

鋼繊維補強コンクリートを用いた大型セグメントの開発

三桶 達夫*¹・丸屋 剛*¹・堀口 賢一*¹・村田 裕志*¹・西田 与志雄*²・服部 佳文*²・川島 広志*³

Keywords : reinforced steel fiber concrete(RSF), segment using RSF, 3D nonlinear finite element analysis, tension softening curve, equivalent length

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, コンクリートに鋼繊維を混入させたセグメント (以下 RSF セグメントと称す) 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。

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。

2. 実験概要

図-1 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, 載荷状況を図-2 に, 試験体の寸法と配筋図を図-3 に示す。

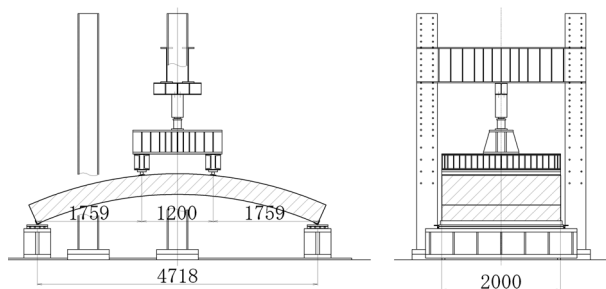


図-1 曲げ試験概要図 単位 mm

Fig.1 Overview of bending test



図-2 載荷状況

Fig.2 Situation of bending test

表-1 ベースコンクリートの配合

Table.1 Mix proportion of concrete of test specimens

試験体	水粉体比 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							鋼繊維 SF(vol%)	有機繊維 PP(kg/m ³)
			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

* 1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室
 * 2 本社土木本部土木技術部都市土木技術室
 * 3 本社土木本部土木設計部陸上第二設計室

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,

配力鉄筋及びフープ鉄筋は省略した。RSF 試験体の鋼繊維混入量は 0.4vol%とした。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。

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 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 加えてある。

また、コンクリートの設計基準強度は $54\text{N}/\text{mm}^2$ とした。

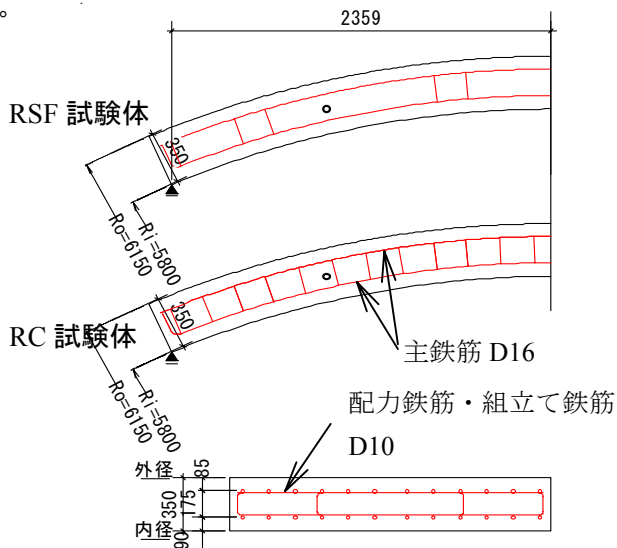


図-3 試験体配筋図 単位 mm
Fig.3 Test specimens

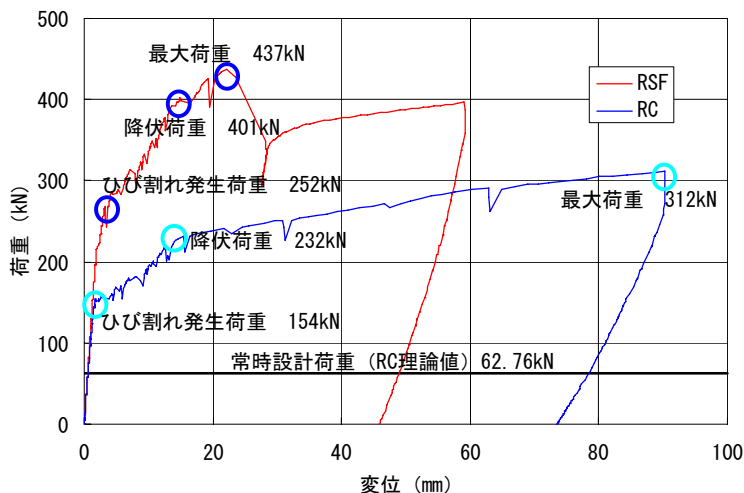


Fig.4 Load-displacement curve

表-2 鉄筋の材料物性値

Table.2 Results of tensile strength test of reinforcing bars

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

荷重は 1000kN 油圧ジャッキを使用し、中央 2 点に対し鉛直方向に線荷重を試験体に破壊が生じるまで単調漸増荷重を行った。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

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。また、図-4 に各試験の荷重-スパン中央たわみ関係を、図-5 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



Fig.5 Crack patterns of test specimens

表-3 コンクリートの材料物性値

Table.3 Results of compressive strength test of concrete

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

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。

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。

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で主鉄筋にひずみ硬化が生じたためと考えられる。

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 線載荷, RC 線載荷) 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。

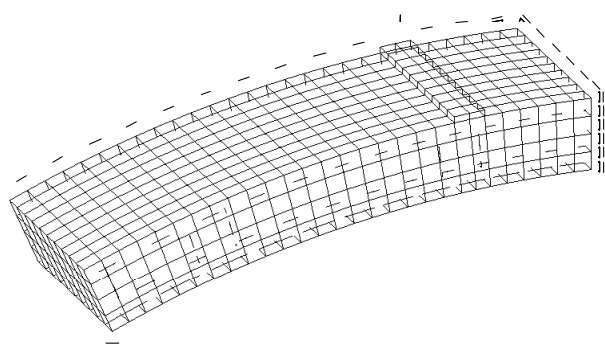


図-6 解析モデル(1/4モデル)

Fig.6 Analytical model

表-4 解析に用いた等価検長

Table.4 Equivalent length of analysis

	RSF 線載荷	RC 線載荷
等価検長※1[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-6 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-7,8 に引張軟化曲線を示す。コンクリートの材料特性は表-3 に示す値を用いた。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)」¹⁾(以降RSF指針)のモデルを使用し, JCI-S-001-2003²⁾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-9)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-10)を使用した。鉄筋には単純なバイリニアモデル(図-11)を使用した。表-4 に解析に用いた各特性(実験値)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-12 に示す。

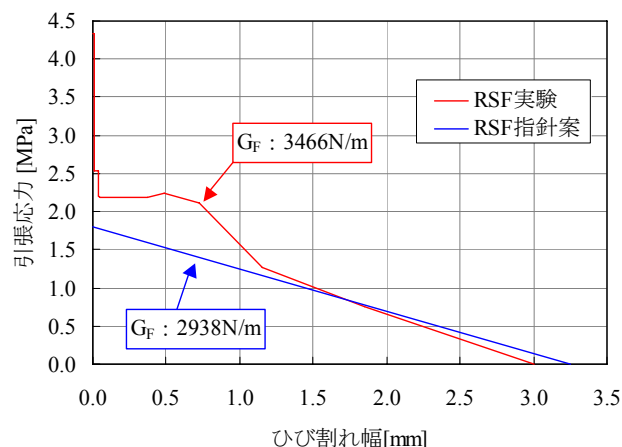


図-7 RSF の引張軟化曲線

Fig.7 Tension softening curve of RSF

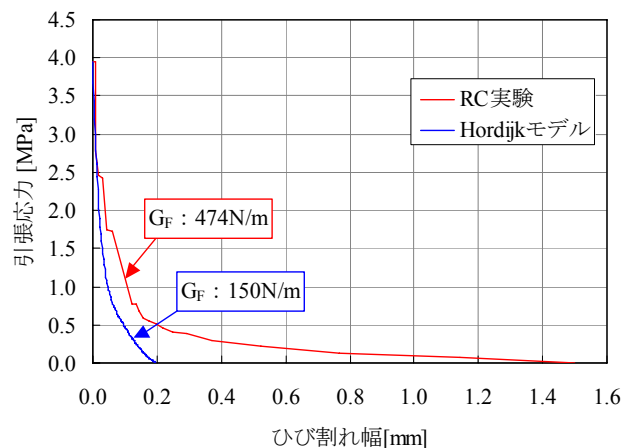


図-8 RC の引張軟化曲線

Fig.8 Tension softening curve of RC

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], σ_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-9 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³⁾による引張軟化曲線を合わせて示す。

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。

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

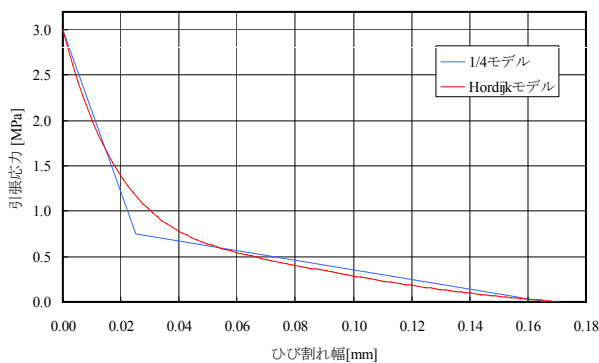


図-9 Hordijk モデルと 1/4 モデルによる引張軟化曲線

Fig.9 Model of tension softening curve

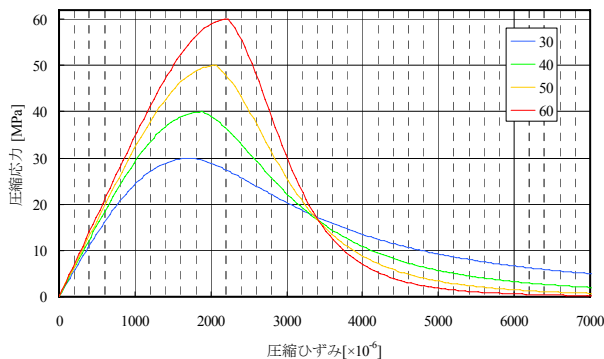


図-10 Thorenfeldt モデルによる圧縮応力-ひずみ曲線

Fig.10 Compression model of concrete

$$n = 0.8 + \frac{f_c'}{17}, \quad k = \begin{cases} 1 & 0 \leq \varepsilon_c' \leq \varepsilon_p' \\ 0.67 + \frac{f_c'}{62} & \varepsilon_c' > \varepsilon_p' \end{cases}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_p' = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{f_c'}{1000E_c}$$

ここで、 f_c' : 圧縮強度[MPa], σ_c' : 圧縮応力[MPa], σ_p' : ピークひずみ, ε_c' : 圧縮ひずみ, E_c : ヤング係数[GPa]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-10 に示す。なお、ヤング係数は 28, 31, 33, 35GPa とした。

4.2 解析結果

図-13 に解析結果と実験結果の荷重-試験体中央たわみ関係を合わせて示す。

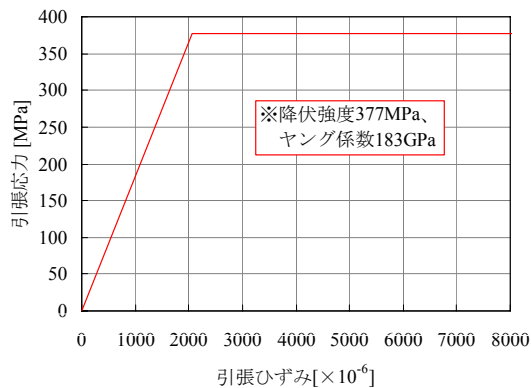


図-11 鉄筋モデル

Fig.11 Reinforcement model

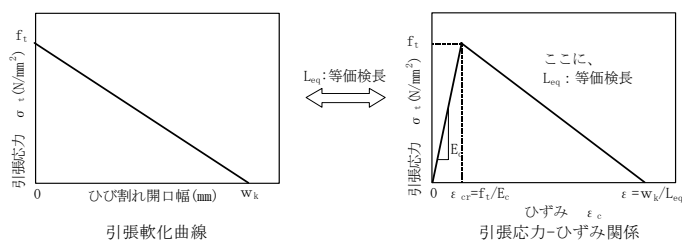


図-12 引張軟化曲線と引張応力-ひずみ曲線の関係

Fig.12 Image of tension softening curve

表-5 各荷重[kN] (赤字は解析値)

Table.5 Each event load

	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 : 鉄筋降伏荷重
 P_{max} : 最大荷重

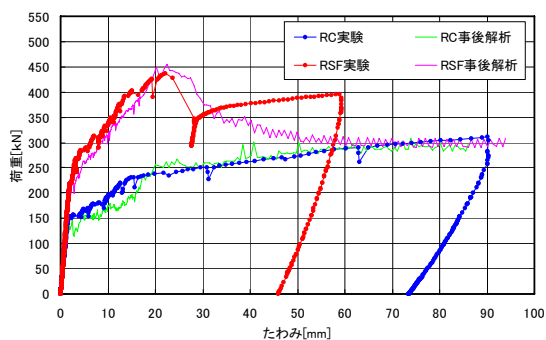


図-13 解析結果

Fig.13 Analysis results

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。

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-14~15 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 セグメントの載荷試験を行った結果, 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 SF 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入力した 3 次元非線形有

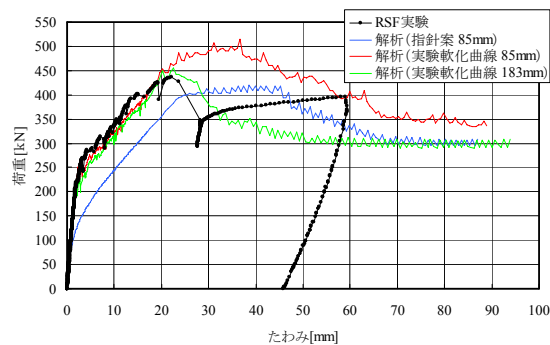


図-14 RSF 線載荷のパラメータ解析結果

Fig.14 Analysis results of RSF specimen

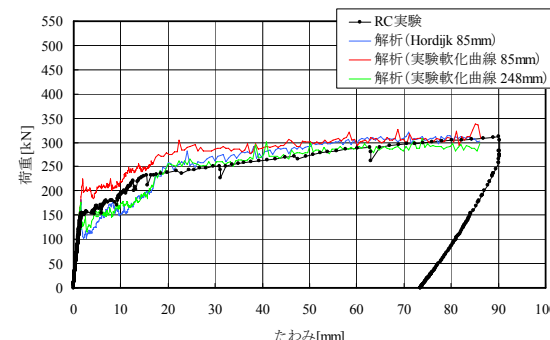


図-15 RC 線載荷のパラメータ解析結果

Fig.15 Analysis results of RC specimen

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することが出来た。

謝辞

東京工業大学大学院の二羽淳一郎教授には, 載荷実験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) コンクリートライブラリー97 鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案), 土木学会, 1999
- 2) コンクリート工学, Vol.44, No.12, p.p.10~p.p15, 2006.12
- 3) Rokugo,K., Iwasa,M., Suzuki,T. and Koyangi,W. : Testing Method to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy, Balkema, pp.153-163, 1989