

# 垂下版式低反射工による渦流れが捨石マウンド被覆材の安定性に及ぼす影響に関する研究

INFLUENCE OF WAVE INDUCED VORTEX FLOWS ON THE STABILITY OF ARMOUR UNITS ABOUT A CURTAIN WALLED DISSIPATER

神野充輝<sup>1</sup>・小野塚孝<sup>1</sup>・中村孝幸<sup>2</sup>

Mitsuteru JINNO, Takashi ONODUKA and Takayuki NAKAMURA

<sup>1</sup>正会員 株式会社 三柱 (〒134-0083 東京都江東区永代1-13-5永代春更ビル)

<sup>2</sup>正会員 工博 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

It has become known that a curtain walled type dissipater is effective for reducing reflected waves from a vertical wall for comparatively long waves. It consists of a vertical barrier in front and a vertical wall on the back. The dissipation mechanism of reflected waves is to enhance the vortex flow under the front curtain wall by the piston-mode wave resonance in the water chamber. However it may be concerned that the stability of rubbles in front of the dissipater due to generation of strong vortex flows.

In this study, to protect the rubbles in front of the dissipater from wave induced vortex flows, the stability of armour concrete units is examined experimentally. Special attentions are paid on the behavior of vortex flows from the lower edge of the front curtain wall. For the practical design of a cover layer in front of the dissipater, the conventional stability formula is applied to find out the adequate stability number for this dissipater.

**Key Words :** Curtain walled dissipater, wave induced vortex flow, cover layer stability

## 1. はじめに

既に著者ら<sup>1)</sup>は、スリット式低反射工に比較すると遊水室幅をほぼ半減できる垂下版式低反射工を提案し、その消波特性などを明らかにしてきた。この低減工は、図-1に示すような直立壁の前面に垂下版を設置するだけの簡単な構造であり、その遊水室内にピストンモードの波動運動が励起されることを利用して垂下版下部に大規模な渦(写真-1)を発生させ、結果的に反射波を低減する方式である。

しかしながら、垂下版下部より強い渦流れを発生することで波エネルギーを消散させているため、低減工の基礎マウンドの洗掘やそれを防止するための被覆材の耐波安定性が問題になると考えられる。

こうしたマウンド被覆材の安定性については、既に直立堤などを対象にしてBrebner・Donnelly<sup>2)</sup>等による実験的研究があり、被覆石や被覆ブロックの所要質量の算定法などが提案されている。しかしながら、従来の被覆材の安定質量の推定式は、波運動を主要外力とするもので、波による渦流れの卓越する垂下版式低反射工に対する適

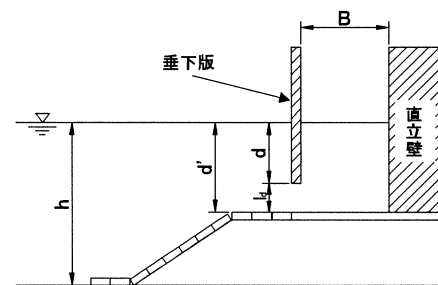


図-1 垂下版式低反射工

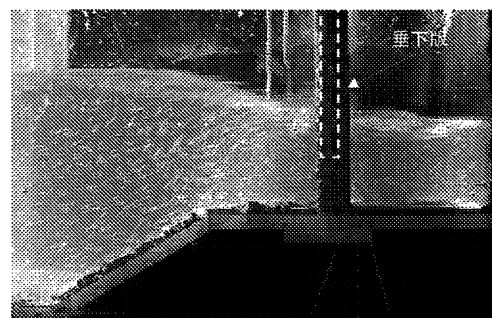


写真-1 渦流れの状況

表-1 模型寸法および実験条件

| case  | スケール   | 模型寸法  |      | 潮位    | 水深<br>h | 天端上水深<br>d' | d'/h  | 周期T(sec) |        |      | マウンド天端<br>ブロック列数 |
|-------|--------|-------|------|-------|---------|-------------|-------|----------|--------|------|------------------|
|       |        | 遊水室幅B | 吃水深d |       |         |             |       | 短周期      | Gr極小周期 | 長周期  |                  |
| case1 | 1/25   | 13.7  | 4.0  | L.W.L | 23.0    | 8           | 0.348 | 0.80     | 1.00   | 1.50 | 3                |
|       | 1/25   | 13.7  | 10.0 | M.W.L | 29.0    | 14          | 0.483 | 0.90     | 1.20   | 1.60 | 3                |
|       | 1/25   | 13.7  | 16.0 | H.W.L | 35.0    | 20          | 0.571 | 1.05     | 1.35   | 1.70 | 3                |
| case2 | 1/25   | 18.0  | 8.0  | M.W.L | 29.0    | 14          | 0.483 | 0.90     | 1.20   | 1.60 | 3                |
| case3 | 1/25   | 16.0  | 14.0 | H.W.L | 35.0    | 20          | 0.571 | 1.05     | 1.35   | 1.70 | 3                |
| case4 | 1/25   | 13.9  | 10.0 | M.W.L | 33.0    | 18          | 0.545 | 0.90     | 1.20   | 1.60 | 3                |
| case5 | 1/15.4 | 23.2  | 13.3 | H.W.L | 44.2    | 23.2        | 0.525 | 1.00     | 1.35   | 1.70 | 3                |
| case6 | 1/15.4 | 23.2  | 13.3 | H.W.L | 44.2    | 23.2        | 0.525 | 1.00     | 1.35   | 1.70 | 6                |

用性や移動機構などについては十分に知られていない。

このため、本研究では、波による渦流れの強さに密接に関係する、垂下版背後の遊水室内のピストンモード波浪共振などに着目して、基礎被覆材の耐波安定性の実態について明らかにする。

## 2. 実験装置および実験方法

### (1) 実験水槽と実験模型

本実験は、愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ28m、幅1m、高さ1.25mの2次元水槽を用いて行った。

実験に用いた6種類の垂下版式低反射工の模型寸法を、表-1に示す。このとき想定した実験諸元も併せて表中に示す。遊水室内でのピストンモードにより発生する垂下版下部の渦流れが被覆ブロックに及ぼす影響を検討することに主眼を置き、ピストンモードを支配するパラメータとして知られる波長と断面特性長の比に着目した<sup>1)</sup>。断面特性長とは  $l = \sqrt{B \cdot d}$  で定義されており、消波対象波長Lとの比  $l/L$  が0.1程度となるように遊水室幅Bと垂下版吃水深dを設定すれば、効果的に反射波が低減できることが知られている。

case2(B=18.0cm) およびcase3(B=16.0cm) の断面は、case1(B=13.7cm) と比較して、断面特性長  $l$  が同じとなるようにBを広くしたときに相当し、それぞれ平均・高潮位の2つの水位に対応している。

また、case4ではcase1と比較し、B=13.9cm、d=10cmを固定した状態で、水深を深くすることで垂下版下部の開口幅 $l_0$ を広げた断面に相当する。

case5以降では堤体構造をより現地モデルに近いものとし、隔壁や壁厚などを詳細に模型化した。このときの縮尺は現地量の1/15.4と前述のものに比較してスケールアップしてある。

case6はマウンド天端ブロックの配列数を変えたときの被覆ブロックの安定性に及ぼす影響を検討するため、天端上の被覆ブロックを6列とした。

ここで用いた水深は、平均潮位(M.W.L)を現地で7.25mとし、それより±1.25mとしたものを、それぞれ高潮位(H.W.L)、低潮位(L.W.L)とした。これらの水深は、実験スケール1/25では35cm、29cm、23cmとなる。

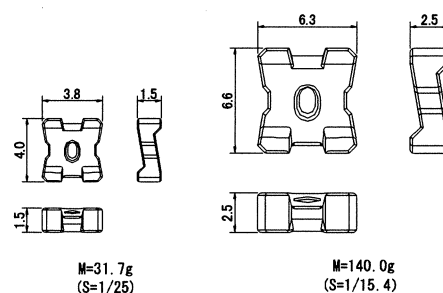


図-2 被覆ブロックの模型(unit:cm)

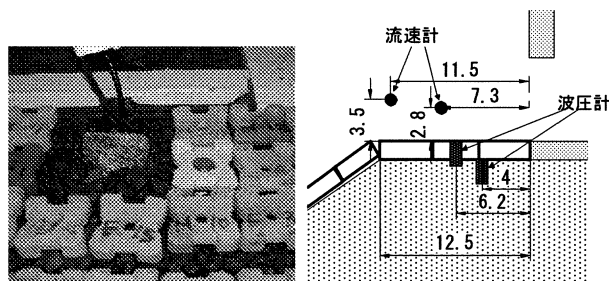


写真-2 波圧計の設置状況

図-3 流速計と波圧計の設置位置

マウンドは粒径5～10mmの栗石よりなるコア部とそれを被覆するためのブロック被覆層で構成されている。このマウンドの法面勾配は1:1.5である。被覆ブロックには、図-2に示す平型ブロックを模型スケールに合わせて用いた。

### (2) 測定機器とその設置状況

実験では、計5本の容量式波高計を用いて、入射波・反射波及び遊水室内外の水面変動を測定した。

流速測定には、水平・鉛直方向の流速成分が同時に測定可能な電磁流速計を用いた。図-3で示すように、垂下版から沖側の位置と、天端上の位置が異なるように2台設置した。

また、被覆ブロックに作用する鉛直波力を測定するため、写真-2および図-3に示すように、被覆ブロック上面およびマウンド内に波圧計を設置し、ブロックの上面および下面に作用する差圧が求められるようにした。このとき差圧は鉛直上向きを正と定義した。

### (3) 実験方法及び実験条件

#### a) 被覆ブロックの移動

被覆ブロックの被害率Dは水路の側面に面した両側2列を除いた部分を検査域とし、その被覆ブロックの総個数に対する被害個数の割合(%)で定義した。被害判定は被覆ブロックの移動距離がその配列ピッチ長すなわちブロック半個以上の距離で、行あるいは列より離脱した状態と定義した。なお、本論文では、行＝水槽横断方向、列＝水槽長手方向を指すものとする。

#### b) 波条件

表-1に示すように実験周期は、潮位ごとに反射率が極小となる周期を理論算定<sup>3)</sup>より求め、それよりも短周期側と長周期側の3種類を用いた。記録時間は規則波5分、不規則波を高橋ら<sup>4)</sup>の研究を参照して1000波とした。不規則波実験では、規則波実験との対応を検討するために実施したもので、実験で目標とした有義波の周期 $T_{1/3}$ は、規則波実験と同様の周期とした。

### 3. 被覆ブロックの移動状況

ここでは、マウンド被覆材の所要重量の算定式として、次式で示すBrebner・Donnellyの式を準用した。

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{Ns^3 (S_r - 1)} \quad (1)$$

ここに、W:被覆ブロックの重量、 $\gamma_r$ :空中単位体積重量、 $S_r$ :ブロックの比重、H:波高、Ns:安定数である。ただし、不規則波の場合は、代表波として有義波波高 $H_{1/3}$ を用いる。

#### (1) 潮位変化による影響

ここで検討の対象にした堤体は表-1のcase1に相当する。図-4には被害率Dが0%, 3%未満, 5%以上の場合における安定数Nsを天端水深と設置水深の比 $d'/h$ に対して示す。Nsは $d'/h=0.35, 0.48$ では短周期波より長周期波のほうが高いのに対し、 $d'/h=0.57$ では対照的に短周期波のほうが高くなる傾向にある。すなわち、設置水深が浅いときには短周期の波条件で被災しやすく、深いときには長周期の波条件で被覆ブロックが被災しやすいといえる。

また、谷本ら<sup>5)</sup>によると、混成堤のマウンド被覆材の安定数Nsは、 $d'/h$ が小さいほどNsは小さく、水深波長比 $h/L$ が大きな短周期波の場合に小さなNsの値を示す。つまり、 $d'/h$ の値が大きく、また長周期の波条件になるほど被覆ブロックは安定状態を保つことが報告されている。

このように、上記の結果と混成堤のそれと比較すると短周期波ではそれはほどNsについて相違は見られないが、長周期波においては、全く異なる特性を示す。これは、遊水室内の波浪共振によって垂下版の下端部で形成され

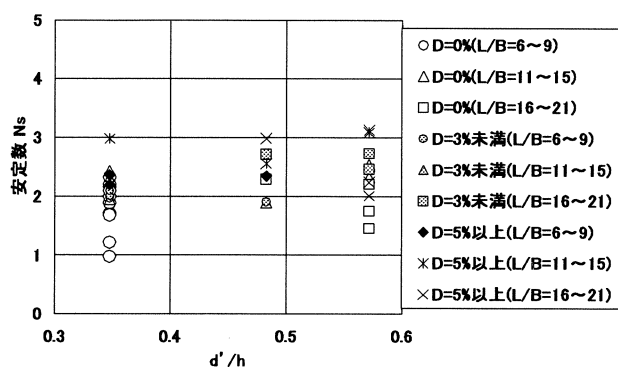


図-4 被覆ブロックの安定数(case1)

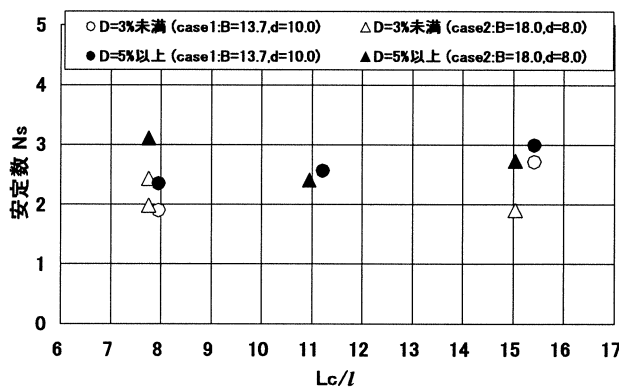


図-5 遊水室幅の影響

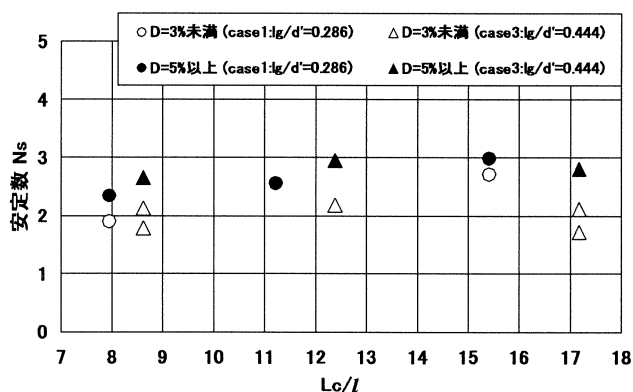


図-6 開口幅の影響

る渦流の影響によるものと推測される。

#### (2) 遊水室幅の影響

断面特性長  $l = \sqrt{B \cdot d}$  を固定して、遊水室幅が変化したときの安定数Nsを図-5に示す。ここで、水深はM.W.Lとして図中では横軸をマウンド天端水深での波長Lcと断面特性長lの比 $Lc/l$ 、縦軸をNsとして示す。この図から、反射率Crが極小となる周期( $Lc/l \approx 11$ )と長周期においては、遊水室幅を広げたほうが、Nsの値は下がっていることが分かる。また、移動状況としては遊水室幅を広げても変化なく、短周期および反射率が極小となる周期で、垂下版付近の列の被覆ブロックの飛散が多く、長周期では天端3列の中央の列で飛散が多く見られた。この原因としては、長周期になるにつれ渦流の発生位置が垂下版から離れるためであると考えられる。

### (3) 垂下版下部の開口幅の影響

図-6は、横軸に $L_c/l$ 、縦軸に安定数 $N_s$ をとり、 $N_s$ に及ぼす垂下版下部の開口幅 $l_g$ の影響を示す。これらの図から、短周期の実験結果と $C_r$ が極小となる周期( $L_c/l \approx 12$ )の実験結果においては開口幅を広げても $N_s$ の値はほとんど変化しない。しかし、長周期の条件では開口幅を広げると、 $N_s$ が小さくなる傾向にある。また、移動状況としては開口幅を広げても変化なく、短周期および反射率が極小となる周期で、垂下版付近の列の被覆ブロックの飛散が多く、長周期では天端3列の中央の列で飛散が多く見られた。よって、断面特性長に基づき、遊水室幅 $B$ と吃水深 $d$ を固定したまま垂下版下部の開口幅 $l_g$ を広げる影響は、被覆ブロックの安定性において長周期条件以外ではほとんど見られない。

### (4) 現地に即した模型の結果

垂下版式の低反射工では、垂下版下部で形成される非線形性の強い渦流の発生によって効果的にエネルギーを逸散しているため、模型と実物との間における縮尺の反射波低減効果に及ぼす影響が考えられる。ここでは、堤体構造をより現地モデルに近づけるため、case5の模型を用いて、堤体ユニット間に隔壁を設け、隔壁の有無の影響などについて検討した。

図-7は、このときの結果を横軸に $L/B$ 、縦軸に安定数 $N_s$ を示す。短周期条件の実験結果においては、砕波したため移動限界波高が特定できなかったが、やはり長周期条件において安定数が低くなる傾向が認められる。また、移動状況の特徴については、短周期条件および反射率が極小となる周期条件では、垂下版付近の列の被覆ブロックの飛散が多く、長周期条件では天端3列の中央の列で飛散が多く見られた。また、周期条件によらず開口部の柱の前面で飛散するケースが多く見られた。そのときの移動状況を写真-3で示す。これは目視観測により柱の前面で発生する縦渦の影響で飛散していると推測される。よってスケールが変わっても被覆ブロックの安定性は変わらないが、堤体構造の違いにより開口部に柱がある場合は、その前面の被覆ブロックにはより強い揚圧力が作用するものと推測される。

### (5) 天端マウンドの配列数の影響

ここではcase5,6の実験模型を用いて、天端マウンドの被覆ブロックが3列並びと6列並びについて比較する。

図-8は各波条件に対する結果を、横軸に $L/B$ 、縦軸に安定数 $N_s$ をとり示す。この図より天端マウンドの配列数による安定数の変化はほとんど見られないことが分かる。また被災状況はどちらの堤体も、短周期条件および反射率が極小となる周期条件では、垂下版付近の列の被覆ブロックの飛散が多く、長周期条件では垂下版から沖側3列目の列で飛散が多く見られた。また、移動限界波高も同じような値になった。このように、天端のブロックの配列行数を変えても被覆ブロックの被災には影響しないことが分かる。

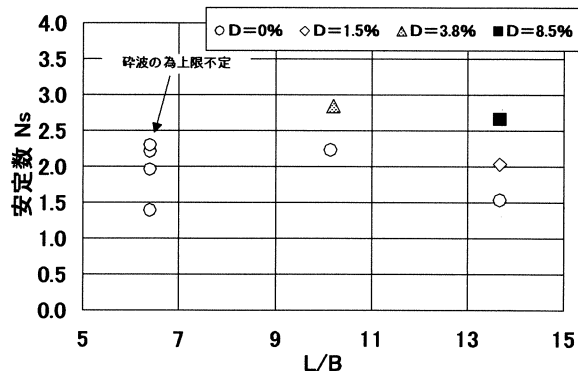


図-7 現地に即した模型による安定数

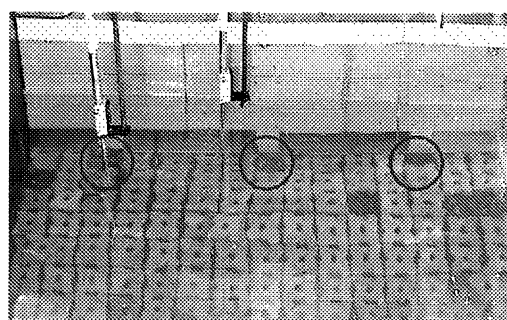


写真-3 隔壁部前面での被災状況

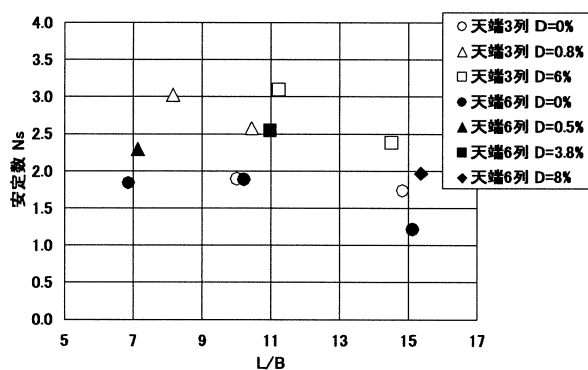


図-8 天端マウンドの配列数による安定数の変化

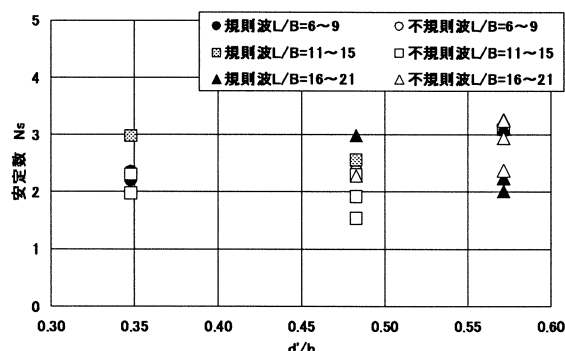


図-9 規則波と不規則波に対する $N_s$ の比較

### (6) 不規則波に対する結果

図-9は、不規則波における被害率 $D=5\%$ 以上の場合において安定数 $N_s$ を $d'/h$ との関係について示す。なお不規則波では代表波高として有義波高を用いた。規則波と比較すると全体的に $N_s$ は低くなる傾向にある。これは不規則波であるため、代表波以上の波高をもつ波も含まれ、これによる影響といえる。

また被覆ブロックの規則波に対する移動状況の特徴は、短周期および反射率が極小となる周期では、垂下版付近の列の被覆ブロックの飛散が多く、長周期では天端3列の中央の列で飛散が多く見られた。これは、周期によって渦流れの発生位置が異なることによると思われる。また、不規則波に対する移動状況の特徴は、作用波数が規則波の場合より多かったため、被害率としては大きな値が出るが、波周期による飛散場所の相違などはほとんど見られなかった。

#### 4. 被災機構の考察

各潮位での水平方向の流速成分のピーク値の測定結果を図-10に示す。流速には微小振幅波理論による水表面の水平流速振幅 $U_{\max}$ により無次元化した $u^*$ と、波長・遊水室幅比 $L/B$ との関係を示す。図中で示す水平流速 $u$ の無次元量 $u^*$ は次式による。

$$u^* = u/U_{\max} = u / \left( \frac{gkH}{2\omega} \right) \quad (2)$$

ここで、 $g$ ：重力加速度、 $k$ ：波数、 $\omega$ ：角振動数である。また、図-11では各潮位での鉛直流速 $v$ について比較するため水平流速 $u$ と同様に無次元化した $v^*$ を示す。

図-10により、L.W.Lでは周期条件の違いによって水平流速は変わらないことが判る。しかしM.W.Lでは反射率が極小となる周期条件 $L/B=9.7$ から長周期条件で負ピーク値が卓越する。つまり、沖側への流れが大きくなることを示す。よって、遊水室内にピストンモードが起きるときに沖側への水平流速が大きいことが判る。またH.W.Lでは長周期になるにつれて、やはり沖側への流れが大きくなることがわかる。また図-11により、鉛直流速はL.W.Lのみ大きな値をとる。これはL.W.Lでは天端上水深が浅いため、水位変動による影響が強くなるためである。

次に、水平流速が大きくなるM.W.Lでの鉛直波力に比例する差圧 $\Delta p$ の測定結果の代表的な例を、垂下版前と遊水室内の水位波形と、垂下版付近の流速との関係を図-12、13に示す。この図から、鉛直波力のピーク値が2つあることが判る。図-12では差圧が第1ピークとなるときは垂下版前の水位波形がピークになり、第2ピークとなるときは垂下版前の水位と遊水室内の水位が等しくなることであることが判る。また図-13では差圧が第1ピークとなるときは水平流速の加速度が最大となる条件で発生し、そのときの水平流速 $u=0$ になり、第2ピークとなるときは水平流速がピークとなることであることが判る。よって、鉛直波力は2つのピークをもち、第1ピークでは垂下版前の波変形による水平方向の流れに影響され、第2ピークでは水平流速がピークとなるとき、つまり渦流れの規模が最も大きくなることである。そしてM.W.Lでは第2ピークの方がより大きな値を示すため、

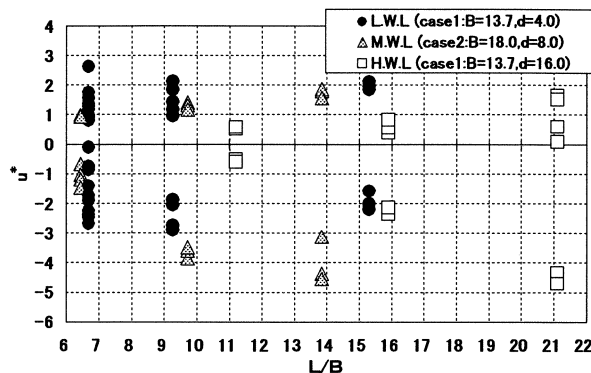


図-10 水平流速の正負ピーク値

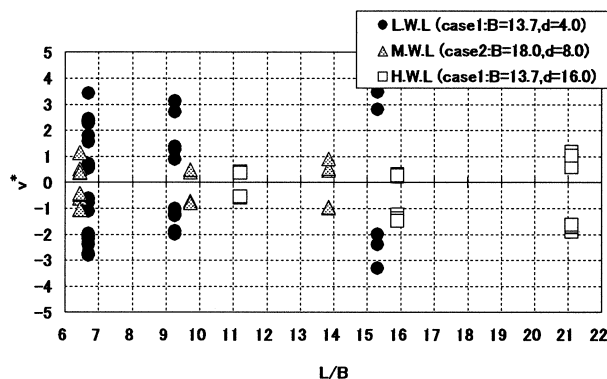


図-11 鉛直流速の正負ピーク値

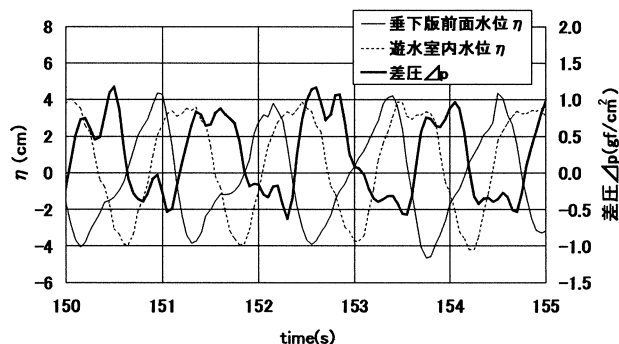


図-12 水位変動とブロック上下面の差圧の時間波形  
(case2:  $T=1.2s, H=6.8cm$ )

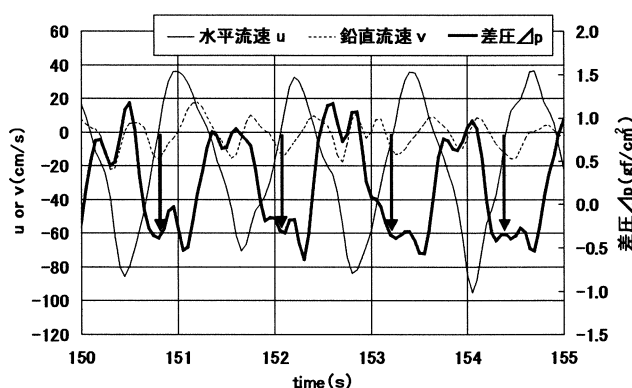


図-13 流速とブロック上下面の差圧の時間波形  
(case2:  $T=1.2s, H=6.8cm$ )

垂下版前の波変形より遊水室内のピストンモードにより発生する渦流の方が強い影響されることが判る。従って、被覆ブロックの被災機構は、潮位によって異なりL.W.Lの短周期側では鉛直流速に影響され、渦流れが発

生するM.W.LおよびH.W.Lでは渦流れによる負圧および水平流速に影響されると考えられる。

## 5. 渦流れの減勢工

ここでは、最も安定数が低かった条件であるH.W.Lにおいて、渦流れの発生位置を天端から離すようにという意図から、case6の模型に図-14に示すように堤体の開口部の底面に縦2.4cm、横2.9cmの突起を付加することによる安定性向上への効果について検討してみた。

図-15に突起の有無による水平流速 $u$ と差圧 $\Delta p$ の測定結果の比較を示す。この図から冲向きの水平流速と上向きの差圧が共に減少することが確認できる。

また、図-16には突起の有無の堤体条件での安定数 $N_s$ を示す。これにより、突起がある場合では、最も不安定となる長周期条件でも被害率 $D=1.5\%$ について比較すると $N_s$ が3割ほど増加することがわかる。

このように、開口部に突起を付けることで被覆ブロックの安定性を増すことができ、有効な対策法と考えられる。

## 結論

(1) 被覆ブロックの安定数 $N_s$ は波長・遊水室幅比 $L/B$ によって異なり、低潮位および平均潮位では $L/B$ が大きいほど $N_s$ も大きくなる。しかし高潮位では低くなる傾向がある。また、不規則波の安定数 $N_s$ は、規則波と比較すると全体的に低くなる傾向にある。

(2) 安定数 $N_s$ は直立式混成堤マウンドの場合に比べ、低潮位ではあまり変わらないが、遊水室内のピストンモードにより発生する渦流れの規模が大きくなる平均潮位および高潮位の条件下では低くなる傾向がある。

(3) 被覆ブロックに作用する揚圧力は周期条件によって発生原因が異なり、短周期では天端上の水位変動に伴う流体加速度が主な原因となり、長周期では遊水室内のピストンモードの発生に伴う垂下版下部での渦流れおよびそれによる水平流速が主な原因となる。

(4) 垂下版真下の底床版上に矩形突起を設けることにより、被覆ブロックの安定性が有意に向上する。これは、垂下版よりの剥離渦による底床版上の流れが矩形突起により減勢されることによる。

## 参考文献

1) 中村孝幸, 神野充輝, 西川嘉明, 小野塚孝: 渦流れの増大現象を利用した垂下版式の反射波低減工について, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.797-800, 1999.

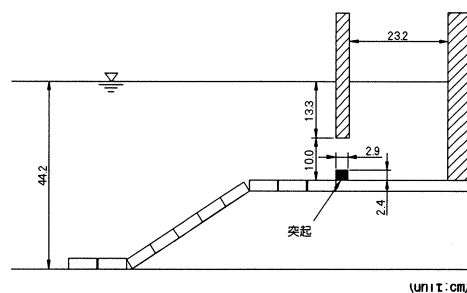


図-14 減勢工を付けた実験模型( $S=1/15.4$ )

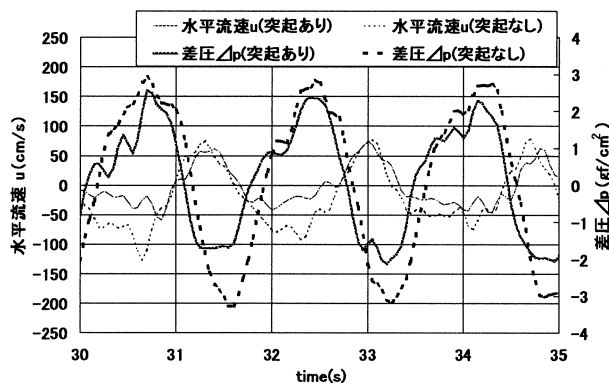


図-15 突起の有無による時間波形の変化

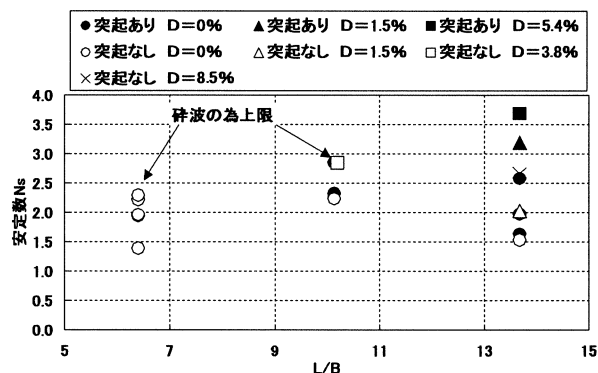


図-16 突起の有無による安定数の変化

- 2) Brebner, A. and D. Donnelly: Laboratory study of rubble foundation for vertical breakwaters, Proc. 8<sup>th</sup> Conf. on Coastal Eng., pp.408-429, 1962.
- 3) 中村孝幸, 井出善彦: 波の逸散現象を考慮した隅角部まわりの波変形と作用波力の算定法, 海洋開発論文集, 第13巻, pp.177-182, 1997.
- 4) 高橋重雄・半沢稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内潔・高山知司・谷本勝利: 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量—消波ブロック被覆堤の設計法の再検討, 第一報, 港湾技術研究所報告 第38巻 第1号, pp.3~28, 1998.
- 5) 谷本勝利, 柳生忠彦, 村永努, 柴田鋼三, 合田良美: 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の所要重量, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.604~608, 1981.