

論文 高炉スラグ微粉末を用いたセメントペースト硬化体の透気性状に湿度環境の変化が及ぼす影響

落合 昂雄^{*1}・吉田 亮^{*2}・岸 利治^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨：供試体を静置する湿度環境を変化させたうえで透気試験を行い、湿度環境が透気性状に及ぼす影響について検討を行った。普通ポルトランドセメントを使用した供試体に関しては、水中養生および気中養生の供試体ともに湿度変化に伴う透気係数の顕著な変化は確認されなかった。一方、高炉スラグ微粉末を混和した水中養生の供試体において R.H.60%環境下では透気係数が顕著に増加し、また湿度変化に透気係数が敏感に反応することが確認された。これは高炉スラグ微粉末を混和することで形成されるボトルネック構造のような特徴的な空隙構造に起因すると考えられる。

キーワード：高炉スラグ微粉末、透気係数、相対湿度、インクボトル空隙

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化現象は多岐にわたり、そのひとつにコンクリートの中性化が挙げられる。中性化は、大気中に含まれる二酸化炭素がコンクリート表面に存在する毛細管空隙から内部に侵入および拡散し、炭酸塩化反応を引き起こすことでアルカリ性である細孔溶液の pH を低下させる。この pH の低下が鉄筋などの鋼材位置に達すると、鉄筋表面に形成されている不動態皮膜が破壊され、鉄筋腐食の原因となる。不動態皮膜の破壊に加え、水分と酸素の供給により鉄筋腐食が進行することで腐食生成物が堆積・膨張し、コンクリートのひび割れの発生やかぶりの剥離・剥落、鋼材の断面欠損による耐力の低下などの鉄筋コンクリート構造物の性能低下を生じさせる。

特に高炉セメントを使用したコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較し、中性化の進行が早いとされる。これは、高炉セメントは高炉スラグ微粉末の置換によりセメント量が減少することで水和生成物である水酸化カルシウムの生成量が減少することに加え、高炉スラグの有する潜在水硬性により水酸化カルシウムが消費されることに起因する¹⁾。

高炉セメントを使用した構造物から採取したコアによる促進中性化試験では、普通ポルトランドセメントを使用した構造物のコアよりも中性化進行が早いとの報告がある²⁾。一方、外部環境に晒される既設構造物の中性化深さは、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート構造物と、高炉セメントを使用したコンクリート構造物に大差がみられないとも報告されている²⁾。これらの報告から、一定の相対湿度環境下で行う促進中性化

試験と異なり、自然暴露では季節や天候等により生じる温度・湿度環境の変化および雨水等の水分の影響が中性化の進行に顕著な影響を与えることが考えられる。

さらに高炉スラグ微粉末を混和したセメントペースト硬化体では、高炉スラグ微粉末の有する潜在水硬性により空隙構造が緻密化し、しきい径の狭小化やインクボトル量の増加などの特徴的な空隙構造が形成されるとの報告がある³⁾。中性化をはじめとする諸劣化現象に対するコンクリートの耐久性は、セメントペースト部分の空隙構造に通底する物質透過抵抗性に依存すると考えられており、高炉スラグの混和により形成される特徴的な空隙構造が前述のような影響を及ぼすことが推測される。このような既往の研究から、高炉スラグを混和した場合の中性化に対する検討には化学的面からの検討のみではなく、物理的面、すなわち混和の有無による空隙構造の相違に着目する必要があると考えられる。

そこで本研究では中性化試験の代替として透気試験⁴⁾⁵⁾を行い、その指標である透気係数について検討を加えた。その際に湿度環境を段階的に設定し、乾燥および湿潤環境が透気性状に及ぼす影響を空隙構造と関連づけることを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

供試体には普通ポルトランドセメント(O)を使用し、また混和材として高炉スラグ微粉末(B)を使用した。混和材は内割置換とし、置換率は45%とした。また供試体の水結合材比は30%、45%、60%の3水準を設定した。

前述の配合に基づき、セメントペースト硬化体を30×

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科創成シミュレーション工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 教授 博士(工学) (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院 工学研究科 教授 Ph.D. (正会員)

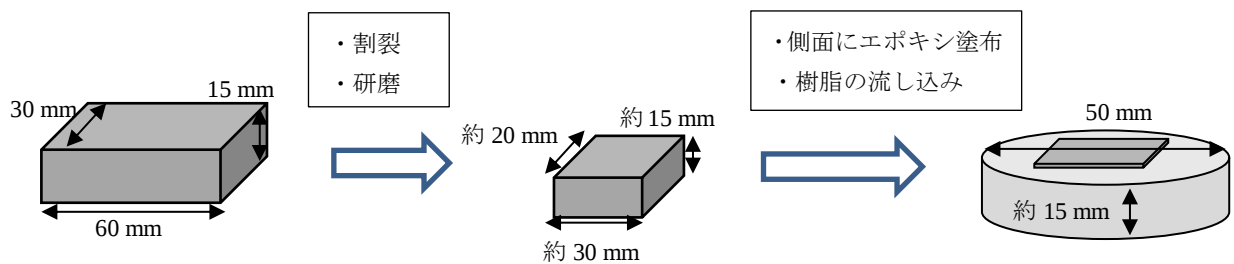


図 - 1 供試体の作製手順

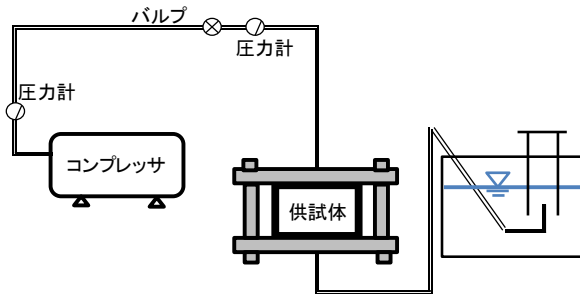


図 - 2 透気試験概要

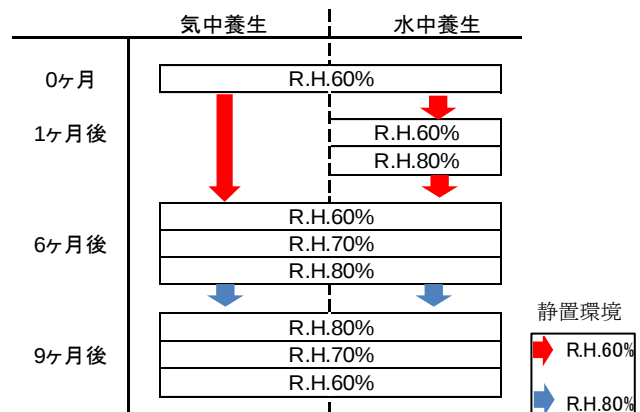


図 - 3 湿度変化のフロー

60×15 mm の型枠を用いて作製した。打設した翌日に脱型し、水温 20℃における水中養生(W)および温度 20±3℃、湿度 60±5%の室内における気中養生(A)の2種類の養生方法を材齢 2 年 9 ヶ月まで行った。また本研究では、供試体の識別を OW30 のように結合材種類、養生条件、水結合材比の順に記号で表す。

2. 2 透気試験

2. 2. 1 透気試験用供試体

供試体は 30×60×15 mm のセメントペースト硬化体を各配合、養生ごとに図 - 1 に示すように成形して作製し、透気試験を各供試体に対して行った。具体的には、前項の試料を割裂し、湿式の研磨機を用いて約 20×30×15 mm の直方体に成形した後、試料の洗浄および研磨時に試料内部に浸入した水分を排出させる目的で、アセトン内において超音波洗浄を行った。その後、恒温恒湿槽(20℃, R.H.60%)内にておおよそ 1 ヶ月程度、試料質量が安定するまで静置した。前処理として透気面以外の 4 面をエポキシ系接着剤で被覆した後、試料周囲にエポキシ樹脂を流し込み、試料を中心とする直径 50 mm、厚さ約 15 mm の円盤状に加工した。

供試体の加工は9月から10月にかけて行い、25±5℃、R.H.60±5%程度の環境下において乾燥を受けた可能性がある。

2. 2. 2 試験方法

円盤状に加工した供試体を鋼製のリングにはめ込み、リングと供試体との間の隙間をシーリング材により充填

し行った。つぎに 6 ヶ月後での測定では、R.H.60%でのた。その後、図 - 2 に示す試験装置にセットし、測定を行った。測定は負荷圧力を供試体種類により 0.2～0.6 MPa と設定し、試験体内部を透過した空気の流量が定常となった後に、水上置換法により透気量を測定した。透気係数は、得られた透気量から次式を用いて算出した。なお、透気係数には負荷圧力の相違による影響がほぼないことを確認している。

$$k = \frac{2L\mu P_2 Q}{(P_1^2 - P_2^2)A} \quad (1)$$

ここに、k：透気係数 m^2

Q：透気量 m^3/sec

P_1 ：載荷圧力 Pa

P_2 ：大気圧 Pa

L：試験体厚さ m

A：断面積 m^2

μ ：空気の粘性係数 $1.81 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{sec}$

2. 3 湿度環境

本研究では、実環境での湿度変化を参考にし、供試体を静置する湿度環境を図 - 3 のように変化させたうえで透気試験を行った。まず恒温恒湿槽(20℃、R.H.60%)内で静置した供試体に対して測定を行った。その後、1 ヶ月程度そして 6 ヶ月程度、9 ヶ月程度の期間を空けて透気試験を行った。1 ヶ月後の透気試験では、R.H.60%内に静置し測定を行った後に、R.H.80%内に供試体質量が安定するまで 1 週間程度静置して再度試験を行った。ただし

1 ヶ月後の測定では水中養生の供試体のみに対し測定を行った。つぎに 6 ヶ月後での測定では、R.H.60%での測定後に R.H.70%, R.H.80%と段階的に設定湿度を高め、それぞれの湿度環境において測定を行った。9 ヶ月後の測定では、6 ヶ月後と逆に R.H.80%から R.H.70%, R.H.60%と段階的に設定湿度を下げ、それぞれの湿度環境において同様に試験を行った。

また BW60 は供試体を貫通するひび割れが発生したため、6 ヶ月後以降のデータはない。

3. 湿度環境と空隙径の関係

空隙中における水分の凝縮および逸散は、熱力学的に求められる Kelvin 式に従うと考えられている。

$$r_s = -\frac{2\gamma M}{\rho R T \ln h} \quad (2)$$

ここに、 r_s ：水分の凝縮する最大半径 nm

γ ：液体の表面張力 mN/m

M ：水の分子量 g/mol

R ：気体定数 J/mol・K

T ：絶対温度 K

ρ ：液状水密度 g/cm³

h ：相対湿度 %

式(2)により算出される半径 r_s 以下の空隙には水分が凝縮する。相対湿度とその相対湿度下において水分が凝縮する空隙径の対応関係を表 - 1 に示す。なお、吸着を考慮した修正 B.E.T.理論⁶⁾による式(3)を用いて算出した空隙径も併せて示した。

$$r_c = C r_s \quad (3)$$

ここに、 $C = 2.15$

表 - 1 凝縮する空隙径(直径)

相対湿度(%)	空隙径(nm)	
	Kelvin式	修正B.E.T.理論
80	10.0	21.5
70	6.2	13.3
60	4.4	9.5

4. 実験結果・考察

4. 1 静置期間の相違による透気係数の変化

図 - 4～図 - 7 に R.H.60%での静置期間の相違による透気係数の変化を示す。高炉スラグ微粉末の混和の有無に関わらず、図 - 4、図 - 5 に示す気中養生を行った供試体の透気係数は、静置期間の進行による大きな変化は確認されない。一方、水中養生を行った供試体については、図 - 6 の普通ポルトランドセメントを使用した供試体において OW45 は初期の透気係数が大きい、これは最初の測定後に供試体と鋼製リングとの間にシーリング材を

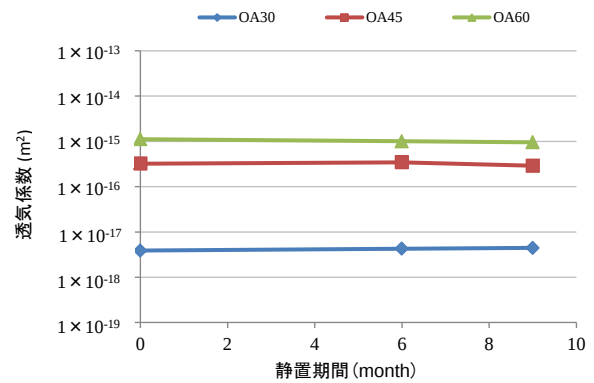


図 - 4 R.H.60%での透気係数の変化 (OPC 気中)

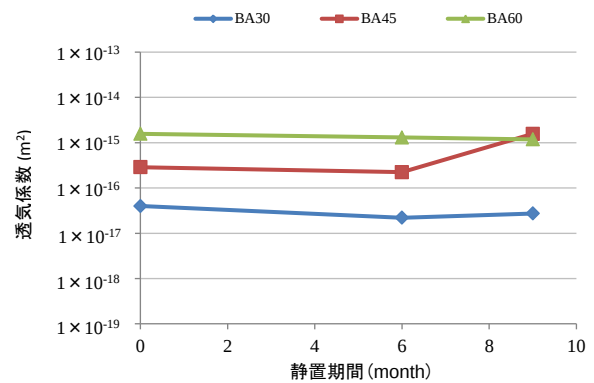


図 - 5 R.H.60%での透気係数の変化 (BFS 気中)

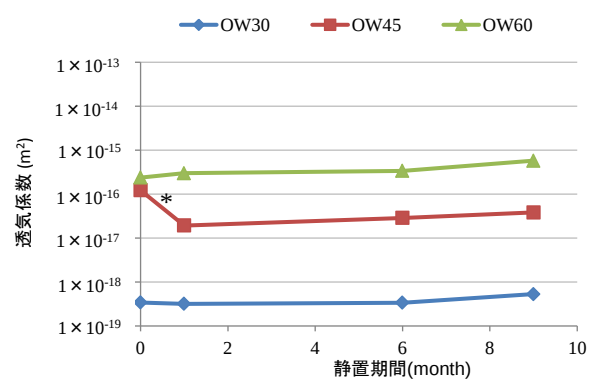


図 - 6 R.H.60%での透気係数の変化 (OPC 水中)

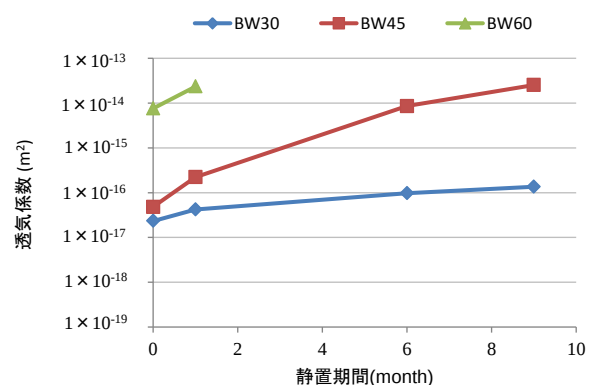


図 - 7 R.H.60%での透気係数の変化 (BFS 水中)

充填し直した影響を考えている。図-7 に示す高炉スラグ微粉末を混和した供試体が静置期間の進行に伴い、水結合材比が高い程に透気係数が変化する傾向が確認される。

また図-7 に示す高炉スラグ微粉末を混和した供試体では顕著な変化を確認でき、乾燥期間の進行に伴い、透気係数が増加し、次第に収束していく様子が認められる。BW60 はひび割れにより供試体が破損したため6ヶ月後以降のデータはないが、破損しなかった場合には BW45 と同様に透気係数が大幅に増加したと考えられる。

ここで本研究の結果を既往の研究と照合させて考えてみる。浅賀らの研究⁷⁾において、高炉スラグ微粉末を混和したセメントペースト硬化体は、無混和と比較して高い物質移動抵抗性を示している。また吉田らの研究³⁾においては、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により、しきい径の狭小化やインクボトル量の増加などの特徴的な空隙構造が形成されることが報告されている。これら既往の研究から、高炉スラグ微粉末を混和した場合には、無混和より緻密な空隙構造により高い物質移動抵抗性を示すことが考えられる。

しかし本研究で得られた透気係数の傾向は、普通ポルトランドセメントのほうが高炉スラグ微粉末の供試体よりも小さく、これら既往の空隙構造の結果³⁾⁷⁾に合致しない。その理由には、高炉スラグ微粉末の供試体でひび割れが発生したことからも想像されるが、長期間にわたる乾燥を受けたことによる空隙構造の変化、もしくは炭酸化による空隙構造の変化が透気係数へ影響したと推察している。2. 2. 1 に記したように全試料の加工完了までに1.5ヶ月程度を要しており、前述の影響が初期の測定においても現れた可能性があると考えている。

白川らの研究⁸⁾では、高炉スラグを3割および5割置換したモルタル試験体の気体有効拡散係数は、炭酸化領域において未炭酸化領域と比較して大きな値と示したとの報告もある。

4. 2 湿度環境の相違による透気係数への影響

図-8～図-10 に湿度環境を変化させた際の普通ポルトランドセメントを使用した供試体での透気係数の変化を示す。図-8 は最初の測定から1ヶ月後、図-9 は6ヶ月後、図-10 は9ヶ月後における透気係数の変化である。まず図-8 は水中養生を行った普通ポルトランドセメントの供試体における試験結果であり、湿度環境の変化による透気係数への顕著な影響は確認されない。

また図-9、図-10 では水中養生および気中養生を行った供試体の試験結果をそれぞれ示しており、湿度環境の変化に伴う顕著な変化は確認されない。

水中養生を行った供試体では、水和反応が十分に進行し、緻密な空隙構造が形成されることが知られている。低水結合材比(30%)では、乾燥などの外部環境による影響

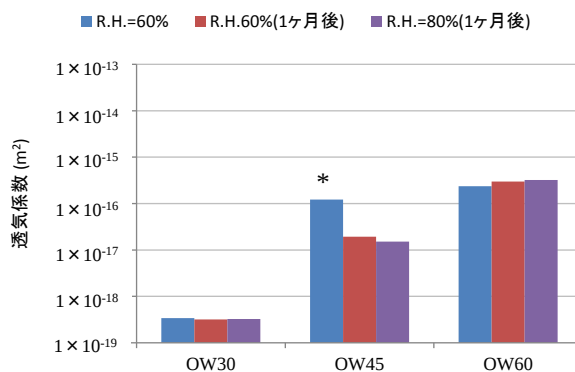


図-8 1ヶ月後での透気係数の変化(OPC 水中)

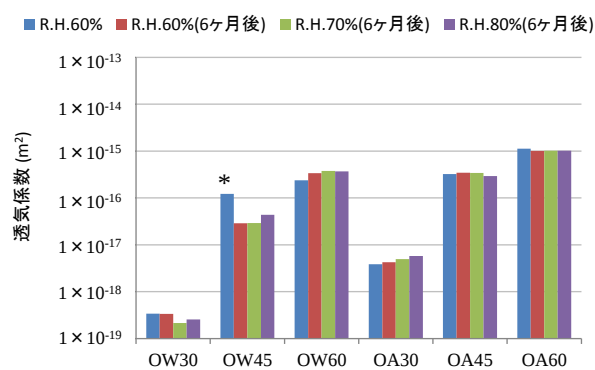


図-9 6ヶ月後での透気係数の変化(OPC)

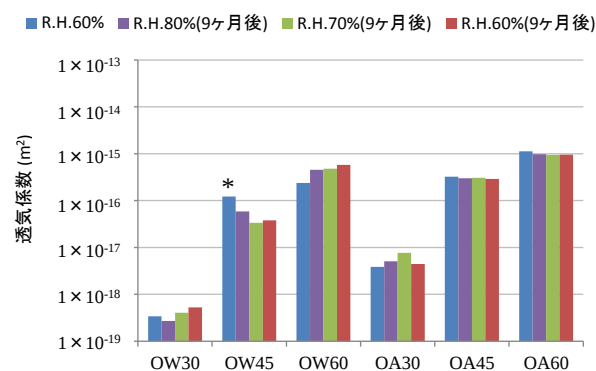


図-10 9ヶ月後での透気係数の変化(OPC)

を受けにくいと考えられ、また高水結合材比(45%, 60%)では透気経路となる粗大な空隙が存在することに起因し、湿度環境の変化に伴う透気係数の増減は確認されなかったと考えられる。一方、気中養生の供試体において透気係数の変化が確認されない理由には、気中養生による粗大な空隙構造に起因すると考えられる。気中養生では水和反応が阻害され、粗大な空隙構造が形成されることが知られている。

表-1 に示したように、相対湿度下において水分が凝縮する空隙径が算出することができ、本研究の範囲では最大湿度である R.H.80%では 10 nm 以下、また空隙壁面

への吸着を考慮した場合には 21.5 nm 以下の空隙には水分が凝縮すると考えられる。しかしながら気中養生の供試体では、透気経路となる粗大な空隙が存在することが考えられ、高湿度環境下においても透気性状に変化が現れなかったと考えられる。

つぎに、高炉スラグ微粉末を混和した供試体における湿度環境の変化に伴う透気係数の推移を図 - 11～図 - 13 に示す。図 - 11 は最初の測定から 1 ヶ月後、図 - 12 は 6 ヶ月後、図 - 13 は 9 ヶ月後における透気係数の変化を表す。まず図 - 11 に示す水中養生を行った供試体では、水結合材比が高い程に湿度変化による透気係数への影響が顕著であることを確認でき、R.H.60%内で 1 ヶ月程度静置したことでいずれも透気係数は増加し、高湿度環境下に静置後では透気係数が減少する傾向を確認できる。

図 - 12 は、水中養生および気中養生の供試体における透気係数の変化を示しており、水中養生の供試体では図 - 11 と同様の傾向を確認できるが、気中養生の供試体では湿度変化に伴う透気係数の顕著な変化は確認されない。

つづいて図 - 13 に示す 9 ヶ月後の測定では、1 ヶ月後・6 ヶ月後とは逆に湿度環境を高湿度(R.H.80%)から低湿度(R.H.60%)に段階的に下げた乾燥過程における試験結果である。1 ヶ月後・6 ヶ月後と同様に、水中養生を行った供試体では透気係数が低湿度環境下では増加し、高湿度環境下では減少する傾向が確認された。また気中養生を行った供試体に関しても、6 ヶ月後での測定時と同様に湿度環境に伴う透気係数の変化は確認されなかった。このように水中養生の供試体における透気性状には湿度依存性が確認される。

透気係数の増減と、その際の湿度環境に着目し、湿度環境と透気係数の変化に関して OW45 および BW45 を例にそれぞれ図 - 14、図 - 15 に示す。高炉スラグ部粉末を混和した供試体では、水結合材比が高い程に湿度環境の変化に伴う透気係数の増減が確認されたが、BW60 は供試体破損により 6 ヶ月以降のデータがないため、W/B 45%を基準として示した。

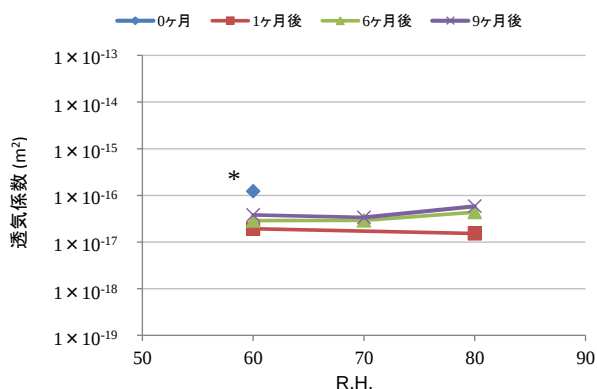


図 - 14 湿度変化による透気係数の変化 (OW45)

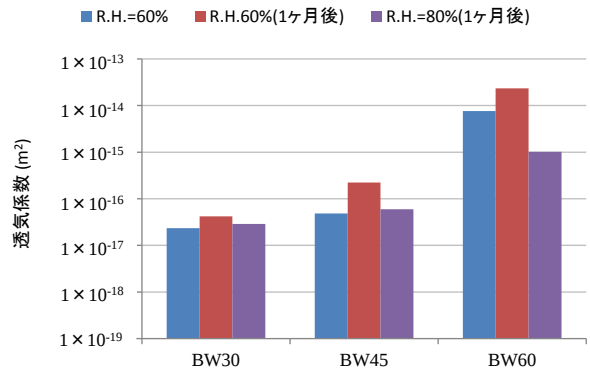


図 - 11 1 ヶ月後での透気係数の変化 (BFS 水中)

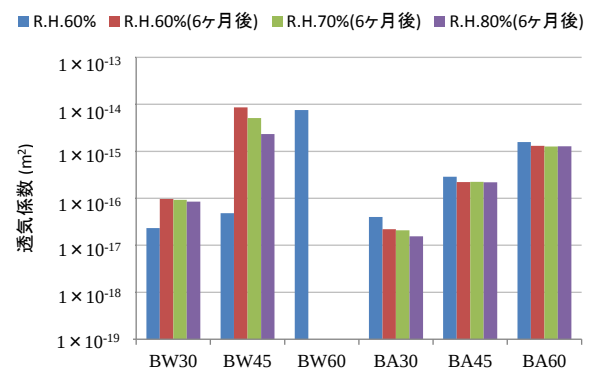


図 - 12 6 ヶ月後での透気係数の変化 (BFS)

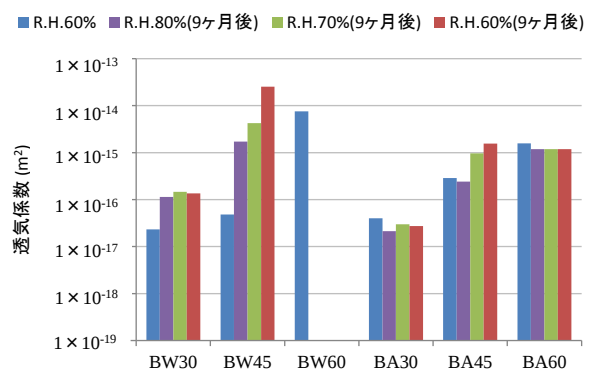


図 - 13 9 ヶ月後での透気係数の変化 (BFS)

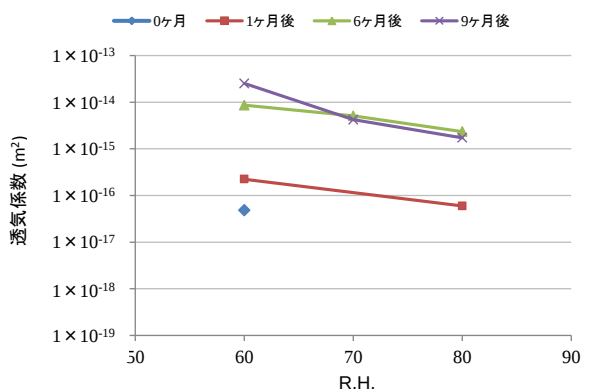


図 - 15 湿度環境による透気係数の変化 (BW45)

R.H.60～80%の変化に対する透気係数の変化の傾向は前述のとおりであるが、特に R.H.60%で長期間乾燥させることにより透気係数が大幅に増加することがわかる。一方、高湿度環境下(R.H.70～80%)では乾燥期間の相違による透気係数の大幅な変化は確認されない。

これらは高炉スラグ微粉末により形成される特徴的な空隙構造に起因すると考えられる。高炉スラグ微粉末を混和した供試体では、吉田らの研究³⁾のように毛細管空隙のネットワーク上にボトルネック空隙が多数形成されると考えられる。

そのため本実験の結果と合わせて考えると R.H.60%内に静置した期間に乾燥が進行し、毛細管空隙網上に形成されたボトルネック空隙に凝縮した水分が逸散することで開孔され物質移動経路が増え、透気係数が増加したと考えられる。また高湿度環境下での静置後はボトルネック空隙に水分が凝縮し、閉塞されることにより物質移動経路が減少し、透気係数が減少したと推測される。また空隙壁面に水分が吸着をすると考えた場合、表-1に示す値から、R.H.80%では21.5 nm以下、R.H.70%では13.3 nm以下の空隙径において水分が凝縮すると考えられている。水中養生の供試体における透気係数の増減の傾向を考慮すると、毛細管空隙網上に形成されたボトルネック空隙の空隙径は、おおそ10～20 nm以下である可能性が示唆される。

一方、気中養生では粗大な空隙構造が形成されることに起因し、普通ポルトランドセメントの場合と同様に湿度変化に伴う透気係数の変化が確認されなかったと考えられる。

今後、透気試験に用いた供試体の空隙構造分析を行い、前述した湿度環境の変化に伴う空隙構造ならびに透気係数の変化の関係を精緻に検証する。

5. まとめ

本研究では、湿度環境の変化が透気性状に及ぼす影響に関して検討を加えた。混和材種および養生条件の異なるセメントペースト硬化体に対し、湿度環境を段階的に変化させたうえで透気試験を行った。

普通ポルトランドセメントを使用した供試体に関しては、湿度変化に伴う顕著な変化は確認されなかった。

一方、高炉スラグ微粉末を混和した水中養生による供試体では、R.H.60%の一定湿度環境下で長期間静置した際に、透気係数が大きく増加することがわかった。この要因としては、炭酸化や長期間にわたる乾燥の影響により空隙構造が変化している可能性を考えている。また、R.H.60～80%で湿度環境を変化させた際には、湿度環境の変化に敏感に応じることが確認できた。この透気性状における湿度依存性には、高炉スラグ微粉末を混和した

供試体が内包する特徴的なインクボトル構造に由来すると考えられる。高炉スラグ微粉末を混和した供試体では、このインクボトル空隙が物質移動経路となる毛細管空隙網上にボトルネックを形成することで、透気性状に大きく関与することが示唆される。

既往の研究²⁾において、高炉セメントを使用したコンクリートは、一定湿度環境下での促進中性化試験では中性化の進行が早い、湿度変化の大きい実環境では、普通ポルトランドセメント使用のコンクリートと中性化の進行に大差がないことを報告されている。本研究の結果においても、高炉スラグ微粉末の混和した供試体では、湿度環境により透気係数が顕著に変化することを確認でき、同様の傾向が得られたと考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり、名古屋工業大学 尾澤敏行氏には、多大なご協力を頂きました。ここに記し、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 郭度連、他：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの内部組織の形成に及ぼす置換率の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.1, pp783-788, 2004.7
- 2) 松田芳範、他：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.32, No.1, pp629-634, 2010.7
- 3) 吉田亮、岸利治：水銀漸次繰返し圧入法によって観察される OPC・BFS ペースト硬化体の空隙構造の相違、第 65 回セメント技術大会、社団法人セメント協会、pp.38-39, 2011.5
- 4) 田中亨二、他：モルタルの透気性に及ぼす細骨材量の影響、日本建築学会構造系論文集、第 511 号、pp25-30, 1998.9
- 5) 氏家勲、長瀧重義：コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究、土木学会論文集、第 396 号、V-9, pp79-87, 1988.8
- 6) Koich Maekawa、他：MODELLING OF CONCRETE PERFORMANCE, E & FN SPON, p77, 1999
- 7) 浅賀喜与志、他：水セメント比の大きなセメントペースト硬化体の透水性と透水によるイオン溶出および微構造組織の変化、セメント・コンクリート、No.61, pp72-78, 2007
- 8) 白川敏夫、他：モルタル・コンクリートの気体有効拡散係数への炭酸化の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.28, No.1, pp617-622, 2006.7