

消波ブロック被覆堤ケーソンに対する 作用力の伝達過程について

島 田 真 行*

1. ま え が き

前面海域への反射波および波力の低減化を図るため、直立ケーソン前面に消波ブロックを設置した消波ブロック被覆堤が採用されつつある。このタイプの防波堤のケーソンに作用する波力については、消波ブロックによる波力低減率 λ

$$\lambda = \frac{\text{消波ブロックを被覆した直立ケーソンに作用する力}}{\text{直立ケーソンに作用する力 (非被覆)}} \dots\dots\dots (1)$$

の提案が行われてきている^{1,2)}。しかし作用力の伝達機構にもとづいて波力低減率を解明している研究は少ない³⁾。

著者は先き⁴⁾に、防波堤護岸の安定実験の検討結果や施工中の被災例^{5,6)}の事実から、消波ブロック被覆堤のケーソンに作用する力の伝達過程には波力と同時に消波ブロック荷重の一部を考慮する必要があることを指摘した。今回これらの作用力がどのように重合されてケーソンに作用するかを水理実験を用いて検討し簡単なモデル化を行って消波ブロック荷重、波力の伝達機構の解明を試みた。

2. ケーソンに対する作用力の概念

消波ブロックで被覆されたケーソンに対する作用力は次の各分力に分けて考えることができる。各分力の定義を以下に述べる。なお作用力は時間の関数とする。

2.1 水平力 (t/m)

- (1) 直立ケーソンに作用する水平波力 $F_0(t)$ (非被覆)
- (2) 消波ブロック被覆ケーソンに作用する波力の水平分力 $F(t)$
- (3) 消波ブロック透過波力 $F_1(t)$

消波ブロックの間隙より直接、ケーソンに伝達される波力でケーソン前面での水位変動と水粒子の運動によって直接決定される。

(4) 消波ブロック経由波力 $F_2(t)$

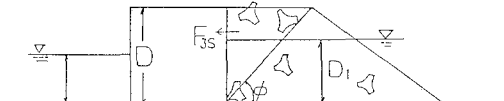
進行波が被覆消波ブロックの法面に到達した時から消波ブロックを通じてケーソンに伝達される波力で $F_1(t)$ よりも時間的に早く到達する。

(5) 消波ブロック自重水平力 $F_3(t)$

安息角 ϕ 以上にある自立できない消波ブロック荷重の水平分力で 図—1 に示すように一部静水中に没している場合の力を F_{3s} とすると消波ブロックを粒子のあらい土質材料とみなして表示すれば次式が得られる。

$$F_{3s} = K_s \left\{ \frac{1}{2} \gamma (1 - \epsilon) D^2 - \frac{1}{2} \omega_0 (1 - \epsilon) D_1^2 \right\} \dots\dots (2)$$

ここに γ : 消波ブロック単位体積重量 (t/m³)、 ϵ : 消波ブロックの空隙率、 D : ケーソン高 (m)、 D_1 : ケーソン底部よりの水位高 (m)、 ω_0 : 海水の単位体積重量 (t/m³)、 K_s : 土圧係数に相当する係数



図—1 静水時の消波ブロック自重水平力

なお、 $F_2(t) + F_3(t)$ を消波ブロック伝達波力と称す、

2.2 揚力 (t/m)

- (1) 直立ケーソンに作用する揚力 $U_0(t)$
- (2) 消波ブロック被覆ケーソンの底部に作用する揚力 $U(t)$

3. 水理模型実験

3.1 実験諸元と実験方法

2. で考察した各分力を実験的に検討するため、実験は二次元造波水路 (長さ 77 m、高さ 1.2 m、巾 0.9 m) 内に 図—2 に示す標準的な消波ブロック被覆堤模型断面 (現地換算 1/36 縮尺) を設置して行った。作用力の測定概要を 図—3 に示すが、堅固に作製したプラスチック製ケーソン模型上部に三分力 (水平力・水平モーメント、揚力) 検出器を取り付け、模型下部と捨石マウンドとの間を 1 mm 程度の隙間をもうけるように水路内に吊り下げた。この懸下式模型の固有周期は静水中で 26.8 Hz であり実験波 (1~2.5 ses) との共振現象は生じていないが衝撃砕波が作用する場合は衝撃応答特性の補正を行って作用力を求めた。また実現象が捨石マウンド上部面を支点としたロッキング現象であるのに対して測定模型ケー

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所

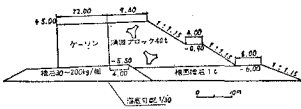


図-2 実験に用いた防波堤断面図

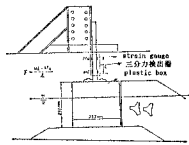


図-3 波力測定装置の概要

ソンの振れ運動は逆であるが、実験で最大の作用力でケーソン変位が 0.24mm と極めて微小であるため、ほぼ実現に近い挙動をしているものと見做せる。

つぎに各分力の測定にあたっては、ケーソンと消波ブロックの間に流体抵抗の少ない鉄製格子を入れてわずかに分離させ各分力を独立に測定した。なお消波ブロック伝達波力 $F_2(t) + F_3(t)$ は波の水位変動による波力と浮力の変化を含んでいるため波形から分離することが困難であるが設計上からは合力で充分なため $F_2(t)$ の値は静水時の消波ブロック自重水平力 F_{3s} をベースに考えることとした。実験波は現場換算値で周期 7, 9, 11, 13, 15sec の規則波を砕波波高まで作用させた。

3.2 実験結果と考察

(1) 一体測定の結果

直立ケーソンに作用する水平波力 $F_0(t)$ の最大値 F_0 の測定結果を 図-4 に無次元表示で示すが合田¹⁾の算定式と同等な値と傾向を示す。つぎにケーソンを消波ブロックで被覆した場合の水平波力 $F(t)$ の最大値 F を F_0 と同様な表示で 図-5 に示す。また F と F_0 との比、すなわち水平分力の波力低減係数 λ と相対水深波高との関係を示したものが 図-6 である。図より相対水深波高が 0.5 以下の波では λ が 1 以上であり、このことから消波ブ

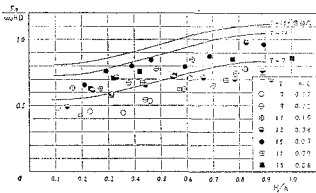


図-4 直立ケーソンに作用する水平力

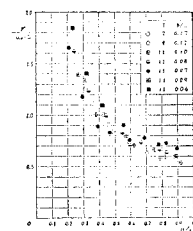


図-5 消波ブロック被覆ケーソンに作用する力

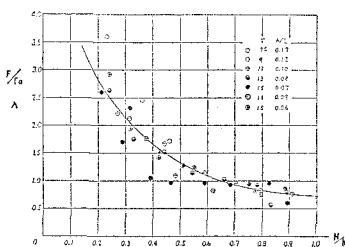


図-6 直立ケーソンの消波ブロック被覆による波力低減効果(水平力)

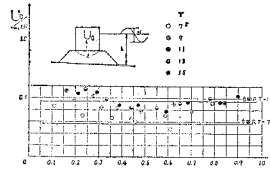


図-7 直立ケーソンに作用する揚力

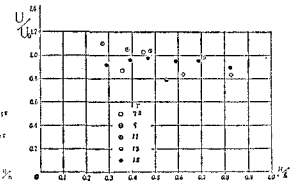


図-8 直立ケーソンの波力低減効果(揚力)

ロック自重の水平分力が波力低減効果に関与していることが知れる。つぎに揚力についても静水中での揚力を 0 として水平力と同様、直立ケーソンでの最大値 U_0 、消波ブロック被覆での最大値を U として各作用力とその比を無次元表示したものが、図-7, 8 である。図より直立ケーソンの揚力は合田¹⁾の算定式でほぼ近似できる。また被覆した場合の揚力も波力低減係数 λ を 0.9 とした合田式で算定することができよう。

(2) 分離測定の結果

鉄製格子で分離して測定した各分力の波形記録の一例を 図-9 に示す。図より各分力のピークが時間的にややずれていることがわかる。

(a) 消波ブロック透過波力 $F_1(t)$ の最大値 F_1

一体測定での結果と同様、無次元波力 F_1/w_0HD で表わしたものが 図-10 であり直立ケーソンの場合と比較したものが 図-11 である。この比 F_1/F_0 は短周期の波の場合を除けば 0.6~0.8 の値をとる。

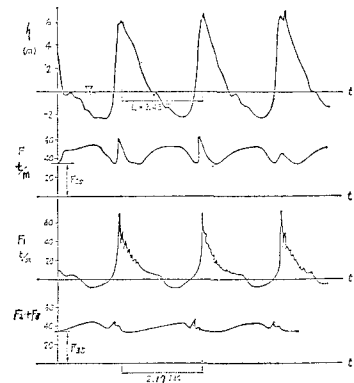


図-9 消波ブロック被覆堤のケーソン前面水位 η と各分力の経時波形記録

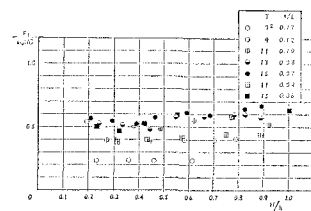


図-10 消波ブロック透過波力

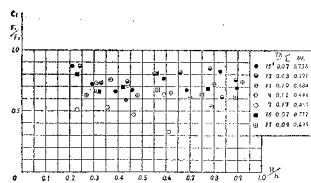


図-11 消波ブロック透過波力の直立ケーソンとの比較

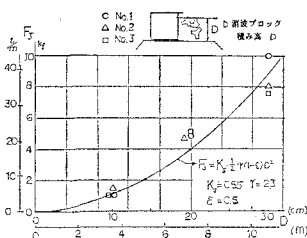


図-16 空中における消波ブロック自重水平力

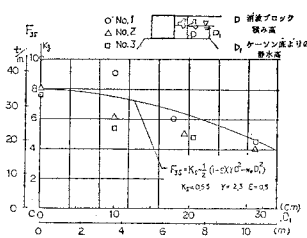


図-17 静水中における消波ブロック自重水平力

(b) 消波ブロック伝達波力 $F_2(t) + F_3(t)$

消波ブロックを介してケーソンに作用する伝達波力の最大値 $F_2 + F_3$ の無次元表示を 図-12 に示す。図より波高が小さい場合は水平自重力 F_3 の占める割合が大きいことが知れる。

また静水中の消波ブロック自重水平力 F_{3s} をベースとして得られる $F_2(t)$ のピーク時の値 F_{2p} を 図-13 に示すが 図-11 と比較して F_1 より小さい。また $F_2(t)$ のピークは $F_1(t)$ のピークより早く生じ、 $F_1(t)$ のピーク時には 図-14 に示すように F_{2p} より小さな値をとる。この値 F_2 の直立ケーソン堤との比 F_2/F_0 は 図-15 に示すように 0.1 以下である。

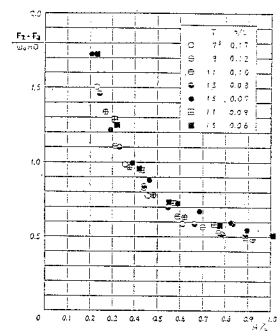


図-12 消波ブロック伝達波力

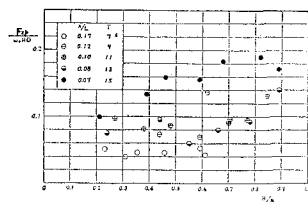
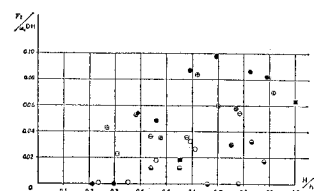
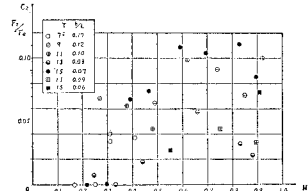


図-13 波消波ブロック經由波力 (ピーク時)

図-14 消波ブロック經由波力 (F_1 ピーク時)図-15 消波ブロック經由波力 (直立ケーソンとの比較) (F_1 ピーク時)(c) 消波ブロック自重水平力 $F_3(t)$

ケーソン模型前面に消波ブロックを漸次天端まで積み上げた場合 (空中) と静水中の水位を変えた場合のについて実験的に検討した結果が 図-16, 17 である。これらの図より $F_3(t)$ が積み高と浮力に関係することが知れる。これらの結果より波峰がケーソン前面に到達した状

表-1 被覆材の土圧係数

(ケーソン模型幅 23.3m)				
測定箇所	被覆材	測定値 F_1	計算値 F_1	F_1/F_0
A (一部水中)	テトラ	5.9 t	5.9 t	0.43
A (一部水中)	テトラ	3.6 t	6.0 t	0.44
B (一部水中)	テトラ	7.8 t	7.9 t	0.69
C (一部水中)	テトラ	1.2 t	2.5 t	0.39
D (空中)	砂	1.0 t	5.1 t	0.29
E (空中)	砂	0.1 t	5.0 t	0.28

態では $F_3(t)$ は最小に、逆に波の谷で最大となることが示唆され、図-9 の波形記録からもこの事実が見出される。なお種々の被覆材に対する係数 K_s を実験的に求め

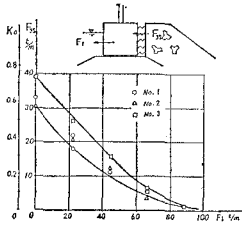
た結果を 表-1 に示す。表より K_s は平均で 0.5, $0.42 < K_s < 0.66$ であったが、消波ブロックの種類、形状、積み方、かみ合せ状態で種々かわるものと思われる。

3.3 作用力の伝達過程に関する考察

実験で得られた各分力の中、水平分力については、 F_1 , F_2 , F_3 を単純に加算したのでは一体測定での F の 1.5 倍程度になり過大に評価してしまう。そこで実際の場合の水平力算定のためにこれらの各分力の伝達過程を検討する。

一般に透過波力 $F_1(t)$ は波動に伴う静水圧と動水圧との和と考えられ直接ケーソンに伝達される。一方、消波ブロックを介して伝達される $F_2(t)$, $F_3(t)$ はケーソンと消波ブロックとの相対変位に伴う伝達力の変化、消波ブロックの浮力や主働土圧の変化、によって作用力が異なるものと推定される。この例証として懸下式模型を用いて F_1 を作用させる代りにワイヤーで模型を引っばった場合の作用力 F を 図-18 に示す。この場合の最大作用力 (現地換算値で 88 t/m) でも模型変位は 0.24 mm (同上 8 mm) であり

消波ブロックとケーソンはほぼ接触状態にある。図より F_1 の増大に伴い静水中での消波ブロック自重水平力 F_{3s} が減少し、 F_1 の現場換算値 100 t/m 近くになって 0 に近づくように変化する。この事例はケーソン模型変位による F_{3s} の変化を検証したものであるが、実際の現象でもこのような伝達過程が生じているものと推定される。



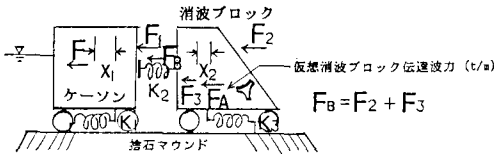
図一18 静的検定における F_1 と F_{3s} の関係

すなわち、誇張していえば、やわらかな捨石マウンドの上にやややかたいケーソンと消波ブロックが置かれてい
ると考えられ波浪時にはケーソンと消波ブロックの動揺
による変位がそれぞれ異なるため、消波ブロックの自重
水平力が主働土圧的に減少したり、場合によっては離れ
たりするため前述の実験のような伝達過程を呈するもの
と推定される。そこで消波ブロック被覆堤のケーソン、
消波ブロック・捨石マウンド各部が圧縮バネで結合され
た構造物と見做して簡単なモデル化を行ってみる。

4. 伝達過程モデル

4.1 モデル式

図一19 に示すようにケーソン、消波ブロック、捨石
マウンドが圧縮バネで結ばれて（一部接触）いる状態に
各分力が作用していると仮定する。ここにケーソン変位
 x_1 は消波ブロックを被覆しない状態からの、消波ブ
ロック端部変位、 x_2 は仮想的な自立消波ブロックから
の位置とし、(1) ケーソンと捨石マウンド、(2) ケーソンと
消波ブロック、(3) 消波ブロックと捨石マウンドとの弾
性バネ定数をそれぞれ K_1 , K_2 , K_3 (t/m²) とすると弾性
変形限界内では以下の式がなりたつ



図一19 水平力伝達形態のモデル化

$$F = K_1 x_1 = F_1 + K_2 (x_2 - x_1) \dots\dots\dots (3)$$

$$K_2 (x_2 - x_1) + K_3 x_2 = F_2 + F_3 \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{仮想力: } F_A = (F_2 + F_3) (1 + K_3 / K_1 + K_3 / K_2) \dots\dots\dots (5)$$

これらの式より次式を得る。

$$F = F_1 + \frac{(F_2 + F_3)}{1 + K_3 / K_1 + K_3 / K_2} \times \left(1 - \frac{K_3 / K_1}{1 + K_3 / K_1 + K_3 / K_2} \cdot \frac{F_1}{F_2 + F_3} \right) \dots\dots\dots (6)$$

上式中で

$$\alpha = \frac{K_3 / K_1}{1 + K_3 / K_1 + K_3 / K_2} \dots\dots\dots (7)$$

の値はモデル結合体バネ系のシステム定数というべき値
であり、今このシステム定数を懸下式模型実験 (m) と
滑動実験 (c) により求めてみると (m , c) で K_1 が異
なるが、 K_2 , K_3 , F_A は変わらぬ事から次式を得る。

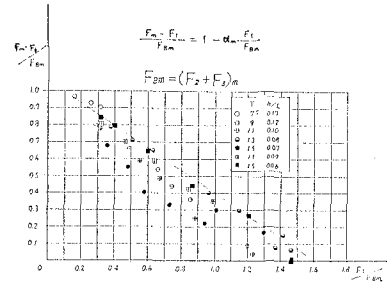
$$\frac{F_0 - F_1}{(F_2 + F_3)_m} = \frac{1/\alpha_m}{(1/\alpha_m - 1) + \beta} \left\{ 1 - \frac{\beta}{1/\alpha_m} \cdot \frac{F_1}{(F_2 + F_3)_m} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$\alpha_0 = \frac{\beta}{(1/\alpha_m - 1) + \beta} \dots\dots\dots (9)$$

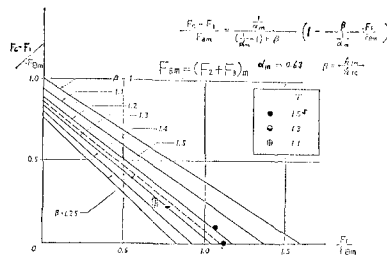
ただし懸下式模型での支持バネ K_{1m} と滑動実験での
ケーソンと捨石マウンドの地盤バネ K_{10} との比を上式で
 $\beta = K_{1m} / K_{10}$ とする。

そこで懸下式模型をもちいた実験結果より α_m を求め
ると 図一20 より $\alpha_m = 0.63$ を得る。

つぎに懸下式模型と同じ大きさのコンクリートケーソ
ン模型の滑動する瞬間での波高、揚力、摩擦係数より水平
力 F_0 を求め、同時測定した F_1 , $(F_2 + F_3)_m$ の値で表
示したものが 図一21 である。この実験値を式 (8) に重
ねると $\beta = 1.3$ が滑動例をみだし、式 (9) より $\alpha_0 = 0.68$
の値が得られる。



図一20 累下式模型によるシステム定数 α_m



図一21 滑動実験よりえられるバネ定数比 $\beta = K_{1m} / K_{1c}$

よって次のモデル式を得る。

$$F_0 = F_1 + (F_2 + F_3)_c \left(1 - \alpha_0 \cdot \frac{F_1}{(F_1 + F_2)_c} \right) \dots\dots\dots (10)$$

この式を吟味すると K_2 , $K_3 \ll K_1$ の場合、 $\alpha_0 \approx 0$ でこ
の場合には非常に堅いマウンド上でのケーソンは波力と消
波ブロック自重水平力の各分力の和の力がそのまま作用
するため滑動しやすい状態を呈す事を意味する。

5. 水平作用力の算定法の一提案

以上の考察から消波ブロック被覆堤ケーソンに作用する水平力 F は次式で与えられる.

$$F = (1 - \alpha_0)F_1 + F_2 + F_{3s}$$

ここに F_0 を消波ブロックを被覆しない直立ケーソンに作用する波力 (t/m) とすると各分力は以下の式で与えられる.

F_1 : 消波ブロック透過波力で $F_1 = 0.8F_0$

F_2 : 消波ブロック經由波力で $F_2 = 0.1F_0$

F_{3s} : 消波ブロック静水時自重水平力で (2) 式で与えられ, 式中の係数 K_s は 0.42~0.66

α_0 : ケーソン, 消波ブロック, 捨石マウンドの形状や材料特性で決定される定数で 1/36 縮尺実験では 0.68 の値をとる.

なお消波ブロック静水中自重水平力 F_{3s} を決定する係数, K_s システム定数 α_0 の現場への適用に当っては, 現場実測, あるいは大型造波水路における実規模大の波浪実験による検証が必要である.

5. 結 語

消波ブロックで被覆されたケーソンに対する作用力の伝達過程が, 波浪およびケーソン, 消波ブロック, 捨石マウンドの材料特性による相対変位に依存することを指

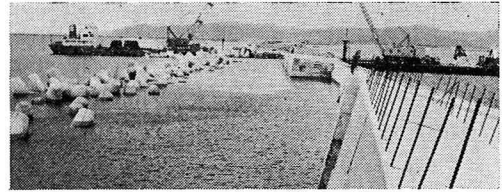


写真-1 施工中のケーソン滑動被災例
——1983, 日本海中部地震津波による——

摘し, その算定法に関する一提案を行った. この伝達過程の解明手法によりケーソンの滑動等の被災例を説明することができる (写真-1).

参 考 文 献

- 1) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技研報告, 第12巻, 第3号, 1973.9, pp. 31~69.
- 2) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 2-115~117, 1979.3.
- 3) 広本文泰・西島浩之・今野 茂・木村岩男: 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回海岸工学講演集, pp. 347~351, 1983.
- 4) 島田真行・長谷川寛: 消波ブロック被覆堤への水平力に関する一考察, 土木学会第35回年次学術講演会第2部, pp. 39~40, 1980.
- 5) 昭和47年苫小牧西港ケーソンヤード作業基地護岸における施工中滑動例——北海道開発局技術長, 竹田英章氏談による.
- 6) 島田真行・田中寛好: 日本海中部地震による津波規模および被災状況の調査報告. 1983年9月, 電力中央研究所報告.