

論文

[1131] 各種 FRP ロッドの斜め引張特性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

この数年、鋼材のような腐食をおこさないコンクリート用補強材として、高強度で軽量の炭素繊維あるいはアラミド繊維などの新素材を用いた、繊維強化プラスチック（FRP）の棒材の開発と応用に対する関心が高まっている。これらのFRPロッドをRCあるいはPCの主筋として利用する研究は盛んに行われており、ロッドの付着性能の改善方法の面から大別すると、FRPを格子状に成形する方法¹⁾、組紐状あるいはより線状に編む方法²⁾、表面に繊維を巻き付けて異形の凸部を構成する方法³⁾などに関するものである。一方、FRPを主筋のみではなく、せん断補強筋としても積極的に利用することも考えられる。既往の研究によると、スターラップとして使用したFRPがせん断破壊する場合があること¹⁾、鉄筋と同様の設計法では補強効果が十分ではないこと⁴⁾などの問題点も報告されているが、FRPのせん断性状に関する研究はまだ非常に少ない⁵⁾。そこで、本研究ではFRPをコンクリートはりのスターラップとして利用する場合を想定し、はりに斜めひびわれが発生した以後にFRPが受け持つせん断力をモデル化し、FRPが斜め方向に種々の角度で引張力をうける場合の耐荷性状について実験的に検討したものである。

2. 実験方法

2.1 使用材料

使用したFRPロッドは炭素繊維、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ものである。付着性改善のために異形化する方法は、ロッド表面に炭素繊維束をスパイラル状に巻き付ける方法（片巻）、綾巻き状に巻き付ける方法（綾巻）、フィラメントを細かく巻き付ける方法（糸巻）、および7本よりのより線状に加工する方法（より線）などである。これらのFRPロッドの破断強度は、表-1に示すようにいずれも 150kgf/mm^2 以上であり、荷重～

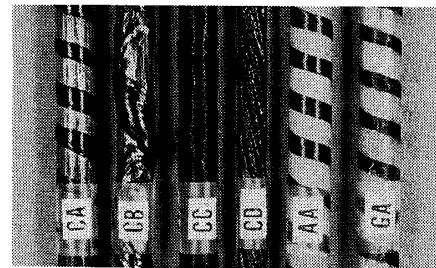


写真-1 FRPロッドの形状

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	より線	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	—

ひずみ曲線は完全弾性体であると考えられる。写真-1に表面の異形状態を示す。なお、炭素繊維FRPロッドのメーカーは3社であり、比較のために異形鉄筋も使用した。

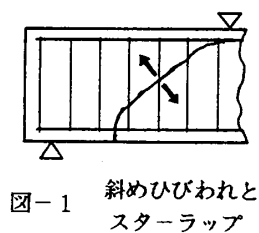


図-1 斜めひびわれとスターラップ

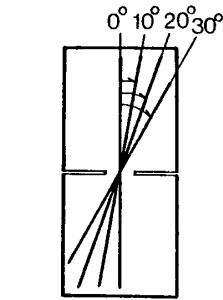


図-2 FRPロッドの配置角度

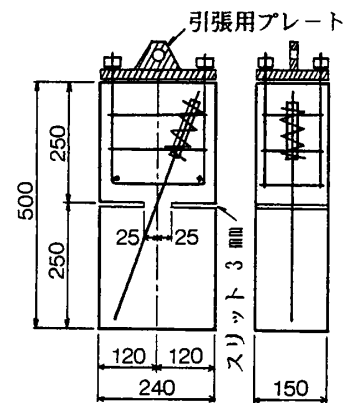


図-3 供試体の形状寸法

2.2 供試体の形状寸法

コンクリートはりに斜めひびわれが発生した

場合、スターラップは一般に図-1に示すようにその軸方向とは異なる斜め方向の引張力を受けることになり、これをモデル化した供試体が図-2である。スターラップと考えるFRPロッドの斜め配置角度は、 0° 10° 20° および 30° の範囲とした。供試体は図-3に示す形状寸法であり、FRPロッドの抜け出しを防止するために、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たうえスパイラル補強を行った。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15mm、スランプ 8 ± 2 cm、細骨材率49%、水セメント比55%、単位セメント量

335 kg/m^3 とした。供試体はコンクリート打設後1週間の水中養生を行い、その後3週間の空气中養生を行って載荷した。供試体と同一養生を行ったコンクリートの圧縮強度は $350 \sim 450 \text{ kgf/cm}^2$ 、引張強度は $35 \sim 45 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

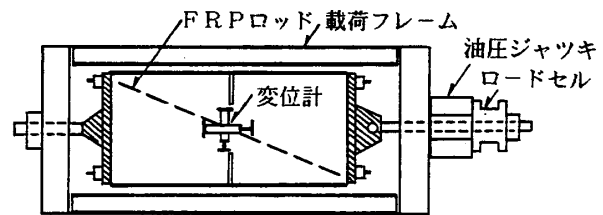


図-4 斜め引張力の加力方法

2.3 載荷方法

および測定項目

FRPロッドに対する斜め引張力の加力方法は、図-4に示すような載荷用フレーム内に供試体を置き、スリットの両側のコンクリート中に配置した補強鉄筋を引張用プレートにボルトで定着し、油圧ジャッキを用いて加力した。引張荷重はロードセルで測定し、スリット間のひびわれ部の引張方向および引張直角方向の変位は、供試体中央に取り付けた

表-2 FRPロッドの斜め引張試験の結果

繊維記号		FRPロッドの破断荷重 kgf (kgf/mm^2) *1			
		角度 0°	角度 10°	角度 20°	角度 30°
炭素片巻 CA	F	4,595(162)	2,770(98)	2,775(98)	1,370(48)
	F_o / F_o	1.000	0.603	0.604	0.298
炭素綾巻 CB	F	3,045(155)	2,345(120)	1,700(87)	1,100(56)
	F_o / F_o	1.000	0.770	0.558	0.361
炭素糸巻 CC	F	4,240(189)	2,965(132)	2,165(97)	1,360(61)
	F_o / F_o	1.000	0.699	0.511	0.321
炭素点線 CD	F	1,915(190)	1,535(152)	1,145(113)	955(95)
	F_o / F_o	1.000	0.802	0.598	0.499
ガラス片巻 AA	F	*2 4,245(150)	3,310(117)	2,305(81)	1,895(67)
	F_o / F_o	1.000	0.780	0.543	0.446
ガラス片巻 GA	F	3,705(131)	3,375(119)	2,470(87)	2,420(86)
	F_o / F_o	1.000	0.911	0.667	0.653
異形鉄筋 S	F	1,820(64)	1,785(63)	1,905(67)	1,710(60)
	F_o / F_o	1.000	0.981	1.047	0.936

*1 破断荷重を断面積で除した値

*2 試験不能であったため、理論値より求めた

*3 破断荷重は試験体2個の平均値

変位計で測定した。載荷フレームと供試体側面との隙間は約5mmとし、ひびわれ発生後のコンクリートの引張直角方向のずれ変形の拘束は行わなかった。

3. 斜め引張試験の結果

FRPロッドをコンクリート中に斜めに埋設した供試体を引張った場合の試験の結果を表-2に示す。FRPロッドの配置角度 0° で軸方向に引張った純引張の場合を1.0として、各配置角度に於ける破断荷重の割合も併せて示した。コンクリートを介して斜め方向に引張られたFRPロッドの破断荷重は、いずれの繊維においても配置角度が大きくなるに従って低下した。その低下の割合は繊維の種類によって異なり、また同じ炭素繊維でも巻き付け異形加工の方法にはほとんど関係なく、より線加工のようにロッドそのものの製造方法による多少の差が表われた。一方、異形鉄筋の場合は、斜め方向に引張られても破断荷重はほとんど変わらない結果が得られた。なお、FRPロッドおよび鉄筋はすべてひびわれ開口部内で破断し、また、FRPロッドの破断面は斜めになっていた。

4. FRPロッドの斜め引張特性

に関する考察

4. 1 FRPロッドの斜め引張強度

図-5は、FRPロッドが斜め方向に引張られた場合の破断荷重をロッドの断面積で除した値（以下斜め引張強度とよぶ）を示したものである。この図から、FRPロッドの斜め引張強度は、いずれのロッドにおいても配置角度が大きくなるに従って直線的に減少していることがわかる。(a)図の片巻、綾巻、および糸巻の炭素繊維FRPロッドは、ダイスを通して繊維を引き揃えた後に表面加工用の繊維を巻き付けて硬化させたプルトルージョンタイプである。これらのロッドの引張試験の状態(0°)における強度は約150~190 kgf/mm²であるのに対し、角度が大きくなるにしたがって

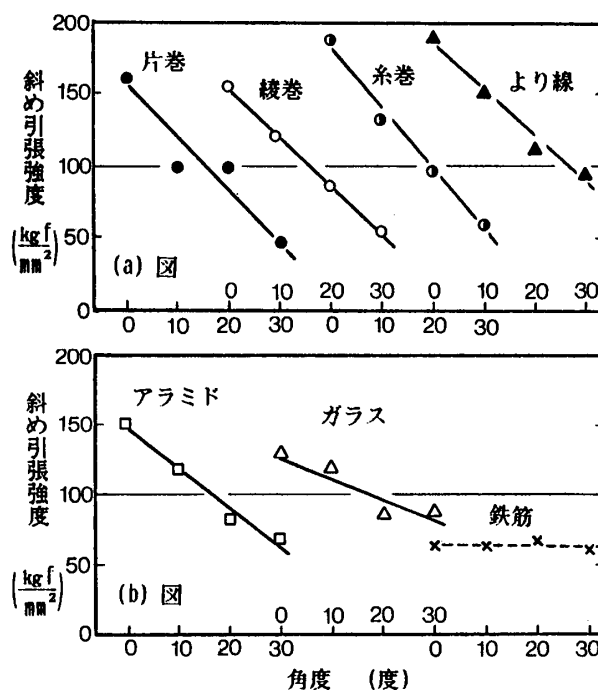


図-5 各種FRPロッドの斜め引張強度と角度との関係

斜め引張強度は直線的に低下し、角度 30° の場合は 0° の約30%に相当する50~60 kgf/mm²程度まで低下してしまう。この傾向は表面加工が異なる3種類ともほぼ同じであり、その理由は表面に巻き付けた繊維の使用量が少なく、軸方向に対して直角に近い状態で巻き付けられているために引張抵抗に寄与していないものと推定される。同じ炭素繊維でも、7本より線加工した場合の低下率は比較的小さいが、それでも純引張で190 kgf/mm²の強度であるものが角度 30° では95 kgf/mm²になり、その低下率は50%程度もある。繊維が密に並んだプルトルージョンタイプに比較して、より線タイプでは7本のより線間の隙間がある程度あるために各繊維の相対移動が可能で、ロッドの曲げ剛性も小さいことが低下率に影響しているものと考えられる。

(b)図はアラミド繊維およびガラス繊維の場合であり、角度に対して斜め引張強度は直線的に低下するが、その割合は炭素繊維に比べていずれも小さくなっている。すなわち、角度 30° の場合の 0° に対する割合はアラミド繊維で約45%、ガラス繊維で約65%である。両繊維とも炭素繊維

に比べて伸び能力が大きいこと、弾性係数が小さくロッドの曲げ剛性も小さいことなどが関係しているのではないと思われる。一方、異形鉄筋の場合の斜め引張強度は、配置角度が変わってもほとんど一定で純引張の場合にはほぼ等しく、方向性のない優れた特長が示されている。鉄筋は単一の金属から成る等方性の均質材料であるのに対し、FRPロッドは方向性のある繊維と樹脂とを複合化した異方性材料であるために、この様な大きな相違が生じたものと思われる。

4. 2 斜め引張強度の低下率

図-6は、FRPロッドの純引張（角度0°）の場合の強度を 1.0 として、配置角度の大きさと斜め引張強度の低下率との関係を表したものである。いま、斜め引張強度の低下の割合が角度に対して一次関数で表されると仮定すると、次の関係が成り立つ。

$$f_{u\theta} = f_u \left(1 - \frac{k}{100} \theta \right)$$

$f_{u\theta}$: 配置角度 θ の場合の FRP

ロッドの斜め引張強度

f_u : FRPロッドの引張強度

k : 繊維の種類による低下率係数

θ : 引張方向に対する FRP

ロッドの配置角度

繊維の種類による斜め引張強度の低下率係数(k)を、本実験条件における図-6

の測定値から求めると表-

3のようになる。すなわち、

(k) の値が最も小さいものは鉄筋でほとんど0に近く、強度は低下しないことを示す。ガラス繊維は 1.3、ア

ラミド繊維および炭素繊維のより線タイプは 1.9でほぼ同等であり、炭素繊維の

プルトルージョンタイプは 2.3の順となっている。このようにFRPロッドの斜

め引張抵抗力は、配置角度が30°程度の小さい範囲では角度の一次関数として表

すことができ、その低下率係数は繊維の種類あるいは

ロッドの成型方法の違いによって影響を受ける。

表3 強度の低下率係数

繊維		k
炭素 索	プルトル ージョン	2.3
	より線	1.9
アラミド		1.9
ガラス		1.3
鉄筋		0.1

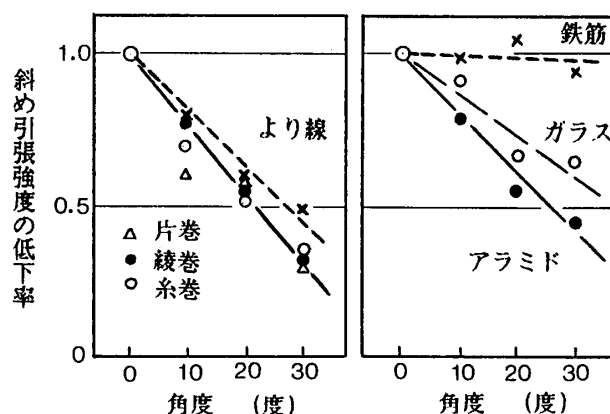


図-6 斜め引張強度の低下率と角度との関係

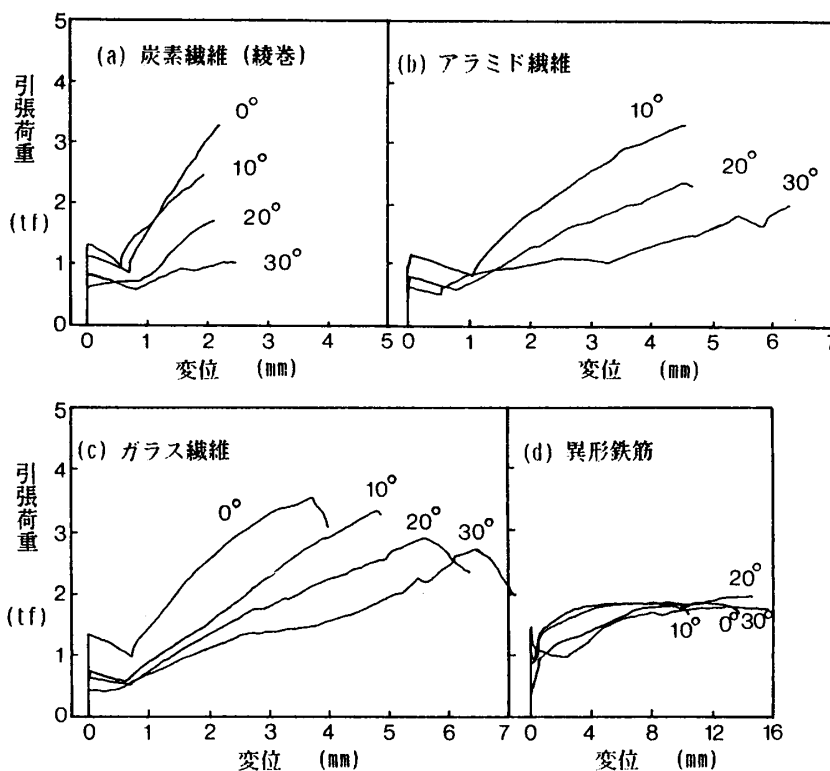


図-7 引張荷重と引張方向変位との関係

4.3 荷重と引張方向の変位

図-7に、引張荷重とひびわれ部の引張方向の変位との関係を示す。(a)図は綾巻炭素繊維の例で、コンクリートにひびわれが発生すると0.5～1mm程度の変位を生じて荷重は一度下がる。配置角度が小さい範囲では荷重の増加に対する変位量は少ないが、角度が大きくなるに従って変位の増加の程度は大きくなり、最大変位はいずれの場合も他のFRPよりも小さく2～2.5mmである。アラミドおよびガラス繊維の場合は、(b)(c)図のようにほぼ同様の傾向を示しており、ガラス繊維では最大荷重に達した後に荷重が下がっているのが特徴である。これらの繊維は、炭素繊維に比較して曲線の傾きは緩やかで変位量は大きいことから、弾性係数や伸び能力の相違が表われたものと思われる。一方、鉄筋の場合は配置角度が異なっても関係曲線の形、最大荷重、最大変位量などにはほとんど差がなく、等方性材料で剛性や伸び能力が大きいことやコンクリートに比較して相当硬いことなどから、この程度の角度の影響は受けないものと考えられる。

4.4 FRPロッドの破断時の最大変位

各FRPロッドの破断時における引張方向の最大変位を図-8に示す。炭素繊維の最大変位はいずれの角度においても2～3mmの範囲であり他に比較して小さい。しかし、糸巻の場合は0°～10°において少し大きく、定着スリーブ内ですべりを起こしていることが考えられる。アラミドおよびガラス繊維の最大変位は5～7mm程度で、角度に関係なくほぼ一定である。これらの実測値は、各FRPロッドの両端に取り付けた定着スリーブが十分に機能して、すべりが生じなかったとする場合のロッドの伸びにほぼ等しい。

4.5 荷重と引張直角方向の変位

本実験では、供試体の引張直角方向への横ずれ変形を拘束していないために、ひびわれ発生後は引張方向の変位と共に直角方向には図-9に示すようなずれ変位を生じている。ずれ変位の曲線はいずれのFRPロッドおよび鉄筋においても、引張方向の変位の場合と同様な傾向を示している。しかし、コンクリートはりにおけるひびわれのように横ずれを生じない場合は、斜めに配置された

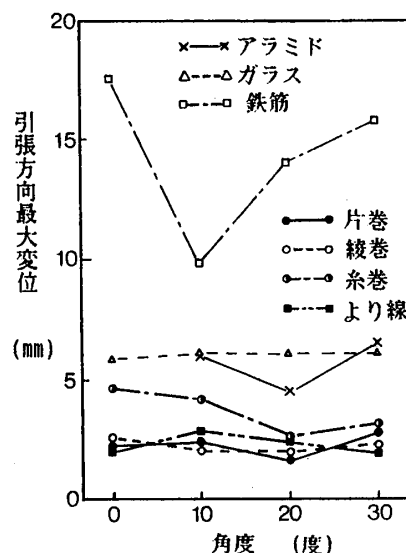


図-8 引張方向の最大変位

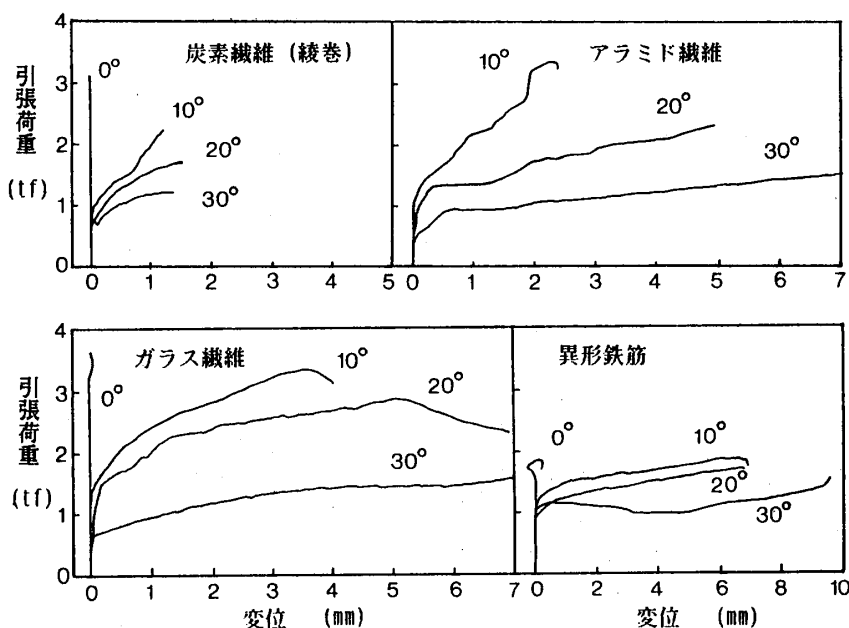


図-9 引張荷重と引張直角方向変位

FRPロッドはもっと急激な強制変形を受けることから、局部応力はさらに過大になり斜め引張強度はより低下することが予想される。

以上のように、FRPロッドが斜め引張力をうける場合、すなわち、引張力を負担しながら急激な曲げあるいはせん断を受けるような応力状態においては、その耐荷力が著しく低下することがわかった。そして、FRPロッドの斜め引張強度は配置角度に依存し、角度が大きいほど低下率が大きく、また、その割合は繊維の種類によって相違することも明らかにできた。この理由として、もともと強度に異方性がある複合材料であること、繊維によって弾性係数や最大伸びひずみが異なること、FRPロッドは2～6mmのひびわれ開口部の中で引張を受けながら、正負の両方向に小さな曲げ半径で急激に折り曲げられて局部応力が過大になること、コンクリートのひびわれ縁がロッドに対して鋭角的に接触して繊維の局部損傷をまねくことなどが考えられる。

5 結論

本研究の実験条件の範囲で得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) コンクリートに埋め込まれたFRPロッドが、ひびわれを介して斜め方向の引張力を受ける場合、その引張抵抗力は著しく低下する。
- (2) FRPロッドの斜め引張に対する抵抗力は、斜め方向に引張る角度に比例して低下する。
- (3) 斜め引張抵抗力は繊維の種類によって相違し、低下する割合が最も大きかったのは炭素繊維であり、つぎにアラミドおよびガラス繊維の順であった。
- (4) 角度30°で斜めに引張った場合の強度は、炭素繊維では引張強度の約30%程度、アラミド繊維では約45%、ガラス繊維では約65%程度に低下した。
- (5) 斜め引張強度が角度に対して一次関数的に低下すると仮定した場合の低下率係数は、炭素繊維のアルトルージョンタイプで2.3、より線で1.9、アラミド繊維で1.9、ガラス繊維で1.3であり、鉄筋の場合のほぼ0に比較して大きな差があった。
- (6) より線タイプの炭素繊維FRPロッドの場合のように、同じ繊維を用いてもその製造方法や形状寸法を変えることによって、斜め引張強度の低下割合を改善できる可能性がある。

本実験では、FRPロッドをはりのスターラップとして使用する状態をモデル化しているが、荷重や拘束の条件等が実際のはりの状況に合わない事が考えられる。したがって今後は、コンクリートはりにおけるFRPロッドの静的、および動的なせん断耐荷機能についてデータを十分に蓄積する必要がある。

(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) 三上 浩、林 寿夫、加藤正利、田村富雄 : アラミド繊維による組紐状棒材を用いたPCはりの静的耐荷挙動、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、1988
- 3) 丸山武彦、伊東幸雄、西山啓伸、土田伸治 : 各種FRPロッドの付着特性に関する研究、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集、1988
- 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 : 各種FRPロッドのせん断性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻、1989