

論文 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

松崎 晋一朗*1・吉田 亮*2・岸 利治*3

要旨: コンクリート表層の透気性に影響を与える要因には、配合や施工および養生などが挙げられる。本研究では、水セメント比と単位水量、および養生をパラメータとした円柱供試体に対しブリーディング試験・透気試験を行った。その結果、外的因子である養生が透気性に及ぼす影響は内的因子である配合に比べて大きいことを示し、ブリーディングと透気性は相関関係にあることを確認した。そこで単位水量と型枠条件をパラメータとした大型の角柱供試体に対し、ブリーディング試験・透気試験を行い、寸法の相違が透気性に大きく影響を与えることを確認した。

キーワード: 単位水量, 水セメント比, 養生, 透気, ブリーディング

1. はじめに

今後構造物に対して適切な維持管理を行うためには、既存のコンクリート構造物の耐久性を定量的に確認することが必要である。従来、既存の構造物の耐久性は圧縮強度を代用してきた。しかし、圧縮強度は構造性能にとって重要な特性であるが、耐久性を必ずしも評価しているとは限らない¹⁾。耐久性の指標は中性化や塩化物イオンの浸透、化学作用に対する抵抗性に代表される物質移動抵抗性を考える必要があり、その評価には近年これを用いる必要があると考えられている。物質移動抵抗性に影響を与える要因として、配合等の内的因子と養生等の外的因子がある。

内的因子においてはコンクリート標準示方書の耐久性設計で、かぶり(厚さ)と水セメント比をパラメータとした照査が行われるように、水セメント比がコンクリートの物質移動抵抗性に及ぼす影響は大きく、水セメント比の重要性が認識されている。同様に、内的因子である単位水量についても、その重要性が指摘されている。施工現場では、水セメント比が同一であっても施工現場に運ばれるコンクリートの単位水量は同一ではなく、また不法加水対策として施工現場で単位水量試験が実施されている。さらに、構造物ではブリーディングが生じ、その影響で品質にむらができると考えられる。

吉田ら²⁾は内的因子に関して、単位水量を固定し水セメント比を変動させた供試体と水セメント比を固定し単位水量を変動させた供試体を作製し、透気試験を行い、物質移動抵抗性は水セメント比と単位水量の影響を受けることを示した。物質移動抵抗性は単位水量の増加に伴い生じるブリーディングの影響を受けると考えられる。既往の研究³⁾によりブリーディング水は型枠に沿っ

て上昇することが報告されており、コンクリート表層の品質は単位水量により大きく異なると考えられる。

一方、実構造物は現場で打設されることが一般的であることから、外的因子である養生や施工方法が作用し、その対応として現場環境に適した養生や型枠を使用することが必要である。岡崎ら¹⁾は養生条件が異なる供試体に対して、材齢を同一にした供試体、水和率を一定にした供試体の二通りの条件で圧縮試験と透気試験を行い、養生の相違が物質移動抵抗性に与える影響が大きいことを確認した。また、圧縮強度で耐久性を評価するのは極めて困難であることを示した。

本研究ではこれらのことを踏まえ、内的因子と外的因子が透気性と物質移動抵抗性に与える影響程度を透気・ブリーディングの各試験を行って定量的に評価を行うことにした。

2. 目的

既往の研究^{1,2)}では各因子の影響を独立して扱っているため、内的因子と外的因子の影響程度が分かりづらい。そこで本研究では水セメント比、単位水量および養生条件を網羅することで、各因子の相加・相乗的な影響程度を明らかにすることを研究の主眼に据えた。

また、単位水量の変動により、ブリーディング量が大きく変動すると考えられ、その影響は供試体寸法による影響が大きいと考えられるため、供試体寸法と透気性の関係についても検証する。

3. 実験概要

3.1 供試体諸元

*1 芝浦工業大学 工学部 土木工学科専攻 (学生会員)

*2 名古屋工業大学 助教 (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 准教授 博士(工) (正会員)

表-1 単位水量 145kg/m³の際の示方配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)	SP (%)
30	145	483	726	987	2.5	2.5	C×1.0
45	145	322	783	1066	6.0	5.5	C×1.0
60	145	242	812	1105	4.5	5.1	C×1.0

表-2 単位水量 155 kg/m³の際の示方配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)	SP (%)
30	155	517	702	956	4.0	3.0	C×0.8
45	155	344	764	1040	9.5	5.0	C×0.8
60	155	258	795	1082	10.5	5.7	C×0.8

表 - 3 単位水量 165 kg/m³の際の示方配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)	SP (%)
30	165	550	679	924	6.0	3.0	C×0.6
45	165	367	745	1014	13.0	6.0	C×0.6
60	165	275	778	1058	18.5	6.1	C×0.6

表 - 4 単位水量 175 kg/m³の際の示方配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)	SP (%)
30	175	583	656	892	10.5	4.0	C×0.5
45	175	389	726	987	14.5	6.1	C×0.5
60	175	292	760	1035	19.5	6.5	C×0.5

表 - 5 単位水量 185 kg/m³の際の示方配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)	SP (%)
30	185	617	632	861	7.5	3.5	C×0.0
45	185	411	706	961	10.5	3.5	C×0.0
60	185	308	743	1011	12.5	4.5	C×0.0

表 - 6 角柱供試体の示方配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)	SP (%)
45	145	322	783	1066	16.5	5.5	C×1.0
	155	344	764	1040	18.5	6.2	C×0.8
	165	367	745	1014	17.0	5.8	C×0.6
	175	389	726	987	20.0	6.5	C×0.5
	185	411	706	961	12.0	3.0	C×0.0

(1) 円柱供試体

供試体作製にあたって、水セメント比、単位水量及び養生をパラメータとなるように表-1 から表-5 に示した示方配合で、水セメント比 W/C=30, 45, 60%で単位水量 W=145, 155, 165, 175, 185kg/m³ に変動させた計 15 種類の配合とした。Φ150×300mm の円柱型枠に 2 層で打設し、各層で振動機により締固めを行った。打設後から表面を封緘養生し、打設一日後から表面のみ湛水・封緘・気中養生の三通りで 28 日間養生を行った。封緘・気中養生は脱型後に測定を行い、湛水養生は脱型後に温度 20℃、湿度(RH)60%に設定された部屋で一週間乾燥させた後に透気試験を行った。

ここで配合は細骨材率(s/a)を 43%で固定して配合設計を行った。その理由はセメント細骨材比(c/s)を固定した場合、モルタル量の変動による影響を確認できるが、逆に言えば粗骨材のみを変化させた単調な比較になってしまうためである。

(2) 角柱供試体

角柱供試体の配合を表-6 に示す。配合は表-1 から表-5 の水セメント比 45%と同一で単位水量 W=145, 155, 165, 175, 185kg/m³ に変動させた計 5 種類の配合とした。円柱供試体と角柱供試体でスランプが異なるのは、一度に練るコンクリート量が異なったためと考えられる。練混ぜたコンクリートを底面 300×300 mm、高さ 600mm の角柱型枠に連続的に 1 層で打設した。

また、型枠の側面条件は鋼製型枠面とウレタンコートパネル型枠の二通りとし、打設後から打設面を封緘養生し、28 日後に脱型し、その後透気試験を行った。透気試験は供試体の各側面を高さ方向に 0~15cm, 15~30cm, 30~45cm, 45~60cm の 4 区間に区分し、各区間で透気係数の測定を行った。

3.2 ブリーディング試験概要

ブリーディング試験は各単位水量の水セメント比 45%の配合で試験を行った。試験方法は「コンクリートのブリーディング試験方法(JIS A 1123)」とは異なり、今回は傾向をとらえられる簡易な手法で行った。

円柱供試体の配合におけるブリーディング試験では φ150×300mm の鋼製の型枠に、高さ 150mm でコンクリートを 1 層で打設し、振動機により 2 回締固めた後に表面を適度にならしてふたをした。角柱供試体の配合におけるブリーディング試験では φ120×150mm のプラスチック製の容器に、高さ 80mm まで 1 層で打設し、振動機により 2 回締固めた後に、表面をならしてふたをした。両試験共 3 時間後に供試体重量を測定し、ブリーディング水を抜取り、再度重量を計測した。その重量差をブリーディング水として算出した。

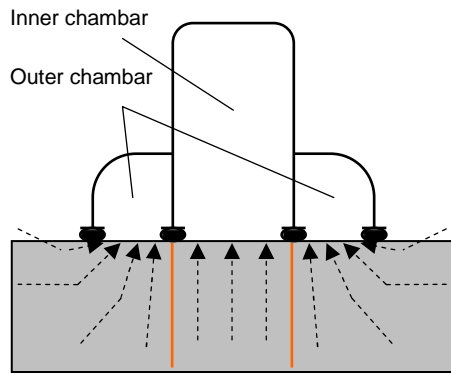


図-1 TORRENT 法による透気試験器

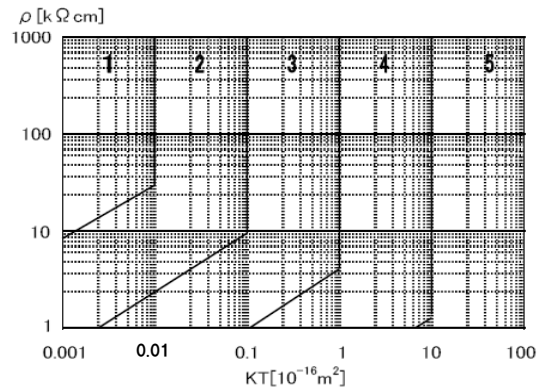


図-2 透気係数によるグレード評価指標

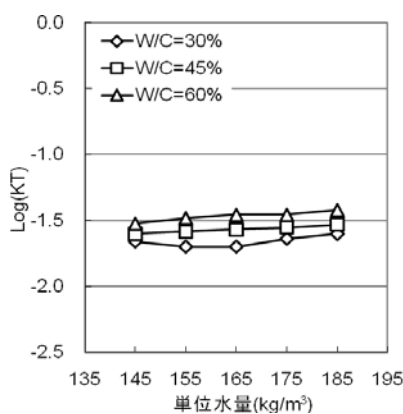


図-3 円柱供試体底面
(打設面：空中養生)

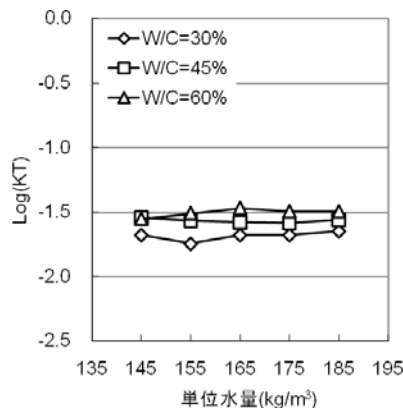


図-4 円柱供試体底面
(打設面：封緘養生)

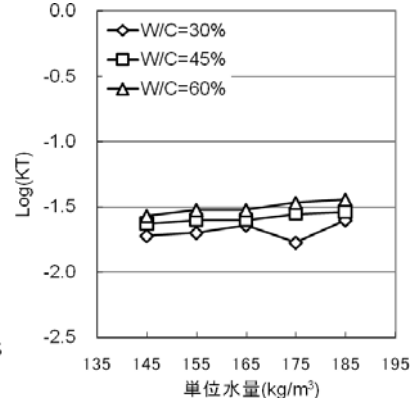


図-5 円柱供試体底面
(打設面：湛水養生)

3.3 TORRENT 透気試験概要

TORRENT 法⁴⁾による透気試験とは、図-1 に示すようにダブルチャンバーの吸引によってコンクリート表層を真空状態にし、その後吸引をストップさせチャンバー内の気圧が回復するまでの時間から透気係数 KT ($\times 10^{-16} \text{m}^2$) を算出する手法である。算出した透気係数は、図-2 の指標に従い透気係数を 0.001~0.01, 0.0~0.1, 0.1~1, 1~10, 10~100 の 5 段階に区分し、透気係数の値が小さいものを物質移動抵抗性が大きく、品質の良いコンクリートと評価した。各区間を透気係数の小さい方からグレード 1 からグレード 5 とした。また、透気係数はコンクリートの含水率の影響を受けるため、Wenner 法に基づく四電極法により電気抵抗を算出し、グレードを補正した。図-2 では縦軸に電気抵抗、横軸に透気係数を取り、湿潤状態にあるコンクリートは斜線部によりグレードの補正を行った。

本実験では円柱供試体は打設面（養生面）と底面を測定し、角柱供試体は条件の異なる側面を区分した高さごとに測定し、同じグレードの値が二度出るまで測定を行った。算出した透気係数 KT は、相加・相乗平均の常用対数を取り評価を行った。以後図では $\text{Log}(KT)$ と示す。

4. 実験結果及び考察

4.1 円柱供試体の透気試験結果

(1) 水セメント比と単位水量が透気性に及ぼす影響

円柱供試体底面の養生条件ごとの透気係数と単位水量の関係を図-3~5 に示す。供試体は打設面のみを養生し、脱型を 28 日後に行ったため、底面および側面は打設面の養生の影響が現れていないことを確認した。

配合の影響を検証すると、水セメント比の増加に伴い透気係数も増加しているのに対し、単位水量の相違による影響は見られない。このことから、透気性は主に水セメント比の影響を受けることを確認した。

(2) 水セメント比と養生が透気性に及ぼす影響

円柱供試体打設面において、水セメント比と養生が透気係数に与える影響を図-6~8 に示す。

いずれの条件においても水セメント比の増加と共に、透気係数も増加している。これは、水セメント比が物質の移動経路である空隙構造に影響を与えているためと考えられる。つまり、水セメント比が増加するとセメント粒子同士の間隔が広がるため空隙径は大きくなり、コンクリート表層を覆うセメントペーストの品質が低下することで直接的に透気性に影響を与えていると推察できる。

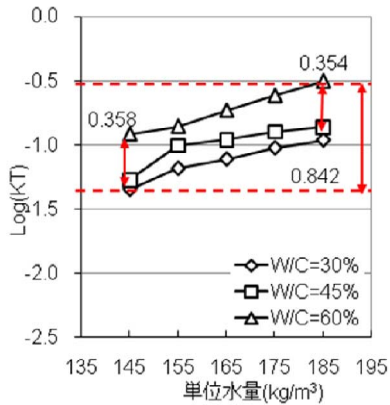


図-6 円柱供試体打設面
(打設面：気中養生)

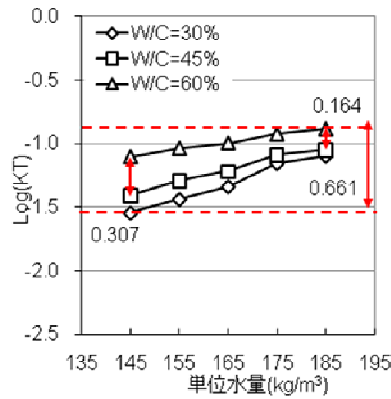


図-7 円柱供試体打設面
(打設面：封緘養生)

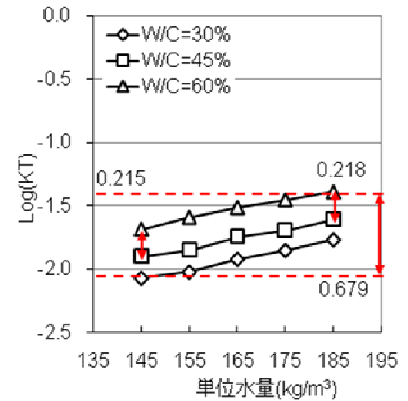


図-8 円柱供試体打設面
(打設面：湛水養生)

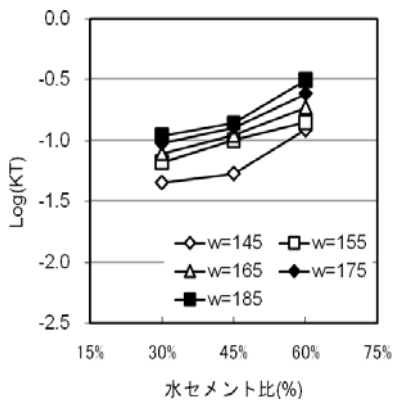


図-9 円柱供試体打設面
(打設面：気中養生)

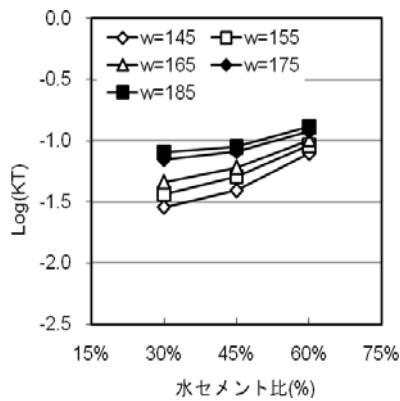


図-10 円柱供試体打設面
(打設面：封緘養生)

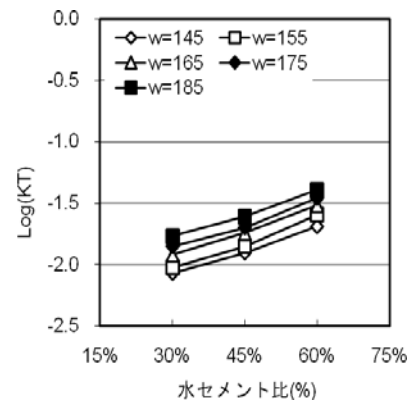


図-11 円柱供試体打設面
(打設面：湛水養生)

次に、養生の相違が透気係数に与える影響を比較すると気中養生と封緘養生では各単位水量の透気係数は水セメント比 30%と 45%の間で差が大きく、45%と 60%では差が小さいのに対して、湛水養生では各単位水量での透気係数は水セメント比の増加に伴い、等間隔で増加する傾向を示した。

これは、養生の相違が水和反応の過程で空隙組織に影響を与えたと考えられる。つまり、湛水養生ではセメント粒子に対して水が十分に存在するため、配合に準じた粒子間隔を保ちながら水和反応が進行したと考えられる。気中養生と封緘養生では水セメント比 45-60%間の透気係数の増加は 30-45%間の分よりも大きいことから、水セメント比 60%ではセメント量に対して水が多く、空隙径が大きいためコンクリート表層の水分が逸散しやすいため、セメントペーストの品質が顕著に低下していると考えられる。

水セメント比が透気係数に与える影響は養生条件によって大きく異なる。このことから、養生が透気性に及ぼす影響は水セメント比が透気性に及ぼす影響より大きいことを確認した。

(3) 単位水量と養生が透気性に及ぼす影響

円柱供試体打設面より単位水量と養生が透気性に与える影響を図-9~11に示す。

単位水量が透気係数に与える影響を考察すると、底面では傾向が見られなかったのに対して、打設面では単位水量の増加と共に透気係数が増加していることを確認した。また、封緘養生の単位水量 165 kg/m³と 175kg/m³での透気係数は水セメント比が 30%と 45%の間で差がみられた。これはブリーディング現象により表層のモルタルの品質が低下したためと考えられる。

(4) 円柱供試体のブリーディング試験結果

単位水量とブリーディング量の関係について図-12に示す。高性能 AE 減水剤の差が僅かなのに対し、単位水量 165kg/m³と 175 kg/m³の間でブリーディング量が急激に増加している。4.1(3)の結果より封緘養生した打設面(図-10)の水セメント比 45%においても単位水量 165kg/m³と 175 kg/m³の間で透気係数に差がみられたことから、ブリーディングと透気性は密接に関係していると考えられる。単位水量 185kg/m³の時のブリーディング量は 175kg/m³の時に比べ減少しているが、単位水量

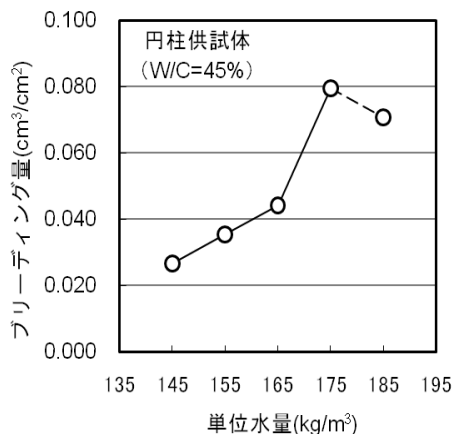


図-12 単位水量の相違がブリーディング量に与える影響

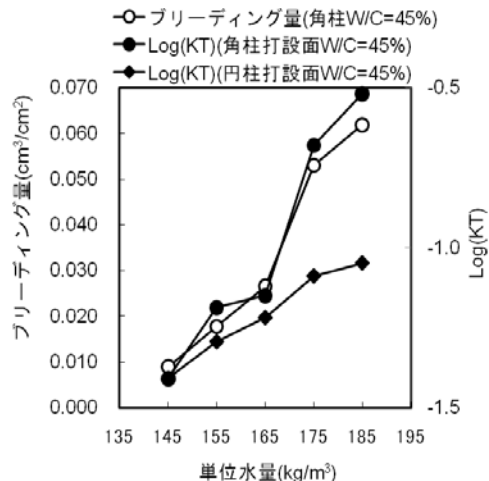


図-13 供試体寸法の相違が透気性に与える影響

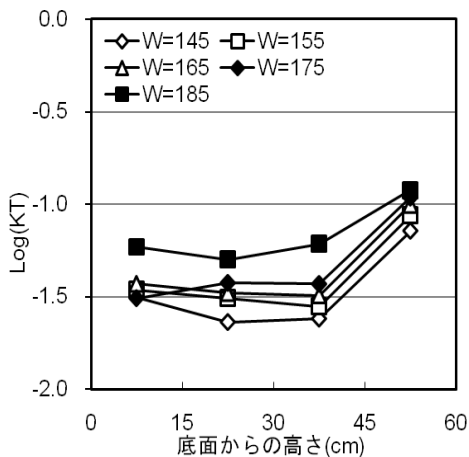


図-14 鋼製型枠面の高さ方向の透気係数の変化

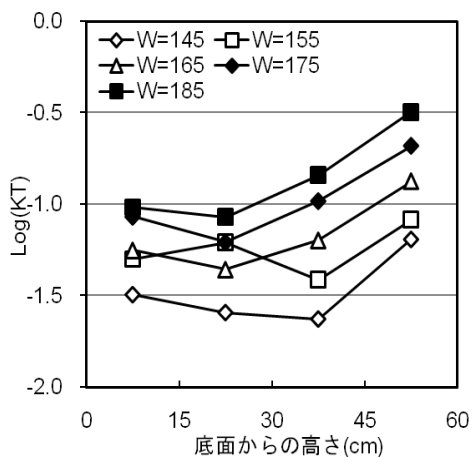


図-15 ウレタンコートパネル型枠面の高さ方向の透気係数の変化

185kg/m³では高性能 AE 減水剤を使用していないため参考値とした。

本研究における配合では単位水量の増加と共に細骨材の量が減少する。そのため、モルタル中の水が急激に増加し、材料分離現象であるブリーディングが発生することが推察される。そして、既往の研究¹⁾で報告されているように、ブリーディングに伴い形成された水みちが透気性に影響を与えたと考えられる。

単位水量 165 kg/m³と 175kg/m³の間で見られる差は、水が十分に存在するためセメント粒子や骨材同士を拘束する力が弱まり、顕著に材料分離抵抗性が低下する境界があることを示唆していると考えられる。

4.1 の(1)~(4)より、配合要因である水セメント比は空気の通り道である空隙構造を決定することで直接的に透気性に影響し、単位水量は材料分離に伴う水みちの形成により透気性に間接的に影響を与えていると考えられる。養生については、湛水養生した供試体では低い透気係数を示し、気中養生した供試体では高い透気係数を

示した。このことから養生が透気性へ及ぼす影響は大きいことを確認した。

4.2 角柱大型供試体

(1) 供試体寸法の相違が透気性に与える影響

単位水量と角柱供試体のブリーディング量（左縦軸）の関係ならびに各供試体打設面の透気係数（右縦軸）の関係を図-13 に示す。角柱供試体の透気係数とブリーディング量は、円柱供試体の時と同様に単位水量 165 kg/m³と 175kg/m³の間で大きく変動しており、単位水量と透気係数は密接に関係していることを確認した。

円柱供試体と角柱供試体の透気係数を比較し、寸法の影響を確認すると単位水量 165 kg/m³より大きいところで透気係数に大きな差が見られる。これは 165 kg/m³と 175kg/m³の間でブリーディング量が急激に増加したことに起因するものと考えられる。

尚、今回角柱供試体と円柱供試体のブリーディング試験の際に使用した容器寸法が異なるためブリーディン

グ試験値を比較するに至らなかった。

(2) 型枠の相違が透気性に及ぼす影響

単位水量の相違が角柱供試体側面の高さ方向の透気係数に与える影響を図-14~15に示す。鋼製型枠面とウレタンコート型枠面共に単位水量の増加に伴い透気係数も増加している。また、高さ方向で考察を行うと、打設面付近ほど透気性が高く、コンクリートの品質が悪いことを確認した。

これは、ブリーディング試験結果からもわかるように、ブリーディング水が上昇したため供試体側面の打設面付近ほど表面を覆うセメントペーストの品質が低下したためと考えられる。一番底面に近い区間では中間の区間に比べて高い透気性を示しているが、これは底面の気泡および水が上昇しきらずに、残っていたためと考えられる。

型枠条件の相違が透気係数に与える影響を確認すると、ウレタンコート型枠面では各単位水量が透気係数に与える影響が大きいことがわかる。これは、ウレタンコート型枠のほうが鋼製型枠に比べて剛性が低く、振動機をかけた際に型枠近傍に負圧が生じやすいため、ブリーディング水が多く集約されたためと考えられる。

振動機の影響および型枠の剛性に関する影響については今後検証が必要である。

5. 結論

単位水量、水セメント比と養生をパラメータとしたコンクリート供試体に対してブリーディング試験と透気試験を用いて検証したところ、以下のような知見が得られた。

1) 円柱供試体底面の測定結果から、水セメント比は単位水量より透気性に与える影響が大きいことを確認した。水セメント比は空気の通り道である空隙径と関係があり、セメントペーストの品質に直接的に影響を及ぼすと考えられる。

2) 円柱供試体と角柱供試体の打設面の透気試験とブリーディング試験結果から、単位水量の増加は材料分離現象であるブリーディング現象を助長し、透気性に間接的に影響を与えていることを確認した。

3) 養生に関しては、湛水養生では低い透気性を示し、気中養生では透気性が高いことを示した。養生は単位水量、水セメント比の相違によらず透気性への影響が大きいことを示した。

4) 角柱供試体と円柱供試体の打設面の透気係数の比較より、単位水量 165 kg/m^3 より大きいところで透気係数が急激に増加しており、供試体寸法による影響を確認することができた。

5) 角柱供試体側面の透気試験結果より、単位水量および型枠条件の相違に関わらず透気係数は打設面付近で透気性が高いことを確認した。また、ウレタンコートパネル型枠面は鋼製型枠面に比べて単位水量の相違が透気係数に与える影響が大きいことを確認した。

参考文献

- 1) 岡崎慎一郎, 八木翼, 岸利治, 矢島哲司:養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究, セメント・コンクリート論文集, V60/227-234.2006
- 2) 吉田亮, 高松俊介, 秋山仁志, 岸利治:水セメント比および単位水量がコンクリート表層の透気性に与える影響の養生依存性に関する一考察, コンクリート技術シリーズ No.80, 379_382, 2008.4
- 3) 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
- 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) コンクリートライブラリー126 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案), 社団法人土木学会, 1-4, 2007.3