

論文 微小鋼繊維補強コンクリートの水密性および力学特性

堀口 至^{*1}・市橋 哲之^{*2}・佐伯 昇^{*3}・竹村 和夫^{*4}

要旨：鋼繊維補強コンクリートは、土木分野では一般的に長さ 30mm 程度の鋼繊維がよく用いられているが、近年では長さの短い微小な繊維が注目され、研究が盛んに行われている。しかし既往の研究では、高い繊維混入率や繊維の良好な分散を保障するために、マトリクスとしてモルタルやペーストを用いることが多い。そこで本研究ではマトリクスにコンクリートを用い、微小鋼繊維の混入率を 0～3.0%に変化させて、その力学特性および水密性に対する補強効果について検討を行った。試験結果より、微小鋼繊維の混入率が 3.0%の場合、長さが 30mm の鋼繊維を 2.0%混入したコンクリートと同等の力学特性を示すことが分かった。

キーワード：繊維補強コンクリート、微小鋼繊維、水密性、力学特性

1. はじめに

繊維補強コンクリートはコンクリートの引張特性を改善するために開発されてきたものであり、土木分野では一般的に長さ 30mm 程度の鋼繊維がよく用いられている。

しかし近年では、長さの短い微小な繊維が注目されている。Rossi ら¹⁾の研究によると、長さ 30mm 程度の鋼繊維がマクロなひび割れに効果的であるのに対して、微小鋼繊維はマトリクス中へ多量に混入することでミクロなひび割れを抑制できるとしている。微小な繊維の定義についてはまだ明確ではないが、Banthia ら²⁾は長さが 20mm 以下、直径 25 μ m 以下、比表面積 1000 mm²/g を微小繊維(micro fiber)と分類としている。Ouyang ら³⁾によると微小繊維はマトリクスの靱性に対する効果だけではなく、強度自体にも効果的であるとしている。また、Li ら⁴⁾は微小繊維を用いて、複数ひび割れを生じさせることにより高いエネルギー吸収能力を発揮できる ECC(Engineered Cementitious Composite)を開発している。

以上に挙げた既往の研究では、高い繊維混入率や繊維の良好な分散を保障するために、マトリクスとしてモルタルやペーストを用いることが多い。だが、建設材料としてはモルタルやペーストよりもコンクリートのほうが経済的であり、実用範囲が広くなると思われる。また、微小繊維はその長さゆえファイバーボールを形成しにくく、マトリクスがコンクリートでも多量に混入することが可能と考えられる。

そこで本研究ではマトリクスにコンクリートを用い、微小鋼繊維を混入したコンクリートの特性を明らかにすることを目的として、繊維混入率を 0～3.0%に変化させて、その力学特性および水密性に対する補強効果について検討を行った。ただし、本論文中の微小鋼繊維とは、0.1×0.1×6mm の鋼繊維を指す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

試験にはセメントに普通ポルトランドセメント、粗骨材は最大骨材寸法 20mm の川砂利、細

*1 呉工業高等専門学校助手	環境都市工学科	工博 (正会員)
*2 北海道大学大学院	工学研究科社会基盤工学専攻	
*3 北海道大学大学院教授	工学研究科社会基盤工学専攻	工博 (正会員)
*4 呉工業高等専門学校教授	環境都市工学科	工博 (正会員)

骨材は川砂を用いた。混和剤はプレーンコンクリート(PC)には AE 剤，繊維補強コンクリート(SC)には繊維の分散を良好にするためポリカルボン酸系の高性能減水剤を用い，空気量調節のために消泡剤と AE 剤を用いた。繊維は長さ 6mm の微小鋼繊維と，比較のために土木分野で一般的に用いられている長さ 30mm の鋼繊維の 2 種類を用いた。表-1 に繊維の特性を示し，図-1 に使用した繊維を示す。

コンクリートの配合を表-2 に示す。配合表に示す記号は，SC6 が SF6 を，SC30 が SF30 を混入したコンクリートを示す。すべての配合における W/C は 50%とし，s/a は PC においては 45%とし，SC においては 60%とした。単位水量は 164kg/m^3 一定として，混和剤だけでワーカビリティを調節した。スランプは 5～12cm，空気量は $5\pm 1.5\%$ を目標としたが，配合によっては 1～2cm の低いスランプ値が出るがあった。しかしスランプが低い配合もバイブレータを用いると流動し，十分なワーカビリティを有すると判断できた。

供試体の作製は JCI-SF1「試験室における繊維補強コンクリートの作り方」に基づいて行い，打設から約 24 時間後に脱型を行い，水温 20℃ の養生槽で 27 日間の水中養生を行った。

2.2 強度試験方法

本研究では繊維補強コンクリートの力学特性を検討するために圧縮強度および曲げ変形試験を行った。圧縮強度試験は JCI-SF5「繊維補強コンクリートの圧縮強度及び圧縮タフネス試験方法」に基づいて行い，曲げ変形試験は JCI-SF4「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」に基づいて行った。

曲げ変形試験用供試体は $100\times 100\times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用い，圧縮強度試験用供試体は $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いた。両試験とも，各配合につき 3 体の供試体について試験を行った。曲げ変形試験用供試体には養生期間終了後，ダイヤモンドカッターを用いて供試体中央部に深さ 30mm の切り欠きを設けている。

表-1 使用繊維の特性

記号	長さ (mm)	断面積 ($\text{mm}\times\text{mm}$)	アスペクト比	引張強度 (N/mm^2)	形状
SF6	6	0.1×0.1	53	920	平滑
SF30	30	0.5×1.0	38	780	波型



図-1 使用繊維

表-2 配合

記号	混入率 V _f (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	混和剤 (C×%)	
PC	—	50	45	164	0.44	
SC6	0.5		60			0.6
	1.0					0.8
	2.0					1.2
	3.0					1.5
SC30	0.5				0.8	
	1.0				1.0	
	2.0				1.2	

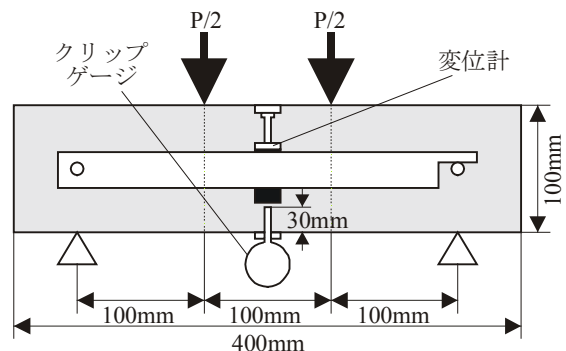


図-2 曲げ変形試験装置

供試体の中央の変位を変位計により，切り欠きの開口変位をクリップゲージによってそれぞれ計測を行った。図-2 に曲げ変形試験装置を示す。

本研究では曲げ変形試験よりひび割れ発生荷重を求めた。試験より得られた荷重 P —たわみ δ (または開口変位) 曲線からデータの対数表示を行い， P — $\log \delta$ 曲線または $\log P$ — $\log \delta$ 曲線を描くと直線がある点で折れ曲がった形状を示す。この 2 つの直線の交点をひび割れ発生荷重

として求めた⁵⁾。最大荷重およびひび割れ発生荷重から式(1)を用いて、曲げ強度およびひび割れ発生強度を求めた。

$$\sigma_b \text{ or } \sigma_{crack} = \frac{Pl}{bh^2} \quad (1)$$

σ_b : 曲げ強度 (N/mm²), σ_{crack} : ひび割れ発生強度 (N/mm²), P : 最大荷重またはひび割れ発生荷重 (N), l : スパン (mm), b : 破壊断面の幅 (mm), h : 破壊断面の高さ (mm)

また、たわみがスパンの 1/150 (2mm) となるまでの荷重－たわみ曲線下の面積から曲げタフネスを求め、式(2)より曲げ靱性係数を求めた。

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_{ib}} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (2)$$

$\bar{\sigma}_b$: 曲げ靱性係数 (N/mm²), T_b : 曲げタフネス (N・mm), δ_{ib} : スパンの 1/150 のたわみ (mm)

2.3 透水試験方法

一般にコンクリートの透水試験方法は、供試体に水圧を作用させてコンクリート中を透過した水量を測定するアウトプット式と、一定期間供試体に水圧を作用させてその間にコンクリート中に浸透した水の深さを測定するインプット式の2種類がある。本研究においては短期間で試験が可能な、DIN 1048 に基づいたインプット式透水試験⁶⁾を採用した。

図-3 に DIN 1048 に基づく透水試験装置を示す。供試体には 200×200×120mm の角柱を用い、水圧が作用する部分は直径 100mm の円形となっている。水圧作用面は表面状態を一定とするために、供試体脱型後ワイヤブラシを用いて表層のペーストを取り除き、骨材を露出させた。水圧が作用しない部分にはセメントペーストキャッピング (WC= 25%) を行い、ゴム板と O-リングを挟み供試体と装置間の漏水を防止した。また、供試体は乾燥させずに試験に用いた。供試体は打設面が下になるように装置に設置したので、打設方向と水圧方向は鉛直方向で互いに逆向きである。水圧は最初に 0.1MPa の

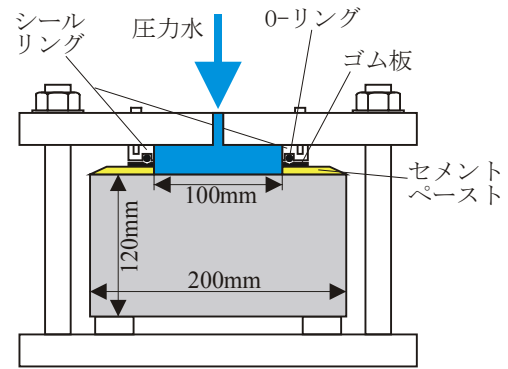


図-3 透水試験装置

水圧を 48 時間作用させ、次に 0.3MPa と 0.7MPa の水圧をそれぞれ 24 時間作用させ、合計 4 日間供試体に水圧を加える。水圧作用期間終了後、供試体を割裂して水の浸透状況を観察し、浸透部分を油性インキで印した。その後ノギスにより水の浸透深さを計測した。水密性の評価方法としては以下の式(3)を用いて、浸透深さ d (m) より透水係数 k (m/s) を算出した。試験は各配合につき 3 体の供試体について行った。

$$k = \frac{d^2}{2ht} \quad (3)$$

h : 水頭 (m), t : 水頭を与えた時間 (s)

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

図-4 に SC6 および SC30 における圧縮強度と繊維混入率の関係を示す。図より、SF30、SF6 両繊維をコンクリート中に混入することによって強度増進が見られ、繊維混入率の増加に伴い圧縮強度は増加する傾向を示した。また、混入

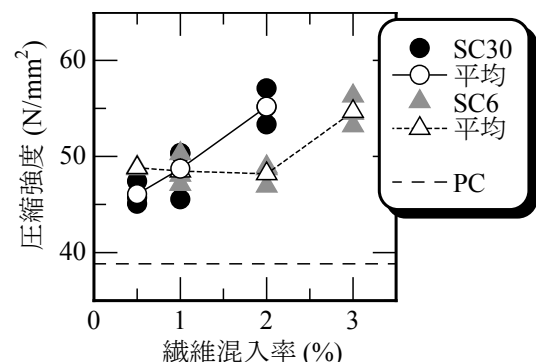


図-4 圧縮強度と繊維混入率の関係

率増加に伴う強度増加の割合は SC30 のほうが大きく、SC6 が混入率 3.0% の場合、混入率 2.0% の SC30 の圧縮強度とほぼ同じ値を示す。

3.2 曲げ変形試験結果

SC6, SC30 において、典型的な荷重—たわみ曲線をそれぞれ図-5a, b に示す。得られた荷重—たわみ曲線より SC6, SC30 の曲げ・ひび割れ発生強度、曲げ靱性係数を求め、その結果をそれぞれ図-6a, b に示す。ただし図-6 の値は 3 体の供試体の平均値を用いている。

図より圧縮強度試験結果と同様に、曲げ・ひび割れ発生強度、曲げ靱性係数といった全ての曲げ特性に対して SF30 の補強効果が大きく、繊維混入率の増加に伴いその効果は著しく大きくなることが分かる。微小鋼繊維 SF6 を混入している SC6 においても、繊維混入による曲げ特性の増進が見られるが、SC30 と比較すると増加の程度は小さい。また圧縮強度試験結果と同様に、微小鋼繊維を 3.0% 混入した場合、SF30 を 2.0% 混入した場合の曲げ特性とほぼ同じ値を示すことがわかる。ただし曲げタフネスにおいては傾向が異なり、混入率 3.0% においても、曲げ強度などに比べると補強効果が小さいことが図-5 および 6 より分かる。これは微小鋼繊維の繊維の埋め込み長さが短く、ひび割れ後の繊維による応力伝達能力が小さくなるためである。

3.3 透水試験結果

図-7 に SC6 および SC30 における透水係数と繊維混入率の関係を示す。図から繊維をコンクリート中に混入することにより、繊維の種類によらず水密性は向上することが分かる。SC30 に関しては繊維混入率の増加に伴い透水係数は低下する傾向を示し、繊維混入率 2.0% のときに最も低い透水係数の値を示した。一方 SC6 に関しては SC30 と比較して繊維混入率が増加しても水密性の変化は小さい。これは強度試験結果と同様の傾向である。繊維混入によるコンクリートの水密性向上の原因はまだ明らかでないが、水の移動に影響を及ぼすコンクリート中の欠陥部分が、繊維を混入することによって改良され

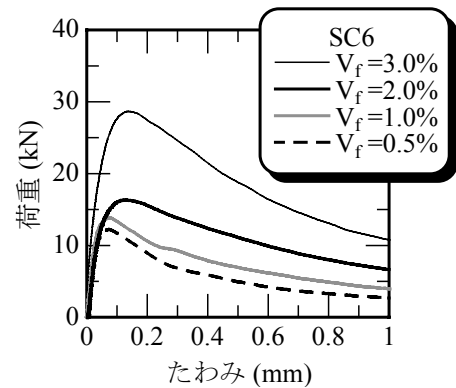


図-5a 荷重—たわみ曲線 (SC6)

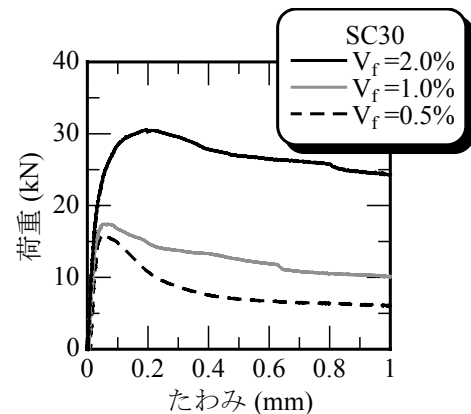


図-5b 荷重—たわみ曲線 (SC30)

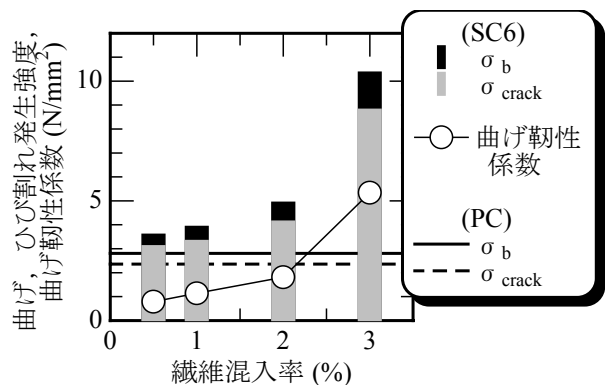


図-6a 繊維混入率と曲げ特性の関係 (SC6)

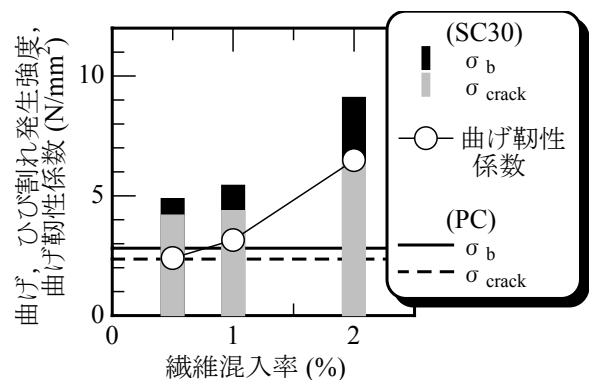


図-6b 繊維混入率と曲げ特性の関係 (SC30)

と考えられる。ここで欠陥部分とは、気泡や毛細管空隙、微細なひび割れなどを指す。

3.4 繊維の補強効果の比較

繊維補強コンクリートの力学的性能に対する強化則は複合則や繊維間隔説が有名である⁷⁾。Swamy ら⁸⁾は複合則を利用して繊維補強コンクリートの曲げ強度を繊維混入率と繊維のアスペクト比より求める式(4)を提案している。ただし、使用繊維に関する係数 α_f については繊維固有の特性を表し、繊維の形状や界面特性などによって決定される値である。

$$\sigma_c = \alpha_m \sigma_m (1 - V_f) + \alpha_f \sigma_f V_f \left(\frac{l}{d} \right) \quad (4)$$

σ : 強度, V_f : 繊維混入率, α_m : マトリクスに関する係数, α_f : 使用繊維に関する係数, l, d : それぞれ繊維の長さ, 直径, 添え字 c, m, f : それぞれ複合体, マトリクス, 繊維

本研究では上記の複合則が、強度のみならずコンクリートの水密性に対しても当てはまると仮定して、水密性および曲げ特性向上に対する繊維の補強効果の検討を試みた。ただし、本研究では簡便のためにマトリクスに関する係数 $\alpha_m=1$ とし⁵⁾、使用繊維に関する係数 α_f に繊維が分担する応力 σ_f およびアスペクト比 l/d などを含ませている。

SC6 および SC30 の各種強度と透水性の試験値を PC の値で除して増加率を求め、図-8 にその増加率と繊維混入率の関係をプロットする。プロットした点から、最小自乗法を用いて近似直線を引き、使用繊維に関する係数 α_f を求め、これを水密性および力学特性に対する繊維の補強効果の指標とした。ただし、強度は圧縮強度、曲げ・ひび割れ発生強度について行い、透水性に関しては式(5)で表される耐透水指数⁹⁾について増加率を求めた。

$$K = -\log_{10} k \quad (5)$$

K: 耐透水指数, k: 透水係数(m/s)

図より、全ての結果において SC30 の使用繊維

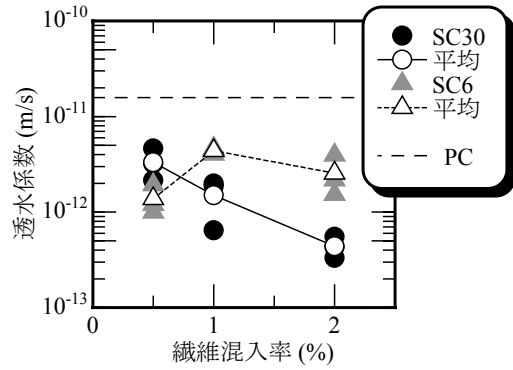


図-7 繊維混入率と透水係数の関係

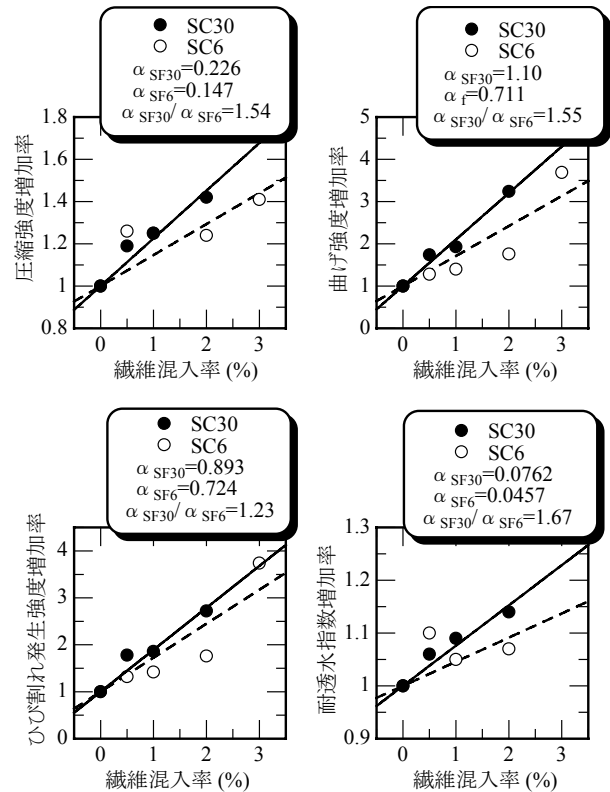


図-8 SF6 と SF30 の補強効果の比較

維に関する係数 α_{SF30} が SC6 の値よりも大きくなることが分かった。 α_{SF30} を α_{SF6} で除して SF30 と SF6 の補強効果を比較したところ、 $\alpha_{SF30}/\alpha_{SF6}=1.23\sim1.67$ の範囲の値を示し、平均で 1.50 であった。以上の結果より、SF30 は SF6 と比較して約 1.5 倍の補強効果があると言える。ただし、これは繊維混入率が 0~2.0% の範囲内と言えることである。

以上の試験結果より、繊維混入率が 0~2.0% の範囲にある場合、一般的に使用されている鋼繊維 SF30 の方が、微小鋼繊維 SF6 と比較して

補強効果が高いと言える。同一繊維混入率においては、繊維のサイズが小さいとコンクリート中に混入される繊維本数が多くなり、計算では微小鋼繊維を混入した SC6 は SC30 の 10 倍の繊維が混入される。そのため微小鋼繊維を混入した方が補強効果は大きくなると思われたが、試験結果は逆の傾向を示した。これは繊維の補強効果が使用繊維のサイズに依存するためである。

しかし、SC30 においては繊維混入率 2.0% が限界値であり、2.0% を超える高い混入率となると、ファイバーボールが形成しやすくなり、繊維の均一な分散が難しくなる。一方、微小鋼繊維を混入した SC6 においては、繊維長さが短いことから SC30 よりも高い混入率の配合が可能であると推察され、実際に繊維混入率 3.0% の SC6 の作製は可能であり、混入率 2.0% の SC30 と同等の力学特性を示している。本研究では混和剤のみでワーカビリティを調節し、繊維混入率 0~3.0% の範囲で打設を行ったが、単位水量および細骨材率を増加させることによってさらに高い混入率の配合のコンクリートを打設することが可能である。予備試験の結果では単位水量 174 kg/m^3 、細骨材率 70% の値で繊維混入率 4.0% の微小繊維補強コンクリートの打設可能なことが確認されている。よって今後の研究課題として、さらなる高い繊維混入率の微小鋼繊維補強コンクリートを作製し、その強度試験および透水試験を行い、微小鋼繊維の補強効果を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、長さが 6mm の微小鋼繊維 (SF6) を混入した繊維補強コンクリートにおいて、繊維混入率を 0~3.0% に変化させて、その力学特性および水密性に対する補強効果を検討した。以下に本研究により得られた知見をまとめる。

- (1) SF6 の混入率が 3.0% の場合、長さ 30mm の鋼繊維 (SF30) を 2.0% 混入したコンクリートと同等の力学特性を示した。
- (2) 繊維混入率 0~2.0% の範囲では、SF6, SF30

両方とも混入率の増加に伴い力学特性および水密性は向上する傾向を示したが、SF30 を用いたコンクリートの方がその増加率は高いことが分かった。

- (3) 複合則を用いて繊維の補強効果を検討した結果、SF30 は SF6 と比較して約 1.5 倍の補強効果を持つことが分かった。ただし、これは繊維混入率 0~2.0% の範囲内と言えることである。

参考文献

- 1) Rossi, P., Acker, P. and Malier, Y.: Effect of steel fibers at two different stages: the material and the structure, *Materials and Structures*, Vol.20, No. 120, pp.436-439, 1987
- 2) Banthia, N., Azzabi, M. and Pigeon, M.: Rest-raised shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, Vol.26, No.161, pp.405-413, 1993
- 3) Ouyang, C. and Shah, S. P.: Toughening of high strength cementitious matrix reinforced by discontinuous short fibers, *Cement and Concrete Research*, Vol.22, pp.1201-1215, 1992
- 4) Li, V. C. and Leung, C. K. Y.: Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118, No.11, pp.2246-2264, 1992
- 5) 金南旭: 長短繊維を混入したハイブリッド繊維補強コンクリートのひび割れ抵抗性に関する研究, 北海道大学学位論文, 2000
- 6) Wasserundurchlässigkeit, DIN 1048, Blatt 1, Teil 4.7, 1972
- 7) 小林一輔: 繊維補強コンクリートー特性と応用ー, オーム社, pp.27-40, 1981
- 8) Swamy, R. N., Mangat, P. S. and Rao, C. V. S. K.: The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices, *Fiber Reinforced Concrete*, ACI-SP-44, pp.1-28, 1974
- 9) 村田二郎: コンクリートの水密性に関する研究 (1), 土木学会論文集, Vol.46, pp.1-6, 1957.6