

論文

[1179] 繊維補強コンクリート部材の靱性設計に関する研究

正会員○浦野登志雄 (八代高専土木建築工学科)

正会員 村上 聖 (熊本大学建築学科)

三井宜之 (熊本大学建築学科)

志垣隆浩 (熊本大学大学院)

1. はじめに

最近のRC構造設計の動向に見られるように、RC構造物の終局性状の向上に部材の靱性確保が要求されている現状で、靱性に乏しいコンクリートの脆性的な性質を改善するために鋼繊維補強コンクリート(SFRC)のRC部材への適用が注目されている。その際に、SFRCの優れた靱性を構造安全上の単なる余力として扱うのでは、コスト的にSFRCを用いる意味が失われる。しかしながらSFRCの靱性、特に引張靱性を考慮した部材設計は未だ十分に確立されておらず、SFRCの引張靱性を適切に評価し、その結果を部材設計にどの様に反映させるかがSFRCの構造部材への用途開発において重要な課題である。これまでにSFRCの靱性評価法としてJCI規準案が示されているが、そこで提案の靱性指標は、靱性の改善効果を相対的に評価するものでしかなく、部材設計にはSFRCの応力度-ひずみ度関係を定量的に表示することが必要である。しかし、SFRCの特に引張応力度-ひずみ度関係を直接実験的に求めることは難しく、引張靱性に及ぼす部材の寸法効果も含めてその関係を十分に定量化できるほどの実験データはほとんどないのが現状である。

そこで本研究では、シリーズ①で曲げ試験による荷重-変位関係の測定値と計算値の一致から引張応力度-ひずみ度関係を推定する手法に基づいて、その関係に及ぼす部材の寸法効果について実験及び解析の両面から検討を行い、SFRCの引張応力度-ひずみ度関係の寸法効果を考慮する方法を提案した。シリーズ②では、本手法の適用妥当性を調べる目的で、鋼繊維補強RCはり(SF-RCはり)の曲げ性状に関してSFRCの引張靱性とその寸法効果を考慮したSF-RCはりの曲げ解析を行い、実験結果との比較検討を行った。

2. 解析方法

2-1. 引張応力度-ひずみ度関係の推定

本解析では次の仮定を設ける。

- ①平面保持が成り立つ。
- ②圧縮応力度-ひずみ度関係には次のPopovics式を用いる。

$$\sigma_c/f_c = n(\varepsilon_c/\varepsilon_{co}) / \{ (n-1) + (\varepsilon_c/\varepsilon_{co})^n \}$$

ここに、 f_c :圧縮強度、 ε_{co} :強度時のひずみ度、 n :実験定数。ただし、実験定数 n は圧縮応力度-ひずみ度関係の測定値をPopovics式に当てはめ、非線形回帰により求めた。

- ③引張応力度-ひずみ度関係は、引張強度時まで線形弾性で見なす。ただし、引張強度には割裂引張強度の測定値を次式により直接引張強度に換算した値を用いた[1]。

$$f_t = 1.81 f_{st}^{0.794}$$

ここに、 f_t :直接引張強度、 f_{st} :割裂引張強度。

④曲率を弾性曲率と塑性曲率の和とみなし、塑性曲率は設定した塑性ヒンジ領域の幅(ω)内部で均等に分布するものと仮定する。したがって全変位は、弾性曲率による弾性変位とヒンジ内部の塑性回転による塑性変位の和として求められる。

以上の仮定に基づき、図-1に示す解析のフローチャートに従って引張応力度-ひずみ度関係を求めた。ただし、 ω については直接実験的に求めることは困難であるので、引張縁ひずみ度-載荷点変位関係の測定値と計算値の一致を調べることにより選定した。

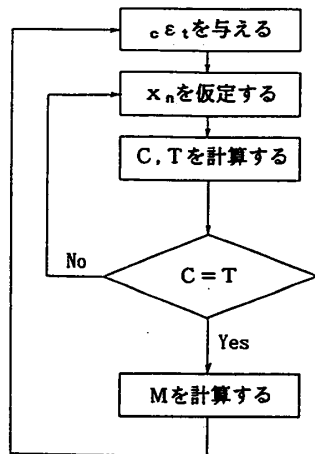
2-2. 鋼繊維補強RCはり (SF-RCはり) の曲げ解析

本解析のフローチャートを図-2に示す。ここで、SFRCの引張応力度-ひずみ度関係には前述の推定結果を、圧縮応力度-ひずみ度関係には前述のPopovics式を用いた。鉄筋の応力度-ひずみ度関係は完全弾塑性とし、降伏強度には測定値を用いた。

3. 実験方法

3-1. SFRCの調合設計

SFRC及び比較用のプレーンコンクリートの使用材料及び調合を表-1,2に示す。調合は水セメント比(W/C)を50%一定とし、スランプ18cmを目標に試し練りにより定めた。練り混ぜには容量50リットルの強制攪はん型ミキサーを使用した。

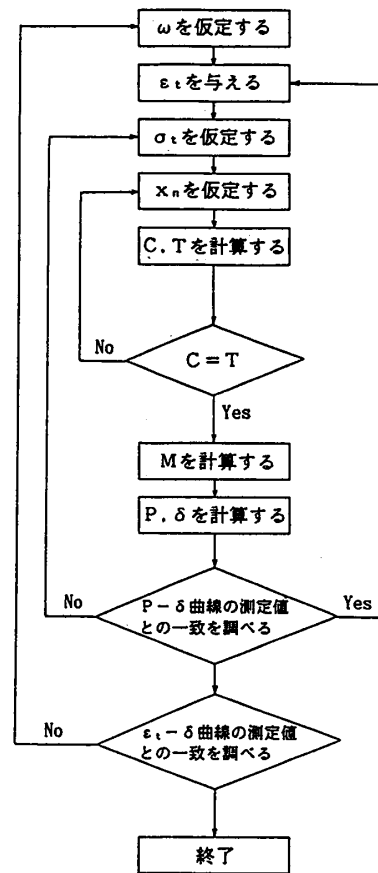


ϵ_t : はりの引張縁ひずみ度
 x_n : 中立軸高さ
 C : 圧縮合力
 T : 引張合力
 M : 曲げモーメント

図-2. SF-RCはり曲げ解析法

表-1. 使用材料

セメント	普通ポルトランド
細骨材	緑川産川砂 表乾比重=2.53 吸水率=2.70% 最大寸法=5mm 粗粒率=2.49 実積率=64.4%
粗骨材	緑川産川砂利 表乾比重=2.68 吸水率=1.72% 最大寸法=20mm 粗粒率=6.52 実積率=64.3%
鋼繊維	異形カットワイヤ $\phi 0.6 \times 30\text{mm}$



ω : 塑性ヒンジ領域の幅
 ϵ_t : 引張ひずみ度
 σ_t : 引張応力度
 x_n : 中立軸高さ
 C : 圧縮合力
 T : 引張合力
 M : 曲げモーメント
 P : 荷重
 δ : 載荷点変位

図-1. 引張応力度-ひずみ度関係の推定法

3-2. シリーズ①

本シリーズは、SFRCの強度・靱性に及ぼす部材の寸法効果を調べる目的で、無筋のSFRCについて圧縮、割裂引張、曲げ試験を行った。圧縮試験は $\phi 10 \times 20$ cm円柱供試体を用いて圧縮応力度-ひずみ度関係を測定し、Popovics式を用いてその関係を定量化した。割裂引張試験は表-3に示す円柱供試体を用いて割裂引張強度を、曲げ試験は表-4に示すはり試験体（3点曲げ）を用いて荷重-載荷点変位関係を測定し、JCI規準案に準拠して曲げ強度、曲げタフネス及び換算曲げ強度を求めた。また基準試験体となる $10 \times 10 \times 30$ cmはりについては、引張縁に貼付けた塑性域ゲージ（ゲージ長60mm）により引張縁ひずみ度-載荷点変位関係を測定した。なお試験体の材令は28日（水中養生）である。

3-3. シリーズ②

本シリーズは、SFRCの引張靱性の寸法効果を考慮したSF-RCはりの曲げ解析を行い、解析結果と実験結果の比較検討を行った。素材試験として、SFRCについて $\phi 10 \times 20$ cm円柱供試体を用いて圧縮及び割裂引張強度を、 $10 \times 10 \times 30$ cmはり試験体を用いて前述の解析法により引張応力度-ひずみ度関係を求めた。図-3にSF-RCはり試験体の形状寸法を示す。主筋にはSD30、D10を用い、圧縮鉄筋2-D10、引張鉄筋1-D10、2-D10、3-D10の3種類についてそれぞれ1体ずつ作製した。あばら筋には $\phi 5$ mmの磨き棒鋼を用い、あばら筋間隔はすべてについて $\square @ 100$ mmとした。SF-RCはり及び素材試験体の材令は28日（現場水中養生）である。SF-RCはりの載荷方法は4点曲げ（載荷点間隔30cm、スパン長さ200cm）とし、荷重-載荷点変位関係及びスパン中央の圧縮・引張鉄筋ひずみ度を測定した。ひずみの測定にはゲージ長3mmのワイヤーストレインゲージを使用した。

表-2. 使用調合

V _r (%)	slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	重量 (kg/m ³)				圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	n 値
				C	W	S	G			
0	19.2	50	38	392	196	644	1114	472	2.71×10^5	2.92
2.0	18.2	50	81	526	263	1127	279	542	2.50×10^5	2.86

V_r : 繊維体積率, s/a : 細骨材率, n 値 : Popovics式の実験定数

表-3. 割裂試験体寸法及び試験結果

試験体寸法 [直径×高さ] (cm)	試験体 本数	割裂引張強度 (平均値) (kgf/cm ²)	
		SFRC	プレーンコンクリート
$\phi 7.5 \times 7.5$	4	81.3	47.1
$\phi 7.5 \times 15$	4	78.0	34.6
$\phi 10 \times 10$	4	65.6	38.7
$\phi 10 \times 20$	4	67.6	39.6
$\phi 15 \times 30$	4	61.4	30.0
$\phi 20 \times 30$	4	56.8	35.3

表-4. 曲げ試験体寸法及び試験結果

試験体寸法 [幅×はりせい×スパン長さ] (cm)	試験体 本数	曲げ強度 (平均値) (kgf/cm ²)	
		SFRC	プレーンコンクリート
$10 \times 10 \times 30$	4	113.4	66.3
$10 \times 15 \times 45$	4	122.1	58.1
$20 \times 10 \times 30$	4	109.8	53.6
$10 \times 20 \times 60$	4	90.2	50.5
$10 \times 20 \times 160$	2	65.4	41.5

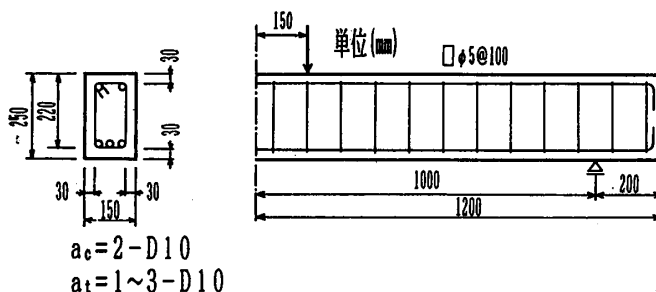


図-3. SF-RCはり試験体形状・寸法

4. 実験結果及び考察

4-1. SFRCの強度・靱性に及ぼす部材の寸法効果

表-2～表-4に圧縮、割裂引張及び曲げ試験結果を示す。図-4に高応力体積と基準試験体（ $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}$ はり試験体）に対する引張強度比の関係を両対数で示す。ここで、高応力体積とは試験体内部で最大引張応力の95%以上の引張応力を受ける領域の体積と定義され、最弱リンク理論により高応力体積が大きくなるほど引張強度は小さくなるというものである[2]。図より、載荷形式の違いによらず曲げ強度と割裂引張強度はほぼ同一線上にのり、高応力体積と引張強度の関係を両対数で表示するとほぼ直線的な関係が成り立つ。また、SFRCとプレーンコンクリートの比較では両者の寸法効果に明確な差異は認められなかった。図-5に基準試験体に対する曲げ強度比と換算曲げ強度比の関係を両対数で示す。図より、靱性パラメータである換算曲げ強度の寸法効果は曲げ強度比のほぼ2乗で表されることがわかる。このことは、靱性（吸収エネルギー）が強度（応力）と延性（ひずみ）の相乗効果で表されるものと仮定すれば、応力度とひずみ度の寸法効果がほぼ同程度であるということを示している。

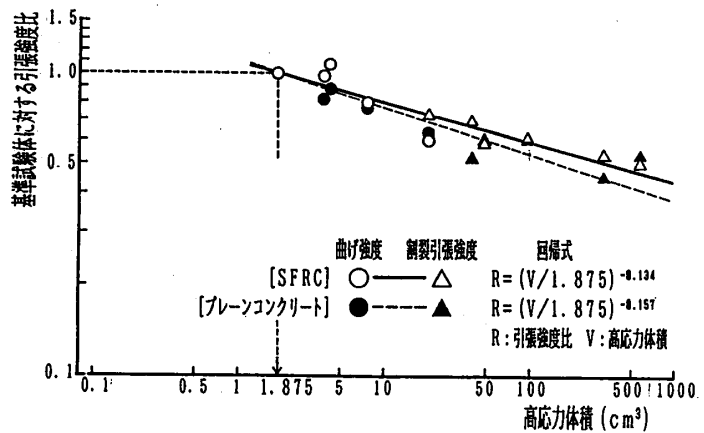


図-4. 引張強度比と高応力体積の関係

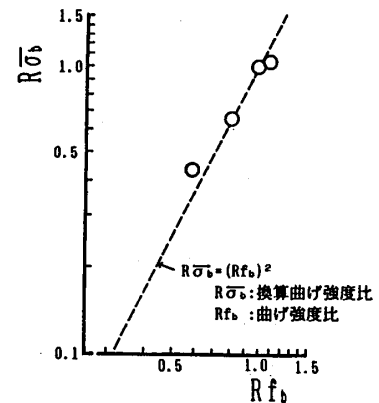


図-5. $R\sigma_b$ と Rf_b の関係

4-2. SFRCの引張応力度-ひずみ度関係の寸法効果

図-6に引張応力度-ひずみ度関係の推定に用いた $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}$ はり試験体の荷重（P）-載荷点変位（ δ ）及び引張縁ひずみ度（ ϵ_t ）- δ 関係の測定値（試験体4体の平均値）と本手法による計算値を示す。この場合 $\omega = 4.8 \text{ cm}$ とすると、 ϵ_t - δ 関係の測定値と計算値の間に良い一致が得られた。図-7に本手法により推定された引張応力度（ σ_t ）-ひずみ度（ ϵ_t ）関係を示す。図-8は基準試験体よりも大きなはり試験体に関して、測定値と計算値を比較したものである。ここで、計算には図-7の σ_t - ϵ_t 関係を基準試験体に対する曲げ強度比で縮小したものをを用いた。両者を比較すると測定値と計算値の間に妥当な一致がみられる。

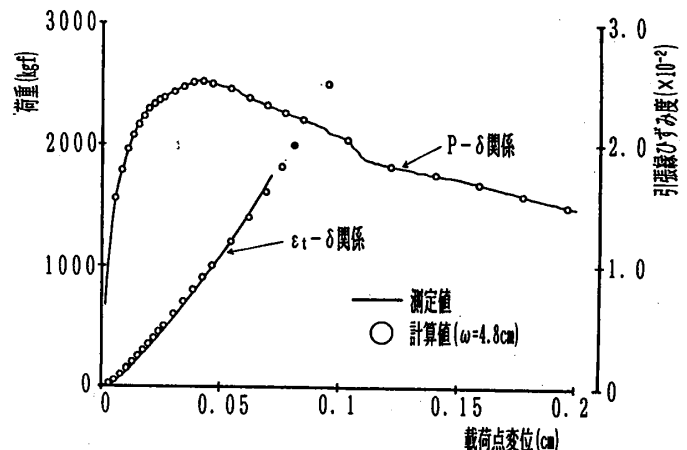


図-6. 基準試験体の測定値と計算値

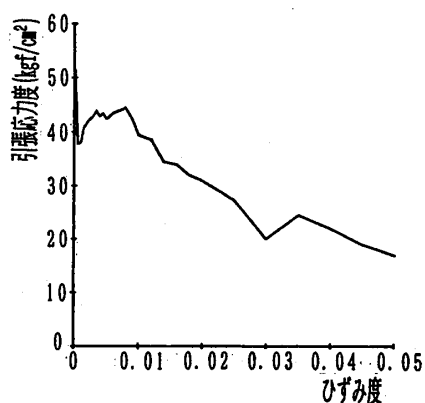


図-7. 推定された引張応力度
－ひずみ度関係

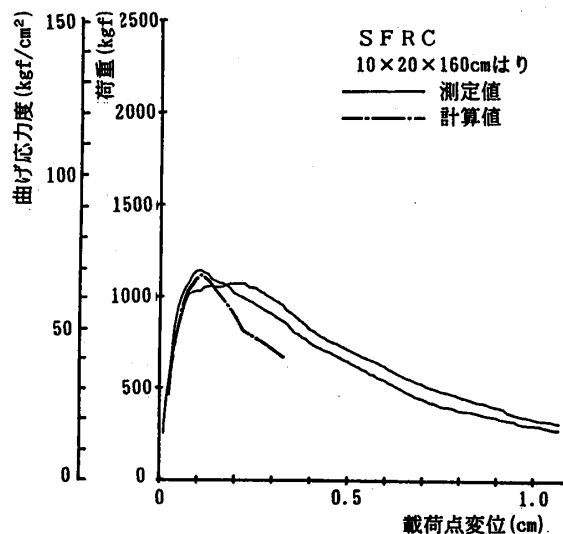


図-8. 大型試験体の測定値と寸法効果
を考慮した計算値の比較

4-3. 鋼繊維補強RCはり (SF-RCはり) 試験体の曲げ性状

表-5にSF-RCはり試験体に用いたSFRC及び鉄筋（主筋）の素材試験結果を示す。SF-RCはり試験体のひび割れ性状の特徴として、引張鉄筋降伏に至るまで数本のひび割れが純曲げ区間内で発生し、降伏以後はその中の一本のひび割れだけが拡大・進展することがすべての試験体で観察された。これは付着強度に比べて相対的にSFRCの引張強度が大きいことに起因しているものと考えられる。図-9にSF-RCはり試験体の荷重－載荷点変位関係を示す。図中には引張鉄筋降伏点を○印で示している。ひび割れ発生点に関しては、荷重－載荷点変位関係から明確な傾向を見いだすことは不可能であった。図-10にSF-RCはり試験体に関する曲げモーメント（M）－曲率（ ϕ ）関係の測定値と計算値の比較を示す。曲率の測定値は、スパン中央の圧縮及び引張鉄筋ひずみの値から平面保持を仮定して算出したが、本実験の場合には主ひび割れ発生位置がスパン中央からはずれたためにスパン中央の主筋に除荷が生じ、引張鉄筋降伏点近傍以降の曲率を求めることができなかった。そこで、降伏モーメント（ M_v ）は図-9に示す荷重－載荷点変位関係の測定値から求めた。またM－ ϕ 関係の計算値は、推定された引張応力度－ひずみ度関係を1.0～0.2まで0.1刻みの相似比（以下、寸法効果係数と称す）で縮小して計算したものである。ここで本実験のSF-RCはり試験体の曲げ載荷試験について高応力体積は321cm³となり、図-4の回帰式に当てはめ

表-5. SFRC, 鉄筋の素材試験結果

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	割裂引張強度 (kgf/cm ²)	n 値
SFRC	477	2.69×10 ⁵	61.1	3.18

	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	破断伸び (%)
SD30	3418	4899	20.8

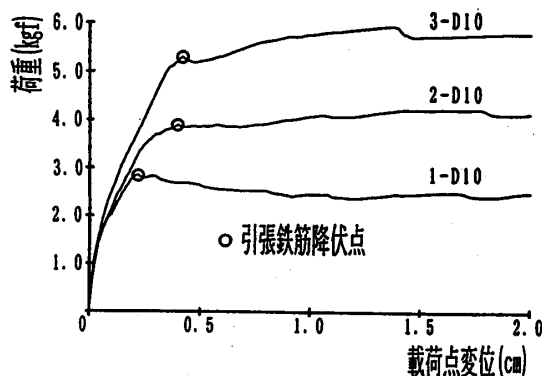


図-9. SF-RCはりの荷重－載荷点変位
関係の測定値

ると基準試験体に対する曲げ強度比は0.50となる。そこで、寸法効果係数を0.5とした場合の計算値と測定値を比較すると、引張鉄筋降伏点に至るまでの $M-\phi$ 関係や M_y について両者の間に妥当な一致が得られている。

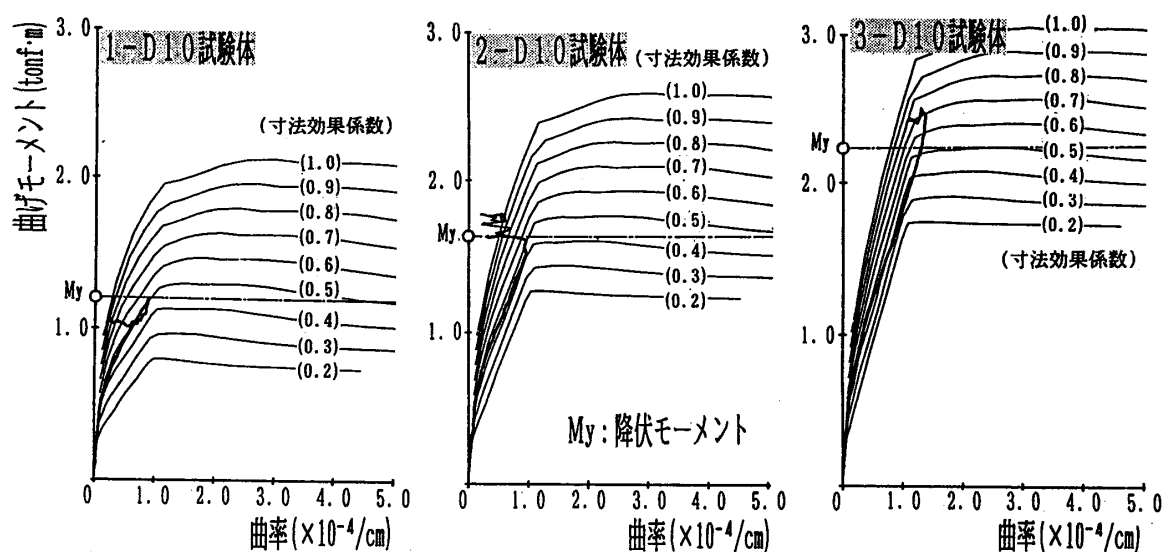


図-10. SF-RCはり試験体の曲げモーメント-曲率関係の測定値と計算値の比較

5. まとめ

本実験の範囲内で次のような知見が得られた。

- 1) SFRCに関して高応力体積と引張強度比を両対数で表示するとほぼ直線的な関係が得られ、曲げ強度と割裂引張強度はほぼ同一線上にのることが明かとなった。このことはコンパクトな割裂引張供試体を用いることで大寸法はり試験体の曲げ強度の推定が可能であることを示している。
- 2) SFRCの曲げ靱性の寸法効果は曲げ強度比のほぼ2乗で表され、靱性が強度と延性の相乗効果で表されるとすれば、強度（応力度）と変形能力（ひずみ度）の寸法効果がほぼ同程度であることを示している。このことは、引張応力度-ひずみ度関係の寸法効果を応力度とひずみ度の両方を同じ比率で縮小する方法で考慮できる可能性を示唆している。
- 3) 以上の知見に基づいてSFRCの引張靱性とその寸法効果を考慮したSF-RCはりの曲げ解析結果と実験結果の比較検討を行い、基準はり試験体について推定された引張応力度-ひずみ度関係を基準試験体に対する曲げ強度比を相似比として縮小することにより、曲げモーメント-曲率関係及び引張鉄筋降伏モーメントの解析結果と実験結果の間に良い対応が得られた。

参考文献

- 1) 渡辺夏也ほか1名：コンクリートの引張強度に関する研究、セメント技術年報、第38巻、pp.294-297、1984.12
- 2) R.J.Torrent: Materials and Structures-Research and Testing, Vol.10, No.58, July/August 1977, pp.187-196.