

論文

[1133] 各種 FRP ロッドのせん断性状に関する研究

正会員 丸山武彦 (日本コンクリート工業)

正会員 〇本間雅人 (日本コンクリート工業)

1. はじめに

新素材を使用した繊維強化プラスチックの棒状体 (FRP ロッド) あるいは 2 次元、3 次元編組体をコンクリート補強材として利用する研究が各方面で行われている。これらは、主として RC あるいは PC の主筋として利用する場合の曲げ性状に関するものが多く¹⁾²⁾、FRP を主筋として用いることの可能性は高く評価されつつあり、すでに炭素繊維 FRP ロッドについては道路橋 PC 桁として実用化されている³⁾。一方、梁のせん断補強筋として FRP を用いた場合は、スターラップあるいは FRP 主筋がせん断破壊を起こすことがあること¹⁾、鉄筋と同様な補強の計算法では補強効果が十分得られないことがあること⁴⁾、FRP がひびわれをはさんで斜め方向の引張力を受けると耐力が低下すること⁵⁾等の報告があり、FRP のせん断耐荷性状に関する問題点も指摘されている。しかし、FRP の基本的なせん断性状に関する研究はまだ非常に少ない。

本研究は、各種の FRP ロッドのせん断性状を把握することを目的として、push-off タイプのコンクリート供試体中に数種類の配置角度で埋設した FRP ロッドの間接一面せん断試験を行い、その結果について考察したものである。

2. 使用材料および実験方法

2.1 使用材料

表-1 FRP ロッドの特性

繊維	記号	表面形状	呼び径 (mm)	繊維含有率 %	断面積 (mm ²)	破断荷重 (kgf)	破断強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	最大ひずみ (%)
炭素	CA	片巻	6	65.4	28.3	5,000	177	14,700	1.18
	CB	綾巻	5	55.0	19.6	3,460	176	15,700	1.0
	CC	糸巻	6	-	22.4	4,170	186	13,800	1.40
	CD	7線	5	-	10.1	1,870	185	13,900	1.40
アラミド	AA	片巻	6	54.8	28.3	-	150	5,900	2.30
ガラス	GA	片巻	6	58.6	28.3	4,580	162	5,800	2.82
鉄筋	S	異形	6	-	28.3	1,860	66	21,300	-

(断面積は呼び径より求め、アラミドの破断強度は V f 値より求めた理論値である)

使用した FRP ロッドは表-1 に示すように、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維の 3 種類であり、いずれもエポキシ樹脂をマトリクスとして収束した異形ロッドで、比較のために異形鉄筋も使用した。FRP ロッドの加工方法は、引き抜き成型ロッドが未硬化時にロッドの表面に繊維束をスパイラル状に巻きつけたもの (CA, CB)、綾巻き状に巻きつけたもの (CC)、7 本よりのより線状にしたもの (CD) などで異形加工後に硬化させ一体成型しているこれらのロッドの引張強度はいずれも 150kgf/mm² 以上である。

2.2 供試体および実験方法

FRP ロッドの間接一面せん断試験の供試体は図-1 に示す形状

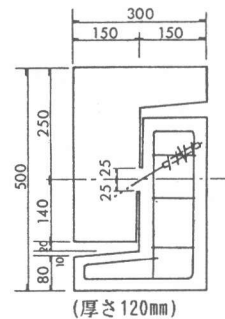


図-1 試験体の形状

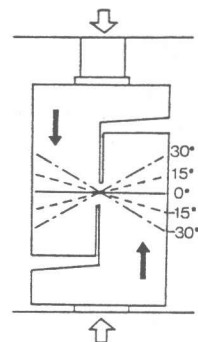


図-2 FRP ロッドの配置

寸法で、ロッドを埋設した部分のコンクリートのせん断破壊が先行するようにスリットを設けてあり、せん断面の断面積は 60cm^2 とした。FRPロッドの配置は図-2に示すように、せん断面に対して垂直になる角度 0° を基準とし、せん断面において多少の引張力を受けながらせん断力に抵抗する角度 15° 、 30° および、圧縮力を受ける形でせん断力に抵抗する角度 -15° 、 -30° の5種類とした。FRPロッドの抜け出しが心配されるものについては、ロッドの両端に樹脂充填したつば付き鋼管スリーブを取り付けてスパイラル補強を行なった。

コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、細粗骨材とも鬼怒川産で、粗骨材の最大寸法は 15mm 、スランプ $8\pm 2\text{ cm}$ 、細骨材率49%、水セメント比55%、単位セメント量 $355\text{kg}/\text{m}^3$ とした。供試体は脱型後1週間の水中養生を行い、その後3週間の空中養生を行ってから試験した。供試体と同一養生を行ったコンクリートの圧縮強度は $350\sim 450\text{ kgf}/\text{cm}^2$ 、引張強度は $35\sim 45\text{ kgf}/\text{cm}^2$ 、一面せん断強度は $50\sim 65\text{ kgf}/\text{cm}^2$ であった。供試体は 30ton 圧縮試験機とロードセルを用いて加力測定し、ひびわれ部のせん断ずれ変位およびひびわれ幅は予め供試体に埋め込んだボルトに変位計を取り付けて測定した。

3. せん断試験の結果および考察

コンクリート中に埋め込まれたFRPロッドのせん断試験の結果を表-2に示す。供試体にせん断力を加えていくと、ある荷重において上下のスリットの端部を起点として、およそ $10\sim 30^\circ$ の角度で外側に向かう斜めひびわれが発生した。このひびわれは長さ 20mm 程度で発達は止まり、荷重は増加して最大値に達したのち急速にスリット間を直接結ぶせん断ひびわれが発生してせん断荷重は低下した。この様子は図-6のずれ変位からも読みとることができ

る。表-2の最大値はコンクリートのせん断直前の最大荷重を示し、破断値はせん断ずれ変位が 2mm 以上発生した後のFRPの切断時の値である。なお、FRPロッドの切断面はせん断方向とほぼ平行であったが、炭素繊維の断面は瞬間的に切れていたのに対し、アラミドおよびガラス繊維では徐々に引きちぎられた様子を呈していた。

3.1 供試体の最大せん断応力

せん断荷重の最大値をコンクリートの断面積で除した値を供試体の最大せん断応力とすると、これと各FRPロッドとの配置角度との関係は図-3に示すようである。アルトルージュンタ

表-2 せん断試験結果

繊維記号	荷重(kgf)	FRPロッドの配置角度				
		-30°	-15°	0°	15°	30°
炭素片巻 CA	最大値	3,600	4,560	4,500	5,350	7,000
	破断値	1,060	2,890	3,710	4,560	6,900
炭素綾巻 CB	最大値	3,040	4,650	5,130	4,740	5,980
	破断値	900	1,780	3,430	4,030	5,480
炭素糸巻 CC	最大値	4,370	3,700	4,980	4,630	5,630
	破断値	1,050	2,070	3,470	4,180	4,490
炭素より線 CD	最大値	3,800	3,690	3,800	4,330	4,210
	破断値	1,110	1,500	2,570	2,660	3,090
アミド片巻 AA	最大値	3,730	3,990	4,660	4,460	4,480
	破断値	1,590	2,340	3,130	3,800	3,950
ガラス片巻 GA	最大値	3,000	4,450	3,530	4,260	4,540
	破断値	850	2,050	3,040	3,400	4,440
異形鉄筋 S	最大値	-	3,940	4,700	5,580	6,340
	破断値	-	990	1,070	1,240	1,750

(値は試験値2個の平均である)

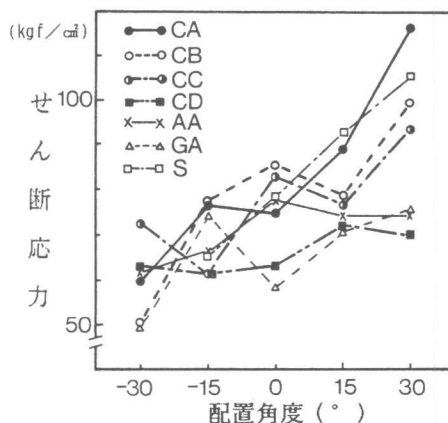


図-3 FRPロッドの配置角度とコンクリートの最大せん断応力

イブの炭素繊維FRPロッド（CA、CBおよびCC）の場合、供試体の最大せん断応力は多少ばらつきがあるものの、純せん断の角度 0° から引張を受ける角度 30° に向かってほぼ直線的に増大し、圧縮を受ける角度 -30° の方向には逆に減少する傾向を示す。配置角度 0° を基準とすると、角度15度当たりの増減率は10%程度になる。炭素繊維のより線およびアラミド繊維の場合は、ロッドの配置角度が変わっても最大せん断応力は $60\sim 80\text{kgf/cm}^2$ 程度でほとんど変化がないといえる。ガラス繊維はばらつきが大きく、角度がプラス側になるにしたがって増加する傾向を示しているが、あまり変わらないと言える。これに対して、鉄筋の場合は直線的に大きく変わり、角度15度当たりの増減率は約20%に達する。このように、コンクリートおよびFRPロッドの共同作用で抵抗する供試体の最大せん断応力は、FRPロッドが引張られる形で配置される場合には増大し、逆に圧縮される形の場合には減少すること、繊維の種類によって増減率が異なることなどの結果が得られた。この理由は明らかではないが、引張剛性や曲げ剛性の大きいものは増減率が大きいことから、繊維の弾性係数が関係していることが考えられる。

3. 2 FRPロッドのせん断強度

コンクリートがせん断破壊し、せん断面に連続ひびわれが発生すると、せん断荷重は急激に低下してFRPロッドのみのせん断抵抗に移行し、せん断ずれ変位が限界に達した時点でロッドは破断する。この時の破断荷重をロッドの断面積で除した値をFRPロッドのせん断強度とすると、これらと配置角度との関係は図-4に示すとおりである。いずれのロッドの場合も、せん断強度と配置角度は直線的な関係にある。片巻および綾巻の炭素繊維の場合は、(a) 図に示すように関係直線の傾きはほとんど同一であり、圧縮を受ける角度 -30° でのせん断強度は $30\sim 50\text{kgf/mm}^2$ で非常に小さく、

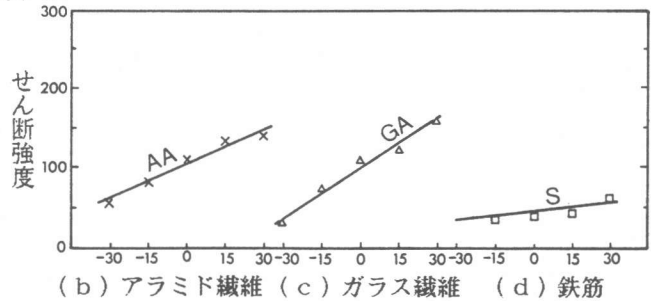
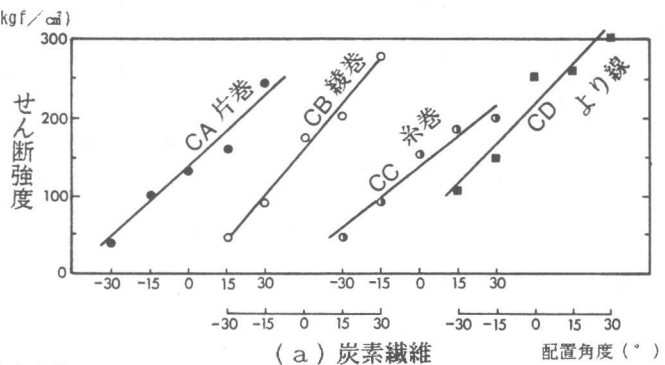


図-4 FRPロッドの配置角度とせん断強度

純せん断の角度 0° では $140\sim 150\text{kgf/mm}^2$ 、引張を受ける角度 30° では $240\sim 270\text{kgf/mm}^2$ となりロッドの引張強度 $150\sim 180\text{kgf/mm}^2$ に比較して相当大きな値になった。このように、プラス側の配置角度でせん断強度が大きくなる理由は、ロッドのせん断面が斜めであるために見掛けの断面積が大きくなること、異形加工のために巻き付けた繊維の量が多く軸方向の繊維を損傷から保護する役割を果たすこと、巻き付けピッチは直径以上であることからせん断に対しても有効に抵抗したことなどが考えられる。また、圧縮を受ける形のマイナスの角度では、FRPロッドが拘束のない圧縮に弱いこと、座屈を伴う形で変形して繊維とマトリクスの界面が剥がれ、複合材としての機能を失うことなどが強度低下の原因と思われる。いずれにしてもFRPロッドは異

方性の複合材料であり、その欠点がせん断強度に表れたものである。糸巻炭素繊維のせん断強度は全体的に低いが、関係直線の傾きは若干緩やかである。これは巻き付けた繊維が軸方向の繊維を保護したためと考えられる。より線の場合の関係直線の傾きは片巻および綾巻とほぼ同様であるが、同じ配置角度におけるせん断強度はプルトルージュンタイプに比べて約50kgf/mm²高い。

(b)(c)図に示すアラミド繊維およびガラス繊維においては、全体の傾向は前記の炭素繊維の場合と同様であるが、両者のせん断強度と角度との関係直線の傾きは炭素繊維よりも緩やかである。この理由は、繊維の弾性係数が小さいこと、最大伸びひずみが大きく脆性的ではないことなどが考えられる。一方、鉄筋の場合は(d)に示すように、せん断強度に対する角度の影響は著しく小さく、高弾性で等方性の材料としての均質性が表れたものと考えられる。

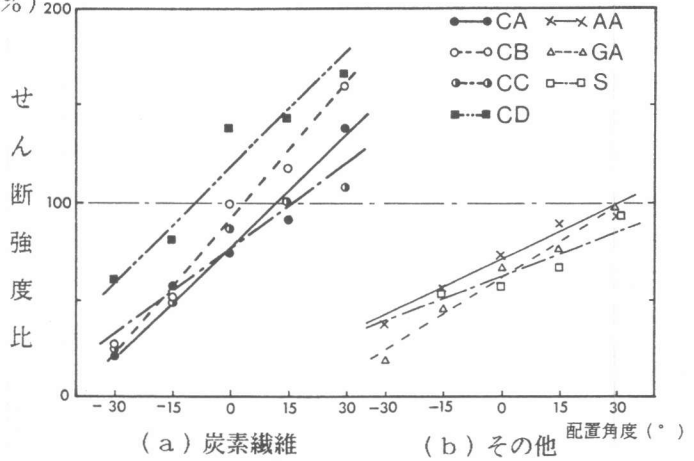


図-5 FRPロッドのせん断強度比

3.3 FRPロッドのせん断強度比

FRPロッドのせん断強度の引張強度に対する割合をせん断強度比とすると、これと配置角度との関係は図-5のようになる。せん断強度比は、前項で述べたように配置角度に対してほぼ直線的な関係があり、引張を受ける角度となるにしたがって大きくなる。また、繊維の種類によっても異なり、炭素繊維の場合、せん断強度比が100%以上になる角度はより線及び綾巻では0°以上、片巻及び糸巻では15°以上であった。一方、アラミド繊維、ガラス繊維及び鉄

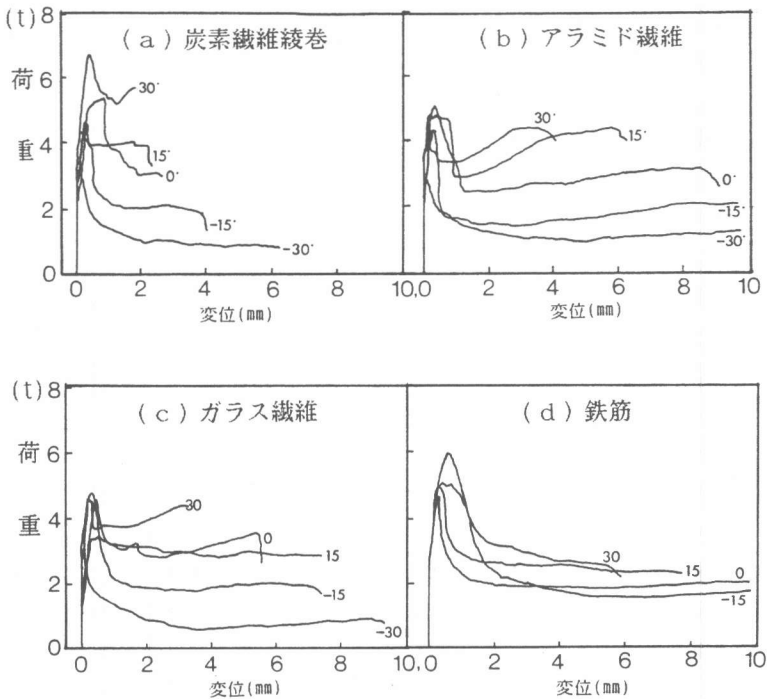


図-6 せん断面のずれ変位

筋の場合、せん断強度比は角度が 30° でも100%を超えなかった。しかし、これらの繊維及び鉄筋のせん断強度比に対する角度の影響は炭素繊維に比較して小さい。

3.4 せん断面のずれ変位

せん断荷重とせん断面のずれ変位との関係を図-6に示す。(a)図は綾巻炭素繊維の場合であり、せん断荷重が2~3tf程度になるとスリット部より斜めひびわれが発生してずれ変位が生じはじめるが、コンクリートとロッドの共同荷重負担のために変位はそれ程増大しないまません断力は最大値に達する。この時のずれ変位量は、どの配置角度でもほぼ同じである。コンクリートがせん断破壊した後はFRPロッドのみでせん断力を負担することになり、荷重は急減する。その後は、ロッドのせん断変形、ひびわれ部でロッドの局部圧力を受けるコンクリートの剥離などによってずれ変位は増大し、最終的にロッドはせん断で破断する。(b)(c)図のアラミドおよびガラス繊維のずれ変位曲線は、ほぼ同一の傾向を示している。変位量は炭素繊維に比較すると両者とも大きく、アラミド繊維はとくに大きい。ロッド

が圧縮を受けるマイナス角度においてずれ変位が大きい原因は、ロッドがせん断変形がすると共に押し潰されて座屈する変形も伴うためと考えられる。これらに対して(d)図の鉄筋の場合は、どの配置角度においても曲線の形状や変位量には大差は見られず、せん断抵抗の性状は角度に関係なくほぼ同一のパターンである。

図-7は、FRPロッドの破断直前の最大変位量と配置角度との関係を示したもので、

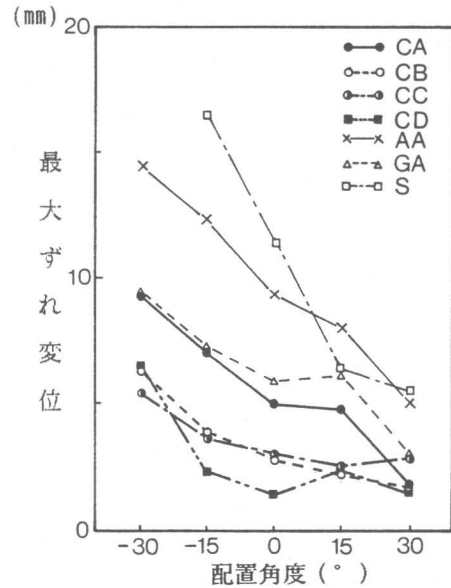


図-7 FRPの配置角度と最大ずれ変位量

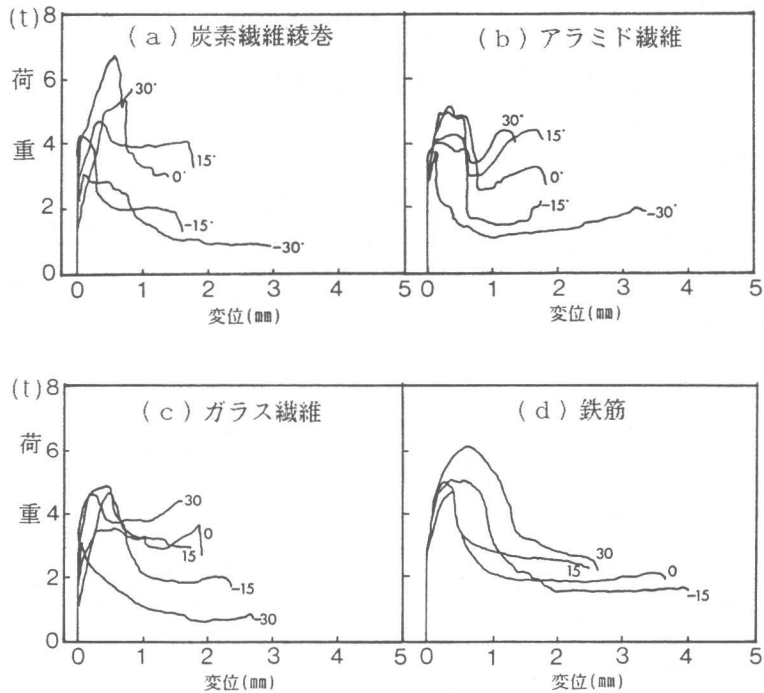


図-8 せん断面のひびわれ幅

大部分の角度において最大変位は鉄筋、アラミド、ガラス、炭素の順になっている。このように、せん断ずれ変位曲線の形や大きさは繊維の種類によって異なり、前述したように、繊維の弾性係数や伸び能力に関係しているものと考えられる。

3. 5 せん断面のひびわれ幅

せん断荷重が大きくなると共に、せん断面のひびわれ幅が増大する様子を図-8に示す。炭素繊維の場合のひびわれ幅の最大値は1~2mm、アラミドおよびガラス繊維は2~3mm程度、鉄筋では2~4mm程度である。FRPロッドが圧縮を受ける角度 -30° の場合のひびわれ幅はとくに大きく、ロッドが座屈しながら変形していることをうかがわせる。

4. 結論

配置角度を変えてコンクリート中に埋設したFRPロッドの間接一面せん断試験の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) FRPロッドのせん断強度は、ロッドがせん断力を受ける角度によって大きく異なり、角度に対して直線的な関係がある。
- (2) せん断強度が低下する割合は、FRPロッドの種類によって異なる。
- (3) ロッドが軸方向に引張られる形になる配置角度($15\sim 30^{\circ}$)においては、せん断強度の低下は少なく、炭素繊維の場合はむしろ増加して引張強度以上であった。
- (4) ロッドが軸方向に圧縮される形の角度($-15\sim -30^{\circ}$)でせん断力を受ける場合の強度は著しく低下する。例えば -30° の場合は、 0° のせん断強度に対して炭素繊維で約30%、アラミド繊維で約50%、ガラス繊維で約30%であった。
- (5) せん断強度の引張強度に対する割合は、炭素繊維の場合は 15° を超えると100%以上になったが、アラミド、ガラス繊維及び鉄筋の場合は 30° でも100%を超えなかった。
- (6) せん断面のずれ変位は繊維の種類と配置角度によって異なり、アラミド、ガラス、炭素繊維の順に大きかった。

以上のように、FRPロッドのような異方性の複合材料のせん断強度特性は、繊維の種類や配置角度あるいは力を受ける方向によって異なることが明らかになった。しかし、FRPロッドのせん断強度はコンクリートのひびわれ幅の大きさ、ロッドに作用している軸力の大きさや方向、あるいはロッドの周りのコンクリートの強度や弾性係数などの影響も受けることが考えられるので、今後十分なデータを積み重ねることが必要である。

〈参考文献〉

- 1)小沢一雅、関島謙蔵、岡村 甫 : 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、第9巻、1987
- 2)岡本 直、遠藤克彦、松原澄行、谷垣正治: アラミド繊維による組紐状棒材を用いたPRCはりの曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、1988
- 3)葛葉靖次、山下武秋: 国内初の炭素繊維PC橋~新宮橋、橋梁、1988、10
- 4)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、1988
- 5)丸山武彦、本間雅人、岡村 甫 : 各種FRPロッドの斜め引張特性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11巻、1989