

# 報告 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

佐藤 翔<sup>\*1</sup>・藤森 繁<sup>\*2</sup>・犬飼 利嗣<sup>\*3</sup>・井向 日向<sup>\*4</sup>

**要旨**：筆者らはこれまでに、ドリル削孔速度と各種透気試験法による透気性指標との関係について検討し、ドリル削孔速度により透気性を評価できることを示した。鉄筋コンクリート部材の健全性はかぶり厚まで評価できることが望ましいが、現状の削孔深さ10mmでは極表層部のみを評価するに留まることが危惧される。そこで本報では、コンクリート表面からの深さがドリル削孔速度と吸水性、透気性に及ぼす影響について検討した。実験結果より、表層10mmの削孔で得られる削孔速度により、表面から30mmまでの吸水性を評価できることを示した。また、測定面が乾燥した状態であれば、透気性についても評価できることを再確認した。

**キーワード**：小径ドリル型削孔試験、削孔速度、吸水性、吸水速度、透気性、空気流入量

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は経年により劣化が生じるため、構造物を維持管理する上では、強度や耐久性を調査診断することが重要である。強度や耐久性を適切に評価するには、構造物からコアを採取し評価することが望ましいが、歴史的価値の高い建築物等では、部材を傷つけない非破壊試験法か損傷を最小限とする微破壊試験法によって評価することが望まれる。そのため、これまでに鉄筋コンクリート構造物の調査診断を目的とした非破壊・微破壊試験法の開発と適用が検討されてきた。

本実験で用いる小径ドリル型削孔試験機は、削孔径 $\phi 3\text{mm}$ 、削孔深さ10mmの微破壊試験装置であり、モルタルやコンクリートなどの複合材料に適用するための改良を重ね<sup>1)</sup>、抽出したセメントペースト部分のドリル削孔速度から、おおよその圧縮強度が推定できることを報告している<sup>2)</sup>。また、小径ドリル型削孔試験で得たドリル削孔速度とコンクリート表層の透気性の関係についても継続的に検討<sup>3)</sup>している。既報<sup>4)</sup>では、トレント法による透気係数と強い相関関係にあるシリンダー法による空気流入量<sup>5)</sup>に着目し、ドリル削孔速度と空気流入量は強い相関関係にあることを明らかにした。おおよそではあるが、ドリル削孔試験によって圧縮強度と透気性を同時に評価できれば、鉄筋コンクリート構造物の健全性評価に大いに資すると考えられる。

一方で、鉄筋コンクリート部材の健全性を評価するには、少なくとも建築基準法施行令第79条に定められた鉄筋のかぶり厚さ(ここでは、30mm)まで評価していることが望ましい。しかし、現状の小径ドリル型削孔試験で削孔可能な深さ10mmでは、コンクリートの極表層部の

みを評価していることが危惧される。

そこで本報では、コンクリート表面からの深さによって異なることが予想される含水率や組織の緻密さに着目し、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について検討することとした。すなわち、試験体側面表面および表面から深さ方向に10mmごとに切断した試験体の切断面を対象とした、小径ドリル型削孔試験、シリンダー法による空気流入量試験、および吸水試験の結果から、コンクリート表面からの深さが、削孔速度や物質移動抵抗性の指標となる吸水速度や空気流入量に及ぼす影響について検討した。また、ドリル削孔速度と物質移動抵抗性との関係についても検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因

表-1に実験要因を示す。実験要因は、水セメント比とコンクリート表面からの深さ(以降、測定面深さとする)とした。水セメント比は45, 50, 55, および60%の4水準とし、測定面深さは表面から深さ0(試験体側面表面)、10, 20, 30, および40mmの5水準とした。

### 2.2 使用材料および配合と試験体

表-2に使用材料を、表-3に配合とフレッシュ性状を示す。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

表-1 実験要因

因子	水準
水セメント比 (%)	45, 50, 55, 60
コンクリート表面から深さ方向の距離の距離 (mm)	0, 10, 20, 30, 40

\*1 岐阜工業高等専門学校 専攻科先端融合開発専攻 (学生会員)

\*2 大同大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

\*4 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博士(工学) (正会員)

表-2 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-3 配合とフレッシュ性状

No.	W/C (%)	空気量 (%)		スランブ (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	±	4.2	±	19.0	42.9	336	1008	4.20		
4	60	1.5	4.0	2.5	20.0	42.3	308	1032	4.20		

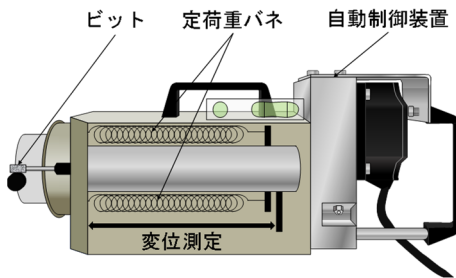


図-2 小径ドリル型削孔試験機

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。空気量とスランブは、目標値を得られるよう単位混和剤量で調整した。

図-1に、試験体と試験位置を示す。試験体は、150mm角の立方体とし、水セメント比1水準につき6体作製した。なお、型枠材は塗装合板であり離型剤は使用していない。試験体は材齢1日で脱型後、既報<sup>3),4)</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°Cの気中養生をした。気中養生期間中の相対湿度は未調整としたため、供試体の含水状態は、空気流入量試験とドリル削孔試験の試験開始前に静電容量式表面含水率計を用いて確認することとした。試験体の切断は気中養生期間中の材齢8週で行い、切断位置は試験体側面表面から10、20、30、および40mmとした。また、いずれの試験体も、切断時の給水量と切断に要した時間は同一とした。

### 2.3 実験方法

試験は、図-1に示した未切断の試験体の表面および表面から10~40mmの位置で切断した厚さ140~110mmの試験体の切断面(以降、測定面とする)において、シリンダー法による空気流入量試験、吸水試験、ドリル削孔試験の順で各試験を実施した。ドリル削孔試験は、吸水試験終了後、7日間恒温室にて乾燥させたのちに実施した。

ドリル削孔試験には、図-2に示す小径ドリル型削孔試験機<sup>2)</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

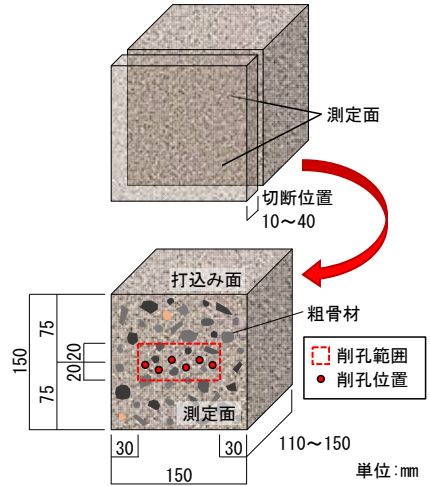


図-1 試験体と試験位置

表-4 削孔速度 $V_p$ の抽出条件

抽出速度範囲	0.06~0.13 mm/s
速度振幅	0.2 mm/s以下
連続削孔深さ	0.05~0.4 mm

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>6)</sup>で修正した表-4に示す抽出条件を用いた。これらの抽出条件は、削孔穴側面の画像と1/25秒ごとに算出した削孔速度の関係、および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おり、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継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>7)</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-4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。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2本のビットを使用したの

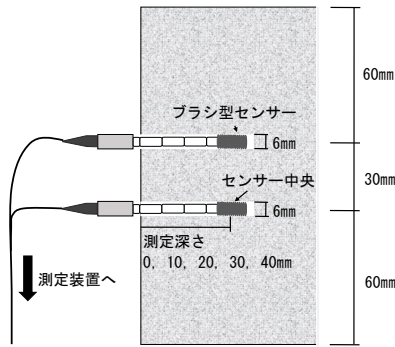


図-3 含水率測定の概要

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、各試験体とも図-1中に赤色の破線で示した削孔範囲内の骨材を避けた6点で行い、その平均値を試験値とした。なお、試験体表面(測定面深さ0mm)では、測定範囲内の任意の点を削孔し、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、削孔範囲内に新たに測定点を設けて削孔した。また、削孔深さが10mm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。

含水率の測定には、電気抵抗式コンクリート・モルタル水分計を用いた。含水率は、試験体の側面から振動ドリルを用いて深さ50mmの孔を開け、図-3に示すように各測定面深さに対応する位置までブラシ型センサーを差し込んで測定した。

吸水試験は、各試験体の測定面を吸水面として実施した。試験体は、吸水面以外からの水分の移動を抑制するために、吸水面以外をアルミテープで被覆した。吸水開始前に重量を測定後、ウェスを敷いて水を張ったバットに吸水面を下向きにして静置し、吸水開始から10分、30分、1時間、3時間、1日、2日、3日、5日および7日経過時の重量を測定した。吸水開始前からの重量の増分を吸水量とし、吸水量を吸水時間で除した値を吸水速度として整理した。

図-4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

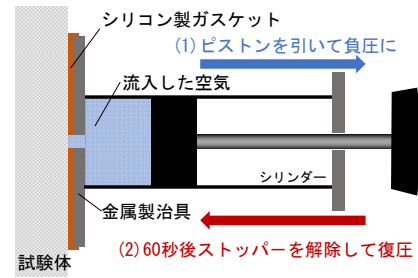


図-4 シリンダー法の概要

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。試験にあたっては、測定面において、前述した含水率とは別に、静電容量式表面含水率計で含水率を測定し、トレント法で目安とされている含水率上限値の5.5%以下であることを事前に確認している。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 深さ方向の含水率の変化

図-5に、含水率と測定深さの関係を示す。水セメント比によらず、測定深さが大きくなると含水率も大きくなる傾向がみられ、おおむね線形的に増加している。ただし、水セメント比55%では、測定深さが20~30mm以深で減少する傾向がみられる。これは、測定位置の試験孔内でブラシ型センサーと接するコンクリートの構成要素(骨材、空隙、セメントペースト等)の違いによるものと推察されるが、詳細については別途検討を要する。

#### 3.2 削孔速度 $V_p$ に及ぼす影響

図-6に、削孔速度 $V_p$ と測定面深さの関係を示す。試験体側面表面(測定面深さ0mm)では、水セメント比の増加にともなって削孔速度 $V_p$ も大きくなり、既報<sup>5)</sup>と同様の傾向を示している。また、測定面深さによらず水セメント比による削孔速度の差異は確認できる。一方、測定面深さ40mmでばらつきはみられるが、削孔速度 $V_p$ と測定面深さの関係には特定の傾向はみられない。したがって、少なくとも表面から30mmの範囲であれば、削孔速度 $V_p$ に及ぼす測定面深さの影響は小さいと考えられる。なお、ドリル削孔速度の標準偏差は0.003~0.024mm/sであり、変動係数はW/C=45%、測定面深さ40mmで最大となった。

#### 3.3 吸水性状に及ぼす影響

図-7に、吸水量と吸水時間の関係を測定面深さごと

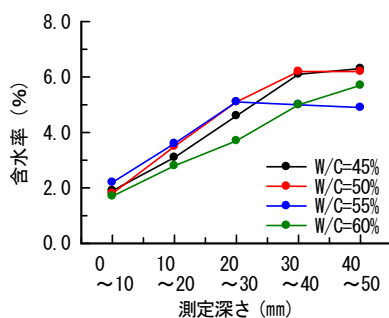


図-5 含水率と測定深さの関係

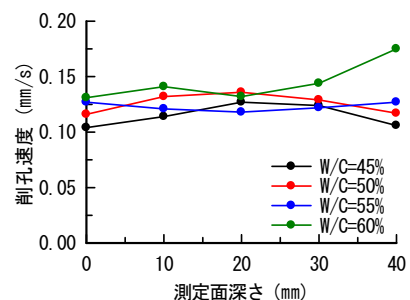


図-6 削孔速度 $V_p$ と測定面深さの関係

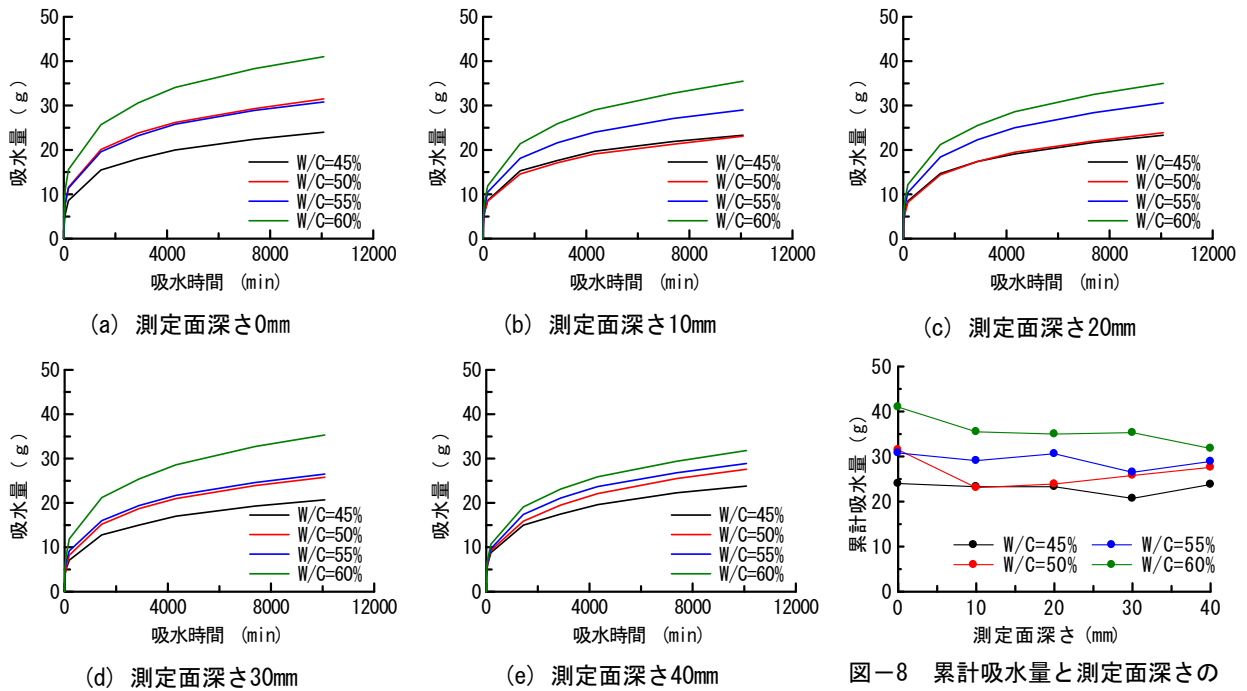


図-7 吸水量と吸水時間との関係

図-8 累計吸水量と測定面深さの関係

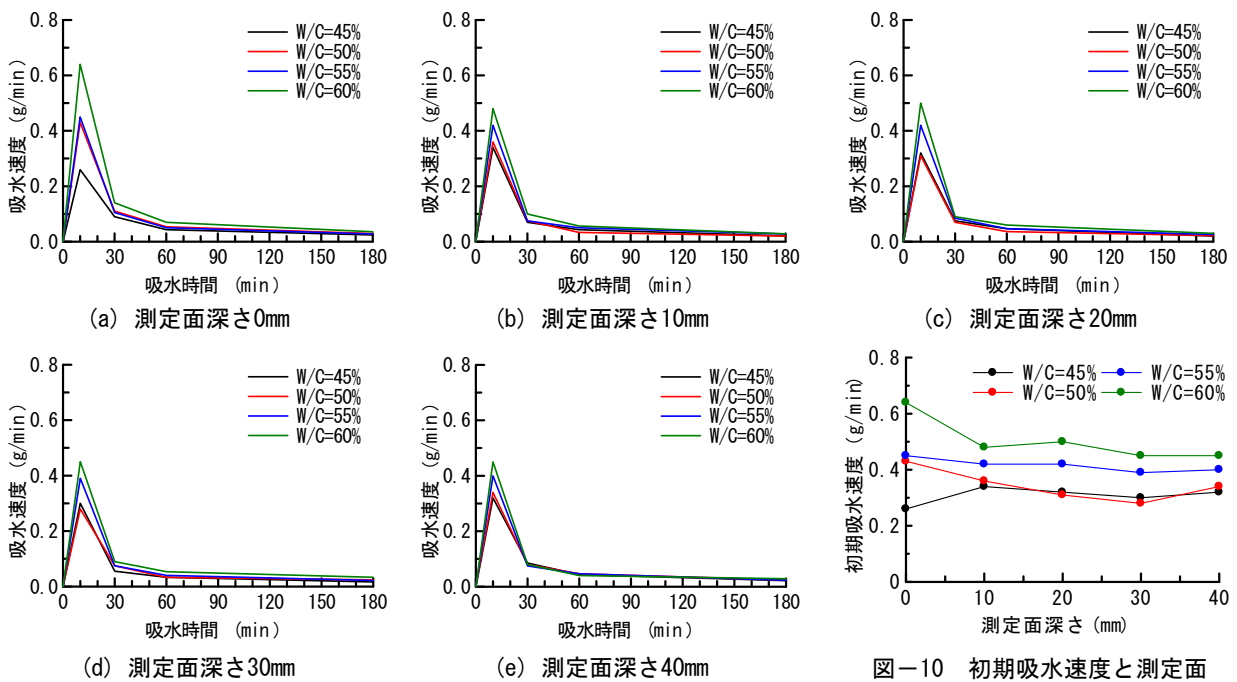


図-9 吸水速度と吸水時間との関係

図-10 初期吸水速度と測定面深さの関係

に示す。また、図-8に、累計吸水量と測定面深さの関係を示す。なお、吸水試験は空気流入量試験終了直後に実施していることから、試験開始時の含水率はおおむね5.5%以下であると想定される。ここで、累計吸水量は、吸水試験開始から7日(10080min)後の吸水量とした。図-7によれば、吸水量は水セメント比によらず、吸水開始直後に大きく増加し、以後は吸水時間の経過とともに緩やかに増加する傾向にある。また、図-8によれば、

一部にばらつきがみられるが、測定面深さによらず、水セメント比が大きくなるにもなって吸水量が大きくなる傾向にある。これは、水セメント比によるセメントペースト部分の緻密さが異なることに起因すると推察される。なお、水セメント比60%では、測定面深さの増大にともない、若干ではあるが累計吸水量が減少する傾向がみられるが、コンクリート測定面の構成要素の違いによるものと推察される。

図-9に、吸水速度と吸水時間を測定面深さごとに示す。吸水速度は、測定面深さによらず吸水時間が10分で最大となった後は低下し、吸水開始から1時間以後は、水セメント比、測定面深さによらず、おおむね一定の値となっている。したがって、吸水開始から10分までの吸水速度の違いが、最終的な吸水量に大きく影響を及ぼすと考えられる。

図-10に、吸水試験開始から10分間の初期吸水速度と測定面深さの関係を示す。測定面深さが10mm以深では、測定面深さによらず初期吸水速度の差異は小さい。また、試験体側面表面では初期吸水速度が大きくなる傾向もみられる。これらは、試験体側面表面にはみられない粗骨材が、測定面深さが10mm以深の切断面になると表面に現れ、相対的にセメントペースト部分の割合が小さくなることに起因すると考えられる。

図-11に、削孔速度 $V_p$ と初期吸水速度の関係を示す。測定面深さ20mmを除いては、初期吸水速度の増加にともなって削孔速度 $V_p$ も大きくなる傾向にあり、両者の間には相関関係が認められる。測定面深さ20mmの傾向が異なる点については、水セメント比50%の測定結果のば

らつきが影響していると考えられるが、詳細については別途検討を要する。また、測定面深さ40mmでは、線形近似式の傾きが他と比較して大きくなっている。これは、図-6に示したように、水セメント比60%の削孔速度 $V_p$ が他と比較して大きくなったことに起因すると考えられるが、削孔速度 $V_p$ が大きくなった要因については、別途詳細に検討をしたいと考えている。

以上の結果より、吸水性状については、試験体側面表面の影響が最も大きい。また、図-10によれば、ばらつきはあるものの、初期吸水速度と水セメント比の大小関係は、測定面深さによらず、試験体側面表面と同様の傾向にあることから、現行の小径ドリル型削孔試験により評価している表面から10mmの削孔速度によって、表面から30mm程度までの範囲の吸水性を評価できる可能性が示唆された。なお、ドリル削孔試験の際、削孔粉の排出を目的にドリルビットに沿って給水しているが、削孔試験に要する時間は最大でも120秒程度であり、削孔時の吸水が削孔速度に及ぼす影響は小さいと考えている。

### 3.4 空気流入量に及ぼす影響

図-12に、シリンダー法による空気流入量と測定面深さ

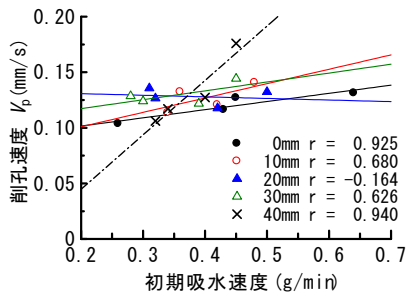


図-11 削孔速度 $V_p$ と初期吸水速度の関係

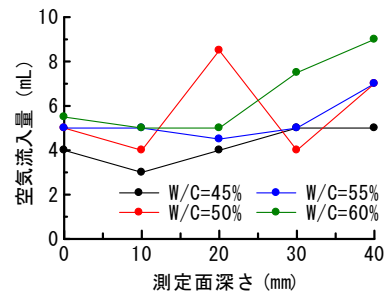


図-12 空気流入量と測定面深さの関係

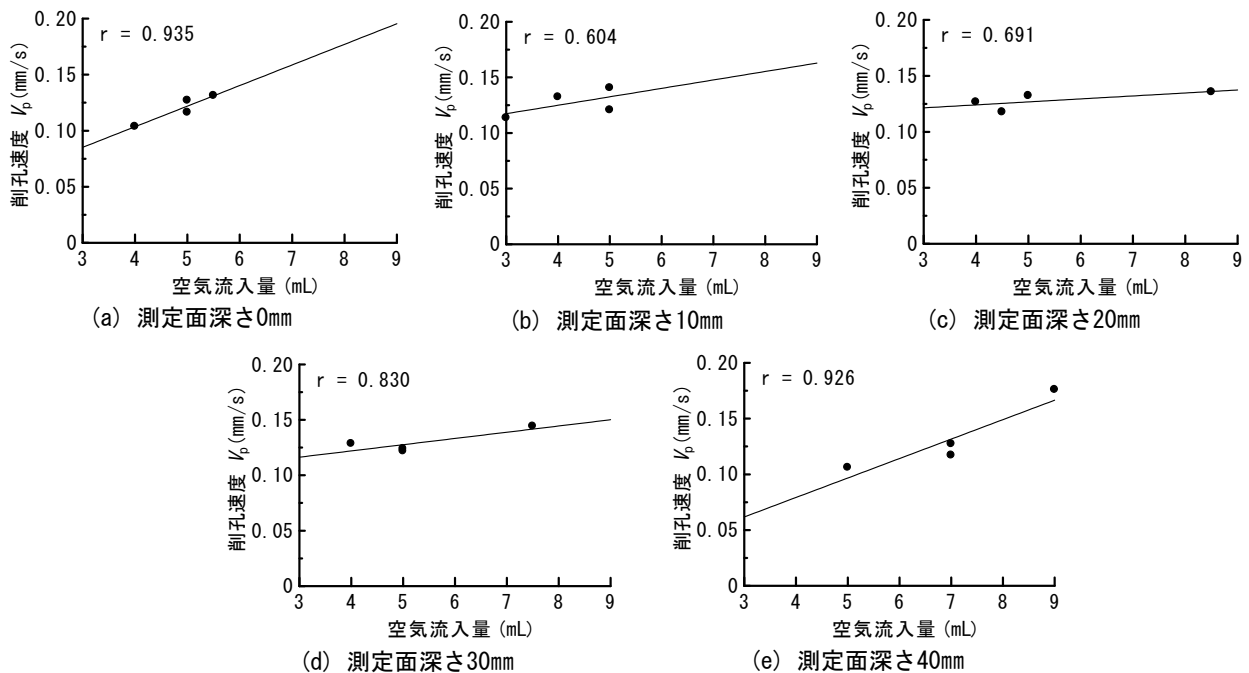


図-13 削孔速度 $V_p$ と空気流入量の関係

さの関係を示す。水セメント比が50%では大きなばらつきがみられるが、空気流入量は、試験体側面表面である測定面深さ0mmから試験体内部に至ると一度小さくなったのち、再び大きくなる傾向がみられる。これは、養生期間中に試験体を切断し、測定面を開放した状態で試験日まで気中養生としていたことに起因すると考えられる。図-5に示したように、試験体内部の含水率は、試験体側面表面から深くなるほど大きくなっている。しかし、試験体を切断し測定面を開放した状態で気中養生したので、本来であれば水和反応で消費される細孔中の水分が乾燥によって失われ、移動経路となり空気流入量の増加に繋がったと推察される。

図-13に、削孔速度 $V_p$ と空気流入量の関係を測定面深さごとに示す。測定面深さによらず、空気流入量が大きくなると削孔速度 $V_p$ は大きくなる傾向にあり、両者の間には相関関係が認められる。とくに、試験体表面である測定面深さ0mmでは相関係数が非常に大きく、既報<sup>1)</sup>の結果とも一致する。しかし、測定面深さ10mm以深では、相関係数が小さくなることも一部にみられる。これは、測定面に存在する粗骨材断面が占める割合が空気流入量に影響を及ぼすことに起因すると推察されるが、詳細については別途検討を要する。

今回の実験条件では、測定面に存在する粗骨材や、試験体内部の含水率を考慮した空気流入量の測定はできていない。したがって、表面から10mmの削孔で得られる削孔速度 $V_p$ によって推定される透気性が、表面から40mmまでの透気性を代表できるかは定かではない。ただし、各試験前の表面含水率は、空気流入量試験の前で4.5~5.2%、また、削孔試験前では4.6~5.2%であったので、表面が乾燥した状態であれば、図-13に示したように削孔速度 $V_p$ と空気流入量との相関は強く、削孔速度 $V_p$ で透気性を評価できることは示唆された。今後は、含水率や測定面の粗骨材の面積を要因とした試験体を対象として、空気流入量に及ぼす影響について詳細に検討をしたいと考えている。

#### 4. まとめ

本実験で得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 少なくとも、表面から30mmの範囲であれば、測定面深さが削孔速度 $V_p$ に及ぼす影響は小さく、水セメント比の差異をとらえることができる。
- 2) 吸水量は、水セメント比が大きくなると増大する。また、吸水開始から10分間の初期吸水速度が最終的な吸水量に大きく影響を及ぼすと考えられる。
- 3) 水セメント比による吸水速度の差異は、試験体側面表面で最も差が大きく、試験体の内部では差は小さい。また、測定面深さによらず、初期吸水速度と水セメン

ト比の大小関係は同様の傾向にあることから、試験体側面表面の削孔速度 $V_p$ によって、おおむね深さ30mmまでの吸水性状を評価できる可能性が示唆される。

- 4) 本実験の範囲では、試験体内部の測定面深さが10mm以深で空気流入量が増加する傾向がみられたが、これは、測定面の乾燥によって細孔中の水分が失われ移動経路となったことによるものと推察される。
- 5) 削孔速度 $V_p$ と空気流入量との相関係数は大きく、削孔速度 $V_p$ によって、コンクリートの透気性を評価できることが示唆された。

#### 謝辞

本研究費の一部は、JSPS科研費JP19K04719(研究代表者：藤森 繁)によった。本実験の遂行にあたり、竹本油脂株式会社および、岐阜工業高等専門学校学生のご助力を得た。ここに付記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 藤森 繁，長谷川哲也，畑中重光，青木孝義，朴 相俊：小径ドリル型削孔試験機の改良とコンクリートへの適用のための検討，日本建築学会技術報告集，Vol.23，No.53，pp.25-30，2017.2
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 関川昌之，渡邊健：シリンダーを用いた透気試験機の開発，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，A-1，1521，pp.1041-1042，2021.9
- 6) 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
- 7) 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