

防波堤基礎工における洗掘防止工の実態調査

鈴木高二郎* ・渡邊和重** ・山本 悟***
梅崎康浩**** ・小澤康彦***** ・村上俊春*****

宮崎港南防波堤は全長 2,150 m で, 昭和 56 年から建設が進み, 現在, 建設の最終段階にある。当防波堤は夏期の台風のため設計有義波高が 10 m 以上と大きく, 細粒の砂地盤上に設置されるため各種洗掘防止工を用いて室内実験や現地実験を重ねた上で, 現況の防波堤断面が決定されてきた。現地実験では洗掘による防波堤の変形もあり, その防止工は施工法も含めて改良されてきている。本研究では, 洗掘防止工の設計法の確立に資することを目的として, 宮崎港南防波堤での洗掘に関する現地実験と過去の洗掘の実態を調べるとともに, その対策法をとりまとめた。

1. はじめに

混成防波堤の法先洗掘や捨石下部の砂が吸い出されることによる洗掘は消波ブロック, あるいはケーソン本体の沈下をもたらし, 防波堤の機能を損なうほか, 衝撃碎波の誘発によるケーソンの滑動, 破壊の原因となる場合がある。そのため, これまで防波堤の法先にはアスファルトマットのような法先洗掘防止工, マウンド碎石の下部には帆布のような洗掘(吸い出し)防止工が施されてきた。しかし, その設計法や施工法は未定な部分が多い。その原因としては, 小型の水理模型実験を行おうとしても, 0.2 mm 程度の砂や数 mm の厚さの帆布を縮尺にあわせて小さくするということができないため小型実験でその効果を確認が難しいこと, また, 構造物の一番下に敷設されるため, 施工後の効果や耐久性に関する事後調査が困難であったことがあげられる。このような設計法や施工法が未確立のため完成後被災する場合も多い。

本研究で対象とする宮崎港南防波堤は全長 2,150 m で, 昭和 56 年から建設が進み, 現在, 建設の最終段階にある。夏期の台風のため設計有義波高が 10 m 以上と大きく, 細粒の砂地盤上に設置されてきたため計画当初から当時最新の洗掘防止工法を用いて現地実験や設計・施工がなされてきた。また, 洗掘による防波堤の変形もあり, その防止工は施工法も含めて改良されてきている。

本研究では, 洗掘防止工の設計法の確立に資することを目的として, 宮崎港南防波堤での洗掘に関する現地実験と過去の洗掘の実態, さらにその後採用された洗掘対策工についてとりまとめることとした。

2. 宮崎港南防波堤の概要と設計条件

宮崎港は日向灘に位置し, その第一線防波堤である南

* 正会員	工修	(独法)港空研 海洋・水工部 主任研究官
** 正会員		鳥取県県土整備部空港港湾課長(前 国交省九州地方整備局下関技術調査設計事務所長)
*** 正会員		国交省九州地方整備局下関技術調査設計事務所副所長
**** 正会員		国交省九州地方整備局下関技術調査設計事務所
*****	工修	国交省九州地方整備局宮崎港湾空港整備事務所
*****		国交省九州地方整備局宮崎港湾空港整備事務所副所長

防波堤は夏から秋にかけて台風による高波の来襲を受け, その沖波設計有義波高は 13.8 m, 周期は 14.4 s と大きい。

図-1 は南防波堤の平面図であり, 工区と設計波高, 周期をとともに示している。防波堤は 19 の工区に分けて築造されており, 沖合に向かうにつれて水深が増加し, 設計波高も大きくなっている。一方, 海底は中央粒径 0.14~0.2 mm の細砂からなる砂質地盤であり, 洗掘を受けやすい。

図-2 は, これまでに築造された南防波堤の特徴的な断面図であり, それぞれ, 7 工区, 12~14 工区, 18 工区の断面図である。なお, 5~7 工区は直立混成堤, 8 工区以後は消波ブロック被覆堤である。

図-3 は, ケーソンと各種洗掘防止工の施工年度を示すものである。これまでに, 多くの洗掘防止工が実施されていたのが分かる。

これまでに, 洗掘防止工としては, 法先に遮水性の“アスファルトマット”や“塩化ビニルマット”, 碎石フィルター材としての“石かご”, “グラベルマット”が用いられている。なお, “石かご”とは 100~300 kg の碎石を金網の中に入れたものであり, “グラベルマット”とは 100~300 kg の碎石を砂地盤上に置いただけのものである。

いずれも, 碎石の中で流れを小さくし, 砂の舞い上が

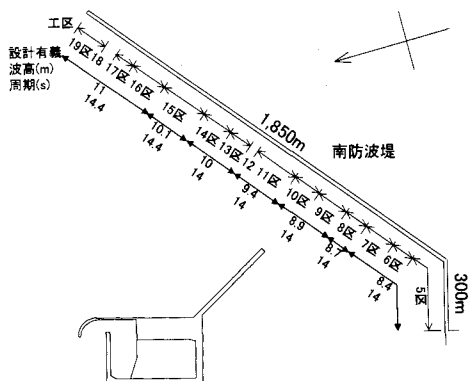


図-1 宮崎港南防波堤各工区と設計波高, 周期

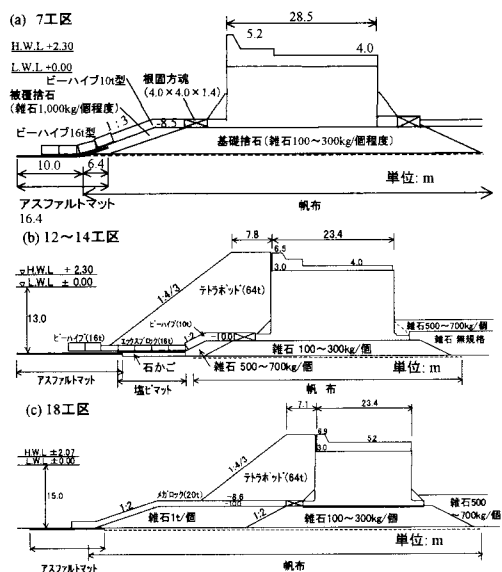


図-2 各工区の特徴的な断面図

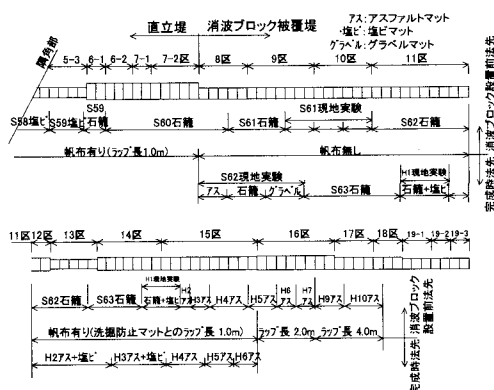


図-3 各種洗掘防止工の施工年度

りを抑え、砂が碎石から漏れ出して洗掘を受けないようにするためのものである。一方、100～300 kg の碎石で造られたマウンドの下には、“帆布”といわれるジオテキスタイルが使用されている。

現在の断面は現地実験やその後の経過を追跡し、安定性を考慮した上で、図-2(c)のようなアスファルトマットと帆布を併用した断面となっている。

3. 洗掘防止工の現地実験

(1) 現地実験の目的

昭和58年当時、直立堤では重複波の節で洗掘が発生するという現象(L-type洗掘)が明らかになっていた(入江ら, 1984)。しかし、消波ブロック被覆堤の洗掘防止工は検討例がほとんど無かった。そのため、図-3の8~10工区の“S61現地実験”、“S62現地実験”で示される位置

で洗掘防止工を選定するために現地実験が行われた。S61 現地実験では、消波ブロックを設置する前の直立堤の断面（以下、暫定断面）での洗掘防止工の性能の比較を、S62 現地実験では消波ブロックを設置した後の消波ブロック被覆断面（以下、完成断面）での洗掘防止工の性能の比較を行っている。使用した洗掘防止工は、アスファルトマット、石かご、グラベルマットである。

(2) 施工順序と観測方法

施工は昭和60～61年にケーソン、被覆ブロック等を設置して暫定断面とした後、昭和62年に消波ブロックを設置し完成断面とするように2年度に分けて行われている。

構造物設置後の観測は、ケーソンより沖合 150 m までの区間について、海底地盤、法先洗掘防止工、被覆ブロック、消波ブロックの変化を昭和 62 年 9 月、10 月、平成元年 2 月、7 月、12 月、平成 2 年 9 月に行っている。

また、ケーソンもその4隅の沈下量を計測している。

(3) 觀測結果 (暫定断面: 直立断面)

消波ブロック設置前の暫定断面では、L-type 洗掘により法先が洗掘され、いずれの断面でも約 2 m の洗掘孔ができて、洗掘防止工はこれになじむように変形している。なお、この結果は既に木原ら (1988) で報告されている。

(4) 観測結果（完成断面：消波ブロック被覆断面）

図-4 は、消波ブロックが設置された後の堤体の変形状況である。写真-1 は、このときの消波ブロックの沈下状況を防波堤の沖から撮影したものである。写真では、中央部の石かごによる施工部分が大きく沈下しており、アスファルトマットやグラベルマットの性能の方が良いように見えるが、図-4 から分かるようにアスファルトマットやグラベルマットの場合も天端部が残っているだけで、全体的に消波ブロックは大きく沈下している。

一方、法先の洗掘孔は暫定断面の時ほど大きくなっておらず、法先の被覆ブロックや石かごはあまり沈下していない。

このように消波ブロック法先の洗掘が大きくないにもかかわらず、消波ブロックが大きく沈下するのは、消波ブロック下部マウンド下の砂地盤が洗掘を受けたためであると考えられる。このような現象は、消波ブロック前面で波が碎波することで、消波ブロック下部で沖向きの流れの継続時間が、岸向きの流れの継続時間より長い振動流が発生し、砂が消波ブロックの外に吸い出されてしまうことで発生するものであり、最近の大型移動床実験で明らかになっている（鈴木ら、2002）。

このような消波ブロック下部の洗掘は、マウンド下部でも起こるため、法先洗掘防止工だけでは不十分である。8～11 工区では試験的に帆布を入れなかったため、消波ブロックの沈下をさらに大きくしたものと考えられる。

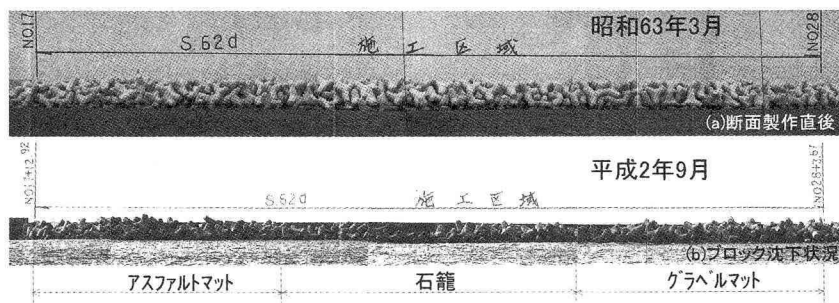


写真-1 消波ブロックの沈下状況，現地実験（完成断面）

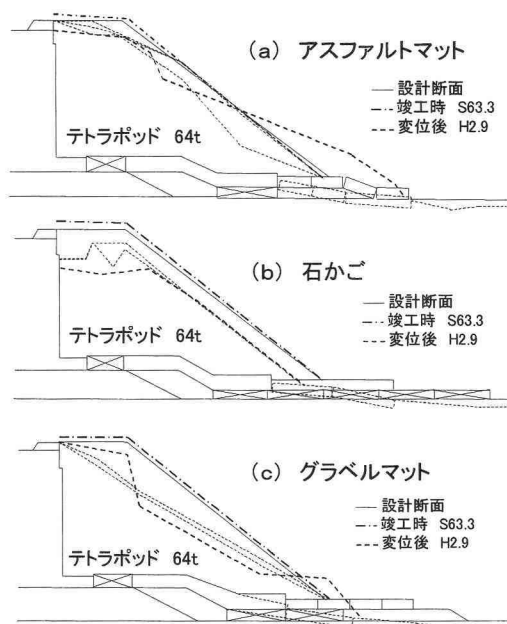


図-4 現地実験（完成断面）での消波ブロックの沈下

また，暫定断面の状態で1年間放置されていると，法先部がL-type洗掘を受けるため，前に施工した洗掘防止工と次に施工する洗掘防止工のラップがうまくできず，消波ブロックを設置した後にラップの不十分な箇所での洗掘が発生する。したがって，洗掘防止工の位置を確認し，隙間無く施工することが重要である。

(5) 観測結果（ケーソンの沈下）

図-5は5～14工区におけるケーソンの沈下量であり，7，9，11工区で大きく，11工区では約1m沈下している。図-6は5～15工区間の土質柱状図であり，沈下の大きい箇所では粘土層が見られ，粘土層の圧密による沈下が大きな要因ではないかと考えられる。

図-7はケーソン沈下の履歴であり，ケーソン据付直後から沈下が起こり，1000日を過ぎる頃には徐々に落ち着いているものと推定される。

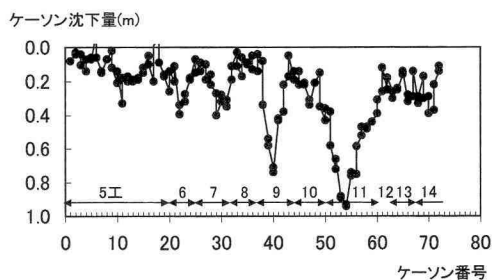


図-5 ケーソンの沈下状況

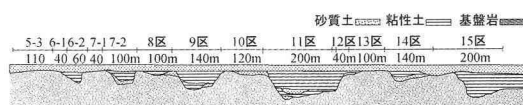


図-6 南防波堤下部海底地盤の土質柱状図

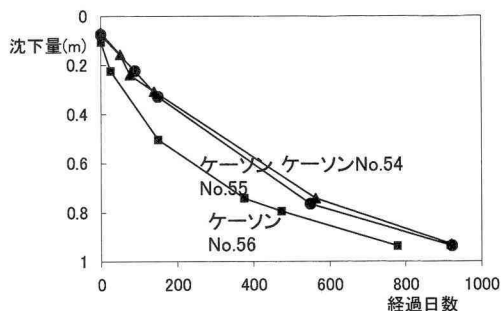


図-7 南防波堤ケーソンの沈下履歴

このような圧密による沈下は設計で考慮されており，圧密沈下が収まった上で沈下した量を考慮し，パラベットを継ぎ足すという方法をとっている。

図-8は，ケーソンの港外側の沈下量から港内側の沈下量を差し引いたものである。7，9，11工区では，港外側の沈下量が多い。森平ら（1978）に示されるように帆布を敷設していない場合，ケーソンは港外側のマウンド下部の砂が洗掘を受け，港外側に傾斜しやすい傾向がある。

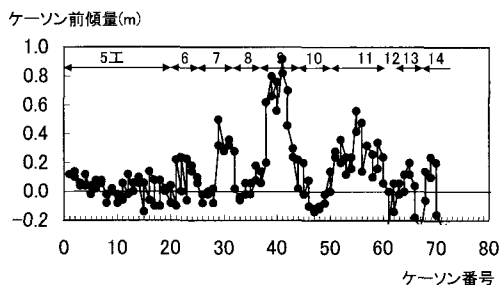


図-8 ケーソンの沖側への傾斜と前傾化

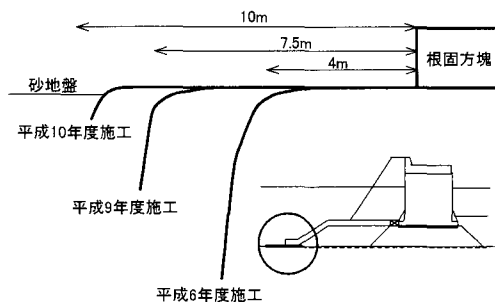


図-9 法先アスファルトマットの洗掘孔への追随

7, 9, 11 工区では帆布が敷設されておらず、粘土層の圧密沈下の他に、こうしたケーソンマウンド下部での洗掘が発生している可能性がある。

(6) アスファルトマットの経時変化

図-9 は 16～19 工区のアスファルトマット張出部の経年変化である。アスファルトマットはその重量とたわみ性により波であおられることなく洗掘孔にそって変形するように設計されており、洗掘孔が消波ブロックやケーソンにまで進行してくるのを抑える役割を果たしている。

設置当初マットの張出長は 10 m だったが、洗掘孔が大きくなるにつれて洗掘孔になじむように垂れ下がり、平成 6 年に施工されたマットは水平部が 4 m まで減少している。マットの張出長は、通常波長の 1/8 程度必要とされているが、洗掘孔は消波ブロックの位置まで及んでおらず、南防波堤のマット長 10 m が適切な長さだったことが分かる。

(7) 施工区境での洗掘

施工区境（施工年度をまたぐ境目）では、前年度以前に施工された防波堤端部において、帆布やアスファルトマットが 1 年以上放置され、その間波でこれらの洗掘防止工がめくれ上がるなどして、その後防波堤を延伸する際に、新しい施工箇所との間でうまくラップさせられない状態となる。図-10 は 15 工区の平成 3 年と平成 4 年の施工区境で発生した洗掘により、被覆ブロックが沈下

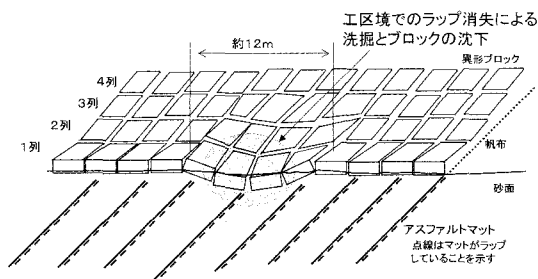


図-10 施工区境でのラップ不良によるブロックの沈下

した例である。

4. 洗掘防止工の設置法

(1) アスファルトマットと帆布の併用

前出図-2(c)は現行の設計断面であり、現地実験に基づいている。現行の設計法では、マウンドの下に帆布を、法先部にはアスファルトマットを用いている。また、施工は同年度に施工することで、帆布とアスファルトマット間に隙間ができないようにし、さらに、帆布とアスファルトマットのラップ長は 4 m としている。

(2) アスファルトマットの必要厚

8 工区のアスファルトマットの厚さは移動床水理模型実験によりその浮き上がり移動限界を求めた上で決定し、空隙率 20% の孔あきアスファルトマットを採用している。実験で得られた暫定断面（消波ブロック設置前）での必要なマットの厚さは 8 cm、完成断面では 6 cm であったため、現地では暫定断面の厚さ 8 cm のマットが使用されている。

その後、9 工区以後の必要マット厚は、尾崎ら(1987)のマットの厚さとマットの浮き上がり設計抵抗力の図(図-11)を以下のように適用して求めた。

図-11 中、 H は堤前有義波高であり、 q は (1) 式で与えられる。また、 κ は各防波堤の断面形状などから決定される係数で実験により求める必要がある。なお、 ρ_w ：海水の単位体積重量、 g ：重力加速度、 h ：水深、 L ：波長である。

$$q = \rho_w g / (2 \cosh(2\pi h/L)) \dots\dots\dots (1)$$

南防波堤 8 工区（暫定断面）では、堤前有義波高 H が 7.3 m、有義波周期 T が 14 s、水深 h が 12 m であり、 Hq は 32.5 (kPa) である。一方、水理模型実験によって得られた必要マット厚 t は 8 cm であり、図-11 より κHq は 37.3 (kPa) である。よって、南防波堤における κ は 1.147 と求められる。

9 工区以後は、この $\kappa=1.147$ を用いて図-11 より必要マット厚を求めている。例えば、14 工区の暫定断面では有義波高 H が 8.4 m、周期 T が 13.3 s、水深 h が 13.5

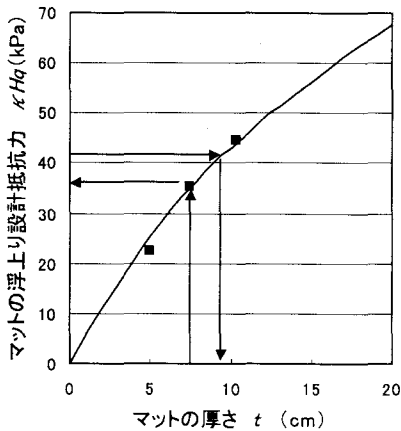


図-11 必要アスファルトマット厚の算定図

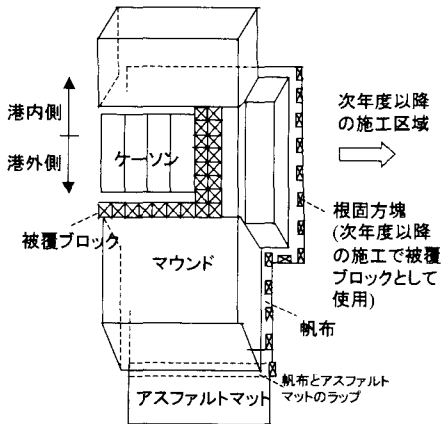


図-12 施工区境での帆布の保護対策

mであり $\kappa Hq=41.5$ (kPa)であり、図-11より必要マット厚は9.2 cmとなる。以上の計算結果から、マットの安定性を考慮し、10 cmのマットを使用している。

(3) 施工区境の洗掘対策

3.(7)のような施工区境での洗掘を防ぐため、施工後次の断面の製作まで1年以上あける場合は、図-12のように根固方塊を帆布の端部に設置することでめくれやよりが生じないようにしている。また、アスファルトマットの場合も施工区境での隙間ができないように、次の施工時に前の施工時と十分なラップ長を持たせるようにしている。なお、根固方塊は次年度以後の施工で被覆ブロックとして使用している。

5. ま と め

本研究では、宮崎港南防波堤での設計施工の経緯、洗

掘防止工の効果に関する現地実験等を取りまとめ、宮崎港南防波堤における特徴的な対策法を取りまとめた。主な結論は以下のとおりである。

(1) 消波ブロックを設置する前の直立堤の断面(暫定断面)と消波ブロックを設置した後の消波ブロック被覆断面(完成断面)での洗掘防止工の性能の比較を行った。暫定断面ではL-type洗掘による法先の変形が見られた。一方、完成断面では法先の変形は大きくないものの、消波ブロックの沈下が見られた。これは消波ブロック下部マウンド下の砂地盤が洗掘を受けたためであると推定される。このような消波ブロック下部の洗掘は、マウンド下部でも起こるため、法先洗掘工だけでは不十分である。

(2) 現行の設計では、マウンドの下に帆布、法先部にアスファルトマットを用い、帆布とアスファルトマットの間に4 mのラップをとって洗掘防止工の間に隙間が発生しない設計法をとっており、ほぼ妥当であることが分かった。

(3) アスファルトマットの経年変化を調べたところ、波浪等でめくれあがることなく、洗掘防止工になじみ、適切なマット厚とたわみ性を備えていることが確認された。

謝辞：本研究を行うにあたり日本海上工事田崎邦男部長、乾邦博九州営業所長、さらに港湾空港技術研究所高橋重雄統括研究官、山崎浩之土質研究室長、下迫健一郎耐波研究室長より貴重ご助言を頂いている。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 入江 功・近藤隆道・赤石正廣・寺崎賢次 (1984): 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.
- 尾崎 晃・鴻上雄三・田崎邦男・中野 浩・小川明久 (1987): 洗掘防止工の現状と海底面被覆工の波力に対する安定性, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 416-420.
- 木原 力・甲斐正義・鳥居雅孝・望月規行 (1988): 防波堤前面の洗掘対策について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 402-406.
- 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎 (2002): 砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について—現地調査と大規模実験—, 港湾空港技術研究所報告第41巻, 第1号, pp. 51-89.
- 日本海上工事株式会社 (2001): 洗掘および吸出し防止用アスファルトマット工調査研究報告書, p. 30.
- 日本港湾コンサルタント (1990): 防波堤法先洗掘防止対策調査委託報告書, p. 118.
- 森平倫生・神田勝己・国田 治 (1978): 沖合防波堤設計上の諸問題(新潟港防波堤災害の考察), 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 581-584.