

防波堤前面の洗掘防止工について

入江 功*, 栗山善昭**, 浅倉弘敏***

1. まえがき

防波堤前面の海底洗掘は、防波堤の安定性の低下につながる多くの変状の発生原因となっている。したがって有効な洗掘防止工を見出す必要がある。

前回は、二次元水槽において洗掘現象の再現性を高める方法について調べ、 u_b を底面における最大水粒子速度、 w を底質の沈降速度としたとき $u_b/w > 10$ ならば重複波の節の位置で侵食、腹の位置で堆積の海底地形変化（以下、L-タイプ）が、 $u_b/w < 10$ ならば逆の海底地形変化（以下、N-タイプ）が発生し、L-タイプの海底地形変化が現地を比較的良く再現していることを示した。

本報告では、まず斜め重複波によって生ずる三次元的洗掘の特性を調べ、さらに有効な洗掘防止工法について実験的に検討した結果について述べることとする。

2. 斜め重複波による三次元的洗掘の特性

(1) 斜め重複波による防波堤前面の底層平均流

重複波による三次元的洗掘特性を把握するために、まず固定床で底面近くの平均流を測定した。

図-1 は、波作用中に過マンガン酸カリウムの粉末を堤体に対する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。

同図には、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の理論値²⁾も示してある。図-1 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 の場合である。波の入射角は 30° である。

これらの結果は、実験値が理論値と定性的に一致し、反射率が高いと節から腹へ収束しつつ下流へ向かう流れが存在するが反射率を下げると堤体へ向う流れの成分が増すことを示している。これは、二次元的平均流と同じ性格のものであり、三次元移動床実験でも $u_b/w > 10$ を満足すれば L-タイプの海底地形変化が生ずると考えられる。反射率の低下によって堤体方向へ向う流れが増加する性質は、後述するように洗掘対策にとっては重要な

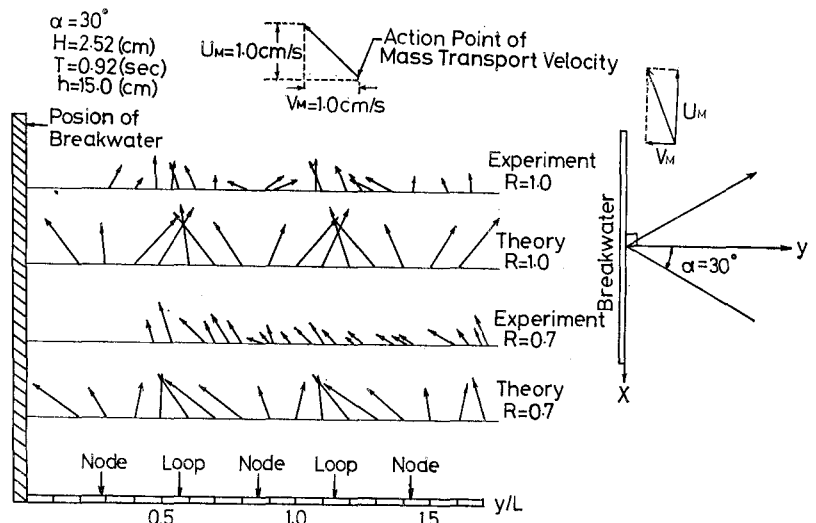


図-1 斜め重複波による防波堤前面の底層平均流

性質である。

(2) 斜め重複波による防波堤前面の海底洗掘

斜め重複波によって生ずる海底洗掘を三次元水槽を用いた移動床実験で調べた。水槽及び模型の諸元を 図-2 に示す。実験縮尺は 1/75 である。

実験波の波高は堤体設置水深において $H_p=6$ m, $T_p=10$ s (添字 p は現地換算値を示す) とし、波の入射方向

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室

*** 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室

表-1 実験ケース及び条件

実 験 ケ ー ス	縮 尺 S	波 高 周 期				粒 径 波 向		波 の 種 類	u_b / u_c
		模 型 (現 地)	模 型 (現 地)						
		H_m (cm)	(H_p) (m)	T_m (sec)	(T_p) (sec)	d (mm)	α ($^{\circ}$)		
1	1/75	8.0	(6.0)	1.15	(10.0)	0.14	30	規 則 波	20.8
2	1/75	8.0	(6.0)	1.30	(11.3)	0.14	30	不規則波	23.5
3	1/75	8.0	(6.0)	1.30	(11.3)	0.14	45	不規則波	14.5

と防波堤法線との角度は 30° および 45° とした。水槽側壁からの反射を消すために堤体下流側の側壁には消波工を設け、堤体に沿う流れを乱さないように堤体と側壁の間にある程度のすき間を設けた。図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。測線は堤体に沿って 1m 間隔とした。底質としては、 $u_b/w > 10$ を満足するように中央粒径 0.14 mm の砂を使用し、水槽の長手方向に 1/100 勾配で敷き均した。実験ケースを表-1 に示す。実験で用いる防波堤断面は、図-3 のように決定した。

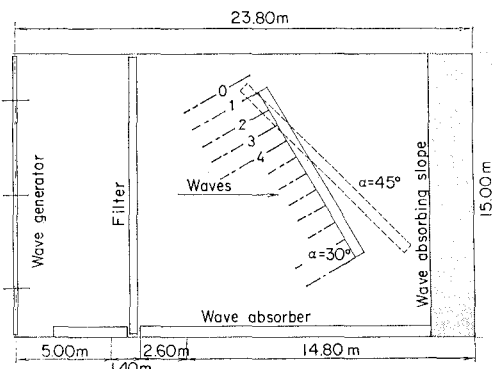


図-2 三次元移動床実験に用いた水槽

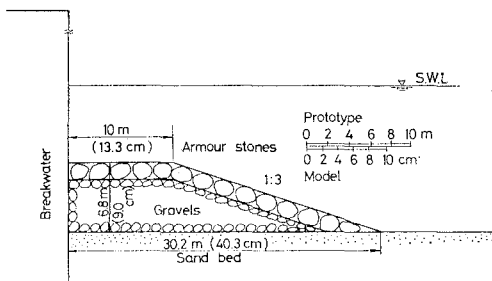


図-3 三次元実験に用いた防波堤の標準断面

a) 規則波による海底洗掘

Case 1 では $T_p=10.0$ s, $H_p=6.0$ m の規則波を波向 30° から作用させた。波作用 660 分後の地形と初期地形との間の水深差の分布を図-4 に示す。図より、3 次元

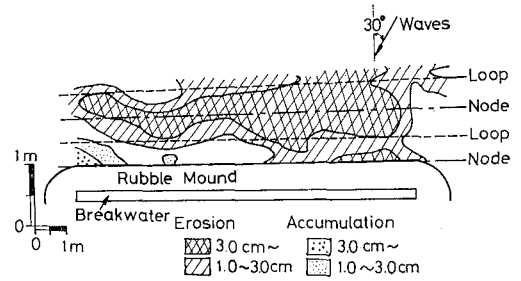


図-4 660 分後の地形と初期地形との間の水深差の分布

移動床実験では、侵食領域あるいは堆積領域が堤体に沿って一様に生じないことがわかる。しかし、重複波の節の位置を中心として侵食領域が存在し、L-タイプ of 海底地形変化による洗掘の生じたことを確認できる。

堤体に最も近い節の位置 (直立壁面から 42.0 cm) における洗掘深の防波堤に沿う分布を図-5 に示す。下流では側壁の影響と考えられる堆積領域が存在し、堤体の中央付近でも水槽内の水の共振あるいは前面波高分布の不均一性によると考えられる堆積領域が存在している。

そこで、側壁あるいは共振の影響を余り受けていないと考えられる測線-2, 3, 4 の断面図を図-6 に示す。

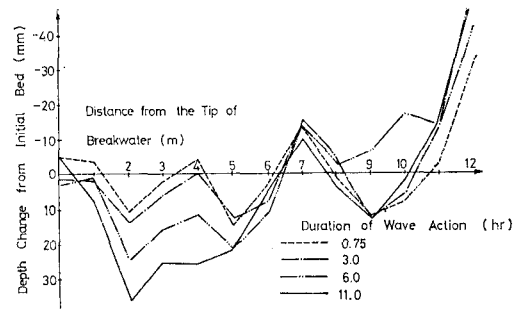


図-5 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case 1)

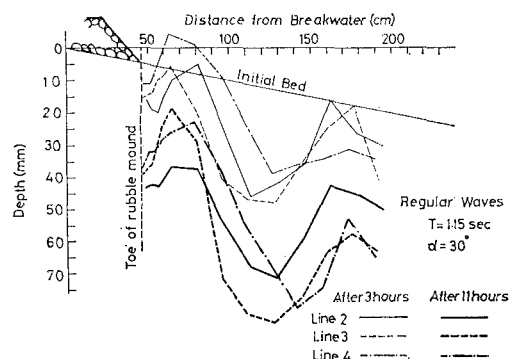


図-6 防波堤に直角方向の断面図 (Case 1)

法先を含めた重複波の節の位置で洗掘深が大きく、L-タイプ洗掘の生じたことをこの図からも確認できる。

b) 実験波として規則波を作用させた場合と不規則波を作用させた場合の海底洗掘の相違

Case 2 では、 $T_{p1/3}=11.3$ s、 $H_{p1/3}=6.0$ m の不規則波を波向 30° から作用させた。図-7 に測線-2, 3, 4 の断面図を示す。Case 1 の図-6 と比べて、洗掘深の絶対値に関しては明らかに規則波の方が大きい。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場合、規則波の方が単位時間あたりのエネルギーが大きいためと考えられる。

図-8 に、堤体に最も近い節の位置（直立壁面から 48.3 cm、有義波周期で計算）における洗掘深の防波堤に沿う分布を示す。規則波の場合に見られた堤体中央部における堆積領域は、不規則波の場合波作用時間の少ない間は現れず、ほぼ一様に侵食している。

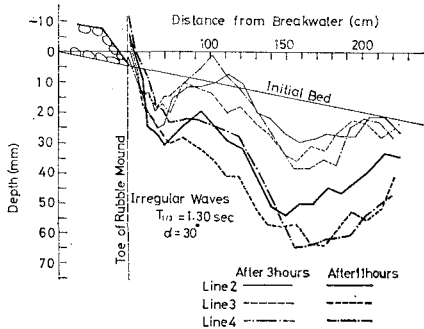


図-7 防波堤に直角方向の断面図 (Case 2)

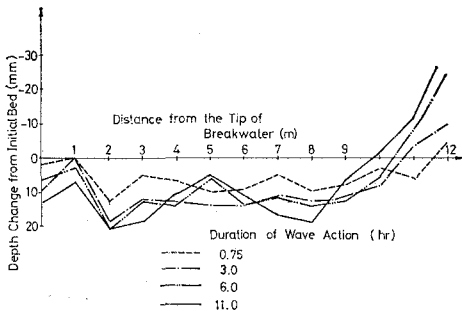


図-8 防波堤に沿う洗掘深の分布 (Case 2)

c) 波向による海底洗掘の相違

Case 3 では、 $T_{p1/3}=11.3$ s、 $H_{p1/3}=6.0$ m の不規則波を波向 45° から作用させた。図-9 に測線-2, 3, 4 の断面図を示す。Case 2 の図-7 と比較すると、洗掘深の絶対値に関しては、波向 $\alpha=30^\circ$ の方が $\alpha=45^\circ$ に比べて大きい。これは、海底洗掘に対して、底層平均流の堤体に直角方向の成分の方が、平行方向の成分に比べて影響力が大きいためと考えられる。

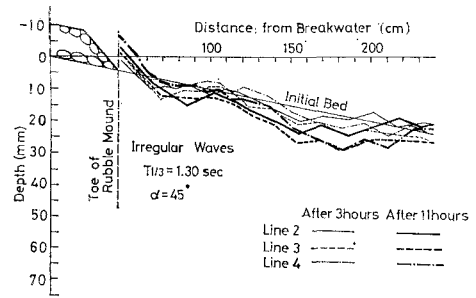


図-9 防波堤に直角方向の断面図 (Case 3)

d) 洗掘対策実験について

三次元実験の結果をまとめると以下の様になる。

①波が堤体に対して斜めから入射している場合でも、 $u_b/w > 10$ ならば L-タイプ洗掘が発生し、現地の現象をある程度表わすことができる。

②規則波の波高と不規則波の有義波高を等しくした場合、規則波のときの洗掘深の方が大きくなる。

③波向による違いを調べると、堤体に対してより直角に近い角度で入射したときの洗掘深の方が大きくなる。

ところで、洗掘対策実験は、洗掘防止工の効果を確認することを目的としているので、対策を施さない標準断面における洗掘深が大きくなるように実験法を選択した方が洗掘防止工の効果を評価しやすい。したがって、上述の三次元実験を考慮すると、洗掘対策実験は規則波を用いた二次元実験でも可能である。

3. 洗掘防止工

二次元実験、三次元実験の結果、これまで明らかになった重複波のもとでの底質移動の特性を利用し、有効な対策工法を見出すための実験を行った。

その一つは N-タイプの底質移動を利用する方法である。L-タイプ洗掘では、重複波の節の位置で著るしい洗掘が発生し、防波堤のマウンドの法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、防波堤マウンド法先が節の位置に当たるとき、 $u_b/w < 10$ となるグラベルを法先に敷くとグラベルは法先にとどまり、その下の底質の浮遊をおさえ法先洗掘を防止すると考えられる。

いま一つは堤体前面に消波工を設置する工法である。図-11に示すこの工法は一般的には消波を主目的として用いられるものである。しかし、消波工を設置すると底層平均流の堤体へ向かう成分が増えるため、今まで沖に運び去られていた法先の底質の量が減り法先洗掘防止に効果があると考えられる。

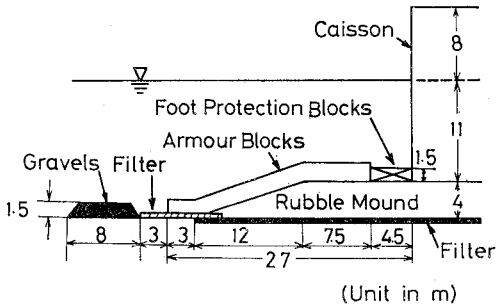


図-10 N-タイプの底質移動を利用する工法

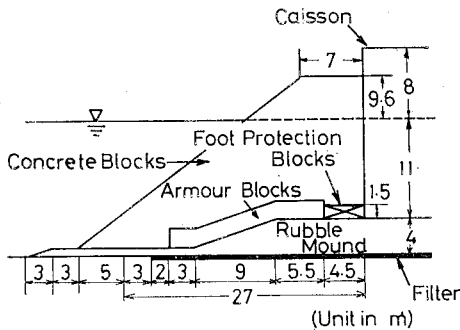


図-11 消波工を設置する工法

(1) 実験方法

洗掘対策実験は、 $u_b/w \gg 10$ となるような底質（中央粒径 0.07 mm）及び規則波を用いた二次元実験とした。実験波の波高は堤体設置水深において $H_p=7$ m, 周期 $T_p=10$ s とし、模型縮尺は 1/50 とした。

実験は、まず洗掘防止工を施さない標準断面で行った。(Case 4) 標準断面は 図-12 の様に決定した。波長が 216 cm なので法先が重複波の節の位置と一致した。

標準断面での実験終了後、前述した図-10 (Case 5), 図-11 (Case 6) の 2 ケースについて実験を行った。法先に敷いたグラベルの粒径は 5.0~10.0 mm で、 $u_b/w \approx 3$ であった。

波は計 600 分間作用させ、波作用 45 分, 90 分, 180

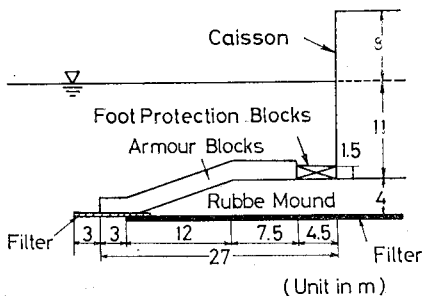


図-12 防波堤の標準断面

分, 360 分, 600 分後に地形測量を行った。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・根固工の散乱によって生ずるので、本実験では海底地形変化だけでなく被覆工・根固工の移動にも注目し、移動状況をスケッチによって記録した。

(2) 実験結果

法先における洗掘深の時間変化を 図-13 に、波作用 600 分後の海底地形及び被覆工・根固工の散乱状況を波高分布とともに 図-14 に示す。図-14 では、実線が波作用 600 分後の断面を、破線が初期断面を示している。

a) 標準断面における実験結果

図-13 に示すように、洗掘防止工を施さない標準断面では、波作用 45 分後ですでに重複波の節の位置にあたる法先で 3 cm 近い洗掘が起こっていた。しかし、被覆工・根固工は移動したものの横転してはいなかった。

波作用 90 分後には洗掘深が 3.5 cm にもなり、被覆工の横転も見られ、法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-14 の Case 4 に示す断面になった。この断面における被覆工の散乱状況は、現地で見られるものと比較的良く似ている。

b) 法先にグラベルを敷いた断面における実験結果

グラベルを設置した断面で波を作用させると、波作用 45 分後までに法先に敷いたグラベルの表面の石が転動してグラベル両側の 1:1 勾配の斜面がくずれてよりなだらかな斜面となり、しかもグラベル全体が若干堤体寄りに移動した。このとき標準断面で洗掘の起こっていた領域はグラベルで覆われているため底質の浮遊が阻止され、洗掘は発生していなかった。

更に波を作用させるとグラベルはわずかずつではあるが堤体寄りに移動し、しかもグラベルで覆われている領域にはしだいに砂がついて法先は堆積領域となった。波

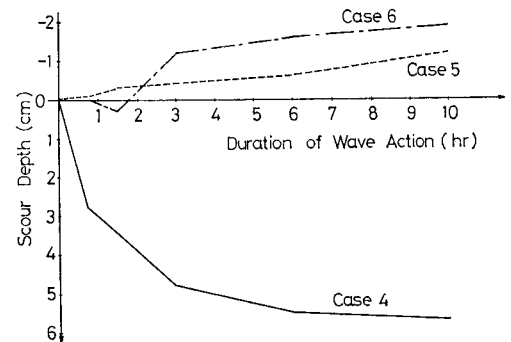


図-13 法先における洗掘深の時間変化

作用 600 分後の断面は図-14 の Case 5 に示す通りで、この工法が洗掘防止に効果のあることを示している。

c) 消波工を設置した断面における実験結果

消波工を設置した断面では反射率が 0.3 の部分重複波が形成されていた。浮遊している底質の量は標準断面のときに比べて少なく、地形変化量も小さかった。

波作用 90 分までは部分重複数の節の位置よりやや沖側の法先で 1~2 cm の洗掘が発生していた。しかし、波作用 180 分後ではこの洗掘が完全になくなり堆積領域となっていた。波作用 600 分後の断面は図-14 の Case 6 に示す通りで、この工法が洗掘防止に効果のあることを示している。

4. 結 語

三次元実験において斜め重複波による海底地形変化の特徴を調べた結果によれば、洗掘対策実験は $u_b/w \gg 10$ を満足する底質及び規則波を用いた二次元実験でも可能である。

この実験法によって底質移動の特性を利用した二つの洗掘防止工、すなわち N-タイプの底質移動を利用した工法と堤体前面に消波工を設置する工法の洗掘防止効果を調べたところ、両ケースともに洗掘防止効果のあることがわかった。

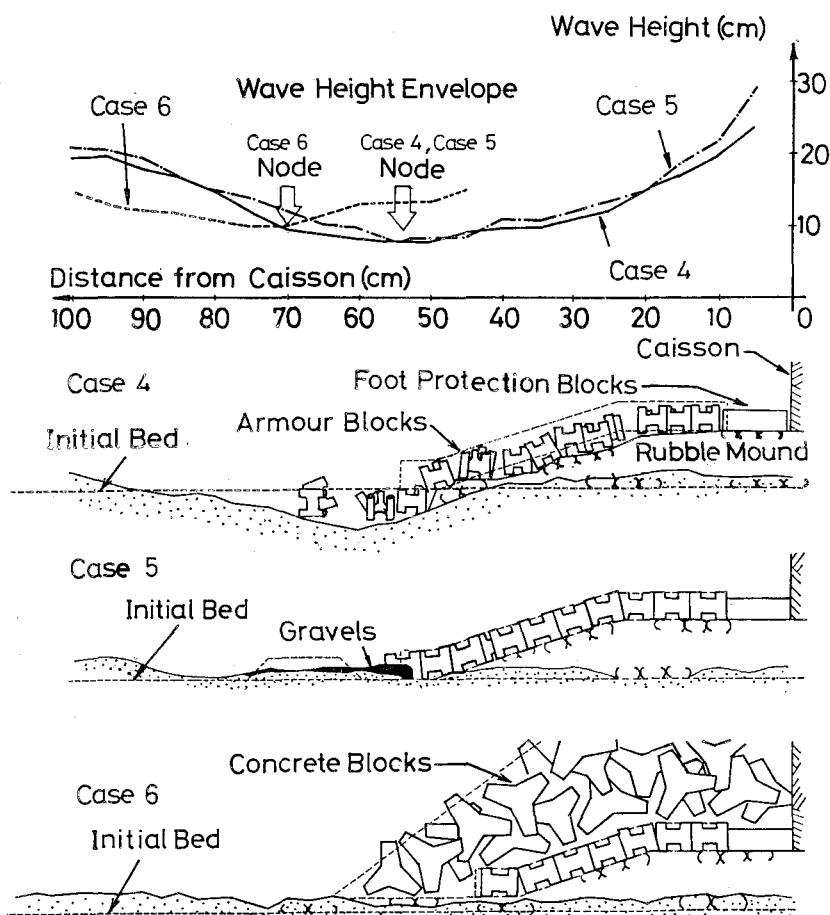


図-14 波作用 600 分後の海底地形及び被覆工・根固工の散乱状況

特にグラベルによる N-タイプの底質移動を利用した工法は実用上も有効と思われるが、それらの石材の大きさ、マウンドの高さ、幅については今後の検討課題である。

参 考 文 献

- 1) 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢次: 重複波による防波堤前面での海底洗掘—底質の移動機構に着目した研究—, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 350~354, 1984.
- 2) 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, pp. 111~140, 1972.