

# アラミド繊維ロッドを用いた橋脚基部曲げ補強に関する実験的研究

## Experimental Study on Flexural Behavior of Bridge Columns Strengthened with AFRP Rods.

篠崎 裕生 HIROO SHINOZAKI

三上 浩 HIROSHI MIKAMI

ファイベックス (株) 田村 富雄 TOMIO TAMURA

藤田 学 MANABU FUJITA

アラミド繊維ロッドを用いた RC 橋脚基部の曲げ補強工法を開発した。アラミド繊維ロッドは柱基部に切削した溝への埋込みと、フーチングに切削した鉛直孔への挿入により橋脚基部へ定着する。本工法は、鉄筋を用いた場合と比較して補強後の自重増加がほとんどなく、フーチングへの切削孔の径や本数を減らすことができる。本研究で行った柱模型試験体の水平交番載荷試験により、補強柱の耐力は鉄筋コンクリート構造と同じように、ファイバーモデルで精度良く推定できること、補強柱のじん性は、アラミド繊維ロッドの破断で耐力が決まる場合は補強していない試験体よりも若干劣ることなどが明らかとなった。

**キーワード** : RC 橋脚, 曲げ補強, アラミド繊維ロッド, 正負交番載荷

The Authors have developed a method of increasing the flexural strength of RC bridge columns using AFRP rods embedded in and around the bottom of columns. This simplified method does not increase the dead weight of treated columns. Cyclic horizontal loading tests were conducted with scale models. The test results showed that the relationship between the displacement and the strength of bridge column can be computed considering AFRP rods as re-bars.

**Key Words**: RC Bridge Column, Flexural Strengthened, AFRP Rod, And Cyclic Horizontal Loading Test

### 1. はじめに

RC 橋脚基部の曲げ耐力を向上させる方法として、著者等はアラミド繊維ロッド（以下、ロッドと呼ぶ）を用いた補強工法を開発した。

本工法は、図-1に示すとおり、橋脚基部の主鉄筋に平行してロッドを配置するもので、“柱埋込み部”と“フーチング内埋込み部”の2区間からなる。柱埋込み部は、柱表面に切削した溝にロッドを接着剤とともに埋込むものである。この溝への埋込みによる補強方法については、すでに、梁やスラブを用いた実験によりその効果を確認している<sup>1),2)</sup>。フーチング内埋込み部は、フーチング上面から切削した孔へロッドを挿入し、接着剤を充填・定着するものである。

本工法は、補強後の柱断面の増加がないため自重の増加がなく、鉄筋や鋼板を用いた補強工法と比較してフーチングなど基礎工への負担が軽減される。また、高強度のロッドを使用するため、鋼材を用いた場合と比較して、フーチングへの切削孔の径や本数を減らすことがで

きる。ここでは、本工法を用いて補強した柱模型試験体の正負交番載荷試験を行うことにより、その補強効果を確認するとともに、圧縮力と引張力を繰り返し受けるロッドの挙動をひずみ分布などから詳細に分析した。

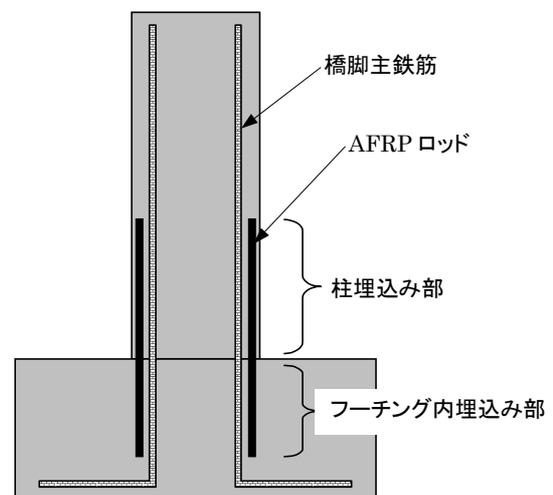


図-1 補強概念図

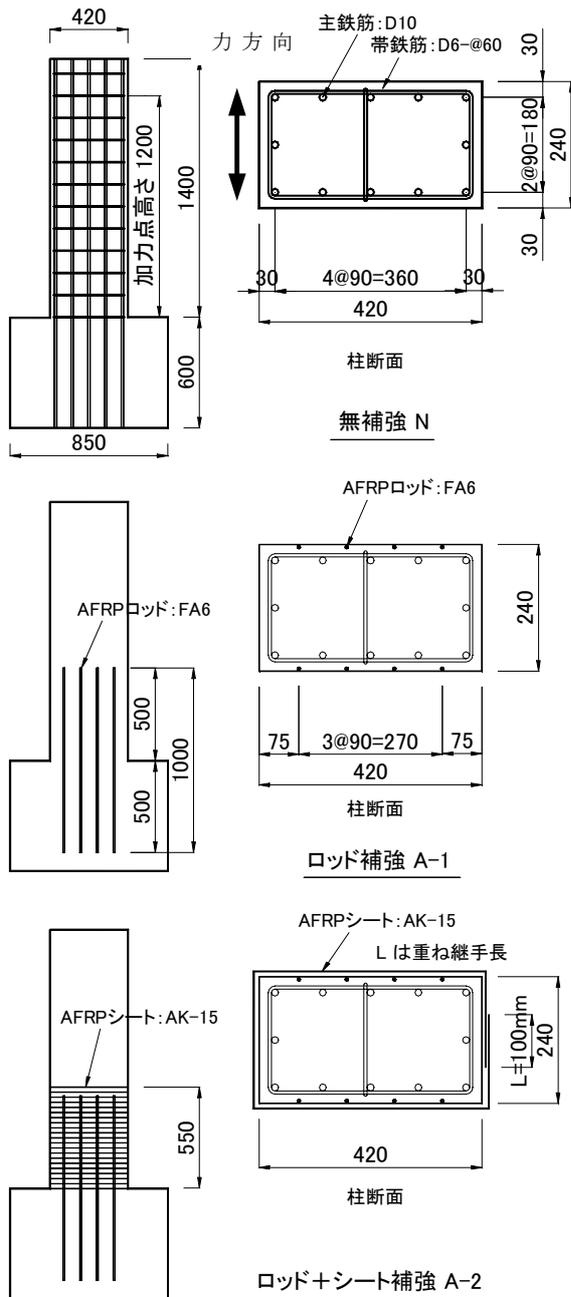


図-2 試験体形状寸法 (単位 : mm)

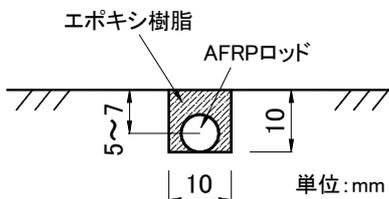


図-3 溝埋込み部詳細

## 2. 試験の概要

### (1) 試験体の概要

図-2に、試験体の形状寸法を示す。断面寸法は



写真-1 切削完了後の状況

420 × 240mmで、加力点高さと断面高さの比(a/d)は5とした。主鉄筋はD10を12本、帯鉄筋はD6を120mmピッチで配置した。

試験体は無補強試験体1体とロッドで補強した試験体2体の計3体とした。ロッドで補強した試験体のうち1体は、ロッドの柱埋込み部を覆うようにアラミド繊維シート(以下、シートと呼ぶ)を巻き付けたもので、溝部ロッドの付着劣化の進行を抑制するとともに、柱のじん性向上を狙った試験体である。

柱埋込み部のロッドは、図-3に示す大きさの溝にエポキシ樹脂とともに埋込み定着した。ロッドの芯かぶりりは5～7mmである。フーチング内へのロッドの埋込みは、写真-1に示すようにコアボーリングにより空けたφ25mmの孔にロッドを挿入することにより行った。挿入後、エポキシ樹脂により定着した。

柱に接するようにフーチングに鉛直に孔を開ける場合、切削装置の大きさなどから多少傾きが生じる。今回の試験では、長尺の切り刃を用いてフーチング上面から装置までの距離を長くすることなどにより、傾斜を5°以下にすることができることを確認しており、この程度であれば柱部とフーチング部のロッドの連続性は損なわれないものと考えられる。

### (2) 試験体の設計

ロッドの径と本数は、補強した試験体の耐力(69.0kN)が無補強試験体(43.2kN)の約1.5倍になるように決めた。耐力は、材料強度の規格値を用いてファイバーモデルによって計算した。ロッドの圧縮耐力は引張耐力と比較して極端に小さい<sup>3)</sup>ため、計算ではこれを無視した。

試験体のせん断耐力は、文献<sup>3)</sup>に従い計算した。無補強およびA-1試験体のせん断耐力は98.7kNである。シート補強したA-2試験体は、シートにより受け持たれるせ

ん断力(43kN)と、帯鉄筋のせん断負担(39kN)がほぼ等しくなるようシート量を決定した。いずれの試験体も、せん断耐力は曲げ耐力を十分に上回っている。

ロッドを配置する範囲は、ロッドの必要定着長から決めた。必要定着長 $l_d$ は、文献<sup>3)</sup>に示される以下の式(1)で計算した。

$$l_d = \alpha_1 \frac{f_d}{4f_{bod}} \phi \quad (1)$$

ここに、 $\alpha_1$ ：補強材のかぶりなどで決まる係数、 $f_d$ ：補強材の設計引張強度、 $f_{bod}$ ：コンクリートの設計付着強度、 $\phi$ ：補強材の直径、である。フーチングへのロッドの必要定着長は480mmとなった。一方、柱部の必要定着長は899mmとなり、今回の試験体の場合、ほぼ柱全長に渡り埋込み補強することとなる。しかし、本試験では、繰り返し加力による基部コンクリートの劣化の方がロッドの付着劣化よりも大きいと考えられることと、シート巻付けによる付着劣化の防止効果を検討する意味から、定着長をフーチングへの埋込み長と同じである500mmとした。

使用材料のロッドとシートおよび鉄筋の力学特性値を表-1および表-2に示す。コンクリートの圧縮強度と弾性係数は柱部で24.4～25.1N/mm<sup>2</sup>、25.3～5.6kN/mm<sup>2</sup>、フーチング部で33.0～36.1N/mm<sup>2</sup>、28.9～30.0kN/mm<sup>2</sup>であった。

表-1 ロッド・シートの力学特性値

種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
ロッド (FA6)	32	1520	64.0
シート*	68.9**	2060	118

\*：シートの目付け量は100g/m<sup>2</sup>

\*\*：断面積は幅1m当たり

表-2 鉄筋の力学的特性値

試験体	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
D10	356	512	206
D6	343	505	206

### (3) 加力方法と計測項目

荷重は主鉄筋降伏時変位 ( $\delta_y$ )の整数倍の変位 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ 、 $\dots$ を振幅とする変位制御により、漸次変位を増加させて終局状態に達するまで3回ずつ繰り返し行った。鉄筋降伏ひずみは材料試験結果を用いた。荷重点の荷重および変位、ロッドと主鉄筋および帯鉄筋のひずみを計測した。

## 3. 試験結果

### (1) 荷重－変位関係

荷重と変位の関係を図-4に示す。無補強試験体の主鉄筋降伏時の変位と荷重は9.4mm、38.8kNであった。3 $\delta_y$ 時に46.0kNの最大荷重(正側載荷時)を示した後、6 $\delta_y$ の2、3回目の繰り返し時に、主鉄筋の座屈および破断が生じ耐力が低下した。ロッド補強したA-1試験体は、主鉄筋降伏時の変位と荷重は11.8mm、45.4kNであり、無補強試験体よりも大きな荷重および変位で降伏した。主鉄筋降伏後もロッドが曲げ負担することにより耐力が上昇し、4 $\delta_y$ の1回目で最大荷重64.8kNを示した。4 $\delta_y$ の2回目以降、柱下端においてロッドの破断が進行し、耐力が低下した。4 $\delta_y$ でほぼすべてのロッドが破断し、5 $\delta_y$ の繰り返しでは無補強試験体の耐力とほぼ等しい残存耐力を示したが、2回目以降基部の圧縮破壊が進行しさらに耐力が低下した。終局時においてもフーチングからのロッドの抜けや、柱部におけるロッド埋込み部の付着破壊などは発生しなかった。

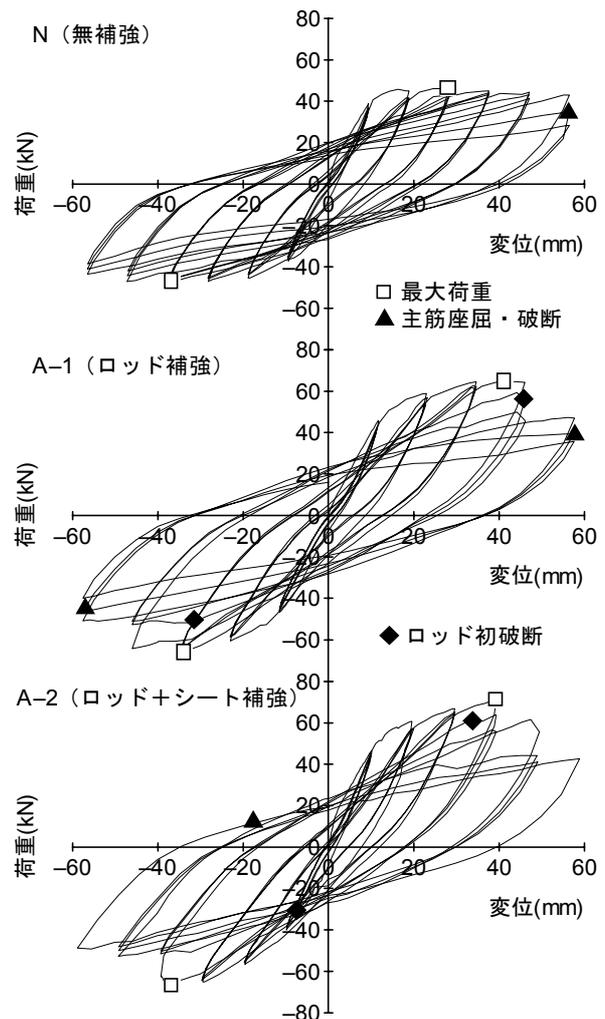


図-4 荷重－変位関係



N (無補強)



A-1 (ロッド補強)  
写真-2 破壊状況

ロッドとシートで補強した A-2 試験体は、主鉄筋降伏時の変位と荷重は 10.2mm，46.6kN であった。4  $\delta_y$  の 1 回目最大荷重 70.8kN を示し、2 回目以降、柱下端においてロッドの破断が進行し、耐力が低下し始めた。5  $\delta_y$  の 2 回目以降は、ほぼすべてのロッドが破断し、残存耐力は無補強試験体とほぼ等しくなった。6  $\delta_y$  の 2 回目で主鉄筋座屈が進行しさらに耐力が低下したため、試験を終了した。A-1 試験体と同様、フーチングからのロッドの抜けや柱部の付着破壊は生じていなかった。

写真-2 に N と A-1 試験体の破壊状況を示す。無補強試験体は、柱高さ方向に 10～15cm の間隔でひび割れが生じ、基部の損傷はフーチング基面から 15cm 程度の高さの範囲で生じていた。一方、A-1 試験体は、载荷初期には N 試験体と同様 10～15cm の間隔でひび割れが生じていたが、柱の変形が進むにしたがってロッドの付着ひび割れが密に生じた。基部の損傷範囲は N 試験体とほぼ同様であった。A-2 試験体は、終局時において基部損傷に伴うシートの“ふくれ”が生じていた程度で、シートの破断は生じなかった。

図-5 に荷重-変位包絡線を示す。横軸は、それぞれの試験体の降伏変位で正規化した。また、いずれの試験体も、各変位振幅における 3 回繰り返し载荷後の残存耐力が、主鉄筋降伏荷重以上である塑性率までを有意なものとしてプロットした。

塑性率は無補強試験体が 5 であるのに対し、A-1、A-2 試験体は 4 で若干劣る結果となった。ロッドで補強した試験体の耐力は、ロッドの破断が始まる 4  $\delta_y$  以降、ほぼ無補強試験体の耐力まで大きく低下するため、じん性率に関しては無補強試験体の性能を確保することができなかった。これに関しては、柱基部付近のロッドをアンボンドにして、じん性の改善を図ることなどが考えられ、今後の研究課題としたい。

図-6 は、ファイバーモデルによる計算値と包絡線を比較したものである。ファイバーモデルの断面分割数は 48、柱軸方向の分割数は、ひび割れの間隔が 10cm 程度であることを考慮して 12 (120 ÷ 10) とした。材料特性値は材料試験結果を用いた。コンクリートの応力-ひずみ関係においては帯鉄筋あるいはシートの拘束効果は無視している。

計算値は試験値と良く一致しており、本試験の場合、柱の耐力と変位の関係は、鉄筋コンクリート構造と同様にファイバーモデルにより推定できることが確認できた。

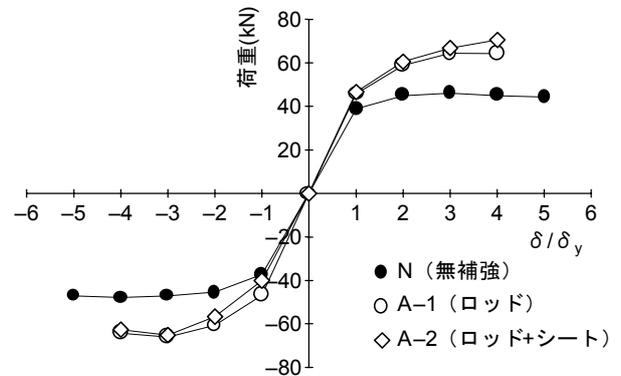


図-5 荷重-変位包絡線

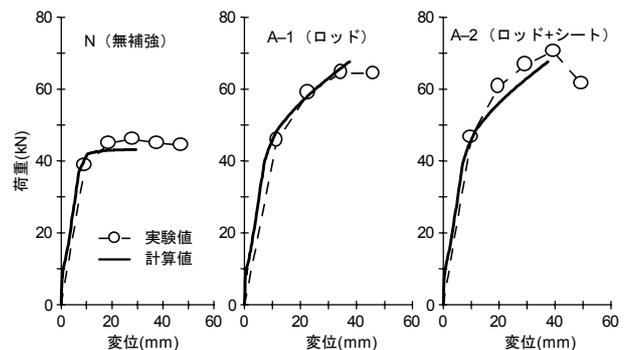


図-6 荷重-変位計算値との比較

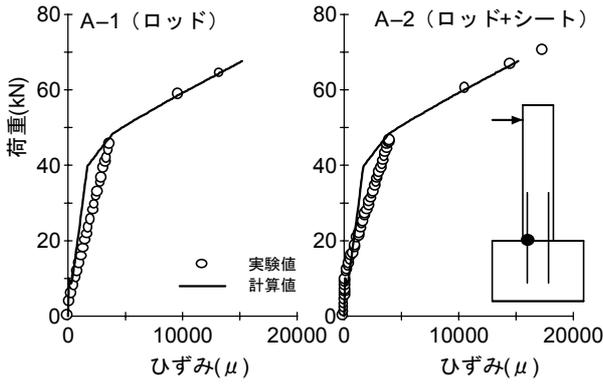


図-7 ロッドのひずみ

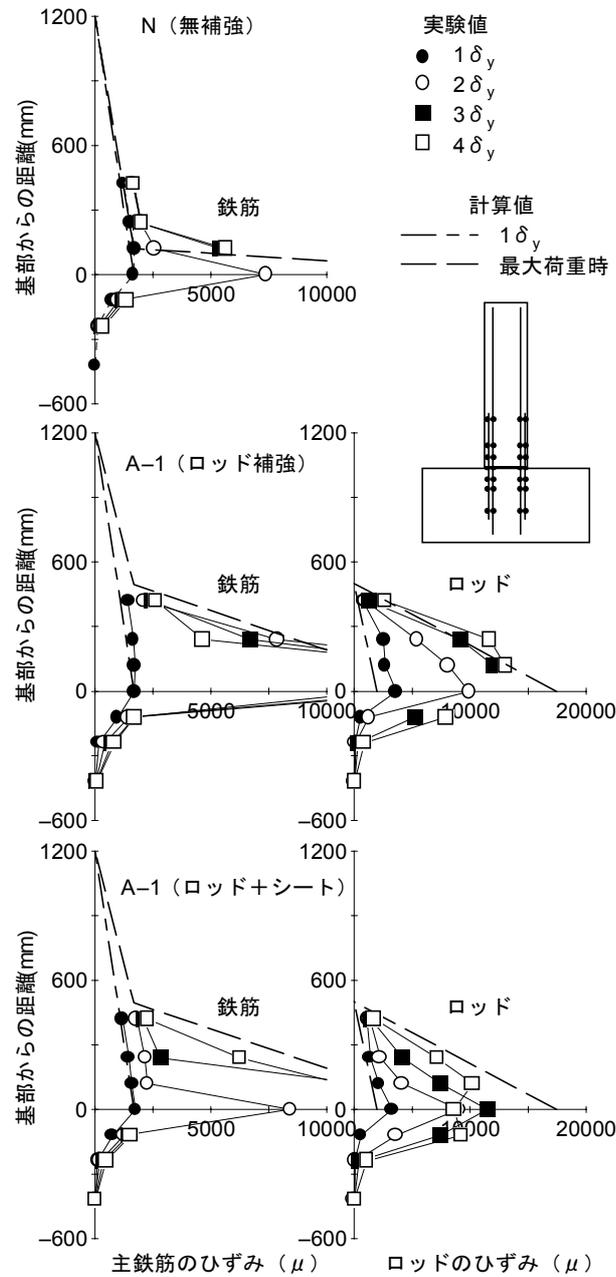


図-8 補強材ひずみ分布

(2) 計算値との比較

図-7は、ロッド補強した試験体の柱基部におけるロッドのひずみと荷重の関係を計算値と比較したものである。実験値は2測点の平均値で、 $2\delta_y$ 以降はそれぞれの載荷振幅において一回目の加力時におけるピーク値とした。計算値はファイバーモデルの値を用いた。

$1\delta_y$ までのひずみの推移には若干の相違があるものの、 $2\delta_y$ 以降は計算値と非常に良く一致していた。

図-8は、それぞれの試験体の主鉄筋およびロッドの軸方向ひずみを示し、計算値と比較したものである。実験値は $1\sim 4\delta_y$ のピーク値である。計算値は図-7と同様にファイバーモデルの結果を用いて、主鉄筋降伏時および最大荷重時の値を示した。なお、ロッドひずみの計算値は、ロッドの埋込み端部(基部から柱高さ方向に500mm)のひずみ値をゼロとして、基部ひずみの計算値と直線で結んだ。

主鉄筋ひずみおよびロッドひずみは、いずれも計算値と良く一致していた。

図-7で示した基部におけるロッドひずみと、図-8の

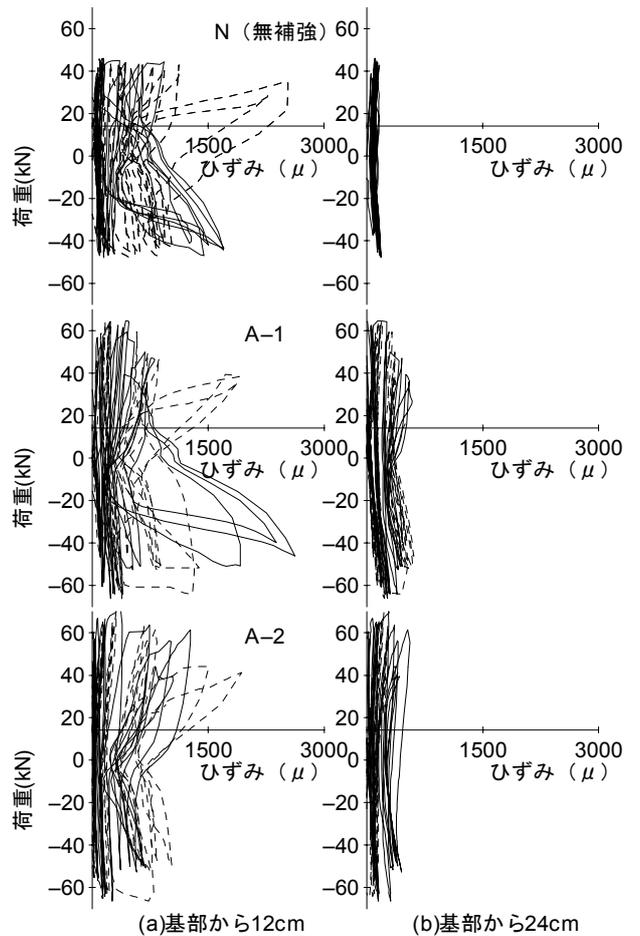


図-9 帯鉄筋ひずみ

主鉄筋およびロッド軸方向ひずみの分布が計算値とほぼ一致している点から、本工法に対するファイバーモデルによる計算の妥当性が確認できた。また、試験体の耐力がロッドの破断で決まっており、ロッドの付着切れがなかった点から、今回設定した柱部のロッド定着長(500mm)が妥当であったことが分かった。

### (3) 帯鉄筋のひずみ

図-9に帯鉄筋のひずみを示す。左図はフーチング基面から12cmの位置の帯鉄筋ひずみ、右図は同24cmのものである。実線は正側載荷時、点線は負側載荷時を示す。

基面から12cmの位置においては、いずれの試験体もほぼ同様の傾向が見られた。終局時には降伏ひずみを超えるものも見られた。基面から24cmの位置では、N試験体ではほとんどひずみが生じないのに対し、A-1、A-2試験体では500 $\mu$ 程度のひずみが生じている。これは、ロッド埋込み部で生じたひび割れに起因しているものと考えられるが、その値は小さく問題となるものではない。

## 4. まとめ

柱の曲げ耐力向上を目的として、ロッドを基部に埋込んだ柱模型試験体の正負交番載荷試験により、以下が明らかとなった。

- (1) 柱の耐力やロッドのひずみなどは、鉄筋コンクリート構造と同様にファイバーモデルにより精度良く推定できることが確認できた。
- (2) 本試験の場合、柱の耐力はロッドの破断で決まり、じん性率は無補強の場合よりも若干劣る結果となった。

本工法の実用化に当たっては今後、じん性率改善手法の検討や柱部必要定着長の詳細な検討を行う必要があると考える。また、試設計により、実構造におけるロッドの配置・定着長などを検討し、本工法の優位性を生かせる橋脚の適用範囲を明らかにする予定である。

## 参考文献

- 1) 岸, 三上, 栗橋, 田村: AFRPロッドを埋設したRC梁の曲げ耐荷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. 25, No.2, pp.1783-1788, 2003
- 2) 三上, 岸, 今野, 田村: AFRPロッドを下面埋設して補強したRC版の押し抜きせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.1801-1806, 2003
- 3) 土木学会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー 88, 1996.9