

[93]

鋼繊維補強RCはりの曲げ耐力および変形能力の寸法効果

正会員 谷川 恭雄 (名古屋大学)

同 山田 和夫 (同)

同 ○畑中 重光 (同)

1. まえがき 鋼繊維補強コンクリート(以下, SFRCと略記)の力学性質については, 引張・曲げ載荷時の挙動を中心として, 既に数多くの研究成果が報告¹⁾²⁾されているが, その優れた性能を有効に利用するためには圧縮載荷時の挙動³⁾⁴⁾やRC部材としての挙動についても更に多くの資料を蓄積する必要がある。一般に, コンクリート中の鋼繊維は試験体寸法によっては, ある方向に偏って配向する性質を有するため, SFRCの力学性質は通常のコンクリートのそれとは異なり, 寸法効果を有すると考えられる。そのため本研究では, SFRCを構造物として実用化するための基礎資料の充実に図ることを目的として, 鋼繊維補強RCはり(以下, SFRCはり)の曲げ耐力および変形能力の寸法効果に関する一連の実験的研究を行うことにした。なお, SFRCはりの力学性質について解析する際の基礎データを得るために, 円柱形試験体および角柱形試験体の各種力学性質の寸法効果に関する実験も併せて行った。

2. 実験方法 2.1 実験の概要: 本研究では表-1に示すような内容のSFRCはりに関する三等分点静的曲げ載荷実験および漸増繰返し曲げ載荷実験並びに円柱体および角柱体に関する静的圧縮載荷実験を行った。実験要因としては, 試験体寸法, 鋼繊維の体積混入率(V_f)および水セメント比(W/C)を取り上げた。試験体個数は, 円柱体および角柱体がそれぞれ要因別に各20個, 合計600個, また, はり試験体は要因別に各3体, 合計45体とした。SFRCはりの主筋比(R)は予備実験の結果(図-1参照)に基づいて2.1%の一定とした。

使用したSFRCはりの形状寸法および配筋状況を表-2および図-2に示す。2.2 試験体の製作および養生方法: 試験体の製作には, 普通ポルトランドセメント, 川砂(粒径5mm未満), 川砂利(粒径5~10mm), 鋼繊維および鉄筋を用いた。使用鉄筋の性質を表-3に示す。コンクリートの調合表および実測スランプは別報⁵⁾を参照されたい。角柱体は材令1日目に, 円柱体は材令2日目に, また, はり試験体は原則として材令5日目に脱型した後, 試験材令(28日)まで空中養生を行った。2.3 載荷および測定方法: SFRCはりの載荷および測定方法を図-3に示す。図-3に示したように, 本実験では, スターラップの代りに試作の鋼製棒をせん断スパン部に取り付けてせん断補強を行った⁶⁾。このようなせん断補強を行うことにより, 今回用いたSFRCはりは, すべて曲げによって破壊した。また, 一部スターラップで補強したはりの載荷実験を行って, この補強方法による場合との比較を行ったが, 両者の間に顕著な相違はみられなかった。

3. 実験結果とその考察 円柱体および角柱体による各種力学性質の実験結果の一覧を表-4に示す。表中の

表-1 実験の概要

シリーズ 記号	Vf (%)	W/C (%)	鋼繊維の形状 (mm)	試験体の形状と寸法 (cm)
1.5-50	1.5	50	0.4x0.7x30	円柱体 φ5x10, φ10x20, φ15x30
0-60	0	60		角柱体 5x5x10, 10x10x20, 15x15x30
0.75-60	0.75	60		はり試験体 4.5x8.9x107.2 (φ6)
1.5-60	1.5	60		はり試験体 7.2x14.5x173.9 (D10)
1.5-70	1.5	70		はり試験体 9.7x19.4x232.2 (D13)
				付着試験体 4x4x4
(記号) Vf: 鋼繊維の体積混入率(%) W/C: 水セメント比(%)				

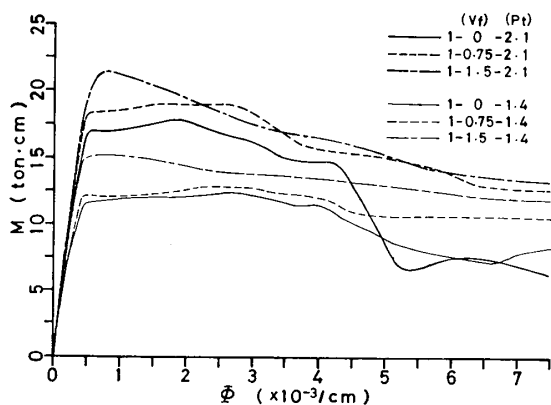
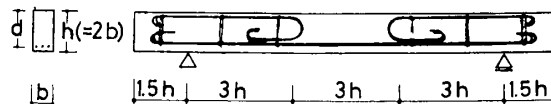
図-1 はり試験体の $M-\delta$ 曲線に関する予備実験結果

図-2 はり試験体の形状寸法および配筋状況

表-2 はり試験体の形状寸法

シリーズ記号 (寸法別)	主筋		はり断面				寸法比
	主筋名	直径(mm)	b(cm)	h(cm)	d(cm)		
$\phi 6$	$\phi 6$	5.65	4.45	8.90	8.04		0.46
D10	D10	9.18	7.28	14.49	13.04		0.75
D13	D13	12.19	9.68	19.35	17.42		1.00

シリーズ記号は鋼繊維の体積混入率(V_f) - 水セメント比(W/C)を示し、Mはそのシリーズにおける母材を表わす。表-5はSFRC はりの曲げ耐力、曲率およびエネルギー吸収率の実測値並びに表-4に示したSFRCの基本力学的性質の実測結果を用いて求めた計算値を示している。以下、SFRC はりの曲げ耐力および変形能力の寸法効果を中心として考察を行う。

3.1 モーメント-曲率曲線の形状: 図-4(a)~(d)は、SFRC はりのモーメント(M) - 曲率(ϕ)曲線の測定例($W/C=60\%$ の場合)であり、(b)図~(d)図は、それぞれたて軸を最大モーメントで、横軸を最大モーメント時の曲率で除して無次元表示したものである。図-4(b)によれば、鋼繊維を混入していない

0-60シリーズのはり試験体の寸法効果はかなり大きく、 $\phi 6$ 試験体に比べてD10およびD13試験体は極めて脆性的な破壊性状を示す。これに対して、(c)図および(d)図から明らかのように、鋼繊維を混入した試験体は、最大モーメント以後のじん性を増すばかりでなく、混入率の増大に伴ってその寸法効果も小さくなる傾向がみられる。特に、脆性的な破壊性状を示すような

RC はりにSFRCを適用すれば、じん性の改善効果が大きいと言える。また、図には示していないが、1.5-50および1.5-70シリーズのはり試験体についても1.5-60シリーズの場合とはほぼ同様な傾向がみられた。

3.2 モーメント、曲率およびタフネスの寸法効果: 図-5~図-7は、それぞれ可視ひびわれ発生時、降伏耐力時および最大耐力時のモーメント(M)並びに曲率(ϕ)の寸法効果を表わしている。ただし、図のたて軸は鉄筋の効果を除外するため、それぞれ0-60シリーズの値で除した後、 $\phi 6$ 試験体(寸法比 $X=0.46$)に対する

表-3 鉄筋の引張試験結果

主筋名	降伏点		引張強度		伸び率	
	Ave. (kg/cm ²)	C.V. (%)	Ave. (kg/cm ²)	C.V. (%)	Ave. (%)	C.V. (%)
$\phi 6$	4020	3.14	4750	2.99	27.4	9.05
D10	4140	1.60	6020	2.63	23.6	6.23
D13	3779	1.07	5515	0.64	24.9	5.17

(記号) Ave.: 平均値 C.V.: 変動係数 試験体本数: 150本

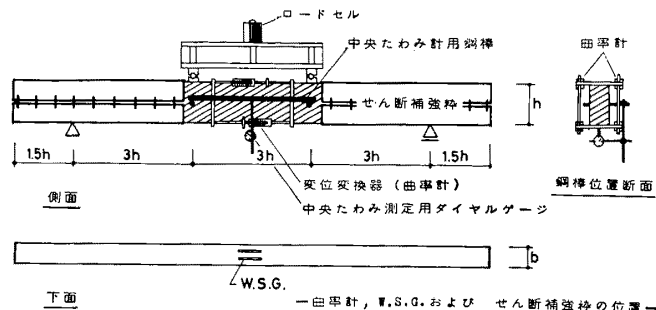
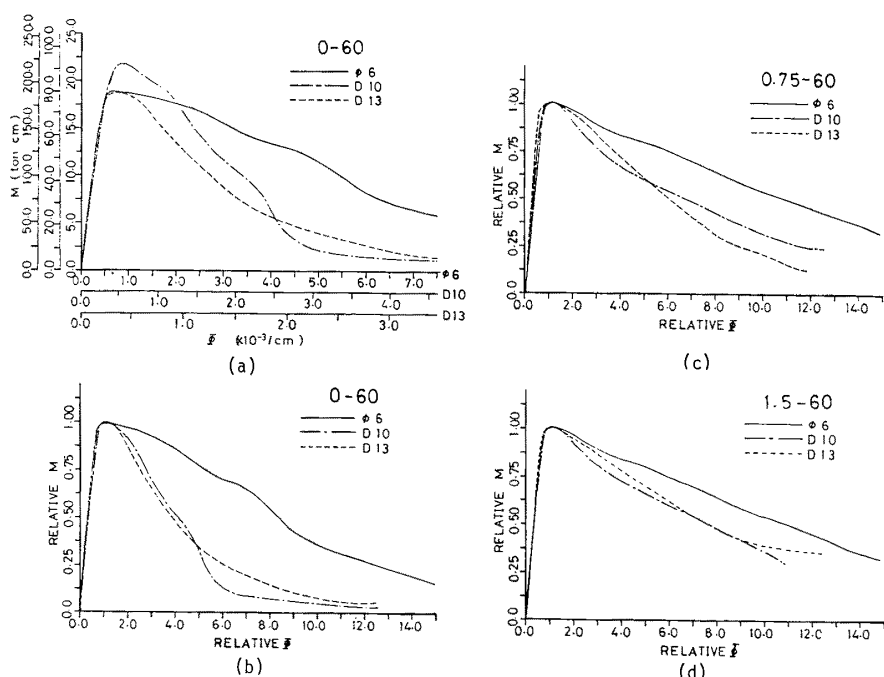


図-3 はり試験体の載荷および測定方法

表-4 円柱体および角柱体の実測値

シリーズ 記号	D (cm)	圧縮試験										割裂試験		Popovics式 における係数	
		ρ	F_{cp} (kg/cm ²)	F_{cp}/F_{cc}	ϵ_m ($\times 10^{-3}$)	E_i ($\times 10^3$ kg/cm ²)	K_u	δ	S_o (kg/cm ²)	A_o (kg/cm ²)	m	$\sigma_{t,cr}$ (kg/cm ²)	F_t (kg/cm ²)	n_a	n_d
1.5-50M	10				3200	2.17	2.45	1.25	149.0	63.6	2.34			2.4	6.0
1.5-50	5	2.21	264	1.10	4667	2.07	0.22	2.52	315.9	85.4	3.72			1.5	2.4
	10	2.24	306	0.99	3990	1.95	0.36	2.36	374.3	86.4	4.44	34.9	43.1	2.1	2.2
	15	2.24	322	0.96	4667	2.02	0.43	2.06	395.8	110.4	3.59			1.9	2.6
0-60	5	2.27	271	1.57	3533	2.13	0.92	1.78	115.7	42.9	2.82			1.8	3.5
	10	2.26	264	1.26	1977	2.24	0.71	1.81	112.9	28.4	4.05	22.1	22.1	2.4	3.1
	15	2.26	263	1.05	2600	2.22	0.68	1.72	152.0	44.6	3.41			2.1	3.5
0.75-60	5	2.25	238	1.30	4000	2.08	0.21	2.35	212.4	54.4	3.93			1.5	2.4
	10	2.24	274	1.23	3453	2.24	0.20	2.81	277.2	56.5	5.00	28.3	30.6	1.6	2.0
	15	2.23	265	1.10	3400	2.12	0.20	2.81	295.9	60.3	4.95			1.7	2.0
1.5-60M	10				2667	2.18	0.80	1.73	153.6	43.8	3.54			2.0	3.6
1.5-60	5	2.16	175	0.94	5400	1.87	0.13	2.87	284.7	76.7	3.80			1.4	2.0
	10	2.19	254	1.12	4211	1.91	0.19	3.01	319.0	71.2	4.54	27.5	36.3	1.6	1.9
	15	2.17	239	1.03	3200	1.95	0.28	2.75	284.9	53.6	5.32			1.8	2.0
1.5-70M	10				2667	1.54	0.57	1.57	96.1	28.4	3.40			2.4	4.0
	5	2.19	193	1.14	6000	1.84	0.11	2.33	246.3	74.6	3.32			1.5	2.4
	10	2.17	212	1.13	4274	1.64	0.11	3.30	275.8	60.3	4.71	22.7	31.1	1.6	1.8
	15	2.17	210	1.04	4300	1.78	0.13	2.96	277.8	62.0	4.48			1.8	2.0

(記号) D: 直径 ρ : 比重 F_{cp} : 角柱体の圧縮強度 F_{cc} : 円柱体の圧縮強度 ϵ_m : 最大応力時のひずみ度 E_i : 初期弾性係数 K_u : 最大角こう配 δ : じん性率 (応力下降域の $\frac{2}{3}F_c$ 時のひずみ度と ϵ_m との比) S_o : タフネス ($\epsilon=20 \times 10^{-3}$ 時の $\sigma-\epsilon$ 曲線の囲む面積) A_o : タフネス ($\epsilon=\epsilon_m$ 時の $\sigma-\epsilon$ 曲線の囲む面積) m : タフネス比 ($=A_o/A_s$) $\sigma_{t,cr}$: 初ひびわれ強度 F_t : 割裂引張強度

図-4 M- ϕ 曲線に及ぼす試験体寸法の影響

比を取っている。図-5によれば、可視ひびわれ発生時のモーメントおよび曲率は、ひびわれの観測がやや困難であつたこともあり、かなりのバラツキを示しているが、一般に寸法比が小さくなるほど大きくなるものが多い。これは試験体寸法が小さいほど鋼繊維がはりの引張応力方向に配向するためと考えられる。一方、図-6によれば、降伏耐力時のモーメントおよび曲率は寸法比(X)が大きいほど増大し、中6試験体(X=0.46)の曲率とD10試験体(X=0.75)の曲率の差が最も大きい。これと同様の傾向は、図-7に示した最大耐力時のモーメントと曲率にもみられる。また、図-8は、角柱体の圧縮強度(F_{cp})および円柱体の圧縮強度時のひずみ度(ϵ_m)を上記と同様の無次元量を用いて比較したものであるが、図-6および図-7に示したはり試験体の結果と同様に、寸法(D)が大きくなれば、これらの値は大きくなっている。このように試験体寸法が大きいほど圧縮強度および圧縮強度時のひずみ度が大きくなる傾向はプレーンコンクリートの場合とは異なっており、試験体寸法が小さい場合は、圧縮に関しては、鋼繊維がむしろ欠陥材として働くものと考えられる。図-9は、図中に示したように、曲率 $\kappa=80.4/d$ に至るまでのエネルギー吸収率(S)の最大耐力時のそれ(A)に対する比に及ぼす寸法効果を示したものである。この図によれば、D10試験体(X=0.75)およびD13試験体(X=1)が中6試験体(X=0.46)に比べて脆性的な挙動を示すことが明らかである。3.3

モーメント-曲率曲線の実測結果と計算結果の比較：(1) 計算上の仮定 M- κ 曲線の算定に際しては以下の仮定を設けた。①鉄筋の応力度-ひずみ度関係をbi-linear型とする。②SFRCの圧縮側の σ - ϵ 曲線は下記のようなPopovics式⁷⁾で表示する。ただし、式中の実験定数 n の値は応力上昇域(n_a)と下降域(n_d)で別個に与えるものとする(表-5参照)。

$$\frac{\sigma}{F_c} = \frac{\epsilon}{\epsilon_m} \cdot \frac{n}{n-1 + (\epsilon/\epsilon_m)^n} \quad (1)$$

σ - ϵ 曲線の実測値とPopovics式による計算値を比較した一例を図-10に示す。また、式中の圧縮強度(F_c)の値としては、それぞれのはり断面に相当する角柱体の強度を用いる。③SFRCの引張側の σ - ϵ 曲線はbi-linear型(塑性ひずみ量=弾性ひずみ量)とし、引張強度としては割裂引張載荷時の初ひびわれ強度($\sigma_{t,cr}$)を、また、弾性係数としては圧縮載荷

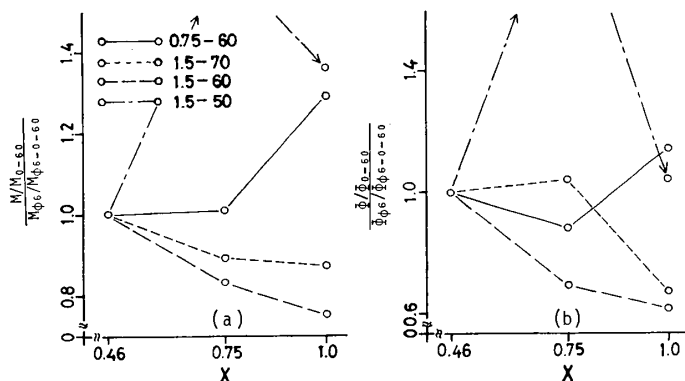


図-5 可視ひびわれ発生モーメントおよび可視ひびわれ発生時の曲率と試験体の寸法比(X)との関係

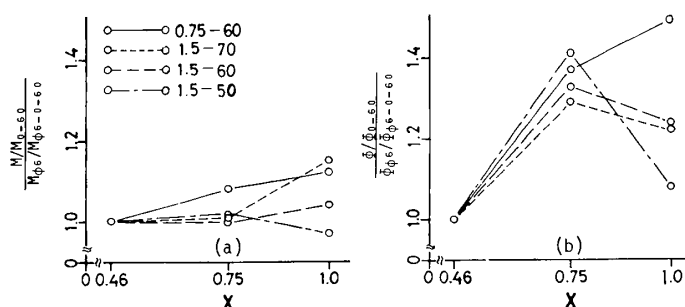


図-6 降伏モーメントおよび降伏時の曲率と試験体の寸法比(X)との関係

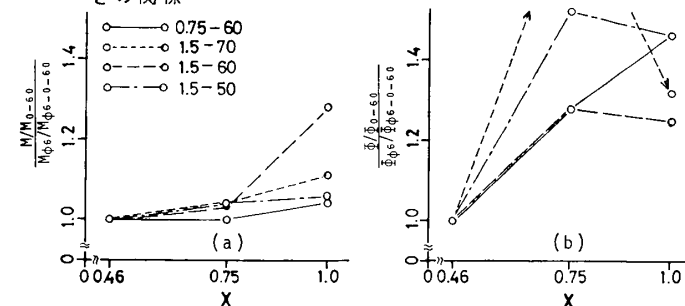


図-7 最大モーメントおよび最大時の曲率と試験体の寸法比(X)との関係

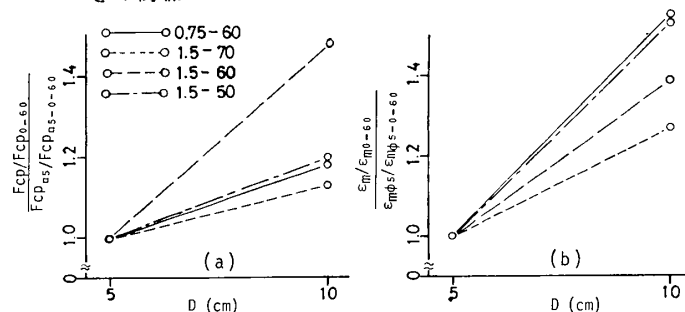


図-8 SFRCの圧縮強度(F_{cp})および最大強度時のひずみ度(ϵ_m)と試験体の寸法比(X)との関係

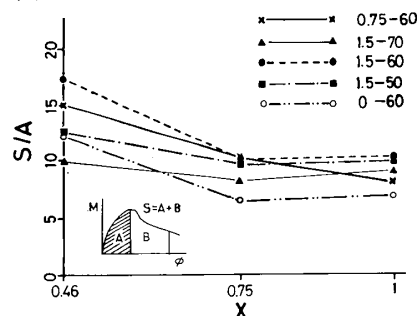


図-9 タフネス比(S/A)と試験体の寸法比(X)との関係

表-5 はり試験体の実測値および計算値

試験体記号	(Vf)-(W/C)	可視ひびわれ発生時						降伏時						最大時						圧壊時		エネルギー吸収率		
		eMc (t·cm)	cMc (t·cm)	eMc (t·cm)	eCc (x10 ⁻⁶ /cm)	cCc (x10 ⁻⁶ /cm)	eCc (x10 ⁻⁶ /cm)	eMy (t·cm)	cMy (t·cm)	eMy (t·cm)	cMy (t·cm)	eCc (x10 ⁻⁶ /cm)	cCc (x10 ⁻⁶ /cm)	eMm (t·cm)	cMm (t·cm)	eMm (t·cm)	cMm (t·cm)	eCc (x10 ⁻⁶ /cm)	cCc (x10 ⁻⁶ /cm)	eMu (t·cm)	cMu (x10 ⁻⁶ /cm)	A (kg)	S (kg)	S A
φ6	1.5-50	7.2	—	—	228	—	—	19.1	18.5	1.03	665	549	1.21	19.2	20.0	0.96	829	1900	0.44	13.9	1293	11.7	148	12.7
	0-60	9.4	—	—	229	—	—	18.8	18.5	1.02	727	532	1.37	18.8	19.9	0.94	727	1160	0.63	18.8	1005	8.7	107	12.3
	0.75-60	8.1	—	—	208	—	—	17.5	18.2	0.96	488	567	0.86	19.0	19.4	0.98	645	1550	0.42	18.6	988	8.0	121	15.1
	1.5-60	14.7	—	—	437	—	—	18.7	17.0	1.10	600	735	0.75	18.8	18.1	1.04	750	1450	0.52	18.3	1330	8.2	143	17.4
D10	1.5-70	11.6	—	—	427	—	—	14.8	17.4	0.85	814	723	1.13	15.3	18.4	0.83	694	1550	0.45	13.9	1338	8.7	87	10.0
	1.5-50	32.6	—	—	194	—	—	94.4	—	—	523	—	—	96.4	—	—	704	—	—	95.4	804	43.3	423	4.7
	0-60	26.1	—	—	88	—	—	91.2	—	—	408	—	—	91.2	—	—	408	—	—	85.8	445	27.2	178	6.5
	0.75-60	22.7	—	—	70	—	—	91.3	—	—	377	—	—	92.0	—	—	464	—	—	91.8	619	28.9	299	10.3
D13	1.5-60	33.8	—	—	116	—	—	91.0	—	—	450	—	—	93.7	—	—	540	—	—	93.7	680	33.9	348	10.3
	1.5-70	28.5	—	—	171	—	—	72.9	—	—	586	—	—	77.8	—	—	702	—	—	77.3	656	31.7	263	8.3
	1.5-50	53.8	40.7	1.32	57	37	1.54	187.3	181.9	1.03	248	226	1.10	204.9	200.0	1.02	529	900	0.59	204.8	576	71.2	720	10.1
	0-60	52.2	25.5	2.05	55	22	2.50	188.4	184.0	1.02	253	209	1.21	190.4	192.5	0.99	319	500	0.64	190.2	396	42.4	292	6.9
D13	0.75-60	58.0	32.2	1.80	57	26	2.19	195.3	181.3	1.08	253	218	1.16	198.9	199.5	1.00	414	660	0.63	197.0	522	61.7	511	8.3
	1.5-60	61.0	32.2	1.89	64	30	2.13	195.0	177.8	1.10	260	230	1.13	202.5	194.0	1.04	410	820	0.50	202.0	480	54.5	572	10.5
	1.5-70	55.3	27.5	2.01	69	29	2.38	172.1	174.0	0.99	347	256	1.36	173.1	176.0	0.98	399	700	0.57	171.1	437	46.4	422	9.1

(記号) Vf: 鋼繊維の体積混入率(%) W/C: 水セメント比 eMc: 可視ひびわれモーメントの実測値 cMc: 可視ひびわれモーメントの計算値
 eCc: 可視ひびわれ時の曲率の実測値 cCc: 可視ひびわれ時の曲率の計算値 eMy: 降伏モーメントの実測値 cMy: 降伏モーメントの計算値
 eCy: 降伏時の曲率の実測値 cCy: 降伏時の曲率の計算値 eMm: 最大モーメントの実測値 cMm: 最大モーメントの計算値 eCc: 最大時の曲率の実測値 cCc: 最大時の曲率の計算値 eMu: 圧壊時の曲率の実測値 cMu: 圧壊時の曲率の計算値 A: エネルギー吸収率(最大モーメントまでの M-φ 曲線の囲む面積) S: エネルギー吸収率(φ=80.4 時までの M-φ 曲線の囲む面積)

時の初期弾性係数(Ei)を用いる。④ひびわれ発生後は SFRC の引張耐力を無視する。(2)実験値と計算値との比較 表-5に示したように、可視ひびわれ発生時のモーメント(M)と曲率(φ)の計算値は実測値の約1/2程度となり、あまり一致しない。降伏耐力時の計算値は、M、φともに実験値とよく一致するが、最大耐力時の計算値は、φの値が実験値の約2倍となっており、計算上の仮定に問題があるものと思われる。なお、図-11は、M-φ曲線の実測値と計算値との比較を示した一例であり、図中には、σ-ε曲線の形状の相違とそれに対応するM-φ曲線の変化を併記してある。本実験では、SFRCのσ-ε曲線は $\epsilon=20 \times 10^{-3}$ までしか測定していないが、SFRCはりの大変形領域に至るまでのM-φ関係を追跡するために、ここではPopovics式を適用して $\epsilon=40 \times 10^{-3}$ に至るまでのσ-ε曲線を用いてM-φ曲線を算定した。図によれば、一般に計算によるM-φ曲線は、圧縮側縁ひずみ度が 20×10^{-3} 以下の範囲では延性的な形状を示すが、それ以後急激に脆性的な破壊性状を示す曲線となり、実測値と一致しない。従って、SFRCはりの大変形領域に至るまでのM-φ関係をより正確に追跡するためには、高いひずみ領域に至るまでのσ-ε曲線の表示がきわめて重要である。

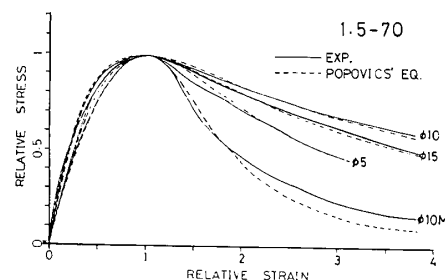


図-10 無次元化 σ-ε 曲線の測定例と Popovics 式との比較

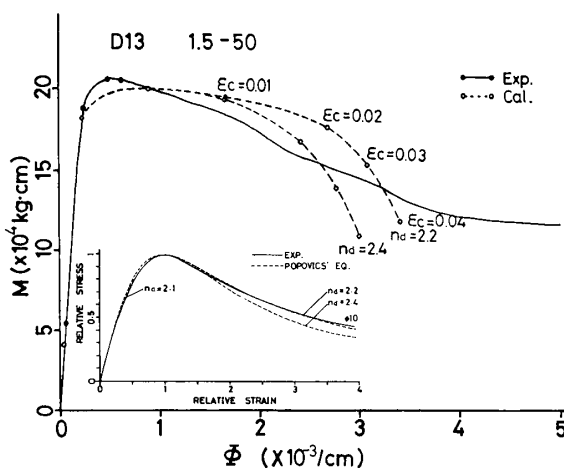


図-11 M-φ 曲線の測定例と計算値との比較

4. むすび 上述のように、本研究により、試験体の断面寸法が約7.5 cm以下のように比較的小さいSFRCはりの曲げ耐力および変形能力は試験体寸法によってかなり相違すること、鉄筋比の大きいRCはりにSFRCを適用することは、じん性改善の上で極めて有効であり、また、破壊性状に及ぼす試験体寸法の影響が小さくなること、および、SFRCのσ-ε曲線をPopovics式で表示して求めたSFRCはりのM-φ曲線の計算値は大変形領域において実測値をかなり下廻ることなどが明らかとなった。なお、鋼繊維の配向・分散性を考慮に入れた解析を現在進行中であり、これらの結果については別の機会に報告する予定である。

〔謝辞〕 本実験に際して多大の御助力を得た名大学生・戸沢博良君、愛工大学生・原広則君、碓誠君、三輪正博君をはじめ名大、小阪・谷川研究室および愛工大、加藤・小池研究室の諸氏に謝意を表します。

〔文献〕 1) 小林, 材料, 第25巻, 第277号, 昭51.10, pp.937-945. 2) 河野, 材料, 第26巻, 第290号, 昭52.11, pp.37-47. 3) 谷川・橋詰, 鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム発表文集, 昭52.11, pp.25-28. 4) 小阪・谷川・田中, セメント技術年報, Vol.32, 昭53. 5) 谷川・山田・田中, 第1回コンクリート工学年次講演発表文集, 昭54.5.

6) AHMED, A. and PLENKEI, Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae 76, 1974, pp.391-411. 7) Popovics, S, Cement and Concrete Research, Vol.3, No.5, Sept. 1973, pp.583-599.