

論文

[2167] FRPで被覆した長柱アンボンドブレースの弾塑性変形状

正会員○高橋春蘭（スペース工房21）

正会員 安藤信好（武蔵工業大学建築学科）

1. 序

筆者らは、ここ数年鉄筋コンクリート（以下R.C.と称す）で被覆したアンボンドブレース（R.C.とブレース間の付着は絶縁としている）について研究を行って来た。昨年度は、その一環として地震力を対象にR.C.被覆部のひび割れ後の耐力低下と靱性の改善を図るための新アンボンドブレース材を開発し、この材についての基礎的な実験及び検証から実設計への展開を試みて来た[1]。

本文は、昨年度に引き続いての研究論文である。材の構成は基本的には昨年と同じく、芯ブレースの鉄骨をR.C.で被覆し、更にその外周をFRPで補強する方法である。芯ブレースには一般性のあるフラットバーを用い、かつ細長比の大きい部材を対象としている。

その研究目的は、細長比、主筋比及びFRPの補強長さの違いによるアンボンドブレース材の座屈荷重（耐力）と靱性についての考察である。

2. 試験体及び試験方法

2.1. 試験体

試験体は、表-1に示すように細長比（芯ブレースに対する値でR.C.被覆長を座屈長とした） $\lambda$ が157~266の範囲で、かつFRPの補強長さを $L/2$ としたRA, RB, RCシリーズと補強長さをLとしたRC-Aの4シリーズとし、更に主筋比を変えた計12体とした。

FRPは、RC被覆材の外側にCM（チョップストランドマット）を敷き、その上にアラロイ（一方向強化材）と樹脂含浸したガラスクロス巻き、トップコート（樹脂コーティング）仕上げとした。但し、繊維方向は材軸と一致させている。またこの厚さは計6mm程である。絶縁材は、厚さ100 $\mu$ のポリエチレンビニール（PV）を4層

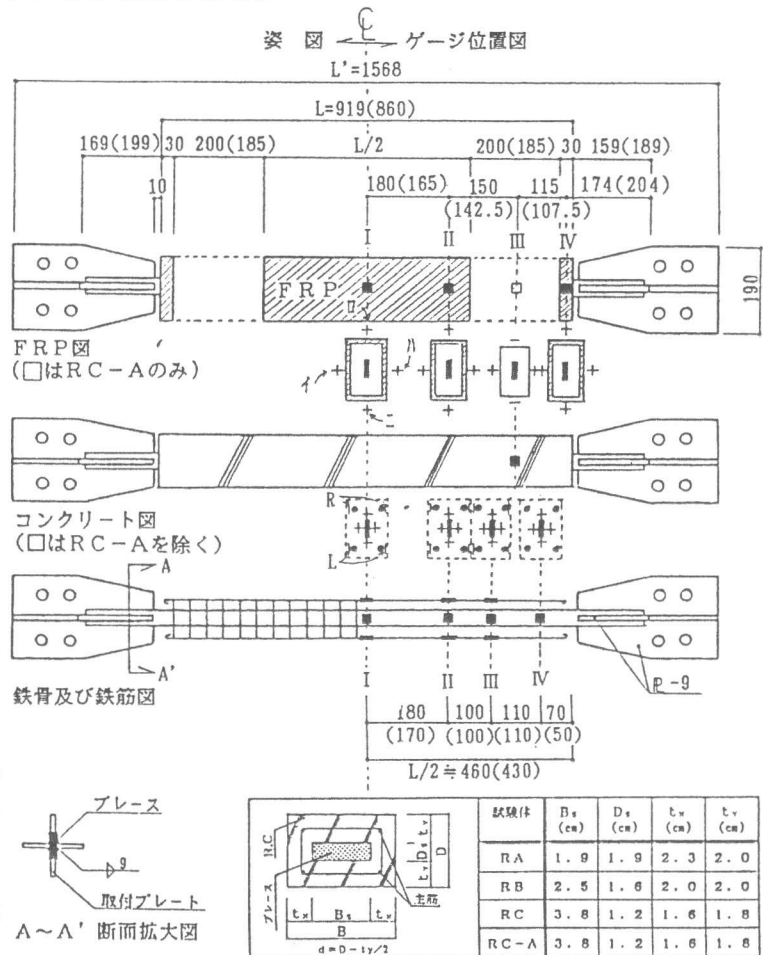


図-1 試験体及びゲージ位置図

表-1 試験体諸元

| 試験体   | 材長<br>L (cm) | 細長比<br>λ     | FRP長 | 全断面積<br>B × D (cm <sup>2</sup> ) | 比<br>E <sub>s</sub> I <sub>s</sub> | 主筋             | 主筋比<br>P <sub>s</sub> (%) | 引張鉄筋比<br>P <sub>t</sub> (%) | 帯筋比<br>P <sub>w</sub> (%) |
|-------|--------------|--------------|------|----------------------------------|------------------------------------|----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| RA-1  | 86.0         | 157<br>(286) | L/2  | 6.5 × 5.9                        | 15.8                               | 4-2.0φ         | 0.33                      | 0.19                        | 0.21                      |
| -2    |              |              |      |                                  | 16.6                               | 4-2.0φ, 2-2.6φ | 0.60                      | 0.36                        |                           |
| -3    |              |              |      |                                  | 18.5                               | 6-3.2φ         | 1.26                      | 0.74                        |                           |
| RB-1  | 91.9         | 200<br>(339) | L/2  | 6.5 × 5.6                        | 17.7                               | 4-2.0φ         | 0.35                      | 0.21                        | 0.21                      |
| -2    |              |              |      |                                  | 18.4                               | 4-2.6φ         | 0.68                      | 0.35                        |                           |
| -3    |              |              |      |                                  | 20.2                               | 8-2.6φ         | 1.17                      | 0.70                        |                           |
| RC-1  | 91.9         | 266<br>(453) | L    | 7.0 × 4.8                        | 16.6                               | 4-2.0φ         | 0.37                      | 0.23                        | 0.22                      |
| -2    |              |              |      |                                  | 17.3                               | 4-2.6φ         | 0.63                      | 0.39                        |                           |
| -3    |              |              |      |                                  | 18.9                               | 8-2.6φ         | 1.26                      | 0.78                        |                           |
| RC-0A | 91.9         | 266<br>(453) | L    | 7.0 × 4.8                        | 11.7                               | -              | -                         | -                           | 0.22                      |
| -1A   |              |              |      |                                  | 12.7                               | 4-2.0φ         | 0.37                      | 0.28                        |                           |
| -2A   |              |              |      |                                  | 13.5                               | 4-2.6φ         | 0.63                      | 0.39                        |                           |

1. 細長比λはブレースに対する値
2. ( )は、実長L'の場合の値を示す。
3.  $E_p I_p = (E_c I_c + E_r I_r) / E_s I_s$  但し  $E_s, E_c, E_r, I_s, I_c, I_r$  は、それぞれ鉄筋、コンクリート、鉄骨のヤング係数、及び断面二次モーメントを示す。
4. 主筋比:  $P_s = \sum a_r / B \times D$ 、引張鉄筋比:  $P_t = \sum a_t / B \times D$  但し  $a_r, a_t$ : 引張側鉄筋量、 $d = D - t_y / 2$

に重ね計400μ厚とした。また昨年度[1]の結果より、材端でのひび割れを防ぐ目的から端部もFRP補強した(図-1参照)。表-2は鉄筋、コンクリート等の材料の機械的性質を示す。

### 2-2. 試験方法

フレーム内のブレースを対象とする事から、4節点をピン支持とする架台に試験体をはめ込み、正負の繰り返し加力を行った(図-2参照)。その加力サイクルは、変形制御方式とし、 $1\delta y, 3\delta y, 5\delta y, 7\delta y, 10\delta y$  ( $\delta y$ : 芯ブレースの降伏時の歪 $\epsilon_y$ に材長Lを乗じたもの)としている。変位は材軸及び面外(材に対する)の2方向での値を高感度変位計で、また応力はポリエステル及び箔歪ゲージを用いて測定している。図-1に測定箇所を示す。

なお、材軸方向の変位は、加力台の容量より最終変位  $15\delta y$  で実験を終了させた。

### 3. 解析

解析理論は、既論文[1],[3]及びこれを補足した下式によって求めるものでポテンシャルエネルギーの停留式に基く理論である。数値解は、FEM法を用い、節点内力と外力が釣り合う迄のIteration法、強制変位を段階的に変化させる Step by step法を組合せ求める方法による。停留条件  $\delta \Pi = 0$  より最終的に次式となる。

表-2 材料の機械的性質

|        |                           | 降伏強度: $\sigma_y$<br>(t/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度: $\sigma_u$<br>(t/cm <sup>2</sup> ) | ヤング率<br>E: (*1) |
|--------|---------------------------|--|--|-----------------|
| 鉄線     | 2.0φ                      | 2.25                                     | 3.09                                     | —               |
|        | 2.6φ                      | 2.65                                     | 3.40                                     | —               |
|        | 3.2φ                      | 2.22                                     | 3.23                                     | —               |
| 鉄骨     | RA(*2)                    | 2.76                                     | 4.28                                     | 1.97            |
|        | RB                        | 2.96                                     | 4.41                                     | 1.91            |
|        | RC                        | 2.98                                     | 4.58                                     | 2.14            |
|        | RC-A                      | 2.91                                     | 4.30                                     | 1.95            |
| F      | 破断強度 (t/cm <sup>2</sup> ) |  | —  |                 |
| R      | 繊維並行方向                    | 1.55                                     | 0.25                                     |                 |
| P      | 繊維直交方向                    | 0.80                                     | 0.14                                     |                 |
| コンクリート | スランプ (cm)                 | 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )               |  | —               |
|        | RA, RB                    | 22.8                                     | 345                                      | 0.29            |
|        | RC, RC-A                  | 23.0                                     | 332                                      | 0.29            |

(\*1) 単位:  $\times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>。

(\*2) RA, RB, RC、及びRC-Aは、各試験体シリーズを示す。

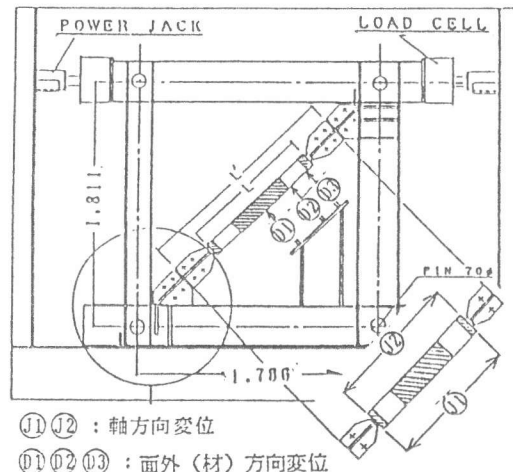


図-2 加力装置図

$$[K] \Delta u + [F_{in}] - [F_{ex}] = 0$$

$K$  : 全構造体の剛性マトリックス

$F_{in}$  : 全構造体の内部応力に釣り合うために必要な節点内力ベクトル

$F_{ex}$  : 全節点外力ベクトル

$\Delta u$  : 全構造体の変位増分

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4-1. 破壊性状について

FRPの補強長さを $L/2$ としたRA, RB, RCシリーズとL補強のRC-Aでの最終破壊形の違いは、前者は、FRPの取付け端部(図-1位置II~III間、図-3参照)におけるR.C.に急激なひび割れが発生、そのひび割れが大きく拡大し急激な耐力低下を生じている。後者は、材軸端における鉄骨ブレースのFRPへの「めり込み」である。又そこでのコンクリートに対しては、材軸方向の割れが発生し除々に進展しているものの耐力低下はみられない。また主筋比 $P_s$ の違いによる破壊性状の特徴を挙げると、 $L/2$ 補強のシリーズでは、主筋比( $P_s = 0.33 \sim 1.26\%$ )の差による最終破壊形に差はないが、いずれも位置IIとIII間での曲げ破壊となっており、 $P_s$ の小さい程早期に曲げひび割れが発生している。具体的には、RA-1( $P_s = 0.33\%$ )は3サイクル $2.5\delta y$ で曲げひび割れが発生し、以降耐力が急減している。またRA-2( $P_s = 0.60\%$ )は、5サイクル $2.5\delta y$ で曲げひび割れが発生している。RCシリーズでは、主筋比の差による曲げひび割れの発生時には特に差はなく、約 $1\delta y$ で曲げひび割れが発生している。一方、L補強のRC-Aシリーズでは、主筋比の差による破壊形の違いはなく、約 $7\delta y$ で「めり込み」現象が始まり最終 $15\delta y$ までの状態が続き、他の破壊現象はみられず非常に安定した挙動となっている。ここで、昨年度[1]の結果を踏まえて、アンボンドブレースにおける破壊性状を比較してみると、 $L/2$ 補強による細長比が小さい場合の破壊形は、拘束に必要な剛性比 $E_R I_R$ が小さくて良いので、ひび割れの発生とその後の加力によるひび割れとの関係は、ひび割れが除々に進展、拡大して、その後曲げ破壊に至る。しかし、今回の実験シリーズのように細長比が大きい場合には、必要剛性比が大きくなるため、上述したように瞬間的な曲げ破壊となる違いがみられた。

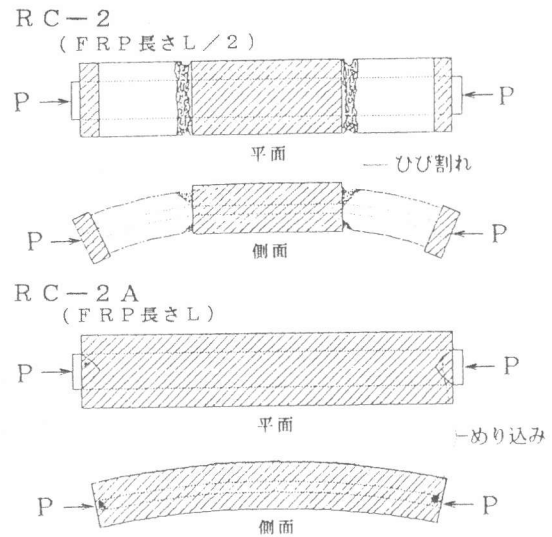
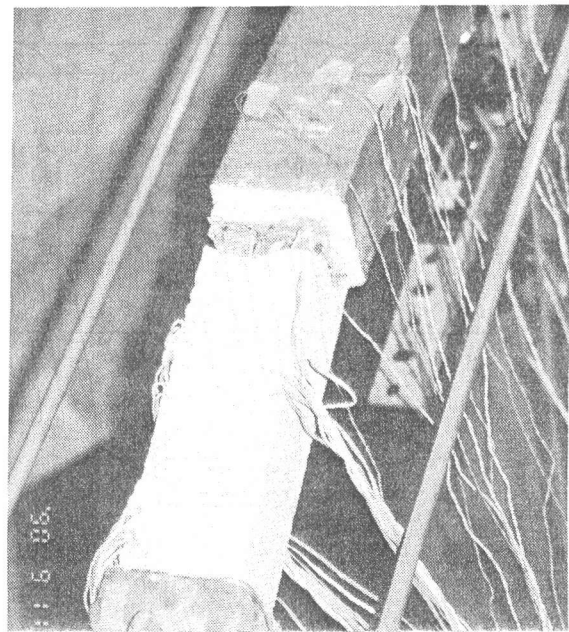


図-3 破壊性状図



曲げ破壊状況

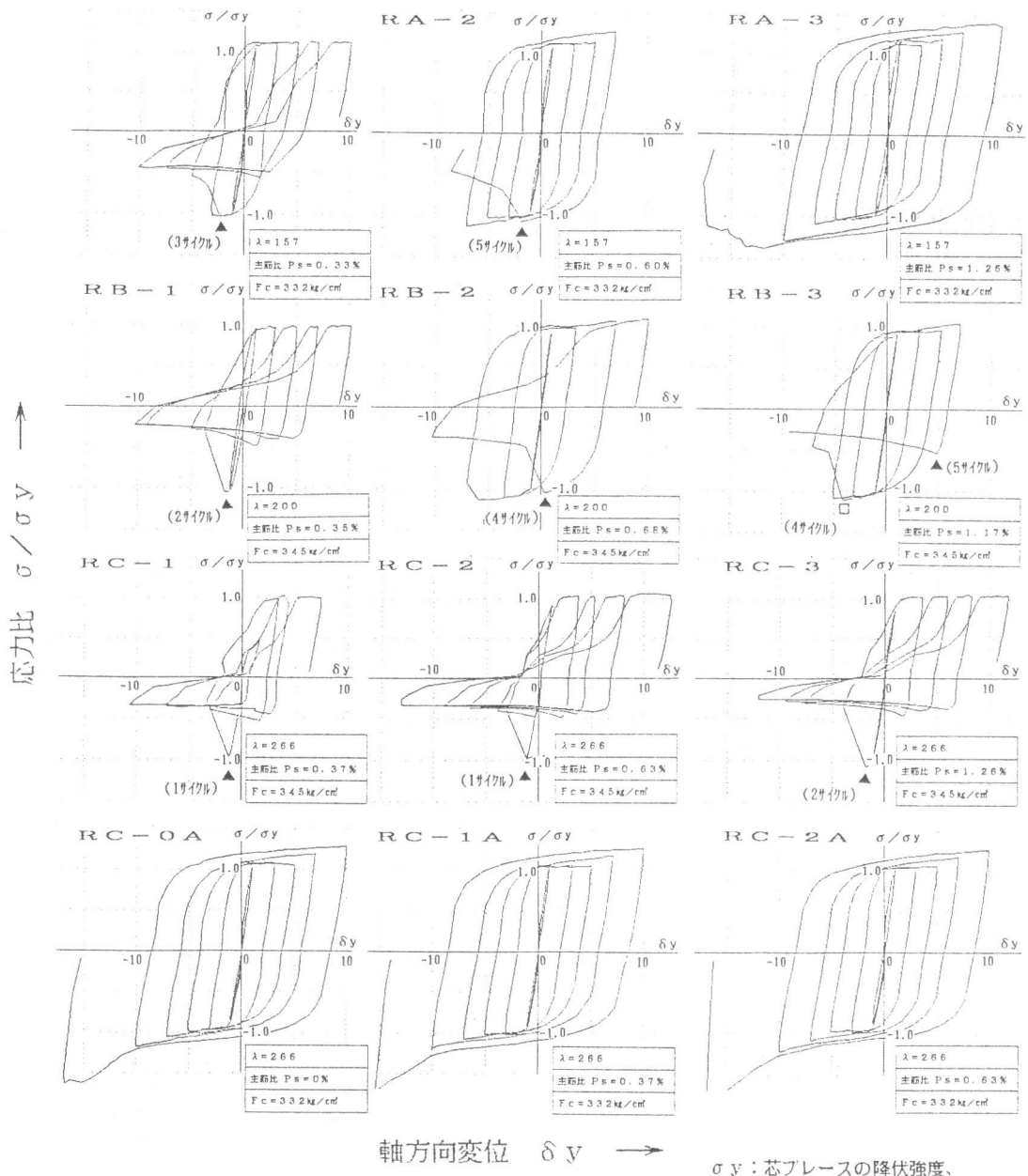


図-4  $\sigma / \sigma_y - \delta y$  曲線

#### 4-2. 軸方向変位

図-4に各試験体の応力比 $\sigma / \sigma_y$ と変位 $\delta y$ の関係を示す。L/2とL補強シリーズの間には明確な相違をみることができる。

細長比 $\lambda$ が約200以下であるRA, RBシリーズ(L/2補強)において、引張鉄筋比 $P_t$ が約0.2%と少ない試験体RA-1, RB-1は、軸方向変位が約1~3 $\delta y$ 間で不安定(座屈)となる。この為、以降の繰り返し荷重加力における荷重と変形ではエネルギーの吸収能力(靱性)が急減し、鉄筋の効果の小さい事を示している。しかし $P_t$ を0.35, 0.70%と増したRA-2, 3, RB-2, 3、特にRA-2, 3( $\lambda \approx 160$ )の試験体は、靱性も非常に良く鉄筋量の効果も十分であることが判明した。RB-2, 3( $\lambda = 200$ )は、RA-2, 3より靱性は多少劣るが、不安定となる軸変位は約7 $\delta y$ とよい結果となっている。なお、RB-3の靱性(図-4. 口印)がRB-2と比較すると主筋比が多いにもかかわらず劣っているのは試験体製作上の不手際(リード線の束ねすぎ)によるものと思われる。

一方、細長比の大きいRCシリーズ ( $\lambda \approx 270, L/2$  補強) においては、主筋比 ( $P_t \approx 0.23 \sim 0.78\%$ ) による影響は小さく軸方向変位  $1 \sim 2\delta y$  で不安定となる。その為、以降の加力下では、履歴ループの劣下が著しく実用上適切でない。しかし、FRPの補強長さをLとしたRC-Aシリーズは、主筋比による影響は小さく約  $15\delta y$  まで非常に安定した履歴特性を示しており、FRPの拘束効果を確認することができた。その結果、実用上必要な靱性を得るには、FRPの必要補強長さが細長比毎に異なることも判明した。

#### 4-3. 応力・歪について

図-5はFRPの補強長さの違いによる応力の相違 (加力段階 1サイクル:  $\sigma/\sigma_y \approx 0.75$ ) を示す。補強長さをL/2としたRC-2の特性として、剛性が急変し曲げ破壊となった近傍の位置IIとIIIの応力から次の事が明らかとなった。1サイクル目の圧縮時における応力比0.75の加力段階から、材の引張側と圧縮側の応力差が大きくなり以降の加力増大につれこの応力差が急増している。位置Iでは初期から応力比1近くまで、II及びIIIでの応力差に較べると小さく、また加力増大につれても応力差が急増することはなかった。

一方、RC-2Aでは位置II,IIIの応力差は、最終までRC-2より小さく、かつ位置Iでの応力差は、位置II,IIIでの応力差とあまり変わらない。図-6は、RC-2とRC-2Aの位置III (位置IIと比較して応力集中が大きい) での材軸方向の歪を示す。図-7は、同位置IIでの直交方向の歪を示す。これより剛性の急変する個所での曲げひび割れに伴って生ずるコンクリート

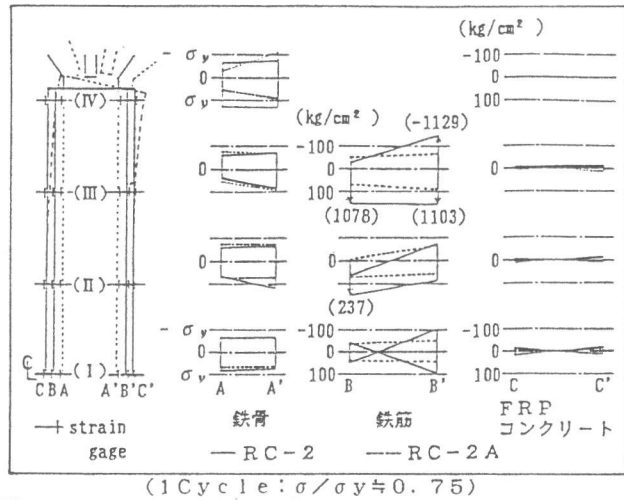


図-5 FRPの補強長さの違いによる応力の相違 (1 Cycle:  $\sigma/\sigma_y \approx 0.75$ )

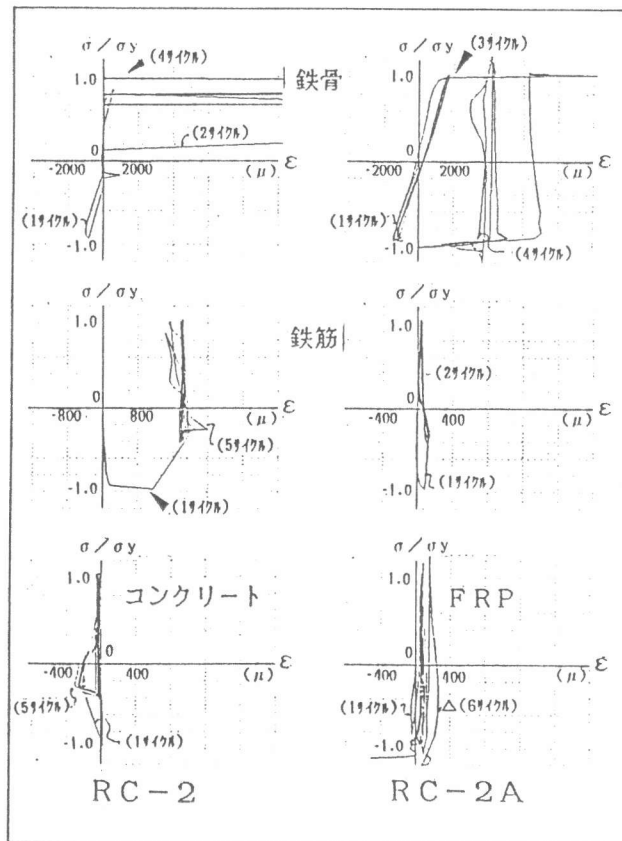


図-6  $\sigma/\sigma_y$ -軸方向歪曲線 (図-1, 位置III)

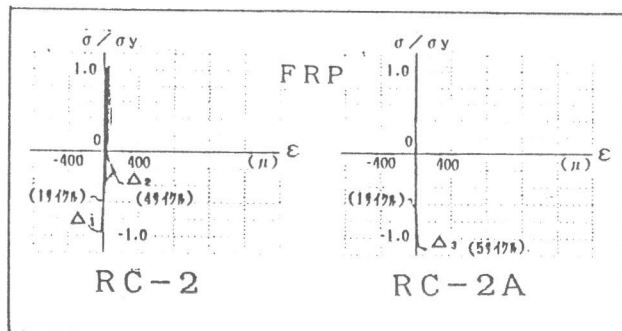


図-7  $\sigma/\sigma_y$ -周方向歪曲線 (図-1, 位置II)

の膨らみに対するFRPの拘束効果が、RC-2Aの場合より大きい事が判明した。

ここで、1サイクル目での降伏直前における位置IIでのFRPの材軸方向の応力を考察してみる。RAシリーズでは約 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 、RBシリーズで約 $11\text{kg}/\text{cm}^2$ 、RCシリーズで約 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ にすぎない。また材軸に直交する方向（周方向）の応力は、それぞれ約3, 2, 6 $\text{kg}/\text{cm}^2$ （図-7.△<sub>1</sub>印、解析値 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ ）と細長比の大きいほどその値は大きい傾向にある。RC-Aシリーズでは、同位置IIで材軸方向では約 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 、周方向では約 $3\text{kg}/\text{cm}^2$ である。

また、加力サイクルに関係なく、FRPにおける応力の最大値を比較してみる。FRPの補強長さの違いによるRC-2とRC-2Aで比較した場合、材軸方向で前者は約 $85\text{kg}/\text{cm}^2$ （位置II, 解析値 $44\text{kg}/\text{cm}^2$ ）、後者は約 $72\text{kg}/\text{cm}^2$ （位置III, 図-6.△印, 解析値 $65\text{kg}/\text{cm}^2$ ）であり、周方向で前者は約 $58\text{kg}/\text{cm}^2$ （位置II, 図-7.△<sub>2</sub>印, 解析値 $41\text{kg}/\text{cm}^2$ ）後者は約 $22\text{kg}/\text{cm}^2$ （位置II, 図-7.△<sub>3</sub>印, 解析値 $29\text{kg}/\text{cm}^2$ ）である。このようにL/2補強の場合、軸及び周方向共にFRPの応力値がL補強の場合でのそれぞれの値より大きいのは、R.C.部の曲げ破壊及び応力集中から来るコンクリートの膨らみに対するFRPの拘束効果のためである。しかしFRPの破壊強度と比較した場合これらの応力値は非常に小さい。

今回の実験は、長柱を対象として行った。その結果、L補強の場合は端部の「めり込み」現象であり、L/2補強の場合はR.C.部の曲げ破壊となり、FRPの使用範囲でのコンクリートに対する拘束効果が十分であった事が判明した。

また絶縁材PVの材質と厚さ $400\mu\text{m}$ は、アンボンド材の特性である軸力を伝達させないとする機能を満足した。

## 5. 結論

本実験での破壊状況、変位曲線、及び応力・歪分布より次のような結論が得られた。

- 1) 細長比  $\lambda$  が 160以下においては靱性上、FRPの補強長さを材長の1/2、かつ引張鉄筋比を約0.40%以上にすれば十分安定したループ性状を得ることができる。
- 2) 細長比  $\lambda$  が 200前後においては、補強長さを材長の1/2にし、かつ鉄筋比を約0.40%以上とすることにより、かなりの程度まで安定したループ性状が得られる。
- 3) 細長比  $\lambda$  が 270以上では、補強長さを材長Lにすれば鉄筋比に左右されることなく安定したループ性状が得られる。
- 4) FRPの拘束効果という観点からは、材厚6mmで芯ブレースの降伏以降の大変形に対し、曲げ破壊を十分拘束し安定した履歴特性を確保できたが、より経済的な材厚の検討は今後の課題である。

## < 参考文献 >

- [1] 高橋春蘭、安藤信好 「FRPで被覆したアンボンドブレースに関する実験的研究」  
コンクリート工学年次論文報告集 第12巻 第1号  
1990年
- [2] 安藤信好、高橋春蘭 「鉄筋コンクリートによりブレースを拘束したアンボンドブレースの基礎的研究」  
構造工学論文集 Vol. 36B 1990. 3
- [3] 藤本盛久、和田章他 「筋違付鉄骨ラーメンの弾塑性に関する研究」  
日本建築学会論文報告集 第209号 S48. 7