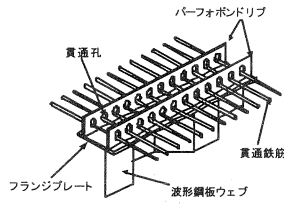


パーフォボンドリブ接合のせん断耐力および面外曲げ疲労に関する実験的研究

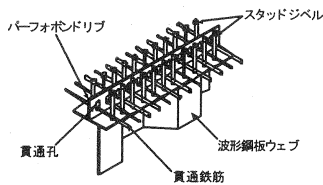
ドービー建設工業(株) 北海道本店 正会員 ○青木 正行
 日本道路公団 北海道支社 東田 典雅
 日本道路公団 北海道支社 中村 元
 ドービー建設工業(株) 技術センター 正会員 立神 久雄

1. はじめに

北海道縦貫自動車道の遊樂^{ゆうらつ}ぶがわばし部川橋は、従来のプレストレストコンクリート(以下PCとする)箱桁橋のウェブを波形鋼板に置き換えた波形鋼板ウェブPC橋を採用している。この構造形式において最も重要な部分の1つが上・下床版と波形鋼板との接合部で、遊樂部川橋では、ツインパーフォボンドリブ接合(以下Twin-PBL)およびシングルパーフォボンドリブ接合(以下PBL)とスタッドジベルとを併用させた構造を採用した(図-1, 図-2参照)。上床版側は、せん断力と首振りモーメントに抵抗させるためTwin-PBLを、下床版側は、スタッドのみではブリージングによる耐力低下が懸念されるためPBLとの併用とした。本研究では、これらの接合方法におけるせん断耐荷挙動およびTwin-PBLの首振りモーメント(図-3参照)に対する静的耐荷力および疲労耐久性を確認することを目的として行った実験結果について報告するものである。



(a) Twin-PBL (Aシリーズ)



(b) PBL+スタッド (Cシリーズ)

図-1 遊樂部川橋の接合方法

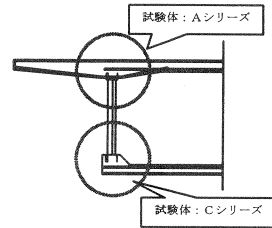


図-2 接合部の着目位置

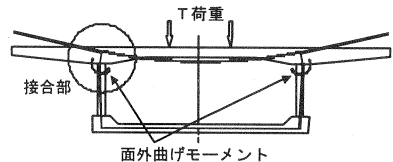


図-3 接合部の首振りモーメント

2. 押抜き実験

2. 1 実験概要

押抜き実験(図-4参照)は、①Twin-PBLのリブ幅とリブ高の関係(図-5参照)、②PBLとTwin-PBLの耐力比較、③押し抜く方向に孔を2個にした場合の耐力の影響、④スタッドとPBLの累加挙動について着目して実施し、同時に土木学会式¹⁾との比較検討を行った。

押抜き実験に使用した試験体の種類を表-1に示す。各試験体は、3体ずつ製作し、使用したコンクリートの設計基準強度 σ_{ck} 、鉄筋、鋼板およびスタッドは、すべて実橋と同一条件とするため、 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ 、鉄筋はSD345(引張強度 575N/mm^2)、鋼板はSM490Y、スタッドはSS400とした。また、各試験体のコンクリートの配合および養生方法は、同一条件とし、試験体製作日および実験日が異なるため、実験実施日に圧縮強度およびヤング係数を測定した。試験体のヤング係数は $2.731\sim 3.130\text{N/mm}^2$

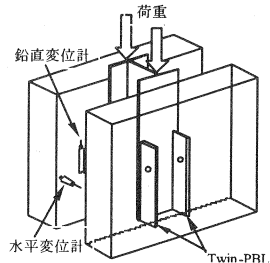


図-4 押抜き実験概要図

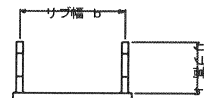


図-5 リブ幅とリブ高

圧縮強度は表-2および表-3に記載したとおりである。

2. 2 実験結果と考察

実験結果を表-2, 表-3に示す。押抜き実験結果から明らかになったことを以下に示す。

①Twin-PBLのリブ幅 (b) とリブ高 (h) の影響

b/h と土木学会式を参照して圧縮強度 40N/mm² に換算した場合の実験値 (以下 40N/mm² 換算実験値) と計算値の比率の関係を図-6に示す。図-6より貫通鉄筋が無い試験体を除けば, b/h が大きくなると計算値に対する実験値の比率が小さくなっている。この要因として貫通鉄筋の拘束効果が, 2枚それぞれのPBLに均等に作用していないと考えられるが, 今後もこの耐力低下の要因を検討する必要がある。

②PBLとTwin-PBLのせん断耐力比較

b/h と 40N/mm² 換算実験値のTwin-PBLとPBLの比率の関係を図-7に示す。図-7からTwin-PBLの耐力は, b/hが大きくなるとPBL1枚当りのせん断耐力は2倍を下回る結果となった。今後, b/hに応じた低減係数を検討していく必要があると考える。

③押し抜く方向に孔を2個にした場合の耐力の影響

1枚当たりの孔数1個と2個の場合の40N/mm²換算実験値の比率を表-4に示す。表-4から, 貫通鉄筋が有るPBLのみ, 比率が2程度となっているが, その他の試験体では2を下回る結果となった。また, 貫通鉄筋が有りb/h=3のTwin-PBL(A5)に関しては, 孔1個当たり約11%程度の耐力低下を示す結果となった。この原因が, 押し抜く方向に孔を増やしたことによるものなのか, Twin-PBLにしたことによるのか, 両者に起因しているのかは, 今後の検討課題である。

④スタッドとPBLの累加挙動

表-3および表-4より, PBL+スタッド(C4)の40N/mm²換算実験値は1490kNであり, PBL単体(A1)とスタッド単体(C2)の合計値1231.4kN (=700.1+531.3)を上回っており, 累加挙動を示しているものと考えられる。しかしながら, スタッド単体の実験値は計算値(道路橋示方書²⁾から求められる値に安全率6倍を考慮)をかなり下回っていることから, せん断耐力の算出方法については, さらなる検討が必要である。

表-1 試験体の種類

試験体種類	ずれ止め種類	ずれ止めの着目点	孔径φ (mm)	貫通鉄筋	打設方向	数量 (体)	備考
Aシリーズ	A-1	PBL1枚 (孔1個)	φ55	D16	正打ち	3	基準試験体
	A-2	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	b=1.5h
	A-3	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	b=2.0h
	A-4	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	b=2.5h
	A-5	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	b=3.0h
	A-6	PBL1枚 (孔1個)	φ55	—	正打ち	3	基準試験体
	A-7	PBL2枚 (孔2個)	φ55	—	正打ち	3	b=3.0h
	A-8	PBL2枚 (孔2個)	φ55	—	正打ち	3	孔は縦列
	A-9	PBL2枚 (孔2個)	φ55	—	正打ち	3	孔は縦列
	A-10	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	孔は縦列
	A-11	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	b=3.0h 孔は縦列
	A-12	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	b=3.0h
	A-13	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	b=5.0h
	A-14	PBL2枚 (孔2個)	φ55	D16	正打ち	3	b=0.4h
Cシリーズ	C-2	スタッドのみ	—	—	逆打ち	3	スタッド φ22×150
	C-3	スタッドのみ	—	—	正打ち	3	スタッド φ22×150
	C-4	PBL1枚 (孔1個) +スタッド	φ55	D16	逆打ち	3	スタッド φ22×150
	合計					51	

注) 孔2個/リブ1枚の孔中心間隔は, 125mm

表-2 Aシリーズの実験値と計算値

試験体	圧縮強度 σ _c (N/mm ²)	実験値 (平均値) (kN)	①圧縮強度 40N/mm ² 換算実験値 (kN)	②圧縮強度 40N/mm ² 時の計算値(N) (土木学会式)	比率 ①/②	孔数 (個)	b/h
A1	53.6	802.6	700.1	537.4	1.303	3	—
A2	49.6	1504.5	1363.8	1074.8	1.269	4	1.5
A3	49.6	1546.2	1384.7	1074.8	1.288	4	2.0
A4	54.2	1439.0	1248.7	1074.8	1.162	4	2.5
A5	52.6	1422.9	1249.4	1074.8	1.162	4	3.0
A10	57.9	1626.9	1429.1	1074.8	1.330	4	—
A11	38.4	2197.4	2235.8	2149.7	1.040	8	3.0
A12	50.3	1209.6	1089.1	1074.8	1.013	4	3.0
A13	50.3	1199.6	1080.2	1074.8	1.005	4	5.0
A14	57.2	1686.7	1423.8	1074.8	1.325	4	0.4
A6	43.2	529.9	490.7	139.4	3.519	2	—
A7	43.2	1130.2	1046.5	278.8	3.753	4	3.0
A8	52.9	1088.4	823.0	278.8	2.951	4	—
A9	48.8	1886.0	1545.9	557.7	2.772	8	3.0

表-3 Cシリーズの実験値と計算値

試験体	圧縮強度 σ _c (N/mm ²)	実験値 (平均値) (kN)	圧縮強度 40N/mm ² 換算実験値 (kN)	圧縮強度40N/mm ² 時の計算値(kN)		
				PBL	スタッド	合計
C2	50.5	—	—	—	—	—
C3	50.8	597.6	531.3	0.0	690.6	690.6
C4	57.2	683.6	571.7	0.0	690.6	690.6
C4	38.4	1461.0	1490.0	537.4	690.6	1228.0

注) 計算値の中のスタッドは, 道路橋示方書²⁾から求められる値に安全率6倍を考慮

表-4 孔数1個と2個の換算実験比率

試験体	b/h	貫通鉄筋の有無	孔数 (個)	①孔1個/リブ1枚の換算実験値 (kN)		②孔2個/リブ1枚の換算実験値 (kN)		孔1個と2個の比率 ②/①
				有	無	有	無	
PBL	—	—	2	有	700.1	—	2.0	—
				無	—	1429.1	—	—
				有	490.7	—	1.7	—
				無	—	823.0	—	—
Twin-PBL	3.0	—	4	有	1249.4	—	1.8	—
				有	1089.1	—	2.1	—
				無	—	2235.8	—	—
				無	1046.5	—	1.5	—
Twin-PBL	—	—	8	有	—	1545.9	—	—
				無	—	—	—	—

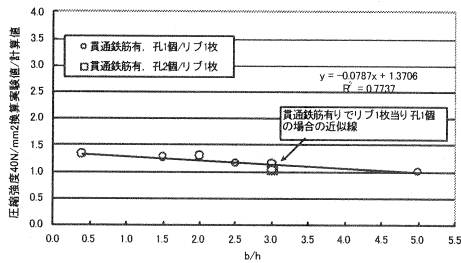


図-6 b/hと換算実験値/計算値

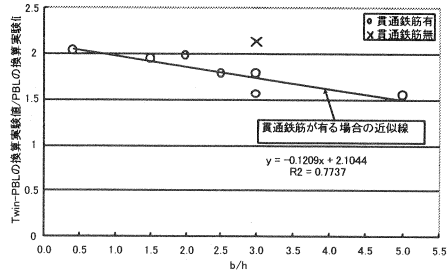


図-7 b/hとTwin-PBL/PBLの換算実験値

3. 首振り実験

3. 1 実験概要

本研究ではTwin-PBLの首振りモーメントに対する静的および疲労実験を行ったが、その他の接合方法との比較が行えるよう日本道路公団試験研究所と社団法人PC建設業協会の共同研究(波形鋼板ウェブPC箱桁橋の適用拡大に関する研究³⁾:以下CSWとする)において実施された首振り実験と整合性を図ることにした。試験体は、接合部のみTwin-PBL(リブ幅 $b=2 \times$ リブ高 h)とし、それ以外の形状および荷重条件はCSWと同一条件とした。試験体に使ったコンクリート(設計基準強度 40N/mm^2)の圧縮強度およびヤング係数を表-5に示す。また、波形鋼板および鉄筋の仕様は、SM490A, SD345とした。試験体の種類を表

表-5 試験体の種類

	孔径 (mm)	孔ピッチ (mm)	貫通 鉄筋	リブ幅	コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (N/mm^2)
静的試験体	φ55	@125	D16	b=2h	51.8	3.2E+04
疲労的試験体						

5-に、静的および疲労実験の試験体形状と実験概要図を図-8に、接合部および波形鋼板の詳細図を図-9に示す。

3. 2 実験結果と考察

1) 静的荷重実験

図-10に載荷点直下の荷重-変位曲線を示す。また、実験結果より以下のことが明らかとなった。

- ① 載荷荷重 $P=80\text{kN}$ までは線形挙動であり、その後、波形鋼板の降伏およびフランジプレートの変形により非線形挙動になった。
- ② フランジプレートとコンクリートの目開きは確認されなかった。

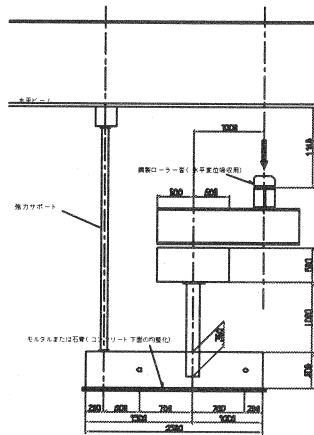


図-8 試験体形状および実験概要図

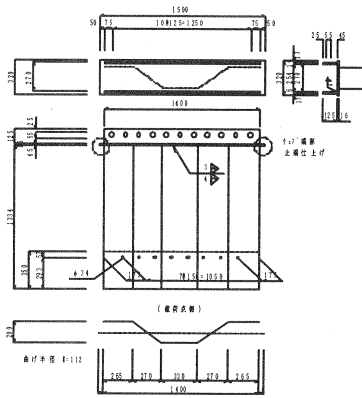


図-9 接合部および波形鋼板の詳細図

- ③ 首振りによる引張力に対してパーフォボンドリブ孔は、波

形鋼板の凸上のL1, C, R1の3孔(図-11参照)が有効であった(遊楽部川橋の波形鋼板形状においては、FEM解析から波形鋼板の凸上の5孔が有効であることを確認した)。

- ④ 土木学会式¹⁾を用い上記の有効孔数3個から求めた終局耐力($Q_u=230.5\text{kN}$)の1/3($Q_a=76.8\text{kN}$)では、ずれが生じていないことから、使用時にはパーフォボンドリブが首振りモーメントに対し有効に作用していることが確認できた。

- ⑤ 静的試験体のはつり出しおよび磁探探傷試験の結果、Twin-PBL部に損傷や亀裂等は確認されず健全であった。

2) 疲労実験

疲労実験の最小荷重は、 $P_{min}=18kN$ (一定) とし、最大荷重は載荷 385 万回まで $P_{max}=52kN$ 、載荷 386 万回まで $P_{max}=78kN$ 、載荷 387 万回まで $P_{max}=104kN$ 、破壊までは $P_{max}=156kN$ と増加させた。図-11 にひずみ振幅-載荷回数、図-12 にすみ肉溶接部の亀裂状況を示す。実験結果から以下のことが明らかとなった。

- ①疲労試験体はウェブとフランジの首溶接部の疲労亀裂 (載荷 300 万回で発生) の進展により、最大荷重 $156kN$ ($52kN \times 3$)、載荷回数 387 万回で破壊した。
- ②疲労試験体のはつり出しおよび磁粉探傷試験の結果、波形鋼板の凸上の Twin-PBL すみ肉溶接止端部に亀裂が確認された。これは、200 万回の計測時点でパーフォボンドリブのひずみが減少しており、150 万回~200 万回の間には生じたものと考えられる。
- ③上記②の亀裂が生じた載荷荷重 ($P_{min}=18kN$, $P_{max}=52kN$) から算出したパーフォボンドリブの応力振幅は $85N/mm^2$ であった。また、遊楽部川橋の設計において、T 荷重により発生するパーフォボンドリブの応力振幅は $5.6N/mm^2$ であり、およそ 15 倍の応力振幅となり、Twin-PBL は、十分な疲労耐久性を有していることが確認できた。

4. まとめ

押抜き実験結果から以下のことが明らかになった。

- ①b/h が大きくなると、せん断耐力が低下する傾向を示す。
- ②b/h が大きくなると、Twin-PBL の耐力は PBL1 枚当りのせん断耐力の 2 倍を下回る傾向を示す。
- ③リブ1枚当たりの孔の数が増えると1孔当りの負担するせん断耐力が低下する傾向を示す。
- ④PBL+スタッドのせん断耐力は、累加挙動を示しているものと考えられる。

以上のことから、遊楽部川橋の接合部の設計は、土木学会式に、低減係数を乗じて設計を行った。

首振り実験結果から以下のことが明らかになった。

- ①使用時においてはパーフォボンドリブが首振りモーメントに対し有効に作用していることが確認できた。
- ②本首振り疲労実験結果と CSW で実施された実験³⁾とを比較すると Twin-PBL は、アングルジベル接合と同等以上の疲労耐久性を有していることが明らかとなった。

参考文献

- 1)土木学会：新形式の鋼・コンクリート複合橋梁調査研究小委員会孔開き鋼板ジベル WG：孔あき鋼板ジベル設計マニュアル (案)，2001年11月
- 2)道路橋示方書・同解説，社団法人日本道路協会，平成14年3月
- 3)鈴木永之，上東泰，櫻田道博，立神久雄：波形鋼板ウェブPC箱桁橋における接合部の面外曲げ疲労に関する実験的研究，土木学会第57回年次学術講演会，I-626，2002年9月。

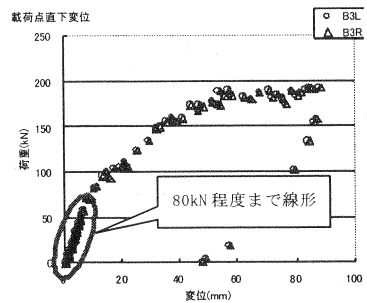


図-10 載荷点直下の P-δ 曲線

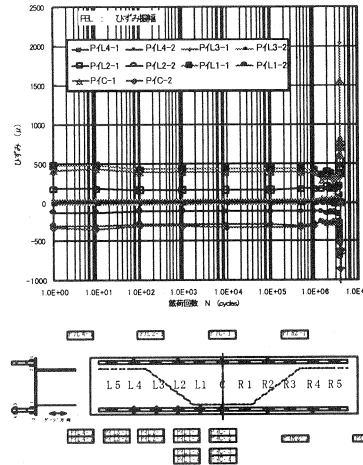


図-11 載荷回数とひずみ振幅

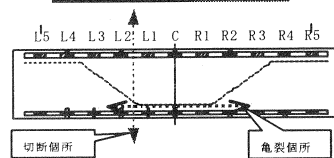
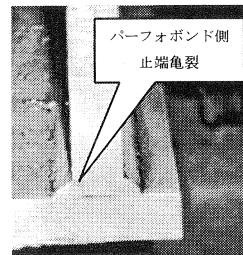


図-12 Twin-PBL の溶接部の亀裂