

論文

繊維補強コンクリートの靱性評価に関する研究

— 曲げ解析による引張靱性の評価 —

村 上 聖*
 三 井 宣 之**
 鹿 毛 忠 継***

Study on Evaluation of Toughness of Fiber Reinforced Concrete
 — Evaluation of Tensile Toughness by means of Flexural Analysis —

Kiyoshi MURAKAMI*
 Yoshiyuki MITSUI**
 Tadatsugu KAGE***

1. 序 論

最近の構造設計の動向に見られるように、部材の靱性設計に重点が置かれつつある昨今では、靱性に乏しいコンクリートの脆性的性質を材料レベルで改善する目的で、繊維補強コンクリートの構造部材への適用が注目されている。その際に、繊維補強コンクリートの引張靱性を構造安全性に対する単なる余力として扱う従来の立場から、積極的に部材の設計に取り入れる方法への移行が必須の要件となる。特に、面部材の場合には、鉄筋による補強効果は小さく、繊維補強コンクリートの引張抵抗を期待した設計が合理的かつ経済的である。その場合、繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ関係が与えられれば、繊維補強コンクリート部材の力学的挙動ならびに終局耐力の計算が可能となるが、実験的に引張応力-ひずみ関係を求めるために

は、載荷治具の工夫、偏心荷重の影響、高ひずみ領域におけるひずみの測定などの問題点がある。

そこで、本研究では、測定された曲げ荷重-たわみ曲線から、高ひずみ領域に至るまでの引張応力-ひずみ関係を曲げ解析により求め、鋼繊維補強コンクリートに対して推定された引張応力-ひずみ関係に基づく引張靱性と測定された曲げ靱性との相関を調べることで、本手法の妥当性について検討を行い、さらに繊維補強コンクリートの引張抵抗を考慮した鉄筋コンクリートはりの曲げ解析例を示した。

2. 曲げ解析

2.1 解析の仮定

本解析では、以下の仮定を設ける

- 1) 平面保持が成り立つ。
- 2) 圧縮応力-ひずみ関係は、線形弾性とみなす。
- 3) 引張応力-ひずみ関係は、引張強度時まで線形弾性とみなす。
- 4) 塑性回転を生じる破壊域の存在：コンクリートは、その引張ひずみ軟化特性により、局所的に変形が集中し、塑性回転を生じる。そこで、曲率のうち塑性

平成元年9月13日受付

* 講師 工博 建築学科

** 教授 工博 建築学科

*** 大学院生 工修 環境科学専攻

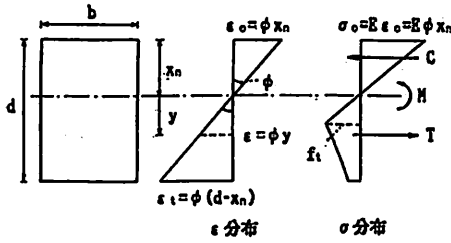


図-1 断面内の σ , ϵ 分布

曲率は、破壊域内部で均等に分布するものと仮定し、破壊域の幅を解析に導入する。

2.2 解析方法

1) 弾性限

$M_0 = Z f_t$: 弾性限モーメント

ここに、 $Z = \frac{bd^2}{6}$: 断面係数、 b : はり幅、 d : はりせい、 f_t : 引張強度である。

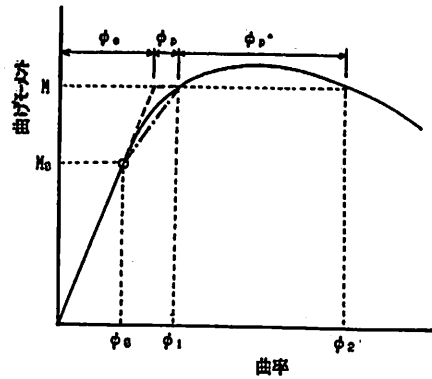
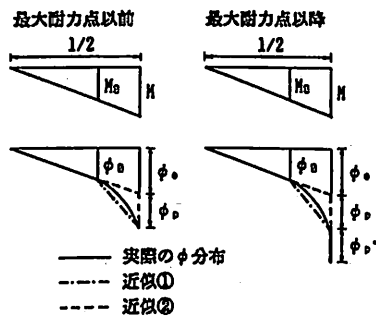


図-2 M, ϕ 分布及び M- ϕ 関係

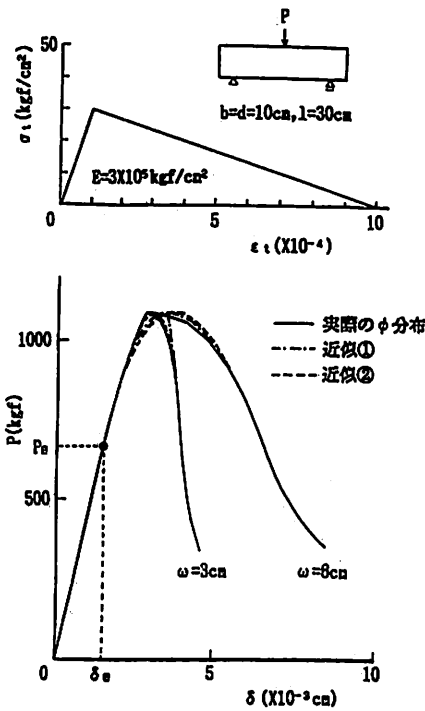


図-3 P- δ 関係の解析例

$P_0 = \frac{4M_0}{l}$: 弾性限荷重 (ただし、3点曲げ)

ここに、 l : スパン長さである。

$\phi_0 = \frac{M_0}{EI}$: 弾性限曲率

ここに、 $I = \frac{bd^3}{12}$: 断面2次モーメント、 E : ヤング係数である。

$\phi_0 = \frac{l^2}{12} \phi_0$: 弾性限たわみ (ただし、スパン中央のたわみ)

2) 弾性限以降

図-1を参照して、圧縮および引張合力はそれぞれ次式で表される。

$C = \frac{1}{2} \sigma_c b x_n = E \phi b x_n^2$: 圧縮合力

$T = \int_0^{d-x_n} \sigma b dy = \frac{b}{\phi} \int_0^{\epsilon_t} \sigma d\epsilon$: 引張合力

ここに、 x_n : 中立軸高さ、 σ_c : 圧縮線応力、 ϵ_t : 引張線ひずみである。

曲率 ϕ の計算

軸方向の力のつり合いより、 $C = T$

$\int_0^{\epsilon_t} \sigma d\epsilon = \frac{1}{2} E \phi^2 x_n^2$

ここで、 $x_n = d - \frac{\epsilon_1}{\phi}$ を代入して、

$$\phi = \frac{1}{d} \left(\epsilon_1 + \sqrt{\frac{2}{E} \int_0^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon} \right)$$

曲げモーメント M の計算

中立軸に関するモーメントのつり合いより、

$$M = C \cdot \frac{2}{3} x_n + \int_0^{d-x_n} \sigma y b dy$$

$$= \frac{1}{3} E \phi b x_n^3 + \frac{b}{\phi^2} \int_0^{\epsilon_1} \sigma \epsilon d\epsilon$$

また、 $P = \frac{4M}{\ell}$

たわみ δ の計算

たわみは、図-2を参照して、次式で表される。

- 最大耐力点以前におけるたわみ δ_1
- 実際の ϕ 分布

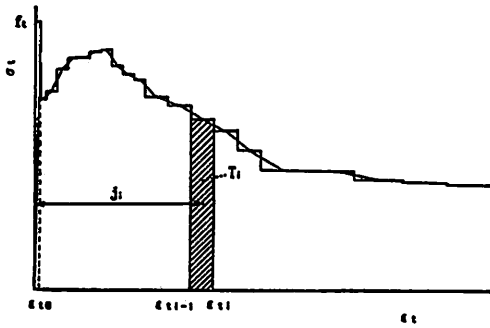


図-4 $\int_0^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon$, $\int_0^{\epsilon_1} \sigma \epsilon d\epsilon$ の計算

$\theta = \int_0^{\ell/2} \theta dx$: 支点と中央点との相対回転角

$\Delta = \int_0^{\ell/2} \phi \left(\frac{\ell}{2} - x \right) dx$: 支点と中央点との相対変位

$$\delta_1 = \frac{\ell}{2} \theta - \Delta$$

近似①

$$\delta_1 = \frac{\ell^2}{24} \left\{ \left(1 - \frac{M_0}{M} \right) \left(2 + \frac{M_0}{M} \right) \phi_1 + \left(1 - \frac{M_0}{M} \right) \phi_0 \right\}$$

近似②

$$\delta_1 = \delta_0 + \delta_p$$

ここに、 $\delta_0 = \frac{\ell^2}{12} \phi_0$, $\phi_0 = \frac{M}{M_0} \phi_0$, $\delta_p = \frac{\ell}{4} \theta_p$, $\theta_p =$

$\phi_0 \omega$, ω : 破壊域の幅である。

- 最大耐力点以降におけるたわみ δ_2

$$\delta_2 = \delta_1 + \delta_p^*$$

ここに、 $\delta_p^* = \frac{1}{4} \theta_p^*$, $\theta_p^* = \phi_p^* \omega$ である。

2.3 解析例

本解析例を図-3に示す。この図から、実際の ϕ 分布、近似①、近似②では最大荷重点近傍で若干の相違があるが、大きな差異は見られない。ただし、破壊域の幅 ω は、下降域の挙動に大きく影響し、 ω が大きくなるほど、耐力低下の度合はゆるやかになる。

2.4 引張応力-ひずみの関係の推定

前述の曲げ解析の逆解法により、設定した引張ひずみ ϵ_1 にたいして引張応力 σ_1 を仮定して荷重及びたわみを求め、測定された荷重-たわみ曲線に一致するよ

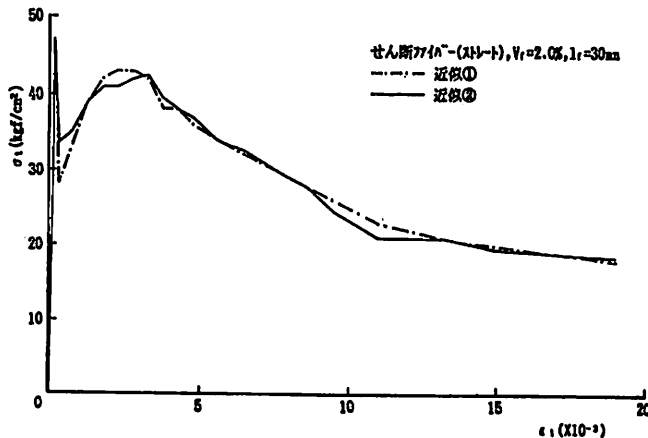


図-5 近似①、②による σ_1 - ϵ_1 関係の推定値

うに、引張応力-ひずみ関係を矩形近似で求めた。

その際に、 $\int_0^{\epsilon_{11}} \sigma d\epsilon$ 及び $\int_0^{\epsilon_{11}} \sigma \epsilon d\epsilon$ は、図-4を参照して、以下のように求められる。

$$\int_0^{\epsilon_{11}} \sigma d\epsilon = T_0 + \sum_{j=1}^n T_j$$

$$\int_0^{\epsilon_{11}} \sigma \epsilon d\epsilon = T_0 X_{j0} + \sum_{j=1}^n (T_j X_j)$$

ただし、 $T_1 = \sigma_{11}(\epsilon_{11} - \epsilon_{11-1})$

$$j_1 = \frac{1}{2}(\epsilon_{11-1} + \epsilon_{11})$$

$$T_0 = \frac{1}{2} f_t \epsilon_{t0}$$

$$j_0 = \frac{1}{2} \epsilon_{t0}$$

ϵ_{t0} : 引張強度時のひずみ

図-5は、測定された荷重-たわみ曲線から、近似①及び近似②で推定した引張応力-ひずみ関係の一例を示す。この図から、近似①及び近似②で推定結果に大きな差異がないことから、以下では計算の簡便な近似②で引張応力-ひずみ関係の推定を行った。

3. 実験方法

使用材料及び調合を表-1, 2に示す。調合は、W/C=50%, スランプ=18cmを目標に試し練りにより定めた。曲げ試験は、10×10×40cm角柱供試体の3点曲げ載荷(スパン・高さ比=3)で行い、供試体は同一条件ごとに3体ずつ作製した。また、供試体は材令3週(水中養生)で気中乾燥した後、たわみを測定するために供試体両側面の載荷点下にアングル状の切片を接着した。測定方法は、図-6に示すとおりである。曲げ解析には、引張強度として割裂引張強度 f_s を直接引張強度 f_t に換算した値(換算式 $f_t = 1.81f_s^{0.794}$)をヤング係数は圧縮応力-ひずみ関係における $f_c/3$ 割線弾性係数を用いた。

4. 結果及び考察

4.1 引張応力-ひずみ関係の推定結果

図-7は、せん断ファイバー(ストレート)、 $\ell_f=30$ mmを使用した $V_f=0.5, 1.0, 1.5, 2.0\%$ の鋼繊維補強コンクリートに関する荷重-載荷点変位曲線(供試体3個の測定値の平均)を、また図-8は、破壊域の幅を6cmとして推定された引張応力-ひずみ関係をそれぞれ示す。ところで、図-7には、引張応力-ひずみ関係の推定において、測定された荷重-変位曲線との

セメント	普通ポルトランド
細骨材	川砂 表乾比重 = 2.54 吸水率 = 2.89% 最大寸法 = 2.5mm 粗粒率 = 2.48
粗骨材	川砂利 表乾比重 = 2.63 吸水率 = 1.46% 最大寸法 = 15mm 粗粒率 = 6.61 単位容積重量 = 1.60kg/ℓ 実積率 = 61.8%
鋼繊維	せん断ファイバー(ストレート, 波形) 寸法 0.5×0.5×20.30mm 異形カットワイヤー 寸法 0.5φ×20.30mm

表-2 使用調合

繊維材質・形状	ℓ_f (mm)	V_f (%)	sl (cm)	W/C (%)	s/a (%)	重量 (kg/m ³)				f_c (kgf/cm ²)	f_s (kgf/cm ²)
						C	W	S	G		
せん断ファイバー(ストレート)	30	0	18.8	50	39	404	202	660	1052	366	25.2
		0.5	18.1		51	438	219	801	806	389	36.3
		1.0	18.7		62	472	236	936	594	389	40.9
		1.5	18.4		73	504	252	1046	411	424	52.0
		2.0	18.0		83	534	267	1146	243	422	61.2
せん断ファイバー(ストレート)	20	2.0	16.1	50	55	450	225	855	724	430	42.1
	30	2.0	18.2		83	534	267	1146	243	410	57.3
せん断ファイバー(波形)	20	2.0	16.6	50	55	450	225	855	724	332	47.5
	30	2.0	18.3		83	534	267	1146	243	364	58.6
異形カットワイヤー	20	2.0	14.1	50	55	450	225	855	724	421	50.4
	30	2.0	18.4		83	534	267	1146	243	475	66.3

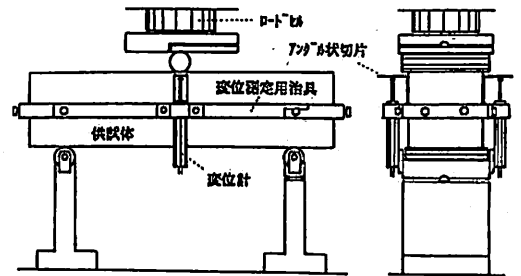


図-6 測定方法

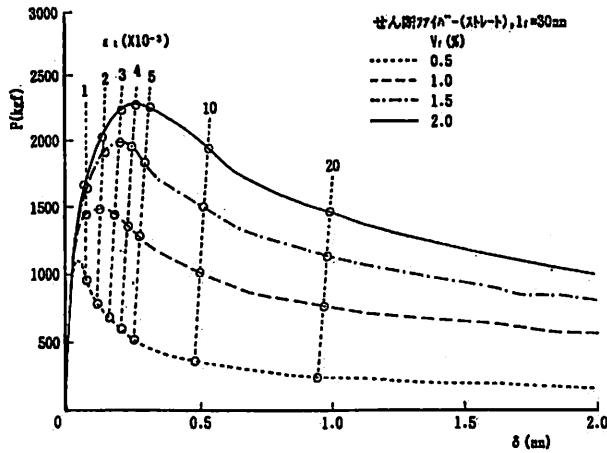


図-7 P- δ 曲線の測定値

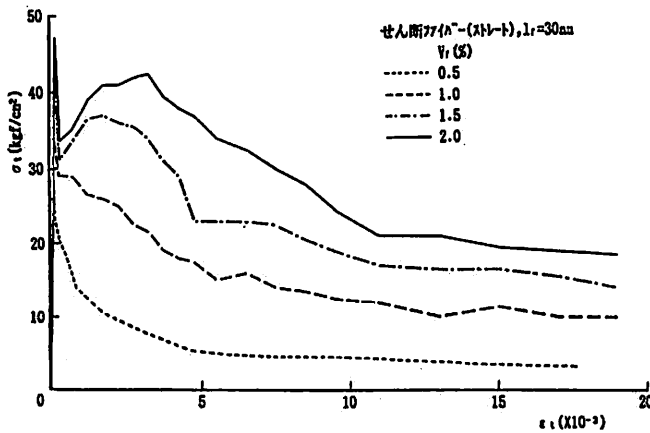


図-8 σ - ϵ 関係の推定値

一致を調べた点 (○印で示す) における引張縁ひずみの値も併記しているが、この値は破壊域の幅の選定により変化するので、引張縁にひずみゲージ (ゲージ長 60mm) を貼り付けて実際に測定した結果と比較することにより、破壊域の幅を 6 cm とした妥当性について検討した。その結果を図-9 に示す。ただし、 $V_f=1.0\%$ の場合には引張縁ひずみの測定限度は約 5000μ 、 $V_f=2.0\%$ では約 10000μ 程度であり、それ以上でひずみの測定は不可能であった。これは、 V_f が小さくなるにつれて、ひび割れの拡大が急激になるためと思われる。従って、実験的に引張応力-ひずみ関係を求めようとしても、 V_f がかなり大きい範囲で最大限約 10000μ 程度のひずみ領域までであり、それ以上の高ひずみ領域の測定は不可能であるように思われる。ところで、図-

7 と図-9 との比較から、破壊域の幅を 6 cm とした場合に荷重-変位曲線上における引張縁ひずみの推定値と実測値との間に良い一致が得られていることがわかる。ただし、 $V_f=1.0\%$ の場合には、若干推定値が実測値よりも低めにシフトしているので、 V_f が小さくなるにつれて破壊域の幅もやや小さくする方がさらに良い一致が得られるものと考えられる。これに関してはさらに検討を行う必要がある。図-10 は、せん断ファイバー (ストレート、波形)、異形カットワイヤー、 $l_f=20, 30\text{mm}$ を使用した $V_f=2.0\%$ の鋼繊維補強コンクリートについて測定された荷重-載荷点変位曲線を、また図-11 は、破壊域の幅を 6 cm として推定された引張応力-ひずみ関係を示す。

これらの図から、鋼繊維補強コンクリートの引張応

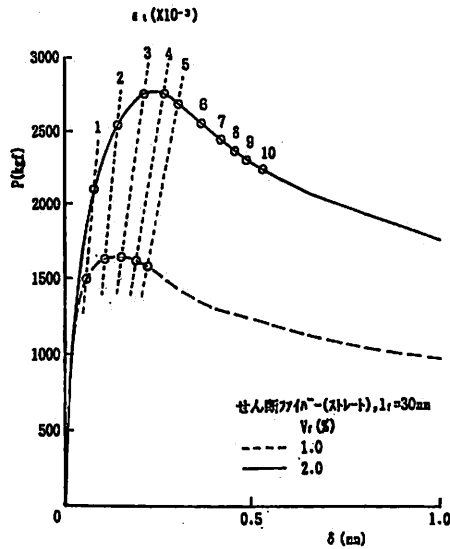


図-9 P-δ 曲線上における ϵ_t の測定値

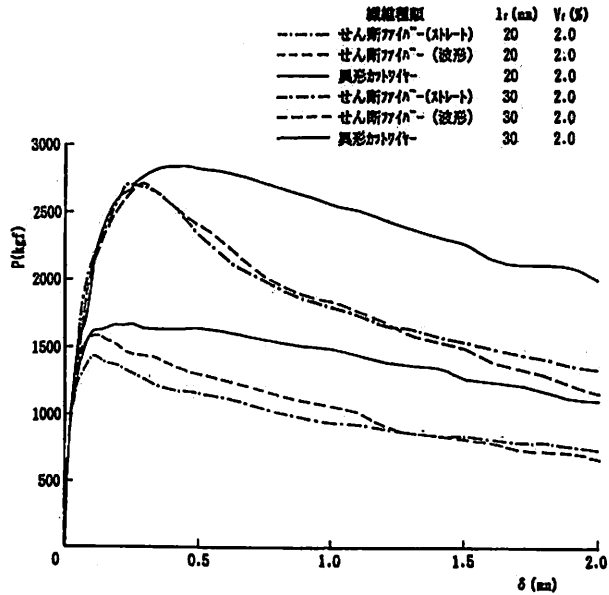


図-10 P-δ 曲線の測定値

力-ひずみ関係の特徴をみることができる：1) 引張強度時に一旦応力が低下した後、 V_r が大きい範囲ではひずみの増加に伴い再び応力が上昇し、ひずみ硬化に類似の現象により第2ピーク点が見られること、2) せん断ファイバーよりも異形カットワイヤーの方が、ひずみ軟化域における応力低下の程度が小さく、靱性に

すぐれていること、3) l_r が20mmと小さくなると第2ピーク点は明確に現れず、初期からひずみ軟化特性を示すことがわかる。

特に1)の傾向については、既往の文献⁹⁾においても報告されている。

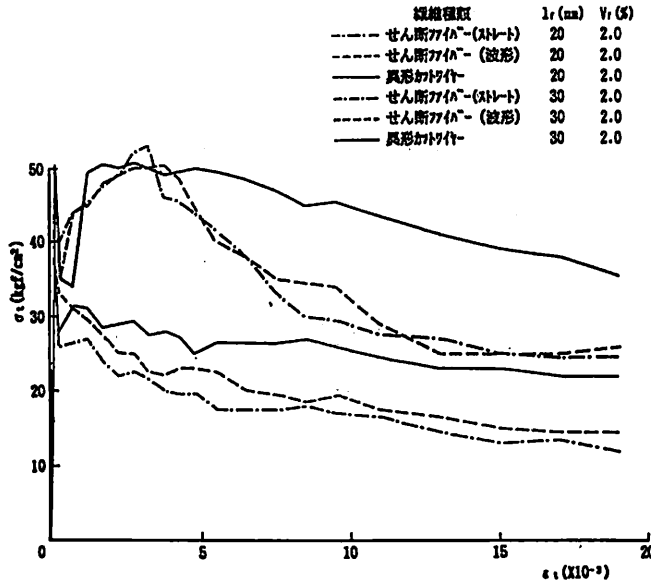


図-11 σ_t - ϵ_t 関係の推定値

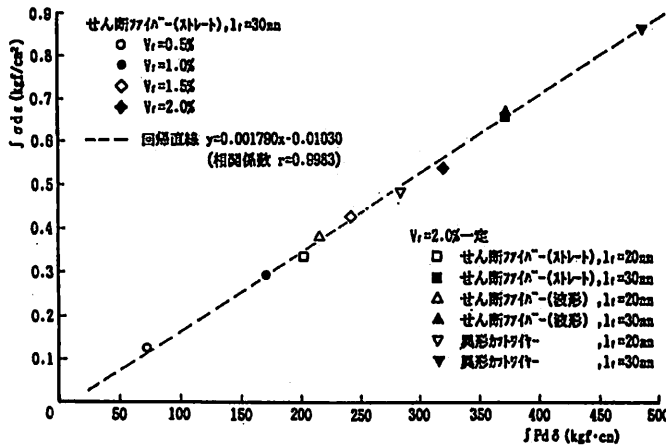


図-12 引張靱性と曲げ靱性の相関

4.2 引張靱性と曲げ靱性との相関

引張靱性として $\epsilon_t=20 \times 10^{-3}$ に至るまでの引張応力-ひずみ曲線下の面積、即ちひずみエネルギーを、曲げ靱性として $\delta=2mm$ に至るまでの荷重-載荷点変位曲線下の面積、即ち曲げタフネス (JCI案) を採用し、両者の相関を調べることで、本手法による引張応力-ひずみ関係の推定の妥当性について検討を行った。図-12は、せん断ファイバー(ストレート)、 $l_f=30mm$ を使用した $V_f=0.5, 1.0, 1.5, 2.0\%$ の、またせん断

ファイバー (ストレート、波形)、異形カットワイヤ、 $l_f=20, 30mm$ を使用した、 $V_f=2.0\%$ の鋼繊維補強コンクリートについて、曲げ靱性と引張靱性の相関を示す。この図から、曲げ靱性と引張靱性との相関は極めて高く (相関係数 $r=0.9983$)、本手法の一つの妥当性を与えるものと考えられる。

4.3 繊維補強鉄筋コンクリートはりの曲げ解析例

図-13は、解析に用いた試験体の形状・寸法及び載

荷方法を示す。ただし、部材断面は、実際のスケールのほぼ1/2となっているが、これは今後の実験との比較検討を意図したものである。材料特性として、繊維補強コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係は、圧縮強度を基に梅村によるe関数で表示し、引張応力-ひず

み関係は前述の推定結果を用いた。また、鉄筋の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性とし降伏強度として最小規定値を用いた。

図-14に本解析のフローチャートを示す。与えられたコンクリートの引張縁ひずみ ϵ_t に対して、中立軸高

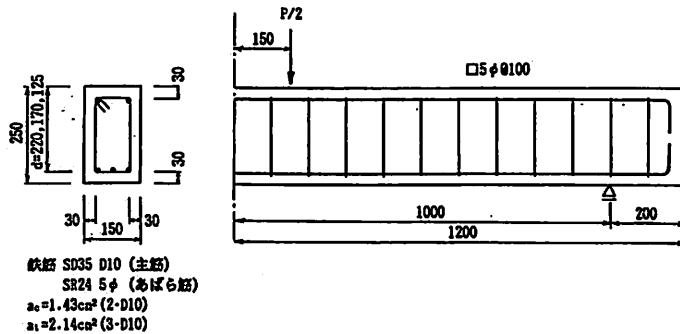


図-13 解析に用いたRCはりの形状・寸法及び荷方法

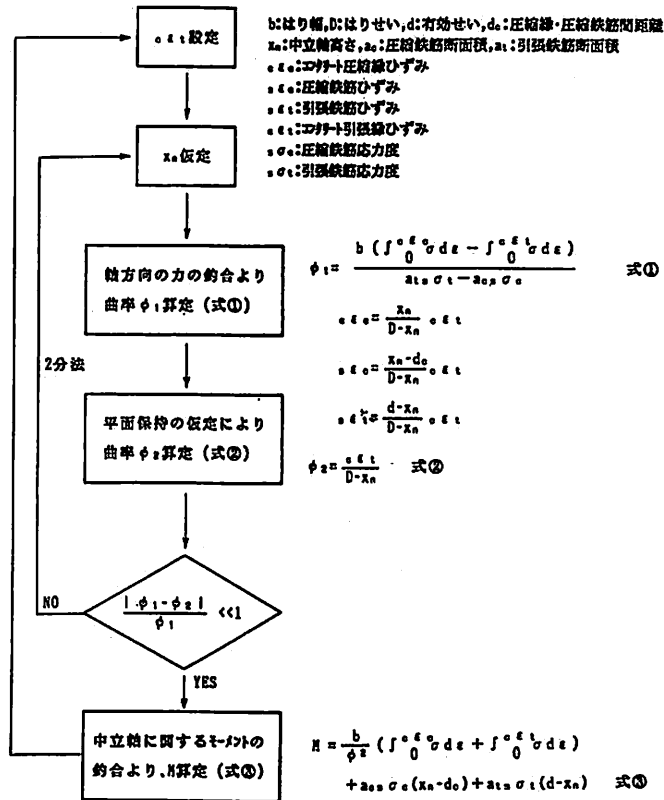


図-14 解析のフローチャート

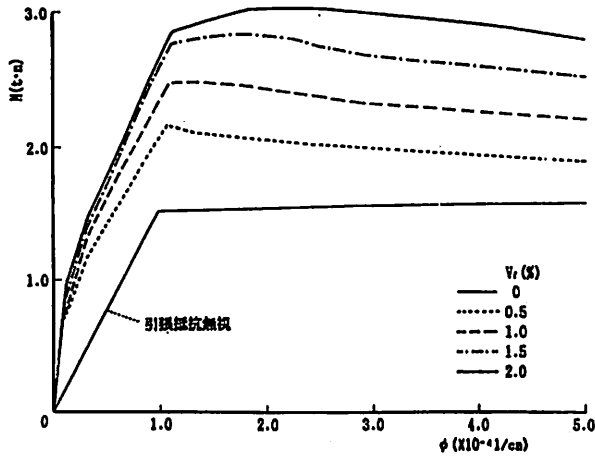


図-15 繊維補強RCはりに関するM-φ関係の計算値

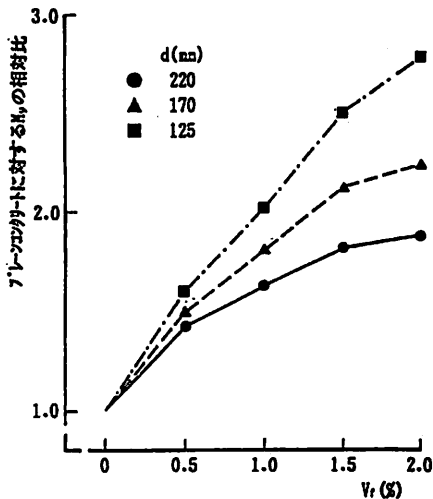


図-16 有効せいが変化したときのM_y-V_f関係の計算値

さ x_n を仮定して軸方向の力のつり合いから算定される曲率 ϕ_1 と平面保持の仮定により幾何学的に求められる曲率 ϕ_2 が許容誤差の範囲内で一致するまで反復計算(2分法)を行うことにより x_n を決定し、中立軸に関するモーメントのつり合いから M-φ 関係を求めた。

図-15に、せん断ファイバー(ストレート)、 $l_f=30$ mmを使用した $V_f=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\%$ の鋼繊維補強鉄筋コンクリートはりに関する M-φ 関係を示す。ただし、有効せいは $d=22$ cm、 $V_f=0\%$ についてはコン

クリートの引張抵抗を無視した。また、図-16は、有効せいを $d=22, 17, 12.5$ cmと変化させた場合の $V_f=0\%$ に対する降伏曲げモーメントの相対比を V_f に対してプロットしたものである。これらの図から、鉄筋コンクリートに対する繊維補強効果が定量化され、特に、有効せいが減少し鉄筋の補強効果が小さくなったときの繊維補強コンクリートの有効性が示された。

5. 結 論

本研究の範囲内で次のような知見が得られた。

- 1) 測定された荷重-たわみ曲線から、破壊域の幅を導入した曲げ解析により、高ひずみ領域にわたる引張応力-ひずみ関係が推定され、その引張靱性と曲げ靱性の測定値との間に良い相関が得られた。
- 2) 推定された鋼繊維補強コンクリートの引張応力-ひずみ関係の特徴として、繊維体積率が大きい範囲で、引張強度時に一旦応力が低下した後、ひずみの増加に伴い再び応力が上昇するひずみ硬化に類似の現象により第2ピーク点が現れること、繊維材質の影響として高強度の異形カットワイヤーを用いた方がせん断ファイバーよりも引張靱性が大きいこと、また繊維長さが20mmと小さくなると、初期からひずみ軟化特性を示し、引張靱性も小さくなることが挙げられる。
- 3) 繊維補強鉄筋コンクリートはりの曲げ解析例を示し、鉄筋コンクリートに対する繊維補強効果、並びに有効せいが減少し鉄筋の補強効果が小さくなった

ときの繊維補強コンクリートの有効性が定量化された。

謝辞

本実験及び解析にあたって、熊本大学大学院修士2年の渡部政治，昭和63年当時修士2年の兼崎浩佳，昭和61年当時卒論生の浜田康成，切通 哲，恒吉久雄，昭和63年当時卒論生の木村晃志，中原明子，熊本大学技官の甲斐定夫諸氏の協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

1) K. B. Lub, T. Padmoes; Mechanical Behav-

ior of Steel Fiber-Cement Mortar in Tension and Flexure, Interpreted by Means of Statistics, ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 1, 1989. 1-2, pp. 16-28

- 2) 浜田康成，切通 哲，恒吉久雄；鋼繊維補強コンクリートの靱性評価に関する実験的研究，昭和61年度熊本大学卒業論文
- 3) 兼崎浩佳；鋼繊維補強コンクリートの靱性に関する実験的研究，昭和63年度熊本大学修士論文
- 4) 木村晃志，中原明子；繊維補強コンクリートの靱性に関する研究 — 曲げ解析による引張靱性の評価 —，昭和63年度熊本大学卒業論文