うねりに対する港内側没水型対策工の 消波性能に関する検討

菅 章悟¹・三井 順²・久保田 真一³・松本 朗⁴

¹ 正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7)
E-mail: shogo.suga@fudotetra.co.jp

² 正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7)
E-mail: jun.mitsui@fudotetra.co.jp

³ 正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7)
E-mail: shinichi.kubota@fudotetra.co.jp

⁴ 正会員 株式会社不動テトラ 総合技術研究所 (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町 2-7)
E-mail: akira.matsumoto@fudotetra.co.jp

長周期波あるいは風波・うねりに対する港内静穏度対策として港内に消波構造物を設置する方法がある。その対策構造形式として天端が静水面に位置する没水型が提案されているが、風波・うねりに対する荷役限界波高における反射波抑制効果は明らかでない。本研究では、比較的周期が長い風波を対象とし、荷役限界波高を含む検討対象波高に対して没水型の反射波抑制効果について検討するとともに、越波に対する消波ブロックの安定性についても検討した。

没水型は荷役限界波高を含む検討対象波高に対し、天端が静水面より高い干出型よりも反射波抑制効果が高いことがわかった。また、精度の良い所要構造物幅の算定方法を明らかにした。さらに、本研究の検討条件における消波ブロックの所要質量算定法を求めた。

Key Words : *wind waves, submerged wave absorbing structure, wave reflection, stability against wave overtopping, hydraulic model experiment*

1. はじめに

多くの港湾において、長周期波あるいは風波・うねりを起因とした係留船舶の動揺による荷役障害が問題となっている。その対策として港内に消波構造物を設置する方法がある。

長周期波を対象とした消波構造物の検討は田中ら¹⁾によって行われており、構造物の天端が静水面より高い構造形式（以下、干出型とする）よりも構造物の天端が静水面に位置する構造形式（以下、没水型とする）の方が、長周期波を効率よく消波できることを明らかにしている。

一方、風波・うねりを対象とした消波構造物の検討は上久保ら^{2),3)}により行われている。消波ブロック被覆堤において、段階的に消波工の天端高さを下げた場合の反射率の変化について検討しており、消波工の天端が静水面付近に位置する場合に反射率が小さくなる傾向にあることを示した。しかし、検討対象とした波高は2m以上であり、港内長周期波影響評価マニュアル⁴⁾に記載されている荷役限界波高（0.2m～0.5m）における反射率は不明である。

そこで本研究では、比較的周期が長い風波（以下、うねりとする）を対象とし、荷役限界波高を含む検討対象波高に対して没水型の反射波抑制効果について検討した。さらに、うねりに対する断面諸元と反射率の関係を整理して所定の反射率に対する構造物幅の算定方法を提案するとともに、越波に対する消波ブロックの安定性についても検討した。

2. 実験条件

(1) 実験方法

実験には、長さ 50m、幅 1.0m、高さ 1.3m の二次元造波水槽を用いた。図-1 に示す通り、水槽内に 1/30 勾配の模型床を設け、造波板より 27m の位置に堤体を設置した。実験波は不規則波とし、その理論スペクトルは修正 Bretschneider-光易型スペクトルとした。波浪条件は、現地量で周期 $T_{1/3}$ を 10s, 15s, および 20s, 波高 $H_{1/3}$ を 0.25m から 4.0m 程度（以下、数値は全て現地量）とし、1 波群 250 波以上を作用させた。反射率の測定位置はケーソン

図-1 造波水槽模式図 (模型量)

図-2 検討断面図 (現地量: 単位 m)

前面から1波長以上離れた位置とした。反射率 K_R は合田ら⁵⁾の入・反射波分離推定法を適用して求めた。実験縮尺は1/53.9である。

(2) 検討断面

検討対象断面は図-2に示すように干出型と没水型とし、ケーソン前面位置の水深 h を16.05mとした。消波ブロックはテトラポッド10t型を用いた。消波ブロックの反射率 K_R は一般的に0.3~0.5程度である⁶⁾。そこで、最も短い周期である $T_{1/3}=10$ sの時の反射率 K_R が0.3程度を満たすように構造物幅 B (静水面における構造物幅)を設定した。その際、干出型においては谷本ら⁷⁾を、没水型においては上久保ら²⁾を参照した。干出型の反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$ ($L_{1/3}$ は波長)の関係を図-3に示す。これより、相対天端幅 $B/L_{1/3}$ は0.11程度となる。また、没水型の反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の関係を図-4に示す。これより、相対天端幅 $B/L_{1/3}$ は0.10程度となる。よって、干出型の所要構造物幅は12.30m、没水型は11.18mとなる。実験断面における構造物幅 B は、上記の所要構造物幅を満たすように設定した。干出型の天端幅を消波ブロック4個並び(8.10m)とし、没水型の天端幅を6個並び(12.50m)とすることで、干出型および没水型の構造物幅 B は13.73mおよび12.50mとなる。

3. 実験結果

(1) うねりに対する効果的な対策工の検討

図-5に各周期における干出型および没水型の反射率

 図-3 反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の関係 (谷本ら⁷⁾)

 図-4 反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の関係 (上久保ら²⁾)

図-5 反射率 K_R と波高 $H_{1/3}$ の関係

図-6 反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$

図-7 反射率 K_R と波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ の関係

K_R と波高 $H_{1/3}$ の関係を示す。干出型と没水型の反射率 K_R を比較すると、荷役限界波高を含む検討対象波高に対して没水型の反射率 K_R が小さいことがわかる。構造物幅 B は干出型の方が大きいにもかかわらず、よりコンパクトな没水型の方がうねりに対する反射波抑制効果が高いことが示された。干出型および没水型ともに、周期 $T_{1/3}$ が長くなるに伴い反射率 K_R が大きくなる傾向は共通である。波高 $H_{1/3}$ の増大に伴う反射率 K_R の変化の傾向については、干出型では減少傾向を示しているが、没水型は波高 $H_{1/3}$ が 1.0m 程度までは減少傾向を示すものの、その後は概ね一定となっている。

没水型の方が干出型に比べ反射波抑制効果が高いメカニズムについては、長周期波を対象とし三井ら⁸⁾が明らかにしている。没水型は天端部の広い範囲でエネルギーを消費することで高い消波性能を得られることが示されており、うねりについても同様のことが起きていると考えられる。詳細は三井ら⁸⁾を参照されたい。

(2) 断面諸元と反射率の関係

図-6 は図-5 に示した干出型および没水型の結果を水深波長比 $h/L_{1/3}$ を用いて反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の関係で示したものである。相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の増大に伴い反射率 K_R が小さくなることがわかる。また、没水型は相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の増大に伴い波高 $H_{1/3}$ の違いによる反射率 K_R のばらつきが大きくなるが、干出型はあまり変わらない。図-7 は相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の増大に伴い波高 $H_{1/3}$

図-8 反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の関係の比較

の違いによる反射率 K_R のばらつきが大きくなる没水型に着目して、各水深波長比 $h/L_{1/3}$ における反射率 K_R と波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ の関係を示したものである。波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が概ね 0.01 以下の比較的小さい範囲において波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ の増大に伴い反射率 K_R は減少し、その後、概ね一定となるのは共通である。波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ の増大に伴う反射率 K_R の減少の程度は、水深波長比 $h/L_{1/3}$ が大きいほど顕著である。

図-8 に没水型における本研究および上久保ら^{2), 3)}の反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の関係を示す。本研究の結果は、波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ の増大に伴い反射率 K_R が減少する範囲である 0.01 以下のものと反射率 K_R が概ね一定となる範囲である 0.01 より大きい範囲のものと分けて示している。また、上久保ら²⁾は波高 $H_{1/3}=3.5\text{m}$ における反射率

K_R 、上久保ら³⁾は波高 $H_{1/3}=3.0\text{m}$ における反射率 K_R であり、両者ともに波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ は 0.01 より大きい条件である。なお、上久保ら²⁾と上久保ら³⁾では波高 $H_{1/3}$ だけでなく水深波長比 $h/L_{1/3}$ も異なっている。各実験とも相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の増大に伴い反射率 K_R は減少しており、共通の傾向を示している。しかし、相対天端幅 $B/L_{1/3}$ が同じとき、水深波長比 $h/L_{1/3}$ が大きいほど反射率 K_R が小さくなる傾向が見られる。

田中ら¹⁾は長周期波を対象とした検討において、波の場を長波近似すれば流速は水深方向に一定であるため、水深（消波工の厚さ）が構造物の消波特性に影響を与えるものと考えた。図-9に示すように構造物幅を構造物断面の没水部をそれと等しい高さの矩形に置き換えたときの幅 B^* と定義し、反射率 K_R と B^*/L (L は波長) の関係から構造物幅を精度よく算定できること示した。

本研究および上久保ら^{2),3)}の $h/L_{1/3}$ を確認すると、いずれの実験条件も長波領域 ($h/L_{1/3} < 1/20$) ではなく浅海波領域 ($1/20 \leq h/L_{1/3} \leq 1/2$) であるため、水深方向の流速は一定でないものの海底面の流速は 0 とはならない。よって、水深の違いによる構造物の大きさが水深波長比 $h/L_{1/3}$ の違いによる反射率 K_R の違いに影響していることが考えられることから、田中ら¹⁾を基に反射率と $B^*/L_{1/3}$ の関係で再整理した。その結果を図-10に示す。反射率 K_R を相対天端幅 $B/L_{1/3}$ で整理した図-8と比較すると、 $B^*/L_{1/3}$ で整理した方が $h/L_{1/3}$ の違いによる反射率 K_R のばらつきが小さいことがわかる。このことから、反射率 K_R と $B^*/L_{1/3}$ の関係を用いて所要構造物幅を算定した方が精度は良いと考えられる。

なお、上久保ら^{2),3)}は波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が 0.01 より大きい条件の結果であるため、波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が 0.01 以下の場合における反射率 K_R は図-8および図-10に示す値よりも大きくなる懸念がある。そのため、波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ が 0.01 以下を対象として所要構造物幅を定める際は留意する必要がある。

(3) 反射波の特性

反射率測定位置における干出型および没水型の反射波の周波数スペクトルを図-11に示す。波は周期 $T_{1/3}$ が 15s,

波高 $H_{1/3}$ が 0.5m, 2.0m および 3.5m である。没水型は波高が大きくなるにつれて周波数 0.125Hz 付近のエネルギーが発生しているが、干出型は見られない。波作用状況を確認すると、没水型は波高が大きくなるにつれてケーソン前面に衝突した波が打ち上がり反射するが、干出型は確認されなかった。よって、没水型は来襲した波がケーソン前面に作用し、作用した波が打ち上がり反射することが要因となり高周波のエネルギーが発生したと考えられる。このように干出型と没水型では反射してくる波の特性が若干異なっている。

4. 越波に対する消波ブロックの安定性

(1) 検討方法

前述したように、没水型における消波構造物の所要構造物幅は反射率 K_R と $B^*/L_{1/3}$ を用いて算定することがで

図-9 B^* の定義

図-10 反射率 K_R と $B^*/L_{1/3}$ の関係

図-11 反射波スペクトル

きる。しかし、防波堤の港内側に適用する場合、港外からの越波に対する消波ブロックの安定性についても検討する必要がある。防波堤前面における消波ブロックの所要質量の算定方法としては、一般的に安定数 (N_s 値) を用いたハドソン式 (式 (1)) が用いられている。

$$M = \frac{\rho_r H_D^3}{N_S^3 \left(\frac{\rho_r}{\rho_w} - 1 \right)^3} \quad (1)$$

ここに、 M : 消波ブロックの所要質量、 ρ_r : コンクリートの密度、 ρ_w : 海水の密度、 H_D : 設計波高、 N_S : 消波ブロックの安定数である。田中ら⁹⁾は矩形構造の消波ブロック被覆堤背後の没水型マウンド構造物において、被覆材にテトラポッドを用いた場合の越波に対する所要質量算定手法として、前面被覆材の N_S 評価式に越波による安定数の割増係数を取り込む方法を提案している（式(2)）。

$$\left\{ \begin{array}{l} N_S = C_H \left\{ p \left(\frac{N_0}{N^{0.5}} \right)^r + q \right\} \\ p = 2.32k_s, \quad q = 1.33k_b, \quad r = 0.2k_s \end{array} \right. \quad (2)$$

ここに、 C_H ：碎波効果係数 ($1.4 / (H_{1/20}/H_{1/3})$)、 $H_{1/20}$ ：堤体前面から $5H_{1/3}$ 沖での $1/20$ 最大波高)、 N_0 ：被覆材の被災度、 N ：波数、 p 、 q および r ：断面諸元別係数、 k_a 、 k_b および k_c ：安定数の割増係数である。そこで、本検討では越波に対する消波ブロックの安定実験を行い、田中ら⁹⁾の手法に倣い実験結果を整理し、本研究の検討条件における所要質量の検討を行った。

(2) 実験方法

実験には、長さ 50m、幅 1.0m、高さ 1.3m の二次元造波水槽を用いた。水槽内の 1/30 勾配の模型床上に防波堤を設置した。検討断面を図-12 に示す。港内側の消波工の天端幅 B_M (構造物幅 B) は、消波性能の検討の際に用いた幅である $B=12.50\text{m}$ を満たす消波ブロック天端並び個数とした。また、ケーソン前面位置の水深 h は、潮位が消波性能の検討に用いた潮位 (港内側の消波工の天端位置) から一般的に防波堤の設計の際に用いられる朔望平均満潮位 (H.W.L.) まで上がったと仮定して $h=16.50\text{m}$ とした。そのため、港内側の消波工の天端より静水面が高い条件となっている。波浪条件は不規則波とし、設計波高を $H_D=8.5\text{m}$ 、周期を $T_{1/3}=13\text{s}$ とした。よって、防波堤の天端高さ h_c に対する設計波高 H_D の比は $h_c/H_D=0.59$ となる。実験波は段階的に増加させ、 $0.6H_D \sim 1.2H_D$ となる波高 $H_{1/3}$ を作用させた。なお、同一波高ランクにおける作用波数 N は 1000 波とした。波高ランクごとの消波工の修復は行わず、消波ブロックの被害は累計で算定した。ブロックの被災判定基準はブロックの大きさの 1/2 程度以上の移動または 45° 程度以上の回転とした。実験

図-12 越波実験における検討対象断面（現地量：単位 m）

図-13 N_s/C_H と $N_0/N^{0.5}$ の関係の実験値と計算値の比較

縮尺は 1/53.9 である.

(3) 実験結果

図-13 に N_g/C_H と $N_0/N^{0.5}$ の関係を用いて実験値および計算値を示す。なお、計算値は以下の方法で求めたものである。まず、田中ら⁹⁾が提案している安定数の割増係数を用いて外挿することで、本研究の検討条件における安定数の割増係数を求めた。そして、その係数を用いて式(2)より計算値を求めた。実験値と計算値の安定性を比較すると、実験値の方が計算値に比べ安定性が高い。両者の検討条件を比較すると、田中ら⁹⁾は消波ブロック2層被覆形式で天端と静水面が一致しているのに対し、本研究では全断面被覆形式で天端よりも静水面の方が高い条件である。このことから、実験値の安定性が高くなった要因として、全断面被覆形式であることと天端よりも静水面が高いことによるウォータークッション効果が考えられる。

実験値と計算値が異なっているため田中ら⁹⁾の手法に倣い、実験値を基に安定数の割増係数を定めて式(2)より計算値を求めた。その結果を図-14に示す。本来であれば、図-13に示すように B_M/H_D に応じた計算値が得られることが予想される。しかし、本研究の B_M/H_D が異なっているのは、港内側の消波工の天端幅 B_M が基準とした幅を満たす消波ブロック天端並び個数とした影響であり、その幅は12.50mの1種類である。このように、1種類の基準とした天端幅に対する限定的な実験であり、また、被災箇所がどのケースにおいても法肩付近と同様

であったため、本研究では1つの計算値が得られるものと仮定して求めている。図-14の計算値を用いて、設計波高 $H_D=8.5\text{m}$ 、波数 $N=1000$ に対する今回の防波堤条件における港内側消波工の所要質量 M を求めると、被災度 $N_0=0.3$ とすれば $M=46.34\text{t}$ 、被災度 $N_0=1.0$ とすれば $M=32.47\text{t}$ となる。

5. おわりに

本研究では、長周期波に対して反射波抑制効果が高いとされる没水型について、うねりに対する消波効果および越波に対する消波ブロックの安定性に関する検討を行った。主要な結論を以下に示す。

- (1) 荷役限界波高を含む検討対象波高に対し、没水型は干出型に比べ反射率 K_R が小さく、長周期波だけではなくうねりに対しても反射波抑制効果が高いことがわかった。
- (2) 没水型の所要構造物幅 B は、反射率 K_R と相対天端幅 $B/L_{1/3}$ の関係を用いて算定するよりも反射率 K_R と $B^*/L_{1/3}$ の関係を用いて算定した方が精度よく算定できる。
- (3) 越波に対する消波ブロックの安定実験を行い、今回の検討条件における所要質量算定線を求めた。

参考文献

- 1) 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, pp.I_816-I_821, 2012.
- 2) 上久保勝美, 山本泰司, 長谷一矢: 港内消波工の天端幅および高さが反射率におよぼす影響, 第54回北海道開発技術研究発表会, 2011.
- 3) 上久保勝美, 酒井和彦, 林誉命: 港内消波工の反射波

図-14 N_S/C_H と $N_0/N^{0.5}$ の関係

特性について, 第57回北海道開発技術研究発表会, 2014.

- 4) 沿岸技術研究センター: 港内長周期波影響評価マニュアル, 86p, 2004.
- 5) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊地治: 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) 合田良実: 耐波工学, 430p, 鹿島出版会, 2008.
- 7) 谷本勝利, 原中祐人, 富田英治, 和泉田芳和, 鈴木諭司: 曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第19巻, 第4号, 53p, 1980.
- 8) 三井順, 菅章悟, 久保田真一, 松本朗, 半沢稔: 没水型長周期波対策マウンド構造物の消波メカニズムに関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_895-I_900, 2016.
- 9) 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, pp.I_664-I_669, 2013.

(2017.2.2 受付)

EXPELIMENTAL STUDY ON WAVE ABSORBING PROPERTIES OF SUBMERGED TYPE WAVE ABSORBING STRUCTURES FOR WIND WAVES

Shogo SUGA, Jun MITSUI, Shin-ichi KUBOTA and Akira MATSUMOTO

In many ports, it has been reported that long-period waves and wind waves cause trouble in cargo handling. As a countermeasure to this, wave absorbing structures installed on the harbor side are employed. For long-period waves, we have already proposed submerged type wave absorbing structure and shown that it works effectively. However, the effectiveness of submerged type for wind waves is unclear.

In this study, a series of hydraulic model experiments was conducted to evaluate the wave absorbing performance of the submerged structure for wind waves. Furthermore, the stability of wave dissipating concrete blocks used for the submerged structure was examined. Throughout this study, it become clear that submerged structures display a higher wave absorbing performance for wind waves than conventional structure whose crown is situated above the still water level. Finally, methods to estimate the required crown width and the mass of wave dissipating concrete block are proposed.