

[1082] スチールファイバーコンクリートの圧送性能に関する実験的研究

正会員 ○ 西垣 太郎 (大成建設技術研究所)
 石堂 修次 (大成建設東京支店)
 桐ヶ谷 仁 (プリヂストン新事業開発室)
 正会員 山内 克己 (プリヂストン・ベカルト
 スチールコード販売部)

1. 序

倉庫、工場のRC床は、面積が広く乾燥収縮によるひびわれ、フォークリフト等の動的荷重によるひびわれが生じやすい。これらのひびわれ発生やひびわれ幅の拡大は、コンクリートのミクロな構造に起因するので、鉄筋補強による防止が難しい。この対策のひとつとして、プレストレストコンクリート工法があげられるが、周辺の壁、架構にひびわれを生じやすい欠点がある。スチールファイバーコンクリート (SFRC) は、強化則によってひびわれ強度が改善されるとともに、ファイバーの付着が良い場合、あるいは機械的定着のある場合には、ひびわれ発生後も、ファイバーの架橋効果により応力を伝え、正勾配で荷重が増えるので、ひびわれ幅の拡大を制御することができる。

筆者らはこの点に着目し機械的定着効果の大きいファイバーを用いて、倉庫、工場のRC床にSFRCを使うことを考えているが、この報告は、そのポンプ施工性に関する実験的研究の一部である。

2. 実験の目的

SFRCのポンプ施工については、せん断カットファイバーを使った坂井らの報告⁽¹⁾がある。本研究では、コンクリート中での分散をよくするため、ホッチキスの玉のように糊付けされかつ力学的性状が優れていると考えられる、 ϕ 寸法の長い (長さ=60mm, 径=0.8mm), ϕ 両端にフックの付いた、伸線カットファイバーを使って、i) 室内試験を行いSFRCの調合、スチールファイバー (SF) 投入後、並びに、流動化後におけるSFRCのフレッシュコンクリートの性質、力学的特性を検討する。ii) 圧送試験 (水平圧送試験 $L = 116m$, 垂直圧送試験 $H = 25m$) を行い、圧送特性、圧送前後におけるSFRCのフレッシュコンクリートの性質、力学的特性、SFの分散性について検討する。

表-1 実験に使用した材料

材 料	内 容
セメント	普通ポルトランドセメント
粗骨材	砕石津久見産 (最大骨材寸法20mm, 表乾比重2.70, FM6.63)
細骨材	砂 木更津・鹿島産 (比重2.59, FM2.51)
スチールファイバー	両端フック付 伸線カットファイバー
混和剤	リグニンスルホン酸塩
流動化剤	メラミンスルホン酸塩系複合物

3. 実験

表-2 実験に使用したスチールファイバーの形状と寸法

3.1 使用材料

本実験に使用した材料、および、SFの形状寸法をそれぞれ表-1, 表-2に示す。SFの材質はA, B共にJIS G3505, SWRM6相当品で、引張強さは $110 - 120kg/cm^2$ である。

記号	形状	公称長さ (L) (mm)	直径 (D) (mm)	アスペクト比 (L/D)	公称断面積 (mm ²)	1本当りの重量 (mg)
Aファイバー		60	0.8	7.5	0.503	237
Bファイバー		30	0.5	6.0	0.196	46

3.2 室内試験方法

図-1に示す流れに従って室内試験を行った。SFRCの調合を表-3に示す。力学的には圧縮強度 $\sigma_c = 350kg/cm^2$, 曲げ強度 $\sigma_b = 90kg/cm^2$ を目標とした。調合設計はスランプ18cm, 空

気量4%として、小林、岡村の研究⁽²⁾を参考にして行った。SFRCの練り混ぜは傾胴式ミキサー(容量100ℓ)を用い1バッチ40ℓとし、コンクリートが練り上がった後、ミキサーを停止してSFを投入し、再混練を行った。

3.3 圧送試験方法

水平及び垂直圧送試験は、図-2に示す試験の流れに従って行った。SFRCの練り混ぜは、アジテータ車(容量6 m^3)を用い、4 m^3 のコンクリートに所定のSFを直接投入し、かく拌して行った。SF投入に際しては、投入中はドラムを低速回転させた。SF投入終了後、および、流動化剤投入後は、それぞれ、1分30秒間、1分間の高速回転をして練り混ぜを行った。図-3、図-4に水平・垂直圧送試験時の配管を示す。各々の圧送距離は116 m 及び25 m である。なお、後者には、水平圧送距離約30 m が付加している。配管は全て5B管を用い、図中A~E部に管圧測定用のセンサーを取り付けた。表-4にポンプ車の仕様、図-5に測定ブロックダイアグラムを示す。尚、管圧測定は、目標吐出量を20, 30, 40, 50 m^3/hr と変化させ、各吐出量時においてピストンを10ストローク稼働させて行った。

4. 実験結果とその考察

4.1 フレッシュコンクリートの性質

4.1.1 練り混ぜ状況

室内試験において、SFの練り混ぜ状況を観察すると、SF投入後、1分30秒で、寸法の大きいAファイバーを用いたNo.1, No.2調合とも、水溶性高分子で糊付けされたファイバーは、良くほぐれ分散よく練り混ぜられた。また流動化後の練り混ぜでも分離することなく良好なSFRCが得られた。圧送試験においては、どの調合でもファイバーボール等のトラブルはなく良好なSFRCが得られた。このことよりファイバーの両端にフックがあること、寸法が大きいことが混練性に与える影響は、細骨材率を変え、SF投入前のコンクリートのスランプを調整することにより解決されると

表-3 SFRCの調合

調合No	SF種	混入率 %vol	セメント kg/m^3	水 kg/m^3	細骨材 kg/m^3	粗骨材 kg/m^3	SF kg/m^3	混和剤 kg/m^3	流動化剤 kg/m^3	W/C %	s/a %
No.1	A	1.0	432	216	959	616	80	1,728	1,550	50	61
No.2	A	0.7	412	206	879	743	56	1,648	1,000	50	54
No.3	B	1.2	402	201	926	716	96	1,608	2,400	50	56
No.4	B	0.7	382	191	816	874	56	1,528	1,375	50	48

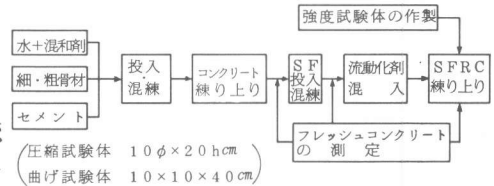


図-1 室内試験の流れ

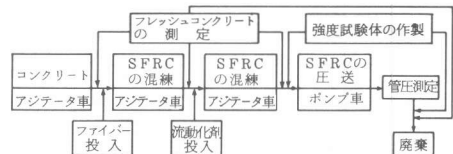


図-2 圧送試験の流れ

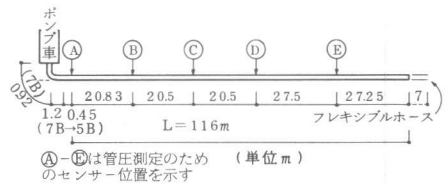


図-3 水平圧送試験の配管図

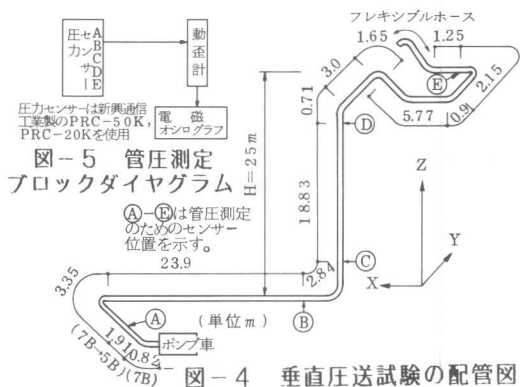


図-4 垂直圧送試験の配管図

表-4 実験に使用したポンプ車の仕様

項目	仕様
型	ピストン式
コンクリートシリンダ	180×1500mm(38ℓ/ストローク)
最大吐出量	90 m^3 /時
理論吐出圧力	65 kg/cm^2

考えられる。

4. 1. 2 スランプの変化

室内試験、圧送試験におけるスランプ変化を図-6に示す。いずれのSFRCにおいても、SF投入後のスランプは、元のコンクリートのスランプより4~7cm低下する。No.1, No.2調合で寸法の大きいAファイバーの場合は、ファイバー混入量が1%、0.7%と異なっても、スランプ変化に差異は見られなかった。Bファイバーを用いたNo.3調合の場合、SF投入後のスランプダウンが大きい。これはNo.3調合において、ファイバー長が短く、かつファイバー混入量が1.2%と多いため、例えば、No.1調合より、ファイバー本数が6倍近くになるためと考えられる。圧送試験の場合、圧送前後によるスランプの変化は、バラツキはあるものの、ほぼ一定であった。

4. 1. 3 空気量の変化

空気量の変化を図-7に示す。室内試験における空気量は、SF投入前のコンクリートで4.8~5.5%を示した。

SFを投入して流動化後は4.1~5.0%と少なくなったが、ほぼ、プレーン、SF投入後、流動化後で一定した値を示した。一方、圧送試験では、SF投入によって空気量は、SF投入前の1.3~2.5倍に増加し、特に水平圧送試験においては、6.5~7.3%に達した。これは、アジテータ車で、SFRCを練り混ぜる時、空気をコンクリート中に取り込むためと考えられる。特にBファイバーを用いたNo.3調合では、流動化後も空気量が増加した。4.1.2でも述べたように、No.3調合は、短いファイバーが数多く入っているためと思われる。このことより実際の施工にあ

たっては、SF投入前のコンクリートの空気量は、SFRC打設時の設定値より低く押える必要がある。垂直圧送試験では、水平圧送試験において空気量が著しく多くなったので、SF投入前のコンクリートの空気量を3%と低く設定した。その結果圧送後の空気量は、3.5~5.2%と水平圧送試験の空気量より低くなり、設定値近くなった。しかしSF投入と流動化に際する練り混ぜ後は、水平圧送試験と同様に、空気量が増加する傾向を示した。

4. 2. ポンプ圧送並びに圧力損失

No.1, No.2, No.3, 3種類の調合の水平及び垂直圧送試験を行った結果、いずれの調合においても、圧送可能であり、ファイバーボール、あるいは、SFを糊付けしている水溶性高分子糊の溶け出し不良等によって、管が閉そくしたり過大な圧力がかかるということはない。水平圧送試験において、目標吐出量50ml/hrの場合、管内圧力損失から圧送限界距離を算出すると、Aファイバーを1%混入したNo.1調合では780m、Aファイバー混入率0.7%のNo.2、及びBファイバー混入率1.2%のNo.3調合では682mとなって、ポンプ圧送性について全く問題ないと考え

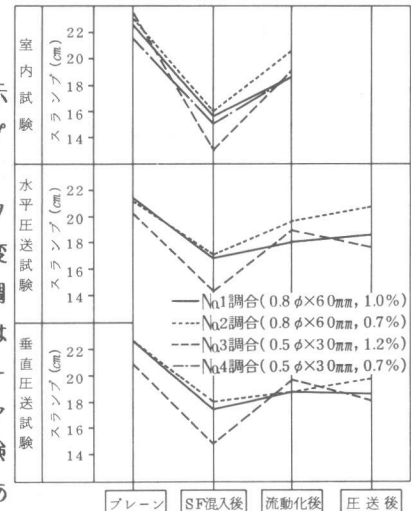


図-6 SFRCのスランプの変化

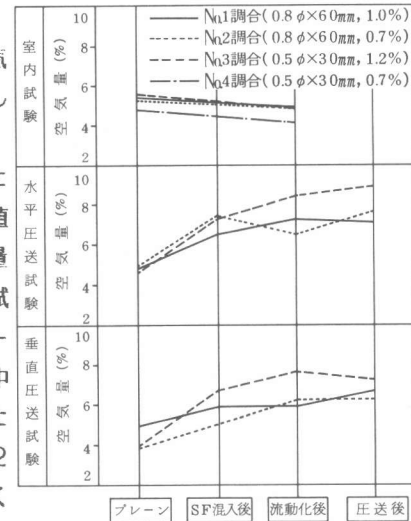


図-7 SFRCの空気量の変化

られる。

表-5に各調合の水平及び垂直圧送試験時の理論吐出量、主油圧、並びに管内圧力測定結果を示す。また、目標吐出量を20 m^3/hr と50 m^3/hr に設定した場合の、水平及び垂直圧送試験における管内圧力分布を水平換算距離とともにそれぞれ図-8と図-9に示した。水平圧送試験時の管内圧力分布は、普通コンクリートと同様に、根元部分が高く直線的に先端に向かって圧力が低くなっている。一方、垂直圧送試験時の管内圧力分布は、中間部が低く、下に凸の曲線的な圧力こう配を示しており、軽量コンクリートを圧送したときの圧力分布によく似ている。

各調合の単位長さ当りの管内圧力損失を、目標吐出量とともに、水平および垂直圧送試験についてそれぞれ図-10と図-11に示した。図-10並びに図-11と、普通コンクリートの管内圧力損失、図-12⁽³⁾とを比較すると、スランプ18~21 cm の普通コンクリートに相当している。圧送したSFRCのスランプは18~20 cm の範囲にあるが、これは、ファイバーが混入されていることによる見掛けのスランプで、普通コンクリートのスランプとは異なる。しかしながら、本実験のように、SF混入量が1.2%以下で、スランプが18~20 cm 程度のSFRCの圧送を検討する場合には、普通コンクリートと同等と見做して計画すれば良いと思われる。

4.3 硬化後のSFRCの力学的性質

室内試験、圧送試験におけるSFRCの圧縮強度 σ_c 、曲げびわれ強度 σ_t 、曲げ強度 σ_b 、曲げタフネス T_b を図-13に示した。室内試験における各強度と曲げタフネスが、圧送試験に比較して高く、特に圧縮強度においてその傾向が大である。

この原因としては、空気量が表-7に示すように、室内試験の方が少ないことによるものと考えられるが、空気量の違いということでは、曲げ試験結果によりその影響が表われて良い筈で

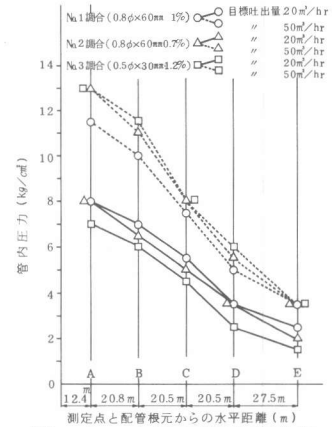


図-8 水平圧送試験時における管内圧力の分布

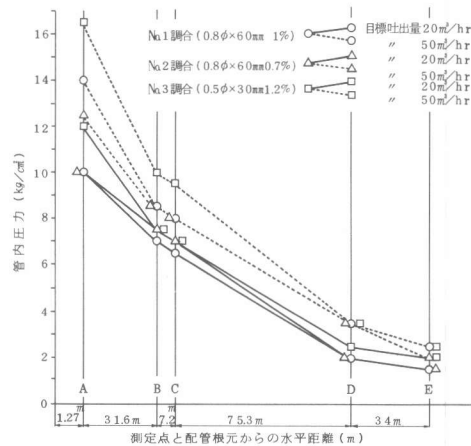


図-9 垂直圧送試験時における管内圧力の分布

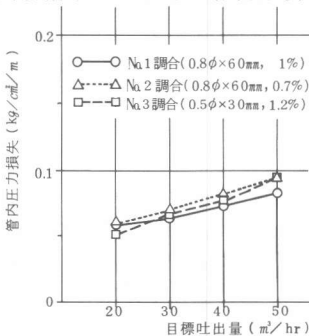


図-10 水平圧送試験時における管内圧力損失

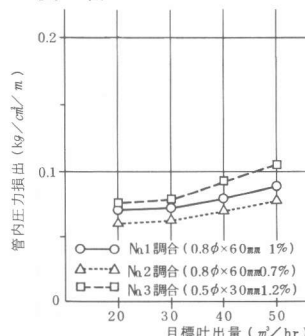


図-11 垂直圧送試験時における管内圧力損失

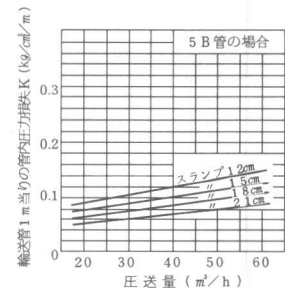


図-12 普通コンクリートの
輸送管1 m 当りの管内
圧力損失 $K^{(3)}$ ($\text{kg}/\text{cm}^2/\text{m}$)

表-5 圧送試験における管内圧力測定結果

SFRC調合	目標吐出量 (m ³ /hr)	理論吐出量 (m ³ /hr)		主油圧 (kg/hr)		管内圧力 (kg/cm ²)											
		水平		垂直		A		B		C		D		E			
		水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直		
No.1調合	2.0	2.29	2.36	4.0	5.0	8.0	10.0	7.0	7.0	5.5	6.5	3.5	2.0	2.5	1.5		
	3.0	3.03	3.09	5.0	5.5	9.0	11.5	8.0	7.5	6.0	7.0	4.0	2.5	3.0	2.0		
	4.0	3.82	3.93	5.2	6.0	10.0	12.5	8.5	8.0	6.5	7.5	4.5	3.0	3.5	2.5		
	5.0	4.93	5.06	6.0	7.0	11.5	14.0	11.0	8.5	7.5	8.0	5.0	3.5	3.5	2.5		
No.2調合	2.0	2.28	2.36	4.0	5.0	8.0	10.0	6.5	7.5	5.0	7.0	3.5	2.0	2.0	1.5		
	3.0	3.04	3.06	5.0	5.0	9.5	10.5	8.0	8.0	6.0	7.0	4.0	2.5	2.5	2.0		
	4.0	3.78	3.92	5.5	5.8	11.0	11.5	9.0	8.5	6.5	8.0	4.5	3.5	2.5	2.5		
	5.0	4.89	5.03	6.5	6.5	13.0	12.5	11.0	8.5	8.0	8.0	5.5	3.5	3.5	2.5		
No.3調合	2.0	2.27	2.38	4.0	5.0	7.0	12.0	6.0	7.5	4.5	7.0	2.5	2.5	1.5	2.0		
	3.0	2.94	3.14	5.0	5.5	9.0	13.0	7.5	8.0	5.5	7.5	3.0	2.5	2.0	2.0		
	4.0	3.76	3.92	5.2	6.0	10.5	14.5	9.0	8.5	6.5	8.0	4.0	3.0	2.5	2.5		
	5.0	4.78	5.03	6.5	7.0	13.0	16.5	11.0	10.0	8.0	9.5	6.0	3.5	3.5	2.5		

あり、今後の検討を要する。また水平圧送試験結果は、垂直圧送試験結果より強度が低い傾向を示している。これは、水平圧送試験において、空気量が6.5~8.9%と著しく多かったためと考えられる。曲げひびわれ強度 σ_t は、室内試験が70kg/cm²以上と高い値を示したが、水平、垂直圧送試験による両者の強度の差はそう大きくなかった。圧送試験においては、圧送後の諸強度、曲げタフネスともNo.1調合が高く、No.2, No.3の順になっており、寸法が大きいかつアスペクト比の大きいAファイバーを使うことは、短いBファイバーを多量に使うより力学的に効果的であることを示している。No.1調合は垂直圧送試験において設計値の目標である $\sigma_c \geq 350\text{kg/cm}^2$ 、 $\sigma_b \geq 90\text{kg/cm}^2$ を満足した。

この実験の特徴の1つとして、圧送前後における曲げひびわれ強度、曲げ強度、曲げタフネスの低下があげられる。特に、この傾向は、垂直圧送試験において著しく、曲げ強度の場合、No.1調合18%、No.2調合45%、No.3調合21%の低下をきたした。図-14~図-16はそれぞれ室内試験、圧送試験前後によるSFRCの曲げ荷重-変位曲線を示したものである。ひびわれ後の大变位領域を中心にしたのでひびわれ発生までは、変位が小さく荷重軸に重なっている。

室内試験では、ひびわれ後、変位が進んでも荷重が上昇するバイ

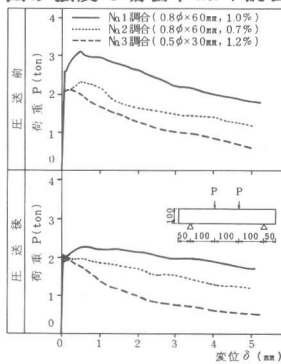


図-15 水平圧送試験における曲げ荷重(P)~変位(delta)曲線

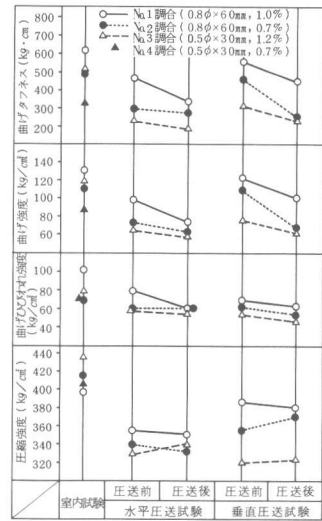


図-13 SFRCの曲げ・圧縮強度試験結果

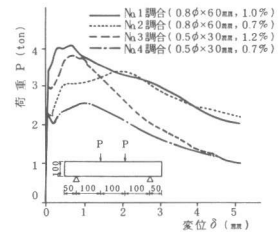


図-14 室内試験における曲げ荷重(P)~変位(delta)曲線

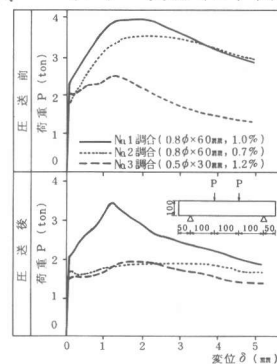


図-16 垂直圧送試験における曲げ荷重(P)~変位(delta)曲線

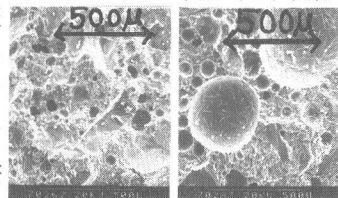


写真-1

写真-2

後の曲げ試験体破断面における 100倍の電子顕微鏡写真の一例を示したものである。圧送前のSFRCの空隙は70 μ 程度の小さいものが多いが、圧送後は300 μ 前後の大きな空隙が散見される。これが圧送試験後の曲げ力学的性質に影響を与えていると考えられるが、管内をSFRCが流れるときどうしてこのような現象が起きるのか不明であり今後の研究を必要とする。

4. 4. スチールファイバーの分散性

表-6は、SFRC中のSFの分散性を調べるため、圧送試験において、容量7 ℓ で洗い試験を行った結果である。測定値/所定混入量の比で示した。パラッキはあるものの、SFは、分散良く練り混ぜられていた。図-17は、圧送試験において、100 \times 100 \times 7cmの型枠にSFRCを打ち込み、図中に示した中央部で断面を切り取り、ファイバー本数の測定値と理論値を比較したものである。理論値は $n_w = \beta NL / V^{(4)}$ (n_w : 単位面積当りのファイバー本数、 β : 配向係数、 N : 体積V中のファイバー本数、 L : ファイバー長さ、 V : SFRCの体積) $\beta = 0.41^{(5)}$ として計算した。試験体の厚さが7cmのためファイバーの長いNo.1と、No.2の調合の測定値は二次元配向近くなるので理論値の1.3倍と大きく、No.3調合はファイバー長さが短いため三次元配向に近く1.1倍と理論値に近くなった。またテストピース切断面観察によるとファイバーの分散性も良好であった。

5. 結論

両端にフックの付いた寸法の長い特殊なSFを用いたSFRCのポンプ圧送試験を行い次のような結論を得た。1)SF混入量が1.2%以下で、スランプが18~20cm程度のSFRCのポンプ圧送性と施工性を考える場合、普通コンクリートと同等に見做して計画して良い。2)圧送後のSFRCの力学的特性として曲げひびわれ強度60kg/cm²、曲げ強度90kg/cm²、圧縮強度350kg/cm²を満足し靱性に極めて富むコンクリートが得られ、これらの力学的性質を損うことなく水平及び垂直ポンプ圧送できることが分った。3)圧送前後において、曲げに関する力学的性状の低下がみられ、SFRCに特有なものかどうか今後の研究課題である。

謝辞. 実験と論文作成に協力を得た大成建設技術研究所 石井貴和氏とプリチストン・ベカルトスチールコード 篠塚誠治氏に深甚の謝意を表します。

参考文献.

- (1) 坂井正美、中村信行: SFRC構造建物のためのポンプ施工実験、第3回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.241~244.1981
- (2) 小林一輔、岡村雄樹: 所用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の配合設計法、土木学会論文報告集、No.296, pp.111~119.1984.10.
- (3) コンクリートポンプ工法施工指針案、同解説、日本建築学会、pp.45.1979.
- (4) James P. Romualdi and James A. Mandel: Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement, Journal of the American Concrete Institute, pp.657 ~ 671 June, 1964.
- (5) S. R. Parimi, J. K. S. Rao: On the fracture toughness of fiber reinforced concrete, Fiber reinforced concrete, A. C. I. SP-44 pp. 80 ~ 92, 1974.

表-6 SFRC中のファイバー本数比 (測定値/所定混入量)

調合	水平圧送試験		垂直圧送試験	
	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
No.1	0.85	0.72	1.00	1.20
No.2	1.12	0.87	1.10	1.00
No.3	0.96	1.00	0.95	0.87

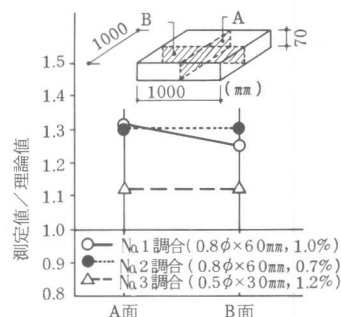


図-17 ファイバー本数比