

チャンネル型プレキャスト PC 床版の鋼合成桁橋への適用に関する研究

Application of Composite Steel Girder with Channel-Shaped Precast PC Panels

堤忠彦¹・松井繁之²・日野伸一³・太田俊昭⁴・山口浩平⁵・木下広志⁶

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

¹ 正会員		富士ピー・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)
² フェロー	工博	大阪大学大学院教授, 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
³ 正会員	工博	九州大学大学院助教授, 工学研究科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)
⁴ フェロー	工博	九州大学大学院教授, 工学研究科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)
⁵ 学生会員	工修	九州大学大学院工学研究科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)
⁶ 学生会員		九州大学大学院工学研究科 (〒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、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。一方、現場工事では、現場技能労働者の不足・高齢化が深刻であり、また建設資材の投廃棄による周辺環境に与える影響に配慮するため、現場施工の省力化・省資源化も望まれている。

これらの問題に対処するため、プレキャスト PC 床版(以下、PPC 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多く採用され実績も増加している。PPC 床版の適用は、プレキャスト化による高品質化、現場施工の省力化、現場技能労働者不足への対応、工期の短縮など施工環境の改善や、型枠材に木材を使用しないことで環境保護への貢献ができるなど、従来の RC 床版の適用に比べて、様々な優位性が挙げられる。

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^{1),2),3)}のみであることから合理的な構造の開発が望まれている。

著者らは、鋼合成桁橋へのプレキャスト床版の適用に関して、床版としての合理性とともに、従来の PPC 床版に対して種々の優位性が期待され、既に数橋の非合成桁橋への実用化も行われているチャンネル型プレキャスト PC 床版(以下、CPC 床版)を適用した新しい合成構造を提案した。本研究では、PPC 床版を用いた鋼合成桁橋の設計・施工における問題点を解決する手段として、スタッドによる鋼桁と床版の結合にかわる CPC 床版下面の形状効果によるせん断力の伝達機能を活用する構造の安全性を確認し、合成桁橋への CPC 床版の適用を図ることを目的とするものである。

本論文では、CPC 床版の基本的力学特性と実橋(非合成桁橋)への適用例を紹介するとともに、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. CPC 床版の特徴と実施例

2.1 CPC 床版の特徴

図-1 は CPC 床版を鋼プレートガーダー橋に適用する場合の構造概念を、また図-2 は CPC 床版単体版の

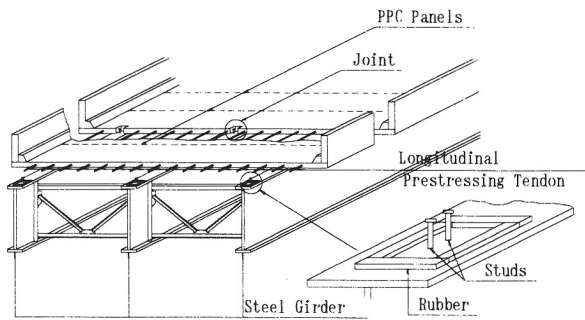


図-1：CPC床版を適用した鋼桁橋の概念図

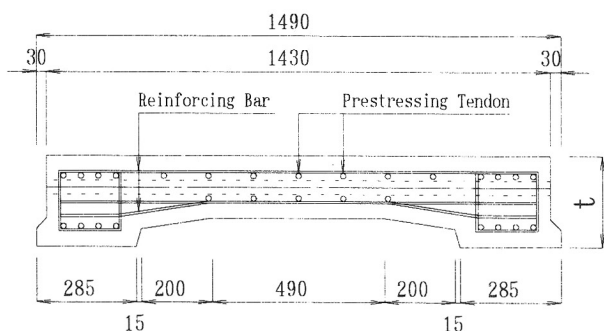


図-2：CPC床版断面図

断面を示している。

CPC床版の基本的力学特性を把握するためにCPC床版の静的破壊実験と疲労実験が先に行われている⁴⁾。

図-3は静的破壊実験に用いた供試体を示しており、床版間の目地部を施工後、3枚のCPC床版を縦締めプレストレスにより連続版としたものであり、荷重は中央床版の支間中央に面載荷(500×200mm)した。図中にひびわれ分布を示しているが、設計荷重98kNの約3.8倍の372kNで載荷板直下にひびわれが発生し、その後3枚の版全体にわたりひびわれが発生した。なお、破壊形態は押し抜きせん断破壊(破壊荷重=1210kN)であった。また、橋軸方向縦締めプレストレス量を $\sigma=5.6, 3.6, 2.0\text{MPa}$ と変化させて実験を行ったが、プレストレス量の違いによる連続版としての挙動の違いは認められなかった。

さらに、床版間目地部の疲労耐久性を調べるために、2枚のCPC床版を連続版とした輪荷重走行試験による疲労試験を行った。その結果、乾燥状態での100万回の疲労試験終了時に至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た。

2.2 CPC床版の施工例

表-1に示す桜樹橋は、床版にCPC床版を用いて施工された鋼逆ローゼアーチ橋である。壁高欄を床版と一体製作することにより、省力化・工期短縮が図られており、架設時から側方の安全柵ができていたため、現場施工の安全対策として有効である。なお、写真-1

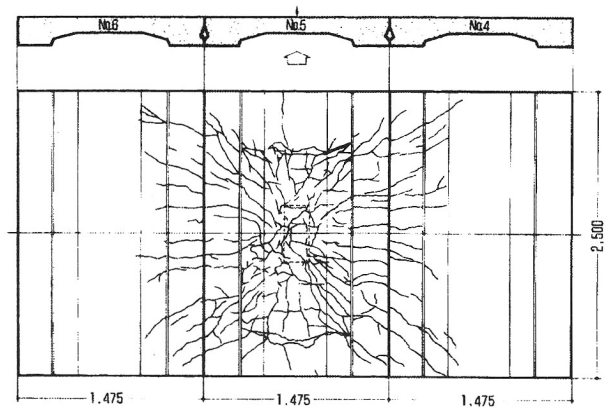


図-3：ひびわれ分布図

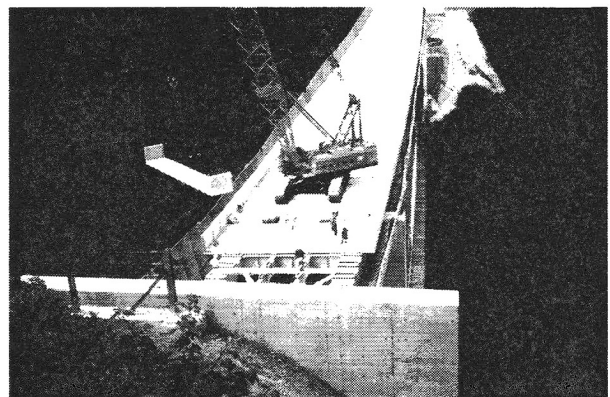


写真-1：クローラークレーンによる床版架設

表-1：桜樹橋の諸元

名称	: 松山自動車道 桜樹橋
場所	: 愛媛県周桑郡丹原町
施工年	: 1994年
構造形式	: 鋼逆ローゼアーチ橋
橋長	: 198m
有効幅員	: 9.0m ~ 9.5m
活荷重	: TL-20, TT-43
床版寸法	: 10.45m~10.55m×1.49m×27cm(17cm)
架設方法	: 橋面上より吊りクローラークレーン1台による。

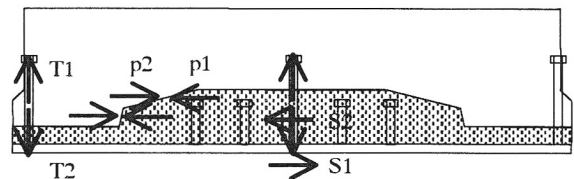


図-4：CPC床版の合成作用原理

は、クローラークレーンによる床版架設時の状況を示している。

3. 鋼合成桁の曲げ載荷実験

CPC床版は、床版両端にリップを設けることにより、床版厚を橋軸方向に変化させている。図-4は、CPC床版と鋼桁の合成作用原理を示している。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(S1, S2)は、床版と間詰め部モルタルの接合面に水平せん断力が生じ、間詰め部モルタルと床版の接合面には、床版リップ部の支圧効果によるせん断抵抗(p1, p2)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(T1, T2)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、床版リップを設けることによるメリットがある。

3.1 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-5に桁供試体の全体概略図を、また図-6(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、床版リップ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低減し、開口部、

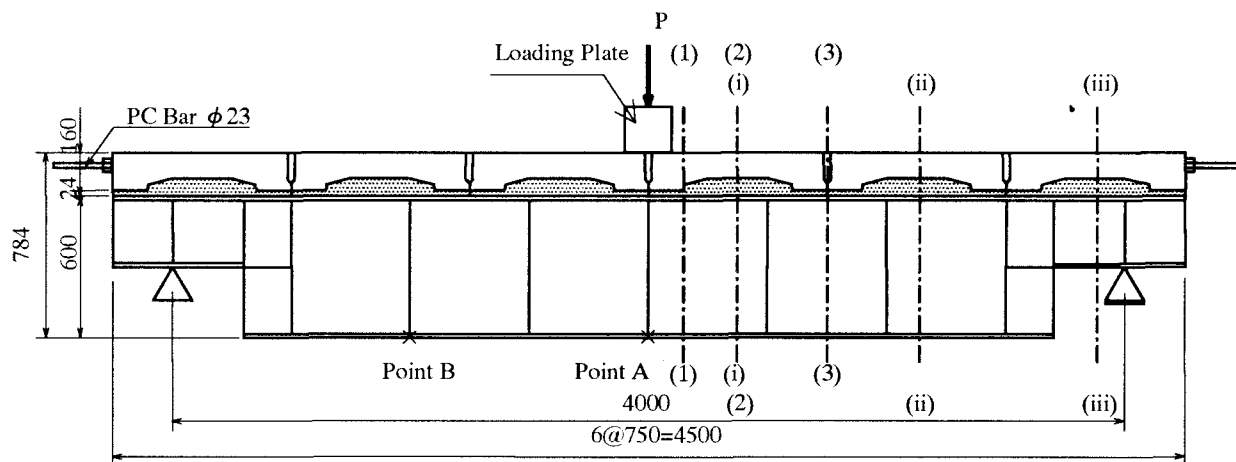
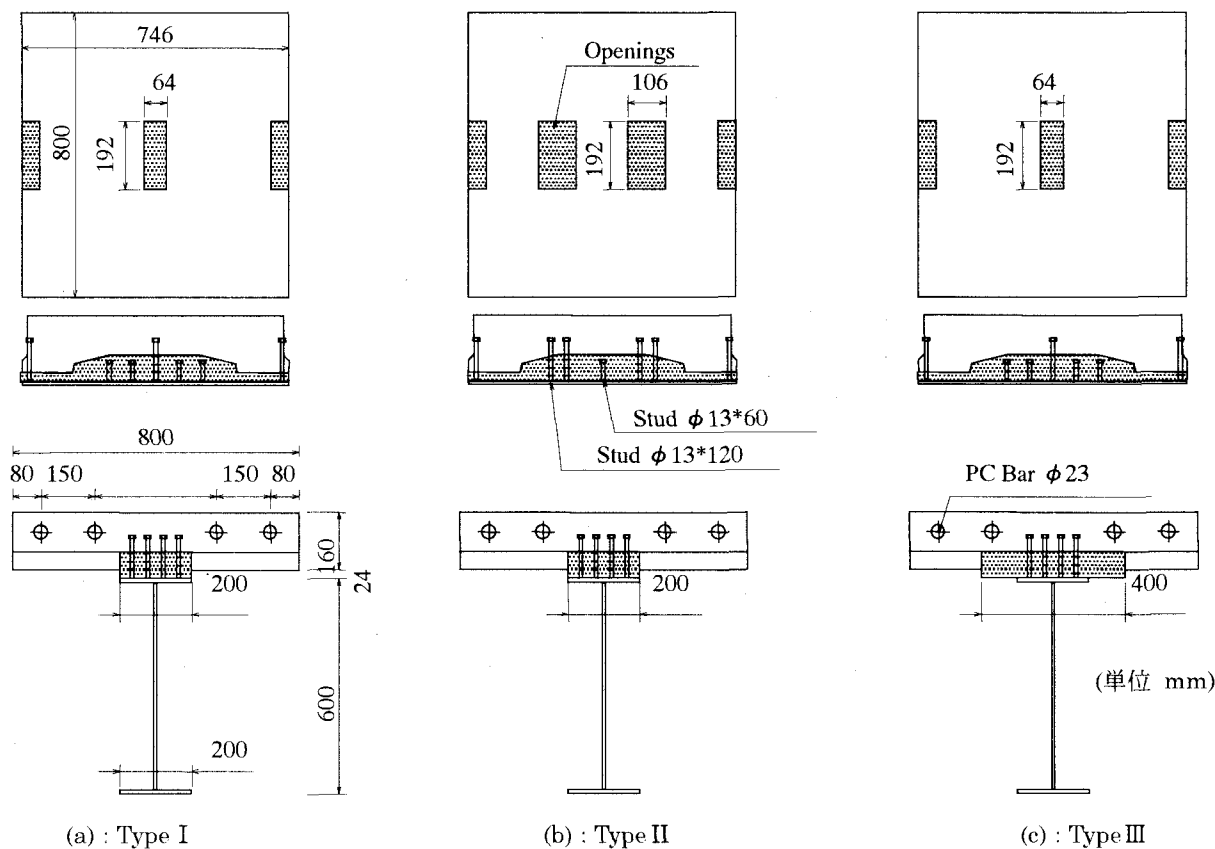


図-5：全体概略図

(単位 mm)



(a) : Type I

(b) : Type II

(c) : Type III

図-6：各供試体の平面図、および縦横断面図

表-2: 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

表-3: 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

後打ちモルタル打設量を少なくして施工性に配慮したものである。一方、道路橋示方書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と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、Type I, Type III は $\phi 13H60mm$ のタイプを 4 列、 $\phi 13H120mm$ のタイプを 3 列配置し、Type II は $\phi 13H60mm$ のタイプを 1 列、 $\phi 13H120mm$ 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。また、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、および鋼桁の材料実験結果を示している。

3.2 荷重方法

荷重試験は、九州大学内の構造物荷重試験装置を用いて、供試体の支間中央に集中荷重を荷重した。荷重板は、橋軸方向 200mm、橋軸直角方向は供試体の全

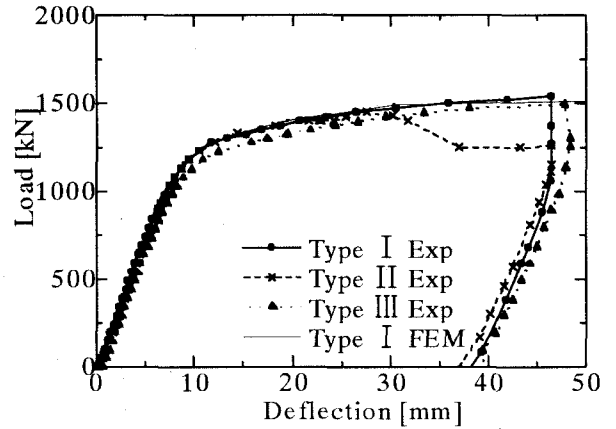
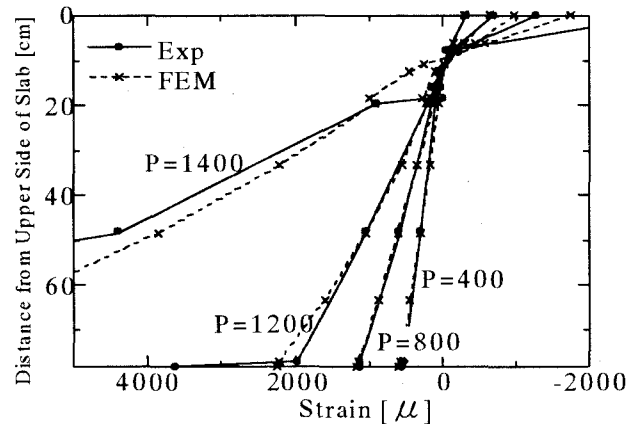
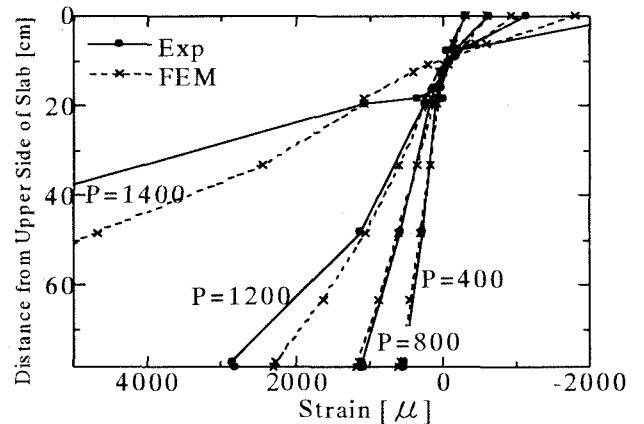


図-7: 荷重-たわみ曲線(Point A)



(a): Type I



(b): Type II

図-8: ひずみ分布図(Section 1)

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、荷重・除荷を 2 回繰り返す、その後破壊に至るまで漸増荷重を行った。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。

4. 実験結果および考察

4.1 合成挙動および終局耐力

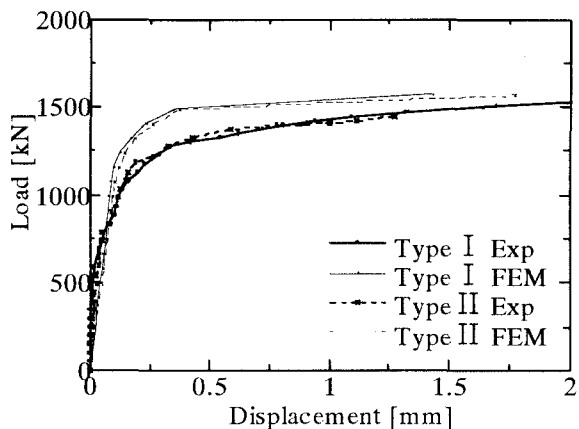


図-9：荷重-相対変位曲線(Section i : Slab-Girder)

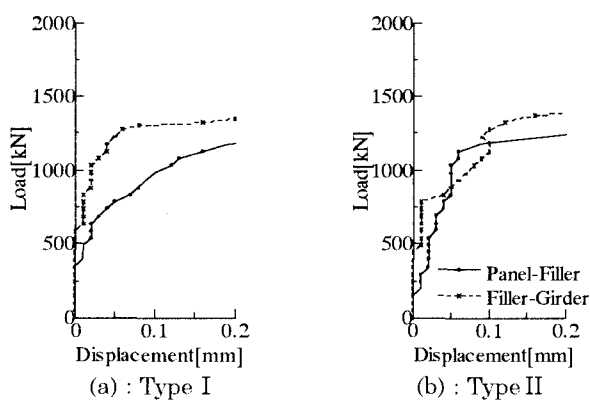


図-10：荷重-相対変位曲線(Section i)

図-7 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、荷重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 FEM 解析値を示しているが、初期剛性、弾塑性挙動ともに解析値は実験値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。

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-3 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。

図-8(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

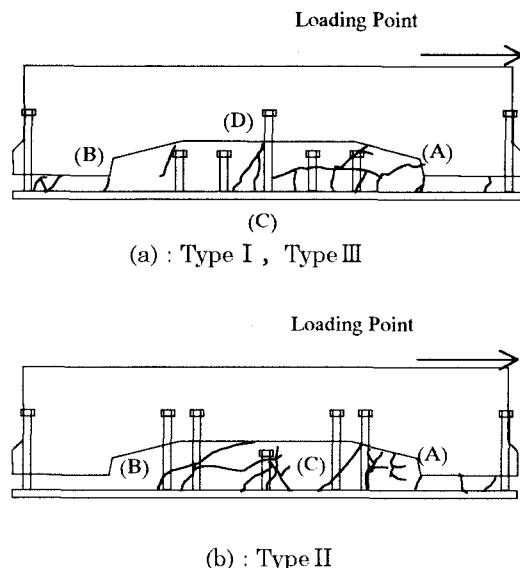


図-11：間詰め部モルタルのひびわれ進展状況(実験)

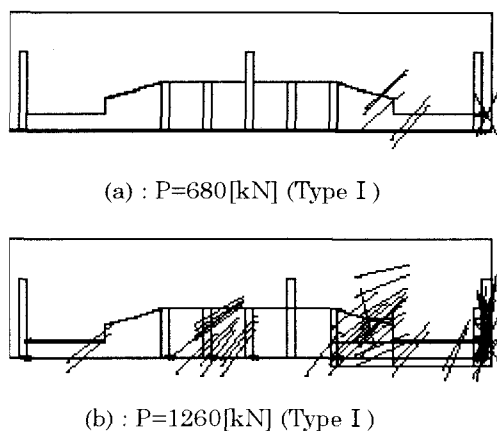


図-12：間詰め部モルタルのひびわれ進展状況(解析)

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度の低下というよりは、鋼桁の局部応力によるものと考えられる。Section 2, Section 3, および Type III 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の圧縮応力、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 接合面の相対変位およびひびわれ状況

図-9 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(Panels-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、設計荷重時までずれはほとんど生じず、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、Type III も同様の結果であった。

図-10(a), (b)は、それぞれ Type I, および Type II の支間中央から 1 枚目の床版パネル中央位置の床版と間詰め部(Panels-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。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。なお、Section ii, Section iiiについても同様の傾向が見られた。

図-11(a), (b)は、それぞれType I・Type III, 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、載荷前より発生した乾燥収縮ひびわれ以外のひびわれ進展のパターンは、Type Iと同様であった。

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-12(a), (b)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る。しかしながら両供試体とも、間詰め部モルタルの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、構造上特に問題ないと考えられる。

以上のことより、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

床版の耐久性の向上、現場施工の省力化・合理化を目的として、CPC床版の開発を行った。実験では十分な耐久性を有していることがわかり、また在来RC床版に比べると工期の短縮が可能となった。

さらに、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曲げ載荷実験、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、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った。
- (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であるが、接合面の相対変位をばね要素でモデル化した本FEM解析を用いることにより、そ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。

参考文献

- 1) 川田忠樹ほか：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) 真鍋英規ほか：チャンネル形状プレキャスト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