

消波ブロックで被覆された岩着式ケーソンに作用する ブロック荷重について

水流正人* ・佐貫 宏** ・関本恒浩***
泉 雄士**** ・平岡順次***** ・松蔭茂男*****

1. はじめに

消波ブロックで被覆された直立壁には、波の直接作用による波力とブロックの寄り掛かりによる荷重（ブロック荷重）が働く。このうち、波力に関しては、消波ブロックによる低減率 λ を考慮した合田式によって算定されるのが一般的となっている。

一方、ブロック荷重に関しては、廣本ら(1983)、島田(1984)、田中ら(1985)、高橋ら(1989)などの研究が行われているが、現在のところ確立された算定方法はない。高橋ら(1989)によると、ブロック荷重は図-1 に示すように作用する波力によって、Ⅰ：静水時ブロック荷重が透過波力より大きい領域、Ⅲ：ブロック荷重が無視できる領域、Ⅱ：両者の間でブロック荷重が多少影響する領域の3領域に分類され、波力が小さい場合や水深がかなり大きい場合以外はほとんど無視できるとしている。これより、現行の設計においてはブロック荷重が考慮されない場合が多い。

しかしながら、上述の研究はいずれも基礎マウンド上のケーソンを対象としており、コンクリートで岩盤と一体化した岩着式ケーソンの場合、ケーソンの変位があまり期待できないため、図-1 中の領域Ⅲに該当するような大きな波力が作用する場合でもブロック荷重が無視できなくなる可能性が高い。

そこで本研究では、岩着式ケーソンおよび基礎マウンド上のケーソンを想定した水理模型実験を同一の条件で行い、両者の実験結果を比較することにより、岩着式ケーソンに作用するブロック荷重特性について考察を行った。

2. 水理模型実験

2.1 実験断面およびブロック荷重の測定方法

実験には、長さ 50 m、幅 60 cm、高さ 1.2 m の二次元

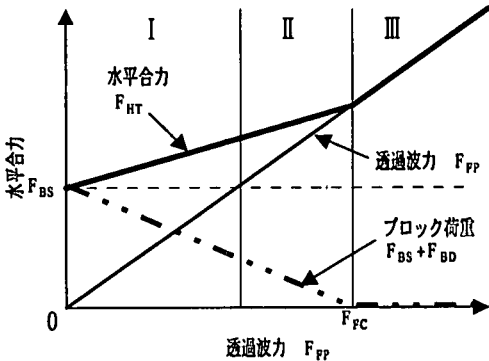


図-1 透過波力と水平合力の関係の模式図

造波水路を用いた。水路の沖側端部にはピストン型造波装置が設置されている。また、水路内には 1/30 勾配斜面が設置され、岸側は一樣水深床と接続している。1/30 勾配斜面端に縮尺 1/60 の実験模型を設置した。

図-2 に実験模型の断面図を示す。模型はパラペット後退型の堤体を想定し、前面を消波ブロック (80 t 型テトラポッド) で被覆した。また、海底面、下部工およびケーソンをそれぞれボルト・ナットで固定し、岩着式ケーソンを模擬した。基礎マウンド上を対象としたケースでは、ブロック荷重の受圧面積が変わらないように、点線 (図-2) で示した形状に基礎マウンドを作成し、その上に天端高が同じケーソンを設置した。

次に、波圧およびブロック荷重の測定の概要を図-3 に示す。ケーソンの前面壁にみたてた実験対象壁と左右

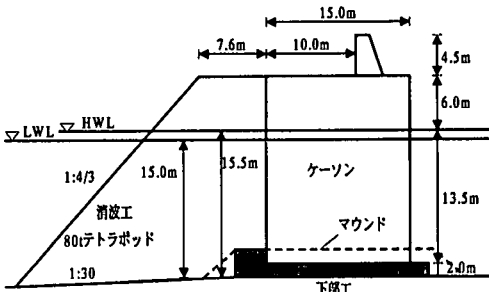


図-2 実験断面図

* 正会員 五洋建設(株)土木本部土木設計部
** 正会員 修(工) 五洋建設(株)技術研究所
*** 正会員 博(工) 五洋建設(株)技術研究所
**** 正会員 工 修 五洋建設(株)中国支店土木部設計課
***** 正会員 中国電力(株)土木部
***** 正会員 中国電力(株)島根立地調査事務所立地部

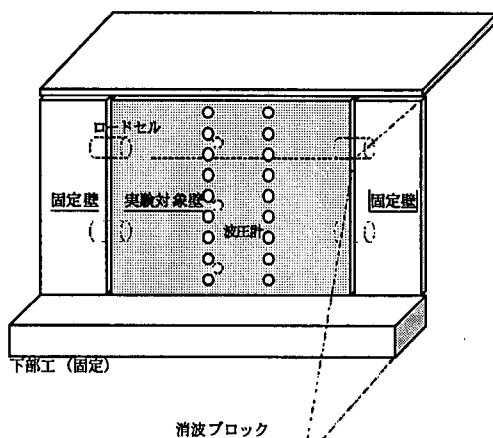


図-3 実験装置概要図

表-1 実験ケース一覧表

ケース	ケーソン 設置方法	潮位	ブロックの 積み直し	作用波数 (通算)
G-H-1	岩着式	H.W.L	1回目	750波
G-H-2			2回目	750波
G-H-3			3回目	250波
G-L-1		L.W.L	1回目	750波
G-L-2			2回目	750波
G-L-3			3回目	250波
M-H-1	マウンド	H.W.L	1回目	750波
M-H-2			2回目	750波
M-H-3			3回目	750波

3. 実験結果

3.1 静水時のブロック荷重

静水時のブロック荷重 F_{BS} は、粒子の粗い土質材料による土圧とみなした場合、次式で表される。

$$F_{BS} = K_s \left\{ \frac{1}{2} \gamma (1 - \varepsilon) (h + h_c) - \frac{1}{2} w_0 (1 - \varepsilon) h^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 K_s ：土圧係数に相当する係数、 γ ：ブロックの単位体積重量、 ε ：ブロックの空隙率、 h ：ケーソン底面の水深(m)、 h_c ：ケーソン天端高(m)、 w_0 ：水の単位体積重量である。

消波ブロックを積載して注水した直後は、岩着式ケーソンの場合 $K_s = 0.32 \sim 0.84$ 、基礎マウンド上ケーソンの場合 $K_s = 0.47 \sim 0.64$ であり、岩着式ケーソンの方がややばらつきが大きくなった。

3.2 波作用時および作用後のブロック荷重

a) 平均水平合力の経時変化

図-4に、それぞれ岩着式ケーソンおよびマウンド上ケーソンに作用する平均水平合力の経時変化を示す。平均水平合力の算出にあたっては、ロードセルで得られた時系列データを用い、波の全作用時間（約750波）を30区間に等分して、各区間で水平合力の平均値を求めた。ただし、平均値の算出に当たっては、データ区間ごとに作用する波力が異なるため、波圧計で測定された透過波力の平均値をデータ区間毎に求めておき、得られた平均値から差し引くことで補正した。

平均水平合力は、岩着式ケーソンおよびマウンド上ケーソンのいずれも比較的早い段階（ $t=600$ (s)、約60波程度）で急激に増加する傾向を示した。しかしながら、岩着式ケーソンを対象とした場合、 $t=600$ (s)以後の平均水平合力はどのケースもほぼ平衡状態を示しており、しかも波作用前（注水後）の K_s の大小関係が最後まで維持される結果が得られた。それに対し、マウンド上のケー

の固定壁で構成される堤体模型をアクリル板で作成し、実験対象壁の前背面に波圧計を取り付けた。なお、実験対象壁は左右の固定壁に上下2台づつ取り付けられたロードセルによって支持されている。岩着式ケーソンを模擬する場合は、固定壁を模型床に固定された下部工にネジ止めた。また、マウンド上のケーソンを模擬する場合は、マウンド上に堤体を設置し、ケーソン内部に鉛を置いて堤体の安定を図った。この実験装置によって、ロードセルには消波ブロックの透過波力とブロック荷重の合力が、波圧計には透過波力のみが作用し、それぞれの差をとることによってブロック荷重が間接的に求められる。

2.2 実験ケースと実験方法

表-1に実験ケースの一覧表を示す。実験ケースは、岩着式ケーソンとマウンド上ケーソンを想定したケースの2つに大別される。実験波は、Bretschneider-光易型の沖波スペクトルを用いた不規則波で換算沖波波高9.5(m)、沖波周期13(s)の1種類である。また、岩着式のケースについては、H.W.L.とL.W.L.を想定した水深2種類（ $h=15.5$ m, 15.0 m）に対して実験を実施し、比較のためH.W.L.の条件に対してのみマウンド上のケーソンを対象とした実験を行った。また、消波ブロックの積み方によるデータのバラツキを考慮するため、消波ブロックの積み直しを岩着式のケースでは6回（3回×水深2種類）、マウンド上のケースでは3回行い、1回の積み直し毎に約250波の波を3回続けて（通算750波）作用させた。1シリーズの実験において測定したブロック荷重は、①消波ブロック積載後、②注水後、③波作用時、④波作用後の4種類である。

なお、データのサンプリング周波数は、衝撃波力の発生を見逃さない条件に着目して、1000 (Hz) と 200 (Hz) について予備実験を行い、その結果から200 (Hz) を採用した。

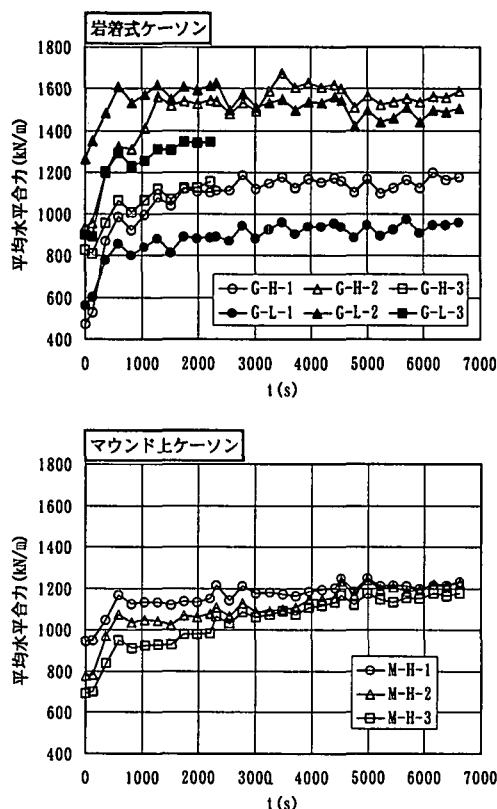


図-4 平均水平合力の経時変化

ソンを対象にした場合は、 $t=600$ (s)以後も徐々に平均水平合力は増加しており、高橋ら(1989)も指摘しているように、波作用後の最終的な K_S がある一定値へ落ち着く傾向がみられた。

これは、基礎マウンドが一種のパネとして機能し、ケーソンが振動することによって、消波ブロックのかみ合わせが良くなり、結果として荷重を平面的に分散させる役割を果たしているものと考えられる。一方、岩着式の場合は、荷重を分散させる効果が小さいため、実際のひとつひとつのケーソンごとに積載初期のばらつきがそのまま維持されるものと解釈できる。

このとき、波作用後のブロック荷重は、岩着式ケー

表-2 係数 K_S

	ケーソン 設置方法	係数 K_S	
		波作用前	波作用後
本実験	岩着式	0.32~0.84	0.64~1.08
		0.47~0.64	0.80~0.84
高橋ら(1989)	マウンド	0.28~0.72*	1.44*
廣本ら(1983)		—	0.63
島田(1984)		—	0.42~0.66

* 高橋ら(1989)の示した K_S を(1)式に換算すると $K_S=2K_S'$ となる

ンの場合 $K_S=0.64\sim1.08$ 、マウンド上ケーソンの場合 $K_S=0.80\sim0.84$ であった。なお、係数 K_S は、既往の研究成果(表-2)に示すように、作用する波の大きさや作用時間、ブロックの形状、積み方などの諸条件によって変化することに留意することが必要である。なお、H.W.L.とL.W.L.の違いについては、水深差が50 cmと小さいこともあって、有意な差は認められなかった。

b) 波作用時のブロック荷重

波が作用したときのブロック荷重は、静水時のそれよりも小さくなるのが既往の研究より明らかとなっている。これは、波作用時の水位の上昇による浮力の増加に加え、ケーソンのロッキングによる微小な変位が原因と考えられている。

図-5は、岩着式およびマウンド上のケースについて、それぞれ同じ時間帯における透過波力 F_{FP} 、ブロック荷重 F_B および水平合力 F_{HT} ($=F_{FP}+F_B$)の時系列波形を示したものであるが、上述の傾向がそれぞれのケースで現れている。マウンドのケースでは、波作用時のブロック荷重はほぼゼロに近づいているのに対し、岩着式ケーソンの場合、下限値は200(kN/m)程度と有意な値を示

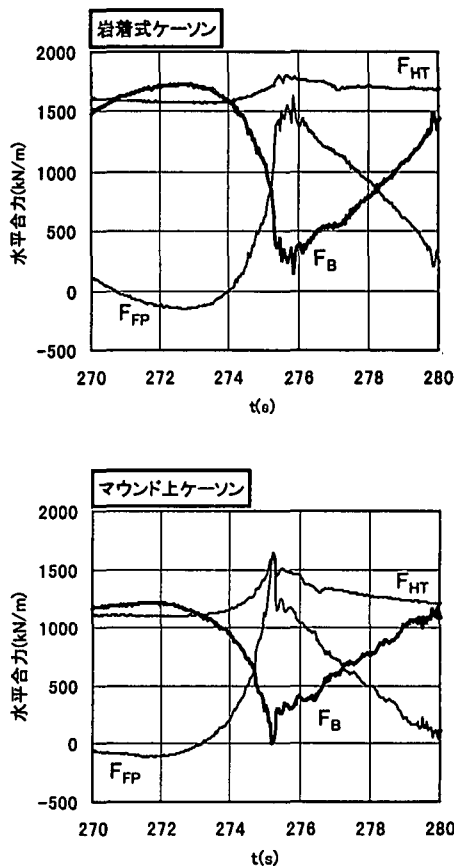
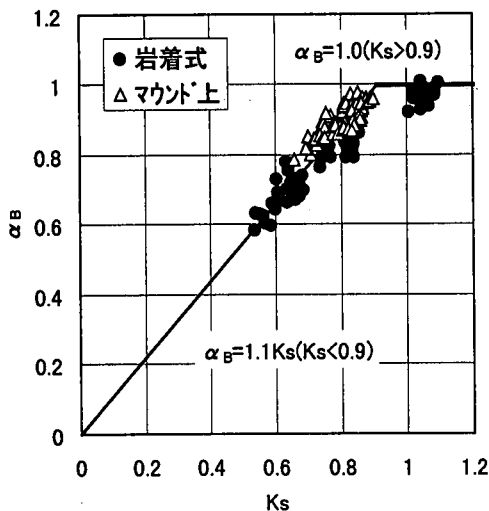


図-5 各水平力の時系列波形

図-6 α_B と K_s の関係

しているのが特徴的である。また、透過波力 F_{FP} 、水平合力 F_{HT} のピークを示す時間はどちらのケースも概ね一致している。

次に、高橋ら(1989)にならって、透過波力を F_{FP} 、静水時をゼロとしたときのブロック荷重の変動量を F_{BD} ($=F_B - F_{BS}$) で定義すると、双方の関係は平均的に次式のように表される。

$$F_{BD} = -\alpha_B F_{FP} \quad \dots\dots\dots (2)$$

この係数 α_B は、高橋ら(1989)によってブロック荷重低減係数と呼ばれており、ブロックの締めり方によって変化する係数である。ブロックの締めり方が緩く静水時のブロック荷重が増加段階にある初期においては α_B も増加傾向にあり、十分に締め固められた状態においては α_B はほぼ一定の値になる。

そこで、今回の実験結果を基に、 α_B および K_s の関係を求めて図-6にプロットした。その結果、波の作用に伴い K_s は経時的に大きくなり、且つ α_B も K_s に比例して大きくなることがわかった。 α_B と K_s は次式のように関係付けられる。

$$\alpha_B = \begin{cases} 1.1 K_s & (K_s \leq 0.9) \\ 1.0 & (K_s > 0.9) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

この関係は岩着式ケーソンだけでなく、基礎マウンド上のケーソンを対象とした場合にも同様に成り立つ。

3.3 ブロック荷重の評価

ピーク時の透過波力 F_{FP} と水平合力 F_{HT} の関係を図-7に示す。

水平合力 F_{HT} は、ブロック荷重 F_B ($=F_{BS} + F_{BD}$) と透過波力 F_{FP} の和として表される。領域Ⅰ、領域Ⅱ($F_{FP} < F_{FC}$)に該当する水平合力は、式(2)の関係を使うと次

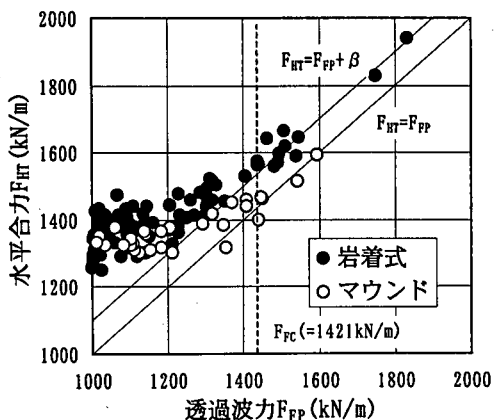


図-7 透過波力と水平合力の関係

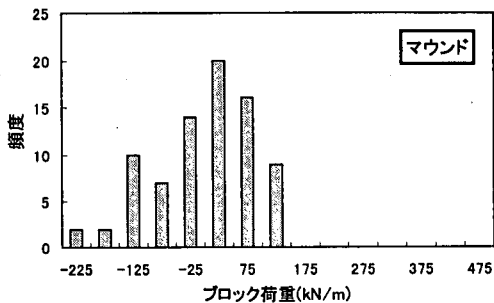
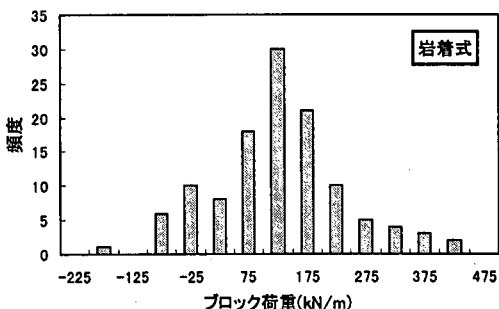


図-8 ブロック荷重の度数分布

式で求められる。

$$F_{HT} = F_{BS} + (1 - \alpha_B) F_{FP} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)は、岩着式ケーソンおよびマウンド上ケーソンの両方で成り立つ。なお、領域Ⅱと領域Ⅲの境界値 F_{FC} (ブロック荷重が無視できる透過波力の最小値)は、透過波力 F_{FP} とブロック荷重 F_B の関係を各実験ケース毎に直線回帰式で求め、 $F_B = 0$ とおくことにより求まる。その結果、 $F_{FC} = 1332.8 \sim 1862.0$ (kN/m) となった。なお、図-7に示したケースでは1421.0 (kN/m) であった。

しかし、図-7において、基礎マウンド上を対象とした場合にブロック荷重が無視できる領域Ⅲ($F_{FP} > F_{FC}$)に

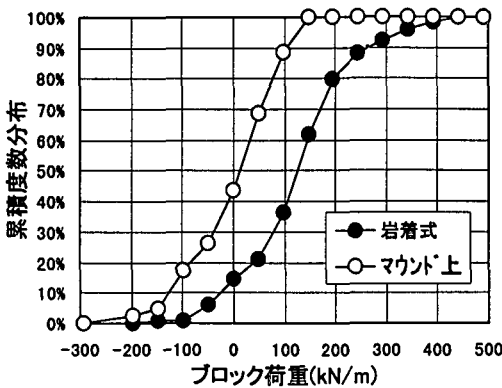


図-9 ブロック荷重の累積度数分布

着目すると、水平合力 F_{HT} は式 (5) および (6) のように表わすことができ、岩着式ケーソンとマウンド上ケーソンとで異なる傾向を示した。

$$\text{岩着式: } F_{HT} = F_{FP} + \beta \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{マウンド: } F_{HT} = F_{FP} \dots\dots\dots (6)$$

したがって、岩着式ケーソンの場合、領域IIIにおけるブロック荷重は無視できないものと結論付けられる。

次に、実際の設計にあたっては、ブロック荷重 β を定量的に算定する必要がある。実験結果では、ブロック荷重のデータにばらつきが見られたため、全実験ケースを対象に領域IIIに該当するブロック荷重のヒストグラムおよび累積度数分布を作成した。ヒストグラムおよび累積度数分布はそれぞれ図-8、図-9に示した。

ケーソンに働くブロック荷重は、透過波力の大小に係らずランダムにばらついている。マウンド上のケーソンの場合、ほぼ0 (kN/m) まわりにばらついているのに対して、岩着式の場合は130 (kN/m) 程度を中心にばらつきを見せている。岩着式ケーソンに働くブロック荷重 β は土圧係数に換算すると、平均的に $K_s=0.1$ 程度の荷重に相当する。

以上の結果より、マウンド上ケーソンの場合はブロック荷重が無視できるが、岩着式ケーソンを対象とする場合は従来の設計法で無視されてきたブロック荷重を考慮しなければならない。

4. おわりに

本研究では、岩着式ケーソンおよび基礎マウンド上の

ケーソンを想定した水理模型実験を行い、岩着式ケーソンに作用するブロック荷重特性について考察を行った。その結果、以下の主要な結論が得られた。

① 消波ブロックの静水時ブロック荷重は、基礎マウンド上ケーソンに比べて岩着式ケーソンの方がややばらつきが大きくなった。

② 消波ブロックの静荷重は、波の作用直後急激に増加し、岩着式ケーソンを対象とした場合、比較的早い段階 (波作用60波程度) で平衡状態に落ち着く。しかも波作用前 (注水後) の K_s の大小関係が最後まで維持される。それに対し、マウンド上のケーソンを対象にした場合は、60波程度作用させた後も徐々に平均水平合力は増加し、最終的な K_s がある一定値へ落ち着く傾向がみられた。

③ これより、基礎マウンドは波作用時にバネとして働き、ブロック荷重を分散させる役割を果たしていることがわかった。

④ 透過波力 F_{FP} とブロック荷重の変動量 F_{BD} には、 $F_{BD} = -\alpha_B F_{FP}$ なる関係があり、 α_B は K_s によって変化する傾向が認められた。

⑤ 領域I、領域IIに該当する水平合力 F_{HT} は、岩着式ケーソンおよび基礎マウンド上のケーソン同様に、 $F_{HT} = F_{BS} + (1 - \alpha_B) F_{FP}$ で表される。

⑥ 領域IIIに該当する水平合力について、マウンド上のケーソンの場合、これまでいわれてきたようにブロック荷重が無視できることが確認できた。

⑦ しかし、岩着式ケーソンの場合、土圧係数換算で平均的に $K_s=0.1$ 程度のブロック荷重を考慮しなければならない。

参 考 文 献

- 島田真行 (1984): 消波ブロック被覆ケーソンに対する作用力の伝達過程について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 571-575.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎 (1989): 消波ブロック被覆堤ケーソンの波力と滑動に関する実験的考察, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 594-598.
- 田中寛好・阿部宣行・加藤正進 (1985): 消波ブロック被覆堤ケーソンに作用する水平荷重の評価, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 490-494.
- 廣本文泰・西島浩之・今野 茂・木村岩男 (1983): 消波ブロック被覆堤に働く波浪時のブロック荷重について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 347-351.