

論文 連続繊維シートによるせん断補強 RC はりの耐荷性状に関する実験的検討

子田 康弘^{*1}・岩城 一郎^{*2}

要旨：本研究では，せん断破壊先行型の RC はりについて，連続繊維シートによるせん断補強効果に関する実験的検討を行なった。その結果，シート補強の有無およびシート補強量の違いにより，RC はりの耐荷性状が大きく変化した。これらの結果に基づき，せん断力に対するシートの荷重分担性状をシートの平均ひずみを基に検討した。その結果，平均ひずみを基にシートの分担せん断力の評価が可能であり，これと，スターラップの分担せん断力より，シート変位に伴うシートとスターラップのせん断力に対する寄与分を明らかにした。

キーワード：連続繊維シート，せん断補強，RC はり，平均ひずみ，分担せん断力

1. はじめに

近年，既存鉄筋コンクリート（以下，「RC」）構造物の補強方法として，部材の軽量化，施工時の人的省力化の点で優れている連続繊維シートの接着工法が用いられている。このうち，連続繊維シートを用いたせん断補強に関しても，既往の研究や各種委員会等において多くの検討がなされ，例えば，土木学会では，2000 年度に「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」¹⁾を発行し，連続繊維シート補強後のせん断耐力の評価法が示されている。

連続繊維シートによるせん断補強では，RC 部材に発生した斜めひび割れ域における連続繊維シートが受け持つせん断力の適切な評価が重要である。これは，連続繊維シートとコンクリート間の付着・剥離特性がシート補強後のせん断耐力に対して支配的な役割を果たすためであり，この特性の定量評価の重要性も指摘されている²⁾。すなわち，連続繊維シートの分担せん断力の評価には，シートの付着・剥離挙動の把握が重要と言える。

しかし，連続繊維シートによりせん断補強した RC 部材において，ひび割れの発生と進展，また，それに伴う連続繊維シートのひずみ分布の

推移を詳細に計測し，これより連続繊維シート

のせん断力に対する荷重分担性状の検討をした研究例は十分であるとは言い難い。本研究では，連続繊維シートとして炭素繊維シート(以下「シート」)を取り上げ，シートによる RC はりのせん断補強効果に関する実験的検討を行なった。実験では，せん断破壊先行型の RC はりにシートをゼブラ状に貼付する全周閉合のせん断補強を施して載荷試験を行い，シート補強の有無およびシート補強量がその耐荷性状に及ぼす影響を究明した。さらに，斜めひび割れの発生が予測される箇所のシートのひずみ分布よりその平均ひずみを求め，これと周辺のひび割れの進展状況より，シートのせん断力に対する荷重分担性状を評価した。併せて，スターラップの分担せん断力を評価することにより，シートとスターラップのせん断力に対する寄与分を明らかにした。

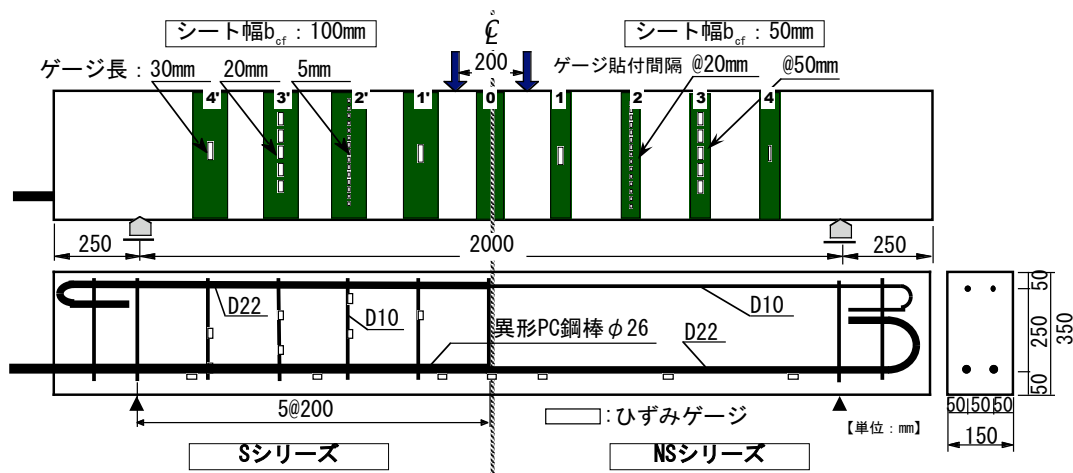
2. 実験の概要

2.1 供試体形状

図-1 に，供試体の形状，配筋，シートによるせん断補強の概要を示す。供試体は，断面寸法(高さ×幅)を 350×150mm，スパン長 2000mm とす

*1 日本大学 工学部土木工学科助手 修士(工学) (正会員)

*2 日本大学 工学部土木工学科助教授 博士(工学) (正会員)



図－1 実験供試体の概要図

る複鉄筋矩形はりである。本実験の供試体は、NS シリーズと S シリーズの 2 シリーズに大別される。NS シリーズは、スターラップを配置していない供試体であり、引張鉄筋に SD295A D22、圧縮鉄筋に SD295A D10 を用いている。S シリーズは、スターラップを有する供試体であり、引張鉄筋に $\phi 26$ の異形 PC 鋼棒、圧縮鉄筋に SD295A D22 を用いている。このように NS シリーズと S シリーズで補強鋼材の仕様を変えている理由は、シート無補強でかぶり、あきを確保しつつ、両方せん断破壊先行型とするためである。スターラップとして、供試体中央より左右に 200mm 間隔で、SD295A D10 を配置している。これにシート幅を 50mm と 100mm とする 2 ケースのシート補強量を設定した。すなわち、実用上の観点から、せん断補強先行型の RC に対し、シートせん断補強によりせん断耐力の向上を想定したものである。これより、表中に示す曲げせん断耐力比(P_{su}/P_{mu})は、シートによるせん断補強によって 1.0 程度以上になる。表－1 には、供試体諸元を示した。なお、シートの貼付間隔は、200mm であり、曲げ耐力、および補強後せん断耐力は、それぞれ土木学会の示方書、補修補強指針¹⁾に基づき算出している。

シートの貼付方法に関しては、所定の工法³⁾に準拠し、供試体軸直角方向全周に巻き付けるゼブラ状の閉合補強であり、上縁においてシートをラップさせた。また、供試体隅角部には、 $R=10\text{mm}$ の面取り⁴⁾を施している。

表－1 供試体諸元

供試体No.	シート幅 b_{sf} (mm)	シート補強 量比 p_{sf} (%)	曲げ耐力 P_m (kN)	せん断耐力 P_{su} (kN)	P_{su}/P_{mu}	想定 破壊形式
NS0	—	0.00	169.8	91.6	0.54	せん断破壊
NS5	50	0.06		226.6	1.33	曲げ破壊
NS10	100	0.11		318.5	1.88	曲げ破壊
S0	—	0.00	400.9	228.2	0.57	せん断破壊
S5	50	0.06		363.3	0.91	せん断破壊
S10	100	0.11		455.2	1.14	曲げ破壊

表－2 鋼材およびコンクリートの物性値

鋼 材	鉄筋:D10	鉄筋:D22	PC鋼棒: $\phi 26$	コンクリート	
f_y (N/mm^2)	385	381	1071	f'_c (N/mm^2)	28.5
f_{st} (N/mm^2)	542	567	1199	f_t (N/mm^2)	2.47
E_s (kN/mm^2)	191	194	229	E_c (kN/mm^2)	24.7

表－3 シートの物性値

引張強度 f_{sf} (N/mm^2)	ヤング率 E_{sf} (kN/mm^2)	目付量 ρ_{sf} (g/m^2)	シート厚 t_{sf} (mm)
4170	231	313	0.167

2.2 使用材料

表－2 と表－3 に、本実験に使用した材料の物性値を示す。鋼材及びコンクリートの物性値は、実験室における測定結果であり、コンクリートの測定結果は載荷試験直前(材齢 211 日)に実施したものである。また、シートの物性値は、メーカーによる材料試験結果である。

2.3 載荷および実験の方法

載荷試験は、静的な対称 2 点集中荷重載荷方式により行った。測定項目は、ロードセルによる載荷荷重、高感度変位計(精度 1/100、容量 100mm)によるスパン中央点変位である。また、シート軸方向ひずみと、主鉄筋およびスターラップのひずみを測定した。ここで、本実験のシ

ートのひずみゲージの貼付間隔は、図-1 に示すように、斜めひび割れの横断が予測される位置(図-1 の No.2,3,2',3')において、ひずみ分布の詳細を計測するため、その貼付間隔を 20mm と 50mm にしている。

3. 実験結果

図-2 は、NS シリーズと S シリーズにおける各供試体の荷重-変位関係を示したものである。図より、各シリーズとも、シートによるせん断補強による耐力の増加が認められる。まず、NS シリーズの場合は、NS0 が最大荷重 113.7kN で破壊したのに対して、NS5、NS10 はその後も荷重が増加し、190kN 付近で変位が急増する傾向を示した。両者の最大荷重はほとんど同じで、変形性能は NS10 でやや上回る結果となった。これは、シート補強によるせん断耐力の向上によって、後述するように供試体の破壊形式が曲げ破壊に移行したためである。ここで引張側の主鉄筋は、NS0 では降伏していないが、NS5、NS10 では 180kN を超えた頃より載荷点下において降伏ひずみに達していた。次に、S シリーズの場合、S0 では 200kN 過ぎよりスターラップの降伏が生じ、その後 313.3kN で最大荷重に達した。S5、S10 では、300kN 付近でスターラップが降伏したが、これ以降も荷重が増加し、S5 が 449.5kN、S10 が 460.8kN でシートの破断が生じた。シート破断後は、急激に耐力を失う性状を示した。また、シートの破断は、S5 の場合、No.2、No.1、No.3(図-1 参照)と段階的であったが、S10 の場合では No.2 のシートが下縁隅角部付近で突如破断した。S10 のシート補強量は、S5 の 2 倍であり、実験では、せん断耐力が S5 より明らかに大きくなることを期待したが、S10 の想定外のシートの破断により、両者の最大荷重は同程度となった。このシート破断の原因は、不明だが、もし、シートが健全であれば、曲げ破壊に移行したと推察される。

図-3 に、各供試体の実験終了後の破壊状態を示す。図に示すように、無補強供試体(NS0、S0)

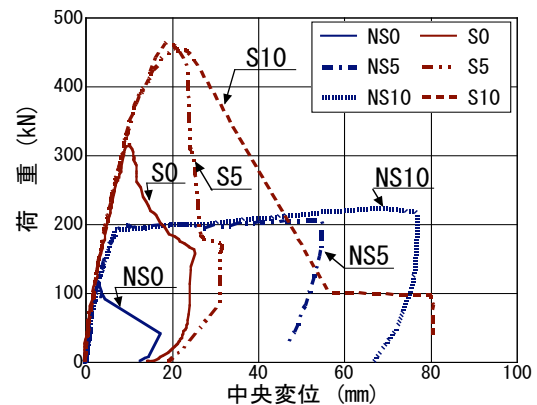


図-2 荷重-変位関係

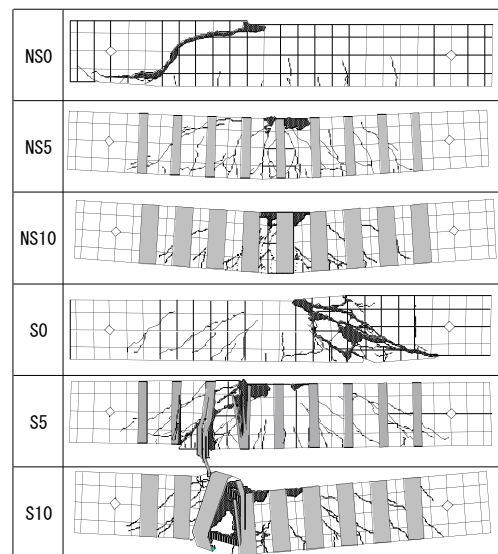


図-3 実験供試体の破壊状態

表-4 載荷試験結果

NS シリーズ	最大荷重 (kN)	破壊形式	S シリーズ	最大荷重 (kN)	破壊形式
NS0	113.3	斜め引張	S0	313.5	斜め引張
NS5	206.1 (191.9)*	曲げ	S5	449.5	斜め引張
NS10	221.7 (190.4)*	曲げ	S10	460.8	—

※ () 内は、変位が増大した荷重

の破壊形式は、斜め引張破壊である。これがシートによるせん断補強を施すことで、NS シリーズの場合、せん断スパン間の斜めひび割れがシートによってその進展を拘束され、載荷点下の曲げひび割れの進展、上縁コンクリートの圧壊が認められる典型的な曲げ破壊に移行した。一方、S シリーズでは、S5 はせん断スパン中央付近の斜めひび割れによりシートが破断し、破壊形式としては、斜め引張破壊と判定される。しかし、S10 はシートの急激な破断により破壊形式を判定できなかった。表-4 に、本実験結果のま

とめを示す。

図-4 に、シートのひずみ分布の一例を示す。図中のひずみ分布は、図-1 の No.2 と No.3 のシートを対象としており、無貼付供試体の最大荷重付近、シート補強した供試体の変位が急変した荷重 (NS : 190kN, S : 最大荷重), およびこれらの中間程度の荷重に対するものである。図-4 のひずみ分布より、斜めひび割れがシートを横切る位置のひずみが最初に増加するため、その形状は、凹凸状を示す。その後は、ひび割れ位置を起点にひずみが増加し、シートが完全に剥離すると概ねひずみは均等になる傾向を示す。また、図-4 (b) に示すように、ひずみの増加途中で台形の分布形状となる状態が生じている。これは、シートの剥離が進展している状態⁵⁾であり、本実験における剥離時のひずみは、概略 5000 μ である。

4. シートとスターラップの荷重分担性状

4.1 シートの平均ひずみ

本検討では、シートの平均ひずみを基に、シートのせん断補強効果、すなわち、せん断力に対するシートの荷重分担性状に関する評価を行った。本節に示す平均ひずみは、ひび割れ幅から算出されるもの(以下「 $\overline{\varepsilon_{cr}}$ 」)と、シートのひずみ分布に基づくもの(以下「 $\overline{\varepsilon_{cf}}$ 」)の2種類に分けられる。ここで、平均ひずみが求まれば、シートの荷重分担力の算出が可能となり、また荷重の増加に伴い、 $\overline{\varepsilon_{cr}}$ と $\overline{\varepsilon_{cf}}$ が同じ挙動で推移すれば、ひび割れの進展状況とシートのひび割れ拘束効果を連動して考えることができると考えられる。なお、 $\overline{\varepsilon_{cr}}$ は、ひび割れ幅の累計がシートの伸びに等しいと仮定し、その値をシート長で除した値であり、式(1)で表される。一方、 $\overline{\varepsilon_{cf}}$ は、図-4 のひずみ分布の面取り部を除いた範囲でひずみ分布を積分(台形法)して求めた。

$$\overline{\varepsilon_{cr}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{cri}}{l_{cf}} \quad (1)$$

ここに $\overline{\varepsilon_{cr}}$: ひび割れ幅による平均ひずみ(μ),

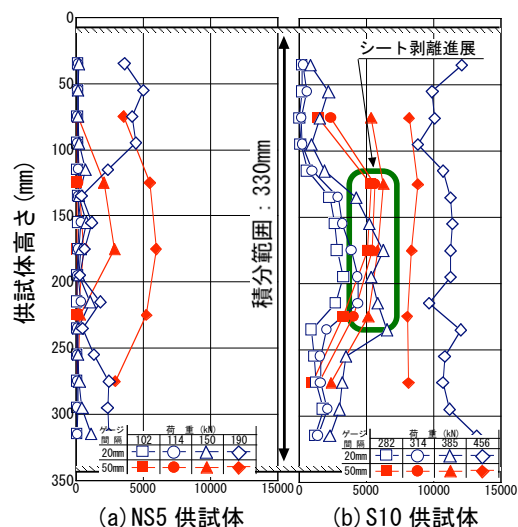


図-4 CF シートのひずみ分布

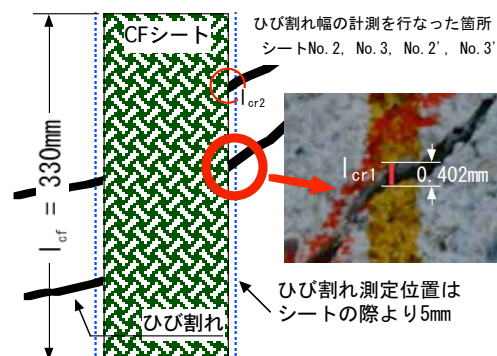


図-5 ひび割れ幅の計測方法の概念図

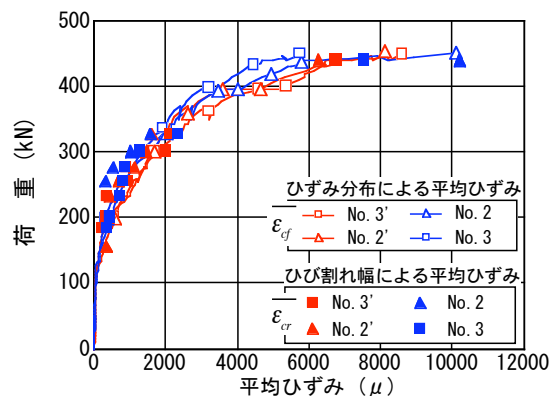


図-6 平均ひずみ変化の比較 (S5 供試体)

l_{cri} : ひび割れ幅(mm), l_{cf} : 面取り部を除くシート長さ(mm)

ここで、ひび割れ幅の計測は、図-5 に示すように、CCD カメラ(仕様: 30 万画素, 50 倍率)でシート際より 5mm 位置において計測対象のシート(ゲージ貼付間隔が 20mm と 50mm)を横切るひび割れを記録し、画像処理ソフト上で RC はり軸直角方向の幅を計測した。

図-6 は、荷重ステップ毎の両平均ひずみの一例を表したものである。図より、 $\overline{\varepsilon}_x$ と $\overline{\varepsilon}_y$ は、終局状態に至るまで概ね一致している。これより、ひび割れ発生直後から終局状態までのシートの荷重分担の把握が可能と思われる。また、シートの平均ひずみに及ぼすゲージの貼付間隔の影響を調べた結果、ゲージ間隔 50mm でも 20mm と同等の精度で平均ひずみを評価可能であることが確認された。

4.2 シートの分担せん断力

図-7 は、NS5 と S10 における、シート (No.2 と No.3) の $\overline{\varepsilon}_y$ にそのヤング率と断面積を乗じて引張力に換算した値と、作用せん断力の関係を示したものである。図より、作用せん断力と共にシートの分担力は増加するものの、シートの位置によって分担せん断力は大きく異なる。最大荷重時におけるせん断スパン中央に位置するシート (No.2', No.3', No.2, No.3) の分担せん断力の合計は、NS5 が 68kN, NS10 が 123kN であり、また S5 が 116kN, S10 が 156kN である。これらの結果より、シート補強により、シートが確実にせん断力を分担し、その傾向は、S シリーズでより顕著に現れた。また各シリーズとも補強量の増加によりシートの分担せん断力が増加した。

4.3 スターラップの分担せん断力

図-8 は、S シリーズにおいて、荷重と斜めひび割れがスターラップと交わる位置のスターラップひずみの関係を示したものである。図に示すように、せん断補強の有無によらず、100kN 付近でひずみが増加し始めている。これは斜めひび割れの進展が顕著になる時点と一致している。その後は、概略荷重の増加に伴い直線的にひずみが増加し、鉄筋が降伏したとき荷重の増加が頭打ちとなる。しかし、降伏時の荷重は、シート補強量が多い程増加する傾向にあり、シートによる補強効果が認められる。図-9 は、横軸が $\overline{\varepsilon}_y$ に l_{cf} を乗じて求めたシート伸び変位、縦軸がスターラップのひずみを実測の応力-ひずみ関係から応力換算し、引張力として表した図である。図-9 から、スターラップの分担力は、

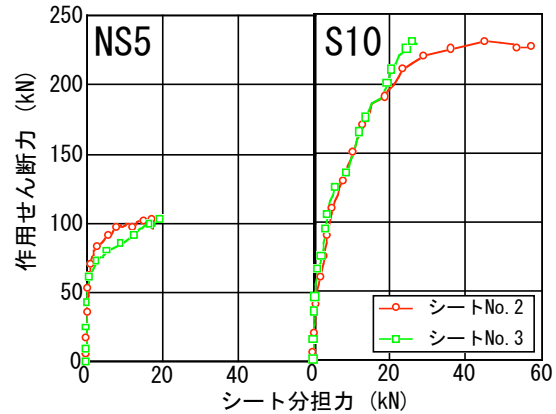


図-7 シート分担力の変化

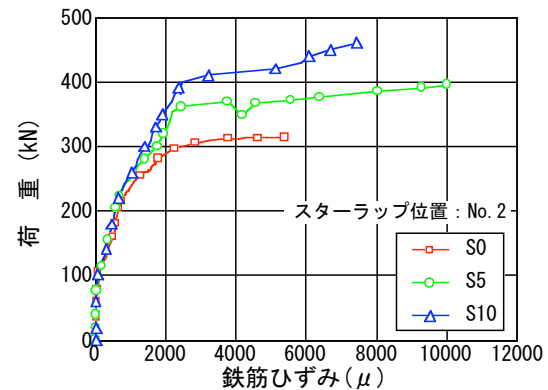


図-8 スターラップひずみ変化

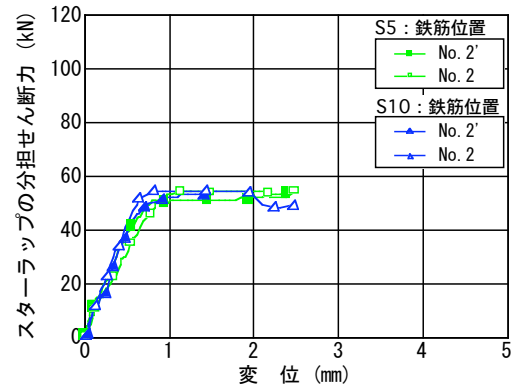


図-9 スターラップ分担力-変位関係

直線的に増加した後、シート変位 0.8mm 付近、すなわち、シートの平均ひずみが約 2400 μ になり一定となる。この傾向は、シート補強量の大きさによらず、概ね同じである。このように、スターラップの分担せん断力をシート変位との関係として表すことにより、シートとスターラップの分担せん断力の足し合わせが可能となる。

4.4 シートとスターラップのせん断力寄与分

ここでは、シートとスターラップの分担せん断力を式(2)のように両者の和 V_{cs} として表し、この分担力とシート変位の関係を示した。

$$V_{cs} = V_{\overline{cf}} + V_s \quad (2)$$

ここに $V_{\overline{cf}}$: シートの分担力(kN)

V_s : スターラップの分担力(kN)

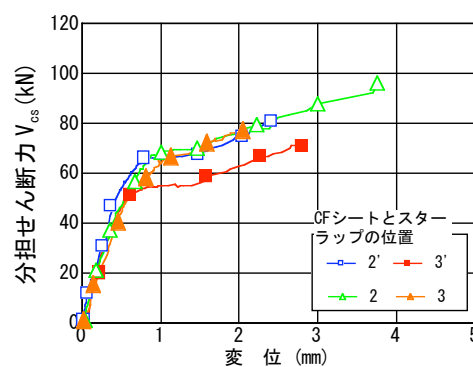
図-10 は、 V_{cs} とシート変位の関係である。図に示すように、 V_{cs} の性状は、3 段階にその挙動が変化している。すなわち、1) スターラップの降伏前までは、概略直線的に増加し、2) 鉄筋降伏段階において V_{cs} の推移が平坦な状態、3) シート剥離が進展し、シートの引張力の負担が顕著になる 3 段階である。図-10 に示す No.2, No.3(シート破断側)と No.2', No.3' の 4 箇所の最大値の合計は、S5 が 328kN, S10 が 359kN である。S シリーズの最大荷重と比較して(表-4 参照)、概ね最大荷重の 75% はせん断スパン中央のシートとスターラップで受け持つ結果であった。これは、シートのひずみ増加がせん断スパン中央付近で最も大きくなる傾向があり⁶⁾、本実験においてもせん断スパン中央でせん断力に対する寄与分が顕著に現れる結果となった。

なお、本稿では、シートの付着・剥離挙動について触れてないが、この点についても別途検討をしており、その結果、シート剥離終了までは本検討の分担せん断力が多少過小評価されることになる。この点については、別稿にて報告予定である。

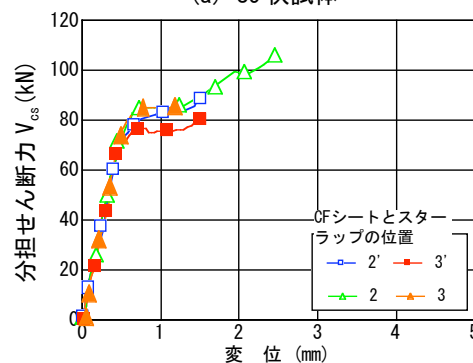
5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) シートによるせん断補強により、最大荷重は顕著に増加したが、本実験の範囲では、シート補強量(シート幅: 5cm と 10cm)の違いが最大荷重に及ぼす影響は小さかった。
- (2) ひび割れ幅とシートの伸び量の測定結果から、ひび割れ幅の累積とシートの伸び量はほぼ一致することが確認された。
- (3) シートの分担せん断力は、平均ひずみを基に表すことができ、これとスターラップの分担せん断力から、せん断力に対する各々の寄与分を評価可能である。その結果、これらせん断補強効果が顕著に現れる位置、およびシートの変形に伴う両者の寄与分の推移を解明



(a) S5 供試体



(b) S10 供試体

図-10 CF シートとスターラップの分担力

することができた。

謝 辞

本研究は、当研究室の学生の助力を得た。本研究の一部は、文部科学省学術フロンティア推進事業(日本大学工学部):「中山間地及び地方都市における環境共生とそれを支える情報通信技術に関する研究(研究代表:小野沢元久)」の一環として実施し、日本大学学術研究助成金(奨励研究)も受けた。ここに付記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリートライブラリー101 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, 丸善, 2000
- 2) 上原子晶久ほか: 連続繊維シート補強コンクリートの部材のせん断耐力の評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.217-226, 2000.5
- 3) CF ルネサンス協会: CF ルネサンス工法[説明資料]
- 4) 睦好宏史ほか: RC ラーメン橋脚におけるはり部耐震補強に関する研究, 土木学会論文集, No.746/V-61, pp.215-228, 2003.11
- 5) 阿部弘典ほか: 炭素繊維シートによる RC 梁のせん断補強効果と抵抗メカニズム, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1291-1298, 2005.3
- 6) 佐藤靖彦ほか: 炭素繊維シートにより補強した RC はりのせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1469-1474, 1996