

論文 繊維補強吹付けコンクリートの強度特性に関する研究

平間 昭信^{*1}・大森 啓至^{*2}・西村 次男^{*3}・魚本 健人^{*4}

要旨:配合(水セメント比, 繊維混入率)および施工条件(圧送空気流量, 急結剤添加率)を実験要因とし, 繊維補強吹付けコンクリートの強度特性とX線撮影により繊維の配向性, 分散性について実験を行った。今回の検討においては, 圧送空気流量が吹付けコンクリート硬化体中の繊維の配向性への影響が見受けられ, 曲げ強度および曲げタフネス係数に影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード:吹付けコンクリート, 繊維補強, 曲げ強度, 配向性, X線画像

1. はじめに

近年の第二東名・名神高速道路建設計画に見られるように, トンネルの大断面化, 扁平化および各種地下構造物など, 多様化するニーズや建設費縮減を背景とし, トンネル支保の形式が次第に変化している。これを反映して主要な支保部材である吹付けコンクリートについては, 品質の向上(高強度化, 高品質化)を図るべく種々の取り組みがなされている¹⁾。その取り組みの一つである繊維補強吹付けコンクリートは, 引張強度, 曲げ強度, 靱性およびひび割れ拘束性能などの向上が図れることから, 破砕帯などの地質が脆弱な地山, 膨張性の地山あるいは地下発電所のような地下大空洞などにおいて適用されている。第二東名・名神高速道路建設計画においても, トンネルを安全かつ経済的に建設するための新しい支保材料として実用化に向けた検討が行われており²⁾, 今後更なる需要の増加が予想される。しかしながら, 吹付けコンクリートは, 圧縮空気により吹き付ける特殊な施工方法であるため, はね返りによる構成材料の比率の変化や, 硬化体中の繊維の分散や配向が打込みのコンクリートとは異なることが指

摘されている³⁾。しかし, これらと強度特性との関係についての検討は十分に行われていないのが現状である。本研究では, 鋼繊維吹付けコンクリートについて, 実規模大の湿式吹付け実験により供試体を作製し, 圧縮強度試験, 曲げ強度試験および曲げタフネス試験を実施し, また, 曲げ強度試験を実施した供試体については, X線撮影により鋼繊維の配向性を調べ, 強度特性との関係について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 配合および使用材料

吹付け実験における実施配合を表-1に, 使用した材料の物性値などを表-2に示す。

2.2 吹付け方法

吹付け方式は湿式吹付け方式とし, 吹付けシステムは空気圧送方式とした。空気圧送方式はローター方式の吹付け機を用い, 急結剤との混合装置まで 20m を空気圧送し, 急結剤と混合して 2m のフレキシブルホースを介してテーパノズル(L=0.6m)にて吹付けを行った。なお, 吐出量は, 8m³/hr 一定で実験を実施した。

*1 飛島建設㈱技術研究所材料研究室主任 (正会員)

*2 太平洋セメント㈱中央研究所第一研究部コンクリート技術Gグループリーダー 工修

*3 東京大学生産技術研究所第5部技術官 (正会員)

*4 東京大学国際・産学共同研究センター教授 工博 (正会員)

表-1 実施配合

スランブ (cm)	空 気 量 (%)	水結合材比 (%)	繊維混入率 (vol %)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
12	2	55.6	0.0	60.0	200	360	1,040	710
			0.5	62.5	205	369	1,061	654
			1.0	65.0	210	378	1,082	598
			1.5	67.5	215	387	1,100	545
21	2	44.4	0.0	58.2	200	450	965	710
			0.5	61.2	200	450	1,004	657
			1.0	63.8	205	462	1,024	598
			1.5	70.0	230	518	1,037	459

注1) 目標スランブを得るために、高性能減水剤により適宜調整を行った。

注2) 繊維混入率とは、コンクリート1m³中に占める鋼繊維の容積百分率である。

表-2 使用材料

材 料	名 称	密度(g/cm ³)	諸 元 , 主 成 分
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	比表面積 3,320cm ² /g
細 骨 材	千葉県君津市産山砂	2.62 ^{注1)}	吸水率 1.64%, 粗粒率 2.62
粗 骨 材	東京都八王子産6号砕石	2.69 ^{注1)}	吸水率 0.97%, 粗粒率 5.88
混 和 剤	高性能減水剤	1.05	主成分 ポリグリコールエステル誘導体
繊 維	鋼繊維(両端ダブルフック付き)	7.85	長さ30mm, 径0.6mm
急 結 剤	セメント鉱物系粉体急結剤	2.57	主成分 カルシウムアルミネート系

注1) 細骨材, 粗骨材の密度は, 表乾密度である。

2.3 実験要因および水準

表-3に, 実験要因および水準を示す。急結剤添加率はセメント量に対する質量百分率である。

表-3 実験要因および水準

実験要因	W/C	実験水準
繊維混入率	55.6%	0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%
	44.4%	0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%
圧送空気量	44.4%	10m ³ /min, 12m ³ /min, 18m ³ /min
急結剤添加率	55.6%	C×7.0%
	44.4%	C×3.5%, C×5.0%, C×6.5%

2.4 供試体の作製方法

吹付けコンクリートは, JSCE-F553 に準拠し, 箱型枠(60 × 60 × 25cm)に吹付けた試験体よりコア供試体およびはり供試体を採取した。また, 比較として, 荷下ろし時のコンクリート(以下, ベースコンクリート)についても, JSCE-F552 に準拠して供試体を作製した。

箱型枠採取終了時, はね返り材を回収し, はね返り率および鋼繊維はね返り率を求めた。

2.5 試験項目および試験方法

(1)強度試験

強度試験に関する試験は, ①圧縮強度試験(JSCE-G 551に準拠), ②曲げ強度および曲げタフネス試験(JSCE-G 552に準拠)を実施した。曲げタフネス試験では, 載荷点のたわみが

スパンの 1/150 となるまでの荷重-たわみ曲線下の面積を求め, 曲げタフネス係数を算出した。なお, 曲げ強度試験における載荷面は, 吹付けコンクリートは吹付け面を下面となるように設置し, ベースコンクリートでは型枠側面を上下面となるように設置した。

(2)X線撮影による鋼繊維の配向

鋼繊維の配向の測定は, 曲げ試験終了後の供試体を用いた。破壊断面近傍を図-1に示すように, 吹付け面または打込み面に平行な面(以下, X断面)およびその面に垂直な面(以下, Y断面)の2断面を10mm程度の厚さに試験片を切り出し, X線撮影を行った。その繊維投影面積Aを用いて式(1)により, 切断面に直角な方向への配向係数βを算出した⁴⁾。

$$\beta = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{A}{ndt} \right) \right] \quad (1)$$

n:繊維数, d:繊維径, t:試験片の厚さ

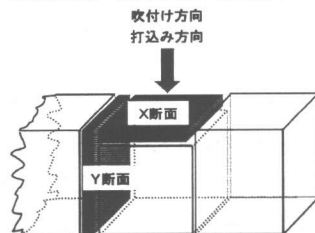


図-1 鋼繊維の配向性測定断面

X線撮影による鋼繊維の投影画像の一例（鋼繊維混入率 1%）を図-2に示す。

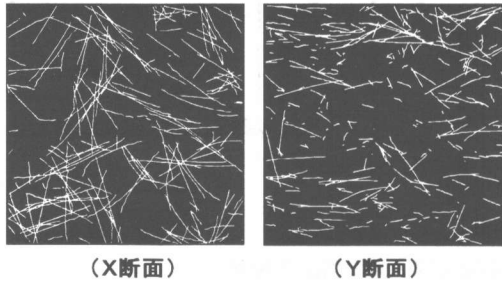


図-2 X線撮影による鋼繊維の投影画像の一例
(3)繊維の分散

繊維の分散係数は破壊断面 2 面を 16 分割した要素内の繊維数を測定し、式(2)により求めた⁴⁾。

$$\alpha = \exp \{ -\psi(x) \}$$

$$\psi(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} / \bar{x} \quad (2)$$

x_i : 試料中に含まれる繊維数, n : 試料数
 $\bar{x}$: 試料中に含まれる繊維数の平均値

3. 実験結果および考察

3.1 はね返り率, 繊維はね返り率について

今回実施した実験におけるはね返り率, 繊維はね返り率の測定結果を表-4に示す。繊維混入率については, 特にはね返り率に傾向は認められない。水セメント比の違いでは, はね返り率, 繊維はね返り率とも, 水セメント比の小さい 44.4%の方が少ない。また, 圧送空気流量については, 圧送空気流量の増加に伴い, はね返り率, 繊維はね返り率は増加する傾向であった。

吹付けコンクリートにおいては, はね返りに伴い構成材料比が異なるが, 繊維混入率は設定

値に対して僅かな減少であり, 設定値 1.0%の場合で測定値は 0.91 ~ 0.96%の範囲であった。

表-4 はね返り率, 繊維はね返り率測定結果

実験要因	水準	測定結果			
		はね返り率 (%)	繊維はね返り率 (%)	繊維残存率 (%)	繊維混入率 (%)
繊維混入率の検討	0.0%	21.2	-	-	-
	0.5%	11.2	16.8	83.2	0.46
	1.0%	14.3	21.3	78.7	0.91
W/C=55.6%	1.5%	18.1	20.6	79.4	1.44
繊維混入率の検討	0.0%	13.2	-	-	-
	0.5%	11.2	14.7	85.3	0.48
	1.0%	12.2	17.0	83.0	0.94
W/C=44.4%	1.5%	9.7	13.2	86.8	1.43
	3.5%	20.4	24.5	75.5	0.94
急結剤添加率の検討	5.0%	12.6	16.6	83.4	0.95
	6.5%	16.4	21.5	78.5	0.93
圧送空気流量の検討	10m ³ /min	9.3	12.5	87.5	0.96
	12m ³ /min	15.1	18.1	81.9	0.96
	18m ³ /min	19.6	24.0	76.0	0.94

3.2 強度特性

(1)繊維混入率について

繊維混入率と圧縮強度, 曲げ強度および曲げタフネス係数の試験結果を図-3~図-4に示す。今回の実験では, 水セメント比 55.6%, 44.4%ともに, 圧縮強度は繊維混入率による改善は見受けられない。曲げ強度は, ベースコンクリートが繊維混入率 0.5vol %以上で比例的に増加する傾向である。しかし, 吹付けコンクリートは, 繊維混入率の影響は見受けられず, 曲げ強度と圧縮強度の関係において, その比は繊維混入率に関係なく 1/5 ~ 1/6 程度であり, 一般のコンクリートと同等の比であった。曲げタフネス係数については, 繊維混入率にほぼ比例的に増加する傾向であるが, ベースコンクリートに対する曲げタフネス係数の比は 0.60 程度であり, 圧縮強度の強度比 0.75 程度に比べ小さく, 吹付けによる影響をより大きく受けている。

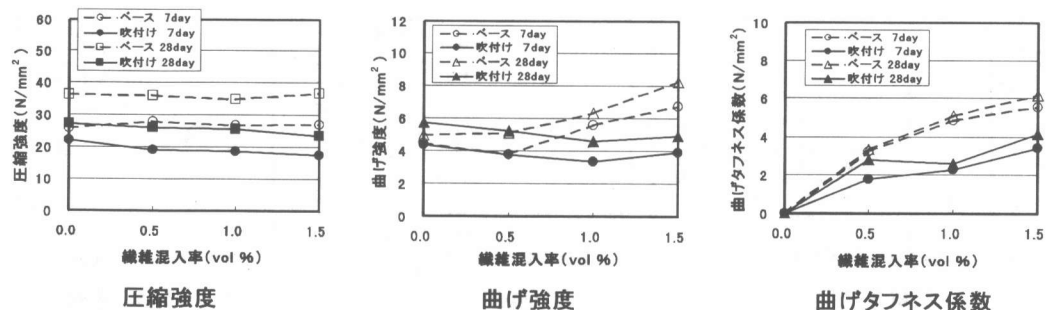


図-3 水セメント比55.6%における繊維混入率と強度の関係

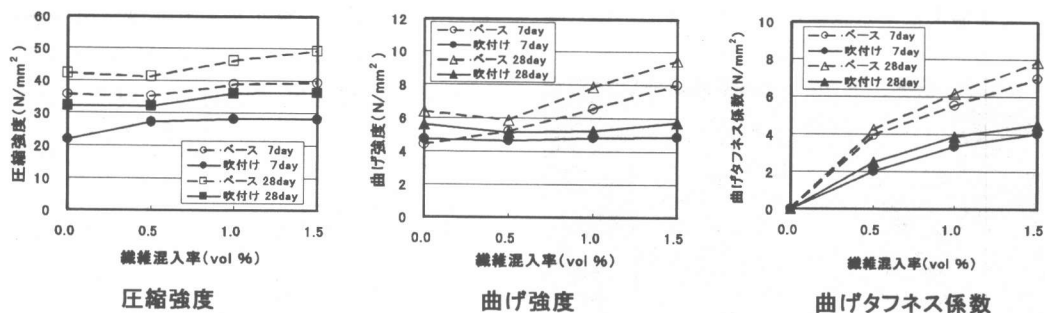


図-4 水セメント比44.4%における繊維混入率と強度の関係

(2) 急結剤添加率について

急結剤添加率と圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネス係数の試験結果を図-5に示す。ベースコンクリートに対する吹付けコンクリートの強度比（材齢 28 日）は、圧縮強度において急結剤添加率が 3.5% で 0.87, 5.0% で 0.76, 6.5% で 0.69 と急結剤添加率が大いほど強度比は小さくなる傾向となった。急結剤添加率の増加に伴う強度低下の傾向は、曲げ強度および曲げタフネス係数でも若干見受けられ、急結剤添加率の増加に伴い、曲げ強度では 0.05 程度、曲げタフネス係数では 0.03 程度の強度比の低下が認められ、急結剤添加率の増加に伴うマ

トリックスの強度低下の影響と考えられる。

(3) 圧送空気流量について

圧送空気流量と圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネス係数の試験結果を図-6に示す。圧縮強度の材齢 28 日における試験結果は、 $35.5 \sim 36.3 N/mm^2$ と圧送空気量の変化による影響を受けなかったが、曲げ強度および曲げタフネス係数は、圧送空気流量の増加に伴い、強度値は若干低下する傾向がある。吹付け後の繊維混入率および圧縮強度に差異が見られないことから、曲げ強度および曲げタフネス係数の低下は吹付けコンクリート中の繊維の配向や分散に圧送空気流量が影響したものと考えられる。

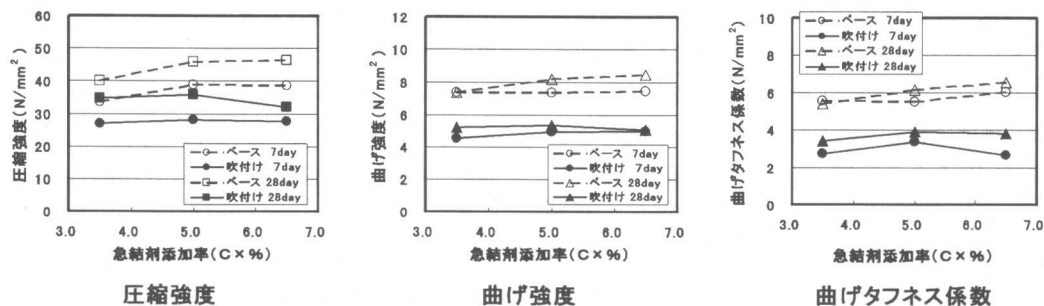


図-5 急結剤添加率と強度の関係

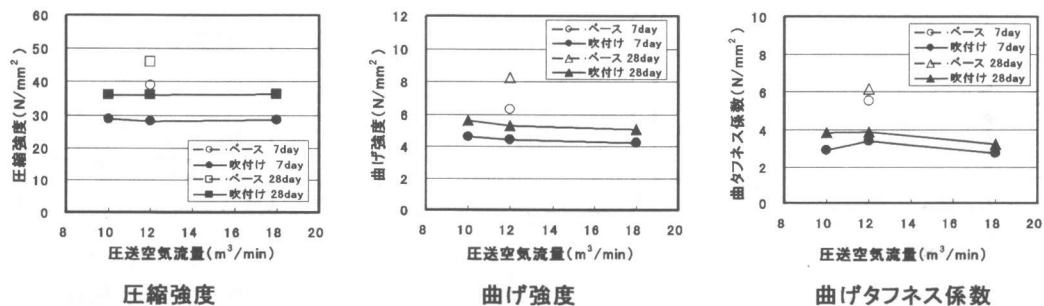


図-6 圧送空気流量と強度の関係

3.3 配向性および分散性

(1) 繊維混入率について

水セメント比 44.4%の繊維混入率と鋼繊維面積率、配向係数の関係をベースコンクリート、吹付けコンクリート別に図-7に示す。鋼繊維面積率は吹付け面に平行な面（X断面）、吹付け面に垂直な面（Y断面）とも、繊維混入率と正の比例関係であり、ベースコンクリートと吹付けコンクリートに鋼繊維面積率の差はほとんどない。また、配向係数についても、いずれのコンクリートともX断面で 0.57 程度、Y断面で 0.79 程度の値であり、吹付けによる鋼繊維面積率、配向係数への影響は認められない。

繊維混入率と分散係数の関係を図-8に示す。分散係数は、ベースコンクリートおよび吹付けコンクリートとも繊維混入率の増加に伴って大きくなり、繊維混入率が大きいほどベースコンクリートと吹付けコンクリートに分散係数の差は見受けられなくなる。

従って、吹付けコンクリートの配向性および分散性がベースコンクリートとほぼ同等であったにも係わらず、曲げ強度が繊維混入率の影響

を受けなかったことは、吹付けによる繊維とマトリックスとの付着性の低下などが考えられるが、更なる検討が必要である。

(2) 急結剤添加率について

急結剤添加率と鋼繊維面積率および配向係数の関係を図-9に示す。繊維補強吹付けコンクリートでは、急結性が高いほど吹付け面に対して垂直な方向に繊維が配向する傾向にあると言われている。今回の実験において、吹付けコンクリートのX断面およびY断面の配向係数は急結剤添加率に関係なく、ほぼ同等の値を示しており、急結剤添加率が繊維の配向性に及ぼす影響は認められなかった。

急結剤添加率と分散係数の関係を図-10に示す。吹付けコンクリートの分散係数では、急結剤添加率 6.5%で 0.58 であり、急結剤添加率 6.5%の場合の分散性が低いという結果となった。しかし、曲げ強度などの強度試験結果において、急結剤添加率 6.5%が他の添加率とほぼ同等の値であったことから、この程度の分散性の違いは強度特性に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

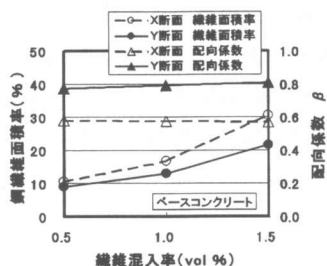


図-7 繊維混入率と鋼繊維面積率および配向係数 β の関係(W/C=44.4%)

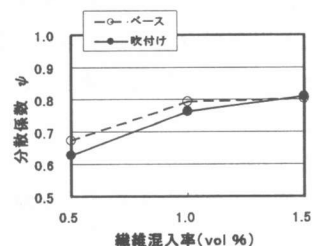
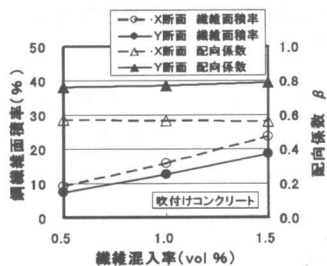


図-8 鋼繊維面積率と分散係数 ψ の関係(W/C=44.4%)

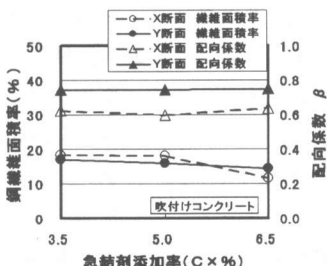
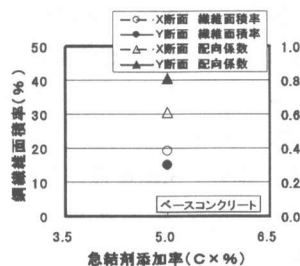


図-9 急結剤添加率と鋼繊維面積率および配向係数 β の関係

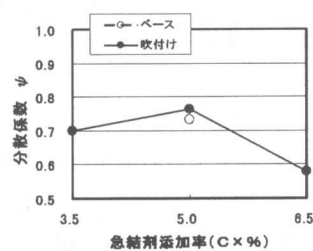


図-10 急結剤添加率と分散係数 ψ の関係

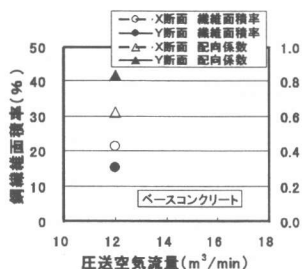


図-11 圧送空気流量と鋼繊維面積率および配向係数 β の関係

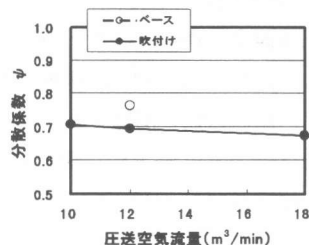
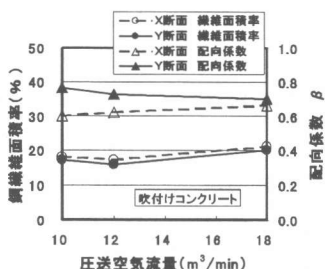


図-12 圧送空気流量と分散係数 ψ の関係

(3) 圧送空気流量について

圧送空気流量と鋼繊維面積率、配向係数の関係を図-11に示す。吹付けコンクリートの配向係数は、圧送空気流量の増加とともにX断面では小さくなる傾向であり、一方、Y断面は大きくなる傾向である。配向係数は切断面に直角な方向へ配向性を示すものであることから、この傾向は吹付け面に平行な面への配向が低下していることが伺える。このことから、吹付けコンクリートの曲げ強度および曲げタフネス係数が圧送空気流量の増加に伴い、強度値が低下したものと考えられる。

圧送空気流量と分散係数の関係を図-12に示す。図に示すように、圧送空気流量の増加とともに分散係数は右下がりの傾向が認められ、圧送空気量が分散性に影響を及ぼす結果である。

4. まとめ

本研究の範囲において、繊維補強吹付けコンクリートに関して以下の知見が得られた。

- (1) 吹付けコンクリートの配向性および分散性はベースコンクリートと同等にも係わらず、曲げ強度がベースコンクリートと異なり、繊維混入率の影響を受けなかったことは、繊維とマトリックスとの付着性の低下などが考えられ、更なる検討が必要である。
- (2) 急結剤添加率の増加に伴う強度比の低下(ベースコンクリートに対する吹付けコンクリートの強度の比)の傾向は圧縮強度に比べて小さいが、曲げ強度で0.05程度、曲げタフネス係数で0.03程度、強度比の低下が認められた。

(3) 圧送空気流量の増加に伴い、吹付けコンクリートの曲げ強度および曲げタフネス係数が低下した要因としては繊維の配向性が影響したものと考えられる。

謝辞

本研究は、東京大学国際・産学共同研究センターにおける「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究の成果であり、共同会社である(株)青木建設、(株)エヌエムビー、(株)大林組、(株)鹿島建設、(株)熊谷組、(株)佐藤工業、清水建設(株)、大成建設(株)、(株)竹中土木、電気化学工業(株)、東急建設(株)、戸田建設(株)、飛鳥建設(株)、西松建設(株)、(株)間組、前田建設工業(株)、および協力会社として御協力頂いた富士物産(株)、(株)北川鉄工所、(株)東京測器研究所、(株)ブリヂストン、また、吹付け実験に参加された方々、千葉工業大学卒論生 飯土井達也氏に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 例えば、トンネルの吹付けコンクリート、(社)日本トンネル技術協会、pp.92-96、1996.2
- 2) 大津敏郎ほか：第二東名・名神高速道路トンネル本体工に関する設計検討、ハイウェイ技術、No.9, pp.212-217、1997.9
- 3) 例えば、大久保誠介ほか：鋼繊維補強モルタルの力学特性、トンネルと地下、Vol.28, No.10, pp.49-53、1997.10
- 4) 小林一輔：繊維補強コンクリート 特性と応用、(株)オーム社、pp.51-72、1981