

[55] 鋼繊維吹付けコンクリートのはね返り率、強度に及ぼす諸因子

正会員 山 川 純 雄 (住友金属工業, 中研)
 正会員 白 川 潔 (住友金属工業, 中研)
 正会員 ○小 山 清 一 (住友金属工業, 中研)
 能 勢 博 司 (住友金属工業, 本社)

1 まえがき

最近、鋼繊維補強コンクリートの吹付け工法への適用が活発に行なわれ¹⁾、施工性や吹付け後の強度特性等につき詳細な検討がなされている。しかしながら、吹付けに適した鋼繊維の形状寸法については、吹付けコンクリートの物性（はね返り率、強度等）が非常に多くの要因（吹付け機種、施工条件、配合等）に左右されるため、不明な点が多い。他方、吹付け機的能力差により、鋼繊維吹付けコンクリートの物性（付着率）が極端に変化すると²⁾の報告もある。

以上の観点から、吹付けコンクリートに適した鋼繊維の形状寸法ならびに吹付け条件を検討するため、実規模の原理模型吹付け機（湿式）を試作し、はね返りならびに硬化後の諸特性を調査した。

2 試験概要

2.1 試験条件

試験に用いた鋼繊維の種類を表1、配合を表2に示す。鋼繊維（SF）は薄板切断品で、長さ9～35mm、アスペクト比33～64の合計11種類である。

セメントには普通ポルトランドセメントを用い、SF混入率は1vol%一定とした。なお、鋼繊維補強モルタル（SFRM）のスランブは図1に示すごとくSFのアスペクト比や断面形状により若干変化するが、配合はSFの種類にかかわらず同一とした。吹付け条件としてはモルタル吐出量を2～7 m³/hrの間で4段階、空気量を5、10 m³/minの2段階変化させた。

2.2 試験方法及び測定項目

吹付け原理模型機は湿式で、図2に示すごとくあらかじめミキサーで混練されたSFRMをジャッキにより押し出し、ノズル先端にて流入する圧縮空気により吹付ける構造となっている。

試験は吹付け時性状調査と吹付け後物性調査の2種類に分けて行なった。前者では、図2に示すようなパネル上にモルタル約70ℓを平均厚さ約10cmになるよう吹付け、はね返り率とSF付着率（SFの計画混入率に対する吹付け後の実質混

表1. 鋼繊維の種類※

断 面 W × h (mm)	換 算 直 径 de (mm)	長 さ ℓ (mm)		
		ℓ/de ≧ 33	ℓ/de ≧ 48	ℓ/de ≧ 63
0.25×0.25	0.28	9	—	18
0.25×0.5	0.40	13	19	25
0.25×1.0	0.56	19	27	35
0.5×0.5	0.56	19	27	35

※ 異形：全面波形

表2. SFRMの配合

空気量 (%)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	鋼繊維混入率 (vol%)	単 位 量 (kg/m ³)			
				W	C	S ⁽²⁾	SF
4	10±1	55	0	243	441	1482	0
4	10±1	55	1.0	258	469	1420	78

(1) SFRMのスランブ10±1は鋼繊維0.25×0.5×25を用いた場合

(2) 比重：2.57

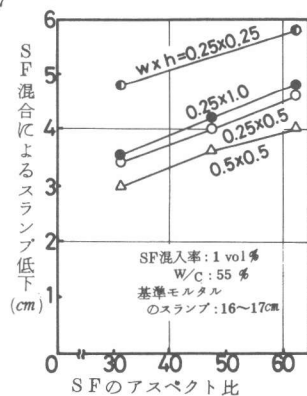


図1. 鋼繊維の種類とスランブ低下率

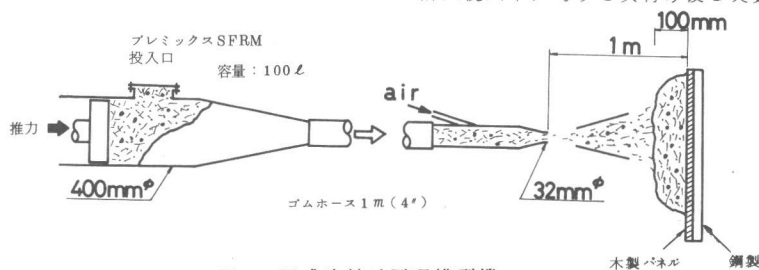


図2. 湿式吹付け原理模型機

入率に対する比)を測定した。このとき、施工誤差を極力小さくするため、ノズル先端の円軌道を一定に保つ支持台及びはね返り材料の飛散防止用の囲いを設けた。また、はね返り率についてはモルタルとSFを含めた全のはね返り率とSF自身の損失率(吹付け時に飛散損失するSF量と吹付け前の計画混入量の比)とともに吹付け厚さ1~2cmごとのそれらの変動についても測定した。後者については曲げ強度により評価した。供試体は木製型枠(500×700×100mm)に吹付けし、20±1℃の水中にて28日間養生したのち、カッターにより100×100×400mmの寸法に切り出した。強度試験はすべて材令1.5ヶ月で実施した。

3 試験結果

3.1 吹付け条件の影響

現在の吹付け機械はブレンコンクリート(又はモルタル)を対象に開発されたものであるから、その性能をそのままSFRMの吹付けに適用できるとはいえない。ここでは、吹付け条件としてモルタル吐出量と空気量を取り上げその影響について調査した。

(1) はね返り率

吐出量 V_m 、空気量 V_a がモルタルとSFを含めた全のはね返り率(単にはね返り率と記す)及びSF損失率に及ぼす影響を図3に示す。これより、SFRMのはね返り率、SF損失率はともに吹付け機の吐出量 V_m が大きいほど小さく、逆に空気量 V_a を大にすると両者とも大きくなることわかる。また、ブレンモルタル(PM)においても同様の傾向が認められる。

これらの現象は、吐出量を小さくあるいは空気量を大きくすると、吹付けられる各材料の飛び出し速度が大きくなり、吹付け面での反発力が増大するためと考えられる。そこで、吐出量と空気量の比 V_m/V_a (混合比)を用いて図3の結果を整理し直したのが図4で、このようにすると吐出量、空気量の影響が一つの曲線で表わされる。実験データが少なく、今後検討の余地はあるが、SFRMのはね返りを少なくするには、混合比 V_m/V_a を2%前後に選定するのが望ましいと言える。

(2) 曲げ強度

他方、吐出量と空気量が吹付け後の強度に及ぼす影響を示したのが図5である。SFRMの曲げ強度は混合比 V_m/V_a が大きくなると向上する。これは図4に示したごとく、 V_m/V_a が大きくなるとSF自身のはね返りが少なくなるためである。これに反し、PMでは V_m/V_a が大きくなると逆に強度は低下する傾向にある。この理由は V_m/V_a が大きくなると締固め効果が減少し、図5下段に示すごとく密度が小さくなるためと考えられる。したがって、SFを混入しない場合、 V_m/V_a を小さくしてはね返りが多くなっても強度は逆に向上することから吹付け条件としては特に問題とならないが、SFRMの場合、補強材であるSFのはね返りが大きくなると実質SF混入率が低下し、補強効果が減少するため吹付け条件としては不利となる。以上のことから、SFRMの吹付け条件としては、本実験の範囲内で見限り、混合比 V_m/V_a を2%前後にするのが良いと言える。

3.2 鋼繊維の形状寸法の影響

(1) はね返り率

吹付け厚さごとのSFRMのはね返り率とSF損失率の変化を図6、7に示

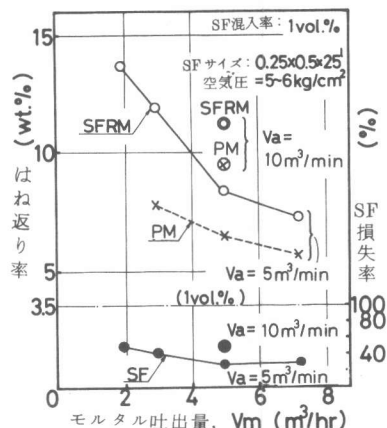


図3. モルタル吐出量、空気量ははね返り率に及ぼす影響

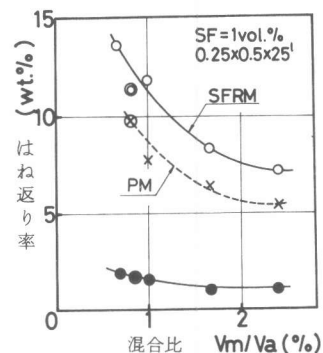


図4. はね返り率と混合比 V_m/V_a

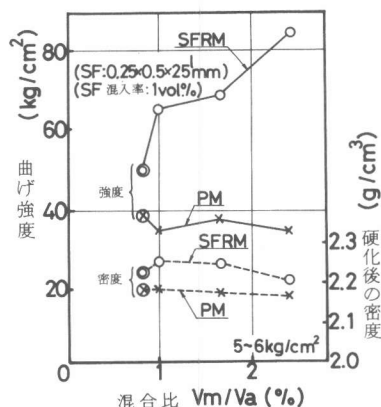


図5. 曲げ強度、密度と混合比 V_m/V_a との関係

す。SFRM, PMのはね返り率及びSF損失率はともに壁面付着厚さが約2 cmに達するまでが非常に多く、4 cm以上になるとほぼ一定となる。しかし、吹付け厚さに関係なくSFのアスペクト比が大きいほどはね返り率は大きくなっている。

そこで、SFRMのはね返り率をSF長さで整理したのが図8である。これより、SF断面が一定の場合、長さが長く（アスペクト比が大きくなるにしたがってはね返り率は大きくなる）ことがわかる。この現象は吹付けコンクリートにおいて³⁾ 粒径の大きい骨材ほどはね返りが多いという報告と類似している。また、この結果は、吹付け後洗

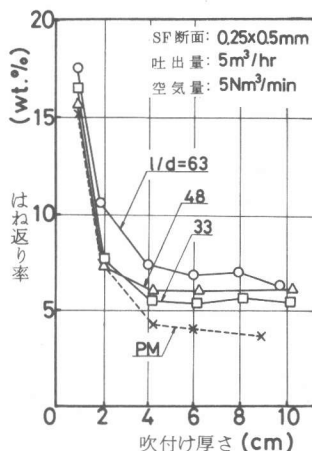


図6. はね返り率と吹付け厚さ

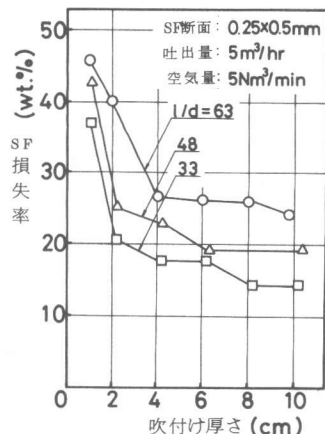


図7. SF損失率と吹付け厚さ

い試験により求めたSF付着率の試験結果（図9）とほぼ一致している。しかしながら、断面の偏平率 (W/t) が2以下のSFの場合、SF長さ $\ell=20\sim35$ mmの範囲ではSF長さが付着率、はね返り率に及ぼす影響は小さく、したがって、圧送中の閉塞問題がなければSF長さが長くとも吹付けに使用可能であると言える。なお、SF長さが同一 ($\ell=19$ mm) の場合、SF断面積が小さくなるとはね返り率は大きくなる傾向を示すが、付着率では顕著な差は認められない。

(2) 曲げ強度

吹付け及び流し込み成型品の曲げ強度とSF長さとの関係を図10に示す。SF断面が一定の場合、SF長さが長く（アスペクト比が大きくなるにしたがって吹付け及び流し込み強度は高くなるが、アスペクト比が同一の場合0.25×0.5×19 mmの点を除き、SF長さに関係なくほぼ等しい値を示す。以上より、SFのはね返りが多くなっても、強度面からはSFのアスペクト比 (ℓ/de) が大きいほど効果的で、 ℓ/de は少なくとも48以上が望ましいと言える。

他方、吹付け強度は実質SF混入率が計画混入率の10～30%低下するにもかかわらず、すべてのSFの種類について、流し込み強度より10～20%程度高くなっている。これは吹付けられたSFが吹付け方向に垂直な平面内にはほぼ二次元ランダム配向し、応力方向に対し有利な配向状態となるためである。写真1は吹付けSFRMのX線写真で、これをもとに代表的なSFの吹付け面に対す

る平均角度 θ を求めたのが表3である。これより、吹付けられたSFはSF長さに関係なく吹付け面にほぼ平行に分布していることがわかる。そこで、吹付けの場合のSFの配向係数 α を、SFは吹付け面に平行な平面内では二次元ランダム分布すると仮定し、 $\cos\theta$ を補正係数として次式により求めた。結果は表3に

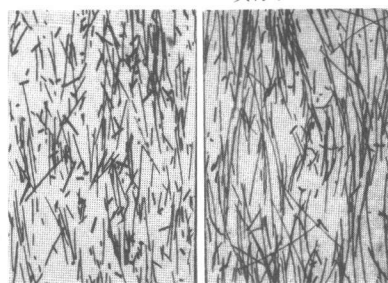


写真1. 吹付けられたSFRMのX線写真
(SF: 0.25×0.5×13mm) (SF: 0.25×0.5×25mm)

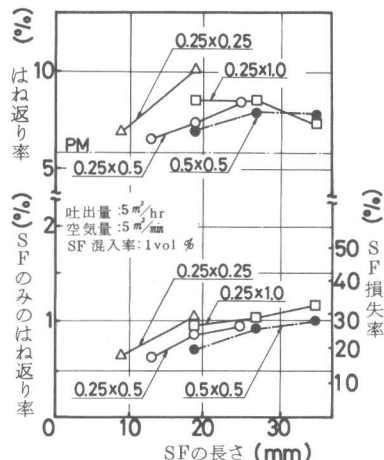


図8. SF長さとはね返り率

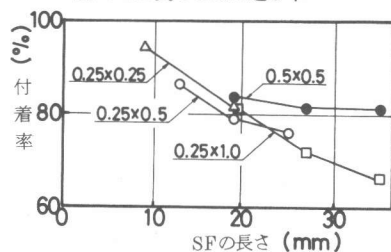


図9. SF付着率とSF長さ

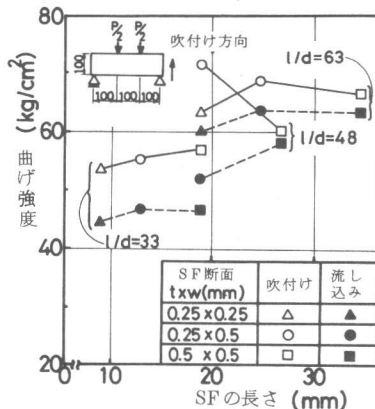


図10. SF長さとはね返り率

示すとおりで、配向係数 $\alpha \approx 0.60$ となる。 $\alpha = \cos \theta \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \gamma \cdot d\gamma / \frac{\pi}{2}$

以上の結果、吹付け強度は配向係数 α 、実質 S F 混入率 (計画混入率 $V_f \times$ 付着率/100) によってほぼ決定されると考えられる。そこで、配向係数 α 、S F 混入率 $\bar{V}_f$ を考慮した混合則を用いて今回の結果を整理したのが図 11 である。図中の計算式 σ_b^p 、 σ_b^s の定数は最小二乗法で求めた。これより、吹付け強度と流し込み強度の傾向は若干異なるものの、吹付け後の曲げ強度は、S F の配向係数 α 、実質 S F 混入率 $\bar{V}_f$ を考慮することにより、混合則を用いてある程度推定可能であることが判明した。

(3) 曲げタフネス (靱性)

曲げ試験における代表的な $P-\delta$ 曲線を図 12 に示す。これから明らかなように、S F のアスペクト比が小さいために、最大荷重が小さくとも断面が大きい場合には最大荷重は小さいがそれ以後の変形能は逆に向上する場合がある。そこで、A C I Committee 544 で提唱された Toughness Index (T.I.) の概念を導入し、たわみ量が 2 mm に達するまでの荷重-たわみ曲線とたわみ軸とで囲まれた部分の面積をブレンモタルの場合の面積で除した値を T.I. として各 S F についてそれぞれの T.I. を求めた。結果は図 13 に示すとおりで、吹付け品の T.I. は S F 寸法に関係なくすべて流し込み品の場合より大きい。またアスペクト比が大きく且つアスペクト比が同一でも S F 長さが長く (断面が大きく) になると T.I. は大きくなる。これはアスペクト比が同一でも S F 長さが長くなると平均付着強度が小さくなり、S F の引き抜ける確率が高くなるためと考えられるが、今後さらに詳細な検討が必要である。以上より、大きいタフネス (靱性) を必要とする場合にはアスペクト比が小さくとも長い S F を使用することが望ましいといえる。

4. まとめ

- (1) S F R M のはね返り率を小さく且つ強度を向上させるためには、吹付け条件としてのモルタル吐出量 V_m 、空気量 V_a の比 V_m/V_a を 2 倍前後にするのが良い。
- (2) 吹付けに適した S F 形状寸法としては、はね返り率、S F 付着率及び曲げ強度等をもとに評価すると $\theta = 20 \sim 35$ 、 $l/d \geq 48$ が望ましい。また、高い靱性 (曲げタフネス) が要求される場合には、施工が可能な限り長さが長く且つ断面の大きい S F を使用の方が効果的である。

5. 参考文献

- 1) 小林; セメント・コンクリート 373, Mar. 1978, PP. 2-9
- 2) 中原, 中里, 須藤; 土木学会第 34 回年次学術講演会概要集, V, 1979, 10 月, PP. 153-154
- 3) W.H.Ward and D.L.Hills; Building Research Establishment Current Paper CP18/77, April 1977
- 4) 福光, 森山, 他 4 名; 鋼繊維補強コンクリートに関するシンポジウム発表論文集, 1977, 11 月, PP. 168-171
- 5) R.N.SWAMY, P.S.MANGAT; Proc. Inst. Civil Engin. 1974, Dec, PP. 701-707
- 6) E.K. Schrader; Proc. of RILEM Symposium. 1978, PP. 9-21

表 3. 吹付け SFRM の配向係数

S F の種類	吹付け面に対する		配向係数 α
断面 (mm) 長さ (mm)	平均角度 θ (°)		
0.25 $\times$ 0.5	13	21.6	0.59
	19	17.3	0.61
	25	18.5	0.60

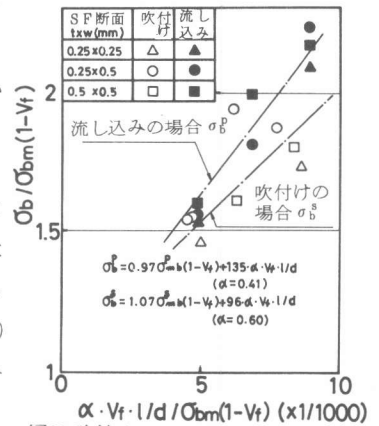


図 11. 吹付け SFRM の曲げ強度の推定

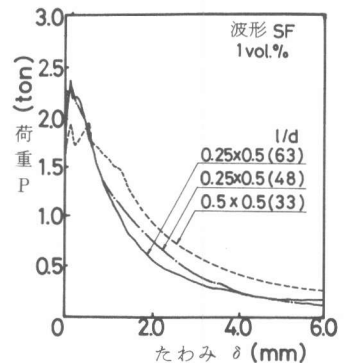


図 12. 吹付け品の代表的荷重-たわみ曲線の例

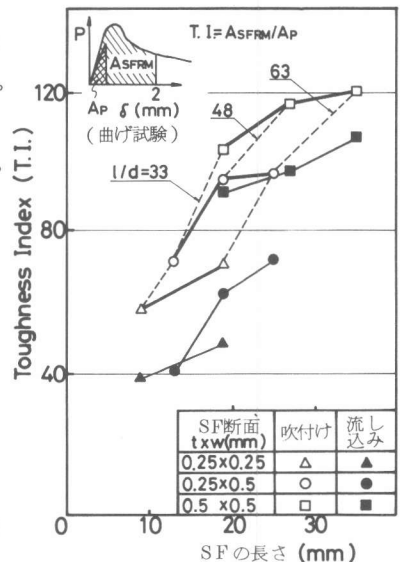


図 13. S F 寸法と Toughness Index