

渦消波型長周期波対策構造物に関する研究

山下 徹*・中嶋さやか**・津田宗男***・榎 正浩****

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 五洋建設株式会社 技術研究所

*** 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター 水圏・環境技術グループ リーダー

**** 東洋建設株式会社 土木事業本部 土木技術部 課長

従来の長周期波対策施設とは全く異なる消波メカニズム（波から流れへのエネルギーの転化）を有する渦消波型長周期波対策構造物の設計法を研究し、共同研究報告書として取りまとめを行った。渦消波型構造物を鋼管矢板または直立消波ブロックを用いて築造することにより、従来の捨石式よりも工費や消波性能の面で有利になることを確認した。

キーワード：長周期波，残差流，循環流，設計法

1. はじめに

国内の多くの港湾では船舶が大型化するに伴い、港内係留船舶の長周期動揺の発生が顕在化しており、荷役の中断、係留索の切断、防舷材や船体の損傷の発生が報告されている。

現在、ハード面での長周期波対策としては、構造物による対策と係留系の改善などによる対策が実施されている。このうち、構造物による対策では、捨石による築堤や有孔ブロックと捨石を組み合わせた堤体などが適用されているが、これらは広い構造物幅を必要とすることや、波の反射率が0.9程度であることなど、十分に機能的な対策となっていないとまでは言えない。

このような背景から従来の構造とは全く異なる消波メカニズムを有する「渦消波型長周期波対策構造物」が開発されている。しかしながら、本構造物は設計法などに不明なところがあったこともあり、今のところ実用までには至っていない。そこで、当センターと五洋建設(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)の4者により多様な長周期波対策構造物を提供することを目的として渦消波型長周期波対策構造物の設計法を中心とした共同研究を行った。

2. 渦消波型長周期波対策構造物について

2.1 従来工法との比較

長周期波対策には、波浪予測によるソフト面の対策や、防波堤の新設や延伸、消波構造物の設置、係留系の改善などのハード面の対策が挙げられる。安全性を向上するにはソフト面の対策も十分に有効な手段となるが、荷役稼働率を向上させるには、港内の長周期波を構造物により低減し、港内静穏度を高めることが有効である。

港内の長周期波を低減する構造物としては、レキ・ブロックタイプの幅50m程度の消波構造物が実用化されて

いるが、航路や泊地のスペースを圧迫するといった短所も同時にかかえている。新しく開発された「渦消波型長周期波対策構造物」はその構造物幅が25m程度と従来の構造物に比べて所要幅が狭く、省スペース型の構造物である。図-1に各種構造物の構造物幅の比較を示す。

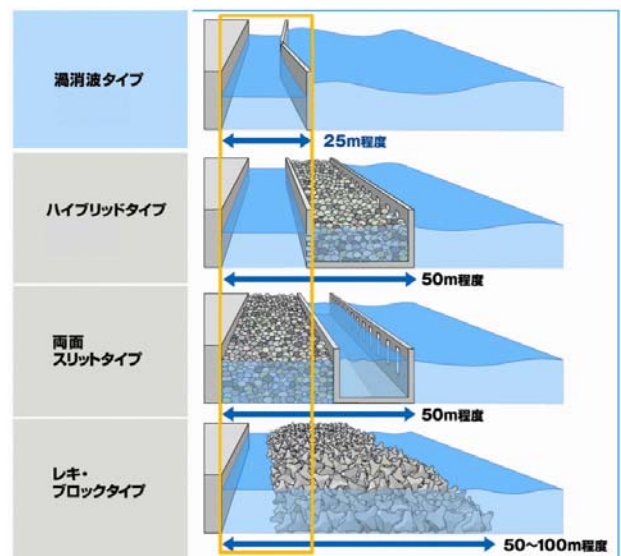


図-1 同一消波性能における各種構造物の構造物幅の比較

2.2 基本形状

渦消波型長周期波対策構造物は、1ユニットにつき、1対の導水板と導水板により構成されるスリット部、および仕切壁と背後壁に囲まれた遊水室により構成される。

ただし、本構造物は仕切壁の有無に関係なく波消性能を発揮することができ、必ずしも仕切壁を設ける必要はない。特に斜め入射波に対

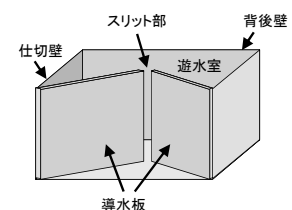


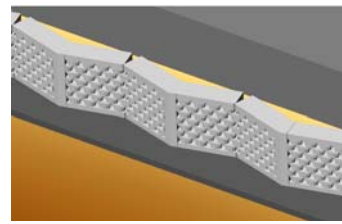
図-2 渦消波型長周期波対策構造物の基本形状

しては、仕切壁のない条件において、消波性能が向上することを水理模型実験により確認されている。

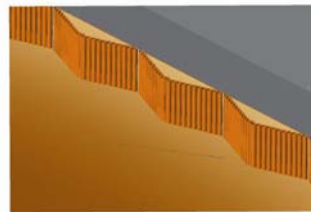
2.3 消波メカニズム

渦消波型長周期波対策構造物は、波の非線形性と構造物の形状効果によって、長周期波の波エネルギーの一部が流れエネルギーへと転化されるというメカニズムを利用して消波している。

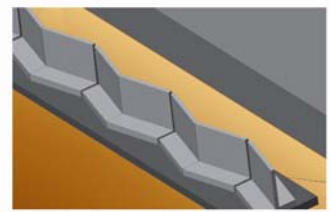
遊水室内では、①スリット部の水の流出入に伴う「変動流」と、②波の非線形性と構造物の形状効果により生ずる「残差流」が共存している。残差流は、定常的な流れ成分であり、遊水室内部を循環する循環流として存在している。長周期波は、その波エネルギーの一部が構造物前面のスリットを介して定常的な流れ成分（循環流）に転化されるため、これが結果として反射率の低下をもたらす。なお、この波から流れへのエネルギーの変換メカニズムは、海浜流や潮汐残差流の発生原理と同じである。



a) 直立消波ブロック式



b) 矢板式



c) 衝立型ブロック式

図-4 導水板の構造形式

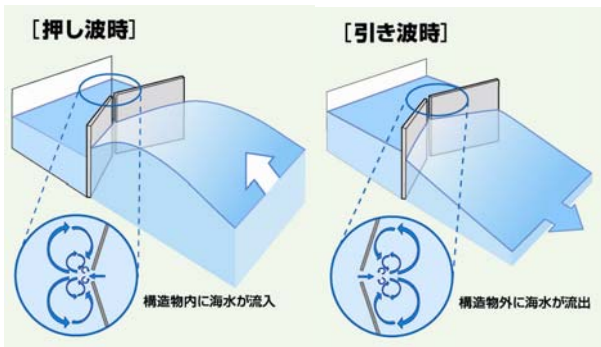


図-3 消波メカニズムの概念図

2.4 特徴

渦消波型長周期波対策構造物は、小さな構造物幅、シンプルな構造を特徴とする。

(1) 小さな構造物幅

同一性能を有する他構造物と比べ、その必要構造物幅が半分程度と小さく、省スペース型の構造物である。したがって、航路や泊地エリアへの影響が少なく、既存の港湾に対しても適応性が高い。

(2) シンプルな構造

既存の護岸などを背後壁として利用することにより、導水板の設置のみで構築することができる。導水板の構造形式については、水深や外力によって直立消波ブロック式、矢板式、衝立型ブロック式などが考えられる（図-4）。このうち直立消波ブロック式は、長周期波だけでなく短周期波に対しても有効な消波性能を発揮することができる。

対象波周期に対する各構造形式の適用範囲イメージを図-5に示す。

| 構造形式 | 適用範囲（周波帯） | |
|-----------|------------|------|
| | 長周期波 | 短周期波 |
| 直立消波ブロック式 | [適用範囲イメージ] | |
| 矢板式 | [適用範囲イメージ] | |
| 衝立型ブロック式 | [適用範囲イメージ] | |

図-5 構造形式ごとの適用範囲イメージ図

2.5 活用方法

遊水室は、上部を開放させて利用することができるほか、遊水室内に杭を打設して栈橋構造とすることにより護岸として利用することも可能である。

図-6は、護岸として利用した場合の遊水室上部の活用例であるが、防波堤を背後壁とした利用も可能である。

必要構造物幅が小さいため、航路・泊地への影響を抑えることができる。なお、遊水室内は浮遊ゴミが溜まる可能性があるため、定期的なメンテナンス、または対策等が必要となる。

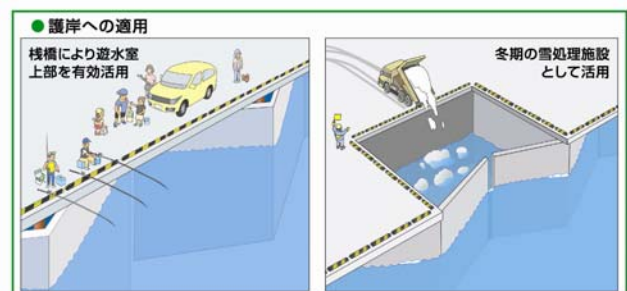


図-6 遊水室上部の活用例

3. 設計手法

3.1 設計手順

渦消波型長周期波対策構造物の設計にあたっては、消波の対象となる長周期波の周期（波長）、設置位置、設計水深、設計外力等の条件を設定する。次に、設計水深、設計外力に適した導水板の構造形式を選定し、目標とする消波性能を満足する構造物の諸元を設定する。最後に「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に従い、対象とする構造形式に対して適切な安定性照査を実施する。通常は、長周期波の波高は小さいため、これを作用としては考慮する必要は無く、通常の波浪および地震力等の作用に対して安定性能の照査を行えばよい。

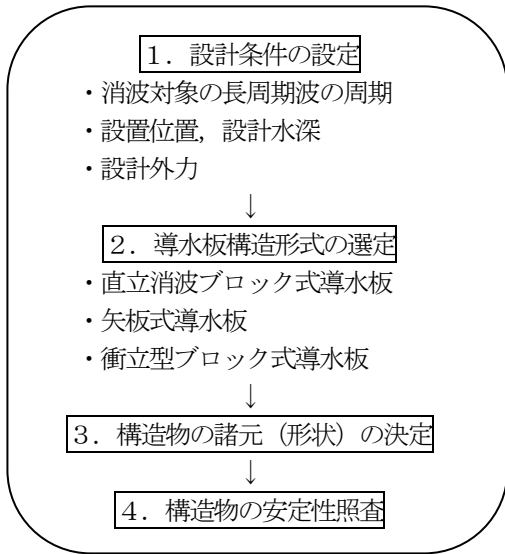


図-7 設計手順

3.2 構造物諸元と消波性能について

渦消波型長周期波対策構造物は、既往の構造物とは異なる消波メカニズムを有していることから、目標とする消波性能を満足させるために適切な諸元の設定が必要となる。ここでは、本構造物特有の消波メカニズムを踏まえた構造物諸元の設定方法について概説する。

(1) 構造物諸元の設定

構造物諸元は、図-8 に示すような手順に沿って設定する。各諸元の名称は図-9 に示すとおりである。

構造物諸元のうち、①導水板の板厚については、直立消波ブロック式や矢板式などの構造形式を踏まえて、不透過壁の厚み t を設定する (t の厚さについては、“構造物の安定性照査”において最終決定する)。②導水板設置角度や③スリット開口幅については、水理模型実験結果より、消波性能が向上する次の設定値を標準としている。

- ・導水板設置角度 : $\theta=15^\circ$
- ・スリット開口幅 : $\delta=0.75\sim 1.0\text{m}$

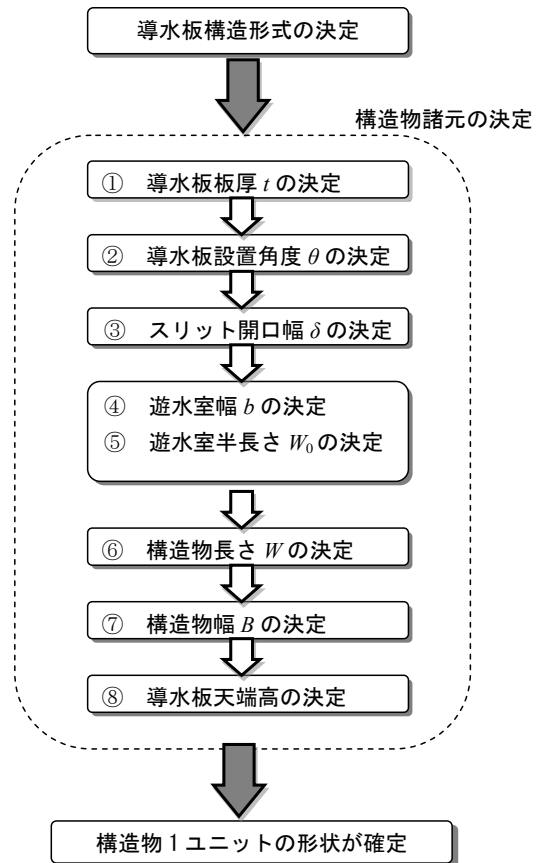


図-8 構造物諸元設定手順例

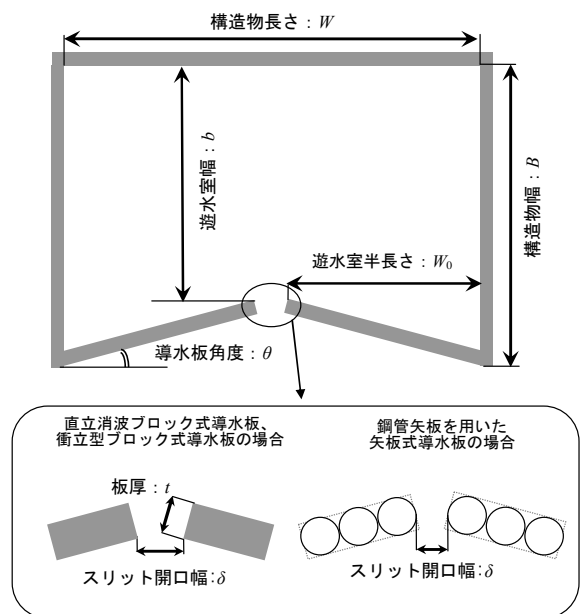


図-9 構造物諸元

④遊水室幅 b 、⑤遊水室半長さ W_0 については、まず図-10 を用いて、目標性能（反射率 K_r ）を満足する“遊水室幅 b と遊水室半長さ W_0 の積”を算出する。図-10 は、長周期波の波長 L で無次元化した遊水室幅 b/L と遊水室半長さ W_0/L の積（近似的に波長の2乗で無次元化した遊水室面積）を横軸として反射率との関係をあらわしたものであり、水理模型実験に基づき作成されたものである。次に、遊水室幅 b と遊水室半長さ W_0 それぞれについて、

式(1)および式(2)の制約条件を満足するように決定する。これらの制約条件は、構造物の消波性能が低下しないような範囲から諸元を選択できるようにするための条件であるが、このうち、式(2)については図-10のように無次元化した遊水室規模 bW_0/L^2 を用いて反射率との関係を整理できる範囲が、 $0.6 \leq b/W_0 \leq 2.4$ であったことによる。

式(1)の理由については後述する。

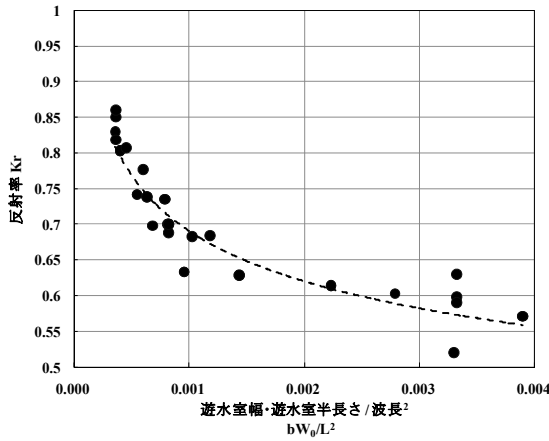


図-10 遊水室幅・遊水室半長さ/波長²と反射率 K_r の関係 (bW_0/L^2 と反射率 K_r の関係)

$$\frac{W_0}{\delta} \leq 0.3 \frac{L}{h} + 10 \quad (1)$$

$$0.6 \leq b/W_0 \leq 2.4 \quad (2)$$

⑥構造物長さ W 、及び⑦構造物幅 B は、図-9の構造物形状と既に設定している W_0 、 t 、 θ 、 δ 、 b より一義的に決まる。計算式は、式(3)、(4)のとおりである。

$$W = 2 \cdot (W_0 + t \cdot \sin \theta) + \delta \quad (3)$$

$$B = b + \frac{W - \delta}{2} \tan \theta + t \cdot \cos \theta \quad (4)$$

⑧導水板天端高は、来襲波浪や施工性を考慮し導水板を越流しない高さに設定する。

(2) 遊水室半長さ W_0 とスリット開口幅 δ の関係

スリット開口幅 δ に対して遊水室半長さ W_0 が著しく大きい場合、消波性能の低下が予測される。すなわち、所定の消波性能を期待するためには遊水室半長さ W_0 に対するスリット開口幅 δ の比 W_0/δ はある程度制限されると考えられる。

そこで、消波性能の低下がみられる条件を明瞭にする目的で W_0 と δ の関係を図-11のように整理した。

図-11に示すように、消波性能の低下(5~10%)がみられるものとそうでないものは、図中の直線(実線、破線)を境に区分けすることができ、これは式(5)で表される。

$$\frac{W_0}{\delta} \leq 0.3 \frac{L}{h} + A, \quad A = 10 \sim 12 \quad (5)$$

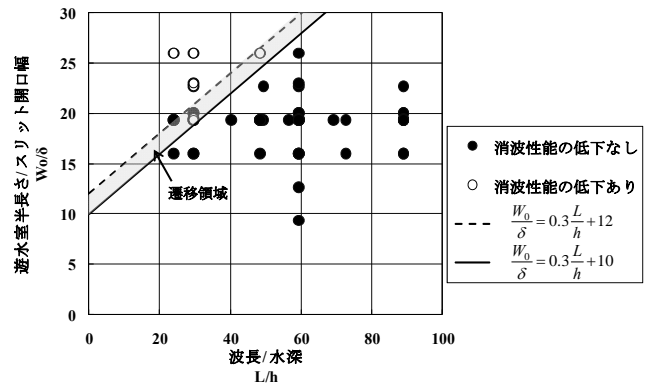


図-11 「性能低下に及ぼす波長と水深との比」と「遊水室半長さスリット開口幅の比」との関係

式(5)では、性能の低下がみられるものとみられないものが混在する領域(ここでは、遷移領域と呼ぶ)により、定数 A は10~12の値をとるが、設計においては安全側をとって $A=10$ とし、これを制約条件、式(1)とした。

4. 設計条件の違いによる感度分析

設計水深および設計外力を変化させた場合の感度分析(コスト比較)を行い、実績のある捨石式傾斜堤と渦消波型長周期波対策構造物(直立消波ブロック式、矢板式)との比較検討を実施した。設計水深については、-7.5m、-12m、-20mの3ケースを、設計波については、 $H_{1/3}=0.5m$ 、1.0m、1.5m(周期 $T_{1/3}=14s$)の3ケースを条件として実施した。その結果、いずれの条件においても渦消波型長周期波対策構造物が有利となることを確認した(図-12)。

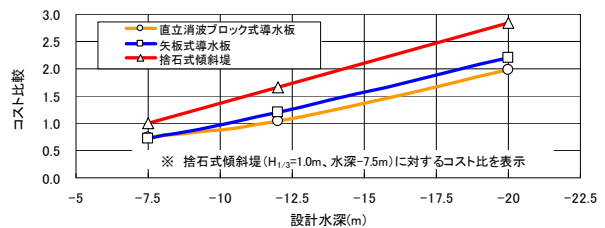


図-12 感度分析結果
(設計水深と概算工費の関係, $H_{1/3}=1.0m$)

5. おわりに

当センターを含む4者により、渦消波型長周期波対策構造物の設計法を中心とした共同研究報告書のとりまとめを行った。今後は実証実験等により、設計法の妥当性を検証していくことが必要と思われる。

6. 謝辞

本稿は、京都大学の高山知司名誉教授、京都大学防災研究所の平石哲也教授にアドバイザーとして貴重なご意見を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

(財) 沿岸技術研究センター・五洋建設(株)・東亜建設工業(株)・東洋建設(株)：渦消波型長周期波対策構造物に関する研究報告書 2011.