

論文 曲げ補強用炭素繊維シートの新しい定着方法に関する研究

佐川 康貴*¹・松下 博通*²・岳尾 弘洋*³・斉藤 誠*⁴

要旨：本研究ではRC梁部材の曲げ補強として梁底面に接着した炭素繊維シート（曲げ補強用シート）の定着方法として、梁軸と45°をなす方向に新たに炭素繊維シート（定着用シート）を接着する方法を提案し、検討を行った。定着用シートの繊維方向が梁軸直角方向の場合（90°巻き上げ定着）と梁軸に対して45°となる場合（45°巻き上げ定着）とを比較し、後者の定着方法の方が曲げ補強用シートの剥離後も荷重およびたわみが増加し、定着効果が大きいことが示された。

キーワード：炭素繊維シート、曲げ補強、剥離、定着、45°巻き上げ定着

1. はじめに

RC部材を炭素繊維シート（以下、シート）で補強した場合、多くはシートが剥離することによりその補強効果を失うことが知られている。具体的な破壊形態としては、せん断剥離、ピーリングによる剥離、補強材端部におけるコンクリートの付着破壊等が報告されている¹⁾。これらの剥離時においてはシートは破断強度に対して大幅に小さい応力しか分担しておらず、シート接着端部を何らかの方法によって定着することにより剥離の進行が抑制され、定着を行わない場合に比べて大きな応力をシートに負担させ得るものと考えられる。

RC部材の曲げ補強に用いたシートの定着方法として、様々な方法が検討されている。その一つとして、鋼製アングルや鋼板、アンカーボルトといった金具を用いる方法（機械的定着）がある。この方法はアンカーボルト等をコンクリート躯体に打ち込むためにシートに開けた孔での応力集中によってシートの引き抜けが起こる場合があるうえ、補強対象部材自体に損傷を与えるため好ましくない。

既に、著者らはアンカーボルト等を用いず、シートのみを用いた定着方法として「増し貼り定着」を提案している¹⁾。増し貼り定着とは付着応力集中緩和を目的として曲げ補強用シートの接着端部を曲げ補強用シートと同じ繊維方向の定着用シートで積層貼りするものである。増し貼り定着を梁部材に適用した場合、剥離進行抑制効果が得られると共に、梁中央の剥離区間がアンボンド状態になることによって定着部剥離時のスパン中央たわみは定着が無い供試体に対して大幅に大きくなることを確認している。

本研究では曲げ補強用シートの接着端部に定着用シートをU字型に接着する定着方法について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 定着方法

シートの剥離進行抑制を目的とし、定着用シートをU字型に接着する方法として、定着用シートの繊維方向が梁軸と直交するように配置する方法^{2), 3)}が検討されているが、現在一般的に用いられているシートは一方向性の典型的な異

* 1 九州大学大学院 工学研究科 建設システム工学専攻（正会員）

* 2 九州大学大学院教授 工学研究科 建設システム工学専攻 工博（正会員）

* 3 ショーボンド建設（株） 技術本部 技術部 博士（工学）（正会員）

* 4 日鉄コンポジット（株） 担当部長 工修

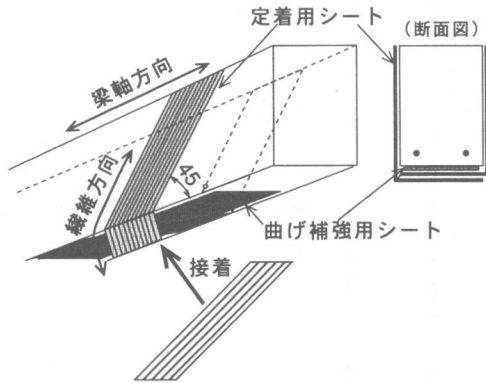


図-1 接着方法

方性材料であり、繊維直角方向の外力に対してはほとんど抵抗できない。よって、定着用シートは繊維方向を傾斜させて配置する方が有効であると考えられる。そこで本研究では定着用シートの繊維方向と梁軸とが45°をなすように配置する方法(45°巻き上げ定着)を提案し、その定着効果について検討を行った。接着方法を図-1に示す。平行四辺形にカットした定着用シートを曲げ補強用シートの接着端部梁側面、梁底面にL字型に接着し、2枚のL字型のシートを梁底面で貼り重ね、U字型の定着部とする。本研究では、シートを接着する梁の隅角部にはあらかじめ $r=10\text{mm}$ 程度の面取りを行った。本方法は梁底面で貼り重ねていることにより、著者が既に提案し、効果を確認した「増し貼り定着」¹⁾による付着応力集中緩和効果が期待でき、梁側面に接着することによって接着面積が増加し、付着域の増加も期待できる定着方法である。

2.2 供試体

本実験で使用した鉄筋、シートの材料特性を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートを打設して3週間後にエポキシ樹脂含浸接着剤でシートを接着し、1週間程度樹脂の養生を行った後、曲げ载荷実験を行った。

実験を行った供試体は表-3に示す計3体(Uシリーズ)である。補強対象とした梁部材は曲げ破壊先行型となるように設計を行った。

曲げ補強用シートは梁底面に幅14cmで接着している。U1-45-1は定着用シートの繊維方向が

表-1 材料特性

鉄筋					
	種類	弾性係数 (kN/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	伸び
D13 (軸方向鉄筋)	SD295A	179	341	503	23%
D6 (スターラップ)		160	310	514	18%

シート

引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)	設計厚さ (mm)	目付量 (g/m^2)	破断伸び
3480	230	0.167	300	1.5%

表-2 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m^3)				
		W	C	S	G	Ad
49%	43.0%	163	333	755	1087	0.832

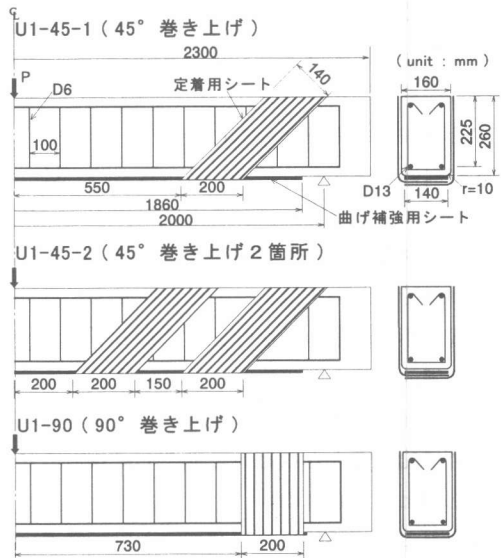


図-2 供試体形状寸法

梁軸と45°をなすように接着したものの(45°巻き上げ定着)、U1-45-2は「45°巻き上げ定着」を2箇所設けたものである。U1-90は繊維方向が梁軸直角方向となるようにしたもの(90°巻き上げ定着)である。なお、U1-90では定着用シートは2枚のシートを組み合わせたのではなく、1枚のシートによってU字型に接着した。供試体の形状寸法を図-2に示す。

2.3 実験方法

鉄筋およびシート表面には10cm間隔でひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。スパン中

表-3 供試体種類および実験結果

供試体	曲げ補強	端部定着	降伏時		終局時*		f _c (N/mm ²)
			荷重 (kN)	たわみ (mm)	荷重 (kN)	たわみ (mm)	
N0	なし	なし	40.8	4.8	45.3	37.0**	31.3
N1	1層	なし	52.0	4.8	62.1 (1.00)	16.5 (1.00)	31.3
U1-45-1		45° 巻き上げ 1層	50.2	5.0	86.2 (1.39)	40.7 (2.47)	27.3
U1-45-2		45° 巻き上げ 1層・2箇所	50.1	4.6	83.3 (1.34)	19.8 (1.20)	27.3
U1-90		90° 巻き上げ 1層	50.2	5.3	53.6 (0.86)	47.7 (2.89)	27.3

*カッコ内はN1供試体に対する比 **コンクリート圧壊時の値

中央位置の梁上縁から6cmの位置に変位計を取り付け、たわみを測定した。載荷方法は全て一点載荷とし、スパン中央位置の鉄筋が降伏するまでは荷重制御 (0.80~1.0kN/min.) で、それ以降は変位制御 (0.30~0.50mm/min.) にて実験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 破壊性状

実験結果を表-3に示す。表-3には定着無し供試体(Nシリーズ)の結果も示している。N1はスパン中央から支点方向に向かって進行した曲げ補強用シートの剥離が接着端部に達し、耐力が急激に低下し、補強効果を失った¹⁾。U1-45-1は曲げ補強用シートの剥離が接着端部に達した後、定着用シートが定着効果を発揮し、耐力およびたわみが増加し、終局時にはスパン中央部分80cm区間の曲げ補強用シートが破断し、小片となって飛び散った。U1-45-2は載荷点直下のシートが破断したが、剥離はスパン中央寄りの定着部までしか進行していなかった。U1-90は図-3に示すように曲げ補強用シートが接着端部まで剥離した後、定着用シートにずれが発生した。それ以降荷重は増加せず、曲げ補強用シートが定着用シートの位置で破断した。

3.2 荷重-たわみ関係

各供試体の荷重-たわみ関係を図-4に示す。図中には定着無しの供試体(Nシリーズ)の結果も合わせて示してある。U1-90以外の供

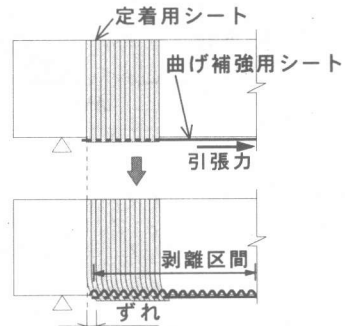


図-3 定着用シートのずれ状況図(U1-90)

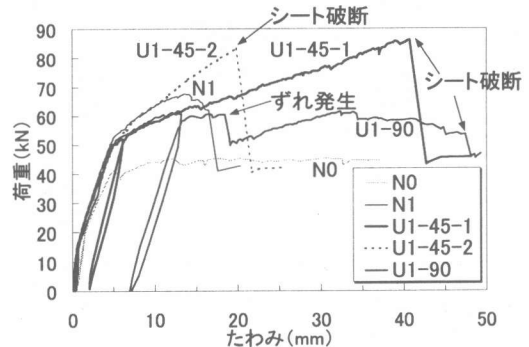
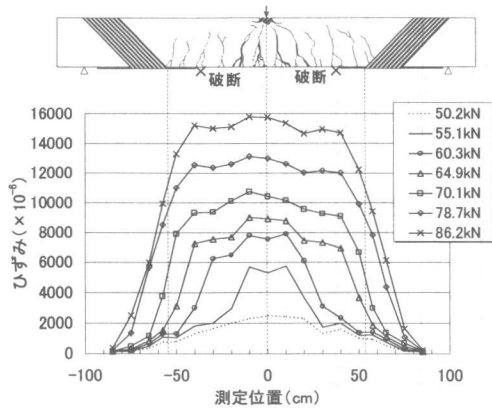


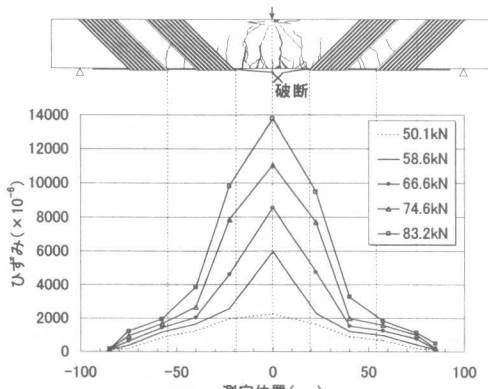
図-4 荷重-たわみ関係

試体に関して、降伏後の荷重-たわみ関係は直線関係を示し、定着をしない供試体に比べて終局時の耐力およびたわみが大幅に増加している。例えば、U1-45-1の耐力および終局時のたわみをN1と比較するとそれぞれ約1.4倍、約2.5倍となっている。U1-90は定着用シートのずれによって荷重が一時低下し、その後は破断に至るまでたわみのみが大幅に増加している。この間、荷重はN0よりも大きな値を示した。

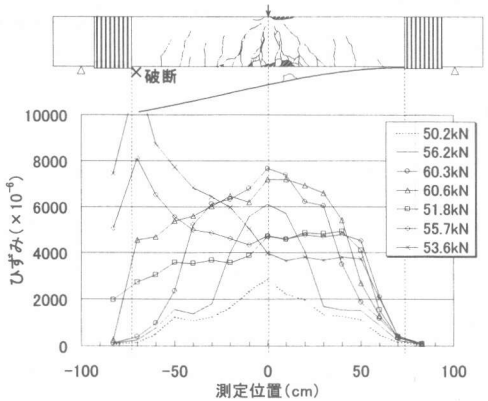
U1-45-1とU1-45-2とは耐力がほぼ等しくなっ



(a) U1-45-1供試体



(b) U1-45-2供試体



(c) U1-90供試体

図-5 曲げ補強用シートのひずみ分布

ているものの、降伏以降の荷重-たわみ関係の傾きはU1-45-2の方が大きくなっている。これは定着部を2箇所設けることによって剥離可能な区間が定着部より内側の区間に限られ、変形が抑制されたためである。すなわち、終局が曲げ補強用シートの破断で決定される場合、定着

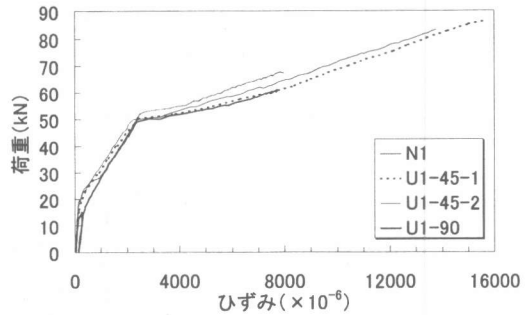


図-6 シートの荷重-ひずみ関係(スパン中央位置)

用シートの配置状況によって変形形状は異なるものの、終局時の耐力は等しくなる。曲げ補強用シートを接着した全ての供試体は曲げ補強用シートの全面剥離後あるいは破断後、荷重が低下するものの、荷重-たわみ関係は無補強供試体の関係に擦り寄っていることが分かる。

3.3 曲げ補強用シートのひずみ

図-5に各供試体のひび割れ性状と曲げ補強用シートのひずみ分布とをまとめて示す。図-5(a)より、U1-45-1は55.1kNで等ひずみ区間が現れ、スパン中央から支点に向かって剥離が進行し、70.1kNで剥離区間が定着部まで達しており、定着部より内側のシートのひずみが梁軸方向についてほぼ一定で、アンボンド区間が生じていることが分かる。その後、シートのひずみは一樣に増加し、公称破断ひずみである $15,000 \times 10^{-6}$ を越え、破断に至った。U1-45-2は定着用シートを2箇所に着着しており、剥離の進行が抑制されるためにスパン中央部のみひずみが大幅に増加している。図-5(b)では定着部よりも内側のひずみが三角形分布となり、U1-45-1の結果より、実際には剥離発生後、等ひずみの区間が存在するものと考えられる。

図-5(c)より、U1-90は60.6kNで剥離区間が供試体左側の定着部に達した後、一時荷重が51.8kNに低下し、その後曲げ補強用シート左端部のみひずみが増加し、破断に至ったことがうかがえる。スパン中央部のひずみの最大値は約 $7,700 \times 10^{-6}$ であり、破断強度の2分の1の応力しか負担していない。

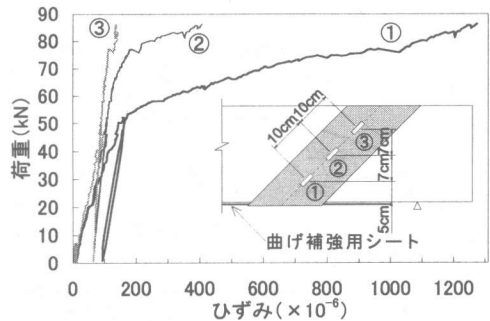
図-6は各供試体のスパン中央位置の曲げ補強用シートの荷重-ひずみ関係である。図には最大荷重時までの結果を示してある。図-6より、定着の有無、定着箇所、定着用シートの繊維方向の違いに関わらず、全ての供試体が同じ荷重-ひずみ関係を示していることが分かる。しかし、U1-90は定着部にずれが発生することにより破断ひずみの2分の1のひずみまでしか達していないことが分かる。

3.4 定着用シートのひずみ

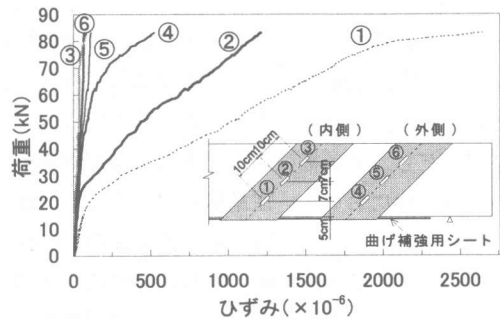
図-7に各供試体の定着用シートの荷重-ひずみ関係をまとめて示す。なお、ひずみゲージの貼付位置も同時に示す。まずU1-45-1において、ゲージ①のひずみが急増し始める荷重は50kN程度であり、これは剥離が進行し始める荷重(55.1kN: 図-5より求めた荷重)とほぼ一致する。実験後に供試体を観察した結果、ゲージ①の位置に曲げひび割れは発生しておらず、定着用シートのひずみの増加は曲げ補強用シートの引張力によるものであると考えられる。ゲージ②のひずみが急増するのは75kN以降であり、ゲージ③のひずみは最大荷重時においても 100×10^{-6} 程度しか発生しておらず、定着効果は十分であると言える。U1-45-1は定着用シートを梁側面の4箇所に接着しているが、全ての定着用シートに関して同様の傾向が見られた。

次に、U1-90の補強用シートのうち破断した側の荷重-ひずみ関係を図-7(c)に示す。定着用シートにずれが発生した後、ゲージ①のみ値が増加し、ゲージ②およびゲージ③は終局時においても 50×10^{-6} 程度しか発生していない。また、曲げ補強用シートが破断しなかった側の定着用シートのひずみは最大で 30×10^{-6} 程度とU1-45-1に比べて3分の1程度であり、「90°巻き上げ定着」よりも「45°巻き上げ定着」の方が有効であることが示される。

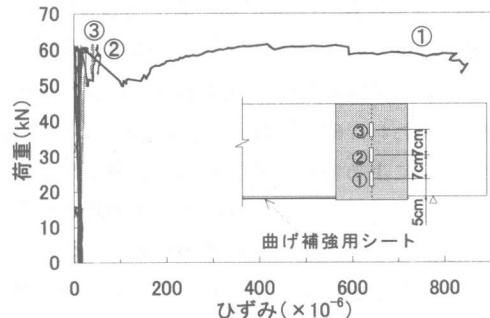
2箇所に定着用シートを接着したU1-45-2(図-7(b))において、曲げひび割れがスパン内側の定着用シート内に発生したため、ゲージ①およびゲージ②は荷重が低い段階(20kN程度)



(a) U1-45-1 供試体



(b) U1-45-2 供試体



(c) U1-90 供試体

図-7 定着用シートの荷重-ひずみ関係

からひずみが増加している。図-5(b)で示したように、曲げ補強用シートの剥離が内側の定着用シート位置で抑制されているため、ゲージ④の値が増加するのは60kN時と遅れている。残りのゲージ③、④、⑥の最大荷重時における値は 100×10^{-6} 程度である。

4. 定着設計について

本研究で得られた結果をもとに、シートで曲げ補強したRC部材の荷重-たわみ関係をモデル化すると図-8のようになる。ここでは、シー

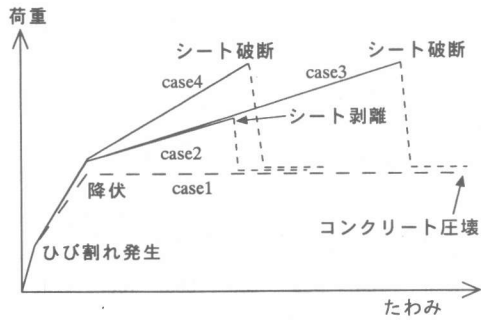


図-8 荷重-たわみ関係モデル図

トにより曲げ補強した部材の終局は曲げ補強用シートの全面剥離あるいは破断によって荷重-たわみ関係がRC部材の関係に擦り寄る時点とする。ただし、曲げ補強用シートの全面剥離あるいは破断時において、圧縮縁のコンクリートが終局ひずみに達していない場合を考える。case 1は典型的な曲げ破壊先行型のRC部材について表したものであり、コンクリート圧壊時が終局となる。case2はシートによる曲げ補強を行い、定着を設けていない場合であり、曲げ補強用シートの剥離が接着端部に達することにより補強効果は失われ、終局となる。case3およびcase4はシートによる曲げ補強に加え、十分な定着を行ったものであり、いずれの場合も剥離進行が抑制されることによって荷重が増加し、曲げ補強用シートが破断する。しかしながら、曲げ補強用シートの接着端に定着を設けた場合(case 3)とスパン内側寄り定着を設けた場合(case 4)とでは挙動が異なる。case3とcase4の終局は曲げ補強用シートの破断によって決定されるため耐力は同程度であると考えられるが、case 4の方が曲げ補強用シートの剥離可能な区間が短いため、終局時のたわみは小さくなる。

「コンクリート構造物の補強指針(案)」⁴⁾をはじめとする既往の設計マニュアルでは剥離破壊を防ぐよう定められているものの、剥離判定基準、定着方法に関しては言及されていない。しかし、本研究で提案した「45°巻き上げ定着」を施すことにより曲げ補強用シートの部分的な剥離を許容し、シートの破断という明確な終局

状態を想定することにより、合理的な設計が可能になるものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 曲げ補強用シートの接着端部を「90°巻き上げ定着」した場合、曲げ補強用シートの剥離が定着部に達すると同時に定着用シートにずれが発生し、それ以降荷重は増加せず、たわみのみが増加した。
- (2) 曲げ補強用シートの接着端部を「45°巻き上げ定着」した場合、定着用シートが全面剥離することなく荷重とたわみは直線的に増加し、曲げ補強用シートの破断で終局に至った。また、破断時には公称破断ひずみにも達した。
- (3) 「45°巻き上げ定着」を2箇所設けることにより、終局時のたわみは小さくなるが、耐力は同程度であった。

以上のことより、本研究で提案した「45°巻き上げ定着」は曲げ補強用シートの定着方法として構造的に十分有効であることが実験的に示された。

参考文献

- 1) 岳尾弘洋ほか：せん断スパン比を変化させたCFRP補強梁の曲げ載荷実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 2, pp. 205-210, 1999.
- 2) 木村耕三ほか：炭素繊維シートとコンクリートとの付着・定着性状に関する研究，構造工学論文集，Vol. 41B, pp. 527-536, 1995. 3.
- 3) 高橋義裕ほか：炭素繊維シートで曲げ補強した梁の曲げ性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 1, pp. 509-514, 1998.
- 4) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針(案)，コンクリートライブラリー95, 1999. 9.