

論文 一部柱の補強が困難なラーメン高架橋を想定し定着体を設けた連続繊維シートによる梁曲げ補強の実験的検討

松尾 伸二^{*1}・菅野 貴浩^{*2}・高橋 宏幸^{*3}・小林 朗^{*4}

要旨：RC ラーメン高架橋下に店舗等が存在する際、一部柱の補強が困難な箇所が存在する。その時、柱や横梁を避け縦梁を連続的に曲げ補強することにより高架橋全体での崩壊を防ぐことができる。そこで、梁下面に連続繊維シートを貼付けることが可能な部分は梁下面に補強し、貼付けが困難な部分は梁側面に貼付け補強する方法を考案し載荷実験により補強効果を確認した。また部材の終局時に連続繊維シートの剥離破壊が先行しない鋼制定着体を用いた端部定着方法を用いることとした。その結果、端部定着方法の有効性及び梁の連続的な補強が可能であることが分かった。

キーワード：RC ラーメン高架橋、炭素繊維シート、曲げ補強、端部定着、鋼制定着体、剥離破壊、梁

1. はじめに

図-1 に示すように、一般的な高架橋の耐震補強方法として、補強が必要とされた柱について、せん断およびじん性補強を基本とした各種耐震補強工法などが実施され高架橋全体系としては崩壊しないようにしている¹⁾。一方、RC ラーメン高架橋下を店舗等で利用され、全ての柱のうち一部の柱が補強困難な場合、補強出来ない柱が地震時にせん断破壊等を起こし、上層の梁またはスラブの崩落により大規模な崩壊につながると推測される。しかし、店舗内など一部の柱が補強困難となる場合であっても、梁などを連続的に曲げ補強しておくことで地震発生時に補強出来なかった柱がせん断破壊等したとしても、高架橋全体系としての崩壊を防ぐことにより、梁やスラブを崩落させずに店舗内の空間を確保することによ

り安全が確保できる可能性があることが解析的にわかった²⁾。そこで縦梁を連続して補強する工法を検討することとした。

具体的には、図-2 に示すように柱や横梁を避けながら梁の下面および側面を利用して連続繊維シートを貼付けることにより、縦梁を連続的に補強できると考え、その補強効果について確認した。

なお本工法では、連続繊維シートの継手部およびシート端部での剥離および剥離後の落下を防止するため、図-3 に示すように鋼制定着体を設けて連続繊維シートを定着することを検討した。

連続繊維シート端部定着構造の要素実験ならびに柱や横梁を避けて梁の下面だけでなく側面の補強を模擬した梁の曲げ載荷実験を実施した結果について報告する。

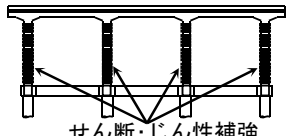
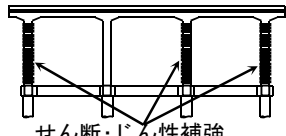

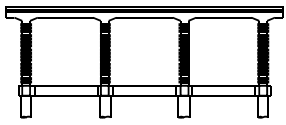
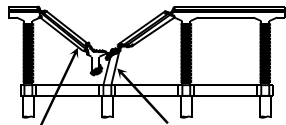
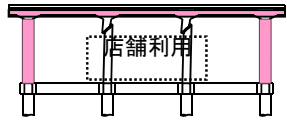
	従来補強工法	柱の一部補強省略	上層梁の補強により一部の柱の補強を省略
補強方法	 せん断・じん性補強	 せん断・じん性補強	 店舗利用 曲げ補強 せん断・じん性補強
地震後の損傷イメージ	 崩壊しない	 梁の曲げ破壊 柱のせん断破壊	 店舗利用 高架橋全体系としては崩壊しない

図-1 各補強方法と地震後の損傷イメージ

*1 東日本旅客鉄道(株) 鉄道事業本部 設備部 工修(正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 工事管理室 工修(正会員)

*3 ジェイアール東日本コンサルタンツ(株) 技術第二部

*4 新日鉄マテリアルズ(株) 日鉄コンポジット社 社会資本材料事業部 技術部 工修(正会員)

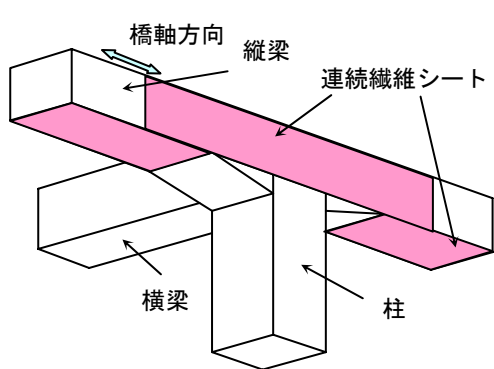


図-2 縦梁と柱、横梁の接合部
およびその補強方法の概念図

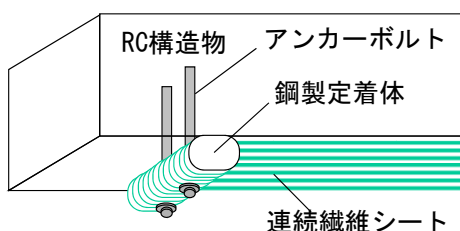


図-3 定着体概念図

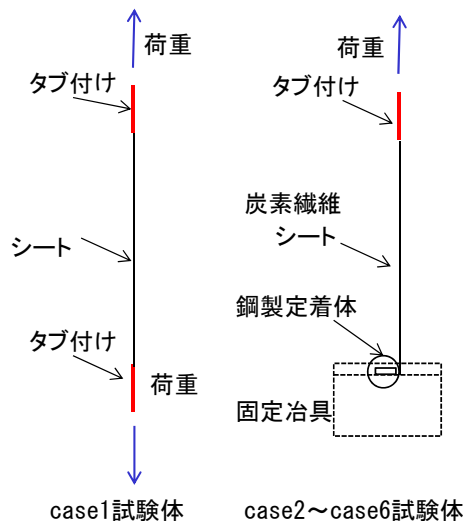


図-4 供試体概要

2. 連続繊維シートの端部定着

2.1 定着部の引張試験

定着体の鋼板に連続繊維シートを接着しただけでは、必要接着長が長くなること、また面外力によるピーリング作用により早期に剥離する可能性があることから、棒状の鋼制定着体に連続繊維シートを巻きつけて固定する方法を考案した。実験により剥離や巻きつけ部での強度低下が生じない連続繊維シートの必要な巻き数と鋼制定着体の巻き径を確認した。

図-4 に供試体の概要を示す。図に示す円形断面を持つ定着体に接着剤を含浸させた連続繊維シートの一種である炭素繊維シートの端部を巻きつけて硬化させ1週間養生した後、定着体を固定し、端部片側を緊張し、引張試験を行った。試験片数は、各ケース7体とした。

連続繊維シートは高強度型の目付け量 300g/m^2 の炭素繊維シート（保証引張強度 3400N/mm^2 ）を用いた。なお、case1 は、JSCE-E 537-2007 に基づき平らな試験体で引張り試験をした基準試験片である。

2.2 実験結果

引張試験の実験結果を表-1 に示す。case2, case3 および case4 で巻き径は $\phi 20$ と一定にし、巻き数を1周から2周と変化させた試験では、巻き数が増えるにつれて引張り強度は上がり、1周では 1850N/mm^2 に対して2周では 3100N/mm^2 と 67%引張強度が上がる結果となった。また、case4, case5 および case6 で巻き数を2周と一定にし、巻き径を $\phi 20$ から $\phi 60$ と変化させた試験では、巻き径が増えるにつれて引張強度が上がり、case5 および case6 の $\phi 40, 60$ で、保証引張強度 (3400N/mm^2) を上回り、case6 の $\phi 60$ では、通常の曲がりなし巻きつけなしの case1 の引張試験結果 (3710N/mm^2) を上回り曲率の影響による強度低下が認められなかった。破断位置は、いずれの供試体もシート下端の定着体近傍であった。繊維シートを定着体に巻きつけるため、巻きつけ位置において繊維方向が直線から曲率方向へ変化するが、径が大きいほどその曲率が小さくなり定着体近傍で起こっている応力集中が小さくなり引張強度が増加したと考えられる。また、巻き数が増えることにより FRP 層が多くなり再外層の巻き径が大きくなり定着体近傍の応力集中が緩和され引張強度が増加したと考えられる。以上のことから、 300g/m^2 目付の炭素繊維シートであれば $\phi 40$ 以上でかつ2周以上巻きつけることが必要であることが分

表-1 実験結果一覧

試験条件	case1	case2	case3	case4	case5	case6
定着体の直径 ϕ (mm)	0	20	20	20	40	60
シート巻き数 (周)	0	1	1.5	2	2	2
平均引張強度 (N/mm^2)	3710	1850	2710	3100	3560	4020
破壊性状	シート破断	シート破断	シート破断	シート破断	シート破断	シート破断

かった。

3. 梁の曲げ荷重実験

3.1 実験概要

本実験に用いた供試体は、全て普通コンクリートによる矩形RC梁である。図-5に供試体の形状寸法、配筋状況を示す。断面は幅400mm×断面高さ550mmとし、引張側の主鉄筋はD13@5本とした。梁の全長は3600mmで支持スパンは3200mmとした。

供試体は表-2に示したNo.1～No.6供試体の6体とした。No.1供試体は一般的に曲げ補強として実施されている下面貼付のモデルに今回提案する定着体を施した供試体であり、これを基準供試体として他の供試体と比較することとした。No.1供試体は、目付量300g/m²の炭素繊維シート1層で下面に補強しその両端に定着体を施した。No.2,4,5,6供試体は、梁下面中央部に柱により連続繊維シートが連続して接着できないことを想定し、梁下面の連続繊維シートは中央部で分割して接着し、その部

分の側面に連続繊維シートを貼付け、その両端に定着体を施した。No.1,2,4,5供試体は、継手部の長さ（以下、継手長）をパラメータとし、No.2,6供試体は目付量をパラメータとした。補強方法の比較として、No.3供試体は目付量を150g/m²としたシートを2層貼付け、両端に定着体を各々2段で配置し、各定着体に1層150g/m²目付けずつ定着させた。なお、下面に貼付けた補強量と側面に貼付けた補強量は同程度である。

表-3に曲げ実験時のコンクリートの圧縮強度、表-4に鉄筋、および表-5に炭素繊維シートの材料特性を示す。表-3において、コンクリート強度がばらついており、コンクリート強度の違いを考慮した計算値と実験結果の比で耐力を評価することとする。本実験では、連続繊維シートとして保証引張強度3400N/mm²の高強度型の炭素繊維シートを用いた。表-5に示した引張強度と表-1のcase1の引張試験の結果との違いは炭素繊維シートのロットの違いである。

なお、本実験では連続繊維シートで曲げ補強したR

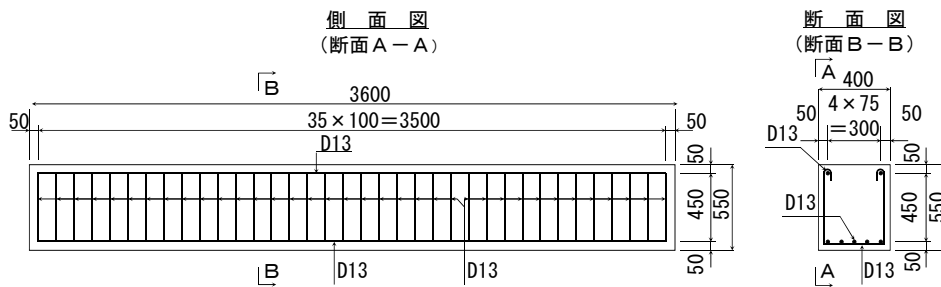


図-5 供試体形状および配筋図

表-2 供試体一覧

供試体No	供試体略図	試験体仕様
No. 1		<ul style="list-style-type: none"> シート下面貼付1層（目付量300g/m²）
No. 2 No. 4 No. 5 No. 6		<ul style="list-style-type: none"> シート下面貼付1層（目付量300g/m²） シート側面貼付3層（目付量300g/m²）×両側 No. 2 継手部長さ：100mm No. 4 継手部長さ：300mm No. 5 継手部長さ：500mm シート下面貼付1層（目付量150g/m²） シート側面貼付3層（目付量150g/m²）×両側 No. 6 継手部長さ：100mm
No. 3		<ul style="list-style-type: none"> シート下面貼付2層（目付量150g/m²）

表-3 コンクリート強度

供試体	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
コンクリート強度 (N/mm ²)	25.9	41.6	32.1	37.6	40.6	32.4

表-4 主鉄筋の材料特性

種類	降伏強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D13(SD345)	369	188

表-5 炭素繊維シートの材料特性

保証強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
3400	4232	253

C梁の曲げ耐荷性状および定着体の性能確認の検討を目的としており、供試体の設計は、炭素繊維シートによる曲げ補強後においてもせん断破壊が先行しないこと、上縁コンクリートの圧壊前に炭素繊維シートが破断すること、を条件として行った。ただし、実際の補強設計では、上縁コンクリートの圧壊が先行することが望ましい。



写真-1 可撓性シート状織物

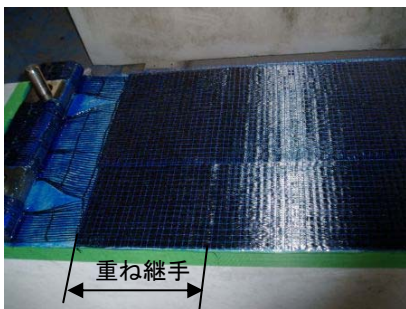


写真-2 端部定着体とシートの接続

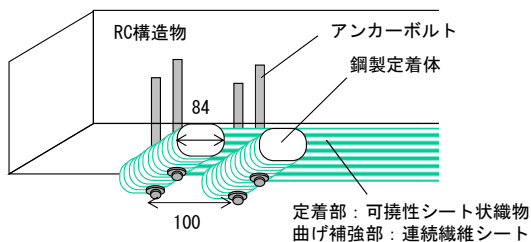


図-6 複数層積層の概念図

3.2 定着方法

図-3 に示す定着体では、連続繊維シートの巻きつけ範囲内に定着ボルトを貫通させる必要があり、一方向性連続繊維シートを定着体全体に巻きつけた場合は、ボルト穴部の連続繊維シートを切断する必要があり、連続繊維シートの断面欠損により強度低下が生じる。アンカーボルト部での断面欠損が生じないように、定着体の鋼棒に連続繊維シートを巻きつける際に、連続繊維を切断することなくアンカーボルトを避けて配置することが必要となる。そこで、写真-1 に示した連続繊維を径1mm程度の紐状に収束させ、その繊維束を一方向に複数本並べ、シート状に織り、保形した可撓性シート状織物を使用した。写真-2 に示すようにこの可撓性シート状織物は連続繊維を切断することなく容易にボルト部を避けて定着体に巻きつけることが出来る。また、現場作業の効率化を図るため工場で鋼制定着体をあらかじめ可撓性シート状織物を巻きつけて固定し、曲げ補強部の連続繊維シートと現場で重ね継手で接続した。

必要補強量が多く複数層の連続繊維シートを接着する場合に、端部の定着体を1箇所定着しようとする、定着体鋼材と連続繊維シートのすべりの恐れがあること、また定着体に作用する連続繊維シートの張力が高くなるため、これに対応して定着体の棒状鋼材の断面を大きくする必要があり、アンカーボルトのサイズ、埋め込み深さも大きくする必要があるのである。そこで、複数層積層する場合は図-6 に示すように、端部に1層ずつ定着体を取り付けて連続繊維シートと1層ずつ重ね継手で接続し、複数段に定着体配置することで確実な定着力が得られる構造とした。

今回用いた 300g/m² 目付の炭素繊維シートでは、定着体の棒鋼のはり軸方向の幅は 84mm 厚さ 40mm 折り返し部の曲率 20mm であり、複数層積層する場合 100mm ピッチで配置することができる。なお既往の研究で、定着

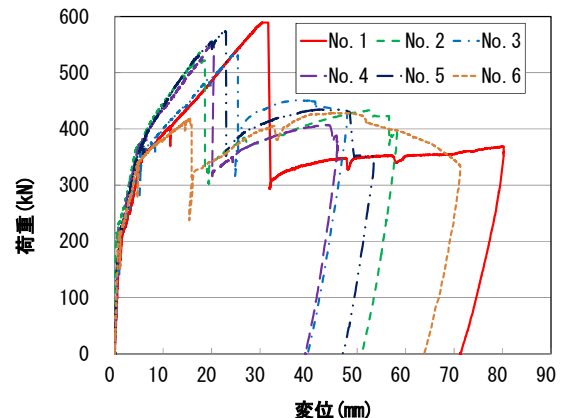


図-7 荷重-変位曲線

体を設けずに梁側面と下面のシートを接続する構造では、 $300\text{g}/\text{m}^2$ 目付の2層の場合、継手長が450mm以上必要である³⁾ことを考えるとコンパクトに施工できる。

3.3 実験結果

炭素繊維シートで補強した No.1~No.6 供試体の梁中央での荷重-変位曲線を図-7に、実験結果の一覧を表-6に示す。なお、ひび割れ荷重、降伏荷重、最大荷重を計算する際に材料係数、部材係数および構造物係数は1.0とした。最大荷重の計算値については、コンクリート構造物の一般的な仮定の他、連続繊維シートの応力-ひずみ曲線は、破断まで直線であるとする、ということ considering して算定している。これらの仮定から、連続繊維シートが終局ひずみに達する時の抵抗曲げモーメントから曲げ耐力を算出することとした。算出に用いた終局ひずみは、シートの保証荷重時のひずみである 13877μ を用いた。

基準となる No.1 供試体 (シート下面貼付) の破壊形態は、350kN 時に主鉄筋の降伏後、最大荷重である 589kN 時にシート破断で終局に至った (写真-3 参照)。No.2 供試体以降の供試体も全て、No.1 供試体と同様に、破壊形態は主鉄筋の降伏後、最大荷重時では下面のシート破断で終局に至った (写真-5 参照)。No.3 供試体に関しては 150g 目付部分での破断となった (写真-4 参照)。いずれの供試体においても、終局のシート破断時まで梁側面および梁下面の炭素繊維シート端部での剥離や定着部での破断およびコンクリートと炭素繊維シート間のずれ等は発生せず、炭素繊維シートは梁に確実に接着されていた。

計算値に対する実験値の値は、ひび割れ荷重において、 $0.82\sim 1.08$ 、主鉄筋降伏は $1.2\sim 1.25$ となった。全ての補強供試体の最大荷重は、無補強の計算終局曲げ耐力 274kN を大幅に上回り、梁の下面を連続して補強できない場合でも、端部に定着体を設けたシートを梁下面と梁側面に継手区間を設けて接着することで曲げ補強効果が得られた。ただし、No.1 供試体以外は、計算値に対して実験値の値が小さくなった。これは、コンクリートに発生したひび割れの位置およびひび割れ幅の大きさで炭



写真-3 No. 1 供試体破壊状況

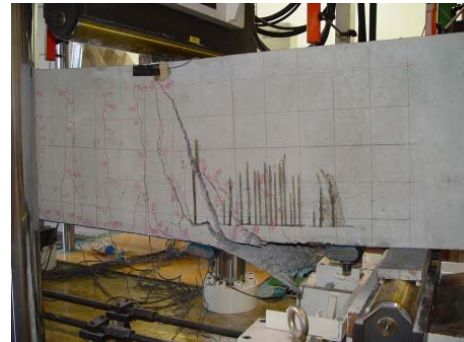


写真-4 No. 3 供試体破壊状況

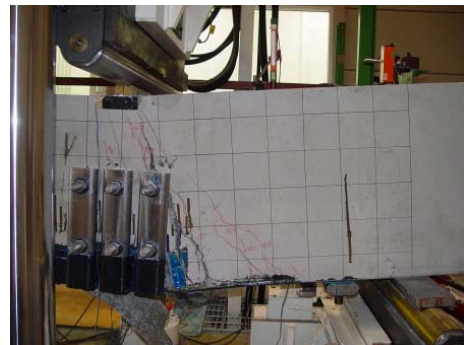


写真-5 No. 5 供試体破壊状況

素繊維シートのひずみのばらつきが大きくなることや、側面定着や面を変え継手長を設けたこと、定着体の剛性や位置の影響等と考えられる。ただし、計算値との比較は、部材係数等の安全係数を1としており、補強設計においては適切に安全率を設定する必要があると考える。

継手長については、基準の継手なしの No.1 供試体に

表-6 実験結果一覧

供試体	継手長 (mm)	ひび割れ荷重			主鉄筋降伏			最大荷重			シート破断時 シート中央部 ひずみ (μ) (注1)	シート 破断位置 (注2)
		計算値 (a) (kN)	実験値 (b) (kN)	(b)/(a)	計算値 (a) (kN)	実験値 (b) (kN)	(b)/(a)	計算値 (a) (kN)	実験値 (b) (kN)	(b)/(a)		
No. 1	なし	185	200	1.08	293	350	1.20	558	589	1.06	10080	等曲げ区間
No. 2	100	254	209	0.82	305	376	1.23	633	537	0.85	13720	載荷点位置
No. 3	なし	214	210	0.98	295	356	1.21	563	539	0.96	9830	せん断スパン内 (150g目付1層部)
No. 4	300	238	226	0.95	305	382	1.25	630	548	0.87	18360	せん断スパン内
No. 5	500	250	205	0.82	305	378	1.24	633	573	0.91	8440	せん断スパン内
No. 6	100	215	215	1.00	278	338	1.22	450	429	0.95	8110	載荷点位置

(注1) case1, case2は下端シートのひずみ、それ以外は側面シートの下端から20mm上の位置でのひずみ (注2) シートの破断は全て下面

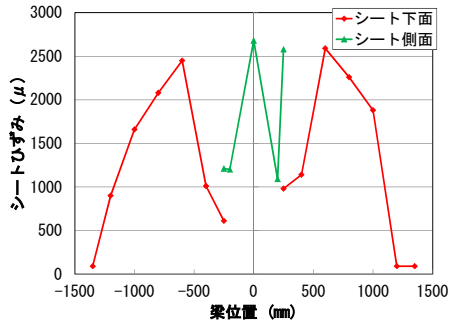


図-8 降伏荷重時の梁位置でのシートひずみ (No. 2)

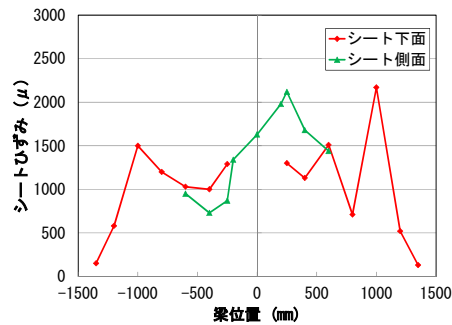


図-9 降伏荷重時の梁位置でのシートひずみ (No. 5)

において計算値に対する実験値の値は1.06であったのに対し、No.2 供試体（継手長 100mm）では 0.85, No.4 供試体（継手長 300mm）では 0.87, No.5 供試体（継手長 500mm）では 0.91 となった。どのケースも同じような破壊形態で、継手長が長くなるにつれて最大荷重が継手無しの場合の計算値に近づく結果となったが、継手長 100mm の No.2 供試体においても計算値の 85%の最大耐力を示し定着部でのシート破断は生じなかった。

No.2 供試体および No. 5 供試体の降伏荷重時の梁位置でのシートひずみをそれぞれ図-8 および図-9 に示す。シート下面のひずみは、No.2 供試体では梁中央から継手直前の 600mm の位置で最大のひずみが発生しており、No.5 供試体でも継手直前の 900mm の位置で発生している。また、定着体を使用しているため端部までシートにひずみが発生しており定着端部付近まで剥離せず補強効果があることがわかる。さらに、継手部が始まる付近でひずみが小さくなっており下面のシートと側面のシートが荷重を分担していると考えられ、そのため継手長が短くてもシート破断まで耐力が向上したと考えられる。

以上より 300g/m² 目付程度の炭素繊維シートで補強する場合、端部定着体を用い継手長を 100mm 以上とすることによりシート破断までの補強効果があると判断できる。

また複数層積層の複数段定着について、150g/m² 目付

の2層を2段の定着体で定着した No.3 供試体の最大荷重において、計算値に対する実験値の値は、0.96 となり、300g/m² 目付の1層を1段で定着した No.1 供試体の 1.06 に対して若干低い値を示したが、ほぼ計算値と同程度となっており、複数層を複数段の定着体で定着できる可能性が示されたと考えられる。

4. まとめ

縦梁を連続的に補強する方法の確立を目指して、端部定着体の実験、および下面および側面に炭素繊維シートを貼付けた梁の曲げ実験を行い以下の知見が得られた。

- 1) 定着体の引張要素実験の結果、定着体の巻き数と径が大きいほど強度が出るということがわかった。巻き数および径が大きいほど応力集中が小さくなることが考えられる。また、300g/m² 目付の高強度型炭素繊維シートの場合、φ40 以上でかつ2周以上巻きつけることにより保証引張強度以上の耐力を有することが分かった。
- 2) 梁曲げ実験の結果、梁中央部で梁下面の連続繊維シートが不連続な場合でも、端部に定着体を設けたシートを梁下面と梁側面に継手区間を設けて接着することで曲げ補強効果が得られた。
- 3) 梁下面と梁側面の継手長が長くなるにつれて耐力が若干増す結果となった。鋼制定着体を用いることにより継手長が 100mm 程度でも計算耐力の 85% 程度の補強効果が得られた。
- 4) 連続繊維シートの端部に可撓性シート状炭素繊維織物を巻きつけた鋼制定着体を重ね継手で接続して定着することで終局時まで炭素繊維シートの全面的な剥離は発生せず、下面の炭素繊維シートの破断で終局に至った。また総補強量が 300g/m² 目付程度であれば今回提案した定着体により分割することなく1段でシート破断まで耐えられること、複数層の場合は鋼制定着体を複数段に分けて定着できる可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) 東日本旅客鉄道株式会社, 耐震補強設計施工マニュアル, 2007.12
- 2) 高橋宏幸, 松尾伸二, 菅野貴浩, 長澤 徹, 中村浩司: 上層梁の補強により、一部の柱の補強を省略する利用高架橋等の耐震補強に関する実験結果と計算例, SED No.25, pp136-149, 2005.11
- 3) 東海林信利, 高橋宏幸: 炭素繊維シートを不連続に貼付けた場合の RC 梁の曲げ耐力と定着長に関する実験, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp1009-1010, 2006.9