

海底から浮上する防波堤

～直立浮上式防波堤～

井上博士・三城健一・木原一禎・木村博英

一般的な港湾は、外海の波浪に対して安全性を確保できるように、外郭施設となる防波堤が整備されている。しかし、港湾の港口部には船舶の航路を確保するために防波堤を設置することができず、大規模な高波等に対しては、必ずしも十分な安全性を確保できているとは言えない状況にある。

「直立浮上式防波堤」は、このような問題を解決するため、常時は鋼管を海底面下に格納し、高波来襲時など異常時にのみ上部鋼管を水面上に浮上させて、人命や港内施設等を自然災害から守るという全く新しい概念の可動式防波堤である。直立浮上式防波堤の開発は2004年から始まり、これまで大規模水理模型実験、数値シミュレーション、実海域実証試験等による技術的検証を行ってきた。本報では、本防波堤の概要とこれまでに実施した技術検証の一部について紹介する。

キーワード：防波堤，可動，直立，浮上，浮力，高波，防災

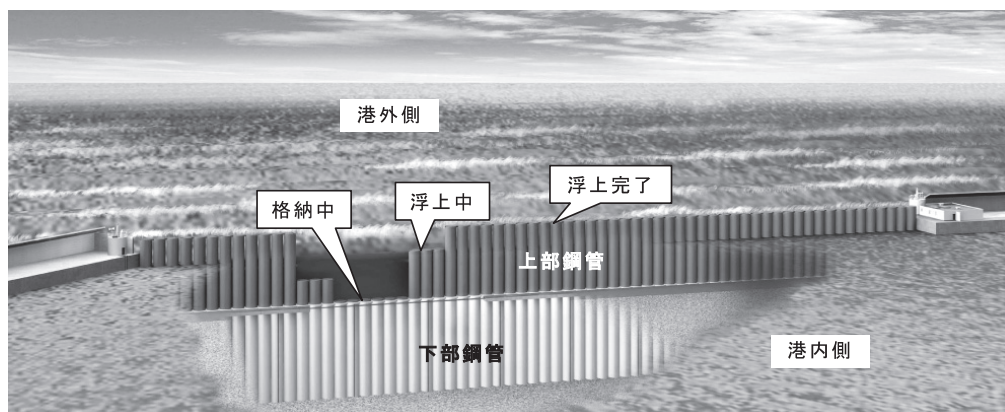
1. はじめに

わが国は四方を海に囲まれ、人口や都市機能が沿岸域に集中しているため、高波等による災害のリスクは大きい。さらに、東海・東南海・南海地震等の大規模地震発生の切迫性が指摘され、長期的には地球温暖化による海面上昇や台風の大型化も懸念されていることから、沿岸域における災害リスクは年々高まってきている。

全国各地の港湾では、高波等の災害から人命や港湾施設を守るため、防波堤の整備が進められてきた。しかし、港湾の港口部には船舶の航路を確保するために防波堤を設置することができず、港口部から侵入する高波等のエネルギーを十分に低減し、真に安全な港湾を整備することは難しいのが現状であった。

この問題を解決するため、新形式の可動式防波堤である「直立浮上式防波堤」の開発を行ってきた。直立浮上式防波堤は、鋼管を壁状に配置した防波堤であり、常時は航路を確保するために海底面下に格納し、高波来襲時等の異常時にのみ浮上して航路を封鎖して、港内への侵入波を遮蔽することが可能な新しい概念の防波堤である。また、災害回避後には、再び海底面下に沈降させることによって、早期に航路を開放することが可能である（図—1）。

本報では、直立浮上式防波堤の施工精度、建設コスト、構造特性、水理特性、耐久性、海生生物付着状況などを確認するため、官民共同で行った実海域における実証試験および適用可能性の確認などについて紹介する。

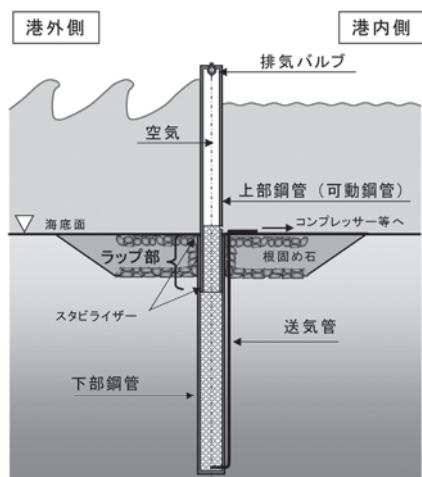


図—1 直立浮上式防波堤のイメージ図

2. 構造の概要と特長

(1) 構造概要

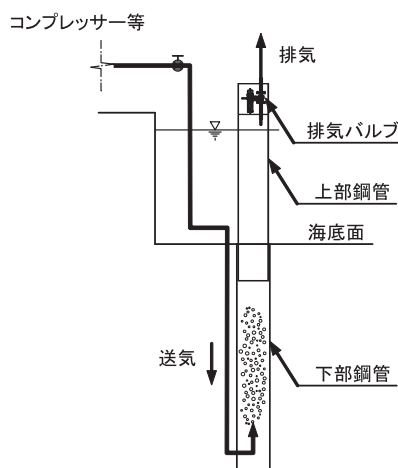
直立浮上式防波堤は、図一2に示すように海底面下に設置された下部鋼管とその内側に挿入された浮上・沈降が可能な上部鋼管（可動鋼管）からなる鞘管構造となっている。その鋼管を壁状に配置して防波堤を形成するが、防波堤の延長方向の隣り合う鋼管との間は、数パーセント程度の開口部を有する。



図一2 防波堤の構造模式図（断面図）

固定されている下部鋼管には、陸上の送気設備（コンプレッサー等）につながる送気管が取り付けられている。その送気管に空気を送ると、下部鋼管を通じて上部鋼管に空気を送ることができ、上部鋼管内に設けられた空気室に送り込まれた空気を貯留することができる構造となっている。

海底面下に格納された状態の上部鋼管内に空気を送ることにより、その空気による浮力が上部鋼管の有効



図一3 浮上・沈降の基本原理

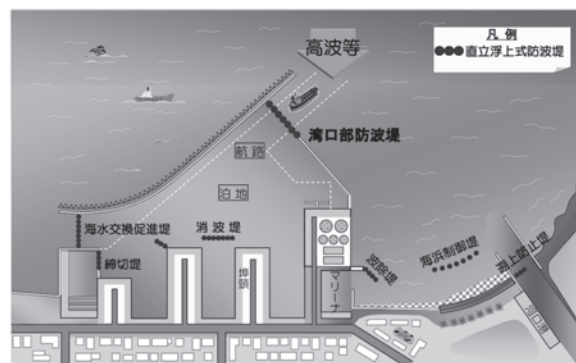
重量を上回ると浮上を開始し、水面上に突出して一定の高さで停止する。一方、上部鋼管の上部には排気バルブが取り付けられており、そのバルブを開放して空気室内に貯留された空気を排出すると、浮力が減少して上部鋼管が沈降する。浮上・沈降の速度は、送気量・排気量によって調整することが可能である。浮上・沈降の基本原理を図一3に示す。

(2) 特長

本防波堤は、前述のとおり上部鋼管内部への空気の送気および排気によって、上部鋼管の浮上・沈降を制御することが可能であり、以下に示すような特長を有する。

- ① 常時は海底面下に格納されているため、船舶の航行の支障とならない。また、潮汐や海流に影響を与えないため、港内の海水交換の妨げとならない。
- ② 上部鋼管の浮上・沈降には浮力を利用し、大規模な駆動装置を必要とせず、機構が単純なため、管理が容易である。
- ③ 海底面下に格納されているため、地震に対する安全性が高い。
- ④ 構成材料は施工実績の多い鋼管であるため、材料に対する信頼性および安全性が高い。

このような特長を活用し、本防波堤を港湾の港口部（航路部）に設置することにより、大規模な高波等による災害を防止したり、港内静穏度を確保して荷役稼働率を向上させたりすることが可能となる。本防波堤の利用例を図一4に示す。



図一4 直立浮上式防波堤の利用例

3. 技術的課題に対する取り組み

本防波堤の開発を進めるにあたっては、構造的な特徴から以下に示すような技術的課題を解決する必要があった。

- ① 隣り合う鋼管との間には隙間があり、開口部を有する防波堤となるため、侵入波に対する遮蔽（防御）

効果を明らかにする必要がある。

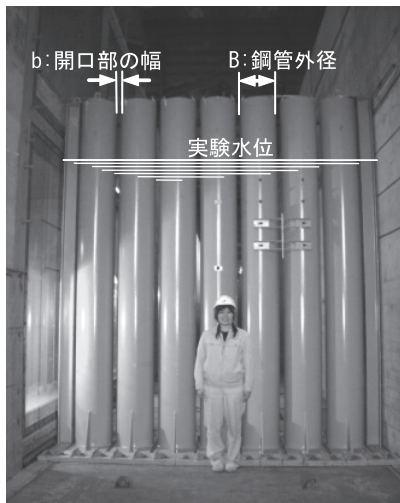
- ② 浮上・沈降に問題の無い精度の鋼管の製作と二重管（鞘管）構造の施工精度の確保が可能か、また、静穏時はもちろん波浪中においても円滑かつ確実に浮上・沈降するかを確認する必要がある。
- ③ 上部鋼管が受ける波浪等の水平力の下部鋼管への伝達機構を明らかにし、上部鋼管と下部鋼管が接触するラップ部の作用力を把握する必要がある。
- ④ 格納中の鋼管への生物付着状況と、各鋼製部材の腐食耐久性を確認する必要がある。

上記課題に対する取り組みの一つとして実施した水理模型実験^{1)~3)}と実海域実証試験⁴⁾の結果について、その一部を以下に紹介する。

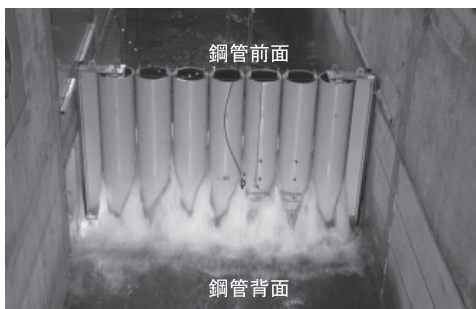
(1) 水理模型実験

波浪防御効果を明らかにするため、(独)港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路（長さ：184 m、深さ：12 m、幅：3.5 m）を用いて水理模型実験を行った。模型の縮尺は1/5とし、開口率は0.05、0.1、0.15の3ケースについて風波と津波を対象に実験を行った。

なお、開口率（ α ）は $\alpha = b / (B + b)$ （ b ：鋼管の開口幅、 B ：鋼管外径）とした。実験模型と実験状況を写真—1および写真—2に示す。



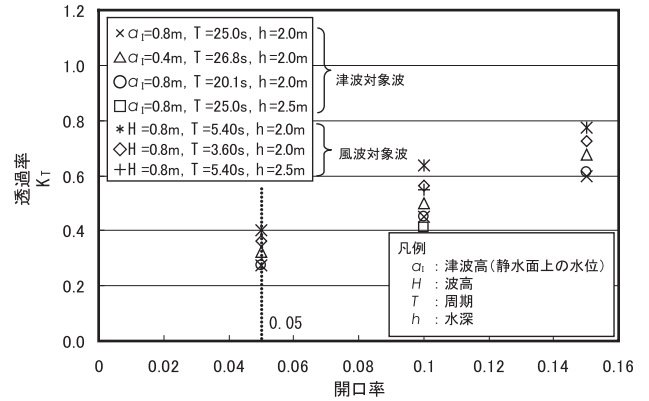
写真—1 実験模型



写真—2 実験状況（津波対象波）

(a) 透過率

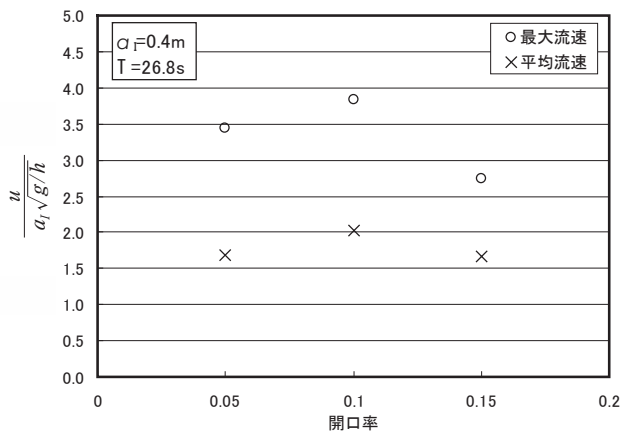
開口率と透過率の関係を図—5に示す。同図より、開口率が大きくなるに従って透過率も大きくなっていることが分かる。周期によっても異なるが、開口率0.05の場合、風波対象波に対して透過率0.35～0.40、津波対象波に対して透過率0.25～0.30程度となった。



図—5 開口率と透過率の関係

(b) 鋼管開口部の通過流速

開口率と開口部通過流速の関係を図—6に示す。なお、開口部通過流速 u は線形津波流速 $a_1 \sqrt{g/h}$ (a_1 ：津波高さ、 h ：水深) で無次元化した。同図より、無次元平均流速は1.5～2.0となった。この結果を用いて防波堤背後（港内側）への通過流量を概算することが可能である。



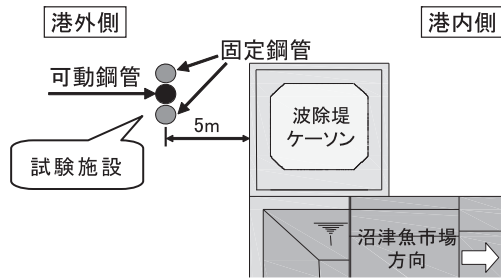
図—6 開口率と開口部の流速の関係

(2) 実海域実証試験

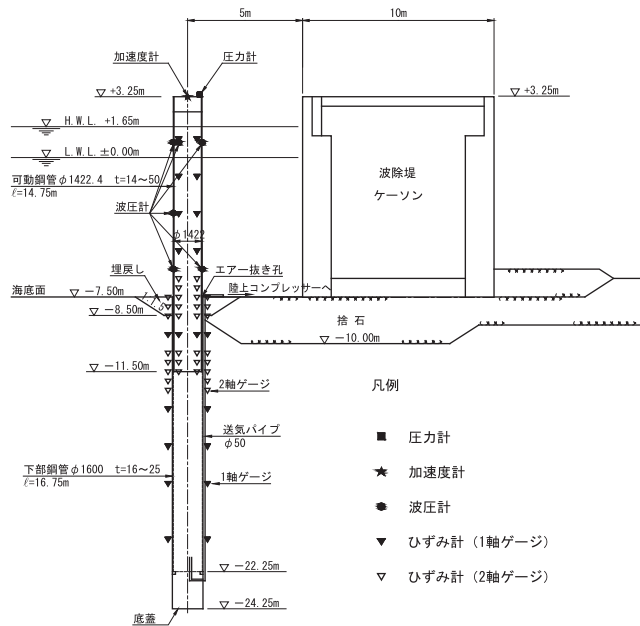
実海域における実証試験のため、平成18年9月に静岡県沼津港の港口部の波除堤ケーソン前面（港外側）に試験施設を設置し、約3年間にわたり実験を行った（図—7）。

(a) 試験施設の概要

試験施設の構造図を図—8に示す。



図一七 試験施設配置図



図一八 試験施設構造図

上部鋼管（可動鋼管）：φ 1,422 mm L=14.75 m
 下部鋼管：φ 1,600 mm L=16.75 m
 固定鋼管：φ 1,422 mm × 2 本（静岡県施工）
 設置水深：7.5m, 鋼管天端：+ 3.25 m
 浮上設備：コンプレッサー及び送気管

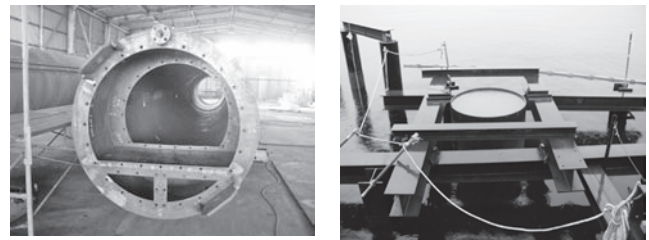
1年目は試験施設の施工後に可動試験及び水理・力学特性などの基本性能を確認し、2年目は上部鋼管を再浮上させた後、沈設後1年経過時点における付着生物調査や鋼材の劣化状況に関する調査を行った。

また、試験施設の設置から約3年経過した平成21年5月には、2年目の試験に加えて、下部鋼管内の溶存酸素濃度の調査、排気バルブ開閉等に関わるシステム機器の実証試験等を実施した。

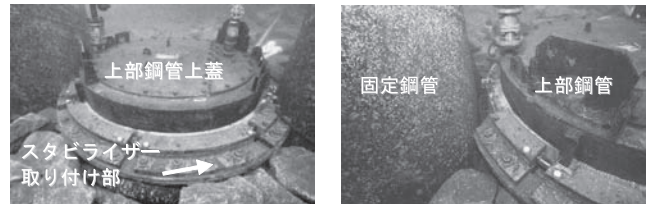
(b) 試験結果

①鋼管の製作及び施工精度

上部鋼管は肉厚の異なる4種類の鋼管を溶接接合して製作した。最も重要となる鋼管中心線のズレは0mmであり、十分な真円度を確保することができた。また、下部鋼管はウォータージェットを併用したバイブロンマーで打設したが、導材を設置することで、極めて



写真一三 上部鋼管製作状況及び下部鋼管打設状況



写真一四 上部鋼管格納時の状況

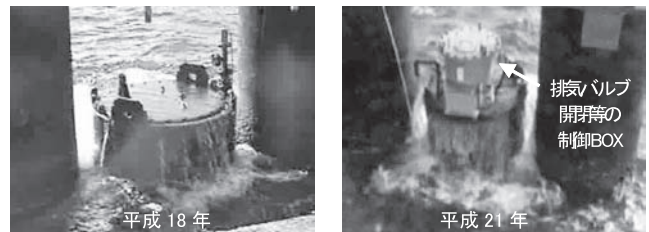
良好な鉛直精度を確保することができた（写真一三）。

上部鋼管を下部鋼管内に格納した状況を写真一四に示す。露出部分は、鋼管上蓋とスタビライザー取り付け部のみであり、海底面からの突出は無い。

②浮上・沈降試験及び再浮上試験

管内圧力計及び大容量変位計を取り付けた後、上部鋼管（可動部）の浮上・沈降試験を行った。

試験では送気量を変化させ、浮上時間との関係を調べた。延べ100回以上の浮上・沈降試験でトラブルは1回も無く、システムの信頼性を確認した。浮上試験の状況を写真一五に示す。



写真一五 浮上試験の状況

③水理・力学特性試験（波浪中応答試験）

波浪による上部鋼管の動揺によって、ラップ部における上・下部鋼管の接触点に作用すると考えられる衝撃力や、繰返し荷重による疲労の問題が懸念された。

上記のような問題の解決を目的として、上部鋼管を



写真一六 波浪中応答試験の状況

浮上させたままの状態にして、波浪時の上部鋼管天端加速度、上部鋼管前背面波圧、上・下部鋼管のラップ部周辺のひずみを約2週間にわたって経時計測した(写真-6)。

上部鋼管の波浪中の挙動について、図-9に示す上部鋼管(浮体)運動モデルを用いて数値解析により再現し、上部鋼管の天端加速度について実験結果と計算結果を比較した(図-10)。

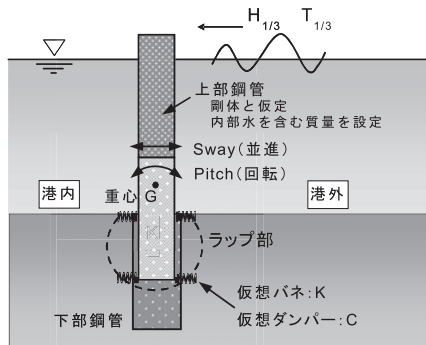


図-9 波浪中応答解析モデル

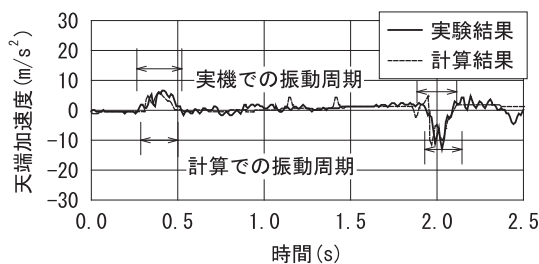


図-10 波浪中の上部鋼管の天端加速度

図-10より天端加速の実験値と計算値は良く一致しており、数値解析によって上部鋼管の挙動を再現できることが確認された。これにより、数値解析によってラップ部にゴム等の衝撃緩衝材を設置した場合のシミュレーションが可能となり、衝撃緩和対策に関する検討を既に完了している。

4. おわりに

本防波堤の実海域における実証試験等は、国土交通省中部地方整備局、(独)港湾空港技術研究所、(株)大林組、新日鉄エンジニアリング(株)、東亜建設工業(株)、三菱重工鉄構エンジニアリング(株)の共同研究で実施した。その他、これまでの研究開発により、本防波堤の波浪防衛効果、浮上・沈降性能及び波浪中の応答特性等を確認することができた。設計・施工面以外の今後の課題としては以下の点が挙げられ、早期実用化に向け更なる改良に努める予定である。

- ①本防波堤の一般的な耐用年数は50年以上を想定しており、機械(送・排気)設備や安全監視システムを中心に最適な維持・管理計画を立案し、当該経費の一層の削減を図る必要がある。
- ②航路閉鎖・開放時の安全性を担保し、合理的な運転計画を策定するため、実港湾における運用手法の整備を図る必要がある。

謝辞: 沼津港における実海域実証試験を行うにあたり、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 菊池喜昭地盤・構造部長をはじめとした皆様には多大なるご支援を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

JICMA

《参考文献》

- 1) 山根隆行, 有川太郎, 伊藤政人, 増山琢也, 亀井幸雄, 宮坂政司: 直立浮上式防波堤の開発, 海洋開発論文集 第21巻, pp.115~120, 2005.
- 2) 有川太郎, 中野史丈, 野村逸人, 下迫健一郎, 宮島正悟, 小林真, 虎石龍彦, 荒井清, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の津波・風波に対する水理特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1156, June 2007.
- 3) 有川太郎, 下迫健一郎, 小林真, 虎石龍彦, 荒井清, 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.
- 4) 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.

【筆者紹介】



井上 博士 (いのうえ ひろし)
東亜建設工業(株)
土木事業本部 設計部
海上グループ
グループリーダー



三城 健一 (みき けんいち)
(株)大林組 東京本社
土木本部 生産技術本部
海洋土木技術部
主任



木原 一禎 (きはら かずよし)
三菱重工鉄構エンジニアリング(株)
橋梁事業本部 技術統括部
技術グループ
部長代理



木村 博英 (きむら ひろひで)
新日鉄エンジニアリング(株)
海洋・エネルギー事業部
海洋・エネルギー第2ユニット
プロジェクト部
シニアマネジャー