

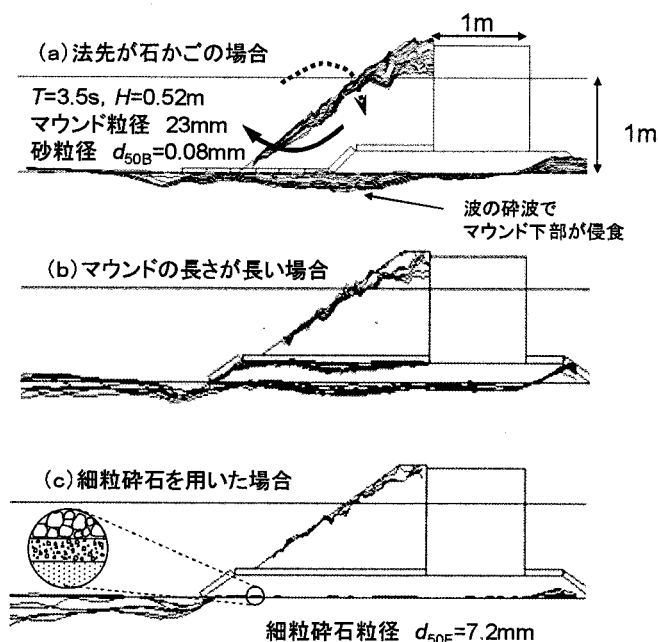


図-2 水理模型実験によるマウンド下部の洗掘状況と、細粒砕石による対策工法

が行われるまでは、このような現象がよく分かっていなかった。

これまでもマウンド下部の洗掘防止工としては、帆布などのジオテキスタイルや、ジオテキスタイルの網の中に砕石を入れたフィルターユニット、あるいは塩ビマットやアスファルトマットのようなマットなどが実際に使用されてきた。フィルターユニットやアスファルトマットは施工後の安定性が高いものの、費用が高いため災害復旧費用も勘案して、実際には帆布が用いられる場合がほとんどである。

帆布は数 mm の厚さと軽いため、波浪や潮流で舞い上がりやすく施工が困難である。また、マウンド砕石を設置する際や設置後の波によって破損するケースが多く、機能していない可能性が高い。

このように既にいくつかの工法が実施されているものの、その効果は明確ではなく、洗掘防止工を全く設置していない防波堤も多い。

以上のような理由から、マウンド下部の洗掘によるものと考えられる消波ブロックの沈下や、それにとまうブロックの衝突によるケーソン壁の損傷が2000年以降も全国各地で問題となっている。

そこで鈴木ら(2002)は新たなマウンド下部の洗掘防止工として、図-2(c)のように数 mm～数 cm の細粒の砕石をマウンド下部に敷設する工法を提案し、その有効性を大規模な水理模型実験によって確かめている。この工法は細粒砕石をマウンド砕石と同様に海底地盤に敷設するという単純な工法なので、コストは帆布敷設の半分程度となり、費用面からも有利である。しかし、これまでのところ現地に適用する場合の設計法や施工法が確立されていなかった。

そこで本研究では、細粒砕石工法の設計法と施工法を確立することを目的として、施工法に関する現地実験を行うこととした。

なお、図-2の実験では全ケース、法先洗掘防止工の模型を設置しなかったため、マウンド法先で洗掘が発生した。法先洗掘防止工も今回のマウンド下部の洗掘防止工とあわせて実施する必要があることが分かる。また、図-2(a)と(c)を比較するとマウンド法先だけでなく、防波堤の前面の水深が全体に深くなっている。この現象は断面実験の結果であり、実際には防波堤前面の水深は防波堤に沿う流れなどによって決まってくるものと考えられ、図-2(a)も(c)も実態はあまり変わらないものと考えられる。

2. 設計対象の防波堤と現地施工実験

細粒砕石の設計を図-3の位置にある高知港三里地区東第一防波堤を対象として行い、平成18年11月1日から約1ヶ月かけて施工実験を行った。

水深は14.3m、堤前の設計最大波高は13.2m、周期は16.1sであり、その設計断面は図-1に示すとおりである。マウンド厚は3.8mであり、そのうちマウンド下部の洗掘防止工として、細粒砕石を0.7mの厚さで敷設した。

なお、今回の現地施工実験終了後、約1年後にマウンド砕石の法先に洗掘防止マットと1000kg/個の被覆石が設置され、さらにケーソン本体と被覆ブロック、消波ブロックが設置される予定である。

今回の現地施工実験では①設置時に細粒砕石が所定の位置に0.7mの厚さで設置できるかの検討、②細粒砕石設置からマウンド砕石投入までの間に高波浪が作用した際の細粒砕石の安定性の検討、③マウンド砕石設置時の細粒砕石の安定性の検討を行った。

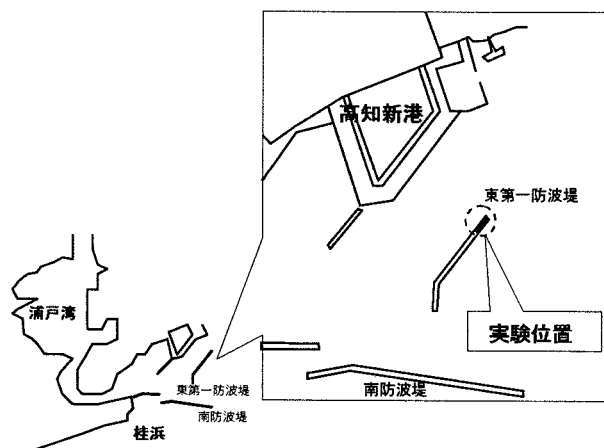


図-3 高知港施工実験位置図

3. 砂と細粒砕石の安定条件について

(1) マウンド内部の流速と洗掘の発生機構について

防波堤のマウンド内部には波による流れ(振動流)が発生しており、さらに、図-1のように数 mm

以上のことから、細粒碎石の設計では動水勾配を 0.35 として安定性を調べることにした。

(4) 細粒碎石に対する砂の安定性

図-6は、砂の移動限界を表-1に示す3種類の碎石（クラッシャーランC40、単粒度碎石S13、S80）について調べたものである。

式(1)で表される曲線よりも $n_F \cdot d_{15F} / d_{50B}$ が大きいと洗掘が発生する。最大動水勾配0.35ではクラッシャーランC40（中央粒径14mm）は洗掘限界のライン付近にあり、砂の洗掘が防げることが分かる。

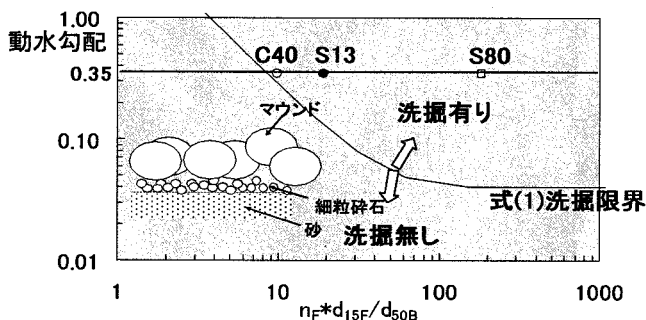


図-6 砂地盤の洗掘発生限界

表-1 比較した碎石の粒径，Fはフィルター材（細粒碎石），Bはベースマテリアル（砂）

	単粒度S13	クラッシャーランC40	単粒度S80
砂地盤中央粒径 d_{50B} (mm)	0.13	0.13	0.13
フィルター15%通過粒径 d_{15F} (mm)	6.2	3.2	60
フィルターの空隙率 n_F	0.4	0.4	0.4

(5) マウンド碎石に対する細粒碎石の安定性

細粒碎石はそれ自体の中央粒径が 14mm と小さいため、200～500kg のマウンド碎石の中の流れによってそれ自体が洗掘される可能性がある。そのため、細粒碎石自体の安定性についても考慮する必要がある。

図-7は、細粒碎石の移動限界を表-2に示す3種類の碎石（クラッシャーランC40、単粒度碎石S13、S80）について図-6と同様に調べたものである。

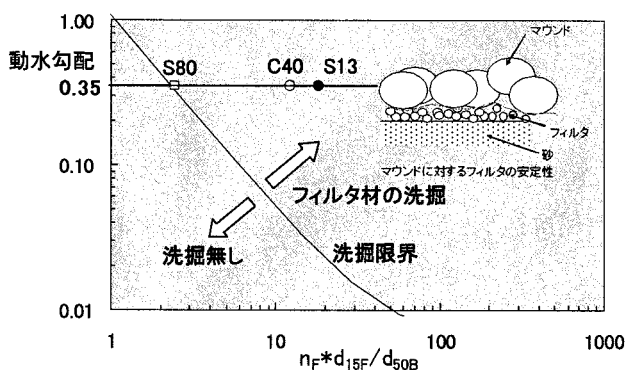


図-7 細粒碎石の洗掘発生限界

表-2 比較した碎石の粒径，Mはマウンド材（200kg），Fはフィルター材（細粒碎石）

	単粒度S13	クラッシャーランC40	単粒度S80
フィルター中央粒径 d_{50F} (mm)	9.3	14	70
マウンド15%通過粒径 d_{15M} (mm)	425	425	425
マウンドの空隙率 n_M	0.4	0.4	0.4

クラッシャーランでは、それ自体が流れて移動する可能性があるものの、30mm以上の成分が15%程度含まれていることから、いずれ表面が粗粒化してくることを考慮して、クラッシャーランC40を採用することとした。

なお、細粒碎石の表層 10cm の 85%の碎石成分が消失すると仮定すると 0.09m の程度の沈下が予想される。しかし、図-2 に示されるような砂の洗掘による 1.5～3m の沈下と比較するとその差は大きく、消波ブロックの沈下にも大きく影響しないものと推定される。

4. 現地施工実験

(1) 細粒碎石の設置と拡散状況

細粒碎石をガット船によって投入した。海面より上から投入すると拡散量が大きく、所定の位置に設置できない可能性があるため、①海面上から細粒碎石を投入する場合（水上投入）と、②クレーンを海面下まで入れて水中から投入する場合（水下投入）を試みた。水上投入は水面上で、水下投入は現地盤上約 5m の位置で投入した。

写真-1 は、ガット船に積まれた細粒碎石（クラッシャーラン）である。実際には 5～10cm 程度の大きめの碎石も多く含まれている。写真-2 は、細粒碎石の投入状況であり、水中でクレーンを開いている（水下投入）。

投入にともなう細粒碎石の拡散は、水上投入で半径 10m 程度（細粒碎石の堆積厚さ 40cm）、水下投入では半径 9m 程度（堆積厚さ 50cm）で、いずれも許容範囲だった。いずれも堆積形態を円錐と仮定して計算すると堆積量は投入量と一致した。水上投入と水下投入いずれの場合も、顕著な差異がないため、拡散状況の把握後は全て容易な水上投入で細粒碎石を投入した。

(2) 細粒碎石の波浪に対する安定性

平成 18 年 11 月 1 日に細粒碎石を設置してから 20 日間放置した。写真-3 は、投入後 1 週間後の細粒碎石の状況である。表面に薄く砂が堆積しているものの、投入当初から大きな変化が見られなかった。

その後、2006 年 11 月 19 日 19 時に最大波高 3.25m、周期 8.2s の時化を受けた。投入時にできた凹凸が多少均されたものの、大きな変状は見られなかった。なお、細粒碎石の均し作業は H 鋼を引きずることで行っており、70cm の厚さで 1000m² の施工が完了した。このように細粒碎石の設置が容易に施工できることが確認された。

(3) マウンド碎石投入に伴う細粒碎石の安定性

マウンド碎石の投入は目標点にめがけて3投、投入し、1投毎にフィルター材の状況（飛散、めり込み状況）をスケッチ、写真撮影した。マウンド捨石のめりこみ状況は捨石（200～500kg）の大きさが40～50cm程度なので、細粒碎石の上にてているマウンド碎石の大きさからめり込み深さを推定した。



写真-1 投入前に船積みされた細粒碎石

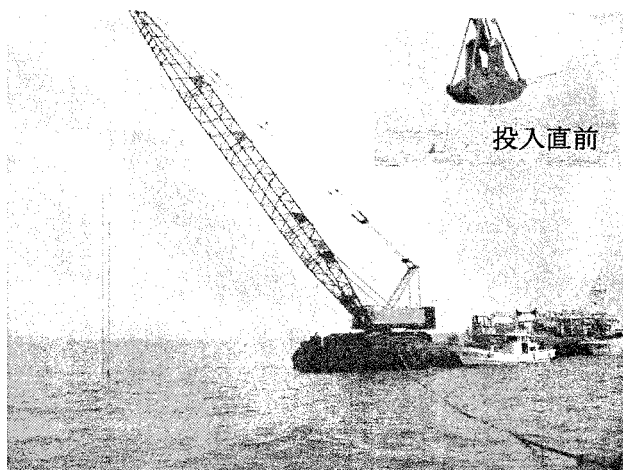


写真-2 水中でグラブを開き、投入している



写真-3 投入後1週間後（平成19年11月8日）

マウンド碎石の投入によって細粒碎石が飛散することを懸念していたものの、大きな拡散は発生せず、マウンド碎石のめり込み量も最大5cm程度であった。

(4) 細粒碎石の粒度変化

図-8 は細粒碎石の粒度の変化を示している。投入直後の粒度と20日後（11月21日）の粒度である。なお、サンプルは3箇所から取り、その平均を示している。全体に粒度が粗くなっており、15%通過粒径は1.2mmから3mmに、50%通過粒径は9mmから13mmに変化している。投入直後は軽い成分が表面に積もるなどして、全体に粒度が細かくなっていたものの、20日間の間に波によって粗粒化し、当初の目標値に達したと推定される。

図-9 は、投入前と投入後の細粒碎石に対する砂

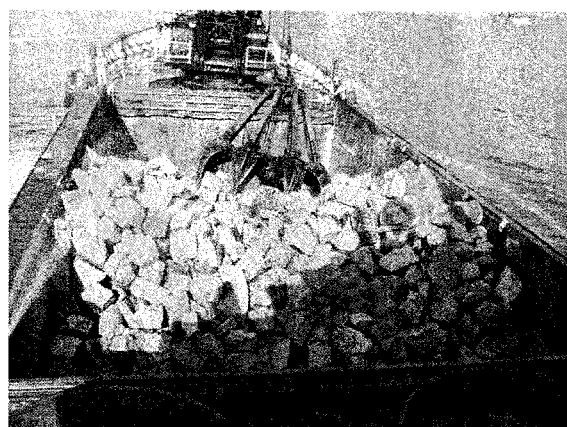


写真-4 マウンド碎石（200～500kg）の投入（平成19年11月30日）

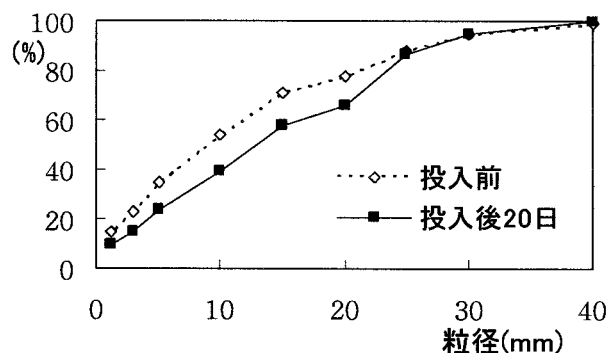


図-8 細粒碎石の粒度変化

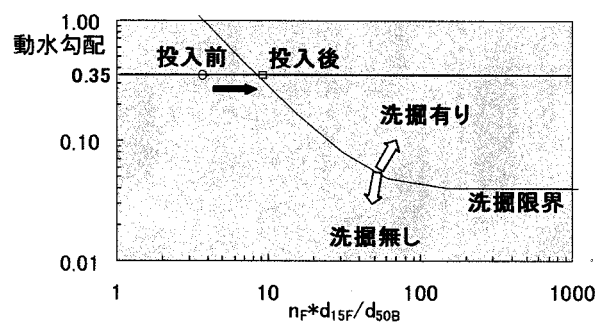


図-9 細粒碎石投入前後の砂の安定性

の安定性である。投入後、洗掘有りの方に移動しているものの、ほぼ洗掘限界のライン上にあり、砂のフィルターに対する安定性が保たれているものと考えられる。

5. おわりに

消波ブロック被覆堤のマウンド下部の洗掘によるものと考えられる消波ブロックの沈下や、それともなうブロックの衝突によるケーソン壁の損傷が2000年以降も全国各地で問題となっている。

本研究では、新たなマウンド下部の洗掘防止工として、数mm～数cmの細粒の碎石をマウンド下部に敷設する工法について、現地施工実験を行い、その設計法を検討した。なお、本工法は細粒碎石をマウンド碎石と同様に海底地盤に敷設するという単純な工法でありコストは帆布敷設の半分程度となり費用面からも有利である。まとめは以下のとおりである。

1) 波による動水勾配から砂の移動限界を推定するDe Graauwの式を用いた新たな設計法を提案した。この式によると、細粒碎石に対する砂の安定性は、消波ブロック被覆堤のマウンド下部に発生する最大動水勾配0.35の条件で、クラッシャーランC40(中央粒径14mm)が最適であった。

2) 投入にともなう細粒碎石の拡散は、水上投入で半径10m程度(細粒碎石の堆積厚さ40cm)、水下投入では半径9m程度(堆積厚さ50cm)で、いずれも許容範囲だった。

3) 平成18年11月1日に細粒碎石を設置してから20日間放置した。2006年11月19日19時に最大波高3.25m、周期8.2sの時化を受けたが、大きな変状は見られなかった。

4) 細粒碎石の均し作業はH鋼を引きずることで行っており、容易に施工できることが確認された。

5) マウンド碎石の投入によって細粒碎石が飛散

することを懸念していたが、大きな拡散は発生せず、マウンド碎石のめりこみ量も最大5cm程度であった。

6) 投入直後の粒径と20日後(11月21日)の粒径を比較した。投入直後は軽い成分が表面に積もるなどして、全体に粒径が細かくなっていたものの、20日間の間に波によって粗粒化し、当初の目標値に達していた。

以上のように、本調査では細粒碎石の洗掘防止工としての設計手順、施工法の筋道が示された。今後平成19年にケーソンと消波ブロックを設置し、洗掘防止工としての機能が確認される予定である。

謝辞： 本調査を実施するにあたり、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所 伊藤春樹建設管理官、中川恵美子調査第二係長、国土交通省四国地方整備局高知港湾・空港整備事務所 矢野剛様、(独)港湾空港技術研究所海洋・水工部耐波研究室下迫健一郎室長、同沿岸環境領域田中陽二研究員のご協力を頂きました。ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 五明美智男・堺和彦・高山知司・寺内潔・高橋重雄：消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査，海岸工学論文集，第42巻，pp.901-905，1995.
- 2) 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎：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－，港空研報告第41巻，第1号，pp.51-89，2002.
- 3) 鈴木高二朗・渡邊和重・山本悟・梅崎康浩・小澤康彦・村上俊春：防波堤基礎工における洗掘防止工の実態調査，海岸工学論文集，第51巻，pp.726-730，2004.
- 4) A.F., De Graauw, T. Van der Meulen, and M.R. van der Does de Bye : Granular Filters Design Criteria, Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.110, No.1, pp.80-96, 1984.