

直立浮上式防波堤の開発

DEVELOPEMENT OF BUOYANCY-DRIVEN VERTICAL PILING BREAKWATER

山根隆行¹・有川太郎²・伊藤政人³・増山琢也⁴・亀井幸雄⁵・宮坂政司⁶

Takayuki YAMANE, Taro ARIKAWA, Masato ITO, Takuya MASUYAMA, Yukio KAMEI and
Masashi MIYASAKA

¹正会員 工修 (独)港湾空港技術研究所津波防災研究センター (〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所津波防災研究センター (〒239-0826神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工博 (株)大林組技術研究所土木構造研究室 (〒204-8558東京都清瀬市下清戸4-640)

⁴工修 新日本製鐵(株)鉄構海洋・エネルギー事業部海洋・鋼構造部 (〒100-8071東京都千代田区大手町2-6-3)

⁵正会員 東亜建設工業(株)土木本部設計部 (〒102-8451東京都千代田区四番町5)

⁶正会員 三菱重工業(株)鉄構建設事業本部橋梁部技術グループ (〒108-8215東京都港区港南2-16-5)

Buoyancy-driven vertical piling breakwater – a new type of breakwater formed by upper and lower steel pipes – rises above sea level by feeding the air into the upper pipe when high waves or tsunamis are imminent, whereas it normally rests inside the lower pile installed below seabed so that navigation is undisturbed. This paper outlines the results of a series of experiments by a large scale physical model and of the numerical analyses with regard to the rising / sinking behavior of the breakwater. The results clearly demonstrate that: 1) The time required for raising the upper pipe is just a few minutes, being rapid enough to prevent tsunamis from attacking harbors; and 2) The numerical model gives good approximation and is fairly applicable.

Key Words : breakwater, tsunami, large scale model test, buoyancy, numerical analysis

1. はじめに

高波、高潮あるいは津波から港湾施設を守るため、各港湾では防波堤の整備が進められている。2004年12月に発生したスマトラ沖大地震インド洋津波において自然災害の恐ろしさ、防災対策の必要性が改めて認識されたところであるが、船舶が航行する航路には防波堤を設置できなかったことから、航路から侵入してくる高波、津波を遮断し、安全な港湾を整備することは困難であった。

本研究はこの問題を解決すべく、常時は船舶航行の障害とならないように鋼管を海底面以下に沈設し、高波や津波来襲時など必要な時にだけ鋼管を水面上に浮上させて港内を高波・津波から守るという全く新しい形式の防波堤「直立浮上式防波堤」の実用化に向けた開発を目的としたものである。

直立浮上式防波堤の構造を図-1に、浮上原理を図-2に示す。本防波堤は上部鋼管(内鋼管)と下部鋼管(外鋼管)から形成される鞘管方式の鋼管を壁状に構築した構造物で、常時は海底に設置された下部鋼管の中に上部鋼

管が格納されている。高波や津波来襲時など必要な時には、陸上に設置されたコンプレッサーから上部鋼管内に空気を圧送し、浮力によって上部鋼管を水面上に浮上させる。高波や津波がおさまると鋼管内の空気を排気することにより、鋼管は自重により徐々に降下し、再び海底に格納される。

直立浮上式防波堤の特長を以下に示す。

- ①常時は海底地盤中に格納されているため、船舶航行の障害とならないこと。また、潮汐や海流を妨げることがないため港内の海水交換性が高い。
- ②海底地盤中に格納されているため、地震に対する安全性が高い。
- ③鋼管の浮上・降下には浮力を利用するため、大規模な駆動装置を必要としない。
- ④構成材料は施工実績の多い鋼管であるため、材料面での信頼性、安全性が高い。

一方、本防波堤は全く新しい形式であることから実用化に向けては以下に示す課題が考えられる。

- ①津波来襲時には短時間内に上部鋼管を浮上させなければ

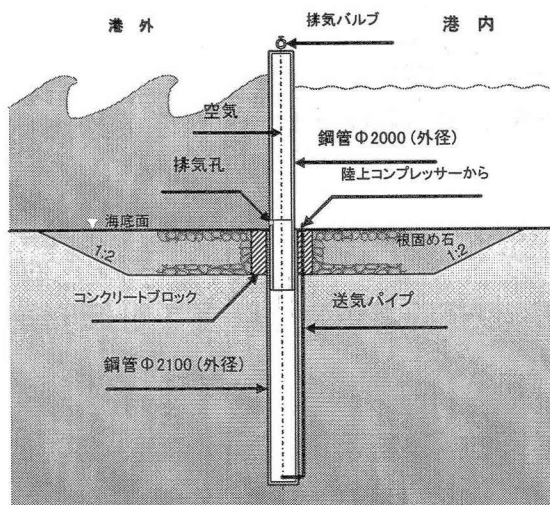


図-1 直立浮上式防波堤構造図(断面図)

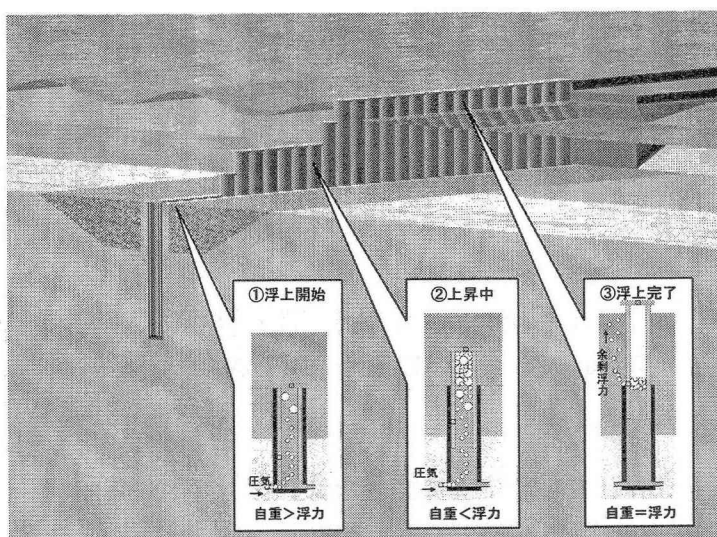


図-2 直立浮上式防波堤の浮上原理

ばならない。

②潮流など一方向外力が作用している状態、あるいは上部鋼管と下部鋼管との隙間に土砂が侵入しても、浮上・降下が確実に行われなければならない。

③浮上後の隣り合う鋼管同士には隙間があるため、津波来襲時における隙間からの海水流入による防波堤内側の水位上昇量を定量的に評価しなければならない。

そこでこうした課題に対して、基本的挙動を確認し、設計のための基礎的な検討資料を得るため、直径1mの鋼管を用いた実物大規模の大型模型による浮上・降下実験を陸上にて行った。本論文では、その大型模型実験の結果について報告するとともに、浮上・降下時間に関する数値計算と実験結果の比較について述べる。さらに、モデル港を対象にこの防波堤形式を津波防波堤として適用した場合の港内の津波の透過抑制効果について検討した結果について述べる。

2. 大型模型実験

(1) 実験装置

実験は、大林組東京機械工場（埼玉県川越市）にて行った。本実験に用いた実験装置全体図を図-3に示し、実験装置全景を写真-1に示す。

実験装置は、外鋼管（外径 $\phi 1.12\text{m}$ 、全長 7.5m ）の上部に、海中を模擬する水槽（内径 $\phi 2.2\text{m}$ 、全長 2.4m ）を接続しており、浮上して防波堤となる内鋼管（外径 $\phi 1.02\text{m}$ 、全長 6.5m ）が外鋼管に挿入された構造となっている。実験装置は全高 10m 程度となるため、地上高さ 9.5m の位置に作業および監視用の構台を作成した。

内鋼管には上部まで伸縮可能なエアホースが配管されており、コンプレッサー（吐出容量 $5.8\text{m}^3/\text{min}$ ）とレシーバータンクより、浮上時に必要な空気を供給できる

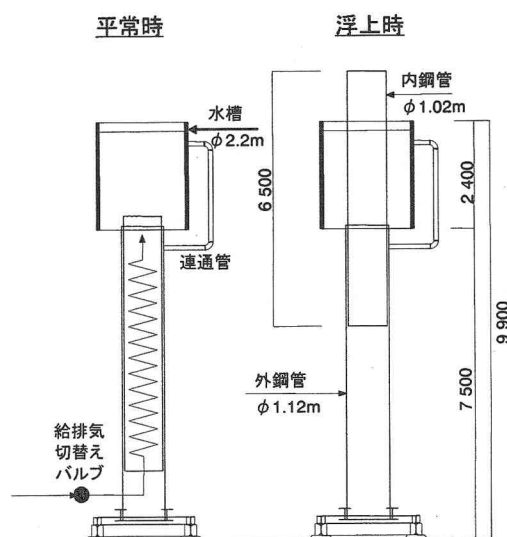


図-3 実験装置全体図

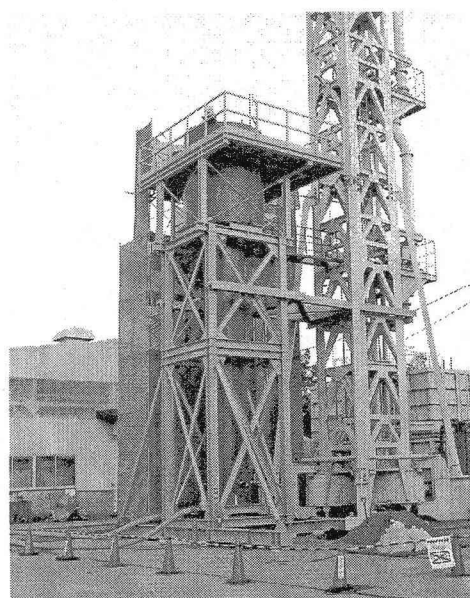


写真-1 実験装置全景

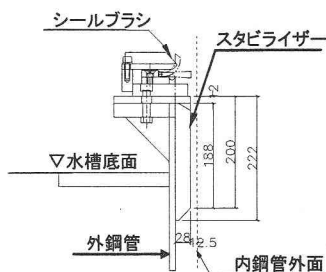


図-4 外鋼管上部詳細図

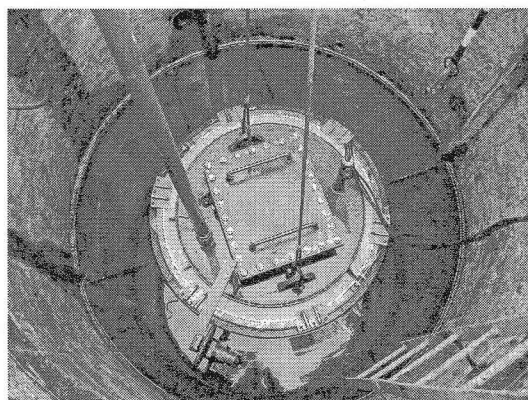


写真-2 内鋼管設置後水槽内状況

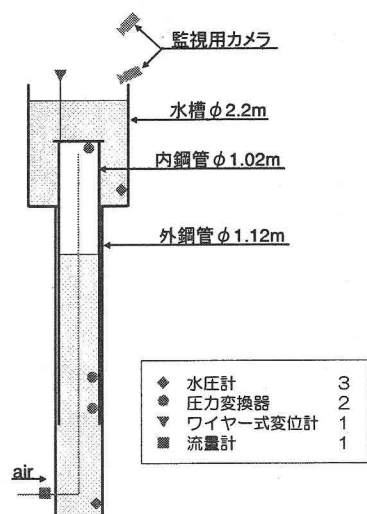


図-5 計測器配置図

ようになっている。降下時には、外鋼管下部のバルブを切り替えることにより内鋼管内の圧力を大気圧開放し、自然排気によって降下させた。内鋼管には天端から4m下の位置に排気孔が設けてあり、浮上時に内鋼管内の空気量がこの位置まで達すると余剰空気が排気され内鋼管内の空気量を一定に保つことにより最大浮上量を制御した。

図-4に外鋼管上部の詳細図を示す。外鋼管最上部の内側には、内鋼管と外鋼管の隙間調整のための鋼製のスタビライザーを取付け、さらにその上部には、外鋼管と内鋼管の隙間へ土砂が流入するのを防止するためのシールブラシ（ポリプロピレン製）を取付けた。写真-2に内鋼管設置後の水槽内状況を示す。

図-5に計器配置図を示す。計測項目は、内鋼管鉛直変位、水槽内下部水圧、内鋼管最上部空気圧、内鋼管内下部水圧および供給空気量である。また、内鋼管の浮上・降下状況を2台のテレビカメラによって監視した。

(2) 実験内容および実験目的

表-1に今回行った実験内容を示す。実験Aにおいては、浮上・降下に関する基本的な挙動の確認を行うとともに、内鋼管への空気供給量および内外鋼管の隙間が浮上時間に及ぼす影響について調査した。実験Bは、内鋼管天端に水平力を作用させた状態で浮上あるいは降下挙動を再現させ、内外鋼管間の摩擦係数を把握した。実験Cでは、海底面を模擬した水槽部の底面に砂を敷均した状態で浮上降下挙動を行い、シールブラシの土砂流入防止効果の確認を行った。

(3) 実験結果

a) 実験A

図-6に浮上時における給気開始からの時間と内鋼管天端高さおよび内鋼管内水位高さの関係を示す。実験は、給気量および内外鋼管の隙間をパラメータに行っており、その実験条件を表-2に示す。内鋼管内水位は、内鋼管内

表-1 実験内容

実験名	実験目的	実験パラメータなど
実験A	浮上・降下時間の把握	・空気供給量の影響 ・内外鋼管の隙間の影響
実験B	水平力作用時の浮上・降下挙動の検証 (内外鋼管間の摩擦係数の把握)	・浮上時 ・降下時
実験C	シールブラシの土砂流入防止効果の確認	

最上部に取付けた圧力変換器によって計測した内鋼管内空気圧と内鋼管下部の水圧から計算によって算出した。なお、給気開始時の初期状態は、いずれのケースも内鋼管高さ=GL+7.5m、内鋼管水位=GL+7.0m、水槽水位=GL+9.5m（水深=2.0m）である。

給気を開始すると、内鋼管内水位が徐々に下がり内鋼管内の空気量が増加する。その後空気量が一定量に達して浮力が内鋼管の自重を上回ると浮上し始め、内鋼管内水位が排気孔位置に達すると余剰空気が排気されて浮上完了する。給気は余剰空気の排気確認された時点で停止させた。各ケースの浮上開始から完了までの時間を表-2に示す。どのケースも浮上開始から完了までの時間は2分程度以内であり、十分に短い時間で浮上完了可能であることを確認できた。また、給気量を多くすることで浮上時間を短縮できること、内外鋼管の隙間が浮上時間に与える影響は比較的小さいことがわかった。

b) 実験B

図-7に実験Bにおける模式図を示す。実験は、内管天端に水平力H（ロードセルによって計測）を作用させた状態で、排気による降下（case-B1）、給気による浮上（case-B2）を行った。初期水平力は2kNとした。表-3に降下（浮上）開始時の水平力H、および内鋼管内空気量などから算出した降下（浮上）に要した鉛直力Vを示す。同表にはその時の内鋼管に作用するモーメントの釣り合いから定まる支点反力とそれらから求めた内外鋼管間の摩擦係数を示してある。作用させた水平力（H=2.0kN）は、約3ノットの流速に相当し、この程度の流速であれば浮上・降下挙動には支障とならないことを確認した。また、

表-2 実験条件および実験結果 (実験A)

case	実験条件		実験結果
	給気量 (nL/min)	内外鋼管の隙間 (mm)	浮上開始から 完了までの時間 (分:秒)
case-A1	1000	12.5	1:31
case-A2	3000	12.5	0:42
case-A3	1000	3.5	2:05

表-3 実験結果 (実験B)

case	実験結果		摩擦係数の算定結果		
	H (kN)	V (kN)	R _U (kN)	R _L (kN)	摩擦係数 f=V/(R _U +R _L)
case-B1	2.0	-1.9	4.1	1.9	0.32
case-B2	2.3	1.8	3.2	1.2	0.41

水平力作用下での浮上降下挙動を検証する上で必要となる内外鋼管間の摩擦係数は0.3~0.4程度と推定された。

c) 実験C

実験Cにおいては、海底面を模擬した水槽部の底面に砂を約20cm (シールブラシの上で約5cm) 敷均した状態で、実験Aと同様の浮上・降下挙動を行った。浮上・降下時の砂の挙動を水中カメラで確認するとともに、実験後には水槽内から排水し、水槽内の砂の状態および外鋼管内最下部の状態を目視で確認した。浮上・降下実験終了後にはシールブラシ上の砂は、8割程度なくなっていたが、外鋼管下部にはほとんど溜まっていた。これは浮上時あるいは降下時に内外鋼管の隙間には上向きの水流が発生することにより、シールブラシ上の砂を吹き上げたためであり、シールブラシの土砂流入防止効果を確認することができた。

3. 浮上・降下挙動に関する数値計算

(1) 計算手法

浮上・降下時の挙動は、内管の運動の式と内管内部水の連続の式によって表すことができる。浮上時の内管の運動の式は、(1)式ようになる(図-8参照)。

$$m_G \frac{d^2 z_G}{dt^2} = P - W \quad (1)$$

ここに、 m_G : 内管質量、 z_G : 内管天端高 (m)、 t : 時間 (sec)、 W : 内管重量 (kN)、 P : 内管の上下動推進力で、(2)式によって求められる。

$$P = p_{air} A_{Gi} + p_b (A_{Go} - A_{Gi}) - p_{out} A_{Go} \quad (2)$$

ここに、 p_{air} : 内管内の空気圧 (kPa)、 p_b : 内鋼殻底面に作用する揚圧力 (kPa)、 p_{out} : 内管上面に作用する圧

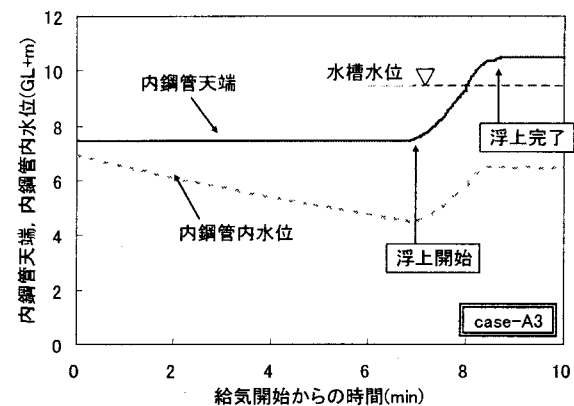
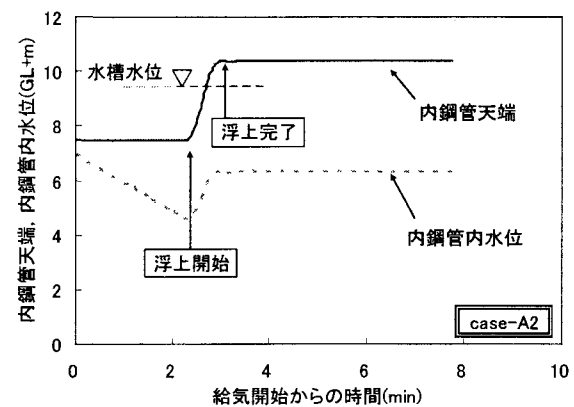
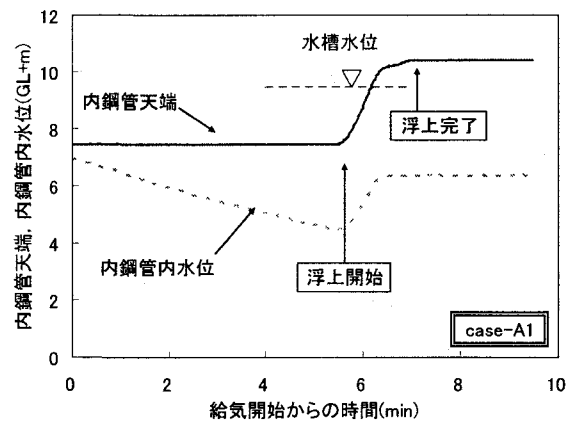


図-6 浮上時の内鋼管挙動

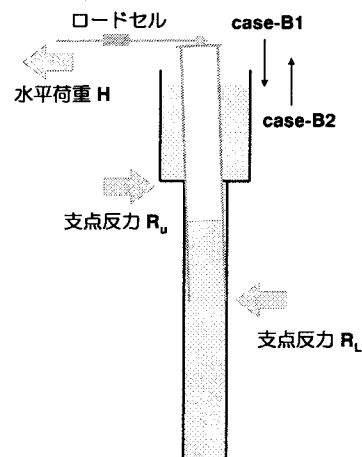


図-7 実験B模式図

力 (kPa) A_{Gi} : 内管内空断面積, A_{Go} : 内管外径断面積, である。

一方, 浮上時の内管内部水の連続の式は(3)式のようになる。

$$A_{Gi} \frac{dz_{wG}}{dt} = Q_p \tag{3}$$

ここに, Q_p : 内外鋼管隙間を通る流量 (m³/sec), z_{wG} : 内管内の水位 (m), である。

上述の式(1)～(3)において, 求めるべき従属変数は内管の運動(天端高標高) z_G および内管内の水位変動 z_{wG} の2つとなる。上式を変形すると最終的には, 内管の運動 z_G に関しては2階, 内管水位 z_{wG} に関しては1階の2元連立常微分方程式(4)式および(5)式) となり, 適当な初期条件のもとで微小時間ごとに逐次計算することにより, 両者の時刻歴の値が算出される。また, 降下時においても同様の定式化を行うことにより数値計算が可能である。

$$\frac{d^2 z_G}{dt^2} = F(t, z_{wG}, z_G) \tag{4}$$

$$\frac{dz_{wG}}{dt} = G(t, z_{wG}, z_G) \tag{5}$$

(2) 大型模型実験のシミュレーション計算

前章で示した大型模型実験における浮上・降下挙動に関してシミュレーション計算を行った。計算との比較を行った実験ケースはcase-A1である。なお, 計算にあたって必要となる内外鋼管間通水部の粗度係数およびシールブラシの透水係数は, 各々 0.013 m^{-1/3}sec, 5.0×10⁻³ m/secと仮定した。

図-9に浮上時および降下時の内鋼管天端高さおよび内鋼管水位高さの経時変化における実験結果と計算結果の比較を示す。浮上時および降下時とも, 計算結果は実験結果とほぼよい対応を示しており, 前節で示した計算手法の妥当性を確認することができた。

4. モデル港への適用検討事例

(1) 検討条件

表-4に想定したモデル港の現地条件と津波防波堤としての適用検討条件を示す。直立浮上式防波堤の延長は, 航路幅80mを想定し, 上部鋼管および下部鋼管からなる鞘管構造を34セット設置するものとする。

(2) 浮上時間に関する検討

前節で示した数値計算手法を用いて浮上時間に関する検討を行った。空気供給量は0.085kg/sec (4000 nL/min に相当) とし, 通水部粗度係数およびシールブラシ透水係数は, 実験のシミュレーションに用いた値と同じとした。

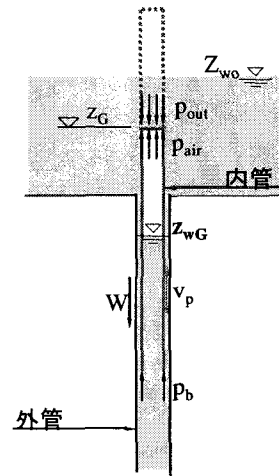


図-8 浮上・降下時に関する数値計算

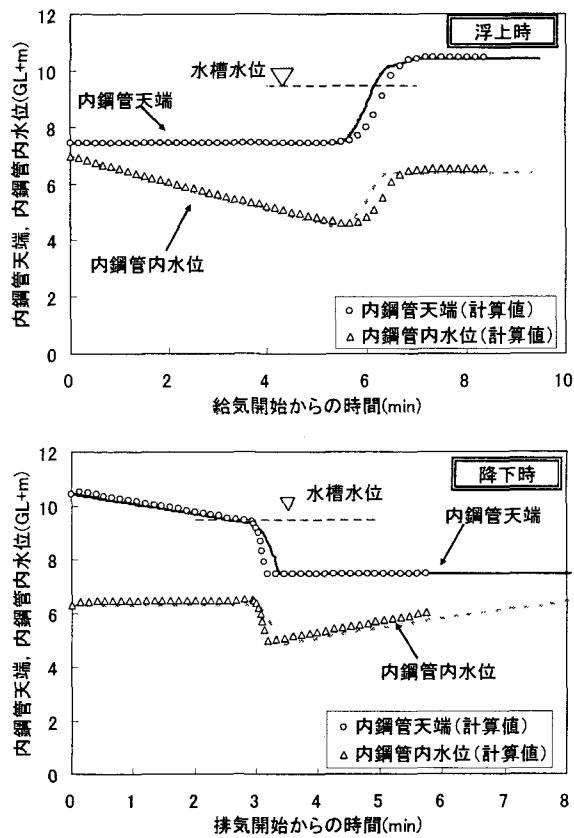


図-9 実験結果と計算結果の比較

表-4 検討条件

現地条件	航路幅	80m
	港内水域面積: 航路水深	80,000m ² D.L-4.5m
津波条件	要求浮上時間	3分
	津波片振幅, 周期	H=2m, T=15分
直立浮上式 防波堤構造 条件	防波堤天端高	D.L+4.0m
	上部鋼管径, 肉厚	φ2080mm, t25mm
	上部鋼管長さ	13.5m
	下部鋼管径, 肉厚	φ2200mm, t30mm
	下部鋼管長さ	16.5m
	上部鋼管の開口幅	180mm

図-10に給気開始からの時間と上部鋼管天端高さおよび上部鋼管内水位高さの関係を示す。本計算では鋼管内が海水で満たされている状態から空気を供給しているため、浮上完了まで10分程度要しているが、実際の運用時には、鋼管内に所定の空気量（例えば、浮上に必要な空気量の80%）をあらかじめ維持させておけば給気開始から3分程度で浮上を完了させることができると考えられる。

(3) 津波に対する透過抑制効果に関する検討

鋼管を用いた直立式防波堤は大阪港北港において施工実績があり、作用する波圧特性¹⁾、高波に対する透過抑制効果など²⁾に関する研究がこれまで行われている。直立浮上式防波堤では鞘管構造であるため、浮上した上部鋼管には隣り合う鋼管との間に隙間が生じることとなり、津波などの長周期波浪に対してはこの隙間からの海水流入による防波堤内側の水位上昇量を定量的に評価しなければならない。そこで、ここでは港内の水位変化は、開口部を流入する水量が港内の水域面積に分配した量に等しいと仮定して数値計算を試みた。計算基礎式を(6)式³⁾に示す。

$$\frac{dy}{dt} = \frac{A}{S} V = \pm \frac{C_v A}{S} \sqrt{2g|\eta - y|} \quad (6)$$

ここに、 η ：港外水位(m)、 y ：港内水位(m)、 A ：開口部の断面積(m²)、 S ：港内水域面積(m²)、 V ：開口部の流速(m/s)、 g ：重力加速度(9.81m/s²)、 C_v ：速度係数で、概略値を開水路の損失水頭の計算式から導く。

図-11に計算結果を示す。津波は、片振幅2m、周期15分の正弦波を仮定した。港内における平均潮位との水位差は最大で0.5m程度であり、水位上昇は25%程度まで低減される結果となった。これにより、今回のモデル港のケースにおいては、簡易的な手法による検討ではあるが、津波に対する透過抑制効果を確認することができた。今回の検討は簡易的な手法であるため、今後は波浪計算モデルを用いたさらなる詳細な検討を行う必要がある。

5. まとめ

高波や津波来襲時に鋼管を水面上に浮上させて港内を高波・津波から守る「直立浮上式防波堤」の実用化に向け、大型模型実験によって浮上・降下など基本的性能の検証を行った。さらに浮上・降下時間に関する数値計算について明らかにし、実海域への適用事例を示した。その結果をまとめると以下ようになる。

- ①上部鋼管の浮上・降下時間は送気する空気量によって制御可能であり、十分に短い時間で浮上が完了可能であることを確認した。
- ②通常の潮流力程度の条件下では鋼管の浮上、降下に支障がないこと、考案したシールブラシは土砂の流入防止に効果があることを確認した。

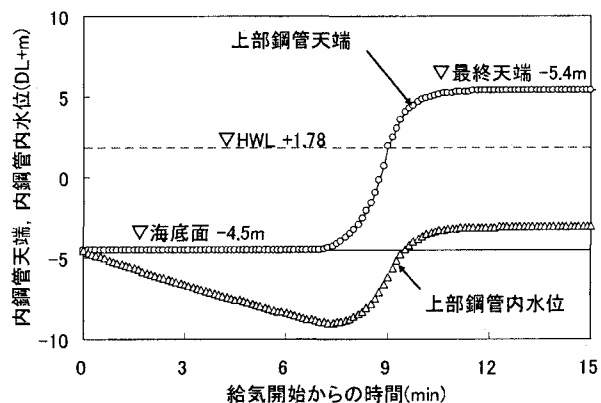


図-10 浮上時間計算結果

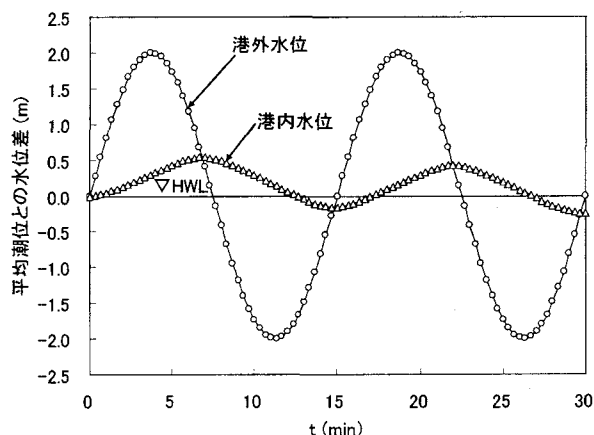


図-11 津波に対する透過抑制効果（片振幅2m、周期15分）

- ③浮上・降下時間に関する数値計算結果は、実験結果と良く一致し、数値計算手法の妥当性を確認した。
- ④モデル港における適用検討事例において、浮上時間を試算したところ、3分程度で浮上完了することを確認した。

本防波堤形式の津波透過抑制効果に関しては、今回は簡易的な手法により有効性を確認したが、今後は波浪計算モデルを用いた詳細な検討を行っていきたいと考えている。また、さらなる課題として、①構造設計（波浪時、船舶衝突時、地震時）、②プロトタイプにおける給排気システム、③維持管理（防食、海洋生物付着対策）に対する検討を現在進めており、今後は大型水槽実験による透過抑制効果の検証等を行い、実海域での実証工事に向けてさらに研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 永井莊七郎、久保直、時川和夫：鋼管防波堤に関する研究（第1報）、第12回海岸工学講演会講演集、pp.209-218、1965。
- 2) 林泰造、狩野徳太郎、白井増次郎、服部昌太郎：筒型透過性防波堤の水理特性について、第12回海岸工学講演会講演集、pp.193-197、1965。
- 3) 土木学会編：わかり易い土木講座シリーズ17巻、「海岸・港湾」、1972。