

# 論文 定着部に損傷を有する RC 部材に対する予防的先行補強

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

**要旨:** 鉄筋コンクリートの定着部に損傷が発生した場合、定着部の損傷部位に直接補強を施しても、高い補強効果は一般に期待し難い。非損傷部位に対して先行補強を施すことで、現状とは異なる耐荷機構を形成することにより、構造性能の回復を図ることを検討した。作用外力によって既存損傷の先端からひび割れが発生する前に補強を行う必要があること、定着部損傷面の特性によって補強効果に変化すること、補強材として靱性が高いものが望ましいこと等が必要なことが明らかになった。解析検討から補強要件に合致する材料を用いて実際の定着部損傷部材を補強したところ、ほぼ解析で予測された通りの補強効果が確認された。

**キーワード:** 定着部損傷, せん断, 予防的先行補強, シート補強

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造における重大な劣化損傷の一つに、鋼材の腐食が挙げられる。鋼材断面欠損あるいは破断による耐力の低下のみならず、腐食膨張に伴う腐食ひび割れがコンクリートに導入されるため、付着やひび割れの面に沿ったせん断伝達低下し、耐荷機構そのものも影響を受ける場合がある。腐食ひび割れの発生部位に着目すると、損傷がせん断スパン内に留まり、主鉄筋定着部が健全な場合には、条件によっては耐荷力の低下が抑えられること<sup>1)</sup>が報告されている。損傷がせん断スパン内に生じた場合、主筋付着の劣化でせん断耐荷機構がトラスからタイドアーチ機構へ転換するためである。一方で腐食損傷が主鉄筋定着部に限定的に現れると、部材耐荷力が著しく低下する<sup>2)</sup>ことも知られている。損傷が定着部に生じた場合、せん断に抵抗する主たる斜め圧縮力成分と主筋による引張力の合流点が維持できなくなり、せん断耐荷機構そのものが消失するからである。

主鉄筋定着部損傷により著しく耐荷力が低下した鉄筋コンクリート梁に対する補強法として、筆者らは非損傷領域への予防的先行補強法のコンセプトを提案している<sup>3)</sup>。これは既存の損傷領域を維持したまま、外荷重作用によって損傷が進展すると想定される健全な領域に先回りの補強を付加することで、新たな耐荷機構を形成し、構造性能の回復を図るというものである。本研究は、この補強法を実部材に適用し、その可能性を実験で確認することを主目的とするものである。

## 2. 予防的先行補強法の適用性

### 2.1 予防的先行補強法のコンセプト

既往の研究<sup>3)</sup>で提案された予防的先行補強とは、今後損傷の進展が予想される箇所に対して予防的な補強を施すというものである。定着部損傷を有する梁に対しては、定着部の損傷に直接的に補強を施すよりも効率的に補強効果を得られる可能性がある。ただし、この補強適用に際しては、低剛性かつ高靱性を有する面的な補強材料であること、補強とは別メカニズムによって部材軸方向の拘束力を確保すること等の必要要件がある。

これらの要件を満たす補強材として、本研究ではシート材を用いた検討を行うこととした。シートを用いる場合、靱性については補強材本来の材料特性に依存するものの、剛性についてはシートの重ね合わせ厚さで調整することが可能である。またシート材が荷重による損傷面開口を拘束することはせん断ひび割れ面の噛み合わせを確保することにもつながる。骨材が噛み合い、せん断伝達が有効に発揮されることで、部材軸方向の拘束力を得ることが可能になると期待される(図 - 1)。

### 2.2 想定損傷梁

#### (1) 梁諸元

想定する損傷梁として、筆者らが過去に特性を報告している損傷梁を選んだ<sup>2)</sup>(図 - 2)。この梁では確実にせん断破壊を生じさせるため、梁の主鉄筋、圧縮鉄筋はともに呼び強度 685MPa の高強度鉄筋が使用している。定着部損傷については、せん断スパンのちょうど半分の位置から梁端部まで、鋼材腐食によるひび割れが鉄筋に沿う貫通面を形成している状況を想定した。

定着部損傷として 2 通りのパターンを設定する。一方は 1mm 厚のスチレンボードを主鉄筋上に沿わせて配置した状態でコンクリートを打設して作成したモデル

\*1 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)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (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)

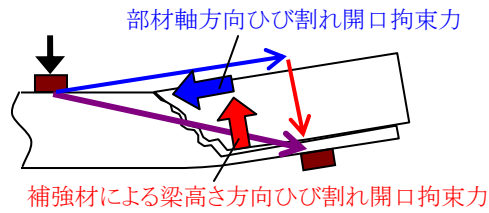


図 - 1 補強材によるひび割れ開口拘束

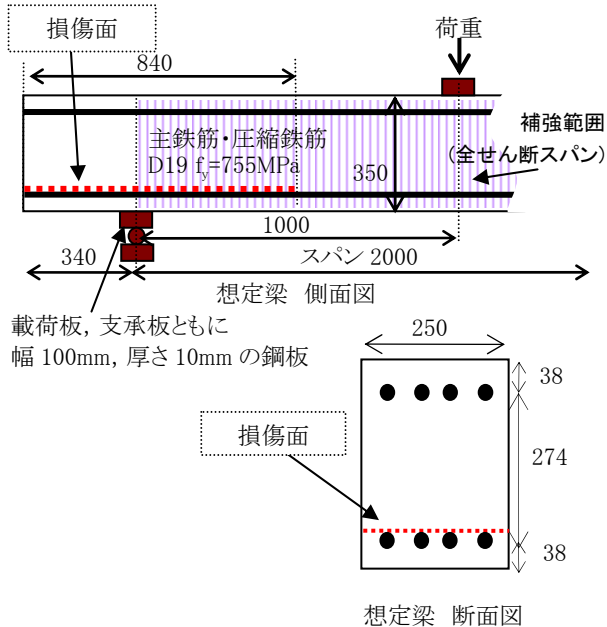


図 - 2 想定梁配筋図

損傷面である。実際の腐食ひび割れを正確に模擬する目的で表面が平滑なスチレンボードを部材幅全域に渡って配置したのではない。機構解明の観点から、定着部損傷の影響を寧ろ拡大強調させて部材応答に反映させるものである。他方はより現実に近い状況を想定し、定着部に実際の腐食ひび割れが発生した状況を設定した。ひび割れ面は梁奥行き方向に貫通しているものとする。

補強材は荷重板幅を除いたせん断スパン全面を覆うよう巻き立てて設置する。せん断スパン全面を覆うことで確実にせん断応力をとらえ、予防的先行補強の可能性を確認するためである。外力によるひび割れは定着部損傷のスパン内側先端部から発生すると考えられることから、補強部位を限定できる可能性がある。

### 3. モデル損傷面の特性実験

#### 3.1 供試体概要

モデル損傷面の特性が部材耐力と斜めせん断ひび割れの発生に関与していることから、モデル損傷面の閉合方向の圧縮特性とせん断ずれ特性を事前に把握するための要素実験を行った。

試験体と実験装置の概要を図 - 3 に示す。試験体断面寸法は 2. に示した梁試験体の支点条件を考慮し、同等

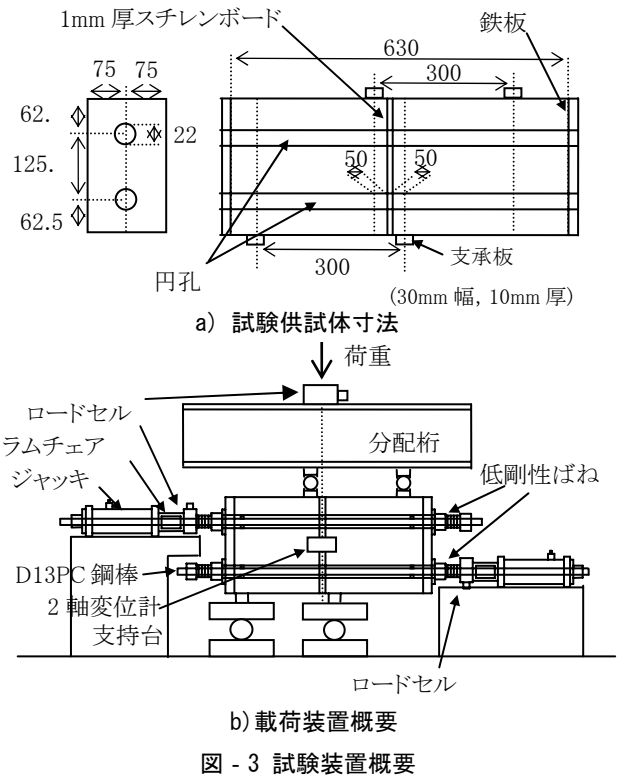


図 - 3 試験装置概要

の支圧力が再現されるように決定した。試験体作成には圧縮強度 35MPa のコンクリートを用い、1mm スチレンボードを供試体の中央に固定してコンクリートを後施工した。せん断面に拘束力を導入するための PC 鋼棒を通す穴は、アクリルパイプを設置した状態で打設を行い、硬化後にパイプを取り除くことで設けた。スチレンボードとパイプが交差する個所には、スチレンボード側に開口を開けて貫通させている。穴と PC 鋼棒の間には 5mm の余裕を設け、荷重中に接触しないようにした。

ジャッキによりせん断面に均一な拘束力をひび割れ直交方向に与えた状態で、鉛直方向にせん断荷重を行った。損傷面の圧縮変位に伴い拘束力が低下することを抑える目的で、ジャッキと供試体側面の鉄板の間に低剛性バネを設置した。モデル損傷面の相対変位計測は、損傷面を跨ぐように取り付けられた 2 軸変位計で行った。

#### 3.2 荷重条件

鉛直荷重速度は 0.2mm/min で行った。ひび割れ直交方向の拘束力は 20kN, 40kN の 2 通りとし、ひび割れ面でのせん断ずれ変位が急速に進み出した時点をもって、スチレンボード表面の見かけの静止摩擦力を算定する。

#### 3.3 試験結果

ひび割れ直交方向変位(ひび割れ面閉合方向の相対変位)とその方向の拘束力の関係を図 - 4 に示す。0.1mm までの変位に対しては剛性が 0.8N/mm<sup>2</sup>/mm, 変位が 0.1mm を超えると剛性が急増し、6.67N/mm<sup>2</sup>/mm となった。

せん断方向変位(ひび割れ平行方向変位)-モデル損傷

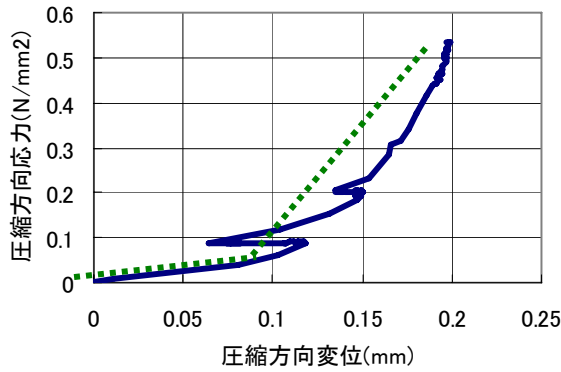


図 - 4 圧縮方向結果

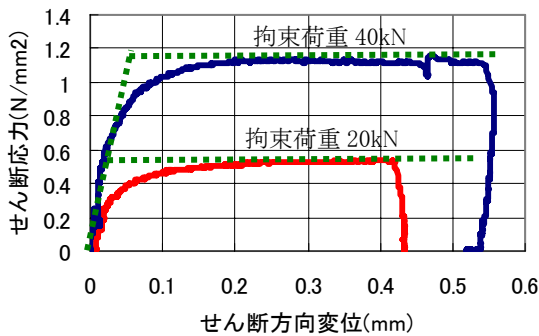


図 - 5 せん断方向結果

面せん断力の関係を図 - 5 に示す。ひび割れ面直交方向の拘束力が 40kN の場合、作用せん断力が 43kN を超えた時点、拘束力が 20kN の場合、作用せん断力が 20kN を超えた時点で、せん断方向変位だけが增加する状態になった。せん断力/ひび割れ直交方向拘束力から見かけの摩擦係数は約 1.1 と計算される。この値は打設時にモデル損傷面が僅かに変形する影響も含む見かけの数値である。最大摩擦力に達した変位の半分に相当する 0.05mm を代表値とすると、平均せん断剛性は 9.14N/mm<sup>2</sup>/mm となる。

#### 4 補強効果の検討

2.2 で延べた梁を対象として、予防的先行補強の効果を解析によって検討した。载荷は中央 1 点载荷である。

##### 4.1 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>5)</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。せん断伝達モデルは、定着部損傷を有する梁で観察されるひび割れの大きな開口にも対応可能な拡張せん断伝達モデル<sup>6)</sup>を適用し、損傷面に対しては、摩擦接合要素モデルによって表現することとした。

##### 4.2 既存損傷面の表現

既存損傷面の挙動を摩擦接合要素で反映させた。接合

表 - 1 ひび割れ面の特性

損傷面	モデル損傷面	電食ひび割れ
圧縮剛性	6.6N/mm <sup>2</sup> /mm	289.09 N/mm <sup>2</sup> /mm
開口剛性	0 N/mm <sup>2</sup> /mm	0 N/mm <sup>2</sup> /mm
せん断剛性	9.14 N/mm <sup>2</sup> /mm	4000 N/mm <sup>2</sup> /mm
摩擦係数	1.1	4.0

表 - 2 検討するシートの特性

補強材	CFRPシート	SRFシート
素材	炭素繊維	ポリエチレン繊維
ヤング率	230 GPa	4.5 GPa
破断強度	3400 MPa	400 MPa
破断歪	1.48%	10%
1層厚さ	0.167mm	25mm
1層あたり剛性	38.41 N/mm	11.25 N/mm

要素はクーロン摩擦力を仮定した体積 0 の仮想応力伝達要素であり、境界面でのずれやひび割れ開口による応力伝達の消失を表現できるものである。モデル損傷面に対しては 3. の実験結果を元に、実ひび割れ面については筆者による数値実験結果<sup>7)</sup>を元に、表 - 1 のように特性値を設定した。

#### 4.3 想定する補強材および表現モデル

補強材料として炭素繊維シート(CFRPシート)と SRF シート<sup>4)</sup>の 2 つを選んだ。表 - 2 は両者の特性と鉄筋の特性を比較したものである。CFRP シートは鉄筋並みの高いヤング率を有しているのに対して、SRF シートはその 100 分の 1 程度のヤング率しかない。ただし、シート 1 層あたりの剛性では両者はほぼ同じオーダーとなる。靱性は、SRF シートが CFRP シートの約 7 倍である。

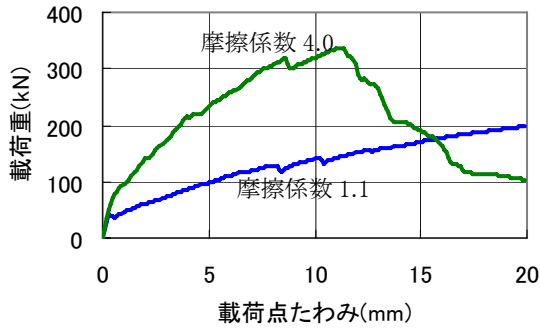
有限要素解析上、補強材はその繊維方向の引張力にのみ剛性を持ち、他には 0 とみなせる程度の剛性しか持たない平面要素としてモデル化した。今回の部材では補強材を巻きたてて設置するので、部材軸に直行する方向の引張力にのみ補強の効果が発揮される。

#### 4.4 補強材とコンクリートの界面の表現

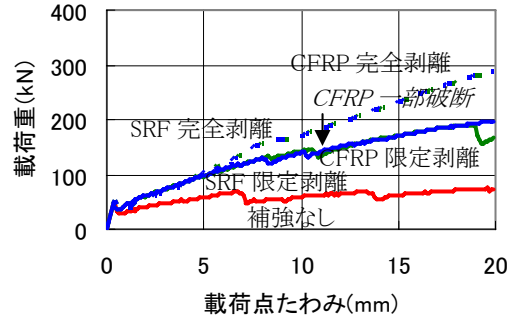
コンクリートと補強材の界面では部材の変形に伴い、補強材の剥離が生じると考えられるが、2 次元解析では载荷中の剥離進行を表現できない。そこで载荷前の段階で 2 つの極端な接着状況を仮定して検討した。

一方は補強材の剥離が有限要素節点間の限られた領域で生じていて、それ以上剥離が進行しない場合(限定剥離)である。コンクリートと補強材の設置領域においてコンクリートと補強材とは全ての節点を共有する。

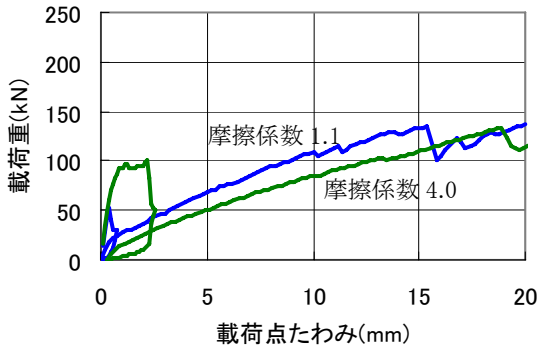
他方は梁側面で完全に剥離が生じている場合(完全剥離)である。コンクリートと補強材とは部材の上縁と下縁



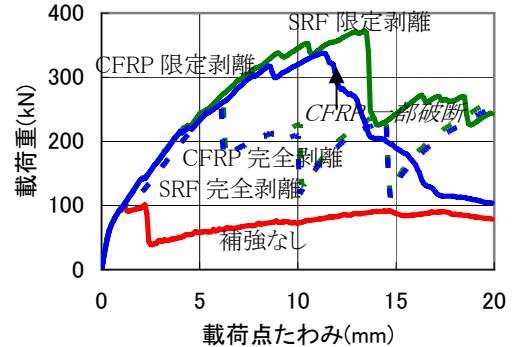
a) 斜めひび割れ発生前に補強した場合



a) 摩擦係数 1.1(モデル損傷面程度)



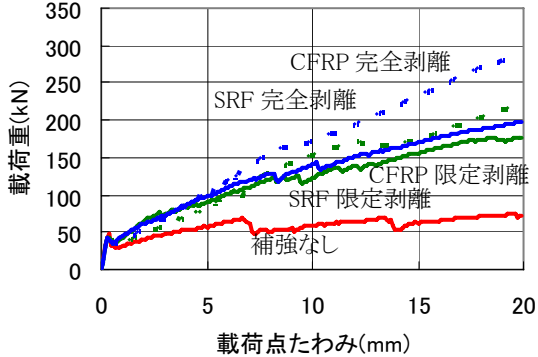
b) 斜めひび割れ発生後に補強した場合



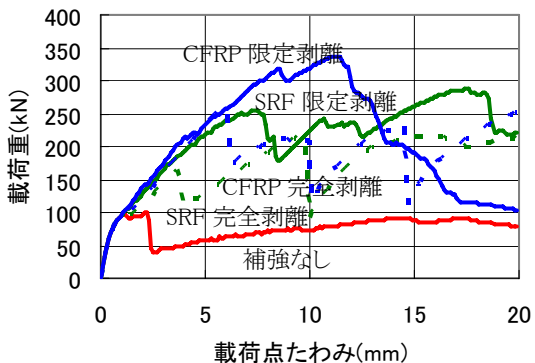
b) 摩擦係数 4.0(実ひび割れ面程度)

図-6 補強のタイミングと補強効果

図-8 補強総数を変えた場合の補強効果



a) 摩擦係数 1.1(モデル損傷面程度)



b) 摩擦係数 4.0(実ひび割れ面程度)

図-7 損傷面特性と補強効果

でのみ節点を共有するが、側面では節点を共有しない。

現実の剥離状況はこれらの両極端な状況の間にあると考えられる。

#### 4.5 各検討

##### (1) 補強時期

損傷面の先端を起点とした斜めせん断ひび割れが発生する前に補強した場合と、発生した後に補強した場合の2通りのケースについて解析を行った。後者のケースでは、一旦荷重を行い、斜めひび割れの発生によって耐荷力が急落した後、直ちに除荷を行い、この時点で補強して再荷重を行う過程を解析で再現した。補強はCFRPシート1層のみで、剥離の発生領域は限定的であるとした。

図-6に示した解析結果から、斜めせん断ひび割れの形成前に補強を行わないと、全く補強の効果が得られないことがわかった。斜めせん断ひび割れの開口により、この面上でのせん断伝達が低下してしまっており、後補強によりそれ以上の開口を拘束したとしても、補強効果が得られなかったのである。逆に斜めせん断ひび割れ形成前の補強では、ひび割れが開口しようとする直後から拘束効果が働き、せん断伝達が有効に発揮されるため、解析上、高い補強効果が得られた。

##### (2) 損傷面特性

(1)の結果を元に斜めせん断ひび割れの発生前に補強を行うとした上で、損傷面の摩擦特性に着目した感度解析

を行った。補強材はCFRPシート1層を使用する場合と、SRFシート1層を使用する場合の2通りを設定した。

解析結果を図-7に示す。摩擦係数が大きくなる程、補強の効果が高くなることが示唆された。この一因は損傷面摩擦の増加による部材軸方向の拘束力の増加である。拘束力が増加すると、梁としての最大せん断耐力が増加するとともに、斜めせん断ひび割れが部材軸方向に近づく。それに伴い、鉛直方向に配置された補強材がひび割れの開口を効果的に拘束するようになる。

摩擦係数が1.1と4.0の場合を比較すると、摩擦の大きな4.0の方が完全剥離を仮定した場合と限定的な剥離を仮定した場合との差が小さい。摩擦が小さい時には損傷面上で滑りが起きやすく、部材軸方向・部材軸直交方向の両方向にひび割れが大きく開口するようになることから、補強材がコンクリートに追従するか否かの仮定次第で、解析上の耐力が大きく変化した。摩擦が大きい場合は、損傷面上での摩擦によって部材軸方向のひび割れ開口が抑えられるため、剥離に関する数値解析上の仮定の差異はあまり影響しなくなったと考えられる。

### (3) 補強材の靱性および層数の影響

シートの種類と厚さを変えた感度解析を行い、補強に適切な材料を考察した。これまでの議論から補強の時期は斜めせん断ひび割れが発生する前、損傷面の摩擦係数が1.1、4.0の2通りを考慮する。補強はCFRPシートは1層、SRFシートは3層と、両補強の剛性がほぼ同じとなるようにして比較した。

解析結果を図-8に示す。摩擦係数が1.1の場合も4.0の場合も、シートの素材に関わらず、同じような解析結果となった。両ケースの補強剛性がほぼ等しかったためである。しかし靱性の面で差が見られ、CFRPシートを用いた場合、終局耐力に至る前に局所的に破断が生じる可能性があることが示唆された。

既往の研究<sup>3)</sup>で補強材に求められる要件として、無損傷部材の応力の流れを可能な限り保持するような、柔なものであることが挙げられている。本検討結果はこれに加えて、元の損傷部材の持つ変形特性に追従可能な補強材であることも必要であることを示すものである。

## 5 検証実験

解析による機構検討を検証するため、実供試体を用いた検証実験を行った。ベースとなる梁の諸元は図-2に示したものと同一である。補強材は3層のSRFシートとし、定着部損傷の先端から斜めひび割れが発生する前の状態で補強を施した。なお、ここでは定着部損傷としてモデル損傷面のみを取り上げる。モデル損傷を導入した梁のように性能が極限まで低下した状態から性能を回復することができれば、通常の損傷の場合には確実に性

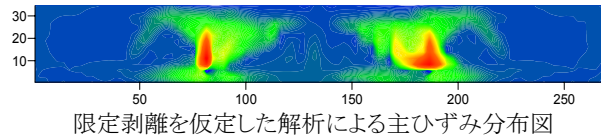
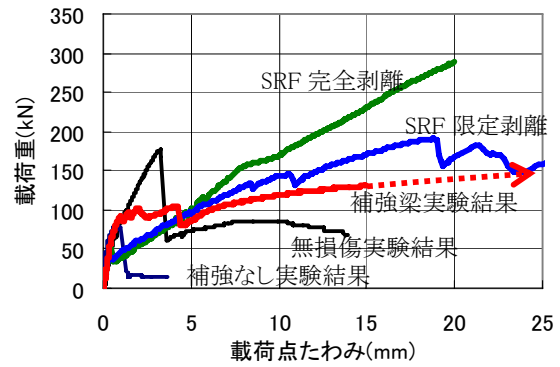


図-9 荷重試験結果

能回復可能と考えられるからである。

### 5.1 荷重条件

荷重は変位制御とし、荷重速度は0.2mm/minとした。変位については試験機から離れた地面を基準として、荷重点直下の鉛直変位、両支点上の梁高さ中央位置における鉛直変位を計測し、荷重点直下の変位から両支点上の平均変位を差し引いたものを荷重点たわみ量とした。荷重時の支点条件は両支点がローラーヒンジとなっており、荷重点の摩擦により水平剛体変位を拘束する。

### 5.2 実験結果

実験による荷重変位曲線、ひび割れパターンを図-9に示す。無補強の場合よりも約20kN高い95kNまで、荷重は単調な増加を見せた後、耐力が損なわれた急落ののち、再上昇、再急落を経て安定的な残存耐力の再上昇に入った。この間に起きた耐力の急落はそれぞれ両損傷面先端からの斜めせん断ひび割れの形成に対応している。この証左として、荷重急落後、形成された斜めひび割れと交差すると思われる付近の圧縮鉄筋に取り付けたひずみゲージのうち、梁下面側のものが圧縮から引張ひずみ状態になったことが挙げられる。以降は徐々に耐力の増加率は低減しながら変位が増加し続



け、載荷点たわみが 35mm 程度で最大耐荷力 150kN を迎えた。シートの剥離領域は、ひび割れ近傍の数 cm の範囲のみであった。

### 5.3 補強梁の実験結果に対する考察

無補強の場合よりも約 20kN 高い載荷重 95kN において斜めひび割れが生じている。これは補強材によって斜めせん断ひび割れの開口が拘束されたためと考えられる。モデル損傷面の先端から生じた斜めせん断ひび割れは、損傷面が十分に滑らかで部材軸方向のずれ抵抗が小さいことから直ちに圧縮鉄筋に達し、以降はこの交差箇所と損傷面先端の主鉄筋の 2 か所に曲げが集中する。補強材がなければ模擬損傷面を境とした上面下面は容易に分離され、鉄筋径程度のアーム長しかないこの 2 か所のモーメント抗力以外に外力に抗することになる。しかし、実験では既存損傷面を境とする上面下面が補強材によって連結されているため、全断面でもって外力に対抗するような曲げ耐荷機構が再形成され、高い耐荷機構を維持し続けることができたと考えられる。両定着部損傷先端から斜めせん断ひび割れが発生した後は完全にこの耐荷機構に移行し、曲げモードでの安定的な終局を迎えた。

### 5.4 事前解析の結果

シートの剥離領域が限定的という仮定に基づく解析、完全剥離するという仮定に基づく解析、いずれの場合でも約 60kN で斜めひび割れが形成され、剛性が著しく低下する。剥離が限定的な場合、ここから耐荷力が増加し、170kN 程度でほぼ終局耐力に至った後に、荷重を保持したまま、変位が流れる状態になる。一方、完全剥離を仮定した場合は、斜めひび割れの形成後、耐荷力が大きく低下するが、限定剥離を仮定した場合よりも高い増加率で荷重は増加を続け、載荷点たわみ 11mm 程度で限定剥離を仮定したものよりも高い耐力を示すようになる。

### 5.5 実験結果と事前解析との比較

実験で剥離が生じたのはひび割れの近傍数 cm の範囲のみであった。これは限定剥離を仮定した解析の条件に近い。実験の荷重変位関係も限定剥離を仮定した解析と同様の曲線を描くことから、このことが裏付けられる。以降では限定剥離を仮定した解析結果を元に議論する。

既存損傷先端からのひび割れ発生による最初の耐荷力低下が起きる荷重値は解析よりも実験の方が大きい。解析では載荷当初から限定的な範囲で剥離が生じていることを仮定しているのに対し、実験では既存損傷先端部でも補強材が十分に付着していて、損傷の開口を抑制する作用が強かったためと考えられる。

解析による主ひずみ分布と実験結果を比較すると、既存損傷面先端からのひび割れが一番大きく開口していること、既存損傷面先端からのひび割れより内側にもせん断ひび割れが生じていることなど、実験で見られた結

果をほぼ良好に再現できていることが認められた。

梁端部におけるモデル損傷面上での相対滑り量を比較すると、載荷点たわみ 7mm の時で実験値 2mm、解析値 3.5mm、載荷点たわみ 11mm の時に実験値 3mm、解析値 5.8mm、載荷点たわみ 18mm の時に実験値 6.5mm、解析値 8.9mm、載荷点たわみ 24mm の時に実験値 9mm、解析値 11.1mm と、ほぼ一致する結果となっていた。

## 6. 結論

定着部損傷によって性能低下が究極に進んだ場合にも、耐荷性能を回復することができる見込みが示された。解析で示されたように、実際の腐食ひび割れ面ではモデル損傷面よりもせん断伝達が大きく期待できるため、より高い補強効果が期待できると考えられる。補強材を未見損傷領域へ選択的に付与することにより、現状とは異なる耐荷機構に転換させ、耐荷力を回復するという手法の可能性が示せたことは、維持管理手法の選択枝を増やすものと期待している。今後は構造詳細が補強効果に与える影響の詳細な分析、補強範囲の限定、損傷領域の大きさと補強効果の関係、載荷パターンが変化した場合の効果について検討を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 佐藤吉孝, 山本貴士, 服部篤史, 宮川豊章: せん断補強筋および主筋の腐食が RC 部材のせん断耐荷特性に与える影響: コンクリート工学年次論文集, vol.25, pp.821-826, 2003.
- 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 梁への強度補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.30, 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) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press (London), 2003.
- 6) Bujadham, B., and Maekawa K.: The universal model for stress across cracks in concrete, proceeding of JSCE, No.451/V-7, pp.277-287, 1992.
- 7) N. Chijiwa: 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.