

論文 CFRP シートによりせん断補強した RC はり部材のせん断抵抗機構の検討

永島 史晟^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・大島 義信^{*3}・石田 雅博^{*4}

要旨：CFRP シートを用いてせん断補強した RC はりのせん断抵抗機構の検討を行った。本論文の特徴は、供試体の寸法とシートのせん断補強方法（側面貼り付けと U 字貼り付け）がせん断抵抗機構に与える影響に着目している点にある。FRP シートが、局所的な剥離から全体剥離に移行する過程でせん断抵抗割合が変化すること、また、供試体の寸法が大きくなってもシートが負担できるせん断力の大きさに直接的な影響を及ぼさないが、シートの積層数が増えると剥離が早く発生し、シートのせん断抵抗能力が小さくなることを明らかにした。

キーワード：CFRP シート、せん断補強、RC はり、せん断耐荷機構、剥離、付着応力

1. はじめに

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)シートは、RC 構造物の補修補強材料として世界的に広く用いられている。

国内では、CFRP シートにより補強された RC 構造物のせん断耐力は、土木学会の指針¹⁾により示されている。しかしこれは、柱部材等に巻きつけた場合、または端部に十分な定着がなされている場合を想定しており、はり部材のように端部の定着がなされない補強方法の場合については、十分な検討がなされていない。RC はりの側面に貼り付けた場合のせん断耐力に関しては、佐藤ら²⁾、上原子ら³⁾、子田ら⁴⁾の研究がある。しかし、いずれの検討においても、小型の供試体を用いた実験をもとに耐力式の検討を行っており、実構造物のサイズで同じような補強効果が得られるかの検討が行われていない。そこで本研究は、大型の供試体を用いた実験を通じて、寸法やシートの貼り方の違いが補強後のせん断抵抗機構にどのような影響を及ぼすのかを明らかにする。

2. 実験概要

本研究で作製した供試体は計 9 体である。各供試体の概略を図-1、図-2 に、諸元および曲げ耐力、せん断耐力の計算値を表-2 に示す。曲げ耐力ははり理論より、せん断耐力は二羽式⁵⁾を用いた修正トラス理論で計算した。本研究では、中弾性の CFRP シートを用いた。使用したシートおよび鉄筋の力学特性を表-1 に示す。

供試体は、有効高さ 600mm,900mm,1200mm のものがそれぞれ 3 体ずつで、順に小型供試体、中型供試体、大型供試体と呼ぶ。それぞれの供試体は、RC シリーズ、CF-U シリーズ、CF-I シリーズに分けられる。RC シリーズは、CFRP シートを貼り付けておらず、左右のせん断ス

パンにスターラップが用いられている。CF-U シリーズは、右側のせん断スパンはスターラップを用いてせん断補強し、試験スパンである左側に CFRP シートを U 字型に巻きつけてせん断補強を施している。CF-I シリーズは、右側のせん断スパンはスターラップを用いてせん断補強し、試験スパンである左側の側面のみに CFRP シートを貼り付けている。以下、シート補強した供試体をまとめて CF シリーズと呼ぶ。スターラップとシートの補強量は、各供試体の補強量比に弾性係数をかけた値が等しくなるように定めた。補強量比を合わせる関係で、小型供試体の CFRP シートの積層数は 1 層、中型、大型供試体の積層数は 2 層となっている。また、シート補強した全ての供試体において、端部の定着は施されていない。

実験は 2 点単純支持の状態の RC はりに対して、2 点載荷で荷重を加えた。載荷装置は、国立研究開発法人土木研究所に設置されている 30MN 大型構造部材万能試験機および大型構造物繰返し載荷試験装置を用いた。載荷の際、斜めひび割れ発生前後に 1~3 回の除荷を行い、そ

表-1 使用材料の力学的特性値

	種類	断面積 (mm ²)	弾性 係数 (GPa)	降伏 強度 (MPa)	引張 強度 (MPa)
鉄 筋	D10	71.33	190.5	341.4	558.2
	D13 ^{*1}	126.7	—	406	574
	D25	506.7	191.5	367.5	592.5
	D29	642.4	197.7	384.0	565.3
	D38	1140	191.6	388.2	561.7
	CFRP シート	0.163 ^{*2}	417.8	—	3264

*1 D13 の材料特性はミルシートの値を採用

*2 単位幅あたりの断面積 (=シート厚さ t_f)

*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 (学生会員)

*2 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 (株)ナカノフドー建設 博士(工学) (正会員)

*4 国立研究開発法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター

表-2 実験供試体の諸元

供試体名	f'_c (MPa)	d (mm)	補強方法	補強量 比 $p(\%)^{*1}$	シート 積層数 n_f	シート 幅 b_f (mm)	シート 間隔 s_f (mm)	曲げ 耐力 *2 (kN)	せん断 耐力 (kN)
RC-600	38.2	600	スターラップ	0.158	—	—	—	506.8	316.5
CF-U600	37.4		U字型	0.082	1	150	200	505.4	—
CF-I600	35.8		側面補強	0.082	1	150	200	502.5	—
RC-900	44.5	900	スターラップ	0.158	—	—	—	1189	722.9
CF-U900	42.5		U字型	0.087	2	150	250	1184	—
CF-I900	42.5		側面補強	0.087	2	150	250	1184	—
RC-1200	42.7	1200	スターラップ	0.158	—	—	—	2084	1227
CF-U1200	45.4		U字型	0.087	2	200	250	2088	—
CF-I1200	40.5		側面補強	0.087	2	200	250	2061	—

*1 スターラップ…補強量比 $p = 2A_w/b_w s$ CFRP シート…補強量比 $p = 2n_f t_f b_f/b_w s_f$ (A_w : スターラップ断面積, s : スターラップ間隔)

*2 曲げ耐力は、せん断耐力(V)と比較するため、終局時の荷重(P)の半分($V=P/2$)で表記した。

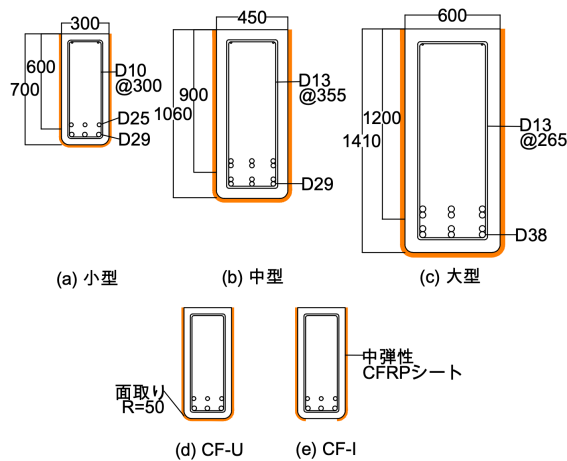


図-1 供試体断面図

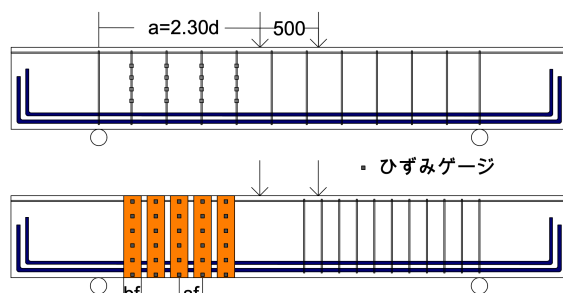


図-2 供試体側面図

の後単調に荷重し破壊に至らしめた。また、荷重点の変位、主筋、スターラップ、コンクリート、CFRPの歪みを計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 せん断耐力の比較

実験結果から得られた荷重変位曲線を図-3に、各供試体の破壊形式とせん断耐力をまとめたものを表-3に

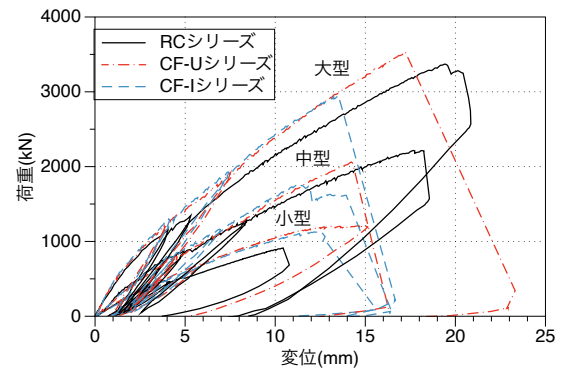


図-3 荷重変位曲線

表-3 最大荷重と破壊形式

供試体名	破壊形式	せん断耐力 (kN)
RC-600	せん断圧縮破壊	456.3
CF-U600	曲げ破壊	—
CF-I600	シート破断	564.5
RC-900	せん断圧縮破壊	1107.9
CF-U900	シート剥離	1030.9
CF-I900	シート剥離	873.7
RC-1200	せん断圧縮破壊	1684.8
CF-U1200	シート剥離	1770.4
CF-I1200	シート剥離	1476.9

示す。RC シリーズは、3 体ともにせん断スパンの圧縮縁コンクリートが破壊するせん断圧縮破壊であった。シート補強供試体は、中型、大型の場合は CF-U シリーズ、CF-I シリーズともにシートの剥離による斜め引張的な破壊が発生した。CF-U600 は、シートが剥離する前に主

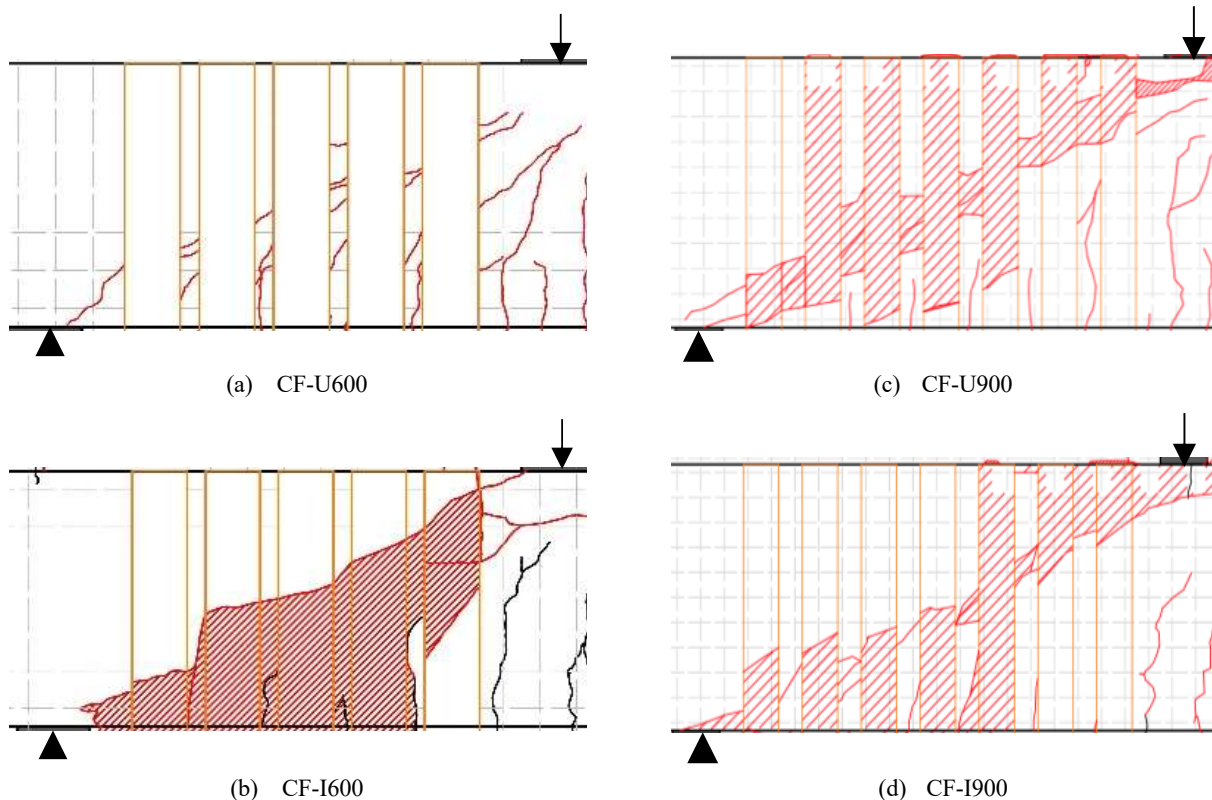


図-4 破壊後のひび割れおよびシート剥離の様子

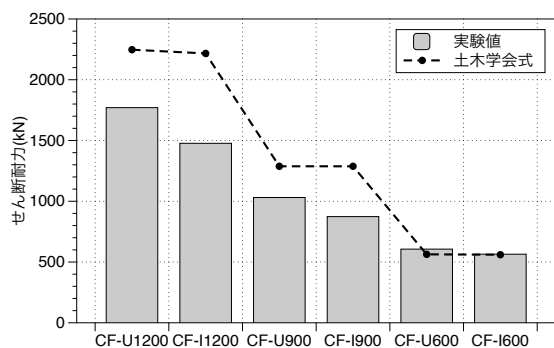


図-5 土木学会式との比較

鉄筋が降伏し曲げ破壊となった。CF-Iシリーズは、剥離が起こる前にシートが破断し、斜め引張的な破壊となった。シートの剥離により破壊した中型、大型の供試体において、CF-UシリーズとCF-Iシリーズのせん断耐力を比較すると、約20%の差があった。したがって、U字型に補強すると、側面のみにシートを貼り付けた場合に比べて、約20%せん断耐力が向上すると言える。この結果は、過去に佐藤ら²⁾が報告した結果と一致している。また、RCシリーズとCFシリーズの最大荷重を比較すると、小型供試体ではCFシリーズの最大荷重がRCシリーズを大きく上回っているのに対し、中型、大型供試体ではCFシリーズの最大荷重はRCシリーズと同程度か、やや下回る程度におさまっている。したがって、シート

の補強量比が同じでも寸法が異なることにより、シートが負担できるせん断力の大きさに違いが出るのが推察される。寸法とシートが受け持つせん断力の関係については後の節で考察する。

図-4は、中型と小型のCFシリーズにおける破壊後の様子を示したものである。シートおよびコンクリート表面の剥離が目視で確認された部分を斜線で示している。なお、大型のCFシリーズは中型の結果と差異がなかったので割愛した。シート剥離により破壊した中型供試体CF-U900とCF-I900を比較すると、剥離の進展の仕方に違いが見られる。CF-U900は全てのシートで斜めひび割れの上部に向かって剥離が進展しているのに対し、CF-I900は載荷点側のシートでは斜めひび割れの上方向、支点側のシートでは斜めひび割れの下方向に剥離が進展している。したがって、貼り付け方の違いにより、剥離の進展の仕方に差異が表れることが確認された。

図-5は、今回の実験結果と、土木学会の指針¹⁾に示されたせん断耐力式で計算した結果を比較したものである。CF-U600については、曲げ破壊時の作用せん断力としている。指針には、実験結果から回帰して得られた式と、上原ら³⁾によって提案された、シートの付着構成則に基づき応力分布を評価し、シートが受け持つせん断力を評価する方法がある。どちらの方法も、全周巻き付けまたは両端の定着を仮定している点で同じであること、前

者の方が簡易的に求めることができることから、今回は前者の式を採用した。シートの剥離が生じなかった小型の供試体では、計算値とほぼ同じせん断耐力が実験において得られたが、シートの剥離が生じた中型、大型の供試体では、せん断耐力の実験値が計算値を大きく下回った。したがって、全周巻き付けや両端の定着を仮定した既存の式をはり部材に当てはめることができないということが確認された。

3.2 シートひずみの考察

図-6 は、供試体 CF-U1200 において、せん断スパン中央付近に配置された CFRP シートの高さ方向のひずみ分布を表したものである。図には、写真から読み取った斜めひび割れの発生位置が破線で示されている。751.8kN は、コンクリートに斜めひび割れが入った直後の作用せん断力であり、1770.4kN は、終局直前の作用せん断力である。ひずみ分布の変化から、シートで補強した RC はりは以下のような過程を経て破壊することがわかる。すなわち、まずコンクリートに斜めひび割れが発生すると、ひび割れ付近でシートのひずみが増加する。その後荷重が増加するにつれひび割れ付近のひずみは増加していく。ひずみがある程度増加すると、シートの剥離が発生し、斜めひび割れ位置から端部に向かって進展していく。図-6 において、下端から 450mm~1100mm の位置に着目すると、荷重が増加していくとシートのひずみが一定の領域が現れ、その領域が徐々に広がっていることから読み取れる。剥離している領域が端部まで到達すると、シートが完全に剥離し、終局状態に至ると考えられる。以下、混同を防ぐため、初めに斜めひび割れ位置付近でシートの剥離が発生することを局所剥離、剥離領域がシート全体に進展し、完全に剥がれることを全体剥離と呼ぶ。

次に、シートが全体剥離したときのひずみを考える。各シートにおいて、斜めひび割れと交差している部分のひずみを読み取り、平均を取った値を有効ひずみと定義する。表-4 は、各供試体においてシートの全体剥離または破断が発生したときの有効ひずみを算出したものである。ただし、供試体 CF-U600 については、全体剥離、破断共に発生しなかったため、最大荷重時の有効ひずみを算出している。CF-U900 と CF-U1200、CF-I900 と CF-I1200 をそれぞれ比較すると、全体剥離時の有効ひずみが概ね同じ値になっている。すなわち、シート、コンクリートの材料特性、シートの補強量比、積層数が変わらなければ、寸法が変わっても全剥離するときのシートひずみの値は変わらないと言える。CF-U シリーズと CF-I シリーズの有効ひずみを比較すると、全体剥離が発生したとき、CF-I シリーズの方が小さい。これより、シートを側面のみに貼り付けた場合、U 字型に巻きつけたときよりも小さいひずみで全体剥離が発生し、結果としてシ

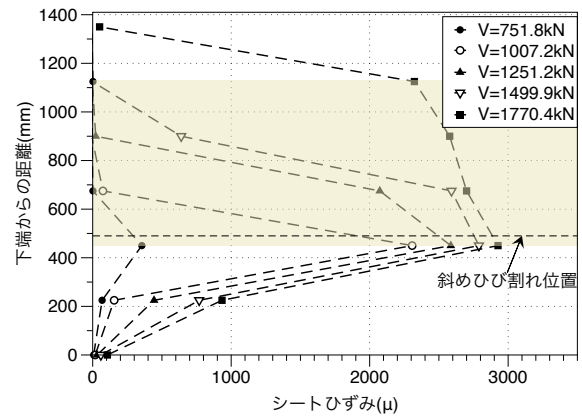


図-6 高さ方向ひずみ分布 (CF-U1200)

表-4 終局時の有効ひずみの比較

供試体名	有効ひずみ(μ)	供試体名	有効ひずみ(μ)
CF-U600	3338	CF-I600	3408
CF-U900	2402	CF-I900	2023
CF-U1200	2408	CF-I1200	2224

ートが負担できるせん断力は小さくなると考えられる。小型供試体と中型、大型供試体の有効ひずみを比較すると、小型供試体の方が 1.5 倍近く大きくなっている。小型と中型、大型を比較すると、シートの材料特性は等しく、補強量比もほぼ等しい。異なるのはシートの積層数である。補強量比を揃えるため、小型供試体では積層数を 1、中型、大型供試体では積層数を 2 としている。この違いが終局時の有効ひずみの差につながっていると考えられる。すなわち、シートの積層数を増やすと付着応力が大きくなることで剥離が発生しやすくなり、シートが負担できるせん断力が小さくなると推察される。現在提案されているせん断耐力式では補強量比は考慮されているが、シートの厚さと積層数の影響は、一切考慮されていない。せん断耐力を予測する上で、これらを重要なパラメータとして認識すべきである。

ここまでの考察から、コンクリートの寸法とシート補強したときのせん断耐力の関係を整理すると、寸法が大きくなることによるせん断耐力への直接的な影響はないと考えられる。一方で、寸法が大きくなると、必要なシートの補強量が多くなり、積層数が多くなる。積層数が多くなると小さいひずみで剥離が発生するため、シートが負担できるせん断力が小さくなる。したがって、CFRP シートによりせん断補強した RC はりのせん断耐力には、広い意味での寸法効果があると言える。

3.3 シート負担せん断力と付着応力

(1) せん断力の負担割合

一般的に、CFRP シートによりせん断補強した RC 棒

部材のせん断耐力は以下の式で求めることができる。

$$V = V_c + V_s + V_f \quad (1)$$

ここで、 V_c はコンクリートが受け持つせん断力、 V_s はスターラップが受け持つせん断力、 V_f はCFRPシートが受け持つせん断力である。実験結果から、斜めひび割れと交差するシートが受け持つせん断力は以下の式で求めることができる。

$$V_{fi} = A_{fi} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fi} \quad (2)$$

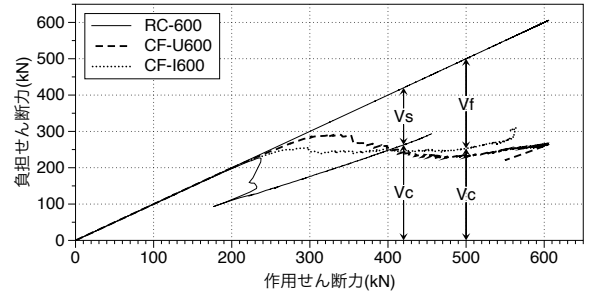
ここで、 A_{fi} は斜めひび割れと交差するシートの断面積、 E_f はシートの弾性係数、 ε_{fi} は斜めひび割れと交差部のシートひずみである。シート全体が受け持つせん断力は、(2)で求めた値を、斜めひび割れと交差する全てのシートについて足し合わせることで求めることができる。すなわち、以下の式(3)によってシートが受け持つせん断力は算出できる。

$$V_f = \sum V_{fi} \quad (3)$$

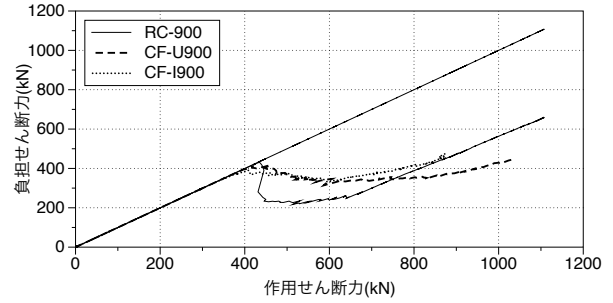
式(3)により求めた V_f を全体の作用せん断力から引くと、コンクリートが負担するせん断力 V_c を求めることができる。また、同様の方法でスターラップが負担するせん断力 V_s も求めることができる。このようにして求めたせん断力の負担割合を図-7の(a)～(c)に示す。

小型、中型、大型ともに、全ての供試体でほぼ同じ作用せん断力で V_s および V_f の増加が始まっている。したがって、シート補強した場合も、斜めひび割れが発生する荷重は通常のスターラップでせん断補強した供試体と変わらないことがわかる。一方、斜めひび割れ発生後の性状を比較すると、RCシリーズとCFシリーズに違いが見られる。RCシリーズは、斜めひび割れ発生後、 V_s が急激に増加し、 V_c が急激に減少している。CFシリーズでは、斜めひび割れ発生後、緩やかに V_f が増加していき、 V_c の急激な減少は見られない。CFRPシートは、スターラップに比べ、斜めひび割れ発生後のひずみの増加が緩やかであることを表している。スターラップやシートのひずみの大きさは、ひび割れ幅に依存するので、シート補強には、斜めひび割れの開口を抑制する効果があると言える。

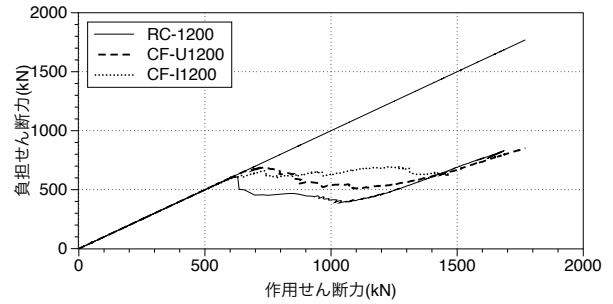
スターラップおよびシートの負担せん断力がある程度増加した後について考える。RCシリーズでは、 V_s がある程度まで増加すると、その後一定の値をとるようになり V_c が増加する。これはスターラップが降伏していることを表している。CFシリーズも、RCシリーズほどではないが、終局直前では V_c の増加が見られる。これはシートの局所剥離によるものと考えられる。シートの局所剥離が発生すると、ひずみは一定となりそれ以上負担せん断力は大きくならない。しかし、一本のシートで局所剥離が発生しても応力の再分配により他のシートがせん断力



(a) 小型供試体



(b) 中型供試体



(c) 大型供試体

図-7 せん断力の負担割合

を負担するようになるので、全体として V_f は緩やかに増加していく。図-7 からこのような機構が分かるが、これだけでは局所剥離の発生する点を読み取ることができない。シートの剥離性状について掘り下げて考察するため、シートの付着応力を検討する。

(2) 付着応力

鉛直方向の力の釣合いから、ある区間におけるシートとコンクリートの間の付着応力は式(4)で求めることができる。

$$\tau = n_f t_f E_f \frac{d\varepsilon_f}{dx} \quad (4)$$

ここで、 $d\varepsilon_f/dx$ はシートのひずみ勾配である。シートのひずみ分布から、斜めひび割れとの交差部の付着応力を求め、さらに斜めひび割れと交差している全てのシートの付着応力の平均値を算出し、平均付着応力とする。求めた平均付着応力と、式(3)で求めた V_f を比較したものを図-8に示す。図-8(a)、(b)ともに、斜めひび割れが発生する400kN付近で V_f と平均付着応力が増加している。

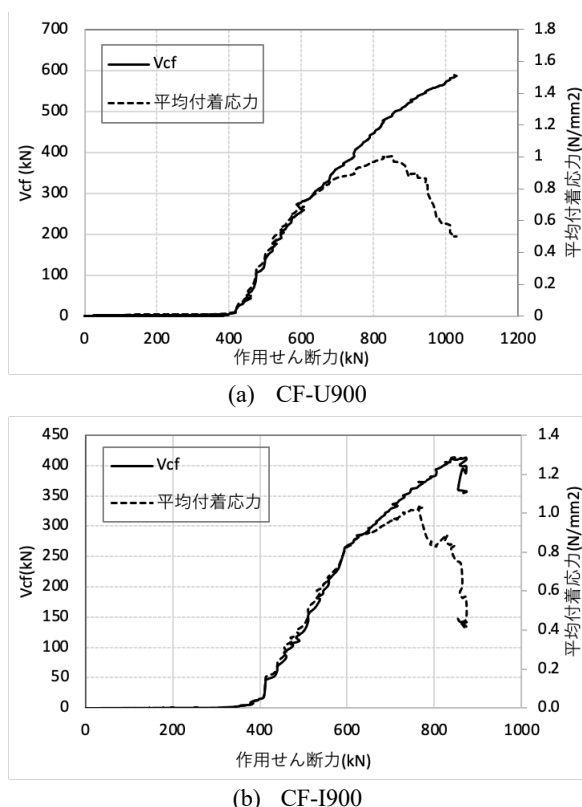


図-8 V_f と平均付着応力の関係

その後は V_f と平均付着応力が同じ割合で増加していくが、650kN付近で増加の割合に乖離が生じ始めている。この時点でシートの局所剥離が生じていると考えられる。さらに、CF-U900では850kN付近で、CF-I900では770kN付近で平均付着応力の低下が見られる。この時点ではシート間での応力の再分配ができなくなり、全体的に剥離が進行していると考えられる。平均付着応力の低下の仕方を比較すると、CF-U900ではなだらかに低下しているのに対し、CF-I900では急激に低下している。これは補強方法の違いによる局所剥離から全体剥離に移行する過程の差異が表れていると考えられる。

局所剥離が生じている状態は、まだ破壊には至っておらず、せん断力に抵抗できている状態ではあるが、可逆性という点で考えると、設計上許容されるべき状態ではない。したがって実際の設計を考慮すると、図-8において局所剥離が生じているとした点を設計上のせん断耐力とする方法が望ましいと考えられる。

3.4 せん断抵抗機構からみたせん断耐力予測の考え方

3.2節の考察から、シートの積層数が増えると、シートの剥離が早く発生するため、シートが負担できるせん断力が小さくなることがわかった。したがって、シートの積層数やシートの厚さを重要なパラメーターとする必要がある。また、同じく3.2節で、シート補強した供試体はシートの局所的な剥離から全体破壊に移行することで最終的に破壊に至ることがわかった。さらに、3.3節で、

局所剥離の発生する荷重が平均付着応力を算出することによって推定できることがわかった。すなわち、FRPシートの剥離領域の拡大が部材全体としての抵抗機構に大きな影響を及ぼす。これらの考察から、終局状態のみを考慮した式ではなく、局所剥離の発生という可逆限界点を考慮に入れた耐力評価は、実際の機構に基づく合理的な考え方だと言える。

今後は、シートの局所剥離や全体剥離が発生するときのひずみ、さらに、はりの変形性状に着目し、変形と斜めひび割れの幅、それに伴うシートひずみ量の増加を結びつけたせん断耐力評価法を提案したいと考えている。

4. まとめ

本研究でシートによるせん断補強に関する実験を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) シートの端部に定着がないはり部材の場合、シートの剥離によりせん断破壊が発生するので、既存のせん断耐力式をそのまま当てはめることはできない。
- (2) 供試体の寸法が大きくなってもシートが負担できるせん断力の大きさの直接的な影響を及ぼさないが、シートの積層数が増えると剥離が早く発生し、シートの負担せん断力が小さくなる。
- (3) シートの負担せん断力と平均付着応力を比較することにより、シートの局所剥離が発生する荷重を推定することができる。これにより実際の設計を想定した耐力式の検討が可能になる。

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，2000
- 2) 佐藤靖彦，田中高行，上田多門，小野定：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集，Vol18，No.2，pp.1469-1474，1996
- 3) 上原子晶久，下村匠，丸山久一：連続繊維シート補強コンクリート部材のせん断耐力の評価方法に関する研究，土木学会論文集，No.648/V-47，pp.217-226，2000.5
- 4) 子田康弘，岩城一郎，中村晋：RCはりをU字型補強した連続繊維シートによるせん断補強効果の簡易な評価方法，土木学会論文集 E，Vol.64 No.1，pp.224-236，2008.2
- 5) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.167-176，1986.8