

波形鋼板ウェブを用いた複合 PC 桁の接合部の損傷メカニズム

新構造技術 (株) 正会員 工修 ○栗根 聡
 九州工業大学工学部 正会員 Ph.D. 幸左賢二
 九州工業大学工学部 内野裕士
 (株) ピーエス三菱 張 建東

1. はじめに

波形鋼板ウェブ PC 橋は、ウェブに波形鋼板を用いることで多くのメリットが挙げられるが、構造の複合化から生じる設計上の検討課題も数点残っている。コンクリートフランジと波形鋼板の接合方法もその1つであり、これまで多くの研究機関において合理的でかつ経済的な接合方式の検討が行われている。

現在までに検討、採用された従来の接合方式には数種類あり、波形鋼板ウェブの上下端にフランジプレートやCT形鋼を溶接し、さらにスタッドやアングルなどを溶接するフランジタイプと波形鋼板を直接コンクリートフランジに埋込み、波形鋼板および付属の鉄筋で水平せん断力に抵抗させる埋込みタイプとに大別できる。両者の主な違いは接合部の剛性、破壊メカニズム、施工性などが挙げられるが、埋込みタイプは破壊性状および耐久性能の懸念から波形鋼板ウェブ PC 橋の適用に対して採用事例が少ないのが現状である。しかし、埋込みタイプはフランジタイプに比べて溶接延長が減り、施工性が向上するため、その適応性を検討することは有用であると考えられる。

そこで、本研究では、接合部に埋込みタイプの接合方式を採用した波形鋼板ウェブ PC 桁を作製し、終局状態における埋込みタイプの接合部に着目した損傷メカニズムについて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験供試体は阪神高速道路北神戸線の中野高架橋をモデル橋梁とし、PC箱桁の片ウェブを1/3縮尺でモデル化した。供試体の緊張量は曲げモーメント算定時におけるPC鋼棒のひずみレベルを実橋の曲げ終局モーメント算定時のPC鋼材のひずみ(28860 μ)に合わせるように決定し、供試体端部には荷重の偏心に対する供試体の安定性を考慮して横桁を設けた。波形鋼板の板厚については鋼板の先行座屈を避けるため、せん断座屈強度を考慮し6mmとした。表-1に供試体諸元を、図-1に供試体形状を示す。波形鋼板とコンクリートフランジとの接合部には従来の埋込み接合方式に加え、施工性の向上および剛性の向上を目的に形鋼を波形鋼板

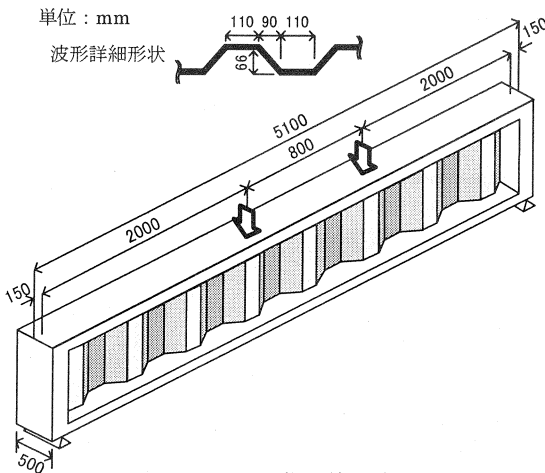


図-1 供試体形状

表-1 供試体諸元

供試体名称		No. 1	No. 2
接合部 (接合耐力)	形式	埋込み方式	逆L方式
	埋込み長	65mm	
	孔径	ϕ 20mm	
	貫通鉄筋	SD345 / D10	
	接合部材	異形鉄筋 SD345 D13	等辺山形鋼 SS400 L30×30×3
鉄筋	材質	SD345	
PC鋼棒	材質	SBPR 930/1080 (ϕ 23mm)	
	緊張力	310kN (0.8Py)	
ウェブ	材質/板厚	SS400/6mm	

ウェブの上下端側面にボルト止めした構造形式(以下、逆L方式と称す)を採用した。ただし、本来の埋込み方式では貫通鉄筋と波形鋼板にかけられた貫通孔との隙間に充填したコンクリートが一種のジベルとして水平せん断力に抵抗するが、本検討ではその影響を排除するために、波形鋼板の貫通孔はパテにより隙間を充填した。なお、逆L方式の接合部の設計は波形鋼板ウェブPC橋計画マニュアル(案)に準拠し、従来の埋込み接合方式と同様に同等のせん断耐力を有するように設計している。

2.2 実験手法

荷重は図-1に示すように、供試体を単純支持として、スパン中央部における静的2点荷重(せん断スパン比=2.5)とした。加力の制御は荷重制御で行い、荷重ステップは50kNを基本とし、各ステップ終了後には0kNまで除荷し、ひび割れ状況を目視により観測した。その他、供試体変位、鋼材ひずみを荷重10kN刻みで計測し、支間中央近傍の下側接合部にはデジタルビデオカメラを常設し、ひび割れ発生荷重および荷重に伴うひび割れの進展傾向をクラックスケールとの比較から計測した。

2.3 実験結果

図-2に荷重-変位関係を示す。No.1供試体は曲げ挙動が支配的であり、曲げひび割れ発生後、下フランジにおいて接合棒鋼、主鉄筋、PC鋼棒が順次降伏に至った。その後、荷重荷重1100kNで上コンクリートフランジが圧壊し最大荷重となった。また、No.2供試体においても荷重荷重1000kNでPC鋼棒のひずみが6000 μ を超え、それまでの挙動がNo.1供試体と同様であったことから、上コンクリートフランジの圧壊で終わることが想定されたので、PC鋼棒の破断なども予想されることから安全性を考慮して実験を終了した。

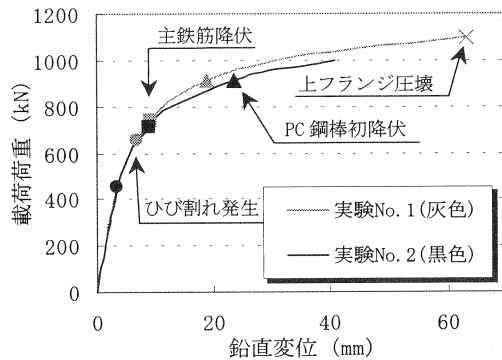


図-2 荷重-変位関係(スパン中央)

(1) 接合部の損傷状況

図-3に示すように、供試体下側に発生した曲げクラックは荷重700kN~800kNにかけて下フランジ側面を上向きに進展し、その後ひび割れは側面側から波形鋼板の埋込み位置に向けてほぼ直角に進展した。荷重荷重が850kNを超えると主要なひび割れは接合部に達し、写真-1に示すように徐々に波形鋼板とコンクリートフランジとの間にハダ隙が生じた。ハダ隙は最大荷重荷重時には約6mmまで進展し、下フランジにおいてスパン中央から左右に600mm(支点間の1/4)の区間で生じていた。No.1供試体でハダ隙は、主鉄筋降伏荷重において見られず、降伏荷重の1.15倍以上の荷重荷重時に確認された。今回の供試体では、接合部のせん断耐力と桁の曲げ耐力を同程度として設計を行い、実橋を想定した場合に、最も接合部が危険側となる状態を想定している。しかし、実橋では、接合部のせん断耐力は桁の曲げ耐力よりも大きく設計されることから、設計荷重レベルではハダ隙発生量は非常に小さいと考えられる。

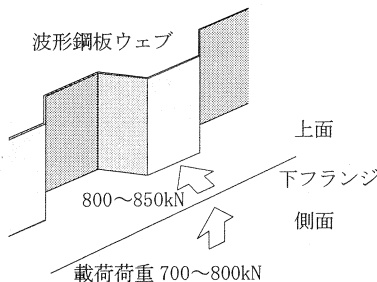


図-3 クラックの進展状況

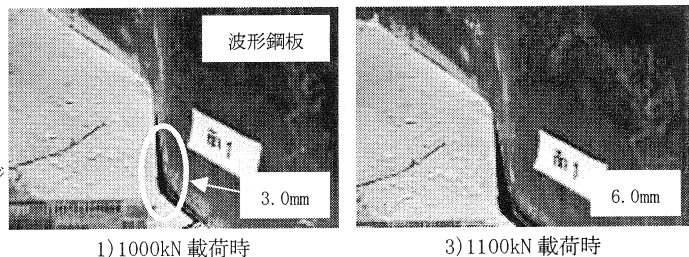


写真-1 接合部における損傷状況

3. 解析による検討

3.1 解析条件

載荷実験を行った結果、桁の曲げ終局挙動時に接合部の損傷としてハダ隙が確認された。接合部にハダ隙が生じることで、雨水などが浸入することで接合部が腐食し、構造的な問題が生じると考えられる。そこで、本解析では接合部に生じたハダ隙のメカニズムを明らかにして、その抑制策を検討することを目的とする。

図-4に解析対象範囲を示す。実験では図中に示すように、主要なクラックは供試体側面から波形鋼板にかけて発生する。また、供試体中央区間では曲げモーメントが一定であるため、対象区間は均等間隔でひび割れが発生すると考えられ、実験によるひび割れ区間をモデル化した。

また、図-5に解析で用いたフレームモデルを示す。波形鋼板ウェブは梁要素とした。ここで、桁の曲げ終局荷重時に波形鋼板は平板に戻る挙動を示すと考えられる。従って、ここでは平行パネルと斜め方向パネルをピン結合することで、この波形独自の平板に戻ろうとする挙動を再現した。接合棒鋼および貫通鉄筋は実験により測定されたひずみが、解析対象範囲に渡り分布すると仮定して、バネ要素を用いた。また、波形鋼板が平板になろうとする際、コンクリートフランジは橋軸直角方向に広がろうとする。この挙動に対して、橋軸直角方向のコンクリートは引張りで抵抗すると考えられることから、解析対象区間を12分割して、バネ要素を用いてモデル化を行った。なお、各バネの抵抗は式(1)を用いて、材料試験のおよびミルシートの値を参考として算出した。その結果を表-3に示す。

また、ハダ隙は曲げに伴う引張り挙動によって発生したと考えられることから、実験における主鉄筋のひずみから算出した曲げ変形量を、図中に示す位置に加えた。

$$k_1 = E \cdot A / (n \cdot l) \quad (1)$$

ここに、E：各部材のヤング係数 A：対象部材の断面積
n：分割数 l：部材長

3.2 解析結果

図-6に解析結果と実験結果におけるひずみ進展状況の比較を示す。解析におけるひずみは、部材が一樣に抵抗すると仮定していることから、バネの変位量を部材長lで除することで求めた。解析では載荷荷重900kN以降、橋軸直角方向の貫通鉄筋のひずみが著しい引張りひずみが生じている。これは、実験のひずみ進展と比べると若干の差は見られるが、最大荷重時には約2000 μ と降伏に至っており、実験と同様の傾向を示していると考えられる。解析におけ

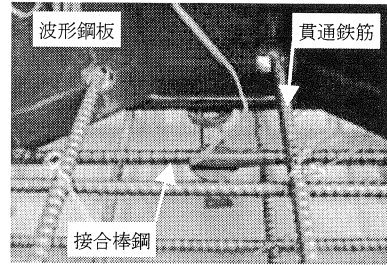


写真-2 接合部の詳細

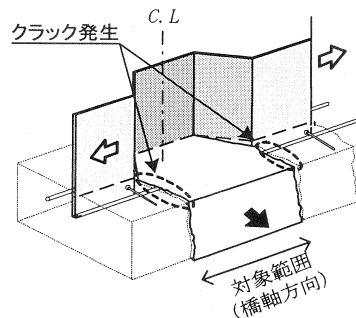


図-4 解析対象範囲

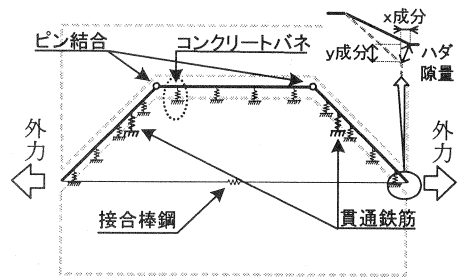


図-5 フレームモデル

表-3 バネ定数

	初期剛性(N/mm)	降伏荷重(N)
接合棒鋼	9.175×10^4	4.777×10^4
貫通鉄筋	3.329×10^4	2.589×10^4
コンクリート	9.917×10^5	$8.812 \times 10^3 *1$

*1: 引張荷重

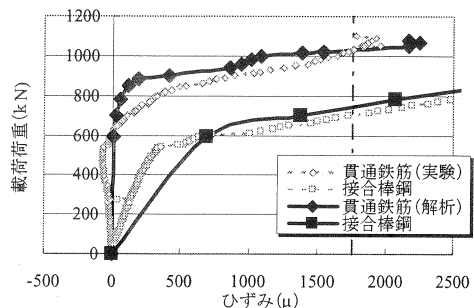


図-6 ひずみ進展状況の比較

る接合棒鋼の降伏荷重は約740kN とほぼ実験と同じ荷重であり、その進展傾向に同様に一致していると考えられる。

また、図-7 はハダ隙の進展状況を解析結果と実験結果について示したものである。図中の縦軸に載荷荷重を、横軸にハダ隙量を表している。実験におけるハダ隙量は、支間中央近傍の下側接合部に設置したデジタルビデオカメラで撮影した画像を用いて、波形鋼板とフランジ間で最も離れている箇所を画像処理により推定した。解析では、接合棒鋼が降伏した荷重時に約0.2mmのハダ隙が確認された。その後、実験におけるハダ隙の進展と同様に、載荷荷重850kN以降に著しいハダ隙の進展が見られる。

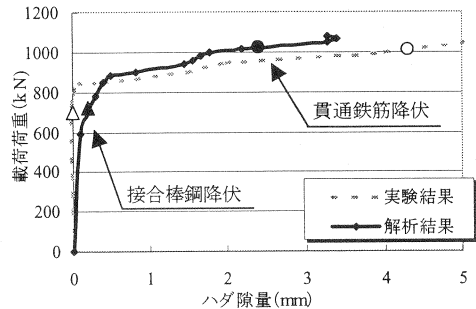


図-7 ハダ隙の進展状況

図-8 にハダ隙の進展の模式図を示す。載荷荷重700kNでは橋軸直角方向の成分は、ほとんど確認されなかった。しかし、接合棒鋼が降伏することによって、載荷荷重850kNでは0.04mm、載荷荷重1050kNでは1.06mmと、橋軸直角方向のハダ隙の成分が顕著となっていることが確認された。これは接合棒鋼が降伏し、その後、曲げ挙動が著しくなることで波形鋼板が平板に戻ろうとする独自の挙動を示す。これによって、フランジが橋軸直角方向に押し出される。すなわち、波形鋼板の形状特性に伴う損傷が生じているものと考えられる。

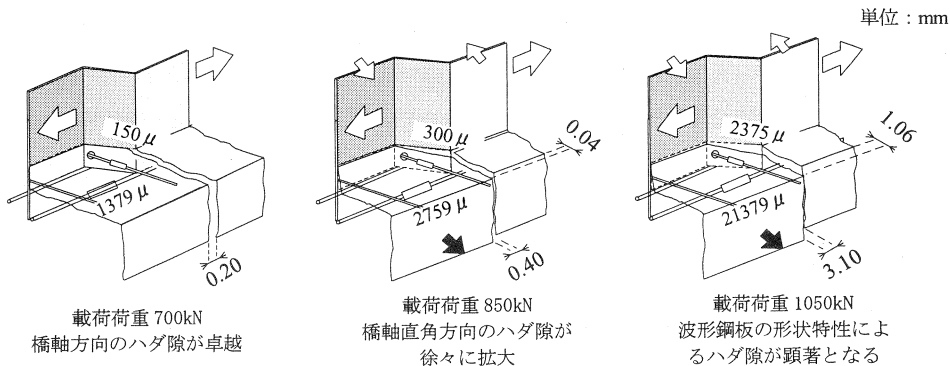


図-8 ハダ隙の進展模式図

4. 結論

今回、波形鋼板ウェブとコンクリートフランジに埋め込み接合方式を用いた供試体の載荷実験より、接合部に着目した検討を行った。さらに、解析を用いて接合部の損傷状況を再現した結果を以下にまとめる。

- (1) 接合部材に異形棒鋼と等辺山形鋼を用いた供試体の挙動、損傷状況に差異は見られず、両部材は同様の性状を示した。
- (2) ハダ隙発生に伴う荷重の低下現象は見られず、挙動も安定していることから、はだ隙の発生自体が脆性的な破壊に至らず、その発生荷重も主鉄筋降伏以降であることを考慮すると埋め込み接合部は十分な余剰耐力を有している。
- (3) 本解析モデルでハダ隙の進展状況を再現した結果、曲げ降伏荷重程度では波形鋼板の形状特性に伴う橋軸直角方向のハダ隙量は小さいと考えられる。しかし、曲げ変形が著しくなることで、その影響は大きくなるのが分かった。

参考文献

- 1) 波形鋼板ウェブ PC 合成構造研究会：波形鋼板ウェブ PC 橋計画マニュアル (案), 1998.10