

港湾維持管理に向けた リアルタイム水中ソナーの計測精度検証

道前 武尊¹・Sivaranjani Jayaprasad²・樋渡 和朗³・琴浦 毅⁴
帯田 俊司⁵・西畑 剛⁶・平山 達也⁷

¹ 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部
（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: takeru.michimae@mail.penta-ocean.co.jp

² 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部（同上）
E-mail: sivaranjani.jayaprasad@mail.penta-ocean.co.jp

³ 五洋建設（株）船舶機械部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
E-mail: kazuaki hiwatari@mail.penta-ocean.co.jp

⁴ 正会員 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部
（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: tsuyoshi kotoura@mail.penta-ocean.co.jp

⁵ 五洋建設（株）船舶機械部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
E-mail: syunji obita@mail.penta-ocean.co.jp

⁶ 正会員 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部
（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: takeshi nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

⁷ 五洋建設（株）船舶機械部（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）
E-mail: tatsuya hirayama@mail.penta-ocean.co.jp

港湾施設の中で建設後 50 年を経過するものが増加するなか、水中部の点検を実施する潜水士の数は年々減少傾向にある。今後、定常的に発生する港湾施設の点検に対し、潜水士による点検の代替手法として広域かつ短時間に水中部を計測可能な技術を確認することが必要不可欠である。本研究の技術は計測機器と潜水士を併用して運用し、点検の効率化を目指すため計測機器のリアルタイム性が重要となる。本稿では、水中部をリアルタイムに可視化可能な水中ソナーを用いた護岸計測実験を実施し、計測結果と潜水士による実測結果を比較することでリアルタイム水中ソナーを使用した際の計測精度を確認するとともに、港湾施設の点検診断ガイドラインに定められた点検項目の中で代替可能な項目について確認したことを報告する。

Key Words : *underwater, four-dimensional underwater visualization, realtime 3D sonar system , port construction, maintenance, Port i-Construction, diver*

1. はじめに

建設産業における生産性向上を図るとともに、現場の労働力不足の解消のため、国土交通省を主体とした「i-Construction」への取り組みが進められている。例として、ドローンによる測量技術の開発や、建設機械の自動化システムの開発が挙げられる。これらの陸上工事における生産性向上技術の開発はメディアなどにも取り上げられ着実に進展がみられる。

現在、建設後 50 年以上が経過する構造物が増加するなか、筐子トンネル天井板落下事故など構造物の劣化を原因とする事故や機能不全が発生している。国土交通省を主体とした「港湾の施設の点検診断ガイドライン」^{1,2)}が

整備され、効率的かつ効果的な点検診断技術の確立が重要となってきた。

港湾施設では建設後 50 年以上経過する港湾数は全体の約 20%程度を占めている。これが、15 年後には約 60%に急増する。供用年数を越え、点検を必要とする岸壁が急増する一方で水中部の点検を行う潜水士は高齢化が進み人数も年々減少傾向にある。港湾施設の点検は平成 25 年 6 月に公布された改正港湾法において、技術基準対象施設の維持は定期的に点検を行うこととし、港湾の施設の点検診断ガイドラインに定められた基本的な考えをもとに実施するものとされている。ここで、潜水士による水中目視が必要とされる詳細点検診断は 10~15 年に 1 回の頻度で実施する必要がある、減少傾向にある潜水士

の数では恒常的に人員が不足することは明白である。港湾の健全な運営を行うためには潜水士による水中目視確認に代わる、もしくは併用する技術の開発が喫緊の課題となっている。

筆者らは過去に閉鎖されたドック内や室内実験槽などの波浪の影響を受けない環境下においてリアルタイム水中ソナーの計測精度検証実験を実施し、ノイズ処理後のデータで標準偏差±5cm程度の成果⁹⁾を得ている。そこで、本実証試験では波や流れが作用し、船舶の動揺を伴う実海域における計測精度を検証することで、港湾の点検診断項目のなかで潜水士に変わる代替可能な範囲について検討し、港湾維持管理業務の生産性向上を図ることを研究目的とした。

2. 水中ソナーシステム

今回使用した水中ソナーシステムの構成機器と仕様を表-1に示し、特徴を以下に列記する。⁴⁾⁵⁾

- ・海底地形や水中構造物の形状を4次元(X, Y, Z, 時刻)で計測し、表示および記録をすることができる。ソナーにより代表例として50°×50°の範囲を128×128(16,384)本のビームを四角錐状に照射し、最大120mの距離まで計測することができる。
- ・データ更新レートは最大12f/sであるため、水中の動体計測も可能である。船を静止させた状態でも計測することができる。
- ・水中ソナーを艀装した船体の動揺をINS(Inertial Navigation System : 慣性航法装置)で計測し、補正することができる。超音波のノイズデータの除去も自動で行うため、従来は不可能であったリアルタイムの3次元表示があらゆる角度で可能である。

表-1 水中ソナーシステムの構成機器と仕様³⁾

機器	項目 ()内: 本実証実験の使用条件	
水中ソナー	周波数	340~700kHz(375kHz)
	ビーム数	128×128 16,384
	最大レンジ	120m(15m)
	最少レンジ	1m
	レンジ分解能	0.03m
	更新レート	最大12f/s
	計測範囲	25°×25°, 50°×50°他(50°×50°)
	1ビーム当たりの角度	1°, 0.5°(1°)
	ソナー寸法	380mm×300mm×160mm
	ソナー気中重量	22kg
ソナー水中重量	12kg	
ソナー耐水圧	600m	
INS	方位計測精度	0.01°
	ロール計測精度	0.01°
	ピッチ計測精度	0.01°
	ヒープ計測精度	5%, 5cm
	出力レート	最大100Hz
	寸法	160mm×160mm×160mm
GNSS	重量	4.5kg
	精度	水平 8mm+1ppm RMS 垂直 15mm+1ppm RMS
	更新レート	20Hz
	重量	1.55kg

- ・計測データは4次元で記録されているため、動画として再現が可能である。
- ・機器は重量、構成ともにナローマルチビームソナーと同等で軽量かつ簡易であるため、船体に後付けの艀装をすることが可能であり、特定の船舶や特別な装備を用意することなく対応することができる。
- ・作成した3次元モデルを水中ソナーシステム機器に取り込み、現地で映し出される3次元データと同時に表示することが可能である。

3. 現地実証実験概要

(1) 実証フィールドの選定

実証フィールドを選定する要素として以下の3点が挙げられる。1つ目として、一般的な港湾構造物であるケーソン式防波堤および鋼管矢板式護岸を対象とした。次に、GNSSを用いた位置情報の取得が可能な場所、周囲にGNSSの電波を阻害する建造物や施設が無い場所であること。最後に、築造30年以上経過し、陸上からの目視で段差などの変位が確認できる施設を選定した。写真-1と図-1に選定したフィールドおよび計測位置図を示す。

(2) 計測内容

選定したフィールド(ケーソン式:約400m, 鋼管矢板式:約30m)において、写真-2に示すように水中ソナー、INSとGNSSを艀装した船舶で防波堤から約15mの位置を法線に対し平行に航行させて計測した。また、比較用のデータとしてケーソン式防波堤ではケーソン間の水平方向の段差を上下方向に対して1m間隔で、潜水士による目視確認および実測を行った。鋼管矢板式護岸では鋼管矢板前面から継ぎ手までの距離を同様に目視確認および実測を行った。この海域での視程距離は0.5m程度であった。

図-2と写真-3に計測概念図および潜水士による計測状況を示す。



写真-1 実証フィールド (ケーソン式防波堤)

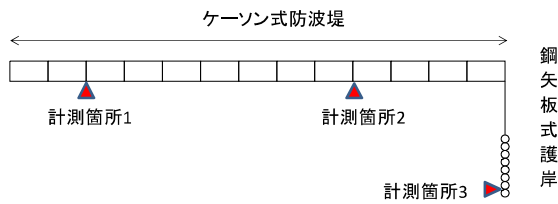


図-1 計測位置図

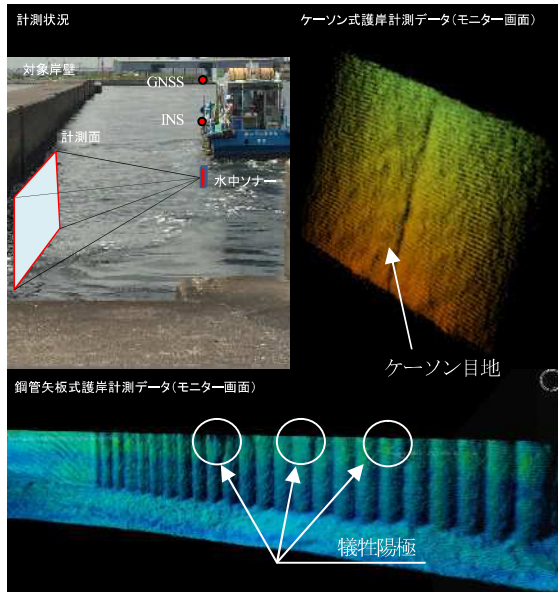


写真-2 計測状況 (リアルタイム水中ソナー)

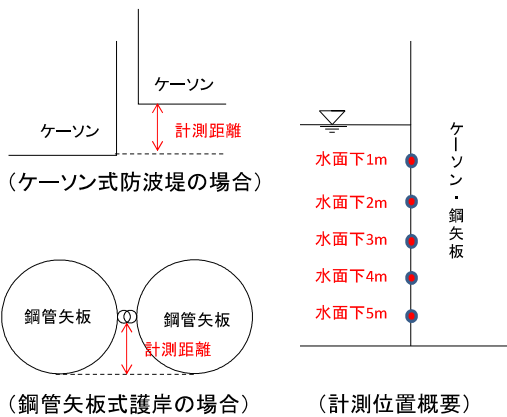


図-2 計測概念図



写真-3 ケーソン段差計測状況

4. 維持管理への適用 (計測精度実験)

(1) データ整理方法

水中ソナーで取得する点群データは膨大な量となる。そこで、潜水土によって実測した水面下 1m から 5m において 1m ごとの点群平面分布を抽出した。抽出した平面分布それぞれに対し、ケーソン式防波堤は法線平行方向 (船舶進行方向) に距離 10cm 毎で点群を平均化処理、曲線形状になる鋼管矢板式護岸は 5cm 毎で平均化処理を行った。

平均化処理を行う前に、魚影や水面反射などの明らかなノイズは除去した。

(2) 計測結果 (ケーソン式防波堤)

表-2 および図-3 に示すように、ケーソン間の段差が大きい計測箇所 1 では、計測誤差は実測値に対して最大で 41mm、最少で 6mm となった。ケーソン間の段差が小さい計測箇所 2 では最大で 13mm、最少で 1mm となった。

今回の計測では潜水土による実測と水中ソナーによる計測結果に大きな乖離はなく、ケーソン表面の状況確認においては十分な計測精度を有していることが確認できた。

表-2 計測結果比較表 (ケーソン式防波堤)

水深	計測箇所1			計測箇所2		
	潜水土実測値 (mm)	水中ソナー (mm)	差異 (mm)	潜水土実測値 (mm)	水中ソナー (mm)	差異 (mm)
1m	70	63	7	20	8	12
2m	90	49	41	15	13	2
3m	70	76	6	0	13	13
4m	60	40	20	0	5	5
5m	15	4	11	0	1	1

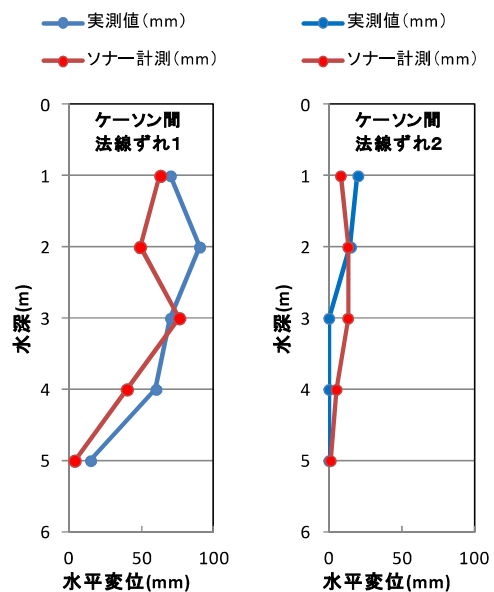


図-3 計測結果比較図 (ケーソン式防波堤)

(3) 計測結果(鋼管矢板式護岸)

潜水士による実測結果 70cm に対して、水中ソナーの計測値が 24.5cm となり、誤差 45.5cm となった。これは、本ソナーが有するビーム幅と測定距離の関係より、実際の矢板間位置より手前の位置を検出したと考えられる。このようなビーム幅よりも狭い、狭隘な空間に対しては機器性能上の問題で適用性がないと判断できる。

鋼管矢板に設置されている犠牲陽極(L=1.0m, B=0.2m, H=0.2m)の有無については判断することができた。

(4) 作業日数

本実証実験で掛った日数は、計測機器を船舶に機装するのに実質 1 日、護岸の側壁や護岸の前面の海底地盤を計測するのに実質数時間、データ整理に実質 2 日であった。計測機器の機装時間を考えると、広大な領域に対して点検を実施することで効率的に点検が実施できる。

5. 点検診断への適用性

筆者らによる過去の実証実験および本実証実験での結果を踏まえて、港湾の施設の点検診断ガイドラインに記載されている事項に対する適用性について以下に述べる。

劣化度の判定基準は表-3 に示すように a から d の 4 段階で評価される。水中ソナー適用性については a から d のどこまでを判断することができるかによって評価した。劣化度が少ない状態を判断できるほど適用性が高いものとした。

(1) 凹凸・出入り

本実証実験から潜水士による実測値に対し、約 4cm 程度の誤差を有していることと、ケーソン等の表面状況の確認においては、十分な計測精度を有していることが分かった。この結果から、表-4 に示す劣化度 a から c については判定することができるが、約 4cm の誤差を有していることから本来は劣化度が b のものを a と判定したり、a のものを b と判断してしまう可能性がある。

1 段階の評価誤差が発生する可能性があるものの、それ相応の精度を有しているため凹凸・出入りに対しては有用であると考えられる。また、位置を特定できているため 20cm 前後の変位の場合は即座に潜水士を向かわせ、実測することにより正確な判定をすることも可能である。

(2) 劣化・損傷・腐食

筆者らの既往の研究成果⁶⁾から、水中ソナーを固定し測定距離 10m で鋼矢板に開けた 30cm 程度の開孔が認識できることは確認されている。よって、表-5 に示す劣化度 a に対しては判断可能であるがそれ以下の損傷や腐食については判断することはできない。

(3) 洗掘・堆積

筆者らの既往の研究成果⁶⁾から、水中ソナーを固定し測定距離 10m において標準偏差±5cm 程度の測定精度があることが確認されている。よって、変状がないことを断定することはできないが、表-6 に示す劣化度 a から c についてはおおよそ判定することが可能であると考えられる。

洗掘・堆積の点検診断は水中ソナー単独で行うことが可能であり、リアルタイムに変位を確認することができることから、異常な洗掘箇所や堆積箇所については即座に潜水士が特定された位置に向かい、詳細に点検することができる。

(4) 犠牲陽極

本実証実験から犠牲陽極を認識することが可能であることが分かった。リアルタイム水中ソナーのソフトには設計データを取り込むことが可能なため、犠牲陽極が脱落又は全消費している場合は即座に判断することが可能である。但し、取り付け金具の損傷などは判断できない。

表-3 劣化度・水中ソナー適用性一覧表

劣化度	性能低下度の評価基準	水中ソナー適用性
a	施設の性能が相当低下している状態	低 ↑ ↓ 高
b	施設の性能が低下している状態	
c	変状はあるが、施設の性能の低下がほとんど認められない状態	
d	変状は認められず、施設の性能が十分に保持されている状態	

表-4 劣化度・適用性一覧表(凹凸・出入り)

点検項目	劣化度	性能低下度の評価基準	水中ソナー適用性
凹凸 出入り	a	隣接ケーソンとの間に20cm以上の凹凸がある 性能を損なうような法線のほらみ出しがある	○
	b	隣接ケーソンとの間に10~20cm程度の凹凸がある 法線のほらみ出しが見られる	○
	c	上記以外の場合で、隣接ケーソンとの間に10cm未満の凹凸がある	○
	d	変状なし	○

表-5 劣化度・適用性一覧表(劣化・損傷・腐食)

点検項目	劣化度	性能低下度の評価基準	水中ソナー適用性
劣化 損傷	a	中継材が流出するような穴開き、ひび割れ、欠損がある 広範囲に亘り鉄筋が露出している	△
	b	複数方向に幅3mm程度のひび割れがある 1方向に幅3mm程度のひび割れがある	×
	c	局所的に鉄筋が露出している	×
	d	変状なし	×
腐食	a	腐食による開孔や変形、その他著しい損傷がある	×
	b	-	-
	c	-	-
	d	腐食による開孔や変形はない	×

表-6 劣化度・適用性一覧表(洗掘・堆積)

点検項目	劣化度	性能低下度の評価基準	水中ソナー適用性
洗掘 堆積	a	岸壁前面で深さ1m以上の洗掘がある 洗掘に伴い、マウンド等や岸壁本体への影響が見られる	○
	b	岸壁前面で深さ0.5m以上1.0m未満の洗掘がある	○
	c	深さ0.5m未満の洗掘又は堆積がある	○
	d	変状なし	○

表-7 劣化度・適用性一覧表(犠牲陽極)

点検項目	劣化度	性能低下度の評価基準	水中ソナー適用性
犠牲陽極	a	陽極が脱落又は全消費している 陽極取付に不具合がある	○
	b	-	-
	c	-	-
	d	脱落等の異常はない	○

6. 変位量算出システムの開発

水中ソナーによって判定可能な点検診断の目安は水平方向もしくは鉛直方向の変位量による判断であった。現状のシステムは設計や過去のデータを取り込み、リアルタイムの計測データと重畳することは可能であったが、双方の変位量についてはモニター上で視覚的に判断する方法しかなかった。

また、設計や過去のデータに対する変位量を潜水士が水中に潜り目視や実測によって把握し、判断することは不可能である。そこで、点検診断用に過去のデータや設計に対して、変位量を算出可能なシステムを開発した。

(1) システム内容

このシステムは港湾の設計データもしくは過去の計測データに対して、鉛直方向もしくは水平方向の変位量を算出するシステムである。設計データ、過去の計測データおよび当日の計測データは位置座標を保有しているデータであるため、それぞれのデータを重畳することで即座に変位量を確認することが可能である。

(2) システム利用例

本実証実験で取得したデータに対しての過去のデータおよび施工出来形図を保有していないため、他の海域での海底地盤データを使用してシステムの確認を実施した。

図-4に計測データを図-5に2回の計測データから算出した変位量を示す。2回の計測データから視覚的に判断すると、大きな違いは見えてとれない。なおさら、潜水士が水中に潜って点検を行い、過去とどれくらいの差があるかなど到底判断することはできない。今回開発したシステムを利用すると赤色の部分が約10cmの変位量が見られ、緑色の部分が5cm以下の変位量であることを即座に判断することができた。

このシステムを利用すると設計や過去データとの比較はもちろんのこと、10~15年ごとに実施する詳細点検のデータを蓄積することで護岸や海底地盤の変位の変遷を把握することができ、変位量が多い場所を重点的に確認することができる。

7. まとめと今後の展望

(1) まとめ

まとめを以下に述べる。

a) 実海域における計測精度

・潜水士の実測結果と水中ソナーの計測結果の最大差異は41mmであり、ケーソン等の長大物の表面状況の確認

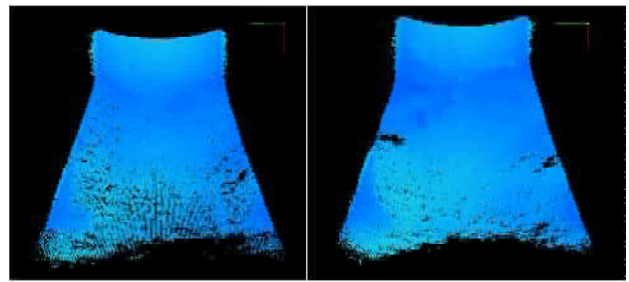


図4 計測点群データ (左: 過去データ, 右: 新規データ)

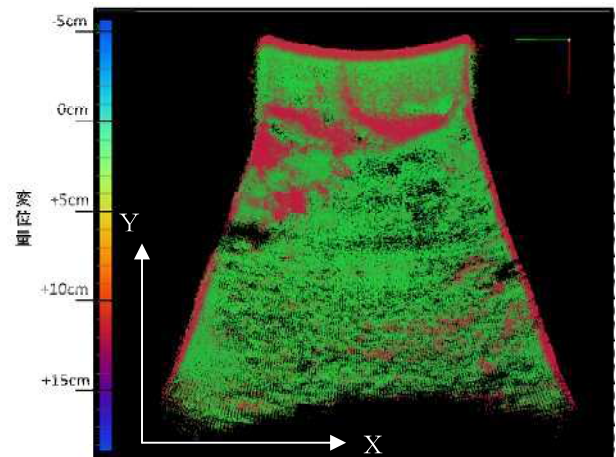


図5 変位量算出図 (鉛直変位量)

においては、十分な精度を有することが分かった。

・鋼管矢板間の奥行きについては実測値に対する差異が大きく45.5cmであった。鋼管矢板のジャンクション付近などの狭隘な部分については計測することが困難である。

b) 点検診断への適用

- ・ケーソン間の凹凸や出入りに関する点検項目に対して、十分な計測精度を有していることが確認できた。
- ・鋼管矢板式護岸、鋼矢板式護岸や栈橋などの上部工の法線変位量と水中部の変位量がリンクしていない可能性がある構造体については、法線の変位量を広域に把握することが有用である。
- ・劣化、損傷や腐食に関する点検項目に対して、大きな変化がある場所については適用することができるが、詳細な変化について適用することは困難である。
- ・洗掘や堆積に関する点検に対して、十分な計測精度を有していることが確認できた。
- ・犠牲陽極に関する点検に対して、犠牲陽極の大きさに依存するが、今回確認できた犠牲陽極(L=1.0m, B=0.2m, H=0.2m)の場合は十分な計測精度を有していることが確認できた。水中ソナーを用いて計測することで広域かつ、特定するのにかかる費用や時間を大幅に削減することができる。但し、取り付け金具等の損傷は確認できない。
- ・水中ソナーによる適用可能な点検は非常に広範囲であることから、潜水士による確認に対して、大幅な時間短縮が可能であると考えられる。特に、水中部の視程が1m

程度しかない海域においては生産性向上が見込まれる。

c) 変位量算出システム

- ・過去の海底地盤データを用いて2回の取得データに関しての変位量を図化することができた。
- ・データ取得後、過去のデータに対して短時間での変位量算出が可能となり計測当日に変位量の大きい場所を重点的に潜水士に確認させることができる。これにより、従来の計測データを処理してから異常点を確かめ、後日潜水士による潜水調査を行う場合や、潜水士によってすべての領域を確認する場合に対して作業効率が高まる。

(2) 課題と今後の展望

課題と今後の展望について以下に述べる。

a) 実海域での計測精度

- ・本実証実験は30年以上経過した施設に対し、1時点での計測データを取得したのみである。このため、今後の維持管理業務に運用するには、同一施設のデータを数年後に取得し、変位量を算出して蓄積する必要がある。
- ・新規施設は沈下等の初期変位量があるため、短期間で比較するデータを取得することが可能である。そこで、新設のケーソン式防波堤などを対象にサンプルデータ数を増やしていく必要がある。
- ・狭隘な部分の計測については、代替可能な技術を開発することが課題である。
- ・本実証実験ではケーソン式防波堤や鋼管矢板式護岸を対象とした。港湾構造物は他に多くの構造形式が存在するため、それらに対しても実証実験を行う必要がある。

b) 点検診断への適用

- ・現状のリアルタイム水中ソナー技術では細かい劣化、損傷や腐食を特定することはできなかった。音響計測機器の特性上、特定することは困難であるため、潜水士に頼らず特定可能な技術が開発可能か検討する必要がある。

- ・鋼矢板式護岸や栈橋などの構造様式に対しても実証実験を行う必要がある。

c) 変位量算出システム

- ・本稿では海底地盤に対する変位量の算出を示した。港湾施設に対する変位量の算出は現在保有するデータではできないため、同一港湾もしくは実験水槽において新たな比較用データを取得し、システムの精度を検証する必要がある。

なお、本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO)に関連する研究開発として実施した。

ご協力いただきました関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 港湾の施設の点検診断ガイドライン【第1部 総論】国土交通省港湾局 平成26年7月
- 2) 港湾の施設の点検診断ガイドライン【第2部 実施要領】国土交通省港湾局 平成26年7月
- 3) 港湾関連民間技術の確認審査・評価報告書第12004号 4D ソナーによる施工管理システム 一般財団法人沿岸研究センター
- 4) 眞鍋匠：4D ソナーによる施工管理システム，港湾荷役，No.6, Vol58.pp.617-622, 2013.
- 5) 野口孝俊，内藤裕之，守屋典昭，眞鍋匠：4D ソナーシステムを活用した航路障害物啓開作業の効率化に向けた検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発) No.2, Vol70.pp.990-995, 2014,
- 6) 道前武尊，樋渡和朗，帯田俊司，琴浦毅，西畑剛，平山達也，野口孝俊：リアルタイム水中ソナーを用いた海上工事の施工・維持管理に向けた検討，土木学会論文集 B3 (海洋開発) No.2, Vol33.pp.1013-1018, 2017, (2018.2.8 受付)

INVESTIGATION OF MEASUREMENT OF THE REAL-TIME UNDERWATER SONAR FOR PORT MAINTENANCE AND MANAGEMENT

Takeru MICHIMAE, Sivaranjani JAYAPRASAD, Kazuaki HIWATARI, Tsuyoshi KOTOURA, Syunji OBITA, Takeshi NISHIHATA and Tatsuya HIRAYAMA

In the midst of the increasing Port Structures that have crossed the in-service period of 50 years after construction, there is also deterioration in the number of divers carrying out the underwater investigation. In future, it is essential to develop a technique capable of carrying out wider area investigation in a short time as an alternative of current method of steady inspection of port structures. In order to improve the inspection efficiency of investigation while using surveying equipment and the divers, the technology of real-time surveying equipment becomes indispensable.

In this paper, revetment surveying experiment was carried out with the Real-time Underwater Sonar capable of visualizing underwater in real-time and the results have been compared with the actual survey results of the Divers in order to check the measurement accuracy of the Real-time Underwater sonar and to confirm the investigation results based on the check points for substitution of items as mentioned in the Guidelines on Inspection and Diagnosis for Port Structures and reported.