

緊急時浮上式津波防波堤の開発ー浮力浮上式鉛直鋼管システムー

Development of Urgently Emerging Tsunami BreakwaterーBuoyancy-Driven Vertical Piling Systemー

高山知司*・有川太郎**・西村大司***・平澤充成****

* (財) 沿岸技術研究センター 参与

** (独) 港湾空港技術研究所 主任研究官

*** 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 前所長

**** 国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 前所長

An innovative ‘buoyancy-driven vertical piling breakwater’ has been developed to protect harbors against high waves and tsunamis. This breakwater is constructed as a row of cylindrical steel piles and each pile consists of upper and lower portion. This paper describes the results of model tests of 1/5 scale, a field test at Numazu Port by an actual scale structure, and structural analyses of strain and stress at the overlapped part of upper and lower piles by three dimensional FEM.

キーワード : 津波防波堤, 鉛直浮上式, 浮力浮上, 2重鋼管

1. まえがき

地球温暖化に伴う台風の大型化や平均海面の上昇による高潮災害, また, 海溝性巨大地震が引き起こす津波災害が近年, 特に懸念されるようになってきており, 沿岸部における浸水災害のリスクは年々高まってきていると言える。これまで, 全国各地の港湾では高潮や高波, あるいは津波から港湾施設を守るために, 防潮堤や防波堤の整備を進めてきた。しかしながら, 港湾は航路を確保しておくために, 港口部を開放しておかなくてはならない。そのために, そこから高潮や津波が進入してきて, 大きな災害を招くことがあった。港口部の存在が, 安全な港湾の整備にとって大きな障害

となっていた。

この問題を解決するために, 常時は海底面下に格納されており, 高潮や津波が来襲するような異常時に浮上して, 港内を防御する可動式防波堤の開発を行ってきた。新しい概念の可動式防波堤として直立浮上式津波防波堤を選定し, この防波堤の実用を目指して技術課題の解明を行ってきた¹⁾。直立浮上式津波防波堤は, 図-1に示すように2重鋼管から成り, 下部鋼管を海底面下に設置し, その中に上部鋼管を収納する構造になっている。そして, 上部鋼管内に空気を供給することで, 浮力によって上部鋼管を浮上させ, 津波の侵入を遮蔽するものである。

本論文では, 直立浮上式津波防波堤の主要な技術的

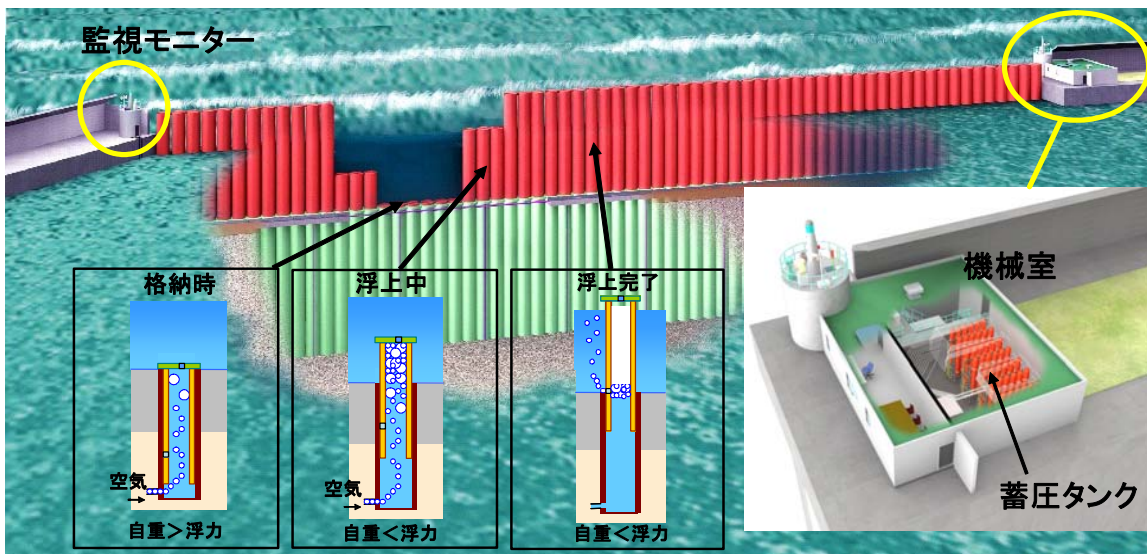


図-1 直立浮上式防波堤のイメージ

課題を明らかにして、その課題を解明するために採用した手法について述べると共に、その手法によって得られた結果についても述べている。

2. 構造の特徴と浮上・沈降の原理

2.1 構造の特徴

本防波堤は図-2に示すように、下部鋼管を打設後に内部掘削を行い、上部鋼管を下部鋼管内に挿入する鞘管構造になっている。法線方向には隣り合う鋼管の間に数%の開口部が存在する状態で、鋼管を壁状に設置して防波堤を形成する。上部鋼管に作用する水平波力は図-3に示すように上・下部鋼管のオーバーラップ部を介して下部鋼管に伝達され、下部鋼管の周辺の地盤反力で支持される。上部鋼管と下部鋼管は上部接点と下部接点で接触しているために、その点では非常に大きな反力が発生する。特に、上部接点では上部鋼管に作用する水平外力と下部接点での反力との合力が作用するため、非常に大きな力が作用することになる。そのために、これらの接点では鋼管の変形を抑える補強材が必要となる。

2.2 浮上・沈降の原理

図-4に浮上方式の基本原則を示している。下部鋼管内に挿入した上部鋼管内部に空気を送り、上部鋼管内部に貯留する。内部空気による浮力が上部鋼管の水中重量を超えると浮上を開始し、浮上とともに水圧の低下で内部空気は膨張し、空気の供給と膨張によって浮力は増大し、スムーズな浮上を継続する。ただし、空気が所要の体積以上になると、排気孔から余分な空気は排出されるシステムとなっている。また一方、上部鋼管の沈降に当たっては、空気室上部の排気バルブを開放して、内部空気を排出することによって行う。

上部鋼管には予め密封した空気室を設けている。このようにしたのは上部鋼管を浮上させるに必要な空気供給量を少なくし、直ぐに浮上開始するようにするとともに、蓄圧タンクの容量を小さくして経済性を高めるようにしたものである。

3. 本防波堤の特長と技術的課題

3.1 本防波堤の特長

本直立浮上式防波堤の特長を以下に示す。

- ① 通常時は海底地盤内に格納されていて、異常時にのみその機能を発揮するために、船舶航行上の障害にならない。また、潮汐や海流を妨げることがないために、港内の海水交換に支障を与えない。
- ② 海底地盤中に格納されているために、地震に対する安全性が高い。
- ③ 鋼管の浮上・沈降には浮力を利用するために、蓄圧タンク（またはコンプレッサ）と送気管だけで

- よく、大規模な駆動装置を必要としない。
- ④ 材料として施工実績の多い鋼管を使用しているために、材料面での信頼性と安全性が高い。

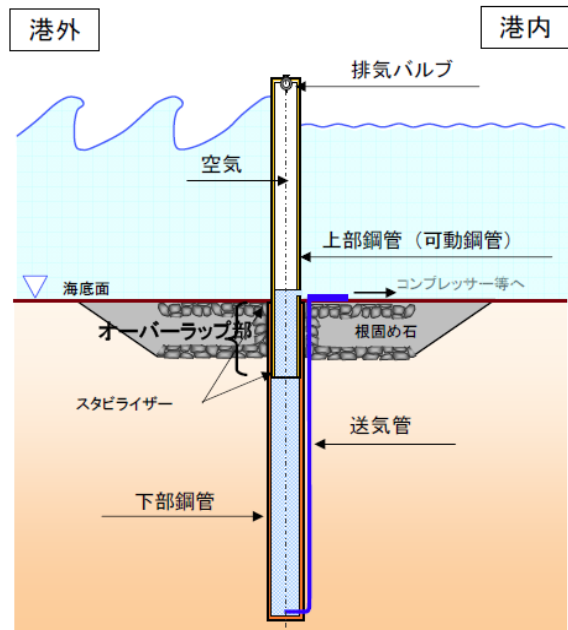


図-2 防波堤の構造模式図 (断面図)

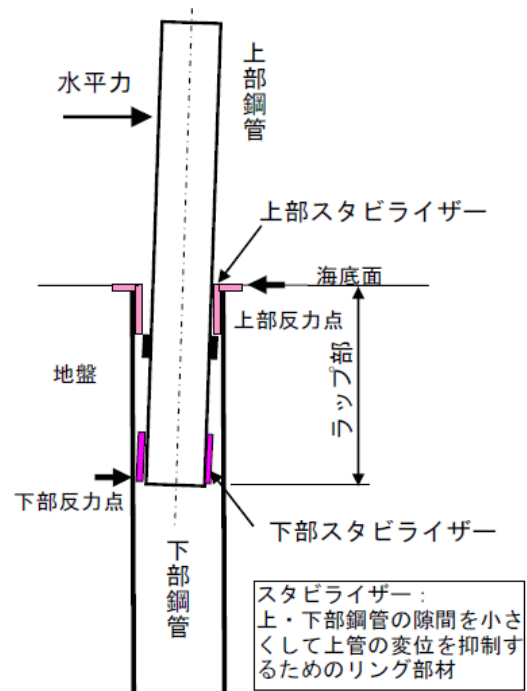


図-3 水平外力の伝達機構

3.2 技術的課題

本直立浮上式防波堤は鋼管式防波堤と形式的には類似しているが、上部鋼管が浮上してくるために上部鋼管間に開口部を有すると同時に、上部鋼管は外力の作用で振動するという今までにない特性を有している。このような特性に起因した新たな技術課題が生じている。それらの課題を以下に示す。

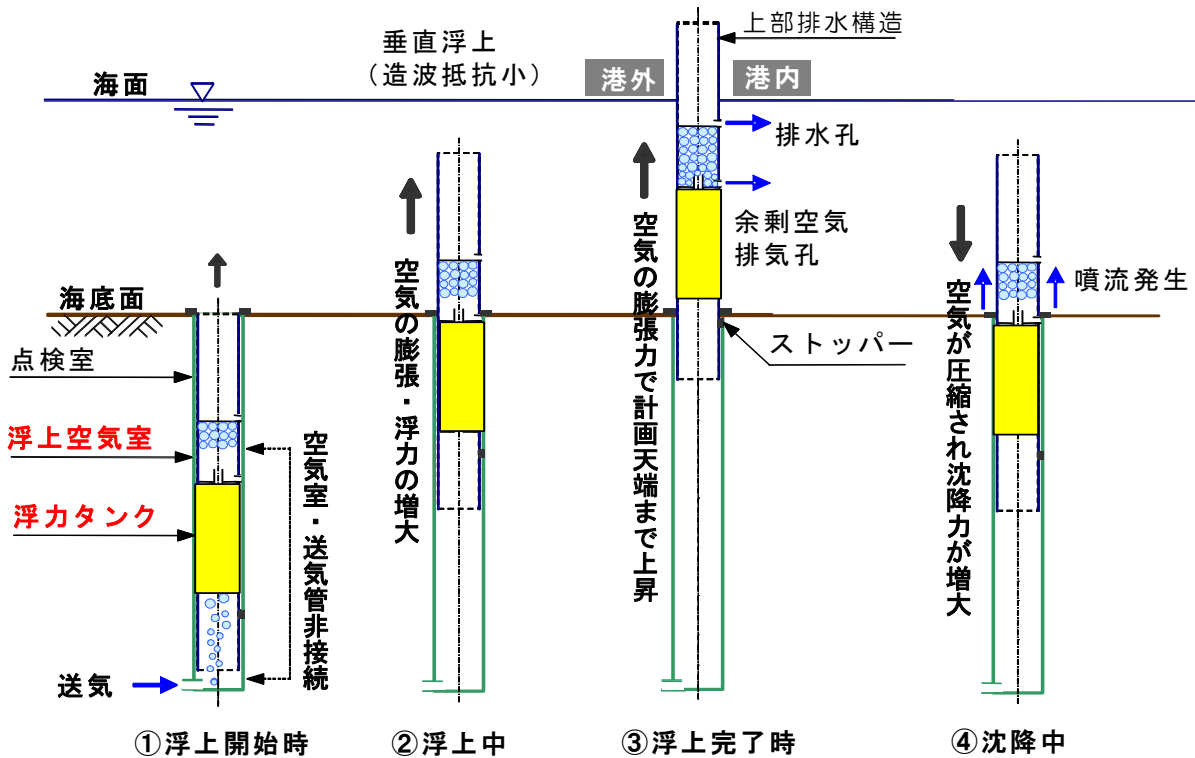


図-4 浮上の基本原理

- ① 上部鋼管間に開口部を有するために、波浪や津波が防波堤背後に透過することになり、防波堤の防御効果が低下する。この防護効果を明らかにすること。
- ② 上部鋼管の動的挙動特性と下部鋼管との接触作用力の解明
- ③ 上部鋼管と下部鋼管のオーバーラップ部における補強方法と応力分布の解明
- ④ 2重鋼管構造の施工可能性と波浪中における円滑で確実な浮上・沈降の確認
- ⑤ 沈設中の生物付着状況と構成部材の腐食耐久性

4. 課題解明に向けて

4.1 波浪防御効果

下部鋼管の外径が大きいため、上部鋼管間には隙間が開いており、この隙間の割合を開口率 α と定義すると、 $\alpha = b/(B+b)$ となる。ここに、 b は鋼管間の隙間幅で、 B は上部鋼管の外径である。開口率を0.05と0.1、0.15の3種類について模型実験を実施し、波浪の透過率を調べた。ここで、透過率とは入射波高に対する透過波高の比であり、防波堤の背後空間が無限に広いと仮定したときの値である。

模型実験は(独)港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路(長さ:184m、深さ:12m、幅:3.5m)で実施した²⁾。模型は縮尺1/5で作製した。写真-1は実

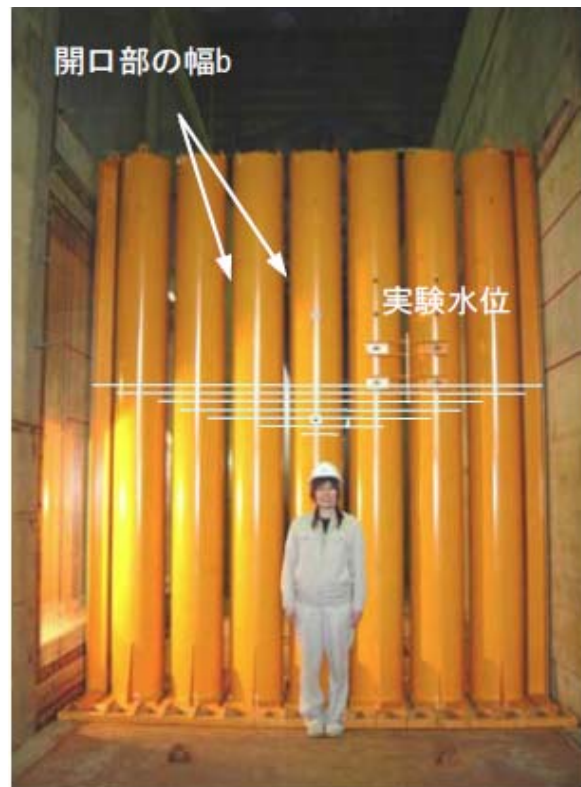


写真-1 実験模型 (縮尺:1/5)

験模型の設置状況を示している。

本実験で得られた開口率と透過率との関係を図-5に示す。図-5中の数値は模型上での値を示し、記号は次

の通りである。 a_1 は津波の高さ、 H は波高、 T は周期、 h は水深である。 模型上で周期が 20s 以上を津波とみなし、 5.5s 以下の波を風波とみなして整理している。 この図から、 開口率 0.05 では透過率は 0.3~0.4、 開口率 0.10 では 0.4~0.6、 開口率 0.15 では 0.6~0.8 となつて、 開口率が大きくなればなるほど透過率は大きくなる傾向にある。 風波対象の場合と津波対象の場合とでは少し透過率が異なり、 風波対象の場合の方が平均的に見ると 0.05 程度透過率が大きい傾向がある。 風波対象では周期が長いと、 透過率がわずかに大きくなる傾向にあるが、 津波のように長くなると透過率は逆に風波の場合より小さくなる。 反射波は開口率が小さくなればなるほど大きくなる。 その結果、 透過波は小さくなる。 短周期の波では波圧は水面付近で大きく作用するが、 長周期波では水面から水底まで一様な波圧が作用する。 そのため、 長周期波では開口部を通して流れ込む流速が大きく、 流速の自乗に比例するエネルギーが失われることで、 長周期波の透過率が小さくなったものと考えられる。

防波堤の波浪防御効果は、 風波のような波の場合には図-5 に示す透過率で判断することができるが、 津波のように周期が長い場合には防波堤背後の水域の広さによってその効果は異なる。 そのために、 背後の水域の広さを考慮したシミュレーションによって防波堤の防御効果を検討する必要がある。

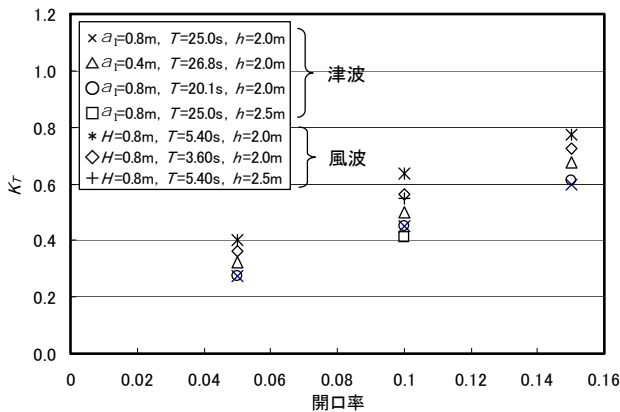


図-5 開口率と透過率との関係

4.2 上部鋼管の動的応答

本防波堤は、 通常時、 上部鋼管を下部鋼管内に格納しており、 津波の来襲のような異常時に空気を供給して、 浮上させ、 港内を防護するシステムとなっている。 そのため、 上部鋼管は作用する津波や波浪といった外力の作用で動揺する。 上部鋼管が動揺しながら下部鋼管に接触する際に衝撃的な力が作用することが沼津港における波浪中における現地実験 (写真-2) から明らかになった³⁾。 特に、 波浪中においては上部鋼管の動



写真-2 波浪中における現地実証実験

揺加速度に比例した衝撃力が上・下部鋼管のオーバーラップ部に作用することがわかった。 そのことから波浪による繰返し疲労の問題が新たに懸念されるようになった。

この衝撃力の解析には波浪中における上部鋼管の応答解析モデルの開発が必要になった。 上部鋼管の応答解析モデルとしては図-6 に示すような上部鋼管の並進運動と重心周りの回転運動の 2 自由度の運動モデルを基本に考えた⁴⁾。 上下運動については、 余剰浮力とストッパーによって上部鋼管が拘束されているために無視している。 その基礎式は以下のとおりである。

$$(M + m_a)\ddot{x} + \{c(x) + C\}\dot{x} + \{k(x) + K\}x = F \quad (1)$$

ここに、

x : 上部鋼管の運動成分で、 並進運動と重心周り回転成分

M : 上部鋼管の質量と慣性モーメント

m_a : 付加質量と付加慣性モーメント

$c(x)$: 支持構造部材 (スタビライザー一部) の減衰係数

C : 造波減衰係数

$k(x)$: 鋼管や支持構造部材等の剛性

K : 復元力あるいはモーメント係数

F : 外力あるいはモーメント

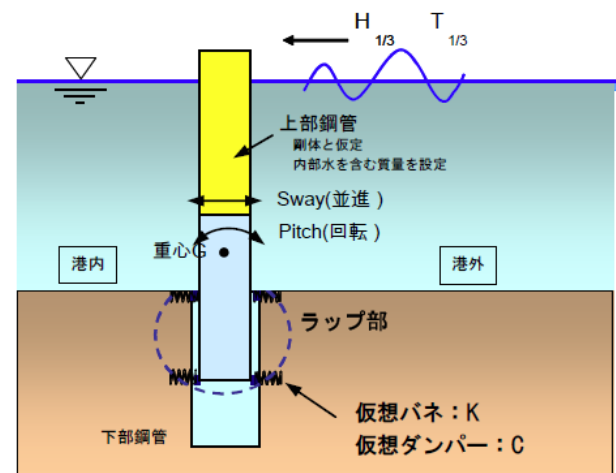


図-6 上部鋼管の応答解析モデル

式(1)の減衰係数や剛性など必要な係数を適切に定めて、計算を行うと、図-7に示すように実験結果をよく再現することができた。図-7では、上部鋼管の天端における加速度を実験と計算で比較したものである。これによって、衝撃緩和対策として緩衝ゴム等を使用する場合の衝撃力緩和効果を定量的に把握することが可能になった。

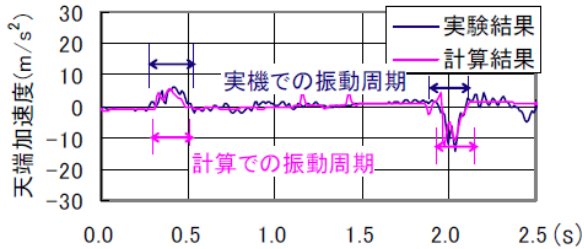


図-7 上部鋼管の加速度応答解析

周期の長い津波対象波に関して段波状の津波が上部鋼管に作用するとして、波圧と歪計測を行った⁵⁾。その結果を図-8に示す。図-8において上4図は波圧の時系列波形を示し、最下図は歪の時系列波形を示す。波圧は模型上での値である。図中のzの値は上方正の鉛直軸を示し、静水面が原点になっている。これらの図の中で上から3枚目のz=0mの静水面における図において特に顕著に現れているが、津波が作用した直後に非常に大きなパルス状の波圧が生じている。しかしながら、最下図の歪の図にはこれに対応する歪が現れず、これは実際の波圧ではなく、上部鋼管が下部鋼管に接触したときに生じた振動が波圧センサーに大きな加速度振動を起こして生じたものであると考えている。横軸でt=43sのところでは大きな歪が生じており、波圧もこの時刻付近で大きな波圧となっている。この

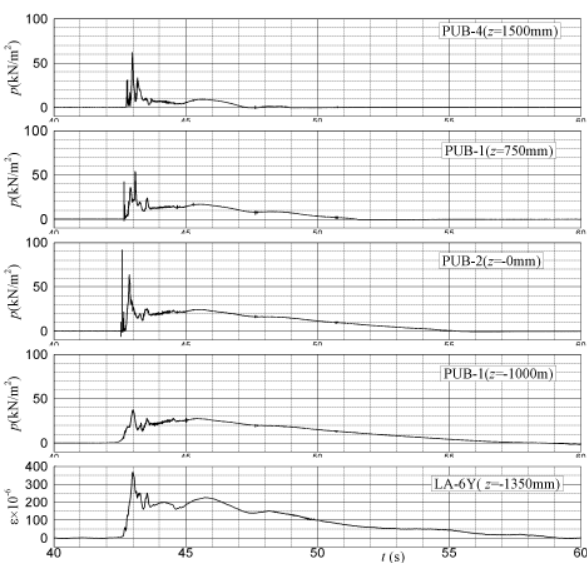


図-8 段波津波波圧とひずみの時系列分布

波圧は作用時間も短く、衝撃的な波圧で、津波が来襲して0.5s後に発生している。この波圧は段波の砕波によって生じたもので、津波本体の波圧はその後につき、ゆっくりした変化となっている。この衝撃的な波圧は、静水面では津波本体の波圧の2倍程度の値になっている。しかし、水中深くなると衝撃波圧の大きさは相対的に小さくなる。津波のような長周期波では、大きな波圧が作用するときは既に上部鋼管は下部鋼管に接触して、静止した状態になっているので、上部鋼管の動的な影響は小さい。

4.3 オーバーラップ部の応力分布

上部鋼管に作用する外力は上・下部鋼管のオーバーラップ部を通して下部鋼管に伝達される。そのために、上部鋼管と下部鋼管の接触部には非常に大きな力が作用する。上方と下方の2接触点のうち、特に上方接触点には上部鋼管に作用する水平外力と下方接触点で発生する接触力との合力が作用することになり、それは非常に大きな力となる。そのために、図-9に示すよう

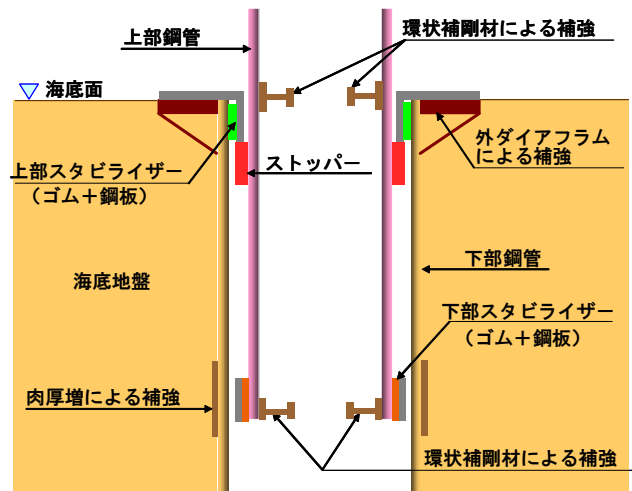


図-9 オーバーラップ部の補強構造

な補強が必要となる。図-9に示すように補強部の構造は非常に複雑であるために、補強部の構造が要求性能を満足しているか適切に照査する手法の確立が重要となる。

上部鋼管に作用する水平外力に対して上・下部鋼管にどのような応力が発生するかを現地実験で調べた。実験では上部鋼管に設計波の波力に相当する330kNの静的水平荷重を作用させて、上下部鋼管に発生する応力を測定した。そして、現地実験と同じ条件で3D-FEMの解析ソフト「ABAQUS」を用いて、応力を解析した。解析ソフト「ABAQUS」は、点接触の状態から面接触の状態に変化する過程が評価できるコンタクトペアと呼ばれる機能を有しており、本防波堤システムのように上・下部鋼管が点接触する状態から始まる構造物には適した解析ソフトである。

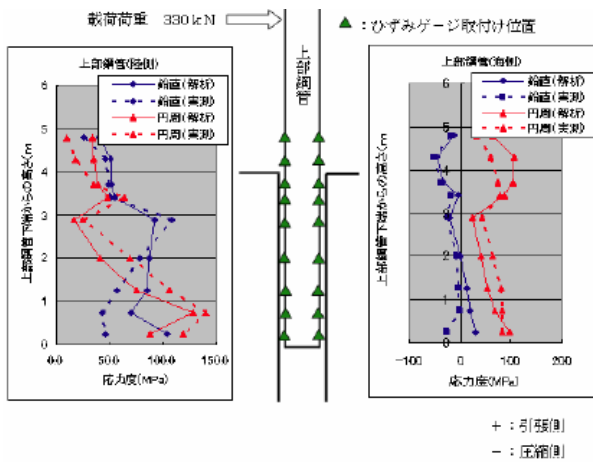


図-10 载荷荷重によって上部鋼管に生じる応力の解析値と実験値の比較

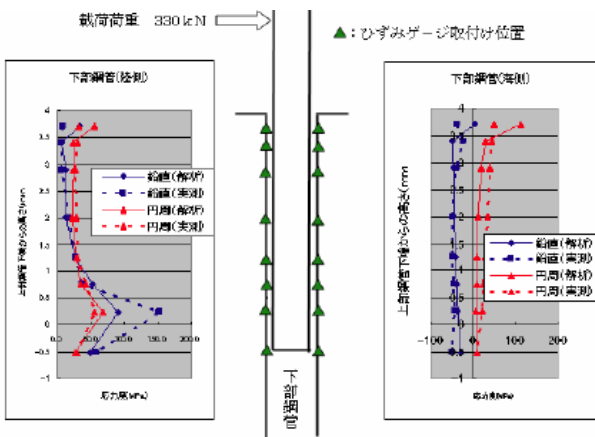


図-11 载荷荷重によって下部鋼管に生じる応力の解析値と実験値の比較

図-10 と 11 は実験と解析による応力を比較したものである⁶⁾。図-10 は上部鋼管に生じる応力であり、図-11 は下部鋼管の応力である。図中の実線が解析結果で、点線が現地実験結果である。また、赤い線が円周方向、黒い線が鉛直方向の応力を示している。正の値が引張り側の応力で、負が圧縮側の応力である。解析値が実験値からずれている箇所がいくつかあるものの、応力の分布形状としては円周方向も鉛直方向も実験地をよく再現している。このことから 3D-FEM の解析ソフト「ABAQUS」を用いて、複雑な補強材に生じる応力かなりの精度で解析できることがわかった。そこで、補強材を含めオーバーラップ部の応力を照査する手法として 3D-FEM の解析ソフト「ABAQUS」を用いることとしている。

4.4 浮上・沈降試験

現地実験において管内に圧力計と管天端に変位計を取り付けて、上部鋼管の浮上・沈降試験を行った。上部鋼管が浮上している状況を写真-3 に示す。この写真は上部鋼管がちょうど海面上に現れたところである。

上部鋼管内の空気圧と上端部の高さを数値計算して、観測値と比較した³⁾。その比較図が図-12 である。図中の実線が観測値で、点線が計算値である。また、赤い線が上部鋼管天端の高さで、緑色の線が管内空気圧である。そして、紫の線が上部鋼管内の水位の計算値である。管内の空気圧も上部鋼管の天端高さもどちらも計算通りに変化していることが明らかになった。このことから、上部鋼管の浮上時間と送気量との関係は数値計算で十分予測できることがわかった。

4.5 付着生物調査

現地実験において上部鋼管を沈降させた状態で 1 年間放置したのち、浮上させて付着生物について調べた。鋼管上蓋面と側面における付着生物の状況を写真-4 に



写真-3 浮上状態の上部鋼管

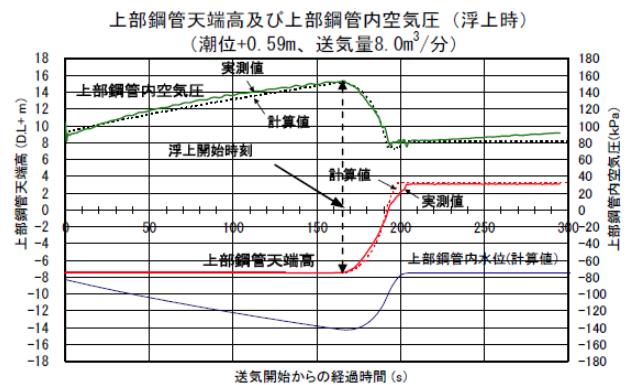


図-12 上部鋼管浮上に関する計算と実験の比較



写真-4 1年後の生物付着状況

示す³⁾。この写真からわかるように上蓋面に1~2mm厚のフジツボが見られるだけで、鋼管側面には付着生物はほとんど確認できなかった。上部鋼管浮上直前における下部鋼管内の溶存酸素濃度を計測した結果では2PPM以下であり、管内の光量不足と相まって藻類を含めた生物の成長を抑制できる環境であることがわかった。このことから鋼材の維持管理上非常に有利になることが判明した。

5. あとがき

直立浮上式防波堤について主ないくつかの課題について、水理模型実験や現地実験、数値計算を通して検討を行ってきた。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) 水理模型実験によって波浪の防御効果を調べた結果、開口率0.05の場合、風波対象波に対して透過率が0.35~0.40、津波対象波に対して透過率が0.25となった。
- 2) 波浪に対する上部鋼管の挙動については、応答解析モデルによって再現できることがわかった。それによって、上・下部鋼管の接触部に生じる衝撃力を求めることができるようになった。
- 3) 上・下部鋼管のオーバーラップ部には大きな力が作用するために補強材が必要になる。補強材を含めたオーバーラップ部の応力については3D-FEM解析で求めることができることが現地実験結果から判明した。
- 4) 上部鋼管の浮上・沈降については数値計算で十分に再現できることがわかった。これによって送気量に対する上部鋼管の浮上時間が設定できる。
- 5) 沈降させた状態で1年間放置したのち、浮上させて付着生物について調べた結果、上蓋面にわずかなフジツボが見られるだけで、鋼管側面には付着生物はほとんど確認できなかった。また、下部鋼管内の溶存酸素濃度は2PPM以下であり、生物が成長できないことがわかった。

このように直立浮上式防波堤が抱えていた技術的課題の主なものを解明することができ、実用化へ大きく前進したと考えている。しかしながら、実海域に適用するに当たっては設計上の課題だけではなく、施工上の課題もまだ多く残っている。このような可動式防波堤は世界初めての経験であり、実用化に当たっては考えられるあらゆる条件を想定し、検討しておくことが重要である。しかしながら、実際に建設してみなければわからない問題もあると考えられるので、試験堤の製作を通して問題点を洗い出し、解決することが重要になる。

本防波堤がその機能を発揮するのは常時ではなく、

津波来襲という異常時のときである。そのときは数年後であるかもわからないし、数十年後かもわからない。しかしながらそのときには確実にその機能が発揮できるようにしておかなければならない。そのための技術検討を今後も行ってゆく所存である。

本論文は、英国のリバプールで5月10~14日に開催された第32回国際航路会議(The 32nd PIANC Congress)で発表した論文を日本語版に校正し直したものであることを付記しておく。

謝辞

本防波堤を開発するに当たり、静岡県建設部港湾局沼津土木事務所の皆様並びに、(独)港湾空港技術研究所菊池地盤・構造部長と大阪産業大学飯田教授、また、(株)大林組、(株)東亜建設工業、三菱重工鉄構エンジニアリング(株)、新日鉄エンジニアリング(株)の皆様には多大なる支援を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 杉田博章・黒川文宏・平澤充成・斉藤輝夫・谷島義孝・須野原 豊・由木 誠・村井伸康：港口における可動式津波防波堤の適用性に関する一考察，海洋開発論文集，第26巻，pp. 255~260，2010。
- 2) 有川太郎・下迫健一郎・小林 真・虎石龍彦・新井 清・木原一禎：大規模水理模型実験による津波・高波に対する直立浮上式防波堤の水理特性に関する研究，海洋開発論文集，第23巻，pp. 117~122，2007。
- 3) 有川太郎・坂口 章・小林 真・虎石龍彦・櫻井良宏・木原一禎：直立浮上式防波堤の実海域実証試験，海洋開発論文集，第24巻，pp. 93~98，2008。
- 4) 木原一禎・有川太郎・坂口 章・濱地克也・永友久信・山本邦弘：直立浮上防波堤の数値計算手法に関する研究，海洋開発論文集，第25巻，pp. 99~104，2009。
- 5) 有川太郎・中野史丈・菊池喜昭・小林 真・木原一禎・櫻井良宏・虎石龍彦：浮上型の模型を用いた直立浮上式防波堤に関する大規模実験，海岸工学論文集，第55巻，pp. 906~910，2008。
- 6) 有川太郎・坂口章・木原一禎・小林真・山本邦弘・永友久信：直立浮上式防波堤ラップ部の補強方法に関する研究，第64回年次学術講演会講演概要集，第I部門，pp. 1265~1266，2009。

