少数主桁プレキャスト PC 床版縦接合部の曲げ載荷実験および設計手法について

㈱大林組　正会員　○丸本　悠真
正会員　坪倉　辰雄
正会員　佐々木　一成

１．はじめに

少数主桁橋の幅員方向分割床版取替工事に適用するプレキャスト PC 床版（以下，PCa 床版）の構造においては，PCa 床版の縦接合部周辺の設計を成立させることが課題となる．これは，プレテンション方式により橋軸直角方向に導入されたプレストレス力が部材端部で低下してしまうためである（**図-1**）．本課題に対し，縦接合部側の PCa 床版端部を超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFC）に置換する構造を開発した．接合部構造は**図-2** のようになっており，PCa 床版のうち，縦接合部付近を UFC としている．UFC の高い付着力により PCa 床版端部でのプレストレス力低下を抑制するとともに，UFC の大きなひび割れ発生強度（8.0 N/mm²）や引張強度（8.8 N/mm²）を利用することにより，ポストテンション鋼材による補助的なプレストレス力を導入せずに設計が可能となる．本構造について，実物大の曲げ載荷実験および終局荷重作用時の検討を実施した．本報文でこれらの内容について報告する．

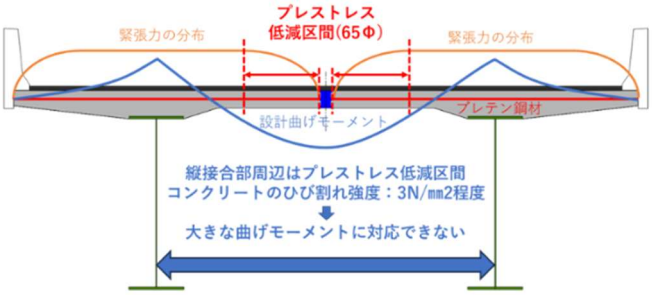


図-1　縦接合部を有する少数主桁床版の設計上の課題

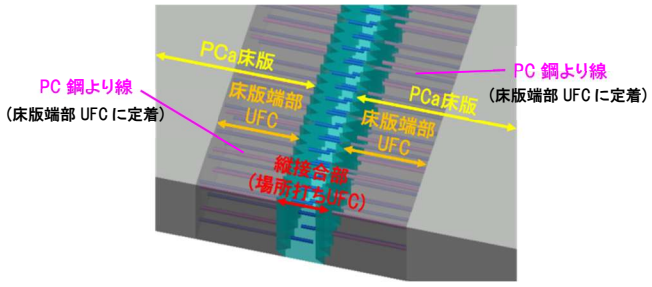


図-2　開発した少数主桁対応の床版構造

２．開発構造

本検討の対象は，プレテンションによりプレストレスを導入した PCa 部材を接合した構造である．**図-2** に示すように PCa 部材は，端部に UFC による PC 鋼より線の定着を一定区間設けた構造である．PC 鋼より線を緊張した状態でコンクリートと端部 UFC を同時に打込んで一体化している．接合部の間詰には UFC を場所打ちし，接合している．なお，場所打ち UFC との打継面は，一体化性能向上のため鋸歯形としている [1)]．

３．曲げ載荷実験

（１）試験体

ａ）概要

試験体構造を**図-3** に示す。設計基準強度 50N/mm² の早強コンクリート，設計基準強度 180N/mm²，ひび割れ発生強度 8.0N/mm²（いずれも特性値）の UFC，PC 鋼より線 1S15.2（降伏強度の規格値 1570N/mm² 以上）を使用した部材を対象とした．PCa 部は実際の製造を勘案し，55°C, 4 時間の蒸気養生の後，脱型してプレストレスを導入する工程で作製し，接合部は UFC を場所打ちし，常温で養生した．

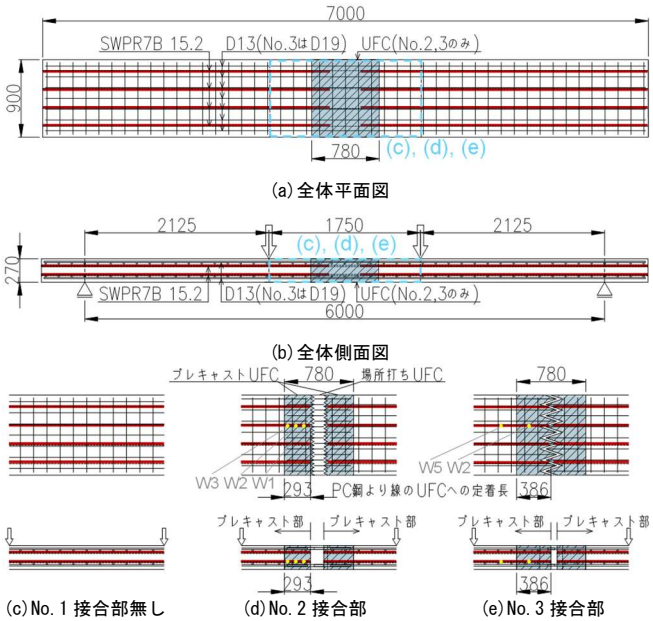


図-3　試験体構造図

キーワード　少数主桁，プレキャスト PC 床版，超高強度繊維補強コンクリート（UFC）
連絡先　〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 （株）大林組　生産技術本部橋梁技術部　TEL070-1049-8578

ｂ）実験パラメータ

No.1 試験体は接合部がなくプレストレスの低下がない試験体，No.2, 3 試験体は接合部を有し，No.2 試験体は橋軸直角方向鉄筋が一般的な D13，No.3 試験体は接合部の耐力を確認するため，コンクリート部分が先行して破壊しないよう橋軸直角方向鉄筋を D19 としてコンクリート部分の曲げ耐力を高くした試験体である．なお，UFC 定着長は No.2 試験体が 293 ㎜，No.3 試験体が 386 ㎜であるが，プレキャスト部と場所打ち部の UFC 幅の合計は共に 780 ㎜である．使用したコンクリートおよび UFC の諸元は**表-2** のとおりである．

表-1　試験体諸元

試験体	長さ (mm)	幅 (mm)	厚さ (mm)	軸方向鉄筋	PC 鋼より線	UFC 定着 (mm)
No.1	7000	900	270	D13	8-1S15.2	接合なし
No.2						293
No.3				D19		386

表-2　使用材料諸元

材料	プレストレス導入時		載荷実験時		
	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm²)	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm²)	ひび割れ発生強度 (N/mm²)
Con	45.3	32.1※	72.7	37.6	4.41(4.01※)
UFC	121	－	204	48.9	8.53

※ コンクリート標準示方書[設計編]により圧縮強度から換算

ｃ）プレキャスト部の導入緊張力

PC 鋼より線は 4 本×2 段で配置し，PC 鋼より線に貼り付けたひずみゲージによりプレストレス導入前からひずみを計測した．3 体の試験体は同一ベンチで同時に製作している．PC 鋼より線のうち 1 本の緊張力をロードセルで計測した．コンクリート打込み前に 1 本当り 180kN で緊張したが，プレストレス導入時の緊張力は 1 本当り 173kN であり，ひずみは 5800×10^{-6} であった．

コンクリートへのプレストレス導入直後の PC 鋼より線のひずみ分布を**図-4** に示す．UFC の定着を設けていない側のコンクリート端部では，PC 鋼より線径の 65φ に近い範囲でひずみの低下が見られ，道路橋示方書記載の PC 鋼材のプレストレス低減長と概ね一致する．UFC による定着を設けた接合部側の端部では，試験体 No.2, 3 試験体ともにひずみの低下範囲が 40φ 程度と，コンクリート部と比較してひずみの低下が抑制されていることが分かる．

緊張力導入直後，171×10^{-6} のひずみが低下しており，コンクリートの弾性変形分の計算値 172×10^{-6} とほぼ一致していた．この結果より，PC 鋼より線のひずみからコンクリートへの導入プレストレスを計算すると 5.5N/mm² 程度と考えられる．また，No.2 試験体において接合部直近のコンクリート部では 800×10^{-6} 程度ひずみが減少しており，同様に導入プレストレスを計算すると 4.9N/mm² 程度であったと考えられる．

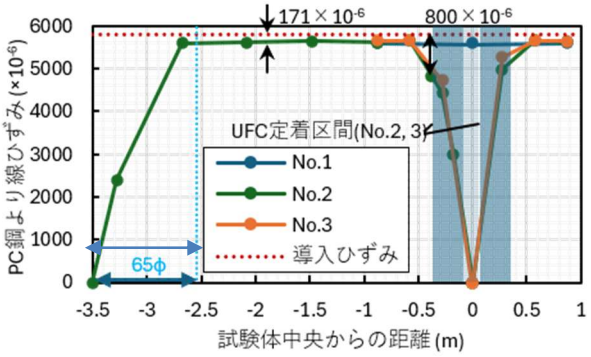


図-4　PC 鋼より線のひずみ分布

（２）載荷方法

曲げ載荷実験の実施状況を**写真-1** に示す．試験体の載荷は**図-3** のように支点間距離 6000mm，載荷点距離 1750mm とし，支間中央で鉛直変位を計測した．No.1～3 試験体で荷重が低下するまで単調載荷をしたが，No.3 試験体では単調載荷の前に引張縁に作用する引張応力が 8.3N/mm² に相当する載荷荷重 60kN で 200 万回の繰り返し載荷を実施している．



写真-1　曲げ載荷実験状況

（３）実験結果

ａ）概要

荷重－変位関係を**図-5** に示す．No.3 試験体の繰返し載荷においてたわみの増加は見られたが，PC 鋼より線ひずみの急激な低下は見られなかった．発生していたひずみは 67×10^{-6} であり，PC 鋼より線 1 本あたりに作用していた引張力に換算すると 2kN 程度である．同程度の繰り返し作用であれば UFC に 386mm 定着した PC 鋼より線にすべりは生じないものと考えられる．

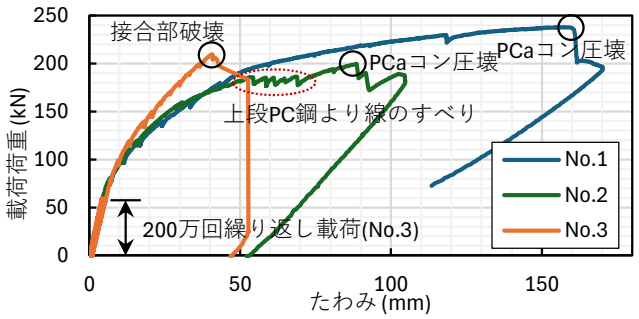


図-5　載荷荷重-たわみ関係

実験終了時の各試験体のひび割れ図を図-6 に示す．単調載荷において，No.1, 2 試験体は上面コンクリートの圧壊，No.3 試験体は接合部下縁の破壊により荷重低下した．No.2 試験体ではたわみ 50～70mm で上段の PC 鋼より線のすべりによると思われる破裂音をともないながら荷重の上下を繰り返した．UFC への定着が長い No.3 試験体では上段 PC 鋼より線のすべりは計測されず，No.2 試験体のような荷重低下は見られなかった．

b）ひび割れ発生荷重

No.2 試験体においてコンクリートにひび割れが発生した荷重は 66kN であった．引張縁に作用した引張応力は自重分を含めて 8.9N/mm^2 と計算され，コンクリートのひび割れ発生強度 4.0N/mm^2 および導入されていると考えられるプレストレス 4.9N/mm^2 の合計と整合していた．

c）曲げ耐力

No.2 試験体は，接合部を有さない No.1 試験体と同様にコンクリート部分の曲げ圧縮破壊となったが，曲げ耐力は No.1 試験体と比べて低くなった．No.2 試験体では定着区間において曲げ引張が作用するため，プレストレス導入力以上の引張の作用によって PC 鋼より線のすべりが生じる．すべり開始時に PC 鋼より線に生じていたひずみを表-3 および図-7 に示す．この結果より，3 か所のひずみが同時に低下しているため，PC 鋼より線のひずみ急減時にすべりが生じていると判断した．発生していたひずみから載荷によって PC 鋼より線に作用していた引張力を計算し，付着長から付着強度を算出した．この付着強度はプレストレス導入時から載荷時までの経時による材料強度の増加によるものと考えられ，UFC は圧縮強度が 83N/mm^2 増加し，付着強度として 0.8N/mm^2 程度増加したものと考えられる．プレストレス導入時にすべりを経験していることから，純粋な付着強度と比較して増加量は小さいと考えられる．

No.2 試験体ではすべりが載荷荷重 116kN から生じているが，載荷荷重 160kN 付近まで荷重－たわみ関係（図-5）において No.1 試験体との差はなく，すべり発生後もプレストレスの効果が発揮されていると考えられる．

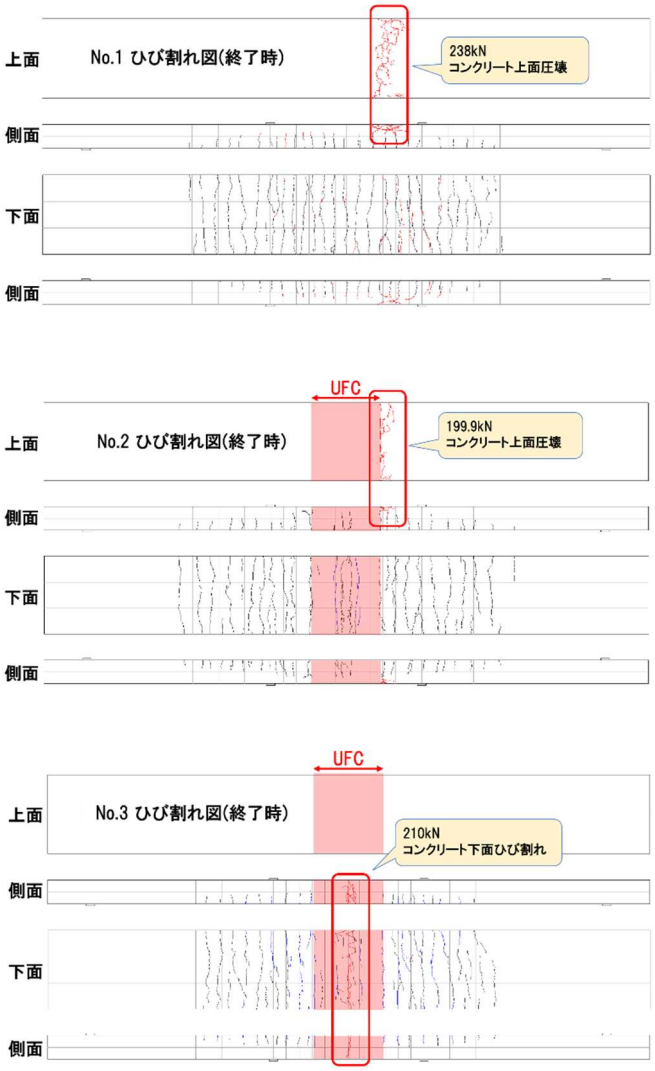


図-6　曲げ載荷実験後のひび割れ図

表-3　No. 2 試験体のすべり直前の PC 鋼より線ひずみ

試験体	計測 No.	ひずみ ($\times 10^{-6}$)	引張力 (kN)	定着長 (mm)	付着強度 (N/mm^2)
No.2	W1	145	4.0	78	1.08
	W2	289	8.0	178	0.94
	W3	380	10.5	278	0.79

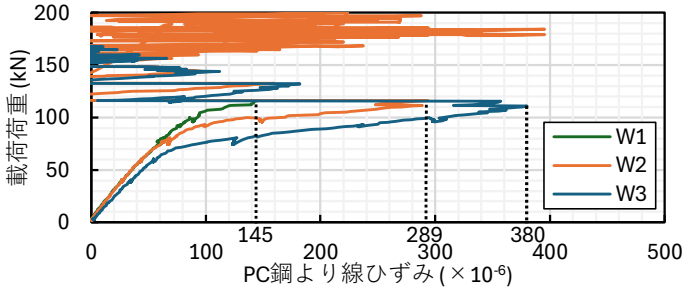


図-7　No.2 試験体の下側 PC 鋼より線ひずみ測定結果

４．終局荷重作用時の検討

（１）検討対象

曲げ載荷実験(**図-8**)より，No. 2 試験体は計算で求められるコンクリート側断面の曲げ耐力相当値 185.3 kN に対し 109%の曲げ耐力を有することが確認され，接合部の UFC 部では破壊が生じない結果となった．一方で，No.3 試験体では曲げ耐力は No.2 試験体より大きかったものの，接合部が先行破壊した結果であった．よって，PCa 部材の終局耐力を確認するため，耐力検討では No.2 試験体の接合部形状を対象とすることとした．

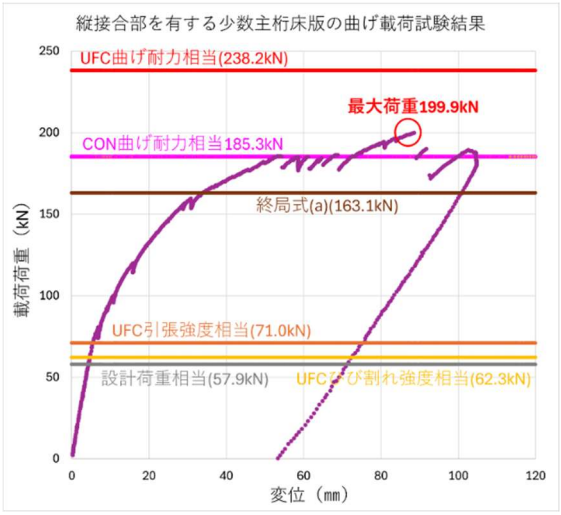


図-8　No.2 試験体の荷重-変位関係

（２）耐力の考察

曲げ載荷実験の結果より，PC 鋼材に取り付けたひずみゲージの結果から，荷重 116 kN の際に下段の PC 鋼材が UFC と普通コンクリートの境界部で滑り出していることが確認された．しかし，すべり発生後もプレストレスの効果が発揮されていると考えられる結果であったため，載荷によりすべりが生じた PC 鋼より線の引張抵抗を全く見込まないことは過小評価になると考えられる．そこで，付着強度の増加は不確実なため見込まないものの，プレストレス導入時に UFC 部に定着できている PC 鋼より線の応力 1075N/mm^2 を降伏強度に置き換えて曲げ耐力を試設計すると**表-4** のように計算される．実験結果は計算値の 1.09 倍となり，合理的に評価できる可能性がある．

表-4　曲げ耐力の試算

試験体	最大荷重	曲げ耐力					PC 鋼線
	実験値	荷重分	自重分	実験値	計算値	比	降伏強度
	P_{exp} (kN)	M_{expL} (kN･m)	M_{expD} (kN･m)	M_{exp} (kN･m)	M_{cal} (kN･m)	M_{exp}/M_{cal} (kN･m)	σ_y (N/mm^2)
No.1	238	259	25.6	284	276	1.03	1570
No.2	200	217	25.6	243	222	1.09	1075

（３）実験結果に基づく設計手法

UFC 部分の PC 鋼材の滑り出しについては，コンクリート強度発現中の若材令時に PC 鋼材のプレストレスを導入しているため，プレストレス導入後にも強度が増進する．強度増加に伴い付着強度も増加するため，付着強度の増加を考慮した設計手法も考えられる．また，UFC 幅を増加させて付着長を確保する方法や，PC 鋼材に定着具を取り付けて有効プレストレス量を向上させる手法も考えられる．

５．まとめ

UFC に PC 鋼より線を定着させたプレテンション部材の接合を対象に曲げ載荷実験を実施し，No.2 試験体ではプレキャスト UFC 部で PC 鋼材のすべりが生じていることが分かった．また，プレストレス導入時から増加した付着強度内では繰り返し引張作用を受けても PC 鋼より線のすべりは生じないことを確認した．

曲げ載荷実験の結果より，プレストレス導入時の PC 鋼材の作用応力度を降伏強度に置き換えて曲げ耐力を算定する設計手法を提案した．

今後の更なる実験や検討により，少数主桁プレキャスト PC 床版において縦目地部へのプレストレスの導入なしで，ひび割れ発生を回避できる新たな床版構造の設計手法を確立する．

参考文献

1) 塩畑ほか：防水層に UFC を用いた複合プレキャスト PC 床版の実用化に向けた検証，橋梁と基礎（2021 年 10 月），p.31

2) 丸本ほか:UFC により端部プレストレス量の低下を抑制したプレキャスト床版の設計に関する検討，令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，V-598，2024

3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート部材・コンクリート上部構造編，2026

4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.10，2012

5) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2022