

## CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力評価

Evaluation on Shear Strength of RC Beam with CFRP Stirrup

鳥巢陽平\*, 山口浩平\*\*, 日野伸一\*\*

Yohei Torisu, Kohei Yamaguchi, Sinichi Hino

\*ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5 丁目 4 番 20 号)

\*\*九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

In recent years, Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) materials have been used in many fields around the world. The superior material properties such as high tensile strength, lightweight and high corrosion resistance are the main reasons of using CFRP. In Kyushu University, CFRP method was proposed for construction of concrete structure. CFRP manufactured by using this method has U-shaped anchors in both side of CFRP rod. In this study, to clarify strength properties of CFRP rod, tensile test of corner of CFRP stirrup were carried out. Also to evaluate the shear strength of RC beam with CFRP stirrup, shear test of RC beam with CFRP stirrup was carried out. From the results, tensile strength of corner of CFRP stirrup was about half of CFRP tensile strength. And the shear strength of RC beam with CFRP stirrup was defined by the corner strength of CFRP stirrup.

Key Words : CFRP stirrup, RC beam, Shear strength, Corner strength

キーワード : CFRP せん断補強筋, RC はり, せん断耐力, 曲げ成形部強度

## 1. はじめに

新素材として注目されている CFRP(炭素繊維強化プラスチック)は、高強度・軽量・耐食性などの特徴を有しており、鉄筋や PC 鋼材の代替としてコンクリート構造物への適用に関する研究が進められている。本研究で対象とする CFRP せん断補強筋(図-1)は、CFRP 自動製作ロボット(図-2)を用いて製作される。鉄筋の代替材料として、主筋およびせん断補強筋全てにおいて CFRP を用いた部材の開発を行うために、CFRP せん断補強筋のせん断耐力評価方法を検討することは重要である。

そこで本研究では、自動製造ロボットにより製作される CFRP の曲げ成形部強度試験を実施して、CFRP せん断補強筋の脆弱部分である曲げ成形部強度において、既往の曲げ成形部強度の評価式の適用性を検討する。次に、その CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断試験を行い、せん断破壊の破壊メカニズムを明らかにして、曲げ成形部強度を基にした CFRP を用いた RC はりのせん断耐力の評価について検討する。

## 2. 連続繊維補強材を用いた RC はりの既往のせん断耐力評価方法

2.1 コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>による評価

土木学会「コンクリート標準示方書」<sup>1)</sup>(以下、示方書と呼ぶ。)では、せん断補強筋を有する棒部材の終局せん断耐力  $V_u$  は、せん断補強筋の効果を無視した部材そのもののせん断耐力  $V_c$  とトラスアナロジーから求めたせん断補強筋の負担せん断耐力  $V_s$  の和とする、式(1)で表される。

$$V_u = V_c + V_s \quad (1)$$

式(2)にせん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力  $V_c$  を示す。

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{wd} \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

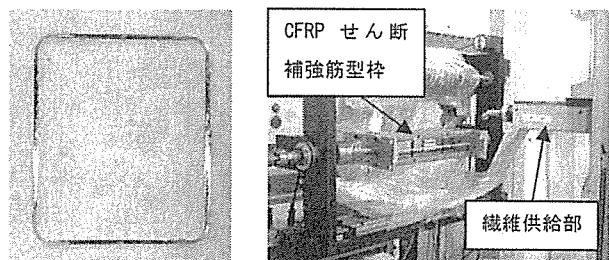


図-1 CFRP せん断補強筋 図-2 CFRP 製作ロボット

ここに、 $f_{wd}=0.20\sqrt{f'_{cd}}$  ただし  $f_{wd} \leq 0.72(\text{N/mm}^2)$ ,  
 $\beta_d=\sqrt[3]{1/d}$  ( $d$ : m, ただし  $\beta_d > 1.5$  の場合は、 $\beta_d=1.5$ ),  
 $\beta_p=\sqrt[3]{100 p_w}$  (ただし  $\beta_p > 1.5$  の場合は  $\beta_p=1.5$ ),  
 $\beta_n=1+M_o/M_d$  (詳細は文献 1)を参照),  $f'_{cd}$ : コンクリートの設計圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ ),  $b_w$ : ウェブの幅(mm),  $d$ : 有効高さ(mm),  $A_s$ : 引張補強筋の断面積( $\text{mm}^2$ ),  $p_w$ : 引張主鉄筋比( $=A_s/(b_w d)$ )

せん断補強筋が負担するせん断耐力  $V_s$  を式(3)に示す。

$$V_s = A_w f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) z/s \quad (3)$$

ここに、 $A_w$ : 区間  $s$  におけるせん断補強筋の総断面積( $\text{mm}^2$ ),  $\alpha$ : せん断補強筋と部材軸となす角度,  $f_{wyd}$ : せん断補強筋の設計降伏強度,  $z$ :  $z=d/1.15$

## 2.2 連続繊維補強材および鉄筋のヤング係数比による評価 2), 3), 4)

既往研究において、主筋やせん断補強筋に CFRP を用いた RC はりのせん断試験が行なわれている。その結果、連続繊維補強材および鉄筋のヤング係数比を考慮した式が提案されている。せん断補強筋を有する棒部材の終局せん断耐力  $V_u$  は、コンクリートの負担せん断耐力  $V_c$  とせん断補強筋の負担せん断耐力  $V_s$  の和としている。 $V_c$  には岡村・檜貝式<sup>4)</sup>を用い、CFRP を用いたことによる軸方向の剛性の影響をヤング係数比で考慮している。また  $V_s$  については示方書式を基本とし、せん断補強筋断面積にヤング係数比をかけることで、せん断耐力評価が可能と提案されている。

式(4)にせん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力  $V_c$  を示す。

$$V_c = f_{v0} (0.75 + 1.4d/a) (1 + \beta_p^* + \beta_w) b_w d \quad (4)$$

ここに、 $f_{v0}=0.20\sqrt{f'_{cd}}$  ただし  $f_{v0} \leq 0.72(\text{N/mm}^2)$ ,  
 $\beta_d=\sqrt[3]{1/d} - 1$  ( $d$ : m, ただし  $d \leq 1.1$ ),  $\beta_p^* = \sqrt{p_w^*} -$

$1(p_w^*=p_w E_{CFRP}/E_0$  ただし  $p_w \leq 3\%$ ),  $E_{CFRP}$ : 引張補強筋のヤング係数,  $E_0$ : 基準(引張補強筋)のヤング係数( $=200\text{kN/mm}^2$ ),  $p_w$ : 引張主鉄筋比( $=A_f/(b_w d)$ ),  $A_f$ : 引張補強筋の断面積( $\text{mm}^2$ )

せん断補強筋が負担するせん断耐力  $V_s$  を式(5)に示す。

$$V_s = A_w^* f_{wyd} (\sin \alpha + \cos \alpha) z/s \quad (5)$$

ここに、 $A_w^* (=A_w E_{CFRP}/E_0)$ : 区間  $s$  におけるせん断補強筋の総断面積( $\text{mm}^2$ )

## 2.3 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)による評価<sup>5)</sup>

土木学会は、「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)」<sup>5)</sup>(以下、指針)により、連続繊維補強材を用いた RC はりの設計せん断耐力  $V_{ud}$  を式(7)に示す。

$$V_{ud} = V_{cd} + V_{sd} \quad (6)$$

式(8)にせん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力  $V_{cd}$  を示す。

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p^{**} \cdot \beta_n \cdot f_{wd} \cdot b_w \cdot d \quad (7)$$

ここに、 $\beta_p^{**} = \sqrt[3]{100 p_w E_{fu} / E_0}$  (ただし  $\beta_p^{**} > 1.5$  の場合は  $\beta_p^{**} = 1.5$ ),  $E_{fu}$ : 引張補強筋のヤング係数

式(9)にせん断補強筋により受け持たれる設計せん断耐力  $V_{sd}$  を示す。

$$V_{sd} = [A_w E_w \varepsilon_{fwd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s + A_{pw} \sigma_{pw} (\sin \alpha_p + \cos \alpha_p) / s_p] z \quad (8)$$

ここに、 $E_w$ : せん断補強筋のヤング係数,  $\varepsilon_{fwd}$ : 終局限界状態におけるせん断補強筋のひずみの設計用値で、式(9)により求めてよい。ただし、 $E_w \varepsilon_{fwd}$  が曲げ成形部強度の設計用値  $f_{bd}$  より小さい場合は、 $E_w \varepsilon_{fwd}$  を  $f_{bd}$  に置換する。

$$\varepsilon_{fwd} = \sqrt{f'_{mcd} \frac{p_w E_{fu}}{p_{web} E_w} \left[ 1 + 2 \left( \frac{\sigma'_N}{f'_{mcd}} \right) \right]} \times 10^{-4} \quad (9)$$

連続繊維補強材の曲げ成形部設計強度  $f_{fbd}$  は、一般に式(10)により求めてよい。

$$f_{fbd} = (0.05r/h + 0.3) f_{fuk} \quad (10)$$

ただし、式(10)の右辺の値が  $f_{fuk}$  より大きくなる場合は、 $f_{fbd} = f_{fuk}$  とする。 $f_{fbd}$ : 曲げ成形部強度の特性値,  $f_{fuk}$ : 一軸引張強度の特性値,  $r$ : 曲げ内半径,  $h$ : 連続繊維補強材の断面高さ,  $\gamma_{mfb}$ : 一般に 1.3 とする。  $\alpha_s$ : せん断補強筋が部材軸となす角度,  $s_s$ : せん断補強筋の配置間隔,  $p_{web}$ :  $A_w/(b_w \cdot s_s)$ ,  $A_{pw}$ : 区間  $s_p$  におけるせん断補強用緊張材の総断面積,  $\sigma_{pw}$ : 終局限界状態におけるせん断補強用緊張材の引張応力度,  $\sigma_{pw} = \sigma_{wpe} + E_{fpw} \varepsilon_{fwd} \leq f_{fpud}$ ,  $E_{fpw}$ : せん断補強用緊張材のヤング係数,  $f_{fpud}$ : せん断補強用緊張材の設計引張強度,  $\alpha_p$ : せん断補強用緊張材が部材軸となす角度,  $s_p$ : せん断補強用緊張材の配置間隔,  $\sigma'_N$ : 平均軸圧縮応力,  $\sigma'_N = (N'_d + P_{ed})/A_g$ , ただし、 $\sigma'_N > 0.4f'_{mcd}$  となる場合には  $\sigma'_N = 0.4f'_{mcd}$  とする。 $P_{ed}$ : 軸方向緊張材の有効引張力,  $A_g$ : 全断面の断面積,  $f'_{mcd}$ : 寸法効果を考慮したコンクリートの設計圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ ),  $f'_{mcd} = (h/0.3)^{1/10} \cdot f'_{cd}$ ,  $h$ : 部材の高さ(m)

## 2.4 既往の評価式のまとめ<sup>1), 2), 3)</sup>

主筋とせん断補強筋に CFRP を用いた場合の RC はりのせん断耐力評価について、著者らの知る限りでは、2.2 および 2.3 に述べた 2 つの方法が存在するのみである。しかし、2.3 については既往研究の曲げ内半径のデータが不明なため検討できなかった。そこで、CFRP を用いた RC はりせん断耐力の既往研究のデータ<sup>2), 3)</sup>から(1)ヤング係数比を用いない、(2)主筋のみヤング係数比を用いる、(3)せん断補強筋のみヤング係数比を用いる、(4)主筋およびせん断補強筋にヤング係数比を用いる場合について検討した。なお、せん断スパン比が 2.0 以下の  $a/d=1.5$  および 2.0 の供試体せん断耐力理論値は、ディープビーム式<sup>1)</sup>を適用した。

CFRP を用いた RC はりのせん断耐力の既往研究による実験値と理論値の関係を図-3 に示す。同図に示したデータはせん断スパン比  $a/d=1.5, 2.0, 2.5$  の供試体である。 $a/d=1.5$  および 2.0 の供試体は、示方書での実験値と理論値の比が 1.0 を超えていた。主筋およびせん断補強筋にヤング係数比を用いた場合は、十分な安全側で評価できている。 $a/d=2.5$  は、示方書では実験値と理論値の比が 1.0 未満であるが、主筋とせん断補強筋にヤング係数比を用いることで、その比は 1.0 以上となり実験値をよく評価できる結果となっている。

以上より、主筋およびせん断補強筋に CFRP せん断補強筋を用いた RC はりの供試体に関しては、ヤング係数比を用いてせん断耐力評価ができると考えられる。

## 3. CFRP の曲げ成形部強度

### 3.1 供試体および試験方法<sup>6)</sup>

図-4 に CFRP 曲げ成形部強度試験の供試体概略図を示す。供試体は断面積  $11.2\text{mm}^2$  の 4. に示す RC はりのせん断補強筋と同じ規格の矩形 CFRP を  $180 \times 180 \times 100\text{mm}$  のコンクリート塊で覆い、両方のコンクリートブロックを開くように荷重を与えた。着目部である供試体の片側はアクリル管を曲げ成形部付近まで配置し、コンクリートとの付着を無くした。曲げ成形部付近のコンクリートとの付着を無くすことで、CFRP は曲げ成形部で荷重に抵抗するため、曲げ成形部から破断すると予想される。曲げ成形部に 4. に示すはりの主筋を模擬した鉄筋(D22)を配置した。コンクリートブロックは格子状の鉄筋(D6)により補強を行い、コンクリートブロックの破壊を防いだ。なお、供試体数は 3 体とした。

## 3.2 結果および考察

試験結果を表-1 に示す。曲げ成形部強度の理論値は式(10)により算出した値であり、直線部強度の 52%である。引張耐力の平均値は  $24.9\text{kN}$  であり、実験値と理論値の比は 0.93 であった。

図-5 に、CFRP 破断状況を示す。全供試体は、アクリル管によって付着を無くした側の両曲げ成形部で破断した。これらの結果より CFRP の曲げ成形部強度は、式(10)による値よりもやや小さいものの、概ね評価できると判断される。

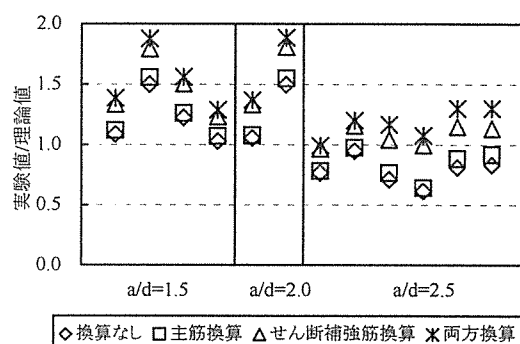


図-3 実験値と理論値の比較(既往研究)

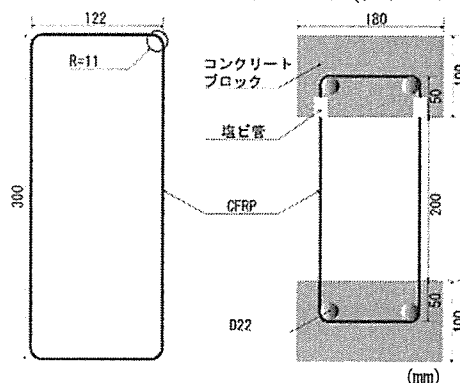


図-4 CFRP 曲げ成形部強度供試体

表-1 CFRP 曲げ成形部強度試験結果

| No. | 実験値(kN) |      | 理論値(kN) | 実験値/理論値 | 破断箇所  |
|-----|---------|------|---------|---------|-------|
|     | 1       | 2    |         |         |       |
| 1   | 23.3    | 24.9 | 26.6    | 0.93    | 曲げ成形部 |
| 2   | 25.2    |      |         |         | 曲げ成形部 |
| 3   | 26.1    |      |         |         | 曲げ成形部 |

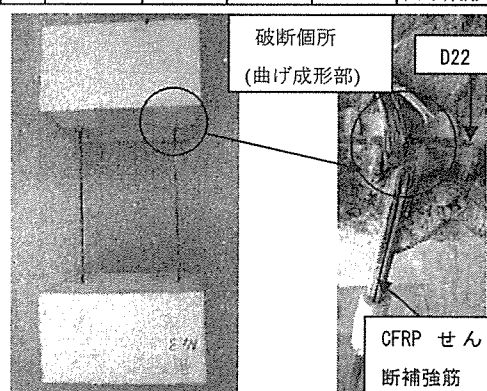


図-5 CFRP 破断状況

### 3.3 FEM 解析

#### 3.3.1 解析モデル

解析モデルは、MSC.marc を用いて製作し、2次元非線形解析を行った。解析モデルは CFRP の奥行きが 2.54mm、鉄筋およびコンクリートの奥行きが 180mm の平面要素である。接点数は 28928、要素数は 26632 である。最小要素は CFRP 曲げ成形部で  $0.38 \times 0.25\text{mm}$  である。また、荷重条件および境界条件は矢印で示す。CFRP、コンクリートおよび鉄筋の接触に関しては、Marc. における Contact 要素を用いて摩擦は 0 であるが要素同士は接触している解析モデルである。また、コンクリートと CFRP については、摩擦は 0 で圧縮力を伝達するというモデルである。図-6 に、材料構成則を示す。CFRP の材料特性は、引張強度  $4000\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数  $230000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.2、等方性部材(Isotropic)とした。構成則はリニアとした。鉄筋の材料特性は、降伏強度  $386\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数  $230000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.2、等方性部材(Isotropic)とした。構成則は、バイリニアとした。コンクリートの材料特性は、圧縮強度  $35.6\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数  $28000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比

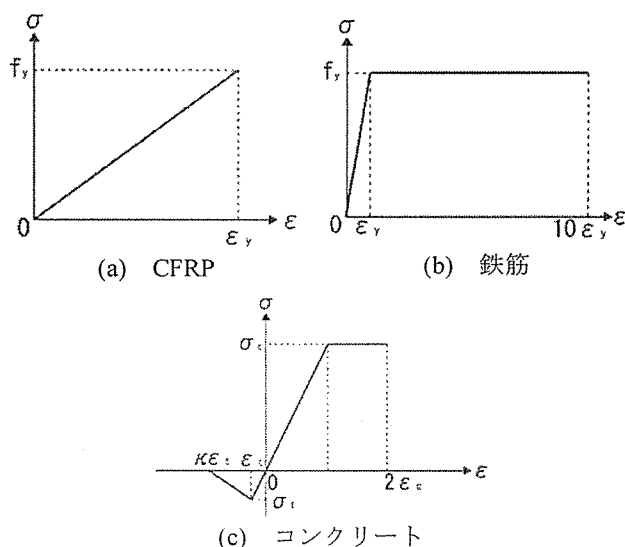


図-6 材料構成則

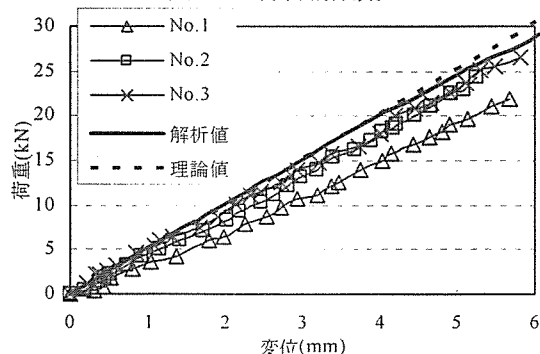


図-7 荷重-変位関係

0.22、等方性部材(Isotropic)とした。また、 $\kappa=15$  とし、構成則はトリリニアとした。

#### 3.3.2 解析結果

図-7 にコンクリート部を含んだ供試体全体の荷重-変位関係を示す。解析値は、実験値と比較すると多少の誤差はあるが、理論値と概ね一致していることから解析は実験をよく再現できていると考えられる。

図-8 に CFRP 直線部荷重-ひずみ曲線を示す。CFRP 直線部のひずみは線形挙動を示した。FEM 解析における CFRP の挙動と実験におけるひずみの挙動はよく一致している。これらからも、解析は実験の挙動をよく再現できていると考えられる。

図-9 にコンター図を示す。応力集中点は CFRP が鉄筋と接触し始める点の内縁部である。図-5 の破断状況と比較すると実際の破断個所と応力集中点とは一致しているため、曲げ成形部の内縁部で応力集中が発生し、徐々に繊維が外縁部に向かい破断していくものと考えられる。これは、図-10 に示す繊維の高さ方向の応力分布から考えられる。応力集中点の繊維高さ方向の応力分布は、内縁が一番大きく外縁に向かい徐々に小さくなっているためである。

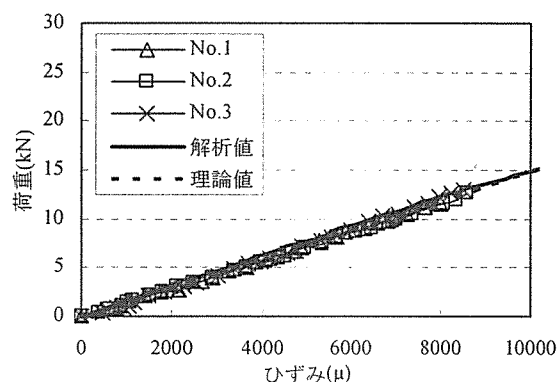


図-8 荷重-ひずみ関係

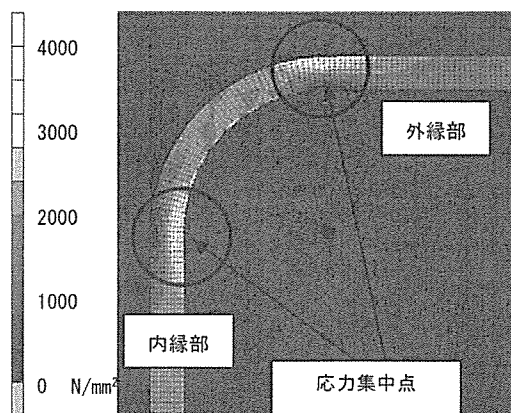


図-9 CFRP 曲げ成形部の主応力図(最大荷重時)

### 3.3.3 パラメータ解析

CFRPの曲げ成形部の内半径 $r$ (鉄筋径)を変化させた解析を行った。内半径 $r$ を11mm(D22)から5mm(D10), 8mm(D16), 16mm(D32), 19mm(D38)に変化させた場合について解析を行った。CFRP(幅122mm, 高さ200mm)およびコンクリートの寸法は同じで、内半径のみを変化させたモデルで解析を行った。接触条件および構成則は同じである。

曲げ成形部強度式、式(10)と解析値を比較した。図-11に指針による算定値と解析値の比較を示す。解析における曲げ成形部強度と内半径および断面高さの関係は、指針による算定値の傾向は良く一致しているといえる。これより、九州大学で製作されるCFRPせん断補強筋の曲げ成形部強度は、指針により評価できると考えられる。

## 4. CFRPをせん断補強筋に用いたRCはりのせん断試験

### 4.1 供試体および試験方法

供試体は、幅180mm, 高さ200mm, 有効高さ160mm, 長さ1460mm, スパン1160mm( $a/d=3.0$ )とする単純RCはりとした。パラメータは、せん断補強筋種類、せん断スパン比およびせん断補強筋配置間隔である。主鉄筋は、D22を3本、圧縮側にD10を3本配置した。また、せん断補強筋にD6およびCFRPを用い

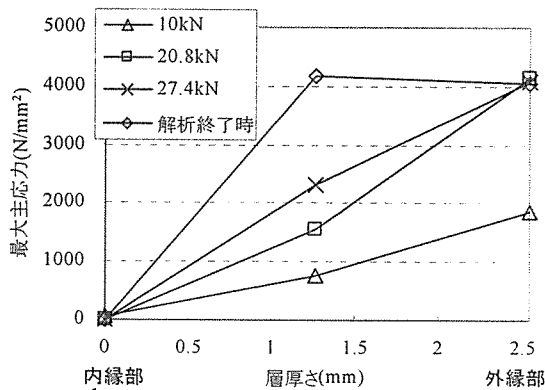


図-10 層厚さ方向の最大主応力

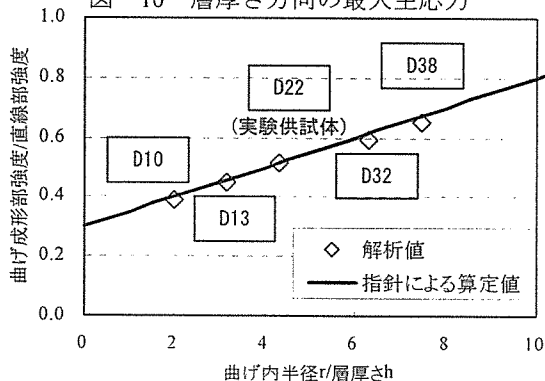


図-11 パラメータ解析による強度比

た。各供試体は3体ずつ製作した。表-2に供試体概要、表-3に使用材料諸元、図-12に供試体概略図を示す。なお、表-3(a)のCFは炭素繊維そのものの力学特性、CFRPはエポキシ樹脂を含むCFRPとしての力学的性質である。

## 4.2 結果および考察

### 4.2.1 変形状

試験結果を表-4に、ひび割れ状況を図-13に示す。また、図-14に供試体中央部の荷重-変位関係

表-2 供試体概要

| TYPE | コンクリート | a/d | 主筋    | せん断補強筋配置間隔(mm) | せん断補強筋      |
|------|--------|-----|-------|----------------|-------------|
| S    | 普通     | 3   | 3-D22 | -              | -           |
| SS   |        |     |       | 80(d/2)        | D6          |
| SCa  |        |     |       | 80(d/2)        | CFRP(14回巻き) |
| SCb  |        |     |       | 120(d/1.3)     | CFRP(14回巻き) |

※d…有効高さ(mm)

表-3 使用材料諸元

#### (a) CFRP

| 種類   | フィラメント束の断面積(mm²) | 断面積(mm²) | 引張強度(N/mm²) | ヤング係数(kN/mm²) |
|------|------------------|----------|-------------|---------------|
| CF   | 0.46             | 6.44     | 4000        | 230           |
| CFRP |                  | 11.2     | 2300        | 132           |

#### (b) コンクリート

| 種類 | 圧縮強度(N/mm²) | 引張強度(N/mm²) | 曲げ強度(N/mm²) | ヤング係数(kN/mm²) | ポアソン比 |
|----|-------------|-------------|-------------|---------------|-------|
| 普通 | 35.6        | 3.09        | 4.57        | 28.0          | 0.22  |

#### (c) 鉄筋

| 種類  | 規格    | 断面積(mm²) | 降伏強度(N/mm²) | 引張強度(N/mm²) | ヤング係数(kN/mm²) |
|-----|-------|----------|-------------|-------------|---------------|
| D6  | SD295 | 31.7     | 303         | 544         | 175           |
| D10 | SD345 | 71.3     | 354         | 502         | 189           |
| D22 | SD345 | 387      | 386         | 565         | 202           |

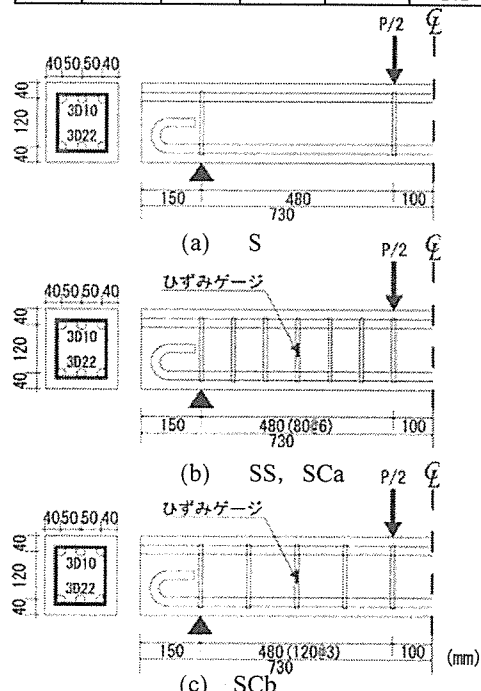


図-12 供試体概略図

表-4 試験結果

| TYPE | No. |     | 実験値(kN)                        |                |                | 理論値(せん断耐力)(kN)                 |                |                |                                |                |                |                                |                |                | 実験値<br>/示方書 | 実験値<br>/ヤング係数 | 実験値<br>/指針 | 破壊形式  |
|------|-----|-----|--------------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|----------------|----------------|-------------|---------------|------------|-------|
|      |     |     | 平均値                            |                |                | 示方書                            |                |                | ヤング係数                          |                |                | 指針                             |                |                |             |               |            |       |
|      |     |     | V <sub>c</sub> +V <sub>s</sub> | V <sub>c</sub> | V <sub>s</sub> | V <sub>c</sub> +V <sub>s</sub> | V <sub>c</sub> | V <sub>s</sub> | V <sub>c</sub> +V <sub>s</sub> | V <sub>c</sub> | V <sub>s</sub> | V <sub>c</sub> +V <sub>s</sub> | V <sub>c</sub> | V <sub>s</sub> |             |               |            |       |
| S    | 1   | 121 | 116                            | 116            | 0              | 85                             | 85             | 0              | -                              | -              | -              | -                              | -              | -              | 1.36        | -             | -          | 斜め引張  |
|      | 2   | 123 |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |             |               |            | せん断圧縮 |
|      | 3   | 111 |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |             |               |            | 斜め引張  |
| SS   | 1   | 269 | 227                            | 116            | 111            | 152                            | 85             | 67             | -                              | -              | -              | -                              | -              | -              | 1.49        | -             | -          | せん断圧縮 |
|      | 2   | 226 |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |             |               |            | せん断圧縮 |
|      | 3   | 229 |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |             |               |            | せん断圧縮 |
| SCa  | 1   | 209 | 208                            | 116            | 92             | 264                            | 85             | 179            | 204                            | 85             | 118            | 178                            | 85             | 93             | 0.78        | 1.02          | 1.17       | 斜め引張  |
|      | 2   | 237 |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |             |               |            | 斜め引張  |
|      | 3   | 177 |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |             |               |            | 斜め引張  |
| SCb  | 1   | 199 | 197                            | 116            | 81             | 205                            | 85             | 119            | 164                            | 85             | 79             | 147                            | 85             | 62             | 0.96        | 1.20          | 1.34       | 斜め引張  |
|      | 2   | 144 |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |             |               |            | 斜め引張  |
|      | 3   | 194 |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |                                |                |                |             |               |            | 斜め引張  |

を各タイプ1体ずつ示す。ひび割れ発生荷重の10～20kNまでは全断面有効の挙動を示すが、ひび割れ発生荷重を超えてからは、ひび割れ断面としての挙動を示す。最大荷重まで漸増载荷した後、せん断破壊して急激に荷重が減少した。S No.2, SS No.1～No.3は、荷重が急激に減少することなく徐々に荷重が減少する破壊形式で、せん断圧縮破壊と考えられる。その他の供試体はせん断ひび割れとともに急激に破壊する斜め引張破壊であった。CFRP せん断補強筋を用いたSCaおよびSCbは、せん断破壊と同時にせん断補強筋の曲げ成形部で破断するため、CFRP せん断補強筋は荷重を受け持つことができずSSに比べて急激に破壊すると考えられる。

次に、各供試体の剛性を見ると、各シリーズにおけるSSとSCの断面諸元は同じであるが、後述するがせん断補強筋ひずみが急増する荷重からCFRP せん断補強筋を用いたSC供試体は剛性が小さくなっている。これは、せん断補強筋でのCFRPの剛性(EA)が鉄筋に比べて小さいことに起因している<sup>7)</sup>と考えられる。

#### 4.2.2 せん断補強筋ひずみ

図-15にせん断補強筋ひずみを示す。SSの鉄筋せん断補強筋のひずみは降伏ひずみ付近まで達していたので降伏状態であったと考えられる。SCaのCFRP せん断補強筋ひずみは7157 $\mu$ であり、破断ひずみ17391 $\mu$ の41%であった。SCbのCFRP せん断補強筋ひずみは10151 $\mu$ であり、破断ひずみの58%であった。これは、式(10)による曲げ成形部強度の破断ひずみ8987 $\mu$ に近い値であった。これらの結果から、CFRP せん断補強筋を用いたRCはりのせん断耐力評価は、CFRP 曲げ成形部強度を用いた評価方法が適切であると言える。

次に、全供試体ともせん断補強筋ひずみ(図-15参照)は载荷直後にはほとんど発生していなかったが、100～130kN付近で急増した。これは、100kNま

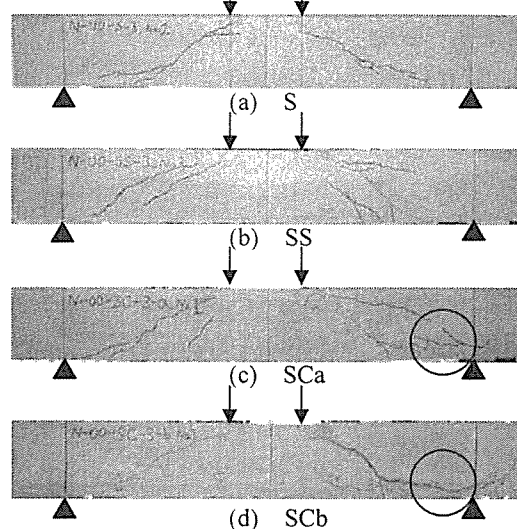


図-13 ひび割れ状況

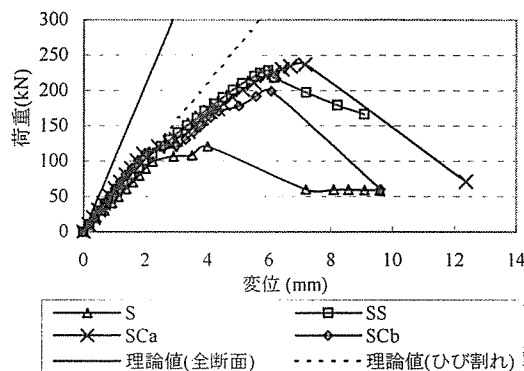


図-14 荷重-変位関係

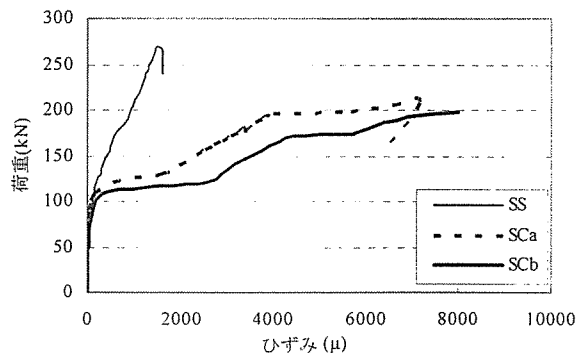


図-15 荷重-ひずみ関係

ではコンクリートがせん断力を受け持っていることを示唆している。また、せん断補強筋を配置していないSの最大荷重はコンクリート負担分せん断耐力 $V_c$ であり116kNであった。これらの結果からも、せん断補強筋ひずみの急増する点で、せん断力の分担がコンクリートからせん断補強筋へ移行していると考えられる。

また、せん断補強筋ひずみが急増する点において、せん断補強筋に鉄筋を用いた供試体SSとCFRPを用いた供試体SCaおよびSCbを比較すると、SCのひずみが大きくでている。これは、せん断補強筋の剛性が、CFRPせん断補強筋は鉄筋の約1/4であるため、同じ荷重時のひずみはCFRPのほうが大きくなるためと考えられる。

#### 4.2.3 最大荷重

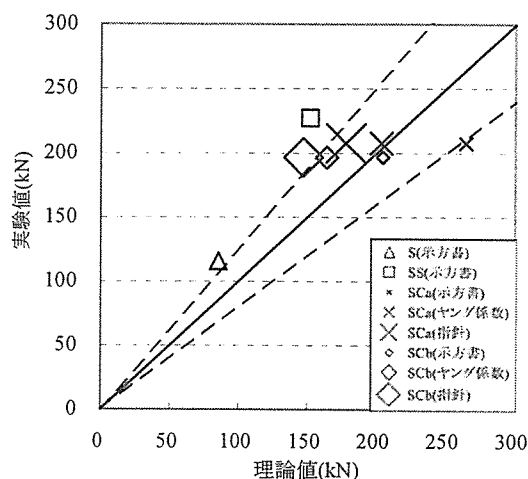
タイプごとの最大荷重は、No.1~No.3の平均値とした。この際、S No.2は破壊挙動が異なったため、またSS No.1は極端に荷重が異なったため平均値から除外した。

Sの $P_{max}$ は116kNであった。図-16に $P_{max}$ の実験値と理論値の関係を示す。S、SSのせん断耐力は、示方書での比は1.36および1.49で評価できた。SCaおよびSCbは、示方書での比は0.78と0.96と実験値は危険側であった。ヤング係数比でせん断耐力を評価した場合は、その比は1.02と1.20であった。指針の場合は、その比は1.17と1.34と実験値をよく評価できた。

#### 4.2.4 せん断耐力の評価

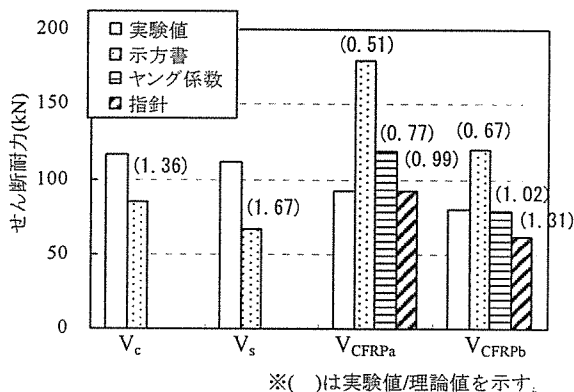
せん断耐力の $V_c$ 、 $V_s$ の実験値および理論値の比を図-17に示す。4.2.2および4.2.3よりコンクリート負担分せん断耐力は116kNである。ここで、RCはりのせん断耐力は、評価方法に関わらず式(1)のようにコンクリート負担分せん断耐力 $V_c$ とせん断補強筋が受け持つせん断耐力 $V_s$ の累加で表される。よって、実験値から鉄筋が受け持つせん断耐力は、SSからSの差の111kNとなる。また、SCaは208kNより、 $a/d=3.0$ でせん断補強筋配置間隔80mm( $d/2$ )の場合のCFRPせん断補強筋が負担するせん断耐力は92kNとなる。SCbは197kNより、 $a/d=3.0$ でせん断補強筋配置間隔が120mm( $d/1.33$ )の場合のCFRP負担分せん断耐力は81kNとなる。 $V_c$ および $V_s$ は、示方書により実験値と理論値の比は、1.36および1.67で評価できた。また、SCaおよびSCbのCFRPせん断補強筋が受け持つせん断耐力 $V_{CFRPa}$ および $V_{CFRPb}$ は、示方書での比は0.51、0.67、ヤング係数

での比は0.77、1.02となった。また、指針での比は0.99、1.31となりヤング係数比および指針により安全側に評価できた。CFRPせん断補強筋配置間隔を変化させた場合においても、ヤング係数比および指針によるせん断耐力評価に大きな影響はなかった。



※破線は±20%の範囲を示す。

図-16 実験値および理論値の比較



※( )は実験値/理論値を示す。

図-17 せん断耐力の比較

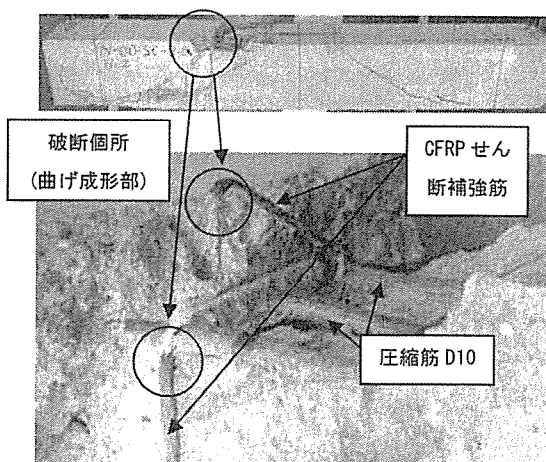


図-18 CFRP 破断状況(SCa)

#### 4.2.5 ひび割れ状況

ひび割れは、載荷点と支点を結ぶせん断ひび割れであった。図-12(c), (d)の黒丸で示すように、CFRP せん断補強筋を用いた供試体については、主要なせん断ひび割れが発生した後、破壊と同時に主鉄筋に沿った大きなひび割れが発生して大きな音とともに破壊に至った。これは、破壊時に主筋に急激な引張力が作用したためであると考えられる。なお、終局時の主要なせん断ひび割れのひび割れ幅は、せん断補強筋に鉄筋を用いた供試体に比べて CFRP を用いた供試体のほうが大きいことが確認された。試験終了後にコンクリートをはつり、せん断補強筋の破壊状態を確認した。図-18 にせん断補強筋破壊状態を示す。SCa および SCb の全ての供試体において、CFRP せん断補強筋は曲げ成形部で破断していた。しかし、CFRP せん断補強筋の直線部は破断していなかったため、供試体のせん断破壊と同時に CFRP せん断補強筋の曲げ成形部が破断したと考えられる。

#### 5. まとめ

- (1) CFRP 曲げ成形部強度は理論値の 0.93 であり、破断箇所は曲げ成形部であった。九州大学で製作される CFRP せん断補強筋の曲げ成形部強度は、式(10)によって評価可能である。
- (2) CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力評価は、ヤング係数比を考慮した場合は実験値と理論値の比は 1.02 および 1.20、指針では 1.17 および 1.34 と安全側で実験値をよく評価できた。ヤング係数比による評価と指針によりせん断耐力評価は可能である。
- (3) CFRP せん断補強筋の破断箇所は曲げ成形部であり、直線部は破断していなかった。よって、CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力評価を行う場合は、CFRP の曲げ成形部強度を基にせん断耐力を評価できる。
- (4) CFRP の曲げ成形部強度は、式(10)で評価可能であること、CFRP せん断補強筋を用いた RC はり試験において CFRP せん断補強筋が曲げ成形

部から破断していたことおよび指針によってせん断耐力評価が可能であることから、指針によって CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力を評価するのが適切である。

#### 謝辞

本研究は日本管洗工業(株)との共同研究であるとともに、一部は科学研究費若手研究(B)による補助を受けて実施した。また、九州大学大学院工学研究院知能機械システム部門鬼鞍宏猷教授、佐島隆生助教には CFRP の製作を、九州大学田北翔氏、宮崎大学住朋樹氏、柳川真末氏には試験に関して協力を頂いた。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書―構造的な照査編一，2002
- 2) 小林俊彦，丸山久一，清水敬二，金倉正三：CFRP ロッドを主筋およびスターラップに用いたコンクリート梁のせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.2，pp.701-706，1992
- 3) 白砂和昭，丸山久一，清水敬二，山本康之：CFRP ロッドで補強したコンクリートの曲げ・せん断性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，pp.783-788，1991
- 4) H. OKAMURA, T. HIGAI: Proposed Design Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement, Proc. of JSCE, No.300, pp.131-141, Aug.1980
- 5) 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），1996
- 6) 大原英史，本田勉，FRP スターラップの曲げ加工部の引張強度に関する研究，土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集，pp.320-321，1990
- 7) 本田勉，池田弘，橘田敏之：FRP スターラップで補強したコンクリート部材のせん断特性に関する研究，土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集，pp.342-343，1990