

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

(株) ピーエス三菱 正会員 ○ピヤマハント ソンクラム  
 (株) ピーエス三菱 正会員 大山 博明  
 (株) ピーエス三菱 正会員 志道 昭郎  
 早稲田大学 理工学部 正会員 依田 照彦

1. はじめに

一般に、PC橋における押し出し架設工法は、桁下空間を全く利用しない利点があり、跨線橋や跨道橋などの他、高橋脚を有する橋梁や山岳地における架橋など、支保工の設置が困難な場合に有効な架設工法である。しかしながら、重量の大きいコンクリート桁を押し出すため、比較的規模の大きい押し出し設備が必要となることや、押し出し時に主桁に生じる曲げモーメントの交番に対する架設用のPC鋼材が必要となることなどの短所を有している。このような背景から、著者らは波形鋼板を用いたPC箱桁橋において新しい押し出し架設工法を開発した。

本工法では、波形鋼板の下フランジ上に敷設したプレキャストコンクリート板(以下、PC板)を用いて下床版の施工を行うため、波形鋼板と下床版の接合部に、パーフォボンドリブを有するプレートによる新しい接合構造(以下、プレートジベル接合)を提案している(図-1)。本稿は、提案するプレートジベル接合と海外で実績のあるスタッドジベル接合<sup>1)</sup>について実施した、面外方向の曲げ抵抗に関する確認実験について報告するものである。

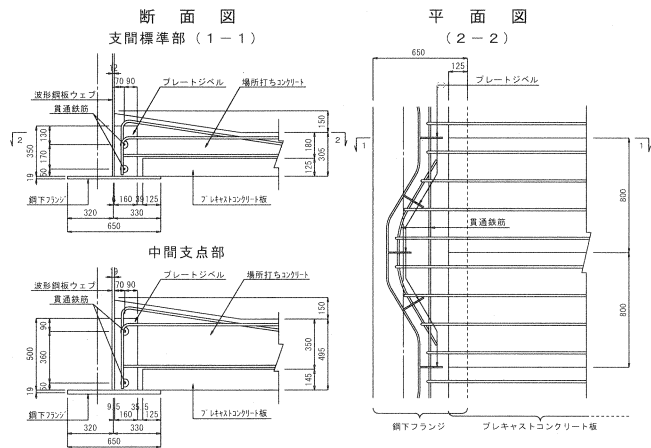


図-1 波形鋼板と下床版の接合構造

2. 実験概要

(1) 供試体形状

供試体は、試設計を行ったモデル橋梁における支間標準断面の1/2縮尺形状とし、片持ち状態の下床版に波形鋼板ウェブ1波長を配置した(図-2)。また、下床版コンクリートは、縮尺を考慮して最大粗骨材寸法を13mmとし、初期の乾燥収縮による肌離れを防止するため膨脹材を添加した。波形鋼板は、鋼板の曲げ耐力が接合構造の曲げ耐力を上回るよう板厚を9mmとし、接合構造以外の波形鋼板と下床版の接合面に剥離材をあらかじめ塗布した。

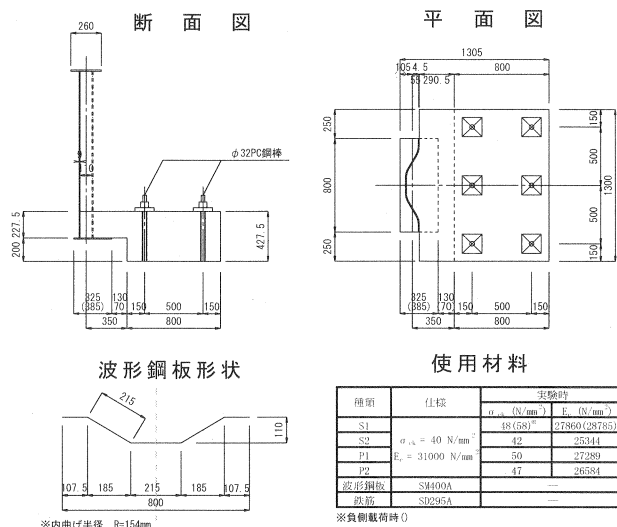


図-2 供試体形状

種別	仕様	実験時	
		$\sigma_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )
S1		48 (58) <sup>1)</sup>	27860 (28785)
S2	$\sigma_{yk} = 40$ N/mm <sup>2</sup>	42	25314
D1	$E_s = 31000$ N/mm <sup>2</sup>	50	27289
P2		47	26584
波型鋼板	S1400A		
剥離材	SD295A		

※負荷載荷時0

図-3 に供試体の接合構造の形状を示す。実験は、まず本工法で提案するプレートジベル接合を配置した P 1 供試体およびスタッドジベル接合を配置した S 1 供試体の各 1 体について実施した。その後、その実験結果を受けて、P 1 供試体に負側の曲げに対する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 P 2 供試体と、S 1 供試体に同様の異形棒鋼アンカーに加えて、正側の曲げに対する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 S 2 供試体を各 1 体製作し、同様の載荷実験を実施した。

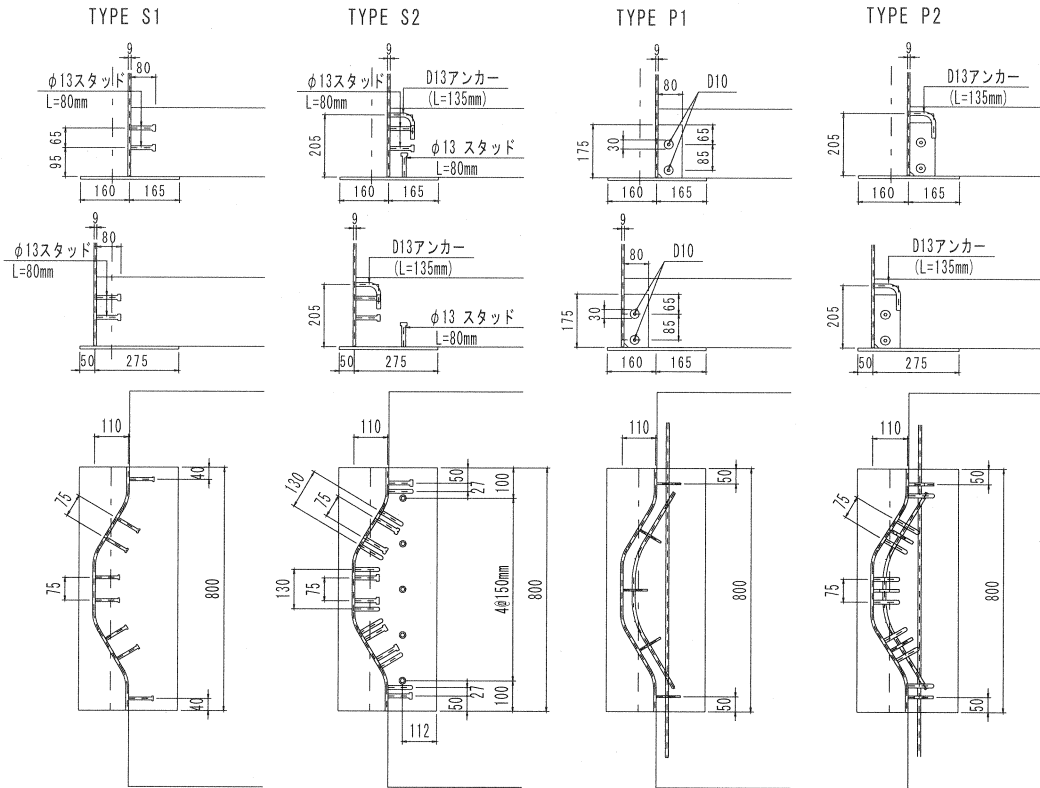


図-3 接合構造形状

(2) 載荷方法及び計測

荷重は、図-4 に示す載荷装置を用いて、波形鋼板ウェブ上端に曲げモーメント荷重を載荷した。載荷は、床版下縁が引張りとなる正側（図の載荷方向）方向に接合構造の使用時耐力相当の曲げモーメントを載荷後、ジャッキ位置を入れ替え、負側の使用時耐力相当の曲げモーメントを載荷し、その後同方向に破壊に至るまで荷重を増加させた。なお、荷重ピッチは  $1.5\text{kN}\cdot\text{m}$  とし、あらかじめキャリブレーションを行った圧力変換器を用いたジャッキの油圧計測により管理した。肌離れは、下床版の上下縁位置において波形鋼板の削孔箇所鋼板と接触しないように下床版に固定した鋼棒と

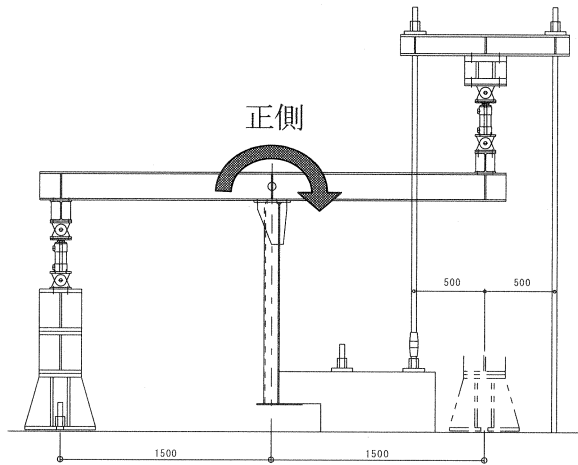


図-4 荷重載荷方法

波形鋼板の相対変位(肌離れ量)を計測した。

図-5に肌離れ量の計測位置を示す。なお、S1およびP1供試体においては、床版上縁の肌離れ量を图中的“変位形①”により計測したが、計測値に含まれる波形鋼板の変形の影響が過大であることが想定されたため、供試体S2およびP2においては“変位形③”を追加した。

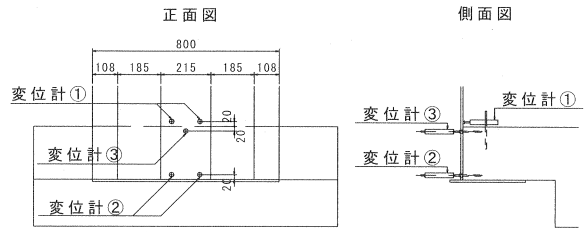


図-5 肌離れの計測位置

### 3. 接合構造の曲げ耐力

#### (1) 使用時および終局時耐力の算出方法

使用時および終局時耐力の曲げ耐力算出方法を表-1に示す。スタッドジベル接合においては、床版上下端を回転支点と仮定し、スタッドジベルまでの距離を有効高とする鉄筋コンクリート断面計算により、最外縁スタッドジベルが引張耐力となる曲げモーメントを曲げ耐力とした。プレートジベル接合においては、プレートに配置したパーフォボンドリブの2分点を回転支点とし、パーフォボンドリブのせん断耐力に支点からの距離を乗じた曲げモーメントを曲げ耐力とした。

表-1 使用時および終局時の曲げ耐力算出方法

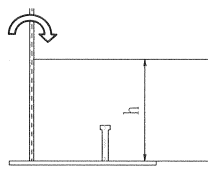
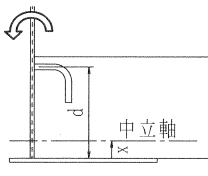
		曲げモーメント耐力の計算方法	ジベルの耐力計算式
スタッドジベル接合	正曲げ	<p>使用時曲げモーメント耐力  <math>M_a = C(2x/3) + T_1(d_1 - x) + T_a(d_2 - x)</math></p> <p>終局時曲げモーメント耐力  <math>M_u = C(2x/3) + T_1(d_1 - x) + T_u(d_2 - x)</math></p>	<p>スタッドジベルの引張耐力<sup>2)</sup></p> <p>終局耐力  <math>T_u = \min(T_{u1}, T_{u2})</math></p> $T_{u1} = 10.96\sqrt{f_c}(l_c + d_b)\sqrt{\beta_w} \cdot (1 + (N-1)D/4l_c)$ $T_{u2} = f_{sy}A_sN$
	負曲げ	<p>C : コンクリート圧縮力  <math>T_1</math> : <math>d_1</math>高さにスタッド引張力  <math>T_a</math> : スタッドの使用時引張力  <math>T_u</math> : スタッドの終局時引張力</p>	<p>使用耐力  <math>T_a = T_u / 1.7</math></p>
プレートジベル接合		<p>使用時曲げモーメント耐力  <math>M_a = V_{sd} \cdot d</math></p> <p>終局時曲げモーメント耐力  <math>M_u = V_{ud} \cdot d</math></p> <p><math>V_{scd}</math> : パーフォボンドリブの使用時せん断力  <math>V_{sud}</math> : パーフォボンドリブの終局時せん断力  <math>d</math> : 回転支点からリブの距離</p>	<p>パーフォボンドリブのせん断耐力<sup>3)</sup></p> <p>終局耐力  <math>V_{ud} = [1.45\{d^2 - \phi_{st}^2\}f'_c + \phi_{st}^2 f_{st}] - 106.1] / \gamma_b</math></p> <p>使用耐力  <math>V_{ad} = 0.6V_{ud}</math></p>

#### (2) 肌離れ耐力の算出方法

肌離れ改善構造は、使用時における肌離れ性状の改善を目的として、表-2に示す方法で耐力を算出した。正曲げに対しては、下床版上端を回転支点と仮定して、下フランジに設置したスタッドジベルのせん断耐力に支点からの距離を乗じた曲げモーメントを肌離れ耐力とした。負曲げに対しては、異形棒鋼アンカーまでの距離を有効高とする鉄筋コンクリート断面計算により、異形棒鋼アンカーの引張応力が制限値 ( $\sigma_{sa} = 100N/mm^2$ ) となる曲げモーメントを肌離れ耐力とした。

S2およびP2供試体のL形異形棒鋼アンカーおよび下フランジに設置したスタッドジベルは、肌離れ改善のみを目的としており、使用時の設計断面力に対して単体で配置数量を決定するものとした。

表-2 肌離れ耐力の曲げ耐力算出方法

	改善構造の計算方法	ジベルの耐力計算式
正側	 <p>使用時曲げモーメント  <math>M_a = V_{scd} \cdot h</math></p> <p><math>V_{scd}</math> : スタッドの使用時せん断耐力  <math>h</math> : 床版高さ</p>	<p>スタッドジベルのせん断耐力<sup>3)</sup>  <b>終局耐力</b>  <math>V_{sud} = \inf (V_{sud1}, V_{sud2})</math>  <math>V_{sud1} = (31 A_{ss} \sqrt{(h_{ss}/d_{ss}) f_{cd}} - 22000) / \gamma_b</math>  <math>V_{sud2} = 0.7 A_{ss} f_{sy}</math>  <b>使用耐力</b>  <math>V_{scd} = 0.5 V_{sud}</math></p>
負側	 <p>使用時曲げモーメント  <math>M_a = C(2x/3) + \sigma_{sa} A_s (d - x)</math></p> <p><math>\sigma_{sa}</math> : 異形棒鋼アンカーの許容応力度  <math>A_s</math> : 異形棒鋼アンカーの断面積  <math>d</math> : 有効高さ  <math>C</math> : コンクリート圧縮力</p>	

4. 実験結果及び考察

(1) 使用時および終局耐力

図-6 に、スタッドジベル接合を配置した S 1 供試体における曲げモーメントと肌離れの関係を示す。正曲げ载荷では、使用時の範囲において引張りとなる下縁側 (変位計②) で 0.4mm 程度の肌離れが計測され、圧縮となる上縁側 (変位計①) では、-0.2mm 程度の肌離れ (閉じ側) が計測された。上縁側のマイナスの計測値は、計測をコンクリート上縁の 20mm 上方で行ったことから、波形鋼板の変形によるものと考えられる。

負曲げ载荷では、使用時の範囲において引張りとなる上縁側 (変位計①) で 1.0mm 程度の肌離れが計測され、圧縮となる下縁側では 0.2mm 程度の肌離れが生じた後変動していない。上縁側 (変位計①) の計測値には、波形鋼板の変形が含まれることが想定されるが、目視において荷重増加に伴う明らかな肌離れが確認されたことから、スタッドジベル接合においては、正負両方向に対して肌離れ性状を改善する構造を付与する必要があることが確認された。なお、負曲げに対する最終的な耐力は終局時の耐力を上回るものであった。

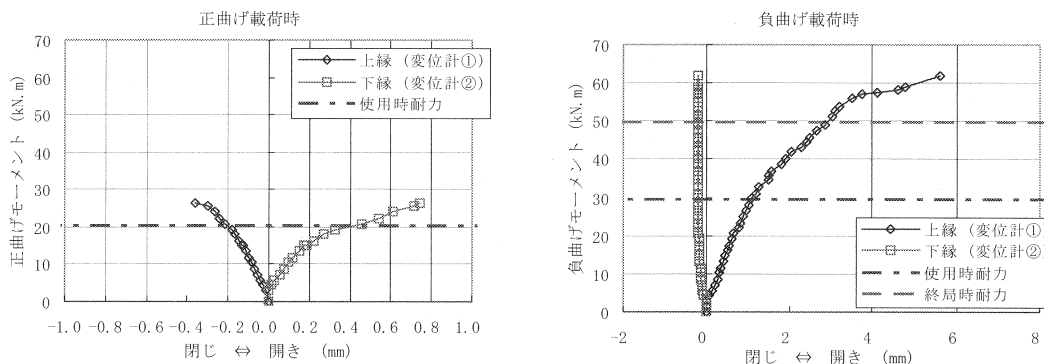


図-6 供試体 S 1 における曲げモーメントと肌離れ量の関係

図-7 にプレートジベル接合を配置した P 1 供試体の曲げモーメントと肌離れの関係を示す。正曲げ载荷では、使用時の範囲において引張りとなる下縁側 (変位計②) に肌離れは生じなかった。圧縮となる上縁側 (変位計①) で -0.1mm 程度の肌離れが計測された。マイナスの計測値は、S 1 供試体と同様に測定位置に伴う波形鋼板の変形によるものと考えられる。

負曲げ载荷では、使用時の範囲において引張りとなる上縁側 (変位計①) で 0.5mm 程度の肌離れが計測された。上縁側の計測値には波形鋼板の変形が含まれることが想定されるが、目視において荷重増加に伴う若

干の肌離れが確認されことから、プレートジベル接合においては、負曲げ方向に対して離れ性状を改善する構造を付与する必要があることが確認された。なお、負曲げに対する最終的な耐力は終局時を上回るものであった。

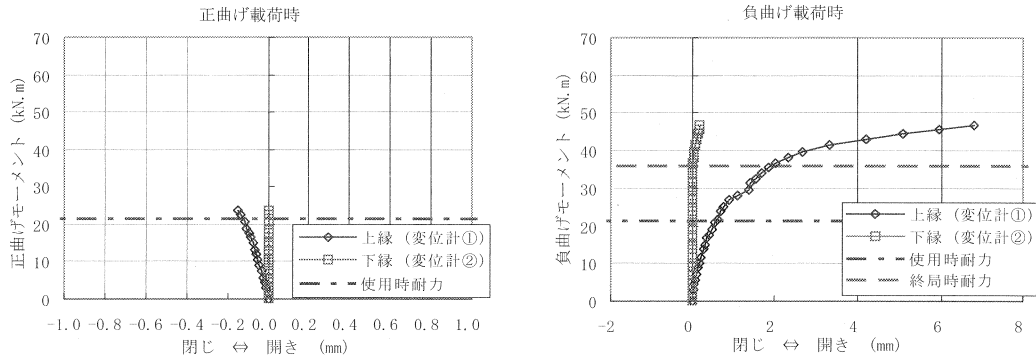


図-7 供試体P1における曲げモーメントと肌離れ量の関係

(2) 肌離れの改善効果

図-8 に、S1 供試体に正負両方向の曲げに対する肌離れ改善構造を追加した、S2 供試体の曲げモーメントと肌離れの関係を示す。正曲げ载荷では、使用時の範囲において引張りとなる下縁側 (変位形②) で肌離れは生じておらず、肌離れの改善目的で付与したスタッドジベルによる効果が確認できた。負曲げ载荷では、使用時の範囲で引張りとなる上縁側 (変位形③) で若干の肌離れが計測されたが、その量はわずかであり、また弾性挙動の範囲内であった。

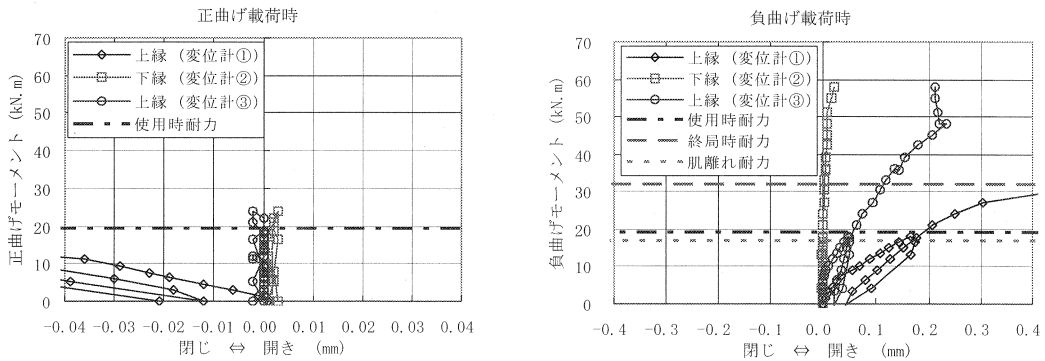


図-8 供試体S2の曲げモーメントと肌離れ量の関係

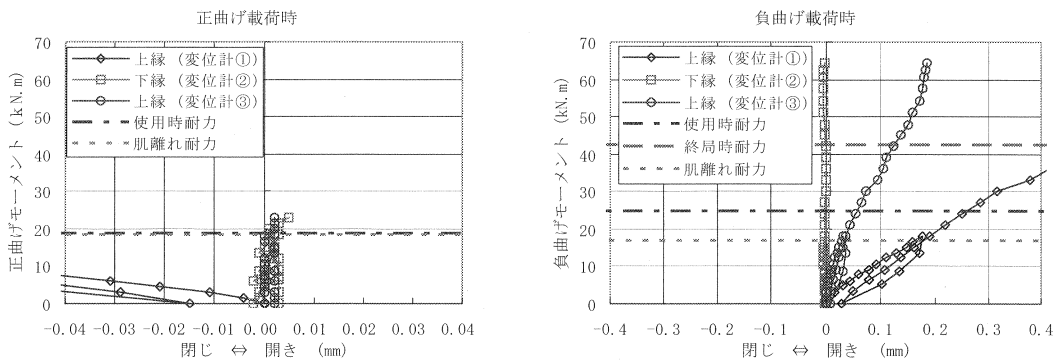


図-9 供試体P2の曲げモーメントと肌離れ量の関係

図-9 に、P 1 供試体に負側の曲げに対する肌離れ改善構造を追加した、P 2 供試体の曲げモーメントと肌離れの関係を示す。正曲げモーメントに対しては肌離れを改善する構造を付与していないが、引張りとなる下縁側 (変位計②) において使用時の範囲で肌離れは生じなかった。負曲げ荷重では、引張りとなる上縁側 (変位計③) において使用時の範囲で若干の肌離れが見られるが、S 2 供試体と同様に、肌離れの改善目的で付与した異形棒鋼アンカーによる効果が確認できた。

また、S 2 および P 2 供試体においては、使用時耐力相当の荷重載荷後、荷重を除荷して残留肌離れ量を計測した。その結果、残留する肌離れ量は極めて小さく、設定した肌離れ改善構造によって使用時の範囲における肌離れは十分制御可能であると考えられる。

### (3) ひび割れおよび破壊性状

使用時耐力まで載荷した正曲げ荷重では、いずれの供試体もひび割れは確認されなかった。負曲げ荷重では、使用時耐力に相当する荷重近傍でひび割れが発生した。終局時には、肌離れを改善する構造を付与していない P 1 および S 1 供試体においては、波形鋼板と下床版接合面の肌離れが卓越して増加したことから、接合構造の降伏による破壊と想定される。肌離れ改善構造を付与した P 2 および S 2 供試体においては、接合界面の肌離れではなく、下床版上縁のひび割れ幅が卓越して増加したことから、下床版コンクリートに配置した鉄筋の降伏に伴う破壊と想定される。破壊後の P 1 供試体のひび割れ状況を写真-1 に、肌離れの改善構造を付与した P 2 供試体のひび割れ状況を写真-2 に示す。何らかの要因による損傷の発生を想定した場合、変状確認および補修が容易となるよう接合構造の耐力は床版の耐力以上とし、P 2 供試体のような床版部のひび割れが卓越する破壊性状とする方が望ましいと考えられる。

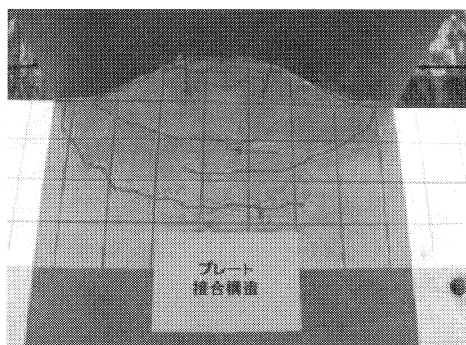


写真-1 ひび割れ状況 (P 1 供試体)

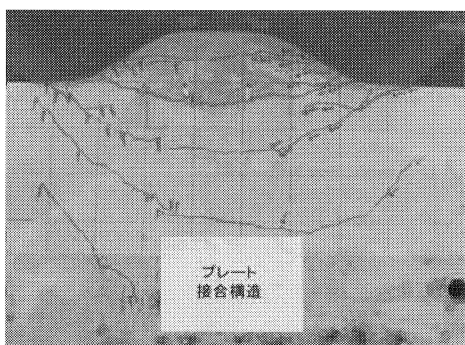


写真-2 ひび割れ状況 (P 2 供試体)

## 5. まとめ

本実験では、面外方向の曲げモーメントに対して、提案する新しい波形鋼板と下床版の接合構造の曲げ耐力性能を確認した。本実験により以下の事項が確認できた。

- 1) プレートジベル接合およびスタッドジベル接合の両接合構造において、提案した耐力算出方法により安全側の評価が可能である。
- 2) 肌離れを改善する構造を付与することにより、使用時の範囲における波形鋼板と下床版との接合界面の肌離れは、ごくわずかに抑制することができ、弾性的な挙動の範囲に制御することが可能である。

### 【参考文献】

- 1) 「Altzipfergrund 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
- 2) Bode, H. and Roik, K., Headed Studs-Embedded in Concrete and Loaded in Tension, the PCI Annual Conventional, Los Angeles, pp.61-88, 1983.
- 3) 「複合構造物の性能照査指針(案)」構造工学シリーズ 11, 土木学会, 2002 年