

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

田中寛好*・阿部宣行**・加藤正進***

1. ま え が き

消波ブロック被覆堤はわが国消波型防波堤の主流であるにかかわらず、このタイプの防波堤ケーソンに作用する水平荷重のメカニズムを細かく議論した研究^{1),2)}は少く、その水平荷重は、被覆の無い混成堤を対象とした合田の波圧式³⁾に波圧低減率 λ を乗じた式に基づいて算定されているのが一般的⁴⁾である。しかるに、今後、大水深部にこうした種類の防波堤が建設される場合、消波ブロックがケーソンに寄りかかることによって生じる水平荷重が全水平荷重に対してかなりの割合を占めることが予想されるため、従来の設計法では安全性を十分確保できない可能性もあると考えられる。

本研究では、まず、分力計を用いた懸下式測定等の従来方式に比べてより実際に近い作用荷重を把握するため、捨石マウンド模型上に直接ケーソン模型を設置して水平荷重を測定する新しい方式を考案した。さらに、その実験結果に基づき荷重の構成要素やそれら相互の関係を明らかにした上で、従来の設計法に比して力の機構をより忠実に表現し得る水平荷重算定法の検討を試みた。

2. 模型実験の内容

2.1 実験装置および実験条件

本実験は、図-1に示すように、77m長、1.2m高、0.9m幅の二次元造波水路内に縮尺1/50の消波ブロック被覆堤模型を設置して実施した。本被覆堤は、沖波有義波高15m、周期16sを設計波とし、H.W.L.での水深21.5mに建設されるマウンド高5mの防波堤を想定したものである。

従来は、ケーソン模型をマウンドより少し離して懸下あるいは固定し、分力計^{1),5)}やロードセル²⁾によって荷重を測定する方式が採用されているが、これらの方式でケーソンのロッキングの実態等を正しく再現することに問題があり、これがケーソンに作用する荷重の測定結果に微かな影響を及ぼすものと考えられる。

本実験においては、図-2に示すように、直接マウンド上に設置した測定用コンクリートケーソンユニット前面に4個の荷重変換器を介してアクリル製受圧板をゴムバンドで固定した測定系を用いた。シリコンを用いてケーソン前面と受圧板の間隙での水の出入を防止する方法も検討したが、荷重速度が大きな場合そのシリコンが緩衝材の役目をするため荷重を過小評価する恐れがあった。そのため、この間隙での水の出入を許す代わりに間隙での水位変動による受圧板背後からの荷重変動を受圧板裏面上の5個の小型圧力変換器でとらえた。なお、ケーソン模型は水路幅方向に3ユニットで構成されており、中央のユニットが測定用となっている。

荷重測定実験における波浪条件としては、原型換算で模型設置位置での進行波高6.4~15.6m、周期7.9~18.7sの規則波ならびに有義波高12.0m、有義波周期15.3sの不規則波を用い、ケーソン設置条件は、水深21.5mと20.0m、マウンド高さ5m一定とした。

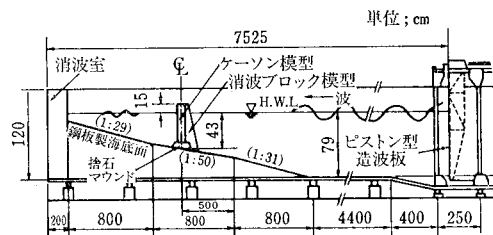


図-1 実験装置概略図

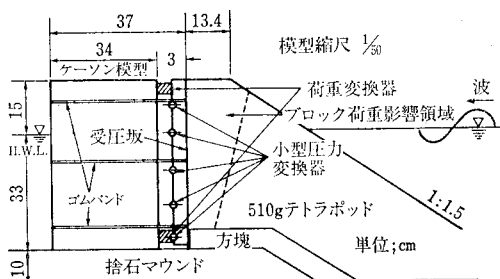


図-2 ケーソンに作用する水平荷重測定方式

* 正会員 工修 電力中央研究所 土木研究所環境部

** 正会員 電力中央研究所 土木研究所環境部

*** 正会員 工博 電力中央研究所 金西部計画課(長)

2.2 荷重測定方法

防波堤模型を設置する前に、設置位置での進行波特性を容量式波高計でモニターし把握した。

ケーソンに作用する水平荷重 F の構成要素としては、消波ブロックを通過して伝達される波力 F_i とブロックより受ける力 F_b とが考えられる。 F_i , F_b は、新しく考案した測定系を用い図-3 に示す測定・算定方法により求めた。図中 F_1 は、受圧板と消波ブロックを接触させ、波浪を十分作用させてブロックの寄りかかり状態が定常となった後の波作用下の荷重変換器出力を示す。

F_2 は、消波ブロックの背後に流体抵抗の小さい鉄製格子を挿入してケーソンをブロックからわずかに分離した際の荷重変換器出力を示す。なお、 F_1 , F_2 は、いずれも静水状態の荷量を基準とした荷重変動成分である。これらは、ケーソン前面と受圧板との間隙水による受圧板背後からの荷重変動 F_3 の影響を受けた結果の荷重であるため、実際の受圧板前面に作用する荷重を求める際は補正が必要となるが、この補正のための F_3 は、各位相での圧力分布より求められる。 F_1 , F_2 , F_3 測定後、静水時のブロック寄りかかり荷重 F_4 を荷重変換器の出力のみから求めた。以上の測定結果をもとに、 $F=F_1+F_3+F_4$, $F_i=F_2+F_3$, $F_b=F_1+F_4-F_2$ として各荷重が算出され、規則波作用下の解析結果の一例（原型値換算）が図-3 中に示される。

さらに、任意水深における静水時ブロック寄りかかり

水平荷重の予測を試みるため、消波ブロックの安息角観測結果ならびに空中でのブロックが寄りかかる際の受圧板上部と下部の荷重計出力比をもとに、静水時に水平荷重としてケーソンに影響を及ぼす荷重影響領域の推定を実施した。なお、安息角の観測は、波を十分作用させてブロックのかみ合わせ、寄りかかり状態が定常となった後、ケーソンを背後に取り除くことによって実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 水平合計荷重ならびに荷重構成要素

水平合計荷重、透過波力、ブロックから受ける力それぞれの変動特性に関する解析結果 2 例（原型値換算）を図-4 に示す。左側は一連の不規則波の最高波と同じ波高、周期を有する規則波が作用した場合の結果、右側は一連の不規則波作用下で最大水平荷重を与える場合の結果を示す。図より、まず透過波力の最大値に関しては、規則波、不規則波両結果にさほど差が無いことが見出され、最高波に相当する規則波を用いて不規則波波力の最大値はほぼ予測できることが確認できた。また、透過波力が最大るときブロックから受ける力は最小となること、しかもブロックからの力 F_b の変化特性は、透過波力 F_i をある割合で縮小し、静水時寄りかかり荷重 F_4 から差し引いた形で近似できることも認められた。これは、ケーソンが不透過性構造物であるのに対し、ブロック群は透過性の構造物であるため、波による両構造物の相

対的な変位（不透過性構造物の方が変位大）が生ずることが一因であろう。波による水位変化によって水没ブロックの数が増えるため、荷重影響領域の重量の変化ひいては寄りかかり水平荷重への変化が生ずることに起因すると考えられる。さらに、規則波作用下と不規則波作用下の F_b の変化特性を比較すると、規則波の場合の方が変動振幅が若干大きいことが見出される。これは、双方の種類の波に対してケーソンのロッキング特性が異なることと関係があるものと考えられる。このために、水平合計荷重の最大値 F_{max} としては、不規則波作用下の方が規則波作用下に比べて 1 割程度大きくなっている。なお、 F_{max} と被覆の無い混成堤ケーソンを対象とした合田式に

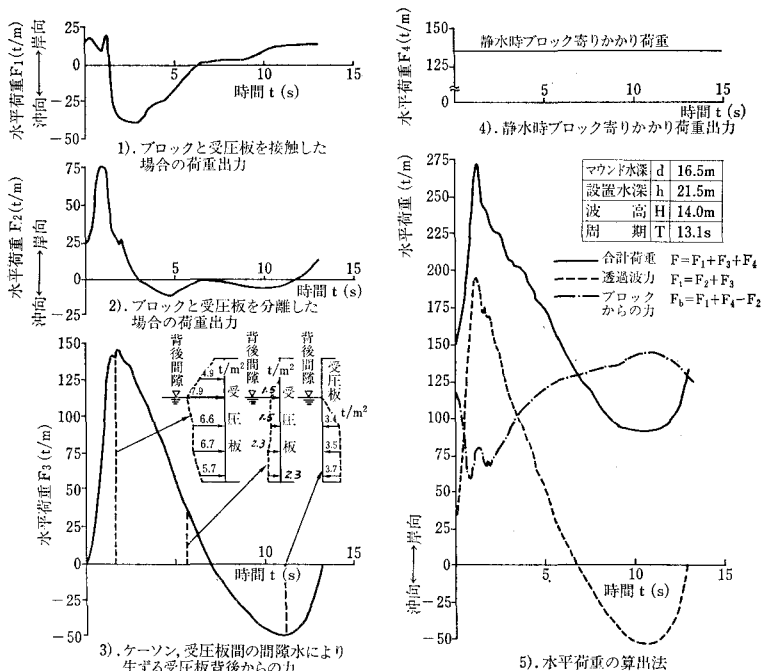


図-3 ケーソンに作用する水平合計荷重ならびに荷重構成要素の算出法

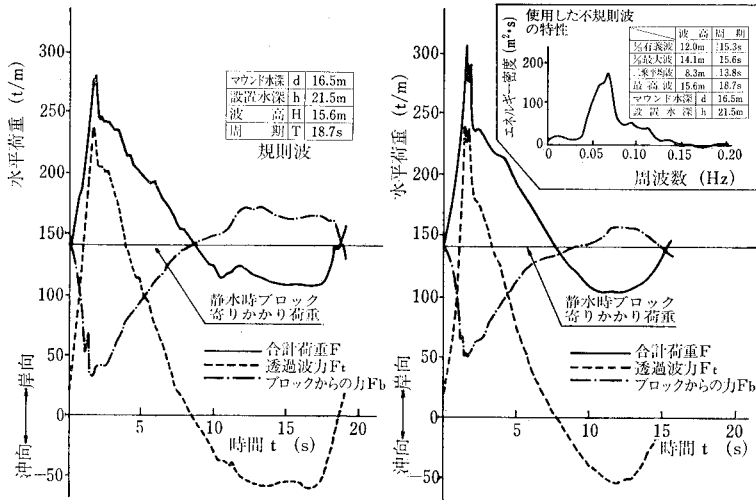


図-4 水平合計荷重ならびに荷重構成要素の解析結果2例

基づく波力算定値 F_0 とを比較した場合, $F_{\max}/F_0$ は規則波に対し 0.69, 不規則波(最高波を対象とした F_0 を用いる)に対し 0.77 となり, この場合は, 従来のように波圧低減率 0.8 を用い, 被覆堤に作用する水平方向最大荷重を $0.8F_0$ として算定しても安全であることがわかる。

図-5 には, 種々の規則波作用下で, 水平合計荷重最大値 $F_{\max}$ ならびに透過波力最大値 $F_{t\max}$ を F_0 と比較した結果を示す。横軸を進行波高マウンド水深比 H/h' として整理すると, $F_{\max}/F_0$ に関するプロットはかなり顕著な傾向を示す。つまり, H/h' が大きく 1.0 近辺の場合は 0.7 程度の値を示すが, H/h' が小さくなるにつれてこの比は大きくなる。従来の多くの防波堤のように設置水深が高々 13m, マウンド水深が 10m 程度であれば, $H_{\max}/h'$ が 1.0 近辺となり得るため $0.8F_0$ として最大水平荷重を算定しても安全であると考えられるが, 今後建設される趨勢にある大水深防波堤でしかも設計波高がさほど大きくない条件下では, 消波ブロックがケーソンに及ぼす荷重の相対的割合が増大するため, $0.8F_0$ で評価する設計法では危険な場合も起こり得ると考えられる。波の不規則性を考慮すれば, 危険度合はさらに増すものと推定される。 $F_{t\max}/F_0$ に関するプロットは, H/h' の関数としての傾向が $F_{\max}/F_0$ に比べて顕著でなく, ばらつきはあるものの平均 0.7 程度の値であることを示している。したがって, 透過波力のみに対しては $0.7F_0$ として評価すれば, かなり妥当な予測が可能である。

3.2 ブロック荷重の変動成分

3.1 においても述べたように, 波浪作用時のブロック水平荷重の変動成分は透過波力と非常に相関性が高いこ

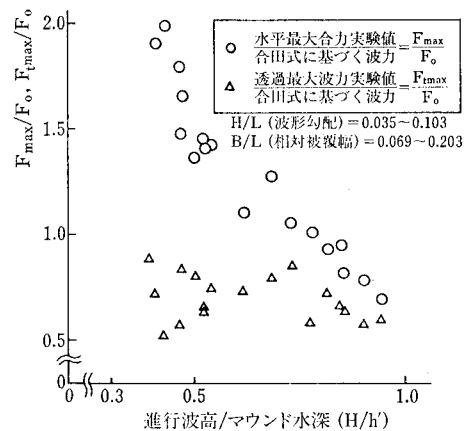


図-5 合田式波力で無次元化した合力と透過波力

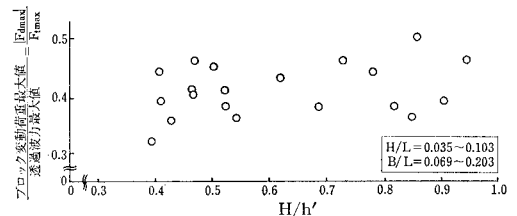


図-6 ブロック荷重最大変動振幅と透過波力最大値との比

とが判明したため, 規則波を対象とし, ブロック荷重の最大変動振幅 $|F_{b\max}|$ と透過最大波力 $F_{t\max}$ との比を図-5 同様 H/h' を横軸としてプロットした結果を図-6 に示す。この図より, $|F_{b\max}|/F_{t\max}$ は, H/h' の増加とともに増大する傾向も若干見受けられるが, 0.4 近辺の値を有することが認められる。したがって, 波浪が作

用する場合、透過波力 F_t が最大となる位相で、ケーソンとブロック群の相対的な変位のため、ブロック寄りかかり荷重は静水時よりもほぼ $0.4F_{t\max}$ だけ主動圧的に小さくなるものと判断される。

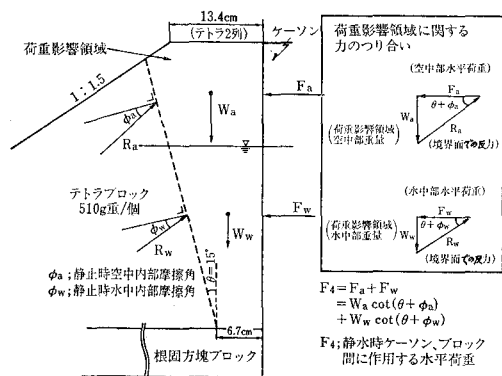
3.3 静水時ブロック寄りかかり荷重

静水時ブロック寄りかかり荷重 F_4 の算定法の概略は図一7に示す。土質力学⁶⁾では、主動土圧と受働土圧は理論的に求められるが、両極限土圧の中間に存在する静止土圧は理論的解析が不可能である。ゆえに、静止時のブロック寄りかかり荷重も純粋な理論的アプローチは困難であると考えた。ここでは、まず、2.2に述べた方法により寄りかかりを生ぜしめると考えられる荷重影響領域の推定を行なったが、この領域の底辺はブロックの1列分有効幅、境界面は鉛直と 15° の角を成すとした。この領域内のブロック群重量 W がケーソンからの水平力 F_4 ならびに境界面での反力 R によって支えられるものと仮定する。反力 R については、境界面でブロックのかみ合いによる摩擦力が存在するため境界面に直角に作用せず静止時内部摩擦角 ϕ (静止時に境界面で作用する摩擦応力と垂直応力との比を μ とすれば、 $\phi = \tan^{-1} \mu$) 分だけ傾く。 ϕ は、通常の意味の内部摩擦角つまり最大摩擦応力と垂直応力との比を示すものではないことに注意する必要がある。ブロックが空中に存在する場合と水中に没している場合で ϕ の値が異なるか否かを検討するため、ブロックがすべて空中に出た状態およびすべて水中に没した状態それぞれの荷重影響領域内のブロック全重量と寄りかかり荷重を測定した。その結果、空中では $\phi_a = 25.9^\circ$ 、水中では $\phi_w = 20.6^\circ$ という値を得た。

上記の結果を用いれば、任意水深で静水時にケーソンとブロック間に作用する水平荷重 F_4 は、

$$F_4 = W_a \cdot \cot(\theta + \phi_a) + W_w \cdot \cot(\theta + \phi_w) \quad \cdots (1)$$

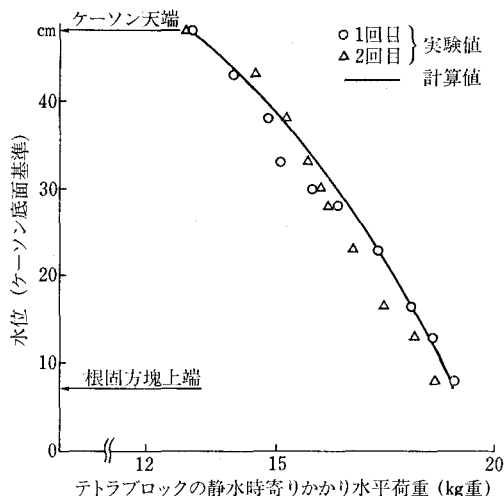
によって計算される。ただし、 W_a 、 W_w はそれぞれ荷重影響領域内の空中部および水中部ブロック全重量、 θ は境界面と鉛直とのなす角 ($\theta = 15^\circ$) である。



図一7 静水時ブロック寄りかかり水平荷重の算定法

図一8には、消波ブロックの静水時寄りかかり荷重に関して、上述の計算結果と種々の水位で荷重計によりピックアップした測定結果とを比較して示す。両結果は、かなり良く一致しているのが認められる。

波浪が作用する場合、寄りかかり荷重は変動するが、その際、 ϕ の値が変化しているものと考えられる。つまり、透過波力ピーク時には ϕ の値が最大となるため寄りかかり荷重が最小となるものと推察される。



図一8 静水時ブロック寄りかかり水平荷重に関する計算結果と実験結果との比較

3.4 ケーソン到達波圧と反射率との関係

図一2に示す最下部の圧力変換器でとらえた波圧に関して、消波ブロック未設置の場合と設置した場合を比較した2例を図一9に掲げる。この図より消波ブロックがケーソン到達波圧を軽減していることが理解できる。波峰時の波圧低減割合は2例間でさほど差は無いのに対し、波谷時の波圧変動低減率は特に左側の例で著しい。参考のため図一10には被覆堤の反射率を B/L (静水位でのブロック被覆幅と模型設置位置での波長との比) を横軸としてプロットした結果を示すが、図一9の左側の例は $B/L = 0.15$ つまり反射率が極小値を示す条件のものである。したがって、波谷時の波圧変動の低減と反射率とが強い相関を有するのではないかと考えられる。つまり、反射率が小さいということは、消波ブロックが急激な引き波を抑制する効果が大いことを意味するものと推察される。 $F_{t\max}/F_0$ は B/L に対して特徴ある関数とはならないことが判明しており、このことと図一9の結果とから、消波ブロックによる波峰時の波圧低減は反射率とさほど強い相関を持たないと思われる。

3.5 水平最大荷重の評価

水平荷重 F が、透過波力 F_t 、ブロック寄りかかり荷

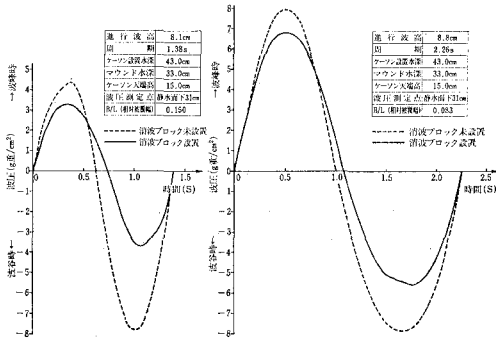


図-9 消波ブロック未設置の場合と設置した場合のケーソン到達波圧の比較

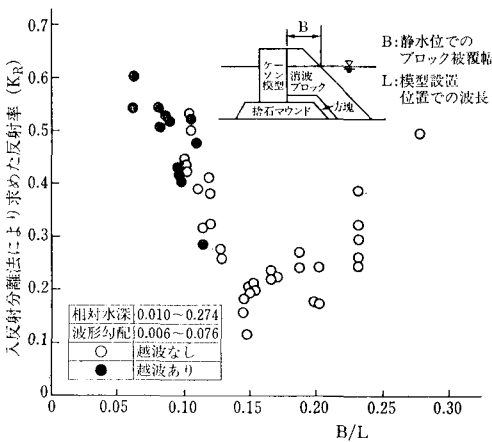


図-10 消波ブロック被覆堤の反射特性

重変動成分 F_d ならびにブロック 寄りかかり静荷重 F_4 より構成されると考えれば、水平最大荷重 F_{max} は、

$$F_{max} = F_{tmax} - |F_{dmax}| + F_4 \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。各荷重構成要素は、既述の検討結果をもとに、 $F_{tmax} = 0.7F_0$ 、 $|F_{dmax}| = 0.4F_{tmax} = 0.28F_0$ 、 $F_4 = (1)$ 式右辺で与えられる。ゆえに、規則波を対象とした場合、合田による波力 F_0 を基本に

$$F_{max} = 0.42F_0 + F_4 \dots\dots\dots (3)$$

として与えれば精度良い予測が可能であるが、波の不規則性を考慮した場合、3.1 中にも述べたように 1 割程度割増をして考える必要がある。そのため、この場合は、

$$F_{max} = 0.46F_0 + 1.1F_4 \dots\dots\dots (4)$$

と評価し、適切な安全率を考慮して設計を行うのが妥当であると結論づけられる。

4. 結 論

本研究で得られた主要な結論は、以下の通りである。

- 1) 今までの防波堤のように比較的設置水深が小さな場合は、従来のように合田式に波圧低減率 0.8 を乗じて被覆堤を設計しても安全であると考えられるが、今後建設される趨勢にある大水深防波堤で設計波高がさほど大きくない条件では、消波ブロック荷重の占める割合が増し、従来の設計法では危険な場合も起こり得る。
- 2) ブロック透過波力は、被覆なし混成堤を対象とした合田式に基づく波力の約 0.7 倍である。
- 3) 波作用時のブロック寄りかかり水平荷重の変動成分は透過波力と非常に相関が高く、透過波力が最大となる位相付近で、寄りかかり荷重は透過波力の約 40% に相当する分静水時よりも主働圧的に小さくなる。また、被覆堤に作用する水平合計荷重の変動振幅は被覆の無い場合に比べて小さくなる。
- 4) 波が十分作用した後のテトラブロックの任意水位における静止時寄りかかり水平荷重は、荷重影響領域に関する力のつり合いから図-7 に示す算定法により得られ、予測結果と実験結果との斉合性は高い。
- 5) 被覆堤では、波峰時の波圧低減よりも波谷時の波圧変動の低減が反射率と強い相関を持つようである。
- 6) 被覆堤に作用する水平最大荷重 F_{max} は、波の不規則性を考慮した場合、(4) 式によって評価できる。

5. あとがき

縮尺 1/50 の模型実験より得られた上記結論を現地に直接適用する場合には、消波ブロックや捨石マウンド等の水理・土質力学的特性に関するスケール効果の有無を確認しておく必要があるため、縮尺 1/10 の模型を用いた大型実験を実施する計画である。

参 考 文 献

- 1) 島田真行: 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, 1984.
- 2) 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回海岸工学講演会論文集, pp. 347~351, 1983.
- 3) 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, pp. 31~69, 1973.
- 4) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp. 2-115~2-117, 1979.
- 5) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和: 曲面スリットケーソンに働く波力について、第27回海岸工学講演会論文集, pp. 330~334, 1980.
- 6) 赤井浩一: 土質力学, 朝倉土木工学講座, 268 p., 1966.