

## 論文

鋼繊維補強コンクリートの引張特性の  
寸法効果に関する研究村上 聖\* ・浦野 登志雄\*\*  
三井 宜之\*\*\* ・志垣 隆浩\*\*\*\*Study on Size Effect of Tensile Characteristics  
of Steel Fiber Reinforced ConcreteKiyoshi MURAKAMI, Toshio URANO, Yoshiyuki MITSUI  
and Takahiro SIGAKI

## 1. 序 論

コンクリートの引張特性は、鉄筋コンクリート(RC)構造物の断面設計では無視されているために、その寸法効果が設計で特に問題になることは少なかった。しかし、RC部材のひびわれ発生荷重の算定や、斜張力によるコンクリートの斜め引張ひびわれに起因するせん断耐力の算定では、引張強度の寸法効果が問題になり、従来の実験に基づく経験式に代わる、より合理的な理論式の確立が望まれている。この方面では、破壊力学に基づく設計規準式の導入が計られつつある。

また、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)のように、引張特性を十分に設計に期待できるような材料の構造物への適用に関しては、引張特性の寸法効果の定量化が重要な課題であり、この方面でも破壊力学に基づく方法論の展開がなされている。しかし、RC梁・柱部材

の断面算定に常用されている、平面保持を仮定した曲げ解析は、計算の簡便性や、これまでの実績など、従来のRC構造設計との整合性の点から、破壊力学よりも方法論としての一般性があるものと考えられる。

そこで、本研究では、SFRCの引張特性の寸法効果を曲げ解析により定量化し、その妥当性を実験的に検証することを目的とする。その方法論は、次のとおりである。1) 実験的に求めることが難しい引張応力-ひずみ関係を、曲げ試験による荷重-変位曲線の測定値と曲げ解析による計算値の一致から逆推定する手法を提示する。2) 引張応力-ひずみ関係の寸法効果則を破壊力学概念により誘導する。3) 本手法の妥当性を寸法の異なる梁の曲げ試験により実験的に検証する。

## 2. 解析方法

2.1 曲げ解析による引張応力-ひずみ関係の推定  
以下に、本手法の概要を示す。

## 1) 解析の仮定

本解析では、次の仮定を設ける。

① 平面保持が成り立つ。

② SFRCの圧縮応力-ひずみ関係には、次式のPopovics式を用いる。

平成5年9月6日受付

- \* 助教授 工博 建築学教室
- \*\* 助手 工修 八代工業高等専門学校
- \*\*\* 教授 工博 建築学教室
- \*\*\*\* 九州電力㈱ 工修

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{n(\epsilon/\epsilon_{co})}{n-1+(\epsilon/\epsilon_{co})} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $\sigma$ ：(圧縮)応力、 $\epsilon$ ：(圧縮)ひずみ、 $f_c$ ：圧縮強度、 $\epsilon_{co}$ ：強度時のひずみ、 $n$ ：実験定数。ここで、実験定数  $n$  は、圧縮応力-ひずみ関係の測定値を Popovics 式に当てはめて、非線形回帰により求めた。

③ SFRC の引張応力-ひずみ関係は、引張強度時まで線形弾性とみなす。ただし、引張強度には、割裂引張強度を直接引張強度に換算した値を用いた。換算式には、次式を用いた。

$$f_t = 1.81f_{st}^{0.794} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $f_t$ ：直接引張強度、 $f_{st}$ ：割裂引張強度。

④ 変位の計算は、曲げを受ける RC 部材の変形計算でよく利用されている塑性ヒンジ域の仮定に準じる。

2) 解析方法

① 中立軸位置の計算

中立軸高さ ( $x_n$ ) は、軸方向の力の釣り合いより、圧縮力 ( $C$ ) と引張力 ( $T$ ) が許容誤差の範囲内で一致するように、反復計算により求めた。ここで、 $C$ 、 $T$  はそれぞれ次式により与えられる。

$$C = \frac{b}{\phi} f_c^* \sigma d \epsilon \dots\dots\dots(3)$$

$$T = \frac{b}{\phi} f_s^* \sigma d \epsilon$$

ここに、 $b$ ：梁幅、 $d$ ：梁せい、 $\phi$ ：曲率 [=  $\epsilon_t/(d-x_n)$ ]、 $\epsilon_c$ ：圧縮緑ひずみ [=  $\phi \cdot x_n$ ]、 $\epsilon_t$ ：引張緑ひずみ。

② 曲げモーメント、荷重の計算

中立軸に関するモーメントの釣り合いより、曲げモーメント ( $M$ ) は、次式により与えられる。

$$M = \frac{b}{\phi^2} (f_c^* \sigma \cdot \epsilon d \epsilon + f_s^* \sigma \cdot \epsilon d \epsilon) \dots\dots\dots(4)$$

また、3点曲げの場合、荷重 ( $P$ ) は、次式により与えられる。

$$P = (4/L)M \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $L$ ：スパン長さ。

③ 載荷点変位の計算

解析の仮定④により、載荷点変位 ( $\delta$ ) は、以下に示すように与えられる (図-1 参照)。

$$\delta = \delta_e + \delta_p \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $\delta_e$ ：弾性変位、 $\delta_p$ ：塑性変位。

$$\delta_e = (L^2/12)\phi_e \dots\dots\dots(7)$$

ここに、 $\phi_e$ ：弾性曲率 [=  $(M/M_0)\phi_0$ ]、 $M_0$ ：弾性限モーメント [=  $Z \cdot f_t$ ]、 $Z$ ：断面係数 [=  $b \cdot d^2/6$ ]、 $\phi_0$ ：弾性限曲率 [=  $M_0/(E \cdot I)$ ]、 $E$ ：ヤング係数、 $I$ ：断面 2

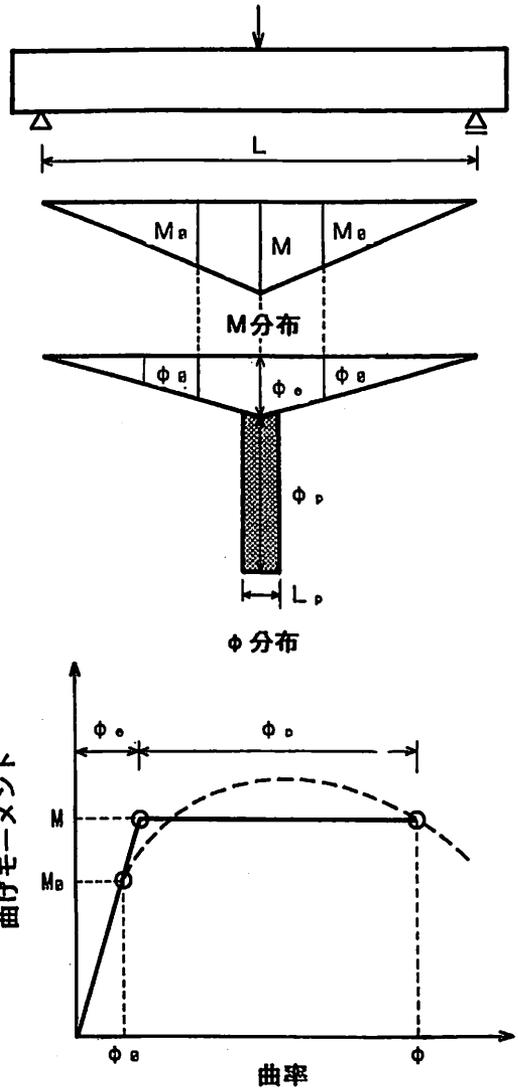


図-1 塑性ヒンジ域の仮定による変形計算

次モーメント [=  $b \cdot d^2/12$ ].

$$\delta_p = (L/4)\theta_p \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 $\theta_p$ ：塑性回転角 [=  $\phi_p \cdot L_p$ ]、 $\phi_p$ ：塑性曲率 [=  $\phi - \phi_e$ ]、 $L_p$ ：塑性ヒンジ域の幅。

以上の計算では、あらかじめ  $L_p$  を与える必要があるが、それを直接実験的に求めることは困難であるので、ここでは、 $\epsilon_t - \delta$  関係の測定値と計算値の一致が最適になるように  $L_p$  の値を選定した。図-2 に、本解析のフローチャートを示す。

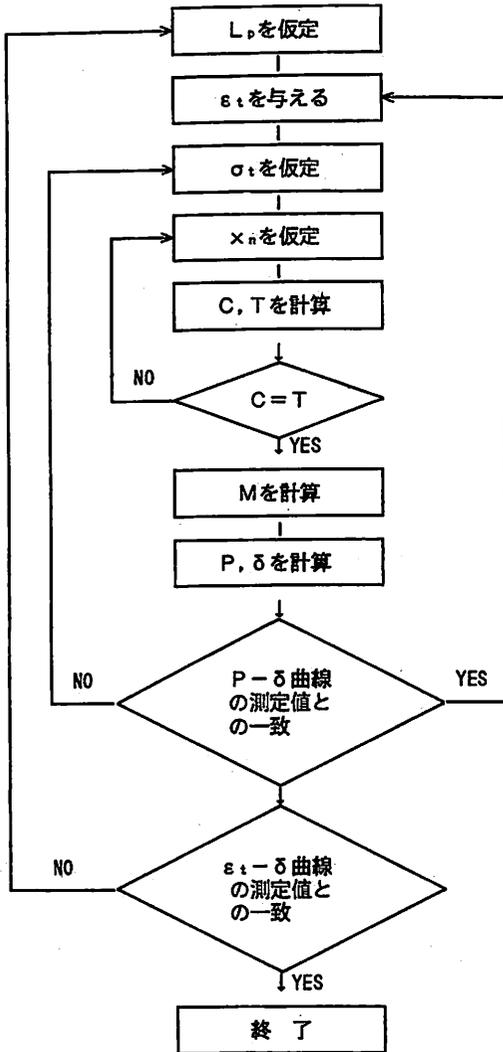


図-2 引張応力-ひずみ関係推定のフローチャート

2. 2 引張応力-ひずみ関係の寸法効果則の誘導

いま、仮想ひびわれモデルを考える。そのモデルにおける引張軟化曲線下の面積はJ積分を表し、次式で与えられる。

$$J = \int \sigma d\omega \quad (9)$$

ここに、J: J積分,  $\sigma$ : 結合応力あるいは引張応力,  $\omega$ : ひびわれ開口変位 (crack opening displacement, COD).

ここで、ある基準試験体に対する相対比 (寸法効果) を R を付けて表示すると、式(9)より、

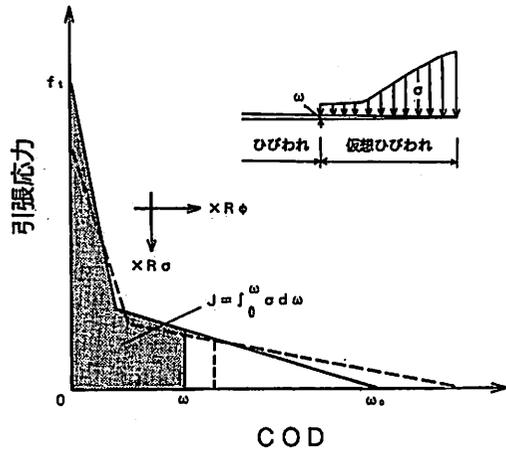


図-3 引張軟化曲線の寸法効果

$$RJ = R\sigma \cdot R\omega \quad (10)$$

J積分に寸法依存性がない、即ち  $RJ = 1$  とすると、

$$R\sigma \cdot R\omega = 1 \quad (11)$$

$$\therefore R\omega = 1/R\sigma$$

式(11)は、引張応力が寸法効果により小さくなると ( $R\sigma < 1$ )、COD は  $R\sigma$  の逆数で増加することを意味している (図-3 参照)。

COD は、破壊進行領域あるいは塑性ヒンデ域内部のマイクロクラックの開口変位の総和とみなせるから、COD は、塑性ヒンデ域の幅方向のマイクロクラックの発生量ひいては塑性ヒンデ域の幅に比例するものと考えられる。即ち、

$$\omega \propto L_p \quad (12)$$

これに関しては、Hu & Wittmann らも同様の見解を示している<sup>2)</sup>。また、個々のマイクロクラックの開口変位は、線形弾性破壊力学に従えば、応力拡大係数ひいては  $\sigma$  に比例するので、

$$\omega \propto \sigma \cdot L_p \quad (13)$$

従って、

$$R\omega = R\sigma \cdot RL_p \quad (14)$$

式(11)、(14)より、

$$RL_p = \frac{1}{(R\sigma)^2} \quad (15)$$

式(15)は、引張応力が寸法効果により小さくなると、塑性ヒンデ域の幅は、 $R\sigma$  の2乗の逆数で増加することを意味している。

また、

$$\omega = L_p \cdot \varepsilon_p \quad (16)$$

ここに、 $\varepsilon_p$ : マイクロクラックの開口に起因する非回

復性のひずみあるいは塑性ひずみ。

$$\therefore R\omega = RL_p \cdot R\epsilon_p \dots\dots\dots(17)$$

式(11), (15), (17)より,

$$R\epsilon_p = R\sigma \dots\dots\dots(18)$$

ここで, ヤング係数の寸法効果が無視できるとすると,

$$RE = R\sigma/R\epsilon_o \approx 1 \dots\dots\dots(19)$$

$$\therefore R\epsilon_o = R\sigma$$

ここに, E:ヤング係数,  $\epsilon_o$ :弾性ひずみ。

従って, 弾性ひずみと塑性ひずみの寸法効果はともに, 引張応力の寸法効果に等しいので, 全ひずみの寸法効果も引張応力の寸法効果に等しい。即ち,

$$R\epsilon = R\sigma \dots\dots\dots(20)$$

ここに,  $\epsilon = \epsilon_o + \epsilon_p$ :全ひずみ。

以上のように,  $R\sigma$ が定量化されれば, 引張応力-ひずみ関係の寸法効果は,  $R\sigma$ で相似縮小することにより考慮することができ, また塑性ヒンヂ域の寸法効果も式(15)により定量化することができる。そこで, ここでは, 引張応力の寸法効果は, 引張強度の寸法効果に等しい, 即ち  $R\sigma = Rf_t$ として, 後述の高応力体積の概念により, 実験的に求めた。

### 3. 実験方法

#### 3.1 SFRCの調合設計

SFRCの使用材料及び調合を表-1, 2に示す。鋼繊維には, 繊維公称直径( $d_f$ )×繊維長さ( $l_f$ )が0.6×30mm, 0.7×50mmの異形カットワイヤーを使用した。繊維体積率( $V_f$ )は, アスペクト比( $l_f/d_f$ )× $V_f$ が1.0一定となるように選定した。これは, ( $l_f/d_f$ ) $V_f$ が繊維分散性の目安を与え, 1.0がほぼその上限であると考えられるためである。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, 試し練りにより決定した。

#### 3.2 試験及び測定

圧縮試験には, 直径×高さが100×200mmの円柱供試体を用いて, 圧縮応力-ひずみ関係を測定し, 圧縮強度, ヤング係数(1/3割線弾性係数), 強度時のひずみを求めた。なお, ひずみの測定には, コンプレッソメータを用いた。割裂試験には, 圧縮試験と同一寸法の円柱供試体を用いて, 割裂引張強度を測定した。なお, 割裂引張強度の算定には, 最大荷重を用いた。

曲げ試験には, 幅×せい×長さが100×100×400mm, 100×150×550mm, 100×200×700mm, 100×300×1000mm, 100×400×1300mmの梁試験体を用い

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランド
細骨材	川砂 表乾比重=2.53 吸水率=3.50% 最大寸法=1.2mm 粗粒率=1.70 実績率=60.7%
粗骨材	川砂利 表乾比重=2.68 吸水率=1.42% 最大寸法=20mm 粗粒率=6.97 実績率=61.4%
鋼繊維	異形カットワイヤー $d_f \times l_f = 0.6 \times 30\text{mm}$ $0.7 \times 50\text{mm}$

\*  $d_f$ : 繊維公称直径,  $l_f$ : 繊維長さ

表-2 使用調合

$l_f$ (mm)	$V_f$ (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)
30	2	50	60	274	17.4
50	1.4	50	60	274	16.3

\*  $V_f$ : 繊維体積率, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, W: 単位水量

て, 3点曲げ(スパン・高さ比=3)により荷重-載荷点変位関係を測定した。なお, 載荷点変位の計測は, 変位測定治具を直接試験体に取り付けて, 支点及び載荷点のめり込み変位を除去した。また, 100×100×400mm梁試験体については, 塑性ヒンヂ域の幅を推定するために, 引張線ひずみを測定した。ひずみの測定には, ゲージ長60mmの塑性域ゲージを使用した。

以上の試験体は, 同一条件ごとに3個以上ずつ作製し, 材令28日(水中養生)後, 試験時まで気中に放置した。

### 4. 実験結果及び考察

#### 4.1 実験結果

表-3に, 圧縮及び割裂試験結果を示す。同表中には, 圧縮応力-ひずみ関係の測定値を前述のPopovics式に当てはめて, 非線形回帰により求めた実験定数n

表-3 圧縮及び割裂引張試験結果

$l_f$ (mm)	$V_f$ (%)	W/C (%)	$f_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	E( $\times 10^5$ ) (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{co}$ ( $\times 10^{-3}$ )	n	$f_{st}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
30	2	50	490	2.67	2.70	3.67	66.2
50	1.4	50	429	2.28	3.27	2.57	72.7

\*  $f_c$ : 圧縮強度, E: ヤング係数(1/3割線弾性係数),  $\epsilon_{co}$ : 圧縮強度時のひずみ, n: Popovics式における実験定数,  $f_{st}$ : 割裂引張強度

表-4 曲げ試験結果

$l_f$ (mm)	$V_f$ (%)	W/C (%)	b * d * l (mm)	$f_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$T_b$ (kgf * cm)	$\sigma_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
30	2	50	100 * 100 * 400	91.8	313	70.4
			100 * 150 * 550	77.0	533	53.3
			100 * 200 * 700	77.9	805	45.3
			100 * 300 * 1000	70.2	1483	37.1
			100 * 400 * 1300	73.6	2046	28.8
50	1.4	50	100 * 100 * 400	95.8	326	73.5
			100 * 150 * 550	85.9	648	64.8
			100 * 200 * 700	86.7	1029	57.9
			100 * 300 * 1000	84.0	2021	50.5
			100 * 400 * 1300	80.1	3243	45.6

\* b: 梁幅, d: 梁せい, l: 梁長さ,  $f_b$ : 曲げ強度,  $T_b$ : 曲げタフネス,  $\sigma_b$ : 換算曲げ強度

の値を併記している。表-4に、曲げ試験結果を示す。なお、曲げタフネス( $T_b$ )は、基準変位に至るまでの荷重-変位曲線下の面積(吸収エネルギー)であり、基準変位は、日本コンクリート工学協会(JCI)の「繊維補強コンクリートに関するJCI規準案」に準拠<sup>3)</sup>、スパン長さの1/150とした。また、換算曲げ強度は、基準変位までの平均荷重を曲げ強度に換算した値で、JCI規準案で採用されている靱性指標である。同表から分かるように、曲げ強度以上に曲げ靱性の寸法効果が大きく、最大荷重だけでなく、荷重-変位曲線の寸法効果の定量化が重要な課題になるものと考えられる。

#### 4. 2 高応力体積の概念による引張強度の寸法効果の定量化

前述のように、引張応力-ひずみ関係及び塑性ヒンヤ域の幅の寸法効果の定量化には、引張応力あるいは引張強度の寸法効果を定量化する必要がある。そこで、本研究では、高応力体積の概念により、引張強度の寸法効果を実験的に評価した。ここで、高応力体積の概念は、最弱リンク理論に基づくもので、脆性材料が引張を受けるとき、高引張応力域で生じるひびわれが終局的な破壊をもたらすことから、その領域の体積が大

きくなるほど、材料の引張強度は小さくなるというものである。高応力体積は、試験体中で最大引張応力の95%以上の引張応力を受ける領域の体積と定義され、3点曲げ梁試験体及び割裂引張円柱供試体について、それぞれ次式で与えられる<sup>4)</sup>。なお、前者は平面保持を仮定した曲げ理論、後者は線形弾性論による結果である。

$$V = 6.25 \times 10^{-4} b \cdot d \cdot L \dots\dots\dots(21)$$

ここに、V: 3点曲げ梁試験体の高応力体積, b: 梁幅, d: 梁せい, L: スパン長さ。

$$V = 0.0475 \phi^2 \cdot h \dots\dots\dots(22)$$

ここに、V: 割裂引張円柱供試体の高応力体積,  $\phi$ : 円柱供試体直径, h: 円柱供試体高さ。

図-4に、高応力体積と引張強度(曲げ及び割裂)の関係を示す。なお、曲げ強度及び割裂引張強度は、それぞれ梁幅及び円柱供試体高さにほとんど影響を受けないという既往の実験結果から、高応力体積は、式(21)及び(22)においてb及びhを無視した単位厚当たりとして算出した。また、高応力体積及び引張強度は、両対数で表示されている。同図より、曲げ強度も割裂引張強度も、載荷形式の違いによらず、一般に次式により表示できることが分かる。

$f_t = A \cdot V^a$  .....(23)  
 ここに、 $f_t$ : 引張強度(曲げ及び割裂),  $A, a$ : 実験定数。

従って、引張強度の寸法効果は、次式により与えられる。

$Rf_t = (RV)^a$  .....(24)

ここに、 $RV$ : 基準試験体に対する高応力体積の相対比。

本実験では、 $l_f = 30 \text{ mm}$  &  $V_f = 2\%$ 及び $l_f = 50 \text{ mm}$  &  $V_f = 1.4\%$ のSFRCについて、それぞれ $a = -0.08316$ 及び $-0.06989$ となった。また、プレーンコンクリートに関する実験結果では、 $a = -0.1720$ の結果

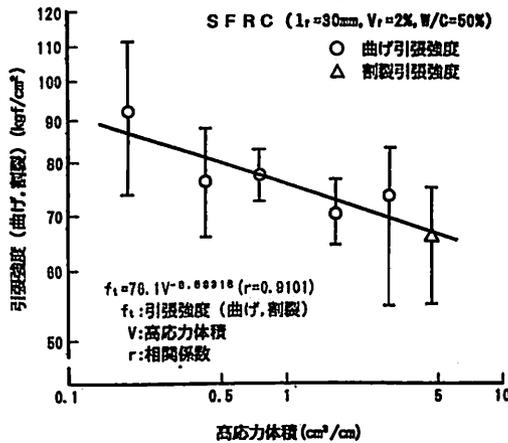


図-4(a) 高応力体積と引張強度の関係 ( $l_f = 30 \text{ mm}$ ,  $V_f = 2\%$ )

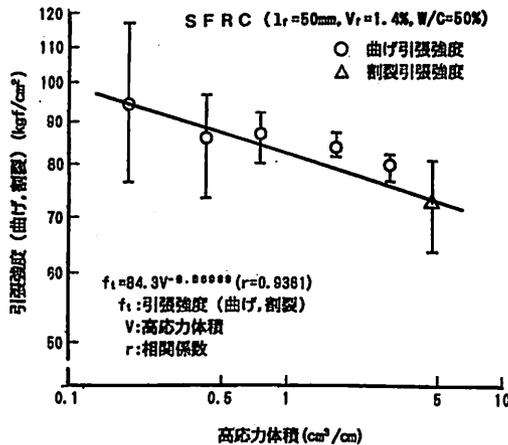


図-4(b) 高応力体積と引張強度の関係 ( $l_f = 50 \text{ mm}$ ,  $V_f = 1.4\%$ )

果が得られており、プレーンコンクリートよりもSFRCの方が引張強度の寸法効果が小さく、また ( $l_f/d_f$ )  $V_f$ 一定の比較では、アスペクト比の大きい繊維ほど、引張強度の寸法効果が小さくなるという結果が得られた。

4. 3 本手法の適用性に関する実験的検証

ここでは、寸法の異なる梁試験体の荷重-変位関係の測定値と、引張応力-ひずみ関係及び塑性ヒンヂ域

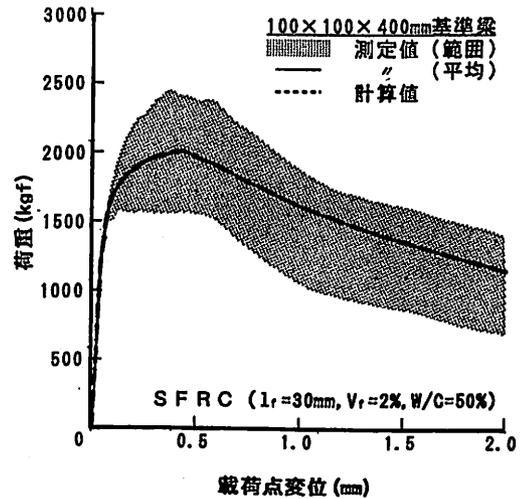


図-5(a) 基準梁試験体の荷重-変位関係 ( $l_f = 30 \text{ mm}$ ,  $V_f = 2\%$ )

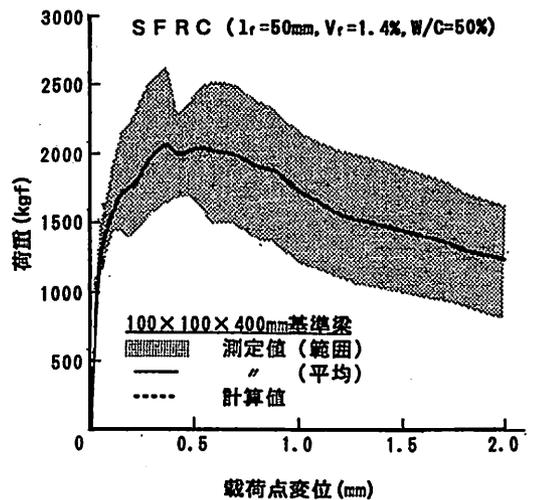


図-5(b) 基準梁試験体の荷重-変位関係 ( $l_f = 50 \text{ mm}$ ,  $V_f = 1.4\%$ )

の幅の寸法効果を考慮した曲げ解析による計算値の比較を行い、本手法の適用性について実験的に検討した。

図-5に示す、100×100×400mm 梁試験体(基準試験体)の荷重-載荷点変位関係の測定値と計算値の一致から、本手法により推定された引張応力-ひずみ関係を図-6に示す。なお、 $\epsilon_t - \delta$  関係の測定値と計算値の最適な一致から推定された塑性ヒンジ域の幅は、ともに  $L_p = 50$  mm である。ここで、RC 梁の場合、 $L_p$  の値としていくつかの実験式が提案されているが、およそ  $L_p = (0.5 \sim 1.0) d$  ( $d$ : 有効せい) 程度になることが示されている。いま、 $d = 100$  mm とすると、 $L_p = 50 \sim$

100 mm となり、50 mm はその下限値に相当する。RC 梁の場合、引張鉄筋の存在によりひびわれが分散し、塑性ヒンジ域が拡大するものと考えられ、無筋の SFRC に関して、 $L_p = 50$  mm の値はほぼ妥当な範囲にあると考えられる。

図-7に、基準梁試験体よりも寸法の大きな梁試験体の荷重-載荷点変位関係の測定値と計算値の比較を示す。計算は、引張応力-ひずみ関係及び塑性ヒンジ域の幅の寸法効果を考慮した場合と考慮しない場合の両方の結果を示している。なお、 $R\sigma$  は、式(24)により求め、 $R\epsilon$ ,  $RL_p$ ,  $L_p$  とともに表-5に示す。同図より、

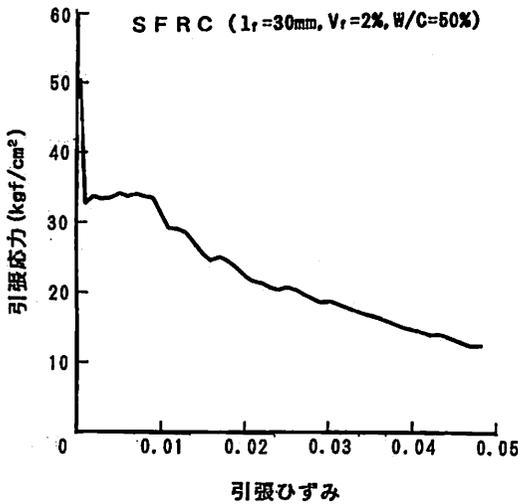


図-6(a) 引張応力-ひずみ関係推定値 ( $l_f = 30$  mm,  $V_f = 2\%$ )

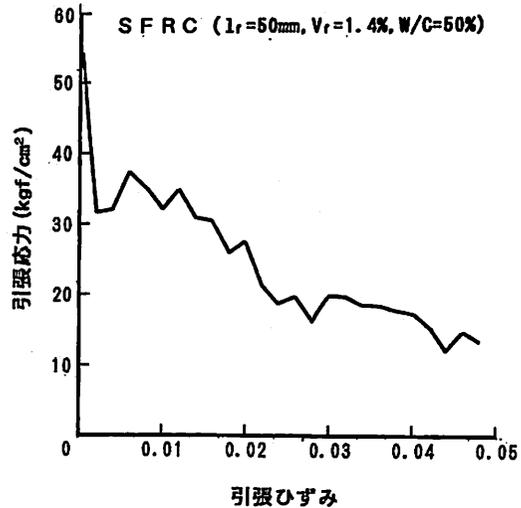


図-6(b) 引張応力-ひずみ関係推定値 ( $l_f = 50$  mm,  $V_f = 1.4\%$ )

表-5  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $L_p$  の寸法効果

$l_f$ (mm)	$V_f$ (%)	W/C (%)	$b * d * l$ (mm)	$R\sigma = R\epsilon$	$RL_p$	$L_p$ (mm)
30	2	50	100 * 100 * 400	1	1	50
			100 * 150 * 550	0.935	1.144	57.2
			100 * 200 * 700	0.891	1.260	63.0
			100 * 300 * 1000	0.833	1.441	72.1
			100 * 400 * 1300	0.794	1.586	79.3
50	1.4	50	100 * 100 * 400	1	1	50
			100 * 150 * 550	0.945	1.120	56.0
			100 * 200 * 700	0.908	1.214	60.7
			100 * 300 * 1000	0.854	1.360	68.0
			100 * 400 * 1300	0.824	1.473	73.7

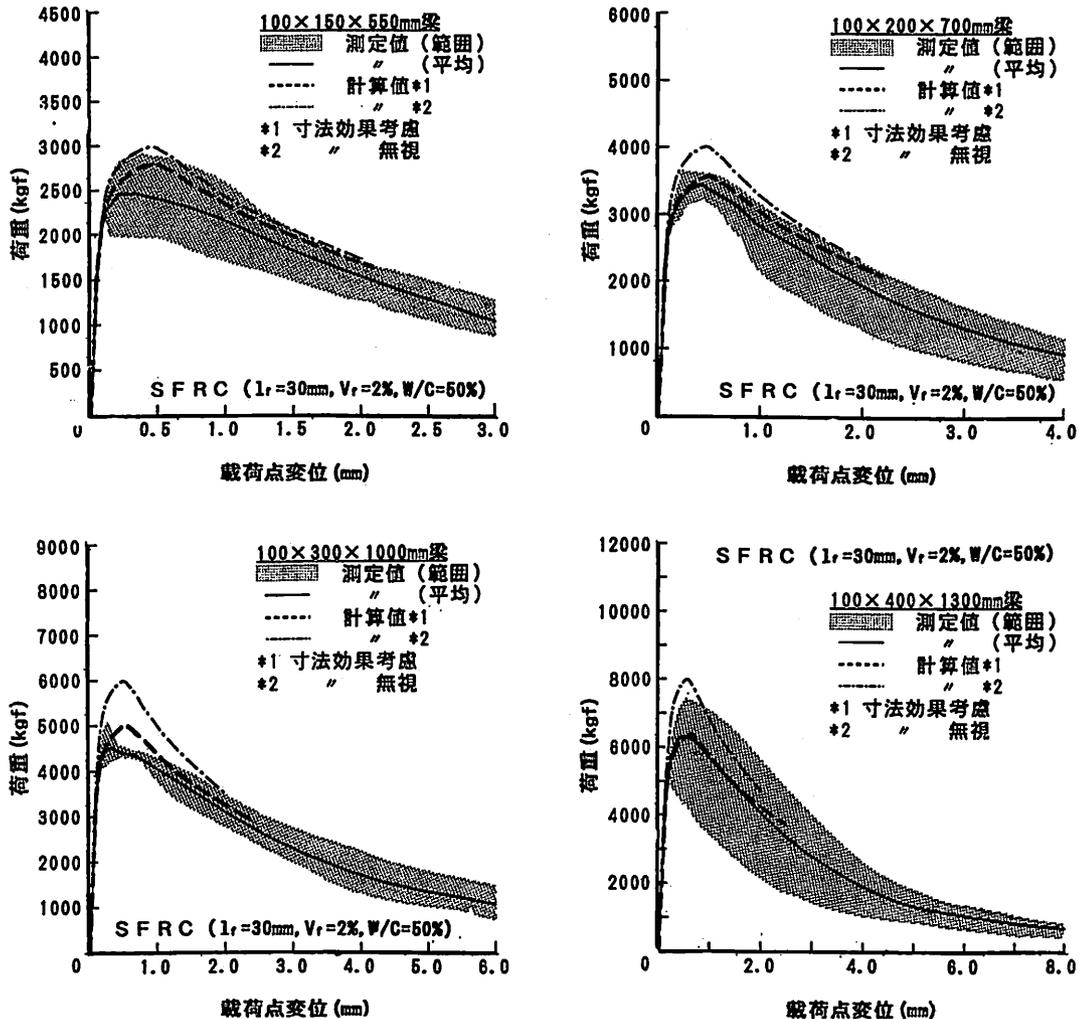


図-7(a) 荷重-変位関係の測定値と計算値  
( $l_f=30\text{mm}$ ,  $V_f=2\%$ )

寸法効果を考慮した計算値と測定値の間にはほぼ妥当な一致が得られているが、寸法効果を考慮しないと、最大荷重の計算値は測定値を上回り、その程度は、試験体寸法が大きくなるほど大きくなること分かる。

## 5. 結 論

本研究では、SFRCの引張特性の寸法効果を定量化するために、平面保持を仮定した曲げ解析に必要な引張応力-ひずみ関係及び塑性ヒンジ域の幅の寸法効果則を破壊力学概念により誘導し、その適用性を寸法の

異なるSFRC梁試験体の曲げ試験により実験的に検証した。

本実験にあたっては、熊本大学甲斐定夫技官に協力を頂きました。ここに記して、感謝致します。

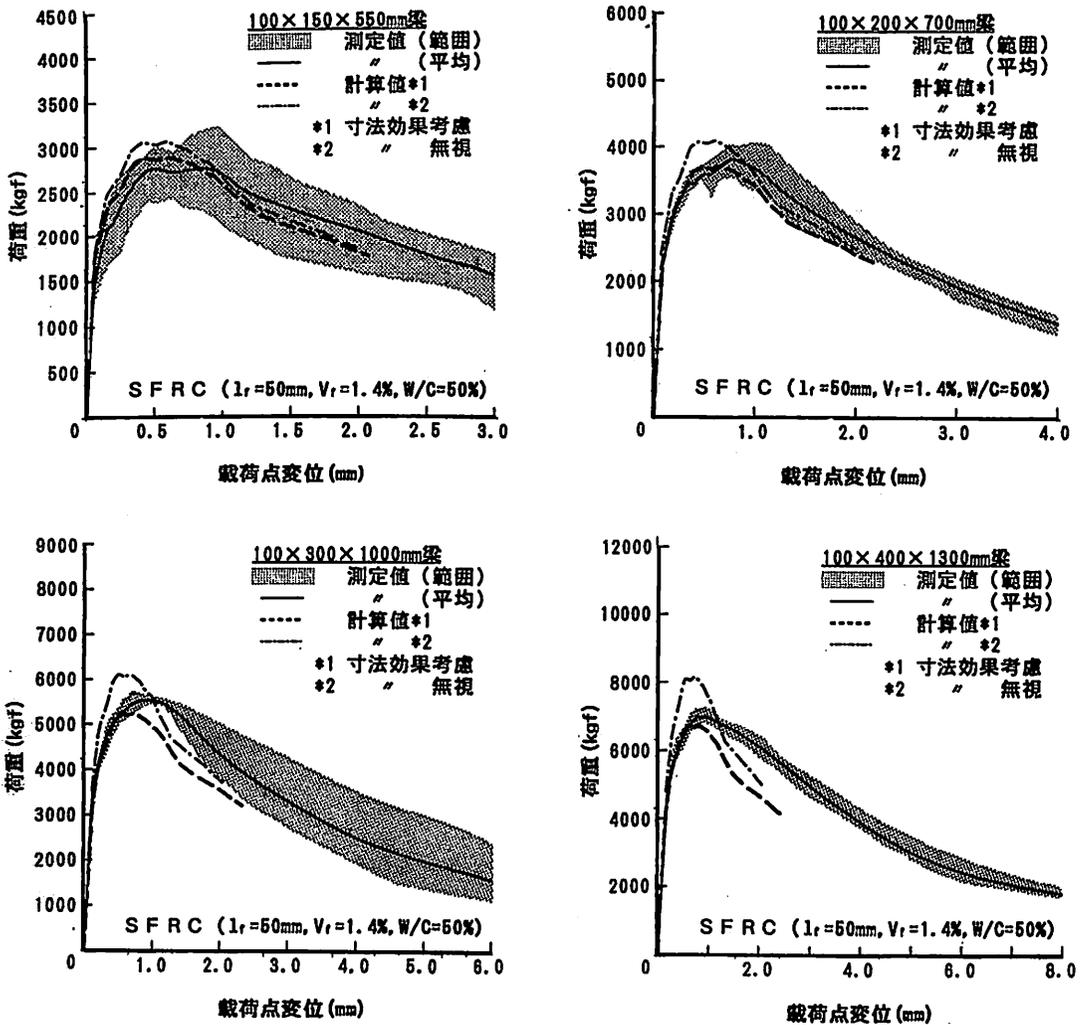


図-7 (b) 荷重-変位関係の測定値と計算値  
 ( $l_r=50\text{mm}$ ,  $V_f=1.4\%$ )

参考文献

1) 渡辺真也ほか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, Vol. 38, pp. 294-297, 1984. 12  
 2) X. Z. Hu, F. H. Wittmann: Fracture Energy and Fracture Process Zone, Materials and Structures, Vol. 25, No. 150, pp. 319-326, 1992.

3) 繊維補強コンクリート研究小委員会: 繊維補強コンクリートに関する試験方法のJCI規準案(その3) 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法(案), コンクリート工学, Vol. 20, No. 10, pp. 4-7, 1982. 10  
 4) R. J. Torrent: A General Relation Between Tensile Strength and Specimen Geometry for Concrete-Like Materials, Materials and Structures, Vol. 10, No. 58, pp. 187-196, 1977. 7-8