

小径木材で構築した人道橋の 長期間構造モニタリングによる変形および振動の観測

田口 典生*¹・佐藤 貢一*¹・林 祐光*¹・安田 聡*²・相馬 智明*²・一色 裕二*³

Keywords : wooden bridges, small diameter timber, bolted joint, structural monitoring, secular change

木橋, 小径木材, 構造モニタリング, 経年変化

1. はじめに

近年, 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた取り組みとして木質構造の利用が促進されるようになってきた。このような背景から, これまで構造体として使用してきた鋼材やコンクリートを木質の大断面集成材(短辺の断面寸法が 150 mm 以上の木材)に置き換えた構造物が多く提案されている。大断面集成材は, 軽量化, 加工性(アーチ状屋根や曲線的なデザイン)や構造強度に優れているなどの利点がある。しかし, 国内では限られた工場でしか製造できないため調達コストが高いという課題がある。また通常は屋内での使用に限定されている。

一方, 戸建て木造住宅等を中心に広く一般的に適用されている小径断面木材は, 断面寸法が 105 mm や 120 mm の構造材であり, 日本国内の人工林で採取された丸太寸法 250~300 mm から成形されたものである。これら小径断面木材は, NC 機(Numerically Control : 数値制御装置が備わっている工作機械)によるプレカットの成形加工技術が確立され経済合理性が高められており, 軽量かつ, 大断面集成材と同等以上の加工性に優れている特徴を有している。

そこで, 小径断面木材の構造適用拡大を図るために, 当社技術センター内の施設間を断面寸法 120 mm のヒノキ集成材で構築した渡り通路橋(以下, 人道橋「TAC.T BRIDGE」と呼ぶ)を施工し, 2023 年 10 月に竣工した。この構造体は, 小径断面木材が螺旋状に組上がった複雑に絡み合う形式としている。このためピン接合部が多く, さらに屋外における長期間暴露状態になるため, 温湿度による伸縮や木材のクリープの影響に加えて, 上下方向の歩行時の環境振動の変化や,

地震や風などの自然外乱時に振動特性(振動数やモード)の変化が想定された。

本報では, まず人道橋の構造概要と接合部構造性能を示す。次に竣工後に実施した連続的なひずみ及び温湿度測定, 定期的な変位測定, 自然外乱時の加速度測定, 歩行実験や加振実験による構造モニタリングについて, 約 2 年間の挙動および振動特性測定結果を報告する。



写真-1 人道橋「TAC.T BRIDGE」
Photo.1 Pedestrian Bridge "TAC.T BRIDGE"

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 音響研究室

* 2 技術センター 都市基盤技術研究部 木・鋼研究室

* 3 設計本部 構造設計第二部

2. 橋の構造

2.1 構造概要

写真-1 に当社技術センター内に小径断面木材を用いて建設された人道橋を示す。人道橋は実際の木材の繊維構造であるヘリカルワインディング構造^{注1)}をモチーフとしてデザインされており、図-1 の①②に示すように 120 mm 角の木材を 2 方向に螺旋状に組上げて床面・両側の壁面・屋根面を構成した構造となっている。しかし、この振られた状態の繊維構造形式だけでは元に戻る力が作用するため、構造安定性を確保するために、3 方向目の螺旋を以下の方法で追加し構成した。

③-1 壁面 : 同じ小径断面木材

③-2 屋根面 : 両壁面の木材を繋ぐ鋼製タイロッド

③-3 床面 : 床下地を兼ねた橋横断方向鉄骨部材

材軸方向の木材同士の接合は鋼板を用いたボルト接合としている。また、人の歩行する床面はヒノキ集成材(厚さ 45 mm)であり、上記鉄骨部材の上に設置されている。屋根は構造材の上から人道橋全体を覆うようなガラス仕上としている。

木材の腐朽・変色対策としては、乾式加圧注入処理(日本農林規格による保存処理製剤の性能区分: JAS K4)と表面保護塗料により、耐久性・耐候性を向上さ

せた。人道橋を支える基礎構造部分は、環境配慮コンクリート²⁾を用いたプレキャスト部材を土台とした構造とした。

施工時は、一旦平坦な地盤上で構造体全体を地組みし、その後クレーンで揚重して所定の位置に配置した。図-2 に示すように、橋の下部に木材の引張力低減用としてプレストレスケーブルを配置し、橋全体を基礎に設置後かつ仕上げ施工前にケーブルに張力を導入した。その際の人道橋の南側支持部はローラー支承であったが、床材や屋根ガラスを施工して所定の長期荷重が作用した後に、ローラー支承を基礎に固定することし、供用後の地震時に橋全体が自由に軸伸縮しないように工夫した。

2.2 接合部の詳細

前述したように複雑に絡み合ったヘリカルワインディング構造を構成するために、図-1 および図-3 に示すように人道橋の側面において 2 材 1 組の斜材を約 60 度の角度で交互に交差させ、交差部をボルト接合した。この接合部には、図-4(b)に示すように事前にボルト挿入用の穴を穿孔し、相互の木材が接する部分に鋼製の円形プレートをビスで固定後、ボルトを挿入およびナット緊結することでピン接合した。この鋼製プレート併用ボルト接合方式を新接合方式と呼ぶ。接合面の雨水の滞留を軽減するとともに、ボルトによる木材の支圧変形を抑制し、複数本のビスにせん断力を分散させることでボルト接合部のせん断剛性・耐力を向上させている。

ボルト接合部詳細を図-5 に示す。厚さ 9 mm の円形プレートを木材に固定する 8 カ所のビス孔には、ビス頭が隠れる座掘りを設けている。

この新接合方式の構造性能を確認することを目的に、一方向せん断加力実験を行い、構造性能を検証した。図-6 に試験体形状を示す。加力は単調載荷とし、載荷速度は 0.2 mm/s 程度に調整し、主材と側材の相対変位を計測した。

従来のボルト接合方式と新接合方式の荷重-変位関係を図-7 に示す。最初の 2 mm の初期スリップはボルト貫通孔径と軸径とのクリアランスの差によるものである。従来方式と、新接合方式の破壊状況を写真-2 に示す。この木材内部のボルトの破壊状況は、曲げヒンジが確認され、学会規準²⁾による「モード IV」の破壊性状を示した。従来方式と新接合方式では、初期剛性は同程度であるが、降伏耐力に明確な差が確認され、新接合方式の構造性能が確認できた。

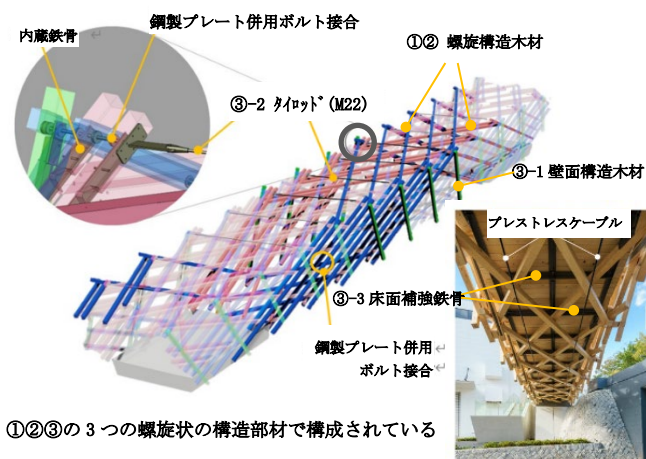


図-1 構造概要

Fig.1 Structural Design Outline

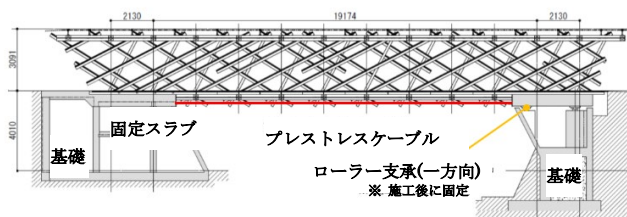


図-2 断面図

Fig.2 Section

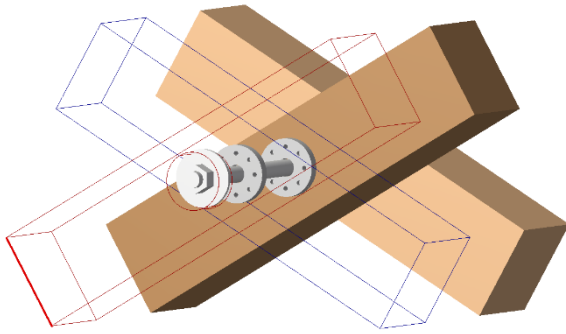


図-3 鋼製プレート併用ボルト接合
Fig.3 Steel Plate Combined Bolt Connection

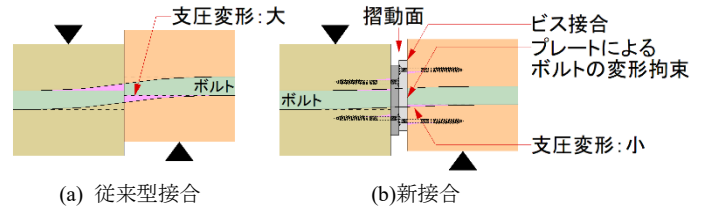


図-4 鋼製プレート併用ボルト接合
Fig.4 Steel Plate Combined Bolt Connection

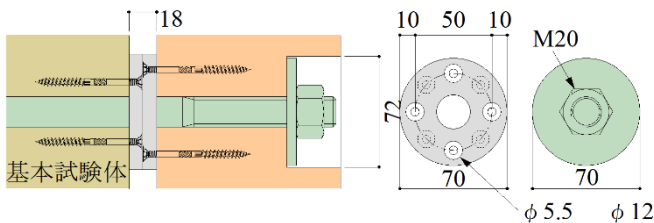


図-5 ボルト接合部詳細
Fig.5 Detail of the Bolt Joint

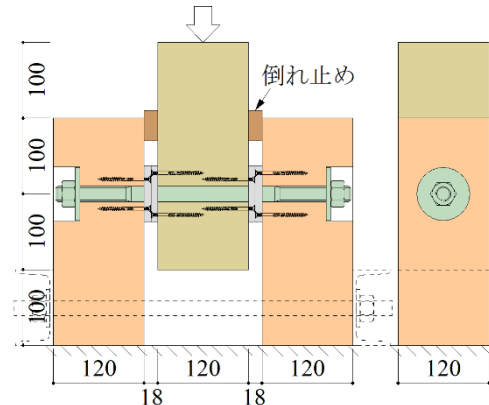


図-6 試験体および加力方向
Fig.6 Test Specimen and Loading Direction

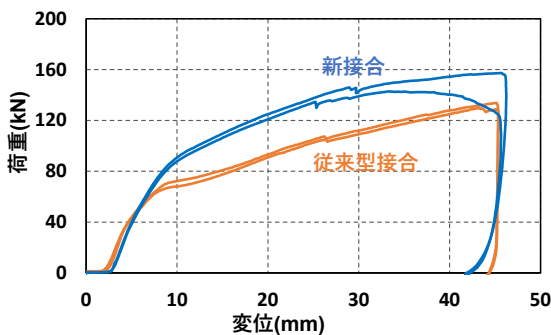


図-7 荷重－変位関係
Fig.7 Load-Deflection Behavior

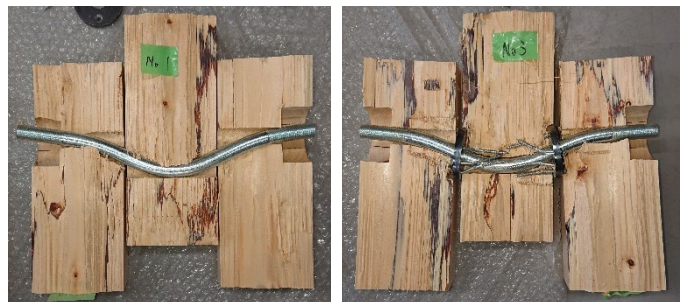


写真-2 破壊状況 (左：従来型接合, 右：新接合)
Photo.2 Damage Status (Left: Normal Joint, Right: New Joint)

3. 構造モニタリングによる挙動と振動性状の検討概要

前述したように、人道橋の構造は螺旋形状による架構構成であり、クリープ性状を有する木材を屋外使用した構造体の全体挙動や振動性状も不明な点がある。そのため長期間にわたり構造的な観測を行う必要がある。橋の竣工後、以下の 4 項目の構造モニタリングを実施し、橋全体の挙動および振動性状の経時変化を把握した。

① ひずみ測定：木材または木材間を連結する鉄骨部材の収縮量の経時変化を測定する。

- ② 変位測定：人道橋の骨格が把握できる代表点の変形量を定期的に 3 次元で測定する。
- ③ 振動測定：ハンマ加振、砂袋落下加振と歩行加振時の振動を測定し、固有振動数や減衰、歩行時の振動値を算出する。
- ④ 自然外乱測定：地震や風（台風や強風）により、比較的大きな振動が発生した際の振動を自動測定する。

3.1 ひずみ測定による挙動

3.1.1 ひずみ測定の概要

ひずみの測定位置を図-8 および表-1 に示す。設計時の構造計算で応力の大きかった箇所を選定している。

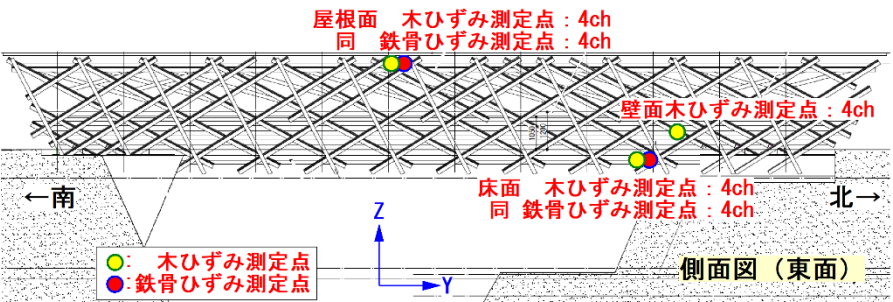


図-8 ひずみの測定点
Fig.8 Measurement Points for Strain

図-9 に示すように木材については各 4 面に 1 枚ずつ計 4 枚、平鋼の鉄骨接続部には片面 2 枚ずつ計 4 枚のゲージを施工時に設置した。従って、ひずみゲージの枚数は合計 20 枚である。なお、ジョイント部は木製のカバーを被せている。ひずみの測定方向はすべて材軸方向とした。測定は竣工後に開始して 1 時間おきに実施した。また、人道橋南側近傍に温湿度計が入った百葉箱を設置し、10 分おきに温湿度を測定した。

3.1.2 ひずみ測定の結果

屋根面の木材（屋根上面）と鉄骨（屋根上面（東））の 2024 年 4 月～2025 年 5 月までのひずみ量および温湿度の 1 日の平均値の推移を図-10 に示す。全体的な傾向としては冬期から夏期に向かって木材は圧縮側に、鉄骨は引張側にひずみ量が増加し、夏期から冬期に向かって前年の冬の値に近づく傾向を示した。これは、鉄骨は気温上昇に伴い伸びる傾向があるのに対し、木材は気温上昇に伴い木材が乾燥し縮むことが起因していると考えられる。ただし、鉄骨は接合部のみで長さは木材に比べ小さいため、橋全体で見ると木材の伸縮の方が支配的であると考えられる。また期間全体で見ると木材のひずみ量は縮む方向に変移している。

図-11 に同じ点の晴天時の 2024 年 5 月 2～6 日間の 1 時間ごとのひずみ量と温湿度を示す。図-10 と同様に、木材は日中に気温上昇と相対湿度低下に伴い収縮し、鉄骨は気温上昇に伴い伸びる傾向がみられた。

3.2 変位測定による挙動

3.2.1 変位測定の概要

図-12 に変位計測を行った測定点を○印で示す。橋の西側の壁面にマーカーを 8 カ所貼付け、橋の側面から 60 m 程度離れた位置にトータルステーションを設置して、竣工後から 2025 年 6 月までに計 9 回（2024 年 7 月からは平均すると約 2 か月毎に 7 回）3 次元測量を行っている。

表-1 ひずみ測定位置一覧

Table 1 Strain Measurement Points

部位	材料	測定位置
屋根	木材	上面、下面、東面、西面
	鉄骨	上面（東）、上面（西） 下面（東）、下面（西）
壁	木材	上面、下面、東面、西面
床	木材	上面、下面、東面、西面
	鉄骨	上面（東）、上面（西） 下面（東）、下面（西）

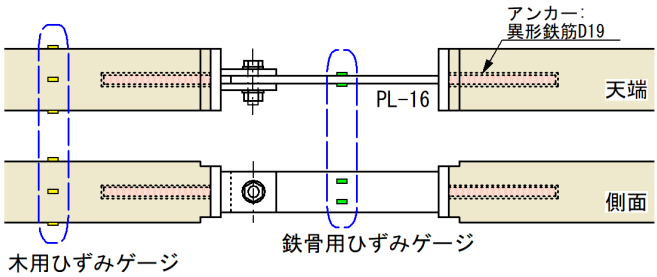


図-9 木材の軸方向ジョイント部およびひずみゲージ
Fig.9 Wood Axial Joint and Strain Gauges

3.2.2 変位測定の結果

図-13 に、竣工時の 2023 年 10 月 11 日から 2025 年 6 月 16 日まで約 1 年 8 ヶ月の期間の 8 カ所の測定値の鉛直方向の変位の推移を、測定初日の値を基準として示した。このうち、人道橋の中央床面（δ3）に着目すると、竣工から 3 か月後の 2024 年 1 月 18 日には基準値から -5.3 mm 変位して人道橋中央が下がったが、さらに 6 か月後の 2024 年 7 月 23 日には基準値から -3.0 mm となり逆に持ち上がった。その後、2025 年 1 月 25 日には基準値から -6.3 mm まで変位し、前年の同時期の -5.3 mm より若干大きなたわみ量になった。さらに 2025 年 6 月 16 日には基準値から -5.0 mm となり、やや持ち上がった。

3.1.2 で述べたとおり、木材は夏期に縮むため橋は持ち上がり、冬期は伸びるため橋は下がったと考えられる。ただし、期間全体ではたわむ方向に変移している。

3.3 振動実験による振動性状

3.3.1 振動実験の概要

振動実験として、(1)インパクトハンマ加振実験、(2)砂袋落下加振実験、(3)歩行実験を行った。図-12 に測定位置を△印で示す。測定方向はすべて鉛直方向のみとし、竣工後から合計 5 回の実験を実施した。

インパクトハンマとはヘッド部に荷重計が付いており、床などを打撃して加振した際の加振力波形を測定することができる機器である。このハンマで図-12 の Y7 位置で鉛直方向に橋を打撃した際の加振力波形と、

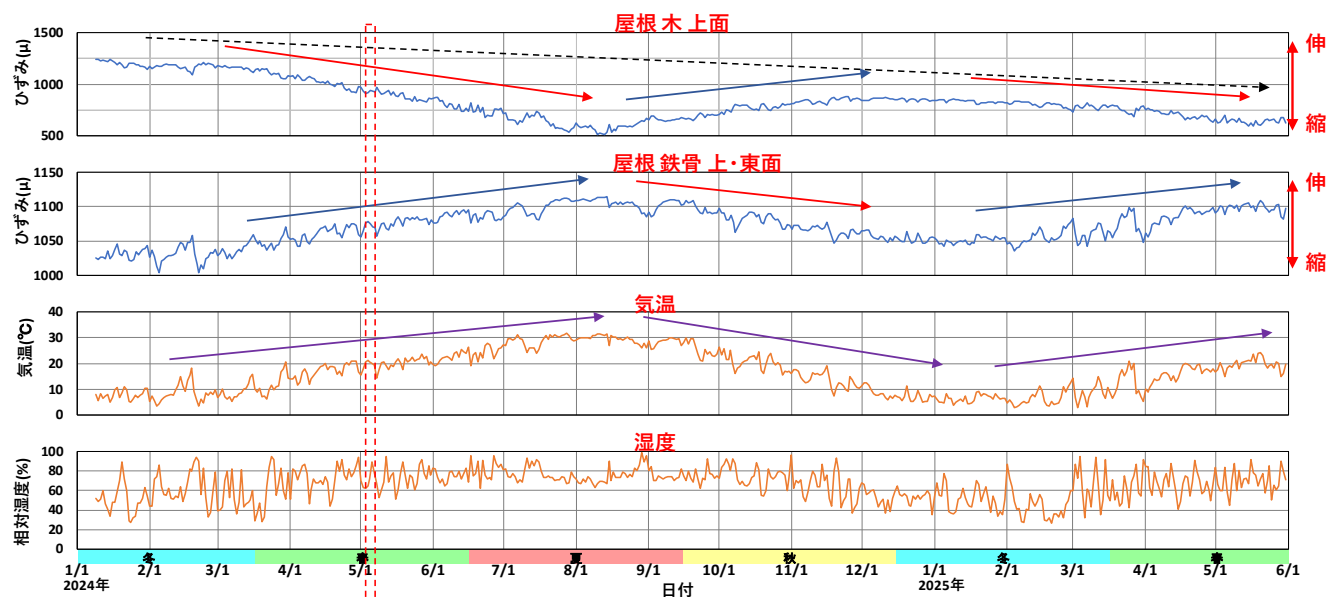


図-10 屋根面ひずみ&温湿度の日平均の推移 (全体)

Fig.10 Trend of Roof Surface Strain & Temperature and Humidity (all periods) (daily average)

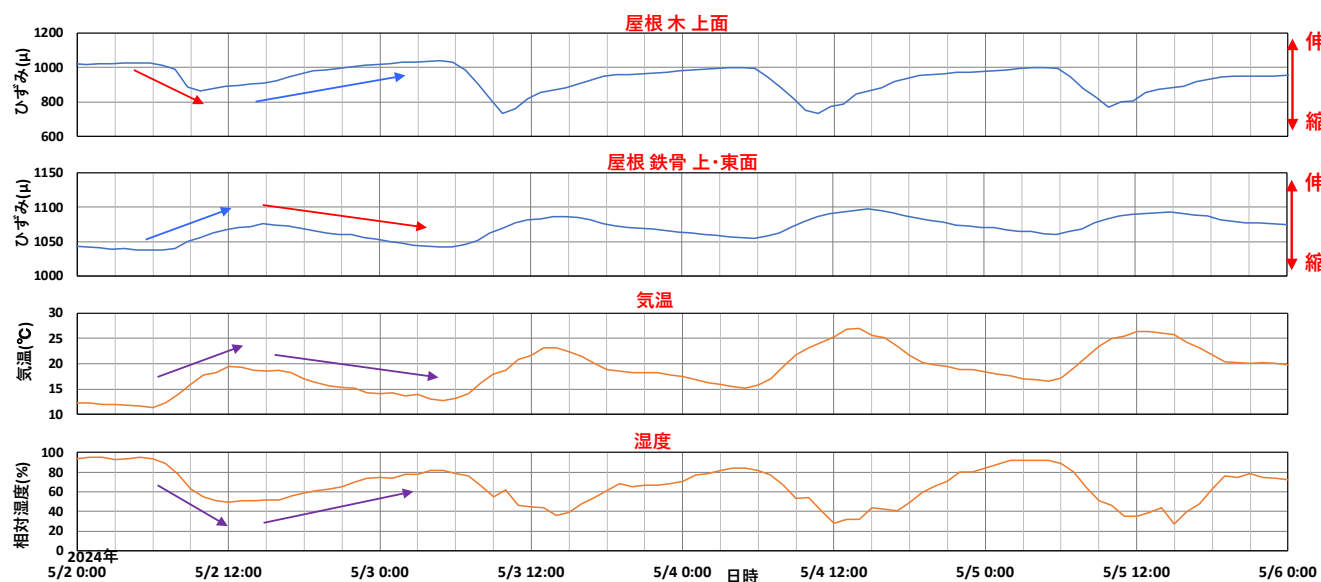


図-11 屋根面ひずみ&温湿度の推移 (4日間を拡大)

Fig.11 Trend of Roof Surface Strain & Temperature and Humidity (4-day expansion)

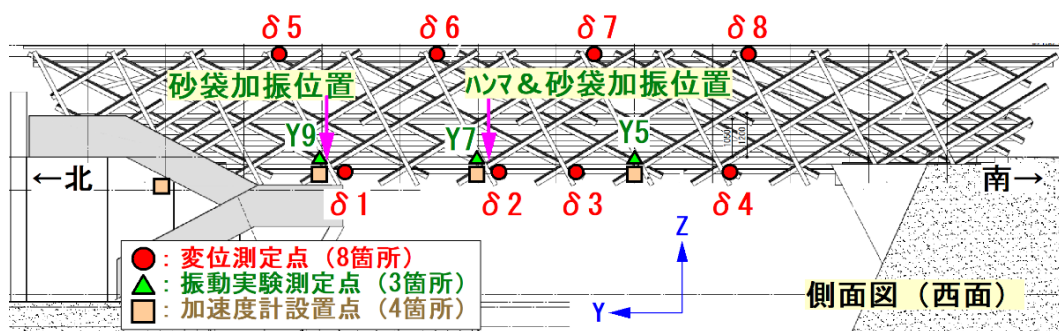


図-12 変位・振動実験の各測定点

Fig.12 Each Measurement Points for Displacement and Vibration Experiments

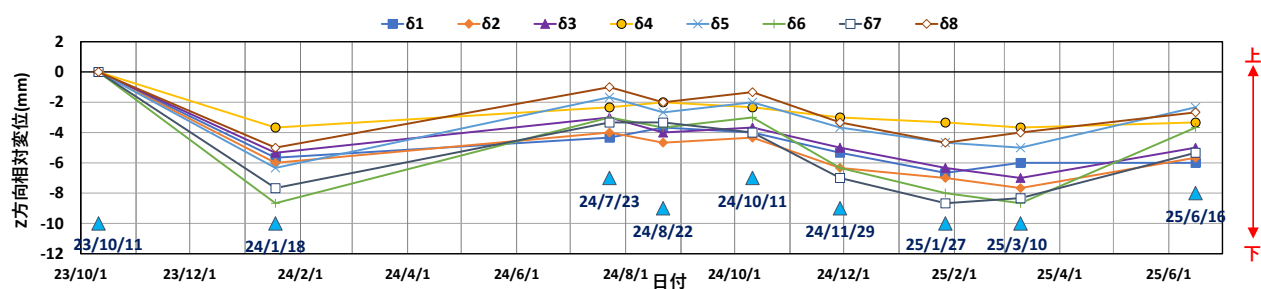


図-13 鉛直変位測定結果の推移
Fig.13 Trend of Vertical Displacement

橋の各測定点での床鉛直方向加速度波形を同時に記録して処理することにより、単位加振力あたりの加速度の周波数応答性状（アクセランス，単位(Gal/N)等）を求めることができる。対象物の固有振動数や揺れやすさを求める試験である。

砂袋落下試験とは重さ 20 kg の砂が入った土のう袋を 10 cm 程度の高さから橋の床面に落下させた際の橋の鉛直方向加速度を測定するもので、得られた加速度波形を周波数分析することで橋の鉛直方向の固有振動数が求まる。また、徐々に減衰する加速度波形より、その減衰の早さの指標である減衰比を求めるために行う試験である。図-12 の Y7 と Y9 で試験を実施した。

歩行実験は橋の上を人が歩行あるいは走った時の振動の大きさを調べるものである。1 人歩行，2 人歩行，1 人小走りについてそれぞれ測定を行った。振動が大きくなるように、メトロノームを用いて歩行のピッチの整数倍が、インパクトハンマ加振で求めた橋の固有振動数になるように設定して歩行することとした。

3.3.2 振動実験の結果

3 種類の振動実験の結果を以下に述べる。

(1)インパクトハンマ加振

測定時期の違いによるインパクトハンマ加振実験結果を図-14 に示す。横軸は振動数，縦軸はアクセランスで示した。1 次固有振動数は 6.00 Hz，2 次が 10.25 Hz，3 次が 14.75 Hz のピークと考えられ，それ以降の高い振動数では，細かいピークが複数見られた。

5 回のアクセランスの振動数のピークは概ね一致し，竣工後から約 14 か月間で振動特性の大きな変化は見られなかった。

(2)砂袋落下加振実験

Y9 点で砂袋を落下した際の Y5 点，Y7 点と Y9 点の振動加速度のフーリエスペクトル分析結果の例として，2023 年 11 月 22 日実施した試験結果を図-15 に示す。ここで，分析評価した周波数刻みは 0.03125 Hz である。

アクセランス評価では周波数刻みを 0.25 Hz としたが，フーリエスペクトルでは分析器の仕様が異なり，1/8 の周波数刻みで分析したため，1 次固有振動数 6.00 Hz のピークが表-2 に示すように 5.84 Hz と 6.31 Hz の 2 つの振動数に分離された。2 次モードの 10 Hz 付近も 3 か所が同程度の振幅で振動するモードとなっていた。また，3 次モードは人道橋の中央から橋の長さの 1/4 北側の Y9 が大きくなる 16.75 Hz であると思われる。

5 回行った試験の 6 Hz 付近の 2 つのピーク振動数と，6 Hz 付近のみ通過させるバンドパスフィルタ処理後の加速度波形より求めた減衰比一覧を表-2 に示す。固有振動数は測定開始日の 2023 年 11 月 22 日と比べて 1 年経過後は若干上昇傾向を示した。一方，減衰比は計測開始日と比較して，2025 年 1 月 21 日の測定結果では 0.9% 減少傾向を示した。この傾向が，季節性や経年変化の影響か，誤差であるかは不明のため，今後も動向を調査したい。

(3)歩行実験

人道橋は渡り通路橋としての位置づけであり，居住空間ではないが，振動の体感の大きさを評価するために，居住空間における振動の評価方法を用いて評価を行った。評価方法は日本建築学会の振動に関する居住性能評価指針³⁾に従った。評価値一覧を表-3 に示す。このうち，2 人歩行時の人道橋中央 (Y5) における振動加速度の結果を図-16 に示す。図-16 内の「V-○」の○印の数値は，○% の人が振動を感じる知覚確率の大きさを示している。歩行ピッチはインパクトハンマ加振結果の 1 次固有振動数 6.0 Hz を元に，歩行は 2.0 Hz，小走りは 3.0 Hz で行った。

図-16 に示すように低次の卓越 1 次固有振動数 6.3 Hz 帯域や高次の固有振動数が含まれる 10Hz 帯域及び 16～25 Hz 帯域で 2 人歩行時や小走り時に V-90 のラインをやや超える評価値となった。居住空間に対しては大きな値であるが，人道橋上の歩行振動としては他の歩行

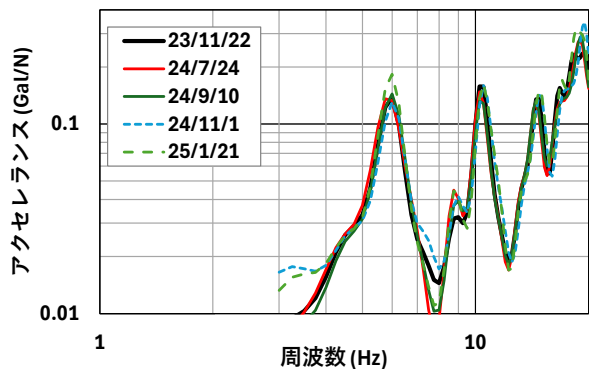


図-14 アクセランス測定結果比較

Fig.14 Comparison of Accelerance Measurement Results

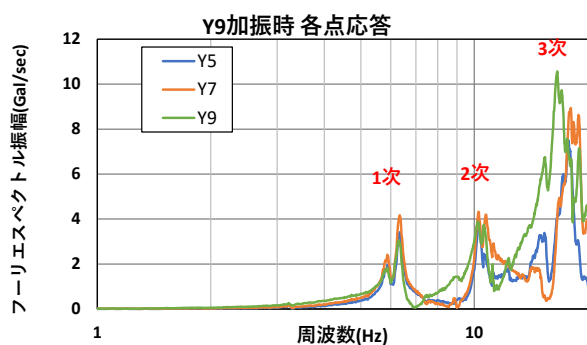


図-15 砂袋加振時のフーリエスペクトル比較

Fig.15 Comparison of Fourier Spectrum when Sandbag

者に障害を与えることは極めて低いため、問題は無いと判断した。

なお、5 回行った居住性能評価結果は概ね一致しているが、卓越している振動数のピーク（6.3 Hz や 10 Hz）以外の振動数の範囲では、計測開始日の 2023 年 11 月 22 日と比較すると 2024 年 7 月、2024 年 9 月、2025 年 1 月の方が大きくなっている傾向が確認された。歩行加振力のばらつきの影響が考えられる。

3.4 自然外乱による測定

3.4.1 自然外乱の測定概要

前述した振動実験に加えて、図-12 に□印で示すように加速度計を人道橋の床面および基礎の合計 4 点にそれぞれ 3 方向設置し、地震や強風が発生したときに測定を開始するように閾値を設定し、トリガ計測を行った。いずれかのセンサがトリガ計測を開始すると、他のセンサも同時に測定を開始する。

3.4.2 自然外乱の測定結果

2024 年 8 月 9 日に、神奈川県西部を震源とする M5.3 の地震が発生した。当該地の震度は 3 で、橋中央（Y5）の最大加速度は上下方向で 33.1 Gal であった。この地震発生時刻の前後で、1 時間ごとに測定している各測定

表-2 1 次固有振動数と減衰の推移

Table 2 Shift in 1st Natural Frequency and Attenuation

	23年11月	24年7月	24年9月	24年11月	25年1月
ピーク振動数 (Hz)	5.84	5.81	5.88	6.06	6.06
	6.31	6.25	6.31	6.44	6.44
減衰比 h	2.6%	2.3%	2.5%	1.8%	1.7%

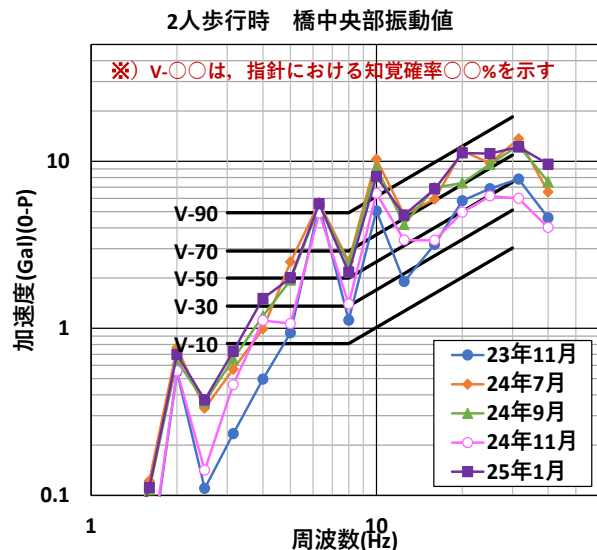


図-16 2 人歩行時の居住性能評価の比較

Fig.16 Comparison of Habitability Evaluation for Two People Walking

表-3 居住性能評価結果の推移

Table 3 Habitability to Building Vibration Results

	2023年 11月	2024年 7月	2024年 9月	2024年 11月	2025年 1月
暗振動	V-10以下	V-10以下	V-10以下	V-10以下	V-10以下
1人歩行	V-90以下	V-90以下	V-90以下	V-70以下	V-90以下
2人歩行	V-90以上	V-90以上	V-90以上	V-90以上	V-90以上
1人小走り	V-90以上	V-90以上	V-90以上	V-90以上	V-90以上

点のひずみ値には大きな変化は見られなかったため、橋が弾性範囲内で振動したと考えられる。

地上に対する橋の中央位置の橋水平方向（X 軸：横断方向）の伝達関数と、鉛直方向（Z 軸）の伝達関数を図-17 に示す。水平方向は 7.3 Hz に、鉛直方向は 6.1 と 6.4 Hz にそれぞれ固有振動数によるピークが見られた。上下方向の固有振動数は前節の振動実験結果と概ね一致している。

4. まとめ

経時的な構造モニタリングの結果から、以下のことを確認した。

- 1) 日ごとの相対湿度とひずみ量の関係から、木材は気温が上昇し相対湿度が低下すると収縮し、鉄骨

の場合は伸びる傾向があることを確認した。これは季節による変化も同様である。

- 2) 測定期間における変位は、時期に応じて上下方向に繰り返し動く様子が確認され、冬期のたわみ量が大きくなる傾向を示した。
- 3) 計測期間全体としては、時間が経過するにつれ、基準値から徐々にたわんでいく傾向が確認された。
- 4) アクセラランスは竣工後から 14 か月の間では、鉛直方向のピーク振動数 6.00 Hz に変化は無かった。
- 5) 砂袋落下試験では、竣工後は 5.8 Hz 付近と 6.3 Hz 付近に近接して鉛直方向の固有振動数が見られた。
- 6) 歩行時振動を建築学会の指針で評価すると、5 回行った居住性能評価結果は概ね一致していた。
- 7) 地震時の橋の鉛直方向の卓越振動数は、固有振動数と一致した。

一連のモニタリングにより、季節によって木材のひずみと、その伴い鉛直変位が変化する傾向が見られた。今後も引き続きひずみの連続測定と定期的な変位・振動測定を行い、季節による変動とともに経年変化の観測を行う予定である。

注

- 注1) 「ヘリカル・ワインディング構造」とは、木の細胞壁の構造で、多層構造の木繊維が方向を変えながら積層し、ねじり合うことで強さとしなやかさを併せ持った中空構造が特徴である

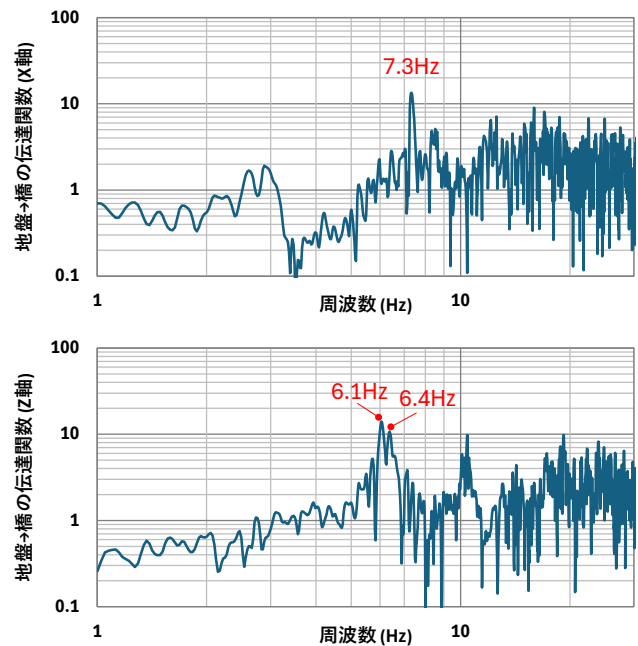


図-17 地震時の地盤→橋中央伝達関数
Fig.17 Transfer Function from Ground to Center of Bridge

参考文献

- 1) 加藤優志・山本佳城・一色裕二・輪湖大元・小林圭：T-eConcrete®/セメント・ゼロ型，Carbon-Recycle の建築物の構造部材への適用，大成建設技術センター報，第 57 号，2024.
- 2) 日本建築学会 木質構造設計規準・同解説，2006
- 3) 日本建築学会 建築の振動に関する居住性能評価指針・同解説，2004