

消波ブロック被覆堤における直立堤への荷重について

小林 智 尚*・三 浦 健 吾**

1. はじめに

我が国の消波型防波堤として一般的な消波ブロック被覆堤に関する研究は数多くなされているが, その多くは消波工における波浪の反射・減衰などによるものであり, 背後の直立堤(ケーソン)に作用する力に関するものは少ない。この直立堤に作用する力は, 消波工を透過した波の波力, 消波ブロックあるいは消波工からの荷重とに大きく分けることができる。このうち波力については一般に合田の波力式に波圧減衰率を乗じて算出されている(例えば, 谷本ら, 1985)。これに対して消波工からの荷重に関してはあまり研究がなされていない。田中ら(1985)は直立堤への消波工からの荷重(ブロック荷重)が波力に匹敵する程度であることを実験により示し, さらに大水深防波堤では直立堤への荷重のうちブロック荷重が占める割合が大きくなることを指摘している。

本研究ではこの直立堤へのブロック荷重について詳細な検討を行いその特性を明らかにするとともに, 現地の防波堤と同様に複数の高波浪群が作用した場合の挙動についても検討を行った。

2. 実験装置および測定方法

(1) 実験装置

本研究で用いた水槽は反射波吸収式造波装置付の全長 30 m, 側面ガラス張りの波動水槽である。水槽内岸側には 1/20 勾配の斜面が設置しており, 測定部は幅 325 mm となるように鉛直板により水路幅を仕切っている。図-1 に示すとおり実験対象の直立防波堤の模型はアクリル製で高さ 500 mm とし, 斜面先端から 1.8 m の地点に設置した。直立堤は水槽側面とは非接触となるようにわずかな隙間をあけて設置されており, 底面でのみ支持されている。このような不安定な支持の場合, 波による直立堤の模型の動揺が問題になる。本研究の場合, すべての実験ケースにおいて直立堤上端での波動による変位幅が直立堤の高さの 1/100 以内であった。この直立堤単体での波の反射率は約 85% であり, 直立堤の上端も固定した場

合に比べて 5% 程度低い値を示した。この結果から直立堤の模型の動揺による影響は見られるが, 実験結果に対しては十分許容範囲であると判断した。

この直立堤の上端には変位計が設置してあり, この点での変位から直立堤に作用する波力や消波工による荷重が換算できる。一方, この直立堤の前面には波高計が設置してあり, 測定された水位と直立堤背後の水位から直立堤に作用する波力が換算される。直立堤に作用する圧力分布 p は, 微小振幅波において波動運動を考慮した次式を用いて水位より換算している(日野, 1983)。

$$p(x, z, t) = -\rho g \left(z - \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \eta \right) \dots\dots (1)$$

ここで x, z は水平方向および鉛直方向の座標, ρ, g, h, k, η はそれぞれ水の密度, 重力加速度, 水深, 波数, 水位である。本研究ではこの変位計から換算された直立堤への荷重と波高計から換算された荷重を直立堤下端でのモーメントの値で比較・検討することにより直立堤に作用するブロック荷重を議論することとした。

消波工は高さ 64 mm モルタル製のテトラポッドの模型を約 210 体乱積みして図-1(b)に示す様に作成した。

(2) 実験条件

本研究では消波工の設置に関して図-1 に示すように (a) 消波工を設置せず直立堤単体の場合(直立堤単体), (b) 消波工が直立堤に接触しないようにわずかに隙間をあけて設置した場合(消波工分離), (c) 消波工を直立堤と一体で設置した場合(消波工一体), の 3 種類について実験を行った。波浪場は直立堤設置部分において水深 300 mm とし, 周期 1.0 s, 波高 30 mm の規則波と, 有限振幅性のある周期 1.0 s, 波高 60 mm および 100 mm の

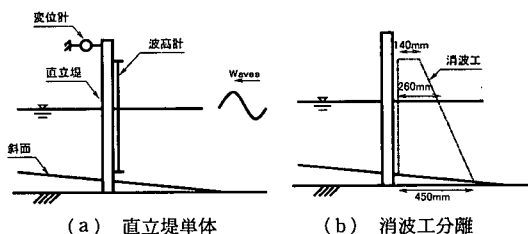


図-1 直立堤と消波工の配置

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科
** (株)テトラ

3種類の規則波を用いた。

(3) 測定方法の検証

直立堤に作用する波力などの荷重を直立堤上端での変位あるいは鉛直定前面での水位から換算する方法に対して検証を行った。

まず、直立堤の一点に水平方向の静的荷重を作用させ、直立堤上端での変位から換算される荷重との比較を行った。その結果、変位から換算される直立堤下端でのモーメントの値は作用させた荷重より求められた値に対してかなりよい精度で一致していた。

つぎに水槽内に直立堤単体を設置し、周期1.0 s、波高30 mmの規則波を作用させ、この時の直立堤の変位から換算される荷重と直立堤前面の水位から換算される荷重との比較を行った。その結果を図-2に示す。図-2(a)は直立堤上端の変位および直立堤前面の水位より換算した直立堤下端でのモーメントの時系列変化である。モーメントは直立堤に岸方向に荷重が作用したときを正とした。図-2(b)は横軸に直立堤の変位からのモーメントを縦軸に水位より換算したモーメントをとり、各時間での値をプロットしたものである。図-2(a)では両者の時系列波形はほぼ重なっており、また図-2(b)においても換算結果はほぼ傾き1の直線上にあることから、直立堤の変位から換算される荷重と水位から換算される荷重とはほぼ同じ値を示しているといえる。ただし変位から換算される荷重の時系列波形の高周波成分は水位から換算されるものに比べてわずかながら小さくなっている。これは直立堤の慣性によりこの直立堤が比較的滑らかに変位

するため、変位から換算される荷重の高周波成分は実際の荷重に比べて小さい値を示しているものと考えられる。また図-2(b)では換算結果の分布が直線ではなく、わずかに楕円を描いている。この理由としては先に述べた直立堤の慣性による直立堤の変位の応答の位相遅れのほかに、直立堤を支持している水路床(斜面)が波による圧力変動によりわずかに変動し、それが直立堤上端で増幅されて検出されたとも考えられる。

以上の結果から実験装置の構造上避難以誤差が含まれているものの、直立堤上端の変位および直立堤前面の水位から換算される荷重はほぼ妥当な値を示していると判断できる。そこで以下ではこれらの測定・換算方法を用いて実験・解析を行う。

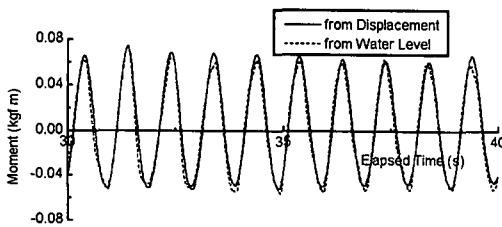
3. 実験結果および解析

実験を行ったところ、直立堤上端の変位から求めた荷重の時系列波形には入射波の位相とともに変化する成分とほぼ定常の成分とが存在することが見出された。そこで本研究では前者を動的荷重、後者を静的荷重と名づけ、以下では分けて議論することにする。

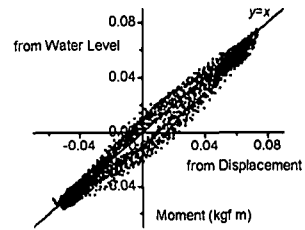
(1) 動的荷重

a) 直立堤単体の場合

まず消波工を設置せず直立堤単体の場合について実験・解析を行った。波高が小さい場合(周期1.0 s、波高30 mm)については前節、図-2で議論したとおりである。周期1.0 s、波高60 mmの有限振幅性を有する入射波を作用させたときの結果を図-3に示す。図-3(a)の時

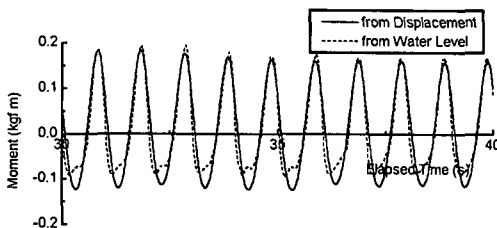


(a) 荷重(モーメント)の時系列変化

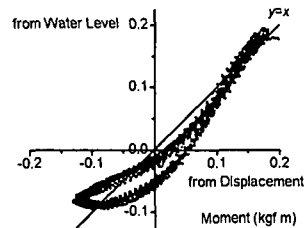


(b) 変位からの荷重と水位からの荷重の位相

図-2 直立堤単体時の動的荷重(波高30 mm)



(a) 荷重(モーメント)の時系列変化



(b) 変位からの荷重と水位からの荷重の位相

図-3 直立堤単体時の動的荷重(波高60 mm)

系列変化では直立堤の変位から換算した荷重の変動は水位から換算したものに比べて有限振幅性が十分に現れていない。この様子は図-3(b)の換算結果の軌跡にも、軌跡が直線あるいは図-2(b)のように楕円ではなく、ややひずんで原点を避けた形状として現れている。これは前節で指摘した理由のほかに、直立堤前面での水位から荷重を換算する際に用いた式(1)に有限振幅性を含んだ高次の項が考慮されていないことも考えられる。ただし高次の項を含んだ有限振幅波の圧力分布は一次の水位 η のみの関数で表すことができず、実験結果への適用が困難なためここでは有限振幅性を有する波の場合にも式(1)を用いて換算している。図-3(b)の結果は図-2(b)の結果に比べて傾き1の直線からやや外れているものの、直立堤単体の場合には直立堤の変位から換算した荷重と水位から換算した値に大きな差は見られなかった。

b) 消波工分離の場合

次に図-1(b)に示すように直立堤とはわずかに隙間を空けて接しないように消波工を設置した場合について実験・解析を行った。入射波高がそれぞれ30 mmと100 mmの場合の結果を図-4、および図-5に示す。これらの実験において消波工の反射率は20%程度であった。

直立堤に作用する波は消波工を透過した波であるので直立堤に到達するまでに減衰している。さらに直立堤前面で観測される水位変動は消波工を透過した直後の波であるので波形は乱れる。この様子が図-4あるいは図-5(a)の水位より換算された荷重の時系列波形からわかる。これに対して直立堤の変位から換算した荷重の波形は、振幅については水位より換算された荷重と同じよう

に小さくなっているが、その波形には乱れの成分が見られない。これは先に述べた、直立堤の変位の応答性の問題のほかに、波高計は乱れた波浪場の一点の水位を測定しているが直立堤の変位は水路幅方向の水位の平均値を測定しているためである。この様子は図-5(b)に示される軌跡の形状にも現れている。この図の軌跡は図-2(b)に比べてひずんでおり、さらに図-5(a)で見られるように水位から換算した荷重が峰や谷が落ち込んでいるために、軌跡の端部が水平方向に曲がっている。

消波工を直立堤からわずかに離して設置した場合、図-4および図-5(a)で見られるように水位から換算される荷重が直立堤の変位から換算される荷重よりわずかに小さい値を示すものの、図-5(b)で軌跡はほぼ傾き1の直線に沿っていることから、両者はともに直立堤に作用する波力を表しており妥当な結果であったといえる。

c) 消波工一体の場合

最後に実際の消波ブロック被覆堤と同じ構造をしている、直立堤と消波工を一体とした場合について実験・解析を行った。入射波高がそれぞれ30 mmと100 mmの場合の結果を図-6、および図-7に示す。これらの実験での消波工の反射率は消波工を分離して設置した場合と同じ20%程度であった。このケースでは直立堤前面に設置した波高計での計測水位から換算される荷重は波力だけによるものであるが、直立堤上端の変位から換算される荷重は直立堤に作用する全荷重、すなわち波力によるものと消波工からのブロック荷重の和である。

図-6や図-7では水位から換算された荷重の波形は図-4や図-5(a)のものと同様傾向を示しているものの振幅はやや大きくなっている。このように同じ入射波を作用したにもかかわらず波形の振幅が大きくなっているのは、消波工を直立堤と一体に設置した場合には波高計が消波工内部に位置することになり消波工の間隙率により水位変動が大きくなっているためである。したがって消波工を直立堤と一体に設置した場合には消波工を分離して設置した場合に比べて波力はわずかに増加していることがわかる。これに対してこれらの図では直立堤の変位から換算された荷重の振幅は消波工を分離して

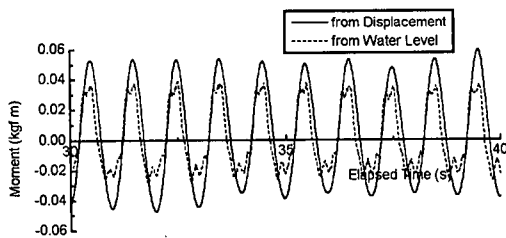
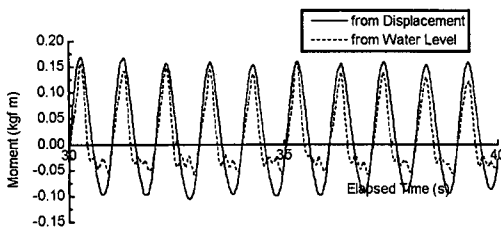
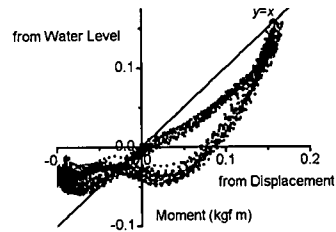


図-4 消波工分離時の動的荷重の時系列変化 (波高 30 mm)



(a) 荷重 (モーメント) の時系列変化



(b) 変位からの荷重と水位からの荷重の位相

図-5 消波工分離時の動的荷重 (波高 100 mm)

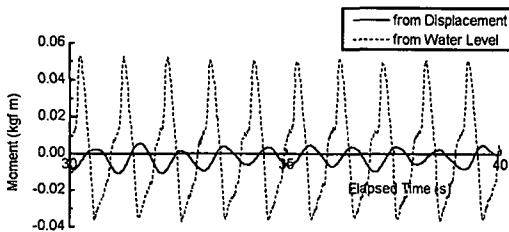


図-6 消波工一体時の動的荷重の時系列変化 (波高 30 mm)

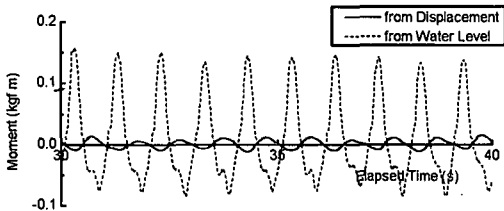


図-7 消波工一体時の動的荷重の時系列変化 (波高 100 mm)

設置した場合に比べてかなり小さくなっている。この波形についていくつかの検討を行ったところ、この波形はその振幅などから、図-2(b)での軌跡が直線ではなく楕円になった原因の一つとしてあげられている、波による圧力変動に伴う水路床のわずかな変形によって生じたものであり、直立堤が実際に波力や消波ブロックからの荷重として受けたものではないと推測される。このような議論から直立堤の変位から換算される動的荷重はほぼゼロであり、全荷重はほぼ一定値であると考えられる。このように直立堤に作用する波力は時々刻々変化しているにもかかわらず、消波工からのブロック荷重を含めた、直立堤に作用する全荷重はほぼ一定となっている。これは次のような理由によるものである。

図-6や図-7に示されている直立堤の変位から換算された荷重は、測定された荷重のうちの動的成分のみである。実際には次節図-8などに示すように、消波ブロックを積んでいる段階ですでにこの消波工からのブロック荷重が静的荷重として生じている。この静的荷重の大きさは図-6や図-7で見られる波力による直立堤への動的荷重より大きい。また一方、積みあがった消波工は直立堤に静的荷重を作用させていながら、みずからも消波ブロックのかみ合わせによりある程度構造を持って自立している。つまり消波工が直立堤をある程度変形させた状態で固定している。このような状態で波の峰が直立堤に達し波圧成分が瞬間的に増加しても消波工はすでに直立堤に及ぼしている静的荷重の一部を開放して波圧による増加分を打ち消してしまうと同時に、消波ブロックのかみ合わせによる自立によって開放した静的荷重分を自ら支えてしまう。このため直立堤や消波工には変形が起

こらず、直立堤に作用する全荷重の変動も生じず、検出されなかった。逆に波圧成分が瞬間的に減少した場合には変形していた直立堤は起き上がろうとするが消波工はその形状を保とうとして波圧による荷重の減少分を補っている。そしてこの場合にも直立堤に作用する全荷重は変化しなかった。

以上に述べたように消波工を直立堤と一体に設置した場合、消波工を構成する消波ブロックが移動しない限り、直立堤に作用する全荷重のうち入射波とともに変動する動的荷重成分は見られなかった。ただし本研究で用いた消波ブロックはモルタル製であり、模型実験としてはかなり剛な条件で行っている。したがって今後、消波ブロックに対して固体力学的に相似則の成り立つ条件で動的荷重が作用していないか改めて検討する必要がある。

(2) 静的荷重

次に消波工と直立堤を一体で設置した場合において、消波工が直立堤に作用する静的荷重、すなわち定常的に作用する荷重の成分について検討を行った。この静的荷重は消波ブロックを積み上げ消波工を設置する段階ですでに発生する。そこで消波工を設置する前、直立堤単体での状態を静的荷重ゼロとして測定・解析を行った。

消波工を設置後、波群を防波堤に作用させるまでの時間における、直立堤の変位および直立堤前面の波高計の

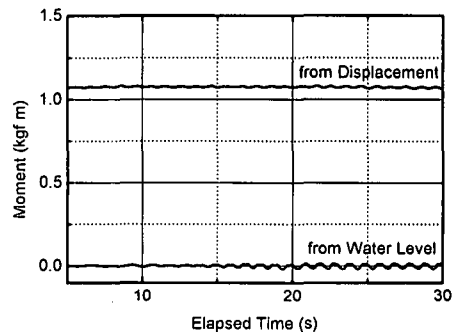


図-8 直立堤に作用する荷重の時系列変化 (波高 30 mm)

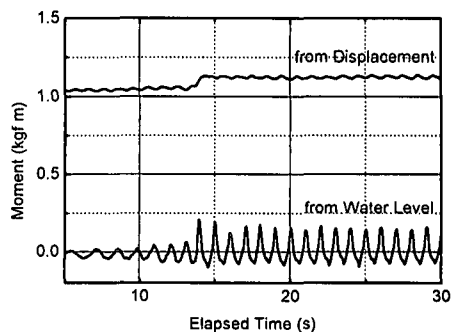


図-9 直立堤に作用する荷重の時系列変化 (波高 100 mm)

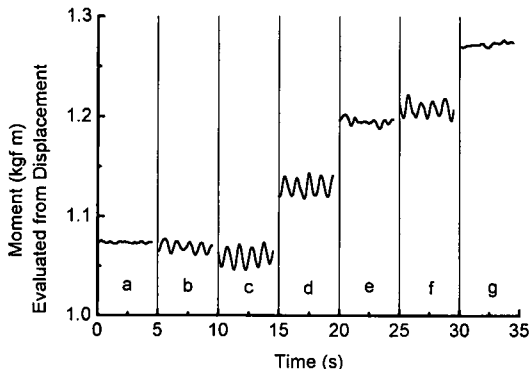


図-10 直立堤に作用する荷重の変化 (複数波群作用時)

水位から換算された荷重の時系列変化を図-8および図-9に示す。図-8では周期1.0s、波高30mmの規則波を、図-9では周期1.0、波高100mmの規則波をそれぞれ時刻10s以降から防波堤に作用させている。これらの図では直立堤の変位から求めた荷重、すなわち直立堤に作用している全荷重(堤体下端でのモーメント)が波を作用させる前からすでに1.0 kgf・mを超えている。これは消波工を設置したことによって生じたブロック荷重である。直立堤単体の場合に堤体が直接受ける波圧の振幅は図-2などから波高が30mmのときには0.1 kgf・m強、波高が100mmの場合でも0.5 kgf・m程度であった。したがって、この場合には直立堤が単体で直接受ける波力よりも大きな荷重をブロック荷重として消波工から受けていることになる。

図-9では波群の第1波が作用した時刻14s付近で直立堤に作用している荷重がステップ状に増加している。このようなステップ状の荷重の増加は他の場合にも観測された。このステップ状に荷重が増加する瞬間には、大きな波が消波工に入射することにより消波工を構成している消波ブロックがわずかに動揺し、それにともない消波ブロック群がわずかに沈下・再配列を行いさらに密な状態にかみあっていく様子が目視により観測された。このように直立堤に作用する静的荷重は大きな波力を受け消波工を構成する消波ブロックが動揺し再配列をすることによってステップ状に増加している。

実海岸のような不規則波浪場では消波ブロックの安定限界を超える波浪が確率的に発生すると考えられるために、鹿島ら(1993)は消波工の変形が防波堤への作用波数の平方根に比例して進むと指摘している。したがってこのように直立堤への荷重を増加させる消波ブロックの再配列は実海岸のような不規則波浪場ではまれではないといえる。またこのような消波ブロックの動揺は波によるだけでなく、ブロック同士が動く場合、例えば消波ブ

ロック設置部の局所洗掘に伴うブロックの沈下(例えば木原ら, 1988)などによっても発生すると考えられる。

複数の波浪群が防波堤に作用した時の様子を連続的に表したのが図-10である。この図は直立堤の前面に消波ブロックを設置してから複数の波浪群を順次作用させた場合において、それぞれの状態で測定された直立堤への全荷重の時系列変化の一部を順番にならべたものである。図中、aは消波工を設置した直後(静水)であり、つづいて順次波高30mmの規則波を作用(b)、波高100mmの規則波を作用(c)、静水状態にした後再び波高100mmの規則波を作用(d)、静水状態(e)、波高100mmの規則波を作用(f)、静水状態(g)と変化させた時の結果を示している。この図からそれぞれの高波浪群が作用した前後で静的荷重がステップ状に増加しているのがわかる。この増加量は回数が増すたびに少なくなるが、荷重が減少することはほとんどなく、ある値に収束するような傾向を示した。

4. おわりに

本研究では波浪場において消波ブロック被覆堤の消波工が背後の直立堤にどのような影響をおよぼしているのか、その荷重について室内実験をととして検討を行った。その結果直立堤が受ける全荷重のうち入射波の水位変動とともに変化する動的荷重成分については、消波工を透過した波が直接直立堤に作用する波力の変動成分は消波工を構成している消波ブロックのかみ合わせなどその構造により吸収されるために直立堤に作用する全荷重の変動成分はほとんど見られなかった。しかし消波工はその設置当初より直立堤に静的で大きなブロック荷重を加えている。そして高波浪などにより消波工を構成する消波ブロックが動揺するとブロックの再配列・沈下が生じ、この静的荷重はさらに増加することがわかった。

謝辞：本研究のきっかけをいただきました(財)土木研究センター名誉会長の福岡正巳先生に感謝いたします。

参考文献

- 鹿島遼一・柳山 勉・清水琢三・関本恒浩・国栖広志・京谷修：不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について、海岸工学論文集，第40巻，pp. 795-799。
- 木原 力・甲斐正義・鳥居雅孝・望月規行(1988)：防波堤前面の洗掘対策について，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 402-406。
- 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。
- 日野幹雄(1983)：明解水理学，丸善株式会社 345 p。