没水型長周期波対策工の 消波特性に関する実験的検討

田中 真史¹・松本 朗²・半沢 稔³

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:masashi.tanaka@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:akira.matsumoto@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:minoru.hanzawa@fudotetra.co.jp

多くの港湾で長周期波による荷役障害が問題となっている。対策の一つとして、防波堤背面に設置されるマウンド構造物が提案されているが、既存断面の構造物幅は30 m以上であり、断面の小型化が求められている。本論文では、既存の干出型マウンド構造物よりも小型の長周期波対策工を提案する目的で、天端が静水面に位置する没水型断面の消波特性を水理模型実験により明らかにした。

没水型は干出型より長周期波の反射率を低減でき、特に消波ブロック二層被覆形式はその効果が安定的であった。例えば水深10 m、周期60秒の条件において、干出型の構造物幅30 mの場合と同等の反射率となる没水型の所要構造物幅を計算すると、約16 mとなった。これにより、工費の縮減および水域の狭隘な中小港湾への適用性の向上が実現するものと思われる。

Key Words : long-period wave, submerged wave absorbing mound, hydraulic model experiment

1. はじめに

多くの港湾においてしばしば係留船舶の動揺が起こり、荷役作業が非効率になるばかりでなく、岸壁との接触事故や係留索の切断事故も報告されている¹⁾。このため利用者は作業の中断を余儀なくされており、現状は不安定かつ不経済といえる。船体動揺の支配的要因は、主に港外から侵入する長周期波、あるいは港内で多重反射した長周期波と考えられており、比較的小さな波高でも水平方向の長周期動揺が起こる。中でもサージングの固有周期は一般に極めて長いため、長周期波と共振して動揺量が大きくなりやすく、波高0.5 m程度以下で最大振幅8 mの大きな長周期動揺が確認された例もある²⁾。なお、長周期波の周期は30秒から300秒と定義³⁾されるが、これまでに各地の現地観測^(例えば2,4,5)により確認された周期(ピーク周期)は、200秒程度以下が多い。

港内長周期波に対する抜本的な対策としては、防波堤の延伸や港内消波構造物の設置が考えられるが、防波堤の延伸は閉じられた水域を形成することとなり、新たな係留障害を及ぼす可能性があるため、詳細な検討が必要

である⁶⁾。ここでは、閉じられた水域を形成することなく、実施にあたる期間と費用を比較的抑えることができる港内消波構造物について、防波堤背面(港内側)への適用を想定して検討を行う。この類の研究は従来からなされており、例えば池野ほか⁷⁾は前面スリットの透水室と、孔のある隔壁を挟んで設けられた遊水室からなる直立消波構造物を考案し、全幅約60 mで周期60秒に対して反射率0.7程度となることを実験と数値解析で確認している。さらに大島・森屋⁸⁾は、導水板で渦を発生させてエネルギーを低減させることを特徴とするスリット構造物について実験を行い、幅約30 mでも池野らの断面と同等の消波性能を有するとしている。一方、より即時的な港内静穏度の向上を目的として、マウンド形式の断面の検討もなされており、例えば小澤ほか⁹⁾、山田ほか⁹⁾は捨石マウンドによる透過構造を検討し、堤体幅30 mで、周期80秒に対しても反射率0.9程度との結論を得ている。また、同様の透過構造による対策が既に実施されている秋田港や苫小牧港¹⁰⁾においては、現地観測を基にその効果が確認されている。しかしながら、構造形式によらず構造物幅(静水面上の幅)は何れも30 m以上であり、

図-1 造波水槽模式図 (模型量, 単位: m)

図-2 検討断面図 (現地量, 単位: m)

さらなる断面の小型化による適用性の向上が求められる。

そこで本検討では、既存の断面よりも小型の長周期波対策工を提案する目的で、水理模型実験により捨石マウンドに被覆材を配した構造物の消波特性を調べた。具体的には、既存の干出型に対して、対策工の天端における波高減衰効果を期待し、天端が静水面に位置する没水型の消波特性を明らかにした。

2. 実験条件

(1) 実験方法

実験には、長さ50 m、幅1.0 m、高さ1.5 mの二次元造波水槽を用いた。図-1に示すとおり、水槽内に長さ27 mの水平床を設け、港内の一様水深部を再現した。入射波は現地量（以下、数値は全て現地量）で周期30秒から120秒、波高0.25 mから1.5 m程度までの規則波とした。反射率の解析に用いた容量式波高計は、水平床の中間に波高 L の1/4の間隔で設置した。反射率は合田ほか¹¹⁾の入・反射波分離推定法を適用して求めた。縮尺は1/50である。

(2) 検討断面

図-2に示すとおり、検討断面は既存の干出型、および天端が静水面に位置する没水型の断面とした。干出型は非越波条件とするため、静水面上の天端高を5 mと十分高く設定した。マウンドを基礎捨石（50～200 kg/個）で形成し、被覆層に用いる材料の種類や大きさを変えて実験を行った。すなわち、干出型については被覆石（1 t内外）および消波ブロック（8 t型）の二層被覆とした。没水型については、この他に消波ブロック（2 t、16 tおよび

図-3 波高と反射率の関係

び32 t型) 二層被覆と被覆ブロック（2 t型）とした。没水型の8 t型消波ブロック二層被覆形式の断面については、適用範囲を確認するため、水深7 mから16 mまで4段階、また水深10 mに対して構造物幅15 mおよび30 mに変えて実施した。

3. 実験結果

(1) 干出型および没水型の消波特性

図-3に、干出型および没水型について、被覆層に被覆石と8 t型消波ブロックをそれぞれ二層被覆で用いたときの波高と反射率の関係を周期別に示す。被覆材の種類によらず、同一の周期に対して、没水型は干出型より反射率が低いことが分かる。なお、周期が長くなると反射率

図-4 被覆材別の周期と反射率の関係

図-5 消波ブロックの大きさによる周期と反射率の関係

は大きくなり、また、波高が増大すると反射率は小さくなる傾向については共通している。

(2) 最適な被覆材

没水型は干出型よりも長周期波の反射率を低減させることが分かった。ここでは、没水型について被覆材の種類や大きさを変えたときの消波特性を明らかにする。

図-4に、被覆石、2t型消波ブロックおよび2t型被覆ブロックをそれぞれ用いて被覆層を形成したときの、波高1.5m未満における周期と反射率の関係を示す。周期80秒程度以下では消波ブロックの反射率が低い。一方、周期80秒程度以上では被覆石および被覆ブロックの反射率が低いが、90秒を超えると被覆材によらず反射率約0.9に漸近するものと考えられる。従って、一定の幅を持つ周期帯に対して、安定的に反射率を低減させるのは、消波ブロックであるといえる。なお、被覆ブロックの反射率は周期によらず被覆石と同等であった。

同様に、消波ブロックの大きさを2t型から32t型まで4ケースに変えて図-5に示す。これは、主に港外側からの越波水塊に対して、安定性を確保するために相応の所要重量が求められる¹²⁾ことを想定したものである。なお、二層被覆としているため被覆層厚は異なる。ここに示すとおり、周期50秒程度以下ではブロックの大きい方が、また、50秒程度以上では逆に小さい方が反射率が低減されるといった特性が認められるが、全体の傾向はブロックの大きさによらないことが分かる。

図-6 水深と反射率の関係

(3) 潮位変化の影響

次に、潮位変化を想定して干出型と没水型の特性を比較する。干出型については被覆石で、また、没水型については8t型および32t型消波ブロックで被覆層を形成し、水深 h を10mから ± 1.5 mの範囲で変化させたときの反射率を図-6に示す。波高は0.5mおよび1.0mを対象とし、反射率はデータを線形近似して算出した。干出型の周期90秒以上については水深10mにおける実験値しかないので、周期60秒および75秒の値を外挿して予測値を求めた(図中点線)。図示のとおり、干出型の反射率は水深の増加に伴って緩やかに単調増加する一方、天端が静水面に位置する没水型は一部を除きV字形の分布を示し、 ± 1 mの範囲で干出型を超えることはほとんどなかった。また、この傾向は周期の比較的長いケースで弱まるが、波高やブロックの大きさによらず同様であった。すなわち、消波ブロック二層被覆形式の没水型は、天端を静水面に設定することで、 ± 1 mの潮位変化があっても干出型より反射率を低く抑えられることが確認された。

図-7 2種類の構造物幅における B/L と反射率の関係

図-9 2種類の構造物幅における B^*/L と反射率の関係

図-8 没水型マウンド構造物の模式図

(4) 断面諸元と反射率の関係

ここでは、没水型マウンド構造物の断面諸元と反射率の関係調べる。図-7は、構造物幅 B を15 mおよび30 mとしたときの、波高1.5 m未満における B/L (L は波長)と反射率 K_R の関係である。互いの近似曲線にずれが生じており、反射率が B/L で精度良く算定できないことが分かる。これは断面諸元として幅のみを考慮していることによる。長波近似では、流速は水深方向に一定であるため、水深(天端高)が構造物の消波特性に影響を与えるものと考えられる。そこで図-8に示すとおり、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^* を定義した(1式)。

$$B^* = B + 0.5\beta h \quad (1)$$

ここに、 B : 構造物幅、 β : 法面勾配、 h : 水深である。これを用いて、図-7の横軸に B^*/L をとって示したものが図-9である。図-7で認められたずれが解消され、構造物幅によらず反射率を B^*/L で算定できることが分かる。

次に、構造物幅30 mの断面において、水深を7 mから16 mまで4段階に変化させたときの B^*/L と反射率の関係を図-10に示す。対象波高は同様に1.5 m未満としている。若干のばらつきはあるものの、 K_R の実水深依存性は認められず、反射率は一般的な水深帯において B^*/L で算定可能であることが示された。

図-10 水深を変化させたときの B^*/L と反射率の関係

図-11 B^*/L を用いた反射率算定図

(5) 没水型長周期波対策工の所要構造物幅の試算

B^*/L と反射率の関係をj用いて、干出型の構造物幅30 mのときと同等の消波性能を発揮する没水型の所要構造物幅を試算する。既に述べたとおり、波高0.5 m程度以下において荷役障害が発生することが知られていることから、試算は波高0.5 m未満、周期60秒を対象とする。

図-11に、水深10 m、法勾配1:1.5、波高0.5 m未満にお

ける B^*/L と反射率の関係を示す。干出型の被覆層は被覆石（二層）、没水型は8字型消波ブロック二層被覆形式である。干出型の構造物幅（静水面上の幅）30 mとすれば $B^*/L=0.063$ となり、期待される反射率約0.86が図-11から求められる。没水型で同等の反射率となると、 $B^*/L=0.040$ となるため、所要構造物幅 B は約16mと試算できる。また、試算断面の概算工費は干出型の8割程度となった。なお、ここでは干出型の構造物幅30 mとの比較検討を行ったが、実際には、所望の反射率に対する所要構造物幅を直ちに算定すればよい。

4. おわりに

既存の干出型マウンド構造物よりも小型の長周期波対策工を提案する目的で、天端が静水面に位置する没水型断面の消波特性を水理模型実験により調べた。没水型は干出型より長周期波の反射率を低減でき、特に消波ブロック二層被覆形式はその効果が安定的であった。一定の条件において試算したところ、消波ブロック二層被覆形式の没水型長周期波対策工は、干出型のおよそ半分の構造物幅および約8割の工費で、同等の消波性能を発揮することが分かった。これにより、工費の縮減および水域の狭隘な中小港湾への適用性の向上が実現するものと思われる。

本研究では、検討条件は一般的となるように心掛けたが、適用範囲を広げるためには、数値流体解析による評価が望まれる。また、設計を効率的に実施するため、主に港外側からの越波水塊に対して安定となるブロック重量の適切な算定方法の検討が必要である。これらは今後の課題である。

参考文献

- 1) 関本恒浩：長周期波の設計への反映に関する取り組みの現状と課題，海洋開発論文集，第18巻，pp.167-172，2002.
- 2) 平石哲也，田所篤博，藤咲秀可：港湾で観測された長周期波の特性，港湾技術研究所報告，第36巻，第3号，pp.3-36，1996.
- 3) 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.
- 4) 平石哲也，藤咲秀可，近藤充隆，佐藤恒夫，山口孝市：鹿島港における長周期波の長期観測，海洋開発論文集，第13巻，pp.141-146，1997.
- 5) 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.
- 6) 平石哲也，平山克也：港湾における長周期波対策の現状と課題，海洋開発論文集，第18巻，pp.143-148，2002.
- 7) 池野勝哉，熊谷隆宏，森屋陽一，大島香織，関本恒浩：長周期波を対象とした直立消波構造物の開発，海岸工学論文集，第51巻，pp.731-735，2004.
- 8) 大島香織，森屋陽一：導水板によるスリット構造物の長周期波消波特性，海洋開発論文集，第21巻，pp.791-796，2005.
- 9) 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.
- 10) 松野健，矢野隆博，葛西弘行，山本泰司，平石哲也，木村克俊：苫小牧港西港区における長周期波対策工に関する現地観測，土木学会論文集 B2（海岸工学），第67巻，第2号 pp.1681-1685，2011.
- 11) 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，港湾技術研究所資料，No.248，24p，1976.
- 12) 田中真史，松本朗，半沢稔：天端が静水面に位置する混成堤背面マウンド構造物の越波に対する安定実験，土木学会年次学術講演会概要集，2012.（投稿中）

EXPERIMENTAL STUDY ON WAVE ABSORBING PROPERTIES OF SUBMERGED MOUND TYPE LONG-PERIOD WAVE ABSORBING STRUCTURES

Masashi TANAKA, Akira MATSUMOTO and Minoru HANZAWA

In many ports, it has been reported that long-period waves cause trouble in cargo handling. As a countermeasure to this, a wave absorbing mound installed on the harbor-side of the breakwater is proposed. The crown height of the mound is almost equal to that of the caisson. However, because of the low wave absorbing performance of such conventional structures, the required width to absorb the long-period waves becomes more than 30m. It is important therefore to reduce the size of the structure to apply to various site conditions. In this study, a submerged mound type long-period wave absorbing structure is proposed. A series of hydraulic model experiments was systematically and carefully carried out to evaluate the wave absorbing performance of the proposed structure.

Throughout this study, it became clear that submerged structures display a higher wave absorbing performance compared with those of conventional structures. In particular, the wave absorbing performance

of a two-layer covering of concrete armor blocks is significant. For example, under conditions where the water depth is 10m and the wave period is 60s, a 16m width submerged structure is equivalent to a 30m width conventional structure from the standpoints of wave absorbing performance. As a result, it can be expected that the proposed submerged structure would contribute to cost reduction. Such mound structures are particularly applicable to middle- and small-sized harbors.