

## 仮設ゴム支承を用いた既設合成鋼鈹桁橋の支点拘束開放実験と解析

## Test and Analysis to open Support Restraints of the Existing Steel Composite Girder Bridge by using Temporary Rubber Bearing

○山村 浩一\* 岩崎 正二\*\* 出戸 秀明\*\*\* 堀合 聡\*\*\*\* 宮本 裕\*\*  
Koichi YAMAMURA Shoji IWASAKI Hideaki DETO Satoshi HORIAI Yutaka MIYAMOTO

**ABSTRACT** Concretely confirming the difference when the support function in the existing bridge is healthy and when it is not so, and understanding what influence the decrease in the support function gives to the entire bridge become useful information to do the maintenance management of the bridge.

In this paper, actual bridge loading test is performed when there is support restraint and when the support restraint is opened, and the differences of them are examined based on the test result and the FEM analytical result about static and dynamic characteristics.

**Key words** : 既設合成鋼鈹桁橋、実橋載荷試験、支点拘束開放実験、仮設ゴム支承、FEM 解析

*existing steel composite girder bridge, field loading tests, test to open support restraints, temporary rubber bearing, FEM analysis*

## 1. まえがき

既設鋼鈹桁橋の支点近傍は、他の部分に比べ損傷発生頻度が高いことから<sup>1)</sup> 維持管理を行う上で、注視すべき部位となっている。支点近傍の損傷としては、ソールプレートの溶接部から発生する疲労亀裂がある。この疲労亀裂は、溶接部に生じる集中応力が原因とされ、集中応力は支承機能の低下によって増大することが明らかとなっている<sup>2)~4)</sup>。また、ソールプレート周辺に腐食が生じると桁の座屈耐力が大きく低下するだけではなく、ソールプレート縁端の主桁下フランジに応力が集中することも報告されており<sup>5)</sup>、この応力は、支承機能の低下によってさらに増加する可能性がある。

既設鋼橋の支承には、高力黄銅支承板支承

(以下 BP-A 支承)が多く用いられている。BP-A 支承は、一方の接触面を平面、他方を球面としたベアリングプレートを用い、上沓および下沓それぞれと接触させて、平面接触部で伸縮機能、球面接触部で回転機能を持たせた支承である。しかし、経年劣化等によりこれらの機能が低下し、桁の水平変位や回転変位に追従できなくなっていることが多い。また、支承本体の腐食や沓座モルタルの圧壊なども多いため、近年ゴム支承への交換が積極的に行われている。ゴム支承は、支点近傍に生じる集中応力の緩和や<sup>6)</sup> 耐震性の面で有効とされている<sup>7)</sup>。

しかしながら、支承交換は、支間長 30m 程度の橋で 1 基 200 万円程度の工事費を必要とし、また、狭い作業空間と既設部材の影響で確実な施工が難しいなど、経済性、施工性の問題が顕

\*東邦技術株式会社 道路部 (〒014-0041 秋田県大仙市大曲丸子町 2-13)

\*\*工博 岩手大学 工学部建設環境工学科 教授 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5)

第 2 種正会員

\*\*\*工博 岩手大学 工学部建設環境工学科 准教授 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5)

\*\*\*\*(株)中央コーポレーション 鉄鋼事業部 (〒025-0003 岩手県花巻市東宮野目 11-5)

在化しつつある。このため、落橋防止システムを設置して、支承の耐震性が補完されている橋については、BP-A 支承を補修しながら使い続けるケースも増えていくものと思われる。

既設の BP-A 支承を使い続けていくには、機能低下によって生じる影響を明らかにし、それを踏まえた維持管理を行う必要がある。

支承機能低下に関する過去の研究では、支点近傍の疲労亀裂に着目したものが多く、橋全体にどのような影響を及ぼすかについての研究は少ない状況にある。

著者らは、支承機能低下が主桁の耐荷力等に及ぼす影響を研究している。今回、支承機能が低下し支点拘束が生じている場合とそうでない場合の主桁挙動を把握するために、支点拘束がある橋で拘束を一時的に開放させることを試みた。支点拘束がある場合と開放させた場合について実橋載荷試験を行い、その試験結果と FEM 解析結果に基づき、両者の静的及び動的特性の違いを検討したので報告する。

## 2. 実橋載荷試験の概要

### 2. 1 対象橋梁および試験方法

対象橋梁は、1980 年に完成した橋長 30m、幅員 7m、3 本主桁を有する単純活荷重合成鋼鈹桁橋である。設計活荷重は TL-20、支承形式は BP-A 支承で死荷重による中桁の支点反力は 388KN である。図-1 に橋梁側面図と上部工断面図を示す。

対象橋梁での実橋載荷試験は、今回が 2 回目である。第 1 回目の試験では、主桁全体にわたり密に計測して、現状における主桁の挙動を把握した。

第 1 回目の試験項目は、図-2 に示す位置で、ひずみ、変位、加速度を計測したほか、傾斜分解能 1 ナノラジアンを有する高精度傾斜計を支点近傍に設置して、主桁のたわみ角を測定した。荷重の載荷方法は、総重量 20tf と 25tf のダンプトラックを 1 台ずつ用意し、載荷位置、載荷台数、走行速度を変えて行った(写真-1)。

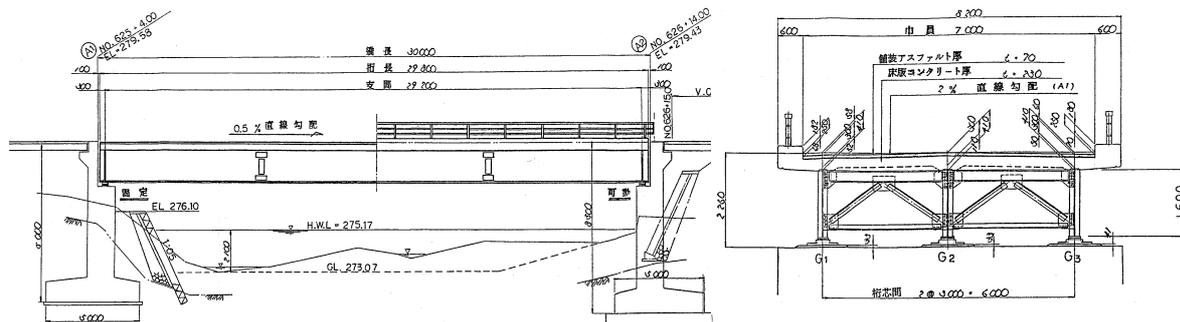


図-1 橋梁側面図, 上部工断面図

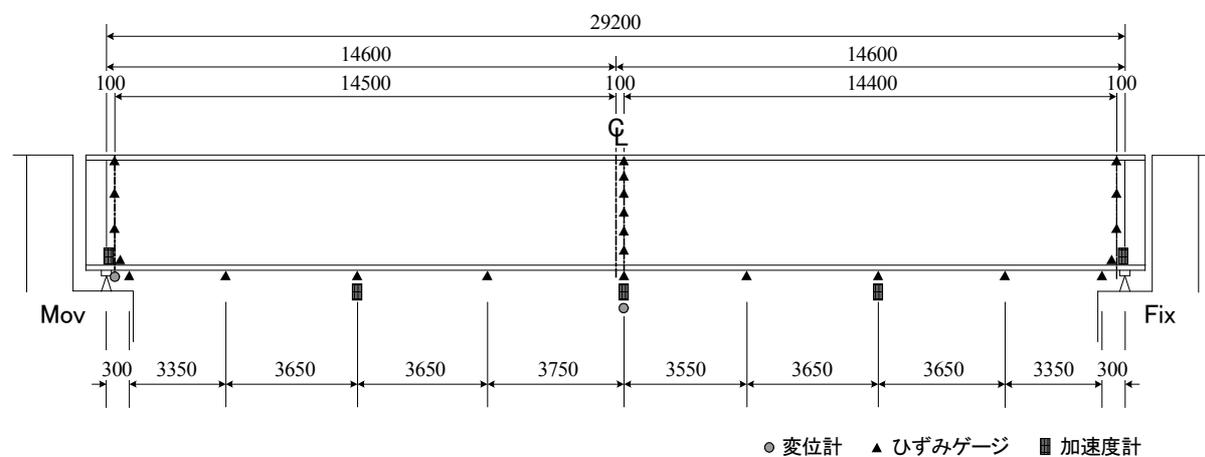


図-2 第 1 回目試験の計測位置 (単位: mm)



写真-1 第1回目の試験状況

第2回目の試験（支点拘束開放実験）では、支点部と支間中央部に着目して計測を行った。ひずみの計測は、支点から 0.3m, 0.6m, 1.1m 離れた位置の主桁下フランジとした。図-3 に計測位置を示す。また、可動支点近傍には高精度傾斜計を設置し主桁のたわみ角を測定した。荷重の載荷方法は、総重量 20tf のダンプトラック 1 台を用意し、載荷位置、載荷速度を変えて行った。

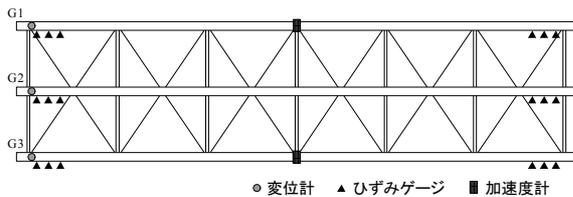


図-3 第2回目試験の計測位置

## 2.2 支点拘束開放実験の概要

支点開放実験では、まず、現状における静的および動的載荷試験を行い、第1回目の試験と同様の主桁挙動（支点拘束状態）であることを確認した。つぎに、支点拘束を開放した場合の実橋載荷試験を行った。

支点拘束を開放させる方法としては、2つの方法を試みた。第1の方法は、既設可動支承の水平移動機能を回復させることを目的として、上沓とベアリングプレート間に摩擦抵抗の小さいスライド板を挿入した（写真-2）。スライド板は厚さ 1mm のステンレス板（SUS403）の表面に厚さ 1mm の四フッ化エチレン樹脂（PTFE）を接着したものを使用した。

第2の方法は、可動支承の回転機能と水平機能を回復させることを目的として、既設の可動支承に替えて仮設ゴム支承を設置した。仮設ゴ

ム支承は、厚さ 16mm のクロロプレンゴム 3 層で構成され、製品の平面寸法は、360mm×360mm、厚さは 62mm である（写真-3）。設置位置は、既設支承の前方 45cm とした（写真-4）。

スライド板や仮設ゴム支承の設置作業は、まず、仮支点位置の主桁を補剛材で補強した後、既設支承のサイドブロックを取外して上沓とベアリングプレートを切り離す。つぎに、橋台前面に設置したベント上で、上部工を 3mm 程度ジャッキアップし、スライド板および仮設ゴム支承をセットした。これらの作業は、一般交通を供用させた状態で行った。

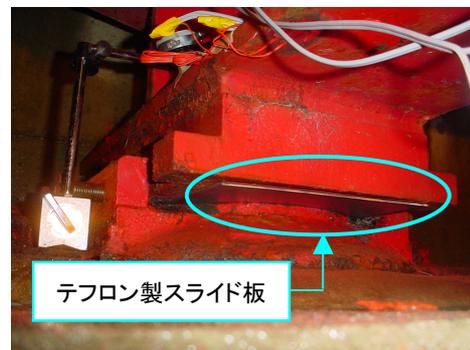


写真-2 スライド板設置状況



写真-3 仮設ゴム支承

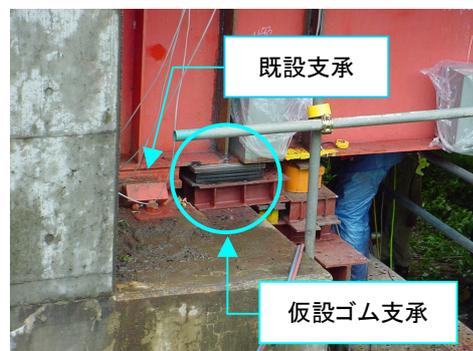


写真-4 仮設ゴム支承設置状況

### 3. FEM解析モデル

支点拘束開放実験における主桁の挙動を検討するために、FEM 解析を行った。解析モデルは、床版、主桁フランジ、ソールプレートをソリッド要素でモデル化し、主桁のウェブと補剛材はシェル要素、対傾構はビーム要素でモデル化した。また、仮設ゴム支承は、バネ要素に置き換えてモデル化し、BP-A 支承は、支点拘束状態に応じて、ピンまたはローラーの境界条件を適宜使分けて解析した。表-1 に各部材の剛性、図-4 にモデル図を示す。

表-1 各部材の剛性

部材	弾性係数, バネ定数	ポアソン比
床版コンクリート	$2.8 \times 10^7$ KN/m <sup>2</sup>	0.167
鋼部材	$2.0 \times 10^8$ KN/m <sup>2</sup>	0.300
仮設ゴム支承 (鉛直バネ)	408000 KN/m	—
仮設ゴム支承 (水平バネ)	2042 KN/m	—
仮設ゴム支承 (回転バネ)	1316 KN/m	—

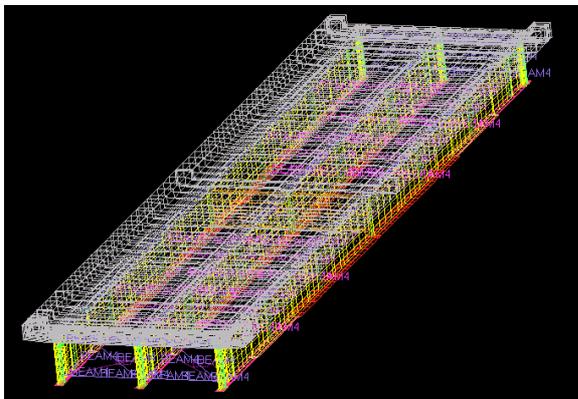


図-4 FEM モデル図

### 4. 対象橋梁の支点拘束状態

対象橋梁の支点拘束状態については、主桁全体を密に計測した第 1 回目の試験結果により確認した。

図-5 は、20tf と 25tf のダンプトラックを G2 桁の支間中央に載荷した場合の、G2 桁下フランジのひずみの計測値と、格子解析から求めたひずみの計算値を示したものである。

ひずみの計測値では、支点から 5m 程度まで

の区間に圧縮ひずみが生じ、その最大値は支間中央の引張りひずみの 2 倍程度になっている。このようなひずみ分布は、両端固定桁に生じるひずみ分布と同じであることから、対象橋梁は支点拘束状態にあると言える。また、ひずみの計測値は、支点の移動を完全拘束して求めた格子解析値とほぼ同等であることから、対象橋梁の支点拘束は、かなり強い状態であると考えられる。また、この試験ケースにおける支承の水平変位は、0.085mm であり、可動支承はほとんど移動していなかった。

このような支点拘束状態にある橋に対して、支点拘束開放実験を行った。

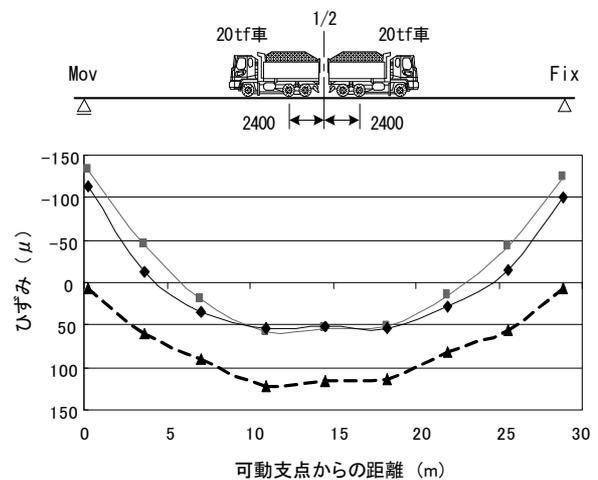


図-5 G2 桁のひずみ分布 (第 1 回目の試験)

### 5. 支点拘束開放実験の結果と考察

支点拘束解放実験では、つぎに示す 3 つの支点ケースについて静的および動的載荷試験を行った。

- 1) 既設 BP-A 支承 (以下「現状」)
- 2) BP-A 支承の上柵とベアリングプレート間にスライド板挿入 (以下「スライド板」)
- 3) 既設の支承に替えて仮設ゴム設置 (以下「仮設ゴム」)

#### 5. 1 静的載荷試験

静的載荷試験の結果は、各桁ともほぼ同じ傾向であったことから、ここでは G2 桁の計測結果を取り上げた。

表-2 は、主桁下フランジのひずみの計測値と FEM 解析の結果をまとめたものである。数値が記載されていない部分は、「仮設ゴム」とひずみゲージ取付け位置の関係から、計測不能もしくは計測不要になった箇所である。計測値のうち、「現状」および「スライド板」の支点から 0.3m の値が可動支点と固定支点で大きく異なっている。計測上の問題であると思われるが原因は判明していない。ただし、固定支点か

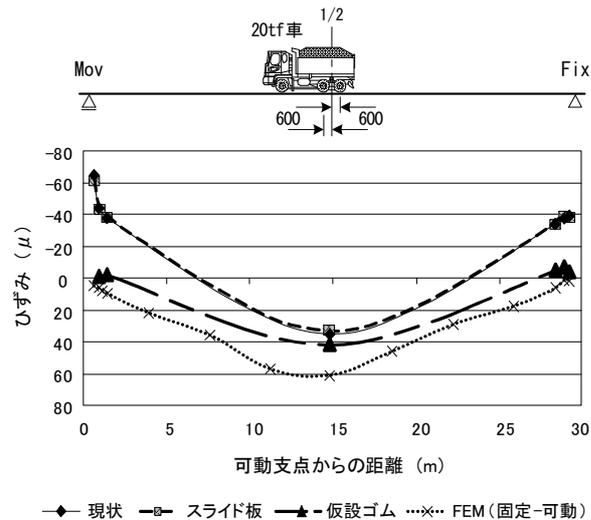


図-7 ひずみの分布

表-3 支承の水平変位とたわみ角

項目		可動支承の水平変位 (mm)	可動支承近傍の主桁たわみ角 ( $\mu R$ )
種別、支点状態	現状	0.05	160
	スライド板	0.05	209
	仮設ゴム	0.87	388
FEM 解析値	ピン・ローラ	1.04	457
	ピン・ピン	0	27
	ピン・ゴム	0.96	408

表-2 ひずみの計測値と解析値 (単位:  $\times 10^{-6}$ )

種別、支点状態	位置	既設可動支点からの距離				支間中央	既設固定支点からの距離		
		0.3m	0.6m	0.8m	1.1m		1.1m	0.6m	0.3m
計測値	現状	-65	-44	—	-38	35	-34	-38	-39
	スライド板	-61	-43	—	-38	33	-34	-39	-38
	仮設ゴム	—	—	-1	-2	42	-5	-7	-4
FEM 解析値	ピン・ローラ	5	6	8	10	61	6	1	1
	ピン・ピン	-65	-55	-49	-45	33	-44	-51	-63
	ピン・ゴム	—	—	2	4	58	4	2	0

ら 0.3m の値を除くと、第 1 回目の試験結果と同様のひずみ分布になることから、これらの値については、信頼できると判断した。

図-7 は計測ひずみと支点境界条件 [ピン・ローラー] の FEM 解析から求めたひずみの分布を比較したものである。計測値がない区間のひずみ分布については、第 1 回目の試験で得られた知見から 2 次放物線で処理している。

表-3 は、支承の水平変位と支点近傍の主桁たわみ角の計測値と解析値をまとめたものである。

### 5. 1. 1 「スライド板」

#### (1) 支点拘束の開放

「スライド板」のひずみは、支点拘束が強い状態にある「現状」のひずみとほぼ同等である。また、支点境界条件 [ピン・ピン] の FEM 解析値とも近似する。支承の水平変位は、「現状」と同じ 0.05mm で水平移動機能は全く改善されていない。たわみ角については、「現状」に比べ少し大きくなっている。これは、「スライド板」による効果ではなく、BP-A 支承のサイドブロックを取外して試験したため、これまで拘束されていた上方への動きが開放されたことによるものと思われる。

これらの結果から、「スライド板」では、支点拘束は開放されないとと言える。

#### (2) 回転移動機能

静的載荷試験における、支承の回転角は、支点近傍のたわみ角の計測値で評価することができる<sup>8)</sup>。回転機能の理想値を支点境界条件 [ピン・ローラー] の FEM 解析から求めた支点部の主桁回転角とし、その値と計測値の比率を「回転機能率=たわみ角の計測値/主桁回転角の解析値」とすれば、「現状」の回転機能率

は35%、「スライド板」の回転機能率は46%で、「スライド板」は「現状」に比べ回転機能が大きい。

これに対して、主桁下フランジの圧縮ひずみの値は、「スライド板」と「現状」は同じである。「スライド板」の回転機能が向上しても圧縮ひずみは軽減されなかった。両者の支承水平変位の計測値が同値であったことと考え合わせると、支点拘束によって生じる主桁下フランジの圧縮ひずみの大きさは、回転移動機能より水平移動機能に依存するものと考えられる。ただし、ここで対象としている圧縮ひずみは、ソールプレート縁端の主桁下フランジに生じるスポット応力とは異なることを申し述べておく。

### (3) 水平移動機能

設計上の摩擦係数は、「現状」0.15、「スライド板」0.1である<sup>9)</sup>。「スライド板」により摩擦抵抗を小さくしても、BP-A 支承の水平移動機能は「現状」と同じであった。一般に、PTFE(「スライド板」のすべり材)の摩擦係数は、面圧とすべり速度の影響を受け、特に、面圧の影響を強く受ける。面圧が小さくなると摩擦係数は増加する傾向にあり、PTFEを用いたすべり支承技術資料では、設計摩擦係数0.1における基準面圧を $20\text{N/mm}^2$ とし、摩擦係数比と面圧の関係式を示している<sup>10)</sup>。

本試験での「スライド板」の面圧は $12\text{N/mm}^2$ であり、面圧の関係式から摩擦係数を推定すると、0.12程度になる。現場では、錆や汚れ等の影響も受けることから、面圧の要素だけで実際の摩擦係数を推定することはできないが、本試験の結果では、既設BP-A 支承の摩擦係数を設計値より小さくしても、常時の水平移動機能は改善されない可能性があると言える。

## 5. 1. 2 「仮設ゴム」

### (1) 支点拘束の開放

可動支承を「現状」から「仮設ゴム」に換えると、「現状」で生じていた支点近傍の圧縮ひずみは大幅に減少し、その値は、支点境界条件[ピン-ゴム]のFEM解析値に近づく。また、支承の水平変位および主桁たわみ角の計測値とそれらの理想値(支点境界条件[ピン・ローラー])との比率は、それぞれ84%、85%となり、

「現状」での比率5%、35%に比べ大幅に改善する。このことから、支点近傍のひずみ挙動および支承移動機能の側面からは、支点拘束はほぼ開放されたと言える。

一方、支間中央のひずみは、計測値と理想値(支点境界条件[ゴム・ピン]のFEM解析値)の比率は72%であり、「現状」での比率57%に比べ、支点拘束の影響は回復傾向を示すが、支承移動機能の比率84%、85%に比べると回復の程度は小さい。このことから、支間中央ひずみの側面からは、支点拘束は十分なレベルまで開放されなかったと言える。

### (2) 支間中央のひずみ

「仮設ゴム」により「現状」の支承移動機能が大幅に改善されても、支間中央のひずみは、理想値(=解析値)と同等にはならなかった。

一般に、実橋で生じる応力と橋全体をモデル化したFEM解析値との差は小さいことが知られている。著者らの検討では、単純鋼鈹桁における静的載荷試験の計測値と橋全体をモデル化したFEM解析値との比率は、96%程度になることを確認している。「仮設ゴム」の支間中央の計測値とFEM解析値との比率は72%であり、計測値と解析値に隔たりがある。

この原因として、「現状」での死荷重による圧縮軸力が支承交換後も残存し、支間中央の引張りひずみを軽減したものと考えられる。この圧縮軸力がどの程度の大きさになるかを検討した。その結果、上部工断面の中立軸の位置に450KNの圧縮軸力を作用させた場合に、計測値とほぼ一致した。ひずみの解析値は、支点から0.3m, 0.6m, 1.1mの位置でそれぞれ-2, -4, -9( $\times 10^{-6}$ )、支間中央は $42 \times 10^{-6}$ であった。「現状」での死荷重による水平支承反力の解析値は846KNであり、求めた圧縮軸力は水平支承反力の約50%であった。主桁に作用する圧縮軸力が水平支承反力より小さくなった理由としては、「仮設ゴム」の水平剛性等によって圧縮軸力が軽減されたものと考えられる。

## 6. 動的載荷試験

支間中央の地覆上に設置した加速度計より得られた応答加速データからFFT方式により

パワースペクトルを算出し、卓越振動数から動的特性を評価した。図-8～図-10に各支承状態における車両退出後のパワースペクトル図を示す。

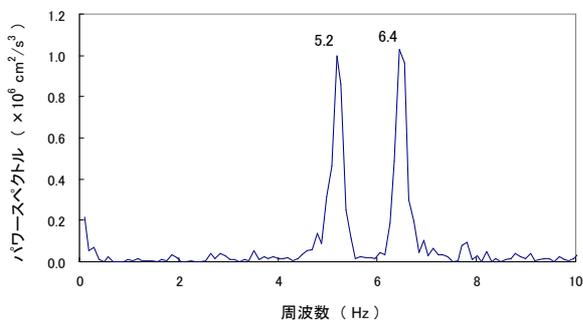


図-8 「現状」のパワースペクトル図

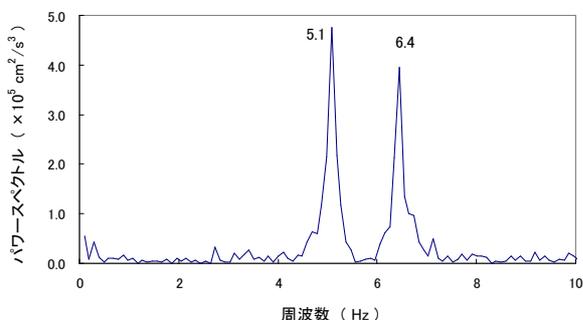


図-9 「スライド板」のパワースペクトル図

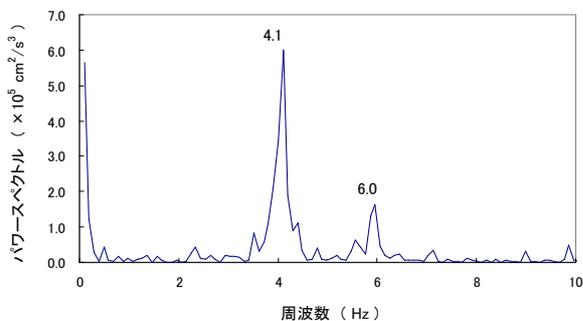


図-10 「仮設ゴム」のパワースペクトル図

次に、FEM プログラムを用いて、固有振動数解析を行い、解析値と計測値を比較した。解析の結果、曲げ1次、ねじれ2次が敏感に反応し、モード次数が増えるほど固有振動数の反応は小さくなること、また、計測結果でも同様のモード次数が出現していることから、この2つの値で計測値と解析値を比較した。

表-4に示すように、動的载荷試験の計測値と解析値の関係は、静的载荷試験のひずみのそ

れと同様の傾向を示す。すなわち、「現状」と「スライド板」の固有振動数は同等で、その値は、支点境界条件〔ピン・ピン〕のFEM解析値に近い。また、「仮設ゴム」では、「現状」や「スライド板」に比べて固有振動数は小さくなり、その値は、支点拘束がない状態の解析値(支点境界条件〔ピン・ローラー〕のFEM解析値)に近づく。

支点拘束状態にある「現状」と「スライド板」が支点拘束の小さい「仮設ゴム」に比べ、固有振動数が大きくなる原因として、支点拘束状態では支承の動きがないために支点部で負曲げ発生し、両端固定梁に近い挙動となるためと考えられる。

動的载荷試験では、静的载荷試験で得られるような、支承の回転及び水平移動機能等については把握できないが、固有振動数の大きさから支点拘束状態にあるかどうかの判定は可能であると言える。

表-4 固有振動数の計測値と解析値の比較

モード 種別, 支点状態		曲げ 1次モード	ねじれ 2次モード
		現状	5.2
計測値	スライド板	5.1	6.4
	仮設ゴム	4.1	6.0
FEM 解析値	ピン・ローラー	3.6	5.4
	ピン・ピン	5.8	6.7
	ピン・ゴム	4.5	5.7

## 7. 主桁応力度の検討

対象橋梁において、支承機能低下が及ぼす影響を定量的に捉えるため、主桁応力度に着目して検討を行った。静的载荷試験の結果から、「現状」に活荷重が作用すると支点付近の主桁には、圧縮応力生じる。この位置における主桁の設計では、曲げ応力はほとんど考慮されていないため、設計活荷重作用時の圧縮応力度を照査した。また、支承機能が低下した状態で床版打替えを行うことを想定し、設計活荷重および床版、橋面死荷重によって生じる圧縮応力度について照査した。検討条件としては、設計活荷重をTL-20、主桁の検討位置は支点から0.3mとした。負の曲げモーメントに対する抵抗断面とし

ては、桁と床版内部の鉄筋を考慮した。

表-5に示すように、現状では支点拘束によって圧縮応力が生じて、主桁は十分安全である。ただし、支承機能が低下した状態で床版打替えを行うと許容応力度を超えるため注意が必要である。

表-5 主桁応力

支承機能	荷重	現状		床版打替え時	
		発生モーメント (KNm)	発生応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	発生モーメント (KNm)	発生応力度 (N/mm <sup>2</sup> )
健全	従前の死荷重	114	8.6	16	1.3
低下	設計荷重	-1193	-72	-1193	-72
	床版横面荷重	—	—	-1378	-106.1
主桁応力度		-63.4 ( $\sigma_a = 114.3$ )		-176.8 ( $\sigma_a = 114.3$ )	

## 8. まとめ

支点拘束開放実験では、以下のような結果が得られた。

- 1) BP-A 支承の上沓とベアリングプレート間に摩擦抵抗の小さい「スライド板 (PTFE)」を挿入した実験では、支点拘束は開放されなかった。
- 2) 既設 BP-A 支承の摩擦係数を設計値より小さくしても、常時の水平移動機能は改善されない可能性がある。
- 3) 支点拘束によって生じる主桁下フランジの圧縮ひずみの大きさは、支承の回転移動機能より水平移動機能に依存するものと考えられる。
- 4) BP-A 支承を「仮設ゴム」支承に替えた実験では、支点近傍のひずみ挙動および支承移動機能の側面からは、支点拘束はほぼ開放されたと言える。しかし、支間中央のひずみの側面からは、支点拘束は十分なレベルまで開放されなかった。
- 5) 「仮設ゴム」の実験において、支間中央のひずみ値と理想値 (= 解析値) に隔たりが生じた原因として、「現状」での死荷重による圧縮軸力が支承交換後も残存し、支間中央に生じる引張りひずみを軽減したものと考えられる。
- 6) 支点拘束開放実験における動的載荷試験の計測値と解析値の関係は、静的載荷試験のひずみのそれと同様の傾向を示し、固有振動数の大

きさから支点拘束状態にあるかどうかの判定が可能である。

7) 対象橋梁において、支点付近の主桁応力度を照査した。その結果、現状では、設計活荷重によって生じる圧縮応力度に対して主桁は十分安全であった。ただし、支点拘束状態で、床版打替えを行うと主桁の圧縮応力度は許容値を超えるため注意が必要である。

## 【参考文献】

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：道路橋の健全度に関する基礎的調査に関する研究—道路橋に関する基礎データ収集要領(案)—, 国総研資料 第381号, 2007.4
- 2) 西川和廣, 村越潤, 広瀬隆広：鋼桁支承ソールプレート溶接部の疲労に関する検討—実橋載荷実験に基づくソールプレート周辺部の応力測定結果の報告—, 土木技術資料 35-2, 1993.2
- 3) 西川和廣, 村越潤, 佐々木靖雄, 広瀬隆広：鋼桁支承ソールプレート溶接部の疲労に関する検討—模型桁の静的載荷実験に基づく桁端部の応力と細部構造に関する検討—, 土木技術資料 35-7, 1993.7
- 4) 三木千寿, 妹尾賢一郎, 森猛：鋼橋支承部ソールプレート端に生じた疲労損傷と局部応力についての考察, 構造工学論文集, Vol.36A, 1990.3
- 5) 石尾真理, 玉越隆史, 武田達也, 中洲啓太：桁端部の腐食が耐荷力に及ぼす影響に関する一考察, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部 Vol.60, 2005
- 6) 徳田浩一, 岩崎雅紀：支承の活荷重に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.41A, 1995.3
- 7) 社団法人 日本道路協会：道路橋支承便覧, pp.35, 2004.4
- 8) 黒墨秀行, 岩崎正二, 出戸秀明：高精度傾斜計を用いた実橋載荷試験時の傾斜計測により推測される支点付近の挙動, 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, □-1, 2008.3
- 9) 社団法人 日本道路協会：道路橋支承便覧, pp.54, 1991.7
- 10) 角型すべり支承技術資料：東京ファブリック工業(株), pp.10, 2007.6