

## 論文

## 床版部材を有する橋梁構造模型の振動実験

飯田琉希也\*, 大西弘志\*\*, 掛田遥斗\*

\*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)

斜角を有する橋梁は, 活荷重作用時には直橋と比べて複雑な挙動を示すことが考えられる. 斜橋の挙動を再現することを目的として鋼桁に床版の剛性と自重を模した鋼製部材を加えた橋梁モデルを構築し, 振動試験を行うことで, 床版を含めた橋梁の全体モデルとして妥当な挙動を再現できるのかどうかについて振動試験により確認することを試みた.

キーワード: 床版モデル, 橋梁モデル, 振動試験, 斜角

## 1. はじめに

現在, 日本では約 73 万橋の橋梁が供用されており, その多くが 1960 年代から 1970 年代の高度経済成長期にかけて建設されている. また, それらの橋梁のうち 9 割以上を地方公共団体が管理しており, 市区町村が管理している橋梁は全体の 71%を占めている. これらの橋梁のうち供用開始から 50 年以上が経過する老朽化橋梁は 2033 年までに 61%に達するといわれている. また, 予算の確保や土木技術者の不足も課題となっており, 今後増加する老朽化橋梁への対策が必要である<sup>1)2)</sup>.

これらを解決するためには, より簡易的で定量的な評価手法を確立し, 橋梁の現状や挙動を正確に把握することが重要となる. 橋梁の定量的な健全度評価手法の一つとして振動試験が挙げられる. 振動試験とは, 車両の走行や重錘の落下, 起振機を利用して構造物に振動を与え, その応答に基づき構造物の健全度を評価する非破壊検査手法である. 振動試験においてはより簡易的に検査を行うための研究や劣化の検出に関する研究がなされている<sup>3)~5)</sup>. 振動試験の目的は, 目視できない部分を含めた構造物の健全度を定量的に判定することであり, 判定指標として主に固有振動数を用いる. そのため, これらの振動試験においては橋梁の健全な状態の振動特性を正確に把握しておくことが重要である.

これまで著者らは斜橋の振動特性を把握するために斜角を変化させることのできる桁のみの小規模橋梁模型を作成し, 振動実験を行ってきた<sup>6)</sup>. しかし, 実験値と解析値の差が大きく, 実験の再現性が低かったと考えられる. そこで本研究では, 鋼桁試験体に床版を模した部材を加え, 振動実験を行った. 振動実験では計 10 か所に加速度計を設置し, 加振による応答加速度を計測した. 振動実験によって得られた応答加速度から数値解析を行うことで固有振動数を算出し, 斜角が固有振動数に与える影響について検討した. また, 再現解析を行い, 実験値と比較する



図-1 試験体全体像(90°)



図-2 試験体全体像(60°)

ことで本実験の妥当性を検討した.

## 2. 実験概要

## 2.1 実験試験体

本研究では 2 主桁の上部に床版部材を載せた小規模橋梁を想定し, 試験体を作成した. 試験体は, 斜角 90°, 80°, 70°, 60°の 4 パターンと設定した. 試験体全体像の一例として桁間隔 750mm の場合の斜角 90°と斜角 60°を示す(図-1, 図-2). 床版は C150×50 断面の軽溝形鋼と平鋼を高力ボルトとクランプを用いて接合させることで斜角の変更を可能にし, 橋軸方向と橋軸直角方向の曲げ剛性, 重量を合わせることで厚さ 60mm の RC 床版を再現した.

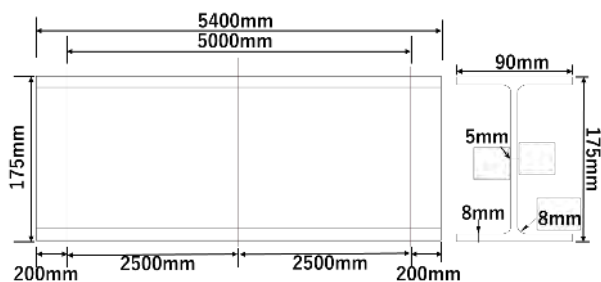


図-3 主桁の側面図及び断面図  
(赤線：横桁取り付け位置)

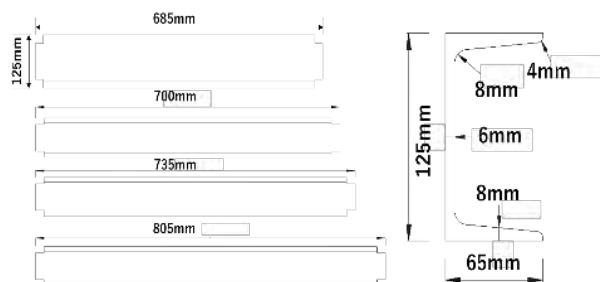


図-4 横桁の側面図及び断面図 (桁間隔 750mm)



図-5 横桁取り付け用ガセット (斜角 90°)



図-6 横桁取り付け用ガセット (斜角 60°)

主桁には JIS 規格の H175×90 の H 形鋼を用いた。桁長 5400mm、支間長 5000mm とし、両支点部と支間中央の計 3 か所に横桁を取り付けた。主桁の側面図及び断面図を示す (図-3)。

横桁は JIS 規格の溝形鋼を使用した。また、斜角を変化させても桁間隔が変化しないように、斜角ごとに長さの異なる横桁を使用した。

荷重の分配性能を考慮し、主桁間隔 750mm の場合の横桁として C125×65 断面の溝形鋼を使用した。横桁の側面図及び断面図を以下に示す (図-4)。

横桁はガセットと高力ボルトを使用することで主桁に取り付けた。斜角を変化させるために、ガセットプレートの溶接角度を変化させ、特定の斜角を再現した。一例として、斜角 90°、60°を示す (図-5、図-6)。

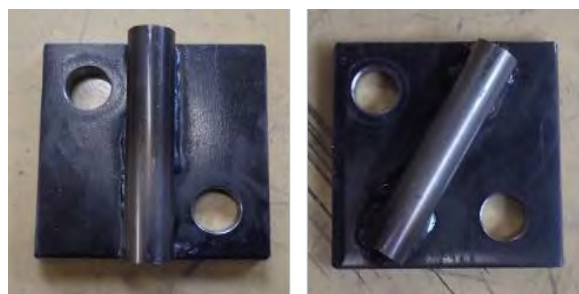


図-7 支承ガセット (左：90°，右：60°)



図-8 支承部 (橋脚)

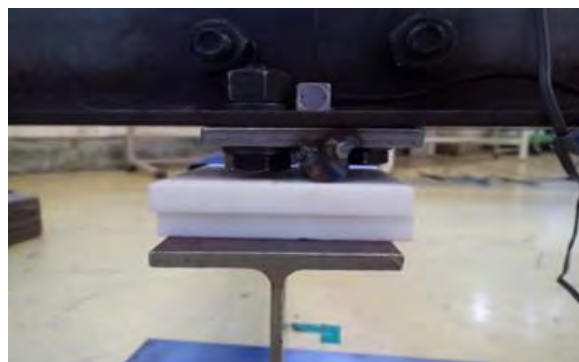


図-9 ローラー支承

横桁取り付け用ガセットの厚さの違いにより数 mm の誤差はあるものの、斜角を変化させても桁間隔を統一することができた。

試験体の支承部分は鋼板と丸鋼を用いて作成し、鋼板に丸鋼を溶接することでローラー支承の回転を再現した。また、丸鋼の溶接角度を変化させることで支承の斜角を再現した (図-7)。支承ガセットは主桁の支承部に高力ボルトを用いて取り付け、橋脚には主桁に用いた H175×90 の断面の H 形鋼を使用した (図-8)。

また、橋軸方向の可動条件を再現するために橋脚と支承ガセットの間にテフロン板を入れて実験を行った (図-9)。

## 2.2 実験概要

本研究では桁の固有振動数を算出するために、橋桁の試験体を用いて加振実験を行った。本研究の目的は橋桁の振動特性に斜角が与える影響を検討することであるため、パラメータとして斜角を変化させた。





図-10 実験に使用したショックレスハンマー



図-11 小型低容量加速度計 (ARF-50A)

試験体には、ショックレスハンマーを用いて振動を与えた(図-10). 振動を与える位置によって振動形態が異なることが予測されるため、各主桁の支間 1/4 地点、支間中央、支間 3/4 地点で打撃を行った。また、ノイズなどの影響を除去するために 1 つの打撃点につき 3 回の打撃を行い、数値解析の際に重ね合わせ処理ができるようにした。

応答加速度は株式会社東京測器研究所が製造する「ARF-50A」の小型低容量加速度計を用い(図-11)、同研究所が製造する「TMR-300 シリーズ」のマルチレコーダーに接続し計測を行った(図-12)。計測位置は各主桁の両側支点部、支間 1/4 地点、支間中央、支間 3/4 地点の計 10 地点とした(図-13)。加速度計の設置位置は主桁の下フランジ上面とし、部材と加速度計の干渉を防ぐために横桁を配置しない主桁の外側の下フランジ上面に設置した(図-14)。

### 3. 実験結果

前章の試験体を用いて振動実験を行った。実験より得られた応答加速度データに高速フーリエ変換を用いて振幅スペクトル及び位相差スペクトルを得た。その得られた振幅スペクトルから卓越振動数を抽出し、卓越振動数における振動モード図を作成することで固有振動数を求めた。また、支承条件は pin-roller とした。

#### 3. 1 応答加速度の計測結果

振動実験より、試験体の応答加速度データを得ることができた。データの重ね合わせでは打撃点での最大加速度が観測された時刻以降のデータを打撃回



図-12 動的データロガー (TMR-300)

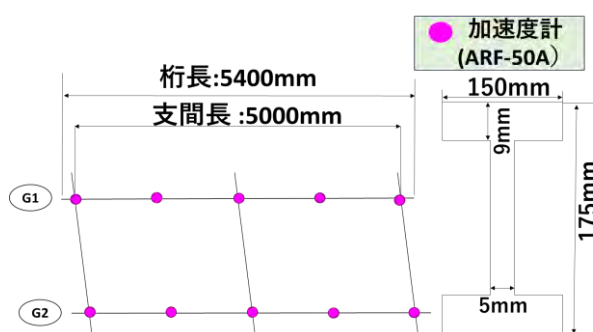


図-13 加速度計設置位置



図-14 加速度計設置状況 (支間中央)

数分足し合わせた。計測された応答加速度データではハンマーによる打撃以外の振動は観測されなかったため、本実験ではノイズなどの影響はほとんどなかったと推測できる。重ね合わせ後の応答加速度波形からもノイズなどの影響がほとんどなかったといえる。

#### 3. 2 高速フーリエ変換

振動実験で計測した応答加速度データから固有振動数を算出するために、数値解析ソフト「MATLAB」を用いて高速フーリエ変換を行った。高速フーリエ変換を行うことで、振幅スペクトルと位相差スペクトルを得ることができ、その結果から卓越振動数を読み取ることができる。

#### 3. 3 振動モード図

卓越振動数がどの振動モードに対応するのかを振動モード図を描画することで明らかにする。振動モード図は、検出した卓越振動数における各計測地点での振幅と位相角を読み取り、振動による相対変位

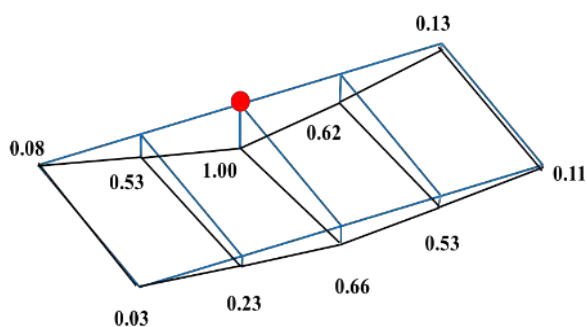


図-15 卓越振動数における振動モード図 (32.96Hz)

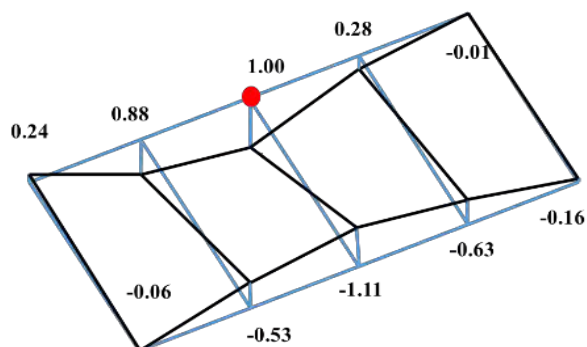


図-16 卓越振動数における振動モード図 (32.58Hz)

表-1 桁間隔 750mm の場合の固有振動数 (Hz)

| 斜角  | 曲げ1次  | ねじれ1次 | 曲げ2次  | ねじれ2次 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 90° | 32.96 | 32.58 | 66.53 | 70.95 |
| 80° | 33.72 | 34.64 | 71.03 | 66.99 |
| 70° | 33.72 | 37.23 |       | 73.24 |
| 60° | 37.77 | 36.62 | 79.35 | 78.51 |

を算出することで描く。打撃点での変位を 1.00 とし、振動モード図を描画した。一例として、斜角 90°の試験体の支間中央を打撃した際の振動モード図を示す(図-15, 図-16)。図-15 は曲げ挙動, 図-16 はねじれ挙動を示す。赤い丸は、打撃点である。

#### 4. 固有振動数

実験より得られた応答加速度データに高速フーリエ変換を用いて振幅スペクトルおよび位相差スペクトルを得た。その得られた振幅スペクトルから卓越振動数を抽出し、卓越振動数における振動モード図を作成することで固有振動数を求めた。本節ではそれぞれの試験体において求めた固有振動数を表にまとめている。各主桁で異なる固有振動数が算出された場合には平均値を全体の固有振動数として表にまとめている(表-1)。また、図-17~図-20 のように、直橋よりも斜橋の方が固有振動数は増加していることを見やすくするために、固有振動数をグラフにまとめた。

表と図より桁間隔 750mm の場合、斜角を変化させることで固有振動数に変動がみられる。まず曲げ 1

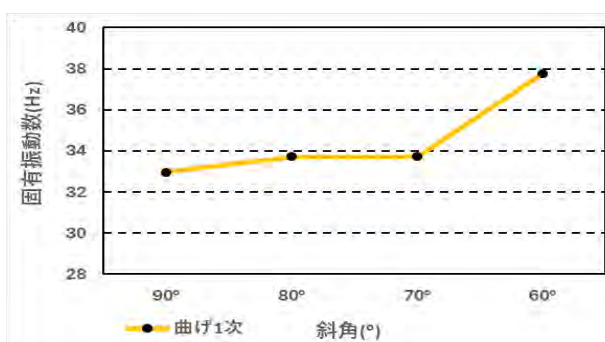


図-17 曲げ 1 次固有振動数

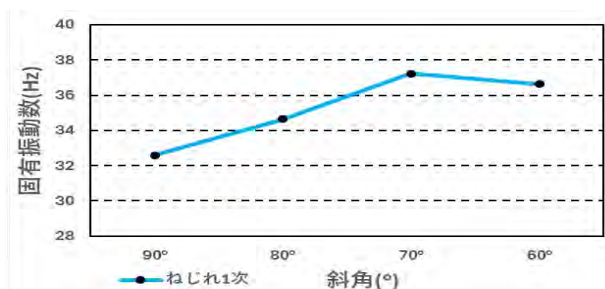


図-18 ねじれ 1 次固有振動数

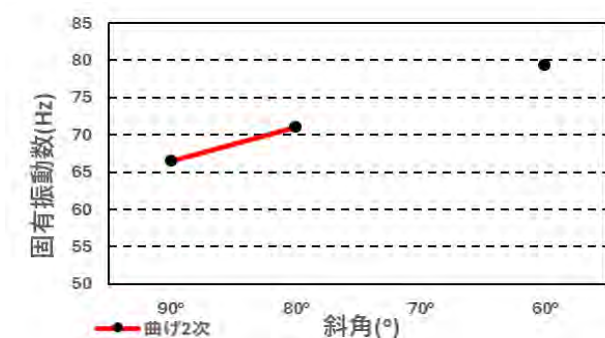


図-19 曲げ 2 次固有振動数

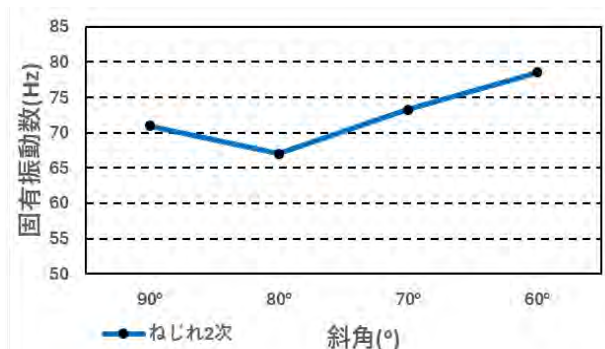


図-20 ねじれ 2 次固有振動数

次固有振動数においては、斜角 80°, 斜角 70°は固有振動数の変化がないものの、直橋よりも斜橋の方が固有振動数は増加していることが分かる。

次にねじれ 1 次固有振動数においては、斜角 70°までは斜角が小さくなるほど固有振動数が増加するが、斜角 60°のみ固有振動数は減少した。しかし、斜角 60°の固有振動数は、斜角 90°の固有振動数よりも大きく、直橋よりも斜角の方がねじれの影響が大きい

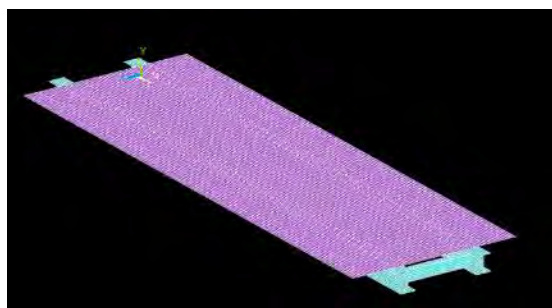


図-21 解析モデル(90°)

表-2 鋼桁モデルの物性値

|       | 物性値                                   |
|-------|---------------------------------------|
| 密度    | $7.85 \times 10^{-9} \text{ton/mm}^3$ |
| ポアソン比 | 0.3                                   |
| ヤング係数 | $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$       |

表-3 床版モデルの物性値

|       | 物性値                                  |
|-------|--------------------------------------|
| 密度    | $2.5 \times 10^{-9} \text{ton/mm}^3$ |
| ポアソン比 | 0.2                                  |
| ヤング係数 | $2.65 \times 10^4 \text{N/mm}^2$     |

表-4 固有振動数

| 斜角  | 曲げ1次  | ねじれ1次 | 曲げ2次  | ねじれ2次 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 90° | 29.20 | 31.18 | 62.75 | 52.94 |
| 80° | 29.34 | 31.60 | 63.49 | 53.70 |
| 70° | 29.78 | 32.92 | 65.58 | 56.42 |
| 60° | 30.14 | 33.93 | 68.23 | 83.01 |

ことが考えられる。

2次固有振動数において曲げとねじれを判別することは困難であった。その結果、斜角70°において曲げ2次固有振動数は検出できなかった。しかし、他の角度に着目すると、斜角を小さくすることで、固有振動数は増加していることが分かる。

最後に、ねじれ2次固有振動数においては、斜角80°のみ固有振動数が減少しているが、斜角70°、60°は斜角90°と比較して、固有振動数が増加していることが分かる。角の影響度が大きいと考えられる。

## 5 FEM 解析

### 5.1 解析概要

解析モデルは ANSYS により構築し、解析モデルは橋長 5400mm、横桁間隔 2500mm、主桁間隔 750mm とした。また、斜角 90°、80°、70°、60°の4パターンで解析を行い、支承条件は pin-roller を再現した。また、厚さ 60mm の RC 床版モデルを作製した(図-21)。解析に使用した鋼桁モデルの物性値を表-2 に、床版モデルの物性値を表-3 に示す。解析結果から1次固有振動数と2次固有振動数を算出し、曲げとねじれの2種類の固有振動数に斜角が与える影響につ

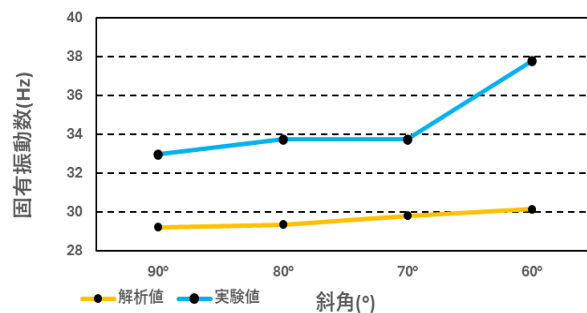


図-22 曲げ1次固有振動数の実験値と解析値の比較

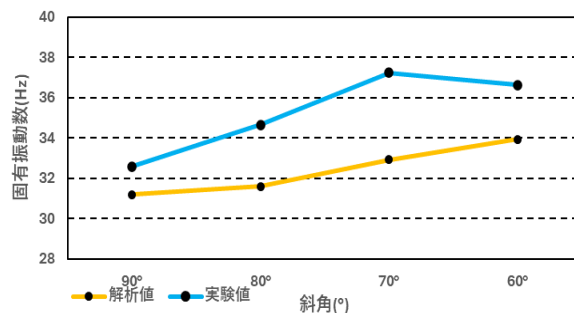


図-23 ねじれ1次固有振動数の実験値と解析値の比較

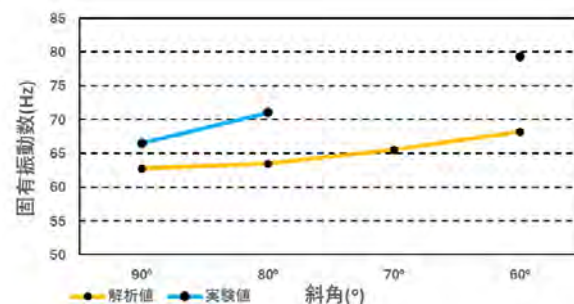


図-24 曲げ2次固有振動数の実験値と解析値の比較

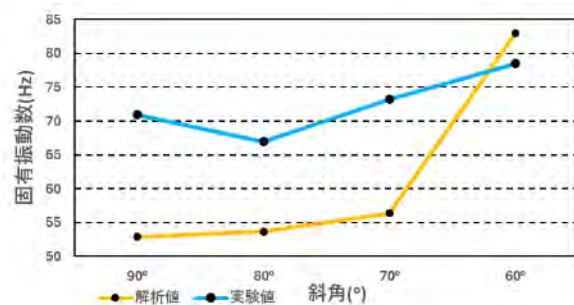


図-25 ねじれ2次固有振動数の実験値と解析値の比較

いて検討した。

### 5.2 固有振動数

4パターンの固有振動数を表-4にまとめた。表-4より、桁間隔 750mm の場合、斜角を変化させることで固有振動数に変動が見える。1次固有振動数においては斜角が小さくなるほど固有振動数は増加し



ている。曲げとねじれの斜角の影響度を比較すると、ねじれの方が固有振動数の増分が大きいため斜角の影響が大きいことが分かる。また、曲げ 1 次とねじれ 1 次を比較すると、どちらも斜角 80°～斜角 60°までの増加量が似ていることが分かる。

2 次固有振動数においても斜角が小さくなるほど固有振動数は増加している。しかし、曲げ 2 次固有振動数とねじれ 2 次固有振動数の増加量を比較すると、ねじれ 2 次固有振動数の方が大きいことが分かる。また、ねじれ 2 次固有振動数は、斜角 70°～斜角 60°の斜角による影響が最も大きいことが分かる。これによって、斜角を有する橋梁は斜角が小さくなるほどねじれの影響を受けやすいと考えられる。

### 5.3 実験値と解析値の比較

今回の研究は振動実験を行い、床版部材の妥当性を検討するために実験値と解析値を比較した。

図-22 より、実験値と解析値の曲げ 1 次固有振動数を比較すると、斜角を小さくすることで固有振動数が増加するという傾向が等しくなっている。

図-23 より、ねじれ 1 次固有振動数の比較をすると、曲げ 1 次と同様にどちらも斜角が小さくなるにつれ固有振動数が増加していることが分かる。

図-24 より、曲げ 2 次固有振動数の比較をすると、斜角によって固有振動数が増加する傾向が等しいことが分かる。また、2 次固有振動数は 1 次固有振動数の約 2 倍であるという傾向が見られた。

図-25 より、ねじれ 2 次固有振動数の比較をすると、実験値の斜角 80°の固有振動数は斜角 90°の固有振動数よりも小さく、解析値とは異なる結果となったが、斜角を変化させると固有振動数が増加する傾向は類似している。

これらより本研究では、これまで行ってきた桁のみの小規模橋梁模型での振動試験結果<sup>9)</sup>に比べ、斜角が固有振動数に与える影響を顕著に示すことができた。また、実験値と解析値で近い値を示すことができ、床版部材を有することで小規模橋梁模型での振動実験の妥当性は高くなったといえる。

## 6. まとめ

本研究では、斜角が橋梁の振動特性に与える影響について検討するため、斜角を変化させることができる床版部材を有する橋梁構造模型を用いて振動実験を実施した。また、実験の再現解析を行うことで実験の妥当性を確認し、斜角の影響を詳細に確認した。本研究では以下の知見が得られた。

1)固有振動数は斜角を変化させることで変動がみられる。1 次固有振動数では斜角による固有振動数の変化が小さいが、2 次固有振動数では斜角による変化が大きいため 2 次固有振動数の方が斜角の影響を受けやすいと考えられる。

2)曲げ 1 次固有振動数は、斜角を小さくすると固有振

動数が増加した。また、ねじれ 1 次固有振動数は、斜角 90°よりも角度が小さい方場合に固有振動数が増加することが分かる。

3)解析結果から、1 次固有振動数、2 次固有振動数共に、斜角を小さくすると固有振動数が増加することが分かる。このことから、曲げとねじれは斜角の影響を受けやすいと考えられる。

4)実験値と解析値共に、斜角が小さくなるほど固有振動数が増加する傾向がみられ、床版部材を加えた小規模橋梁での振動実験の妥当性が高まった。

今後は、主桁間隔 1000mm, 1250mm での振動実験を行い、桁間隔を変化させた時の斜角の影響について検討する。また、支承部にばね要素を導入した場合の解析を行い、様々な支承条件を再現し、ばね定数を変化させた場合の固有振動数の変化を調べる。

### 参考文献

- 1) 国土交通省：道路の老朽化対策、老朽化対策の取組み
- 2) 国土交通省：道路の老朽化対策、令和 3 年度・二巡目道路メンテナンス年報
- 3) 千葉陽子、大西弘志、岩崎正二、木村如水、佐々木太一：小型 FWD 試験で得られた応答加速度を用いた床版の劣化判定手法の検討、構造工学論文集 Vol.68A, pp638-648, 2022.
- 4) 三増拓也、金哲佑、五井良直、林巖：実鋼板桁橋の損傷前後における振動特性に関する考察、土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.74, No.2(応用力学論文集 Vol.21), I\_513-I\_522, 2018.
- 5) 古川愛子、大塚久哲、梅林福太郎：構造物の損傷に伴う振動特性の変化に関する実験的考察、土木学会地震工学論文集 Vol.28, p.19, 2005.
- 6) 里見瑞樹、大西弘志：橋桁の振動特性における斜角の影響に関する実験的検討、JCOSSAR2023 論文集, pp333-336, 2023.10.
- 7) 公益財団法人日本道路協会：道路示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編, 2017.

(2024年7月12日受付)