

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

高橋 重雄*・谷本 勝利**・下迫 健一郎***

1. ま え が き

消波ブロック被覆堤は、我が国における代表的な防波堤構造の一つである。消波ブロック被覆堤の直立部に働く波力の算定式として、森平式が使われていたが、合田式を準用して波力低減係数 λ で補正する方法が一般的となりつつある。

波力低減係数 λ は、消波ブロックの設置による波力低減効果を示すもので、谷本ら(1985)、常井ら(1988)などによって研究されている。現在では消波ブロック被覆堤が採用される通常の条件であって、十分に被覆されている場合には、 $\lambda=0.8$ を標準的に用いることが多い。しかし、既往の研究でも指摘されているように、条件によっては λ はこの値より大きいときもあるため、その条件等について検討する必要がある。

また、実際にはケーソンにはブロックの寄りかかり荷重も作用している。これについても広本ら(1983)、島田(1984)、田中ら(1985)などの研究が行われており、条件によっては波力に比べて無視できない値になるとされている。しかし、ケーソンの安定性に対して、ブロックによる荷重がどのように影響するのかについては十分に解明されていない。

本研究は、模型実験によって波力低減係数やブロック荷重について調べるとともに、それらが滑動にどのように影響するのかを検討するものである。

2. 実験の方法

(1) 実験水路と模型

実験は長さ105m、幅3m、深さ2.5mの大型造波水路で行った。堤体断面は図-1に示した断面を標準としたが、このほかにも水深、マウンドの高さ、ブロックの被覆幅などを変えたいくつかの断面についても実験を行っている。また、ブロックで被覆しないケースについても行った。ただしこの場合にはマウンド上で碎波を促進しないように、マウンドの前肩幅を短くしている。実験

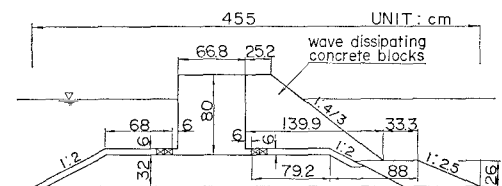


図-1 堤体断面図

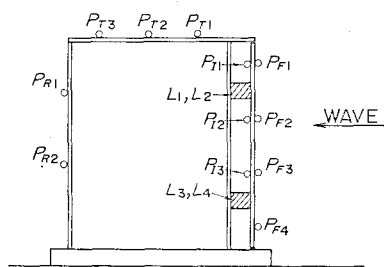


図-2 ケーソン部の断面

に使用したケーソンは、モルタル製底版の上にアクリル製のケーソンを固定したもので、ケーソンの各面には波圧計を取り付け、波力を測定できるようにしてある。図-2はケーソン部の断面で、 P_{F1} 、 P_{F2} などは波圧計の位置を示す。なお、前面板は $L_1 \sim L_4$ のロードセルで本体に固定しており、ブロック荷重を含む全水平力の測定が可能である。

(2) 実験の種類と測定方法

実験はケーソンに波を作用させる実験(波力実験)と、波力の代わりに重錘を用いて水平力を作用させる実験(水平力载荷実験)に大別される。波力実験では不規則波(有効波数250波程度)を用いて、ケーソン各面に働く波圧の分布やブロック荷重を含む全水平力を測定した。また、ケーソンの重量を変化させ、非接触式の超音波式滑動測定装置を用いてケーソンの滑動量も測定した。実験波はブレットジュナイダー・光型型スペクトルを目標として作成し、有義波周期を3種類、波高レベルを3~5段階に変化させて実験を行った。

水平力载荷実験ではケーソンの変位とブロック荷重の

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 耐波研究室長

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部長

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 耐波研究室

変化を測定した。ブロックは力を加えて締め固め、波の作用後と同じ程度のブロック荷重にした後、水平力を載荷した。

3. 透過波力と波力低減係数 λ

(1) 波圧波形の変化

図-3 はブロックで被覆した場合と被覆しない場合について、同じ波による波圧波形の違いを示した例で、下段の波形は波高が小さい場合、中段は波高がやや大きい場合、上段は波高が非常に大きい場合である。ただし、これらはブロックの幅と波長の比が比較的小さい、 $b_0/L_{1/3}=0.053$ (b_0 : 静水面における被覆幅) である。ブロックによる波力の低減は波高の大きいときに顕著で、やや切り立ったピークが減衰することによって生じており、波高の小さい重複波的な波では低減効果が小さいことがわかる。既往の研究では被覆幅の大きい断面でも行われており、たとえば田中ら(1985)は $b_0/L_{1/3}=0.068\sim 0.202$ 、稲垣ら(1986)は $b_0/L_{1/3}=0.134\sim 0.270$ を対象としている。このような場合は波力の低減形態が異なり、ピークの部分だけでなく波圧波形全体も小さくなる。ただし、現地で最近建設された 111 の消波ブロック被覆堤の例をみると、設計波に対する、 $b_0/L_{1/3}$ は 0.05~0.17 に分布し、平均値が 0.094、標準偏差が 0.022 であり、被覆幅と波長の比は比較的小さい。

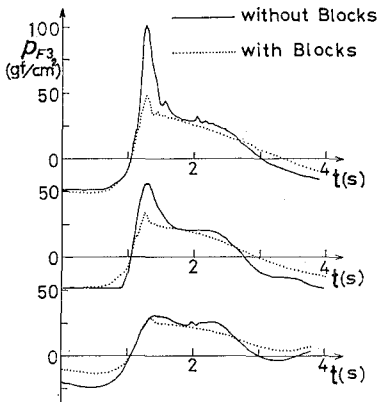


図-3 波圧波形の例

(2) 波力低減係数の検討

図-4 は平均水平波力強度のピーク値の低減率 λ_H^* と波高水深比 H/h の関係を示したものである。ここで用いている低減率 λ_H^* は、ブロックで被覆した場合としない場合の波力のピーク値の比で定義しており、図中のデータは1つの波群における波高と波力の代表値(最大値, 1/10 最大値, 1/3 最大値) どうしを対応させてプロットしている。波高が小さい範囲では $\lambda_H^*=0.85\sim 0.92$ でほぼ一定であり、波高が大きくなると、 λ_H^* はしだい

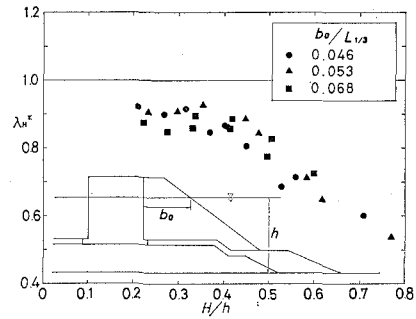


図-4 水平波力の低減率

に小さくなっていく。 H/h が 0.5 以上では λ_H^* は 0.8 以下である。現地の 111 の例では設計波に対する H/h が 0.5 よりも小さいのは、内湾の防波堤などの数例にすぎず、通常の場合は $\lambda=0.8$ を用いることができると考えられる。ただし、ここには示していないが、合田式による波力に対する低減率 λ_H は、今回の実験範囲ではここに示した λ_H^* より全体的にやや大きい。紙面の都合で示せないが、揚圧力の低減率についても水平波力と同様の傾向がある。ただし、特に波高が大きいたときには水平波力と揚圧力とではピークとなるタイミングが異なるため、水平波力ピーク時の揚圧力はピーク値よりもやや小さくなる。

なお、越波が生じる場合には、ケーソン前面の水平波力や底面の揚圧力以外に、上面や背面にも波力が作用するが、位相差があるため、前面の波力がピークとなるタイミングでは波力はほとんど 0 である。したがって、ケーソン全体の安定性に対しては考慮する必要はない。

4. ブロック荷重の影響

(1) 静水時のブロック荷重

ケーソンには透過波力以外に、ブロックに作用しこれを通じて伝達される波力や、ブロックの自重による水平力も作用する。計算上は、これらをブロックがケーソンにおよぼす力としてまとめて考えたほうが簡単である。以後これを単にブロック荷重と呼ぶ。静水時のブロック荷重については、土圧と同様に考えると、次式で計算できる。

$$F_{BS} = K_S \{ \gamma (1 - \varepsilon) (h' + h_c)^2 - w_0 (1 - \varepsilon) h'^2 \} / 2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに F_{BS} は静水時のブロック荷重、 K_S は土圧係数に相当する係数、 γ はブロックの単位体積重量、 ε はブロックの空隙率、 h' はケーソンの基面水深、 h_c は天端高、 w_0 は水または海水の単位体積重量である。

波力実験において、ブロック設置直後と波作用後の静水時のブロック荷重の値を測定した。設置直後では $K_S = 0.14\sim 0.36$ となり積み方によるばらつきが大きいが、

ケーソンを重くして滑動しないようにして波を作用させると、ブロック荷重はしだいに増加する。作用させる波が小さいと、ブロック荷重はあまり大きくならず安定し、その後同じ波を作用させても変化しない。しかし、さらに大きな波を作用させると再び増加し、最終的には $K_S=0.72$ 前後ではぼ一定の値となった。したがって、静水時のブロック荷重の値は作用した波の大きさと関係があり、波高が小さい場合にはあまり大きくなり得ないと考えられる。なお、 $K_S=0.72$ という値はケーソンの滑動なしにブロックが十分に締め固まった状態での値であり、既往の研究における広本ら(1983)の $K_S=0.63$ 、島田(1984)の $K_S=0.42\sim0.66$ と比較すると、かなり大きな値である。

また、後述する滑動実験時にもブロック荷重を測定している。ケーソンが滑動すると静水時ブロック荷重は低下する。模型量で数mm程度のわずかな滑動であると、波の作用によって静水時ブロック荷重は次第にもとにもどる。しかし、滑動量がそれ以上になると、下部のブロックは移動せず、ケーソンと離れた状態となり、上部のブロックによる荷重のみとなる。ただし、滑動量がかなり大きくなると上部のブロックがくずれることになる。このように静水時のブロック荷重は、作用した波の大きさや時間、あるいは滑動量によって変化することに留意する必要がある。

(2) 波作用時のブロック荷重

既往の研究でも明らかなように、ブロック荷重は波が作用すると静水時よりも小さくなる。この原因としては、水位の上昇による浮力の増加以外に、ケーソンの変位によるブロック荷重の低下が考えられる。ここでいう変位とは滑動量よりもむしろロッキングなどによるケーソンの瞬間的な変位である。実際に波作用時にケーソン前面の上端で変位をダイヤルゲージを用いて測定した結果、全く滑動しないときでも、ロッキングにより $0.05\sim0.10$ mm 程度の変位が認められた。

図-5は平均水平波力強度のピーク値 f_{FP} と、そのときのブロック荷重の変動量 f_{BD} との関係を示したものである。ここに f_{BD} は、ブロックとケーソンが接触している場合と金網を用いて分離した場合の全水平力(いずれも静水時を0とする)のピーク値の差で定義している。実験結果の平均的な関係式は

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

と表され、 $\alpha_B=0.7$ となる。 α_B はブロック荷重低減係数とよぶことにする。波力が大きくなると f_{BD} は頭打ちになっているがこの絶対値は静水時のブロック荷重にほぼ等しく、波力がある程度大きくなると、ブロック荷重は0となることを示している。

ただし、これはブロックが十分に締め固められた状態

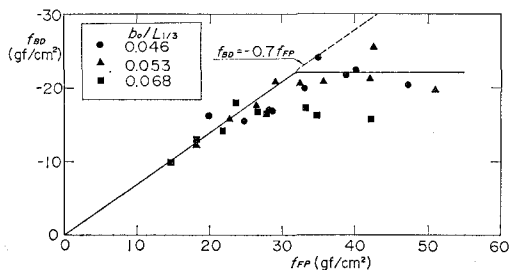


図-5 水平波力とブロック荷重の変動量

における結果であり、締めりかたが十分でない、すなわち静水時のブロック荷重が小さく、増加している途中の状態では、波作用時のブロック荷重の減少量も小さく、式(2)のブロック荷重低減係数 α_B は0.7より小さい値となる。また、ケーソンが滑動した後では静水時ブロック荷重は小さくなるが、この場合における波作用時ブロック荷重の減少量も小さい。

(3) 水平力載荷実験結果

ケーソンに作用する力と変位そしてブロック荷重の関係を調べるために、水平力載荷実験を行った。この場合の水平力は、波作用時の透過波力に対応すると考えられる。図-6はブロックを積むときに力を加えて、初期ブロック荷重を $K_S=0.7$ 程度に大きくしたときの結果で、載荷した水平力の単位面積あたりの大きさ $F_H/(l \cdot D)$ と水平ブロック荷重強度 f_{BH} の関係を示したものである。ただし、 l はブロックの高さ、 D は法線方向のケーソンの長さである。水平力の作用高さは、静水面付近とケーソン底部近くの2種類で行ったが、同じような傾向を示している。

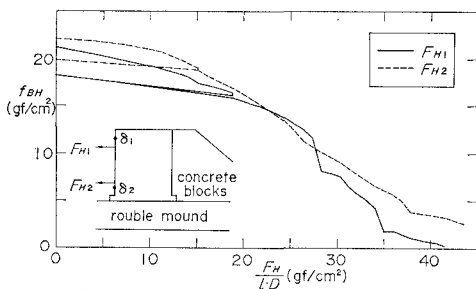


図-6 水平力載荷実験結果

水平載荷力が大きくなると、荷重の減少率は -0.7 程度で一定となっており、これは図-5に示した波作用時の減少率と一致する。水平載荷力が小さいうちは、波作用時に比べて減少率が小さいが、これは波作用時には水位の上昇による浮力の増加があるためと考えられる。

ケーソンの変位は、水平力の作用位置がケーソン底面近く、大きさが 20 gf/cm² のとき、上側の変位 $\delta_1=0.44$

mm, 下側の変位 $\delta_2=0.19$ mm であり, 合田 (1973) と同様に求めた, マウンドの弾性係数から得られる変位量 ($\delta_1=0.11$ mm, $\delta_2=0.07$ mm) よりもかなり大きい。これは, ケーソンの変位に滑動が含まれることと, アクリル模型自体に多少のひずみが生じたことが原因と考えられる。波作用時に比べて変位量が多いにもかかわらず, ブロック荷重の減少量が変わらないのは, 波力の作用は動的であることや, 締め固まりの状態の違いによると考えられるが, 明確ではなく今後の検討が必要である。なお, マウンドの弾性係数はケーソンの接地面積の平方根に比例するため, 現地では模型との縮尺の比以上に変位は大きくなる。したがって相対的なブロック荷重の減少率は現地のほうがより大きいと考えられる。

(4) ブロック荷重を含む全水平力

ブロック荷重を考慮した波作用時の全水平力 F_{HT} は次式で表される。

$$F_{HT}=F_{BS}+F_{BD}+F_{FP} \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-7 は波高 H と水平力の関係を模式的にしたものである。I は静水時ブロック荷重が透過波力より大きい領域, III はブロック荷重を無視できる領域, II は両者の間で, ブロック荷重が多少影響する領域である。

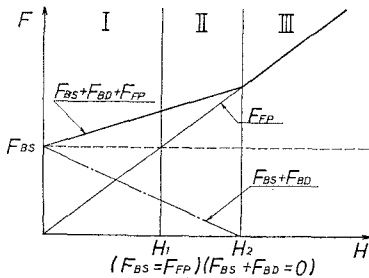


図-7 波高と水平力の関係

$F_{BD}=-\alpha_B F_{FP}$ の関係を用いると, 全水平力は次のように表すことができる。

$$F_{HT}=F_{BS}+(1-\alpha_B)F_{FP} \quad (\text{領域 I, II: } H < H_2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$F_{HT}=F_{FP} \quad (\text{領域 III : } H \geq H_2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし, H_2 は $F_{BS}+F_{BD}=0$ すなわち $F_{FP}=F_{BS}/\alpha_B$ のときである。また H_1 は $F_{FP}=F_{BS}$ のときである。実験では $\alpha_B=0.7$ であり, $(1-\alpha_B)$ は 0.3 となる。

なお, 式 (4) 中の $(1-\alpha_B)F_{FP}$ は波作用時における全荷重の変動分であり, 現地ではケーソンの変位が大きいと考えると, $\alpha_B=1$ とみなして無視することも考えられる。この場合, 式 (4) は $F_{HT}=F_{BS}$ と表される。すなわち, 全水平力としては静水時のブロック荷重 F_{BS} と透過波力 F_{FP} のどちらか大きいほうを考えることに

なる。このとき $H_1=H_2$ であるから, 領域 II はなくなる。

(5) 現地の設計条件とブロック荷重

図-8 は h/L を横軸に, H/h を縦軸にとって図-7 における H_1 すなわち領域 I と II の境界を示すものである。図には静水時ブロック荷重係数 K_S として今回求められた比較的大きな値 0.72 と, やや小さい 0.50 の 2 通りの場合について示している。それぞれの線の下側が領域 I で, 静水時ブロック荷重が卓越している。ただし, $h'/h=0.7$, $h_C=0.35H$ と仮定し, 合田式から求めている。図からわかるように, ブロック荷重が問題となるのは水深が大きい場合や波高がかなり小さい場合である。

図-8 には現地の消波ブロック被覆堤の 111 例についてその設計条件を示している。ほとんどの例でブロック荷重が無視できるか, 多少影響する領域にあることがわかる。 $K_S=0.50$ としたとき, 領域 I となるのは数例のみである。

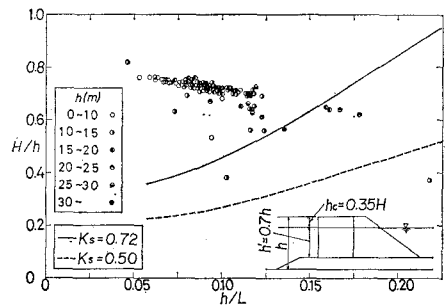


図-8 現地の設計条件とブロック荷重

5. 滑動安定性

図-9 は, 各波高レベル (250波) ごとのケーソンの滑動量 S と最高波高 H_{max} の関係を示すもので, それらを各重量において合田式 ($\lambda=0.8$) から計算される滑動限界波高 H_{CG} で無次元化して整理したものである。なお, ここに示したデータはすべてブロック荷重を無視できる領域 III の結果である。理論上は $H_{max}/H_{CG}=1.0$ が滑動限界であり, 実験結果は $H_{max}/H_{CG}=0.9$ でやや滑動したケースがあるものの, それ以外はほぼ $H_{max}/H_{CG}=1.0$ が滑動限界となっている。また $H_{max}/H_{CG}>1.0$ であっても, 多少のばらつきはあるが, 滑動量はそれほど急激には増加しない。これは滑動限界よりも多少大きい波であっても, 波圧波形のピークが鋭く作用時間が短いことや, 滑動し始めた直後に越波によってケーソン上面に下向きの波力が作用し, 滑動を抑える効果があるためと考えられる。

図-10 はブロック荷重が問題となる場合の滑動実験結果を示すものである。横軸は H_{max}/h であり, これが

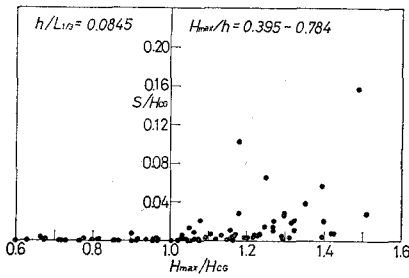


図-9 滑動実験結果(ブロック荷重の影響なし)

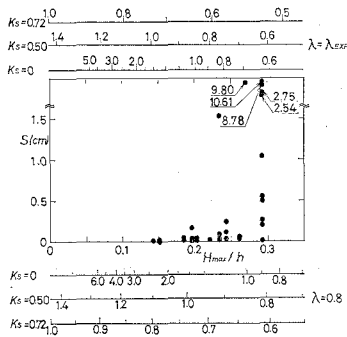


図-10 滑動実験結果(ブロック荷重の影響あり)

比較的小さい条件である。実験では一つの堤体重量に対して有義波高を変えて滑動量を測定した。横軸には合田式を用いて $\lambda=0.8$ として求めたケーソンの滑動安全率も示している。ただし、 $K_S=0$ とはブロック荷重を無視したもので、 $K_S=0.50$ と $K_S=0.72$ はブロック荷重を考慮したものである。実験値のばらつきは大きい、ブロック荷重を無視するとやや危険側であることがわかる。

さらに、ブロック荷重が問題となる領域は波力低減係数 λ_H が 0.8 より大きいところでもあるので、実験値の λ_H^* で透過波力を計算し直した安全率も図の上に示している。この安全率でみるとブロック荷重を無視してもそれほど危険ではないことがわかる。その理由としては、まず、静水時ブロック荷重が $K_S=0.72$ となるほど大きくなっていないことが考えられる。たとえば $H_{max}=17.4\text{ cm}$ となる場合の静水時ブロック荷重は、 $K_S=0.45$ 程度である。ただし前述したようにブロックが十分縮まっていないときは波作用時のブロック荷重の減少量が小さい。すなわち、式(4)において F_{BS} の値は小さくなるが、 α_B が 0.7 より小さく、 F_{FP} の係数 $1-\alpha_B$ が 0.3 より大きくなると考えられる。しかしながら、これらを考慮しても実験時の全水平力 F_{FT} は透過波力 F_{FP} に近

い値であったと考えられる。また、滑動の限界においては、ケーソンの変位によってブロック荷重の低減が大きくなり、結果的に滑動量がわずかであったとも考えられる。

6. まとめ

今回の研究において得られた主要な結果を示す。

① 消波ブロックによる波力の低減効果はブロック幅が比較的小さい場合、やや切り立った波力のピークが減衰することによって生じる。したがって波高の大きい碎波的な波ほど顕著である。

② 静水時のブロック荷重は、設置直後は小さいが、波の作用を受けるにしたがって増加する。最終的に安定となる値は、作用した波の大きさなどによって異なる。

③ 波の作用時には浮力の増加やケーソンの微小な変位によりブロック荷重は減少し、波高が大きくなるとほとんど 0 とみなせる。ただし、この減少量はブロックの縮まりの程度などによって決まる。

④ ブロック荷重を考慮しなければならないのは波高がかなり小さいか、水深の大きい場合である。通常の消波ブロック被覆堤はほとんどブロック荷重が無視できる。

⑤ ブロック荷重が無視できる条件では、 $\lambda=0.8$ として合田式を準用して計算される波力のみを考慮すればよい。静水時ブロック荷重が波力よりも大きい場合には、少なくとも静水時ブロック荷重は考慮する必要がある。波作用時のブロック荷重については今後さらに検討する必要がある。

参考文献

- 稲垣圭二・野口雄二・服部昌太郎(1986): 消波ブロック被覆工の波力低減率とその評価指標, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 362~366.
- 合田良実(1973): 衝撃碎波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察, 港研報告, 第12巻 第3号, pp. 3~29.
- 島田真行(1984): 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, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 571~575.
- 田中寛好・阿部直行・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.
- 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行(1985): 消波ブロック被覆堤の直立部に働く不規則波力, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 485~489.
- 常井公一・服部昌太郎・野口雄二・遠藤泰司(1988): 消波ブロック被覆堤の不規則波力の低減効果, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 647~651.
- 広本文泰・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.