

論文 RC部材の曲げ補強に用いる炭素繊維シートのCFアンカーによる定着方法

小林 克巳^{*1}

要旨: RC梁下面に炭素繊維シート(Carbon Fiber Sheet: CFシート)を貼付して曲げ補強をすると, CFシートがひび割れの影響を受けて剥離したり, 端部で定着部破壊が起こったりするため, CFシートの大きな引張力を発揮させることができない。CFシート定着区間の途中および端部にCFアンカーを取り付けると, CFシートが破断するまでその引張力を発揮できるようになることを実証した。CFアンカーは, 施工性を考慮してCFシートから加工する方法を提案した。
キーワード: 連続繊維, 炭素繊維, シート, CFアンカー, 曲げ補強, 定着

1. はじめに

繊維シートで梁下面の曲げ補強を行うと, せん断ひび割れのずれによって剥離が生じ(図-1), シート端部ではひび割れが主筋下面へ延びるようにコンクリートを剥がしとる破壊(図-2)が生じてしまい, シートの強度が十分に発揮されない⁶⁾⁷⁾⁸⁾。これを防ぐために, 梁側面に繊維シートを取り付けたり¹⁾, 梁下面のシートをU字形のシートで補強することが行われる。

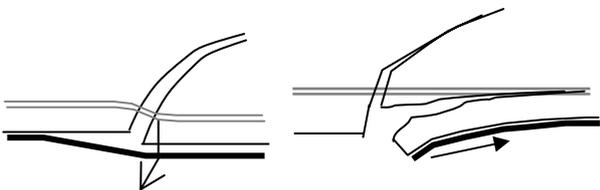


図-1 剥離破壊

図-2 定着部破壊

炭素繊維シートで壁面を補強しようとする試みもあるが, 壁の両面に貼付したCFシートを特殊形状に加工したアンカーで結びつけると, シートの剥離が起こり難くなることが報告されている²⁾。本論は, 梁下面に取付けた炭素繊維シート(Carbon Fiber Sheet: 以下, CFシート)の定着区間の途中および端部にCFアンカーを取り付けると, 梁下面のCFシートが破断するまでその引張力を発揮できるようになることを実証したものである。

2. CFアンカー

2.1 CFアンカーの製作

CFアンカーは, 柱あるいは梁のせん断補強を行

う場合に, 壁やスラブがあっても擬似閉鎖型に炭素繊維シートを取付けるために開発され^{3), 4), 5)}, 炭素繊維ストランドから製作しているが, 本論ではCFアンカーの剥離耐力向上と施工性向上の目的から, 梁下面に貼付するCFシートと同じものから加工した。図-3のようにCFシートを短冊状に切断し, 短冊をずらしながら扇形を作った。その後, 短冊の位置を固定して形状を保持し, 先端をストランド状にして, アンカー埋込み用のワイヤーを取付けた。

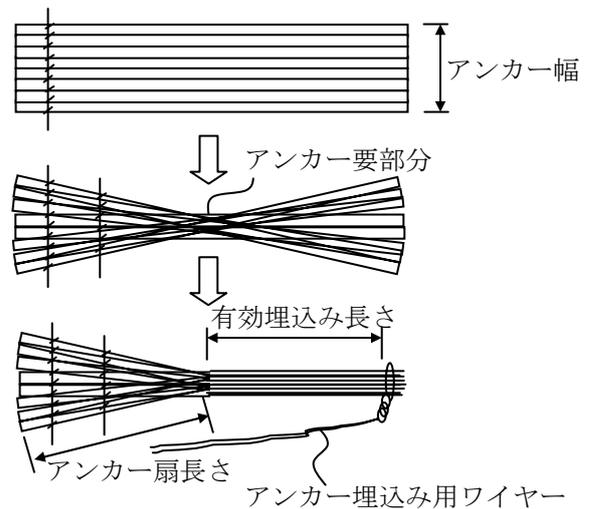


図-3 CFアンカーの製作

2.2 CFアンカーの要素実験

試験体を図-4に示す。200×200×400mmのコンクリートブロック①(圧縮強度24N/mm²)に, 先ず50mm幅の直交シートを接着し, その上から

*1 福井大学大学院 工学研究科建築建設工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 試験体および実験結果一覧

Group	No.	埋め込み角度(θ) その他	アンカー1本当たりの耐力(kN)	平均(kN)	*	破壊モード
Group 1	1	5° 鉛直シート施工後、1日あけてアンカーを施工	24.5	23.0	40.5%	扇剥離
	2		16.7			アンカー引き抜け
	3		27.0			鉛直シート剥離、アンカー引き抜け
	4		25.5			扇剥離
	5		21.5			扇剥離
Group 2	6	45° 鉛直シートとアンカーを同日に施工	19.3	16.9	29.8%	アンカー破断
	7		15.8			コンクリートごと引き抜け、アンカー破断
	8		15.0			アンカー引き抜け
	9		16.7			アンカー引き抜け
	10		17.7			コンクリートごと引き抜け
Group 3	11	5° 鉛直シートとアンカーを同日に施工	26.2	26.9	47.4%	アンカー破断
	12		29.2			アンカー破断
	13		23.3			アンカー破断
	14		29.0			アンカー破断

扇の幅 100mm, 扇の長さ 120mm, 埋め込み長さ 120mm(有効埋め込み長さ 100mm)はすべて共通

* CFシートの引張強度をもとに求めた, 引張耐力 56.8kN に対する実験値の割合

120mm 幅の鉛直シートを接着した。これをアンカー用無筋ブロック②(圧縮強度 34N/mm²)の上におき、100mm 幅の CF アンカーを取付けた。CF アンカーの埋め込み直線部分に樹脂を含浸させ、図-3の埋め込み用ワイヤーで、ブロック②にあけた穴に押し込み、扇部分に樹脂を塗ってローラーをかけ、鉛直シートと貼り合わせた。使用したシートは 300g 目付けの炭素繊維シートで、厚さ 0.167mm, 引張強度 3400N/mm², ヤング係数 2.3×10⁵N/mm² である。コンクリートブロックに埋めこんだ 4-M16 を、アンカー用ブロック②

を反力にして引っ張ることにより載荷した。試験体および実験結果一覧を表-1 に示す。

Group-1, -3 は埋め込み角度(θ)を 5°とし、Group-2 は 45°とした。Group-1 は鉛直シートとアンカーの施工を 1 日ずらして行ったが、Group-2, -3 では鉛直シートとアンカーを同日に施工した。Group-1 では CF アンカー幅に対応する 100mm 幅 CF シートの引張耐力 56.8kN の 40% 程度、Group-2 では 30%程度、Group3 では 50%程度でほぼ安定した耐力が得られた。Group-2 では耐力が低くアンカーの引抜けが目立った。アンカーの埋め込み角度が大きい場合には、図-5 のように、埋込み口付近の支圧を受けるコンクリートが圧潰し、有効埋め込み長さが短くなるのが原因と考えられる。埋め込み長さを長くすれば改善されると思われるが、本論のような補強位置では、曲げせん断ひび割れ角度が小さくなれば、図-5 の有効埋め込み長さを短くするようなひび割れは起こりにくくなる。埋め込み角度が 45°でも、部材に用いた時にはもう少し大きな耐力が得られると思われる。Group-1 の破壊モードはほとんど扇剥離だった。ストランドを束ねて製作した CF アンカーでは、扇の接着面積が確保しにくいため扇剥離モードが多かったので⁵⁾、本論の CF シートから製作する CF アンカーは、扇の接着面積を大きくして接着耐力を大き

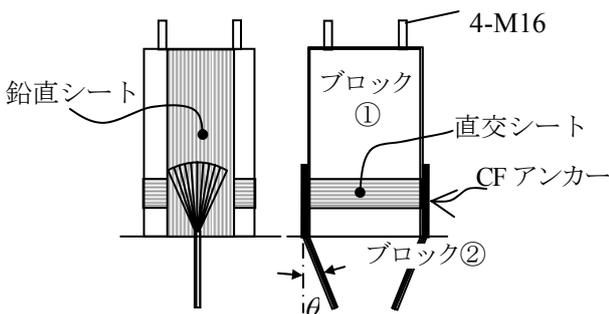


図-4 CF アンカー要素実験試験体

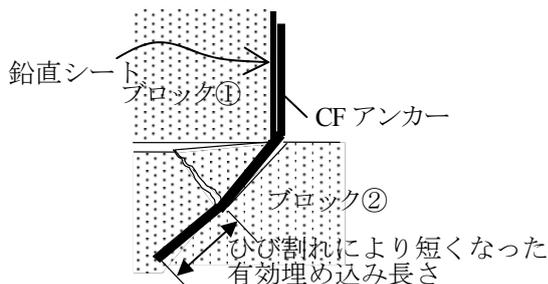


図-5 アンカー引き抜けモード

くする目的があった。しかし、Group-1では、扇剥離モードになるものが多く、鉛直シート施工後の樹脂の硬化の影響があったものと思われる。

Group-3では、鉛直シート施工後の樹脂の硬化の影響が除かれ、要部分の破断となった。要部分では全繊維が収束するので、樹脂の含浸不足が起こりがちである。これを改善するには、サイジング材を低減したストランドを使用することが有効であることは分かっているが⁵⁾、本論では、扇の接着面積を確保することを優先している。樹脂の含浸性が良い材料を使用すれば、さらに大きな耐力が得られるはずである。

3. RC 梁の曲げ補強実験

3.1 試験体

試験体一覧を表-2、試験体の配筋及びCFシートとCFアンカーの取付け位置を図-6に示す。使用したコンクリートの圧縮強度は22.8 N/mm²、主筋D10の降伏点強度は363 N/mm²であった。

表-2 試験体一覧

No.	CFシート	CFアンカー	
		シート端部	等曲げ区間の端から150mmの位置
1	なし	なし	なし
2	最大曲げモーメントが43%まで小さくなる位置まで	なし	なし
3	同上	有り	なし
4	同上	有り	有り
5	最大曲げモーメントが13%まで小さくなる位置まで	有り	有り
6	同上+Uラップ	有り	有り

No.6では剥離防止の目的で、CFアンカー扇先端位置のCFシートを、50mm幅のCFシートでU字形に覆った。

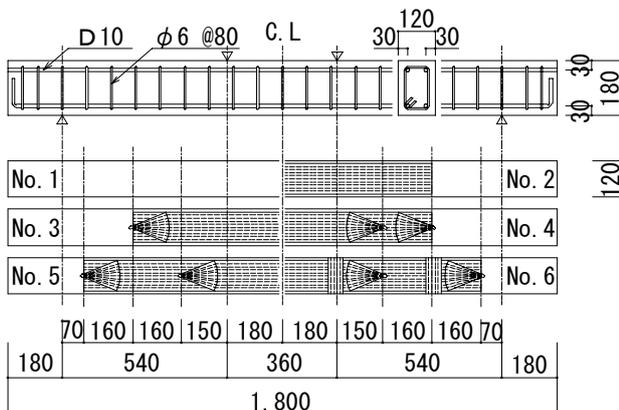


図-6 試験体配筋図

引張鉄筋比は2-D10で0.66%、せん断区間のせん断補強筋比はφ6@80mmで0.58%、せん断スパン比(a/D)は3.0とした。CFシート量は、曲げ終局モーメントがシート無しのものに比べ約2倍となるように300g目付け、100mm幅とした。CFシートはCFアンカーの製作に使用したのと同じである。CFアンカーは、CFシート量と同じにし、扇の幅100mm、扇長さ120mm、有効埋め込み長さ100mmとした。

3.2 CFシートとCFアンカー取付け位置の決定

図-7は等曲げ区間から左半分を表わしたもので、CFアンカーによってCFシートの引張応力が小さくなっていくことを模式的に表わし、CFアンカーの位置を決める考え方を示したものである。CFシートがコンクリートに完全に付着していればCFシートの引張応力は、図-7のA点から支点に向かって減少する。シートが完全に剥離した後、一定間隔のアンカーによって定着されている状態を考えれば、図-7の太線のようになる。表-1の実験結果より、CFアンカーがCFシート引張強度の30%を定着できるとすれば、およそ160mm間隔にアンカーを取付けておけば、シートは破断に到るまで強度を発揮できることになる。

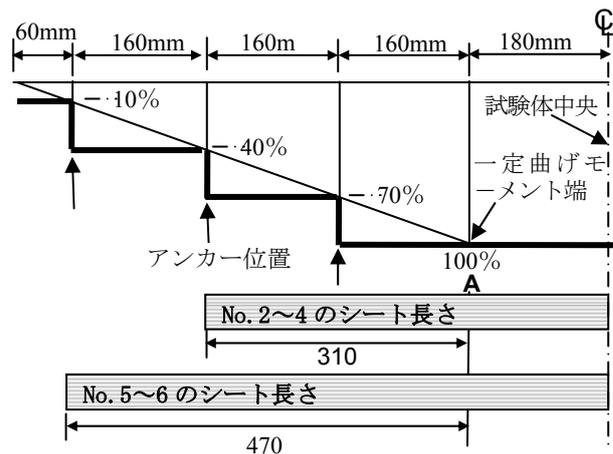


図-7 CFシートの引張応力の分布とCFアンカー位置の考え方

アンカーを取付けるための孔とせん断補強筋位置との関係から、試験体No.2~4のシート長さを一定曲げモーメント端から310mmとし、No.4では、一定曲げモーメント端から150mm、310mmの位置にアンカーを取付けた。この時、

310mm 位置のアンカーはシート引張強度の約70%を定着しなければならないので、シートは破断に到らず、アンカーの引き抜けが生じると予想できる。No.3 では、一定曲げモーメント端から150mm位置のアンカーを省略しているの、シート引張強度の100%を定着しなければならないが、No.4 より早くアンカーの引き抜けが生じると予想できる。No.2 にはアンカーを取付けていない。文献 7)によれば、シートとコンクリートの付着強度は $0.7\sim 0.8\text{N/mm}^2$ であり、シートが端部まで曲げモーメントに応じた引張力を最大限発揮したとしても、剥離が生じる計算になる。試験体 No.5~6 のシート長さを一定曲げモーメント端から470mmとし、一定曲げモーメント端から150mm, 470mmの位置にアンカーを取付けた。この時、310mm位置のアンカーは省略した。図-7の考え方で、一定曲げモーメント端から470mm位置のアンカーはシート引張強度の70%を定着しなければならないが、十分な長さのシート定着長を確保しているの、No.5 ではシートとコンクリートの付着を期待することとした。No.6 では、シートとコンクリートの付着を確実にするために、アンカーの扇先端付近にU字形のシートを取付けた。

3.2 加力測定方法

試験体両端を単純支持し、等曲げ区間ができるように中央2点片振り繰返し荷重 (P: 2点の荷重の合計) を加え、試験機からの出力を記録した。たわみ(δ)は、試験体の支点位置に取り付けたゲ-

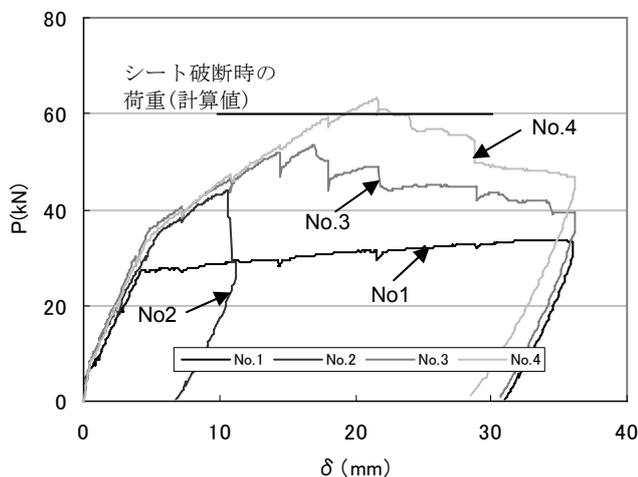


図-8 P- δ 関係



図-9 試験体 No. 4 の最終破壊モード

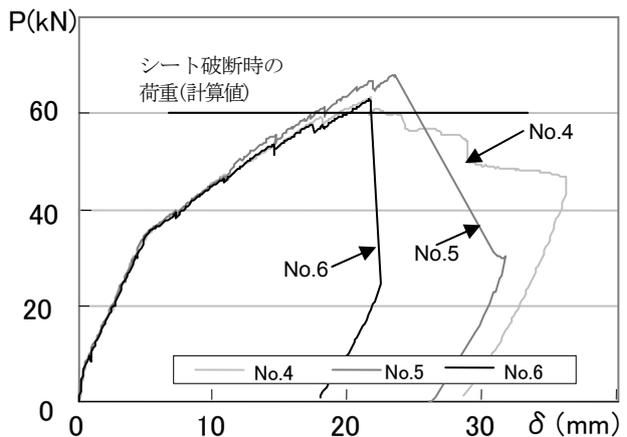


図-10 P- δ 関係

ジホルダーからの相対たわみとして測定した。

3.3 曲げ補強耐力と破壊性状

P- δ 包絡線を図-8, 図-10 に示す。図中のシート破断時の荷重計算値は略算式を用いて求めた⁶⁾。No.2~4 ではアンカーの数に応じて耐力が増加した。No.2 では、 $P=44\text{kN}$ で図-2 のモードでCFシートがコンクリートと共に剥離した。No.3, No.4 でも同様の破壊モードに到るひび割れが生じたが(図-9), CFアンカーが引き抜けながら、ひび割れの拡大に抵抗して耐力が上昇した。No.4 ではシート破断が起こる直前まで耐力が上昇したことがわかるが、最終破壊モードは図-2のモードであり、CFアンカーの効果は現われているが、まだ十分でないことが分かる。No.5, No.6 はシートが破断した。図-2の破壊モードも現われなかった。概ね予想した破壊モードとなり、図-7の考え方でアンカーを配置していくことと、曲げモーメントが十分小さくなる位置までCFシートを延ばすことによって、シートが破断するまで確実に定着し得ることを実証できた。

3.4 シートのひずみ分布

図-11 に最大耐力時のシートのひずみ分布を示す。No.2 のひずみ分布から最大付着応力度を求めれば 0.7N/mm^2 となるが、最大ひずみはおよそ 6000μ で、シート引張強度の 40%程度が発揮されたとき、図-2 のモードでシート剥離が生じた。No.3, No.4 は、シート端部のアンカーの扇先端位置で、およそ 8000μ のひずみが生じているが、シート引張強度の 50%を超えている。表-1 の実験結果より、CF シートの引張強度の約 30%で引き抜けモードになると予想されたが、図-9 の最終破壊に到る過程の引き抜けモードと一致している。アンカーの引き抜けでは、徐々に耐力低下するために、図-8 の $P-\delta$ 関係でも、最大耐力後に徐々に耐力低下している。最終破壊モードは No.2 と同じであるが、CF アンカーを使用することによ

り急激な破壊を防止できている。図-11 の斜影は、CF シートが曲げモーメントの大きさに応じた引張力を発揮するときのひずみ分布を表している。No.5 および No.6 のひずみ分布はこの分布形に近く、ほぼ完全にシートがコンクリートに付着して、引張強度を発揮するまでのひずみを示したことを表している。No.5 および No.6 では、一定曲げモーメント端から 310mm位置のCF アンカーを省略しているが、シートが支点近くまで延長して貼付されていることと、中間部のCF アンカーの効果が見れているものと考えられる。

4. CF アンカーの取付け間隔について

図-7 の考え方によれば、CF アンカーの強度が大きいほど、間隔を大きくできることになる。しかし、中間部での剥離を防止するために適当な間隔があるはずである。また、図-12 のように、

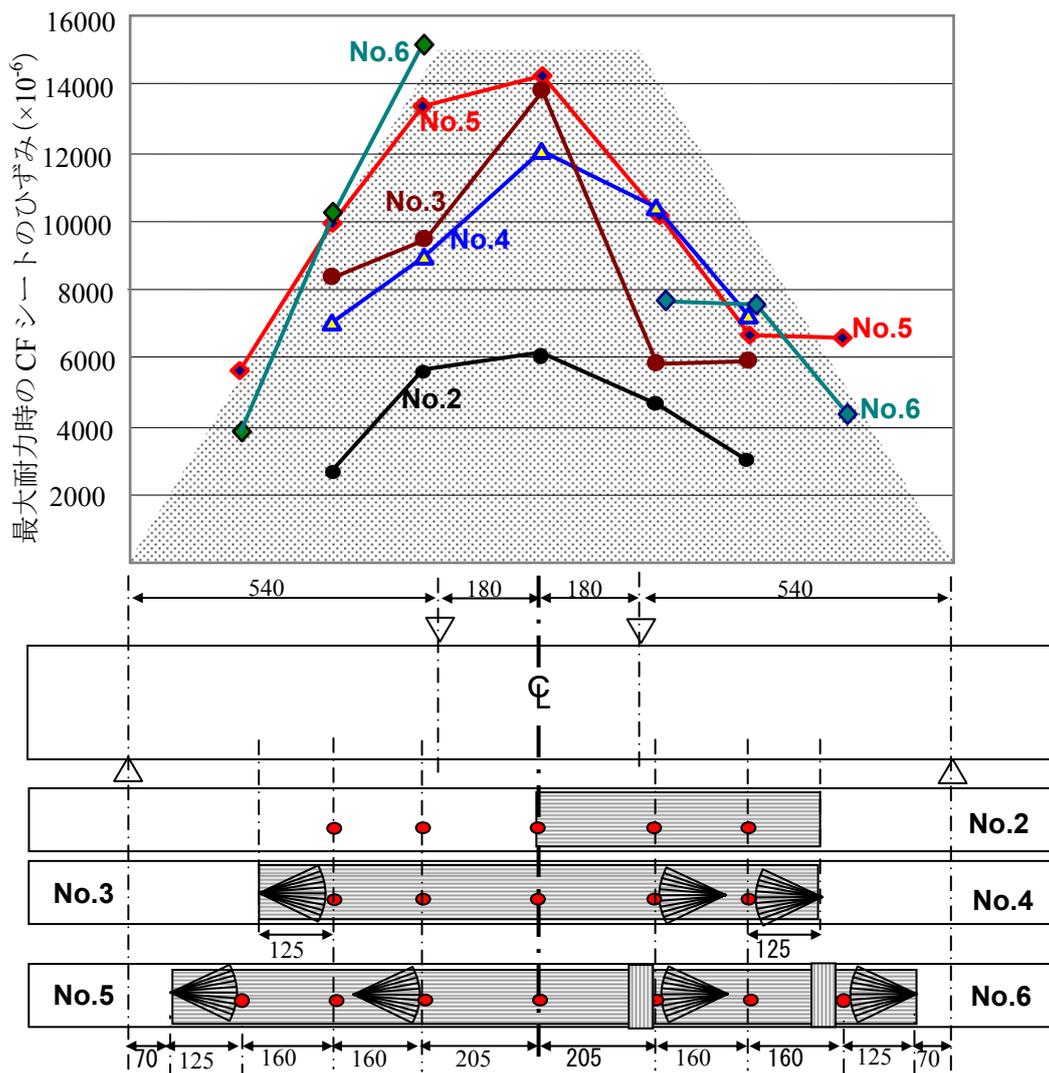


図-11 最大耐力時のシートのひずみ分布

シート上の力を CF アンカーの要部分に集約するためには dF_3 の力が必要であり⁵⁾、これはシートとコンクリートの接着力に頼ることになる。したがって、扇の開き角度を大きくして、扇長さを短くすることも得策ではない。本論では、経験的に扇の幅 100mm、扇長さ 120mm としている。扇の幅についても適切な大きさがあるはずであり、実用化するには、実際に用いる大きさでの検証が必要になる。

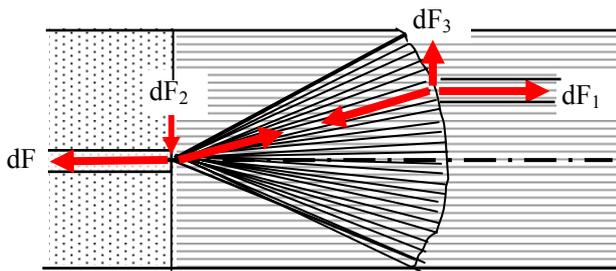


図-12 CF アンカーにおける力の集約⁵⁾

5. まとめ

曲げ補強の目的で梁下面に取付けた CF シートの定着区間の途中および端部に、CF アンカーを取り付けることにより、CF シートが破断するまでその引張力を発揮させる方法を提案した。CF アンカー強度が定着すべき CF シート強度の 30%程度あるものとして、CF シートの取付け長さや CF アンカーの取付け位置を決めて実験を行ったが、結果として CF シートが破断するまでその引張力を発揮できるようにすることができた。CF シートの定着長さや CF アンカーの取付け位置は、せん断スパン比、せん断ひび割れ発生位置、アンカー強度、シート補強量などの影響を受けるはずであり、本実験結果で一般化することは難しいが、CF シートの取付け長さや CF アンカーの取付け位置を決める一つの考え方と CF アンカーの有効性を示した。

梁端部のように応力が最大となる位置で CF シートを定着するためには、CF アンカー強度が定着すべき CF シート強度の 100%あることが望ましいが、CF シートの応力が減少していく方向での定着に用いる場合には、CF シート強度の 100%が必要ではなく、強度に見合った使い方がある。

謝辞

本実験は、科学研究費補助金基盤研究(C)(2) No.16560493 の一部として実施したものである。実験に使用した繊維材料は前田工織(株)に提供していただいた。実験の実施に当たっては、当時卒論生の佐伯幸夫さんの労によるところが大きい。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 澤田純之, 岸徳光, 三上浩, 栗橋祐介: 側面接着を施した FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1399-1404, 2005
- 2) Mut Akguzel, "Seismic Retrofit of Brick-Infilled R/C Frames with Lap Splice Problems in Columns", Bogazici University, pp.125, 2003
- 3) Jinno Y., et al., "RC Beams with Slabs Strengthened by Carbon Fiber Sheets and Bundles of CF Strands," Proc. of FRPRCS-5, Vol.2, Cambridge UK, pp.981-988, 2001.7
- 4) Jinno Y. and Tsukagoshi H., "Sismic Strengthening of Reinforced Concrete Walls by SR-CF System --Methods and Effect of Shear Strengthening by Carbon Fiber Sheets and CF-anchors--," First fib Congress 2002, Session6, pp.109-118, 2002
- 5) Kobayashi K., et al., "Advanced wrapping system with CF-anchor --Stress transfer mechanism of CF-anchor--," Proc. of FRPRCS-5, Vol.2, Cambridge UK, pp.379-388, 2001.7
- 6) 日本建築学会: 連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案, 2002
- 7) 本間博行, 小林正浩, 藤原一成, 中野克彦, 松崎育弘, 明星徹: 炭素繊維シートにより曲げ補強された RC 梁の曲げ耐力に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.191-192, 1998.9
- 8) 岸 徳光, 三上 浩, 田村富雄, 栗橋祐介: FRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷挙動に及ぼす補強筋の剛性の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1417-1422, 2005