

## 鋼繊維と超早強セメントを用いた湿式吹付けコンクリートの物性と施工性

高 木 隼 二

福 光 健 二

(土木技術部)

森 山 謙 久

(土木技術部)

奈 良 禧 徳

## § 1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete, 以下 SFRC と呼ぶ) は鋼繊維の入らない従来のコンクリート (以下, プレーンコンクリートと呼ぶ) に比べ, 曲げ, 引張り, せん断などの諸強度や, 耐ひびわれ性, 凍結融解抵抗性, エネルギー吸収能などの諸性能などが大幅に向上するため, これまでのコンクリートの範疇を越えた新しい形の複合材料として, 今後の利用が期待されている. 一方, コンクリートの施工方法としての吹付けコンクリート工法は, “厳密な強度管理が可能な新しい湿式吹付け機” の出現により, 幅広い分野で用いられるようになってきた. 特に, 今後, 社会的要請から建造物に対する要求条件が複雑になるに従い, 吹付けコンクリート工法の有する “型枠が不用であること (または, 大幅に削減できること) や, 自由な曲面を容易に作りうること” などの特徴は, 一層その力を発揮するものと思われる.

もし, この吹付けコンクリート工法に SFRC を用いて円滑な施工を行なうことができれば, SFRC の物性と吹付けコンクリート工法の施工性という 2 つの特質を生かしたこの工法は, 各種構造物への幅広い適用が期待できる. 例えば, 建築関係では曲げ耐力やせん断耐力を生かした構造物の補修や補強への適用, 引張り耐力や曲面施工の容易さを生かしたシェル構造への適用などが考えられる. 一方, 土木関係では, 曲げ耐力や凍結融解抵抗性を生かした法面の保護工, せん断耐力やエネルギー吸収能を生かしたトンネル, 大地下空間 (石油備蓄用や地下発電所用) などのライニングへの適用などが考えられる.

以上述べた中でも, 特にトンネルライニングへの適用は関係諸方面の関心を集めている. それは, トンネル工学へ新しいページを加えるといわれる NATM (New Austrian Tunneling Method; 新オーストリア工法) において, せん断強度, エネルギー吸収能などの大きな吹

付けコンクリートが不可欠とされているためである<sup>1)</sup>. そして, NATM で用いられる吹付けコンクリートにおいては, 施工上の制約条件から, 吹付け後 1~2 日における早強性が特に必要とされている.

以上のような諸条件を勘案し, SFRC を用いた吹付けコンクリートについてその物性と施工性を検討した. そして, その適用対象の第 1 として NATM のライニングを考えた. そのため, 物性については高い早期強度を得ることを 1 つの目標とし, その目的を達するために種々に検討した結果, セメントに超早強ポルトランドセメントを用いた. また, 施工性については実際のトンネルにおいて実験施工を行ない, 各種の問題を検討した.

## § 2. 既往の研究

吹付けコンクリートについてはこれまで数多くのレポートが出されているが, 鋼繊維を混入した吹付けコンクリートについては 1973 年<sup>2)</sup>以降, いくつかのレポートが出されている. しかし, 研究としてまとまっているものは極めて少ない.

乾式吹付け機を用いて SFRC を吹いた Parker 他の実験<sup>3)4)</sup>では, 鋼繊維の半分以上がはね返ってしまい, 曲げ強度などの改善は見られなかった, と報告されている. また, 中原他は乾式吹付け機を用いて吹付けた SFRC の諸物性<sup>5)</sup>, および急結剤の混入可能な湿式吹付け機を用いた場合の諸物性<sup>6)</sup>を報告しており, 湿式吹付け機が SFRC の吹付けには適している, としている. また, 福井他は超速硬セメントを用いた鋼繊維補強吹付けコンクリートについて報告している<sup>7)</sup>.

以上の文献調査の結果, 次の点が明らかになった.

i) SFRC を吹くための吹付け機としては, 乾式吹付け機より湿式吹付け機の方が適している.

ii) 吹付け施工した SFRC についてのデータ (特に強度などの吹付け SFRC の物性に関するデータ) は,

ほとんど公表されていない。

ii)超早強ポルトランドセメントを用いた吹付けコンクリートは、これまで例がない。

以上の事実を踏まえて、超早強ポルトランドセメントを用いた吹付け SFRC の物性と施工性を総合的に検討することにした。

### § 3. 実験方法

実験は大きく実験Ⅰと実験Ⅱに分けることができる。実験Ⅰは、超早強ポルトランドセメントを用いた鋼繊維補強吹付けコンクリートの諸物性の把握を第一の目的とした。実験Ⅱは、実験Ⅰで得られた結果を踏まえて、実際に施工中のトンネル現場で SFRC 吹付け実験施工を行ない、主に施工性を検討した。

#### 3.1 実験の要因と水準

表一1に実験の要因と水準を示す。同表の水準欄の括弧内には、以下の本文で用いる略称を示した。吹付け機は湿式の2機種を用いた。セメントは超早強ポルトランドセメント（以下 UHP セメントと呼ぶ）を主に用い、比較のために普通ポルトランドセメント（以下 OP セメントと呼ぶ）を一部用いた。細骨材率は既往の研究を参考にして、S機の場合は主に70%、C機の場合は主に100%（モルタル）とした。なお、以下では特にことわらない限り、モルタル、コンクリートを総称してコンクリートと呼ぶ。鋼繊維（SF）はA繊維を標準とし、比較のために寸法形状の異なる2種類のものを用いた。繊維混入率（ $V_f$ ）はモルタルやコンクリートなどのマトリックスの外割り容積比で表わし、実用上の限界混入率である2%vol. までとした。供試体は吹付けによるもの（以下、吹付け SFRC と呼ぶ）の他に、品質管理方法を検討する目的で、吹付ける前の SFRC を用いて鋼製型枠に打設した供試体（以下、打込み SFRC と呼ぶ）も作製した。試験材令は、初期材令として NATM の施工上で大きな意味を有するとされる材令2日、標準材令として4週、長期材令として13週および1年半とした。

#### 3.2 使用した材料

材料は骨材以外は実験Ⅰ・Ⅱを通して共通である。セメントは日本社製の UHP セメントと OP セメントを用いた。骨材は実験Ⅰでは粗骨材が15mm以下の碎石（F. M. =6.20）、細骨材が2.5mm以下の川砂（F. M. =2.73）、実験Ⅱでは粗骨材が10mm以下の碎石（F. M. =5.53）、

要 因	水 準
吹 付 け 機	S機, C機
セ メ ン ト	超早強ポルトランドセメント (UHP セメント) 普通ポルトランドセメント (OP セメント)*1)
細 骨 材 料	0.7*2) 1.0*3)
繊維の形状寸法	0.3 × 0.5 × 20mm: 細長比46 (A繊維) 0.35 × 0.5 × 15mm: 細長比32 (B繊維) 0.25 × 0.5 × 25mm: 細長比63 (C繊維)
繊維混入率 $V_f$ (% vol.)	0, 1.0, 1.5, 2.0
供試体作製方法	吹付け, 打込み
試 験 材 令	2日, 4週 13週*4) 1.5年*4)

\*1) 実験Ⅱにおいて (括弧内は略称)

\*2) 主にS機用の使用配合

\*3) 主にC機用の配合

\*4) 一部のものについてのみ試験

表一1 実験の要因と水準

細骨材は2.5mm以下の川砂（F. M. =2.53）を用いた。混和剤はNM社製の遅延型 AE 減水剤、またはK社製の高性能減水剤を、急結剤はNS社製の粉末型急結剤を用いた。なお、急結剤は吹付け SFRC にのみ用い、打込み SFRC には用いていない。SFは全てせん断ファイバーであり、A繊維（表一1参照）はNK社製、B繊維はSN社製、C繊維はSK社製である。

#### 3.3 使用した吹付け機

表一2に使用したS機（M社製、パッチ式）とC機（K社製、連続圧送式）の簡単な比較表を示す。

#### 3.4 プレーンコンクリートの示方配合

湿式吹付け機を用いる場合には、吹付け前のコンクリートのコンシステンシー（ここではスランプで表わす）が、その吹付け機に適したものでなければ、吹付け作業を行なうことができない。表一3にプレーンコンクリートの示方配合を示す。実験Ⅰでは、物性の把握を第一の目的としたので、水セメント比を一定とするために、全ての SFRC の配合を試しねりによって決定した。これに対して、実験Ⅱは施工性の検討を目的としたので、プレーンコンクリートの配合のみを試しねりによって決定し、それ以外の SFRC の配合は、生コンプラントで SFRC を製造する際に、プレーンコンクリートに所定の SF を加えたのち、水量を調節して所要のコンシステンシーを得ることにした。そのために、水セメント比は一定の値とはなっていない。なお混和剤として、S機用の配合には遅

吹付け機	施工能力* ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	実用的 スランブ ( $\text{cm}$ )	実用的な骨 材最大寸法 ( $\text{mm}$ )	実用的な 細骨材 率 (%)	実用的な織 維混入率 (% vol.)	急結剤添加方式
S	3~4	0~2	15	60~100	2.0	粉末急結剤を水に といてペースト状 にしたものを添加
C	4~6	6~12	15	60~100	2.0	粉末急結剤を直接 添加

\*) 普通のコンクリートを施工する場合の標準値

表一 2 実験に使用した湿式吹付け機

	吹付け機	セメント 種類	粗骨材の 最大寸法 ( $\text{mm}$ )	スランブ ( $\text{cm}$ )	空気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			
								水	セメント	細骨材	粗骨材
実 験 I	S	U H P	15	0~2	4	45	70	168	373	1243	550
	C		—	6~10	4	50	100	228	457	1531	—
実 験 II	S	U H P	10	0~2	4	50	70	204	408	1150	520
			*1) O P (—)	10 (—)	0~2 (0~2)	4 (4)	55 (55)	70 (100)	195 (232)	354 (422)	1159 (1506)
	C	U H P	—	6~10	4	50	100	271	542	1371	—

\*1) 一部にモルタルをマトリックスとして用いたが、その配合を括弧内に示す。

注) スランブは荷卸し時の値を示す。また、混和剤としてS機には遅延型AE減水剤をセメント重量に対して0.25%、C機には高性能減水剤をセメント重量に対して0.6%添加した。

表一 3 プレーンコンクリートの示方配合

遅延型減水剤を、C機用の配合には高性能減水剤を用いた。

### 3.5 吹付け作業の概要

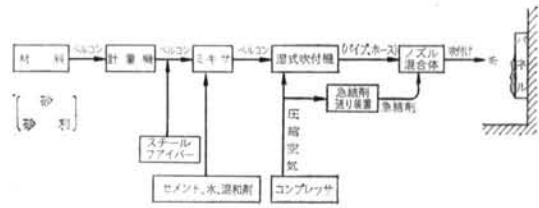
図一1に実験IにおけるC機の作業工程を示す。吹付け機までの材料運搬は全てベルトコンベアによる。図一2には、実験IIにおけるS機の作業工程を示す。SFRCの運搬は、S機の場合にはダンプトラックを、C機の場合には生コン車を用いた。吹付けを行なった地山は石灰岩で、比較的亀裂は多かったが、漏水などは少なく、岩質は安定していた。吹付け施工した面には支保工や矢板は入っていない。なお、トンネル内でのSFRCの吹付けにおいて、ノズルマンの防護に特別な配慮はしていない。

### 3.6 練りませ方法

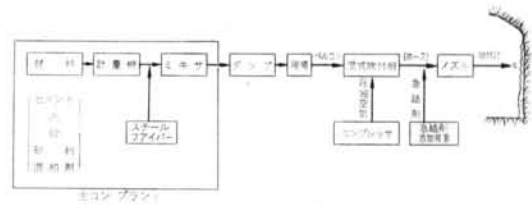
SFRCの練りませ方法を実験I、IIに分けて述べる。

#### 1) 実験I

練りませは、ハイスピードミキサ(容量 $0.15\text{m}^3$ 、回転数 $32\text{r.p.m}$ )を用いた。材料の投入順序は(細・粗骨



図一 1 C機の作業工程(実験I)



図一 2 S機の作業工程(実験II)

材) → (鋼繊維) → (セメント) → (空練り) → (水および混和剤) とし、鋼繊維はベルトコンベア上に手でほ

ぐして投入した。

## 2) 実験Ⅱ

練りまぜはレードミクストコンクリート製造工場で行なった。ミキサは強制式（容量 1.5 $\text{m}^3$ ）であり、材料投入順序は（細・粗骨材，セメント）→（空練り）→（水，混和剤）→（鋼繊維）とし、鋼繊維はミキサ上部投入口より投入した。1パッチの容量は練り上がり 0.5 $\text{m}^3$ とした。

### 3.7 供試体の作製方法および養生方法

図-3に実験Ⅰ，Ⅱに用いた吹付け SFRC パネルの作製方法を示す。パネルの型枠は木製で、その内法寸法は 10 $\times$ 50 $\times$ 50 $\text{cm}$ とした。なお、型枠を図-3のように立てた時の下方の側壁板は、はね返りがたまるのを防ぐために取り外してある。実験Ⅰでは、側壁吹付けを対象にして全てのパネルは図-3に示すように垂直に立て、吹付け供試体を作製した。実験Ⅱでは、側壁に取付けたパネルに吹付けて作製した供試体の他に、吹付け方向が強度に与える影響をみるために、一部のパネルをトンネルの天端に取り付け、垂直上向きに吹付けた供試体も作製した。パネルの吹付け施工後2日間は表面を濡れムシロで養生し、その後は室内に放置した。10 $\times$ 10 $\times$ 40 $\text{cm}$ の供試体は、試験材令の直前にダイヤモンドカッターで図-3に示すように切り出した。なお、打込み SFRC 供試体は、吹付ける前の SFRC（荷卸し地点の SFRC）を用い、JIS A 1132 に準じて作製し、試験材令まで標準水中養生とした。

### 3.8 試験項目ならびに試験方法

表-4に試験項目ならびに試験方法を示す。ただし、JIS および ASTM に規格がない試験項目、および特別の考慮を払ったものについては以下に述べる。なお、強度試験などにおける供試体数は、特にことわらない限り3個とした。

1) 圧縮強度：JIS A 1114 によった。荷重の方向は打込み SFRC では打込み方向と垂直に、また吹付け SFRC では、トンネルで実際に生じる応力状態を考慮して吹付け方向と垂直で、かつ重力方向と平行にした。なお、この試験においては供試体数は6個とした。

2) 曲げ強度・曲げ変形：曲げ強度は、JIS A 1106 によったが、荷重の方向は打込み SFRC では打込み方向と垂直に、また吹付け SFRC では上記と同じ配慮から、吹付け方向と平行（型枠面から加力）にした。また、曲げ変形は 10 $\times$ 10 $\times$ 40 $\text{cm}$  の供試体スパン中央部のたわみを 1/100 $\text{mm}$  の電気式ダイヤルゲージで測定し、X-Y

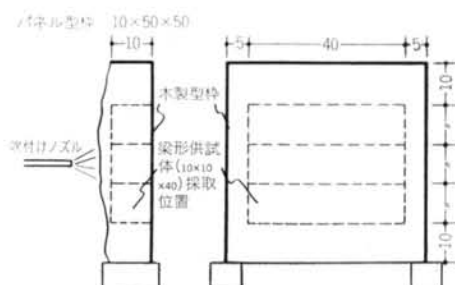


図-3 吹付け供試体の作製方法（単位 $\text{cm}$ ）

試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1114
曲げ強度	JIS A 1106
曲げ変形	*1)
せん断強度	2面せん断法
凍結融解抵抗性	ASTM C 666-75
コンクリートの中性化および繊維の発錆状態	*2)
繊維の付着率	*3)
繊維の配向性	*4)
SFRC のはね返り率	*5)
吹付け能力	*6)

\*1)～\*6)：本文参照

表-4 試験項目と試験方法

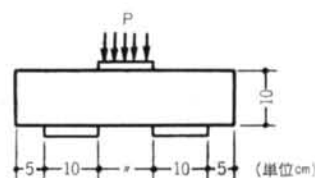


図-4 2面せん断試験方法（供試体寸法10 $\times$ 10 $\times$ 40 $\text{cm}$ ）

記録計を用いて記録した。

3) せん断強度：図-4に示す2面せん断法によった。荷重の方向は曲げ強度試験と同様にした。

4) コンクリートの中性化および繊維の発錆状態：10 $\times$ 10 $\times$ 40 $\text{cm}$ 供試体を室内および屋外に暴露し、材令1年で上記の観察を行なった。その方法は、以下のとおりである。まず、供試体の上下面にあてた鉄筋棒に加力して割裂破断させ、その破断面における中性化の程度をフェノールフタレイン溶液を用いて判定すると同時に、鋼繊維の発錆状態を目視により観察した。

5) SFの付着率：吹付けコンクリートでは、吹付け時に生ずるはね返りによって、吹付け前の配合と付着したコンクリートの配合とは異なるのが普通である。SFRC においては、SFの混入量はその物性に大きく影響を与えるので、付着した SFRC の凝結が始まる前に試

吹付け機	セメント類	ス目 ラン プ標 (cm)	得られた配合								まだ固まらないSFRCの物性		
			W/C (%)	s/a (%)	V <sub>f</sub> (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	SF (kg/m <sup>3</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)	単重 (t/m <sup>3</sup> )
実験 I	S	0~2	42.0~47.0	70	0~2.0	160~171	373~382	1204~1257	532 ~555	0~155	0~2.5	1.7~3.7	2.26~2.40
	C	6~10	47.0~50.0	100	0~2.0	228~271	457~541	1305~1531	—	0~154	10.0 ~12.0	2.7~3.8	2.21~2.29
実験 II	S	UHP 0~2	50.0~64.6	70	0~2.0	228~271	457~541	1044~1150	472 ~520	0~153	0~2.0	2.7~3.8	2.25~2.30
	OP	*1) 0~2 (0~2)	52.6~60.3 (52.6~55.6)	70 (100)	0~1.5 (0~1.0)	192~210 (222~229)	348~354 (412~422)	1137~1159 (1383~1506)	515 ~525 (—)	0~116 (0~73)	0~1.0 (0)	2.8~4.1 (4.5~7.5)	2.20~2.32 (2.09~2.18)
	C	UHP 6~10	51.1~63.5	100	0~2.0	277~303	477~542	1302~1371	—	0~155	6.5 ~14.5	1.5~3.7	2.15~2.24

\*1) 一部にモルタルをマトリックスとして用いたが、その配合を括弧内に示す。

表—5 得られた配合とまだ固まらない SFRC の物性

料を採取し、洗い試験を行なうことにより、SFの混入重量を測定した。SFの付着率 $r$ は次式により求めた。

$$\text{SFの付着率 } r = \frac{\text{付着したSFRCに含まれた繊維重量}}{\text{吹付け前のSFRCに含まれる繊維重量}}$$

6) SFの配向性: 吹付けならびに打込み SFRC 内で、SFがどのように配向しているかを検討するために、X線写真を撮影した。試料としては、せん断強度試験終了後の供試体から切り出した“厚さ5mmで吹付け方向と垂直な平面を持つ薄板、または平行な平面を持つ薄板”を用いた。

7) SFRC のはね返り率: トンネルのインパートと吹付け用構台上面にシートを敷き、トンネルの側壁およびアーチ部分に1.5~2.0m<sup>2</sup>のSFRCを吹付けした後、シートの上に落下したSFRCの重量を計り、次式によりSFRCのはね返り率を求めた。

$$\text{SFRCのはね返り率(\%)} = \frac{\text{はね返ったSFRCの総重量}}{\text{吹付けたSFRCの総重量}} \times 100$$

なお、吹付けたSFRCの厚さは約10cm、横幅約4m、縦方向は側壁下部から天端まで総延長約5mであった。

8) 吹付け能力: 吹付け作業の開始から終了までの時間を測定し、単位時間当りの吹付け能力を算出した。

## § 4. 物性に関する実験結果と検討

以下の各節では特にことわらない限り、実験Iの結果を用いている。

### 4.1 得られた配合とまだ固まらない SFRC の物性

表—5に標記について得られた結果の範囲を示す。この表から、実験Iでは水セメント比がほぼ一定であるが、実験IIでは大きくばらついていることがわかる。

### 4.2 硬化した吹付け SFRC の圧縮、曲げ、せん断強度

強度試験結果を一覧表にして表—6、7に示す。

#### 1) 繊維混入率 V<sub>f</sub> の影響

図—5に材令2日および28日におけるV<sub>f</sub>と強度の関係を示す。この図はA繊維を用いた場合のものである。材令2日ではV<sub>f</sub>が強度にそれ程影響を与えていない。ただ、この場合のブレンコンクリートの圧縮強度をみると300kg/cm<sup>2</sup>を越えている。通常の打込みによるSFRCにおいて、材令2日でブレンコンクリートの圧縮強度が300kg/cm<sup>2</sup>を越える場合には、繊維による補強効果が顕著に現われるのが普通である。そのため、このような結果がどのような理由によって生じたのか、今後、さらに検討する必要がある。ただ、C機を用いてV<sub>f</sub>を2%とした時のせん断強度が、100kg/cm<sup>2</sup>を越えている

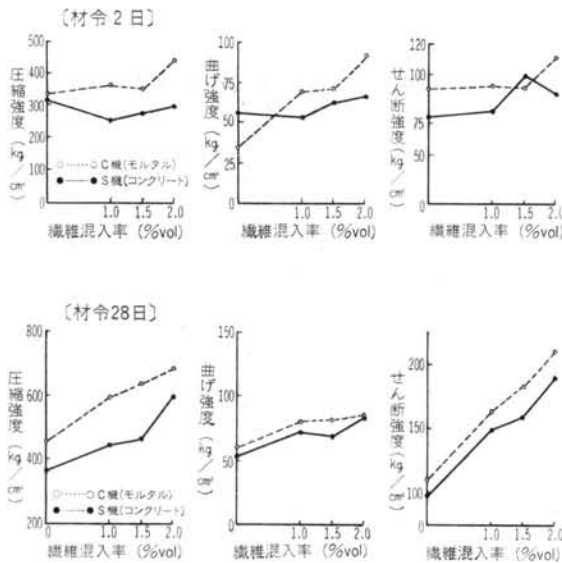
吹付け機	SF 種類	V <sub>f</sub> (%)	s/a (%)	W/C (%)	吹付け SFRC									打込み SFRC					
					材令2日強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			材令28日強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			材令2日強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			材令28日強度 (kg/cm <sup>2</sup> )					
					圧縮	曲げ	せん断	圧縮	曲げ	せん断	圧縮	曲げ	せん断	圧縮	曲げ	せん断	圧縮	曲げ	せん断
S	—	0	70	42.0	314	55.5	73.2	369	53.2	97.7	296	39.1	59.8	569	62.4	145			
	A	1.0	70	42.4	253	52.9	77.0	443	73.1	150	450	52.4	103	732	74.3	226			
		1.5	70	44.6	273	62.6	99.9	465	69.4	158	428	63.7	119	699	89.7	235			
		2.0	70	45.2	299	65.9	88.0	592	84.0	189	300	57.8	85.1	643	101	214			
	B	1.0	70	43.6	267	45.2	85.9	446	65.7	144	338	44.9	88.4	505	63.6	172			
		2.0	70	46.7	321	49.3	91.4	467	67.4	147	334	47.8	95.2	627	76.2	194			
	C	1.0	70	44.2	312	43.1	80.5	439	62.6	140	309	59.4	88.1	631	73.9	197			
		2.0	70	47.0	339	53.2	82.6	342	60.1	112	486	93.3	140	747	117	239			
C	—	0	100	49.9	333	34.4	91.3	456	60.1	122	378	33.9	85.2	547	62.0	125			
	A	1.0	100	47.0	366	69.3	93.6	596	80.0	164	383	50.2	115	623	74.8	189			
		1.5	100	50.1	351	71.5	92.6	637	83.0	183	361	68.3	110	600	85.7	191			
		2.0	100	49.9	444	92.6	114	689	86.6	211	434	68.7	110	696	89.2	185			
	B	1.0	100	48.1	373	53.5	98.6	575	71.9	161	408	44.6	85.7	640	73.9	199			
		2.0	100	50.0	447	73.0	112	676	99.8	187	414	64.9	102	706	109	184			
	C	1.0	100	46.6	377	55.2	114	623	79.1	156	420	60.2	93.3	659	70.8	207			
	A	1.0	70	50.0	328	43.5	88.5	464	62.0	120	430	44.6	100	665	63.7	191			

表一6 強度試験結果：実験Ⅰ（UHPセメント使用，材令2日および28日）

吹付け機	セメント 種類	SF 種類	V <sub>f</sub> (%)	s/a (%)	W/C (%)	吹付け SFRC									打込み SFRC						
						吹付け 位置	材令2日強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			材令28日強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			材令2日強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			材令28日強度 (kg/cm <sup>2</sup> )					
							圧縮	曲げ	せん断	圧縮	曲げ	せん断	圧縮	曲げ	せん断	圧縮	曲げ	せん断	圧縮	曲げ	せん断
UHP	S	—	0	70	50.0	側壁	220	36.3	62.0	321	39.6	70.9	171	25.9	45.3	543	60.2	115			
		A	1.0	70	55.1	側壁	160	36.8	57.2	320	48.8	60.7	238	38.3	67.9	551	66.5	127			
			側壁	286	45.7	76.4	384	49.5	117	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
				天端	263	45.4	72.7	392	47.4	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
		側壁	270	49.1	69.4	364	50.5	115	167	33.3	45.8	539	72.9	152	—	—	—	—			
	側壁	249	53.8	67.3	367	72.5	108	216	44.4	68.6	579	80.9	156	—	—	—	—				
	天端	249	49.9	63.4	358	58.5	103	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—				
	B	1.5	70	59.4	側壁	222	37.2	66.0	360	48.4	77.2	161	25.4	46.3	543	60.8	149				
	C	1.5	70	60.1	側壁	234	51.9	70.2	361	50.3	125	209	38.8	56.3	557	79.1	164				
	O	—	0	70	54.2	側壁	—	—	—	293	45.9	65.5	—	—	—	405	46.6	90.1			
A		1.0	70	55.1	側壁	—	—	—	330	47.8	70.6	—	—	—	457	58.5	116				
		1.5	70	57.8	側壁	—	—	—	324	55.1	84.7	—	—	—	550	70.3	125				
B		1.0	70	59.5	側壁	—	—	—	269	44.8	70.3	—	—	—	379	70.6	92.8				
C		1.0	70	60.3	側壁	—	—	—	298	41.9	83.5	—	—	—	420	63.2	114				
A	—	0	100	52.6	側壁	—	—	—	272	50.0	73.2	—	—	—	404	60.4	88.8				
	1.0	100	55.6	側壁	—	—	—	319	35.9	95.0	—	—	—	480	54.2	141					
UHP	S	—	0	100	51.1	側壁	226	45.8	67.7	402	52.7	103	245	38.1	62.8	508	60.8	82.9			
		A	1.0	100	52.6	側壁	251	44.8	67.5	391	51.6	103	—	—	—	—	—	—			
			側壁	314	45.4	83.2	504	66.9	151	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
			天端	293	51.2	87.6	466	48.8	136	270	48.2	95.0	551	60.6	166	—	—	—			
	側壁	310	55.5	90.9	411	69.7	138	183	36.9	71.2	546	61.2	172	—	—	—					
	天端	261	56.6	94.3	385	59.0	126	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
	側壁	307	59.9	90.7	412	72.0	111	185	36.8	57.7	556	59.2	156	—	—	—					
	天端	311	61.5	86.5	402	73.6	111	—	—	—	—	—	—	—	—	—					

表一7 強度試験結果：実験Ⅱ（材令2日および28日）





図一五 繊維混入率と強度の関係 (A繊維使用、括弧内はマトリックスを示す)

繊維種類	吹付け機	圧縮強度		せん断強度		曲げ強度	
		S	C	S	C	S	C
A		443	596	150	164	73.1	89.9
B		446	575	144	161	65.7	71.9
C		439	623	140	156	62.6	79.1

表一八 繊維形状寸法の強度への影響 (kg/cm<sup>2</sup>) (V<sub>f</sub>=1.0%, 材令28日)

強度	要因	偏差平方和	自由度	不偏分散	F = V <sup>2</sup> /u <sup>2</sup>	判定*
圧縮	級内	8032.7	18-3=15	u <sup>2</sup> =535.6	0.054	有意差なし
	級間	57.3	3-1=2	V <sup>2</sup> =28.7		
曲げ	級内	196.8	9-6=3	u <sup>2</sup> =32.8	2.766	有意差なし
	級間	181.5	3-1=2	V <sup>2</sup> =90.7		
せん断	級内	534.1	9-3=6	u <sup>2</sup> =89.0	0.388	有意差なし
	級間	69.1	3-1=2	V <sup>2</sup> =35.5		

\* 危険率1%

表一九 繊維形状寸法の強度への影響についての分散分析表 (S機, V<sub>f</sub>=1%, 材令28日)

のは注目に値する。

一方、材令が28日になると繊維補強の効果が顕著になる。圧縮強度は V<sub>f</sub> が2%の場合、無混入のもの1.5~1.6倍程度となっている。これはOPセメントを用いた通常の打込みSFRCにおいて、V<sub>f</sub> を2%とした時の強度増加倍率が1.1~1.2倍程度であるのに対し、かなり大きな値であり、UHPセメントを用いた吹付けSFR

Cの一つの特徴と思われる。ただ、曲げ強度は、従来のSFRCで得られる程の強度増加が見られなかった。この点についても、さらに検討する必要がある。せん断強度は、他の2つの強度に比べ最も大きな強度増加を示し、V<sub>f</sub> が2%の場合には、無混入のもの1.9倍程度となった。また、C機を用いた場合には絶対値で200kg/cm<sup>2</sup>を越えるという結果を得た。このように大きなせん断強度が得られることは、せん断力による設計が行なわれるNATMのライニングに用いる場合には、極めて有利となる。なお、図一五でC機による試験結果がS機による場合を常に上回っているが、これは両機の急結剤添加方式の違いや、S機用のマトリックスがコンクリートであるのに対し、C機用のそれが単位セメント量の多いモルタルであること、などによると思われる。

## 2) 繊維形状寸法の影響 (V<sub>f</sub>=1%の場合)

表一八に、A、B、Cの各SFを1%用いた時の材令28日における試験結果を示す。この試験結果は、圧縮強度については6個、曲げ、せん断強度については3個の供試体の平均値である。これらの全ての試験値を用い、SFの形状寸法が各強度に影響を与えるかどうか検討するために行なった分散分析の結果の一部を表一九に示す。この表から、V<sub>f</sub> が1%の時には繊維の形状寸法は強度に影響を与えないことがわかる。材令28日におけるC機の場合についても、また材令2日におけるS、C両機の場合についても、ほぼ同様な結果を得ている。このような現象が生じる原因は、「繊維長さが大きい程、繊維補強効果は大きい、吹付け時の繊維付着率が小さくなる(4.4, 1)の項で詳述)ので、この2つの現象が互いに打ち消しあって、繊維形状の違いが強度に影響を与えなかったもの」と考えられる。§5. 施工性の項で述べるが、繊維長さが小さい方が繊維の投入時間が短かくてすむなど製造面で有利となる。そこで、この実験の範囲では総合的にみて、「V<sub>f</sub> が1%の時には総合的にみて短かいSFを用いた方が良い」という結論が得られる。

なお、V<sub>f</sub> が1.5%および2.0%の場合については、実験例が少ないために明確な傾向を把握できなかった。

## 3) 細骨材率の影響

図一六にマトリックスをモルタルとコンクリート(s/a=0.7)とした時の吹付けSFRCと、打込みSFRCの強度を示す。供試体はC機、A繊維で作られており、試

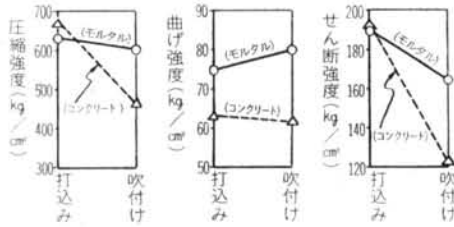


図-6 マトリックスの違いが SFRC の強度に与える影響  
(C機, A繊維,  $V_f=1\%$ , 材令28日, 括弧内はマトリックスを示す)

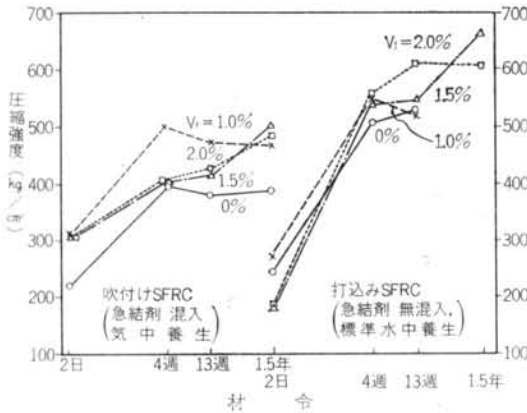


図-7 SFRC の材令と強度の関係 (C機, A繊維使用)  
 験材令は28日である。この図から、マトリックスがモルタルの場合の方がコンクリートの場合より、“吹付け SFRC の打込み SFRC に対する強度低下の割合が小さいこと”がわかる。同様な傾向が材令2日における試験結果においても見られた。このような現象が生じる原因は、マトリックスがコンクリートの方が吹付け時の SF 付着率が小さくなることや、大きな運動エネルギーを有する粗骨材が、すでに吹きつけられている SF に当り、組織を乱してしまうことなどによるものと思われるが、真の原因の究明には今後の研究が必要である。

#### 4) 材令と強度

一般に、急結剤を用いるとコンクリートの初期強度は大幅に増加するが、長期強度は伸びないといわれている<sup>8)</sup>。また、吹付けコンクリートの強度については、材令28日における試験結果は比較的多く見られるが、それ以外の材令については、ほとんど公表されたデータのないのが実情である。そこで、ここでは材令13週および1.5年における強度試験を行ない、材令と強度の関係について検討した。図-7にC機でA繊維を用いた時の圧縮強度試験結果を示す。なお、この場合の水セメント比の値は一定ではない。また、参考として同図に同じ SFRC を用いた打込み SFRC の試験結果を示す。この図から、吹付け SFRC の強度は、長期材令に

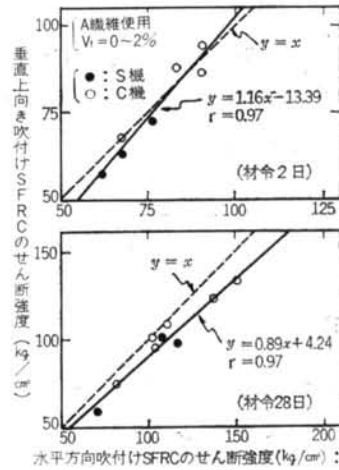


図-8 吹付け方向の違いによるせん断強度の関係

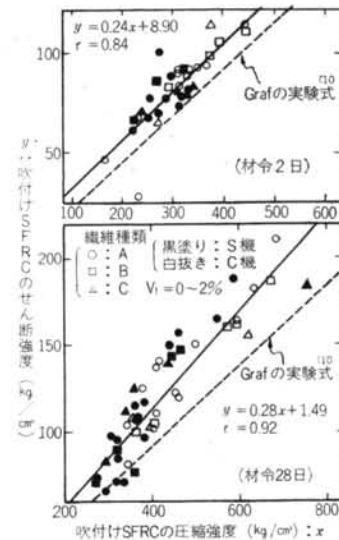


図-9 吹付け SFRC の圧縮強度とせん断強度の関係

おいては材令28日における値とほぼ等しいか、または少し上昇する傾向のあることがわかる。このような傾向は、圧縮強度についてだけではなく、曲げ強度やせん断強度においてもみられた。次に、吹付け SFRC と打込み SFRC を比べてみると、吹付け SFRC は打込んだものに比べ材令2日以降の強度の伸びが大幅に劣ることがわかる。この原因は、吹付け SFRC では急結剤を用いているが、打込み SFRC では用いていないことや、両者の養生条件が異なることなどが考えられる。ただ、両者を比べた場合、一般に初期強度は急結剤を用いた吹付け SFRC の方が大きいにもかかわらず、材令28日以降になるとその関係が逆転していることからみて、従来の吹付けコンクリートについていわれているように、急



結剤が長期強度の増進を大幅に阻害しているものと思われる。この事実から、今後は急結剤を用いない吹付け工法を検討することが望まれる。

#### 5) 吹付け方向の影響 (実験 II)

吹付けコンクリートは吹付け方向によって強度に差が生じるとする既往の研究<sup>9)</sup>がある。そこで、水平方向と垂直上向きに吹付け施工した SFRC の強度の関係について検討した。図-8 にせん断強度についての結果を示す。この場合の供試体は S, C 両機で A 繊維を  $V_f=0\sim 2\%$  として作製したものである。この図から、実用的には吹付け方向によるせん断強度の差はないと考えて良いことがわかる。このような関係は、せん断強度だけでなく圧縮強度、曲げ強度においても認められた。

#### 6) 圧縮強度とその他の強度との関係

図-9 に材令 2 日および 28 日における吹付け SFRC の圧縮強度 (はりの折片による強度) とせん断強度 (2 面せん断強度) の関係を示す。図中の実線は回帰直線である。また点線は、従来の打込みによるプレーンコンクリートについての既往の実験式である (Graf<sup>10)</sup> が 20cm の立方供試体の圧縮強度と 2 面せん断強度について求めたもの)。この図より、吹付け SFRC のせん断強度は圧縮強度と強い相関があることがわかる。また、既往の実験式とこの実験で得られた直線回帰式は、ほぼ同様な傾向のあることが分かる。ただ、この実験で得られた回帰式の方が既往の実験式を上回っている。これは、繊維補強の効果が、圧縮強度における場合よりせん断強度における場合の方が顕著であることによるものと考えられる。なお、圧縮強度  $x$  と曲げ強度  $y$  についても同様な結果が得られており、その場合の直線回帰式と相関係数  $r$  は次のようである。

$$\text{材令 2 日: } y=0.12x+15.2 \quad r=0.62$$

$$\text{材令 28 日: } y=0.10x+17.3 \quad r=0.84$$

### 4.3 硬化した吹付け SFRC の強度以外の物性

#### 1) 曲げタフネス

図-10 に C 機で作製した A 繊維混入モルタル供試体の曲げ荷重-たわみ曲線の一例を示す。S 機による SFRC についても、ほぼ同様な傾向を得ている。これらの結果から、吹付け SFRC は SF の補強効果により、曲げタフネス (荷重-たわみ曲線と  $x$  軸で囲まれる面積) が大幅に向上することが分かる。曲げタフネスの表わし方の一例として、(i) 最大荷重時、(ii) たわみ量がスパン ( $l=300\text{mm}$ ) の  $1/300$  の時 (たわみ量  $1\text{mm}$ )、および (iii)  $1/150$  の時 (同  $2\text{mm}$ ) の曲げタフネスを求めた。これらの値と、プレーンモルタルとの比率を相対タフネスとして図-11

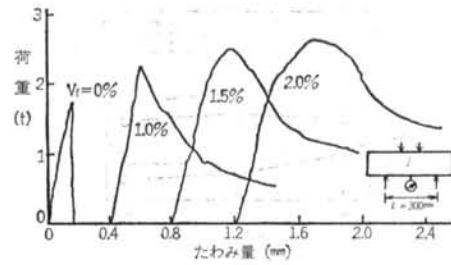


図-10 曲げ荷重-たわみ曲線 (C 吹付け機, A 繊維使用, 材令 28 日)

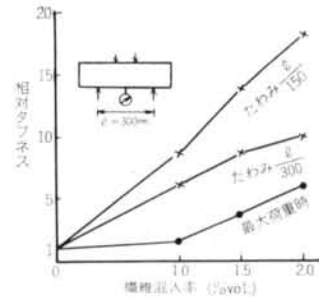


図-11 繊維混入率と相対タフネスの関係 (C 機, A 繊維使用, 材令 28 日)

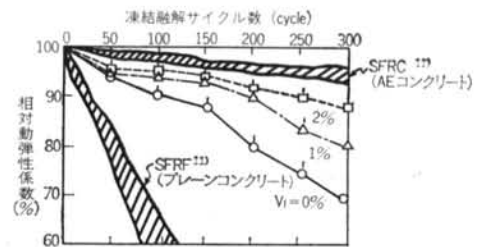


図-12 吹付け SFRC の凍結融解試験結果 (C 機, A 繊維使用)

に示す。この図から “一般にタフネスが定義されるような、耐力がほとんど 0 に近づいた時のたわみ量” に比べて、比較的小さいたわみ量の場合にも、SFRC の相対タフネスは  $V_f$  の増加につれて、ほぼ直線的に向上することが分かる。

#### 2) 凍結融解に対する抵抗性

図-12 に、A 繊維、C 機を用いた試験結果の一部を示す。この実験に用いた SFRC の吹付け前の空気量は 2% 内外であったが、吹付け後の値は明らかではない。比較のために、打込み SFRC ( $V_f=0\sim 2\%$ ) についての既往の実験結果<sup>11)</sup>を同図に幅で示す。この場合、プレーンコンクリートをマトリックスとする場合の空気量は約 2%、AE コンクリートをマトリックスとする場合のそれは約 6% であった。この図から、吹付け SFRC の凍結

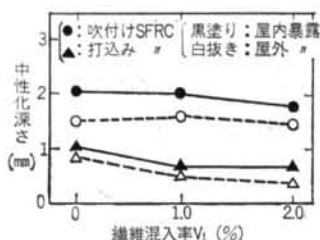


図-13 SFRC の中性化深さ (材令1年) (C機, A繊維使用)

融解抵抗性は、打込み SFRC の場合より優れており、その傾向は  $V_f$  が大きいほど顕著であることがわかる。しかし、また  $V_f=2\%$  としても、AEコンクリートをマトリックスとした打込み SFRC ほどの抵抗性は無いことがわかる。

3) 中性化深さおよびコンクリート内の SF の発錆状態

材令1年までの中性化深さの測定結果を図-13に示す。この図より、S機を用いた場合の方がC機の場合より中性化深さが大きいこと、繊維混入率が変わっても中性化深さは余り変化しないこと、打込み SFRC に比べ吹付け SFRC の中性化深さはかなり大きいことがわかる。なお、SFの発錆状態について目視で観察したところ、表面に出ているSFは赤く錆びていたが、コンクリートの非中性化領域におけるSFには全く錆が生じていなかった。

#### 4.4 吹付け SFRC の繊維補強効果の検討

ここでは、吹付け SFRC の繊維補強効果が、従来の打込み方法による場合とどのような関係にあるかを検討した。なお、ここでは主にS機、A繊維、 $V_f=0\sim2\%$  の場合の検討結果を示すが、他の場合についてもほぼ同様な結果を得ている。

##### 1) 繊維の付着率

繊維の付着率の試験結果を図-14に示す。この図から以下の知見が得られた。

i) SFの付着率は、 $V_f$  が1%を越えると小さくなる傾向がある。また、繊維長さが大きくなると、付着率は小さくなる傾向がある。

ii) S機を用いた場合よりC機を用いた場合の方が付着率は大きい。これはC機の場合のマトリックスがモルタルであるのに対し、S機の場合はコンクリートであることによると思われる。

##### 2) 繊維の配向状態と“配向係数の改善率”

吹付け SFRC のX線写真を写真-1 (吹付け方向と垂直な平面)および写真-2 (吹付け方向と平行な平面)

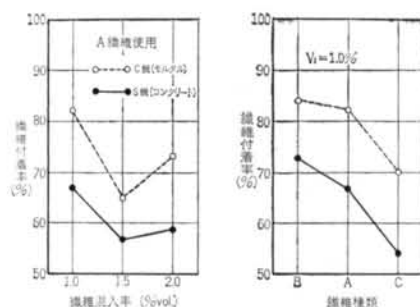


図-14 繊維混入率および繊維種類とSF付着率の関係

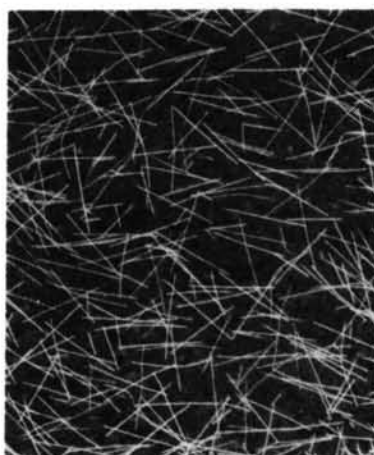


写真-1 吹付け方向に対して垂直な面における繊維のX線写真 (C機, A繊維使用,  $V_f=1.5\%$ )

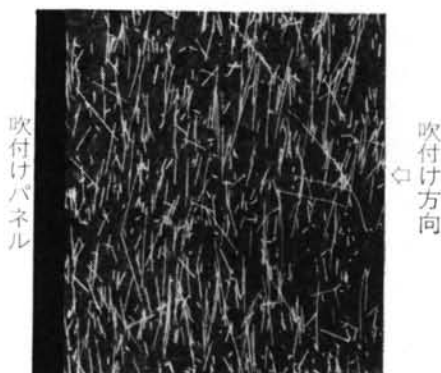


写真-2 吹付け方向に対して平行な面における繊維のX線写真 (写真-1と同じ)

に示す。これらはC機でA繊維を1.5%とした時のものである。これらの写真から、吹付け SFRC 内ではSFが吹付け方向と垂直な面に倒れ込み、2次元にランダムな配向をしていることがわかる。このような配向状態は、吹付け SFRC が構造物に用いられた時、その内部に発生する引張り、曲げ、せん断などの応力に対して最

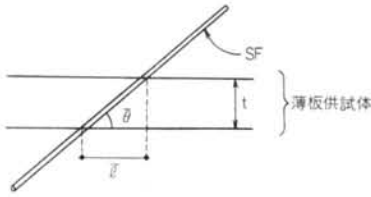


図-15  $\theta$  と  $l$ ,  $\bar{l}$  の関係

調査記号	$V_f$ (%)	繊維付着率 $r$	$\theta$	$\cos \theta$	$\phi$	$\phi \cdot r$
U <sub>1.0</sub>	1.0	0.82	0°~28.6°	0.88~1.0	1.37~1.56	1.12~1.28
U <sub>1.5</sub>	1.5	0.65	0°~23.6°	0.92~1.0	1.43~1.56	0.93~1.01
U <sub>2.0</sub>	2.0	0.73	0°~18.4°	0.95~1.0	1.48~1.56	1.08~1.14

表-10 吹付け SFRC の ( $\phi$ ,  $r$ ) の計算 (C機, A繊維使用)

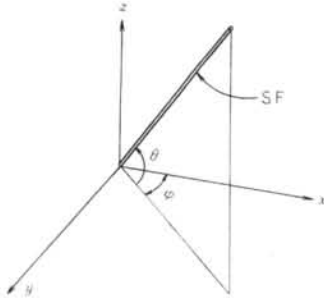


図-16  $\theta$ ,  $\phi$  の定義

も効果的に SF が配列していることを示す。

吹付け SFRC の “吹付け面と平行な軸 (曲げ, せん断などがかかると考えられる軸) に対する SF の配向係数  $\alpha_s$ ” を求める。そのために, 吹付け方向と垂直な面を持つ薄板供試体 (厚さ 5mm) の X線写真 (例として写真-1) において, 各 SF の長さを計り, 総数  $n$  個の SF の長さの総延長  $l$  を求めた。全ての SF は, 長さ  $t$  の薄板供試体を貫通していると仮定すると, SF と吹付け面と成す角度の平均値  $\bar{\theta}$  は, 図-15 から式(1)のようになる。ここで  $\bar{l}$  は, SF の平均長さ ( $l/n$ ) を表わす。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \frac{t}{\bar{l}} = \tan^{-1} \frac{tn}{l} \quad \dots\dots(1)$$

しかし, 実際には試料を貫通しない SF も存在することから, この場合に求められる  $\bar{\theta}$  は, 考えられる  $\bar{\theta}$  の値の最大値を表わすことになる。一方,  $\bar{\theta}$  のとり得る値の最小値は 0° であるので,  $\bar{\theta}$  の範囲は実測結果から表-10 のようになる。配向係数  $\alpha_s$  は, 上記の結果を用いて次式で表わすことができる。ここで  $\gamma$  は, 二次元ランダム配向の SF がその平面上の任意の軸に対して有する配向

係数を表わす。

$$\alpha_s = \gamma \cos \bar{\theta}$$

$$\gamma = \int_0^{\pi/2} \cos \theta d\theta / \int_0^{\pi/2} d\theta = 0.64$$

$$\therefore \alpha_s = 0.64 \cos \left( \tan^{-1} \frac{tn}{l} \right) \quad \dots\dots(2)$$

一方, 打込み SFRC における SF の配向状態を 3次元ランダムと仮定すると, その場合の SF が任意の軸に対して有する配向係数  $\alpha_p$  は次のようになる。ここで  $\theta$ ,  $\phi$  は図-16 のように定義する。

$$\alpha_p = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \cos \phi d\theta d\phi / \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} d\theta d\phi = 0.41$$

$\alpha_s$  を  $\alpha_p$  で除した係数を  $\phi$  とすると, この値は “吹付けることによる繊維配向係数の改善率” を表わすことになる。

$$\phi = \alpha_s / \alpha_p = 1.56 \cos \left( \tan^{-1} \frac{tn}{l} \right) \quad \dots\dots(3)$$

$\phi$  の値を表-10 に示す。

### 3) 吹付け SFRC と打込み SFRC の繊維補強効果の比較

打込み SFRC の曲げ強度  $\sigma_f^0$  は, 一般に次式で精度よく近似できるとされている<sup>12)</sup>。

$$\sigma_f^0 = A(1 - V_f)\sigma_m + BV_f l/d \quad \dots\dots(4)$$

ここで,  $V_f = SF$  の体積率,  $\sigma_m =$ マトリックスの曲げ強度,  $l, d = SF$  の長さ と直径,  $A, B =$ 実験定数

式(4)の第1項はマトリックスによって, また第2項は SF によって負担される応力  $\sigma_f^0$  を表わすとみなすことができる。ここでは繊維補強効果を検討するために, 第2項のみをとりあげる。

$\sigma_f^0$  の実験定数  $B$  を, 配向係数  $\alpha_p$ , SF とマトリックスとの付着強度  $\tau$ , およびそれ以外の影響を表わす定数  $\beta_p$  との積で表わされると仮定して,  $\sigma_f^0$  を次のように置く。

$$\sigma_f^0 = \beta_p \alpha_p V_f \tau l/d \quad \dots\dots(5)$$

一方, 式(4)で表わされるものと同じの SFRC を吹付け施工してできた吹付け SFRC において, SF により負担される応力  $\sigma_f^1$  は, 繊維付着率を  $r$  とすると次式で表わされる。ここで,  $\beta_s$  は式(5)における  $\beta_p$  と同じ意味を有する定数とし, また  $\tau$  は吹付けすることによって変化しないと仮定する。

$$\sigma_f^1 = \beta_s (\phi \cdot \alpha_p) (r \cdot V_f) \tau l/d$$

$$= (\phi \cdot r) \beta_s \alpha_p V_f \tau l/d \quad \dots\dots(6)$$

式(6)を式(5)で除し,  $\beta_s$  と  $\beta_p$  は等しいと仮定すると次式を得る。

$$\sigma_f^1 / \sigma_f^0 = (\phi \cdot r) \quad \dots\dots(7)$$

実験結果を用い,  $(\phi \cdot r)$  を計算した結果を表-10 に示

調合 記号	吹付け前の調合		曲げ強度*1) (kg/cm <sup>2</sup> )		せん断強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	W/C (%)	V <sub>f</sub> (%)	*2)打込み	吹付け	打込み	吹付け
U <sub>0</sub>	50	0	62	60	125	122
U <sub>1.0</sub>	47	1.0	75	80	189	164
U <sub>1.5</sub>	50	1.5	86	83	191	183
U <sub>2.0</sub>	50	2.0	89	87	185	211

\*1) 強度試験結果は3個の供試体の平均値

\*2) SFRCの作製方法

表-11 強度試験結果 (C機, A繊維使用, 材令28日)

強度 種類 打設 方法 記号*	曲げ強度			せん断強度		
	打込み (P)	吹付け (S)	(s)/ (P)	打込み (P)	吹付け (S)	(s)/ (P)
U <sub>1.0</sub> /U <sub>0</sub>	1.20	1.33	(1.11)	1.51	1.34	(0.89)
U <sub>1.5</sub> /U <sub>0</sub>	1.39	1.38	(0.99)	1.45	1.50	(1.03)
U <sub>2.0</sub> /U <sub>0</sub>	1.44	1.45	(1.01)	1.48	1.73	(1.16)
(平均)	—	—	(1.04)	—	—	(1.03)

\*) 表-11参照

表-12 SFRCのブレンコンクリートに対する強度比率

[SFRCの強度/ブレンコンクリートの強度]

(C機, A繊維使用, 材令28日)

す。この表で(φ・r)がほぼ1であることから、この実験の範囲では、上記の仮定が正しいとすれば、吹付けSFRCの曲げ強度における繊維補強効果は、打込みSFRCにおける場合と大差はない、という仮説が導かれる。

#### 4) 強度試験結果による検証

表-11に実験結果を示す。強度試験結果で打込みSFRCより吹付けSFRCの強度の方が小さいのは、急結剤の添加の有無などの影響と思われる。このような急結剤などの影響を取り除き、吹付けSFRCと打込みSFRCの繊維補強効果を比較検討するために、吹付け、打込みの各々試験結果を、それぞれの繊維無混入供試体(U<sub>0</sub>)の強度で除し、比率(SFRCの強度/ブレンコンクリートの強度)を求めた。そして、その比率を吹付けと打込みのSFRCについて比較した。その結果を表-12に示す。この表から、吹付けSFRCの繊維補強効果は曲げ強度だけでなく、せん断強度においても打込みSFRCにおける場合とほぼ等しい傾向が見られ、上で述べた仮説は正しいと考えて良いと思われる。

以上の検討の結果、吹付けSFRCでは、吹付け時のSFのはね返りによってSFの混入率が減少するが、SFの配向性が改善されるため、曲げ、せん断、引張りなどの外力に対しては、打込みSFRCとほぼ等しい繊維補強効果のあることがわかった。この事実から、吹付け

時のSFのはね返り率を小さくすれば、打込みSFRCより物性の優れたSFRCを吹付け工法によって得られるので、今後はその方向に向かって検討を進めることが望まれる。

### 4.5 吹付けSFRCの強度に影響を与える要因の統計手法による検討

吹付けSFRCの強度は、数多くの要因の影響を受けるが、最も大きな影響を与える要因を把握するために、統計手法を用いた分析を行なった。なお、ここでは同一吹付け機種、同一条件下での測定数を多くとることと、W/Cを変数とする必要性から、実験IIで得たデータを用いる。

#### 1) 検討方法

検討は"変数増減法による逐次重回帰分析法"<sup>13)</sup>を用いて行なった。この方法を用いたのは、数多くの説明変数の中の影響力の大きな少数個の説明変数を把握しようとするためである。それがわかれば、それらの変数の値を操作することにより、比較的容易に目的変数を希望する方向にコントロールすることができる。計算は当社計算センター保有の汎用統計解析プログラムパッケージによった。また、この分析においては既往の文献<sup>14)</sup>を調査した上で、UHPセメントを用いて得られた実測値とOPセメントを用いて得られた実測値の間に、セメントによる差はないものとして、両者を同一に扱っている。なお、計算を行なうにあたり、変数増減の基準値としての変数の分散比F<sub>r</sub>は2.0とした<sup>13)</sup>。

#### 2) 検討結果

ここではスペースの関係から、S機を用いたせん断強度について主に述べる。表-13にせん断強度に関する変数を示す。表-14には各変数の実測を、表-15には相関行列、表-16には分析結果を示す。なお、表-16のbi', t, F<sub>r</sub>は次式から求められる。なお、s<sub>i</sub>, s<sub>y</sub>は各々、x<sub>i</sub>, yの標準偏差を示す。

$$bi' = b_i \cdot s_i / s_y, \quad t = b_i / s_b, \quad F_r = t^2$$

検討の結果、次の知見が得られた。

i) この分析では自由度がやや小さいにもかかわらず、自由度調整済みの重回帰係数R\*が0.76でRとの差が小さいことから、重回帰式の信頼性は高いと考えてよい。

ii) 表-16から、重回帰式は次のようになる。

$$y = 150.27 - 12.03 x_0 + 0.18 x_4 \quad (R=0.80)$$

この式から、吹付けSFRCのせん断強度yは、急結剤の添加率x<sub>0</sub>が小さいほど、また繊維混入量x<sub>4</sub>が大きいほど高く、この2つの変数を用いた重回帰式によって得られる値は、実測値と80%の重回帰係数を有している

説明変数	$x_1$	繊維の細長比( $l/d$ )
	$x_2$	セメント水比
	$x_3$	細骨材率(%)
	$x_4$	繊維混入量(kg/cm <sup>3</sup> )
	$x_5$	吹付け時のスランプ(cm)
	$x_6$	急結剤添加率(%)*
目的変数	$y$	SFRCのせん断強度(kg/cm <sup>2</sup> )

\*) セメントに対する重量%

表-13 SFRCのせん断強度に“影響が大きいと考えられる説明変数”と目的変数

変数 No.*)	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$y$
1	0	2.00	70	0	1	5.5	115
2	46	1.81	70	79	1	3.5	127
3	46	1.59	70	114	0.5	5.0	152
4	46	1.55	70	148	2	3.3	156
5	32	1.68	70	115	0	6.5	149
6	63	1.66	70	114	2	3.5	164
7	0	1.85	70	0	0.5	6.3	90
8	46	1.81	70	77	1	5.1	116
9	46	1.73	70	116	1.5	5.2	126
10	32	1.68	70	77	0	4.9	93
11	63	1.66	70	77	1.5	4.6	114
12	0	1.90	100	0	0	6.1	89
13	46	1.80	100	73	1.5	4.2	141
平均	35.8	1.748	74.6	76.2	0.96	4.9	125.5
標準偏差	22.32	0.128	11.27	48.77	0.740	1.06	25.64

\* ) No1~6は超早強ポ・セ、No7~13は普通ポ・セを使用した。

表-14 SFRCのせん断強度に関する各変数の実測値

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$y$
$x_1$	1.000						
$x_2$	-0.712	1.000					
$x_3$	-0.255	0.355	1.000				
$x_4$	0.812	-0.874	-0.361	1.000			
$x_5$	0.233	-0.195	-0.369	0.295	1.000		
$x_6$	0.046	-0.080	0.425	0.219	-0.162	1.000	
$y$	0.603	-0.541	-0.113	0.622	0.559	-0.701	1.000

表-15 相関行列

ことがわかる。また、この分析で用いた実測値の範囲では、標準偏回帰係数の大きさからみて、急結剤の添加率を減らす方が繊維混入量を大きくするより、せん断強度を大きくする上で効果が大きい。

ii) スペースの関係から結果は示さないが、曲げ強度についてもせん断強度と同様な傾向がみられた。また圧縮強度も、セメント水比が影響の大きな変数として重回帰

Step	1	2
変数増減	追加	追加
変数番号	$x_6$	$x_4$
重相関係数 $R$	0.70	0.80
自由度 $f$	11	10
自由度調整済み $R$	$R^*$ 0.67	0.76
定数項 $b_0$	184.80	150.27
変数番号	$x_4$	$x_6$
偏回帰係数 $b_i$	15.41	12.03
標準偏回帰係数 $b_i'$	0.64	0.50
標準誤差 $s_b$	4.74	4.43
$t$ 値	3.25	2.72
変数の分散比 $F_V$	10.57	7.37
変数番号	$x_4$	$x_4$
偏回帰係数 $b_i$		0.18
標準偏回帰係数 $b_i'$		0.34
標準誤差 $s_b$		0.08
$t$ 値		2.25
変数の分散比 $F_V$		5.06

表-16 変数増減法による逐次重回帰分析結果 (吹付け SFRC のせん断強度)

式に入っている他は、やはり、せん断強度と同様な傾向を示した。

以上の検討結果から、吹付け SFRC の諸強度を改善する最も効果的な方法は、急結剤添加率を小さくすると共に、 $V_f$  を大きくすることであることが分かった。なお、今回の分析ではデータ数が限られていたので、今後はデータの集積に努め、吹付け SFRC の施工性や物性を含めたトータルな意味での最適化を計って行きたい。

## § 5. 施工性に関する実験結果と検討

施工性については、実際のトンネル施工現場で実験施工(実験II)を行ない、種々の検討を行なった。

### 5.1 SFRC の製造と運搬

製造に関しては、以下の知見が得られた。

i) 1回の練りまぜ量をミキサの定格容量の半分以下にすれば、長さ25mmのSFを2%混入したSFRCでも、問題なく製造することができる。

ii) SFRCの製造時間は、ブレンコンクリートの製造時間にSFの投入時間(80kgを投入する場合で1~4分)とSF投入後の練りまぜ時間(1分程度)を加えたものになった。SFの投入時間は、SFの長さに比例し

て長くなるので、短いSFを用いる方が製造面からは有利となる。なお、作業員などがSFRCの製造に習熟した場合には、プレーンコンクリートの場合より1~2分長くなる程度でSFRCを製造することが可能になると思われる。

次に、運搬に関してはスランプロスが最も大きな問題となる。とくに吹付け施工においては、その吹付け機に適したスランプのコンクリート(SFRC)でないと施工ができない。それで、荷卸し地点におけるスランプを適正なものにするために、運搬中に生ずるスランプロスを事前に検討した。その結果、S機用のSFRCでは3~4cm、C機用の場合には5~6cmのスランプロスが約1時間の運搬時間中に生ずることがわかった。それで、そのロスを見込んだSFRCを製造し、支障なく施工することができた。以上から、SFRCの運搬においては、その間に生じるスランプロスさえ考慮しておけば、実施工において特に問題はないことがわかった。

## 5.2 吹付け作業における施工性

### 1) SFRCのはね返り率

吹付けコンクリートでは、はね返り率が施工性と経済性を大きく左右する。これまでの調査では、乾式吹付け機を用いた場合のコンクリートのはね返り率は30~50%、湿式吹付け機を用いた場合は10~20%程度といわれている<sup>9)</sup>。そこでこの実験では、湿式吹付け機でSFRCを吹いた時ののはねかえり率を検討した。図-17に実験結果を示す。検討の結果から得られた知見は下記のとおりである。

i) S機を用いた場合のはね返り率が、C機を用いた場合に対して大幅に上廻っているが、これはS機の場合、SFRCのマトリックスがコンクリートであるのに対し、C機の場合はモルタルであることが大きな理由と考えられる。

ii) SF種類やSF混入率のSFRCはね返り率への影響は、それ程明らかではない。

iii) この実験の範囲では、概括的にみて、S機で“コンクリートをマトリックスにしたSFRC”を吹いた時のSFRCはね返り率は10%内外、C機で“モルタルをマトリックスにしたSFRC”を吹いた時ののはね返り率は5%内外とみて実用上さしつかえないことがわかった。

### 2) 吹付け能力

吹付け作業はトルネル工事のサイクルタイムに含まれるため、その吹付け能力は工程上、極めて大きな意味を有する。この実験では、吹付け機の種類、繊維の形状と混入率が吹付け能力に与える影響について検討した。実

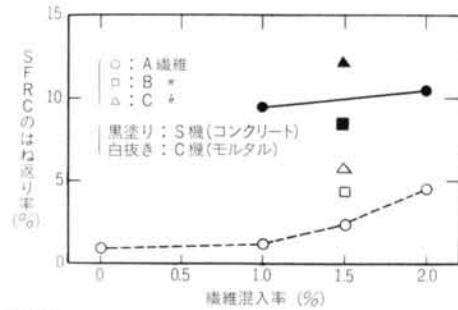


図-17 繊維混入率とSFRCのはね返り率の関係

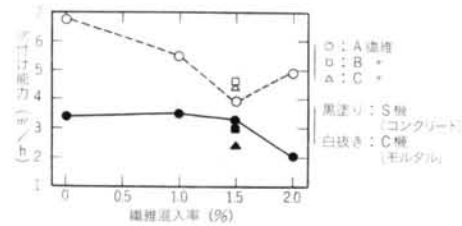


図-18 繊維混入率と吹付け能力の関係

験結果を図-18に示す。検討によって以下の知見が得られた。

i) C機とS機の比較では、セメント種類や鋼繊維の種類にかかわらず、C機の方が2~3 m³/h 大きな吹付け能力を有するという結果を得た。これはC機がコンクリートポンプを改良してできていて連続運転が可能であるのに対し、S機はパッチ式であることが最も大きな原因と思われる。その他にも、C機の場合はスランプの大きなモルタルをマトリックスにしているのに対し、S機の場合は低スランプのコンクリートをマトリックスとしていることにもよるとと思われる。

ii) SF種類が変わっても、吹付け能力にはそれ程大きな差は生じなかった。この原因としては、“使用したSF長さ(25~15mm)が配管径(50mm)の1/2以下であったこと”や、“吹付けの前のSFRCのスランプがSF種類にかかわらず、ほぼ一定であったこと”、などがあげられる。

iii) SF混入率が1%を越えると、吹付け能力はやや低下する傾向がある。これはSF量が増えると程度の軽いファイバーストリップが生じやすくなったり、分離が生じやすくなったりするため、SF量が少ない時より円満な搬送管内流動が得られにくくなるためと思われる。しかし同図に示されているように、C機でモルタルをマトリックスとした時には、A繊維を2%入れても約5.0 m³/hの吹付け能力を得られることがわかる。この事実から、



吹付け機種と配合さえ適切に選定すれば、 $V_f$  が 2% の SFRC でも十分、実用的な施工性を得られることがわかる。

ii) 総合的にみて、この実験の範囲では  $V_f$  が 1% の場合の S 機の吹付け能力は約 3.0 m<sup>3</sup>/h、C 機の場合のそれは約 5.0 m<sup>3</sup>/h と考えて良いと思われる。

## § 6. 強度管理方法の検討

本実験で得られた「吹付け SFRC と打込み SFRC の関係」のうち、材令 28 日のせん断強度についての結果を図-19 に示す。また、材令 2 日および 28 日における「吹付け SFRC のせん断強度  $y$ 」の「打込み SFRC のせん断強度  $x$ 」に対する回帰直線  $y=ax+b$  の定数  $a$ 、 $b$  と、その相関係数  $r$  を表-17 に示す。同じ表に、相関係数  $r$  の危険率 1% の有意限界  $R_{0.01}$  を示す。これらの図、表から以下の知見が得られた。

i) 表-17 において全般に相関係数が大きいことや、各相関係数が  $R_{0.01}$  を上廻っていることから、打込み SFRC から吹付け SFRC の強度を精度よく推定可能であることがわかる。この傾向は、とくに材令 28 日強度において著しい。また、せん断強度におけるのと同様な結果は、圧縮強度、曲げ強度についても得られている。今後さらにデータ数を増やすことによって、一層精度の良い推定式を得ることができよう。

ii) S 機と C 機の結果を比較すると、打込み SFRC の強度を同じとした場合、回帰直線から決まる吹付け SFRC の強度は、C 機の方が S 機より一般に大きくなっている。これは、両機の急結剤の添加方式が異なることや、C 機の場合はセメント量が多いモルタルがマトリックスであるのに対し、S 機の場合はコンクリートであるため吹付けて付着した SFRC の組成が異なることなどによると思われるが、この点についてはさらに突込んだ検討が必要である。

以上の検討結果から、吹付け SFRC の強度を打込み SFRC を用いて管理できる可能性の高いことがわかった。今後、吹付け SFRC を信頼性の高い構造材料として用いてゆくには、手軽でしかも精度の高い管理手法が不可欠になってくる。その観点から「打込み SFRC による吹付け SFRC の強度管理方法」について、今後、さらに検討する必要がある。

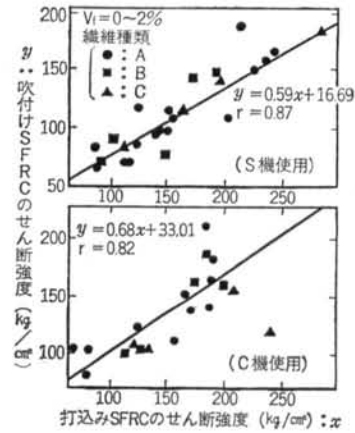


図-19 打込み SFRC と吹付け SFRC のせん断強度の関係 (材令 28 日)

材令 (H)	吹付け機	a	b	r	$R_{0.01}$ *)
2	S	0.20	60.7	0.65	0.63
	C	0.67	31.0	0.68	0.61
28	S	0.59	16.7	0.87	0.50
	C	0.68	33.0	0.82	0.57

\*) 危険率 1% の時の  $r$  の有意限界

表-17 せん断強度に関する回帰直線  $y=ax+b$  の定数  $a$ 、 $b$ 、相関係数  $r$  および相関係数の有意限界  $R_{0.01}$

## § 7. まとめ

超早強ポルトランドセメントを用いた吹付け SFRC は、従来のコンクリートにはない優れた性能を有し、その施行性にも問題のないことがわかった。今後は各種の工法へ適用し、その持てる性質を十分に生かして各種工法の改良を進めたいと考えている。以下に、本実験で得られた知見を示す。

### 7.1 物性について

i) 圧縮、曲げ、せん断強度は、繊維混入率 ( $V_f$ ) 2% までの範囲では、 $V_f$  の増加に伴ってほぼ直線的に向上する。また、NATM で最も重要とされるせん断強度は、 $V_f=2%$  で材令 2 日では 100 kg/cm<sup>2</sup> を、材令 28 日では 200 kg/cm<sup>2</sup> をこえた。さらに、材令 28 日以降、1 年半までの間に各強度はほぼ横ばいか、または幾分向上した。

ii) 逐次重回帰分析法を用いて検討したところ、吹付け SFRC の強度は、急結剤の添加率を小さくし、 $V_f$  を大きくすることによって、最も効果的に改善できることがわかった。また、マトリックスをコンクリートとするよりもモルタルとした方が、吹付けることによる強度低

下は低いことがわかった。

iii) 繊維の形状寸法を変えた3種類の繊維を用いて、 $V_f=1\%$ とした時の強度を分散分析を用いて検討した結果、繊維長さによる強度差はほとんど認められなかった。一般に、繊維長さが大きくなる程SFRCの製造には時間がかかるので、 $V_f=1\%$ の時には、総合的にみて短い繊維(15mm程度)を用いた方がよい。

iv) 吹付け方向(水平または垂直上向き)による強度差はないと見てよい。

v) 圧縮強度と曲げ強度およびせん断強度の関係は、既往の打込みコンクリートにおける場合とほぼ同様な関係を有する。

vi) 曲げタフネス、凍結融解抵抗性は $V_f$ の増大に伴って向上する。また、吹付けSFRCの中性化深さは、材令1年までの結果では打込みSFRCより大きくなったが、SFRCの非中性化領域における繊維には全く錆が見られなかった。

vii) SFRCは吹付けることによって、 $V_f$ が吹付け前の状態より20~40%程度減少する。その減少の度合いは、繊維長さが大きいほど、また吹付け前の $V_f$ が大きいほど大きい傾向がある。また、吹付け面に対する繊維の配向係数は、吹付けることによって改善される。そして、上で述べた $V_f$ が減少というマイナス効果が、繊維の配向性の改善によって補なわれる。そのため、吹付けSFRCの繊維補強効果は、打込みSFRCにおける場合とほぼ等しい。

## <参考文献>

- 1) 岡行俊他：“新しい覆工の設計方法——新オースリア工法——(地下構造物の設計と施工)”土木学会(51年9月)pp.1~19
- 2) H.W. Parker: “Use of Shotcrete for Underground Structural Support (SP 45)” A.C.I. (July 1973) pp.330~350
- 3) H.W. Parker, et al.: “Shotcrete Practice in Underground Construction (PB-248765)” Univ. of Ill.
- 4) H.W. Parker, et al.: “Field-Oriented Investigation of Conventional and Experimental Shotcrete for Tunnels (PB-252672)” Univ. of Ill.
- 5) 中原康他：“鋼繊維補強コンクリートの吹付け工法への応用実験(その1)——在来の吹付け機を用いた場合の諸物性および問題点——”土木学会第31回大会梗概集(昭和51年)
- 6) “同上(その2)——急結剤の混入が可能な湿式吹付け機を用いた場合の諸性質——”
- 7) 福井康他：“鋼繊維および超速硬セメントを使用した吹付けコンクリートの性状について”土木学会第32回大会梗概集(昭和52年)
- 8) ACI Committee 506: “Proposed ACI Standard; Recommended Practice for Shotcreting” J. of ACI, Vol. 63, No. 2 (1966)
- 9) 鉄建公団、青函建設局：“青函トンネルのコンクリート吹付け工法”(1973年3月)
- 10) O. Graf: “Die Eigenschaften des Betons (2. Auslage)” Springer (1960)
- 11) 小林一輔他：“鋼繊維補強コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性”生産研究 28巻9号
- 12) ACI Committee 544: “State of the Art Report on FRC” J. of ACI (Nov.1973)
- 13) 奥野忠一他：“多変量解析法”日科技連(1974)
- 14) 建築学会：“超早強セメントによるコンクリート調査設計・施工指針案・同解説”(昭和51年)

## 7.2 施工性について

i) SFRCの製造は、従来のレデーミクストコンクリート用の設備で十分であり、特別な装置は必要としない。また、運搬については、途中に生ずるスランプロスさえ事前に正確に把握してそれに対処すれば、他に問題はない。

ii) SFRCのはね返り率はS機で“コンクリートをマトリックスとしたSFRC”を吹いた場合で10%内外、C機で“モルタルをマトリックスとしたSFRC”を吹いた場合で5%内外であった。また、吹付け能力は、 $V_f=1\%$ のときS機で約3 m<sup>3</sup>/h、C機で約5 m<sup>3</sup>/hであった。

## 7.3 強度管理方法について

“吹付け前のSFRCを従来の方法で打ち込むことによって作製した供試体”を用いて、吹付けSFRCの強度を管理することが可能と思われる。

**謝辞** 実験を行なうにあたり、日本セメント(株)から施工場所の提供など種々の便宜を計って頂きました。また、実験の遂行にあたっては当社技術開発部、土木部、土木技術部、研究所など多くの部署の方々の御協力を頂きました。記して謝意を表します。また、当報文をまとめるにあたり、当研究所丸一主席研究員、森永主任研究員、中西研究員からは種々御指導を頂きました。謝意を表します。