

# 論文 シリンダーを用いた簡易透気試験によるコンクリート表層透気性のスクリーニング手法に関する実験的検討

岸 悠樹\*1・渡辺 健\*2・関川昌之\*3・小谷健太\*4

**要旨**：本研究では、簡易透気試験を、短い時間で多くの点を測定し良否判定を行う、スクリーニングとしての利用を検討した。しきい値の設定には校正器とコンクリート試験体に対して簡易透気試験ならびにダブルチャンバー法で測定を行なったが、校正器とコンクリート試験体の表面の透気領域の差異などから、コンクリートの結果のみを用いてしきい値を設定する方が望ましいことが分かった。ダブルチャンバー法の品質評価の一般と劣の境を基準とすると、コンクリートに対しての簡易透気試験の空気流入量は、測定時間 10 秒の時約 2.5ml, 30 秒の時約 5ml, 60 秒の時約 10ml であることが分かった。

**キーワード**：簡易透気試験, シリンダー法, スクリーニング, しきい値, 校正器

## 1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の維持管理が社会的課題となっており、コンクリート構造物の劣化の程度を評価し予防保全的に構造物の補修・補強といった対策を講じて行く必要があると考えられる。そういった現状の中、コンクリート構造物の非破壊試験が注目されており、これまで様々な試験方法が開発、提案されている。その中でも本研究は表層透気性を評価する試験方法に着目しており、その中の代表的な試験方法にダブルチャンバー法や削孔法等が挙げられる。しかし代表的な試験方法やその他の提案されている試験方法は基本的に電源を必要とする試験方法が多い。そこで本研究室では電源を用いずに、より簡易的に測定するシリンダーを用いた簡易透気試験手法の検討を行ってきた<sup>2)</sup>。

既往の研究では、シリンダーを用いた簡易透気試験（以下、シリンダー法と称す）により養生条件や水セメント比を変化させたコンクリート試験体を対象に実験的な測定を実施した。その結果、コンクリートの配合条件や養生条件の相違に伴う透気性の差異を相対的に評価することが可能であり、シリンダー法とダブルチャンバー法との間には高い相関性が確認された<sup>3)</sup>。一方、これまでのシリンダー法は配管パテとシリンダーを用いた試験で測定時間を基本的に 300 秒であるが、パテを成形する過程とシリンダーの設置に時間がかかることが大きな欠点であった。そのため、現場で適用するには設置時間の短縮およびスクリーニングの後に詳細に調査することが、構造物全体の透気性の把握や評価フローの最適化につな



写真-1 校正器

がると思われる。

そこで、本研究ではシリンダー法をスクリーニングの段階での、良否判定手法として利用することを目的に、本手法の測定時間を短縮した適用方法について実験的に検討した。検討内容は校正器に対してシリンダー法およびダブルチャンバー法で測定した結果を比較し、良否判定を行うしきい値を設定できるか検討した。また、そのしきい値が実際のコンクリートに対して計測した場合でも適用可能かどうかを検討した。そして、今回の測定では試験機の改良も併せて行い、本研究では改良した試験機を用いて検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 校正器概要

校正器を写真-1に示す。校正器はバルブ、アクリル板で構成される。使用した精密バルブは流量とバルブ開放値に一定の線形性があり、適用範囲がバルブ開放値

\*1 徳島大学 理工学部理工学科 (学生会員)

\*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 (株) マルイ 開発部 Ph.D (正会員)

\*4 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)

0.00~23.00 (0.05-65200ml/min) のものである<sup>4)</sup>。アクリル板の中心に漏気口を設けてあり、そこから空気が流出する仕組みとなっている。また、バルブ開放値を設定することで空気流出量を調整できる。

## 2.2 試験体概要

コンクリートの計画配合および使用材料を表-1 および表-2 に示す。配合は、表層透気性に影響を及ぼすと考えられる単位水量および粗骨材量を一定とした。また、W/C を 30, 40, 50, 60, 70, 80% と変化させた 6 水準とした。コンクリート試験体の寸法は、200×200×200mm の立方体型の試験体とした。脱型は打設後 20℃の恒温室内に 24 時間静置させた後に行なった。この際、恒温室内では一定の湿度管理は行っていない。養生条件は水中養生とし脱型後 20℃の水中で 7 日間養生を行なった。また、養生終了後はすべての試験体を温度、湿度管理がされていない室内に静置しておき、本検討を実施した際にはすべての試験体は材齢が 1 年程度経過していた。

## 2.3 シリンダー法による測定および試験機の改良

本研究で検討していた従来のシリンダー法は、測定面に先端を切断したシリンダーに配管パテを密着させたものを試験機とする。測定は測定面に配管パテの粘着力を利用し設置し、シリンダー内のピストンを引き固定することで負圧を与える。その際に流入する空気量から表層透気性を評価するといったものである。試験機を写真-2 に示す。この従来の試験方法では、測定時のパテの成形や測定時にシール材を測定面に塗布しなければならないことや、測定値の読み取りの際にはノギスを用いて実施しなければならないといった手間が生じていた。

そこで本研究ではそういった手間を省略するために試験機の改良を実施してきた。改良した試験機の模式図とシリコンリングを図-1 に示す。試験装置はアルミ製のアタッチメント、シリンダー、ブランジャ固定器具、コンクリート表面への密着は透気径  $\phi 40\text{mm}$ 、外径  $\phi 100\text{mm}$  の(柔軟な)シリコンリングで構成されている。改良点としては、アタッチメントを使用することで市販のシリンダーを用いることができ、シリンダーの切断する必要がなくなり、空気流入量を直接目盛によって読み取れるようになった。また、シリコンリングを用いることでパテを成形するといった手間がなくなった。こういった改良からコンクリート表面への設置の手間は大幅に改善された。また、校正器では同等の性能を有することを予備試験によって確認している。本研究では改良型の簡易透気試験機のみを用いて検討を実施した。以下にて測定方法を説明する。

まず、アセトンを染み込ませた綿で測定表面の汚れや塵を拭き取る。その後シリコンリングとアタッチメントとシリンダーを接続した試験機を測定面に押し付ける。

表-1 計画配合

W/C(%)	s/a(%)	セメント種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤(C×%)			SL(cm)	Air(%)
			W	C	S	G大	G小	AE減水剤	高性能AE減水剤	AE剤		
30	40.2	OPC	175	583	615	366	549	-	1.3	0.005	14.5	5.0
40	44.5			438	734			1	-	0.007	9.5	4.0
50	46.8			350	805			0.9	-	0.003	8.5	5.0
60	48.2			292	852			0.6	-	0.001	5.5	4.5
70	49.2			250	886			0.6	-	0.003	3.0	4.2
80	49.9			219	912			0.9	-	0.002	4.0	4.5

表-2 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 <sup>3</sup> , 比表面積:3340cm <sup>2</sup> /g
阿波市産砕砂:S	表乾密度:2.57g/cm <sup>3</sup> , FM:2.63, 吸水率:1.77%
板野町産5号砕石:G大	表乾密度:2.57g/cm <sup>3</sup> , FM:7.08, 吸水率:1.64%
板野町産6号砕石:G小	表乾密度:2.57g/cm <sup>3</sup> , FM:6.40, 吸水率:1.64%
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
AE剤	アルキルエーテル系

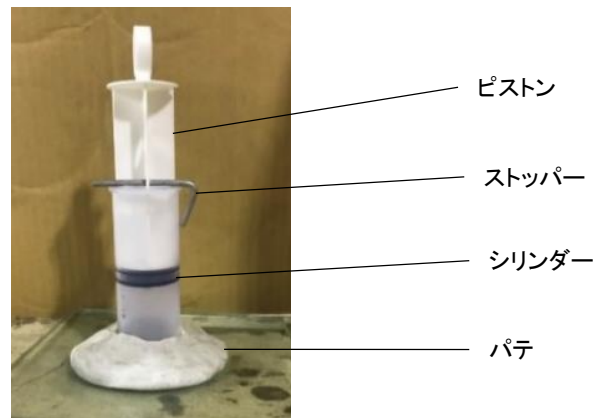


写真-2 既往の試験装置

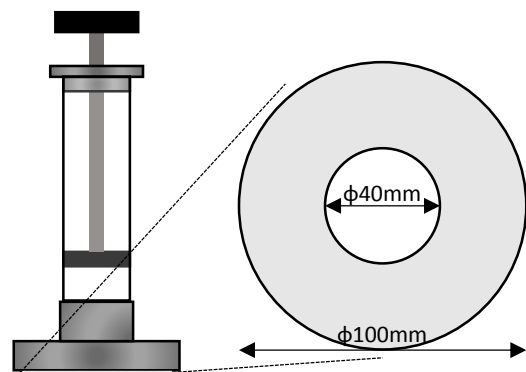


図-1 試験機とシリコンリングの模式図

次に押し付けたままシリンダーのピストンを引きプランジャ固定器具で固定し、シリンダー内部に負圧を発生させる。この際を測定開始時間とし、設定した測定時間が経過した際にストッパーを解除し復圧させる。ここで復圧とは、シリンダー内部の圧力を負圧がかかった状態から、大気圧に戻すことをいう。その後、シリンダー内部に流入した空気量をシリンダーの目盛りから目視により値を読み取る。読み取った値を空気流入量とし、評価を行う指標とした。

本検討でのシリンダー法での測定は、校正器のバルブ開放値を 3 (0.361ml/min), 4 (0.921ml/min), 5 (2.423ml/min), 6 (5.14ml/min), 7 (9.727ml/min), 8 (17.8ml/min) に設定し、それぞれの開放値に対して測定時間を 10 秒, 30 秒, 60 秒とし測定を行なった。また、各測定はそれぞれ 3 回ずつ実施した。そして各コンクリート試験体に対しても同様に測定時間を 10 秒, 30 秒, 60 秒とし測定時間毎に 3 回ずつ測定を実施した。コンクリート試験体での測定では各試験体表面の一面で同一中心位置を測定対象とした。

また、測定を行う直前にキャリブレーションとしてガラス板に対して測定時間 60 秒で測定した。その際の空気流入量はいずれも 0.0ml であることを確認しており、試験機のリークや異なる試験機器での機差はないと考えられる。

#### 2.4 ダブルチャンバー法による測定

シリンダー法での結果の透気性について検討するため、ダブルチャンバー法でも同様に校正器およびコンクリート試験体に対して測定を実施した。今回は Torrent 法の試験機を用い測定した(写真-3)。

Torrent 法における評価グレードを表-3 に示す。評価グレードは透気係数  $kT$  ( $\times 10^{-16}m^2$ ) の値によって定められており、5 段階に設定されている。本検討ではこの 5 段階の評価グレードを基準にシリンダー法での良否判定のためのしきい値設定を試みている。

測定はダブルチャンバーの内部と外部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  $kT$  ( $\times 10^{-16}m^2$ ) を算出した<sup>2),3)</sup>。

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

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( $m^3$ )、 $\varepsilon$  はコンクリートの空隙量:  $0.15(m^3/m^3)$ 、 $p_a$  は大気圧( $N/m^2$ )、 $p_i$  は内部チャンバーの圧力( $N/m^2$ )、 $A$  は栓流の断面積( $m^2$ )、 $\eta$  は気体の粘性( $Ns/m^2$ )をそれぞれ示す。

#### 2.5 表面含水率の測定

コンクリート試験体に対して各種透気試験を行う直前に高周波容量式のもルタル・コンクリート水分計を用

いて試験体の表面含水率を測定した。具体的には試験体の測定面を 3 等分(左, 中心, 右)し、それぞれの測定箇所でも算出した値を算術平均することによって、その試験体の表面含水率を導き出した。測定の様子を写真-4 に示す。



写真-3 Torrent法での測定の様子

表-3 Torrent法における評価グレード

透気係数 $kT$ ( $\times 10^{-16}m^2$ )	評価グレード
100~10	極劣
10~1	劣
1~0.1	一般
0.1~0.01	良
0.01~0.001	優



写真-4 表面含水率測定時の様子

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 校正器に対しての測定結果

校正器に対してのシリンダー法およびダブルチャンバー法の測定結果を図-2～図-4に示す。図-2はシリンダー法の測定時間10秒の結果で、図-3はシリンダー法の測定時間30秒の結果、図-4はシリンダー法の測定時間60秒の時の結果である。ダブルチャンバー法の試験結果はどれも同じものである。シリンダー法、ダブルチャンバー法ともに3回の測定結果の平均を示している。

図より、シリンダー法の測定時間10秒の時、バルブ開放値が5よりも小さい時、空気の流入がごく少量であり目盛は0を示しており空気流入量による違いを評価できなかった。バルブ開放値が6, 7, 8になると空気流入量が大きくなっていることが分かるが、各バルブ開放値における空気流入量の差があまりないことが確認できた。測定時間30秒の時もバルブ開放値が大きくなると空気流入量が大きくなっていることが分かる。バルブ開放値が5よりも小さい場合、測定時間10秒と同様に空気流入量が少量のため違いを評価することができないことが分かった。測定時間60秒の時、バルブ開放値が大きくなるにつれて空気流入量も大きくなっており、各バルブ開放値の差を評価できることが分かった。今回使用した校正器はバルブ開放値3の時の空気流量は0.361 (ml/min)であり、測定時間60秒を有しても、シリンダー目盛からの値を読み取ることができず空気流入量が0という結果になったと考えられる。

また、ダブルチャンバー法とシリンダー法の結果を比較するとその結果は大小関係が類似していた。

ダブルチャンバー法ではバルブ開放値が大きくなるにつれて透気係数が大きくなっていることが分かる。バルブ開放値5の時、おおよそ透気係数の品質評価での一般と劣の境を示していることが分かる。

また、透気係数の品質評価の一般と劣の境をしきい値として設定できないか検討する場合、校正器に対して測定時間10秒の時空気流入量0ml、測定時間30秒の時0ml、測定時間60秒の時1mlと設定できると考えられる。このしきい値がコンクリート試験体に対しても適用できるか3.2節にて検討した。

#### 3.2 コンクリートに対しての測定結果

表面含水率の測定結果を図-5に示す。結果よりW/Cが大きくなるにつれて表面含水率が小さくなっており表面含水率は3.6~4.5%の間を示していることが分かる。表面含水率が透気試験に影響を及ぼすかを検討しなければならないが、表面含水率の差が1%未満であることからそれほど大きな影響を及ぼすものではないとして以下では検討を進める。

コンクリート試験体に対してのシリンダー法および

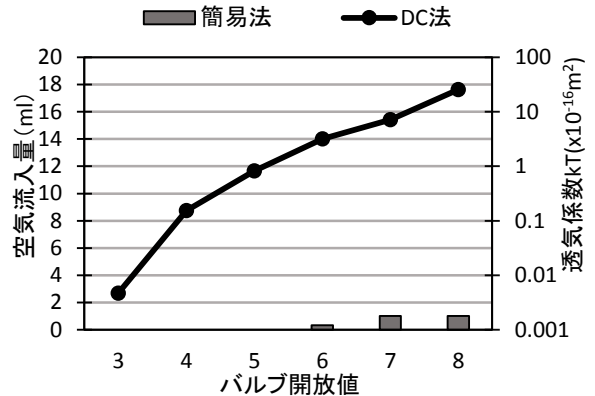


図-2透気試験結果(簡易法:10秒)

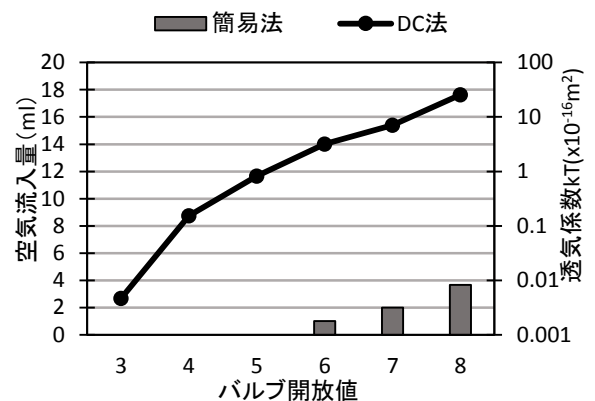


図-3透気試験結果簡易法:30秒)

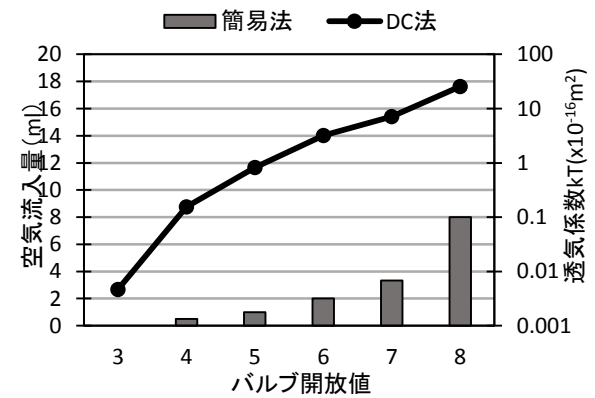


図-4透気試験結果(簡易法:60秒)

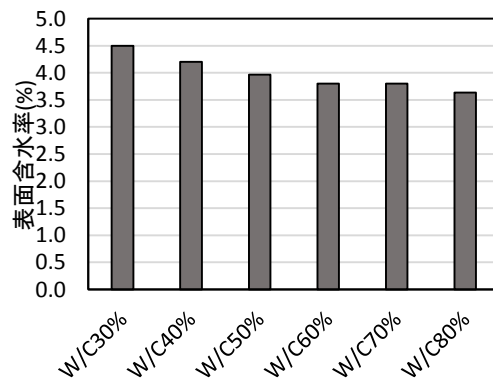


図-5 表面含水率測定結果

ダブルチャンバー法の測定結果を図-6～図-8に示す。図-6はシリンダー法の測定時間10秒の結果で、図-7は測定時間30秒、図-8は測定時間60秒の結果を示している。ダブルチャンバー法の測定結果はどれも同じ結果を示している。シリンダー法、ダブルチャンバー法ともに一面の同一中心位置で測定しており3回の測定結果の平均を示している。また、測定時間ごとに校正器に対しての検討で設定したしきい値を赤線で示している。

図より、測定時間10秒、30秒、60秒ともにW/Cが大きくなるにつれてシリンダー法の空気流入量も大きくなっていることが分かる。しかし、測定時間が短ければ各W/Cの空気流入量にあまり差がなく、測定時間60秒の時の方が10秒、30秒の時よりも各W/Cの空気流入量の差が明確に出ていることが分かる。

また、ダブルチャンバー法とシリンダー法の結果を比較すると、その大小関係は類似していることから簡易透気試験機でコンクリート試験体に対しても正確な測定が行えていることが分かる。

ダブルチャンバー法では、おおよそW/Cが大きくなるにつれて透気係数も大きくなっていることが分かる。また、W/C50%の時、透気係数の品質評価で一般と劣の境を示していることが分かる。

また、校正器に対してのしきい値と比較をすると、どのしきい値も大きく設定されていることが分かる。これは、シリンダー法においてコンクリート試験体では、コンクリートの面全体から空気が流入しているのに対し、校正器ではアクリル板に開いている穴からのみ空気が流入しないといった透気領域の違いによるものだと考えられる。模式図を図-9に示す。また、ダブルチャンバー法では空気流入が円筒状の一様になるのに対してシリンダー法では、半球状になるといった透気メカニズムの違いも影響していると考えられる。今回の検討ではコンクリートを相対的に評価するのではなく、普遍的なしきい値を設定することを目的としている。よって、今後しきい値の設定の検討を行う際にはコンクリートに対しての結果のみを用いるべきであると示唆される。

ダブルチャンバー法の品質評価の一般と劣の境をしきい値と設定する場合、コンクリート試験体に対しての時、空気流入量は測定時間10秒の時約2.5mlで、30秒の時約5ml、60秒の時約10mlと設定できる。そのしきい値を用いてコンクリート試験体に対して良否判定を行えるか確認した場合、W/C60%、80%の時、空気流入量はしきい値よりも大きくその時のダブルチャンバー法の品質評価も劣に位置していることが分かる。また、W/C70%の時しきい値とおおよそ同等の空気流入量を示しているが、ダブルチャンバー法の品質評価でもおおよそ一般を示していることからしきい値は適用できると考えられる。

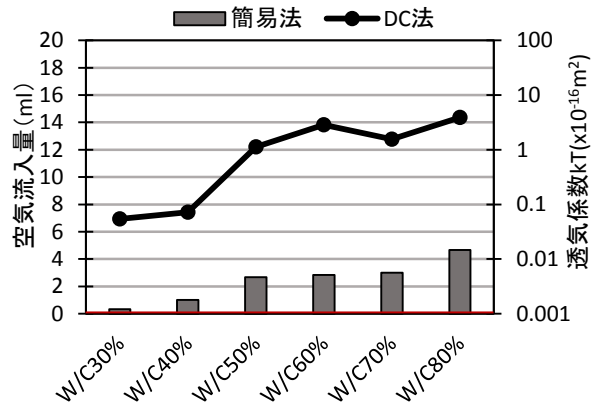


図-6透気試験結果(簡易法:10秒)

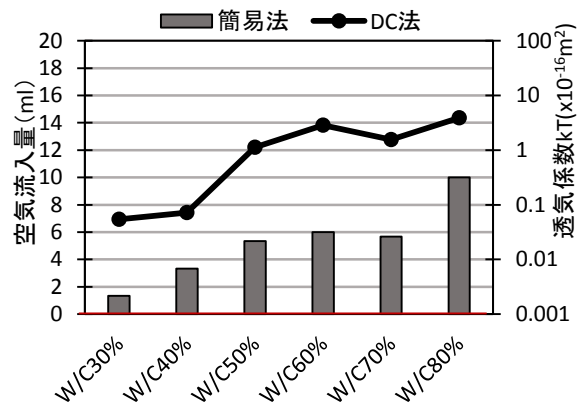


図-7透気試験結果(簡易法:30秒)

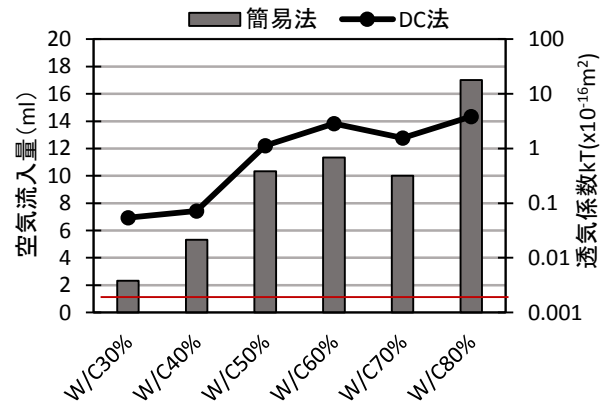


図-8透気試験結果(簡易法:60秒)

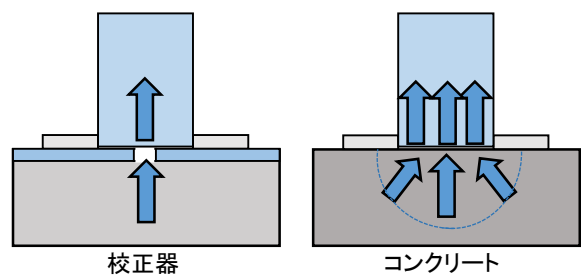


図-9校正器とコンクリートの透気領域の違い

### 3.3 簡易透気試験の測定結果のばらつき

校正器に対してのシリンダー法の変動係数を図-10 に示す。バルブ開放値の3は空気流入量が0であったため、除外している。図より、バルブ開放値4を除くと変動係数が20%以下を示しており、十分な再現性があると言える。

コンクリート試験体に対してのシリンダー法の変動係数を図-11 に示す。図より、W/C が大きくなるにつれて、シリンダー法での測定の変動係数が小さくなっていることが確認できた。これは、W/C が小さければ空気流入量も小さくなり、少しの差でも変動係数が大きくなったためである。W/C30%を除くと変動係数は0~23%を示している。

コンクリート試験体に対してのダブルチャンバー法による測定の変動係数を図-12 に示す。ダブルチャンバー法でも W/C が大きいと変動係数が小さくなっていることが確認できる。図-11 と図-12 を比較するとシリンダー法の W/C30%を除くと、両手法の変動係数の値は同じ程度であった。

## 4. まとめ

以下に本実験で得られた知見をまとめる。

- (1) 校正器とコンクリート試験では表面の透気領域の違いがあり、ダブルチャンバー法とシリンダー法では透気メカニズムに違いがあることからしきい値の設定の検討にはコンクリートに対しての結果のみを用いるのが望ましいと分かった。
- (2) コンクリート試験体に対してのダブルチャンバー法の品質評価の一般と劣の境のしきい値は測定時間10秒の時約2.5ml, 30秒の時約5ml, 60秒の時約10mlに設定できることが分かった。また、測定時間が各バルブ開放値, 各W/Cの空気流入量にあまり差がでないことから測定時間30秒もしくは60秒が最適な測定時間であると考えられる。今後は、コンクリートの表面含水率を考慮したしきい値の検討を進める。
- (3) 変動係数はコンクリート試験体に対してW/C30%を除くと0~23%と小さいことから、試験機の再現性があることが確認できた。

### 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，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

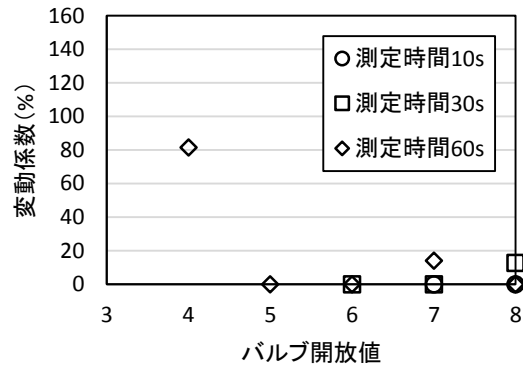


図-10 校正器に対しての変動係数(シリンダー法)

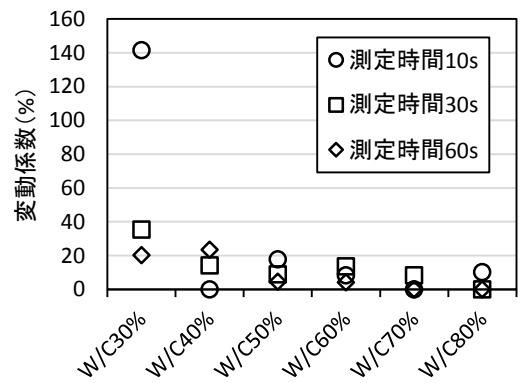


図-11 試験体に対しての変動係数(シリンダー法)

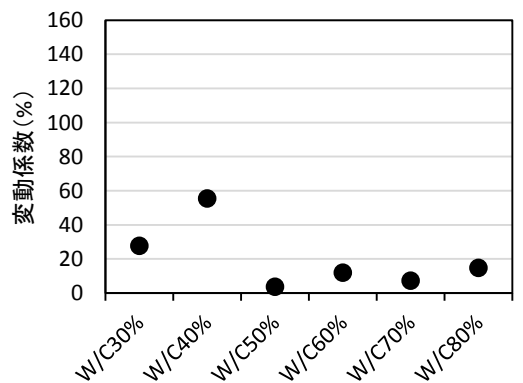


図-12 試験体に対しての変動係数(ダブルチャンバー法)

- 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
- 4) 面矢健次郎ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp1975-1980, 2017.7
  - 5) 山崎順二，今本啓一，田中章夫，加藤猛：透気係数における繰返し測定および試験機の検定に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp1921-1926, 2017.7