## (48) 波形鋼板ウエブ箱桁橋に適用した 新しい下床版接合構造

志道 昭郎1・大山 博明2・ピヤマハント ソンクラム3・小林 仁4

<sup>1</sup>正会員 (株)ピーエス三菱 土木技術部 (〒104-8215 東京都中央区晴海二丁目5-24) E-mail:a-shiji@psmic.co.jp

<sup>2</sup>正会員 (株)ピーエス三菱 土木技術部 (〒104-8215 東京都中央区晴海二丁目5-24) E-mail: h ohyama@psmic.co.jp

3(株)ピーエス三菱 土木技術部(〒104-8215 東京都中央区晴海二丁目5-24)

E-mail:s-piyamahant@psmic.co.jp

4正会員 (株)ピーエス三菱 大阪支店 技術部 (〒530-6027大阪府大阪市北区天満橋一丁目8-30)

E-mail:kobayashi\_hs@psmic.co.jp

波形鋼板ウエブ橋は,優れた構造特性およびコスト縮減の観点から,現在までに多くの採用実績を有す る橋梁構造である.近年では更なる合理化を目指して,完成構造系においてのみ考慮されていた波形鋼板 ウェブの剛性を施工時荷重に対して積極的に考慮する試みも進められている.著者らは,波形鋼板ウェブ 橋において下床版を波形鋼板ウェブの内側に配置した断面形状を検討し,より合理的な波形鋼板の使用が 可能となる結果を得た.また,波形鋼板と下床版の新しい接合構造を開発し,確認試験によりその安全性 を確認した.実構造への適用に関しては,押出し架設工法に対して試設計においてその合理性および経済 的優位性を確認した他,張出し架設工法おいて実橋への適用実績を有する.

Key Words:, Corrugated steel Webs, Lower Slab, Prestressed concrete Panel, Connection

## 1. はじめに

波形鋼板ウェブ橋は、フランスで開発された複合構造 橋で、主桁自重の低減に加えて、波形鋼板の形状特性に よる優れたプレストレス導入効率とせん断抵抗性を有す る.我が国では1993年竣工の新開橋以来、施工実績を急 速に増やし、現在では施工中も含めて100橋程度に達し ている.これらの大部分では、施工時の荷重を波形鋼板 ウェブに負担させない方法が主流であるが、近年、波形 鋼板ウェブにある程度の施工時荷重を負担させた事例が 報告されている.具体的には、片持ち架設の側径間部に おいて上下床版荷重を負担させた事例<sup>10</sup>や、押出し架設 において手延べ桁の代用とした事例<sup>20</sup>などであり、架設 機材の簡易化等による施工の合理化とコスト縮減効果が 報告されている.

著者らは、波形鋼板ウェブ橋のより合理的な構築を目 的に、下床版を波形鋼板の内側に配置する断面形式につ いて検討した.本稿では、上記断面形状の優位性と波形 鋼板と下床版の新しい接合構造の確認実験について報告 するとともに、実橋への適用性として押出し架設に関す る検討結果と張出し架設の施工事例について報告する.

#### 新しい下床版構造

#### (1) 従来の下床版構造

従来,波形鋼板ウェブ橋の断面には,図-1に示すよう な下床版を波形鋼板ウェブの下側に配置する形状が採用 されている.また,波形鋼板と下床版の接合部には,フ ランジに設置したスタッドジベルやパーフォボンドリブ 等の接合部材による方法か,波形鋼板を床版内に直接埋 め込む方法が採用されている(図-2).

この構造の留意点としては以下があげられる.

- ①上下フランジは橋軸方向に連続化されないため、波形 鋼板ウェブ単体では施工時の荷重を支持できない。
- ②フランジを有する形式の場合、下床版の施工において コンクリートの逆打ち箇所が発生し、所要の品質を確 保するために、施工に際して細心の注意を要する。
- ③耐久性上留意が必要となるトリプルコンタクトポイントが主桁外面の雨水等が滞留しやすい位置にあり、点検時に足場等の設備が必要となる.埋込み接合では鋼とコンクリートの境界部にシーリング等の止水対策も施される.



#### (2)新しい下床版構造

従来構造の留意点をふまえ,連続した上下フランジを 有する波形鋼板ウェブの内側に下床版を配置する断面形 状(図-3)について検討を行った.この断面形状は、ド イツ初の波形鋼板ウェブ橋であるAltwipfergrund橋<sup>3)</sup>でも 採用されており,利点として以下があげられる.

①波形鋼板ウェブに施工時の荷重を負担させてることで架設機材の小型化・簡易化が可能となる.

- ②コンクリートの逆打ちが無くなるとともに、施工性 も向上して品質管理が容易になる。
- ③トリプルコンタクトポイントが箱桁内部のみとなり, 点検等の維持管理性が向上する.
- ④PC板を型枠替わりに使用することにより、施工の 省力化による工程短縮が見込める.



#### (3) 波形鋼板と下床版の新しい接合構造

本断面形式では、下床版は波形鋼板の内側に配置され るため、従来とは異なる接合構造が必要となる.そのた め、下フランジと波形鋼板の隅各部にパーフォボンドリ ブを有するプレートを溶接したプレートジベル接合を開 発した(**写真-1(a)**).本接合構造は、鋼プレートによる 支圧抵抗によって橋軸方向のずれせん断力を,パーフォ ボンドリブのせん断抵抗によって面外方向の断面力を伝 達する.このプレートジベル接合とAltwipfergnund橋で実 績のあるスタッドジベル接合(写真-1(b))を対象に,以 下に示す確認実験を行った.なお,②③に関しては文献 <sup>45</sup>に詳細を報告している.

①接合部の押抜きせん断試験
 ②1/2梁供試体によるずれせん断挙動確認試験
 ③ 〃 面外曲げ耐力試験



(a)プレートジベル (b)スタッドジベル 写真-1 接合構造

#### 3. 接合構造の性能確認試験

#### (1) 接合部の押抜きせん断試験

スタッドジベル接合は実績豊富で耐力算出式が提案されているため、実験はプレートジベル接合に対して実施した.図-4に供試体形状を表-1に供試体パラメータを示す.供試体は、後述する押出し架設への適用で実施した試設計における標準断面の形状を基本(No.1供試体)とし、プレート形状および溶接脚長をパラメータとした4種類各3体とした.載荷は、頭付きスタッドの押抜き試験方法<sup>6</sup>を参考に、各供試体3体中2体は単調増加載荷法により、1体は漸増繰返し載荷法によった(**写真-2**).



#### 図-4 供試体形状

表-1 供試体パラメータ

			No.1	No.2	No.3	No.4
ブロック高	Н	mm	455	455	455	525
プレート	h	mm	350	350	350	420
形状	b	mm	160	160	160	133
	t	mm	12	12	16	16
溶接脚長	S	mm	9	5	12	12
計算上の破壊性状			支圧	溶接	支圧	支圧



写真-2 押抜き試験の状況

プレート1枚あたりの押抜き耐力は,複合橋設計施工 規準<sup>7</sup>に示されるアングルジベル接合のずれ耐力式を参 考に,以下に示す式により算出した.なお,プレートジ ベルが2辺で支持されることから,コンクリートの支圧 に対しては接合端を結ぶ三角形部分を有効とし,プレー トジベル母材に対しても耐力算出に考慮することとした.

 $R_d = \min(R_{dl}, R_{d2}, R_{d3}), R_a = 0.6 \cdot R_d$  $R_{d1} = A \cdot \sigma_{ck} / 1.5$  $R_{d2} = a \cdot \Sigma L \cdot (\sigma_{sy} / \sqrt{3})$  $R_{d3} = t \cdot (b+h) \cdot (\sigma_{sy} / \sqrt{3})$ ここに,  $R_{d1} : = 2 / 2 / 2 / 2 - b \cdot 0$  $R_{d2} : 溶接部のせん断強度に対する耐力$  $R_{d3} : 母材のせん断強度に対する耐力$  $R_{a3} : 使用時耐力$  $A : \mathcal{T} \cup - b \cap mata (=1/2 \cdot b \cdot h)$  $b, h, t : \mathcal{T} \cup - b \cap mata , a = 5, 厚 = 5$ a : 溶接の理論のど厚, L : 溶接長

実験の結果,破壊形態はすべての供試体においてコン クリートの支圧破壊によるものであった.また,実験終 了後の供試体切断によって,ウェブおよびフランジの溶 接端を結ぶ三角形部分のコンクリートが破壊している性 状が確認された(写真-3).切断面の破壊性状から,コ ンクリートの支圧に対する耐力算定において,ウェブお よびフランジの溶接端を結ぶ三角形部分を有効面積とす ることは適当であり,設計上の終局耐力に対して十分な 耐力を有していることが確認できた(図-5).ずれ量に ついては,スタッドジベル接合に見られるような明確な ずれの急変点は確認されなかったが,想定する使用時耐 カ相当の範囲でほぼ弾性的な挙動を示しており、使用時 耐力の設定に問題ないと考えられる.図-6に基本形状供 試体(No.1-③)における荷重とずれ量の関係を示す.







## (2)1/2梁供試体によるずれせん断挙動確認試験

実験は、試設計橋梁における標準断面の1/2縮尺とし、 それぞれの接合構造を両ウェブに配置した梁供試体により行った.図-7に供試体形状を示す.

スタッドジベル接合のずれせん断耐力は、複合構造物 の性能照査指針(案)<sup>8</sup>に示されるせん断耐力式を適用 した.なお、波形鋼板の斜パネル部については算出耐力 に対して斜比分を低減することした.

ずれ量の計測は、図中の計測位置において下フランジ 下面と下床版コンクリートとの相対変位を測定した.

図-8および図-9に波形鋼板1波長当たりのずれせん断

カとずれ量の関係を示す.実験の結果,いずれの接合構 造も設計上の使用時耐力程度まではほとんどずれは生じ ることなく,弾性的な挙動の範囲であった.また,設計 上の終局耐力以上の荷重載荷に対しても十分な耐力を有 していた.実験は,載荷装置の制限から計算上の終局耐 力を1割程度上回った段階で載荷を終了したが,コンク リート表面にわずかなひび割れが生じる程度の損傷であ り,十分な耐荷力を有していることが確認できた.



## ) -1.0 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 ずれ量(mm)

図-9 ずれ量の計測結果(スタッドジベル接合)

0

#### (3) 1/2梁供試体による面外曲げ耐力試験

実験は、FEM解析の結果から接合部の挙動が顕著とな る断面外側に凸となる波形鋼板ウェブ1波長に着目し、 試設計橋梁の1/2縮尺供試体により実施した.供試体は、 プレートジベル接合およびスタッドジベル接合を配置し たP1、S1供試体と、P1供試体に床版上縁での肌離れを改 善するL形の異形棒鋼アンカーを追加したP2供試体、S1 供試体に同様の異形棒鋼アンカーに加えて床版下縁での 肌離れを改善するスタッドジベルを下フランジに追加し たS2供試体の4タイプ各1体とした.図-10に供試体形状 を示す.供試体の材料仕様はずれせん断挙動確認試験と 同様とした.荷重は、波形鋼板ウェブ上部に載荷梁を用 いて純曲げモーメント荷重を載荷し(写真-4)、床版の 上下端位置において肌離れ量を計測した.





写真-4 面外曲げ実験の状況(正曲げ載荷)

各接合構造に対する曲げ耐力算出方法を以下に示す. なお,波形鋼板の斜パネル部については算出耐力に対し て斜比分を低減することした.

①プレートジベル接合

面外曲げモーメントに対しては、パーフォボンドリブ のせん断抵抗で負担させる.パーフォボンドリブのせん 断耐力は,複合構造物の性能照査指針(案)<sup>8</sup>に示される算出式に従って算出した.

抵抗曲げモーメント:M<sub>d</sub>=V<sub>d</sub>・h (図-11(a))

 $V_{ud} = [1.45\{(d^2 - \phi_{st}^2) \cdot f_c + \phi_{st}^2 \cdot f_{st}\} - 106.1] / \gamma_b$  $V_{ad} = 0.6V_{ud}$ 

②スタッドジベル接合

面外曲げモーメントに対しては、スタッドジベルを引 張鋼材とした鉄筋コンクリート断面で負担させる(図-11(b)).スタッドジベルの引張耐力は、文献<sup>9</sup>に示され る群当たりの耐力算出式により、波形鋼板1パネルごと に同一高さのスタッドジベルを1群として算出した.

 $T_{u} = \min (T_{ul}, T_{u2})$   $T_{ul} = 10.96\sqrt{l_{e}} (l_{e} + d_{h}) \sqrt{\beta_{w}} \{1 + (N-1)D/(4 \cdot l_{e})\}$   $T_{u2} = f_{sy} \cdot A_{s} \cdot N$   $T_{a} = T_{u}/1.7$ 



(a) プレートジベル(b) スタッドジベル図-11 抵抗モーメントの算出の仮定

実験の結果,プレートジベル接合,スタッドジベル接 合ともに設定した終局時の曲げ耐力により十分な安全性 が確保可能であることが確認できた.また,肌離れを改 善する構造を付与することにより、使用時における肌離 れ量を十分小さくすることが可能であることを確認した. 図-12および図-13にP2供試体およびS2供試体における曲 げモーメントと肌離れの関係を示す.

## 4. 実構造への適用

#### (1) 押出し架設工法への適用

#### a) 従来工法

押出し架設工法は,架設時に桁下条件の制約を受けな いため,跨道橋や跨線橋,河川や山間部の架橋など,支 保工の設置が困難な場合に有用な架設工法である.また, 主桁製作を設備の整ったヤードで集中して行うため,プ レファブ化や機械化などによる施工の省力化が可能で, 施工管理および品質管理の向上も図ることができる.

反面, 架設時に主桁のほぼ全ての断面が支点上または 支間中央を通過するため, 完成系と全く異なる正負交番 の断面力が主桁に発生する. そのため, 主桁にプレスト レスを軸力的に導入する必要性から架設PC鋼材量が増 加し, 完成系においてせん断力の小さい支間中央部付近 などにもせん断鋼材の配置が必要となる場合もある. ま た, 架設最終段階では橋体全長を押し出す必要があり, 押出し設備もこれに対応したものが必要で, 先端に使用 する手延べ桁も主桁重量と支間長に応じて大型化する.

### b) 波形鋼板を用いた新しい押出し架設工法

従来の押出し架設工法の特長と課題をふまえ、波形鋼



48 - 5

板ウェブを架設材として積極的に用いた新しい押出し工 法の開発を行った.本工法における架設順序と各施工段 階の主桁断面形状を図-14に示す.

本工法では、製作ヤードで組み立てた波形鋼板に下床 版型枠としてのPC板を敷設した状態で押出し架設を行 う(図-15).押出し完了後、横桁および下床版コンク リートを打設し、下床版内に配置した内ケーブルにより プレストレスを導入する.上床版の施工は、橋体を使用 した固定支保工または移動作業車により施工する.上床 版の施工順序は、まず中間支点上を分割打設し、この部 分に内ケーブルによってプレストレスを導入する.その 後、残り区間の上床版を施工する.最後に、連続外ケー ブルのプレストレスを導入して橋体を完成させる.

本工法の特徴として以下があげられる.

 ①波形鋼板の先行架設

軽量な波形鋼板を先行架設することで架設重量の大幅 な軽量化が図れ、鋼橋と同程度かそれ以下の設備での架 設が可能となる.また、手延べ桁の省略も可能である. ②中間支点上上床版の先行打設

鋼橋では、後荷重による応力の影響を軽減する目的か ら、中間支点上の上床版を最後に打設することが一般に 行われる.これに対して、本工法では中間支点上の上床 版を最初に打設する.波形ウェブの上下フランジ厚は架 設時の曲げにより決定されるため、断面力の大きな部位 から先行してコンクリートとの合成構造にすることによ り板厚の軽減を図る.先行打設した床版に発生する引張 応力度に対しては、プレストレスの導入で対応する. ③合理的なPC鋼材配置

押出し架設中の正負交番曲げモーメントに対するPC 鋼材配置は不要で,押出し完了後の連続桁状態でプレス トレスを導入するため、合理的なPC鋼材配置が可能と なる.また、各施工段階の内ケーブルによるプレストレ ス導入は、波形鋼板のアコーディオン効果により必要な 部位に効果的に圧縮応力を付与することを可能としてい る.これらにより大幅なPC鋼材量の低減が可能となる.

工法の実用性を検証するため、5径間連続橋(40m+ 3@50m+40m)をモデルとして、従来工法によるコンク リートウェブ箱桁橋および波形鋼板ウェブ橋と比較した. 表-2に主要材料の比較を示す.比較の結果、コンクリー トウェブ箱桁橋と比較して架設時重量を9分の1、主方向 PC鋼材量を2分の1に低減できる結果が得られた.



図-15 押出し架設時のイメージ図

表-2 主要材料の比較

	従来押出	新押出し架設工法			
	コンクリート 箱桁構造	波形鋼板ウェブ 箱桁構造	波形鋼板ウェブ 箱桁構造		
主桁Con:m <sup>3</sup>	2396.5	1960.4	1692.7		
PC板:tf	_	-	378		
主PC鋼材:tf(比率)	77.9(1.00)	60.7(0.78)	39.2(0.50)		
鉛直PC鋼材:tf	5.5	-	-		
波形鋼板:tf(比率)	_	147.2(1.00)	267.9(1.82)		
架設時重量 : tf(比率)	60514(1.00)	51274(0.85)	6858(0.11)		



図-14 架設順序および各施工段階の主桁断面

#### (2) 張出し架設工法への適用

#### :新名神高速道路杉谷川橋(下り線)

杉谷川橋は,張出し架設によるPC6径間連続ラーメン 波形鋼板ウェブ箱桁橋(図-16)で2007年7月に竣工した.

杉谷川橋では、PC板を型枠替わりとした本下床版構 造を使用し、波形鋼板に架設時の荷重を積極的に負担さ せることによる施工の合理化が図られた.また、主桁重 量を低減する目的から、PC板と場所打ちコンクリート の付着性状に関する確認実験を実施して、PC板を主桁 断面として部分的に考慮する設計手法が採用された.

詳細については文献<sup>10</sup>で紹介されているため,ここで は本下床版構造を用いた施工の概要について紹介する.

#### a) 張出し部の施工

図-17に示すように、張出し施工部は3ブロックの同時施工で実施された.下床版重量はPC板を介することにより、上床版重量は型枠受け梁を前方の波形鋼板に支持させることにより、施工中の主桁重量は波形鋼板にすべて負担させている.そのため、従来の張出し施工における移動作業車とは異なり、基本的に足場および作業荷重のみを負担させることを目的とした新しい架設機を採用している.これらにより、従来工法と比較してサイクル工程で約1.5日の短縮を可能としている(表-3).





表-3 サイクル工程の比較

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
打設·養生	 									÷∓⊤	法
緊張·架設機移動							-	新工		法	
波形鋼板溶接·検查			:								
PC板設置											
型枠組立て						: -	:		:		
鉄筋組立て・打設準備											

#### b) 柱頭部の施工

柱頭部の施工においても、張出し施工部と同様に波形 鋼板に施工時の荷重を負担させ、従来のブラケット支保 工を不要としている.実際には、足場としての簡易なブ ラケットは必要となるが、支保工材数量は大幅に低減さ れ、ブラケットの設置および撤去における省力化による 工程短縮が図られている.



写真-5 柱頭部の施工

#### 5. おわりに

波形鋼板ウェブ橋において,波形鋼板の内側に配置す る下床版構造は,施工性および維持管理性の向上に有効 と考えられる.また,波形鋼板に施工時の荷重を負担さ せることも容易であり,架設機材の簡易化や工程短縮を 図ることが可能となる.断面形状の前提となる波形鋼板 と下床版の接合構造に関しても,実施した各確認実験に より十分な安全性の確保が可能と考えている.



48-7

現段階での施工実績は、張出し架設工法によるものの みであるが、押出し架設工法に適用した場合にもコスト 縮減効果に優れる検討結果が得られている.従来、鋼橋 に比較して優位性に劣っていた中規模支間橋梁において 有力な工法となることを期待している.

## 謝 辞

本接合構造の開発,実験では,早稲田大学理工学術院 の依田照彦教授には大変貴重なご意見,ご協力をいただ いた.この場を借りて心よりお礼申し上げます.

#### 参考文献

- 宮内,安川,中薗,森,張:第二名神高速道路 栗東橋の計 画と設計,橋梁と基礎,2003.12
- 2) 吉田,中村,白谷,大島:波形鋼板ウェブと超高強度繊維 補強コンクリートを用いた手延べ桁の開発-北海道縦貫自動 車道鳥崎川橋-,プレストレストコンクリート, Vol.48, No.3, 2006.
- 3) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会: Aitwipfergrund高架橋 ― ドイツ初の波形鋼板ウェブPC橋―, プレストレストコンク

リート, Vol.44, No.1, 2002.

- 4) 志道,森,大山,依田:波形鋼板と下床版の新接合方法の 提案とずれせん断力に対する挙動確認実験,第15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, 2006.10
- 5) ピヤマハント、大山、志道、依田:波形鋼板と下床版の新 接合構造に関する面外曲げ耐力の算定式と確認実験、第15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,2006.10
- 6) 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状,社団法人 日本鋼構造協会
- 7) 複合橋設計施工規準(社), プレストレストコンクリート 技術協会編, 技報堂出版
- 8) 複合構造物の性能照査指針(案), 土木学会
- Bode, H. and Roik, K., Headed Studs-Embedded in Concrete and Loaded in Tension, the PCI Annual Conventional, Los Angels, pp.61-88, 1983.
- 10) 声塚,高橋,當真,小林:第二東名高速道路杉谷川橋(下 り線)の設計・施工,プレストレストコンクリート, Vol. 49, No. 3, 2007.

## NEW JOINT STRUCTURE BETWEEN LOWER SLAB AND CORRUGATED STEEL WEBS APPLIED TO BOX-GIRDER BRIDGE

# Akio SHIJI, Hiroaki OHYAMA, Songkram PIYAMAHANTAND and Hitoshi KOBAYASHI

Prestressed concrete bridge with corrugated steel webs is a structure with superior properties and lower cost so that many bridges have been constructed up to date. The idea, employing corrugate steel webs to resist the construction load, has been recently developed. In this paper, the cross-section of bridge is studied by locating lower slab at the inner side of corrugated steel webs in order to gain more efficiency of corrugated steel webs. New joint structures are developed and safety is confirmed from the experiment. Superior efficiency and economy are confirmed by the trial design of incremental launching. Concerning with applicability, the bridge constructed by cantilever launching already employed this method.