

河口部に設置された浮防波堤の河川流への影響と消波性能

Breakwater efficiency and influence of river current
due to floating breakwater setted near river-mouth.

福田和國*・高丸泰忠*・吉田義和*・日下 理**・平岡辰男**・保木本秀行**
Kazukuni Fukuda, Yasutada Takamaru, Yoshikazu Yoshida, Tadasu Kusaka,
Tatsuo Hiraoka and Hideyuki Hokimoto

The floating breakwater of dolphin type was adopted for outlying facilities of marina. This breakwater has some salient features which are small influence of river current due to floating breakwater presence, excellence regulation of sea water with incoming and outgoing tides and good visibility from marina site during low tide. We describe the hydraulic characteristics of floating breakwater setted near river-mouth.

Keywords : Floating breakwater, Pontoon, Dolphin, Marina.

1. はじめに

わが国のレクリエーション需要は、価値観の多様化や余暇時間の増大などに伴って、近年著しく増加してきている。中でも、プレジャーボートを利用した海洋性レクリエーションは、着実に増加している。このような背景と第12回アジア競技大会ヨット会場の使用に対応するため、広島港内にマリーナが建設されることになった。

このマリーナの外郭施設には、洪水時の河川流への影響を小さくすること、マリーナ内の水質を良好に保つこと、干潮時の眺望性と航行安全性を重視したことなどの理由により、浮防波堤を採用した。浮防波堤を設置する海域は、中国地方有数の河川である太田川河口部となる上に、波浪条件も比較的厳しいので、この報文は、浮防波堤による河川流への影響、防波堤形状と消波性能の検討を中心に設計及び施工上の課題について述べたものである。

2. 浮防波堤の採用理由とそれに伴う技術的課題

マリーナは広島県広島港内に計画され、その建設途上の状況を写真-1に示す。この写真の右部に映っているものが、太田川から分流した天満川であり、浮防波堤によるこの河川流への影響が、技術的課題の一つであった。

2.1 浮防波堤の採用理由

防波堤形式は各種のものがあるが、本施設には、次の理由によりドルフィン係留方式浮防波堤を採用した。

○浮防波堤下部が通水可能となっているので、洪水時においても、河川の背水位に与える影響を小さくすることができる。

○浮防波堤の吃水を浅くしているので、遮蔽率（＝吃水／水深＝ $2.5\text{m}/8.5\text{m}=0.29$ ）が他の形式より小さくなり、浮防波堤下部からの海水交換性が良好である。したがって、マリーナ内の水質を良好に保つことができる。

○今回のマリーナは、広島港のメインマリーナとして整備するものであり、レジャーのために多くの人達が集まるので、眺望性と航行安全性を重視した。広島港の干満差は、約3.8mと国内でも大きい方であるが、浮防波堤は潮の干満に追従して浮函が上下するので、干潮時においても水面上の構造物部分が少ない点で眺望性が優れている。

今回用いた浮防波堤（1函分）の鳥瞰図を、図-1に示す。全体では、長さ97.8m×幅20.0m×全高3.5m：3函、長さ70.75m×幅21.0m×全高3.5：2函の構成となっており、単体としても全体構成としても国内最大級の規模である。

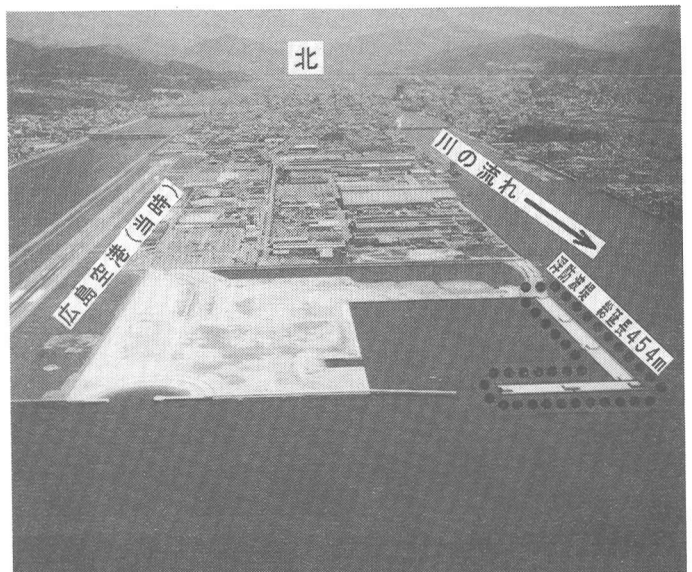


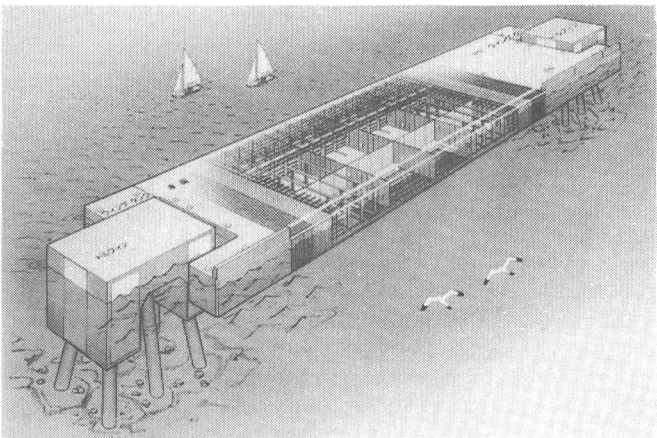
写真-1 浮防波堤の設置状況

*正会員 広島県土木建築部

**正会員 中電技術コンサルタント(株) (〒734 広島市南区出汐二丁目3番30号)

2. 2 技術的課題

- 河川流への影響：河口部に構造物をつくる場合には、洪水時の河川流の疎通に影響がないようにしなければならない。今回の浮防波堤では、浮体式にすることによって、浮防波堤下部における河川流の透過性に配慮しているが、その効果が不明であったので、3次元流況実験を行った。（3. 2で説明）
 - 防波堤の消波性能：マリーナ内の小型船を安全に係留するためには、外海の波高2.2mの波を泊地では波高0.5m以下に減衰させなければならない。この要求を満たす浮防波堤の形状を調べるため、2次元消波性能実験を実施した。（3. 3で説明）
 - 浮函動揺の非線形性：ドルフィン係留方式の場合、浮函は防舷材によって拘束される。防舷材のばね特性は、浮函の動揺量の大きさによって変化するので、波浪の不規則性を考慮して、浮函の動揺量及び防舷材反力を検討しなければならない。これを調べるため、浮函動揺の非線形解析を実施した。（3. 4で説明）
 - 維持管理の容易性：今回の浮防波堤は、洪水時の流木の衝突やマリーナの外部施設の特性上からくる小型船の衝突という不測の損傷を受ける可能性が高いので、このような状況にも対応できる方式を検討した。（3. 5、4. 3で説明）
- 以上について、順次説明する。



図－1 浮防波堤の鳥瞰図

3. 設計に関する事項

3. 1 設計条件

設計条件を以下に示す。

- ・風 暴風時：33.4m/s（全方向）
常 時：10.0m/s（全方向）
- ・潮位 Mx.H.H.W.L.：C.D.L+4.61m
Mi.L.L.W.L.：C.D.L-0.43m
- ・流れ 暴風時：0.3m/s（全方向）
常 時：0.2m/s（全方向）
- ・腐食 C.D.L -2.0m以上：重防食
C.D.L -2.0m～海底面：電気防食20年＋腐食代10年
海底面以下：腐食代30年（0.03mm/年）
- ・波 暴風時：SSE方向 $H_{1/3}=1.8m$, $T=4.0s$
S方向 $H_{1/3}=2.2m$, $T=4.5s$
常 時：全方向 $H_{1/3}=0.5m$, $T=2.73s$
暴風時において $H_{1/3}=0.5m$ 以下
- ・港内波高
- ・設計震度 水平震度：0.1
鉛直方向：0.0
- ・土質 C.D.L. -6.6m～-31.3m：粘性土層
 $C=-0.8+0.14Z$ (tf/m²)
($Z=0$ at C.D.L. $\pm 0.0m$)
C.D.L. -31.3mより深：N値50以上の砂礫

3. 2 平面水槽による流況実験

(1)実験の目的

浮防波堤設置前の流況と設置後の流況とを比較して、河口部に設置される浮防波堤の河川流への影響を検討した。水位の測定精度は最小0.1mm(現地換算で5mm)であるので、実験器具でのミリメートル単位(現地換算)の水位測定は不可能である。そこで、実験では浮防波堤設置前後の流況を調べることにし、定量的な水位の変化については、不等流計算で補完することとした。

(2)実験の条件

模型の範囲	2100m × 1500mの範囲
縮 尺	水平方向1/100、鉛直方向1/50
河 道	2ケース：現況河道、計画河道(注)
流 量	計画高水流量 930 m ³ /s
潮 位	満潮位 (T.P.+2.500m=C.D.L.+4.520m)
浮 防 波 堤	2ケース：浮防波堤無し、浮防波堤有り
粗 度 係 数	$n=0.028$ (計画)

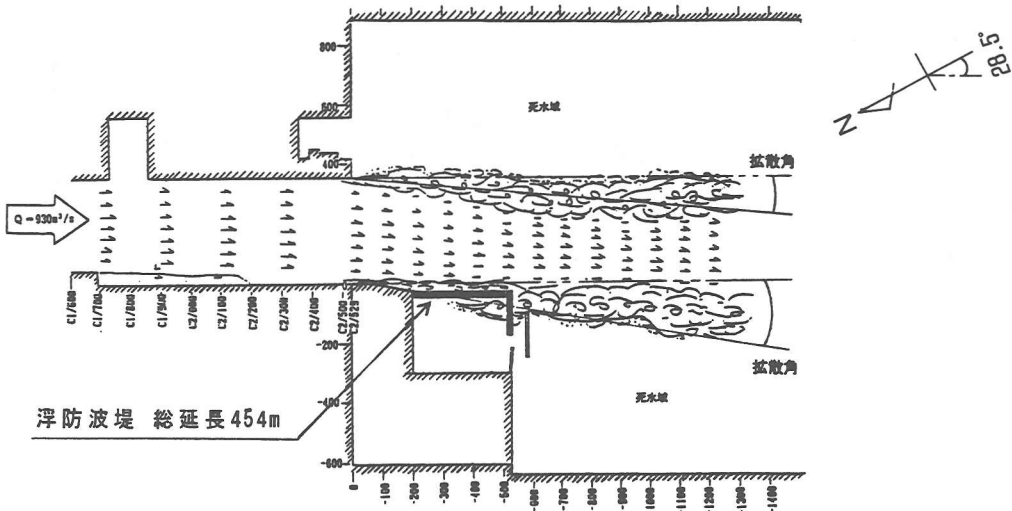
注) 計画河道とは、将来の河川計画断面を意味する。

(3)実験の結果

○拡散角：染料の拡がり具合を図－2のように護岸法線の延長線上からの拡散角と定義して、観測された拡散角を比較すると、下表の通りである。

項 目	浮防波堤設置前の拡散角	浮防波堤設置後の拡散角
左 岸	- 1° 18′	- 6° 50′
右 岸 (マ)ナ側	+ 11° 00′	+ 11° 00′

(-は河川中心へ向いての角度)



図－2 河口部における流れの拡散状況（平面図）

- 流況差：目視の結果、浮防波堤設置後も、河川流が浮防波堤の下を流れており、浮防波堤設置前と比べて流況に大きな変化はなかった。
- 流速差：流速を測定した結果、浮防波堤設置前後において流速差はみられなかった。
- 以上より、浮防波堤設置前後での流況・流速の差は小さいことが明らかになったが、水位差については次の不等流計算で検討することとした。

(4)不等流計算

- 計算条件：条件は模型実験と同じであるが、拡散角は、設置前後とも左右岸各11°とした。浮防波堤の影響は、河川断面の減少と潤辺の増加という形で計算に反映させた。
- 計算結果：水位差が下表の最右欄に示すように零であることから、浮防波堤の背水位への影響は無いと考えることができる。

項 目	①浮防波堤設置前の水位	②浮防波堤設置後の水位	差（②－①）
現 河 口	T. P. +2.497m	T. P. +2.497m	0.0mm
河口から3.5km 上流	T. P. +2.705m	T. P. +2.705m	0.0mm

3. 3 2次元消波性能実験

(1)実験の目的

今回の浮防波堤には、消波性能の向上を図る目的で、パラベット（波返し）を取付けた。このようなパラベットがあると碎波現象が生じるので、数値シミュレーションだけでは消波性能を予測することが難しい。そこで、浮防波堤の基本的な消波性能を調べるために、規則波による水理実験を行った。

(2)実験の条件

項 目	予 備 実 験	確 認 実 験
実 験 装 置	2次元水路(27mL×0.6mB×0.8mD)	
縮 尺	1 / 20	1 / 20
実物相応値	浮 体 幅	21.0m
	浮体の吃水	3.5m
	乾 舷	1.0m
	パラベット 高	0.7m

(3)実験の結果

浮防波堤の消波性能は、浮体の幅、吃水、乾舷、パラベット高に左右される。これら4つの諸元の組合せ

は、数多くあるが、まず、要求される消波性能に合う諸元を数値計算¹⁾によって概略決定し、この諸元を基に予備実験を実施した。この予備実験より消波性能の特性を把握後、浮防波堤の諸元を微修正し、確認実験を実施した。

○予備実験の結果

確認実験に先立って、予備実験を行ったところ、次のようなことが分かってきた。

- ・パラペット高を0.7m→1.0mに高くした方が、消波性能が良くなりそうだ。
- ・一方、浮体の吃水は、3.5m→2.5mに小さくしても良さそうだ。

○確認実験の結果

確認実験では、箱型断面の上に1.0mのパラペットを継ぎ足すことにより、波がパラペットを乗り越える際のエネルギー損失を期待した。予備実験と確認実験の比較を図-3に示す。透過率の面からは、わずかな改善でしかないようにみえるが、浮体体積の面から考えると、

$$\frac{\text{確認実験}}{\text{予備実験}} = \frac{\text{幅}20.0\text{m} \times \text{全高}3.5\text{m}}{\text{幅}21.0\text{m} \times \text{全高}4.5\text{m}} = \frac{70.0}{94.5} = 0.74$$

の改善となっている。つまり、パラペット高の0.3mの増加により、浮体体積を約25%減ずることができて製作費の節約につながった。

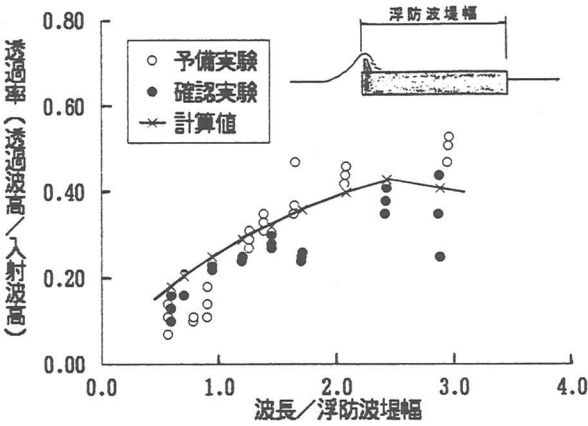


図-3 規則波中の消波性能

同図には、計算値も合わせて示したが、これは領域分割法¹⁾による計算値に砕波現象に相当するエネルギー損失係数を掛けて、実験値を包含するような曲線にしたものである。このようなやり方を採ったのは、前述の実験は、規則波中の基本的なものであったので、これを不規則波中の値に変換し、さらに波入射角度の補正・潮位差の補正等の若干の整理を必要としたためである。以上のような検討をして、最終的には下記のような諸元とした。

項 目		仕 様	決 定 根 拠
浮 函	係留方式	ドルフィン係留方式	浅海において、波浪エネルギーを吸収するため。
	形 式	R Cハイブリッド構造	鋼板による水密性確保、鋼板+R Cの合成構造による剛性増大、P C鋼線不使用による損傷時の補修容易等のため。
	浮体長さ	№1, 2, 3 浮函: 97.8 m №4, 5 浮函: 70.75m	経済性比較により、東側を3分割、南側を2分割とするため。
	浮 体 幅	№1, 2, 3 浮函: 20.0 m №4, 5 浮函: 21.0 m	港内静穏度(波高0.5m以下)の確保のため。2次元消波性能実験から決定。
	吃 水	2.5 m	海水交換性の確保と河川背水位への影響度の極小化のため
	乾 舷	1.0 m	復原性能の確保のため。
ドル フ ィ ン	形 式	杭式ドルフィン	波浪外力より大きな水平反力に対抗するため。
	上 部 工	長さ14m×幅9m(3基) 長さ9m×幅9m(4基)	構造上から決定。
	杭 径	φ1300~φ1600	許容応力度上から決定。

3. 4 浮函動揺の非線形解析

(1)ドルフィン係留の採用理由

今回の海域の場合、干潮時の水深が7.0m、浮防波堤の吃水が2.5mであるので、有効水深は 7.0-2.5 = 4.5mという浅海である。浅海になると、通常のチェーン係留方式では懸垂曲線が十分には形成されないで、波浪エネルギーを吸収できない。そこで、今回は図-4のようなドルフィン係留とした。この方式には、次の特徴がある。

○係留装置の主要部分(防舷材、上部コンクリート等)が空中、または海面付近にあるので、メンテ

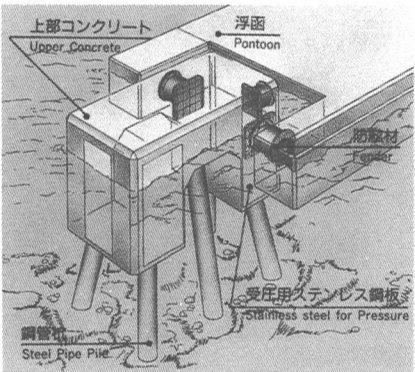


図-4 ドルフィン係留の模式図

ナンスが容易である。

○通常使われているチェーン係留方式では、川側にチェーンやアンカーブロックを設置するので、洪水時には洗掘、漂流物衝突による損壊の恐れがあるが、ドルフィン方式では、河川流の主方向からはずれるので、安全性が高まる。

○浮函の外側にチェーンやアンカーブロックの構造物がないので、河川を利用する船舶も安全に航行できる。

(2)解析の目的

ドルフィン係留では、防舷材の反力曲線が非線形となる上に波や風の不規則性にも影響を受けるので、時刻歴解析を行って浮函の動揺量及び防舷材反力を調べた。

(3)解析の方法

浮函の動揺は、式(1)の運動方程式に支配される。

$$[A] \ddot{\eta} + [B] \dot{\eta} + [C] (\eta - u) \cdot |\eta - u| + [K] \eta = E \quad (1)$$

ここに、 $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ ： 係数マトリックス

E ： 波浪外力と風荷重のベクトル

η ： 求める動揺量のベクトル

u ： 速度ベクトル

式(1)は数値積分することにより時系列的に解いた。

(4)解析の結果

解析の一例として、下記の計算条件の結果を示す。

- ・ 波 波高 ($H_{1/3}$) = 2.2m 波周期 = 4.5秒
波向 S 光易のスペクトルを使用
- ・ 風 風速 = 33.4m 風向 SE ダーベンポートのスペクトルを使用
- ・ 潮位 Mx. H. H. W. L. : C. D. L. + 4.61m
- ・ 防舷材 定格より15%柔らかい場合

波と風の不規則な外力に対して、浮函動揺と防舷材反力が複雑に応答するが、その1/1000期待値を求める
と次のようにまとめられる。

動 揺	前後揺	X	—	+0.40m	—	-0.28m
	左右揺	Y	—	-0.06m	—	-0.24m
	上下揺	Z	—	+0.10m	—	-0.10m
	横揺	θ_x	—	+0.41°	—	-0.44°
	縦揺	θ_y	—	+0.26°	—	-0.26°
	船首揺	θ_z	—	+0.18°	—	-0.16°
反 力	防舷材反力(長手方向) F_x : 101.1tf					
	防舷材反力(短手方向) F_y : 49.1tf					

○動揺：動揺量の許容値というものには特にはないが、浮函動揺は防舷材を23%歪ませる程度であり、防舷材の許容歪の42%以下なので問題ない。

○反力：防舷材反力の方も、浮函の長手方向：101.1tf < 許容反力133.6tf、浮函短手方向：49.1tf < 許容反力64.8tfとなっており、問題ない。

以上のような検討を波向、波高、風向、潮位、防舷材の固さを変化させて実施し、全てが許容値内に収まっていることを確認した。

3.5 ハイブリッド構造の採用

浮防波堤の場合、浮栈橋ほどには維持管理が行き届かないという特性上、特に水密性と補修の容易性に留意する必要があるところから、今回の浮防波堤には、図-5に示すようなハイブリッド構造を採用した。この構造には、次のような特徴がある。

- 外側は200～300mm厚の鉄筋コンクリートであるが、内側には8mm厚の鋼板を入れているので、水密性が良好である。
- コンクリート打設時に内部鋼板が型枠を兼用するので、施工性が良好である。最近では、沈埋トンネルにも合成構造が使われるようになってきている。
- プレストレスがはいっていないので、洪水時の流木や小

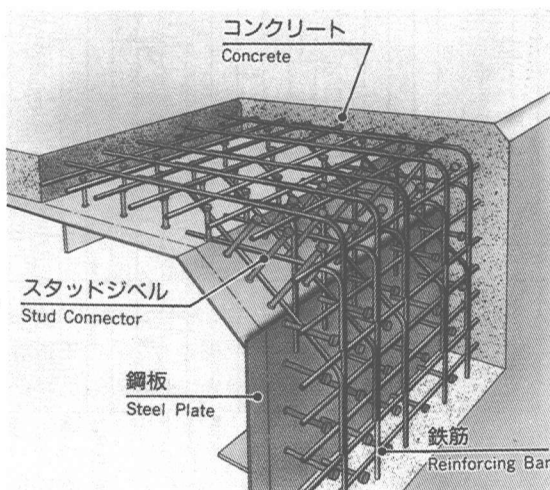


図-5 ハイブリッド構造の模式図

型船の衝突等による不測の損傷を受けた場合でも、補修が容易である。

尚、底版については、浮防波堤規模が大きいために、反転するのが難しいという製作上の理由から、外側が鋼板である。

4. 施工に関する事項

4. 1 工事概要

- ・工 期 平成3年～平成6年
- ・工事数量 浮 函 長さ97.8 m×幅20.0m×全高3.5m : 3 函
長さ70.75m×幅21.0m×全高3.5m : 2 函
ドルフィン 長さ14.0m ×幅 9.0m×全高7.8m : 3 基
長さ 9.0m ×幅 9.0m×全高7.8m : 4 基
- ・工 程 全工期は、平成3年～6年であるが、1セット分（浮函：1函、ドルフィン：2基）の概略工程は、約10か月であった。尚、ドルフィン工事の主なものは、隣接する広島空港（当時）による航空制限のために、夜間に実施した。

4. 2 ドルフィンの据付精度

今回の浮防波堤は、浮函の長手方向を2基のドルフィンで、挟み込む方式になっている。従って、ドルフィンの据付精度が懸念されたが、以下に示すように規定値以内であった。

鋼管杭の打設	:	予定位置からのずれ	20mm～86mm	<	規定値 100mm
ドルフィンの据付	:	浮函の長手方向	-6mm～+39mm	<	規定値±50mm
	:	浮函の短手方向	-39mm～+20mm	<	規定値±50mm

4. 3 浮函据付のためのウィングタンク方式の採用

今回の浮防波堤では、ウィングタンクを使用して、浮函の着脱が容易にできるようにした。ウィングタンク方式とは、図-6に示すように接合ボルトを使用して、浮函とウィングタンクとを接合する方式であり、次の特徴がある。

- 浮函補修：浮防波堤は、河川に隣接しているので、洪水時の流木等によって損傷される可能性がある。さらに、マリーナには小型船が頻繁に出入港するので、操船ミスによる衝突の危険性は、一般の防波堤や浮桟橋より大きいと考えられる。このようなとき、ウィングタンク使用の着脱可能な構造にしておくと、修理ドックへの入渠による修理が比較的容易である。
- 現場工期：ウィングタンクの取り付けだけなので、現場における据付の工事期間を短縮できる。現場では、浮防波堤据付工事と同時期に護岸工事、埋立工事が並行して行われていたので、この効果は大きいものがあつた。

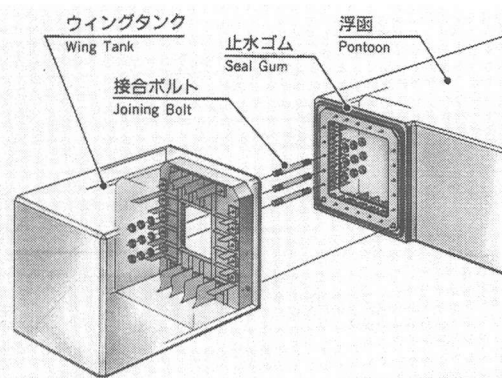


図-6 ウィングタンクの模式図

5. おわりに

- 構造物の下部が通水できる浮防波堤を用いることは、洪水時の河川流の疎通性への影響を軽微にできることを、水理実験と数値計算によって確かめた。今後、河口部に港湾施設や下水・ごみ処理施設等の生活関連施設が建設される場合もあるので、今回の浮防波堤は河川流への影響が小さい構造物としての一事例を示すことができた。
- 従来方式の箱型断面浮防波堤では十分な消波性能は得られない場合でも、箱型断面の上面にパラペットを継ぎ足すことによって、消波性能が向上することが明らかになった。

謝辞：本研究の遂行に際し、浮防波堤の不規則波中動揺解析につきましては、鳥取大学工学部 上田茂教授（当時：港湾技術研究所構造部長）のご指導を賜りました。施工時の資料に関しましては、三菱重工業㈱、五洋建設㈱、不動建設㈱からの提供を受けました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献：1）藤田秀夫、日下 理：エネルギー損失を伴う2次元浮防波堤，第24回海岸工学講演会，PP.285-289，1977.