

論文 各種要因がシリンダーを用いた簡易透気試験に及ぼす影響

三宅 純平*1・山田 悠二*2・渡辺 健*3・橋本 親典*4

要旨：簡易透気試験の流入範囲や設置条件，モルタルおよびコンクリートの各種要因の相違が測定値に与える影響について検討した。流入範囲および試験装置の設置方向の影響については，スタイロフォームに対して測定を実施し，その結果，流入範囲は半径 20mm よりも小さい半球である可能性が示唆され，また試験装置を設置する面によっては測定結果が異なるがその差は小さいと分かった。各種要因の異なるモルタルおよびコンクリートに対して測定を行った結果，W/C45%，55%よりも 65%の方が流入空気容積は大きくなった。また含水率が大きいと流入空気容積は小さくなるため，含水率は小さい方が望ましいことが示唆された。
キーワード：表層透気性，簡易透気試験，シリンダー，流入範囲，含水率，水セメント比，養生条件

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理に対する考え方が，事後保全から予防保全に移行している昨今，近接目視による点検の義務化に代表されるように，初期点検の重要性が改めて認識されている。また，近接目視による点検は，外観の変状を目視確認するだけでなく，それに付随して叩き点検などの簡単な点検を行うことも含まれる。

コンクリート構造物の耐久性を低下させる要因となる劣化因子は，コンクリート表面から侵入する。このため，近接目視や詳細調査の際にかぶりコンクリートの物質移動抵抗性を簡易的に把握できれば，その後の対策を効果的に行ううえで有効なものになると考えられる。かぶりコンクリートの物質移動抵抗性を評価する指標の一つとしては表層透気性があり，その測定にはダブルチャンバーを用いた手法（以下，Torrent 法と称する）が提案されている。ダブルチャンバーに対して本手法は電源装置や真空ポンプが不要となるため，持ち運びに優れ，安価な試験装置とすることを念頭に置いて開発した。

本手法は，ボンドシリンダーを加工したものを試験装置（写真-1）としたものである。これまでに，本手法で得られた測定結果を Torrent 法により得られた透気係数と比較したところ，両者に良好な相関関係があることを確認している¹⁾。

本研究では，簡易透気試験の基礎的性質を把握することを目的として，表-1 に示す項目について検討し，その結果について述べる。

2. 簡易透気試験の概要

2.1 試験方法

本手法はボンドシリンダーの先端をカットしたもの



写真-1 試験装置および測定の様子

表-1 本実験の検討項目

測定対象	検討項目	備考
スタイロフォーム	試験装置の流入範囲	厚さの異なるスタイロフォームを測定した。
	設置条件の影響	鉛直面および水平面に対して測定した。
	測定時間の検討	測定時間を30秒～600秒として測定した。
モルタル，コンクリート	圧縮強度	水セメント比を45～65%に変化させて測定した。
	養生条件の影響	水中養生後に気中養生した場合と気中養生のみの場合で比較した。
スタイロフォーム，モルタル，コンクリート	測定値のばらつき	測定値のばらつきを標準偏差により評価した。

（写真-1）を試験装置（容量40ml）としたシングルチャンバー方式の測定手法である。以下に測定手順を示す。

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)
 *2 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士後期課程 修士(工学) (学生会員)
 *3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 准教授 博士(工学) (正会員)
 *4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 教授 工博 (正会員)

まず、測定箇所の表面の塵や汚れをアセトンにて拭き取った後、測定箇所の周辺にシール材を薄く引き伸ばしながら塗布し、乾燥固化させた。そしてエアコンの室外機用パテを試験装置の先端に装着したものを、測定箇所に密着させた。ピストンを引いてストッパーで固定し、300秒経過した後、ストッパーを外して復圧させ、試験装置の先端からリングまでの距離をノギスにて小数点以下2桁まで読み取った。読み取った測定値に試験装置の断面積(7.065cm²)を乗じたものを試験装置に流入した空気の容積とし、これを見掛けの流入空気容積とした。コンクリート、モルタル及びスタイロフォームの測定は一つの対象物に対して3箇所行い算術平均した。測定の前には透気性の無いガラス板を対象に測定を行い、その時の値を除いたものを真の流入空気容積(以下、流入空気容積と称する)とした。

2.2 簡易透気試験と Torrent 法の相関について¹⁾

(1) 試験体概要

試験体はコンクリートを用いて作製し、寸法は200×200×100mmとした。配合は、水セメント比を50%および55%の2配合とした。養生条件は、気中養生のみと水中養生を1日、7日および28日を行った4水準とした。高周波水分計を用いて含水率を測定した。W/C50%の含水率は6.7~9.6%の範囲であり、W/C55%の含水率は5.8~8.3%の範囲内であった。また、測定は3箇所で行い、3箇所の測定結果を流入空気容積では算術平均をし、透気係数は幾何平均をした。

(2) 測定結果

図-1に簡易透気試験による流入空気容積とTorrent法による測定結果の透気係数の関係を整理した図に示す。相関係数が0.7以上であり、両者には概ね正の相関関係があると考えられる。

3. 実験概要

3.1 本試験装置の流入範囲および測定条件による影響

(1) 測定対象

本検討では測定対象としてスタイロフォームを採用した。既往の研究より、スタイロフォームの透気性はW/C50%の材齢28日まで湿布養生を行ったコンクリートの透気性より小さいことが示されている²⁾。このことからコンクリートにおける試験体作製のばらつきや、含水率などの各種要因が小さいと思われるスタイロフォームを測定対象とすることにより、統一的な条件のもと流入範囲を実験的に把握することを試みた。表-2に本検討で使用したスタイロフォームの諸性状を示す。使用したスタイロフォームは、スタイロフォーム一種(JIS A 9511 A種押出法ポリスチレンフォーム保温版1種b)に準拠するものである。

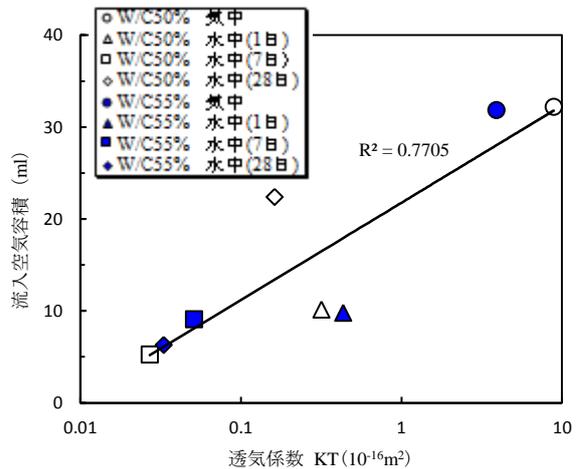


図-1 流入空気容積と透気係数の比較

表-2 スタイロフォームの物性

材料	物性
ポリスチレン	密度: 20(kg/m ³)以上, 透湿係数: 145(ng/m ² sPa)以下, 圧縮強さ: 16(N/cm ²)以上, 吸水量: 0.01(g/100cm ²)以下

表-3 使用材料

材料名: 記号	物性など
普通ポルトランドセメント: C	密度: 3.16g/cm ³ , 比表面積: 3340cm ² /g
阿波市産砕砂: S	表乾密度: 2.57g/cm ³ , FM: 2.63, 吸水率: 1.77%, 実積率: 66.6%
鳴門市産5号砕石: G1	表乾密度: 2.57g/cm ³ , FM: 7.08, 吸水率: 1.62%, 実積率: 57.6%
鳴門市産6号砕石: G2	表乾密度: 2.57g/cm ³ , FM: 6.37, 吸水率: 1.60%, 実積率: 55.4%
AE減水剤: Ad1	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
AE剤: Ad2	アルキルエーテル系

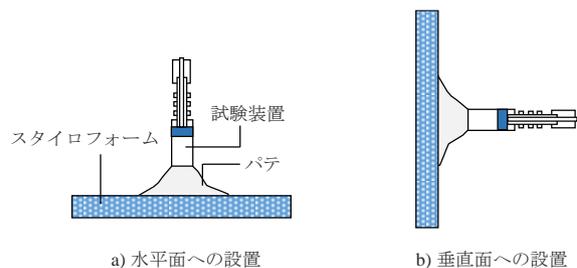


図-2 試験装置の設置条件

(2) 試験の概要

スタイロフォームの縦と横の長さを200mmで一定とし、厚さを20mm, 30mm, 40mm, 50mmの4水準に変化させたものに対して測定を行った。

3.2 設置方向による影響の検討

スタイロフォームに対して、図-2に示すように水平面に試験装置を設置した場合と垂直面に設置した場合で測定を行った。

表-4 モルタルの配合

W/C (%)	s/c	単位量(kg/m ³)			Ad1 (C×%)	モルタルフロー(mm)	Air (%)
		W	C	S			
45	3.0	221	490	1470	0.5	120.0	4.8
55		257	467	1402	0.3	172.5	3.6

表-5 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m ³)					混和剤(C×%)		SL (cm)	Air (%)
			W	C	S	G1	G2	Ad1	Ad2		
45	41	20	175	389	687	395	592	0.8	0.004	15.0	4.8
55	43			318	745			0.7	0.005	12.0	3.6
65	44			269	785			0.3	0.004	10.0	3.0

3.3 水セメント比や養生条件の相違による影響の検討

(1) モルタル・コンクリートの使用材料および配合

表-3 に使用材料，表-4 にモルタルの配合，表-5 にコンクリートの配合を示す。モルタルは，水セメント比が45%および55%の2配合とし，コンクリートは，水セメント比が45%，55%，65%の3配合とした。

(2) 簡易透気試験に供した試験体の概要

測定面の縦と横の長さを200mmで一定のもと，試験体の厚さを200mmと100mmに変化させた2水準とした。測定面は，打設時に側面となる面とした。測定は写真-1 に示すような3箇所で行った。

(3) 養生条件

モルタルは，7日間の水中養生後に所定の期間気中養生した。コンクリートは，モルタルと同様に養生した場合と，気中養生のみを行った場合の2水準とした。

(4) 含水率の測定

簡易透気試験の直前に高周波容量式のモルタル・コンクリート水分計により試験体表面の含水率を測定した。モルタルの測定結果を表-6 に示し，コンクリートの測定結果を表-7 に示す。水中養生後に気中養生を行ったコンクリートに比べてモルタルでは，含水率が高くなる傾向にあり，その含水率は8.0~10.6%となった。これは，モルタルの方がコンクリートよりも単位水量が多いことが影響したと考えられる。コンクリート試験体では，気中養生のみ行ったものでは材齢7日で5.5~6.2%，材齢28日で4.7~5.5%となった。水中養生を7日間行った後に気中養生を行った場合では材齢14日で5.9~10.7%，材齢28日では5.2~6.0%となり，気中養生のみを行った場合に比べて含水率は高くなる傾向にあった。水中養生を7日間行ったコンクリート試験体は，材齢7日では15%を超えるほど含水率が高くなったため，さらに7日間乾燥させ材齢14日で測定を行った。

(5) フレッシュ性状の評価

練上がり後のモルタルに対してフロー試験を JIS R 5201 に準拠して実施し，空気量試験を JIS A 1128 に準拠して実施した。硬化後のモルタルには圧縮強度試験を JIS R 5201 にて実施した。また，練上がり後のコンクリートに対してスランプ試験および空気量試験をそれぞれ JIS A 1101 および JIS A 1128 に準拠して実施した。硬

表-6 モルタルの表面含水率

試料	W/C (%)	試験体厚さ (mm)	表面含水率(%)	
			水中7日	
			材齢28日	
モルタル	45	100	10.2	
		200	8.0	
	55	100	10.6	
		200	8.8	

表-7 コンクリートの表面含水率

試料	W/C (%)	試験体厚さ (mm)	表面含水率(%)			
			気中のみ		水中7日	
			材齢7日	材齢28日	材齢14日	材齢28日
コンクリート	45	100	5.9	5.0	6.2	5.9
		200	6.0	5.0	10.7	6.1
	55	100	6.2	5.5	7.0	5.4
		200	6.2	5.1	8.9	5.4
	65	100	5.9	4.7	6.5	5.2
		200	5.5	5.1	5.9	6.0

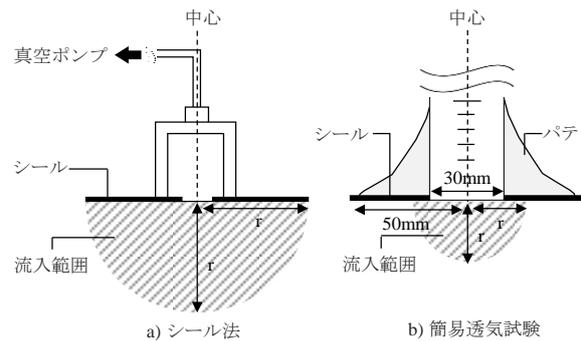


図-3 流入範囲の概念

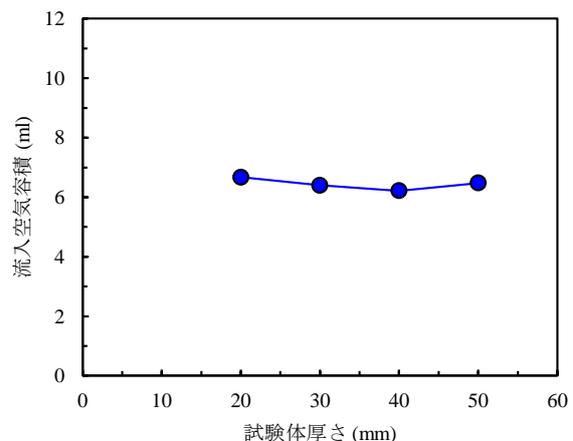


図-4 スタイロフォームの厚さと流入空気容積の関係

化後のコンクリートに対し，圧縮強度試験を JIS A 1108 に準拠して実施した。なお，モルタルおよびコンクリートの目標空気量は4.5±1.5%とした。

4. 実験結果および考察

4.1 試験装置の流入範囲および測定条件による影響

本手法における空気が流入している範囲（以下、流入範囲と称す）を明確にするため検討を行った。氏家らが開発したシール法による透気性試験では、コンクリート表面を円形に気密処理し、その中央から真空ポンプで空気を吸出し、吸い出した流量から透気係数を算出するものである。この場合には、コンクリート内部の透気領域は図に示すように半球体になると考えられる²⁾と示されている（図-3）。また本試験方法は、シール法と同様に空気の流入範囲は半球体であると仮定している。シール法のシール材は気密性を保つために塗布されているが、本手法のシール材はコンクリートとパテの接着性を良好にするために塗布をしている。本手法のパテが気密性を保つ役目をしている。本手法では試験装置の中心からパテ端部までの距離が、50mm以上を良いとしている¹⁾。本実験では、試験装置の中心からパテ端部までの距離50mmを深さ方向の流入範囲と想定したが、図-4より、厚さ20mm以降で流入空気容積は6ml程度と変化せず、厚さによる影響は見られなかった。そのためスタイロフォームを対象とした流入範囲は、半径20mmよりも小さい半球と考えられる。これについては今後も、継続して検討を行いたい。

図-5にスタイロフォームに対し垂直面および水平面に試験装置を設置して測定した結果を示す。垂直面では、測定時間を30秒とした場合よりも150秒以上とした方が流入空気容積が大きくなった。また、150秒~450秒までの流入空気容積は同程度であるが、600秒では大きくなった。詳細は不明であるが、測定時間が長くなることで測定対象と試験装置の付着が低下し、そのため測定対象と試験装置に隙間が生じて、シリンダー内へコンクリート内部以外からの空気が流入し始めた可能性が考えられる。水平面では、150秒以降では流入空気容積が大きくなる傾向にあったが、300~600秒の測定された流入空気容積の差が小さくなった。また、600秒を除き、垂直面よりも水平面の方が流入空気容積が大きくなった。しかし図-5の水平面と垂直面の流入空気容積の差は最大でも3ml以下であり、後述するコンクリートの流入空気容積と比べると小さい差であるため、水平面と垂直面の違いがもたらす影響は相対的に小さいと考えられる。

図-6に測定時間と測定した3箇所における標準偏差の関係を示す。試験装置の設置方向や測定時間による顕著な差はなく、標準偏差は0.2~1.2ml程度となった。

4.2 水セメント比および養生条件による影響

図-7に圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は、モルタル、コンクリートとも水セメント比が小さいものほど大きくなった。またコンクリートでは、同一水セメント

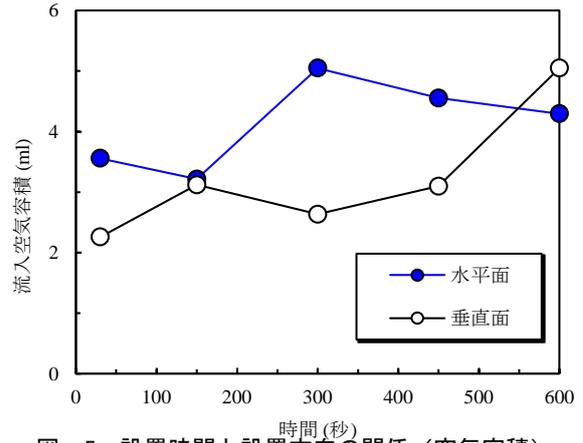


図-5 設置時間と設置方向の関係（空気容積）

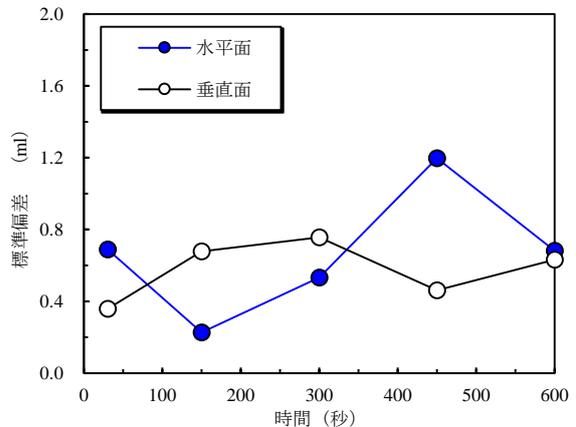


図-6 設置時間と設置方向の関係（標準偏差）

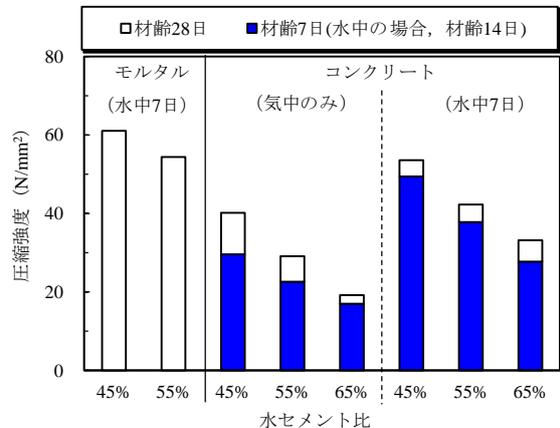


図-7 モルタルとコンクリートの圧縮強度

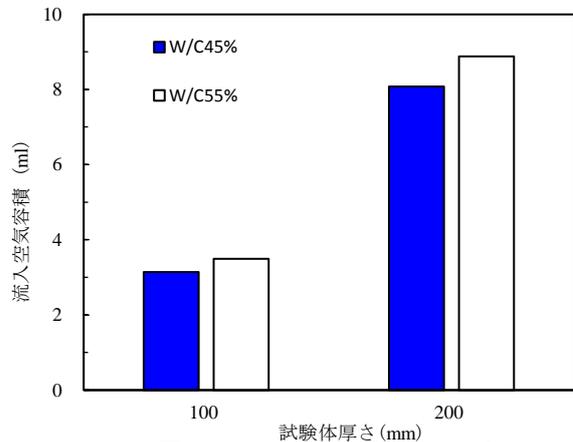


図-8 モルタルの流入空気容積

比であっても気中養生のみ行ったものよりも水中養生後に気中養生を行ったものの方が大きくなった。

図-8 にモルタルの流入空気容積を示す。いずれの試験体厚さも、W/C45%に比べて W/C55%では流入空気容積は若干大きくなった。試験体の厚さで比較すると、厚さ 100mm よりも 200mm の方が流入空気容積は大きくなった。前述したように、本試験はシングルチャンバー方式であり、また流入範囲はごく表層であることが示唆される。そのため、既往の研究でも示唆されるように、ブリーディングによる表面性状の変化が測定結果に大きく影響を及ぼすと考えられる³⁾。試験体が厚さ 200mm では厚さ 100mm のものよりも打設量が多いため、ブリーディング量も多くなり、コンクリート表面に脆弱層が形成されやすくなると推察される。

図-9 および図-10 に水セメント比と流入空気容積の関係を示す。一般に、水セメント比が大きいほど緻密性が低下するため、気密性が小さくなることは知られている。

まず試験体の厚さに着目すると、気中養生のみでは、材齢 7 日、28 日ともに厚さ 100mm より 200mm の方が流入空気容積は大きくなった。これは、前述のようにブリーディングによる表面性状の変化が要因と考えている。水中養生を行ったものでは、必ずしも厚さ 200mm の方が 100mm より流入空気容積が大きくなっていない。これは水中養生を行うことで試験体が緻密になり、ブリーディングによる表面性状の変化が表れにくかったためと考えられる。

養生条件ごとに比較すると、気中養生の場合では水セメント比の増大に伴って流入空気容積も大きくなる傾向にあった。一方、水中養生を行った場合では、W/C65% に比べて W/C45%、55% では流入空気容積は小さくなったが、W/C45% よりも W/C55% の方が流入空気容積は同等もしくは若干小さくなる傾向にあった。本手法では、水中養生を行った W/C45% や W/C55% の様な比較的に入水セメント比が大きい場合における透気性の違いは確認できなかった。

材齢の影響を見ると、水中養生後に気中養生を行った場合は材齢の経過とともに流入空気容積が増加したが、気中養生のみの場合は、材齢の経過による変化は確認できなかった。以上からコンクリートの養生条件の違い、比較的に入水セメント比が高くない配合 (W/C45%, 55%) と水セメント比が高い配合 (W/C65%) の差を確認できた。

図-11 に含水率と流入空気容積の関係を示す。気中養生のみを行ったものでは配合によらず、含水率が 5~6% となり変動が小さいことから、水セメント比が高いほど流入空気容積が大きくなったが、水中養生を行ったコン

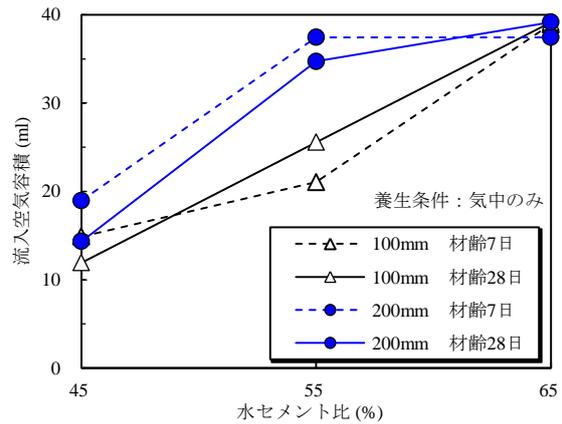


図-9 コンクリートの流入空気容積

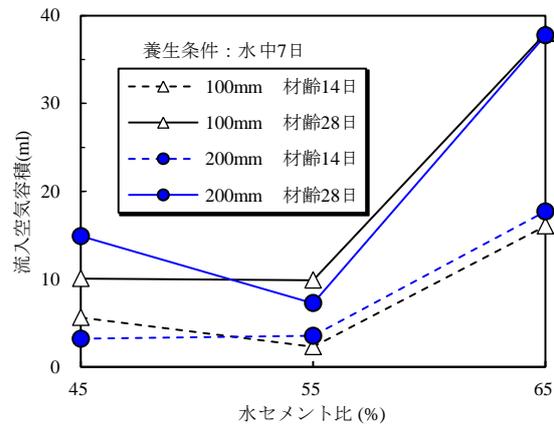


図-10 コンクリート流入の空気容積

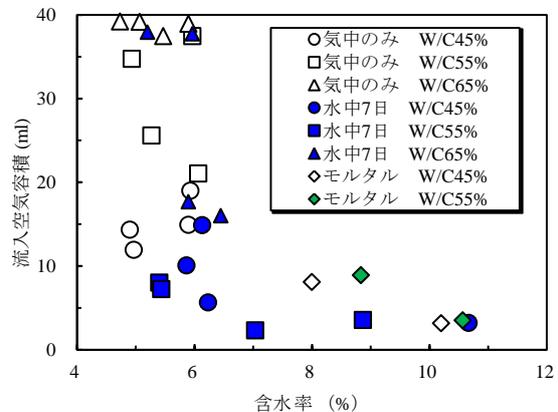


図-11 含水率と流入空気容積の関係

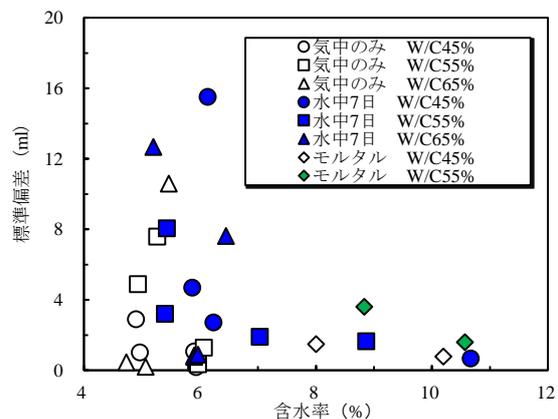


図-12 含水率と標準偏差の関係

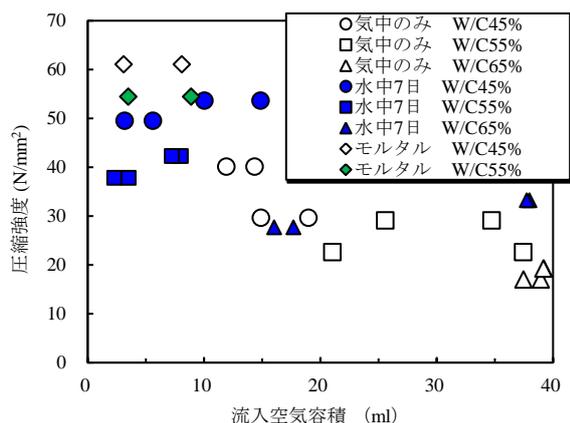


図-13 圧縮強度と流入空気容積の関係

クリートおよびモルタルに関しては、含水率が低いほど流入空気容積が大きくなった。本試験方法以外にも、シングルチャンバー法や Torrent 法などの透気試験で同様の傾向が確認されている^{3) 4)}。含水率が高くなると流入空気容積が小さくなるため、配合間の差を確認するには測定対象の含水率は低い方が望ましいと考えられる。今回の実験範囲では、含水率が約 6%程度もしくはそれを下回る場合に試験体毎の流入空気容積の差が明確になる傾向が示された。コンクリートの配合等によってもこれらは変化することが考えられるため、今後も継続して測定を行う。

図-12 に含水率と標準偏差の関係を示す。標準偏差は、3 箇所の測定データを母集団として算出した。含水率が低い場合は、含水率が高い時と比べコンクリート表面の乾燥状態にムラが生じ、コンクリート表面の水分の逸散が均一でないことが影響して標準偏差が大きくなったと考えられる。また図-11 より、含水率が 4~6%では、流入空気容積が異なることで標準偏差の違いが見られないため精度に問題はないと考えられる。

図-13 に圧縮強度と流入空気容積の関係を示す。これによると、本実験の範囲では、相関係数が-0.64 で右肩下がりである。圧縮強度と物質移動抵抗性は必ずしも一致しないことは知られている⁵⁾。しかし、基本的には圧縮強度が大きいものほど緻密であるため、透気性は小さくなると考えられることから、本試験方法による評価の妥当性が窺える。また、モルタルとコンクリートでは、コンクリートの方が流入空気容積は大きくなる傾向にあった。これは、コンクリート中の粗骨材界面の影響が大きいためと考えられる⁶⁾。

5. まとめ

以下に本実験で得られた知見をまとめる。

- (1) スタイロフォームの厚さを変化させて測定を行った結果、本手法の流入範囲は半径が 20mm より小

い半球であると考えられる。

- (2) 試験装置を垂直面に対して設置した場合、測定時間が長い場合には流入空気容積は大きくなった。また、水平面に対して設置した方が垂直面に設置した場合よりも流入空気容積は大きくなった。しかし、水平面と垂直面の流入空気容積の差は最大 3ml 程度であるため、コンクリートに対する測定には影響は小さいと考えられる。
- (3) 水セメント比が 45%および 55%のコンクリートよりも 65%のコンクリートの方が流入空気容積は大きくなった。また、水セメント比によらず、気中養生のみを行った場合の方が水中養生を行った場合よりも流入空気容積は大きくなった。
- (4) モルタルよりもコンクリートの方が流入空気容積は大きくなった。また、モルタルおよびコンクリートの圧縮強度と流入空気容積は右肩下がりであった。
- (5) 含水率が小さいほど流入空気容積は大きくなり、標準偏差も大きくなった。透気性の比較を行う際、含水率は小さい方が流入空気容積の差が表れるため、含水率の小さいコンクリートを対象とするのが望ましい。

謝辞

トレント法による実験を行うにあたり、東京理科大学の今本啓一教授にご協力頂いた。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺健ほか：シリンダーへの空気流入を利用した簡易透気試験に関する検討，第 15 回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム，pp319-324，2015.10
- 2) 氏家勲・土屋崇・岡崎慎一郎：実構造物でのコンクリートの透気係数の想定方法に関する検討，Cement Science and Concrete Technology, pp197-204, No.62, 2008
- 3) 温品達也・坂田昇・渡邊賢三・柳井修二：表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, 2012
- 4) 今本啓一ほか：構造体コンクリートの表面透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性検討，日本建築学会構造系論文集，第 607 号，pp.31-48，2006.9
- 5) 岡崎慎一郎・八木翼・岸利治・矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No60，pp227-234，2007.2
- 6) 金武漢・權寧璠・朴宣圭・姜錫杓：モルタル及びコンクリートの中性化に影響を及ぼす透気係数に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol22, No.1, 2000.7