

# 論文 連続繊維シートの付着性状を考慮した RC はりのせん断耐力評価

上原子 晶久<sup>\*1</sup>, 丸山 久一<sup>\*2</sup>, 下村 匠<sup>\*3</sup>, 西田 浩之<sup>\*4</sup>

**要旨：**連続繊維シートにより補強された鉄筋コンクリート部材のせん断耐力をシートの付着・剥離性状と終局時における部材の変形状態から評価するシステムを構築した。既往の実験データを用いた検証の結果、提案したせん断耐力評価システムはシートの貼り付け方法によって適用性に差が見られるものの、シートの剥離状態を考慮しながら部材のせん断耐力を評価し得ることを示した。シートの剥離状態に関する解析結果を実験結果と比較し、モデル化における今後の検討課題について考察した。

**キーワード：**CFR シート, せん断耐力, 付着, 剥離長さ, ひびわれ幅

## 1. はじめに

既設 RC 構造物の補強工法として、炭素、アラミドなどの連続繊維シート（以下 CFR シート）を接着する工法が近年急速に普及しており、これに関する研究も精力的に行われている<sup>1)</sup>。本研究は、CFR シートにより補強された RC 部材のせん断耐力評価法の開発を目的としている。メカニズムの観点からは、シートコンクリート間の付着・剥離性状が、部材のせん断耐荷力に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで CFR シートの付着・剥離特性を、構成モデルにより表現し、部材の終局変形と関係づけてシートが負担するせん断力を評価し、部材のせん断耐力を評価するシステムを構築した。

## 2. せん断耐力評価システムの概要

### 2.1 基本概念

CFR シートによって補強された RC 部材では、せん断ひび割れ発生後の変形、すなわち主せん断ひび割れの開口に伴って、これを横断する CFR シートの剥離が進展すると考えられる。シートの

引張力は剥離長さ剥離部分に含まれるせん断ひび割れ幅に依存する。この考えに基づき、終局時にシートの負担するトータルのせん断力を、主せん断ひび割れ幅の分布とシートの剥離長さの分布を定量的に評価することにより算定する

図-1 に部材のせん断耐力算定フローを示す。各ステップにおける計算方法、および計算に用いたモデルを以下に説明する。

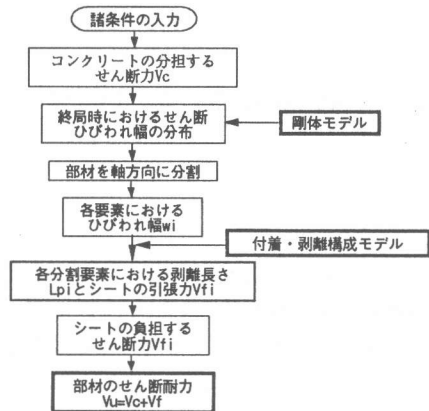


図-1 本論文におけるせん断耐力算定フロー

### 2.2 CFR シートの付着・剥離構成モデル

<sup>\*1</sup> 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 修士 (工学) (正会員)

<sup>\*2</sup> 長岡技術科学大学教授 工学部環境・建設系 Ph.D. (正会員)

<sup>\*3</sup> 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 博士 (工学) (正会員)

<sup>\*4</sup> 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

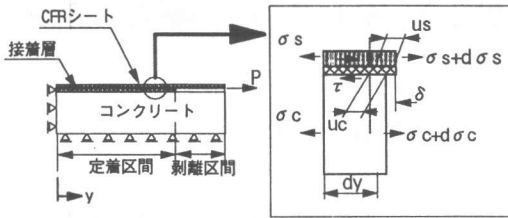


図-2 一次元シート-コンクリートモデル

コンクリートと CFR シートより成るシステムを  
図-2 に示す 1 次元モデルにより考える。

微小区間  $dy$  において、シート及びコンクリートに作用する力の釣り合いは、それぞれ以下のように表わされる。

$$t_s \frac{d\sigma_s}{dy} - \tau = 0 \quad (1)$$

$$t_c \frac{d\sigma_c}{dy} + \tau = 0 \quad (2)$$

ここに  $\tau$ : 付着応力,  $t_s, t_c$ : シート及びコンクリートの厚さである。

シートおよびコンクリートは弾性体とし、弾性係数をそれぞれ  $E_s, E_c$  とする。

シートとコンクリートの間の付着応力  $\tau$  は、シートとコンクリートの相対変位  $\delta$  の関数であるとし、その関係は図-3 のように表わされると仮定する。

$$\delta = u_s - u_c \quad (3)$$

$$\tau = k \cdot \delta \quad (4)$$

ここに、 $u_s, u_c$ : シート及びコンクリートの変位、 $k$ : 付着の特性を表わす係数である。

以上より、シートとコンクリートの変位に関する基礎方程式(5)、(6)が得られる。

$$t_s \cdot E_s \frac{d^2 u_s}{dy^2} - k(u_s - u_c) = 0 \quad (5)$$

$$t_c \cdot E_c \frac{d^2 u_c}{dy^2} + k(u_s - u_c) = 0 \quad (6)$$

図-2 に示した 1 次元モデルにおいて、シートの定着区間長と剥離区間長を設定する。荷重  $P$  を与え、境界条件 ( $y=0$  において  $u_s=u_c=0$ ) のもとで式(5)、(6)を解くことにより、各部分にお

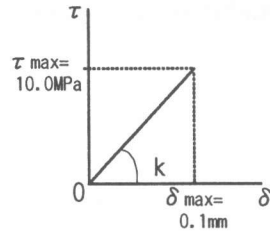


図-3 付着応力-相対変位関係

るシートとコンクリートの変位、応力、両者間の付着応力が得られる。荷重を増大させてゆき、定着区間と剥離区間の境界において、シートとコンクリートの相対変位が限界値  $\delta_{max}$  に達したとき、剥離が進展する。新たな定着区間長と剥離区間長を設定し、同様の手順を繰り返す。

図-2 の 1 次元モデルの右端をひび割れの中心とし、左右に折り返したモデルを考えると、ひびわれ幅は、剥離部分のシートの伸びと定着区間と剥離区間の境界における相対変位により表わされる。

$$w = \left( \frac{P}{E_s \cdot t_s} \cdot L_p + \delta_0 \right) \times 2 \quad (7)$$

ここに、 $w$ : ひびわれ幅、 $P$ : 荷重、 $L_p$ : CFR シートの剥離長さ、 $\delta_0$ : 定着区間と剥離区間の境界における相対変位である。

シートとコンクリートの間の相対変位と付着応力の関係は、接着層の特性を表わすものであり、主として接着剤により決まると考えているため。シートの種類 (炭素繊維、アラミド繊維) によらず同一とした。パラメータスタディの結果に基づき、最大付着応力  $\tau_{max}$  と限界相対変位  $\delta_{max}$  は、それぞれ 10.0MPa、0.10mm とした<sup>2)</sup>。

### 2.3 剛体モデル

終局時における主せん断ひび割れ幅の  $y$  方向成分の分布を剛体モデルにより評価した。なお、終局時におけるひび割れ幅は  $y$  方向成分が卓越し、 $x$  方向成分は閉じる傾向にあることは、著者らの実験により明らかにされている<sup>3)</sup>。

図-4 に鉄筋コンクリートはりの剛体モデルを

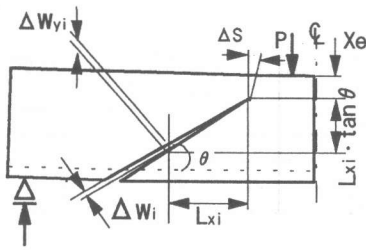


図-4 剛体モデル

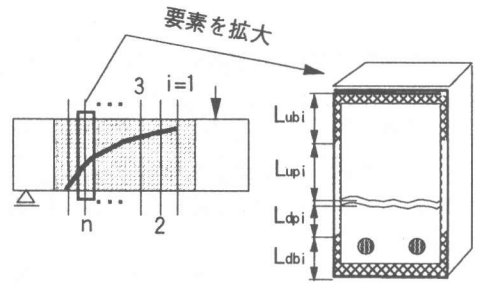


図-5 分割方法と定着・剥離長さ

示す。これは Walter のせん断圧縮理論<sup>4)</sup>に使用されているモデルを簡略化したものである。

剛体モデルより主せん断ひび割れ幅の y 方向成分  $\Delta w_{yi}$  は以下のように算定される。(詳細な定式化の手順及び仮定は著者らの既往の研究<sup>5)</sup>を参考されたい。)

$$\Delta w_i = \frac{L_{xi} \cdot \epsilon_b \cdot d \sqrt{x_e/d}}{y \cdot \cos \theta} \quad (7)$$

$$\Delta w_{yi} = \Delta w_i \cos \theta \quad (8)$$

ここに、 $\Delta w_i$ : i 番目の分割要素のひび割れ幅、 $L_{xi}$ : 主せん断ひび割れ先端から分割位置までのせん断破壊長さ、 $\epsilon_b$ : 終局時における圧縮縁のコンクリートひずみ、 $d$ : 有効高さ、 $x_e$ : せん断圧縮深さ、 $\Delta w_{yi}$ : i 番目の分割要素における主せん断ひび割れ幅の y 方向成分、 $\theta$ : 主せん断ひび割れの方向である。本論文では既往の研究<sup>3)</sup>を参考に  $\theta = 35^\circ$ 、 $x_e = 0.1d$  とした。

## 2.4 シートのせん断力の算定

シートが負担するせん断力は、はりを軸方向に等分割して算定する。この方法を図-5に示す。図中に i 番目の分割要素におけるシートの定着・剥離状態を示す。

$$L_{ui} = L_{ubi} + L_{upi} \quad (9)$$

$$L_{di} = L_{dbi} + L_{dpi} \quad (10)$$

ここに、 $L_{ui}$ : 主せん断ひびわれ幅より上部のシート長さ、 $L_{ubi}$ 、 $L_{upi}$ : 主せん断ひび割れより上部の定着・剥離長さ、 $L_{di}$ : 主せん断ひび割れより下部のシート長さ、 $L_{dbi}$ 、 $L_{dpi}$ : 主せん断ひび割れより下部の定着・剥離長さである。

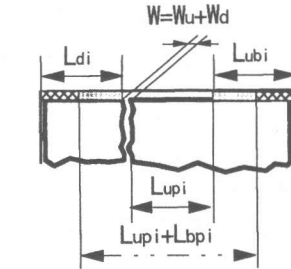


図-6 剥離長さ算定方法 (記号の解説)

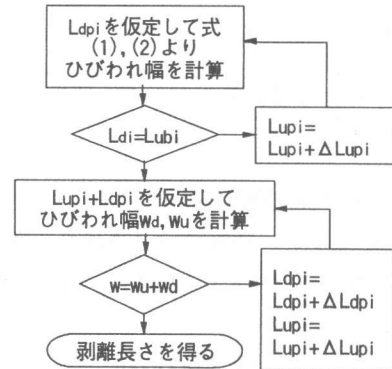


図-7 剥離長さ算定方法 (計算フロー)

終局時における i 番目分割要素の主せん断ひびわれ幅の y 方向成分は式(7),(8)より求められる。ここで、図-5に示す i 番目の分割要素は、ひび割れにおいて図-1の一次元モデルが2つ相対している状態と仮定する。ひび割れではシートに作用する引張力の釣合い及び以下に示す変形の適合条件を満足しなければならない。

$$\Delta L_{yi} = \Delta w_{ui} + \Delta w_{di} \quad (11)$$

ここに、 $\Delta W_{ui}$ : 剥離長さ  $L_{upi}$  によって生じるひび割れ幅、 $\Delta W_{di}$ : 剥離長さ  $L_{dpi}$  によって生じるひび割れ幅である。各分割要素におけるひび割れ位置と終局時のひび割れ幅は剛体モデルにより与えら

表-1 検討データの諸元

貼り付け方法	繊維種類	弾性係数 (Gpa)	有効高さ (mm)	一本のシート幅 (mm)	シート張付間隔 (mm)	供試体数
全面貼り	炭素繊維	240-430	200-280	-	-	9
	アラミド繊維	90	300-550	-	-	9
ゼブラ貼り	炭素繊維	240-430	200-600	20-50	50-100	14
	アラミド繊維	90	200-600	40	100	2

れている。図-6, 7 に以上の条件式を用いて剥離長さを算定する方法を示す。

i 番目の要素について、終局時における剥離長さが求まれば、シートひずみ  $\epsilon_{si}$  は以下の式(12)により算定する。

$$\epsilon_{si} = \frac{\Delta L_{yi} - \delta_{ui} - \delta_{di}}{L_{upi} + L_{dpi}} \quad (12)$$

ここに、 $\epsilon_{si}$ : i 番目の分割要素におけるシートひずみである。

部材中でシートが負担するトータルのせん断力  $V_f$  を以下の式により算定する。

$$V_f = \sum_{i=1}^N \epsilon_{si} \cdot E_s \cdot A_{si} \quad (13)$$

### 2.5 部材のせん断耐力の算定

終局時において、CFR シート以外のメカニズムにより受け持たれるせん断力  $V_c$  は以下の式(14)<sup>6)</sup>により算定する。

$$V_c = 0.2 \cdot (P_w \cdot f'_c)^{1/3} \cdot (d/1000)^{-1/4} \times [0.75 + (1.4/(a/d))] \quad (14)$$

以上より、部材のせん断耐力  $V_u$  を以下の式(15)により算定する。

$$V_u = V_c + V_f \quad (15)$$

### 3. 計算結果及び考察

#### 3.1 せん断耐力評価システムの検証

既往の実験データ<sup>7)~11)</sup>を用いて、提案したせん断耐力評価システムの検証を行う。検証に使用したデータの諸元を表-1 に示す。検証はシートの接着方法(全面貼り・ゼブラ貼り)ごとに分けて行う。(ここで、ゼブラ貼りとは帯状のシートを等間隔に接着することを指す)

図-8 に全面貼り供試体における実験値と提案

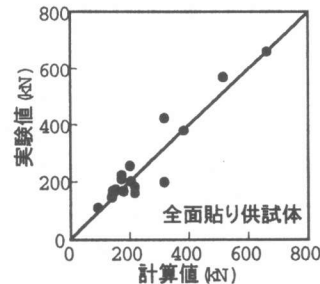


図-8 実験値と計算値の比較 (提案システム)

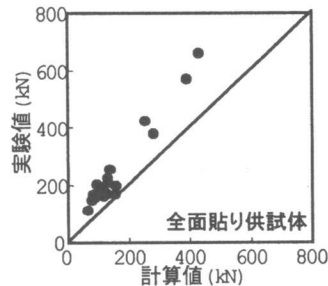


図-9 実験値と計算値の比較 (剥離長さ=はり背)

評価システムによる計算値の比較を示す。シートの付着と剥離を考慮することの影響を考察するため、剥離長さをはり背と等しいとしてシートの引張力を計算した結果を図-9 に示した。これら 2 つの図を比較すると、シートの付着と剥離を考慮した提案評価システムによる計算値は実験値と整合性が良いことがわかる。また、付着・剥離構成モデルにおいてシートの弾性係数は考慮されている。よってシートの種類、すなわち弾性係数の違いによらず、同一のシステムでせん断耐力を評価することが可能になる。両算定法の耐力比  $\mu$  と変動係数 CV は以下の通りである。

・提案評価システムによる場合

$$\mu = 1.16, CV = 15.75\%$$

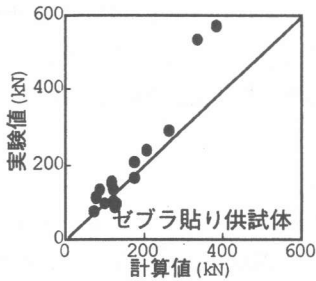


図-10 実験値と計算値の比較  
(提案システム)

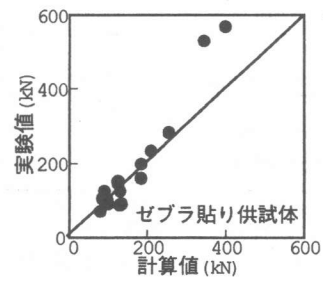


図-11 実験値と計算値の比較  
(剥離長さ=はり背)

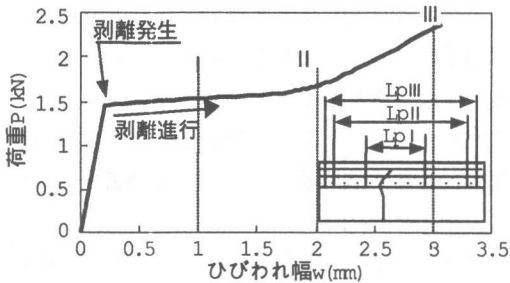


図-12 分割要素における荷重とひび割れ幅の  
関係

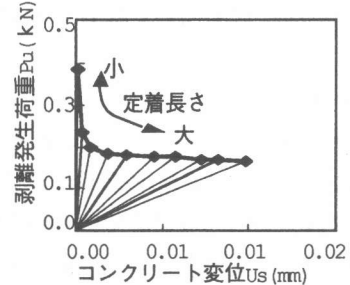


図-13 一次元モデルによる剥離発生荷重とコン  
クリート変位の関係

・剥離長さをはり背と等しいとした場合

$$\mu = 1.61, CV = 17.81\%$$

シートの付着と剥離を考慮せず、剥離長さをはり背と等しいとした場合は、剥離長さを過大に評価することになり、その結果シートの負担するせん断力を過小に評価してしまうことが実験値と計算値が乖離する原因である。特に有効高さが大きくなるとその影響は顕著である。このことは、シート補強したコンクリート構造のせん断耐力評価において、シートの付着と剥離性状を評価することの重要性を示すものである。

ゼブラ貼り供試体における同様の比較を図-10、図-11 に示す。これらにおける耐力比と変動係数は次の通りである。

・提案評価システムによる場合

$$\mu = 1.10, CV = 22.77\%$$

・剥離長さをはり背と等しいとした場合

$$\mu = 1.10, CV = 24.27\%$$

ゼブラ貼りの場合は、付着と剥離の考慮の有無に関わらず有効高さが大きくなると計算値と

実験値との整合性が良くないことが分かる。この理由としては付着・剥離モデルに基づく剥離長さの評価が若干過大であることが原因であると思われる。このことについては次節で詳細に議論する。

しかしながら、全面貼り供試体の計算値は実験値との整合性は良好であった。現段階では、このような結果を招く要因が特定できない。剥離長さ・主せん断ひびわれ幅・付着応力-相対変位関係が耐力評価に及ぼす影響を詳細に検討することが今後の課題である。

### 3.2 シート剥離長さに関する考察

図-12 は主せん断ひび割れ中央付近の分割要素における、付着剥離モデルで計算した荷重  $P$  とひびわれ開口変位  $w$  の関係を示したものである。図中に分割要素における 3 つのひび割れ開口変位 (I~III) それぞれに対応するシートの剥離長さ  $L_{pI} \sim L_{pIII}$  を示してある。ひび割れの開口に伴い、ひび割れを基点として左右に剥離領域が

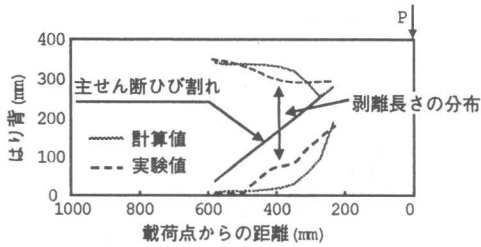


図-14 終局時におけるシート剥離長さの分布

進展していることが分かる。しかしながら、剥離長さは左右同一ではない。以下にその理由を示す。

図-13 は一次元モデル (図-1 参照) で定着長さを変化させた時の剥離発生荷重  $P_u$  と載荷点におけるコンクリート変位  $u_c$  関係の一例を示したものである。図中には剥離発生荷重に対する包絡線を記した。図より、シート定着長さが短くなるに従って剥離発生荷重は増加することが分かる。換言すれば、はり部材の分割要素では主せん断ひび割れを起点に定着長さの長い側から先に剥離が発生することになる。この原因は図-1 のモデルにおいて端部を固定端、すなわち  $y=0$  において  $u_s=u_c=0$  としていることによるものである。せん断耐力評価システムにおいても、この境界条件を採用している。

図-14 は終局時におけるシート剥離長さの分布を示したものである。実験値は著者らの既往の実験<sup>11)</sup>において測定したシートのひずみ分布から推定した。計算値は今回提案した評価システムによるものである。実験値に見られる主せん断ひび割れに沿った剥離領域の分布の大略の傾向、および主せん断ひび割れをはさんで上下で剥離長さが異なることは計算値において再現されている。しかしながら、主せん断ひび割れの中ほどにおいて、計算値は実験値よりも剥離長さを過大に評価する傾向にあることが分かる。この原因のひとつとして、計算において仮定した境界条件が実際の現象とは異なることが考えられる。すなわち、実際のはりではシートに引張力が作用するとはりの隅角部ではシートとコ

ンクリートのすべり ( $y=0$  において  $u_s \neq u_c$ ) が生じると考えられる。付着・剥離構成モデルとならんで、境界条件の検討が今後の課題である。

#### 4. まとめ

本研究では CFR シートの付着・剥離性状及び終局時における部材の変形に基づきシート補強されたコンクリート部材のせん断耐力評価方法を提案した。シートの付着・剥離性状を考慮することの有効性を示すとともに、シートの貼り付け方法によっては提案手法によっても十分な精度で予測できないことが明らかとなった。実際の部材中におけるシートの挙動について検討を重ね、精度と適用性に優れた予測手法へと改良する予定である。

本研究で使用した CFR シートは三菱化学(株)、帝人(株)に提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書，1997.7
- 2) 佐藤裕一，木村耕三，小島克朗：CFR シートとコンクリートの付着挙動（その1），日本建築学会構造系論文集，第500号，pp.75-82，1997.10
- 3) 趙唯堅，丸山久一：連続繊維補強コンクリートのはりのせん断耐荷機構とせん断耐力評価，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.1-17，1997.11
- 4) R.Walter：Über die Berechnung der Schubr-agfähigkeit von Stahl-und Spanbetonbalken，B. Unt.Bst.，1962.11
- 5) 上原子晶久，丸山久一，下村匠，西田浩之：付着を考慮した連続繊維補強コンクリートのせん断性状に関する解析的研究，構造工学論文集 Vol.44A，pp.1309-1306，1998.3
- 6) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 7) 加藤博文，児島孝之，高木宣章，濱田譲：炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートのはりのせん断補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.101-106，1996.7
- 8) 佐藤靖彦，田中高明，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報告集，Vol.18，No.2，pp.1469-1474，1996.7
- 9) 宮内克之，井上正一，西林新蔵，田中良典：CFR シートでせん断補強した鉄筋コンクリートのはりのせん断挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1605-1610，1997.7
- 10) UMEZU, K. et al. : Shear Behavior of RC Beams with Aramid Fiber Sheet, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Proceedings of the Third International Symposium Vol.1, pp.491-498, 1997.10
- 11) 石崎克匡，丸山久一，下村匠，高田賢司：連続繊維シートによりせん断補強された RC はりのせん断耐力における寸法効果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.201-206，1997.7