

# 静的及び動的載荷試験を用いた九年橋の剛性評価に関する一考察

## A study on the rigidity evaluation of Kunen bridge by static and dynamic loading test

○葛西 智文\* 岩崎 正二\*\* 大西 弘志\*\*\* 出戸 秀明\*\*\*\* 山村 浩一\*\*\*\*\*  
Tomofumi KASAI Shoji IWASAKI Hiroshi ONISHI Hideaki DETO Koichi YAMAMURA

**ABSTRACT** In this paper, the Kunen bridge at the Kitakami city in Iwate prefecture is taken up and the static loading test using the truck vehicle and the impulsive vibration test using a weight are carried out. In the static loading test, strain and displacement are measured. The natural frequencies are calculated from measured acceleration waves by dynamic loading test.. The purpose of this paper is to examine the rigidity evaluation of the object bridge by comparing the analysis result obtained by three-dimensional frame analysis with the observation result obtained from two loading tests.

**Keywords** : 合成鋼鉄桁橋, 静的載荷試験, 衝撃振動試験, 3次元フレーム解析  
*Steel composite girder bridge, Static loading test, Impulsive vibration test, Three-dimensional frame analysis*

### 1. はじめに

日本では長期に亘る経済低迷のため、老朽化した既設橋梁の更新は難しい状況にある。そのため、既設橋梁群を適切に管理し、実現可能な範囲での延命化を図ることで維持管理費用の縮減と道路網の安全性の維持を実現させることが課題となっている。

このような課題を解決するためには既設橋梁の現状を適切に把握することが重要であり、そのための手法として健全度評価が実施されている。健全度評価は目視点検や非破壊検査が中心に行われているが、より対象橋梁の状態を正確に調査するための手法として静的載荷試験及び動的載荷試験がある。また、動的載荷試験の中にも車両走行試験や衝撃振動試験など様々な試験がある。それらの調査結果に基づき適切な補修・補強を実施することにより、橋梁の長寿命化が実現可能となる。

本論文では、写真-1に示す岩手県北上市の和賀川に架かる17径間の超高齢化道路橋である九年橋(9径間2主鉄桁橋+8径間4主鉄桁橋)の4主鉄桁橋を取り上げ、トラック車両を用いた静的

載荷試験や重錘を用いた衝撃振動試験を実施する。実施された静的載荷試験では、ひずみ、変位などを計測し、動的載荷試験では、計測された応答加速度波形から固有振動数を算出する。

本論文の目的は二つの載荷試験から得られた実測結果と3次元フレーム解析によって得られた解析結果を比較することにより、対象橋梁の剛性評価について検討することである。



写真-1 九年橋

\*岩手大学大学院工学研究科社会環境工学専攻(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

\*\*博士(工学) 岩手大学工学部社会環境工学科教授(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)第2種正会員

\*\*\*博士(工学) 岩手大学工学部社会環境工学科准教授(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5) 第2種正会員

\*\*\*\*博士(工学) 岩手大学工学部社会環境工学科教授(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

\*\*\*\*\* (株)昭和土木設計(〒020-0891 岩手県紫波郡矢巾町流通センター南 4-1-23)

## 2. 対象橋梁と実橋載荷試験方法概要

対象橋梁である岩手県北上市の九年橋は、和賀川に架かる橋長 334.00m の 17 径間単純鋼鈹桁橋である。奥州市側 9 径間は、単純 2 主鈹桁橋（昭和 8 年架設）であり、盛岡市側 8 径間は単純 4 主鈹桁橋（大正 15 年架設）である。今回の計測では、第 11 径間（単純非合成 4 主鈹桁橋）に着目し静的載荷試験及び重錘衝撃試験を実施する。断面図を図-1 に示す。なお、4 主鈹桁橋の床版は、後述するようにチャンネル断面を有する RC 床版となっている。

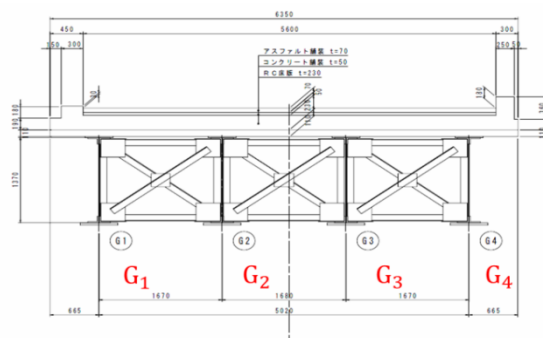


図-1 4主鈹桁橋断面図

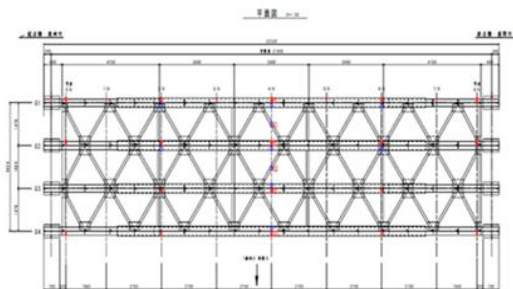


図-2 4主鈹桁橋の載荷試験計測設置位置図（平面図）

●：ひずみゲージ ○：変位計

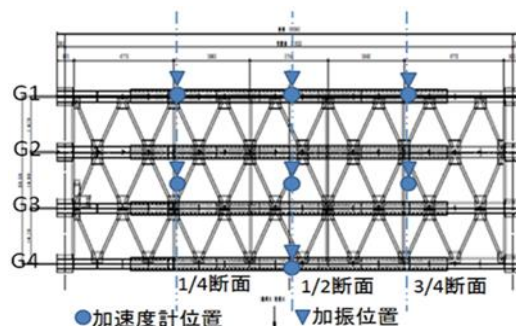


図-3 4主鈹桁橋の加速度計設置位置及び打撃点

静的載荷試験<sup>1)</sup>は、20t トラック 1 台と 2 台を用いて対象橋梁上に、橋軸方向と幅員方向に載荷位置を変化させて載荷を行った。ひずみと変位を測定するため、ひずみゲージと変位計を図-2 に示す各計測位置に設置した。静ひずみゲージは、計測径間の各主桁の下フランジ、ウェブ、上フランジに計 67 箇所に貼り付け、変位計測については主桁の下フランジと床版底面および橋脚上部に、計 14 箇所にリング式変位計を設置した。

動的載荷試験<sup>2)</sup>では重錘衝撃試験を採用し、静的載荷試験と同径間を対象として、図-3 に示すように、支間の 1/4 点、1/2 点、3/4 点における主桁 G<sub>1</sub> 上及び幅員中央上の舗装面と、支間 1/2 点における主桁 G<sub>4</sub> 上の舗装面の計 7 点を重錘で打撃した。加速度計設置位置についても同様である。測定に用いた重錘は重さ 400N、厚さ L=200mm、φ=230mm の円筒形重錘とし、50cm 程度の高さから落下させている。

なお、応答加速度の測定にはサーボ加速度計（LS-10C、測定周波数 0.1～100Hz）を使用した。

## 3. 実橋載荷試験結果と考察

### 3. 1 静的載荷試験結果と考察

静的載荷試験における各主桁の下フランジ橋軸

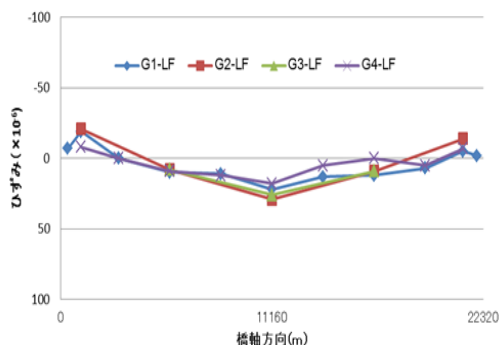


図-4 橋面中央 1 台載荷時の静ひずみ分布

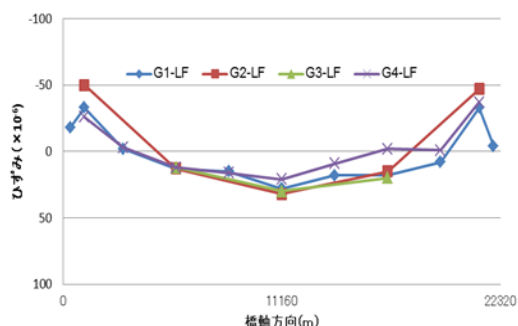


図-5 橋面中央縦列 2 台載荷時の静ひずみ分布

方向静ひずみの実測結果を、図-4～7に示す。図-4～7より両支点近傍で圧縮ひずみが生じている。このようなひずみ分布は、両支点が固定状態の桁で生じるひずみ分布と同じであることから、九年橋の4主鈑桁橋では、可動支点が水平移動拘束されて両支点に水平反力が発生している状態と考えられる。また図-4と図-5を比較すると、20tfトラック2台载荷した方が1台载荷したときと比べて圧縮ひずみが約2～3倍大きくなっている。これは载荷荷重の増加とともに支点拘束が強くなったためと考えられる。

図-6のケースでは主桁G<sub>1</sub>に輪荷重がかかっているため、主桁G<sub>1</sub>で大きな引張ひずみを計測し、他の桁では主桁G<sub>1</sub>から離れるに従い最大引張ひずみの値は減少している。偏载荷のケースでは、床版や対傾構により荷重分配が十分機能しているといえる。

20tfトラックを左右隣接径間に1台ずつ载荷したときの計測径間の静ひずみは、図-7より両支点近傍で大きな圧縮ひずみが生じているが、中央部ではほぼ一定の圧縮ひずみとなっている。

以上の静ひずみの試験結果から4主鈑桁橋には支点拘束が生じている。载荷荷重を大きくすると支点拘束が強くなるため、支点拘束は载荷荷重の影響を受けている。また4主鈑桁橋は、荷重分配が十分機能しているといえる。

各主桁及び橋脚上部の実測変位を表-1に示す。表-1から、隣接径間(10径間)に20tfトラック1台を载荷した場合、支間中央では上向きの変位が生じ、橋脚P<sub>10</sub>では右側に変位している。また計測径間と隣接径間(10径間)に20tfトラックを1台ずつ载荷した場合、橋脚P<sub>10</sub>はほとんど変化しなかった。

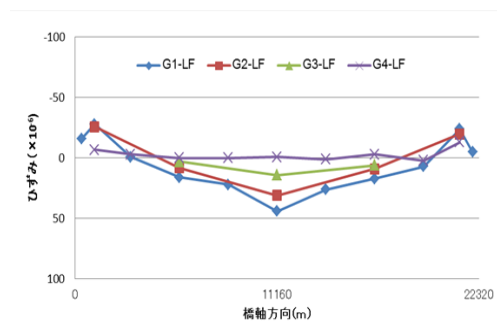


図-6 G<sub>1</sub>桁側に1台载荷時の静ひずみ分布

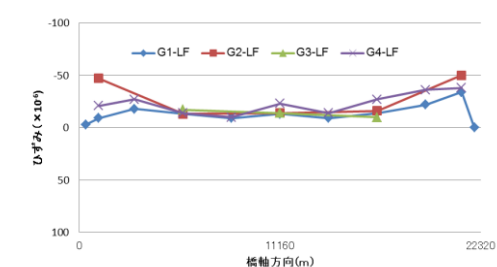


図-7 左右隣接径間に1台载荷時の静ひずみ分布

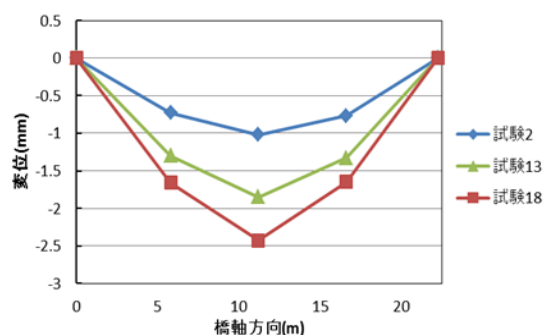


図-8 各試験での主桁G<sub>1</sub>の静変位分布

表-1 静的载荷試験時の各主桁支間中央鉛直変位と橋脚上部水平方向変位

| 試験内容                | 橋脚上部(P <sub>10</sub> ) |                   | 支間中央             |                  |                  |                  | 橋脚上部(P <sub>11</sub> ) |                   |
|---------------------|------------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|-------------------|
|                     | G <sub>1</sub> 桁側      | G <sub>4</sub> 桁側 | G <sub>1</sub> 桁 | G <sub>2</sub> 桁 | G <sub>3</sub> 桁 | G <sub>4</sub> 桁 | G <sub>1</sub> 桁側      | G <sub>4</sub> 桁側 |
|                     | マイナスは右に変位              |                   | マイナスは下に変位        |                  |                  |                  | マイナスは左に変位              |                   |
| 1台を隣接径間(10径間)に载荷    | -0.59                  | -0.73             | 0.39             | 0.08             | 0.08             | 0.19             | 0.07                   | 0.12              |
| 1台を隣接径間(12径間)に载荷    | 0.10                   | 0.07              | 0.29             | 0.02             | 0.18             | 0.29             | -0.63                  | -0.75             |
| 2台を計測径間と10径間に1台ずつ载荷 | -0.04                  | -0.02             | -1.37            | -1.19            | -1.00            | -0.74            | 0.59                   | 0.53              |
| 2台を計測径間と12径間に1台ずつ载荷 | 0.35                   | 0.41              | -1.39            | -1.19            | -0.93            | -0.63            | -0.01                  | -0.02             |
| 2台を隣接径間に1台ずつ载荷      | -0.47                  | -0.29             | 0.34             | 0.25             | 0.21             | 0.35             | -0.53                  | -0.24             |

このことから主桁下フランジの伸縮とともに、支点の水平移動拘束のため橋脚も一体となって変位していることがわかった。他のケースにおいても同様なことが表-1より言える。

また、静変位の代表的な解析例として主桁  $G_1$  の静変位分布を図-8に示す。なお、試験2は20tfトラック1台を支間中央、幅員中央に载荷した場合、試験13は20tfトラック2台を支間中央、幅員中央に縦列载荷した場合、試験18は20tfトラック2台を支間中央、幅員中央に並列载荷した場合である。

### 3. 2 衝撃振動試験と考察

重錘衝撃実験では、時間刻み0.001秒ごとの応答加速度データを4096個サンプリングし、FFT方式で振幅スペクトルを算出した。

図-9は、重錘衝撃試験により得られた第11径間の振幅スペクトル図及び位相差スペクトル図である。打撃点及び振幅、位相差スペクトル観測点は同一の場所を採用し、それぞれ支間1/2点幅員中央（曲げ1次卓越）、支間1/4点幅員中央（曲げ2次卓越）、支間1/2点主桁  $G_1$  上（ねじれ1次卓越）の値である。

振幅スペクトルのピークが複数存在するため、振幅が卓越し、位相差が  $270^\circ$  を示す振動数を基本にするとともに、各測点における振幅や位相差から固有振動モードを把握することで、構造物の固有振動数を特定した。橋梁の曲げ1、2次及びねじれ1次の固有振動数と振動モード図を、図-10に示す。

図-9及び図-10からわかるように、支間1/2点加振時には曲げ1次、支間1/4点加振時には曲げ2次の振動モードの卓越が見られるなど、加振位置によって卓越する振動性状が異なることを確認した。

## 4. 3次元フレーム解析結果と考察

### 4. 1 3次元フレーム静的解析結果と考察

図-11に示すように、4主鈑桁部の設計図（復元）をもとに3径間フレームモデルを作成した。

なお、可動支承をすべて固定支承としてモデル化した。床版と桁を剛体要素で結び、チャンネル床版を再現した。九年橋の4主鈑桁部の床版は図-12に示すようなチャンネル断面を有するRC床版となっており、床版と桁が床版端部のリブで接していることにより支えられている。また、各部

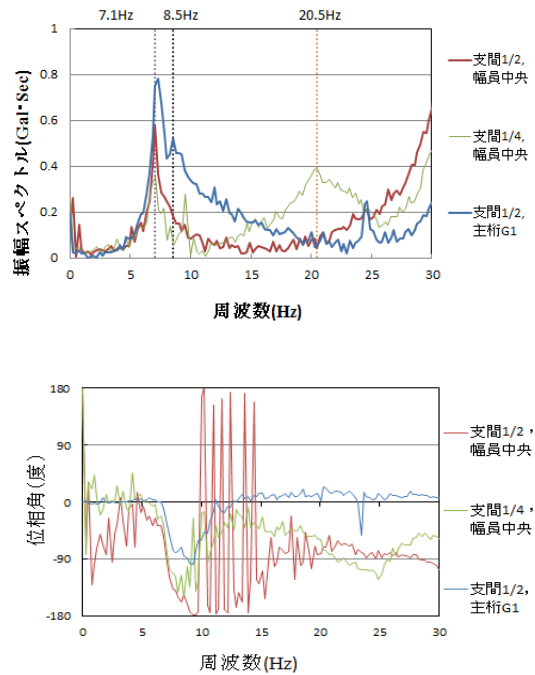


図-9 重錘衝撃試験結果  
(上図：振幅スペクトル図，  
下図：位相差スペクトル図)

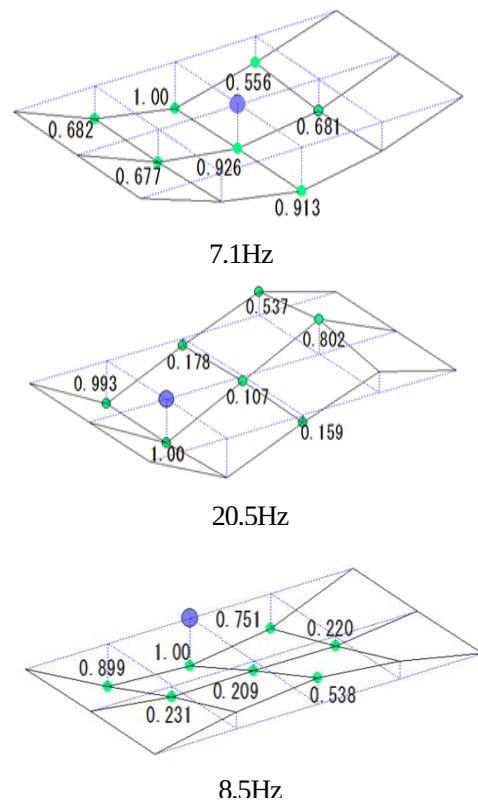


図-10 実測固有振動数と実測振動モード図  
(上図：曲げ1次，  
中図：曲げ2次)  
下図：ねじれ1次)



材の材料定数は設計時に使用した道路構造令(大正8年)を参考に、それぞれ、床板のヤング係数は  $E_c=2.35 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、橋脚のヤング係数は  $E_c=2.00 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、鋼桁のヤング係数は  $E_s=2.00 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  とした。

代表的な解析例として、試験2及び試験13の主桁  $G_1$  の静変位分布の解析結果を図-13に示す。図-13に示すように、試験2では解析値が実測値とほぼ近似する形となった。また、試験13の変位解析結果を見ると、主桁の曲げ剛性を10%~15%減少させると実測値に近似する結果となった。

また、試験2及び試験13の主桁  $G_1$  の静ひずみの解析結果を図-14に示す。図-14に示すように、試験2では支間3/8点、試験13では支間3/4点で解析値が実測値とほぼ近似する以外は、解析値は実測値に比べてひずみ分布が上昇する傾向を示した。この原因として、解析モデルでは可動支点を完全拘束状態にしているが、現実の可動支点の拘束状態は弱い可能性が考えられる。また、結果は省略するが主桁の曲げ剛性を10%と20%減少させても、ひずみ分布の差はわずかであり、ひずみの感度は低いように思われる。今後は解析モデルに支点バネ等を取り入れることでさらなる改善を目指したい。

#### 4. 2 3次元フレーム固有値解析結果と考察

次に、静的解析と同様の解析モデルで実測固有振動数(以後、実測値と記述)と解析固有振動数(以後、解析値と記述)の比較検討を行った。

図-15に、固有値解析で得られた橋梁全体の曲げ1次及び2次及びねじれ1次の橋梁全体の固有振動数と振動モード図を示す。また、実測値と解析値との比較を表-2に示す。それぞれの解析値に対する実測値の比率は95%~83%となり、実測値の方

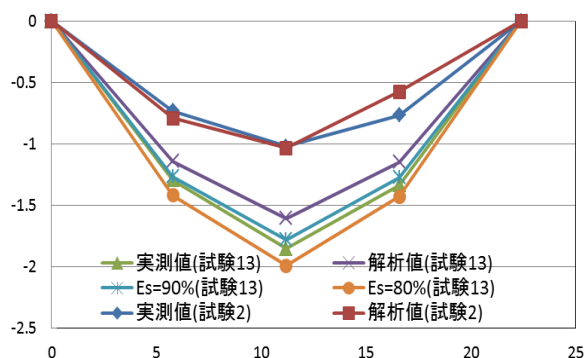


図-13 試験2及び試験13  
の主桁  $G_1$  の静変位解析結果

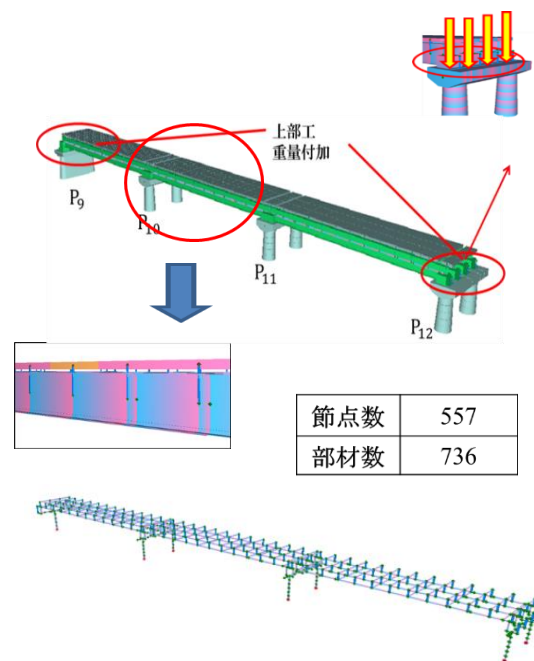


図-11 3径間フレームモデル図  
( $P_9$ ,  $P_{12}$  橋脚含む)

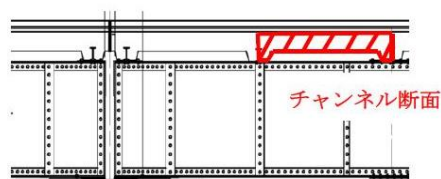


図-12 九年橋 4主鈑桁部床版の  
チャンネル断面

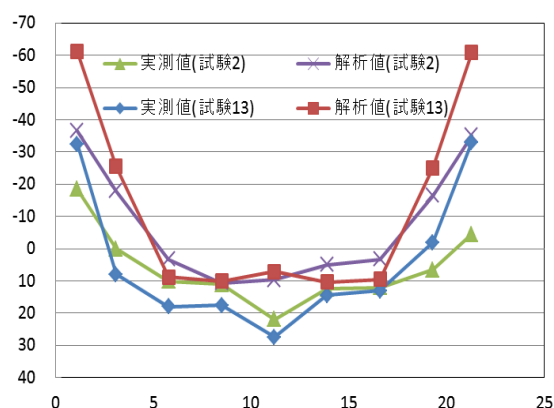


図-14 試験2及び試験13  
の主桁  $G_1$  のひずみ解析結果

が低い傾向が見られ、剛性が低下している可能性が考えられる。

また、主桁の剛性低下（下部工の剛性は一定）が振動特性に及ぼす影響を表-3に示す。重錘衝撃試験で得られた実測固有振動数と比較すると、主桁は約10%～20%の曲げ剛性の低下の可能性が推定される。

## 5. まとめ

本論文では、九年橋4主桁桁橋の剛性評価について考察するために、静的載荷試験及び重錘衝撃試験の実測結果と3次元フレーム解析結果の比較検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。  
(1)本橋では、下部工も含めた3径間フレームモデルとすることで橋脚と上部工が一体となって挙動する現象が再現できた。また、4主桁桁橋は非合成桁橋（リベット橋）であるが、チャンネル床版部と主桁部を剛体要素で連結した構造としてモデル化しないと解析結果は実測結果と近似しなかった。

(2) 静的載荷試験結果と3次元フレーム解析結果を比較すると、主桁の曲げ剛性は若干低下している可能性がある。下フランジ橋軸方向の変位分布の解析結果から、試験13の解析結果では、主桁の曲げ剛性10%～15%減少させたとき、実測値に近づく結果になった。ただし、主桁の曲げ剛性を10%～20%減少させても、下フランジひずみ分布の変化は少なく、ひずみの感度は低いことが分かった。従って剛性評価においてひずみ解析結果のみで評価するのは難しいが、ひずみ、変位の解析結果を合わせて評価する必要がある。

(3) 重錘衝撃試験結果と3次元フレーム固有値解析結果を比較すると主桁の剛性を10%～20%減少させたとき、曲げ1次及び2次の解析固有振動数は、実測値に近づく結果になった。

以上より、静的載荷試験及び重錘衝撃試験で得られた実測値と解析結果を、それぞれ比較検討したところ、主桁の曲げ剛性が同じような割合で減少していることが確認でき、重錘衝撃試験結果も静的載荷試験結果を補間する意味で剛性評価に応用できる可能性を示すことができた。

しかし、詳細な点検時の数値データが不足しているため、局所的な劣化を取り込んだフレーム解析を実施するまでには至っていない。今後本研究で使用した九年橋の3次元フレーム解析モデルのさらなる改善が必要であり、検討していく予定である。

## 【参考文献】

- 1) 櫻田和志, 岩崎正二, 大西弘志, 出戸秀明, 梅田洋佑, 松原和則: 89年供用した4主鋼版橋の静的載荷試験, 土木学会東北支部技術研究発表会, I-41, 2013.3
- 2) 葛西智文, 岩崎正二, 大西弘志, 出戸秀明, 宮村正樹: 衝撃振動試験を用いた89年供用4主鋼桁橋の固有振動数評価に関する一考察, 土木学会東北支部技術研究発表会, I-10, 2014.3

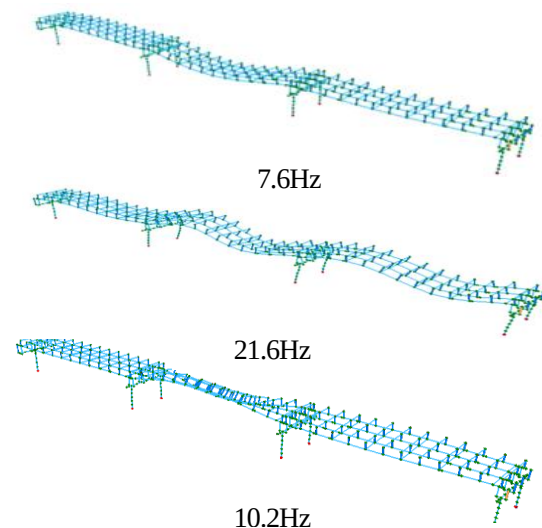


図-15 解析固有振動数と解析振動モード図  
(上図: 曲げ1次 中図: 曲げ2次)  
(下図: ねじれ1次)

表-2 実測値と解析値との比較  
(括弧内の数値は「実測固有振動数/解析固有振動数」を示す)

| モード   | 実測固有振動数 (Hz) | 解析固有振動数 (Hz) |
|-------|--------------|--------------|
| 曲げ1次  | 7.1(93%)     | 7.6          |
| 曲げ2次  | 20.5(95%)    | 21.6         |
| ねじれ1次 | 8.5(83%)     | 10.2         |

表-3 主桁の剛性低下に伴う固有振動数の変化

| 振動モード    | 主桁の剛性低下時における解析固有振動数(Hz) |      |      |      |      |      |
|----------|-------------------------|------|------|------|------|------|
|          | 100%                    | 90%  | 80%  | 70%  | 60%  | 50%  |
| 上部工曲げ1次  | 7.6                     | 7.3  | 7.0  | 6.7  | 6.3  | 5.9  |
| 上部工曲げ2次  | 21.6                    | 20.9 | 19.2 | 18.1 | 17.0 | 15.7 |
| 上部工ねじれ1次 | 10.2                    | 9.9  | 9.5  | 9.1  | 8.8  | 7.6  |