

論文 コンクリートの長期飽和透水性状

小西 一寛^{*1}・中畑 昭彦^{*2}・山本 修一^{*3}・辻 幸和^{*4}

要旨:コンクリート製中空円筒体の飽和透水試験を実施し、水位測定から算出した流出量は注入量より常に少なく測定された。そこで、質量保存を確認するため試験体を収容した試験水槽全体の質量を測定し、その質量増加が注入量と流出量の差分量と一致したことから、アンバランス量の存在を確認した。事前に実施した無加圧時の試験体内・外の湛水水位変動は、セメントの水和反応に伴う自己収縮と吸水に起因すると考えられたことから、アンバランスの原因は不飽和空隙への保水によるものと推定した。さらに飽和透水試験を5年間継続したが、流出量は定常に至らないため、実用的に初期注入量を用いてコンクリートの透水係数を評価した。

キーワード:飽和透水試験, アウトプット法, 吸水性, 保水性, 透水係数, 加圧注水法

1. はじめに

コンクリート構造物を廃棄物処分施設等の止水材料の一つとして利用するために、温度ひび割れを制御し透水性を評価する研究を行ってきた¹⁾。その一環として実施したコンクリート製中空円筒形試験体を対象とした飽和透水試験において、流出量が注入量より少なく測定された²⁾。

コンクリートの理想的な透水試験方法とされるアウトプット法では、一定圧力下で注入量と等しくなった定常流出量をダルシー則に代入し、飽和透水係数を評価する。文献³⁾によると、円柱形⁴⁾の透水試験では初期に流出量がなく、流出後もしばらく注入量より少ない測定例が報告されているが、これまで定量的に解明されなかった。

本研究では、健全なコンクリートの初期から定常に至る透水性状を明らかにするため、飽和透水試験を5年間実施した。試験初期にはコンクリートの吸水性や保水性を確認したが、5年間継続しても定常透水にならなかったことから、低透水性のコンクリートの実用的な評価方法として、透水試験初期に測定される注入量により評価する加圧注水法の適用性を確認したので、報告する。

2. 透水試験体の概要

2.1 コンクリート試験体の形状寸法

本透水試験ではコンクリート自体の微少透水量を測定するため、試験体は図-1に示すように、境界面が注入管周りのみの中空円筒形を採用した。また、コンクリートを無打継とするため、試験体の内空形状の確保に埋設型枠を用いた。さらに、貫通鋼材となる注入管や埋設型枠の固定金具の周りを止水するため、水膨張性ゴムを巻いた。

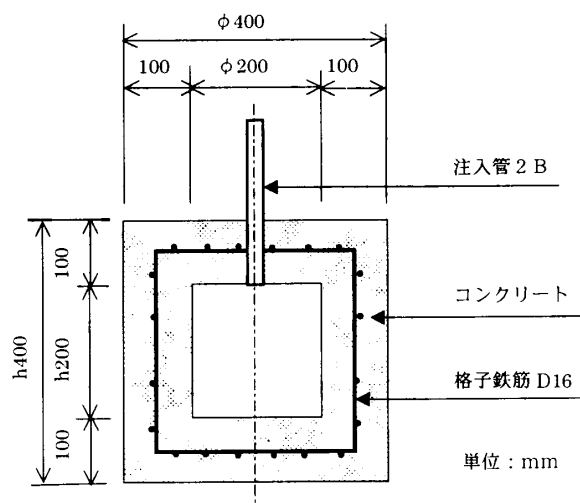


図-1 中空円筒形試験体の形状寸法

*1 (株)大林組土木技術本部設計第二部設計課課長(正会員)

*2 (財)原子力環境整備センター深地処分システム研究部

*3 (株)大林組土木技術本部設計第二部設計課課長代理 工博

*4 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

	使用材料	比重
水	水道水	—
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
細骨材	秩父川砂	2.59
粗骨材	石灰石	2.70
A E 減水剤	ボツリスNo70-4 倍液	—
A E 剤	303A-100倍液	—

表-2 コンクリートの配合

単位量 (kg/m ³)					
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤	A E 剤
165	330	835	983	3.3	13.2

2.2 コンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、設計基準強度を40N/mm²にすることから、水セメント比を50%とした。粗骨材の最大寸法は、試験体厚さの1/5の20mmとした。コンクリートの使用材料と配合を表-1、表-2に示す。

2.3 コンクリート試験体の作製

試験体は乾燥を抑制するため、打設直後から湿布で覆い、材齢2日目には脱型し水中養生した。なお、作製時の空気量は1.8%と測定された。

2.4 インプット法による材料透水試験

試験体と同時に作製したφ150×300mmの円柱供試体で、インプット法のうち浸透深さ方法による材料透水試験を行った。供試体は試験28日前に水中から取り出し、20℃、60%RHで気中養生した。試験7日前にφ150×150mmで両端を切断・研磨し、試験容器との隙間にエポキシ樹脂を充填した。透水試験は材齢91日目に3体行い、圧力1.0MPaで48時間注入後、割裂して水の浸透深さを測定し、平均値から式(1)、式(2)により拡散係数: β^2 cm²/s と透水係数: k m/s を算出した⁵⁾。

$$\beta^2 = \alpha \cdot D_m^2 / (4 \cdot t \cdot \xi^2) = 1.3 \times 10^{-3} (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (1)$$

ただし、 D_m : 平均浸透深さ (2.6cm)

t : 加圧時間 (48h × 60²s)

α : 加圧時間に関する係数 ($t^{3/2}=175.7$)

ξ : 加圧力に関する係数 (文献⁵⁾により

$P_0=1.0\text{MPa}$, $P_f=0.1\text{MPa}$ の 1.163 を代用)

$$k_{\text{インプット法}} = \beta^2 \cdot w_0 / E \quad (2)$$

$$= 2.4 \times 10^{-12} (\text{cm/s}) = 2.4 \times 10^{-14} (\text{m/s})$$

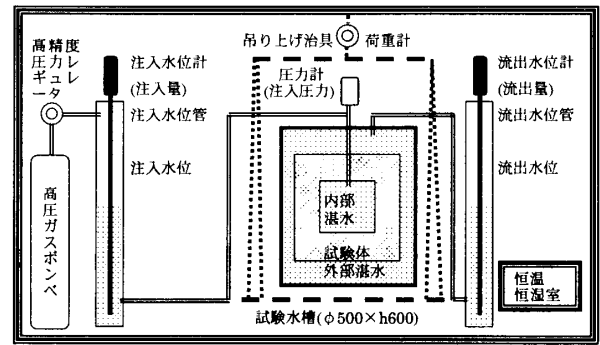


図-2 飽和透水試験の装置概念

ただし、 w_0 : 水の単位体積質量 (1.0g/cm³)

E : 体積弾性係数 ($E=3E_i \times (1-2\nu)=53\text{kN/mm}^2$)

E_i : 初期弾性係数 ($E_i=1.1 \times E_c=33\text{kN/mm}^2$)

E_c : 静弾性係数 (30kN/mm²)

ν : ポアソン比 (0.23)

3. 透水試験方法

3.1 試験圧力の設定

本試験では、中空円筒形試験体の内側に加圧するが、この場合試験体には円周方向に最大引張応力度が発生し、その大きさは試験圧力と等しい。したがって、試験圧力が大き過ぎると試験体にひび割れが生じることから、設計引張強度の2.7N/mm²に対し十分な安全余裕度を考慮して、最大試験圧力を1.0MPaに設定した。

3.2 飽和透水試験方法

飽和透水試験の装置概念を図-2に示す。

一般的な透水試験では、注入水位の低下から算出する注入量を試験体への注水量と見なし、流出水位の上昇から算出する流出量を試験体からの透水量と見なすため、試験対象外からの漏水及び内・外湛水の内空積変動を無視できることが前提条件である。そのため試験体は、漏水の可能性のある試験器具との境界を短くできる中空円筒形とし、境界を中空部に貫通する注入管周りのみに限定した。この結果は、内部湛水に加圧し外部湛水前に注入管から漏水がないことにより確認した。

また、試験体内・外湛水の内空積の変動原因である試験温度・圧力を一定に保つために、試験体を収容し湛水する透明なアクリル製円筒形試験水槽、水位管及び高圧ガスポンペを恒温室内に設置

した。さらに、できるだけ炭酸ガスの影響を避けるため、窒素と酸素から成る混合空気の高圧ガスを、高精度圧力レギュレータ2台を介して所定圧力に調圧した。さらに、試験体の内・外湛水や注入水には水道水を脱気して用い、試験後期の水補給時には、流出水位管内の流出水を注入水位管内に戻し、不足分のみを新規の脱気水で補った。

4. 透水試験性状

4.1 初期静置試験(無加圧)

初期飽和透水試験に先立ち試験温度を一定にし初期水位を得るために、材齢3ヶ月まで水中養生した試験体を試験水槽内に静置し、試験体内・外の湛水に水位計を設置した。図-3の試験日数2日目までに示すように、室温一定のとき内側水位は変動しないのに対し、外側水位は低下した。このあと試験水槽内から試験体を取り出し湛水のみにすると水位低下せず、試験体を水槽に戻すと再度水位低下したことから、この現象には、コンクリート固有の材料特性が関わっていると思われた。

そこで、試験体の内側水位は変動せずに、外側水位のみ低下する現象を説明できる理由として、セメントの水和反応に伴う自己収縮及び吸水現象を想定⁶⁾し、各量を以下のように試算した。すなわち、内空容積の自己収縮量を $X\text{cm}^3/\text{h}$ 、内面への吸水量を $Y\text{cm}^3/\text{h}$ とすると、内側水位は試験体の収縮変形による内空容積減少とともに、試験体への吸水が打ち消し合い変動しなかったと仮定すると、式(3)で表される。

$$-X + Y = 0.00(\text{cm}^3/\text{h}) \quad (3)$$

ここで、試験体は均質に収縮し、均等に表面吸水するものとする。試験体の内・外寸法比の2.0により、容積比から試験体外形容積の自己収縮量は $2^3 \cdot X\text{cm}^3/\text{h}$ 、面積比から試験体外面の吸水量は $2^2 \cdot Y\text{cm}^3/\text{h}$ となる。外側水位は試験体の収縮変形により外側湛水容積が増加するとともに、試験体に吸水されるため低下したと仮定すると、減少水量を $-0.11\text{cm}^3/\text{h}$ とした式(4)が導かれる。

$$-8 \cdot X - 4 \cdot Y = -0.11(\text{cm}^3/\text{h}) \quad (4)$$

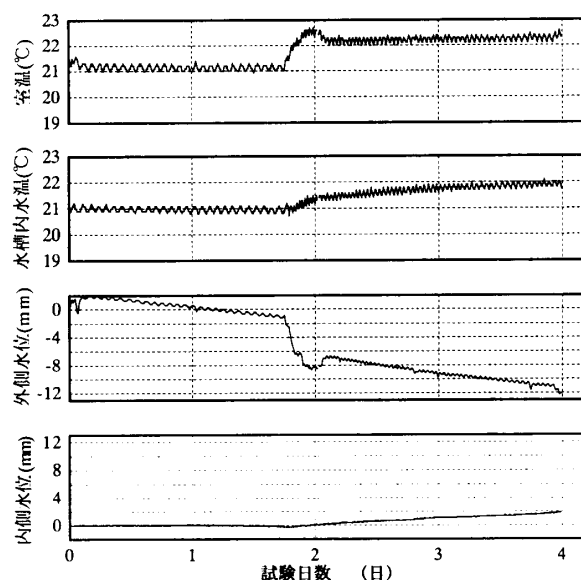


図-3 初期静置試験(無加圧)結果

式(3)、式(4)により、 $X = Y = 0.0092\text{cm}^3/\text{h}$ と算出される。このことより、内・外湛水の水位変動は、セメントの水和反応に伴う自己収縮と吸水に起因すると考えられ、その量はこの程度と推定される。したがって、厚さ10cmの試験体コンクリートは3ヶ月間水中養生したにも関わらず、その後の無加圧時にも、試験体全体の自己収縮量は $7 \cdot X$ に相当する $0.064\text{cm}^3/\text{h}$ 、吸水量は $5 \cdot Y$ に相当する $0.046\text{cm}^3/\text{h}$ 、合わせて $0.11\text{cm}^3/\text{h}$ の水位低下を継続していたことになる。

4.2 初期飽和透水試験

(1) 初期透水試験結果

静置試験に引き続き、3から5日間隔で試験体内側の注入圧力を0.25, 0.5, 0.75, 1.0MPaへ、段階昇圧した飽和透水試験結果の平均を図-4に示す。注入量は、静置試験の $0.00\text{cm}^3/\text{h}$ から0.21, 0.31, 0.41, $0.49\text{cm}^3/\text{h}$ へほぼ比例的に増加した。一方流出量は、静置試験の $-0.11\text{cm}^3/\text{h}$ から-0.09, -0.07, -0.07, $-0.03\text{cm}^3/\text{h}$ へと相変わらず負の値が続くことから、静置試験のときと同様に吸水が持続していると推定された。

ところが、図-5に示すように、1.0MPaに昇圧後5日目から、流出水位の上昇が始まり、徐々に水位上昇速度が早くなった。流出量の増加に伴うように、減少中の注入量も増加に転じたが、短期間で両者ともに最大に達した後、漸減し始め

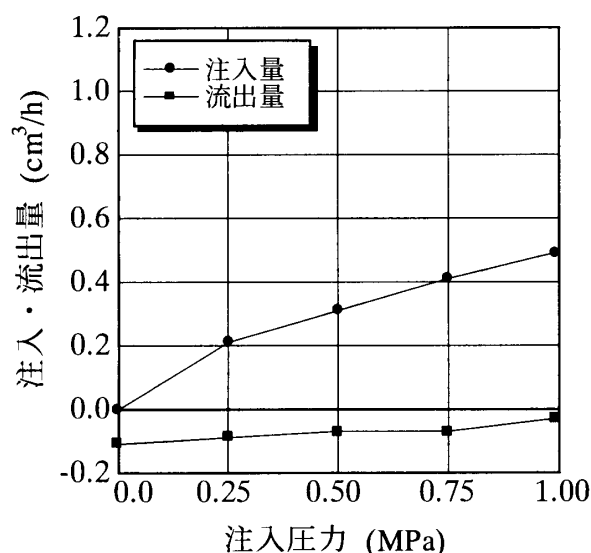


図-4 初期飽和透水試験(段階昇圧)結果

た。最大値は注入量の $0.63\text{cm}^3/\text{h}$ に対し、流出量はその $2/3$ を超えると推定された。

(2) 荷重計による質量測定

水位測定された注入量と流出量の差分量(以下、アンバランス量と称す)が僅かなことから、質量保存を確認するため、試験体を収容した試験水槽全体を荷重計で吊り、質量増加を追加測定することにした。試験水槽、試験体、内・外湛水及び吊り治具の合計質量が約 220kg あり、定格 200kg の荷重計(測定精度 $\pm 50\text{g}$)2台を設置した。質量測定結果は図-6に示すように、質量は増加し、注入量と流出量の差分量と良く一致したことから、アンバランス量の存在を確認した。つまり、 1.0MPa 定圧の透水試験時に加圧注入された水の一部は、試験体コンクリート内に保水されたと考えられる。

このことは、事前に実施した静置試験や透水試験の低圧加圧時の試験体外側の水位低下が、実現象であったことの傍証となる。したがって、試験体内側に加圧注水しても、試験体外側からの吸水は継続していたと推定される。

4.3 湿潤ベンチレーション法による透水試験

材齢5ヶ月目に飽和透水試験を中断し、試験体の外部湛水を排水して、湿潤環境に浸出したコンクリート表面の液状水を水蒸気として回収する湿潤ベンチレーション法による透水試験を実施した。その結果は図-5の75日前後に示すように、

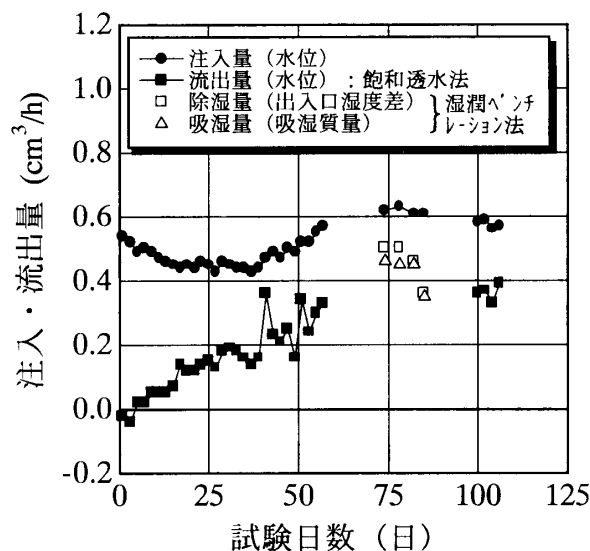


図-5 初期透水試験(1.0MPa定圧)結果

除湿量(あるいは吸湿量)として、飽和透水試験の流出量を若干上回る $0.47\text{cm}^3/\text{h}$ が得られ、湿潤ベンチレーション法の妥当性をほぼ確認した²⁾。

ただし、図-7に示す試験日数約300日からの再試験初期には、試験水槽の全体質量が減少し、注入量以上の水分が蒸発したと推定される。それを補うように、約600日から外部湛水した飽和透水試験の再開後には、全体質量が増加することから、不飽和になった空隙が水分を取り戻す保水が生じたと推定される。なお、注入量は、浸出側の外部湛水の有無に関わらず安定していた。

4.4 長期飽和透水試験

材齢3ヶ月から5年間にわたる全ての透水試験の測定結果についても、測定量を図-7、累積量と増加質量を図-6に示している。

(1) 長期透水試験結果

1.0MPa 定圧の飽和透水試験において、注入量は $0.65\text{cm}^3/\text{h}$ まで増加後に、 $0.12\text{cm}^3/\text{h}$ へ漸減しほぼ一定になった。これに対し流出量は、初期の吸水状態から流出後 $0.4\text{cm}^3/\text{h}$ まで急増後に、 $0.11\text{cm}^3/\text{h}$ へ漸減しほぼ一定になった。材齢経過に伴い組織の緻密化や動水勾配の減少により、両者は減少すると思われたが、オーダに変わりはない。また、この間の飽和透水試験中の流出量は、注入量より常に少なかった。

透水試験初期には、累積注入量と累積流出量の増加が大きかったが、試験日数200日から600日

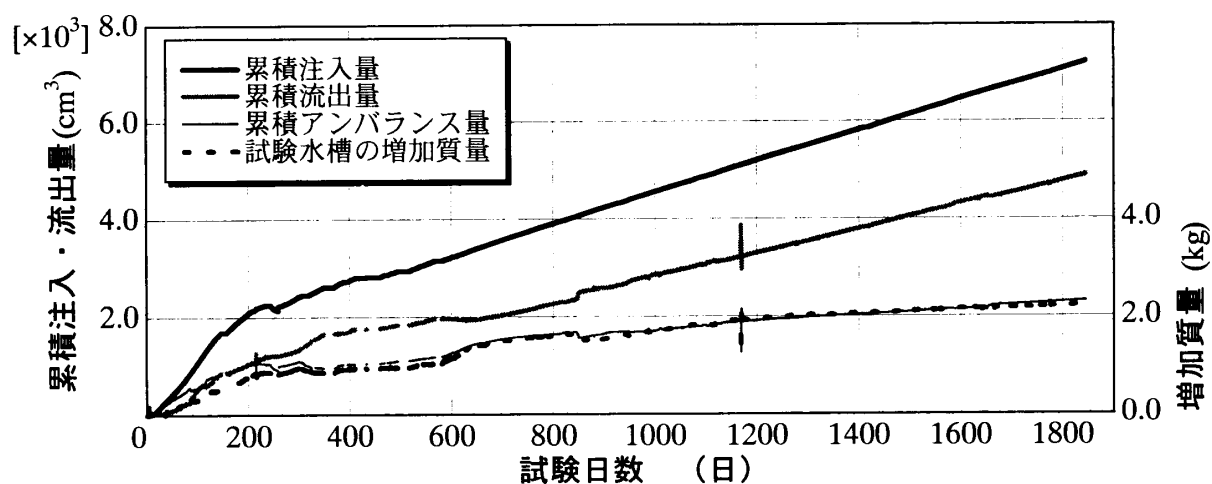


図-6 長期透水試験結果(累積注入量, 累積流出量, 累積アンバランス量, 試験水槽の増加質量)

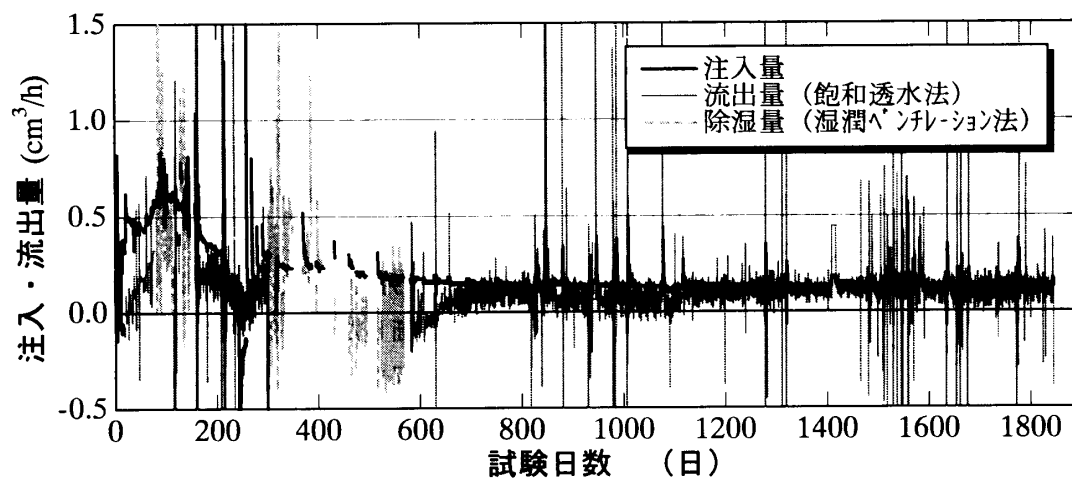


図-7 長期透水試験結果(注入量, 流出量)

までを境に増加量は急激に減少し, 累積注入量と累積流出量はほぼ一定勾配になった。また, 5年間の累積注入量は $7,200\text{ cm}^3$, 累積流出量は $4,900\text{ cm}^3$ に対し累積アンバランス量は $2,300\text{ cm}^3$ となり, 累積注入量の32%を占める。また, この量は試験体コンクリート体積の $40,500\text{ cm}^3$ の5.7%に達し, 試験水槽全体の増加質量の2.2kgとほぼ一致する。なお飽和透水試験を5年以上継続しても, 未だに流出量が注入量より約10%少なく, アンバランスな状態が続いている。これらのアンバランス量の発生メカニズムの解明は, 今後の課題である。

(2) アウトプット法による透水係数の評価

5年間透水試験を継続し定常にならないため, 最新の流出量を式(5)に示すダルシー則に代入し, アウトプット法により水セメント比が50%のコンクリートの透水係数 $k\text{ m/s}$ を算出する。ただし, 試

験体形状は中空円筒形であり, 式(5)の L/A に該当する透水に関する試験体の形状係数を, あらかじめFEM定常浸透流解析により求めておく。

$$k_{\text{アウトプット法}} = Q \cdot L / (A \cdot H) \quad (5)$$

$$= 0.11 / 60^2 / (326 \cdot 10000)$$

$$= 9.4 \times 10^{-12} (\text{cm/s}) = 9.4 \times 10^{-14} (\text{m/s})$$

ただし, Q : 飽和透水試験の定常流出量(cm^3/s)

L : 試験体の厚さ(cm)

A : 試験体の透水面積(cm^2)

H : 平均水頭差(cm)

しかし, 健全なコンクリートの飽和透水試験では, 流出側から逆に吸水したり, 流出しても注入量より少なく, 長期間継続しても定常透水に至らない。このように, 定常流出量は測定困難であることから, 低透水性コンクリートの透水試験方法として, アウトプット法は実用的ではない。

表－3 各種透水試験方法から求めた透水係数

評価 材 齢	透水 試験 方法	注入圧力 (加圧期間)	注入量 (cm^3/h)	試験体	流出量 (cm^3/h)	流出側 環境	透水係 数の評 価方法	透水係数 (m/s)
3 ヶ 月	インプ ット法	1.0 MPa (2 日)	(浸透深 さ測定)	円柱形 コンクリート	—	空気	圧縮率 で換算	2.4×10^{-14}
半 年	加圧注水 法	1.0 MPa (3 日)	0.49	中空 円筒形 コンクリート	-0.03 (吸水量)	潜水	ダルシー 則に 単純に 代入し て算出	4.2×10^{-13}
5 年	湿潤ベン チレーション法	1.0 MPa (15 日)	0.63		0.47 (除湿量)	高湿 空気		4.0×10^{-13}
	アウトプ ット法	1.0 MPa	0.12		0.11	潜水		9.4×10^{-14}

注：斜体字は注入側の諸量により求めた

5. 加圧注水法による透水係数の評価

一方注入量は、飽和透水試験初期の低圧加圧直後から測定され注入圧力にも比例的であり、常に流出量より多かった。また、流出側が大気環境の湿潤ベンチレーション法による透水試験前後でも注入量の変動は少なく、飽和透水試験を長期間継続しても注入量の低下は少なかった。そこで、定常に至らない流出量の代わりに、図－4 に示した材齢3ヶ月で実施した初期注入量をダルシー則に代入すると、 $4.2 \times 10^{-13} \text{m/s}$ と算出された。

$$k_{\text{加圧注水法}} = Q \cdot L / (A \cdot H) \quad (6)$$

$$= 0.49 / 60^2 / (326 \cdot 10000)$$

$$= 4.2 \times 10^{-11} (\text{cm/s}) = 4.2 \times 10^{-13} (\text{m/s})$$

ただし、 Q : 飽和透水試験の初期注入量 (cm^3/s)

得られた透水係数は、透水試験を5年間継続した後の流出量により算出したアウトプット法の透水係数に対して、5 倍の大きさに収まった。この倍率はコンクリートの吸水性、保水性、透水性及び注入圧力により変動すると考えられるが、長期透水試験により飽和透水試験中の定常流出量は、初期注入量を上回ることはないと思われる。

そこで、飽和透水試験初期に短期間で測定された注入量を、直接ダルシー則に代入して透水係数を評価する加圧注水法は、測定が容易な注入側の測定量により評価できることから、実用的な健全コンクリートの低透水性の評価方法として、適用可能であるといえる。

報告したように、各種透水試験方法により求めたコンクリート(試験体)の透水係数は、評価条件が種々異なるが、参考として表－3 に整理した。

6. まとめ

5 年間にわたり実施した中空円筒形コンクリートの飽和透水試験により、明らかになった長期透水性状を以下にまとめる。

(1) 健全なコンクリートの飽和透水試験前や低圧初期に本来流出すべき透水側水位が低下したが、その主原因はセメントの水和反応に伴う自己収縮と吸水と推定された。

(2) 高圧で飽和透水試験すると、流出量は常に注入量より少なく、差分量は試験体を収容した水槽全体の質量増加と一致したことから、アンバランス量の存在を確認した。

(3) 水セメント比が50%の健全コンクリートの透水試験を5年間継続し、アンバランス量は5.7vol%を超えたが、未だに定常に至らず、流出量から算出される透水係数は $9.4 \times 10^{-14} \text{m/s}$ である。

(4) 材齢3ヶ月で実施した飽和透水試験の初期注入量から評価した透水係数は、アウトプット法の5倍程度に収まったことから、加圧注水法は実用上、健全なコンクリートにも適用可能である。

参考文献：

- 1) 小西一寛，辻 幸和，伊藤 洋，藤原 愛：中空円筒形鉄筋コンクリート構造物を対象とする加圧注水型透水試験方法の提案，土木学会論文集，No. 623/VI-43，pp. 163～176，1999. 6
- 2) 須藤 賢，丹生屋純夫，小西一寛，藤原 愛，渡辺 邦夫：湿潤性に配慮したベンチレーション試験法による透水性評価について，第31回地盤工学研究発表会，日本地盤工学会，vol. 31，No. 2，pp. 2089～2090，1996. 7
- 3) 国分正胤編，土木材料実験（改訂4版），技報堂出版，pp. 289～293，1989. 6
- 4) Ruettgers A., Vidal E. N. and Wing S. P.: "An Investigation of the Permeability of Mass Concrete with Particular Reference to Boulder Dam", Jour. ACI, Vol. 31, pp. 382～416, Mar. - Apr. 1935
- 5) 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. 11
- 6) 自己収縮研究委員会報告書：日本コンクリート工学会，pp. 19～42，1996. 11