

# 論文 無損傷領域に繊維シート材料を配置した予防的先行補強の効果

川中 勲<sup>\*1</sup>・千々和 伸浩<sup>\*2</sup>・前川 宏一<sup>\*3</sup>

**要旨**：RC 梁の主筋定着部に腐食ひび割れなどの損傷が在る場合、健全な梁に比べて大幅に耐力が低下する。これに対して、非損傷部位に選択的に繊維シート材料を付与する予防的な先行補強を検討した。SRF 補強材、CFRP 補強材を用いた実験から、シートの拘束によるせん断ひび割れの開口が抑制され、既存の損傷領域のせん断抵抗の増加と相まって部材耐力の回復が見られた。有限要素解析による補強機構の検討を行い、圧縮筋の付加的な補強効果、せん断スパンと定着部損傷の違いによる補強効果への影響を検討した。

**キーワード**：定着部損傷、予防的先行補強、SRF 補強、CFRP 補強、シート剥離

## 1. はじめに

高度経済成長期に整備された構造物の多くは、今なお我が国の社会経済を支える重要基盤である。しかし、経年とともに、これらの構造物に劣化などの諸問題が顕在化するようになってきた。

鉄筋腐食は RC 部材の劣化損傷の中でも代表的なものであり、発生機構と構造性能への影響が明らかにされてきた。鉄筋腐食の影響をひび割れ発生位置から分類すると、せん断スパン内と定着部とで、その影響度は大きく異なることが知られている。せん断スパン内に腐食ひび割れが発生した場合、定着部が十分に健全ならば、タイドアーチ機構が形成されることで終局耐力は増加する場合がある<sup>1)</sup>。一方、主鉄筋の定着部に腐食ひび割れが発生した場合には、鉄筋とコンクリートの合力による耐荷機構が維持できず、部材耐荷力が著しく低下する上、原状回復が難しい<sup>2)</sup>。

千々和らは、定着部に損傷を有する RC 部材の挙動に着目し、損傷部位ではなく、将来、損傷の進展が予想される個所に先回りして補強する予防的な“先行補強”を施すことで、部材性能を回復する補強法の有効性を検討した<sup>3)</sup>。今後、先行補強の成立要件を定量的に明確にするとともに、策定された補強計画の事前照査方法を提示することが、実用化に向けた課題といえる。

本研究の目的は、先行補強の成立要件を実験と解析から検討するものである。有効性の期待できる繊維シート材料の力学的特性と先行補強効果、原設計の配筋詳細が補強効果に与える影響、せん断スパン比と定着部損傷の大きさが補強効果に与える影響、の3点に着目する。

## 2. 繊維シート材料特性による補強効果の検証実験

### 2.1 使用する繊維シート材料

表-1 使用するシートの特性

補強材	SRF シート	CFRP シート
素材	炭素繊維	ポリエチレン繊維
ヤング率	4.5GPa	245GPa
破断強度	400MPa	3400MPa
破断歪	10%	1.5%
厚さ	5mm	0.25mm
接着剤の種類	ポリウレタン系	エポキシ系

補強に用いる繊維材料として、SRF<sup>4)</sup>とCFRP<sup>5)</sup>(炭素繊維)シートの2種類を実験に用いた。両者の材料特性を表-1に示す。SRF シートのヤング率は低く、破断歪が大きい。対してCFRP シートの剛性は鋼材のそれに近く、一方で破断歪は1.5%と小さい。1層あたりの補強量を換算すると、CFRP シート0.25mmがSRF15mm補強と同程度の剛性を与え、SRF5mm補強はCFRP0.25mm補強の3分の1の補強量となっている。

### 2.2 試験供試体概要

定着部に鋼材腐食等のひび割れ損傷を有する部材を模擬して、図-1に示すRC梁を作製した。使用したコンクリートの骨材最大寸法は20mmであり、実験時の圧縮強度は41.04MPa、引張強度は3.16MPa、主鉄筋の降伏強度は718MPaであった。定着部損傷として、1mm厚のスチレンボードを主鉄筋上に設置した状態でコンクリート打設を行い、モデル損傷面を構築した。滑らかな定着部損傷面を作成することで定着部損傷の影響を顕在化させ、鉄筋の定着性能がほぼ失われた状況を想定したものである。打設から28日経過後にスパン内全面に巻き立てによるシート補強を行った。

主筋のみを梁部材に配置し、繊維シート補強を行わず、かつ端部損傷が無い場合、土木学会コンクリート標準示方書式に従って算定した曲げ耐力は433kN、せん断耐力は164kNであった。

\*1 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (正会員)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 工修 (正会員)

\*3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 工博 (正会員)

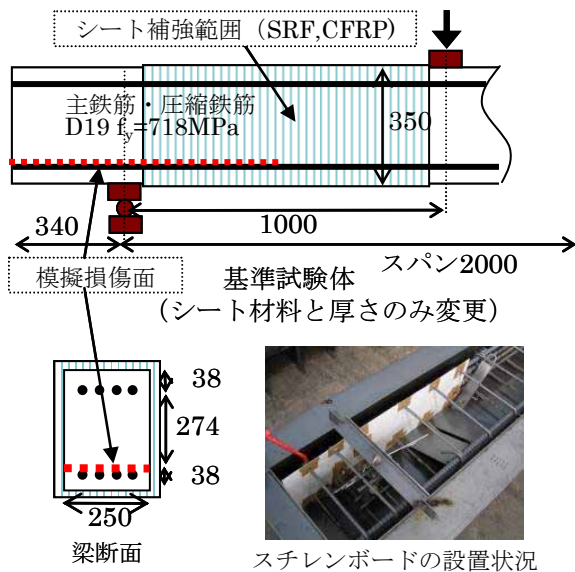


図-1 試験体諸元

なお、荷重は万能試験機を用い梁中央部に変位制御で加重を加えた。また、千々和<sup>6)</sup>によるSRF15mm補強供試体の実験を比較対照として記載している。

## 2.3 実験結果

### (1) SRF5mm (1層) 補強供試体

実験結果を図-2、図-3に示す。80kNで片側のモデル損傷面先端からせん断ひび割れが発生、荷重の急落が生じた。同時に梁端部のモデル損傷面上でずれが生じ、斜めひび割れと交差した箇所の圧縮鉄筋下面のひずみ値が、圧縮から引張に推移したことが確認された。荷重が90kN、荷重点たわみが9.9mmに達した時点で、これまで無傷であった側のモデル損傷面先端からもせん断ひび割れが形成され、荷重が51kNまで急落した。その後は、千々和による実験で生じた再増加と類似したパターンで上昇に転じ、132kNに達するまで荷重は増加した。たわみが20mmを超えた後から、モデル損傷面を介した上下コンクリートの水平方向のずれが進行し、接着剤部分でのシートの剥離が目視により観察された。さらに変位を増加させ、最終的には荷重156.8kNを迎えたところで試験機の容量超過に至り、荷重を終了した。

終局状態では、繊維シート材料の剥離はモデル損傷面近傍の十数cmの範囲で生じており、圧縮筋の位置までは進行していなかった。荷重終了後シートを剥がし、ひび割れの観察を行ったところ、損傷面先端から発生した斜めひび割れが1cm近く開口していた。スパン中央部付近では、モデル損傷面の先端から部材軸方向に進展し、その後、荷重点方向に向かうような斜めひび割れが観察された。圧縮筋と斜めひび割れが交差する点から圧縮筋に沿って部材軸方向に進展したひび割れも観察された。

### (2) CFRP0.25mm 補強供試体

荷重107.2kNで一方のモデル損傷面先端から斜めせ

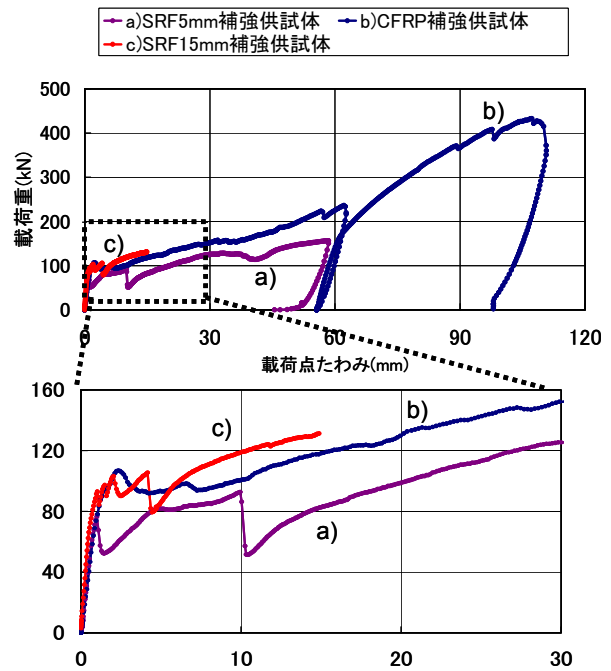
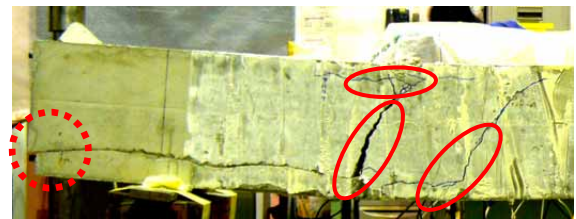
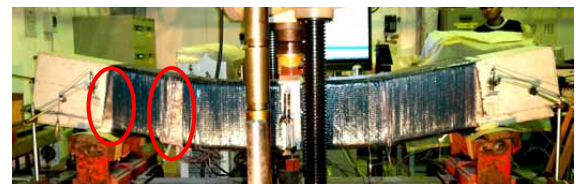


図-2 荷重変位関係(下図は部分拡大)



SRF補強供試体終局(シートを剥した状態)



CFRP補強供試体終局

図-3 終局状態の写真

ん断ひび割れが発生し、荷重は緩やかに低下した。約92kNにまで低下した後、荷重は微増に転じた。荷重が98.3kNまで回復した時点で、もう片方のモデル損傷面先端からもせん断ひび割れが発生し、荷重は緩やかに低下した。その後、再度荷重は増加し、たわみ23mmでせん断ひび割れ近傍で局所的なシート破断が生じるも、荷重の低下は見られなかった。157.8kNに達した際に、せん断ひび割れ近傍で破裂音とともにシートが破断した。剥離は接着材の塗布面ではなく、コンクリート表面部分と一体となって生じたものである。2~3kN程度の低下の後、再び荷重は増加に転じ、荷重点のたわみが30~40mmの間で局所的な破断を繰り返しながらも、荷重は増加を維持した。この間に打音により剥離状況を確認したところ、モデル損傷面近傍から圧縮縁側に向かって剥離が進行している様子が伺えた。荷重が237.2kNに達した時

点で試験機の載荷許容範囲を超える恐れがあったため、載荷を一旦終了し、2日後に再度試験を開始した。載荷重は既往最大値を超えて増加し、載荷点たわみが89mmに達した時点で、モデル損傷面から生じた斜めひび割れの近傍で、大きな音とともに約10cm幅に渡るシートの破断が同時に生じた。ここで載荷重は一旦低下し、その後増加に転じるが、せん断ひび割れ近傍で広範囲にわたってシートの破断が進行し、載荷重433kNに達した時点で終局を迎え、その後、載荷重はシートの破断によって350kNまで低下した。

## 2.4 考察

### (1) 共通に見られる補強効果

いずれの梁も変位の増加と共に梁定着端部の損傷に沿って過大なずれが生じる(図-3の赤点線の丸の位置)。さらにモデル損傷先端から発生した斜めひび割れが圧縮鉄筋と交差する個所に曲げが集中し、損傷先端で梁が折れ曲がる変形が生じた。繊維シート材料がせん断ひび割れの開口を面的に抑制し、同時にモデル損傷面を介した上下面を力学的に繋ぐ役割を果たしたことが、斜めひび割れ発生後にも載荷重が増進した理由と考えられる。

### (2) 材料特性の違いによる影響

5mm厚のSRF補強ではCFRP補強と比べて斜めひび割れ発生後の載荷重が30kN程度低い値で推移する。前者は後者に比べて幅当たりの剛性が約3割と、せん断ひび割れの開口を抑制する能力が小さかったことがその理由と考えられる。変形の増加に従い、CFRP補強の方がSRF補強に比べて部材耐力は大きくなっている。これはシートの接着剤強度に因るものと考えられる。SRF補強供試体で用いた接着剤の強度は高くないが、変形追従性が大きい。従って、剥離は接着材の塗布面で生じ、変位の増加につれて剥離域が徐々に拡大していく。応力を負担する部材範囲も急激には変化せず、変形が進行しても、残存荷重はほぼ安定している。

しかし、CFRP補強供試体では接着剤塗布面ではなくコンクリート表層部で剥離が生じ、変位増加と共に急速に剥離領域が拡大した。剥離は軸方向のコンクリートの変形拘束を緩和するため、ひび割れの開口が進む。結果として益々、補強材にひずみが蓄積される。このとき、剥離によってひび割れ近傍の材料だけで力を受け持っていた状態から、繊維が梁高さ方向に一樣に面内力を受け持つモードに移行した。これら相互作用の結果、加速的に増加する部材変形を広範囲に設置された補強材が受け持ち、載荷重の増加が得られたものと推定される。

## 3. 解析による補強効果の検証と圧縮筋の影響分析

### 3.1 解析手法

多方向非直交ひび割れ群を考慮可能な鉄筋コンクリ

ート2次元非線形有限要素解析<sup>7)</sup>を使用し、本実験の挙動を数値解析で再現することを試みた。ここで、定着部損傷面を摩擦接合要素モデルで表現した。

### 3.2 解析モデル概要

補強効果を検討するために、2つのケースを設定した。1つは実験条件の通り、圧縮筋を配置したものである。もう1つは圧縮筋を配置しないケースである。定着部の損傷面上の摩擦抵抗が小さい場合には、損傷面先端からのひび割れが一気に圧縮縁を貫通するため、圧縮筋部位でひび割れ分散性が発揮されない可能性がある<sup>3)</sup>ことを鑑みたものである。

2次元有限要素解析では、繊維シートでコンクリートを巻きたたてた状況を再現するため、繊維シート要素とコンクリート要素の構成節点を共有させた。解析終了まで節点の共有が継続される。この条件は、剥離が各節点間の数cmの領域に限定的に発生するという状況に近い仮定といえる。繊維シートは繊維方向のみに剛性を発揮するモデルとした。

### 3.3 解析結果

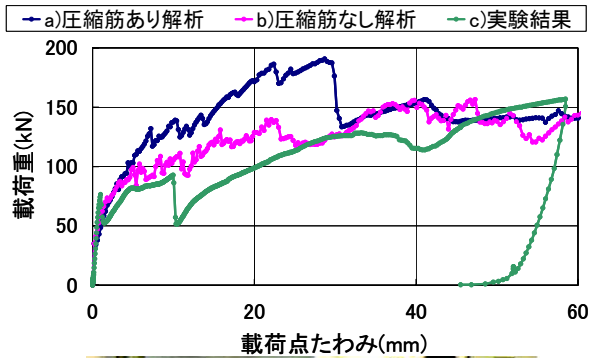
#### (1) SRF5mm (1層巻き) 補強解析

解析結果を図-4に示す。圧縮筋の有無し両方の解析ともに、実験で観察されたモデル損傷先端から立ち上がる斜めひび割れが観察された。その後、載荷重の急激な低下は生じず、大きな変形性能を有するという結果が得られた。圧縮筋が無いケースでは、損傷先端から立ち上がる斜めひび割れのみが生じている。

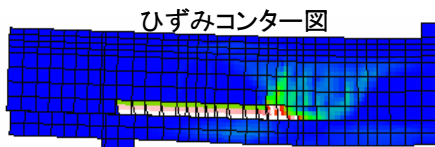
一方、圧縮筋を配置したケースでは、モデル損傷から部材軸方向に伸び、その後、載荷点方向に立ちあがる斜めひび割れが再現されている。さらに、損傷面の先端を起点とするせん断ひび割れと圧縮筋とが交差して局所曲げ変形が集中する地点を起点として、圧縮筋に沿った部材軸方向のひび割れが再現されるなど、実験で観察された挙動がほぼ再現された。

#### (2) CFRP0.25mm 補強解析

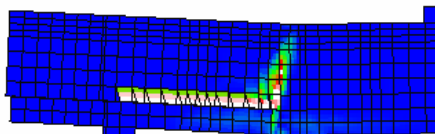
解析結果を図-5に示す。たわみが30mm以下の範囲で、両解析とも実験と類似した荷重変位関係が得られた。ひび割れパターンについては、モデル損傷面からのせん断ひび割れの立ち上がりが観察された。ただし、初期に現れる部材強度のピーク点に関しては相違が見られ、解析では実験よりも低い載荷重で斜めひび割れが発生した。両解析とも、載荷点たわみが20mmを越えた時点から、せん断ひび割れ発生箇所繊維シート破断が生じた。圧縮筋なしのケースでは30mmを超えた付近からシートの破断が次々と起こり、耐力が低下した。圧縮筋が有るケースでは、破断の連続的な発生は見られず、無しの場合と比較すると、載荷重の低下も緩やかであった。



SRF補強供試体終局(シートを剥した状態)



ひずみコンター図  
圧縮筋ありのケース(変位1倍)



圧縮筋なしのケース(変位1倍)

図-4 SRF 補強解析結果

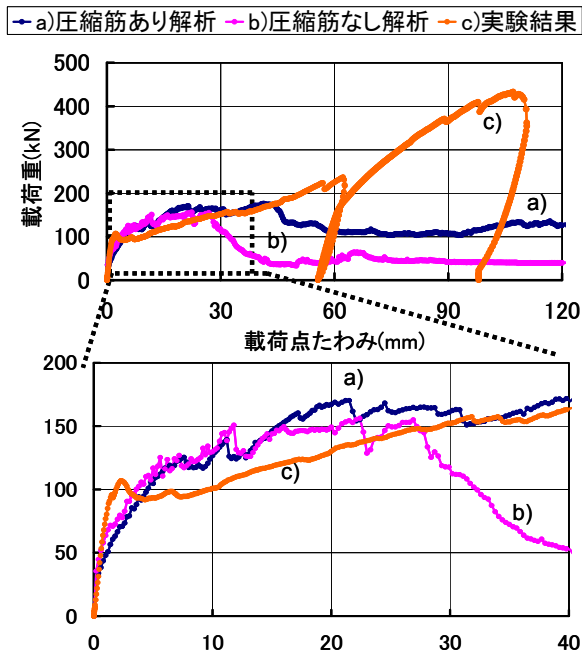


図-5 CFRP 補強解析結果

### 3.4 考察

#### (1) 実験との比較検討

剥離が進行する前段階では、どちらの補強でも斜めひ

び割れ後の荷重変位関係は、おおむね良好に予測された。圧縮筋を配置したケースでは、模擬損傷先端から生じる2本の斜めひび割れと、圧縮筋に沿って部材軸方向に進展するひび割れも再現できた。ただし、荷重点たわみが大きく、シート材料の剥離が進行すると、実験値と解析値との間で差が広がる。解析では剥離の過渡的な進行を考慮していないため、と考えられる。剥離の進行に伴う荷重の増加を追跡するには、繊維材料とコンクリート表面の接着材部分のモデル化を詳細に行い、拘束効果を直接、反映可能な3次元非線形解析を行う必要がある。

#### (2) 圧縮筋による影響の検討

圧縮筋を配置したケースでは、いずれもせん断スパン内でひび割れが分散する結果となった。圧縮筋が損傷面上部のコンクリートの分離と損傷面を介した上下面のずれを抑制し、損傷先端から発生したひび割れが一気に圧縮縁を貫通するのを防いだことで、圧縮筋近傍のひび割れ分散性が確保されたものと推定される。

### 4. 定着部損傷長さを変化させた場合の補強効果の検証

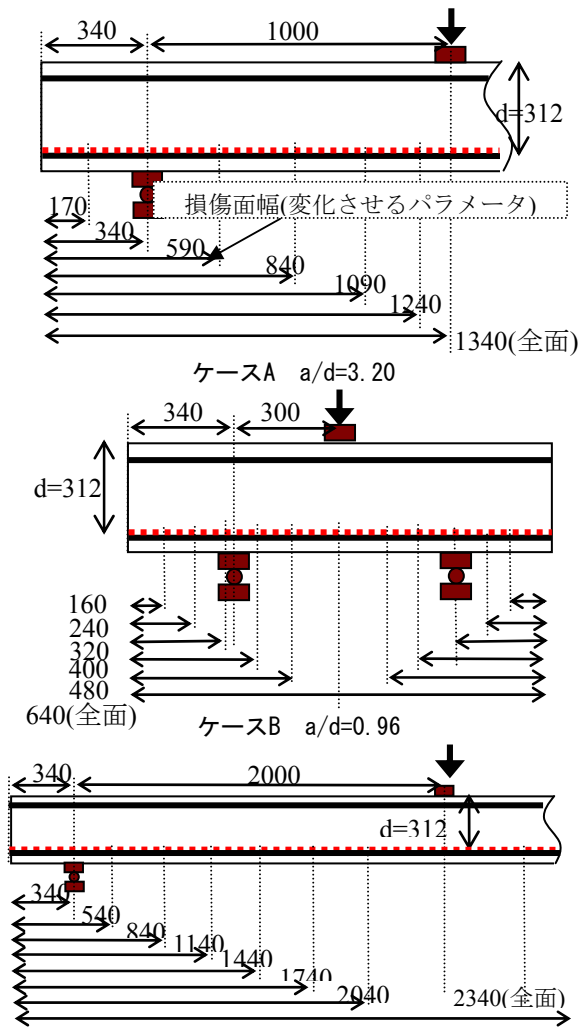
ここまでは梁の寸法と損傷長さを固定とした条件での検討であった。しかし、実際の梁部材の諸元、寸法は多様であり、損傷の長さや程度も様々である。3章と同様の解析モデルを用い、梁部材の寸法と損傷領域、損傷の程度を変化させた場合について、無補強での残存耐力とシートによる補強効果の検討を行った。

#### 4.1 解析モデル概要

想定するRC梁の概要を図-6に示す。梁部材寸法に関しては、梁高さ、鉄筋量、鉄筋位置、コンクリート材料特性を同条件とし、せん断スパン比が異なる三種類のケースを想定した。ケースA,B,Cはそれぞれ $a/d=3.20, 0.96, 6.41$ である。モデル損傷長さについては、ケースAの場合には定着域の半分が損傷しているもの、定着域全てが損傷、せん断スパンの4分の1, 2分の1, 4分の3, 荷重板幅と同程度の健全部を残し損傷しているもの、主筋全長にわたって水平ひび割れが生じているものの、全7ケースを対象とした。ケースB, ケースCも図に示すモデル損傷長さを有するモデルを準備した。損傷面はスチレンボードによるモデル損傷面と、実ひび割れによる損傷を仮定し、見かけの摩擦係数の特性は既往の研究<sup>9)</sup>からそれぞれ1.1, 4.0とした。補強に関してはSRFシートを用い、厚さ15mmのシートをスパン内全面に行う場合を想定した。剥離はごく限定的域に限られるものとする。

#### 4.2 解析結果

見かけの摩擦係数が1.1, 4.0の場合の解析結果を図-7, 図-8に示す。縦軸がそれぞれのケースの部材最大耐力を示しており、横軸方向は損傷長さを示す。①部分の



ケースC a/d=6.41 (図は縮小したもの)

図-6 梁の寸法と損傷先端位置の設定

棒グラフが無補強の場合の最大耐力であり、②部分が繊維補強による耐力の増加分となる。

ケース A と C では、無補強の場合において、定着部損傷の先端が閾値を越えると、最大耐力が低下する傾向が見られた。耐力低下の程度は、損傷部の見かけの摩擦係数が小さいほど低下の割合が大きい。損傷が定着部付近に位置する場合は、摩擦係数に関わらず先行補強によってケース A では 450kN、C で 250kN まで効果的に回復するが、損傷が梁スパン内に向かって延伸するにつれ、補強による最大耐力の回復量は減少した。

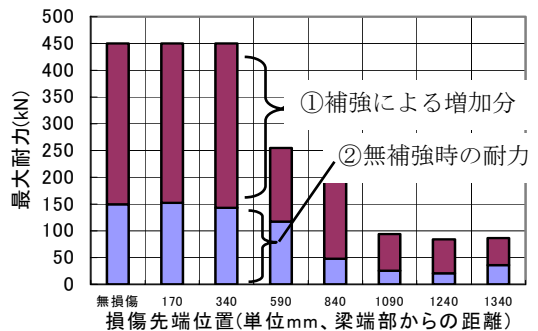
ケース B では、無補強の場合の損傷長さによる最大耐力の違いは殆ど見られなかった。損傷の長さと同補強効果は、見かけの摩擦係数 1.1 の場合ではせん断スパン内に損傷部が及ぶにつれ、低下する傾向は見られたが、ケース A、C と比較すると、低下の傾向は小さい。摩擦係数が 4.0 の場合、最大耐力の低下は殆ど見られなかった。

#### 4.3 考察

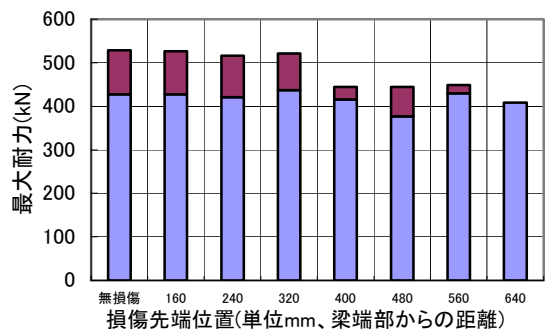
図-9 に耐荷機構の概略を示す。補強が無い場合は損傷面の先端が載荷点と支点を結ぶ直線よりもせん断ス

パン内に入った場合に、最大耐力の低下が生じた。この閾値を越えた際に、載荷点から支点に流れる斜め圧縮力の部材軸方向の分力に抗するメカニズムが失われ、最大耐力も低下したと考えられる。ただし、見かけの摩擦係数が 4.0 の場合、最大耐力の低下の割合は小さくなっている。損傷面の摩擦が十分に大きいため、摩擦力によって部材軸方向の分力を負担することで、耐力の低下を抑制した、と考えられる。

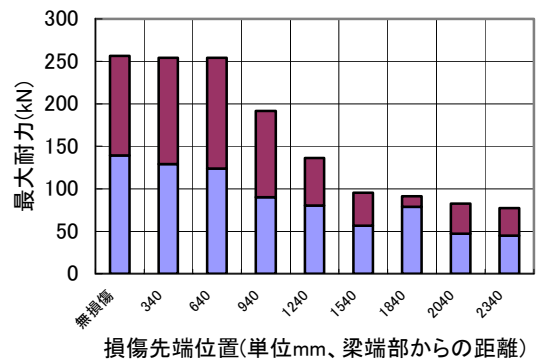
補強がある場合、損傷先端が載荷点から 45 度で下ろした線の支点側に位置する場合、高い補強効果が現れてくる。この領域に損傷が存在する場合、せん断ひび割れが損傷面の先端から斜め方向に発生するため、このひび割れを補強材が効果的に拘束し、高い補強効果が得られたものである。さらに損傷領域が広がり、載荷点から 45 度で下ろした線の内側の範囲まで伸びると、ひび割れは



ケース A a/d=3.2



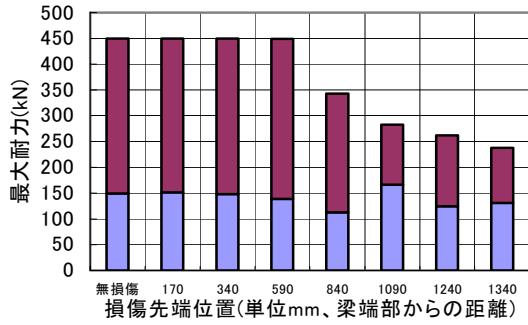
ケース B a/d=0.96



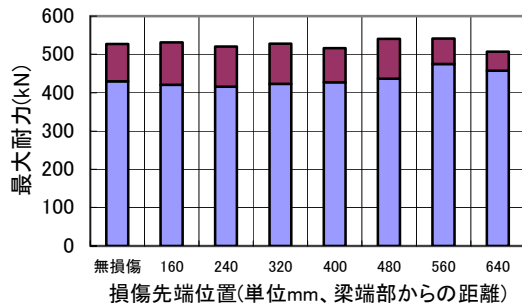
ケース C a/d=6.41

図-7 摩擦 1.1 の場合

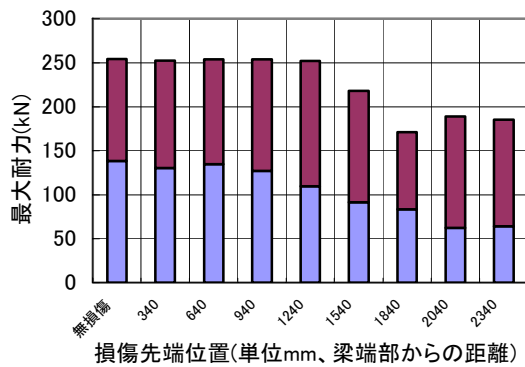




ケース A a/d=3.2



ケース B a/d=0.96



ケース C a/d=6.41

図-8 摩擦 4.0 の場合

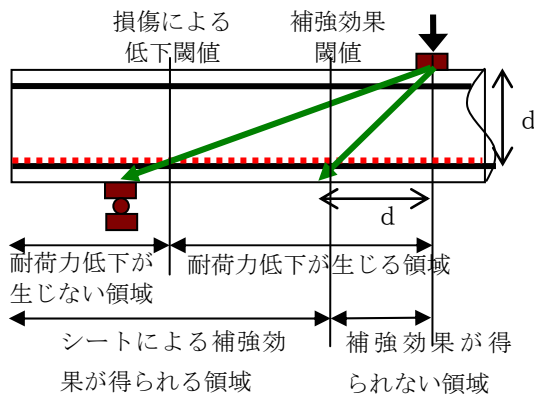


図-9 損傷先端位置と補強効果の関係

鉛直方向に伸展するようになり、補強材の拘束効果が発揮されにくくなるため、補強効果が得られなかったと思われる。ケース B では定着部損傷の影響が小さく、損傷がせん断スパン内に入っても最大耐力は殆ど低下しな

かった。このケースはディープビームに相当する。損傷状況に関わらず、載荷点から支点へと直接的に斜め圧縮力がウェブ内に形成されるためと考えられる。

### 5. 結論

予防的”先行補強”の有効な利用を念頭に、繊維シート材の力学特性と補強効果の関係を検証した。両方のケースでシートの拘束によるせん断ひび割れの開口抑制、損傷面上の摩擦抵抗力の増加による部材耐力の回復が見られ、大きな変形性能を許容可能であることが示された。

圧縮筋の有無による補強効果への影響分析から、圧縮筋によってひび割れの分散性が高まり、損傷を有する定着部のずれが抑制されることが示された。せん断スパン比と損傷の影響について検討した結果、損傷面の先端が載荷点と支点を結ぶ直線よりもせん断スパン内に入った場合に、最大耐力の低下が生じ、補強を行った場合にはシートの拘束によるせん断伝達力の増加によって、耐力の回復がみられることがわかった。

### 謝辞

SRF シートの補強に際して、構造品質保証研究所に、CRFP シート補強に際して、日鉄コンポジット(株)にご協力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) Toongoenthong, K. and Maekawa, K.: Multi-mechanical approach to structural performance assessment of corroded RC members in shear, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.3, No.1, pp.107-122, 2005
- 2) 千々和伸浩, GEBREYOUHANNES Esayas, 藤山知加子, 前川宏一: 定着部に損傷を有する RC 梁のせん断耐荷機構, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.29, pp.709-714, 2007
- 3) 千々和伸浩, 川中 勲, 商 峰, 前川宏一: 定着部に損傷を有する RC 梁への限定的補強の効果に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.30, pp.1639-1644, 2008
- 4) 五十嵐俊一: 部材表面を包絡する伸展性補強材の補強効果 *コンクリート工学年次論文集*, vol.24, pp.1273-1278, 2002
- 5) 小林朗, 佐藤靖彦, 高橋義裕: あと施工差込型連続繊維補強材により補強された RC はりのせん断耐力に関する実験的研究, vol.29, pp.1585-1590, 2007
- 6) Chijiwa, N.: Rational retrofitting method for reinforced concrete beam with damage at their anchorages zones, 7th International PhD Symposium in Civil Engineering, Stuttgart, chapter12 pp.3-14, Sept. 2008.
- 7) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, SPON Press (London), 2003.