

# 報告 非線形有限要素解析による炭素繊維シートにより補強した RC 梁部材の破壊機構に関する検討

野並 優二\*1・篠崎 裕生\*1・新藤 竹文\*2・田中 良樹\*3

**要旨**：連続繊維シートを用いた床版補強を対象に，シートのはく離破壊のメカニズム解明と設計への適用を目的として，補強した梁の曲げ試験と試験体を詳細にモデル化した非線形の FEM 解析によるシミュレーションを行った。その結果，本試験の範囲において既往の研究と同様に，シートのはく離は曲げひび割れに隣接して形成される三角形のブロックの回転により生じることを確認した。また，分散ひび割れモデルを用いた FEM 解析では，この三角形ブロックによるはく離は再現できないものの，耐荷挙動や終局荷重については，高い精度で再現できることを明らかにした。

**キーワード**：連続繊維シート，床版，梁部材，曲げ試験，非線形 FEM 解析，はく離

## 1. はじめに

コンクリート床版の補修・補強工法として，連続繊維シート（以下，シート）を用いた方法が多く採用されている。シートにより補強した部材の終局は，鉄筋コンクリートとしての破壊のほか，シートのはく離あるいは破断によって決まる場合があることが，既往の研究により明らかにされている。床版の補強設計においては，設計法が複数あるため，設計者によって補強量に大きな差異が生じるケースが見られるが，これら終局時に生じる現象に対する知見が十分でないことも要因の一つと考えられる。本報告は，シートのはく離に着目し，そのメカニズムの解明と設計への適用を行うための実験的・解析的検討を行ったものである。

シートのはく離はこれまで，曲げせん断ひび割れに起因して生じるシート接着面の段差によって，起こるなどが指摘されている<sup>1)</sup>が詳細なメカニズムは明らかになっていない。ここでは既往の研究から，補強した梁部材の曲げ試験において，コンクリートのひび割れを起点にシートのはく離が先行して生じる諸元を採用して梁の載荷試験を行い，シートをはく離させ，そのメカニズムを検討した。そして，試験体を詳細にモデル化した非線形 FEM 解析により，はく離現象の再現が可能であるか検討を行った。解析においては，シート接着面に樹脂を模擬したインターフェイス要素を，埋込み鉄筋要素に付着-すべり関係を適用するとともに，汎用性を重視してコンクリートに分散ひび割れモデルを適用した。

本稿では，実験においてひび割れ観察とビデオ映像で確認したシートのはく離の発生と進展のメカニズム，非線形 FEM 解析においては，要素寸法や構成則が結果に与える影響などを詳細に検討し，適用にあたっての課題を

述べる。

## 2. 実験および解析の概要

### 2.1 実験方法

シートはく離のメカニズムに着目した実験であることから，試験体は梁形状とし，既往の研究<sup>1)~3)</sup>などから，ひび割れを起点に生じるシートはく離で破壊することが予想される諸元を採用した。

図-1 に，試験体の形状寸法と配筋，載荷点位置およびシート接着範囲等を，表-1 に試験体一覧を示す。試験体の断面寸法(幅×高さ)は，200×250mm を標準とし，C113-Lのみ 200×180mm とし断面高さの影響を，引張鉄筋は D13 を標準とし，C116のみ D16 を用いることで鉄筋比の影響をそれぞれ検討した。せん断補強鉄筋および圧縮側軸方向鉄筋は D10 とした。既設の床版を想定して，鉄筋はすべて SD295 を用いることとした。

補強シートは目付 200g/m<sup>2</sup> の高強度炭素繊維を用いた。シートは 1 層を標準とし，C213, C313 については，それぞれ 2 層，3 層接着したものである。シートは，梁下面にエポキシ樹脂にて接着した。シートの幅は，試験体の幅と同じ 200mm とし，接着範囲は，支点鋼板(幅 100mm)の手前 20mm までとした。

表-2, 表-3 および表-4 に，それぞれ実験時に実施したコンクリート，鉄筋および CFRP シートの材料試験により得られた力学特性値を示している。

計測項目は，載荷荷重と梁のたわみ，シートのひずみとした。シートのひずみは，図-1 に示すように，載荷点位置からせん断スパン方向に約 500mm にわたって 15mm 間隔で細かく測定した。載荷中は，ひび割れとシートはく離の観察を行うとともに，ビデオ撮影を同時に行い，

\*1 (一社) 繊維補修補強協会 (正会員)

\*2 (一社) 繊維補修補強協会 (フェロー会員)

\*3 (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (正会員)

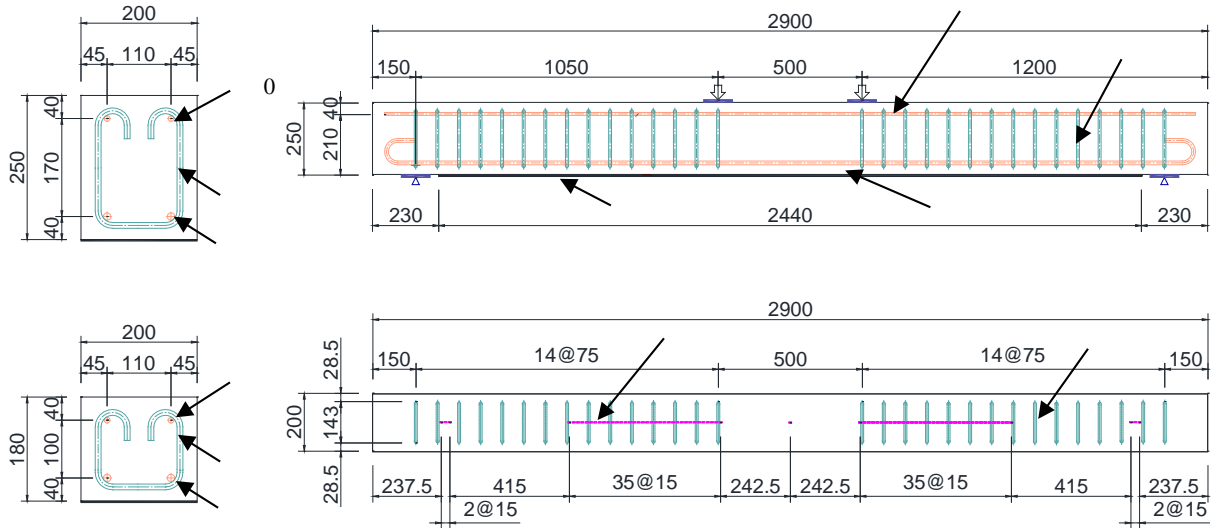


図-1 試験体形状寸法

表-1 試験体一覧

	試験体寸法(mm) (幅×高さ×長さ)	引張鉄筋	シート層数
C113	200×250×2900	D13	1
C213			2
C313			3
C116	200×180×2900	D16	1
C113-L		D13	

表-2 材料試験結果(コンクリート)

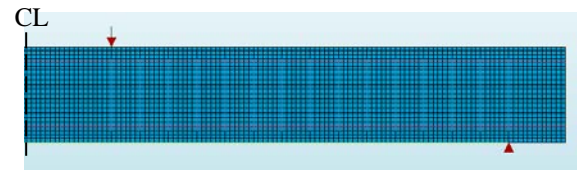
材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン 比	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
28	33.5	23.9	0.15	2.3
43	34.7	24.5	0.16	2.7

表-3 材料試験結果(鉄筋)

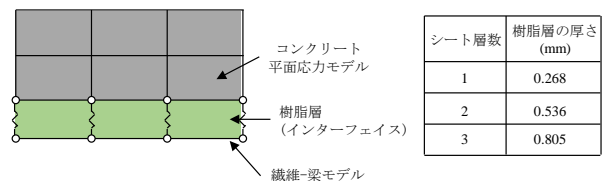
種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D10	346	1830	470
D13	348	1760	495
D16	332	1710	488

表-4 材料試験結果(CFRPシート)

層数	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	破断時 ひずみ(μ)	ポアソン 比
1	4100	252	16000	0.34
2	3880	255	14800	0.34
3	4180	257	15800	0.36



(a) 全体モデル



(b) コンクリートとCFRPシート界面

図-2 解析モデル

はく離現象を詳細に検討した。

## 2.2 解析方法

### (1) 解析モデル

解析は、汎用 FEM プログラム DIANA を用いた。解析モデルを図-2 に示す。梁は 4 節点の平面要素でモデル化し、鉄筋は DIANA に予め組み込まれている埋込み鉄筋要素を用いた。シートは、梁要素を用いてモデル化し、コンクリートとシートの間に樹脂を模擬したインターフェイス要素を設定した。樹脂の厚さは、シートの層数に応じて変化させた(図-2(b))。樹脂層の厚さは、コンクリート下面からシート中心までの距離を示している。

解析にあたり、要素寸法の影響を検討するため、C113

において、1 要素の辺の長さを 5mm、12.5mm、25mm と変えた。その結果を踏まえ、他の試験体は要素寸法 12.5mm で解析を行った(後述)。図-2(a)は、要素寸法 12.5mm の C113 の解析モデルである。梁は左右対称であるが全体をモデル化している。

### (2) 材料構成則

図-3 に解析で用いた各材料の構成則を示す。各構成則において、材料特性値には別途実施した材料試験結果を用いている。図-3(a)および図-3(b)は、コンクリート引張側の構成則で、ここでは、2 直線で軟化を表現した JSCE モデルと、曲線で表現した Hordijk のモデルで解析結果を比較した。これは、解析において終局時の挙動に、引

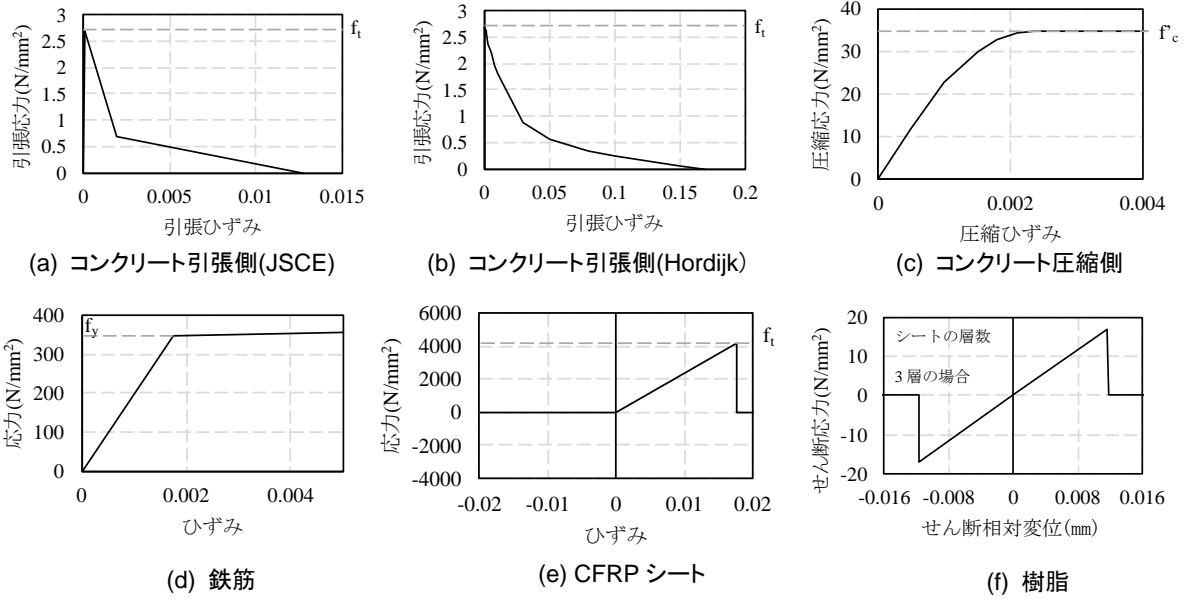


図-3 材料構成則

張軟化曲線の形状が大きく影響することが判明したためである。引張破壊エネルギー $G_{ft}$ は、式(1)<sup>4)</sup>により算出しており、図-3(a)と図-3(b)は、要素寸法が12.5mmの場合の構成則であり、いずれも $f_t$ までは弾性挙動すると仮定した。コンクリート圧縮側は、図-3(c)の放物線モデルを用いた。圧縮破壊エネルギー $G_{fc}$ は、以下の式(2)<sup>5)</sup>によって算出した。ひび割れモデルは、分散モデルとし、主応力直角方向にひび割れ軸が変化する回転モデルとした。

$$G_{ft} = \frac{1}{100} \times (d_{max})^{1/3} \times f_{ck}^{1/3} \quad (1)$$

$$G_{fc} = 8.77 \times f_{ck}^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 $d_{max}$ :粗骨材の最大寸法(mm)=20mm、 $f_{ck}$ :コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)。

鉄筋はバイリニアで、第二勾配を $E_s/100$  ( $E_s$ は鉄筋の弾性係数(N/mm<sup>2</sup>))とした(図-3(d))。鉄筋とコンクリートの付着すべり関係には、島らが提案しているモデル<sup>6)</sup>を適用した。シートや樹脂は、弾性体として図-3(e)と図-3(f)に示す構成則を用いた。なお、図-3(f)は、シートの層数が3層のものを示している。樹脂のせん断応力は、文献<sup>7)</sup>を参考に17N/mm<sup>2</sup>とした。樹脂のせん断弾性係数はJIS K7161に準拠して実施した試験により、1100N/mm<sup>2</sup>とした。本解析では、シート-コンクリート間の付着すべり関係を、樹脂単体の層をモデル化することで表現している。

### (3) 載荷方法および収束条件

載荷は変位制御による増分解析とし、収束計算には、最も一般的なNewton-Raphson法を採用した。また、収束の判定には、エネルギー法を採用し、収束誤差は0.0001とした。

## 3. 結果

### 3.1 荷重-変位関係

実験および解析の荷重-変位関係を図-4に示す。実験では、計算降伏荷重とその1/2の荷重で一度除荷している。実験ではいずれの試験体も、せん断スパン内の載荷点に近いひび割れを起点にシートがはく離し始め、支点付近まではく離が進展して荷重が大きく低下した。

解析結果は、鉄筋が降伏して梁の剛性が変化する付近とその後しばらくの間のたわみ挙動が実験値と良く一致している。実験結果は、鉄筋降伏後の梁の剛性がほぼ一定のまま保持された後、ある時点でシートがはく離して耐力を失うが、解析ではある荷重以上になると梁の剛性が少しずつ低下し、最大荷重を示した後も一定の耐力を保持していた。その後、荷重が急激に低下するところでは、実験と同様に支点付近までシートはく離した。はく離の詳細については次項で詳述する。

図-4は、C113を対象として要素寸法と引張軟化特性を変えた場合を比較したものである。要素寸法については、いずれも鉄筋降伏前後の挙動は変わらないが、実験値と乖離し始める変位が、要素寸法が小さくなると低下する傾向が見られた。なお、曲げひび割れが発生する付近の挙動について比較すると、ひび割れ発生荷重はいずれの要素寸法でも大きく変わらないが、要素が小さくなるとひび割れにともなう梁の剛性低下が遅れる傾向にあった。その影響は5mmのケースが最も大きく、12.5mmと25mmで大きな差異はなかった。

引張軟化特性の違いが与える影響については、要素寸法12.5mmで比較した。Hordjikモデルでは、JSCEモデルに比べてはく離が起こりにくくなり、梁の剛性が低下しつつも大きく変形する結果となった。Hordjikモデルは、

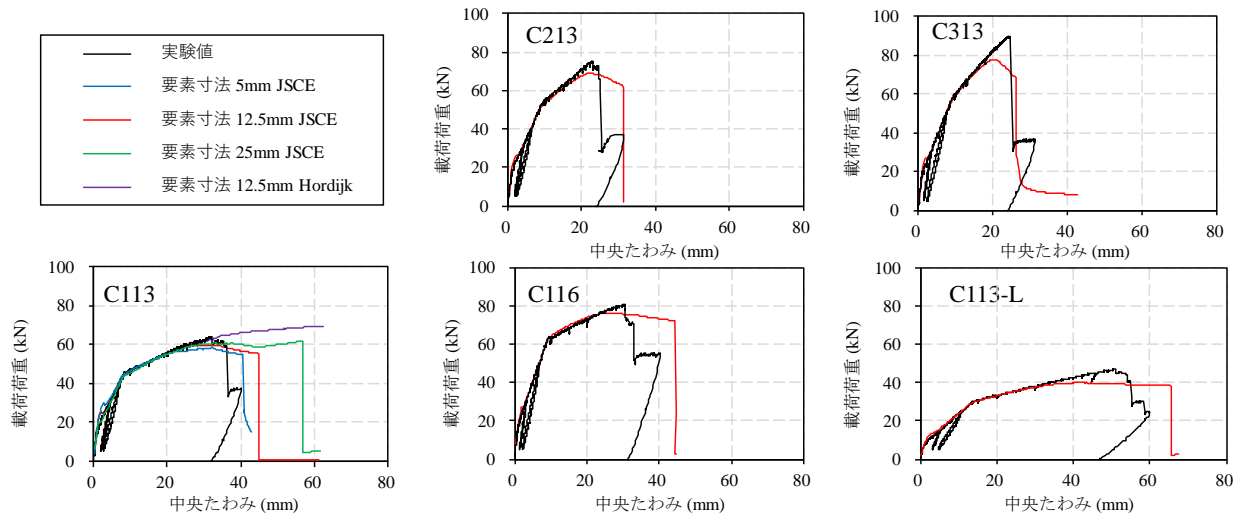


図-4 解析と実験での荷重-変位関係の比較

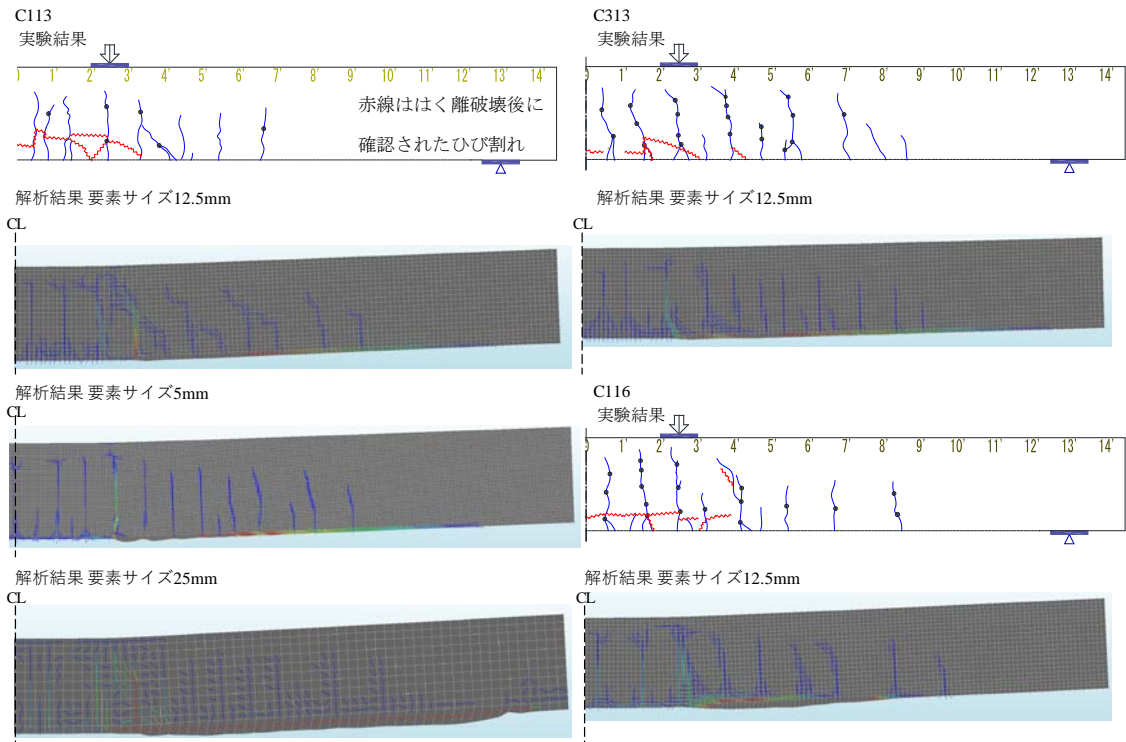


図-5 実験および解析でのひび割れ状況

比較的大きな引張ひずみまで引張応力が残存するため、ひび割れが分散することでシート界面の局所変形が抑制されることにより、はく離が抑制されるものと考えられる。

要素寸法を 12.5mm とし、引張破壊エネルギーおよび圧縮破壊エネルギーを式(1)、(2)を用いて算出することによりすべてのケースで耐荷挙動を精度良く再現できることおよび最大荷重を安全側に評価できることが分かる。後述するひび割れ性状の考察と合わせて、これらの結果から、解析では要素寸法 12.5mm と JSCE 軟化特性を標準とすることとした。

### 3.2 ひび割れ状況

図-5 に実験と解析におけるひび割れ状況を示す。ここでは紙面の関係で、C113 と C313 および C116 の結果のみ示している。実験結果は、青線はシートのはく離破壊が発生する直前、赤線ははく離破壊後に観察されたひび割れを示している。解析結果においては、ひび割れ幅が 0.01mm 以上のものを表示している。

実験では、曲げひび割れが先行して発生し、新たなひび割れが生じなくなると、載荷点に近い曲げひび割れにおいてそのひび割れ間のかぶり部分に斜め方向のひび割れが発生した。これは、いずれの試験体も鉄筋降伏後に

見られ、比較的早い段階で生じるものも見られた。このひび割れは、曲げひび割れを跨ぐシートの引張力が増大し、曲げひび割れ間のかぶりコンクリートに水平方向のせん断力が作用することにより生じたと考えられる。斜め方向のひび割れの先端は、引張鉄筋の位置付近まで達し三角形のブロック（以下、三角ブロック）となっていた。

ビデオ映像による観察の結果、終局時付近では、この三角ブロックが回転することでシート接着面に段差が生じてシートが剥がれる様子が観察された。すなわち、図-6に示すように、三角ブロックが赤矢印の方向に回転し、それにより生じる段差を起点としてシートがはく離していくと考えられる。三角ブロックは、荷重点付近で数か所発生し、それらが連なってはく離が進展する様子も確認できた。

一方、解析結果においては、図-5に示した要素寸法を12.5mmとしたケースにおいて、曲げひび割れの位置と間隔が実験と比較的良く一致していた。25mmのケースでは、ひび割れが広い範囲に分散する傾向が、5mmのケ

ースでは局所化する傾向が見られた。先の荷重-変位関係において、要素寸法が小さくなるほど実験値と乖離し始める変位が小さくなる理由は、このひび割れの局所化の程度によるものと考えられる。

解析においては、曲げひび割れの起点近くにひび割れが分散して発生する傾向が見られたが、分散ひび割れであるため明確な三角ブロックを形成することはない。解析では、実験値との乖離が大きくなる付近からシート直上のコンクリート要素の破壊が始まり、その領域が徐々に支点方向に進展して破壊していく様子が確認できた。

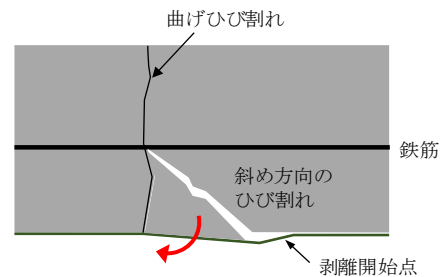


図-6 三角ブロック

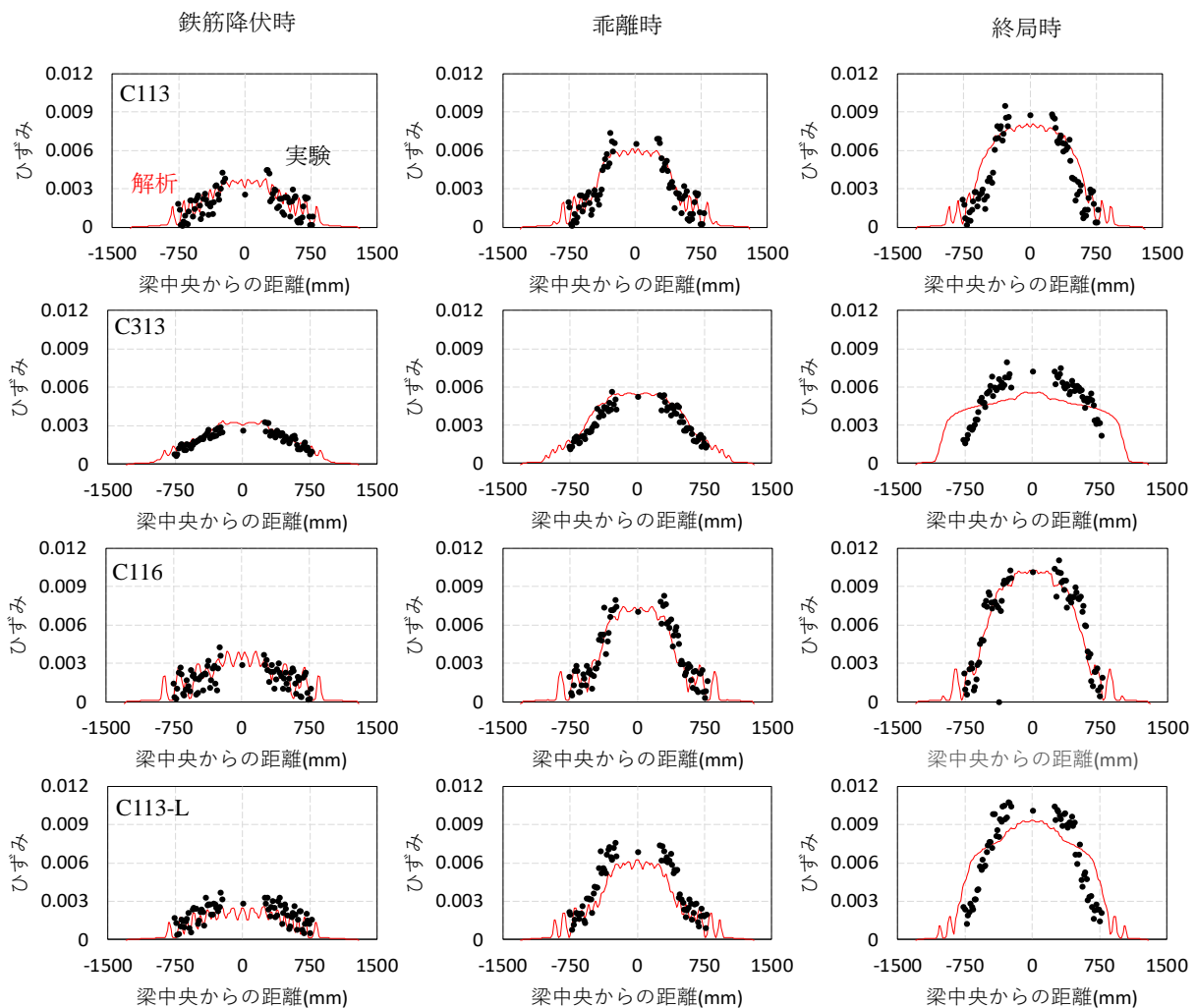


図-7 シートひずみ分布

すなわち、梁の一番下のコンクリート要素がシートの引張力に起因する水平方向の力に抵抗できず破壊が進展していくと考えられる。実験において、はく離したシートを観察すると、シート端部付近では界面できれいに剥がれ、その他の部分では、コンクリートがシートに残っていたが、樹脂が破壊している部分はなかった。

ここでの解析は、分散ひび割れモデルを用いているため実験で明らかになった三角ブロックの作用によるはく離は再現できないものの、耐荷挙動や最大荷重などは実験値と良く一致していた。ただし、要素寸法やコンクリートの引張挙動などに注意する必要がある。

### 3.3 シートのひずみ分布

シートのひずみ分布を図-7に示す。図に示した荷重段階は、鉄筋降伏時と荷重変位関係において実験との乖離が始まる変位（乖離時）および終局時とした。解析における終局時とは、最大荷重を示した時点とした。試験体は、C113、C313、C116、C113-Lの4つとした。C213はC113と同様の傾向であった。

解析における鉄筋降伏時のシートひずみ分布は、実験と概ね同様の傾向であった。シート層数が3層であるC313は、シート自体の剛性が大きいいため、シートひずみに与えるひび割れの影響が小さく、他の解析結果のようにひずみが波打つ程度が小さい。この傾向は、実験値も同様である。乖離時においても、シートひずみの挙動に関して、実験と解析は良く一致しており、梁の挙動を良く表現できていると考える。

一方、終局時においては、両者で差が見られた。実験値はひずみの勾配が比較的立っており、シート1層の場合、せん断スパンにおけるひずみ勾配は乖離時とほぼ一致している。すなわちシートとコンクリートの付着が乖離時でも良好であることを示している。シート3層のC313でも、載荷点付近で若干ひずみ勾配の低下が見られるがその外側では付着が良好である。それに対して解析では、載荷点付近からはく離が進行してひずみ勾配が低下している領域が拡大する様子が確認できる（C113、C313、C113-L）。実験結果と比べて、終局時に荷重-変位関係が異なっていたのは、解析ではシートはく離の開始が早く、はく離後すぐに耐力を失うことなく、抵抗したためと考えられる。C116については荷重-変位関係においても比較的差異が小さかったので、ひずみ分布も両者は良く一致していた。

## 4. まとめ

炭素繊維で曲げ補強したRC梁部材の破壊機構の検討を目的とし、補強梁の曲げ試験と非線形有限要素解析を実施した。本検討で得られた知見は以下の通りである。

- 1) シートのはく離は、曲げひび割れ間で形成される三角ブロックが回転することによりシート接着面に段差が生じ、それが起点となって発生することを試験体の詳細な観察で確認した。
- 2) 分散ひび割れモデルを用いた非線形FEM解析により、試験体の耐荷挙動および最大荷重を精度良く再現できることを明らかにした。ただし、実験で見られた三角ブロックの形成およびその回転は再現することはできていない。
- 3) FEM解析においては、荷重-変位の関係が終局時に実験値と異なった理由として、解析モデルにおける要素寸法やコンクリートの引張特性の影響が挙げられる。しかし、それらの影響だけでは荷重-変位の関係を十分に説明できていないことから、三角ブロック形成に関わるひび割れモデルや樹脂の物性の評価など、他のモデル上の要因もあると考えられる。

なお、本研究は、(国研)土木研究所と(一社)繊維補修補強協会による令和元年～2年度の「連続繊維補強されたRC床版の耐久性評価に関する共同研究」の一部として実施したものである。

## 参考文献

- 1) 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: AFRPシートで曲げ補強したRC梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 683, pp. 47-64, 2001
- 2) 呉智深, 松崎智優, 福沢公夫, 神田建: CFRP緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.641, pp.153-165, 2000
- 3) 佐藤靖彦, 伊藤智之, 小牧秀之, 前田敏也: 緩衝材を用いた炭素繊維シート補強RCはりの曲げ挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.2002
- 4) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物), 丸善, 2004
- 5) Nakamura, H and Higai, T: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999
- 6) Shima, H. and Tamai, S.: Tension stiffness model under reversed loading including post yield range, IABSE Colloquium Delft, pp.547-556, 1987
- 7) 張広鋒, 星隈順一, 堺淳一, 運上茂樹: 炭素繊維シートと鋼板を併用したRC橋脚の耐震補強工法とその効果, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.430-445, 2011