

CFRP スtrandシート接着による RC はりの曲げ補強効果

Flexural Performance of Externally-Strengthened RC Beams by Bonding CFRP Strand Sheets

川 島 洋 平 森 川 英 典
Yohei Kawashima Hidenori Morikawa

1. はじめに

近年、社会基盤として重要な役割を果たしてきた鉄筋コンクリート（以下、「RC」）構造物の劣化が社会問題化しており、RC 構造物に対する維持管理の重要性が高まっている。RC 構造物が劣化し性能が低下した場合、性能の回復あるいは向上を目的として補修・補強が行われることが一般的である。現在、RC 構造物の補強には様々な工法が存在しているが、近年ではシート状にした炭素繊維やアラミド繊維などのドライシートを施工現場において樹脂で接着することで補強を行う連続繊維シート接着工法が普及している。この工法は、軽量かつ高強度の連続繊維を用いるため施工が容易であり、耐久性に優れていることが利点として挙げられる。その反面、施工時には施工現場において樹脂の含浸と接着を同時に行う必要があるため、浮きや膨れなどの施工不良が生じる可能性もある。このような施工不良を避けるためには、シートの接着前における入念な不陸修正や、シート含浸・接着時における入念な脱泡作業が必要であるなど、作業手順が多く施工品質が作業員の技量に依存してしまう課題がある¹⁾。また、必要な補強量が大きい場合には連続繊維シートを複数回に分けて施工する必要がある、工期が長期化する問題点もある。

このような課題から、工場にて連続繊維ストランド 1 本ずつにあらかじめ樹脂を含浸・硬化させ、これをすだれ状にした連続繊維補強材（以下、「CFRP スtrandシート」）が開発された。CFRP スtrandシートはあらかじめ工場にて樹脂を含浸させているため、施工現場において樹脂を含浸させる必要がない。また、CFRP スtrandシートはすだれ状であるため、接着時にはプライマーと不陸修正パテを兼ねたパテ状の樹脂が連続繊維ストランドの隙間を通して連続繊維ストランドを取り囲み、連続繊維ストランドと一体化するため気泡を巻き込む恐れも少ない利点がある。しかし、従来から用いられてきた炭素繊維のドライシート（以下、「炭素繊維シート」）を使用した連続繊維シート接着工法とはシートの形状や接着方法などが異なるため、補強量が同一の場合であっても補強効果が異なる可能性が予想される。

そこで本研究では、RC はり部材に対して CFRP スtrandシートを接着した場合の曲げ補強効果を評価し、既往の炭素繊維シートを接着した場合の曲げ補強効果と比較し検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 供試体概要

前述のとおり、本研究では CFRP スtrandシートおよび炭素繊維シートをそれぞれ RC はりに接着し、その曲げ補強効果を検討することを目的としている。図-1 に本研究で用いる RC はり供試体の概要を示す。供試体は曲げスパン 1600mm、幅 150mm×高さ 200mm の矩形断面を有する曲げ破壊先行型の RC はりであり、引張側となる供試体下面に CFRP スtrandシートまたは炭素繊維シートを接着した。各シートの接着範囲はいずれの供試体においても同様とし、幅 75mm、長さ 1500mm の範囲としている。

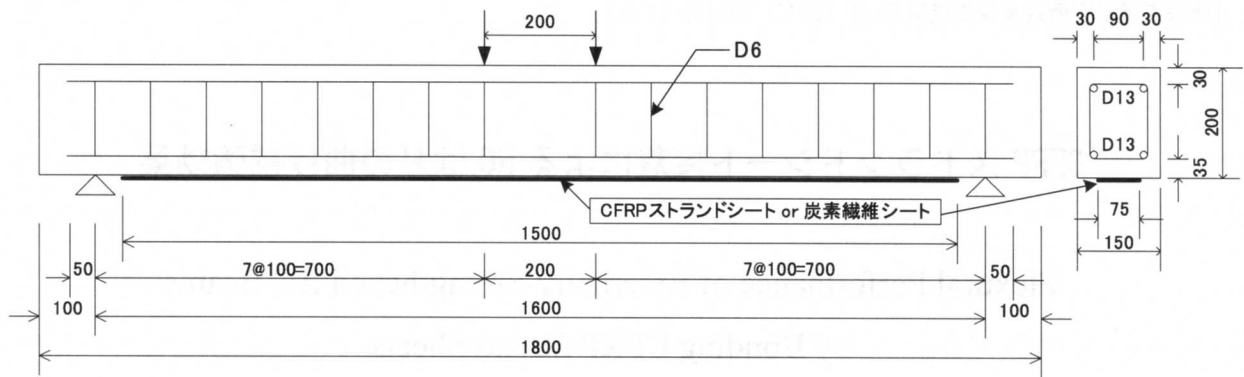


図-1 供試体寸法

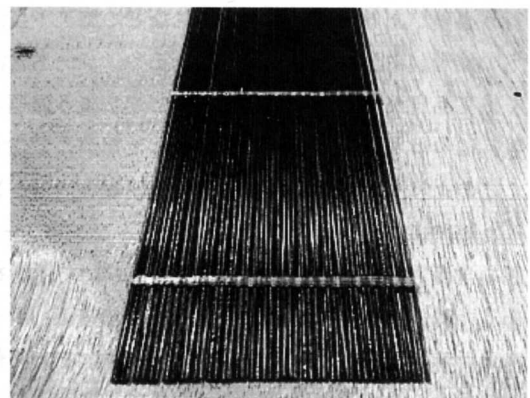
2. 2 使用材料

(1) コンクリート材料および配合

表-1 に RC はり供試体の示方配合を示す。本研究では、後述するように既往の実験結果²⁾を用いて比較を行うことから、強度特性がほぼ同等となった A 配合と B 配合の 2 種類の配合を用いた。2 種類の配合のうち、B 配合は既往の研究において用いられた RC はり供試体の示方配合であり、既往の研究における供試体寸法や連続繊維シートの接着位置等の条件は図-1 と同様である。また、本研究はアルカリシリカ反応（以下、「ASR」）により劣化した RC 構造物に対して CFRP スtrandシートを接着した場合の曲げ補強効果の検討を行うための基礎的検討として行われたため、A 配合には ASR 反応性骨材が用いられている。しかし、打設後 28 日に載荷試験を実施したため、載荷時において曲げ耐荷性能に影響を及ぼすような ASR 膨張は生じていないものと考えられる。また、載荷試験時においては曲げ耐荷性能に影響を及ぼすようなひび割れが発生していないことを確認している。

(2) CFRP スtrandシート

CFRP スtrandシートの外観を写真-1(a)に、引張試験結果を表-2に示す。前述のように、CFRP スtrandシートはあらかじめ工場で炭素繊維ストランドに樹脂を含浸させてすだれ状としたものである。接着には、表-3に示す CFRP スtrandシート専用のエポキシ系接着樹脂を使用する。この専用接着樹脂はパテ状であり、プライマーと不陸修正パテを兼用している。また、接着時には接着面に塗布した専用接着樹脂の上から CFRP スtrandシートを押し付けることで接着する。



(a) CFRP スtrandシート

表-1 RC はり供試体の示方配合

(a) A 配合

W/C (%)	G _{max} (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE 減水剤 (ml/m ³)
			W	C	S1	S2	G1	G2	
63	20	48	181	287	423	431	462	474	575

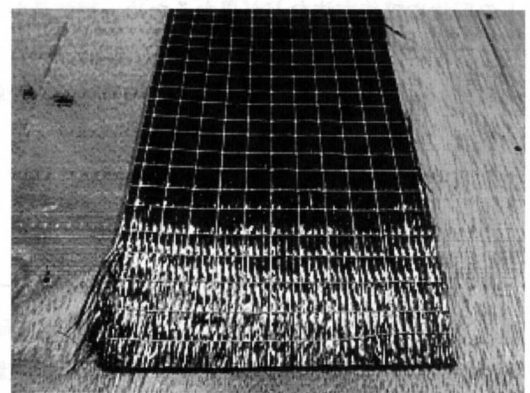
S1：山砂，S2：安山岩砕砂，G1：砕石，G2：安山岩砕石

(b) B 配合*

W/C (%)	G _{max} (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (ml/m ³)	AE 助剤 (ml/m ³)
			W	C	S	G		
55	20	45	174	316	778	985	474	395

S：普通細骨材，G：普通粗骨材

※既往の研究における配合



(b) 炭素繊維シート

写真-1 CFRP スtrandシートおよび炭素繊維シートの外観

表-2 シート引張試験結果

項目	CFRP ストランドシート (高強度型炭素繊維)	炭素繊維シート (高強度型炭素繊維)	
	略称	HT	CF
繊維目付量 (g/m ²)	616	600	300
設計厚さ (mm)	0.333	0.333	0.167
引張強度 (N/mm ²)	4540	4490	4485
引張弾性率 (kN/mm ²)	260	263	253
破断ひずみ (μ)	17280	17180	17600

※接着樹脂により FRP 化させたシートの試験結果

(3) 炭素繊維シート

炭素繊維シートの外観を写真-1 (b) に、引張試験結果を表-2 に示す。炭素繊維シートは炭素繊維をシート状に保形したものであり、施工現場

において樹脂の含浸と接着を行う。そのため、施工品質確保のためには入念な脱泡作業が必要となる。表-4 には接着樹脂およびパテの材料特性を示しているが、本研究ではこれらに加えてプライマーを使用した。なお、本研究で用いた接着樹脂、パテ、プライマーはいずれもエポキシ系のものである。

本研究では、繊維目付量が約 600g/m² の CFRP ストランドシートと炭素繊維シートの 2 種類の連続繊維シートを用いるが、シートによる補強量が曲げ耐荷性能に及ぼす影響を併せて検討する。そのため、炭素繊維シートに関しては既往の研究²⁾において行われた繊維目付量が 300g/m² の炭素繊維シートの結果を用いることで、補強量による違いも検討する。

2. 3 供試体一覧

表-5 に供試体一覧を示す。本研究では表に示す 5 体の RC はり供試体について検討を行った。また、コンクリートの圧縮強度の確認のため、それぞれの配合において φ100mm×200mm の円柱供試体を作製し強度試験を実施した。

2. 4 シート施工方法

各供試体は打設後 2 日間、湿潤養生を行った後に脱型を行い、材齢 14 日の時点で CFRP ストランドシートおよび炭素繊維シートの接着を行った。その後、材齢 28 日で載荷試験を実施した。以下に、それぞれのシートの施工方法を示す。

(1) CFRP ストランドシート

CFRP ストランドシートの施工は、メーカーが指定する方法に準じて行った。まず、シートの接着面である RC はり供試体下面をディスクサンダーにより入念に研磨し、その後、研磨粉の除去を行った。次に、シートの接着面に専用接着樹脂を塗布し (下塗り)、その上から CFRP ストランドシートを押し当てて RC はり供試体と一体化させた。また、樹脂が不足している箇所には樹脂を補充した (上塗り)。その後、離型シートをかぶせ、表面を均一に整えて養生を行った。

(2) 炭素繊維シート

炭素繊維シートの施工は、全国上下水道エポキシ工事業協会³⁾や阪神高速道路公団⁴⁾などが示している方法に準じた。まず、CFRP ストランドシートの施工時と同様にシートの接着面をディスクサンダーにより研磨し、研磨粉の除去を行った。次に、シートの接着箇所にプライマーを均一に塗布した。プライマーの指触乾燥確認後、塗布厚さを 1mm とし不陸修正パテを塗布した。パテの硬化後、接着樹脂をパテ上に塗布し (下塗り)、その上から炭素繊維シートを

表-3 専用接着樹脂の材料特性
(CFRP ストランドシート)

試験項目	試験値
圧縮強さ (N/mm ²)	75
圧縮弾性率 (N/mm ²)	4030
引張せん断強さ (N/mm ²)	24
コンクリート接着強度 (N/mm ²)	4.7

表-4 接着樹脂とパテの材料特性
(炭素繊維シート)

試験項目	接着樹脂	パテ
圧縮強さ (N/mm ²)	92.8	71.9
圧縮弾性率 (N/mm ²)	3200	5180
引張強さ (N/mm ²)	50.9	-
引張弾性率 (N/mm ²)	3650	-

表-5 供試体一覧

配合名	補強材の種類	繊維目付量 (g/m ²)	供試体名
A 配合	無	-	N
	CFRP ストランドシート	616	HT600
	炭素繊維シート	600	CF600
B 配合*	無	-	N'
	炭素繊維シート	300	CF300

※既往の研究結果を用いる

かぶせ,脱泡ローラーにより入念に含浸・接着作業を行った。その後,接着樹脂の上塗りを行い,離型シートにより表面を均一に整えて養生を行った。

各シートの接着界面の構造を図-2に示す。CFRPストランドシートではプライマーとパテを兼用した専用樹脂を用いているため,プライマーおよびパテを用いていないことによる曲げ補強効果への影響が懸念される。プライマーは,塗布することによりコンクリート表層部を強化するとともに,コンクリートとシートとの界面における接着強度を向上させる役割がある。また,パテは接着面の不陸を修正するために用いられるが,既往の研究⁵⁾では,パテの塗布により応力分散性能が発揮されることで付着応力が増大し,付着性能が向上すると報告されている。

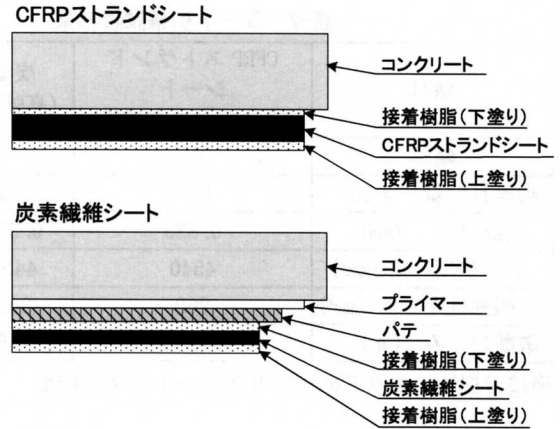


図-2 各シートの接着界面の構造

8. 5 載荷試験方法および測定項目

供試体への載荷は,図-1に示すように等曲げ区間200mmの中央2点載荷により行った。測定項目は,荷重,中央点変位,鉄筋ひずみ,シートひずみ,ひび割れ発生状況(各荷重段階におけるひび割れのスケッチ)である。図-3にA配合の供試体におけるひずみゲージ貼付位置を,図-4にB配合の供試体におけるひずみゲージ貼付位置をそれぞれ示す。

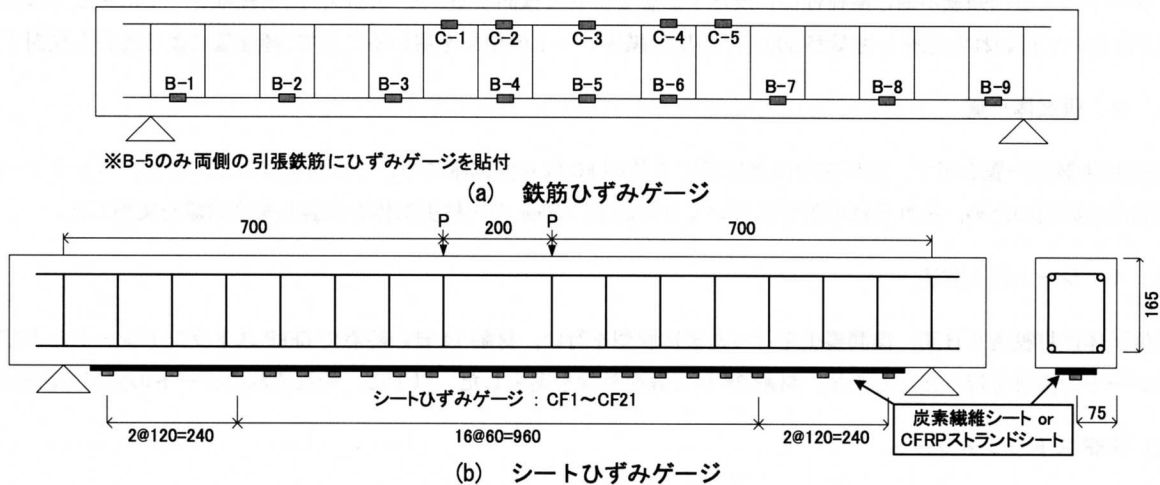


図-3 ひずみゲージの貼付位置 (N, CF600, HT600 供試体)

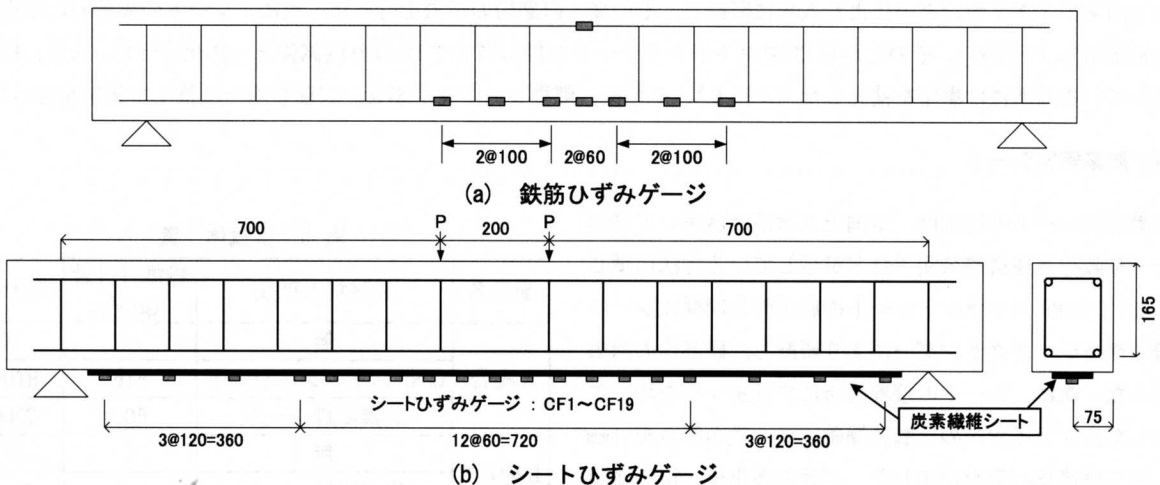


図-4 ひずみゲージの貼付位置 (N', CF300 供試体)

3. CFRP スtrandシートおよび炭素繊維シートの接着による RC はりの曲げ補強効果

3. 1 強度試験結果

表-6 に各配合における円柱供試体の強度試験結果を示す。配合によって若干の違いはあるものの、コンクリート強度は概ね同様であることが確認できる。

3. 2 載荷試験結果

表-7 に載荷試験結果を、図-5 に荷重-中央点変位関係を示す。以下、各々の供試体に対して考察を行う。

(1) 配合による耐荷性状の違い

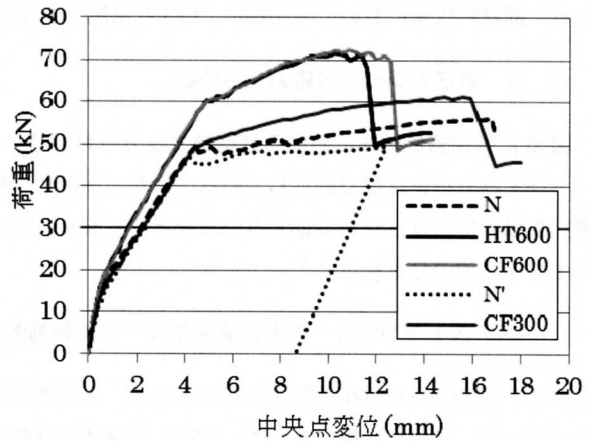
各配合の無補強供試体である N 供試体と N' 供試体を比較すると、N' 供試体は部材降伏荷重、最大荷重が若干低い傾向がみられるものの、概ね同様の耐荷性状を示した。これより、補強供試体においても配合による耐荷性状の違いは小さいと推察できる。

(2) CFRP スtrandシートと炭素繊維シートの補強効果の違い

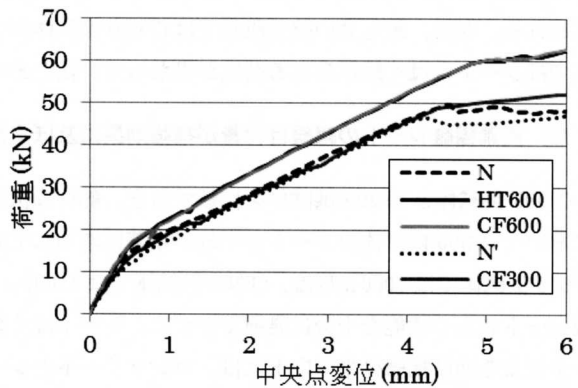
HT600 供試体と CF600 供試体を比較すると、部材降伏荷重および最大荷重は同程度であり、シートはく離直前までは両者の耐荷性状に明確な違いは確認できなかった。しかし、CFRP スtrandシートを用いた HT600 供試体では、比較的早期にシートはく離が生じており、比較的脆性的な破壊挙動を示した。CFRP スtrandシートによる曲げ補強効果を検討した既往の研究¹⁾においては、CFRP スtrandシートにより補強した供試体が炭素繊維シートを用いた供試体よりも最大荷重が大きくなった結果が得られているが、その実験では炭素繊維シートの施工時に不陸修正パテを塗布していない。そのため、パテの有無が曲げ補強効果に影響を及ぼした可能性が予想される。

表-6 強度試験結果

供試体名	配合名	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
N	A 配合	38.6	25.4	3.07
HT600				
CF600				
N'	B 配合	37.9	31.2	3.46
CF300				



(a) 全体図



(b) 荷重初期段階時

図-5 荷重-中央点変位関係

表-7 載荷試験結果

供試体名	部材降伏時				最大荷重時			
	荷重 (kN)	変位 (mm)	剛性 (kN/mm)	耐力比	荷重 (kN)	変位 (mm)	剛性 (kN/mm)	耐力比
N	49.7	4.53	11.0	-	56.1	16.64	0.5	-
HT600	60.3	4.94	12.2	1.21	71.7	10.26	2.2	1.28
CF600	60.2	4.94	12.2	1.21	72.3	10.83	2.1	1.29
N'	46.2	4.12	11.2	-	49.5	12.41	0.4	-
CF300	48.3	4.32	11.2	1.05	61.3	14.85	1.2	1.24

※1: 部材降伏時=部材剛性が大きく変化した点

※2: 部材降伏時の剛性=部材降伏荷重/部材降伏時の変位

最大荷重時の剛性= (最大荷重-部材降伏荷重) / (最大荷重時の変位-部材降伏時の変位)

※3: 耐力比= (各補強供試体) / (各配合の無補強供試体)

(3) 炭素繊維シートの繊維目付量が補強効果に及ぼす影響

CF600 供試体と CF300 供試体を比較すると、CF300 供試体の最大荷重時における耐力比が 1.24 倍であるのに対し、CF600 供試体の最大荷重時における耐力比は 1.29 倍となり、顕著な耐力比の増加はみられなかった。荷重-中央点変位関係を確認すると、CF300 供試体では中央点変位が 16mm 程度と比較的大きい段階までシートはく離が生じず、靱性的な挙動を示している。それに対し、CF600 では中央点変位が 12mm 程度と、比較的早期にシートはく離が生じた。

各段階における部材剛性に着目すると、部材降伏前においては CF300 供試体と無補強供試体である N' 供試体の部材剛性は同様であり、補強の有無に関わらず部材剛性に变化はみられない結果となった。しかし、CF600 供試体では無補強供試体 N と比較して剛性の増加が明確に認められた。これは、繊維目付量によってシートの引張剛性も異なるため、比較的引張剛性の大きな繊維目付量 600g/m² の炭素繊維シートを接着した結果、部材剛性が顕著に増加したためと考えられる。部材降伏後においても同様に、CF300 供試体と比較して CF600 供試体の部材剛性が大きい結果となっている。

3. 3 鉄筋とシートの応力分担性状

図-6 に各補強供試体における鉄筋ひずみ分布およびシートひずみ分布を示す。図中では鉄筋ひずみ分布を実線で、シートひずみ分布を点線で表示している。また、凡例の「降伏」は部材降伏時を示している。なお、図ではシートのはく離発生以前におけるシートひずみ分布を示しており、最も高い荷重段階の鉄筋・シートひずみ分布ではシートにはく離が生じる直前の分布を示した。

(1) CFRP スtrandシートと炭素繊維シートの補強効果の違い

HT600 供試体と CF600 供試体を比較すると、各荷重段階において明確な違いは認められず、ほぼ同様のひずみ分布となっている。部材降伏後において、CF600 供試体の鉄筋ひずみ分布が供試体中央部において突出した形状となっているのに対し、HT600 供試体では台形の形状となっているが、これは供試体に生じたひび割れの位置が異なるためであると思われる。なお、最も高い荷重段階では CF600 供試体のシートひずみが若干高いが、これは CF600 供試体と HT600 供試体ではシートにはく離が生じる荷重が異なっていたためである。

(2) 炭素繊維シートの繊維目付量が補強効果に及ぼす影響

CF600 供試体と CF300 供試体を比較すると、部材降伏以前の挙動については両供試体とも同様であるが、部材降伏後において CF300 供試体のシートひずみが顕著に増加している。また、各供試体の最大荷重時におけるシートひずみは、CF600 供試体では 7000 μ 程度、CF300 供試体では 11000 μ 程度であった。これらを踏まえると、CF600 供試体では炭素繊維シートのもつ性能を十分に発揮できずに、シートはく離により比較的早期に終局したものと考えられる。炭素繊維シートによる曲げ補強効果の向上には、コンクリートとシートの付着性能を向上させることが重要であると考えられる。

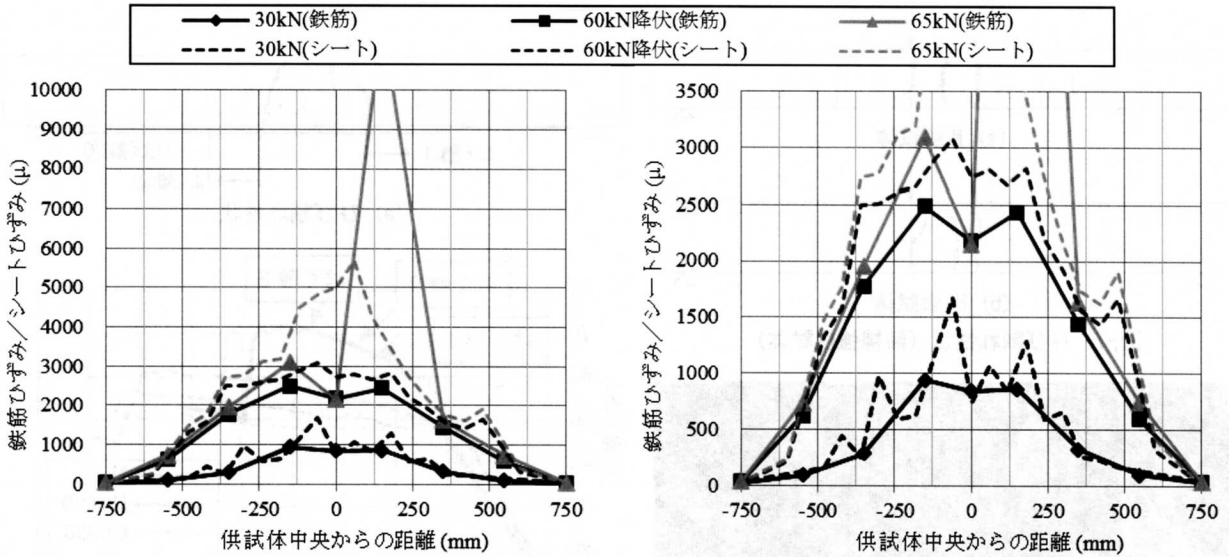
3. 4 各供試体におけるシートはく離過程

本項では、各々の補強供試体におけるシートはく離過程を検討することにより、曲げ補強効果の評価を行う。

(1) HT600 供試体

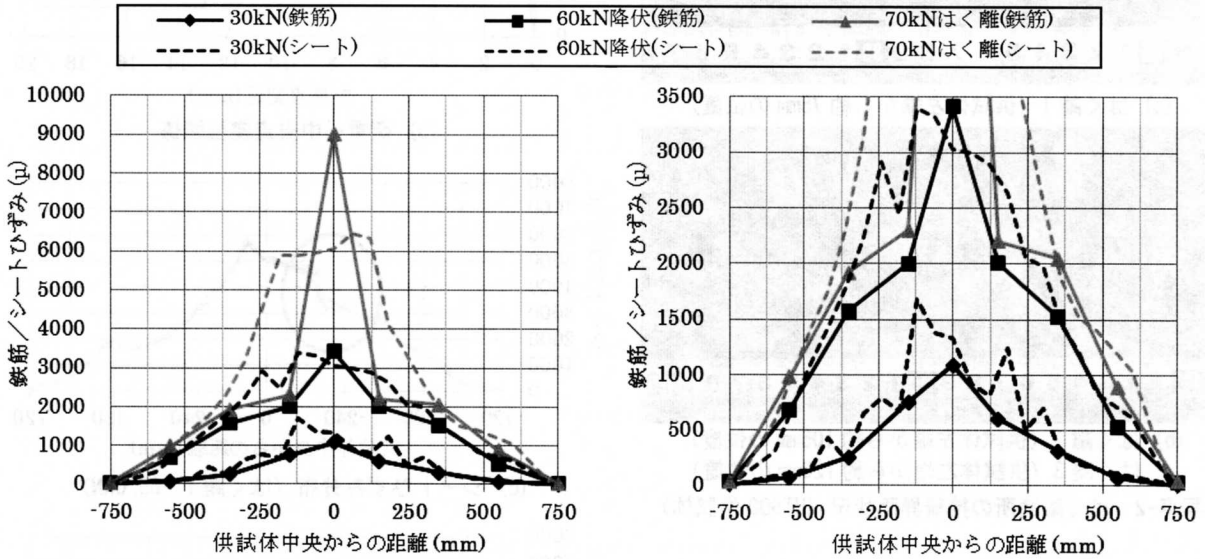
図-7 に無補強供試体のひび割れ性状を、図-8 に HT600 供試体のシートはく離過程を、写真-2 にシートはく離後におけるシートの接着界面の状況を示す。ひび割れ性状では、供試体の破壊に支配的であったひび割れを太線で示している。

N 供試体と N' 供試体を比較すると、ひび割れの位置や間隔に明確な違いは見受けられず、概ね同様のひび割れ性状となっている。また、補強供試体である HT600 供試体と比較すると、N 供試体と比較して HT600 供試体では全体的にひび割れが複雑化しており、シート補強による曲げひび割れの分散性の向上が認められる。ひび割れの角度についても、N 供試体では引張側である供試体下面とほぼ垂直なひび割れが多く見られるが、HT600 供試体では全体的に載荷点に向かうようにひび割れ角度が変化しており、供試体内部の応力状態の変化が認められる。



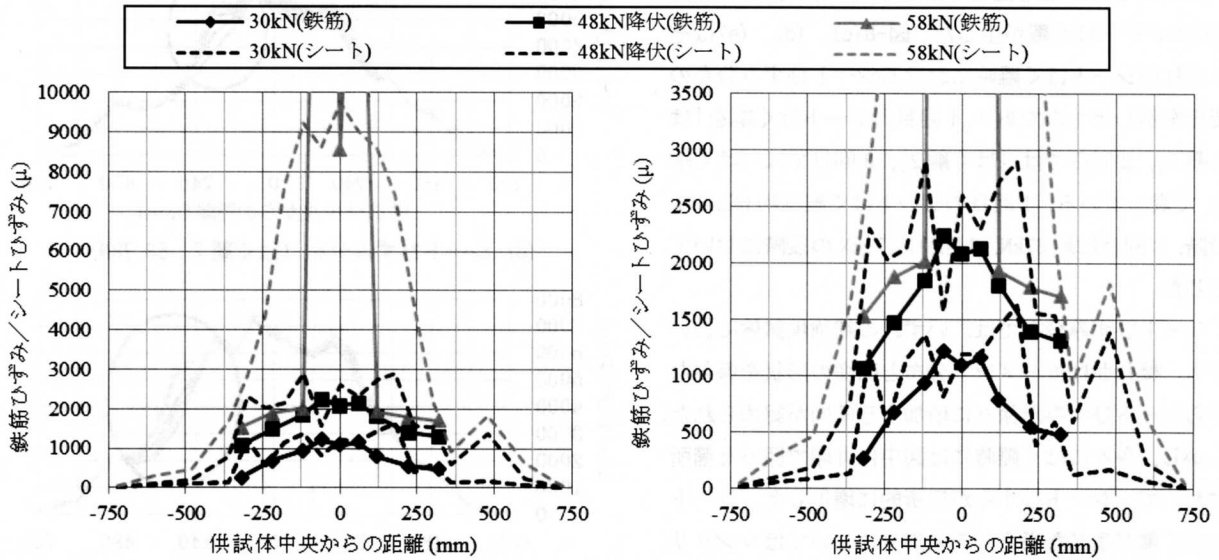
(a) HT600 供試体 (全体図)

(b) HT600 供試体 (拡大図)



(c) CF600 供試体 (全体図)

(d) CF600 供試体 (拡大図)



(e) CF300 供試体 (全体図)

(d) CF300 供試体 (拡大図)

図-6 鉄筋ひずみ分布とシートひずみ分布

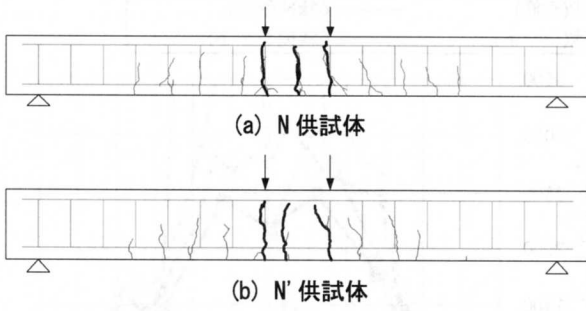


図-7 ひび割れ性状 (無補強供試体)



写真-2 はく離箇所の接着界面状況 (HT600 供試体)

HT600 供試体では、図-8 に示すように部材降伏以降、3 回のシートはく離が生じた。図-8 (c), (d), (e) はそれぞれのシートはく離時におけるシートひずみ分布の変化を示したものであり、1 回目のシートはく離を「はく離 1」、2 回目では「はく離 2」、3 回目では「はく離 3」で表している。1 回目のシートはく離は約 65kN の段階、2 回目は約 67kN、3 回目は 71kN の段階において生じた。

シートひずみ分布では、いずれの補強供試体においても、概ね曲げモーメント分布と同様の形状を保ちながらシートひずみが徐々に増加する傾向が認められた。しかし、各々のはく離時には図中に丸印で囲った箇所において、シートひずみが局所的に増加した。シートにはく離が生じた場合、その部分においてはコンクリートへの応力の伝達が不可能となるため、シートひずみは局所的に増加すると考えられる。また、それらの

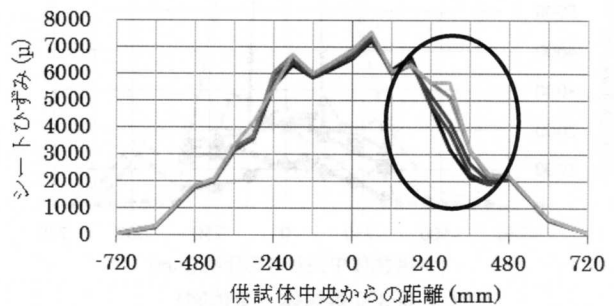
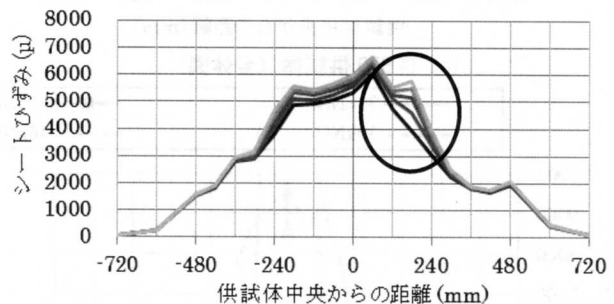
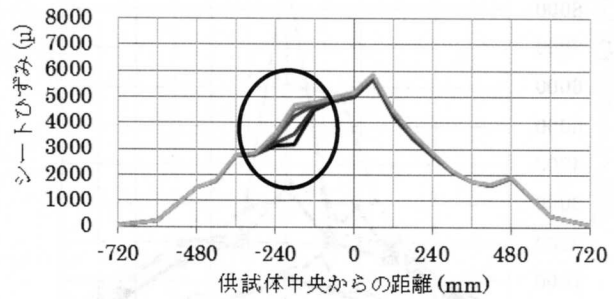
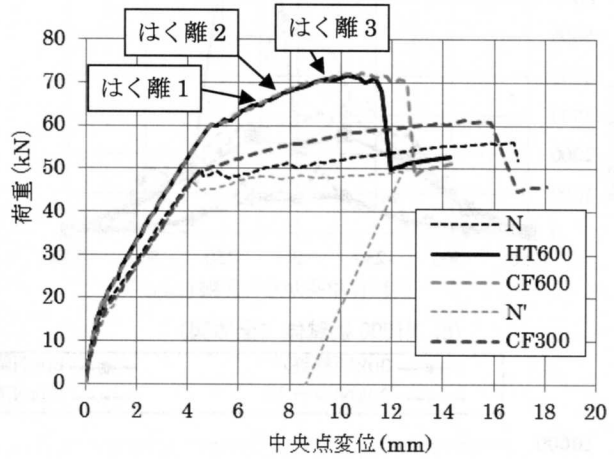
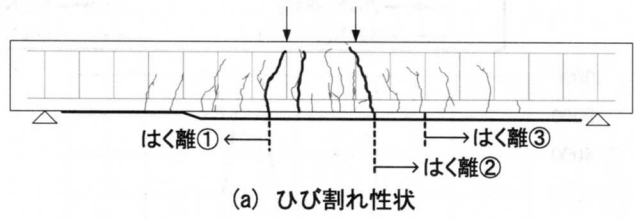


図-8 HT600 供試体のシートはく離過程

