

## ツインパーフォボンドリブ接合の押抜きせん断実験

(株)ピーエス三菱 正会員 ○桜田道博  
 日本道路公団 北海道支社 東田典雅  
 日本道路公団 北海道支社 竈本武弘  
 (株)ピーエス三菱 正会員 清水俊一

### 1. はじめに

近年、PC 橋の軽量化、施工の合理化およびコスト削減を図るため、波形鋼板ウェブを有する複合 PC 箱桁橋(以降、波形鋼板ウェブ橋)の実績が増えている。波形鋼板ウェブ橋における床版とウェブとの接合方法のひとつとして、ツインパーフォボンドリブ(以降、Twin-PBL)接合がある。本接合方法は孔あき鋼板ジベル(パーフォボンドリブ、以降、PBL)が橋軸方向に2列配置されたものであり、水平せん断力だけでなく横方向の首振りモーメントに対しても抵抗できる接合方法である(図-1)。一方、波形鋼板ウェブ橋においては、架設外ケーブルを定着するため、図-2のようにコンクリート床版を打ち下ろすケース(コンクリートエッジ方式)が増えている。Twin-PBL 接合の基本的性状については、既往の研究<sup>1),2),3)</sup>によりある程度明らかにされているが、コンクリートエッジ方式において、本接合のせん断耐力を検討した例はない。コンクリートエッジ方式の場合、通常の床版に比べ、PBL の縁端距離が小さくなるため、接合部の水平せん断耐力の低下が懸念される。そこで、コンクリートブロックの幅を小さくした供試体により、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 接合のせん断耐力を検討した。

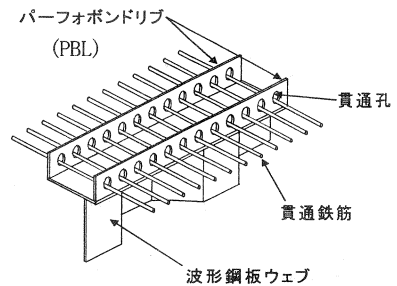


図-1 ツインパーフォボンドリブ接合

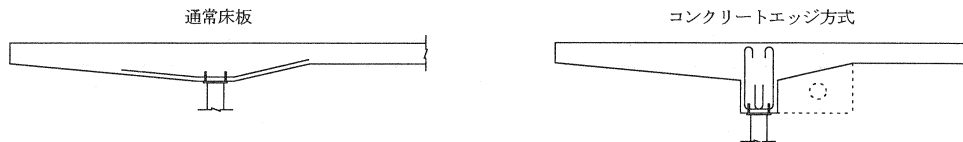


図-2 波形鋼板ウェブ橋の床板形状

### 2. 実験概要

#### (1) 供試体

供試体の諸元および形状・寸法をそれぞれ、表-1 および図-3 に示す。供試体は、コンクリートブロックの幅、貫通孔数、貫通孔の径および貫通鉄筋径をパラメーターとした5種類(各3体、合計15体)とした。供試体製作時のコンクリートの打設方向は実際の施工に合わせ、接合部の上方からとした。鋼フランジとコンクリートブロックとの付着は、試験結果に影響しないよう切断した。本試験においては、載荷荷重、コンクリートブロックと鋼フランジとの相対ずれ変位および貫通孔周りのひずみを計測した。

#### (2) 載荷方法

載荷方法および載荷状況をそれぞれ、図-4 および写真-1 に示す。弾性域での載荷は、荷重制御にて50kNピッチで行った。荷重と相対ずれ変位との関係が直線ではなくなった後は、変位制御にて載荷した。

表-1 供試体の諸元

供試体名	コンクリート ブロック幅(mm)	PBL 枚数	貫通孔数 (個/枚)	孔径 (mm)	貫通 鉄筋
50-D22-1	500	2	1	60	D22
50-D22-2	500	2	2	60	D22
60-D22-1	600	2	1	60	D22
60-D22-2	600	2	2	60	D22
50-D16-1	500	2	1	55	D16

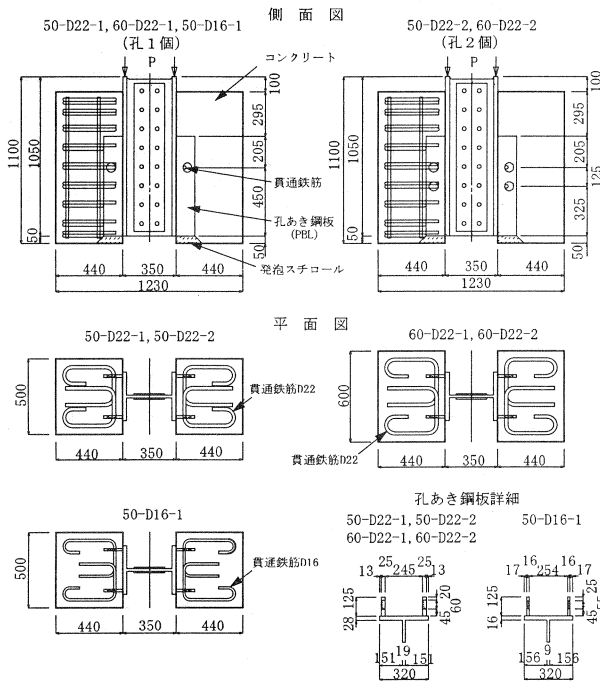


図-3 供試体形状・寸法

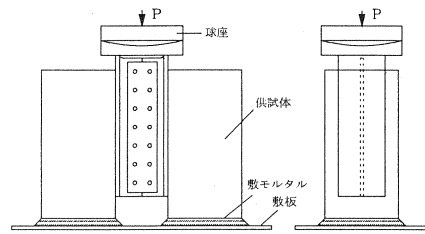


図-4 載荷方法

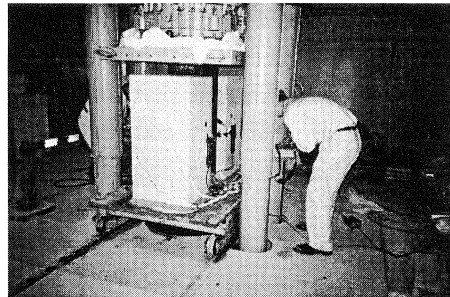


写真-1 載荷状況

(3) 使用材料

本実験に使用した材料，コンクリートの配合および使用材料の機械的性質をそれぞれ，表-2，表-3および表-4に示す。

表-2 使用材料

種別	記号	種類および性質
セメント	C	早強セメント，密度 3.14g/cm <sup>3</sup>
水	W	上水道水
細骨材①	S1	山砂(麻生町産)，表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup>
細骨材②	S2	砕砂(岩間町産)，表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石(岩間町産)，表乾密度 2.76g/cm <sup>3</sup> ，粗骨材最大寸法 20mm
AE 剤	AE	マイクロエア 775S，10 倍希釈液
高性能減水剤	SP	レオビルド 8000S
鋼板 (PBL, フランジ, ウェブ)	—	SM490, 降伏点強度 315MPa (公称), 引張強度 490MPa (公称)
鉄筋	—	SD345, 降伏点強度 345MPa (公称), 引張強度 490MPa (公称)

表-3 コンクリートの配合

設計基準強度 f <sub>ck</sub> ' (MPa)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 添加量	SP 添加量
					W	C	S1	S2	G		
40	20	8.0	4.5	43.0	153	356	393	404	1071	C×0.15%	C×0.65%

表-4(a) コンクリートの機械的性質

材齢	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	備考
1 日	31.4	—	蒸気養生直後
11~19 日	42.6	28.8	載荷実験前(平均)
28 日	46.2	—	

表-4(b) 鉄筋の機械的性質

鉄筋	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
D16	381	553
D19	380	550
D22	376	555

3. 実験結果および考察

(1) 供試体のせん断耐力

各供試体のせん断耐力および荷重とずれ変位との関係をそれぞれ、表-5 および図-5 に示す。表-5 のひび割れ荷重およびせん断耐力の実測値は3体の平均値である。せん断耐荷力の計算値は、土木学会で提案されている孔あき鋼板ジベルのせん断耐荷力式<sup>4)</sup>(式(1))により算出した値である。既往の研究<sup>2)</sup>に準じて、コンクリートの圧縮強度には実測値を、鉄筋の引張強度には公称値を用いた。

$$Q_u = 1.45 \{ (d^2 - \phi_{st}^2) \cdot f_c' + \phi_{st}^2 \cdot f_{st} \} / 1000 - 106.1 \quad (1)$$

ここに、 $Q_u$ : 孔あき鋼板ジベル1個のせん断耐力(kN),  $f_c'$ : コンクリートの圧縮強度(MPa),  $f_{st}$ : 鉄筋引張強度(MPa),  $d$ : 貫通孔の径(mm),  $\phi_{st}$ : 鉄筋径(mm)。

供試体のうち、せん断耐力の実測値が式(1)の計算値を上回ったのは、60-D22-1(コンクリートブロック幅60cm, 貫通鉄筋D22, 孔数1個/枚)のみで、その他の供試体の耐荷力は、計算値の72~98%であった。

貫通鉄筋の径と孔数が同一の供試体でコンクリートブロックの幅が50cmのもの(50-D22-1)と60cmのもの(60-D22-1)とを比較すると、幅が50cmの供試体のせん断耐力は幅60cmの供試体に比べ、2割程度小さくなっている。貫通鉄筋の径と孔数が同じ場合、コンクリートブロックの幅が小さいほど、Twin-PBL接合のせん断耐力は低下することがわかる。幅が50cmの供試体では、幅60cmのものに比べ、ひび割れが早期に発生していることから、耐荷力が低下した原因はPBLの縁端距離が小さいことにより、コンクリートが早い段階から損傷し、鉄筋のダウエル効果が十分発揮されないためと考えられる。一方、ジベル孔(貫通孔)が上下に2個連続している供試体(50-D22-2, 60-D22-2)とジベル孔が1個の供試体(50-D22-1, 60-D22-1)とを比較すると、ジベル孔が2個連続している供試体は、せん断耐力の実測値と計算値との比(以降、耐荷力比)が小さい傾向にある。実際の橋梁においては、曲げに伴う水平せん断力は均等に各ジベル孔に作用すると考えられるが、本実験のような載荷方法では、上のジベル孔に荷重が集中し、上のジベル孔の破壊が先行するため、耐荷力比が低下したものと推察される。

表-5 供試体のせん断耐力

供試体	コンクリート強度 (MPa)	ひび割れ荷重 (kN)	せん断耐力		
			①実測値 (kN)	②計算値 (kN)	耐荷力比 (①/②)
50-D22-1	42.3	1117	1511	1715	0.88
60-D22-1	42.0	1566	1872	1711	1.09
50-D22-2	43.1	1408	2505	3459	0.72
60-D22-2	43.2	1937	2838	3464	0.82
50-D16-1	42.2	945	958	981	0.98

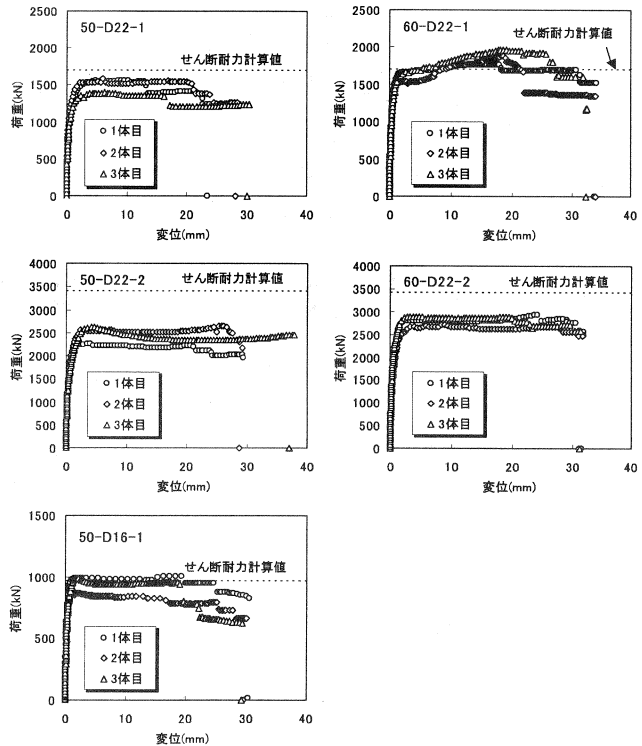


図-5 荷重とずれ変位との関係

(2) 破壊形態

供試体の破壊状況を写真-2 および写真-3 に示す。写真-2 において丸で囲んだ部分のコンクリートを取り

除いたものが右の写真である。貫通鉄筋は下へ20~30mm移動しており、コンクリートには大きな損傷が認められる。また、写真-3より、供試体側面のコンクリートは鋼板の孔(コンクリートジベル)を中心に、放射状に破壊していることがわかる。今回の実験供試体の破壊形態は図-6のようであったと推察される。PBLからの縁端距離が小さい場合、荷重に抵抗できるコンクリートの断面積が小さくなり、貫通鉄筋が定着されている縁端部のコンクリートが損傷するため、耐荷力が低下すると考えられる。

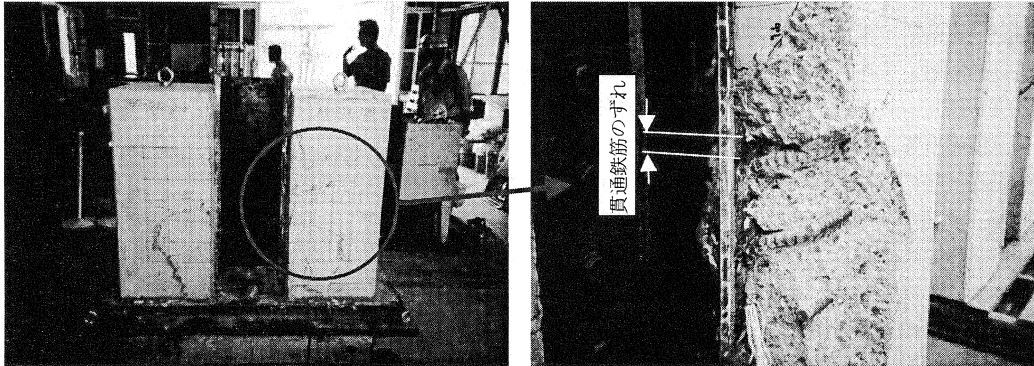


写真-2 供試体破壊状況 (60-D22-2)

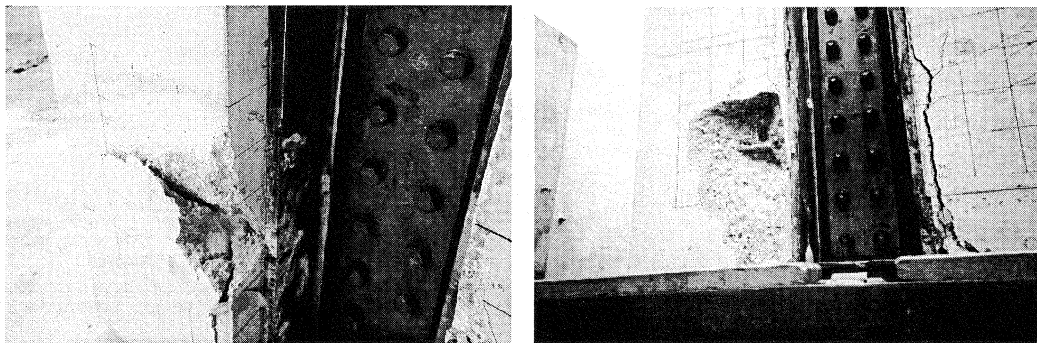


写真-3 供試体破壊状況 (50-D22-1)

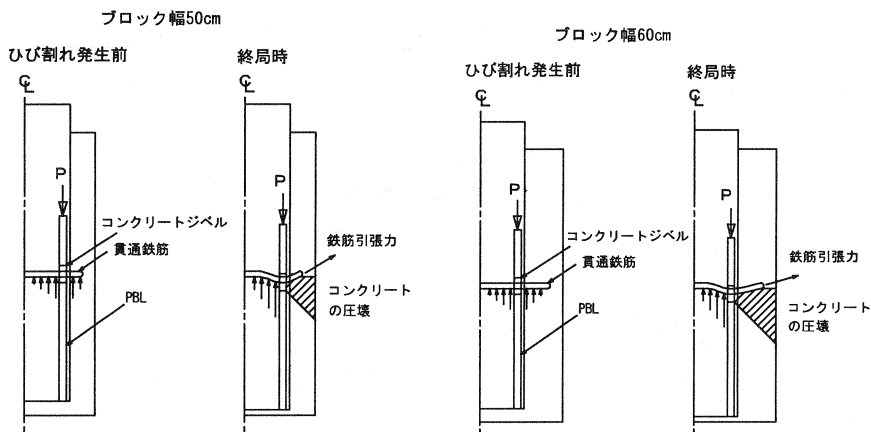


図-6 供試体の破壊形態

(3) 既往のせん断耐力式との比較

貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル(PBL)のせん断耐力の実験式として、式(2)がある<sup>2)</sup>。これは、土木学会のせん断耐力算定式の基となったものであり、式(1)は実験値のばらつきを考慮し、式(2)を標準偏差σの2倍だけ下方にシフトした設計式である。

$$Q_u = 1.45 \left\{ (d^2 - \phi_{st}^2) \cdot f'_c + \phi_{st}^2 \cdot f_{st} \right\} / 1000 - 26.1 \quad (2)$$

ここに、 $Q_u$ : 孔あき鋼板ジベル1個のせん断耐力(kN),  
 $f'_c$ : コンクリート圧縮強度(MPa),  $f_{st}$ : 鉄筋引張強度(MPa),  
 $d$ : 鋼板孔の径(mm),  $\phi_{st}$ : 鉄筋径(mm)。

式(1)および式(2)により算出した計算値と実験値との比較を図-7に示す。実測値は今回の実験(コンクリートブロック幅50cm, 60cm)および既往の研究(コンクリートブロック幅125cm)<sup>1)</sup>におけるジベル1個あたりの耐荷力である。計算値と実験値とを比較すると、コンクリートブロックの幅が50cmの供試体を除き、実験値は式(2)とほぼ一致している。縁端距離が小さい供試体においては、実験値が式(2)の値より小さい傾向にあるものの、式(2)は、Twin-PBL 接合のせん断耐力をほぼ適切に評価していると考えられる。

(4) 縁端距離の影響

PBLの縁端距離と耐荷力比との関係を図-8に示す。ここで、耐荷力比は、実測値と式(2)による計算値との比であり、縁端距離は、PBL 中心からコンクリート側面までの距離である。本実験および既往の研究<sup>1)</sup>における供試体の縁端距離は図-9に示すとおりである。図-8より、縁端距離が小さくなるほど、PBLの耐荷力も低下する傾向にある。コンクリートエッジ方式においては、PBL からコンクリートブロック側面までの縁端距離を考慮してせん断耐力を低減する必要があると考えられる。

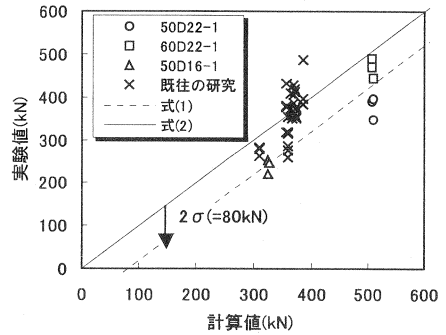


図-7 計算値と実験値との比較

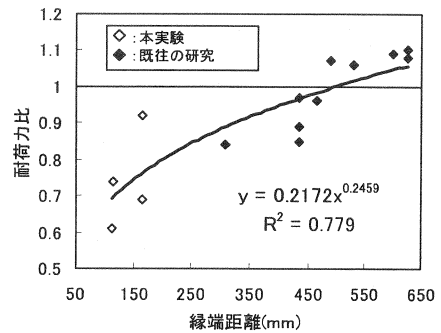


図-8 縁端距離と耐荷力比との関係

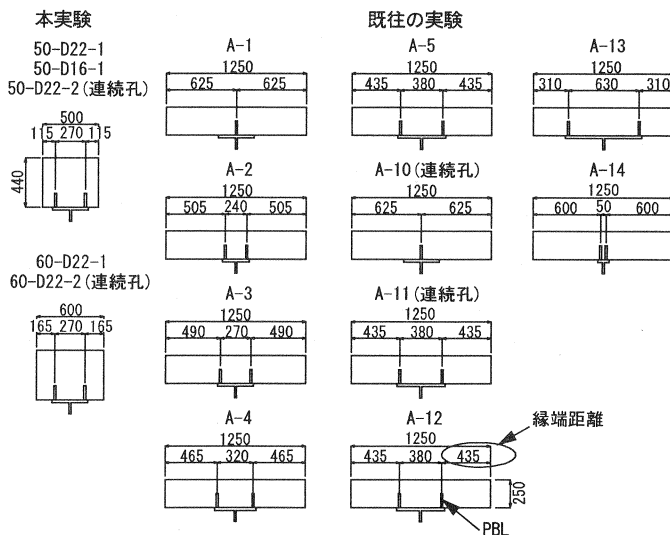


図-9 各供試体の縁端距離

(5) 縁端距離を考慮したせん断耐力式の提案

前述のとおり、縁端距離が小さい場合はTwin-PBLのせん断耐力は既往のせん断耐力式に比べ低下することが確認された。そこで、式(1)および式(2)に補正係数 $\alpha$ を乗じ、縁端距離によるせん断耐力の低下を考慮したせん断耐力式を式(4)および式(5)に示す。補正係数 $\alpha$ は、図-8の縁端距離と耐荷力比との関係から求めたが、実験のデータがまだ少ないこと、および実験値のばらつきが大きいこと、等を考慮し、上限を0.85とした。提案式の計算値と実験値との比較を図-10に示す。式(4)の計算値は、実験値のほぼ平均を示しており、設計式(5)の計算値は、実験値の下限値に対して安全側の値となっている。このことから、式(5)により、縁端距離が小さいTwin-PBL接合を適切に設計できると考えられる。

$$Q_u = \alpha \cdot [1.45 \{ (d^2 - \phi_{st}^2) \cdot f'_c + \phi_{st}^2 \cdot f_{st} \} / 1000 - 26.1] \quad (4)$$

$$Q_u = \alpha \cdot [1.45 \{ (d^2 - \phi_{st}^2) \cdot f'_c + \phi_{st}^2 \cdot f_{st} \} / 1000 - 106.1] \quad (5)$$

$$\alpha = 0.217 \cdot x^{0.246} \leq 0.85$$

ここに、 $\alpha$ ：縁端距離を考慮した補正係数、 $Q_u$ ：孔1個のせん断耐力(kN)、 $f'_c$ ：コンクリートの圧縮強度(MPa)、 $f_{st}$ ：鉄筋の公称引張強度(MPa)、 $d$ ：孔径(mm)、 $\phi_{st}$ ：鉄筋径(mm)、 $x$ ：縁端距離(mm)。

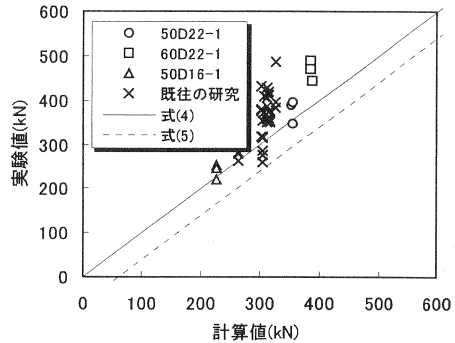


図-10 提案式と耐荷力との関係

5. まとめ

接合部のコンクリートブロックの幅が小さいコンクリートエッジ方式を想定した Twin-PBL 接合の押抜きせん断実験、および既往の研究の整理を行った結果、以下の知見が得られた。

- ①Twin-PBL 接合では、PBL からコンクリート端部までの縁端距離が接合部の耐荷力に大きく影響し、縁端距離が小さい供試体ほど、接合部の耐荷力は低下する傾向にあった。
- ②縁端距離が小さい供試体ほど接合部の耐荷力が低下するのは、縁端部のコンクリートが早期に損傷し、貫通鉄筋のダウエル効果が十分発揮されないためと考えられる。
- ③ジベル孔が上下に2個連続している供試体の耐荷力比は、孔数が1個のものに比べ、小さい傾向にあった。これは、本実験のような載荷方法では、各ジベル孔に荷重が均等に作用せず、特定のジベルに荷重が集中するためと考えられる。
- ④既往の研究を整理した結果、Twin-PBL 接合の耐荷力は既往のせん断耐力式(実験式)とよく一致することが確認された。
- ⑤縁端距離による補正係数 $\alpha$ を考慮した筆者らの提案式により、コンクリートエッジ方式におけるTwin-PBL接合の耐荷力を適切に設計できると考えられる。

参考文献

- 1) 東田, 小野塚, 金子, 蝦名, 吉田, 青木: 波形鋼板ウェブ PC 橋におけるパーフォボンドリブ接合のせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp. 595-596, 2003. 9
- 2) 保坂, 光木, 平城, 牛島, 橘, 渡辺: 孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究, 土木学会, 構造工学論文集, 46A, pp. 1593~1604, 2000. 3
- 3) 保坂, 光木, 平城, 上野, 牛島: 孔あき鋼板ジベルのせん断耐荷挙動に及ぼす影響因子に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp. 572~573, 2001. 10
- 4) 土木学会: 複合構造物の性能照査指針(案), 構造工学シリーズ 11, pp. 204~205, 2002. 10