

PC 箱桁曲線橋における複数の加速度センサを用いた挙動解析

海田 翔平*・春日井康夫**・佐藤 昌宏***・松山 公年****・服部 達也*****・園田 崇博****
大城 直*****・國場 幸恒*****・上原 和晃*****

* 前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員
** (一財) 沿岸技術研究センター 専務理事 *** 調査部 主席研究員
**** 日本工営株式会社 道路事業部
***** 内閣府 沖縄総合事務局

那覇港臨港道路 1 号線に位置する「なうら橋」は、国道 58 号の渋滞緩和を図ることを目的に建設され、現在は沖縄の物流を支える橋梁である。なうら橋は PC5 径間の連続変断面箱桁の曲線橋で、1993 年に開通してから約 30 年経過したことより、詳細な点検診断を実施した。本稿は、この点検の一環として、複数の加速度センサを使用して走行車両による橋梁全体の動的挙動を把握した調査について報告する。

キーワード : PC 箱桁, 曲線橋, 動的載荷試験, 静的載荷試験, 加速度計, たわみ計測, 傾斜角

1. はじめに

「なうら橋」は、沖縄県の重要な港湾である那覇港を構成する那覇ふ頭、泊ふ頭、浦添ふ頭を結ぶために建設された那覇港臨港道路 1 号線の北部に位置する全長 240m の海上橋である。当橋の特徴として、上部構造は PC5 径間の連続変断面箱桁の曲線橋である(図-1, 図-2)。高温多湿の環境と既存の道路との摺り付けにより標高が制約されて波しぶきの影響を受けるため、エポキシ樹脂塗装鉄筋が採用されている。下部構造には、鋼管杭 ($\phi 1200\text{mm}$, $t=16\text{mm}$) が採用され、腐食代として 2mm の増厚、孔食対策として流電陽極方式の電気防食工法が併用されている(図-3)。支承構造は、水平力を各橋脚に分散させる水平分力分散沓(リング沓)が採用され、移動制限装置により橋軸直角方向の移動が制御されている¹⁾。1993 年の供用開始後、兵庫県南部地震を踏まえ、2002 年から 2003 年にかけて、鉄筋コンクリート巻立による橋脚の耐震補強と落橋防止装置が施工された。また、2005 年から 2007 年にかけて、PC 鋼材のプレストレスによる腹圧力の影響により生じたひび割れに対する対策として、表面被覆と炭素繊維シート補強が施工された²⁾³⁾。2010 年には維持管理計画書が策定され、維持管理計画の目標、点検診断計画、総合評価、維持補修計画、異常時における点検診断などが示された⁴⁾。

2021 年から 2022 年にかけて、詳細な点検診断を実施した。本稿では、この点検の一環として、橋梁全体の動的挙動を把握するために複数の加速度センサを使用した調査を実施した結果について報告する。

2. 調査方法

2.1 調査概要

本調査では、供用中の大規模な曲線橋のため、変位計の設置や画像処理法などではたわみ計測が困難であったことより、橋面上に設置した 3 軸加速度センサ(以下、加速度センサ)を用いた 2 つの分析手法を用いた。加速度による挙動分析は、加速度センサから得られたデータを使用して、本橋梁の固有振動数、モード形状、および減衰定数を算出し、橋の振動特性を評価した。傾斜角による変形分析は、各地点の重力加速度を傾斜角に変換し、たわみ形状とたわみ量を算出し、橋梁全体のたわみ形状とねじれの挙動を確認した。さらに、調査結果と 3 次元骨組解析結果との整合性を確認した。

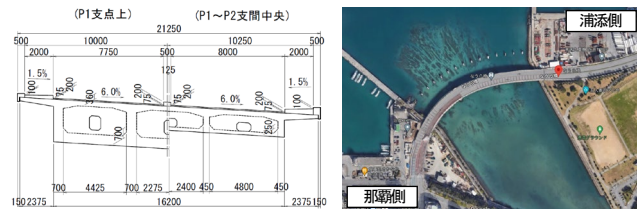


図-1 上部工の断面図

図-2 なうら橋の全体形状

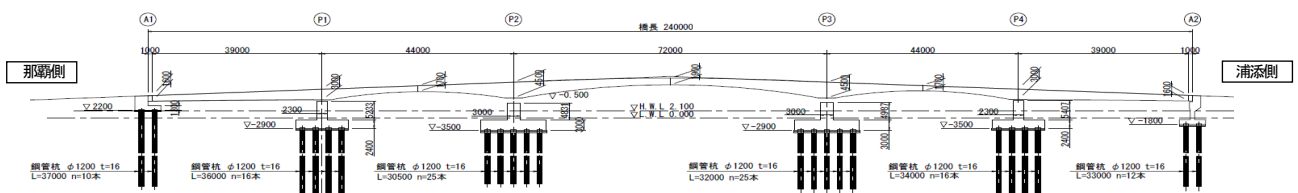


図-3 なうら橋(上部構造, 下部構造)

2.2 調査条件

図-4 に加速度センサの設置位置、図-5 に設置状況を示す。加速度センサは、海側と陸側、そして中央の地覆上に、1 径間あたり 5 箇所の合計 39 箇所に設置した。計測は、夜間に通行止めの条件下で行い、動的載荷試験と静的載荷試験を実施した。また、交通量が多い平日の朝夕の供用時にも計測した。

(1) 動的載荷試験

動的載荷試験は、25t のラフタークレーン 2 台を並走させて実施した。ラフタークレーンは、海側車線を那覇から浦添方向（海側走行）、陸側車線を浦添から那覇方向（陸側走行）に約 20km/h の速度で 3 往復し、連続的に加速度および傾斜角を計測した。図-6 にラフタークレーンの並走状況（海側走行）を示す。

(2) 静的載荷試験

静的載荷試験は、ラフタークレーン 2 台を各支点および各径間中央に並列で停止させ、加速度および傾斜角を計測した。当加速度センサは、対象物が動いた時に生じる加速度に加えて、重力加速度成分を検出できる。加速度センサを水平面に静的に設置している場合、水平成分がゼロ、鉛直成分に $1G(=9.8m/s^2)$ が得られ続ける。傾斜面の場合、鉛直成分と水平成分に分解された加速度が得られる。この特性を利用し、静的な状況における傾斜角の算出が可能になる。

(3) 朝と夕方の供用時

朝方の 8 時から 9 時、夕方の 17 から 18 時にそれぞれ 1 時間連続的に加速度および傾斜角を計測した。計測中は、ビデオカメラにより交通状況を撮影し、橋梁のたわみと交通量の関係性を考察した。

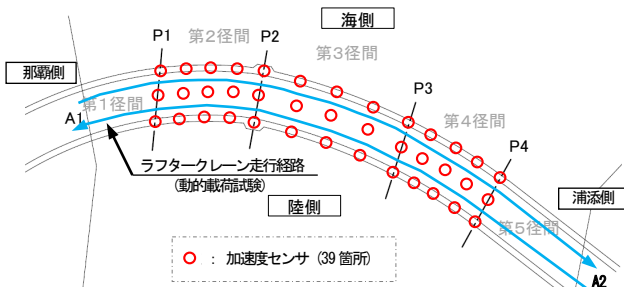


図-4 加速度センサ設置位置



図-5 加速度センサの設置状況（海側の地覆上）



図-6 ラフタークレーン並走状況（海側走行）

2.3 調査手法

(1) 加速度による挙動分析

挙動分析には、「構造同定手法 NExT-ERA」^{5)~8)} を適用した。図-7 に NExT-ERA の算出原理と手順を示す。NExT (Natural Excitation Technique) は、複数点の常時微動データから自由減衰波形を算出する手法である。ERA (Eigensystem Realization Algorithm) は複数点の自由減衰波形を用いて、構造システムの状態モデルを推定し、推定したモデルの固有値を求めることで対象構造物の固有振動数、モード減衰、モード形状を同定する手法である。この手法を用いることで、強制加振試験なしで自由減衰波形を算出でき、動的特性を同定できる。

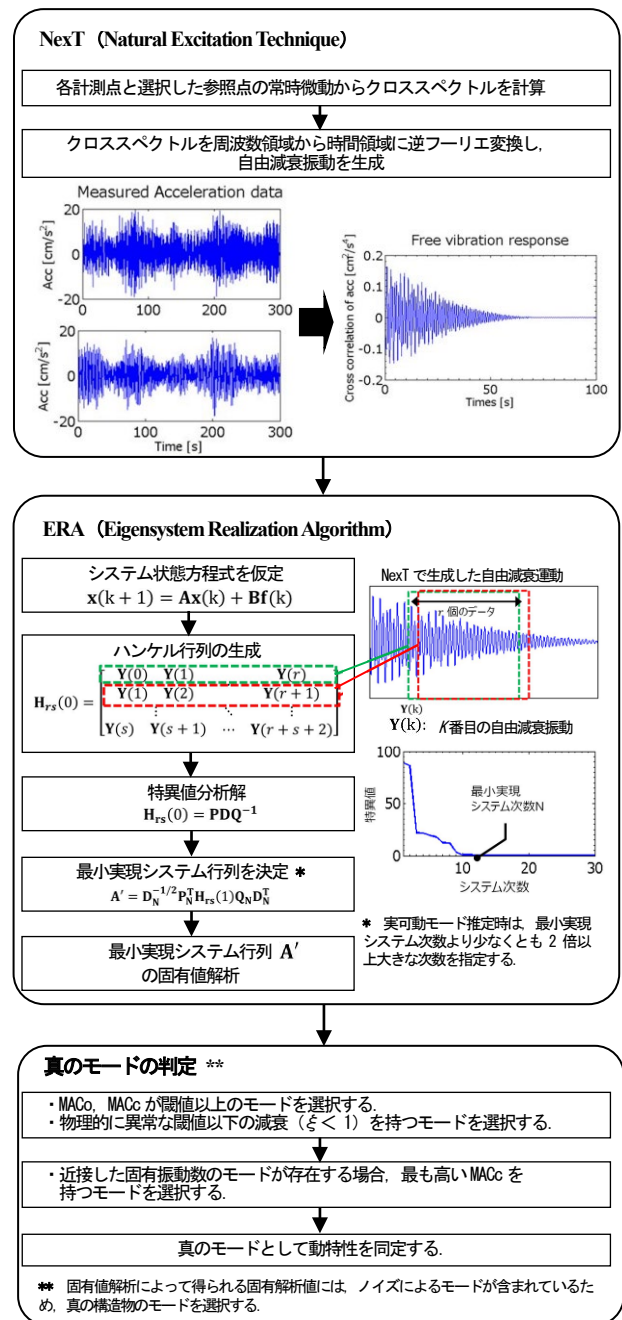


図-7 NexT-ERA の算出原理と手順

同図において、真のモード判定を行う際の評価手法として、MACo (Model Assurance Criteria) があり、ERA により同定された固有値に基づく理想のモード系の相関性を示す。MACc (Model Amplitude Coherence) は、ERA により求められるモード振幅時刻歴と、同定されたモード初期幅からのモード複素固有値を用いて得られる理想的な挙動の相関性を表した評価指標である。

(2) 傾斜角による変形分析

傾斜角による変形分析には、「構造物変形の計測監視技術 DEGRIS[®]」^{9)~14)}を適用した。図-8 は、たわみ形状およびたわみ量の算出原理と手順を示す。

STEP1: 橋軸方向の直線 L 上に設置した加速度センサにより、加速度の鉛直成分を計測する。

STEP2: 直線 L 上の各設置位置 x_i (mm) で計測された加速度の鉛直成分 A_i (G) の変化から、傾斜角 θ_i (μrad) を算出する。

$$\theta_i = \text{asin}(A_i / G) \quad (1)$$

STEP3: 直線 L 上の各設置位置 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ の傾斜角 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ から最小二乗法で、任意の位置 x (mm) に関する傾斜角を示す傾斜角関数 θ_x (μrad) を算出する。

$$\theta_x = f(x) = a_1x^n + \dots + a_{n+1} \quad (2)$$

a_n は n 次項の係数である。

STEP4: (2) 式の θ_x (μrad) を積分して、位置 x (mm) に対する変位を示す変位関数 δ_x (mm) を算出し、橋桁の変位形状とする。

$$\delta(x) = \int f(x) dx = \frac{a_1}{n+1} x^{n+1} + \dots + a_{n+1}x + a_{n+2} \quad (3)$$

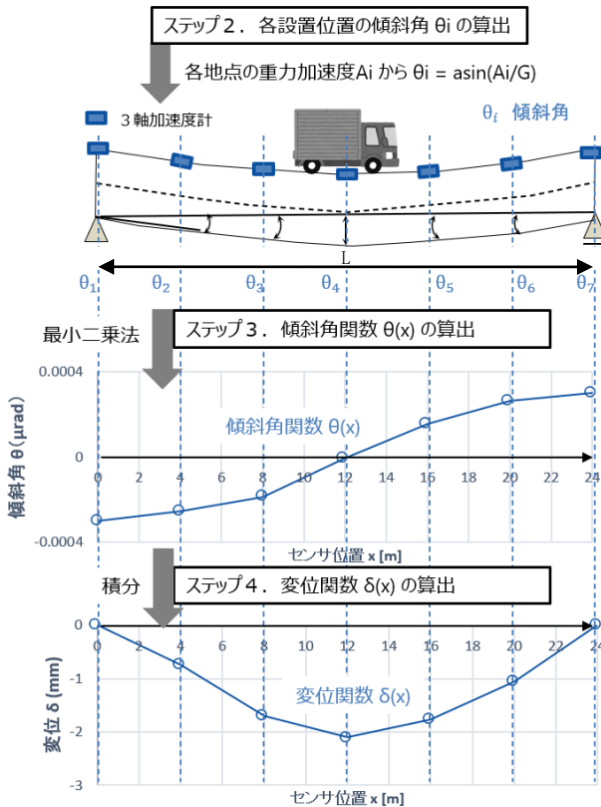


図-8 DEGRIS の算出原理と手順⁹⁾

3. 調査結果

(1) 加速度による挙動分析

動的載荷試験の計測結果を用いて、鉛直方向、水平（橋軸直角）方向、橋軸方向の3方向における卓越周波数を周波数解析により確認し、それに基づきモード形状、固有振動数、および減衰定数を算出した。図-9 に第3径間（海側）におけるパワースペクトル密度を示す。また、表-1 にモード別の卓越周波数、固有振動数、減衰定数を示す。その結果、1次から6次までのモードが生じており、鉛直1次振動モードが最も卓越していること、曲線橋の特徴として、水平モードが生じていることを確認した。

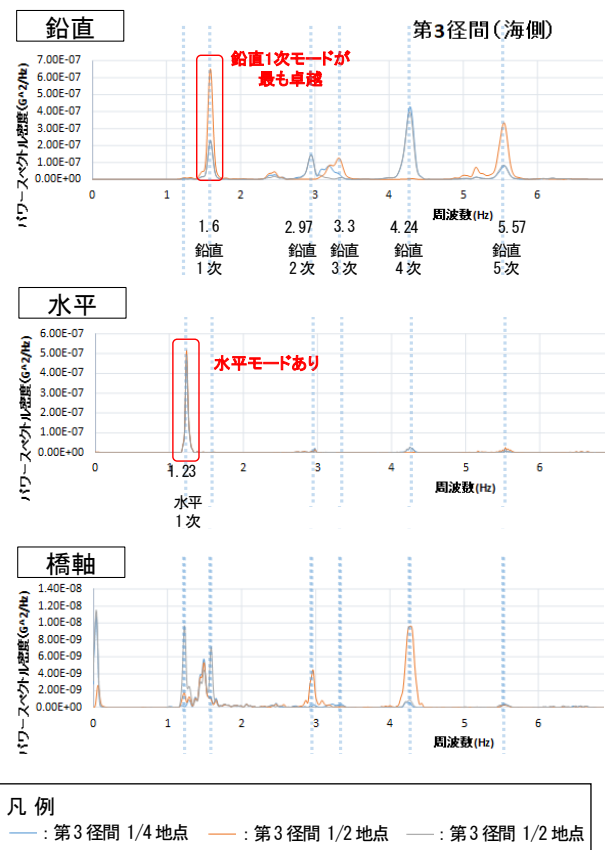


図-9 第3径間(海側)のパワースペクトル密度

表-1 モード別の卓越周波数、固有振動数、減衰定数

モード	各方向の卓越周波数 (Hz)			固有振動数 (Hz)	減衰定数
	鉛直	水平	橋軸		
水平1次	-	1.23	1.23	1.25	0.018
鉛直1次	1.60	-	1.59	1.59	0.010
鉛直2次	2.97	2.96	2.97	2.94	0.012
鉛直3次	3.30	-	-	3.36	0.018
鉛直4次	4.24	4.24	4.24	4.3	0.011
鉛直5次	5.57	5.57	-	5.49	0.004

図-10 に第2～4 径間において海側側線で計測した各次数でのモード形状を示す。各モード振幅は、最大値を1として正規化した。モード形状の解析から、鉛直1次モードが最も卓越していること、鉛直5次モードが各測線で異なるねじりモードであることを確認した。ただし、鉛直5次モードの第3径間中央のパワースペクトル密度は、鉛直1次モードと比べて非常に小さいため、全体の挙動への影響は限定的と考えられる。水平方向のモード振幅は、曲線橋により生じていると考察した。なお、陸側側線についても、同様の計測結果が得られた。

(2) 傾斜角による変形分析

a) 動的荷重試験

動的荷重試験において、最大たわみ量は第3 径間中央で計測され、3.30～3.57mmであった。図-11 に最大たわみ量を示した動的荷重試験（海側走行）による海側側線の変位時刻歴を示す。第2 径間（青枠）、第4 径間（緑枠）に比べて、第3 径間中央（赤枠）のたわみが大きく、各径間において、荷重車が中央部を通過した時に最大たわみを示した。

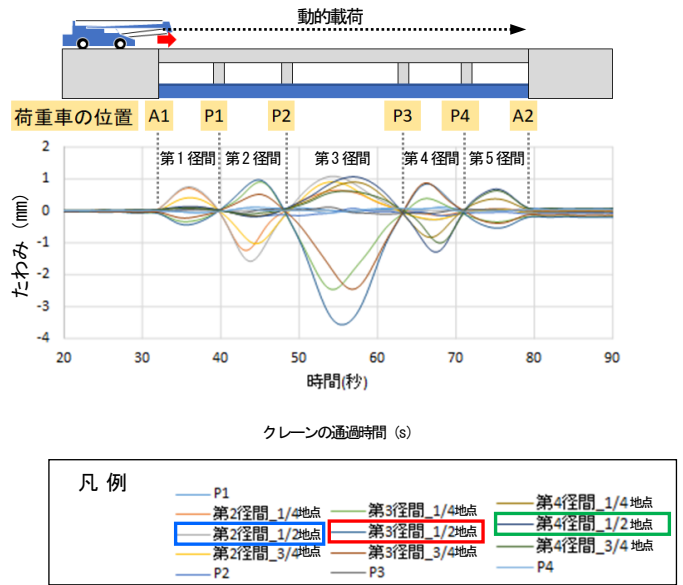


図-11 動的荷重試験（海側走行）による海側側線の変位時刻歴

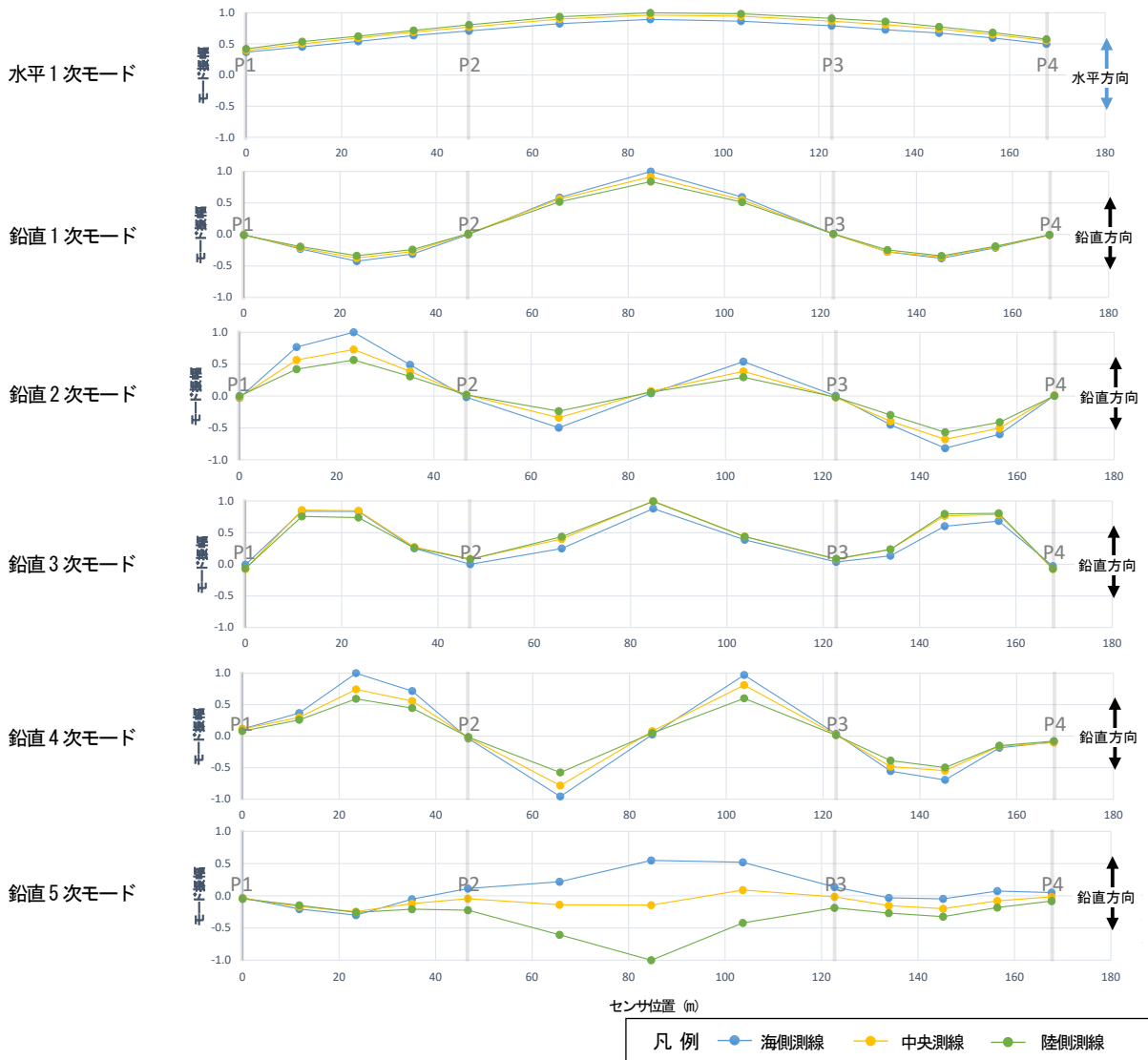


図-10 各次数のモード形状

(b) 静的荷重試験

図-12 に静的荷重試験のたわみ形状変化を、図-13 に最大たわみ量を示した第3 径間中央荷重時（海側車線）のたわみ分布を示す。静的荷重時の最大たわみ量は 3.53mm であり、この値は動的荷重のたわみ量の 3.30 ~3.57mm と概ね同値であった。また、静的荷重試験と同条件（荷重車寸法・重量、荷重位置）で立体骨組線形解析を実施した。この解析は全断面有効、コンクリートのヤング率は $3.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、高欄や地覆は荷重としてのみ考慮し剛性は無視する条件とした。図-14 に立体骨組解析の解析モデルを示す。表-2 に示す解析結果と調査結果のたわみ量は概ね一致しており、今回得られたたわみは、設計の想定内範囲であり、過大なたわみが生じていないことを確認した。

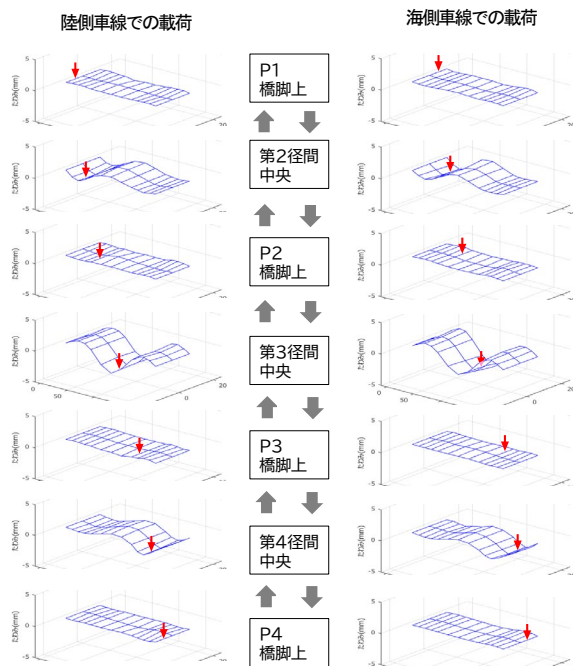


図-12 静的荷重試験のたわみ形状変化

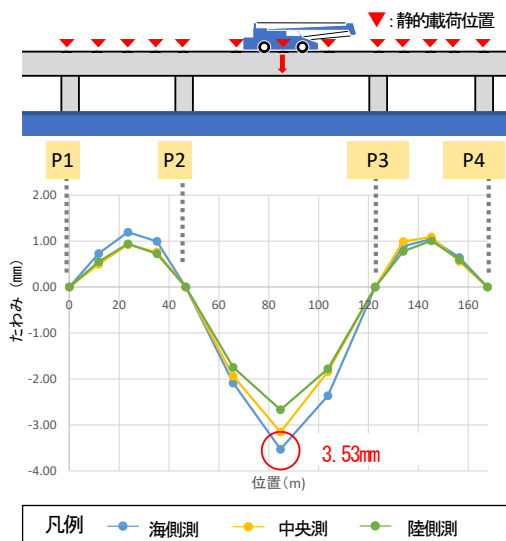


図-13 第3 径間中央荷重時（海側車線）のたわみ分布

(c) 朝方・夕方の供用時

朝方・夕方の供用時において最大たわみ量を示した際のたわみ分布を図-15 に示す。朝方の計測結果では、静的荷重試験時のたわみ分布と概ね同様の傾向を示すが、第3 径間中央部における最大たわみ量は 4.40mm となり、荷重試験時を上回る結果となった。図-16 に朝方の最大たわみ量が計測された時点の交通状況を示す。海側車線ではクレーン付き大型トラックが、陸側車線ではユニックや大型ダンプトラックが走行していることを確認した。

夕方の計測結果では、全体的にたわみが小さい傾向を示し、最大たわみ量は 2.48mm であった。図-17 に夕方の最大たわみ量計測時点の交通状況を示す。最大たわみ発生時には、海側車線では乗用車が、陸側車線では大型トレーラが走行しており、大型車両走行時の影響を受けていることを確認した。

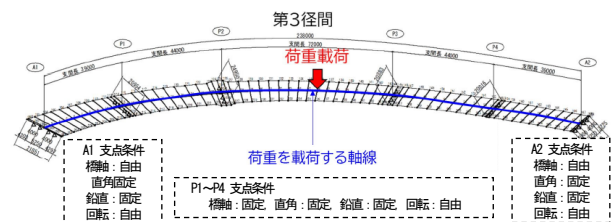


図-14 立体骨組解析の解析モデル

表-2 静的荷重試と立体骨組解析のたわみ量比較

海側車線 荷重位置	計測値 (mm)				解析値 (mm)	解析値 /計測値平均
	海側	中央	陸側	平均		
P1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—
第2径間_1/4地点	0.73	0.50	0.55	0.59	0.37	0.62
第2径間_1/2地点	1.19	0.92	0.94	1.02	0.92	0.90
第2径間_3/4地点	1.00	0.76	0.72	0.83	0.61	0.74
P2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—
第3径間_1/4地点	-2.09	-1.93	-1.75	-1.92	-1.46	0.76
第3径間_1/2地点	-3.53	-3.16	-2.67	-3.12	-3.23	1.04
第3径間_3/4地点	-2.37	-1.84	-1.78	-2.00	-1.65	0.83
P3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—
第4径間_1/4地点	0.89	0.99	0.78	0.89	0.72	0.81
第4径間_1/4地点	1.04	1.09	1.01	1.05	1.09	1.04
第4径間_3/4地点	0.64	0.56	0.60	0.60	0.45	0.75
P4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—

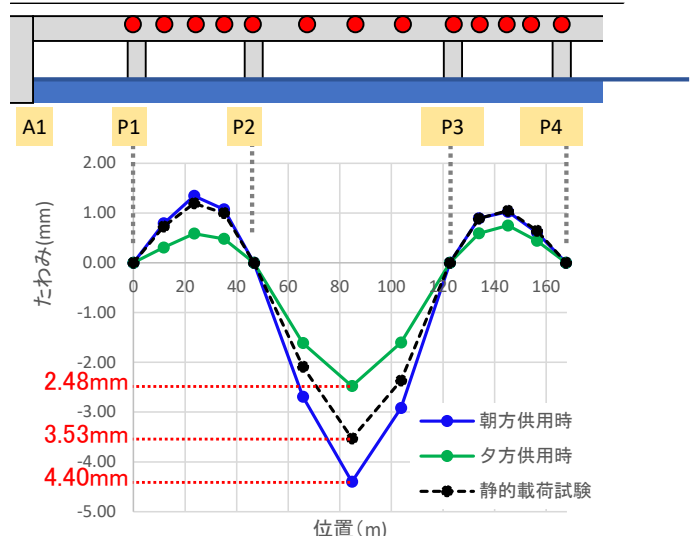


図-15 朝方・夕方供用時（海側車線）のたわみ分布



図-16 朝方の最大たわみ量計測時の交通状況

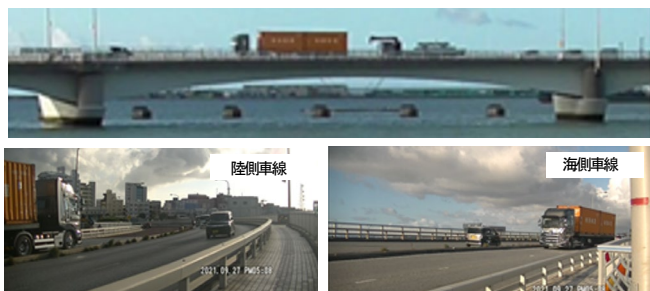


図-17 夕方の最大たわみ量計測時の交通状況

4. まとめ

本検討では、なうら橋の挙動と健全性を評価するため、複数の加速度センサを使用した調査を行った。

加速度による挙動分析は、動的載荷試験の結果、鉛直方向、水平方向、橋軸方向の3方向における卓越周波数を確認し、モード形状、固有振動数および減衰定数を算出した。モード形状の解析から、鉛直1次振動モードが卓越し、鉛直5次モードが各測線で異なるねじりモードであることを確認した。また、曲線橋の特徴として、水平モードが生じていることを確認した。

傾斜角による変形分析は、連続桁の特徴になる中央部で上下に変形し、中央部でたわみが最大となり、端に向かって減少する結果となった。朝夕の交通量が多い供用時や、夜間の通行止め条件下で行った動的載荷試験では、橋梁本体に異常なたわみが生じていないことを確認した。また、静的載荷試験のたわみは、立体骨組解析結果と概ね一致しており、設計で想定しているたわみ挙動の範囲内であった。

以上より、海上に位置するPC5径間の連続変断面箱桁の曲線橋全体は、現時点で異常な挙動が生じていないことを確認した。今後、施設の供用期間中は定期点検・診断を行い、長期に使用していくために適切な補修・補強対策を実施する必要がある。今回実施した現地調査および、解析結果との比較は、今後の補修・補強の効果の把握などにも活用することが期待される。

謝辞

本稿は、内閣府 沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所発注の「令和3年度 那覇港臨港道路（橋梁）劣化対策検討業務」の成果の一部をとりまとめたものである。業務実施にあたっては、検討委員会が開催され東京工業大学の岩波委員長、琉球大学の富山委員、九州大学の梶田委員、港湾空港技術研究所の川端委員から貴重なご意見、ご指導をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 内閣府 沖縄総合事務局 那覇港湾空港工事事務所：30年の工事誌，那覇港臨港道路の維持管理手法の検討，2003。
- 2) 白石秀幸，白石悟：那覇港臨港道路の橋梁劣化状況点検結果に関する一考察，沿岸技術研究センター論文集 No3，2003。
- 3) 尾見良二，白石悟：那覇港臨港道路のコンクリート橋梁劣化対策について，沿岸技術研究センター論文集 No4，2004。
- 4) 沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所：那覇港維持管理計画書—那覇臨港道路 橋梁：なうら橋一，2010。
- 5) 長山智則，阿部雅人，藤野陽三，池田憲二：常時微動計測に基づく非比例減衰系の非反復構造逆解析と長大吊橋の動特性の理解，土木学会論文集 No.745/1-65，2003。
- 6) 藤野陽三，阿部雅人，長山智則，池田憲二：長大吊橋の常時微動モニタリングからの動特性・空力特性の解明，日本風工学会誌，第94号，2003。
- 7) 西川貴文，田代大樹，中村聖三，岡林隆敏；実稼働モード推定のための構造同定条件に関する解析的検討：構造工学論文集 Vol.62A，2016。
- 8) Jer-Nan Juang, Richard S.Pappa : An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 8 (5), 1985.
- 9) 国土交通省：点検支援技術 性能カタログ，重力加速度を用いた傾斜角による橋桁変形計測技術（技術番号BR030030），付録2-5-228-234，令和5年3月。
- 10) Karim Helmi, Todd Taylor, Ali Zarafshan, Farhad Ansari : Reference free method for real time monitoring of bridge deflections, Engineering Structures, Vol.103,2015.
- 11) Y.Umekawa, H.Suganuma : Development of structural deformation measurement system using multiple acceleration sensors, Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations, eBook ISBN 9780429279119, 2021.
- 12) 梅川雄太郎，菅沼久忠，木下義昭，小野 友暉：車両通行に伴う加速度データを用いた橋梁の変位モニタリングに関する検討，土木学会第72回年次学術講演会，2017。
- 13) 梅川雄太郎，菅沼久忠，木下義昭：複数加速度センサを用いた橋梁のたわみ算出方法の適用性および精度向上に関する検討，土木学会第74回年次学術講演会，2019。
- 14) 梅川雄太郎，菅沼久忠，木下義昭：傾斜角変化に着目した変形形状計測の適用，第10回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会，2021。