[58]　鋼繊維補強コンクリートの標準調合に関する研究

正会員　友沢史紀（建設省建築研究所）
正会員　福士　勲（住宅都市整備公団）
正会員○田中　斉（建設省建築研究所）
安田正雪（建設省建築研究所）

1.はじめに

鋼繊維補強コンクリート（以下，ＳＦＲＣと略記）を実際の構造物に利用していくためには，その力学的性質や構造物としての性能を明らかにする必要があることはもちろんであるが，一方，施工性が良く均質で密実なＳＦＲＣが得られるような調合方法を明らかにすることも不可欠である。また，ＳＦＲＣの諸性質を検討するためにも一定のルールに従った調合定め方による各種調合のＳＦＲＣの性質を比較検討する必要がある。このような目的で建築構造物を対象とする軟練りのＳＦＲＣの標準的な調合を得るための実験研究を行い「繊維補強コンクリートに関するシンポジウム」（ＪＣＩ）に報告した。

本研究は，それに続くもので，粗骨材最大寸法，細骨材粗粒率を変化させたＳＦＲＣの標準的な調合について検討したものである。

なお，本研究は，日本建築学会材料施工委員会「スチールファイバーコンクリートの実用化に関する調査研究委員会」（委員長小倉弘一郎明大教授）の研究の一環として実施したものである。

2.研究計画

2.1 ＳＦＲＣの調合検討方法および実験計画

ＳＦＲＣの調合検討において硬化後の性質は，水セメント比および鋼繊維（以下ＳＦと略記）混入率によって代表するものと考え，ＳＦＲＣの均質性および適切なワーカビリチーが得られる調合を最適調合とし求めることとした。まだ固まらない状態でのＳＦＲＣの調合の評価条件は，ＳＦを混入しない通常のコンクリートと同様に下記のようにした。

ｉ）必要な流動性が得られること
ii）均一性が得られること（ＳＦの分散も含む）
iii）単位水量が少ないこと
iv）単位粗骨材量が多いこと（細骨材率が小さいこと）

表１　実験計画

要　因	水　　準
粗骨材最大寸法	20　15　mm
細骨材粗粒率	2.2，2.8，3.2
水セメント比	45　55　65　%
スランプ	8,12,15,18,21　cm
空気量	5％
ＳＦ混入率	0，0.5，1.0,1.5 %
ＳＦ寸法	0.5X0.5X30 mm
混和剤	ＡＥ減水剤

本研究では，表１に示す要因・水準を組合せて実験を実施した。実施にあたって，試し練りの調合は，既住の研究・報告およびコンクリートの調合に関する資料を参照し定めた。こうして得られたＳＦＲＣの調合をもとに練り混ぜを繰り返し，ＳＦＲＣの最適調合を求めることとした。なお，ＳＦＲＣのワーカビリチーの評価は，目視によりプラスチシチー，分離性状およびＳＦの分散などを観察して行った。

2.2 使用材料

ｉ）セメント　普通ポルトランドセメント
ii）骨　材　粗骨材　砕石2005（実積率59.5，61.8%）　砕石1505（実積率59.5%）
　　細骨材　鬼怒川産砂および大井川水系陸砂（粗粒率3.2,2.8,2.2 ）
iii）練り混ぜ水　上水道水
iv）ＳＦ　薄板せん断法による波形タイプ（寸法：0.5 ×0.5 ×30mm ,引張強さ：70kg／mm級）
v）混和剤　ＡＥ減水剤標準形（ポゾリスNo.70）および空気量調整剤（適宜使用）

2.3 ＳＦＲＣの練り混ぜ

ＳＦＲＣの練り混ぜは，「繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準」に規定される「試験室における繊維コンクリートの作り方」に準じて行った。ＳＦＲＣは，可傾式ミキサに材料を投入し，マトリクスコ

ンクリートの練り混ぜを行ない，ミキサを回転させたままシュートを用いてＳＦを分散投入しマトリクスコンクリート練り混ぜ開始から3.5 ～5 分間練り混ぜを行った。また，ＳＦを混入しない通常のコンクリートは，材料を投入し3.5 ～4 分間練り混ぜを行った。

3. 実験結果によるＳＦＲＣの調合の考察

本研究では，合計128 バッチのコンクリートの練り混ぜを行ってＳＦＲＣの最適調合を検討をした。表1の実験要因の組合せのうち，試し練りを行っていないものもあるが，以下に述べる図および考察では，それに近い組合せでの試験結果および既応の調合に関する資料をもとに適切と考えられる値を推定し用いた。

3.1 ＳＦＲＣのワーカビリチー

ＳＦＲＣのワーカビリチーの評価は，スランプおよび目視によって行った。硬練り，中練りのＳＦＲＣは通常のコンクリートとほぼ同様なワーカビリチーの評価が可能であるが，スランプ21cm，ＳＦ混入率1.5 %のような高スランプ，高ＳＦ混入率のＳＦＲＣは同じスランプの通常のコンクリートと比較しかなり軟かく分離の傾向がみられるようになり，目視によるワーカビリチーの評価とスランプ値が一致しなくなる。ＳＦ混入率の大きい軟練りのＳＦＲＣは，スランプ値から推量される以上の流動性があるものと思われ，このようなＳＦＲＣに対しては，スランプだけでその流動性やワーカビリチーを評価することは問題があると思われる。

また，ＳＦ混入率の大きい軟練りのＳＦＲＣは，単位水量および細骨材率が著しく大きくなることから，その水密性，収縮性状，耐久性等の品質について別途検討する必要があると考えられる。

3.2 単位水量について

粗粒率2.8 の細骨材および最大寸法15,20mm の砕石を用いた場合のＳＦＲＣの単位水量とＳＦ混入率の関係を図１に示す。図からわかるようにＳＦＲＣの単位水量は，ＳＦ混入率の増加に伴い直線的に増加する。ただし，スランプ，水セメント比がともに大きいＳＦＲＣは，ＳＦ混入率の増加の割合がやや大きい。また粗骨材の最大寸法，細骨材の粗粒率，水セメント比が変化した場合のＳＦＲＣの単位水量の変化量は，通常のコンクリートの場合とほぼ同様である。以上より，通常のコンクリートの単位水量に対するＳＦＲＣの単位水量の増加率はおよそ下式の様に表わすことができる。

$$Wi = (0.46S\ell + 11.3)\ Vf$$

Wi ：単位水量の増加率（%）
Sℓ：スランプ（cm）
Vf：ＳＦ混入率（%）

3.3 細骨材率について

粗粒率2.8 の細骨材および最大寸法15,20mm の砕石を用いた場合のＳＦＲＣの最適細骨材率とＳＦ混入率の関係を図２に示す。ＳＦＲＣの最適細骨材率は，ＳＦ混入率の増加に伴い直線的に増加する。スランプ，水セメント比がともに，大きいＳＦＲＣは，ＳＦ混入率の増加に伴う細骨材率の増加の割合がやや大きい。また，粗骨材の最大寸法，細骨材の粗粒率，水セメント比，スランプが変化した場合のＳＦＲＣの最適細骨材率の変化量は，通常のコンクリートの場合とほぼ同様である。

ＳＦＲＣは，ＳＦの混入によって単位水量が著しく増加するため，良好なワーカビリチーを確保するためには細骨材量を大幅に増す必要がある。ＳＦ混入率の増大に伴って最適細骨材率が大きくなるのは，このためである。

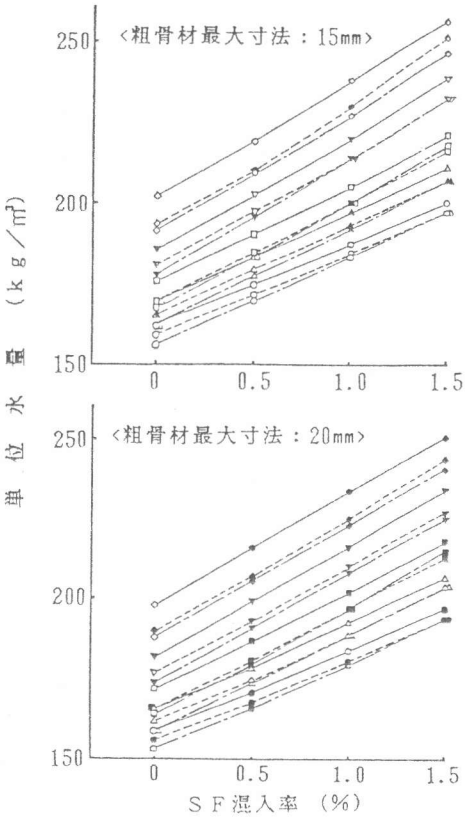
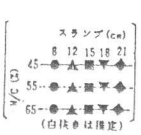


図１　単位水量とＳＦ混入率



4．ＳＦの仮想実積率

ＳＦを混入することによる単位粗骨材かさ容積の減少量から，ＳＦの仮想実積率を次式により定義した。

$$\text{SFの仮想実積率}(\%)=\frac{\text{SFの絶対容積}\ (\ell\ m^3)}{\text{単位粗骨かさ材容積の減少量}\ (\ell\ m^3)}$$

このようにして求めたSFの仮想実積率とSF混入率の関係を図3に示す。これによるとSFの仮想実積率は，スランプ15cm以下で6.0 ～7.0 %，スランプ18cmで5.5 %程度およびスランプ21cmで4.5 ～5.0 %となりスランプが大きくなるとSFの仮想実積率は若干小さくなる。

図3に示したような，SFRCの調合条件に応じたSFの仮想実積率が与えられると，通常のコンクリートについての最適な粗骨材かさ容積から，SFのみかけのかさ容積を減少することにより，容易にSFRCの最適な単位粗骨材かさ容積を求めることができる。

SFRCの調合設計にあたって，SFの混入率と仮想実積率によって単位粗骨材かさ容積が求まり，単位水量が別に与えられれば，調合指針による通常のコンクリートの調合手順と同様にSFRCの調合を定めることができる。また，SFの仮想実積率というパラメータをSFの形状，寸法などによって求めることができれば容易にSFRCの最適な調合を定めることが可能となる。

5. SFRCの単位水量および細骨材率の標準値

実験結果に基づき，各種の粗骨材最大寸法，細骨材粗粒率，水セメント比，スランプおよびSF混入率の組合せに対応するSFRCの単位水量および細骨材率の標準的な値を求めた。これを表2．3に示す。

6. まとめ

使用材料や調合条件の種々の組合せに対して128 バッチのコンクリートの練り混ぜ実験を行いSFRCの最適調合について以下の結論を得た。

i）SFRCの単位水量および細骨材率は，SF混入率の増加に伴ってほぼ直線的に増加する。

ii）SFRCの粗骨材の最大寸法，細骨材の粗粒率，セメント比，スランプが変化した場合の単位水量および最適細骨材率の変化量は，SF混入率1.5 %程度までは，通常のコンクリートの場合とほぼ同様である。

iii）SF混入率の大きい軟練りのSFRCは，流動性が通常のコンクリートと若干異なり，スランプだけで流動性を評価することは困難であり，また，単位水量，細骨材率が著しく大きくなるので，力学的性質以外に硬化後のSFRCの乾燥収縮，耐久性等の品質についての検討が必要になると考えられる。

iv）SFの仮想実積率を考案し，この仮想実積率からSFのかさ容積を求め，粗骨材の標準かさ容積と同一に扱うことによってSFRCの最適調合を求める方法の可能性を検討した。

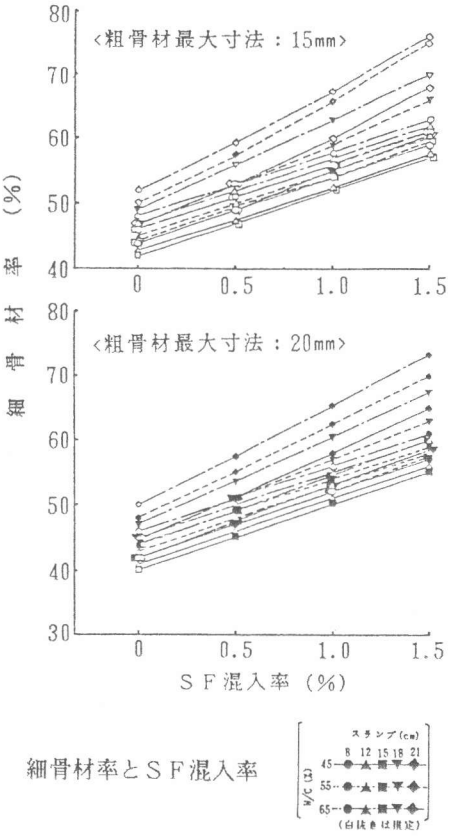


図2　細骨材率とSF混入率

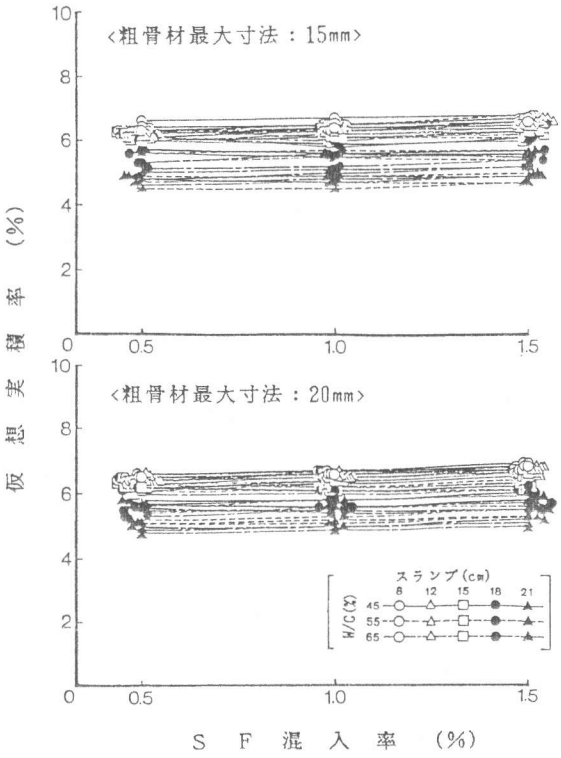


図3　SFの仮想実積率とSF混入率

表2　ＳＦＲＣの単位水量の標準値（Kg／m³　）

鋼繊維混入率 (%)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	細骨材最大寸法15mm 細骨材粗粒率 3.2	2.8	2.2	細骨材最大寸法20mm 細骨材粗粒率 3.2	2.8	2.2
0.5	45	8	172	174	179	169	171	175
		12	181	183	187	177	179	183
		15	188	190	195	185	187	191
		18	200	202	206	196	199	202
		21	217	219	224	214	216	220
	55	8	169	171	176	166	168	172
		12	177	179	183	173	175	179
		15	182	184	190	179	181	186
		18	195	197	201	191	193	197
		21	209	210	215	205	207	211
	65	8	167	169	174	164	166	170
		12	175	177	182	172	174	178
		15	181	183	188	178	180	184
		18	193	195	199	189	191	194
		21	207	209	214	204	206	210
1.0	45	8	185	187	192	182	184	188
		12	195	197	201	191	193	197
		15	203	205	210	200	202	206
		18	218	220	224	213	216	220
		21	234	238	242	231	234	238
	55	8	182	184	189	166	181	185
		12	191	193	197	173	189	193
		15	198	200	206	179	197	202
		18	212	214	218	191	210	214
		21	228	231	235	205	225	229
	65	8	181	183	188	164	180	184
		12	190	192	197	172	189	193
		15	198	200	205	178	197	201
		18	211	214	218	189	208	212
		21	225	227	232	204	223	227
1.5	45	8	198	200	205	195	197	201
		12	209	211	215	205	207	211
		15	219	221	226	216	218	222
		18	236	238	242	231	234	238
		21	253	256	260	248	251	256
	55	8	195	197	203	192	194	199
		12	205	207	211	202	204	208
		15	214	216	222	211	213	218
		18	230	232	237	225	227	231
		21	249	251	255	242	244	248
	65	8	195	197	202	192	194	198
		12	205	207	212	202	204	208
		15	216	218	223	213	215	219
		18	229	232	236	223	225	229
		21	246	246	251	239	241	245

表3　ＳＦＲＣの細骨材率の標準値（%）

鋼繊維混入率 (%)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	細骨材最大寸法15mm 細骨材粗粒率 3.2	2.8	2.2	細骨材最大寸法20mm 細骨材粗粒率 3.2	2.8	2.2
0.5	45	8	52.5	49.0	44.0	50.0	47.0	43.0
		12	51.5	47.5	43.0	49.0	46.0	42.0
		15	50.5	47.0	42.0	48.0	45.0	41.0
		18	53.5	49.0	44.0	51.0	47.0	43.5
		21	56.5	53.0	48.0	54.0	51.0	47.0
	55	8	54.5	51.0	46.0	52.0	49.0	45.0
		12	53.5	50.0	45.0	51.0	48.0	44.0
		15	52.5	49.0	44.0	50.0	47.0	43.0
		18	57.0	53.0	48.0	54.0	51.0	47.0
		21	61.0	57.5	53.0	58.0	55.0	51.0
	65	8	56.5	53.0	48.0	54.0	51.0	47.0
		12	55.5	52.0	47.0	53.0	50.0	46.0
		15	54.5	51.0	46.0	52.0	49.0	45.0
		18	59.5	56.0	50.5	57.0	53.5	49.5
		21	63.0	59.5	54.5	60.5	57.5	53.5
1.0	45	8	57.5	54.0	49.0	55.0	52.0	48.0
		12	56.5	52.5	48.0	54.0	51.0	47.0
		15	55.5	52.0	47.0	53.0	50.0	46.0
		18	58.5	55.0	49.5	56.0	53.0	49.0
		21	63.5	60.0	55.0	61.0	58.0	54.0
	55	8	59.5	56.0	51.0	57.0	54.0	50.0
		12	58.5	55.0	50.0	56.0	53.0	49.0
		15	57.5	54.0	49.0	55.5	52.0	48.5
		18	63.0	59.0	54.0	60.0	57.0	53.0
		21	69.0	66.0	61.5	65.5	62.5	58.5
	65	8	61.5	58.0	53.0	59.0	56.0	52.0
		12	60.5	57.0	52.0	58.0	55.0	51.0
		15	60.0	56.5	51.5	57.5	54.5	50.5
		18	66.5	63.0	57.0	63.0	60.5	56.0
		21	71.0	67.5	62.5	68.5	65.5	61.5
1.5	45	8	62.5	59.0	54.0	60.0	57.0	53.0
		12	61.5	57.5	53.0	59.0	56.0	52.0
		15	60.5	57.0	52.0	58.0	55.0	51.0
		18	64.0	60.5	55.0	61.5	58.5	54.5
		21	71.0	68.0	62.0	68.0	65.0	61.0
	55	8	64.5	61.0	56.0	62.0	59.0	55.0
		12	63.5	60.0	55.0	61.0	58.0	54.0
		15	63.0	59.5	54.5	61.0	57.5	54.0
		18	70.0	66.0	61.0	66.5	63.0	60.0
		21	77.5	75.0	70.0	73.0	70.0	66.0
	65	8	66.5	63.0	58.0	64.0	61.0	57.0
		12	65.5	62.0	57.0	63.0	60.0	56.0
		15	65.5	61.0	57.0	63.0	60.0	56.0
		18	73.5	70.0	64.0	70.0	67.5	63.0
		21	79.5	76.0	70.5	76.5	73.5	69.5

条件

セメント：普通ポルトランドセメント　　混和剤：ＡＥ減水剤
粗骨材　：砕石2005　絶乾比重2.62　実積率61.8%　　Ｓ　Ｆ：0.5x0.5x30mm
　　砕石1505　絶乾比重2.62　実積率59.8%　　空気量：　5.0 %
細骨材　：川　　砂　絶乾比重2.61　粗粒率3.2.2.8.2.2

v）実験結果に基づき，ＳＦＲＣの最適な単位水量および細骨材率の標準値を示した。これによって所要のワーカブルなＳＦＲＣの調合を容易に求めることができる。

〈謝辞〉本研究の実施にあたり御助言頂いた材料施工委員会「スチールファイバーコンクリートの実用化に関する調査研究委員会」の委員の方々，実験の実施にあたり協力頂いた日曹マスタービルダーズ中央研究所中川氏，西条氏およびその他の方々に謝意を表します。

〈参考文献〉

1）「鋼繊維補強コンクリートの標準調合に関する研究」
友沢，田中　他　ＪＣＩ繊維補強コンクリートに関するシンポジウム　昭和59年2 月
2）「鋼繊維補強ＡＥコンクリートの配合参考表の一提案」
太田，小林　他　ＪＣＩ鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム1977.11
3）「所要のコンシステンシーを得るための鋼繊維補強コンクリート配合設計方法」
小林，岡村　土木学会論文報告集№239 号　1980.4
4）「スチールファイバー実用化に関する調査研究」日本建築学会　材料施工委員会第一分科会　1982.4
5）「スチールファイバーコンクリート用ファイバーの補強性能」
友沢，赤石　他　日本建築学会大会　昭和57年
6）「スチールファイバーコンクリート技術の現状」日本建築学会　昭和59年3 月
7）「繊維コンクリートの試験方法に関する基準」　日本コンクリート工学協会　昭和59年2 月
8）「コンクリートの調合設計・調合管理・品質検査指針案・同解説」　日本建築学会　昭和58年3 月
9）「スチールファイバーコンクリートの実用化に関する調査研究」　日本建築学会　昭和59年9 月