

コンクリートの水密性および曲げ特性に 対する形状寸法の異なる鋼繊維の補強効果

堀口至¹・佐伯昇²

¹正会員 博士(工学) 呉工業高等専門学校助手 環境都市工学科
(〒737-8506 広島県呉市阿賀南2丁目2-11)

²フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

本研究は形状寸法の異なる鋼繊維で補強したコンクリートの水密性および曲げ特性について研究を行ったものである。1種類の繊維のみを混入した単一繊維補強の試験結果より、使用繊維を長繊維と短繊維に分類することができ、各繊維の補強効果はそれぞれ異なることを明らかにした。2種類の繊維を組み合わせて混入したハイブリッド繊維補強の試験結果より、水密性に対して効果的な繊維の組合せが、必ずしも曲げ特性に対して効果的でないことから、繊維の組合せ効果は水密性と曲げ特性に対してそれぞれ異なることが分かった。また、水密性と圧縮強度の相関が良いことから、コンクリートの強度を説明するセメント空隙比説を用いて、水密性に対する繊維の組合せ効果の定量化を行った。

Key Words : steel fiber reinforced concrete, water permeability, flexural property, effect of combination of fibers, cement-void ratio

1. はじめに

一般的にコンクリートは耐荷力、経済性および耐久性が優れており、構造材料として広く使用され、コンクリート材料はメンテナンスフリーであるという認識が存在してきた。しかし 1970 年代の高度経済成長期に建設された RC 構造物の早期劣化の問題や、土木学会コンクリート標準示方書における設計方法の性能照査型への移行などから、近年コンクリートの耐久性について関心が非常に高まりつつあり、高い耐久性を有するコンクリートが望まれている。本来、密実に打ち込まれたコンクリートは力学的性能、耐久性ともに優れているが、ひび割れが生じることによってその性能は著しく低下する。コンクリート材料は圧縮強度と比較して引張強度が低いため、他の構造材料よりもひび割れが生じやすい。そのため高い耐久性を有するコンクリートの持つべき要素として、高いひび割れ抵抗性が挙げられる。

一般に繊維補強コンクリートはコンクリート中に鋼繊維や合成繊維などを混入して、コンクリートの引張特性改善を目指している。そのため繊維補強コンクリートは高いひび割れ抵抗性を持ち、繊維無混入のコンクリートと比較して曲げ強度やじん性に対して優れている。そこで本研究ではコンクリートの耐久性向上を図るために、

2 種類以上の繊維を組み合わせて混入するハイブリッド繊維補強に注目した。従来の繊維補強は同一の長さ、材質の繊維を使用するが、ハイブリッド繊維補強は 2 種類以上の繊維を組み合わせて混入し、単一繊維補強では得ることのできない力学的、物性的効果が期待される。ハイブリッド繊維補強に関して、いくつかの研究^{1)~3)4)5)}がみられ、単一繊維補強とは異なるタフネス特性を示すことや、ひび割れ抵抗性が増加することなどが分かっているが、ほとんどが力学的性能に関する研究報告であり、耐久性に関する報告は非常に数が少ない⁶⁾。

コンクリートのような多孔質材料にとっては、材料中の水の移動が劣化と結びつくことが多い⁷⁾。水の移動自体が問題にならなくても、水による劣化媒体の侵入や鉄筋腐食作用に対する水分の供給なども起こるため、コンクリートの耐久性にとって透水性は基礎的であり、かつ重要な要因の一つであると言える。そのためコンクリート中の水の移動を抑制することが可能であればコンクリートの劣化の進行を遅らせることが可能であり、長期的に耐久性を保持することが可能である。

以上のことを踏まえて、本研究では高い耐久性を持つコンクリートを開発するために繊維補強コンクリートに注目し、コンクリートの耐久性の指標として水密性を取り上げた。補強用繊維には形状寸法の異なる鋼繊維を使

用し、1種類の繊維のみを混入した単一繊維補強コンクリートと2種類の繊維を組み合わせて混入したハイブリッド繊維補強コンクリートについて透水試験、曲げ変形試験を行った。本研究の目的は、コンクリートの水密性および曲げ特性に対する形状寸法の異なる鋼繊維の補強効果について明らかにすることである。なお対象構造物としては、地下構造物や廃棄物埋設施設などの水密性を要する構造物が挙げられる。

表-1 使用鋼繊維の特性

記号	形状寸法 (mm)	アスペクト比	引張強度 (N/mm ²)	形状
SF30S	0.5×0.5×30	53	780	波型
SF30R	0.5×1.0×30	38		
SF12	φ0.6×12	20	1211	インデント
SF6	φ0.1×6	53	920	平滑
SF3	φ0.09×3	33	635	平滑

2. 実験概要

(1) 使用材料

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、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高性能減水剤用の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、長さ30mmの繊維については断面積が0.5×0.5, 0.5×1.0mmの2種類を用いた。表-1に繊維の特性を示し、図-1に使用繊維を比較した写真を示す。長さが30mmの繊維は土木分野で一般的に使用されているものであり、舗装用コンクリート、トンネルライニング、法面への吹きつけコンクリートなどに用いられている。長さが12mmの繊維は鋼繊維メーカーに依頼して特別にカットしたものである。図および表より、長さ30, 12mmの繊維と比較して長さ6, 3mmの繊維が非常に細かい繊維であることが分かる。このような非常に短い繊維は土木分野で一般的に使用されるものではなく、電子・IC部材の静電防止材やブレーキパッドなどに使用されている。

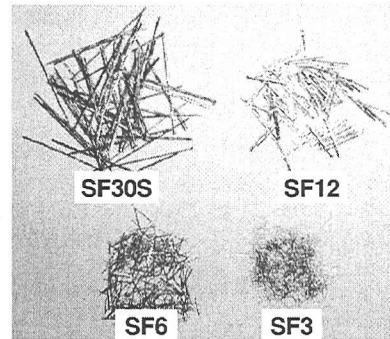


図-1 使用鋼繊維

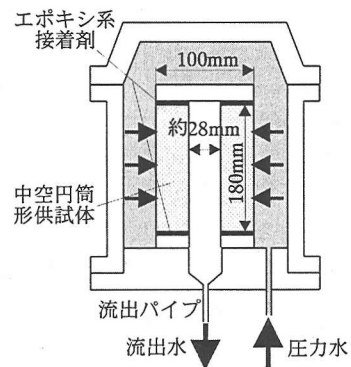


図-2 アウトプット式透水試験装置

(2) 透水試験方法

コンクリートの透水試験方法としてはアウトプット式、インプット式の2種類がある。どちらの方法もコンクリートに水圧を作用させるが、アウトプット式はコンクリート中を透過する水量を測定し、インプット式は水圧作用後に供試体を割裂して水の浸透深さを測定する。まず本研究では、アウトプット式とインプット式両方の透水試験方法を行い、両試験方法の妥当性を確認した。

a) アウトプット式透水試験

図-2 にアウトプット式透水試験装置を示すが、透水試験供試体にはφ100×180mmの円柱供試体からコアを抜き、約28mmの中心孔を設けた中空円筒形供試体を用いた⁹⁾。供試体には2.0MPaの水圧を作用させ、試験装置の水の流出パイプにメスシリンダーを置き、水の蒸発を防ぐためにラップフィルムを用いてメスシリンダ

一の口を密封した。また、水の流出量は電子天秤により増加量を測定した。透水性の評価方法としては、水の流出量が一定になったと思われるところでダルシーの法則に基づく以下の式(1)を用いて透水係数を算出した。

$$k = \frac{\rho \log_e(r_0/r_i) \cdot Q}{2\pi h P} \quad (1)$$

ここで、 k : 透水係数 (m/s)、 ρ : 水の密度(kg/m³)、 r_0 : 供試体半径 (m)、 r_i : 中心孔の半径 (m)、 h : 供試体の高さ (m)、 Q : 水の流出量 (m³/s)、 P : 水圧 (kg/m²)

b) インプット式透水試験

インプット式透水試験はDIN 1048の規格⁹⁾に基づいて

行った。DIN 1048 の規格では供試体は 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。ただし水圧作用面は打設面の逆の面とした。供試体と装置間の漏水を防止するために、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%)を行った。また、供試体は乾燥させずに試験に用いた。

図-3 に DIN 1048 に基づく透水試験装置を示す。供試体の水圧作用面は打設面とは逆になるため、打設方向と水圧方向は鉛直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 0.7 MPa 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。水の浸透深さの測定にはノギスを用い、両割裂面から浸透深さを約 10mm 間隔で合計 20 点計測して平均値を求めた。透水性の評価方法としては、コンクリート中の水の流れがダルシーの法則に基づくとして以下の式(2)を用い、透水係数により水密性の評価を行った。

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

ここで、 k : 透水係数 (m/s), d : 水の浸透深さ (m),
 h : 圧力水頭 (m), t : 作用水圧時間 (s)

㉑) アウトプット式透水試験の難易性

何種類かのプレーンおよび繊維補強コンクリートに対してアウトプット式の透水試験を行ったところ、繊維補強においては、12 本中 8 本の供試体から水の流出がみられず、プレーンにおいても 4 本中 1 本の供試体から水の流出がみられなかった。また水の流出がみられた供試体においても、水の流出が開始するまで長時間を必要とし、最長で 22 日間であった。

水の流出がみられた場合においては、流出量が非常に少ないため定常流状態が明確に現れない場合があった。その例として、比較的水密性の低いコンクリートと高いコンクリートに対して、アウトプット式透水試験を行った際のコンクリートからの流出水の状況を図-4 に示す。図より、水密性の違いによって流出水の状況がかなり異なることが分かる。図-4 に示すような水密性の高いコンクリートの流出水量の変動を小さくするためには、集水・測定間隔を長く設定するなどの工夫を必要とする¹⁰⁾。また、流出水量の変動は水密性が高くなるにつれて増加する傾向にある。図-5 に過去の研究¹¹⁾のアウトプット式透水試験結果より得られた、透水係数と単位流出水量のばらつき関係を示す。ここで単位流出水量のばらつ

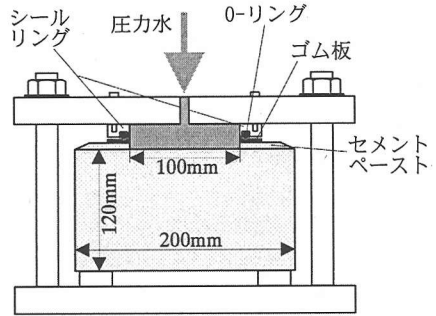


図-3 インプット式透水試験装置

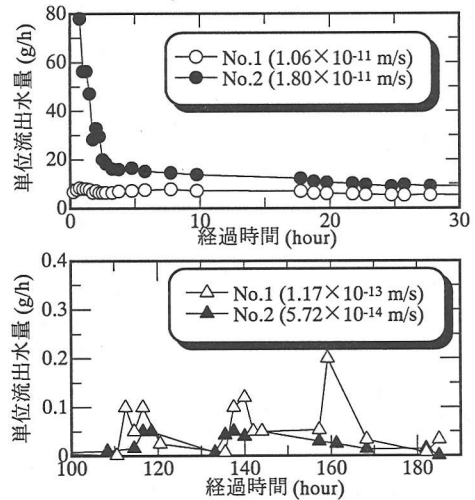


図-4 水の流出状況 (上:低水密, 下:高水密)

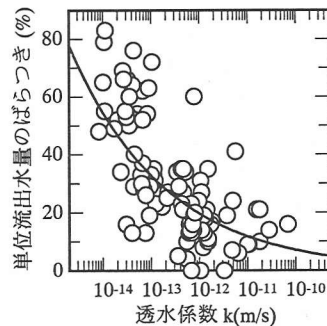


図-5 透水係数と単位流出水量のばらつき関係

きは、ある経過時間の区間を流出水の定常状態と仮定して、その区間の単位流出水量の平均値と標準偏差を求め、求めた標準偏差を平均値で除した変動係数と定義している¹⁰⁾。

以上のように高水密なコンクリートに対するアウトプット式の透水試験において、短時間で精度の高い実験データを得ることは非常に困難である。本研究では高耐久性コンクリートの開発を目的とし、そのため高水密なコンクリートに対しても可能な透水試験方法が望まれる。

そこで、本研究の透水試験においては短期間で試験を行うことができ、高水密なコンクリートに対しても試験が可能な DIN 1048 に基づくインプット式の透水試験方法を採用した。

(3) 曲げ変形試験

本研究では繊維補強コンクリートの力学的性能を検討するために曲げ変形試験を行った。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 100×100×400mm の角柱供試体を用いた。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。供試体の中央の変位を変位計によって、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-6 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)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。本研究ではこの 2 つの直線の交点をひび割れ発生荷重とした⁹⁾。曲げ変形試験より得られた最大荷重およびひび割れ発生荷重から式(3)を用いて、曲げ強度およびひび割れ発生強度を求めた。

$$\sigma_b \propto \sigma_{crack} = \frac{Pl}{bh^2} \quad (3)$$

ここで、 σ_b : 曲げ強度 (N/mm^2)、 σ_{crack} : ひび割れ発生強度 (N/mm^2)、 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、繊維補強コンクリートのタフネスを検討するために、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(4)より曲げじん性係数を求めた。

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b}{\delta_b} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{\sigma}_b$: 曲げじん性係数 (N/mm^2)、 T_b : 曲げタフネス ($N \cdot mm$)、 δ_b : スパンの 1/150 のたわみ (mm)

3. 単一繊維補強コンクリートの水密性および曲げ特性

(1) 配合

表-2 に繊維無混入のプレーンコンクリート(PC : Plain

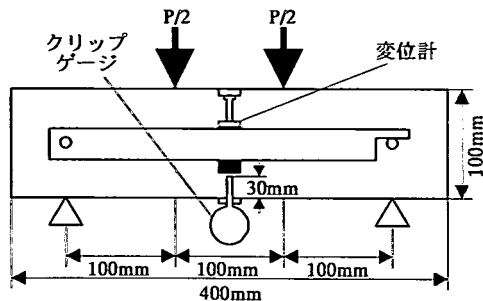


図-6 曲げ変形試験装置

表-2 プレーンおよび単一繊維補強コンクリートの配合

記号	混入率 V_f (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m^3)	混和剤 (C×%)
PC	—		45		0.44
S30S-10	1.0	50	60	164	1.2
S12-10	1.0				0.8
S3-10	1.0				0.7
S30R-05	0.5				0.8
S30R-10	1.0				1.0
S30R-20	2.0				1.2
S6-05	0.5				0.6
S6-10	1.0				0.8
S6-20	2.0				1.2

Concrete)および繊維を 1 種類だけ混入した単一繊維補強コンクリート(SC : Single Fiber Reinforced Concrete)の配合を示す。表中の記号は、頭文字のアルファベットが単一繊維補強であることを示し、次に続く数字は混入されている繊維の種類を示し、ハイフンに続く数字は繊維混入率を示す。例えば S30S-10 であれば SF30S を 1.0%混入した SCを示す。

全ての配合において、W/C は 50%、s/a はプレーンコンクリートを 45%、繊維補強コンクリートは 60%として、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、繊維の組合せや混入率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 SF3 を用いた場合や混入率が 2%の場合)でもパイプ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。

繊維混入率の増加に伴い、繊維補強コンクリートの空気量は増加する傾向がみられる。これは繊維による空気の巻き込みが原因と思われる。コンクリートの水密性はコンクリート内部に含まれる空気量と密接な関係にある

ので、空気量を $5 \pm 1.5\%$ の範囲に収まるように消泡剤と 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の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。

供試体の作製は JCI-SF2「繊維補強コンクリートの強度及びタフネス試験用供試体の作り方」に基づいて行い、すべての配合においてパイプレータを用いた。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) 繊維の長さおよび断面形状の影響

SC の水密性および曲げ変形特性に対する繊維の長さの影響を検討するために、4 種類の長さ(30, 12, 6, 3mm)の繊維を混入率 1.0% でコンクリート中に混入した SC について、透水試験、曲げ変形試験を行った。また、長さ 30mm の繊維については断面積が $0.5 \times 0.5\text{mm}$ 、 $0.5 \times 1.0\text{mm}$ の 2 種類の鋼繊維を用いて、繊維の断面形状の影響について検討を行った。

a) 透水試験結果

図-7 に繊維の長さを変化させた場合の透水試験結果を示す。図より繊維をコンクリートに混入することにより水密性は向上し、なかでも長さ 6mm の鋼繊維を混入した S6-10、長さ 3mm の繊維を混入した S3-10 が低い透水係数の値を示している。

図-8 に長さ 30mm で断面積が $0.5 \times 0.5\text{mm}$ 、 $0.5 \times 1.0\text{mm}$ と異なった鋼繊維を混入した SC の透水試験結果を示す。図より同一長さでも繊維の断面形状が異なる、すなわち正方形よりも扁平な形状な鋼繊維を混入することによって、水密性が大きく向上することが分かる。

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。例えば気泡や毛細管空隙、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、それらの欠陥部分が改良されて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。長さが同一の繊維を混入している S30S-10、S30R-10 で透水性が著しく異なる理由としては、混入されている繊維の断面形状が異なるためモルタル-繊維界面の微細構造が異なることなどが考えられる。

b) 曲げ変形試験結果

図-9 に繊維の長さを変化させた場合の曲げ変形試験結

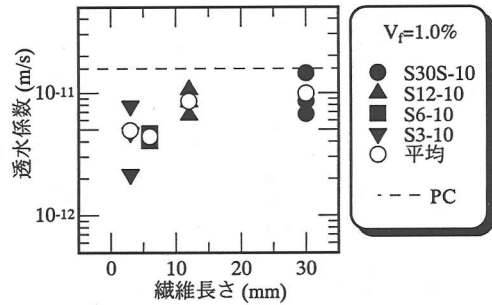


図-7 繊維長さとお透水係数の関係

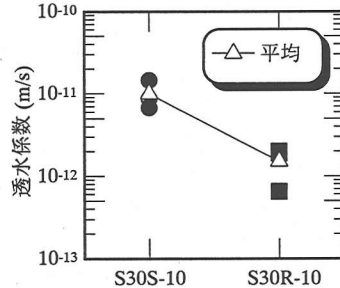


図-8 繊維の断面形状とお透水係数の関係

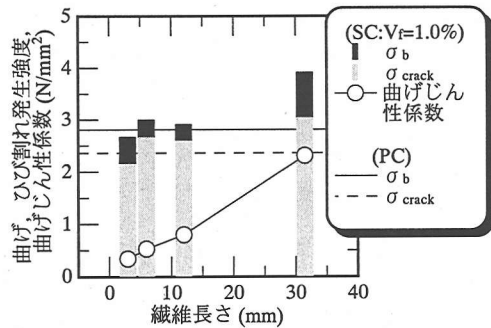


図-9 繊維長さとお曲げ特性の関係

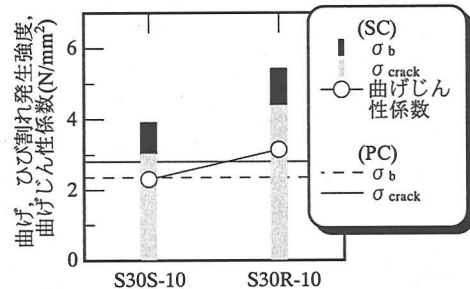


図-10 繊維の断面形状とお曲げ特性の関係

果を示す。ただし図-9の値は3体の供試体の平均値を用いている。図より、4種類の鋼繊維のうち曲げ特性向上に対して最も効果的なのは、長さ30mmの鋼繊維であることが分かる。

図-10に長さ30mmで断面積が $0.5 \times 0.5\text{mm}$ 、 $0.5 \times 1.0\text{mm}$

と異なった鋼繊維を混入したSCの曲げ変形試験結果を示す。ただし図-10の値は3体の供試体の平均値を用いている。図より、同一長さでも繊維の断面形状が異なる、すなわち正方形よりも扁平な形状な鋼繊維の方が曲げ特性向上に対して効果的であることが分かる。これは断面形状を扁平にすることにより1本あたりの繊維の表面積が増大し、その結果付着強度が増大したためと思われる。

(3) 繊維混入率の影響

SCの水密性および曲げ変形特性に対する繊維混入率の影響を検討するために、SF30RおよびSF6の繊維混入率を変化させてコンクリート中に混入したSC(S30RおよびS6)について、透水試験、曲げ変形試験を行った。ただし繊維混入率は、0.5、1.0、2.0%の3種類としている。

a) 透水試験結果

図-11にS30RおよびS6についての透水試験結果を示す。図より、S30R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S30R-20が全てのSCの透水係数において最も低い値を示した。一方S6に関してはS30R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く、混入率0.5%のときに最も低い透水性を示した。

一般に繊維補強コンクリートは繊維混入率の増加に伴いその補強効果が増大する。そのためS30Rの場合、繊維混入率の増加に伴いコンクリートの透水性に対する補強効果も大きくなり、その結果透水係数は低い値を示した。一方S6の場合、繊維混入率0.5%の時に最も低い透水性を示し、混入率が増加してもS30Rと比較して水密性の変化は小さく、混入率の増加に伴い補強効果が増大する傾向はみられなかった。この結果の差異は混入されている繊維の形状寸法が原因の一つであり、S30RとS6がコンクリートの水密性に対して与える影響が異なることを示している。

b) 曲げ変形試験結果

繊維混入率を増加させたS30R、S6についての曲げ変形試験結果をそれぞれ図-12a、bに示す。ただし図-12の値は3体の供試体の平均値を用いている。試験結果より、繊維長さが長いS30RがS6よりも優れた曲げ特性を示していることが分かる。また繊維の種類にかかわらず、曲げ強度、ひび割れ発生強度、曲げじん性係数、全ての曲げ特性が繊維混入率の増加に伴い増加する傾向を示している。

(4) 補強効果による繊維の分類

次にコンクリート中への繊維分散状況を調べるために、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-13にその結果を示す。S30R-10においては

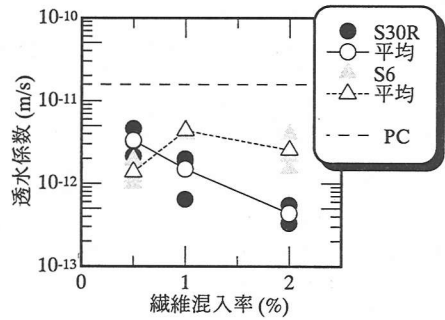


図-11 繊維混入率と透水係数の関係

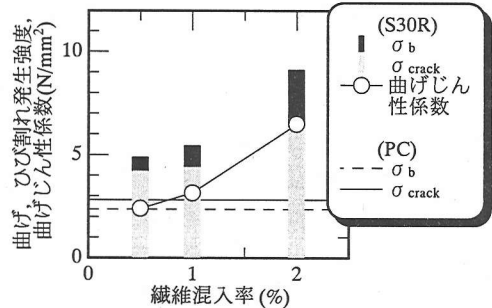


図-12a 繊維混入率と曲げ特性の関係 (S30R)

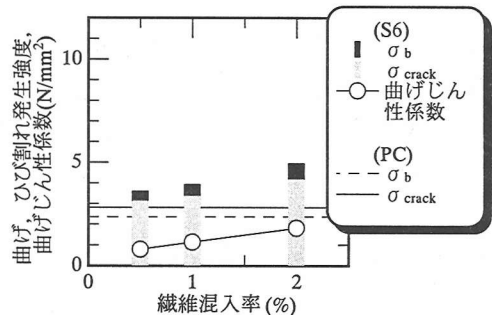


図-12b 繊維混入率と曲げ特性の関係 (S6)

X線写真の撮影を行わなかったが、SF30SとSF30Rはほぼ同じ形状寸法(表-1)であるため、両者の繊維分散状況は等しいと推察される。図から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。S30S-10、S12-10においては繊維が一本づつ確認できる一般的な繊維の分散状況にあるが、S6-10、S3-10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、その分散状況は大きく異なる。これは形状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SF30S、SF12と比較してSF6、SF3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S30S-10、S12-10よりも、細かい繊維が混入されているS6-10、S3-10の方が多くなる。

Banitha ら¹²⁾はセメント系材料に使用される繊維をマクロ繊維(macro fiber)およびマイクロ繊維(micro fiber)の2

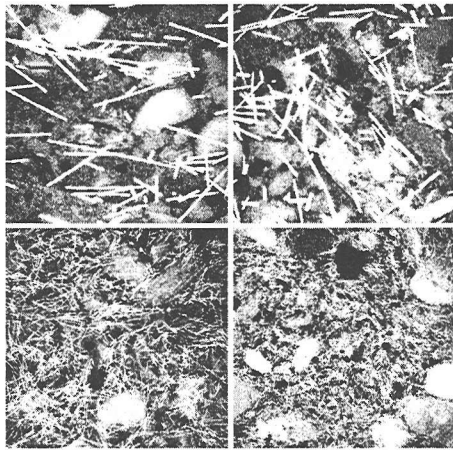


図-13 繊維の分散状況(左上:S30S-10, 右上:S12-10, 左下:S6-10, 右下:S3-10)

種類に分類して、マクロ繊維は長さ 25~60mm, 幅 0.3~3mm, 比表面積 1000mm²/g を持ち、タフネスに対して効果があるとしている。一方長さが 20mm 以下, 幅 25μm 以下, 比表面積 2000mm²/g 以上を持つ繊維をマイクロ繊維と分類して、タフネスおよび強度両方に対して効果的であるとしている。以上のことを参考にして、本研究においても使用繊維をその形状寸法および繊維分散状況によって長繊維と短繊維に分類することとした。長繊維は比較的寸法が大きい繊維 SF30S, SF30R, SF12 であり、短繊維は寸法が小さい繊維 SF6, SF3 である。

透水試験, 曲げ変形試験結果より, 長繊維および短繊維がコンクリートに及ぼす影響に関してそれぞれ異なることが分かる。長繊維は力学的性能, 特に曲げ特性を高めるのに非常に効果的である。コンクリート中の長繊維は荷重を分担することによって, ひび割れ発生強度や曲げ強度を増進させ, 最大荷重後はマトリクスからの引き抜けに対して抵抗するためタフネスの増進がみられる。よって長繊維の曲げ特性に対する効果はその長さに依存する。本研究では SF12 を形状寸法および繊維分散状況より長繊維と分類したが, 曲げ特性向上に対する効果が小さいのはそのためである。一方, 透水性に対する効果は短繊維と比較するとあまり大きくは無いが, 繊維の断面形状を変えることによって水密性向上に対して効果がみられる。これは繊維の断面形状の違いによる繊維-モルタル界面の違いが原因の一つであると思われる。また, 繊維混入率の増加に伴い曲げ特性増進および水密性向上に対する効果が大きくなる傾向を示す。

一方, 短繊維もコンクリートの曲げ特性に対する効果を有し, 繊維混入率の増加とともにその効果は大きくなる。しかしひび割れの拡大・伝播に十分抵抗できるほど繊維の長さが長くないため, 効果は長繊維に比べるとかなり小さく, PC と同程度の曲げ特性を示す。水密性向

表-3 ハイブリッド繊維補強コンクリートの配合

記号	混入率 V _f (%+%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	混和剤 (C×%)
H30S12-0505	0.5+0.5	50	60	164	0.8
H30S6-0505					0.8
H126-0505					0.7
H123-0505					0.8
H63-0505					0.8
H30R6-0501	0.5+0.1				0.9
H30R6-0307	0.3+0.7				1.1
H30R6-0505	0.5+0.5				1.0
H30R6-0703	0.7+0.3				1.0
H30R6-0510	0.5+1.0				1.1
H30R6-0515	0.5+1.5				1.2
H30S3-0109	0.1+0.9				1.0
H30S3-0307	0.3+0.7				1.0
H30S3-0505	0.5+0.5				0.8
H30S3-0703	0.7+0.3				1.0

上に対しても効果的であるが, 長繊維の場合とは異なり繊維混入率が増加してもその効果はあまり変化がみられない。

以上をまとめると, 長繊維はコンクリートの力学的性能増進, 水密性向上に効果的であり, 繊維混入率の増加に伴いその効果は著しく大きくなるという特徴がみられる。一方, 短繊維は同様に力学的性能増進, 水密性向上に効果があるが, 長繊維と比較するとその効果は小さく, 繊維混入率の変化による繊維の補強効果の変化も小さいという特徴がみられる。

4. ハイブリッド繊維補強コンクリートの水密性および曲げ特性

(1) ハイブリッド繊維補強コンクリート

ハイブリッド(hybrid)とは雑種, 混成物といった意味を持つ単語であり, 複合材料学の分野ではハイブリッド複合材料とは一般的に, 2種類以上の繊維あるいは2種類以上のマトリクスを用いた複合材料のことを言う。本研究のハイブリッド繊維補強コンクリートにおいては2種類の繊維をコンクリート中に組み合わせて混入しているが, 材質は2種類とも同じで鋼繊維を用いている。しかし前章のSCの試験結果より, 繊維の形状寸法が異なることによりコンクリートに及ぼす影響は異なる。そのため材質は同じであるがコンクリートに対して及ぼす影響は異なることから, 性質の違う2種類の繊維を使用していると考えて, 本研究ではハイブリッド繊維補強コンクリートと呼んでいる。

表-3にハイブリッド繊維補強コンクリート(HC: Hy-

brid Fiber Reinforced Concrete)の配合を示す。表中で使用した記号は、頭文字のアルファベットがハイブリッド繊維補強であることを示し、次に続く数字は混入されている2種類の繊維を示し、ハイフンに続く数字はそれぞれの繊維混入率を示す。例えばH30S12-0505であればSF30SとSF12をそれぞれ0.5%ずつ混入したHCを示す。供試体作製方法、試験条件などについてはSCと同一である。

(2) 繊維の組合せの影響

本研究で使用した長さ30, 12, 6, 3mmの鋼繊維を2種類、繊維混入率0.5%ずつ組み合わせて混入したHCにおいて、透水試験、曲げ変形試験を行い、繊維の組合せの影響について検討を行った。なお本章で用いる繊維の分類を示す長繊維、短繊維という語句は、前章で分類したように前者が長さ30, 12mmの繊維を示し、後者が長さ6, 3mmの繊維を示す。

a) 透水試験結果

図-14に本研究で用いた4種類の繊維のうち2種類を、それぞれ繊維混入率0.5%で組み合わせて混入したHCの透水試験結果を示す。図より全てのHCの透水性がPCよりも低くなる傾向を示していることが分かる。6種類のHCのうち最も低い透水性を示したのは長繊維SF12と短繊維SF6を組み合わせて混入したH126-0505であった。前章のSCの透水試験結果によると、長繊維SF30S, SF12を混入したSCと比較して、短繊維SF6, SF3を混入したSCは水密性が高くなる傾向を示したが、SF30SとSF3およびSF12とSF6を組み合わせて混入したHCの水密性が著しく向上したのは注目すべき結果である。

b) 曲げ変形試験結果

図-15に本研究で用いた4種類の繊維のうち2種類を、それぞれ繊維混入率0.5%で組み合わせて混入したHCの曲げ変形試験結果を示す。図より長繊維SF30Sと短繊維SF6を組み合わせて混入したH30S6-0505が、曲げ強度、ひび割れ発生強度および曲げじん性係数全ての曲げ特性に対して、最も高い繊維の組合せ効果を発揮していることが分かる。

(3) 組み合わせた繊維の混入率バランスおよび短繊維混入率の影響

前節では、HCの水密性および曲げ変形特性に対する繊維の組合せの影響を検討するために、組み合わせた繊維の繊維混入率を両者とも0.5%とし、総繊維混入率を1.0%と設定したが、1対1の繊維混入率のバランスが繊維の組合せに対して最適であるとは限らない。そこで本節では、組み合わせた繊維の混入率において最適なバランスが存在するかを確認するために、長繊維と短繊維を組み合わせたHC(総繊維混入率=1.0%)について繊維混入率のバランスを変化させて、透水試験、曲げ変形試験を行った。

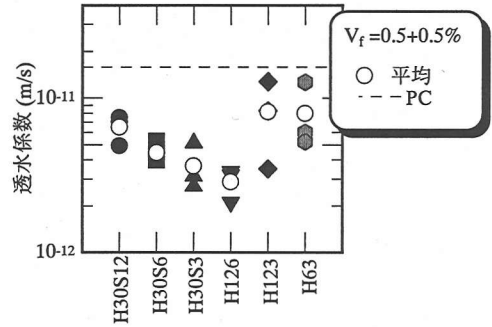


図-14 繊維の組合せと透水係数の関係

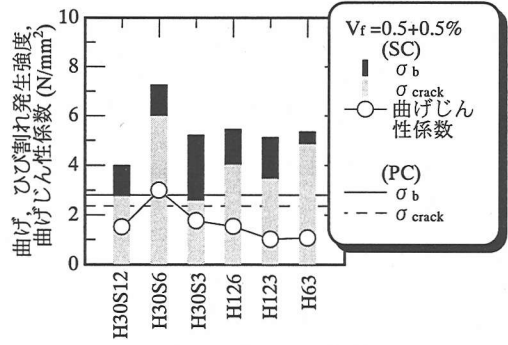


図-15 繊維の組合せと曲げ特性の関係

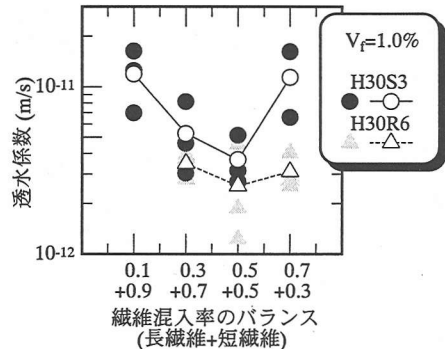


図-16 繊維混入率のバランスと透水係数の関係

また併せて、短繊維混入率がHCに及ぼす影響を検討するために、長繊維混入率を一定として短繊維混入率を変化させたHCについての試験も行った。

a) 透水試験結果

HCの水密性に対して繊維の混入率バランスの影響を検討するために、長繊維と短繊維の組合せであるH30S3, H30R6の2種類のHCを用いて、繊維の混入率バランスを変化させて透水試験を行った。その試験結果を図-16に示す。試験結果より、H30S3, H30R6両者ともに繊維の混入率バランスが1対1である0.5+0.5%のときに透水係数は最も低い値を示した。この結果から、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水密性向

上に対して、最適な繊維の混入率バランスが存在する。

次に短繊維混入率がHCの水密性に及ぼす影響を検討するために、H30R6において長繊維混入率を0.5%一定として、短繊維混入率を0.1, 0.5, 1.0, 1.5%と変化させて透水試験を行った。図-17にその結果を示す。試験結果より、短繊維混入率の増加に伴い透水性は一定の傾向を示さず、増加と低下の両方の傾向がみられた。

b) 曲げ変形試験結果

HCの曲げ特性に対して繊維の混入率バランスの影響を検討するために、長繊維と短繊維の組合せであるH30R6について、繊維の混入率バランスを変化させて曲げ変形試験を行った。図-18に試験結果を示す。図より、繊維の混入率バランスを変えることによって、HCの曲げ特性に目立った変化はなかったが、0.5+0.5%の混入率バランスにおけるHCの曲げ特性は多少低い値を示した。

次に短繊維混入率がHCの曲げ特性に及ぼす影響を検討するために、H30R6において長繊維混入率を0.5%一定として、短繊維混入率を0.1, 0.5, 1.0, 1.5%と変化させて曲げ変形試験を行った。図-19に試験結果を示す。図より、短繊維混入率の増加に伴い曲げ特性は増加する傾向を示すことが分かる。しかし、総混入率が1.5, 2.0%の場合においては曲げじん性係数はほぼ同等の値を示し、曲げ強度、ひび割れ発生強度に関しては総混入率2.0%になると低下する傾向を示している。したがって本研究の場合、H30R6の曲げ特性に対して混入率0.5+1.0%の時に最大の効果を発揮すると言える。

(4) 水密性と曲げ特性に対する繊維の組合せ効果

本研究ではHCについて透水、曲げ変形試験を行ったが、水密性向上に対して繊維の組合せ効果があったからといって、必ずしも曲げ特性に対しても効果があるとは限らない。また、その逆も言える。この原因としてコンクリートに対する繊維の補強メカニズムが、水密性と曲げ特性では異なることが挙げられる。

コンクリートの水密性に対する繊維の効果は、コンクリート中の欠陥の改良を原因の1つとして挙げた。例えば繊維が混入されることにより、その周辺のマトリクスの水密性が向上すると仮定すると、繊維の形状寸法によってマトリクスに与える影響は変わってくる。また、その効果の程度も異なると思われる。そして、形状寸法の異なる繊維を組み合わせることによって、水の移動の点から言えば不均一な状態すなわち水の移動経路の複雑化が起きる。このことから、コンクリートの水密性向上のためには繊維の形状寸法よりは、繊維の組合せや、組み合わせた繊維量のバランスが重要となる。

一方、コンクリートの曲げ特性に対する繊維の効果はひび割れの拘束である。繊維の形状寸法が大きい(長さ30mm以上)とコンクリートの破壊直前に生じるモルタル中に進展する比較的大きなひび割れに対して効果があり、

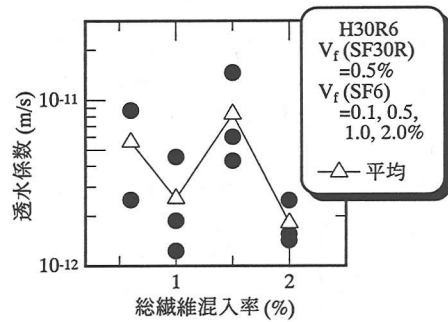


図-17 短繊維混入率と透水係数の関係

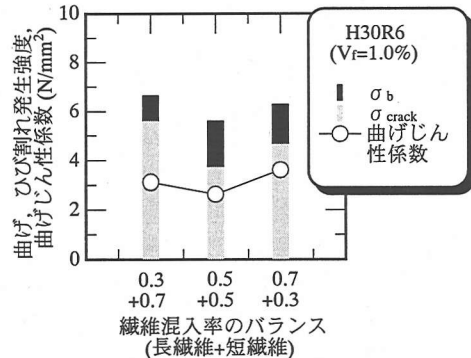


図-18 繊維混入率のバランスと曲げ特性の関係

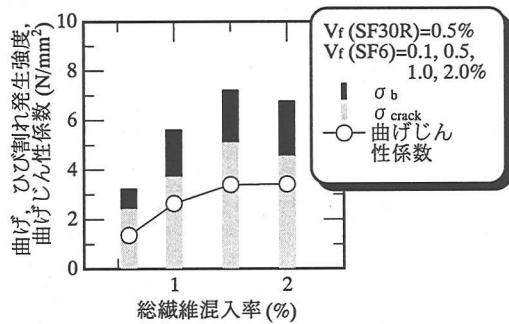


図-19 短繊維混入率と曲げ特性の関係

細かい繊維だと破壊初期に生じる微細ひび割れに対して効果がある¹³⁾。そして、形状寸法の異なる繊維を組み合わせることによって、ひび割れの大きさ別の補強効果が現れるが、水密性に対する繊維の組合せ効果と異なり寸法の小さい繊維同士の組合せの場合、破壊初期の微細ひび割れに対する効果はあるが、微細ひび割れが拡大・伝播すると繊維の寸法が小さいため、破壊直後に生じるモルタルひび割れに対しては拘束効果が期待できない。そのため組み合わせた繊維量のバランスも影響はあるが、それよりも組み合わせた繊維の平均長さや繊維混入率に対して強く影響を受けると考えられる。

以上のように、HCの繊維の組合せ効果は、水密性向上に対しては水の移動経路の複雑化、曲げ特性向上に対し

してはひび割れの大きさ別の補強を原因として挙げた。例として水密性向上に対して最も効果が大きかったH12-6-0505について繊維の組合せ効果を説明すると、水の移動経路の複雑化という点から考えると長繊維SF12と短繊維SF6は最適な組合せであるが、曲げ特性向上の点から考えると長繊維SF12はその繊維長さゆえ、拡大・伝播したひび割れに対する拘束効果が小さく、結果的に曲げ特性向上に対する効果は小さいと説明できる。

5. 繊維の組合せ効果の定量化

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り¹⁴⁾、複合則を利用してSwamyら¹⁵⁾は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を提案している。金⁹⁾はSwamyらが提案した式の拡張を行いHCに適用して、曲げ特性に対する繊維の組合せ効果を検討している。一方、繊維補強コンクリートの透水性に対してはまだ算定式がみられないため、本章では繊維補強コンクリートの透水性に対する算定式を理論的に導き、水密性に対する長繊維と短繊維の組合せ効果を検討することを目的とする。

コンクリートの透水性に関する算定式を導くために、まず本研究で用いた供試体 PC, SC, HC 全て(予備実験も含む)の曲げ強度、圧縮強度といった力学的性能と透水係数の関係を調べたところ、圧縮強度と透水係数の関係に最も高い相関性がみられた。圧縮強度が異なるコンクリートの透水性に関する既往の研究^{16, 17, 18)}はいくつかみられ、透水性と圧縮強度との間に相関性がみられることは既に報告されている。これはコンクリートが密になることによって水密性、圧縮強度の両方が高くなることによるが、本研究の実験結果により、このことが繊維補強コンクリートに対しても当てはまることが分かった。図-20に本研究と既往の研究^{16, 17, 18)}の圧縮強度と透水係数の関係を示す。

以上のように、繊維補強コンクリートの透水性と圧縮強度との間に相関がみられることから、繊維補強コンクリートの透水性に対する算定式の構築を、コンクリートの圧縮強度に関する理論式であるセメント空隙比説を用いて行うことを試みた。セメント空隙比説とは、水と空隙との容積の和を空隙とみなしコンクリートの圧縮強度はセメント空隙比によって支配されるとして、Talbot¹⁹⁾が式(5)を提案している。

$$F_c = A + B \frac{c}{v} = A + B \frac{c}{w + a} \quad (5)$$

ここで、 F_c : コンクリートの圧縮強度、 c : セメン

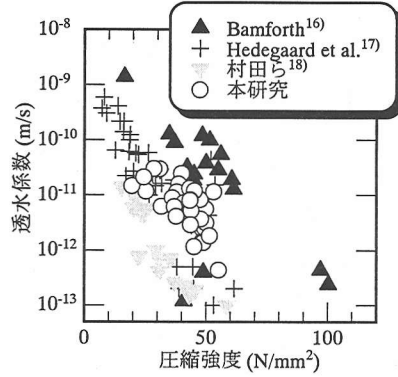


図-20 圧縮強度と透水係数の関係

トの絶対容積、 w : 単位水量の容積、 a : コンクリート 1m^3 中の空気の容積、 A, B : セメントの品質、材齢などによって決まる定数

コンクリートの透水性と圧縮強度の相関が良いことからこの考え方を利用して、コンクリートの透水性も圧縮強度と同様にセメント空隙比により支配されると仮定して、以下の式(6)を導いた。

$$\ln k = A + B \frac{c}{v} = A + B \frac{c}{w + a} \quad (6)$$

ここで、 k : コンクリートの透水係数

繊維をコンクリート中に混入することによってコンクリートの透水性が低下する原因の1つとして、コンクリート中の水の移動経路が複雑になることを挙げたが、これを繊維混入により水の移動経路となりうるコンクリートの空隙が減少すると表現することで、以下の式(7)を求めた。

$$\ln k_{sc} = A + B \frac{c}{(w + a) - \alpha_f V_f} \quad (7)$$

ここで、 k_{sc} : 単一繊維補強コンクリートの透水係数、 α_f : 繊維がコンクリートの空隙に及ぼす影響に関する係数、 V_f : 繊維混入率

HCの算定式においては、式(7)より求まる長繊維、短繊維それぞれの繊維の影響に関する係数 α_n, α_p を複合則により用い、加えてコンクリートの水密性に対する繊維の組合せ効果に関する係数 ξ を導入することによって、式(8)を求めている。すなわち係数 $\xi > 1$ であれば、単一繊維の混入効果と比較して繊維を組み合わせることにより水の移動経路となりうるコンクリートの空隙がさらに減少することを表し、係数 $\xi < 1$ であれば逆に増加することを表す。

$$\ln k_{HC} = A + B \frac{c}{(w+a) - \xi(\alpha_{f1}V_{f1} + \alpha_{f2}V_{f2})} \quad (8)$$

ここで、 k_{HC} ：ハイブリッド繊維補強コンクリートの透水係数、 ξ ：繊維の組合せがコンクリートの空隙に及ぼす影響に関する係数

解析手順としては、実験結果を用いてそれぞれの式中の定数を最小自乗法により求めた。セメントにより決まる定数 A 、 B は PC の実験結果(既往の研究結果¹⁷⁾ も使用)により求め、繊維の影響に関する係数 α_f を SC の実験結果より求めたところ、 $A=16.97$ 、 $B=-16.76$ 、 $\alpha_f=1.67$ 、 $\alpha_f=1.85$ となった。そして HC の実験結果より繊維の組合せ効果に関する係数 ξ を求めたところ、 $\xi=1.22>1$ が求まったことから HC の水密性に対する繊維の組合せ効果が存在することが判明した。

本研究で提案した算定式の妥当性を検討するために算定値と実験値の関係を図-21 に示したところ、若干のばらつきがみられたものの両者は良い相関を示すことが分かった。図-21 にみられたばらつきは、コンクリートの透水性が圧縮強度のなどは異なり試験値に比較的大きなばらつきが生じるためや、繊維補強コンクリートの透水試験データが少ないためと考えられる。相関係数は 0.65 と精度は若干低い以上を考慮すると、提案した算定式が妥当であると言える。ただし、これらの式に使用した試験データは、SC に関しては長繊維、短繊維どちらの場合も繊維混入率は 0.5~2.0% の範囲にあり、HC に関しては総繊維混入率が 0.6~2.0% の範囲にあるため、この範囲よりも繊維混入率が超える配合の場合は算定式が当てはまらない可能性もある。

6. 結論

本研究は高い耐久性を持つコンクリートを開発するために繊維補強コンクリートに注目し、コンクリートの水密性と曲げ特性に対する形状寸法の異なる鋼繊維の補強効果について研究したものである。以下に本研究より得られた知見をまとめる。

- 1) 本研究で使用した5種類の繊維を、形状寸法および繊維分散状況を基に長繊維と短繊維に分類したところ、各繊維は異なる補強効果を持つことが分かった。
- 2) 長繊維はコンクリートの水密性および曲げ特性向上に対して効果があり、特に力学的性能向上に対する効果が高い。そして繊維混入率の増加に伴いその効果は増加する。
- 3) 短繊維もコンクリートの水密性および曲げ特性向上に対して効果があるが、その効果は長繊維と比較して小さい。また、繊維混入率の増加に伴う効果の変化も小

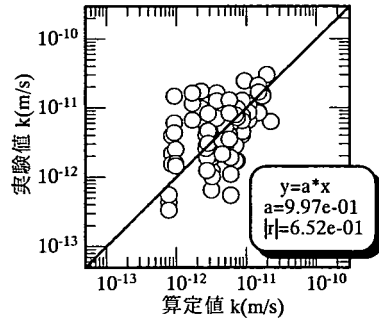


図-21 透水係数の算定値と実験値の関係

さい。

- 4) ハイブリッド繊維補強コンクリート(HC)の水密性に対して効果的な繊維の組合せが、必ずしも曲げ特性に対しても効果的であるとは限らないことから、HCの水密性と曲げ特性に対する繊維の組合せの効果が異なることが分かった。
- 5) HCの水密性に対する繊維の組合せ効果の定量化をセメント空隙比説によって行ったところ、繊維の組合せ効果に関する係数 $\xi=1.22$ となり、水密性に対する繊維の組合せ効果が存在することが明らかとなった。

7. 今後の課題

本研究は形状寸法の異なる鋼繊維を1種類のみ混入した単一繊維補強ならびに2種類の繊維を組み合わせ混入したハイブリッド繊維補強の実験結果についてまとめたものである。本研究の実験結果により、形状寸法の異なる鋼繊維がコンクリートの水密性および曲げ特性に対して異なる補強効果を示すことが明らかになった。また、形状寸法の異なる鋼繊維を組み合わせ混入することが水密性および曲げ特性に対して効果的であることが分かり、セメント空隙比説を用いて水密性に対する繊維の組合せ効果の定量化を行った。コンクリートの透水試験は試験期間の問題やデータのばらつきなどにより難しく、データの蓄積には時間を要する。そのため、繊維の補強メカニズム(特に水密性に対する)や繊維の組合せ効果などについてはさらに実験を進めていく必要がある。また、繊維補強コンクリートの水密性と圧縮強度との間に相関がみられることから、セメント空隙比による耐久性評価手法の可能性が考えられる。そこで繊維補強コンクリートの水密性に関するデータをさらに加えて新しい知見を得るために、鋼繊維に限らず様々な種類の繊維補強コンクリートに関する試験データの蓄積が必要である。その他に施工性に関する検討として、長繊維と短繊維を比較すると短繊維は形状寸法が小さいことから、ファイバーボールが形成されにくく繊維混入による施工性の低下が小

さいことが挙げられる。そこで同一繊維混入率における単一繊維補強とハイブリッド繊維補強の補強効果を、繊維混入による施工性の低下と関連付けて比較検討を行うことも重要な検討課題と言える。

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、東京製綱株式会社より鋼繊維を、混和剤は株式会社フローリックに提供して頂きました。また、本研究の実験については吉田博之氏(山形県庁)、川口昌平氏(奥村組)、佐藤良樹氏(北海道庁)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) Rossi, P.: High performance multimodal fiber reinforced cement composites (HPMFROC): the LCPC experience, *ACI Materials Journal*, Vol.94, No.6, pp.478-483, 1997.
- 2) Banthia, N., Moncef, A., Chokri, K. and Sheng, J.: Uniaxial tensile response of microfibre reinforced cement composites, *Materials and Structures*, Vol. 28, No.183, pp.507-517, 1995.
- 3) Mobasher, B. and Li, C. Y.: Mechanical properties of hybrid cement-based composites, *ACI Materials Journal*, Vol.93, No.3, pp.284-292, 1996.
- 4) Horiguchi, T. and Sakai, K.: Hybrid effects of fiber-reinforced concrete on fracture toughness, *High-Performance of Concrete*, ACI-SP-172, pp.535-548, 1997.
- 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) Banthia, N., Djeridane, S. and Pigeon, M.: Electrical resistivity of carbon and steel micro-fiber reinforced cements, *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, No.5, pp.804-814, 1992.
- 7) 例えば, Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (田澤榮一, 佐伯昇監訳): コンクリート工学-微視構造と材料特性-, 技報堂出版, pp.115-180, 1998.

- 8) 村田二郎: 中空円筒形供試体を用いる透水試験方法, 土木学会論文集, 第63号, pp.1-7, 1959.7.
- 9) Wasserundurchlässigkeit, *DIN 1048*, Blatt 1, Teil 4.7, 1972.
- 10) 堀口至, 佐伯昇, 堀口敬, 志村和紀: 長短の繊維で補強したコンクリートの浸透性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.313-318, 2000.
- 11) 堀口至: 長短の繊維を混入したハイブリッド繊維補強コンクリートの透水性, 北海道大学修士論文, 1999.
- 12) Banthia, N., Azzabi, M. and Pigeon, M.: Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, Vol.26, No.161, pp.405-413, 1993.
- 13) Rossi, P., Acker, P. and Malier, Y.: Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure, *Materials and Structures*, Vol.20, No. 120, pp.436-439, 1987.
- 14) 小林一輔: 繊維補強コンクリート-特性と応用-, オーム社, pp.84-85, 1981.
- 15) 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.
- 16) Bamforth, P. B.: The water permeability of concrete and its relationship with strength, *Magazine of Concrete Research*, Vol.43, No.157, pp.233-241, 1991.
- 17) Hedegaard, S. E. and Hansen, T. C.: Water permeability of fly ash concretes, *Materials and Structures*, Vol.25, No.151, pp.381-387, 1992.
- 18) 村田二郎, 越川茂雄, 伊藤義也: コンクリートにおける加圧浸透流に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.1, pp.61-73, 2000.1.
- 19) Talbot, A. N.: A proposed method of estimating the density and strength of concrete and proportioning the materials by the experimental and analytical consideration of voids in mortar and concrete, *Proc. ASTM*, 1921.

(2002.11.18受付)

EFFECT OF STEEL FIBER WITH DIFFERENT SIZE ON WATER TIGHTNESS AND FLEXURAL PROPERTIES OF CONCRETE

Itaru HORIGUCHI and Noboru SAEKI

The effect of steel fiber with different size on water tightness and flexural properties of concrete was investigated. From the test results of single fiber reinforced concrete, fibers used in this research were divided in two categories of longer and shorter ones. The effect of each fiber on water tightness and flexural properties was different. From the test results of hybrid fiber reinforced concrete, the effect of combination of fibers on water tightness and flexural properties were different each other. The permeability of fiber reinforced concrete had correlation with compressive strength, and the effect of combination of fibers on water tightness was quantified using by cement-void ratio theory, which explained compressive strength of concrete.