

各種ずれ止めを用いた合成2主桁橋の 床版と鋼桁接合部に関する実験的研究

済藤英明¹・大垣賀津雄²・安川義行³・稲葉尚文⁴

¹正会員 川崎重工業株式会社 鉄構ビジネスセンター (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島8)

²正会員 工博 川崎重工業株式会社 鉄構ビジネスセンター (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島8)

³工修 日本道路公団 関西支社 建設第二部 (〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20)

⁴工修 日本道路公団 関西支社 建設第二部 (〒530-0003 大阪市北区堂島1-6-20)

我が国においても頭付きスタッド以外のずれ止めを橋梁に使用する動きが見られ、関係各所で研究が進められている。その例として、孔あき鋼板ジベルやアングル形ジベルが挙げられる。本研究では、これらのずれ止めが合成2主桁橋に使用された場合の床版支間中央側載荷と張出し部側載荷による両方向への曲げ引抜き力作用下における挙動に着目し、実物大の部分模型供試体による静的載荷実験を実施し、ずれ止めの発生ひずみ、床版と鋼桁の界面剥離量、床版の引抜きせん断破壊状況等、接合部の基本的性状を明らかにした。

Key Words : *perforated rib, angle shear connector, pull-out force, composite two plate girder bridge*

1. はじめに

近年、建設費の縮減、耐久性の向上、維持管理の容易さ等の必須の課題を考慮した合理的な橋梁構造の研究開発が関係各所でなされており、鋼橋においてはPC床版を有する合成2主桁橋がこのような要求性能を満足させる経済性・耐久性に優れた橋梁形式の一つとして認められ、施工事例が多く見られるようになってきている^{1) 2)}。

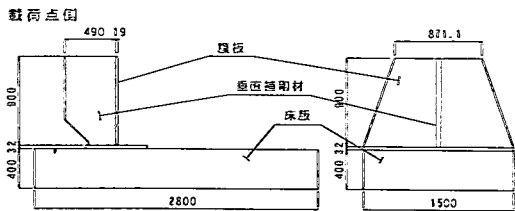
従来、合成桁のずれ止め設計においては、現行の道路橋示方書³⁾(以下、道示と呼ぶ)Ⅱ鋼橋編に規定されているように、橋軸方向せん断力のみを考慮していた。しかしながら、この種の2主桁橋において、横桁位置での腹板と垂直補剛材による柱、および横桁と床版からなるラーメンフレームを考えると、各種荷重による断面変形に起因した上フランジの首振り変形が剛性の高い垂直補剛材で拘束されることにより、接合部には橋軸直角方向曲げモーメントが作用することとなる。特に、2主桁橋においては、床版支間や張出しがより広くなることから、この橋軸直角方向曲げモーメントが大きくなる傾向にあり、横桁取り付け位置近傍に配置されたずれ止めには曲げ引抜き力が作用することが考えられる⁴⁾。今後、こ

の種の橋梁の建設が増加することを考慮すると、橋軸方向せん断力のみならず、この曲げ引抜き力も含めた設計法を確立する必要がある。

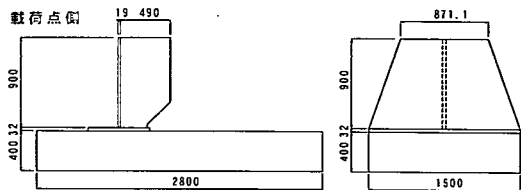
このような状況を踏まえ、広幅員PC床版合成2主桁橋のずれ止め設計法確立に資するために、施工性の良さや水平せん断力の方向性に依存しないことから、国内外で幅広く一般的に使用されている頭付きスタッドをずれ止めの対象にし、その配置をパラメータとした実物大の部分模型供試体を製作し、床版支間中央側載荷による曲げ引抜きに着目した静的載荷実験を実施した。その結果から接合部の力学的挙動を明らかにするとともにスタッドの軸方向引抜き力を算出できるような簡易解析モデルの構築を行ってきた^{5)~8)}。

一方、頭付きスタッド以外のずれ止めの研究が我が国においても関係各所で進められており、その一つとして孔あき鋼板(パーフォボンドプレート)ジベルが挙げられる⁹⁾¹⁰⁾。また、ヨーロッパにおいては、近年、アングル形ジベルや床版のアップリフト対策としてアングルに輪形筋を取り付けたずれ止めの使用も見られる。

本研究は、これらのずれ止めに対して床版支間中央側載荷と張出し側載荷による両方向への曲げ引抜き



a) 内曲げ供試体



b) 外曲げ供試体

図-1 実験供試体形状図

きに着目した静的載荷実験を実施し、ずれ止めが発生する応力やコンクリートの破壊形態等の基本性状について確認・考察するとともに、頭付きスタッド供試体との性能比較を行うものである。

2. 実験概要

(1) 実験目的

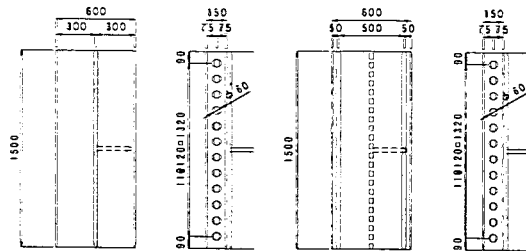
本実験は、合成 2 主桁橋の床版と鋼桁の接合部に着目し、ずれ止め形式をパラメータとした供試体を用い、主に接合部の変形性能、フランジと床版の剥離量、ずれ止めのひずみ分布、および引抜きせん断破壊状況を調査項目として実施するものである。

これらの結果から、各種ずれ止めを使用した場合の橋軸直角方向曲げモーメントに対して、床版と鋼桁間の力の伝達メカニズムを明らかにすることを目的としている。

(2) 実験供試体

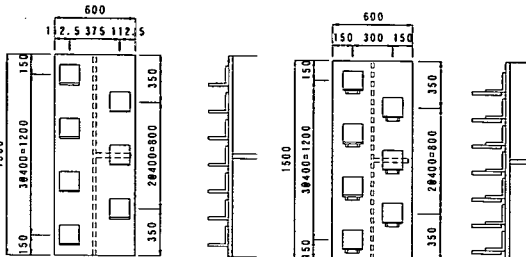
実験供試体は、活荷重の床版支間側載荷を想定した内曲げ供試体(I:内曲げ In の頭文字)と、活荷重および壁高欄などによる張出し側載荷を想定した外曲げ供試体(O:外曲げ Out の頭文字)の 2 タイプを基本とし、それぞれにつきずれ止め形状を 5 種類に変化させた合計 10 体を製作するものとした。

内曲げ供試体鋼桁部では図-1 a)に示すように、載荷点側に垂直補剛材を取り付けている。一方、外曲げ供試体では図-1 b)に示すように、腹板を挟ん



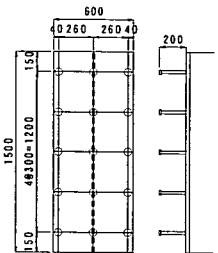
a) PB-1

b) PB-2



c) CB-1

d) CB-2



e) SC

図-2

ずれ止め配置図

で載荷点とは逆側に垂直補剛材を取り付けている。フランジ上のずれ止め配置は、図-2に示すとおりである。孔あき鋼板ジベルを用いた PB シリーズは、板厚 16mm、高さ 150mm、孔径φ60の鋼板を腹板直上に 1 枚配置した PB-1 供試体と、フランジ端部付近に計 2 枚配置した PB-2 供試体とした。孔にはジベルと直角方向の鉄筋を貫通させている。また、アングルを用いた CB シリーズは、幅、高さとも 150mm のアングルを千鳥に配置した CB-1 供試体と、床版のアップリフト対策として、CB-1 供試体と同配置で各アングルに輪形筋を取り付けた CB-2 供試体としている。CB-1 供試体では、アングルに鉄筋を貫通させている。

さらに、これら各種供試体との比較の対照として、径 22mm、高さ 200mm の頭付きスタッドを橋軸直角

方向3本、橋軸方向に300mm間隔で配置したSCを作成した。ここで、ある一定値のせん断力に対してずれ止めを配置することを想定した場合、SCを基準とすると、CB-1、CB-2は1.25倍、PB-1は1.17倍、PB-2に関しては2.34倍のずれ止め配置となっている。

床版部は橋軸方向幅1500mm、橋軸直角方向長さ2800mmのRC構造とし、床版厚は床版支間6m程度の実橋でハンチを含んだ主桁直上の床版厚さを想定した400mmとしている。鉄筋は、橋軸直角方向にD13を、橋軸方向にはD19をそれぞれ125mmピッチで上下2段ずつ配筋した。さらに、実験で安全側の評価を得るために、フランジ表面にMSスーパーフィルム(通称ロイハン)を敷いて、フランジと床版コンクリートの付着を切ることで、ずれ止めのみで合成される構造とした。

(3) 使用材料

a) 床版コンクリート

供試体床版部に使用したコンクリートには早強ポルトランドセメントを用い、設計基準強度は40N/mm²とした。材料試験結果を表-1に示す。

b) 鉄筋

橋軸方向に配置する鉄筋はD19を125mm間隔に上下2段配置し、その外側を巻くように橋軸直角方向にD13の補筋筋を125mm間隔に配置した。また材質は全てSD295とした。

c) 鋼板

供試体鋼桁部の材質はSM490とし、フランジおよび垂直補剛材は32mm、腹板には19mmの鋼板を用いた。引張試験より得られたこれら鋼材の機械的性質を表-2に示す。

d) アングル

アングルの材質はSS400とし、形状は150×150×12mmのものを使用した。アングルの機械的性質を表-3に示す。

e) 頭付きスタッド

頭付きスタッドの材質はJIS B 1198に従うものとし、軸径22mm、高さ200mmのものを用いた。スタッドの機械的性質を表-4に示す。

(4) 荷重方法

荷重方法を図-3に示す。内曲げ、外曲げ荷重実験とも供試体鋼桁部に同図に示すような荷重治具を取付け、その治具を介し腹板から2.2mの位置に荷重して接合部に曲げ引抜きを発生させるような荷重方法とした。荷重は、ずれ止めのひずみの弾性域で3~4回の予備荷重を繰り返し、その後荷重荷重が上昇しなくなるまで、すなわち、供試体の終局状態と

表-1 コンクリート材料試験結果

材齢	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	静弾性係数 N/mm ²
7	43.9	—	—
28	50.5	—	—
30	51.5	3.9	3.3×10 ⁴
78	54.3	4.1	3.5×10 ⁴

※材齢30日は実験開始日、78日は終了日である。

テストピースは標準養生(20℃水中)とした。

表-2 鋼板の機械的性質

種類	板厚 mm	材質	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
フランジ,補剛材	32	SM490	380.0	537.3
腹板	19		389.0	533.7

表-3 アングルの機械的性質

断面 mm	材質	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
150×150×12	SS400	301.0	475.0

表-4 スタッドの機械的性質

高さ mm	軸径 mm	材質	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
200	22	JIS B 1198 に従う	287.0	457.0

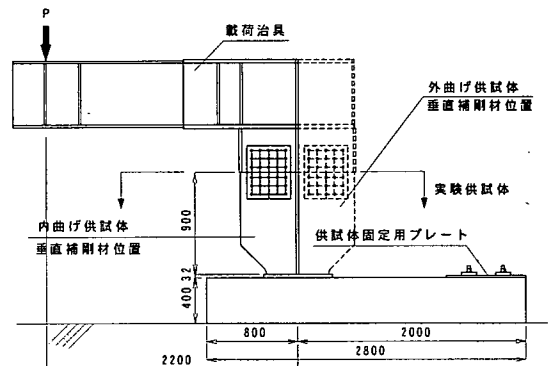


図-3 荷重方法

なるまで荷重を漸増させた。

(5) 計測

床版と鋼桁の接合部およびその近傍の挙動や耐荷力を検討・確認するために、下記に示す項目につい

て各荷重段階で計測を行った。

- ① 荷重点直下の鉛直変位
- ② 床版と鋼桁フランジ間の剥離量
- ③ 各種ずれ止めのひずみ分布
- ④ 供試体破壊状況

3. 載荷荷重の検討

PC床版2主桁橋においては、床版支間および張出し部が従来形式の橋梁より長くなるために、橋軸直角方向の曲げモーメントが大きくなり、床版と鋼桁を接合しているずれ止めに引抜き力が作用する⁴⁾。しかしながら、この接合部に発生する橋軸直角方向曲げモーメントの算出方法は明らかにされていないのが現状である。したがって本研究においては、実橋モデルによる立体 FEM 解析を行い垂直補剛材に発生する応力を求め、その値から橋軸直角方向の設計曲げモーメントを換算し、次にそのモーメントを実験供試体における荷重点から腹板までの距離 2.2m で除することによって、本実験における設計載荷荷重とした。

(1) FEM解析

a) 解析モデル

解析は、床版支間 5.7m、張出し長さ 2.85m の断面を持つ PC 床版 2 主桁橋を対象とした(図-4 参照)。解析モデル作成にあたっては、ずれ止めの引抜き力が卓越すると考えられる横桁位置近傍に着目し、図-5 に示すように、橋軸直角方向は対称断面と考え床版支間中央で対称の境界条件を設けた半橋モデルとし、橋軸方向は横桁位置を中心とし、横桁間隔相当の 8.5m の長さとした。また床版はソリッド要素、主桁および横桁はシェル要素、PC 鋼線は棒要素でモデル化し、モデル橋軸方向端部には曲げ固定の連続条件を設けている。さらにモーメント伝達が安全側に大きく評価できることから、床版と鋼桁の接合部は剛結としてモデル化している。

b) 荷重条件

本解析に用いた荷重条件は以下のとおりである。

① 活荷重

活荷重は、総重量 $W=245\text{kN}$ の大型車を図-6 に示すように、前輪($0.1W \times 2$)と後輪($0.4W \times 2$)に分配されているものを一組の集中荷重に置き換え、道示Ⅲコンクリート橋編 5.5¹¹⁾に規定されている床版支間による割り増し係数を乗じたものとした。この集中荷重を、床版支間側載荷の内曲げの場合、張出し側

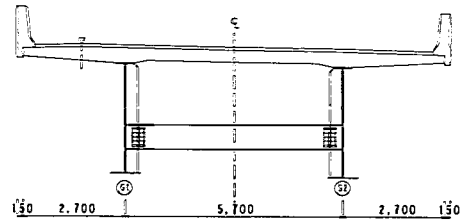


図-4 解析対象橋梁断面

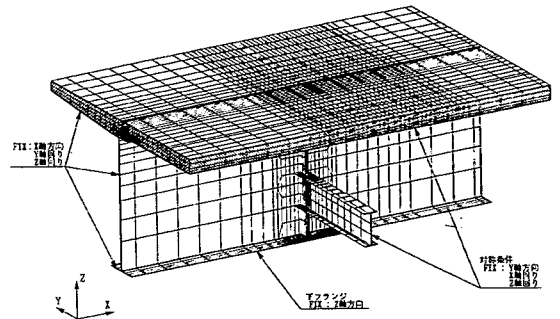


図-5 FEM 解析モデル

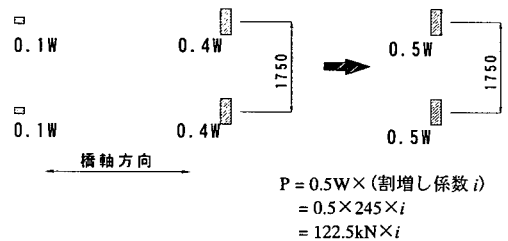


図-6 車両輪(T)荷重

載荷の外曲げの場合それぞれについて、ずれ止めに最大負荷が与えられると考えられる図-7 に示す位置に載荷した。

② 床版自重

床版の単位体積重量は 24.5kN/m^3 とした。

③ 舗装

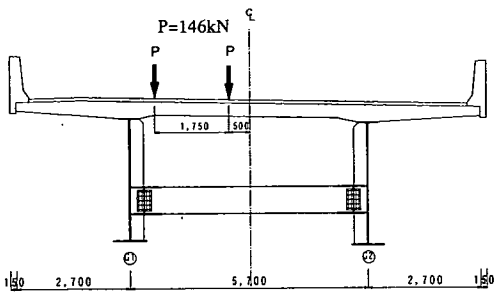
舗装厚さ 75mm を想定し、 1.69kN/m^2 の等分布荷重を解析モデル床版部上面に載荷した。

④ 壁高欄

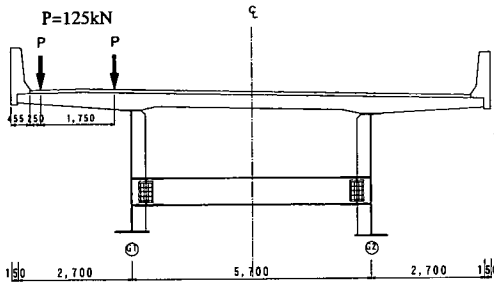
壁高欄荷重として、線荷重 9.56kN/m を解析モデル床版端部に載荷した。

⑤ PC 軸力

PC 軸力として、PC 鋼線をモデル化した棒要素に PC 導入軸力(約 305kN)相当の温度荷重を与えた。



a) 活荷重 L1 载荷(支間側)



b) 活荷重 L2 载荷(張出し側)

図-7 活荷重載荷位置

(2) 設計曲げモーメント相当の載荷荷重検討

本研究においては、接合部に発生する設計曲げモーメントを垂直補剛材応力から算出するものとした。床版からの力の伝達による応力が大きくなると考えられる上フランジとの結合部付近の垂直補剛材応力分布解析値を図-8に示す。同図より、床版自重および舗装荷重による発生応力以外は自由端側で局所的に大きくなり、また、どの荷重が載荷された場合でも、腹板との結合部(腹板表面付近)にはほとんど応力が発生しないことがわかる。ここで、設計曲げモーメントを同図に示した応力分布から算出した場合、端部の局所応力の影響により設計曲げモーメントを過大評価することになると考えられる。したがって、ここでは、局所応力の影響を取り除くために、同図中破線部で示すように、端部から20mmおよび50mm腹板側に入った2カ所の応力を結ぶ直線上に端部付近の応力も分布すると仮定した。また各荷重による発生曲げモーメントを算出する際には、垂直補剛材発生応力がほぼゼロとなる25mmの位置からの長さを、応力分布を考慮した合力に掛け合わせて積分するものとした。

各種荷重により垂直補剛材端部に発生する応力から算出した曲げモーメントを表-5に示す。同表より、PC軸力により発生する曲げモーメントは、内

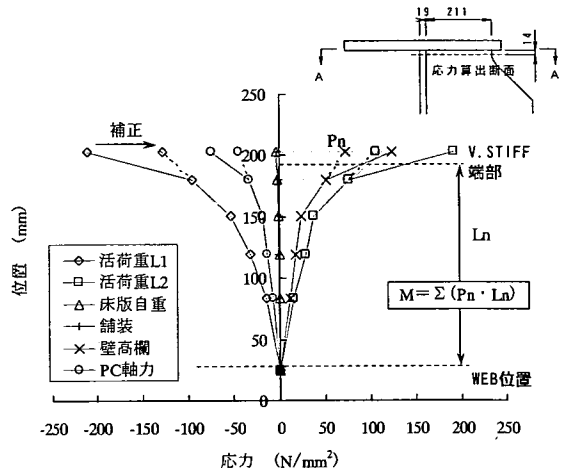
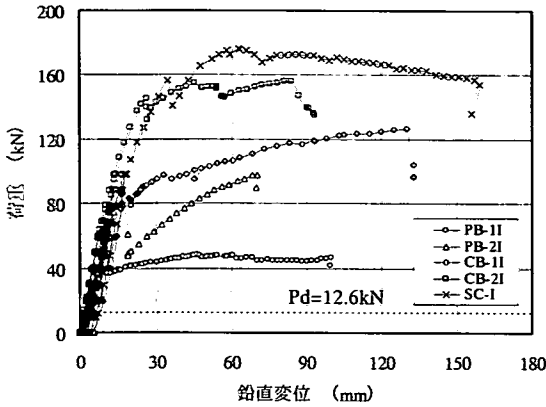


図-8 垂直補剛材応力分布

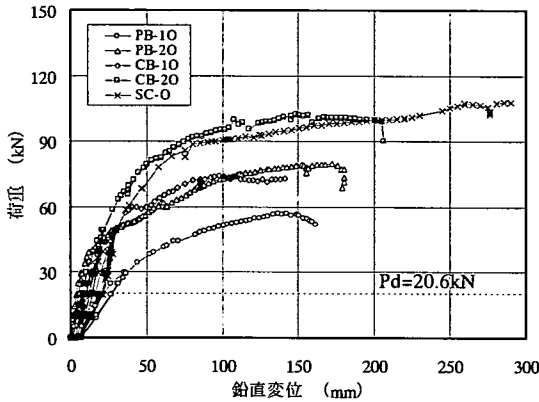
表-5 設計曲げモーメントおよび載荷荷重

項目	設計モーメント kN・m	
	内曲げ	外曲げ
① ₁ 支間側活荷重載荷 L1	-33.48	
① ₂ 張出し側活荷重載荷 L2		27.62
②床版自重		-0.57
③舗装荷重		-0.30
④壁高欄荷重		18.58
⑤PC軸力		-12.05
M(①+②+③+④)	-15.77	45.33
M(①+②+③+④+⑤)	-27.82	33.28
載荷荷重 (kN)	12.6	20.6

曲げ載荷においては曲げモーメントを増加させる方向に、外曲げ載荷においては減少させる方向に作用していることがわかる。PC軸力によってこの部位に発生する曲げモーメントは、PC鋼材の偏心量や曲げ形状の微小な差によって変わると考えられるため、単純に全ての荷重により発生する曲げモーメントの合計を設計曲げモーメントとすると危険側の評価を与える恐れがあるため、ここでは、内曲げ載荷、外曲げ載荷それぞれ同表中のハッチ部分を設計曲げモーメントとした。また、この設計曲げモーメントを発生させるための実験供試体における載荷荷重は、載荷点から腹板までの距離 2.2m で除することによって求めた。



a) 内曲げ荷重



b) 外曲げ荷重

図-9 鉛直変位

4. 実験結果と考察

(1) 載荷点直下の鉛直変位

内曲げ荷重実験における、各供試体の荷重と鉛直変位の関係を比較したものを図-9 a)に示す。ここで鉛直変位とは、載荷点直下の治具下面の鉛直変位計測値である。図中、各供試体には、内曲げ荷重の場合にはIを付け、外曲げ荷重の場合にはOを付けてそれぞれ区別した。

同図より、いずれの供試体も耐荷性能および変形性能がSC-Iより劣っていることがわかる。PB-2Iについては、約90kNで腹板より外側(載荷点と反対側)のジベル近傍でコンクリートの引抜き破壊が生じ、孔を貫通している鉄筋の効果で約70mmまで変形したが、約100kNで内側のジベル近傍で再び引抜き破壊が生じ終局を迎えた。最大荷重は設計荷重に対し約8倍となっているが、破壊形態は脆性的なもので

あった。一方、PB-1Iは最大荷重が50kN弱で、設計荷重に対し約4の安全率であった。また貫通鉄筋の効果で約100mmまで変形が進んだが、SC-Iの約60%程度の変形性能である。

一方、アングル型ジベルを配置した供試体については、両方とも最大荷重がSC-I供試体を下回る結果となったが、CB-2Iにおいては設計荷重の約13倍の160kNとなっており、十分な耐荷性能を有することがわかる。またCB-1Iは、約100kNでコンクリートの引抜き破壊が生じ荷重が下がったが、アングルジベルを貫通している鉄筋の効果もあり、最大荷重が約125kNまで上昇していることがわかる。

アングルをずれ止めに使用した場合、本実験対象としているような、曲げ引抜き力が卓越する垂直補剛材位置においては、CB-2Iのように輪形筋を取り付け、引抜きに抵抗するせん断面積を大きくすることが有効であると考えられる。またアングルジベル内に鉄筋を貫通させることで、接合部の変形性能が少し向上すると考えられるが、配筋等施工性が良くない問題もあり、鉄筋を貫通させなくとも輪形筋を取り付けることで十分な耐荷性能および変形性能を有する接合部構造になるといえる。いずれにしても、終局耐力、変形性能共に頭付きスタッドが良いといえる。

外曲げ荷重実験における、各供試体の荷重と鉛直変位の関係を比較したものを同図 b)に示す。

同図より、最大荷重はPB-2OではSC-Oの約73%の80kN、PB-1Oでは約53%の58kNとなっていることがわかる。また、PB-1O供試体は設計荷重に対する安全率が3以下の値となっている。PB-2Oでは約60kNで、PB-1Oでは約40kNで孔あき鋼板ジベル付近のコンクリートが引抜き破壊を生じたが、孔を貫通している鉄筋の効果で両供試体とも約160mmまで変形する粘りのある挙動を示しているが、SC-Oの約60%程度である。一方、載荷初期段階における変形量であるが、PB-2Oが設計荷重レベルで約10mmと他の2供試体に比べて小さくなっている。本載荷ケースで想定しているように床版張出し側に荷重が載荷された場合、床版の張出し側の変形量は床版自体の変形、上フランジの首振り変形、床版と鋼桁の接合部の結合度合い(床版と鋼桁上フランジ界面の剥離量。以下、単に剥離量と呼ぶ)等に左右されると考えられる。

この剥離は、床版の回転変形に鋼桁上フランジが追従して変形できれば生じにくいと考えられるが、横桁位置においては垂直補剛材により上フランジの回転が拘束されるため、この近傍では他の部分より剥離を生じさせるような力が集中することが予想さ

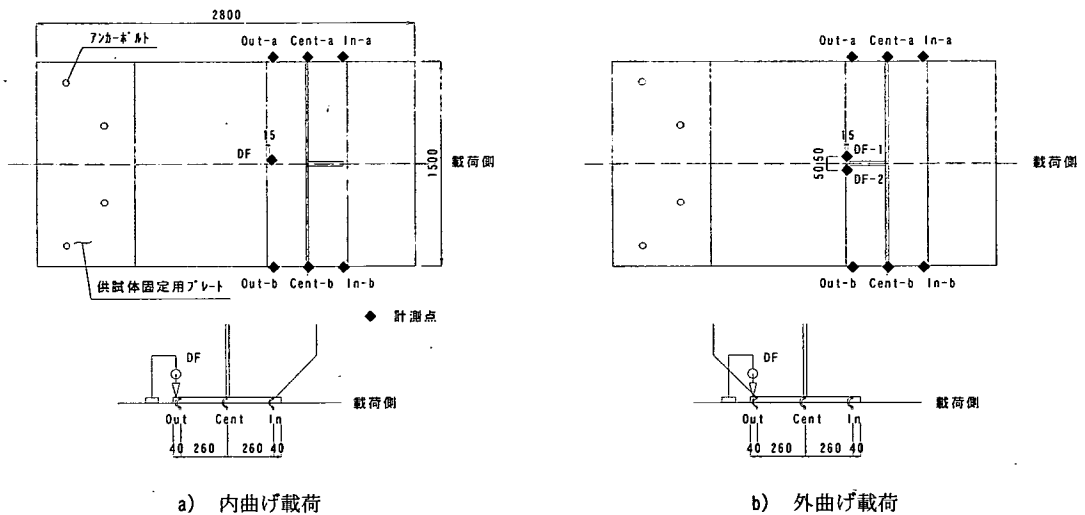


図-10 剥離量計測位置

れる。したがって、垂直補剛材近傍の床版変形量は垂直補剛材の剛性や配置するずれ止めの寸法、形状等、特に腹板位置より床版支間側の垂直補剛材近傍に配置されたずれ止めの形状や数量に左右されるといえる。ここでは、PB-10 が腹板直上にしかジベルが配置されていないことや、SC-O が垂直補剛材直上にスタッドが1本配置されているのに対し、PB-20 はフランジの端部付近に配置され、なおかつジベルが連続していることから初期段階の変位が抑えられると考えられる。

CB シリーズ供試体においては、設計荷重の約 2.9 倍の 60kN までは、SC-O と同じような挙動を示しているが、輪筋のない CB-10 では、そこでコンクリートの引抜き破壊が生じたため、変位が増大していることがわかる。一方、輪筋を取り付けた CB-20 と SC-O は、ほぼ同様の挙動を示しており、最大荷重は共に約 110kN であった。ただし、CB-20 の変形性能は SC-O の約 70% 程度に止まっている。

アングル型ジベルのみを使用した CB-10 では、同図 a) に示したように内曲げに対しては、耐荷性能は低いものの貫通鉄筋の効果により変形性能は高くなったが、外曲げ荷重に対しては、耐荷性能で約 30%、変形性能で約 50% 程度 SC-O を下回る結果であった。しかしながら、CB-20 の結果からもわかるように、アングルに輪筋を取り付けることで頭付きスタッドと同程度の耐荷性能を得ることができると考えられる。

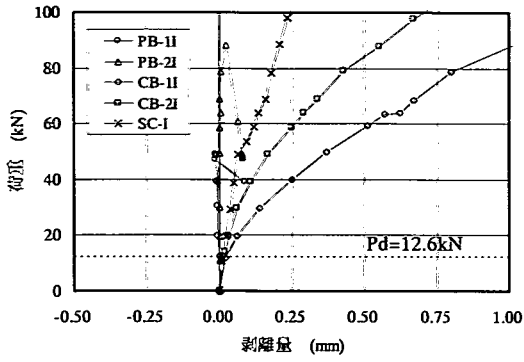
(2) 床版と鋼桁フランジ間の剥離量

a) 側面の剥離量

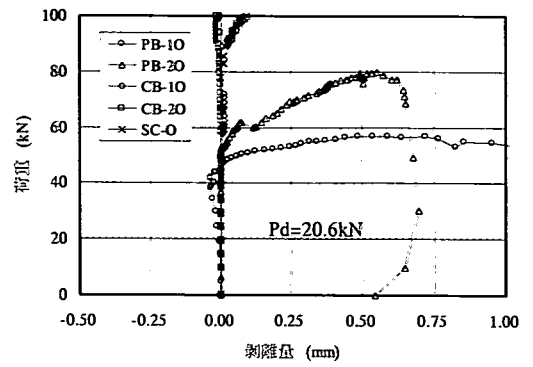
通常目視では確認できない床版と鋼桁間の界面剥離状況を確認するため、図-10 に示すような、供試体側面の両側 3 箇所において、界面の剥離量を計測した。

内曲げ荷重実験における各供試体の側面の剥離量を図-11 に示す。PB シリーズ供試体および SC 供試体については、供試体両側面 (In, Cent, Out) の a と b の平均値とした。一方、CB シリーズについては、図-2 に示したとおり、アングルの立ち上がり部分が非対称となっているために、a と b 側で剥離量に差異が見られた。したがって、安全側の評価として、剥離量の大きい b 側のデータをプロットした。

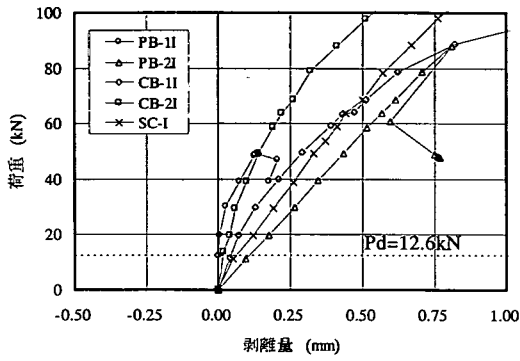
PB シリーズでは、両供試体とも In および Out において、設計荷重レベルでほとんど剥離が生じていないことがわかる。一方、Cent においては PB-2I が設計荷重で約 0.1mm の剥離が生じており、また PB-1I の Out においては、設計荷重でほとんど剥離が生じていないものの、40kN で 0.25mm に至っており、SC-I の約 2 倍の剥離量が生じている。図-13a) に示すように、内曲げ荷重においては、床版と鋼桁の接合部に発生する垂直補剛材自由端側コーナーカット部を支点とした偶力により、フランジが腹板によって引き上げられる。PB-2I では腹板直上にその力に抵抗するずれ止めが配置されていないため、Cent の位置から剥離が生じている。一方、PB-1I では、腹板より外側の引張領域にずれ止めが配置されていないため、Out の位置の剥離が大きくなっていることが考えられる。



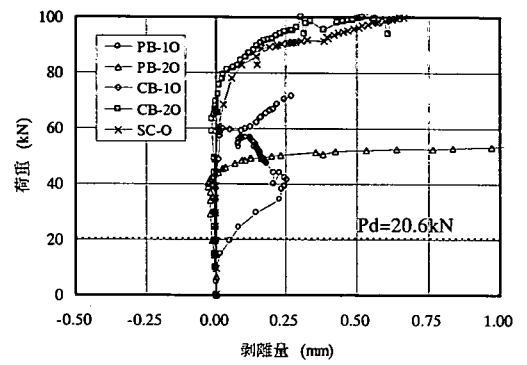
a) In



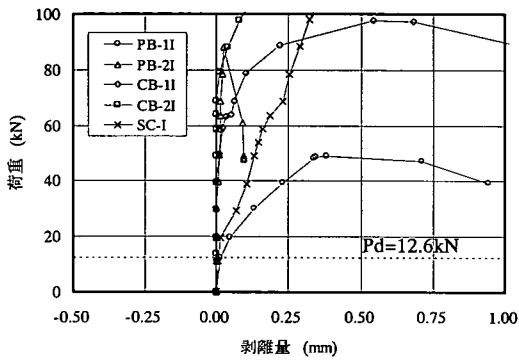
a) In



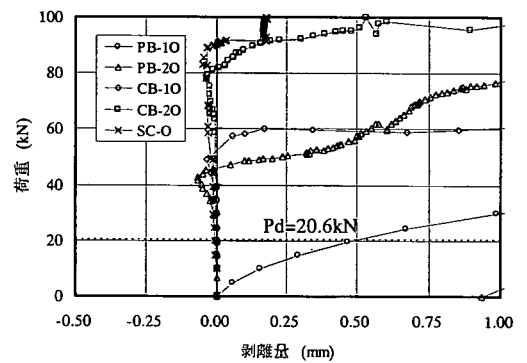
b) Cent



b) Cent



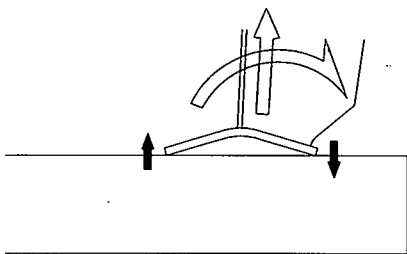
c) Out



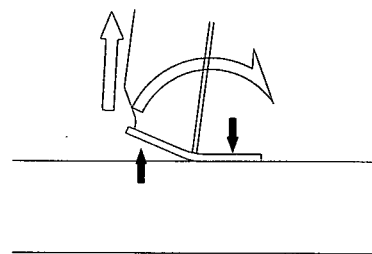
c) Out

図-11 内曲げ荷荷における側面剥離量

図-12 外曲げ荷荷における側面剥離量

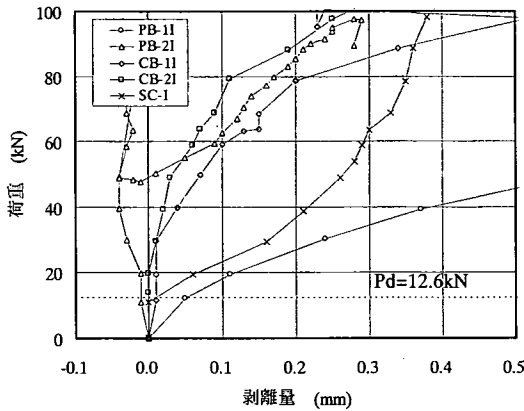


a) 内曲げ荷荷

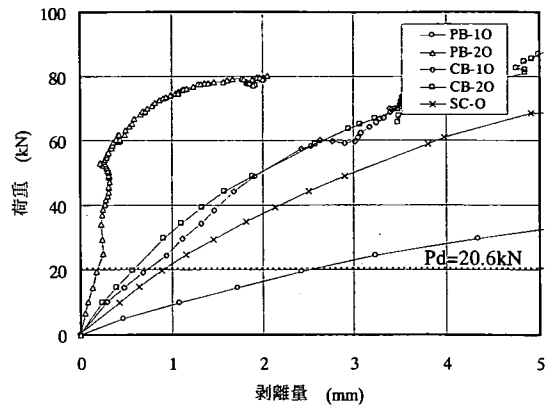


b) 外曲げ荷荷

図-13 フランジ変形概念図



a) 内曲げ載荷



b) 外曲げ載荷

図-14 供試体上面の剥離量

図-12には外曲げ載荷実験における各供試体の側面の剥離量を示す。同図より、PB-1O以外は設計荷重において、ほとんど剥離が生じていないことがわかる。PB-1Oにおいては、設計荷重でOutの剥離量が0.5mmと大きくなっている。これは、図-13b)に示すように、外曲げの載荷の場合、腹板とフランジの結合部を支点とした偶力により、フランジの外半分は床版から鋼桁を引き剥がすような力が作用するが、PB-1Oにおいては、腹板直上にしかずれ止めが配置されていないために、その力に抵抗するものがなく、剥離量が大きくなったと思われる。

b) 上面剥離量

図-10に示したように、供試体上面の垂直補剛材取付け断面位置において、床版と鋼桁間の界面剥離量を確認する。内曲げ載荷実験における各供試体の上面の剥離量を図-14a)に示す。

図-13a)に示したように、内曲げ載荷においては、載荷荷重によって上フランジは腹板に引き上げられるような挙動を示し、フランジ端部の載荷側には圧縮が、腹板を介して反対側の端部には引張が作用する。したがって、ずれ止めをできる限り外側に配置することが、上面端部DFにおける剥離防止につながると考えられ、このことは、頭付きスタッドに関する解析的検討から明らかにされている¹²⁾。ここでは、PB-1Iが腹板直上にしかずれ止めが配置されていないために設計荷重において、剥離量が0.05mmに至っていることがわかる。

図-14b)には外曲げ載荷実験における各供試体の上面の剥離量を示す。同図はDF-1とDF-2の平均値をプロットしたものである。図-13b)で説明したように、外曲げ載荷において垂直補剛材位置は最も剥離が生じやすい位置であることから、設計荷重にお

いて、CB-1Oでは0.6mm、CB-2Oでは0.7mmの剥離が生じているが、SC-Oの0.9mm以下の値となっている。CBシリーズ、SCとも垂直補剛材直上にずれ止めを配置しているが、アングルの軸引張方向の剛性がスタッドよりも大きいため、このように若干剥離量が小さくなっていると考えられる。

PBシリーズでは、PB-1Oが内曲げ載荷時と同様に剥離量が大きくなり、設計荷重において約2.5mmとなっている。一方、PB-2Oにおいては、ずれ止めがフランジ端部付近に配置されていることと、連続していることから剥離量が0.2mm程度におさまっていることがわかる。

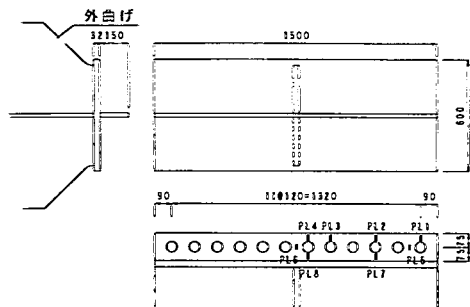
(3) 孔あき鋼板ジベルのひずみ分布

a) 内曲げ載荷

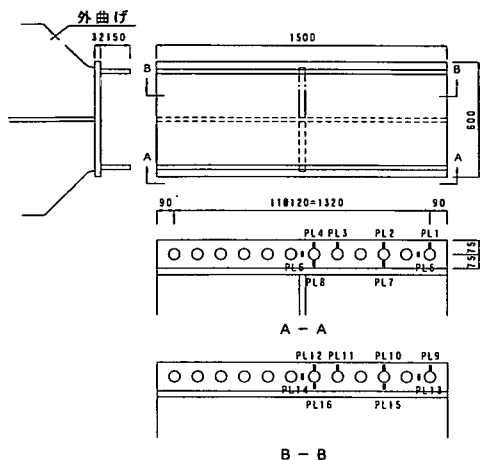
孔あき鋼板ジベルを用いたPBシリーズ供試体の内曲げ載荷時における発生ひずみ分布を確認するため、図-15に示す位置で表裏2枚貼付したひずみゲージにより鉛直方向ひずみを計測した。以下に示すひずみ値は、設計荷重相当の12.6kN載荷時におけるものである。

①PB-1I 供試体

PB-1I 供試体における軸方向ひずみ分布を図-16a)に示す。軸方向ひずみは、鋼板両面に貼り付けた表裏2枚のゲージの平均値より求めた。正値は引張を、負値は圧縮ひずみが作用していることを示している。同図より、ジベルの各部位において、鉛直軸方向ひずみはほとんど生じておらず、最も大きなひずみが発生している孔間においても28μ程度の引張りひずみである。同図b)には曲げひずみ分布を示す。曲げひずみは、ジベルに貼り付けた表裏2枚のゲージの差より求めた。正値は外側(載荷点とは反対側)



a) PB-1 供試体



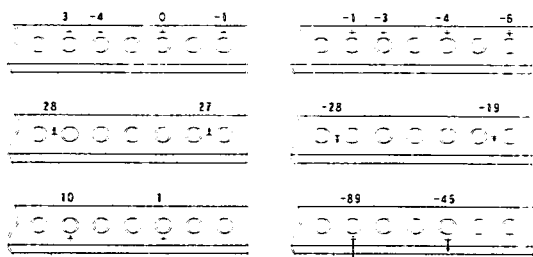
b) PB-2 供試体

図-15 PB シリーズ計測位置

へ、負値は内側(荷点側)へ曲げられる挙動を示している。同図より、腹板直上に立てられた孔あき鋼板ジベルは、荷点側へ曲げられる挙動を示していることがわかる。また鋼板とフランジの結合部付近で最も大きい 89μ の曲げひずみが生じていることがわかる。

②PB-2I 供試体

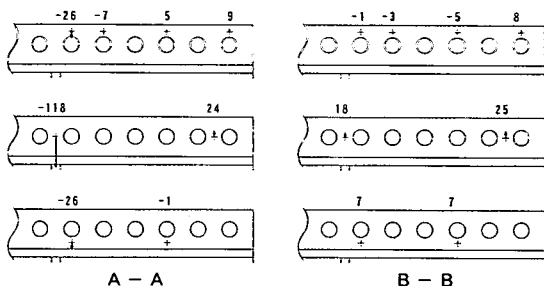
PB-2I 供試体における軸方向ひずみ分布を図-17a)に示す。同図より、荷点側(A-A 断面)のジベルの孔間において 118μ の圧縮ひずみが生じているが、その他の位置においては、PB-1I と同様、ほとんどひずみが発生していないことがわかる。同図 b)には曲げひずみ分布を示す。同図より、2 枚のジベルともフランジとの結合部付近が最も大きなひずみが生じている。これは、図-13b)に示したように、腹板直上にずれ止めが配置されていないと、フランジの変形により、端部のずれ止め根元部分が局所的に互いに逆方向に曲げられるためと考えられる。しかしながら、その値は 108μ 程度である。



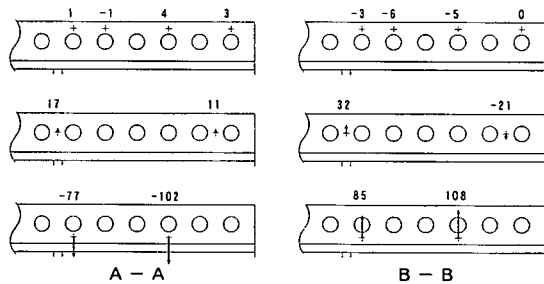
a) 軸方向ひずみ

b) 曲げひずみ

図-16 PB-1I ずれ止めひずみ



a) 軸方向ひずみ



b) 曲げひずみ

図-17 PB-2I ずれ止めひずみ

b)外曲げ荷重

PB シリーズ供試体の外曲げ荷重時における発生ひずみ分布を確認するため、設計荷重相当の 20.6kN 荷重時のひずみを図-18, 19 に示す。計測位置は、図-15 と同様である。

①PB-10 供試体

図-18a)に軸方向ひずみを示す。同図より、垂直補剛材位置における鋼板とフランジの結合部付近で最も大きい 338μ の引張ひずみが生じていることがわかる。同図 b)には曲げひずみを示す。同図より、内曲げ荷重実験と同様に、ジベルが荷点側へ曲げられる挙動を示していることがわかる。また、曲げひずみは軸方向ひずみより大きくなり、軸方向ひずみと同様、鋼板とフランジの結合部付近において、

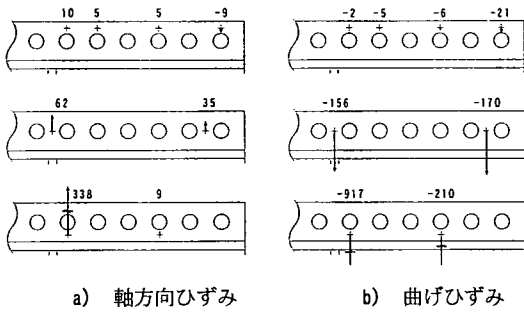


図-18 PB-10 ずれ止めひずみ

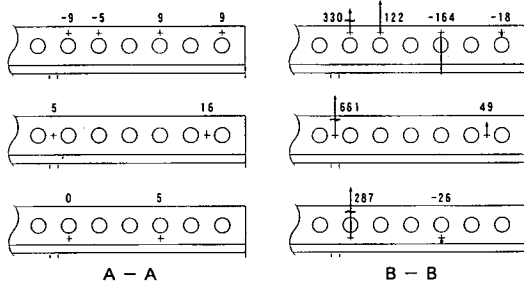
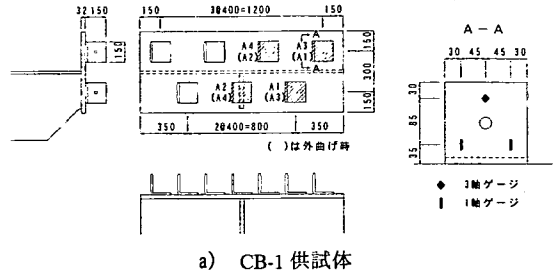
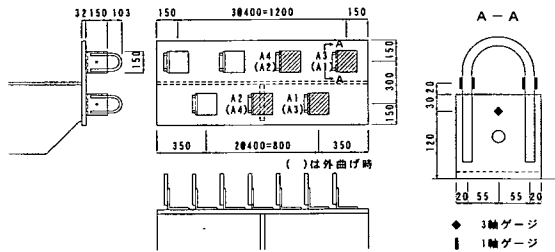


図-19 PB-20 ずれ止めひずみ



a) CB-1 供試体



b) CB-2 供試体

図-20 CB シリーズ計測位置

のジベルは、鋼板とフランジの結合部付近で、最大 106μ の曲げひずみが発生している。一方、外側のジベルにおいては、軸方向ひずみと同様に、内側のジベルよりもひずみが大きくなり、垂直補剛材位置のジベルとフランジの結合部近傍で降伏に近い最大 905μ の曲げひずみが生じている。

以上のことより、PB-20 のような配置で孔あき鋼板ジベルに外曲げの引抜き力が作用した場合、軸方向ひずみは孔間で大きくなり、曲げひずみは鋼板とフランジの結合部付近で大きくなるといえる。特に孔間部分には、橋軸方向の水平せん断力も作用するため注意を要する部位である。

降伏に近い 917μ となっている。

②PB-20 供試体

軸方向ひずみ分布を図-19a)に示す。同図より、床版と鋼桁の界面が圧縮力を受けることが予想される領域に配置された荷側(A-A断面)のジベルの孔間においては、ほとんど軸方向ひずみが発生していないことがわかる。一方、外側に配置されたジベルは、図-13b)に示したように、フランジが垂直補剛材位置で床版から引き剥がされるためにひずみが大きくなり、特に垂直補剛材位置付近の孔間では 661μ の引張ひずみが生じている。また、その他の部位においても $122\sim 330\mu$ の比較的大きな引張ひずみが作用していることがわかる。

同図 b)には曲げひずみを示す。同図より、荷側

(4) アングルジベルのひずみ分布

a) 内曲げ荷

アングルジベルを用いた CB シリーズ供試体の内曲げ荷時における発生ひずみ分布を確認するため、図-20に示す位置で鉛直方向ひずみを計測した。同図 a)に示すように、CB-1 供試体については、アングルの立ち上がり部の根元付近には鉛直方向の 1 軸ゲージを、貫通鉄筋孔の上部には 3 軸ゲージをそれぞれ表裏 2 枚貼り付けた。また同図 b)に示すように、CB-2 供試体については、輪筋筋に 1 軸ゲージを、アングルの貫通鉄筋孔の上部には同じく 3 軸ゲージを表裏 2 枚貼り付けた。以下に示すひずみ値は、設計荷重相当の 12.6kN 荷重時におけるものである。

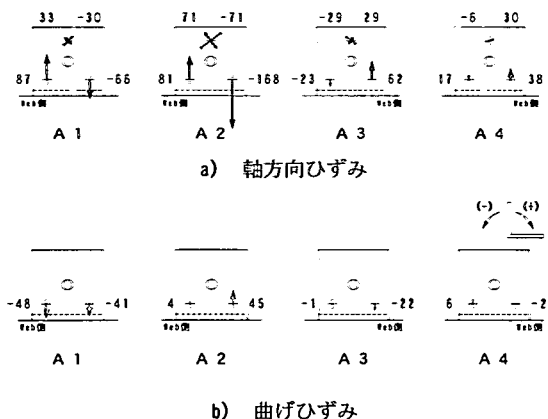


図-21 CB-11 ずれ止めひずみ

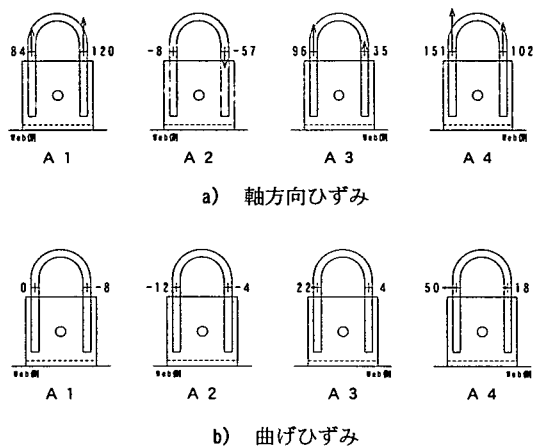


図-22 CB-2I ずれ止めひずみ

①CB-1I 供試体

CB-1I 供試体における軸方向ひずみ分布を図-21a)に示す。軸方向ひずみは、ジベルに貼り付けた表裏2枚のゲージの平均値より求めた。正值は引張を、負値は圧縮ひずみが作用していることを示している。また、3軸ゲージを貼り付けた位置では、主ひずみを示している。同図より、アングルの根元付近のひずみは、腹板近い位置で引張力が作用していることがわかる。一方、腹板から遠い側のひずみは圧縮応力が作用しており、引張応力が生じている場合でも小さいものであることがわかる。A1のジベルで最大引張応力が生じているが、 87μ 程度である。また鉄筋貫通孔上での主ひずみは、最大でもA2のジベルにおける 71μ の引張応力であり、その他の位置においては小さいひずみであった。

同図b)には曲げひずみ分布を示す。曲げひずみは、ジベルに貼付けた表裏2枚のゲージの差より求めた。

正值はアングルが内側へ閉じる方向へ、負値は外側へ開く挙動を示すことを意味している。同図より、A1のジベルにおいて開く方向へ平均 45μ 程度のひずみが生じる程度で、その他の位置ではほとんど生じていないことがわかる。

②CB-2I 供試体

CB-2I 供試体の輪形筋における軸方向ひず分布を図-22a)に示す。同図より、垂直補剛材直上のA2ジベルの輪形筋のみで 57μ の圧縮応力が生じ、その他の位置においては $35\sim 151\mu$ の引張ひずみが生じていることがわかる。また輪形筋に発生するひずみは、CB-1Iのアングルに見られた挙動とは逆の腹板から離れている側が大きくなっている傾向を示している。同図b)には輪形筋の曲げひずみ分布を示す。同図より、腹板より外側のジベルの輪形筋は外側へ、内側のジベルでは載荷点側へ曲げられる挙動を示していることがわかる。また曲げひずみは、最大でもA4のジベルにおける 50μ であり、軸方向ひずみに比べて小さいものである。

b)外曲げ載荷

CBシリーズ供試体の外曲げ載荷時における発生ひずみ分布を確認するため、設計荷重相当の 20.6kN 載荷時のひずみ分布を図-23, 24に示す。計測位置は、図-20と同様である。

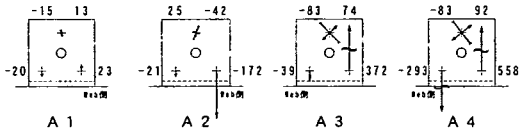
①CB-10 供試体

図-23a)に軸方向ひずみを示す。同図より、図-13b)にも示したように、外曲げ載荷により垂直補剛材直上がフランジを引き剥がそうとするため、腹板より外側(載荷点の反対側)に配置されたA3とA4のジベルの外側の引張ひずみが卓越していることがわかる。特に垂直補剛材直上のA4においては、軸方向引張ひずみが 558μ と非常に大きいものであることがわかる。また、A3, A4ジベルの貫通鉄筋孔上に引抜き力の作用方向に引張ひずみが生じているが、最大 92μ 程度の値である。

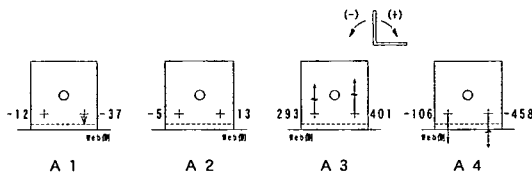
同図b)には曲げひずみ分布を示す。同図より、床版と鋼桁の界面が圧縮を受ける領域に配置されたA1とA2のジベルにおいては、ほとんど曲げひずみが発生していないことがわかる。一方、腹板より外側に配置されたジベルにおいては、A3で閉じる方向に 401μ 、A4で開く方向に 458μ の曲げひずみが生じており、外曲げ載荷においては、軸方向、曲げひずみとも内曲げ載荷に比べ、比較的大きくなっていることがわかる。

②CB-20 供試体

輪形筋の軸方向ひずみ分布を図-24a)に示す。同図より、CB-10と同様に、垂直補剛材直上に配置されたA4ジベルの輪形筋の引張ひずみが最大 467μ と

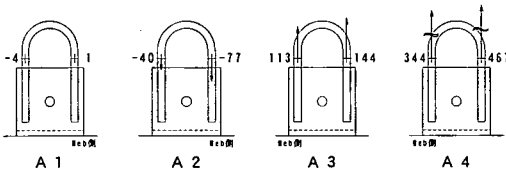


a) 軸方向ひずみ

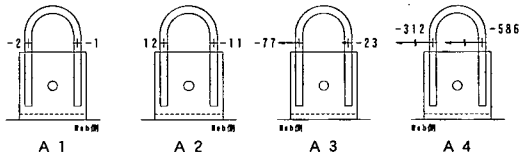


b) 曲げひずみ

図-23 CB-10 ずれ止めひずみ



a) 軸方向ひずみ



b) 曲げひずみ

図-24 CB-20 ずれ止めひずみ

なり、隣に配置された A3 の 3 倍以上の大きなひずみが発生していることがわかる。一方、圧縮領域に配置された A1, A2 のジベルにはほとんどひずみが発生しなかった。

同図 b) に曲げひずみ分布を示す。同図より、引張領域に配置されたジベルの輪形筋に大きな曲げひずみが生じる傾向が見られ、特に垂直補剛材直上の A4 ジベルにおいては、 586μ の曲げひずみが発生していることがわかる。

(5) 供試体破壊状況

各供試体の実験終了後における床版内部の破壊状況を図-25 に示す。外曲げ載荷実験においては、SC 供試体および CB シリーズ供試体にコンクリートの破壊が見られなかったため、ここでは、内曲げ供試体の破壊状況のみを示す。同図に示す断面は、SC および PB シリーズについては垂直補剛材取付け位置、

CB シリーズは、その位置より少し外側のずれ止め配置断面とした。

a) SC 供試体

図-25a) に SC-I の床版内部破壊状況を示す。同図からわかるように、本供試体においては、腹板直上のスタッドと外側スタッドのひび割れが結合し、両者から上方もしくは下方 45° にコンクリートのせん断破壊が生じている。

b) PB シリーズ供試体

同図 b), c) には、PB シリーズの破壊状況を示す。コンクリート破壊形態として、床版コンクリートのせん断破壊、孔の中に充填されたコンクリートジベルのせん断破壊、および引抜きに対して孔の上面が抵抗することによる引抜きせん断破壊が考えられるが、PB-1I, PB-2I とも脆性的な引抜きせん断破壊形態であった。本実験に使用した孔あき鋼板は、高さ 150mm であり、孔の上面がフランジ面から 105mm と低く、引抜き力に対するコンクリートのせん断断面積が小さかったために、引抜きせん断破壊が支配的となり、耐荷力も低くなったと思われる。

c) CB シリーズ供試体

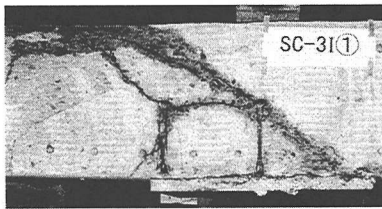
同図 d) に CB-1 の破壊状況を示す。貫通鉄筋の効果で脆性的な破壊を起こさなかったが、床版表面から 75mm の位置に配置された貫通鉄筋のみが引抜きに抵抗するため、図-9 の荷重と鉛直変位関係からもわかるように、耐荷力は低いものであった。また、同図 e) には CB-2 の破壊状況を示す。同図より、本供試体においては、コンクリートの引抜き破壊が生じているが、輪形筋を取り付けているため、引抜きに対するせん断断面積が大きくなり、耐荷力も向上している。

5. まとめ

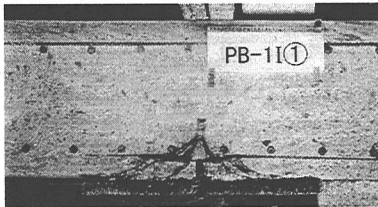
以上の実験結果より、以下のことが明らかになった。

- ① 本実験で使用した孔あき鋼板ジベルは、高さ 150mm で孔の上部までの高さが 105mm であり、頭付きスタッドより引抜きせん断断面積が小さくなるため、耐荷性能、変形性能とも頭付きスタッドよりかなり劣るものであった。
- ② アングルのみをジベルとして使用した場合、耐荷性能、変形性能とも頭付きスタッドより劣るが、輪形筋を取り付けることでこれらの性能を向上させることができる。
- ③ 孔あき鋼板ジベルは、橋軸方向に連続して配置されるため、フランジ端部に配置することで床版

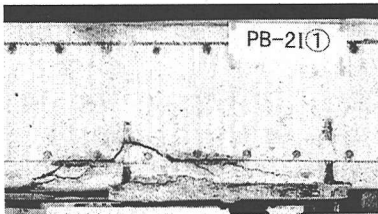
と鋼桁間の剥離量が抑制できる。また、アングルジベルには輪形筋を取り付けることで、頭付きスタッドと同等の剥離量に抑えることができる。



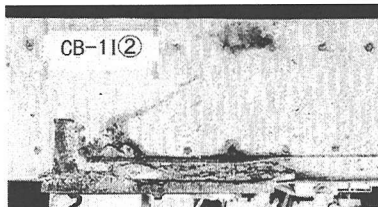
a) SC



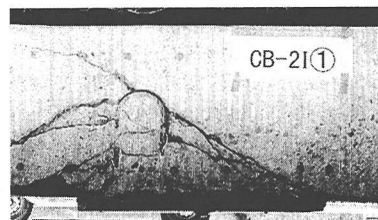
b) PB-1I



c) PB-2I



d) CB-1I



e) CB-2I

図-25 供試体破壊状況
(写真右側が載荷点側)

④ 孔あき鋼板ジベルのフランジとの結合部付近の軸方向ひずみおよび曲げひずみは、外曲げにおける設計荷重載荷時に降伏点近くに至る。

以上のとおり、本実験結果から各種ずれ止めを用いた場合の接合部の変形挙動やずれ止め発生ひずみ、床版と鋼桁の界面剥離状況等、接合部の基本的性状が明らかになり、有益なデータが得られたと考えている。しかしながら、本研究におけるずれ止め配置は4種類に限定したものである。孔あき鋼板ジベルに関しては、孔径、孔の間隔、板厚等、アングル形ジベルに関してもアングルのサイズ、形状、配置方法等、様々なパラメータが考えられ、現在までに蓄積されたデータ数も少ないことから、今後のずれ止めを使用するに当たっては、その都度性能確認実験を行うことが望ましいと考えられる。

本実験の範囲内において、各ずれ止め使用上の留意事項を挙げると以下のとおりである。

- ・ 孔あき鋼板ジベルは、橋軸方向せん断力に対して優れた性能を持つずれ止めとして認められているが、橋軸直角方向曲げ引抜き力が卓越する場合には、耐荷性能、変形性能という点で頭付きスタッドとの併用が望ましい。
- ・ また孔あき鋼板ジベルでは、曲げ載荷状態において、垂直補剛材直上付近に降伏点近いひずみが発生するが、その近傍でジベルの連続性を絶つことなどが有効な手段であると考えられる。
- ・ アングル形ジベルに輪形筋を取り付けることで、曲げ引き抜き耐荷性能という点で、頭付きスタッドとほぼ同等の性能を示すが、変形性能(ねばり)は頭付きスタッドの方が優れている。なお、アングルジベルは上フランジへ全周溶接するため、上フランジの疲労強度を低下させることに注意する必要がある¹³⁾。

参考文献

- 1) 高橋昭一, 志村勉, 橘吉宏, 小西哲司: P C床版2主桁橋「ホロナイ川橋」の設計および解析・試験検討, 橋梁と基礎, Vol.30, No.2, pp.23~30, 1996.
- 2) 田村陽司, 川尻克利, 大垣賀津雄, 作川孝一: P C床版連続合成2主桁橋「千鳥の沢川橋」の設計, 橋梁と基礎, Vol.32, No.9, pp.18~22, 1998.
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, 1996.
- 4) 坂井藤一, 八部順一, 大垣賀津雄, 橋本靖智, 友田富雄: 合成2主桁橋の立体挙動特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.41A, 1995.
- 5) 大垣賀津雄, 八部順一, 済藤英明, 長井正嗣: 長支間

- PC 床版を有する 2 主桁橋の鋼桁-床版接合部の挙動に着目した実験研究, 鋼構造論文集第 5 巻第 20 号, 1998.
- 6) 八部順一, 山本晃久, 大垣賀津雄, 済藤英明: 連続合成 2 主桁橋のずれ止め作用力の簡易計算法, 川崎重工技報, 139 号, 1998.
- 7) 済藤英明, 八部順一, 山本晃久, 大垣賀津雄, 長井正嗣: 合成 2 主桁橋のずれ止め引抜き実験と設計法に関する一考察, 第 4 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1999.
- 8) 大垣賀津雄, 済藤英明, 吉川倫弘, 安川義行, 稲葉尚文: 各種ずれ止めを用いた合成 2 主桁橋の床版と鋼桁接合部に関する実験研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会
- 9) Fritz Leonhardt, Wolfhart Andr p, Hans-Peter Andr  und Wolfgang Harre : Neues,vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, BETON-UND STAHLBETONBAU, 1987.
- 10) 依田照彦, 中洲啓太: 鋼板孔を用いたずれ止めの設計法に関する一考察, 第 4 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1999.
- 11) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編, 1996.
- 12) 江田徹, 石毛立也, 山本晃久, 布施光啓, 池田隆成: 鋼 2 主桁橋(姿川橋)におけるスタッド配置と垂直補剛材上端形状の検討, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 I -A325, 1999.
- 13) (社)日本鋼構造協会: 鋼構造物疲労設計指針・同解説, 1993.

(2003. 3. 14 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON TRANSVERSE CONNECTING BEHAVIOR BETWEEN STEEL GIRDER AND CONCRETE SLAB IN COMPOSITE TWO PLATE GIRDER BRIDGES USING VARIOUS KIND OF SHEAR CONNECTORS

Hideaki SAITO, Kazuo OHGAKI, Yoshiyuki YASUKAWA and Naofumi INABA

The experimental study is carried out, in which the full-scale models using the perfbond rib shear connectors and the angle shear connectors are used, in order to investigate the mechanical behavior of the shear connectors including the headed studs. From the experimental results, the fundamental properties of these shear connectors are cleared, that is the strain of the shear connectors, the quantity of the opening between concrete slab and steel girder, the shear failure mechanism of the concrete slabs and so on.