

論文 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

安江 歩夢*1・家田 康暉*2・藤森 繁*3・犬飼 利嗣*4

要旨: 本研究では、小径ドリル型削孔試験機を用いた構造物表層の品質評価を目的とし、表層品質に影響を及ぼすブリーディングとの関係を検討した。また、打込み面、上部側面、および下部側面の削孔速度から、試験体高さ方向の品質が削孔速度に及ぼす影響についても検討した。実験結果より、打込み面の削孔速度は、側面より大きな値を示す傾向があり、脆弱層を評価できる可能性が示唆された。一方、試験体高さや型枠界面に発生する水みちなどの影響により、上部側面と下部側面の削孔速度に明確な差異はみられなかった。また、水セメント比を実験要因とした削孔速度 V_p と小型容器ブリーディング量の間には相関関係がみられた。

キーワード: 水セメント比, 単位水量, ブリーディング, モルタル, 小径ドリル型削孔試験, 削孔速度

1. はじめに

一般的に用いられているコンクリートは、施工上の要求から、水和反応に必要な水量よりも多くの水量を必要とする。したがって、水和反応に必要な水は、施工終了後、鉄筋コンクリート構造物に品質の低下をもたらす余剰水となる。また余剰水は、材料分離の一つであるブリーディングを引き起こす要因となる。ブリーディングが過剰になると粗骨材や水平鉄筋下面に水隙が形成されるだけでなく、コンクリートの上層部も脆弱となり耐久性は低下し強度も減少する¹⁾。したがって、ブリーディングの挙動を知ることは、コンクリート構造物の内部のみならず、硬化後表層の品質を評価する上で極めて重要である。

一方、調査・診断の分野では、コンクリート構造物に対する損傷が小さく、高い精度で強度や耐久性の評価が可能な微破壊試験への期待が寄せられている。本研究で検討している小径ドリル型削孔試験もその一つであり、既報^{2,3)}において削孔速度によりコンクリートの圧縮強度や表層の品質が推定できる可能性を示唆している。しかし、ブリーディングと削孔速度の関係については明らかではなく、削孔速度によってブリーディングの影響を捉えることができれば、小径ドリル型削孔試験機の適用範囲はより拡大し、コンクリート表層の品質も精度よく容易に評価することにつながると考えられる。

そこで本研究では、コンクリート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を検討する前段階として、モルタルを試料とし、配合を要因とした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を検討した。また、打込み面、上部側面、

および下部側面の測定結果から、試験体高さ方向の削孔速度に及ぼすブリーディングの影響について検討した。

2. 水セメント比がブリーディング量とドリル削孔速度に及ぼす影響(実験1)

2.1 実験要因

実験要因は4水準の水セメント比とし、それぞれ50, 55, 60, および65%とした。

2.2 モルタルの使用材料および配合

表-1にモルタルの使用材料を、表-2にモルタルの配合を示す。単位細骨材量は、水セメント比による影響を明確にするためにいずれも同一とし、空気量(8±2%)とフロー値(190±20)も一定の範囲内に収まるように単位混和剤量で調整した。

2.3 実験方法

(1) モルタルの練混ぜおよびフロー試験

モルタルの練混ぜおよびフロー試験は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法(10.4.3.練混ぜ方法および11.フロー試験)」に準じて行った。

表-1 モルタルの使用材料(実験1, 2)

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 ³ , 比表面積:3480cm ² /g	C
細骨材	乾燥珪砂(4号, 5号)	絶対密度:2.54g/cm ³ , 混合比率 1:1	S
混和剤	高性能減水剤(I種)	主成分:ポリカルボン酸コポリマー	AD
水	上水道水	-	W

表-2 モルタルの配合(実験1)

No.	W/C (%)	Air (%)		FL		S/C (wt)	単位量(kg/m ³)			
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	AD
1	50	8 ± 2	9.0	190 ± 20	182	2.53	508	254	1284	0.72
2	55		7.6		190	2.68	479	263		0.52
3	60		7.6		202	2.84	452	271		0.55
4	65		7.2		203	3.00	428	278		0.23

*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

*3 大同大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

*4 岐阜工業高等専門学校 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

(2) フレッシュモルタルの空気量試験

フレッシュモルタルの空気量は、JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材(5.12.d.モルタルの単位容積質量の測定)」に準じて単位容積質量を測定し、JIS A 1116「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法(質量方法)(6.2.空気量)」により算出した。

(3) ブリーディング試験

モルタルのブリーディング試験は、JCI-S-015-2018「小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法」

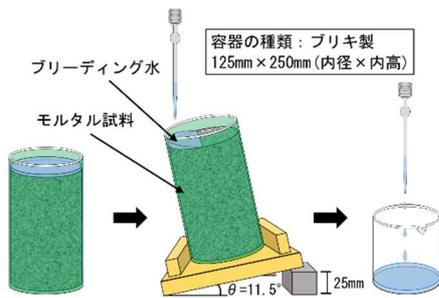


図-1 小型容器によるブリーディング試験方法

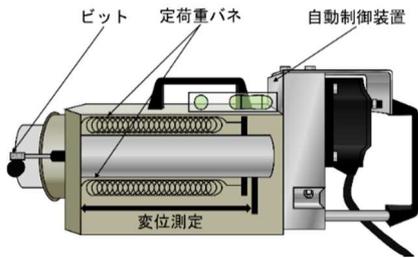


図-2 小径ドリル型削孔試験機

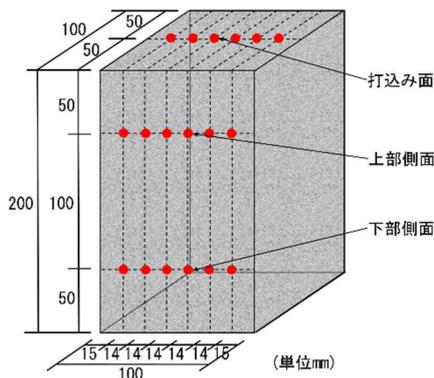


図-3 削孔試験用供試体と測定位置(実験1, 2)

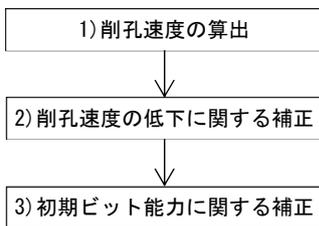


図-4 削孔速度の算出および補正のフロー

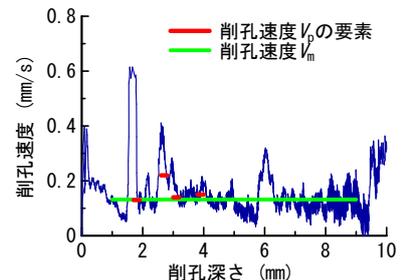


図-5 削孔速度と削孔深さの関係の例(実験1 W/C=50% 下部側面)

に準じ、以下の手順で行った。

試験容器(内径125mm, 内高250mm)に試料を2層で打ち込んだ。試料の表面は、最小の作業で平滑な面となるようにコテで均し、その後から時刻の記録を開始した。記録した最初の時刻からブリーディングが認められなくなるまで30分ごとに、図-1に示すようにブリーディング水を吸い取った。吸い取った水は質量で1mlまで記録した。ブリーディングが認められなくなったら、直ちに容器と試料の質量を量り、本試験で得た小型容器ブリーディング量を式(1)により算出した。

$$B_q(\varphi^*) = V/A \quad (1)$$

ここに、 $B_q(\varphi^*)$: 小型容器ブリーディング量(cm^3/cm^2)
 φ^* : 容器の内径(*をmm表示の数値に置き換える)
 V : 最終時まで累計したブリーディングによる水の容積(cm^3)
 A : 試料上面の面積(cm^2)

(4) 小径ドリル型削孔試験

小径ドリル型削孔試験は、図-2に示す試験機を用いた。この試験機は14×2Nの定荷重バネを用い、測定部位にφ2.8mmのダイヤモンドビットを押しつけ、定トルク、定回転数に制御されたモータによって深さ10mm程度まで削孔する装置である。

図-3に、削孔試験に用いた試験体および測定位置を示す。削孔試験には、底面100×100mm、高さ200mmの角柱試験体を用いた。打込み面は、木ごてを用いておおよそ型枠の高さにならした後、試料を指で押しした際に変形しない程度に固まった時点で、金ごてを強く押し付けながら押し固めて仕上げた。試験体は脱型後、材齢28日ま

表-3 本論文で用いる記号とその定義

記号	定義
V_p	主にセメントペーストを削孔していると想定される、削孔速度が0.13~0.40mm/sで、かつ0.20~0.40mmの間継続する区間を抽出し平均した値を示す。細骨材中のビット径未満の微粒分を削孔した結果も含む。ただし、前述の区間内において、異種材料の境界面と推定される削孔速度が0.20mm/s以上変化するものについては除外する。
V_m	削孔時の削孔深さと削孔時間の関係(のグラフ)から、線形近似して得られる傾きを速度として算出したものであり、セメントペーストのみを抽出した V_p とは異なり、モルタル全体の平均削孔速度を示す。ただし、明らかに細骨材のみ、あるいは空隙のみを削孔したと推定される区間については近似する範囲から除外する。
rV_f	削孔開始時におけるレファレンスモルタル(深さ0~5mm)の削孔速度 V_m を示す。
rV_e	削孔終了時におけるレファレンスモルタル(深さ0~5mm)の削孔速度 V_m を示す。

では標準水中養生とし、その後、試験日とした材齢91日まで20℃の気中養生とした。試験体数は1水準につき2体とした。測定位置は、打込み面、上部側面、および下部側面の3面とし、各測定面において、図中に赤点で示した6点を削孔した。なお、後述するが、削孔速度を補正するために、各水準の試験体の削孔試験の前後に、0.6mm以下の細骨材のみで作成した同一のレファレンス用モルタルを削孔した。

図-4に削孔速度の算出および補正のフローを、表-3に本論文で用いる記号とその定義を示す。以下に、削孔速度の算出および補正方法を詳述する。

1) 削孔速度の算出

図-5に、削孔速度と削孔深さの関係の一例を示す。図は、1回の削孔試験結果であり、1/100秒間隔で測定された削孔深さを11点移動平均した後、その移動平均値を1/25秒ごとにプロットしたデータを示している。削孔速度は、骨材を含む部分では極端に遅くなる一方、空隙部や界面を削孔した場合はより速くなる。したがって、本研究では、主にセメントペーストを削孔していると想定される区間を抽出した。図中の赤線が、抽出された主にセメントペーストを削孔していると想定される部分で、これらを平均して削孔ごとの削孔速度を算出している。各測定面の削孔速度 V_p は、2体の試験体により得られる計12回の削孔速度の平均値とした。 V_p の要素の抽出基準については文献2)を参照されたい。また、図には、細骨材を含むモルタル全体の削孔速度 V_m も緑線で示した。なお、本研究では、極表層の品質評価を目的としているので、 V_p および V_m のいずれについても、削孔深さ0~5mmの範囲で算出された値を用いている。

2) ビットの切れ味(能力)の低下に関する補正

ビットの切れ味(能力)は、削孔回数増加にともなうビット先端のダイヤモンド粒子のすり減りにより、おおむね線形的に低下する²⁾。しかし、実際には強度が大きく、硬い材料を長時間削孔した場合には、ダイヤモンド粒子は大きく摩耗するので、削孔回数のみで切れ味の低下の

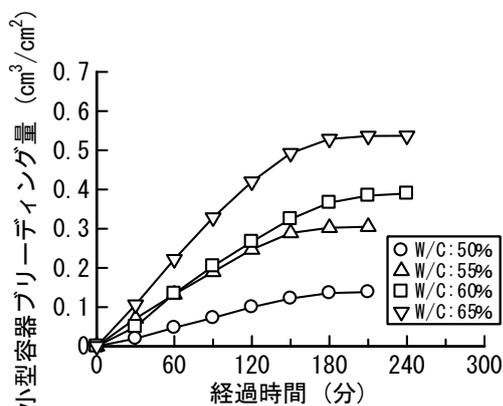


図-6 小型容器ブリーディング量と経過時間の関係(実験1)

程度を評価するのは困難である。そこで、本研究では、各水準につき1本のビットで削孔試験をし、削孔ごとの削孔深さと削孔時間を乗じた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、1)で得られた各面の削孔速度を補正した。なお、ある面の削孔試験開始時のビットの切れ味は、その直前の面の削孔試験までの削孔による削孔深さと削孔時間の累積和によって低下するものとして、測定面ごとに削孔速度を補正した。

3) ビット間の切れ味(能力)の違いに関する補正

ビットの切れ味(能力)は、ビット自体のばらつきに加え、取付け方向(角度)によっても異なる²⁾。そこで、各水準間での削孔速度を比較検討するために、2)で得られた削孔速度を、各水準において、削孔試験開始前に削孔しておいたレファレンス用モルタルの削孔速度 rV_r の比で補正した。なお、 rV_r は、実験1では水セメント比50%を、実験2では単位水量259kg/m³を基準とした。

本研究では、上述した1)~3)の手順で算出・補正された削孔速度を削孔速度 V_p および削孔速度 V_m として、以降の実験結果を示し議論する。

2.4 実験結果および考察

(1) 水セメント比がブリーディング量に及ぼす影響

図-6に、水セメント比ごとの小型容器ブリーディング量の経時変化を示す。図から分かるように、水セメント比が50および55%では210分まで、水セメント比が60および65%では240分まで小型容器ブリーディング量の増加がみられた。

図-7に、小型容器ブリーディング量と水セメント比の関係を示す。図より、水セメント比が大きくなると小型容器ブリーディング量も大きくなる傾向にあり、図中に示す相関係数 r からも分かるように、小型容器ブリーディング量と水セメント比の間には強い相関関係がみられる。

(2) 水セメント比および測定位置が削孔速度に及ぼす影響

図-8に、削孔速度 V_p と測定位置の関係を示す。図中のエラーバーは、各水準で1体につき6点削孔した、補正前

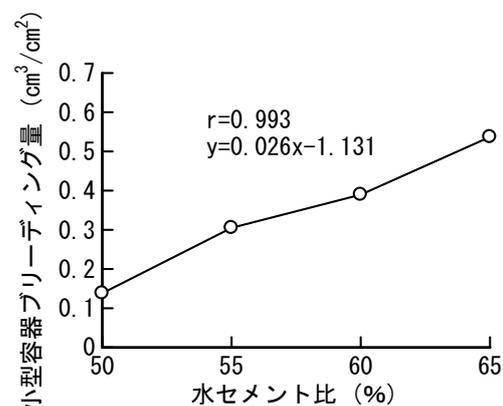


図-7 小型容器ブリーディング量と水セメント比の関係(実験1)

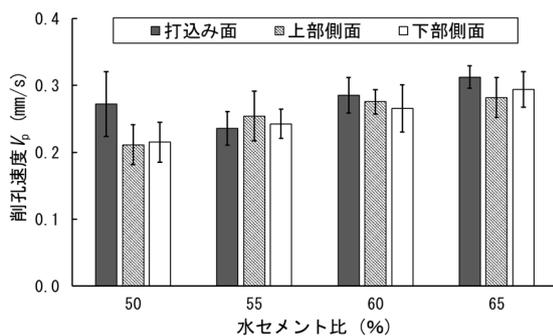


図-8 削孔速度 V_p と測定位置の関係(実験1)

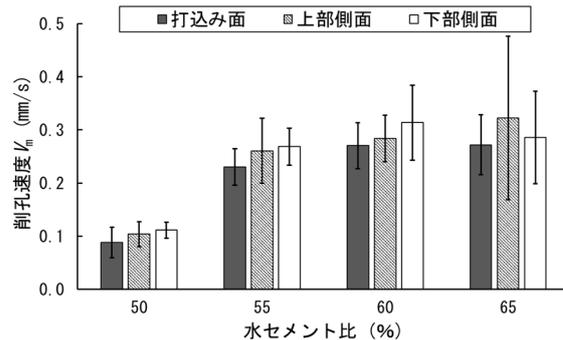


図-9 削孔速度 V_m と測定位置の関係(実験1)

の削孔速度の標準偏差を平均したものである(以降, 図-9, 13および図-14についても同様とする)。図より, 水セメント比が50, 60, 65%では, 打込み面の削孔速度 V_p は試験体側面の削孔速度 V_p より大きいことが分かる。一方, 水セメント比が55%では, 試験体側面の削孔速度 V_p は打込み面の削孔速度 V_p より大きいことから, 水準ごとの打込み面のコテ仕上げの良否が削孔速度に影響を及ぼしているおそれがあるものの, プリーディング水の上昇による試験体上層の脆弱化を評価できる可能性がある。

また, 水セメント比が55および60%においては, 上部側面の削孔速度 V_p は下部側面の削孔速度 V_p より大きな値となっているが, 50および65%においては下部側面の削孔速度 V_p が上部側面の削孔速度 V_p より大きな値を示している。これは, 試験体側面の透気性や透水性は打込み高さに比例するわけではなく, 上層部はプリーディングによる影響を顕著に受ける⁴⁾こと, また, 型枠と試料の界面が水みちとなり自由水が型枠面に沿って移動する⁵⁾こと, および200mm程度の高さが透気係数に及ぼす影響は小さい⁶⁾ことなどによるものと考えられる。さらに, 本実験に用いた試験体の高さが200mmで, かつ削孔速度を評価する範囲が表層から5mmまでの極表層であることを考慮すると, 試験体側面の削孔速度 V_p は, 型枠界面に生じた水みちなどの影響を大きく受けると推察される。その結果, 試験体側面の削孔速度 V_p には, 高さ方向の違いによる明確な差異がみられなかったと考えられる。

また, 打込み面の削孔速度 V_p は, コテ仕上げなどの影響により多少のばらつきはみられるが, 上部側面および下部側面においては, 水セメント比が大きくなると削孔速度 V_p も大きくなる傾向がみられる。したがって, 本実験の範囲では, 側面の削孔速度 V_p によって, 水セメント比が5%程度の差異を捉えられる可能性がある。

図-9に, 削孔速度 V_m と測定位置の関係を示す。図より, いずれの水セメント比においても, 打込み面の削孔速度 V_m は試験体側面の削孔速度 V_m より小さいことが分かる。また, 側面の削孔では, 型枠界面に生じた水みちなどの

脆弱層の影響を含んでおり, さらにはビット径以下の骨材を削孔した結果も含んでいる。したがって, 削孔速度 V_m において, 試験体側面では脆弱層の, また, コテ仕上げされた打込み面では仕上げの程度による影響が顕著に現れ, 打込み面と側面の削孔速度の関係が逆転したと推察される。加えて, 削孔速度 V_m のばらつきは削孔速度 V_p と比較して大きいことを踏まえると, 削孔速度 V_m により型枠側面の表層品質を捉えることは困難であると考えられる。

(3) 削孔速度とプリーディング量の関係

図-10に, 削孔速度 V_p と小型容器プリーディング量の関係を示す。図より, 試験体側面では, 小型容器プリーディング量が大きくなると, 削孔速度 V_p も大きくなる傾向にあり, 図中に示す相関係数 r からも分かるように, 削孔速度 V_p と小型容器プリーディング量の間には強い相関関係がみられる。また, 打込み面においても, コテ仕上げの影響が顕著に現れたと推察される水セメント比55%を除いて, 小型容器プリーディング量が大きくなると, 削孔速度 V_p も大きくなる傾向がみられる。

3. 単位水量がプリーディング量とドリル削孔速度に及ぼす影響(実験2)

3.1 実験要因

実験要因は4水準の単位水量とし, それぞれ259, 266, 273, および280kg/m³とした。

3.2 モルタルの使用材料および配合

モルタルの使用材料は, 実験1と同様とした。表-4に, モルタルの配合を示す。

3.3 実験方法

実験方法は実験1と同様とした。

3.4 実験結果および考察

(1) 単位水量がプリーディング量に及ぼす影響

図-11に, 単位水量ごとの小型容器プリーディング量の経時変化を示す。図より, 単位水量259kg/m³を除き, 最終的な小型容器プリーディング量は概ね同じ値を示し

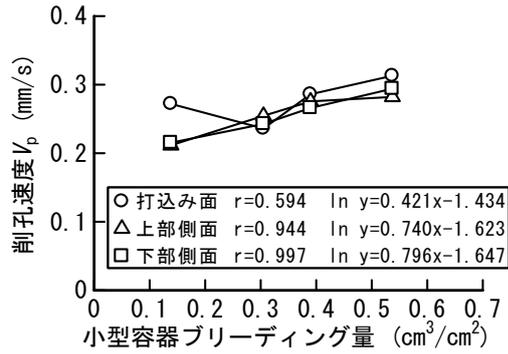


図-10 削孔速度 V_p と小型容器ブリーディング量の関係(実験1)

ていることが分かる。また、単位水量の増加にともないブリーディングの継続時間が長くなっている。これは、単位水量の増加にともなうセメント粉体量の増加によって、拘束水量も増加したことで、単位水量の違いが最終的なブリーディング量に及ぼす影響が小さくなったと推察されるが、単位水量が 259kg/m^3 の小型容器ブリーディング量のみが小さな値を示した原因は不明であり、各材料の比表面積および練混ぜ水の拘束能力を含め、詳細な検討が必要である。

図-12に、小型容器ブリーディング量と単位水量の関係を示す。図中に示した相関係数は大きいですが、上述した通り、単位水量 259kg/m^3 のブリーディング量のみが小さな値を示したことが影響しているので、引き続き詳細な検討を進めていきたい。

(2) 単位水量および測定位置が削孔速度に及ぼす影響

図-13に、削孔速度 V_p と測定位置の関係を示す。図より、単位水量が 259 および 266kg/m^3 では、打込み面の削孔速度 V_p は側面の削孔速度 V_p よりも大きな値を示している。実験1と同様にブリーディング水の上昇による上層の脆弱化を評価できる可能性がある。一方、単位水量が 273 および 280kg/m^3 では、側面の削孔速度 V_p が打込み面の削孔速度 V_p より大きな値を示す例がみられた。これは、試料中の自由水は骨材界面も水みちとして移動することが報告されている⁵⁾ことから、単位水量 273 および 280kg/m^3 では、単位細骨材量が小さく骨材界面の水みちが減少し、型枠界面の水みちの影響がより顕著になると推察されるので、相対的に側面の削孔速度 V_p の値が大きくなったと考えられる。

また、単位水量が 259kg/m^3 の削孔速度 V_p は、いずれの測定位置についても、他の単位水量よりも大きくなっている。これは、単位水量が 259kg/m^3 の小型容器ブリーディング量が他の単位水量に比べて著しく小さな値を示したので、相対的に試料中の水セメント比が大きくなったことに起因していると推察される。また、既報⁷⁾において、空気量の増加にともなう削孔速度 V_p の増加傾向が示され

表-4 モルタルの配合(実験2)

No.	W/C (%)	Air (%)		FL		S/C (wt)	単位量 (kg/m^3)			
		目標値	実測値	目標値	実測値		C	W	S	AD
1	55	8 ± 2	190 ± 20	7.6	195	2.76	471	259	1300	0.91
2				7.5	199	2.63	484	266	1273	0.51
3				6.6	195	2.50	497	273	1243	0.22
4				6.4	198	2.39	509	280	1217	0.00

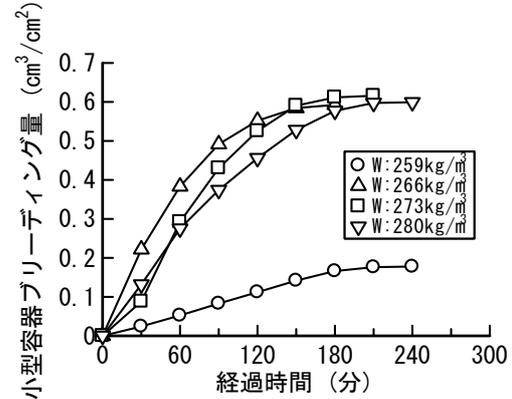


図-11 小型容器ブリーディング量と経過時間(実験2)

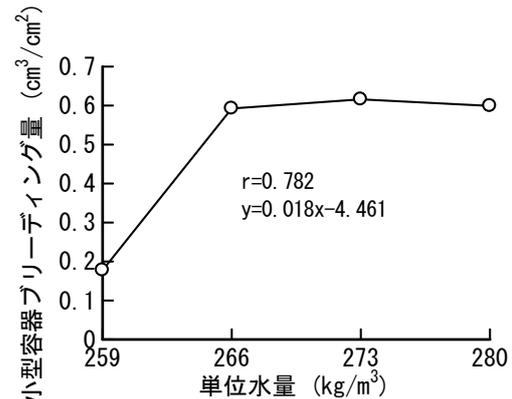


図-12 小型容器ブリーディング量と単位水量(実験2)

ている。表-4に示す通り、単位水量の大きい試料は空気量の値が小さいので、空気量の多寡による影響も考えられる。

図-14に、削孔速度 V_m と測定位置の関係を示す。削孔速度 V_m は、単位水量、測定位置のいずれであっても、削孔速度 V_p と比較してばらつきが大きく、特定の傾向はみられない。実験1による削孔速度 V_m の考察も踏まえれば、削孔速度 V_m による表層の品質評価は困難であると考えられる。

(3) 削孔速度とブリーディング量の関係

図-15に、削孔速度 V_p と小型容器ブリーディング量(実験2)の関係を示す。図より、小型容器ブリーディング量が大きくなると削孔速度 V_p は小さくなる傾向がみられる。これは、実験1とは異なる傾向であり、前項で述べた、小型容器ブリーディング量の差異によって、試料の水セメント比が異なり、削孔速度に影響を及ぼしたと考えられる。

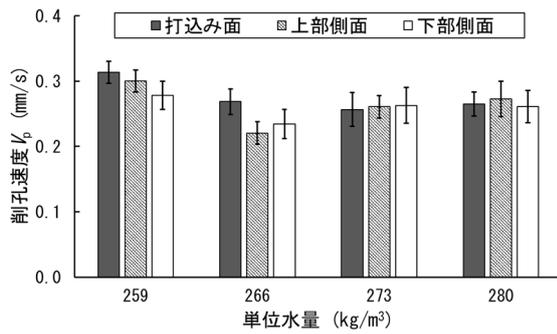


図-13 削孔速度 V_p と測定位置の関係 (実験2)

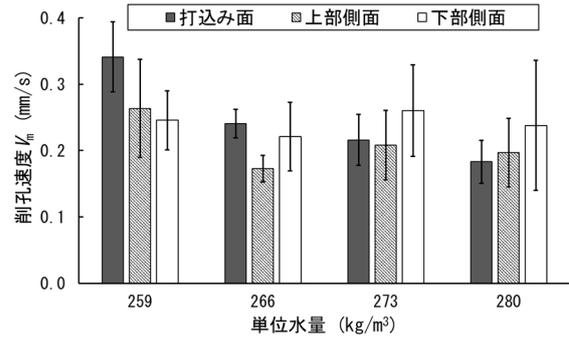


図-14 削孔速度 V_m と測定位置の関係 (実験2)

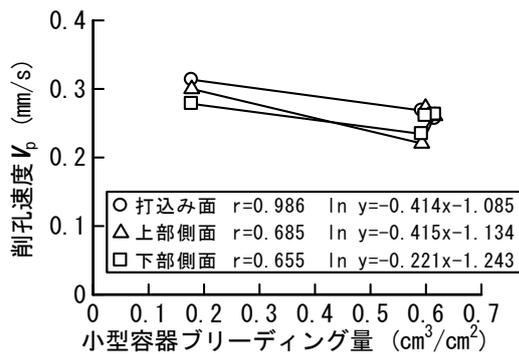


図-15 削孔速度 V_p と小型容器ブリーディング量の関係 (実験2)

5. まとめ

本実験から得られた知見は、以下の通りである。

- 1) 打込み面の削孔速度 V_p は、他の測定面より大きな値を示す傾向にあり、削孔速度 V_p によって、ブリーディングによる表層の脆弱化を評価できる可能性が示唆された。しかし、試験体高さや型枠界面の水みちなどの影響により、試験体側面の削孔速度 V_p が打込み面の削孔速度 V_p を上回ることもある。
- 2) 本実験の範囲内では、試験体高さや型枠界面に生じた水みちの影響が大きく、削孔速度 V_p の側面高さの違いによる差異はみられなかった。
- 3) 本実験の範囲内ではあるが、削孔速度 V_p は試験体側面において、5%程度の水セメント比による差異を評価できる可能性がある。
- 4) 小型容器ブリーディング量と削孔速度 V_p の間には、水セメント比を実験要因とした場合には正の相関関係が、一方、単位水量を実験要因とした場合には、負の相関関係がみられた。これは、小型容器ブリーディング量の差異によって異なる、試料の相対的な水セメント比による影響と考えられる。
- 5) 削孔速度 V_m は削孔速度 V_p と比較し、試験面によるばらつきが大きく、削孔速度 V_m を用いた表層品質の評価は困難であると考えられる。

謝辞

本研究費の一部は、JSPS 科研費 JP19K04719 (研究代表者: 藤森 繁) および令和元年度越山科学技術振興財団研究助成金 (研究代表者: 犬飼利嗣) による。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松崎晋一郎, 吉田 亮, 岸 利治: 単位水量と水セメント比がコンクリート表層の透気性に及ぼす影響とその養生依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.757-762, 2009.7
- 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) 安江歩夢, 加藤和也, 藤森 繁, 犬飼利嗣: 配合要因が硬化モルタル表層の透気性と削孔速度の関係に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.527-532, 2019.7
- 4) 日本コンクリート工学会: 構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書, pp.37-38, 2017.6
- 5) 犬飼利嗣, 畑中重光, 三島直生, 金子林爾: 視覚的評価方法にもとづくモルタル中の自由水のブリーディング挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第590号, pp.1-7, 2005.4
- 6) 樫村 啓, 大塚秀三, 中田喜久, 奥山夏樹: ブリーディング性状の異なる試験体における表面からの距離と硬化コンクリートの品質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.41, No.1, pp.1103-1108, 2019.7
- 7) 安江歩夢, 早矢仕啓太, 加藤和也, 藤森 繁, 犬飼利嗣: ドリル削孔速度による硬化モルタル表層の透気性の評価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19巻, pp.13-18, 2019.10