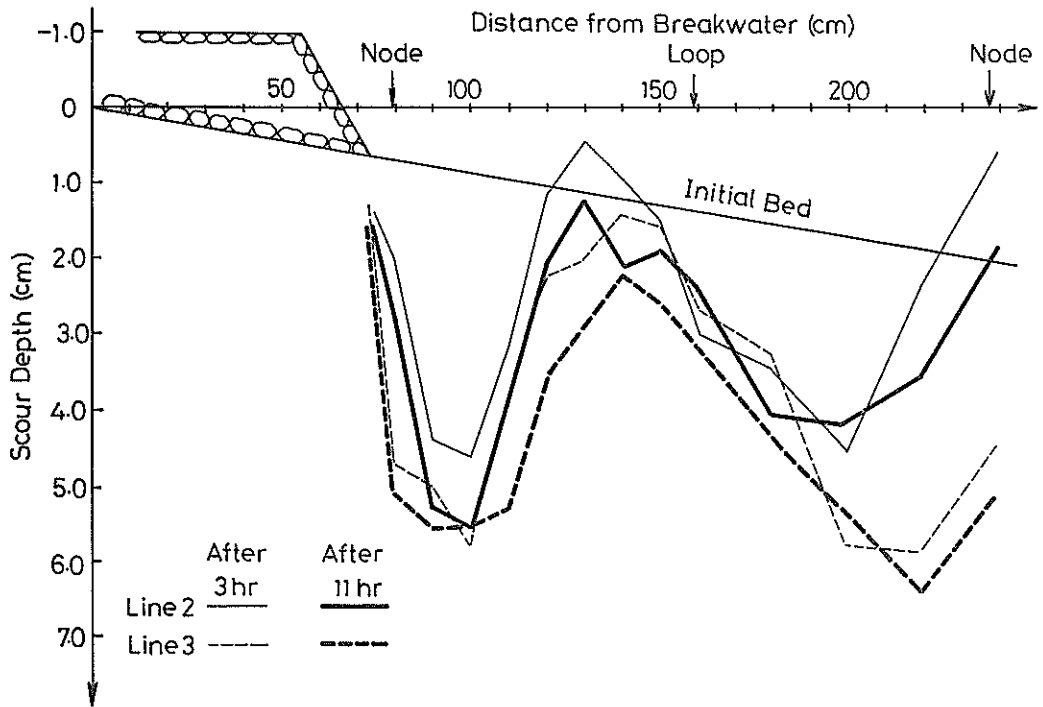


図-34 堤防波前面の海底地形断面図 (Case B-6, 測線-2, 3)

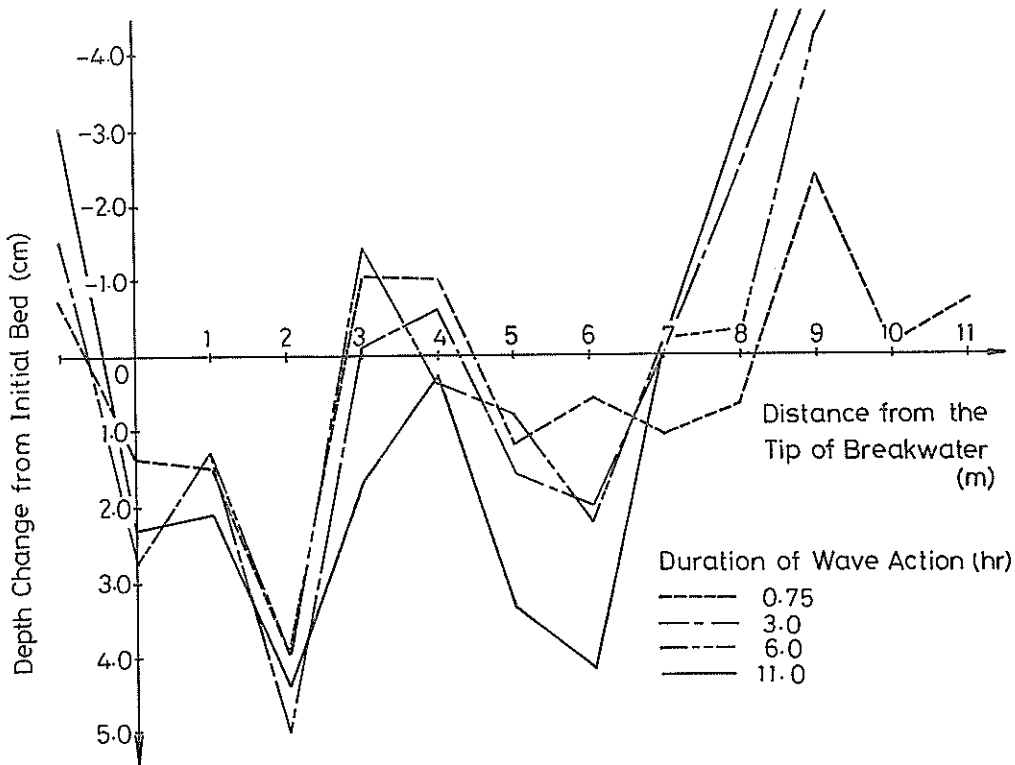


図-35 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-6, $L/4$)

図-34は、Case B-6 における防波堤上手の測線-2, 3 における波作用 180 分後と波作用 660 分後の防波堤に直角方向の断面図を示したものである。Case B-5 と同様に、防波堤より $L/4$ 沖側の重複波の節の位置よりやや沖側の位置、および防波堤より $3L/4$ 沖側の重複波の節の位置よりやや岸側の位置で洗掘が発生している。

図-35は、防波堤から $L/4$ の位置における洗掘深の防波堤に沿う分布を示しており、図-36 は、波作用 660 分後の地形と初期地形の水深差の分布を示している。Case B-6 では Case B-5 に比べて防波堤下手の堆積領域がふえ、波高を大きくすることによって側壁の影響を更に大きく受けたと考えられる。

(4) 側壁など境界の影響が小さい場合

Case B-1, Case B-2, Case B-5, Case B-6 では、重複波の節の位置で洗掘、腹の位置で堆積という典型的な L-タイプの洗掘形状が防波堤上手側にしか見られなかった。しかし、この原因が側壁などの影響であれば、側壁の影響を小さくすることによって防波堤に沿って一

様な海底地形変化を再現できるはずである。

そこで、次に波を堤体に直角方向とし、側壁の影響を小さくした場合の実験結果の一例を示す。実験水槽として 3.3 において底層平均流を測定したのと同じものを用い、図-37のように造波機、防波堤を設置し、波向を 0° とした。実験波の周期は 0.80 s、波高は 5.6 cm で水深は 13.0 cm、底質は中央粒径が 0.07 mm の珪砂である。防波堤はマウンドなしの直立堤で、長さが 1.8 m である。図-37 中の一点鎖線は地形測量を行った測線を示し、数字は測線番号を示している。

波作用 360 分後の地形を写真-3に示し、測線-1, 3, 5 の断面図を図-38に示す。写真及び図より、防波堤に沿って一様に洗掘、堆積の起こっていることがわかる。この原因として、防波堤からの反射波が造波機前面のフィルターによって二重に消去され、乱れの小さかったことが考えられ、側壁など境界の影響を小さくすれば移動床平面実験においても防波堤に沿って一様な海底地形変化の発生することがわかる。

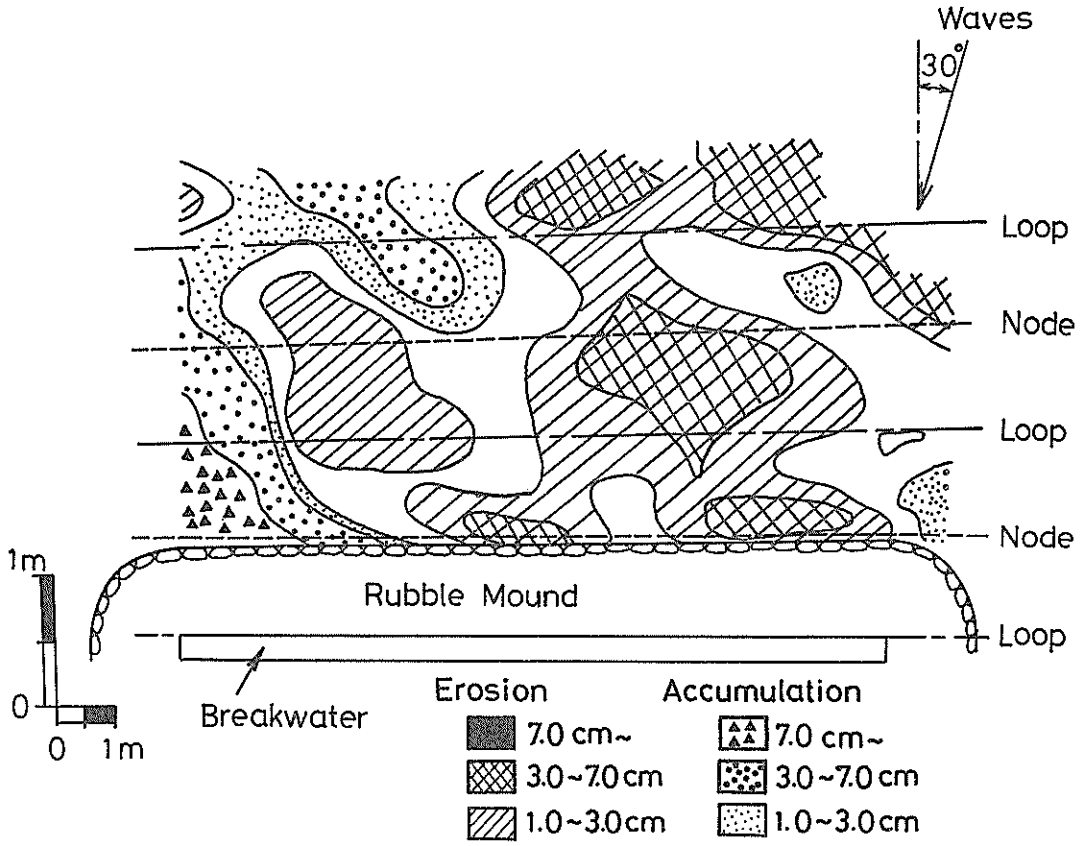


図-36 波作用 660 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-6)

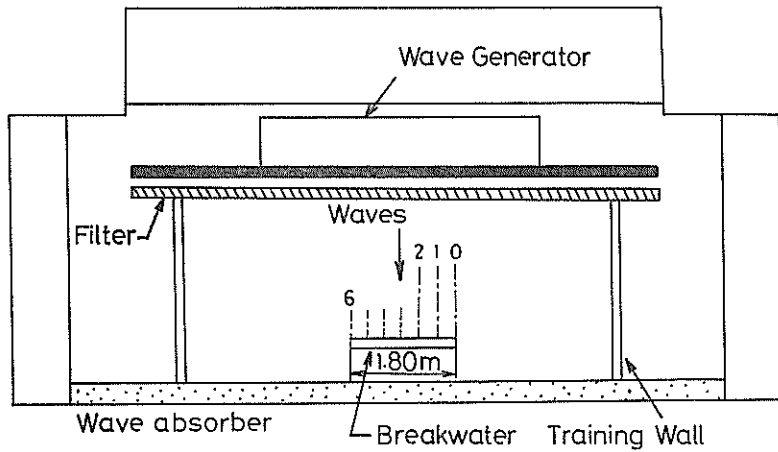


図-37 移動床模型実験用平面水槽

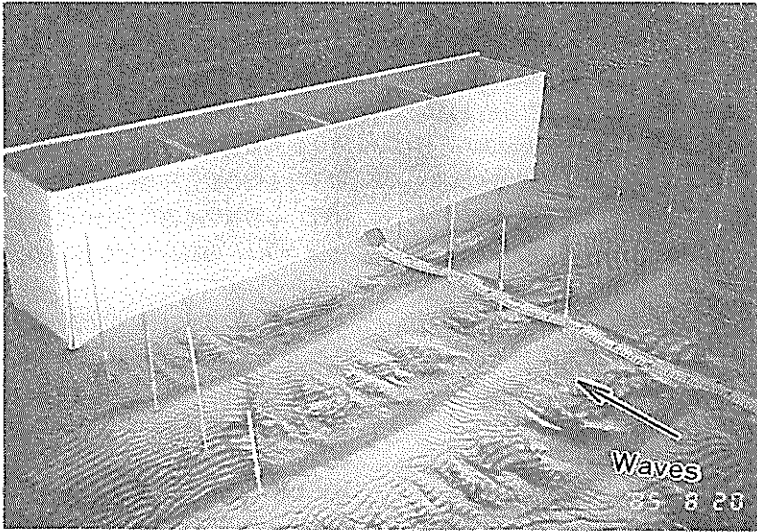


写真-3 波作用 360 分後の海底地形

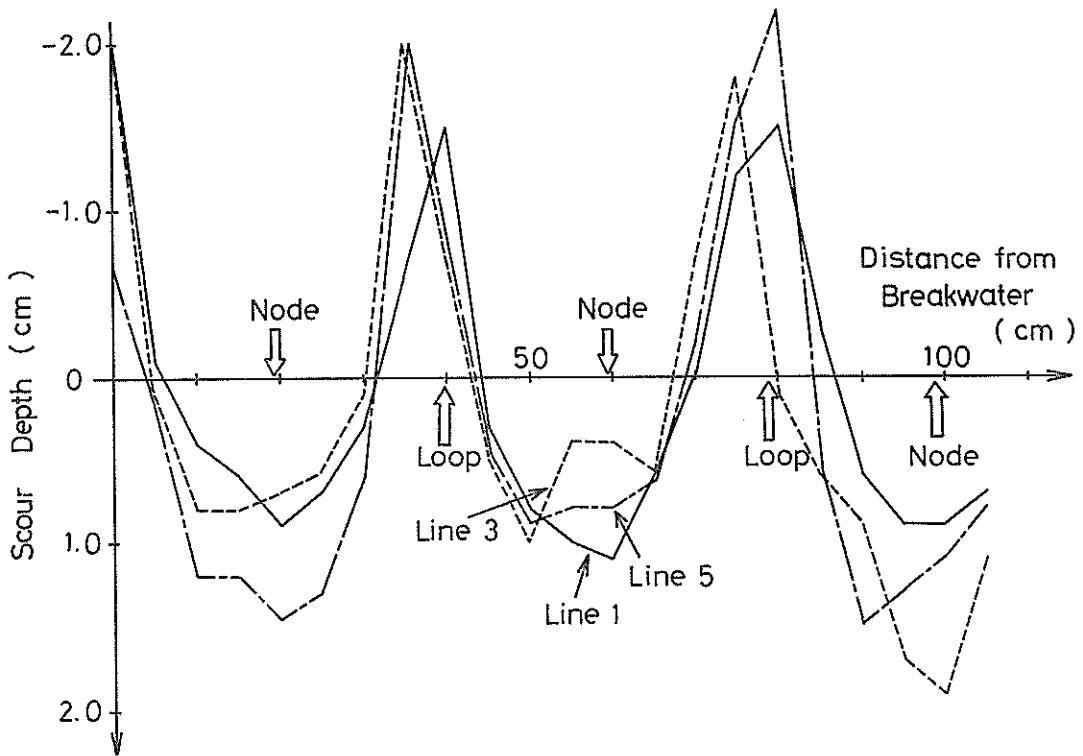


図-38 波作用 360 分後の海底断面図 (測線-1, 3, 5)

3.5 不規則波による海底洗掘の特徴

(1) 波向が30°の場合 (Case B-3)

防波堤設置水深 20 cm (現地換算値 15.0 m) における有義波高が 8.0 cm (現地換算値 6.0 m), 有義波周期が 1.30 s (現地換算値 11.3 s) の不規則波を波向 30°として作用させたとき (Case B-3) の実験結果について述べる。

図-39(1), (2) はそれぞれ防波堤上手の、測線-2, 3, 4 及び中央部の測線-5, 6, 7 における波作用 180 分後と波作用 660 分後の、防波堤に直角方向の断面図を示したものである。防波堤上手では、防波堤より $L/4$ 沖側の重複波の節の位置よりやや沖側の位置、および防波堤より $3L/4$ 沖側の重複波の節の位置で洗掘領域が見られる。のり先が堆積領域となったのは、前述したように重複波の節の位置とのり先との位置関係によるものと考えられる。防波堤に最も近い位置の洗掘領域が重複波の節の位置より若干沖側になった原因は、マウンドの影響と考えられる。防波堤より $3L/4$ 沖側の洗掘領域は、不規則波を作用させたときの海底地形変化は防波堤より $L/2$ 沖側の領域では大きくないという入江ら²⁾の予想に反し比

較的大きな洗掘深になっている。今回のケースでは波高を測定していないためこの現象の原因についての考察は、3.5(2) (Case B-4) の考察で行う。波作用 180 分後の断面と波作用 660 分後の断面を比較すると、規則波のとき同様に両者はほぼ相似であり、図-40 に示す防波堤に平行方向の底質移動による海底地形変化量を表す指標 $\bar{h}(t)$ と防波堤に直角方向の底質移動による海底地形変化量 $\Delta h(t)$ の経時変化も規則波とはほぼ同様の傾向を示している。

図-41(1)は、防波堤より $L/4$ 沖側の洗掘領域における洗掘深の防波堤に沿う分布を示したものである。規則波の場合と比べて、波作用時間の少ないときには防波堤中央部における洗掘深の小さい領域は現れていない点特徴的である。図-41(2)は防波堤より $3L/4$ 沖側の洗掘領域における洗掘深の防波堤に沿う分布を示したものである。防波堤中央部に洗掘深の小さい領域が波作用時間の少ないうちから存在するものの、他の洗掘領域との差は比較的小さく、防波堤より $L/4$ 沖側の洗掘領域の場合と同じ傾向が見られる。

洗掘深の防波堤に沿う分布を見ると、防波堤より $L/4$

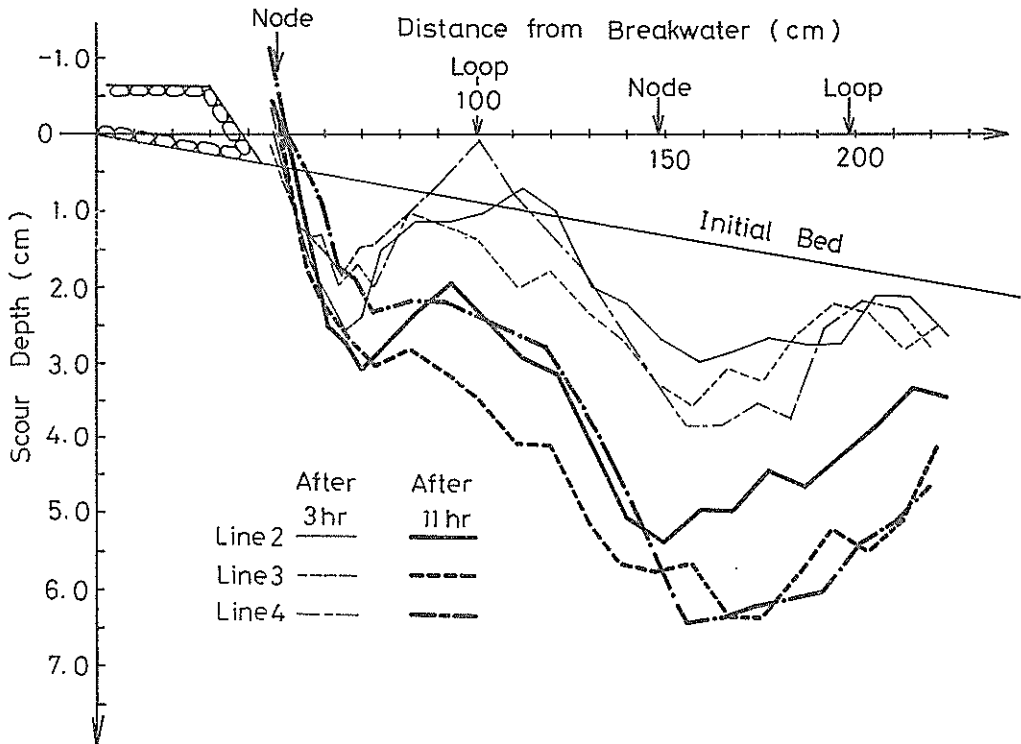


図-39 (1) 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-3, 測線-2, 3, 4)

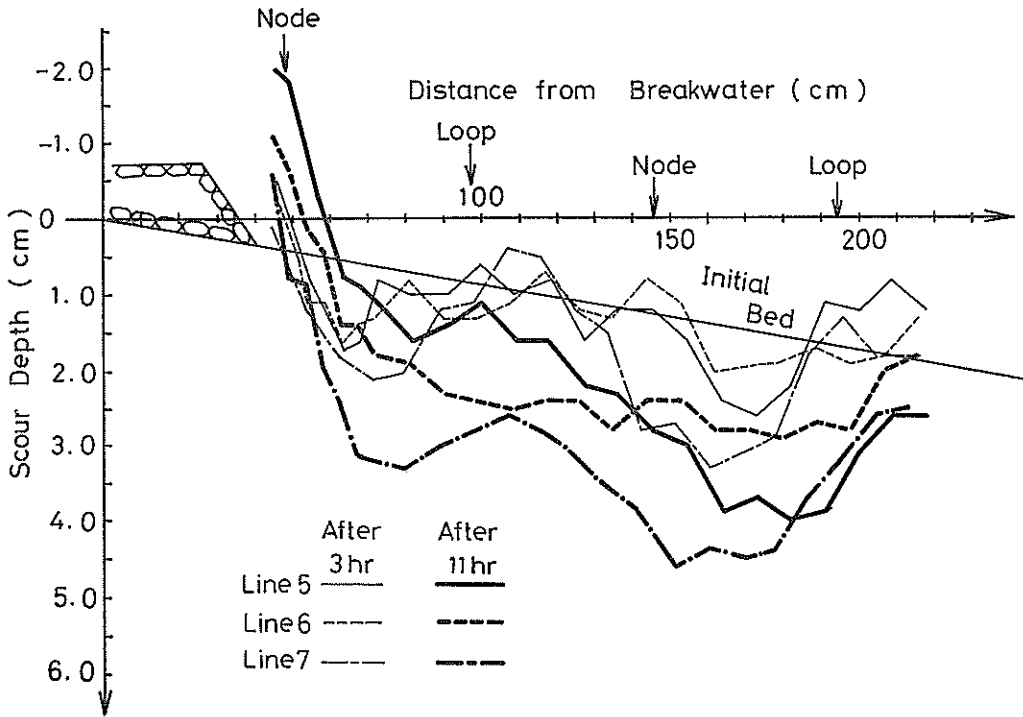


図-39 (2) 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-3, 測線-5, 6, 7)

沖側の節の領域でも、防波堤より $3L/4$ 沖側の節の領域でも、規則波のときほど、防波堤上手から下手にかけて洗掘深の減少する傾向は強くなかった。

図-42(1), (2), (3)は、それぞれ波作用 45 分後、180 分後 660 分後の地形と初期地形の水深差の分布を示したものである。防波堤より $3L/4$ 沖側の重複波の節の位置よりやや沖側で、防波堤上手先端より 1~3 m 及び 6~9 m に存在する洗掘の著しい領域は波の作用時間にかかわらず固定している。これは、図-41(2)からも確認できる。

図-43(1), (2), 図-44(1), (2)は経験的固有関数法を適用した結果である。モード 1 では、図-43(1)に示すように時間係数 e_1 が単調増加的に変化している。一方、図-43(2)に示す e_1 の平面分布より、解析領域はほぼ全域にわたって $e_1 > 0$ となっており、特に重複波の節の位置を中心に e_1 が大きくなっていることがわかる。したがって、モード 1 では、解析領域全体として洗掘が進行しており、特に重複波の節の位置を中心に著しい洗掘の起っている海底地形変化を示している。モード 2 では、図-44(1)に示すように時間係数 e_2 がやはり波作用時間 180 分を境に減少の傾向から増加の傾向へ変化している。図

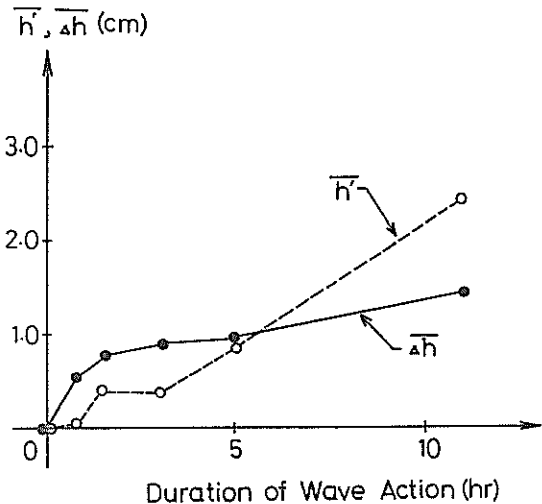


図-40 \bar{h} と $\bar{\Delta h}$ の経時変化 (Case B-3)

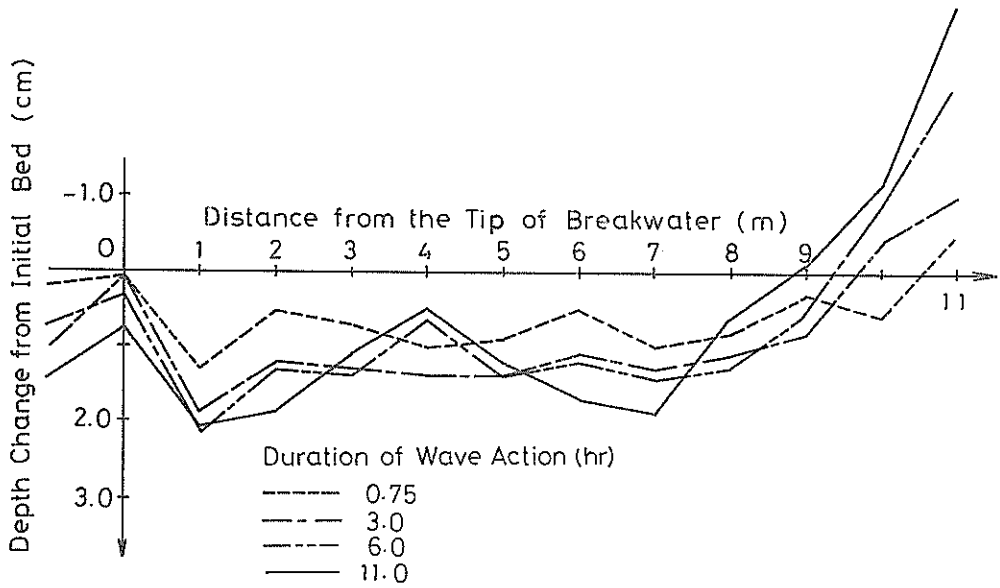


図-41 (1) 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-3, L/4)

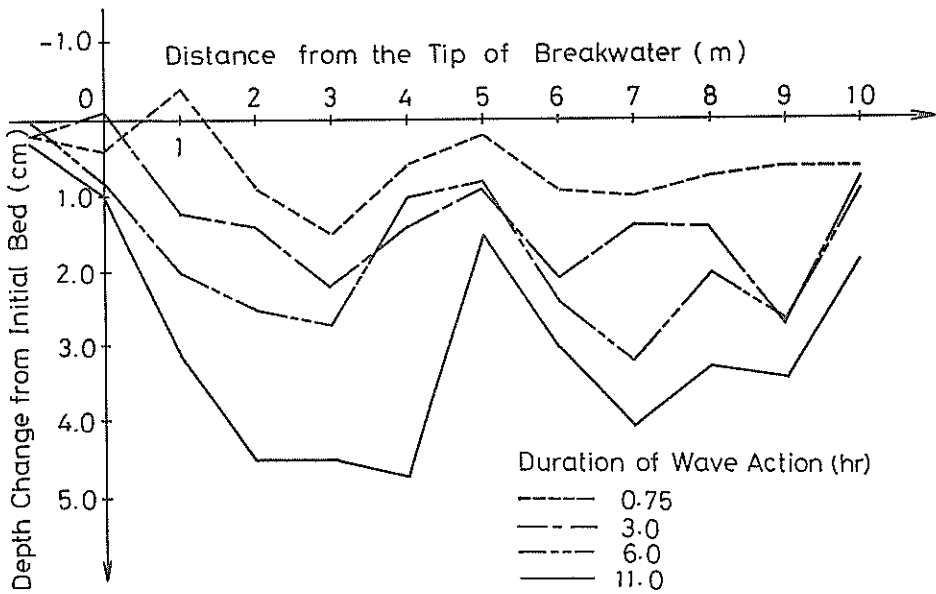


図-41 (2) 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-3, 3L/4)

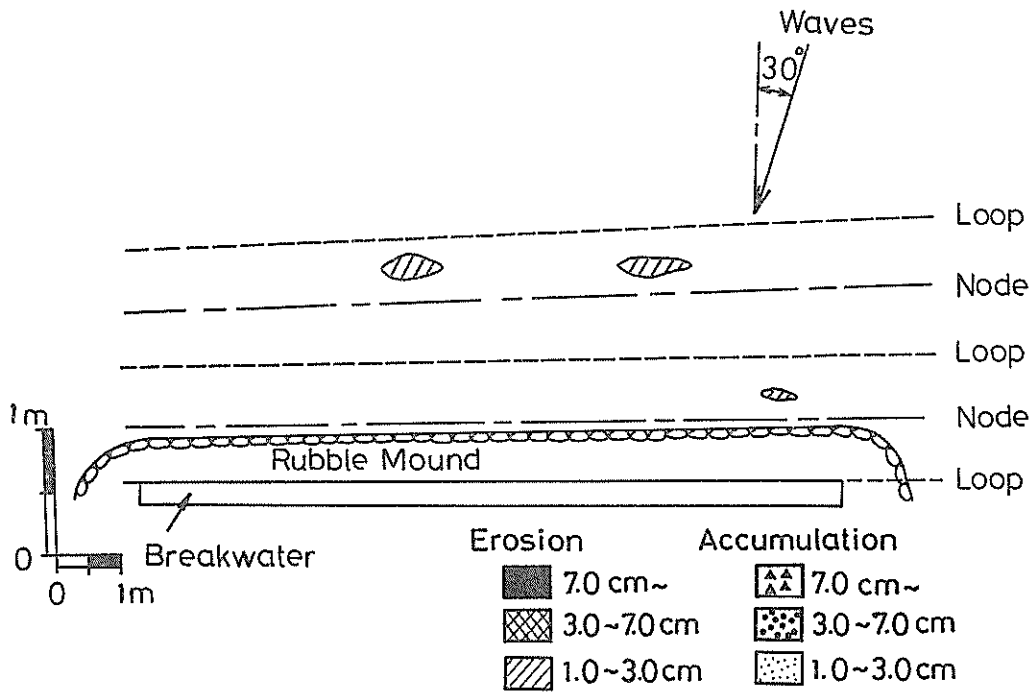


図-42 (1) 波作用 45 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-3)

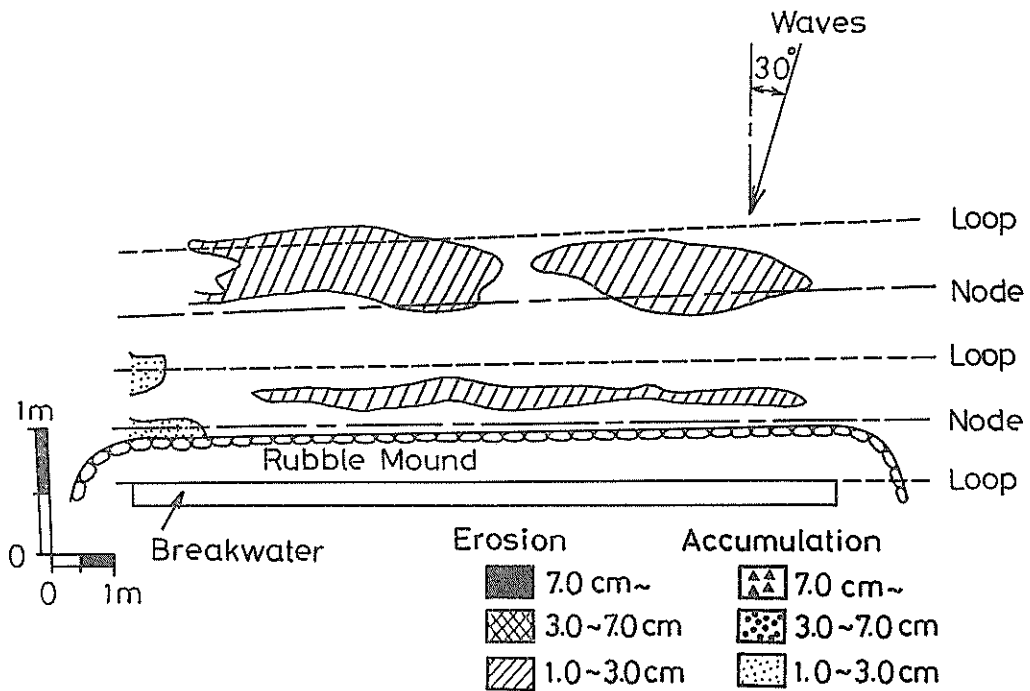


図-42 (2) 波作用 180 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-3)

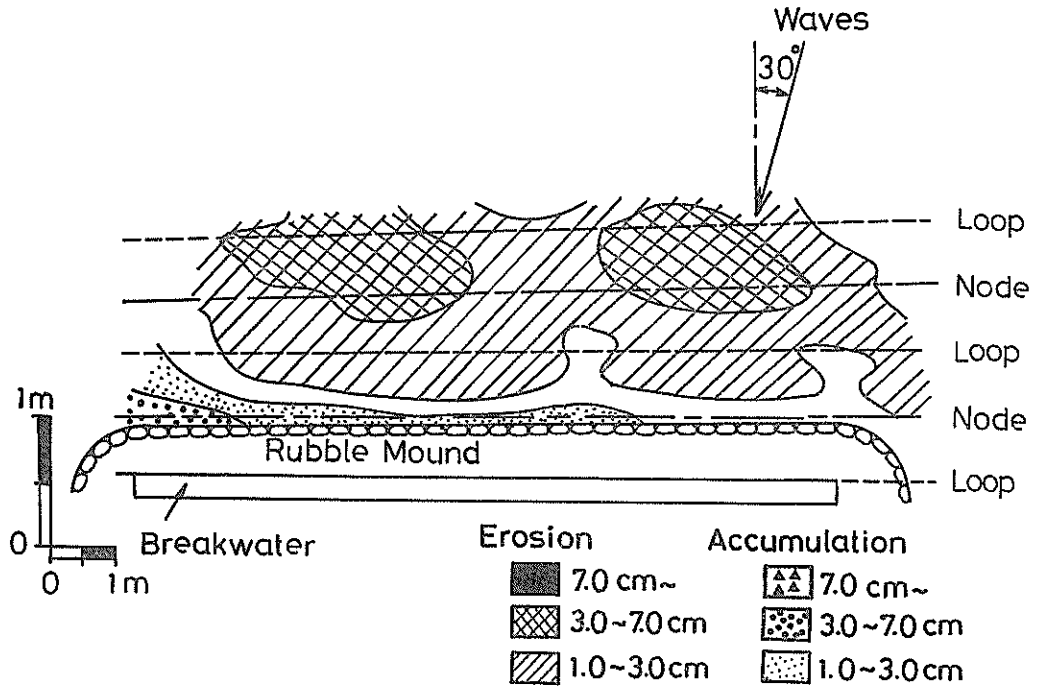


図-42 (3) 波作用 660 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-3)

-44(2)によれば、 $e_2 < 0$ 、すなわち最初洗掘したのがやがて堆積に転じた領域と、逆に $e_2 < 0$ 、最初堆積したのがやがて洗掘に転じた領域の分布パターンが、重複波の節、腹のパターンと合致しており、モード 2 が、防波堤と直角方向の底質移動による海底地形変化を示していることがわかる。

図-45は、Case B-2 と Case B-3 の測線-2, 3, 4において波作用 660 分後の地形と初期地形の差を示したものである。縦軸は洗掘深を堤体設置水深における波高（ただし Case B-3 の場合は有義波高）で無次元化しており、横軸は防波堤からの距離を波長で無次元化してある。洗掘深を比較すると、規則波による洗掘深のほうが不規則波の場合より大きいことがわかる。これは、規則波の波高と不規則波の有義波高を一致させたとき、一波当たりの波の平均エネルギーにおいて、規則波のほうが不規則波より大きいためと考えられる。

図-46は、Case B-3 における波作用 180 分後の防波堤前面の深淺図と、福井港における防波堤前面の深淺図を比較したものである。両者とも、防波堤前面にはほぼ一様な洗掘が見られ、不規則波を用いることによって三次元洗掘の再現性の高まることわかる。

(2) 波向が 45° の場合 (Case B-4)

防波堤設置水深 20 cm (現地換算値 15.0 m) における有義波高が 8.0 cm (現地換算値 6.0 m)、有義波周期が 1.30 s (現地換算値 11.3 s) の不規則波を波向 45° として作用させたとき (Case B-4) の実験結果について述べる。

図-47(1), (2)は、それぞれ防波堤上手の測線-2, 3, 4 と中央部の測線-5, 6, 7における波作用 180 分後と波作用 660 分後の防波堤に直角方向の断面図を示したものである。防波堤上手では、洗掘深は小さいものの、防波堤より $L/4$ 沖側の重複波の節の位置よりやや沖側の位置、および防波堤より $3L/4$ 沖側の重複波の節の位置で洗掘深の大きい領域が存在している。防波堤中央部ではそのような傾向が弱まっている。

防波堤上手で、防波堤より $3L/4$ 沖側の重複波の節の位置で洗掘深が大きくなった原因について考える。図-48は、測線-3, 5, 7, 10における防波堤に直角方向の波高分布を示したものである。縦軸は有義波高を示し、横軸は防波堤からの距離を波長で無次元化した値を示している。防波堤より $3L/4$ の位置で特に波高が大きくなっているわけではなく、防波堤より $3L/4$ の位置での洗掘深と波高を直接結びつけて考えることはできない。底面流速などがその原因になっているのではないかと考えら

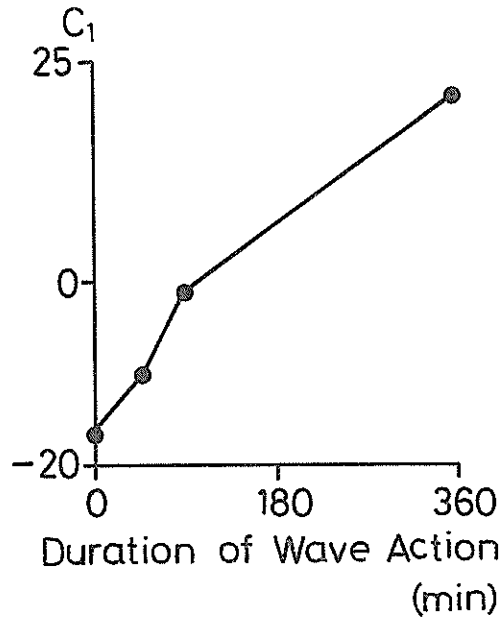


図-43 (1) c_1 の経時変化 (Case B-3)

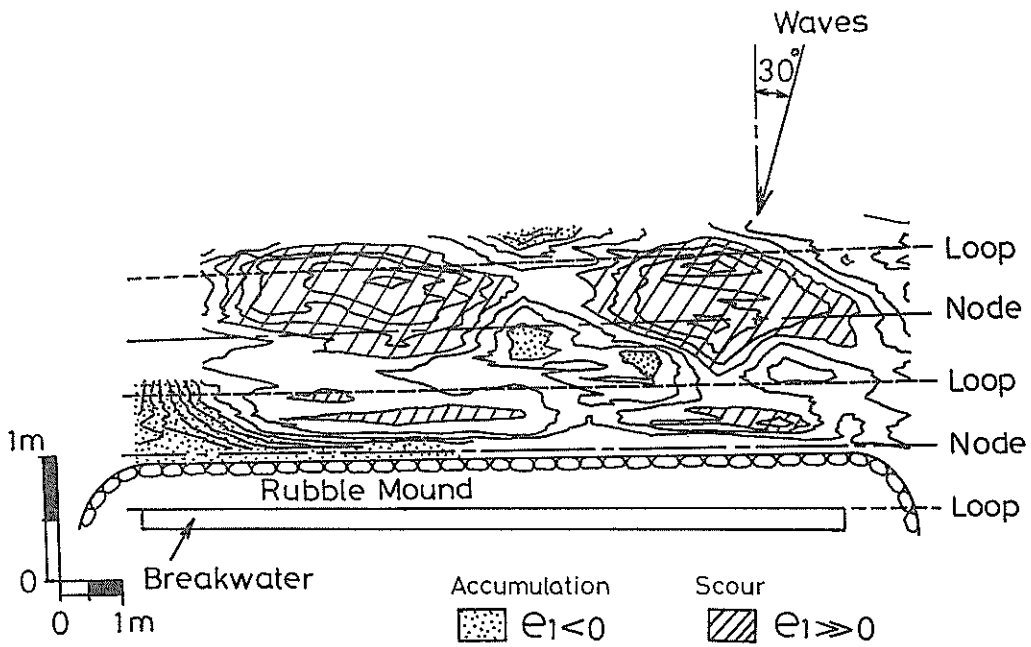


図-43 (2) e_1 の平面分布 (Case B-3)

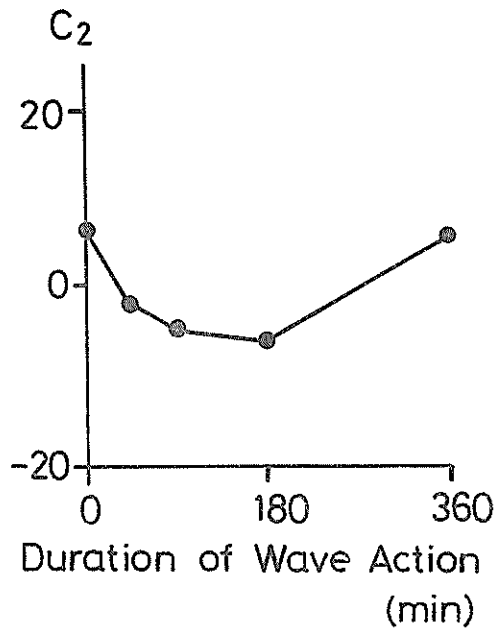


図-44 (1) C_2 の経時変化 (Case B-3)

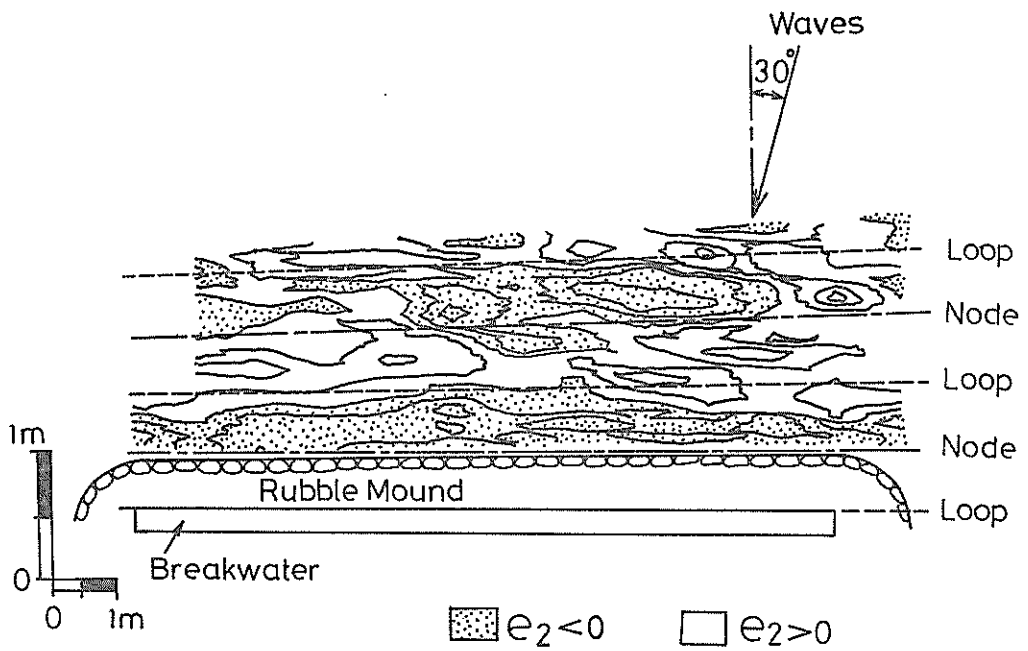


図-44 (2) e_2 の平面分布 (Case B-3)

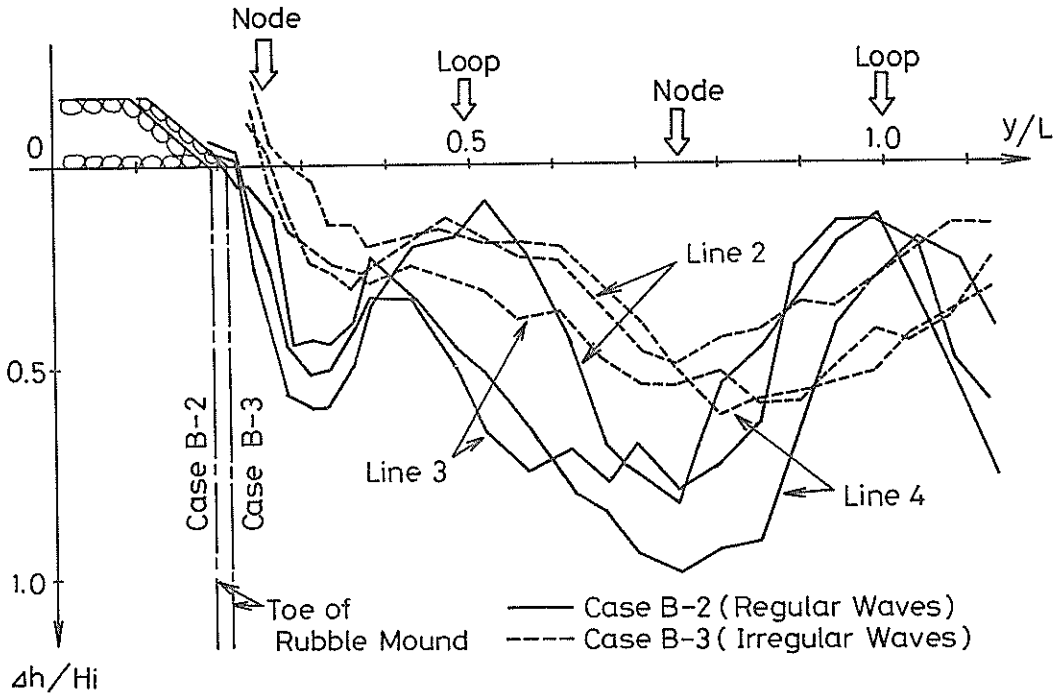


図-45 規則波と不規則波による海底地形変化の相違 (Case B-2 と Case B-3)

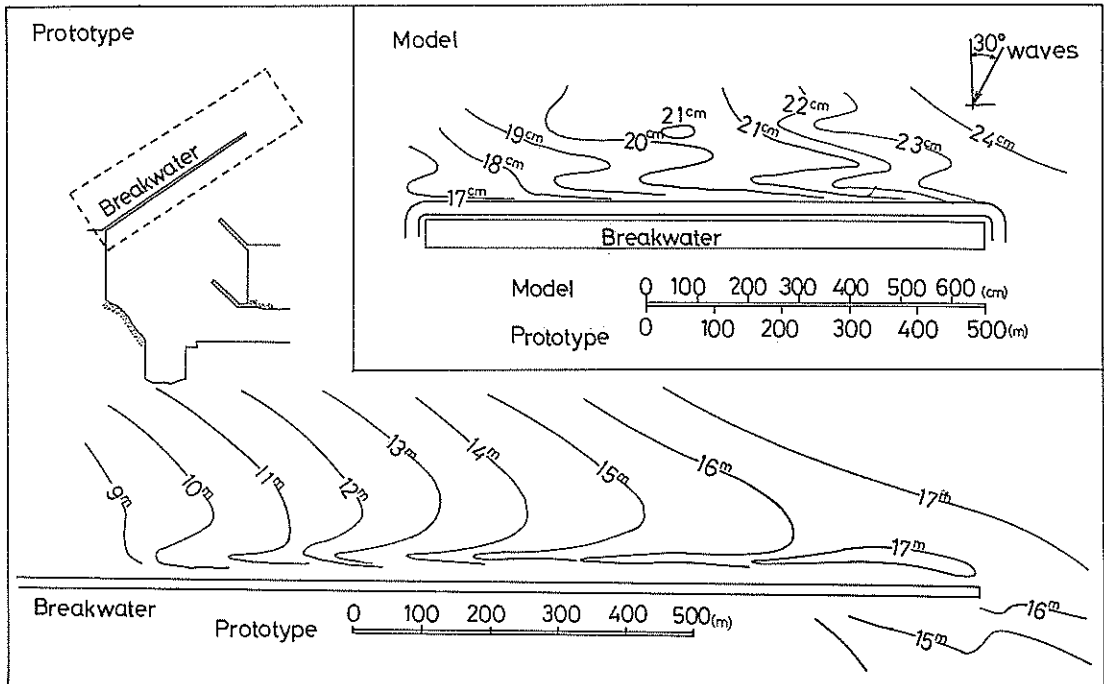


図-46 防波堤前面の模型と現地の対比

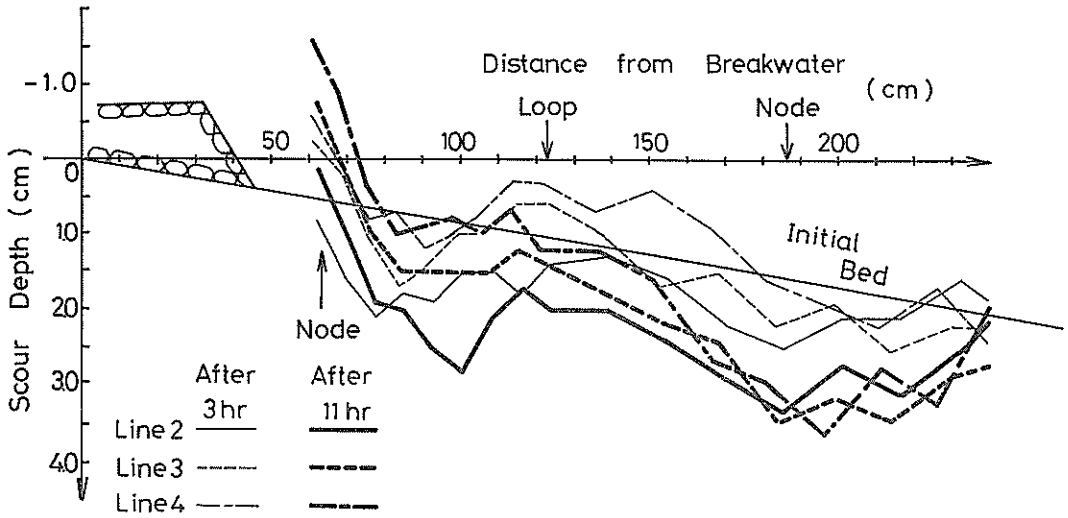


図-47 (1) 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-4, 測線-2, 3, 4)

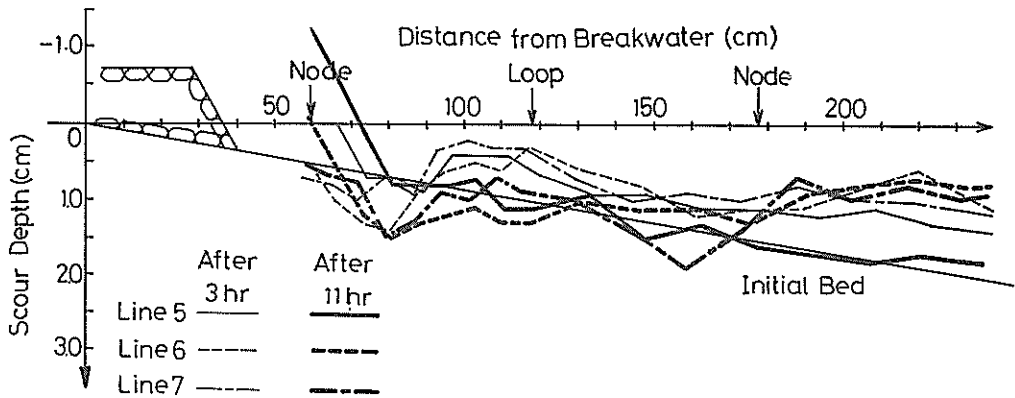


図-47 (2) 防波堤前面の海底地形断面図 (Case B-4, 測線-5, 6, 7)

れるが詳細は不明である。

波作用 180 分後の断面と波作用 660 分後の断面の比較では両者の相似性は余りはっきりしないけれども、図-49に示す $\bar{h}(t)$ と $\Delta \bar{h}(t)$ の経時変化はこれまでの結果とはほぼ同様の傾向を示しており、防波堤に直角方向の底質移動による地形変化が相当早い時間で安定傾向になる一方、防波堤に平行方向の底質移動による地形変化が比較的緩慢に進行していることがわかる。

図-50(1)は、防波堤より $L/4$ 沖側の領域における洗掘深の防波堤に沿う分布を示したものである。洗掘深は防波堤下手に向かうほど大きくなっており、波向 30° の場合と逆の傾向を示している。この原因は不明であるけれ

ども斜め入射波による防波堤前面の波高分布は波向、堤体長によって微妙に変化しており、その効果も原因の一つと考えられる。図-50(2)は、防波堤より $3L/4$ 沖側の洗掘領域における洗掘深の防波堤に沿う分布を示したものである。図-50(1)における防波堤下手ほど洗掘深が大きくなる傾向は見られないものの、防波堤中央部および下手で洗掘深のまわりに比べて小さい領域が存在している。

図-51は、波作用 660 分後の地形と初期地形の水深差の分布を示したものである。洗掘深が小さいものの、重複波の節の位置を中心に洗掘領域の存在することがこの図から確認できる。

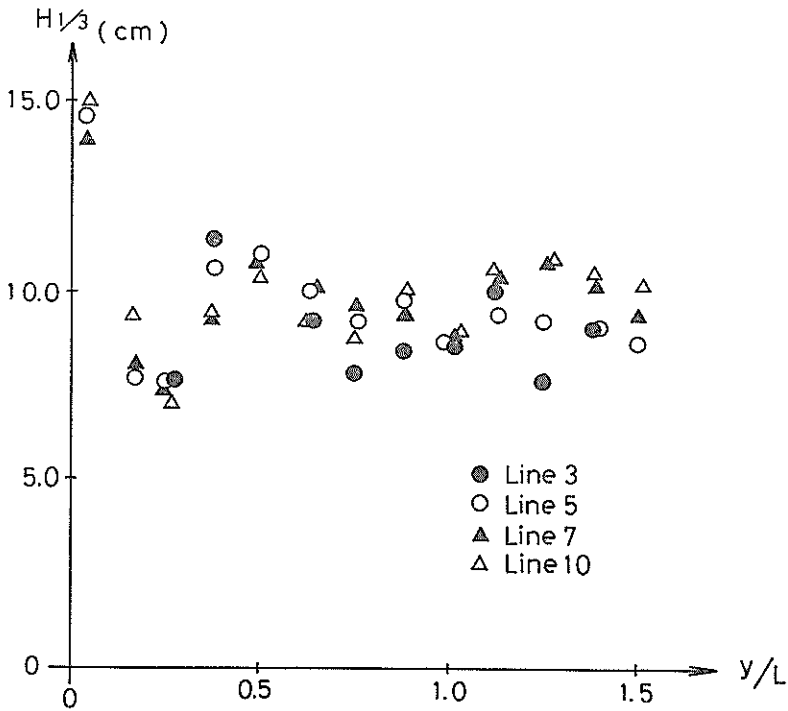


図-48 防波堤前面の波高分布 (Case B-4)

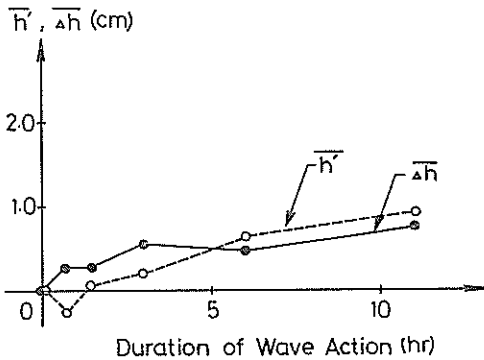


図-49 \bar{h} と $\Delta \bar{h}$ の経時変化 (Case B-4)

写真-4は、防波堤のり先付近のリップルのような様子を示したものである。水粒子が重複波の節の位置では防波堤と直角方向に振幅の大きい運動をし、重複波の腹の位置では防波堤と平行方向に振幅の大きい運動をするため、リップルが重複波の節の位置では防波堤に対して平行で、重複波の腹の位置では防波堤に対して直角である。

図-52(1), (2), 図-53(1), (2)は経験的固有関数法を適用した結果である。モード1では、図-52(1)に示すように

時間係数 c_1 が単調増加している。一方、図-52(1)の e_1 の平面分布より、 $e_1 < 0$ の領域が他のケースに比べてやや多いものの、 $e_1 > 0$ の領域は重複波の節の位置を中心として広い範囲に分布している。したがって、モード1では、やはり解析領域全体に洗掘が進行していることを示している。モード2では、図-53(1)に示すように時間係数 c_2 が波作用時間180分を境に、増加傾向から減少傾向に変わっている。一方、図-53(2)の e_2 の平面分布より、防波堤前面から $L/4$ 沖側の重複波の節の位置では $e_2 > 0$ の領域が、防波堤から $L/2$ 沖側の重複波の腹の位置では $e_2 < 0$ の領域が主に分布していることがわかるけれども、それより沖側の領域では、重複波の節、腹のパターンと e_2 のパターンが合致していない。したがって、モード2では、防波堤前面から $L/2$ 沖側の領域においてのみ防波堤と直角方向の底質移動による海底地形変化が表されている。

図-54は、Case B-3 と Case B-4 の測線-2, 3, 4において波作用660分後の地形と初期地形の差を示したものである。縦軸は洗掘深を堤体設置水深における有義波高で無次元化しており、横軸は防波堤からの距離を波長で無次元化してある。洗掘深を比較すると、波向 30° の

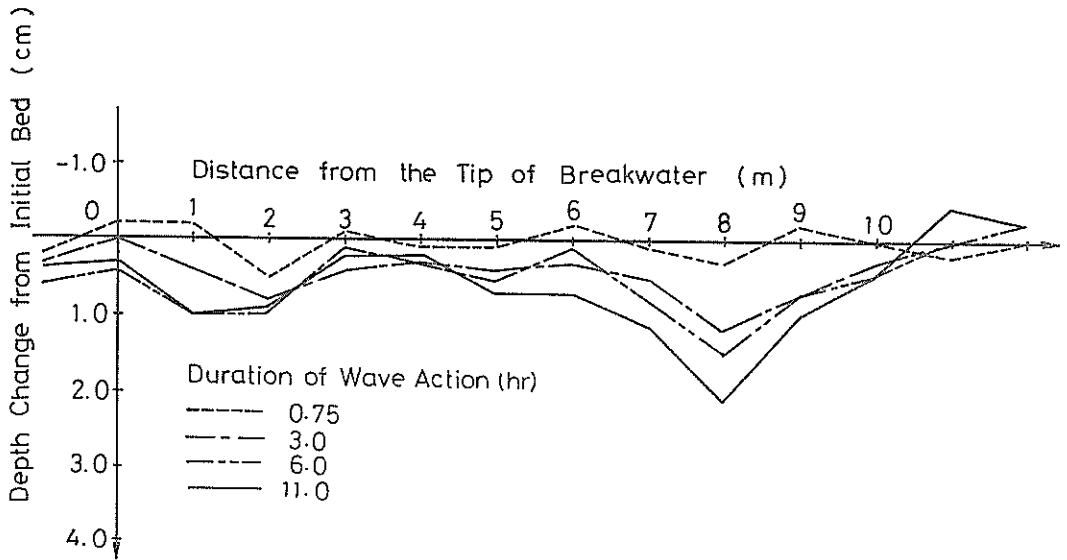


図-50 (1) 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-4, L/4)

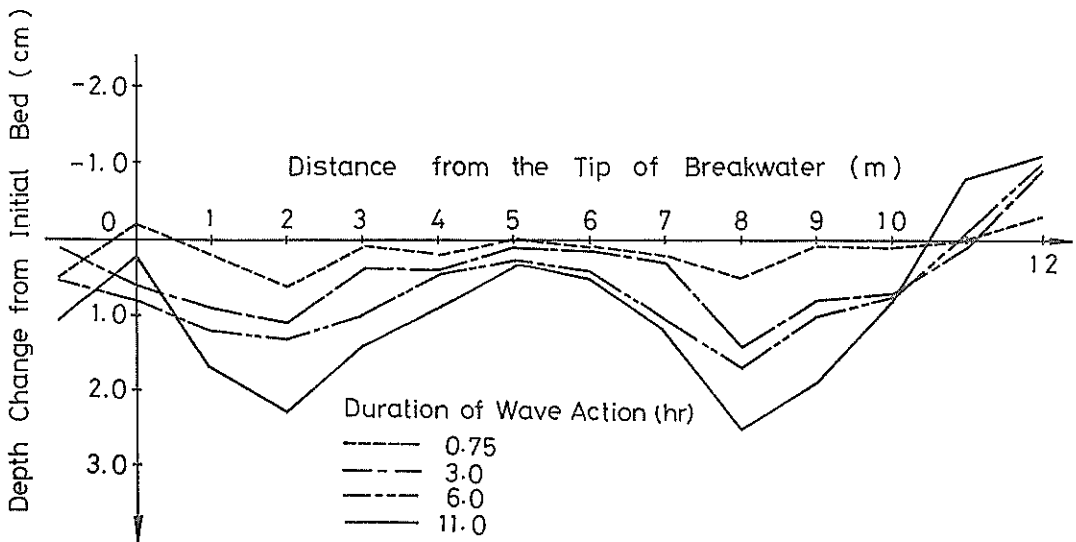


図-50 (2) 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case B-4, 3L/4)

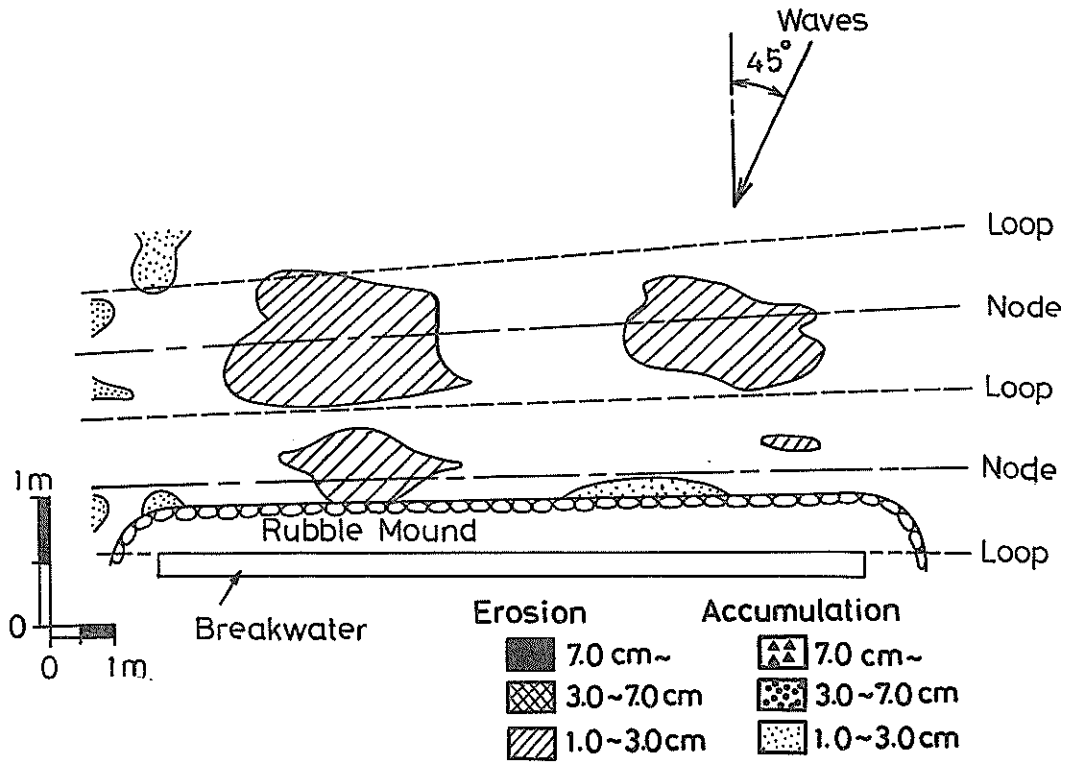


図-51 波作用 660 分後の地形と初期地形の差分図 (Case B-4)

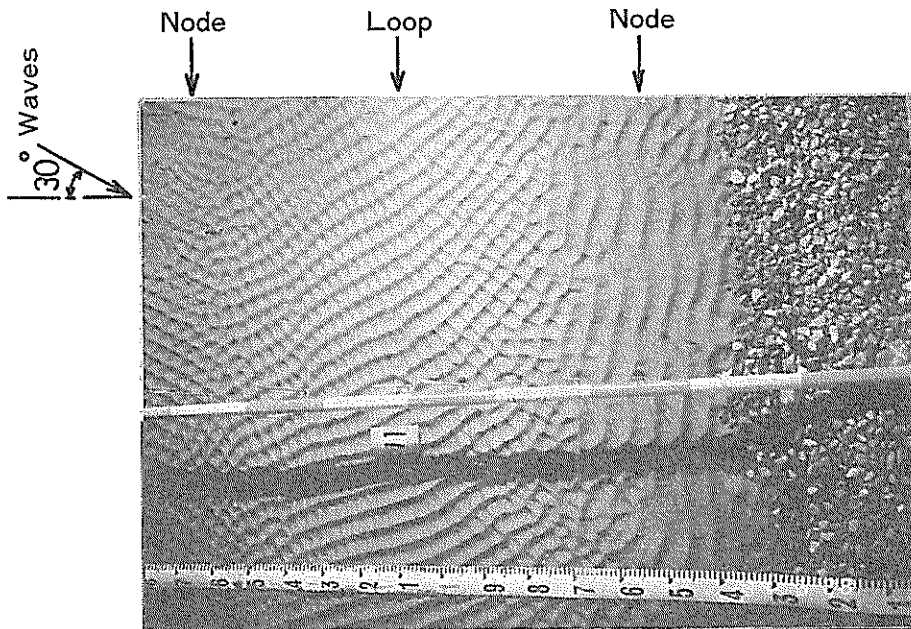


写真-4 防波堤前面のリップル (Case B-4)

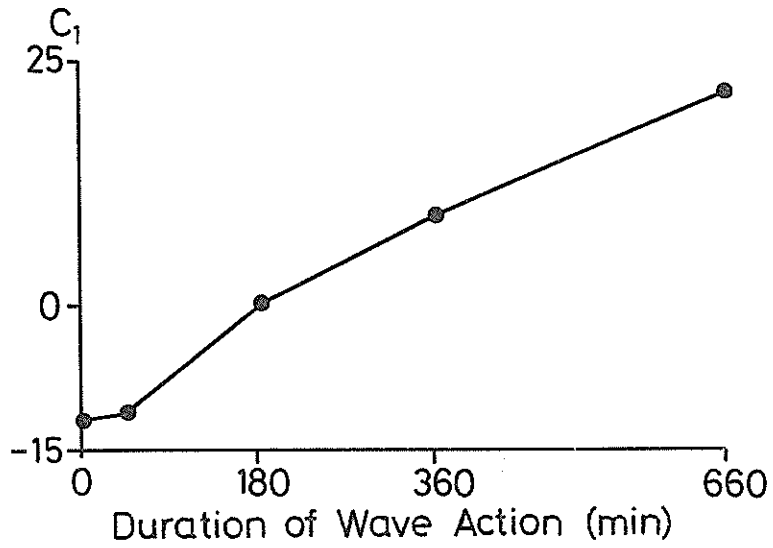


図-52 (1) c_1 の経時変化 (Case B-4)

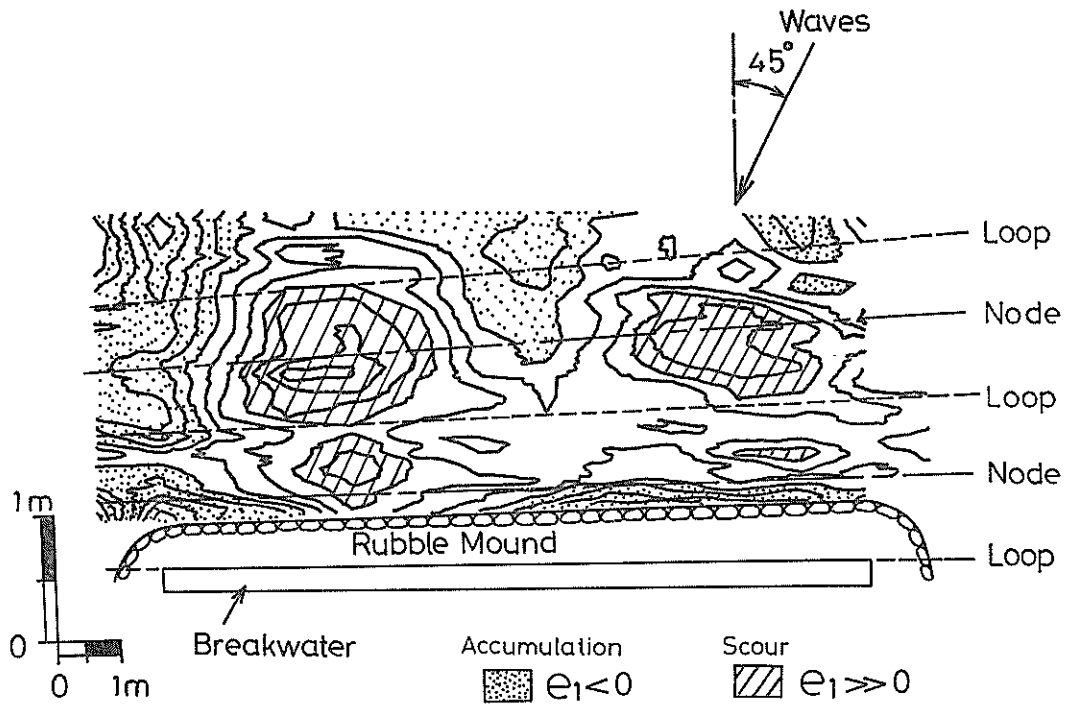


図-52 (2) e_1 の平面分布 (Case B-4)

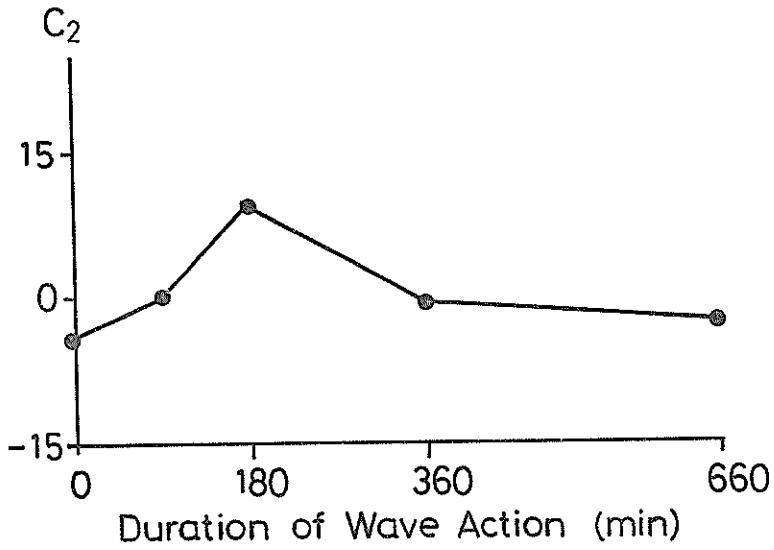


図-53 (1) c_2 の経時変化 (Case B-4)

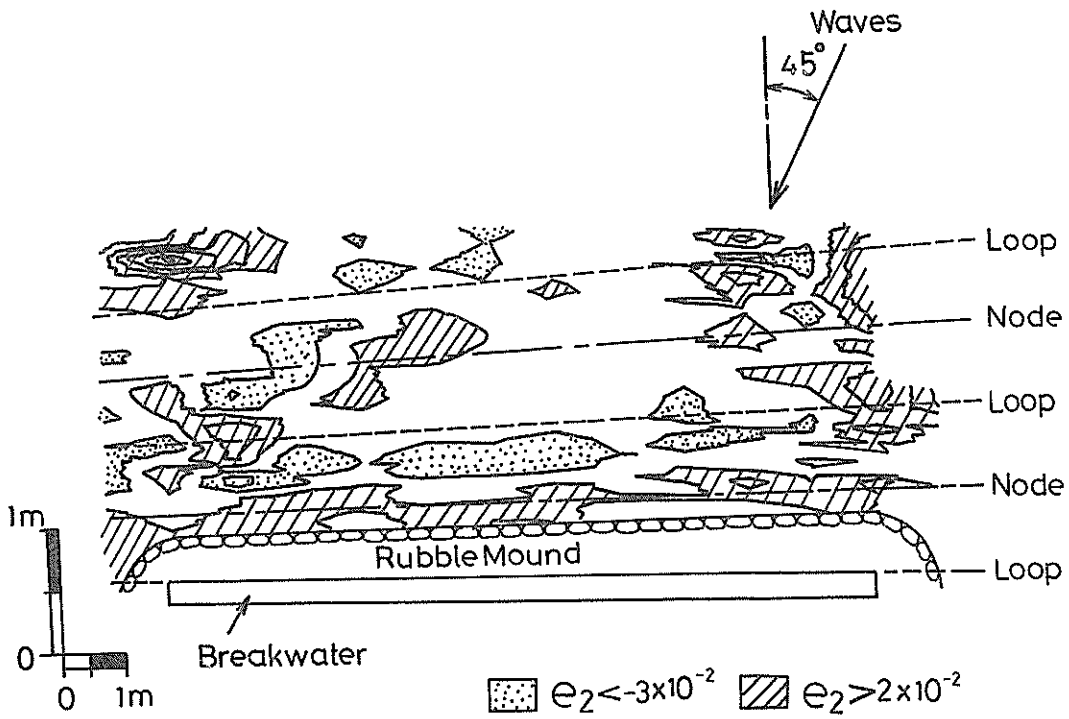


図-53 (2) e_2 の平面分布 (Case B-4)

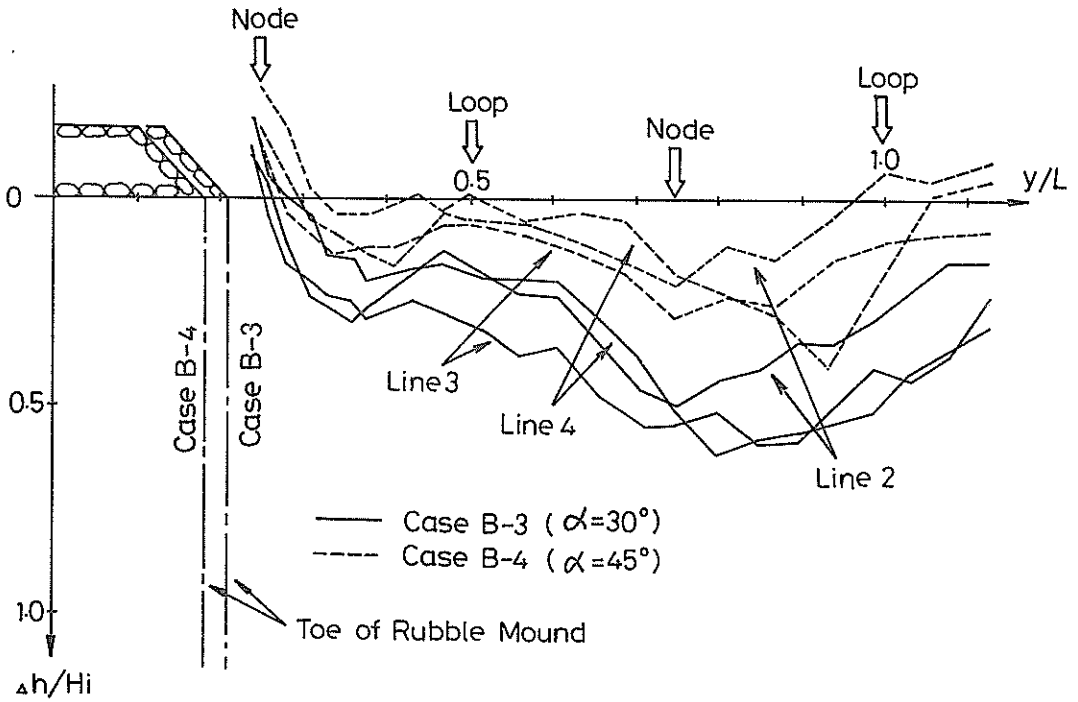


図-54 波向の違いによる海底地形変化の相違 (Case B-3 と Case B-4)

洗掘深のほうが波向 45° のときに比べて大きい。波向の洗掘深に及ぼす効果については、3.6 で検討する。

3.6 防波堤前面の洗掘に及ぼす波向の効果

防波堤前面の洗掘を、防波堤と直角方向の底質移動による洗掘と防波堤と平行方向の底質移動による洗掘に分けて考える。

まず、防波堤と直角方向の底質移動による洗掘について以下に示す方法で重複波の節の位置における洗掘深を推定する。海底地形変化量の計算は、基本的には底質の連続式を用いて行う。すなわち x 軸を防波堤と平行な方向、 y 軸を防波堤と直角な方向、 z を水深値としたとき

$$-\Delta z / \Delta t = (Q_y(j) - Q_y(j+1)) / \Delta y \quad \dots\dots(1)$$

となる。ここで $Q_y(j)$ は、 j 点における水深、波、流れにより定まる防波堤に直角方向の漂砂量で、

$$Q_y(j) = V \times \int_0^{\delta} c(j) dz' \quad \dots\dots(2)$$

となる。 V は反射率が 1.0 のときの防波堤に直角方向の境界層外縁の質量輸送速度、 $c(j)$ は j 点における浮遊砂濃度、 δ は境界層厚さで、それぞれ次に示される式で表される。

$$V = -\frac{\beta}{8\sigma} \cdot a_i^2 \cdot \left(\frac{g}{\sigma \cosh kh} \right)^2 \cdot 4(k^2 + 2\beta^2) \sin 2\beta y \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 $\sigma = 2\pi / T$

$k = 2\pi / L$

$\beta = k \cos \alpha_0$

α_0 ; 波の入射角

y ; 防波堤からの距離

a_i ; 入射波の振幅

$$c = c_{b1} \exp(-\beta c z') \quad \dots\dots(4)$$

ただし、 $c_{b1} = 5000 \times \varphi_m^{1.5}$

$$\varphi_m = f_w \cdot (\text{Max}\{u_b, v_b\})^2 / 2(s-1)gd_{50}$$

$$\beta c = \frac{1}{2\nu} \cdot \sqrt{\frac{f_w}{2}} \cdot \text{Max}\{u_b, v_b\} \cdot \beta_1 \cdot d_0$$

$$\beta_1 = 29.0 \times \left(\frac{\sqrt{\frac{f_w}{2}} \cdot \text{Max}\{u_b, v_b\} \cdot d_{50}}{\nu} \right)^{-2.2}$$

z' ; 水底からの高さ

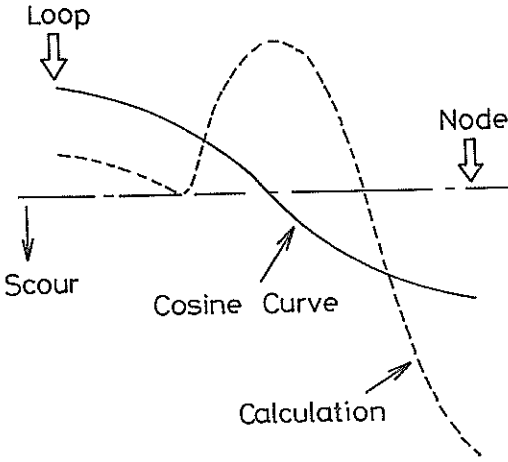
f_w ; Johnsson の粗度係数

u_b ; 水底における堤体に平行方向の最大水粒子速度

v_0 ; 水底における堤体に直角方向の最大水粒子速度
 $\text{Max}(a, b)$; a または b いずれか大の値
 s ; 底質比重
 d_{50} ; 底質の中央粒径
 w ; 底質の沈降速度

d_0 ; 水粒子軌道振幅
 ν ; 水の動粘性係数

$$\delta = 7.07 \sqrt{\frac{\nu T}{2\pi}} \quad \dots\dots(5)$$



式(1)による今回の計算では、水深変化をフィードバックすることを行わなかったため、計算結果は初期の洗掘速度を示していることになる。図-55の点線で示される曲線は波向30°のときの計算結果である。拡散現象を考慮していないため、現実には若干起りにくい形状となっている。そこで、この曲線を、洗掘孔の面積が等しくなるように cosine カーブに置きかえる。図-55の実線で示される曲線がそれである。このときの重複波の節の位置における洗掘深を、波向30°のときの初期洗掘速度と定義する。このようにして、種々の波向に対する洗掘深さを計算した結果を図-56に示す。この結果によれば、防波堤と直角方向の底質移動による洗掘については、波向0°のときの洗掘深がいちばん大きくなる。

続いて、防波堤と平行方向の底質移動による洗掘について考える。本研究ではのり先が重複波の節の位置近くにある混成堤式防波堤を対象としている。したがって、重複波の節の位置を中心とした $L/4$ の範囲の海底地形変化が特に重要となる。そこで、この領域における防波

図-55 海底地形変化の計算結果と修正曲線

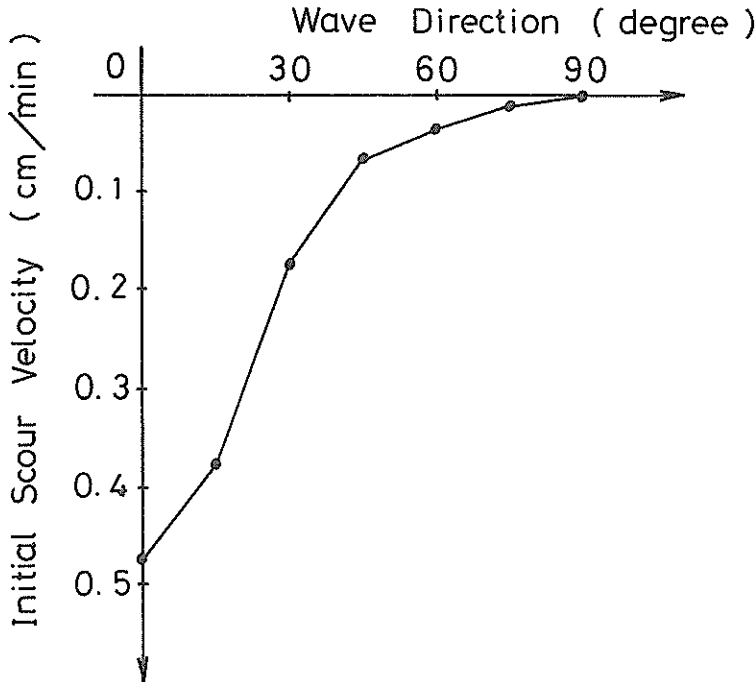


図-56 波向と初期洗掘速度との関係

堤と平行方向の漂砂量 $Q_{\frac{L}{4}}$ を計算する。

$$Q_{\frac{L}{4}} = \int_{\frac{3}{8}L}^{\frac{5}{8}L} Q_x(j) dy \quad \dots\dots(6)$$

ただし、 $Q_x(j)$ は j 点における防波堤に平行方向の漂砂量で次式で表される。

$$Q_x(j) = U \times \int_0^a c(j) dx' \quad \dots\dots(7)$$

U は防波堤に平行方向の境界層外縁の質量輸送速度を示し、

$$U = \frac{\alpha}{8\sigma} \cdot a_1^2 \cdot \left(\frac{g}{\sigma \cosh kh} \right)^2 \cdot (16\alpha^2 \cos 2\beta y + 4k^2 \cos 2\beta y + 20k^2) \quad \dots\dots(8)$$

で表される。ただし $\alpha = k \sin \alpha_0$ である。

図-57は、それぞれの波向に対する、重複波の節の位置を中心とした $L/4$ の領域における防波堤に平行方向の漂砂量を示したものである。波向 30° 付近にピークが

存在している。図-57に示したのは漂砂量そのものであるため直接には洗掘深に結びつかない。しかし、防波堤先端における進行波領域と重複波領域の境界では、進行波による漂砂が少ないため、洗掘深は漂砂量にほぼ比例すると考えることができる。すると、波向 30° 付近に防波堤に平行方向の底層平均流によって生ずる洗掘深の最大となる点が存在すると考えられる。

最後に、防波堤に直角方向の底質移動による洗掘と防波堤に平行方向の底質移動による洗掘を一つの現象にまとめることを考える。図-40より波向 30° のときの波作用 600 分後の堤体に直角方向の底質移動による洗掘深 $S_y(30)$ と堤体に平行方向の底質移動による洗掘深 $S_x(30)$ がわかる。一方、図-49より波向 45° のときの波作用 600 分後の、堤体に直角方向の底質移動による洗掘深 $S_y(45)$ と堤体に平行方向の底質移動による洗掘深 $S_x(45)$ がわかる。 $S_y(30) = 12.0(\text{mm})$ 、 $S_x(30) = 22.0(\text{mm})$ 、 $S_y(45) = 7.0(\text{mm})$ 、 $S_x(45) = 9.0(\text{mm})$ である。

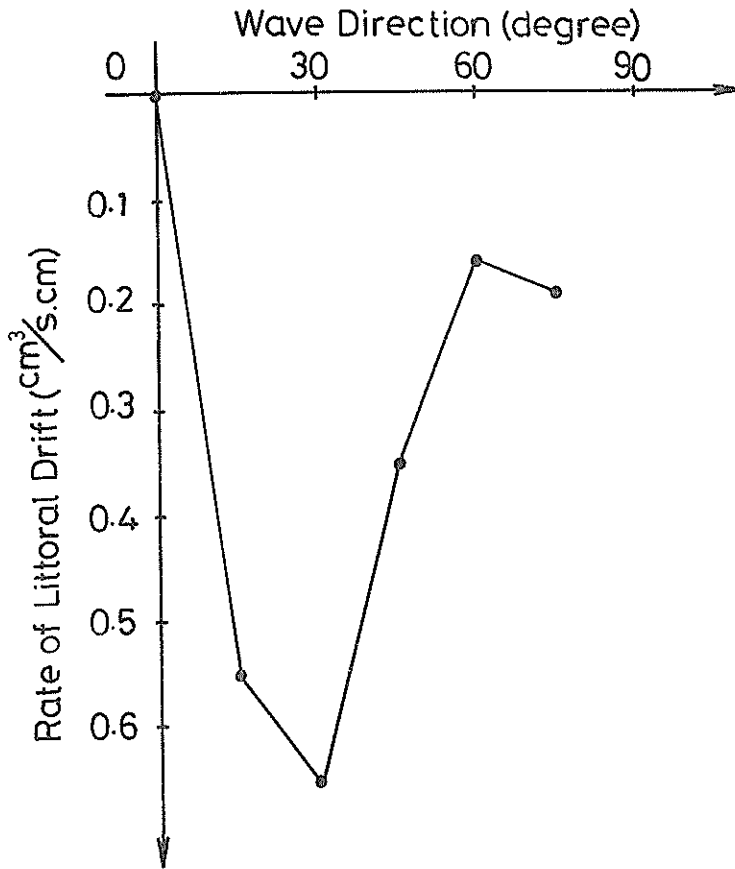


図-57 波向と漂砂量との関係 (その1)

堤体に直角方向の底質移動による洗掘深を比較すると、 $S_y(30) : S_y(45) = 0.63 : 0.37$ である。一方、式(1)によって求めた初期侵食速度 S_y' を比較すると、 $S_y'(30) : S_y'(45) = 0.73 : 0.27$ である。堤体に直角方向の底質移動による洗掘深について、実験値をもとにして得られた波作用 600 分後の洗掘深と計算で得られた初期侵食速度を比較すると、波向 30° の値と波向 45° の値の比率が非常に近い。このことは、波作用 600 分後洗掘深が初期侵食速度と比例する関係にあることを示していると考えられ、他の波向における洗掘深も初期侵食速度にある係数を掛けることによって求めることができると考えられる。

一方、堤体に平行方向の底質移動による洗掘深を比較すると、 $S_x(30) : S_x(45) = 0.71 : 0.29$ である。式(6)により求まる漂砂量 $Q_{\frac{L}{4}}$ を比較すると、 $Q_{\frac{L}{4}}(30) : Q_{\frac{L}{4}}(45) = 0.65 : 0.35$ である。堤体に平行方向の底質移動による洗掘深に関しては、実験値をもとにして得られた波作用 600 分後の洗掘深と計算で得られた漂砂量を比較すると、波向 30° の値と波向 45° の値の比率が互いに近い。このことは、波作用 600 分後の洗掘深が漂砂量に比例関係にあることを示していると考えられ、他の波向に

おける波作用 600 分後の洗掘深も漂砂量にある係数を掛けることによって求めることができる。

以上の考察より、堤体に直角方向の底質移動による洗掘深も、堤体に平行方向の底質移動による洗掘深も計算によってある程度の推定が可能であることが明らかになった。そこで、式(1)によって求まる初期侵食速度及び式(6)によって求まる漂砂量に適切な係数を掛け、実験室スケールで波作用 600 分後の洗掘深を求めると 図-58 のようになる。堤体に平行方向の底質移動による洗掘が波作用 600 分でも平衡に達していなかったため最大洗掘深に関する議論は行えないけれども、波向が 0° から 30° の間に防波堤前面の洗掘に関して最も危険な領域の存在することがうかがえる。

図-59には、重複波の腹の位置を中心とした $L/4$ の範囲における防波堤と平行方向の漂砂量 $Q_{\frac{L}{2}}$ を示す。波が防波堤に対して平行に近く入射するほど、重複波の腹の位置を中心とした領域では漂砂量の増すことがわかる。このことは、防波堤がマウンドを有しない直立堤の場合、これまで述べたマウンド有りの場合と異なって、防波堤に対して波が斜めから作用するほど洗掘に関して危険である可能性を示している。

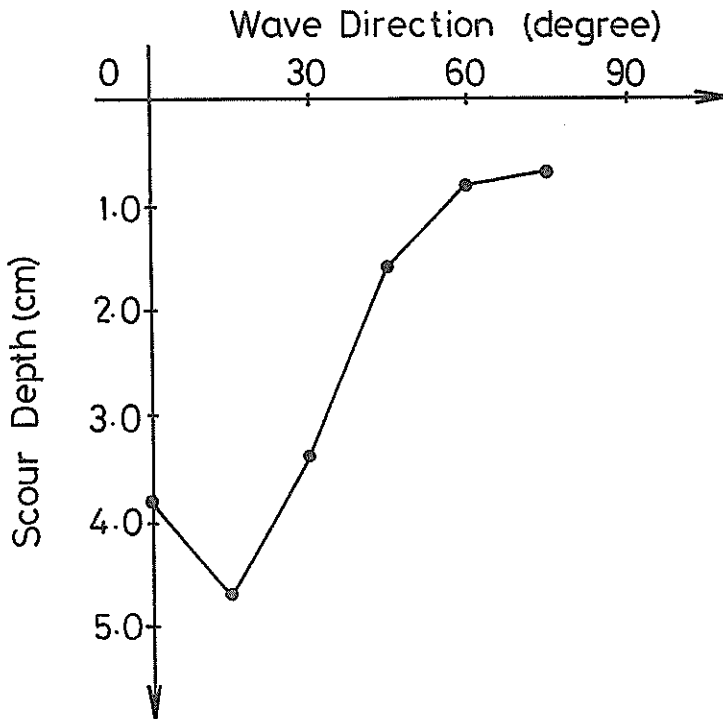


図-58 計算による波作用 600 分後の洗掘深と波向との関係

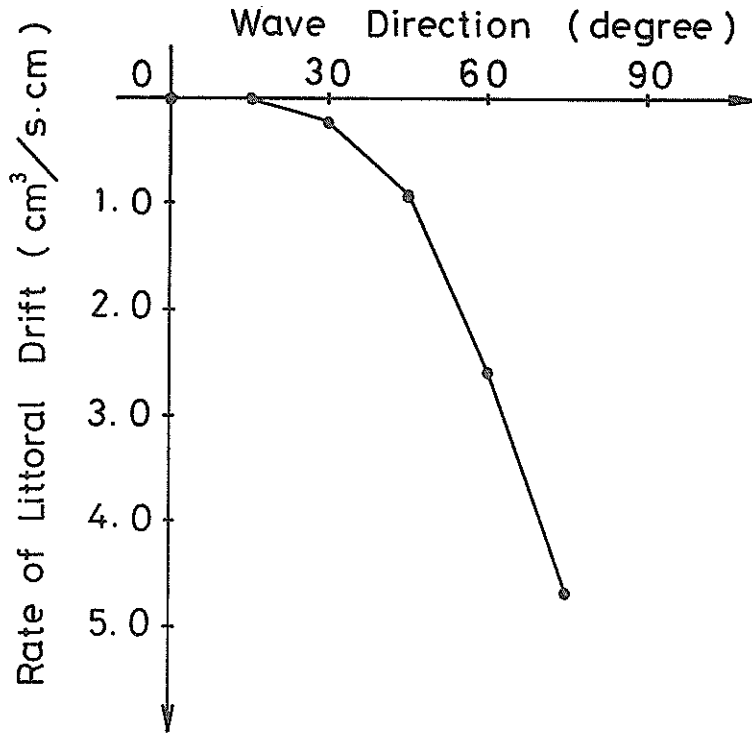


図-59 波向と漂砂量との関係(その2)

4. 重複波の下での底質の移動特性を利用した洗掘対策工法の実験的検討

4.1 洗掘対策工の特徴

従来までの洗掘対策工は、マウンドのり先を強化アスファルトマットで覆ったり、あるいは石かごをのり先に置くなどの工法であったけれども、それらが必ずしも洗掘対策工として有効に働いているわけではなかった。そこで、本研究では二次元実験の結果明らかになった重複波の下での底質の移動特性を利用した洗掘対策工を提案し、その洗掘防止効果を実験的に調べた。

2. の図-2 に示されるように、L-タイプ洗掘では重複波の節の位置で著しい洗掘が発生し、防波堤のマウンドのり先がこの位置にあるとき被害を受けていた。ところで、 $u_b/w < 10$ であれば、底質は波の非線型性の影響を強く受けて重複波の腹の位置から節の位置へ移動する。したがって、防波堤マウンドのり先が節の位置に当たるとき、 $u_b/w < 10$ となるグラベルをのり先に敷くとグラベルはのり先にとどまり、その下の底質の浮遊をおさえのり先洗掘を防止すると考えられる。

4.2 実験施設及び実験方法

(1) 実験水路

対策実験は、模型縮尺を 1/50 及び 1/25 として行った。模型縮尺 1/50 の場合には、実験水路として、図-60 に示すような長さ 25 m、幅 1 m、高さ 0.62 m、片面ガラス張りの二次元水路を仕切り板によって二分したものを使用した。模型縮尺 1/25 の場合には、図-61 に示す長さ 40 m、幅 1.5 m、高さ 1.5 m、片面ガラス張りの二次元水路を使用した。

(2) 実験に使用した防波堤断面

今回の実験では、堤体設置水深 15 m の防波堤を想定し、その断面を、いくつかの実例を参考にして図-62 のように決定した。ただし図中の数字は現地換算値である。実験では、この断面をそれぞれの模型縮尺によって縮小した断面を使用した。

捨石マウンドは粒径 2~3 cm の碎石で作成し、堤体は木製とし、中に石を詰めて沈めた。堤体と水路の間は、水が透過できないようにシーラントで埋め、堤体の天端高は越波を許さないように決定した。

根固め工としては、4.5(m)×3.5(m)×1.5(m) 重さ 55t/個 (いずれも現地換算値) のものを、被覆工としては、高さ約 1.6 m 重さ 8 t/個 (いずれも現地換算値) の

重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究

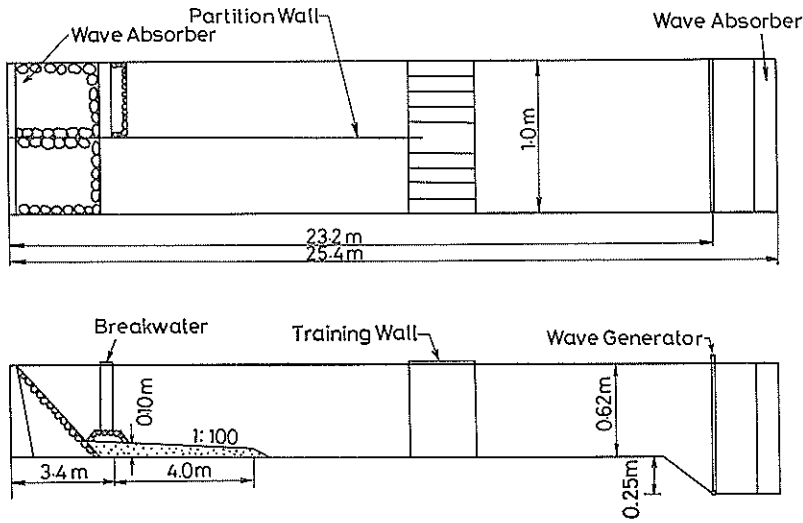


図-60 実験水路 (模型縮尺 1/50)

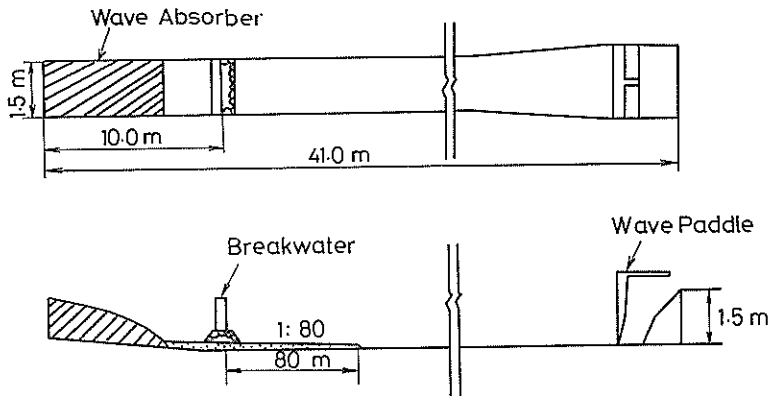


図-61 実験水路 (模型縮尺 1/25)

ものを、それぞれ模型縮尺によって縮小したものを使用した。

(3) 実験波

実験波の選定に当たって以下の二点を考慮した。

- イ) 波の周期が洗掘場所を支配するので、比較的頻繁に来る時化の周期を実験波の周期として選択する。
- ロ) 対策工を施さない標準断面における洗掘深ができるだけ大きくなるように、マウンド被覆工の設計波より小さい条件で発生可能な大きな波高を選択する。

その結果、現地換算値で、防波堤設置水深 15 m にお

いて入射波高 7 m、周期 10 s の規則波を、フルードの相似則によって縮小した表-3の値の波を実験波とした。実験波の防波堤設置水深における波長は、いずれの場合も現地換算値で 108 m となり、重複波の節の位置とのり先が一致した。

(4) 底質

重複波による堤体前面の洗掘実験を行う際、現地を比較的良く再現するためには、 u_b を進行波の底面における水粒子速度の最大値、 w を底質の沈降速度としたとき $u_b/w > 10$ を満足する必要があることが二次元実験²⁾ より明らかになっている。本実験でもこのことを考慮して、模型縮尺 1/50 の実験では、中央粒径 0.07 mm 珪砂

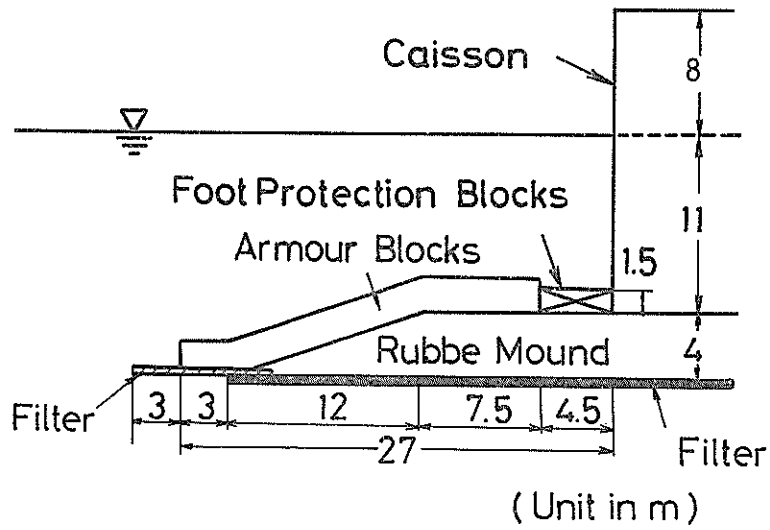


図-62 実験に使用した防波堤断面

表-3 洗掘対策実験における実験ケース

実験 ケース	縮 尺 S	波 高		周 期		底 質 粒 径 d (cm)	グ ラ ベ ル	
		模 型 H_m (cm)	(現地) (H_p) (m)	模 型 T_m (s)	(現地) (T_p) (s)		粒 径 d_g (cm)	厚 さ t_h (cm)
C-1	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007		
C-2	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.1 ~ 0.25	1
C-3	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.1 ~ 0.25	2
C-4	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.1 ~ 0.25	3
C-5	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.25 ~ 0.5	1
C-6	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.25 ~ 0.5	2
C-7	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.5 ~ 1.0	1
C-8	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.5 ~ 1.0	2
C-9	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.5 ~ 1.0	3
C-10	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	1.0 ~ 2.0	2
C-11	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	2.0 ~ 3.0	2
C-12	1/50	14.0	7.0	1.83	13.0	0.007	0.25 ~ 0.5	2
C-13	1/50	14.0	7.0	1.41	10.0	0.007	0.1 ~ 0.25	2
		14.0	7.0	1.41	10.0			
D-1	1/25	20.0	5.0	2.0	10.0	0.014		
D-2	1/25	20.0	5.0	2.0	10.0	0.014	1.39 ~ 2.04	4
D-3	1/25	20.0	5.0	2.0	10.0	0.014	0.70 ~ 0.83	4
D-4	1/25	20.0	5.0	2.0	10.0	0.014	0.45 ~ 0.70	4

($u_b/w=80.0$) を使用し、模型縮尺 1/25 の実験では、中央粒径 0.14 mm の砂 ($u_b/w=24.0$) を使用した。模型断面では、底質を 1/100 勾配で敷きならした。

(5) 波作用時間及び各種測定

波は 600 分間作用させ、波作用 45 分、90 分、180 分、360 分、600 分後に地形測量を行った。

地形測量は、水路ガラス壁に物差しを当て、模型縮尺 1/50 の場合、2.5 cm 間隔で行い、模型縮尺 1/25 の場合、5 cm 間隔で行った。

波高測定は波作用 360 分から 600 分の間に、模型縮尺 1/50 の場合には 5 cm 間隔で、模型縮尺 1/25 の場合には 10 cm 間隔で行った。

防波堤の安定性の低下は、洗掘に引き続いて起こる被覆工・根固め工の散乱によって生ずるので、波作用 600 分後に排水し、被覆工・根固め工の移動状況を水路上方及び側方からスケッチによって記録した。

4.3 実験ケース

実験ケースは表-3に示されるとおりである。実験は模型縮尺 1/50 の場合と模型縮尺 1/25 の場合に大別され、それぞれの場合において、まず洗掘対策工を施さない標準断面において実験を行いその後 図-63 に示す対策工を施した断面において実験を行った。

本実験では対策工の幅を現地換算値 8 m に固定し、厚さと粒径を変化させてその洗掘防止効果を調べた。Case C-12, C-13 では、堤体設置水深における現地換算波高 7.0 m、周期 13.0 s の波を 10 時間作用させ、後に波高 7.0 m、周期 10.0 s の波を 10 時間作用させ、周期の異

なる波に対する対策工の安定を調べた。

4.4 中型実験によるグラベルの洗掘防止効果の検討

(1) 標準断面における実験結果 (Case C-1)

図-64(1)に対策工を施さない標準断面と波作用 360 分から 600 分にかけて測定した波高分布を示す。洗掘防止工を施さない標準断面では、図-64(2)に示すように、波作用 45 分後ですでに重複波の節の位置にあたるのり先で 3 cm 近い洗掘が起こっていた。しかし、被覆工・根固め工は移動したものの横転してはなかった。

波作用 90 分後には図-64(3)に示すように洗掘深が 3.5 cm にもなり、被覆工の横転も見られ、のり先の被覆工のなかには移動、横転によってフィルターからはずれて砂地盤の上に直接載ってしまったものがあった。

波作用時間が長くなるとともに更に洗掘が進行し、被覆工の移動・横転による散乱も激しくなり、波作用 600 分後には 図-64(4) に示す状態となった。図の上段は水路上方から見た被覆工の散乱状況であり、下段は水路側壁から見た断面図である。この断面における被覆工の散乱状況は、図-65に示す日本海に面したある港の防波堤における被覆工の散乱状況とのり先から崩壊している点で比較的良く似ている。

(2) グラベルを設置した断面における実験結果

混成堤式防波堤の捨石マウンドのり先の底質の大きさが $u_b/w < 10$ の条件にあれば、底質は N-タイプ移動を示し、のり先は洗掘されないことが期待できる。そこで、 $u_b/w < 10$ であるグラベルをのり先に敷いた場合の洗掘防止効果に関する一連の実験を行ったが、その結果

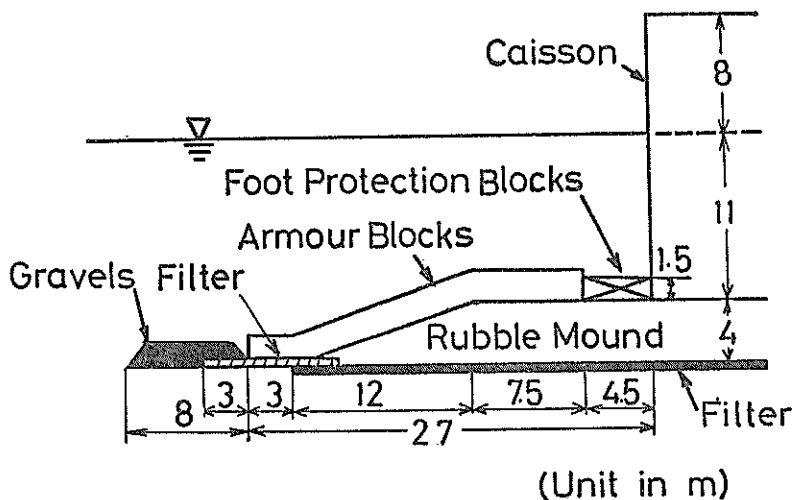


図-63 洗掘対策工を施した防波堤断面

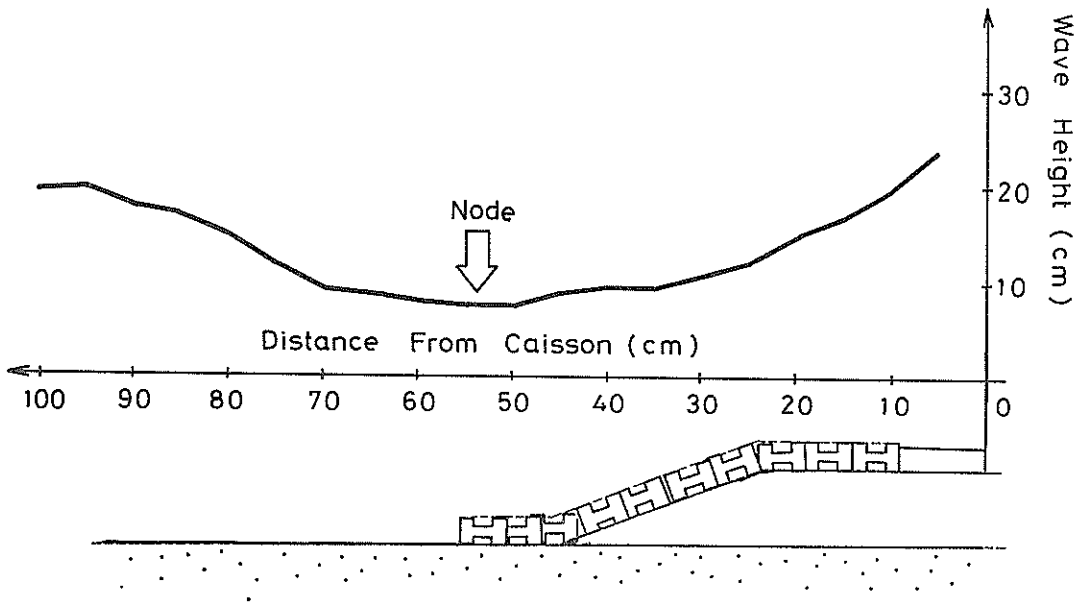


図-64 (1) 標準断面と波高分布 (Case C-1)

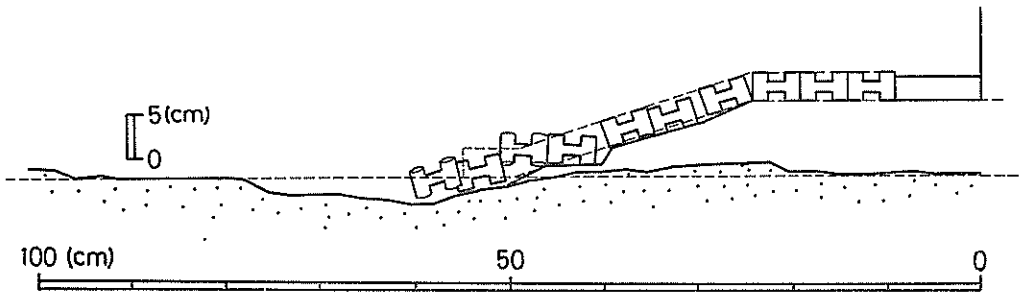


図-64 (2) 波作用 45 分後の断面 (Case C-1)

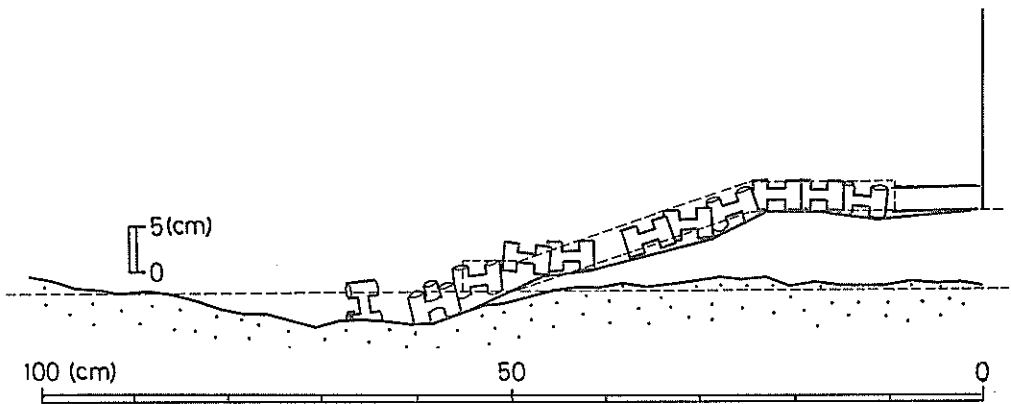


図-64 (3) 波作用 90 分後の断面 (Case C-1)

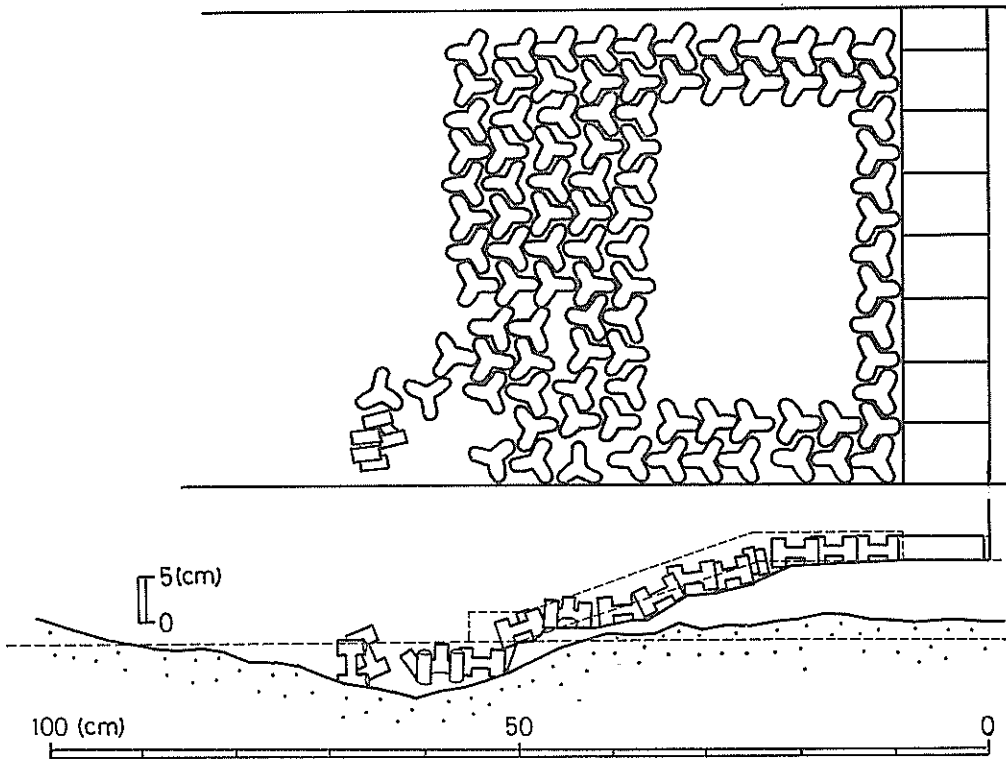


図-64 (4) 波作用 600 分後の海底地形及び被覆工の散乱状況 (Case C-1)

からグラベルの洗掘防止効果を以下の 3 ランクに大別できる。

ランク A；被覆ブロックはほとんど移動しておらず、グラベルの洗掘防止効果が非常にあったケース。

ランク B；被覆ブロックの移動が見られるものの、その移動はのり先のブロックに限られ、ブロックの散乱が防波堤本体の安定性には影響しないと考えられる。グラベルの洗掘防止効果が比較的あったケース。

ランク C；被覆ブロックの移動がのり肩付近にまで及び防波堤本体の安定性の低下につながると考えられる。グラベルの洗掘防止効果がなかったケース。

以上の 3 ランクを、代表的な実験結果を用いて具体的に説明する。

ランク A；Case C-6 図-66(1)に示すように、粒径 2.5~5.0(mm) のグラベルを厚さ 2.0(cm) で敷いたときの結果について述べる。

波作用前には厚さ 2 cm あったグラベルは、波作用 45

分後には、図-66(2)に示すように厚さが 1 cm にまでなり、のり先よりもやや防波堤寄りの地点（防波堤より約 50 cm）から防波堤より約 75 cm の地点まで幅広く分布している。このときのり先洗掘は起こっていない。のり先から 3 列目のブロックが若干沈下しているものの、のり先洗掘が原因ではなく、ほとんど無視できると考えられる。

波作用 360 分後には図-66(3)に示すようにのり先で約 5 mm 程度の洗掘が発生したけれども、被覆工の移動・沈下には至っていない。

波作用 600 分後には図-66(4)に示す状態となった。グラベルはのり先にとどまり、被覆工はほとんど移動しておらず、グラベルが洗掘防止に効果のあったことがわかる。

ランク B；Case C-7 図-67(1)に示すように、粒径 5.0~10.0 (mm) のグラベルを厚さ 1 cm で敷いたときの結果について述べる。

本ケースは、初めフィルターを図-63のように設置して実験を行ったけれども、グラベルがフィルターの下にもぐり込み、ころのような働きをしたため、フィルター

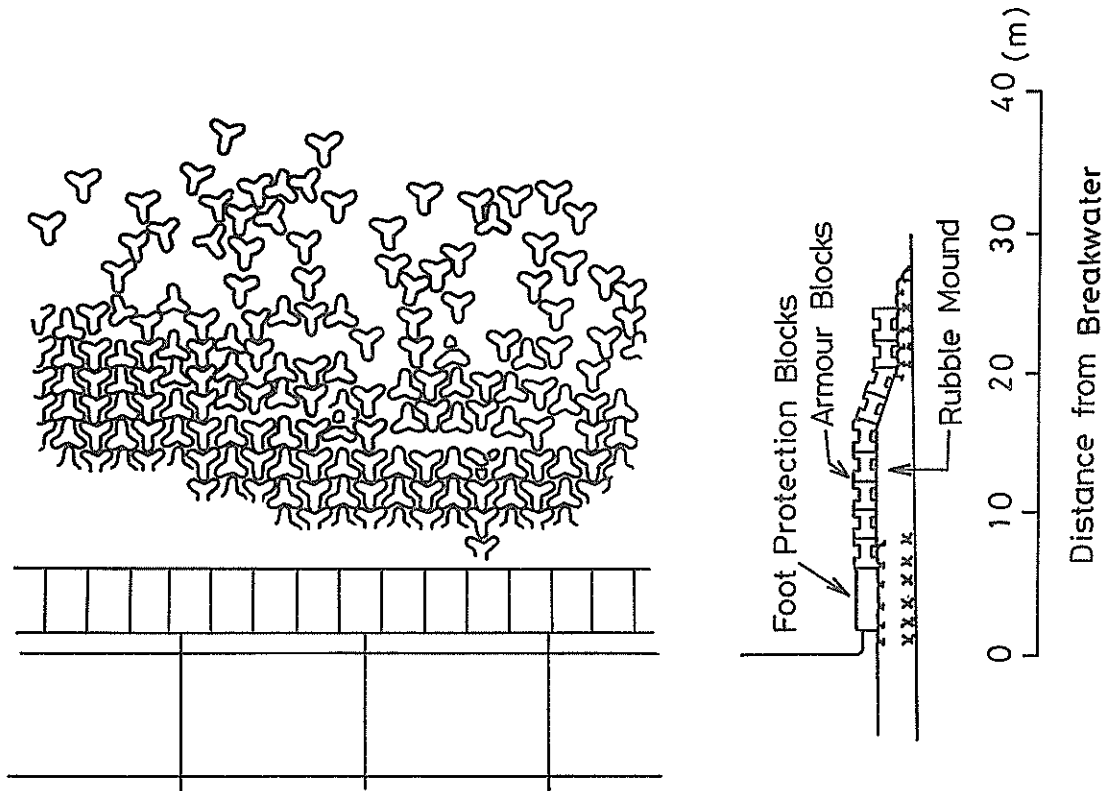


図-65 現地における被覆工の散乱状況

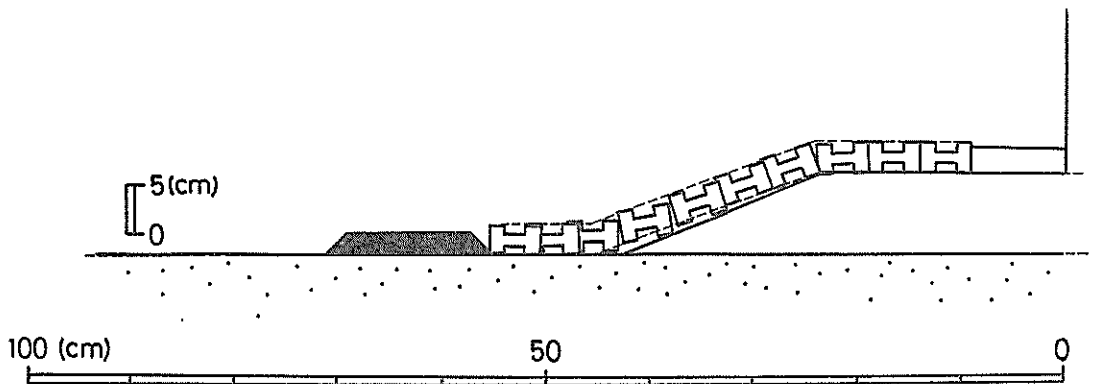


図-66 (1) 波作用前の断面 (Case C-6)

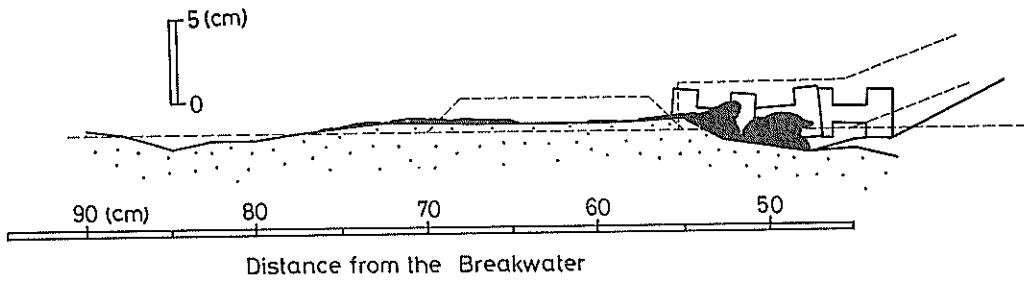


図-66 (2) 波作用 45 分後ののり先 (Case C-6)

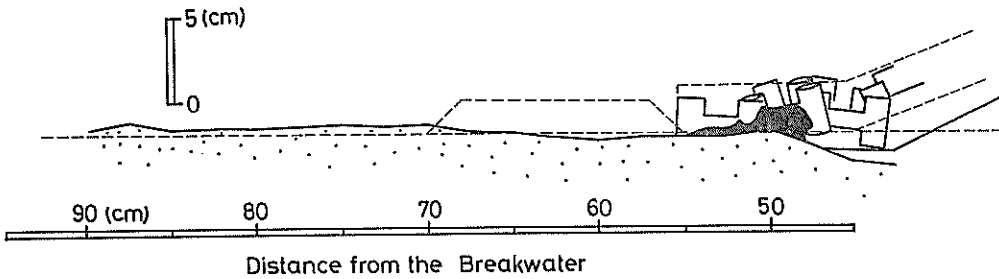


図-66 (3) 波作用 360 分後ののり先 (Case C-6)

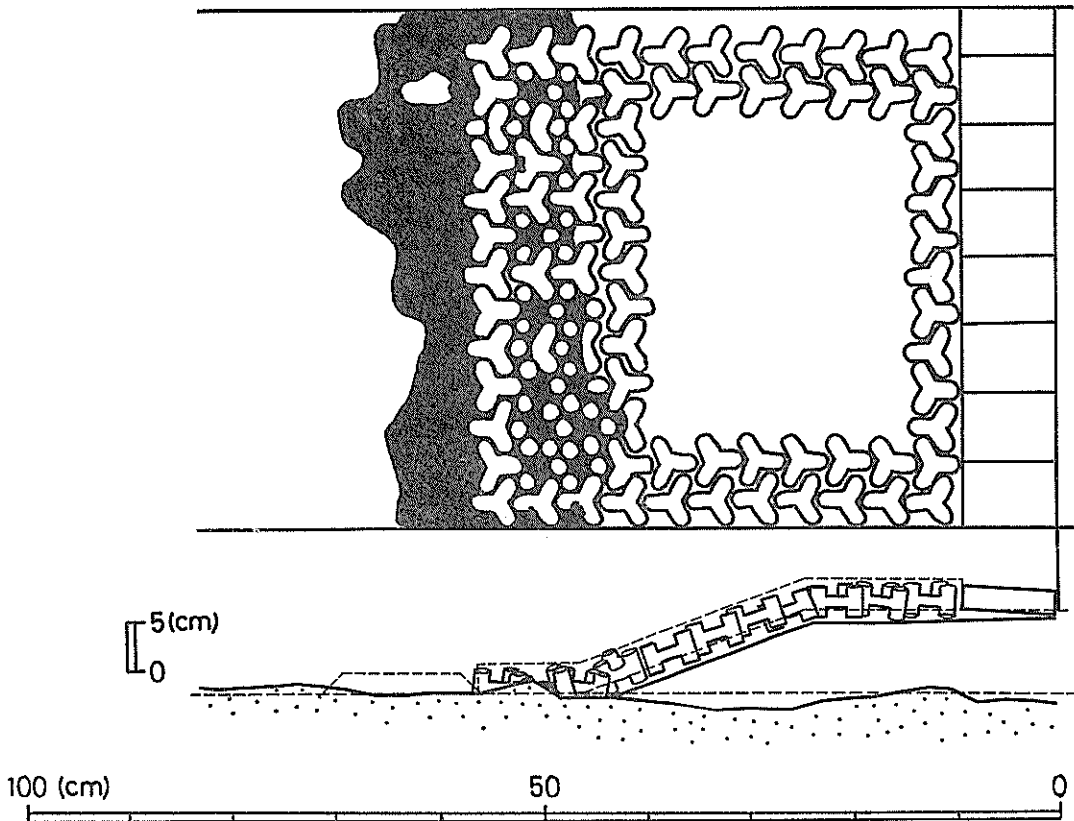


図-66 (4) 波作用 600 分後の海底地形及び被覆工の散乱状況 (Case C-6)

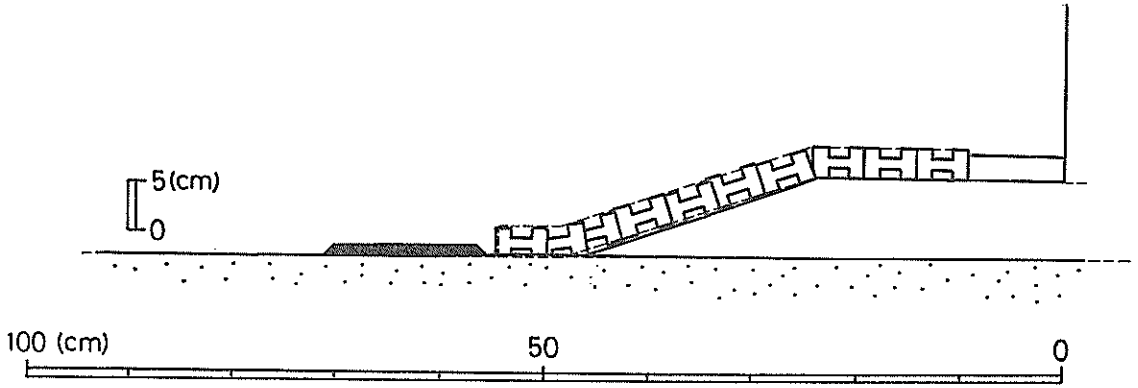


図-67 (1) 波作用前の断面 (Case C-7)

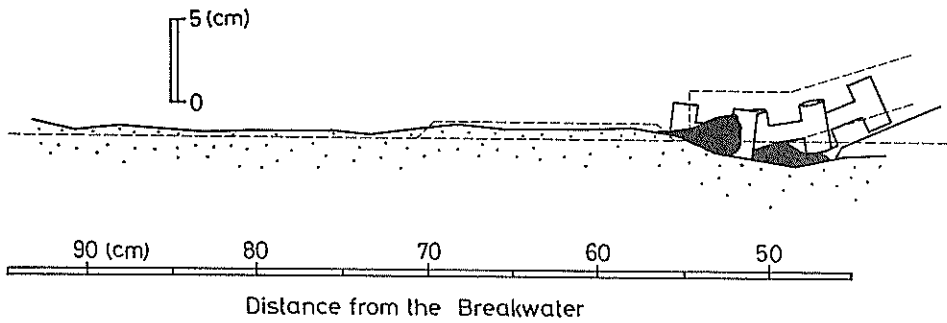


図-67 (2) 波作用 45 分後ののり先 (Case C-7)

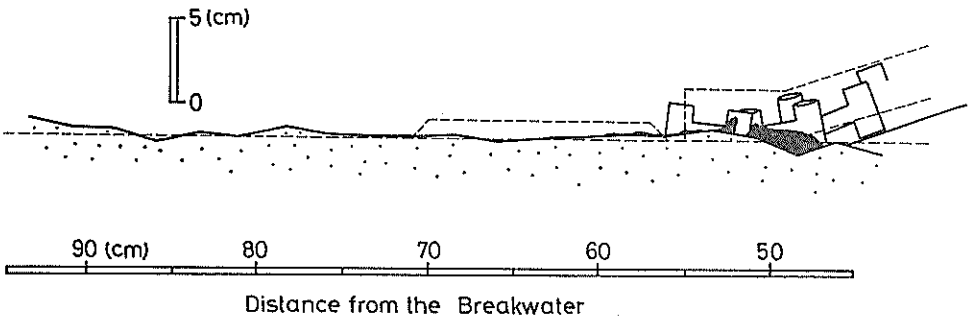


図-67 (3) 波作用 180 分後ののり先 (Case C-7)

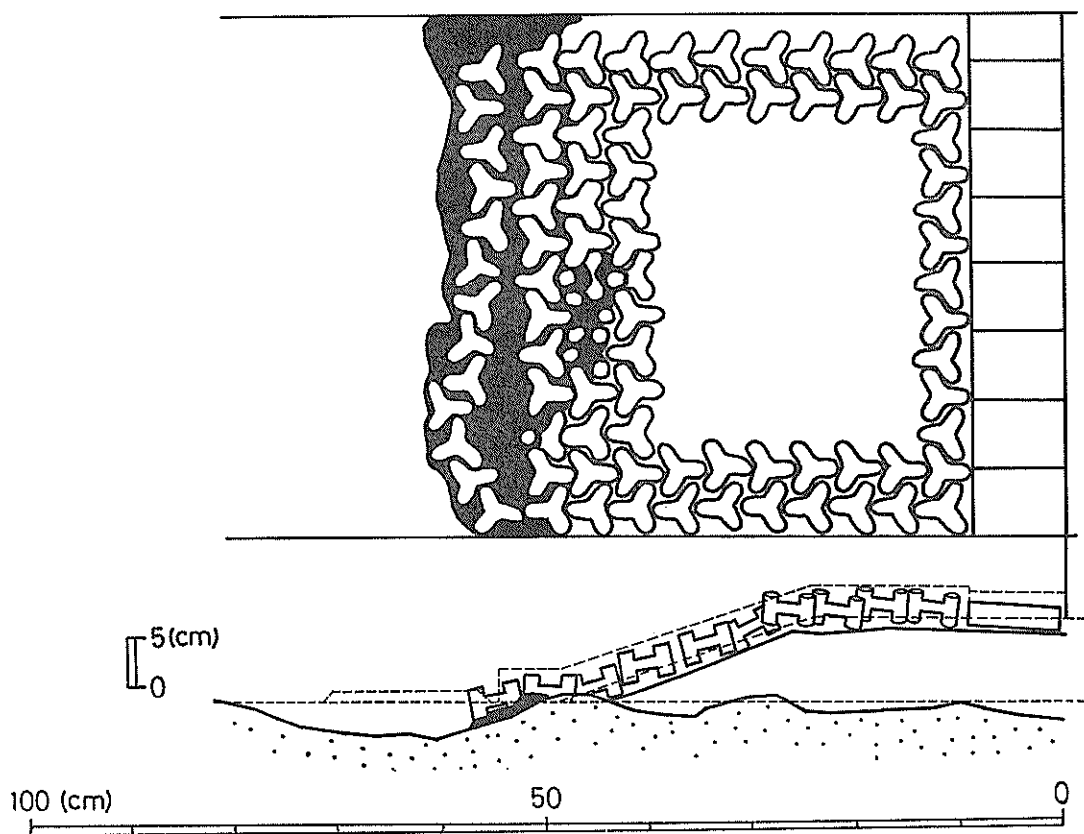


図-67 (4) 波作用 600 分後の海底地形及び被覆工の散乱状況 (Case C-7)

が波作用中に抜けてしまい、その上の被覆工も洗掘と別の原因で、散乱してしまった。そこで、本ケースはフィルターなしで実験を行った。

波作用直後に、まずのり先の被覆工直下が洗掘され始め、その後しだいに洗掘孔が発達し、波作用 45 分後には図-67(2)に示すように大きいところで 2 cm に達する洗掘孔となり、のり先および 2 列めの被覆工が若干沈下している。グラベルの一部は防波堤寄りに移動し、洗掘孔を覆っている。

波作用 180 分後には、図-67(3)に示すように、被覆工直下の洗掘孔は砂で埋まり、のり先よりもやや沖側の領域で海底がしだいに洗掘され始めている。ガラス面から見るかぎり、グラベルは大部分がのり先よりも防波堤寄りの被覆工の間に入り込んでいる。

その後、波作用時間の増大とともに洗掘が進行し、波作用 600 分後には図-67(4)に示す状態となった。のり先の被覆工は移動・沈下しているものの 2 列め以降の被覆工はほとんど移動しておらず、しかも被覆工の間にグラ

ベルが詰まり非常に動きにくい状態となっている。のり先被覆工の移動・沈下はあるものの、防波堤本体の安定性には影響しないと考えられ、グラベルの洗掘防止効果が比較的あったことがわかる。

ランク C ; Case C-3 及び Case C-11 図-68(1)に示すように、粒径 1.0~2.5(mm)のグラベルを厚さ 2.0(cm)で敷いた Case C-3 の結果についてまず述べる。波作用直後からのり先に敷いたグラベルは二つに分かれ、一方は防波堤寄りに移動し被覆工の下にもぐり込み、他方は少し沖側に移動した。そのためのり先から約 5 cm 沖側の地点 (防波堤から約 60 cm) のグラベルがなくなり、そこから洗掘が発生した。波作用 45 分後には、図-68(2)に見られるような洗掘状況となったけれどものり先にはまだグラベルが存在するためのり先洗掘は発生しておらず、被覆工の移動・沈下もなかった。

図-68(3)に示す波作用 180 分後では、のり先の被覆工が洗掘孔に滑り落ちており、のり先から 2 列めの被覆工の下も洗掘され始めている。

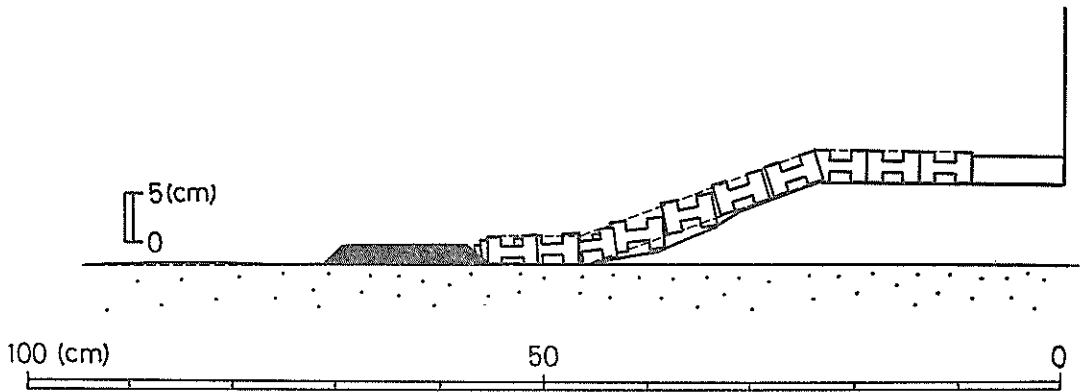


図-68 (1) 波作用前の断面 (Case C-3)

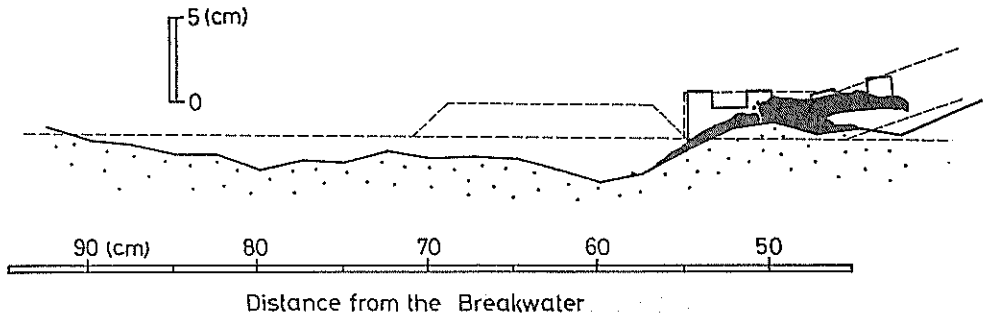


図-68 (2) 波作用 45 分後ののり先 (Case C-3)

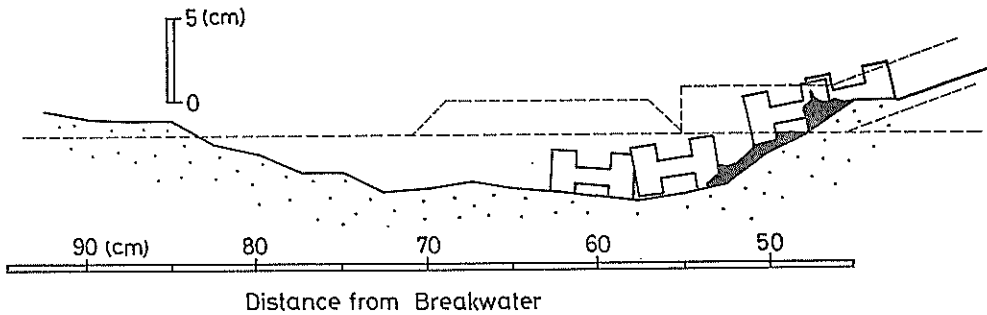


図-68 (3) 波作用 180 分後ののり先 (Case C-3)

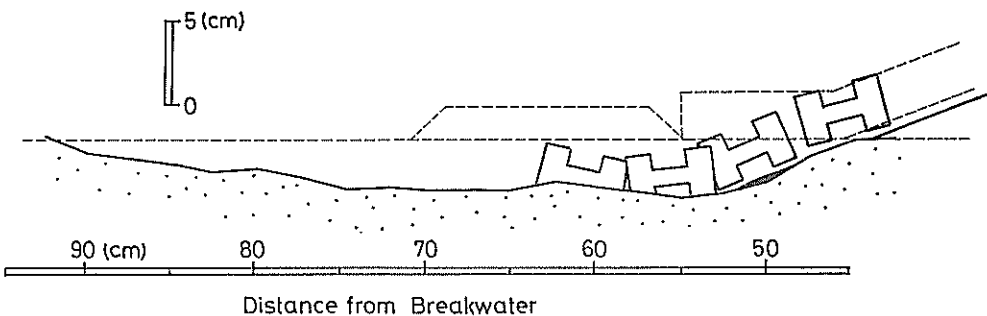


図-68 (4) 波作用 360 分後ののり先 (Case C-3)

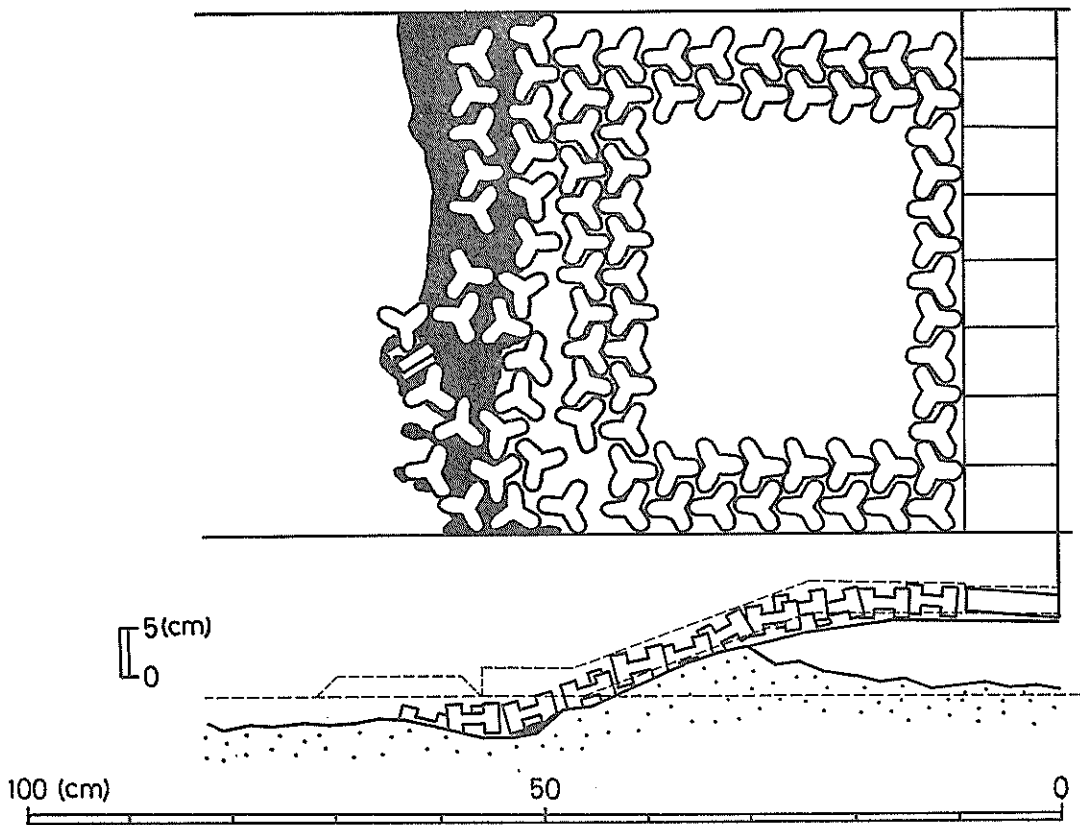


図-68 (5) 波作用 600 分後の海底地形及び被覆工の散乱状況 (Case C-3)

波作用 360 分後には、図-68(4)に示すようにのり先から第 2 列めの被覆工も洗掘孔に滑り落ちている。しかし、グラベルが洗掘孔を覆っているため、のり先洗掘はそれほど進行していない。

波作用 600 分後の状況は図-68(5)に示すとおりであるが、被覆工はのり先から 2 列めにかけて散乱しており、グラベルの洗掘防止効果のなかったことがわかる。このケースでは、グラベルの中心は重複波の節の位置を中心に存在しているものの、グラベルそのものがのり先より防波堤寄り、あるいは沖側に移動してしまい、のり先のグラベルが少なくなり、すき間から底質が吸い出され洗掘が発生したものと考えられる。

次に図-69(1)に示すように粒径 20.0~30.0(mm)のグラベルを厚さ 2 cm にして設置した Case C-11 の結果について述べる。

波作用 45 分後の状況を図-69(2)に示す。グラベルは全く移動していないものの、グラベルのすき間が大きいためそこから底質が吸い出され波作用 45 分後ですでの

り先において 4 cm 近い洗掘が見られる。

波作用 270 分後には、図-69(3)のようになり、グラベルの洗掘防止効果のなかったことがわかる。このケースでは、グラベルは移動しないものの、グラベル間のすき間が大きく、そこから底質が吸い出され洗掘深が発生したと考えられる。

Case C-1 から Case C-11 を以上の 3 ランクに分類し、グラベルの粒径と量で整理した結果を図-70に示す。縦軸はグラベルの単位幅当たりの体積 Volume (cm^3/cm) を、底面における水粒子軌道振幅 a_m (cm) の 2 乗で無次元化した値で、横軸はグラベルの中央粒径 d_{050} (cm) を入射波高 H_i (cm) で無次元化した値である。ただし、 a_m は次式で表される。

$$a_m = a_i / \sinh(kh) \quad \dots\dots(9)$$

a_i ; 入射波の振幅

$k = 2\pi/L$

L ; 波長

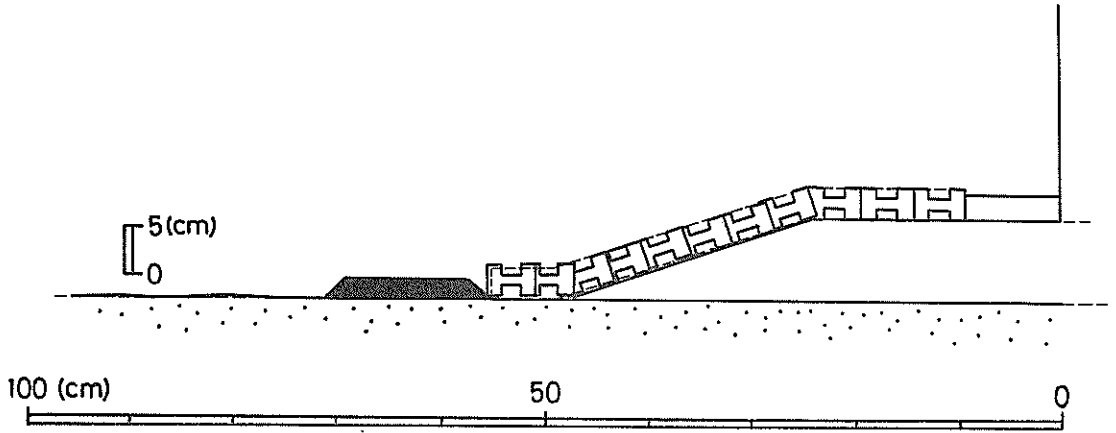


図-69 (1) 波作用前の断面 (Case C-11)

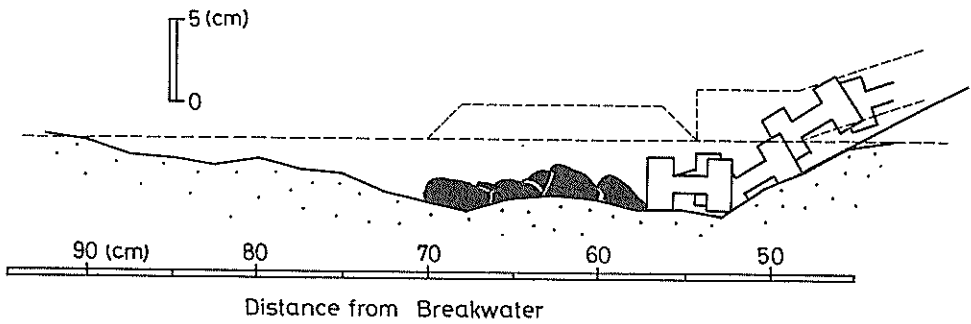


図-69 (2) 波作用 45 分後ののり先 (Case C-11)

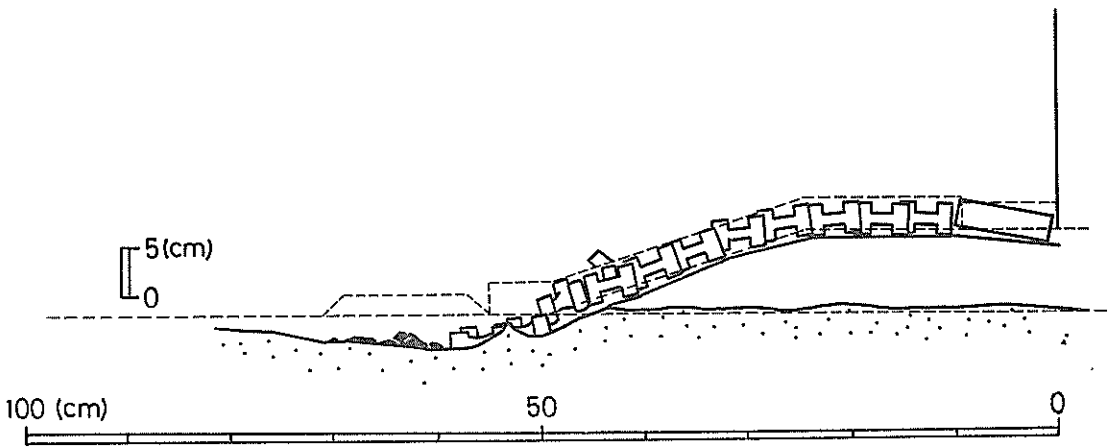


図-69 (3) 波作用 270 分後の断面 (Case C-11)

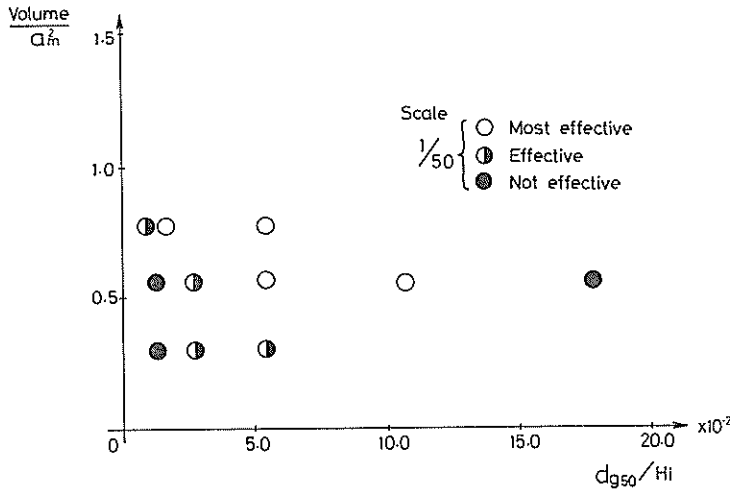


図-70 グラベルの諸元と洗掘防止効果との関係 (その1)

h ; 水深

d_{g50}/H_i が小さい領域および Volume/a_m^2 が小さい領域においてグラベルの洗掘防止効果が認められなかったケースは、Case C-3 に代表されるようにグラベルが分散してしまったために洗掘が発生したケースであり、 d_{g50}/H_i が大きい領域で洗掘防止効果が認められなかったケース (Case C-11) は、グラベル間のすき間から底質が吸い出されたことによって洗掘が発生したケースである。したがって、グラベルがのり先の洗掘を防止するためには、グラベルが分散しにくいこと、のり先にとどまりのり先の底質を被覆した状態で維持できるように十分な量があること、さらにはグラベルの粒径がその下の底質の浮遊・吸い出しを防ぐことができるように十分小さいことの三つの条件が必要と考えられる。図より、これらの条件を満たしグラベルの洗掘防止効果のある範囲が、 $3.0 \times 10^{-2} < d_{g50}/H_i < 15.0 \times 10^{-2}$ 、 $0.5 < \text{Volume}/a_m^2$ であることがわかる。

4.5 周期が変化したときのグラベルの安定性の検討

本章で対象としている洗掘対策工法は、 $u_b/w < 10$ なる物質の重複波の節の位置に集まる特性を利用している。したがって、例えば、周期が 10(s) の重複波の節の位置とのり先が一致する防波堤においてのり先にグラベルを設置したとき、時化時に周期が 13(s) の波が来襲すると重複波の節の位置がのり先より沖側の位置となり、グラベルはのり先より沖へ移動すると考えられる。するとのり先のグラベルの量が少なくなっているため、この状態で周期が 10(s) の波が来襲するとこの状態で洗掘の発生する可能性がある。そこで、実験では、まず周期

1.84(s) (現地換算値 $T_p=13.0$ s) 堤体設置水深における波高 14.0 cm (現地換算値 7.0 m) の波を 10 時間作用させ、その後、周期 1.41(s) (現地換算値 $T_p=10.0$ s)、堤体設置水深における波高 14.0 cm (現地換算値 7.0 m) の波を 10 時間作用させ、グラベルの挙動と海底地形変化を調べた。

(1) グラベルの粒径が大きい場合 (Case C-12)

図-71(1)に示すように、粒径 2.5~5.0(mm) のグラベルを厚さ 2 cm にしてのり先に設置した Case C-12 の結果について述べる。図-71(1)には、周期が 1.84(s) ($T_p=10.0$ s) のとき、周期が 1.41(s) ($T_p=13.0$ s) のときの波高分布も合わせて示してある。このケースは、単一の規則波を作用させた場合には、Case C-6 に相当し、洗掘対策として非常に有効であったランク A のケースである。

周期 1.84(s) (現地換算値 $T_p=13.0$ (s)) の波を 45 分間作用させた後の断面図を図-71(2)に示す。グラベルの厚さは約 1 cm になったものの、大部分が初期設置位置にとどまり、しかものり先は堆積領域となっている。グラベルの存在する領域が堆積領域となる現象は、その領域の底質の浮遊がグラベルによって押さえられたため浮遊砂濃度がまわりに比べて小さくなり、拡散現象によって運ばれてきた底質が堆積したためと考えられる。

その後、波作用時間を増してものり先はそれほど侵食されず、 $T_p=13.0$ (s) の波を 600 分作用させた後の状況は図-71(3)のようになった。グラベルはやや沖側に分散しているものの大部分は初期設置位置にとどまり、のり先は堆積領域となっている。

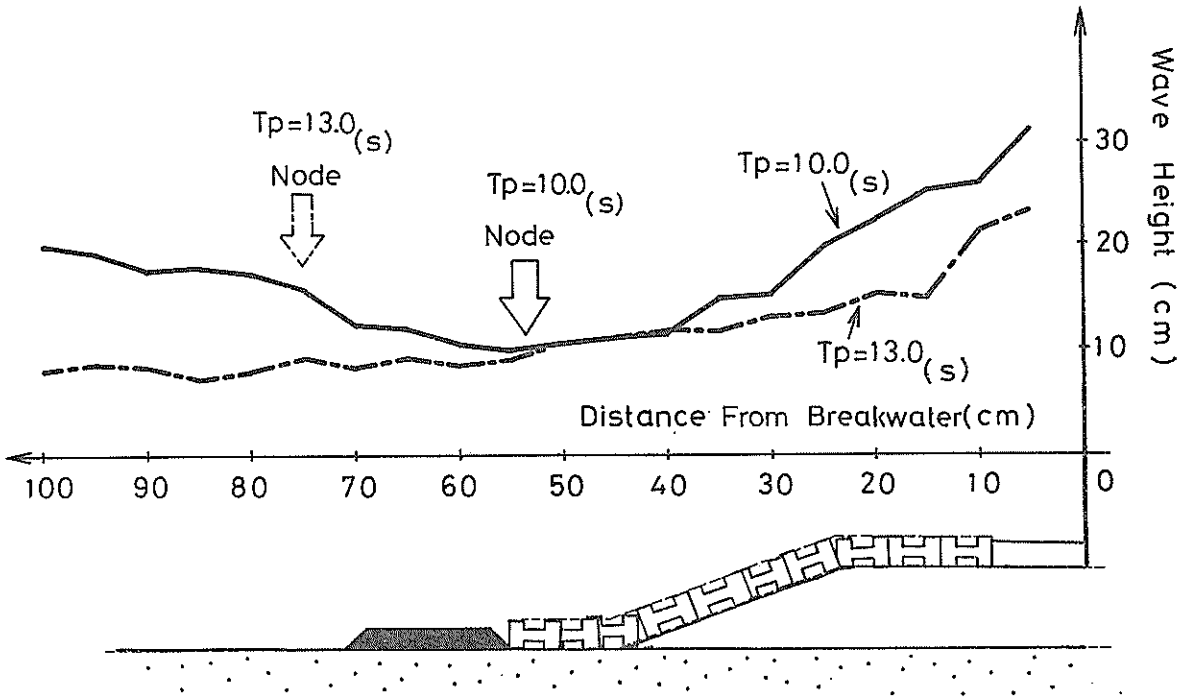


図-71 (1) 波作用前の断面と波高分布 (Case C-12)

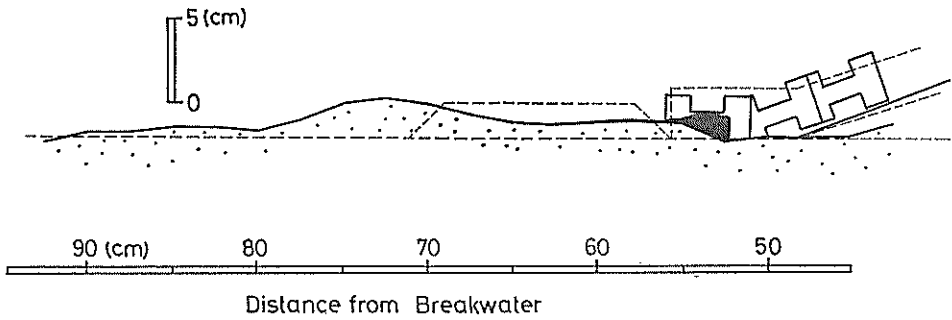


図-71 (2) 波作用 45 分後ののり先 (Case C-12)

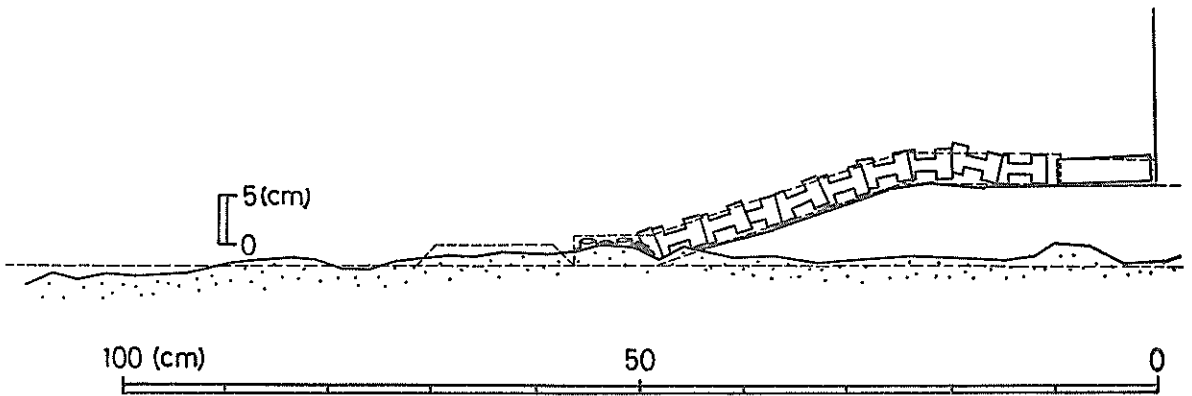


図-71 (3) 波作用 60 分後の断面 (Case C-12)

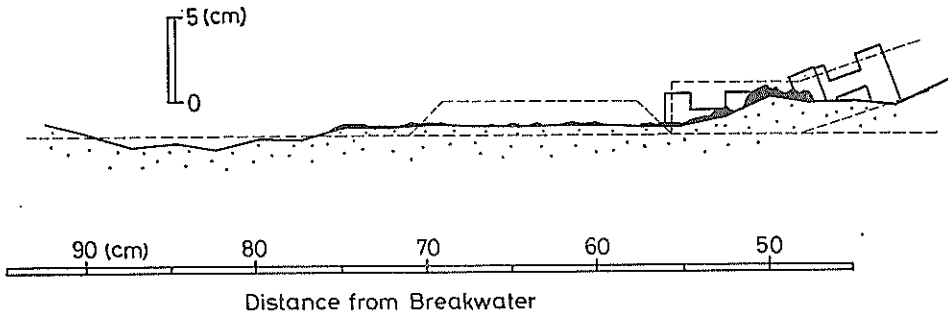


図-71 (4) 波作用 645 分後ののり先 (Case C-12)

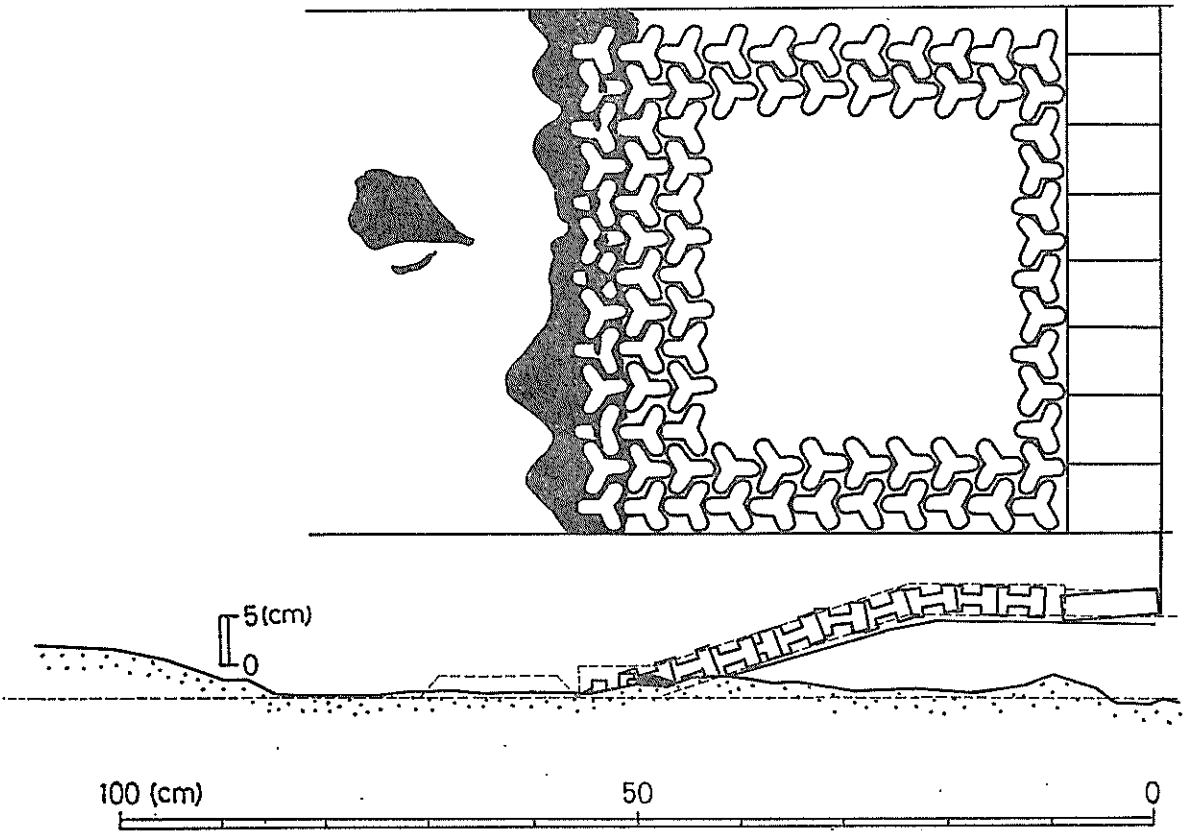


図-71 (5) 波作用 1200 分後の海底地形及び被覆工の散乱状況 (Case C-12)

この状態から、周期 1.41(s) (現地換算値 $T_p=10.0$ (s) の波を作用させる。 $T_p=10.0$ (s) の波を 45 分間作用させた後の (合計波作用時間 645 分) 断面図を図-71(4) に示す。波作用 600 分後の断面に比べのり先より沖側の領域がやや侵食されているものの依然として堆積領域となっている。

$T_p=10.0$ (s) の波を 600 分間作用させた後の (合計波作用時間 1200 分) 状況を図-71(5) に示す。グラベルが初期設置位置ののり先にとどまり、のり先洗掘を防止していることがわかる。

図-72 はのり先洗掘深の経時変化を示している。波作用時間が 10 時間までは $T_p=13.0$ (s) の波を、波作用時

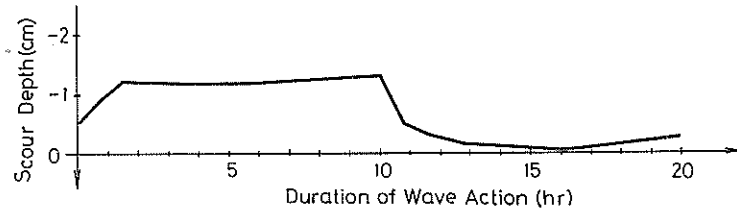


図-72 のり先洗掘深の経時変化 (Case C-12)

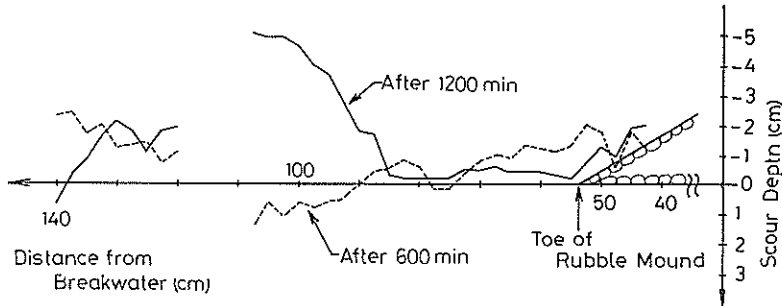


図-73 波作用 600 分後と波作用 1200 分後の海底断面の比較 (Case C-12)

間が 10 時間から 20 時間までは $T_p=10.0$ (s) の波を作用させたときのり先洗掘深である。いずれの場合もりのり先で洗掘が起こっておらず、のり先洗掘の発生が防止されていることがわかる。

図-73は波作用 600 分後の地形と 1200 分後の地形を比較したものである。捨石マウンドのり先から防波堤より 80 cm までのグラベルの存在する領域では両断面の差が非常に小さいのに対し、それより沖側のグラベルの存在しない領域では両断面の差が大きい。

(2) グラベルの粒径の小さい場合 (Case C-13)

粒径 1.0~2.5(mm)のグラベルを厚さ 2 cm にしてのり先に設置した Case C-13 の結果について述べる。このケースは、単一の規則波を作用させた場合には、Case C-3 に相当し、洗掘対策としてほとんど効果のなかったランク C のケースである。

周期 1.84(s) (現地換算値 $T_p=13.0$ (s)) の波を 45 分間作用させた後の断面図を 図-74(1) に示す。グラベルはのり先より防波堤寄りとなり、のり先より沖側に分かれてしまい、のり先で 1~2 cm の洗掘が発生している。しかし、被覆工の移動、沈下は見られない。

その後、波作用時間を増しても洗掘は進行せず、 $T_p=13.0$ (s) の波を 600 分作用させたときの状況は 図-74(2) のようになった。のり先洗掘が発生しているものの、被覆工の移動・沈下は依然として見られない。

この状態から、周期 1.41(s) (現地換算値 $T_p=10.0$ (s)) の波を 45 分間作用させた後の (合計波作用時間 645 分) 断面図を 図-74(3) に示す。洗掘深が 2~3 cm となり洗掘孔も大きくなったにもかかわらず、のり先被覆工の周辺はグラベルが存在しているためにそれほど洗掘されておらず、被覆工の移動・沈下はない。

$T_p=10.0$ (s) の波を 180 分間作用させた後の (合計波作用時間 780 分) 断面図を 図-74(4) に示す。洗掘が更に進行したためりのり先の被覆工が移動、沈下してしまっている。

その後、洗掘は進行せず、逆に堆積し始め、 $T_p=10.0$ (s) の波を 600 分間作用させた後の (合計波作用時間 1200 分) 状態を 図-74(5) に示す。のり先の被覆工は移動、沈下しているものの 2 列目以降の被覆工は移動しておらずグラベルの洗掘防止効果がややあった、ランク B に相当している。

図-75は、波作用 600 分後の地形及び波作用 1200 分後の地形を示したものである。Case C-12 同様に、グラベルの比較的密に存在している領域、すなわち捨石マウンドのり先から防波堤より 65 cm までの領域では、両断面の差が小さいのに対し、グラベルの少ないその他の領域では地形変化量が大きい。

図-76は、のり先洗掘深の経時変化を示している。この図の波作用 10 時間以降の部分すなわち、 $T_p=10.0$ (s)

重複波による防波堤前面の海底洗掘及びその対策に関する研究

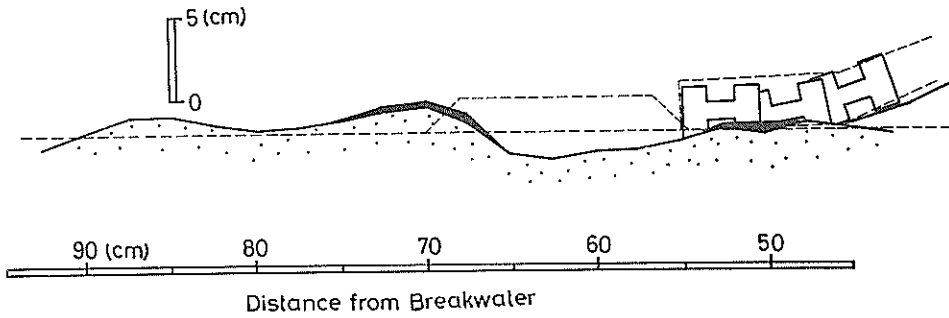


図-74 (1) 波作用 45 分後ののり先 (Case C-13)

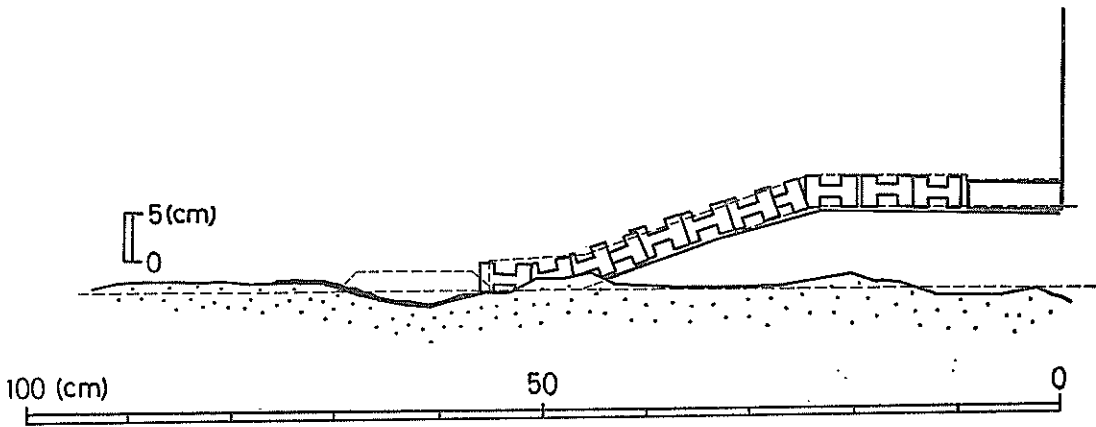


図-74 (2) 波作用 600 分後の断面 (Case C-13)

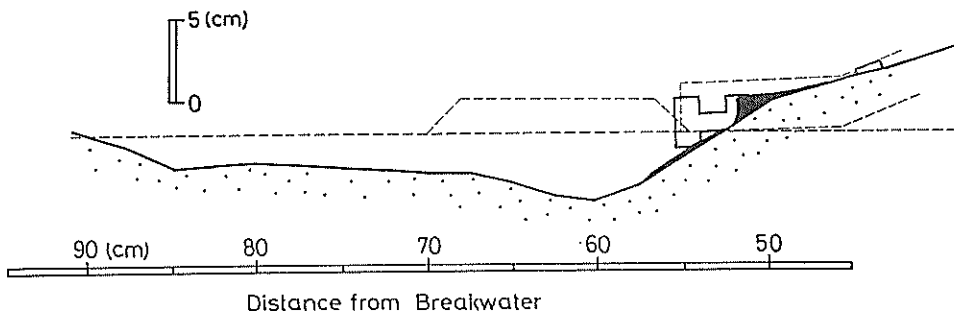


図-74 (3) 波作用 645 分後ののり先 (Case C-13)

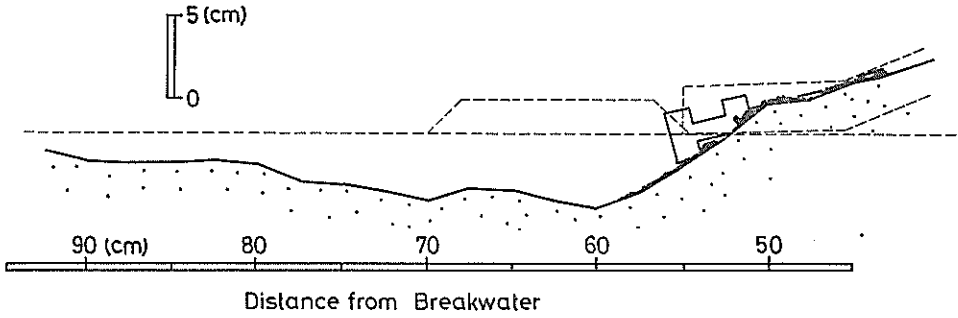


図-74 (4) 波作用 780 分後ののり先 (Case C-13)

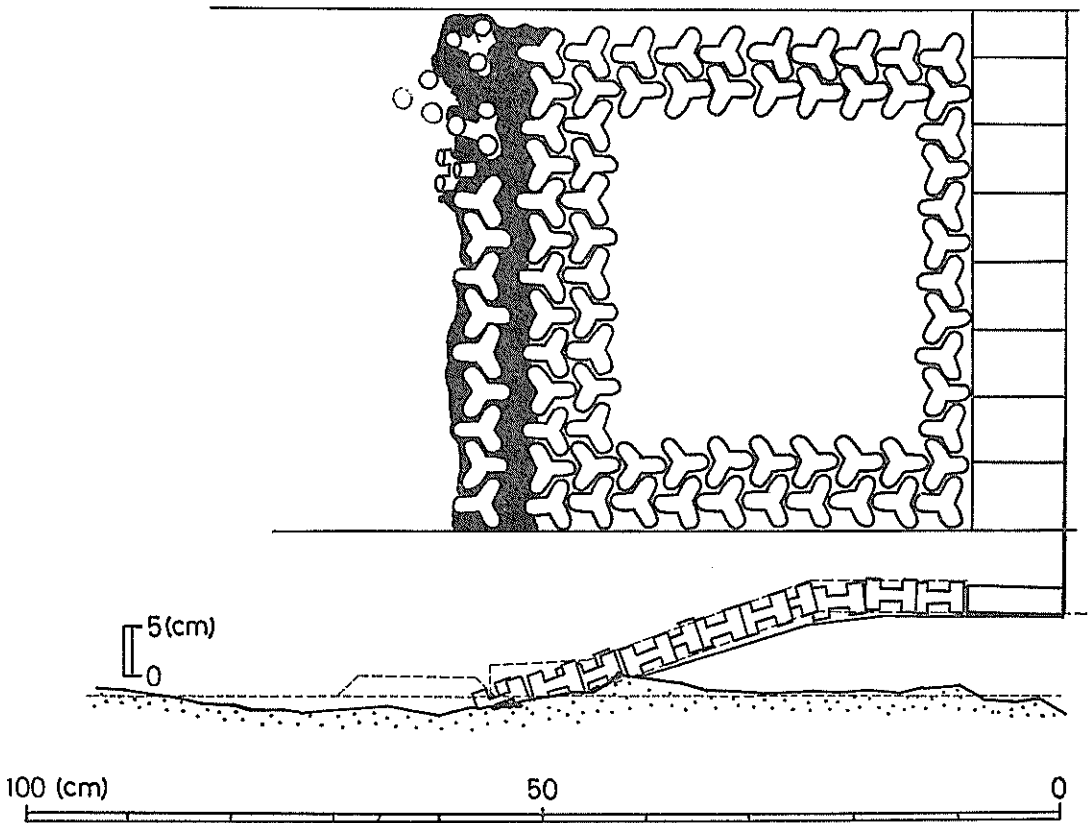


図-74 (5) 波作用 1200 分後の海底地形及び被覆工の散乱状況 (Case C-13)

の波を作用させたときののり先洗掘深の経時変化と、Case C-13 とグラベルの条件が同じで単一の規則波を作用させた Case C-3 ののり先洗掘深の経時変化を重ねると図-77 のようになる。Case C-13 のときの洗掘深のほうが、単一の波を作用させた Case C-3 の洗掘深に比べて小さい。Case C-13 では、 $T_p=13.0$ (s) の波を

作用させたときにグラベルが徐々に沖側へ移動していく過程で底質と適当に混合しており、グラベルの底質になじむ現象が洗掘を抑制しているのではないかと考えられる。

(3) 周期が変化したときのグラベルの安定性
本洗掘対策工が、 $u_b/w < 10$ なる底質が重複波の節の

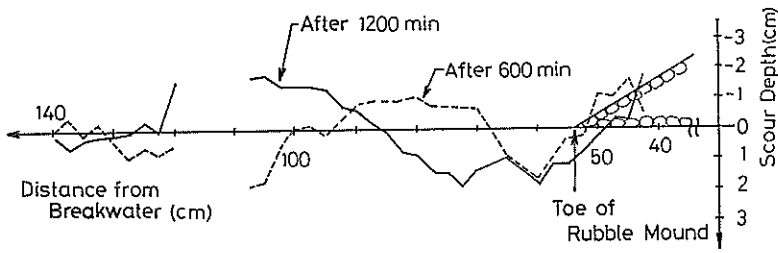


図-75 波作用 600 分後と波作用 1200 分後の海底断面の比較 (Case C-13)

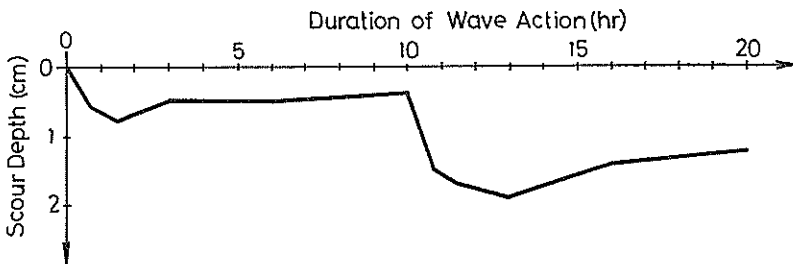


図-76 のり先洗掘深の経時変化 (Case C-13)

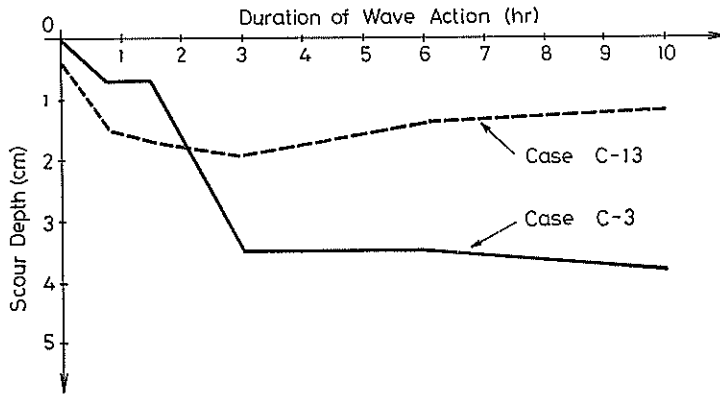


図-77 初期状態の違いによるのり先洗掘深の経時変化の相違 (Case C-3 と Case C-13)

位置に集まるという特性を利用しているがゆえに生ずる危険性、すなわち、グラベルを設置したときに対象とした波よりも周期の大きい波が襲来したときにグラベルが沖へ運び去られ、その後襲来する周期の小さい波によりのり先が洗掘されるという危険性を、実験において $T_p = 13.0$ (s)の波を 10 時間作用させ、その後 $T_p = 10.0$ (s)の波を 10 時間作用させることによって検討したところ以下のことが明らかになった。

単一の規則波において洗掘防止効果の大きかったグラ

ベルは、周期の違う波に対してもそれほど移動しないため、のり先が常にグラベルで覆われており洗掘防止効果がある。

単一の規則波を作用させたときに洗掘防止効果のなかったグラベルは、移動しやすいため、周期の大きい波を作用させたときにグラベルが分散してしまい、のり先が若干洗掘され、その後、周期の小さい波を作用させると更に洗掘が進行し、洗掘防止効果はそれほど期待できない。しかし、周期の大きい波のときにグラベルと底質が

ほど良くなじむことによって、その後の周期の小さい波による洗掘は、周期の小さい波を単一で作用させたときの洗掘よりも小さくなる。

4.6 大型実験における検討

移動床模倣実験の相似則はまだ確立されていない。したがって、模型縮尺が1/50の場合に洗掘防止効果があったケースでも、違う模型縮尺のもとでは実験結果が変わる可能性がある。しかも、田中ら¹⁰⁾は、技術開発的な実験は、可能なかぎり大縮尺の実験を行うことを勧めている。そこで、模型縮尺を1/25として洗掘対策工法の洗掘防止効果の検討を行った。

実験は、まず対策工を施さない標準断面で行い、続いてグラベルをのり先に設置する断面について、グラベルの幅を32 cm (現地換算値8 m)、厚さを4 cm (現地換算値1 m)に固定し、グラベルの粒径を3種類変えて行った。

(1) 標準断面における実験結果 (Case D-1)

図-78(1)に対策工を施さない標準断面と波作用時間360分から600分にかけて測定した波高分布を示す。

波作用45分後には、図-78(2)に示す断面となった。のり先の被覆工周辺で局所洗掘が発生し、のり先と2列めの被覆工が移動・沈下している。しかし、洗掘孔そのも

のは小さく、最大洗掘深もただか1 cm 程度である。

波作用600分後の状態を図-78(3)に示す。洗掘はそれほど進行しておらず、最大洗掘深も3 cm 程度である。しかも移動・沈下したのり先被覆工の前面には、まわりに比べて洗掘深の小さい領域が存在している。これらの原因として、前の1/50のスケールでは $u_b/w=80$ であったのに対し、今回は $u_b/w=24$ と小さかったこと、被覆工前面が流れのよどみ域になってしまったこと、被覆工前面に粒径の大きい底質が集まったこと、などが考えられるけれども詳細は不明である。

(2) グラベルの粒径が大きい場合 (Case D-2, D-3)

グラベルとして粒径1.39~2.04 cmを使用したときの実験結果 (Case D-2) について述べる。グラベルは実験波 (堤体設置水深における入射波高20.0 cm, 現地換算値5.0 m) に対してほとんど動かず、表面の比較的粒径の小さいグラベルが転動する程度である。波作用480分後の断面図は図-79に示すとおりで、グラベルは初期設置位置からほとんど移動していない。防波堤より145 cmの地点より沖側の領域では洗掘深が2.5 cmに及ぶ洗掘孔が存在しているものの、グラベルの存在している領域、すなわち防波堤より105 cmの地点から防波堤より145 cmの地点までの領域はグラベルによって洗掘が防

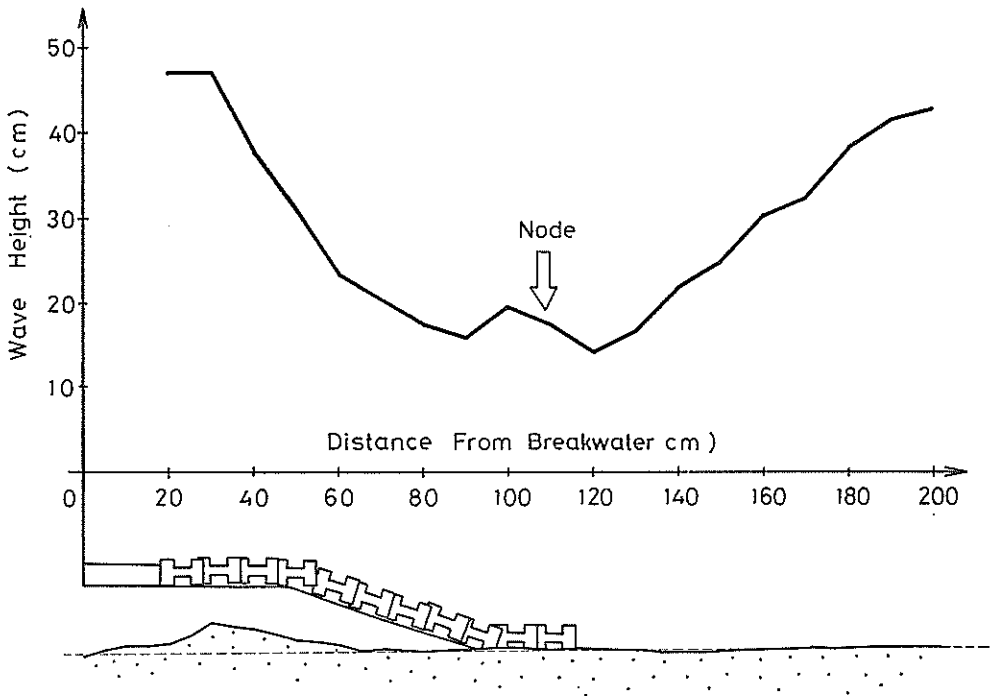


図-78 (1) 標準断面と波高分布 (Case D-1)

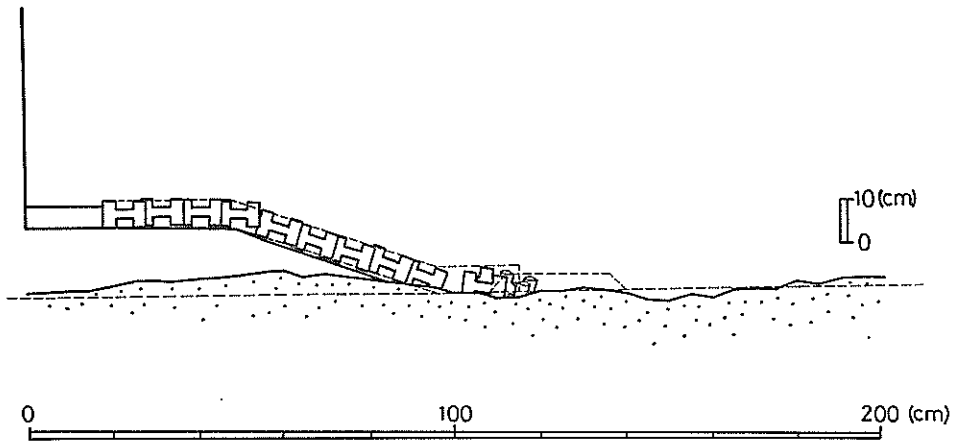


図-78 (2) 波作用 45 分後の断面 (Case D-1)

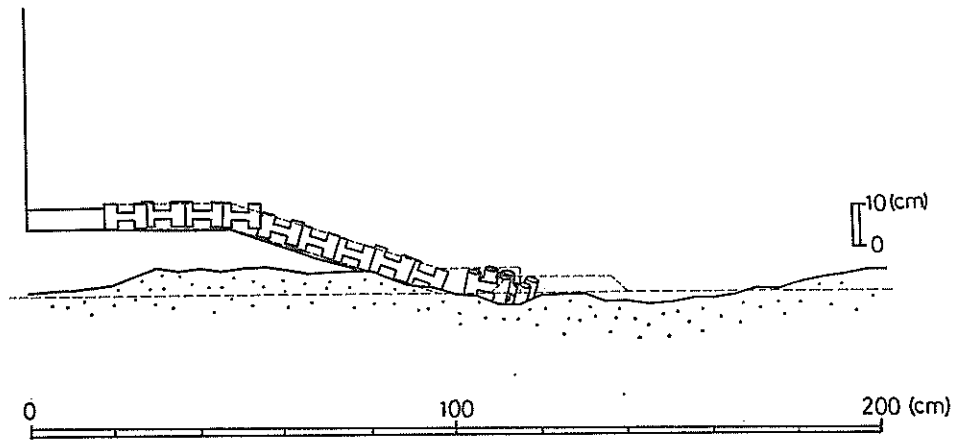


図-78 (3) 波作用 600 分後の断面 (Case D-1)

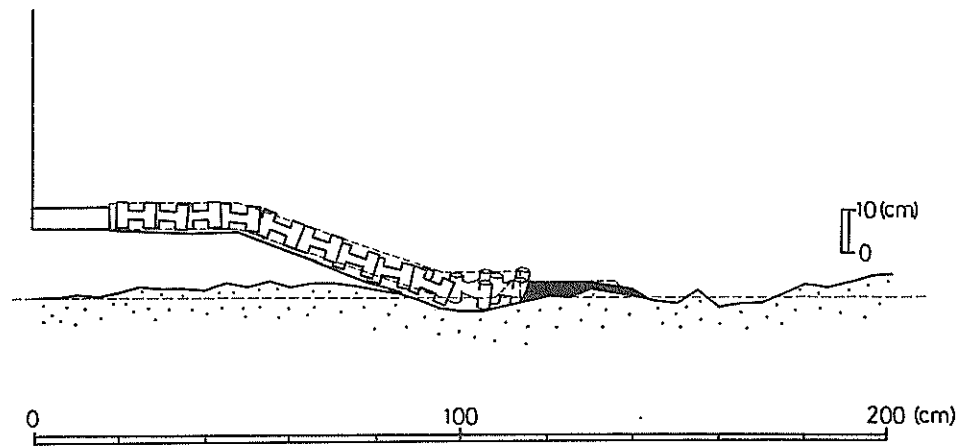


図-79 波作用 480 分後の断面 (Case D-2)

止されており、グラベルが洗掘対策として有効であったことがわかる。

次に、グラベルとして Case D-2 よりやや小さい、粒径 $0.70 \sim 0.83 \text{ cm}$ を使用したときの実験結果 (Case D-3) について述べる。実験波を作用させるとグラベルの表面の石が転動し、波作用 45 分後には図-80(1)に示すように、グラベルが防波堤より 100 cm の地点から防波堤より 150 cm の地点の領域に広がっている。グラベルの存在している領域では、Case D-2 同様に洗掘が防止されている。その後、グラベルの分散範囲及び海底地形はほとんど変化せず、波作用 480 分後には図-80(2)に示す断面となり、グラベルが洗掘対策として有効であったことがわかる。

(4) グラベルの粒径が小さい場合 (Case D-4)

グラベルとして Case D-3 よりもさらに小さい、粒径 $0.45 \sim 0.70 \text{ cm}$ を使用したときの実験結果について述べる。実験波に対しては、やはりグラベルの石が転動し、波作用 90 分後には図-81(1)に示すように、グラベルが防波堤より 90 cm の地点から防波堤より 155 cm の地点の領域にまで広がり洗掘を防止していた。

しかし、波作用 180 分後には図-81(2)の断面となり洗掘が発生している。この洗掘は図-82に示すように、被覆工の前面に発生する渦によってグラベルが巻き上げられ、次の位相で防波堤寄りに運ばれることが原因となっている。すなわち、渦によってグラベルが運び去られ、のり先のグラベルが減少し、さらに底質も渦によって巻

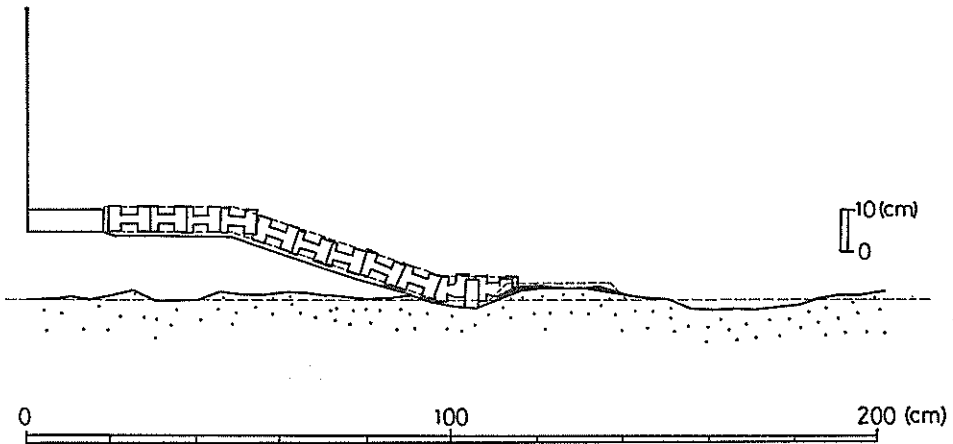


図-80 (1) 波作用 45 分後の断面 (Case D-3)

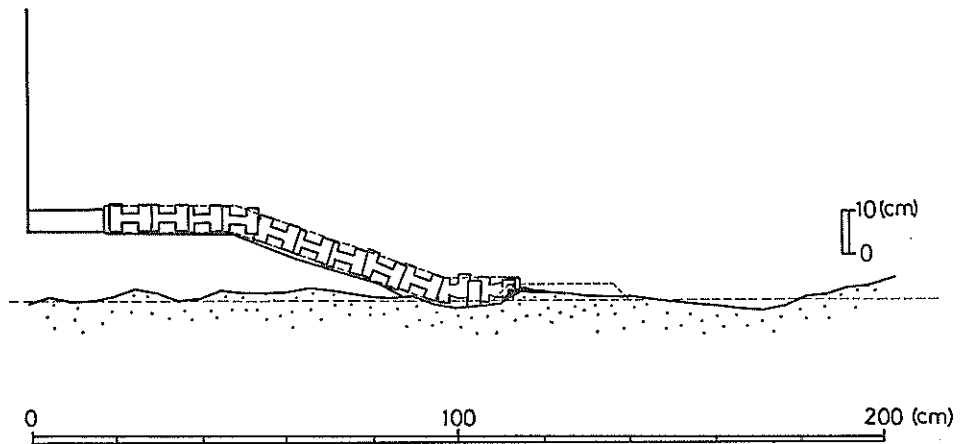


図-80 (2) 波作用 480 分後の断面 (Case D-3)

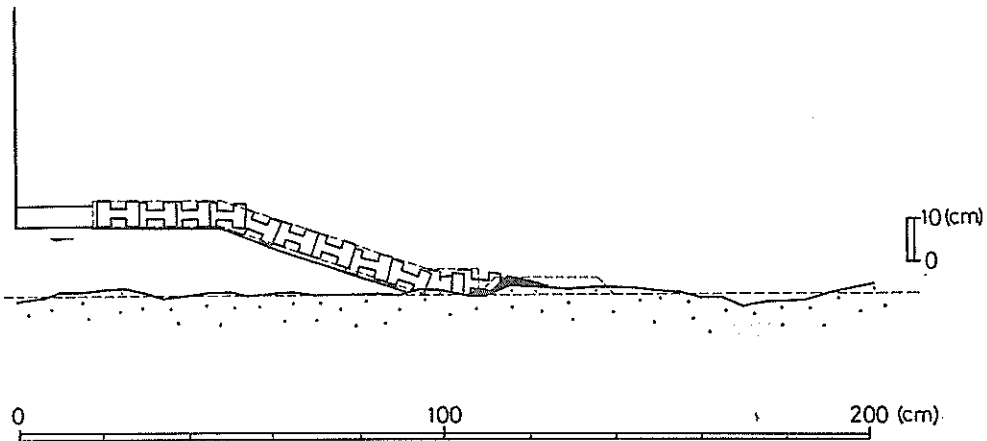


図-81 (1) 波作用 90 分後の断面 (Case D-4)

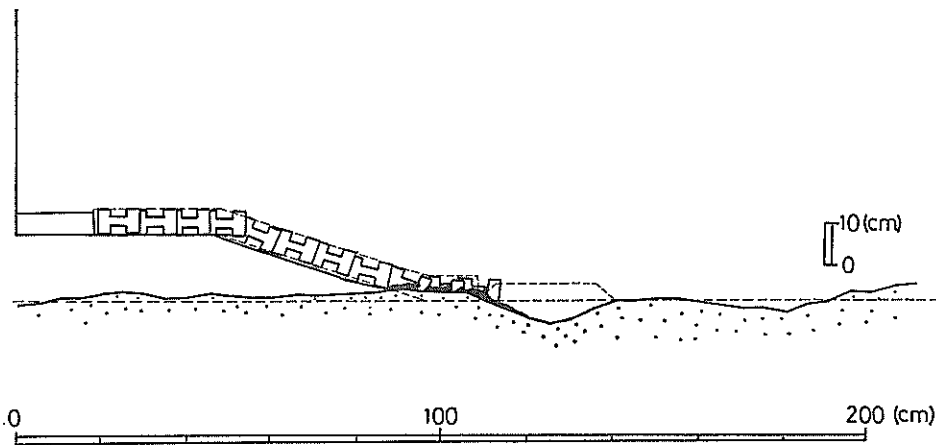


図-81 (2) 波作用 180 分後の断面 (Case D-4)

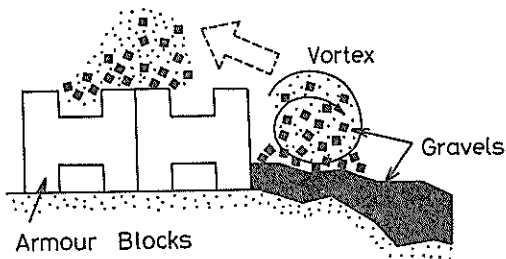


図-82 被覆工前面の渦による局所洗掘

き上げられることによって、この局所的な洗掘が発生したのである。

図-83は、模型縮尺 1/50 の場合で、グラベルの洗掘防止効果がなく洗掘の発生した Case C-3 の波作用 180 分後の断面と、Case D-4 の波作用 180 分後の断面を比較したものである。縦軸は洗掘深を入射波高で無次元化しており、横軸は防波堤からの距離を波長で無次元化してある。

図より Case D-4 でいかに局所的な洗掘が起こっていたかがわかる。その後、波作用 600 分後には図-84に示す断面となった。のり先の被覆工が移動、散乱し、被覆工周辺にしか存在していなかった洗掘孔が沖側にまで発達していることがわかる。図-85は、海底断面の経時変

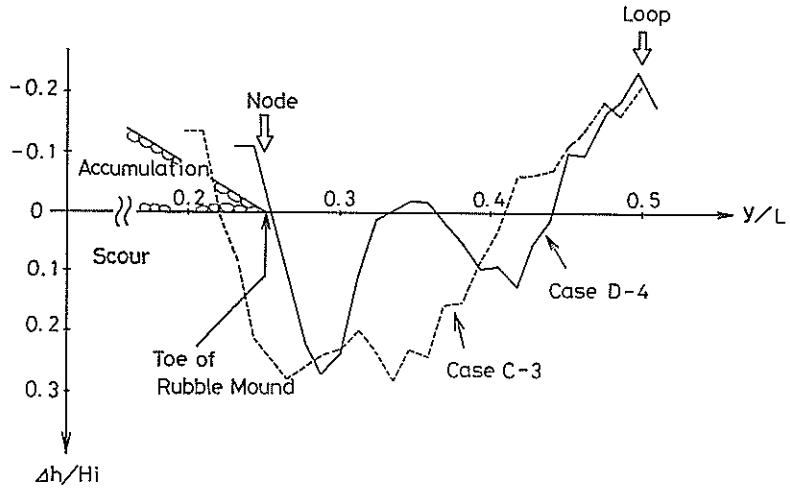


図-83 被覆工前面の渦の有無による洗掘形状の相違 (Case C-3 と Case D-4)

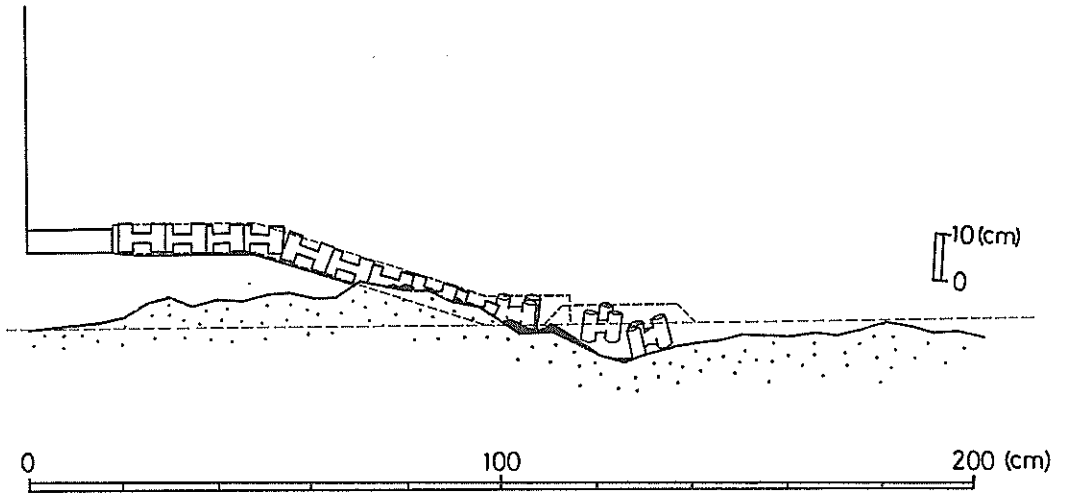


図-84 波作用 600 分後の断面 (Case D-4)

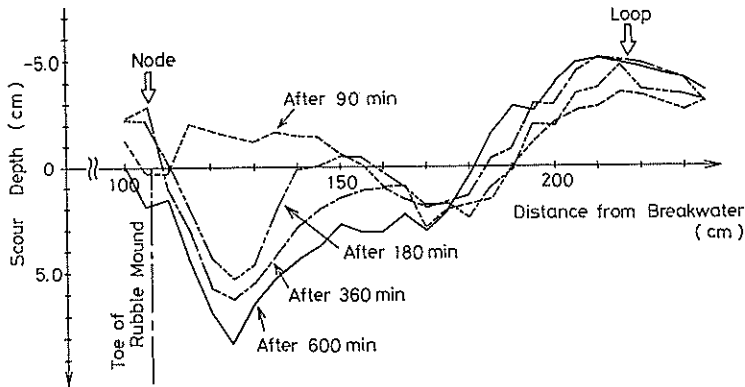


図-85 海底断面の経時変化 (Case D-4)

化を示したものであり、この図からも被覆工周辺に発生した洗掘孔がしだいに沖側へ発達しているようすがわかる。

(5) 中型実験結果との比較

大型実験の結果を、4.4の中型実験と同様の整理を行うと図-86となる。縦軸は、グラベルの単位幅あたりの体積 Volume (cm³/cm) を、底面における水粒子軌道振幅 a_m (cm) の2乗で無次元化した値で、横軸はグラベルの中央粒径 d_{95} (cm) を入射波高 H_i (cm) で無次元化した値である。大型実験においてもグラベルの粒径が小さくなるとグラベルの洗掘防止効果が認められなくなり、大型実験の結果が中型実験の結果と矛盾していないことがわかる。図-86から、グラベルの洗掘防止効果のある範囲は、 $3.5 \times 10^{-2} < d_{95}/H_i < 15.0 \times 10^{-2}$ 、 $0.5 < \text{Volume}/a_m^2$ であると言える。

(6) グラベル敷きならし工法に関する実験結果の現地への適用について

グラベル敷きならし工法は、底面の摩擦力を受けつつ移動するグラベルが、重複波の流速波形のひずみのため節の位置に集まろうとする性質を利用したものである。グラベルの量が少なかったり、グラベルの大きさが小さかったりすると、節に集まろうとする性質は有しつつも、波による分散効果がより大きく働き、洗掘防止効果は失われる。図-86は、グラベル敷きならし工法が有効であるためのグラベル投入量、グラベルの大きさに関する許容値についての実験結果を示したものであったが、これを現地適用するについては、以下の点に留意せねばならない。

a) 今回の実験に用いた1ミリメートル程度から数センチメートルまでの大きさのグラベルの流体による移動

に関しては、ほぼフルードの相似則が成立し¹⁴⁾、その意味では本実験は相当に実際に近い現象を対象としたことになる。

b) しかし、移動床の材料に用いた $d=0.07$ mm の珪砂や、 $d=0.14$ mm の砂の移動については、境界層の影響を強く受け、また波動運動する流体中の乱れの構造についても現地と模型で相当の違いがあるため、再現される洗掘及びその防止効果にしても、定性的なものと考えざるを得ない。

c) したがって、図-86に得られたグラベル投入量やその大きさに関する許容限界は、あくまで、現地スケールの洗掘対策を検討する上の目安を与えたものに過ぎず、実際の計画については既往のグラベルマット工法の追跡結果などからグラベルの波に対する安定について十分チェックした上で適用する必要がある。

5. 防波堤の反射率低減の効果

5.1 防波堤の反射率低減のねらい

図-2に示されるように、L-タイプ洗掘では、重複波の節の位置とのり先が一致したとき、重複波の節の位置から腹の位置へ向かう底層平均流によってのり先の底質が沖側へ運び去られることよりのり先洗掘が発生していた。しかし、3.3の結果から明らかなように、防波堤の反射率を低減すると、底層平均流の防波堤へ向かう成分が増す。したがって、今まで沖へ運び去られていたのり先の底質の量が減り、のり先洗掘が防止されると考えられる。

5.2 実験結果

実験条件は、4.3のCase C-1と同様で、二次元水路において横型縮尺1/50実験波の波高は堤体設置水深

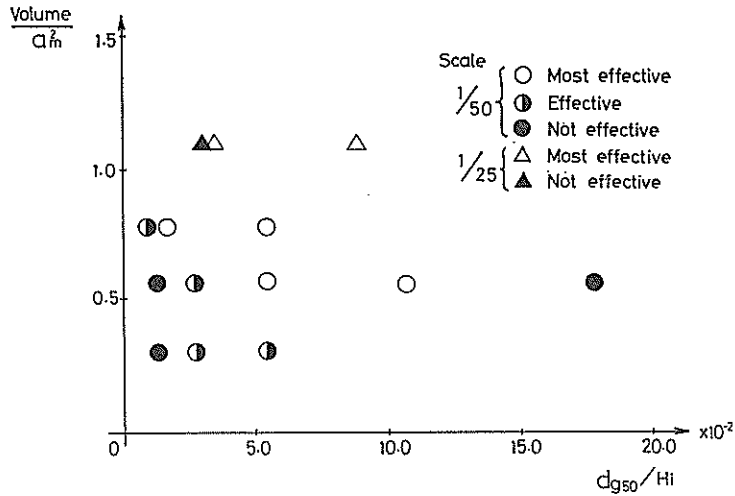


図-86 グラベルの諸元と洗掘防止効果との関係 (その2)

30.0 cm (現地換算値 15.0 m) において 14.0 cm (現地換算値 7.0 m), 周期 1.41(s) (現地換算値 10.0(s)) とし, 底質は中央粒径 0.07 mm とした。防波堤の反射率を低下させるために, 図-87 のように防波堤前面に消波工を設置した。

波作用 90 分後, 及び 600 分後の断面を 波高分布とともに 図-88 に示す。この断面では反射率が 0.3 の部分重複波が形成されており, 波作用 90 分後では, 部分重複

波の節の位置より やや沖側で 1~2 cm の洗掘が発生していた。しかし, 波作用 600 分後ではこの洗掘が完全になくなり防波堤の反射率を低減することが洗掘防止に効果のあることを示している。防波堤前面に消波工を置くことは, 一般に消波を主目的として用いられるものであるけれども, 洗掘防止効果も期待できることが実験結果より明らかになった。

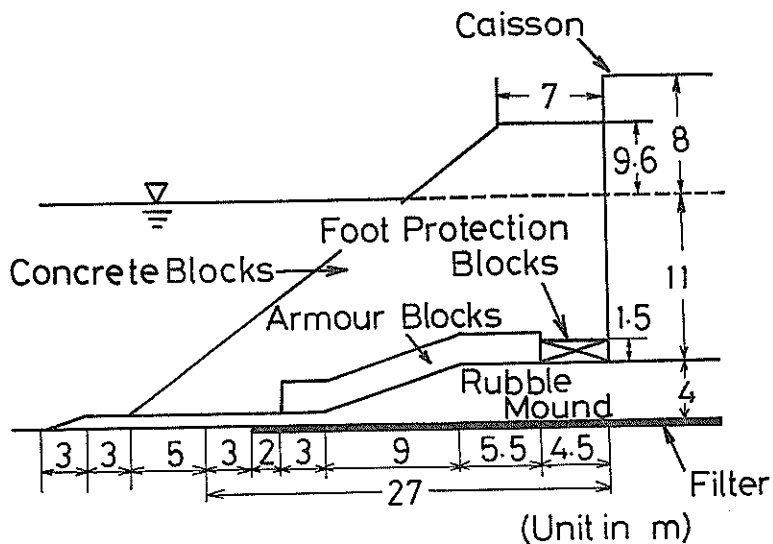


図-87 防波堤の反射率を低減する工法の断面図

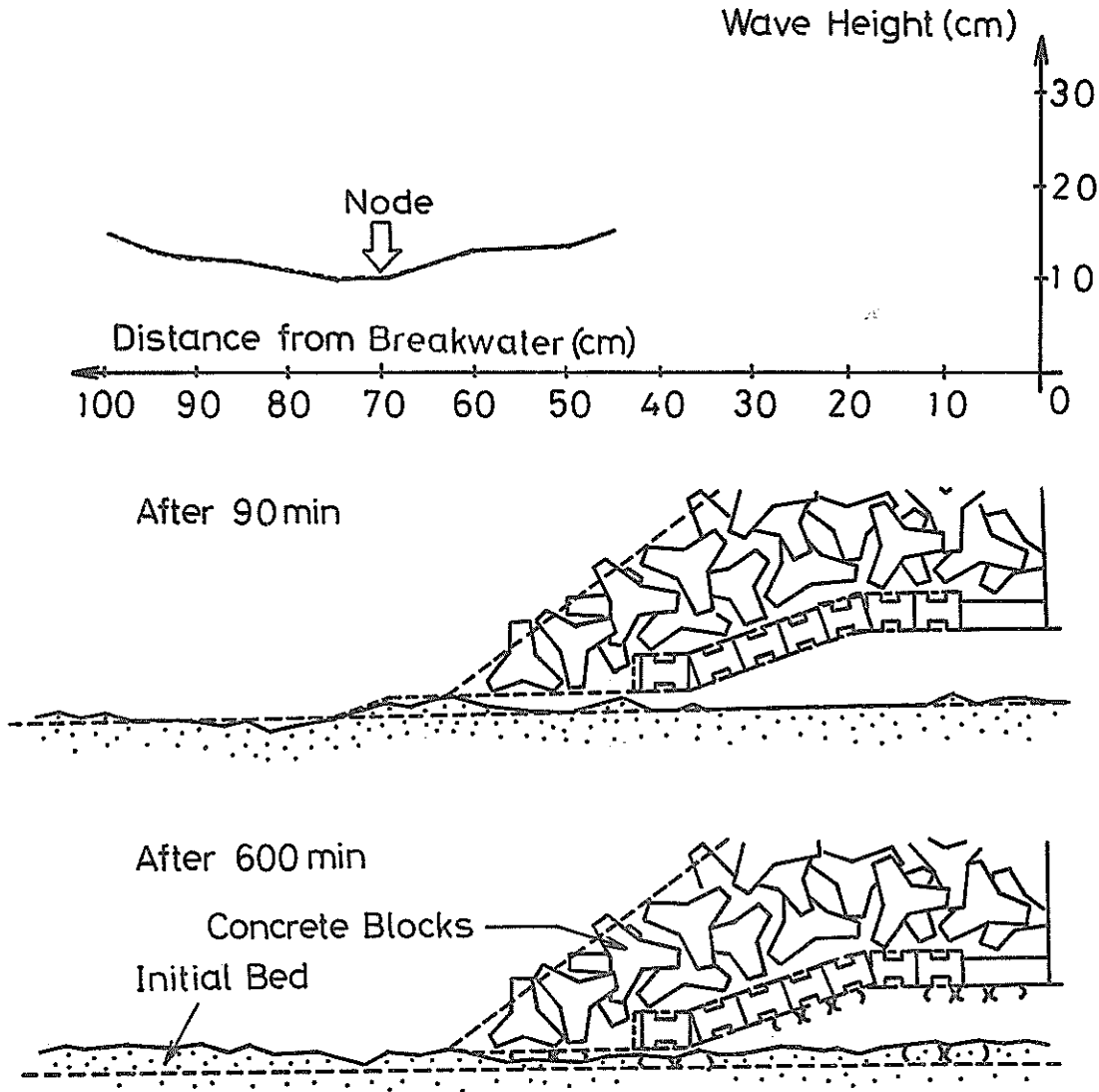


図-88 波作用 90 分後及び波作用 600 分後の海底断面と波高分布

6. 防波堤前面の三次元的洗掘及び洗掘対策についての考察

(1) 斜め入射波による防波堤前面の洗掘

本報告では、まず斜め入射重複波の下での防波堤前面における海底洗掘を、底層平均流、地形変化に関する水理模型実験により検討した。固定床平面実験によって斜め入射波による防波堤前面の底層平均流を測定したところ、重複波の節の位置から腹の位置へ収束しつつ下手へ向かう平均流が確認され、境界層外縁の質量輸送速度の

理論的検討結果と定性的にはほぼ一致した。一方、移動床平面実験より、防波堤前面は防波堤先端寄りを中心に全体的に侵食傾向がみられ、重複波の腹の位置に比べると、特に節の位置で著しい洗掘の起こっていることがわかった。すなわち、防波堤前面の海底地形変化を、防波堤と直角方向の底質移動による海底地形変化と防波堤と平行方向の底質移動による海底地形変化に分けて考えると、防波堤に直角方向では、平均流が重複波の節から腹へ向かっていること、腹より節の位置で相対的に著しい洗掘の起こっていることなどから、L-タイプ洗掘の発

生したものと考えられた。この防波堤と直角方向の底質移動による地形変化は、時間的応答性が高く、波作用後3時間近くで平衡状態に達する。また、防波堤に平行方向では、防波堤先端から下手へ向かう平均流のため底質も下手へ運ばれ、防波堤先端付近を中心に全体的な洗掘が発生した。この防波堤平行方向の底質移動による地形変化は、時間的には緩慢である。

防波堤に対する波の入射角と前面洗掘との関係をみると、波の入射角が小さいと（直角に近い状態で作用すると）重複波の節で防波堤に直角方向の底面近くの軌道粒子速度が大きくなるため底質の攪乱移動する量も多くなり、また節から腹へ向かう底層平均流も強くなるため、防波堤捨石マウンドのり先が大きく洗掘される。この場合、波の入射角が 0° の場合より、ある角度をなしていたほうが、防波堤に平行方向の平均流の効果が入り、防波堤直角方向と平行方向の底質移動による洗掘が合成されることになるので洗掘深は大きくなる。

一方、波が大きな角度（防波堤に対して平行に近い角度）で入射する場合は、直角に近い場合に比べて節の近くにおける軌道粒子速度が小さくなり、底質の攪乱移動量が著しく小さくなる。波が防波堤に対し平行に近い角度で入射すると、節の位置での防波堤に沿う底層平均流は増大するものの、底質の攪乱移動量が少なくなるので、結果として洗掘深は大きくならない。結局、波が防波堤に斜めから入射するときは、入射角が、 $0^\circ \sim 30^\circ$ の間で洗掘深が最大となると考えられる。

以上の結果を考慮すると、洗掘対策は、防波堤に直角方向の底質移動による洗掘と防波堤に平行方向の底質移動による洗掘に分けて考える必要があり、今回は主として前者についての対策を検討し、後者に対する対策を考慮しつつ洗掘対策工法を論じた。

(2) 防波堤の洗掘対策

防波堤断面方向の二次元的底質移動による洗掘対策としては、有限振幅重複波の下での底質移動特性を利用したもの及び低反射の部分重複波の質量輸送を利用する方法について検討し、それぞれに洗掘防止効果を確認した。

本章では、これまでの実験結果をもとに、防波堤の洗掘対策について、少し考察を加えてみる。

防波堤の洗掘対策の目的は、前面の海底洗掘が、やがては防波堤本体の安定に影響を及ぼし、防波堤としての機能が失われることを未然に防止することにある。図-89は、前面の海底洗掘の影響がどのように混成堤式防波堤に及んで行くかの変状連鎖の一つの考え方を示したものである。防波堤前面の洗掘対策の目的は、この変状連鎖図において、前面洗掘から堤体の不安定までに至る各

連鎖過程のうち、単数、あるいは複数の段階でそれ以上変状が進むのを防止することにある。その洗掘対策は、工学的に最も有効かつ経済的である必要がある。この観点から、これまでの検討結果をもとに洗掘対策について述べると以下ようになる。

a) 防波堤前面の海底の底質特性に対するくふうをすること——グラベル敷きならし工法（L-N工法）

有限振幅重複波固有の底面における流速波形の上下の非対称性により、 $u_0/w < 10$ を満たす底質が重複波の節へ集まる性質を利用するもので、4.の中型、大型実験により、一定の条件が整えば洗掘防止効果が大きいことが明らかになった。ここに、一定の条件とは、前面に敷かれるグラベルの所定の数量が、波作用後も十分残存する条件であり、入射波に対するグラベルの大きさ、及び底質に対するグラベルの大きさ及びグラベルの投入量に関係する。この条件を求めるには、図-86に示す実験結果が一つの目安として参考にならう。

これまで実際に用いられている洗掘防止工法の中で、本工法と類似の工法としてグラベルマット工法があり、経験的にも洗掘防止効果の大きいことが認められている。これは、捨石マウンドのり先にグラベルを一定の幅だけ敷きならすもので、今回実験したグラベル敷きならし工法と方法的には同じである。ただし、グラベルマット工法では、洗掘防止用マットや沈床材と同様に、捨石マウンドのり先の底質を、洗掘、吸い出しによる地形変化になじみやすい材料で被覆するという考えに立っている。その意味では、今回のグラベル敷きならし工法は、波と底質との相互作用という水理学的機構を利用したもので、そのその観点に立って施工範囲を検討する必要がある。L-タイプ底質移動をN-タイプ底質移動に変換させることで洗掘防止を期待するもので、L-N工法とも呼称すべきものである。

このL-N工法では、グラベルはある程度波によって動かされることにより効果が発揮されるものである。したがって、斜め入射重複波の場合には、堤体法線に沿って下手側にグラベルが輸送され、防波堤先端付近より徐々にグラベルがなくなって洗掘防止効果が失われることが考えられる。このような場合には、防波堤法線沿いに洗掘が著しく発生する区域より上手側（先端側）まで、グラベル施工範囲を広げ、経年変化を追跡して必要があれば上手側にグラベルを補給することが考えられる。通常、防波堤前面で、斜め重複波による著しい洗掘が発生するのは、防波堤先端より数百メートル手前付近である。

b) 防波堤前面の波の反射率の低下

波の反射率を低下させることにより、重複波の下での

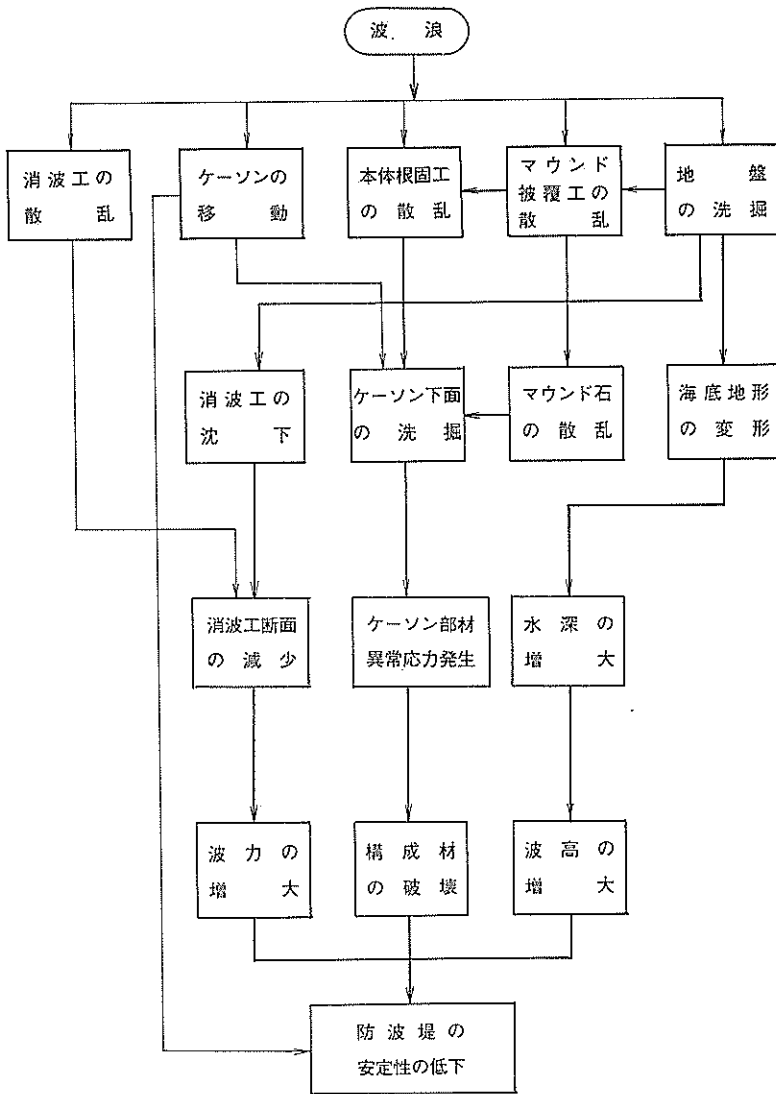


図-89 波による防波堤の変状連鎖

底層平均流の堤体へ向かう流れが卓越するようになることを利用したもので、この傾向は斜め入射重複波の場合でも同じである。5.において、この方法が前面洗掘を防止する上に有効であることが実験により判明した。ただし、通常の外海に面する港では、防波堤前面に異形ブロック等を置くことは、越波伝達波を防止し、防波堤の機能を増大させるために行われるものであり、前面の洗掘を防止することが第一の意図ではない。その意味では、この方法を洗掘防止工法と呼ぶのは適切ではない。むしろ、前面消波による機能増の結果、副次的に洗掘防止効果が期待されると考えるべきである。

c) 捨石マウンド長に対するくふう

現地スケールでL-タイプ洗掘が発生しているとすれば、堤体前面より $L/4$ までの範囲の底質は基本的には堤体の方へ向かって移動することになる。したがって、もし捨石マウンドのり先が、 $L/4$ より堤体寄りになるように捨石マウンド長を調整できれば、のり先洗掘を減ずることが期待できる。しかし、混成堤式防波堤における捨石マウンドの寸法形状は、前面波圧に対し微妙な影響を与え、場合によっては堤体の安定に致命的な影響を与えかねない。したがって、捨石マウンドの寸法形状を扱うについては、十分慎重に当たらねばならない。

以上のほか、捨石マウンド被覆ブロックの連結による一体化など、上記のような水理学的理由によらない工法もあるであろう。これらのうち、どの対策を取ったほうが工学的に有効でかつ経済的かについては、来襲する波の規模、水深、底質条件により異なるであろう。したがって、洗掘対策の検討に際しては、これらに関する経験工学的知見を総合し対処すべきものと思われる。

7. 結 論

本研究で明らかになったことは以下のとおりである。

- (1) 斜め入射波による防波堤前面の底層平均流は、重複波の節の位置から腹の位置へ収束しつつ下手へ向かうものであり、境界層外縁の質量輸送速度の理論的検討結果と定性的にほぼ一致する。
- (2) 防波堤前面の海底地形変化を、防波堤に直角方向の底質移動による海底地形変化と防波堤に平行方向の底質移動による海底地形変化に分けて考えると、防波堤と直角方向には L-タイプ 洗掘が発生している。この海底地形変化は、時間的応答性が高く、波作用 3 時間近くで平衡状態に達する。
- (3) 防波堤と平行方向には、重複波の節の位置でも腹の位置でも防波堤先端から下手へ向かっての底質移動があり、これによって防波堤先端付近を中心に全体的な洗掘が発生する。この海底地形変化は、時間的には緩慢である。
- (4) 防波堤上手における、重複波の節の位置を中心とした領域では、入射角が 0° から 30° 付近のときに洗掘深が最大となり、入射角が大きくなると洗掘深が減少する。
- (5) 防波堤に直角方向の底質移動による洗掘の一つの対策として、捨石マウンドののり先に N-タイプ 移動（重複波の腹から節への移動）をするグラベルを敷く方法が考えられる。この方法が洗掘対策として有効であるためには、グラベルの量と大きさが一定の条件を満足する必要がある。
- (6) 上記のグラベルは、波の周期を、荒天時に発生する範囲内で変化させても洗掘防止効果を有する。
- (7) 洗掘対策実験において、模型縮尺が $1/25$ の大型実験の結果は、模型縮尺が $1/50$ の中型実験の結果とほぼ一致する。ただし、大型実験では、被覆工前面ののりに生ずる渦による局所洗掘が発生しており、現地においても注意を要すると考えられる。
- (8) 防波堤の反射率を低減させることも、堤体と直角方向の底層平均流による洗掘に対して有効であ

る。

なお、本研究の遂行に際し、当所加藤一正高潮津波研究室長および田中則男海洋水理部長、合田良史次長から貴重な御示唆をいただいた。また、3.3 の固定床実験、及び 3.4、3.5 の移動床実験では、当時漂砂研究室、現第五港湾建設局四日市港工事事務所赤石正廣技官に協力していただき 4.4、4.5 の洗掘対策実験、及び図面整理では漂砂研究室藤田誠技官、城内辰也君に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

(1985 年 11 月 30 日受付)

参 考 文 献

- 1) 入江 功：防波堤前面の海底洗掘について、昭和 59 年度港湾技術研究所講演会講演集、1984 年、pp. 1~34
- 2) 入江 功・澁岡和夫・近藤隆道・寺崎賢次：重複波による防波堤前面での二次元的海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—、港湾技術研究所報告、第 23 巻、第 1 号、1984 年、pp. 3~52
- 3) Herbich, J. B., et al.: Scour of Sand Beaches in Front of Seawalls, *Proc. of 16th Conf. on Coastal Eng.*, 1968, pp. 622~643
- 4) 樺木 亨・川崎芳一：海岸堤防堤脚部の洗掘について、京大防災研究所年報、第 4 号、1960 年、pp. 1~12
- 5) Shi-Leng, X.: Scouring Patterns in Front of Vertical Breakwaters and Their Influence on the Stability of the Foundations of the Breakwaters, *Technische Hogeschool, Delft (Netherlands)*, September '81, 61 p.
- 6) Hou, H.S. and K.T. Tseng: Research of the Effect of Breakwaters on the Nearshore Currents, *Proc. of 6th Australian Conf. on Coastal & Ocean Eng.*, 1983, pp. 293~299
- 7) 加藤一正・吉松 晃：三次元の経験的固有関数による深淺図解析法、港湾技術研究所報告、第 23 巻、第 2 号、1984 年、pp. 27~47
- 8) 田中則男・入江 功・小笹博昭：斜め入射部分重複波による質量輸送速度の分布に関する研究、港湾技術研究所報告、第 11 巻、第 3 号、1972 年、pp. 111~140
- 9) 入江 功・寺崎賢次・加藤一正：砂れん上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂観測法に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第 24 巻、第 2 号、1985 年、pp. 123~156
- 10) 田中則男・小笠原 昭・小山内英雄：養浜工に関する研究(その 1)、港湾技研資料、No. 260、1977 年、86 p.
- 11) 佐伯康二・北川 信・山縣 守・今井貫爾・利穂吉彦・小池 司：強潮流下における大規模構造物周りの局所洗掘現象に関する実験的研究、第 32 回海岸工学講演会論文集、1985 年、pp. 435~439