

〈一般研究課題〉 コンクリート表層部の深さ方向への連続的  
品質評価方法の確立

助成研究者 大同大学 藤森 繁



## コンクリート表層部の深さ方向への連続的 品質評価方法の確立

藤森 繁  
(大同大学)

### Study on Establishment of Quality Evaluation Method from Surface of Concrete Specimen to Depth Direction

Shigeru FUJIMORI  
(Daido University)

#### Abstract :

This study investigates the air permeability of cover concrete by focusing on differences in water absorption from surface to cover depth. Concrete specimens were prepared with depth dependent water content adjusted by controlled water absorption. Using these specimens, the influence of water absorption on drilling speed, and the relationship between drilling speed and air inflow at the cover depth, was examined to evaluate permeability. Furthermore, the effects of drilling rotation speed and the conditions for extracting drilling speed on the relationship between drilling speed and air inflow were also investigated. Experimental results demonstrate a clear correlation between air inflow and water absorption, indicating that reliable permeability assessment is feasible when the surface water absorption is up to approximately 7%. Drilling speed exhibited sensitivity to water absorption in specific ranges, and the findings suggest that evaluating only the cement paste is insufficient for a comprehensive assessment of air permeability.

#### 1. はじめに

本研究では、筆者らの提案する微破壊試験法の一つである小径ドリル型削孔試験によって、かぶりコンクリートの深さ方向の品質の連続的な性状の定量的に把握することを目的とする。かぶりコンクリートの品質は、強度のみならずコンクリート中を移動する二酸化炭素や水分の通しにくさ、

すなわち物質移動抵抗性によって評価する必要があるが、普及しつつある規格化された非破壊試験法は、その評価範囲が表層から数十mmの範囲の平均的な評価となり、また、原位置におけるコンクリートの強度を評価するためには、別の試験を再度実施する必要がある。一方、小径ドリル型削孔試験によって得るデータは表層から深さ方向に連続的であり、加えて、コンクリートの強度が原則として水セメント比に依存すること、さらに、コンクリート中の粗骨材がコンクリート中の物質移動に及ぼす影響が小さいことに注目すれば、モルタル部分の削孔によって、一定の確度で強度推定が可能で、かつ同時に物質移動抵抗性を評価可能である点において優位性をもつ。

今後、建設後50年以上経過した橋梁などの社会基盤をなす構造物、建築物の維持管理の需要は増える一方で、労働人口の減少から建設技術者不足が課題となっている。我が国の根幹を支える各種建設物の維持管理のためには、できるだけ手間が少なく、かつ必要な箇所を的確に評価する手法の確立が急務である。

筆者らはこれまでに、小径ドリル型削孔試験機によって表層から10 mmまでの範囲の削孔試験によって得られるデータ(削孔速度)から、コンクリート表層の品質の指標のひとつである透気性をおおよそ評価できることを示している。一方、鉄筋コンクリート部材の健全性はかぶり厚さまで評価できることが望ましいが、現状の削孔試験機の削孔可能深さは10mmであるため、極表層部のみを評価するに留まることが危惧される。そこで本研究では、硬化後のコンクリート試験体の表面から深さ方向の含水率の違いに着目した。一般的に、含水率の増加とともに、透気性は低下することが知られていることから、かぶり厚さである表面から40 mm程度までの含水率と同等になるように調整した試験体を対象に、シリンダー法による空気流入量試験および小径ドリル型削孔試験を実施し、削孔速度と空気流入量の関係を整理することで、かぶり厚さ程度までの範囲の透気性の評価を試みた。また、削孔試験で得られる削孔速度の抽出方法、ならびに削孔試験機のモータの回転数を変化させることで、コンクリート表層の透気性の評価するための適切な条件についても改めて検討した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験要因

実験要因は、水セメント比とコンクリート試験体表面の含水率および小径ドリル型削孔試験のモータの回転数とした。水セメント比は45, 50, 55および60%の4水準とした。試験体表面の含水率は、既報<sup>1)</sup>で得られた表面から深さ方向の含水率分布(図2.1参照)を参考に、表層からの深さ10~20mm程度の含水率である4~5%(含水率-小)、20~30mm程度の5~6%(含水率-中)および30~40mm程度の7%(含水率-大)になるように、後述する吸水処理によって調整した。また、小径ドリル型削孔試験のモータの回転数は、3000, 4000および5000回転の3水準とした。

### 2.2 使用材料および配合と試験体

表2.1に使用材料を、表2.2に配合とフレッシュ性

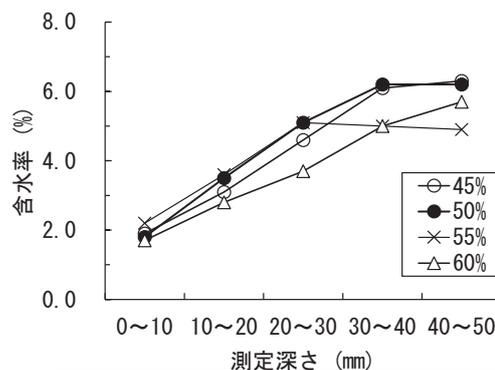


図2.1 表面から深さ方向の含水率分布<sup>1)</sup>

表2.1 使用材料

材料名	種類	備考	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm <sup>3</sup>	C
細骨材	大井川水系産陸砂	表乾密度:2.59g/cm <sup>3</sup>	S
粗骨材	岡崎産碎石	表乾密度:2.66g/cm <sup>3</sup> 最大寸法:20mm	G
混和剤	高性能AE減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体	AD
	AE剤	樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤	
水	蒲都市上水道水	-	W

表2.2 配合とフレッシュ性状

No.	W/C (%)	空気量 (%)		スランプ (cm)		細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	G	AD
1	45	4.5 ±	5.0	18 ±	18.5	44.5	185	738	944	3.90	
2	50		4.7		19.5	43.6			370	979	4.70
3	55	1.5	4.2	2.5	19.0	42.9			336	1008	4.20
4	60		4.0		20.0	42.3			308	1032	4.20

状を示す。セメントは、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比の影響を明確にするため単位水量は一律に185kg/m<sup>3</sup>とした。また、削孔速度に及ぼす細骨材の影響を最小限に抑えるため、単位細骨材量も一律に738kg/m<sup>3</sup>とした。空気量とスランプは、目標値を得られるよう単位混和剤量で調整した。

試験体は、150mm角の立方体とした。試験面は打ち込み面に垂直な側面とした。試験体は材齢1日で脱型後、既報<sup>2),3)</sup>と同様に、材齢28日までは標準水中養生を施し、その後、試験日まで20℃の気中養生をした。

### 2.3 実験方法

#### (1) 事前準備 (表面含水率の調整)

試験前に、試験面の含水率を2.1節に述べた目標値とするために、以下の手順で吸水処理をおこなった。1) 吸水処理の際は、試験面(吸水面)の側面からの吸水を抑制するために試験面に垂直な面はアルミテープで被覆した。2) 水を張ったバットに吸水面を下向きにして静置し、24時間吸水後に取り出し、20℃に制御された恒温室内に静置する。3) 静電容量式表面含水率計で定期的に表面含水率を測定し、目標の含水率になった時点で以下の試験を実施した。

#### (2) 小径ドリル型削孔試験

試験には、図2.2に示す小径ドリル型削孔試験機<sup>4)</sup>を用いた。この試験機は、測定部位にφ2.8mmのダイヤモンドビットを押しつけ、定圧力、定トルク、定回転数に制御されたモーターによって深さ10mm程度まで削孔し、ビット先端の変位を記録する装置である。削孔試験で得た記録を用い、削孔深さと削孔時間の関係から得られる削孔速度(以降、平均削孔速度とする)と、主にセメントペースト部を削孔していると想定される部分のドリル削孔速度(以降、削孔速度 $V_p$ とする)を算出した。削孔速度 $V_p$ を算出する上でのセメントペースト部分の削孔速度の抽出にあたっては、既報<sup>5)</sup>で提案した修正前後の2つの抽出条件を用いた。表2.3に抽出条件を示す。修正前の条件は、削孔

表2.3 削孔速度の抽出条件

	修正前	修正後
抽出速度範囲	0.13~0.40 mm/s	0.06~0.13 mm/s
速度振幅	0.2 mm/s以下	変更なし
連続削孔深さ	0.2~0.4 mm	0.05~0.4 mm

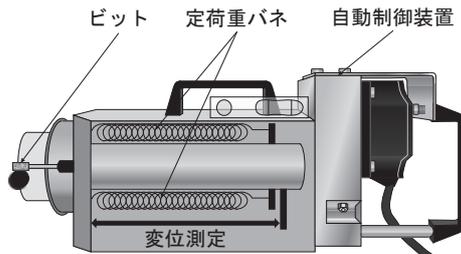


図2.2 小径ドリル型削孔試験機

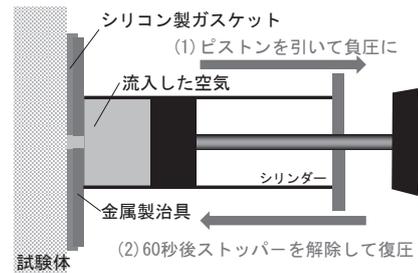


図2.3 シリンダー法の概要

穴側面の画像と1/25秒ごとに算出した削孔速度の関係から求めたものであるが、粒径の小さな細骨材の影響を受けることが明らかになったため、修正後の条件は、セメントペーストで作製した試験体の平均削孔速度をもとに定めている。いずれの抽出条件においても骨材や空隙、ならびに削孔速度が急激に変化する境界面は除外している。なお、表中の「連続削孔深さ」とは速度振幅の範囲内で削孔速度が継続する区間(距離)であり、セメントペーストのみが連続する区間を想定している。

ドリル削孔速度は、試験体の種類やビットの初期切れ味、ならびにビットの摩耗によって変化するため、以下の手順<sup>6)</sup>によって抽出・補正している。1)1/100秒ごとに記録された削孔深さ(変位)を11点移動平均したのち、1/25秒間隔で削孔速度を算出する。2)手順1)で得た削孔速度から、表2.3に示した抽出条件を満たす区間の削孔速度を抽出して平均する。3)削孔時間と削孔深さの累積和の増加にともない、ビットの切れ味が線形的に低下するものとして、手順2)で抽出された削孔速度を補正し、削孔速度 $V_p$ とする。本実験においては、モータの回転数も実験要因としたため、回転数が大きいほど摩耗が早く進むと仮定し、削孔時間と削孔深さの累積和に回転数の比を乗じている。なお、使用したビットの切れ味の低下率は、削孔試験の前後に細骨材を0.6mm未満としたレファレンスモルタルで得た平均削孔速度の比より算出している。また、本実験では3本のビットを使用したので、削孔試験前に測定したレファレンスモルタルの平均削孔速度の比でビット間の切れ味の差異を補正した。

削孔試験は、各試験体とも試験面の中心に近い範囲で3点を削孔し、削孔中に粗骨材などの影響で削孔が進まなくなった場合は新たに測定点を設けて削孔した。また、削孔深さが10 mmを大きく下回る測定値は、試験値を算出するにあたって除外した。

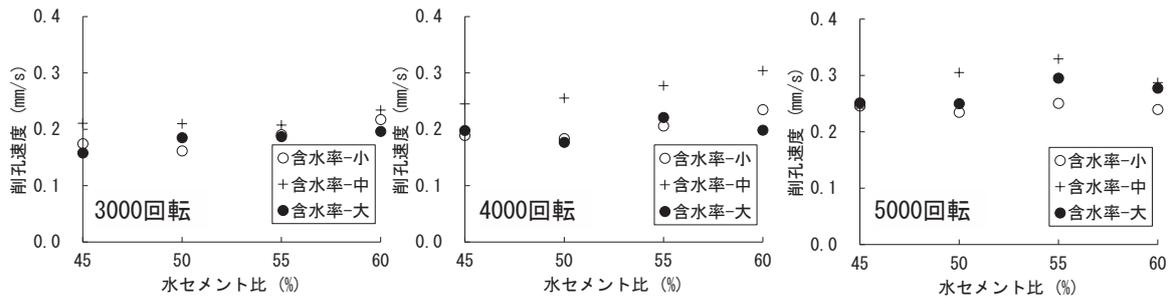
### (3) 空気流入量試験

図2.3に、シリンダー法による空気流入量試験の概要を示す。直径約100mmのシリコン製ガスケットを介して装置を測定面に押し当て、ピストンを引いてシリンダー内を負圧にし、60秒後にストッパーを解除して復圧によって流入した空気量をシリンダーの目盛から読み取った。

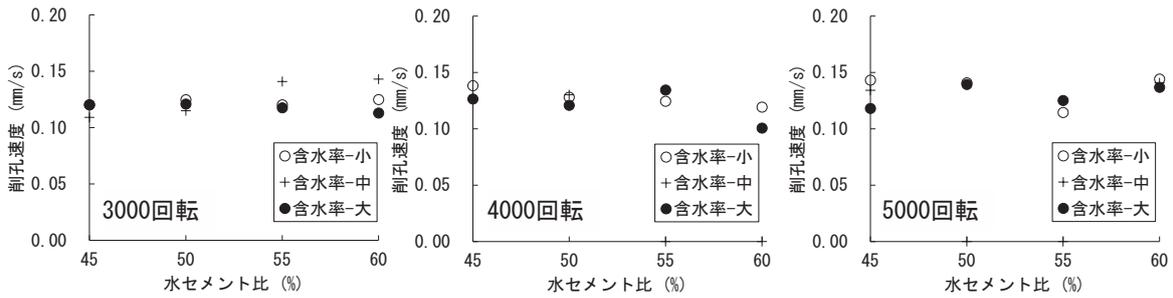
## 3. 実験結果と考察

### 3.1 水セメント比が各試験結果に及ぼす影響

図3.1に、削孔速度と水セメント比の関係を示す。削孔試験機のモータの回転数が3000および4000回転では、試験体表面の含水率によらず、水セメント比が大きくなると削孔速度が大きくなる傾向にあり、削孔速度によって5%程度の水セメント比の差異を評価できることがわかる。モータの回転数が5000回転の場合にも同様の傾向はみられるが、水セメント比が大きくなるとややば



(a) 修正前の抽出条件で削孔速度を算出した場合



(b) 修正後の抽出条件で削孔速度を算出した場合

図3.1 削孔速度と水セメント比の関係

らつきが大きい。また、必ずしも含水率が高い範囲で削孔速度が大きくなるものではない。また、削孔速度の抽出条件で比較すると、修正前の抽出条件では含水率による削孔速度の差異が大きいものに対し、修正後の抽出条件ではその差異は小さく、削孔速度と水セメント比との間に特定の関係を認められなかった。既報5)では、水セメント比による削孔速度の差異はわずかではあるものの、水セメント比の増加にともない削孔速度は大きくなる傾向が見られたことから、本実験結果は既往の実験結果とは異なる傾向にあった。従来、ドリル削孔試験では、1水準につき6回の削孔を実施していたが、本実験では1本のビットあたりの削孔回数が多くなったため、ビットの極端な摩耗を抑制するために削孔回数を3回としたことで、試験結果のばらつきの影響が大きく現れたものと推察される。

図3.2に、空気流入量と水セメント比の関係を示す。深さ方向を想定した含水率の範囲によらず、水セメント比が55%までは水セメント比の増加にともない空気流入量も増加する傾向にあるが、水セメント比60%では低下に転じる傾向にある。また、含水率が5~6%の範囲と含水率が7%程度に比較して、含水率が4~5%の範囲の空気流入量が著しく大きくなっている。これは、含水率の大きなコンクリート試験体では、試験体中の空隙に存在する自由水によって空気の移動が抑制されたことに起因すると推察される。

### 3.2 空気流入量と表面含水率の関係

図3.3に、空気流入量と表面含水率の関係を示す。図中には指数近似曲線と決定係数 $R^2$ を示す。表面含水率の増大にともない空気流入量は減少する傾向にある。透気試験は含水率の影響を受けることが知られており、表面含水率が5.5%以下であることを確認してから実施すること

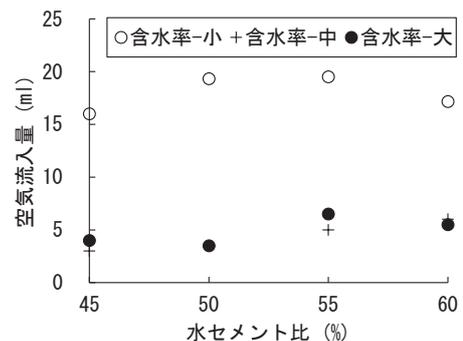


図3.2 空気流入量と水セメント比の関係

が推奨されているが、試験体表面から50mm程度までの範囲で計測された含水率7%前後までは評価できることが示唆される。

### 3.2 削孔速度と表面含水率の関係

図3.4に、削孔速度と表面含水率の関係を示す。修正前の抽出条件で削孔速度を算出した場合、全体としては、含水率が削孔速度に及ぼす影響は小さいが、モータの回転数が3000回転および4000回転では、表面含水率の増加とともに削孔速度が減少する傾向がみられる。また、表面からの深さを想定した含水率の範囲内で比較した場合にも同様に、含水率の増加とともに削孔速度は減少する傾向がみられる。ただし、これはモータの回転数が3000回転および4000回転の場合に限られ、5000回転では特定の傾向はみられなかった。

一般的に、水セメント比が小さな試験体の方が密実であると考えられるが、本実験の結果では、相対的に粗であると考えられる水セメント比の大きな試験体で削孔速度が小さくなっている。これは、表面含水率計の評価範囲(深さ)と、ドリル削孔試験の削孔深さ(10 mm)との関係が影響したと考えられる。水セメント比の小さい、すなわち相対的に密である(空隙の小さい)試験体においては、毛細管現象によって表面からより深い位置まで水分が浸透するのに対し、水セメント比の大きい試験体ではごく表面付近に水分が滞留することが想定される。一方、ドリル削孔試験で得られる削孔速度は、表層から深さ10 mmまでの範囲の平均値である。そのため、水セメント比の小さい試験体では、削孔速度に及ぼす含水率の影響がより大きく現れたと推察されるが、詳細については今後の検討を要する。

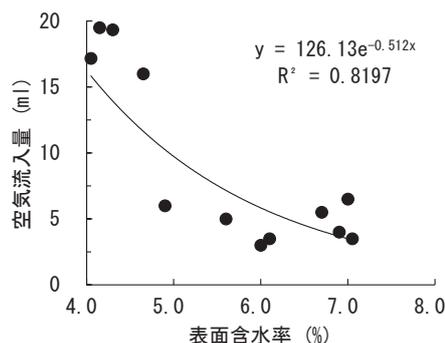
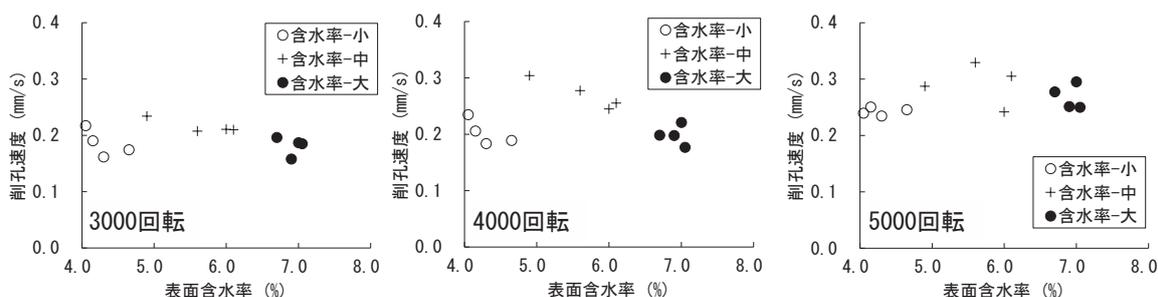
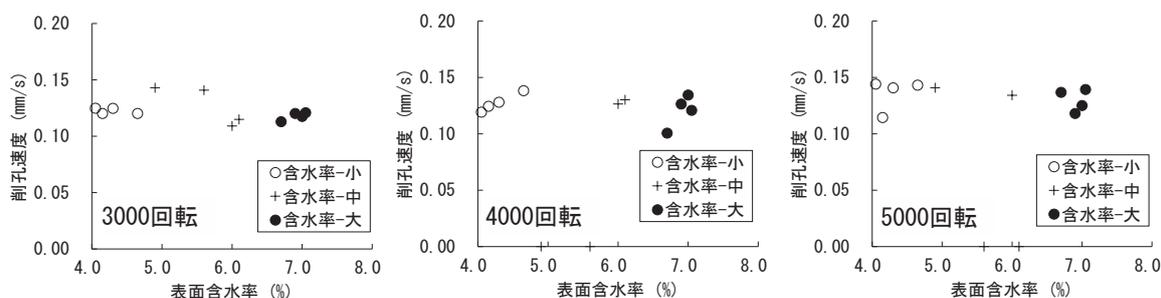


図3.3 空気流入量と表面含水率の関係

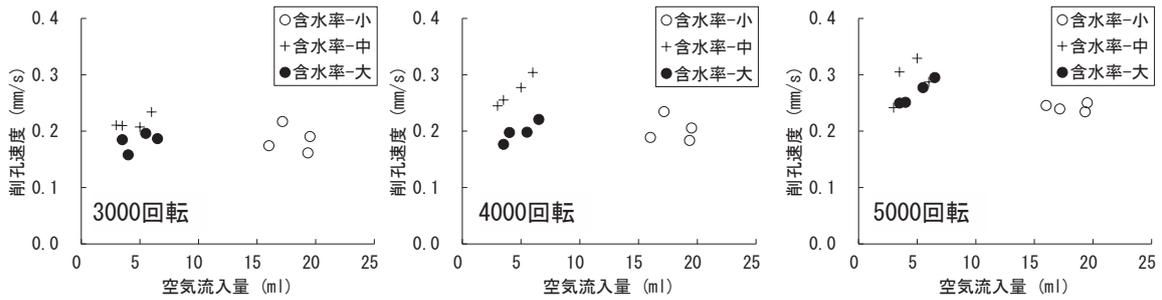


(a) 修正前の抽出条件で削孔速度を算出した場合

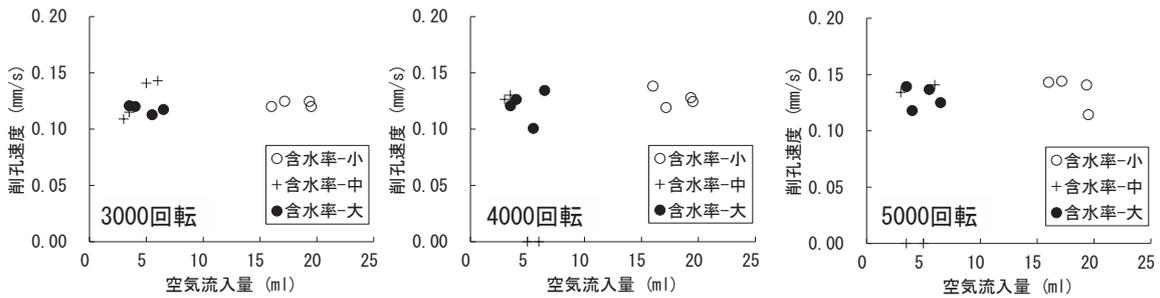


(b) 修正後の抽出条件で削孔速度を算出した場合

図3.4 削孔速度と表面含水率の関係



(a) 修正前の抽出条件で削孔速度を算出した場合



(b) 修正後の抽出条件で削孔速度を算出した場合

図3.5 削孔速度と空気流入量の関係

修正後の抽出条件で削孔速度を算出した場合も、修正前の条件で削孔速度を抽出した場合と同様に、全体としては、含水率が削孔速度に及ぼす影響は小さい。一方、表面からの深さを想定した含水率の範囲内で比較すると、モータの回転数が4000回転では、含水率の増加とともに削孔速度が大きくなる傾向が見られる。ただし、3000回転および5000回転では特定の傾向は見られなかった。これは、削孔速度を抽出する条件の違いによると考えられるが、詳細については不明である。

### 3.3 削孔速度と空気流入量の関係

図3.5に、削孔速度と空気流入量の関係を示す。修正前の抽出条件で削孔速度を算出した場合には、モータの回転数によらず、含水率が大きな範囲(5~6%および7%)では、空気流入量の増加とともに削孔速度が大きくなる傾向にあるが、含水率の小さな範囲(4~5%)では、削孔速度と空気流入量の間特定の傾向はみられなかった。

修正後の抽出条件で削孔速度を算出した場合には、空気流入量によらず削孔速度の変化は小さく、削孔速度に及ぼす空気流入量の影響は小さいことから、セメントペースト部分のみを抽出した削孔速度では透気性を評価するには十分でないおそれがある。

## 4. まとめ

本研究では、コンクリート試験体表面からかぶり厚さまでの含水率の違いに注目し、吸水処理によってかぶり厚さまでの含水率に調整した試験体を用いて、含水率が削孔速度に及ぼす影響、ならびに、かぶり厚さまでの削孔速度と空気流入量との関係を整理することで、透気性の評価を試みた。また、小径ドリル型削孔試験機モータの回転数および削孔速度の抽出条件が削孔速度と空気流入量との関係に及ぼす影響についても検討した。本研究の範囲で得られた知見をまとめると、以下のとおりとなる。

- 1) ドリル削孔試験のモータの回転数が大きくなると、削孔速度の抽出条件によらずばらつきが大きくなる。
- 2) 水セメント比55%までは、水セメント比の増大にともなって空気流入量は増加傾向にあるが、水セメント比60%では低下に転じる。
- 3) 空気流入量と表面含水率の間には相関関係がみられ、含水率7%程度までは評価できる可能性がある。
- 4) 含水率の範囲によって、削孔速度は含水率の影響を受けるおそれがある。
- 5) 削孔速度の抽出条件の違いにより、得られる削孔速度が評価する部分が異なることから、削孔速度と含水率との関係が逆転する現象がみられる。
- 6) 修正前の細骨材の影響を含む抽出条件において、含水率が5%を超える範囲では、空気流入量の増加にともない、削孔速度は大きくなる傾向にあるが、修正後の抽出条件では、削孔速度の差異は小さく、透気性を評価するには十分でないおそれがある。

#### 参考文献

- 1) 佐藤翔，藤森繁，犬飼利嗣，井向日向：コンクリート表面からの深さがドリル削孔速度と物質移動抵抗性に及ぼす影響
- 2) 例えば，安江歩夢，加藤風紗，犬飼利嗣，藤森繁：小径ドリル型削孔試験跡を利用した透気性評価手法と簡易透気速度とドリル削孔速度との関係に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.1139-1144，2021.7
- 3) 佐藤翔，辺志切琉成，井向日向，犬飼利嗣，藤森繁：修正したドリル削孔速度とシリンダー法による空気流入量との関係に関する実験的検討，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，第23巻，pp.157-162，2023.10
- 4) 朴相俊，藤森繁，青木孝義，畑中重光：小径ドリル型削孔試験機を用いたコンクリートの圧縮強度推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.1207-1212，2017.7
- 5) 辺志切琉成，天田百合子，犬飼利嗣，藤森繁：セメントペースト部分のドリル削孔速度を算出する抽出条件の修正に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.1330-1335，2023.7
- 6) 安江歩夢，家田康暉，藤森 繁，犬飼利嗣：モルタルのブリーディングが硬化後表層のドリル削孔速度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1528-1533，2020.7