

V-12

AFRPロッドを用いたRCはりのせん断耐力の低下機構について

北海道大学工学部 和田 宜之  
北海道大学大学院 学生員 佐藤 靖彦  
北海道大学工学部 正員 上田 多門  
北海道大学工学部 正員 角田 與史雄

1. まえがき

鉄筋コンクリートはり同様、FRPロッドをはり部材の補強材料として用いる場合、曲げおよびせん断補強材としての利用が考えられ、それに関する数多くの研究がなされている。その結果として、FRPロッドを主筋として用いた場合、その曲げ耐力は、従来のはり理論により評価できることが確認されている。しかし、せん断耐力は、同じ補強面積を持つ鉄筋コンクリートはりに比べ低下し、その評価方法として、従来の耐力算定式にFRPロッドと鉄筋との弾性係数比を考慮することにより評価可能であるとされている<sup>1)</sup>。

また、せん断補強筋としてFRPロッドを用いた場合、そのせん断耐力を、FRPロッドの破断強度を用いたトラス理論値と比較した結果、実験値と計算値のばらつきが大きく、トラス理論をそのまま適用できないことが報告されている<sup>2)</sup>。今後、FRPロッドを用いたコンクリートはりの設計法を確立する上で、このせん断耐力低下機構の解明は、重要課題であると考えられる。そこで、本研究は主筋およびせん断補強筋に鉄筋およびAFRPロッドを用いたRCはりの静的曲げせん断載荷試験を行い、さらに、非線形有限要素解析結果との比較検討を行うことにより、せん断耐力の低下機構の解明を目的としたものである。

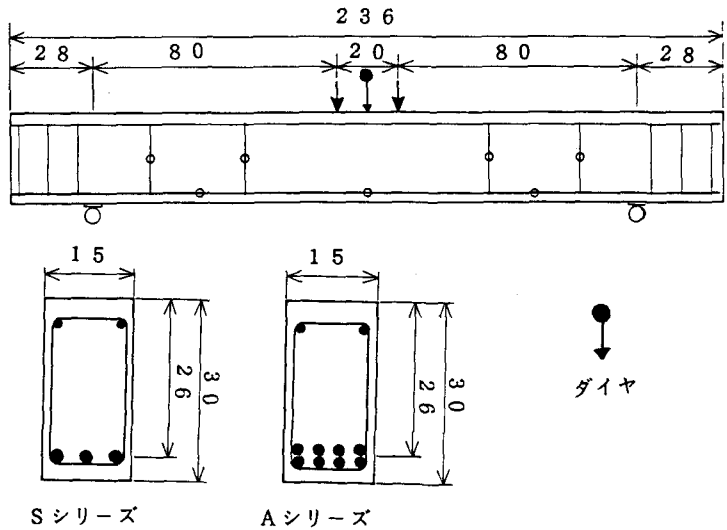


図-1 供試体寸法図

|      |       | 公称直径<br>(cm) | 公称断面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | 降伏強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破断強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|------|-------|--------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| AFRP | K196S | 1.38         | 1.50                        | —                              | 12800                          | 650000                         |
|      | φ6    | 0.60         | 0.28                        | —                              | 19000                          | 540000                         |
| 鉄筋   | D22   | 2.22         | 3.87                        | 3755                           | 5842                           | 2100000                        |
|      | D6    | 0.64         | 0.32                        | 3207                           | 4490                           | 2100000                        |

表-1 使用した鉄筋およびAFRPロッドの力学特性

## 2. 実験概要

### 2-1. 使用材料

使用した補強材は、AFRPと鉄筋の2種類である。主筋に用いたAFRPロッドは、アラミド繊維を組紐状に編み樹脂を含浸させたものであり、表面には珪砂が接着されている。また、スターラップとして用いたAFRPロッドはロッド表面にワインディング繊維を持つ異径ロッドである。鉄筋は主筋にはD22を、スターラップにはD6を用いた。それらの力学的特性値は、表-1に示す。コンクリートは早強ポルトランドセメントを用い、最大粗骨材寸法25mm、単位水量 $175\text{ kg/m}^3$ 、水セメント比45%、細骨材比45%とした。また、コンクリートの圧縮強度は表-3に示す。

|      | 主筋    | せん断補強筋   | 軸方向補強筋比 | せん断補強筋比 |
|------|-------|----------|---------|---------|
| WSST | D22   | D6       | 0.0298  | 0.0011  |
| WSAT | D22   | $\phi 6$ | 0.0298  | 0.0009  |
| WAST | K196S | D6       | 0.0308  | 0.0011  |
| WAAT | K196S | $\phi 6$ | 0.0308  | 0.0009  |

表-2 各実験供試体の使用した鉄筋およびAFRPロッドの組み合わせ

### 2-2. 供試体および載荷方法

本実験供試体は、主筋とスターラップが表-2に示す組み合わせにより作成されている。今回の実験では、補強材の弾性係数の違いが、はりの変形および耐力に与える影響を調べるために、各供試体の曲げおよびせん断補強筋量を等しくしている。供試体の形状および寸法は図-1に示す。全供試体とも、せん断スパン比を3.08、有効高さ(d)を26cmと一定としている。

載荷は、単純はりの中央部に二点集中荷重を、アムスラー型試験機により単調にけることにより行った。

測定は、主筋およびスターラップのひずみをワイヤーストレインゲージにより測定した。また、変位を載荷点および図-1に示す位置で測定した。

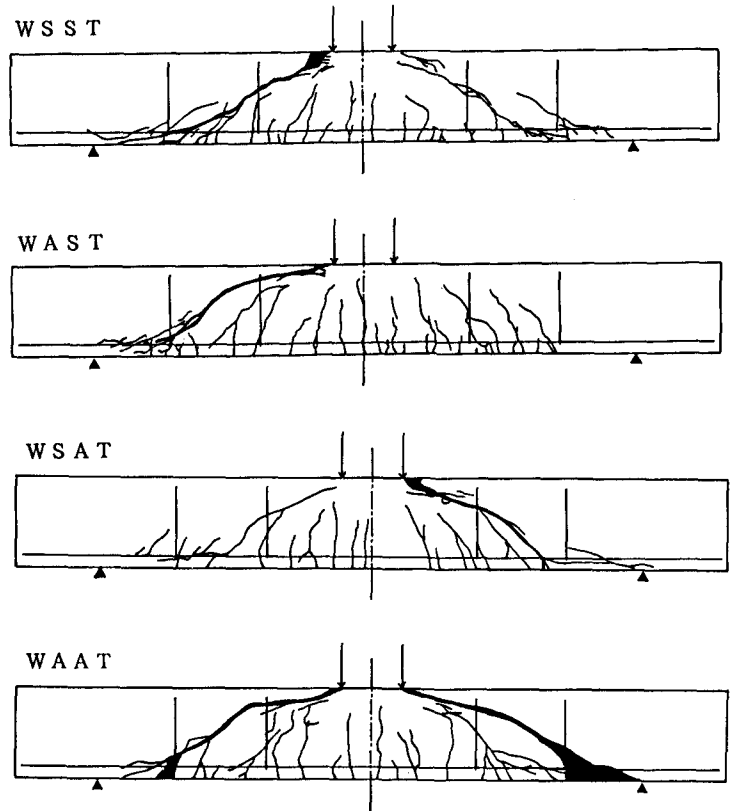


図-2 ひび割れ図

## 3. 実験結果

供試体の破壊形式は、主筋に鉄筋を用いたWSST、WSATと主筋がAFRPロッドであるWASTはせん断圧縮破壊であり、WAATは斜め引張破壊であった。各供試体の破壊後のひび割れ性状は図-2に示すとおりである。また、その破壊荷重は表-3に示す。

以下、WSST、WSATをSシリーズ、WAST、WAATをAシリーズと呼ことにする。

### 3-1. 曲げ性状について

一般に、FRPロッドで補強したRCはりの曲げ耐力は、従来のはり理論により評価できるとされている。

これは、はり断面内において平面保持の仮定を満足することが必要条件である。図-3は、破壊荷重の90%の荷重におけるWSSTとWAATのはり中央部のコンクリート圧縮域のひずみと主筋のひずみ、およびその荷重時の各実験供試体の最大曲げモーメント区間の曲げひび割れの進展高さを整理したものである。

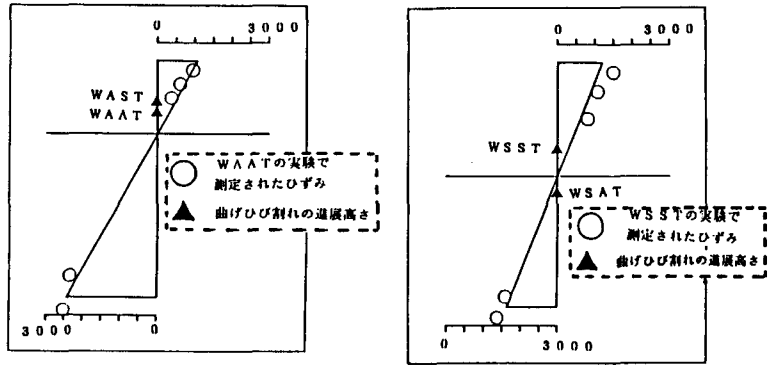


図-3 断面のひずみ分布図

図中の実線は、コンクリートの引張断面を無視して計算した弾性計算値を示すものである。主筋に鉄筋を用いたWSST同様、AFRPロッドを用いたWAATにおいても計算値と実験値はよい対応をしており、断面内のひずみ分布は線形性を保っている事が確認された。

また、これによりAシリーズの方がSシリーズよりも圧縮域が狭いことがわかる。

### 3-2. セン断ひび割れ

各実験供試体のセン断ひび割れの性状は、図-2に示されているようにSシリーズは支点から載荷点までほぼ直線的に進展しているひび割れが観察された。一方、Aシリーズでは支点からコンクリート圧縮域に膨らみながら載荷点まで進展しているひび割れが観察された。

また、SシリーズとAシリーズの差異は、はりを破壊に至らしめる支配的ひび割れが載荷点直下に進展した後、破壊するまでの耐荷力にも見られた。Sシリーズにおいては、図-4に示すセン断ひび割れの上縁からの距離XがWSSTは破壊荷重19.75tfに対して、18tfのとき3.2cm、WSATは破壊荷重17.30tfに対して、14tfのとき3.1cmであった。Aシリーズにおいては、WASTは破壊荷重10.86tfに対して、10tfのとき2.9cmであり、WAATはセン断ひび割れが急激にはりの上縁まで進展して斜め引張破壊に至った。また、図-5に示すようにセン断ひび割れの上縁からの距離Xと中立軸の上縁からの距離には明かな相関関係がある。これは、3-1で示したようにAFRPロッドを用いた供試体の中立軸の上縁からの距離が小さくなったようにセン断ひび割れの上縁からの距離Xも小さくなることを示している。よって、SシリーズとAシリーズの耐荷力の違いはセン断ひび割れの上縁からの距離Xの違いであり、Aシリーズの方がその距離が小さいのでSシリーズよりも耐荷力が弱い。

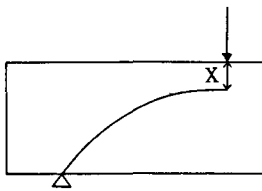


図-4 セン断ひび割れの上縁からの距離X

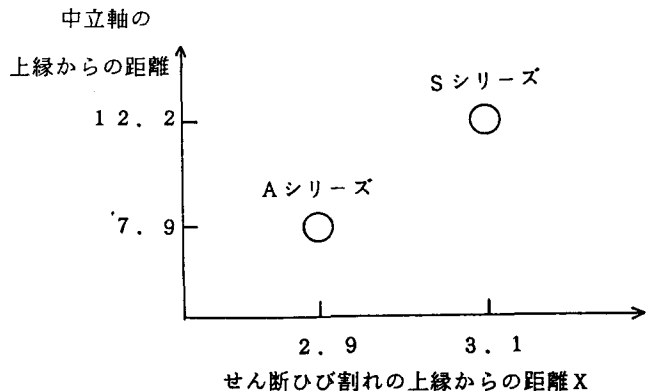


図-5 セン断ひび割れの上縁からの距離Xと中立軸の相関関係

#### 4. 実験結果とFEM解析との比較

##### 4-1. 荷重変位曲線について

各実験供試体の実験結果とFEM解析結果の荷重変位曲線を図-6に示す。図-6に示すように、実験結果とFEM解析結果は一致こそしていないが、実験値の傾向をとらえている。

WSSTとWAST、WSATとWAATの変位量をそれぞれ比較した場合は、AシリーズがSシリーズの約2倍となっており、主筋が鉄筋とAFRPロッドの場合の弾性係数の違いによる変形の差異を表している。

また、荷重が10tfのときの各実験供試体の変位の実験値とFEM解析値の比を調べてみると、WSSTは1.21、WSATは1.29、WASTは1.44、WAATは1.32となっており、実験値とFEM解析値の比もAシリーズの方が大きい。これは、現時点では明確な原因はわからないが、テンションスティフニングの影響によるものだろうと考えられる。

##### 4-2. スターラップの応力

各実験供試体の実験結果とFEM解析結果のスターラップにかかる応力を図-7に示す。図-7に示すように、実験結果は大きく、FEM解析結果は小さくなっており一致していない。

これには、二つの理由が考えられる。一つは、ひずみ測定位置とひび割れがスターラップと交わる位置との距離である。図-2に示したひび割れ図から推測するとスターラップのひずみ測定位置の付近をひび割れが通過しているために測定されたひずみはひび割れ交差部での最大ひずみに近い。しかし、FEM解析値はひびわれおよびひび割れ間のスターラップの応力の平均値であり、最大ひずみと比較すると小さい。この差は、本研究のようにスターラップの補強筋比が小さい場合には大きくなる。もう一つは、鉄筋の構成則の適用性の問題である。今回用いた解析プログラム<sup>3)</sup>では分散ひび割れモデル、つまり、ひび割れの影響を平均的にとらえ連続体に置き換えることのできるよう、鉄筋コンクリート要素の平均応力-平均ひずみ関係を採用している。したがって、鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は鉄筋単体のものとは大きく異なり、降伏強度が小さいbilinearな曲線となる(図-8参照)<sup>4)</sup>。鉄筋コンクリート要素の鉄筋比が小さい場合は降伏強度が小さくなる。本研究のようなスターラップの補強筋比(要素の補強筋比で0.14%)に対してのこのモデルの適用性に問題がある可能性がある。

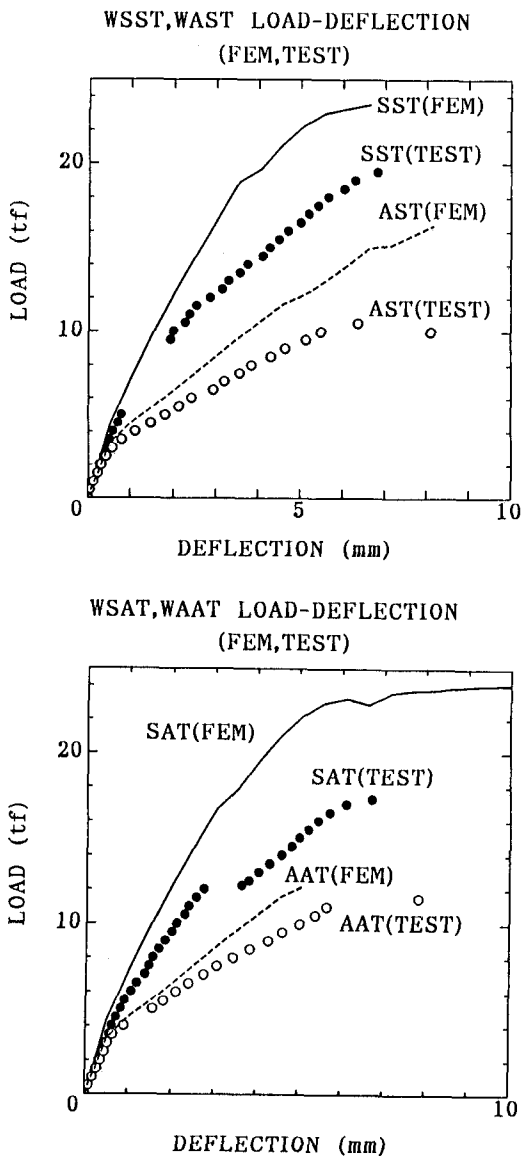


図-6 荷重-変位曲線図

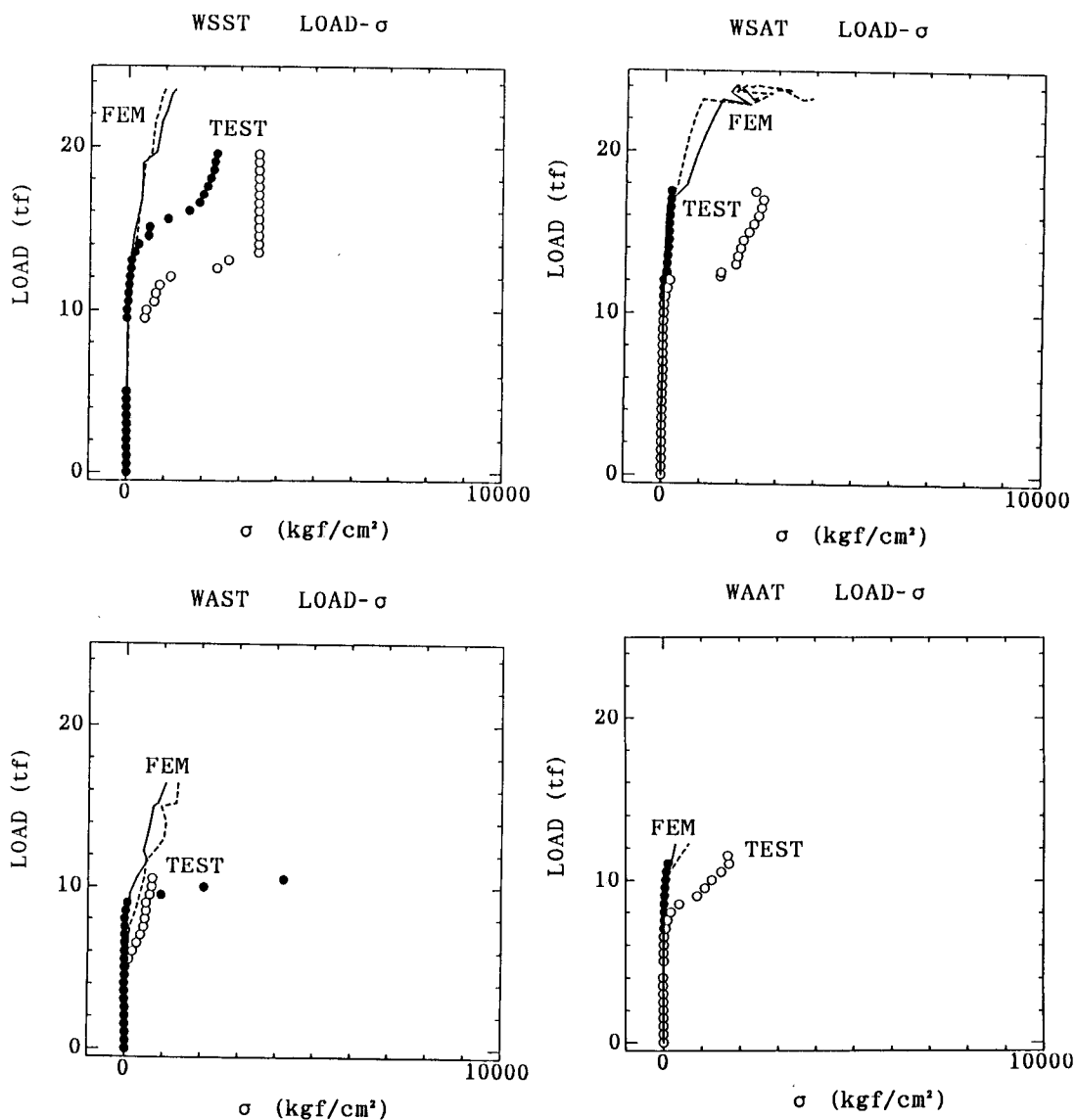
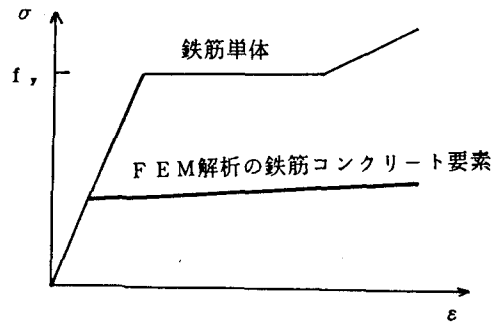


図-7 荷重-応力図

#### 4-3. 耐力について

各実験供試体のトラス理論とFEM解析と実験による耐力を表-3に示す。この表-3において、トラス理論値には弾性係数比を考慮し、主筋にAFRPロッドを用いた場合は $E_{f1}/E_s = 65/210$ を乗じ、スターラップにAFRPロッドを用いた場合には $E_{f2}/E_s = 54/210$ を乗じた。トラス理論値と実験値の比を調べると、WSSTは0.82、WSATは0.99、WASTは0.66、WAATは0.68となっており、主筋の弾性係数比による耐力の補正は実験結果を過小評価しているが、スターラップの弾性係数比による耐力の補正の評価は実験結果を適切に評価している。

次に、FEM解析値と実験値の比較をした結果、4-2でも述べた適用性の問題などにより、本FEM解析による破壊耐力の評価は精度が十分とは言えず、構成則の改良が必要である。しかしながら、荷重変位曲線でもそうであったように耐力でも主筋の弾性係数の差異による耐力の差異は概ね評価できていると思われる。



## 5. まとめ

これまでの考察により以下のことが確かめられた。

- (1) FRPロッドを用いたRCはりにおいても平面保持の仮定は満足する。
- (2) 主筋に鉄筋を用いたRCはりよりも主筋にAFRPロッドを用いたRCはりの方が、中立軸の位置が高い。
- (3) 中立軸の位置と破壊間際のせん断ひび割れの高さは相関関係がある。
- (4) FEM解析は、主筋の弾性係数の差異による変形および耐力の差異を評価できる。
- (5) 分散ひび割れモデルを適用した本FEM解析は、せん断補強筋比が小さすぎるとせん断補強筋の応力などが適切に評価できない。

今回の実験供試体は、先にも述べたようにせん断補強筋比が小さすぎるので、4-2や5の(5)でも述べたような理由によりFEM解析値と実験値を比較できなかった。

今後は、本研究で問題であったせん断補強筋比を、もう一度考慮し直してFEM解析値と実験値を比較検討をしなければならないと思われる。

## 参考文献

- 1) 辻・斉藤・関島・小川：FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状  
コンクリート工学年次論文報告集、第10巻3号、1988年、pp547-552
- 2) 土木学会コンクリート委員会・連続繊維研究委員会：連続繊維を利用したコンクリート系複合材料の土木分野への適用に関する技術の現状(中間報告) 1990・6
- 3) PANTARATORN Nares: FINITE ELEMENT ANALYSIS ON SHEAR RESISTING MECHANISM OF RC BEAM  
東京大学大学院学位論文 1991年
- 4) 出雲 淳一：正負繰返し载荷を受ける鉄筋コンクリート要素の解析モデルとその評価  
東京大学大学院学位論文

図-8 FEM解析における鉄筋コンクリート要素の応力-ひずみ曲線図

|      | コンクリート<br>圧縮強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 曲げ耐力<br>(tf) | せん断耐力 (tf) |     |      | FEM<br>(tf) | 実験値<br>(tf) |
|------|------------------------------------------|--------------|------------|-----|------|-------------|-------------|
|      |                                          |              | VC         | VS  | V    |             |             |
| WSST | 407                                      | 22.0         | 13.0       | 3.1 | 16.1 | 23.5        | 19.8        |
| WSAT | 396                                      | 22.0         | 12.9       | 4.2 | 17.1 | 24.1        | 17.3        |
| WAST | 408                                      | 23.3         | 4.1        | 3.1 | 7.2  | 16.3        | 10.9        |
| WAAT | 430                                      | 24.1         | 4.2        | 4.2 | 8.4  | 12.1        | 12.3        |

表-3 コンクリート圧縮強度および耐力