

論文 連続繊維シート補強部材のせん断耐力に関する感度解析

新保 学幸^{*1}・下村 匠^{*2}・丸山 久一^{*3}・上原子 晶久^{*4}

要旨: 連続繊維シートとコンクリートの付着構成モデルに基づきシートの剥離現象を考慮した、シート補強コンクリート棒部材のせん断耐力算定法を用いて、補強後の部材の破壊モードとせん断耐力に及ぼす、シートの物性値、接着層の力学特性、シートの積層数、定着方法の各種要因の影響の感度解析を行った。解析結果をもとに、効率的な補強を実現する設計諸元の範囲、材料特性値の範囲について論じた。

キーワード: 連続繊維シート、剥離、付着構成則、せん断耐力

1. はじめに

炭素繊維、アラミド繊維などの連続繊維シートを、既設コンクリート構造物の表面に接着、あるいは外周を巻立てる補強工法の適用例が増加の一途をたどっている¹⁾。合理的な補強設計法の確立が急がれる。

連続繊維シートは降伏しない材料であるので、補強部材中でシートが負担する力を算定するには、シートのひずみを評価する必要がある。一方、シート直下のコンクリートのひび割れの開口にともないシートの剥離が生じた場合、シートのひずみはひび割れ幅と剥離長さに依存することとなる。したがって、シート補強部材の耐力を合理的に評価するには、弾性係数や引張強度などのシート単体の物性値のみならず、シートとコンクリートとの間の剥離を考慮することが鍵となる。このような観点から、著者らは、

- ①連続繊維シートとコンクリートとの間の付着構成モデルに基づく、剥離の進展解析²⁾
- ②一軸引張付着試験による連続繊維シートとコンクリートとの付着・剥離特性の定量化²⁾
- ③剥離の進展解析に基づく、シート補強部材のせん断耐力算定法の開発³⁾⁴⁾

を進めてきた。

本論文では、開発した③のせん断耐力算定法を用いて、部材のせん断耐力に及ぼす各種要因の感度解析を行う。シートの物性（弾性係数、引張強度）、接着層の力学特性、補強量（シートの積層数）、シートの定着方法などの要因が、補強部材の破壊モードとせん断耐力に及ぼす影響をパラメトリックに調べ、効率的な補強を実現する設計諸元の範囲、材料特性値の範囲を検討する。連続繊維シートを用いた補強設計法の確立、シート、接着樹脂の材料開発に有効な情報を得ることを目的としている。

2. せん断耐力評価法の概要

2.1 計算条件

連続繊維シートにより巻立て補強した鉄筋コンクリート棒部材のせん断耐力 V_u は、次式により算定する。

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

ここに、 V_c : コンクリートが負担するせん断耐力、 V_s : せん断補強鉄筋が負担するせん断耐力、 V_f : 連続繊維シートが負担するせん断力である。右辺の $V_c + V_s$ は補強前の部材のせん断耐力に他ならないので、コンクリート標準示方書⁵⁾に準じて算定する。本研究で実質的に検討対象となるの

*1 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)
 *2 長岡技術科学大学助教授 工学部建設・環境系 工博 (正会員)
 *3 長岡技術科学大学教授 工学部建設・環境系 Ph.D (正会員)
 *4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 工修 (正会員)

は、連続繊維シートが負担するせん断耐力 V_{cf} である。 V_{cf} は以下の仮定に基づき算定する³⁾⁴⁾。

- (1) せん断ひび割れは部材軸と35度を成すものとする。(図-1)
- (2) せん断ひび割れ発生以降の部材の変形は、せん断ひび割れの先端を回転中心とした剛体回転により表されるとする。(図-1)
- (3) せん断ひび割れを横断するシートの剥離過程は、コンクリートを剛体、シートを弾性体と仮定し、図-2 で表されるシートとコンクリートとの間の相対変位と付着応力の関係(付着構成則)を用いた応力解析により評価できるものとする。
- (4) 圧縮部コンクリートのひずみは、剛体回転を仮定した部材の回転角の関数として表されるものとする。

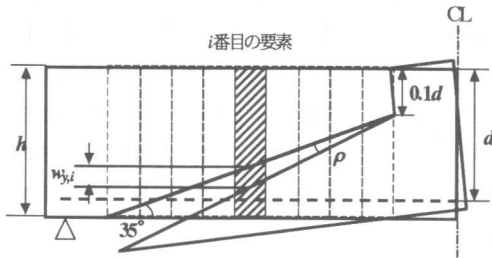


図-1 部材のモデル化

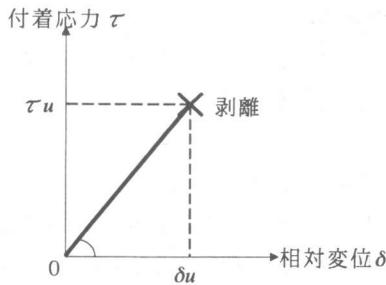


図-2 付着構成則

2.2 計算手順

図-1 に示したように、対象部材のせん断ひび割れが横断する区間を軸方向に要素分割し、剛体回転モデルにおける回転角 ρ を段階的に増加させながら、各変形段階においてシートが負担するせん断力 V_{cf} を求める。

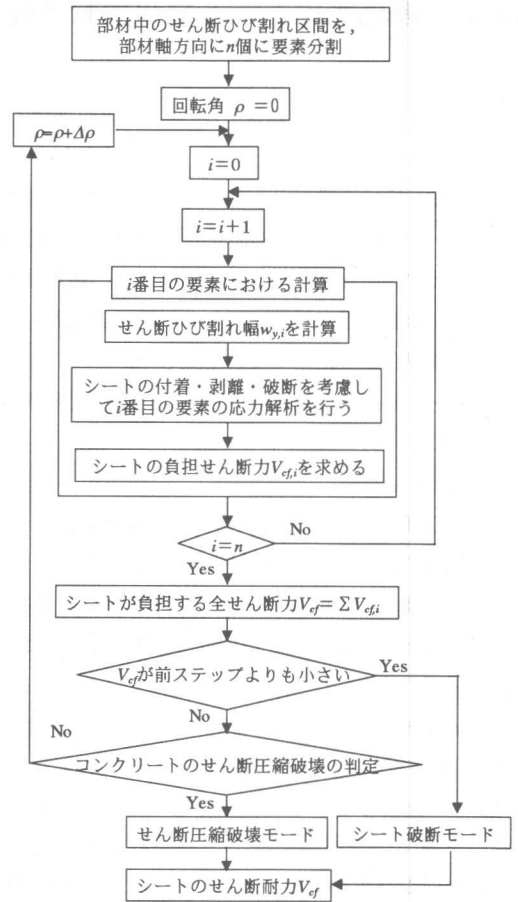


図-3 シートのせん断耐力算定フロー

計算フローを図-3 に示す。剛体回転モデルより求められた、各変形段階・各要素におけるせん断ひび割れ幅 $w_{y,i}$ を 変形適合条件として各要素の応力解析を行い、各要素におけるシートの剥離状態、ひずみ分布、応力を評価する。(図-4)

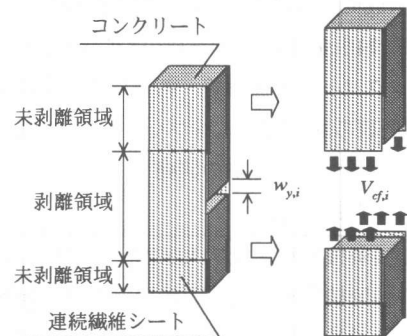


図-4 i 番目の要素の計算モデル

各要素のシートが負担するせん断力 $V_{cf,i}$ を足し合わせ、部材中において連続繊維シートが負担する全せん断力 V_{cf} を評価する。

$$V_{cf} = \sum_{i=1}^n V_{cf,i} \quad (2)$$

部材の回転角 ρ を段階的に増加させてゆく過程で得られる V_{cf} の最大値が、終局時においてシートが負担するせん断耐力 V_{cf} となる。部材のせん断破壊モードは、大別して、シートの破断により最大耐力が決定される「シート破断モード」と、圧縮部コンクリートの破壊により終局状態を迎える「せん断圧縮破壊モード」があり、本法はそのいずれも考慮できることとなる。

2.3 適用性

本せん断耐力評価法は、著者らおよび他の研究者が行った炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートにより巻立て補強された鉄筋コンクリートはり供試体の実験データを用いて検証を行っている（図-5）。検証の詳細は別報⁴⁾に譲るが、本法はシート補強部材のせん断耐力を、破壊モードの判定を含めて完全ではないものの、十分な精度で算定できることが確認されている。

本法の特徴は、シートの物性値や接着層の付着特性などの諸要因が、自然な形式で考慮できることである。そこで本論文では、本法を用いて、それら諸要因が補強部材のせん断耐力に及ぼす影響を、数値実験により検討することにしたのである。

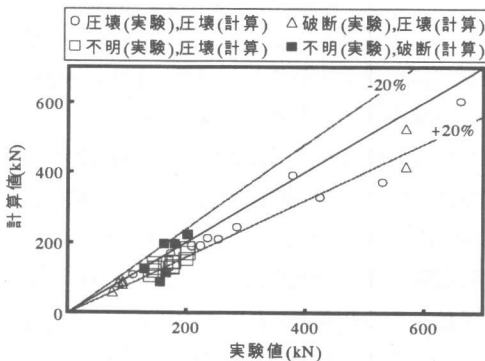


図-5 本せん断耐力評価法の検証

3. シートの物性に関する検討

3.1 弾性係数

現在コンクリート構造物の補強に用いられている連続繊維シートの物性値には、選択の幅がある¹⁾。シートの物性が補強効果に与える影響の把握は、合理的な補強設計を行う上で重要であり、材料開発の道標となる。まず、連続繊維シートの弾性係数が、シートが負担するせん断耐力 V_{cf} に及ぼす影響について検討した。弾性係数の範囲は、実在する炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートの弾性係数を参考に 80~440GPa とした。シートの引張強度は 3000MPa で一定とした。したがって、シートの破断ひずみは弾性係数にともなって減少させている。その他の計算条件は表-1に示す。

表-1 計算条件

部材の高さ h (mm)	350
部材の有効高さ d (mm)	300
コンクリートの圧縮縁破壊ひずみ (μ)	2500
シートの厚さ t_s (mm)	0.05~0.6
シートの弾性係数 E_s (GPa)	80~440
シートの引張強度 f_s (MPa)	1000~4000
接着層の剥離せん断応力 τ_u (MPa)	0.94~60
接着層の剥離変位 δu (mm)	0.025~1.6

図-6 は、シートの弾性係数と終局時においてシートが負担するせん断耐力 V_{cf} の関係を、シートの厚さ（積層数）ごとに示したものである。

シートの弾性係数が低い場合、剥離しやすく破断しにくい。そのため破壊モードは、せん断圧縮破壊モードとなる。本計算条件下では、弾性係数 300GPa 以下の場合、シートの厚さ（積層数）に関わらず、せん断圧縮破壊モードとなった。せん断圧縮破壊モードの範囲では、シートが負担するせん断耐力 V_{cf} は、シートの弾性係数にともなってほぼ線形に増大する結果となった。

ここでの検討では、シートの破断ひずみを弾性係数に応じて減少させるので、弾性係数が大きくなると、破壊モードはコンクリートの圧縮破壊に先行してシートが破断するシート破断モードに移行する。シート破断モードの場合、 V_{cf} はシートの引張強度に依存すると考えられる。ここでは、

引張強度を一定としているので、 V_{cf} はほぼ一定となった。完全に一定とならないのは、弾性係数によって、剥離領域の分布が異なるからである。

シートの弾性係数がさらに大きくなると、破断ひずみが極端に小さくなるため、接着されていたシートが剥離条件を満足するよりも先に破断(未剥離破断)するようになる。このような破壊モードの場合、シートの伸び能力を有効に生かすことができず、良好な補強効果が得られないことがわかる。図-6によると、計算を行ったシートの弾性係数が80~440GPaの範囲では、シートの厚さが小さい(シート1層に相当)ケースに未剥離破断が生じている。この結果から直ちに定量的なことはいえないが、破断ひずみの小さいシートを用いる場合、未剥離破断を避けるためには、最小補強量に留意する必要があることが示唆される。

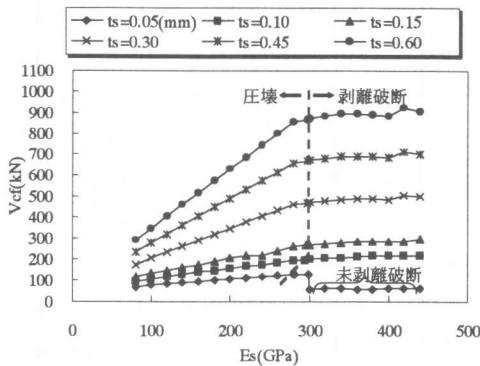


図-6 シートの弾性係数 E_s とせん断耐力 V_{cf} の関係

3.2 引張強度

連続繊維シートの弾性係数を240GPaで一定として、引張強度をパラメトリックに変化させた場合のせん断耐力 V_{cf} の変化を図-7に示す。引張強度の範囲も、現在実際に使用されているシートの物性値を参考に1000~4000MPaとした。その他の計算条件は、前節と同じく表-1の値を用いた。

シートの引張強度がせん断耐力に及ぼす影響は、弾性係数の影響を検討した前節の結果から予想できる結果が得られた。すなわち、引張強度が低いと、シートは破断しやすく未剥離破断が生じ、

引張強度が剥離開始時のシートの応力を超えるようになると剥離後にシートが破断する通常の破断モードとなり、せん断耐力 V_{cf} は急激に上昇する。引張強度をさらに大きくすると、せん断圧縮破壊モードに移行し、以降は V_{cf} が増加しない。

未剥離破断を生じさせないためには、シートの積層数がある程度以上とする必要があること、破断ひずみの小さいシートほど、そのような下限補強量が大きくなるのがわかる。また、破壊モードがせん断圧縮破壊モードとなる場合、せん断耐力を増加させるには、引張強度のより高いシートを用いても効果は期待できず、むしろシートの積層数を増加させるのがよいことがわかる。

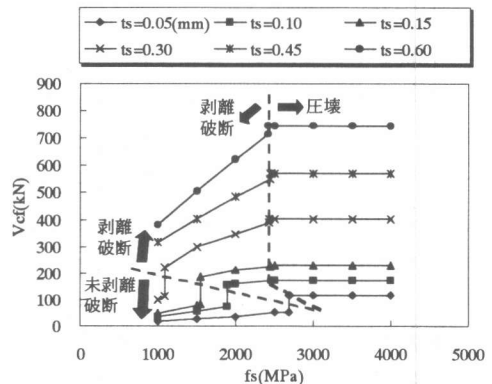


図-7 シートの引張強度 f_s とせん断耐力 V_{cf} の関係

4. 接着層の力学特性に関する検討

4.1 剥離せん断応力

本研究で用いたせん断耐力評価法では、シートとコンクリートの間の接着層の力学特性が付着構成則により考慮されているので、その影響を数値実験により検討することが可能である。一軸引張付着試験を用いた著者らの既往の研究²⁾によれば、標準的な接着方法によった場合、接着層の力学特性は、シートの物性値、コンクリート強度によらず、ほぼ一定となることが明らかとなっている。接着層の力学特性は、接着樹脂の性質に最も大きく依存すると考えられるが、現状では連続繊維シートに比べ、接着樹脂は物性値の選択の幅が大きい。しかし、今後の材料開発の観点から、

接着層の力学特性が部材レベルの構造特性に及ぼす影響を把握しておくことは有意義であると考えた。

図-8 は、接着層の付着構成モデルにおける剥離せん断変位 δ_u を0.2mmと一定として、剥離せん断応力 τ_u をパラメトリックに変化させた場合のせん断耐力 V_{cf} を、シートの厚さ(積層数)ごとに示したものである。 τ_u を増大させるにつれ、剥離しにくくなり、剥離領域が狭くなるので、終局時のシートのひずみが大きくなり、せん断耐力 V_{cf} は増大する。しかし、さらに τ_u を増大させると、破壊モードがシート破断モードに移行し、シートの応力分配が効率的でなくなるために、せん断耐力 V_{cf} が減少する。破壊モードがせん断圧縮破壊モードからシート破断モードに移行するときのせん断耐力が最も高い。図-8の結果では、シートの積層数が2層以上の場合、現状の標準的な値である $\tau_u=7.5\text{MPa}$ から τ_u を増大させる効果は期待できることがわかる。

なお $\tau_u=0$ のケースは、部材上下端におけるシートの定着のみを行い、コンクリートとシートとの間に接着を行わない場合に相当する。

4.2 剥離せん断変位

図-9 は、付着構成モデルにおける剥離せん断応力 τ_u を7.5MPa、シートの弾性係数を240GPa、引張強度を3000MPaで一定として、剥離せん断変位 δ_u をパラメトリックに変化させた場合のせん断耐力 V_{cf} を、シートの厚さ(積層数)ごとに示したものである。図-8と同様の結果となった。すなわち、接着層の剥離せん断変位 δ_u を標準的な値である0.2mmより増大させることにより、せん断耐力の向上が期待できる。

接着層の力学特性の本質的な影響を明らかにするために、接着層の界面剥離破壊エネルギー(付着構成モデルの τ - δ 曲線に囲まれた面積)を一定とした計算を行った。その結果が図-10である。 τ_u がきわめて小さい範囲を除き、破壊エネルギーが一定ならば、せん断耐力 V_{cf} は、 τ_u 、 δ_u の値によらずほぼ一定となった。

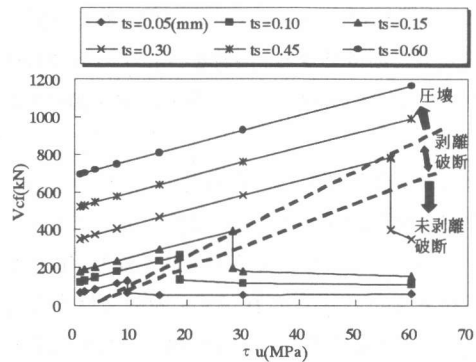


図-8 接着層の剥離せん断応力 τ_u とせん断耐力 V_{cf} の関係

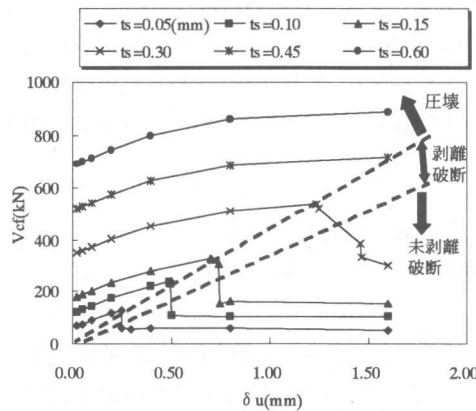


図-9 接着層の剥離せん断変位 δ_u とせん断耐力 V_{cf} の関係

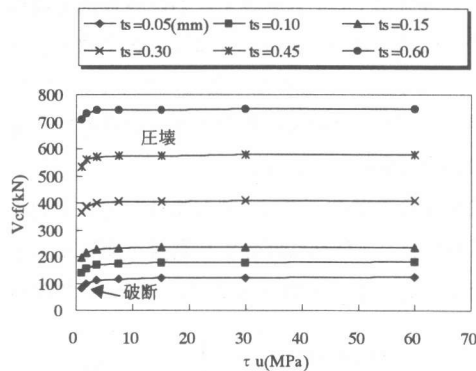


図-10 接着層の剥離せん断応力 τ_u とせん断耐力 V_{cf} の関係(破壊エネルギー一定の場合)

5. 巻立て方法に関する検討

5.1 接着を行わない場合

棒部材のせん断補強の場合、シートとコンクリートをすべての接触面で接着しなくとも、端部の

定着，あるいはシートの閉合により，ある程度の補強効果が期待できる。接着を行わない場合のせん断耐力について検討した。その結果を図-11に示す。

せん断圧縮破壊モードの場合は，終局時における部材の回転角が同じになるので，未剥離領域が残っている限りシートの応力は高くなり，したがって接着を行う場合の方がせん断耐力は大きくなる。シート破断モードの場合は，破断の生じた部分でのシートの応力は同じになるが，接着を行っている場合，部材軸に沿ったシートの応力分布が接着を行っていない場合よりも均一化されるために，部材中においてシートの受け持つせん断力は大きくなる。したがって，いずれの破壊モードの場合も，シートの接着を行った方がせん断耐力は大きくなる。

5.2 定着を行わない場合

実構造物中では，たとえば桁の上フランジなどのために，連続繊維シートを部材の全周にわたり巻立てることができない場合がある。そのような場合，閉合できない端部において機械定着などが行われる。定着を行わない場合，補強効果はどの程度損なわれるか検討した。本研究で用いたせん断耐力評価法では，分割要素における端部の境界条件の変更により，そのような状況を考慮できる。はりにU字型に接着することを想定し，下端部では定着，上端部では未定着の条件で計算を行った。その結果を図-11に示す。

このような条件下では，せん断ひび割れ上側の未定着側は，ひび割れ部分から剥離を開始するとただちに上端まで剥離することとなる。したがっ

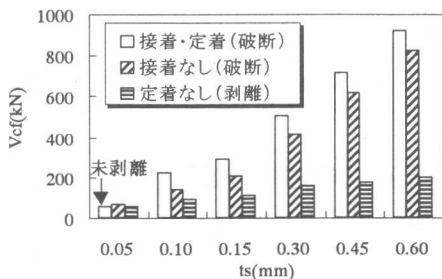


図-11 せん断耐力 V_{cf} への巻立て方法の影響

て，破壊モードは，閉合巻立ての場合には見られなかった「剥離破壊モード」となる。この場合，図-11に明らかなように，補強効果は小さいばかりか，積層数を増やす効果が期待できない。

6. まとめ

連続繊維シート補強部材のせん断耐力に関して感度解析を行った結果，以下が明らかとなった。

- (1) シートの破断ひずみが小さい場合，シートが未剥離のまま破断する場合がある。
- (2) せん断破壊モードがシート破断モードの範囲では，シートの引張強度を増加させることがせん断耐力の向上に有効であるが，せん断圧縮破壊モードの範囲では有効ではない。
- (3) シートとコンクリートの接着層の破壊エネルギーを増大させることは，せん断耐力の向上をもたらす。
- (4) シートとコンクリートの接着を行わない場合，行った場合よりもせん断耐力が低下する。
- (5) シートの端部の定着を行わない場合，せん断補強効果が著しく損なわれる。

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（II），1998.5
- 2) 上原子晶久，下村匠，丸山久一，西田浩之：連続繊維シートとコンクリートの付着・剥離挙動の解析，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.197-208，1999.11
- 3) 上原子晶久，丸山久一，下村匠，西田浩之：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，コンクリート工学論文集，Vol.20，No.1，pp.497-502，1998.7
- 4) 上原子晶久，下村匠，丸山久一：連続繊維補強コンクリート部材のせん断耐力評価法に関する研究，土木学会論文集，投稿中
- 5) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，1996.3