

# 論文 チャンネル型プレキャスト PC 床版鋼合成桁の曲げ疲労特性

山口浩平<sup>\*1</sup>・堤忠彦<sup>\*2</sup>・日野伸一<sup>\*3</sup>・太田俊昭<sup>\*4</sup>

**要旨**：鋼橋のコンクリート床版は、車両荷重の増加や交通量の増大による損傷・劣化という大きな問題を抱えており、床版の耐久性を向上させることが命題となっている。本研究では、床版としての合理性とともに、従来工法に対して様々な優位性が期待されるチャンネル型プレキャスト PC 床版(以下、CPC 床版)を鋼合成桁に適用することを目的として、モデル供試体を用いた曲げ疲労試験、200 万回疲労試験終了後の静的曲げ破壊試験および水平接合部の押抜きせん断試験を行い、本構造の合成挙動について検討した。

**キーワード**: 鋼合成桁、プレキャスト床版、CPC 床版、曲げ疲労特性、押抜きせん断特性

## 1. はじめに

プレキャスト PC 床版は、高品質で高耐久性を有する床版であり現場施工の省力化が図られるが、その多くは非合成桁橋に適用されている。これらの版を合成桁橋に適用する場合、ずれ止めが配置される位置のプレキャスト版に開口部を設け、版と鋼桁間の間詰め部には無収縮モルタルを充填して、一体化を図る必要がある<sup>1), 2)</sup>。しかし、開口部には床版にプレストレスを導入するための PC 鋼棒を配置できること、また相当量の開口量があるため、後打ちのモルタル充填量が多くなることから、床版の耐久性にも問題が生じる可能性がある。

これに対して、著者らが先に開発したチャンネル型プレキャスト PC 床版<sup>3)</sup>は、従来のプレキャスト PC 床版を用いた場合における鋼合成桁橋の施工上の問題点を解決する手段として、合理的な床版形状およびスタッドの配置スペースが多く確保できるなどの様々な優位性が期待できる(図-1)。すなわち、合成桁の曲げ変形にともなう床版-鋼桁間の水平せん断力に対しては、床版リブを設けているため支圧効果によるせん断抵抗が有効に作用し、また床版-鋼桁間

の接触長が短いためプレストレスを導入するときの床版-鋼桁間の摩擦抵抗が小さいなどのメリットが挙げられる。なお、床版のアップリフトに対しては、床版間の目地部と床版に貫入して配置したスタッドによって抵抗する。先に、CPC 床版の基本的な力学特性を把握するために CPC 床版連続版の静的破壊試験と輪荷重走行試験が行われ、静的破壊試験では設計荷重の約 3.8 倍でひびわれが発生し、また輪荷重走行試験では乾燥状態での 100 万回の疲労試験終了時にいたるまでひびわれは発生せず、水張り状態での 50 万回の走行試験においても漏水は見られず、無収縮モルタルを充填している目地部の疲労耐久性は十分であることが確認されている<sup>4)</sup>。

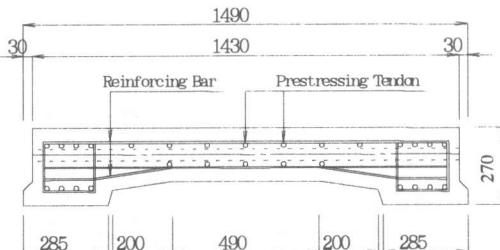


図-1 : CPC 床版断面図(橋軸直角方向)

\*1 九州大学大学院

工学研究科都市環境システム工学専攻

工修 (正会員)

\*2 (株)富士ピー・エス

福岡支店技術部設計課課長

(正会員)

\*3 九州大学大学院助教授

工学研究科都市環境システム工学専攻

工博 (正会員)

\*4 九州大学大学院教授

工学研究科都市環境システム工学専攻

工博 (正会員)

本研究は、上記の CPC 床版を鋼合成桁へ適用する場合を想定して、先の静的曲げ載荷試験<sup>5)</sup>に引き続き、モデル供試体を用いた曲げ疲労試験、200 万回疲労試験終了後の静的曲げ破壊試験、CPC 床版のチャンネル形状効果に着目した押抜きせん断試験を行い、それらの合成挙動について検討を行ったものである。

## 2. 疲労試験および曲げ破壊試験

### 2.1 供試体および載荷方法

供試体は、載荷最大荷重(以下、 $P_{\text{Max}}$ )およびプレストレス量の異なる計 3 体(Type I, Type II, Type III)であり、図-2(a)は側面図および上面図、図-2(b)は断面図、図-2(c)はスタッド配置図を示している。表-1 は、各供試体の特徴を示しており、Type I および Type II は供試体形状は同様であるが、支間中央 1 点集中荷重の

$P_{\text{Max}}$  がそれぞれ 224kN および 294kN と異なっている。ここに、224kN は支間中央の鋼桁下縁の応力が、設計計算上許容曲げ引張応力度

表-1：供試体の特徴

| Type | プレストレスの有無 | 載荷最大荷重 [kN] | 載荷最小荷重 [kN] |
|------|-----------|-------------|-------------|
| I    | あり        | 224         | 96.0        |
| II   | あり        | 294         | 96.0        |
| III  | なし(RC)    | 224         | 96.0        |

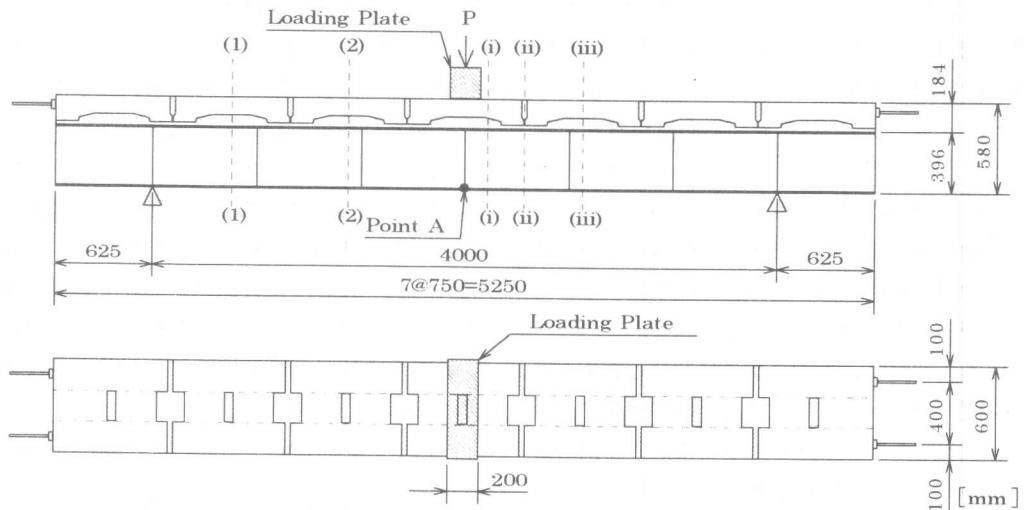
表-2：材料試験結果

(a)：床版部コンクリート、間詰め部モルタル

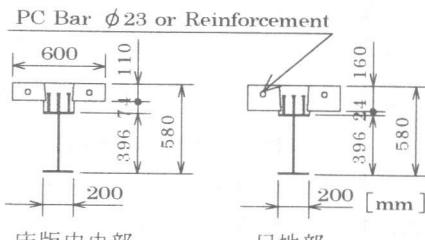
| Type | 床版部        |             | 間詰め部       |             |
|------|------------|-------------|------------|-------------|
|      | 圧縮強度 [MPa] | ヤング係数 [GPa] | 圧縮強度 [MPa] | ヤング係数 [GPa] |
| I    | 51.4       | 39.4        | 52.3       | 25.2        |
| II   | 68.9       | 40.9        | 42.6       | -           |
| III  | 69.7       | 38.0        | 60.1       | 23.8        |

(b)：鋼桁

| 降伏強度 [MPa] | 引張強度 [MPa] | ヤング係数 [GPa] |
|------------|------------|-------------|
| 278        | 421        | 204         |



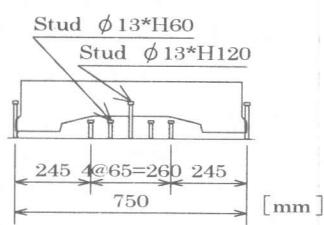
(a) : 側面図および上面図



床版中央部

目地部

(b) : 断面図



(c) : スタッド配置図

図-2：供試体の全体概略図

143MPaに達するときの載荷荷重、また294kNは設計荷重の1.3倍で試験装置の最大能力である。載荷最小荷重は各供試体とも同等であり、実橋において死荷重時の鋼桁下縁の応力度に相当する96.0kNとした。橋軸方向のプレストレス導入は、鋼桁上に床版を設置後、目地部にモルタルを打設し床版を一体化した後、Type I, Type IIは橋軸方向にPC鋼棒SBPR930/1080-φ23を2本配置し、支間中央での床版下縁の応力が設計荷重時において許容引張応力度以下、すなわちパーシャルプレストレスとして1本当たり183kN一括導入した。その後、間詰め部にモルタルを充填し床版と鋼桁を合成した。Type IIIはPC鋼棒の替わりに異形鉄筋SD390-D22を2本用いて、ノンプレストレスとした。

図-2(c)に示すように、橋軸方向の床版1パネルあたりのスタッド配置は、φ13H60mmのタイプを4列、φ13H120mmのタイプを2列配置し、橋軸直角方向にはそれらを3列配置した。供試体を設計する際、床版下面の凹部の形状、

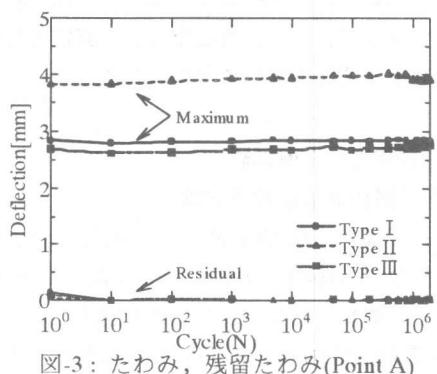


図-3：たわみ、残留たわみ(Point A)

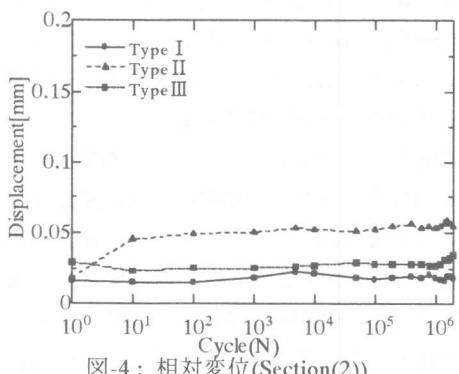


図-4：相対変位(Section(2))

床版下面と鋼桁上面との間隔は実橋の1/2とし、床版と鋼桁の断面積比、および中立軸の位置が実橋とほぼ一致するように、床版幅と鋼桁の断面寸法を決定した。床版-鋼桁の接合面におけるずれ止め(スタッド)の設計は、道路橋示方書に準じて  $P_{Max}=224kN$  に対して行った。なお、使用スタッドの寸法比も実橋の約1/2とした。表-2(a), (b)は、それぞれ床版部コンクリート・間詰め部モルタルおよび鋼桁の材料試験結果を示している。

疲労試験は、200万回の繰返し載荷、また載荷速度は約2Hzとした。疲労試験終了後に行った曲げ破壊試験は、設計荷重まで載荷・除荷を2回繰り返し、その後破壊にいたるまで漸増載荷を行った。測定項目は、合成桁のたわみ、ひずみ分布、また床版-間詰め部-鋼桁間の相対変位およびひびわれの進展状況である。

## 2.2 疲労試験結果および考察

図-3は、 $P_{Max}$ 時の支間中央(Point A: 図-2(a)参照)位置のたわみ(太線)および残留たわみ(細線)の変化を示している。同様に、図-4はSection(2)位置の床版-鋼桁間の相対変位を示している。図-3において、Type IIのたわみが大きいのは  $P_{Max}$ の違いによるものである。両図より、設計荷重レベルでの残留たわみおよび相対変位はほとんど生じておらず、また載荷回数の増加にともなうたわみおよび相対水平変位の増加は見られないことがわかる。

また、合成桁断面のひずみ分布は設計荷重およびその1.3倍の294kNでも直線分布であり、平面保持は成り立っており、さらに各供試体とも載荷前より乾燥収縮ひびわれと思われる微細なひびわれが発生した以外は、繰り返し回数の増加にともなうひびわれ進展は見られなかった。

## 2.3 曲げ破壊試験結果および考察

図-5は、Point Aの荷重-たわみ曲線を示している。Type Iのみ最大荷重が幾分小さいが、それは表-2(a)からわかるように床版コンクリートの圧縮強度の影響であるものと考えられる。それを考慮すれば、Type IIは疲労試験時の  $P_{Max}$

が Type I の 1.3 倍であるが、初期剛性、また高荷重域でも Type I と同様の挙動を示していることがわかる。Type III は、PC 鋼棒の替わりに異形鉄筋を使用し、ノンプレストレスであるが

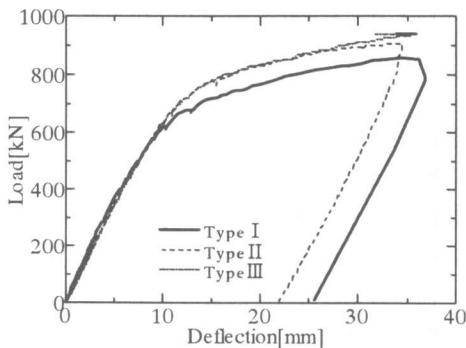


図-5：荷重-たわみ曲線(Point A)

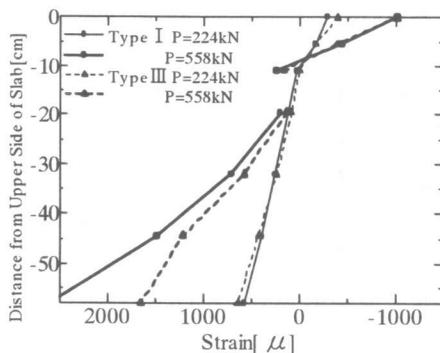


図-6：ひずみ分布(Section(i))

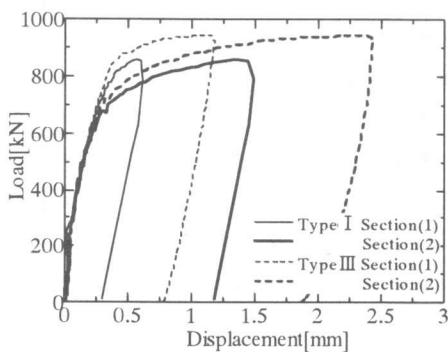


図-7：床版-鋼桁間の相対変位

表-3：終局曲げ耐力および設計荷重

| Type | 実験値                         |                  | 計算値              |                | $P_{\text{Max}}$ | $P_{\text{Max}}$ |
|------|-----------------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|
|      | 最大<br>$P_{\text{Max}}$ [kN] | 設計<br>$P_d$ [kN] | 終局<br>$P_u$ [kN] | $P_{\text{D}}$ | $P_u$            |                  |
| I    | 858                         | 225              | 785              | 3.81           | 1.09             |                  |
| II   | 908                         | 226              | 803              | 4.02           | 1.13             |                  |
| III  | 943                         | 224              | 805              | 4.21           | 1.17             |                  |

Type I との差異は見られないことがわかる。

図-6 は、Section(i)のひずみ分布を示しており、設計荷重である 224kN 時のひずみ分布は直線であり合成挙動を示しているが、高荷重域の 558kN 時は床版-鋼桁間で不連続となり、次第に合成効果が消失していくことがわかる。

図-7 は、床版-鋼桁間の相対変位であり、Section(1)を細線で、Section(2)を太線で示している。同図より、Section(1)と Section(2)を比較すると、相対変位は低荷重域では一致しており、設計荷重レベルでの相対変位はほとんど見られないが、高荷重域では載荷点寄りに位置する Section(2)の方が大きいことがわかる。これは終局時に載荷点近傍の床版、間詰め部がより大きな損傷を受けたことによると考えられる。

表-3 は、実験値である最大荷重と、本供試体を完全合成のコンパクト断面と仮定して等価応力ブロック法により算定した終局荷重および設計荷重をまとめたものである。同表より、最大荷重は設計荷重に対して 3 以上の安全率を有していること、また終局時には合成効果が消失しつつあるが、完全合成と仮定して算定を行っても実用上問題のないことがわかる。

### 3. 押抜きせん断試験

#### 3.1 供試体および載荷方法

供試体は、床版-鋼桁間のせん断力の伝達特性の異なる Type I, Type II, Type III の 3 種類であり、それぞれ 2 体の計 6 体を製作した。表-4 は各供試体のせん断力伝達機構およびその特徴を、また図-8(a), (b), (c) は、それぞれ Type I, Type II, Type III の全体概略図を示している。なお、床版の形状、スタッドの本数および配置は前述の桁モデルと同様である。

試験方法は、通常ずれ止めのせん断挙動を究明するのに多用される 2 面押抜きせん断試験である。載荷方法は、H 形鋼上面より載荷し、床版-鋼桁間の相対変位が急激に増大するまでは 98kN ピッチ、その後は 49kN ピッチで載荷・除荷を繰り返し、スタッドの限界せん断耐力と

される残留相対変位が 0.075mm を超過後は除荷をせず、最大荷重にいたるまで漸増載荷を行った。測定項目は、供試体の中央高における床版・間詰め部・鋼桁間の相対変位、鋼桁、間詰め部の高さ方向のひずみ分布および間詰め部モルタルのひびわれ進展状況である。

### 3.2 結果および考察

図-9は荷重-床版・鋼桁間の相対変位曲線(Type IIIのみ)を、また図-10はその包絡線の供試体間の比較を示している。表-5は、実験値、計算値、および両者の比較をまとめたものである。ここに、スタッドの終局せん断耐力、限界せん断耐力および許容せん断耐力の計算値は、鋼構造物設計指針(Part B)<sup>6)</sup>および道路橋示方書から引用した。図-10、表-5より終局せん断耐力については、Type II, Type IIIは約 1100kN と同様の値であるが、Type I のみ約 800kN と小さ

な値を示していることがわかる。このことは、Type II, Type IIIはチャンネル形状による支圧効果が有効に作用していることを示唆するものである。実験値である終局・限界せん断耐力と設計上重要となる許容せん断耐力の比である  $P_u/Q_a$  および  $P_L/Q_a$  は、それぞれ 4.72~6.84 および 3.33~4.31 と、両者とも通常のスタッドと同等以上の安全率を有していることがわかる。また、終局せん断耐力の実験値と計算値を比較すると、Type I ではほぼ同じであるのに対して、

表-4：各供試体の特徴

| Type | せん断力伝達機構             | 特徴   |
|------|----------------------|--|
| I    | スタッド                 | 支圧効果の影響をなくすため、間詰め部モルタルの下部に緩衝材となる発泡スチロールを配置   |
| II   | チャンネル形状              | スタッドによる床版と鋼桁の合成作用をなくすため、全スタッドを間詰め部モルタル高さ内に配置 |
| III  | スタッド<br>+<br>チャンネル形状 | 支圧効果、およびスタッドによるせん断力の伝達が期待される通常の配置            |

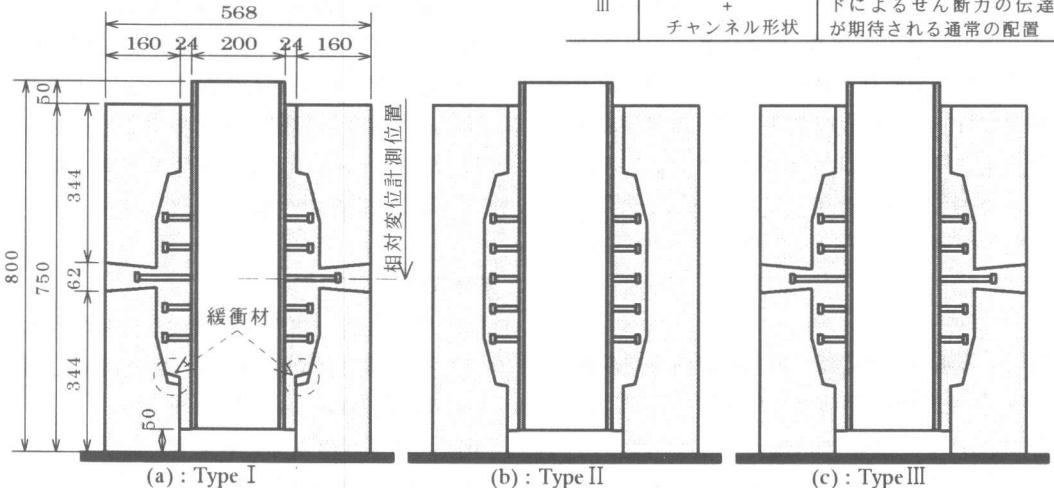


図-8：全体概略図

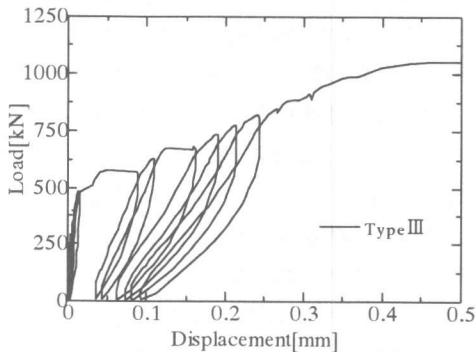


図-9：荷重-相対変位曲線(Type III)

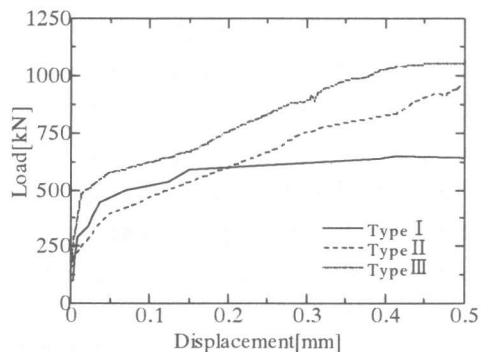


図-10：荷重-相対変位曲線(包絡線)

表-5：押抜きせん断試験の実験値および計算値

| Type | 実験値              |                  | 計算値              |                  |                  | $P_u / Q_a$ | $P_L / Q_a$ |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|
|      | 終局<br>$P_u$ [kN] | 限界<br>$P_L$ [kN] | 終局<br>$Q_u$ [kN] | 限界<br>$Q_L$ [kN] | 許容<br>$Q_a$ [kN] |             |             |
| I    | A 884            | 687              | 766              | 383              | 176              | 5.01        | 3.89        |
|      | B 823            | 587～             | 760              | 380              | 174              | 4.72        | 3.37        |
| II   | A 1210           | 629～             | 791              | 396              | 181              | 6.65        | 3.47        |
|      | B 1170           | 568              | 744              | 371              | 171              | 6.84        | 3.33        |
| III  | A 1090           | 794              | 804              | 402              | 184              | 5.90        | 4.31        |
|      | B 1110           | 745              | 844              | 422              | 194              | 5.71        | 3.84        |

Type II および Type III では実験値の方が十分に大きな値であることがわかる。

試験終了後にスタッドの変形状況やその近傍の破壊状況を観察するために、供試体の切断を行い、その切断面を写真-1(Type I)に示している。スタッドは、Type I が他の供試体と比較してもっとも大きく変形しておりスタッド近傍のモルタルは圧壊されていたが、Type II はわずかな変形、Type III は変形を確認できなかった。また、床版-間詰め部-鋼桁間の両接合面の付着は、いずれの供試体とも床版-間詰め部モルタル間の付着が切れており、それはスタッドの変形と同様に、Type I の付着切れが他の供試体に比べて顕著に表れていることが確認できた。このことは CPC 床版におけるチャンネル形状効果の有効性を示唆するものと考えられる。

#### 4. まとめ

曲げ疲労試験、その後の静的曲げ破壊試験および水平接合部の押抜きせん断試験の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) CPC 床版を鋼合成桁に適用する場合、スタッドを間詰め部に群配置する形式でも、そのスタッドの配置・本数は、鋼桁と間詰め部接合面において、道路橋示方書のずれ止めの計算方式に準じて決定すれば、十分な性能を確保できることがわかった。
- (2) 合成桁は床版部コンクリートの圧壊により破壊し、設計上本合成桁の終局耐力、応力および変形の算定には、実用上完全合成として取り扱ってよいことがわかった。
- (3) 設計荷重およびその 1.3 倍を載荷最大荷重

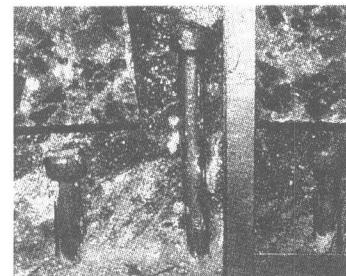


写真-1: スタッド近傍の  
破壊状況(Type I)

とした疲労試験の結果、載荷回数の増加とともにうたわみ、床版-鋼桁間の相対変位の変化およびひびわれの発生は見られず、静的曲げ破壊試験の結果、プレストレス量の異なる供試体の初期剛性、終局耐力は一致しており疲労耐久性は十分であることがわかった。

- (4) 押抜き試験の結果、チャンネル形状による支圧効果が有効に作用し、さらに試験で得られた限界・終局せん断耐力を設計上重要な許容せん断耐力と比較すると、それぞれ約 3, 5～6 以上の十分な安全率を有していることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 川田忠樹 : 複合構造橋梁, 技報堂, 1994
- 2) 寺田博昌ほか : 新しい合成構造と橋 NCB 研究会編, 山海堂, 1996
- 3) 真鍋英規ほか: チャンネル形状プレキヤスト PC 床版の鋼橋への適用, プレストレストコンクリート技術協会, 第 4 回シンポジウム論文集, pp.171-176, 1994
- 4) 真鍋英規ほか : チャンネル形状プレキヤスト PC 床版の開発, プレストレストコンクリート技術協会, pp.36-44, 1997
- 5) 日野伸一ほか : チャンネル型プレキヤスト PC 床版を用いた鋼合成桁の静的曲げ挙動, 構造工学論文集, 1999
- 6) 土木学会 : 鋼構造物設計指針(Part B 合成構造物), 1997