

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

About the Influence degree that the Decrease of the Support Function causes for the Stress
in the Existing Steel Composite I Girder Bridge

山村 浩一*, 出戸 秀明**, 岩崎 正二***

Koichi Yamamura, Hideaki Deto and Shoji Iwasaki

*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, 岩手大学准教授, 工学部社会環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5)

***工博, 岩手大学教授, 工学部社会環境工学科 (〒020-8551 盛岡市上田 4-3-5)

The decrease of the support function causes the fatigue crack to occur in the sole plate weld. We are concerned about the decrease of the support function having bad influence on superstructure. However, the concrete influence level is hardly examined.

In this study, the loading test is performed in bridges where the support function is normal and deteriorates. We identify consistency with FEM analysis values as these test results. FEM analysis is carried out about the state that design live load and temperature load acted on in the existing steel composite I girder bridge where the support function deteriorated.

We examined an influence degree of the decrease of the support function from the result.

Key Words: decrease of the support function, field loading test, FEM analysis

キーワード: 支承機能低下, 実橋載荷試験, FEM 解析

1. はじめに

支承は、橋を支える重要な構造部材であり鉛直支持、水平移動および回転移動の機能が常に保持されていることが要求される。しかしながら、線支承や高力黄銅支承板支承（以下、BP 支承）を用いた既設鋼合成 I 桁橋で実橋載荷試験を行うと可動支承はほとんど動かず、移動機能が低下していることが多い¹⁾。

支承の機能低下は、ソールプレート溶接部に生じる疲労亀裂の原因²⁾となっているほか、上部構造への悪影響が懸念されている。また、線支承や BP 支承は耐震性の低いものが多いため、近年、このような橋では、ゴム支承への取替え工事が積極的に行われている。

ゴム支承は、支承近傍に生じる集中応力の緩和や³⁾耐震性の面で有効である⁴⁾。その一方で、ゴム支承への取替えは、支間長 30m、幅員 9m 程度の橋で 2 千万円程度の工事費が必要となり、また、狭隘な空間で既設部材の影響を受けながら作業するため確実な施工が難しく、経済性や施工性の問題が顕在化しつつある。このようなことから今後、落橋防止システムを設置して耐震性を確保している橋では、BP 支承を定期的に補修しながら継続使用するケースも多くなると思われる。

過去の研究では、既設の BP 支承を新しい BP 支承に取

替えた場合でも、取替え後の水平移動量は解析値の 55% 程度であることが報告されている³⁾。このため、既設の BP 支承をグリスアップ等で補修しても移動機能はほとんど改善しないと考えられ、BP 支承を継続使用する場合は、機能低下を前提とした維持管理を行う必要がある。

前述したとおり支承の機能低下は、ソールプレート溶接部に生じる疲労亀裂の原因のほか、上部構造への悪影響が懸念される。しかし、橋のどの部分にどの程度の悪影響を及ぼすかについては、ほとんど検討されていない。

本研究では、支承機能が正常な橋（ゴム支承を有する新設橋）とそうでない橋（BP 支承を有する既設橋）について実橋載荷試験を行い、両者の静的および動的挙動の違いを把握した。ゴム支承を有する新設橋では、可動支承を人工的に拘束する実験を行い、その拘束力から支承に作用する水平反力の大きさを確認した。BP 支承を有する橋では、移動機能の実態を把握するために、テフロン板と仮設ゴム支承を用いて、支点拘束を開放する実験を行った。

これらの実験結果を踏まえ、対象橋梁を FEM でモデル化し、その解析結果から、支承機能低下が上部構造の

応力度や固有振動数に及ぼす影響について検討したものである。

2. 実橋載荷試験

2.1 対象橋梁

対象橋梁は、岩手県内の主要地方道に架設されている落合橋と梨の木橋である。落合橋は、架設後2年が経過した橋長33.2mの単純鋼合成I桁橋で、支承形式はゴム支承である。目視調査の結果、損傷は見られず健全な状態であった。また、ゴム支承については、一般車両の通行に追従して変形していることを目視で確認した。このような状態から判断し、落合橋では新設橋と同等の挙動を把握できると考え、対象橋梁として選定した。

梨の木橋は完成後24年が経過した橋長30mの単純鋼合成I桁橋で支承形式はBP支承である。目視調査の結果、主桁では防食機能の劣化と局部的な腐食が見られ、床版では部分的な一方向ひび割れが見られた。いずれの損傷も軽微なものであり、主要部材はほぼ健全な状態であった。また、舗装の異常や伸縮装置の段差はなく、路面の平坦性は保たれていた。BP支承では、防食機能の劣化と軽微な腐食が見られたが、支承の傾斜や遊間異常等の変状はなかった。対象橋梁の諸元、断面図、支承写真を図-1、図-2に示す。

2.2 試験方法

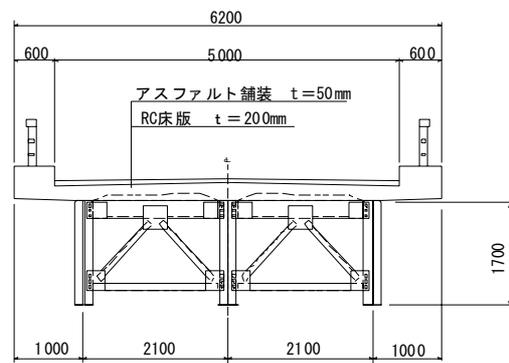
(1) 落合橋

落合橋では、支承機能が正常な橋（支承が桁の回転や移動に追従して動く橋）の挙動を把握する実験（以下、実験1）と主桁と橋台のパラペットの間をジャッキで水平載荷し、人工的に支承機能を低下させる実験（以下、支点拘束実験）を行った。

支点拘束実験では、水平載荷したジャッキ荷重の値から支承に生じる水平反力を確認した。この実験の手順は、まず、試験車両載荷時の水平変位を拘束するために、支承の遊間に鋼製のライナー材をはさみ込む。次に、試験車両を計画された位置に載荷した後、各主桁の下フランジをジャッキで押す。ジャッキによる載荷は、支承部に取付けた水平方向の変位計がジャッキ開始前の値と同様になるところ、すなわちジャッキ反力が最大となるところで載荷をストップし、この時のジャッキ反力を水平支承反力とした。固定支承および可動支承の拘束状況を写真-1、写真-2に示す。

測定項目は、ひずみ、変位、加速度とした。ひずみゲージは、支点から0.25m、1.15m、4.05m、8.10m、16.2m離れた位置の主桁のフランジとウェブに貼り付けた（図-3）。また、変位計は、主桁スパン長の1/4点に取り付けたほか、可動支承の鉛直方向と水平方向に取り付けた。

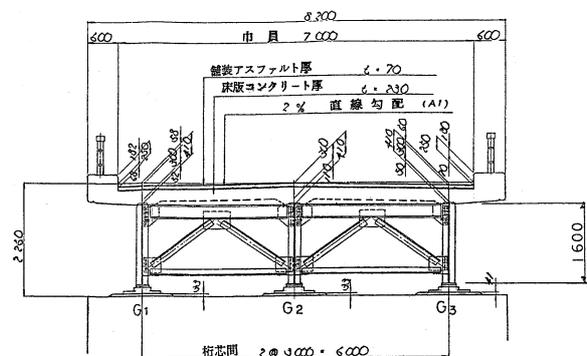
荷重の載荷方法は、総重量25tfのダンプトラック（前



落合橋	
上部工形式	単純鋼合成I桁橋
支間長	32.4m
幅員	5.0m
主桁	3主桁 高さ1.7m
設計活荷重	A活荷重
支承形式	ゴム支承
支承の死荷重反力	485kN (G2桁)
架設後の経過年数	2年



図-1 落合橋の諸元



梨の木橋	
上部工形式	単純鋼合成I桁橋
支間長	29.2m
幅員	7.0m
主桁	3主桁 高さ1.6m
設計活荷重	TL-20
支承形式	BP-A 支承
支承の死荷重反力	382 kN (G2桁)
架設後の経過年数	24年



図-2 梨の木橋の諸元

輪と後輪の軸距 3.2m, 前後輪と後後輪の軸距 1.32m, 前輪 1 輪当りの軸重 3.475tf, 後輪 1 輪当りの軸重 9.025tf) を 2 台用意し, 載荷台数, 載荷位置を変えて行った。また, 動的載荷試験における試験車両の走行速度は, 10km/h 及び 20km/h とし, 走行位置は中桁を跨いで走行するラインと右側車輪が耳桁上を走行するラインとした。

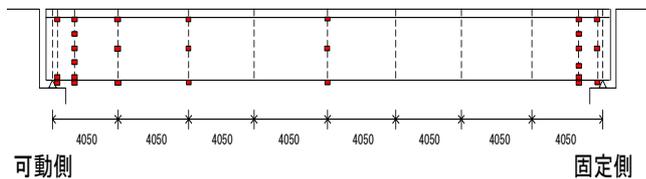


図-3 ひずみゲージ取り付け位置

(2) 梨の木橋

梨の木橋では, 支承機能が低下した橋(支承が桁の回転や移動に追従して動かない橋)の挙動を把握する実験(以下, 実験2)と支承機能を一時的に回復させる実験(以下, 支点開放実験)を行った。支点開放実験の目的は, 支承の移動機能の実態を把握することである。

実験2は, 図-4に示す位置で, ひずみ, 変位, 加速度を計測したほか, 支点近傍に傾斜分解能1ナノラジアンを有する高精度傾斜計を設置して, 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のダンブトラックを1台ずつ用意し, 前述した落合橋と同様に載荷位置, 載荷台数及び走行速度を変えて行った。

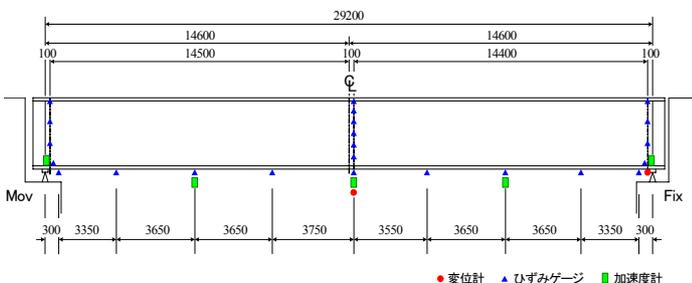


図-4 実験2の計測位置

支点開放実験では, 図-5に示す支点近傍と支間中央部に着目して計測を行った。試験車両は, 総重量20tf(前輪1輪当りの軸重2.8tf, 後輪1輪当りの軸重3.6tf, 軸間距離は落合橋の25tfと同じ)のダンブトラック1台を用いた。

支承機能を回復させる方法として, 2つの方法を試みた。第1の方法は, 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, 可動支承の上沓と下沓の間に摩擦抵抗の小さいテフロン板を挿入する方法である(写真-3)。テフロン板は, 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。



写真-1 落合橋 固定支承の拘束状況



写真-2 落合橋 可動支承の拘束状況



写真-3 梨の木橋 テフロン板設置状況



写真-4 梨の木橋 仮設ゴム支承設置状況

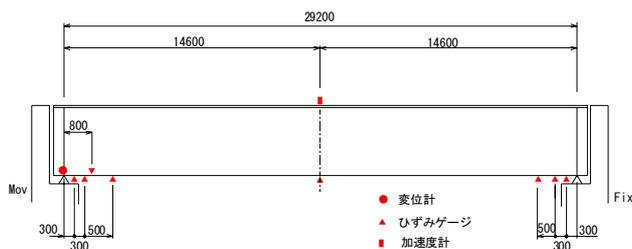


図-5 支点開放実験の計測位置

第2の方法は、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、可動側のBP支承を仮設ゴム支承に替える方法である(写真-4)。仮設ゴム支承はTL-20で設計し、クロロプレンゴム3層から構成された平面寸法360mm×360mm、全厚62mmの断面とした。物性値は製品検査の結果、ゴムの静的せん断弾性係数が0.8N/mm²、圧縮バネ定数は424kN/mm²であった。仮設ゴム支承の設置位置は、既設のBP支承に干渉しないよう、可動支点から45cm離れた位置にセットした。

テフロン板や仮設ゴム支承の設置手順は、まず、ジャッキアップ位置の主桁を垂直補剛材で補強した後、BP支承のサイドブロックを取外して上沓と下沓を切り離す。次に、橋台前面に設置したベント上に油圧ジャッキをセットして、上部工を3mm程度ジャッキアップした後、スライド板と仮設ゴム支承を取付けた。

3. FEM解析モデル

本研究では、汎用FEMプログラムAnsysを用いて支承機能低下の影響を検討した。解析モデルは、床版と地覆をソリッド要素、主桁と横桁をシェル要素、対傾構と横構をビーム要素でモデル化した(図-6)。可動支承は、移動機能が低下した状態をピン、正常な状態をローラーでモデル化した。また、ゴム支承はソリッド要素でモデル化した。ゴム支承のモデル化では、弾性係数の値が解析結果に大きな影響を及ぼす。しかしながら、ゴム支承は、ゴムと鋼板の積層構造であるため弾性係数を一義的に定めることはできない。そこで、製品試験の結果(鉛直荷重980kNで鉛直変位が2.85mm)と合うようにFEMモデルでトライアルし、弾性係数を $E=7.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ と決定した。

落合橋の支点拘束実験における支承モデルは、鉛直方向をバネ要素、水平方向を拘束、回転方向を自由としてモデル化した。表-1に各橋梁の支承モデルを示す。

表-1 支承のモデル化

橋梁名	支承の状態	鉛直方向	水平方向	回転方向
落合橋	ゴム支承	ソリッド要素		
	水平拘束されたゴム支承	221000kN/m	拘束	自由
梨の木橋	機能低下した可動支承	拘束	拘束	自由
	仮設ゴム支承	ソリッド要素		
	正常な可動支承	拘束	自由	自由

4. 落合橋の実橋載荷試験の結果と考察

(1) 実験1(支承機能が正常な橋の挙動)

G2桁上に総重量25tfのダンプトラックを2台載荷したケースの静的載荷試験の結果を取上げて考察する。図-7は、G2桁下フランジにおける応力分布の計測値とFEM解析値を示したものである。ゴム支承をソリッド要素

でモデル化したFEM解析値と計測値はほぼ一致している。スパン中央における両者の比率は「計測値/解析値=0.97」である。また、スパン1/4点におけるたわみの計測値と解析値の比率も「計測値/解析値=7.53mm/8.15mm=0.92」と近似している。表-2は、ゴム支承の変位の計測値である。ゴム支承が試験車両の荷重に追従して水平方向と鉛直方向に動いていることが分かる。

動的載荷試験では試験車両が橋上から退出したあとの応答加速度データからパワースペクトルを求め、卓越振動数を抽出した。その結果、曲げ1次モード3.5Hz、捩り1次モード5.7Hzであった(図-8)。一方、FEMモデルによる固有振動数解析の結果は、曲げ1次モード3.4Hz、捩り1次モード5.7Hzとなり、計測値と解析値はほぼ一致した。以上の結果から、支承機能が正常な新設橋の静的及び動的挙動は、FEM解析で精度よく捉えることができると言える。

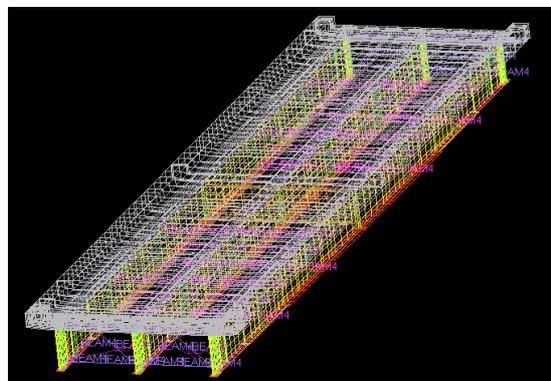


図-6 FEMモデル図(梨の木橋)

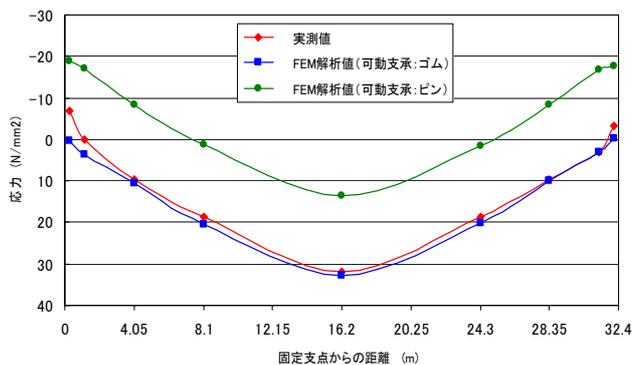


図-7 実験.1 G2桁下フランジの応力分布図

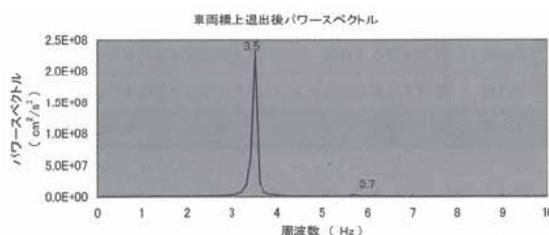


図-8 実験.1 パワースペクトル図

(2) 支点拘束実験

図-9は、G2桁下フランジにおける応力分布の計測値とFEM解析値を示したものである。载荷ケースは実験1と同じである。支承の移動機能を拘束すると主桁の応力分布は、支点から約8mの区間が圧縮域となる。一方、スパン中央の引張応力は、移動機能が正常な橋（実験1）の60%程度に減少する。

図-10は、主桁断面方向のひずみ分布を示したものである。合成桁橋の場合、上フランジに引張応力が作用すると床版コンクリートの橋軸方向にひび割れが生じて、桁の断面剛性が低下する恐れがある。前述したように、支承機能が低下すると、支点近傍の下フランジが圧縮域となるため、逆に、上フランジが引張域になることも考えられる。そこで、図-10の上フランジ側のひずみに着目して、主桁断面方向の計測結果について考察した。

支間中央の上フランジのひずみは、実験1の値と支点拘束実験の値はほぼ同じであるが、支点近傍の上フランジのひずみは、実験1の値に比べ支点拘束実験の値が小さくなっている。すなわち、支承機能が低下すると正常な場合（実験1）に比べ、支点近傍の上フランジの圧縮応力は小さくなるようである。今回の実験では、支点拘束による圧縮ひずみの低下率は約40%であった。荷重の大きさや载荷位置によっては、上フランジが引張域となることも考えられるため、橋に作用する多くの荷重状態を考慮して検討する必要があると思われる。

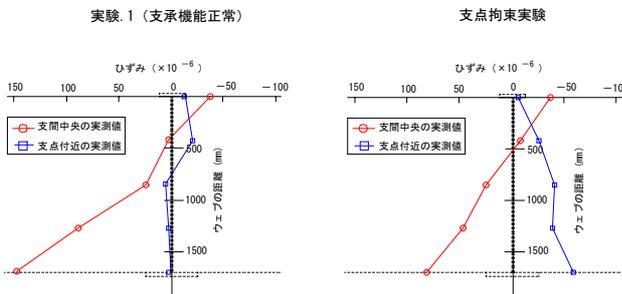


図-10 主桁断面方向のひずみの計測値

表-2の下段は、支承の変位とジャッキ反力の計測値を示したものである。支点拘束実験の鉛直変位①と鉛直変位②の差は、実験1のそれとあまり変わらない。支承の遊間部をライナー材で固定しても支承の回転移動は十分に拘束されていないようである。ジャッキ反力は、FEM解析値の約80%であった。支承の回転拘束が不十分であったため、水平支承反力の一部が支承の回転変形に吸収された可能性がある。このように、支承が完全に拘束されていない状態でも、载荷荷重（試験車両2台=500kN）とジャッキ反力（G3桁=260kN）関係から考え、支承には载荷荷重の50%以上の水平反力が作用すると考えられる。

動的载荷試験の卓越振動数は、曲げ1次モード4.5Hz、振り1次モード5.8Hzであった（図-11）。一方、FEM

による固有振動数解析の結果は、曲げ1次モード5.5Hz、振り1次モード6.5Hzで計測値とは差がある。支承の変位や反力の計測結果と同様に、支点拘束が不十分であったことが原因であろう。実験1と支点拘束実験の固有振動数の違いは、支点拘束の大きさが橋の動的挙動に大きく影響することを示すものである。

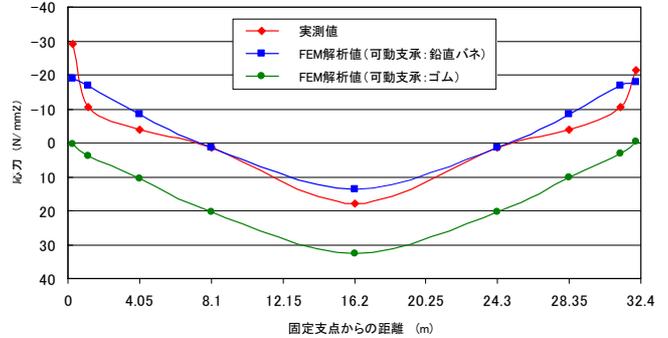


図-9 支点拘束実験
G2桁下フランジの応力分布図

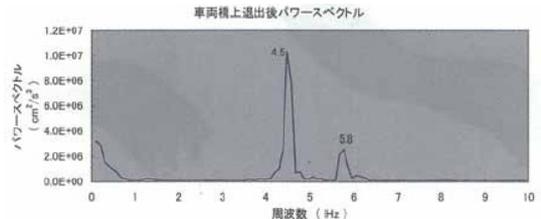
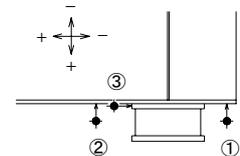


図-11 支点拘束実験のパワースペクトル

表-2 支承の変位とジャッキ反力の計測値

試験名	測定桁	鉛直変位① (mm)	鉛直変位② (mm)	水平変位③ (mm)	ジャッキ 反力 (kN)
試験1	G2桁	-0.01	0.37	2.18	0
	G3桁	-0.01	0.43	3.13	0
支点拘束 実験	G2桁	0.11	0.31	-0.04	305 (346)
	G3桁	0.08	0.31	-0.05	260 (330)

()内の反力はFEM解析値



5. 梨の木橋の実験2の結果と考察

図-12は、20tfと25tfのダンプトラックをG2桁の支間中央に载荷した場合のG2桁下フランジの応力分布を示したものである。計測値の応力分布は、可動支承をピンでモデル化したFEM解析とよく一致している。支点から約5mの区間では圧縮応力が生じ、その最大値は支間中央の引張応力の2倍程度になっている。このような応力分布は、両端固定桁に生じる応力分布と同様であり、また、落合橋の支点拘束実験の結果ともよく似ている。さらに可動支承の水平変位が0.08mmと微小であったこ

とから考えると、梨の木橋のBP 支承は、移動機能が低下し、ほとんど動かない。すなわち、支点拘束状態にあると言える。

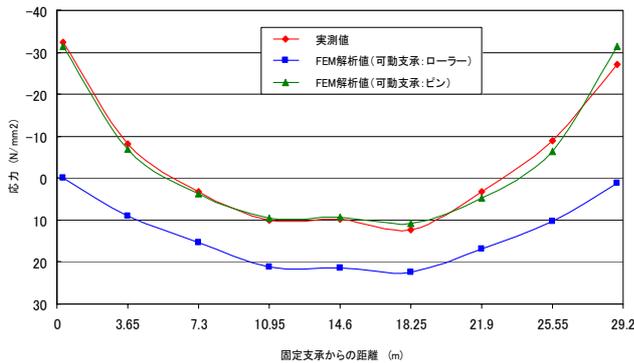


図-12 実験2 G2 桁下フランジの応力分布

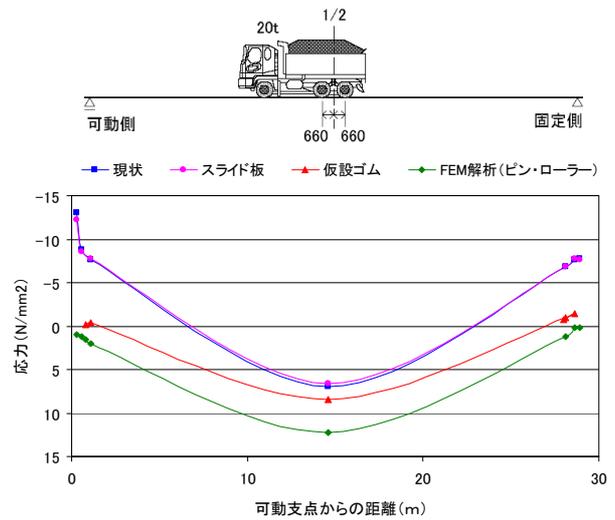


図-13 G2 桁下フランジの応力分布図

6. 支点拘束開放実験の結果と考察

支点拘束開放実験では支承構造を変えて計測を行った。本章では、これらの計測を以下のように表現する。

- ・既設のBP 支承で計測したもの・・・「現状」
- ・既設のBP 支承（可動）の上沓と下沓の間にテフロン板を挿入して計測したもの・・・「スライド板」
- ・既設のBP 支承（可動）に替えて仮設のゴム支承を設置して計測したもの・・・「仮設ゴム」

6.1 静的載荷試験の結果

表-3 は、G2 桁下フランジの計測値と FEM 解析値を示したものである。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」は支点から 0.3m の値が可動支点と固定支点で異なっている。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。しかし、固定支点から 0.3m の値を除くと、実験2 の結果と同様のひずみ分布を示すことから、固定支点から 0.3m 以降の値は信頼できると判断し、この値を用いて検討した。

図-13 は、計測値と FEM 解析値（支点条件ピン・ローラー）の応力分布である。表-4 は、支承の変位及び

主桁のたわみ角の計測値と FEM 解析値をまとめたものである。

6.2 スライド板の考察

(1) 支点拘束の開放

「スライド板」の応力値は、「現状」の応力値及び支点条件ピンの FEM 解析値とほぼ同じである。また、支承の水平変位も「現状」と同じ 0.05mm である。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、実験を行う前に BP 支承のサイドブロックを取外したことにより、これまで拘束されていた鉛直方向の動きが自由になったことが要因と思われる。

以上の計測結果から、「スライド板」では支点拘束は開放されなかったと言える。

(2) 回転機能の回復

支承の回転角は支点近傍の主桁のたわみ角で評価することができる⁵⁾。ここでは、このたわみ角を用いて、支承の回転機能を評価する。

回転機能の正常値を支点条件ピン・ローラーの FEM 解析値とする。この正常値とたわみ角の計測値の比率から回転機能を評価した。

表-3 G2 桁下フランジの計測値と解析値（応力）

単位：N/mm²

種別、支点状態		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	-13.0	-8.8	-	-7.6	7.0	-6.8	-7.6	-7.8
	スライド板	-12.2	-8.6	-	-7.8	6.6	-6.8	-7.8	-7.6
	仮設ゴム	-	-	-0.2	-0.4	8.4	-1.0	-1.4	-0.8
FEM 解析値	ピン・ローラー	1.0	1.2	1.6	2.0	12.2	1.2	0.2	0.2
	ピン・ピン	-13.0	-11.0	-9.8	-6.6	6.6	-8.8	-10.2	-12.6
	ピン・ゴム	-	-	0.4	0.8	11.6	0.8	0.4	0

$$\text{支承の回転機能率} = \frac{\text{主桁たわみ角の計測値}}{\text{主桁回転角の解析値}} \times 100$$

「現状」の回転機能率35%に対して「スライド板」の回転機能率は46%となり、スライド板を設置したことにより支承の回転機能はわずかに回復した。

次に、支承の回転機能と主桁下フランジの圧縮応力の関係を見る。主桁下フランジの圧縮応力は、「現状」と「スライド板」は同値である。「スライド板」の回転機能が向上しても支点近傍に生じる主桁の圧縮応力は軽減されていない。さらに、「現状」と「スライド板」の支承変位が同値であったことを考慮すると、支点拘束によって生じる主桁下フランジの圧縮応力の大きさは、支承の回転機能より水平移動機能の影響を受けているものと考えられる。

表-4 支承の水平変位と主桁のたわみ角

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 (μR)
種別, 支点状態			
計測値	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・ローラー	1.04	457
	ピン・ピン	0	27
	ピン・ゴム	0.96	408

(3) 水平移動機能の回復

設計上の摩擦係数は「現状」が $\mu=0.15$ 、「スライド板」が $\mu=0.1$ である⁴⁾。「スライド板」で支承の摩擦抵抗を小さくしても、水平移動機能は「現状」と同じであった。

一般に、テフロン板の摩擦係数は、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る。テフロン板に関する技術資料⁶⁾では、設計摩擦係数 $\mu=0.1$ における基準面圧を $20N/mm^2$ として、摩擦係数比と面圧の関係式を示している。

本実験における「スライド板」の面圧は $12N/mm^2$ で、上述した面圧の関係式からスライド板設置後の支承摩擦係数を推定すると約0.12になる。現場では錆や汚れ等の影響も受けることから、面圧の要素だけでは実際の摩擦係数を推定することはできない。しかしながら、本試験の結果を見る限り、既設のBP支承を設計摩擦係数($\mu=0.15$)のレベルまで改善しても、水平移動機能は回復しないようである。

6.3 仮設ゴムの考察

可動支承を「現状」から「仮設ゴム」に替えると、「現状」で生じていた支点近傍の圧縮応力は減少し、その値は支点条件をピン・ローラーでモデル化した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

測値とそれらの正常値（支点条件ピン・ローラーのFEM解析値）の比率は、それぞれ84%、85%となり「現状」での比率5%、35%に比べ大幅に改善した。

一方、支間中央の応力は、計測値と正常値の比率が69%であり、「現状」の比率57%と比べ支点拘束の影響は回復傾向を示したものの、水平変位とたわみ角の比率84%、85%に比べ回復の程度は小さかった。

この原因として、支点拘束によって主桁に生じていた圧縮力が支承取替え後も残存し、その圧縮力が支間中央の引張応力を軽減しているものと考えられる。FEMモデルを用いた実験結果の再現では、主桁の中立軸に450KNの圧縮力を作用させた時、下フランジの応力値が計測値とほぼ一致した。

6.4 動的载荷試験の結果と考察

動的载荷試験では、試験車両が橋面上から退出したあとの応答加速度データからパワースペクトルを求め、卓越振動数を抽出した(図-14, 15, 16)。それら値とFEMモデルによる固有振動数解析の結果をまとめたのが表-5である。

表-5 固有振動数の計測値と解析値の比較

モード		曲げ1次モード	ねじれ2次モード
種別, 支点状態			
計測値	現状	5.2	6.4
	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

曲げ一次モードの計測値を見ると、支点拘束状態の「現状」と「スライド板」の固有振動数は、支点拘束がほぼ開放された「仮設ゴム」の1.27倍となっている。この傾向はFEM解析でも同様であり、支点条件ピン・ピンの固有振動数は、支点条件ピン・ゴム及びピン・ローラーのそれぞれ1.29倍、1.61倍になる。この結果から、支承機能が低下している橋は、そうでない橋に比べ、固有振動数が約30%以上高くなるようである。また、振れモードでも、支点拘束が強くなると固有振動数が高くなる傾向にあるが、その比率は5%~18%程度で曲げ一次モードの増加率に比べ小さい。

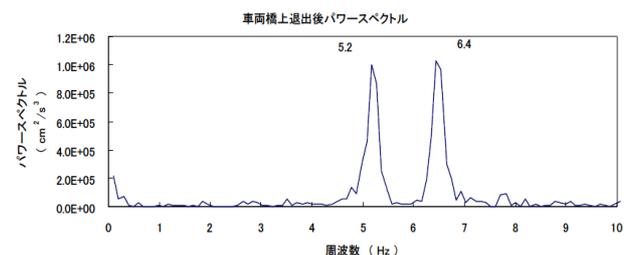


図-14 「現状」のパワースペクトル図

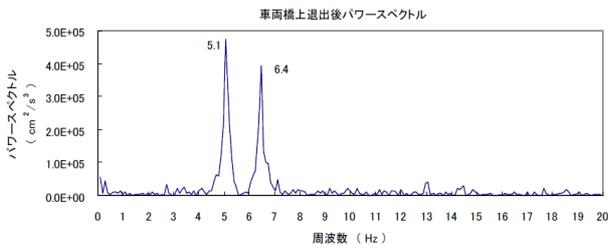


図-15 「スライド板」のパワースペクトル図

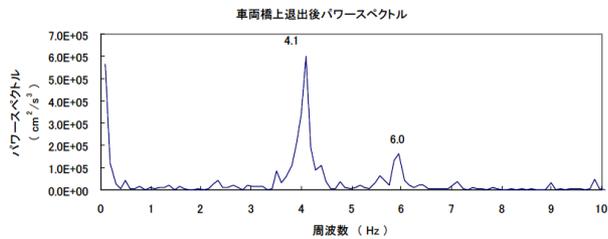


図-16 「仮設ゴム」のパワースペクトル図

7. 支承機能低下が上部構造に及ぼす影響

これまでの実験結果を踏まえ、支承機能低下が上部構造にどのような影響を及ぼすかについて、主桁、横桁及び対傾構の応力度に着目して検討した。

(1) 摩擦抵抗力の設定

支承機能が低下した橋でも、ある大きさの外力が作用すると、支承が動き支点拘束が開放されると考えられる。この場合、支点の拘束力が最大となるのは、支承が動く直前で「水平支承反力 ≒ 支承の摩擦抵抗力」となる状態である。本検討では、支承の摩擦係数を $\mu=0.8$ として摩擦抵抗力を算定した。摩擦係数 $\mu=0.8$ は、無潤滑な状態の鋼と鋼の摩擦係数の最大値⁴⁾を採用したものである。なお、今回の実験結果から梨の木橋の支承の摩擦係数を求めると $\mu \geq 0.55$ であった。

(2) 検討条件

以下に示す条件を設定して、支点拘束の影響を検討した。

- ・対象橋梁は、梨の木橋とする。
- ・支承機能が低下した橋の解析モデルは、支点条件を「ピン・ピン」とした FEM モデルとする。
- ・支承機能が正常な橋の解析モデルは、支点条件を「ピン・ローラー」とした FEM モデルとする。
- ・支承機能が低下した橋の支点拘束力は、支承の摩擦係数を $\mu=0.8$ として算定する。
- ・橋に作用する常時の外力として、活荷重 (L-20, L-14) と温度差を考慮する。
- ・架設当時は支承機能が正常であったと考えられるため、死荷重による支点拘束力は考慮しない。よって、死荷重については、鉛直反力のみを考慮する。

(3) 検討ケースの設定

表-6 は、支点条件をピン・ピンとした梨の木橋の FEM モデルに、活荷重を載荷した時に生じる水平支承反力と支承摩擦抵抗力の値を示したものである。摩擦抵抗力は死荷重と活荷重の鉛直反力の合計に摩擦係数 0.8 を乗じた値である。表-6 に示すとおり、活荷重のみを載荷した場合は、「水平支承反力 ≒ 支承の摩擦抵抗力」の状態にはならないため、活荷重に温度荷重を組み合わせる検討ケースを設定した。

表-7 は、活荷重と温度荷重を組み合わせる検討ケースである。死荷重のみが作用する状態では、温度差 8°C の時「水平支承反力 (305kN) ≒ 摩擦抵抗力 (306kN)」となる。よって、この状態を検討ケースとした。

活荷重が載荷する状態では、表-6 で示したとおり、L-20 では水平支承反力が摩擦抵抗力を上回り支点拘束が開放されてしまうため、L-14 で検討した。L-14 を載荷すると桁が伸びる方向に水平支承反力が発生する。よって、同方向に伸びるプラスの温度差を加えて「水平支承反力 ≒ 摩擦抵抗力」となる状態を求め「L-14 + 温度差 +1°C」を検討ケースとした。

一方、マイナスの温度差で桁が縮む方向に水平支承反力が発生する状態では、L-20 を載荷しても摩擦抵抗力が水平支承反力を上回る。しかし、温度差が -8°C を越えると支点拘束は開放されるので、-8°C を超える温度差と L-20 の組み合わせはない。よって、「L-20 + 温度差 -8°C」を検討ケースとした。

以上に加え、梨の木橋の設計時の状態（支承機能が正常な状態）を検討ケースとした。

表-6 G2 桁の水平支承反力と支承摩擦抵抗力

荷重	単位: kN		
	鉛直反力	水平支承反力	摩擦抵抗力
死荷重	382	—	306
試験車両 (20tf+25tf)	88	257	376
L-20	236	560	494
L-14	165	392	438

表-7 検討ケース

検討ケース	単位: kN	
	水平支承反力	摩擦抵抗力
温度差 8°C	305	306
L-14, 温度差 +1°C	415	438
L-20, 温度差 -8°C	255	494
L-20 (設計時)	—	—

(4) 検討結果

図-17 は G2 桁上フランジの応力分布を、図-18 は G2 桁下フランジの応力分布を示したものである。これらの応力には死荷重応力は含まれていない。表-8 は各検討ケースの最大応力に死荷重応力を加えた値である。

図-17, 図-18の外力のみが作用しているケースでは、上フランジと桁端部の下フランジでL-20(設計時)の応力値を超えるケースがある。しかし、表-8に示すように、死荷重応力を加えて比較すると、L-20(設計時)の応力とほぼ同じになる。上フランジ及び下フランジの許容応力度は、それぞれ241.5N/mm², 210N/mm²なので全てのケースが許容応力度内に収まる。また、横桁及び対傾構の応力も主桁と同様の傾向を示す(表-9)。

以上の検討から、支承機能が低下し、支点拘束力が無潤滑な状態の鋼と鋼の摩擦抵抗レベルまで達しても、上部構造の安全性は確保できるものと考えられる。ただし、既設橋梁では架設誤差や下部工の移動等により上沓が移動制限装置に衝突し、温度の伸縮が拘束されている橋もある。このような橋では、安全性を確保できないことも有り得るため、今回の検討ケースだけではなく、橋の様々な状態を考慮した検討が必要であると思われる。

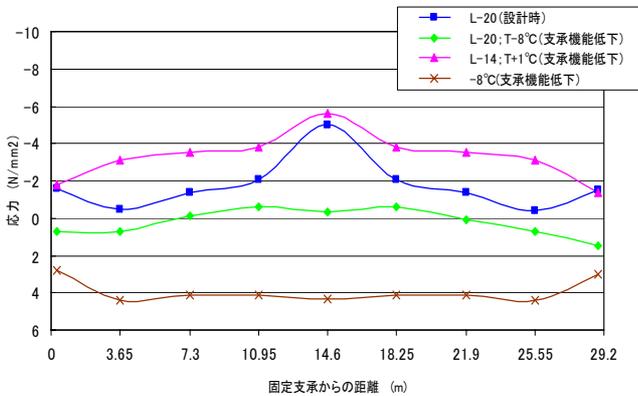


図-17 G2桁上フランジの応力分布

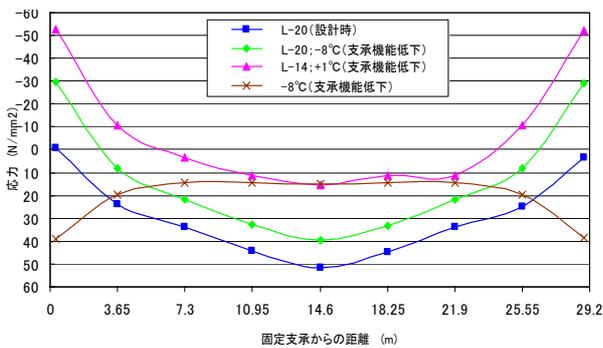


図-18 G2桁下フランジの応力分布

表-8 主桁の部材最大応力

荷重	支承機能の状態	支点からの距離	単位: N/mm ²		
			0.3m	7.3m (スパン1/4点)	14.6m (スパン1/2点)
L-20(設計時)	正常	上フランジ	-42	-162	-213
		下フランジ	22	139	187
L-20, -8°C	機能低下	上フランジ	-39	-159	-211
		下フランジ	-21	130	175
L-14, +1°C	機能低下	上フランジ	-42	-163	-213
		下フランジ	-44	108	188

表-9 横桁, 対傾構の部材最大応力

荷重	支承機能の状態	横桁 フランジ応力	単位: N/mm ²
			対傾構 水平材応力
L-20(設計時)	正常	-79.7	26.7 (下弦材)
L-14, +1°C	機能低下	-75.8	27.0 (下弦材)
L-20, -8°C	機能低下	-77.9	24.8 (下弦材)

8. まとめ

本研究で得られた検討結果を以下に取りまとめる。

- (1) ゴム支承を有する橋の挙動は、ゴム支承を適切(支承の物性値及び力学特性に合うソリッド要素またはバネ要素)にモデル化したFEM解析で精度よく表すことができる。
- (2) 支承機能が低下している橋の挙動は、支点条件をピン・ピンとしてモデル化したFEM解析で精度よく表すことができる。
- (3) 支承機能が低下している橋では、主桁下フランジに圧縮応力が発生する。圧縮応力の大きさは、支承の拘束度合いに影響される。
- (4) 支承機能低下の有無は、橋の固有振動数から判定することが可能である。
- (5) 梨の木橋では、L-20 または、8°Cの温度差が作用した時、支点拘束が開放されると考えられる。
- (6) 梨の木橋では、支承機能が低下し、支点拘束力が無潤滑な状態の鋼と鋼の摩擦抵抗レベル ($\mu=0.8$) まで達しても、常時における主桁、横桁及び対傾構の応力度は、許容応力度を超えることはなかった。

参考文献

- 1) 社団法人 岩手県土木技術センター: 道路橋設計荷重の変更による既設橋梁上部工に及ぼす影響 第4回共同研究報告書, 2002.8
- 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) 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
- 4) 社団法人 日本道路協会: 道路橋支承便覧, pp.35, 2004.4; 1991.7; pp.54, 1991.7
- 5) 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定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, 2008.3
- 6) 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

(2009年9月24日受付)