

防波堤アスファルトマットの集中荷重分散効果 に関する実験的研究

宮田正史* ・長尾 毅**・釣 哲之***
清水庸介****・田崎邦男*****

本研究では、防波堤アスファルトマットの集中荷重分散効果について知見を得るために、実際の港湾で使用される捨石材料を用いた載荷実験を実施した。実験の結果、マットを使用しない場合、防波堤ケーソンは点接触状態で支持されていることが明らかになった。一方、マットを敷設した場合、捨石はマットにくい込んで面的に接触するため、捨石からの集中荷重は、捨石がめり込んだ領域よりやや広い範囲に分散してケーソン底版に作用することが明らかになった。実験結果から得られた載荷ブロックに作用する底版反力を用いた有限要素法解析の結果から、本実験条件下においては、マット敷設により底版の曲げモーメントは大幅に減少した。

1. はじめに

防波堤の基礎として使用される捨石マウンドの表面は、マウンドに上載する鉄筋コンクリート製のケーソン底版（スラブ）に過大な集中荷重が作用しないように、従来から潜水士による入念な均し作業が行われている。一方、建設コスト縮減の観点から、捨石マウンド表面の均し精度の緩和が求められている。均し精度を緩和した場合、ケーソン底版にはより集中的な接触荷重が作用すると予想され、このためケーソン底版の曲げモーメント等の断面力が増加する懸念がある。そこで、均し精度の緩和に対応した新たなケーソン底版の内的安定設計手法を構築する必要があり、筆者らはこのための検討を行っているところである（宮田ら，1999；宮田ら，2002）。

ところで、近年、捨石マウンドとケーソンとの摩擦抵抗の増大を目的として、ケーソン底面にアスファルトマットを敷設することが増えている。アスファルトマットによる摩擦抵抗の増大効果については、実験および現地から多くの知見が得られている（加川，1964；加川，1972；下迫ら，2001）。アスファルトマットを敷設した場合、摩擦抵抗増大効果に加えて、ケーソン底版への集中的な荷重作用の緩和効果も期待されると考えられる（図-1）。マットの集中荷重緩和効果を考慮すると、ケーソン底版に作用する断面力を軽減できる可能性がある。しかしながら、これまで摩擦増大アスファルトマットの有無がケーソン底版の支持構造（反力分布）に及ぼす影響についての知見は皆無であった。

本研究では、アスファルトマットの集中荷重分散効果について知見を得ることを目的として、実際の捨石を用いた大型載荷実験を実施した。載荷実験により、アスファ

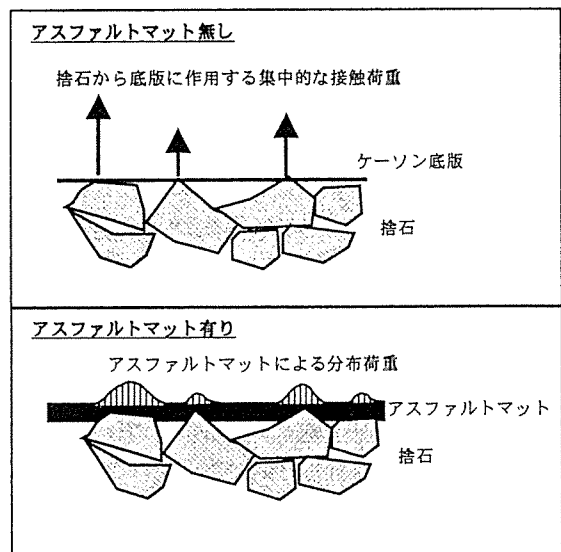


図-1 アスファルトマットによる集中荷重分散効果

ルトマットの有無および捨石表層の均し特性の相違が、ケーソン底版の支持構造に及ぼす影響を検討した。また、マットの集中荷重分散効果によりケーソン底版断面力の緩和効果について有限要素法を用いた解析を行った。

2. 実験概要

捨石マウンドによる支持構造を明らかにするために、室内大型載荷実験を実施した（写真-1）。実験は、ケーソン底版の一部を模擬した載荷ブロック（載荷面 2.5 m×2.5 m、重量約 190 kN）を用いて、捨石層を鉛直載荷するものである。図-2 に実験装置の断面図を示す。土槽は鋼製であり、土槽のサイズは幅 3.5 m、奥行 3.0 m、深さ 2.0 m である。捨石層は土層内に捨石を投入して建設し、捨石層の高さは約 1.5 m とした。捨石は、実際に港湾工事で使用されているものを用いており、捨石の重量は約 40～2000 N/個、粒径は 10～80 cm 程度である。図-3 に捨石の重量分布を示す。

載荷ブロックの底面における捨石層による支持状態を明らかにするために、ブロックの底面全体に 625 個のロードセル（接触面 10 cm×10 cm）を取り付けた計測シ

* 正会員 工修 国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所技術開発課長（前国土技術政策総合研究所）
** 正会員 工博 国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室長
*** 工修 五洋建設(株)技術研究所基幹技術グループコンクリートチーム
**** 工修 ベンタテクノサービス(株)技術部第一技術課長
***** 正会員 日本海上工事(株)水工事業部工務部長

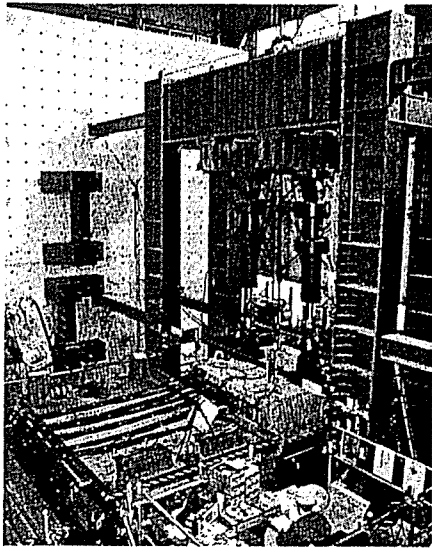


写真-1 実験装置の全景

ステムを構築した。このシステムにより、捨石からブロック底面に作用する接触荷重を直接計測することができる。

マウンド表面は、基準高さ 1.5 m からの凹凸量が概ね 10 cm 以内に収まるように均し作業を行った。さらに、間詰め石の効果を確認する観点から、マウンドの約半分については、約 150 N/個以下の小粒径の捨石（以下、間詰石と呼ぶ）を捨石表層の窪んだ部分に詰めて、相対的に平坦な天端面とした。本実験では、小粒径を用いて平坦な天端面とした領域を“間詰有り”，間詰石を使用しない領域を“間詰無し”と呼ぶ。

荷重は 2 機の油圧ジャッキを用いて、偏心を与えず鉛直方向に荷重した。アスファルトマットの有無によるブロック支持状態の相違を把握するために、はじめにマットを敷設しない状態で荷重ブロックを捨石層に直接設置し、最大波圧作用時に相当する鉛直応力レベル（約 590 kN/m²）まで荷重・除荷した。ここで荷重ブロックを一度取り外し、マットを敷設した。アスファルトマット（幅 2.5 m × 1.25 m、厚さ 8 cm）は、間詰有り・無しの領域に合わせた 2 枚を、捨石層の上に敷設した。次に、荷重ブロックをアスファルトマットの上に設置し、常時のケーソン底版に作用する鉛直応力レベルとして約 200 kN/m² で約 40 時間マウンドに馴染ませた。その後、繰返し荷重の影響を確認するために、鉛直応力が 200 から 590 kN/m² の範囲で、合計 12 回荷重・除荷を実施した。

荷重時の計測項目は、荷重ジャッキの荷重、荷重ブロック頂部の水平および鉛直変位（ブロック四隅）、荷重ブロック底面のロードセル荷重である。捨石マウンド表層については、荷重前後の合計 3 回にわたり標高計測を実施している。標高計測は、スタッフ先端に 10 cm 四方の正方形版を設置したものをを用いて測量した。また、荷重

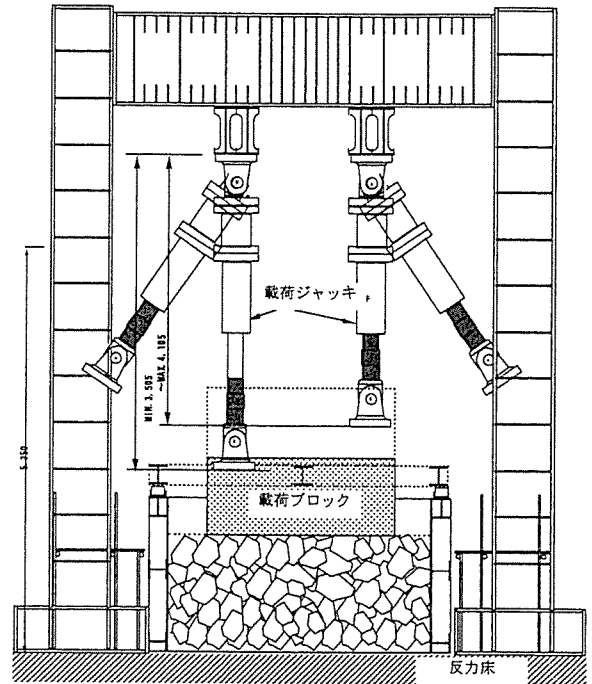


図-2 荷重装置の断面図

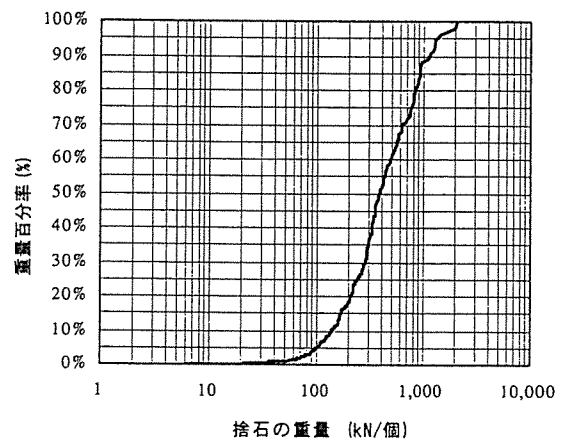


図-3 捨石の重量分布

後には、捨石のアスファルトマット内へのくい込み状況を観察し、くい込み深さを計測した。

3. 実験結果

3.1 荷重ブロックの沈下・クリープ特性

図-4に、荷重開始からの荷重ブロック底面における鉛直応力の経時変化を示す。鉛直応力は 2 機のジャッキ荷重とブロック重量の合計をブロック底面積で除して算定している。マット無しの状態においては、約 2 時間で荷重・除荷を行なった。この時、荷重ブロックはブロック設置時を沈下の原点とすると、最大荷重時に約 23 mm 沈下し、除荷後の残留沈下量は約 18.5 mm であった。この後、アスファルトマットを敷設し、鉛直応力を約 200 kN/m² に保持した。鉛直応力の保持は、ジャッキ荷重が 5% 程度減少すると適宜ジャッキ荷重を増加させること

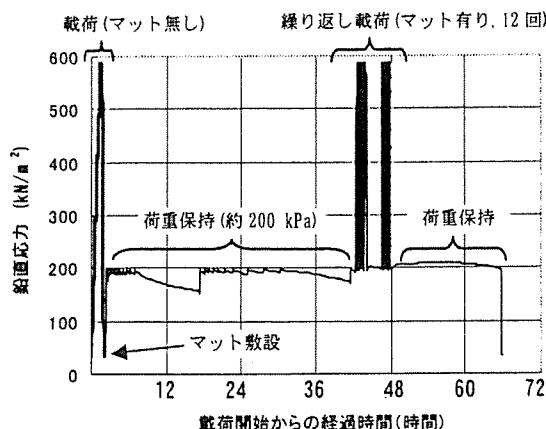


図-4 載荷ブロック底面の鉛直応力の経時変化

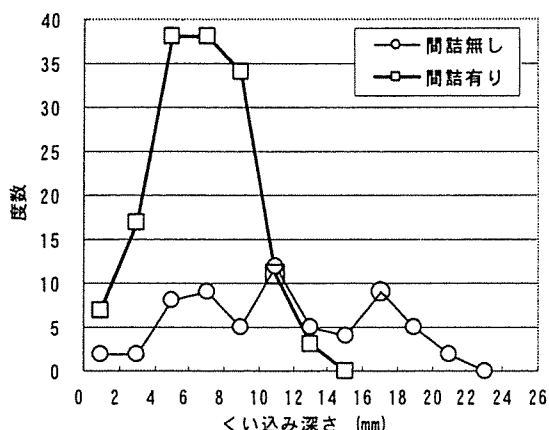


図-5 アスファルトマットのくい込み深さの頻度分布

により行った。荷重保持の初期においては、約4分間でジャッキ荷重が5%程度減少した。荷重保持の終期(約40時間後)になると荷重の減少速度は遅くなり、同じ荷重の減少が生じるまで約91倍の時間がかかった。荷重保持の間に、載荷ブロックは約5.2mm沈下した。この沈下は、捨石がアスファルトマットに食い込むことによるものである。荷重保持後の12回の載荷により、載荷ブロックはさらに約6.6mm程度沈下した。アスファルトマット敷設後を原点とすると、載荷ブロックの残留沈下量は約18.5mmであった。

3.2 アスファルトマットの塑性変形特性

載荷後に、捨石とアスファルトマットが接触していた面を観察した。間詰無しの領域についてみると、マット表面には石の形状に合わせた窪み(塑性変形)が残っていた。マットの塑性変形は、捨石が接触していた部分のみで生じており、捨石が接触していない領域については、マットは平坦のままであった。一方、片岡ら(1983)が、現地のケーソン底面に約20年間敷設されていたアスファルトマットを取り出した結果によると、捨石がアスファルトマット全面にわたり食い込んでおり、マットが平坦性を保っていた領域は皆無であった。従って、今回

の実験においても、載荷保持や載荷・除荷をさらに長期間継続すると、マットの塑性変形はさらに進行すると考えられる。間詰有りの部分についても、同様に捨石のくい込みが生じていた。この場合、表層部分の捨石は小さく、マウンド表面が平坦であるため、間詰無しに比較すると、くい込み箇所が多く、またくい込み面積・深さは小さい結果となった。図-5に、アスファルトマットのくい込み深さの頻度分布を示す。くい込み深さの測定は、マットを10cm格子に分割し、格子内で最も深い箇所について計測した。計測の結果、間詰無しおよび間詰有りの場合における平均くい込み深さは、それぞれ約11mmおよび約7mmであった。従って、マウンド表層部分に集中的に小粒径の間詰石を配置すると、捨石のマットへのくい込み深さが浅くなり、両者の噛み合わせ効果が小さくなると考えられる。このため、アスファルトマットを利用する場合、間詰石の有無が滑動抵抗メカニズムに影響を及ぼす可能性があるため、今後検討が必要である。

3.3 アスファルトマットによる集中荷重の緩和効果

マット無しの場合の捨石による支持形態について、捨石に残った接触跡を観察すると、捨石が破碎しない場合、接触痕跡は大きいものでも直径3cm程度であり、点支持状態であった。一方、マット有りの場合は、捨石がマットに食い込むため面的な接触状態であった。これを図-6に視覚的に表す。図中には、捨石形状、マット下面における捨石との接触痕跡の平面形状、およびマット上面における接触痕跡の平面形状(マット上面と載荷ブロック底面のロードセルとの接触痕跡)を重ねた図を示す。本図から、捨石が面的にマットと接触していることがわかる。また、マット～捨石とマット～ロードセルの接触状況の違いから、厚さ8cmのアスファルトマットを経て、荷重が広く分散している様子がわかる。間詰無しの場合、マット下面と上面との接触痕跡の面積比は、概ね1.5~2倍程度になっていることがわかる。間詰有りの場合、荷重分散効果はさらに大きくなる。これは、間詰有りの場合、マットの厚みに対してマット下面の接触面積が小さいこと、および隣り合う接触点同士の距離が近いことためマット上面における分散荷重がお互い重なり合うためと考えられる。

図-7に、マット無しおよび有りの2ケースにおける載荷ブロックの支持機構を示す。両ケースともに、鉛直応力は最大載荷時(590 kN/m²)のデータを用いており、マット有りの場合は1回目載荷時のデータを用いている。図中には、各ロードセル(10cm格子)の接触荷重が全荷重の何パーセントを支持しているかを示している。各図の上半分が間詰有り、下半分が間詰無しの領域である。

本図より、アスファルトマットを敷設せず、かつ間詰

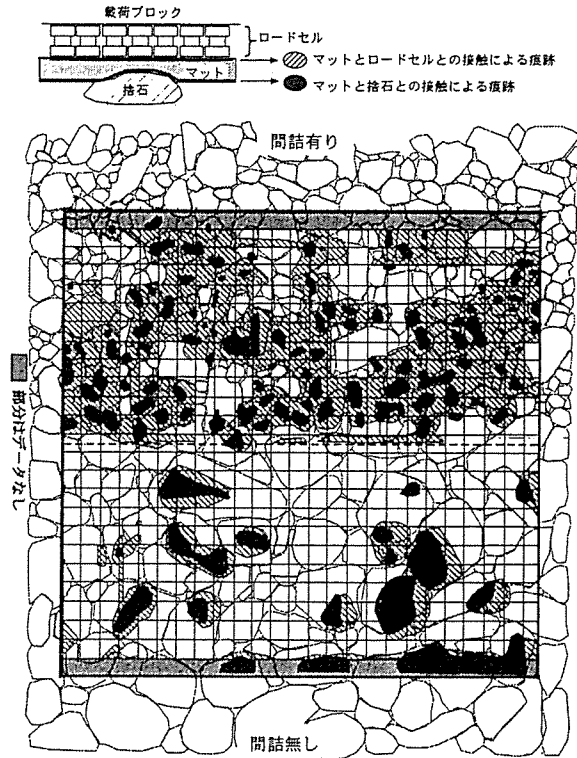


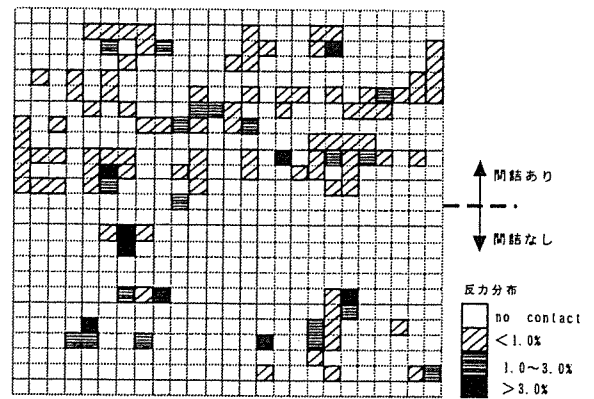
図-6 アスファルトマット上下面の荷重分散状況

めをしない場合、載荷ブロックは設計で想定しているような平面的な支持形態（線形分布荷重）ではなく、比較的少数の接触点で支持されていること、また各接触荷重値のばらつきは非常に大きく、捨石マウンドに作用する荷重は各接触点に均質的には分配されないことが明らかになった。この結果は、著者らが別途実施した潜水士による本均しマウンド（均し精度±5 cm）の場合においても同様であり(宮田ら, 2002), 捨石マウンドによる支持構造の特徴である。

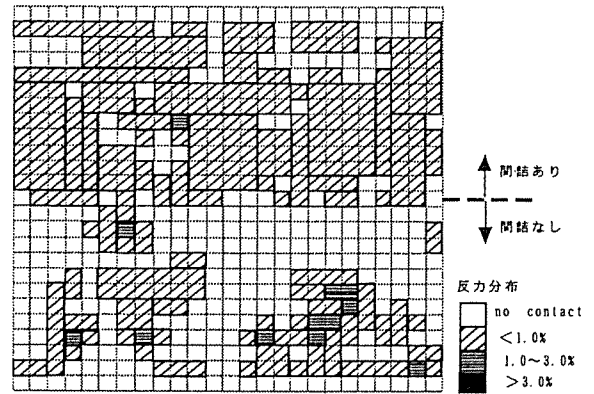
マットの有無が支持構造に及ぼす影響を見ると、マット無しの場合は全荷重の3%以上を支えるポイントが9点あるのに対して、マット有りの場合は全荷重の3%以上を支えるポイントは存在しない。同様に、全荷重の1~3%を支えるポイントは、マット無しの場合19点、マット有りの場合12点であり、マット敷設による集中荷重分散効果が確認できる。さらに、間詰め効果についても、マット無し状態で全荷重の3%以上を支えるポイントが間詰めなしで6点、間詰め有りで3点であり、間詰石にも集中荷重の分散効果があることがわかる。特にマット・間詰め共にありの条件では、全体の80%程度に接触荷重が認められ、通常設計で想定している支持状態（線形分布荷重）に近いことが分かる。

3.4 集中荷重緩和効果の底版曲げモーメントへの影響

最後に、実験で得られたブロック底版に作用する反力分布を用いて、載荷ブロック底面に発生する曲げモー



(a) アスファルトマット無し



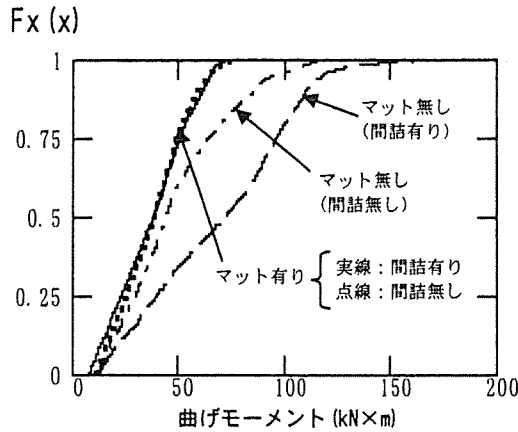
(b) アスファルトマット有り

図-7 載荷ブロック底面の支持構造 (鉛直応力=約590 kPa)

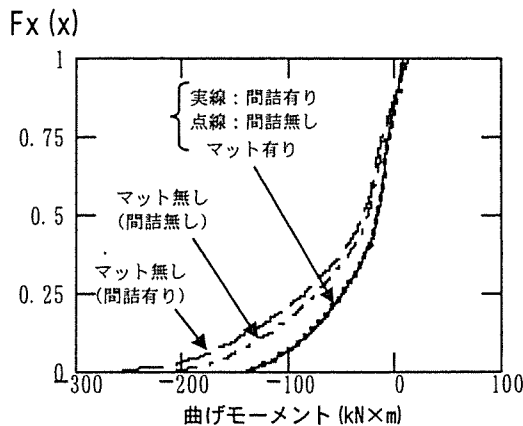
ントをFEM解析により検証した。解析は、ケーソン底版の設計を想定して、載荷ブロック部分を50×50要素に分割し、4辺全てを固定した境界条件で実施した。また、図-7に示した各ロードセルで計測した接触荷重を底版モデルに入力し、底版に作用する単位幅当りの曲げモーメントを算定した。

図-8に、解析により得られた各要素の曲げモーメントの累積分布を示す。底版の中央付近で発生する正の曲げモーメントを図(a)に、底版の端部付近で発生する負の曲げモーメントを図(b)に示す。各図中には、マット無しの条件における間詰め有りおよび無しの各領域内で発生する曲げモーメント、およびマット有りの条件における同様の曲げモーメント、の合計4ケースの曲げモーメントを累積分布として示す。

本図から、今回の実験の範囲では、マットの敷設は底版曲げモーメントの抑制効果があること、およびこの効果は底版端部と中央部のいずれにおいても有効であることがわかる。負の極大曲げモーメント(底版端部で発生)について見ると、マット無しの場合は約250 kN・mであるが、マット有りの場合は約140 kN・mとなり、マット敷設により曲げモーメントの大きさは約56%に低減した。また、正の極大曲げモーメント(底版中央付近で発



(a) 正の曲げモーメント



(b) 負の曲げモーメント

図-8 底版曲げモーメントの累積分布

生)についても同様であり、曲げモーメントは大幅に緩和され(マット無し:約185 kN・m→マット有り:74 kN・m)、マット敷設により曲げモーメントの大きさは約40%にまで低減した。今回は1ケースのみの载荷であるが、摩擦増大マットの敷設により、捨石マウンドからの反力作用による载荷ブロック底面の曲げモーメントは、大幅に減少することが示された。このため、前述した均し精度の緩和に対応した新しい設計法については、マットの有無を考慮に入れる必要性があり、今後の課題であることが明らかになった。

一方、間詰石の効果を見ると、マット無しの条件では、間詰有りの場合の曲げモーメント(絶対値)は、間詰無しの場合に比較して、大きな値となっている。これは、底版の断面力分布は、荷重作用位置に大きく依存するためであり、本実験結果の場合は版中央部分に荷重が集中したためである。従って、今回の実験条件下においては、間詰石の有無は反力分布に影響を及ぼしたものの、曲げ

モーメントの抑制の効果は期待できない結果となった。

4. まとめ

本研究では、防波堤アスファルトマットの集中荷重分散効果について知見を得るために、実際の港湾で使用される捨石材料を用いた载荷実験を実施した。実験の結果、マットを使用しない場合、防波堤ケーソンは点接触状態で支持されていることが明らかになった。一方、マットを敷設した場合、捨石はマットにくい込んで面的に接触するため、捨石からの集中荷重は、捨石がめり込んだ領域よりやや広い範囲に分散してケーソン底版に作用することが明らかになった。実験結果から得られた载荷ブロックの底版反力を用いた有限要素法解析の結果より、本実験条件下においては、マット敷設によりケーソン底版に作用する曲げモーメントは大幅に減少することが明らかになった。また、間詰石はケーソン反力分布に影響を及ぼすものの、底版断面力の緩和には寄与しない結果となった。今後は、アスファルトマットの集中荷重緩和効果、およびケーソン底版における断面力の緩和効果を定量的に把握するための検討を進める予定である。

なお、本実験では、五洋建設(株)技術研究所の三藤正明氏、田中英紀氏、また山口了也氏をはじめとするペンタテクノサービス(株)技術部の諸氏に多大な協力を得ている。独立行政法人建築研究所(加藤博人氏、水野二十一氏)および東洋建設(株)技術研究所からは、長期間にわたり計測器を貸して頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 加川道男(1964): 重力式構造物の摩擦抵抗増大について, 第11回海岸工学講演会論文集, pp. 217-221.
- 加川道男(1972): 重力式防波堤などに適用するアスファルトマットに関する研究, 土木学会論文報告集, 第201号, pp. 99-111.
- 片岡真二・西 宏一・矢島道夫・三浦 修(1983): ケーソン底面に施設した摩擦増大のためのアスファルトマットの耐久性について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 643-647.
- 下迫健一郎・増田慎太郎・宮間俊一(2001): 混成防波堤の滑動時における捨石マウンドの挙動に関する基礎実験, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 896-899.
- 宮田正史・菅野高弘・長尾 毅・篠原勝次・近藤隆道(1999): 均し精度がケーソン底版断面力に及ぼす影響, 港研資料, No. 945.
- 宮田正史・菅野高弘・長尾 毅・菊池信夫(2002): 捨石マウンドの支持機構を考慮したケーソン底版設計法の開発への取り組み, 土と基礎, Vol. 50, No. 4, Ser. No. 531, pp. 19-21.