

片山和也* 山本正寿**
永田敏春*** 大久保宣人****

概要

東九州自動車道の成恒橋（支間長53.0m）を対象として、鋼ポータルラーメン橋の変形挙動や剛結部の応力性状を把握するため、実橋載荷試験を実施した。また、計画的な予防保全を行う上で必要となる振動特性の初期値データを取得することを目的として、段差落下による振動試験も実施した。実橋試験では、活荷重載荷時の全体挙動、剛結部の応力性状および振動特性を計測して、FEM解析値との比較検証を行った。

静的載荷試験では、鋼ポータルラーメン橋の変形挙動およびひずみ分布に対して、計測値と解析値が良好な一致を示しており、FEM解析モデルの妥当性が検証できた。剛結部の応力性状は、鋼桁とRC橋台の境界部で応力集中が確認された。振動試験では、供用前の鋼ポータルラーメン橋の振動特性が取得できた。固有振動数は、鉛直たわみとねじれが非常に近接していた。

1. はじめに

近年、初期建設コストや維持管理コストの削減を目的として、RC橋台に鋼桁を埋め込み、支承や伸縮装置を省略した鋼ポータルラーメン橋の建設が増加している。

本形式では、温度変化による鋼桁の伸縮に追随する機能が制限されるため、橋台と盛土間に空隙が生じたり、剛結部近傍に舗装割れが発生することが懸念され¹⁾、適用支間長は30～50m²⁾とされている。

鋼ポータルラーメン橋に関する既往研究では、解析的検討や剛結部をモデル化した供試体による載荷試験の事例³⁾は、多数実施されているが、実構造物を対象とした載荷試験や振動試験の事例^{4),5)}は数例あるのみで、非常に少ないのが現状である。

本研究では、支間長53.0mの鋼ポータルラーメン橋である成恒橋を対象として、実橋載荷による変形挙動および剛結部の応力性状を把握するため、静的載荷試験を実施した。また、計画的な予防保全を行う上で必要となる振動特性の初期値データを取得することを目的として、段差落下等による振動試験も実施した。実橋試験では、活荷重載荷時の全体挙動、剛結部の応力性状および振動特性を計測して、FEM解析値との比較検証を行った。

2. 実橋載荷試験の概要

2.1 成恒橋の概要

東九州自動車道は、福岡県北九州市を起点として、東九州（大分・宮崎・鹿児島）を縦断し、鹿児島市に至る幹線道路である。このうち、椎田南～宇佐間は、既に供用中の福岡県側一般有料道路椎田道路と大分県側一般有料道路宇佐別府道路に直結し、北九州市内および大分市

内を結ぶ主要アクセスルートとして、重要な役割を果たすことが期待されており、早期供用を目指して建設中である。成恒橋は、東九州自動車道の椎田南～宇佐間に位置し、支間長53.0mを有する国内最大級の鋼ポータルラーメン合成2主I桁橋である⁶⁾。成恒橋の全景を写真-1に示す。

2.2 試験方法

静的載荷試験は、重量約400kNの50tラフタークレーン（以下、試験車という）を支間中央部の床版上に2台載荷して、変位とひずみを計測した。この載荷荷重は、設計活荷重の約40%に相当する。載荷ケースは、主桁G1、G2上の並列載荷と主桁G1側の偏心載荷とした。変位は、鋼桁支間長Lに対して、L/2、L/4、L/8点および橋台の鋼桁支点上を測点とし、光波測距儀により計測した。ひずみは、正曲げモーメント最大となる支間中央部、ならびに負曲げモーメント最大となる剛結部を着目断面とし、鋼桁と床版に設置したひずみゲージにより計測した。

振動試験は、外乱の少ない状態での常時微動観測、試



写真-1 成恒橋全景

* 橋梁事業部 大阪工場 設計部 設計課
*** 橋梁事業部 工事部 工事グループ 課長

** 橋梁事業部 大阪工場 設計部 生産情報課長
**** 博(工)橋梁事業部 大阪工場 設計部長

験車1台を支間中央部で段差落下させた強制振動，および試験車を走行させた交通振動をそれぞれ床版上に配置した加速度計で計測した．強制振動は，着目振動モードを鉛直たわみ1次とねじれ1次とし，試験車を幅員中央で段差落下することで鉛直たわみ振動を加振させ，主桁G1側で段差落下することでねじれ振動を加振させた．

変位および加速度の計測位置を図-1に示す．剛結部と支間中央部のひずみゲージの計測位置を図-2に示す．

なお，試験時においては，背面盛土がA1側が未施工，A2側が施工済，アスファルト舗装が未施工であった．

2.3 FEM解析方法

FEM解析は，鋼桁およびRC橋台を含めた全橋をモデル化して，汎用有限要素解析コードNASTRANで実施した．図-3に示すように解析モデルは，鋼部材をシェル要素，コンクリート部材をソリッドでモデル化した．

鋼桁と橋台の剛結部に設置する孔あき鋼板ジベル（以下，PBLという）は，鋼板部のシェル要素とコンクリート部のソリッド要素の間を並進3方向のバネ要素でモデル化した．PBLのずれ剛性は，既往の引抜き試験結果⁷⁾より，孔面積と鋼板厚に比例すると仮定して，次式より算出した．

$$K_{x,y} = 95000 \times (\phi^2 / 70^2) \times t \quad (1)$$

ここに， $K_{x,y}$ ：ずれ剛性(N/mm²)， ϕ ：孔径(mm)， t ：鋼板厚(mm)である．

背面盛土による受働抵抗は，道路橋示方書IV下部構造編⁸⁾に規定されている地盤反力度と変位の関係より，水平方向地盤反力係数の初期勾配を線形バネとしてモデル化した．背面盛土の地盤反力係数は，次式より算出した．

$$k_H = \alpha_k \cdot k_{H0} \cdot \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-3/4} \quad (2)$$

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha \cdot E_0 \quad (3)$$

ここに， k_H ：地盤反力係数(kN/m³)， α_k ：補正係数(=1.0)， k_{H0} ：直径0.3mの剛体円板による平板載荷試験の値に相当する水平方向地盤反力係数(kN/m³)， B_H ：背面土圧を受ける面の換算載荷幅(m)， α ：換算係数(=1.0)である．

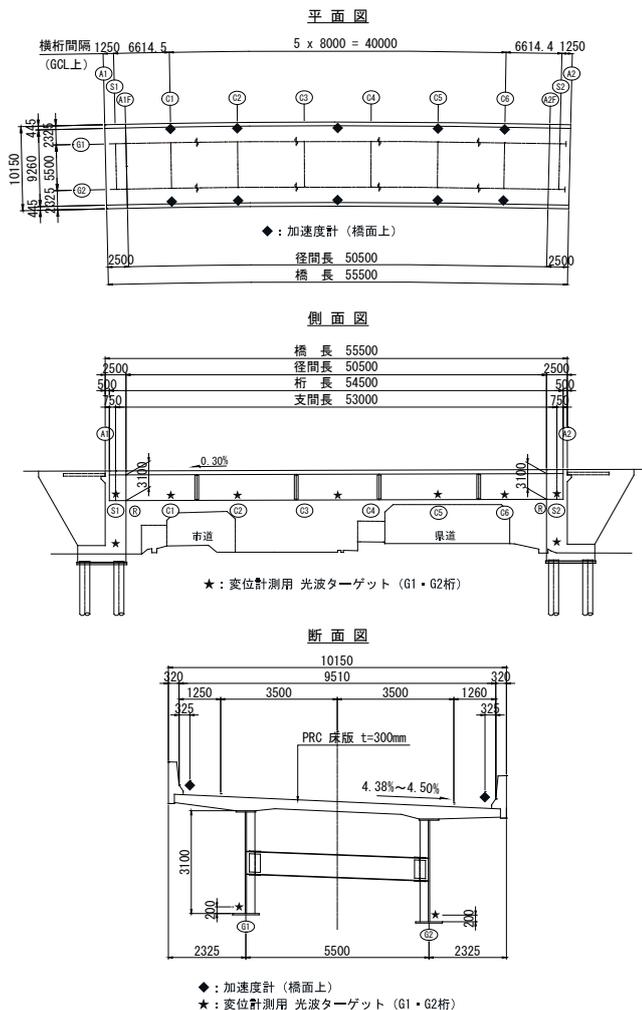


図-1 変位および加速度の計測位置

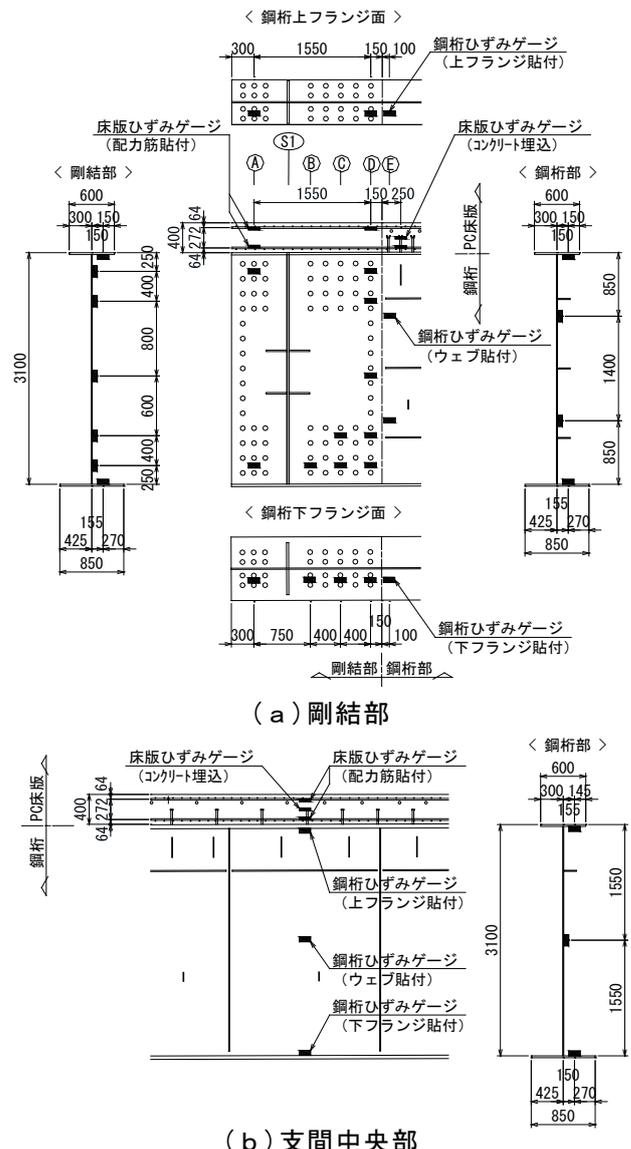


図-2 ひずみゲージの計測位置

試験時の背面盛土は、A1側が未施工、A2側が施工済であったため、A2側のみ背面盛土を線形バネでモデル化した。橋台基礎と地盤は、水平・鉛直・回転バネでモデル化した。背面盛土および基礎モデル化を図-4に示す。鋼桁とPC床版は完全合成とした。鋼部材およびコンクリート部材の材料定数を表-1に示す。線形条件は、平面線形のみ考慮して、縦断・横断勾配は無視した。メッシュサイズは、一般部が150mm程度、剛結部および支間中央部が100mmとした。

3. 試験および解析結果

3. 1 静的荷重試験

(1) 変形状

写真-2に示すように、支間中央部に試験車2台を静的荷重して変形状を計測した。並列荷重ならびに偏心荷重時における主桁G1の鉛直変位の計測値と解析値を図

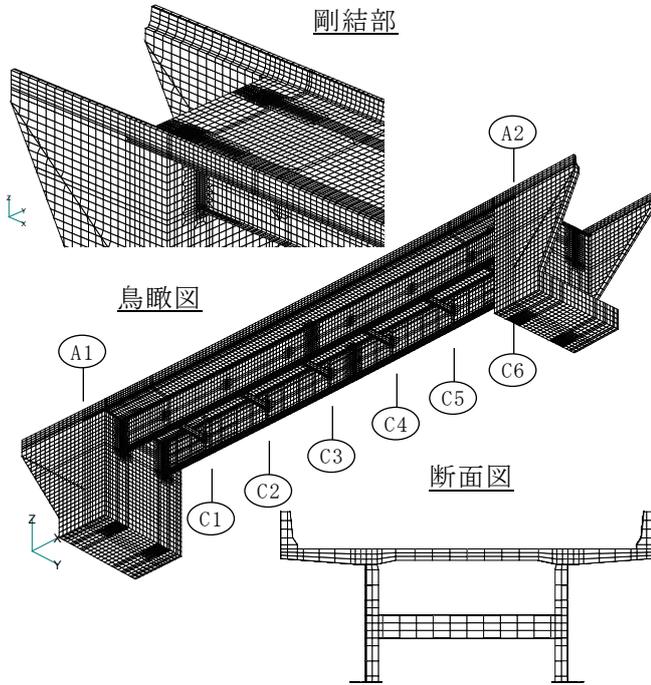


図-3 解析モデル

-5に示す。並列荷重した場合、支間中央部の変位は、計測値が3.8mm、解析値が4.7mmであった。偏心荷重した場合、支間中央部の変位は、計測値が5.9mm、解析値が6.3mmであった。いずれも、計測値は解析値より1~2割小さくなる傾向が認められた。その要因として、橋台基部に考慮した地盤バネが解析で用いた値よりも大きく、ほぼ固定状態に近い挙動を示したためと推察される。

また、支間中央部からA2側にかけて計測値と解析値の乖離が大きくなる傾向が認められた。これは、A2側橋台の背面盛土による軸圧縮力を線形バネでモデル化した際に、解析で用いたバネ値よりも大きく、ほぼ固定状態に近い挙動を示したためと推察される。

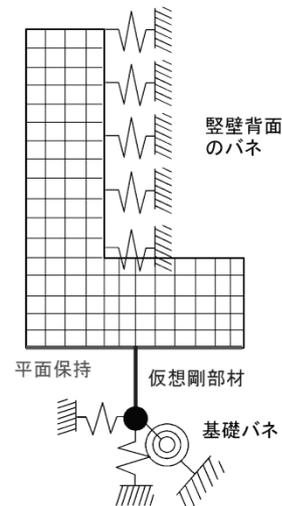


図-4 背面盛土および基礎モデル化

表-1 材料定数

	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	線膨張係数	備考	
鋼桁	2.00E+05	0.3	1.20E-05		
橋台	一般部	2.80E+04	0.167	1.00E-05	$\sigma_{ek} = 30\text{N/mm}^2$
	剛結部	2.98E+04	0.167	1.00E-05	$\sigma_{ek} = 36\text{N/mm}^2$
PC床版	3.10E+04	0.167	1.20E-05	$\sigma_{ek} = 40\text{N/mm}^2$	
壁高欄	2.80E+04	0.167	1.20E-05	$\sigma_{ek} = 30\text{N/mm}^2$	



(a) 並列荷重



(b) 偏心荷重[主桁 G1 側]

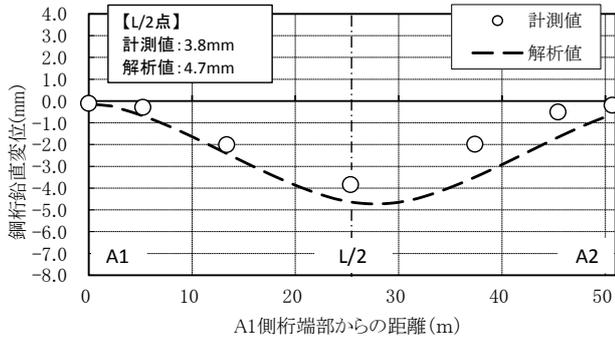
写真-2 静的荷重状況

(2) ひずみ分布

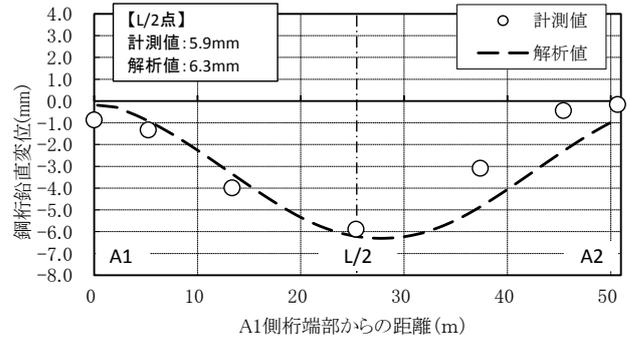
並列載荷時における支間中央部の主桁G1橋軸方向ひずみ分布の計測値と解析値を図-6に示す。計測値と解析値は概ね一致している。支間中央部では、中立軸が上フランジ近傍に位置しており、合成桁としての挙動を示していることが確認できた。

一方、負曲げ領域となる剛結部では、図-7に示すように、境界部の鋼桁下フランジ側で $\sigma_x = -12.3\text{N/mm}^2$ の高い圧縮応力が発生している。剛結部内の鋼桁は、剛結

前面側(D~Cライン)の鋼桁ウェブ下端および下フランジで圧縮応力が発生するのみで、それ以外にはほとんど応力が発生していない。並列載荷時における剛結部の主桁G1橋軸方向ひずみ分布の計測値と解析値を図-8に示す。剛結部では、境界付近(E~Cライン)の主桁下フランジおよびウェブ下端に大きなひずみが発生しているが、境界部より鋼桁埋込み長の1/2以上(B~Aライン)になると、ひずみがほとんど発生していない。計測値と解析値は概ね一致している。



(a) 並列載荷



(b) 偏心載荷[主桁 G1 側]

図-5 主桁 G1 の鉛直変位

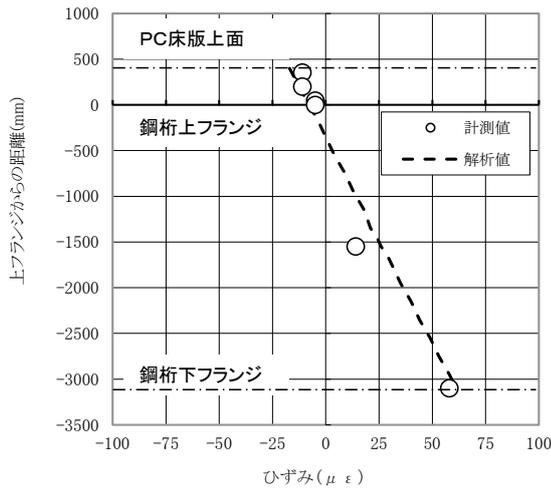


図-6 並列載荷時における支間中央部の主桁 G1 橋軸方向ひずみ分布

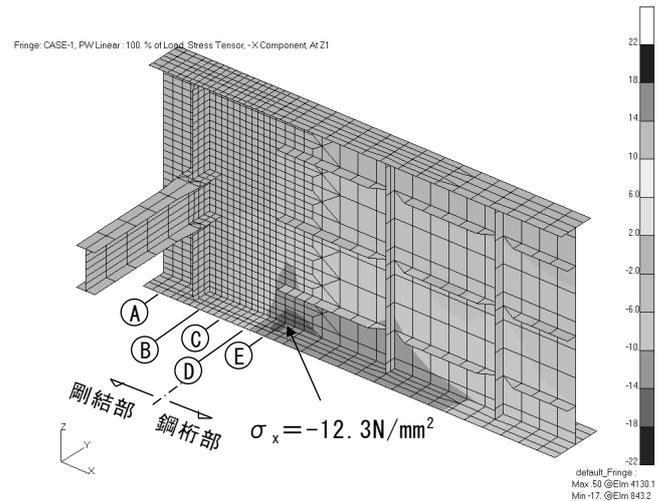


図-7 並列載荷時における剛結部の主桁 G1 橋軸方向応力コンター

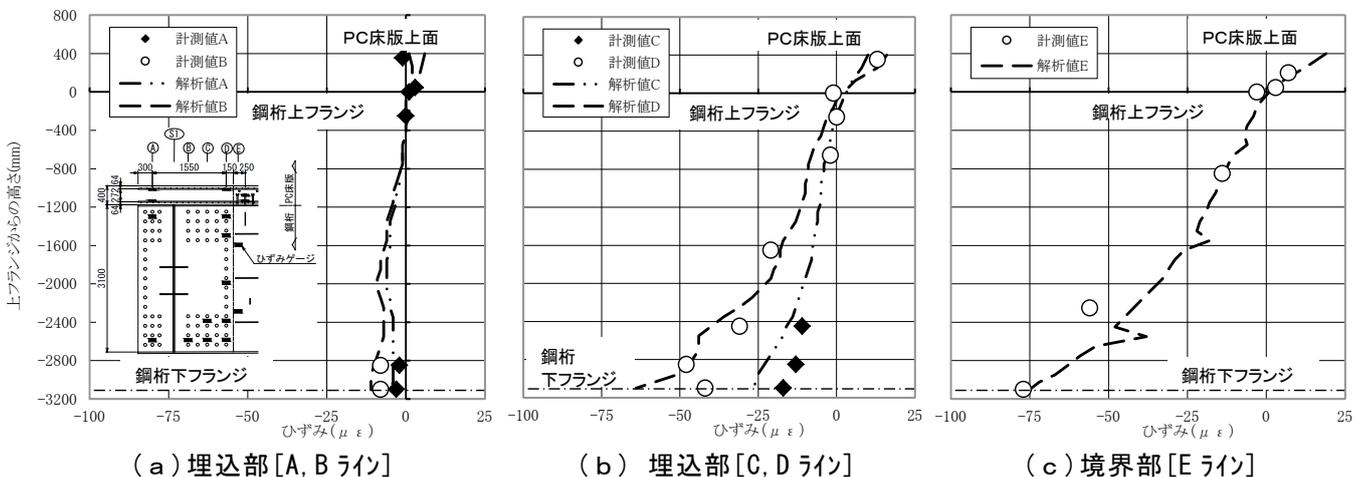


図-8 並列載荷時における剛結部の桁 G1 橋軸方向ひずみ

3. 2 振動試験

(1) 常時微動

微小振幅域で計測された常時微動の応答波形とスペクトルを図-9に示す。加速度の最大振幅は、支間中央部で0.7gal程であった。卓越周波数は、4.4Hzが最も卓越しており、4.2Hzにも卓越周波数が確認された。これらは、鉛直たわみ1次とねじれ1次の振動モードに相当する。鉛直たわみとねじれの振動数が近接しているため、常時微動で計測された応答波形は2つの振動成分が連成したものとなっている。

(2) 段差落下

写真-3に示すように、支間中央部で試験車の後輪を枕木から段差落下させ、強制振動による応答波形を計測した。鉛直たわみ振動に着目する場合には、幅員中央で試験車を段差落下させた。ねじれ振動に着目する場合には、主桁G1上で試験車を段差落下させた。なお、試験車のバネ特性は、バネ上振動が2.0Hz、バネ下振動が

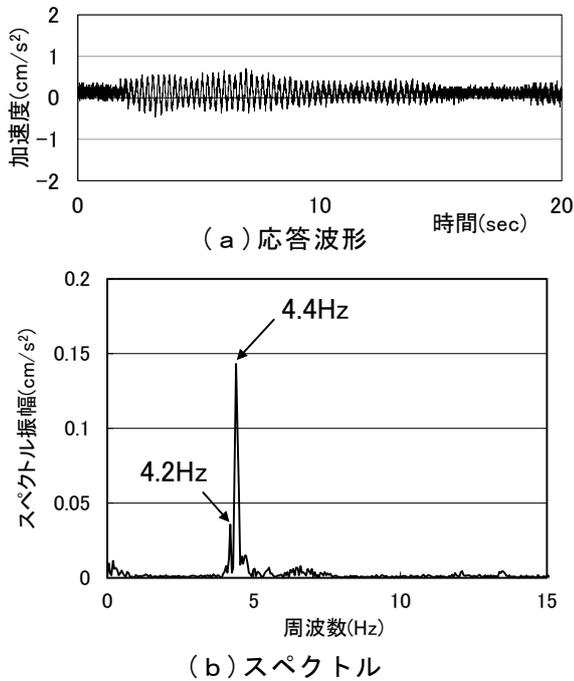


図-9 常時微動の鉛直方向加速度
[支間中央部主桁 G1 側]

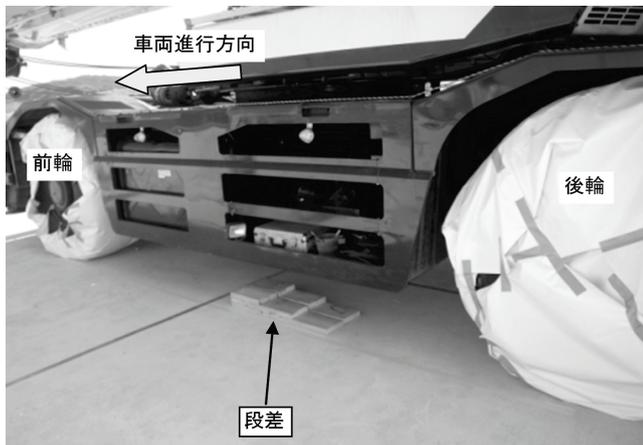


写真-3 段差落下状況

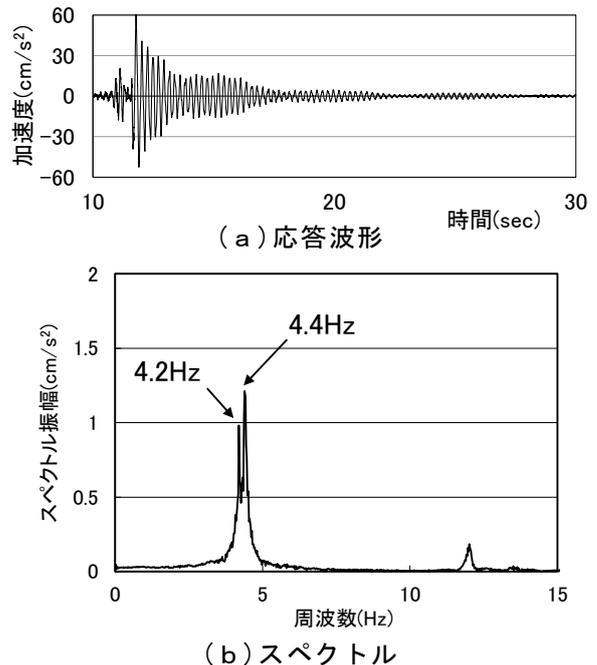
12.0Hzであった。

鉛直たわみの強制振動で計測された応答波形、スペクトルおよびモード形状を図-10に示す。加速度の最大振幅は60gal程であり、卓越周波数は4.4Hzであった。

同様に、ねじれの強制振動で計測された応答波形、スペクトルおよびモード形状を図-11に示す。加速度の最大振幅は90gal程であり、卓越周波数は4.2Hzであった。

段差落下で得られた卓越周波数は、微小振幅域で計測された常時微動の値と同じであり、固有振動数は振幅依存性が無いことが確認された。

構造減衰の評価は、段差落下による強制振動で計測された応答波形の固有振動数の周波数帯のみをバンドパスフィルターで抽出し、得られた自由減衰波形より対数減衰率を算出した。対数減衰率の計測値は、鉛直たわみ振動 $\delta_h = 0.10$ 、ねじれ振動 $\delta_\theta = 0.04$ であり、鉛直たわみ振動がねじれ振動に比べて、かなり高くなる傾向が認められた。鋼ポータルラーメン橋は、鋼桁と橋台が剛結構造であり、鉛直たわみの振動モードは橋台の変形を伴うため、対数減衰率が高くなったものと推察される。一方、ねじれの振動モードは、橋台の変形が小さく鋼桁のねじれ変形のみが発現するため、対数減衰率が小さくなったものと考えられる。



固有振動数: 4.39Hz バンドパスフィルター: 4.30Hz - 4.52Hz
モード形状: たわみ1次

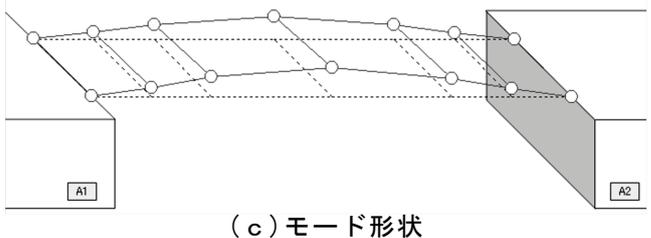
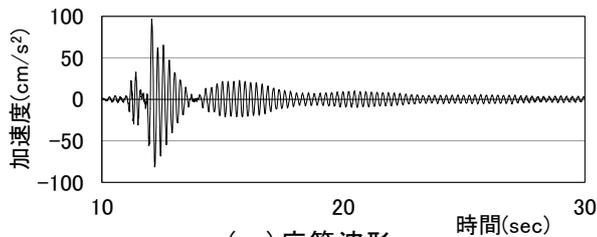
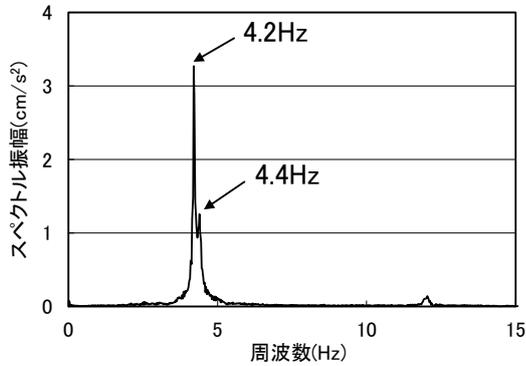


図-10 鉛直たわみ強制振動の加速度応答
[支間中央部主桁 G1 側]

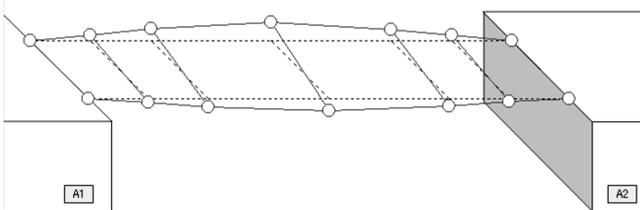


(a) 応答波形



(b) スペクトル

固有振動数: 4.20Hz バンドパスフィルター: 4.15Hz - 4.25Hz
 モード形状: ねじれ1次



(c) モード形状

図-1-1 ねじれ強制振動の加速度応答
 [支間中央部主桁 G1 側]

表-2 振動試験結果

	固有振動数 (Hz)				対数減衰率
	常時微動	段差落下①	解析値②	比率①/②	
鉛直たわみ	4.4	4.4	3.8	1.16	0.10
ねじれ	4.2	4.2	4.0	1.05	0.04

ただし、今回の計測は、背面盛土がA1橋台が未施工、A2橋台が施工済の状態での計測値であり、橋台の背面盛土が両側で施工済の状態では、対数減衰率が異なる可能性もあり、留意する必要がある。

(3) 交通振動

交通振動では、試験車を平均速度約9km/hで走行させ、加速度応答波形を計測した。加速度の最大振幅は、支間中央部で10gal程であった。安全管理上、試験車の走行速度が低速であり、走行面である床版上の路面凹凸が少なかったため、交通振動による衝撃的な波形も認められなかった。交通振動のパワースペクトルより、4.2Hzと4.4Hzに卓越周波数が確認できた。

常時微動、段差落下および交通振動による固有振動数と対数減衰率の計測値と解析値を表-2に示す。加速度振幅が異なる3種類の振動試験でも、固有振動数は全て同じ値であり、振幅依存性が無いことが分かった。また、

計測値は、解析値に比べて、鉛直たわみが16%程、ねじれが5%程高い値であった。これらは、解析モデルと実構造物とで橋台基礎や背面盛土の境界条件が整合できていないためであり、実構造物の方が境界条件の拘束度が高く、より固定状態に近い挙動を示したためである。

4. まとめ

静的載荷試験では、鋼ポータルラーメン橋の変形挙動およびひずみ分布に対して、計測値と解析値が良好な一致を示しており、FEM解析モデルの妥当性が検証できた。剛結部の応力性状は、鋼桁とRC橋台の境界部で応力集中が確認された。また、振動試験では、供用前の鋼ポータルラーメン橋の振動特性が取得できた。固有振動数は、鉛直たわみとねじれが非常に近接していた。

今回、鋼ポータルラーメン橋の実橋載荷試験で得られた供用前の初期値データが、今後の維持管理計画に役立つことを期待している。

謝辞：実橋載荷試験は、「東九州自動車道 山国川橋（鋼上部工）工事」で実施したものである。本試験を進めるにあたり、西日本高速道路株式会社 九州支社および中津工事事務所の方々をはじめ、関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所，鋼管杭・鋼矢板技術協会，社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会，社団法人日本橋梁建設協会，社団法人建設コンサルタント協会：橋台部ジョイントレス構造の設計法に関する共同研究報告書（その2），2012.3.
- 2) 社団法人日本橋梁建設協会：複合橋梁の概要，2007.4.
- 3) 塩永亮介，河野豊，川辺篤宣，上田和哉：鋼ポータルラーメン橋「色太第三橋」の実験と施工，石川島播磨技報，Vol.44，No.2，pp.58-65，2004.3.
- 4) 高木優任，平田尚，道下泰博，横山功一：インテグラル複合ラーメン橋の実橋載荷試験，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp.583-590，2002.11.
- 5) 芦塚憲一郎，宮田弘和，江頭慶三，木曾収一郎，栗田章光：鋼ポータルラーメン橋の施工と実橋載荷試験，第7回複合構造の活用に関するシンポジウム，pp.1-1-1-6，2007.11.
- 6) 片山和也，山本正寿，山野修，永田敏春：国内最大級の支間を有する鋼ポータルラーメン橋の設計と施工 - 東九州自動車道 山国川橋（鋼上部工）工事 - ，片山技報No.33，pp.30-35，2013.11.
- 7) 明橋克良：鋼2主桁とRC橋脚との複合ラーメン橋剛結部の力学的挙動と設計法に関する研究，大阪市立大学博士論文，2001.11.
- 8) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2012.3.