

論文 長短の繊維で補強したコンクリートの浸透性

堀口 至*¹・佐伯 昇*²・堀口 敬*³・志村 和紀*⁴

要旨:長短の繊維で補強したハイブリッド繊維補強コンクリート(HFRC)の水密性を検討するためにアウトプット法, インプット法の透水試験を行った。アウトプット法においては中空円筒形供試体を用いた透水試験を行い, インプット法においては DIN 1048 に基づく透水試験を行った。試験結果より, 水密性の高いコンクリートに対するアウトプット法の透水試験は実験データが取りにくくインプット法が有効であることが分かった。また, 長短の繊維を用いてハイブリッド化することでコンクリートの水密性は向上することが判明した。

キーワード:繊維補強コンクリート, 水密性, アウトプット法, インプット法

1. はじめに

近年,コンクリートの使用が多種多様になり,コンクリートの高性能化が求められている。その一端を担うために開発されたコンクリートが,長短の繊維を組み合わせて補強したコンクリート,すなわちハイブリッド繊維補強コンクリート(HFRC)である¹⁾。HFRCの力学的性能に関する報告は多少あるが,その耐久性に関する報告は少ない。そこで本研究はHFRCの耐久性のうち水密性についての検討を行った。

コンクリートの透水試験は大きく分けてアウトプット法とインプット法の2種類がある。アウトプット法はコンクリートに一定の水圧を加えて水をコンクリート中に透過させ,定常流状態,すなわち流出量と流入量が一定になった時の単位流出量,または流入量を測定する。この試験方法は透水の解析が容易であるが,長時間の試験期間を必要とし,また密なコンクリートになると水の流出が得られない場合がある。一方,インプット法はコンクリートに一定の水圧を一定期間加えて水をコンクリートに浸透させ,

その後供試体を割裂して,コンクリート中に浸透した水の深さや分布状況を測定する。この試験方法は試験期間が短くてすむが解析が困難であるといわれており,それぞれ長所と短所を持っている。

本研究では HFRC の水密性評価方法として,中空円筒形供試体を用いた透水試験(アウトプット法)とドイツ国家規格 DIN 1048 の試験方法に基づく透水試験(インプット法)の両試験を行った。

2. 実験概要

2.1 透水試験

(1) アウトプット法による透水試験

本研究ではアウトプット法の透水試験は中空円筒形供試体を用いる透水試験²⁾を行った。透水試験装置を図-1に示す。中空円筒形供試体の作製方法としては,シリンダーの型枠に中心孔を空けるために金属棒が設置されている専用の型枠を用いるか,円柱形供試体を作製してドリルなどで中心に孔を空けるかの2つの方法があ

*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)

る。前者の専用の型枠を用いると、直径が100mm、中心孔の直径が20~30mmの供試体の場合、肉厚が35~40mmとなることから長さ30mmの繊維の配向が制限される可能性がある。そこで本研究では後者の方法を用い、コアを抜くことによってφ100×180mmの円柱形供試体に約28mmの中心孔を設け、繊維の配向の自由度を確保した。また、供試体表面の汚れやレイタンスがコンクリートの透水性に与える影響を無くすために、ワイヤブラシを用いてこれを取り除いた。供試体の両端面と装置間のシール方法は供試体の両端面を研磨機によって平滑にしてアセトンを用い水分やごみを除去し、エポキシ系の接着剤を用いて供試体を透水試験装置に完全に接着した。接着剤が硬化した後、透水試験装置を組上げ、2.0MPaの水圧をかけて実験を開始した。試験装置の水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ラップフィルムによりメスシリンダーの口を密封した。水の流出量は電子天秤により増加量を測定し、流出量が定常状態になったと思われるところでダルシーの式に基づいた以下の式により透水係数を算出した。

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

ただし、 k は透水係数(m/s)、 ρ は水の密度(kgf/m³)、 r_0 は供試体半径(m)、 r_i は中心孔の半径(m)、 h は供試体の高さ(m)、 Q は水の流出量(m³/s)、 P は水圧(kgf/m²)を表す。

(2) インプット法による透水試験

わが国ではインプット法の透水試験は村田が行った試験方法³⁾を用いるのが一般的であるが、規格として定まっておらず、水圧や試験期間などの諸条件が研究者によって異なる場合がある。そこで本研究ではインプット法の透水試験はドイツ国家規格 DIN 1048 に基づく透水試験⁴⁾を行った。図-2a, b に DIN 1048 に基づく透水試験装置を示す。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

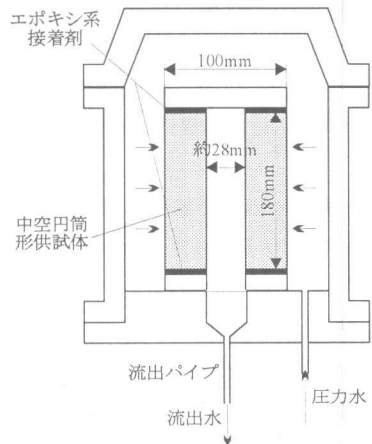


図-1 アウトプット式透水試験装置

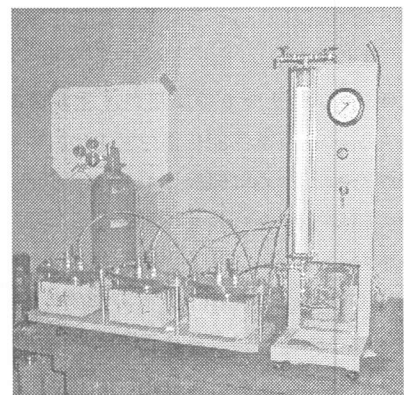


図-2a インプット式透水試験装置

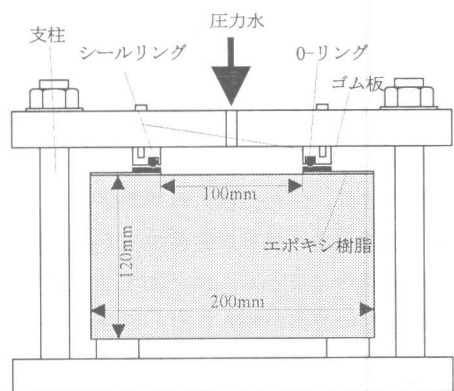


図-2b DIN式透水試験装置

る部分は直径100mmの円形となっている。インプット法では一般に水が浸透した部分が明瞭になるように試験前に供試体を乾燥させる。しか

し、供試体を乾燥させることにより微小ひび割れが発生することも考えられ、また、絶乾状態のコンクリートの透水試験はあまり実際的ではないため、供試体は乾燥させないまま試験に用いた。打設面が下になるように供試体を装置に設置し、レイタンスを取り除くために水压を作用させる面をワイヤブラシにより削り取った。供試体と装置のシールリング間のシールは図に示すようにエポキシ系の樹脂を塗布してゴム板とOリングを用いて行った。樹脂硬化のための養生期間は室温20℃前後の室内において1日間とした。樹脂硬化後、装置を組上げ支柱のナットを締め付けることによって供試体と装置間の漏水を防止する仕組みになっている。水压は最初に0.098MPa(1kg/cm²)の水压を48時間作用させ、次に0.294MPa(3kg/cm²)と0.686MPa(7kg/cm²)の水压をそれぞれ24時間作用させ、合計4日間供試体に水压を加える。試験終了後、供試体を直ちに割裂して水の浸透深さと分布状況を測定、観察した。透水性の評価方法としては以下の式(2)を用いて⁵⁾、浸透深さより透水係数を算出してコンクリートの透水性を評価した。

$$k = \frac{d^2}{2ht} = \frac{d^2}{2(h_1t_1 + h_2t_2 + h_3t_3)} \quad (2)$$

ただし、 d は浸透深さ(m)、 h は与えた水頭(m)、 t は水頭を与えた時間(s)を表す。

2.2 試験供試体

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ワーカビリティを確保するため高性能AE減水剤を用いた。スランプは8±2cm、空気量は5%を目標とした。繊維は長さ6mmと30mmの鋼繊維(それぞれSF6、SF30とする)を用い、SF6のみで補強したコンクリートをマイクロ繊維補強コンクリート(MFRC)、SF30とSF6両方の繊維で補強したコンクリートをハイブリッド繊維

表-1 使用繊維の特性

記号	繊維の種類	長さ(mm)	直径(mm)	アスペクト比	引張強度(MPa)	形状
SF6	鋼繊維	6	0.02	300	1037	波形
SF30	〃	30	0.6	50	1198	波形

表-2 配合表

記号	種類	混入率(%)	W/C(%)	s/a(%)	W(kg/m ³)	混和剤(%)
PC	プレーン	—	50	45	164	0.44
MFRC	SF6	1.5	〃	60	〃	0.8
HFRC	SF30+SF6	0.5+1.0	〃	〃	〃	0.9

補強コンクリート(HFRC)とする。繊維の混入率などは本研究室の研究より選定したものである。繊維の特性並びにコンクリートの配合についてはそれぞれ表-1、2に示す。

コンクリートの練り混ぜには2軸ミキサを用い、HFRCの供試体製作は次のように行った。まず粗骨材と細骨材を30秒間練り混ぜ、次にセメント、使用する鋼繊維の半分の量を投入して1分30秒間練り混ぜた。最後に残りの鋼繊維と、混和剤を混ぜた水を投入して2分間練り混ぜた。練り混ぜ後油を塗った型枠に入れて、アウトプット法式透水試験用供試体(φ100×200mm)においては突き棒とプラスチックハンマーを用いて、インプット法式透水試験用供試体(200×200×120mm)においてはパイプレーターを用いて入念な締め固めを行った。打設から約24時間後に脱枠を行い、20℃、28日間の水中養生を行った。

3. 試験結果

3.1 アウトプット法による透水試験の難易性

プレーンコンクリート(PC)とHFRCにおいて中空円筒形供試体を用いるアウトプット法による透水試験結果を行った。各配合につき3本の供試体について試験を行ったが、PCにおいては供試体3本のうちの1本は装置供試体間の接着不良のため2本の供試体で試験を行った。試験結果としてHFRCは28日間2.0MPaの水压を作用させたが水の流出が見られなかった。PCにおいても2本の供試体のうち1本は水の流出が見

られず、23日間水圧を作用させたが水の流出は見られなかった。また、もう一本のPCにおいては水の流出が得られたが水圧を作用させてから水の流出が開始するまで22日と長時間を必要とした。

一般にアウトプット法による透水試験は密なコンクリートに対しては適当でないといわれ、初期材令のコンクリートや厚さをごく薄くした供試体などで試験が可能になるといわれている。よって十分な養生を行った材令28日の密なコンクリートでは水の流出が得られない場合もあり、また水の流出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る。

図-3aに比較的水密性の低いコンクリート(SF30+PP6, PP6:長さ6mmのポリプロピレン繊維)の水の流出例を示す。図よりコンクリートからの水の流出が定常流状態になっているのが明確に分かる。経過時間が18~28時間の間にある各時間における単位流出水量の値より平均単位流出水量を求め、式(1)を用いてNo.1, No.2の透水係数を算出したところ、それぞれ 1.06×10^{-11} , 1.80×10^{-11} m/sであった。ここで、経過時間が18~28時間の間にある各時間における単位流出水量の標準偏差とその平均値で除した変動係数を単位流出水量のばらつきと定義すると、No.1, No.2でそれぞれ10, 11%であった。

図-3bに水密性の高いコンクリート(PC)の水の流出例を示す。図より水の流出状態が図-3aと明確に異なることが分かる。この原因の1つとして、流出水の集水・測定間隔が挙げられる。集水・測定間隔が短いと、水の流出量が微小なため単位流出水量の変動が大きくなる。図-3bにおける透水試験での流出水の集水・測定間隔は、短い間隔で2時間であった。そのため、たとえ水の流れが定常流状態になっていても図-3aに示すような単位流出水量が一定の形状を得られなかったものと思われる。ここで、図-3bにおける水の流出状態を定常流状態であると仮定して、経過時間110~185時間の間にある供試体No.1, No.2の単位流出水量のばらつきはそれぞ

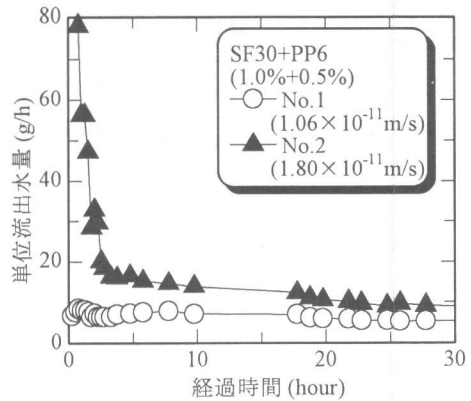


図-3a 水の流出例 (低水密)

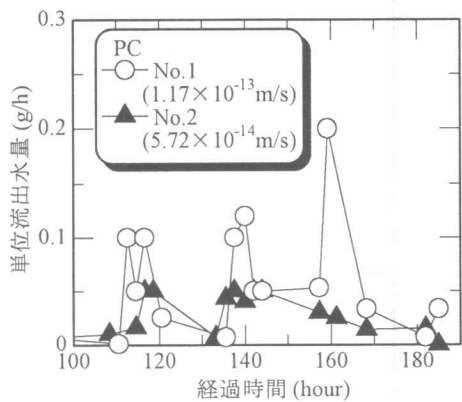


図-3b 水の流出例 (高水密)

れ79, 53%となった。またそのときの透水係数は 1.17×10^{-13} , 5.72×10^{-14} m/sとなった。

このように密なコンクリートに対するアウトプット法の透水試験においては、水の流出量が微小なことから単位流出水量がほぼ一定となる定常流状態を得られない場合がある。前述したように、この原因の一つとして水の流出量の集水・測定間隔が挙げられる。集水・測定間隔が短いほど流出水量が微小なため、一定の単位流出水量を得ることができない。そこで図-3bのデータを用い、集水・測定間隔を12時間以上とした場合の単位流出水量の平均値を算出すると、流出水のばらつきはNo.1, No.2においてそれぞれ29, 18%と著しく減少した。以上より密なコンクリートに対するアウトプット法の透水試験は非常に困難であり、集水・測定間隔を長く設定

するなどの工夫を必要とする。

3.2 インプット法による透水試験結果

試験は各配合につき3個の供試体を用いて行った。試験終了後、直ちに供試体を割裂して水の浸透部分を観察した。図-4に割裂直後の供試体の割裂面(PC No.1)を示す。図より、割裂面において水の浸透部が周囲より濃い色をしていることがわかる。時間が経過するにつれて割裂面が乾燥するので水の浸透部分が判別できなくなるため、油性インクで浸透部分のかたどりをした。その後ノギスによって水の浸透深さを計測した。PC, MFRC, HFRC についてその試験結果を取りまとめたものが表-3である。表中の圧縮強度は透水試験供試体の打設の際に作成した円柱形供試体(φ100×200mm)を用いて JIS A 1108 に基づく圧縮強度試験により求めたものである。

試験結果より透水係数の大きさは HFRC<MFRC<PC の順となった。この原因として次のことが考えられる。コンクリート中の水の移動は、大きな空隙はもちろんのこと、細孔や微小なひび割れ、遷移帯に依存する。しかし単純にそれらの量が多ければ水の移動が容易であるのではなく、その連続性に強く影響を受ける。コンクリート中に繊維を混入することによって遷移帯が増加すると考えられる。その結果、繊維補強コンクリートの圧縮強度はプレーンコンクリートに比べて幾分低下する傾向を示した。しかし水の移動の点から見ると、繊維の混入によって遷移帯が増加することにより水の移動経路が分岐し複雑化することにより透水係数が低下する傾向を示したと考えられる。さらに寸法の異なる2種の繊維を組み合わせることによって1種類の繊維よりもさらに水の移動経路が複雑になったことが透水性の低下に与える繊維のハイブリッド化の影響であると思われる。

A. Raoufら⁶⁾はアスベスト繊維(φ0.1~2×50

表-3 透水試験結果(インプット法)

		浸透深さ(mm)		透水係数	平均	圧縮強度(MPa)
		平均	最大	($\times 10^{-12}$ m/s)	($\times 10^{-12}$ m/s)	
PC	No.1	13.4	18.1	8.69	11.83	42.2
	No.2	15.0	19.5	10.84		
	No.3	18.2	37.3	15.95		
HFRC	No.1	12.2	21.9	7.14	6.18	37.0
	No.2	14.2	20.9	9.70		
	No.3	5.9	11.7	1.70		
MFRC	No.1	11.4	21.6	6.30	7.30	36.2
	No.2	14.6	28.0	10.29		
	No.3	10.5	18.1	5.30		

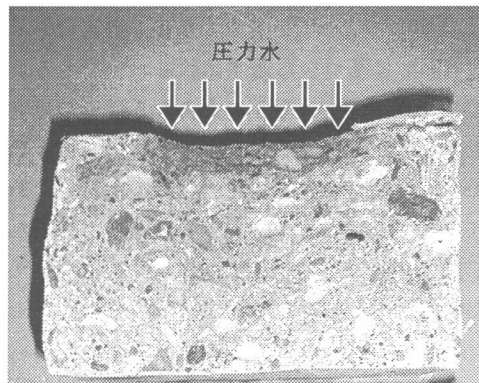


図-4 割裂直後の供試体(PC No. 1)

~100 μm)で補強した場合と、セルロース繊維(φ20~30 μm×1~3mm)とポリビニルアルコール繊維(PVA: φ50 μm×6mm)を組み合わせる補強した場合の繊維補強セメントスレートの水分伝達を検討するために細孔径分布を測定した。その結果、セルロース繊維とPVAを組み合わせたセメントスレートにおいては、アスベスト繊維補強セメントに比べて総細孔量は増加する傾向を示し、細孔径分布は径が小さい方向にシフトすることとなった。この原因として A. Raoufらは2種類の繊維の異なる寸法の影響をあげている。本研究では細孔構造の観察は行っていないが、同様の効果が得られたものと思われる。すなわち寸法の異なる2種類の繊維を組み合わせることでコンクリート中に混入することによって水の移動経路が分岐され複雑化して細孔構造の変化が生じ、水の移動が繊維無混入の場合よりも困難になり、透水性が低下する傾向を示したと考えられる。

本研究の試験結果において HFRC の透水係数は PC や MFRC と比較して低下する傾向を示したがその度合いは小さいものであった。一般にコンクリートの透水性は水セメント比に依存するといわれている。コンクリート標準示方書⁷⁾によれば水密コンクリートの水セメント比は 55% 以下と規定されている。この規定内であれば過剰に繊維を入れることが無ければコンクリートの水密性が保持されるものと思われる。本研究に用いた供試体のすべてにおいて水セメント比が 50% であった。また、数多くの実験より DIN 1048 に基づいた透水試験において水の最大浸透深さが 50mm 以下であるならばそのコンクリートは DIN 1045 により「不透水性」と分類される⁸⁾。表-3 よりすべての種類の供試体において最大浸透深さは 50mm 以下となったことから、DIN 1045 より PC, HFRC, MFRC はすべて「不透水性」と分類される。

HFRC は微細ひび割れを拘束する目的で開発されたコンクリートであり、そのためハイブリッド繊維がコンクリートの水密性に大きな影響を与える場合はコンクリート中に微細ひび割れが発生しやすい応力下や暴露環境下においてであると思われる。今後の研究課題としては圧縮応力や引張応力を与えたときのコンクリートの透水性や長期にわたり劣化作用を受けるコンクリートの透水性に与えるハイブリッドの繊維の影響などが挙げられる。

4. まとめ

長さ 30mm と 6mm の長短の鋼繊維を混入したハイブリッド繊維補強コンクリート(HFRC)について、アウトプット法及びインプット法の 2 種類の透水試験を行ったところ、以下のことが判った。

1) アウトプット法による透水試験において、密なコンクリートに対しては水の流出が得られない場合があり、また流出が得られたとしてもその量が微少なため水の流れが定常流状態であるかの判断が困難であることがわかり、

水の流出量の集水・測定間隔を長くするなど工夫が必要であることが判明した。

2) インプット法の試験において、DIN 1048 に基づいた試験により HFRC の水密性を評価したところ、プレーンコンクリートに比べて HFRC の透水性が低くなる傾向を示した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、住友金属建材株式会社より鋼繊維を提供して頂きました。また、実験を行う際に本研究室卒業生の吉田博之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) 村田次郎：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
- 3) 村田次郎：コンクリートの水密性の研究，土木学会論文集，第 77 号，pp.69-103，1961.11
- 4) Wasserundurchlässigkeit, DIN 1048, Blatt 1, Teil 4.7, 1972
- 5) Valenta, O.: The permeability and durability of concrete in aggressive conditions, Proceedings, 10th International Congress on Large Dams, Montreal, pp.103-117, 1970
- 6) Raoof, A. and Sabouraud, A.: Hydrous transfer within fibrous-cement slates, Materials and Structures, Vol.30, pp.22-28, Jan.-Feb. 1997
- 7) コンクリート標準示方書,平成 8 年版,施工編
- 8) Stark, J. and Wicht, B. (太田利隆, 佐伯昇訳): コンクリートの耐久性, (社)セメント協会