

連続繊維シートが部分的に剥離した補強後の鉄筋コンクリートはりにおける耐荷性状

上原子 晶久¹・中道 泰貴²・三浦 貴大²

¹正会員 弘前大学准教授 大学院理工学研究科 (〒036-8561 青森県弘前市文京町3番地)
E-mail:kami@cc.hirosaki-u.ac.jp

²元弘前大学 理工学部地球環境学科 (同上)

本研究では、炭素繊維シートを用いて鉄筋コンクリートはりに曲げ補強を行った場合に、載荷前に生じているシートの剥離がはりの耐荷性状に与える影響について実験と解析を行い検討した。載荷試験の結果、連続繊維シートの剥離区間が比較的短い場合には、そのことが耐荷性状に及ぼす影響は小さいことを明らかにした。実験結果をより精緻に検討するため、2次元非線形有限要素解析により載荷試験の再現解析を行った。その結果、実験値と解析値が概ね一致する結果が得られた。

さらに、実験結果を用いて、現行の必要定着長に関する設計法の課題を指摘した。それを踏まえて、将来制定されるであろう新たな補強指針に対する提言を行った。

Key Words : FRP sheet, Debonding, Bonding, Flexural behavior, FEM

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震を機会に、連続繊維シートやストランド、プレートなどを用いた鉄筋コンクリート構造物に対する補強が活発化してから、およそ20年が経過した。したがって、補強後10年以上を経過している構造物が増加しているものと推測される。一方で、補強後の構造物に対しては、所定の耐久性能や構造性能を満たすために、適切な維持管理が行われることが望ましい。2000年に刊行された土木学会の補修補強指針¹⁾では、目視や適切な機器を用いて点検を行い、その結果により対策判定を行うことを定めている。その後、知見の集約が進み、2013年に刊行されたコンクリート標準示方書・維持管理編²⁾では、構造物の表面に連続繊維シートなどを巻き立てた場合には、母材が隠れるので、母材の状態を適切に把握できるようにモニタリングセンサーなどを活用することを推奨している。このように、当時を代表する指針¹⁾から13年が経過して刊行された示方書²⁾では、維持管理の手法に何らかの進展が見られる。しかしながら、具体的に補強後の構造物に損傷が生じた場合の具体的な対策については、明記されていない現状にある。これは、文献¹⁾に代表される指針類では、連続繊維シートなどの補強材の剥離を許容していないことに大きな理由があると著者らは理解している。

ところで、実際の連続繊維シートで補強された構造物では、以下のような変状が確認されている³⁾。

- ・ シートを保護するポリマーセメントモルタルが凍結融解作用によりひび割れる。
- ・ 施工時の不具合により、シートが剥離する。
- ・ 点検対象の構造物中での約2割に、以上のような変状が発生していた。

このように、環境作用などにより補強後のシートに剥離が発生した場合、補強時の保有性能がどの程度、低下するのかを明らかにする必要があると著者らは考えている。そこで、連続繊維シート補強鉄筋コンクリートはりに対して擬似的にシートの剥離を発生させた上で、載荷試験と有限要素解析を行い、剥離後の力学性能を検証する。

一方で、連続繊維シートなどのFRP材料を対象にした指針類は、今日まで更新作業がおこなわれていない。そのことを考慮して、現状の設計指針が抱える課題を以上と合わせて検討する。具体的には、曲げ補強部材の必要定着長の算定方法について本実験結果を用いて検証を試みる。

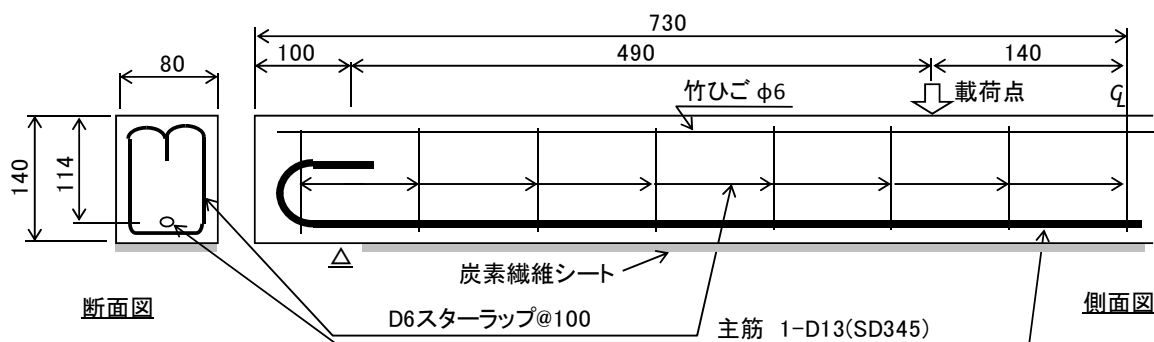


図-1 試験体の概要(単位：ミリメートル)

2. 実験の概要

本研究で作製した試験体の一覧を表-1に示す。実験のパラメータは、表-2に示す剥離区間の長さ(280mm, 920mm)、およびその位置である。以下に詳細を述べる。

(1) 試験体

本論文で用いたRCはりとは、土木学会 コンクリート委員会 材料劣化の生じた構造性能研究小委員会が実施した電食によるRCはりに関する共通試験⁴⁾で採用されたものを参考に仕様を決定した。その仕様を参考にした理由は、以下による。

- ・ 共通試験で鉄筋腐食の生じていない基準供試体で曲げ破壊が先行することが数多くの載荷試験で確認されている。
- ・ はり1体あたり40kgである。すなわち、成人男性2人で可搬であり、クレーンなどの重機が不要である。

この試験体の概要を図-1に示す。はりの外形寸法は全高140mm(有効高さ114mm)・幅80mm・長さ1460mmである。内部鋼材は主筋がD13、スターラップにD6の異形鉄筋を使用した。はりの主筋比は1.39%であり、主筋は引張側にのみ配置した。圧縮側でスターラップの固定するため、圧縮力を負担しない竹ひごを配置した。内部鋼材の固定には、ケーブルタイを用いた。使用したコンクリートの配合を表-3に示す。使用したセメントは早強セメントであり、水セメント比を45%とした。コンクリート打設を二次製品工場で行ったため、表-3の配合は一般的なコンクリート二次製品と同等である。載荷試験終了時におけるコンクリートの圧縮強度は45.3N/mm²、主鉄筋の降伏強度は325N/mm²であった。

使用した連続繊維シートは、炭素繊維シートである。使用したシートの物性値を表-4に示した。本実験では、図-1に示したように曲げ補強を目的にはり下面に1層の

表-1 試験体と載荷試験結果のまとめ

試験体	実験結果	
	最大荷重 (kN)	最大荷重時の変位 (mm)
No.1	33.6	16.5
No.2	35.7	19.5
No.3	33.3	20.0
No.4	32.5	22.5

表-2 剥離区間の長さとその位置

試験体	載荷前の剥離区間	
	長さ	位置
No.1		なし
No.2	280mm	等曲げ区間
No.3	280mm	左载荷点から支点方向
No.4	920mm	はり中央から左右対称

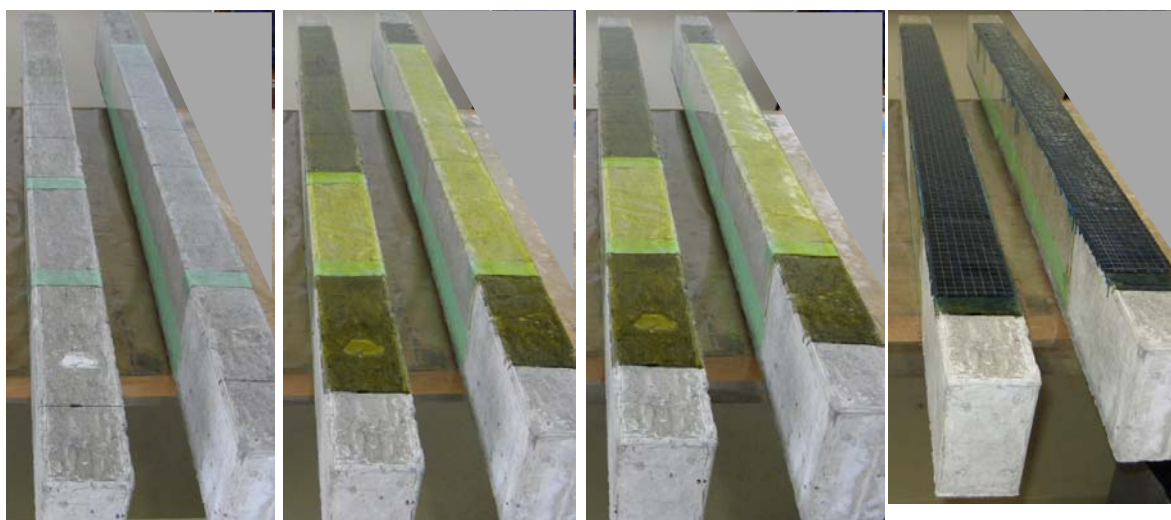
↔ は、剥離区間を表す

表-3 コンクリートの配合表

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
45	6.0	36	149	330	673	1220

- ・ 目標スランプは7.5cmである
- ・ 0.108kg/m³のAE減水剤を添加した

炭素繊維シートを接着した。炭素繊維シートの長手方向の長さは1200mmである。この長さは、支点と干渉しな



(1) ビニルフィルム＋ワセリン塗布

(2) プライマー塗布

(3) 接着樹脂下塗り

(4) シート接着＋接着樹脂上塗り

図-2 シートとコンクリートとの間の剥離層の挿入方法

いことを優先して決定された。接着方法は、母材表面のケレン後、プライマーを塗布して所定の時間で養生を行った。その後、エポキシ樹脂にて幅80mmのシートを接着した。ここで、表-2に示したように載荷前に剥離区間を設ける試験体については、図-2に示した方法でシートと母材の間に剥離層を挿入した。まず、所定の剥離長さの区間の母材に厚さ0.5mmのビニルフィルムを養生テープで固定する。その際、ビニルフィルムと母材との間にエポキシ樹脂が浸入しないように留意した。ビニルフィルムの表面に白色ワセリンを塗り、その上に通常の手順で炭素繊維シートを接着した。載荷試験終了後に確認したところ、載荷前の剥離区間においてはフィルムと母材が接着していなかった。載荷前の剥離区間は、等曲げモーメント区間を基準に決定した。すなわち、表-2に示したように試験体No.2では等曲げモーメント区間280mmのすべてが剥離区間になっている。一方、試験体No.3では、等曲げモーメント区間の左端から支点方向に280mmの載荷前の剥離区間を設けた。試験体No.4では、はりの中央を中心に載荷前の剥離区間が920mmとした。これは、No.2、No.3とは対照に定着区間を280mmとしたためである。

(2) 曲げ載荷試験

シート接着後、1週間以上の養生期間を経た後に、図-1に示した方法で曲げ載荷試験を行った。支点の支持条件は、単純支持である。計測項目は荷重、はり中央のたわみ、はり中央上縁のコンクリートひずみ、ならびに連続繊維シートのひずみ(100mm間隔)である。加力には、容量1000kNの万能型試験機を用いた。荷重は、部材降伏までは2kNごとの荷重制御、部材降伏以降は0.5mmご

表-4 炭素繊維シートの機械的性質

繊維目付 (g/m ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
212	4420	252

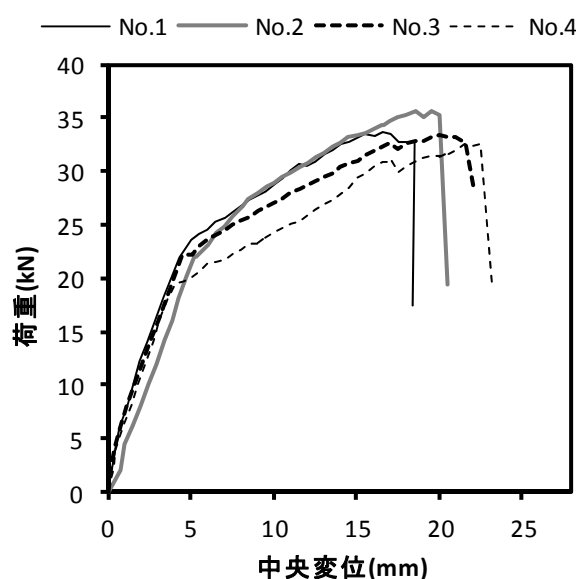


図-3 実験で得られた荷重－中央変位関係

との変位制御とした。

3. 曲げ載荷試験結果の考察

図-3に、すべての試験体の荷重と中央変位との関係を示す。なお、いずれの試験体においても、連続繊維シートが端部まで急激に剥離して終局状態に至った。その際

に荷重段階の途中でシートが破断することはなかった。まず、剥離区間の大小で比較すると、280mmの剥離区間を設けたNo.2、No.3は、剥離区間のないNo.1とほぼ同程度の終局耐力を有していることがわかる。しかし、剥離区間が920mmとなるNo.4では、主筋降伏後の剛性が剥離区間のないNo.1よりも低下する傾向にある。しかしながら、最も長い剥離区間を持つNo.4では、最大荷重がNo.1とほぼ変わらない結果が得られている。これは、No.4において炭素繊維シートの定着が、短いながらも健全であることが原因と考えられる。子田⁹⁾らの研究では、温度変化によって、連続繊維シートとコンクリートとの境界層が損傷して、付着性能が低下することが指摘されている。そのことを考慮すると、連続繊維シートの剥離が生じた実際の構造物では、本実験のような室内試験で再現できないような性能低下が生じていることが予想される。したがって、構造物に大規模に剥離が生じている場合には、4章で示したような数値解析により、残存性能を評価することが望ましいと著者らは考えている。

次に、剥離区間の位置の影響について考察を試みる。No.2とNo.3をの荷重－中央変位関係をそれぞれ比較すると、両者の終局荷重と終局変位がほぼ同じになっている。著者らの過去の研究⁹⁾では、左右の定着長に偏りがある場合には、力学性能が不利になることが明らかにされている。本実験結果では、そのような傾向が見られなかった。このことが妥当であるかを解明するためには、剥離区間を280mm以上にして実験を行う必要があり、今後の課題としたい。

ここまでの考察をまとめると、荷重－中央変位関係から類推される曲げ耐荷性能に対して、剥離区間が比較的短い場合には、連続繊維シートの剥離が及ぼす影響は、大きくないと推定される。

図-4に終局時のひび割れ図と荷重によるシート剥離の状況を示した。この図より、荷重前の剥離区間が偏在しているNo.3と同剥離区間が920mmのNo.4で特徴的な破壊が見られた。まず、No.3では荷重前の剥離区間が存在するせん断スパンではコンクリートにひび割れが発生せず、荷重前から炭素繊維シートが接着されている側に曲げひび割れが集中している。そのようにひび割れが集中したことが原因となり、No.3においては荷重による剥離の進展とともに終局時には一部の炭素繊維シートが破断した。No.4では、荷重前におけるシートの剥離区間が比較的長いので、はり全体に曲げひび割れが分散していない。曲げひび割れは、等曲げモーメント区間のみ発生している。以上の結果より、連続繊維シートによりRCはりの曲げ補強を行った場合には、剥離区間が比較的短くても偏在していたり、あるいは剥離がスパンの大部分を占める場合には、力学性能に少なからず影響を及ぼすことが懸念される。

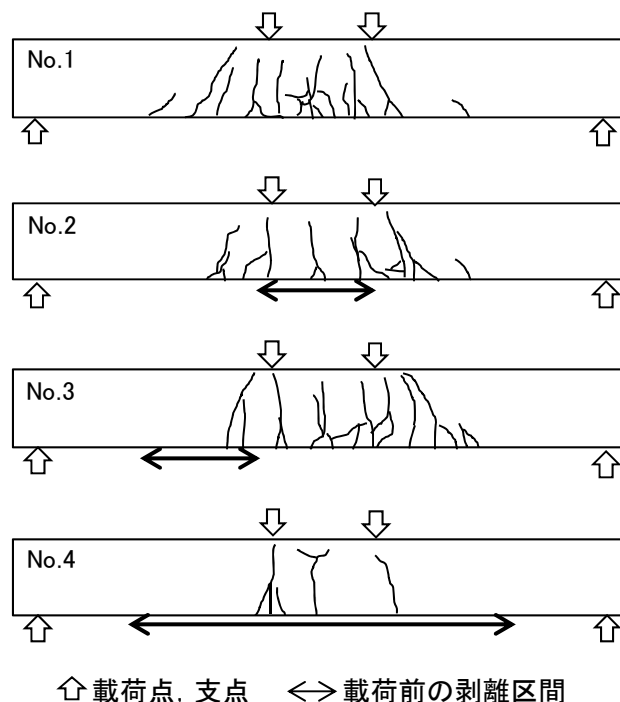


図-4 終局時のひび割れ図

4. 有限要素解析

(1) 解析方法

本検討では2次元非線形有限要素解析⁷⁾により部材の解析を行った。解析モデルを図-5に示す。使用した材料の構成モデルを図-6に示す。コンクリートについては、圧縮側はNakamuraら⁸⁾、並びに斉藤ら⁹⁾の提案したモデル、引張側はコンクリート標準示方書¹⁰⁾に記載の1/4モデルである。コンクリートに対する構成モデルでは、要素寸法に計算結果が異存しないような工夫が必要である。本解析では、文献⁹⁾にしたがって要素寸法で破壊に消費されるエネルギーが一定になるようにした。具体的には、圧縮・引張破壊エネルギーを一辺の平均要素寸法で除することにより降伏時、および破壊時のひずみを定めた。鋼材はせん断補強鉄筋、主筋ともにバイリニアモデルとした。なお、全ての鋼材は埋込鉄筋要素を用いて離散配置した。従って、鋼材とコンクリートとは完全付着となる。一方、コンクリートと連続繊維シートとの間にはせん断ばね要素を挿入して両者の付着と剥離を考慮した。図-6に示したばね要素の付着応力とすべりとの関係における材料パラメータについては、著者ら¹¹⁾の既往の研究を参考に決定した。なお、荷重前に剥離区間を設けた試験体を対象にした解析では、その剥離を以下のようにモデル化した。すなわち、当該剥離区間の付着要素を取り除き、シートとコンクリート間を2重節点として荷重前の剥離をモデル化した。解析上の荷重は、実験と同様に4点曲げ荷重で変位制御とした。

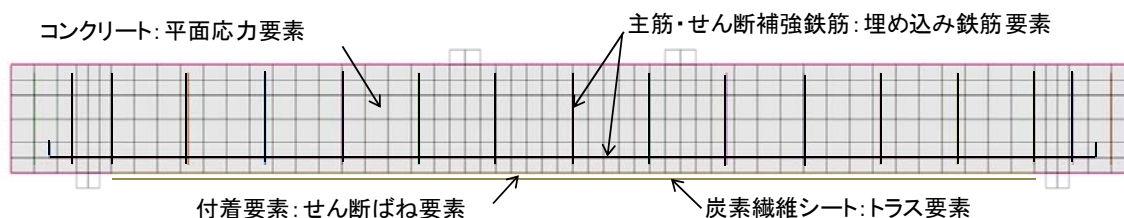


図-5 有限要素モデル

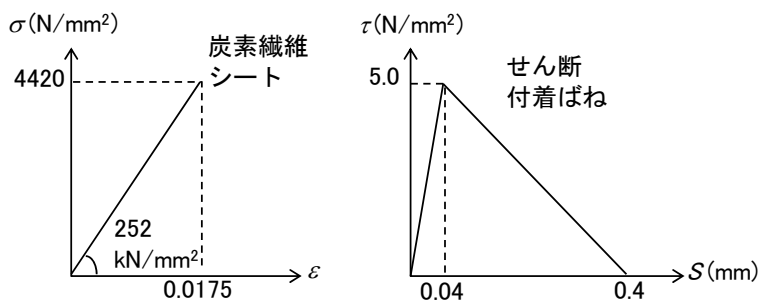
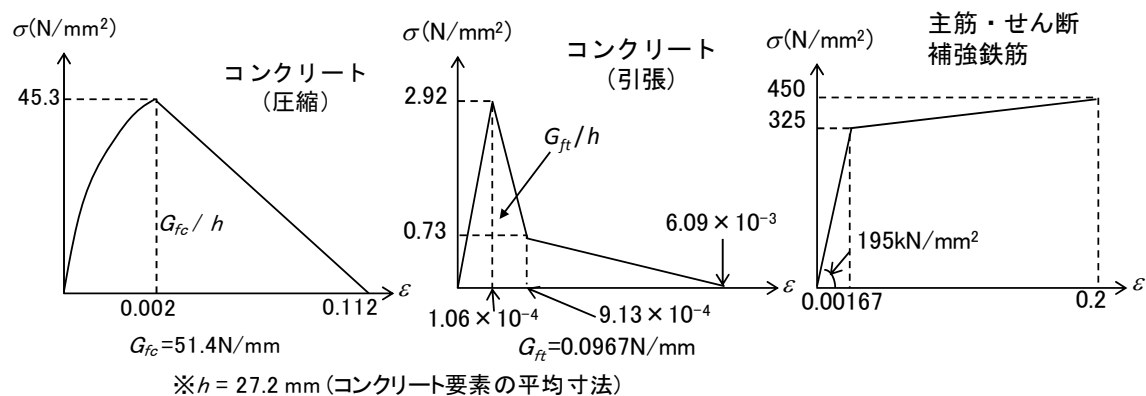


図-6 材料の構成モデル

(1) 解析結果

図-7にすべての試験体における荷重－中央変位関係に関する実験値と解析値との比較を示す。この図より、いずれの試験体においても解析値は実験値を精度よく再現していることが確認できる。特に、主鉄筋降伏前後の力学性状に関しては、実験値と解析値が一致する傾向を示しており、本解析における連続繊維シートとコンクリートとの付着と剥離のモデル化が適切であると理解される。

一方、終局時に関しては、いずれも試験体でも解析値が実験値を過大に評価している。実験では、等曲げモーメント区間の端部を起点にした端部方向へのシート剥離が急激に起こることにより終局を迎える。一方、解析では、仮にシートの剥離が端部まで進展しても解析は継続され、圧縮側コンクリート圧壊、もしくはシート破断により終局となることを確認した。このような破壊モードの違いにより、解析における終局状態の予測の精度が低

下したものと考えている。さらには、主鉄筋とコンクリートを完全付着としていることも、解析値における予測精度が低下する原因の一つと考えられる。

図-8に炭素繊維シートのひずみ分布に関する実験値と解析値の比較を示す。いずれの試験体においても終局時以外の解析値は、ほぼ良好に実験値を再現しているといえる。終局時において、解析値が実験値よりも過大になっているのは、図-7で示した考察と同様の理由である。ここで、左右の定着区間に偏りのあるNo.3におけるひずみ分布の解析値に着目すると、定着区間の短い方でシートひずみが大きくなっている。このことは、図-4で示したひび割れ図で見られた傾向と同じである。したがって、剥離の生じた劣化部材では、見かけの力学性能が健全部材と同じでも、両者の耐荷機構に差異があるといえる。

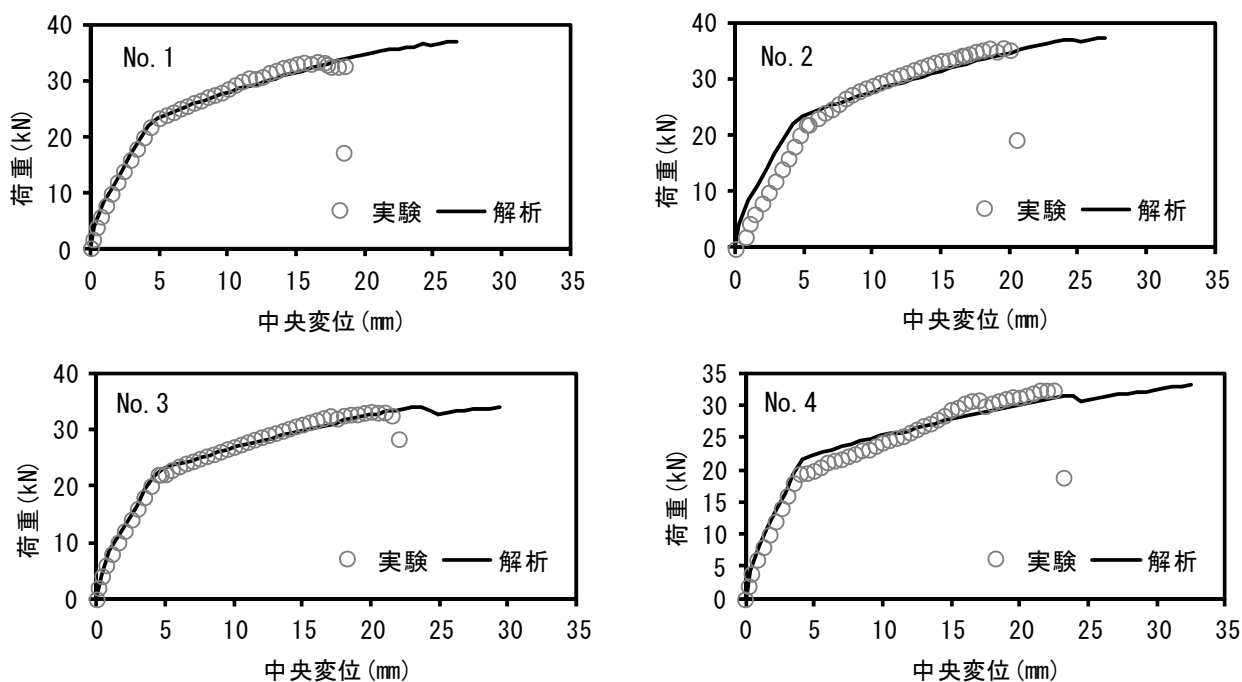


図-7 すべての試験体における荷重－中央変位関係に関する実験値と解析値との比較

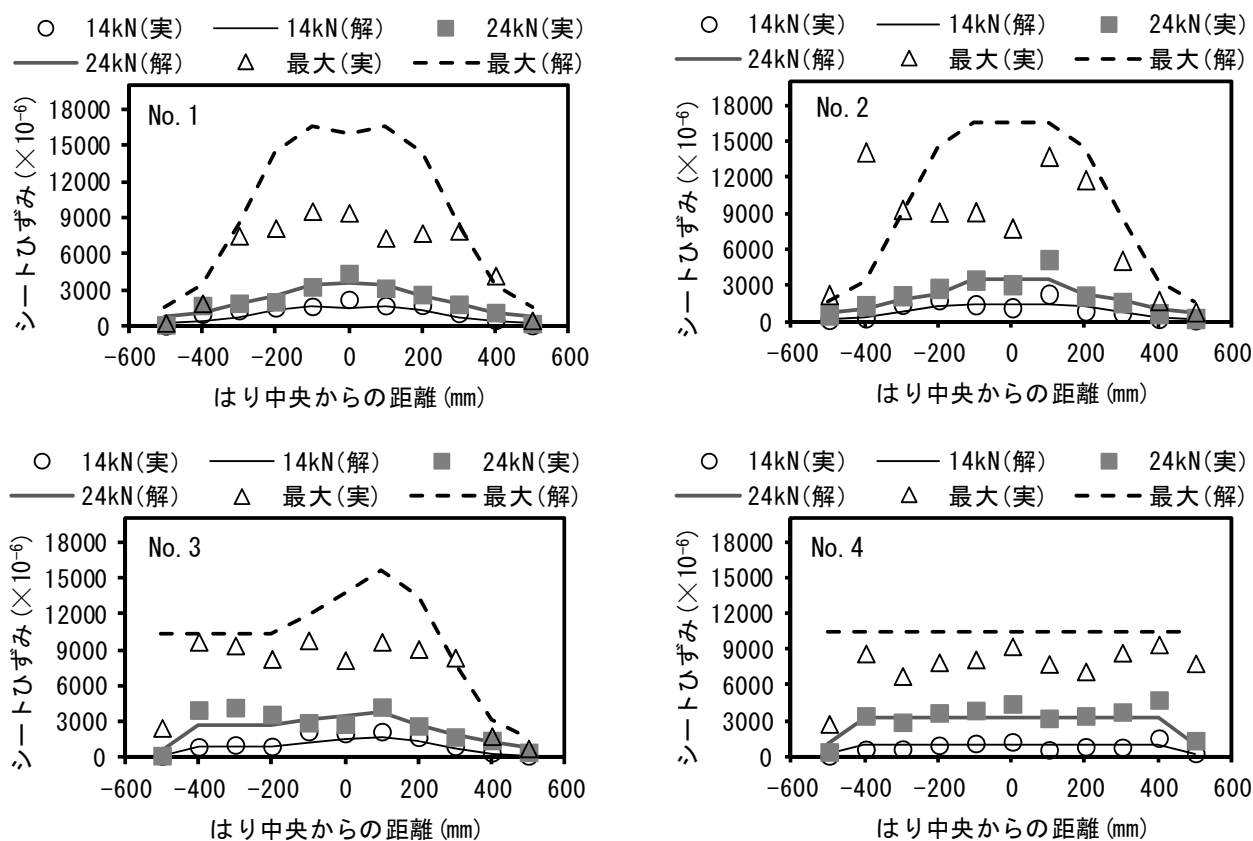


図-8 連続繊維シートのひずみ分布に関する実験値と解析値の比較

5. 必要定着長の評価

現状の連続繊維シート補強による補強設計指針¹²⁾にお

いては、以下の式(1)で示すように付着強度を一定して連続繊維シートの必要定着長を算定するのが一般的である。

表-5 本実験における必要定着長と実定着長

	試験体	等曲げ区間のシートひずみ ($\times 10^{-6}$)	等曲げ区間のシート応力 (N/mm^2)	必要定着長 (mm)	実定着長 (mm)
14kN時	No.1	1913	482	127	600
	No.2	1582	399	104	460
	No.3	2088	526	138	320
	No.4	1009	254	67	280
24kN時	No.1	3661	923	242	600
	No.2	3865	974	256	460
	No.3	3289	829	218	320
	No.4	1009	254	67	280
終局時	No.1	16527	4165	1091	600
	No.2	10216	2574	676	460
	No.3	9211	2321	609	320
	No.4	8446	2128	558	280

$$l_{CFd} \geq \frac{T_{CF}}{b_{CF} \cdot f_{CFbod}} = \frac{\sigma_{CF} \cdot n \cdot t_{CF}}{f_{CFbod}} \quad (1)$$

ここに、 T_{CF} は曲げモーメント最大位置での炭素繊維シートの引張力(N)、 b_{CF} は炭素繊維シートの幅(mm)、 f_{CFbod} は炭素繊維シートの設計付着強度(N/mm^2)、 σ_{CF} は曲げモーメント最大位置での炭素繊維シートの引張応力(N/mm^2)、 n は炭素繊維シートの使用枚数、そして t_{CF} は炭素繊維シート1枚の厚さ(mm)である。指針¹²⁾では、付着強度 f_{CFbod} を要素試験により求めない場合には、 $f_{CFbod} = 0.44\text{N}/\text{mm}^2$ にすることを定めている。式(1)が必要定着長を求める方法として妥当であるかを以下に検討したい。

表-5は式(1)による必要定着長、並びに本研究の試験体における実定着長を求めたものである。表-5の検討では、3つの荷重ステップごとに必要定着長と実定着長を求めた。(14kN時：部材降伏前、24kN時：概ね部材降伏時、終局時：シートの剥離破壊直前)なお、必要定着長の計算では、等曲げモーメント区間における実測のシートひずみを平均することにより、引張応力 σ_{CF} を求めた。

表-5の計算結果を、実定着長と必要定着長との関係としてグラフ化したものが図-9である。この図では、必要定着長>実定着長(図-9における点線より左側)となれば、剥離破壊が生じることになる。確かに図-9では、終局時においては、プロットが定着長>実定着長となり式(1)の予測と実験結果が一致している。さらに、14kN時や24kN時では、定着長<実定着長となっている。本実験において、これらの荷重ステップでは、シートの剥離は末端まで生じていないことを確認している。したがって、終局に至らない時点でも、式(1)による必要定着長が妥当に評価されている結果となった。

一方で、細部では式(1)の条件と実験結果が相違している部分が見られる。まず、付着応力だが、図-8の連続

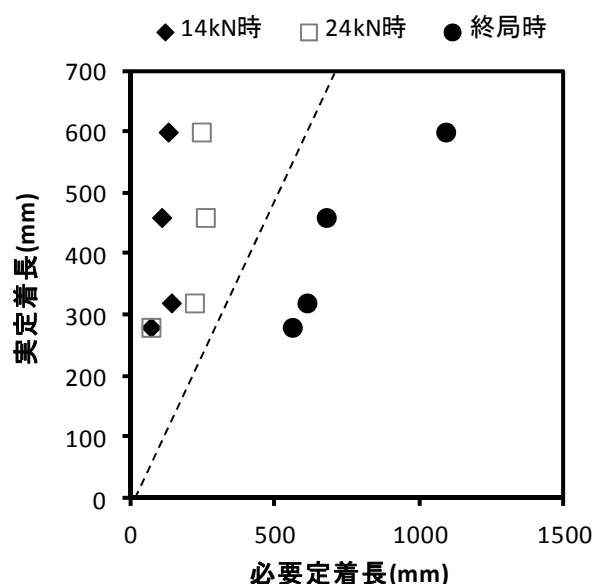


図-9 実定着長と必要定着長との関係

繊維シートのひずみ分布をみても明らかなように、シートとコンクリートとの付着応力は、荷重ステップごとに大きく異なる。付着応力は、シートひずみの勾配で大小が決定されるためである。また、終局時のNo.1において、必要定着長は実定着長の約1.8倍となっている。実際の構造物での曲げ補強を想定すると、この結果では、端部での機械定着がほぼ必須になるものと予想される。したがって、一定の付着応力で必要定着長を求めるのではなく、何らかの合理的方法で必要定着長を算定することが、今後の新しい補強設計の策定において検討されるべきである。

謝辞：本研究は、文部科学省 科学研究費補助金 基盤研究(B)(課題番号24360184, 研究代表者 岩城 一郎 教授 (日本大学工学部))の助成を受けた。炭素繊維シートにつ

いては、新日鉄住金マテリアルズ（株）コンポジット社から提供して頂いた。末筆ながら各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリー101，2000.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，2013年制定，2013.
- 3) 内藤 勲，田口 史雄，野々村 佳哲：北海道における繊維シート接着コンクリートの変状調査，寒地土木研究所月報，No. 692，pp. 11-19，2010.
- 4) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ No. 85，2009.
- 5) 子田 康弘，上原子 晶久，岩城 一郎：連続繊維シートとコンクリート間のせん断付着特性に及ぼす温度変化の影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 12 巻，pp.17-22，2012
- 6) 上原子 晶久，佐々木 啓太，佐々木 大二郎，福士 怜：炭素繊維シート補強された鉄筋コンクリートはりの耐荷性状にシート剥離が及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 13 巻，pp. 577-584，2013.
- 7) TNO DIANA BV.：DIANA -Finite Element Analysis- User's Manual, Release 9.4.3, 2012.
- 8) Nakamura, H., Higai T.：Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, Japan Concrete Institute, pp. 259-272. 1999.
- 9) 斉藤 成彦，中村 光，檜貝 勇：剛体バネモデルを用いた RC パネルのせん断二次破壊に関する解析的研究，土木学会論文集，V-55，No. 704，pp.219-234，2002.
- 10) 土木学会：2012 年度制定 コンクリート標準示方書[設計編]，2013.
- 11) 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 V-45 / No. 634，pp. 197-208，1999.
- 12) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針，1997

STRUCTURAL BEHAVIOR ON RC BEAM WITH PARTIALLY DEBONDING OF NONMETALLIC FIBER REINFORCED SHEET

Akihisa KAMIHARAKO, Yasutaka NAKAMICHI and Takahiro MIURA

In this study, the influence of the debonding carbon FRP sheet was analyzed with the experimental and FE analytical results, when the RC beam was strengthened by the FRP sheet to improve the flexural capacity. As a result of loading tests, when the debonding section of the FRP sheet was relatively short, it made clear that the influence to the flexural behavior was small. The authors were conducted the FE analysis for the loading test results by a two-dimensional nonlinear finite element analysis. As a result, it was provided that the analytical result almost accorded with experimental one.

Furthermore, the authors pointed out the problem of the design method about the current necessary anchoring length by using the experimental results. Based on that discussion, a recommendation was proposed for the new design guideline that would be established in the future.