

# 論文 鋼繊維補強コンクリートを用いた実大セグメントの構造実験および解析

三桶 達夫\*1・丸屋 剛\*2・村田 裕志\*3・西田 与志雄\*4

**要旨：** 道路トンネルにおいて、セグメントの経済性の追求と高速施工の要求を満たすため、セグメントの大型化が求められている。そこで今回、鋼繊維補強コンクリートを用いた鉄筋コンクリート (reinforced concrete with steel fiber 以下 RSF と称す) <sup>1)</sup>セグメントの開発を行った。開発にあたり、鋼繊維混入に伴う応力伝達性など構造特性への影響の確認を目的として RSF セグメントと RC セグメントの構造実験及び 3 次元非線形有限要素法による実験シミュレート解析を行った。実験結果より、鋼繊維を混入することで降伏、終局耐力が向上することが明らかとなった。また両ケースについて実験結果をよく模擬する解析結果が得られた。

**キーワード：** 鋼繊維補強コンクリート, RSF セグメント, 3 次元非線形解析, 引張軟化曲線, 等価検長

## 1. はじめに

近年、道路トンネルにおいて、セグメントの経済性の追求と高速施工の要求を満たすため、セグメントの大型化が求められている。今回、セグメントの耐久性向上と施工時のひび割れ、角欠け防止、供用後の剥落防止のため、鋼繊維補強コンクリートを用いた鉄筋コンクリートセグメントの開発を行った。

セグメント幅については 2000mm とし、鋼繊維に荷重分配効果を期待し配力鉄筋を省略した。(図-1)

そこで同じ主鉄筋比の実物大の RSF セグメントと RC セグメントを製作し、4 点曲げ試験で比較実験および 3 次元非線形有限要素解析を行うことにより鋼繊維混入が部材特性に与える影響の確認を行った。

RSF セグメントの有限要素解析においては、引張軟化曲線とひび割れ間隔に相当する長さ(以降等価検長)の設定が大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、これらをパラメータとした解析を行い、引張軟化曲線と等価検長の最適な設定手法の検証を行った。今回、これらの実験および解析について報告する。

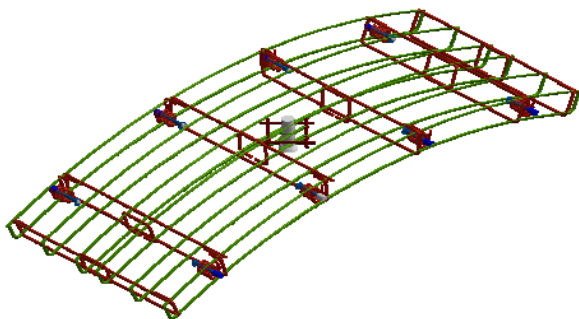


図-1 RSF セグメント配筋イメージ

## 2. 実験概要

図-2 に試験概要図を示す。試験体はセグメントを模したアーチ形状試験体とした。断面は 2000mm×350mm、主鉄筋は SD345-D16 を 12 本、引張鉄筋比で 0.46% とした。また、荷重状況を図-3 に、試験体の寸法と配筋図を図-4 に示す。

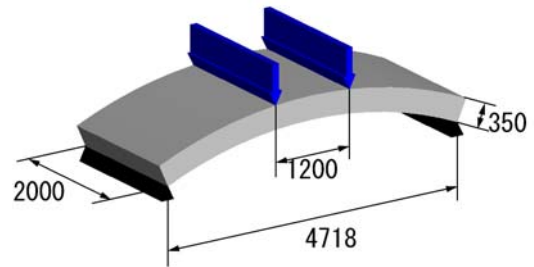


図-2 曲げ試験概要図 単位 mm

今回 RSF セグメント試験体 (以下 RSF 試験体と称す) については主鉄筋に対する応力伝達を鋼繊維に期待し、配力鉄筋は省略した。RSF 試験体の鋼繊維混入量は 0.4vol% とし、コンクリートの設計基準強度は 54N/mm<sup>2</sup> とした。

表-1 にベースコンクリートの配合を示す。混和材には高炉スラグ微粉末を用いた。

今回は鋼繊維の他に耐火対策としてポリプロピレンを 1.5kg/m<sup>3</sup> 加えてある。鋼繊維は L=30mm, φ0.6mm, ポリプロピレン繊維は L=10mm, φ18μm のものを使用した。

等曲げ区間については 1200mm とし曲げ破壊が先行するようにせん断スパン有効高さ比 a/d を 6.77 とした。

\*1 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木構造チーム 工修 (正会員)  
 \*2 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木材工チーム 博(工) (正会員)  
 \*3 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木構造チーム 博(工) (正会員)  
 \*4 大成建設 (株) 土木本部 土木技術部 都市土木技術室

表-1 ベースコンクリートの配合

試験体	水結合材比 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							鋼繊維 SF (vol%)	有機繊維 PP (kg/m <sup>3</sup> )
			水 W	セメント C	混和材 B	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP	消泡剤 AD		
RSF	26.5	60.0	167	315	315	964	647	1.15%	10T	0.4	1.5
RC	26.5	60.0	167	315	315	964	647	1.15%	10T	—	1.5

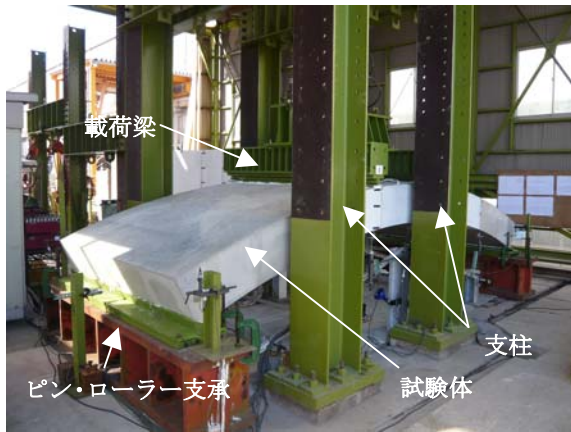


図-3 載荷状況

載荷は 1000kN 油圧ジャッキを使用し、線荷重を中央 2 点に対し、試験体に破壊が生じるまで鉛直方向に単調漸増載荷を行った。

計測項目はロードセルによる油圧、試験体の鉛直および水平変位、主鉄筋のひずみ、コンクリートのひずみとした。

### 3. 実験結果

図-5 に各試験の荷重-スパン中央たわみ関係をまた、

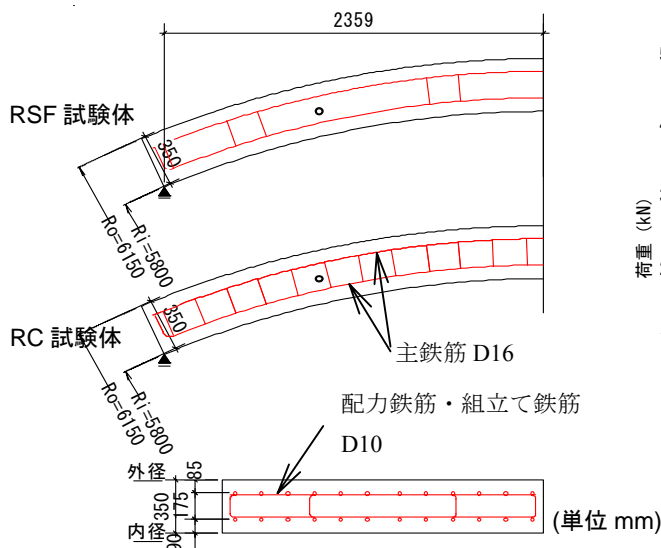


図-4 試験体配筋図

表-2 鉄筋の材料物性値

	鋼種	呼び名	降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )
主鉄筋	SD345	D16	377	541	183
配力鉄筋	SD345	D10	375	507	180

表-2, 3 に試験時に使用した鉄筋及びコンクリートの材料試験結果を示す。図-6 に試験後のひび割れ性状を示す。

RSF 試験体は 252kN, RC 試験体は 154kN でひび割れが発生し、ひび割れ発生荷重は RSF 試験体の方が高かった。これは、目視で観察した結果であるため、RSF 試験体においては目視では確認出来ない微細なひび割れが入っていた可能性が考えられた。

その後、RSF 試験体は 401kN, RC 試験体は 232kN で主鉄筋が初降伏し、RSF 試験体は 437kN, RC 試験体は 312kN で最大荷重を迎えた。破壊形態は両試験体とも曲げ破壊であった。

RSF 試験体において、荷重低下後はひび割れが 1 箇所集中していたため変位 60mm で載荷を終了した。RC 試験体においては変位 90mm まで載荷したがコンクリート上面の圧壊は確認されなかった。

両試験体における主鉄筋の初降伏荷重を比較すると 401kN/232kN=1.73 となり、RSF 試験体においては RC 試験体と比較して鋼繊維を混入することで、降伏荷重が約 7 割向上した。

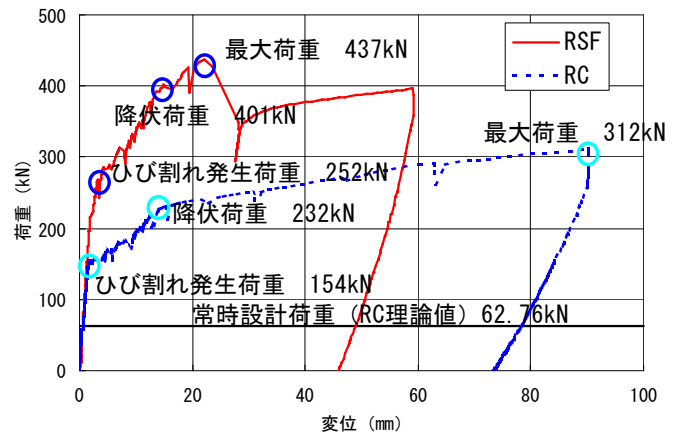


図-5 荷重-スパン中央たわみ関係

表-3 コンクリートの材料物性値

	RSF	RC
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	57.9	62.0
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	4.44	3.94
ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	31.6	33.8

最大荷重についても RSF 試験体は鋼繊維を 0.4vol% 混入したことにより、同じ主鉄筋比の RC 試験体と比較して大幅に増加することが確認された。

等曲げ区間のひび割れ発生状況は RSF 試験体が RC 試験体と比較して若干分散傾向にあったが、RSF 試験体において最大荷重以降は 1 箇所のみひび割れに進展が集中した。RSF 試験体において荷重低下後も荷重を続けたところ、400kN（鉄筋初降伏荷重レベル）まで荷重が回復していた。これはひび割れが集中した箇所鋼繊維が架橋効果により引張力を負担したこと及び主鉄筋にひずみ硬化が生じたことが原因と考えられた。



図-6 ひび割れ性状（荷重終了時）

#### 4. 解析概要

##### 4.1 解析条件

荷重試験を行った実物大アーチ 2 体 (RSF, RC 試験体) を対象に、DIANA9.1 を用いて 3 次元非線形有限要素解析を行った。解析にあたっては引張軟化曲線と等価検長をパラメータとした。

図-7 に解析モデルを示す。解析は試験体の対称性を考慮して 1/4 モデルにて解析を行った。コンクリート要素と載荷板には 8 節点ソリッド要素、鉄筋には埋込鉄筋要素を適用した。

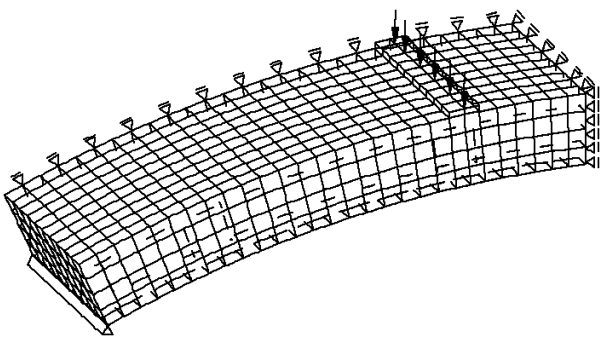


図-7 解析モデル(1/4 モデル)

図-8, 9 に引張軟化曲線を示す。コンクリートの材料特性は表-3 に示す値を用い、等価検長は表-4 に示す通りとした。

RSF 試験体の引張軟化曲線に関しては、土木学会の「鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案）」<sup>1)</sup>(以降 RSF 指針)のモデルを事前解析に使用し、JCI-S-001-2003<sup>2)</sup>による破壊エネルギー試験から得られた結果に等価検長<sup>3)</sup>を用いて設定したものを事後解析に使用した。

RC 試験体の引張軟化曲線に関しては、Hordijk モデル(図-10)を事前解析に使用し、破壊エネルギー試験から得られたものを事後解析に使用した。コンクリートの圧縮モデルに関しては全てのケースで Thorenfeldt モデル(図-11)を使用した。鉄筋には単純なバイリニアモデル(図-12)を使用した。

表-4 に解析に用いた等価検長を示す。引張軟化曲線と等価検長を用いた引張応力-ひずみ曲線の関係を図-13 に示す。RC 試験体の引張軟化曲線として用いた、Hordijk モデルは以下の式(1)および(2)によって描かれるコンクリートの引張軟化曲線である。

$$\sigma_t = \begin{cases} \left[ \left[ 1 + \left( c_1 \frac{w}{w_u} \right)^3 \right] \exp\left(-c_2 \frac{w}{w_u}\right) - \frac{w}{w_u} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \right] f_t & 0 \leq w \leq w_u \\ 0 & w > w_u \end{cases} \quad (1)$$

$$c_1 = 3, \quad c_2 = 6.93, \quad w_u = 5.136 \frac{G_F}{f_t} \quad (2)$$

ここで、 $f_t$ : 引張強度[MPa]、 $\sigma_t$ : 引張応力[MPa]、 $w$ : ひび割れ幅[mm]、 $w_u$ : 限界ひび割れ幅[mm]、 $G_F$ : 破壊エネルギー[N/mm]である。

図-10 に、引張強度が 3MPa、破壊エネルギーが 0.1N/mm の時の Hordijk モデルと六郷らの 1/4 モデル<sup>4)</sup>による引張軟化曲線を併せて示す。また、Thorenfeldt モデルは以下の式(3)および(4)によって描かれるコンクリートの圧縮応力-圧縮ひずみ曲線である。

圧縮強度が 30, 40, 50, 60MPa の時の Thorenfeldt モデルによる圧縮応力-圧縮ひずみ曲線を図-11 に示す。なお、ヤング係数は 28, 31, 33, 35GPa とした。

表-4 解析に用いた等価検長

	RSF 線載荷	RC 線載荷
等価検長 <sup>※1</sup> [mm]	183 (85)	248 (85)

※1 実大実験で発生したひび割れの平均間隔  
( ) 内数値は解析における平均要素長

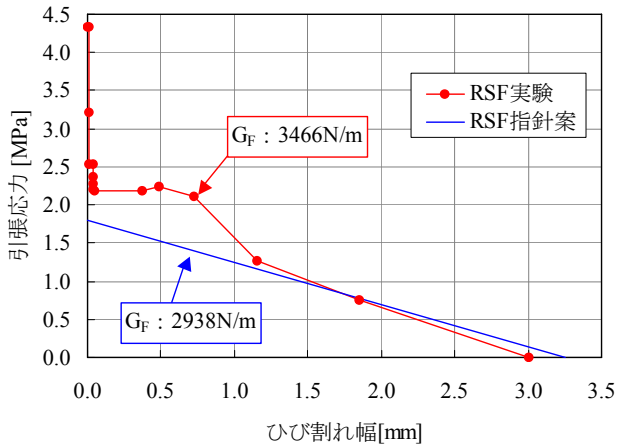


図-8 RSFの引張軟化曲線

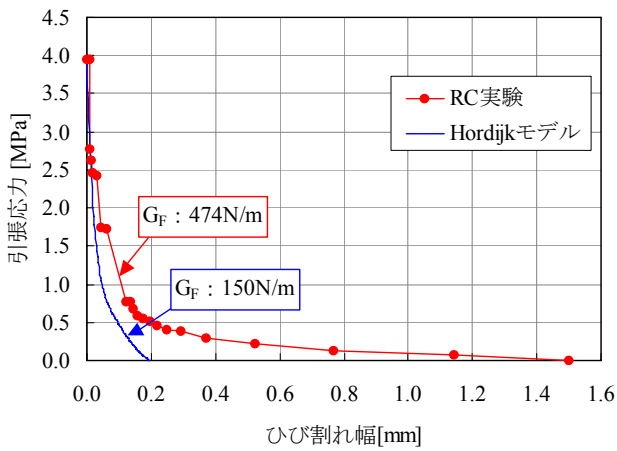


図-9 RCの引張軟化曲線

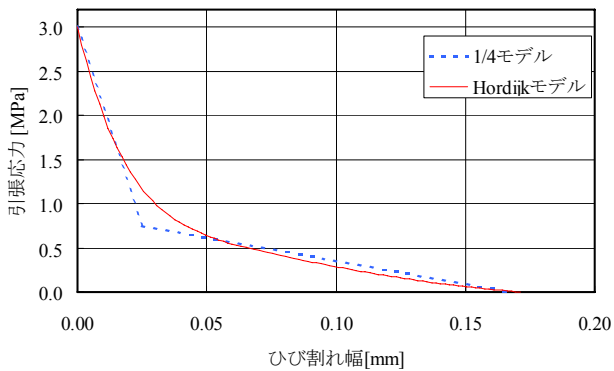


図-10 Hordijkモデルと1/4モデルによる引張軟化曲線

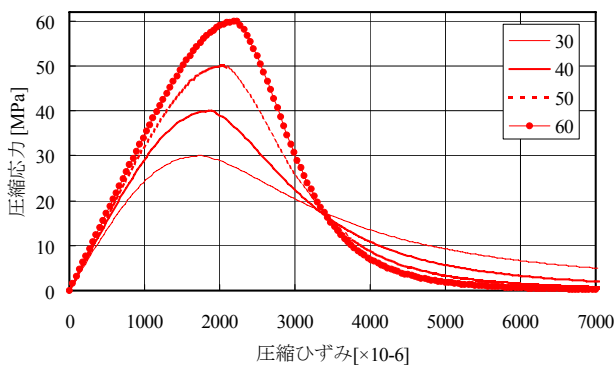


図-11 Thorenfeldtモデルによる圧縮応力-ひずみ曲線

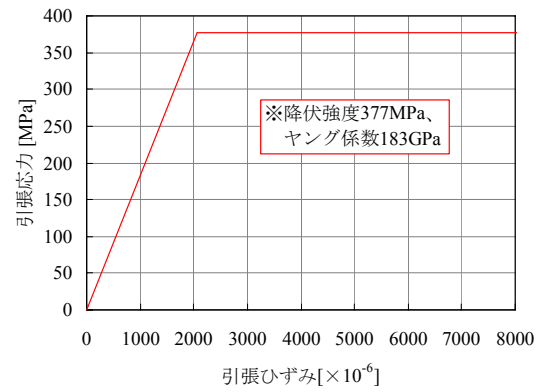


図-12 鉄筋モデル

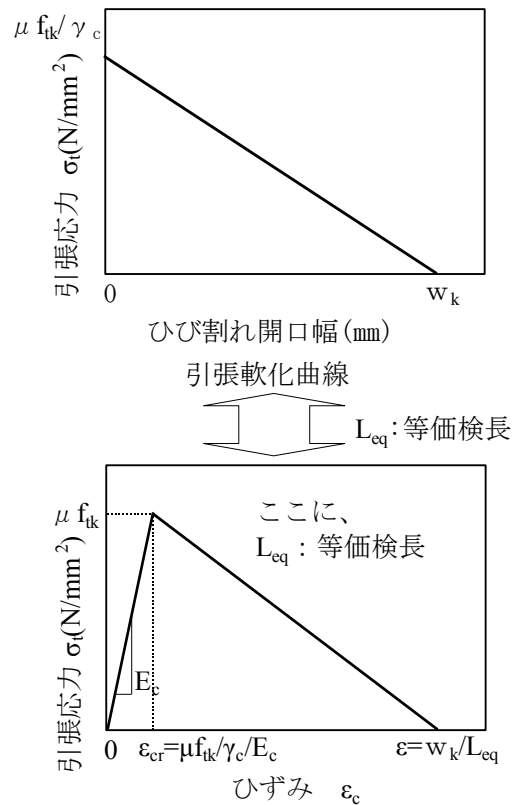


図-13 引張軟化曲線と引張応力-ひずみ曲線の関係

ここで図-13に示すように、引張軟化特性を応力-ひずみ関係に等価検長を用いて変換し、解析を行った。

$$\sigma_c' = \left[ \frac{n(\varepsilon_c' / \varepsilon_p')}{n-1 + (\varepsilon_c' / \varepsilon_p')^{nk}} \right] f_c' \quad (3)$$

$$n = 0.8 + \frac{f_c'}{17}$$

$$k = \begin{cases} 1 & 0 \leq \varepsilon_c' \leq \varepsilon_p' \\ 0.67 + \frac{f_c'}{62} & \varepsilon_c' > \varepsilon_p' \end{cases}$$

$$\varepsilon_p' = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{f_c'}{1000E_c} \quad (4)$$

ここで、 $f_c'$ : 圧縮強度[MPa],  $\sigma_c'$ : 圧縮応力[MPa],  $\sigma_p'$ : ピークひずみ,  $\epsilon_c'$ : 圧縮ひずみ,  $E_c$ : ヤング係数[GPa] である。

#### 4.2 解析結果

図-14 に解析結果と実験結果の荷重-試験体中央たわみ関係を併せて示す。

表-5 に示すように主鉄筋降伏荷重および最大荷重の解析結果は実験結果と概ね一致していた。この結果より要素試験により得られた引張軟化曲線と実物大実験によって得られた平均ひび割れ間隔を適用することで実挙動の傾向を解析出来ることを確認した。

ここでRSFの解析においては、主鉄筋のひずみ硬化域及び、ひび割れ面での鋼繊維の架橋効果のモデル化を行っていないので、実験結果のような荷重の上昇は解析では模擬されなかった。

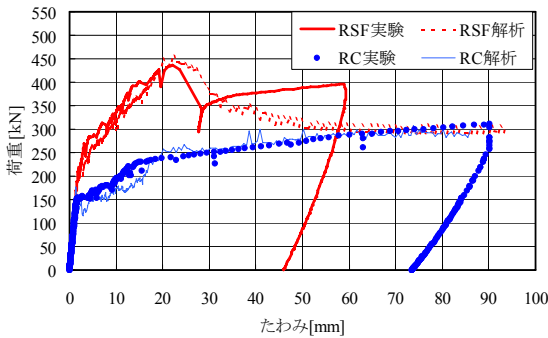


図-14 解析結果

表-5 各荷重 (kN) ( ) 内数値は解析値

	$P_{cr}$	$P_y$	$P_{max}$
RSF 線載荷	252 (214)	401 (420)	437 (455)
RC 線載荷	154 (176)	232 (225)	304 (297)

$P_{cr}$  : ひび割れ発生荷重,  $P_y$  : 主鉄筋降伏荷重

$P_{max}$  : 最大荷重

#### 4.3 引張軟化曲線・等価検長の影響

RSF 線載荷, RC 線載荷に関して、引張軟化曲線と等価検長をパラメータとした解析結果を図-15, 16 に示す。解析結果より、RSF 試験体において引張軟化曲線及び等価検長の違いによって最大荷重が大きく変化することが分かる。

#### 5. 結論

コンクリートに鋼繊維を混入させた RSF セグメントと RC セグメントの荷重試験を行った結果、得られた結論は以下の通りである。

- (1) 同じ主鉄筋量とした場合、RC セグメントに比べ RSF セグメントは主鉄筋の降伏荷重が大幅に増加

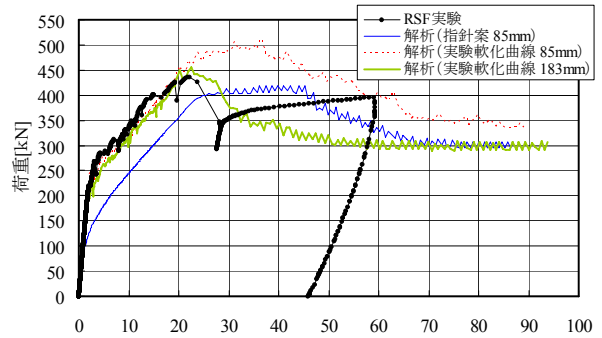


図-15 RSF 線載荷のパラメータ解析結果

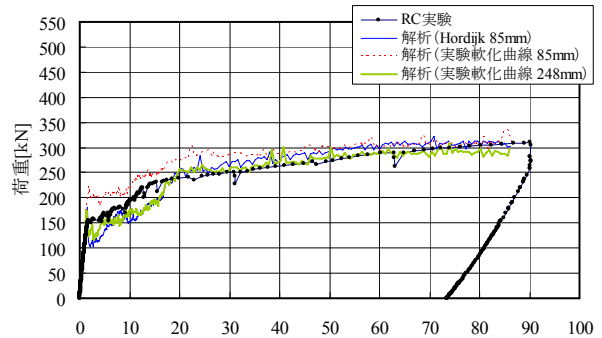


図-16 RC 線載荷のパラメータ解析結果

することが確認された。

- (2) 鋼繊維による曲げ補強効果を考慮して設計を行うことで、主鉄筋を低減でき合理的な構造となる可能性が示された。
- (3) RSF セグメントにおいて、JCI-S-001-2003 に準じた要素実験より得られた引張軟化曲線と実物大実験での平均ひび割れ間隔を等価検長として適用した3次元非線形有限要素解析を行うことで、今回の実験結果に対して実挙動の傾向を把握出来た。

#### 謝辞

東京工業大学大学院の二羽淳一郎教授には、構造実験及び構造解析の評価にあたりご指導を頂きました。ここに記して深謝致します

#### 参考文献

- 1) 土木学会, 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案), コンクリートライブラリー97, 1999.
- 2) 橋高義典, 金久保利之, JCI 規準 (JCI-S-001~003) の概要, コンクリート工学, Vol.44, No.12, p.p.10~p.p15, 2006.12
- 3) 土木学会, 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2004
- 4) Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. and Koyanagi, W. : Testing Method to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy, Balkema, pp.153-163, 1989

