

論文 波形鋼板と軽量コンクリート床版の接合方法に関する実験的研究

立神 久雄^{*1}・田村 聖^{*2}・上平 謙二^{*3}・前堀 伸平^{*4}

要旨: PC 橋の軽量化を図るにあたり、材料面からは軽量骨材を用いたコンクリートの適用、また、構造面からは、ウェブに波形鋼板を用いた合成構造が考えられる。本研究では、波形鋼板ウェブと高性能軽量骨材コンクリート床版からなる合成構造の接合手法の適用性を検討するため、接合部の耐力として重要な橋軸方向ずれせん断挙動に着目し、種々な試験体を作成し、押抜きせん断実験を実施したので、その実験結果と考察を報告する。

キーワード: 波形鋼板, 高性能軽量骨材, 接合部, 合成構造, PC

1. はじめに

コスト縮減をめざした省力化の流れを受けて、複合橋梁が脚光を浴びている。その中でも、PC 箱桁橋（以下、PC 橋という）のコンクリートウェブを波形鋼板に置き換え、自重の軽減やプレストレスの導入効率を向上させた波形鋼板ウェブ PC 橋の採用事例が増えている^{1)~3)}。

このような橋梁構造形式からの軽量化に対して、近年では材料分野から高性能軽量骨材コンクリート（以下、HLA コンクリートという）が開発され、さらなる軽量化が考えられている。波形鋼板ウェブ PC 橋の死荷重に対しては、通常の PC 橋と比較して、15~20%軽減することができるのに対して、HLA コンクリートと波形鋼板を組合せると、30~35%軽減⁴⁾することが

できる。これにより、適用支間長を拡大できるばかりでなく、基礎や下部構造に対する負担も飛躍的に低減することができ、下部構造の建設コストを大幅に縮減することができる。

本研究は、一連の波形鋼板ウェブとコンクリート床版の接合手法の研究（縞鋼板+頭付スタッド^{5) 6)}、パーフォボンドリブ^{7) 8)} およびアングル⁹⁾の一つとして、コンクリート床版に HLA コンクリートを用いた場合の適用性を検討するため、接合部の耐力として重要な橋軸方向ずれせん断挙動に着目し、種々な試験体を作成し、押抜きせん断実験を実施したので、その実験結果と考察を報告する。図-1 に、それぞれの接合手法の概要図を示す。

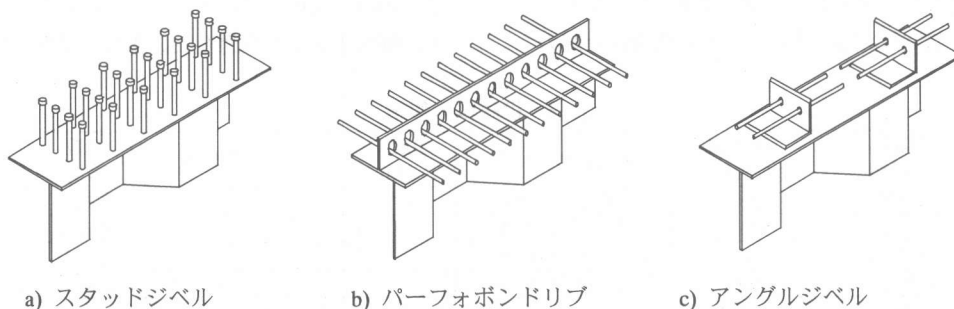


図-1 各種接合手法の概要図

*1 ドーピー建設工業（株）技術センター 主任研究員（正会員）

*2 ドーピー建設工業（株）技術センター 研究員（正会員）

*3 ドーピー建設工業（株）技術センター 技術センター長 工博（正会員）

*4 太平洋セメント（株） 研究本部 清澄研究所 工修（正会員）

表-1 HLA コンクリートの物理特性

使用材料	種 類	密度 (g/cm ³)	物性または成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	3.13
細骨材	S	大井川産川砂	2.62 (表乾密度)
粗骨材	G	人工軽量骨材	1.18 (絶乾密度)
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	最大骨材寸法 15mm, 24 時間吸水率 1.90%
	AE	AE 剤	

表-2 HLA コンクリートの示方配合

	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)	AE (C×%)
			W	C	S	G		
TYPEA (スタッドジベル)	34.8	53.2	150	431	888	353	0.6	0.004
TYPEB (パーフォボンドリブ)	34.1	53.2	150	445	916	363	0.4	0.004
TYPEC (アングルジベル)	34.1	53.2	150	448	922	366	0.4	0.004

2. 高性能軽量骨材コンクリート

本実験に用いた HLA コンクリートの物理特性と示方配合を表-1 および表-2 に示す。

HLA コンクリートの粗骨材には密度 1.2(g/cm³) で最大骨材寸法 15mm の HLA を用い、細骨材には川砂を用いた。

3. 試験体の種類

試験体の種類を表-3 に示し、試験体の形状を図-2 に、試験体の特性値を表-4 に示す。試験体は、実際の橋梁モデルを想定し、コンクリート厚さを 25cm とし、鉄筋配置についても、実橋を想定し D16mm の鉄筋を主鉄筋方向と配力

鉄筋方向にそれぞれ配置した。

- ① TYPEA については、ずれ止めは道路橋示方書で標準とされ、道路橋で多く採用されている径 22mm、長さ 150mm のスタッドジベルを片側あたり 2 本配置した。また、コンクリートの打設方向は、上打ち（上床版を対象）と下打ち（下床版を対象）を用意し、実橋の上床版横方向プレストレスの影響を考慮するため PC 鋼棒でプレストレスを与えたものも用意した。
- ② TYPEB については、ずれ止めは板厚 22mm、高さ 150mm、孔径 60mm のパーフォボンドリブを片側あたり 1 枚配置した。また、橋軸直角

表-3 供試体の種類

試験体の種類	ずれ止めの種類	ずれ止めの寸法	孔径 φ (mm)	貫通鉄筋	プレストレス	打設方向
TYPEA-1	スタッド	H=150, φ22 (2 本)	—	—	—	逆打ち
TYPEA-2	スタッド	H=150, φ22 (2 本)	—	—	—	逆打ち
TYPEA-3	スタッド	H=150, φ22 (2 本)	—	—	—	正打ち
TYPEA-4	スタッド	H=150, φ22 (2 本)	—	—	25tf×4	正打ち
TYPEB-1	パーフォボンド	655×150×15	φ60	D16	—	逆打ち
TYPEB-2	パーフォボンド	655×150×15	φ60	D16	—	逆打ち
TYPEB-3	パーフォボンド	655×150×15	φ60	D16	—	正打ち
TYPEB-4	パーフォボンド	655×150×15	φ60	D16	25tf×2	正打ち
TYPEC-1	アングル	150×100×10×100	—	D16*2	—	逆打ち
TYPEC-2	アングル	150×100×10×100	—	D16*2	—	逆打ち
TYPEC-3	アングル	150×100×10×100	—	D16*2	—	正打ち
TYPEC-4	アングル	150×100×10×100	—	D16*2	25tf×4	正打ち

方向貫通鉄筋 D16 を 1 本フランジプレート側に配置し、TYPEA と同様にコンクリートの打設方向および上床版横方向プレストレスの影響を考慮したものも用意した。

③TYPEC については、ずれ止めはアングル長さ 150mm、アングル高さ 100mm、板厚 10mm のアングルジベルを片側あたり 1 個配置した。また、橋軸方向貫通鉄筋 D16 を 2 本配置し、U 形の鉛直補強鉄筋も配置した。さらに、他タイプと同様にコンクリートの打設方向および上床版横方向プレストレスの影響を考慮したものも用意した。

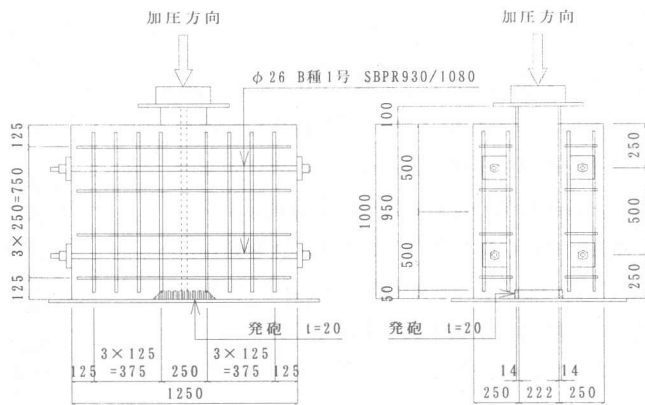
4. 押抜き実験方法

4.1 概要

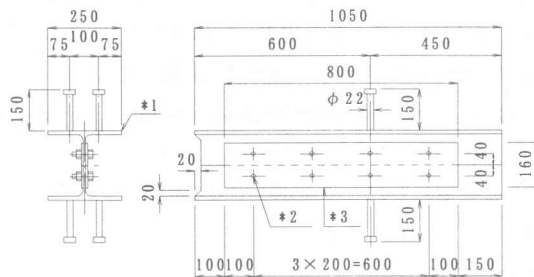
各種ずれ止めのせん断耐力の把握は、押抜き型せん断実験による。試験体は、図-2 に示したように、H型鋼およびパーフォボンドリブ下面のコンクリートが、押し抜き実験時に抵抗しないように、あらかじめ抵抗部分のコンクリートを削除した。

試験体を設置する際には、試験体の下に石膏を敷くことにより左右の傾きの影響をなくするとともに、コンクリート下面の均整化を図った。また、H型鋼と試験機の荷重ヘッドとの間には、両フランジに均等に荷重が荷重されるように荷重分配桁を挿入した。

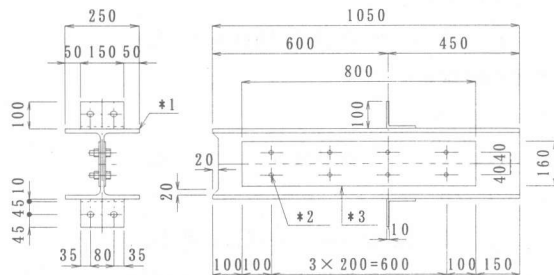
荷重方法は、変位（ずれ）制御による漸増繰返し荷重法で行い、最大せん断耐力と破壊モードが確認できるまで荷重を繰返した。計測は、荷重荷重とともに、鋼フランジとコンクリートの間の鉛直方向相対ずれを計測した。図-3 に試験体のずれ



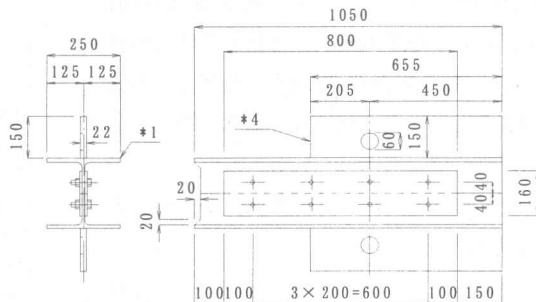
a) 供試体の寸法および鉄筋、PC 鋼棒配置図



b) スタッドジベル



c) パーフォボンドリブ



d) アングルジベル

*1 : H 250×250×9×14 *2 : 高力ボルト φ16mm 程度
*3 : 添接板の厚さ 8mm 以上 *4 : 鋼板 (655×150×22)

図-2 供試体の形状図

量計測位置図を示す。

4. 2 実験結果および考察

以下に、各ずれ止めタイプの耐力式と表-5に各試験体のせん断耐力値を示す。表中の耐力値は、各試験体の左右の耐力の平均値を示す。ただし、TYPEC-3 および TYPEC-4 の実験値は、載荷装置の性能上、途中で載荷を中止したため、両タイプの耐力は表の値以上となる。

(1) Fisher の提案によるスタッドジベルの耐力式¹⁰⁾

$$Q = n \times 0.5 \times A_s \times \sqrt{(\sigma_c \times E_c)} \quad (1)$$

ここに、Q(N)はスタッドの耐力、n はスタッド本数、 A_s (mm²)はスタッド一本の断面積、 σ_c (N/mm²)はコンクリートの圧縮強度、 E_c (N/mm²)はコンクリートのヤング係数を示す。

(2) 新たに提案したパーフォンドリブの耐力式⁸⁾

・コンクリートジベル

$$Q_c = 1.1 \times \phi^2 \times \{-0.818 \times (\phi / \phi_{40}) + 2.691\} \times \sigma_c \quad (2)$$

・貫通鉄筋拘束効果

$$\Delta Q = 1.1 \times \phi^2 \times (12.966 \times p - 0.312) \times \sigma_c \quad (3)$$

$$Q = Q_c + \Delta Q \quad (4)$$

ここに、 Q_c (N)はコンクリートジベルの耐力、 ΔQ (N)は貫通鉄筋拘束効果による耐力の増加分、 σ_c (N/mm²)はコンクリートの圧縮強度、 ϕ (mm)は孔径、 ϕ_{40} は孔径40mm、pは貫通鉄筋比(=貫通鉄筋断面積/孔断面積)を示す。ただし、本式は実験値をもとに安全係数として0.7を考慮している。

(3) フランスの基準によるアングルジベルの耐力式¹¹⁾

$$R_d = \inf. (R_1, R_2) \quad (5)$$

$$R_1 = (b \times h \times \sigma_c) / 1.5 \quad (6)$$

$$R_2 = \sum a \times L_1 \times (\sigma_c / \sqrt{3}) \quad (7)$$

ここに、 R_1 (N)はアングルジベルの耐力、 R_2 (N)はアングル溶接強度、b(mm)はアングルの長さ、h(mm)はアングルの高さ、 σ_c (N/mm²)はコンク

表-4 試験体の特性値

試験体の種類	コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)	コンクリートのヤング係数 (kN/mm ²)
TYPEA-1	43.3	21.3
TYPEA-2	46.7	21.1
TYPEA-3	46.7	21.1
TYPEA-4	46.4	20.0
TYPEB-1	41.7	20.3
TYPEB-2	41.5	20.3
TYPEB-3	41.5	20.3
TYPEB-4	44.3	22.8
TYPEC-1	46.1	22.2
TYPEC-2	47.2	22.4
TYPEC-3	47.2	22.4
TYPEC-4	44.4	20.7
スタッド	JIS B 1198 φ22mm	
ハーフボルト	SS400	
アングル	SS400	
鉄筋	SD295A	

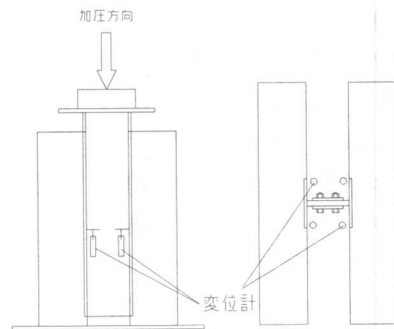


図-3 鉛直ずれ量の計測位置

表-5 各供試体のせん断耐力値

	設計値① (kN)	実験値② (kN)	比率 ①/②
TYPEA-1	365.1	327.0	0.896
TYPEA-2	377.3	366.0	0.970
TYPEA-3	377.3	525.0	1.391
TYPEA-4	366.2	595.0	1.625
TYPEB-1	340.6	351.0	1.030
TYPEB-2	339.0	316.0	0.932
TYPEB-3	339.0	438.0	1.292
TYPEB-4	361.9	529.0	1.462
TYPEC-1	461.0	602.0	1.306
TYPEC-2	472.0	585.0	1.239
TYPEC-3	472.0	757.0	1.604
TYPEC-4	444.0	701.0	1.579

リート圧縮強度, a (mm)は溶接の有効厚, L_1 (mm)は溶接の有効長(フランジプレートとアングルを溶接した4面の合計長さ), σ_c (N/mm²)は溶接部の降伏点強度を示す。

まず, スタッドジベル (TYPEA シリーズ) においては, コンクリートの打設方向により実験値に差が現れた。下打ち打設の場合の実験値は Fisher の提案によるスタッドジベルの耐力式に比べ9割程度の値となっている。また, 横方向プレストレスについては, 普通骨材コンクリートにおいては顕著な効果が見られなかったが⁶⁾, 今回の HLA コンクリートの実験値においては, 横方向プレストレスを導入した供試体のせん断耐力の方が1.5割ほど大きい値となった。

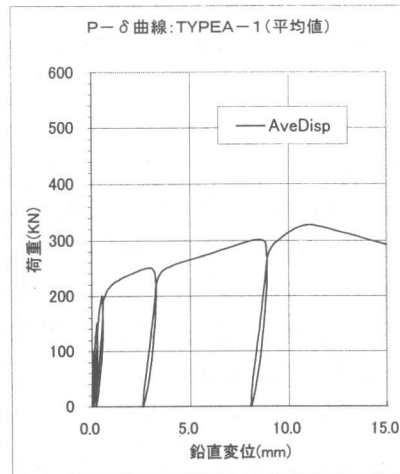
パーフォボンドリブ (TYPEB シリーズ) においても, コンクリートの打設方向により実験値に差が現れ, 下打ち打設の場合の実験値は, 新たに提案したパーフォボンドリブの耐力式に比べ9.5割程度の値となっており, 横方向プレストレスを考慮した供試体のせん断耐力の方が1割ほど大きい値となった。

アングルジベル (TYPEC シリーズ) においては, 下打ち打設の場合の実験値の方がせん断耐力値は小さくなったものの, 普通コンクリートの実験結果と比べても同程度であり, フランスの基準によるアングルジベルの耐力式を下回ることはなかった。

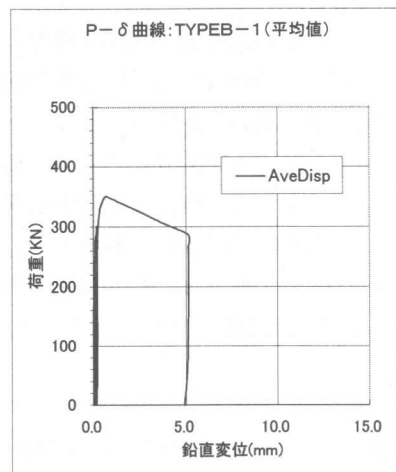
以上より, スタッドジベルは, 下打ちで横方向プレストレスのない場合は, 式(1)よりも10%程度の耐力低下を考慮する必要がある。パーフォボンドリブでは, 下打ちで横方向プレストレスのない場合は, 式(4)よりも5%程度の耐力低下を考慮する必要がある。

また, アングルジベルにおいては, 式(6)そのまま用いても良いことがわかった。

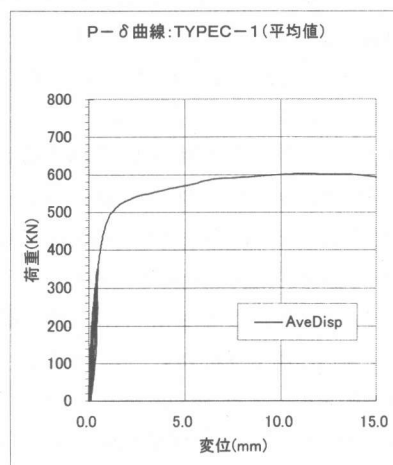
図-4に参考として, 各ずれ止めタイプの荷重-相対鉛直ずれ曲線を示す。この図から, 各ずれ止めタイプとも相対ずれ量は, 最終耐力の1/3相当値では, 殆どずれが生じていないことがわかる。しかし, パーフォボンドリブにおい



a) スタッドジベル(下打ち)



b) パーフォボンドリブ(下打ち)



c) アングルジベル(下打ち)

図-4 荷重-相対鉛直ずれ

ては、スタッドジベルおよびアングルジベルに比べ、ずれ量が小さく、剛ジベルの挙動を呈している。

5. まとめ

本実験から HLA コンクリートを用いた波形鋼板ウェブ橋の上下床版の接合部において、スタッドジベル、パーフォボンドリブおよびアングルジベルをずれ止めとして使用した場合の性状について、以下のことがわかった。

- ① 設計荷重時レベル（耐力の 1/3）では、スタッドジベル、パーフォボンドリブおよびアングルジベルとも、ずれがほとんど発生していないことがわかった。
- ② スタッドジベルの耐力は、下打ちで横方向プレストレスのない場合は、式(1)に安全係数 0.85 を考慮すればよいことがわかった。
- ③ パーフォボンドリブの耐力は、下打ちで横方向プレストレスのない場合は、式(4)に安全係数 0.9 を考慮すればよいことがわかった。
- ④ アングルジベルの耐力は、式(6)をそのまま用いてよいことがわかった。

参考文献

- 1) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブ PC 橋—計画マニュアル(案), 1998. 10.
- 2) 石黒亙, 村田嘉広, 須合孝雄：松の木 7 号橋（銀山御幸橋）の設計と施工, プレストレスコンクリート, pp5~14, Vol. 38, No. 5, Sept. 1996.
- 3) 加藤照己, 芦塚憲一郎, 加藤卓也, 日高重徳：本谷橋（波形鋼板ウェブ PC 箱桁橋）の設計について, 第 7 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 pp747~752, 1997. 10.
- 4) 田村聖, 立神久雄, 上平謙二, 石川雄康, 前堀伸平：高性能軽量骨材コンクリートおよび波形鋼板を用いた PC 橋の試設計, 土木学会第 55 回年次学術講演会概要集, pp. 670-671, 1999. 10.
- 5) 上中宏二郎, 鬼頭宏明, 上平謙二, 園田恵一郎：突起付鋼板と頭付スタッドを併用した付着せん断システムの評価, コンクリート工学年次論文報告集 Vol20, No3, pp853~858, 1998. 6.
- 6) 上平謙二, 鈴木史郎, 松野茂彦, 園田恵一郎：波形鋼板ウェブ PC 橋の鋼板とコンクリート床版の合成手法に関する研究, 第 52 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, pp118~119, 1997. 10.
- 7) 蛭名貴之, 高橋恵悟, 上平謙二, 柳下文夫：パーフォボンドリブのせん断耐力に関する研究, 第 8 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 pp31~36, 1998. 10.
- 8) 新谷英司, 蛭名貴之, 上平謙二, 柳下文夫：波形鋼板とコンクリート床版の結合方法に関する実験的研究, 第 9 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 pp91~96, 1999. 10.
- 9) 立神久雄, 蛭名貴之, 上平謙二, 柳下文夫：アングルジベルのせん断耐力に関する基礎的研究, 第 9 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp79~84, 1998. 10.
- 10) Jorgen G. Ollgaard, Roger G. Slutter and John W. Fisher：Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, pp55~64, 1971
- 11) (社)プレストレストコンクリート技術協会, 複合構造設計施工基準 (案), 1999. 12
- 12) J. NIWA, Y. HAMADA, S. TAMURA, T. OKAMOTO, Y. ISHIKAWA：Ultimate Shear Capacity of Concrete Beams Using High Performance Lightweight Aggregates, fib Symposium, pp. 241-246, 1999. 10, PRAGUE.