# (33) 波形鋼板ウエブPC箱桁橋(広内第二橋)に おける実橋載荷試験による 挙動計測に関する報告

金田 和男1・東田 典雅2・吉田 敦3・清水 俊一4・中井 聖棋5・熊谷 善明6

 「正会員 東日本高速道路株式会社 北海道支社 札幌技術事務所 (〒004-0042 札幌市厚別区大谷地西5丁目12番15号)
E-mail:kazuo.kaneta@jhnet.go.jp

<sup>2</sup>正会員 東日本高速道路株式会社 関東支社 高崎管理事務所(〒370-0015 高崎市島野町381番地) E-mail:norimasa.higashida@jhnet.go.jp

> <sup>3</sup>正会員 東日本高速道路株式会社 北海道支社 建設事業部 計画設計チーム (〒004-8512 札幌市厚別区大谷地西5丁目12番30号)
> E-mail:atsushi.yoshida@jhnet.go.jp

<sup>4</sup>株式会社ピーエス三菱 札幌支店(〒060-0003 札幌市中央区北3条西2丁目6番地 札幌MTビル) E-mail:tshimizu@psmic.co.jp

<sup>5</sup>正会員 株式会社ピーエス三菱 技術本部(〒104-8215 東京都中央区銀座7丁目16番12号 G-7ビル10F) E-mail:nakai-seiki@psmic.co.jp

<sup>6</sup>株式会社ピーエス三菱 東京土木支店(〒104-8215 東京都中央区銀座7丁目16番12号 G-7ビル7F) E-mail:y-kumagai@psmic.co.jp

5 径間連続波形鋼板ウエブ PC 箱桁橋である広内第二橋は、コスト縮減の観点から、波形鋼板の接合に 波形鋼板の軸線にずれが生じる一面せん断ボルト接合を採用している.そのため、外力による高力ボルト の張力変動が予想されたので、実荷重載荷によるボルトの張力変動を計測し安全性の確認を行った.また 本橋は、波形鋼板と上床版との接合方法に2列の孔あき鋼板ジベル(以下 Twin-PBL)を採用している.さら に、Twin-PBL がコンクリートエッジ方式に採用される最初の事例であるため、FEM 解析や模型載荷実験 による検討を経て設計された.しかし、本構造を採用した実橋における性状を確認した事例が存在しない ため、実荷重載荷試験により、その性状を確認した.本文書では、以上の確認事項について報告を行う.

Key Words: Twin-Perfobond Strip connection, corrugated steel web, single shear surface bolted joint

### 1. 概要

従来の PC 箱桁橋のコンクリートウエブを波形鋼板に 置き換えた複合橋梁である波形鋼板ウエブ橋は、上下床 版を構成するコンクリートに対し、プレストレス力を効 率的に導入可能となる利点や軽量化などの理由により、 その採用実績を伸ばしている.その波形鋼板ウエブ橋の 一つである本橋(ペンケオタソイ川橋、発注名:広内第 二橋)の特徴は、上床版コンクリートと波形鋼板ウエブ の接合部と波形鋼板同士の接合部にある.

本橋の波形鋼板ウエブ同士の接合には、一面摩擦接合 が採用された(図-2参照).この場合、波形鋼板の接合部 において軸線のずれが生じるため、活荷重等の外力の影響によるボルトの張力変動の発生が予想された.そこで 設計では、FEM 解析によりボルトの張力変動量を算出 し、その安全性を確認した.本論文では、実橋載荷によ るボルトの変動張力を計測結果とFEM解析結果との比較 による解析の妥当性、および設計で設定している打ち切 り限界値との比較による安全性の確認を行った結果を述 べる.

また、本橋には、床版と波形ウエブとの接合方法として、2列の孔あき鋼板ジベル(ツインパーフォボンドリブ、 以降、Twin-PBL)を採用した(図-3参照). さらに、架設外 ケーブルを定着するためにコンクリート床版を打ち下ろ



す形状(コンクリートエッジ方式)とした(図-4参照).本橋が、これらを併用した初の事例となる.

この部位には、床版上の荷重による横方向曲げと、橋 軸方向のせん断力の影響による水平せん断力が作用する (図-5参照).横方向曲げの影響に対してはFEM解析によ る検討結果を設計に反映させた.

また、水平せん断力に関して、通常の床版に比べて PBLの縁端距離が少なくなるために、接合部の水平せん 断耐力の低下が懸念された.そこで、本橋の設計にあた って、PBLの縁端距離を考慮した供試体による押抜きせ ん断実験を実施し、コンクリートエッジ方式における Twin-PBL接合のせん断耐力の検討を行った.



図-2 波形鋼板ウエブ接合部

しかしながら、これらの構造について、実橋における 性状を確認した事例が存在しないため、実橋載荷によっ て生じるひずみ等の計測により実橋の挙動を確認した.



図-3 Twin-PBL 接合概要

横方向曲げに関して本論文では、実橋載荷による計測

結果と FEM 解析結果との比較を通じて行った,本橋の 設計の妥当性の検証について述べる.また水平せん断力 に関して,計測結果と FEM 解析結果との比較による実 橋の挙動の確認について報告を行う.



#### 2. 高力ボルトの張力変動計測

#### (1) 計測位置および荷重載荷方法

設計時におけるFEM解析により、ねじりモーメントが 最大・最小となる荷重状態において高力ボルトの変動張 力が最大値を示すことが確認された.そのため、橋面上 の載荷荷重により最大・最小のねじりモーメントを作用 可能である位置を計測位置として選定した.計測位置は、 最大支間であるP2-P3 径間のP2 柱頭部と1ブロックの継 ぎ目位置とした(図-1参照).ねじりモーメントは、トラ ック(20tf/台)8 台を橋面上に配置することにより、作用さ せた.図-7に最大ねじりモーメント作用時の車両配置を 示す.なお、このとき計測位置に生じるねじりモーメン トの規模は±3000kNm程度であり、これは設計荷重作用 時の約90%に相当する.

また,FEM解析より上床版または下床版近傍に配置された高力ボルトが,大きな変動張力を示す可能性が確認された.そのため,それらの高力ボルトの変動張力を重点的に計測することとした.図-6に計測対象となるボルトの位置および計測ボルトの詳細を示す.なお,計測は左右の両ウエブを対象とした.



#### 図-6計測機器設置状況(計測ボルト)



#### (2) 解析

解析対象は、着目位置を含むP2-P3 径間と、その両側 の径間であるP1-P2 およびP3-P4 とした(図-8). P2-P3 径間 のP2 から支間中央までを 3 次元モデルとし、その他を 梁要素としてモデル化を行った. 3 次元モデルでは、コ ンクリートをソリッド要素、鋼板をシェル要素、高力ボ ルトをバネ要素とした.載荷荷重は、輪荷重を接地面積 に応じた節点荷重に置き換えて作用させた.



## (3) 計測結果

実橋載荷試験によって計測された高力ボルトの張力変 動を図-9に示す.

この計測値は、温度補正後のデータである.輪荷重を 考慮した FEM 解析結果と比較すると、応力の発生傾向 に若干の差が認められる.これには、以下の理由を挙げ ることができる.実際の高力ボルト接合では、ボルトに 軸力が導入され、鋼板同士の摩擦によって接合されてい る.これに対して FEM 解析モデルでは、高力ボルトを バネとして評価しており、高力ボルトの軸力および鋼板 同士の摩擦は考慮されていない.これらの違いが解析値 と計測値の差を生じさせていると考えられる.これらの 影響を考慮した非線形 FEM 解析を行う方法も考えら れるが、解析の煩雑さや変動応力度が非常に小さいこと、 計測時のノイズの影響等を考慮すると、今回用いた解析 手法によって変動応力を予測しても十分評価できると判 断した.

高力ボルトの疲労設計における打ち切り限界値は 21N/mm<sup>2</sup>である.対して,実橋載荷試験によって得られ た変動張力の最大値は 1.8N/mm<sup>2</sup>程度であり,十分小さ な値であった.作用しているねじりモーメントが設計で 想定しているねじりモーメントの約 90%であることを 考慮すると,活荷重によって変動する高力ボルトの張力 は非常に小さな値となると予測される.そのため,波形 鋼板ウエブ橋の波形鋼板同士の接合への高力ボルトによ る一面摩擦接合の採用に関して,ボルトの疲労の問題は 生じないと考えられる.



図-9高カボルト変動張力(N/mm<sup>2</sup>)計測結果

## 3. 横方向曲げに対する Twin-PBL の挙動

#### (1) 計測位置および荷重載荷

計測位置として、桁内の架設ケーブル定着突起やディ ビエータ等の影響を避けるために、それらが配置されて いない固定支保工により施工された P4-A2 間を選定した. 計測は、接合部鋼部材に生じるひずみおよびコンクリ ートと鋼部材間の相対変位を対象とした.ただし、相対 変位については、「5.波形鋼板ウエブと上床版コンクリ ート間の一体性の確認」において報告する.

ひずみゲージ(3 軸)および変位計の設置位置を 図-10に 示す.計測は右ウエブに対してのみ行った. なお,これ らの計測機器は、水平せん断に対する挙動計測にも用い られる.



図-10 計測機器設置状況(Twin-PBL)



横方向曲げモーメントは、片持ち版付け根部または中間床版側付け根部の曲げモーメントが卓越する位置に、 トラック(20tf/台)を配置し、作用させた.最大モーメント作用時の載荷状態を図-11に示す.

#### (2) 解析および計測結果

解析では、計測位置を含む P4-A2 と隣接する径間であ る P3-P4 を対象とした. P4-A2 径間は 3 次元モデルとし、 コンクリートはソリッド要素、鋼材はシェル要素として、 モデル化を行った. P3-P4 径間は梁要素とした. 載荷荷 重は、輪荷重を接地面積に応じた節点荷重に置き換えて 作用させた.



図-13 解析モデル(P3-A2間)

PBL中段において、橋軸直角方向曲げに着目した場合 の鉛直方向応力度のFEM解析値と計測値を図-12に示す. このFEM解析値は、PBLおよびフランジとコンクリート は完全付着として解析された値である.なお、PBL側面 とコンクリートとの付着を無視した解析を行っているが、 付着有りの解析結果との相違が認められなかったため、 ここでは割愛した.

横方向曲げモーメントに関する設計では,鉛直応力度 のFEM解析値の分布より抵抗する範囲を定めている.す なわち波形ウエブが配置された直上近傍のPBLに鉛直引 張応力度が生じている範囲(図-12参照)を,横曲げに対す る有効抵抗範囲として設定した.

また、横方向曲げによる PBL 発生鉛直応力度計測値 は、引張側においては FEM 解析値と比較的よく一致し



た. ただし, 圧縮側において解析値より大きな値を示し ている箇所が見受けられた.

以上,FEM 解析値と計測値の一致より,設計に適用 した横方向曲げに対する PBL 孔の有効範囲の設定の妥 当性が確認された.

#### 4. 水平せん断力に対する Twin-PBL の挙動

#### (1) 計測位置および荷重載荷

計測位置の選定理由は,既に 3. (1) に述べた.計測機 器についても,「3. 横方向曲げに対するTwin-PBLの挙 動」と共用した.

荷重載荷については、橋面上の荷重によるせん断力が、 断面全体に伝達されるために必要な距離を、事前にFEM 解析に確認して、載荷位置を決定した. 図-14にP4-A2支 間中央にT荷重を作用させたとき、波形鋼板ウエブ鉛直 方向中央部に生じる、せん断応力度の橋軸方向の分布を 示す.なお、桁高方向の波形鋼板ウエブせん断応力度の 分布は、ほぼ一定であったため、中央のみの値としてい る.



図-14 荷重載荷位置からの距離と波形鋼板のせん断応 カ度

外 内 内側 外側 2.5 せん断応力度(N/mm<sup>2</sup>) 2.0 断面図 1.5 1.0 0.5  $\Pi$ Т Πл 0.0 -0.5 0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500 5000 位置(mm) 載荷状態 - 解-1(内) ▲ 計測値(外) ■ 計測値(内) 解-0: 付着有 |---解-0(外) ━━━ 解-1(外) ━-- 解-0(内) ━ 解-1: 付着無

図-14では、桁高h(3.7m)以上離れた位置において、せん

断応力度が一定となっていることから, せん断力が断面 全体に作用するために必要な距離は, 桁高に相当する距 離となる.

以上の理由により着目位置に対し、桁高に相当する距離を確保して、橋面上に載荷を行うこととした.最大の水平せん断力を着目位置に作用させる載荷状態を図-16に示す.



図-16 荷重載荷位置(水平せん断着目時)

#### (2) 解析および計測結果

解析については、図-13に示すモデルを用いて行った. 水平せん断力に着目した場合の、PBL中段における発 生せん断応力度を図-15に示す.解-0はPBLおよびフラ ンジとコンクリートに付着有りとして解析した場合、 解-1は付着無しとして解析を行った場合である.

FEM 解析では、付着の有無にかかわらず、波形鋼板 形状による内外位置の変化に伴う PBL の発生せん断応 力が変化が認められる.すなわち、波形鋼板ウエブ直上 の PBL 発生せん断応力度が大きな値を示している.た だし、鋼とコンクリートの付着有の場合の PBL 発生せ ん断応力度の規模は、付着無の場合よりも大きい.これ は、鋼とコンクリートの付着状態が PBL 発生せん断応 力度の規模に与える影響が大きいことを示している.た



33 - 5

だし設計においては、PBL 側面でのコンクリートとの付着による応力伝達は考慮されていないので、その部分の付着が失われたとしても強度上の問題は生じない.

一方,計測値も解析値と同様の傾向を示しており,実 橋において波形鋼板形状の影響を受けることが確認され た.発生せん断応力度計測値の規模は,付着の有無の影 響を考慮した解析値の中間から付着有の場合に近い値を 示した.これは,載荷試験時の本橋が比較的新しく,鋼 とコンクリート間の付着状態が良好な状態であったため と考えられる.

# 5. 波形鋼板ウエブと上床版コンクリート間の一体 性の確認

横方向曲げ作用と水平せん断作用に対する,波形鋼板 ウエブと上床版コンクリート間の一体性の確認のために, 波形鋼板ウエブ上フランジと上床版コンクリートとの相 対変位を計測した.計測位置を図-10に示す.

表-1に変位計の計測結果を示す.各荷重状態での上床版 コンクリートと波形鋼板上フランジの相対変位は最大 0.01mm程度であり,顕著な変位は計測されなかった. これより,上床版コンクリートとPBLは一体として挙動 していることが確認できた.

#### 表-1 変位計測結果(mm)

荷重ケース	橋軸方向		上下方向	
	右ウエブ	左ウエブ	右ウエブ	左ウエブ
床版着目時	0.00	0.00	0.01	0.01
水平せん断着目時	0.00	0.00	0.00	0.00

#### 6. まとめ

エッジガーダーを有した上床版コンクリートと波形鋼 板ウエブ Twin-PBL を採用し,波形鋼板同士の接合を高 カボルトによる一面摩擦接合で行ったペンケオタソイ川 橋の実橋載荷試験の結果,以下の知見が得られた.

- (1) 高力ボルトによる一面摩擦接合では、活荷重による高力ボルトの変動張力は、設計で考慮した疲労に対する打ち切り限界値に対して非常に小さい.
- (2) そのため、高力ボルトによる一面摩擦接合を採用しても、ボルトの疲労に関する問題は生じないと考えられる.
- (3) 横方向曲げによる計測値の FEM 解析値との一致 から,設計時に設定した横方向曲げに対する有効 PBL 孔範囲の妥当性が確認された.
- (4) 水平せん断力による PBL 発生せん断応力度の計 測値は、鋼-コンクリート間の付着の有無を考慮 した解析値の中間から付着有りとした解析値に近 い値を示した.
- (5) 横方向曲げおよび水平せん断力の伝達は,主に波 形鋼板ウエブ直上の PBL によって行われる.
- (6) 上床版コンクリートと波形鋼板上フランジとの相 対変位は非常に小さく、これらの一体性が確認さ れた.

#### 参考文献

- 1) 竃本,東田,桜田,清水:ツインパーフォボンドリブ接合 部の押抜きせん断実験による検討,土木学会第 59 回年次学 術講演会, pp.1347-1348, 2004.9
- 2) 東田, 竃本, 桜田, 清水: ツインパーフォボンドリブ接合の押抜きせん断実験,第13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.297-302, 2004.10
- 東田,金田,中井,清水:広内第二橋 実橋載荷試験による 波形鋼板-上床版コンクリート接合部の挙動,土木学会第60 回年次学術講演会, pp.1119-1120, 2005.9

# REPORT OF SITE LOADING EXAMINATION OF CORRUGATED STEEL WEB PC BOX BRIDGE (PENKEOTASOI RIVER BRIDGE)

## Kazuo KANETA, Norimasa HIGASHIDA, Atsushi YOSHIDA, Toshikazu SHIMIZU, Seiki NAKAI and Yoshiaki KUMAGAI

Penkeotasoi river bridge is 5-spans corrugated steel web PC box girder bridge. To this bridge, the single shear surface bolted joint for corrugated steel web plate joint was adopted. This joint has axial mismatch between each steel web plate. Then the occurring of tension variation of bolt was expected. So we verified safety of this joining method by a measurement of tension variation of bolt. In addition, to this bridge, the Twin-Perfobond strip was adopted as a connection between steel web and upper slab concrete. And this bridge is the first case that Twin-Perfobond strip was adopted to the concrete edge girder. So we verified the behavior of this joint and this connection by loading experiment with the bridge. This paper deals with those results of verification by experiment with this bridge.