

マウンド構造物による長周期波の 反射波抑制に関する研究

長谷川 巖¹・及川 隆²・額田 恭史³・福田 孝晴³

¹正会員 株式会社エコー技術本部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

E-mail: ihasegawa@ecoh.co.jp

²国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所 (〒983-0852宮城県仙台市宮城野区榴岡5-1-35)

³株式会社エコー技術本部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

長周期波による荷役障害を解消するために、港内で長周期波の反射波を抑制する工法の一つとして、マウンド構造物を設置する対策がとられる。長周期波対策のマウンド構造物として、天端が水面上に出ている干出型、干出型で反射壁側にも法面を持つ切欠型、天端を静水面と一致させる没水型などが提案されている。これらの構造も含めて、長周期波の反射波を抑制するための適切なマウンド構造物条件を、水理模型実験と数値計算で検討した。マウンド構造物の天端を静水面と同じ高さとして反射壁側にも法面を持つ構造が、マウンド構造物の優位な条件である結果を得た。石材マウンドを消波ブロックで2層被覆する構造において、水面変動に伴う水平流速を天端の2層被覆内で発生させることが、反射波の抑制に寄与する。

Key Words : *wave absorbing mound, long-period wave, wave reflection, hydraulic model experiment, CADMAS-SURF*

1. はじめに

港湾における荷役障害の要因となる波浪のうち、風波については防波堤の延伸により港内への侵入を抑制して、荷役稼働率を高めることができる。しかし長周期波に起因する荷役障害は、防波堤の延伸だけでは不十分で不経済となる可能性がある。そのため、港内において長周期波の反射波を抑制する対策が検討される。港内における長周期波の消波構造物として、岸壁に消波機能を持たせる方法がある。例えば大島ら¹は斜めに設置する導水板で渦を発生させて長周期波のエネルギーを低減する工法を検討している。このような岸壁構造は新設の岸壁には採用可能でも、既存施設への適用は困難である。そのため、岸壁等が整備済みで長周期波対策が後から必要になった港湾においては、港内に捨石や消波ブロックによる消波工を設置して長周期波の反射波を抑制する方法がとられる。本論文では、これらの消波工をマウンド構造物と称す。マウンド構造物の天端が水面より上に干出している断面について、山田ら²はマウンド構造物を石材または消波ブロックで構成する条件で長周期波の反射波抑制効果を検討している。しかし、消波ブロックによるマウンド構造物は全体が消波ブロックで構成されており、石材マウンドを消波ブロックで被覆する断面の検討は行われていない。田中ら³はマウンド構造物の天端を静水

面と一致させる没水型について長周期波の反射波抑制効果を検討し、天端が静水面上に出ている干出型よりも反射率が小さくなる成果を得ている。しかし、検討条件を増やして適用範囲を広げることが課題であるとされている。

本研究では、干出型と没水型のマウンド構造物について水理模型実験を実施するとともに、水理模型実験では測定が困難な消波ブロック層内や石材層内の流速を、数値波動水槽CADMAS-SURF/3D⁴⁾ (以下、CS3Dと表記)を用いた数値シミュレーションで補うことにより、長周期波の反射波を抑制するための適切なマウンド構造条件を検討した。

2. 実験内容

長さ55 m, 幅1.2 m, 高さ1.5 mの二次元造波水路において水理模型実験を実施した。反射壁設置位置から造波機側に6.63 mの水平床があり、水平床の造波機側は長さ16.30 mの1:50勾配斜面で、さらにその造波機側に1:10勾配の擦り付け部を設置した。模型縮尺を1/50として構造物と波周期はフルードの相似則で縮小したが、長周期波の波高は計測器による検出精度と目視による視認性を考慮して、波高を1 cmとした。この波高をフルードの相似則で現地量に換算すると0.5 mであるため、実際に発生

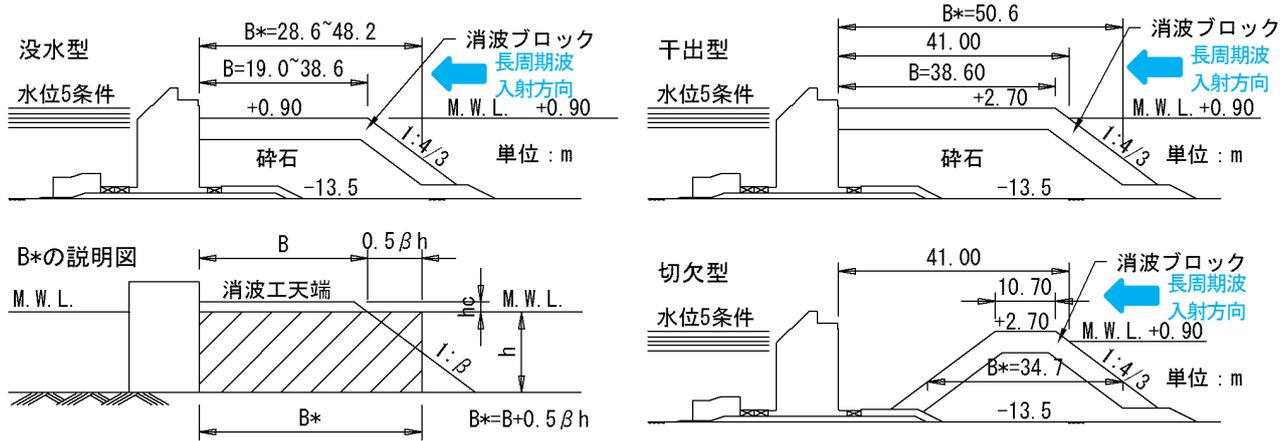


図-1 検討対象断面およびマウンド構造物幅 B^* の説明

する長周期波高よりやや大きい。以降、実験に関する諸量は、模型値の明記がない限りフルードの相似則によって現地換算した値で示す。

波の周期は40 s, 80 s, 120 sの3条件とした。40 sは検討対象港湾で観測されている長周期波の卓越周期である。80 sは検討対象港湾の代表的な入港船舶の固有周期で、120 sは検討対象港湾で観測されている長周期波の周期の上限値である。マウンド構造物は静水面に対する天端高によって長周期波の反射波抑制効果が異なることが田中ら³⁾によって指摘されている。そのため、実験潮位をH.W.L.+1.0 m, H.W.L., M.W.L., L.W.L., L.W.L.-1.0 mの5条件として潮位変化の影響を確認した。H.W.L.はD.L.+1.70 m, M.W.L.はD.L.+0.90 m, L.W.L.はD.L.+0.21 mなので、5種類の潮位条件は、D.L.+2.70 m, +1.70 m, +0.90 m, +0.21 m, -0.79 mである。

水位は容量式波高計で測定した。長周期波は規則波として造波し、実験水路内で多重反射系の反射波が安定した後の30~40波を解析対象とした。反射壁位置から1:50勾配斜面の造波機側端部までの距離は模型量で22.93 mである。その中央の11.47 m地点を中心に1/4波長間隔で設置した2本の容量式波高計による水位データを用い、合田ら⁹⁾の方法を適用して入射波と反射波のエネルギー比により反射率を算定した。

マウンド構造物の形状は、図-1に示す没水型、干出型、切欠型の3種類とした。船舶が接岸する岸壁前面にはマウンド構造物を設置できないので、港湾施設配置によってはこれらのマウンド構造物を防波堤の港内側に設置することになる。この場合、防波堤からの越波伝達波に対して被覆材が安定でなければならない。そのため、マウンド構造物の被覆材は消波ブロック2層積みとした。事前実施した越波伝達波に対する被覆材の安定実験に基づき被覆材の消波ブロックは16型としたので、2層の厚さは3.80 mである。また、消波ブロックの下の石材マウンド部分は、現地量に換算して100~500 kg/個程度の碎石

表-1 実験を実施した天端幅 B とマウンド構造物幅 B^*

構造形式	天端幅 B (m)	マウンド構造物幅 B^* (m)
没水型	19.0	28.6
	23.0	32.6
	30.0	39.6
	38.6	48.2
干出型	38.6	50.6
切欠型	10.7	34.7

を適用した。図-1の左上の没水型は、田中ら³⁾によって提案されているマウンド構造物の天端を静水面の高さと一致させた断面である。没水型の天端はM.W.L.と一致させた。没水型の $B=19$ mは、田中ら³⁾の研究成果を適用して周期40 sに対する反射率が0.7となるように設定した天端幅である。没水型の天端幅 B は表-1に示すように4種類に変更している。表-1に示す B^* は図-1の左下図に示すように $B^*=B+0.5\beta h$ で法面部分も考慮したマウンド構造物幅である。なお、図-1および表-1のマウンド構造物幅 B^* はM.W.L.の潮位に対する値である。図-1の右上の干出型はマウンド構造物の天端をH.W.L.より1 m高くした断面である。山田ら⁹⁾による検討事例を適用して、周期40 sに対する反射率が0.7となるように、M.W.L.における反射壁からマウンド構造物までの幅を41 mとした。結果的に、没水型と干出型の反射率の設定は0.7で同じであるが、マウンド構造物の幅は約2倍の違いがある。図-1の右下の切欠型は干出型マウンド構造物のケーソン側にも法面を設定した断面である。天端幅は山田ら⁹⁾の事例を参考に10 m程度を確保するものとし、消波ブロック天端面の並び個数を考慮して10.70 mとした。切欠型のM.W.L.におけるマウンド構造物幅 B^* は、マウンド構造物の両方の法面を考慮すると34.7 mである。

防波堤の港内側に長周期波対策工としてマウンド構造物を設置する場合には、防波堤を越波した波がマウンド構造物に作用して被覆材が移動する可能性が考えられる。そこで写真-1および写真-2に示すように、消波ブロック



写真-1 消波ブロック1層を移動させた没水型の実験断面



写真-2 消波ブロック2層を移動させた没水型の実験断面

2層被覆のうち、上層の1層目が移動した状態と2層とも移動した状態をつくり、消波ブロックの移動による反射率の変化を確認した。消波ブロック1層移動は、消波ブロック全体数量に対する移動数量の割合で定義する被害率が8.7%相当で、消波ブロック2層移動は被害率が19.3%相当である。

3. 反射率解析結果

没水型のマウンド構造物の幅と波の周期を変更した条件について、マウンド構造物幅 B^* と波長 L の比で表す相対マウンド構造物幅 B^*/L と反射率の関係を図-2に示す。この図に示すデータの実験潮位は没水型の天端と同じM.W.L.であるため、静水面上のマウンド構造物天端高 h_c は0.0 mである。周期の短い条件において反射率が小さい。 B^*/L の増加に伴い異なる周期の反射率が連続して減少していることから、マウンド構造物の反射率を評価する指標として B^* が適切であることがわかる。 B^*/L の増加により反射率は減少し続け、 B^*/L が0.1以下の範囲では極小値を持たない。

没水型、干出型、切欠型の構造で周期の変更による反射率の変化を図-3に示す。3種類の構造ともに周期の短い条件で反射率が小さい。没水型の $B^*=32.6$ mは40 sにおける反射率が干出型の $B^*=50.6$ mより小さく、周期80 sと120 sの反射率は干出型の $B^*=50.6$ mと同程度であるため、費用対効果の観点から干出型より没水型が有利な構造で

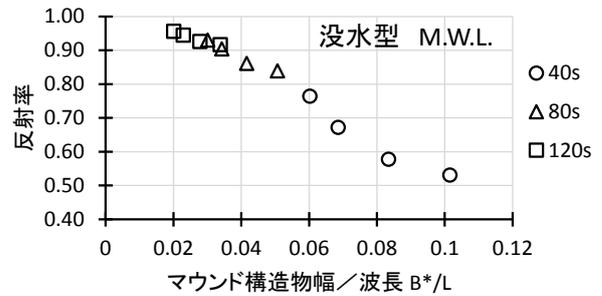


図-2 相対マウンド構造物幅による反射率の変化 (没水型)

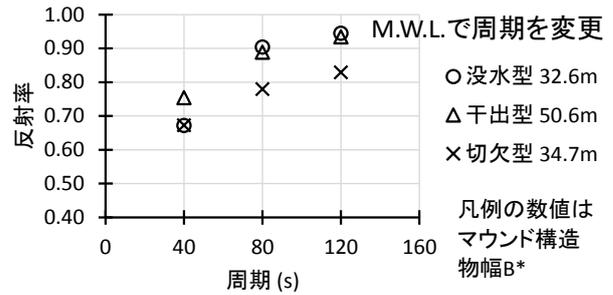


図-3 周期による反射率の変化 (M.W.L.)

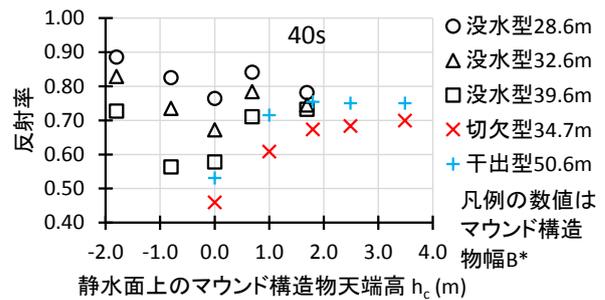


図-4 マウンド構造物天端高による反射率の変化

ある。切欠型の $B^*=34.7$ mは周期40 sにおける反射率が没水型の $B^*=32.6$ mとほぼ同じで、周期80 sと120 sの反射率は没水型より小さいことから、没水型より切欠型の反射波抑制効果が高い。干出型と切欠型を比較すると、3種類のすべての周期で干出型より切欠型の反射率が小さい。小澤ら⁹⁾の研究では切欠きあり（本論文の切欠型）と切欠きなし（本論文の干出型）では反射率は大きく変わらない結果であるが、本研究においては干出型より切欠型の反射率が小さい結果となった。この違いの要因は明らかではないが、小澤らはマウンド構造物の全体を石材で構成しているのに対し、本研究では石材によるマウンドを消波ブロックで2層被覆するという構造の違いが影響している可能性が考えられる。

周期40 sで実験潮位を変更した条件について、静水面上のマウンド構造物天端高 h_c と反射率の関係を図-4に示す。没水型の $B^*=39.6$ mで $h_c=-0.8$ mの反射率が $h_c=0.0$ mより小さいことを除けば、マウンド構造物の天端が静水面と一致している $h_c=0.0$ mの反射率が最も低い。マウンド

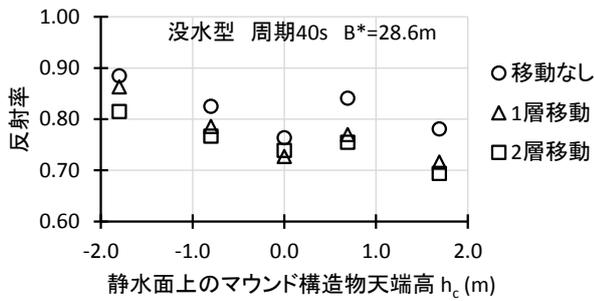


図-5 消波ブロック移動の有無による反射率の比較

構造物の幅を広げることによる反射率の変化は、 $h_c > 0.0$ mの天端が干出している条件よりも $h_c \leq 0.0$ mの天端が水没している条件で大きい。反射壁側にマウンド構造物の法面がある切欠型は、反射壁側に法面がない干出型より反射率が小さい。切欠型の $h_c = 0.0$ mが全データ中で反射率が最も小さいことから、 $h_c = 0.0$ mで反射壁側に法面を持つ形状が、長周期波の反射波を抑制するマウンド構造物の最適形状であると言える。すなわち、マウンド構造物の天端が静水面と一致している没水型でケーソン側にも法面を持つ構造、言い換えれば切欠型の天端をM.W.L.の高さまで下げた構造が、マウンド構造物の最適形状である。

没水型の $B^*=28.6$ mの条件で、潮位を変更して周期40 sを作用させたときの、マウンド構造物被覆材の消波ブロックの移動の有無による反射率の比較を図-5に示す。消波ブロックの移動なしよりも1層移動の反射率が小さく、 $h_c = 0.0$ mの条件を除けば1層移動より2層移動の反射率が小さい。したがって、長周期波の反射波抑制の観点からは、越波伝達波によるマウンド構造物被覆工の変形をある程度許容できる。なお、消波ブロックを移動した断面は、写真-1および写真-2に示すようにマウンド構造物の反射壁側にも小さな法面を持つ構造である。このことから、マウンド構造物の反射壁側にも法面を有する構造が有利であると言える。

4. 反射率の違いに関する要因分析

マウンド構造物の構造により、長周期波の反射率が異なる結果を得た。ここでは、マウンド構造による反射率の違いに関する要因を分析する。

(1) 周波数スペクトルによる分析

反射壁位置から500 m地点の周波数スペクトルを図-6に示す。「対策工なし」は長周期波対策工なし、「 $h_c = 0.0$ m」と「 $h_c = 1.8$ m」は切欠型で、 h_c の数値は静水面上のマウンド構造物天端高を表す。波の周期は40 sである。周期の逆数の0.025 Hzにエネルギーのピークがあることは、どの構造も同じである。ピーク周波数のエネルギー

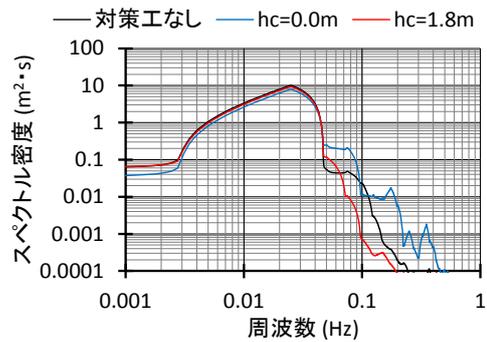


図-6 周波数スペクトル (対策工なしと切欠型)

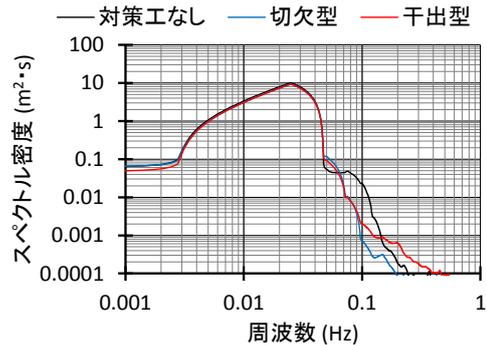


図-7 周波数スペクトル (対策工なしと $h_c=1.8$ m)

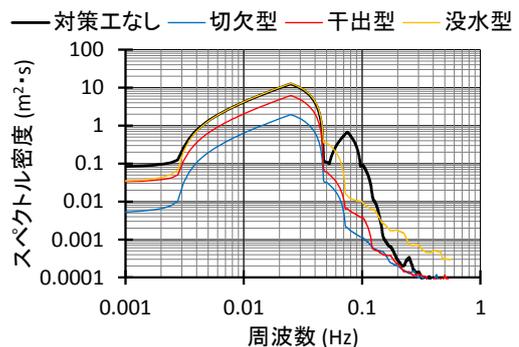


図-8 周波数スペクトル (反射壁直前, M.W.L., 40s)

は対策工なし $\rightarrow h_c = 1.8$ m $\rightarrow h_c = 0.0$ mの順に若干小さくなる。周波数0.05 Hz以上の高周波成分は構造による差が大きく、切欠型の $h_c = 0.0$ mは対策工なしよりエネルギーが大きく、 $h_c = 1.8$ mは対策工なしより小さい。ただし、周波数0.05 Hz以上の短周期成分は入射波周期に相当する0.025 Hzと比べて2桁以上小さな値である。

反射壁位置から500 m地点の周波数スペクトルをマウンド構造物の形状で比較すると図-7のとおりである。波の周期は40sで、切欠型と干出型は $h_c=1.8$ mである。切欠型と干出型は周波数が0.003~0.1 Hzの範囲でエネルギーがほぼ同じである。したがって、切欠型と干出型で反射波を抑制する周波数帯に違いはないと言える。

M.W.L.の潮位で周期40 sを作用させた実験における、反射壁直前の周波数スペクトルを図-8に示す。反射壁直前であるので、対策工なしは反射壁直前の重複波、干出

表-2 CS3Dの計算条件設定

設定項目	周期 40 s	周期 80 s	周期 120 s
計算時間間隔	0.2sで一定	0.4sで一定	0.4sで一定
造波モデル・関数	造波ソース・ストークス波またはクノイド波		
造波位置	270セル目	535セル目	805セル目
水深	15 m		
造波波高	0.5 m		
造波周期	40 s	80 s	120 s
減衰領域幅	490 m	970 m	1460 m
格子間隔	dx=2.0m, dy=2.0m, dz=0.5m		
x方向セル数	1250	2500	3750
y,z方向セル数	y方向:1, z方向:40		
慣性力係数	CM = 1.2		
D-F則の係数	石材 $\alpha 0=1500$ $\beta 0=3.6$		
	消波ブロック $\alpha 0=2100$ $\beta 0=2.2$		
空隙率	石材層:0.43 消波ブロック層:0.5		

表-3 模型実験とCS3Dのマウンド構造物寸法

検討手法	被覆層厚	没水型		没切型	
		天端幅	肩幅	天端幅	天端幅
模型実験	3.8m	23.0m	38.6m	10.7m	
CS3D	4.0m	24.0m	38.0m	10.0m	

表-4 模型実験とCS3Dの反射率

検討手法	没水型			没切型		
	40s	80s	120s	40s	80s	120s
模型実験	0.672	0.904	0.945	0.459	—	—
CS3D	0.817	0.966	0.996	0.469	0.875	0.972

型と没水型はマウンド構造物を透過してきた波，切欠型はマウンド構造物透過後の反射壁前面重複波である。対策工なしは周期の逆数である0.025 Hzにエネルギーのピークを持つ他に，その3倍周波数の0.075 Hzにもエネルギーのピークがある。没水型は周波数0.004~0.05 Hzのエネルギーが対策工なしとほぼ同じで，3倍周波数付近のエネルギーと0.003 Hz以下のエネルギーが低減されている。干出型は対策工なしと比べてほぼすべての周波数帯でエネルギーが低減されていて，切欠型は干出型よりもさらにエネルギーが小さい。この結果は，干出型の反射率が没水型より大きかった結果と異なる。したがって，干出型は反射壁に到達するエネルギーを減殺する効果があるものの，マウンド構造物からの反射波が没水型に比べて大きい可能性が考えられる。

(2) 被覆層内流速による分析

実験水路において染料水を注入した目視観察により，没水型マウンド構造物天端の消波ブロック2層積みの被覆層において，直下の石材層の中よりも速い流れが発生していることを確認した。しかし，模型実験において消波ブロック層内の流速を測定することは困難であった。そこでCS3Dにより模型実験の再現計算を実施し，消波ブロック層内と石材層内の流速を把握した。

CS3Dの計算条件設定は表-2のとおりである。水路幅方向のy方向に1セルだけの2次元計算であるが，複数コアを使用する計算機能を適用して計算時間を短縮するた

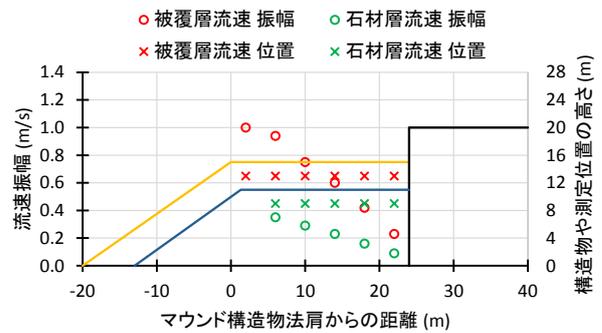


図-9 CS3Dによる水平方向流速振幅 (没水型, 40s)

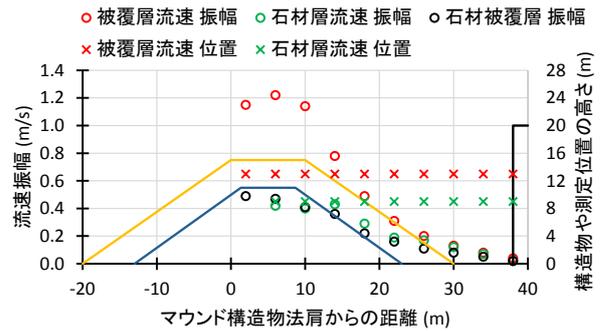


図-10 CS3Dによる水平方向流速振幅 (没切型, 40s)

めに，CADMAS-SURFの3次元モデルを使用した。模型実験の波高1 cmを現地換算すると0.5 mなので，CS3Dの入力波高を0.5 mとした。透過性構造物の設定において粒径の影響を考慮するために，Dupuit-Forheimer式（以下，D-F則と表記）による抵抗力計算を適用した。D-F則における係数 $\alpha 0$ と $\beta 0$ は近藤・武田⁷⁾を参考に表-2に示すように設定した。CS3Dの再現計算対象は，模型実験の没水型・天端幅23.0 m・潮位M.W.L.と，切欠型・反射壁から法肩までの幅38.6 m・潮位H.W.L.+1.0 mとした。切欠型の天端は+2.70 mなので，潮位がH.W.L.+1.0 mは天端と静水面が一致した状態である。すなわち没水型の反射壁側に法面を持つ断面なので，この構造を没切型と称す。CS3Dは水平格子間隔を2.0 m，鉛直格子間隔を0.5 mとし，マウンド構造物の形状は格子間隔と一致させて設定した。そのため表-3に示すように模型実験とCS3Dでマウンド構造物の寸法に若干の違いがある。

模型実験とCS3Dの反射率の比較を表-4に示す。反射率の算定方法は模型実験と同様である。没水型において，模型実験よりCS3Dの反射率が大きく数値は一致していないが，周期が長くなると反射率が大きくなる傾向は一致している。没切型の40 sは模型実験とCS3Dの反射率がほぼ一致している。また，没水型より没切型の反射率が小さい傾向も，CS3Dが模型実験と一致している。以上のように，CS3Dの計算結果は定量的には模型実験結果と異なる点があるが，定性的には一致しているので，消波ブロック層内や石材層内の流速の定性的な比較を行

う。なお、没切型の被覆層を石材として計算すると40sの反射率が0.673で、消波ブロックより大きくなる。

CS3Dによる被覆層内と石材層内の流速振幅の解析結果を図-9および図-10に示す。図中の×印が流速解析位置を示し、○印が流速振幅を示す。流速振幅とは波による水面変動に伴って生じる水平流速の変化の幅である。図-10において×印が被覆層や石材層の外にある地点は、これらの層外の水面内の流速振幅である。図-9の没水型では、被覆層内において石材層内よりも速い流速が発生しており、模型実験の観察結果と一致している。図-10の没切型で発生する被覆層内の流速は没水型より大きい。図-10の黒丸印は被覆層を石材とした場合の被覆層内の流速振幅であり、赤丸印の消波ブロックと比べて小さい。消波ブロックによる被覆層内で速い流れが発生すると乱れを生じるので、それによって波エネルギーが消費され反射波のエネルギーが減殺されると考えられる。マウンド構造物の天端が水面上に出ている干出型は、長周期波の水面変動が天端の被覆層の下で生じるため、没水型ほどには反射率が低くならない。また、マウンド構造物の天端幅を広げることによる反射率の低下が、天端が干出している条件より水没している条件で大きかったことも、水面変動が被覆層と石材層のどちらで生じるかによる流速振幅の違いで説明できる。

5. おわりに

長周期波対策工として港内に設置するマウンド構造物の、長周期波の反射波を抑制するための適切なマウンド構造条件を、水理模型実験とCS3Dで検討した。

マウンド構造物の天端が静水面と一致している没水型が、天端が水面の上に出ている干出型より反射率が小さい。この結果は田中ら³⁾の報告と一致した。

天端が水面の上に出た条件で反射壁側に法面がない干出型よりも法面がある切欠型の反射率が小さい。この結果は小澤ら⁶⁾の報告と異なった。

マウンド構造物の天端が静水面と一致している条件で反射壁側にも法面を持つ没切型が、没水型、切欠型、干出型よりも反射率が小さい。そのため、没切型がマウンド構造物の優位な形状であると考えられる。

反射壁側に法面がない没水型のマウンド構造物において、越波伝達波により被害率10数%の被覆材の移動を生じて、長周期波の反射波抑制効果は低下しない結果となった。

マウンド構造物は、長周期波の水面変動によってマウンド構造物内で発生する流れに伴う乱れにより、波エネルギーを減殺していると考えられる。石材マウンドを消波ブロックで2層被覆する構造においては、天端を静水面と一致させると天端の2層被覆内で流速振幅が発生するので、天端が干出した条件よりも反射波抑制効果が大きい結果となった。

参考文献

- 1) 大島香織, 森屋陽一, 水流正人, 杉田繁樹, 平石哲也: 渦による消波機能を活用した長周期波対策施設の特性, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.145-150, 2006.
- 2) 山田晶子, 国栖広志, 爲廣哲也, 小平田浩司, 平石哲也: 石巻港における長周期波の消波対策に関する検討, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.785-790, 2005.
- 3) 田中真史, 松本朗, 半沢稔: 没水型長周期波対策工の消波特性に関する実験的検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.2, I_816-I_821, 2012.
- 4) (財) 沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF3D 数値波動水槽の研究・開発, 沿岸技術ライブラリーNo.39, 2010.
- 5) 合田良美, 鈴木康正, 岸良安治, 菊池治: 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 24p, 1976.
- 6) 小澤敬二, 森屋陽一, 山本禎寿, 平山克也, 平石哲也: 秋田港における港内長周期波対策施設による静穏度向上効果, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.653-658, 2009.
- 7) 近藤一郎, 竹田英章: 消波構造物, 275p, 森北出版, 1983.

(2015.3.18 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON REDUCION OF THE REFLECTION OF LONG-PERIOD WAVE BY WAVE ABSORBING MOUND

Iwao HASEGAWA, Takashi OIKAWA, Kyoshi NUKADA and Takaharu FUKUDA

Wave absorbing mounds are constructed on the harbor side of breakwaters to reduce the reflection of long-period waves for the smooth loading and unloading. In this study, the suitable shape of the wave absorbing mounds for reduction of reflection of long-period waves is investigated by hydraulic model experiments and numerical wave flume. The crest of the wave absorbing mound is the same height as still water level, and the mound with the slope on the side of reflective wall is more predominant than other shape of wave absorbing mounds. The flow due to fluctuation of water surface occurs in the armor layer of wave absorbing mound. And the flow by the submerged wave absorbing mound is stronger than the not submerged ones. It is the reason that the crest of the wave absorbing mound is the same height as still water level is more predominant than other shape of wave absorbing mounds.