

上部斜面防波堤の港内側に設置する 長周期波対策工に関する検討

長谷川 巖¹・及川 隆²・仲井 圭二³・福田 孝晴⁴

¹正会員 株式会社エコー技術本部水理解析部 (〒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正会員 株式会社エコー技術本部海象解析部 (〒110-0014 東京都台東区北上野 2-6-4)

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

長周期波による荷役稼働率低下を解消するために、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。マウンド構造物を防波堤の港内側に設置する場合には、マウンド構造物の被覆材が越波伝達波に対して安定でなければならない。そこで、上部斜面構造防波堤の港内側に設置するマウンド構造物の被覆材の安定性を二次元水理模型実験で検討した。また、防波堤の港内側に設置するマウンド構造物が、港外側から港内側への伝達率に与える影響についても検討した。上部斜面構造防波堤の港内側に設置するマウンド構造物の被覆材は、矩形構造防波堤背後より安定性が厳しい。防波堤の港内側にマウンド構造物を設置すると、越波伝達波がマウンド構造物に作用することによりエネルギーが減殺され、伝達率が小さくなる。

Key Words : *wave overtopping, sloping top breakwater, harbor side, hydraulic model experiment, wave absorbing mound*

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解消できないことがある。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ている。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させ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。マウンド構造物は船舶が接岸する岸壁前面には設置できないので、小澤ら²⁾の事例にみられるように、港湾施設配置によっては防波堤の港内側に設置することになる。この場合、マウンド構造物の被覆材が防波堤を越波する波に対して安定でなければならない。防波堤港内側

のマウンド構造物の越波伝達波に対する安定性は、本体工が矩形構造の防波堤については早川ら³⁾や田中ら⁴⁾による研究事例があるが、上部斜面構造の防波堤についての検討は十分に行われていない。

そこで本検討では、上部斜面構造防波堤の港内側に設置するマウンド構造物の被覆材の安定性を二次元水理模型実験で検討した。また、越波伝達波がマウンド構造物に衝突することに着目し、長周期波対策工としてのマウンド構造物が伝達波に与える影響についても検討した。

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。防波堤法線の沖側は1:50勾配斜面で、模型床の先端に1:10勾配の擦り付け部を設置した。防波堤法線の岸側は水平床とした。模型縮尺は1/50である。以降、実験に関する諸量はフルードの相似則によって現地換算した値で示す。

実験波浪は修正Bretschneider光易型の不規則波である。有義波周期は13.0 sで、有義波高は3.42 m, 4.28 m, 5.13 m, 5.70 m, 6.84 mの5段階を小さいほうから順に1000波ずつ

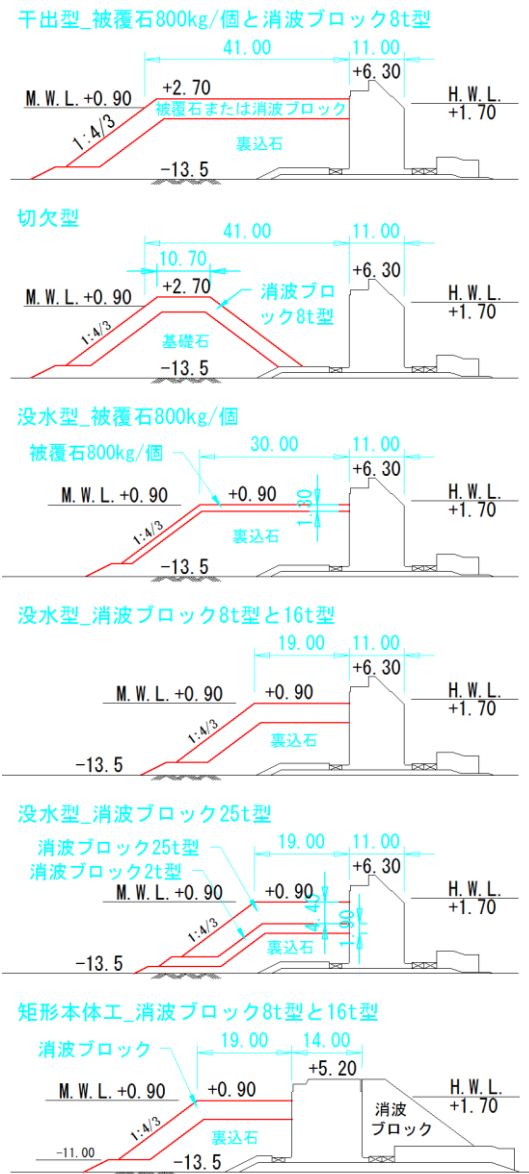


図-1 実験対象断面

作用させた。消波ブロックの大きさや断面形状を変えた各ケースについて、波群を変えて3回の繰り返し実験を実施した。越波伝達波による港内側マウンド構造物被覆材の安定性を検討する実験であるので、伝達波高が大きくなる潮位条件としてH.W.L.のD.L.+1.70 mとした。

実験断面は図-1に示す6種類である。被覆石や消波ブロックの層厚は2層厚としたので、消波ブロックの大きさなどにより2層の厚さが異なる。被覆材の大きさの違いも考慮すると、実験断面は9種類である。

図-1の最上段の干出型はマウンド構造物の天端をH.W.L.より1m高くした断面で、検討対象港湾における長周期波の卓越周期である40 sに対する反射率が0.7となるように、山田ら⁵⁾による検討事例を適用してM.W.L.におけるマウンド構造物の幅を41 mとした。図-1の2段目の切欠型は干出型のマウンド構造物のケーソン側にも法面を

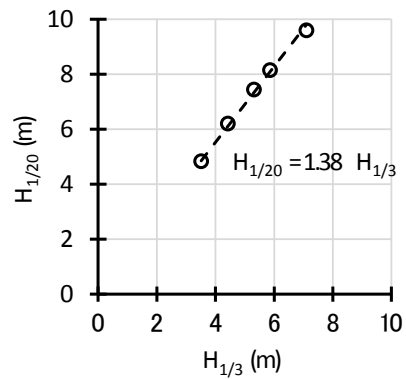


図-2 防波堤法線位置の有義波高と 1/20 最大波高

設定した断面で、天端幅は山田らの事例を参考に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。

図-1の3段目以下は田中ら⁶⁾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。マウンド構造物の天端高はM.W.L.と一致させた。3段目の没水型_被覆石は天端幅を30 mとして、越波伝達波により洗掘を生じる位置を確認した。4段目以下の天端幅19 mは、田中ら⁶⁾の研究成果を適用して卓越周期の40 sに対して反射率が0.7となるように設定した。結果的に、干出型と没水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。

実験水位が+1.70 m、防波堤法線の地盤高が-13.50 mなので、水深は15.2 mである。有義波高は最大で6.84 mのため、図-2に示すように防波堤法線位置の有義波高と1/20最大波高の比は約1.4倍であり、ほぼ非碎波の条件である。碎波帯内において有義波高の変化により最高波高や1/20最大波高と有義波高の比が変わるような条件の場合には、不規則波中の大きな波高で被覆材の安定性を評価する方法も考えられる。しかし、今回は非碎波の条件であるため、被覆材の安定性を有義波高と関連付けて評価する。

3. 被覆材の安定性

(1) 被覆石の安定性と洗掘範囲

干出型と没水型の被覆石の断面に、3.42 m から 6.84 m の5段階の波高を小さいほうから順に1000波ずつ作用させた実験の中から、4段階目の5.70 mを作用させた後の長周期波対策工の断面を図-3 および図-4 に示す。干出型と没水型のどちらもケーソンの直背後で洗掘が生じている。洗掘範囲は干出型が-25 mまで、没水型が-30 mまでである。天端の堆積部と侵食部の高さの差は、没水型の3.8 mに対し干出型は5.5 mと大きい。干出型は近くで深く洗掘し、没水型は遠くで浅く洗掘している。没水

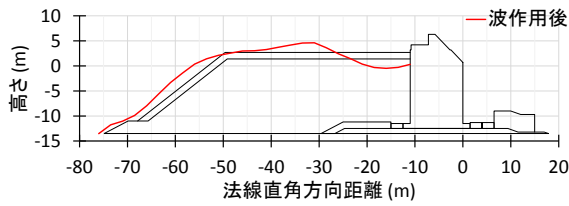


図-3 波高5.70mによる干出型・被覆石の断面変化

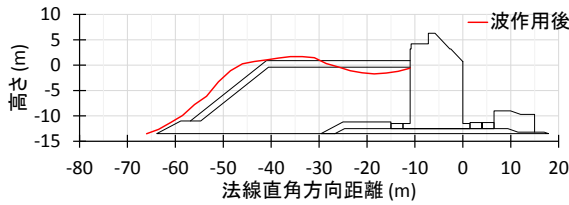


図-4 波高5.70mによる没水型・被覆石の断面変化



写真-1 波高5.70mによる干出型・消波ブロック8t型のマウンド構造物天端の変状



写真-2 波高5.70mによる没水型・消波ブロック8t型の断面変化

型の洗掘位置が干出型より遠くなるのは、没水型は天端が低いので、越波水塊が被覆材に衝突する位置が干出型より遠くなるためである。没水型の洗掘深が干出型より浅くなるのは、天端高が静水面と一致していることによるウォータークッションの効果である。

(2) 消波ブロックの安定性

干出型のマウンド構造物被覆材に8t型の消波ブロックを適用した断面に、5.70mの波高を作用させた後のマウンド構造物天端の変状を写真-1に示す。防波堤本体工は上部斜面構造である。ケーソン直背後で被覆材が侵食さ

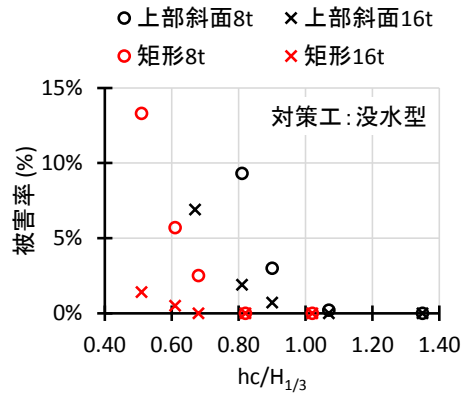


図-5 上部工相対天端高による被害率の変化

れ、天端中央よりやや港内側に消波ブロックが堆積する。消波ブロックは2層積みの2層とも移動して、裏込石が露出している。没水型マウンド構造物の場合には写真-2に示すとおりで、天端上の2層積みのうち上層のブロックの一部が法面に転落し、マウンド構造物被覆材の天端がやや低くなる。被覆材の被害率は干出型が約25%、没水型が約15%である。このように、干出型と没水型でマウンド構造物被覆材の移動状態に違いがある。

没水型のマウンド構造物の被覆材に消波ブロックを適用した断面に、5段階の波高を作用させた実験における被覆材の被害率の変化を図-5に示す。横軸は静水面上の上部工天端高 h_c を実験波高 $H_{1/3}$ で無次元化した。上部斜面の実験範囲は $h_c/H_{1/3}$ が0.67~1.35の範囲で、上部斜面8t型の $h_c/H_{1/3}=0.67$ 被害率は縦軸の上限値を超える31.6%である。本体工の構造の違いに着目すると、同一天端高による被害率は矩形構造よりも上部斜面構造で大きい。港湾基準⁷⁾のp.869によると、矩形構造の $h_c/H_{1/3}=0.6$ と上部斜面構造の $h_c/H_{1/3}=1.0$ の波高伝達率が同程度になるとされている。実験結果による8t型の被害率は、矩形構造の $h_c/H_{1/3}=0.6$ が6.2%で上部斜面の $h_c/H_{1/3}=1.0$ が1.4%である。同一波高伝達率で本体工の構造により港内側被覆材の被害率が異なるのは、矩形構造は越流のような状態であるのに対し、上部斜面構造は越波水塊が上方に打ちあがった後に落下して港内側被覆材に衝突するという、越波形態の違いによるものである。矩形構造の港内側の没水型の被覆材安定数 N_s^3 を $\rho H^3 / \{M(S_r - 1)^3\}$ で求めると、8t型のケースは14.0、16t型のケースは18.0である。ここに、 ρ は被覆材の密度、 M は被覆材の質量、 S_r は被覆材の水に対する比重で、 H は被害率1%に対する安定限界波高とした。田中ら⁴⁾の方法で消波ブロック被覆堤(矩形構造)背後の没水型マウンド構造物被覆材の安定数 N_s^3 を算定すると、 $B_M/H_D=2$ で12.8、 $B_M/H_D=4$ で17.4である。ここに、 B_M は没水型対策工の天端幅、 H_D は設計波高である。港湾基準⁷⁾のp.819に示されるように、一般的に矩形構造の天端高は静水面上に設計波高の0.6倍とされる。

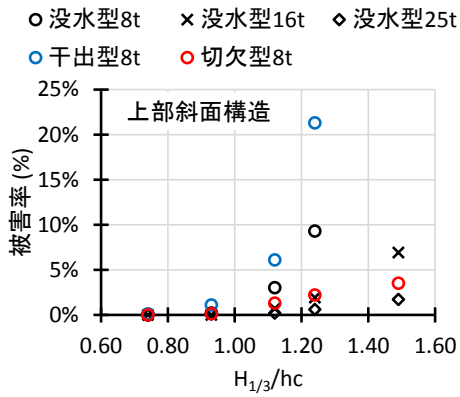


図-6 入射波高による被害率の変化

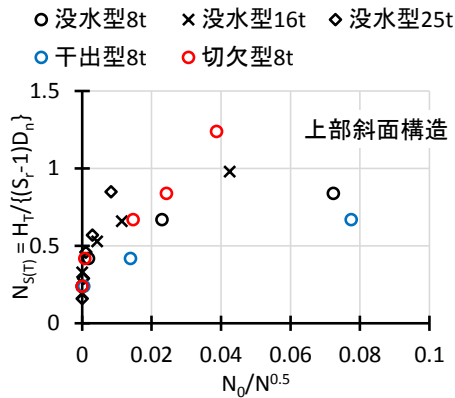


図-7 被災度と $H_T / \{(S_r - 1) D_n\}$ の関係 (伝達波高で評価)

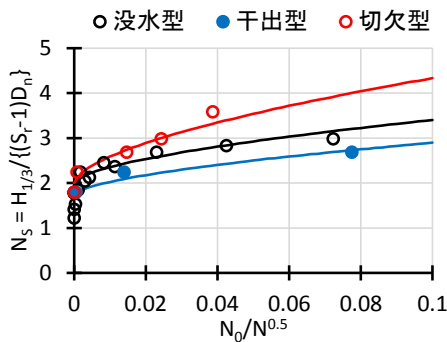


図-8 被災度と $H_{1/3} / \{(S_r - 1) D_n\}$ の関係 (入射波高で評価)

今回の矩形構造物の H.W.L.からの天端高は 3.5 m なので設計波高を $3.5 \div 0.6 = 5.8\text{m}$ とすると、天端幅が 19m なので $B_M/H_D = 3.3$ である。したがって田中らの方法による算定結果が $B_M/H_D = 2$ と 4 の中間的なものとして安定数 N_S^3 が 15 程度になるものとする、本検討の矩形構造の実験結果は田中らの研究とほぼ同じであると評価できる。一方、上部斜面本体工の港内側に設置する没水型マウンド構造物の安定数を同様に算定すると、 $N_S^3 = 10.38 \sim 13.14$ であり、矩形構造の本体工よりも小さい。

波高と被害率の関係をマウンド構造物の形状や被覆材の大きさで比較した結果を図-6 に示す。横軸は入射波の

表-1 安定数割増係数と断面諸元別係数 (上部斜面構造)

断面諸元			安定数割増係数			断面諸元別係数		
h_c/H_D	対策工	B_M/H_D	k_a	k_b	k_c	p	q	r
0.8	没水型	3.3	2.4	1.5	3.0	5.57	2.00	0.60
0.8	干出型	7.2	2.0	1.3	3.0	4.64	1.73	0.60
0.8	切欠型	7.2	4.0	1.5	3.0	9.28	2.00	0.60

有義波高 $H_{1/3}$ を静水面上の上部工天端高 h_c で無次元化した。没水型で消波ブロックサイズの違いに着目すると、消波ブロックが大きいほど被害率が小さい。8t 型の消波ブロックで断面形状の違いに着目すると、干出型の被害率が大きく、没水型、切欠型と被害率が小さくなる。

上部斜面の本体構造で、港内側のマウンド構造物が無い断面において測定した伝達波高 H_T により求めた安定数 $N_{S(T)}$ と、被災度 N_0 の関係を図-7 に示す。安定数 $N_{S(T)}$ は図中の縦軸の式で求めており、 S_r は被覆材の水に対する比重、 D_n は被覆材体積の 3 乗根である。横軸の被災度 N_0 は移動した被覆材個数 \div 水路幅 $\times D_n$ で、 N は波数である。安定数 N_S は無次元数であり、理想的には被覆材の大きさによらず概ね一定の値になるが、没水型の実験結果は被覆材が大きい条件で $N_{S(T)}$ が大きい傾向が認められる。8t 型の被覆材で対策工の形状の違いを見ると、干出型の $N_{S(T)}$ が小さく、没水型、切欠型と大きくなっている。

田中ら⁴⁾の安定数は矩形構造についての提案であるので、本検討の結果から上部斜面構造の港内側に設置するマウンド構造物の被覆材の安定数を検討する。式形は田中らに倣い式(1)とした。

$$\begin{cases} N_S = C_H \left\{ p \left(\frac{N_0}{N^{0.5}} \right)^r + q \right\} \\ p = 2.32k_a, \quad q = 1.33k_b, \quad r = 0.2k_c \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 N_S : 通過波高から算定する港内側被覆材の断面諸元別係数である。

被災度 N_0 と防波堤法線位置の通過波高 $H_{1/3}$ による N_S の関係を図-8 に示す。実験結果と一致するように断面諸元係数を検討すると表-1 のとおりである。本検討は非碎波条件なので $C_H = 1.0$ とした。また、田中らと同様に $r = 0.6$ とした。図-8 の実線は表-1 に示した係数による N_S の算定結果であり、実験結果と一致している。対策工の安定性が高い条件で断面別諸元係数 p が大きな値をとる。

4. マウンド構造物が伝達波に与える影響

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と、越波伝達波はマウンド構造物に衝突し

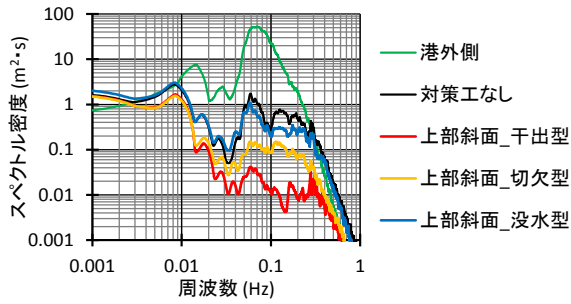


図-9 周波数スペクトル (対策工なしと上部斜面構造)

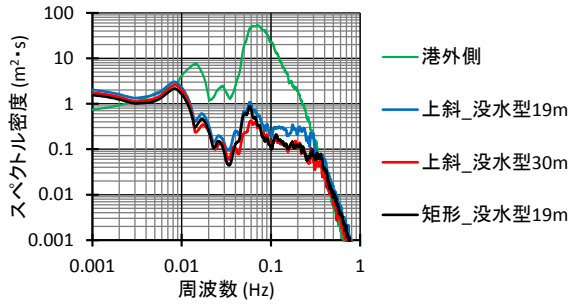


図-10 周波数スペクトル (上部斜面と矩形の没水型)

てから港内に伝播する。そのため、長周期波対策工なしと比べて伝達波を小さくする効果が期待される。

防波堤港外側と港内側のFFT法による周波数スペクトルを図-9および図-10に示す。マウンド構造物被覆材の大きさは8t型である。港外側は造波板前面の水深が十分に大きい地点で、港内側は防波堤法線から100m地点である。港外側では波周期の13.0sに対応する周波数のエネルギーが大きい。図-9において対策工なしは港外側と比べると明らかにエネルギーが小さいが、0.3Hz以上は港外側よりやや大きい。また、低周波数成分を除く対策工なしのピーク周波数は、港外側のピーク周波数とほぼ同じである。上部斜面_没水型は対策工なしよりエネルギーがやや小さい。切欠型は全周波数帯で没水型よりエネルギーが小さく、干出型はさらに小さい。干出型は静水面上に露出した被覆材に越波伝達波が作用するので被覆材の安定性に対して厳しい条件であるが、干出した被覆材に越波伝達波が作用することで、その他構造よりエネルギーの減殺効果が大きいと言える。図-10において、上部斜面_没水型の天端幅19mよりも天端幅30mのエネルギーが小さいことから、港内側の消波工の天端幅が広いほど越波伝達波のエネルギー減殺効果が大きい。上部斜面_没水型の天端幅19mと矩形_没水型の天端幅19mを比べると、矩形のエネルギーが上部斜面より小さい。マウンド構造物の条件は同じなので、天端高+6.3mの上部斜面構造より天端高+5.2mの矩形構造の伝達波のエネルギーが小さいと言える。なお、マウンド構造物の天端が静水面より高い干出型と切欠型は周波数が0.01Hz以下

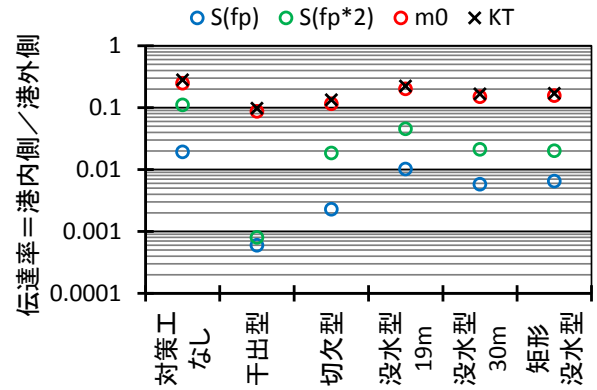


図-11 波エネルギー等の伝達率

の長周期成分についても対策工なりよりエネルギーが小さくなっているが、没水型は長周期成分のエネルギーを小さくする効果がない。長周期波対策としてのマウンド構造物は航路などの開口部から侵入する長周期波の反射波を抑制する構造物であるので、越波伝達波による長周期波が低減されないことは問題ない。

波エネルギー等の伝達率を図-11に示す。 $S(f_p)$ は港外側の周波数スペクトルのピーク周波数である0.706Hzのエネルギーの伝達率であり、その伝達率をピーク周波数伝達率と称す。港外側では $S(f_p)=52.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ である。 $S(f_p*2)$ はピーク周波数の2倍周波数のエネルギー伝達率であり、港外側は $S(f_p*2)=5.82 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ である。 m_0 は水位の2乗平均で算定した波の総エネルギーの代表値であり、その伝達率をエネルギー伝達率と称す。港外側では $m_0=1.72 \text{ m}^2$ である。 K_T は伝達波の波高と防波堤法線位置の通過波高の比であり、その伝達率を波高伝達率と称す。港外側では $H_{1/3}=5.70 \text{ m}$ である。港内側は防波堤法線から100m地点の値を用いた。ピーク周波数伝達率とエネルギー伝達率は分母が造波板前面であるが、波高伝達率は分母が防波堤法線位置である点が異なる。

ピーク周波数伝達率はエネルギー伝達率及び波高伝達率より1から2桁小さい値であるが、マウンド構造物の形状による伝達率の違いはほぼ同じ傾向である。2倍周波数伝達率はエネルギー伝達率とピーク周波数伝達率の中間的な値であるが、干出型はピーク周波数伝達率とほぼ同じ値である。したがって、干出型はその他のマウンド構造物より伝達波のエネルギーを減殺する周波数帯が広いと言える。伝達率はいずれの項目も対策工なしが最も大きく、マウンド構造物を設置した断面は全て対策工なしより伝達率が小さい。したがって、マウンド構造物を設置すると港外側から港内側への伝達率が小さくなると言える。マウンド構造物ありでは、伝達率の小さい順に、干出型、切欠型、没水型である。被覆材の安定性で被害率が大きい順序は、干出型、没水型、切欠型なので、伝達率と安定性の順序に違いを生じている。切欠型は越

波伝達波の作用頻度が高い位置, すなわち図-3において洗掘を生じる位置に被覆材がなく, ケーソン壁とマウンド構造物の間の遊水部に水塊が打ち込むことで波エネルギーが減衰していると考えられる. 没水型の天端幅 19m と 30m では, 30m の伝達率が小さい. 一般にマウンド構造物の幅を広げると長周期波の反射率が小さくなるということが知られているので, マウンド構造物の幅を広げると, 反射率と港外側からの伝達率の双方が小さくなると言える. 矩形本体工と没水型の天端幅 19m の組み合わせは, 上部斜面本体工と没水型の天端幅 30m と伝達率がほぼ同じなので, 伝達率抑制効果がほぼ一致している.

5. おわりに

長周期波対策工として防波堤の港内側に設置するマウンド構造物の, 越波伝達波に対する被覆材の安定性を二次元水理模型実験で検証した.

矩形構造防波堤の港内側に設置するマウンド構造物の被覆材の安定性は, 田中ら⁴⁾の結果と概ね一致した.

防波堤本体工が上部斜面構造の場合には, 矩形構造よりも港内側マウンド構造物の越波伝達波に対する安定性が厳しい. したがって, 港内側マウンド被覆材の安定数 N_S は, 防波堤本体工が矩形構造よりも上部斜面構造の場合に小さな値となる.

マウンド構造物被覆材の天端高を静水面と一致させた没水型は, 天端が静水面より高い干出型よりも被覆材の安定性が高い.

上部斜面構造の防波堤港内側に設置するマウンド構造物は天端の高さにより洗掘の範囲が異なり, 干出型と比べて没水型は洗掘の範囲が広く, 洗掘の深さが浅い.

静水面上の防波堤上部工天端高 h_c と設計波高 H_D の比が $h_c/H_D=0.8$ と条件が限定的ではあるが, 防波堤港内側に設置するマウンド構造物の被覆材の越波伝達波に対する

安定数 N_S 値を算定する係数を提案した.

防波堤の港内側に長周期波対策のマウンド構造物を設置すると, 越波伝達波がマウンド構造物に作用してエネルギーが減殺されるので, エネルギーの伝達率や波高伝達率がマウンド構造物なしより小さくなる. したがって, 港内側にマウンド構造物を設置すると上部工の天端高を低くすることができる可能性がある.

干出型のマウンド構造物は没水型より伝達率が小さくなるが, 被覆材の安定性は没水型より干出型が厳しい. 長周期波対策として防波堤の港内側にマウンド構造物を設置する場合には, 波高等の伝達率を小さくできることは副次的な効果であるため, マウンド構造物の形状や規模は長周期波の反射波抑制に対して決定するべきであると考えられる.

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) 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.
- 3) 早川哲也, 渡部靖憲, 鈴木孝信, 木村克俊, 土井善和, 工藤貴弘: 混成堤における越波水の打ち込み特性と被覆材の安定性, 海岸工学論文集, 第45巻, 土木学会, pp.691-695, 1998.
- 4) 田中真史, 松本朗, 半沢稔: 混成堤背面に適用した没水型長周期波対策マウンド構造物の越波に対する安定性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, I_664-I_669, 2013.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.1-1485, 2007.

EXAMINATION ON STABILITY OF WAVE ABSORBING MOUND SITUATED ON HARBOR SIDE OF SLOPING TOP BREAKWATER

Iwao HASEGAWA, Takashi OIKAWA, Keiji NAKAI and Takaharu FUKUDA

Wave absorbing mounds are constructed on the harbor sides of the breakwaters for reduction of reflection of long-period waves. Armor units of wave absorbing mounds constructed on the harbor sides have to be stable for wave overtopping. In this study, the stability of the armor units of wave absorbing mounds constructed on harbor sides of sloping top breakwaters and rectangular ones for wave overtopping are compared by hydraulic model experiments. The armor units of wave absorbing mounds with the sloping top breakwaters are more unstable than with the rectangular ones. When the crest of the wave absorbing mound is higher than water surface, armor units are more unstable than when the crest is the same height as the water surface. But in this case, the transmission coefficient of overtopping wave is smaller than in case of submerged mounds.