

論文 シリンダーを用いた簡易透気試験による母材と断面修復材の界面の評価に関する基礎的検討

山田 悠二*1・榎原 弘貴*1・塚越 雅幸*2・渡辺 健*3

要旨: 断面修復後における評価方法としてのシリンダー法による簡易透気試験の適用性に関する基礎的検討として、母材（コンクリート）と修復材（ポリマーセメントモルタル）の界面部における透気性の評価を行った。本検討の結果、空気流入量が 40ml 以上となる測定点の割合によって、母材と断面修復材の界面の健全性を評価できる可能性を示した。また、母材部あるいは修復部と界面部の空気流入量の差により、打継面の粗さや処理方法による影響を確認することができた。加えて、シリンダー内の圧力の経時変化より、測定時間 30 秒でも評価を行うことができる可能性を示した。

キーワード: 簡易透気試験, 透気性, シリンダー法, 断面修復, 界面

1. はじめに

小規模な地方自治体では財政的に厳しく、構造物の補修費用を十分に確保することが難しい場合も多い。したがって、軽微な構造物の損傷については、専門業者に委託せず、構造物の管理者である自治体職員が応急的に補修を行うことで、補修費用を軽減しようとする取り組みが広がりつつある(例えば¹⁾)。このような管理者直営による補修の取り組みは、持続的に構造物を維持管理していくうえで、極めて重要度が高いものと考えられる。

一方で、たとえ軽微な損傷に対する補修でも、専門知識や技術力の不足から、効果的な補修が行えていないケースが生じることも懸念される。今後、このような管理者直営補修の取り組みを促すと共に、持続可能なものとするためには、管理者直営補修に対する品質保証が必要になると考えられる。そのためには、補修箇所の健全性の評価が必要である。また、補修に対する評価に基づき、実施者の技能を定量的に判断できれば、実施者の技能を養成するという観点からも有用であると考えられる。

しかし現状では、補修後の評価方法として一般化されているものは存在していない。そこで本研究では、自治体職員が実施できることを念頭に、試験器具を安価に入手でき、簡便に測定可能なシリンダー法による透気試験方法(以下、簡易透気試験)(例えば^{2),3)}による、透気性を指標とした補修後の健全性評価について着目している。

他方、コンクリートの損傷に対する補修方法として断面修復工法が広く用いられている。この工法では、母材と断面修復材(以下、修復材)の一体性が十分でない場合、修復部分の浮きや剥離が生じやすくなる可能性や、母材と修復材の打継界面から劣化因子が侵入しやすくなる可能性がある。したがって、適切な補修の実現には母

材と修復材の打継界面に対する品質の評価が重要であると考えられる。

以上より本検討では、断面修復工法に対する簡易透気試験による評価の適用性に関する基礎的な知見を得ることを目的に、打継界面の状態を変化させた母材に修復材を打ち継いだ試験体を作製し、本試験方法によりその界面部に対する透気性の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 母材および修復材の諸元

母材に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(記号:C, 密度: 3.16g/cm³, 比表面積: 3270cm²/g), 細骨材は玄界灘産海砂(表乾密度: 2.59g/cm³, 吸水率: 0.85%, FM: 2.38, 実積率 65.0%), 粗骨材は下関市産砕石(表乾密度: 2.75g/cm³, 吸水率: 0.90%, FM: 6.57, 実積率 59.8%), 混和剤は AE 減水剤(記号 Ad, リグニンスルホン酸系)を使用した。

修復材に用いたポリマーセメントモルタルの配合を表-2 に示す。ポリマーセメントモルタルは、市販されているドライモルタルに、水を混ぜ合わせて作製した。

2.2 試験体の概要

作製した試験体の様子の一例を写真-1 に、試験体の概要を図-1 に示す。試験体の作製は、まず、角柱の型枠(100×100×400mm)の中心部分に、合板で作製した仕切りに硬化遅延剤を塗布したものを設置した後、コンクリートを打ち込んで、母材となる角柱コンクリート(100×100×200mm)を作製した。この母材となる角柱コンクリートを打込み終了から約 12 時間後に脱型して、打継面をワイヤーブラシで削ることで目荒らしを行い、既往の研究を参考に⁴⁾、写真-2 に示すように粗さを、

*1 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博(工) (正会員)

*2 福岡大学 工学部建築工学科 准教授 博(工) (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会基盤デザイン系構造・材料分野 准教授 博(工) (正会員)

表-1 母材コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m ³)				Ad (C×%)	圧縮強度 (N/mm ²)
			W	C	S	G		
50	45	20	165	330	793	1031	0.35	44.8

表-2 ポリマーセメントモルタルの配合

W/B* (%)	P/C (%)	単位量 (kg/m ³)				圧縮強度 (N/mm ²)
		W	P	C	S	
47	7	263	40	557	1153	56.0

*B=P+C



写真-1 試験体の様子

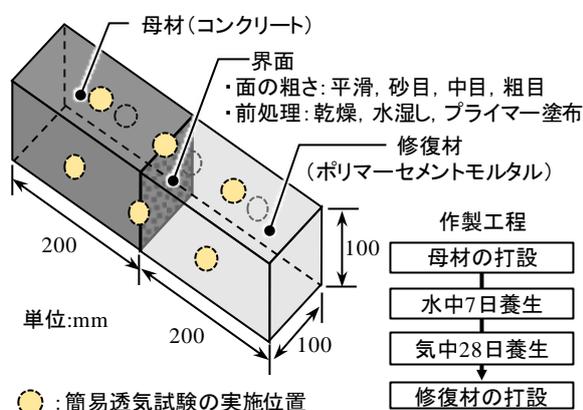


図-1 試験体概要

平滑、砂目、中目、粗目の4水準に変化させた。母材は目荒らし後、1日間の気中養生後に水中養生を7日間行い、その後、乾燥させるため28日間、気中で養生した。

母材を気中で28日間養生させた後、修復材を打ち継いだが、このとき、打継面が乾燥したままの状態（以下、乾燥）、打継面を1日水に浸した状態（以下、水湿し）、打継面にプライマーを塗布した状態（以下、プライマー塗布）とした3水準の処理（以下、前処理）を施した。なお、プライマー塗布では、平滑と粗目の2水準のみとした。修復材の打継後は、断面修復材の部分のみ湿布養生を7日間行った後に、気中で28日間養生を行った。試験体は各ケース2体ずつ作製した。試験体の水準についてまとめたものを表-3に示す。

2.3 簡易透気試験方法と実施要領

(1) 簡易透気試験方法

本試験方法ではシリンダーの先端をカットし、切断面を紙やすりなどで研磨したもの（図-2）を試験装置（シリンダーの内径：30mm、容量：50ml）として使用した。また、シール材として、エアコン室外機の接続の際に用いられるパテを使用した。測定の実理は図-2に示すよ

粗さ	平滑	砂目
外観		
処理	目荒らし無し	表面のペーストのみ除去
粗さ	中目	粗目
外観		
処理	粗骨材表面が露出する程度に打継面を削った	粗骨材が浮き出る程度まで打継面を削った

写真-2 打継ぎ面の様子

表-3 試験体のケース

前処理	界面の粗さ
乾燥	平滑
	砂目
	中目
	粗目
水湿し	平滑
	砂目
	中目
プライマー塗布	粗目
	平滑

うに、ピストンを引いてシリンダー内が負圧となることを利用した、シングルチャンバー方式での透気試験方法である。以下に試験の手順について示す。

まず、試験を実施する箇所の表面の塵や汚れを、アセトンを染み込ませたウェスなどを用いて拭き取った。そして、パテを試験装置の先端に装着したものを、ヘラを用いて測定箇所に着させた。このとき、パテは直径が100mm程度となるよう円形に引き伸ばした。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について、ノギスを用いて小数点以下2桁まで読

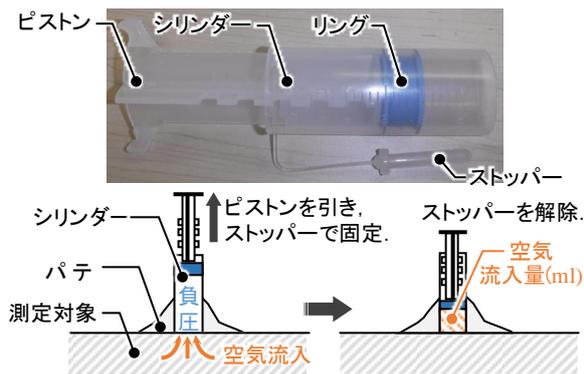


図-2 簡易透気試験の概要

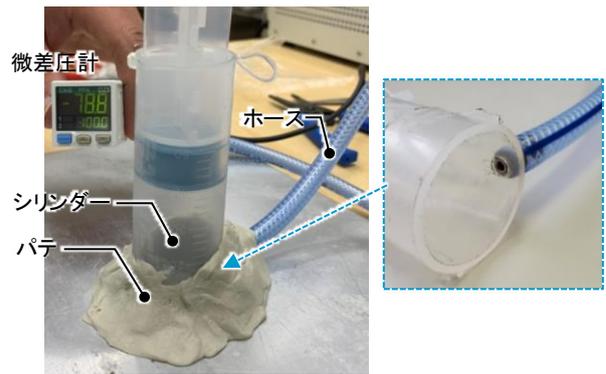


写真-3 微差圧計を取り付けたシリンダー

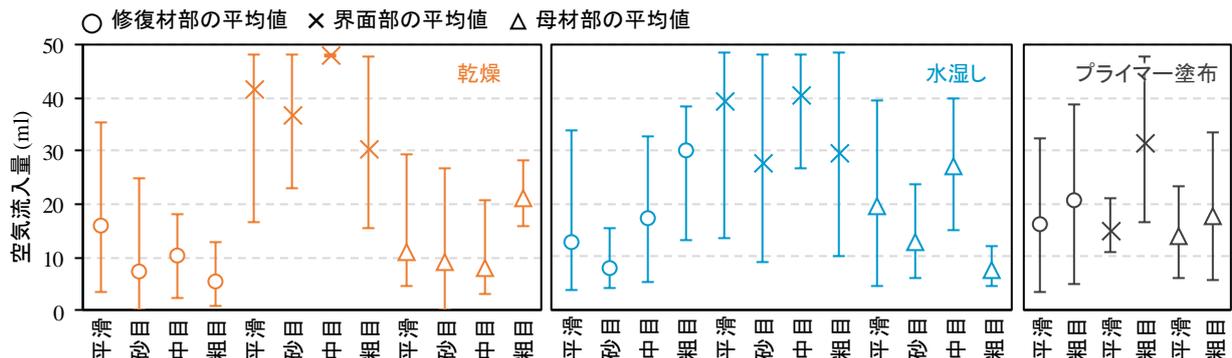


図-3 空気流入量の平均値と誤差範囲

み取った。読み取った値に試験装置の断面積 (7.065cm^2) を乗じたものを V_1 とした。また、シリンダーごとにキャリブレーションとして、ガラス板を対象に測定を行い、この測定で得られた値を試験装置のキャリブレーション値である V_0 とした。この V_0 を V_1 から除したものを、この試験での測定値である空気流入量 (ml) とした。

なお、簡易透気試験の測定時間に関しては現在検討が進められている段階であり⁵⁾⁶⁾、既往の研究では10~300秒の測定時間が設けられている³⁾⁵⁾⁶⁾。本実験ではこのうち最大である300秒を採用した。これは、測定時間が長いほど差異を検出しやすく、基礎的な知見を得ることを目的としている本実験の遂行に適しているためである。

(2) 簡易透気試験の実施要領

簡易透気試験の実施箇所は図-1に示す通り、修復材を施工した部分(以下、修復材部)、修復材と母材の界面の部分(以下、界面部)、母材の部分(以下、母材部)に対して、打込み面を除く3箇所ずつとした。なお、3箇所のうち、空気流入量が10ml以上異なる測定結果がある場合には、30分以上時間を空けて同じ箇所を再測定し、同じ箇所でも最初の測定と再測定の結果に差異が無いことを確認した。なお、山崎らは、十分に測定対象内の復圧が完了していない場合には透気係数が小さくなるため、同一箇所でも連続して透気試験を行う際の測定間隔は10~15分程度以上が良いとしている⁷⁾。本実験では、測定対象や試験方法が山崎らと異なることを考慮し、安全側

に見てこの2倍の時間を同一箇所での測定間隔とした。

打継面を平滑および粗目としたものは、界面部に対して簡易透気試験を行う際、既往の研究⁶⁾⁸⁾を参考に、微差圧計を取り付けたシリンダーを用いてシリンダー内の圧力の経時変化についても測定した。微差圧計の設置に関しては、まず、シリンダー底部から5mmの位置に直径5mmの穴を開けてホースニップルを取り付けた。このホースニップルにホース(内径4mm)を差し込んで接続した後、ホースニップルに差し込んだ方とは逆側のホース先端に微差圧計を取り付けた(写真-3)。

3. 実験結果および考察

3.1 空気流入量の測定分布

空気流入量の平均値と誤差範囲を図-3に示す。まず、修復材部、界面部、母材部によらず、各ケースで空気流入量のばらつきは大きい。これは、同一のケースでも測定位置が異なると、透気性も異なることの影響を受けたと考えられる。特に本試験で用いたシリンダーの径は30mmであり、平面的な影響範囲が狭く、局所的な表面性状の相違が測定結果に反映されやすいと考えられる。一方で、空気流入量の平均値は、界面部で大きい傾向にあり、測定部間での特性を捉えられていると考えられる。

以上のように、同一のケースであっても空気流入量に大きなばらつきがあった。そこで、統計的に解釈することを目的に、図-4には各試験体ケースにおける空気流

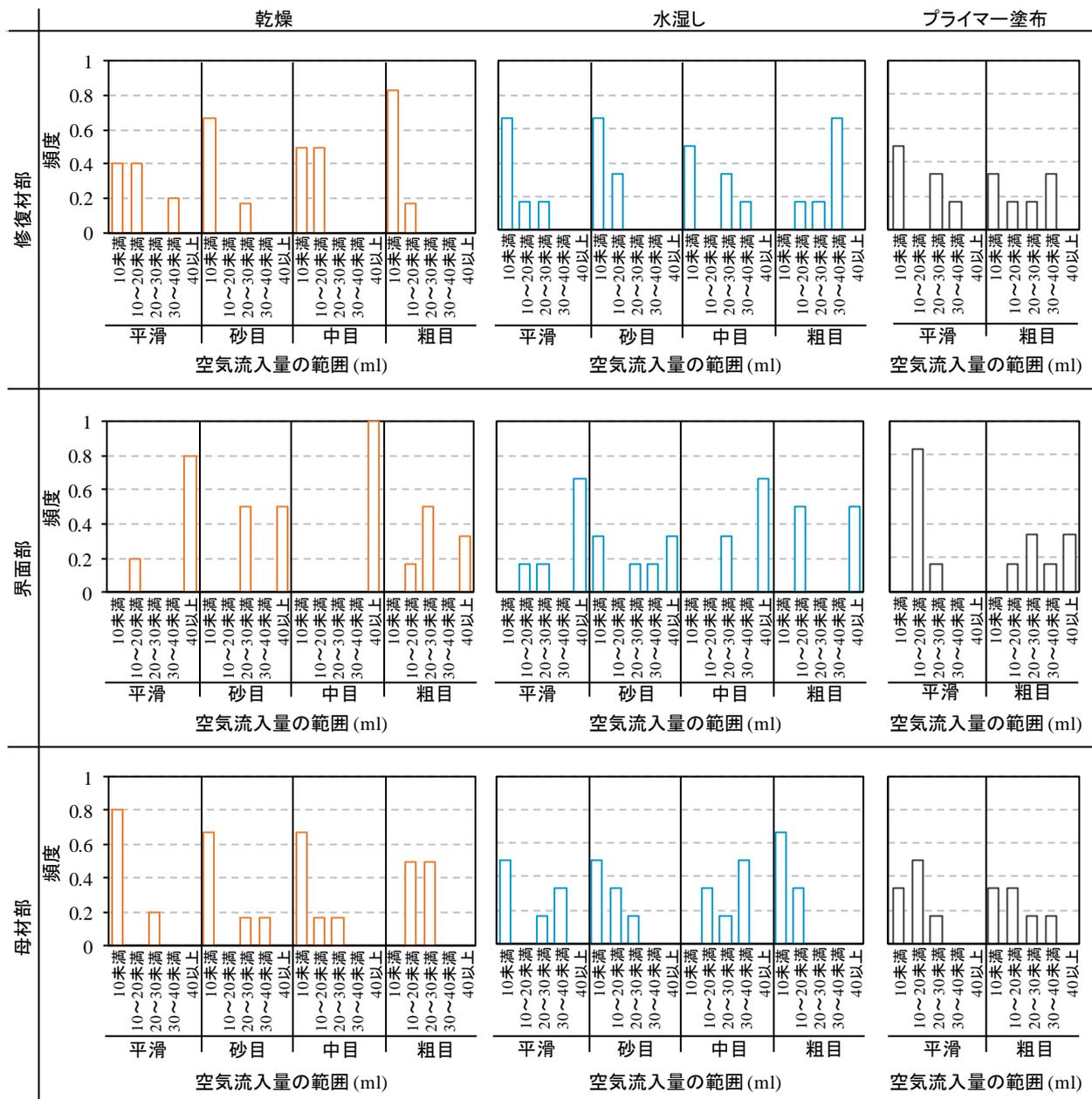


図-4 空気流入量の分布

入量のヒストグラムを示す。ここでは、空気流入量を10mlごとに分類し、その頻度（割合）を示した。これによると、修復材部や母材部で最頻値が「10ml未満」となる結果が多く見受けられた。また、空気流入量の範囲は、最大でも空気流入量が「30～40ml未満」の範囲であった。一方で、界面部においては「10ml未満」に分布はなく、また、修復材部や母材部では確認されなかった「40ml以上」の範囲にも結果が分布していると共に、この「40ml以上」の範囲が最頻値となる場合もあった。

以上より、空気流入量40mlを基準として、断面修復後の界面部の健全性を評価できる可能性がある。すなわち、ある対象範囲における空気流入量40ml以上の割合により、その範囲における健全性の包括的評価が可能であると考えられる。今後の展開として、どの程度の範囲に何

点の測定数が必要かという測定条件の検証が必要である。

3.2 各試験体ケースと空気流入量の関係

本節では、本試験結果が打継の条件の影響を反映できているのかについて検証する。上述のように、同一のケースであっても空気流入量にはばらつきがあるため、得られたデータを単純に平均して取り扱っていると、特出した結果にミスリードされることも予想される。そのためここでは、各ケースにおける空気流入量の中央値を用いて、各試験体ケースとの関係について図-5に整理した。ここで、本実験では1ケースにつき2体ずつ試験体を作製し、測定部ごとに3箇所ずつ測定した。したがって1ケース・1測定部につき6点のデータがあり、このうち3番目と4番目に大きい空気流入量の平均を中央値とした。

界面の粗さを粗目とし水湿しで打継いだケース、界面

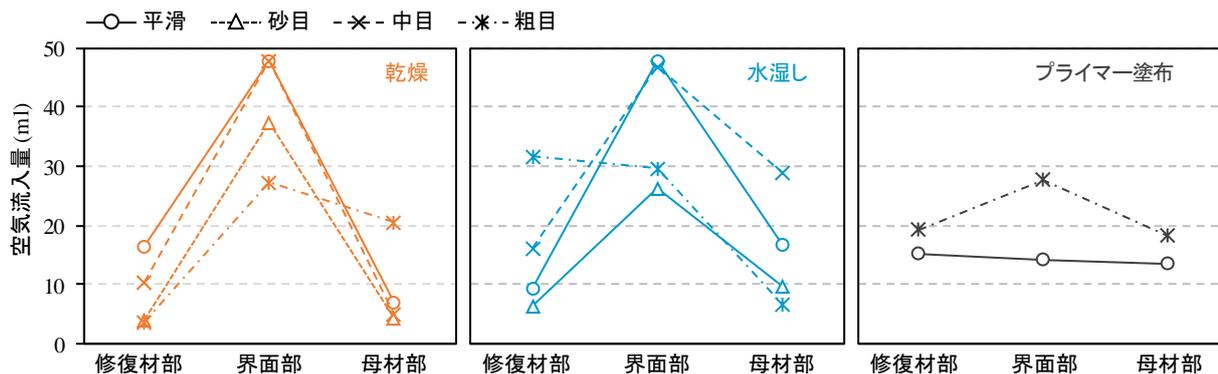


図-5 各種ケースと空気流入量（中央値）の関係

の粗さを平滑としプライマー塗布としたケースでは、界面部と修復材部で空気流入量がほぼ同じであるが、その他では界面部において空気流入量が最大となった。

界面部の気密性は、条件的な要因（界面の粗さ、前処理）と共に、母材および修復材自体の透気性が積算して表れるものと考えられる。したがって、条件的な要因の影響のみを抽出するため、各ケースの界面部での空気流入量から、ケースごとでの母材部と修復材部の空気流入量（中央値）の平均（以下、平均値）を減じたものとその誤差範囲を図-6に示す。

まず、界面の粗さの影響に着目すると、乾燥では空気流入量の差30~40ml付近に平滑、砂目、中目が分布したが、粗目では空気流入量の差が最大でも23ml程度と小さいことがわかる。水湿しの場合、平滑と比べて砂目、中目、粗目の空気流入量の差が小さい範囲に分布し、また誤差範囲は大きいものの平均値との空気流入量の差は粗目をもっとも小さくなった。これは、界面が粗くなることで母材と修復材の付着性が得られやすくなり、その結果が透気性にも表れたものと考えられる。

しかし、乾燥・水湿しでは砂目よりも中目の方が空気流入量の差が大きい範囲に分布する傾向にあった。中目では粗骨材表面が露出する程度に目荒らしを行っており、粗骨材表面が砂目よりも滑らかであるため、修復材が付着しにくいことから疎となりやすく、その影響が空気流入量の差に表れたのではないかと考えられる。一方、粗目の場合は粗骨材および細骨材粒子がより浮き出る形で露出していることや、目荒らし作業を中目よりも長く行った分、粗骨材表面も粗くなったことで、機械的に修復材が付着しやすくなったと考えられる。

一方で、プライマー塗布では平滑よりも粗目の方が空気流入量の差は大きく、乾燥および水湿しと傾向が異なった。この点に関しては、粗目では塗布断面の表面積が増すことに起因し、プライマーの塗りムラが生じやすくなったことや、プライマーが母材に吸収されやすくなり十分な塗厚を得にくかったなどの影響と推察される。片平らによると、プライマーを塗布した場合、母材と修復

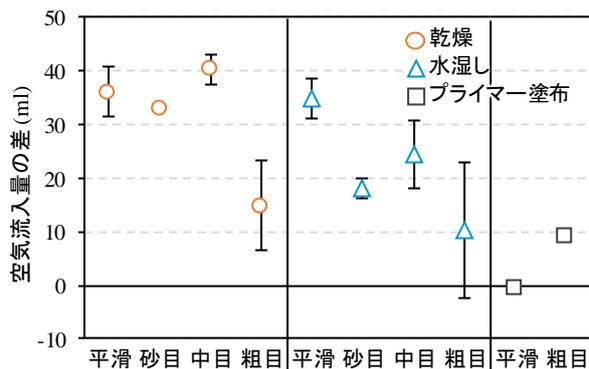


図-6 界面部と母材・修復材部の空気流入量差

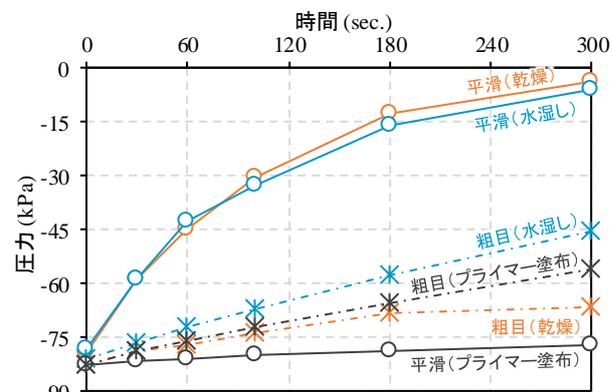


図-7 シリンダー内の圧力の経時変化

材の付着強度への界面の粗さの影響は小さいが、界面が粗い方がやや付着強度が高くなったことが報告されている⁴⁾。このことを踏まえると、本来的には、プライマー塗布では透気性においても粗目は平滑の同等以下となる可能性があり、本実験結果は、施工上の不具合の影響を反映できたものと考えられる。

次に、前処理の影響に着目すると、平滑では乾燥と水湿しは同程度であるがプライマー塗布では空気流入量の差がかなり小さく、プライマー塗布による界面部の改善を確認できた。乾燥と水湿しで差が表れなかった要因としては、平滑の場合、修復材と接する界面の表面積が小さく、機械的に修復材と母材が付着しにくいという、形状の影響が前処理の影響よりも強かったためと考えられる。これは、平滑以外では、水湿しの場合の空気流入量

が乾燥と比べて低くなっていることから妥当性が窺える。水湿しよりも乾燥の方が空気流入量の差が大きい要因としては、ドライアウト現象によるものなどが考えられるため、今後、試験体を解体し、界面内部の観察や付着強度試験などを行って検証する予定である。

3.3 シリンダー内の圧力の経時変化

図-7 にシリンダー内の圧力の経時変化を示す。図中の凡例は、界面の粗さおよびカッコ内に前処理を示している。なお、同図のデータは先述の図-5 に示した中央値の算出に採用した測定点のものである。これによると、いずれのケースにおいても測定開始から 30 秒までの圧力変化が大きく、その後、時間経過と共に変化は緩やかになった。特に、空気流入量が大きい値を示した平滑（乾燥）および平滑（水湿し）では、測定開始 30 秒までの圧力変化の傾きがその他のものに比べて大きいことがわかる。したがって、測定時間を 30 秒としても透気性が相当に大きいものを検出するには十分である。

先述のように、本試験方法は測定範囲が狭く、局所的な透気性を評価するものである。そのため、ある範囲を包括的に評価するうえでは測定数が多いほど望ましく、数をこなすためには一回の測定時間はなるべく短い方が良い。ただし、実用面を考えると、本試験の試験値である空気流入量はアナログな方法で測定するため、空気流入量が小さい範囲で分解能を小さくして評価しようとする、人的な測定誤差が生じやすいことが懸念される。したがって、3.2 節で「0~10ml」～「40ml 以上」のように流入空気量を 10ml ごとで分類したように、分解能を大きくし、分布範囲により評価する方が良い可能性も一方で考えられる。このような実用面に則した課題も含め、今後も適切な測定時間に関する検討を継続したい。

4. まとめ

シリンダー法による簡易透気試験の断面修復後の検査方法としての適用性に関する基礎的検討として、本試験により母材と修復材の界面を評価した。本研究の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 修復材部、界面部、母材部に関わらず、空気流入量は測定点ごとのばらつきは大きい、空気流入量が 40ml 以上となるのは界面部のみであり、空気流入量 40ml 以上となる測定点の割合により健全性を評価できる可能性がある。
- (2) 母材部あるいは修復部と界面部の空気流入量の差により、断面修復を行う母材の断面の粗さや、断面修復前の処理方法といった条件が界面部の気密性に与える影響を確認することができた。
- (3) シリンダー内の圧力の経時変化を測定した結果より、30 秒という比較的短い測定時間とした場合でも、界

面部の気密性を評価できる可能性を示した。

今後は、長期材齢での測定や界面の観察、付着強度および劣化因子の侵入との関係、修復工法の影響などについて検証を継続すると共に、測定範囲と必要な測定数の関係や最適な測定時間といった、実用上の課題として予想される測定条件に関する検討も行っていく予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、福岡大学工学部社会デザイン工学科の永田隆造氏ならびに山下大貴氏には、多大なご協力を頂きました。ここに付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 木下義昭：自治体職員が直営施工を実施する手づくりの橋梁メンテナンスの構築，土木学会論文集 F5（土木技術者実践），Vol.76, No.1, pp.56-65, 2020.7
- 2) 渡辺健，山口喜堂，廣本達也，橋本親典，石丸啓輔：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，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論文報告集，Vol.15, pp.319-324, 2015.10
- 3) 三宅純平，山田悠二，渡辺健，橋本親典：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, pp.1995-2000, 2015.7
- 4) 片平博，渡辺博志：付着面の表面粗さが断面修復材の付着強度に与える影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.14, pp.265-270, 2014.10
- 5) 岸悠樹，渡辺健，関川昌之，小谷健太：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.42, No.1, pp.1672-1677, 2020.7
- 6) 小谷健太，渡辺健，関川昌之，面矢健次郎，岸悠樹：シリンダー法による簡易透気試験を用いた透気性評価および中性化速度係数の推定に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.20, pp.459-464, 2020.10
- 7) 山崎順二，今本啓一，田中章夫，加藤猛：透気性試験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, pp.1921-1926, 2017.7
- 8) 面矢健次郎，渡辺健，関川昌之，橋本親典：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, pp.1975-1980, 2017.7