

(41) 複合トラス橋（志津見大橋）の 実橋載荷実験

吉川 卓¹・藤原 浩幸²・深田 宰史³・正司 明夫⁴・大木 太⁵

¹正会員 オリエンタル建設株式会社 第二技術部（〒102-0093 東京都千代田区平河町2-1-1）

E-mail : taku.yoshikawa@oriken.co.jp

²国土交通省 中国地方整備局（〒690-3312 島根県飯石郡飯南町八神666-1）

E-mail : fujihara-h87me@cgr.mlit.go.jp

³正会員 金沢大学 工学部 土木建設工学科（〒920-8667 石川県金沢市小立野2-40-20）

E-mail : saiji@t.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 オリエンタル建設株式会社 第二技術部（〒102-0093 東京都千代田区平河町2-1-1）

E-mail : akio.shoji@oriken.co.jp

⁵正会員 オリエンタル建設株式会社 第二技術部（〒102-0093 東京都千代田区平河町2-1-1）

E-mail : futoshi.ooki@oriken.co.jp

本研究では、PC複合トラス橋である志津見大橋における固有振動数、減衰定数および衝撃係数といった動的特性を把握することを目的として、総重量を196kNに調整した試験車両を用いた載荷実験を行った。実験項目は、静的載荷実験、衝撃加振実験および車両走行実験とし、上下床版および鋼トラス材のひずみ、および主桁の速度応答波形の計測を行った。また、実験結果をFEM解析モデルを用いた固有値解析結果と比較することで解析モデルの妥当性を示すとともに、同モデルを用いたシミュレーション解析により、本橋の衝撃係数についての検討を行った。

Key Words : PC composite truss bridge, loading test, vehicle's movement, impact coefficient

1. はじめに

志津見大橋¹⁾は、島根県飯石郡飯南町志津見に建設された橋長280mの5径間連続PC複合トラス橋で、志津見ダムの建設に伴い、一部が付け替えとなる県道川本一波多線の湖面を渡る橋梁である。付近には、大山隠岐国立公園の一部をなす三瓶山や、東三瓶フラワーバレーなど観光ゾーンの中心に位置することから、「志津見ダム付替道路景観検討委員会」において、地域の魅力づくりに貢献するシンボルとして、透明感がありながらかつコストを意識した形式として本構造が採用された。本橋は、特に曲弦トラス構造を除くと、国内で初めての桁高変化を有する複合トラス橋である。また、P3橋脚付近においては、PC複合トラス桁とPC箱桁が連続した構造となっており、こちらは世界で初めての構造である。

我が国におけるPC複合トラス橋の施工実績は、現在のところ数が少ないため、実橋の挙動に関する研究は木ノ川高架橋における載荷実験²⁾についての報告があるのみで、十分に把握できているとは言い難い。

特に、本構造の更なる長支間化を考える場合、耐震性

や耐風性を確保する上でも減衰定数等の動的特性を把握することは重要であると考えられる。また、道路橋示方書の衝撃係数は複合トラス橋に関する規定はないため、道路橋示方書の衝撃係数が本橋に適用可能かを確認する必要があると考えられる。そこで、本研究では、志津見大橋における動的特性を把握することを目的として、試験車両を用いた載荷実験を行った。また、FEMモデルによる車両走行のシミュレーション解析を行い、本橋における衝撃係数に関する検討を行った。

以下に、志津見大橋の橋梁概要を示す。

[橋梁概要]

構造形式：PC5径間連続複合トラス橋

橋 長：280m

支 間 長：64.0+75.0+60.0+45.0+34.0m

全 幅 員：10.750m（有効幅員車道7.25+歩道2.50m）

桁 高：6.500m～2.500m（PC複合トラス部）

3.500m～2.500m（PC箱桁部）

平面線形：R=180，A=90m～R=∞

縦断勾配：横断5.0%片勾配～2.0%両勾配 縦断1.00%

表-1 実験概要

実験	概要
静的載荷実験	試験車両による影響線載荷を行い、各断面のひずみ、主桁のたわみを計測する。また、結果を骨組解析モデルによる解析結果と比較し、解析モデルの妥当性を検証する。
衝撃加振実験	試験車両の前輪を高さ 10cm の枕木上より落下させたときの主桁に生じる自由減衰振動の計測を行い、固有振動数、減衰定数を算出する。また、FEM 解析モデルにより算出した固有振動数と比較することで、解析モデルの妥当性を検証する。
車両走行実験	試験車両を一定速度で走行させたときの、主桁の動的応答を計測する。また、FEM 解析モデルを用いた車両走行解析結果と比較し、解析手法の妥当性を検証する。

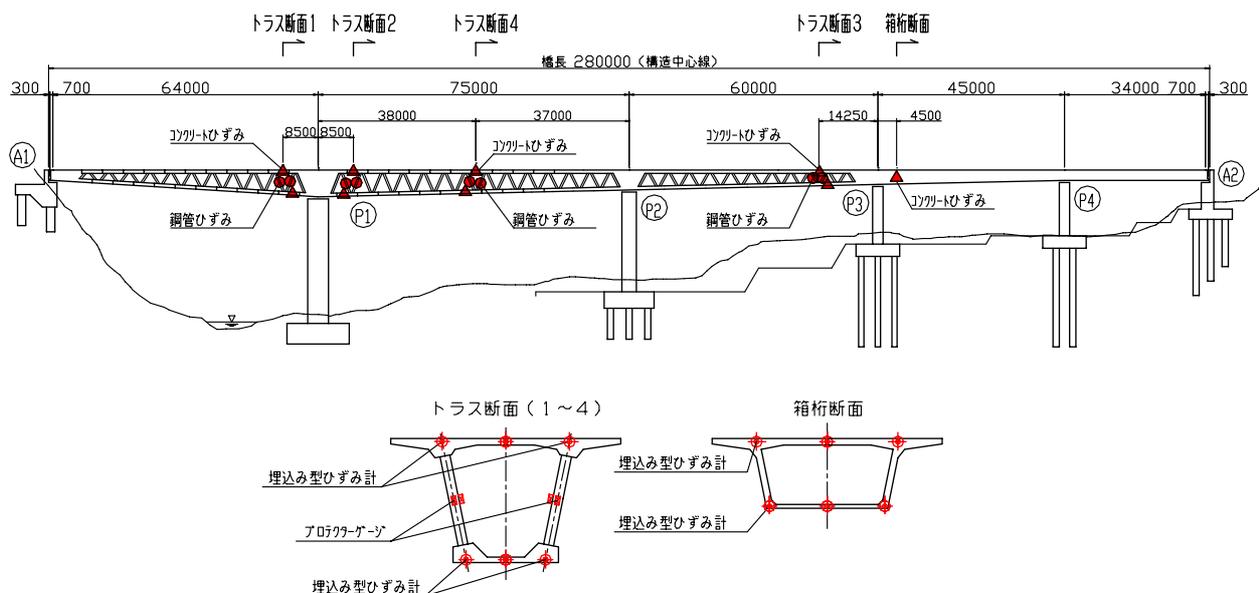


図-1 計測断面

2. 実験概要

本実験の概要を表-1 に示す。全ての実験は、総重量を196kNに調整した試験車両を使用して行った。本実験における計測断面を図-1 に示す。計測断面は、支間長が最大となるP1-P2径間支間中央断面（トラス断面4）、張出し施工時の応力状態の計測を行ったP1橋脚を挟む2断面（トラス断面1、2）、および複合トラス部とPC箱桁部が連続するP3橋脚を挟む2断面（トラス断面3、箱桁断面）である。各断面の上下床版には埋込型ひずみ計、鋼トラス材にはひずみゲージを設置し、荷重載荷時におけるひずみを計測した。また、静的載荷実験では、レベルを使用して主桁のたわみを計測し、衝撃加振・車両走行実験では、地覆上に設置したサーボ型速度計により主桁の動的応答を計測した。なお、解析モデルにおける境界条件を設定するために、各ゴム支承に変位計を設置し実験時のゴム支承の挙動を計測した。また、P1橋脚天端には加速度計を設置し、橋脚天端の振動の計測を行った。

3. 実験結果

(1) 静的載荷実験

静的載荷実験における載荷位置を図-2 に、実験状況を写真-1 に示す。実験では、試験車両10台（2台並列配置）による影響線載荷を行った。荷重載荷位置は、車頭間隔を10mとし、複合トラス部については先頭車両の前輪が上床版の鋼トラス格点位置となるよう設定し、5m間隔で車両を移動させた。また、PC箱桁部については、3台目車両の前輪位置が支間中央と一致する載荷位置とした。図-3~5 に実験結果として、P1-P2径間支間中央断面における鉛直変位および下床版ひずみ、鋼トラス材ひずみを示す。図中、横軸はA1支承からの距離を示し、縦軸のひずみ値は圧縮を正としている。また、解析値は設計計算で使用した骨組解析による計算値であり、実験値は2回行った載荷の平均値をプロットしている。いずれの結果も、解析値は実験値とほぼ一致していることから、設計計算における骨組解析モデルの剛性評価は妥当であったものと判断される。

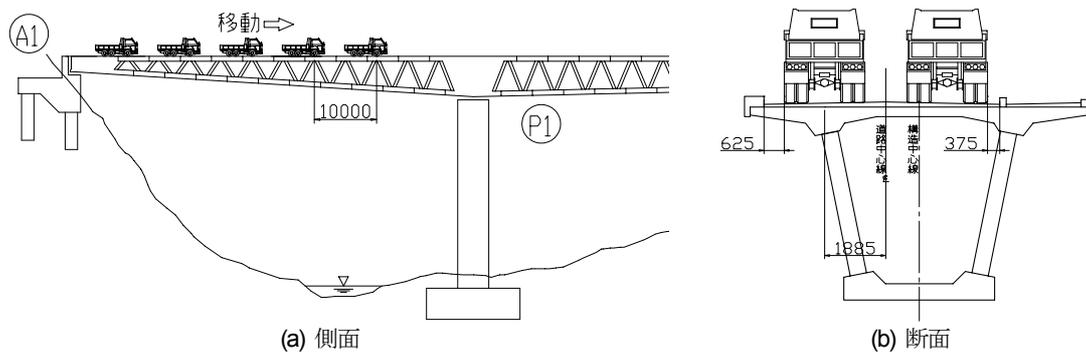


図-2 静的荷重実験荷重位置



写真-1 静的荷重実験状況

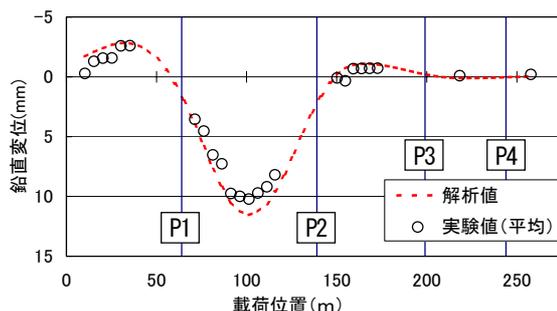


図-3 鉛直変位 (P1-P2 支間 1/2)

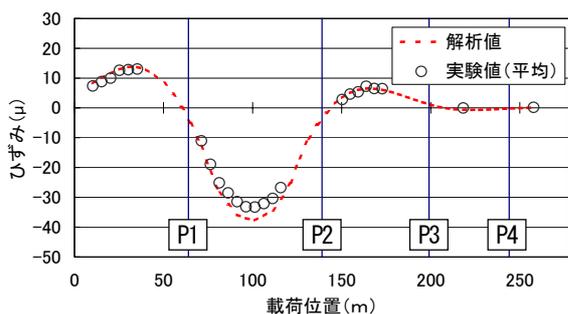


図-4 下床版ひずみ (P1-P2 支間 1/2)

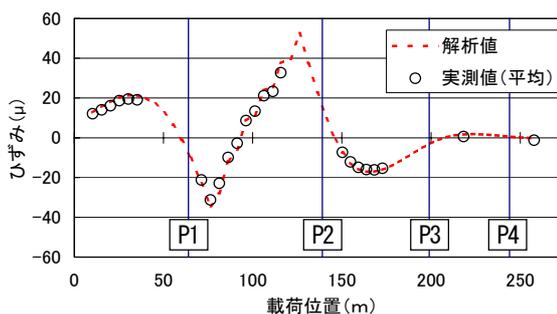


図-5 鋼トラス材ひずみ (P1-P2 支間 1/2)

(2) 衝撃加振実験

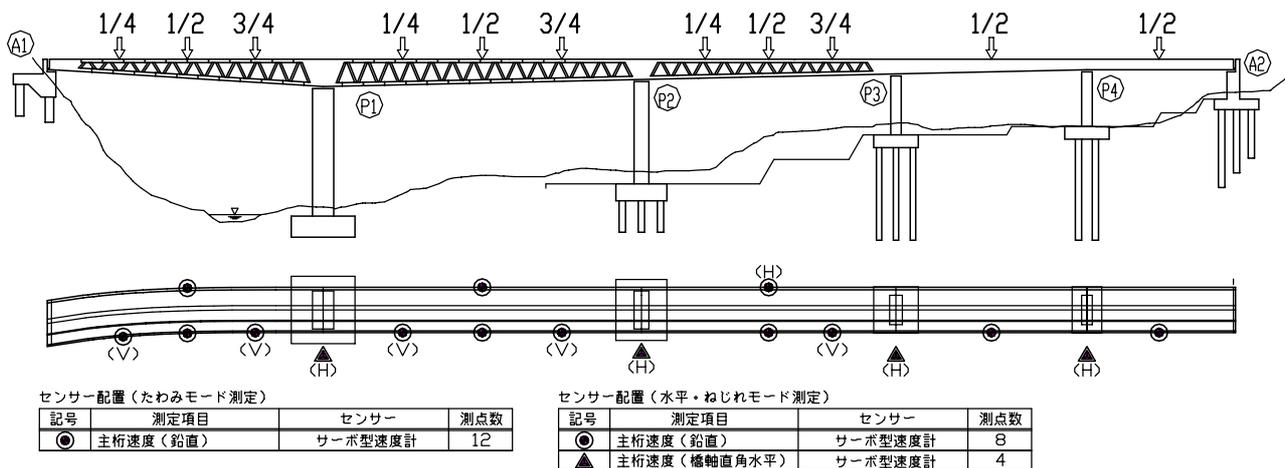
衝撃加振実験では、車両前輪を高さ10cmの枕木上から落下させたときの主桁の振動をサーボ型速度計を使用して測定し、固有振動数および減衰定数の算出を行った。荷重の荷重位置(図-6)は、複合トラス部については支間の1/4, 1/2, 3/4点とし、PC箱桁部については支間の1/2点とした。各荷重断面では、主桁の面内たわみモードに着目した構造中心線上での荷重、ねじれモードに着目した偏心荷重を行った(図-7)。なお、限られた速度計の測点数で各モードの振動波形を効率的に計測できるよう、構造中心荷重と偏心荷重では速度計の配置位置を変更している。写真-2に衝撃加振実験状況を示す。

表-2に、衝撃加振実験より得られた各モードの固有振動数、減衰定数およびFEMモデルを用いた固有値解析の結果を示す。また、図-8, 9にFEM解析モデルによる固有振動モードを示す。なお、FEM解析におけるゴム支

承のバネ定数は、実験時のゴム支承のせん断変形量が微小(橋軸方向に0.1mm以下)であったことを考慮し、設計計算に用いたバネ定数の10倍とした。

実験値より得られた固有振動数に対する解析値の差は最大で約8%であるが、各モードに対して傾向がよく一致していることから、FEM解析モデルによる主桁および支承の剛性の評価は妥当なものであったと判断される。

減衰定数については、面内1次モードに対して0.5%と小さな値となっている。一方、過去に行われた橋梁の振動実験³⁾におけるPC連続桁橋(道路橋)の減衰定数と比較すると、本橋の減衰定数はその下限値程度となっており、PC複合トラス橋である木ノ川高架橋の振動実験結果²⁾(0.54%)とほぼ等しい値となった。このような結果となったのは、加振力が小さかったためゴム支承のせん断変形が微小となり、ゴム支承によるエネルギー吸収が小さかったこと、また、地盤への逸散減衰の影響が小さ



センサー配置（たわみモード測定）

記号	測定項目	センサー	測点数
●	主桁速度（鉛直）	サーボ型速度計	12

センサー配置（水平・ねじれモード測定）

記号	測定項目	センサー	測点数
●	主桁速度（鉛直）	サーボ型速度計	8
▲	主桁速度（橋軸直角水平）	サーボ型速度計	4

※(V)は面内モード測定時、(H)は水平・ねじれモード測定時、無印は共通で使用

図-6 衝撃加振載荷位置およびセンサー設置位置

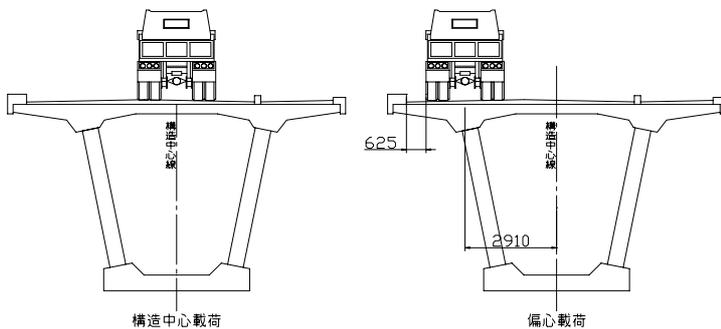


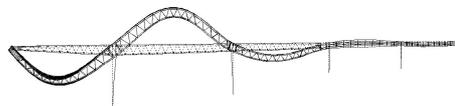
図-7 衝撃加振実験載荷断面図



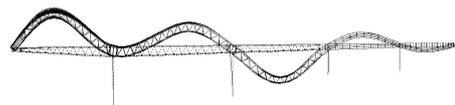
写真-2 衝撃加振実験状況

表-2 固有振動数および減衰定数

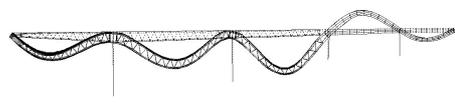
振動モード		固有振動数(Hz)		比率(%) 解析/実験	減衰定数 (%)
		実験値	解析値		
たわみ	1次	2.169	2.024	93.3	0.5
	2次	2.748	2.815	102.4	0.5
	3次	3.004	3.239	107.8	0.5
	4次	4.419	4.629	104.8	0.2
ねじれ	1次	4.117	3.865	93.9	1.0
	2次	4.701	4.606	98.0	0.4
	3次	6.178	5.959	96.5	0.3
	4次	6.428	6.439	100.2	0.5



(a) たわみ1次 (2.024 Hz)

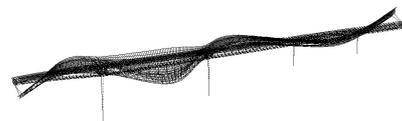


(b) たわみ2次 (2.815 Hz)

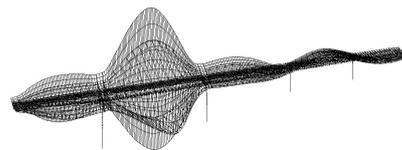


(c) たわみ3次 (3.239 Hz)

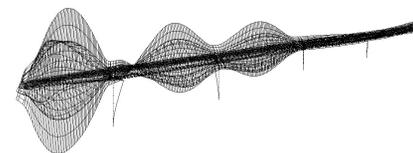
図-8 固有振動モード（たわみモード）



(a) ねじれ1次 (3.865 Hz)



(b) ねじれ2次 (4.606 Hz)



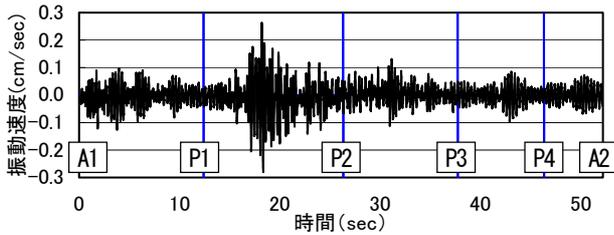
(c) ねじれ3次 (5.959 Hz)

図-9 固有振動モード（ねじれモード）

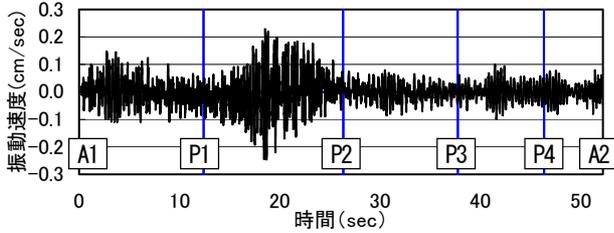
かったためと考えられ、減衰定数の評価については、詳細な検討が必要であると考えられる。

(3) 車両走行実験

車両走行実験では、橋面上に設置した速度計、上下床版に設置した埋込型ひずみ計、および鋼トラス材に設置したひずみゲージを用いて、車両走行時の動的応答波形

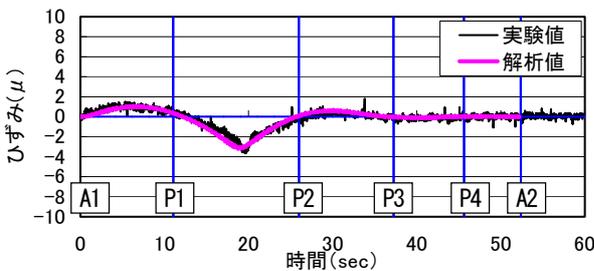


(a) 実験値

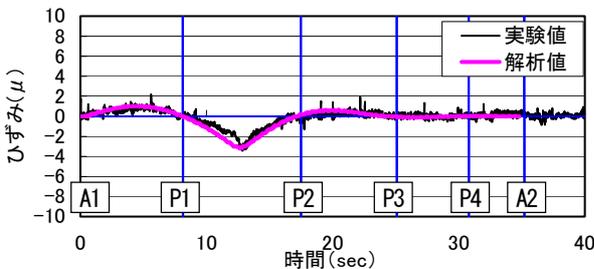


(b) 解析値

図-10 P1-P2 支間中央の速度波形 (20km/h 1台走行)



(a) 20km/h 1台走行



(b) 30km/h 1台走行

図-11 P1-P2 支間中央上床版のひずみ波形

の計測を行った。車両の走行ケースは、速度を20km/h, 30km/h, 40km/hの3ケースとし、連行する車両台数を1台, 2台, 4台の3パターン設定した。また、走行方向はA1側からA2側、およびA2側からA1側の2方向とした。なお、試験車両走行時の車頭間隔は20mに設定した。

図-10, 11 に実験結果の一例として、1台行時におけるP1-P2支間中央の速度波形および上床版のひずみ波形を示す。図中、横軸は車両の走行位置を時間で示しており、縦線は各橋脚を通過した時刻を示している。また、前述のFEM解析モデルを用い、実際の走行路面の凹凸を考慮したシミュレーション解析により算出した応答波形

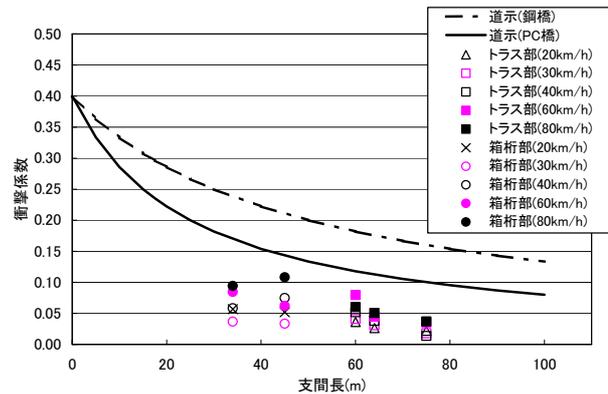


図-12 衝撃係数

を比較して示す。ここで、解析における減衰マトリクスはRayleigh減衰で仮定し、たわみ1次および、たわみ2次の振動数に対して衝撃加振実験で得られた減衰定数0.5%を設定した。速度波形は、振動振幅および波形の性状が実験値と解析値がほぼ一致した結果となっている。また、ひずみ波形についても解析値は実験値を精度よく評価している。この結果より、シミュレーション解析における解析モデルおよび解析手法は妥当なものであることが確認された。

4. 衝撃係数に関する検討

本構造は、PC複合トラス構造という特殊な構造であるため、道路示方書に規定されている衝撃係数⁴⁾が適用可能であるか確認する必要がある。したがって、上述のFEM解析モデルを用いたシミュレーション解析によって本橋の衝撃係数の検討を行った。なお、衝撃係数は、曲げモーメント応答による動的増幅率より評価し⁵⁾、設計活荷重列に相当する連行車両を載荷した。図-12は解析によって算出した衝撃係数であり、縦軸が衝撃係数、横軸が支間長を示している。支間長34m, 45mのプロットがそれぞれ通常のPC箱桁であるP4-A2径間、P3-P4径間の走行速度20km/h, 30km/h, 40km/h, 60km/h, 80km/hの衝撃係数、支間長60m, 64m, 75mのプロットがそれぞれPC複合トラス部であるP2-P3径間、A1-P1径間、P1-P2径間の各々の走行速度に対する衝撃係数である。

図には、道路橋示方書に示されている鋼橋とPC橋の衝撃係数も併せて示しているが、今回の解析結果はいずれもPC橋の衝撃係数を下回る結果となった。この結果から、直ちに本構造の衝撃係数がPC橋の衝撃係数を用いることで、安全側の設計であるとは言えず、さまざまな路面凹凸状態に対する検討や、ラーメン構造、単純桁構造等異なる構造に対しても検討する必要があると考えられる。過去に行われた衝撃係数に関する研究においても、本橋と同程度の支間長に対する解析結果は道路橋示

方書による衝撃係数をかなり下回っているため⁶⁾⁷⁾、どの程度の安全性を考慮することが必要とされるかで今後、本構造の衝撃係数が決定されるべきと考えられるが、本実験の範囲内では、設計で考慮した衝撃係数にPC橋の衝撃係数を用いても安全側の設計となるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、5径間連続PC複合トラス橋である志津見大橋を対象として、動的特性に関する実橋載荷実験を行い、固有振動数、減衰定数の算出を行った。また、実路面の凹凸を考慮したシミュレーション解析により、本橋の衝撃係数に関する検討を行った。その結果は以下の通りである。

- 1) 衝撃加振実験より得られた固有振動数は、FEMモデルにおける支承のバネ定数を設計計算に用いたバネ定数の10倍とすることで精度よく評価することができた。
- 2) 衝撃加振実験より得られた減衰定数は、たわみ1次モードに対して0.5%と小さく評価されたが、これは加振力が小さかったことが原因と考えられる。
- 3) 車両走行実験による動的波形と、実路面の凹凸の影響を考慮したシミュレーション解析より算出した動的波形は、その性状がよく一致していることから、本解析手法は妥当性なものであると考えられる。

- 4) 設計荷重列に相当する連行車両を載荷したシミュレーション解析によって算出された衝撃係数は、いずれも道路橋示方書におけるPC橋の衝撃係数を下回る結果となった。しかしながら、この結果から一概にPC複合トラス橋の衝撃係数に道路橋示方書の衝撃係数を用いることが安全側の設計であるとは言えず、各種構造形式や路面の凹凸状態に対しても検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 藤原浩幸, 榎木洋子, 正司明夫, 野呂直以: 志津見大橋の設計・施工, コンクリート工学, Vol. 43, No. 8, pp. 47-52, 2005.8.
- 2) 河野哲也, 鈴木伸一, 山野辺慎一, 南 浩郎: 鋼・コンクリート複合トラス橋(木ノ川高架橋)の振動特性, 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.285-288, 2003.10.
- 3) 角谷 務, 青木圭一, 山野辺慎一, 吉川 卓, 立神久雄: 波形鋼板ウェブ橋の振動特性 その2-振動解析-, プレストレストコンクリート, Vol. 45, No. 3, pp.35-43, 2003.5.
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, 2002.3.
- 5) 川谷充郎, 嶋田玲志, 田邊裕之: 桁橋の走行車両による不規則応答に基づく衝撃係数の評価法, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 741-748, 1989.3.
- 6) 山田善一, 小堀為雄: 活荷重に対する道路橋の動的応答-衝撃係数-に関する考察, 土木学会論文集, 第148号, pp.40-50, 1967.12.
- 7) 本田秀行, 小堀為雄: 走行自動車による3径間連続桁橋の動的応答と衝撃係数, 土木学会論文報告集, 第313号, pp. 13-22, 1981.9.

LOADING TEST OF PRESTRESSED CONCRETE COMPOSITE TRUSS BRIDGE (SHITSUMI OHASHI BRIDGE)

Taku YOSHIKAWA, Hiroyuki HUJIHARA, Saiji FUKADA,
Akio SHOJI and Futoshi OOKI

Shitsumi Ohashi is a PC composite truss bridge. In order to understand the dynamic characteristics of the bridge such as natural frequency, damping constant and impact coefficient, field tests have been carried out using vehicle with weight of 196kN. Tests included static loading test, impact loading test and test of moving vehicle. Strains of upper and lower slab, strain of steel truss and dynamic response of the bridge were measured. At the same time, analytical method has been established based on FEM analysis. By comparison the results of natural frequency by test and those by FEM analysis, the analytical method used in the study has been verified. Moreover, impact coefficient of this bridge has been examined by analyzing the bridge under moving vehicle.