

直立浮上式防波堤の実海域実証試験

THE FIELD EXPERIMENT OF BUOYANCY-DRIVEN VERTICAL PILING BREAKWATER

有川太郎¹・坂口章²・小林真³・虎石龍彦⁴・櫻井良宏⁵・木原一禎⁶

Taro ARIKAWA, Akira SAKAGUCHI, Makoto KOBAYASHI, Tatsuhiko TORAISHI
Yoshihiro SAKURAI, Kazuyoshi KIHARA

¹正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 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(〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1-57-3)

³正会員 修(工) (株)大林組 海洋土木技術部(〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴非会員 新日鉄エンジニアリング(株) 海洋・エネルギー事業部(〒100-8071 東京都千代田区大手町2-6-3)

⁵非会員 東亜建設工業(株) 土木部(〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁶正会員 修(工) 三菱重工鉄構エンジニアリング(株) 橋梁事業本部(〒108-8215 東京都港区港南2-16-5)

An innovative 'buoyancy-driven vertical piling breakwater' is under development to protect harbor facilities against high waves and tsunamis. This breakwater consists of rows of steel pipe piles and each pile consists of upper and lower steel pipes. The movable performance and hydraulic characteristics of the breakwater have been verified by the large scale hydraulic model tests. In addition, the performance of the breakwater in the sea has to be clarified for its realization.

This paper reports the results of the field experiment by a real scale structure. The results clearly demonstrate that: 1) The fabrication accuracy and the placing accuracy of the steel pipes were excellent; 2) The rising time of the breakwater in the waves was within a few minutes; 3) The transmission mechanism of the wave force from the upper pipe to the lower pipe has been proven; 4) The marine growth around the upper pipe was little.

Key Words: Movable breakwater, Buoyancy-driven vertical piling breakwater, Field experiment

1. はじめに

港湾の航路(港口)部ではこれまで防波堤を設置できなかったことから、航路から侵入する高波等のエネルギーを遮断し、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。

現在、官民共同で開発中の直立浮上式防波堤はこの問題を解決すべく、常時は鋼管を海底面下に沈設し、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港内施設等を守るという全く新しい概念の可動式防波堤である。

本防波堤の基本的な可動(浮上・沈降)性能は陸上施設における大規模模型試験(1/2縮尺)により確認され、数分程度で浮上できることが明らかとなっている¹⁾。また、風波・津波に対する防御効果は大規模水理模型実験及び数値シミュレーションにより明らかにされている^{2) 3) 4)}。

本防波堤は図-1に示すように、上部鋼管が下部鋼管内側に挿入された鞘管構造となっていることが大きな特徴であり、浮上時は上・下部鋼管のラップ

部で外力に抵抗する。それゆえ、以下に示すような課題があった。

- ① 上・下部鋼管の製作精度(真円度)や下部鋼管の鉛直打設精度が可動性能に影響を及ぼすため、それらの施工精度を現地で確認する必要がある。
- ② 波浪中においても、上部鋼管が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 上部鋼管から下部鋼管(地盤)への力の伝達機構を明らかにする必要がある。
- ④ 上部鋼管が下部鋼管内に長期間格納された状態での生物付着状況や上下管隙間からの土砂侵入状況を確認する必要がある。
- ⑤ ラップ部における鋼管の磨耗状況及び鋼管をはじめとした各部材の耐久性を確認する必要がある。

本研究では実海域実証試験によりこれらの課題を解決し、今後の設計・施工・維持管理手法に反映することを目的とする。

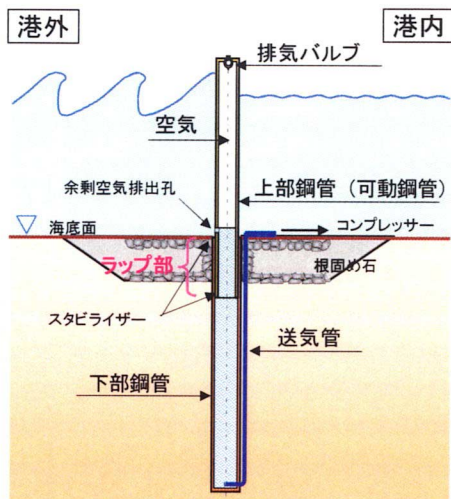


図-1 防波堤の構造模式図 (断面図)

2. 実証試験施設の概要

(1) 試験施設の概要

試験施設は平成18年9月上旬に、静岡県沼津港のケーソン前面に設置された(図-2)。試験施設の構造図を図-3に示す。試験はケーソン護岸の前面5m、水深7.5mの海域に直立浮上式防波堤1本(上部鋼管、下部鋼管)を構築し、その両側に固定鋼管2本を設置して行った。施設の諸元を以下に示す。

上部鋼管(可動鋼管)：Φ1.422m L=14.75m

下部鋼管：Φ1.600m L=16.75m

固定鋼管：Φ1.422m×2本(静岡県施工)

設置水深：7.5m

潮位：LWL：±0.0m (T.P-0.98m)

HWL：+1.65m

鋼管天端：+3.25m

浮上方法：コンプレッサー及び送気管による送気システム

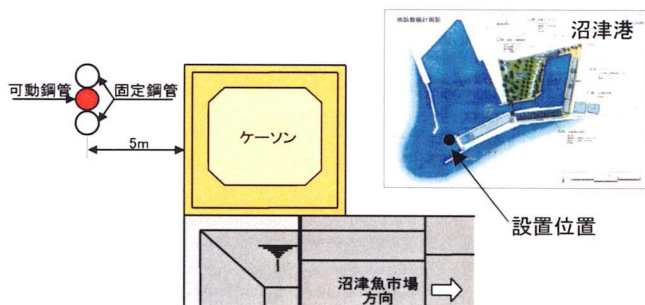


図-2 試験施設の設置位置

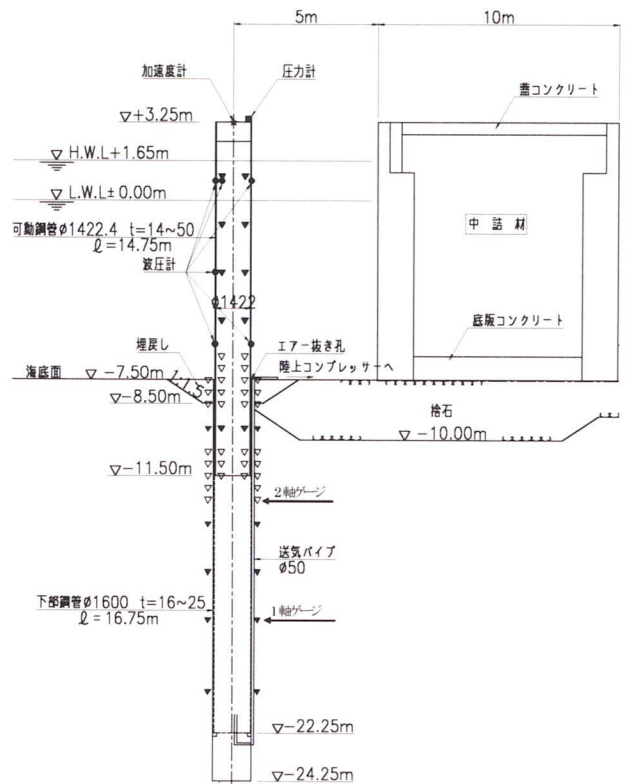


図-3 試験施設構造図(計測器配置図含む)



写真-1 実証試験施設(可動鋼管及び固定鋼管)

(2) 試験項目及び工程

本実証試験で行う試験項目と概略工程を表-1に示す。1年目は施設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。

表-1 実証試験項目と概略工程

実験項目	目的・年度	目的	平成18年								平成19年			
			5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
① 鋼管防波堤製作		鋼管の製作精度の確認												
② 鋼管設置		鋼管の打設精度(設置間隔)の確認												
③ 鋼管浮上降下試験(1年後再浮上)		鋼管が短時間(数分程度)で浮上するかの確認												
④ 水平載荷試験		鋼管に水平力を与え、上管から下管への力の伝わり方を確認												
⑤ 水理・力学特性に係わる試験		鋼管に働く波力・鋼管内のひずみを計測												
⑥ 鋼管耐久性試験(初期値、1年後)		長期間浮上させた状態での磨耗損傷度を確認												
⑦ 地盤高調査(初期値、1年後)		下部鋼管内への土砂の浸入、周辺地盤高(侵食)												
⑧ 海生生物付着(初期値、1年後)		生物等による付着抵抗計測、付着生物調査												
⑨ データ解析・評価		データの分析・評価、数値解析による検証												

(3) 計測概要

図-4に計測方法のイメージ及び計測器一覧を示す。なお、計測器の設置位置は前出の図-3にも示している。波浪中の水理・力学特性試験の計測期間は2006年10月5日～10月18日までの約2週間であり、計測期間中の最大波は最大波高 $H_{max}=0.87\text{m}$ （有義波高 $H_{1/3}=0.49\text{m}$ ，周期 $T=3.5\text{s}$ ）であった。なお、その期間の出現波高が若干小さかったことより、11月7日の暴風時（推定有義波高1.0m）に加速度計測のみを別途実施した。

また、浮上・沈降試験期間中は、上部鋼管への送気量（浮力）と上部鋼管天端位置の関係を明らかにする目的で、管内空気圧計並びに大容量変位計を上部鋼管上蓋位置に追加設置した。

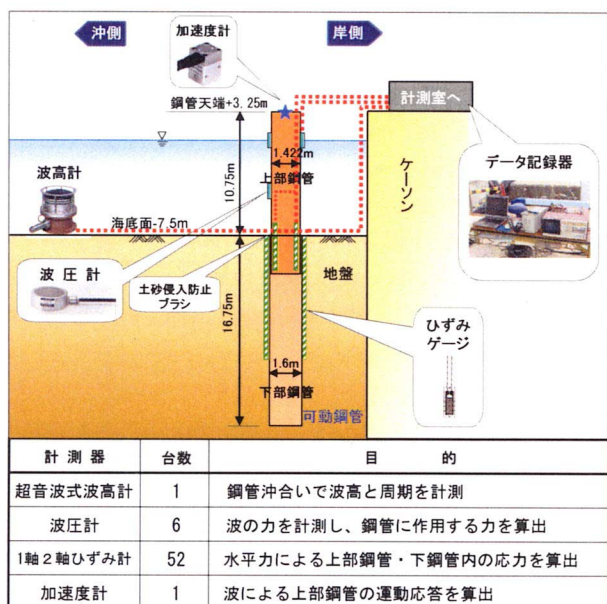


図-4 計測のイメージ図

3. 試験結果

(1) 鋼管製作及び鋼管打設精度

本試験工事では主に以下の項目を確認した。

- ・上・下部特殊鋼管の製作精度確認（真円度）
- ・下部鋼管の鉛直打設精度の確認
- ・下部鋼管内部・外部配管取付作業の確認

a) 上・下部特殊鋼管の製作精度

上部鋼管は、外径 $\phi=1422.4\text{mm}$ で肉厚 $t=14\sim 50\text{mm}$ の4種類の鋼管を溶接接合して製作した（写真-2）。その時の最大外径は1425mmであり+2.6mmの精度で仕上げることができた。また、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。下部鋼管についても肉厚の異なる鋼管を溶接して製作したが、上部鋼管同様に施工性は良好であった。

b) 下部鋼管打設精度

下部鋼管はウォータージェットを併用したパイプロハンマーにより打設した。導材を併用することにより極めて良好な鉛直精度を確保することができた

（写真-3）。なお、今回は試験施工のため海底面より上の部分の鋼管を水中切断したが、今後はヤットコを使用すること等を考えている。

上部鋼管を下部鋼管に挿入した後、着底させた状況を写真-4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。



写真-2 上部鋼管の製作状況（左：下端，右：上端）

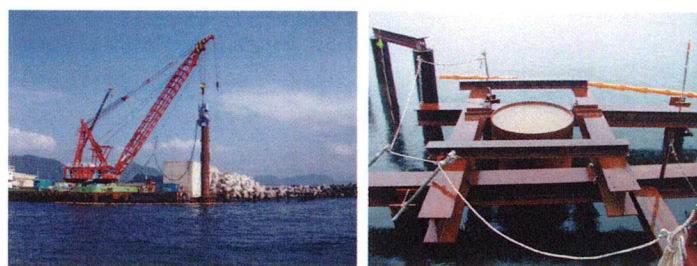


写真-3 下部鋼管の打設状況（左：下部鋼管打設，右：導材）

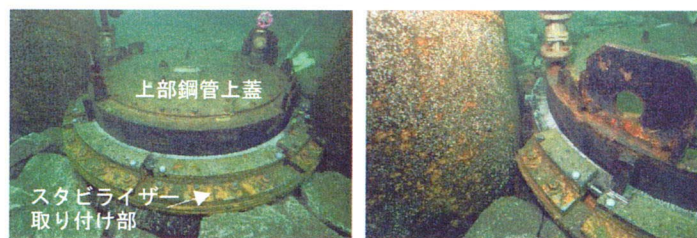


写真-4 上部鋼管着底時の海底面の状況

(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。試験状況を写真-5に示す。

送気設備はコンプレッサー（送気量 $5.8\text{m}^3/\text{分}$ ，送気圧 0.83Mpa ），リザーバータンク及びオイルフィ



写真-5 浮上試験の状況（浮上中）

ルター等からなるシンプルなものである（図-5参照）。送気口から放出された圧縮空気は下部鋼管内で泡状になり上部鋼管に貯留される。このように、空気貯留部と送気管を分離することにより、浮上完了後の沈降リスクを回避できる。

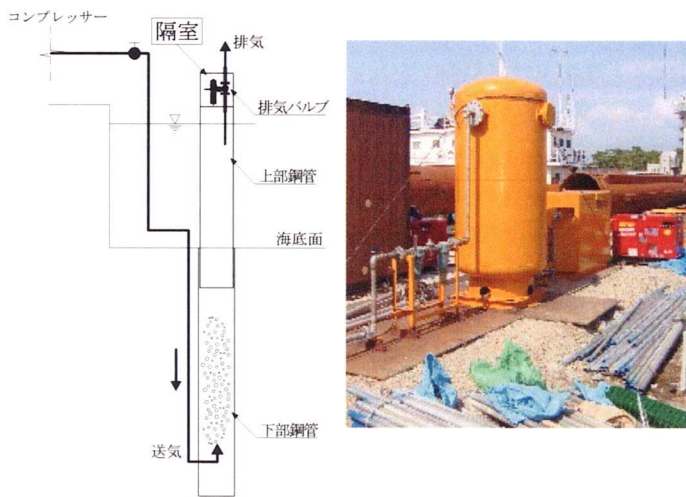


図-5 送気設備の概要

本試験は、送気量を数ケース変化させ、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。

図-6に送気量 $8.0\text{m}^3/\text{分}$ （リザーバータンクにより $5.8\text{m}^3/\text{分}$ 以上の送気量）のケースにおける、送気時間に対する上部鋼管内空気圧（大気圧含まず）と鋼管天端位置の関係を示す。浮上状況を見ると、送気開始後の165s（3分弱）で管内圧力が最大となる時刻に浮上を開始し、浮上に伴い管内空気圧は低下する。このため、浮上中は空気の体積が膨張し実質的に浮力が大きくなっていることが分かる。

図中には数値シミュレーション結果（破線）も併記したが、実測結果と良く一致していることが分かる。

2007年11月に上部鋼管を約1年間沈設した後に再浮上させたときの圧力を計測したが、圧力変化は全く無く、浮上に必要な浮力は変化していない。これ

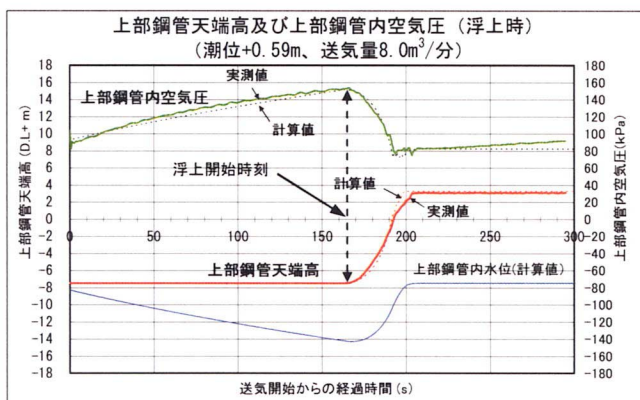


図-6 浮上試験結果（計算値との比較）

れは、後述するように、1年間経過後も生物付着が微少であり、付着抵抗が無かったためである。

(3) 水平载荷試験

本試験は上部鋼管に作用した波力が下部鋼管にどのように伝達されるかを確認するために実施した。実験前の時点での力の伝達イメージを図-7に示す。

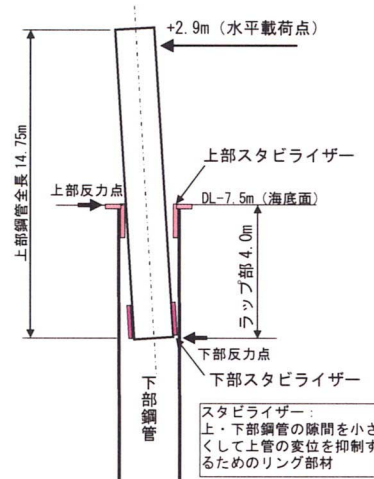


図-7 力の伝達機構のイメージ

すなわち、ラップ部の上下のスタビライザー（隙間調整部材）で2点支持され、下部鋼管を介して地盤に力が伝達されるという非常にシンプルな機構となっている。試験はこの点を検証する目的で、3年確率の波浪荷重（ $F=330\text{KN}$ ）に相当する水平力を最大载荷重として、 60KN ごとに载荷重を増加させ、载荷重に対する鋼管ひずみ、上部鋼管の上端・下端変位、上部鋼管傾斜角の関係を求めた。

試験の状況を写真-6に示す。計測されたひずみ（応力）を作用モーメントに換算した結果を図-8に示す。このとき、上・下部鋼管の肉厚（断面係数）変化を考慮した。上部鋼管からの水平力は当初想定していた通り、ラップ部の上端、下端で2点支持され、それらの支持点で下部鋼管への力の伝達が行われることが分かった。この支持点では応力集中が発生するので鋼管の補強対策が必要となる。



写真-6 水平载荷試験の状況

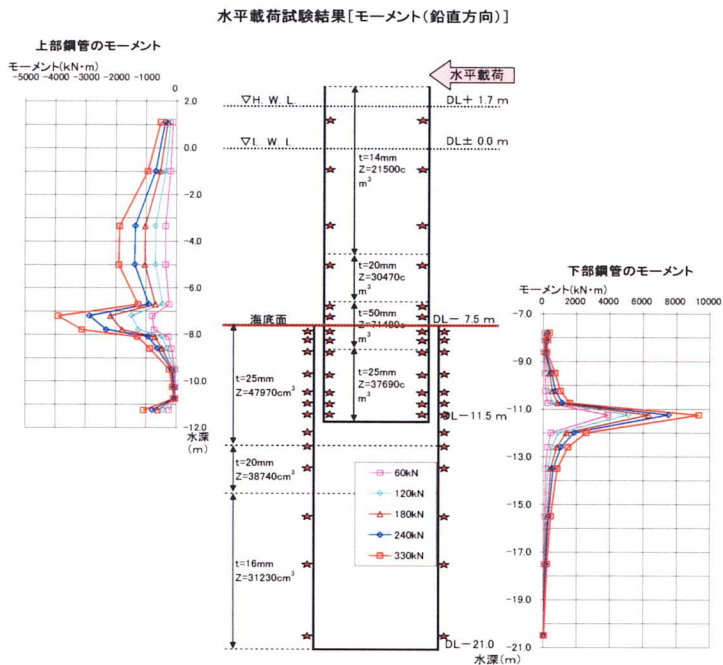


図-8 水平載荷試験結果

(4) 水理・力学特性試験（波浪中応答試験）

上部鋼管を約2週間浮上させたままの状態にして、波浪時における波圧、加速度、ひずみを自動計測した。データ処理は毎正時±30分で全期間に亘って統計処理を行った。計測期間中に台風18号の影響を受け10月16日に有義波高 $H_{1/3}=0.49\text{m}$ ($H_{\text{MAX}}=0.87\text{m}$)の最大波高が発生した。その時の時刻歴波形(6秒間抽出)を図-9に示す。波高計は鋼管中心位置より16m沖合いに設置しているため、波形の位相は他の計測項目と直接対応していない。

港外側波圧計(WP0-1: 静水面+0.8m)の波形を見ると、波周期と同等の周期を有する通常波圧(3kPa)に加えて、衝撃的な水圧(14kPa)が発生し、合計17

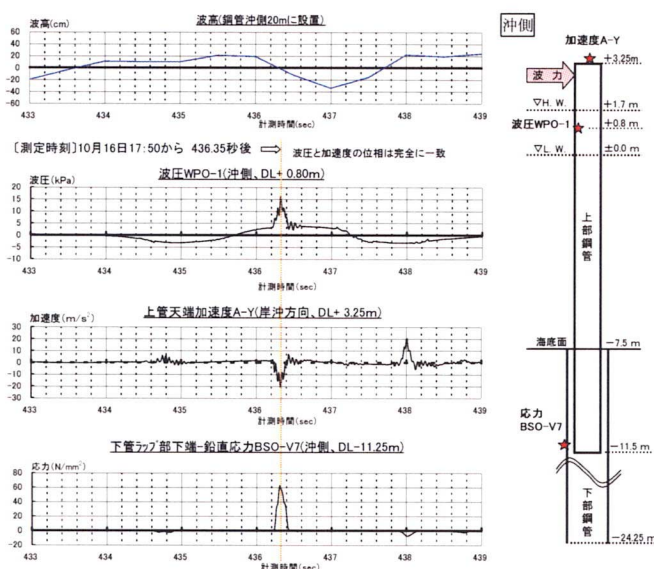


図-9 上・下部鋼管接触時の衝撃波形
(水圧、加速度、ひずみ)

kPaとなっている。この衝撃的な水圧は、上・下部鋼管がラップで接触することに伴い発生する加速度に起因する動水圧成分であると考えられ、同様の波形はかなりの頻度で計測された。この接触に伴い、下部鋼管沖側接触部(BS0-V7)には比較的大きな応力が発生しており(岸側接触部も同様の傾向)、高波防御(港内静穏度)対策として本防波堤を利用する場合は緩衝材等による衝撃緩和対策が必要であることが分かった。

前試験に追加して、スタビライザーと上部鋼管の隙間を原設計より約1/2に縮小して、加速度低減効果を調べた(写真-7)。その結果、隙間縮小前に比較して加速度の低減が見られた。これは、隙間縮小により、接触までの荷重(波力)上昇が抑えられたためであり、隙間を小さくすることが衝撃力緩和の一手法として非常に有効であることが分かった。



写真-7 加速度の計測状況(11月7日 $H_{1/3}=1.0\text{m}$)

(5) 付着生物調査

施設の最終沈設後から約1年経過した平成19年11月中旬に上部鋼管を再浮上させ、ダイバーによる付着生物の調査を行った。

鋼管上蓋面及び側面における生物付着の状況を写真-8に示す。付着生物は上蓋面に1~2mm厚のフジツボが見られただけで、生物相も貧困であった。これは、上部鋼管が光量や溶存酸素の少ない(海水交換がない)下部鋼管内に格納され、新鮮な海水に直接触れていなかったためと考えられる。

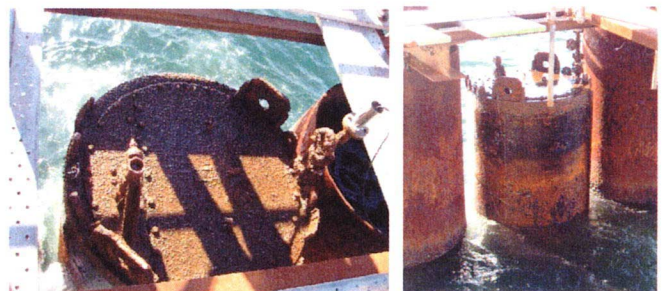


写真-8 上部鋼管の生物付着状況(左:上蓋, 右:側面)

(6) 鋼材耐久性調査

本試験の使用鋼材は試験用にすべて無防食としており、(5)の付着生物調査と併行して、鋼管本体やスタビライザーの磨耗・腐食状況を調査した。

写真-9(左)に示すように、上・下部鋼管が接触

するラップ部では、黒皮の剥がれ（白く光る部分）は見られたが、損傷や腐食は見られなかった。一方、スタビライザーには部材外周部に局部的な孔食が見られたが、損傷は見られなかった（写真-9 右）。



写真-9 1年経過後の磨耗・腐食状況
(左：ラップ部，右：スタビライザー)

(7) 管底地盤高調査

土砂侵入防止ブラシによる土砂防御効果を確認するために、レッド測深により下部鋼管底部のレベルを測定した。1年前に比較して40cm程度の土砂が堆積していたが、表層土砂の成分検査したところ、大部分が鋼管黒皮の剥離片やシルト分（鋼管中掘時の内壁付着土砂）であり、海底周辺地盤の主成分である砂分は全く検出されなかった。よって、ブラシは有効に機能していたと考えられる（写真-10参照）。



写真-10 土砂侵入防止ブラシの状況（1年経過後）

4. まとめ

- ①肉厚の異なる鋼管を接合して製作した上・下部特殊鋼管の製作精度（真円度）は良好であった。また、下部鋼管の鉛直打設精度も基準値以内に収まっていた。よって、従来技術により鞘管（上・下部鋼管）を精度良く施工できることが分かった。
- ②簡易な送気設備により、数分以内で上部鋼管をスムーズに浮上させることができた。100回以上の試験中にトラブルは1回も無く、システムの信頼性が実証された。また、送気量を変化させた系統的な試験により任意時間での浮上が可能であることが分かった。これらの結果は、数値シミュレーション結果とも良く一致しており、解析手法の妥当性があらためて検証された。
- ③水平載荷試験により、上部鋼管から下部鋼管への力の伝達がラップ部を介して行われ、その部分に補強対策が必要であることが分かった。なお、可動性能を確保するため、補強設計では想定内の波

力及び津波力に対して塑性変形を生じさせないことを考えている。なお、想定外の外力が生じた場合は塑性変形する場合があるが、詳細については今後検討を行う予定である。

- ④水理・力学特性試験により、波浪時には上・下部鋼管が接触する際に衝撃力が繰返し発生するため、衝撃緩和対策が必要であることが分かった。
- ⑤上部鋼管を海底地盤中の下部鋼管内に約1年沈設後に再浮上させたが、付着生物は少なく良好な保管環境であった。また、使用鋼材の腐食状況やラップ部の鋼材磨耗状況が明らかになり、今後の維持管理手法の策定に反映する予定である。

5. あとがき

本実証試験では施工性確認のほか、今後の設計技術や維持管理技術の向上に繋がる有意義な成果が多数得られた。「4. まとめ」の③補強対策、④衝撃緩和対策の課題は本実証試験後に実施した3次元FEM構造解析やゴム等を用いた衝撃緩衝効果確認試験により解決済みであり、送気設備の縮小策やシステムの信頼性向上対策についても検討をほぼ完了している。

早期実用化に向けての今後の課題としては以下の点が挙げられる。

- ①本構造物の一般的な耐用年数は50年以上を想定しており、維持・管理計画を策定した上で、これら経費の一層の低減方法を検討する。
- ②運転計画の策定や航路閉鎖上の安全性確保を図るため、実港湾での運用手法の整備が必要である。

謝辞：本実証試験を行うに当たり、静岡県建設部港湾局、沼津土木事務所の皆様並びに港湾空港技術研究所基礎工研究室 菊池喜昭室長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。

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, 野村逸人, 富田孝史, 小林真, 虎石龍彦, 荒井清, 木原一禎：直立浮上式防波堤による現地津波防護効果に関する検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 936～940, 2007.