

光ファイバを用いたUFC床版におけるPC鋼材の伝達長に関する検討

鹿島建設(株) 正会員 工修 ○永井 勇輔
 鹿島建設(株) 正会員 工修 一宮 利通
 阪神高速道路(株) 工修 鈴木 英之
 阪神高速道路(株) 工修 藤原 理絵

Abstract : Ultra-High-Strength fiber reinforced concrete (UFC) has a lighter than a prestressed concrete (PC) slab and a long time durability. A UFC slab was applied to slab replacement construction at the Tamade ramp in the Hanshin Expressway. A structure of this UFC slab has a tendon force by the pretension method toward perpendicular to bridge axis. Under making UFC slab, a portion of a PC tendon force was measured by attaching an optical fiber which can measure strain distribution. This paper shows that the equation of transfer length of UFC was proposed from results of measurement.

Key words : UFC, Optical fiber, Transfer length, Bond stress, Road bridge slab

1. はじめに

RC 床版の更新に対応する技術として、超高強度繊維補強コンクリートを用いた軽量かつ耐久性の高い床版（以下、UFC 床版）が開発され¹⁾、床版取替工事に適用されている。UFC 床版は、橋軸直角方向にプレテンション方式でプレストレスを導入する構造である。UFC は優れた付着特性を有しており、従来のコンクリートと比較すると応力の伝達長は小さくなることが分かっている²⁾。既往の研究では²⁾、伝達長の計測にひずみゲージが用いられていたが、設置する点数が少ないために伝達長を精度よく計測することが困難であった。これに対し筆者らは、光ファイバを用いて PC 鋼より線のひずみ分布を数 cm ピッチで計測する技術³⁾を適用し、伝達長を精度よく計測することが可能であるか検討した。本論文では、UFC 床版製作時にプレテンション PC 鋼材の一部に光ファイバを貼り付けて、プレストレス導入前後におけるひずみ分布から UFC 床版を用いたプレテンション鋼材の伝達長について考察した結果を報告する。

2. UFC 床版の概要

UFC 床版の概要図を図-1 に示す。UFC 床版の寸法は、長さ（橋軸直角方向）6250mm、幅（橋軸方向）1720mm、高さ 150mm である。本 UFC は、エトリンガイト生成系の UFC⁴⁾であり、圧縮強度の特性値が 180N/mm²、ひび割れ発生強度が 8.0N/mm²、引張強度が 8.8N/mm² が得られるものである。橋軸直角方向にはプレテンション鋼材を計 16 本（2 段×8 列）配置し、橋軸方向には現場施工時にポストテンション PC 鋼材を配置する構造としている。プレテンション PC 鋼材の諸特性を表-1 に示す。

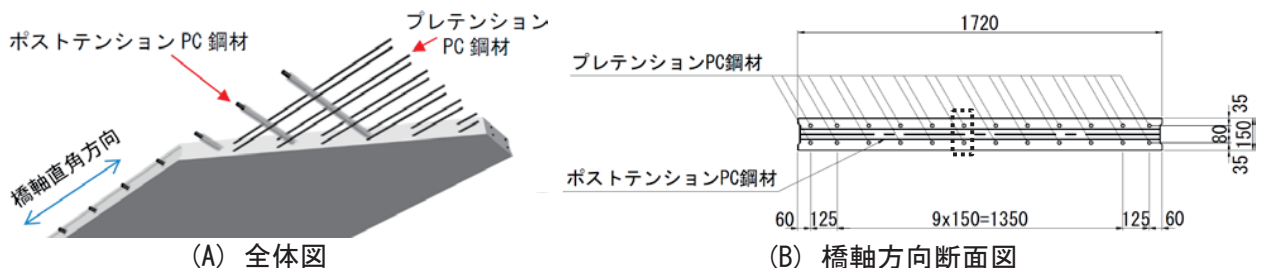


図-1 UFC 床版の概要図

表-1 プレテンションPC鋼材の諸特性

PC鋼より線	鋼材径 (mm)	断面積 (mm ²)	0.2%の永久伸びに対する荷重(kN)	最大引張荷重 (kN)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SWPR7B	15.2	140.7	252.0	278.0	192.2

3. 計測概要

3.1 光ファイバによるひずみ計測原理

本計測では、光ファイバ内で対向する光の間で生じる誘導ブリルアン散乱を利用したBOCDA方式³⁾によるひずみ計測方法を使用した。計測原理および仕様を表-2に示す。同方式では、高い位置分解能でのひずみ計測が可能である。

3.2 光ファイバの設置

計測位置は、図-1(B)内に破線で示す床版中央付近上下のPC鋼より線とした。計測するPC鋼より線に、図-2に示すように、凹部に収まるように光ファイバを接着剤で固定することで、運搬・挿入時における光ファイバの損傷や、定着用ウェッジとの干渉を生じず、通常のPC鋼より線と同様に緊張・定着が可能である。光ファイバとPC鋼より線の接着範囲は約7mとした。

3.3 プレストレス導入概要

工場で作成された光ファイバ組込み式PC鋼より線2本を含むPC鋼より線計16本を型枠内に挿入後、通常と同じ方法で緊張作業を行い、UFCを打設した。40℃の一次養生後、翌日に緊張力を解放してプレストレスを導入した。ここで、PC鋼より線1本あたりの緊張力は190.5kN、総緊張力は3,048kN、導入プレストレスの推定値は11.8N/mm²であった。また、プレストレス導入時のUFCの圧縮強度(σ₁)は93.8N/mm²であった。計測は、プレストレス導入直前および直後に行った。

4. 計測結果からの伝達長の算出

PC鋼より線の伝達長は、プレストレス導入前後のひずみ分布の差分に着目して算出した。付着伝達長の算出イメージを図-3に示す。具体的には、床版長さからプレストレス導入前後でひずみ変化のない区間を差し引いた区間を伝達区間と考え、その1/2を伝達長とした。また、光ファイバはPC鋼より線に螺旋状に設置されているため、理論上から算出した係数を乗ずることで、長さの補正を考慮し、式(1)により伝達長を算出した。

$$(B - x \cdot \alpha) / 2 \quad (1)$$

ここで、*B* : 床版長さ=6250mm (一定), *x* : ひずみ一定区間 (計測結果), *α* : 光ファイバ長さに対するPC鋼より線の長さの比率=0.9877 (一定) とした。

表-2 BOCDAによるひずみ計測原理および仕様

計測原理	<p>光ファイバひずみ計測器 (BOCDA方式)</p> <p>ひずみ分布計測結果の一例</p>
計測精度	約±100 μ
位置分解能	3cm
計測範囲	~200m (光ファイバ全長に渡り、任意の点の計測が可能)
配線	光ファイバ両端を計測器に接続

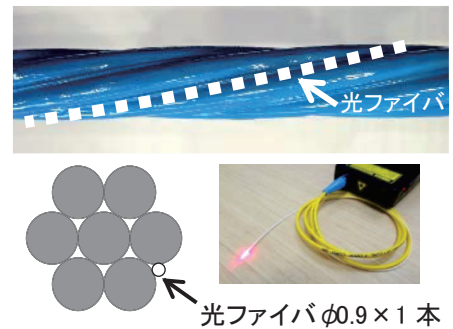


図-2 光ファイバ組込みPC鋼より線

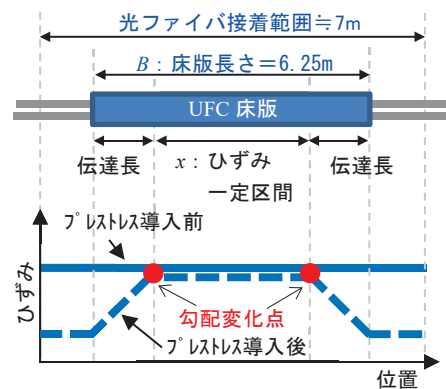


図-3 伝達長の算出イメージ

5. 計測結果および伝達長と付着応力

光ファイバによる計測から得たプレストレス導入前後のひずみ分布を図-4に示す。図-4内に示す○および△は、それぞれ床版上側と下側のPC鋼より線のひずみの勾配変化点を示している。勾配変化点間の距離をひずみ一定区間とし、式(1)より伝達長を算出した。床版上側に関しては、図-4内の6.0~6.5m付近に勾配変化点(○)が2箇所確認できたため、伝達長を2種類算出した。算出結果を表-3に示す。本UFC床版におけるPC鋼より線の伝達長は、床版上側で350mm(23.0φ)、480mm(31.6φ)、床版下側で510mm(33.6φ)であった。ここで、普通強度コンクリートを用いたプレテンション部材の設計に用いられるPC鋼より線の伝達長は、安全側に設定された値で65φである⁵⁾。本UFC床版におけるPC鋼より線の伝達長は、普通強度コンクリートの1/3~1/2程度であった。本計測は、ひずみ分布が数cmピッチで計測可能であり、精度良く勾配変化点を捉えられ、伝達長を精度良く計測できる可能性が示された。勾配変化点が複数箇所表れたため、今後計測の精度向上に向けた検討が必要である。

また、UFCを用いたPC鋼より線の伝達長に関する既往論文²⁾⁶⁾との比較を表-3内に示す。一宮らの実験では、本UFC床版と同様のUFCの配合で、PC鋼より線の径をパラメータとして伝達長を計測している。また川口らは、試験体の寸法、プレストレス導入応力をパラメータとして伝達長を計測している。これらのデータを直接比較するため、本論文および既往論文の伝達長を用いて、PC鋼より線の残留張力を付着面積(伝達長×PC鋼より線の直径)で除し、PC鋼より線の平均付着強度を算出した。算出結果を表-3に、プレストレス導入時のUFCの圧縮強度と算出した付着強度の関係を図-5に示す。土木学会コンクリート標準示方書(以下、示方書)では異形鉄筋についての付着強度の算出式を示しており⁷⁾、コンクリートの圧縮強度の2/3乗に比例するとしているが、プレストレス導入時のUFCの圧縮強度を基に付着強度を算出した結果を図-5内に実線で示すと、本論文および既往論文の実験値が実線よりも大きい値となった。プレストレス力導入時のPC鋼より線のポアソン効果による膨張圧が付着強度に寄与し、異形鉄筋の場合よりも付着強度が大きくなったと考えられる。そこで、UFCを用いたPC鋼より線のプレテンション方式によるプレストレス導入時の付着強度について算出

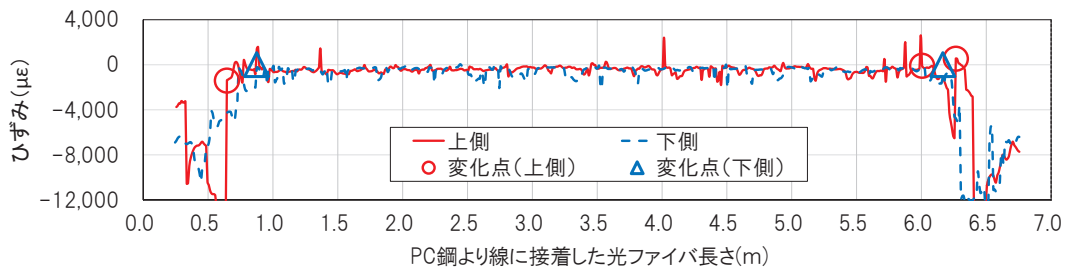


図-4 プレストレス導入前後のひずみ分布

表-3 伝達長の算出結果および既往論文との比較

項目	鋼材径 φ(mm)	鋼材 本数 (本)	床版・試験体の寸法			プレストレス導入時の UFCの圧縮強度 (N/mm ²)	総緊張力 (kN)	プレストレス 導入応力 (N/mm ²)	伝達長		付着強度 (N/mm ²)		
			高さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)				(mm)	(×φ)			
本論文	15.2	16	150	1720	6250	93.8	3048	8.8	350	23.0	11.0		
									480	31.6	8.0		
									510	33.6	7.5		
一宮ら ²⁾	15.2	1	100	100	2000	40.0	200	17.0	532.0	35	7.7		
	19.3							27.0	482.5	25	10.8		
川口ら ⁶⁾	12.7	1	100	100	3000	210.2	135	67.5	13.5	199.8	15.7	16.9	
			150	150	1200				6.0	80.7	6.4	41.9	
									135	13.5	194.3	15.3	17.4
			100	100	1200				67.5	6.8	131.3	10.3	12.9

式を提案するため、本論文および既往論文で示されている UFC の圧縮強度と付着強度（計 10 点）から累乗近似して式（2）を導出した。

$$f_b = 1.04f_c^{0.53} \quad (2)$$

ここで、 f_b ：付着強度、 f_c ：プレストレス導入時の UFC の圧縮強度を示している。式（2）のグラフを図-5内に破線で示す。式（2）より、UFC を用いた PC 鋼より線の付着強度は、UFC の圧縮強度の約 1/2 乗に比例すると考えられる。川口らの実験値で算出式からの外れ値が 1 点確認できるが、試験体断面が大きいことによる拘束力やポアソン効果が寄与したと考えられる。今後、試験体断面や緊張力の条件を変えたデータの蓄積により、推定精度を向上する必要がある。

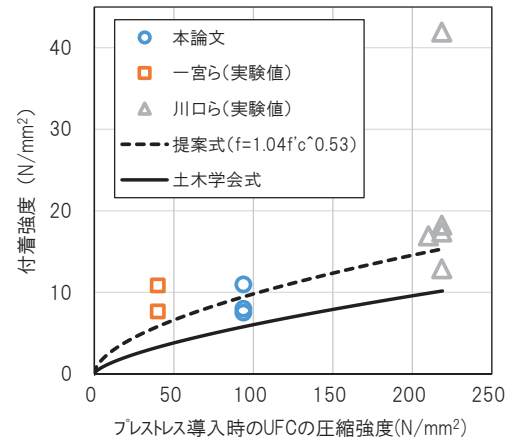


図-5 UFC 圧縮強度と付着強度の関係

6. まとめ

UFC 床版の橋軸直角方向の PC 鋼より線の一部に光ファイバを設置し、ひずみ分布を計測し、プレストレス導入前後のひずみ分布から伝達長を算出した。以下に得られた結果を示す。

- ・ 本 UFC 床版のプレストレスによる伝達長は 350～510mm 程度であり、PC 鋼より線の公称直径（φ 15.2）の 23～34 倍程度、普通強度コンクリートの 1/3～1/2 程度であった。
- ・ 本計測は、ひずみ分布が数 cm ピッチで計測可能であるため精度良く勾配変化点を捉えられ、伝達長を精度良く計測できる可能性が示された。勾配変化点が複数個所表れたため、今後計測の精度向上に向けた検討が必要である。
- ・ PC 鋼より線の付着強度の実験値は、プレストレス力導入時の PC 鋼より線のポアソン効果による膨張圧が寄与したため、異形鉄筋についての付着強度よりも値が大きくなったと考えられる。
- ・ 本論文および既往論文の実験値から、UFC を用いた PC 鋼より線のプレテンション方式によるプレストレス導入時の付着強度について算出式を導出した。PC 鋼より線の付着強度は UFC の圧縮強度の約 1/2 乗に比例する結果となった。
- ・ 実験値は概ね算出式にのっているが、算出式からの外れ値も確認された。試験体の断面が大きいことによる拘束力やポアソン効果が寄与したと考えられるため、今後、試験体断面や緊張力の条件を変えたデータの蓄積により、推定精度を向上する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：UFC 道路橋床版に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.17，2015
- 2) 一宮利通，曾我部直樹，本田智昭，日紫喜剛啓：超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレテンション部材の構造性能：コンクリート工学会年次論文集，Vol.28，No.2，pp.505-510，2006
- 3) 大窪一正，今井道男，千桐一芳，中上晋志：光ファイバーを用いた PC 緊張力計測技術，プレストレスコンクリート工学会第 25 回シンポジウム論文集，pp.283-288，2016.10
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.3，2006.11
- 5) 日本道路公団：PC 橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル，2001
- 6) 川口哲生，森香奈子，河野克哉，田中敏嗣：プレテンション UFC 部材の付着伝達長に関する研究：プレストレスコンクリート技術協会第 20 回シンポジウム論文集，pp.529-532，2011.10
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [2017 年制定] 設計編，2017