

(2) 波形鋼板ウェブと床版接合部の横方向性状に関する実験的研究

(株)ピー・エス 本社土木技術部 正会員 ○桜田道博
 早稲田大学 理工学部土木工学科 正会員 依田照彦
 早稲田大学 大学院理工学研究科 正会員 中洲啓太
 (株)ピー・エス 本社土木技術部 正会員 佐藤幸一

1. はじめに

コンクリートと鋼材との複合構造として、ウェブに波形鋼板を使用した複合 PC 橋(以後、波形鋼板ウェブ PC 橋と呼ぶ)が注目されている。波形鋼板ウェブ PC 橋は、東海北陸自動車道「本谷橋」(日本道路公団)に採用され、構造面、およびコスト面での合理性が実証されようとしている。複合構造では、コンクリートと鋼材との接合方法が重要となるが、本谷橋では従来のスタッドジベルによる接合に替え、波形鋼板に孔をあけ、そこに鉄筋を貫通させ、コンクリート床版に埋め込む接合方法(以後、埋込み接合と呼ぶ)が採用されている(図-1)。これは、鋼板の孔に充填されたコンクリートがずれ止めとして機能する効果、および埋め込まれた波形鋼板自体がずれ止めとして機能する効果を利用したものである。埋込み接合の橋軸方向の性状はいくつかの実験・研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾により明らかにされているが、橋軸直角方向(以後、横断方向と呼ぶ)の性状については十分に明らかにされているとはいえ、今後さらに大規模な橋梁への適用を考えると、横断方向の性状も確認する必要があると思われる。そこで、本谷橋の埋込み接合部の横断方向をモデルとし、埋込み長、鋼板厚を変化させた模型供試体により、静的載荷実験、および疲労実験を行った。ここでは、その結果について報告する。

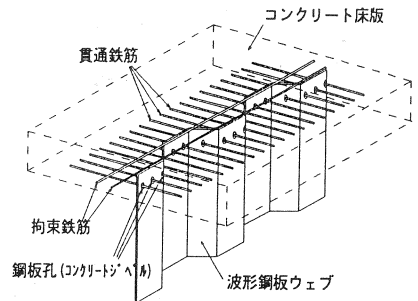


図-1(a) 埋込み接合

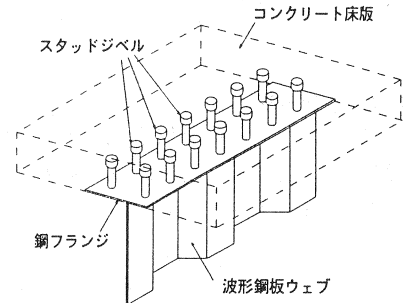


図-1(b) スタッドジベルによる接合

2. 実験概要

供試体の種類、および形状・寸法を表-1、および図-2 に示す。供試体は、本谷橋の埋込み接合部をモデル化したもので、偏心荷重を載荷し、輪荷重による横断方向の曲げモーメントを再現するため上床版の一方を張り出させた形状とした。供試体の種類は、埋込み長、および板厚を変化させた A 体～D 体の 4 種類とした。A 体は本谷橋の埋込み接合部の 3/10 モデルで、B 体は板厚を大きくしたもの、C 体は埋込み長を小さくしたもの、D 体は埋込み長を大きくしたものである。実橋では、波形鋼板の上・下

表-1 供試体種類

種類	埋込み長 (mm)	波形鋼板厚 (mm)
A 体	60	2.7
B 体	60	4.5
C 体	35	2.7
D 体	105	2.7

表-2 使用材料

		設計値 (N/mm ²)	実測値 (N/mm ²)	
コンクリート	σ_{28}	40	45.2	
	σ_u	440~600	552	
鉄筋 (SD295A)	σ_y	295 以上	385	
	σ_u	400~510	446	
波形鋼板 (SS400)	2.7 mm	σ_y 245 以上	348	
	4.5 mm	σ_u	400~510	469
		σ_y	245 以上	331

端に溶接された橋軸方向鉄筋、および横締めPC鋼材が存在するが、本実験ではこれらを省略した。供試体数は各3体、合計12体で、1体は静的載荷実験用とし、他2体は疲労実験用供試体とした。供試体を使用した材料の機械的性質を表-2に示す。コンクリートは、設計基準強度を40N/mm²、粗骨材最大寸法を15mmとした。鉄筋にはSD295Aを、波形鋼板にはSS400を使用した。

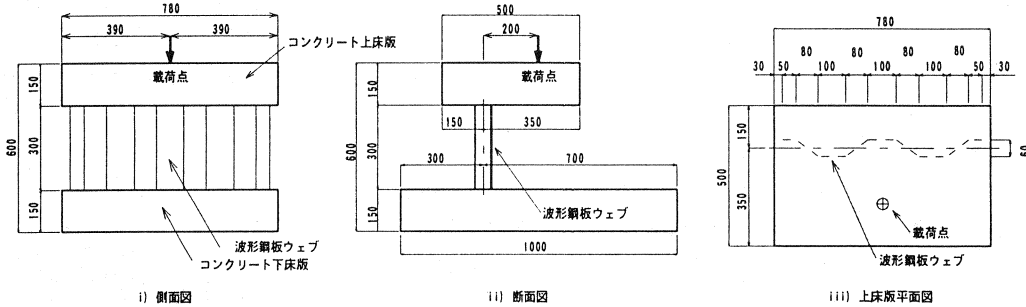


図-2(a) 供試体一般図

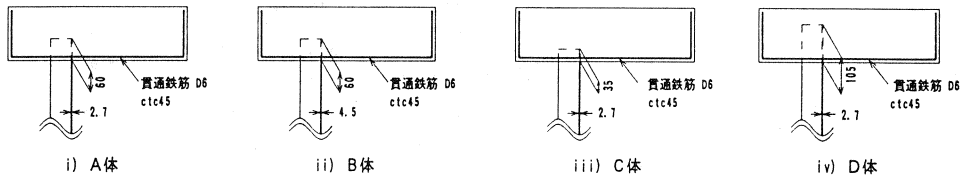


図-2(b) 接合部の詳細

(1) 静的載荷実験

計測項目、および計測位置を図-3に示す。載荷は、0.5tf ステップで、供試体が破壊するまで行った。計測項目は、①上床版の変位、②上床版表面のひずみ、③鋼板孔まわりのひずみ、および④鋼板表面のひずみとした。計測は載荷ステップごととし、供試体が破壊するまで行った。

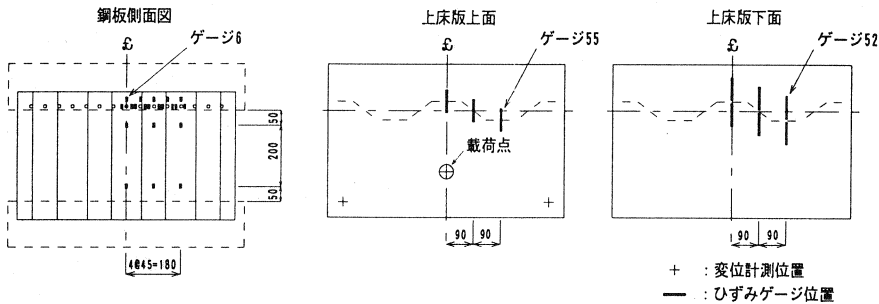


図-3 計測項目、および計測位置

(2) 疲労実験

疲労実験の載荷方法を表-3に示す。最大載荷荷重の2.0tfは、道路橋示方書におけるT荷重を最も厳しい位置に載荷したとき、本谷橋上床版に生じる応力度が供試体上床版にも生じるようFEM解析で求めたものである。計測項目は、静的載荷実験と同様とし、計測時期は、載荷回数1回、10回、100回、1000回、1万回、10万回、それ以降200万回まで随時とした。200万回載荷しても破壊しなかった場合は、静的載荷実験と同様に静的に破壊させた。

表-3 疲労実験の載荷方法

最大載荷荷重	2.0tf
最小載荷荷重	0.2tf
載荷サイクル	3~5Hz
計測時のステップ	0.5tf

3. 実験結果

3.1 静的載荷実験

(1) 破壊に至るまでの過程

静的載荷実験における荷重と変位との関係を図-4 に、各供試体が破壊に至るまでの過程を表-4 に、破壊状況を写真-1~写真-4 に示す。

ひびわれ発生荷重はD体、B体、A体、C体の順で大きいですが、A体とB体との差が小さく、ひびわれ耐力は、鋼板厚の影響より、埋込み長の影響を大きく受けるといえる。

破壊荷重は、ひび割れ発生荷重と同様、D体、B体、A体、C体の順で大きいですが、A体とB体との差が大きく、破壊耐力は、埋込み長だけでなく、鋼板厚の影響も受けるといえる。

破壊形態は、A体、B体、およびC体が上床版下面の破壊で、D体が波形鋼板の座屈であった。また、D体の上床版上面には、埋め込まれた鋼板に沿ったひびわれがわずかに発生した。D体は波形鋼板の座屈で破壊したため、接合部の耐力はさらに大きいと考えられるが、鋼板の座屈は脆性的な破壊であり、接合部の破壊耐力を大きくしすぎることは問題があると思われる。

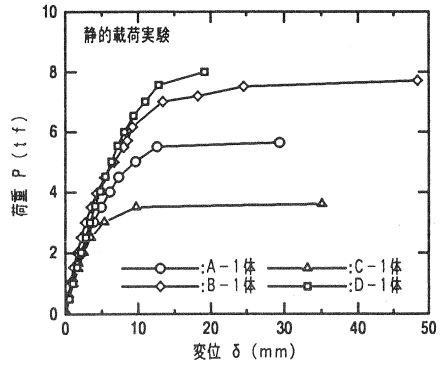


図-4 荷重と変位との関係

表-4 破壊に至るまでの過程

	ひびわれ発生荷重	破壊荷重	破壊形態
A-1	4.0tf	5.7tf	接合部(上床版下面)の破壊
B-1	4.5tf	7.8tf	接合部(上床版下面)の破壊
C-1	2.5tf	3.5tf	接合部(上床版下面)の破壊
D-1	6.0tf	8.0tf	波形鋼板の座屈

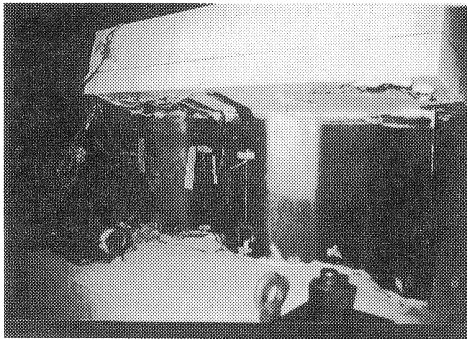


写真-1 破壊状況(A体)

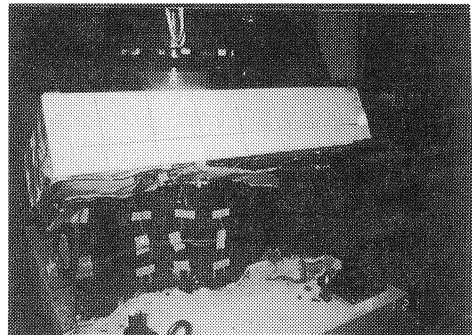


写真-2 破壊状況(B体)



写真-3 破壊状況(C体)

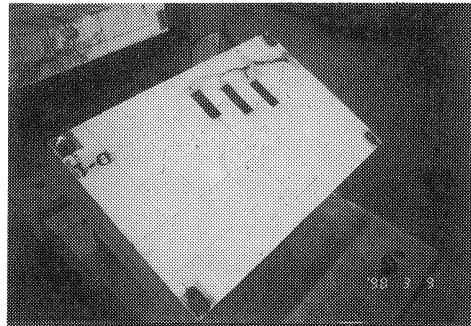


写真-4 破壊状況(D体)

(2) 上床版のひずみ

上床版下面、および上面のひずみを図-5、および図-6に示す。ここで実測値は、正值が引張ひずみで、負値が圧縮ひずみである。上床版下面のひずみは、埋込み長が小さいものほど低い荷重レベルで大きくなっており、埋込み長が等しいA体およびB体はほぼ同様な挙動を示している。C体のひびわれ発生が最も早く、埋込み長が等しいA体およびB体のひびわれ発生荷重がほぼ等しいのはこのためである。上床版上面のひずみは、上床版下面でひびわれが生じたあたりで減少している。これは、ひびわれの発生により接合部の剛性が低下し、曲げモーメントが再分配されたためと思われる。D体の破壊時に上床版上面にひびわれが発生したのは、接合部の剛性が低下せず上床版上面のひずみが大きくなったため、埋め込まれた鋼板の応力集中が原因ではないと思われる。

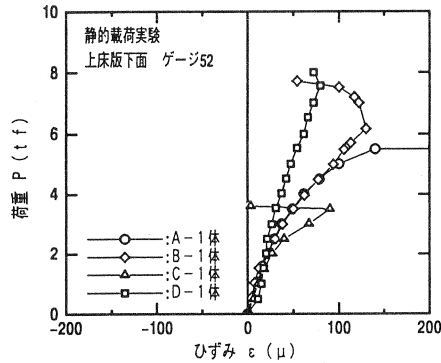


図-5 上床版下面のひずみ

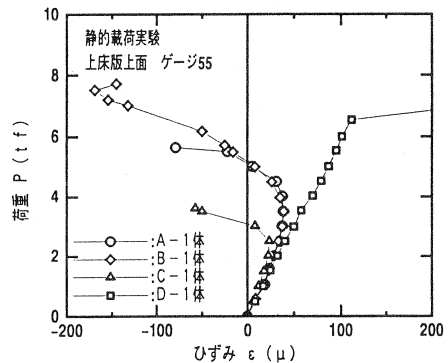


図-6 上床版上面のひずみ

(3) 鋼板孔まわりのひずみ

鋼板孔まわりのひずみを図-7に示す。ここでのひずみは、供試体中央部における鋼板孔上部の鉛直方向のひずみである(図-3参照)。この部分は、埋め込まれた鋼板とコンクリートとが付着して一体となっている間は引張ひずみが発生する。しかし、付着が切れると孔を貫通しているコンクリートジベルが鋼板上部を押し上げるため、ひずみが圧縮に転ずると考えられる。埋込み長が小さいC体は、コンクリートと鋼板との付着が載荷初期に切れ、埋込み長が大きいD体は大きい荷重まで付着が保たれているといえる。

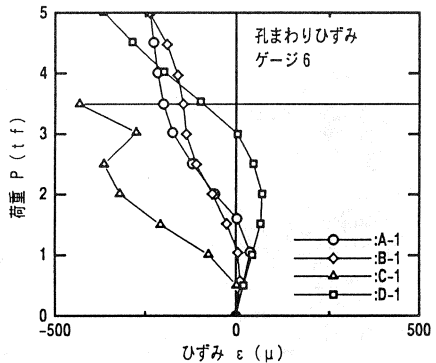


図-7 鋼板孔まわりのひずみ

3.2 疲労実験

(1) 破壊に至るまでの過程

疲労実験における各供試体の破壊に至るまでの過程を表-5に示す。C-2体が159万回で疲労破壊した以外は、すべて200万回載荷しても破壊しなかった。疲労試験後の静的載荷でも、破壊荷重、破壊形態、等の性状は、静的載荷のみの実験結果とほとんど変わらなかった。破壊状況を写真-5~写真-8に示す。疲労破壊したC体は、鋼板孔が、孔の中心線に沿って水平方向に裂けていた。D体上床版上面のひびわれは、

表-5 破壊に至るまでの過程

	疲労破壊時の 載荷回数	200万回後の静的載荷		破壊形態
		クラック 発生荷重	破壊荷重	
A-2	200万回破壊せず	4.0tf	5.6tf	接合部(上床版下面)の破壊
A-3	200万回破壊せず	4.0tf	5.7tf	接合部(上床版下面)の破壊
B-2	200万回破壊せず	4.0tf	8.5tf	接合部(上床版下面)の破壊
B-3	200万回破壊せず	4.0tf	8.8tf	接合部(上床版下面)の破壊
C-2	159万回	(1万回)	-	接合部(上床版下面)の破壊
C-3	200万回破壊せず	3.0tf	3.4tf	接合部(上床版下面)の破壊
D-2	200万回破壊せず	7.5tf	7.5tf	波形鋼板の座屈
D-3	200万回破壊せず	6.0tf	8.5tf	波形鋼板の座屈

疲労载荷後の静的実験では発生したが、疲労実験では発生しなかった。

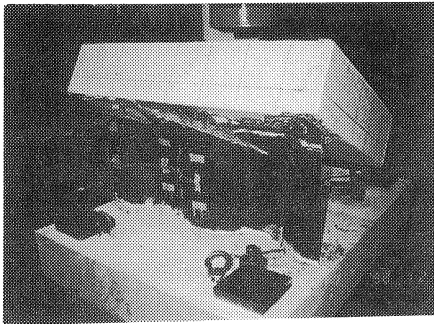


写真-5 破壊状況(A-2体)

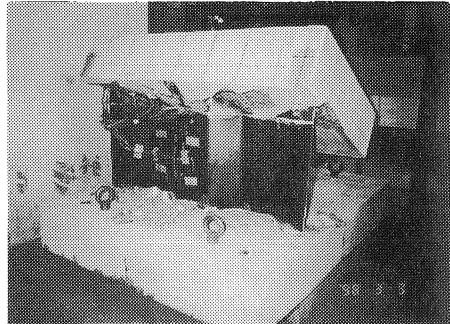


写真-6 破壊状況(B-2体)

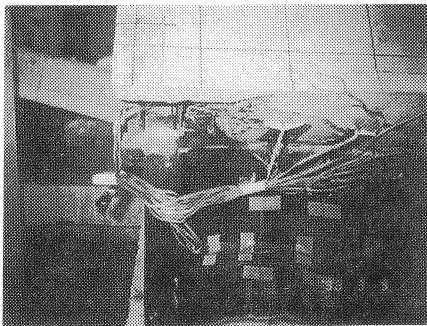


写真-7 破壊状況(C-2体)

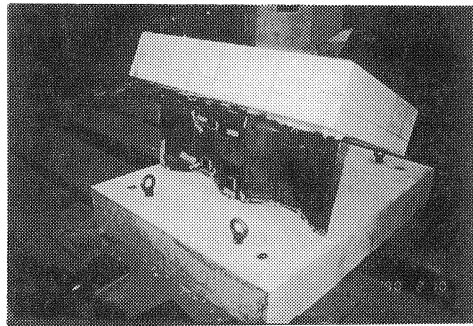


写真-8 破壊状況(D-2体)

(2) 変位振幅および残留変位

载荷回数と変位振幅との関係を図-8 に、载荷回数と残留変位との関係を図-9 に示す。ここで、変位振幅とは、最大载荷荷重時(2.0tf)における変位と最小载荷荷重時(0.5tf)における変位との差であり、接合部の剛性を表している。A 体、B 体、および D 体の変位振幅は、200 万回载荷してもほとんど変化がなく、剛性は低下していないが、C 体は徐々に大きくなっており接合部の剛性が低下しているといえる。

残留変位とは、最小载荷荷重時に残留する変位であり、接合部に発生しているずれの度合いを表していると考えられる。残留変位は、B 体、および D 体ではほとんど変化がないが、C 体は载荷回数 1000 回あたりから急激に大きくなっており、接合部にずれが生じたと考えられる。A 体は、载荷回数 1,000 回から 10,000 回の間で、残留変位がわずかに大きくなっているが、変位振幅の変化がなく、剛性低下が認められないことから、接合部にずれは生じていないと思われる。

これらの結果から、C 体の埋込み長では、疲労に対する抵抗性はほとんどないが、A 体以上の埋込み長であれば、疲労に対する抵抗性には問題がないと思われる。

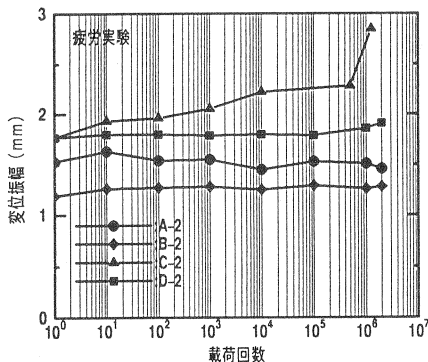


図-8 载荷回数と変位振幅との関係

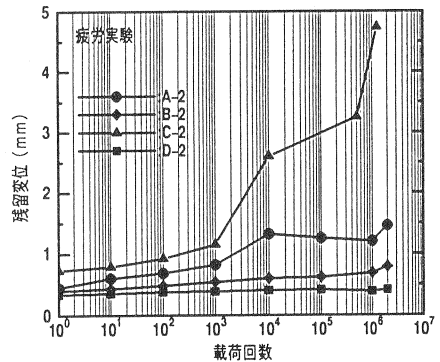


図-9 载荷回数と残留変位との関係

4. おわりに

実験結果をまとめると以下のとおりとなる。

(1) 静的載荷実験

- ① 埋込み接合部のひびわれ耐力は、埋込み長が大きいほど大きいのが、鋼板厚にはほとんど影響されなかった。
- ② 埋込み接合部の破壊耐力は、埋込み長が大きいほど、また鋼板厚が大きいほど大きかった。
- ③ 埋め込まれた鋼板の支圧による上床版上面への応力集中は、最も埋め込み長が大きい D 体においても認められなかった。
- ④ 埋込み長を大きくすれば、接合部の破壊耐力は大きくなるが、大きすぎると波形鋼板が座屈し、脆性的な破壊となるため、埋込み長を大きくしすぎることには問題があると思われる。

(2) 疲労実験

- ① C 体を除く、A 体、B 体、および D 体は、変位振幅、残留変位ともに良好な性状であり、疲労に対する抵抗性に問題はなかった。
- ② 埋め込まれた鋼板による上床版上面への応力集中は、疲労実験においても認められなかった。

(3) 埋込み長の評価

A 体：ひびわれ耐力、破壊耐力、破壊形態、および疲労に対する抵抗性に問題はなかった。

B 体：破壊耐力は A 体より大きかったが、その他の性状は A 体と同程度であった。

C 体：ひびわれ耐力、破壊耐力、疲労に対する抵抗性、すべてが小さかった。

D 体：疲労に対する抵抗性に問題はなかったが、静的破壊実験においてウェブが先に破壊し、脆性的な破壊となった。鋼板の支圧による上床版上面への応力集中はほとんどなかった。

これらの結果から、本谷橋程度の箱桁断面の接合部では、A 体、および B 体程度の埋込み長であれば問題がないと思われる。

今回の実験から、埋込み長は、埋込み接合部の横断方向性状に大きく影響する要因であることが判明した。今後、最適な埋込み長の決定方法等、接合部の設計方法を検討する必要があると思われる。

参考文献

- 1) 中島, 依田, 大浦, 他: 波形鋼板ウェブとコンクリートフランジとの接合部の構造に関する実験的研究, 第3回合成構造の活用に関するシンポジウム論文集, 1995.1
- 2) 竹下, 依田, 他: 波形鋼板ウェブを有する I 形断面合成桁の疲労実験, 土木学会第24回関東支部技術研究発表会講演概要集, 1997.3
- 3) Yoda, Takeshita, Sato, Sakurada, Siga & Nakasu: Fatigue tests of a new type of shear connector in a composite girder with a corrugated steel web, SMSB-V Canada, 1998.7
- 4) 山口(恒), 山口(隆), 池田: 波形鋼板をウェブに用いた複合プレストレストコンクリート桁の力学的挙動に関する研究, コンクリート工学論文集第8巻第1号, 1997.1