

V-4

ハイブリッド繊維補強コンクリートの水密性について

北海道大学大学院 学生員 堀口 至
 北海道大学大学院 学生員 金 南旭
 北海道大学工学部 正 員 堀口 敬
 北海道大学工学部 フェロー員 佐伯 昇

1. はじめに

コンクリートは潜在的に微細なひび割れを持っている。さらにコンクリートが乾燥することによって内部の水分が蒸発し微細なひび割れが生じる。またコンクリートに荷重がかかる場合を考えると、骨材界面に付着ひび割れが入り、さらに荷重が増大するとモルタル中にひび割れが伝播し、連結して連続ひび割れが生じる。コンクリート中の初期微細ひび割れを拘束することができれば従来のものに比べて水密性の高いコンクリートができる。この考えからハイブリッド繊維補強コンクリートが実験されている。

ハイブリッド繊維補強コンクリートはマクロ繊維(長さ 25~60mm, 直径 0.3~3mm)とマイクロ繊維(長さ 20mm 以下, 直径 25 μ m 以下)の繊維を混入したコンクリートである。マクロ繊維はコンクリートにひび割れが生じた後、ひび割れにブリッジした繊維の引き抜きエネルギー強さによりタフネスを増加させ、マイクロ繊維は初期微細ひび割れを拘束する効果があることが報告されている^{1),2)}。

本研究は、ハイブリッド繊維補強コンクリートの水密性を明らかにする目的で実施したものである。

2. 実験概要

2-1. 試験供試体

試験供試体に用いた材料は、セメントに普通ポルトランドセメント、骨材には川砂と最大骨材寸法 10mm の川砂利、混和剤にはプレーンコンクリートでは AE 剤、繊維補強コンクリートには高性能 AE 減水剤を用いた。繊維は長さ 3,6,12,30mm の鋼繊維(SF)、長さ 3,6,12mm のポリプロピレン繊維(PP)、長さ 6,30mm の鋼繊維に亜鉛メッキを施したガルバニク鋼繊維(GaSF)を用いた。表-1,2 に繊維と配合の詳細を記述する。

繊維補強コンクリートの練り混ぜは次の手順で行った。まず骨材を約 30 秒間混ぜてから、セメント、使用繊維量の半分を入れて約 1 分 30 秒間練り混ぜた。そして残りの繊維と、混和剤を混ぜた水を入れて約 2 分間練り混ぜを行った。練り混ぜには二軸のミキサーを用いた。練り混ぜ後剥離剤として油を塗った型枠に入れ、付き棒、プラスチックハンマーを用いて締固めを行う。全ての供試体は打設してから約 24 時間後に脱型を行い水温 20℃の養生槽に供試体を沈め、28 日間の水中養生を行い実験を行った。

表-1 繊維の種類と形状

記号	繊維の種類	長さ	直径	形状
SF3	鋼繊維	3mm	20 μ m	平滑
SF6		6mm	20 μ m	平滑
SF12		12mm	0.25mm	波形
SF30		30mm	0.6mm	波形
PP6	ポリプロピレン繊維	6mm	20 μ m	平滑
GaSF6	亜鉛メッキ鋼繊維	30mm	0.5mm	波形
GaSF30		6mm	0.5mm	波形

*GaSF6はGaSF30を切断して作成

表-2 供試体の配合

	混入率 (%+%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	混和剤 (%) ^{***}
プレーン	-	50	45	166	0.44
SF30+SF6	1.0+0.5	50	60	166	0.70
	1.0+0.3	50	60	166	0.40
	1.0+0.1	50	60	166	0.30
SF30+PP6	1.0+0.5	50	60	166	0.30
	1.0+0.3	50	60	166	0.45
	1.0+0.1	50	60	166	0.40
SF30+SF3	1.0+0.3	50	60	166	0.75
SF30+SF12	1.0+0.3	50	60	166	0.65
GaSF30+GaSF6	1.0+0.1	50	60	166	0.55

*繊維補強コンクリートには高性能AE減水剤を用いた、

プレーンにはAE剤を用いた

**単位セメント量に対する添加量

Water tightness on hybrid fiber reinforced concrete

by Itaru HORIGUCHI, Nam-wook KIM, Takashi HORIGUCHI, Noboru SAEKI

供試体は各配合で透水試験用供試体 3 本、圧縮試験用供試体 3 本を作成した。透水試験用供試体には直径 100mm、高さ 180mm、中心孔の直径約 21~23mm の中空円柱供試体を用いた。圧縮試験用供試体には直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いた。

2-2. 圧縮試験

圧縮試験は透水試験を開始する日に実施し、供試体端面を研磨機により研磨して平滑にし、JIS A 1108 に従いコンプレッソメーターを用いて試験を行った。

2-3. 透水試験

一般にコンクリートの透水試験はアウトプット法とインプット法の 2 種類がある。アウトプット法は実際に水の浸出量を測定して透水係数を計算する方法である。この方法の長所は解析が容易であることで、短所は試験日数がかかることである。インプット法では供試体を乾燥後ある一定時間水圧をかけ、その後供試体を割って水の浸透深さを測定して浸透係数を求める。この方法ではだいたい 2 日間ぐらいの試験期間でよいが、解析が難しいことが難点である。そこで本研究では、試験日数はかかるが解析が容易であり、実際に水の浸出量を測定して透水係数を算出することのできるアウトプット法を用いた。

透水試験用供試体は外径 100mm 内径約 22mm 高さ 180mm の中空円柱供試体を用いた³⁾。図-1a,b に透水試験装置を示す。供試体の上面、下面と装置間に水が入らないように密封するため、装置と研磨した供試体端面の間にゴム板を挟み透水試験を行った。

実験手順であるが、まず供試体端面を研磨機により平らにする。透水試験器を組み立てる際に、透水試験器の部品に O-リングがついているので水密性を高めるためにシリコングリースを塗る。透水試験器を組み立て終わると、まず油圧式ジャッキにより供試体に所定の荷重をかける。その後圧縮強度が低い供試体には 1.0MPa、高い供試体には 2.0MPa の水圧をかけて測定を開始する。試験機の浸出孔にメスシリンダーを置いて水の蒸発を防ぐためにサランラップでメスシリンダーの口を密封する。水の浸出量は電子天秤により増加量を測定する。そして、透水係数はダルシーの式に基づいた右の式により算出する。

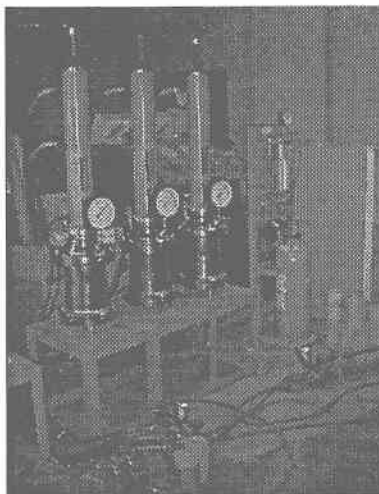


図-1a 透水試験装置

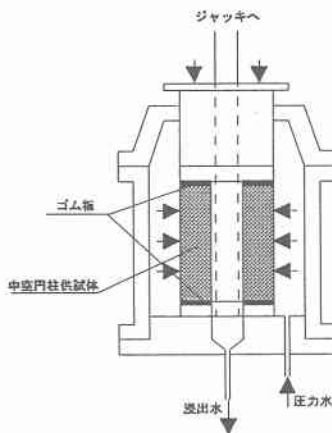


図-1b 透水試験装置

$$Q \text{ (g/h)} = \frac{1}{3600 \cdot 1000 \rho} Q \text{ (cc/s)}$$

$$k = \frac{\rho \log_e \frac{r_0}{r_i}}{2\pi h} \frac{Q}{P}$$

k : 透水係数 (m/s)	P : 水圧 (MPa)
Q : 流出量 (cc/s)	A : 供試体断面積 (mm ²)
h : 供試体高さ (mm)	ρ : 水の密度 (kg/m ³)
r_0 : 供試体半径	r_i : 中心孔の半径

3. 試験結果と考察

3-1. 圧縮試験

図-2 にコンクリートの圧縮強度と単位容積質量との相関関係図を表した。その結果互いに高い相関関係を示し、ハイブリッド繊維補強コンクリートの強度が普通コンクリートと同様にコンクリートの粗密性に大きく依存することが確認された。

図-3a~d に圧縮試験結果を示した。図-3a は、SF30+SF6 においてマイクロ繊維の混入率を 0.1,0.3,0.5 と変化させたコンクリートの圧縮試験結果であるが、SF6 の混入率が増加するにつれて強度の減少が見られた。図-3b は SF30+PP6 においてマイクロ繊維の混入率を 0.1,0.3,0.5 と変化させたコンクリートの圧縮試験結果である。PP6 の混入率が増加するにつれて強度は著しい低下が見られた。図-3c は混入率が 1.0%+0.3% でマイクロ繊維に SF3,6,12mm と PP6mm を用いたコンクリートの試験結果であるが、マイクロ鋼繊維の長さによる強度の増減は見られなかった。しかしマイクロ繊維に PP を用いたときは著しく強度は低下した。図-3d は混入率が 1.0%+0.1% でマイクロ繊維に SF6,PP6,と GaSF30+GaSF6 のコンクリートの圧縮強度を比較した図である。マイクロ繊維に PP6,GaSF6 を混入した供試体の強度はブレンや SF30+SF6 と比較すると強度は約 1/2 であることが分かる。

圧縮強度全般にわたりハイブリッド繊維補強コンクリートはブレンコンクリートと比較して低い値が出ているがこれはマクロ繊維の混入率を 1.0%に固定したことが原因であると思われる。

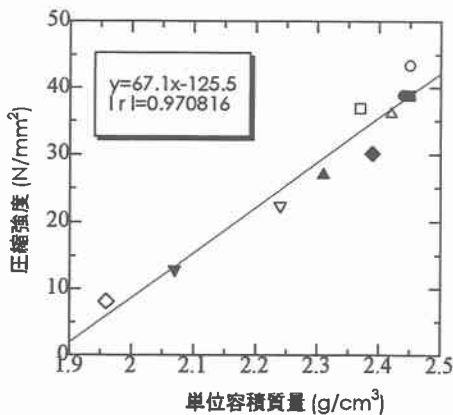


図-2 圧縮強度と単位容積質量との関係

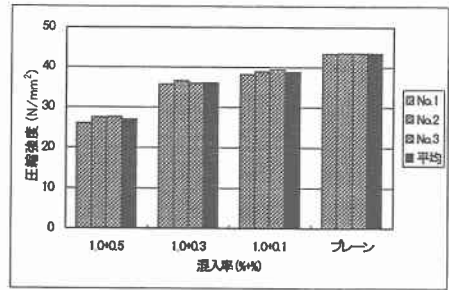


図-3a 圧縮強度 (SF30+SF6)

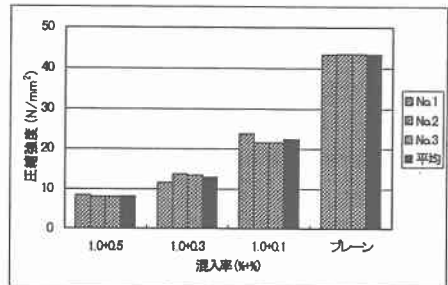


図-3b 圧縮強度 (SF30+PP6)

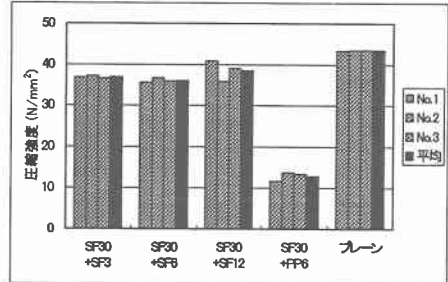


図-3c 圧縮強度 (1.0%+0.3%)

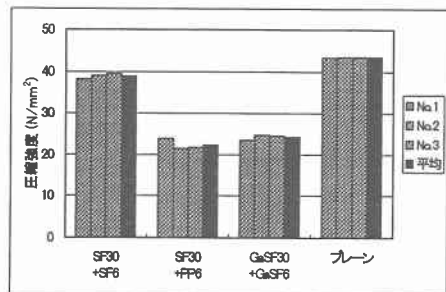


図-3d 圧縮強度 (1.0%+0.1%)

3-2. 透水試験

図-4にプレーンコンクリートに対して圧縮強度の0.15~0.75の圧縮応力をかけたときの透水試験結果を示す。図より、No.2,3は供試体にかけている荷重を圧縮強度の0.15,0.23,0.3と増加すると透水係数が著しく低くなる。しかし、それ以上荷重を増加させても透水係数に明らかに目立った変化は見られず、ほぼ一定値となった。

これは荷重に対して垂直方向の水の伝達に必要な微小ひび割れが圧縮応力によって閉塞されたため、水密性が高くなったことが一因と思われる。一方荷重に平行方向の微小ひび割れは荷重が増加すればするほどひび割れ幅は大きくなる。しかし、コンクリートの横方向のひずみにより生じる引張応力は縦方向の圧縮応力に比べて低いので透水性に与える影響が少ないと言える。荷重を圧縮強度の0.75以上かけると、荷重に平行方向の微小ひび割れが互いに連結して連続ひび割れに成長して透水性を著しく高めると予測できる。既往の研究によれば、引張荷重を受けた供試体の透水係数は増加するものの³⁾、圧縮荷重ではその荷重比により異なり75%前後で大きく変化することが報告されている⁴⁾。本研究では荷重比を0.75まで実施したが上述した傾向は見られなかった。さらに高い荷重比での詳細な検討が必要となる。

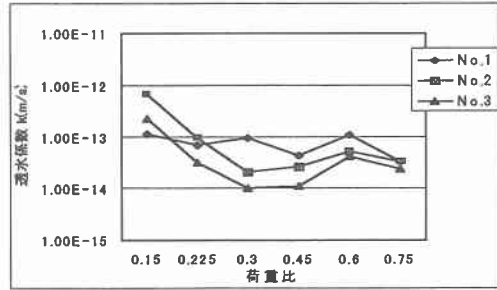


図-4 透水試験結果 (プレーンコンクリート)

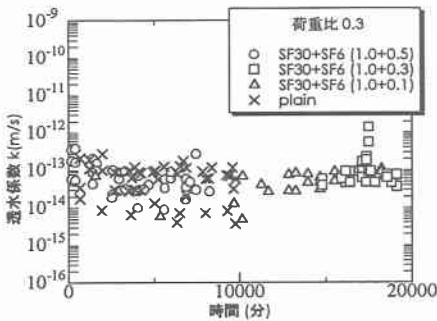


図-5a 透水係数 (SF30+SF6)

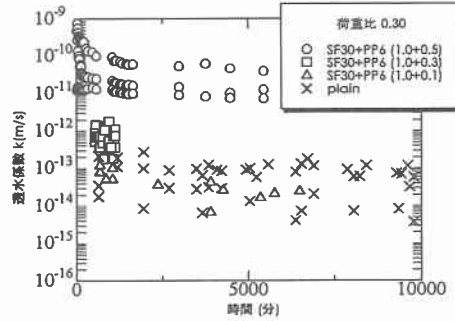


図-5b 透水係数 (SF30+PP6)

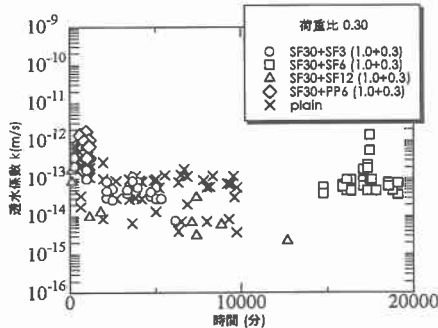


図-5c 透水係数 (1.0%+0.3%)

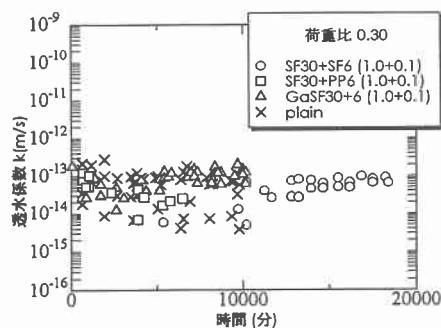


図-5d 透水係数 (1.0%+0.1%)

図-5a~d に荷重比が圧縮強度の 0.3 である時のハイブリッド繊維補強コンクリートとブレンコンクリートの透水試験結果を示す。図-5a は SF30+SF6 に対してマイクロ繊維の混入率を 0.1, 0.3, 0.5 と変化させた透水試験結果であり、マイクロ繊維の混入率が変化しても透水係数に著しい変化は見られなかった。図-5b は SF30+PP6 に対してマイクロ繊維である PP6 の混入率を 0.1, 0.3, 0.5 と変化させた透水試験結果である。これより、PP6 をコンクリートに混入することによって水密性は低下して、混入率が増加すると透水係数も増加することが確認された。これは PP 繊維の分散性が悪いことと、PP 繊維を入れることによって空隙量が増えることが原因であると思われる。しかし PP6 を 0.1% 混入したときの透水性はブレンコンクリートと比べてあまり差がなく、試験供試体 3 本のうち 2 本は水の流出がみられなくなり試験期間中に透水係数が算出できなかった。図-5c は混入率 1.0%+0.3% の供試体に対してマイクロ繊維に SF3, 6, 12, PP6 を混入したときのコンクリートの透水性を比較した。やはり SF に比べて PP を混入した供試体は透水性が低いことが分かる。SF の長さの変化による影響を見ると、SF3, 6 と比べて SF12 を混入した供試体は透水性が低い。図-5d は混入率 1.0%+0.1% の供試体に対してマイクロ繊維に SF6, PP6 を混入したときのコンクリートと、繊維に GaSF を用いたコンクリートとの透水性を比較した。各供試体の透水性に目立った違いは見られなかった。

全ての透水係数の図を見ると 1 つの種類に対して透水係数の幅がかなり大きいことが分かる。これは各供試体のばらつきの影響と考えられる。とくに、透水性が低くなると流出量が極端に少なくなり、透水係数の変動が大きくなり、時には水の流出が止まり透水係数を算出できないことがある。このため、一般にコンクリートの透水性を評価するためには透水係数のオーダーで評価される。

図-6a, b にそれぞれ透水係数と圧縮強度、透水係数と単位容積質量の相関を表した。図から透水係数は圧縮強度又は単位容積質量の増加と共に急激に低下することが分かる。特に圧縮強度が 25N/mm^2 程度を境に水密性が大きく改善されることがわかる。同様に単位容積質量では、 2.25g/cm^3 近辺で同様な傾向を示した。

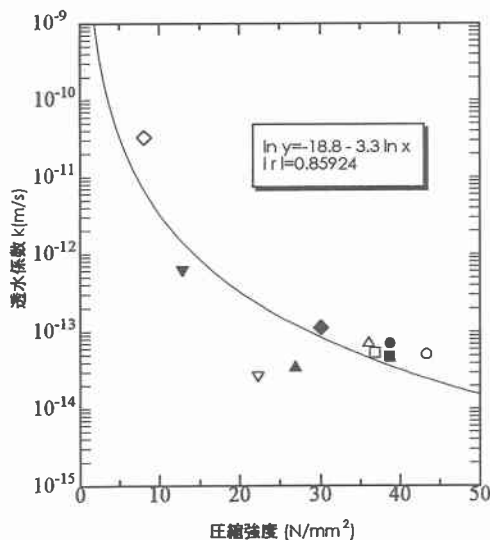


図-6a 圧縮強度と透水係数の関係

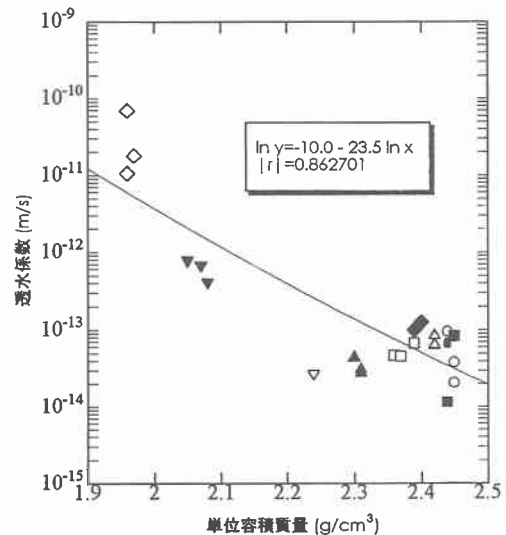


図-6b 単位容積質量と透水係数の関係

4. まとめ

本研究により以下のことが判明した。

- 1)ハイブリッド繊維補強コンクリートの圧縮強度はその単位容積質量と密接な関係があり、単位容積質量の増加と共に直線的に圧縮強度が増加することが明らかとなった。
- 2)マクロな鋼繊維 1%にミクロな鋼繊維あるいはポリプロピレン繊維を混入した場合、マトリクス中の繊維の分散性が低下し、圧縮強度と単位容積質量が共に低下する傾向を示した。
- 3)ミクロ繊維による水密性の向上は、ポリプロピレン繊維を 0.1%程度混入した場合に認められた。
- 4)圧縮荷重による透水性の変化を検討した結果、荷重比が破壊荷重の 30%程度までは減少しそれ以降はほぼ一定の値を示すことが判明した。
- 5)ハイブリッド繊維の透水係数は圧縮強度および単位容積質量と密接な相関があり、圧縮強度および単位容積質量の増加に伴い透水係数は著しく低下することが明らかとなった。

<参考文献>

- 1)金南旭, 堀口敬, 佐伯昇: ハイブリッド繊維補強コンクリートのひび割れ抵抗性, 第 52 回セメント技術講演要旨, pp.396-397, 1998
- 2) N. Banthia: Restrained shrinkage cracking in fibre-reinforced cementitious composites, Materials and Structures, 26, pp.405-413, 1993
- 3)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
- 4) B. Gerard, et al.: Cracking and permeability of concrete under tension, Materials and Structures, 29, pp.141-151, 1996
- 5) T. Sugiyama, et al.: Effect of stress on gas permeability in concrete, ACI Materials Journal, V.93, No.5, pp.443-450, 1996