

# 論文 軽量コンクリート（Ⅱ種）と炭素繊維シートの付着特性に関する実験的研究および一考察

岸田 政彦\*1・井田 達郎\*2・樋口 祐治\*3・小森 篤也\*4

**要旨：**本研究は、軽量コンクリート(Ⅱ種)を用いた道路橋 RC 床版への疲労対策として、炭素繊維シートによる補強を実施するために要素試験として軽量コンクリート(Ⅱ種)と炭素繊維シートの付着試験を行った。既設軽量 RC 床版の設計基準強度を確保した供試体を作製し、付着試験を行った結果、土木学会が規定する界面剥離破壊エネルギーや付着強度の基準値を満足することを確認した。ただし、軽量コンクリート(Ⅱ種)を用いた供試体は、普通コンクリートを用いた供試体と比較して界面剥離破壊エネルギーが小さくなる傾向にあることを実験により確認した。

**キーワード：**軽量コンクリート、炭素繊維シート、界面剥離破壊エネルギー

## 1. はじめに

近年、FRP 材料を用いたコンクリート構造物の補強が多く実施され<sup>1)</sup>、FRP 材料の中でも炭素繊維シート接着補強法はその材料特性より、鋼材などを用いた補強法よりも軽量で、施工現場での加工性・作業性も良好かつ、高い引張弾性係数や高い引張強度を有しているため道路橋 RC 床版への疲労対策や RC 橋脚の耐震補強法などの用途に広く用いられている。

炭素繊維シート接着補強法は、端部定着やアンカーの併用など特殊な定着構造を用いない場合、被着体であるコンクリートと炭素繊維シートとの接着界面での剥離破壊で終局を迎えることが吉澤ら<sup>2)</sup>や中村ら<sup>3)</sup>の研究にて報告されている。しかし、これらの研究では硬質砂岩や石灰石砂岩および川砂・陸砂などを用いた普通骨材コンクリート(以下、普通コンクリートという)を被着体とした場合の炭素繊維シートとの付着強度などの特性が評価されている。しかし、実際のコンクリート構造物では人工軽量骨材・細骨材を用いたコンクリート構造物も多く存在する。首都高速道路では、現在供用されている路線のうち、橋梁上部工の死荷重低減などを目的とし約 560,000m<sup>2</sup>の軽量 RC 床版が存在する。しかし、軽量骨材を用いたコンクリートと炭素繊維シートとの付着特性については研究されていない。

そこで本研究では、軽量コンクリートが用いられている RC 床版への疲労対策の要素試験として、粗骨材・細骨材共に人工軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリート(Ⅱ種)(以下、軽量コンクリートという)を用い、その圧縮強度・養生条件をパラメータとして、炭素繊維シートの付着特性について実験的研究を行った。

表-1 供試体の一覧

供試体名称	コンクリート	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	養生条件	炭素繊維シートの種類
普27-MM-湿潤	普通	27	湿潤	中弾性型
普35-MM-湿潤		35		
普40-MM-湿潤		40	気中	
普35-MM-気中		35		
軽27-MM-湿潤	軽量	27	湿潤	
軽35-MM-湿潤		35		
軽40-MM-湿潤		40	気中	
軽35-MM-気中		35		

## 2. 供試体の諸元・作製方法および試験方法

### 2.1 試験マトリクス

本研究では、普通コンクリートと軽量コンクリートにそれぞれ炭素繊維シートを接着し、土木学会が定める JSCE-E 543-2013<sup>4)</sup>「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法(案)」(4.3.1 コンクリートブロックの作製 (b) B 形供試体 [一体形]) に準拠しコンクリートブロック供試体を作製した。その後、炭素繊維シートを接着させ付着強度や界面剥離破壊エネルギーなどの付着特性を評価・比較検討を行なうものとした。また、炭素繊維シートの付着特性は、コンクリートの強度、コンクリートの養生条件の影響を受けると考えられるため、これらを実験パラメータとして設定した。ここで供試体の一覧を表-1 に示す。各供試体の設計基準強度としては、既設の軽量 RC 床版で実績の多い 35N/mm<sup>2</sup>、普通 RC 床版で実績の多い 27N/mm<sup>2</sup>、高強度な普通 RC 床版で使用される 40N/mm<sup>2</sup>を選定した。炭素繊維シートは首都高速道路で普通コンクリートを使用した RC 床版の補強仕様とし

\*1 首都高速道路(株) 技術部技術推進課 修(工) (正会員)

\*2 首都高速道路(株) 技術部技術推進課

\*3 パシフィックコンサルタンツ(株) 交通基盤事業本部 インフラマネジメント部 修(工)

\*4 新日鉄住金マテリアルズ(株) コンポジットカンパニー 開発本部 博(工) (正会員)

て規定されている中弾性型を用いた。コンクリートの養生条件として、設計基準強度 35 N/mm<sup>2</sup> のコンクリートには湿潤養生に加え、気中養生された供試体も準備した。2 種類の養生方法は、床版補強が一般的に長期間供用された後に施工されることから、供試体表面の乾燥状態が付着強度に及ぼす影響を確認するために実施した。

## 2.2 使用材料

### (1) コンクリート材料

実験に用いたコンクリートの使用材料を、それぞれ表-2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、混練水には上水道水を使用した。普通コンクリートに用いた粗骨材は、東京都青梅産砂岩碎石を、細骨材には静岡県大井川水系の陸砂を用いた。軽量コンクリートには、粗骨材・細骨材とも人工軽量骨材を用い、それぞれ混和剤を用いた。

近年、軽量コンクリートは、製造過程において骨材に十分に水を吸わせるプレソーキングという手法<sup>5)</sup>が用いられている。しかし、過去においては製造法が異なり、骨材に吸水が十分行われていなかったことから、実験には吸水率が 28%程度のも (近年使用するプレソーキング状態を想定した吸水率) と、10%程度のも (一度、絶乾状態にさせたものを吸水させたもの) をそれぞれ準備し、これらを容積比 1:1 で混合し、吸水率 19% (昭和 40 年頃のプレウェッティング状態を想定した吸水率) とした軽量骨材を用いた。混和剤は、過去に用いられていたものと同一の製品を用いることが困難であったため、現在市販されている混和剤を用いた。

### (2) 炭素繊維シート

炭素繊維シートは、表-3 に示す材料特性値を有する 1 方向性の現場含浸型炭素繊維シートを用いた。中弾性型炭素繊維シートは、目付量 306g/m<sup>2</sup>、引張強度 3,773N/mm<sup>2</sup> の性能を有し、設計厚み×引張弾性係数で求められる補強材の引張剛性は 69.7kN/mm である。

### (3) 炭素繊維シート接着用エポキシ樹脂

炭素繊維シートの接着には無溶剤型エポキシ樹脂、プライマー、不陸修正用エポキシ樹脂パテ材、炭素繊維シート含浸接着用エポキシ樹脂の 3 種類の材料を用いた。

プライマー材は、混合物粘度 500mPa・s であり低粘度無溶剤 2 液混合型の市販の製品であり、不陸修正に用いたパテ材は、圧縮強度 86N/mm<sup>2</sup>、圧縮弾性係数 6300N/mm<sup>2</sup>、引張せん断強度 20 N/mm<sup>2</sup> の性能を有す。

含浸接着樹脂は不陸修正後、炭素繊維シートを接着させるために用い、引張強度 45N/mm<sup>2</sup>、曲げ強度 83 N/mm<sup>2</sup>、引張せん断強度 15 N/mm<sup>2</sup>、可使時間 45 分の性能を有している。ここで、本研究に用いた接着樹脂類の材料特性値を表-4 に示す。

表-2 コンクリートの使用材料

コンクリートの種類	普通	軽量
混練水	上水道水	
セメントの種類	普通ポルトランドセメント	
粗骨材	東京都青梅産砂岩碎石	人工軽量骨材
細骨材	静岡県大井川水系陸砂	人工軽量骨材
混和剤	AE減水剤 (標準型 I 種), AE剤 (I 種)	

表-3 炭素繊維シートの材料特性値

シートの種類	繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚み (mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	引張剛性 (kN/mm)
中弾性型	306	0.165	3,773	423	69.7

表-4 接着樹脂類の材料特性値

使用材料	試験項目	単位	試験結果	試験方法
プライマー	混合物粘度	mPa・s	500	B型粘度計
パテ材	圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>	86	JIS K 7181
	圧縮弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	6300	JIS K 7181
	引張せん断強度	N/mm <sup>2</sup>	20	JIS K 6850
	比重	---	1.6	水中置換法
含浸接着樹脂	引張強度	N/mm <sup>2</sup>	45	JIS K 7161
	曲げ強度	N/mm <sup>2</sup>	83	JIS K 7171
	引張せん断強度	N/mm <sup>2</sup>	15	JIS K 6850
	可使時間	(分)	45	ガードナー法

## 2.3 コンクリートの配合

本研究に用いたコンクリートの配合条件を表-5 に示す。普通コンクリート及び軽量コンクリート共に、材齢 28 日の目標基準強度は、過去に実施された首都高速道路での施工資料を参考に、割増し係数を 1.17 とし、普通コンクリートは、27N/mm<sup>2</sup>、35N/mm<sup>2</sup>、40N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度目標により水セメント比をそれぞれ 56%、46%及び 41%とした。これらは、表-2 に示す材料を用いた場合の過去の試験結果から、圧縮強度とセメント水比の関係を式(1)により算出した。

$$\sigma_{ck}' = 23.7C/W - 10.6 \quad (1)$$

一方、軽量コンクリートの水セメント比は、それぞれ 56%、42%、及び 36%とした。これは、人工軽量骨材協会の技術資料<sup>6)</sup>から圧縮強度とセメント水比の関係を式(2)により算出した。

$$\sigma_{ck}' = 15.276C/W + 4.321 \quad (2)$$

## 2.4 供試体の作製

### (1) 鉄筋配置と型枠の作製

使用した型枠を、図-1 に示す。JSCE-E 543-2013「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法 (案)」に準拠し、型枠を作製して供試体を作製した。供試体の作製は、木製型枠を使用し、供試体が 100×100×600mm の角柱となるようにした。この際、型枠にあらかじめ面木を用い、長軸方向の四隅の面取り及び連続繊維シートを接着させない二面に深さ 20mm となるようなノッチを設

表-5 コンクリートの配合

種別	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )※ <sup>1</sup>						AE減水剤	空気量調整剤 (C×%)	
						W	C	S	G	軽量S	軽量G 吸水率 28%			軽量G 吸水率 10%
普通	27	8.0±2.5	4.5±1.5	56	47.4	160	286	286	981	---			250ml/ C=100kg	0.0015
	35			46	46		348	348		0.0020				
	40			41	45		390	390		0.0030				
軽量	27		5.0±1.5	56	48	153	273	---	563 (641)	233 (298)	233 (255)	0.0015		
	35			42	48	148	352		548 (624)	226 (288)	227 (248)	0.0015		
	40			36	45	153	425		492 (560)	229 (293)	231 (253)	0.0030		

※1 軽量骨材の単位量は絶対状態、普通骨材の単位量は表乾状態とする。なお、軽量骨材の（ ）内の数値は使用時密度を用いた単位量とする。

けた。本供試体においては、引張試験を行うため M24 の全ネジの棒鋼を対として配置する必要があり、全ねじの位置が断面中心の引張軸線に対して偏心が無いように注意して作製した。また、引張試験時にコンクリートブロックの破壊を防ぐために φ6×25mm ピッチの丸鋼らせん筋 260×66mm を供試体軸方向の中央位置（ノッチ部）に対し対になるよう設置し、この型枠に表-5 に示す各コンクリートを打設した。打設後、湿潤養生条件では 7 日間の湿潤養生、気中条件では 1 日間のみの湿潤養生を行ない、その後 28 日まで恒温恒湿槽に静置養生した。

(2)炭素繊維シートの接着

炭素繊維シートの接着は、図-2 に示すように配置し、以下の手順により実施した。まず、供試体の下地処理として、供試体コンクリート表面を、ダイヤモンドホイールの設置されたディスクサンダーを用いて研磨した。研磨完了後、研磨粉をエアブローにて除去し研掃完了とした。養生は、炭素繊維シート接着範囲のマーキングを行い、マスキングテープをマーキングに沿って貼り付け、施工部位以外の養生を行った。また、ノッチ部のひび割れ誘導およびシートを完全に剥離させるため、離型フィルムをあらかじめ供試体中央のノッチ部分に 20mm 幅で設置した。コンクリート表面の含水率の測定は、高周波水分計を用い測定し 8%以下であることを確認した。

プライマーは、エポキシ樹脂主剤と硬化剤を混合し、刷毛を用いてシート接着範囲に 0.2kg/m<sup>2</sup> の塗布量となるように塗布した。コンクリート表面にプライマーが含浸し、造膜されない場合はプライマー層の形成を確認されるまで追加で塗布した。プライマーの塗布後翌日以降まで静置養生し、次工程に移るものとした。プライマーの硬化確認後、不陸修正材であるエポキシ樹脂パテ材も主剤と硬化剤を混合しヘラ等を用いて、シート接着範囲に塗布量 1.0kg/m<sup>2</sup> となり、巣穴などを充填するよう平滑に塗布し仕上げた。パテ材もプライマーと同様、翌日以降

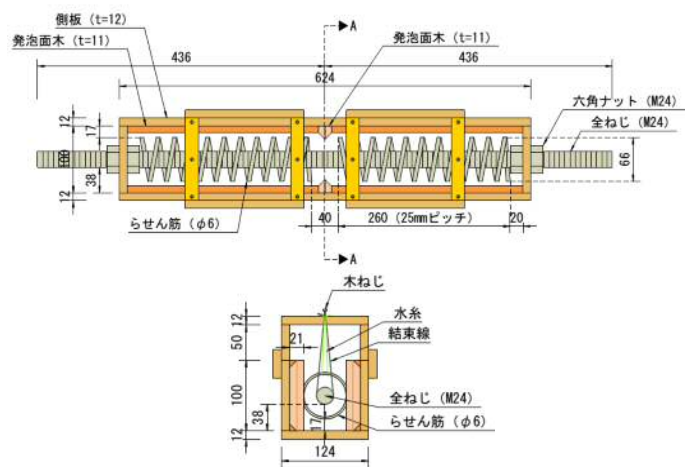


図-1 コンクリート用型枠

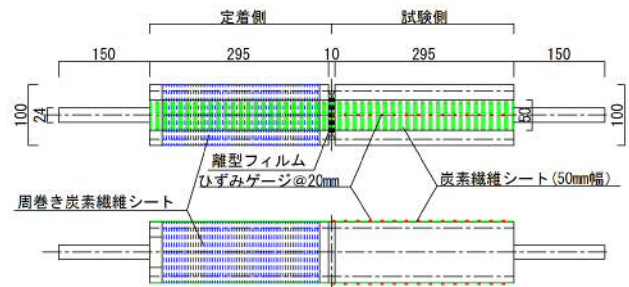


図-2 付着強度試験供試体の概要

まで養生し炭素繊維シートを接着した。

炭素繊維シートを規定の寸法長さ 550mm×幅 50mm に切断した。含浸接着樹脂を刷毛又はローラー等を使用し、シート接着範囲に下塗りとして 0.6 kg/m<sup>2</sup> となるよう塗布した。炭素繊維シートを貼付け、浮きやふくれがない様、脱泡ローラーで含浸・脱泡した。再度、刷毛又はローラー等を使用し、含浸接着樹脂をシート接着範囲に上塗りとして 0.2 kg/m<sup>2</sup> 塗布した。

定着用炭素繊維シートの接着も、図-2 に示すように定着側のコンクリートブロックに、定着用炭素繊維シートを周方向に接着した。定着用炭素繊維シートの貼り付

け位置は、中央部ノッチから 20mm（離型フィルム端部から 10mm）とし、1 周以上巻きつけ、継手長さを 100mm 以上確保した。完成した供試体は 1 週間以上静置養生とし、図-2 に示すように、ひずみゲージを供試体中心の離型フィルムの端部から試験側に 20mm 間隔で設置した。

### 3. 試験結果

#### 3.1 コンクリートの圧縮強度および静弾性係数試験結果

本研究に用いた、コンクリートの圧縮強度及び静弾性係数試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に基づき実施した。

材齢 28 日における、圧縮強度試験結果および静弾性係数試験結果を表-6 に示す。設計基準強度は、目標とする圧縮強度に対して 17% 余裕を考慮したものであったが、圧縮強度試験の結果、普通コンクリートでは 1.33~1.59 倍の範囲に、軽量コンクリートでは、1.38~1.47 倍となり、目標とする設計基準強度を満足させる結果となった。静弾性係数の評価では、普通コンクリートでは 29.0 kN/mm<sup>2</sup>~31.9kN/mm<sup>2</sup> となり普通コンクリートの一般的な値となった。また、軽量コンクリートでは、16.1 kN/mm<sup>2</sup>~18.2kN/mm<sup>2</sup> となり、岡田ら<sup>7)</sup>の研究による軽量コンクリートの圧縮強度 24.4 N/mm<sup>2</sup>~28.8 N/mm<sup>2</sup> に対し静弾性係数 16.3kN/mm<sup>2</sup>~18.2kN/mm<sup>2</sup> とおおむね一致した。

#### 3.2 材令と養生条件による圧縮強度発現状況

材令と養生条件の違いによる圧縮強度の発現状況について表-7 に示す。湿潤条件で養生されたコンクリートの 56 日材齢圧縮強度は、普通コンクリートで 55.6N/mm<sup>2</sup>、軽量コンクリートで 57.1 N/mm<sup>2</sup> となり、表-5 に示す普通コンクリート・軽量コンクリートの W/C はそれぞれ 46%、42% であることから妥当性のある試験結果となった。一方、気中養生された普通コンクリートは、28 日強度で 42.3 N/mm<sup>2</sup> にとどまり軽量コンクリートの 28 日強度は 50.0 N/mm<sup>2</sup> であることから約 15% 下回る結果となった。軽量コンクリートは、外部からの養生水の供給がない場合でも、保水性に優れるポーラスな軽量骨材を使用していることから、内部養生効果によりセメントの水和が促進されたためであると推察される。

#### 3.3 炭素繊維シートの付着試験方法

炭素繊維シートの付着試験方法は、JSCE-E 543-2013「連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法（案）」に準拠し、試験環境を、供試体が試験開始前 48 時間から試験時まで、23℃±2℃となるように環境温度の調整を行った。そして最大荷重 250kN の万能試験機を用い、専用の治具を用い試験体両端のネジ部を試験機に

表-6 圧縮強度および静弾性係数試験結果 (28 日)

コンクリートの種類	養生条件	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度試験結果 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度比	静弾性係数試験結果 (kN/mm <sup>2</sup> )
普通	湿潤	27	42.9	1.59	29.0
		35	51.1	1.46	31.3
		40	53.2	1.33	31.9
	気中	35	42.3	1.21	29.4
軽量	湿潤	27	39.7	1.47	16.1
		35	50.8	1.45	17.5
		40	55.2	1.38	18.2
	気中	35	50.0	1.43	17.6

表-7 材齢と養生条件における圧縮強度発現状況

供試体名	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	28日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	48日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	56日強度 (N/mm <sup>2</sup> )
湿潤35N/mm <sup>2</sup> 普通	41.0	51.1	---	55.6
気中35N/mm <sup>2</sup> 普通		42.3	46.6	---
湿潤35N/mm <sup>2</sup> 軽量		50.8	---	57.1
気中35N/mm <sup>2</sup> 軽量		50.0	---	56.7

固定し、ひずみゲージをデータロガーに接続した。載荷速度は 0.5mm/min の変位制御として炭素繊維シートが剥離するまで載荷した。試験結果は、界面剥離破壊エネルギー ( $G_f$ )、付着強度 ( $\tau_u$ )、( $\tau_y$ ) および有効付着長 ( $L_e$ ) により評価し、それぞれ式 (3)、(4)、(5)、(6) により求めた。

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b^2 E_f t} \quad (3)$$

$$\tau_u = \frac{P_{max}}{2bl} \quad (4)$$

$$\tau_y = \frac{\Delta \epsilon_F \cdot E_F \cdot A_F}{S_g \cdot b} \quad (5)$$

$$L_e = \frac{P_{max}}{2\tau_y \cdot b} \quad (6)$$

ここで、 $G_f$ : 界面剥離破壊エネルギー (N/mm)  $P_{max}$ : 最大荷重 (N)、 $b$ : 炭素繊維シートの接着幅 (mm)、 $E_f$ : 炭素繊維シートの引張弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $t$ : 炭素繊維シートの設計厚み (mm)、 $\tau_u$ : 付着強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $l$ : 炭素繊維シートの接着長 (mm)、 $\tau_y$ : 有効付着長を考慮した付着強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\Delta \epsilon_F$ : ひずみ増加区間のひずみ差 ( $\times 10^{-6}$ )、 $A_F$ : 炭素繊維シートの断面積 (mm<sup>2</sup>)、 $S_g$ : ひずみ増加区間の距離 (mm)、 $L_e$ : 有効付着長 (mm)、 $2\tau_y$ :  $2 \times$  有効付着長を考慮した付着強度 (N/mm<sup>2</sup>)、とする。

#### 3.4 炭素繊維シートの付着特性

コンクリートの種類をパラメータとした、各供試体の試



(1) 普通コンクリート供試体の剥離破壊状況

(2) 軽量コンクリート供試体の剥離破壊状況

写真-1 供試体の破壊状況

験結果の一覧を表-8に示す。

(1) 界面剥離破壊エネルギーによる評価

すべての供試体において界面剥離破壊エネルギーは基準<sup>9)</sup>とされる0.5N/mmを上回り、既存の設計法<sup>8)</sup>が適応可能であることが確認された。しかし、普通・軽量コンクリート双方の供試体を比較すると普通コンクリートを用いた供試体は0.95~1.27N/mmの範囲となったが、軽量コンクリートを用いた供試体は、0.51~0.71 N/mmとなり最大値でも普通コンクリートの界面破壊剥離エネルギーを上回ることにはなかった。そこで、破壊状況なども加味し考察を加えた。

(2) 付着強度 ( $\tau_u$ ) ( $\tau_y$ ) による評価

最大荷重を炭素繊維シートの接着面積で除して求める見かけの付着強度 $\tau_u$ においても、すべての供試体で基準<sup>8)</sup>となる0.44N/mm<sup>2</sup>を上回った。界面破壊剥離エネルギーの評価とあわせ、普通コンクリート、軽量コンクリート共に既往の設計法<sup>8)</sup>が適応可能なことが確認されたが、普通コンクリートの付着強度( $\tau_u$ )と比較すると、軽量コンクリートの付着強度( $\tau_u$ )は小さくなる傾向となった。

最大荷重と、炭素繊維シートに発生したひずみ発生範囲とでひずみ発生量の関係からもとめる付着強度( $\tau_y$ )は、付着強度( $\tau_u$ )よりも通常、接着面積の考え方から値が上昇する。いずれの供試体も十分な付着強度を有しており、普通コンクリートを用いた供試体は3.91~4.48N/mm<sup>2</sup>の範囲に分布し、また、軽量コンクリートを用いた供試体は3.63~4.88 N/mm<sup>2</sup>の範囲に分布しており、ほぼ同等のせん断付着強度が得られていることが確認された。

(3) 有効付着長( $L_e$ )による評価

吉澤ら<sup>2)</sup>の研究により中弾性型炭素繊維シートを用いた場合の普通コンクリートでの有効付着長( $L_e$ )は80~150mm程度とされている。本研究においても普通コンクリートを用いた場合、106.7mm~123.6mmの範囲となり妥当性が確認された。しかし、軽量コンクリートを用いた場合は69.3mm~109.0mmの範囲となり普通コンクリートよりもおおむね低下する結果となった。なお、コンクリート強度や養生条件による傾向は見られなかった。これは、軽量コンクリートに用いた人工軽量

表-8 付着特性評価の一覧

供試体	界面剥離破壊エネルギー ( $G_f$ ) (N/mm)	付着強度 ( $\tau_u$ ) (N/mm <sup>2</sup> )	付着強度 ( $\tau_y$ ) (N/mm <sup>2</sup> )	有効付着長 ( $L_e$ ) (mm)
普27-MM-湿潤	1.27	1.83	3.91	106.7
普35-MM-湿潤	0.92	1.55	3.71	123.6
普40-MM-湿潤	0.95	1.58	4.48	110.8
普35-MM-気中	1.15	1.74	3.71	123.6
軽27-MM-湿潤	0.58	1.24	4.88	69.3
軽35-MM-湿潤	0.82	1.47	3.63	109.0
軽40-MM-湿潤	0.56	1.21	4.32	76.9
軽35-MM-気中	0.71	1.37	4.11	90.6

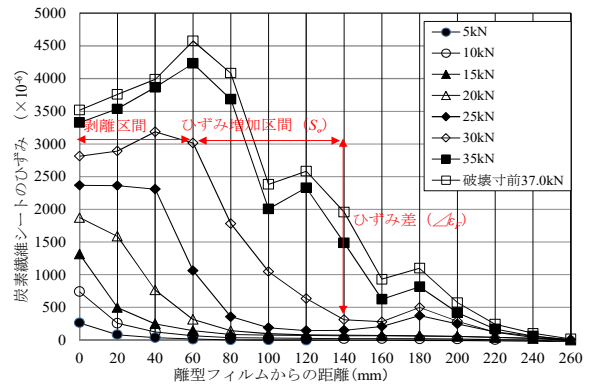


図-3 軽量コンクリート供試体のひずみ分布

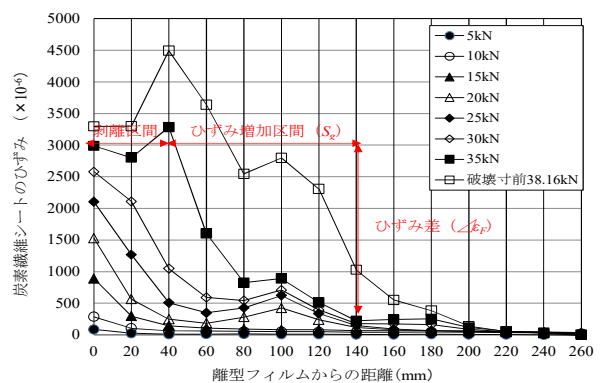


図-4 普通コンクリート供試体のひずみ分布

骨材の素材特性の影響を受け、炭素繊維シートから伝達されるせん断応力に対し、有効付着長が短くなることから確認されたことからひずみ分布による評価も加え考察する。また、軽量コンクリートの静弾性係数は炭素繊維シートの引張弾性係数と比べるとかなり小さいことから、載荷時の双方の伸び量に大きな差が生じたことで有効付

着長の変化が生じた可能性も考えられる。短い領域で荷重を分担するため、おのずと同荷重時の炭素繊維の発生ひずみは大きくなることから剥離しやすくなった。

#### (4) ひずみ分布による評価

軽量および普通コンクリートを用いた場合の炭素繊維シートに発生するひずみの分布状況の一例を図-3、4に示す。軽量コンクリートの場合、図-3の例では、離型フィルムの端部から60mm～140mm、すなわち80mmの範囲で応力分担していることが確認された。一方、普通コンクリートを用いた場合、図-4の例では、40～140mmのひずみ発生分布となり、100mmとなり普通コンクリートを用いた供試体の有効付着長は、軽量コンクリートを用いた供試体より約20%大きいことが確認された。また、同荷重時の炭素繊維シートの最大引張ひずみは軽量コンクリート供試体が大きくなった。

#### (5) 破壊状況

普通コンクリートおよび軽量コンクリートを用いた供試体の剥離破壊状況をそれぞれ写真-1(1)、(2)に示す。すべての供試体は、炭素繊維シートの付着面近傍のコンクリートが炭素繊維シート側に接着したまま剥離破壊で試験を終了した。しかし、普通コンクリートを用いた供試体はコンクリート中のモルタル部分を引き剥がす形状で剥離破壊しているが、軽量コンクリートを用いた供試体は、人工軽量骨材の強度が小さいことから骨材とセメントペースト部分双方が破壊し、骨材の破断を伴いながら剥離破壊していることが確認された。

### 4. まとめ

- (1) 過去に実施されていた軽量コンクリートの配合設計において現在入手不可能な原料を代替し、規定の圧縮強度を確保できる配合設計が可能であることが、コンクリートの圧縮試験および静弾性係数の測定により確認された。
- (2) 首都高速道路で標準的に用いられている、中弾性型炭素繊維シートを普通・軽量コンクリートに接着させ、付着試験にて特性を評価した結果、軽量コンクリートに接着させた場合、界面剥離破壊エネルギーや付着強度は普通コンクリートに接着させた場合よりも低下するが、現在規定されている基準類を上回る結果となり、既往の設計法が適応可能であることが確認された。
- (3) 軽量コンクリートは人工軽量骨材の素材特性の影響を受け、炭素繊維シートから伝達されるせん断応力に対し、短い領域で荷重を分担することが確認された。

また、軽量コンクリートの静弾性係数は炭素繊維シートの引張弾性係数と比べるとかなり小さいがその関係が有効付着長に与える影響については今後の課題とする。

- (4) 軽量コンクリートは普通コンクリートと比較して、短い領域で荷重を分担し、同荷重時の炭素繊維の発生ひずみは大きくなることから剥離しやすくなる。
- (5) 付着試験供試体の破壊状況から、普通コンクリートを用いた供試体は、炭素繊維シート接着部近傍のセメントモルタル部分から剥離破壊したのに対し、軽量コンクリートを用いた供試体は、骨材およびセメントペーストから剥離破壊することが観察された。
- (6) 本研究の範囲内では、コンクリート強度や養生条件により界面剥離破壊エネルギー、付着強度、有効付着長に及ぼす影響はほとんど見られなかった。

### 謝辞

本研究にあたり、日本メサライト工業株式会社殿、株式会社八洋コンサルタント殿より技術的指導をいただいた。ここに謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 山崎淳，池田甫：道路橋補修・補強事例集，「道路橋補修・補強事例集」編集委員会，pp.71-72，2013
- 2) 吉澤弘之，呉智深，袁鴻，金久保利之：連続繊維シートとコンクリートの付着挙動に関する検討，土木学会論文集 No. 662/V-49，pp.105-119，2000
- 3) 中村智，山口浩平，小森篤也，日野伸一：各種接着剤により積層補強された CFRP スtrandシートとコンクリートとの付着特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1345-1350，2002
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書〔基準編〕，2013
- 5) 日本建築学会：コンクリートポンプ工法施工指針・同解説，2009
- 6) 人工軽量骨材協会：人工軽量骨材コンクリート技術資料 No.11 コンクリートの調合，1994.12
- 7) 岡田 清，小柳 洽：人工軽量コンクリートを用いたスラブの曲げ耐力，材料，Vol. 15，No. 157，pp. 716-723，1966
- 8) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー第101号，2000