

防波堤前面の洗掘対策について

木原 力*・甲斐正義**・鳥居雅孝***・望月規行****

1. ま え が き

防波堤前面の洗掘に関する問題を解決することは、防波堤の長期的な安定性を確保するうえで重要な課題の一つであり、洗掘による被災が懸念される防波堤においては何かの対策工が施されている。しかしながら、その設置に際しての設計法は今だに確立されておらず、経験的な模索により対処しているのが現状である。ただし、その場合においても洗掘による被災例は報告されており、最近の傾向である防波堤の大水深化による建設費の増大を考えれば、その抜本的対策が望まれるところである。

一方、それらの問題に対処するための実験的研究は重ねられており、数多くの新しい知見が提示されてきた。なかでも防波堤前面の洗掘が、砕波帯内での戻り流れによるものと砕波帯外での重複波動によって生じることは周知のとおりである。また、後者については波の腹で洗掘され節で堆積する場合と腹で堆積し節で洗掘される場合に大別されるが、その発生機構を含めて発生限界が明らかにされており¹⁾、その定性を利用した洗掘対策工の有効性も実験的に確認されている²⁾。

しかし、それらの結果を現地に適用するには相似則の問題を解決しなければならず、室内実験に加えた現地調査が必要である。本報文は、模型実験によって示された対策工の有効性を現地調査と対比し、効果的な洗掘対策工を見い出すことを目的とした中間報告である。

2. 室内実験

(1) 実験概要

実験は後で述べる現地調査と対比するために、図-1に示す宮崎港の防波堤を対象に 1/60 の縮尺で行った。

まず対策工の選定を行うため、平面水槽内に設けた水路 (21 m×1 m×0.8 m×4 本) に 4 種の対策工 (アスファルトマット、グラベル、石カゴ、トレインマット) を

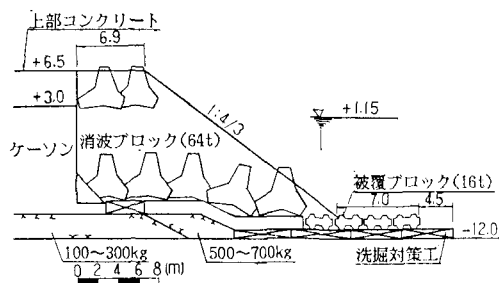


図-1 実験の対象断面

設置し、それぞれの洗掘防止効果について調べた。底質に用いた砂は中央粒径で 0.170 mm であり、波の条件は現地量で、入射波高 3.8 m (造波限界波高)、周期は荒天時を想定した 13.0 sec の規則波である。なお、現地での施工途中を想定するとともに反射率の違いによる洗掘状況を把握するため、消波工を設置しない場合についても調べた。

次いで、選定したアスファルトマットとグラベルについての洗掘防止効果を詳細に把握するため、形状または粒径を変化させた場合についても調べた。ただし、波の周期については重複波の節と防波堤のり先が一致する 9.0 sec である。また二次元水路 (30 m×0.8 m×0.95 m) を使用することにより、入射波高を 6.0 m (重複波の砕波限界波高) とした場合、不規則波 ($H_{1/3}=4.7$ m, $T_{1/3}=9.0$ sec) を作用させた場合についても検討し、さらには対策工を設置しない場合での洗掘状況についても観察した。ただし、底質に用いた砂は中央粒径で 0.225 mm である。

(2) 対策工の選定および反射率の低減効果

図-2 はグラベルを、のり先から沖側へ 4.5 m (現地量) の位置まで設置した場合の波作用 8 時間後の断面を示したものである。消波工は設置しておらず、グラベルについては現地 (100~300 kg/個) を対象とした幾何模型である。洗掘領域は、のり先の背後 7~8 cm から沖側へ約 30 cm であり、洗掘深は、のり先から沖側へ約 10 cm の位置で 2.0 cm に達している。グラベルは底質の吸い出しによって先端より沈下し、底質に埋もれた状態が被覆工の 1 列めに達している。そのため、1 列めの

* 正会員 (前)運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所所長
 ** 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所調査課長
 *** 運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所
 **** (前)運輸省第四港湾建設局宮崎港工事事務所所長

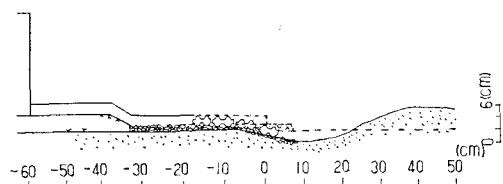


図-2 グラベル(厚さ 1m)を設置した場合

被覆工が前進する状態で洗掘孔に滑り落ちており、2列めも不安定な状態を示している。

このような傾向は、他の対策工を設置した場合においても同様であり、その洗掘防止効果も十分なものとはいえない状況であった。そこで、①石カゴについては金網の腐食やサンドブラストによる減失(早いものは設置後1~3年で生じる)が現地調査でも確認されており、その欠点を改善することが先決であること。②トレインマットの洗掘防止効果は、その構造から見ても相当の期待ができるものであるが、施工性や経済性を考慮すれば他の対策工での詳細な把握を行った後の検討が望ましいこと。を加味し、以降の実験ではアスファルトマットとグラベルに限り検討することとした。

なお、消波工の設置の有無による洗掘スケールは、いずれの場合でも消波工を設置した場合において小さくなる結果が得られた。これは反射率の低減が洗掘防止に効果的であることを示唆しており、対象の防波堤のような消波工を有する場合のその設置は、なるべく早い時期に行うことが望ましいと考えられる。

(3) 対策工の長さの違いによる洗掘防止効果

先に述べたが対策工の長さ 4.5 m では、いずれについても十分な洗掘防止効果は認められなかった。重複波の下での海底地形は波の節、腹に関して対称的な変化を示し、現地スケールにおいては節で洗掘され腹で堆積することが明らかにされている¹⁾。そこで、洗掘から堆積の基本的な境界域に着目し、波の節と腹の中間位置(反射面より 3/8 波長)に相当する 10 m、それを越える 15 m を対策工の長さとした場合の検討を行った。

図-3 にはアスファルトマットの長さを 10 m とした場合の波作用 6 時間後の断面を示した。入射波高は 6.0 m であり、周期は 9.0 sec である。実験に使用したマットの厚みは製作限界の 2 mm であり、単位体積重量と時間一たわみ特性を相似となるようモデル化したものであ

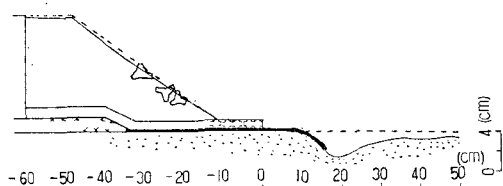


図-3 アスファルトマットを設置した場合

る。また、その先端には波による舞い上がりを防ぐため、直径 5 mm の透過孔を適当に設けた。波の作用初期にはマットの先端部に底質が集まり、のり先付近は堆積の傾向を示したが、それも時間の経過とともに徐々に洗われ、最終的にはマットの先端部で 3 cm に近い洗掘孔を生じる結果となった。マットは、その先端より約 8 cm の位置から地形に追従する形で湾曲状態になり底質の浮遊を抑制している。また、断面については消波工が波の影響により締め固まったため若干の沈下傾向を示したものの、他については初期の状態が保持されており洗掘対策として有効であったことがわかる。

なお、対策工の長さを 15 m とした場合については、洗掘孔が沖側へ若干の移動を示すなどの変化は見られたが、対策工としての評価に顕著な差は見い出せなかった。

(4) グラベルの粒径、厚さの違いによる洗掘防止効果

図-4 と図-5 は、グラベルの厚さと粒径が違う場合での波作用 6 時間後の断面について示したものである。グラベルの長さは 10 m であり、入射波高 6.0 cm、周期は 9.0 sec である。

両者とも、底質の吸い出しがグラベルの全域で生じており、その先端での洗掘が顕著である。ただし、洗掘防止効果の差は歴然としており、グラベルは、その形状を厚くすることよりも粒径を小さくすることが有効であると考えられる。

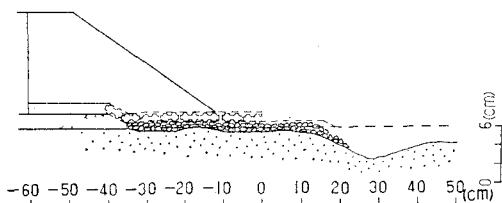


図-4 粒径 100~300 kg/個、厚さ 1 m の場合

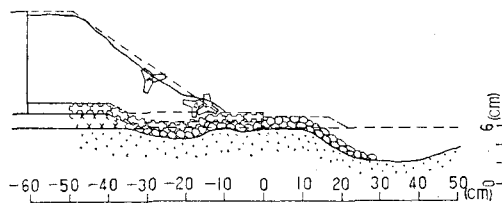


図-5 粒径 1 t/個、厚さ 2 m の場合

(5) 対策工を設置しない場合の洗掘状況

a) 規則波の場合

図-6 は、対策工を設置しない場合での波作用 6 時間後の断面を示したものである。被覆工の 1~3 列は、洗掘孔へ滑るように傾斜し、4~6 列は、地形変化に追従して沈下している。その影響によって消波工にも乱れが

生じており、転落するブロックも見られた。

なお最大洗掘深は、のり先に発生しており、重複波の節の位置と防波堤のり先が一致する場合は、特に慎重な検討が必要であると考えられる。

図-7 は、図-6 に示したのり先から沖側への波高分布と地形変化について示したものである。沖側での地形変化は波高に関して対称的であり、波の腹で堆積し節で洗掘されているが、波の反射面から1波長程度の間では、対称的な地形変化は示されていない。このような傾向は、対策工を設置した場合でも同じように示されており、原因については明確でないが、戻り流れの影響によるものと考えられる。

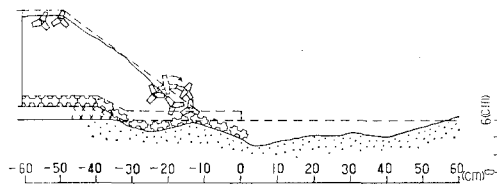


図-6 規則波を作用させた場合

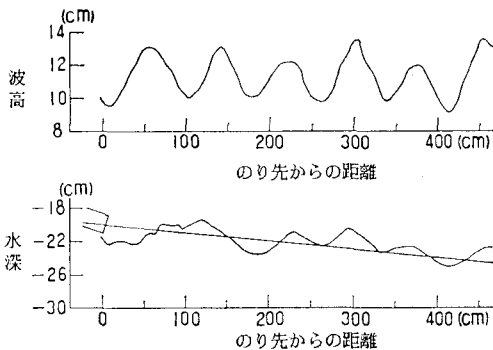


図-7 波高分布と地形変化

b) 不規則波の場合

図-8 は、不規則波を6時間作用させた場合の断面である。のり先付近は堆積し、被覆工のほとんどが底質で覆われている。また、堆積の領域から離れた沖側では、地形変化が示されておらず、リップルが形成された程度であった。このような傾向は、不規則波が作用する反射面近くでは重複波が存在するが、反射面から十分に離れたると波高変動が小さくなり一定の値に落ち着く³⁾といった定性からも明らかのように、沖側での底質移動に卓越した方向性が存在しなかったために、地形変化が生じな

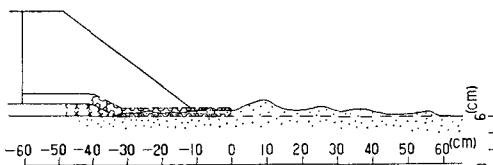


図-8 不規則波を作用させた場合

かったものと考えられる。

ただし、のり先付近の堆積領域は、波と底質の特性により重複波の節で堆積することで示されたものと考えられるが、現地では洗掘領域で示されるはずである。したがって、室内実験の相似則の問題には、そのような危険性が含まれており、対策工の検討は慎重に行う必要がある。

3. 現地調査

(1) 調査概要

現地調査は宮崎港の防波堤にモデル工区を設定して行った。対象の防波堤は漂砂海域である日向灘に位置し昭和54年より、その整備に着手している。モデル工区は隣接する3工区(60m×3工区)に設定し、それぞれにアスファルトマット、グラベル、石カゴを対策工として設置した。ただし、モデル工区の断面は図-10に示すとおり施工途中の暫定的なものである。

調査では、防波堤前面の変状を把握し、対策工の違いによる洗掘防止効果を同時に行った波浪観測と結びつけて調べた。なお、調査は昭和62年7月から10月にかけて行った。

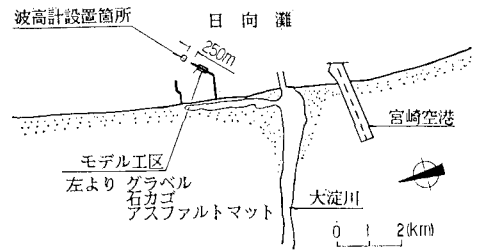


図-9 調査位置図

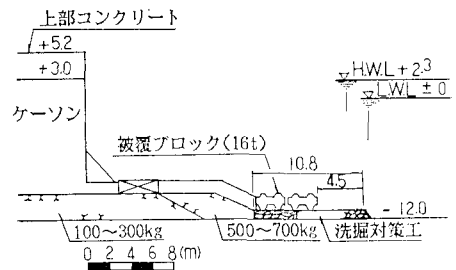


図-10 モデル工区の断面

(2) 波浪状況

調査期間中の波浪状況は、後で述べる変状調査の結果と対比するために、以下のとおり期間別に示した。なお、波高、周期の測定は水圧式の波高計で行い、波向きは、目視観測により把握したものである。

a) 7月26日から9月2日にかけての波浪状況

期間中の代表的な波浪は $H_{1/3}$ で $0.6 \sim 0.8$ m, $T_{1/3}$ で $8 \sim 12$ sec 程度、波向きについては E~SE で卓越し

ており、波高が大きくなるにしたがって SE (防波堤に直入射の方向) に近づく傾向がある。高波浪の例としては、台風 12 号の影響で 8 月 31 日には $H_{\max}$ で 6.2 m が記録された。 $H_{1/3}$ は 4.4 m であり、 $T_{1/3}$ は 9.0 sec が示されている。

b) 9 月 3 日から 10 月 18 日にかけての波浪状況

高波浪を抽出すると、9 月 13 日から 16 日にかけては台風 13 号の影響により $H_{1/3}$ で 4 m 以上、 $T_{1/3}$ は 12 sec 程度が記録されている。また 10 月 14 日から 16 日にかけては台風 19 号が接近し、16 日には $H_{\max}$ で 10.3 m が記録された。 $H_{1/3}$ は 7.8 m、 $T_{1/3}$ は 13.6 sec が示されており、付近は典型的な碎波領域である。また波向きは、いずれについても SE である。ただし、期間中の代表的な波浪については、台風の発生時期でもあり $H_{1/3}$ で 0.6~3.0 m、 $T_{1/3}$ で 7~13 sec 程度で変動しており、波向きについては E~SE で卓越している。

(3) 海底面の経時変動

図-11 は、海底面の経時変動 (8 月 3 日~9 月 5 日) について示したものである。変動量の把握は、光電式の砂面計を防波堤前面の直立壁から約 30 m 離れたモデル工区内 (石カゴの工区) に設置して行った。なお、図中の縦軸は海底面の高さを表し、負号は深くなる場合を示す。

8 月 25 日までの海底面は、その期間の穏やかな波浪に対応し -20 cm で落ちついているが、8 月 26 日からは、台風 12 号の影響によって再び変動を始め、8 月 31 日のピーク時には -70 cm に達した。その後は、もとに戻る傾向が示されており、9 月 5 日には -40 cm であった。

このような傾向は、実験的な研究によって明らかにされている重複波の下での洗掘機構^{1),4)}を肯定するものであり、底質移動が波と底質の特性によって支配されていることを裏づけるものである。

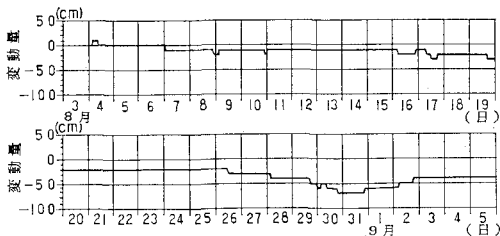


図-11 海底面の経時変動

(4) 対策工別による防波堤前面の変状

防波堤前面の変状を把握するために行った深浅測量と潜水探査の結果を以下に述べる。

a) アスファルトマットを設置した場合

図-12 は、アスファルトマットを設置した場合の防波

堤前面の変状について示したものであり、図中の点線は初期状態 (7 月 25 日) を表している。

9 月 3 日には、すでに防波堤のり先付近で洗掘が生じており、その深さは約 0.7 m に達している。アスファルトマットや被覆工も追従して沈下し、洗掘領域は、のり先から沖側へ約 25 m の位置に達した。

一方、10 月 19 日の洗掘スケールは、さらに増大しており最大洗掘深で約 2.0 m、洗掘領域は、のり先から沖側へ約 45 m に達した。被覆工はマウンドからの底質の吸い出しによって全域で沈下している。なお、アスファルトマットの先端には室内実験と同じく透過孔を設けたことにより波による舞い上がりもなく、その先端は埋没する状態で落ち着いている。ただし、マット自体が沈下する原因については、透過孔からの底質の吸い出しなどが考えられるが詳細は不明である。

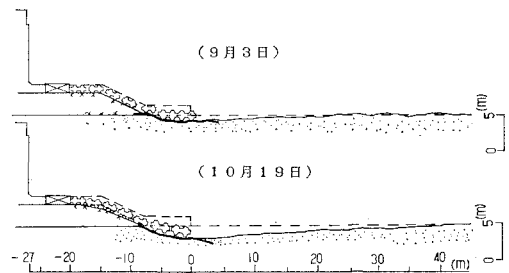


図-12 アスファルトマットを設置した場合

b) グラベルを設置した場合

グラベルを設置した場合でも、防波堤前面の変状はアスファルトマットの場合と同様であり、洗掘スケールも同程度であった。ただし、グラベルの乱れが生じており、その被覆面は保持されているものの、底質は吸い出されているようである。

c) 石カゴを設置した場合

この場合でも他の対策工と同様の結果が示されたが、すでに金網の滅失した箇所も生じている。

(5) 洗掘特性および対策工の洗掘防止効果

今回の現地調査で得られた防波堤前面の洗掘特性を以下に示す。

- ① 重複波領域での防波堤前面の洗掘は、波の節の位置で顕著であり、そのスケールは波と底質の特性によって支配される。
- ② ただし、荒天時には洗掘深さ、洗掘領域とも増大する傾向にある。
- ③ 防波堤前面の地形変化は、波の反射面から 1 波長の範囲内に示される程度であり、波の節、腹に関して対称的な変化を示すとも限らない。

以上については室内実験でも示されたことであり、洗掘対策の検討の際には、十分に考慮する必要があると考えられる。

なお、対策工による洗掘防止効果は、いずれについても顕著な差は見い出せず、十分なものとも言い難い状況であった。したがって、防波堤のり先の洗掘が比較的穏やかな波浪によっても発生していることや室内実験の結果を考慮すれば、対策工の最適長さを検討するためのデータが必要である。

4. 結 語

本研究によって得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 不規則波が作用する防波堤前面の海底地形の変化は、波の反射面から1波長の範囲内に示される程度であり、波の腹、節に関して対称的な変化を示すとも限らない。また、その傾向は戻り流れの影響が卓越する荒天時において顕著であり、洗掘領域を設定する際は慎重な検討が必要である。
- (2) グラベルの洗掘防止効果は、その形状を厚くすることよりも粒径を小さくすること(波によって動かされない条件は必要である)による期待が大きい。しかし、その場合でも底質の吸い出しは認められており恒久的な対策工としての検討が必要である。
- (3) 石カゴは、カゴ自体の耐久性が改善されれば、使用する石の粒径を可能な限り小さくできるなど、グラベルの欠点を補う対策工として検討の余地はあると考えられる。
- (4) アスファルトマットは地形変化への追従性が良く、先端部に設けた透過孔の効果により波による舞

い上がりもなかった。また、荒天時の戻り流れに絶対的な抵抗性を有するなどの利点もあるが、マット自体の沈下が生じるなど、さらに検討を加える必要がある。

以上の結論を得たが、いずれについても明確な提示をするには至っておらず、室内実験の相似則の問題は今だに山積みの状態である。したがって、今後においてもデータの蓄積が不可欠であり、新たなモデル工区も設定したところである。

最後に、運輸省港湾技術研究所の入江 功海洋水理部長、同所水工部漂砂研究室の方々から貴重な御意見をいただいた。また、現地調査は運輸省第四港湾建設局宮崎港工事事務所の方々によって遂行されたものである、ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 入江 功・灘岡和夫・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一底質の移動機構に注目した研究一、港湾技術研究所報告, 第23巻, 第1号, pp. 3~52, 1984.
- 2) 入江 功・栗山善昭・浅倉弘敏: 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、港湾技術研究所報告, 第25巻, 第1号, pp. 3~86, 1986.
- 3) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法、港湾技研資料, No. 248, pp. 11, 12, 1976.
- 4) 入江 功・栗山善昭・浅倉弘敏・藤田 誠: 斜め入射重複波による無マウンド堤前面の海底洗掘、港湾技研資料, No. 581, pp. 3~48, 1987.