

論文 長さの異なる鋼繊維を混入したコンクリートの水密性

堀口 至^{*1}・佐伯 昇^{*2}・堀口 敬^{*3}・志村 和紀^{*4}

要旨:長さの異なる鋼繊維 4 種類を用いて、単一で混入した単一繊維補強コンクリート(SC)と 2 種類組合せて混入したハイブリッド繊維補強コンクリート(HC)について水密性の検討を行った。長さ 30, 12mm の繊維を長繊維, 長さ 6, 3mm の繊維を短繊維と分類すると, 試験結果よりコンクリートの水密性向上に対して長繊維より短繊維の方が効果的である事が分かった。HC においては, 2 種類の繊維を組合せることによって組合せにより水密性は向上する傾向を示し, 同一混入率では最適な長繊維と短繊維の混入率の割合が存在することが分かった。また, 繊維本数と透水係数の関係についても考察を行った。

キーワード: 繊維補強コンクリート, 水密性, 長繊維, 短繊維, 繊維本数

1. はじめに

近年, コンクリートの使用が多種多様化し, これに対応するためにコンクリートの高性能化が求められている。これらの要求の一端を担うために開発されたのが, 長短の鋼繊維を組合せ効果的にひび割れ荷重, 曲げ補強を向上させたハイブリッド繊維補強コンクリートである。ハイブリッド繊維補強コンクリートの力学的性能に関する報告^{1), 2)}は見うけられるが, 耐久性に関する報告は非常に少ない。著者らは既にハイブリッド繊維補強コンクリートの耐久性と密接な関係にある水密性の検討を行っている³⁾。本研究ではさらに詳細な水密性の検討を行うため, 長さの異なる鋼繊維を用い, 単一で混入した場合と 2 種類組合せて混入した場合のコンクリートの透水試験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

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

表-1 使用繊維の特性

記号	長さ (mm)	直径 (mm)	アスペクト比	引張強度 (N/mm ²)	形状
SF30	30	0.5	60	780	波型
SF12	12	0.6	20	1211	インデント
SF6	6	0.1	60	920	平滑
SF3	3	0.09	33	635	平滑

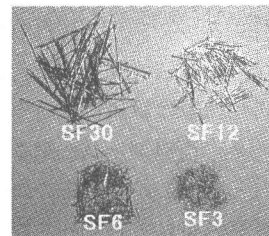


図-1 使用繊維の外観

細骨材には川砂を用いた。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には繊維の分散を良好にするため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 30, 12, 6, 3mm の 4 種類の鋼繊維を用いた。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

- | | | |
|----------------|---------------|----------|
| *1 北海道大学大学院 | 工学研究科社会基盤工学専攻 | 工修 (正会員) |
| *2 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) |
| *3 北海道大学大学院助教授 | 工学研究科社会基盤工学専攻 | 工博 (正会員) |
| *4 北海道大学大学院助手 | 工学研究科社会基盤工学専攻 | 工博 (正会員) |

示す記号は、繊維を1種類だけ混入したコンクリートを単一繊維補強コンクリート(Simple Fiber Reinforced Concrete: SC)とし、2種類の繊維を組合せて混入したコンクリートをハイブリッド繊維補強コンクリート(Hybrid Fiber Reinforced Concrete: HC)とし、後に続く数字は繊維の長さを示し、例えば HC30-12 なら SF30 と SF12 の2種類の繊維を混入したことを意味する。全ての配合における W/C は 50% とし、s/a は PC においては 45% とし、繊維補強コンクリートにおいては 60% とした。単位水量は 164kg/m^3 一定として混和剤だけでスランプを調節した。

スランプは 5~12cm を目標としたが、繊維の組合せによっては繊維のかさばりにより、2~4cm の低いスランプ値が出ることがあった。しかしスランプが低い繊維補強コンクリート(特に長さ 3mm の鋼繊維を用いた場合)で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持っていると判断できた。逆にスランプ値を目標範囲内に収めようとするとう材料分離が生じる可能性があったため、材料分離が生じないことをスランプ値に優先させた。繊維補強コンクリートの空気量は繊維による空気巻き込みが生ずるため、消泡剤と AE 剤を用いて空気量の調整を行った。しかし繊維の組合せによって空気巻き込み量はそれぞれ異なるので、各配合において最適な混和剤量を厳密に決定するためには多くの試験練りを必要とする。しかしながら試験練りの結果より、消泡剤、AE 剤量をそれぞれ単位セメント量の 0.4、0.6% とすることで目標空気量 $5 \pm 1.5\%$ をほぼ達成できることが確認されたため、全ての配合において上記の消泡剤、AE 剤量を用いることとした。表-2 に供試体打設時に測定した空気量を示す。

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°C の養生槽で 27 日間の水中養生を行った。

2.2 試験方法

一般にコンクリートの透水試験方法は供試体

表-2 配合

記号	混入率 V _f (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	空気量 (%)
PC	—	50	45	164	3.8
SC30	1.0		60		3.0
SC12					6.4
SC6					6.1
SC3					4.0
HC30-12					3.3
HC30-6	0.5+0.5		5.4		
HC12-6	4.9				
HC12-3	5.4				
HC6-3	4.6				
HC30-3	0.1+0.9		4.6		
	0.3+0.7		4.0		
	0.5+0.5		5.1		

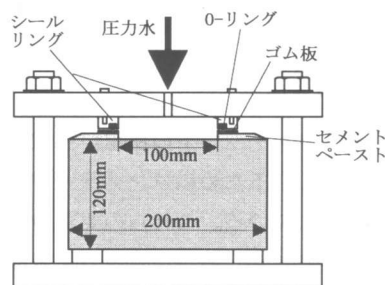


図-2 透水試験装置(DIN 1048 に基づく)

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法と、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法の2種類がある。アウトプット法の透水試験は供試体が完全に飽和状態になるのに時間がかかるため長時間の試験期間を必要とし、高水密なコンクリートの試験においては水の流出が得られない場合もある。よって本研究の透水試験は試験が短期間で行うことが可能な DIN 1048 に基づいたインプット法の試験⁴⁾を採用した。

図-2 に DIN 1048 に基づく透水試験装置を示す。供試体には $200 \times 200 \times 120\text{mm}$ 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。圧力水が漏れないように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(W/C=25%)

を行い、ゴム板とO-リングを挟みこみ供試体と装置間の漏水を防止した。インプット法の透水試験では一般に水の浸透深さが明瞭に判別できるように乾燥させている。しかし、供試体を乾燥させることにより微細ひび割れが発生することとも考えられ、また絶乾状態の透水試験はあまり实际的ではないため、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(1)を用いて、浸透深さ d (m)より透水係数 k (m/s)を算出した。

$$k = \frac{d^2}{2ht} \quad (1)$$

h : 水頭(m), t : 水頭を与えた時間(s)

3. 試験結果及び考察

3.1 単一繊維補強コンクリート(SC)

図-3に繊維混入率1.0%のSCの透水試験結果を示す。試験結果より、SC30、SC12の透水係数が繊維無混入のPCと比較して若干低い値を示したのに対して、SC6、SC3の透水係数はPCよりもかなり低い値を示した。

繊維をコンクリート中に混入することによって透水性が低下する理由はまだ明らかではないが、次のように考えられる。コンクリート中の水の移動はコンクリートの欠陥部において生じる。例えば気泡や毛细管空隙、粗骨材下面の空隙、微小なひび割れ、遷移帯などがそれにあたる。コンクリートに繊維を混入することにより、それらの欠陥を拘束する、または分散しコンクリート中の水の移動が困難になり、その結果透水性が低下するものと考えられる。

次に混入している繊維の種類によって水密性

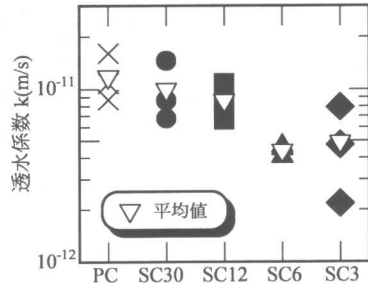


図-3 透水試験結果(SC: $V_f=1.0\%$)

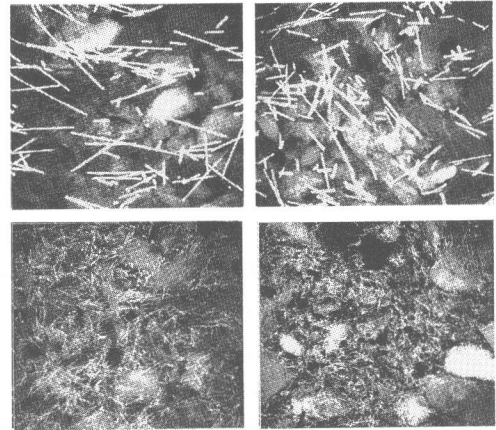


図-4 繊維の分散状況 (左上: SC30, 右上: SC12, 左下: SC6, 右下: SC3)

向上に対する効果が異なることから、繊維の種類の違いによるコンクリート中への分散状況の差異を調べるために、透水試験終了後の供試体からダイヤモンドカッターを用いて厚さ7~10mmの試験片を切り出し、X線写真の撮影を行った。図-4にその結果を示す。図より、繊維の種類によってコンクリート中への繊維分散状況が2種類に分けられる。SC30、SC12においては1本1本の繊維が確認できる一般的な繊維の分散状況にあるが、SC6、SC3においては非常に細かい繊維が多量にコンクリート中に分散しており、その分散状況はSC30、SC12と比較して大きく異なる。これは繊維寸法の違いに起因する。表-1または図-1より分かるようにSF30、SF12と比較してSC6、SC3は非常に細かい繊維であり、同一混入率であればコンクリート中に含まれる繊維本数はSC30、SC12と比較して細かい繊維が混入されているSC6、SC3の方が多

くなる。コンクリート中に含まれる繊維本数が多いと、水の移動経路となり得るコンクリートの欠陥を拘束、または分散する効果が大きくなるため、透水性が低くなるものと思われ、その結果 SC30, SC12 と比較して多くの繊維が混入される SC6, SC3 の透水係数が低い値を示したと推察される。

以上より、本研究で用いた4種類の繊維 SF30, SF12, SF6, SF3 において、SF6, SF3 のコンクリート中への繊維分散状況は他の2種類の繊維と異なり、コンクリートの水密性向上に対して有効であることが分かった。既往の研究によると Banthia ら⁵⁾はセメント系材料の補強材である繊維を長繊維(macro fiber)、短繊維(micro fiber)の2つに分類している。長さが25~60mm、直径0.3~3mmの繊維を長繊維とし、長さが20mm以下、直径25 μ m以下の繊維を短繊維として、長繊維にはタフネスの増加、短繊維には初期ひび割れ発生・伝播の拘束が期待されている。本研究で用いた4種類の繊維においても、SF30, SF12 を長繊維、SF6, SF3 を短繊維として分類すると、コンクリートの水密性向上に対しては長繊維よりも短繊維の方が有効であるといえる。

3.2 ハイブリッド繊維補強コンクリート(HC)

本研究で用いた4種類の繊維のうち2種類をそれぞれ繊維混入率0.5%で組合せて混入したHCの透水試験結果を図-5に示す。図よりSF12とSF6を組合せて混入したHC12-6の透水係数がもっとも低い値を示した。

図-6a, bに同一繊維混入率におけるSCとHCの透水係数の比較を示す。ただし透水係数の値は供試体3体の平均値である。図-6aはSCの試験結果より分類した、長繊維と短繊維を組合せて混入したHCの試験結果を示しており、図の横軸は凡例の順番通りにコンクリートの種類を表し、例えば●の記号においては左からSC30, 真中がHC30-6, 一番右がSC6を示している。図よりSCの試験において水密性向上に効果的であった短繊維SF3, SF6と効果が小さかった

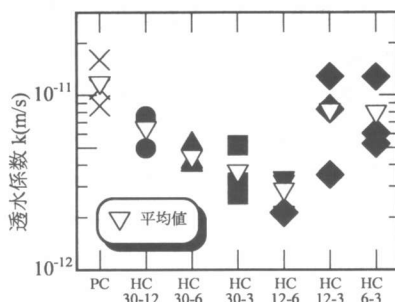


図-5 透水試験結果
(HC: $V_f=0.5+0.5\%$)

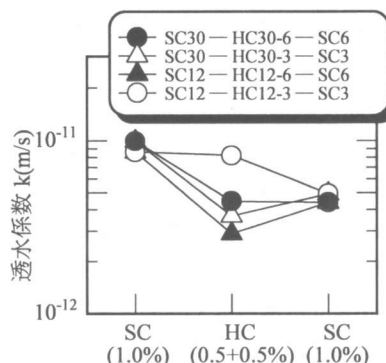


図-6a SC, HC の試験結果の比較
(長短の繊維の組合せ)

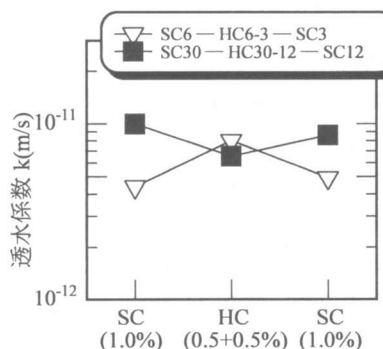


図-6b SC, HC の試験結果の比較
(同種の長さの繊維の組合せ)

長繊維 SF30, SF12 を組合せた HC30-3, HC12-6 の透水係数が低い値を示していることが分かる。HC30-6 においても同様に透水係数は低い値を示したが、SF6 を単一で混入した SC6 の値とほぼ等しかった。しかし HC12-3 においては透水性の低下傾向は見られず、SF12 を単一で混入した SC12 とほぼ同じ透水性を示した。図-6b は同種の長さの繊維(長繊維と長繊維, 短繊維と短繊維)

維)を組合せて混入した HC の試験結果を示している。長繊維と長繊維の組合せである HC30-12 においては、繊維を組合せることによって透水性が低下する傾向を示したが、その効果は HC30-3、HC12-6 と比較すると小さい。また、短繊維と短繊維の組合せである HC6-3 においては、繊維を組合せることによって逆に透水性が増加する傾向を示した。

以上の結果より、繊維を組合せることによってコンクリートの水密性が向上する効果(以下、ハイブリッド効果)は、同種の長さの繊維の組合せよりも、効果的な長短の繊維を組合せた方が有効であるといえる。ただし長短の繊維の組合せであっても HC30-6、HC12-3 のようにハイブリッド効果が見られない繊維の組合せもあることから、長短の繊維の組合せがコンクリートの水密性向上に有効であるとは一概にいえない。この原因の1つとして繊維混入率を長繊維と短繊維共に 0.5%に設定していることが考えられる。著者らの研究結果³⁾によれば、SF30 と SF6 の組合せにおいてもハイブリッド効果は確認されており、その時の SF30、SF6 の繊維混入率はそれぞれ 0.5%、1.0%であった。すなわち、繊維の組合せによっては適切な長繊維と短繊維の組合せの割合が存在するものと思われる。

3.3 長繊維と短繊維の混入率の割合

図-7 に HC30-3(総繊維混入率=1.0%)について、長繊維 SF30 と短繊維 SF3 の繊維混入率の割合を 1.0+0%、0.5+0.5%、0.3+0.7%、0.1+0.9%、0+1.0%と変化させた場合の透水試験結果を示す。図より、SF30 と SF3 の繊維混入率が等しい 0.5+0.5%の場合に最も低い透水係数の値を示し、短繊維 SF3 の混入率が総繊維混入率に占める割合が増加するにつれて透水性は徐々に高くなる傾向を示し、0.1+0.9%の混入率の場合は長繊維 SF30 のみを混入した SC30 とほぼ同程度の高い透水性を示すことが分かった。

以上の結果より、HC において同一混入率の場合、長繊維と短繊維の混入率には最適な割合が存在するものと思われる。当初は水密性向上

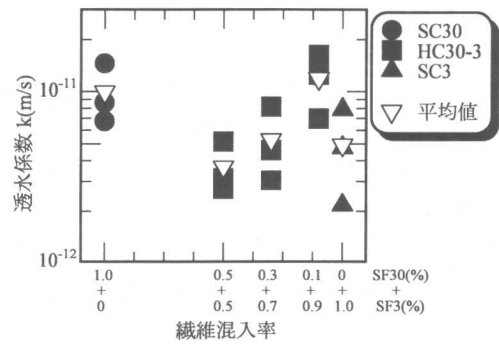


図-7 長繊維と短繊維の混入率の割合

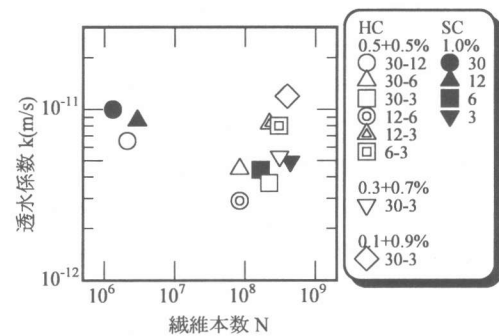


図-8 繊維本数と透水係数の関係

のために有効な短繊維の混入率の割合が大きいほど透水性は低くなるものと思われていたが、試験結果はその逆の傾向を示し、短繊維の混入率の割合が増加するに伴い透水性は増加する傾向を示した。本研究では長繊維の混入率の割合が大きい HC については試験を行っていないため、長繊維と短繊維の混入率の割合については、さらなる検討が必要である。

3.4 繊維本数と透水係数の関係

SC の試験結果で述べたように、繊維の組合せにより繊維寸法が異なるので、同一混入率における HC 中に含まれる繊維本数は異なる。そこでコンクリート中に繊維が均一に分散していると仮定して、以下の式(2)を用いてコンクリート 1m³ 中に含まれる繊維本数 N を計算し、図-8 に HC 及び SC の透水係数と繊維本数 N の関係を示した。ただし透水係数の値は供試体 3 体の平均値である。

$$N = \frac{V_f / 100}{A_f \cdot l} \quad (2)$$

V_f : 繊維混入率(%), A_f : 繊維の断面積(m^2), l : 繊維の長さ(m)

図より HC の繊維本数と透水係数については相関性が見られ、繊維本数 N が約 1×10^8 のときに透水係数の値は最も低い値を示し、その後繊維本数 N が増加するに伴い透水係数は増加する傾向にある。

以上の試験結果より HC の透水性に対して最適な繊維量があるものと思われる。適度な繊維量がコンクリート中に混入されている場合は、コンクリート中の欠陥が拘束または分散され、コンクリートはち密になり水密性は向上するが、繊維量が多すぎると繊維自体が様々な欠陥を誘発する原因となり逆に透水性を増加させる傾向にあるものと思われる。例えば、繊維—マトリックス間の界面すなわち遷移帯が、繊維量が多くなるに伴い増加するため、互いに連結するのであれば水の移動が容易になり、その結果コンクリートの透水性は増大する。あるいは、多量の繊維混入によりエントラップドエアが増加し、強度及び水密性が低下する。

図-8 より HC の繊維本数と透水係数について相関性があることが示唆されたが、繊維本数の範囲が限られているため、水密性向上に対する繊維補強のメカニズムを知るためにはまだ十分ではない。また長繊維及び短繊維に形成される遷移帯や繊維混入によるコンクリートの欠陥部の変化についても明確ではないため、さらなる広範囲な配合や内部構造観察などが今後の研究課題であると思われる。

4. まとめ

長さの異なる鋼繊維 4 種類を用いて、単一で混入した場合(SC)と 2 種類組合せて混入した場合(HC)のコンクリートの透水試験を行ったところ以下のことが判明した。

- 1) 使用した鋼繊維 4 種類のうち長さが 30mm, 12mm の鋼繊維を長繊維、長さが 6mm, 3mm の鋼繊維を短繊維と分類でき、SC の水密性向上においては長繊維よりも短繊維の方が効果

的であった。

- 2) 長さの異なる繊維を 2 種類 0.5%ずつ組合せることによって、組合せにより水密性は向上する傾向を示した。本研究の範囲では、水密性向上に対して最も有効である組合せは長さが 12mm と 6mm の繊維の組合せであった。
- 3) 同一混入率の HC において長繊維と短繊維の繊維混入率の割合を変化させたところ、水密性向上に対して最適な割合が存在することが分かった。
- 4) HC の透水係数と繊維本数の関係を示したところ相関性が見られ、水密性向上に対して最適な繊維量があるものと思われるが、さらなる広範囲な配合や内部構造観察などが必要であると思われる。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、住友金属建材株式会社、神鋼建材工業株式会社、東京製鋼株式会社より鋼繊維を提供していただきました。また、実験を行う際に本研究室大学院生の川口昇平君に多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Horiguchi, T. and Sakai, K.: Hybrid effects of fiber-reinforced concrete on fracture toughness, ACI-SP-172, pp.535-548, 1997
- 2) 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
- 3) 堀口至ほか: インプット法の浸透試験による長短の鋼繊維で補強したコンクリートの水密性評価, 第 54 回セメント技術大会講演要旨, pp.284-285, 2000
- 4) Wasserundurchlässigkeit, DIN 1048, Blatt 1, Teil 4.7, 1972
- 5) Banthia, N., Azzabi, M. and Pigeon, M.: Re-strained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites, Materials and Structures, Vol.26, pp.405-413, 1993