

## V-17

## FRP シートを用いて曲げ補強した RC 柱模型の水平加力実験

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光  
 三井建設(株) フェロー 三 上 浩  
 室蘭工業大学 学生員 栗 橋 祐 介  
 室蘭工業大学 ○学生員 新 井 茂 雄

## 1. はじめに

平成 7 年 1 月に発生した阪神・淡路大地震以後、旧設計指針にて建設された道路・鉄道橋脚の補強工事が盛んに行われている。最近では施工性に優れる FRP シート巻き付け工法によるせん断補強や靱性補強が実構造物に対して適用されるようになった。著者らは主として FRP シート巻き付けによる橋脚のせん断補強効果や靱性能改善効果について様々な観点から検討してきた。<sup>1)</sup> その一方で、FRP シートを橋脚の高さ方向に貼り付けて曲げ補強することも考えられ、橋脚の段落とし部周辺に FRP シートを縦貼りして曲げ補強する方法は一部で実用化されている。また、これまでに炭素繊維シートを用いた場合の曲げ性状や付着性状は種々検討されている<sup>2)</sup> が、RC 柱をアラミド繊維シートを用いて曲げ補強した場合の補強効果に関する検討例は少ないようである。

本研究は、段落としを有する RC 柱に FRP シートを縦貼りして曲げ補強した場合の柱の耐荷性状および靱性能を水平交番加力実験により検討したものである。実験は目付け量の異なるアラミド繊維シートおよび炭素繊維シートを用いて曲げ補強した試験体と無補強の試験体について行い、主として RC 柱の変形挙動を観測した。計測項目は水平荷重および水平変位と FRP シートのひずみ分布である。

## 2. 実験の概要

## 2.1 試験体

図-1 に試験体の形状寸法と配筋、FRP シートの貼り付け状況およびひずみゲージの取り付け位置を示す。実験に用いた試験体の断面寸法は  $25 \times 25$  cm で柱部の高さは 150 cm である。なお、基部から高さ 62 cm の位置で段落としを行っている。FRP シ

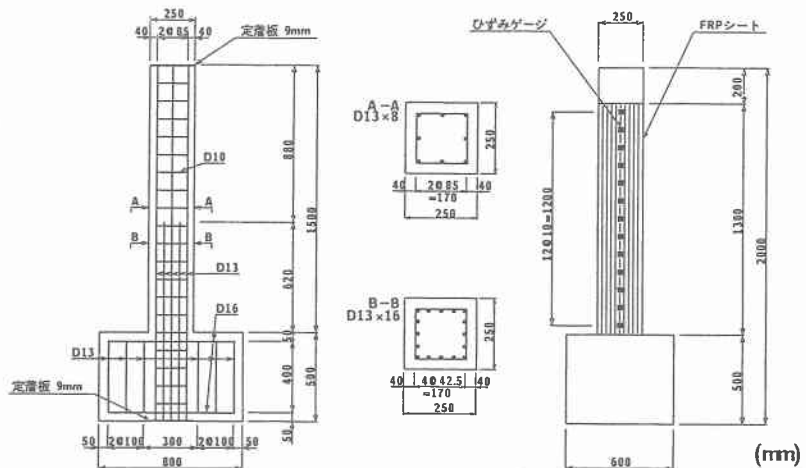


図-1 試験体の形状寸法および配筋とひずみゲージ取り付け位置

ートは柱の正負加力方向の面にのみ貼り付け、シートの種類と目付け量に着目して検討を行った。表-1 に試験体の一覧を、表-2 に FRP シートの力学的特性を示す。なお、コンクリートの表面は FRP シートの付着に有効であるチップング処理(処理深さ 2.1 mm)を施している。コンクリートの実験時の材令は 245 日、平均圧縮強度は 24.91 MPa、ポアソン比は 0.21 である。主筋は D13 (SD345)、スターラップは D10 (SD295A) を 10 cm ピッチで配筋した。ひずみゲージは FRP シートの中心線上に 10 cm 間隔で 13 点、両

Lateral Loading Test of Flexurally Stiffened RC Column Models with FRP Sheet  
 by Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Yusuke KURIHASHI and Sigeo ARAI

面で計 26 点貼り付けた。

2.2 実験方法

実験は試験体に死荷重を模擬した0.98MPaの軸力を作用させた状態で、ジャッキ式繰り返し載荷装置を用いて行った。載荷荷重はロードセルで計測し、水平変位はレーザ式変位計で測定した。なお、柱基部には変位計を取り付け、柱の浮き上がりを測定したが、浮き上がりは見られず完全な固定状態に近いことを確認している。水平交番載荷の方法は、鉄筋にひずみゲージを取り付けていないため段落としを有する試験体の主筋降伏時の荷重を断面分割法により算定し、今回の実験と同一の試験体を用いて別途に単調載荷実験を行ない、前述した計算上の降伏荷重 ( $P_y$ ) に達した時の各試験体の変位を降伏変位 ( $\delta_y$ ) と定義し、 $\delta_y$ 、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$  と振幅を漸増させて繰り返し加振する方法とした。繰り返し回数は各段階ごとに 3 回とし、各振幅正載荷時 1 回目の荷重が  $P_y$  を下回るまで交番載荷を行った。

3.実験結果および考察

3.1 荷重－変位関係

表一3に実験結果を取りまとめた。最大荷重  $P_{max}$  は、段落とし部の曲げ耐力と基部の曲げ耐力がほぼ同様であることから、段落とし部を FRP シートで曲げ補強しても顕著には増大していない。また、終局時の変位は無補強で  $5\delta_y$ 、補強したもので  $5\sim 8\delta_y$  であった。図一3に各試験体の荷重－変位関係を示す。図より、FRPシートで段落とし部の曲げ補強した試験体は無補強の試験体と比べて変形性能が向上していることがわかる。図一4に全試験体に関する荷重－変位関係の包絡線を示す。包絡線は各載荷振幅時、正負 1 回目の荷重－変位関係を用いて示した。図より、包絡線は曲げ補強した試験体の方が大きく、シートの種類が同じ場合には目付け量の多い試験体の方が大きいことがわかる。

3.2 破壊状況

図一5に無補強の試験体 N の終局状態におけるひびわれ図と曲げ補強をした試験体の一例として A200 の終局状態におけるひびわれ図を示す。N は  $1\delta_y$  では基部から柱全体にわたってひびわれが発生する。 $2\delta_y$  で段落とし部にひびわれが集中的に発生する。 $3\delta_y$  では段落とし部において斜めひびわれが進展し、 $4\delta_y$  で段落とし部でのコンクリート圧壊による断面欠損が進行する。 $5\delta_y$  目で段落とし部の鉄筋が座屈して

表一 1 試験体の一覧

| 試験体名 | 補強材  | 目付け量<br>( $\text{g}/\text{m}^2$ ) |
|------|------|-----------------------------------|
| N    | 無補強  | -                                 |
| A200 | アラミド | 200                               |
| A415 |      | 415                               |
| C145 | カーボン | 145                               |
| C300 |      | 300                               |

表一 2 FRPシートの力学的性質

| 補強材  | 目付け量<br>( $\text{g}/\text{m}^2$ ) | 厚さ<br>(mm) | 弾性係数<br>(GPa) | 引張強度<br>(GPa) | 破断歪<br>( $\mu$ ) |
|------|-----------------------------------|------------|---------------|---------------|------------------|
| アラミド | 200                               | 0.138      | 126.51        | 2.48          | 19,600           |
|      | 415                               | 0.286      |               |               |                  |
| カーボン | 145                               | 0.081      | 230.46        | 4.07          | 17,700           |
|      | 300                               | 0.167      |               |               |                  |

表一 3 実験結果

| 試験体名 | 変位 (cm)    |            | 荷重 (KN)    |      |      |            |      |      |           | 終局時         |
|------|------------|------------|------------|------|------|------------|------|------|-----------|-------------|
|      | 降伏変位       | 終局変位       | 降伏荷重 $P_y$ |      |      | 終局荷重 $P_u$ |      |      | 最大荷重      |             |
|      | $\delta_y$ | $\delta_u$ | 正          | 負    | 平均   | 正          | 負    | 平均   | $P_{max}$ |             |
| N    | 2.04       | 11.15      | 32.3       | 34.4 | 33.4 | 21.6       | 22.8 | 22.2 | 42.8      | $5\delta_y$ |
| A200 | 2.34       | 13.14      | 36.1       | 30.8 | 34.6 | 30.4       | 28.2 | 29.3 | 43.9      | $5\delta_y$ |
| A415 | 1.42       | 13.17      | 22.8       | 27.7 | 25.3 | 14.4       | 25.4 | 19.9 | 47.7      | $8\delta_y$ |
| C145 | 2.15       | 14.04      | 36.7       | 35.7 | 36.2 | 23.7       | 21.9 | 22.8 | 45.6      | $6\delta_y$ |
| C300 | 1.60       | 12.85      | 29.5       | 27.8 | 28.7 | 23.5       | 23.9 | 23.7 | 45.0      | $7\delta_y$ |

終局状態に至った。なお、基部では断面欠損は見られない。一方、A200 については  $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$  では柱全体にひびわれが入り、 $3\delta_y$  で段落とし部でのひびわれが進行し、基部には斜め  $45^\circ$  の方向にひびわれが入る。 $4\delta_y$  では基部のシートが鉄筋のかぶり厚程度のコンクリートを付着させたままめくれ始め、その部分から柱中央部に向かって破壊が進行していく。 $5\delta_y$  ではシートが基部から  $20 \sim 25$  cm 位置までめくれ、断面欠損がさらに進んで鉄筋が座屈し、終局状態となった。全体的に見てひびわれの本数は無補強よりも A200 の方が多い。

以上より、無補強の試験体では段落とし部の断面欠損により耐力が低下して終局状態となるのに対し、曲げ補強した試験体は基部での断面欠損により耐力が低下して終局状態に至ることがわかる。

### 3.3 変位分布

図-6に各試験体の各載荷振幅時、正載荷 1 回目における柱高さ方向の変位分布を示した。図より N は  $2\delta_y$  目から段落とし部を起点として変形し始め、段落としよりも上部でのみ振幅している。これに対して、曲げ補強を行った試験体は振幅が小さいときにはなだらかな変位分布を示すが、振幅が増加するにつれて高さ 40 cm の位置で曲率に変化し、それよりも上部では曲率が一定で変形している。ただし、この傾向は A415 では見られない。これは振幅が大きくなるにつれて基部での断面欠損が進むが上部では大きな損傷が生じていないためと考えられる。すなわち、段落とし部を FRP シートで曲げ補強することで柱の変形モードがなだらかなり段落とし部での破壊を防ぐことができるが、一方で基部での断面欠損による破壊を引き起こす可能性がある。

### 3.4 FRP シートのひずみ分布性状

図-7に曲げ補強した試験体のシートのひずみ分布の一例として、C145の各振幅の正載荷時 1 回目におけるひずみ分布性状を示す。まず  $1\delta_y$  では高さ 25 cm と段落とし部近傍 (高さ 65 cm) でひずみが発生し始める。この時基部から柱全体にかけて微小なひびわれが発生している。 $2\delta_y$  ではシートのひずみが段落とし部から柱の上下方向に広がり、段落とし部周辺にひびわれが多数発生している。なお、実験では  $2\delta_y$  正載荷 1 回目で最大荷重となった。

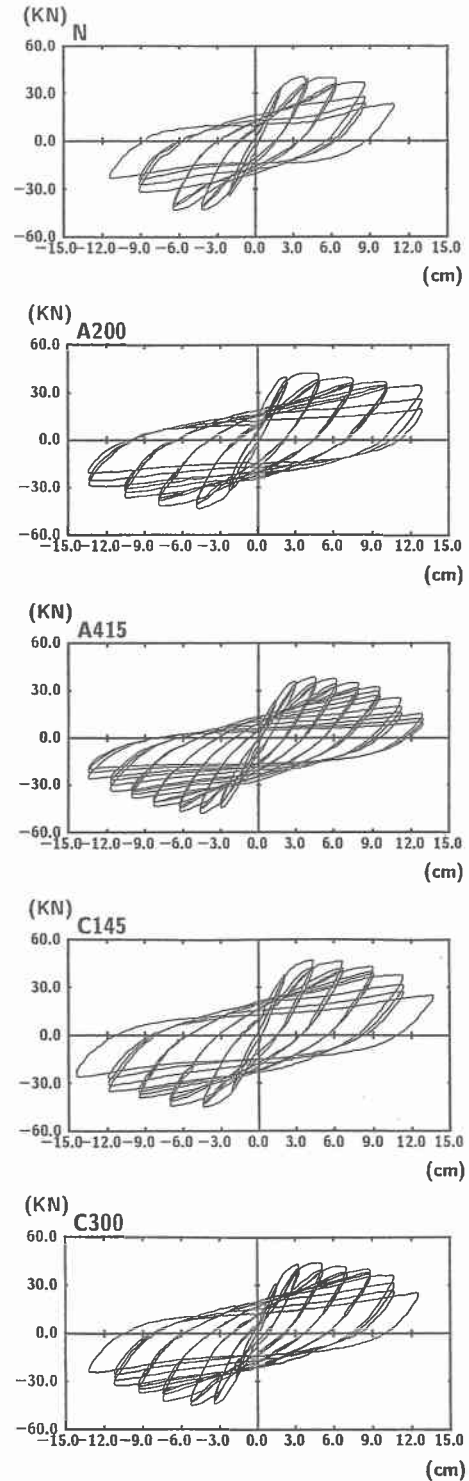


図-3 荷重-変位関係

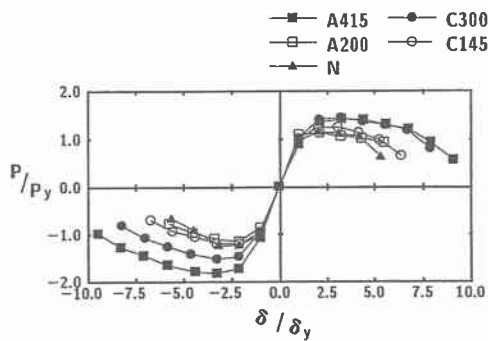


図-4 荷重-変位包絡線

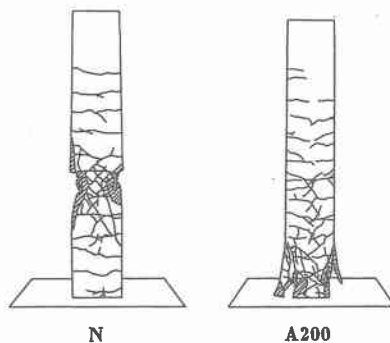


図-5 終局破壊状況の一例

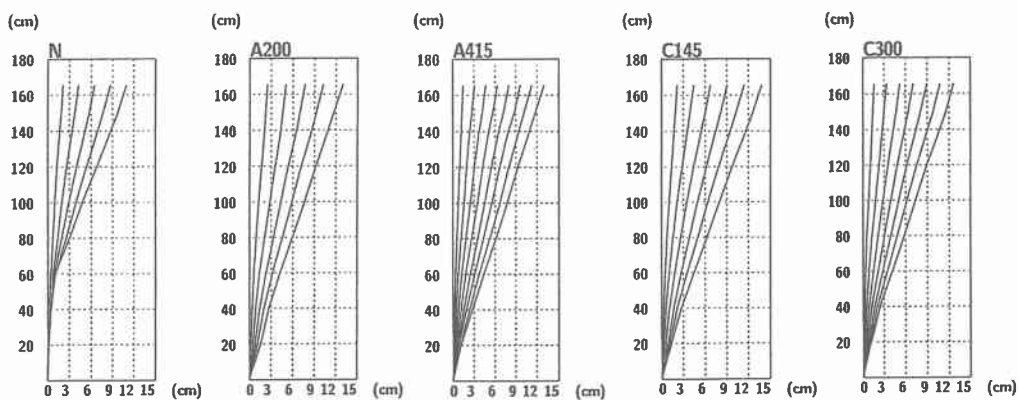


図-6 変位分布

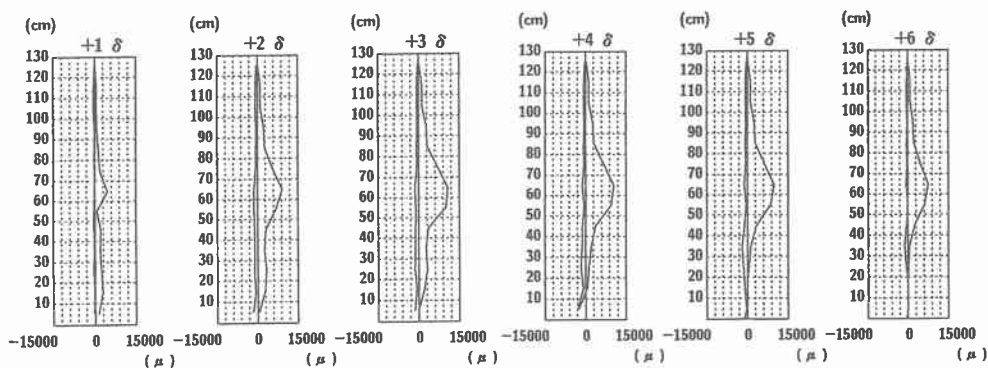


図-7 ひずみ分布 (C145)

$3\delta_y$  ではひずみ分布の性状は変わらず、値のみが大きくなっている。この時、基部にはひびわれが斜め  $45^\circ$  の方向に柱を交差する形で発生する。 $4\delta_y$  に入ってから基部でのシートのひずみが少しずつ減少している。この時、基部ではシートが鉄筋のかぶり厚程のコンクリートを付着させたままめくれ始める。 $5\delta_y$  で全体的にひずみが小さくなり、 $6\delta_y$  でひずみはさらに小さくなり基部のひずみはほとんど 0 となる。この間、

基部では断面欠損による破壊が進行し終局状態に至った。なお、シートの種類、目付け量の違いによるひずみ分布性状の違いは見られなかった。

#### 4. 靱性能の検討

図-8に残留変位率を示す。残留変位率は各載荷振幅の正載荷時 1 回目における除荷時の残留変位を  $\delta_u$  で除した値である。これより、A200 を除いて曲げ補強した試験体の方が無補強の N よりも残留変位率が小さいことがわかる。両者の残留変位率の差は、載荷振幅が大きくなるほど大きくなり、N と A415 を振幅  $5\delta_y$  で比較すると、N の残留変位率は A415 の 2 倍程度に相当している。なお、同一の FRP シートの場合、目付け量が多いシートを用いた方が残留変位率を低減できることがわかる。また、終局時の残留変位率は全試験体で約 70 ～ 85 % である。

図-9に等価剛性を示す。等価剛性は各載荷振幅の正負 1 回目の荷重-変位関係の値を用いて算出した。これより、等価剛性は全試験体について載荷振幅の増加に対応して指数関数的に減少していることがわかる。目付け量が少ない場合は、シートの種類に関わらず無補強の試験体と同等な等価剛性を示している。一方、目付け量が多い場合、特に A415 では無補強試験体よりも等価剛性は大きく  $5\delta/\delta_y$  では 2 倍程度の等価剛性を保持している。このように、曲げ補強することで柱の初期剛性が高まり、同時に各載荷振幅における剛性の低下を抑えることができる。なお、終局時の等価剛性は曲げ補強の有無に関わらずほぼ同等である。

図-10に等価粘性減衰定数を示す。等価粘性減衰定数とは各載荷振幅の正負 1 回あたりのエネルギー吸収能力（ループで囲まれた面積）を載荷時に部材に蓄積されるエネルギーで除したものであり、部材の靱性を評価する指標として用いられる。全試験体ともに減衰定数は載荷振幅の増加とともにほぼ線形に増加している。N は  $\delta_y$  で約 10 %、 $\delta_u$  で約 33 % であり、曲げ補強した試験体は  $\delta_y$  で約 8 %、 $\delta_u$  で約 33 % である。ここで 1 載荷振幅当たりの減衰定数で 3.5 %、C145 で 5.2 %、C300 で 3.9 % となる。このように、貼り付けるシートの目付け量によって減衰定

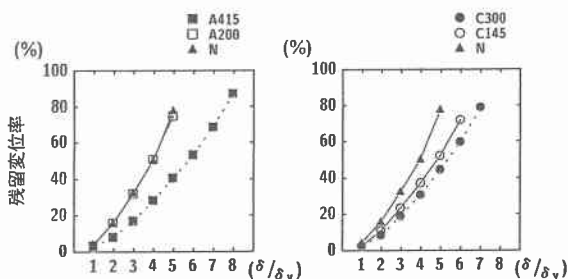


図-8 残留変位率

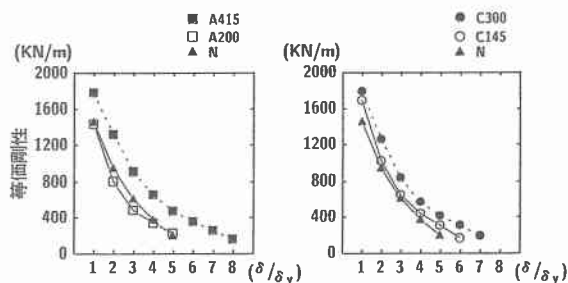


図-9 等価剛性

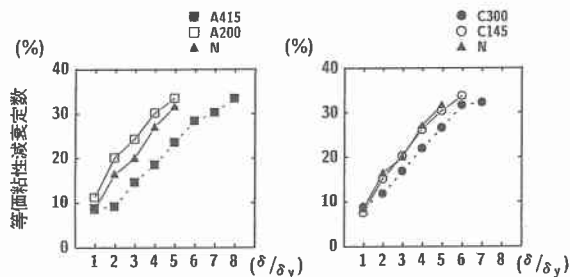


図-10 等価粘性減衰定数

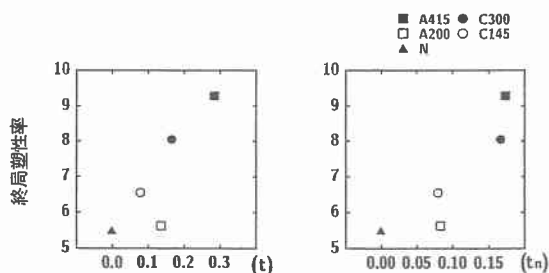


図-11 終局塑性率

数の増加量に差があることがわかる。

図-11に終局塑性率とシートの厚さ $t$ 、および換算シート厚さ $t_n$ との関係を示す。終局塑性率は各試験体の $\delta_u$ を $\delta_y$ で除した値であり、換算シート厚さは鋼材との弾性係数比を考慮した厚さである。A200において終局塑性率が小さいものの、シートの目付け量(厚み)が増加するにつれて終局塑性率が大きくなることわかる。なお、無補強の終局塑性率は5.5程度で、A200を除いて段落としを曲げ補強した試験体では6～9程度を示し、段落としを曲げ補強して基部の破壊に移行させることで大幅に終局塑性率を増加できることがわかる。

図-12に累積履歴吸収エネルギーとシートの厚さおよび換算シート厚さの関係を示す。累積履歴吸収エネルギーとは載荷振幅正負1回あたりのエネルギー吸収能力を各載荷振幅ごとに終局時まで累積したものである。これより、曲げ補強に用いたシートの厚さが増加するに従って吸収エネルギー量が増加していくことがわかる。また換算シート厚さがほぼ同程度の場合は、シートの材料種別に関わらず吸収エネルギーには大差ないことがわかる。

以上のことより、シートによる段落としの曲げ補強はエネルギー吸収能力の向上、剛性低下の抑制、終局塑性率の向上など、段落としを有するRC柱の靱性能を改善する効果があると考えられる。

## 5. まとめ

本実験では段落としを有するRC柱をFRPシートを用いて曲げ補強した場合に、シートの種類や目付け量が耐荷性状や靱性能に与える影響を検討した。本実験の範囲内で明らかになったことを以下に要約する。

- (1) 無補強の場合は段落とし部で破壊が生じるが、段落とし部をFRPシートで曲げ補強することにより基部での破壊に移行させることができる。
- (2) 本試験体のように段落とし部の曲げ耐力と基部の曲げ耐力に大差がない場合でも、段落とし部をシート補強することによって靱性能を大幅に向上できる。
- (3) シートの種類が靱性能に与える影響は少ないが、目付け量の影響は顕著であり、目付け量が多いほど(シートが厚いほど)靱性能は向上する。

今後は基部の曲げ耐力が段落とし部よりもかなり大きな場合や、シートを基部で横拘束した場合などについてその影響を検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 三上浩、佐藤昌志、谷本俊充、松岡健一：アラムドテープを巻き付けたRC橋脚模型の靱性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、NO.18、Vol.2、pp.1457 - 1462、1996
- 2) 増川 淳二、秋山 暉、斎藤 宗、内藤 静男：既存RC橋脚の炭素繊維シートによる曲げ及びせん断補強、コンクリート工学年次論文報告集、No2、Vol.18、pp.89 - 94、1996

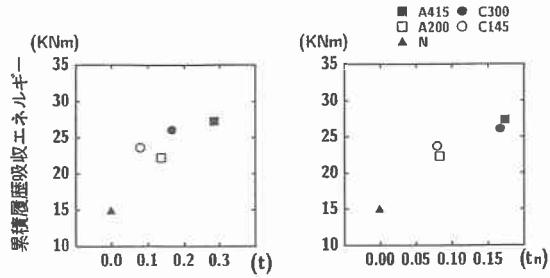


図-12 累積履歴吸収エネルギー