論　文　*Article*

養生方法の異なるコンクリート柱部材の走査型電子顕微鏡による表層部の硬化組織観察

原稿受付 2020 年 6 月 8 日
ものつくり大学紀要　第 10 号　(2020)　1 ～ 7

澤本武博[*1]，沢木大介[*2]，高橋晴香[*3]，樋口正典[*4]，臺哲義[*4]

*1 ものつくり大学　技能工芸学部　建設学科
*2 株式会社太平洋コンサルタント　技術調査室
*3 株式会社太平洋コンサルタント　解析技術部
*4 三井住友建設株式会社　技術本部　建設基盤技術部

Scanning Electron Microscope Observation of Hardened Concrete Surfaces of Pillar Members Cured by Several Methods

Takehiro SAWAMOTO[*1], Daisuke SAWAKI[*2], Haruka TAKAHASHI[*3], Masanori HIGUCHI[*4] and Akiyoshi DAI[*4]

[*1] Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists
[*2] TAIHEIYO CONSULTANT Co., Ltd., Technical Research Office
[*3] TAIHEIYO CONSULTANT Co., Ltd., Instrumental Analysis Technology Department
[*4] SUMITOMO MITSUI Construction Co., Ltd.

Abstract

Concrete pillar members of actual size using two types of cement were cured by four types of method and air permeability and water content were evaluated at three ages. As the age proceeded, coefficients of air permeability were in general increased and water contents were decreased. Correlation between these two values was confirmed. In the case of normal Portland cement (N), coefficients of air permeability were small and water contents were large in the concrete cured under water-supplied condition such as wet curing. In the case of blast furnace slag cement type B (BB), coefficients of air permeability were smaller in the concrete cured under atmospheric condition than other three methods. It was considered that suppression of drying was important for BB concrete to keep air permeability low. Observation of hardened structure of surfaces of each concretes by scanning electron microscope suggested that principal factors of differences of air permeability among four curing methods were denseness of surface in N concrete and degree of occurrence of cracking in BB concrete.

Key Words : Concrete, Curing, Coefficient of air permeability, Water content, Hardened structure, Scanning electron microscope, Backscattered electron image

1. はじめに

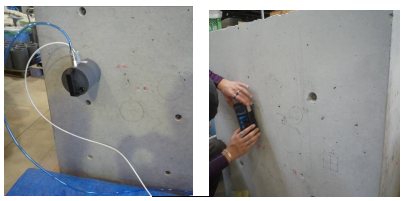
コンクリートの耐久性を評価するにあたって，一般的に水セメント比あるいは圧縮強度をその指標として用いることが多いが，コンクリートの養生によって耐久性は異なってくる．そのため，直接的にかぶりコンクリートの空気や水の移動抵抗性を求める方法が提案され，実用化している[1~4]．そして，コンクリート構造物の表層の透気性に及ぼす影響が検討されるようになってきたものの[5~9]，実大柱部材を用いて検討した例は少ない[10,11]．

Table 1 Mix proportions and properties of concrete

Fc	Cement	W/C (%)	Slump (cm)	Unit content (kg/m^3)					Properties of fresh concrete			Strength at mold-demolding (N/mm^2)	Strength under standard curing (N/mm^2)
				W	C	S	G	Ad	Slump (cm)	Air (%)	Temperature (℃)	7days	
36	N	45.0	12	172	383	733	1006	4.596	11.0	5.0	29.3	25.6	34.6
	BB	44.0	12	171	389	718	1006	4.668	10.0	4.7	26.9	26.9	40.8

Atmospheric Membrane Sealed Wet

Fig.1 Curing methods



Air permeability Water content

Fig.2 Test methods

一方，コンクリートの養生方法が異なると，透気係数にも違いが生じることは知られているが，セメントの種類と養生方法を組み合わせ，コンクリート表層部の走査型電子顕微鏡（以下，SEM と称す）による背面反射電子像（以下，BEI と称す）の観察結果から考察した例は，著者らが知る限りでは見当たらない．

本研究では，普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いたコンクリート柱部材を作製し，コンクリートの養生方法および材齢が，柱部材の透気性および含水率に及ぼす影響を検討した．そして，表面付近の切断面を SEM で観察し，硬化組織の特徴を明らかにするとともに，透気性との関係を考察した．

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合および柱部材の作製

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3）および高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm^3）を，細骨材には栃木県栃木市尻内町産山砂（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産砕石（最大寸法 20mm，表乾密度 2.64g/cm^3，実積率 59.0%）を用いた．また，混和剤には，AE 減水剤を用いた．

コンクリートの配合を表 1 に示す．実験に用いたコンクリートは，普通ポルトランドセメント（以下，N と称す）または，高炉セメント B 種（以下，

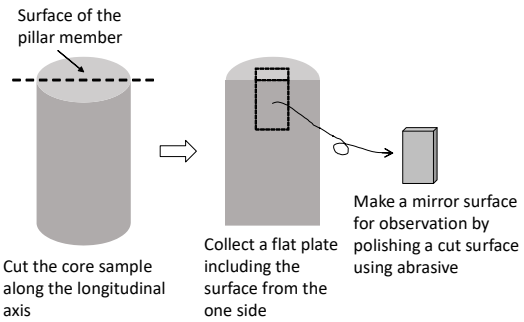


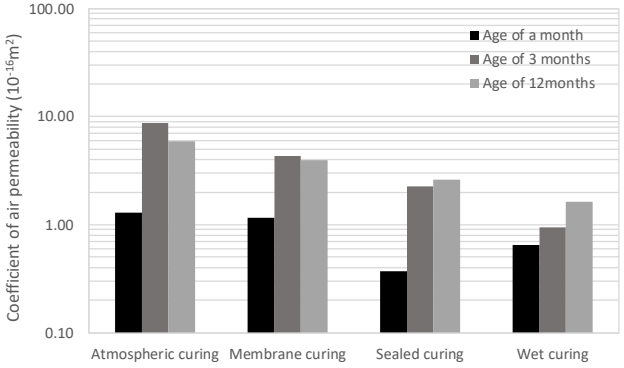
Fig. 3 Procedure for preparation of sample for observation of BEI by SEM

BB と称す）を用いた呼び強度 36 のレディーミクストコンクリートとした．

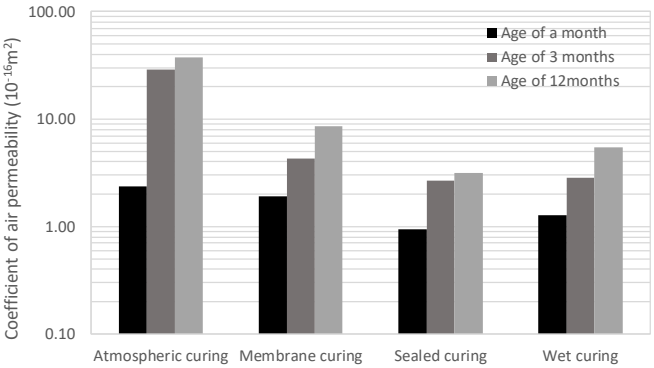
柱部材の寸法は，高さ 1200mm，幅 840mm，長さ 840mm とし，コンクリートはトラックアジテータから直接シュートにより 3 層で打ち込み，内部振動機で締め固めた．

2.2 柱部材の養生方法

実験は，水がかりのない屋内実験棟で行うこととし，材齢 7 日の脱型後，気中養生，膜養生，封かん養生および湿布養生の 4 種類の養生を柱部材側面の 4 面にそれぞれ行った．柱部材の養生の様子を図 1 に示す．膜養生は脱型直後にグリコールエーテル系誘導体を主成分とする収縮低減型養生剤を塗布することとした．また，封かん養生は脱型直後にポリオレフィンを基材とした養生テープを貼り付け，湿布養生は脱型直後に湿らせたウレタンフォーム発泡体および繊維製不織布などを加

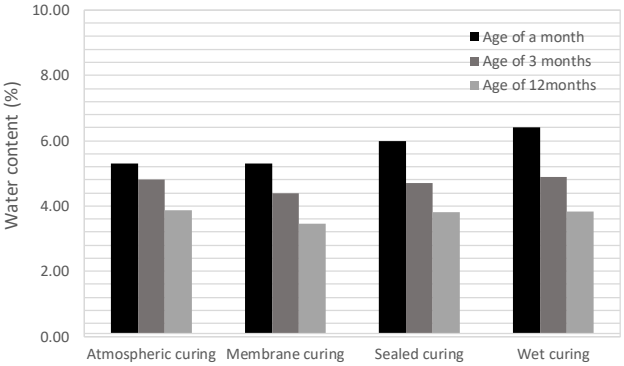


(a)Normal Portland cement(N)

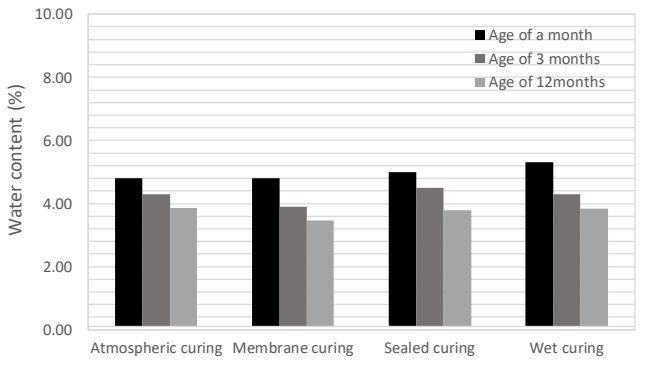


(b)Blast furnace slag cement type B(BB)

Fig. 4　Effect of curing method on coefficient of air permeability



(a)Normal Portland cement(N)



(b)Blast furnace slag cement type B(BB)

Fig. 5　Effect of curing method on water content

工したマットを貼り付け，型枠を再度あてがい，3 日おきに散水した．なお，封かん養生および湿布養生は脱型日から材齢 28 日まで行った．

2.3　透気試験および含水率試験

透気試験および含水率試験の様子を図 2 に示す．透気試験では，スイス規格 262 に示されているダブルチャンバーセルを用い，材齢 1 ヶ月，3 ヶ月および 1 年において，柱部材の各養生面の中央部付近（打込み面・底面の縁部から 300mm 以上および側面の縁部から 200mm 以上離れた内部）を 3 ヶ所ずつ測定し，相乗平均値をそれぞれの透気係数とした．

含水率試験では，電気抵抗式のコンクリート水分計により，透気試験と同じ材齢でコンクリート表面の含水率を測定した．

2.4　硬化組織の観察

材齢 1 年において，各方法で養生した柱部材の一つの面の中央付近より，直径 75mm のコアを 4 本採取し，3 本を圧縮強度試験，1 本を硬化組織の観察に用いた．コアの強度はいずれの養生でも 40N/mm^2 程度であった．

硬化組織の観察では，図 3 に示すように，各コアをダイヤモンドカッターにより長軸に平行する方向に半分に切断し，その片方の切断面から，表面を含む厚さ約 15mm，大きさ 25×40mm の平板を切断して採取した．25×40mm の面を研磨材により鏡面状に研磨し，観察用試料とした．研磨した面に炭素を蒸着し，SEM により BEI を観察し，硬化組織の特徴を明らかにした．SEM は日本電子製の IT-300HR を用い，加速電圧は 15kV とした．

3. 実験結果および考察

3.1　透気試験および含水率試験

透気係数と養生方法および材齢の関係を図 4 に示す．N の場合，いずれの材齢においても，概ね外部から水分を供給する湿布養生を行うと透気係数は最も小さくなり，次に水分を乾燥させない封

かん養生，水分の乾燥を抑制する膜養生，脱型直後から乾燥が始まる気中養生の順となった．これらのことより，N の場合は乾燥を抑制し，さらに水分を供給するほど水和反応が活発になり表層品質が向上すると考えられる．一方，BB の場合は，乾燥の影響が大きいため[12]，気中養生で透気係数が極めて大きくなっており，膜養生，封かん養生，湿布養生を行うことで透気係数は小さくなった．これは BB の場合は N と異なり，乾燥を抑制する養生を行うことで十分な養生効果が得られることを表していると考えられる．

材齢に着目すると，いずれの養生でも材齢の経過に伴い，透気係数は大きくなる傾向にあり，水がかりのない屋内環境では，乾燥の影響を大きく受けると考えられる。

表面含水率と養生方法および材齢の関係を図 5 に示す．N の場合，いずれの材齢においても，概ね湿布養生を行うと表面含水率は最も高くなり，次に封かん養生，膜養生，気中養生の順となった．これは，透気係数の小さい順とも一致しており，N の場合は乾燥を抑制し，さらに水分を供給するほど含水率が高く表層部が緻密であると考えられる．BB の含水率試験の結果も N と同様の傾向が見受けられるが，養生の違いによる表面含水率の差は N より小さい．

透気係数と含水率の関係を図 6 に示す．呼び強度 36 と同程度の強度レベルおよび水がかりのない屋内環境の場合，表面含水率が大きくなるほど透気係数は小さくなる傾向にあり，相関性が見受けられた．

3.2 硬化組織の観察

N のコンクリートの BEI を図 7 に，BB のコンクリートの BEI を図 8 に，それぞれ示す．いずれもコンクリートの表面から深さ 1mm 程度の観察像である．各画像においてさまざまな形状の粒子は骨材，その間を埋めるのがセメントペーストであり，その中に散在する白色の小さい粒子はセメント粒子である．BEI においては空隙など実体のない部分は黒く観察される．各画像に見られる円形の黒い部分は気泡，線状の黒い部分は亀裂などである．

N の場合，コンクリートの表面の形状に，養生

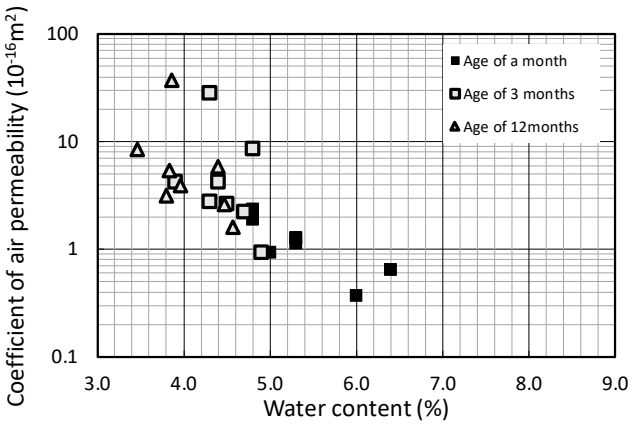


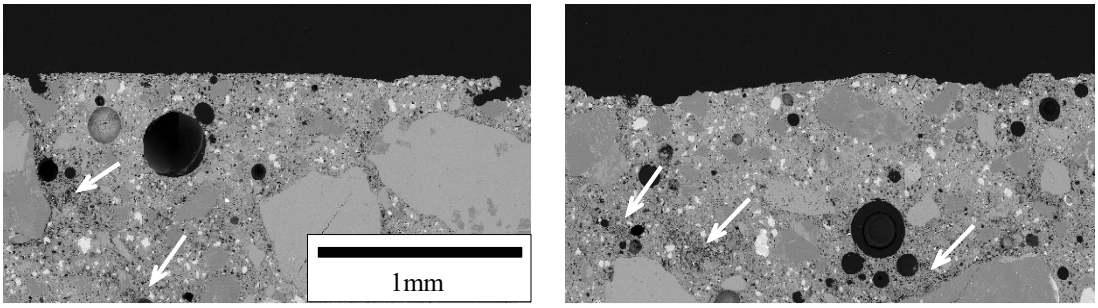
Fig. 6 Relation between coefficient of air permeability and water content

方法による違いが見られた．封かん養生と湿布養生は平滑であるのに対し，気中養生と膜養生には部分的に凹凸が見られた．これはそれぞれのコンクリートの硬さを反映したものと思われ，気中養生と膜養生は封かん養生や湿布養生より柔らかいため，切断などの観察試料作製の過程で表面が欠損したものと考えられる．また，写真ではやや判りづらいが，気中養生や膜養生は矢印で示す部分がやや暗めに観察され，空隙が多いことを示す．このような部分は骨材の近傍に多く，またセメントペーストとの間にすきまが認められる骨材も散見された．

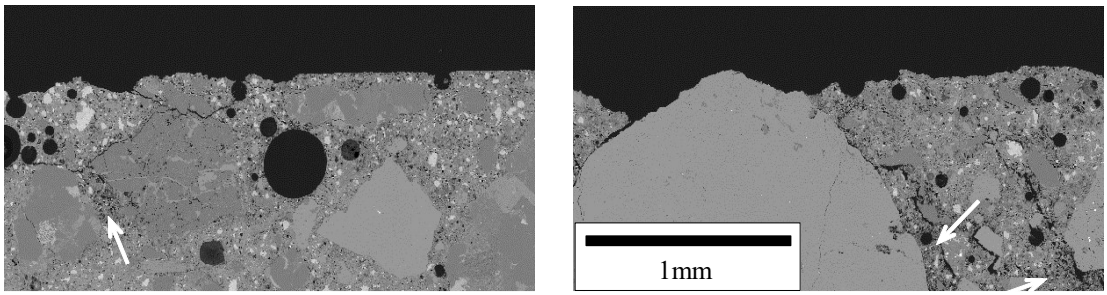
これに対し封かん養生と湿布養生，特に湿布養生では，セメントペーストはおおむね一様の色調で観察され，骨材とセメントペーストの間のすきまも気中養生や膜養生のようには観察されなかった．

以上の結果から，湿布養生や封かん養生は気中養生や膜養生と比べてセメントの水和が進行し，より緻密な硬化組織が形成されており，そのため透気係数が小さいものと考えられる．4 つの試料の透気係数の大小と硬化組織の緻密さは対応しており，表層が緻密なものほど透気性が低いという関係が認められる．

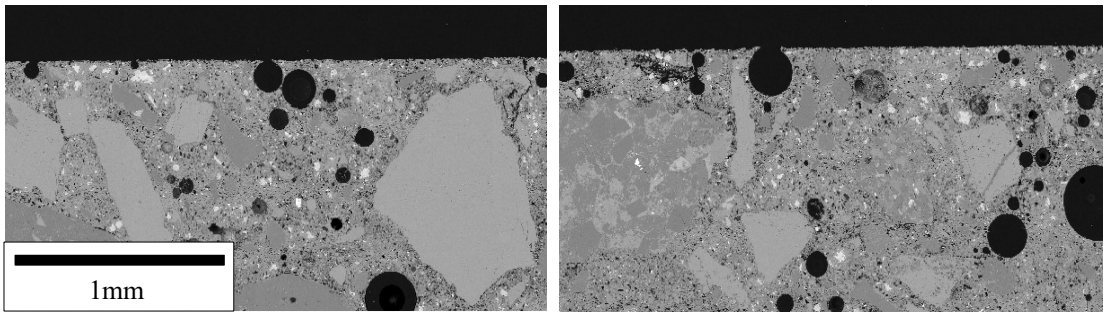
BB の場合，表面の形状には N と同様に養生方法による違いがあり，透気係数の大きい気中養生は，他の 3 試料と比べて凹凸が多かった．気中養生の表層が他の 3 試料より柔らかいことが推察される．また N ではほとんど見られなかった亀裂が観察され，特に気中養生において多かった．



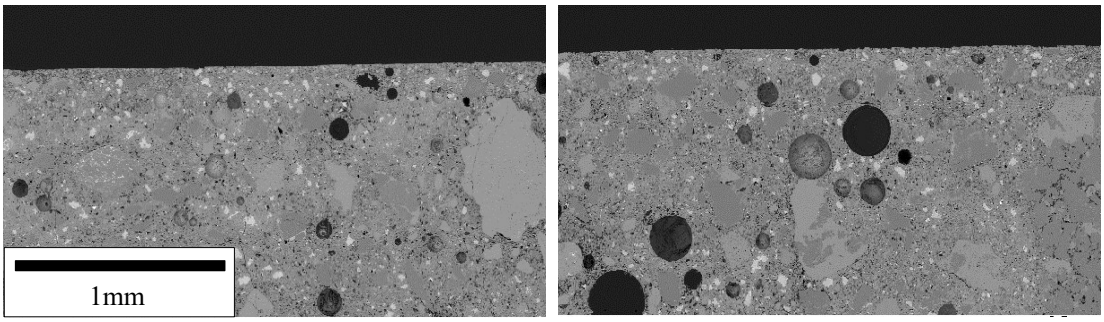
(a) Atmospheric curing (Coefficient of air permeability : $5.90\times10^{-16}m^2$)



(b) Membrane curing (Coefficient of air permeability : $3.97\times10^{-16}m^2$)

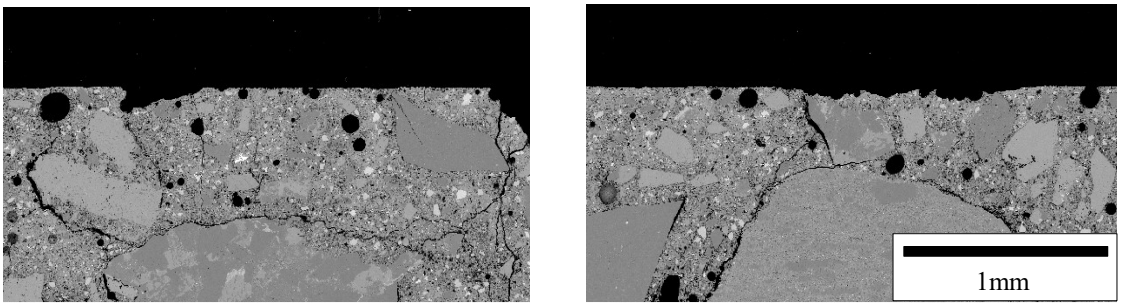


(c) Sealed curing (Coefficient of air permeability : $2.62\times10^{-16}m^2$)

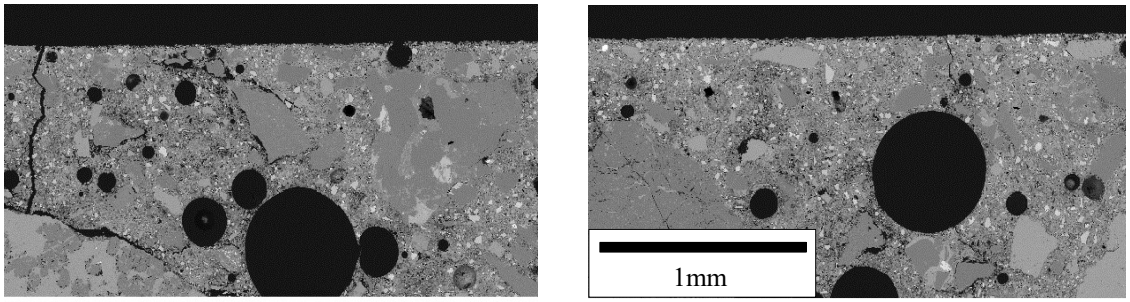


(d) Wet curing (Coefficient of air permeability : $1.63\times10^{-16}m^2$)

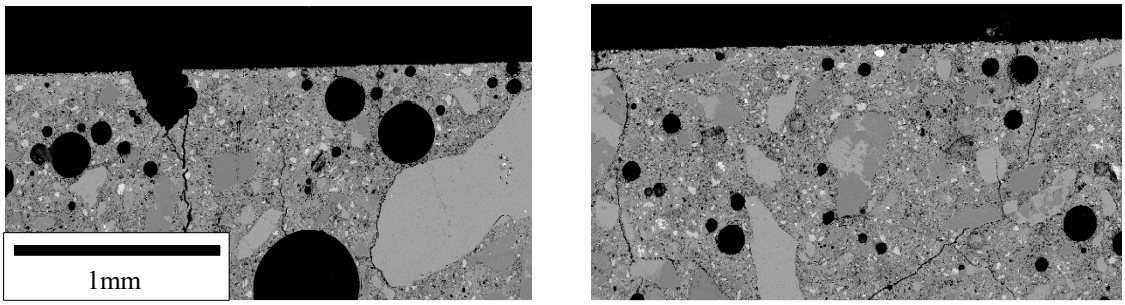
Fig. 7 BEIs of surface of concrete using normal Portland cement (N) (Age of 12months)



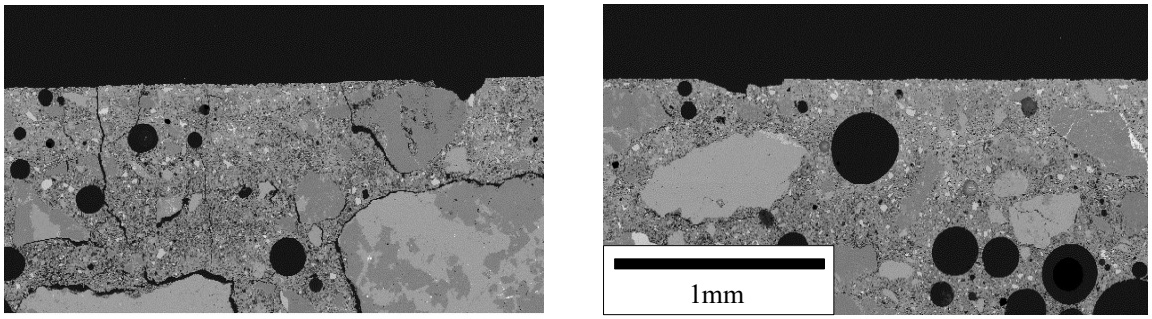
(a) Atmospheric curing (Coefficient of air permeability : $37.32\times10^{-16}m^2$)



(b) Membrane curing (Coefficient of air permeability : $8.59\times10^{-16}m^2$)



(c) Sealed curing (Coefficient of air permeability : $3.15\times10^{-16}m^2$)



(d) Wet curing (Coefficient of air permeability : $5.47\times10^{-16}m^2$)

Fig. 8 BEIs of surface of concrete using blast furnace slag cement type B (BB) (Age of 12months)

前述の通り，N の場合は湿布養生のように水分を供給する方法により透気係数は小さく保たれるが，BB の場合は気中養生以外の 3 種類の方法のいずれでも，透気係数は気中養生と比べて小さく，それは乾燥が抑制されることによると考えられる．

BEI において，BB に亀裂が認められ，気中養生において他の 3 種類の方法より多めであることは，乾燥の程度の相違によるものと考えられる．そして，BB の透気係数が総じて N より大きいのは，亀裂が透気の支配的要因であるためと考えられる．

4. まとめ

普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いたコンクリート柱部材を作製し，コンクリートの養生方法および材齢が，柱部材の透気性，含水率および硬化組織に及ぼす影響を検討した結果，以下の(1)～(3)が明らかになった．

(1) N を用いたコンクリートの養生方法としては，外部から水分を供給する養生方法が最も効果的であった．一方，BB を用いたコンクリートは乾燥を抑制する養生を行うことで十分な養生効果が得られた．
(2) 水がかりのない環境においては，材齢の進行とともに透気係数は大きく，含水率は低くなる傾向にあり，強度レベルおよび使用環境が同じ場合には，透気係数と含水率に相関性が見受けられた．
(3) BEI による表層部の硬化組織の観察により，N を用いたコンクリートでは硬化組織の緻密さが，BB を用いたコンクリートでは亀裂発生の程度が，養生方法による透気係数の差異の主原因であると考えられる．

今後は，同じ配合および養生方法であっても水がかりの有無による使用環境の違いによって透気係数が異なることが報告されているため[10]，硬化組織の観察を行っていく予定である．

謝　辞

本研究を行うにあたり，多くの実験を行った齊藤雅仁大学院生，澤本研究室の学生ならびに RC 構造物総合実習 I の非常勤講師の先生方，授業を履修した学生に多大なるご協力を頂きました．

文　献

1) R. J. Torrent : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365（1992）
2) 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) 山崎順二ほか：実大コンクリート壁における各種の透気性試験に関する共通試験，日本建築学会構造系論文集，Vol.83，No.746，pp.515-525(2018)
4) 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）
5) 家辺麻里子ほか：表層透気試験による養生条件を変化させた中規模柱試験体の表層品質詳細把握，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.659-664(2011)
6) 太田健司ほか：実構造物コンクリート表層品質に日射が与える影響に関する一考察，土木学会第 67 回年次学術講演会，Ⅴ-047，pp.93-94(2012)
7) 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）
8) 井上翠ほか：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(2014)
9) 門井康太ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.1981-1986(2017)
10) 齊藤雅仁ほか：コンクリート柱部材の透気性に及ぼす養生方法および使用環境の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.72，pp.270-276(2018)
11) 齊藤雅仁ほか：コンクリート柱部材の透気性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.73，pp.266-271(2019)
12) 伊代田岳史ほか：高炉コンクリートの耐久性における養生敏感性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.111-116(2008)