

[15] コンクリートおよびコンクリート部材の気密性に関する基礎的研究

正会員 ○ 神山行男 岡田克也 中島 徹 (竹中工務店)

1. まえがき

近年、コンクリートは技術的な進歩とあいまってその用途も広がり、原子炉格納容器など機能上気密性を要求される特殊構造物にも積極的に取り入れられる方向にある。しかし、この種の構造物にコンクリートを用いるためには、単にコンクリート躯体自身の透気性だけでなく、打継目やひび割れ等の施工性に起因する透気性についても適格に把握しておく必要があるが、コンクリートの施工的な要因の透気性についてこれを定量的に論じた既往の研究は少ない。本研究は気密性を要求されるコンクリート構造物の実用化に際しての基礎資料を得る目的で、まず、 $60 \times 60 \times 10 \sim 30 \text{ cm}$  コンクリート板透気試験装置の試作を行い、この試作した透気試験装置を用いて、コンクリート構造物の気密性に関与する各種要因を設けたコンクリート板試験体の透気試験を行って、主として、施工的な要因がコンクリート構造物の気密性に及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験概要

表-1 コンクリートの配合

ト木 比比 (%) シ	骨 材 (%)	単 位 量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	水	セ メ ン ト	細 骨 材	粗 骨 材	AE 剤 ( $\text{cc}$ )	モ ル チ ン ( $\text{cc}$ )	空 気 量 ( $\text{cc}$ )	圧縮強度(%) 気乾養生 柱令約6ヶ月
61.5	42	165	268	783	1094	80	16.2	4.3	197	214
									202	
									243	

2.1 使用材料および配合

セメントは日本セメント社製中庸熟ポルトランドセメント、粗骨材は最大寸法  $25 \text{ mm}$  の鬼怒川産砂利(比重2.65)、細骨材には木更津産山砂(比重2.2, FM2.65)を使用した。なお、本実験に使用したコ

表-2 試験体の種類

番 号	板厚 ( $\text{cm}$ )	部材 (打継目)	貫通孔	フラフ ( $\text{mm}$ )
1	10	版	—	—
2	—	壁	—	—
3	—	版	—	—
4	—	壁	有	—
5	20	版	有	—
6	—	壁	—	有
7	—	—	—	有
8	—	版	—	0.2
9	30	—	—	—

2.2 試験体の製作

今回の実験における試験体の種類は表-2に示すようにコンクリートの気密性に関して支配的な要因と考えられる5種類の要因を組合せ9種類とし、試験体の本数は1種類当り3体、計27体とした。

試験体の製作にあたっては、まずメタルフォームを用いて  $60 \times 60 \times 10 \sim 30 \text{ cm}$  の型わくを組立て、パイプ貫通孔を設ける試験体は図-1に示すように中央に  $15 \times 20 \text{ cm}$  のパイプをボルトで固定し、打継目を設ける試験体およびひび割れを設ける試験体は図-2および図-3に示すように  $\phi 9 \text{ mm}$  のスターラップを番線で固定した後、コンクリートを2層に分けて打込み、入念に締め固めた。

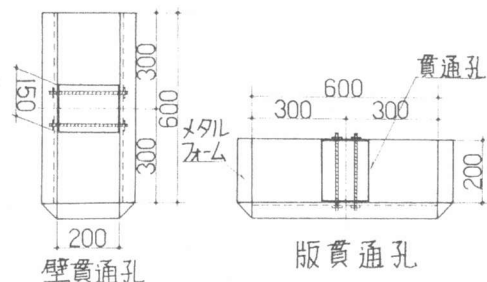


図-1 貫通孔試験体

2.3 試験体の気密処理

試験体は、7日間湿布養生を行ったのち脱型し、7日間屋内に放置して乾燥した後、透気試験該当表面以外の部分、すなわち健全な部材においては4側面ならびに上下端面部幅  $5 \text{ cm}$ 、パイプ貫通孔を設けた試験体においては埋込みパイプの外周から幅  $1 \text{ cm}$  を除いた部分、打継目を設けた試験体およびひび割れを設けた試験体は打継目およびひび割れを挟んだ幅  $1 \text{ cm}$  を除いた部分から空気が漏洩することを防止するため、下記の手順で気密処理を行った。

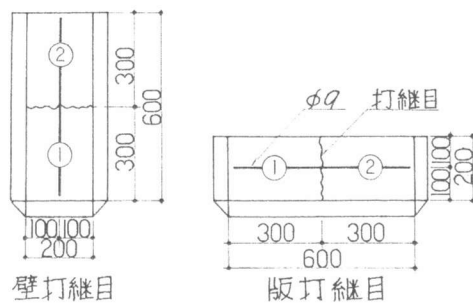


図-2 打継目試験体

- ① 気密処理を行うコンクリート面にサンダーをかけ、金ペラを用いてコンクリート表面の気泡を石膏ペーストで目つぶしする。
- ② サンドペーパー表面を平滑にした後、シンナーで油、ごみなどをとる。
- ③ ショーボンド化学社製工ポキシ樹脂をシンナーで50%に希釈したものを約24時間間隔で3回塗布する。

④ ショーボンド化学社製工ポキシ樹脂を約24時間間隔で3回塗布する。

なお、ひび割れを設ける試験体のみは材令7日で図-3に示すように割製方法によりひび割れを入れた後、透気試験該当部分(長さ50cm)以外のひび割れにショーボンド化学社製ライナー・パテを金ペラを用いて入念に填充したのちに上記の気密処理を行った。

#### 2.4 透気試験装置

本実験に使用した透気試験装置は図-4に示すように、上部に70×70×3.5cmの鋼板、下部に70×70×3cmの鋼板を配し、試験体との取合部には幅5cm、厚さ1cmのゴム板を上下にはりつけた厚さ3cmのパッキングを上下に挟み24本のボルトで締めつける構造になった気密槽に空気圧縮機、二次空気タンクおよび空気置換装置を付属させ、各装置をビニールパイプで連絡させたものである。

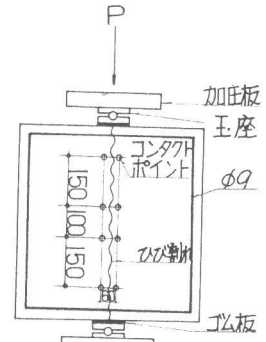


図-3 ひび割れ試験体の作製

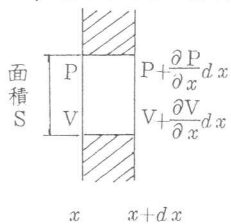
すなわち、空気圧縮機には常時8~10倍の圧縮空気が自動圧力調節計に保たれ、A、Bバルブを通じて二次空気タンクに入り、調節計によりゲージ圧1kg/cm<sup>2</sup>(これ以上の圧力は逃失させる)に落される。これにより連続長時間の試験が一定圧力のもとで行われうる。二次タンクの調節された圧縮空気は分配バルブCにより各気圧槽に入り、試験体の上面から下面へ通過してきた空気は透気量測定装置に導かれ、水と置換される。

#### 2.5 測定方法

約3ヶ月間屋内放置した試験体を下部鋼板にパッキングを介して乗せ、さらに上にパッキングを介して上部鋼板を乗せ、外周のボルトを締め付け気密とした後、分配バルブCを開け加圧した。試験は1kg/cm<sup>2</sup>の圧力で透気量が一定となるまで継続測定し、透気係数は試験体3個の平均値より求めた。

#### 2.6 透気係数の算定

コンクリート中での気体の透過が近似的にはダルシーの法則( $v = -k \cdot \frac{\partial P}{\partial x}$ )に従うものとし、温度が一定であれば、気体の状態方程式  $PV = nR \cdot T$  から気体の圧力P、体積Vとの積が質量に相当すると考えることができるため、この圧力Pと体積Vとの積PVが保存されるものとするれば次式が誘導される。

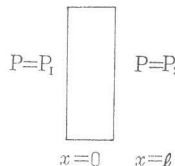


$$P \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 = K \frac{\partial P}{\partial t} \quad \text{--- (1)}$$

$$(K = \frac{e}{k} \text{ ここに、 } k \text{ ; 透気係数、 } e \text{ ; 空隙率})$$

さらに、(1)式を定常状態について解き、透気試験で  $x = l$ 、 $P = P_2$  での流出量  $Q (l)$  を測定すれば、透気係数は次式で算定される。

$$k = \frac{2 \ell P_2}{S(P_1^2 - P_2^2)} \cdot Q \quad \text{--- (2)}$$



ここに、 $k$  ; 透気係数 (cm/sec)、 $S$  ; 加圧面積 (cm<sup>2</sup>)、 $Q$  ; 透気量 (l/sec)

$P_1$  ; 試験体上面の圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)、 $P_2$  ; 試験体下面の圧力 (kg/cm<sup>2</sup>)、 $\ell$  ; 板厚 (cm)

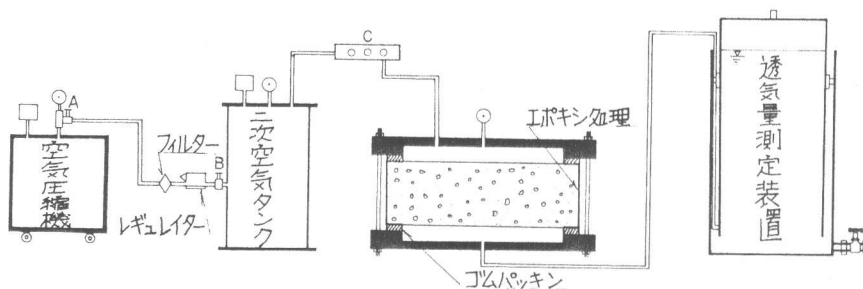


図-4 コンクリート板透気試験装置

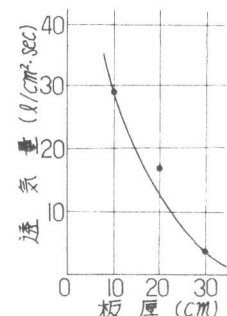


図-6 板厚が透気量に及ぼす影響

### 3. 試験結果および考察

透気試験の結果は表-3および図-5に示すようであって、今回の実験から得られた結果を要約すると以下のようである。

#### 3.1 コンクリートの板厚が及ぼす影響

試験体の板厚を10cm、20cmおよび30cmの種類として行った透気試験の結果を図-6に示す。図-6において、透気量は板厚10cmのものに比べて板厚20cmのものは約1/2、板厚20cmのものに比べて板厚30cmのものは約1/4となり、板厚が増加するに従って透気量は著しく減少した。

しかし、(2)式を用いて算出した透気係数においては板厚10cmおよび20cmのもので約 $4 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 、板厚30cmのもので約 $2 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ となり、板厚による透気係数の差は極めて小さかった。したがって、コンクリート板の気密性を評価する場合、板厚が相違しても一定の透気係数(たとえば、本実験に使用した配合においては $3 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 程度)を使用してさしつかえないと思われる。

#### 3.2 コンクリートの打設方向が及ぼす影響

コンクリート内部にはグリーシングによって生じた毛細管が硬化後も打設方向に沿って存在するため、コンクリートの打設方向と透気する方向が一致する場合には気密性は低下するといわれている。

そこで、板厚を20cmとし、打設方向と透気する方向が一致する場合(版を想定)と打設方向が直角な場合(壁を想定)について透気試験を行って見た。試験結果は表-3および図-5に示すようであって、今回の実験においても打設方向と透気する方向が一致する場合には直角方向の場合と比較してその透気係数は約20%大となった。

#### 3.3 打継目が及ぼす影響

漏水、漏気の原因となりやすい打継目の気密性について検討するため図-2に示す方法で水平ならびに鉛直打継目を設けた試験体を製作して透気試験を行った。

試験は加圧方法、測定方法いずれも打継目のない試験体と同様とし、下面に透過してくる流量を測定して、単位時間一流出量曲線を描き、定常状態と見做される区間における平均流出量を求め、透過が打継目に集中していることから、次式を用いて打継目1cm当りの透気量を算出した。

$$q = Q / \ell$$

ここに、 $q$  ; 打継目長さ1cm当りの透気量(cc/sec・cm)、 $Q$  ; 平均流出量(cc/sec)

$\ell$  ; 打継目の長さ(cm)

また、さらに打継目の水密性を打継目のない躯体コンクリートとおよそ比較して論ずるため、打継目を挟んで幅1cmの層を均等に空気が透過するものと仮定して、次式により換算透気係数を算出した。

$$k' = \frac{2 \ell \cdot P_1}{S(P_1^2 - P_2^2)} \cdot q$$

ここに、 $k'$  ; 換算透気係数(cm/sec)、 $q$  ; 打継目長さ1cm当りの透気量(cc/sec/cm)

試験結果は表-3および図-5に示すようであって、打継目1cm当りの透気量は水平打継目を設けた試験体は平均約0.05 l/hourであったのに対して、鉛直打継目を設けた試験体は平均約0.09 l/hourと約1.7倍の値を

表-3 透気試験結果

番号	板厚 (cm)	打部 型材	打 継	貫 通 孔	ク ラ フ ク (mm)	透気量 Q			透気係数 (cm/sec)
						試験体1体当り (cc/sec)	1㎡当り (l/m²・hour)	厚1cm当り (l/cm・hour)	
1	10	版	—	—	—	1.60	23.0	—	$4.26 \times 10^{-6}$
2	20	版	—	—	—	0.84	12.1	—	$4.48 \times 10^{-6}$
3		壁	—	—	—	0.69	10.1	—	$3.70 \times 10^{-6}$
4		版	有	—	—	1.25	—	0.09	$3.33 \times 10^{-6}$
5		壁	有	—	—	0.73	—	0.05	$1.95 \times 10^{-6}$
6		版	—	有	—	12.30	—	0.89	—
7		壁	—	有	—	1.58	—	0.11	—
8		30	版	—	—	0.2	21.30	—	1.53
9	壁		—	—	—	0.20	2.81	—	$1.56 \times 10^{-6}$

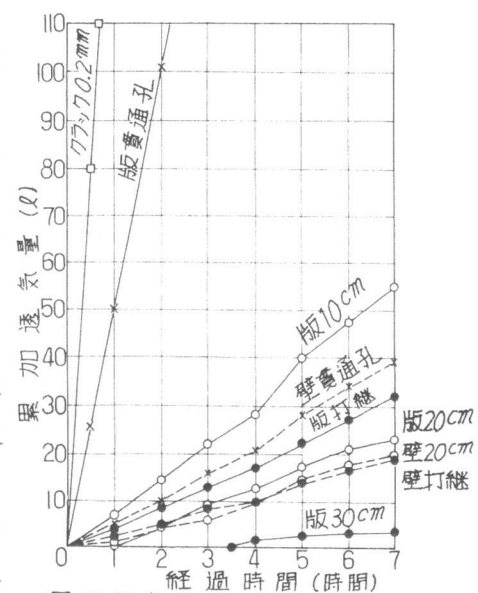


図-5 透気量の測定結果

示した。

また、打継目を設けた試験体の換算透気係数を打継目のない試験体の透気係数と比較してみると、水平打継目を設けた試験体は打継目のない壁を想定した試験体の約50倍、鉛直打継目を設けた試験体は打継目のない版を想定した試験体の約75倍となり、いずれも打継目のない試験体の透気係数に比べて著しく大となった。

### 3.4 貫通孔がコンクリートの気密性に及ぼす影響

通常構造物に必ず存在する貫通孔まわりの気密性について検討するため、図-1に示すように $60 \times 60 \times 20 \text{ cm}$ の板に $\phi 15 \times 20 \text{ cm}$ のパイプを埋込んで透気試験を行った結果を表-3および図-5に示す。

なお、透気量の算出に当っては、打継目の試験と同様に透過が貫通孔まわりに集中していることから、次式を用いて貫通孔の外周 $1 \text{ cm}$ 当りの透気量を算出した。

$$q = Q / \ell$$

ここに、 $q$  ; 貫通孔の外周 $1 \text{ cm}$ 当りの透気量 ( $\text{cc/sec} \cdot \text{cm}$ )、 $\ell$  ; 貫通孔外周の長さ ( $\text{cm}$ )

貫通孔の外周 $1 \text{ cm}$ 当りの透気量は水平に配管した試験体で $0.12 \text{ \%hour}$ 、鉛直に配管した試験体で $0.89 \text{ \%hour}$ となり、打継目と同様に水平方向に比べて鉛直方向の場合には約8倍大きな透気量を示した。

これを打継目 $1 \text{ cm}$ 当りの透気量と比較してみると、水平方向の場合で約2倍、鉛直方向の場合で約10倍といずれも大きな値を示し、貫通孔、特に鉛直方向の貫通孔の存在が構造物の気密性にとって大きな弱点となることが示された。

### 3.5 コンクリートのひび割れが気密性に及ぼす影響

コンクリートのひび割れが気密性に及ぼす影響を検討するため、まず $60 \times 60 \times 20 \text{ cm}$ の健全な部材を製作し、これを図-3に示すように割裂によってひび割れを設け、ひび割れ幅をあらかじめ4ヶ所に貼付けしておいた鋼球を載荷前後にコンタクトゲージで測定して求めた。測定したひび割れ幅は $0.20 \sim 0.26 \text{ mm}$ 、平均約 $0.23 \text{ mm}$ となり、ほぼ所定のひび割れ幅が得られた。

ひび割れ幅約 $0.23 \text{ mm}$ におけるひび割れ長さ $1 \text{ cm}$ 当りの透気量は $1.53 \text{ \%hour}$ であって、これは他の要因の中で透気量の最も多かった鉛直方向に貫通孔を設けた試験体の貫通孔外周 $1 \text{ cm}$ 当りの透気量 $0.89 \text{ \%hour}$ に比べても約1.7倍大であり、当然予想されたことではあるが、気密性の高いコンクリート構造物を造るためには、ひび割れの防止が最も大切であることが明らかとなった。

## 4 まとめ

今回の実験結果から、コンクリート構造物の気密性は用いるコンクリートの品質よりも打継目、パイプ貫通孔およびひび割れの存在と密接に関係することが明らかとなった。したがって、コンクリート構造物の気密性を検討する場合にはコンクリート自体からの透気量ばかりでなく、構造形式や施工の良否等を考慮して行う必要がある。なお、今回得られた評価はいずれも実験室においてアラシックなコンクリートを入念に打込み、締め固めて製作した試験体の透気試験結果に基づくものであり、実構造物を対象とした場合には現場における打込み、締め固めなどの影響も同時に受けることになるので、今後、さらに現場の施工状態の良し悪しを含めた形で検討を進める予定である。

### 参考文献

- (1) 吉井豊藤丸他「コンクリートの透気性に関する研究」  
セメント技術年報 XII (昭和33年)
- (2) 渡辺幸三郎他「コンクリートの透気性」  
セメント技術年報 XII (昭和33年)
- (3) 近藤連一「多孔材料」  
技報堂
- (4) 秋山暉「コンクリート箱型企体の透気性に関する研究」  
セメント技術年報 XXVI (昭和47年)