

[1119] アラミド繊維による組紐状棒材を用いた PRC ばりの曲げ性状

正会員 岡本 直 (三井建設 技術研究所)
 正会員 遠藤 克彦 (三井建設 技術研究所)
 松原 澄行 (三井建設 技術研究所)
 正会員 ○谷垣 正治 (三井建設 技術研究所)

1. はじめに

これまでに組紐状にしたアラミド繊維棒をコンクリート部材の補強に用いるための実験的研究を行った¹⁾。その結果、このような高強度繊維を曲げ補強筋として用いたはりでは、棒材の強度に見合う剛性の確保が難しいため、初期段階でのたわみが大きくなる等の問題点があり、これらの問題を改善する1方法としてプレストレス導入が効果的であることがわかった。そこで、本論では、実用化に向けて、より集束本数の多い繊維棒を主筋および緊張材に用いたプレテンション方式のPRCばりの曲げ試験を行い、主にその荷重-変形関係の示す特性について検討した。

2. 組紐状棒材の材料特性

この繊維棒は、アラミド繊維を組紐状に編んでエポキシ樹脂を含ませた後、表面に珪砂を接着させて製造したもので、樹脂含有率は60%である。本試験に用いた5種類の繊維棒の諸元値を表-1に引張試験結果を表-2に示す。試験結果は4本の試験片の平均値であり、ヤング率は、アラミド繊維のみの断面積から計算する方法と、樹脂を含めた棒材全断面積から計算する方法の2通りを示した。伸びの測定はクリップ式変位計およびひずみゲージで行った。引張耐力はアラミド繊維素材のカタログ値から求めた値の81%程度、ヤング率はカタログ値から求めた値の79%程度となっている。

3. 試験体の形状

試験体の形状を図-1に示す。断面形状はせい300mm巾225mmで、T型のものには厚さ75mm巾270mmのスラブが両側に付いている。各試験体とも繊維棒を引張側の主筋として下端から40mmの位置に3本、上端筋として同種の繊維棒を2本配置している。また、緊張材として繊維棒を下端から100mmの位置に2本配置し、プレテンション方式でプレストレスを導入した。

表-1 繊維棒の諸元

棒材名	線維量 IS6000fc-f ₀	重量 (g/m)	最大直径 (mm)	断面積 (mm ²)		周長 (mm)
				棒材	繊維のみ	
K64S	64	60	9.0	50	30	28.0
K96S	96	90	11.0	75	45	35.0
K128S	128	120	13.5	100	60	42.0
K192S	192	180	15.5	150	90	49.0
K256S	256	240	17.5	200	120	55.0

(* 1fc-f₀ = 1g/9000m)

表-2 繊維棒の引張試験結果

棒材名	引張耐力 (tf)	ヤング係数 $\times 10^6$ (kgf/cm ²)		破断時伸び率 (%)
		棒材断面	繊維断面	
K64S	7.04	0.64	1.07	2.19
K96S	10.65	0.62	1.03	2.30
K128S	13.56	0.66	1.09	2.07
K192S	19.80	0.61	1.02	2.15
K256S	24.80	0.64	1.08	1.92

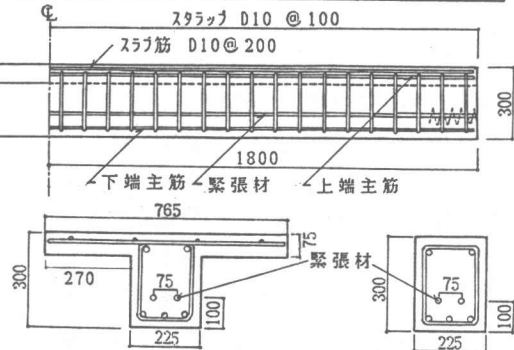


図-1 試験体の形状

表-3 コンクリートの材料特性

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 $\times 10^5$ (kgf/cm ²)	ポアソン比	割裂強度 (kgf/cm ²)
プレストレス導入時	290	2.47	0.125	-
曲げ試験時	361	2.67	0.168	19.8

4. 試験体の構成

表-4に試験体の構成を示す。試験体は全部で9体あり、主筋および緊張材に繊維棒を使用した。試験体のパラメータは、主筋量（引張側に配置された3本の繊維棒の繊維のみの断面積のコンクリート断面積に対する比）で、0.13, 0.26, 0.39%、プレストレスによるコンクリート下縁応力で0, 15, 30, 45, 60 kgf/cm²である。プレストレスによる下縁応力は有効率 $\eta=0.8$ として緊張力より算出した。なお、F-26-0は緊張材が配置されていない試験体である。F-26-15-S試験体の断面形状は長方形、その他の試験体はスラブのついたT型ばりである。

5. 加力方法

加力方法は、図-2に示すように、加力スパン75cm、支持スパン300cmの2点载荷とし、表-4に示すようにF-26-0試験体では単調一方方向载荷、他の試験体では繰返し载荷である。繰返し载荷での加力ルールは中央たわみが支持スパンの1/500, 1/300, 1/200, 1/100の各変位をF-26-15-C試験体では3回、他の試験体では1回繰返すこととした。

6. 試験結果および考察

6.1 荷重-変形関係

図-3, 図-4に各試験体の荷重-変形曲線の包絡線を示す。包絡線は、ひびわれ発生以前の直線部分（以下、第1勾配と呼ぶ）とひびわれ進展に伴う遷移領域およびその後終局点に達するまでの直線部分（以下第2勾配と呼ぶ）の3領域から成っており、プレストレス力の小さい試験体ほど遷移領域は小さくなっている。図-3に見られるように、プレストレス力が大きい程、ひびわれ耐力、最大耐力は大きくなり、最大耐力時変位は小さくなる傾向にある。また図-4に示すように補強筋量の多いもの程第2勾配、最大耐力、最大耐力時変位は

表-4 試験体の構成

試験体名	主筋		プレストレス緊張材			その他の条件
	種類	補強筋比 (%)	種類	緊張力 (tf/本)	ラスト以下下縁応力 (kgf/cm ²)	
F-26-0				0	0.0	単調加力
F-26-15	3-K128S	0.26	2-K96S	3.13	15.0	繰返し加力
F-26-15-C						3回繰返し加力
F-26-15-S						長方形断面繰返し加力
F-13-15	3-K64S	0.13				繰返し加力
F-39-15	3-K192S	0.39				"
F-26-30			2-K192S	6.25	30.0	"
F-26-45	3-K128S	0.26	2-K192S	9.38	45.0	"
F-26-60			2-K256S	12.5	60.0	"

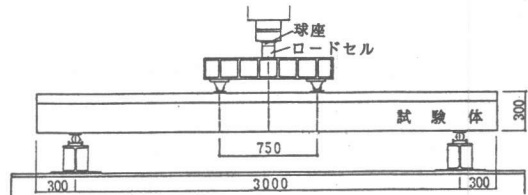


図-2 加力方法

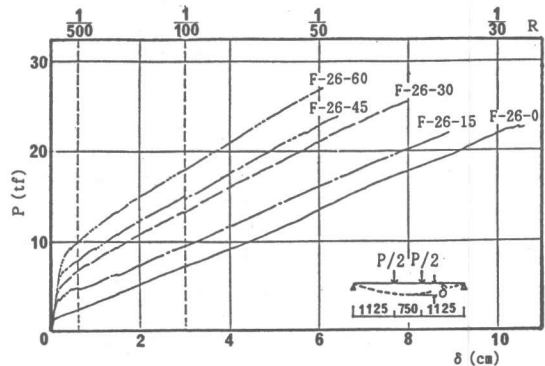


図-3 荷重-変形曲線の包絡線

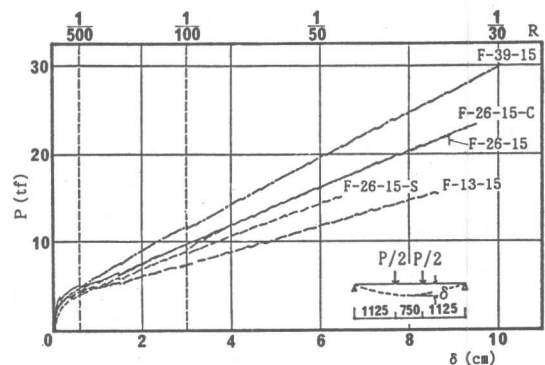


図-4 荷重-変形曲線の包絡線

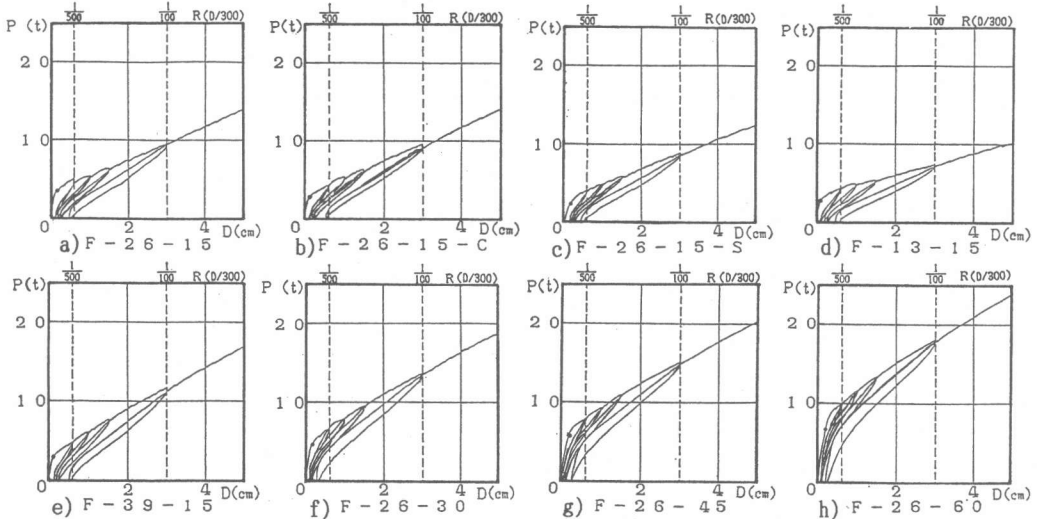


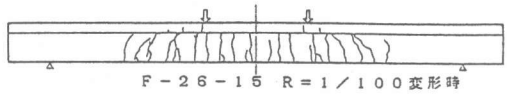
図-5 荷重-変形曲線

大きくなっている。F-26-15 とF-26-15-C を比較すると加力の繰返し回数の差による包絡線への影響は少ない。また、F-26-15-S では上端コンクリートの圧壊によって終局状態に達したため最大耐力、最大変位が小さくなっている。

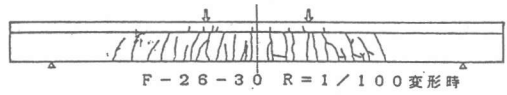
図-5 にF-26-0を除く各試験体の荷重-変形曲線を示す。図中の・印は初ひびわれ発生点を表す。繰返し加力における除荷時の荷重-変形関係はプレストレスト特有の逆S字形をしておりプレストレス力大きいものほど残留変形が小さくなっている。また3回繰返し加力を行ったF-26-15-C 試験体では加力の繰返しによる荷重-変形曲線の変化はほとんど見られなかった。

6.2 ひびわれ状況

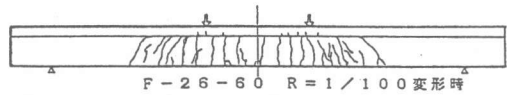
図-6 にF-26-15, F-26-30, F-26-60, F-26-15-S試験体の1/100 変形時と最終状況におけるひびわれ発生状況を示す。1/100 変形時では曲げひびわれはほぼ出尽しており、各試験体間の差はあまり見られない。曲げひびわれ間隔は約10cm程度と小さく、この繊維棒は十分な付着力を有していると考えられる。その後せん断ひびわれも若干発生し、繊維棒の破断と同時に水平方向に走る付着割裂ひびわれを生じて終局状態に達した。なおF-26-15-S では、上端コンクリートが圧壊したので付着割裂ひびわれは生じなかった。



(a) F-26-15 最終ひびわれ



(b) F-26-30 最終ひびわれ



(c) F-26-60 最終ひびわれ



(d) F-26-15-S 最終ひびわれ

図-6 ひびわれ図

表-5 試験結果一覧

試験体名	初ひびわれ時				終局時								
	実験値		計算値		Pcr/Pert	実験値		計算値1		Pu/Pu1	計算値2	Pu/Pu2	破壊モード
	たわみ δ_{cu} (cm)	荷重 Pcr(tf)	荷重 Pert(tf)	たわみ δ_u (cm)		荷重 Pu(tf)	荷重 Pu1(tf)	荷重 Pu2(tf)					
F-26-0	1.14	1.52	2.17	0.70	10.1	22.0	22.8	0.96	22.4	0.98	主筋破断		
F-26-15	1.42	3.58	3.37	1.06	8.93	22.0	22.8	0.96	24.0	0.92	PS材破断		
F-26-15-C	1.29	2.97	3.37	0.88	9.58	23.4	22.8	1.03	24.0	0.98	主筋破断		
F-26-15-S	1.36	2.37	2.60	0.91	6.46	15.0	22.8	0.66	15.3	0.98	圧壊		
F-13-15	1.02	2.97	3.37	0.88	8.68	15.5	14.9	1.04	15.5	1.00	主筋破断		
F-39-15	1.16	2.97	3.37	0.88	10.1	30.0	30.4	0.99	32.4	0.93	#		
F-26-30	1.80	4.78	4.57	1.05	8.02	25.5	28.2	0.90	30.4	0.84	#		
F-26-45	1.84	5.82	5.77	1.01	6.39	23.7	28.2	0.84	27.2	0.87	PS材破断		
F-26-60	1.84	6.80	6.97	0.98	6.10	26.9	30.8	0.87	31.5	0.85	#		

6.3 初ひびわれ耐力および終局耐力

表-5に初ひびわれ時および終局時の実験値と耐力の計算値を比較して示す。初ひびわれ荷重の計算値は、コンクリートの曲げ強度 ($1.8\sqrt{F_c}$) とプレストレス力 (σ_p) から求めたひびわれモーメントから自重の影響 (M_o) を差し引いて求めたものである。終局荷重の計算値1はP R Cばりの曲げ耐力略算式²⁾を用いて求めたものであり、計算値2は断面の平面保持を仮定して各曲率における抵抗モーメントを逐次算定し、圧縮側のコンクリートひずみが3500 μ に達するかまたは繊維棒のひずみが2.1%に達した時点を終局点と見なす方法によって求めた値である。破壊モードは、F-26-15-Sが上端コンクリートの圧壊、その他の試験体は繊維棒の破断によって終局状態に達した。

図-7にひびわれ耐力 (Pcr) とプレストレス下縁応力 (σ_p) との関係を示す。図中実線で示す直線は、上述の初ひびわれ荷重の計算方法で求めた値であり、この結果から、本試験体では所定のプレストレス力が導入されたものと考えられる。

図-8に最大耐力 (Pu) と等価引張補強筋比 (pte) の関係を示す。pteは、引張補強筋として主筋と緊張材の両方を採り、それぞれの高さ位置の違いを考慮して下式によって定義したものである。

$$p_{te} = (A_r + (8d_p - d_r) / 7d_r \cdot A_p) / (b \cdot d) \dots (1)$$

A_r, A_p : 主筋、緊張材の繊維断面積 (cm²)
 d_r, d_p : 主筋、緊張材の高さ位置 (cm)
 b, d : はり巾、はりせい (cm)

図-8より、最大耐力とこの等価引張補強筋比はほぼ比例関係にあると考えられる。

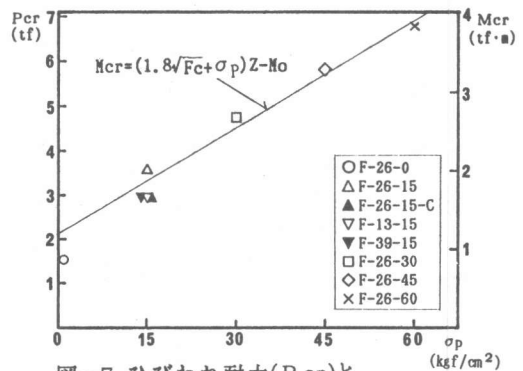


図-7 ひびわれ耐力(Pcr)とプレストレス下縁応力(σ_p)の関係

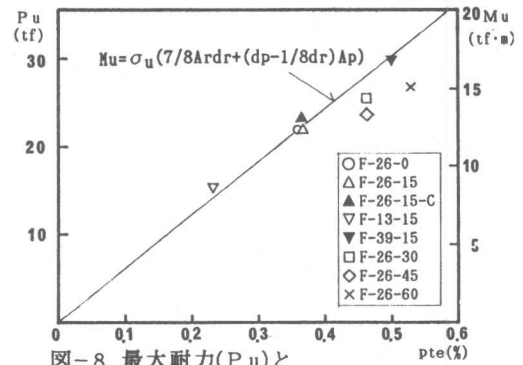


図-8 最大耐力(Pu)と等価引張補強筋比(pte)の関係

6.4 第2勾配

図-9に第2勾配(K₂)と等価引張補強筋比の関係を示す。第2勾配は荷重-変形曲線のR=1/500変形時点と終局点とを結ぶ直線の傾きと考えた。この図より荷重-変形関係の第2勾配は引張補強筋比と比例関係にあることがわかる。これは、曲げひびわれが十分にはいった後は、終局点に達するまで弾性状態にある補強繊維棒の剛性によって、はりの剛性が決定されているためと考えられる。

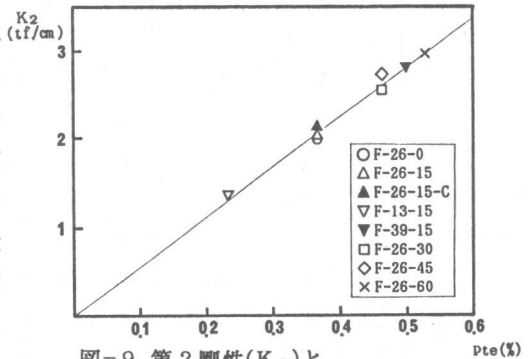


図-9 第2剛性(K₂)と等価引張補強筋比(pte)の関係

6.5 終局時変位

緊張材の初期緊張応力度($p\sigma_i$)と引張強度($p\sigma_u$)との比を初期緊張率($p\sigma_i/p\sigma_u$)と定義し、終局変位(δ_u)と初期緊張率の関係を図-10に示す。この図からわかるように初期緊張率の大きいものほど、終局変位(δ_u)は小さくなっている。同じ初期緊張率のF-13-15, F-26-15, F-39-15を比較すると補強筋比の大きい方が終局変位が大きく、またF-26-15とF-26-30およびF-26-45とF-26-60を比較するとプレストレス応力(σ_p)の大きい方が終局変位は小さくなる傾向にある。

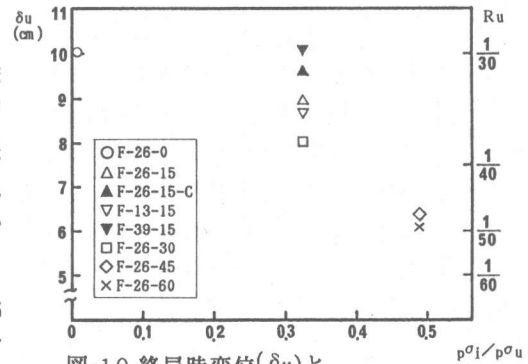


図-10 終局時変位(δ_u)と初期緊張率($p\sigma_i/p\sigma_u$)の関係

6.6 残留変位

図-11に繰返し加力における折返し変位が1/500, 1/100の場合の各試験体の残留変位を示す。プレストレス力が高くなる程、残留変位は小さくなる傾向にある。残留変位の減少はプレストレス応力(σ_p)が15~30 kgf/cm²で最も大きくその後 σ_p が大きくなるに従い減少傾向は緩やかになる。折返し変位に対する残留変位の割合は σ_p が15 kgf/cm²の場合で20~15%、 σ_p が60 kgf/cm²で7%程度となっている。

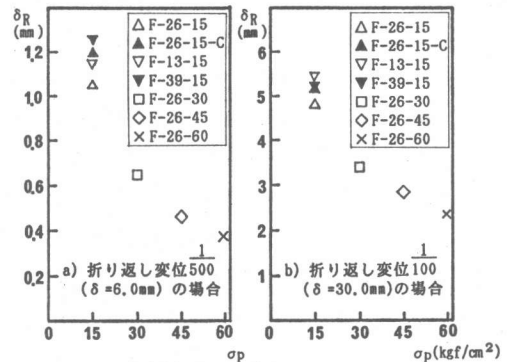


図-11 残留変位(δ_R)とプレストレス下縁応力(σ_p)の関係

6.7 繰返し加力による耐力低下

図-12にF-26-15とF-26-15-C試験体の加力の繰返し回数とピーク耐力(加力折返し点の耐力)の関係を示す。折返し変位1/500の場合F-26-15でやや低下が見られるが、全体的に見てピーク耐力は非常に安定しており、本試験の繰返し回数の範囲では、加力の繰返しによる劣化は少ないものと考えられる。

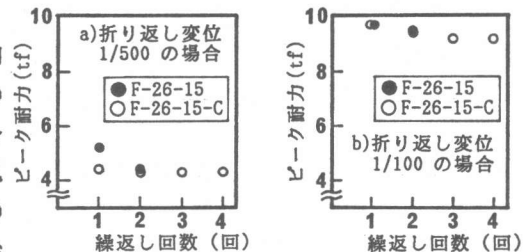


図-12 繰返し回数とピーク耐力の関係

6.8 M- ϕ 、P- δ 関係

図-13に、F-26-15、F-26-60のはり中央断面のモーメント(M)と曲率(ϕ)の関係を示す。図中・印の測定値1はコンクリート上端のひずみとはり側面に取付けたパイゲージの伸びから求めた値、○印の測定値2はコンクリート上端のひずみと外力モーメントから中立軸を仮定して求めた値である。実線で示す計算値2は6.3で示した終局耐力の算定法に基づき、断面のM- ϕ 関係を追跡したものである。なおパイゲージによる測定は変形1/100までとした。また図-14に荷重-変形関係の実験値と計算値を示す。計算値は図-13の計算値2に示すM- ϕ 関係に基づいて求めた。実験値と計算値は変形の小さい段階ではよく一致しているが、変形が大きくなるにつれ計算値が実験値を上回るようになる。しかし、その差は最大耐力および終局変位ともに15%以内であり、この計算方法で荷重-変形関係を推定できると考えられる。

7. まとめ

本実験より、この組紐状アラミド繊維棒をプレテンションのPRCばりの曲げ補強筋(主筋、緊張材)として使用し、曲げ引張破壊が卓越する場合の曲げ性状を以下にまとめる。

- (1) この繊維棒はプレテンションの緊張材として用いることが可能であり、その場合のプレストレス有効率は通常のPC鋼棒同様 $\eta=0.8$ としてよい。
- (2) 荷重-たわみ関係はひびわれ発生以前の第1勾配部分と遷移領域および最大耐力に至るまでの第2勾配部分とから成り、プレストレス力が小さい程、遷移領域は少ない。
- (3) 導入プレストレス力が高い程、ひびわれ耐力は増大するが、初期緊張率(初期張力/引張耐力)が高くなると破壊時の変形能力が低下する。
- (4) 最大耐力および第2勾配は、引張補強筋量にほぼ比例して増大する。
- (5) 最大耐力は、本文中の計算法で十分に推定することができ、荷重-変形関係についても断面のモーメント-曲率関係よりある程度推定することができる。
- (6) 以上より、繊維の補強量、プレストレス力を適切に選定することにより、PRCばりの荷重-変形性能を任意に設定することが可能と考えられる。

最後に、本研究を進めるにあたりご指導頂いた東京理科大学野村設郎教授、ならびに論文作成に協力して頂いた西久保一氏、田所克也氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 岡本, 松原, 谷垣「アラミド繊維による組紐状棒材の研究(その1引張特性および耐久性について、その2コンクリート補強効果について)」日本建築学会大会梗概集A, P529, 昭和62年
- 2) 「プレストレス鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説」日本建築学会 1986

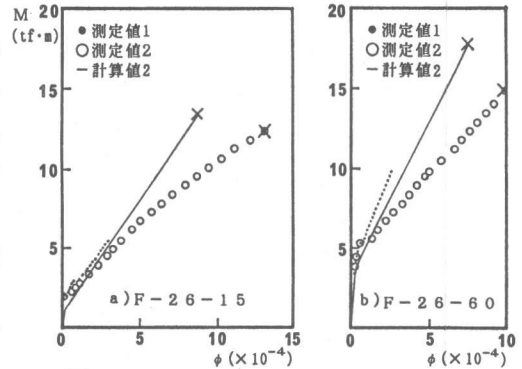


図-13 モーメント(M) - 曲率(ϕ)関係

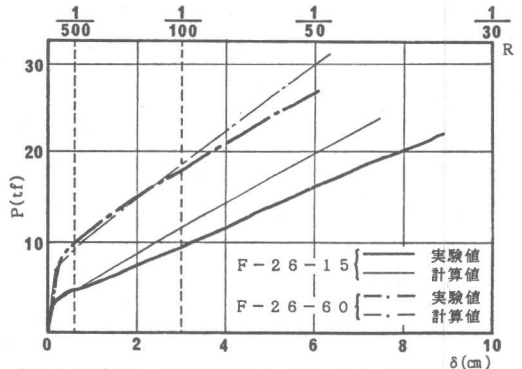


図-14 荷重-変形関係の実験値と計算値の比較