

# 新名神高速道路 芥川橋の設計・施工

## — バタフライウェブ橋による生産性向上とコスト縮減 —

紙永 祐紀\*1・河野 信介\*2・大城 壮司\*3・小柳 公治\*4

新名神高速道路は、名古屋を起点として神戸市に至る延長 174 km の高速道路である。開通後には名神高速道路、中国自動車道などの周辺高速道路とともに、近畿圏と中部圏を結ぶダブルネットワークを形成し、円滑な交通確保による渋滞の緩和が期待されている。本橋は、平成 29 年 12 月に開通した川西 IC～高槻 JCT・IC 区間のうち大阪府高槻市に建設された PC 橋で、ウェブに蝶型のプレキャストパネルを用いたバタフライウェブ箱桁橋である。高強度繊維補強コンクリートを使用した工場製のプレキャスト部材の活用による高耐久化、維持管理性向上と、上部工の軽量化にあわせて下部工断面を見直すことで、上部工・下部工のトータルで建設コスト縮減を図った。また、実橋において載荷試験を実施し、構造解析の妥当性を検証し、将来の維持管理における基礎データの収集を行った。本稿では新名神高速道路芥川橋の設計・施工について報告する。

キーワード：バタフライウェブ箱桁橋、コスト縮減、工期短縮、維持管理

### 1. はじめに

芥川橋は、新名神高速道路の茨木千提寺 IC～高槻 JCT・IC 間に位置する連続ラーメン橋である。位置図を図 - 1 に示す。本橋は、ウェブに蝶型のプレキャストパネル（以下、パネル）を用いたバタフライウェブ箱桁橋である。これまで建設コスト縮減を目的とした上部工の軽量化では、波形鋼板ウェブや鋼トラスなどの複合構造が用いられてきた。バタフライウェブ橋は同じ上部工の軽量化を目的としたものであるが、パネルに高強度繊維補強コンクリートを使用することで、主桁の軽量化だけではなく、高耐久化と維持管理性の向上も図られている。また、本橋では、上部工重量の軽量化により施工ブロック長を大きくし、張出し架設の施工日数の大幅な短縮によって生産性を向上させ、あわせて下部工断面を見直すことで上部工・下部工全体で建設コストの縮減を図っている<sup>1,2)</sup>。

本稿では、高耐久化と維持管理性を向上しながら、建設コストの縮減を図った本橋の設計・施工について報告する。



図 - 1 工事位置図

### 2. 工事概要

本橋の工事概要を以下に示す。また、完成写真を写真 - 1 に、全体一般図を図 - 2 に示す。

工事名：新名神高速道路 芥川橋（PC 上部工）工事

発注者：西日本高速道路(株) 関西支社

工事場所：大阪府高槻市大字原

道路規格：第 1 種第 2 級 B 規格

構造形式：（上り線）PRC 3 径間連続ラーメン

バタフライウェブ箱桁橋

（下り線）PRC 6 径間連続ラーメン

バタフライウェブ箱桁橋

橋長：（上り線）161.0 m （下り線）348.0 m

有効幅員：10.010 m



写真 - 1 完成写真

\*1 Yuki KAMINAGA：三井住友建設(株) 土木本部 土木設計部

\*2 Shinsuke KAWANO：三井住友建設(株) 大阪支店 土木部 部長

\*3 Takeshi OOSHIRO：西日本高速道路(株) 関西支社 建設事業部 構造技術課 課長

\*4 Kimiharu KOYANAGI：西日本高速道路(株) 関西支社 新名神大阪西事務所 高槻西工事長

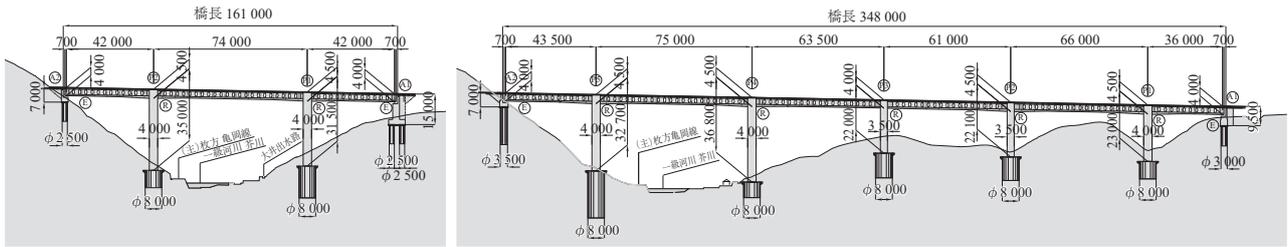


図 - 2 全体一般図

### 3. 設 計

#### 3.1 バタフライウェブ箱桁橋

##### (1) 構造概要

バタフライウェブ箱桁橋とは、通常のコンクリート箱桁のウェブ部分に蝶型のコンクリート製のパネルを使用し、上部工重量を軽量化した新しい構造形式で、東九州自動車道の寺迫ちようちよ大橋において世界で初めて採用された<sup>3)</sup>。ウェブに蝶型のパネルを連続させずにパネルごとに独立させて配置し、この形状と配置によって、せん断力によりパネル内に発生する圧縮力と引張力の方向を限定することで、ダブルワーレントラスと類似した構造としている。本構造の特徴とパネルの構造概要を図 - 3 に示す。パネルの素材には圧縮強度 80 N/mm<sup>2</sup> の高強度繊維補強コンクリートを使用し、鉄筋は配置していない。引張方向にはプレテンション方式でプレストレスを与えており、PC 鋼材 1S15.2 の配置本数は、死荷重時で引張応力を発生させず、設計荷重時でひび割れが発生しないよう決定した。また、パネル厚さは、PC 鋼材の必要本数が配置可能で、かつ終局荷重時に作用する圧縮力に対して抵抗できる厚さとして 150 mm に設定した。

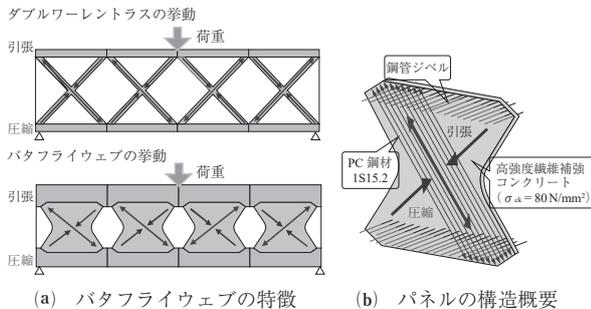


図 - 3 バタフライウェブの特徴とパネルの構造概要

##### (2) 主桁の設計

パネルが橋軸方向に不連続であり、板厚が薄いために一般的なコンクリートウェブの箱桁断面に比べて横方向の剛性が小さい。そのため、パネルの継目となる位置に 3 m 間隔で上床版を補剛するリブを設け、活荷重作用時に発生するパネルの曲げによる引張応力を抑制している (図 - 4)。また、リブ構造とすることで床版の剛性が高くなることから、張出し床版長を大きくすることが可能となり、下床版幅を小さくすることができる。さらに、ウェブ部材の軽量化に加えて主桁コンクリートに高強度コンクリート ( $\sigma_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ ) を使用して主桁のスリム化を図り、従来のコンクリートウェブ箱桁橋に比べて上部工重量を約 10 %

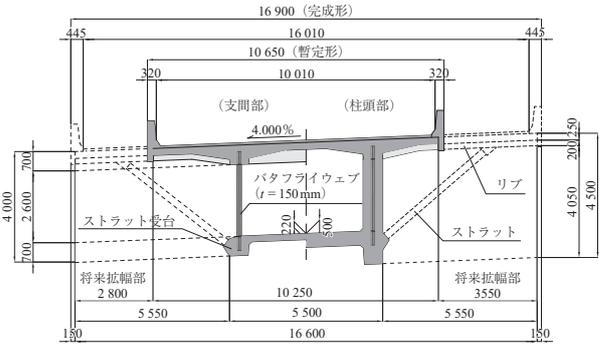


図 - 4 主桁断面図

軽減している。

#### 3.2 バタフライウェブ箱桁橋の採用による効果

##### (1) 張出し架設施工日数の短縮

主桁の軽量化により、施工時の 1 ブロック長を 6.0 m とすることができ、施工ブロック数の減少が可能となる。本橋と同規模のコンクリートウェブ橋の場合のブロック長は、2.5 m ~ 4.0 m 程度であり、上下線を合せた全橋のブロック数は 120 ブロックとなる。それに対して本橋のブロック数は、ブロック長を大きくした効果によって約 50 % のブロック数となっている。1 ブロックあたりの施工日数は多くなるが、全橋の張出し施工の延べ日数は、コンクリートウェブ橋に比べて約 60 % と大幅に短縮することができる (図 - 5)。また、張出し架設の施工日数の短縮により、隣接するトンネル工事の工事用道路として使用する上り線の早期完成を可能とした。

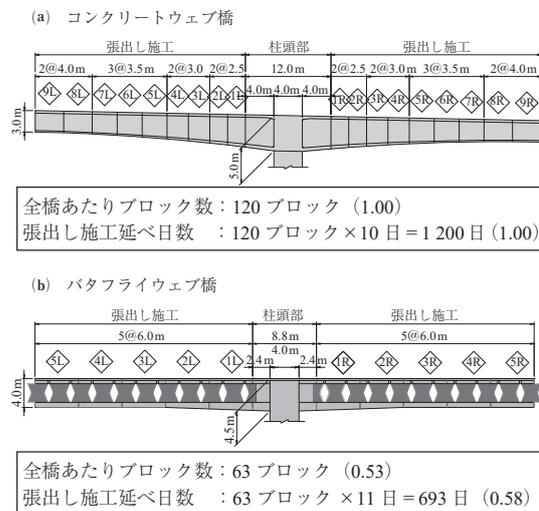


図 - 5 張出し架設の延べ施工日数の比較

(2) 下部工の縮減

バタフライウェブ構造の採用による上部工重量の軽減にともない下部工断面の見直しを行った。上部工構造をコンクリートウェブとバタフライウェブとしたときの下部工断面の比較を図 - 6 に示す。上部工重量の減少によって地震時の慣性力が低減され、橋脚断面積で約 10% の縮小が可能となった。また、橋脚断面の縮小にともない基礎断面も縮小でき、基礎の断面積で約 20% の縮小が可能となった。とくに硬岩部の施工となる大口径深礎の縮小はコスト縮減の効果が大きく、橋脚と基礎を合わせた建設コストを約 15% (約 6000 万円) 縮減することができた。

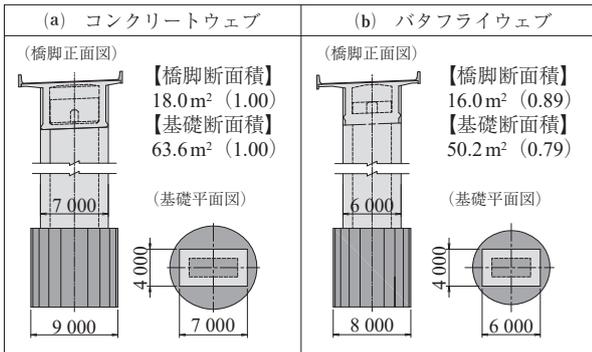


図 - 6 下部工断面の比較

(3) 環境負荷の軽減

本橋にバタフライウェブを採用したことによって得られた効果としては、環境負荷の軽減があげられる。ウェブへの部材厚が薄いパネルの使用と、主桁への高強度コンクリートの使用による上部工使用材料の削減と、上部工重量の軽減に伴う下部工断面の縮小によって、上下部工数量を大幅に低減した。その結果、同規模のコンクリートウェブ箱桁橋に比べて建設時の CO<sub>2</sub> 排出量を約 10% 削減できた。CO<sub>2</sub> 排出量の比較表を表 - 1 に示す。

表 - 1 建設時の CO<sub>2</sub> 排出量比較

(a) 上部工							
項目	摘要	単位	CO <sub>2</sub> 原単位	数量		CO <sub>2</sub> 排出量	
				CONウェブ	BFウェブ	CONウェブ	BFウェブ
コンクリート	主桁: $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$	m <sup>3</sup>	0.294	5 225	-	1 536	-
	主桁: $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$	m <sup>3</sup>	0.329	-	4 061	-	1 336
ウェブパネル	パネル: $\sigma_{ck}=80\text{N/mm}^2$	m <sup>3</sup>	0.440	-	339	-	149
鉄筋	SD345	t	0.767	1 067	925	819	710
PC 鋼材		t	1.322	164	149	217	196
CO <sub>2</sub> 排出量				(t-CO <sub>2</sub> ) (比率)		2 572	2 392
						1.00	0.93
(b) 下部工							
項目	摘要	単位	CO <sub>2</sub> 原単位	数量		CO <sub>2</sub> 排出量	
				CONウェブ	BFウェブ	CONウェブ	BFウェブ
コンクリート	橋脚: $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$	m <sup>3</sup>	0.219	3 994	3 750	875	821
	基礎: $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$	m <sup>3</sup>	0.155	7 578	6 171	1 175	957
型枠		m <sup>2</sup>	0.057	6 851	6 392	391	364
鉄筋	SD345	t	0.767	1 896	1 753	1 455	1 345
CO <sub>2</sub> 排出量				(t-CO <sub>2</sub> ) (比率)		3 894	3 487
						1.00	0.90
注) CONウェブ: コンクリートウェブ BFウェブ: バタフライウェブを示す。			上下部工合計		CONウェブ	BFウェブ	
			CO <sub>2</sub> 排出量 (t-CO <sub>2</sub> )		6 466	5 879	
			比率		1.00	0.91	

(4) 維持管理性の向上

主桁のウェブを構成するパネルは、工場で製作された高

品質な製品であることや、高強度繊維補強コンクリートを用いており鉄筋を配置していないため、塩害や中性化などに起因する鉄筋腐食を生じることがなく、高い耐久性を有することから維持管理の軽減が期待できる。また、パネル間の開口部からは採光があり、主桁内は明るく下床版に突起や段差がないため、維持管理における点検が容易な構造となっている。主桁内の状況を写真 - 2 に示す。

外ケーブルには、パネルの開口部から入る紫外線に対する耐久性を確保するために、エポキシ樹脂被覆鋼材にポリエチレン被覆を施した PC 鋼材を使用した。なお、主桁内には点検時の安全対策として、安全帯を設置するための鋼製ワイヤーを配置し、パネル間の開口部からの転落防止対策としている。



写真 - 2 主桁内の状況

本橋では暴風雨によりパネルの開口部から侵入した雨水が排水できるように、下床版を下側に打ち下げる構造とした。下床版の形状を図 - 7 に示す。これまでの複合トラスのように下床版を打ち上げた構造とした場合、排水対策として下床版に水抜き孔を配置する必要があり、水抜き孔の目詰まりによる滞水が懸念される。そのため、本橋では下床版を打ち下げる形状とし、雨水がバタフライウェブの開口部から自然に流下する構造とした。

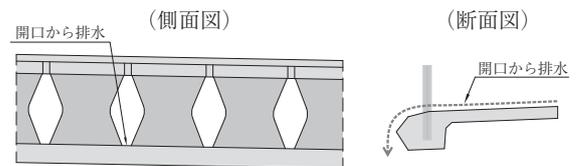


図 - 7 下床版形状

4. 施 工

4.1 パネルの製作

パネルはプレテンション設備が整った滋賀県内の PC 工場にて製作し、トレーラーにて 4 枚ずつ現場まで運搬した。パネルの形状と厚さは一定であるが、使用する位置によりプレテンション PC 鋼材の本数や鋼管ジベルの本数、上下床版と接合するための鉄筋径が異なる。ただし、それらの必要量は主桁に作用するせん断力に対して決まるため、ある程度のグループ化は可能である。このためプレテンション鋼材本数によるグループ化を行うことでパネル種類をな

るべく少なくした。なお、パネルは1ラインで4枚製作し、合計444枚の製作を行った。製作状況を写真-3に示す。



写真-3 パネルの製作状況

#### 4.2 柱頭部の施工

柱頭部のコンクリートはマスコンクリートとなるため、コンクリートの打設を3ロットに分けて施工した。パネルの架設に先立ち、パネルを吊り下げるための架設鋼材を支保工上に設置した。施工状況を写真-4に示す。底版型枠を組み立てたのち、クレーンにてパネルを所定の位置まで揚重し、架設鋼材に設置した吊鋼棒へ吊り替えてセットした。その後、鉄筋・型枠を組み立て、1ロット目として下床版と横桁1層目のコンクリートを打設した。

2ロット目となる横桁2層目は、外ケーブルの偏向管や定着体、補強鉄筋が密に配置されている。そのため打設不良部の発生リスクの低減を目的として、コンクリート打設時に充填状況が確認できるように型枠に透光性型枠を使用し、高流動コンクリートにて施工を行った。また、マスコンクリートとなる2ロット目では、水和熱による初期ひび割れを抑制するために、パイプクーリングを実施した。その後、3ロット目となる上床版部の型枠・鉄筋・PC鋼材を組み立て、コンクリートの打設を行い柱頭部を構築した。

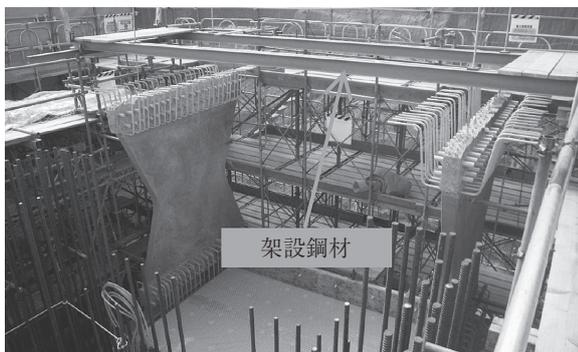


写真-4 柱頭部でのパネルの設置状況

#### 4.3 張出し架設

張出し架設には移動作業車を使用した。バタフライウェブ構造としたことにより主桁重量を軽減できるため、施工ブロック長をパネル2枚分の6.0mとした。図-8に張出し架設要領図を示す。パネルの架設には、移動作業車に設

置された専用のチェーンブロックを使用した。チェーンブロックにて所定の位置へ架設後、吊鋼棒に盛替え、専用の固定器具にてセットを行った(写真-5)。パネルどうしは橋軸方向に接合する必要がないため、主桁の上げ越しに対応するための位置調整を容易に行うことができる。主桁の出来形管理において、パネルの据付け精度が大きく影響することから、据付けにはレベル・トータルステーションを用い、高さ・平面位置を管理した。また、本橋は上下床版にリブを有する構造であることから、型枠組立て・脱枠時の施工省力化を目的として、構造寸法が一定の箇所に鋼製型枠を使用した。

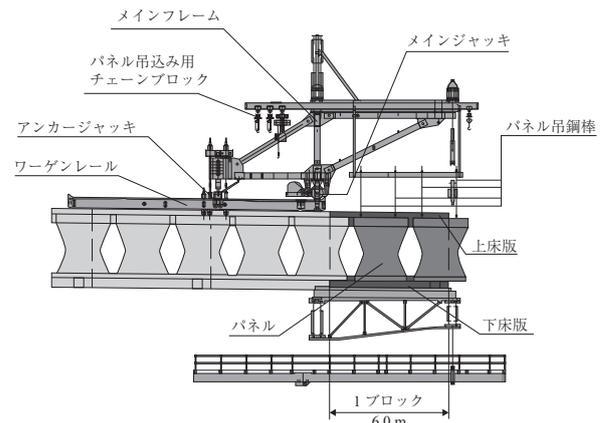


図-8 張出し架設要領図



写真-5 パネルの設置状況

#### 4.4 府道上の張出し架設

下り線P4橋脚は府道枚方亀岡線と近接しており、終点側の移動作業車は、府道の片側交互通行規制を行いながら組み立てた。また、府道上の移動作業車は、資機材などの落下による第三者災害のリスク低減を目的として交通量の少ない夜間に移動した。夜間移動時の道路規制は行わず、一般車両通過時には移動作業車を動作停止しながら移動した。移動作業車の解体は、P4終点側張出し最終ブロック上に移動作業車を移動させ、P5橋脚ヤードからクレーンにて解体した。府道上空を通過する上り線P1および下り線P4の張出し架設においては、移動作業車の足場外周をメッシュシートで囲み、作業床は防水シートによる養生を行った。また、壁高欄施工時には、防水シートとメッシュシートにて腕木足場底面の養生を行い、型枠洗浄水や養生水の府道への落下を防止した。施工状況を写真-6に示す。



写真 - 6 府道上の張出し架設状況

#### 4.5 高圧線近接部における施工

下り線 P3 付近の上空には高圧線があり、クレーンによる移動作業車の組立てができないことから、固定式支保工と移動作業車を組み合わせた張出し施工を行った。P3 張出しの施工ステップを図 - 9 に示す。最初に P3 張出しの左右 2 ブロック分を固定式支保工を用いて施工し、P2-P3 径間の中央閉合部を P2 張出しで使用した移動作業車で施工した。その後、P3 柱頭部を通過できるように移動作業車の作業床を解体し、高圧線影響範囲外まで移動したのち作業床の組立てを行い、P3 張出しの 3 ブロック目と P3-P4 径間の中央閉合部を施工した。なお、固定支保工部のパネルは、高圧線の制限高さに干渉しないように 25t ラフターにより架設した。また、パネルのセットは、柱頭部と同様に架設鋼材に設置した吊鋼棒へ吊り替えてセットした。

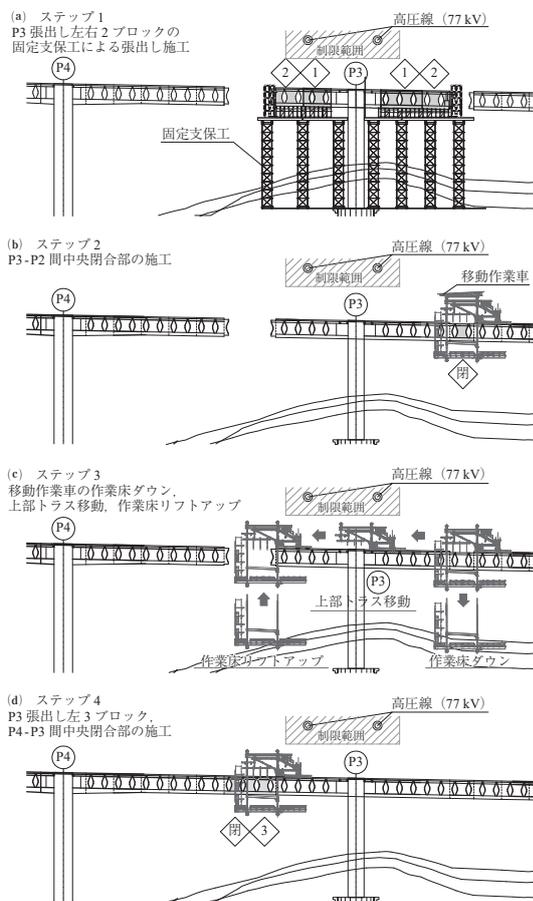


図 - 9 下り線 P3 橋脚張出し施工ステップ

#### 4.6 斜ケーブルの緊張

柱頭部近傍ではパネルに作用するせん断力を軽減するために、主桁内に斜ケーブルとして I2S15.2 の外ケーブルを配置している。斜ケーブルの配置図を図 - 10 に示す。緊張は移動作業車の後方足場で行うことから、下床版下の狭いスペースに緊張ジャッキをセットしなければならず、一括緊張用の大型ジャッキでは緊張箇所までの運搬、緊張作業が困難であるため、小型軽量のシングルストランド用のジャッキを用いて PC 鋼より線を 1 本ずつ緊張した。施工状況を写真 - 7 に示す。

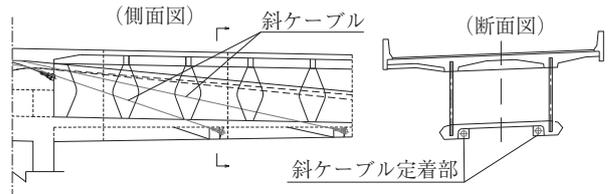


図 - 10 斜ケーブル配置図

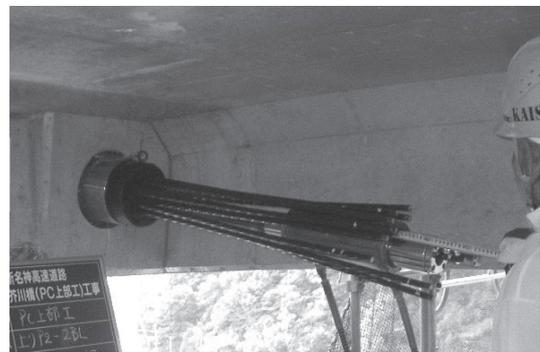


写真 - 7 斜ケーブルの緊張状況

### 5. 実橋載荷試験

#### 5.1 試験目的

本橋では、設計における構造解析の妥当性の確認と、完成直後の振動特性の把握し、供用後の維持管理の基礎データとすることを目的として、上り線を対象として静的載荷実験と振動実験を実施した<sup>4)</sup>。

#### 5.2 静的載荷試験

静的載荷実験では、ダンプトラック 6 台 (約 1 200 kN) を支間中央部に載荷した。載荷要領図を図 - 11 に、鉛直方向の変位分布を図 - 12 に示す。支間中央部では 5.8 mm の変位が生じ、有限要素法 (以下、FEM 解析) による計算値の 6.4 mm とほぼ一致した。また、パネルのせん断変形を無視した曲げ変形のみが考慮される骨組解析による値は 4.8 mm と若干小さい結果となった。バタフライウェブ橋の骨組解析においては、橋軸方向に不連続なパネルは断面剛性に寄与しないものとし、上下床版のみの曲げ剛性を考慮した平面骨組解析を行っており、算出される変位には曲げ変形しか考慮されていない。それに対し、FEM 解析ではパネルのせん断変形も考慮されるため、より実測値に近い結果となったと考えられる。また、FEM 解析値に対して実測値が小さいのは、施工済みの壁高欄の剛性が寄与しているものと考えられる。

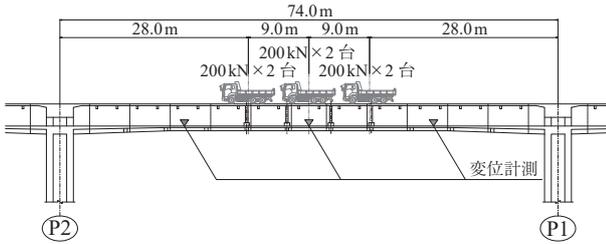


図 - 11 載荷要領図

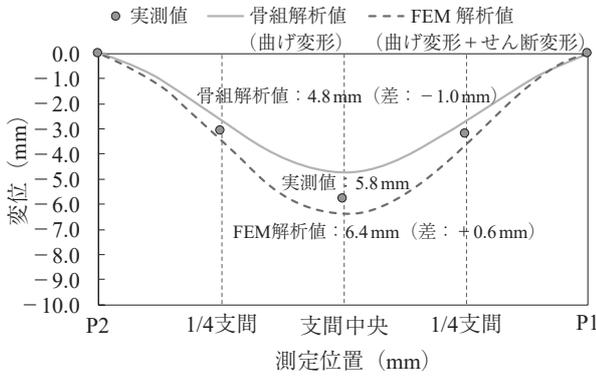


図 - 12 変位分布図

### 5.3 振動試験

振動実験は車両踏台落下法により行った。加振時の加速度波形から得られた固有振動数一覧を表 - 2 に、振動モード図を図 - 13 に、振動実験状況を写真 - 8 に示す。固有値解析においては、主桁の剛性にウェブのせん断変形が無視できないことから、せん断変形を考慮した場合と同じ変位となるように、主桁の剛性を補正して固有値解析を実施した。鉛直方向の変位が卓越する 2 次、3 次モードでは、固有振動数の実測値と計算値との比率はほぼ 1.0 であり、よく一致している。

一方、水平方向の変位が卓越する 1 次モードにおける固有振動数では、実測値 (1.675 Hz) が計算値 (1.132 Hz) の約 1.5 倍となり、差が大きい結果となっている。水平方向の振動実験ではダンプトラックの制動荷重による振動を計測しており、加速度から算出した変位量は約 0.2 mm と非常に小さかった。本橋の端支点ではゴム支承を用いているが、ゴム支承には変位が小さいときにバネ値が大きくなる特性がある。ゴム支承の変位が小さい状態のバネ値を用いた固有値解析の結果、実測値 (1.675 Hz) が計算値 (1.528 Hz) の約 1.1 倍となり、実測値と計算値はおおむね一致する傾向となった。

### 5.4 まとめ

静的載荷試験および振動試験の結果、実験値と計算値は一致しており、設計における構造解析の妥当性が確認できた。

表 - 2 固有振動数一覧

次数	モード	固有振動数 $f$ (Hz)		
		実測値	計算値	比率
1	水平方向卓越	1.675	1.132	1.48
2	対称 1 次	2.763	2.658	1.04
3	非対称 1 次	5.269	5.364	0.98

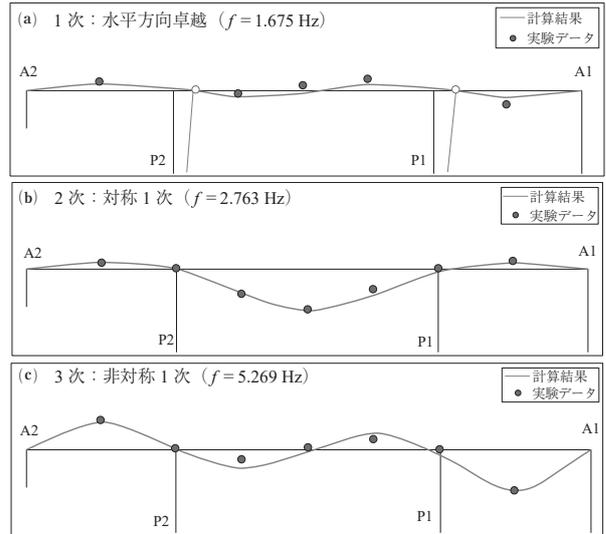


図 - 13 計測モード図



写真 - 8 振動試験実施状況

## 6. おわりに

近年、建設業界における生産性の向上が喫緊の課題とされるなかで、構造物の高耐久化と維持管理性の向上やプレキャスト部材の活用による施工の合理化が望まれている。本橋では新しい構造であるバタフライウェブ橋を採用し、それらのニーズに少なからず貢献できたと考えている。

本工事は、関係者の多大な努力により、平成 29 年 8 月に無事故無災害で無事に竣工を迎えることができた。最後に、本工事の計画・施工にあたり、ご指導、ご協力をいただいた関係各位に深くお礼を申し上げる。

### 参考文献

- 岡村啓太, 高橋 明, 香川仁志, 紙永祐紀: 新名神高速道路芥川橋の設計・施工, 第 23 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, pp.9-12, 2014
- 香川仁志, 紙永祐紀: 新名神高速道路芥川橋におけるバタフライウェブ構造の採用, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.501-502, 2014
- 芦塚憲一朗, 花田克彦, 中積健一, 片 健一: 東九州自動車道(仮称) 田久保川橋の設計・施工, 橋梁と基礎, pp.5-10, 2012.11
- 山本泰造, 紙永祐紀: バタフライウェブ橋の動的挙動の把握を目的とした振動実験について, 土木学会第 72 回年次学術講演会, pp.507-508, 2017

【2018 年 3 月 5 日受付】