

直立浮上式防波堤における鋼管計測装置の開発

西岡 周平¹・萩原 博美²

¹近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課 (〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

²近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課 (〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

直立浮上式防波堤は鞘管構造であるため、所定の真円度を満足できない場合や下部鋼管打設時の施工誤差による傾斜が生じた場合には、上部鋼管が下部鋼管に挿入できない、あるいは上部鋼管が浮上時に所定の天端高を確保できない等の問題が発生すると考えられる。そこで、真円度及び傾斜を高精度に計測するためのシステムの構築を行い、原寸大の鋼管模型を使用した室内試験及び実海域での計測による検証を行った。結果として、本計測システムにより比較的精度良く真円度計測が可能であることを確認している。

キーワード 鋼管杭, 計測装置, 真円度

1. はじめに

和歌山下津港海岸(海南地区)においては、東南海・南海地震等に伴う津波により、甚大な被害が想定されるため、直轄海岸事業による津波浸水対策事業を計画している(図-1)。直立浮上式防波堤は、この津波対策における防護ラインの一翼を担う施設であり、構造としては、上部鋼管と下部鋼管から構成される二重鋼管を連続して並べる形式の防波堤であり、常時は海底に打設された下部鋼管内に上部鋼管が格納されており、津波来襲時には上部鋼管内に空気を送気し、浮力により浮上させて港口部を閉鎖する(図-2)。直立浮上式防波堤は、地震発生後から津波が到達するまでの間に確実に浮上を完了するとともに、所定の天端高を確保するためには、施工時に所定の真円度を満足させることが極めて重要である。

本稿では、下部鋼管打設時の施工誤差による傾斜及び鋼管打設後の真円度を高精度に計測するためのシステムの開発を行い、原寸大の鋼管模型を使用した室内試験及び実海域での計測による検証を実施した結果について報告する。

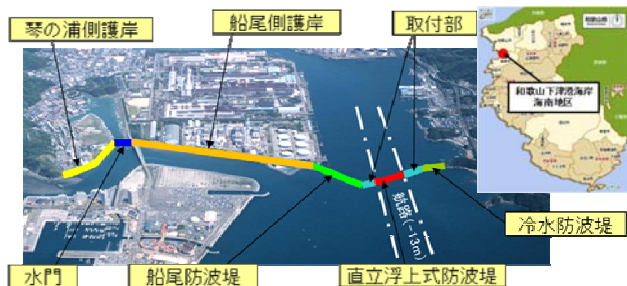


図-1 和歌山下津港海岸(海南地区)津波浸水対策事業

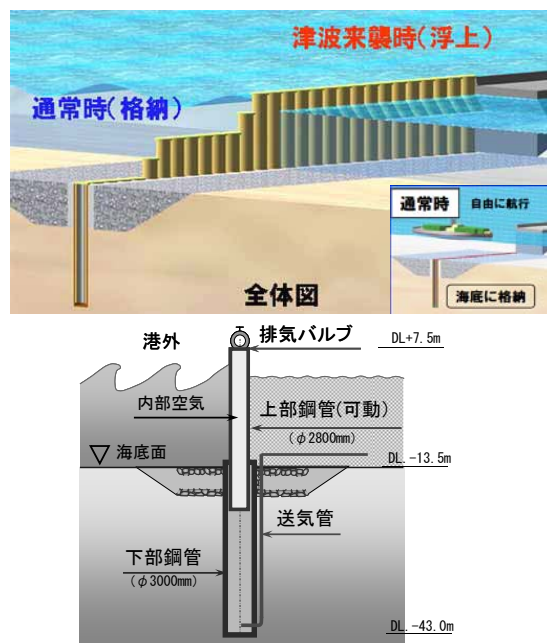


図-2 直立浮上式防波堤の構造(上:全体図 下:断面図)

2. 既往の調査事例

既往の鋼管杭に関する調査事例の収集を行い、下部鋼管の構造に適用する場合の基礎資料とした。なお、計測対象となる実海域における下部鋼管の設計形状は、外径3,000mm(肉厚30mm~45mm)、全長29.45mである。

(1) 潜水士による計測

鋼管杭頭を中心を基準とし、計測用架台を吊り下げ、その計測用架台から鋼管内壁までの距離を潜水士がメジ

ヤーにより計測を行う。特徴として、計測用架台を陸上で製作加工することで、基準となる指標については精度が高い。一方で、濁りや流れによる影響で、ミリ単位での計測精度は低くなり、安全性の観点からも水深が大きくなる管内作業は非常に危険である。

(2) 大型建造物の基礎掘削杭の計測

高層ビル等大型建造物の基礎掘削の計測としては、超音波式側壁計測装置によって掘削した孔の鉛直性や断面形状の計測を行っている。超音波式装置は、記録機（制御・記録）とウインチ部、ウインチ部下にはセンサーユニットを吊り下げている。ウインチを介してワイヤを繰り出しながらセンサーから超音波を発生し、鋼管内壁までの距離の計測を行う。なお、超音波式装置を用いれば水深が大きな現場条件下においても計測が可能であり、ある程度の濁りの中においても小さな誤差で記録の取得が可能である。記録機の規格等にもよるが、測定精度としては、メーカーカタログで 2%（測定レンジ）が記されている。一方で、潮流による影響でセンサーユニットの安定を保つことが困難な場合、測定精度は低くなる。

(3) 被災した岸壁鋼管杭の計測¹⁾

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により被災した関東地方の北東部に位置する岸壁のガントリークレーンの基礎杭では、杭頭が海側に数十 cm 移動した。鋼管杭に変形が生じていることは推測できるが、健全度を把握する方法がそれまでに現存していないことを受け、評価手法の検討が行われている。活用した計測装置は、上記(2) 大型建造物の基礎掘削における計測装置の応用であり、超音波と傾斜計を組み合わせた計測装置である。特徴として、被災等により一定の傾斜を伴った鋼管杭の調査において、昇降時にセンサーユニットが管壁に接触する恐れがあるため、ウインチ下の計測器に直径 20cm の車輪を上下 4 個ずつ設置することで、鋼管内の傾斜に沿った走向ができる台車形式としていることである。なお、車輪にはサスペンションを取り付けることで、鋼管の内壁に押し付ける抗力を発生させ、段差や傾斜にも追従できる機構としている（図-3）。一方で、被災後の早期な健全度調査であったため、取得した電子データをその場でグラフ化するアプリケーションの開発や超音波データの計測精度の確認については不十分であった。

3. 開発した計測装置の概要

既往の事例を踏まえ、調査対象である下部鋼管の構造に適応した計測システム開発のため、被災した岸壁鋼管杭の計測時に用いた装置のさらなる改良を実施した。主

な改良点としては、水中ウインチの開発、取得した電子データのグラフ化に関するアプリケーションの開発及び計測台車構造改良による計測精度の向上等である。以下に、開発した計測装置の概要を示す（図-4及び図-5）。

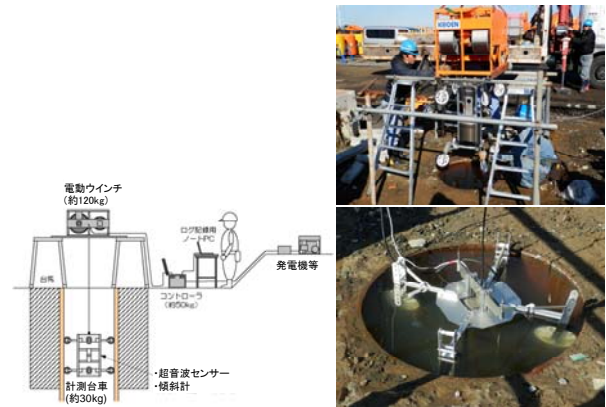


図-3 既往計測機構模式図（左）、計測状況写真（右）

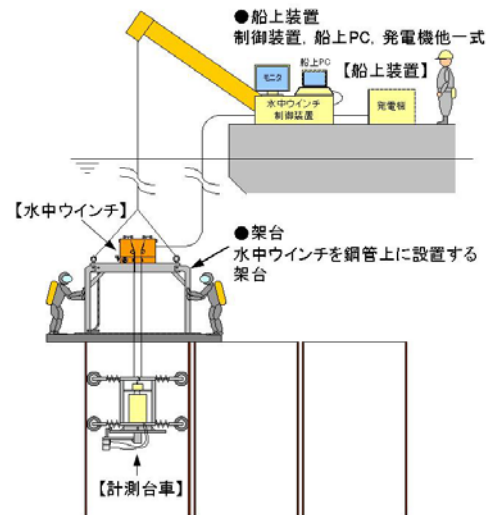
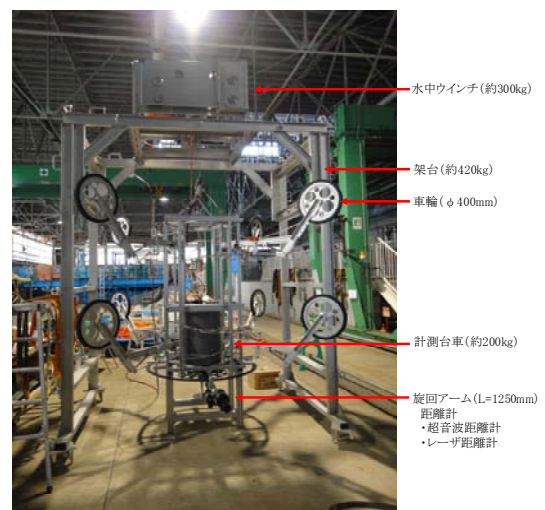


図-4 計測機構模式図（今回）



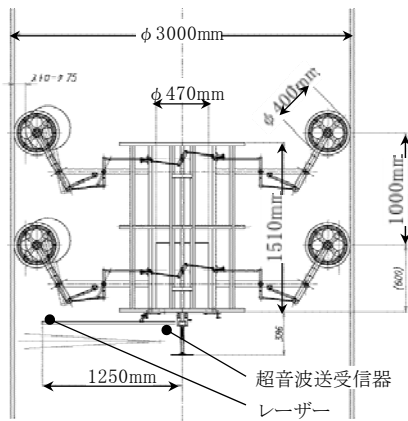


図-5 計測装置の姿写真(上), 計測台車詳細図(下)

計測装置の主要構成は水中ウインチ、架台、計測台車である。これら3つの構成をもとに開発した計測装置の機構については、以下のとおりである。

(1) 主要構成

架台：鋼管の上に設置される架台。

水中ウインチ：架台の上に設置され、船上からの遠隔操作や自動制御により深度を管理しながら計測台車を昇降させる。

計測台車：水中ウインチにより昇降される計測装置の本体。鋼管の内壁に沿って昇降するためのサスペンション付き車輪を有し、台車を鋼管中心に保持するため、対向する車輪のサスペンションは連動してストロークする。主な計測機能は、超音波距離計とレーザ距離計による鋼管内壁までの距離計測、ジャイロによる計測台車の相対方位計測、傾斜計による台車の傾斜計測である。

(2) 計測点の鉛直位置

計測点の鉛直位置は、水中ウインチの巻出量をエンコーダで計測することにより特定する。また、補助的に計測台車による深度計測と水中ウインチによるローカル潮位計測を行い記録しておく。

(3) 下部鋼管内壁までの距離と計測方位

計測台車を深度方向に対して1m毎に自動停止し、計測する。計測は、旋回アームを用いて360°回転させることで任意の方位における計測台車から鋼管内壁までの距離を計測する(図-6)。距離計は施工後の濁りを考慮して超音波距離計を主とし、補助的にレーザ距離計も併用した。超音波の測距が1回/secであるため、約60秒でアームを1旋回させることで、6°ずつの多点計測が可能である。なお、旋回アームによる旋回角をエンコーダで計測し、計測点の方位を特定する。

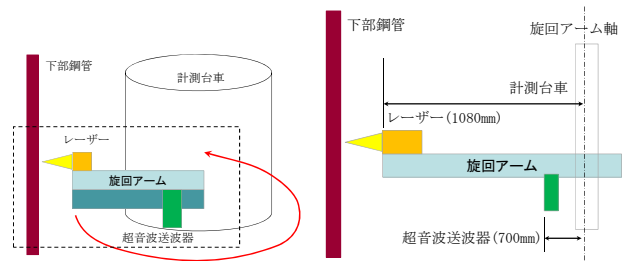


図-6 旋回アームによる計測概念図(右:点線枠の拡大)

(4) 計測時間と計測点数

超音波距離計により深度方向に1m間隔、1回/secの計測を行う場合、計測時間は約63minとなる(a式)。ただし、計測台車が移動する際の加減速、一時停止時間等の関連時間を考慮すると上記の1.5倍程度、昇降による往復計測を実施する場合には2倍程度の計測時間を見込む必要がある。さらに、架台等の計測機器を海底に設置、撤去する時間については、現場状況にもよるが2hr程度を見込む必要がある。これらから、現場への移動時間も考慮すると1本/dayの計測が目安となる。

また、下部鋼管の全長約29mにおける計測点数は3,480点(同一深度では120点)の取得が可能である(b式)。

$$60\text{sec}/\text{周} \times 2 \text{ 旋回} \times 29\text{m}/1\text{m 毎} + 29\text{m}/(\text{巻速最大 } 0.1\text{m}/\text{sec}) = 3,480\text{sec} + 290\text{sec} \div 63\text{min}/\text{片道} \quad (\text{a 式})$$

$$60\text{sec} \times 1 \text{ 回}/\text{sec} (\text{測距}) \times 2 \text{ 旋回} \times 29\text{m}/1\text{m 毎} \div 3,480 \text{ 点} \quad (\text{b 式})$$

(5) 計測精度

現場条件や設置等の影響は除き、超音波距離計自体が有している計測精度については以下のとおりである。

a) 計測原理

対象物に超音波を発し、反射波が戻ってくるまでの伝播時間を計測する。計測される伝播時間は対象物までの往復である。また、海水中の音速は、水温や塩分等に応じて変化することから、計測直前には測定位置における海水中の音速を計算する。これらを踏まえると、計測距離は以下の式により算定できる。

$$\text{計測距離} = \text{伝播時間} \times \text{音速} \div 2$$

b) 計測誤差

計測精度は、反射波を検出するタイミングの影響が大きく、その誤差は、波数×波長×1/2と表すことができる。つまり、反射波を検出するタイミングが遅くなるほど計測誤差が大きくなる。そこで、1点毎に全ての反射波を捉え、その後に捉えた反射波の中から最大となる音量の半分を閾値とした。その閾値を下回る波数の箇所を計測値とすることで、検出するタイミングによる誤差が大きくなるように配慮した。

ちなみに、反射波の多くは1/4波長から5+1/4波長の

間で捉えられることがわかっており、計測誤差は+0.375mm/2から+7.875mm/2となり、最大で約4mmの計測誤差が生じると考えられる(図-7)。

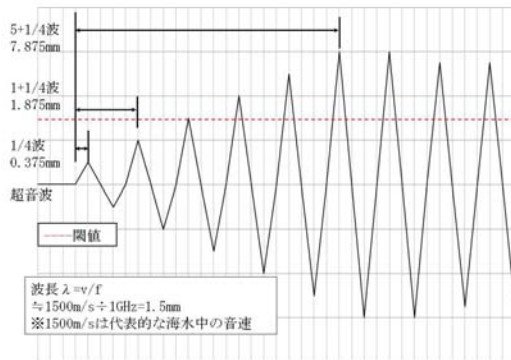


図-7 超音波計測誤差の概念図

なお、補助的に使用するレーザ距離計の原理は、いわゆる三角測量の原理であり、反射光の入射角で距離が求められる。海水中では、屈折率の影響を受けた入射角の変化を考慮する必要がある。そのため、後述する実海域での計測では、現地海域において、気中及び海中における屈折率のキャリブレーションを実施することで計測を行った。結果として、屈折率 1.34 に対する最大誤差は 0.77% となったことから、下部鋼管内壁とレーザ距離計の実距離 266.6mm に 0.77% を乗ずると約 2mm の誤差が生じると考えられる。

4. 室内試験における計測

内径φ2,910mm、高さ1.5mの鋼管模型を2個製作し、これを上下に連結して高さ3.0mの鋼管模型とした(図-8)。また、下部鋼管の口金には実物と同様の補強板を取り付けて厚みを再現した。なお、断面形状再現性の確認のために下部鋼管の内壁に予め3.2mm、6mm、9mm厚の鋼板を貼り付けた(図-9)。

「3. 開発した計測装置の概要」において課題であった取得した電子データのグラフ化に関するアプリケーション



図-8 下部鋼管模型(左)、鋼管模型への装置設置状況(右)

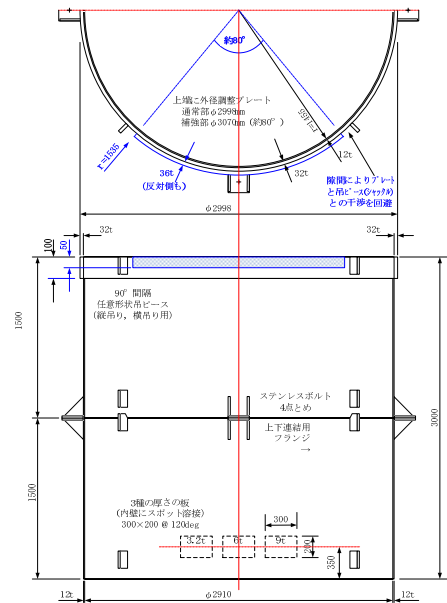


図-9 下部鋼管模型図

の開発を行った(図-10)。真円度について、鋼管製作及び打設等による管理値は、それぞれ0.5%及び1%以下と規定している(「直立浮上式防波堤施工管理マニュアル(案)」(以下、マニュアル))ことから、鋼管の設計形状(外径3,000mm)に対し、僅かな真円の違いを表示するための手助けとして、拡大表示機能を設けた。図-10では施工管理値の目安として設計値の±15mmを赤線で示し、設計値を緑線、計測値を青線(超音波)及びマゼンダ線(レーザ)で示している。この図を見ると、予め内壁に貼り付けた鋼板の形状を良く再現できていることが分かる。

室内試験においては、原理的な計測装置自体が有している誤差を考慮したとしても、実海域で行う計測精度を確保していることは確認した。また、実海域を想定した計測装置の設置方法や手順について、潜水士との打合せや計測装置の動作確認も行った。

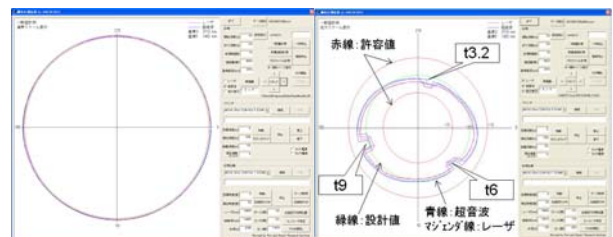


図-10 鋼板貼付部断面の計測(右:拡大表示)

5. 実海域における計測

実海域における計測は、和歌山下津港海岸(海南地区)における実証実験工事にて打設した直立浮上式防波

堤の下部鋼管 3 本を対象に実施した (図-11) .



図-11 実海域計測状況写真

(左：計測装置吊り降ろし作業，右：船上装置)

(1) 真円度の規定値

鋼管打設等による真円度の施工管理値は1%程度としてマニュアルの中で規定している。真円度に関する規定値の設定に当たっては、JIS A5525に示される品質規格を基に、鋼管製作精度、施工精度及び計測精度を考慮した上で1%程度としている。

計測値には、製作から施工までの施工管理値に加え、計測の精度誤差の累積が含まれると考えられる。そのため、施工における管理値を1%とし、その後の計測による精度誤差が数%であるとして、規定値を正確に示すと±1.2%となる。つまり、1%程度とは、計測誤差である0.2%の幅を持たせた値である。

この規定に基づく真円度計測については、図-12 に示すように法線方向の船尾側を基点 (0°) として時計回りに測線 I からIVの45°間隔、深度方向1m 間隔での整理を行う。真円度の定義については、以下の(c式)に示すとおりである。

$$\text{真円度 (\%)} = \frac{\text{I 方向 (II 方向) の計測直径} - \text{III 方向 (IV 方向) の計測直径}}{\text{設計値}} \times 100 \quad (\text{c式})$$

(2) 真円度の計測結果

真円度計測値の深度分布を図-13に示す。これを見ると、下部鋼管No.1及びNo.3の I - III (法線方向と法線直角方向) の真円度は、深度-28mの付近で1%を僅かに超えて1.1%程度となっていることが分かる。II - IV (法線から45°方向及び135°方向) は概ね1%以下となっている。

なお、同一深度における計測点数は、前述のとおり120点の計測を行っている。そのため、I からIV方向での計測値が最小直径を表しているとは限らない可能性もあることから、全ての点において最小直径を算出し、その結果と I からIV方向の直径を比較すると、下部鋼管の真円度を確認する上では、I からIV方向の直径は代表できる値であることを確認している。

これらのことから、実海域における計測値は、管理規定値の真円度1%程度を満足したものであったと言える。

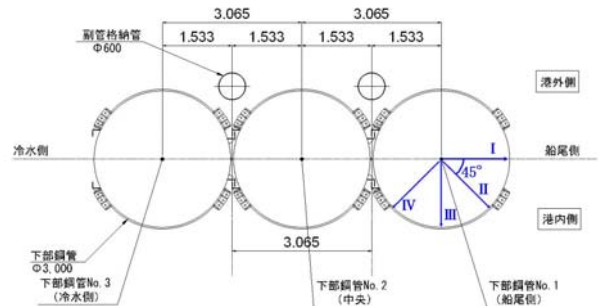


図-12 真円度計測の方位

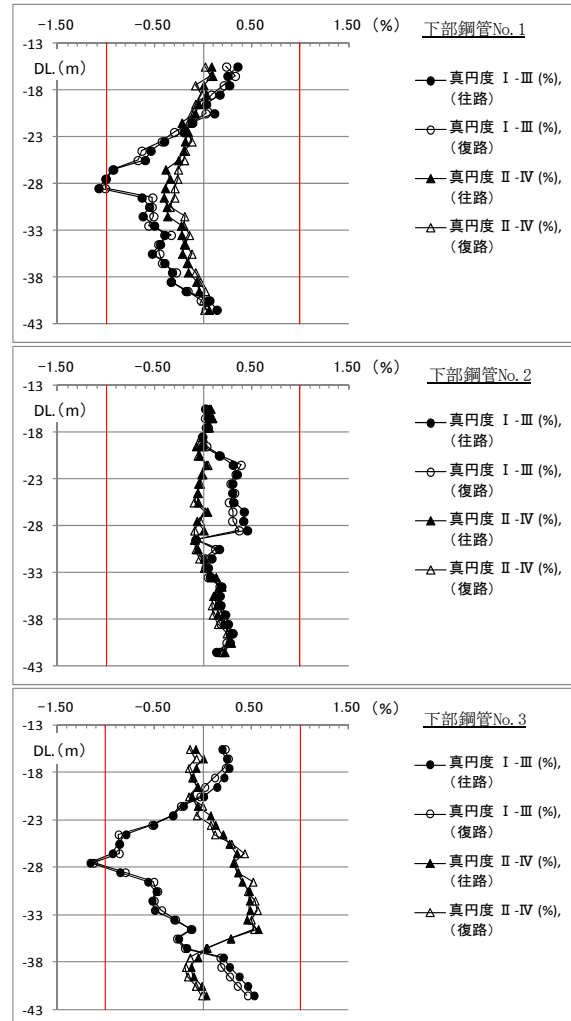


図-13 真円度計測値の深度分布

(上：下部鋼管 No.1, 中：下部鋼管 No.2, 下：下部鋼管 No.3)

(3) 傾斜の計測結果

傾斜の計測原理としては、車輪を使用して鋼管に沿って計測台車を昇降させ、計測台車に装備した傾斜計から各深度における鋼管の傾斜を計測する。その傾斜によるtan成分を積分することで鋼管の水平方向の変位量を推定する。ただし、この計測装置の機構から、①車輪が下部鋼管内の溶接箇所を乗り越えたり、中掘洗浄後の残土を乗り越えたりする場合に上下の車輪に傾斜が生じ、誤

差の要因となる。また、②下部鋼管に架台を設置する際や計測台車に傾斜計を設置する際にも誤差が生じる。その他にも、③傾斜計そのものが有する精度誤差もある。これらより、傾斜値については、誤差の要因が多いことからあくまで今回は参考値として扱うこととした。

傾斜計測値の深度分布を図-14に示す。下部鋼管No.3は他の鋼管と比較して、深度毎のバラツキが大きいと言えるが、この要因としては、前述①の誤差が大きいためであると考えられる。また、全ての鋼管において、下部鋼管上端の深度DL-15.5mでは0.7°程度の値を示している。これは前述②の誤差が大きいためであると考えられる。

誤差が含まれていることを前提として、鋼管全体の傾斜について検討した場合、下部鋼管全長で曲がりや傾斜は生じていないと考えられる。また、傾斜における施工管理値は、マニュアルにおいては、法線直角方向に対し1/300以下と規定している。図-14から下部鋼管No.3について、線形近似式を求め、法線直角に対する勾配を算定したところ、1/600程度であったことから施工管理値は満足したものであった。

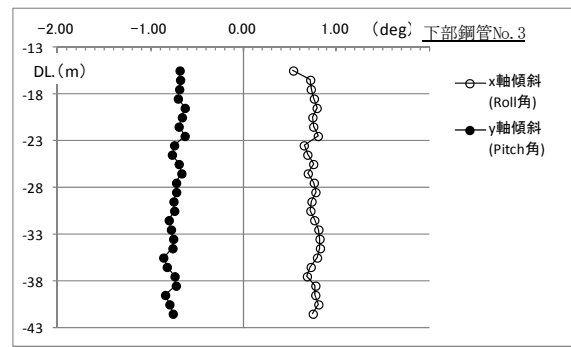
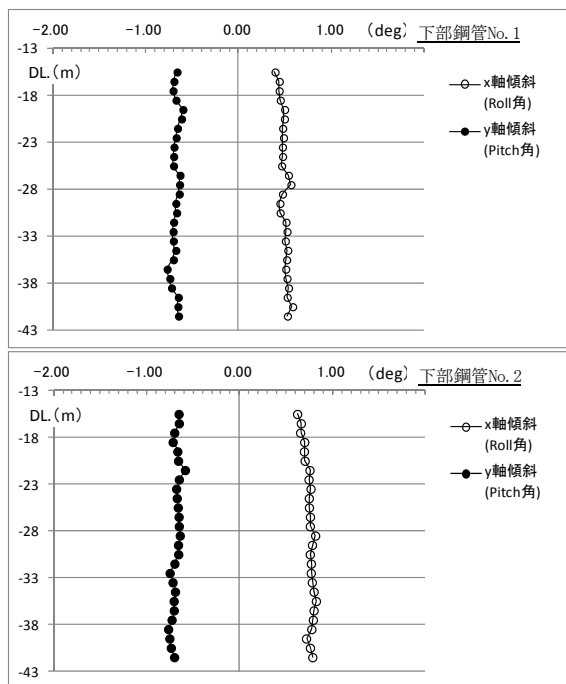
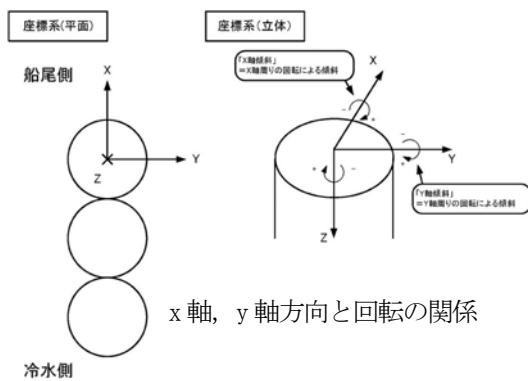


図-14 傾斜計測値の深度分布

(上：下部鋼管 No.1, 中：下部鋼管 No.2, 下：下部鋼管 No.3)

6. おわりに

直立浮上式防波堤において、開発した鋼管計測装置を用いて、原寸大の鋼管模型を使用した室内試験を実施した結果、鋼管の断面形状を上手く再現できることが確認できた。また、実海域での計測においては、深度毎におおむね規定値内の真円度が計測されているが、傾斜については、誤差の要因が多くあくまで参考値レベルの計測結果である。

この成果を踏まえ、今後はより使いやすい計測装置にブラッシュアップするため、以下のとおり改善を図るべきであると考えます。

- ・作業効率の改善
 - ウインチの巻上げ速度の向上, 旋回アームの旋回速度の向上
- ・準備作業の改善
 - 組立作業の簡素化, 下部鋼管上端部への計測装置の設置作業の簡素化
- ・計測機能の向上
 - 旋回アーム及び距離計の設置位置の変更, 距離計測データの同期

とりわけ作業効率の改善等による計測時間の短縮は、航行する船舶に対する安全性向上にも繋がる。また、今回は実証実験工事における計測装置の開発でもあったことから、恒常的な耐久性や腐食性については、今後の検討課題である。これらの課題を解決できれば、今後土中あるいは海中の鋼管杭において、高度な施工精度や杭の性能が求められる場合活用されることが想定される。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局：地中に埋設された鋼管杭の健全度評価手法に関する研究, 2012