

論文 輪荷重走行試験による CPC 床版を用いた鋼合成桁の疲労特性

山口浩平^{*1}・堤忠彦^{*2}・浜田純夫^{*3}・日野伸一^{*4}

要旨：従来のプレキャスト PC 床版を用いた場合の鋼合成桁橋の施工上の改善を図る手段として、合理的な床版形状を有するチャンネル型プレキャスト PC 床版(以下、CPC 床版と略称する)を提案している。本床版は端部にリブを有し、鋼合成桁に適用する場合、床版-鋼桁間に作用する水平せん断力は、スタッドおよびずれ止めとしての作用が期待されるリブ部近傍の結合部モルタルの支圧効果により伝達される。本研究では、CPC 床版を用いた押し抜きせん断試験および 2 主鋼合成桁の輪荷重走行試験を行い、リブ部のずれ止めとしての作用および結合部の疲労特性・合成挙動を検証した。

キーワード：2 主鋼合成桁, CPC 床版, 輪荷重走行試験, 結合部の疲労特性, ずれ止め

1. はじめに

プレキャスト PC 床版は、高品質で高耐久性の床版として鋼非合成桁橋の建設に広く採用されている。しかし一方で、床版と鋼桁の一体化を図るためのスタッドが多く配置される合成桁橋に適用するには未解明の様々な問題点があり、施工実績も数例のみであることから合理的な構造の床版の開発が望まれている。

従来のプレキャスト PC 床版は、RC 床版に類似したフラット形状・ハンチ形状の床版であり、これらを合成桁に適用する場合、スタッドが配置される位置の床版に開口部を設け、床版-鋼桁間の結合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^{1),2),3)}。

著者らは、従来のプレキャスト PC 床版を鋼合成桁橋へ適用する場合の施工上の問題を改善する手段として、合理的な床版形状に着目して新しいチャンネル型プレキャスト PC 床版(以下、CPC 床版と略称する)を提案した⁴⁾。図-1 に CPC 床版の断面図を、写真-1 に実橋に使用された CPC 床版を示す。本構造は、床版を橋軸方向に連続化した後、所要のスタッドを配置した床版と鋼桁の空間(以下、間詰め部と略称する)を無収縮モルタルで充填することで、床版と鋼桁を結合して合成構造とするものである。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は、床版端部のリブ部と間詰め部モルタルの接合面の支圧効果によるせん断抵抗が

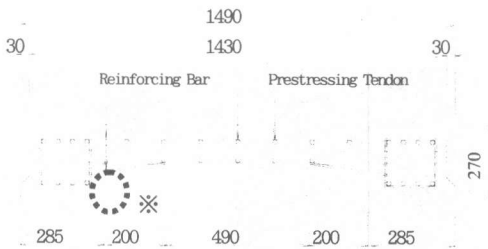


図-1：CPC 床版断面図(橋軸直角方向)

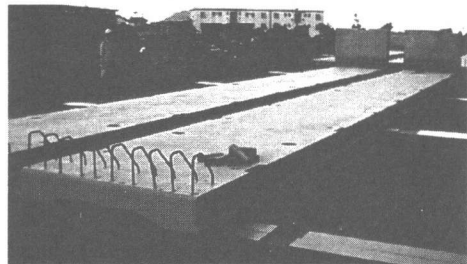


写真-1：CPC 床版

- | | | |
|---------------|-------------------|----------|
| *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)富士ビー・エス | 東京支店技術部開発課課長 | (正会員) |
| *3 山口大学教授 | 工学部社会建設工学科 | 工博 (正会員) |
| *4 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) |

有効に作用し、所要のスタッドを配置した間詰め部を介して伝達される。床版のアップリフトに対しては、床版間の目地部と床版中央位置の間詰め部モルタル充填孔に貫入して配置したスタッドによって抵抗させることとしている。

本研究は、先の合成桁を対象とした静的曲げ破壊試験⁵⁾、定点曲げ疲労試験⁶⁾に引き続き、接合部の押し抜きせん断試験、2主鋼合成桁の輪荷重走行試験を行い、リブ部のずれ止めとしての作用および結合部の疲労特性・合成挙動を検証したものである。

2. 押し抜きせん断試験

2.1 供試体および試験方法

床版端部のリブ部がずれ止めとして作用し、リブ部近傍の間詰め部モルタル(以下、支圧部モルタルと略称する)が負担する水平せん断耐力(以下、支圧耐力と略称する)を明らかにするために、押し抜きせん断試験を行った。図-2に供試体概略図を、写真-2に試験状況を示す。CPC床版を用いた鋼合成桁は床版-間詰め部間(接合面A)、間詰め部-鋼桁間(接合面B)の2つの接合面を有しており、本試験では接合面Aの支圧耐力を評価するため、同図に示すように

全スタッドを間詰め部内に群配置した。また、接合面Aではハンチ部の傾斜面のみの支圧耐力を検討するため、図-1に示す“※”のリブ部を省略した床版形状とした。従って、実構造での間詰め部の支圧耐力は、本試験供試体よりさらに大きなものとなっている。表-1に支圧耐力および接合面Bのスタッド耐力の計算値を示しており、 $Q_u < Q_{stud}$ になるようにφ19H55mmのスタッドを片側10本配置して、接合面Aでずれを生じ支圧部モルタルを破壊させるように供試体を設計・製作した。床版の形状および間詰め部モルタルの打設幅は150mmとし、ハンチ高、すなわち支圧投影面積を変えて2タイプについて試験した。なお、Type Iの床版は3.の桁モデルと同一である。なお、スタッドの終局せん断耐力 Q_{stud} の算出は鋼構造物設計指針(Part B)⁷⁾から引用した。また、支圧耐力 Q_u はリブ部の支圧投影面積(リブ高×間詰め幅)と間詰め部モルタルの圧縮強度の積として評価した。

試験方法は、2面押し抜きせん断試験であり、H形鋼上面より最大荷重に至るまで漸増荷重を行った。

2.2 試験結果および考察

図-3は荷重-床版・鋼桁間の相対変位曲線

表-1：計算値および試験結果

Type	リブ高 [mm]	支圧投影面積 A[mm ²]	計算値		実験値 最大荷重 P _{max} [kN]	P _{max} / Q _u
			床版-間詰め部間 (支圧耐力) Q _u [kN]	間詰め部-鋼桁間 (スタッド耐力) Q _{stud} [kN]		
I	25	3750	556	1350	522	0.94
II	50	7500	1110	1350	1060	0.95

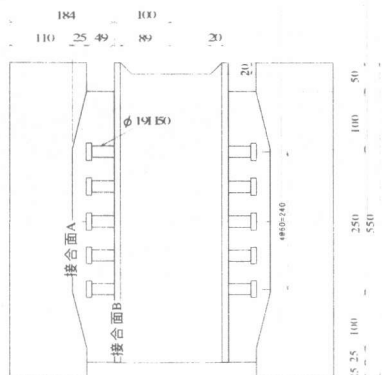


図-2：供試体概略図(Type I)

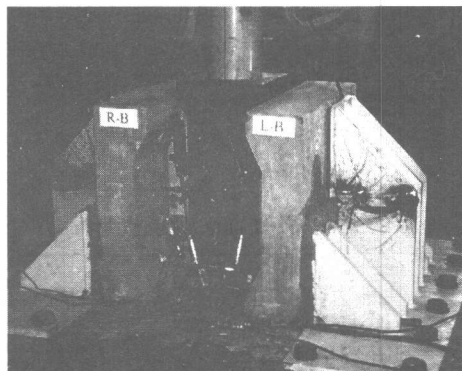


写真-2：押し抜きせん断試験状況

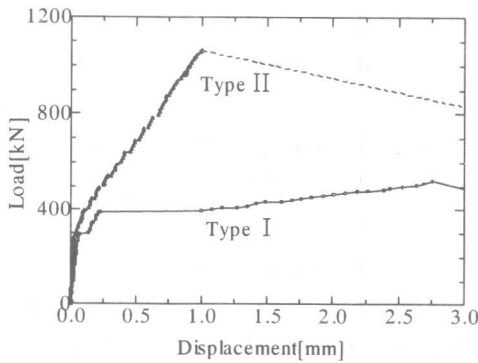


図-3：荷重-相対変位曲線(床版-鋼桁間)

を示している。同図より、Type I は荷重が約 400kN で相対変位が急激に増大していることがわかる。表-1 に実験値と計算値の比を示しているが P_{max} / Q_u は約 0.95 であり、リブ部の支圧耐力の評価はやや危険側ながらほぼ妥当な結果を示している。

また、3. の桁モデルに配置されたスタッドの終局せん断耐力は約 1100kN であり、その値は間詰め部-鋼桁間の水平せん断耐力のことである。それに対して、実験より得られた床版-間詰め部間の支圧耐力は 556kN であり、さらに実際の CPC 床版では供試体では省略したリブ部(図-1"※"参照)および床版中央部に貫入させて配置したスタッドも水平せん断力の一部を負担することから、床版-間詰め部間の支圧耐力は、間詰め部-鋼桁間の水平せん断耐力に比べて、十分に大きな値であると推測される。

以上より、CPC 床版を鋼合成桁に適用する場合、間詰め部-鋼桁間のスタッド配置に対しては現行道路橋示方書のずれ止めの設計式を用いて、また床版-間詰め部間のずれ止めに対しては間詰め部モルタルの支圧耐力に基づいて、それぞれ設計すれば良いことがわかった。

3. 2 主鋼合成桁の輪荷重走行試験

3.1 供試体

図-4 に供試体概略図を、写真-3 に輪荷重走行試験状況を示す。供試体の製作手順は、まず鋼桁上に床版を設置後、床版間の目地部に無収

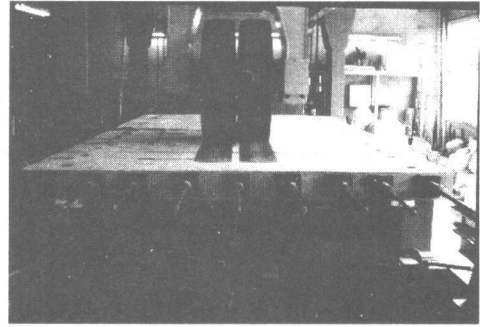


写真-3：輪荷重走行試験状況

縮モルタルを打設し、橋軸方向にプレストレスを導入して床版を一体化した。その後、間詰め部に無収縮モルタルを充填し床版と鋼桁を合成した。

供試体を設計する際、床版下面の凹部の形状、床版下面と鋼桁上面との間隔および鋼桁の高さは実橋の約 1/2 とした。また、床版と鋼桁の断面積比および中立軸の位置がほぼ一致するように、床版厚と鋼桁の断面寸法を決定した。床版 1 枚あたり、橋軸直角方向には PC 鋼より線 1S12.8 を 6 本、橋軸方向は PC 鋼線 1T21.8 を 9 本配置し、それぞれプレテンション方式およびポストテンション方式によりプレストレスを導入した。両方向とも、輪荷重(150kN)載荷時に、床版に作用する最大引張応力度が許容引張応力度以下になるように、すなわちパーシャルプレストレスとして設計し、橋軸方向の PC 鋼線 1 本あたり約 400kN の緊張力を導入して床版を一体化した。また、床版と鋼桁の接合面のスタッド配置は、道路橋示方書のずれ止めに準じて決定し、橋軸方向の床版 1 パネルあたりに $\phi 19H60mm$ を 4 列(床版下面の凹部)、 $\phi 19H150mm$ を 2 列(床版中央部および目地部)配置し、橋軸直角方向にそれぞれ 2 列配置した。

間詰め部に充填するモルタルの強度は、前述の押し抜きせん断試験の結果を踏まえ、載荷回数 50 万回前後で同部にひび割れを発生させることを想定して以下の要領で決定した。設計上、輪荷重載荷時に床版 1 枚あたりの床版-鋼桁間

の水平せん断力は約 95kN である。その値をリブ部の支圧面積で除した値は約 14N/mm² であるが、繰り返し载荷による支圧部モルタルの強度低下を考慮してモルタル強度は約 20N/mm² のものを使用することとした。表-2 に使用した材料の試験結果を示している。

3.2 試験方法

载荷試験は、山口大学内の移動型疲労強度試験機を用いて、輪荷重を床版中央位置上に、支間中央から両側に 1800mm の範囲で橋軸方向

に移動させ载荷した(図-4(c)参照)。走行タイヤは産業車両用の 16.0-25-28PR を用いて、輪荷重は 150kN の一定荷重とした。また、载荷回数は 50 万回、载荷速度は約 2.2km/h とした。供試体の支持は、支間を 4.0m とし鋼桁下フランジの 4 点で単純支持させた。

測定項目は、床版および桁の代表位置のたわみ、床版の橋軸・橋軸直角方向のひずみ分布、床版-鋼桁間の相対変位、間詰め部モルタルのひび割れ状況である。なお、間詰め部には約

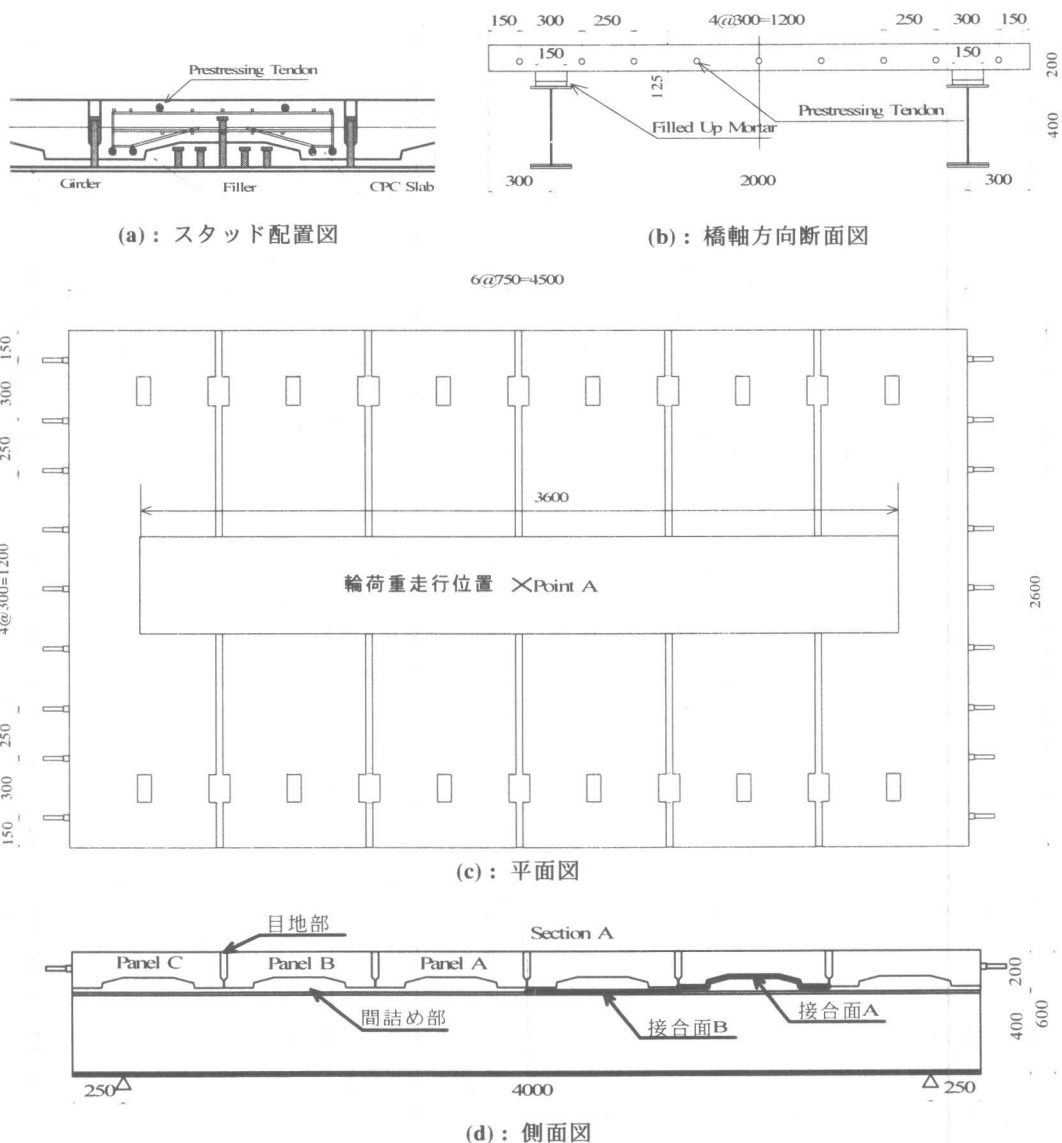


図-4: 供試体概略図

20N/mm²と低強度のモルタルを使用しており、乾燥収縮ひび割れの発生が懸念されたが、試験開始前にはそれらのひび割れは見られなかった。

3.3 数値解析

本研究では、汎用 FEM パッケージである LUSAS[®]を用いて、3次元線形解析を行った。床版および間詰め部は8節点ソリッド要素、鋼桁は8節点薄肉シェル要素、PC鋼線は2節点棒要素を用いた。各要素の材料定数は、表-2に示す材料試験により得られた値を用いた。供試体の対称性を考慮して、解析モデルは1/4対称モデルとした精度良くシミュレーションができるように、要素分割数828、節点数940に細分割してモデル化した。なお、図-5に要素分割図を示す。

3.4 結果および考察

図-6は、床版中央位置(Point A: 図-4(c)参照)に載荷した場合の床版および鋼桁のたわみの変化を示している。なお計測点は、床版は Point A の床版下面、鋼桁は支間中央位置の下フランジ下面である。同図より、両者とも載荷回数の増加にともなうたわみの変化は見られないことがわかる。また除荷時の残留変位は、緩やかに増加していたもののその変化は微小であった。な

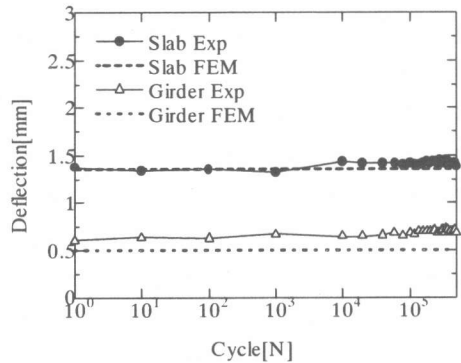


図-6: たわみの変化

表-2: 材料試験結果

(a): 床版コンクリート, 間詰め部・目地部モルタル

	圧縮強度 f_c [N/mm ²]	ヤング係数 E [N/mm ²]
床版 コンクリート	61.8	3.72×10^4
間詰め部 モルタル	19.0	1.01×10^4
目地部 モルタル	54.1	2.29×10^4

(b): 鋼桁(SS400), PC鋼材

	引張強度 f_t [N/mm ²]	降伏強度 f_y [N/mm ²]	ヤング係数 E [N/mm ²]
鋼桁	463	301	2.04×10^5
PC鋼材	1560	1440	1.94×10^5

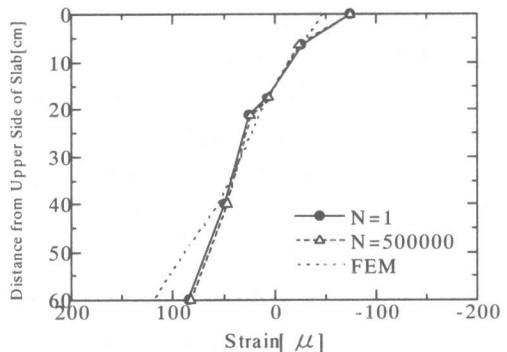


図-7: ひずみ分布(Section A)

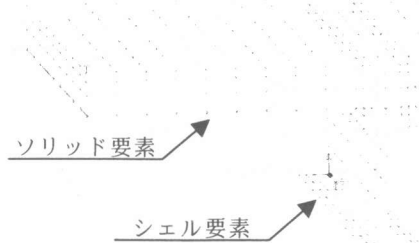


図-5: 解析モデル(要素分割図)

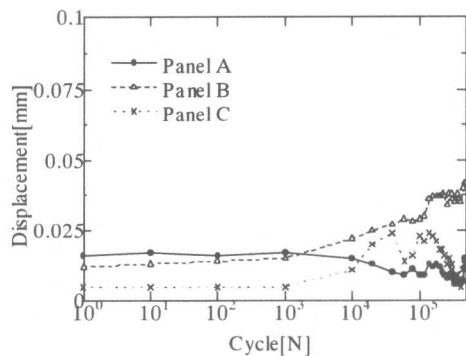


図-8: 床版-鋼桁間の相対変位の変化

お、図中に点線で FEM 解析値を示しているが、実験値とほぼ一致しており、精度良く再現できていることがわかる。

図-7 は、支間中央位置(Section A : 図-4(d)参照)の合成桁断面のひずみ分布を示している。50 万回の疲労試験終了時でもひずみ分布はほぼ直線であり、合成断面として挙動を示していることがわかる。また、FEM 解析値も同様の傾向を示している。

図-8 は、床版-鋼桁間の水平方向の相対変位の変化を示している。Panel A, C は、それぞれ支間中央位置および支点位置の床版であり、Panel B はそれらの間の床版である(図-4(d)参照)。同図より、相対変位は载荷回数 10 万回の前後より緩やかに増加してはいるものの、試験終了時でもその値は約 0.03mm 程度であり、押し抜きせん断試験の結果からもその程度の相対変位であれば十分に合成挙動を示すことが確認されている(図-3 参照)。

間詰め部モルタルのひび割れ発生は確認されず、床版-間詰め部間に作用する水平せん断力に対しては、リブ部の支圧面積と間詰め部のモルタル強度で表されるとして支圧部の間詰め幅を決定した本構造において、十分な合成度を有することが確認された。

また、設計上、間詰め部のモルタル強度の疲労低下を考慮して支圧部へのひび割れを予想したが、アップリフトに抵抗するための床版に貫入させたスタッドも床版-間詰め部間に作用する水平せん断力の一部を負担したことにより、支圧部モルタルに作用する水平せん断力が低減されて、ひびわれが発生しなかったものと考えられる。

4. まとめ

CPC 床版のリブ部のずれ止め作用に着目した押し抜きせん断試験および 2 主鋼合成桁による輪荷重走行試験の結果は、以下のようにまとめられる。

リブ部の支圧耐力は支圧投影面積と間詰め部

のモルタル強度の積で評価することができ、CPC 床版を鋼合成桁に適用する場合、間詰め部-鋼桁間のスタッド配置に対しては道路橋示方書のずれ止めの設計式を用いて、また床版-間詰め部間のずれ止めに対しては間詰め部モルタルの支圧耐力に基づいて設計すれば良いことがわかった。

また、上記の押し抜きせん断試験結果に基づく間詰め幅をもつ合成桁供試体の輪荷重走行試験を行い、50 万回の繰り返し载荷終了時まで間詰め部モルタルへのひび割れは発生せず、十分な疲労耐久性を有していることが確認された。

参考文献

- 1) 寺田博昌ほか：新しい合成構造と橋 NCB 研究会編，山海堂，1996
- 2) 川田忠樹，野村国勝，梶川靖治：複合構造橋梁，技報堂，1994
- 3) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレキャスト床版設計施工マニュアル，1994
- 4) 真鍋英規ほか：チャンネル形状プレキャスト 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
- 5) 日野伸一ほか：チャンネル型プレキャスト 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，pp.1469 - 1476，1999
- 6) 日野伸一ほか：チャンネル型プレキャスト PC 床版を用いた鋼合成桁橋の曲げ疲労特性，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，pp.377 - 380，1999
- 7) 土木学会：鋼構造物設計指針(Part B 合成構造物)，1997
- 8) LUSAS Ver.12 User Guide · Element Library, Finite Element Analysis Ltd, 1996