

論文 各種シリンダーを用いた簡易透気試験による表層透気性の評価手法の検討

面矢 建次郎*1・渡辺 健*2・関川 昌之*3・橋本 親典*4

要旨: 本研究は、ボンドシリンダーを用いたシングルチャンバー法による簡易透気試験を提案しており、本稿では、シリンダー口径および容量の大きさが測定値におよぼす影響について検討した。その結果、シリンダー口径を拡大することにより配合間における測定値の差が明確となり、Torrent 法で得られた透気係数と相関関係がみられた。また、シリンダー内部の圧力を測定し、その経時変化から算出した簡易透気速度に着目すると粗なコンクリートほど測定時間は短い方がよいことが分かった。さらに、測定点を6点に増加し、Grubbs 検定を行うことで各試験体における測定値のばらつきを約 15%以下に抑えることができた。

キーワード: 表層透気性, 簡易透気試験, シングルチャンバー法, 流入空気容積, 簡易透気速度

1. はじめに

コンクリートの耐久性を低下させる要因は、多くの場合がコンクリート表層から内部へと侵入する劣化因子によって引き起こされる。そのため、あらかじめコンクリート表層の品質を把握できれば劣化が進行する前に有効な対策を立て易い。コンクリート表層の品質を評価する指標の一つとして表層透気性があり、その代表的な測定手法としてダブルチャンバー法(以下、Torrent 法と称す)やシングルチャンバー法がある¹⁾。

Torrent 法の特徴は、内部チャンバーおよび外部チャンバー内の圧力を一定とすることにより skin といわれる脆弱層の影響を排除することができる。一方、シングルチャンバー法は、一つのチャンバーから構成されているため脆弱層の影響を排除することが難しいとされる。ただし、シングルチャンバー法には、比較的装置が簡易である利点がある。そこで著者らはシングルチャンバー法に基づいた安価で電源装置が不要な簡易試験装置を提案している(以下、簡易透気試験と称す)²⁾。

三宅らは簡易透気試験を用いて養生条件(気中養生、水中養生)や W/C(45%, 55%, 65%)を変化させたモルタルおよびコンクリート試験体を対象に測定を行った³⁾。その結果、本手法では、相対的に配合条件の相違に伴う透気性の違いを評価できた。ただし、シリンダーの口径や容量の影響などから配合や養生条件による差が明確にならない場合もあった。

本研究では、既報³⁾で使用した試験体を測定対象とし、シリンダー口径の大きさおよび容量が測定値に与える影響について検討した。具体的には、内径 30mm および 40mm といった径の異なるシリンダー2 種類を

用いて各種測定を行った。そして、本手法で得られた測定値と Torrent 法により得られた透気係数に相関関係があるか確認するために両者の比較を行った。また、Torrent 法は、圧力の状態変化から透気係数を算出しているため、本手法における圧力変化はどのようになっているか圧力センサーを用いて検討した。さらに、測定値の精度を向上させるために測定点を増加させ、外れ値の棄却検定を行い、測定値のばらつきを確認した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) 使用材料および配合

表-1, 表-2 にモルタルおよびコンクリートの配合、表-3 に使用材料を示す。モルタルの配合は、W/C 45% と 55% とした。コンクリートの配合は、単位水量を 175kg/m³ で一定とし、W/C を 45%, 55%, 65% と変化させた。また、粗骨材の最大寸法は、20mm とした。目標空気量は 4.5±1.5% に設定した。

(2) 試験体の形状

試験体は、測定面の縦横の寸法を 200×200mm、深さを 100mm および 200mm とした角柱試験体を用いた。また、測定面は打設時の型枠側面側とした。

(3) 養生条件

モルタルおよびコンクリートは、打設から 20℃の恒温室内に 24 時間静置後、脱型し、養生を行った。この際、室内では一定の湿度管理は行っていない。養生方法を以下に示す。モルタルは、20℃の水中で 7 日間水中養生を行った後に所定の期間、同室内で気中養生を行った。そして、コンクリートはモルタルと同様の養

*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 理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 博(工) (正会員)

*3 (株)マルイ R&D センター 主任研究員 (正会員)

*4 徳島大学大学院 理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博 (正会員)

生を行った場合と脱型後から所定の期間、同室内で気中養生のみを行った場合の2水準とした。試験は、モルタルおよびコンクリートともに材齢365日以降に行った。また、それぞれの試験体は試験を行う前後で同様の環境下に静置した。

2.2 試験方法

(1) 簡易透気試験による測定

本手法は写真-1に示すように、シリンダー先端を切断したものを試験装置とし、内径や容量が異なる2種(内径30mmで容量40mlのもの、内径40mmで容量70mlのもの)を用いた。試験手順を以下に示す。

まず、アセトンを染み込ませた綿で試験体表面の汚れや塵を拭き取った後、測定箇所周辺を除いた測定面の全面にシール材(ラテックス樹脂)をヘラで薄く引き伸ばしながら塗布した。そして約3分後シール材が乾燥固化した後に、エアコンの室外機用配管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。この際、パテの半径は、5.0cmとした²⁾。シリンダーのピストンを引いた後にストッパーで固定させ、300秒経過後に固定を解除し、シリンダー内を復圧させた。最後に、シリンダーの先端からリングまでの距離をノギスで小数点以下2桁まで読み取った。

読み取った値にシリンダーの断面積(7.065cm²・12.57cm²)を乗じて求めたものを流入空気容積と称し、本研究で検討を行った。また、測定は1つの測定面に対して3箇所で行い、3つのデータを算術平均した。

また、キャリブレーションとして、測定前に透気性が無いガラス板に対して測定を行い、ピストンが完全に下がることを確認してから測定を行った。

(2) Torrent法による測定

本試験方法が、Torrent法とどの程度の相関性を保持しているかを検討した。測定箇所は試験体表面の1面とし、シリンダーと同様の測定位置で測定した。具体的には内部と外部のチャンバー内を減圧し、減圧開始60秒以降の内部チャンバー直下からの栓流によるチャンバー内の圧力変化量と経過時間を測定し、式(1)により透気係数KT(×10⁻¹⁶m²)を求めた⁴⁾。

$$KT = 4 \left(\frac{V_c(dp/dt)}{A(p_a^2 - p_i^2)} \right) \frac{\eta p_a}{\varepsilon} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_a} \right)^2 \right] dt \quad (1)$$

ここに、V_cは内部チャンバーと接続要素(ホース等)の容積(m³)、εはコンクリートの空隙量:0.15(m³/m³)、p_aは大気圧(N/m²)、p_iは内部チャンバーの圧力(N/m²)、Aは栓流の断面積(m²)、ηは気体の粘性(Ns/m²)である。また、3箇所の測定値に対して幾何平均をし、透気係数を算出した。測定対象は、モルタルおよびコンクリート試験体を対象に測定した。

(3) 含水率の測定

表-1 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-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤(C×%)		SL (cm)	Air (%)
		W	C	S	G1	G2	Ad1	Ad2			
45	41	389	687				0.8	0.004	15	4.8	
55	43	318	745	395	592		0.7	0.005	12	3.6	
65	44	269	785				0.3	0.004	10	3.0	

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%
水:W	上水道水
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



写真-1 試験装置および測定の様子

各種透気試験を行う直前に高周波容量式のモルタル・コンクリート水分計を用いて試験体表面の含水率を測定した。測定は、試験体一面を3等分(左・中心・右)し、それぞれの箇所に対して行い、それらの測定値を算術平均した。各試験体における含水率は、モルタルでは約4~6%、コンクリートで約3~5%の範囲であ

った。透気試験において配合間の差を確認するためには測定対象の含水率が低い方が望ましいとされている^{5) 6)}。また、本試験で用いた試験体では含水率が6%程度かそれを下回る場合に配合間の流入空気容積の差が明確になることが確認されている³⁾。そのため、本試験範囲では配合間における流入空気容積の差を評価する際には、含水率の影響は小さいものと考えられる。

(4) シリンダーにおける圧力変化の測定

Torrent 法は、吸引部における圧力の状態変化から測定値を算出している。そこで、本試験手法におけるシリンダー内部は、どの程度の圧力で測定しているかを検討した。また、シリンダー内部の圧力の経時変化から簡易透気速度を求め、流入空気容積との関係を比較した。圧力の測定方法は、シリンダーのピストンを引き、ストッパーを固定した際の負圧状態を測定時間 0 秒として、そこから 300 秒経過後に復圧させた際の圧力を圧力センサーで測定した(写真-2)。具体的には、圧力センサーをシリンダーに装着するためにシリンダーの底部から 5.0mm の位置に 2.4mm の口径を加工した。また、圧力センサーのノズル部分を加工した口径に装着し、電源装置に圧力センサーおよびデータロガーを取り付けた。測定箇所は試験体表面の 1 面とし中心 1 箇所測定を行った。測定対象は、コンクリート試験体を対象に測定した。

(5) 測定点の検討

山崎らは、同一呼び強度における実大コンクリート壁の 6 箇所測定した透気係数に対して外れ値の棄却検定を行った結果、変動係数は 40% 以下に抑えられたと報告されている⁷⁾。そこで本検討は、測定箇所を 3 点から 6 点に増加させ外れ値の棄却検定を行うことで本手法における測定値のばらつきをどの程度抑えられるか評価した。外れ値の棄却検定方法は、式(2)に示す Grubbs の検定に基づき行った⁷⁾。式(2)により統計値 T を求め、Grubbs の棄却検定表に基づき有意水準 5% ($\alpha=0.05$) で棄却検定を行った。また、測定対象はコンクリート試験体厚さ 200mm を対象に測定した。

$$T = \frac{n - m}{\sigma} \quad (2)$$

T : 統計値

n : 各測定位置における一回の測定値

m : 6 個の測定値の平均

σ : 6 個の測定値の標準偏差

3. 実験結果および考察

3.1 配合および養生条件と流入空気容積の関係

モルタル試験体の流入空気容積を図-1 に示す。いずれの試験体も W/C が增大するとともに流入空気容積



写真-2 圧力測定の様子

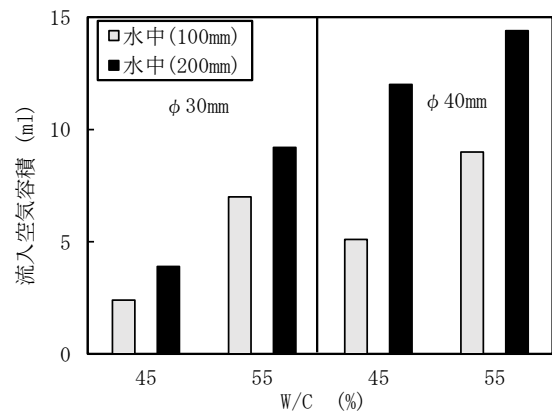


図-1 流入空気容積(モルタル)

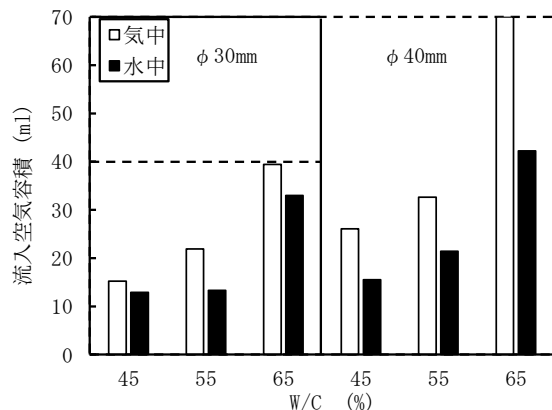


図-2 流入空気容積(コンクリート厚さ 100mm)

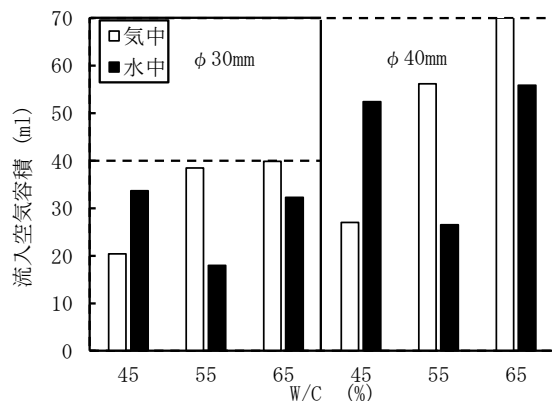


図-3 流入空気容積(コンクリート厚さ 200mm)

は大きくなる傾向がみられた。これは、一般に知られているように W/C が大きくなるほど緻密性が低下するため、気密性が小さくなったと考えられる。また、同

じ試験体でもシリンダー内径 40mm の方が流入空気容積は大きくなった。

コンクリート試験体における流入空気容積を図-2 および図-3 に示す。コンクリート試験体厚さに着目すると、厚さ 200mm の W/C45% (水中養生) を除いて W/C の増大とともに流入空気容積は大きくなった。W/C45% (水中養生) が W/C55% (水中養生) より大きくなる要因として、詳細は定かではないがコンクリート内部に何らかの欠陥があるか、本手法はシングルチャンバー法に基づいた測定方法のため skin の影響を受けた可能性がある。また、厚さ 100mm と比較して厚さ 200mm の方がモルタル試験体と同様に各 W/C での流入空気容積が全体的に大きくなった。明確な理由は不明であるが、試験体厚さ 200mm では 100mm より打設量が多く、ブリーディング量も多くなったためコンクリート表面に脆弱層が形成され易くなったことが一要因として考えられる。

シリンダー口径に着目すると、厚さ 100mm に対する W/C45, 55% (水中養生) では、内径 30mm で測定した場合その差が明確にならなかった。一方、内径 40mm で測定した場合、その差が明確になった。これは、シリンダー内径の拡大により粗骨材 (Gmax 20mm) の影響を低減したことや空気容積が大きくなったことによりその相対的な差が明確になったためと考えられる。

養生条件を比較すると各 W/C では、コンクリート厚さ 200mm の W/C45% (水中養生) を除いて水中養生を行った方が流入空気容積は小さくなっている。これは、水中養生によって水和反応が進行され緻密化したからであると考えられる。

3.2 Torrent 法との相関

内径 30mm および 40mm シリンダーで測定した流入空気容積と Torrent 法による測定結果である透気係数との関係を図-4 と図-5 に示す。W/C65% (コンクリート・気中養生) 試験体は、Torrent 法による影響深さが試験体の厚さを超えていたため測定不能となった。これより、図-4 および図-5 内には、示していない。決定係数は 0.6 以上となり、両者は概ね高い相関性を示した。しかし、W/C45% (コンクリート・水中養生・厚さ 200mm) 試験体では、透気係数に対し流入空気容積は大きくなった。これは、前述で示したように skin の影響を受けたと示唆される。また、この試験体を除いて相関性を評価すると内径 30mm は決定係数 0.8970、内径 40mm では 0.9115 と極めて高い相関関係を示した。

3.3 シリンダー内部の圧力測定

シリンダー内部における圧力経時変化の一例 (コンクリート試験体厚さ 100mm, 気中養生) を図-6 に示す。シリンダーの内部圧力に着目するとピストンを引き、

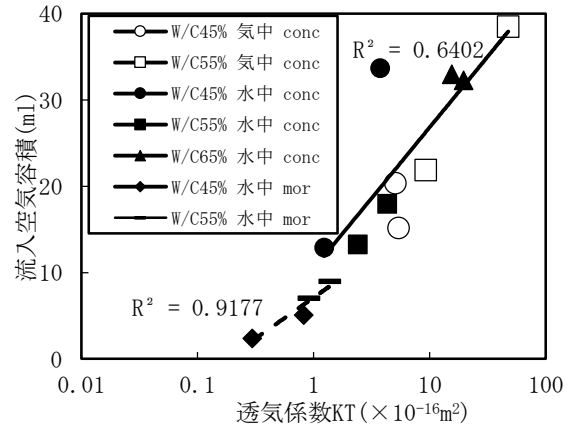


図-4 内径 30mm シリンダーと Torrent 法の比較

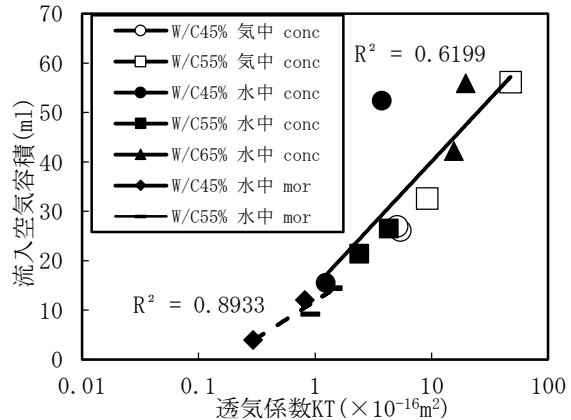


図-5 内径 40mm シリンダーと Torrent 法の比較

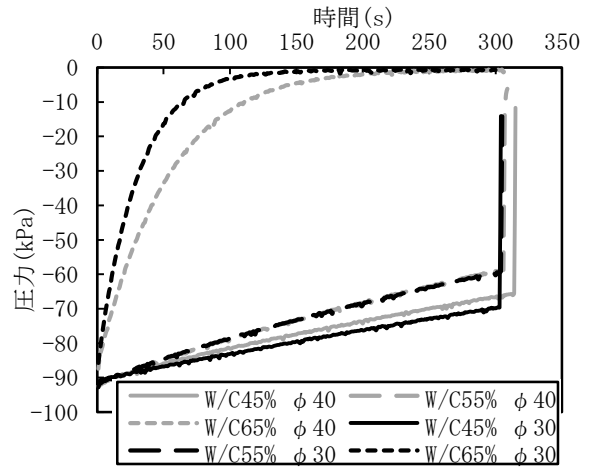


図-6 シリンダー内部における圧力経時変化

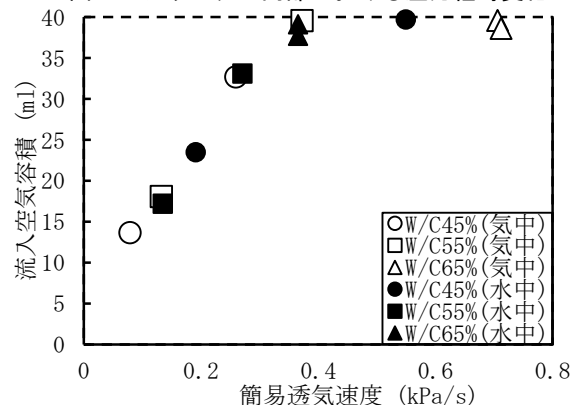


図-7 流入空気容積 (phi 30) と簡易透気速度の関係

ストッパーを固定した際の圧力(測定時間 0 秒)は、内径 30, 40mm とともにほぼ同程度の圧力(-85.7~92.8kPa)となった。また、シリンダーを復圧させた際の圧力(測定時間 300 秒)では負圧からゲージ圧(0kPa)に戻っておらず、W/C65%を除いた各試験体で、ほぼ同程度の圧力に終着した。これは、ピストン先端に装着されているリングとシリンダーの内径に摩擦が生まれピストンが戻りきらなかった可能性が考えられる。

測定時間に着目すると W/C65%では 120 秒付近で 0kPaに戻っている。これは、シリンダー内に流入してきた空気がシリンダー容量の上限に達したことにより負圧状態が解消されたと考えられる。また、W/C 45%および 55%では 30 秒付近まで同様の圧力変化を示しているが、100 秒付近になるとその差が明確になった。

シリンジ径の大きさを比較すると、内径 30, 40mm とともにほぼ同様の圧力変化を示した。これは、他の試験体においても同様の傾向がみられた。

図-7 および図-8 に各コンクリート試験体(厚さ 100, 200mm)における内径 30mm および 40mm で測定した流入空気容積と簡易透気速度の関係を示す。簡易透気速度の算出方法は式(3)に基づき導き出した。具体的には、シリンダー内部における最大負圧(P_r [kPa])から一定圧まで回復する時間(T [s])で簡易透気速度(K [kPa/s])を求めた。ここでは、W/C65%の試験体が、0kPa に約 100 秒付近で到達しているため、一定圧まで回復する時間を今回は 100 秒とした。

$$K = \frac{Pr - Po}{T} \quad (3)$$

内径 30, 40mm シリンダーとともに流入空気容積が増大するにつれて簡易透気速度も増加した。また、skin の影響がある試験体を除いた結果、流入空気容積と同様に W/C が増大するにつれて簡易透気速度も増加する傾向がみられた。各シリンダー容量における上限(40ml, 70ml)付近の試験体に着目すると流入空気容積では、同程度の容量に集まっているためそれ以上の評価は難しい。これより、流入空気容積を求めるための測定時間については緻密性が低い試験体ほど 300 秒より短い方がよいと思われる。また、簡易透気速度では、上限に達することなく評価を行うことが可能であった。

3.4 測定点の検討

各コンクリート試験体厚さ 200mm に対して測定箇所 6 点で測定を行った結果を表-4 および表-5 に示す。表には、Grubbs の棄却検定により外れ値として検出された測定値を赤字で示す。また、図-9 および図-10 には、外れ値の棄却検定前後でそれぞれの測定値を算術平均した結果を示す。

図-9 や図-10 における外れ値の棄却前後における

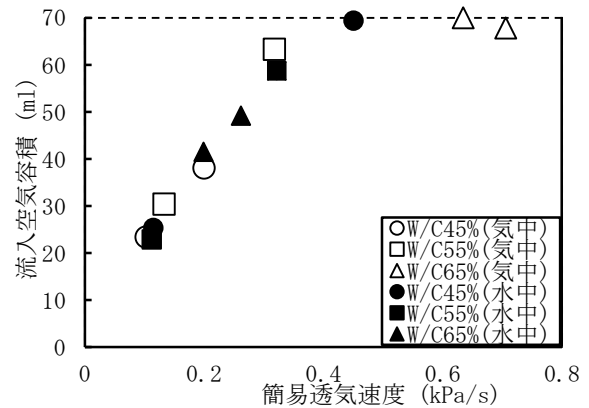


図-8 流入空気容積(φ40)と簡易透気速度の関係

表-4 測定箇所 6 点における流入空気容積(φ30mm)

W/C (%)	養生条件	測定値 (ml)					
		25.1	26.1	22.3	27.3	19.0	23.5
45	気中	38.4	38.0	38.1	39.9	39.1	38.4
55		37.7	37.9	37.9	38.7	38.1	39.0
65		39.6	29.9	38.6	39.4	21.8	39.3
45	水中	23.0	25.1	24.6	25.0	24.7	30.9
55		38.9	38.6	39.8	39.0	39.3	39.0
65							

表-5 測定箇所 6 点における流入空気容積(φ40mm)

W/C (%)	養生条件	測定値 (ml)					
		29.5	32.5	28.0	34.2	29.1	36.2
45	気中	60.1	53.4	61.7	57.2	59.0	61.3
55		69.3	69.9	69.1	68.7	69.4	70.0
65		58.3	56.1	21.0	69.7	53.9	52.4
45	水中	37.3	30.3	28.3	36.2	32.0	43.3
55		53.5	48.0	52.6	57.0	43.0	57.7
65							

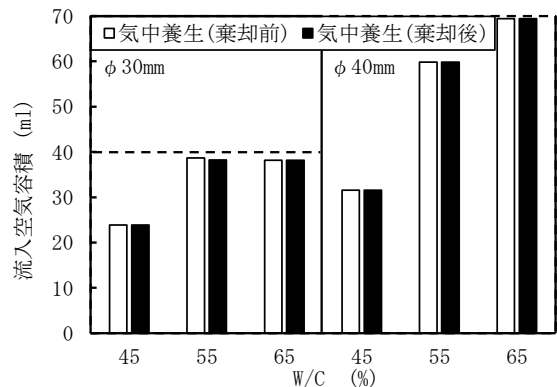


図-9 測定箇所 6 点における流入空気容積(気中)

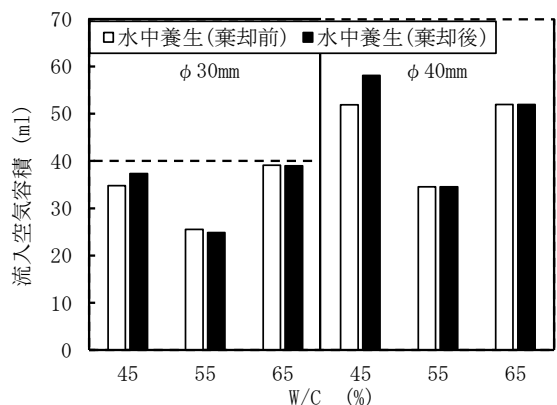


図-10 測定箇所 6 点における流入空気容積(水中)

流入空気容積に着目すると水中養生の W/C45%を除いてあまり明確な変化がみられなかった。

図-11には測定箇所6点における測定値のばらつきを示す。棄却検定を行った結果として気中養生では、それほど大きな変動はみられなかった。しかし、水中養生ではその差が明確なものとなった。これは、表-4や表-5で棄却した値が起因していると考えられる。

図-12は、測定箇所3点と棄却検定を行った6点による測定値のばらつきを示す。W/C45%(水中養生)に着目すると測定箇所3点に対して6点では、ばらつきを約10%に抑えることができた。また、6点では各W/Cにおける変動係数を約15%以下に抑えることができた。

コンクリートの表層品質は型枠の継ぎ目や表面に生じた微細なひび割れ等によりばらつくことがよく知られている。そのため、透気試験において棄却検定を行う場合は、外れ値の扱い方で評価結果が左右されるため、ばらつきと外れ値の判断が重要になる。そこで、本研究では、外れ値を定める一つの判定方法としてGrubbsの棄却検定を用いた。一方で、現状では、算出した外れ値が測定上の問題により生じたものか表層品質のばらつきで生じたのか明確に区別できていないため、今後さらなる検討を行う必要がある。

4. まとめ

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) シリンダーの内径および容量を変化させて測定を行った結果、配合条件の相違に伴う流入空気容積は、内径40mmの方がより詳細に評価できた。
- (2) 本手法における流入空気容積とTorrent法により算出された透気係数には高い相関性がみられた。しかし、一部の試験体で一致しないものがあり、これより本手法が、シングルチャンバー法に基づいた試験手法であるため脆弱層の影響をうけた可能性がある。
- (3) シリンダー内部における最大負圧は、-85.7~-92.8kPa程度となった。また、水セメント比65%(気中養生)のような緻密性が低い試験体ほど圧力の増加傾向は大きくなった。内径30mmおよび40mmともに同様の圧力変化がみられた。
- (4) 簡易透気速度が速くなるほど流入空気容積は増大した。また、流入空気容積と同様にW/Cが増大するにつれて簡易透気速度は増加する傾向がみられた。

謝辞

試験を行うにあたり、徳島大学大学院生の三宅純平氏にご協力頂いた。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 今本啓一ほか：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，

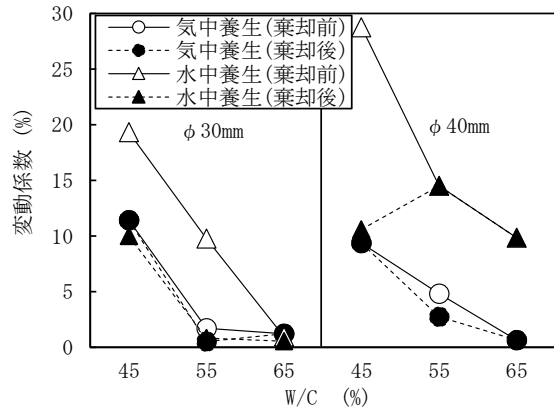


図-11 棄却前後における測定値のばらつき

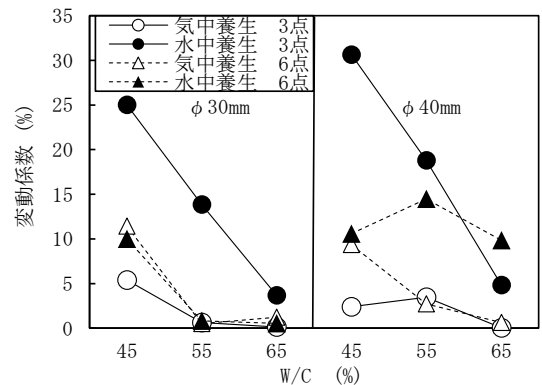


図-12 測定点数の違いによるばらつき

Vol.44, No.2, pp.31-38, 2006.2

- 2) 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，アップグレードシンポジウム，pp319-324, 2015.10
- 3) 三宅純平ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp1995-2000, 2016
- 4) 下澤和幸ほか：鉄筋コンクリート構造物の耐久性検証のための透気性試験による指標値と中性化深さの関連について，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.2005-2010, 2009.7
- 5) 温品達也ほか：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
- 6) 今本啓一ほか：構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用検討，日本建築学会構造系論文集，第607号，pp31-48, 2006.9
- 7) 山崎順二ほか：実大コンクリート壁におけるダブルチャンバー法を用いた表層透気性を評価する共通試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, 2016