

(46) 合成桁による孔あき鋼板ジベルのせん断耐力確認実験

浅沼 大寿¹・平 陽兵²・一宮 利通³・大窪 一正⁴・古市 耕輔⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木構造グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:asanumta@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木構造グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:ytaira@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木構造グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:ichinomt@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木構造グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:okubokaz@kajima.com

⁵正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 土木構造グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)
E-mail:furuichi-k@kajima.com

孔あき鋼板ジベル (PBL) のせん断耐力は、鋼板孔内のコンクリートに作用する拘束力の影響が大きいとされる。筆者らは、外的に拘束力を作用させたせん断実験により、拘束力の影響を考慮した耐力算定式を提案しているが、実際の部材中でPBLにどのように拘束力が作用するかは明らかとなっていない。また、複合構造においては高強度コンクリートの利用により断面の縮小化や鋼材量の低減に期待できることから、高強度コンクリートを用いた複合構造に着目している。そこで、PBLのせん断耐力の確認とともに拘束力に寄与すると考えられる変形挙動を把握するため、高強度コンクリートを用いてPBLによって接合し、曲げ降伏前にPBLが破壊する諸元の合成桁2体の載荷実験を実施した。

Key Words : hybrid members, shear connector, shear capacity, PBL, Perfobond rib shear connector

1. はじめに

鋼・コンクリート複合構造では、コンクリートと鋼の一体化のためにずれ止めが用いられるが、筆者らは孔あき鋼板ジベル (以下、PBL) に着目している。PBLについて複合構造標準示方書¹⁾ (以下、示方書) には、鋼板がせん断降伏する場合 (図-1(a)) と鋼板孔内のコンクリートが鋼板面に沿ってせん断破壊する場合 (図-1(b)) の耐力算定式が示されている。後者は、普通強度コンクリートの実験結果の回帰計算により導出された式であり²⁾、高強度コンクリートへの適用には課題がある。

また、コンクリートが鋼板面に沿って破壊する場合のPBLのせん断耐力は、鋼板孔内のコンクリートに作用する拘束力の影響が大きいとされている。図-2に鋼板孔内のコンクリートに作用する拘束力の概念図を示す。PBLにせん断力が作用すると、鋼板孔内のコンクリートは周囲のコンクリートを押し広げようとし、その反作用の力

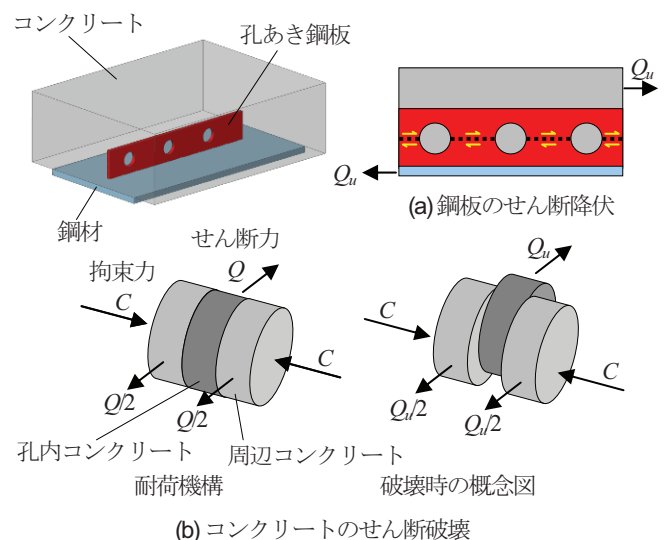


図-1 孔あき鋼板ジベル (PBL) とその破壊モード

として鋼板孔内のコンクリートには拘束力が作用すると考えられる．示方書のせん断耐力算定式では，この拘束力の影響は考慮されていない．拘束力がPBLのせん断耐力に与える影響を確認するため，筆者らは，孔1個を有する小型試験体に外的に拘束力を作用させた状態でせん断試験を実施し（図-2(b)），その結果をもとに圧縮強度と拘束力をパラメータとした高強度コンクリートまで適用可能なせん断耐力算定式を提案している³⁾．

日向ら⁴⁾は，合成桁のように鋼材フランジにPBLによってコンクリートが接合された形状の場合，鋼板孔内のコンクリートが周囲のコンクリートを押し広げることで曲げ変形が生じ，この押し広げる力の反力として拘束力が作用するとしている．曲げ変形が進行し，図-3に示すように抵抗断面の引張縁であるPBL直上のコンクリート応力が引張強度に達すると，周囲のコンクリートは押し広げ力に抵抗できなくなりPBLは破壊に至るとしている．このとき，各材料を弾性体と仮定すると，拘束力は式(1)により算出できる．

$$T_c = \frac{f_{ct}}{\frac{ye}{I_e} + \frac{1}{A_e}} \quad (1)$$

ここで， T_c ：拘束力（N）， f_d ：コンクリートの割裂引張強度（N/mm²）， y ：かぶり部図心からジベル孔中心までの距離（mm）， e ：ジベル直上からかぶり部図心までの距離（mm）， I_e ：横補強筋を考慮したかぶり部の換算断面二次モーメント（mm⁴）， A_e ：横補強筋を考慮した換算断面積（mm²）である（図-4）．

これは，曲げ理論に基づいて理論的に導出される式であるが，実際の部材中で鋼板孔内のコンクリートにどのように拘束力が作用するかは明らかとなっていない．

以上の背景から，高強度コンクリートを用いて，PBLによって接合し曲げ降伏前にPBLが破壊する諸元の合成桁2体の載荷実験を実施した．この結果から，鋼板面に沿ってコンクリートが破壊する場合のPBLのせん断耐力を確認するとともに拘束力に寄与すると考えられる変形挙動について確認した．

2. 合成桁の載荷実験

(1) 実験方法

a) 試験体と載荷方法

試験体一覧を表-1に示す．試験体はPBLの孔数，孔間隔が異なる2体とした．試験体形状を図-5に示す．試験体は，厚さ250mm×幅600mmの鉄筋コンクリートとH-588×300×12×20の鋼桁をPBLで接合した合成桁である．試験体全長は4000mmとした．使用材料の強度試験結果を

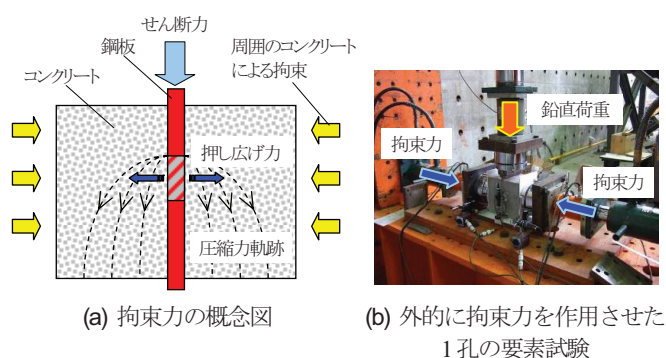


図-2 拘束力の概念図と要素試験

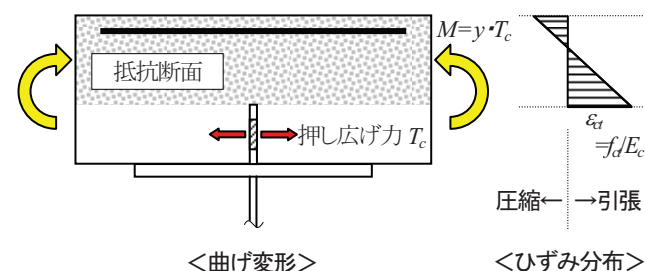


図-3 コンクリートブロックの曲げ変形とひずみ分布

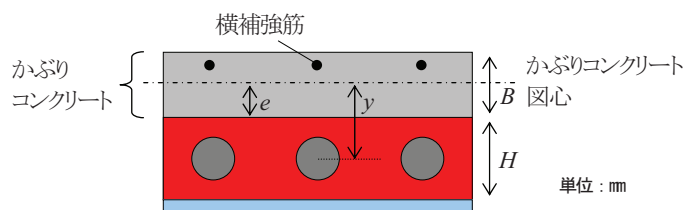


図-4 式(1)の記号の定義

表-1 試験体一覧

試験体名	PBL				
	孔径 (mm)	板厚 (mm)	鋼板高 (mm)	孔間隔 (mm)	孔数 (個/せん断スパン)
PBL-180	50	12	100	180	10
PBL-90	50	12	100	90	20

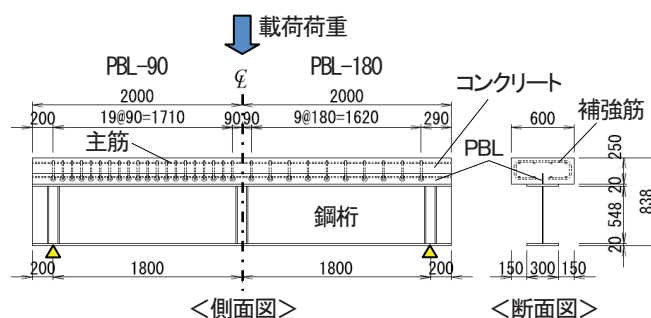


図-5 試験体形状

表-2 材料試験結果

試験体名	部位	強度	
PBL-180	コンクリート (現場封緘)	圧縮強度	146.3 N/mm ²
		ヤング係数	43.9 kN/mm ²
		引張強度	6.70 N/mm ²
	鋼桁	降伏強度	290 N/mm ²
	PBL	降伏強度	277 N/mm ²
PBL-90	コンクリート (現場封緘)	圧縮強度	133.6 N/mm ²
		ヤング係数	41.5 kN/mm ²
		引張強度	5.11 N/mm ²
	鋼桁	降伏強度	338 N/mm ²
	PBL	降伏強度	385 N/mm ²

表-2に示す。PBLは、鋼板厚12mm、鋼板高100mm、孔径50mmと同じであるが、PBL-180では180mmの間隔で孔を配置し、PBL-90では90mmの間隔で孔を配置した。せん断スパン長を1800mmとしており、その結果、せん断スパン中に配置される孔数は、PBL-180で10個、PBL-90で20個である。孔内に貫通鉄筋は配置していない。コンクリート内には軸方向鉄筋D16を配置し、加えてPBLの孔と同じ間隔でせん断補強筋D16を配置した。孔あき鋼板の孔内部を除く鋼板および鋼桁とコンクリートの接触部は、グリスを塗布して鋼とコンクリートの付着を除去した。なお、試験体は曲げ降伏の前に接合面に作用する水平せん断力により、鋼板孔内のコンクリートのせん断破壊によるPBLの破壊が生じるように設計した。

載荷方法は、単純支持、1点載荷の単調載荷とし、載荷板の幅はコンクリート幅と同じとした。載荷実験状況を写真-1に示す。

b) 計測項目

計測位置図を図-6(a)～(c)に示す。支間中央鉛直変位、支点変位、及び接合面のずれ変位を変位計で計測した。ずれ変位はせん断スパンの3断面と試験体端部で計測した。部材軸方向のひずみは、鋼桁の上下フランジ、コンクリート内の鉄筋、及びコンクリート上縁に単軸ひずみゲージを貼付して計測した。加えて、鋼桁ウェブは3軸ひずみゲージを貼付してせん断ひずみも計測した。また、PBLの鋼板に直交する方向のコンクリートと横補強筋のひずみ分布を確認するため、コンクリート上縁、横補強筋にひずみゲージを貼付したほか、PBL鋼板の直上付近にモールドゲージを埋設した。

(2) 実験結果

a) 損傷進展過程

載荷荷重と中央鉛直変位の関係を図-7に示す。鉛直変位は、支間中央に設置した変位計の計測値から支点沈下分を減じた値である。PBL-180では載荷荷重1840kN、PBL-90では載荷荷重2282kNで荷重が低下した。2体の荷重と支間中央鉛直変位の関係を比較すると、孔数の多いPBL-90の剛性が高く、PBL破壊時の荷重が大きい。これ

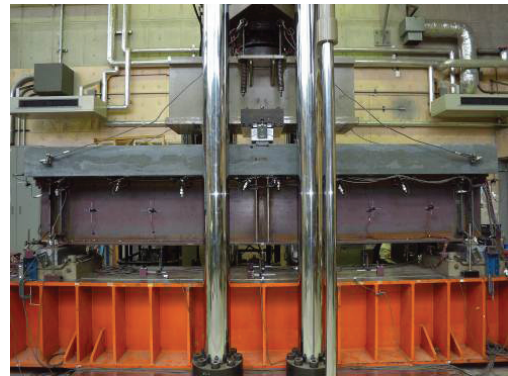


写真-1 載荷実験状況

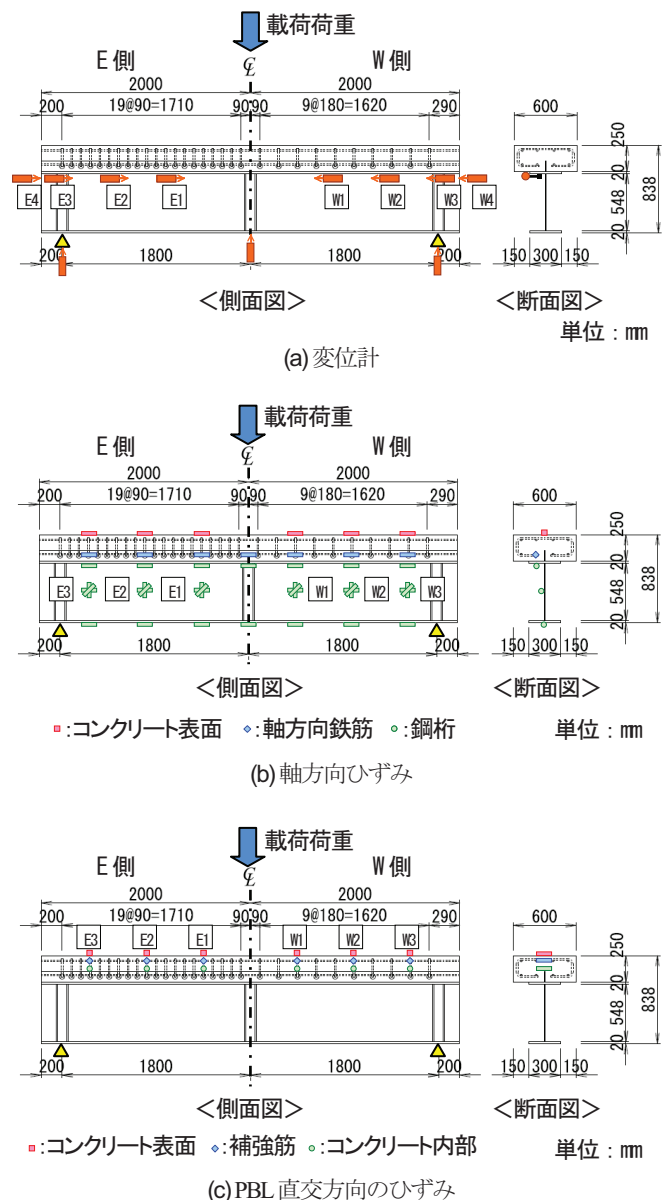


図-6 計測位置図

は、孔数が多いことでコンクリートと鋼桁の一体性が増し、接合面にずれが生じにくいためであると考えられる。

載荷荷重と試験体端部での接合面のずれ変位の関係を図-8に示す。計測の結果、PBL-180ではW側、PBL-90ではE側でずれが急増したため、図には、PBL-180はW4、PBL-90はE4での計測結果を示している。PBL-180では1840kN時、PBL-90では2282kNでずれが急増している。図-7、図-8の結果から、2体の試験体は、それぞれの荷重低下点においてPBLが破壊し、コンクリートと鋼桁の一体性が低下し、荷重が低下したものと考えられる。PBL-180ではW側のみ、PBL-90ではE側のみでずれが急増しており、それぞれの試験体は、片側のせん断スパンの接合面が破壊して荷重が低下したと考えられる。

b) ずれ変位分布

ずれ変位の分布を図-9に示す。2体の試験体それぞれのPBLの破壊が生じた側のせん断スパンにおける、PBL破壊時と載荷荷重500kN時での分布である。ずれ変位の分布から、接合面全体でおおよそ一様のずれが生じていると言える。500kN時における2体の分布を比較すると、PBL-90の方がずれ変位が小さく、孔数が多いことでコンクリートと鋼桁の一体性が増していると言える。また、PBL破壊時のずれ変位は2体でほぼ同じ0.5mm程度であり、破壊時のずれは、孔数の違いによらなかった。

c) PBLのせん断耐力

PBL破壊時に接合面に作用していた水平せん断力を求める。ある区間に作用する水平せん断力は、その区間の端部2点でのコンクリートまたは鋼桁の負担する軸力差であるから、せん断スパンにおける水平せん断力は、支間中央のコンクリートが負担する圧縮力あるいは鋼桁が負担する引張力に等しい。そこで、計測された鋼桁の軸方向ひずみ分布からPBL破壊時に接合面に作用していた水平せん断力を算出した。PBL破壊時における支間中央断面のひずみ分布を図-10に示す。このひずみ分布を断面高さ方向に積分することによって接合面全体のせん断耐力を算出した。算出した接合面全体のせん断耐力を表-3に示す。表には、示方書式による計算値も示した。押抜き試験でも確認されたように³⁾、示方書式の適用範囲外である高強度コンクリートの計算値に対して、今回の実験結果は著しく小さい。2体を比較すると、接合面全体としては孔数の多いPBL-90の方がPBLのせん断耐力が大きいものの、PBL-180の1.18倍しかなく、接合面のせん断耐力は孔数に比例しなかった。

前述のとおり、PBLのせん断耐力は、孔内のコンクリートに作用する拘束力の影響が大きいとされている。孔内のコンクリートが周囲のコンクリートを押し広げようとする力に対して、周囲のコンクリートや横補強筋が抵抗して、押し広げる力の反作用の力が拘束力として孔内

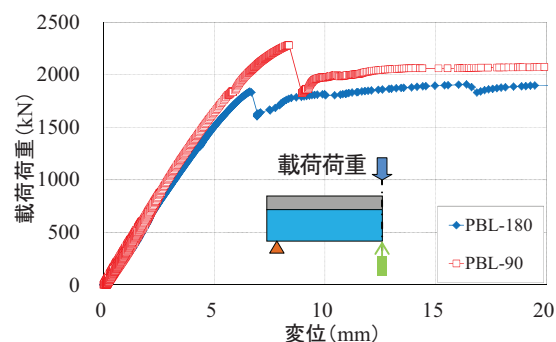


図-7 載荷荷重と支間中央鉛直変位の関係

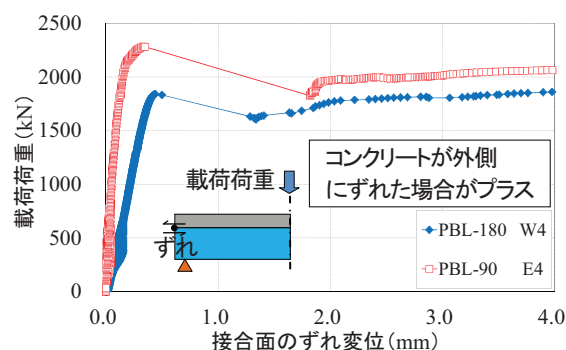


図-8 載荷荷重と接合面のずれ変位の関係

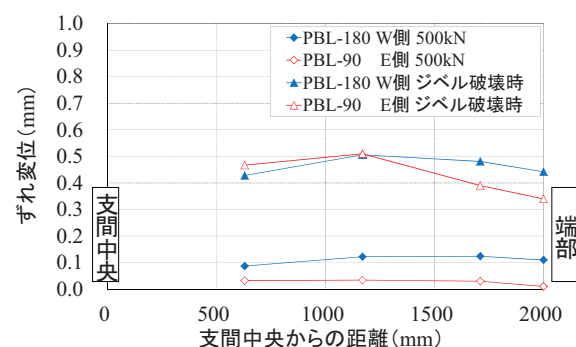


図-9 ずれ変位分布

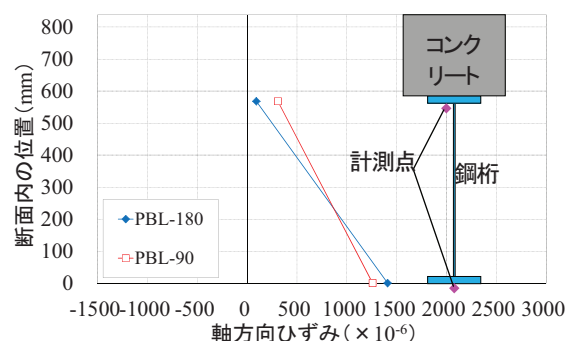


図-10 PBL 破壊時における断面のひずみ分布（支間中央）

のコンクリートに作用するものと考えられる。したがって、拘束力の大きさにはコンクリートの形状や横補強筋量が影響すると思われる。今回の場合、図-11に示すように、PBL-180ではPBL1孔は軸方向に180mm分のコンクリートにより拘束され、PBL-90では軸方向に90mm分のコンクリートにより拘束されていると考えれば、PBL1孔のせん断耐力は、PBL1孔当りの拘束に寄与しているコンクリートの軸方向長さの大きいPBL-180の方が大きくなったと考えられる。

d) PBLの鋼板に直交する方向のコンクリートの変形

荷重低下直後の試験体端部におけるひび割れ発生状況を写真-2に示す。また、PBL直上に埋め込んだモールドゲージで計測したひずみと載荷荷重の関係をPBL-180とPBL-90についてそれぞれ図-12、図-13に示す。2体の試験体とも、全ての計測点においてPBLの破壊時付近で急激にひずみが増加し、一部のゲージは計測不能となった。写真と計測結果から、PBL破壊時において高さ方向にひび割れが発生したと考えられる。

各計測点の最大荷重時におけるPBLの鋼板に直交する方向のひずみ分布をPBL-180について図-14に、PBL-90について図-15に示す。ただし、モールドゲージがひび割れの発生により計測不能となった計測点については、その直前の値を示している。図から、載荷点付近の計測点を除いて、試験体上縁が圧縮、接合面側が引張となるひずみ分布となり、曲げ変形の挙動を示したことがわかる。日向らが示した挙動であるとともに、筆者らが実施した押抜き試験においても同様の傾向が現れており³⁾、鋼板孔内のコンクリートが周囲のコンクリートを押し広げようとする力によって変形が生じていると考えられる。これに対し載荷点付近の計測点（W1、E1）では、高さ方向に一樣の引張ひずみが生じ、曲げ挙動は見られなかった。生じていたひずみの大きさは載荷点付近の方が大きく、端部に向かうほど小さくなっている。したがって、載荷点付近の孔の方が、早期にPBL直上のひび割れが発生するなど破壊に近い状態または破壊していた可能性があると考えられる。

3. 拘束圧を考慮した耐力算定

(1) 実験時にPBLに作用した拘束圧

筆者らは、PBLの孔内コンクリートに作用する拘束力による影響に着目し、圧縮強度 $42.2 \sim 165.4 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートを用いた小型試験体に外的に拘束圧を作用させた状態でのせん断試験を全26体について実施し、その結果をもとに式(2)のせん断耐力算定式を提案している³⁾。

表-3 PBLのせん断耐力

	孔数 個 /せん断 スパン	実験値 kN /せん断 スパン	示方書式*	
			kN/孔	kN /せん断 スパン
PBL-180	10	1,933	568	5,680
PBL-90	20	2,274	515	10,300

※ $V_{PBL} = (4.31 \times \pi \times d^2 / 4 \times (l/d)^{0.5} \times f_{cd} - 39.0 \times 10^3) \gamma$
 ここでは、 $\gamma = 1.0$ として算出した。

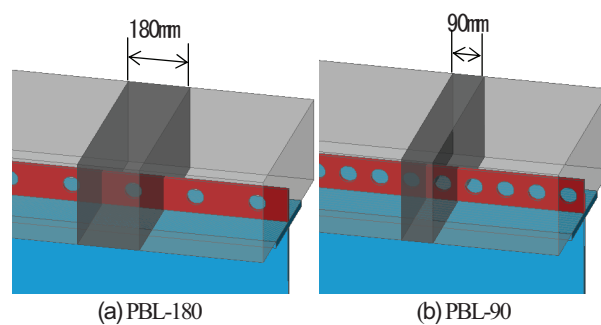


図-11 1孔を拘束する範囲のイメージ

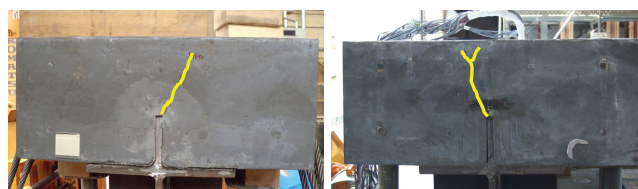


写真-2 PBL破壊時に試験体端部に発生したひび割れ

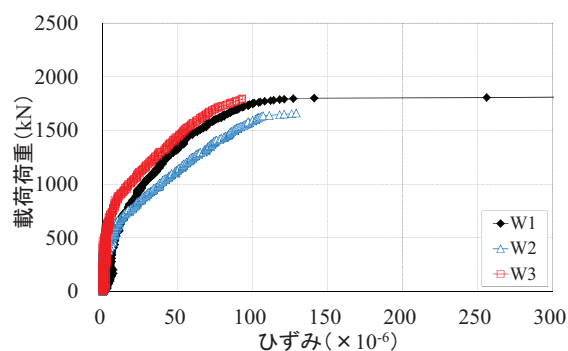


図-12 モールドゲージの計測結果 (PBL-180)

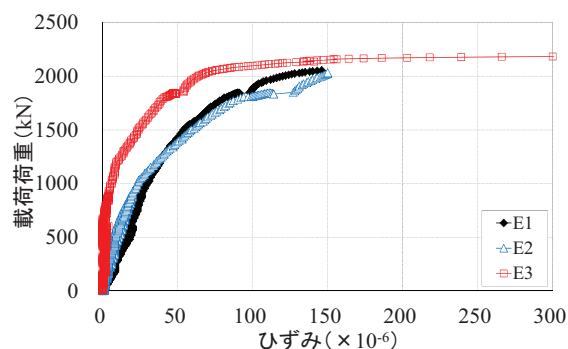


図-13 モールドゲージの計測結果 (PBL-90)

$$Q_c = \left(0.784 \cdot f'_c \cdot \frac{1}{3} \cdot \sigma_n \cdot \frac{2}{3} \right) \times \frac{\pi d^2}{4} \times 2 \quad (2)$$

ここで、 Q_c : PBLのせん断耐力 (N), f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2), σ_n : 鋼板孔内のコンクリートに作用する拘束圧 (=拘束力/孔面積) (N/mm^2), d : 孔径 (mm) である。

PBLの孔内コンクリートは、載荷板や接合面の摩擦などの拘束を受けるほか、せん断力が作用すると、鋼板孔内のコンクリートが周囲のコンクリートを押し広げようとする力によってコンクリートは変形し、押し広げる力の反力として鋼板孔内のコンクリートには拘束力が作用すると考えられる。そこで、実験時には種々の拘束条件や鋼板孔内のコンクリートによる押し広げ力によって図-14、図-15のようなひずみ分布が生じたと考え、このひずみ分布を生じさせた力の反力として拘束力が鋼板孔内のコンクリートに作用したと考えた。この場合、実験時の拘束力は、図-14、図-15のひずみ分布を高さ方向に積分することで求めることができる。拘束力の算出の際には、図-11で示した例のように、拘束に寄与する範囲を孔間隔分と考え、積分する際のコンクリートの幅は、PBL-180では180mm、PBL-90では90mmとした。このようにして算出した拘束力を孔面積で除して拘束圧を算出した。実験時の計測はせん断スパン中の3断面について実施しているため、計測していない部分については線形的に補完した。PBL直交方向のひずみ分布から求めた拘束圧の分布を図-16に示す。この図から、拘束圧はほぼ線形に変化し、端部の方が小さいことがわかる。前述したように、実験では載荷板による拘束があったと考えられる。図-17、図-18に、図-16の値を用いて式(2)により算出した各孔のせん断耐力を示す。拘束力の影響を受けるために各孔の耐力は異なり、拘束力の小さい試験体端部の方が、耐力算定値は小さい。試験体端部と載荷点付近のPBLのせん断耐力について、式(2)による計算値を比較すると、載荷点付近のPBLは端部に比べ2倍以上の耐力となっており、鋼板直交方向の曲げ変形を拘束することでPBLは大きな耐力を得られると考えられる。例えば、コンクリート厚が大きい場合や補強筋量が多い場合、また直交方向にプレストレスが導入される場合などにPBLの耐力向上に期待できる。

(2) コンクリートの変形を考慮した拘束圧の算定

ここでは、PBL破壊時における鋼板直交方向のコンクリートの変形を仮定し、拘束力とせん断耐力の算定を試みる。1つ目の方法として、抵抗断面には高さ方向に一樣に引張りひずみが生じ、そのひずみがコンクリートのひび割れひずみに達した段階でPBLが破壊すると仮定した場合について拘束力を算出した。ひずみ分布の積分値が

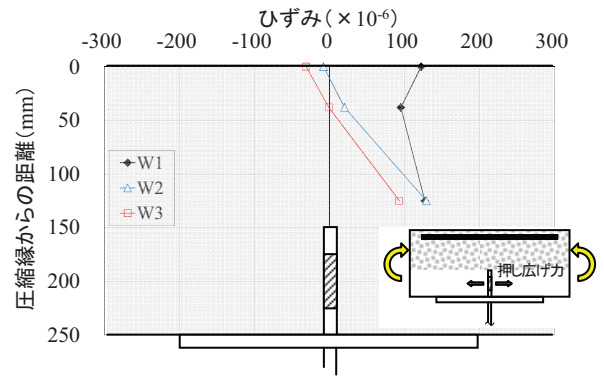


図-14 最大荷重時のコンクリートのひずみ分布 (PBL-180)

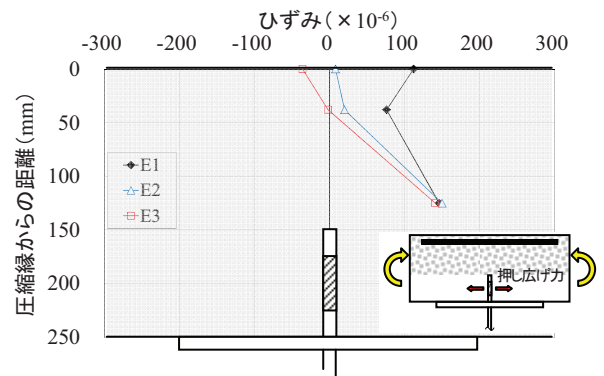


図-15 最大荷重時のコンクリートのひずみ分布 (PBL-90)

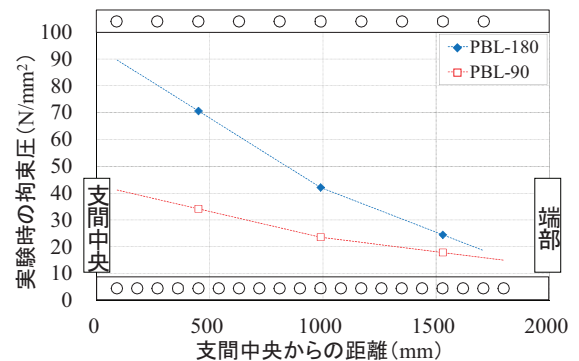


図-16 PBL 破壊時に孔内コンクリートに作用した拘束圧

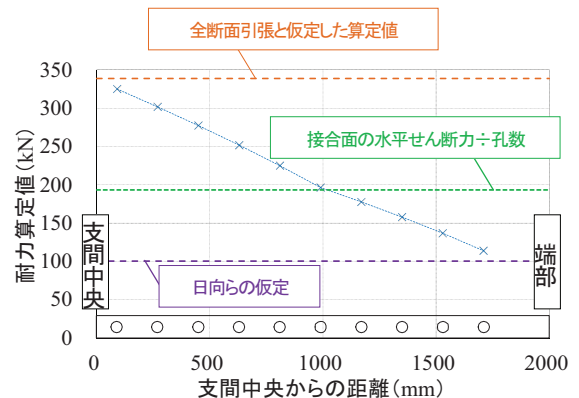


図-17 実験値と提案式による耐力算定値の比較 (PBL-180)

拘束力であるとする、高さ方向に一樣の引張ひずみが生じるとしたこの仮定の場合に、拘束力の算定値が最も大きくなる。2つ目の方法として、日向らの仮定に従い拘束力を式(1)により算出した。2つの仮定により求めた拘束力を孔面積で除して拘束圧とし、式(2)によってPBLのせん断耐力を算定した。せん断耐力算定値を図-17、図-18に示す。図から、実験におけるPBLのせん断耐力は、せん断スパン全体にわたって2つの仮定による耐力算定値の間に分布しており、試験体は2つの仮定の中間的な拘束条件下にあったと考えられる。荷重点付近では、全断面引張とした計算値と実験値が同程度にあり、この要因としては、前述のとおり、荷重板の拘束により曲げ変形が拘束されたことによると考えられる。一方、荷重点から離れた試験体端部付近では、日向らの仮定に近い算定値となっており、端部付近では曲げ変形しやすい状態だったためと考えられる。最も拘束が小さかったと考えられる試験体端部の孔に着目し、実験時の拘束圧と日向らの仮定による拘束圧算定値を表-4に示す。表から、PBL-90については実験値を過小評価していることがわかる。したがって、試験体端部でも周囲のコンクリートにおけるPBL直交方向の曲げ変形以外にも拘束要因があったものと考えられる。

4. まとめ

高強度コンクリートと鋼桁をPBLで接合し、曲げ降伏前にPBLが破壊する諸元で設計した合成桁の荷重実験を実施し、高強度コンクリートを用いたPBLの部材中における耐力と耐力発現時の挙動を確認した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) PBLの孔間隔を半分にして孔数を2倍にした合成桁の方が、接合面全体の耐力が大きいものの、1.18倍しかなかった。
- 2) PBLの鋼板直交方向には、鋼板孔内のコンクリートによる押し広げ力に起因すると考えられる曲げ変形が生じ、PBL破壊時にはPBL直上のコンクリートにひび割れが発生した。
- 3) PBLの鋼板直交方向のコンクリートのひずみ分布を高さ方向に積分して拘束力を算出し、その拘束力を孔面

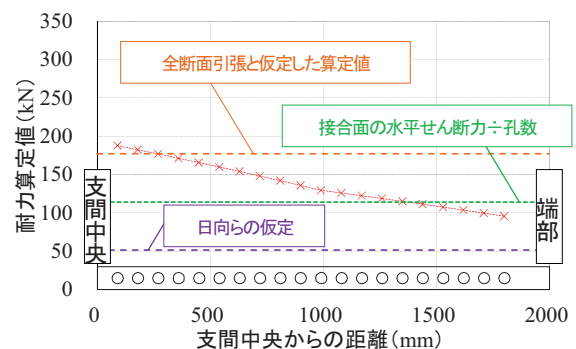


図-18 実験値と提案式による耐力算定値の比較 (PBL-90)

表-4 実験値と仮定に基づく拘束圧算定値の比較

拘束圧	実験値 (端部の孔)	計算値 日向らの仮定 (曲げ理論)
	N/mm ²	N/mm ²
PBL-180	18.6	15.4
PBL-90	15.0	5.9

積で除することで拘束圧を算出した。拘束圧はせん断スパンで線形的に変化し、端部の拘束圧が小さかった。荷重点付近では荷重板による拘束の影響が大きかったためと考えられる。

- 4) 既往の研究を参考に、押し広げ力に起因する曲げ変形でコンクリートにひび割れが発生する時点でPBLが破壊すると仮定した拘束圧による計算値は、実験値を過小評価した。

今後、別途実施している押抜き試験結果との比較や拘束力に影響を与えると考えられるコンクリート形状や補強筋量を変動させた解析を実施し、拘束力に関する種々の要因を明らかにする。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造標準示方書，2009
- 2) 保坂鐵矢，光木香，平城弘一，牛島祥貴，橘吉宏，渡辺滉：孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，(2000)，pp.1593-1604.
- 3) 浅沼大寿，平陽兵，一宮利通，古市耕輔：孔あき鋼板ジベル(PBL)の耐力算定法，鹿島技術研究所年報，Vol.60，(2012.9)，pp.51-56.
- 4) 日向優裕，藤井堅，深田和宏，道管裕一：並列配置された孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動，構造工学論文集，Vol.53A，(2007)，pp.1089-1098.

EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR CAPACITY OF PERFOBOND RIB SHEAR CONNECTORS ON COMPOSITE GIRDERS

Taiju ASANUMA, Yohei TAIRA, Toshimichi ICHINOMIYA, Kazumasa OKUBO
and Kosuke FURUICHI

In the JSCE design code the range of compressive strengths of concrete for evaluating the shear capacity of PBL is $23.8 - 57.6 \text{ N/mm}^2$, so the code is not applicable to high-strength concrete. Moreover, it is still unclear how lateral force affects shear capacity and how lateral pressure acts on the structure. Accordingly, the authors conducted loading tests on two composite girders to determine the shear capacity of PBL and the lateral pressure in composite girders made from high-strength concrete. The bending deformation of the concrete in a direction perpendicular to the PBL was observed when the load was increased. When the shear force reached the capacity of the PBL, a crack caused by bending deformation occurred at the top of the PBL. The lateral pressure was measured in terms of the strain distribution in the PBL in a perpendicular direction. The strain distribution at the center was found to be larger than at the end part. Finally, the lateral pressure was compared with that given by an existing evaluation method based on bending theory, and it was found that the evaluation method underestimated the lateral pressure.