

報告

[1134] 曲げ加工した FRP 筋の引張耐力に関する実験的研究

正会員 宮田 尚彦 (鉄道総合技術研究所)
 正会員 鳥取 誠一 (鉄道総合技術研究所)
 正会員 寺田 年夫 (鉄道総合技術研究所)
 正会員○関島 謙蔵 (ネフコム技術部)

1. はじめに

鉄筋の代わりに繊維強化プラスチック (FRP) 筋をスターラップに使用したコンクリートはりがせん断破壊する場合、FRP筋は曲げ加工部で破断し、曲げ加工部の引張耐力は直線部よりも低下することが指摘されている〔1, 2, 3〕。この原因は、FRP筋の曲げ加工部に応力集中が生じ、内側の繊維から順次破断したためと考えられる。

ところで、格子状FRP筋はコンクリートとの付着及び定着を主に格子交差部で確保している特徴がある。この材料の引張試験は通常気中で行われるために、格子交差部の影響がほとんど見られず、最終破断状況はFRP筋がバラバラになって竹ぼうき状を呈する。しかし、コンクリート内における破断は応力集中によって必ず格子交差部に生じるので、引張耐力が低下する可能性がある。

本研究では、まず、FRP筋の曲げ内半径をパラメータに選び、曲げ加工したFRP筋をコンクリート内に埋込んで引抜き試験を行い、曲げ内半径の大きさが曲げ加工部の引張耐力に及ぼす影響について検討した。次に、定着を確保するための横筋を設けた直線状のFRP筋を埋込んで引抜き試験を行い、気中とコンクリート内の引張耐力の相違についても検討した。

2. 試験の概要

2.1 使用材料

使用したFRP筋は、ガラス繊維束と高強度炭素繊維束を強化材とし、ビニルエステル樹脂をマトリックスとして成形したものである。FRP筋の特性及び荷重-ひずみ関係をそれぞれ表-1と図-1に示す。図-1は炭素繊維が破断した後はガラス繊維に引張力が乗移るという異種繊維を強化材としたFRPの特徴であるハイブリッド効果が現れていることを示す。なお引張試験後の破断状況を図-2に示す。

コンクリートは早強ポルトランドセメントを

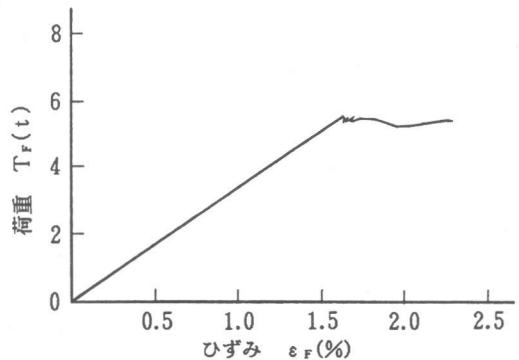


図-1 FRP筋の荷重-ひずみ関係

表-1 FRP筋の特性

筋番	繊維体積含有率			断面積 A_F (cm^2)	初期破損荷重 T_{Fi} (t)	初期破損ひずみ ϵ_{Fi} (%)	破断荷重 T_{Fu} (t)	破断ひずみ ϵ_{Fu} (%)	剛性 $D_F = E_F A_F$ (t)	弾性係数 E_F (kg/cm^2)
	ガラス繊維束 GFC (%)	高強度炭素繊維束 CFC (%)	合計 V_F (%)							
H10	35.6	4.7	40.3	0.884	5.67	1.65	5.79	2.22	346	3.91×10^5

使用し、粗骨材の最大寸法は25mmとした。コンクリートの打設後約1週間気中養生を行い、引抜き試験時における圧縮強度は263~327kg/cm²であった。

2. 2 試験体

試験体の形状を図-3に示す。

(1) 異形鉄筋と交差した試験体

曲げ加工したFRP筋はスターラップをモデル化したものであり、軸筋には異形鉄筋D19を使用した。FRP筋の直線部はコンクリートとの付着を切るために、グリースを塗った後にガ

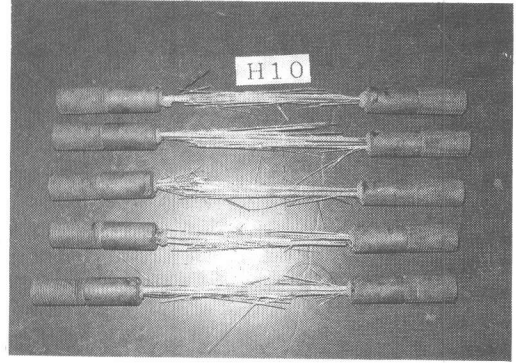
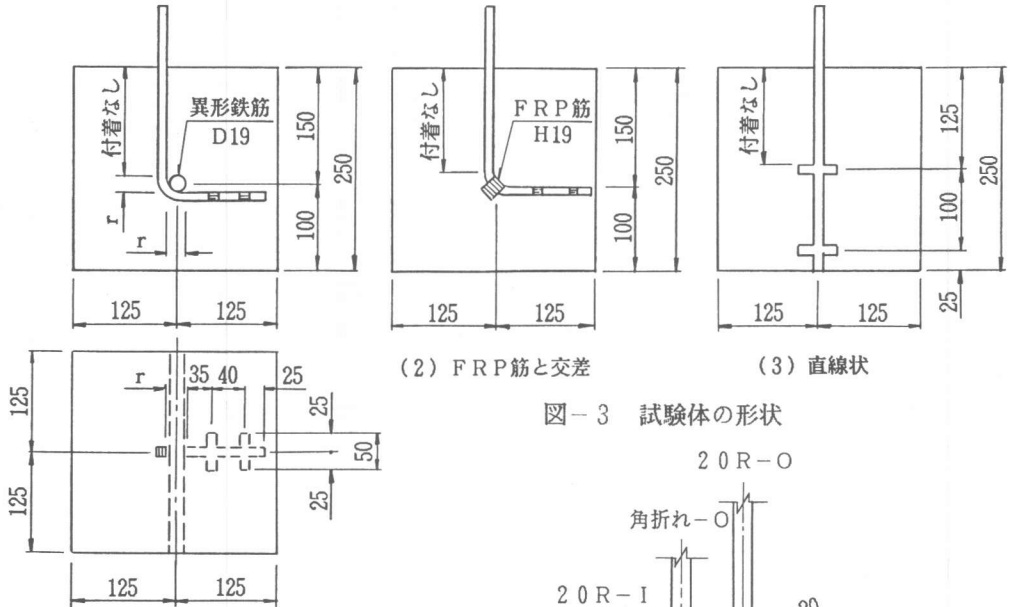


図-2 引張試験後のFRP筋の破断状況



(2) FRP筋と交差

(3) 直線状

図-3 試験体の形状

(1) 異形鉄筋と交差

ムテープを巻いた。なお、FRP筋の先端にはコンクリートとの定着を確保するために横筋を2本(キ印)設けている。

FRP筋の曲げ内半径は10~30mmの5種類とした。FRP筋の直径を10mmと仮定すると、これらの値は直径の1~3倍に相当し、土木学会のコンクリート標準示方書〔4〕に規定されて

いるスターラップ及び帯鉄筋の曲げ内半径について、普通丸鋼及び異形鉄筋のすべての値を含んでいる。試験体数は各曲げ内半径についてそれぞれ2体ずつとし、各1体ずつには曲げ加工部における応力集中の程度を測定するために、曲げ加工部の内側と外側にひずみゲージを貼付けた。

(2) FRP筋と交差した試験体

FRP筋と直交する軸筋にはD19相当のFRP筋を用いた。FRP筋の曲げ方は角折れ及び曲

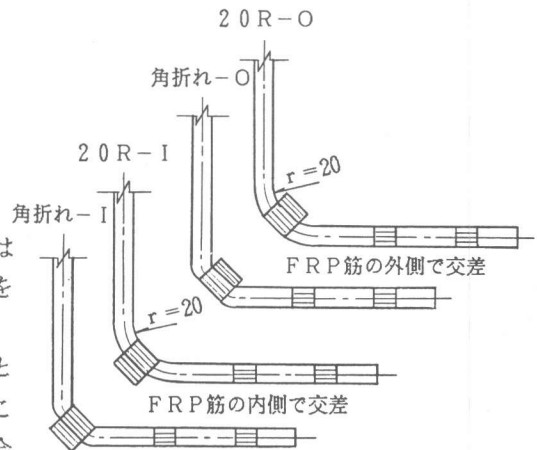


図-4 試験体(2)の詳細

げ内半径20mmの2種類とし、FRP筋と軸筋の交差部はFRP筋が軸筋の内側で交わる場合と外側で交わる場合の2種類とし、計4種類(図-4)を2体ずつ製作した。

(3) 直線状のFRP筋を使用した試験体

FRP筋は格子間隔10cmの平面格子状に成形したものの一部を切出したモデルであり、試験体数は5体とした。

2. 3 試験方法

FRP筋の頭部を引張用治具に挿入して固化させた後、この治具とテンションバーをカプラーで継ぎ、センターホールジャッキを用いてFRP筋に引張力を与えた。この時、ロードセルによって引抜き荷重を測定した。FRP筋の破断後は、コンクリートをはつって破断状況を観察した。

3. 試験結果及び考察

3. 1 異形鉄筋と交差した試験体

(1) FRP筋の最大荷重

試験結果を表-2に示す。FRP筋の破断は、図-5に示すようにほぼ曲げ加工部に生じた。なお、曲げ加工部にひずみゲージを貼付けると軸筋の位置が少し内側にずれ、より大きな曲げ応力が作用するために、最大荷重はひずみゲージのない場合に比べて大きく低下したと考えられる。いずれの試験体も曲げ内半径が増加すると最大荷重が増加した。直線部の本来の引張耐力は曲げ内曲率が0の場合を表しているの

表-2 試験結果(1)

試験体	曲げ内半径 r (mm)	曲げ内曲率 $1/r$ (mm^{-1})	曲げ加工部の ゲージの有無	最大荷重 T_{Fmax} (t)	$\frac{T_{Fmax}}{T_{Fu}}$
10R-1	10	0.100	—	3.48	0.601
10R-2			○	2.19	0.378
15R-1	15	0.067	—	4.07	0.703
15R-2			○	2.21	0.382
20R-1	20	0.050	—	4.46	0.770
20R-2			○	3.07	0.530
25R-1	25	0.040	—	4.33	0.748
25R-2			○	3.57	0.617
30R-1	30	0.033	—	4.99	0.862
30R-2			○	3.77	0.651

が0の場合を表しているの、ひずみゲージのない試験体の延長上にプロットすると、曲げ内曲率と最大荷重の間には若干下側に凸の曲線関係がある(図-6)。

(2) FRP筋の曲げ加工部のひずみ

ひずみゲージを貼付けた試験体の曲げ加工部の内側と外側及びコンクリート面より露出した直線部のひずみと引抜き荷重との関係を図-7

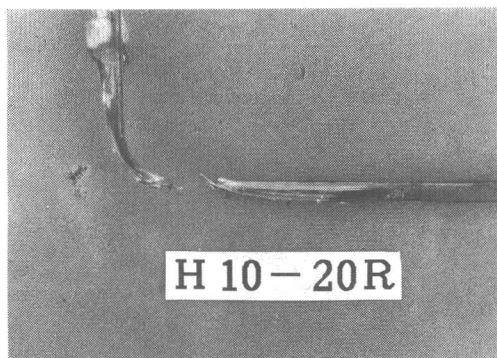


図-5 曲げ加工したFRP筋の破断状況

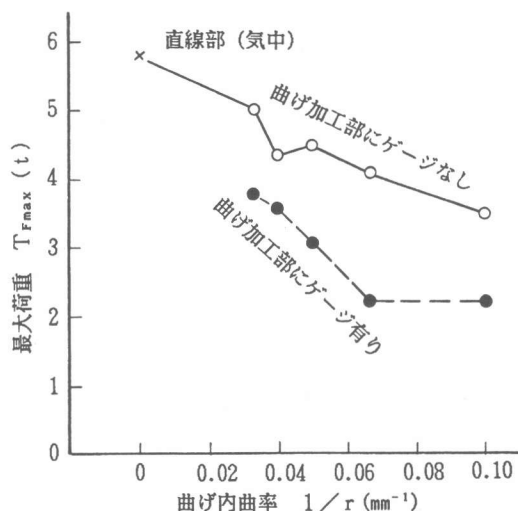


図-6 曲げ内曲率と最大荷重の関係

に示す。曲げ内半径が小さい場合は、曲げ加工部の内側には大きな引張ひずみが生じ、反対に外側には圧縮ひずみが生じた。引抜き荷重が増加すると、曲げ加工部の外側の圧縮ひずみは引張側へ向かう傾向が見られた。一方、曲げ加工部の内側のひずみは、引抜き荷重が1 t前後の時にひずみゲージが剥けてしまったために測定不可能となったが、引抜き荷重が増加すると外側のひずみと逆の傾向を示すものと考えられる。なお、曲げ内半径が大きくなると、曲げ加工部の外側には引抜き荷重が低い段階から引張ひずみが生じた。

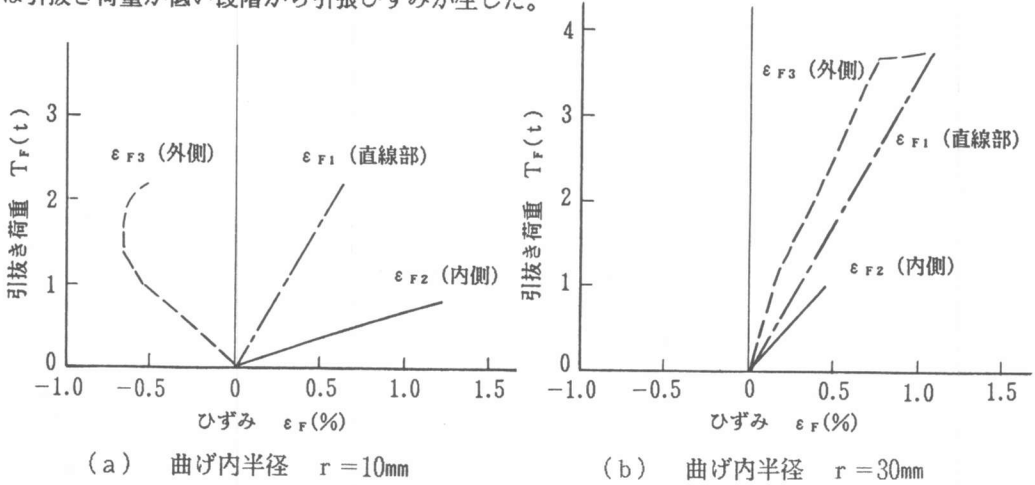


図-7 引抜き荷重とひずみの関係

引抜き荷重が1 tの時のFRP筋の曲げ内曲率と曲げ加工部のひずみ集中度の関係を図-8に示す。なお、ひずみ集中度は次式で定義した。

$$\text{ひずみ集中度} = \frac{\varepsilon_{F2}}{\varepsilon_{F1}} \quad \text{または} \quad \frac{\varepsilon_{F3}}{\varepsilon_{F1}}$$

ここに、 ε_{F1} : コンクリート面より露出した直線部のひずみ

ε_{F2} : 曲げ加工部の内側のひずみ

ε_{F3} : 曲げ加工部の外側のひずみ

曲げ内半径が小さい場合、曲げ加工部の内側には直線部の5倍以上のひずみ集中が生じ、これによって曲げ加工部の内側の繊維から順次破断したために最大荷重が低下したことが確認された。ただし、使用したFRP筋はガラス繊維束と高強度炭素繊維束のハイブリッド型であり、曲げ加工部の内側の炭素繊維が破断した後はガラス繊維に引張力が乗移するというハイブリッド効果が発現されるため、ひずみ集中度が最大荷重に及ぼす影響は緩和されたと思われる。

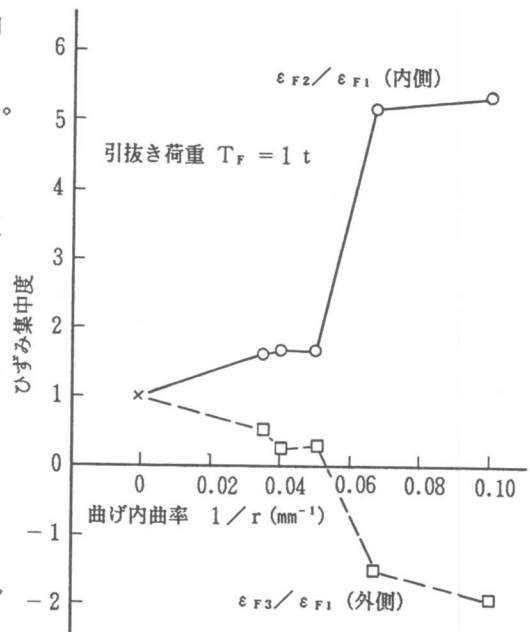


図-8 曲げ内曲率とひずみ集中度の関係

3. 2 FRP筋と交差した試験体

試験結果を表-3に示す。曲げ加工したFRP筋の破断はすべて軸筋との交差部に生じた。FRP筋の曲げ加工部が角折れする場合よりも曲げ加工部に円弧 ($r=20\text{mm}$) を設けた方が最大荷

重は増加した。また、角折れする場合は軸筋の内側で交差する場合と外側で交差する場合とで最大荷重にほとんど差はなかった。一方、交差部に円弧を設けた場合は、軸筋の外側で交差する場合よりも内側で交差する方が最大荷重が低下する傾向が見られた。

FRP筋の曲げ内半径が20mmの場合に着目すると、軸筋に異形鉄筋を用いた場合より、軸筋にもFRP筋を用いて交差した方が最大荷重は若干低下した。軸筋に用いたFRP筋が定着の役割を果たし、曲げ加工したFRP筋のすべりが生じにくくなり、応力集中によって破断するので最大荷重が低下したと考えられる。そして、このことは、FRP筋が直線状の場合にもあてはまるであろうことは容易に想像できる。

表-3 試験結果(2)

試験体	曲げ内半径 r (mm)	曲げ内曲率 $1/r$ (mm^{-1})	FRP筋が軸筋と交差する位置	最大荷重 T_{Fmax}		T_{Fmax} / T_{Fu}	
				(t)	平均		平均
角折れ-I-1	角折れ	∞	軸筋の内側	3.31	3.29	0.572	0.569
角折れ-I-2				3.27		0.565	
20R-I-1	20	0.050	軸筋の内側	3.52	3.48	0.608	0.601
20R-I-2				3.44		0.594	
角折れ-O-1	角折れ	∞	軸筋の外側	3.33	3.26	0.575	0.563
角折れ-O-2				3.19		0.551	
20R-O-1	20	0.050	軸筋の外側	3.71	3.89	0.641	0.671
20R-O-2				4.06		0.701	

3.3 直線状のFRP筋を使用した試験体

試験結果を表-4に示す。また、FRP筋の破断状況を図-9に示す。試験体の最大荷重の平均値は直線部の本来の引張耐力の89%に相当する。気中における格子状FRP筋の引張試験では格子交差部の影響がほとんど見られず、最終破断状況はバラバラになって竹ぼうき状を呈するのに対して、コンクリート内における破断は応力集中によって必ず格子交差部に生じるので、最大荷重が低下したと考えられる。

上記の結果は、格子状FRP筋のコンクリート内における引張耐力は気中よりも10%程度低下することを意味している。従って、格子状FRP筋を主筋に用いたコンクリートはりが曲げ破壊する場合等には、破壊荷重の算定に際して考慮する必要がある。

3.4 試験結果のまとめ

全ての試験結果をFRP筋の最大荷重と直線部の本来の引張耐力の比及び曲げ内曲率で整理したものを図-10に示す。曲げ加工部にひずみゲージを貼付けた試験体は最大荷重が大きく低

表-4 試験結果(3)

試験体	最大荷重 T_{Fmax}		T_{Fmax} / T_{Fu}	
	(t)	平均		平均
No. 1	5.10	5.16	0.881	0.892
No. 2	5.03		0.869	
No. 4	5.25		0.907	
No. 5	5.09		0.879	
No. 6	5.35		0.924	

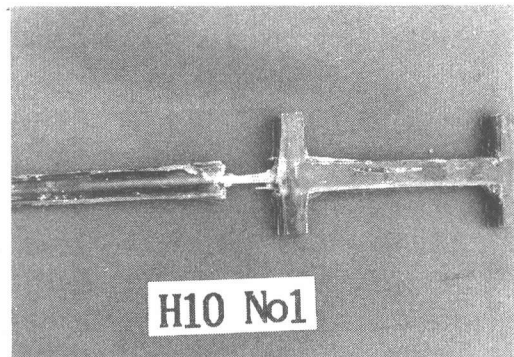


図-9 横筋との交差部における破断状況

下したので除外すると、次の3グループに分類可能である。

- ① 異形鉄筋と交差した試験体
- ② FRP筋の外側で交差した試験体
- ③ FRP筋の内側で交差した試験体

なお、①で曲げ内曲率が0の場合は直線部の本来の引張耐力に等しくなり、②と③は曲げ内曲率が0及び無限大(角折れ)の場合、両者の最大荷重はほぼ一致すると考えられる。

4. 結論

本研究の試験結果から以下の結論を得た。

(1) 曲げ加工したFRP筋に引張力が作用すると、曲げ加工部の内側には曲げ内半径が小さいほど大きな引張ひずみが生じ、反対に外側には圧縮ひずみが生じた。曲げ内半径が大きくなると、曲げ加工部の外側にも引張ひずみが生じた。

(2) 曲げ加工したFRP筋は曲げ加工部の内側の繊維から順次破断し、曲げ内半径が小さくなるほど引張耐力は低下した。

(3) 曲げ加工したFRP筋は異形鉄筋と交差する場合よりも、FRP筋と交差した場合の方が引張耐力は低下した。

(4) FRP筋と交差する場合は、角折れする場合よりも交差部に円弧を設けた方が引張耐力は増加した。更に、FRP筋の内側で交差する場合よりも外側で交差する方が引張耐力は若干大きかった。

(5) 平面格子状FRP筋のコンクリート内における破断は応力集中によって横筋との交差部に生じるので、引張耐力は気中よりも若干低下した。

<謝辞>

FRP筋を提供して頂いたネフコム㈱の二川 稔氏に感謝します。

[参考文献]

- [1] 小沢一雅, 関島謙蔵, 岡村 甫: FRP筋で補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, 昭和62年7月, PP.269-274
- [2] 寺田年夫, 鳥取誠一, 涌井 一, 宮田尚彦: FRPをせん断補強に用いたRCはりの破壊性状について, コンクリート工学年次論文報告集, 第10巻, 昭和63年6月, PP.541-546
- [3] 松崎育弘, 中野克彦, 中沢春生, 藤崎忠志: 繊維強化複合材料(NFM)の建築構造への利用に関する研究(その7) NFMを利用した梁のせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 昭和63年10月, PP.817-818
- [4] コンクリート標準示方書, 設計編, 土木学会, 昭和61年

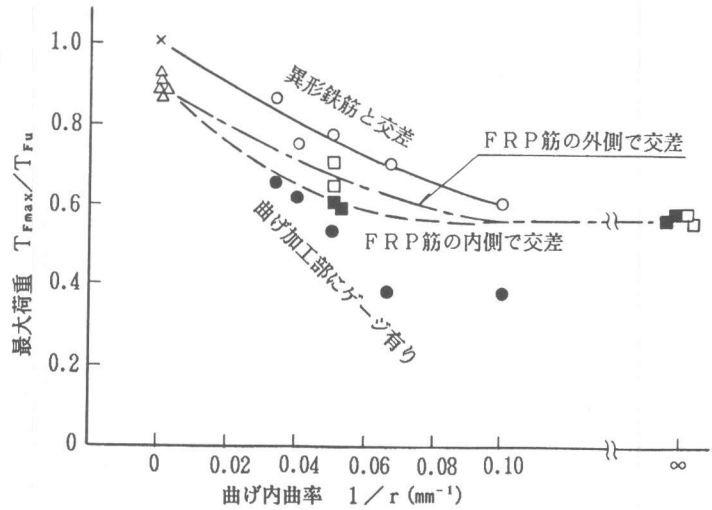


図-10 曲げ内曲率と最大荷重の関係