

# 繊維系新素材の構造部材への適用に関する研究（その1）

——炭素繊維を補強筋とした曲げ部材実験——

木村 耕三      小島 克朗  
武田 寿一

## Research and Development on Structural Members Using New and Advanced Fiber Materials (Part 1)

——Experiments on Flexural Behaviors of Beams Reinforced with Carbon Fiber Strands——

Kozo Kimura      Yoshiro Kobatake  
Toshikazu Takeda

### Abstract

New and advanced materials have been developed in recent years for use in civil engineering and building construction. An aim of this study is to comprehend the characteristics and to make them fit for practical use. This paper describes the results of experiments on flexural behaviors of beams reinforced with carbon fiber strands. The following results were obtained with these experiments. (1) The maximum load of a CFRC beam is calculated in the same manner as an RC beam. At maximum load, however, the deflection of the CFRC beam is larger than that of the RC beam. (2) A CFRC member reinforced with prestressed strands shows good characteristics similarly to PC members.

### 概 要

最近、多くの新素材が開発され、これらの土木建築分野への用途開発が検討されている。この研究の目的は、繊維系素材を構造部材に適用するための諸性状の把握と、その実用化を検討することである。

この報告では、長繊維の炭素繊維(CF)に樹脂を含浸させたCFストランドを補強筋としたCFRC部材の曲げ実験を行なって、通常のRC、PC部材と比較検討し、CFストランドを用いた曲げ部材の構造性能を検討した。

実験の結果、次のことが明らかになった。(1) CFRC部材の曲げ耐力は、通常のRCばかりと同様の計算法で求められる。しかし、最大荷重時の変位は、RCばかりの降伏変位に比べて大きくなる。(2) CFストランドにプレストレスを導入したCFRCの構造性能は、PC鋼線を用いたPC部材と同等となる。

### 1. 序

近年、色々な新素材が開発され、これらの中でも、炭素繊維、アラミド繊維の土木建築分野への用途開発が検討されている。この研究の目的は繊維系素材を構造部材に適用するための諸性状の把握と、その実用化の検討である。

短繊維の炭素繊維を補強材とした繊維補強コンクリートに関する研究は比較的多いが、長繊維の炭素繊維（以

下、CFと呼ぶ）を補強材とした繊維補強コンクリート（以下、CFRCと呼ぶ）の研究は少ない。CFを曲げ補強筋として使用する場合は、直径数 $\mu\text{m}$ のCFを数千本以上束ねる必要がある。この報告は、長繊維のCFに樹脂を含浸、硬化させた棒状のCFRP（以下、CFストランドと呼ぶ）の特性を把握し、曲げ部材の補強筋としての適用を検討した。

CFストランドを補強筋として用いる場合は、CFストランドの強度および剛性が含浸させた樹脂の強度、剛性

に大きく影響されるという問題点がある反面、次のようなメリットがある。

(1) 繊維と構造材料（部材を形成する主材料）との付着を必要としないため、粗骨材を用いた普通コンクリートが使用でき、施工性の向上、コスト低減が可能となる。

(2) 高強度、高弾性のCFストランドは、耐久性がよく、悪い環境条件でのプレレストコンクリート部材(PC部材)の緊張材として利用できる。

## 2. CFストランドの材料特性

使用した補強筋の応力～ひずみ関係を図-1に示す。CFストランドの弾性係数は、低い応力レベルでは負荷によって徐々に高くなり、ある応力レベル以上では、破断まで一定になる。しかし、実用上はストランドのひずみは、破断まで直線的に変化すると考えて支障はない。CFストランドの弾性係数は、鋼材の値に近いが、引張強度は、普通鋼の降伏強度の約10倍である。弾性係数および引張強度は、繊維本数（フィラメント数）の増加に

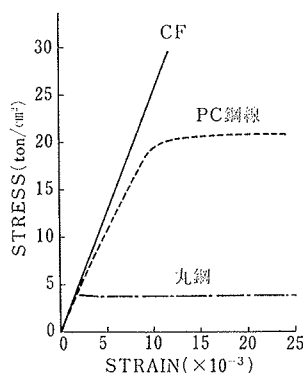


図-1 補強筋のσ～ε関係

	引張強さ (kg)	弾性係数 (t/cm²)
CF 1	64.3	2,534
CF 2	312	2,501
CF 3	541	2,613
CF 4	1,062	2,433
CF 5	1,256	2,519
丸鋼	356 (298)	2,013
PC鋼線	1,371	2,030

( )は降伏強さを示す

表-1 補強筋の特性

構造材料の種類	ストランドの種類	付着強度 $f_s$ (kg/cm²)	圧縮強度 $F_c$ (kg/cm²)	$f_s/F_c$
モルタル	CF 1	39.5	550	0.07
		38.2		0.07
		41.4		0.08
		26.1		0.07
		33.9		0.10
	CF 2	26.7	356	0.08
		43.4		0.12
		40.3		0.11
		35.3		0.10
		35.3		0.10
コンクリート	CF 1	12.6	286	0.04
		11.6		0.04
		9.97		0.03
		12.0		0.04
		10.1		0.04
	CF 2	10.9	286	0.04
		10.8		0.05
		11.0		0.05
		13.3		0.06
		25.5		0.09
丸鋼	24.7	286	0.09	
	24.0		0.08	

表-2 ストランドの付着試験結果

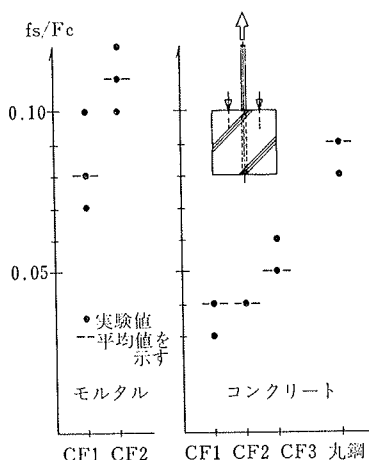


図-2 付着強度

対して低下する傾向が見られる。これは、含浸させた樹脂の影響と、フィラメント数が増えると、各フィラメントが同時、かつ、均等に力を負担しないためと考えられる。

表-2, 図-2は、引抜法によるストランドとモルタルおよびコンクリートとの付着試験結果である。なお、付着強度はCFストランドの外径の実測値を用いて求めた。この結果から、モルタルとCFストランドの付着強度は0.07  $F_c$  以上で、コンクリートに埋込まれた丸鋼と同等である。しかし、コンクリートとCFストランドの付着強度は、0.04~0.05  $F_c$  で、丸鋼の付着強度の半分程度である。

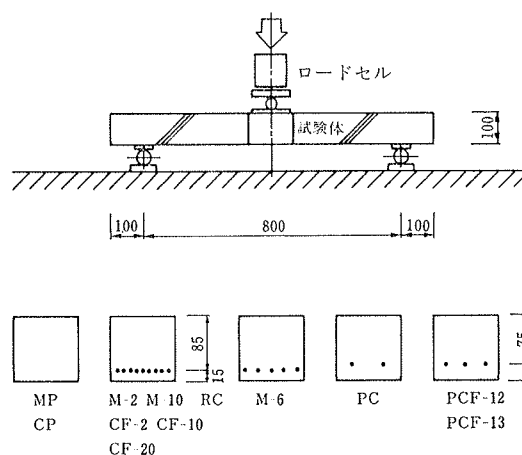


図-3 試験体の形状寸法と加力方法

試験体名	構造材料の種類	補強筋の種類	補強筋量 Pt (%)	プレストレス (kg/cm²)	圧縮強度 $F_c$ (kg/cm²)	
MP	モルタル	なし	0	0	356	
M 2		CF 1	0.02		448	
M 6		CF 2	0.06		356	
M 10		CF 2	0.10			
CP	コンクリート	なし	0	0	286	
RC		丸鋼(3.2φ)	0.72			
CF 2		CF 1	0.02		460	
CF-10		CF 2	0.10		286	
CF-13		CF 3	0.13		238	
CF 20			0.20		212	
PCF 12		CF 4	0.12		5.3	286
PCF 13		CF 5	0.13		13.3	251
PC		PC鋼線(2.9φ)	0.13		14.0	286

モルタルおよびコンクリートの調査

	W/C (%)	重量調査(kg/m³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和材
モルタル	60.0	607	364	1,214	—	—
コンクリート	75.0	259	194	945	834	0,086

表-3 試験体一覧表

### 3. CFストランドを引張補強筋とした曲げ部材実験

#### 3.1. 実験概要

試験体の形状寸法および一覧表を図-3, 表-3に示す。

短繊維を用いたCFRCでは, CFとの付着をよくするために構造材料は, 細骨材のみを使用したモルタルに限られている。しかし, 長繊維では, 構造材料として粗骨材を使ったコンクリートの使用が可能であると考えられる。そこで, この実験では, コンクリートの適用性を検討するため, 構造材料の種類をパラメータとして取り上げている。試験体のパラメータは, 構造材料の種類その他, 補強筋量(補強筋断面積をはり断面積で除した値), 補強筋の種類(CFストランド, 丸鋼, PC鋼線), プレストレスの有無と導入応力レベルである。

RC試験体およびPC試験体は, CF-10試験体および, PCF-12試験体と最大荷重がほぼ近似するように補強筋量を決定した。CFストランドは, 治具を用いて試験体の両端に定着し, 抜出しを防止している。CF-20試験体は, 曲げせん断破壊をする可能性があるため, 試験体の外周にCFを5mm間隔で巻きつけて, せん断補強を施した<sup>2)</sup>。

PCF-12, PCF-13試験体とPC試験体には, それぞれ, 平均圧縮応力 5.3 kg/cm<sup>2</sup>, 13.3 kg/cm<sup>2</sup>, 14.0 kg/cm<sup>2</sup>のプレストレスを導入した。なお, PCF-13試験体を除く, 2体はプレストレス導入後, セメントペーストを注入した。

試験体名	実験値			計算値			
	曲げひびわれ荷重(Q <sub>e</sub> ) <sup>(kg)</sup>	最大荷重(Q <sub>u</sub> ) <sup>(kg)</sup>	破壊状況*	曲げひびわれ荷重(Q <sub>e</sub> ) <sup>(kg)</sup>	(Q <sub>e</sub> ) <sub>e</sub> /(Q <sub>e</sub> ) <sub>c</sub>	最大荷重(Q <sub>u</sub> ) <sup>(kg)</sup>	(Q <sub>u</sub> ) <sub>e</sub> /(Q <sub>u</sub> ) <sub>c</sub>
MP	185	—	B	219	0.84	—	—
M-2	270	279	B	317	0.85	266	1.05
M-6	240	460	B	219	1.10	684	0.67
M-10	240	840	BS	219	1.10	1,260	(0.67)
CP	280	—	B	299	0.94	—	—
RC	319	1,088	B	338	0.94	1,111	0.98
CF-2	359	244	B	353	1.02	266	0.92
CF-10	310	980	B	304	1.02	1,193	0.82
CF-13	269	1,260	BS	273	0.99	1,421	(0.89)
CF-20	261	1,858	B	257	1.02	2,131	0.87
PCF-12	480	1,001	B	521	0.92	1,230	0.81
PCF-13	790	1,359	B	793	1.00	1,649	0.82
PC	690	974	B	735	0.94	1,012	0.96

\* Bは, 曲げ破壊, BSは, 曲げせん断破壊を示す。

表-4 曲げひびわれ荷重・最大荷重一覧表

実験は, 図-3に示す10 cm×10 cm×100 cmのはり部材を用い, スパン80 cmの単純ばり形式による中央集中荷重によって破壊まで漸増荷重を行なった。荷重時には, スパン中央の鉛直変位と補強筋のひずみを測定した。

#### 3.2. 実験結果と考察

図-4に破壊状況の一例を, 表-4にひびわれ荷重および最大荷重(補強筋が降伏もしくは破断に達する荷重)を示す。

図-5, 図-6は補強筋量の違い, 図-7は補強筋の種類, 図-8はプレストレスの導入力の違い, による荷

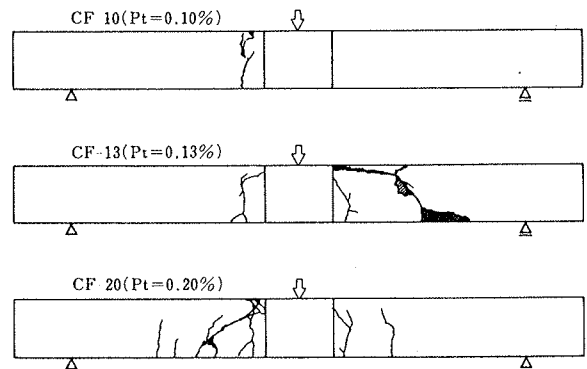


図-4 破壊状況

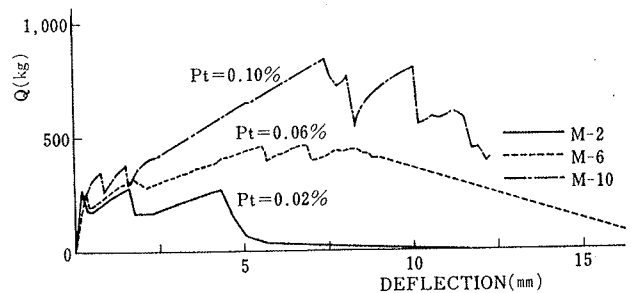


図-5 補強量の違いによる荷重～変位曲線の比較

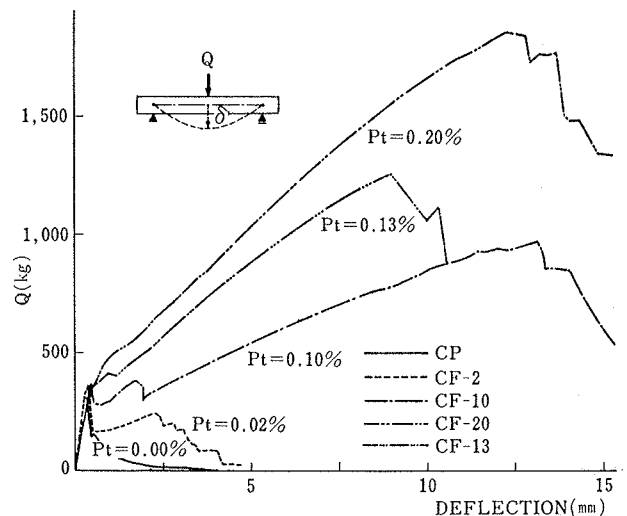


図-6 補強量の違いによる荷重～変位曲線の比較

重～変位（スパン中央の鉛直変位）曲線の比較である。なお、図-5はモルタルを、他はコンクリートを構造材料とした試験体の結果である。

3.2.1. 破壊性状 CF スtrandで補強したモルタルばり試験体では、曲げひびわれの発生によって一時的な荷重の低下が見られる。以降、M-10試験体を除いて、ひびわれの分散はなく、荷重とともにひびわれ幅が増大し、曲げによるstrandの破断で最大荷重に至っている。一方、M-10試験体は、荷重の増大につれて曲げひびわれが分散していった後、コンクリートが曲げせん断破壊を生じた。

M-6, M-10試験体では、ひびわれ幅の増大につれてひびわれ面での鉛直方向のずれが見られた。ずれの量は、M-6試験体、荷重 440 kg で約 1.5 mm であった。

次に、CF スtrandで補強したコンクリートばり試験体の破壊性状について述べる。補強筋量 0.1% 以下では、モルタルばりと同様の性状を示している。補強筋量 0.13%, 0.2% の試験体では、曲げひびわれによる荷重の低下はなく、荷重の上昇につれて、複数の曲げひびわれが生じた。CF-13試験体は、コンクリートの曲げせん断破壊により、CF-20試験体は、曲げによるstrandの破断で最大荷重に至っている。

一方、RC および PC 試験体では、ひびわれの状態は、それぞれ、CF-10, PCF-12試験体と同様であるが、いずれも大変形に至るまで、鉄筋、PC 鋼線の破断は生じなかった。

3.2.2. 各パラメーターによる性状の比較

(1) 構造材料（モルタル、コンクリート）の種類による性状の違い

M-10, CF-10試験体を比べると、曲げひびわれ発生後の同一荷重に対する変位は、後者（コンクリートばり）の方が大きい。これは、コンクリートあるいは、モルタルとstrandとの付着性状の違いによるものと考えられる。

(2) 補強筋量による性状の違い

図-5, 図-6より、CF スtrandを補強筋として用いると、曲げひびわれ後も耐力を保持することができる。さらに、補強量が多くなるとモルタルばり、コンクリートばりともに、曲げひびわれ後も耐力が上昇し、最大荷重は補強筋量に比例する。また、曲げひびわれによる剛性の低下は、補強筋量が多くなるほど小さくなる。

(3) 補強筋の種類による性状の違い

図-7で、CF スtrandを用いたCFRC部材の最大荷重時の変位は、RC部材の降伏変位に比べて大きくなる。また、同じ耐力を有するCFRC, PC, RC部材では、RC部材が曲げひびわれ後の剛性低下が小さく、エネルギー

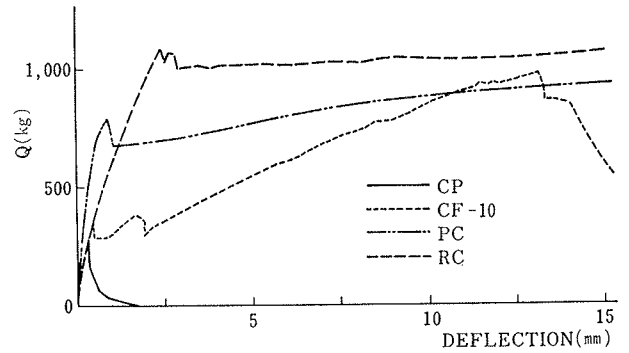


図-7 補強筋の種類による荷重～変位曲線の比較

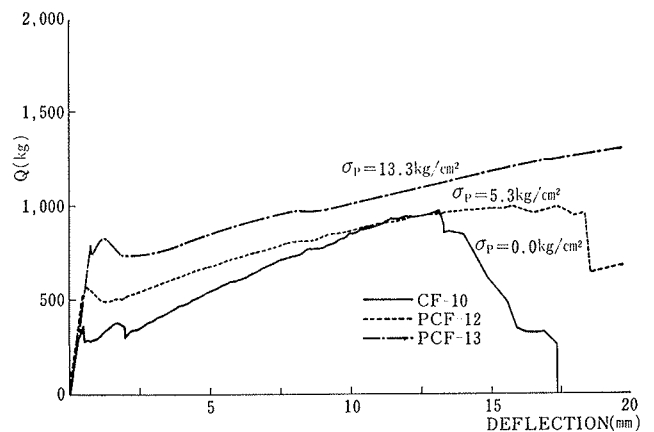


図-8 プレストレスの導入レベルによる荷重～変位曲線の比較

ギー吸収が大きい。これは、CF-10, PC試験体の補強筋量がRC試験体に比べ1/6～1/7で、補強筋の引張剛性が小さく、曲げひびわれ後、部材の剛性低下が大きくなっていること、CF スtrand, PC 鋼線には降伏棚がないことによるものである。エネルギー吸収の面で、RC試験体と同等とするためには、CFの補強筋量を0.2%程度にするか、さらに高い応力レベルのプレストレスを導入し、PC部材として曲げひびわれ荷重を増大させる必要がある。

(4) プレストレス導入による性状の違い

図-8より、CF スtrandにプレストレスを導入すると曲げひびわれ荷重が増大する。補強筋量および導入力が同等のPCF-13とPC試験体を比べると、最大荷重は、前者が後者を上回っているが、変位性状は両者で近似している。これらの結果から、CF スtrandをPC部材の緊張材として利用することが可能であると考えられる。

3.2.3. 曲げひびわれ荷重と最大荷重 表-4に示した曲げひびわれ荷重の計算では、曲げ引張強度として、モルタルの曲げ強度、またはコンクリートの圧縮強度から求めた  $1.8\sqrt{F_c}$  を用いた。また、最大荷重は、補強筋

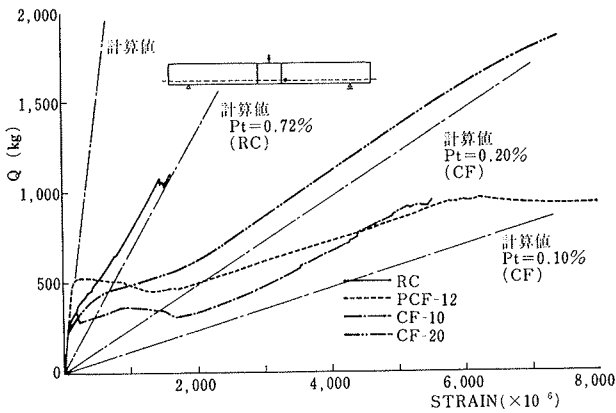


図-9 補強筋の荷重～ひずみ曲線

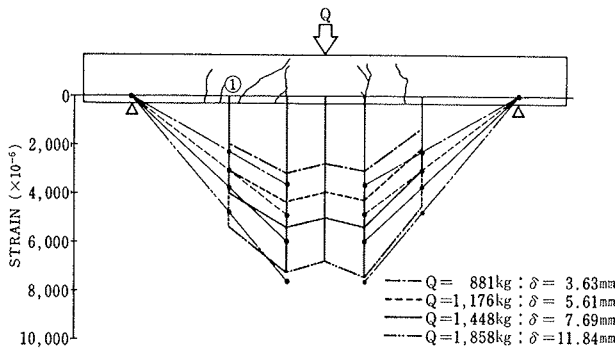


図-10 CFストランドのひずみ分布(CF-20)

の引張試験で得られた降伏強度または引張強度を用いて、 $M_u = a_v \cdot f_y \cdot j$  ( $j = 7/8 d$ ) から求めた。

諸荷重の実験値と計算値を比べると、曲げひびわれ荷重は、計算値の0.84～1.10倍である。鉄筋、PC鋼線を用いた試験体の最大荷重は、計算値の0.98、0.96倍で両者は近似している。しかし、CFストランドを用いた試験体の最大荷重は、計算値の80～90%になっている。

3.2.4. 補強筋のひずみ性状 図-9は、クリティカル断面でのCFストランドおよび鉄筋の荷重～ひずみ関係で、図-10はCF-20試験体におけるCFストランドのひずみ分布である。

図には、コンクリートと補強筋が一体として引張応力を負担する場合と、引張側のコンクリートを無視し、補強筋のみが引張応力を負担する場合の荷重～ひずみ関係を計算値として示した。前者は、曲げひびわれ発生前、後者は曲げひびわれ後のひずみ状態に対応している。

補強筋の荷重～ひずみ曲線は、弾性範囲では、実験値と計算値は一致している。ひびわれ後は、荷重～ひずみ曲線の勾配において、実験値と計算値が近似している。

図-10のひずみ分布をみると、曲げひびわれが数本入

った時点(荷重 881 kg)では、実験値がコンクリートを無視した計算値より小さいが、ひびわれの増大およびひびわれの進展によって、最大荷重時(荷重 1,858 kg)では、実験値は、計算値とほぼ近似している。図-5の破壊状況と図-10のひずみ分布をみると、曲げひびわれのみが生じている加力点より右側のひずみ分布の傾きは、計算値とよく対応している。しかし、曲げせん断ひびわれが生じた左側では、ひずみの傾きが計算値よりゆるやかになっており、測定位置①のひずみがひびわれ幅の増大につれて、急増していることを意味している。実験では、ひびわれ面でせん断によるストランドの破断は見られなかった。

#### 4. まとめ

(1) CFストランドとモルタルあるいは、コンクリートとの付着試験の結果、モルタルとストランドの付着強度は、 $0.07 F_c$  以上で、コンクリートに埋込まれた丸鋼と同等あるいは、それ以上であった。しかし、コンクリートとの付着強度は、 $0.04 F_c$  程度で、丸鋼の半分である。

(2) CFストランドを補強筋とした曲げ部材実験の結果、次のことが明らかになった。

(a) CFストランドは、鉄筋あるいは、PC鋼線と同様に曲げ補強筋として使用することができる。

(b) CFストランドを鉄筋に代る曲げ補強筋として用いる場合、最大荷重時の変位が鉄筋コンクリートばりの降伏変位に比べて大きくなるため、構造部材としての変形の許容量について検討する必要がある。

(c) CFストランドにプレストレスを導入し、PC部材におけるPC鋼線と同様に用いると、その部材の曲げ性状は、PC鋼線を用いたPC部材と同等である。

(d) CFストランドを用いた部材の曲げひびわれ荷重は、鉄筋コンクリートばりあるいは、プレストレスコンクリートばりと同様に求められる。また、最大荷重は、ストランドの引張試験による引張強度を用いて求めた値の0.8～0.9倍となっている。

#### 参考文献

- 1) 木村, 小島, 武田: 炭素繊維を補強筋とした曲げ部材実験, 第30回材料研究連合講演会, (昭和61.9), pp. 71～72
- 2) 勝俣, 小島, 武田: 新素材による既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 33, (1986), pp. 67～71