

論文 FRP スtrandシート の材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究

小林 朗^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・高橋 義裕^{*3}・立石 晶洋^{*4}

要旨: 連続繊維シート接着工法の施工性の改善やFRP プレート接着工法の補強性能の改善を目的として連続繊維ストランド1本ずつに樹脂を含浸・硬化させたFRP スtrandシートを新たに開発した。このFRP スtrandシートの引張試験, 継手試験, 付着強度試験を行ない材料特性を評価した。さらにFRP スtrandシートで補強したRC はりの曲げ載荷試験を行いその補強効果について検討した。FRP スtrandシートを接着することでRC はりの曲げ剛性および曲げ耐力は増加し, 同種の連続繊維を用いた連続繊維シートに比べ剥離荷重が高くなった。FRP スtrandシートの引張剛性の違いによって, 破壊モードに違いが見られた。

キーワード: FRP スtrandシート, 連続繊維シート, 継手強度, 界面剥離破壊エネルギー, 曲げ補強

1. はじめに

既設コンクリート構造物の曲げ補強工法として連続繊維シート接着工法やCFRP プレート接着工法が普及している。連続繊維シート接着工法は, 連続繊維をシート状に保形したドライシートを施工現場で躯体に接着すると同時に連続繊維に樹脂を含浸してFRP 化する工法である。浮きや膨れのないFRP を形成するためには, 貼付け前に入念に不陸修正を行った後にシートを貼付け, さらに含浸・脱泡作業を入念に行う必要が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するといった課題がある¹⁾。また, 繊維目付け量 600g/m² 程度の高目付けシートでは, 含浸工程を3度に分けたり, 事前含浸が必要になるなど作業性に問題があった。

CFRP プレート接着工法は, 工場生産された板状のCFRP を, 施工現場でパテ状の接着剤で躯体に接着する工法であり, 現場含浸工程がないので施工性は良好である。一方, 50mm 程度の幅の狭いプレートを部分的に接着するため, 付着面積が小さく低い荷重で剥離するため補強部材の耐荷力の向上という面では連続繊維シート接着工法と同等の補強効果が得られず, またラップ継手で母材強度を確保できないなどの問題がある^{2,3)}。

筆者らは, 上述のような問題を解決するために工場で連続繊維ストランド1本ずつに樹脂を含浸して硬化させたFRP 線材をすだれ状にシート化した連続繊維補強材(以下, FRP スtrandシート)を開発した(写真-1)⁴⁾。本研究では, このFRP スtrandシートの引張強度, 継手強度, 付着強度などの材料特性を評価するとともに, 各種FRP スtrandシートで補強したRC はりの曲げ載荷試験を行い, その補強効果を実験的に検討した。

2. FRP スtrandシート の材料特性

2.1 FRP スtrandシート の構造

炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維は, 直径 5~10 μ m の非常に細いフィラメントを 3000~24000 本程度収束させたストランドとして製造され流通している。FRP スtrandシートは, この連続繊維ストランド1本ずつにエポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂を含浸させた後, 電気炉内で加熱して硬化させた直径 0.5~2mm 程度のロッド状のFRP スtrandを製作し, これを横糸ですだれのように連結してシート状に保形したものである(写真-1)。FRP スtrandは含浸・硬化した樹脂がフィラメント間の結合材として機能したFRP となっているので, 連続繊維シートのように施工現場でフィラメント間に樹脂を含浸させる必要がない。

コンクリート構造物の補強では, コンクリート表面にペースト状のエポキシ樹脂を塗布した後, その上からFRP スtrandシートを押し付けて接着する。このとき, エポキシ樹脂はFRP スtrandの隙間を通してFRP スtrandを取り囲んで硬化して板状に躯体表面に一体化される。FRP スtrandの隙間から空気が容易に排出



写真-1 CFRP スtrandシート

*1 日鉄コンポジット(株) 技術部担当部長 工修(正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻准教授 博士(工学)(正会員)

*3 北海学園大学 工学部社会環境工学科教授 工博(正会員)

*4 日鉄コンポジット(株) 技術部 工修(正会員)

されるので、連続繊維シートやFRP板を貼付ける場合に比べて接着界面に気泡を巻き込む恐れが少ない。

2.2 FRP スtrandシートの引張強度および継手強度

表-1に示す4種類のFRP スtrandシートを試作した。高強度型炭素繊維は最も引張強度が高く耐震補強など終局限界状態での耐荷力向上に適している。高弾性型炭素繊維はヤング係数が高く部材の曲げ剛性の向上や既設鉄筋の応力低減に有効であり、特にMBタイプは繊維目付量が大きく少ないシート層数で剛性の向上に効果が高い。アラミド繊維は絶縁体であり鉄道施設などで利用されている。連続繊維シートと同様に接着樹脂で板状に固めた試験片を作製して連続繊維シートの試験法に準拠して引張試験（土木学会規準 JSCE-E541-2000）および継手試験（同 JSCE-E-542-2000）を行った。試験体数は各5本とし、継手試験では継手長を200mmとした。試験結果を表-1、接着樹脂の材料特性を表-2に示す。ここでFRP スtrandシートの力学特性は、連続繊維シートと同様に繊維の目付量と比重から樹脂を含まない連続繊維のみの断面積から算定した。

4種類のFRP スtrandの応力-ひずみ関係は、原点から終局時までほぼ直線で降伏現象を示さず脆性的に破断した。現在市販されている同種の連続繊維を使用した連続繊維シートの保証引張強度は、高強度型炭素繊維シート:3400N/mm²、高弾性型炭素繊維シート:1900N/mm²、アラミド繊維シート:2060N/mm²でありFRP スtrandシートの引張強度の平均値、最小値とも連続繊維シートの保証引張強度を上回る結果となった。FRP スtrandシートは、従来の同種の連続繊維を用いた連続繊維シートと同程度の引張強度を有すると考えられるが、材料強度の特性値を定めるためにはさらにデータ数を増やして統計的検討を行う必要がある。

継手試験では、CFRP スtrandが破断する母材破壊

により終局に至り、高強度型炭素繊維の目付け量600g/m²、高弾性型炭素繊維の目付け量600g/m²、900g/m²といった高目付けシートでも、重ね長を200mmとすれば継手部の剥離破壊を防止できることがわかった。

2.3 FRP スtrandシートの付着強度

連続繊維シートとコンクリートとの付着試験方法（案）（JSCE-E 543-2000）に準拠し、図-1に示す供試体を用いて炭素繊維シートおよびCFRP スtrandシートとコンクリートの付着試験を行い、付着性状の相互比較を行った。コンクリートブロックは、側面にノッチを設ける一体型とし、ノッチの上下面に離型フィルムを挿入した。また、コンクリートと全ネジ鋼棒の付着割裂破壊を防止するために、らせん鉄筋を挿入した。CFRPの接着幅は50mmとし、コンクリートブロックの端部まで貼付け、付着長は280mmとした。コンクリートの圧縮強度は、材齢75日で38.9N/mm²であった。載荷は、変位制御式の100kN 万能試験機で行なった。炭素繊維シートおよびCFRP スtrandシート共に繊維目付け量600g/m²の高強度型炭素繊維を使用した。炭素繊維シートはプライマー（表-3）と不陸修正パテを塗布し含浸

表-2 FRP スtrandシート用接着樹脂の材料特性

試験項目	試験値	試験方法
圧縮強さ (N/mm ²)	63.5	JIS K 7208
圧縮弾性係数 (N/mm ²)	3,380	JIS K 7208
引張せん断強さ (N/mm ²)	24.9	JIS K 6850
コンクリート 接着強度 (N/mm ²)	2.5 (母材破壊)	JSCE-E 545-2000

表-3 プライマーの材料特性

試験項目	試験値	試験方法
混合物粘度 (mPa·s)	490.0	JIS K 6833
コンクリート 接着強度 (N/mm ²)	2.3 (母材破壊)	JSCE-E 545-2000

表-1 FRP スtrandシートの材料特性

記号 ^{*1}	HT	MA	MB	AK
連続繊維の種類	高強度型 炭素繊維	高弾性型 炭素繊維	高弾性型 炭素繊維	単独重合型 アラミド繊維
比重 g/cm ³	1.8	2.12	2.12	1.45
繊維目付け量 g/m ²	610	596	854	773
厚さ mm	0.339	0.281	0.403	0.533
引張強度(平均) N/mm ²	4,340	2,520	2,400	2,750
引張強度(最小) N/mm ²	4,009	2,269	2,035	2,683
ヤング係数 kN/mm ²	253	676	683	121
単位幅引張耐力 N/mm	1471	709	967	1466
単位幅引張剛性 kN/mm	85.7	190.1	275.3	64.5
継手強度 N/mm ²	4,160	2,410	1,980	-
破壊モード (L [*] =200mm)	母材	母材	母材	-

^{*1} シートの略称としてシート種類ごとに記号を付した。 ^{*2} L: 重ね継手長

接着樹脂で接着するのに対し、CFRP スtrandシートはプライマーを塗布しペースト状エポキシ樹脂で接着した。ひずみゲージを離型フィルムの端部から20mmピッチで貼付してひずみ分布を計測した。

すべての試験体が片側の試験面のみ剥離して破壊した。最大荷重および界面剥離破壊エネルギーを表-4に示す。界面剥離破壊エネルギー G_f (N/mm)は、JSCE-E 543-2000 に準じて式(1)を用いて算定した。

$$G_f = \frac{P_{\max}^2}{8b^2 \cdot E_f \cdot t} \quad (1)$$

ここに $P_{\max}$ は最大荷重(N)、 b 、 E_f および t はそれぞれシートの幅(mm)、ヤング係数(N/mm²)、厚さ(mm)である。炭素繊維シートとCFRP スtrandシートを比較するとCFRP スtrandシートの界面剥離破壊エネルギーの方が約10%高い結果となった。

図-2に剥離前の炭素繊維シートとCFRP スtrandシートのひずみ分布を示す。それぞれ比較すると、接着樹脂の構成およびCFRP 補強材の種類によってひずみ分布に差は見られなかった。CFRP スtrandシートも炭素繊維シートと同様の付着性状であると考えられる。

3. FRP スtrandシートによる RC 梁の曲げ補強効果

3.1 実験概要

FRP スtrandシートの曲げ補強効果に関する基礎的検討を行うために、土木構造物で一般的な引張鉄筋比が

約1%で曲げ破壊先行型となるようにせん断補強筋を配置したRCはり供試体(図-3)を準備し、4種類のFRP スtrandシート(表-1)および炭素繊維シートで補強して曲げ載荷試験を行った。RC はりは、早強ポルトランドセメントを用い目標圧縮強度を40N/mm²として2体ずつ打設し、打設後約1週間でFRP シートの接着補強を行い、さらに1週間以上養生した。載荷試験時の各供試体のコンクリートの圧縮強度を表-5に示す。曲げ載荷試験は、2点中央載荷とし破壊まで単調に加力した。

はり下面の長さ1500mmの範囲にFRP スtrandシートおよび炭素繊維シートを200mm 幅で貼付けた。炭素繊維シートは繊維目付け量600g/m²の高強度型を用い、その引張強度は4190N/mm²、ヤング係数は251kN/mm²であった。供試体のパラメータは、補強材の種類、積層数、プライマーの有無、重ね継手の有無であり、供試体の一覧を表-5に示す。各補強材の貼付け層数は、1層または2層とした。重ね継手を設ける供試体は、はり中央の等曲げ区間で2枚のFRP スtrandシートを200mmの長さで重ねて接着し接続した。

FRP スtrandシートは、はり下面のコンクリート表面をディスクサンダーでケレンした後(プライマー有の場合はプライマーを塗布し、プライマー硬化後)にペースト状のエポキシ樹脂を塗布し、FRP スtrandシートを押し付けて接着した。FRP スtrandシートを2層接着する場合は、1層目の貼付け終了後、接着樹脂の硬化を待たずに直ちに2層目の接着樹脂を塗布してFRP ス

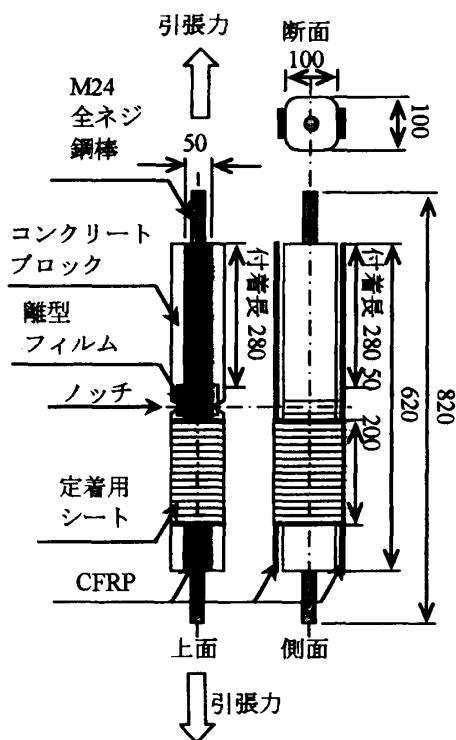


図-1 付着試験体

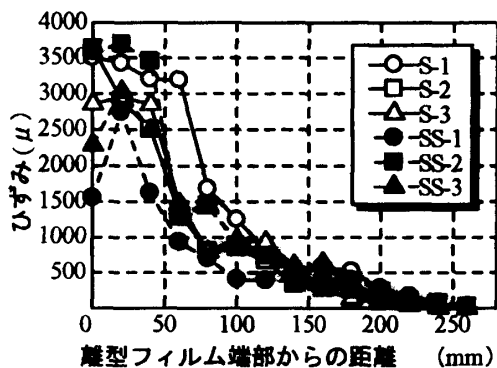


図-2 CFRP のひずみ分布 (P=30kN)

表-4 付着強度試験の結果

シート種類	No.	$P_{\max}$		G_f	
		試験値 (kN)	平均 (kN)	試験値 (N/mm)	平均 (N/mm)
炭素繊維シート	S-1	33.4	37.0	0.68	0.84
	S-2	38.4		0.90	
	S-3	39.0		0.93	
CFRP スtrandシート	SS-1	39.7	39.1	0.97	0.94
	SS-2	40.6		1.01	
	SS-3	36.9		0.84	

$P_{\max}$: 最大荷重, G_f : 界面剥離破壊エネルギー

表-5 FRP シート補強はり供試体一覧

No	記号	シート種類	層数	プライマー	継手	S_f (kN)	F_f (kN)	F_c (N/mm ²)	P_{yex} (kN)	P_{yca} (kN)	P_{yex}/P_{yca}	P_{max} (kN)
N0	N	-	-	-	-			39.5	146.9	145.0	1.01	182.4
A01	HT1PN	HT	1	有	無	17,140	294	36.4	195.6	196.0	1.00	282.4
A02	HT1NN	HT	1	無	無	17,140	294	34.5	194.5	196.0	0.99	278.5
A03	HT1PL	HT	1	有	有	17,140	294	34.7	195.5	196.0	1.00	286.4
A04	MA1NN	MA	1	無	無	38,020	142	35.9	234.7	258.7	0.91	278.5
A05	MB1NN	MB	1	無	無	55,060	193	44.0	—	311.4	—	253.0
A06	HT2NN	HT	2	無	無	34,280	588	38.7	240.8	255.8	0.94	319.7
A07	HT2NL	HT	2	無	有	34,280	588	37.7	224.0	255.8	0.87	304.0
A08	MA2NL	MA	2	無	有	76,040	284	40.2	—	385.4	—	284.5
A09	AK1NN	AK	1	無	無	12,900	293	40.3	184.8	184.3	1.00	273.6
CF1	CF1PN	CF	1	有	無	16,717	279	46.6	161.2	194.5	0.83	255.0

S_f : シート引張剛性, F_f : シート引張耐力, F_c : コンクリート強度, P_{yex} : 降伏荷重 (実験), P_{yca} : 降伏荷重 (計算), P_{max} : 最大荷重
供試体記号: HT1PN

HT (シート種類・表-1 CF: 炭素繊維シート) 1 (積層数) P (プライマー有:P, 無し:N) N (継手無:N, 有:L)

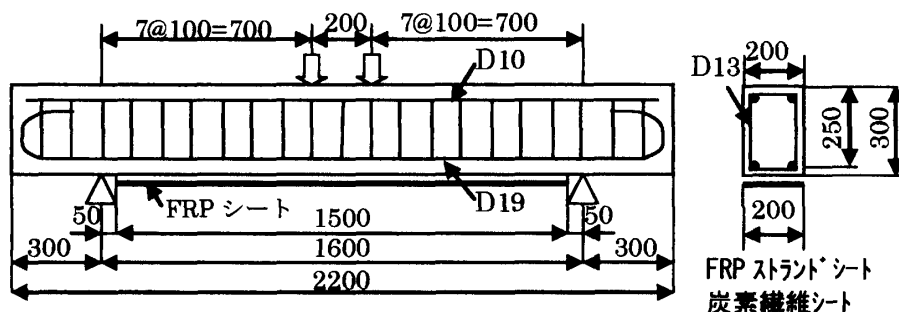


図-3 実験供試体

表-6 鉄筋の強度(N/mm²)

D13 (SD345)	降伏強度	387
	引張強度	622
D19 (SD345)	降伏強度	396
	引張強度	570

トランドシートを続けて貼付けた。炭素繊維シート補強は、ディスクサンダーによるケレン後、プライマーを塗布し硬化後、含浸接着樹脂の下塗り、炭素繊維シートの貼付け、含浸脱泡、含浸接着樹脂の上塗りの順で行った。

3.2 実験結果と考察

(1) 破壊状況および破壊荷重

無補強供試体Nは、主鉄筋降伏後に曲げ圧縮破壊した。FRPシートで補強した供試体は、MA1NNを除いてFRPシートが剥離した時点で荷重が無補強供試体Nの降伏荷重程度まで急落し、その後、変形が大きくなり圧縮縁のコンクリートが破壊した。補強した供試体の最大荷重は、いずれも無補強供試体の最大荷重を大きく上回った。写真-2に各供試体の破壊状況を示す。炭素繊維シートで補強したCF1PNはコンクリート表層のモルタルがシートにごく薄く付着して剥離した。同じ繊維目付け量600g/m²の高強度型CFRPストランドシートで補強したHT1PNは載荷点直下で主鉄筋下のかぶりコンクリートがシートに付着した状態で剥離し、支持点側に剥離が進行した。繊維目付け量900g/m²の高弾性型CFRPストランドシートで補強したMB1NNと繊維目付け量600g/m²の高強度型CFRPストランドシート2層で補強したHT2NNおよびHT2NLは支点近傍のシート端部から主鉄筋にそってかぶりコンクリートがシートに付着した状

態で破壊して剥離した。繊維目付け量600g/m²の高弾性型CFRPストランドシート1層補強のMA1NNは主鉄筋降伏後、載荷点直下でCFRPストランドが破断した(写真-2)。CFRPストランドシートがRCはりに完全合成されているとして平面保持を仮定してコンクリートの引張強度を無視して表-1に示すFRPストランドシートの引張強度から算定したCFRP破断時のはりの曲げ耐力は246.1kNであり、実験値278.5kN(278.5/246.1=1.13)は、これを1割程度上回っていた。耐力の計算では鉄筋の降伏強度を用いておりひずみ硬化を考慮していないことなどがこの原因として考えられる。

繊維目付け量600g/m²として引張剛性および引張耐力がほぼ等しい炭素繊維シートで補強したCF1PNとCFRPストランドシートで補強したHT1PN, HT1NN, HT1PLの最大荷重を比較するとCF1PNが255kN, HT1PN, HT1NN, HT1PLが約280kNとCFRPストランドシートで補強した供試体の方が最大荷重が大きくなった。この原因としては、CFRPストランドシートの方が表-4に示すように界面剥離破壊エネルギーが10%程度大きいこと、前述のように破壊状況が表層モルタル内での剥離とかぶりコンクリート内での破壊と異なることなどが考えられる。

HT1PN, HT1NN, HT1PLの3体を比較するとプライ

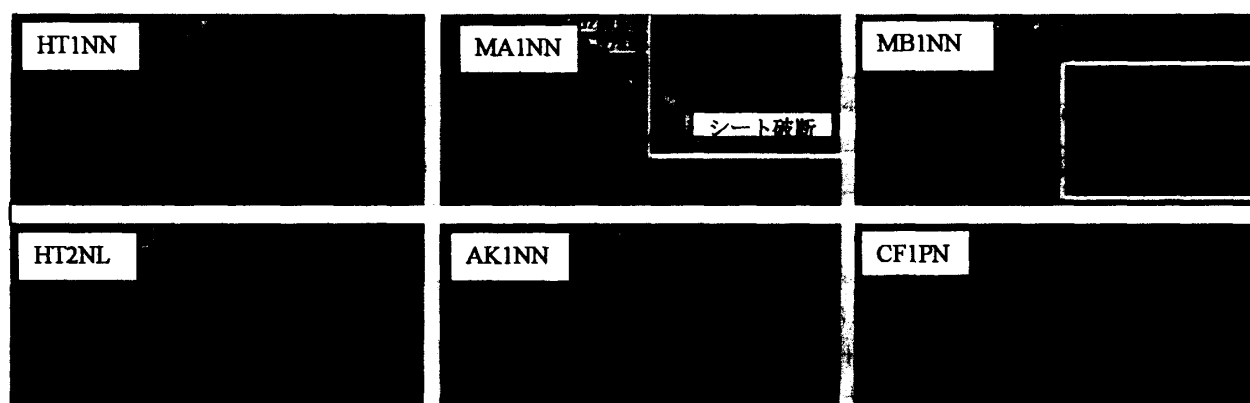


写真-2 はり供試体の破壊状況

マーの有無、継手の有無にかかわらずほぼ同じ最大荷重を示した。同じCFRP スtrandシートを2層積層した場合HT2NNが319.7kN、HT2PLが304.0kNと1層補強より高い最大荷重を示したがせん断スパン内でかぶりコンクリートがシート端部から主鉄筋にそって破壊しFRP スtrandシートが剥離したため荷重増加は少なかった。継手ありの供試体では、終局まで継手の剥離は生じなかった。プライマーの有無、継手の有無ははりの曲げ耐力に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

高弾性CFRP スtrandシートで補強した場合MA1NNは278.5kNで炭素繊維が破断し、繊維目付け量が900g/m²と多いMB1NNはせん断スパンでかぶりコンクリートが主鉄筋に沿って破壊したため最大荷重は253.0kNと高強度型CFRP スtrandシートで補強した場合よりも最大荷重は小さくなった。

アラミド繊維FRP スtrandシートで補強したAK1NNは載荷点直下のひび割れから剥離し、AFRP スtrandシートに薄くコンクリートが付着していた。最大荷重は273.6kNであり高強度型CFRP スtrandシートで補強したHT1NNの278.5kNより若干小さくなった。

今回の実験の範囲では、補強材の引張剛性が同等であれば連続繊維シートに比べてFRP スtrandシートの方が剥離耐力が高く、せん断スパンでのかぶりコンクリートの破壊やシートの破断が生じない場合はシートの引張剛性が高い方が剥離耐力が高く、シートの引張剛性

が高くなるとかぶりコンクリートの破壊が生じ最大荷重が低下する傾向にあった。

(2) 荷重と変位の関係

図-4に高強度型のCFRP スtrandシートおよび炭素繊維シートで1層補強した場合の荷重と載荷点の変位関係を示す。主鉄筋が降伏した後のはりの曲げ剛性は、炭素繊維シートよりもCFRP スtrandシートの方が若干大きいもののほぼ同様の荷重-変位関係を示しており、プライマーおよび継手の有無による顕著な差異は認められない。継手ありのHT1PLの変位が同じ荷重では若干小さくなる傾向にあるが、これは等曲げスパン内に重ね継手を設けているのでこの部分のCFRPの断面積が2倍あり曲率半径が小さくなっているためと考えられる。

図-5には、補強材の引張剛性を変化させた場合の荷重-変位関係を示した。ひび割れ発生後の荷重-変位関係の傾きは補強材の引張剛性が高いほど大きく、はりの曲げ剛性が高くなっている。補強材の引張剛性の大きなMB1NN, MA2NLは主鉄筋降伏前にかぶりコンクリートの破壊を伴ってCFRP スtrandシートが剥離して荷重が低下した。

(3) ひずみ分布

図-6に引張剛性の異なるCFRP スtrandシートで補強した供試体の荷重とはり中央の主鉄筋ひずみの関係を示す。ひび割れ発生後、鉄筋ひずみはほぼ線形に増加し、補強材の引張剛性の大きなものほど同じ荷重での

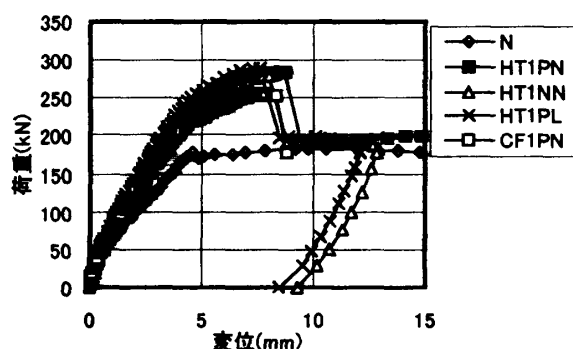


図-4 荷重-変位関係 (高強度CF1層)

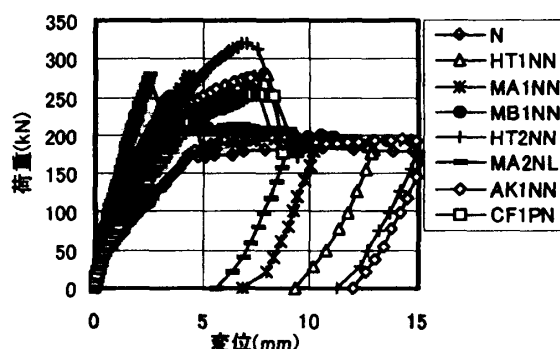


図-5 荷重-変位関係 (補強材の剛性変化)

鉄筋ひずみが小さく鉄筋応力が低減されている。

図-7にHT1NNのはり軸方向のCFRPストランドシートのひずみ分布を示す。主鉄筋降伏前(200kNまで)は、ひずみ分布はほぼ左右対称にシート端部から載荷点に向かって線形に増加している。図-8はHT1NNのはり中央断面の縦ひずみの分布を示したものであるが、主鉄筋降伏前はコンクリート、鉄筋、CFRPストランドシートのひずみは中立軸からの距離にほぼ比例して直線上に分布しており、中立軸の位置も計算中立軸にほぼ一致しており、連続繊維シート接着工法と同様に平面保持が成り立っていると考えられる。降伏荷重の計算値と実験値を表-5に示す。ここで計算値は平面保持を仮定してFRPの引張剛性を考慮してコンクリートの引張強度を無視して算定した値であり、実験値は等曲げ区間の主鉄筋ひずみの測定値が最初に降伏ひずみに達した荷重である。FRPストランドシートで補強した供試体の降伏荷重の実験値と計算値の比は0.87~1.0の間にあり、計算値と実験値は概ね良い一致を見ている。

4. まとめ

- (1) FRPストランドシートは同種の繊維を用いた連続繊維シートと同等の引張強度、ヤング係数を発現した。
- (2) 今回実験したCFRPストランドシートは繊維目付け量 600g/m^2 以上と高目付けであるが、継手長を200mmとすれば継手破壊は発生せず母材破壊した。
- (3) 付着強度試験では、FRPストランドシートと連続繊維シートはほぼ同様の付着性状を示したが、界面剥離破壊エネルギーはFRPストランドシートの方が1割程度大きくなった。
- (4) 曲げ破壊先行型のRCはりにFRPストランドシートを接着して補強することにより、はりの曲げ剛性と曲げ耐力が増加した。高強度型炭素繊維で補強量が同じであれば連続繊維シートに比べてFRPストランドシートの方が最大荷重は大きくなる。FRPストランドシートの引張剛性が過大になるとせん断スパン内でかぶりコンクリートの破壊によりシートが剥離した。かぶりコンクリートの剥離やシートの破断が生じない範囲ではFRPストランドシートの引張剛性が高くなると、剥離荷重も増加する傾向にあった。
- (5) FRPストランドシートで補強したRCはりのひずみ分布は、シートが既設コンクリートに完全合成されていると仮定した平面保持が成り立つと考えられ、降伏荷重の計算値と実験値は良い一致をみた。

参考文献

- 1) 宇佐美惣, 長田光司, 井ヶ瀬良則, 斉藤誠: 炭素繊維巻立て工法の施工時の欠陥が耐久性に及ぼす影

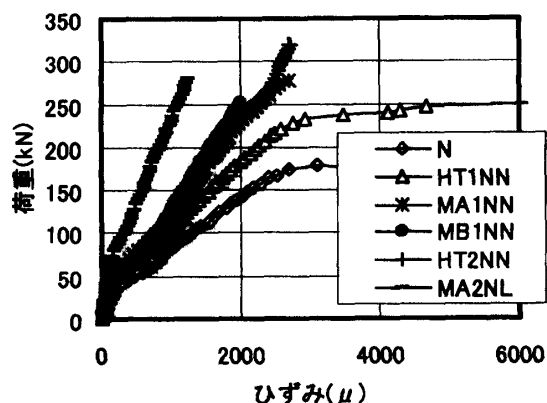


図-6 荷重と鉄筋ひずみの関係

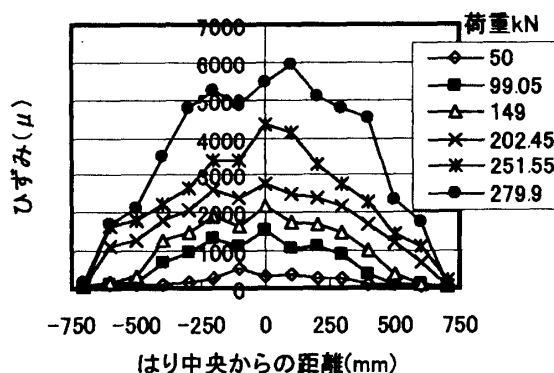


図-7 FRPシートのひずみ分布(HT1NN)

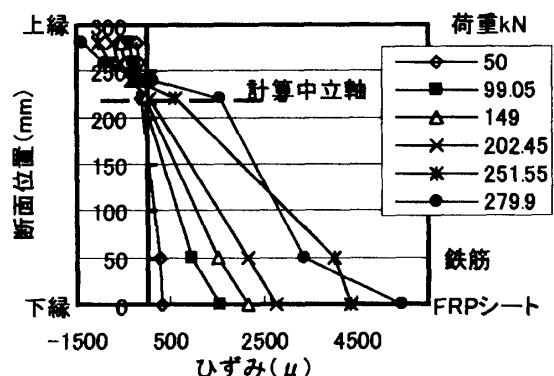


図-8 縦ひずみの分布(μ) (HT1NN)

響, コンクリート工学年次論文報告集, Vo21, No.2, pp.1225-1230, 1999.6

- 2) S. Rizkalla and T. Haasan: Various FRP Strengthening Techniques for Retrofitting Concrete Structures, FRP Composite in Civil Engineering, Vol. 2, pp.1034-1040, Dec.2001
- 3) 久部修弘, 諸星克敏, 大塚浩司: 高弾性CFRPプレートの継手性能とRCはりにおける曲げ補強効果および疲労耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vo29, No.1, pp.471-476, 2007.7
- 4) 小林朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕: ストランドシート, CFRPプレート, 炭素繊維シートによるRCはりの曲げ補強効果, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, V, pp.763-764, 2007.9