

ツイン型浮防波堤の波浪透過特性に関する実験と計算

池 末 俊 一* ・ 田 村 一 美* ・ 木 原 一 禎** ・ 松 浦 正 巳***
太 田 真*** ・ 杉 泰 広**** ・ 高 山 知 司*****

浮防波堤は海水交換性や移設性に優れる反面、長周期の波に対しては波高低減効果が急激に低下するため、単純箱型では幅が大きくなり製作コストが増大する。そこで、長周期の波にも配慮しつつ、従来の単純箱型浮防波堤に代わる廉価型浮防波堤として、ツイン型浮防波堤を提案する。その浮防波堤は、間隔を空けて平行に矩体を 2 個配置し、内部に水平フィンを追加するような構造となっている。本研究では、このツイン型浮防波堤の消波性能について、水槽実験による検討を行った。また、2 次元数値造波水槽と構造運動を連成させて解く非線形計算法を開発し実験との比較を行って、ツイン型浮防波堤の消波性能評価手法を確立した。

1. はじめに

浮防波堤は海水交換性や移設性に優れるだけでなく、従来の重力式防波堤に比較して設置水深が深い場合や、海底地盤が軟弱な場合に有効な防波堤である。

ただし、浮防波堤は長周期の波に対して波高低減効果が急激に低下する。そのため、長周期の波に対応しようとすれば、堤体幅が必然的に大きくなり製作コストが増大するという欠点がある。そのため、浮防波堤の適用は、比較的波周期の短い海域に限られてきた。

そこで、この単純箱型浮防波堤の欠点を補うため、ツイン型浮防波堤を提案する。この浮防波堤は長周期の波にも配慮しつつ、従来の単純箱型浮防波堤に比べ製作材料の少ない新形式の浮防波堤である。

ツイン浮防波堤の構造形式は、図-1 に示しているように、2 個の矩体を間隔を空けて平行に配置し、内部に水平フィンを付加したものである。このようにすることで、矩体間のスペース分の製作材料を省くことができ、同一のコストでより大きな堤体幅を実現することが可能である。矩体の間にスペースを設けることによって消波機能の低下が生じるため、内部空間に水平フィンを設けることで、消波機能を向上させている。また、波上側には外部フィンを付加して消波機能の増大を図っている。

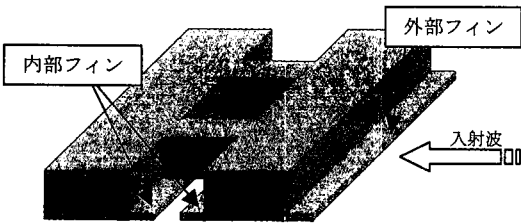


図-1 ツイン型浮防波堤

本研究では、このツイン型浮防波堤の消波性能について 2 種類の実験を行った。また、浮体一流体連成計算法の開発を行い、精度の検証を行って、消波性能手法を確立している。

2. ツイン型浮防波堤の形状影響に関する水槽実験

ツイン型浮防波堤における、矩体間隔や内部フィン・外部フィンの影響を検討するため、1/50 縮尺模型を用いた水槽実験を行った。

実験に用いた模型の形状を表-1 および図-2 に示す。今回の実験では、堤体幅を実機換算で 25 m と想定し、1/50 縮尺模型を 7 体製作した。ここで、CASE-1 はツイン型ではなく、従来の単純箱型模型である。また、CASE-2 はツイン型模型でフィン無し、CASE-3 は内部フィンのみを付加した断面である。CASE-4~7 は内部フィン及び外部フィンを付加した断面である。ただし、CASE-7 については、模型底面を上げ底構造とした断面形状になっている。

表-1 実験模型の断面寸法

	B (m)	d (m)	IB (m)	Fb (m)	Lb (m)
CASE-1	25	5	—	—	—
CASE-2	25	5	10	—	—
CASE-3	25	5	10	4.4	—
CASE-4	25	5	6.3	2.5	2.5
CASE-5	25	5	6.3	2.5	3.8
CASE-6	25	5	10	4.4	2.5
CASE-7	25	5	6.3	2.5	2.5

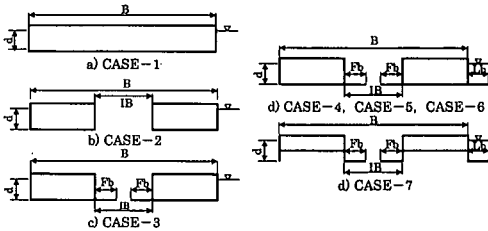


図-2 実験模型の断面形状

* 正 会 員 三菱重工業(株)技術本部広島研究所
** 正 会 員 三菱重工業(株)広島製作所
*** 三菱重工業(株)技術本部長崎研究所
**** 三菱重工業(株)技術本部広島研究所
***** フェロー 京都市防災研究所水災害研究部門

実験条件には、実機換算で波高 1.25 m、波周期 3 s～13 s のものを想定し、相似則にはフルード則を用いた。なお、本実験では規則波を用い、入射波及び透過波の波高を計測し、各モデルの消波性能を検討した。

透過率の実験結果について、図-3 に示す。まず、CASE-1、CASE-2 に着目すると、波周期 5～7 s で後者の方が透過率が高くなっている。これは、CASE-1 では 6.5 s 付近においてヒープの共振運動によって透過波と逆位相の波を発生させているのに対し、CASE-2 では矩体間のスペースによってヒープの共振周期が変化したためである。

これに対し、CASE-2 に内部フィンを付加した CASE-3 では、CASE-1 の透過率とほぼ等しい実験結果が得られた。これは、ツイン型構造でも内部フィンを付加することで流体力特性が変化し、ヒープの共振周期が CASE-1 に近づいたためである。ただし、波周期 6～7 s に着目すれば、透過率が最も小さくなる周期は、CASE-1 の方が若干長周期側となっている。

CASE-1 と、内部フィン・外部フィンを付加したツイン型である CASE-4～7 の結果を比較すると、波周期 7 s～10 s で、CASE-1 の透過率はその他のケースより高い。これより、外部フィンによって、消波性能が向上することが明らかとなった。ここで、CASE-4 と CASE-5

は外部フィンの幅が異なるタイプであるが、両者の透過率に差はほとんど見られなかった。また、CASE-4 と CASE-6 は、矩体間隔及び内部フィンの幅が異なるタイプであるが、これについても透過率に大きな差はなかった。よって、内部フィン、外部フィンの幅を必要以上に大きくしても、消波性能はそれほど向上しないことが分かった。

CASE-7 は CASE-4 の底面形状を上げ底型にしたものであるが、CASE-7 の透過率は CASE-2 のものとほぼ同等の結果となった。この結果から、底面形状が消波性能にさほど影響しないことが分かった。

3. 波高影響及び係留条件に関する水槽実験

形状影響に関する実験結果を踏まえ、消波効果に優れる CASE-4 及び製作材料をより低減可能な CASE-7 の断面形状について、より大きな波高条件下での消波性能を検討するため水槽実験を行った。また、この実験では係留形式による消波性能の差についても検討を行った。

実験模型の寸法を図-4 に示す。この実験においても、堤体幅を実機換算で 25 m と想定した。また、模型の縮尺は 1/25 とした。

実験条件は、実機換算で波高 1.25～3.75 m、波周期 4～12 s を想定し、相似則にはフルード則を用いた。

また、図-5 に示すように、係留形式としてばね係留とチェーン係留の 2 ケースを考えた。ばね係留の条件では、模型を弱いばねで係留することとし、ばね定数 0.060 kN/m のものを用いた。チェーン係留の条件では実機換算で 132 mm のチェーン径を想定し、5.20 N/m のものを使用した。

まず、透過率についての実験結果を図-6、7 に示す。波周期 9 s 以上の長周期帯では、透過率が 0.80～0.90 となっている。また、これらの値は波高によらずほぼ同レ

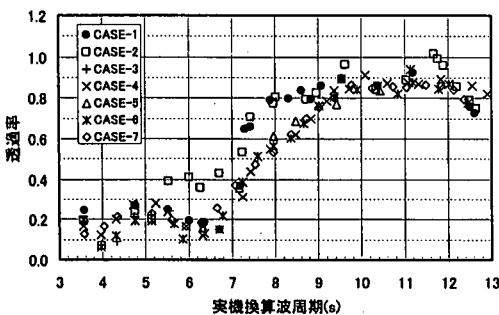
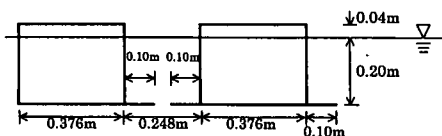
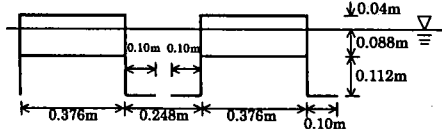


図-3 形状影響に関する水槽実験結果



(a) 1/25 縮尺模型 (CASE-4)



(b) 1/25 縮尺模型 (CASE-7)

図-4 実験模型の断面形状

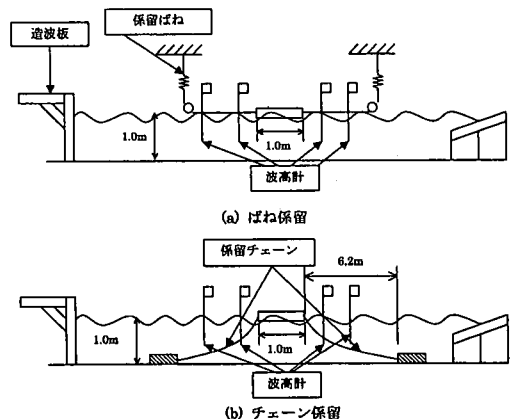


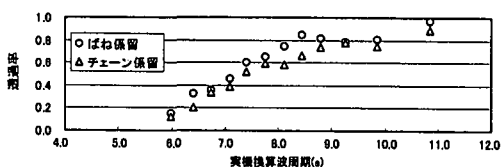
図-5 模型及び計測機器の配置

ベルのものとなっており、この領域では消波性能に対する波高影響が小さいことが分かる。係留形式についても、波周期9s以上の領域では、ばねとチェーンの係留形式の違いによる有為な差が見られない。

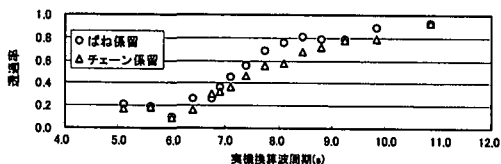
波周期7s~9sの領域では、透過率が0.80~0.90から0.40程度まで急激に低下する。この領域でも、透過率に

対する波高影響は極めて小さい。ただし、係留形式によって透過率特性に差がみられ、チェーン係留の方が、ばね係留の場合に比して消波性能に優れる結果となっている。

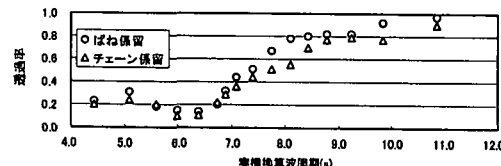
波周期7s以下の領域では、透過率は周期6s付近で一端落ち込み、これより短い周期帯では0.20程度の値に落



(a)波高 0.15m(通常タイプ、実機波高 4.5m相当)

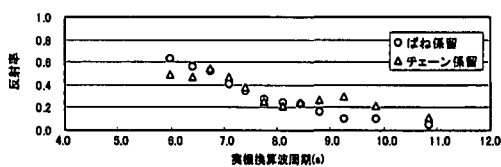


(b)波高 0.10m(通常タイプ、実機波高 2.5m相当)

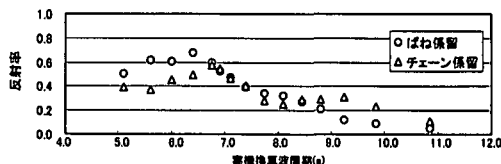


(c)波高 0.05m(通常タイプ、実機波高 1.25m相当)

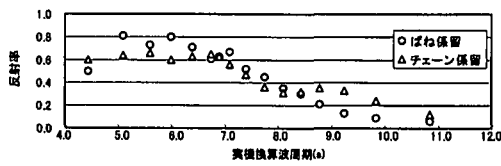
図-6 透過率計測結果 (CASE-4)



(a)波高 0.15m(通常タイプ、実機波高 4.5m相当)

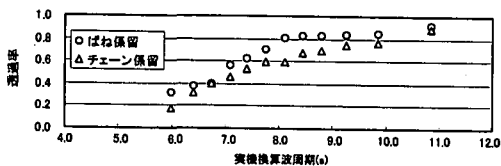


(b)波高 0.10m(通常タイプ、実機波高 2.5m相当)

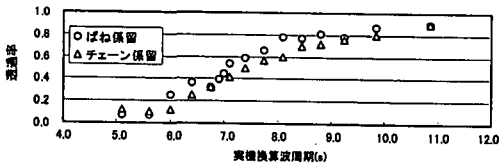


(c)波高 0.05m(通常タイプ、実機波高 1.25m相当)

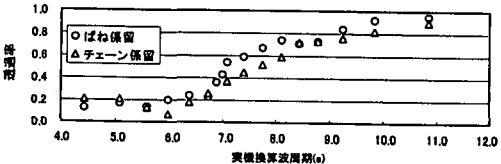
図-8 反射率計測結果 (CASE-4)



(a)波高 0.15m(上げ底タイプ、実機波高 4.5m相当)

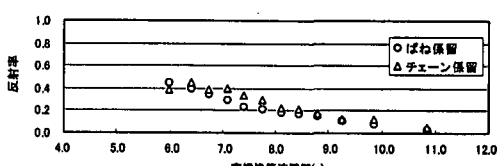


(b)波高 0.10m(上げ底タイプ、実機波高 2.5m相当)

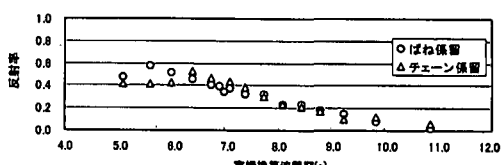


(c)波高 0.05m(上げ底タイプ、実機波高 1.25m相当)

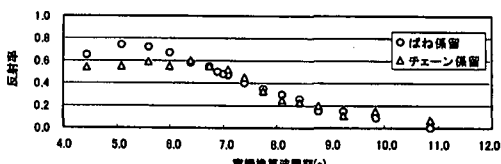
図-7 透過率計測結果 (CASE-7)



(a)波高 0.15m(上げ底タイプ、実機波高 4.5m相当)



(b)波高 0.10m(上げ底タイプ、実機波高 2.5m相当)



(c)波高 0.05m(上げ底タイプ、実機波高 1.25m相当)

図-9 反射率計測結果 (CASE-7)

ち着く。この波周期6s付近の領域では、透過率の波高に対する依存性がみられた。例えば、チェーン係留においてCASE-4で波周期6.4sのときをみると、実機換算波高3.75m, 2.50m, 1.25mに対し透過率が0.20, 0.16, 0.11となっており透過率と波高が比例関係にある。

反射率についての実験結果を図-8, 9に示す。波周期が7s以下の領域では、係留形式の違いによる反射率の傾向はほとんど差がない。しかし、CASE-4の波周期7s以上の領域では反射率に差が生じており、チェーン係留の場合の反射率が、ばね係留に比べ高くなっている。また、波周期6s以下の領域において、実機換算波高1.25mの場合に反射率が0.60~0.80であるが、波高が2.50mの場合には0.40~0.60と、波高による影響がみられた。これは、実機換算波高2.50mの場合には、模型前面で越波が発生しているためである。ただし、越波による水塊はツイン型矩体間にほとんどが流入しており、越波の透過波に対する直接的影響は観察されなかった。

4. ツイン型浮防波堤の消波性能推定計算法の開発

ツイン型浮防波堤の消波性能を精度よく推定するには、内部遊水面の挙動の効果を正しく考慮できる計算法を開発する必要がある。そこで、本研究では谷澤ら(1997)の手法を参考に、自由表面を有する流体運動と構造物運動を連成させた非線形計算法の開発を行った。

本計算法では理想流体を仮定しており、連続式は以下のようなになる。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \nabla \cdot (\nabla \phi) = \nabla^2 \phi = \nabla^2 \phi_t = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は流体の速度ベクトル、 ϕ は流体の速度ポテンシャル、 ϕ_t は速度ポテンシャルの時間微分値である。また、圧力 p はベルヌーイ式より、

$$p = -\rho \left\{ \phi_t + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 + gy \right\} \quad (2)$$

となる。ここで、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 y は静水面を基点とし上方向を正とする鉛直方向座標である。自由表面上では圧力が大気圧と釣り合うことを考慮し、

大気圧を0 kN/m²と仮定すると自由表面上では次式が成立する。

$$\phi_t = -\frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gy \quad (3)$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gy \quad (4)$$

$$\frac{Dx}{Dt} = \nabla \phi \quad (5)$$

流体表面上では、速度ポテンシャル及び位置ベクトルが、式(4)、(5)によって時刻歴計算される。これらの値は、式(1)のラプラス方程式における次タイムステップの流体表面上における境界条件となる。また、自由表面上の ϕ_t は式(3)により計算される。

浮体表面上では、流体の不透過性から以下の境界条件を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial n} &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_0 + \dot{\mathbf{r}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \\ &= \mathbf{n} \cdot (\mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_t}{\partial n} &= -k_n (\nabla \phi - \mathbf{v}_0 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})^2 + \mathbf{n} \cdot (\dot{\mathbf{v}}_0 + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}) \\ &\quad + \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + \mathbf{n} \cdot 2\boldsymbol{\omega} \times (\nabla \phi - \mathbf{v}_0 - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 \right) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 k_n は浮体表面の法曲率、 $\mathbf{v}_0$ 、 $\boldsymbol{\omega}$ は浮体重心の速度、及び浮体の重心周り回転角速度である。また、 $\dot{\mathbf{v}}_0$ 、 $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ は浮体重心の加速度、及び重心周り回転角加速度である。式(6)、(7)は式(1)のラプラス方程式における浮体表面上の境界条件となる。また、固定壁での境界条件は、

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi_t}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

のようなになる。

谷澤ら(1997)は、境界要素法に基づいた定式化により、流体・浮体運動を連成させた境界値問題を解くことで速度場・加速度場を計算している。しかし、著者らは

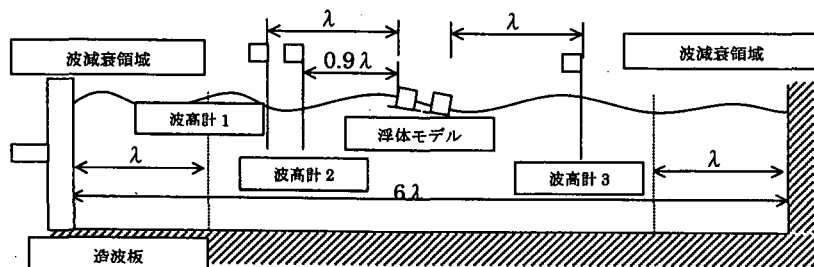


図-10 計算領域模式図 (図中の λ :波長)

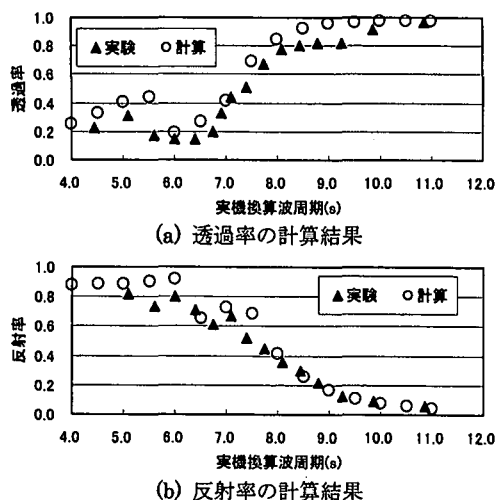


図-11 計算結果および実験との比較

既往の構造計算プログラムの取り込みを容易にするために、敢えて流体部・構造計算部を独立して解き、収束計算で互いの連成を考慮する手法を選択している。今回の計算では、構造計算として剛体運動を用いているが、計算のルーチンを入れ替えることで、弾性変形するような浮体についても流体との連成計算が可能となる。

今回の計算で用いた計算条件を図-10に示す。計算領域の長さは6波長分である。また、水深は3.の実験条件と同様に1.0 mとした。

図に示すように、浮防波堤のモデルは計算領域の中央に配置し、水平方向にばね定数0.060 kN/mのばねで係留した状態を仮定した。フィンのような薄い構造については、あまり薄く設定すると計算安定性に問題があるため、計算上では1.0 mmの厚みを持った板として要素を構成した。

計算領域の両端には、反射波を吸収するために谷澤ら(1997)の方法を参考に波減衰領域を設けた。この波減衰領域の長さは1波長分とした。

計算と実験の比較を図-11に示す。透過率については、実機換算波周期6.5 s付近で計算結果が実験結果に比べ高めの値となっているものの、全体的に両者の値は良く一致している。また、反射率についても、両者は良く一致している。

この結果から、今回開発した計算法はツイン型浮防波

堤のような構造形式に対しても、透過波や反射波を精度良く推定できることが分かった。

しかしながら、本計算法では理想流体を仮定しているけれども、浮体の運動に影響のある流体の粘性抵抗や渦抵抗については運動に比例する形で経験的に導入している。今回の検討では、浮防波堤の消波性能に着目したため、運動についての詳細な実験等は行っていない。従って、これらの影響を計算上にどのように反映させるべきかについては別途詳細な検討を行う必要がある。

5. まとめ

本研究では、ツイン型浮防波堤の波浪透過特性について検討を行った。本研究の成果を以下に述べる。

- (1) ツイン型浮防波堤の波浪透過特性に対して、フィンの影響が大きい。特に外部フィンの有無により波浪透過特性は大きく影響を受ける。
- (2) 外部フィン、内部フィンを付加したツイン型浮防波堤は、同じ幅の単純箱型浮防波堤に比べて消波性能に優れる。
- (3) 係留方法は浮防波堤の波浪透過特性に影響を与える。また、チェーン係留の方が、弱いばねによる係留に比べ透過率が小さくなる。
- (4) ツイン型浮防波堤の反射・透過特性に対する波高の影響は小さい。
- (5) 自由表面を有する流体と構造物の運動を連成させて解く非線形計算法を開発した。また、本計算法をツイン型浮防波堤の波浪応答計算に適用し、透過波・反射波が精度良く推定できることを確認した。

参考文献

- 大楠 丹・柏木 正・池上国広・尾崎雅彦・磯崎芳男 (1991): 内部自由水を利用する浮消波堤の消波性能に関する研究, 日本造船学会論文集, 第169号, pp. 215-222.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港研資料 No. 0248 pp. 3-24.
- 登坂宣好・中山 司 (1986): 境界要素法の基礎, 日科技連, 660 p.
- 登坂宣好・宮田秀明・島崎洋治・野村卓史・志村正幸・畑中勝守 (1995): 移動境界流れ解析, 東京大学出版会, 184 p.
- 谷澤克治 (1997): 加速度ポテンシャルによる波浪中浮体運動の非線形理論と数値解法の研究, 学位論文, 大阪大学, 127 p.