

論文

床版取替した小規模橋梁の剛性変化に伴う 日周期変動への影響に関する検討

菅原智大*, 大西弘志**, 高橋明彦***, 千葉陽子****, 寺島紀瑛*

*岩手大学大学院, 総合科学研究科地域創生専攻 (〒020-0066 岩手県盛岡市上田 4 丁目 3-5)

** 博士 (工), 岩手大学教授, 理工学部システム創成工学科 (〒020-0066 岩手県盛岡市上田 4 丁目 3-5)

***小野工業所 (〒960-2261 福島県福島市町庭坂字堀ノ内 3-1)

****山形県立産業技術短期大学校, 教授 (〒990-2473 山形県山形市松栄 2 丁目 2-1)

中小橋梁の維持管理に当たってはその簡略化が求められている。特に大規模な補修・補強作業を行った後の効果を確認するための簡易かつ確実な方法が求められている。著者らは床版取替を実施した前後でその効果を確認するため、温度の日周期変動に着目した計測を実施した。床版取替前後での床版剛性の変化が橋梁全体の挙動にどのように影響するのかを調査した。また、対象橋梁の 3 次元 FEM モデルを作成し、対象橋梁における日周期変動の再現解析を試みた。

キーワード：床版取替, 日周期変動, 床版剛性

1. はじめに

道路橋の維持管理では 5 年に 1 度の頻度で近接目視による定期点検が実施されている。点検対象橋梁は供用中の道路橋約 72 万橋である。既往の研究によればこれらの橋梁のうち 75%以上が橋長 15m 未満の小規模橋梁であることが分かっている。道路橋のうち地方自治体が管理している橋梁は 7 割以上となる約 51 万橋である。また、2030 年までに供用後 50 年以上経過する橋梁は全体の約 5 割になる見通しである。このような状況に対応するため、将来の財政負担軽減を目的とした予防的な保全対策の実施等、早急な橋梁老朽化対策が求められている。

従来の遠望目視点検に比べ近接目視点検は費用が 2 倍近くになると言われている²⁾。それに加え、地方自治体では町の約 3 割、村の約 6 割で橋梁保全業務に携わる土木技術者が在籍していないといった技術者不足が深刻な問題となっている¹⁾。このような状況下でメンテナンスサイクルを回すためには維持管理にかかる費用の抑制が必要であり、さらには熟練技術者の現法を見据えた点検手法の自動化や簡易化による技術力不足の解消が課題である。

現在、赤外線カメラを用いた床版内の空隙などを検出する方法が実用されている。そこで本研究では健全度評価の指標として温度変化を活用できないかを検討するために温度変化に伴う日周期変動を計測した。また、対象橋梁では床版取替工事が行われたため、その前後で計測した結果を比較することにより床版取替による補修・補強効果の調査も行った。

表-1 赤山橋諸元

| 諸元 | |
|-------|-----------------------|
| 上部工形式 | 鋼単純合成 H 桁 |
| 下部工形式 | 逆 T 式橋台 |
| 設計荷重 | TL-14 |
| 竣工年 | 昭和 49 年 3 月 |
| 橋長 | 16,000mm |
| 支間長 | 15,500mm |
| 幅員構成 | 600+7,000+600=8,200mm |
| 斜角 | 83° |



図-1 取り換え前床版の劣化状況

2. 対象橋梁

本研究では山形県上市市内に架橋されている赤山橋を対象とした。鋼単純合成 H 桁を有する橋長 16,000mm, 幅員 8,200mm の橋梁である (表-1)。赤山橋は供用開始後 40 年以上経過している橋梁であり、2019 年 4 月から 5 月にかけて床版取替工事が行われた。床版取替工事前の床版は図-1 のように ASR が疑われる損傷や、床版内に水平方向のひび割れが確認され、床版剛性は設計よりも大幅に低下し



図-2 支承及び主桁の劣化状況



図-3 赤山橋現況図
(左：取替後，右：取替前)



図-4 温度計測実施状況
(左：赤外線カメラ，右：熱電対)

ていたと考えられる³⁾⁴⁾⁵⁾。床版取替に伴い、床版は従来のものより床版厚が 30mm 薄くなった。主桁、横桁の交換は行ってないため、図-2 に示すように桁端部や支承部では塗装の剥がれやさびの発生など劣化が著しく、橋座部には土砂の堆積が確認されたことから支承の機能低下が想定された。赤山橋の床版取替前後の写真を図-3 に示す。

3. 実験概要

一日を通して周期的に変動する外気温による挙動を計測するために、床版及び桁の部材温度変化、支間中央の鉛直変位、各支点の水平変位を計測した。24 時間にわたって 1 時間おきに計測を実施した。なお、床版取替前後どちらも同様の方法で実験を行った。以下に各計測の詳細を示す。

3. 1 温度変化計測

図-4 に示す赤外線カメラを用いて舗装表面、床版下面、各主桁の上フランジ、ウェブ、下フランジを撮影し、1 時間ごとの温度を計測した。また、赤外線カメラで計測された温度の信頼性を確認するため各主桁下フランジ下面に熱電対を設置し、該当位置の局所温度も並行して計測した。

3. 2 鉛直変位計測

変位計設置位置を図-5 に示す。桁下が 2m 以上あったため、単管パイプで架台を構築し計測を実施した。単管パイプの熱膨張は温度変化により生じる鉛

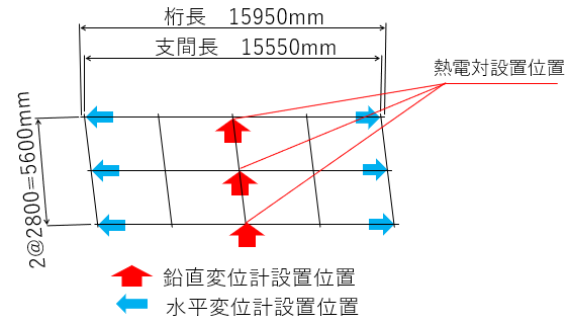


図-5 変位計設置位置



図-6 変位計設置状況
(左：鉛直変位，右：水平変位)

直変位より十分に小さい値であると判断したため、今回の実験においては考慮していない。架台を用いて各主桁の支間中央に変位計を設置し計測を実施した(図-6)。床版取替前後の鉛直変位を計測することにより床版の劣化による影響を検証した。また、温度変化との関連性についても検証した。

3. 3 水平変位計測

変位計は下フランジ下面に取り付け、図-6 に示す位置で水平変位を計測した。鉛直変位と同様に床版取替前後での実測値の比較を行った。

4. 実験結果及び考察

床版取替前の計測は 2018 年 8 月 2 日～3 日にかけて実施した。計測期間中の気候は晴れで、24 時間を通して気温の変化を確認できた。外気温は最高気温が 34.1℃、最低気温が 20.4℃であり、気温差は 13.7℃だった⁶⁾。また、計測実施中に通行した車両は確認されなかった。

床版取替後の計測は 2019 年 5 月 31 日～6 月 1 日にかけて実施した。計測期間中の気候は、5 月 31 日は曇りのち雨、6 月 1 日は雨のち晴れだった。5 月 31 日 20:00 頃から 6 月 1 日 4:00 頃にかけて小雨が降り気温低下が確認されたが、その後は晴れて気温の上昇が確認された。外気温は最高気温が 23.0℃、最低気温が 12.7℃で気温差は 10.3℃だった⁶⁾。また、計測実施中に通行した車両は確認されなかった。

今回の実験では計測開始時の変位を 0mm として計測している。従って、取替前後の季節の違いによる気温差はあるが、温度差による変位に着目し計測を実施したため、季節による気温の影響は考慮せずに計測結果を比較した。

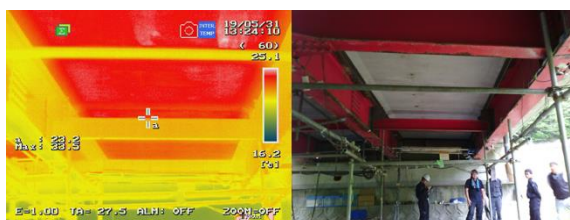


図-7 サーマグラフィー画像と可視画像
(2019年5月31日13:30)



図-8 サーマグラフィー画像と可視画像
(2019年6月1日0:30)



図-9 サーマグラフィー画像と可視画像
(2019年6月1日12:30)

4.1 温度変化計測

2019年の実験時に赤外線カメラで撮影した桁下の画像と可視画像を示す(図-7~9)。サーモグラフィー画像より、時間ごとに桁体に温度変化が生じていることが確認できた。床版下面から主桁の下フランジに向かって温度が低くなっていることから部材同士での温度の伝達があることも確認できた。

図-10, 11に橋梁各部材の温度変化の結果を示す。各主桁の上フランジ、ウェブ、下フランジ、床版下面および舗装面の温度の値は赤外線カメラから得られた値の平均値を使用している。両年ともに舗装面の温度変化が他の部材に比べ大きくなり、最大温度に達する時間帯はほとんど同じだった。舗装面は正午近くの12:00~13:00になると最大温度を計測し、明け方の4:00~5:00に最低温度を計測した。また、取替前の床版内部に生じていた劣化により取替前後で温度伝達時間に差が生じていたと考えられる。

一方、舗装面は外気温よりも温度が高くなる時間が多かったことから外気温ではなく直射日光の影響を受けやすいということが考えられる。それ以外の床版下面、主桁に関しては部材同士の温度差は小さく、1日を通して同様の変化を示した。これらの部材は午前中には温度のばらつきが小さく、夕方(16:00)以降になるにつれて各部材の温度のばらつきが大きくなることが確認された。床版に比べて主桁の下フランジの方が温度変化は大きかったため、橋梁下面の方が温度低下しやすいということが分かる。

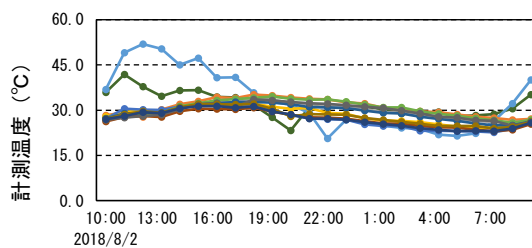


図-10 各部材温度の時刻歴変化
(床版取替前)

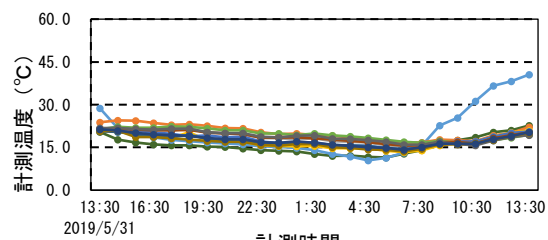


図-11 各部材温度の時刻歴変化
(床版取替後)

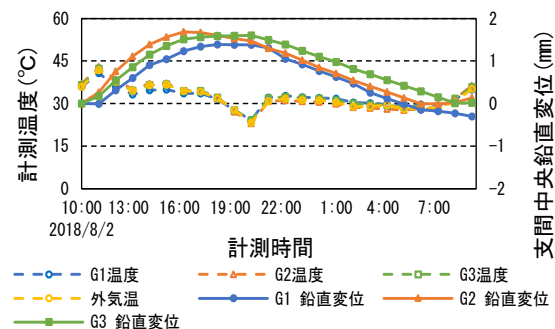


図-12 鉛直変位の時刻歴変化(床版取替前)

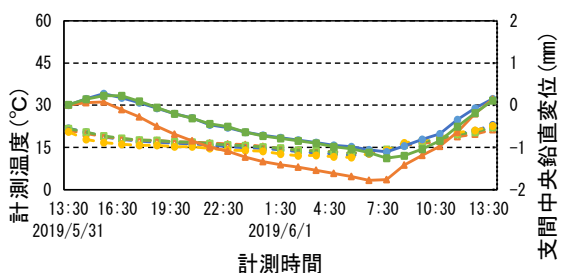


図-13 鉛直変位の時刻歴変化(床版取替後)

これは外気温が橋梁部材の温度を下回っている時間帯とほとんど一致している。このことから外気温が橋梁部材温度を下回ると温度のばらつきが大きくなるということが予想される。

表-2 各温度と鉛直変位の相関係数 (取替前)

| | G1 | G2 | G3 |
|--------|---------|---------|---------|
| 外気温 | -0.1099 | 0.05684 | -0.1892 |
| 橋梁全体平均 | -0.1891 | 0.0326 | -0.2055 |
| 上フランジ | 0.9725 | 0.9072 | 0.9683 |
| ウェブ | 0.8256 | 0.9601 | 0.4540 |
| 下フランジ | -0.1891 | 0.0326 | -0.2055 |
| 主桁平均 | 0.8364 | 0.9645 | 0.6916 |
| 断面内温度差 | -0.1064 | 0.1267 | -0.1955 |

表-3 各温度と鉛直変位の相関係数 (取替後)

| | G1 | G2 | G3 |
|--------|--------|--------|--------|
| 外気温 | 0.5887 | 0.7283 | 0.4759 |
| 橋梁全体平均 | 0.9499 | 0.9792 | 0.9148 |
| 上フランジ | 0.9348 | 0.6500 | 0.8874 |
| ウェブ | 0.9620 | 0.8838 | 0.9394 |
| 下フランジ | 0.8029 | 0.9476 | 0.7603 |
| 主桁平均 | 0.9709 | 0.9552 | 0.9655 |
| 断面内温度差 | 0.2389 | 0.4365 | 0.1663 |

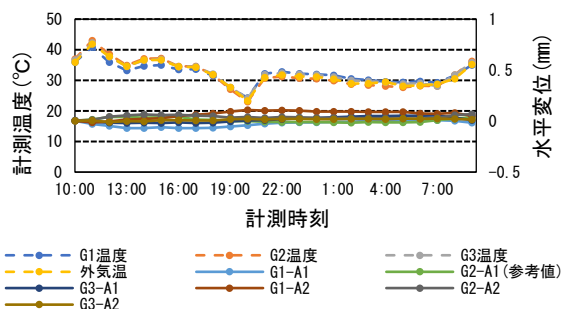


図-14 各支点の水平変位の計測結果 (床版取替前)

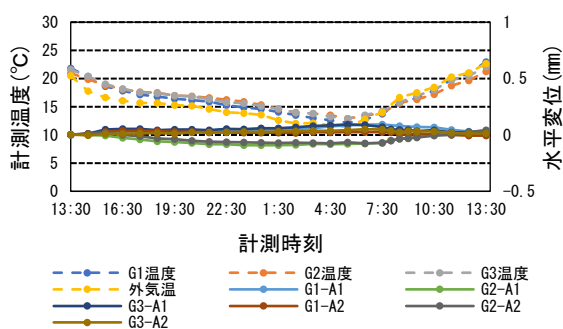


図-15 各支点の水平変位の計測結果 (床版取替後)

4.2 鉛直変位計測

図-12, 13 に鉛直変位の時刻歴計測結果を示す。温度は点線、鉛直変位は実線で表している。外気温及び各主桁の温度変化に伴い支間中央における鉛直変位も周期的に変化することが確認できた。床版取替前後のどちらも G2 における鉛直変位が最も大きな値となった。2018 年の最大変位は 1.686mm, 2019 年の最大変位は 1.783mm だった。床版取替前後で比較すると床版取替後の方が最大変位は大きな値とな

った。取替前後では取替後の方が剛性は高くなるため、変位は小さくなる。それに対し今回の実験では取替後の変位の方が大きくなっているため、取替前の ASR などの症状が疑われる床版では劣化の影響により取替後に比べて変位が小さかったと考えられる。また、図-12, 13 から主桁及び外気温の最高温度を計測した数時間後に最大変位を計測していることから温度と鉛直変位の周期性にはずれが生じているということが確認できた。

次に計測結果をもとに温度と鉛直変位の関連性を調べるために外気温、下フランジ、ウェブ、上フランジ、橋梁全体平均温度、主桁平均、断面内温度差と鉛直変位で相関を取った(表-2, 3)。床版取替前は全体的に各パラメータとの相関がなかったが、上フランジと変位との相関が最も高かった。取替後に比べて相関が低くなった理由としては日射の影響による舗装面の温度変化が大きくなってしまったことや床版内劣化による温度伝達の障害、計測精度が低かったことなどが考えられる。取替後は外気温に比べて部材の温度の方が鉛直変位との相関は高くなった。断面内温度差の相関が低くなった理由としては実験中の日射や降雨によって舗装表面の温度変化が大きくなったことが考えられる。また、部材ごとの温度で比較すると主桁平均と橋梁全体平均の温度との相関が高くなった。このことから橋梁に生じる鉛直変位は外気温ではなく橋梁部材の温度に依存していると考えられる。

4.3 水平変位計測

図-14, 15 に水平変位の時刻歴計測結果を示す。温度は点線、水平変位は実線で示している。なお、床版取替前の A1 橋台側 G2 の水平変位は変位計がずれていたことによる誤差があったため、補正したデータを使用している。赤山橋は A1 が可動支承、A2 が固定支承となっているため可動支承である A1 側の支点で変位が計測された。床版取替前の最大変位が 0.0709mm, 床版取替後は 0.0946mm であった。支承が正常に機能しているかどうかを確認するために移動量を算出し、比較する。道路橋示方書に基づく温度変化による支承部の移動量は次式(1)で表される⁷⁾。

$$\Delta l_t = \Delta T \cdot \alpha \cdot l \quad (1)$$

床版取替前の実験時の外気温の最大温度差は 18.56°C, 取替後の最大温度差は 11.25°C であった。これと線膨張係数 12×10^{-6} を用いて移動量を算出すると床版取替前は 0.355mm, 取替後は 0.215mm であり、算出された移動量に比べて実測値の方が小さい値であることが確認された。最大変位だけで比較すると取替前は計算値の約 2 割, 取替後は約 4 割程度の機能しか果たせていない。図-2 にもあるように支承の劣化が予想されるため、支承の機能低下が生じていることが可能性として考えられる。また、剛性が低くなっていたと考えられる床版取替前の方が水平変位の値が小さかったことから床版内の劣化が挙動に影響を及ぼしているということが考えられる。

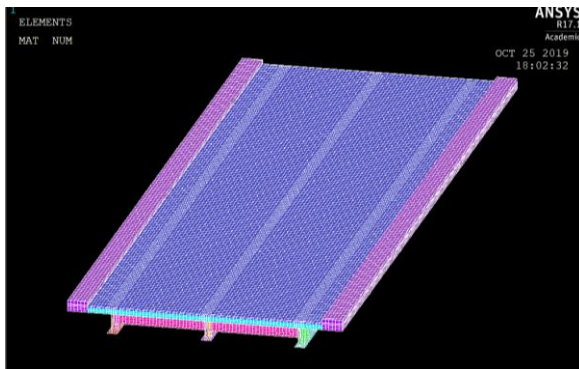


図-16 赤山橋の3次元FEMモデル
(床版取替後)

表-4 解析に使用した各物性値

| | 部材 | 物性値 |
|-------|----------|--------------------------|
| ポアソン比 | 床版 | 0.167 |
| | 主桁 | 0.3 |
| ヤング係数 | 床版 (取替前) | 14,600N/mm ² |
| | 床版 (取替後) | 31,000N/mm ² |
| | 舗装 | 2,000N/mm ² |
| | 主桁 | 200,000N/mm ² |
| 線膨張係数 | すべて | 12×10 ⁻⁶ |

5. 解析

5.1 解析概要

赤山橋の上部工の3次元FEMモデルをANSYSにより構築し(図-16)、再現解析を実施した。上部工のうち、桁体はシェル要素、床版や高欄などコンクリート部分はソリッド要素を用いてモデルを作成した。今回の解析における物性値は道路橋示方書⁷⁾及び架橋当時の鋼道路橋設計示方書を参考にした(表-3)。また、床版取替前のヤング係数については取替工事時に採取されたコア供試体を用いた静弾性係数試験の結果を参考にした。以下に解析条件および解析ケースを示す。

(1) 解析実施時刻

床版取替前後の実験により、各部材の温度変化は類似した傾向を示すことが確認できたため、解析は計測開始から3時間毎に実施した。

(2) 解析時の部材温度

実験で赤外線カメラにより得られた舗装表面、床版下面、主桁の各温度の平均値を使用した。

(3) 解析時の支承条件

解析時の支承条件は現在の支承条件である「pin-roller」と支承の腐食・劣化による機能低下を考慮した「pin-pin」の2種類に設定し、解析を実施した。

(4) 解析値の処理

得られた解析値は床版取替前後において各部材の温度のばらつきが最も小さい時間として床版取替前は8月2日10:00、床版取替後は6月1日7:30を基準に整理した。

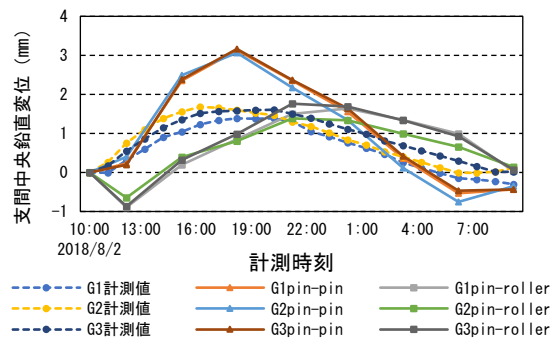


図-17 実測値と解析値の比較 (床版取替前)

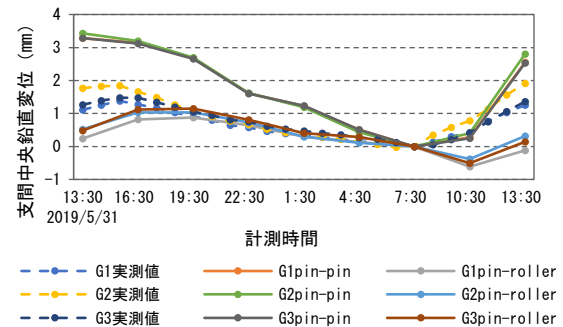


図-18 実測値と解析値の比較 (床版取替後)

5.2 解析結果

図-17, 18に鉛直変位の解析値と実測値の結果を示す。床版取替前の解析値と実測値を比較すると変位の挙動は支承の機能低下を考慮した「pin-pin」の方が類似していることが確認できた。また、解析値のみを比較すると「pin-roller」と「pin-pin」では変位も挙動もあまり類似していないことが分かる。床版取替後においては「pin-roller」の方が実測値と類似した値を示しているが、挙動は「pin-pin」の方が類似していることが確認できた。各部材の温度のばらつきが大きくなる時間帯においては実測値と「pin-roller」でずれが大きくなることも確認された。また、4.1で述べたように夕方以降は各部材の温度のばらつきが小さく、午前中は温度のばらつきが小さい。解析値と実測値を比べると午前中は比較的解析精度が良く、なっていることが読み取れる。床版取替前において実測値と解析値が一致しなかった理由としては床版内に生じていた水平ひび割れなどの損傷を反映できていなかったことが考えられる。床版取替後は取替前に比べて実測値と実橋の支承条件時の解析値とおおむね一致していたことから、床版取替による補修・補強効果があったと言える。しかし、外気温の上昇に伴い各部材の温度が大きい時間帯、及び舗装面とその他の部材で温度差が大きい時間帯においては実測値と解析値のずれが大きかったことから実橋と解析では支承の拘束状態が異なっていることも考えられる。

次に、床版の剛性変化が橋梁の挙動にどれほど影響があるかを調べるために床版の剛性を変化させて解析を実施した。解析モデルは床版取替後のモデル

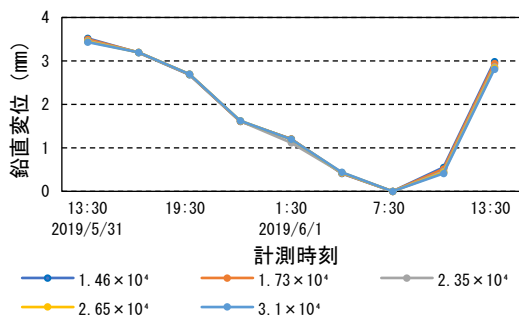


図-19 剛性変化に伴う挙動の比較
(単位：N/mm²，支承条件：pin-pin)

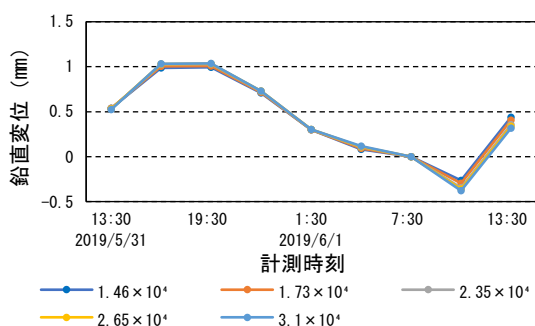


図-20 剛性変化に伴う挙動の比較
(単位：N/mm²，支承条件：pin-roller)

を使用した。解析時の床版剛性は道路橋示方書で定められる基準を下回ることも考慮し、取替前床版のコア供試体を用いた静弾性係数の結果と道路橋示方書⁷⁾を参考にした。解析時の各部材の温度は床版取替後の計測値を使用した。図-19, 20に解析結果を示す。「pin-pin」は剛性が高くなるにつれて鉛直変位の値はおおむね小さくなった。しかし、「pin-roller」では剛性が高くなるにつれて変位の値も大きくなり、「pin-pin」とは逆の挙動を示した。「pin-pin」では水平方向の移動が制限されているのに対し、「pin-roller」では制限されていないことが理由の一つだと考えられる。

6. まとめ

床版取替前後において日周期変動の計測を実施し、床版取替前の方が水平・鉛直変位ともに小さいということが明らかになった。また、実験・解析を通して以下のことを確認できた。

- 1) 温度変化に伴い日周期変動が確認され、その特性は橋梁内部の温度に依存すると考えられる。
- 2) 床版取替前の変位より床版取替後の変位の方が大きかったことから床版内の劣化が挙動に影響を及ぼしていると考えられる。
- 3) 時間帯によって各部材の温度のばらつきが大きい時間帯とばらつきが小さい時間帯が存在し、部材

同士の温度のばらつきが小さい時間帯では比較的解析精度が良くなった。

- 4) 解析では日射や、床版内部の劣化などの実測時に考えられる要素をすべて反映できていないため、正確に再現できなかった。
- 5) 静弾性係数試験の結果と道路橋示方書に基づいた剛性を用いて剛性が変化したことによる挙動への影響を調べた結果「pin-pin」では鉛直変位は剛性に反比例したが、「pin-roller」では剛性に比例する結果となった。

温度による橋梁の日周期変動を計測することで橋梁の挙動を把握することができた。温度変化をモニタリングによる健全度評価の指標とするには計測精度の向上、日射や天候など多くの条件を考慮しなければいけないため、今後も研究を進めていかなければならない。本論文での研究を踏まえて床版の挙動に影響を及ぼす因子として床版内の劣化、斜角などに着目して検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路の老朽化対策，老朽化対策の取り組み
- 2) 川西寛，丸山牧，三木千壽：市町村の橋梁点検業務の費用分析と対策について，構造工学論文集，Vol62A，pp459-471，2016.3.
- 3) 久保善司，市原鴻，横山広，栢谷浩：ASR劣化床版の弾性挙動に関する基礎的研究，第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp45-48，2014.10.
- 4) 前島拓，子田康弘，岩城一郎，内藤英樹，岸良竜，鈴木康範，大田孝二，鈴木基行：アルカリシリカ反応が道路橋RC床版の耐疲労性に及ぼす影響，土木学会論文集E2，Vol72，No2，pp126-145，2016.
- 5) 小松代亮磨，大西弘志，岩崎正二，出戸秀明：RC床版内部水平ひび割れの発生メカニズムに関する一検討，第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp9-12，2014.10.
- 6) 気象庁観測データ：各種データ・資料
- 7) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，2012.
- 8) 高木伸也，村越潤，麓興一郎，次村英毅：既設I桁橋における応力・変位測定計測の分析，土木学会第58回年次学術講演会，pp807-808，2003.9.
- 9) 出野麻由子，三木千壽：温度変形を利用した橋梁健全度評価モニタリングにおける可能性の検討，土木学会第56回年次学術講演会，pp286-287，2001.10.
- 10) 山村浩一，出戸秀明，岩崎正二：支承機能低下が既設鋼合成I桁橋の応力に及ぼす影響度について，構造工学論文集 Vol.56A，2010.3.

(2020年7月17日受付)