

# 浮棧橋の函間渡橋の 挙動計測・解析手法に関する一考察

牟田 直樹<sup>1</sup>・北出 圭介<sup>2</sup>・月坂 明広<sup>1</sup>・松前 芳寿<sup>3</sup>・梅本 秀二<sup>4</sup>

1 中電技術コンサルタント(株) (〒730-8510 広島県広島市南区出汐二丁目 3-30)

E-mail: muta@cecnet.co.jp (Corresponding Author)

2 正会員 中電技術コンサルタント(株) (〒730-8510 広島県広島市南区出汐二丁目 3-30)

E-mail: kitade@cecnet.co.jp

3 (株)計測リサーチコンサルタント 広島事業部 (〒732-0029 広島県広島市東区福田一丁目 665-1)

E-mail: matsumae@krcnet.co.jp

4 正会員 (株)計測リサーチコンサルタント 事業推進部 (〒732-0029 広島県広島市東区福田一丁目 665-1)

E-mail: umemoto@krcnet.co.jp

本研究は、船舶の接岸や航走波により繰り返し動揺を受ける函間渡橋の挙動を解析し、今後の維持管理に向けた計測手法等を考察した。計測は、サーボ型加速度計、モーションキャプチャカメラ、RTK-GNSS 測量器の 3 つの手法を採用し、浮棧橋と函間渡橋の相対変位と絶対変位計測を試みた。何れの評価項目においてもモーションキャプチャーが最適であったものの、それぞれの手法に一長一短があるため、制約条件など計測環境に応じた適切な手法を採用する必要がある。

**Key Words:** pontoon, floating pier, behavior, analysis methods

## 1. はじめに

瀬戸内海におけるカーフェリーや旅客船用の係留施設は、閉鎖性水域特有の潮汐の干満差に対応するため、乗降時の安全性に配慮した浮棧橋構造とするケースが多く、船舶の接岸や航走波による浮棧橋の動揺が渡橋に及ぼす影響が大きい。特に、瀬戸内海に多いチェーン係留方式の浮棧橋同士の間設置された函間渡橋は、ドルフィンや杭係留方式のように動揺の小さい浮棧橋と比較して複雑な外力を受ける可能性が高く、浮棧橋の動揺による繰り返し挙動が函間渡橋の疲労破壊に繋がる可能性がある。このような浮体の動揺をシミュレーションやセンサー計測で解析した事例は多いが<sup>1)2)</sup>、函間渡橋の動揺を計測した事例は確認されない。また、計測方法は、加速度計、カメラ画像解析、GNSS など様々であり、計測時間や計測目的により異なるため、計測方法を体系的に整理することは、施設の維持管理を行う上で極めて重要となる。

本研究は、広島県廿日市市宮島のチェーン係留方式浮棧橋において、船舶の接岸や航走波により繰り返し動揺を受ける函間渡橋の定量的な挙動を 3 つの計測手法を用いて計測・解析するとともに、それぞれの特徴を整理評価することにより、今後の維持管理に向けた計測手法等を考察した。

## 2. 浮棧橋・函間渡橋の概要と海域特性

函間渡橋は、4 点ローラーの自由支承で両サイドの浮棧橋間に設置されているため、両浮棧橋の 3 自由度動揺により、捻じれを伴う複雑な挙動を示す。

海域は、水深 5m、潮位差 3.54 m と潮汐の干満差が大きい海域となっている。これらの浮棧橋と函間渡橋の配置及び規模・利用特性を図-1 に示す。

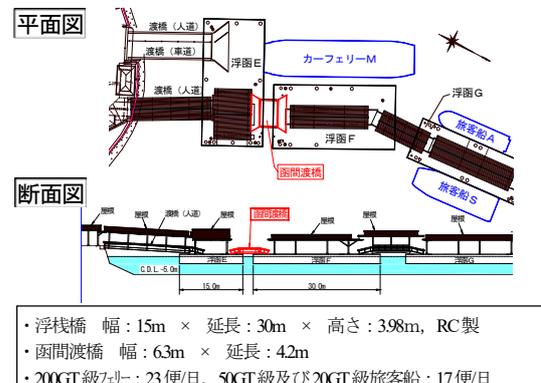


図-1 浮棧橋と函間渡橋の配置及び規模・利用特性

### 3. 浮函と函間渡橋の挙動計測手法

浮函や函間渡橋などの海上での挙動は、波の影響を受けて常に動揺するため、サンプリングピッチ 1 s 未満の動的な計測が求められる。また、波の固有周波数は 0.2 ~ 0.3 Hz と低いため、その動きをとらえる低周波数領域の計測が可能な計測手法を選定しなければならない。一方、浮棧橋は、陸上から海側へ張り出す構造となっているため、浮函や函間渡橋の挙動計測を陸上から行う場合は非接触の計測手法に限られる。そして、その計測距離は長くなる傾向にあり、一方向からのみしか計測できない場合も多い。そのため、計測精度の確保、浮函や函間渡橋の複雑な挙動を 3 次元計測することは非常に難しい。さらに、瀬戸内海は干満差が大きく、常に計測条件が変わることも計測を難しくしている。

これらを踏まえ、本研究では、陸上からではなく、浮函や函間渡橋上での挙動計測が可能で、かつ、動的な計測に対応した 3 種類の計測手法を選定した。表-1 に各手法の計測機器の仕様を、浮函や函間渡橋への計測器の配置を図-2 に示す。計測方向は、函間渡橋の橋軸方向を Y 軸、橋軸直角方向を X 軸、鉛直方向を Z 軸とした。以下に、各計測器の概要、計測方法を示す。

#### (1) サーボ型加速度計 (Acc)

##### a) 概要

サーボ型加速度計は、おもりを吊るした振子、変位検出器およびアンプなどから構成されている。加速度が振子に作用すると、その振子を平衡状態に戻そうとして、加速度に比例した電流がコイルに流れる仕組みである<sup>3)</sup>。低周波領域の微小振動の計測に適している。

表-1 計測機器の仕様

##### ●サーボ型加速度計

メーカー (型式)	リオン (LS-10C)
最大測定加速度	$\pm 30 \text{ m/s}^2$
電圧感度	$0.3 \text{ V}/(\text{m/s}^2) \pm 1 \%(\text{DC})$
測定周波数範囲	DC ~ 100 Hz ( $\pm 10 \%$ )

##### ●モーションキャプチャカメラ

メーカー (型式)	Acuity inc (Prime13)
解像度	1280 × 1024 pixel
フレームレート	30-240 fps
計測距離	最大 15 m
計測精度	$\leq 0.1 \text{ mm}$ ※計測距離による

##### ●RTK-GNSS 測量器

メーカー (型式)	Leica (GS10)
サンプリングレート	最大 20 Hz
測位精度	水平: 10 mm + 1 ppmRMS
※ネットワーク RTK	鉛直: 20 mm + 1 ppmRMS

#### b) 計測方法

E 函・F 函および函間渡橋の 4 隅に、3 台のサーボ型加速度計を X・Y・Z 方向にそれぞれ据え置いた。E 函上にアンプおよび動ひずみ測定器を設置し、各箇所からアンプまで配線した。配線に際しては、干満、船舶接岸時の可動域を考慮し、函間渡橋の可動部に信号線が挟まって信号線を損傷しないよう留意した。計測は、カーフェリーあるいは旅客船の着離棧時を対象とし、サンプリング間隔 0.01 s で実施した。図-3 にサーボ型加速度計の設置状況を示す。

#### (2) モーションキャプチャカメラ (Mcc)

##### a) 概要

モーションキャプチャとは、人や物の動きをデジタル化する技術であり、主にスポーツパフォーマンスやリハビリテーション等の医療分野における身体の動きのデータ収集や映画やゲームなどの CG 制作において活用されている技術である<sup>4)</sup>。光学式、慣性式、ビデオ式、機械式などの種類があるが、本研究では光学式を採用した。光学式は複数カメラで空間を構築し、反射マーカの位置をトラッキングする方式であり、モーションキャプチャの中では最も位置精度が高い方式である。

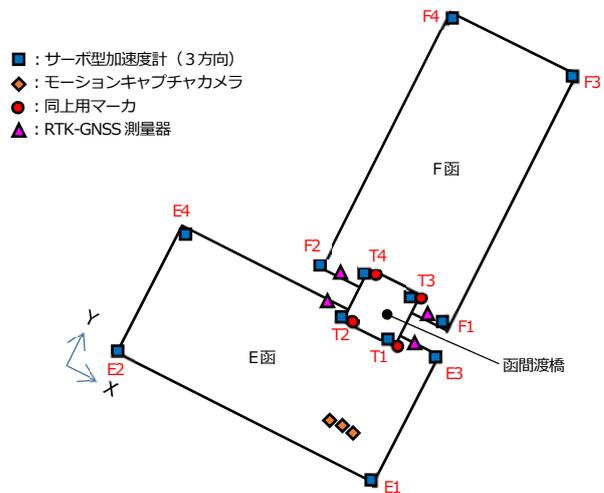


図-2 浮函と函間渡橋の計測器の配置



図-3 サーボ型加速度計設置状況

## b) 計測方法

E 函上に三脚を用いたカメラを3台設置し、函間渡橋の4隅にマグネットでマーカ（2.5インチプリズム）を設置した。その距離は8~14 m程度である。カメラ3台は互いに1 m程度離し、高さをそれぞれ変えて配置した。カメラ配置時には、各カメラから4箇所のプリズムすべてが認識できるように位置および角度を調整した。その後、キャリブレーションを行い、空間の構築と座標軸の設定を行った。計測に際しては、3台のカメラの位置関係が変わらないように、また、カメラの画角内にマーカ以外の反射物が映らないように留意した。計測機器の設置状況を図-4に示す。計測は、カーフェリーあるいは旅客船の着離棧時を対象とし、サンプリングは30 fpsで実施した。

## (3) RTK-GNSS 測量器 (GNSS)

### a) 概要

一般的なネットワークRTK対応のGNSS測量器を採用した。本研究では、ネットワーク型RTK-GNSS法を採用し、VRS方式でジェノバセンターから補正情報を得て計測を実施した<sup>56)</sup>。

### b) 計測方法

函間渡橋周辺の浮棧橋には屋根が設置されており衛星が受信できないため、函間渡橋上にアンテナを設置することができなかった。そのため、函間渡橋4隅の近傍の各浮函に三脚を用いてアンテナを設置し、近傍に受信機を据え付けた。計測機器の設置状況を図-5に示す。計測は、カーフェリーあるいは旅客船の着離棧時を対象とし、サンプリング間隔0.1 sで実施した。



a) カメラ設置状況

b) マーカ設置状況

図-4 モーションキャプチャカメラ機器設置状況



図-5 RTK-GNSS 測量器 (アンテナ) 設置状況

## 4. 計測データの解析

### (1) 解析方法

#### a) 変位

本研究では、主として浮函および函間渡橋の変位挙動に着目した。Accについては、加速度データの2階積分により振動変位を算出した。算出に当たっては、得られたデータから解析に不要な周波数帯を除去するため、各段階で0.05~2.0 Hzのバンドパスフィルター (BPF) 処理を行い、平均値が0となる振動変位とした。Mccデータについては1秒間の中央値フィルタ処理を行い、GNSSデータは得られたデータをそのまま採用した。各手法による変位のゼロ点は、後に示す各計測ケースの計測開始時とした。

#### b) 卓越周波数

卓越周波数は、各変位波形を0.05~2.0 Hzのバンドパスフィルター (BPF) 処理してFFT解析を実施し、ParzenWindowにより平滑化した。ParzenWindowのバンド幅は、Accについては0.02 Hz、MccおよびGNSSデータについては0.05 Hzとした。

#### c) ピッチ・ロール・面ねじれ

図-6に示す考え方で、X軸周りの回転をピッチ( $Z_\theta$ )、Y軸周りの回転をロール( $Z_\phi$ )とし、対角の測点を結んだ2直線の相対変位を面ねじれ( $Z_t$ )として、式(1a)~式(1c)でそれぞれ求めた。ここに、 $Z_1$ : 測点1の鉛直変位、 $Z_2$ : 測点2の鉛直変位、 $Z_3$ : 測点3の鉛直変位、 $Z_4$ : 測点4の鉛直変位とする。

$$Z_\theta = \{(Z_1 + Z_2)/2 - (Z_3 + Z_4)/2\}/2 \\ = (Z_1 + Z_2 - Z_3 - Z_4)/4 \quad (1a)$$

$$Z_\phi = \{(Z_1 + Z_3)/2 - (Z_2 + Z_4)/2\}/2 \\ = (Z_1 - Z_2 + Z_3 - Z_4)/4 \quad (1b)$$

$$Z_t = \{(Z_2 + Z_3)/2 - (Z_1 + Z_4)/2\}/2 \\ = (-Z_1 + Z_2 + Z_3 - Z_4)/4 \quad (1c)$$

### (2) 解析結果

#### a) 函間渡橋のねじれ挙動

船舶着離棧時の函間渡橋の最大面ねじれを表-2に、各計測手法によるケース6の面ねじれの時刻歴波形を図-7に示す。カーフェリーと比べ、旅客船着離棧時の面ねじ



図-6 ロールとピッチ

れが平均で約2倍となっており、旅客船着離棧時の方が函間渡橋のねじれ挙動へのより大きい影響を示す。AccとMccの面ねじれが概ね一致しているのに対し、GNSSが1桁大きな値を示したのは、E函とF函上にある測点の相対的な位置関係が変わったことも要因の1つとして考えられるが、最も大きな要因はGNSSの計測精度にあると考えられる。ケース6の最大面ねじれ発生時の浮函および函間渡橋の鉛直変位のモード図を図-8に示す。函間渡橋のモードは、正方向へ100mmオフセットして表示している。モード図によるとE函・F函のロールの位

相が逆であり、これに伴い、函間渡橋のE函側のT1-T2、F函側のT3-T4のロールの位相も逆となって面ねじれを引き起こしている。先述した振動変位（加速度データの2階積分）を2次元および3次元の鉛直変位コンター図（図-9）で示すと、ねじれ挙動を視覚的に把握することができる。なお、レーザ距離計にて、函間渡橋の4測点と各浮函との相対的な鉛直変位を同時計測していたが、函間渡橋が浮き上がるような挙動は示していない。

表-2 船舶着離棧時の函間渡橋の最大面ねじれ

ケース	船舶	潮汐	Acc	Mcc	GNSS
1	カーフェリーM	満潮	3.66 mm	2.51 mm	26.00 mm
2	カーフェリーM	干潮	3.30 mm	3.18 mm	35.25 mm
3	カーフェリーM	干潮	3.19 mm	4.52 mm	21.75 mm
4	旅客船S	満潮	6.49 mm	6.13 mm	---
5	カーフェリーM	満潮	3.52 mm	3.67 mm	---
6	旅客船A	満潮	7.27 mm	9.83 mm	28.25 mm
7	旅客船S	満潮	6.19 mm	5.53 mm	---
8	カーフェリーM	満潮	3.51 mm	5.18 mm	---
9	カーフェリーM	満潮	2.55 mm	6.17 mm	---
10	旅客船A	満潮	6.57 mm	5.91 mm	---

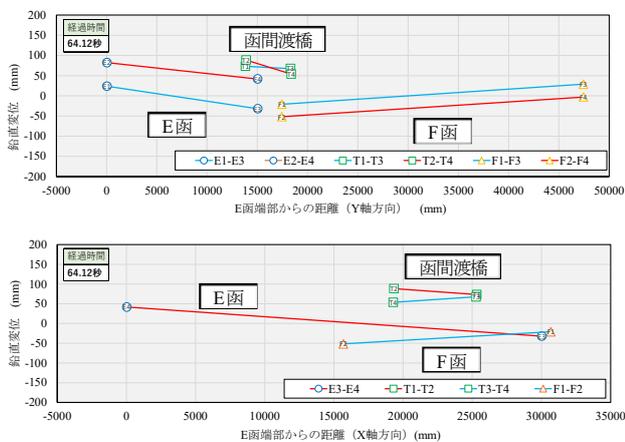


図-8 浮函および函間渡橋のモード図 (Accデータ)

表-3 函間渡橋のロールの卓越周波数

ケース	船舶	潮汐	Acc	Mcc	GNSS
1	カーフェリーM	満潮	0.14 Hz	0.19 Hz	0.13 Hz
2	カーフェリーM	干潮	0.16 Hz	0.15 Hz	0.15 Hz
3	カーフェリーM	干潮	0.19 Hz	0.15 Hz	---
4	旅客船S	満潮	0.19 Hz	0.19 Hz	---
5	カーフェリーM	満潮	0.18 Hz	0.18 Hz	---
6	旅客船A	満潮	0.20 Hz	0.19 Hz	0.19 Hz
7	旅客船S	満潮	0.20 Hz	0.21 Hz	---
8	カーフェリーM	満潮	0.20 Hz	0.20 Hz	---
9	カーフェリーM	満潮	0.18 Hz	0.19 Hz	---
10	旅客船A	満潮	0.20 Hz	0.15 Hz	---

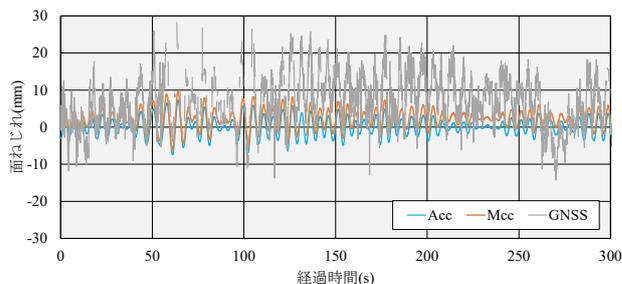


図-7 面ねじれの時刻歴波形

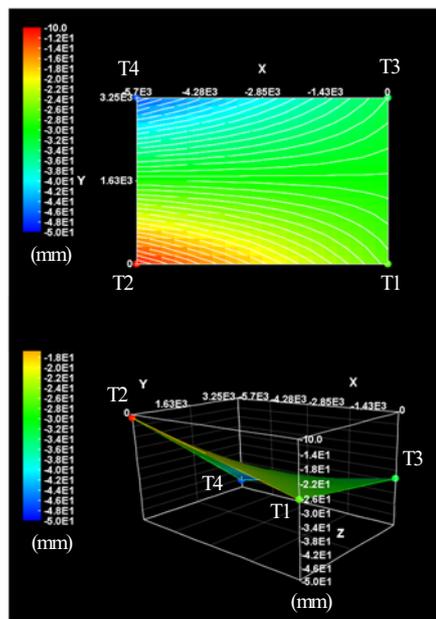


図-9 函間渡橋の鉛直変位コンター図 (Accデータ)

表-4 浮函のロールの卓越周波数 (Accデータ)

ケース	船舶	潮汐	E函	F函
1	カーフェリーM	満潮	0.15 Hz	0.19 Hz
2	カーフェリーM	干潮	0.15 Hz	0.15 Hz
3	カーフェリーM	干潮	0.16 Hz	0.16 Hz
4	旅客船S	満潮	0.16 Hz	0.19 Hz
5	カーフェリーM	満潮	0.16 Hz	0.18 Hz
6	旅客船A	満潮	0.15 Hz	0.19 Hz
7	旅客船S	満潮	0.16 Hz	0.20 Hz
8	カーフェリーM	満潮	0.16 Hz	0.20 Hz
9	カーフェリーM	満潮	0.18 Hz	0.19 Hz
10	旅客船A	満潮	0.15 Hz	0.20 Hz

## b) 函間渡橋および浮函のロールの卓越周波数

函間渡橋および浮函のロールのFFT解析結果を表-3、表-4にそれぞれ示す。また、図-10にケース6の浮函のFFT解析結果図を示す。函間渡橋においては、干潮時は0.15Hz~0.16Hzなのに対し、満潮時は0.18Hz~0.20Hzであった。また、浮函においては、干潮時はE函・F函共に0.15Hz~0.16Hzなのに対し、満潮時は、F函のみ0.18Hz~0.20Hzとなり、E函とF函には最大0.04Hz（卓越周期1.4s）の差が生じた。この差の要因は、浮函の係留向きや係留しているチェーンの張り具合が関係していると考えられる。この結果から、函間渡橋のロールの卓越周波数はF函の影響を受けており、また、E函とF函のロールの卓越周波数の差により、先述したE函とF函の位相がずれて、函間渡橋にねじれを生じさせる要因となっていると考えられる。表-3において、手法によって卓越周波数の違いが認められるケースがあるが、図-10（特にF函）において、満潮時でも0.15Hz付近と0.19Hz付近に山が見られるように、卓越する周波数成分が2つあるために、どちらも取り得る状況になる場合があると考えられ、手法の違いによる差ではないと考えられる。

## c) 函間渡橋の平面2次元変位

図-11に、ケース2におけるカーフェリー着離棧時の函間渡橋のMccによる平面2次元変位を示す。ここで示す変位量はE函との相対変位を表している。E函にフェリーが着棧すると、E函が押されて反時計回りに回転するため、函間渡橋は時計回りに回転する計測結果となっている。離棧後はその逆である。函間渡橋の平面2次元挙動は、概ねT2を支点に回転している。GNSSの計測手

法でも、定性的には平面2次元の変位挙動を評価することができたが、他の評価項目と同様に、計測精度上、定量的に評価することは難しい。また、AccのX方向、Y方向の加速度データを2階積分して求まる振動変位では、ある地点からある地点に移動するような平面2次元変位を評価することはできない。

## 5. 計測手法の評価

函間渡橋の挙動を評価する上で着目した5項目（ロール、ピッチ、面ねじれ、卓越周波数、平面2次元変位）について、各計測手法による函間渡橋の挙動計測の可否を表-5にまとめた。計測の可否は、函間渡橋の実挙動を定量的に評価できるかを判断基準とした。

Accは、振動計測のための計測器であり、函間渡橋の卓越周波数の信頼性は高い。Accの加速度データから算出した振動変位は平均値が0となる変位であり、ある地点からある地点に移動するような実変位挙動は評価できないが、ロールや面ねじれなどの函間渡橋の相対的な変位については、直接、高精度に変位を計測できるMccと概ね同じ値が得られ、評価は可能と判断した。採用したAccは有線タイプの計測器で、測点が増えると配線作業が煩雑となり、計測システムの規模も大きくなって、コストが増大する課題はあるが、近年、小型化、ワイヤレス化が進んでおり、これらを活用することで、簡易かつ低コストで浮函や函間渡橋の挙動計測を実現できる。

Mccは、3次元変位を精度良く計測できる計測器である。今回は、カメラをE函上に設置せざるを得なかった

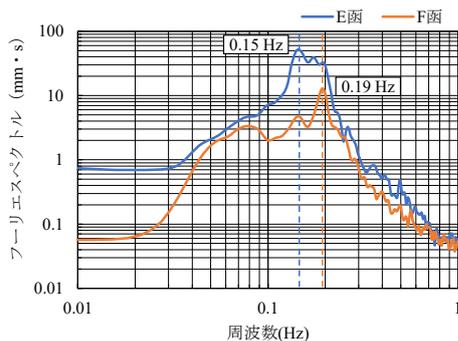


図-10 浮函のロールのFFT解析結果（ケース6：Acc）

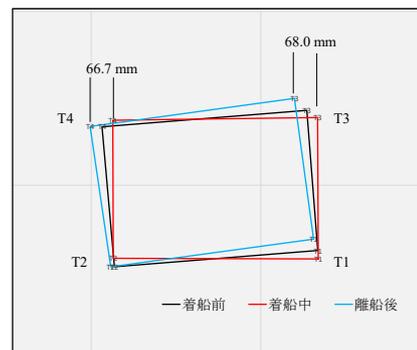


図-11 函間渡橋の平面2次元挙動（ケース2：Mcc）

表-5 各計測手法による函間渡橋の挙動計測の可否

評価項目	サーボ型加速度計 (Acc)	モーションキャプチャカメラ (Mcc)	RTK-GNSS (GNSS)
ロール	○	○	×
ピッチ	○	○	×
面ねじれ	○	○	×
卓越周波数	○	○	○
平面2次元変位	×	○	×

○：可    ×：否

ため、E 函との相対変位データしか得ることができず、函間渡橋の各測点単独での変位の評価はできなかつた。一方、ロールや面ねじれなどの函間渡橋の相対的な変位や Acc と同様の卓越周波数を得ることができた。現時点では、計測距離は 15 m 程度と短く、カメラやマーカの配置の制約により適用できない場合もある。また、非接触の計測手法であるがゆえに、見通しを確保する必要がある。今後、計測距離を長くできれば、陸上から、浮函や函間渡橋の絶対変位計測が可能となり、浮函や函間渡橋の挙動計測の有効な計測手法となり得る。

GNSS は唯一、絶対変位を計測できる計測器であったが、函間渡橋周辺に上空障害構造物（屋根）が存在するために、函間渡橋の 4 隅の測点に配置できず、E 函、F 函上に配置して間接的に函間渡橋の変位挙動を計測した。計測精度上、浮函や函間渡橋の数 mm から数十 mm の変位量を評価することはできないが、その変位波形をもとに Acc や Mcc と同等の卓越周波数を得ることができた。

結果的に、Mcc が函間渡橋の挙動のすべての評価項目を満足したが、それぞれの手法に一長一短があるため、制約条件など計測環境に応じた適切な手法を採用する必要がある。

## 6. おわりに

函間渡橋に発生する面ねじれの大きさは、利用船舶の船型や潮汐の干満により異なる挙動を示すことが分かった。これは、浮棧橋の配置や係留方式、船舶の進路、船舶の接岸位置など様々な要因が考えられるが、これらの複雑な要因により発生する挙動は、設計時に想定した以上の外力を函間渡橋に与える可能性が高いと推察される。特に、チェーン係留方式の浮棧橋同士の間に設置された函間渡橋は、浮棧橋の動揺による繰り返し挙動が頻繁に発生するため、経年劣化による疲労破壊が発生する可能性も少なくない。

本研究では、このような函間渡橋の挙動を把握するため、3 つの計測手法により浮函と函間渡橋の相対変位と絶対変位計測、その解析を試みたが、計測機器や計測手法など改善する余地は残されている。

今後の維持管理のモニタリングとして最適な計測手法について、継続的な研究が必要と考える。

**謝辞：**本調査は、広島県西部建設事務所廿日市支所の協力を得て実施したものである。協力いただいた関係各位には、心からお礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 酒井大樹, 平山克也, 稲垣賢人, 浮体動揺計測を対象とした 3 次元画像解析の省力化と最適化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), VOL.76, No.2, pp.I\_672-I\_677, 2020.
- 2) 早河達也, 宇都宮智昭, 佐藤宏, 湯川和浩, 前田克弥, 加藤俊司, 多方向不規則波を考慮した大型浮体の波浪動揺解析とその現地観測による検証, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.919-924, 2007.
- 3) 山本修一: アクティブ除振技術における加速度計の役割と特性, 精密工学会誌, VOL.73, No.4, pp.422-425, 2007.
- 4) 馬淵大宇, 長澤夏子, 渡辺仁史, 新田かおる, 元岡展久: モーションキャプチャシステムと HMD を組み合わせた没入型 VR システムを用いた生理学的高所ストレスの推定精度の検証, 日本建築学会技術報告集, 第 19 巻, 第 43 号, pp. 1073-1078, 2013.
- 5) 山尾裕美, 鎌苅裕紀, 万所求, 古屋智秋, 辻宏道, 後藤清: 公共測量のためのマルチ GNSS 測量マニュアル(案)の制定, 国土地理院時報, No.127, pp.99-106, 2015.
- 6) 間野耕司, 井関禎之, 森田真一, 橘菊生, 西山哲: 移動車両による河川堤防高把握の検討, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), VOL.73, No.2, pp.I\_53-I\_64, 2017.

(Received February 4, 2021)

(Accepted April 23, 2021)

## A STUDY ON MEASUREMENT AND ANALYSIS METHODS FOR THE BEHAVIOR OF A CONNECTING BRIDGE FOR FLOATING PIERS

Naoki MUTA, Keisuke KITADE, Akihiro TSUKISAKA, Yoshikazu MATSUMAE and Shuji UMEMOTO

In this study, we analyzed the behavior of a connecting bridge for floating piers, which is repeatedly shaken by the berthing of ships and wakes, and considered measurement methods for future maintenance. For the measurement, we employed three methods of servo type accelerometer, motion capture camera, and RTK-GNSS surveying instrument, and tried to measure the relative displacement and absolute displacement of the floating pier and a bridge between the floating piers. As a result, motion capture was evaluated as optimal method in terms of all evaluation items in this study. Note that, since each method has advantages and disadvantages, it is necessary to select an appropriate method at each site according to its constraints considering measurement environment.