

論文

[2131] CFRCロッド補強コンクリートはりの繰返し荷重作用下の曲げ性状

正会員 ○古川 茂 (群馬工業高等専門学校土木工学科)

正会員 辻 幸和 (群馬大学建設工学科)

大谷杉郎 (群馬大学材料工学科)

小島 昭 (群馬工業高等専門学校工業化学科)

1. まえがき

連続炭素繊維に合成樹脂を含浸させてロッド状等に成形し、コンクリートの補強材として用いる場合については、せん断補強材への利用や繰返し載荷時の性状も含め、すでに貴重な成果が報告されている^{1)~5)}。筆者らは、主にロッドの耐火性およびコンクリートの付着性能の向上の観点から、合成樹脂の代わりに、セメントペーストを連続炭素繊維に含浸させて棒状に成形したCFRCロッドとして利用する場合の、はりの曲げ性状やせん断性状への補強効果について報告してきた^{6),7)}。しかしながら、通常作用するような荷重に比べ、地震時のような大きな荷重が少ない回数で繰返し作用する場合のはりの曲げ性状については、CFRCロッドの補強効果も含めて定量的な検討を行っていなかった。

本研究では、棒状に造ったCFRCロッドをコンクリート中に一次元に配置して補強した炭素繊維補強コンクリートはりを作製し、静的破壊荷重の80%程度の高い荷重領域まで荷重を繰返し作用させ、はりのひびわれ状態、CFRCロッドのひずみ、たわみ、および破壊曲げモーメントなどについて実験した結果を、鉄筋コンクリートはりと対比して報告する。

2. 実験方法

2.1 使用材料および配合

連続炭素繊維は、表-1に示す品質をもつビッチ系の汎用品およびPAN系の高性能品を用いた。比較のための引張鉄筋はD6mmを用い、また、せん断補強材としてφ3mmの鋼材を用いた。

セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。またCFRCロッドの作製には、ブレン値が9200cm²/gのグラウト用セメントを用いた。

骨材は利根川産の比重が2.63、粗粒率が2.78の川砂および最大寸法が15mmで、

比重が2.65、粗粒率が6.24の川砂利を用いた。さらに、ナフタリンスルホン酸塩系を主成分とする高性能減水剤も用いた。

コンクリートの配合は、水セメント比が56%、単位セメント量が350kg/m³、細骨材率が62%、スランプが10±2cm、空気量が4±1%で、高性能減水剤をセメント重量の0.6%添加した。CFRCロッド作製のための含浸用セメントペーストは、水セメント比が50%で、高性能減水剤をセメント重量の1%添加した。

2.2 CFRCロッドの作製、はり供試体および曲げ試験

CFRCロッドの作製は、所定本数の炭素繊維の間隙にセメントペーストを含浸させた後、

表-1 炭素繊維の品質

炭素繊維の種類	繊維直径 (10 ⁻³ mm)	比重	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (10 ⁵ kgf/cm ²)	伸度 (%)
ビッチ系汎用品	17.5	1.62	8500	3.8	2.45
PAN系高性能品	7.5	1.78	30000	23	1.3

棒状に成形した。成形したロッドは、1日間空中養生の後、材令7日まで水中養生を行った。その後、CFRCロッドの中央部にワイヤストレインゲージを防水処理を行って貼り付けた。CFRCロッドの直径、ロッド中の炭素繊維の含有率、および供試体中の炭素繊維の総断面積を幅 b と有効高さ d の積で除した比率は、それぞれ表-2の通りである。CFRCロッドは、いずれの供試体とも2本配置し、比較用の鉄筋は1本あるいは2本配置した。表中の繊維比率がPAN系で0.070%、ビッチ系で0.224%以上では、降伏時の総引張力(総断面積×降伏強度)は、鉄筋一本の場合より大きくなる。

供試体の寸法は、高さが11cm、幅が7cm、長さが75cmである。供試体は、図-1に示すようにCFRCロッドあるいは鉄筋を配置し、2層に分けてコンクリートを打込んで仕上げた。繊維量の多い供試体の場合は、せん断補強材を有効高さの1/2以下の間隔で、図-1のように配置した。

締固めは、棒状の振動機を用いて各層毎にコンクリート中および型枠の外部から行った。同時に、 $\phi 10 \times 20$ cmの圧縮強度試験用の円柱供試体を作製した。円柱供試体は材令2日、供試体は材令1日でそれぞれ脱型し、材令7日までは水中養生、その後は材令28日まで湿布養生を行った。

供試体の曲げ試験は、材令7日および28日に、図-1に示すような位置における2点荷重で、静的荷重および繰返し荷重のそれぞれについて行った。繰返し荷重方法は、まず静的荷重時の破壊荷重の80%まで静的荷重した後、静的破壊荷重の20%から80%まで繰返し荷重を15回行った。その後は、再び静的荷重を破壊まで行った。曲げ試験時には、供試体の上面と下面およびCFRCロッドに貼付したワイヤストレインゲージによってひずみを測定した。また、中央部の荷重-たわみ曲線をX-Yレコーダーによって記録した。

3. 曲げひびわれ状態および曲げひびわれ発生応力度

静的荷重および繰返し荷重を行った供試体の、曲げひびわれ状態の例を図-2および図-3に示す。曲げひびわれは、いずれの場合も曲げモーメントが最大の区間に発生し、その後所定の荷重荷重に達するまでにひびわれが発達し、当然ながら中立軸は図のように相当上昇した。

繰返し荷重すると、材令が7日の場合は、繰返し荷重中はいずれの繊維を用いても、図-2に示す

表-2 CFRCロッドの諸元

供試体	繊維の種類	繊維の本数	平均直径(mm)	繊維の含有率(%)	$A_{cf}/(bd) \times 100$ (%) [*]
GP-2	ビッチ系	24000	6.6	16.9	0.174
GP-3		30000	7.5	16.3	0.224
GP-4		36000	9.2	13.0	0.267
HP-2	PAN系	36000	5.0	7.8	0.050
HP-3		48000	6.1	7.3	0.070
HP-4		60000	6.6	7.2	0.082
B-S1	鉄筋06 ^{**}	1本	6.35		0.492
B-S2		2本			0.952

^{*}A_{cf}:炭素繊維の総断面積、b:幅、d:有効高さ、
^{**}降伏強度4025kgf/cm²、

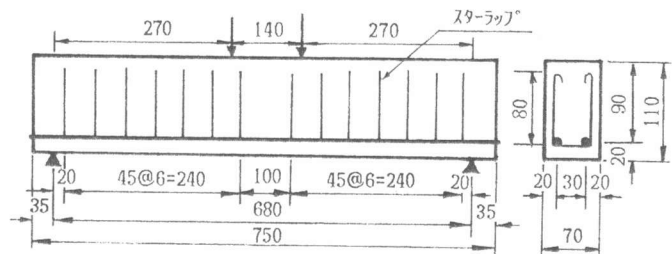


図-1 断面の諸元および荷重方法

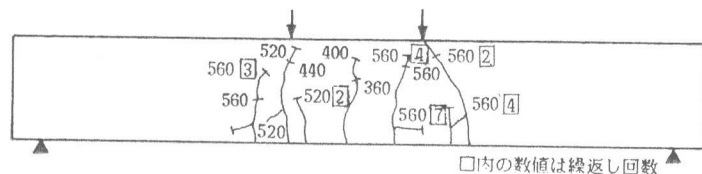


図-2 はりのひびわれ状態 (GP-4S、材令7日)

ように、既に発生している曲げひびわれの発達とともに、繊維量が多い場合には、新たに曲げひびわれやロードに沿うひびわれの発生する場合があった。しかしながら、その後の静的荷重により曲げひびわれが発生する場合は少なかった。

材令が28日の場合には、図-3に示すように、繰返し荷重中は、いずれの繊維でも曲げひびわれが少し発達するが、新たに曲げひびわれが発生することは少なかった。しかし、その後の静的荷重により新たに曲げひびわれが発生した。この中には、スターラップ付近で発生する場合があった。これらのため、ひびわれ本数は、いずれの場合も、静的荷重した場合より増加したが、鉄筋を用いた場合にはほとんど増加しなかった。繰返し荷重によりひびわれ本数が増加する

原因は、現在のところ不明であるが、繰返し荷重によりロード自体のひびわれ本数が増加し、そこを起点にコンクリートにもひびわれが発生することが考えられる。

はりの破壊は、鉄筋を多く用いたはりB-S2では、鉄筋の降伏後に斜めひびわれが発生してせん断破壊したが、それ以外のはりでは、いずれの場合もロードの切断あるいは鉄筋の降伏により曲げ破壊した。

CFRCロードの破断面を観察した結果、PAN系繊維を用いた場合は、いずれのはりでも炭素繊維はほぼ一様に切断されていた。しかしながら、ピッチ系繊維を用いた場合には、繰返し

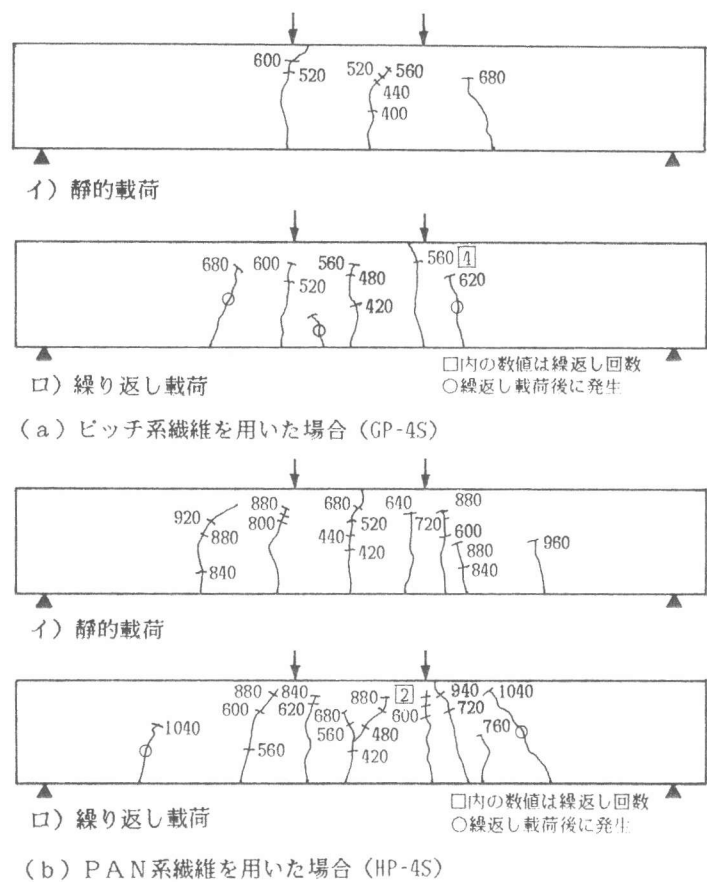


図-3 はりのひびわれ状態 (材令28日)

表-3 曲げひびわれ発生応力度および破壊曲げモーメント

供試体	曲げひびわれ発生応力度 (kgf/cm ²)		破壊曲げモーメント (kgf.cm)										備考	
			実測値				計算値 Muc		Mucy / Must		Mucy / Muc			
	7日	28日	7日		28日		7日	28日	7日	28日	7日	28日		
			Must*	Mucy*	Must*	Mucy*								
プレーン	37.3	43.0	5265				6096							
GP-2	37.3	42.1	6683	6411	6953	6642	8716	8955	0.95	0.96	0.74	0.74		
GP-3	37.8	40.3	7290	7263	7182	7216	10528	10601	0.99	1.00	0.68	0.68		
GP-4S	35.4	40.8	9072	9092	9477	9221	12399	13120	1.00	0.97	0.73	0.70	スターラップ [®] 配置	
HP-2	36.3	42.5	8654	8337	8073	9379	7955	8475	0.96	1.05	1.07	1.11		
HP-3S	36.8	42.1	12042	11388	11246	10962	10876	11002	0.95	0.97	1.05	0.99	スターラップ [®] 配置	
HP-4S	36.4	40.2	15012	14884	15390	14499	13494	14211	0.99	0.94	1.10	1.02	スターラップ [®] 配置	
B-S1**	42.1	45.9	11880	11880	12690	12960	11051	11358	1.00	1.02	1.12	1.14		
B-S2***		44.5			22950	22950				1.03		1.04		

*Must: 静的荷重, Mucy: 繰返し荷重, **鉄筋降伏時, ***鉄筋降伏後斜めひびわれの発生によりせん断破壊

し載荷したはりでは、炭素繊維が一樣に切断されず、破断面に段差の生じる場合があった。ピッチ系繊維を用いた場合は、繊維の直径が太く、ロッド自体の直径を細く作製する必要があり、PAN系繊維に比べセメントペーストの含浸状態が不均一になり易かったためと考えられる。なお、いずれのはりでも、コンクリートとロッドとのずれは認められなかった。

CFRCロッドおよび鉄筋を無視して弾性計算により求めた、曲げひびわれ発生応力度を表-3にまとめて示す。曲げひびわれ発生モーメントは、コンクリートの引張縁に貼ったワイヤストレインゲージのひずみの急変点より求めた。曲げひびわれ発生応力度は、各供試体ともほぼ等しい値を示し、CFRCロッドによる曲げひびわれ発生応力度の増加は、ほとんど期待できないと考えられる。

4. CFRCロッドのひずみ

PAN系およびピッチ系繊維を用いたはりについて、荷重とCFRCロッドのひずみとの関係を図-4に示す。図-4中には、表-2に示した炭素繊維の総断面積を用いて、鉄筋コンクリートはりと同様にして弾性計算により求めた値を、破線で一緒に示している。コンクリートの弾性係数は、材令7日が $2.13 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、また材令28日が $2.50 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

繊維量が多い場合、ひびわれ発生後のロッドのひずみは、図のように弾性係数の小さいピッチ系繊維を用

いと相当大きく増加し、弾性係数の大きいPAN系繊維を用いた場合には、ロッドのひずみの増加は少ない。

繰返し載荷後のロッドのひずみは、いずれの繊維および材令でも、それ以前より増加する。繊維量が多い場合には、増加の程度は10%~15%であり、その差の小さいことが認められる。

その後は、ロッドのひずみは弾性計算値に近づき、PAN系繊維を用いた場合はその値付近で、またピッチ系繊維を用いた場合にはその値を超えてロッドは切断によって破壊した。CFRCロッドは、いずれの載荷方法および繊維の場合も、表-1に示した繊維自体の破壊ひずみより小さなひずみで破壊した。今後さらに検討を進めたい。

5. 破壊曲げモーメント

破壊曲げモーメントの実測値と計算値も、表-3に示している。破壊曲げモーメントの計算値は、コンクリートの応力-ひずみ曲線を等価応力ブロック、コンクリートの最終圧縮ひずみを0.35%、炭素繊維の応力-ひずみ曲線は降伏領域を持たないとそれぞれ仮定し、曲げ引張破壊するとして求めた。圧縮強度は、材令7日が 206 kgf/cm^2 、材令28日が 378 kgf/cm^2 であった。表-3の値について、破壊曲げモーメントと繊維比率との関係をプロットしたのが図-5であ

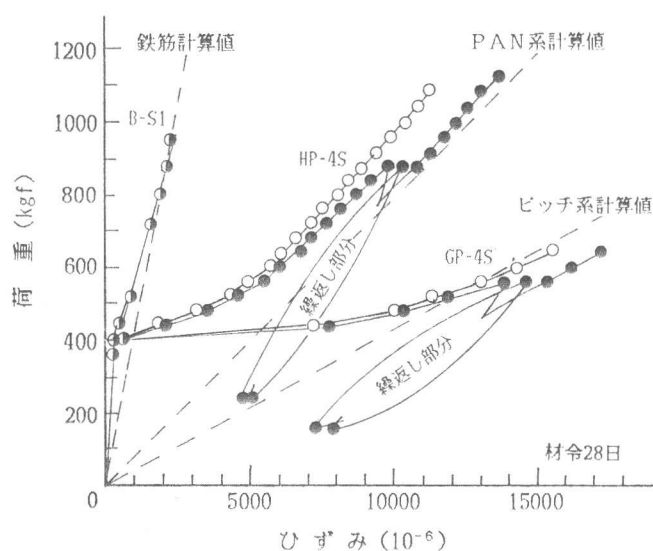


図-4 ロッドのひずみに及ぼす繰返し載荷の影響

る。図中には計算値も破線で一緒に示している。この図からは、破壊曲げモーメントは、いずれの繊維の種類および荷重方法でも、繊維量の増加にともなって増加することが認められる。そして、繰返し荷重しても、静的荷重した場合とほぼ等しく、繰返し荷重による破壊曲げモーメントの低下は、鉄筋を用いた場合と同様にほとんど認められない。このことは、静的荷重した場合の破壊曲げモーメントとの比を示した図-6からより明瞭である。

ロッドおよび鉄筋を用いても、破壊曲げモーメントは、表-3のように、材令が7日から28日に増加してもほとんど増加していない。これは、曲げ引張破壊したため、コンクリートの強度の増加がほとんど影響を及ぼさないためである。

破壊曲げモーメントの実測値は、PAN系繊維を用いると、鉄筋を用いた場合と同様に、計算値にほぼ等しい。しかしながら、ピッチ系繊維の場合には、3.で述べたセメントペーストの含浸状態の影響により、実測値は計算値より30%程度小さくなった。この値は、CFRCロッド自体の引張試験を行った場合⁸⁾の強度低下とほぼ同じである。これらのことから、ピッチ系繊維を用いる場合でも、CFRCロッドの引張強度にいわゆる繊維利用率である低減係数を用いることにより、PAN系繊維を用いた場合と同様に、RCと同様な計算方法により計算することが可能と考えられる。

6. たわみ

図-7には、繊維量が多い場合の荷重-たわみ曲線の例を示す。最大荷重時までのたわみ量は、いずれの荷重方法および繊維の種類でも、繊維量の増加にともなって増加し、材令が増加すると減少した。この現

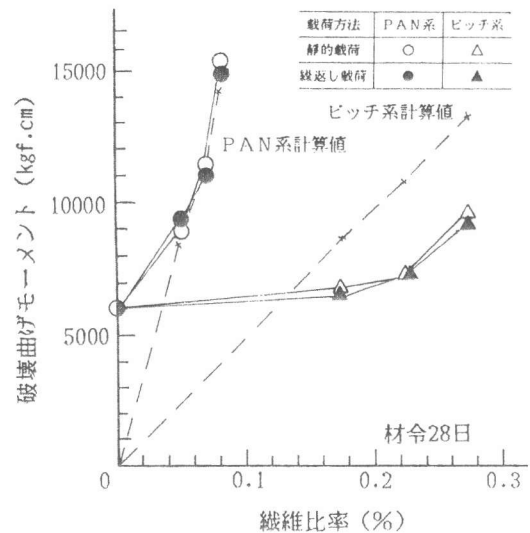


図-5 破壊曲げモーメントと繊維比の関係

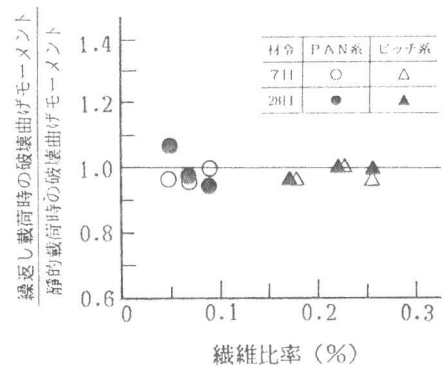
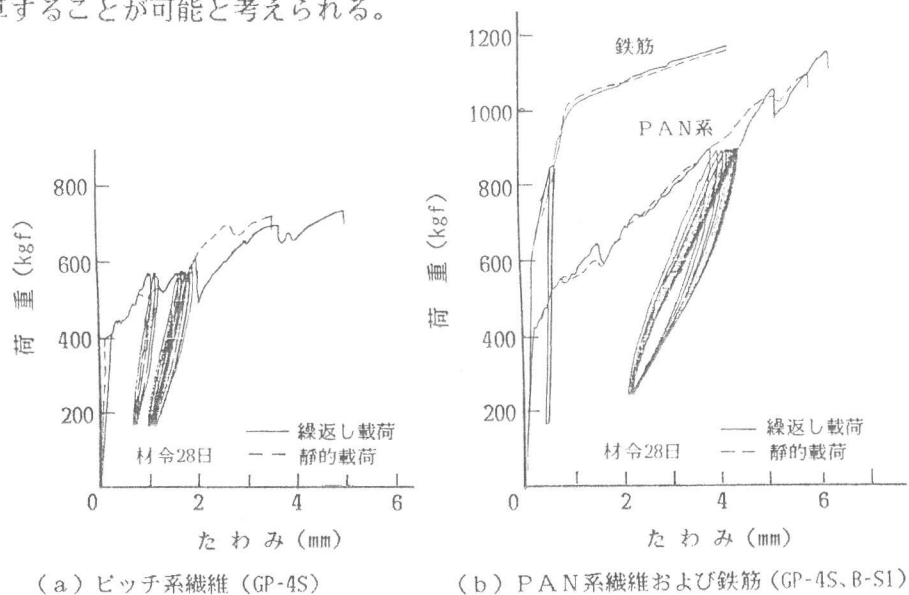


図-6 静的荷重時に対する繰返し荷重時の破壊曲げモーメント比



(a) ピッチ系繊維 (GP-4S)

(b) PAN系繊維および鉄筋 (GP-4S, B-S1)

図-7 たわみに及ぼす繰返し荷重の影響

象は鉄筋を用いた場合も同様であった。

図一7から、繰返し載荷すると、鉄筋を用いた場合と異なり、いずれの繊維を用いても繰返し載荷中にたわみは増加すること、および静的載荷した場合よりたわみは大きくなることがそれぞれ認められる。PAN系繊維を用いた場合は、図一7(b)に示すように、繰返し載荷中におけるたわみの増加は、図一7(a)に示したピッチ系繊維を用いたより少ない。このことは、繊維量が少ない場合にも同様に認められた。これらのことは、3. のひびわれ状態および5. のロッドのひずみからも予測される。ピッチ系繊維を用いたはりのたわみの増加が大きいのは、弾性係数が小さいことと3. で述べたセメントペーストの含浸状態の影響によると考えられる。

FRPを用いたはり¹⁾の場合に、繰返し載荷数を多くすると、たわみが増加することが報告されており、本研究のようにCFRCロッドを用いた場合も、それ自体の曲げ剛性が小さいため、似たような傾向となった。

7. 結論

連続炭素繊維にセメントペーストを含浸させて棒状に造ったCFRCロッドで補強したコンクリートはりについて、静的破壊荷重の20%から80%程度の範囲で繰返し載荷実験を行い、はりの曲げ性状を検討した。本研究により、次のことがいえると思われる。

- 1) 破壊曲げモーメントは、いずれの繊維を用いても、15回程度の繰返し載荷であれば、静的載荷した場合とほぼ等しい値が得られる。
- 2) いずれの炭素繊維を用いても、繰返し載荷によりたわみおよびロッドのひずみは増加する。その増加の程度は、PAN系繊維を用いると、ピッチ系繊維を用いた場合より少し小さい。
- 3) PAN系繊維を用いたはりの破壊曲げモーメントの実測値は、鉄筋コンクリートはりと同様にして求めた計算値にかなり近い値が得られる。しかし、ピッチ系繊維を用いた場合の実測値は計算値に比べて小さく、繊維の引張強度の低減などの検討が必要である。
- 4) はり中のCFRCロッドは、いずれの場合も、炭素繊維自体の破壊ひずみより小さい値で破壊した。

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、Vol.9、No.2、pp.269-274、1987.6
- 2) 辻 幸和・斉藤 等・関島謙蔵・小川弘幸：FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.3、pp.547-552、1988.6
- 3) 丸山武彦・伊藤幸雄・西山啓伸：CFRPおよびAFRPロッドを用いたPCはりの曲げ疲労特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.1081-1086、1990.6
- 4) 丸山武彦・本間雅人・小沢一雅：CFRPロッドを用いたPCはりの繰返し載荷による付着性状に関する一実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.1147-1152、1990.6
- 5) 涌井一・鳥取誠一：FRP棒材をらせん状せん断補強筋として用いた場合のコンクリートはりのせん断補強効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.1141-1146、1990.6
- 6) 古川 茂・辻 幸和・宮本正雄：連続炭素繊維を補強材として用いたコンクリートはりの曲げ性状、セメント技術年報、42、pp.471-474、1988
- 7) 古川 茂・辻 幸和・大谷杉郎・小島 昭：CFRCロッドで補強したコンクリートはりの曲げ強度およびせん断性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.1、pp.849-854、1989.6
- 8) 古川 茂・辻 幸和・大谷杉郎・小島 昭：CFRCロッドの引張試験方法、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.1009~1014、1990.6