

論文 打重ねがコンクリートの表層透気性に及ぼす影響

加藤 祐彬^{*1}・三田 勝也^{*2}・加藤 佳孝^{*3}

要旨：コンクリート構造物を構築する上では、打重ねる必要があるが、その場合、上層と下層で打設に時間差が発生し、下層では上層からの圧密を受け、上層では下層からのブリーディングの影響を受ける。特に、構造物の耐久性はかぶりコンクリートの品質が重要となる。本研究では、打重ねがコンクリートの表層透気係数に及ぼす影響について、配合、締固め時間などを変化させて検討した。その結果、打重ねを行った場合、下層部では圧密により表層透気係数が小さくなることや、下層部より中層部の方が、表層透気係数が小さくなること示唆された。

キーワード：打重ね、表層透気性、細孔構造、中性化、締固め

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性は、劣化因子の侵入経路となるかぶりコンクリートの品質が支配している。かぶりコンクリートの品質は構造物では打込み、締固め、材料分離の影響を受け、特にブリーディング水は型枠界面に沿って上昇することが報告されており¹⁾、構造物の寸法によって表層品質は変動し、供試体レベルのものとは異なる。そのため、コンクリート標準示方書²⁾では、材料特性値から望ましくない方向への変動を考慮して、部分安全係数を用いている。

実構造物の施工では部材の全てが一回で打設されるわけではなく、供給可能量や型枠に作用する側圧などにより制限され、打重ねが生じるのが一般的である。既往の研究³⁾によると、実構造物が標準的な施工方法で打設された場合は、下段ほど自重により圧縮されて密実な組織になることや、ブリーディングの影響により圧縮強度は下部と上部で差が生じることが報告されている。さらに打重ねが生じた場合、上層と下層で打設に時間差が生じ、上層では下層からのブリーディングの影響を受け、下層では上層からの圧密の影響とブリーディングによる脱水の影響を受けると考えられるが、打重ねによる表層品質への影響に関する研究は少ない。

そこで、本研究では打重ねがコンクリート表層品質に及ぼす影響を検討することを目的とし、打重ね高さそれぞれの測定位置の表層透気性および表層の細孔構造との関係を実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 にコンクリートの配合および使用材料を示す。

シリーズ I は打重ねによる上層の打込み高さが下層コンクリートの表層品質に及ぼす影響の検討を目的としたものであり、水セメント比 60% の配合を用いた。シリーズ II では、打重ねが表層品質に及ぼす影響、および水セメント比が打重ねにおよぼす影響の把握を目的とし、水セメント比を 60, 50, 40% の 3 水準とした。単位水量の影響をなくすため、単位水量を一定とし、混和剤を使用することにより、空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ 、スランプを $10.0 \pm 2.5\text{cm}$ に調整した。

2.2 供試体寸法

図-1 に試験体概要を示す。シリーズ I では下層の打設高さを 200mm とし、打重ね上層を 0, 200, 300, 400mm の 4 水準とした。シリーズ II では測定高さ毎の表層透気性について検討するとともに、打重ねの無い供試体も作製し、下層の打設高さを 150mm とし、打重ね上層を 0, 150, 300, 450mm の 4 水準とした。水セメント比を変えた試験体では打重ね下層が 150mm、上層が 450mm の供試体を作製した。それぞれの配合で、打重ねと高さ方向の変動の影響が無い表層透気係数を把握するために、1 辺 150mm の立方体（以下、基準供試体）を作製した。

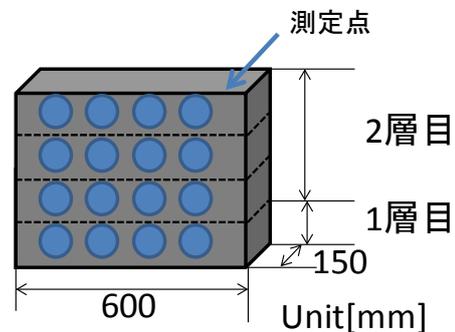


図-1 試験体概要

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部土木工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 コンクリート配合および使用材料

W/C %	目標air %	s/a %	単体量(kg/m ³)				AE(g)
			W	C	S	G	
60	4.5	45	175	292	823	1032	14.6
50	4.5	45	175	350	801	1005	17.5
40	4.5	42	175	438	717	1016	23.4

セメント(C):普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)

細骨材(S):山梨県富士川産川砂(表乾密度2.66g/cm³)

粗骨材(G):埼玉県秩父産碎石(表乾密度2.73g/cm³)

AE剤(AE):アルキルエーテル系AE剤

2.3 供試体作製方法

コンクリートの練混ぜには強制パン型ミキサを用い、細骨材、粗骨材、セメントを投入後 30 秒間練混ぜ、水を投入後 90 秒間練混ぜる方法とした。コンクリート標準示方書では棒状パイプレータを使用して、500mm以内の間隔で5~15 秒間締固めるとされているが、締固めの影響を検討するため、シリーズ I では締固め時間を 1 箇所につき 30 秒ずつ (過剰締固め)、シリーズ II では 1 箇所につき 5 秒ずつ (示方書の範囲内) とし、何れの場合も 3 箇所締固めた。なお、締固めはそれぞれの層の打込み時に各層内のみにパイプレータを挿入した。基準供試体は、中心の 1 箇所を 5 秒間締固めた。全ての試験体で表面気泡の発生を防ぐため、スเปージング処理を行った後に型枠振動機で振動させた。打重ね時間間隔はシリーズ I では 30 分、シリーズ II では 60 分とした。コンクリートはすべて 20℃の室内にて打込み、材齢 5 日で脱型し、試験材齢まで温度 20℃の室内に放置した。なお、相対湿度は制御しておらず、試験期間中の相対湿度は 60~80%であった。

2.4 試験項目

フレッシュコンクリートの試験はスランブ、空気量、温度、およびJIS A 1123 に準拠したブリーディング試験を行った。硬化コンクリートの試験はTorrent法⁴⁾による表面透気試験、中性化促進試験および水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布測定を行った。

表面透気試験は図-1 に示すように、測定高さ毎に側面 8 点を測定し (片面 4 点で 2 面測定)、平均して各高さの表層透気係数値とした。表面透気試験の概要は図-2⁵⁾ に示すように、チャンバー内の圧力を真空ポンプにより減圧し、減圧を停止した後の復圧過程の測定結果より、表層透気係数kTは式(1)によって算出される。

$$kT = \left(\frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left[\frac{\ln \left(\frac{P_a + \Delta P}{P_a - \Delta P} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad (1)$$

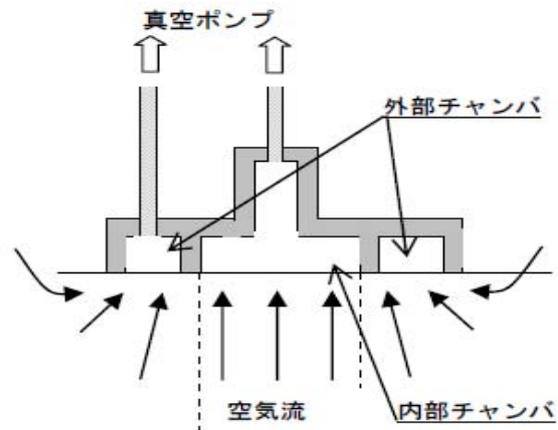


図-2 表面透気試験 (Torrent 法) の概要⁵⁾

ここに、kT: 表層透気係数 (m²), V_c: 内部チャンバーの容積 (m³) (= 0.000165), A: 内部チャンバーの面積 (m²) (= 0.001963), μ: 空気の粘性係数 (N · s/m²) (20℃で 2.0 × 10⁻⁵), ε: コンクリートの空隙率の想定値 (m³/m³), P_a: 大気圧 (N/m²) (= 1), ΔP: 試験終了までの復圧量 (N/m²), t: 試験終了時間 (s), t₀: 試験開始時間 (s) (= 60)

また、試験時において実際のコンクリートの空隙率 ε を正確に知ることができないため、通常 0.15(m³/m³) を想定値として kT が算出される⁴⁾。

表層透気係数は材齢 28 日で実施した。表面透気試験を行う前に K 社製コンクリート表面含水率計を用いて含水率を測定し、いずれの試験体も含水率は 4.5~5.0% の範囲内であることを確認した。

中性化促進試験は表面透気試験を行った位置からコアを抜き、表面透気試験面以外の面をアルミテープでシールし、温度 20℃, R.H.60%, CO₂濃度 5% で中性化促進を行った。

細孔径分布を測定する試料については材齢 56 日経過後、試験体からコアを抜き、試験体表面から深さ 20mm の位置でスライスし、モルタル分だけをはつり出して 2.5mm 以上 5mm 以下に砕きアセトンに浸漬して水和の進行を停止した。その後、D-dry法により乾燥させ、測定ま

での期間はシリカゲルデシケーターで保管した。

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズ I

(1) 表層透気係数

図-3に水セメント比60%の打重ね上層高さが変化したときの、材齢28日における下層の表層透気係数比(以下、kT28比)を示す。kT28比は、各高さの測定結果を基準供試体の同一測定材齢における表層透気係数で除した値である。試験体名の凡例は打重ね下層高さ(mm)ー打重ね上層高さ(mm)であり、打重ね下層高さが200mmであるため、測定位置に当たったチャンバーの中心高さ(以下、測定高さ)は100mmである。基準供試体の測定高さは75mmであり図中の200の試験体より測定高さが25mm低い位置であるが、kT28比で8割程度となっており、締固め時間が影響していると考えられる。基準供試体では締固め時間は5秒、200の供試体では30秒の締固めを行っているが、示方書に記載されている締固め時間の下限値では、充填はされているものの、内部気泡が残留し表層透気係数が大きくなったのではないかと考えられる。打重ねのない200では、他の打重ねのあるものと比べて表層透気係数が大きい結果となった。この結果から、同じ測定高さであっても上層に打重ねがある場合には、上層コンクリートの締固め時に下層に振動が伝わり再振動締固めが起きたことにより下層コンクリートの品質が向上したと考えられる。打重ねたもの同士を比較するとkT28比はほぼ同等な結果となった。このことから、上層に打重ねられたコンクリートの高さが変化しても本実験の範囲内(200~400mmの打重ね)では圧密による下層の透気係数への影響はあまり見られない結果となった。

(2) 中性化速度係数

図-4に材齢28日における表層透気係数(以下、kT28)と中性化速度係数の関係を示す。既往の研究⁶⁾より表層透気係数と中性化速度係数には高い相関性があることが確認されているが、本実験においても同様に、表層透気係数が小さくなる場合、中性化深さも小さくなる傾向にある。このことから、打重ね時の間接的な再振動の影響による品質向上が起きた場合であっても、中性化と表層透気係数には相関性があると考えられる。

3.2 シリーズ II

(1) フレッシュ試験結果

表-2にフレッシュ試験結果、図-5にブリーディング試験結果を示す。水セメント比の増加によってブリーディング量は大きくなる傾向にある。これは単位セメント量の低下が粘性低下に影響し、材料分離抵抗性が低下したことによるものと考えられる。

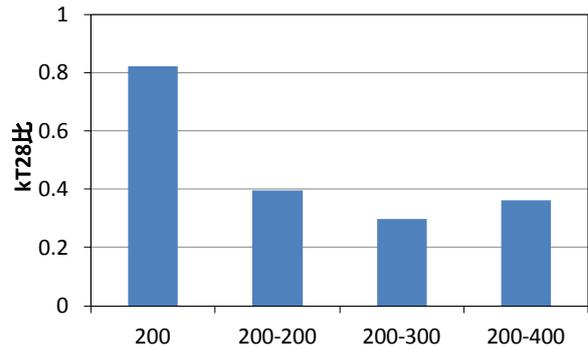


図-3 打重ね下層コンクリート kT28 比

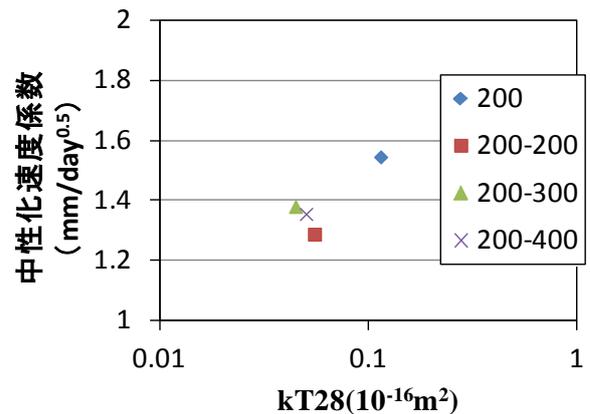


図-4 kT28 比と 28 日促進中性化深さの関係

表-2 フレッシュ試験結果

配合名	空気量 %	スランプ cm
60	5.1	12.0
50	3.8	10.5
40	5.9	9.5

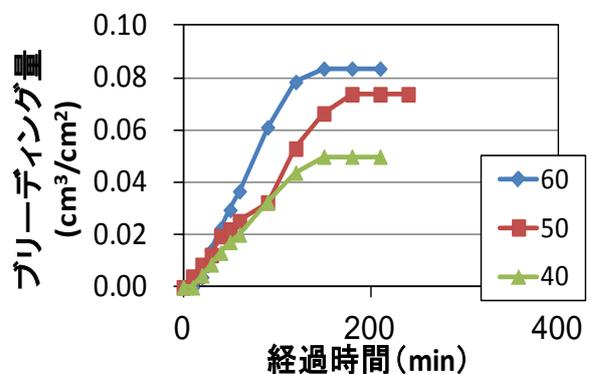


図-5 ブリーディング試験結果

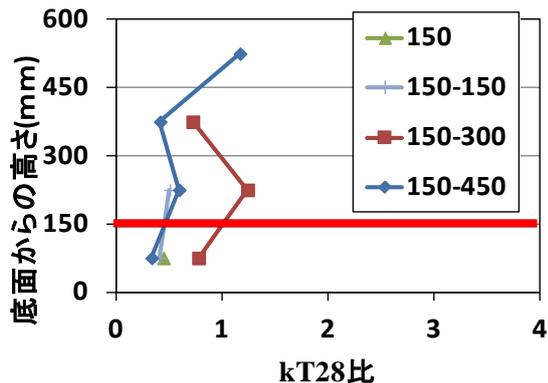


図-6 測定高さと kT28 比 (打重ね有)

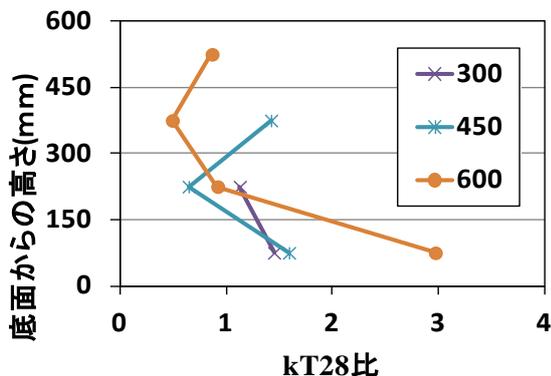


図-7 測定高さと kT28 比 (打重ね無)

(2) 打重ねの有無が高さ方向の表層透気係数に及ぼす影響

図-6 に水セメント比 60% で打重ねがある場合の測定高さと表層透気係数の関係を示す。図中の赤線は打ち重ねた位置を示している。打重ねがある場合の下層コンクリートの表層透気係数は、シリーズ I と比較して、シリーズ II では、必ずしも小さくならず、打重ね上層コンクリート締固め時に下層コンクリートが受ける間接的な再振動の影響が少ない結果となり、kT比は 1 程度で、ばらつく結果となった。

図-7 に打重ねがない場合の測定高さと表層透気係数の関係を示す。打重ねをせずに、それぞれの打重ねを行って作製した試験体と同じ寸法を 1 層で打設した場合は下部で透気係数が大きくなる結果となった。このような結果となった理由としては、シリーズ I と比較して締固め時間が短くなったことから、表層に粗大空隙が残ったことが考えられる。打重ねがある場合、下層部のみで締固めを行い、連続気泡が抜けやすくなるが、打重ねがない場合は下層ほど気泡が抜けにくくなり、表層近傍に連続気泡が残り、表層透気係数に直接影響したものと考えられる。

また、図-6 中の 150-300 と 150-450 の打重ね上層に着目すると、供試体高さ 300~450mm の位置より 150~

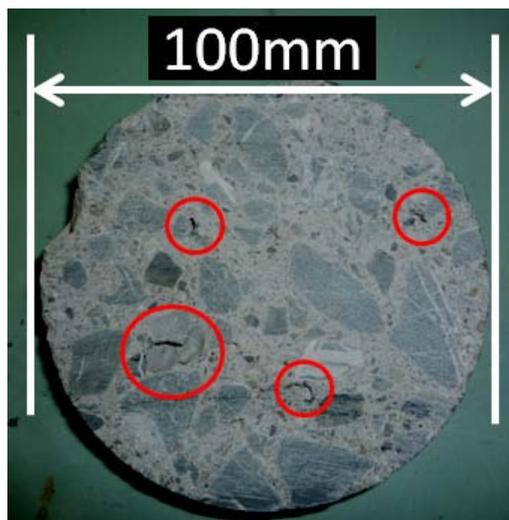


写真-1 確認された粗大気泡

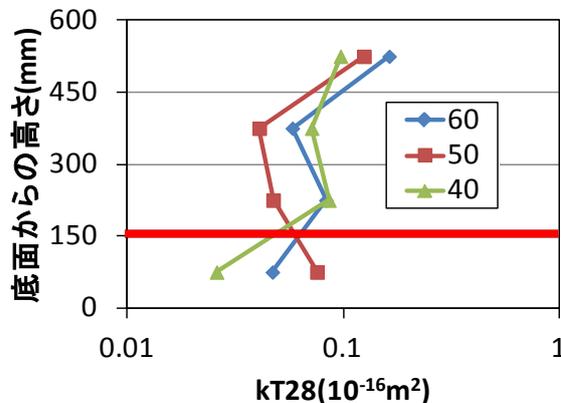


図-8 測定高さと水セメント比毎の kT28

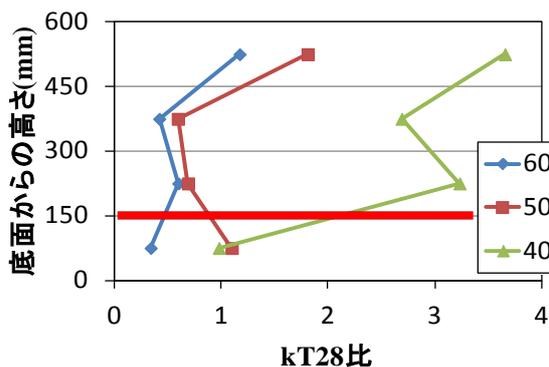


図-9 測定高さと水セメント比毎の kT28 比

300mm の位置の方が表層透気係数は大きくなっており、打重ねが無い場合と類似した傾向が見られる。

既往の文献⁷⁾から、Torrent法による表面透気試験の測定深さは 15~30mm と報告がある。水セメント比 60% で 600mm の高さを 1 層で打設した試験体の、高さ 75mm の位置から抜いたコアの表層から 20mm の深さをスライスしたものを写真-1 に示す。このように表層近傍に残った粗大空隙が表層透気係数に影響を与えているものと考

えられる。

(3) 水セメント比と打重ねが表層透気係数に及ぼす影響

図-8に各水セメント比における、下層高さ150mm上層高さ450mmで打重ねた場合のkT28の高さ方向の変動を、図-9にそのkT28比を示す。凡例は配合の水セメント比、図中の赤線は打ち重ねた位置を示している。いずれの配合も、測定高さの増加に伴い表層透気係数が概ね大きくなるのがわかる。これは、ブリーディングによって、表層品質の低下が生じたためと考えられる。

kT比の高さ方向の変動を見ると、水セメント比50%と40%の高さ75mm位置の表層透気係数は基準供試体とほぼ同等の値となった。一方で、打重ね上層の表層透気係数は基準供試体からの変動が大きく、水セメント比が小さいほど高さ525mm位置のkT28比が大きくなる。このような結果は、ブリーディングおよび打重ねの影響によるものと考えられる。すなわち、打設時に下層からの連続気泡がブリーディングに伴い上昇することで粗大空隙が発生し、高さ525mm位置で留まったのではないかと考えられる。水セメント比が大きいほど粘性が小さく気泡が抜けやすくなり、水セメント比が小さいほど粉体量が多くなり粘性が大きくなるので、気泡が抜けにくくなったのではないかと考えられるが、詳細については今後の課題である。

(4) 既往の研究との比較

図-10は既往の研究結果^{8), 9)}を用いて、表層透気係数と測定高さの関係を示したものである。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象として抽出した。表-3は、各文献における打重ねや締固め等の施工条件、試験体概要を整理したものである。

図より、全体的な傾向として最上部の表層透気係数が最も大きく、試験体中層部の表層透気係数は、最下層の表層透気係数より小さい場合、ほぼ同程度の場合、大きくなる場合があり、本研究と同様な傾向が見られる。最上層の表層透気係数が大きくなる理由は、ブリーディングが原因と考えられる。既往の研究³⁾に基づく、下層部は上層からの自重による圧密によって品質が良くなっていると考えられるが、打重ねのないNo.1の文献では、600mmの高さを連続的に1層で打設しており、高さ0~150mm位置は高さ150~450mm位置に比べて締固めしにくく、粗大気泡が抜けにくくなり、表層部に残った粗大気泡が影響を及ぼしていると考えられる。しかしNo.2の文献では、225mm(図中の赤い線)の高さで打重ねているため、各層とも十分に締固められていると考えられる。この場合は、上層部の締固めを行っているときに、測定高さ180mm位置のコンクリートに振動が伝わり、再振動締固めが起きたことにより表層透気係数が小さくなった

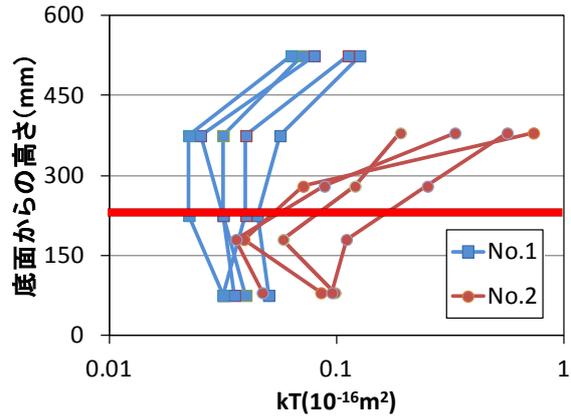


図-10 測定高さ と表層透気係数の関係

表-3 参照文献と条件の整理

No.	出典	打重ね	締固め	試験体概要
1	松崎ら 2009 ⁸⁾	なし	不明	底面300×300 高さ600(mm)
2	早川 2011 ⁹⁾	高さ225mmで 打重ね	各層40秒	底面450×400 高さ450(mm)

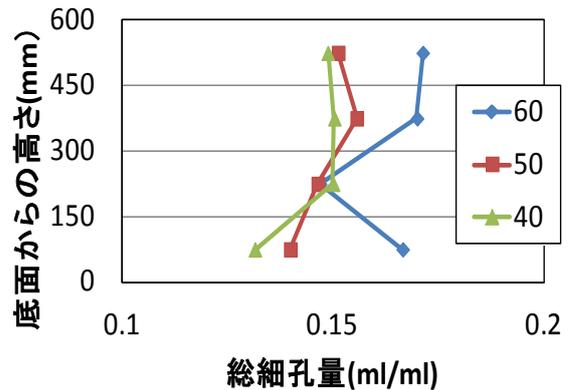


図-11 測定高さ と総細孔量の関係

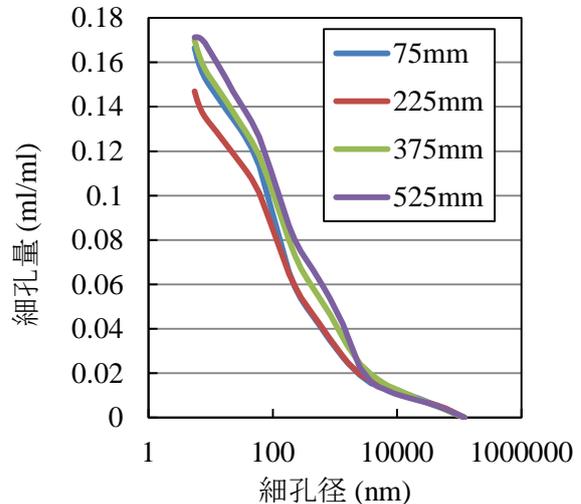


図-12 測定高さ と細孔径分布の関係

と考察されている。このように、表層透気係数の高さ方向の変動は類似していても、締固め、材料分離、粗大気泡の残留など、異なる原因によって、表層透気係数は変化しているものと考えられる。

(5) 打重ねと細孔量

図-11 に表層透気係数を測定した位置と同じ高さから採取した試料で測定した総細孔量の関係を示す。図-8 で上部ほど表層透気係数が大きくなるのと同様に、細孔構造においても上層では総細孔量が大きくなる傾向にある。これは型枠界面を沿って上昇するブリーディング水の影響と考えられる。水セメント比 40%、50%の打重ね上層の細孔量がほぼ同等になっているが、これは表-2 に示した空気量試験結果から、AE剤を使用することで空気量を調節しようとしたが、水セメント比 40%で空気量が 5.9%と多く、50%で空気量が 3.8%と少なくなったため、微細な独立気泡量の影響により総細孔量に差があまり見られない結果となったと考えられる。

(6) 打重ねが細孔分布に及ぼす影響

図-12 に図-11 で示した総細孔量のうち、水セメント比 60%の場合の、細孔径分布の測定結果を示す。凡例は試料採取高さである。総細孔量はブリーディングの影響により、測定位置が高い方が大きい結果となり、細孔径分布においても、測定位置が高い場合は約 2500nm程度から細孔量が増大している。また、測定位置 75mmと 225mmを比較すると、75mmの場合は、約 100nm程度から細孔量が増大していた。

4.まとめ

本研究では、打重ねがコンクリートの表層品質に及ぼす影響を検討することを目的とし、施工や材料分離の影響を受けにくい基準供試体と、打重ねを行った試験体との比較による検討を行った。本研究の範囲で得られた知見をまとめると次のようになる。

(1) 示方書と比較して過剰な締固めを行い上層に打重ねを行う場合、打重ねをしない試験体と比較して、同じ測定高さでの表層透気係数は小さくなる場合がある。

(2) 締固め時間が短い場合、粗大空隙が残り表層透気係数が大きくなることもあり、施工が表層透気係数に影響を与えることを確認した。

(3) 打重ね上層の上部の表層細孔構造は、ブリーディングの影響により粗になり、細孔量は多くなり、透気係数も大きくなる。

参考文献

- 1) 辻 正哲, 坂井秀紀: ブリーディングの発生機構に関する基礎的研究, セメント技術年報 37, 229-232., 1983.12
- 2) 2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2008.
- 3) 早川健司, 伊藤正憲, 小島文寛: かぶりコンクリートの品質評価に関する一実験, 土木学会第 63 回年次学術講演概要集, Vol.63, pp581-182, 2008.9
- 4) R.J.Torrent: A two-chamber cell for measuring the coefficient permeability to air of the concrete cover on site, Material and Structure, 1992, 25, 358-36
- 5) 早川健司, 加藤佳孝: 材料分離がコンクリートの表層透気性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.647-652, 2011
- 6) 加藤佳孝, 早川健司: 表面透気試験を用いた中性化に伴う鋼材腐食の耐久性設計と検査の連係に関する一考察, 土木学会論文集E2, Vol.68, No.4, pp.410-421, 2012
- 7) 水上翔太, 早川健司, 加藤佳孝, 勝木 太: 含水状態を考慮した構造体かぶりコンクリートの透気性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1829-1834, 2011
- 8) 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
- 9) 早川健司: 構造体かぶりコンクリートの品質管理に関する研究, 東京大学学位論文, 2011.