

V-8

密なコンクリートの透水試験に関する一考察

北海道大学大学院 ○学生員 堀口 至
 北海道大学工学部 フェロー 佐伯 昇
 北海道大学工学部 正会員 堀口 敬
 北海道大学工学部 正会員 志村和紀

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のが、長短の繊維を組み合わせで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見うけられるが、耐久性に関する報告はほとんど無い。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ている。

コンクリートの水密性とは、水の浸透・透過のしにくさを表すコンクリートの性質であり、吸水性・透水性によって表される。吸水性とは、水の表面張力を推進力とする毛管浸透流れによりコンクリート中に水が浸透するしやすさを表す性質を言い、透水性とは加圧によりコンクリート中へ水が浸透・透過するしやすさを表す性質を言う²⁾。高水密性のコンクリートを要する構造物としてはダムや水槽、廃棄物埋設施設など様々な存在するが、いずれもコンクリート中の水の流れは加圧流れとなることから、水密性を評価する方法としては透水試験を行うことが实际的であると思われる。

コンクリートの透水試験は大別してアウトプット法とインプット法の2種類がある。どちらの方法もコンクリートに水圧を与えるが、アウトプット法はコンクリート中を透過する水の量を測定し、インプット法はコンクリート中を浸透した水の深さを測定するという違いがある。アウトプット法は解析が容易であるが長時間の試験期間を必要とし、インプット法では試験期間は短くてすむが解析が困難であるといわれ、それぞれ長所と短所を持ち合わせている。

本研究ではHFRCの水密性評価の試験方法として実際に水の浸透量を測定できるアウトプット法を用いて透水試験を行った。また、得られた試験結果より試験方法の妥当性の検討を行い、密なコンクリートの透水試験方法に関する提案を行った。

2. 実験概要

2-1. 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。混和剤はブ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高性能AE減水剤を用いた。ワーカビリティを確保するためスランブは 8 ± 2 cm、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

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(%)
PC0	ブレーン	—	50	45	164	0.44
MFRC	SF6	1.5	"	60	"	0.8
HFRC	SF30+SF6	0.5+1.0	"	"	"	0.9

A study on water permeability test method of high density concrete

by Itaru Horiguchi, Noboru Sasaki, Takashi Horiguchi and Kazunori Shimura

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補強コンクリート(HFRC)とする。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 に詳細を示す。

コンクリートの練り混ぜには 2 軸のミキサーを用い、HFRC の供試体製作は次のように行った。まず骨材を 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突き棒、プラスチックハンマーにより締固めを行った。打設から約 24 時間後に脱型を行い、水温 20℃の養生層で 28 日間の水中共養生を行った。

供試体は各配合につき、透水試験用供試体(φ100×180mm)と強度試験用供試体(φ100×200mm)をそれぞれ 6 本作製した。また、透水試験用供試体を作製する際に打設方向と水压方向を同じにするために、円柱横打ち型枠を用いた。

2-2. 強度試験

強度試験は養生終了後に行い、圧縮強度と引張強度を測定した。強度試験用の供試体の両端面は研磨機によって平滑にし、圧縮強度は JIS A 1108 に基づく圧縮強度試験方法により、引張強度は JIS A 1113 に基づく引張強度試験方法によって求めた。

2-3. 透水試験

一般に、コンクリートの透水試験は大別してアウトプット法とインプット法の 2 種類があるが、本研究では実際に水の浸透量を測定できる中空円筒形供試体を用いるアウトプット法を採用した³⁾。中空円筒形供試体の作製方法としては、シリンドラ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 つの方法がある。前者の専用の型枠を用いると供試体の肉厚が 35~40mm となることから繊維の配向が制限される可能性がある。そこで本研究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視するために、ワイヤブラシを用いてこれを取り除いた。

透水試験装置を図-1a、b に示す。本試験装置は油圧式ジャッキによって荷重を載荷することが可能である。圧縮荷重、引張荷重どちらを載荷するのもテンションロッドを油圧式ジャッキにより引張り、図のように荷重を載荷する仕組みとなっている。供試体の両端面と装置間のシール方法は次のように行った。まず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て水分とごみを除去した。次に圧縮荷重載荷用の供試体はシリコン系の接着剤でゴム板を供試体の両端面に貼り付けた。一方、引張荷重載荷用の供試体はエポキシ系の接着剤を用いて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荷重を載荷させる場合は所定の荷重を導入し、約 2.0MPa の水压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ドラ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

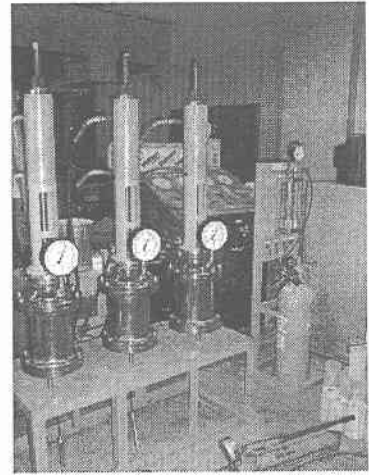


図-1a 透水試験装置

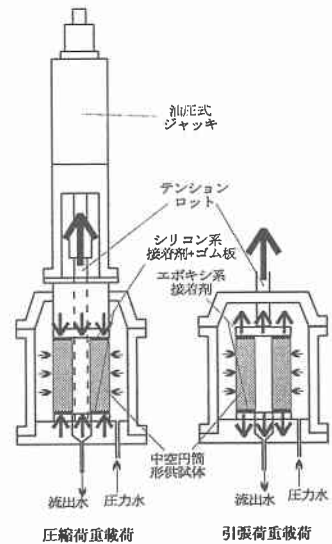


図-1b 透水試験装置

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。

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

ただし、 k は透水係数(m/s)、 ρ は水の密度(kg/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(kg/m²)を表す。

3. 実験結果と考察

3-1. 強度試験結果

図-2a、b に PC、MFRC、HFRC の圧縮強度および引張強度試験の試験結果を示す。ただし、MFRC と HFRC の繊維混入率はそれぞれ 1.5% と 0.5%+1.0% で、総繊維混入率は 1.5% である。一般に使用されている長さ 30mm 程度の鋼繊維(本論文ではマクロ繊維と呼ぶ)は、コンクリートの圧縮強度や引張強度に対してほとんど影響を与えないものと考えられている。しかし図に示されるように、長さ 6mm の鋼繊維を含む HFRC、MFRC ともにその圧縮強度、引張強度は PC よりも大きな値を示す傾向が見られ、特に HFRC は MFRC よりも大きな強度を示した。圧縮強度においては、MFRC の圧縮強度(33.29MPa)は PC の圧縮強度(28.51MPa)との比が 1.17 であるのに対して、HFRC の圧縮強度(36.12MPa)は PC との比が 1.27 であった。引張強度においてはさらに顕著な傾向が見られ、MFRC の引張強度(2.87MPa)と PC の引張強度(2.76MPa)との比が 1.04 であるのに対して、HFRC の引張強度(3.79MPa)と PC との比は 1.37 であった。以上の結果より、マイクロ繊維の混入、特にマイクロ繊維とマクロ繊維を組み合わせる、すなわちハイブリッド化することにより圧縮、引張強度の増進が見られ、特に引張強度においてその傾向が顕著である事が分かった。マイクロ繊維による補強メカニズムは詳しく分からないが、マクロ繊維と比較してマイクロ繊維は微細な繊維であるためコンクリートの細孔構造に影響を与えることが可能であり、またミクロ的にコンクリートマトリクスを拘束することが出来るため、強度の増進が得られたものと推察される。そして繊維をハイブリッド化する事によって長短の繊維が適度にモルタル中に分散され、さらにコンクリートマトリクスが密になったものと思われる。

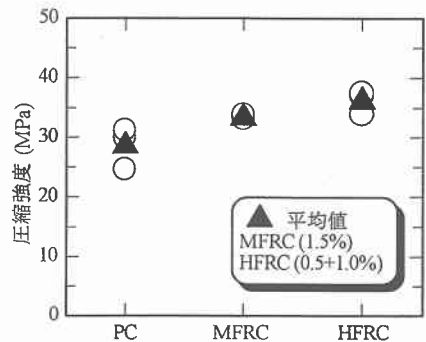


図-2a 圧縮強度試験結果

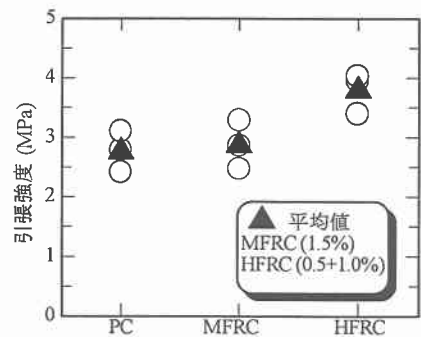


図-2b 引張強度試験結果

3-2. 透水試験結果

本研究で透水試験に用いられているアウトプット法は一般に透水の解析は容易であるが、試験には長時間を要し、時には流出量が得られず実験できない場合がある。このため、材令初期のコンクリートや供試体の厚さをごく薄くしたコンクリートなどの場合には有効であるが、きちんとした養生を行った密なコンクリートの透水試験としてはあまり適当でないといわれている。図-3 に著者らが以前行った透水性の高いコンクリ

ートに対してアウトプット法で圧縮荷重を載荷しながら透水試験を行ったときの流出例を示す⁴⁾。図よりコンクリートからの水の流出が定常状態になっているのがよく分かる。図の定常状態は若干右下がりになっているがこれはセメントの水和作用の進行、溶出した酸化カルシウムが炭酸カルシウムとなって沈殿し、隙間を詰めることなどによるものといわれている。そこで、この定常状態の部分で透水係数の平均値を算出したところ、 1.06×10^{-11} 、 1.80×10^{-11} m/s であった。ここで、透水係数の平均値と透水係数の平均値の算出に用いたデータとの変動係数をデータのばらつきと定義すると、それぞれのデータのばらつきは9、10%であった。

次に今回研究を行った MFRC の流出例を図-4 に示す。図より同じ配合のコンクリートでも流出状態が異なり、供試体 No.1 においては水の流出状態が定常に至ったことが分かるが、供試体 No.2 においては明確な定常状態が得られていない。そこで供試体 No.1 においては64~146 時間を定常状態とみなして透水係数を算出し、No.2 においては18~112 時間を定常状態とみなして透水係数を算出したところ、それぞれの透水係数は 7.79×10^{-14} 、 1.50×10^{-13} m/s であった。また、それぞれのデータのばらつきは14.7、35.3%と前述したデータと比較して大きな値となった。

このようにして今回研究を行った PC、MFRC、HFRC の結果をまとめると表-3 のようになる。ただし圧縮荷重を載荷したときの PC の試験結果、並びに無載荷および引張荷重載荷したときの MFRC の試験結果については装置供試体間の接着不良などによりデータを取れなかったため今回は割愛する。また、表中の水の流出が開始した時間とは水圧をかけてから初めて水の流出が見られた日にちを表す。荷重無載荷と引張荷重載荷は同じ供試体で実験を行っているため水の流出が開始した時間とは無載荷の状態でも水が流出し始めた日にちを表している。例えば、PC においては22 日後に水の流出が見られ流出量を測定した後、引張荷重を

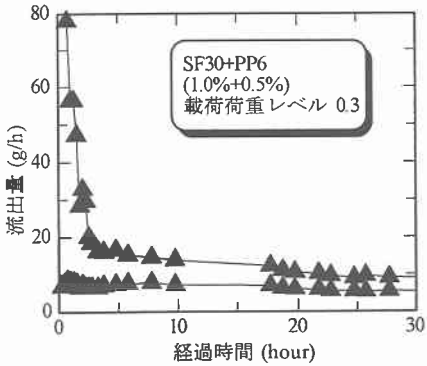


図-3 既往の研究の流出例

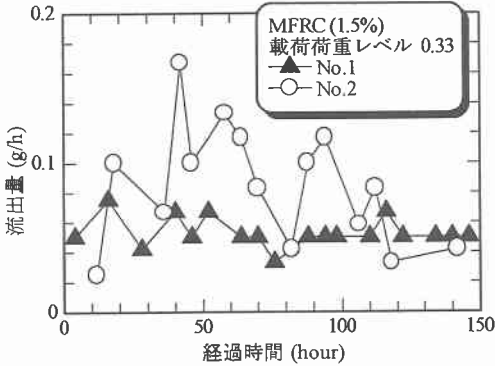


図-4 本研究の流出例

表-3 透水試験結果

種類	無載荷		圧縮荷重		引張荷重		水の流出が開始した時間
	k (m/s)	ばらつき (%)	k (m/s)	ばらつき (%)	k (m/s)	ばらつき (%)	
PC	流出無し 2.11E-14	23日 32			2.13E-14 2.87E-14	86 37	1日 22日
MFRC			1.30E-14	1			7日
			7.79E-14	15			4日
			1.50E-13	35			7日
HFRC	流出無し	28日	7.50E-14	62	流出無し	14日	2日
	流出無し		21日	流出無し			
	流出無し			流出無し			

載荷した。HFRC においては荷重無載荷の状態でも 28 日間水の流出が見られなかったため、引張荷重を載荷したが 14 日間水の流出が見られず、現在も実験継続中である。

表より、透水係数のオーダーが $10^{-14} \sim 10^{-13}$ の密なコンクリートになると水の流出が開始するのに長時間を要することが分かる。また、データのばらつきも非常に大きな値を取り実験として精度の問題があると思われる。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流れが定常状態に至るには、コンクリートが完全に飽和されることが必要であり、今回研究を行ったコンクリートは非常に密であるため、コンクリートが完全に飽和されずに水の流出の定常状態が得られず、その結果水の流出量が一定にならなかったと考えられる。また PC、MFRC、HFRC において、透水係数を算出できた供試体でも透水係数のオーダーは $10^{-14} \sim 10^{-13}$ であった。こういった密なコンクリートにおいては水の流出量が 24 時間で 0.1g 程度しかないことがある。こういった微小量の流出水がコンクリートから浸出し、試験装置の流出パイプを通りメスシリンダーに滑らかに至るとは限らず、水の表面張力で流出パイプなどに留まっている可能性も考えられ、そのため水の流れが定常状態になっていても流出量が一定にならなかったと思われる。

図-5に参考文献 4 の試験結果より、透水係数の平均値とその値の算出に用いたデータの変動係数によって表されるデータのばらつきとの関係を示す。図より、密なコンクリートになり透水係数が低くなればなるほど試験の精度が落ちるということが分かる。また、HFRC においては 28 日間透水試験を行ったにもかかわらず水の浸出が見られなかった(表-3)。このように密なコンクリートをアウトプット法で試験することは試験時間を非常に長く必要とし、完全な定常状態を得ることができない場合があり、適当でないと思われる。

既往の研究によると、R. P. Khatri ら⁵⁾はコンクリートの透水試験としてアウトプット法、インプット法両方の試験装置を用いて圧縮強度が 35~50MPa の透水試験を行っている。そして、アウトプット法の透水試験の適合性確認方法として、試験終了後に供試体を割裂して断面の観察を行っている。もし割裂面において部分的にしか湿潤状態が見られないのであれば、そのコンクリートは試験中完全に飽和された状態ではなかったと判断され、流出量は定常状態のものではなくそのコンクリートの透水試験に対してはアウトプット法が適当でないと判断することが出来る。その結果、アウトプット法で計測できる透水係数の限界を約 $1.3 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ としている。また、P. B. Bamforth⁶⁾はコンクリートの透水試験として、透水性の高いコンクリートにおいては 1MPa 程度の水圧をかけコンクリート中を透過した水の流出量を測定するが、透水性の低いコンクリートにおいては 7 日間水圧をかけ、それでも水の十分な透過が得られない場合は、供試体を割裂して水の浸透深さを計測(すなわちインプット法)している。両者とも O. Valenta⁷⁾が用いた式を修正した以下の式 2 を用いて、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ている。

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

ただし d は浸透深さ(m)、V は水が透過できる細孔量、h は与えた水頭(m)、t は水頭を与えた時間(s)を表す。日本の研究においては、インプット法で試験を行うときは一般に、コンクリート中へ流入した水とコンクリートの圧縮性を考慮すると水の流れは非定常の熱伝導と同様の拡散流れとなるという考えから、Fick の法

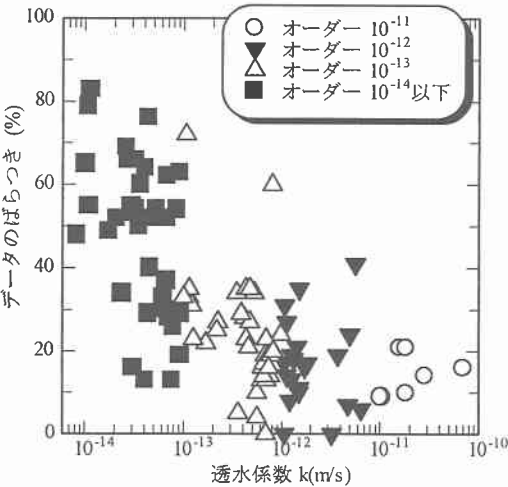


図-5 透水係数の平均値とデータのばらつきの関係

則を適用して拡散係数 $\beta^2(\text{m}^2/\text{s})$ を求めて透水性を評価することが多い^{例えば8)}。しかしこの解析方法は多少困難であるため、コンクリートの水の流れが一次元の流れであると仮定するならば式2により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ても良いと思われる。

以上より、密なコンクリートの試験においてはアウトプット法とインプット法を並行して行い、両方の試験とも透水係数 k を算出し、コンクリートの透水性を評価するのが良いと思われる。

4. まとめ

本研究により以下のことが判明した。

- 1) 長さが 6mm の鋼繊維を混入することによりコンクリートは密になり、圧縮強度、引張強度ともに増進が見られ、特に長さ 30mm の繊維と組み合わせて使用する時、すなわち繊維をハイブリッド化したとき、その傾向は顕著となった。
- 2) 密なコンクリートの透水試験を行う場合、アウトプット法で試験を行うとデータのばらつきが大きくなり、試験の精度に問題が生じ、また水の流出が得られず試験できないことがある。そこでインプット法での試験も並行して行い、水の浸透深さより透水係数を求め、透水性を評価するのが良いと思われる。

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 4 年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) T. Horiguchi and K. Sakai: Hybrid effects of fiber-reinforced concrete on fracture toughness, ACI-SP-172, pp.535-548, 1997
- 2) 笠井芳夫編著: コンクリート総覧, 技術書院, pp.442-452, 1998
- 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) 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, 北海道大学大学院修士論文, 1999
- 5) R. P. Khatri and V. Sirivivatnanon: Methods for the determination of water permeability of concrete, ACI Materials Journal, Vol.94, No.3, pp.257-261, 1997
- 6) P. B. Bamforth: The water permeability of concrete and its relationship with strength, Magazine of Concrete Research, Vol.43, No.157, pp.233-241, 1991
- 7) O. Valenta: The permeability and durability of concrete in aggressive conditions, Proceedings, 10th International Congress on Large Dams, Montreal, pp.103-117, 1970
- 8) 村田二郎: 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