

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

小西 一寛¹・辻 幸和²・伊藤 洋³・藤原 愛⁴

¹正会員 株式会社大林組 土木技術本部設計第二部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

²正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)

³正会員 工博 株式会社熊谷組 技術本部土木技術開発部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)

⁴工修 財団法人原子力環境整備センター 地質環境研究部 (〒105-0001 東京都港区虎の門 2-8-10)

鉄筋コンクリート構造物の初期透水性状を実験的に評価するために、まず構造物規模の透水試験方法を検討し、試験温度および注水圧力を一定とする加圧注水型の透水試験方法を提案した。試験対象として、外径が7.25m、高さが5.25m、側壁の厚さが1.25m、底版と頂版の厚さが1.5mの中空円筒形のマスコングリート構造物試験体を、通常施工を模擬し水平打継目を設け温度ひび割れを制御および誘発して2体作製した。提案した透水試験方法を2試験体に適用し、初期の平均的な透水係数が 10^{-11} m/sおよび 10^{-10} m/sオーダーであることを求めた。

Key Words : reinforced concrete silo, thermal crack, construction joint, permeability test, coefficient of permeability

1. はじめに

従来の各種地下施設や貯蔵施設等の水密コンクリート構造物では、材料・構造・施工およびメンテナンスの面から必要に応じて、防水処理工や排水設備等の漏水対策が施されてきた。そのため直接、透水性が鉄筋コンクリート構造物の機能性、安全性、耐久性に与える影響は小さいとされ、透水性や透湿性に関する報告は少ないのが現状である。しかし、長期間にわたり地下水の流れにさらされる地中コンクリート構造物のうち、長期にわたり低透水性が求められる廃棄物処分施設や大深度施設において、コンクリート材料が本来持つ透水抑制機能を適切に評価し、安全で経済的な施設を構築することが社会的な要請となっている。

ここで対象とする大型の鉄筋コンクリート構造物では、配筋、打込み、型枠・支保工等の施工上の制約から分割施工となり、打継目を設けることが多い。旧コンクリート上に打ち込む新コンクリートは、水和熱による温度上昇により温度応力が発生し、新コンクリートに温度ひび割れが、打継目に剥離や横ずれが発生する可能性がある。このような視点から、鉄筋コンクリート構造物の漏水事例を見直すと、コンクリート一般部からの漏水はほとんど無く、ひび割れ、打継目や

貫通鋼材周りの界面から透水する例が多いことがわかる。このような鉄筋コンクリート構造物の透水性を定量的に評価する方法として、透水経路と各々の透水性を累加して全体の透水性を推定する方法が考えられる。このうちコンクリート一般部やひび割れの透水性を評価する手法は、一応確立されているものの、打継目や貫通鋼材周りの止水欠陥の分布とその透水性の評価手法は、従来の研究では明らかではない。そこで、止水欠陥を含む鉄筋コンクリート構造物全体の透水性を実験的に評価することにした。

ところが、コンクリートの透水試験方法として理想的なアウトプット法を鉄筋コンクリート構造物に適用するには、広範囲な浸出面から僅かに浸出する透水を漏れなく集水する設備により、微量量を定常透水まで長期間測定する必要があり、実施が困難である。

そこで本研究では、まず止水欠陥を有するコンクリート構造物の透水試験として、試験温度および試験圧力が一定で、加圧注入する注水量を透水量とみなす加圧注水型の透水試験法を提案する。つぎに、提案した透水試験法を、温度ひび割れの制御水準が異なる2施工法を模擬して作製した大型中空円筒形の鉄筋コンクリート構造物に適用し、構造物全体の平均的な初期透水性状を報告するものである。

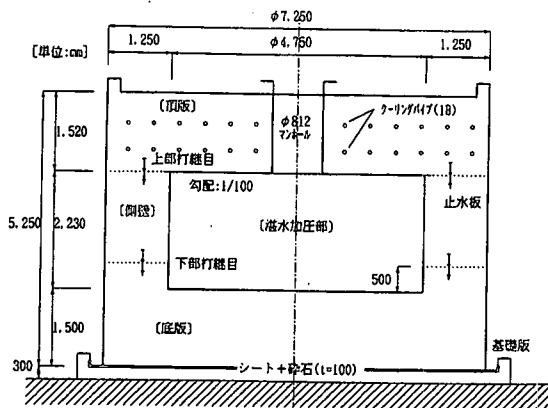


図-1 ひび割れ制御試験体の構造概要

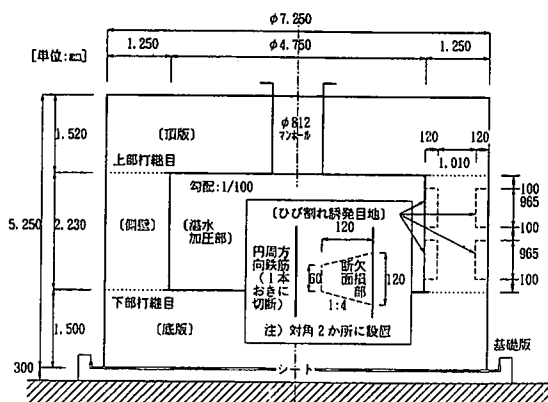


図-2 ひび割れ誘発試験体の構造概要

2. 円筒形鉄筋コンクリート構造物の試験体

(1) 試験体の構造

ひび割れ制御試験体およびひび割れ誘発試験体の構造寸法は、図-1と図-2に示すように、外径が7.25m、側壁厚さが1.25m、高さが5.25mで、底版・頂版厚さが1.5mの中空円筒形の鉄筋コンクリート構造物である。試験体の頂版中央には、頂版コンクリートの下型枠と支保工の撤去および透水試験用に、直径が812mmのマンホールを設置した。

透水試験では、試験体に内圧を作用させ引張応力が発生することから、ひび割れが発生しても主鉄筋が降伏しないように、側壁鉄筋比を0.6%以上とする円周方向鉄筋D32を200mmピッチで配置するとともに、主鉄筋の純かぶりは12cm以上とした。マンホール用の鋼管外周面は、透水試験時に漏水する懸念があり、水膨張性ゴムを被覆した。また、計測センサのリード線は、ケーブル沿いの漏水が想定されたため、液状ブチルゴムを塗布してコンクリートとのなじみを良くするとともに、センサ位置から試験体中の鉄筋に沿わせ、頂版上面から試験体外に引き出した。

表-1 コンクリートの品質条件

	セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (mm)	空気の量 (%)	水割り比 (%)	打込み温度 (°C)	7d-強度 (%)
ひび割れ制御試験体	2成分系低発熱セメント	20	12±2.5	4 ± 1	40	10 以下	2以下
ひび割れ誘発試験体	普通ポルトランドセメント	20	12±2.5	4 ± 1	40	—	—

注) 1. 2成分系低発熱セメントは、中熱ポルトランドセメントを45%、高炉スラグ微粉末を55%含む

表-2 コンクリートの標準配合

	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	石灰石微粉末	高性能減水剤	空気量
ひび割れ制御試験体	40.0	154	385	741	1023	30	5.5825 (1.45%)	2.50 (6.5A)
ひび割れ誘発試験体	44.0	168	420	748	993	—	5.46 (1.3%)	0.84 (2.0A)

2. 粗骨材：両神産硬質砂岩砕石2005と桐郡産石灰砕石2005を5:5で混合
3. 石灰石微粉末：炭酸カルシウム粉末で比表面積5000cm²/g

表-3 試験体の作製および試験工程

月数	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
試験体の作製	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽
試験加圧	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽
保温湿潤発生	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
初期透水試験	—	—	—	—	—	▽	▽	—	—	—	—	—	—	—
頂版ひび割れ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
恒湿湿潤発生	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
長期透水試験	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ひび割れ制御試験体の下部には、コンクリート打込み時の外部拘束緩和のために、砕石を敷き均した。一方、ひび割れ誘発試験体の側壁両側面の対角2断面には、深さ12cmの溝状欠損によるひび割れ誘発目地(断面欠損率19.2%)を設けるとともに、その断面を横切る200mmピッチの円周方向鉄筋D32をあらかじめ1本置きに切断した。

(2) コンクリートの品質

試験体は内圧を受けることから、設計基準強度： f_{ck} を40N/mm²としたコンクリートの品質条件を表-1に示す。また、品質条件を満足するため、試し練りにより定めたコンクリートの標準配合を表-2に示す。ひび割れ制御試験体では、コンクリートの流動性を増すために、石灰石微粉末を30kg/m³添加した。

(3) 試験体の作製とひび割れの発生

試験体は、側壁の上下に順打ち水平打継目ができるように底版・側壁・頂版に分割し、温度ひび割れに dotycząceクリティカルな秋期におよそ1か月の間隔をおいて、建屋内でコンクリートを打ち込んだ。試験体作製とそ

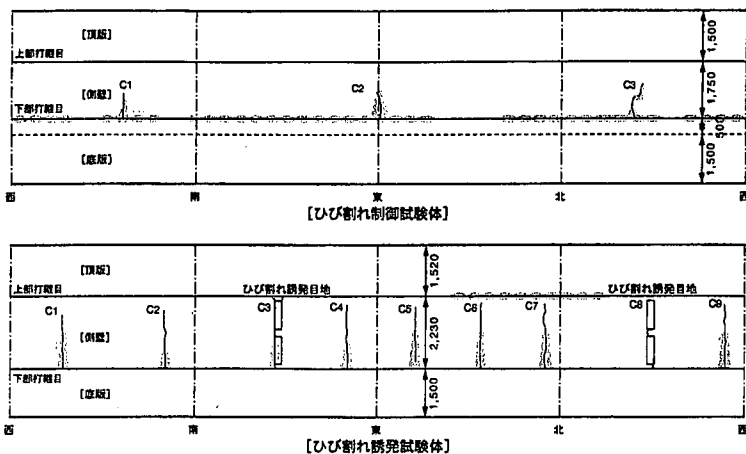


図-3 試験体の試験加圧時のひび割れと漏水分布

の後の透水試験工程を、表-3に示す。

a) ひび割れ制御試験体

ひび割れ制御試験体の打継目処理として、新コンクリートの打設直前に打継目を清掃後、散水により湿潤にしモルタルを30mmの厚さに敷き、コンクリートを打設した。打継面から浮き水が引いた時期に凝結遅延剤を散布し、翌日に高圧水でレイトランスを除去した。なお、打継目には、あらかじめステンレス製の止水板(板厚:1.5mm, 板幅:300mm)を設置した。

施工場所が、外気温の日較差が最大15℃生じることから、ひび割れ制御試験体は、養生マット等により保温するとともに、表面乾燥を防ぎセメントの水和を促進するため、脱型後直ちにシートにより被覆して湿潤養生を行った。また、コンクリートの打込み後の底版および側壁の温度上昇が事前の温度解析より大きかったことから、頂版には、パイプクーリングを追加施工した。試験体施工から、1か月後に試験体の内空部に湛水し、同2か月後に試験加圧を実施するためシートを撤去した。

各種のひび割れ制御対策を施したひび割れ制御試験体でも、側壁に3本の貫通ひび割れが発生した。試験加圧時のひび割れおよび漏水の目視調査結果を、図-3および表-4に示す。平均ひび割れ間隔は6.28mで、平均ひび割れ幅は0.05mm、平均ひび割れ長さは約1.0mで、側壁の打込み高さ1.75mのおよそ半分となった¹⁾。

b) ひび割れ誘発試験体

ひび割れ誘発試験体の打継目処理として、新コンクリートの打設直前に打継目を清掃後、散水により湿潤にしモルタルを30mmの厚さに敷き、コンクリートを打設した。打込み後コンクリートが硬化しない時期に、ワイヤブラシで表層を除去し、打継目の濁水を吸引排水した。

表-4 試験加圧時において止水欠陥になり易い箇所

打継目 φ6.0m	ひび割れ		ひび割れ誘発試験体	
	幅(mm)	長さ(m)	間隔(m)	
平均	0.05	0.95	6.22	
C1	0.05	0.90	6.54	
C2	0.05	1.10	6.09	
C3	0.05	0.98	6.28	

注) ①間隔は円筒型側壁の軸線上のひび割れ間隔に換算のセパレータを使用した。②外面に水膨張性ゴムを塗布

打継目 φ6.0m	ひび割れ		ひび割れ誘発試験体	
	幅(mm)	長さ(m)	間隔(m)	
平均	0.17	1.60	2.24	
C1	0.23	1.70	2.73	
C2	0.31	2.25	2.33	
C3	0.16	1.90	1.81	
C4	0.13	1.70	1.74	
C5	0.20	2.00	1.65	
C6	0.15	1.80	2.19	
C7	0.19	2.25	2.31	
C8	0.05	1.90	1.85	
C9	0.18	1.90	2.09	

注) 間隔は円筒型側壁の軸線上のひび割れ間隔に換算

ひび割れ誘発試験体は、初期透水試験後の長期透水試験を行わずに、温度ひび割れ等の止水欠陥にセメントグラウトを注入する試験²⁾を実施するため、温度ひび割れ等の止水欠陥を確実に発生させる対策を講じた。まず、ひび割れ制御試験体と異なり、打継目に止水板は設置しなかった。また、普通ポルトランドセメントを用いるほか、側壁の打込み後に壁面を断熱材で覆って温度上昇を促すとともに、頂版の下型枠の設置後に2日間、液体窒素により試験体内空部の雰囲気温度を-20℃程度に冷却し、ひび割れを誘発した。さらに、型枠脱型後も、室内放置を継続した。

その結果、ひび割れ制御試験体と比較して、温度ひび割れは誘発され、ひび割れ誘発試験体の側壁には、9本の貫通ひび割れが発生したが、ひび割れ誘発目地に集中せず全周に分散し、平均ひび割れ幅は0.18mmとなった。側壁の打込み高さの2.25mに対し、平均ひび割れ長さは約1.9m、平均ひび割れ間隔は約2.1mであった。また、頂版のマンホール周りにも、僅かな放射方向ひび割れが発生した。

3. コンクリート単体の透水係数

ひび割れの無い健全部のコンクリートの透水係数を評価するため、側壁の打込み時にφ150×300mmの型枠にコンクリートを打ち込み、1日間現場で養生後に脱型し、水中養生を行った。供試体は透水試験の28日前に水中から取り出し、27日間恒温恒湿室(室温20℃、湿度60%)で気中放置し、透水試験の7日前にφ150×150mmの寸法に切断した。透水試験方法はインプッ

表-5 コンクリート単体の透水試験結果

試験材齢	浸透深さ D _m (cm)	拡散係数 β ² (cm ² /s)	弾性係数 E _c (kN/mm ²)	ポアソン比 ν	透水係数 k(m/s)	
ひび割れ 制御 供試体	28日	1.49	4.2×10 ⁻⁴	29	0.23	7.9×10 ⁻¹⁶
	91日	1.33	3.4×10 ⁻⁴	33	0.24	5.9×10 ⁻¹⁶
	110日*	1.28	3.1×10 ⁻⁴	35	0.24	5.0×10 ⁻¹⁶
	365日**	1.17	2.6×10 ⁻⁴	36	0.23	3.9×10 ⁻¹⁶
ひび割れ 発生 供試体	28日	6.23	7.3×10 ⁻⁵	33	0.22	1.2×10 ⁻¹⁵
	160日*	4.14	3.3×10 ⁻⁵	33	0.21	5.1×10 ⁻¹⁶
	438日	2.45	1.1×10 ⁻⁵	35	0.22	1.7×10 ⁻¹⁶

注) 1. 3供試体の平均値を示す
2. * は初期透水試験時、**は長期透水試験時を示す

ト法のうち浸透深さ方法^{3), 4)}により行い、加圧力は1.0MPa、試験時間は48時間とした。試験結果から式(1a)により水の拡散係数を求め、式(1b)により透水係数を算出した。

表-5に示す透水試験結果から、材齢28日におけるコンクリート単体の透水係数は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートが1.2×10⁻¹⁶m/sに対し、2成分系低発熱セメントに石灰石微粉末を添加したコンクリートは、7.9×10⁻¹⁶m/sと優れた水密性を示した。透水係数は材齢が経過するほど小さくなるが、材齢1年でも材齢28日のせいぜい半分になる程度でその効果は小さい。なお、{(材齢438日まで標準水中養生後の試料の表乾重量)-(1日間105℃乾燥後の試料の乾乾重量)}/試料体積により算定した普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの空隙率は、14.4%であった。

$$\beta^2 = \frac{\alpha \cdot D_m^2}{4 \cdot t \cdot \xi^2} \quad (1a)$$

- ここで、β²: 拡散係数 (cm²/s)
 D_m²: 平均浸透深さ (cm)
 t: 水圧を加えた時間 (48h × 60²s)
 α: 水圧を加えた時間に関する係数で t^{3/4}=175.7³⁾
 ξ: 水圧の大きさに関する係数で、注水側圧力が1MPa、平均浸透深さの浸透側圧力が0.1MPaのとき1.163³⁾

$$k = \frac{\beta^2 \cdot \omega_0}{E \cdot 10^7} \quad (1b)$$

- ここで、k: 透水係数 (cm/s)
 ω₀: 水の単位体積質量 (1.0g/cm³)
 E: 体積弾性係数で、E = 3 × E_i × (1 - 2ν)
 E_i: 初期弾性係数で、E_i ≒ 1.1 × E_c
 E_c: 静弾性係数 (kN/mm²)
 ν: ポアソン比

4. 加圧注水法の提案

(1) アウトプット法とインプット法

コンクリート供試体の透水試験方法としては、精度にまだ問題点を残しているものの、アウトプット法・インプット法などが用いられる。アウトプット法は、一定の圧力を加えた供試体の流出量をはかり、圧力と流出量の関係からダルシーの法則により、コンクリートの透水係数を算定する。この方法はコンクリートの透水性を評価する最適な方法であり、文献⁵⁾によると円柱形⁶⁾あるいは中空円筒形^{7), 8)}の供試体を用いる方法が提案されている。しかし、流出量が微小で安定するまでに長期間を要するため、アウトプット法を採用するには、ごく初期材齢で行うか、供試体を極端に薄くするか、水圧を著しく大きくするか、等の配慮が必要であり、現実的ではない。

一方、インプット法は、供試体に一定圧力で一定時間に圧入した浸透深さから、コンクリート中の水の拡散係数を評価する浸透深さ方法^{3), 4)}、浸透方法⁹⁾等が提案されている。3.のコンクリート単体の透水係数では、浸透深さ方法を採用した。しかし、いずれも透水試験終了後に小型の供試体を割裂して浸透深さを測定する間接的な透水性の評価方法であり、透水試験を繰り返して行えないのが欠点である。したがって、両試験方法ともに、大型の鉄筋コンクリート構造物には適用できないことから、透水試験方法を検討することにした。

(2) 加圧注水法の考え方

ひび割れあるいは打継目を対象とする透水試験では、これらに注入された水の大部分が比較的早く通水することから、加圧側の注水量により止水欠陥の透水性を評価できる。これと同様に、ひび割れや打継目の存在する、大型の鉄筋コンクリート構造物を対象とする透水試験においても、加圧後、まもなく注水量の大部分が、止水欠陥を通水すると想定される。そこで、中空円筒形の鉄筋コンクリート構造物の内空部に灌水し、そこへの注水圧と注水量を測定し、全体の平均的な透水性を評価することにした。この透水試験方法を、加圧注水型透水試験方法(以下、加圧注水法と略称する)と呼ぶ。

試験体内空部の灌水に加圧する理由は、注水圧が試験体に対し内圧として働くことによって試験体各部に引張応力が生じ、構造物の防水性からは安全側の透水性評価となることと、試験体自身が加圧中に内空積を変動しにくい剛性灌水容器としても兼用できることからである。

(3) 透水性の評価法

構造物内の水分移動は水分の状態によって異なる。健全なコンクリート中の液状水の流れは、ダルシーの法則に従うと考えられるが、水蒸気の流れは浸潤面に毛細管張力や蒸発作用が加わり、単純ではない。一方、ひび割れ内の液状水の流れは、ひび割れ幅の三乗や動水勾配に比例すると考えられるが、浸出側の水位低下により、ひび割れ内に不飽和領域が生じた場合の水の流れは、流水面積が縮小するものの動水勾配が大きくなることから、透水量はひび割れ内が飽和状態より多くなると推定される¹⁰⁾。したがって、鉄筋コンクリート構造物中の透水は、ひび割れ等の止水欠陥から液状水による流れが支配的であり、動水勾配に比例する流れといえる²⁾。

一方、試験体全体が等質な透水性を有すと仮定すると、透水係数は注水圧と注水量から式(2)のダルシーの法則により求められる。ここで透水長さには注水量の大部分を透水する貫通ひび割れあるいは打継目の深さ、つまりコンクリート厚さを、透水面積には試験体の全透水面積を用いることにより、鉄筋コンクリート構造物全体の透水性を評価する基準として、止水欠陥を含む透水係数を評価できると考えられる。

試験体が複雑な形状の場合には、式(2)のL/Aに相当する試験体の透水に関する形状係数を、あらかじめFEM定常浸透流解析により求めておく。本試験で用いる中空円筒形の透水試験体形状に固有なL/Aに相当する形状係数は、軸対称定常浸透流解析により $1.32 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ となる。

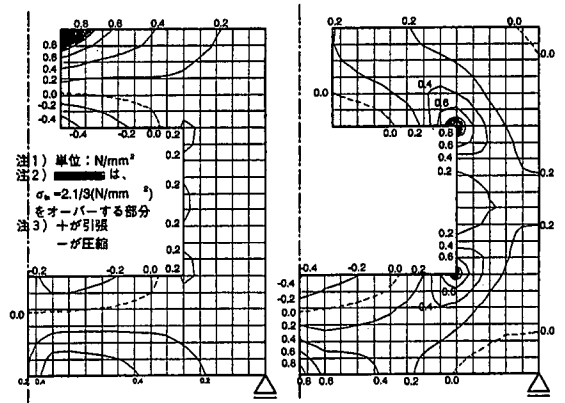
$$k = \frac{Q}{A \cdot i} = \frac{L \cdot Q}{A \cdot H} = 1.32 \times 10^{-2} \times \frac{Q}{H} \quad (2)$$

ここで、
 k : 透水係数 (m/s)
 Q : 注水量 (m³/s)
 A : 透水面積 (m²)
 i : 動水勾配 (H/L)
 L : 透水長さ (コンクリート厚) (m)
 H : 平均水頭差 (m)

(4) 加圧注水法の試験条件

加圧注水法による透水試験が、成立するのに必要と考えられる試験条件を、以下に列挙する。

- ① 透水試験前に、マンホール管の外周等の試験対象外から、漏水が無いことを確認する。
- ② ダルシーの法則は透水対象が飽和であることを前提としており、透水試験前から試験体内空部に湛水するとともに、外面の湿潤養生を行う。
- ③ 内圧による新たなひび割れ発生を防止し、弾性変



(鉛直面内主応力) (円周方向応力)
 図-4 0.4MPa加圧時の最大主応力分布

形後のクリープ変形を抑制するため、試験体の引張応力度は、引張強度の1/3以内とする。

- ④ 注水圧の変動により試験体の内空積が変動し注水量が影響を受けるため、注水圧を一定に保持する。
- ⑤ 外気温の変動による試験体等の膨張・収縮に伴い、内空積が変動し注水量が影響を受けるため、恒温養生により試験体温度を一定に保持する。

5. 注水圧を段階的に変える初期透水試験

透水試験は、2回に分けて実施した。両試験体共に材齢2ヵ月で行った注水圧を段階的に変更する初期透水試験と、ひび割れ制御試験体のみに対し材齢1年で行った注水圧を一定とする長期透水試験である。

(1) 最大注水圧の設定

透水試験において注水圧は大きいほうが試験期間を短縮できるが、鉄筋コンクリート構造物に対し内圧として作用する場合、大き過ぎるとひび割れ幅の拡大や新たなひび割れ発生が懸念される。そこで、最大注水圧を設定するために試験体の応力解析を実施した。

解析は軸対称弾性応力解析とし、境界条件は、試験体の側面最下端のみ鉛直方向を固定した。荷重は、自重と底面の等分布地盤反力および試験圧力として0.4MPaを、試験体内面に作用させた。応力解析結果を円筒座標系で示すと図-4となり、試験体に発生する鉛直面内および円周方向の引張応力度が、引張強度の1/3となる0.4MPaを最大注水圧に設定した。

(2) 加圧注水装置

透水試験装置の概要を図-5、加圧注水装置の仕様を表-6に示す。高圧の窒素ガスを整圧弁で調圧し注水槽上部の内空に加圧すると、注水槽内の水が加圧さ

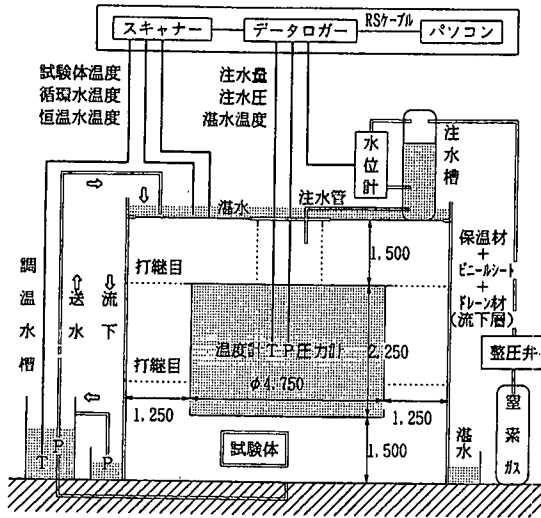


図-5 加圧注水法による透水試験の概要 (ひび割れ制御試験体)

表-6 加圧注水装置の仕様(ひび割れ制御試験体)

名称	仕様	数量
注水槽	内径964mm, 容量:100ℓ	4本
調整弁	0~1MPa, 精度:0.001MPa	1台
圧力計	歪みゲージ式, 定格:1MPa 分解能:0.0001MPa	1台
水位計	磁気歪み式, 測定長:100cm, 分解能:0.1mm ($8 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{min} \sim 20 \text{ℓ}/\text{min}$)	2台
温度計	Pt100Ω シース耐温抵抗体式	1本

れる。同時に、注水管により連通する試験体内空部の湛水も加圧され、試験体の透水性に応じた注水が生じる。一定加圧下において、注水槽の水位低下量を水位計で測定し注水槽の断面積を乗ずれば、測定時間当たりの注水量が測定できる。

(3) 試験加圧

a) 試験方法

透水試験前に、主たる透水箇所の確認、試験対象外の止水性確認および最大注水圧の確認を目的として、試験体作製後2か月目に試験加圧を実施した。試験加圧は、以下の手順により行った。

- ① 試験体や注水槽内に気泡が残らないように、マンホールの蓋は水を越流させながら設置した。
- ② マンホールや計測ケーブル周辺の漏水および主な透水箇所を観察するために、試験体外面を気乾状態にした。
- ③ 図-6に示す段階的な加圧ステップにしたがい、加圧注水装置により昇圧・降圧した。

b) 試験加圧の結果

試験体頂版のマンホールや計測ケーブル周りの漏水

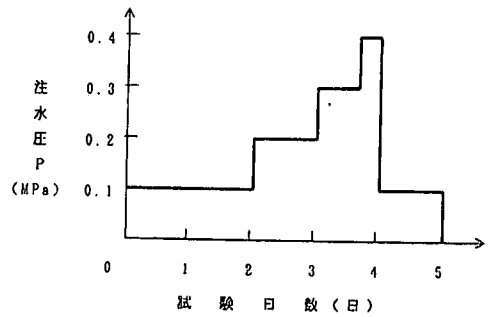


図-6 試験加圧の加圧ステップの例(ひび割れ制御試験体)

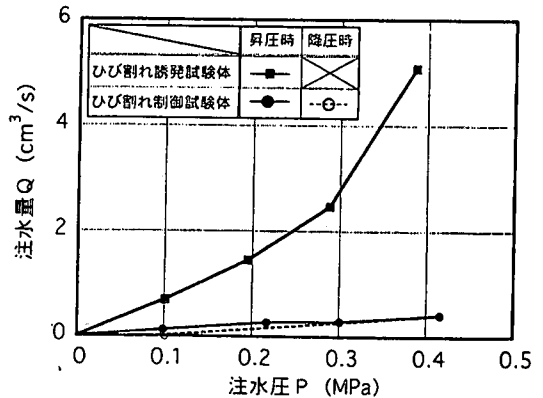


図-7 試験加圧の注水圧と注水量の関係

を観察し、最大注水圧0.4MPaでも漏水せず、透水試験対象外の止水性を確認した。また、鉄筋ひずみは日変動したが、加圧による変動は無視できる程度であった。一方、試験体に引張強度の1/3にあたる0.7N/mm²の引張応力が発生する0.4MPaで加圧しても、試験体に新たなひび割れは生じなかったことから、初期透水試験では、最大0.4MPaの加圧を行うことにした。

試験加圧時の漏水状況は図-3に示す。ひび割れ制御試験体の漏水は、ひび割れのほか止水板を設置した側壁と底版間の下部打継目の一部で観察された。ひび割れのない頂版と側壁間の上部打継目では漏水が観察されなかったことから、下部打継目のように止水板を跨いでひび割れが生じると、止水板は十分な止水効果を発揮できないと考えられる。

打継目に止水板を設置しなかったひび割れ誘発試験体では、昇圧に伴いひび割れからの漏水本数は増加し、浸出位置は上昇した。さらに、ひび割れが進展していない上部打継目の一部から、注水圧を0.4MPaに昇圧以降に漏水が観察されたが、ひび割れが到達した下部打継目では観察されなかった。この理由は明らかではないが、下部打継目は剥離せず上部は剥離したためと推定される。上・下打継目の処理方法が同じであることから、この差が生じる理由は、消去法により上部打

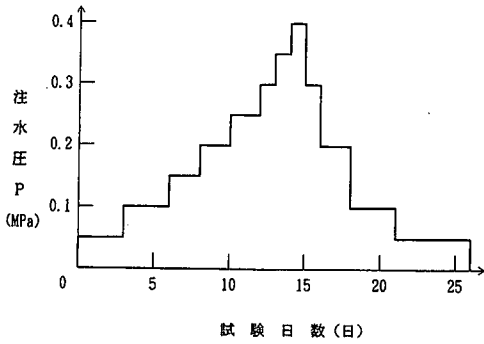


図-8 初期透水試験の加圧ステップの例
(ひび割れ制御試験体)

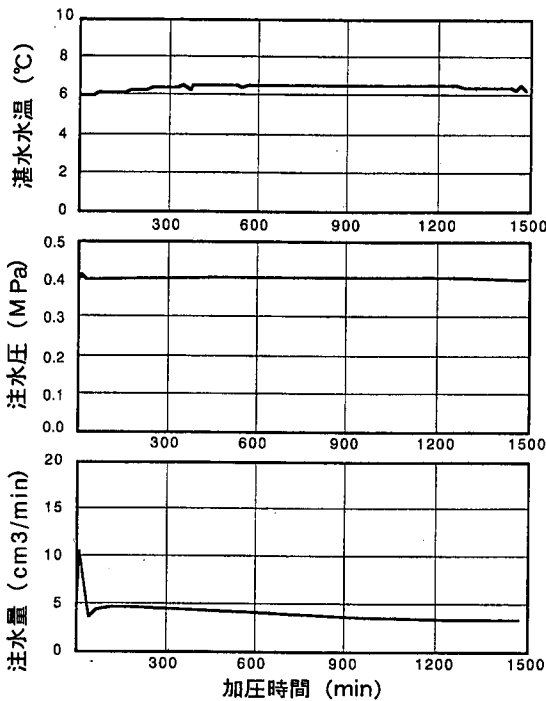


図-9 初期透水試験の0.4MPa加圧時の経時変化例
(ひび割れ制御試験体)

継目の剥離またはずれ応力が下部より大きかった可能性が挙げられる。

また、下部打継目において、ひび割れ誘発試験体が漏水しないのに対し制御試験体が漏水したのも、前者は打継目が剥離せず後者は剥離したためと推定されるが、温度応力は前者の方が大きいため、剥離した理由は打継目の処理方法の違いに帰結するのであろうか。今後、打継目の剥離や横ずれは、温度応力や打継目の処理法の観点から、さらに検討すべき課題と思われる。

注水量は、各注水圧において注水量が安定する測定期間の最終注水量を採用し、その結果を図-7に示す。ひび割れ誘発試験体では、注水量は注水圧の増加に伴いほぼ指数状に増加した。試験加圧開始後、ひび割れ

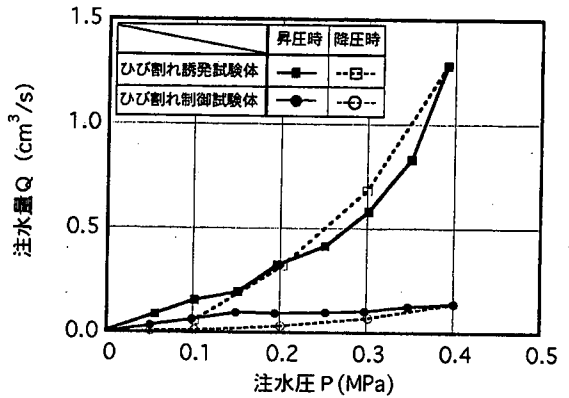


図-10 初期透水試験の注水圧と注水量の関係

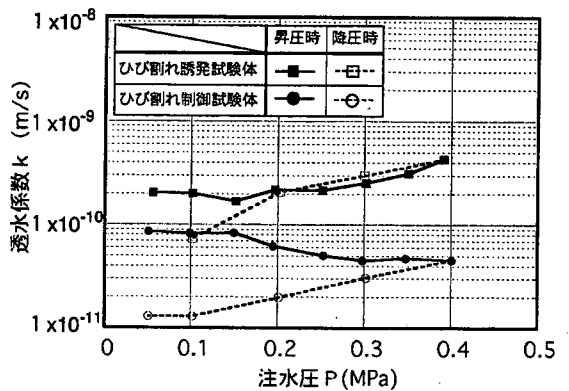


図-11 初期透水試験の注水圧と透水係数の関係

と打継目の一部から漏水し、試験加圧終了後、打継目に炭酸カルシウムの析出を確認した。

(4) 保温湿潤養生

試験加圧の終了後、初期透水試験まで約1ヶ月間、試験体内空部の湛水養生を継続した。またひび割れ制御試験体では、外面を湿潤状態に保つため、図-5に示すように試験体の上下面に散水するとともに、側面をビニールシートで被覆して試験体との間に流水した。さらに、外気温変動を緩和するため、試験体の側面に保温材を被覆した。一方、ひび割れ誘発試験体では、透水経路毎の透水量をベンチレーション法²⁾により測定するため、試験体外面は室内放置とした。

(5) 初期透水試験の結果

a) 注水圧および注水量の経時変化

初期透水試験は、試験加圧と同じく0.4MPaを上限とし段階的に昇圧及び降圧して、試験体の初期の平均透水性およびその圧力依存性の確認を目的として実施した。初期透水試験の加圧ステップを図-8に示す。

各加圧段階の注水圧と注水量の経時変化の例を図-9に、注水圧と注水量の関係を図-10に示す。各注水圧における注水量は、同一圧力の最終測定時間の注水量を採用した。

この結果でも、ひび割れ誘発試験体の注水量は、注水圧に対しおおむね指数状に増加した。なお、注水量が図-7で示した試験加圧と比較して少ないのは、止水欠陥の経時的な目詰まりと考えられる。

b) 透水係数の評価

初期透水試験の注水圧と注水量の関係から、透水係数の推定式(2)を用いて、試験体全体の平均透水係数を評価した結果を、図-11に示す。

0.1~0.3mmの貫通ひび割れが9本発生したひび割れ誘発試験体の透水係数は、注水圧の増加に伴い0.1MPaのときの 2.0×10^{-10} m/sから0.4MPaのときの 4.3×10^{-10} m/sに増加した。この理由はひび割れ幅の測定結果から、内圧増加によりひび割れおよび打継目等の止水欠陥幅が広がり、圧力依存性が現れたといえる。ひび割れの透水性はひび割れ幅に2次比例するとされ、ひび割れ幅は注水圧に1次比例すると、ひび割れの透水性は注水圧に2次比例することになる。コンクリート構造物の透水性はひび割れに支配されるとすると、試験体全体の透水性は注水圧に2次比例し、透水量は $k \cdot A \cdot i$ から注水圧に3次比例することになり、図-10のひび割れ誘発試験体の試験結果の傾向を定性的に裏付ける。

一方、ひび割れが3本発生したひび割れ制御試験体の透水係数は、初期透水試験を開始した試験体作製3か月後の0.1MPa開始時の 8.2×10^{-11} m/sから0.4MPaの 4.5×10^{-11} m/sを経て0.1MPa終了時の 1.3×10^{-11} m/sに、経時的に漸減した。この理由はよくわからないが、ひび割れ制御試験体の透水係数は、誘発試験体と比較しておおむね1オーダー小さいことから、昇圧による止水欠陥の拡幅より、経時的な止水欠陥の目詰まりがまさった可能性が考えられる。その傍証として、透水性の大きい誘発試験体では、昇圧時と降圧時の同じ0.1MPaの透水係数の差は大きくなく、逆に、経時的な目詰まりはほとんどなかったと推察される。つまり、加圧注水法により得られるコンクリート構造物の初期の透水性は、ひび割れ幅等の止水欠陥が大きいと試験圧力への圧力依存性が現れたり、止水欠陥が小さいと経時的な低下傾向が現われたりする可能性がある。

止水欠陥の多い中空円筒形コンクリート構造物の透水係数が、円筒内面にかかる注水圧力に依存するのは、注水圧力により円周方向および鉛直方向に引張応力が作用し、ひび割れや打継目の止水欠陥幅を広げることによると考えられる。ここで、コンクリート構造物の透水性として必要なのは、止水性を期待する際に適用

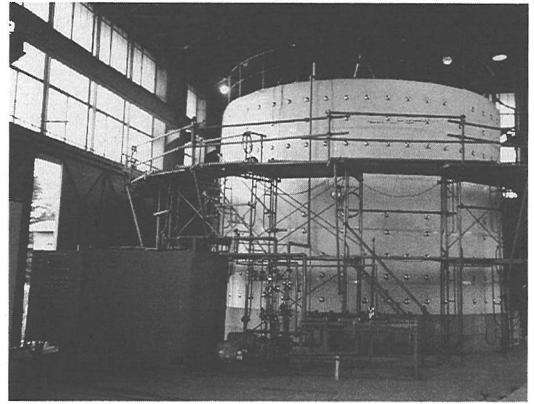


図-12 試験体と恒温湿潤養生の概要

する許容引張強度に匹敵する引張応力が生じているときの値であり、加圧注水法の特徴を生かして、許容引張応力が発生する注水圧力をかけた透水試験を行い、透水係数を得ればよい。

さて本試験のように、材齢初期に注水圧の大きい内圧の透水試験によって得られる透水係数は、大き目に評価され安全側といえる。ところが一般的には、地下水のように小さい動水勾配下の出来るだけ長期の透水係数を取得したいのであり、次節からは、材齢1年に降に注水圧を一定とする長期透水試験を実施したひび割れ制御試験体について述べる。

6. 注水圧一定の長期透水試験

初期透水試験の終了後ひび割れ制御試験体は、さらに6か月間保温湿潤養生を継続したが、材齢11ヶ月が経過して、頂版中央に設置したマンホールの外面から放射方向の貫通ひび割れが4本発生した。ひび割れが生じたときは外気温の変動時期であり、試験体内空部に滲えられる多量の水が、外気温変動に追従できずに内外面温度差による応力が、作用したためと考えられる¹⁾。このあとも長期透水試験を継続することから、ひび割れ補修は可能な限り側壁の透水対象を生かす方法として、頂版ひび割れにエポキシ樹脂を注入した。

(1) 試験方法

段階的に注水圧力を変化させた初期透水試験では、注水圧力の変更後に注水量が変動した。図-9に示したように、圧力変更後の一定圧力の継続時間が短い昇圧時には、試験体内空気がクリープ変形のため広がり見掛け上注水量を過大に、降圧時には逆に過小に評価する可能性がある。そこで注水圧を一定にして、経時的な透水性の低減に注目する長期透水試験を実施することにした。なお注水圧は、初期透水試験後のひび割

表-7 循環水の熱交換と温度変化量

	冬期	夏期
側面入熱量(W)	-4,740	5,020
上下面入熱量(W)	-3,261	3,456
合計入熱量(W)	-8,001	8,476
設計循環水量 (ℓ/min)	300	300
循環中の温度変化量(℃)	-0.382	0.405

れの発生を考慮して、引張強度の1/4にあたる引張応力が発生する0.3MPaに低減した。

(2) 恒温湿潤養生

加圧注水法による透水試験では、試験体の内空積変動が無視できることを前提にしており、試験温度を可能な限り恒温にする必要がある。そこで、初期透水試験の保温養生を強化して、図-12に示すように側面に断熱材を取り付けた恒温養生を行うとともに、試験体の湿潤養生を兼ねて、温度調整した水を側面の断熱材との間に流下することにした。

恒温水温は、試験場所の年平均気温を考慮して、17℃に設定した。循環水温は、上流で調温水槽内の恒温水温に近いが、流下にしながら徐々に外気温の影響を受ける。年間を通じて恒温水温を維持するためには、試験体側面と上・下面の交換熱量を供給する必要がある。試験体内部を全て17℃一定の恒温状態と想定し、式(3a)、(3b)により外気との交換熱量を算定した結果を、表-7に示す。循環水量は、循環中の水温変動を季節に係わらず±0.5℃以内に抑制するため、300ℓ/minを選定した。温度調整は調温水槽内で行い、図-5に示すようにポンプにより試験体の頂版上面および底板下面中央に送水した。

$$Q_w = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot T \cdot H}{\ln(r_2/r_1)} \quad (3a)$$

$$Q_s = \frac{2 \cdot \lambda \cdot T \cdot A}{t} \quad (3b)$$

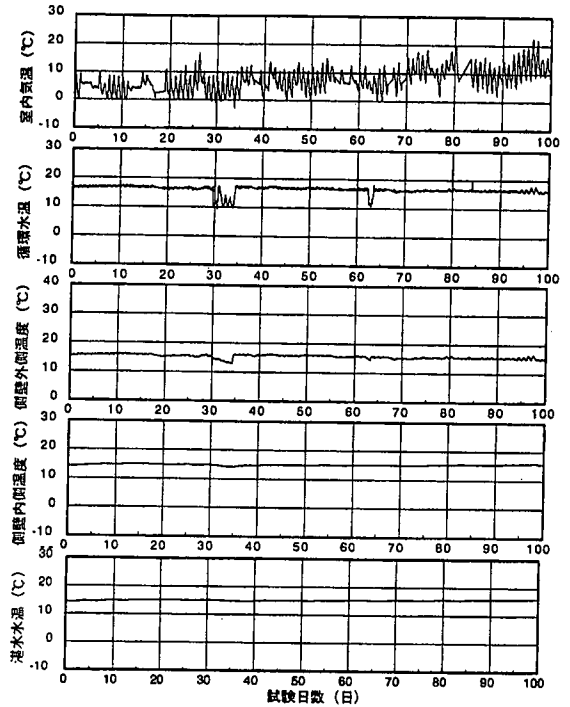
ここで、

- Q_w, Q_s: 側面および上下面への交換熱量(W)
- λ, t: 保温材の熱伝導率(W/m℃), 厚さ(m)
- r₁, H: 試験体外形の半径(m), 高さ(m)
- T: 水温と気温の温度差(℃)であり、最高気温を35℃, 最低気温を0℃に想定
- r₂: 保温材の外半径 (r₁ + t)(m)
- A: 試験体の底面積 (π r₁²)(m²)

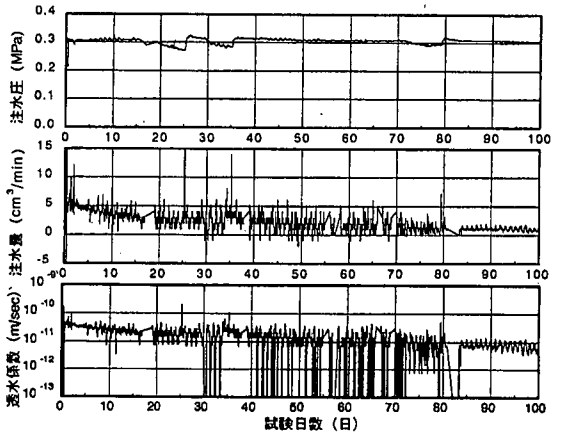
(3) 長期透水試験

a) 試験温度の経時変化

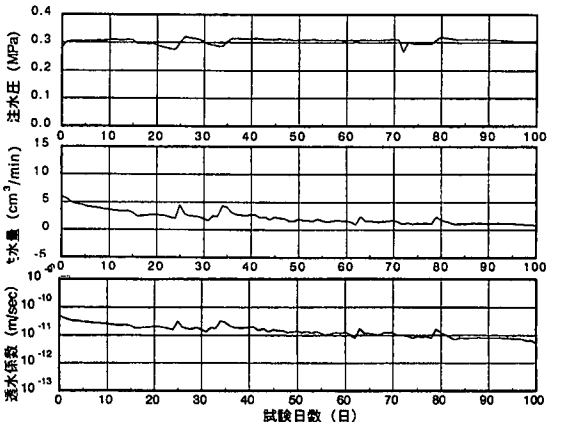
長期透水試験中の恒温湿潤養生による室内気温、循



(a) 温度変化量



(b) 時間変化量



(c) 日変化量

図-13 長期透水試験の経時変化

環水温、試験体側壁温度および湛水温の100日間の経時変化を、図-13(a)に示す。調温水槽の水溫制御幅は±0.5℃程度生じたが、加熱・冷却設備の制御時間の遅れおよび調温水槽の小容量(3.0m³)を考慮すると、制御幅はこの恒温装置による溫度制御の限界と思われる。

17℃の恒温温潤養生を継続することにより、試験体側壁の外側温度は4日間で15.5℃に上昇するのに対し、内側は遅れて温度上昇するが、日変動は±0.05℃程度に緩和された。また、試験体の外側および内側温度は、頂版・側壁・底板でほとんど差がないことから、試験体全体の恒温化が裏付けられた。さらに、17℃の恒温温潤養生を1か月間継続することにより、養生前に14℃程度であった試験体内の湛水温度は、1℃温度上昇し15℃程度となった。温度上昇が遅れる理由は、試験体および内部湛水(容量40.6m³)の熱容量が大きいためと推定される。

b) 注水圧および注水量の経時変化

注水圧および注水量の経時変化を図-13(b)に示す。同図に示すように、比較的注水圧が安定した試験日数2~14日のうち、外気温が安定した6~8日には注水量も安定したのに対し、外気温の日較差が大きい0~5日には、注水圧が±0.01MPa程度変動した。この原因は、注水槽の温度変動によることと考え、17日目から頂版上に送る恒温水の一部を注水槽に散水した結果、注水圧の日変動は低減した。

また、整圧弁を用い注水圧を0.3MPaに保持するように制御したが、計測中に幾度か注水圧が低下し、手動によりほぼ0.3MPaに調整した。この原因は、窒素ガスによる一定背圧と注水槽内の静水圧からなる注水圧が、注水に伴う注水槽内の水位低下に応じて減少すると考え、36日目から注水槽を4本並列配置し、注水槽内の水位低下量を小さくした。注水量の時間変化量を1時間の注水量/60分で整理し、同図に示す。

前項で述べたように、注水圧の日変化を低減させた試験日数17日目以降においても、時間注水量の経時変化には外気温の影響が残った。

さらに、40日目以降には注水量が負の値も測定された。この原因は漸減する透水量に対し、試験温度の変動による試験体内空積の時間変動量が、上回ったと考えられる。そこで、気温の日較差の影響を除去できるように、注水量の日変化量を1日間の注水量/(24×60分)で整理し、図-13(c)に示す。このデータ処理によっても、日々異なる温度変動によりスムーズな注水量は得られないが、注水量は試験日数とともに漸減することが、明確になった。したがって、試験日数が50日目を過ぎ、試験体と湛水温度がほぼ平衡に達した時点で、試験温度および注水圧力一定の加圧注水法に

よる透水試験の前提条件が、ほぼ満足されたと推定される。

c) 透水係数の評価

ひび割れ制御試験体全体の平均的な透水係数は、同図に示すように、透水試験の継続とともに漸減する。その結果、長期透水試験の開始から70日目を過ぎ透水系数は 1.0×10^{-11} m/sとなり、頂版のひび割れ発生前に実施した初期透水試験での透水系数を下回った。この理由として考えられるのは、止水欠陥部の未水和セメントの反応進行による透水経路の目詰まり、浸潤面の進行に伴う圧力勾配の減少等が挙げられるが、特定できていない。また、長期透水試験中は、恒温温潤養生のため試験体全体に断熱材を覆っており、試験体表面や内部の状況を確認していない。

7. 加圧注水法の妥当性検討

加圧注水法では、試験体内空の湛水部に送水する水量を透水量としている。この仮定が成立するには、以下の試験条件が成り立たなければならない。

- ① 試験体の内空積の変動が少なく、湛水部に送水した水量が試験体への注水量と見なせること。
- ② コンクリートの未飽和域への注水が比較的少なく、試験体への注水量が浸出透水量と見なせること。

そこで、これらの試験条件がほぼ成立し、透水試験により得られる試験体の平均的な透水係数が、有効な測定精度を有するかを検証する。

(1) 外気温変動に伴う内空積変動の影響

図-13に示す加圧注水法によるひび割れ制御試験体の長期透水試験のうち、安定した90日以降の測定結果でも図-14に示すように、注水圧および注水量は日周期で変動しており、外気温変動に伴い、試験体内の内圧および内空積は変動すると考えられる。そこで、試験体および注水槽の外面に生じる日温度変動を周期的な三角関数形と仮定し、試験体内の湛水および注水槽内の加圧ガスの内空積、体積および圧力変動を検討することにした。試験体外面の日温度変動は、図-13(a)に示す恒温水温の測定結果に、室内雰囲気からの熱伝導の影響を考慮して±1.5℃とする。注水槽内の加圧ガスの平均的な温度変動 ΔT_G 、体積変動 ΔV_G および圧力変動 ΔP_G には、ボイル・シャルルの法則により、式(4a)が成立する。

$$\frac{P_G \cdot V_G}{273 + T_G} = \frac{(P_G + \Delta P_G) \cdot (V_G + \Delta V_G)}{273 + T_G + \Delta T_G} \quad (4a)$$

ここで、

P_G 、 ΔP_G : 注水槽内の加圧ガス圧力と変動量(MPa)

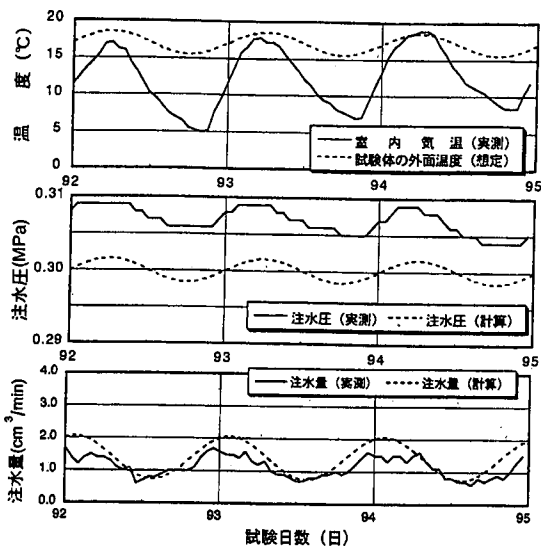


図-14 温度変動による注水圧および注水量変動

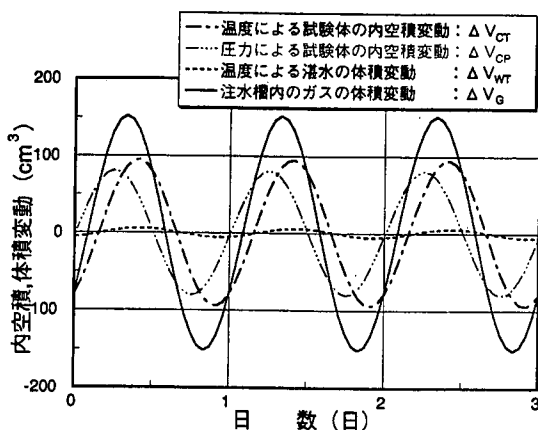


図-15 外面温度変動による内空積および体積変動

$V_G, \Delta V_G$: 注水槽内の加圧ガス体積と変動量 (cm^3)

$T_G, \Delta T_G$: 注水槽内の加圧ガス温度と変動量 ($^{\circ}\text{C}$)

加圧ガスおよび湛水の体積変動は、試験体の温度および圧力変動による内空積変動と等しいことから、式(4b)が成り立つ。なお、水は非圧縮性とし、温度変動による体積変動のみを考慮した。

$$\Delta V_{WT} + \Delta V_G = \Delta V_{CP} + \Delta V_{CT} \quad (4b)$$

$$\Delta V_G = \Delta V_{CP} + \Delta V_{CT} - \Delta V_{WT} \quad (4c)$$

ここで、

ΔV_{WT} : 温度変動による湛水の体積変動量 (cm^3)

ΔV_{CP} : 圧力変動による試験体の内空積変動 (cm^3)

ΔV_{CT} : 温度変動による試験体の内空積変動 (cm^3)

したがって、式(4c)を式(4a)に代入すると、式(4d)となる。

$$\frac{P_G \cdot V_G}{273 + T_G} = \frac{(P_G + \Delta P_G) \cdot (V_G + \Delta V_{CP} + \Delta V_{CT} - \Delta V_{WT})}{273 + T_G + \Delta T_G} \quad (4d)$$

試験体に作用する圧力変動は、注水槽内の加圧ガスの圧力変動と等しいことから、圧力変動 ΔP_G (MPa) による試験体の弾性変形解析により、 ΔV_{CP} は $50,550 \times \Delta P_G \text{ cm}^3$ となる。 ΔT_G は非定常温度解析により、 ΔV_{WT} は非定常温度解析から得られる湛水の平均温度変動 ΔT_{WT} に湛水量と水の体積膨張率を乗じることに、 ΔV_{CT} は非定常温度を用いた応力解析により、それぞれ周期を1日とする三角関数が得られる。これらを式(4d)に代入すると、圧力変動 ΔP_G の2次式となり、バランスする ΔP_G が三角関数で定まる。

図-15に示す変動量の計算結果から、試験体外面の日温度変動が $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 生じると、試験体の内空積変動は $\pm 95 \text{ cm}^3$ 生じるのに対し、湛水の体積変動は $\pm 5.8 \text{ cm}^3$ と少ない。また注水槽内の加圧ガスの温度変動は $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$ 生じ、圧力変動およびこれによる試験体の内空積変動は、それぞれ $\pm 0.0016 \text{ MPa}$ 、 $\pm 81 \text{ cm}^3$ と大きい。

図-14に破線で示したように、試験体外面の日温度変動を三角関数としたモデル化の違いおよび並列に配置した4本の注水槽内の上下逆方向の水位変動に対する水位フロートの追従性を考慮すると、測定した注水圧および注水量の変動は、位相のずれおよび変動幅をおおむね再現していると考えられる。

したがって、ボイル・シャルルの法則を導入することにより、外気温による変動現象はほぼ表現できたと考えられる。

これらの計算結果を式(4b)に代入すると、注水槽内の加圧ガスの体積変動として $\pm 152 \text{ cm}^3$ が求まる。加圧ガスの体積変動は注水槽内の水量の変動を表しており、その変化率が注水量の変動 ΔQ であることから、計算すると $\pm 0.66 \text{ cm}^3/\text{min}$ が求まる。したがって、試験体全体の平均透水係数を $1.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ とすると、注水圧が 0.3 MPa のときの注水量 Q は、式(1)から $1.4 \text{ cm}^3/\text{min}$ となり、測定精度 $\Delta Q/Q$ として47%が得られ、図-13(b)の注水量の変動を比較的良好に説明できる。

以上のことから、試験体の内空に加圧注水する量を透水量とみなす加圧注水法が成立するには、内空積変動を抑制する以下の2条件を抑制することが必要といえる。

① 注水圧が変動すると、試験体の変形により内空積が変動するため、注水圧を一定とする。

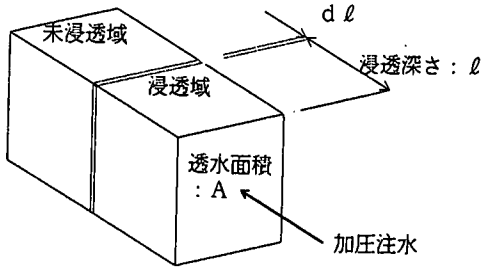


図-16 加圧注水によるコンクリートへの浸透概念

② 温度が変動すると、試験体の熱変形による内空積変動とともに、内空部の湛水および注水槽内の加圧ガスが体積変動するため、試験温度を一定とする。

以上検討した外気温変動により測定水量が変動する現象は、通常の透水試験においても起こり得る現象である。特に、低透水性の大型試験体では顕著になると考えられるが、小型試験体でも透水量が少ないため、温度と圧力による試験体の内空積変動のピークが接近すると想定され、透水試験共通の検討を要する問題と考えられる。

(2) コンクリート一般部への初期注水量の影響

構造物試験体内部の加圧された湛水は、コンクリートの止水欠陥部と一般部に注入される。そのうち止水欠陥部へ注入される水は容易に通水するが、一般部へ注入される水はすぐに通水しないため、浸透域での動水勾配が大きくなり、定常浸透と比較して注水量が多くなる可能性がある。そこで、試験体全体の平均的な透水性を注水量で評価する加圧注水法の妥当性を確認するため、コンクリートの一般部への初期注水量が、止水欠陥部への量と比較して少ないことを検証することにした。

コンクリート供試体では、浸透方法⁹⁾により注水した水量および加圧注水後に割裂して浸透深さを測定すれば、式(5a)により、コンクリートの透水係数が算定できる。

$$k = \frac{Q \cdot \ell}{A \cdot H} \quad (5a)$$

ここで、 k : コンクリートの透水係数 (m/s)
 Q : 単位時間当たりの注水量 (m³/s)
 ℓ : 平均浸透深さ (m)
 A : 透水面積 (m²) で一定
 H : 注水側の圧力水頭 (m) で一定

ところが、大型の鉄筋コンクリート構造物では、加圧注水後に割裂して浸透深さを測定できない。そこで、浸透深さに代わる境界条件を設定するために、図-16

に示す浸透面のコンクリートの空隙率を導入して、注水量と浸透深さの変化量の関係を表すと、式(5b)が成立する。

$$Q \cdot dt = d\ell \cdot A \cdot v \quad (5b)$$

ここで、 dt : 単位加圧時間 (s)

$d\ell$: 単位時間当たりの浸透深さ (m)

v : コンクリートの空隙率 (水の貯留率)

式(5b)を式(5a)に代入し Q を消去すると式(5c)となり、 ℓ は t の関数となる。

$$\frac{d\ell}{dt} = \frac{k \cdot H}{v \cdot \ell} \quad (5c)$$

この一般解の $\ell^2 = 2 \times k \times H \times t / v + \text{const.}$ に、 $t = 0$ のとき $\ell = 0$ の初期条件を適用すると、式(5d)となり、浸透深さと加圧時間の関係が得られる。

$$\ell^2 = \frac{2 \cdot k \cdot H \cdot t}{v} \quad (5d)$$

ひび割れ誘発試験体の初期透水試験において、0.4MPa加圧時にコンクリート一般部に注水された量を、 k は浸透深さ方法により得られた β^2 から算定する値を、 v は105℃乾燥により得られた空隙率14.4%を用いて試算する。最初に、試験加圧から初期透水試験の0.4MPaまでに浸透した深さを算出し、これを式(5a)に代入してコンクリート一般部への注水量を算出する。なお、式(5e)は平行浸透流を想定しているが、 ℓ が微小であることから、式(5f)の A を試験体の内表面積とすることにより、試験体への注水量を算定した。

$$\ell = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot H \cdot t}{v}} = 6.1 \times 10^{-3} \text{ (m)} \quad (5e)$$

$$Q = \frac{A \cdot H \cdot k}{\ell} = 5.7 \times 10^{-8} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (5f)$$

ひび割れ誘発試験体において、0.4MPa加圧時の一般部への注水量は 5.7×10^{-8} m³/sと試算され、初期透水試験において得られた止水欠陥を含む試験体全体への注水量 1.3×10^{-6} m³/sに占める割合は4.5%程度であり、注水量全体に与える影響は少ない。一方、ひび割れ制御試験体の全体注水量は1オーダー小さくなるが、

表-5に示したように、コンクリートの透水係数はおよそ2オーダー小さいことから、影響はさらに少ないと推定される。また、一般的な大型の鉄筋コンクリート構造物には少なくとも打継目が存在することから、コンクリート一般部に注水される量が透水性を過大にすることはないと見える。

したがって、外面温度の日変動を±1.5℃に抑制したひび割れ制御試験体の長期透水試験において、1時間当たりの注水量の測定精度は、(1)、(2)項を合わせておよそ±50%となる。この測定精度は、透水係数が 10^{-11} m/sオーダーのコンクリート構造物を対象とする透水試験では、決して大きくはないが³⁾、本試験では外気温変動の少ない1日間の注水量に基づいて、透水量を算定することにより、さらに安定した透水量を得た。

以上のことから、加圧注水法の試験条件を満足すれば、鉄筋コンクリート構造物全体の平均的な透水係数を、加圧注水法により十分な精度で評価できると見える。

8. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の透水性を実験的に評価するために、構造物内空部の湛水への注水圧と注水量を測定し、構造物全体の平均的な透水係数を評価する加圧注水型透水試験方法(以下、加圧注水法と略称する)を提案した。この加圧注水法を、温度ひび割れを制御および誘発した外径が7.25m、壁厚が1.25m、高さが5.25mの中空円筒形の鉄筋コンクリート構造物に適用し、その透水性状を実験的に検討した。

以下、その結果をまとめる。

(1)中空円筒形の鉄筋コンクリート構造物を対象とする透水試験方法として、内空部湛水に低圧の一定注水加圧を行い、その注水圧と注水量から、構造物全体の平均透水係数を評価する加圧注水法を提案した。

(2)大型構造物の透水試験に対し提案した加圧注水法の妥当性を検証した結果、一定加圧・一定温度条件で長期間の透水試験を行うことにより、少なくとも透水係数が 10^{-11} m/s以上のコンクリート構造物に対し加圧注水法は、適用可能であることを確認した。

(3)低透水性材料を対象とする透水試験において、試験体および加圧注水装置の日温度変動により加圧側湛水の体積および圧力が変動し、測定水位に周期的な変動を与えることから、日温度変動は、注水量あるいは透水量の測定精度に影響することがわかった。

(4)温度ひび割れが9本発生したひび割れ誘発試験体は作製後に室内放置し、5ヶ月目に試験圧力を段階的に変圧する透水試験を実施した。加圧注水法により求めた平均透水係数は、試験圧力に応じ指数的に増加し、

試験圧力が0.4MPaのとき 4.3×10^{-10} m/sを得た。

(5)温度ひび割れが3本発生したひび割れ制御試験体は作製後に保温湿潤養生し、5ヶ月目に試験圧力を段階的に変圧する透水試験を実施した。加圧注水法により求めた平均透水係数は、試験履歴の影響を受け経時的に減少し、試験圧力が0.4MPaのとき 4.5×10^{-11} m/sとひび割れ誘発試験体と比較して透水係数は1オーダー小さくなり、透水の抑制効果が確かめられた。

(6)初期透水試験後に、頂版に発生したひび割れを補修したひび割れ制御試験体は、断熱湿潤養生を行いながら試験圧力が0.3MPa一定の長期透水試験を継続し、加圧注水法により求めた試験体の平均透水係数は 1×10^{-11} m/sまで経時的に漸減した。

謝辞:この研究をまとめるにあたり、(財)原子力環境整備センターに設けられたコンクリート構築物検討委員会の委員の方々から、貴重なご助言を頂き深く感謝いたします。

参考文献

- 1)小西一寛、伊藤洋、藤原愛、辻幸和：中空円筒構造物の温度ひび割れの制御、コンクリート工学年次論文報告集、日本コンクリート工学協会、pp.1405~1410、1997.6.
- 2)坂口雄彦、伊藤洋、西岡吉弘、藤原愛、辻幸和：微粒子セメント懸濁液グラウトによる中空円筒コンクリート構造物の止水欠陥補修、土木学会論文報告集、No.574/VI-36、pp.85~95、1997.9.
- 3)村田二郎：コンクリートの透水試験方法の一提案、セメントコンクリート、NO.166、pp.19~24、1960.12.
- 4)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.
- 5)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.
- 6)Ruettggers, 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.
- 7)吉越盛次：コンクリートの水密性試験に関する一提案、電研月報、第3巻第1号、pp.51~53、1950.
- 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)Tyler, I. L. and Erlin, B.: Jour. Portland Cement Association Research and Development Laboratories, pp. 2~7, Sept. 1961.
- 10)地下水入門編集委員会編、入門シリーズ8 地下水入門、地盤工学会、pp.103~115、1983.11.

(1998.5.26受付)

EXPERIMENTAL STUDY FOR THE METHOD OF PRESSURE INPUT TYPE
PERMEABILITY TEST OF CYLINDRICAL REINFORCED CONCRETE SILO

Kazuhiro KONISHI , Yukikazu TSUJI , Yo ITO and Ai FUJIWARA

This experimental study has been projected on the method of the pressure input type permeability test for the reinforced concrete silo. The method of this permeability test at the reinforced concrete silo being cutoff defects was verified as a proper test method on condition that the test temperature and pressure was fixed. In this study, the results of average coefficient of permeability at this reinforced concrete silo being the controlling and causing cracks has been confirmed of 10^{-10} m/s and 10^{-11} m/s.