

論文

[1178] FRPロッドの曲げ加工部の引張耐力に関する実験的研究

正会員○丸山武彦（日本コンクリート工業）

正会員 本間雅人（日本コンクリート工業）

正会員 岡村 甫（東京大学工学部）

1 はじめに

FRPロッドはPC用緊張材やRC用補強材としての引張材のほか、スターラップなどのせん断補強筋として利用する場合がある。引張補強筋として利用する場合は、従来の構造細目にしたくえばロッドの定着端部にフック等を設けることが要求され、スターラップ等に利用する場合は曲げ加工を行う必要がある。したがって、FRPロッドを補強材として実用化するためには曲げ加工部の耐力に関する情報が必要である。既応の研究によると、はりのせん断補強筋として用いたFRPロッドが曲げ加工部で破断する場合があります¹⁾²⁾、曲げ半径が小さくなるほど引張耐力が低下することが報告されている³⁾。これらの研究は主として格子状FRP筋に関するものであり、繊維含有率が50～65%のFRPロッドの曲げ加工部の耐力に関する資料はまだ報告されていない。本報告では、これらの方式の代表的な炭素繊維およびアラミド繊維FRPロッドについて、加工部の曲げ半径を3種類、コンクリート強度を2種類に変えて引張試験を行い、コンクリート中におけるFRPロッド曲げ加工部の引張耐力に関する検討を行ったものである。

2 実験の概要

2.1 FRPロッドの曲げ加工

使用したCFRPロッドは7本より線型とプルトルジョンタイプの巻きつけ型の2種類とし、AFRPロッドは組紐型で比較のために鉄筋も使用した。これらの性質を表1に示す。CFRPロッドの引張強度は213および177kgf/mm²、弾性係数は14,000および14,700kgf/mm²、破断時の伸びは1.6および1.2%である。AFRPロッドはそれぞれ140kgf/mm²、6,410kgf/mm²、2.16%で強度と弾性係数は小さく伸びが大きいことが特長である。これらのロッドの曲げ加工部の内側半径は表2に示すように、 $r = 5, 15, 25$ mmの3種類とした。より線型および組紐型の場合の曲げ加工の方法は、編組されたプリプレグを所定の曲げ半径を有する金属棒に沿って曲げ、マトリクスであるエポキシ樹脂を加熱硬化させたものであり、曲げ加工部の断面は円形ではなく偏平になり、内側および外側の一部の繊維束においてはたるみを生ずる。巻きつけ型のCFRPは、ほぼロッド径に等しい半円形の溝付金型の円形溝に沿ってプリプレグを曲げて熱硬化させたものであり、曲げ加工部のロッド断面はほぼ円形で内側の異形凹凸はなくなり、かつ内側繊維は曲げ加工の始まりと終わりの一部でたるみ状態のまま硬化することが特長である。

2.2 試験体および試験方法

試験体の形状寸法は図1に示すようで、各曲げ半径につき3本を試験片とする合計9本を1組

表1 使用したFRPロッドの特性

特性	炭素繊維 より線型	炭素繊維 巻きつけ	アラミド繊維 組紐型	鉄筋 丸棒
公称径 (mm)	7.5	6.0	8.0	6.0
断面積 (mm ²)	30.4	28.3	50.0	28.3
引張荷重 (kgf)	6 480	4 990	6 990	1 480
引張強度 (kgf/mm ²)	213	177	140	52
弾性係数 (kgf/mm ²)	14 000	14 700	6 410	21 200
破断伸び (%)	1.6	1.2	2.16	—

表2 FRPロッドの曲げ加工内側半径



記号	半径 r(mm)	曲率 1/r(mm ⁻¹)
5 r	5	0.200
15 r	15	0.067
25 r	25	0.040

表3 コンクリートの配合および強度

コンクリート レベル (kgf/cm ²)	G _{max} (mm)	スランプ (cm)	W		S		単位量 (kgf/m ³)					
			C	A	W	C	S	F	S	G	ad.	
500	20	9	0.45	0.44	162	360	-	804	1031	3.6		
1,000	20	11	0.31	0.42	124	400	80	760	1053	12		

コンクリート レベル (kgf/cm ²)	標準養生				試験体同一養生			
	σ_{14} (kgf/cm ²) (平均値)				σ_c (kgf/cm ²) (平均値)			
500	497	499	495	(488)	455	436	569	(502)
1,000	893	915	932	(913)	1034	1020	973	(1009)

として、コンクリートブロック中に埋設した。ロッドの埋込み深さを 150mm で表面から 100mm の長さの付着を断ち、ロッドとコンクリートの付着区間は引張方向の 50mm および定着方向の 150mm とした。曲げははじめから 70mm の定着側に 1mm ひずみゲージ 2 枚を貼付して、引張荷重の伝達度のチェックを行った。コンクリートは表 3 に示すとうりて早強セメントを使用し、圧縮強度は 500 および 1000 kgf/cm² の 2 種類とした。試験体は、約 1 週間の湿空養生を行った後試験時まで気中に放置した。試験は写真 1 に示すように、鋼製スリーブで定着した引張端部をナットまたは楔でつかみ、15tf 油圧ジャッキを用いて引張った。荷重の測定には 5 tf ロードセルを使用し、荷重は静的に一方単調増加を基本として、一部の試験片では数回の繰り返し載荷を行った。

3 実験結果および考察

3. 1 FRP ロッドの破断状況

FRP ロッドの破断は主として引張側の曲げ加工が始まる位置で発生しており、破断の始まりが加工部の内側からか外側からかは明らかではないが、曲げ加工による繊維のたるみが生じて引張方向に不揃いの配列となる内側の繊維から徐々に切断されたものと思われる。より線型の場合は 7 本の素線の一部から破断が始まり、引張力が他の素線に順次シフトしながら最後に 7 本の素線がばらばらになって破断した様子がうかがえた。プルトルージュンタイプの巻きつけ型 CFRP の場合は、最初に一部の繊維が切れはじめると残りの繊維の破断が一気に進み、ほぼ瞬間的に切れた状況を示していた。AFRP ロッドの場合は繊維の伸び能力が大きいために、徐々にひきちぎられた様子を示している。コンクリート強度が 1000 kgf/cm² の場合のロッドの破断状況および位置もほとんど同様の状態であった。一方、鉄筋の場合はすべてコンクリートの外側の直線部で破断しており、事実上鉄筋の引張試験と同様の結果となった。

3. 2 曲げ加工部の引張耐力

コンクリート強度が 500 kgf/cm² の場合の試験の結果を表 4 に、1000 kgf/cm² の場合を表 5 に示し、通常の引張試験の強度に対する比も合わせて示した。この結果をグラフで示すと図 2 のようになる。いずれのロッドにおいても曲げ半径が小さくなる（曲率が大きくなる）にしたがって、曲げ加工部の引張耐力は低下していることがわかる。耐力の低下の様子はロッドの種類によって多少異なるが、曲率が 0 ~ 0.5 mm⁻¹（曲げ半径で約 20mm より大）の範囲においては概して直線的に低下し、それより大きい曲率では低下割合がゆるやかになる傾向を示している。(a) 図に示す巻き

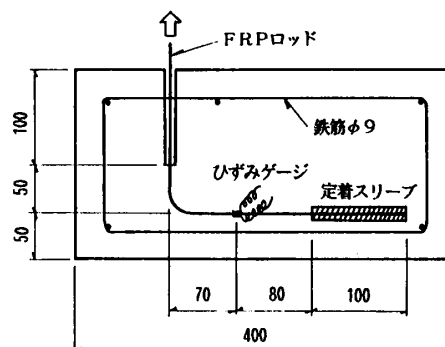


図1 曲げ加工部の引張試験体

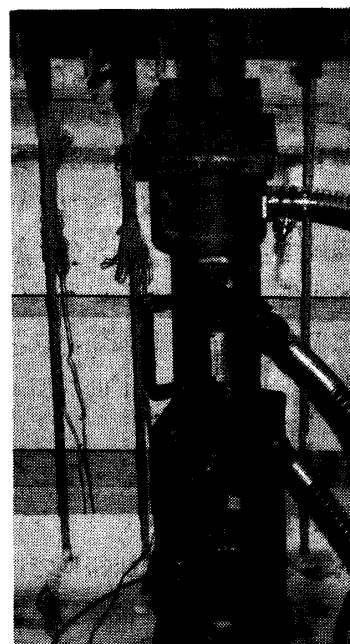


写真1 曲げ加工部の引張試験状況

つけ型の場合はデータ数が不十分ではあるが 25 r で引張耐力は急減し、15 r および 5 r の範囲での値と大差がない。たとえば、直線部の引張強度 177kgf/mm^2 に対して、25 r ~ 15 r の範囲で $100 \sim 120\text{kgf/mm}^2$ となり、5 r における $80 \sim 100\text{kgf/mm}^2$ の強度と 20kgf/mm^2 程度の差がある。この理由として、加工部断面が偏平ではないこと、内側に配置された繊維にはたるみがあって均等な引張力を受けないこと、繊維が密に配置されて曲げ剛性が大きく、繊維が揃う方向に移動変形できないこと、炭素繊維の伸び能力が小さく軸方向以外からの応力に対して非常にぜい性的であることなどが考えられる。(b)図に示すより線型 CFRP の場合は、曲率が大きくなるにしたがって曲げ加工部の強度は双曲線的に低下している。すなわち、引張強度 210kgf/mm^2 に対し、25 r では約 140kgf/mm^2 、15 r で 130kgf/mm^2 、5 r で 110kgf/mm^2 とさらに低下している。5 r の場合の耐力は引張強度の約 50% でプルトルジョンタイプの場合の約 55% とほぼ同程度であるにもかかわらず、25 r および 15 r の低下割合が小さい理由は、より線ロッドの曲げ剛性が小さく、断面内にはロッドの変形に伴って 7 本の

素線が移動できる隙間があり、繊維の破断が瞬間的ではなく徐々に生じるからであると考えられる。コンクリート強度が 1000kgf/mm^2 の場合は、各曲げ半径においてはほぼ 20kgf/mm^2 程度大きな値を示しているが全体の低下傾向は同様である。(c)図の AFRP においてはやはり下に凸の双曲線的であり、曲率が $0 \sim 0.1\text{mm}^{-1}$ の範囲ではほぼ直線的に低下する様子が見られる。この理由は、アラミド繊維の伸びが大きいこと、弾性係数が小さく、さらに組紐状であるのでロッドの曲げ剛性も小さく変形しやすいことなどにより、ロッド加工部の変形にともなうアラミド繊維束の移動がしやすく、繊維の破断が徐々に伝播していくからであると考えられる。

3. 3 曲げ半径と引張耐力の低下率

図 3 は各 FRP ロッドの引張試験時の破断荷重を 1.0 とした場合、それぞれの曲げ半径（曲率）における加工部の引張耐力の割合を示したものである。(a)に示すプルトルジョン型の場合はデータが少なくばらつきも大きいことから十分なことは言えないが、ほぼより線型の CFRP ロッドと同様な傾向を示している。曲げ半径 25 r の場合の曲げ加工部強度は引張強度の約 60%、5 r では約 55% 程度に低下する。高強度コンクリートに埋設された場合は、 500kgf/cm^2 の場合と同等かあるいはそれ以下になると思われる。本試験におけるロッドの加工部断面は円形に近い形状であるが、偏平な曲げ加工部とする場合の方が加工が簡単であり内側繊維のたるみが少なく配

表 4 FRP ロッドの曲げ加工部の引張耐力
(コンクリート強度レベル 500kgf/cm^2 の場合)

強度 ロッド	破断荷重 kgf (kgf/mm^2)		
	5 r	15 r	25 r
炭素 FRP	3 392 (112)	4 093 (135)	3 696 (122)
より線型	3 000 (99)	4 203 (138)	4 701 (155)
$\phi 7.5$	3 300 (109)	3 300 (109)	4 401 (145)
平均	3 231 (106)	3 865 (127)	4 266 (140)
引張強度比	0.499	0.597	0.659
炭素 FRP	2 599 (92)	3 198 (113)	*
巻きつけ型	2 797 (99)	3 000 (106)	*
$\phi 6.0$	*	*	*
平均	2 698 (96)	3 099 (110)	—
引張強度比	0.540	0.620	—
アラミド FRP	2 996 (60)	4 093 (82)	5 300 (106)
組紐型	2 903 (58)	4 599 (92)	5 300 (106)
$\phi 8.0$	3 992 (80)	5 203 (104)	5 405 (108)
平均	3 297 (66)	4 632 (93)	5 335 (107)
引張強度比	0.470	0.661	0.762
鉄筋	すべて埋設外の直線部破断 (引張試験と同様)		
$\phi 6.0$	1 481 (52)	—	1.0

* : 載荷側の定着スリーブが抜出して破断しなかったロッド

表 5 FRP ロッドの曲げ加工部の引張耐力
(コンクリート強度レベル 1000kgf/cm^2 の場合)

強度 ロッド	破断荷重 kgf (kgf/mm^2)		
	5 r	15 r	25 r
炭素 FRP	3,802 (125)	4,004 (132)	4,903 (161)
より線型	3,700 (122)	4,903 (161)	5,296 (174)
$\phi 7.5$	3,700 (122)	4,604 (151)	4,498 (148)
平均	3,734 (123)	4,504 (148)	4,899 (161)
引張強度比	0.577	0.696	0.757
炭素 FRP	2,907 (103)	2,502 (89)	3,000 (106)
巻きつけ型	2,401 (85)	*	*
$\phi 6.0$	2,705 (96)	*	*
平均	2,671 (95)	2,502 (89)	3,000 (106)
引張強度比	0.534	0.500	0.600
アラミド FRP	4,367 (87)	5,697 (114)	5,802 (116)
組紐型	4,599 (92)	4,604 (92)	5,498 (110)
$\phi 8.0$	4,304 (86)	4,604 (92)	5,608 (112)
平均	4,423 (89)	4,968 (99)	5,636 (113)
引張強度比	0.632	0.710	0.805

* : 載荷側の定着スリーブが抜出して破断しなかったロッド

向性が向上するので、今後は偏平加工を含めた曲げ加工方法の相違による耐力低下の検討が必要であろう。(b)のより線型の場合は曲率が 0.05mm^{-1} 程度以下(曲げ半径が $15r \sim 25r$ 以上)の場合の強度低下は急激であり、この範囲を超えると緩やかになる。コンクリート強度 500kgf/cm^2 の場合の加工部強度は $25r$ で約65%、 $15r$ で約60%、 $5r$ では約50%まで低下する。 1000kgf/cm^2 の場合はそれぞれ約75%、約70%および約58%であり、10%づつ高い加工部強度を示している。(c)に示すAFRPの場合は、曲率 0.1mm^{-1} 程度(曲げ半径で $15r$ 以上の範囲)において強度低下はほぼ直線的であり、その低下割合はCFRPに比較してやや小さく、コンクリート強度の相違による差は比較的少ない。しかし、 $5r$ 程度の急激な曲げ半径とする場合の耐力は、 500kgf/cm^2 コンクリートで47%、 1000kgf/cm^2 で63%でありCFRPの場合と同程度まで低下する。以上のように、FRPロッドの曲げ加工部の引張耐力は曲率が大きくなるにしたがって低下し、 500kgf/cm^2 コンクリートの場合は、 $25r$ で引張強度の60~80%、 $15r$ で60~65%、 $5r$ では45~55%の範囲であった。曲げ加工部に繰返し応力が作用する場合は、鉄筋スターラップにおいてさえも曲げ加工部で疲労破断する⁴⁾ほどであるから、FRPロッドの引張耐力は極端に低下することも考えられるので、さらにデータを蓄積し十分な検討をすることが重要である。

3. 4 コンクリート

強度の影響

図4はロッドの引張耐力とコンクリート強度の関係を示したものである。(b)のより線型の場合はいずれの曲げ半径においても、 1000kgf/cm^2 のコンクリートの方が大きな耐力を得ており、曲げ加工部強度で 20kgf/mm^2 程度、約15%増の割合である。(c)のAFRPの場合は半径が小さいほどコンクリート強度の

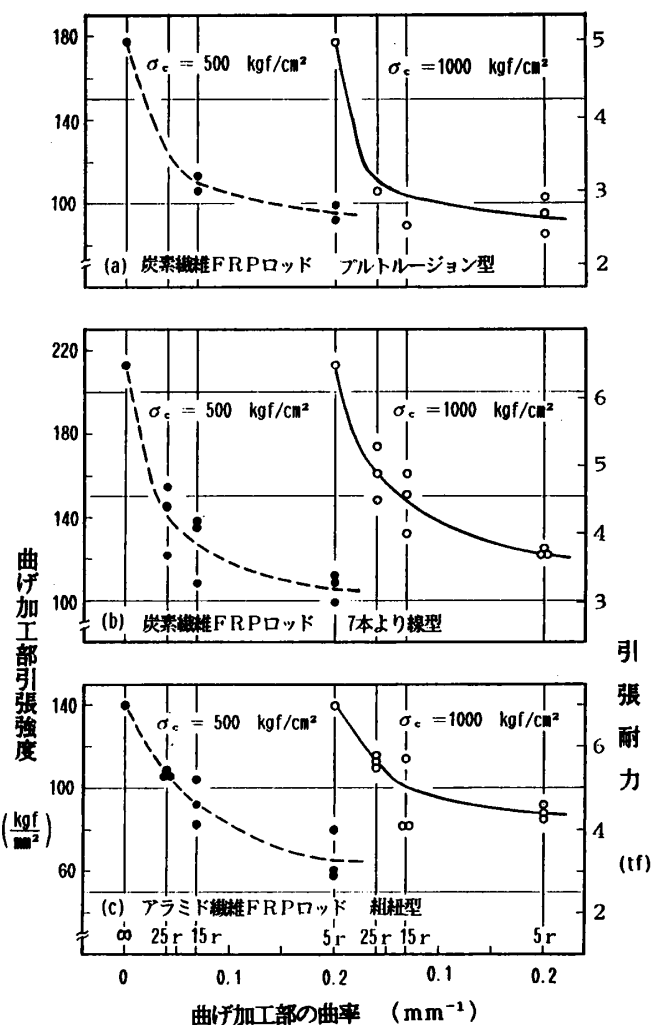


図2 FRPロッドの曲げ加工部の引張耐力

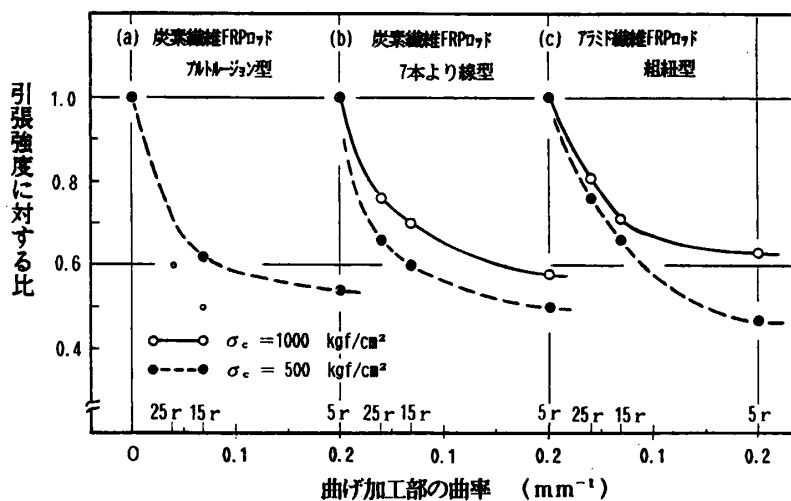


図3 曲げ半径と引張耐力の低下率

影響が大きい結果となった。すなわち、
500kgf/cm²と1000kgf/cm²のコンクリート
の場合を比較すると、25r～15rの
場合は5～7%増加し、5rの場合には
66から88kgf/mm²へと約30%増加してい
る。この原因は明らかではないが、引張
耐力のばらつきを考慮すると30%の増加
割合は過大評価であろうと思われる。

3. 5 曲げ加工部を経由する

引張力の伝達

ロッドの引張側ひずみと、曲げ加工部
を経由して定着側70mm位置に伝達される
引張力のひずみとの代表的な関係を
図5に示す。引張力の伝達率はロッ
ドの種類や曲げ加工方法の相違によ
って差があり、プルトルージョン型
CFRP、より線型CFRP、AF
FRPの順に大きくなる。全体の傾向
として、加工部の曲げ半径が大きい
ほど伝達される引張力は大きいこと、
コンクリート強度が低くなると付着
強度が小さいことから、伝達引張力
は大きくなることが観察される。

(a)の巻きつけ型の場合は、曲げ
部断面はほぼ円形で内側表面は滑ら
かなことからコンクリートとの付着
力はあまり期待できず、定着側への
引張力は早い段階から伝達される。
5rの場合は定着側への引張力の伝
達はほとんどなく、破断直前の荷
重2.8tfにおいてさえも、引張側
ひずみ6700 μ に対して、定着側は
480 μ 程度で伝達率はわずかに7
%である。しかし、25rの場合
はやや伝達が良くなり、破断直前
の定着側ひずみは1500 μ 程度で約
22%の伝達率となる。コンクリ
ート強度が1000kgf/cm²の場合は、ひ
ずみ曲線の勾配が急になり引張力
の伝達はさらに悪くなる。。これ

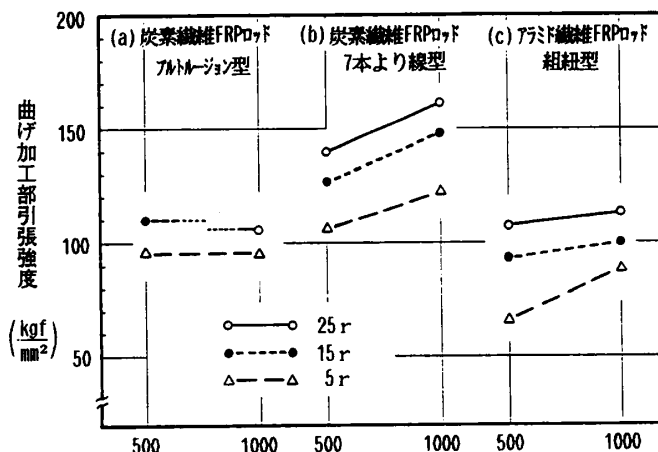


図4 曲げ加工部の耐力とコンクリート強度の関係

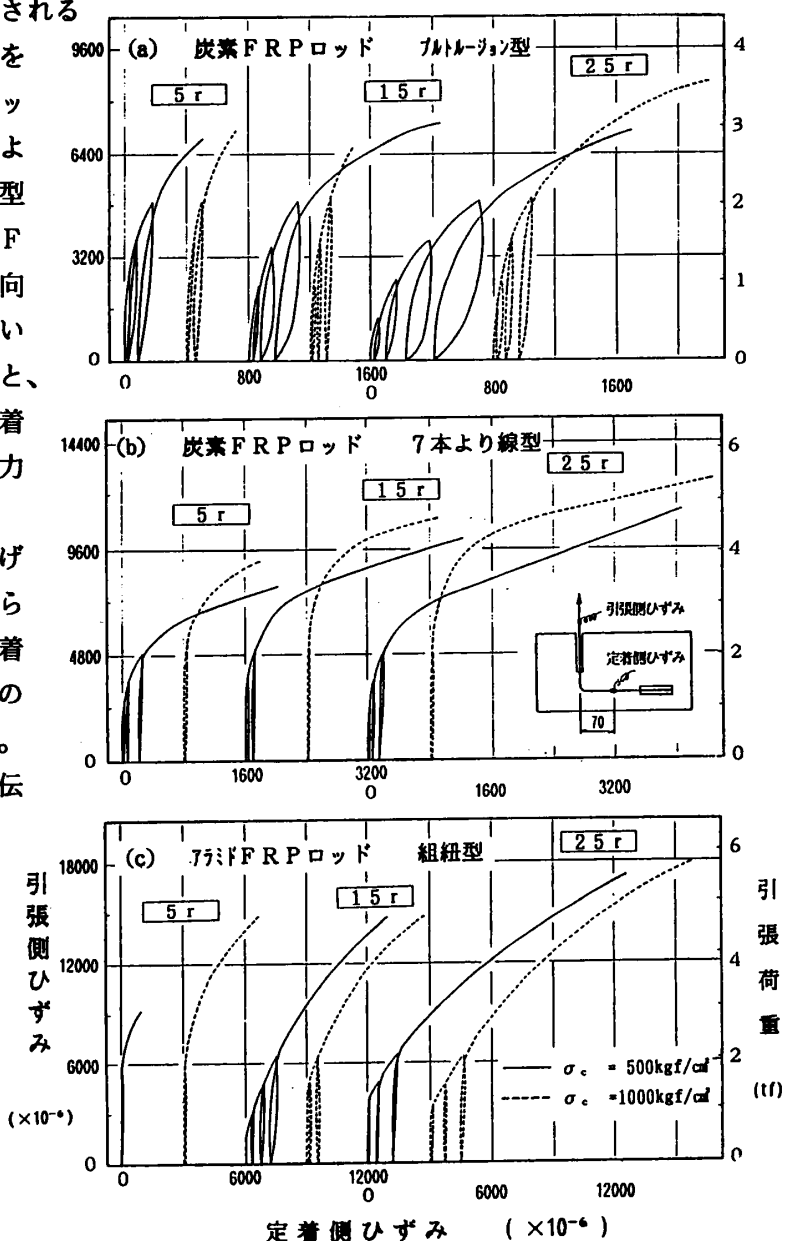


図5 引張側ひずみと曲げ加工部を経由する定着側ひずみの関係

らから、曲げ半径が小さい場合の引張力は、曲げ加工部におけるFRPロッドとコンクリートとの接触圧力によって保たれていると考えられる。(b)はより線型の場合であり、引張力が定着側に伝わり始める荷重は曲げ半径によってあまり左右されず、また定着側に残留するひずみにも大差がない。終局状態における引張力の伝達率は、半径5 rおよび15 rの場合は26~28%、25 rの場合は引張側11000 μ に対して定着側4000 μ で36%程度である。巻きつけ型に比較して伝達率が大きくなる理由は、より線型の付着強度は約50kgf/cm²で劣ること、より線の素線間には相対移動できる空間があること、曲げ剛性が小さいので曲げ部での張力を柔軟に伝達できること等によるものと考えられる。コンクリート強度が1000kgf/cm²の場合にはひずみの関係曲線の勾配は急になって引張力の伝達率は小さくなる。(c)はAFRPの場合であり、半径が15 rより大きくなるとひずみ関係曲線はコンクリート強度に関係なくほぼ類似しており、引張力が小さい段階から定着側に伝達されていることがわかる。5 rの終局状態においては約10%の伝達率にすぎないが、15 rの場合は約46%、25 rになると定着側ひずみは約12300 μ で伝達率は73%と非常に大きくなる。AFRPの引張力の伝達が大い理由は、ロッド表面の組紐の凹凸が小さいこと、付着力が劣ること、アラミド繊維の伸び能力が大きいこと、ロッドの曲げ剛性が小さいことなどによるものと考えられる。コンクリート強度が1000kgf/cm²の場合もほぼ同様であり、強度の影響は少ないようである。

4 まとめ

炭素繊維およびアラミド繊維FRPロッドの曲げ半径を5、15、25 mmとして、曲げ加工部の引張耐力試験を行った結果、実験の範囲内で次の事項が確認できた。

- (1) 炭素繊維およびアラミド繊維FRPロッドはすべて曲げ加工部で破断し、破断位置は引張側の曲げはじめ部分であった。これに対し、鉄筋の場合は曲げ加工部で破断したものはなかった。
- (2) FRPロッドの曲げ加工部の引張耐力は、加工部の曲率が大きくなる(曲げ半径が小さくなる)にしたがって双曲線的に減少する傾向がある。たとえば、より線型CFRPロッドの場合は引張強度が210kgf/mm²であるのに対し、半径25 rでは約140kgf/mm²、15 rでは約130kgf/mm²、5 rでは約110kgf/mm²であった。
- (3) 曲げ加工部の引張耐力の減少率は、曲げ半径、繊維の種類、加工方法等によって相違する。コンクリート強度が500kgf/cm²の場合、より線型CFRPロッドの引張強度に対する割合は、曲げ半径25、15、および5 rに対して、それぞれ65%、60%、および50%程度であり、組紐型AFRPロッドの場合は、それぞれ75%、65%、および45%程度であった。
- (4) コンクリート強度500および1000kgf/cm²の相違が、曲げ加工部の引張耐力に与える影響はロッドの種類によって多少異なるが、高強度コンクリートの方が大きな耐力を得た。
- (5) 曲げ加工部を経由して定着側に伝達される引張力は、曲げ半径が大きくなるにしたがって増加するが、その程度はFRPロッドの種類や曲げ加工の方法等によって異なり、AFRPが最も大きく、より線型CFRP、プルトルジョン型CFRPの順であった。

《参考文献》1)小沢、関島、岡村：FRP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、1987 2)涌井、鳥取、寺田、原：FRP棒材を緊張材ならびに螺旋状せん断補強筋として用いた梁のせん断試験、コンクリート工学年次論文報告集、1989 3)宮田、鳥取、寺田、関島：曲げ加工したFRP筋の引張耐力に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、1989 4)Okamura, Farghaly, Ueda: Behaviors of Reinforced Concrete Beams with Stirrups Failing in Shear under Fatigue Loading, Proc. of JSCE, No. 308, 1981.