

論文 高炉セメント B 種を用いたコンクリートの養生方法の相違が透気性、透水性および表面硬さに及ぼす影響

門井 康太*1・澤本 武博*2・樋口 正典*3・臺 哲義*4

要旨：高炉セメント B 種を用いたコンクリートについて、脱型時期および養生方法の組合せによる養生方法の相違が、コンクリート表層部の透気性、透水性および表面硬さに及ぼす影響を検討した。その結果、高炉セメント B 種を用いた場合、コンクリートの乾燥を防ぐことが最も重要であり、透気性および透水性においては、膜養生および封かん養生ともに給水を行う湿布養生と同程度の効果があった。また、表面硬さを表す反発度に比べて、表層透気係数および表面吸水速度の方が養生の効果を評価できると考えられる。

キーワード：高炉セメント B 種、膜養生、封かん養生、湿布養生、表層透気係数、表面吸水速度、反発度

1. はじめに

コンクリートの耐久性を低下させる劣化原因として中性化や塩害などが挙げられる。中性化および塩害いずれの場合においても、コンクリート表層から劣化原因となる物質を含んだ空気や水が浸透することにより進行する。よって、空気や水を容易には浸透させない表層品質の良いコンクリートが構造物の耐久性を高め、長寿命化を図る重要な要因になると考えられる。

コンクリートの表層品質として、透気性および透水性を用いることがあるが、それらを非破壊試験によって評価し、構造体コンクリートの耐久性を検討する研究が多くなされるようになってきた^{1,2,3)}。

一方、高炉セメント B 種を用いた場合、一般的な構造物は型枠を材齢 7 日～12 日で脱型するが、トンネルの覆工コンクリートでは、材齢 1 日で脱型することもあり、その後の養生についてはさらに多様化し、養生がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響が小さいとは言いがたい。そのため、脱型時期および養生方法を組み合わせた養生条件の変化がコンクリート表層部の透気性および透水性に及ぼす影響を検討する必要があると考えられる。

本研究では、高炉セメント B 種を用いたコンクリートを使用し、作製した壁試験体の脱型時期および養生方法を組み合わせることで養生方法を変化させた。それによって、表層透気試験、表面吸水試験および反発度試験を行い養生方法の相違がコンクリート表層部の透気性、透水性および表面硬さに及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントには高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm^3 ）を、

細骨材には栃木県栃木市尻内町産砂（表乾密度 2.61g/cm^3 、粗粒率 2.75）を、粗骨材には栃木県栃木市尻内町砕石（最大寸法 20mm、表乾密度 2.64g/cm^3 、実積率 59.0%）または栃木県栃木市尻内町砂利（最大寸法 40mm、表乾密度 2.63g/cm^3 、実積率 60.0%）を用いた。混和剤として、AE 減水剤を用いた。

コンクリートの配合を表-1 に示す。高炉セメント B 種を用い、呼び強度 27、水セメント比 51.5%、粗骨材最大寸法 20mm および 40mm(以下、Fc27-20mm および Fc27-40mm と称す)とした 2 配合、呼び強度 36、水セメント比 44%、粗骨材最大寸法 20mm(以下、Fc36-20mm と称す)とした配合の 3 種類のレディーミクストコンクリートを使用した。なお、Fc27-20mm は一般的な土木構造物などに用いるコンクリートを、Fc27-40mm はトンネルの覆工などに用いるコンクリートを、Fc36-20mm は過密配筋の構造物で一般より強度を有するコンクリートを想定している。

2.2 壁試験体および円柱供試体の作製

壁試験体は、幅 400mm、高さ 600mm、長さ 1800mm とし、各脱型時期に外せるようコンクリート用型枠合板の長手方向 1800mm を 600mm ずつ 3 分割した。コンクリートは、トラックアジテータから直接シュートで打ち込み、内部振動機で締め固めた。

また、圧縮強度試験用の円柱供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ とし、JIS A 1132 に準じて作製した。

2.3 養生方法

写真-1 に示したように、3 分割した壁試験体型枠を 1 枚ずつ脱型することにより脱型時期を 1 日または 2 日、7 日および 28 日と変化させた。なお、Fc27-20mm は一般的な土木構造物などを想定しているため、 5N/mm^2 以上

*1 ものつくり大学大学院 ものつくり学研究所 ものつくり学専攻（学生会員）

*2 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科教授 博士(工学)（正会員）

*3 三井住友建設（株） 技術本部 技術研究所 博士(工学)（正会員）

*4 三井住友建設（株） 技術本部 技術研究所

表-1 コンクリートの配合

搬入日	呼び強度	W/C (%)	スランブ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)					試験結果			脱型時強度 (N/mm ²)				標準養生強度 (N/mm ²)
					W	C	S	G	Ad	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	材齢1日	材齢2日	材齢7日	材齢28日	
2014.5.9	27	51.5	12.0	20	166	323	791	1003	3.876	11.5	3.0	23.2	—	7.8	24.4	27.2	32.3
2015.5.8	27	51.5	12.0	40	160	311	754	1067	3.732	11.0	3.0	24.7	4.0	—	20.4	28.6	34.3
2016.4.22	36	44.0	18.0	20	170	387	793	935	3.483	20.5	3.0	21.2	5.4	—	31.9	45.9	53.8



1日または2日脱型



7日脱型



28日脱型

写真-1 脱型時期の変化



気中養生



膜養生



封かん養生



湿布養生

写真-2 壁試験体の養生方法



写真-3 表層透気試験



写真-4 表面吸水試験



写真-5 反発度試験

の圧縮強度が得られた材齢2日、混合セメントを使用した場合の標準的な材齢7日、極端に脱型時期を遅らせた材齢28日とした。また、Fc27-40mmはトンネルの覆工コンクリートなどを想定しており、Fc36-20mmは強度発現が早いため、早期脱型時期を材齢1日とした。型枠脱型後の養生については、写真-2に示したように、気中養生、膜養生、封かん養生および湿布養生の4種類を行った。膜養生は脱型直後に収縮低減型養生剤を塗布することとし、封かん養生は市販の養生用シールを使用して行った。また、湿布養生は湿らせたマットを試験体表面に貼り付け型枠を再度あてがい、1日おきに散水した。なお、封かん養生および湿布養生の養生期間は、Fc27-20mmの場合に30日間、Fc27-40mmおよびFc36-20mmの場合に10日間または30日間とし、その後

は、材齢4ヶ月まで室内で気中養生とした。また、円柱供試体は、壁試験体と同日に脱型し、同様の手順で養生を行った。

2.4 表層透気試験

表層透気試験は壁試験体のみ行うこととし、スイス規格SIA262/1に示されているダブルチャンバーセルを用いた^{4,5,6)}。表層透気試験の様子を写真-3に示す。表層透気試験はコンクリートの含水率が表面接触電気抵抗試験で5.5%を超えると測定値に影響を及ぼすため^{5,6)}、試験材齢は、乾燥の進んだ材齢4ヶ月とした。

表層透気試験の測定箇所は、SIA262/1において6ヶ所となっているが、今回の実験では各脱型時期および養生方法の600×600mmの狭い範囲を測定するため、それぞれ壁試験体の同一高さ付近の3ヶ所ずつ試験を行い、平

均値を表層透気係数とした。また、表面接触電気抵抗試験において、コンクリートの含水率も3ヶ所ずつ測定した。

2.5 表面吸水試験

表面吸水試験は写真-4に示すようにSWAT⁷⁾を用いた。試験は、配合 Fc27-40mm および Fc36-20mm の壁試験体のみ行うものとし、各養生方法の1日脱型および7日脱型、封かん養生および湿布養生については30日間養生した供試体について材齢4ヶ月で実施した。測定箇所は、それぞれ壁試験体の同一高さ付近の2ヶ所ずつとし、10分後の表面吸水速度の平均値を求めた。

2.6 反発度試験

反発度試験⁸⁾は、NR型のリバウンドハンマーを用い、JIS A 1155に準じて壁試験体表面を9箇所測定し、平均値を求めた。なお、測定値にコンクリート表層部の乾湿が影響しないように、試験材齢は3ヶ月とした。リバウンドハンマー試験の様子を写真-5に示す。

2.7 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、円柱供試体のみ行うこととし、JIS A 1108に準じて行った。今回の実験では、養生の影響が大きく反映されるかぶりコンクリート(φ100mmの円柱供試体のためコンクリート表層から50mm程度まで)の強度を想定している。なお、試験材齢は3ヶ月とし、各脱型時期および養生方法の3本から平均値を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 脱型時期および養生方法の影響

(1) 表層透気試験

養生方法と表層透気係数の関係を図-1に示す。脱型後に気中養生を行った場合は、脱型時期が早くなるほど表層透気係数は大きくなる傾向にあり、Fc27-40mmとFc36-20mmで顕著に見受けられた。そして、Fc27-40mmにおいて材齢1日で脱型し気中養生を行うと、表層透気

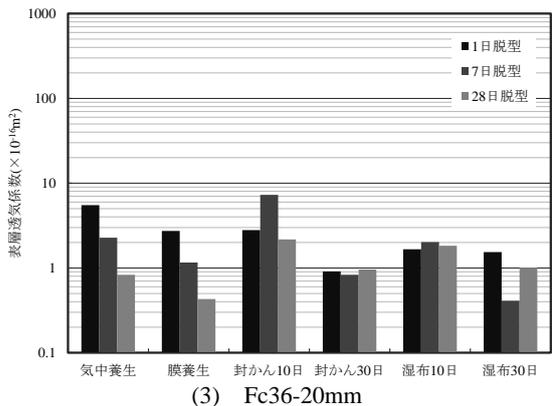
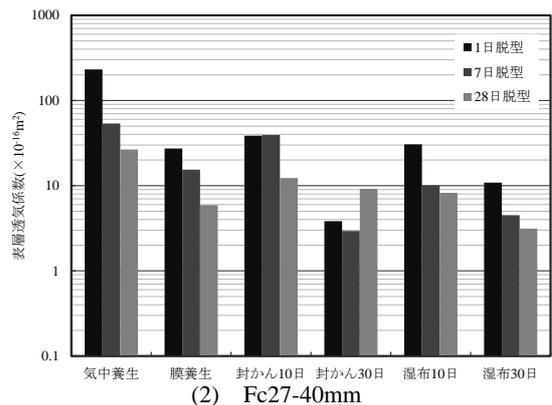
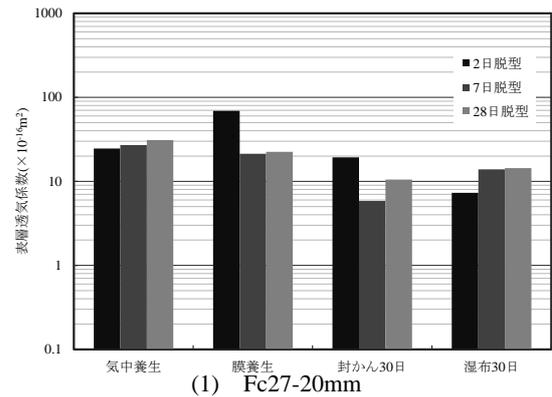


図-1 養生方法と表層透気係数の関係

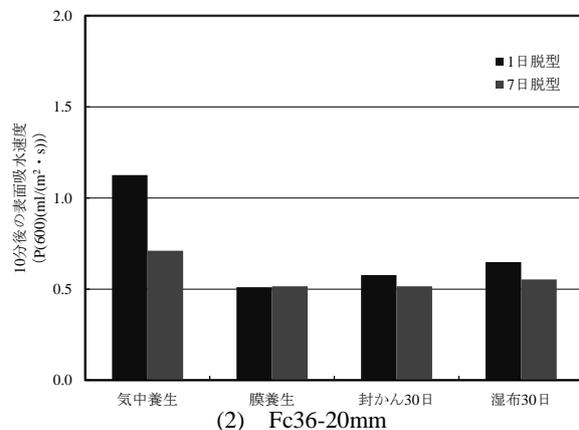
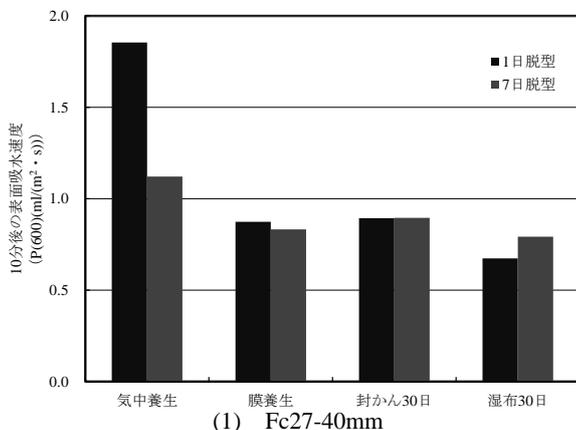


図-2 養生方法と10分後の表面吸水速度の関係

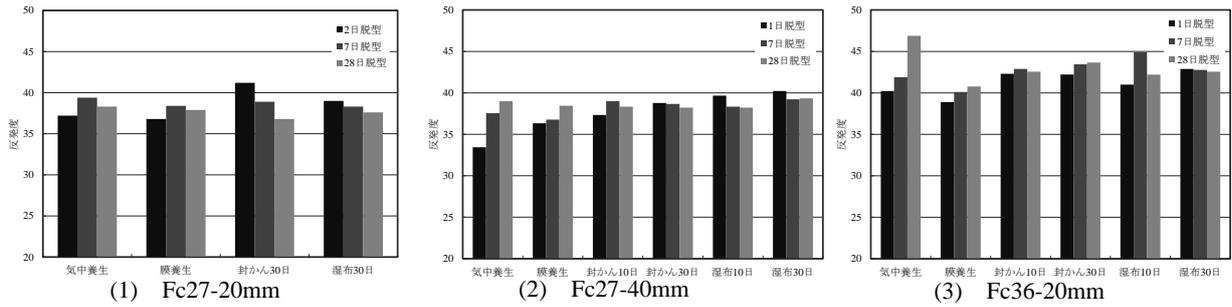


図-3 養生方法と反発度の関係

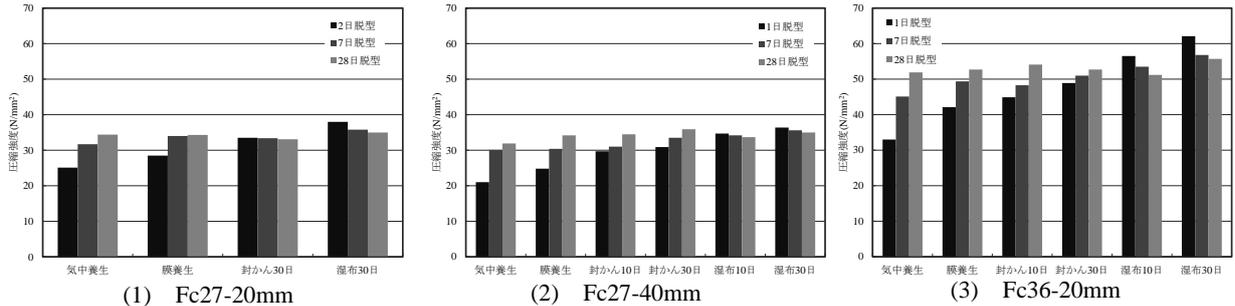


図-4 養生方法と圧縮強度の関係

係数は著しく大きくなった。これは、早期に脱型を行うほど、コンクリート中の水和に必要な水分が乾燥して、表層部がポーラスになるためと考えられる。なお、Fc27-20mmでは、脱型材齢による差があまり見受けられない結果となったが、Fc27-40mmと比較しても同じオーダーでの値であり、測定誤差の影響も考えられる。ただし、気中養生については、2日脱型のFc27-20mmよりも1日脱型のFc27-40mmの方が明らかに大きな値を示しており、より早期に乾燥の影響を受けたことによって表層透気係数が大きくなったことも考えられる。

脱型後に膜養生を行った場合は、脱型時期を遅くして膜養生を行う方が効果的ではあるが、Fc27-40mmにおいて材齢1日で脱型し膜養生を行うと、材齢28日で脱型し気中養生を行った場合と同程度の表層透気係数となっている。また、材齢7日で脱型、さらには材齢28日で脱型後に膜養生を行うと、30日間の封かん養生あるいは30日間の湿布養生を行ったときに近い表層透気係数となる場合もあった。これは、膜養生を行うことで、長期間にわたりコンクリート中の水分の蒸発を抑制することができるためと考えられる。

脱型後に封かん養生あるいは湿布養生を行った場合は、Fc27-40mmとFc36-20mmのみのデータではあるが、いずれの脱型時期においてもその後の養生期間が長い方が表層透気係数は小さくなった。そして、今回の実験の範囲では30日間の封かん養生を行うと、30日間の湿布養生を行った場合と同程度の表層透気係数が得られている。実験を行う前は、給水を行う湿布養生の方が封かん養生

より効果的であると予想していたが、高炉セメントB種を用いた場合、透気性に関しては水分の蒸発を抑えることで十分養生の効果が期待できる結果となった。

Fc27-20mmとFc27-40mmを全体的に見てみると、いずれの養生方法においても、粗骨材の最大寸法の違いによる表層透気係数の違いはさほど見受けられなかった。また、Fc27-20mmとFc36-20mmを全体的に見てみると、いずれの養生方法においても水セメント比が小さくなると、表層透気係数は小さくなる傾向にあった。

(2) 表面吸水試験

養生方法と10分後の表面吸水速度の関係を図-2に示す。Fc27-40mmおよびFc36-20mmいずれの配合においても、膜養生、封かん養生、湿布養生ともに効果的であった。そして、材齢1日で脱型し、それぞれの養生を行った場合は、材齢1日で脱型し気中養生を行った場合に比べ10分後の表面吸水速度は50%程度小さくなり、材齢7日で脱型し気中養生を行った場合に比べ20%~30%程度小さくなった。また、Fc27-40mmでも膜養生、30日間の封かん養生、30日間の湿布養生のいずれかを行うことによって、材齢7日で脱型して気中養生を行ったFc36-20mmと同程度の表面吸水速度を示すことが分かる。このことより、コンクリートの強度を大きくしなくても、乾燥を防ぐ養生を行うことで、耐久性を大きく向上できると考えられる。

(3) 反発度および圧縮強度試験

養生方法と反発度の関係を図-3に、養生方法と圧縮強度の関係を図-4に示す。気中養生、膜養生、封かん

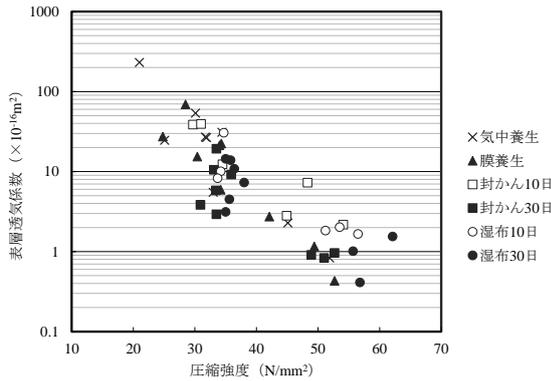


図-5 圧縮強度と表層透気係数の関係(BB)

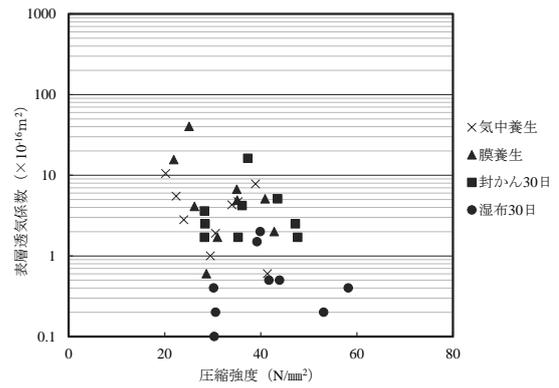


図-6 圧縮強度と表層透気係数の関係(N)⁹⁾

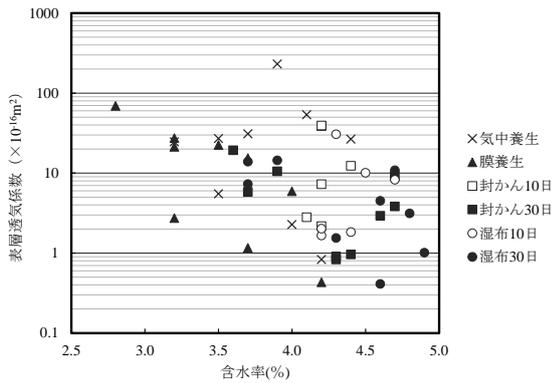


図-7 含水率と表層透気係数の関係

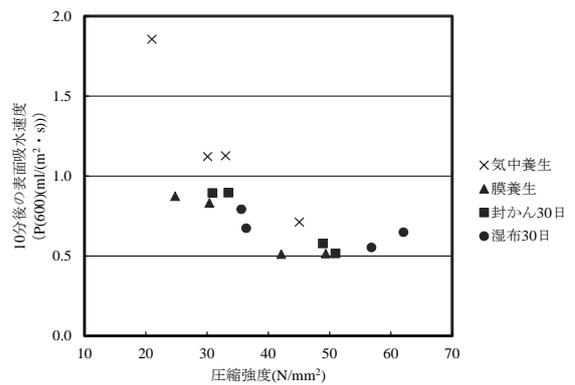


図-8 圧縮強度と10分後の表面吸水速度の関係

養生は、早期に脱型するより材齢7日、さらには材齢28日で脱型した方が反発度および圧縮強度は大きくなる傾向にあった。しかし、湿布養生を行った場合は、早期に脱型し給水を行うことで圧縮強度は大きくなった。

3.2 圧縮強度と透気性の関係

図-1に示した表層透気係数と図-4に示した圧縮強度の関係を表すと図-5ようになる。圧縮強度が大きくなるほど表層透気係数は小さくなる傾向にあるが、同程度の圧縮強度であっても脱型時期および養生方法によって表層透気係数は大きく異なる場合もあり、膜養生、30日間の封かん養生、30日間の湿布養生のいずれも同程度の圧縮強度においては、表層透気係数が小さくなった。この結果は、過去に本研究室で実験を行った普通ポルトランドセメントを用いた場合とは異なるものとなった。普通ポルトランドセメントを用いた場合の圧縮強度と表層透気係数の関係を図-6に示す⁹⁾。普通ポルトランドセメントの場合では、表層透気係数が $0.1 \sim 0.5 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となる範囲では、30日間の湿布養生が多く見受けられ、湿布養生が膜養生や30日間の封かん養生よりも効果的であった。これらのことより、既往の研究と重ね合わせると、セメントの種類による違いも確認できた。

3.3 含水率と表層透気係数の関係

含水率と表層透気係数の関係を図-7に示す。いずれの養生方法においても含水率は5.5%を下回り、概ね2.8%

～4.9%の範囲となった。含水率が大きくなるほど表層透気係数は小さくなる傾向にはあるが、明確な相関は認められなかった。

3.4 圧縮強度と透水性の関係

図-2に示した10分後の表面吸水速度と図-4に示した圧縮強度の関係を表すと図-8ようになる。表層透気係数と同様に、圧縮強度が大きくなるほど表面吸水速度は小さくなる傾向にあり、膜養生、封かん養生および湿布養生ともに効果的であった。

3.5 表面硬さと透気性および透水性の関係

反発度と表層透気係数の関係を図-9に、反発度と10分後の表面吸水速度の関係を図-10に示す。反発度が大きくなるほど表層透気係数、表面吸水速度は小さくなる傾向にはあるが、同じ反発度であっても、表層透気係数は大きく異なる場合も存在している。これらのことより、養生方法の相違による表層品質は、反発度だけで十分に評価することは困難であると考えられる。

3.6 透気性と透水性の関係

図-1に示したFc27-40mmおよびFc36-20mmの表層透気係数と図-2に示した10分後の表面吸水速度との関係を表すと図-11のようになる。10分後の表面吸水速度が大きくなるほど表層透気係数も大きくなるという傾向を示した。また、養生方法の違いによる影響も見受けられ、膜養生、封かん養生、湿布養生を行うことで表面吸

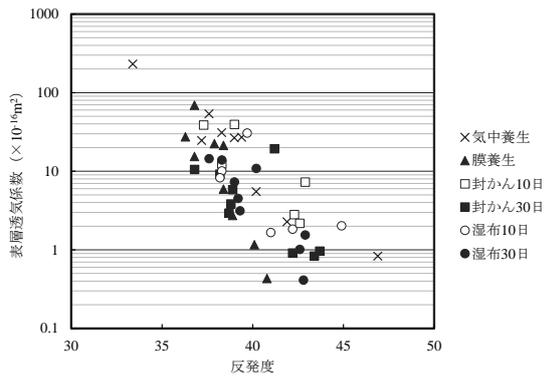


図-9 反発度と表層透気係数の関係

水速度および表層透気係数は小さくなった。よって、空気が移動しにくい緻密な表層部を有するコンクリートは、水も浸透させにくく、透気性、透水性ともに脱型後の養生に大きく左右されるという結果となった。

4. まとめ

高炉セメントB種を用いたコンクリートの養生方法の相違が透気性、透水性および表面硬さに及ぼす影響を検討した結果、以下の(1)~(3)が明らかとなった。

- (1) 高炉セメントB種を用いた場合、コンクリートの乾燥を防ぐことが最も重要であり、透気性および透水性においては、膜養生および封かん養生ともに給水を行う湿布養生と同程度の効果があった。
- (2) いずれの養生方法に関わらず、コンクリートの水セメント比が小さくなると、表層透気係数および表面吸水速度は小さくなるが、粗骨材の最大寸法による違いはあまり見受けられなかった。
- (3) 表面硬さと透気性あるいは透水性に一定の相関性はあるものの、反発度に比べて、表層透気係数および表面吸水速度の方が養生の効果を評価できる。

謝辞

本研究を行うに当たり、前橋工科大学工学部社会環境工学科の舌間孝一郎准教授に多大なるご協力を賜りました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 彌永育代, 豊福俊泰, 高橋典子: 透気性・透水性試験によるコンクリートの塩分浸透性・中性化の診断法に関する研究, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.699-700, 2014.3
- 2) 田中章夫, 今本啓一, 下澤和幸, 山崎順二: ダブルチャンバー法透気試験機を用いた既存鉄筋コンクリート造建築物の中性化予測に関する基礎的研究, シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査論

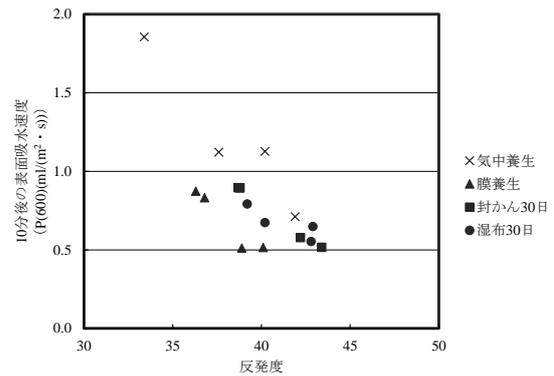


図-10 反発度と10分後の表面吸水速度の関係

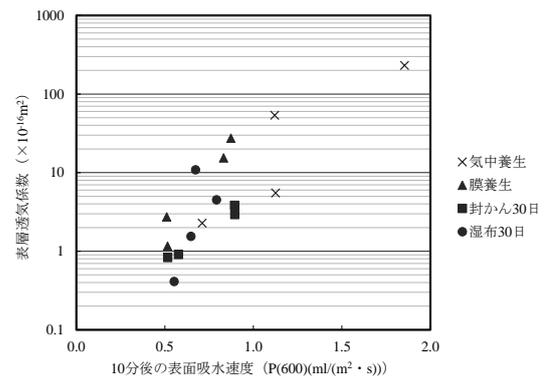


図-11 10分後の表面吸水速度と表層透気係数の関係

文集, Vol.4, pp.63-70, 2012.8

- 3) 栗塚一範, 角田晋相, 若林信太郎, 原田尚幸: 高炉コンクリートの圧縮強度と透気係数の関係に関する一考察, シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol.4, pp.71-76, 2012.8
- 4) R. Torrent: The Gas-Permeability of High-performance Concretes Site and Laboratory tests, ACI Special Publication 186 "High Performance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures", pp.291-308, 1999
- 5) スイス規格 SIA261/1, 2003
- 6) 半井健一郎, 蔵重 勲, 岸利 治: かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査—スイスにおける指針—コンクリート工学 Vol.49, No.3, pp.3-6, 2011.3
- 7) 林 和彦, 細田 暁: 表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.1, pp.82-97, 2013
- 8) 日本工業規格 JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」, 2003
- 9) 井上 翠, 澤本武博, 樋口正典, 藤原貴央: コンクリートの表層品質に及ぼす配合および養生方法の影響, セメントコンクリート論文集, Vol.68, pp.345-351, 2015.3