

## 鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の引張軟化曲線のモデル化と 3次元非線形有限要素解析による SFRC 床版の耐荷力

往田 有果理\*, 寺本 聡\*, 東山 浩士\*\*

### Modeling of Tension Softening Curves for Steel Fiber Reinforced Concrete and 3-D Non-linear Finite Element Analysis on Load-Carrying Capacity of SFRC Slabs

Akari OHTA\*, Satoshi TERAMOTO\* and Hiroshi HIGASHIYAMA\*\*

To enhance concrete toughness and fatigue durability for structural applications, the use of discrete short fibers is effective. Although the use of fiber reinforced concrete (FRC) is continuously increasing in various civil engineering infrastructures, it is still limited with respect to its design codes for FRC structural members. The performance of FRC is related to the post-cracking behavior depending on fiber type, aspect ratio, volume fraction of fiber, and fiber distribution and orientation. The fiber distribution and orientation are affected by boundary conditions of the specimen formwork. The fibers align as 2-D random orientation in a small prism mould, but align as 3-D random orientation in a large size of slab. The aim of this study is to establish the stress-strain constitutive law of the steel fiber reinforced concrete (SFRC) in tension introducing to the non-linear finite element analysis of SFRC slabs. In this study, SFRC prism specimens sawn from square slabs were used under four-point bending tests to determine the mechanical properties such as the flexural strength and the tension softening curve. And, load-carrying capacities of SFRC slabs were compared with the results of 3-D non-linear FE analysis.

**Key words:** Steel fiber reinforced concrete, RC slab, 3-D non-linear finite element analysis, Tension softening curve

#### 1 はじめに

コンクリートは引張力の作用により容易にひび割れが発生する。ゆえに、コンクリートの靱性、衝撃抵抗性、疲労耐久性を高めることを目的に、短繊維を体積比で0.5~2.0%混入した繊維補強コンクリート(Fiber Reinforced Concrete: FRC)の適用が増加している。しかし、FRCの力学特性は、繊維の種類、アスペクト比、繊維混入量などによって異なることが明らかにされている。また、コンクリート中の繊維の分散性は、繊維の長さ、構造物や試験体を成型する型枠寸法の影響を受けることから、繊維の分散性や配向係数に関する数多くの研究が見受けられる[1-3]。一般に、曲げ試験には、100×100×400 mmの角柱試験体がいられ、荷重は打設方向に対して直角に載荷することがコンクリート標準示方書 [規準編] [4]に規定されている。このような試験体を成型する場合、繊維の配向係数は型枠寸法の影響を受け、2次元ランダム配向の理論値に近くなることが明らかにされている[5]。これに比して、実構造物のように寸法が大き

い場合、繊維の配向係数は3次元ランダム配向の理論値に近くなる[5]。さらに、ToutanjiとBayasi[6]は、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の打設方法、養生方法、ならびに荷重作用方向が曲げ挙動に及ぼす影響について研究を行っている。

著者のひとり[7]は、FRCを用いた鉄筋コンクリート床版(以下、FRC床版)の耐荷力に関する研究を行ってきたが、上述したように、繊維の配向は構造物の寸法の影響を受けるとともに、荷重作用方向の影響をも受けることになる。すなわち、繊維の配向係数や荷重作用方向を考慮した材料力学特性(引張軟化曲線、破壊エネルギーなど)を把握した上で、FRC床版の変形特性および耐荷力の検討を行う必要があるといえる。そこで本研究では、3次元非線形有限要素解析プログラム(ATENA)を用いた鋼繊維補強コンクリート床版(以下、SFRC床版)の変形特性と耐荷力を検討するにあたり、まず、繊維の配向係数や荷重作用方向を考慮した曲げ試験からSFRCの引張応力-仮想ひび割れ幅関係(引張軟化曲線)を推定した。次に、SFRCの引張特性を有限要素解析プログラムに導入し、床版厚が異なる3体のSFRC床版と解析との比較を行った。

平成22年6月14受理

\* 総合理工学研究科 環境系工学専攻

\*\* 社会環境工学科

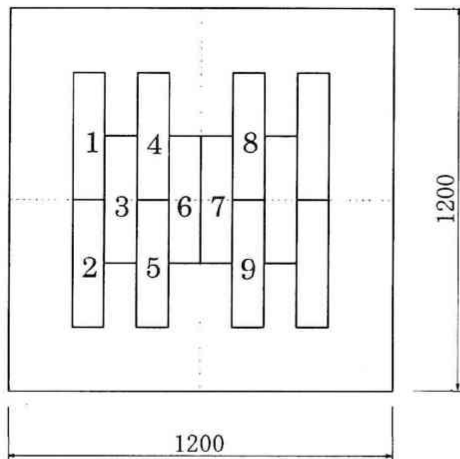


Fig. 1 Cutting position of prism specimens from SFRC slab

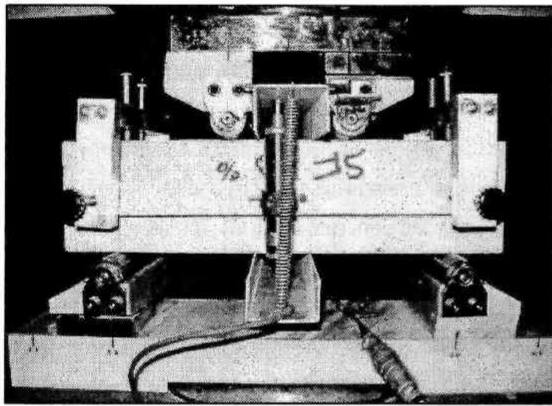


Fig.2 Four-point bending test

## 2 曲げ試験概要と試験結果

### 2. 1 鋼繊維補強コンクリート

本研究に使用したコンクリートは、水セメント比 57%、最大粗骨材寸法 20 mm、スランプ 15 cm のレディミクストコンクリートである。また、鋼繊維は、長さ 30 mm、直径 0.62 mm のフックエンドタイプを用いた。繊維混入率は 0.6% と 1.0% の 2 種類とした。SFRC は、アジテータ車に所定の鋼繊維を投入し、5 分間の高速回転を行った後に打設した。同時に、コンクリート標準示方書 [規準編] [4] に準拠した洗い分析試験により有効繊維混入率を測定した結果、それぞれ 0.63% と 1.03% であった。

### 2. 2 試験体作製方法

試験体は、それぞれの繊維混入率に対して、圧縮試験用として  $\phi 100 \times 200$  mm の円柱試験体を 6 体、引張試験用として  $\phi 100 \times 200$  mm の円柱試験体を 6 体、曲げ試験用として  $100 \times 100 \times 400$  mm の角柱試験体を 6 体、 $1200 \times 1200 \times 100$  mm の正方形版を 1 体作製した。なお、円柱試験体および角柱試験体には型枠パイプ（外部振動）を、また、正方形版には棒パイプ（内部振動）を用いた。

Table 1 Fiber orientation factor

$V_f$ (%)	Experimental value		Theoretical value	
	MPE	SPA	2D	3D
1.03	0.581	0.438	0.637	0.405
0.63	0.746	0.533		

作製した試験体のうち、圧縮試験体 3 体および曲げ試験体 6 体は、打設後 24 時間以内に脱型し、実験室内にて 27 日間の水中養生を行った後、荷重試験まで実験室内にて気中養生を行った。一方、圧縮試験体 3 体および正方形版は、実現場における橋梁床版を模擬して、打設後 1 週間の湿布養生を行い、荷重試験まで屋外にて気中養生を行った。その後、コンクリートカッターにより Fig. 1 に示す箇所から曲げ試験用の角柱試験体を切り出した。なお、曲げ試験に用いた試験体は、No.1~No.6 の 6 体である。

また、それぞれの試験体における繊維の配向係数を調べるために、角柱試験体をさらに 3 体作製した。切り出し試験体では、Fig. 1 の No.7~No.9 を用いて調べた。

以下、 $100 \times 100 \times 400$  mm の型枠から作製した角柱試験体を MPE 試験体、正方形版から切り出した角柱試験体を SPA 試験体とする。

### 2. 3 試験方法

試験方法は、コンクリート標準示方書 [規準編] [4] に従って 3 等分点曲げ荷重 (Fig. 2) とし、ヨークに取り付けた 2 本の変位計により支間中央たわみを計測した。荷重速度は 0.2 mm/min (試験機クロスヘッド速度) とし、荷重およびたわみの計測速度は 5 Hz とした。荷重方向は、MPE 試験体ではコンクリート標準示方書 [規準編] [4] に従って打設方向に直角な方向、SPA 試験体では実際の橋梁床版が受ける荷重方向と同様に打設方向に平行な方向とした。

### 2. 4 配向係数

繊維の配向係数を調べるため、それぞれの角柱試験体の断面をコンクリートカッターにより切断し、切断面における繊維本数をカウントした。MPE 試験体は軸方向に直角な断面における繊維本数、また、SPA 試験体は軸方向および軸直角方向の断面における繊維本数の平均値から次式 [8] を用いて配向係数を求めた。

$$\alpha_f = \frac{nA_f}{V_f} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha_f$  は配向係数、 $n$  は単位面積当たりの繊維本数、 $A_f$  は繊維 1 本当たりの断面積、 $V_f$  は繊維混入率である。

Table 1 に配向係数を示す。理論値は、繊維が 2 次元および 3 次元ランダムに分散したときの配向係数 [5] である。MPE 試験体に比べて SPA 試験体の配向係数は小さく、型枠寸法、すなわち境界条件の影響が現れている。このような結果は、多くの研究

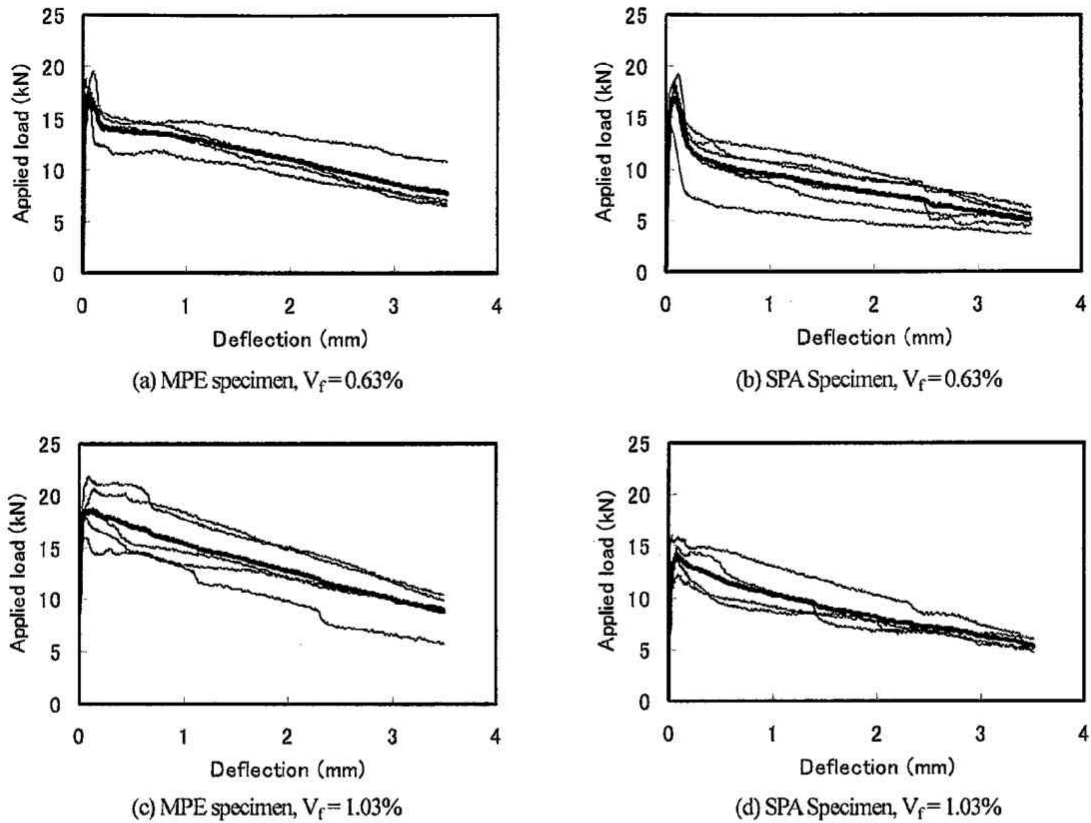


Fig. 3 Applied load and deflection curves

Table 2 Material strengths

Specimen	$V_f$ (%)	$f'_c$ ( $N/mm^2$ )	$f_t$ ( $N/mm^2$ )	$f_b$ ( $N/mm^2$ )	$E_c$ ( $kN/mm^2$ )
MPE	0.63	34.1	2.83 (2.83)	5.38 (5.00)	29.1 (29.2)
	1.03	33.1	2.88 (2.77)	5.60 (4.90)	33.4 (28.9)
SPA	0.63	22.1	1.88 (2.12)	4.77 (3.74)	24.2 (24.1)
	1.03	25.8	2.57 (2.35)	4.54 (4.15)	25.1 (25.7)

成果[1-3]で明らかにされており、型枠の境界条件によって FRC の材料力学特性が異なることになる。

## 2. 5 試験結果

材料強度試験結果を Table 2 に示す。養生条件の違いによる強度低下は見られるものの、繊維混入率の違いによる強度変化はほとんど見られない。また、表中の括弧内に示した値は、プレーンコンクリートの引張強度推定式[9]、曲げ強度推定式[9]ならびにコンクリート標準示方書 [設計編] [10] のヤング係数値である。これらの値と試験結果を比較すると、概ね一致していることから、本研究の繊維混入率の範囲では SFRC の材料強度およびヤング係数をそれらの推定式から算出しても大差がないといえる。

次に、3等分点曲げ試験より得られた荷重-たわみ曲線を Fig. 3 に示す。また、図中に示した太線は、サンプリング不良のあったデータを除いた 4~5 体のデータの平均曲線である。それぞれの平均曲線について比較し、考察すると次のようである。すなわち、SPA 試験体は MPE 試験体に比べて圧縮強度および引張係数が低下していることから、最大荷重後の荷重低下が大きく、ポストクラック挙動に違いが生じている。繊維混入率の違いについて比較すると、繊維混入率 0.63% では最大荷重に達した直後の荷重低下が大きく、繊維混入率 1.03% では最大荷重以降の残存荷重は徐々に低下していくことがわかる。

## 3 引張軟化曲線

### 3. 1 引張軟化曲線の推定

曲げ試験より得られた荷重-たわみ曲線の平均曲線を用いて、それぞれの試験体に対する引張軟化曲線を多直線近似法[11]により逆解析して推定した。解析モデルは Fig. 4 に示す 3等分点曲げ試験をモデル化したものである。この推定方法は引張軟化曲線を有限要素法に組み込み、仮想ひび割れモデルによるひび割れ進展解析から荷重-たわみ曲線、あるいは荷重-CMOD (ひび割れ肩口開口変位) 曲線を逆解析する手法である。

逆解析から得られた荷重-たわみ曲線の一例を Fig. 5 (実線が実験値) に示す。また、そのときに推定された引張軟化曲線を

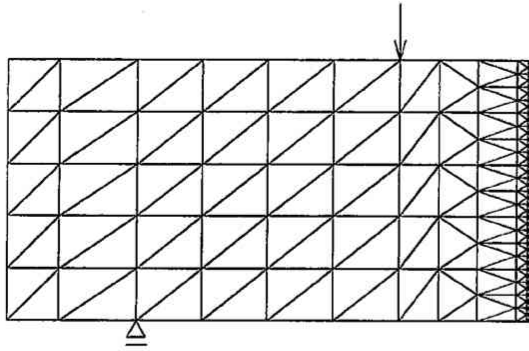
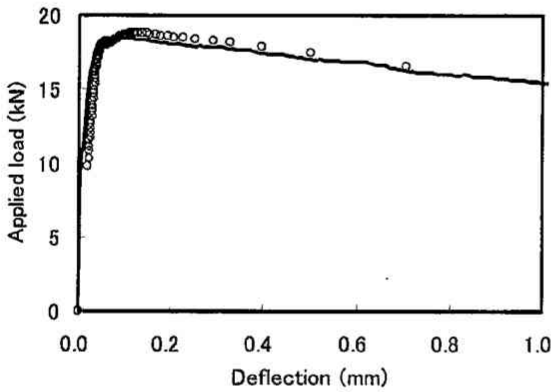
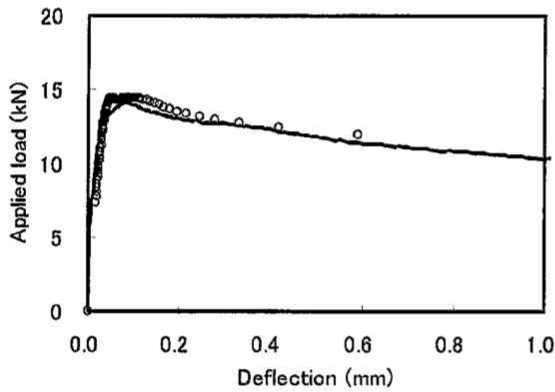


Fig. 4 Mesh model for poly-linear approximation analysis

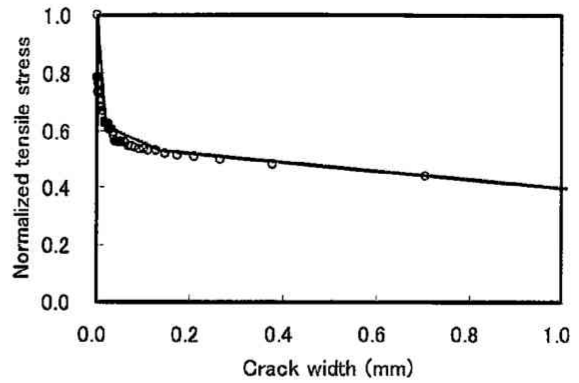


(a) MPE specimen,  $V_f = 1.03\%$

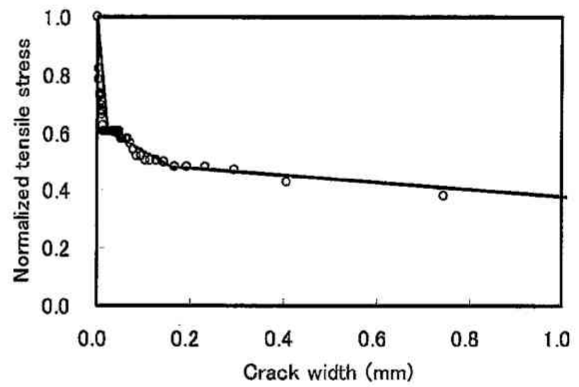


(b) SPA specimen,  $V_f = 1.03\%$

Fig. 5 Applied load and deflection curves



(a) MPE specimen,  $V_f = 1.03\%$



(b) SPA specimen,  $V_f = 1.03\%$

Fig. 6 Result of tension softening curve

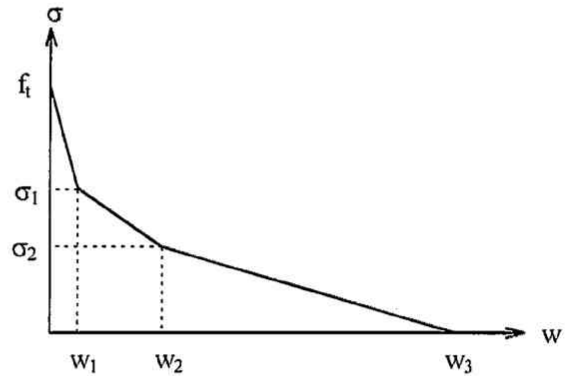


Fig. 7 Tension softening curve model

Fig. 6に示す。なお、Fig. 6中の実線は、推定された引張軟化曲線を Fig. 7 のように3直線でモデル化したものである。すなわち、 $\sigma_1 = 0.62f_t$ 、 $w_1 = 0.75G_F/f_t$ 、 $w_2 = 5G_F/f_t$ 、 $w_3 = 130G_F/f_t$ とし、また、 $\sigma_2$ は試験体種類および繊維混入率によって以下のように近似した。(ただし、 $V_f$ は(%)である。)

$$\text{MPE 試験体 } \sigma_2 = (0.148V_f + 0.375)f_t \quad (1)$$

$$\text{SPA 試験体 } \sigma_2 = (0.255V_f + 0.218)f_t \quad (2)$$

ここで、 $f_t$ は引張強度、 $G_F$ はプレーンコンクリートの破壊エ

ネルギーであり、次式[10]から求めることができる。

$$G_F = 10(d_{max} \cdot f_c')^{1/3} \quad (3)$$

ここに、 $G_F$ は破壊エネルギー (N/m)、 $d_{max}$ は粗骨材の最大寸法 (mm)、 $f_c'$ は圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)である。

繊維混入率 0.63%の場合、MPE 試験体と SPA 試験体の引張軟化曲線に違いが見られたものの、繊維混入率 1.03%ではそれらの引張軟化曲線に大きな違いは見られなかった。しかし、今回の試験では繊維混入率が2水準と少ないこともあり、さらにデー

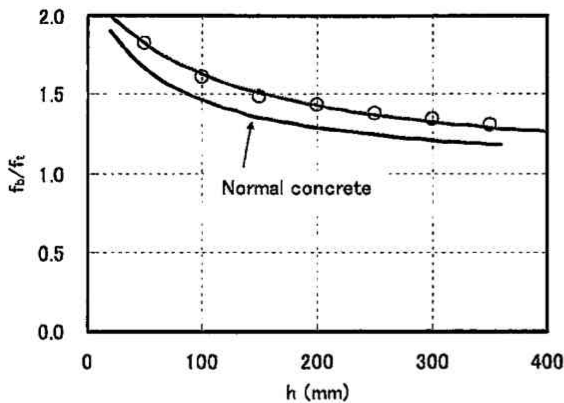


Fig. 8 Size effect on bending strength of SFRC

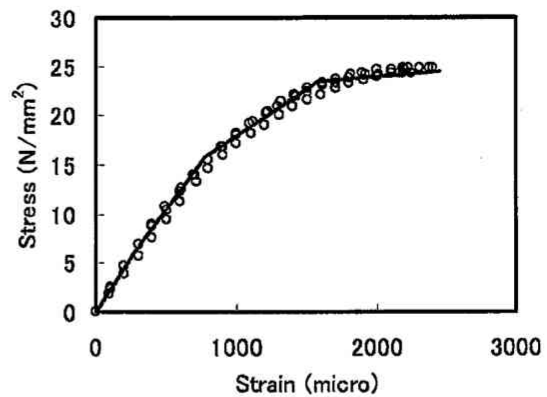


Fig. 10 Stress and strain curve in compression

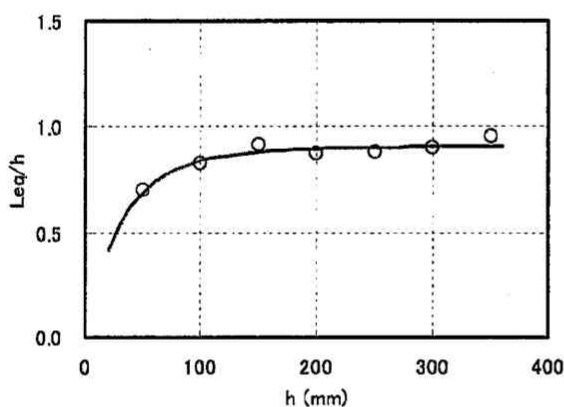


Fig. 9 Equivalent length taken as average crack spacing

タを蓄積して精度のよい引張軟化曲線をモデル化していく必要がある。

### 3. 2 寸法効果の影響と等価検長

コンクリートのようにひび割れが局所化する材料では、耐荷力評価において部材寸法の影響が無視できない。次章に述べるSFRC床版の3次元非線形有限要素解析では、材料構成則に応力-ひずみ関係を組込む必要があり、寸法効果を考慮した応力-ひずみ関係（等価検長を用いた応力-ひずみ関係）を得る必要がある。そこで、前節でモデル化したSPA試験体の引張軟化曲線を基に、次章のSFRC床版の有限要素解析に用いるための応力-ひずみ関係を求めることにした。なお、SFRCの圧縮強度は24.6 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は22.6 kN/mm<sup>2</sup>、繊維混入率は0.67%である。

まず、SFRCの曲げ強度の寸法効果式を求める。上述した多直線近似法[11]による解析を実施し、荷重-たわみ曲線を得ることによって曲げ強度を算出する。Fig. 8は幅100 mmの矩形断面を対象とした寸法効果解析結果であり、引張強度に対する曲げ強度の比で表している。図中には、プレーンコンクリートに関する曲げ強度の寸法効果式[11]も示している。得られた解析結果を近似すると、繊維混入率0.67%のSFRCに対する寸法効果式は次式のように表すことができる。

$$\frac{f_b}{f_t} = 1 + \frac{1}{0.85 + 0.69(h/l_{ch})} \quad (3)$$

$$l_{ch} = \frac{G_F \cdot E_c}{f_t^2} \quad (4)$$

ここに、 $f_b$ は曲げ強度、 $f_t$ は引張強度、 $h$ は部材高さ、 $l_{ch}$ は特性長さ、 $G_F$ および $E_c$ はSFRCの破壊エネルギーおよびヤング係数である。

SFRCの曲げ強度/引張強度比は、プレーンコンクリートより大きいことが分かる。これは、鋼繊維によるひび割れ幅の抑制効果であると考えられる。

次に、引張軟化曲線を応力-ひずみ関係に変換するための等価検長 ( $L_{eq}$ ) を求める。等価検長は、平均ひび割れ間隔を意味し、応力-ひずみ関係を用いた断面解析により求めた曲げ強度が Fig. 8 に示した曲げ強度と同値となるように定めることによって得られる[11]。等価検長の解析結果を Fig. 9 に示す。また、それらを近似した等価検長は次式のように表すことができる。

$$\frac{L_{eq}}{h} = 0.9 \left[ 1 - \frac{1}{\{1 + 50(h/l_{ch})\}^6} \right] \quad (5)$$

## 4 有限要素解析

### 4. 1 材料モデル

SFRCの圧縮応力-ひずみ関係は、Fig. 10に示すように、φ100×200 mmの円柱試験体の圧縮試験から得た結果を用いた。ただし、圧縮側構成則については寸法効果の影響が小さいことから考慮していない。引張応力-ひずみ関係は、3.2で述べた手法により求めた寸法効果を考慮した構成則を用いた。ひび割れに関しては、回転分散ひび割れモデルを採用した。

### 4. 2 解析モデル

解析モデル(1/4モデル)をFig. 11に示す。荷重は100×100 mmの鋼板を介して、変位制御による増分解析とした。床版厚は、

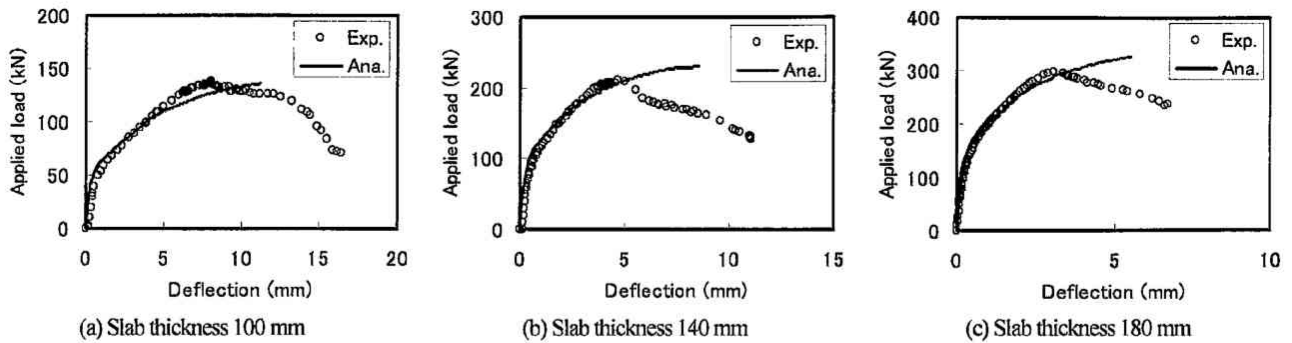


Fig. 12 Applied load and deflection curve of SFRC slabs

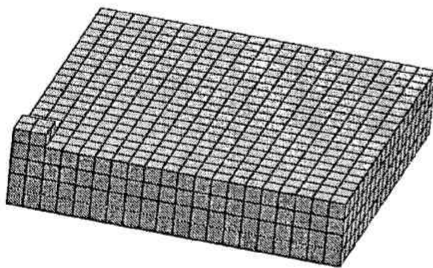


Fig. 11 Finite element mesh for SFRC slab

100 mm, 140 mm, 180 mm の3種類である。鉄筋はD10 (SD295A) を120 mm 間隔に引張側のみ配置した。主鉄筋かぶり(鉄筋中心まで)は25 mm である。床版支間長は1000 mm, 支持条件は4辺単純支持である。要素寸法は予備解析の結果を反映して、それぞれの床版厚に対して、版厚方向をそれぞれ4層, 6層, 7層に分割した。

#### 4. 3 解析結果

実験結果と解析結果を Fig. 12 および Table 3 に示す。解析結果は、実験結果の最大荷重までよい一致を示している。最大荷重に関しては、床版厚が厚い、140 mm および 180 mm で解析精度が低下しているものの、実験値に対する解析値の比は10%以内であり、解析対象である RC 床版の3次元非線形解析としては満足できる解析精度であると判断している。一方、最大荷重時の変位に関しては、解析値の方が大きくなる傾向にある。本実験では、試験体数が3体と少ないことから、解析精度の検証を行うためには、さらに実験パラメータおよび試験体数を増し、信頼性を高めていく必要がある。

## 5 まとめ

鋼繊維補強コンクリートの曲げ試験結果を逆解析することにより引張軟化曲線を求め、それを3直線でモデル化するとともに、寸法効果の影響と等価検長を求めた。得られた引張応力-ひずみ関係を3次元非線形有限要素解析に組み込み、鋼繊維補強コンクリートを用いた RC 床版の変形特性および耐荷力を検討した結果、概ねよい一致を得ることができた。

Table 3 Results of load-carrying capacity of SFRC slabs

Slab thickness (mm)	Load-carrying capacity (kN)		$P_{exp}/P_{ana}$
	$P_{exp}$	$P_{ana}$	
100	133.9	136.3	0.982
140	210.2	230.4	0.912
180	297.6	325.3	0.915

#### 参考文献

- 1) P. Stroeven: The Analysis of Fibre Distribution in Fibre Reinforced Materials, *Journal of Microscopy* **111** (1977) 283-295.
- 2) 小林一輔, 睦好宏史: 繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形, *土木学会論文集* **299** (1980) 101-112.
- 3) P. Soroushian and C.D. Lee: Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal* **Vol.87, No.5** (1990) 433-439.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [規準編] 2005 年制定, (2005).
- 5) 小林一輔, 和泉意登志, 趙力采: 鋼繊維補強コンクリート, *コンクリート工学* **Vol.15, No.3** (1977) 7-21.
- 6) H. Toutanji and Z. Bayasi: Effects of Manufacturing Techniques on the Flexural Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Research* **Vol.28, No.1** (1998) 115-124.
- 7) 東山浩士, 水越陸視, 松井繁之, 青木真材: 繊維補強軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力, *構造工学論文集, 土木学会* **54A** (2008) 703-712.
- 8) J.P. Romualdi and J.A. Mandel: Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Fiber Lengths of Wire Reinforcement, *ACI Journal* **61** (1964) 567-670.
- 9) 岡村 甫: コンクリート構造物の限界状態設計法, *コンクリート・セミナー4*, 共立出版 (1978).
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編] 2007 年制定 (2008).
- 11) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治: コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討, *土木学会論文集 No.442/V-16* (1992) 101-107.