

# 繊維シートによる RC 部材の補強における定着方法に関する研究

日本道路公団 正会員 古谷 嘉康  
武蔵工業大学 正会員 皆川 勝  
武蔵工業大学 正会員 佐藤 安雄

## 1. はじめに

本研究は炭素繊維シート(Carbon Fiber Sheet 以後 CFS), アラミド繊維シート(Alamid Fiber Sheet 以後 AFS)を用いた鉄筋コンクリート(Reinforced Concrete 以後 RC)構造物の角部への定着方法を考案し, その有効性を実験的, 解析的に検討するものである. 既存の RC 構造物, 特に橋脚への補強では, 耐力の増加だけではなく, じん性を向上させねばり強くすることが重要である. 単に耐力を向上させた構造物は大規模な地震時に橋脚から構造物全体に伝達される部材力が大きくなり, そのために大規模な補強が必要となってくる. また, 曲げ耐力を上げる事により作用せん断力が増加してせん断破壊に至ることもある. 従って, 曲げ耐力を過度に上げることなく, じん性を向上させることが重要である. もちろん, じん性のみを十分に向上させたとしても兵庫県南部地震クラスの地震には耐えられない場合が想定されるため, 所要の耐力とじん性の向上を図ったバランスの良い補強工法が望ましい. そのような条件を満たす工法として, RC 巻き立て工法<sup>1),2)</sup>, 鋼板巻き立て工法<sup>3),4)</sup>及び炭素繊維巻付け工法<sup>5)-8)</sup>等が提案または, 実施工されている. しかし, 今後様々な条件での耐震補強施工が予想され, 新しい補強工法の提案が待たれている<sup>7)</sup>.

一方, 橋脚への繊維シート(Fiber Sheet 以後 FS)を用いた補強の多くはせん断耐力の向上, じん性の向上を目的とし, それらの研究<sup>4),5),9),10)</sup>は多く, 実施例も少なくない. また, 曲げ耐力の向上を目的とした研究<sup>7)</sup>, 実施例もある. 繊維シートによる補強は軽量で施工性が良いことから利用される機会は増えると思われる. しかし, 実際にはせん断補強また

は, 鉄筋段落し部の曲げ補強への利用に限定されており, 橋脚基部の補強に利用した例は少ない. これは, 繊維シートを角部に定着する適当な方法が開発されていないことによるところが大きい.

そこで本研究では, 繊維シートを補強材として用いる場合の角部への定着方法を新たに考案すると共に, その応用例として, RC 橋脚の曲げ補強におけるフーチング部への定着において, この工法が有効であることを実験と数値解析により検証した.

## 2. 考案した定着工法

本研究では, 繊維シートを鉄筋コンクリート表面に定着する新たな方法を考案した. 隅角部を有する構造物の補強工法において, 繊維シートを定着する方法が最も容易であると思われる.

しかし, 角部では, 接着面の端部に垂直方向に引張り力が作用するため, 図-1 に示すとおり, 端部から順に引き剥がされて定着強度を得ることが出来ない.

そこで, 本研究では, 接着されたシートの定着効果を上げるために, 図-2 に示すように定着用治具とアンカーボルトで定着する方法を考案した. この方法は, シートを定着部に接着させた直後に, その上から定着用治具を接着し, アンカーボルトを締め込むことにより圧着する方法である. 前述のような引張力がシートに作用した場合, シートに作用する引張力は定着用治具の曲げ剛性によりアンカーボルトへ伝達される.

なお, 定着用治具は L 字型とした. これはシートから定着用治具への応力伝達をスムーズにするため, ならびに, 治具先端部でのシートの破断を避けるための処置である. また, 隅角部のシートが直角



これは FS の強度低下を緩和させ、作用応力がスムーズに伝達するための処理である。プライマーの指触乾燥後、常温硬化エポキシ樹脂(以降 樹脂)を塗り FS を柱軸方向に貼り付け、ゴムベラ等を用いて樹脂を含浸させる。その後、定着用治具により FS を圧着し、更に、アンカーボルトによりフーチング基部と固定する。その状況を写真-1 に示す。

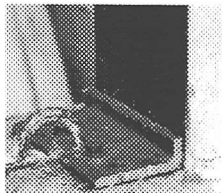


写真-1 治具定着

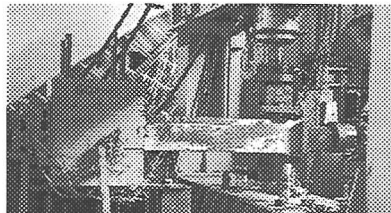


写真-2 実験状況

### 3.4 荷重方法

荷重方法は、図-6 に示すように片持ち梁の先端に死荷重を想定した 91kN の一定軸方向力を荷重した状態で、柱先端での変位を両振りして静的に制御する方法である。試験機は容量 440kN の電気油圧式サーボパルサー型アクチュエーターである。変位振幅は図-7 に示すように、降伏変位  $\delta_y$  を基準とし  $0.5\delta_y$ ,  $1.0\delta_y$  (以降  $0.5\delta_y$  刻み), と変化させた。

なお、ここでいう降伏変位とは、無補強供試体の主鉄筋が降伏を開始する時の供試体先端の変位である。

### 3.5 実験結果及び考察

荷重-変位関係のスケルトンカーブを図-8 に示す。また、CFS または AFS により補強された供試体の無次元化荷重振幅と荷重回数の関係をそれぞれ図-9 及び図-10 に示す。ここで荷重振幅は、荷重-変位関係の上下最大変位時の荷重の絶対値を平均したものである。また、無次元化荷重振幅は荷重振幅を更に無補強供試体の降伏荷重で除した値である。なお変位値は柱先端部での値を用いた。

#### (1) CFS により補強された供試体

CP-Type と CL-Type の無次元化荷重振幅を比べ

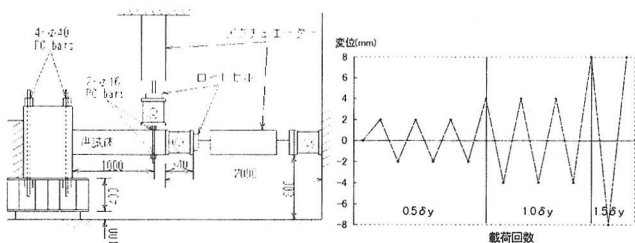


図-6 荷重方法

図-7 荷重パターン

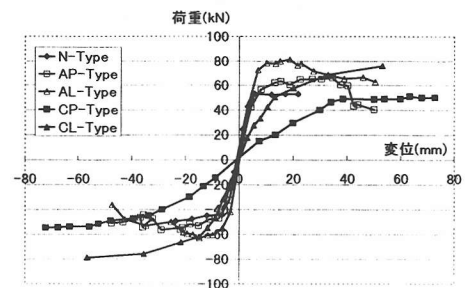


図-8 荷重-変位関係

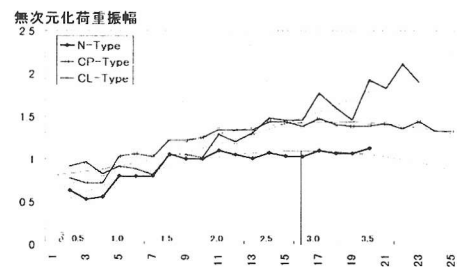


図-9 CFS 補強橋脚モデルの

無次元化荷重振幅-荷重回数

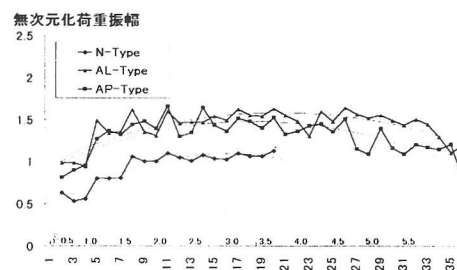


図-10 AFS 補強橋脚モデルの

無次元化荷重振幅-荷重回数

ると  $\bar{\delta} (= \delta / \delta_y) = 2.0$  までは有意な差はないが、 $\bar{\delta} = 3.0$  以上になると徐々に差が生じ CL-Type のほうが大きな値となった。また、CP-Type では  $\bar{\delta} = 2.5$  まで緩やかな上昇となり、 $\bar{\delta} = 3.0$  を過ぎると変化がなくなり、CFS が破断するのに対し、CL-Type では  $\bar{\delta} = 3.0$  以降顕著に上昇して CFS が破断を起こし、荷重は終了した。最大荷重は、CP-type が約 56kN、CL-type が約 81kN、N-type が約 43kN となっており、CL-type の最大荷重は CP-type 及び N-type の約 1.5 倍となった。

これらの結果より、L 字形治具を用いて CFS を定着することにより曲げ耐力が確実に上昇すること、治具の塑性変形により定着部でエネルギー吸収がなされていることがわかる。

## (2) AFS により補強された供試体

AP-Type と AL-Type について無次元化荷重振幅を比較すると  $\bar{\delta}=2.5$  までは大きな差がなく  $\bar{\delta}=2.5$  を超えたところから徐々に AL-Type のほうは上昇し  $\bar{\delta}=2.5$  をピークとして弧を描くように下降した。また、AP-Type も弧を描くような形になったがそのピークは、 $\bar{\delta}=3$  となった。最終的には無次元化荷重振幅の差は約 1.2 倍となった。

最大荷重は AL-Type では 79kN、AP-Type は 66kN となり、N-Type の場合の 1.5 倍、1.2 倍の強度であった。また、図には示していないが治具のひずみは最大でも  $150\mu$  とごく微小なことから治具が変形することなく柱の崩壊を迎えたことが分かる。

## 4. 橋脚モデル解析

前節の実験結果により示された補強効果を数値解析により検証するために、2次元有限要素解析を実施した。補強効果の影響を見るため、無補強(N-Type)、CFS のみによる補強(CFS-Type)、山形鋼を用いた治具により CFS を定着した補強(CL-Type)の3種類の供試体について解析を行う。

### 4.1 解析方法

CFS の材料特性、治具の材料特性は表-1 及び表-2 に示したものと同様である。解析モデルを図-11 に示す。各要素はすべてシェル要素とした。無補強の場合、要素数は 360、節点数は 595 である。鉄筋コンクリート部分の材料は平均応力による降伏応力の減少

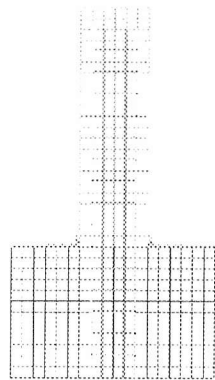


図-11 解析モデル

を考慮した弾塑性材料とし、鋼板は移動硬化を考慮した等方弾塑性体、シートは等方弾塑性破壊モデルとしており、シートが破断した場合には要素が消去される。また、シートと鋼板、シートと RC 試験体の間には接触面への法線方向とせん断方向について破壊応力を設定する接触要素を挿入している。これによりシートの剥離が考慮できる。剥離は次式により判定される。

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{sf}}\right)^2 \geq 1$$

$\sigma_{nf}$ : 垂直破壊応力       $\sigma_{sf}$ : せん断破壊応力  
 $\sigma_n$ : 結合部に実際に作用している垂直応力  
 $\sigma_s$ : 結合部に実際に作用しているせん断応力

定着体、被定着体と FS との間には垂直破壊応力  $3.43\text{N/mm}^2$ 、せん断破壊応力  $102.5\text{N/mm}^2$  とする接触要素を挿入し、定着用治具と FS との間には垂直破壊応力  $2\text{N/mm}^2$ 、せん断破壊応力  $60\text{N/mm}^2$  とする接触要素を挿入した。コンクリートと FS との間の垂直破壊応力は参考資料<sup>11)</sup>の値を用いた。

拘束条件は、フーチング基部を完全固定とした。載荷条件については、先端に 91kN の一定軸力を載荷した状態で 400mm/sec での動的単調載荷とした。

### 4.2 解析結果と考察

各供試体について相当応力分布図を図-12 に示す。定量的な結果を得るには至らなかったが、各分布図より CFS のみによる補強では、その効果はほとんど見られないのに対して、本稿で提案した定着工法を用いることで補強効果が顕著に向上することが明らかとなった。

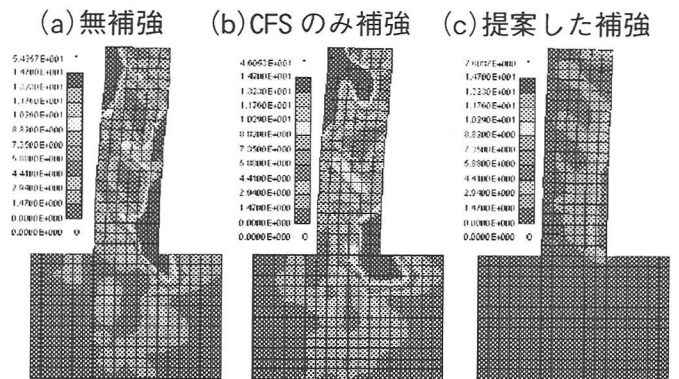


図-12 相当応力分布図

## 5. 隅角部モデルの載荷実験

次に、RC 構造物の隅角部に FS を定着する際の有効性について検討するために、隅角部をモデル化した小型供試体を作成し、その載荷実験を実施した。

### 5.1 材料の力学特性

鉄筋の力学特性、補強材として用いた FS の力学特性、定着用治具の力学特性は表-1、表-2 に示したものと同様である。また、治具は、山形鋼を加工したものを使用した。その形状を図-13 に示す。

### 5.2 供試体の概要

供試体は図-14 に示すように鉄筋コンクリート製定着体、無筋コンクリート製被定着体、及びそれらを定着するための繊維シート、定着用治具、及びア

ンカー用高力ボルトからなる。定着体には、アンカーボルトの代用に全ネジの M16 高力ボルトを埋め込んでいる。ここで高力ボルトを用いているのは、アンカーボルトの引き抜けが実験結果に影響を及ぼさないようにするためである。

定着体の中央部には、110mm×110mm の孔が開けてあり、その中に被定着体を差し込む。その状態で定着体及び被定着体に FS を接着し、その上から定着用治具として L 字鋼を接着して、これをアンカー用高力ボルトで締め付けた。

実験では表-4 に示す 4 タイプの供試体を用意した。供試体タイプ名の 1 文字目は FS の種類を示し、2 文字目は補強枚数、最後の数字は治具の厚み(mm) を示す。なお、隅角部へ R=10mm の面取りを設ける際にモルタルを使用せずアルミ板を用いた。これは、固定部と移動部の摩擦を軽減するためである。

表-4 供試体一覧

供試体名	FS種類	補強枚数	治具の厚さ
C1-12	CFS	1枚	12mm
C2-15	CFS	2枚	15mm
A1-12	AFS	1枚	12mm
A2-15	AFS	2枚	15mm

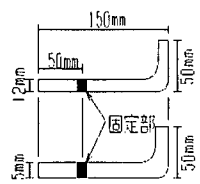


図-13 治具形状

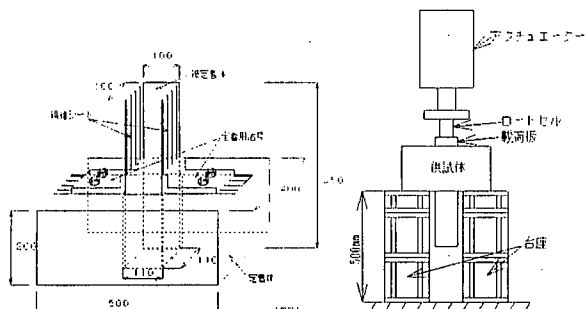


図-14 隅角部モデル概要

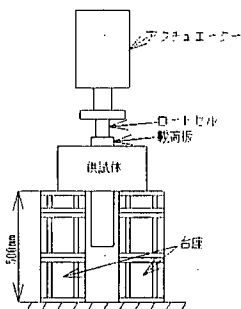


図-15 供試体設置

### 5.3 載荷及び測定

図-15 に示すように供試体全体を逆さにして台座に載せ、定着体底部をアクチュエーターで押すことで載荷を行った。用いた試験機は荷重容量 98kN、最大変位±100mm の電気油圧式サーボパルサー型アクチュエーターである。載荷は変位制御で静的な載荷を行った。測定は荷重、定着用治具の曲げ変位、ひずみ、及び FS の繊維方向のひずみについて行った。

### 5.4 実験結果及び考察

実験結果を次式により無次元化した。

$$\bar{P} = \frac{P}{P_y} = \frac{PL}{w\sigma_y}$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\epsilon_y}$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_y}$$

但し

$$\sigma_y: \text{治具の降伏応力} \quad w: \text{治具の断面係数}$$

$$L: \text{治具のスパン} \quad \epsilon_y: \text{治具の降伏ひずみ}$$

$$\delta_y: \text{治具の降伏変位}$$

被定着体の無次元化荷重-変位関係を図-16 に示す。被定着体の最大無次元化変位と治具の最大無次元化変位の差は C1-12 では約 0.8, C2-15 では約 0.6, A1-12 では約 1.4, A2-15 では約 1.5 となった。このことより CFS により補強された供試体に比べ AFS により補強された供試体の方が最大無次元化変位の差が開くことがわかる。これは、AFS の特徴である変形能の高さが現れたためである。アンカーボルト付近のひずみと荷重の関係を各供試体毎に図-17 に示す。ボルトにより治具を定着する際に用いるワッシャー付近で無次元化ひずみが大きくなり、それから離れる程無次元化ひずみは減少している。また、剥離を生じ始めた時にはワッシャー付近より被供試体に近いほうが無次元化ひずみが大きい場合がある。これは FS が徐々に剥離をしていくためである。

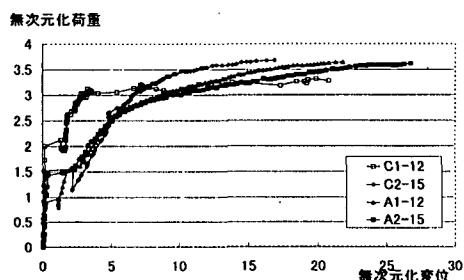


図-16 被定着体の荷重-変位

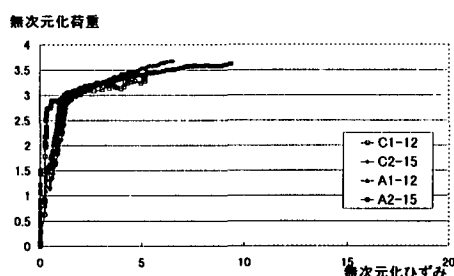


図-17 治具体の荷重-ひずみ関係

## 6. 隅角部モデル解析

### 6.1 解析方法

前述の隅角部モデル実験の結果を参考に表-5 に示す8タイプのモデルを用いて解析を行った。モデルを図-18に示す。要素数266、節点数958である。

表-5 供試体名一覧

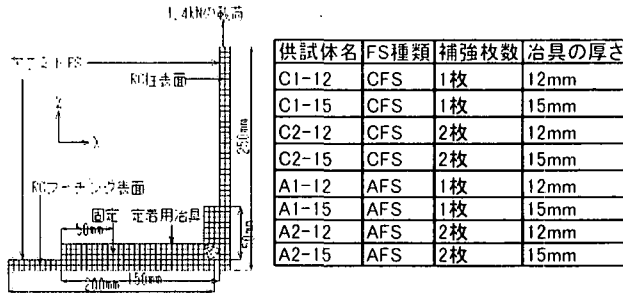
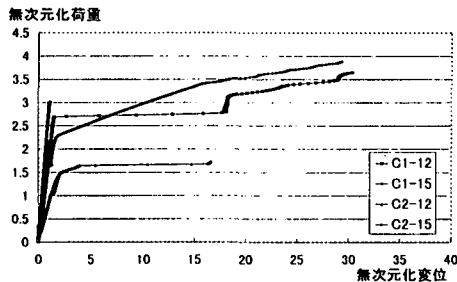
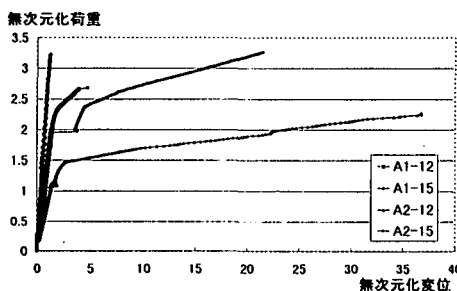


図-18 隅角部モデル図

要素はすべてソリッド要素とした。コンクリート部は剛体とし、FSと定着用治具は、ひずみによる破壊と応力による破壊をそれぞれ判断できるバイリニア形の弾塑性材料とした。また、それらの間には



(a) CFS



(b) AFS

図-19 被定着体の無次元化変位

4.1に示したのと同じ接触要素を挿入した。FSの材料特性及び治具の材料特性は表-1及び表-2に示したものと同様である。拘束条件は、定着用治具のボルトによる固定部分を完全固定とし、移動部をZ軸方向以外の変位を拘束した。また全節点はY軸方向への移動を拘束することでX-Z平面に対し

て対象要素とした。載荷方法については、被定着体の正方向に荷重を載荷した。

### 6.2 解析結果及び考察

#### (1) CFSにより補強された供試体

治具の荷重-変位関係を図-19(a)に示す。C1-15は治具を固定するボルト付近でCFSが破断したため十分な変位が生じる前に解析を終了した。また、C2-12は変位は生じるものの無次元化変位が約20の時にボルト付近から治具が破壊をしたため解析を終了した。C1-12及びC2-15は被定着体の変形後、被定着体とCFSが剥離し解析を終了した。

CFSにおいて隅角部での応力の伝達をスムーズにするためにR=10mmとなるように面取りを施した。C1-15は、治具の強度が高く、治具により定着したCFSがすり抜けたためである。

定着用治具についてはその主応力が一番大きく出た点での無次元化荷重に対する無次元化応力と無次元化塑性ひずみをそれぞれ図-20、図-21に示す。無次元化応力については、急激にぶれるところがある。これはCFSの剥離と対応している。次に治具の無次元化塑性ひずみでは、先ほど述べた応力がぶれる時と無次元化塑性ひずみが対応しているのがわかる。C1-12、C1-15、C2-12、C2-15のそれぞれCFSの破断、剥離または治具の破壊する直前の応力分布図(応力がもっとも大きい時)を図-24に示した。これより、C2-15で応力が広く分布しつついてC1-12、C1-12、C1-15の順となる。

#### (2) AFSにより補強された供試体

治具の荷重-変位関係を図-19(b)に示す。A1-15は治具を固定するボルト付近でAFSが破断したため十分な変位が生じる前に解析を終了した。また、A2-12は変位は生じたものの変位が約5の時にボルト付近でAFSが破断したため解析を終了した。A1-12は十分な変形後、被定着体とCFSが剥離し解析を終了した。また、A2-12は十分な変位を生じるがAFSの強度に対して治具の強度が低いため無次元化荷重はA2-15の約半分となった。定着用治具の無次元化荷重に対する無次元化応力を図-22に、塑性ひずみを図-23に示す。まず、無次元化応力を見ると急激にぶれるところがある。AFSが1枚のタイプと2枚のタイプは無次元化応力が全体的に

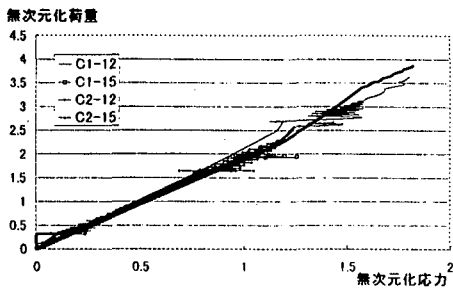


図-20 治具の無次元化応力(CFS)

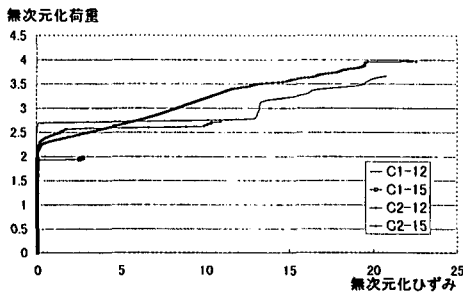


図-21 治具の無次元化塑性ひずみ(CFS)

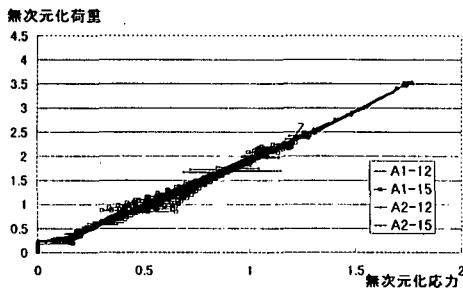


図-22 治具の無次元化応力(AFS)

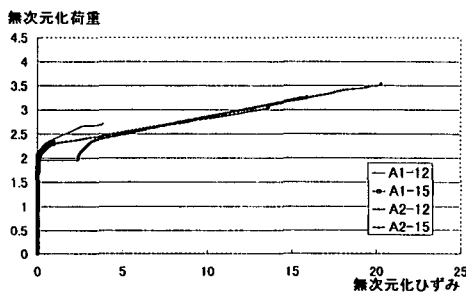


図-23 治具の無次元化塑性ひずみ(AFS)

1.2 倍近く大きくなった。この事から治具の無次元化応力が同値ならば補強枚数に比例して耐荷力も増加することが解る。A1-12, A1-15, A2-12, A2-15 のそれぞれの AFS の破断または剥離, 治具の破壊する直前の応力分布図を図-25 に示した。図-24,25 より, C2-15 と A2-15 が似た分布を示し, その分布も広範囲となった。

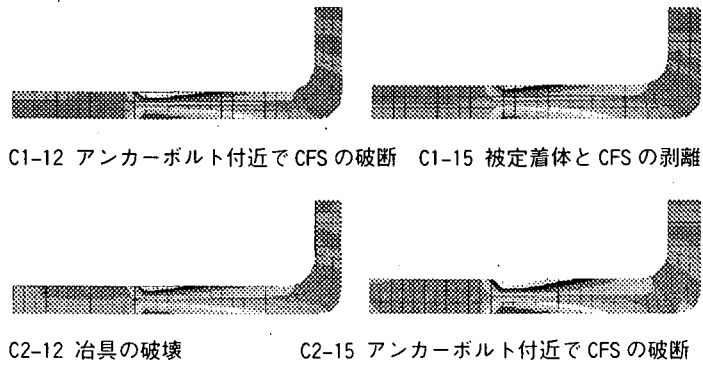


図-24 CFS を用いた定着用治具の応力分布

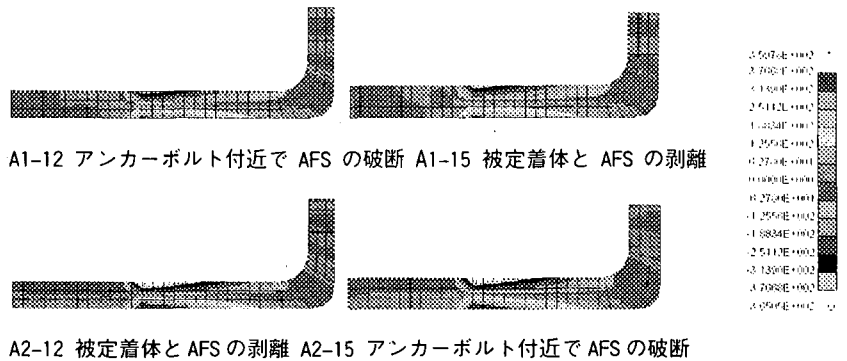


図-25 AFS を用いた定着用治具の応力分布

### 6.3 隅角部モデル実験と解析との比較

隅角部モデル載荷実験で得られた結果と隅角部モデル解析の結果を比較する。被定着体の無次元化荷重-無次元化変位関係を図-26 に示す。C1-12 は無次元化変位が 4.5 までには有意な差が認められないが解析で得られた結果は変位が 4.5 の時に CFS が被定着体と剥離を起こした。C2-15 は無次元化荷重が約 2 で定着体と CFS との間で剥離を起こし被定着体の無次元化変位が急激に増加したため実験結果との差も増加した。A1-12 も同様に無次元化荷重が約 2.7 で定着体と AFS との間で剥離を起こしたため変位が急激に増加し, 実験結果との間に差が生じた。しかし, 無次元化変位が 20 を超えたところから実験結果に沿うようになった。A2-15 は実験結果と解析結果に有意な差が見られなかった。また, ボルト付近の無次元化荷重と無次元化ひずみ関係を図-27 に示す。C1-12 は解析では約 2.5 で CFS が被定着体から剥離したため解析不能となった。しかし, 2.5 までの荷重-ひずみ関係は類似している。C2-15 は, 荷重-変位関係と同様に実験結果と解析結果に差が生じた。同様のことが A1-12 でも言える。A2-15 は無次元化ひずみが 10 以前は実験結果と解析結果に差が生じているがひずみが約 10 以降は類似した軌跡を描いた。

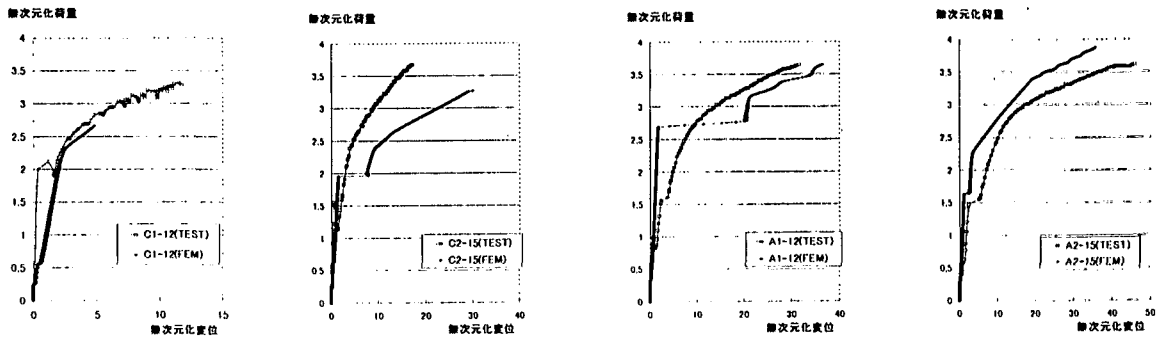


図-26 被定着体の無次元化荷重-無次元化変位比較関係

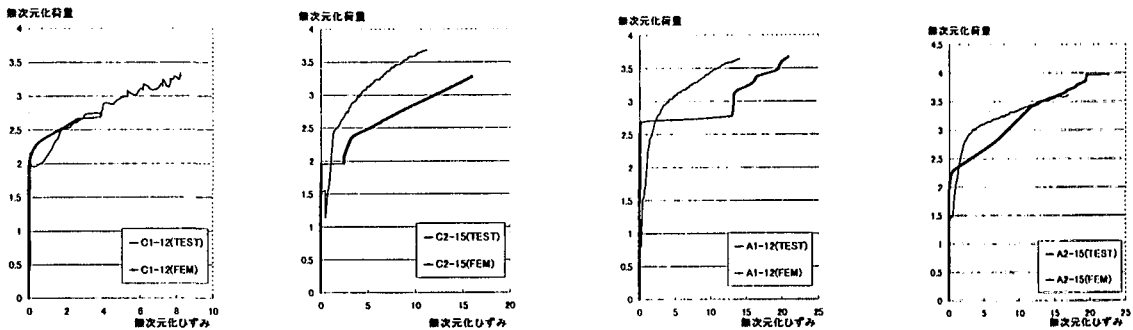


図-27 治具の無次元化荷重-無次元化ひずみ比較関係

## 7. 結論

繊維シートを補強材として用いる場合の角部への定着方法を新たに考案すると共に、その応用例として、RC 橋脚の曲げ補強におけるフーチング部への定着において、この工法が有効であることを実験と数値解析により検証した。本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- (1) 橋脚モデルの実験と解析により、考案した定着工法は、耐力及びじん性の確保に有効であることが分かった。また、その際に用いる定着用治具の形状は L-Type とすることで定着長を確

保し、FS の破損を防ぐことができる。

- (2) 本研究で提案した定着方法を採用することにより、CFS, AFS を有効な曲げ補強材として用いることが可能である。また、FS の枚数、治具の寸法によりその補強目的に合わせた利用方法を選択することが可能である。
- (3) 実験で得た結果と解析で得た結果との比較から本稿で用いたモデル及び力学特性は、隅角部定着工法の解析に有効であることを示した。

## 参考文献

- 1) 半野・大塚・藤本: 既存 RC 橋脚の主基部の耐震補強に関する実験, 土木学会第 48 回年次学術講演会, I-97, pp.342-343, 1993. 10.
- 2) 中野・佐々木・堤: 鋼板補強した RC 橋脚の基部に着目した交番載荷試験, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-323, pp.646-647, 1997. 9.
- 3) 在田・鎌田・海原: 鋼板巻き補強を行った既存 RC 柱の鋼板の役割, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-325, pp.650-651, 1997. 9.
- 4) 佐野・小保・三浦: 鋼板接着により補強された鉄筋コンクリート梁の曲げ性状, 構造工学論文集, Vol39A, pp.1361-1368, 1993. 3.
- 5) 岡野・森山・松本・大内・浦井: 炭素繊維シートによるせん断補強効果に関する解析, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-156, pp.312-313, 1997. 9.
- 6) 前川・梶田: 炭素繊維シートを用いた RC 補強橋脚実験結果の設計的考察, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-313, pp.626-627, 1997. 9.
- 7) 篠原: 新素材により巻き立て補強された RC 柱の耐震補強効果に関する研究, 武蔵工業大学修士論文, 1996. 3.
- 8) 呉・田名部・松崎・神田・横山: FRP シート緊張接着によるコンクリート構造部材の補強法の提案, 構造工学論文集, Vol44A, pp.1299-1308, 1998. 3.
- 9) 岡野・渡辺・渡邊・瀧口: RC 補強柱の変形性能に関する一考察, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-315, pp.630-631, 1997. 9.
- 10) 西野・河津・松木・森・満木: アラミド繊維シートによる補強に関する一実験, 土木学会第 52 回年次学術講演会, V-158, pp.316-317, 1997. 9.
- 11) 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, 1996