論文　高流動コンクリートマトリックスを適用した鋼繊維補強コンクリートの力学的特性

浦野　登志雄[*1]・山口　信[*2]・村上　聖[*3]・武田　浩二[*4]

要旨：繊維補強コンクリートは，コンクリートのひび割れ抑制効果，曲げ・引張強度の増加のほか，靭性の改善効果が顕著であることが特長である。耐衝撃性などに要求される高靭性を得るためには，繊維体積率をさらに大きくすることが有効であるが，繊維体積率の増加とともにコンクリートの流動性は著しく低下する。本研究は，高い繊維体積率による高強度・高靭性の鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を得ることを目的に，高流動コンクリートマトリックスを適用した SFRC の力学的特性について実験的に調べた。その結果，曲げ靭性に関して既往の評価式を上回る結果が得られた。また，圧縮靭性も大きく増加することが明らかとなった。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート，力学的特性，曲げ強度，曲げタフネス，高炉スラグ微粉末

1. はじめに

繊維補強コンクリートの耐衝撃性に要求される高靭性を得るためには，繊維のアスペクト比を可能な範囲で大きくし，さらに高い繊維体積率を実現することが重要である[1)]。しかし，これらの因子は繊維補強コンクリートの流動性を著しく低下させるという欠点を有している。鋼繊維は，他の新素材繊維に比較して安価であり，構造物への使用実績も多いが，筆者らの既往の研究によると，通常のコンクリートマトリックスに対して，スランプ 18±2.5cmを目標にアスペクト比 50 の鋼繊維を用いて試し練りを行った結果，適切な流動性を得るための繊維体積率の上限は 2.0%程度であった[2),3)]。

一方，V.S.Parameswaranらは，型枠に敷き詰めた鋼繊維の上からスラリーを圧入して製造するSIFCON（Slurry Infiltrated Fibrous Concrete）を提案しており，これによると，10.0%を超える高い繊維体積率の鋼繊維補強コンクリート（以下，SFRCと略記する）の製造が可能であることを示している[4)]。しかし，この方法は製造工程が煩雑であることが難点であると考えられる。

筆者らは，高流動コンクリートの使用材料（粉体系混和材と高性能AE減水剤）に準じたコンクリートマトリックスの調合を工夫することにより，合成繊維のように高アスペクト比の繊維を高い繊維体積率で混入した場合でも適切な流動性を示す繊維補強コンクリートが得られることを示した[5)]。このことから，同調合をSFRCに適用することで，高い繊維体積率による高強度・高靭性のSFRCが得られる可能性がある。そこで，本研究では高流動コンクリートマトリックスを適用したSFRCの各種力学的特性について実験的検討を行った。

2. 実験方法

表－1 に使用材料を示す。コンクリートマトリックスには，高流動性の付与を目的に高炉スラグ微粉末と高性能 AE 減水剤を併用し，セメントにはプレキャストコンクリートへの適用を想定して早強ポルトランドセメントを用いた。鋼繊維は，シリーズ A およびシリーズ B で

表－1　使用材料

	シリーズA	シリーズB
セメント	早強ポルトランドセメント 密度:3.13g/cm^3	
細骨材	砕砂 表乾密度:2.62g/cm^3 吸水率:2.24% 最大寸法:2.5mm 粗粒率:2.82	川砂 表乾密度:2.63g/cm^3 吸水率:2.69% 最大寸法:2.5mm 粗粒率:2.58
粗骨材	砕石6号 表乾密度:2.95g/cm^3 吸水率:1.27% 最大寸法:15mm 実積率:56.3%	
混和材	高炉スラグ微粉末 密度:2.89g/cm^3 比表面積:6140cm^2/g	
混和剤	高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系	
短繊維	鋼繊維 異形カットワイヤー 寸法($d_f \times l_f$):0.6×25mm	鋼繊維 異形カットワイヤー 寸法($d_f \times l_f$):0.6×30mm ポリプロピレン繊維 寸法($d_f \times l_f$):1.0×30mm

*1 八代工業高等専門学校　土木建築工学科　准教授　工博　(正会員)
*2 熊本大学大学院　自然科学研究科　大学院生　工修　（正会員）
*3 熊本大学大学院　自然科学研究科　教授　工博　(正会員)
*4 熊本大学大学院　自然科学研究科　助教　工博　(正会員)

それぞれアスペクト比 41.7（$d_f \times l_f$=0.6×25mm），50（$d_f \times l_f$=0.6×30mm）の異形カットワイヤーを用いた。なお，シリーズBでは，比較のためにポリプロピレン繊維（$d_f \times l_f$=1.0×30mm，引張強度：約 300 N/mm^2，ヤング係数：約 5kN/mm^2）を使用した。

表－2 に使用調合を示す。コンクリートマトリックスの調合は既報[5)]で示したポリエチレン繊維補強コンクリートの曲げ靭性が最大となる最適調合を参考に決定した。本研究では，鋼繊維体積率(V_f)は混練が可能な範囲でV_f=3.0，5.0，7.0%の 3 水準とした。

混練には容量 55 リットルの強制 2 軸ミキサーを使用し，最初にセメント，高炉スラグ微粉末および骨材を 15 秒間空練り後，水および高性能 AE 減水剤を投入して 90 秒間混練，その後鋼繊維を投入して 3 分間練り混ぜた。

試験体は，圧縮強度試験および引張強度試験に φ100×200mm の円柱供試体を各 3 体，曲げ強度試験に 100×100×400mm の角柱供試体を各 3 体（シリーズ A の 3 等分点曲げ載荷試験については各 4 体）作製した。圧縮強度試験では圧縮応力－ひずみ曲線を測定し，圧縮強度およびヤング係数を求めた。引張強度試験（割裂引張強度試験）では最大荷重，曲げ強度試験では荷重－スパン中央変位曲線を測定し，引張強度，曲げ強度，曲げタフネス及び換算曲げ強度を求めた。ここで，曲げタフネスの測定は JCI 規準「繊維補強コンクリート曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」に準じて限界変位をスパンの 1/150（スパン中央変位 2mm）とした。以上の供試体は，材齢 14 日まで標準養生を行った。圧縮強度試験と引張強度試験は，供試体を養生水槽から取り出して湿潤状態で直ちに試験を実施したが，曲げ強度試験については，供試体へ変位測定治具を接着するため，室温 20℃の試験室内に気中放置して 2 日後に試験を実施した。

本研究では，SFRCの力学的特性を既往の研究結果[2),3)]と比較するため，曲げ強度試験は既往の研究と同じ 3 点曲げ載荷とした。なお，シリーズAでは 3 点曲げ載荷による試験結果と比較するため，JCI規準に基づいて 3 等分点曲げ載荷試験も併せて実施した。

3. 実験結果及び考察

3.1 SFRC の流動性及び各種力学的特性

写真－1 にマトリックスコンクリートのスランプフロー試験結果を示す。マトリックスコンクリートのフレッシュ特性は，練り上がり温度が 17℃でスランプフローが 605mm，500mm フロー到達時間が 3.5 秒であった。

本調合による SFRC のスランプの測定値を**表－2** に併記している。また，シリーズ A について，スランプ試験結果を**写真－2，3，4** に示す。その結果，高い繊維体積率に起因して一様にスランプは小さくなっており，特に

表－2　使用調合

	V_f (%)	l_f (mm)	W/B (%)	s/a (%)	Sg/B (%)	Sp/B (%)	W (kg/m^3)	Slump (cm)	Air (%)
A	0	—	33	65	50	0.3	325	—	2.0
	3.0	25				0.3		19.5	4.1
	5.0					0.35		17.0	4.8
	7.0					0.35		0	3.8
B	5.0	30	33	65	50	0.5	325	7.5	—
	7.0					0.35		0	—
	7.0-PFRC	30				0.35		2.5	3.5

* V_f：繊維体積率，W/B：水結合材比，s/a：細骨材率，
Sg：高炉スラグ微粉末，Sp：高性能AE減水剤，
W：単位水量

写真－1
(マトリックスコンクリート)

写真－2
(V_f=3.0%，l_f=25mm)

写真－3
(V_f=5.0%，l_f=25mm)

写真－4
(V_f=7.0%，l_f=25mm)

V_f=7.0%ではA，B両シリーズともにゼロスランプとなった。また，V_f=5.0%（繊維長 30mm）の調合で，高性能AE減水剤のやや過剰な添加により結合材ペーストにわずかな分離が認められたが，その他の調合では材料分離は認められず，どの調合についても振動締め固めを行うことで密実な供試体を作製することができた。これらの結果から，本調合によるSFRCがプレキャストコンクリートとして有用であると考えられる。

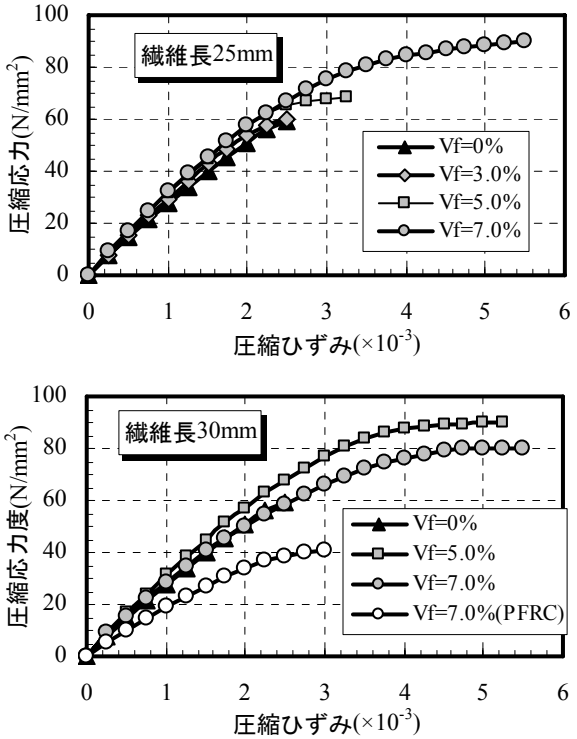
表－3 に各種強度試験結果，**図－1** に圧縮応力－ひずみ曲線の測定結果，**図－2** に曲げ荷重－スパン中央変位曲線の測定結果をそれぞれ示す。

圧縮強度は，鋼繊維無混入のマトリックスコンクリートの供試体と比較して，V_f=5.0%以上で大きく増加している。**図－1** より，特にV_f=7.0%では圧縮強度時におけるひずみ度が鋼繊維無混入の供試体に比べて 2 倍以上となっており，鋼繊維によるコンファインド効果に起因し

表－3　強度試験結果

	V_f (%)	l_f (mm)	F_c (N/mm^2)	E (kN/mm^2)	F_t (N/mm^2)	F_b (N/mm^2)	T_b (kN・mm)	F_b' (N/mm^2)
A	0	—	61.5	28.5	3.39	4.08 [3.46]	—	—
	3.0	25	60.4	30.5	8.38	10.4 [8.74]	36.8 [48.6]	8.06 [7.29]
	5.0		68.2	32.4	12.7	16.6 [14.3]	63.3 [81.5]	14.5 [12.2]
	7.0		91.9	32.7	16.4	20.6 [16.7]	78.3 [96.1]	17.3 [14.4]
B	5.0	30	90.0	30.2	14.5	24.5	95.2	21.4
	7.0		79.6	28.0	17.3	26.4	108	24.3
	7.0-PFRC		40.6	19.9	6.26	7.91	31.6	7.10

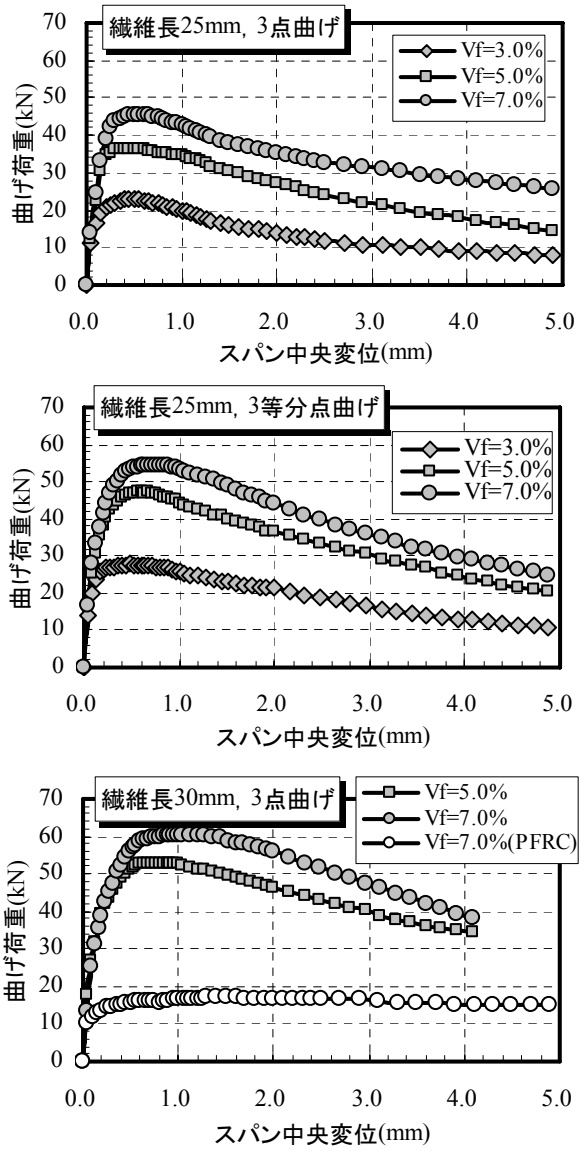
* V_f：繊維体積率，l_f：繊維長さ，F_c：圧縮強度，E：ヤング係数，F_t：引張強度，
F_b：曲げ強度，T_b：曲げタフネス(限界変位2.0mm)，F_b'：換算曲げ強度
※表中[　]内の値は3等分点曲げ載荷による試験結果を示す



図－1　圧縮応力－ひずみ曲線の測定結果

て SFRC の圧縮靭性が大きくなるものと思われる。これに対して，ヤング係数は鋼繊維の混入により若干の増加傾向が認められるが大差ないことが示された。

引張強度，曲げ強度，曲げタフネス及び換算曲げ強度は，いずれも繊維体積率が大きくなると増加しており，V_f=7.0%（繊維長 30mm）では，引張強度が約 17N/mm^2，曲げ強度が約 26N/mm^2，曲げタフネスが約 110kNmmと極めて高い強度と靭性を有するSFRCが得られている。また，曲げ載荷形式の違いによる影響については，3 等分点曲げ載荷よりも 3 点曲げ載荷の方が曲げ強度，換算曲げ強度ともに大きな値が得られた。これに対して曲げタフネスは，3 点曲げ載荷の方が小さな値となっており，曲げ強度とは逆の傾向を示している。



図－2　曲げ荷重－スパン中央変位曲線の測定結果

ポリプロピレン繊維補強コンクリート（PFRC）は，圧縮強度とヤング係数はともに大きく低下した。これは繊維のヤング係数がマトリックスコンクリートよりも極

めて小さいことが影響しているものと思われる。引張強度と曲げ強度については, SFRCよりも補強効果は小さいが，マトリックスコンクリートのひび割れ発生後の繊維によるブリッジング作用により，曲げタフネスはV_f=3.0%（繊維長 25mm）のSFRCに近い値が得られた。

3.2 各種力学的特性の評価

本節では, 本調合を適用したSFRCの各種力学的特性に関して，既報[2),3)]のSFRCとの比較による定量的な評価を試みた。**表－4** に本調合によるSFRCと既報のSFRCの使用材料及び調合の違いを示す。本調合は，使用する鋼繊維は同一であるが，コンクリートマトリックスに高炉スラグ微粉末及び高性能AE減水剤を用いており, 繊維体積率がV_f=3.0, 5.0, 7.0%と高くなっている点が既報のSFRCと大きく異なっている。

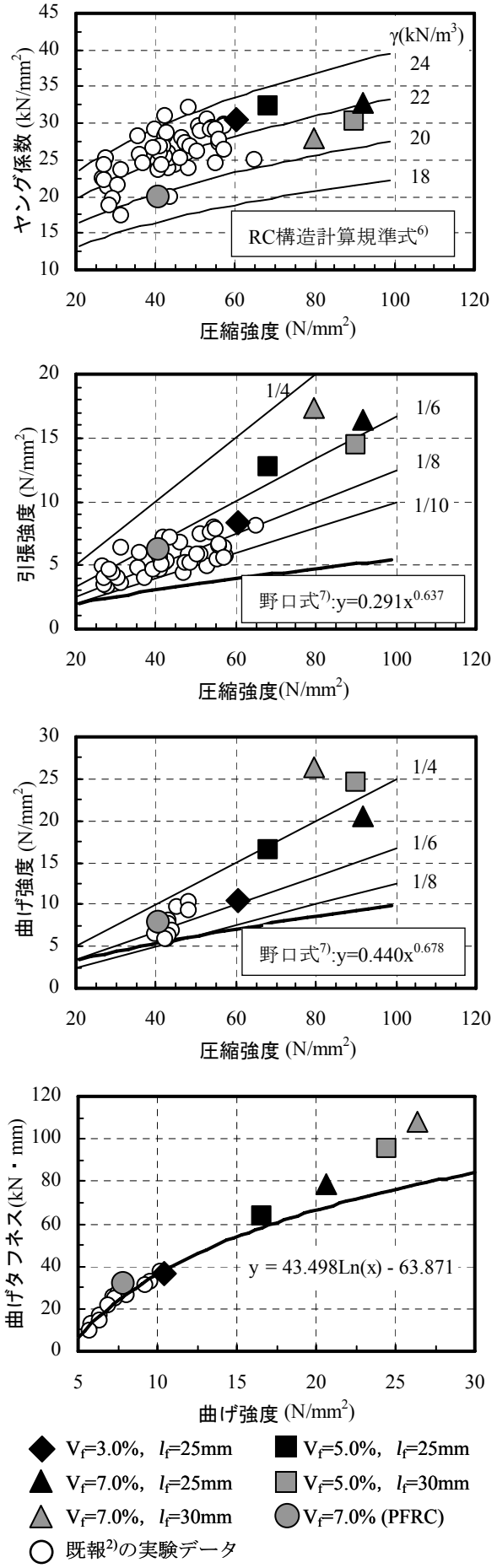
図－3 に SFRC の各種力学的特性の関係を示す。圧縮強度とヤング係数の関係に関して，本調合はモルタルリッチなコンクリートマトリックスを使用しているが，SFRC のヤング係数は既報の SFRC とほぼ同様の傾向を示している。

引張強度は，V_f=5.0%以上の高い繊維体積率で圧縮強度の 1/6 以上，曲げ強度も同様に高い繊維体積率で 1/5～1/3 程度となっており，既報のSFRCと比較して相対的により高い力学的性状が得られていることが分かる。

曲げ強度と曲げタフネスの関係に関して，既報の実験データから評価した近似曲線と比較を行うと，同一曲げ強度で比較した場合, 本調合によるSFRCは曲げタフネスが大きくなる傾向にあることが分かる。これは，本調合では，高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により$Ca(OH)_2$が消費されることで安定なC-S-Hゲル及びC-A-Hゲルが生成され，組織が緻密化することで鋼繊維のインデント加工のくさび作用や摩擦付着作用が向上し，繊維界面の付着強度が増加することによって最大荷重以降に鋼繊維の引き抜けが生じにくくなるものと予測される。ただし，この件に関しては今後の検証が必要であると考えている。

表－4　既報[2)]のSFRCとの材料・調合の相違

項目	既報[2)]	本報
結合材	普通ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	早強ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ 高炉ｽﾗｸﾞ微粉末
混和剤	－	高性能AE減水剤
鋼繊維	異形ｶｯﾄﾜｲﾔｰ φ0.5×20mm φ0.6×25mm φ0.6×30mm φ0.7×50mm	異形ｶｯﾄﾜｲﾔｰ φ0.6×25mm φ0.6×30mm
V_f	0.7～2.88%	3.0, 5.0, 7.0%
W/B(W/C)	33～70%	33%
s/a	39～88%	65%



図－3　各種力学的特性の関係

3.3 各種力学パラメータの推定

既報[2),3)]では，アスペクト比，繊維体積率及びセメント水比の相互作用によって SFRC の力学パラメータが決定されることを明らかにした。また，その相互作用式として次式を提案し，重回帰分析によって各調合因子の回帰係数を求め，測定値と高い相関で SFRC の力学パラメータを推定することが可能であることを明らかにした。

$$F=A\cdot(l_f/d_f)^{\alpha}\cdot V_f^{\beta}\cdot(C/W)^{\gamma} \qquad (1)$$

ここに，F：力学パラメータ，l_f/d_f：アスペクト比，C/W：セメント水比，A，α，β，γ：回帰係数。

本報では，式(1)の更なる精度向上を目的に，セメント水比を圧縮強度に置き換え，再度回帰係数の重回帰分析を行った。以下にその相互作用式を示す。

$$F=A\cdot(l_f/d_f)^{\alpha}\cdot V_f^{\beta}\cdot F_c^{\gamma} \qquad (2)$$

ここに，F_c：圧縮強度。

表－5 に回帰係数の重回帰分析結果を示すが，本式は高い精度で既報の SFRC の力学パラメータの推定値を与える。以下では，式(2)の本調合による SFRC への適用性について検討した。**表－6** 及び**表－7** に力学パラメータの推定値と測定値を示す。**図－4** に本調合についての測定値に対する推定値の相対比を示す。

図より，ヤング係数は，$F_{cal.}/F_{exp.}$=0.9～1.1 の範囲内にあり，式(2)により良い精度が得られていることが分かる。

引張強度は，V_f=3.0%では良い一致を示しているが，V_f=5.0%以上では，全て測定値が推定値より大きな値となっている。この原因として，繊維体積率が大きくなると，割裂引張強度試験での最大荷重値の評価が難しくなることが考えられる。割裂試験終了後の供試体を観察すると，載荷板との接触部分が一定の幅で圧縮されており，供試体に圧縮応力が作用していることが推察されることから，高い繊維体積率を有する繊維補強コンクリートの引張強度を割裂引張強度試験により評価する場合は，試験方法についての検討が必要であるように思われる。

曲げ強度は，V_f=7.0%（繊維長 30mm）を除くと全て $F_{cal.}/F_{exp.}$=1.1 以上となっており，推定値が測定値を大きく上回っている。**表－5** の重回帰分析結果をみると，曲げ強度に対しては，回帰係数γの値が他に比べて大きく，圧縮強度の寄与が最も大きいことが分かる。本実験結果によれば，高い繊維体積率で繊維によるコンファインド効果と思われる圧縮強度の著しい増加が認められており，このことが式(2)による推定結果に大きく影響したものと考えられる。

表－5　式(2)における回帰係数の重回帰分析結果

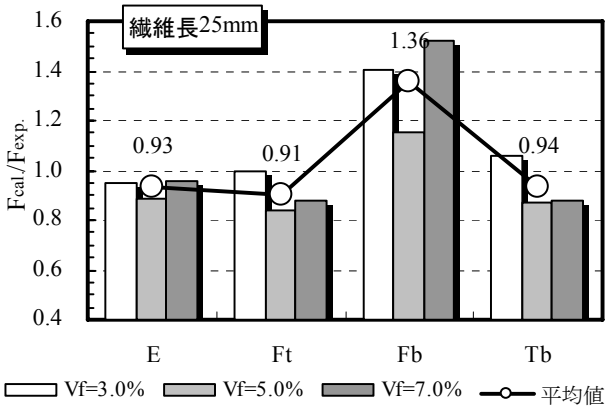
F	回帰係数				$F_{cal.}/F_{exp.}$	
	A	α	β	γ	平均値	変動係数
E (kN/mm^2)	19.8	-0.301	-0.092	0.39	0.9997	7.96%
F_t (N/mm^2)	0.115	0.358	0.333	0.63	1.004	10.3%
F_b (N/mm^2)	0.027	0.056	0.192	1.432	1.002	4.87%
T_b (kN・mm)	1.422	0.67	0.662	0.021	1.008	11.8%

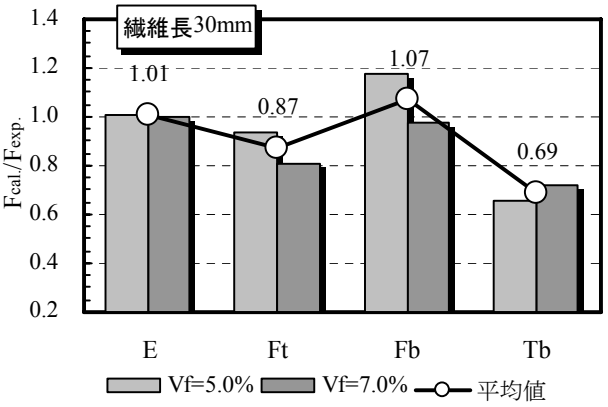
表－6　力学パラメータの推定値と測定値（シリーズ①）

	V_f=3.0%		V_f=5.0%		V_f=7.0%	
	$F_{cal.}$	$F_{exp.}$	$F_{cal.}$	$F_{exp.}$	$F_{cal.}$	$F_{exp.}$
E (kN/mm^2)	28.8	30.5	28.8	32.4	31.4	32.7
F_t (N/mm^2)	8.35	8.38	10.7	12.7	14.4	16.4
F_b (N/mm^2)	14.6	10.4	19.2	16.6	31.3	20.6
T_b (kN・mm)	39.0	36.8	54.9	63.3	69.0	78.3

表－7　力学パラメータの推定値と測定値（シリーズ②）

	V_f=5.0%		V_f=7.0%	
	$F_{cal.}$	$F_{exp.}$	$F_{cal.}$	$F_{exp.}$
E (kN/mm^2)	30.4	30.2	28.1	28.0
F_t (N/mm^2)	13.6	14.5	14.1	17.3
F_b (N/mm^2)	28.7	24.5	25.8	26.4
T_b (kN・mm)	62.4	95.2	77.7	108





図－4　式(2)の本調合への適応状況

曲げタフネスに関しては，V_f=3.0%（繊維長 25mm）を除くと$F_{cal.}/F_{exp.}$=0.7～0.8 程度と，測定値が推定値を大きく上回っている。これは，先述と同様の理由により，最大荷重時以降で繊維の引き抜けが生じにくくなっているためであると考えられ, 本調合によるSFRCの曲げタフネスを精度良く推定するためには，高炉スラグ微粉末の使用による繊維とマトリックス界面の付着力向上の可能性について検証する必要がある。

4. まとめ

本研究では，高流動コンクリート仕様マトリックスを適用した SFRC の各種力学的特性に関して実験的検討を行った。その結果として，以下の知見が得られた。

(1)高流動コンクリート仕様マトリックスの SFRC への適用は，高い繊維体積率とそれに伴う引張・曲げ特性の向上に有効であり，特に曲げ靭性が顕著に増大する傾向が認められた。

(2)圧縮試験の結果，繊維体積率 5.0%以上で鋼繊維のコンファインド効果に起因するものと思われる圧縮強度の顕著な増加が認められた。また，最大荷重時の圧縮ひずみ度が鋼繊維無混入の供試体と比較して 2 倍以上となり，圧縮靭性が増加することが明らかとなった。

(3)本調合による SFRC のヤング係数，引張強度，曲げ強度及び曲げタフネスについて，既往の実験データに基づいたアスペクト比，繊維体積率及び圧縮強度をパラメータとする相互作用式により，各力学パラメータの推定値を計算した結果，ヤング係数については良い精度で推定することが可能であった。しかし，引張強度，曲げ強度及び曲げタフネスは，推定値の精度が悪く，その推定にあたっては，これらの力学的特性に及ぼす影響因子について検証が必要である。

謝辞

実験にあたり，熊本大学工学部技術専門職員甲斐定夫氏，熊本大学大学院生の津田智宏氏，八代高専卒研生の京極竜之介，森　健 諸氏のご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 童　偉光，村上　聖，三井宜之，小川洋介：新素材繊維補強コンクリートの耐爆性状に関する実験的研究，セメント・コンクリート論文集，No.58，pp.442-447，2005.2

2) 村上　聖，浦野登志雄，三井宜之：鋼繊維補強コンクリートの力学パラメータに及ぼす調合因子の相互作用の定量分析，コンクリート工学論文集，第 7 巻・第 1 号，pp.23-30，1996.1

3) 浦野登志雄，村上　聖，三井宜之：鋼繊維補強コンクリートの力学特性に及ぼす調合因子の相互作用，セメント協会第 48 回セメント技術大会講演集，pp.706-711，1994.5

4) V. S. Parameswaran et al. : Toughness of Slurry Infiltrated Fibrous Concrete, Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, pp.43-59, 1994

5) 村上　聖，三井宜之，浦瀬　誠，元村春雄：合成繊維補強コンクリートの最適調合と各種力学的特性，セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.737-743, 2001.2

6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計法－，pp.6-7，1999

7) 野口貴文ほか：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学的特性の関係，日本建築学会構造系論文集，No.472，pp.11-16，1995.6