

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

Flexural Behavior of Composite Steel Girder with Channel-Shaped Precast PC Panels

日野伸一*・堤忠彦**・松井繁之***・山口浩平****・木下広志*****・太田俊昭*****

Shinichi HINO, Tadahiko TSUTSUMI, Shigeyuki MATSUI, Kohei YAMAGUCHI, Hiroshi KINOSHITA, Toshiaki OTA

*工博, 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
(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)** 富士ビー・エス(株)福岡支店技術部設計課
(〒810-0001 福岡市中央区天神 2-14-2)***工博, 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)****工修, 九州大学大学院, 工学研究科都市環境システム工学専攻 博士課程
(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)***** 九州大学大学院, 工学研究科都市システム工学専攻 修士課程
(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)*****工博, 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
(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

In recent years, the precast panel which is similar in shape to the ordinary RC slab(hereinafter, PPC panel) has been increasingly applied to the slab construction on the steel girder bridge, in order to improve the quality of concrete slab and to save labors and skill workers on site.

The authors have developed a channel-shaped precast PC panel(hereinafter, CPC panel) that the further merits are expected comparing with the PPC panel for the purpose of improving the fabrication and erection work of PC panel in steel bridges on site. On the other hand, the application of various types of precast panel in slab construction was limited to the noncomposite girder bridges due to the structural problems such as the interaction device between steel girder and precast PC panel.

In this study, three composite beams with CPC panels, which vary with the arrangement of shear connectors between steel girder and CPC panels and the space filled up with mortar, are examined experimentally and analytically.

Key Words: Channel-Shaped Precast PC panel, Composite Steel Girder Bridge

1. はじめに

近年, 鋼橋のコンクリート床版は, 交通量, 車両重量の増大にともない, 損傷・劣化が大きな問題となっており, 床版の耐久性の向上を図ることが重要な問題の一つになってきている。一方, 現場工事では技能労働者の高齢化・不足が深刻な問題であり, また現場施工の省力化・省資源化が強く望まれている。

プレキャスト PC 床版は, 高品位・高耐久性に優れていることは広く知られており, 採用実績も増えてきている。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・ハンチ形状の版である。しかし, これらの版を合成桁に適用する場合, スタッドが配置される位置の版に開口部を設け, 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^{1),2),3)}。

すなわち, プレキャスト PC 床版を合成桁橋に適用する場合の問題点として, 開口部には床版にプレストレスを導入するための PC 鋼棒を配置できないこと, 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だけでなく, プレストレスが導入できない部分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^{4),5)}。

そこで, 著者らは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における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, 様々な優位性が期待できるチャンネル形状プレキャスト PC 床版(以下, CPC 床版)を提案している^{6),7)}。本構造は, 床版に縦締めプレストレスを導入した後, 床版と鋼桁の空

間(以下、間詰め部)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^{8),9)}。図-1に、CPC床版と鋼桁の合成作用原理を示す。合成桁の曲げ変形にともなう床版と鋼桁間の水平せん

断力は、床版と間詰め部モルタルの接合面に水平せん断力(S_1 , S_2)が生じ、間詰め部モルタルと床版の接合面には、床版リブを設けて軸方向に床版厚を変化させているため支圧効果によるせん断抵抗(p_1 , p_2)が有効に作用して、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(T_1 , T_2)に対しては、床版間の横目地部と、床版に貫入して配置したスタッドによって抵抗させることとしている。また床版と鋼桁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と鋼桁間の摩擦抵抗が小さいなどの、床版リブを設けることによるメリットがある。

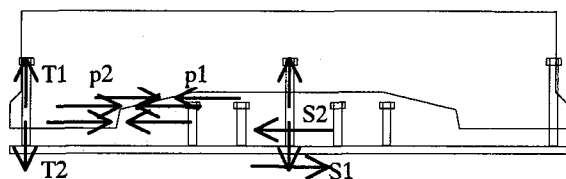


図-1：CPC床版の合成作用原理

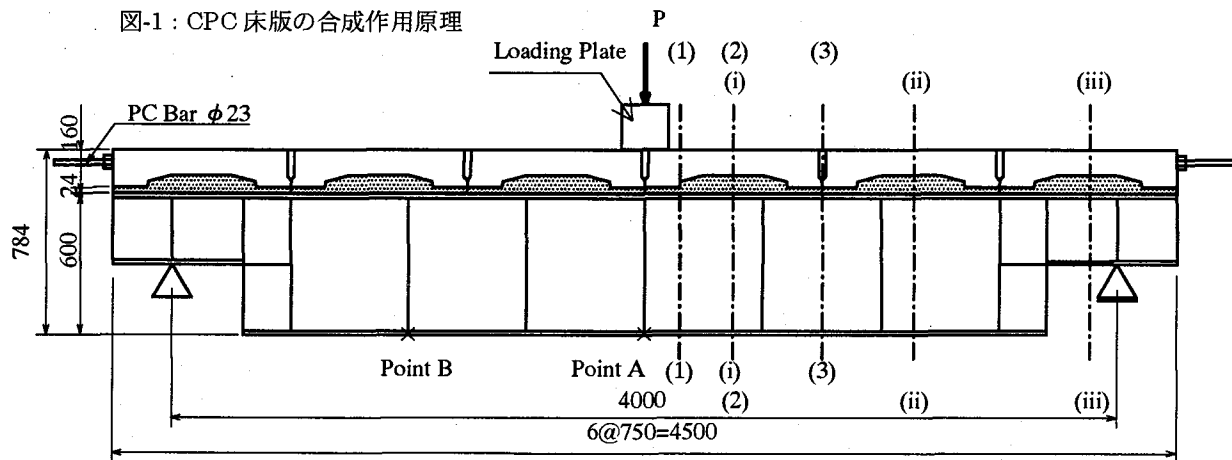
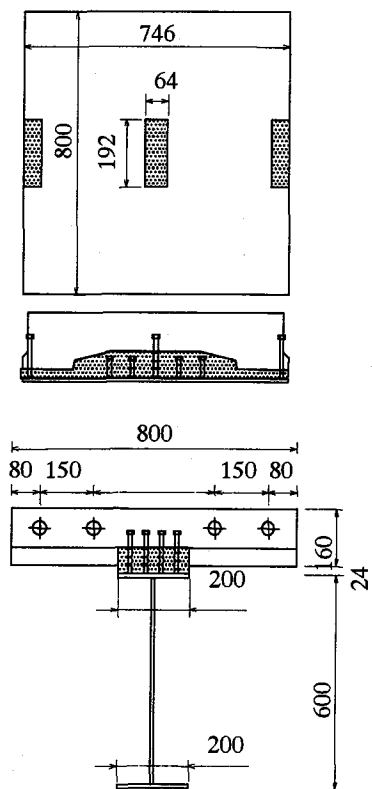
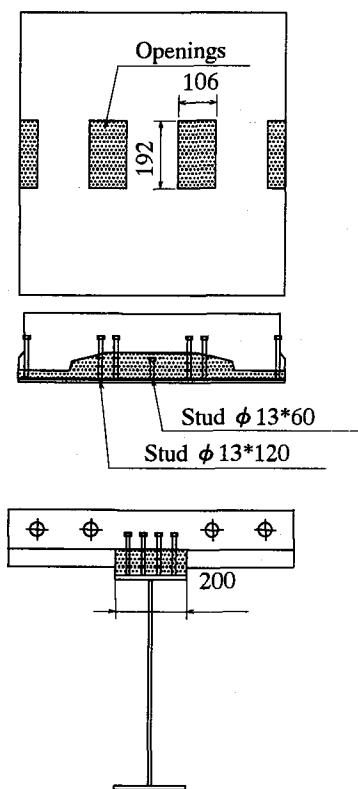


図-2：全体概略図

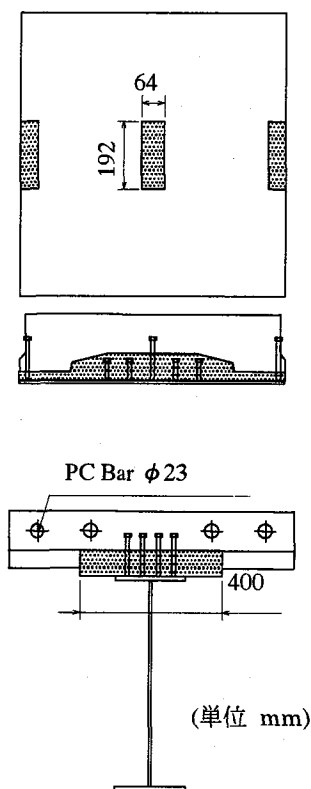
(単位 mm)



(a) : Type I



(b) : Type II



(c) : Type III

図-3：各供試体の平面図、および縦横断面図

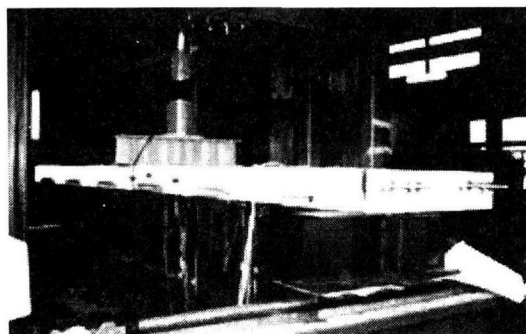


写真-1：載荷実験状況

表-1：材料実験結果

(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	64.9	38.1	72.4	30.8
II	65.1	37.0	66.5	26.8
III	66.6	38.3	64.0	26.2

(b)：鋼桁

降伏強度 [MPa]	引張強度 [MPa]	ヤング係数 [GPa]
308	430	214

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、模型供試体による載荷実験、および数値解析を行い、設計上重要となるスタッド配置による合成効果の影響などについて検討したものである。

2. 曲げ載荷実験の概要

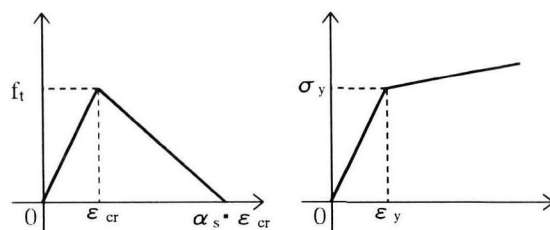
2.1 供試体

供試体は、床版内に貫入したスタッドの本数、および間詰め部モルタルの打設幅の異なる計3体(Type I, Type II, Type III)である。

図-2 に桁供試体の全体概略図を、また図-3(a), (b), (c)にそれぞれ Type I, Type II, および Type IIIの床版 1 パネル分の合成桁の平面図、および縦横断面図を示す。

Type I は、今回提案する改良型で、床版リブの支圧効果によるせん断抵抗を考慮して、Type II に比べて床版内に貫入するスタッドの本数を少なくし、施工性に配慮したものである。一方、道路橋示方書¹⁰⁾のスタッド配置間隔規定に沿った従来型の Type II は、スタッドの大部分が床版内に貫入しているため、Type I に比べて床版開口部が多くなっている。また、Type III は、スタッドの配置は Type I と同様であるが、間詰め部のせん断面積を大きくするためモルタルの打設幅を Type I の 2 倍としたものである。

橋軸方向の床版 1 パネルあたりのスタッド配置は、



(a)：コンクリート・モルタル (b)：鋼材

図-4：応力-ひずみ関係

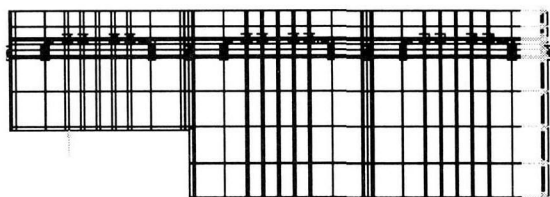


図-5：要素分割図

Type I, Type III は $\phi 13\text{H}60\text{mm}$ のタイプを 4 列, $\phi 13\text{H}120\text{mm}$ のタイプを 3 列配置し, Type II は $\phi 13\text{H}60\text{mm}$ のタイプを 1 列, $\phi 13\text{H}120\text{mm}$ のタイプを 6 列配置した。

Type I と Type II の比較により、スタッドの配置形状の違いによる床版と鋼桁の合成挙動を検証し、また Type I と Type III の比較により、間詰め部モルタル幅の違いによる床版と鋼桁の合成挙動を検証した。

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 1/2 とした。ここで、実橋の断面は支間中央の断面を代表断面とし、床版厚はプレキャスト床版として製作可能な最小の厚さとした。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、床版幅と鋼桁の断面寸法を決定した。橋軸方向は、PC 鋼棒 SBPR930/1080- $\phi 23$ を 4 本配置し、橋軸方向のプレストレス量は、実橋床版に導入される相当量を導入した。すなわち、供試体では床版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になるように、PC 鋼棒の初期緊張応力 551MPa を導入した。

写真-1 は載荷実験状況である。また、表-1(a), (b) は、それぞれ床版部コンクリート・間詰め部モルタル、および鋼桁の材料実験結果を示している。

2.2 載荷方法

載荷試験は、九州大学内の構造物載荷試験装置を用いて、供試体の支間中央に集中荷重を載荷した。載荷板は、橋軸方向 200mm, 橋軸直角方向は供試体の全幅である。

鋼桁下縁の応力が設計計算上、許容曲げ引張応力度 143MPa に達するときの載荷荷重 392kN を設計荷重

として、載荷・除荷を2回繰り返す、その後破壊に至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、また床版と間詰め部、間詰め部と鋼桁の相対変位、およびひびわれの進展状況である。

3. 数値解析

本研究では、汎用FEMパッケージであるLUSAS¹¹⁾を用いて2次元非線形解析を行い、床版コンクリート、間詰めモルタル、鋼桁、およびスタッドは4節点平面応力要素、PC鋼棒は2節点棒要素、また床版コンクリートと間詰め部モルタル間、間詰め部モルタルと鋼桁間には3節点ばね要素を用いて付着特性を考慮した。図-4(a), (b)は、それぞれ床版コンクリート・間詰め部モルタルの引張域、および鋼桁・スタッド・PC鋼棒の応力-ひずみ関係を示している。床版コンクリート・間詰め部モルタルは、引張側ではひびわれ発生までは線形弾性、ひびわれ発生後は直線ひずみ軟化($\alpha_s=35.0$)モデルとした。また、鋼桁・スタッド・PC鋼棒の材料モデルは、ひずみ硬化係数を0.01としたバイリニアモデルとし、表-1(a), (b)に示す値を用いた。供試体の対称性を考慮して、解析モデルは1/2対称モデルとし、またひびわれ発生から進展する過程を精度良くシミュレーションできるように、要素分割数1002、節点数2942に細分割してモデル化した。なお、図-5は要素分割図を示している。

4. 結果および考察

4.1 変形挙動

図-6は、各供試体の支間中央(Point A)位置の荷重-たわみ曲線を示している。各供試体とも、載荷開始から破壊にいたるまで同様な傾向を示しており、スタッドの配置、および間詰め部モルタル打設幅の違いによる影響はないことがわかる。図中にType Iの解析値を示しているが、初期剛性、終局耐力の実験値と解析

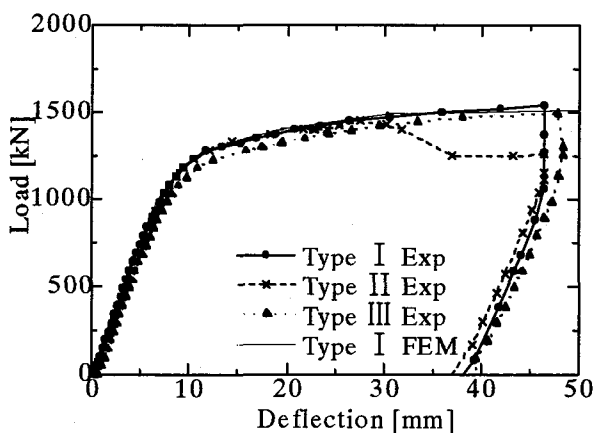
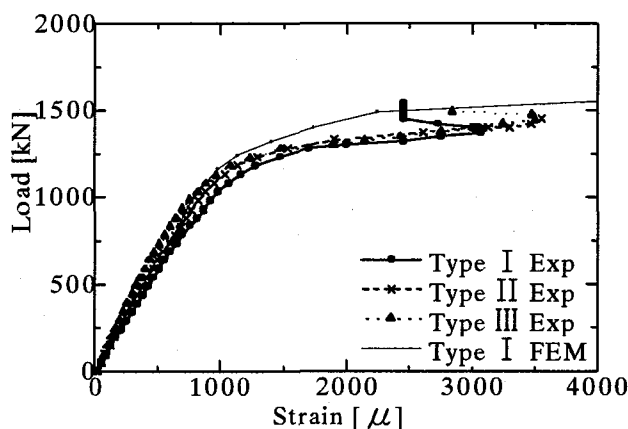


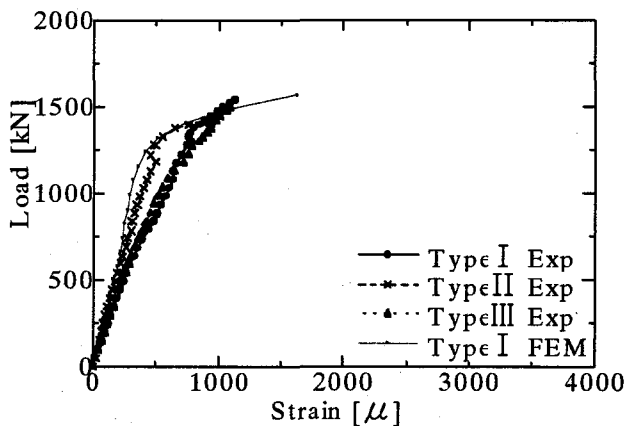
図-6: 荷重-たわみ曲線

値はほぼ一致しており、実験を精度良く再現できていることがわかる。また、図中には示していないが、支間中央から100cm(Point B)位置の荷重-たわみ関係も、各供試体とも同様な傾向を示しており、解析においても再現できている。

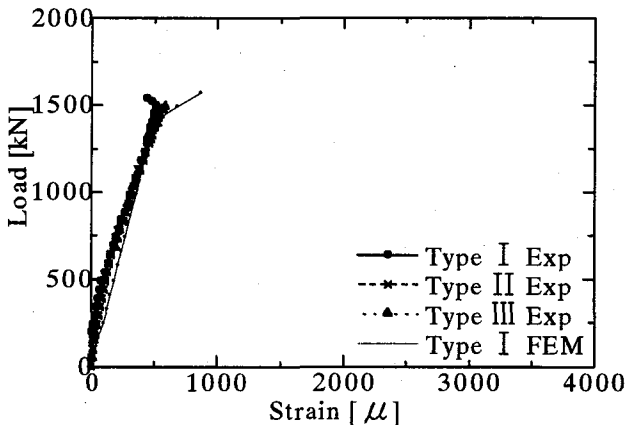
図-7(a), (b), (c)は、各供試体の支間中央から14cm(Section 1)、37.5cm(Section 2)、および75cm(Section 3)位置の床版上縁の荷重-ひずみ曲線を示している。同様に、図-8(a), (b), (c)は鋼桁下縁のそれを示している。Section 1は支間中央付近、Section



(a): Section 1



(b): Section 2



(c): Section 3

図-7: 荷重-ひずみ曲線(床版上縁)

2 は床版パネルの中間，Section 3 は床版間の横目地位置である．荷重-ひずみ関係も，各供試体とも同様の傾向を示していることがわかる．図-8(a)より，鋼桁下縁の降伏荷重である 900kN を超えた領域では，鋼桁の塑性域の拡大にともない荷重-ひずみ関係は非線形に挙動し，急激に増加していることがわかる．また，図中に Type I の解析値を示しているが，同様の傾向を再現していることがわかる．

図-9(a)，(b)は，それぞれ Type I，および Type II の合成桁断面 Section 1 のひずみ分布で，縦軸は床版

上縁からの距離であり，実験値は実線，解析値は点線で示している．なお，図中の“P”の値は荷重(単位 kN)を示している．両供試体とも，破壊荷重の直前まではほぼ直線分布であり，平面保持が成り立っていることがわかる．破壊荷重近傍では，ひずみ分布は直線性を失っているが，これは本供試体の合成効果の低下によるものと考えられる．Section 2，Section3，および TypeIIIについても同様の結果が得られていて，床版間の横目地部モルタルのひずみが直線から外れているが，これは横目地部モルタルに局部的圧縮応力，および破壊時にはひびわれが発生したためであるといえる．

4.2 接合面の相対変位

図-10は，Type I，Type IIの支間中央から1パネル目の床版パネルの中央(支間中央から42.5cm)位置の床版と鋼桁(Panel-Girder)の相対変位であり，Type Iは実線，Type IIは点線で示している．なお，同図に解析値を細線で示している．両供試体とも，設計荷重時まではほとんど生じず，静的載荷の範囲内では，設計荷重の2倍程度の800kNまでは両者の差はほとんど見られないことがわかる．なお，TypeIIIも同様の結果であった．また，実験値と解析値を比較すると，低

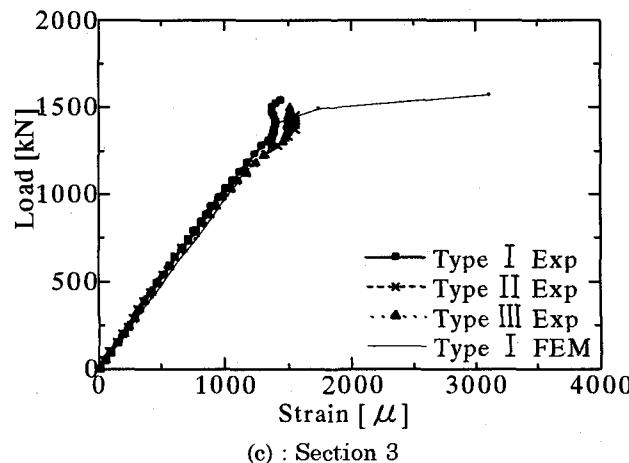
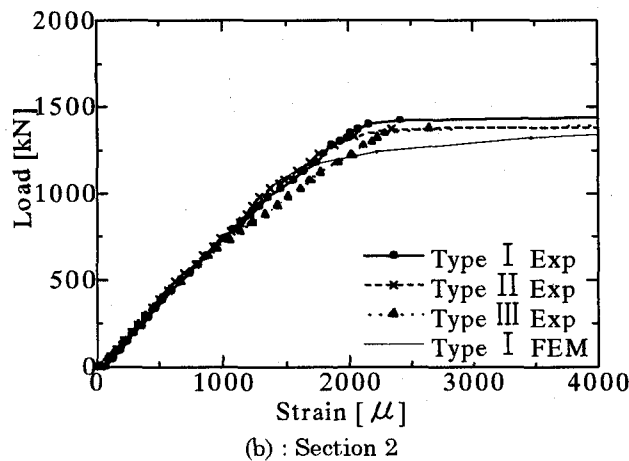
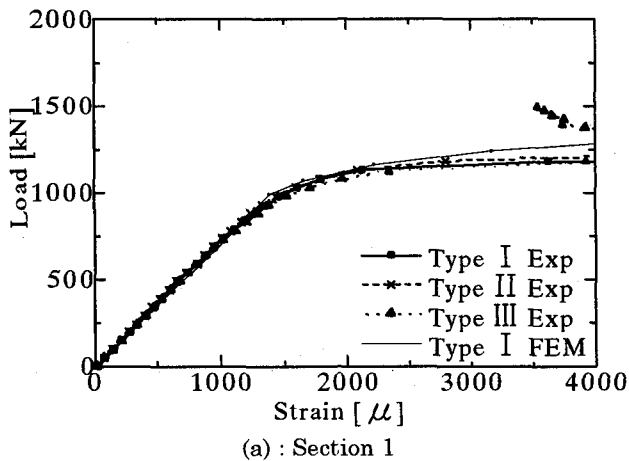


図-8：荷重-ひずみ曲線(鋼桁下縁)

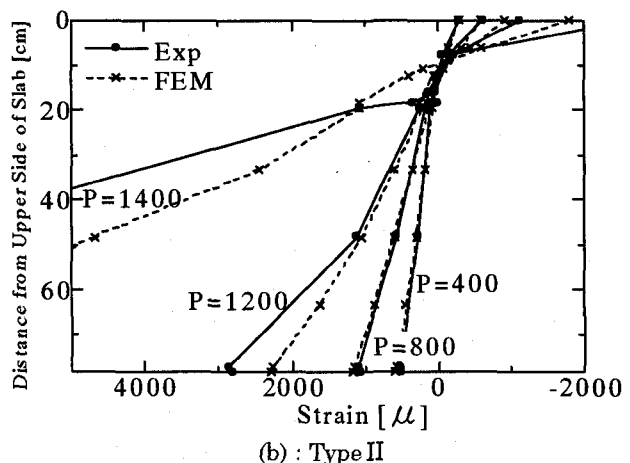
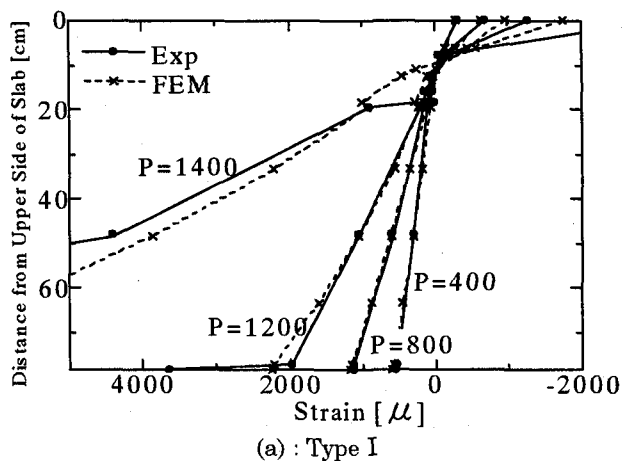


図-9：ひずみ分布図(Section 1)

荷重領域では両者の比較的良好一致が見られるのに対し、高荷重領域では解析値が強度、および剛性において実験値に比べてやや大きくなる傾向が認められた。これは、計測の都合上、床版と鋼桁のずれ変形に加えて、間詰め部モルタルのせん断変形を含む変位を計測したこと、解析上、接合面のすべり(付着)特性に非線形性を考慮していないためと考えられる。

図-11(a), (b)は、それぞれ Type I, および Type II の床版と間詰め部(Panel-Filler), 間詰め部と鋼桁(Filler-Girder)の相対変位であり、Panel-Filler は実線, Filler-Girder は点線で示している。また、

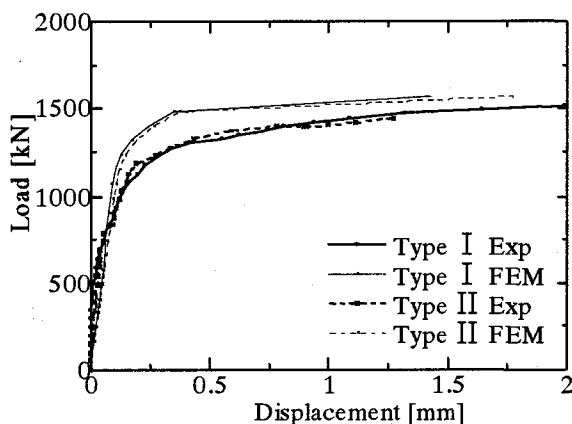


図-10: 荷重-相対変位曲線(Slab-Girder)

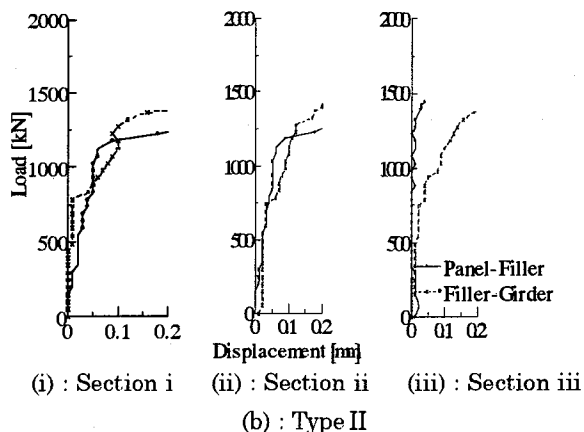
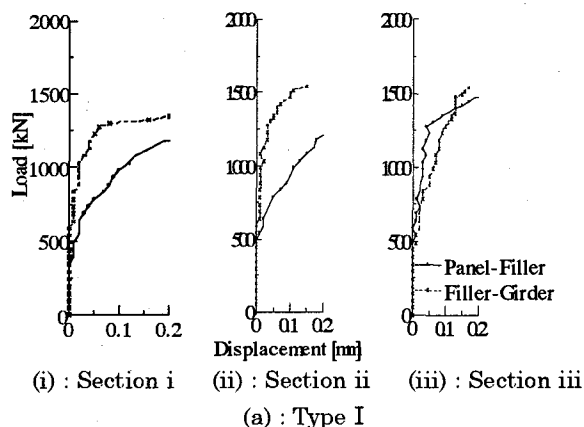


図-11: 荷重-相対変位曲線

(i):Section i, (ii):Section ii, (iii):Section iii は、それぞれ支間中央から 1 枚目, 2 枚目, 3 枚目の床版パネル中央位置の断面である。同図より、設計荷重の 2 倍程度の 800kN 以上では、Type I は Type II に比べて床版と間詰め部のずれが卓越しているが、それは小さな値であるため合成効果に与える影響は小さいものと考えられる。

4.3 間詰め部モルタルのひびわれ発生パターン

図-12(a), (b)は、それぞれ Type I, および Type II の間詰め部モルタルの本実験によるひびわれ進展状況を示している。なお、間詰め部モルタルの充填幅を Type I の 2 倍にした Type III については、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、載荷荷重の増加にともなうひびわれ進展のパターンは、Type I と同様であった。よって、以下では Type I と Type II の比較について記述する。

いずれの供試体とも、床版の圧壊により破壊したが、支間中央から床版 1 パネル目位置の間詰め部モルタルに注目すると、以下のようにまとめられる。

(1) Type I, Type III

- (A) 床版下面凹部の載荷側でひびわれ発生(650 ~ 850kN)
- (B) “(A)”の反対側でひびわれ発生(850 ~ 1100kN)
- (C) 床版中央部のスタッドが貫入している周辺でひびわれ発生(800 ~ 1250kN)
- (D) スタッドが貫入している位置でひびわれ発生(1150kN ~ 最大荷重)

(2) Type II

- (A) 床版下面凹部の載荷側でひびわれ発生(650 ~ 950kN)
- (B) 貫入スタッドの位置でひびわれ発生(750 ~ 1000kN)
- (C) 貫入スタッドの位置でひびわれ発生(800kN ~ 最大荷重)

図-13(a), (b), (c), (d)は、FEM 解析による Type I の各代表荷重段階での間詰め部モルタルへのひびわれ発生箇所を示したものである。同図より、ひびわれ発生荷重、および発生箇所は、前述の Type I の(A) → (B) → (C) → (D)の順となっており、荷重値も実験結果とほぼ一致していることがわかる。

Type I, Type II のひびわれ発生箇所の違いは、前節で述べた両接合面の相対変位の違いによるものと考えられる。Type I は、床版と間詰め部のずれ量の方が大きいため、床版パネル中央位置のスタッドの先端近傍にひびわれが発生したが、Type II は、間詰め部と鋼桁のずれ量の方が大きいため、前述の位置ではなく長いスタッド近傍にひびわれが発生したと考えられ

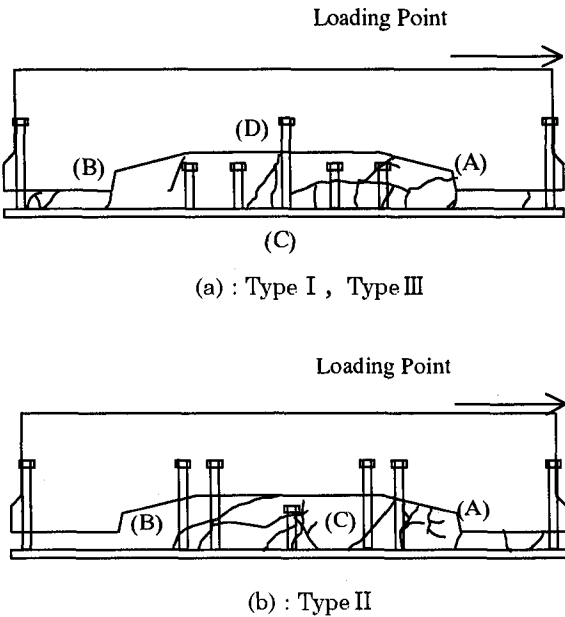


図-12：間詰め部モルタルのひびわれ進展状況(実験)

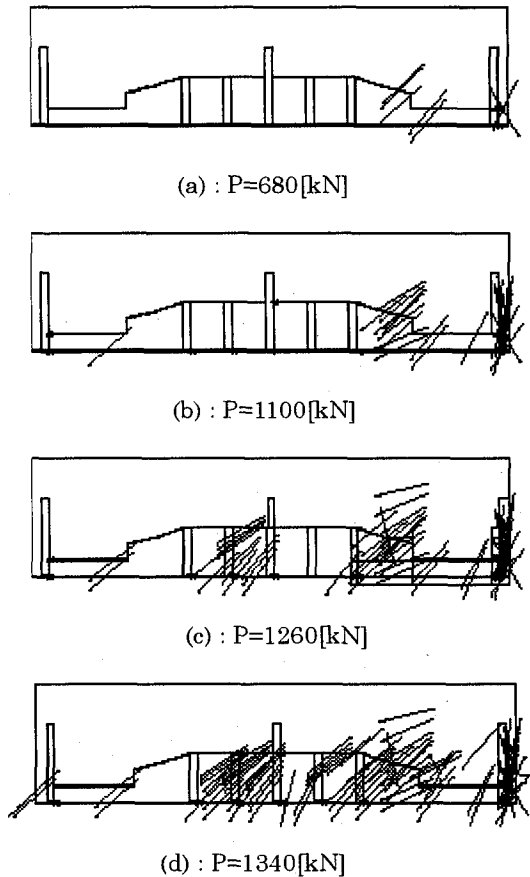


図-13：間詰め部モルタルのひびわれ進展状況(解析)

表-2：終局耐力

Type	終局耐力 Pu[kN]	設計荷重 Pa[kN]	計算値 Pc[kN]	Pu/Pc	Pu/Pa
I	1540	425	1380	1.12	3.63
II	1450	423	1380	1.05	3.41
III	1510	425	1380	1.10	3.56

ひびわれ発生荷重は、設計荷重の 1.5 倍程度に達して
からであり、またその後のひびわれ幅の増加も顕著で
ないことから、静的載荷の範囲内では構造上特に問題
ないと考えられる。

4.4 破壊安全率

各供試体とも鋼桁下フランジの引張降伏にともない、
床版の圧壊によって破壊した。表-2 は、各供試体の
設計荷重、および終局曲げ耐力の実験値と計算値を示
している。これより、各供試体ともに、実験値は道路
橋示方書による終局耐力の計算値に近く、かつ設計荷
重に対して 3 以上の安全率を有していることがわか
る。なお、表中の設計荷重は材料実験結果を用いて算
定したものである。

以上のことより、本研究で実施した静的曲げ載荷試
験の範囲内において、CPC 床版は、間詰め部を貫入
して床版パネル内に定着される長尺スタッドを低減し
ても、床版パネル端部の支圧による水平せん断抵抗に
より十分なずれ止め効果を発揮し、合成桁への適用に
特に問題はないと考えられる。

5. まとめ

CPC 床版の鋼合成桁への適用を目的として、スタ
ッドの配置形状、および間詰め部モルタルを変化させ
た 3 体の合成桁供試体による静的曲げ載荷試験、お
よび 2 次元非線形有限要素解析を行った。得られた
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、桁は破壊に
いたるまで合成桁として挙動し、そのスタッド
の必要配置本数は、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、十分であることがわかった。
- (2) 床版と鋼桁を結合する間詰め部モルタルにひび
われが発生したが、その発生荷重は設計荷重の
1.5 倍に達してからであり、またその後のひびわ
れ幅の増加も顕著でないことから、静的載荷の
範囲内では構造上特に問題ないと考えられる。
- (3) 鋼桁上フランジ上の間詰め部充填モルタル幅を
広く取ることの構造上のメリットは特になく、
フランジ幅程度を確保すればよいことがわかつ
た。
- (4) 合成桁は床版部コンクリートの圧壊により破壊
し、その破壊荷重は、床版と鋼桁とを完全合成
として仮定して求めた理論値にほぼ一致した。
- (5) 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十分に
あるが、接合面の相対変位をばね要素でモデル

化した 2 次元 FEM 解析を用いることにより、桁作用としての本合成桁の挙動を精度良く追跡できることが示された。

以上、CPC 床版を鋼合成桁に適用する場合、桁は破壊直前まで合成桁として挙動することが確認され、CPC 床版は従来型の床版に比べて、開口量が少なくなるため現場施工の簡略化、および省力化が図られるものと考えられる。

本論文では、CPC 床版を鋼合成桁に適用する場合の、桁の合成挙動に注目して検討したが、今後床版下面のチャンネル形状の合成効果へ影響を定量的に明らかにすることにより、合成桁の設計に反映できるものと考えられる。なお、本構造の押し抜きせん断特性、および疲労耐久性については別途検討しており、その優れた構造特性と疲労耐久性については確認している。これについては、後日別の機会に報告予定である。

謝辞

本実験を実施するにあたり、福岡北九州高速道路公社設計課長吉崎信之氏には、貴重なご助言を戴いた。ここに、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川田忠樹, 野村国勝, 梶川靖治: 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) (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) 中井博: プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工, 森北出版, 1988
- 5) 吉川弘道: 鉄筋コンクリートの解析と設計 限界状態設計法の考え方と適用, 丸善, 1996
- 6) 真鍋英規, 寺田光太郎, 曾田信雄, 伊藤正人: 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
- 7) 真鍋英規, 林功治, 鈴木真, 松井繁之: チャンネル形状プレキャスト PC 床版の設計曲げモーメント式に関する一考察, プレストレストコンクリート技術協会, 第 6 回シンポジウム論文集, pp.169-172, 1996
- 8) Tadahiko TSUTSUMI, Shigeyuki MATSUI, Shinichi HINO, Hideki MANABE: Application of Channel-Shaped Precast PC Panel on Composite Steel Girder Bridge, Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering '98, 1998
- 9) 堤忠彦, 日野伸一, 太田俊昭, 松井繁之, 木下広志: チャンネル形状プレキャスト PC 床版の鋼合成桁橋への適用に関する研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会, pp.92-93, 1998
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 1996
- 11) LUSAS Ver.12 User Guide・Element Library, Finite Element Analysis Ltd, 1996

(1998 年 9 月 18 日受付)