

論文 湿度変化による乾燥を受けたコンクリートの透気性に関する検討

小寺 周^{*1}・張 仁淇^{*2}・丸山 一平^{*3}

要旨：本研究では、湿度変化による乾燥を受けたコンクリートの透気係数を求めることで、コンクリート内部のひび割れの性状を明らかにすることを目的とした。骨材の拘束効果による微細ひび割れの程度を表す Gap strain という指標と透気係数の関係について検討を行った。高湿度環境下において粗骨材の拘束効果に起因する微細ひび割れが透気係数に影響し、低湿度環境下において細骨材の拘束効果に起因する微細ひび割れが透気係数に影響すると考察された。

キーワード：乾燥収縮, コンクリート, 透気係数, 微細ひび割れ

1. はじめに

近年、環境負荷低減の観点から構造物の長寿命化が求められている。鉄筋コンクリート構造物において長期供用中に生じる問題の一つとして、ひび割れがある。コンクリートは水分が散逸することにより乾燥収縮が生じる。この収縮が鉄筋による拘束を受けること等が原因となり、コンクリートにひび割れが生じ、この乾燥収縮によるひび割れは構造物の美観や耐久性を低下させる。

一方で、コンクリートを構成する骨材とセメントペーストは共に水分の散逸により収縮するが、一般的に骨材の収縮量はセメントペーストの収縮量と比べ非常に小さい¹⁾。そのため、セメントペーストの収縮が骨材に拘束され、セメントペーストに微細ひび割れが生じる²⁾。この微細ひび割れが生じることでコンクリートのヤング率は低下する³⁾。この観点から水分の散逸を考える上で、コンクリートの透気性が重要な因子であると推定される。

コンクリートの透気性は空隙率と微細ひび割れに密接な関係がある。空隙率は試験体の体積に対する逸散した水分の体積であり、空隙率に対して透気係数はべき関数的に増加する⁴⁾。この関係になる原因としては、空隙量の増加に伴う空隙の連続性の変化という点の他に、微細ひび割れによる影響が考えられる。透気性には発生する微細ひび割れの量、幅、連続性が関係する。

本研究ではコンクリートの透気性と微細ひび割れの関係を検討するために、粗骨材として石灰岩碎石を用いたコンクリート試験体を5種類の湿度環境で乾燥させ、乾燥収縮ひずみと質量変化、透気係数を算出し、考察を行

った。

2. 実験概要

表-1 使用材料

| 材料 | 記号 | 物理的性質など |
|------|----|--|
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³ |
| 細骨材 | S | 大井川水産系陸砂, 表乾密度: 2.59g/cm ³ , 吸水率: 1.94%, 粗粒率: 3.01, 実積率: 67.1 |
| 粗骨材 | G | 秩父産石灰碎石, 表乾密度: 2.69g/cm ³ , 吸水率: 0.36%, 粗粒率: 6.55, 実積率: 61.4, 最大寸法: 20mm |
| 混和剤 | Ad | AE減水剤標準形I種, 主成分: 変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体 AE調整剤, 主成分: 樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤 消泡剤, 主成分: ポリエーテル系 |

表-2 コンクリートの調合

| W/C (%) | s/a(%) | 単位量(kg/m ³) | | | |
|---------|--------|-------------------------|-----|-----|-----|
| | | W | C | S | G |
| 55 | 47.6 | 170 | 309 | 847 | 968 |

表-3 フレッシュ性状

| AE減水剤添加量 (C×%) | AE調整剤 (A) | 消泡剤 (A) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 練上がり温度 (°C) |
|----------------|-----------|---------|-----------|---------|-------------|
| 0.6 | 0.5 | 0.5 | 18.0 | 4.5 | 17.6 |

*1 名古屋大学 工学部環境土木・建築学科 (学生会員)

*2 名古屋大学 大学院環境学研究科 (学生会員)

*3 名古屋大学 大学院環境学研究科 准教授博士(工学) (正会員)

2.1 使用材料及び調合

本実験で使用した材料を表-1、コンクリートの調合を表-2、フレッシュ性状試験の結果を表-3に示す。

2.2 試験体の作製

表-2に示す調合でコンクリートをφ100×200mmの型枠に打込み、その後封緘した。締固めには突き棒を用いた。十分に水和させ、乾燥開始の2週間程度前に脱型を行い、20℃±1℃の一定条件下の飽和水酸化カルシウム水溶液中で水中養生をした。試験体はφ100×200mmのコンクリートをダイヤモンドカッターにより厚さ約10mmに切断し、φ100×10mmとしたものを用いて実験を行った。ただし、試験体はブリーディング等の影響を考慮し、円柱の上面から20mm、下面から10mmを除く位置から採取した。

2.3 試験体の乾燥条件

試験体の乾燥条件は90%RH、79%RH、58%RH、45%RH、11%RHの5パラメータであり、1パラメータにつき3体の試験体を用意し、全て20℃±1℃で乾燥を行った。

2.4 乾燥収縮ひずみの測定

乾燥前後の試験体の長さを、レーザー変位計(精度:0.0005mm)を用いて測定した。1パラメータにつき3体の試験体で測定を行い、1試験体につき3か所の直径を測定し、その平均値を元の長さで除して乾燥収縮ひずみを求めた。図-1に乾燥収縮ひずみが平衡に至るまでに最も時間を要した11%RHの質量減少率の経時変化を示す。全試験体において35日で質量変化がほぼなくなり平衡に達したと判断した。

2.5 透気係数の算出

透気係数の算出式として本論文では以下の式⁴⁾を用いた。

$$K = \frac{2lP_2\gamma_A \cdot Q}{P_1^2 - P_2^2 \cdot A} \quad (1)$$

ここで、K:透気係数(cm/s)、Q:透気量(cm³/s)、A:透気面積(cm²)、l:試験体厚さ(cm)、P₁:载荷圧力(N/cm²)、P₂:大気圧(N/cm²)、γ_A:空気の単位体積重量(1.182×10⁻⁵N/cm³)である。γ_Aは圧力を長さの次元で表すために用いたものである。

単位時間当たりの透気量を算出するために、乾燥後の試験体を20℃±1℃の恒温槽で図-2に示すような透気試験装置を用いて透気試験を行った。1パラメータにつき2体の試験体で試験を行った。図-3には試験体の周辺を拡大した図を示す。図-4に単位時間当たりの透気量が一定となるまでに最も時間を要した90%RHの透気量の経時変化を示す。図-4に矢印で示すように単位時間当たりの透気量が一定とみなせる範囲で式(1)における透気量Qを算出した。また、試験体断面に载荷圧力

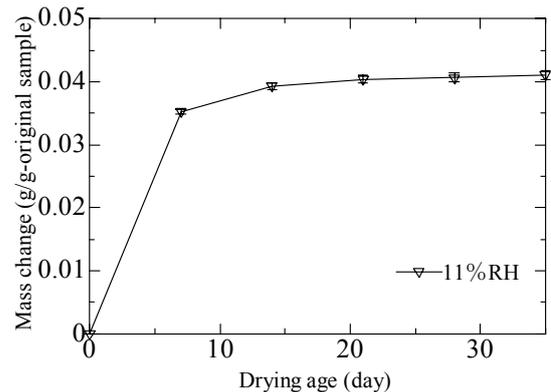


図-1 質量減少率の経時変化

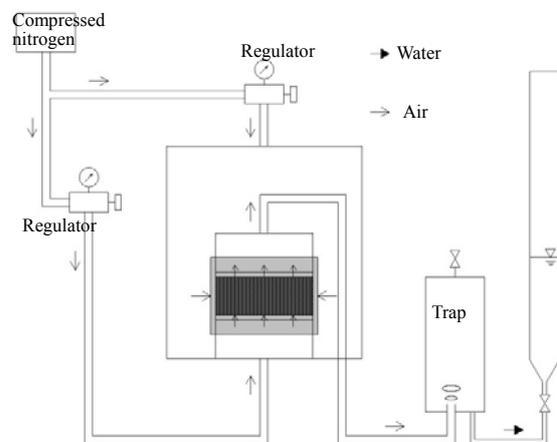


図-2 透気試験模式図

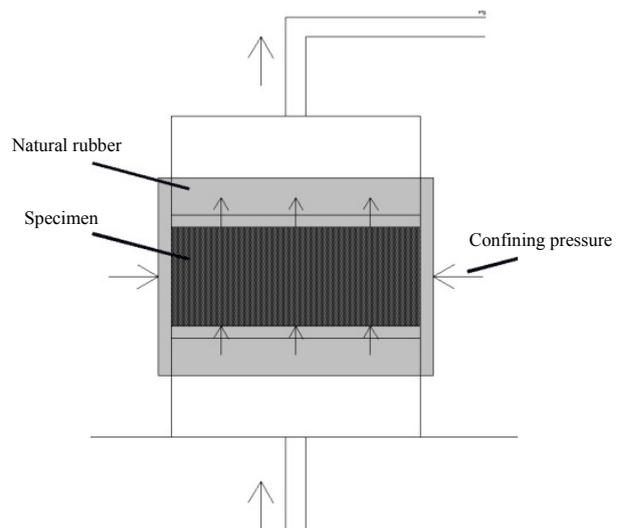


図-3 透気試験模式図(拡大)

を加える際、試験体側面に空気が漏れることを防ぐため、図-3のように側面を天然ゴムで覆い圧力容器内に拘束圧力を加える。この時、拘束圧力と载荷圧力の差圧により空気が天然ゴムを透過するが、試験体の側面積が小さく、空気の透過量は、事前実験によりオーダーが2桁程

度小さかったので、本論文では無視することとした。また、本実験で試験体に透過させた空気は窒素濃度 99.999%であり、用いた窒素の濃度から窒素の相対湿度が実験結果に与える影響は無視できるほど小さいと考えられる。

3. 実験結果

図-5 に相対湿度とコンクリート、モルタル、セメントペーストの乾燥収縮ひずみの関係を示す。モルタル及びセメントペーストの値は使用材料として普通ポルトランドセメントと本実験と同種の骨材を用いた実験を行った参考文献 3)及び 5)から引用した。図-6 に本実験で得られたコンクリートの相対湿度と質量減少率の関係を示す。また、105°C乾燥時の試験体の含水率を 0 とし、以下の式を用いてそれぞれの相対湿度での含水率を算出し、その関係を図-7 に示す。

$$W_i = \frac{w_{sat} - w_i}{M_{sat}} \quad (2)$$

ここで、 W_i ：各相対湿度における含水率(-)、 w_{sat} ：飽和時の含水量(g)、 w_i ：乾燥時に散逸した水の質量(g)、 M_{sat} ：飽和時の試験体の質量(g)である。

図-8 に相対湿度と透気係数の関係を示す。図-8 には各相対湿度における透気係数の平均値をプロットし、実線で結んだ。図-8 におけるエラーバーは 2 つの試験体の透気係数の値を示す。本論文における図-8 を除く図におけるエラーバーは標準誤差を示す。また、本研究では、粗骨材寸法よりも小さい厚さを用いたが、収縮による損傷は 3 次元的に平均的に生ずるものと考え、厚さ 10mm での評価を試みた。エラーバーでみられるように、それぞれの透気性に与える厚さの影響は小さく、十分、調湿条件によって変化する状況の評価できるデータが得られたと考えられる。

グラフは直線とみなせるが、縦軸を対数表示しているため、相対湿度の低下に伴い、透気係数は指数関数的に増加することが確認された。透気係数は空隙率（試験体の体積に対する逸散した水分の体積）と密接な関係があるため、それぞれの相対湿度での空隙率を算出し、図-9 にその関係を示す。また、図-10 に空隙率と透気係数の関係を示し、傾向の再現性確認のため参考文献 6)から水セメント比が 0.5 と 0.6 の時の値を引用した。透気係数は空隙率に対してべき関数的に増加することが確認され、その理由は空隙率の増加によって、空気の通り道が増加すると同時に、屈曲率の低下によるものだとされている⁶⁾。本研究では透気係数が空隙率に対してべき関数的に増加する原因がこれに加え、ひび割れによる影響もあると考え、考察を行う。

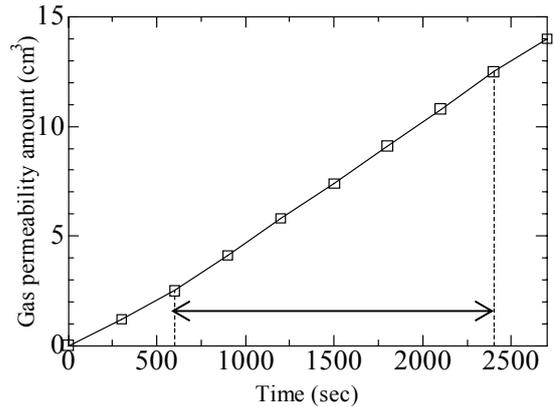


図-4 透気量の経時変化

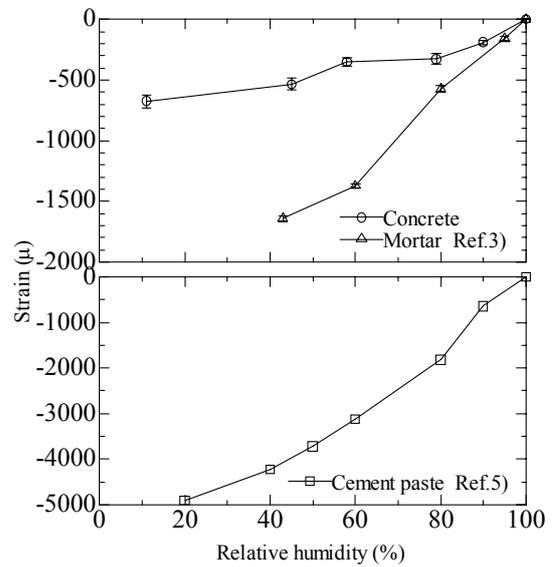


図-5 相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係

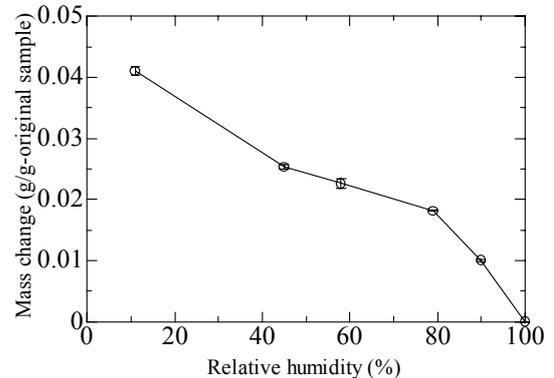


図-6 相対湿度と質量減少率の関係

4. 考察

コンクリートは収縮することで微細ひび割れが生じる。この微細ひび割れは乾燥初期において、粗骨材に対して垂直に生じるひび割れと、粗骨材とセメントペース

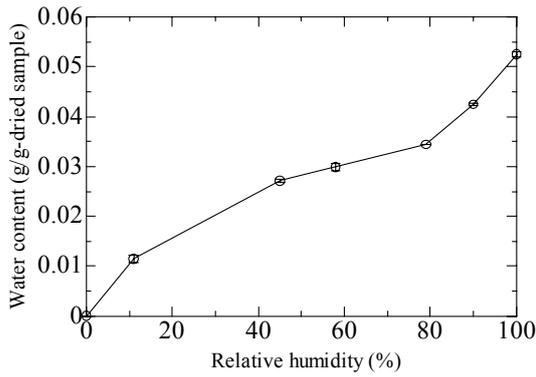


図-7 相対湿度と含水率の関係

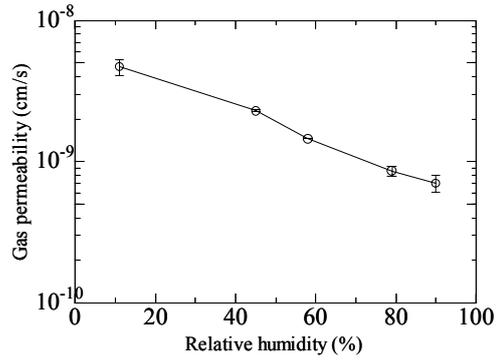


図-8 相対湿度と透気係数の関係

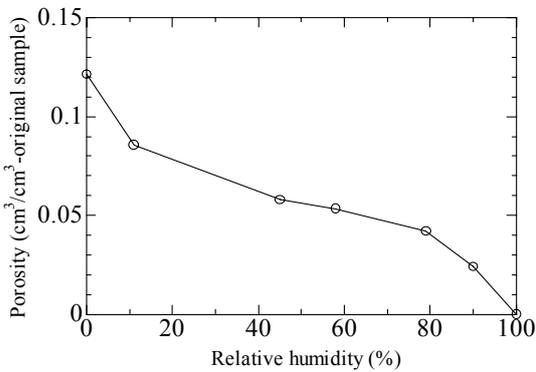


図-9 相対湿度と空隙率の関係

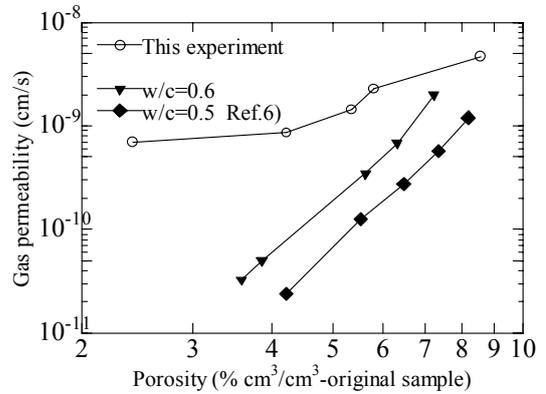


図-10 空隙率と透気係数の関係

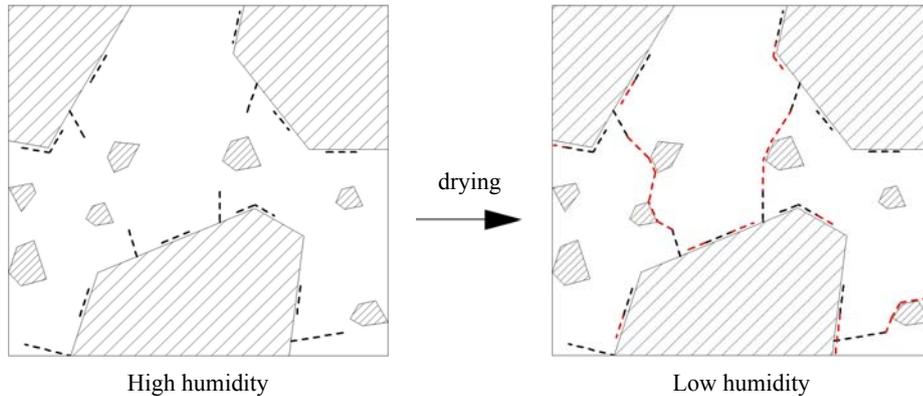


図-11 微細ひび割れモデル

トの界面に生じるひび割れが存在すると考えられる。粗骨材に垂直に生じるひび割れは粗骨材がセメントペーストの収縮を拘束するため生じ、粗骨材とセメントペーストの界面に生じるひび割れは、セメントペーストが収縮することで粗骨材から剥離するように生じるものと考えられる。モルタル及びコンクリートのように骨材を有するセメント系複合材料はセメントペーストマトリクスと骨材の界面に不連続な遷移帯領域が生じることが知られている⁷⁾。この遷移帯の影響によりコンクリート

において、骨材寸法が小さい場合、乾燥収縮がある程度大きくなるまで骨材による拘束効果は発揮されず、コンクリートのひずみが大きくなり、微細ひび割れの量が減少するという報告がある⁸⁾。この観点から、高湿度環境におけるセメントペーストの収縮量は比較的小さいため、骨材寸法の大きい粗骨材による拘束効果に起因するひび割れのみが発生し、セメントペーストの収縮量が多くなる低湿度環境においてはそれに加え、細骨材による拘束効果に起因するひび割れが発生し、粗骨材周辺で発生し

たひび割れと繋がり、コンクリート内部の微細ひび割れを大きくすると考えられる。粗骨材に対して垂直に生じるひび割れと、粗骨材とセメントペーストの界面に生じるひび割れが進展する模式図を図-11に示す。

伊藤らは同じ乾燥条件におけるコンクリートとモルタルの乾燥収縮ひずみの差を Gap strain と定義し、粗骨材の拘束効果に起因する微細ひび割れの程度の指標とした³⁾。本論文では細骨材に起因するひび割れを考慮し、コンクリートとモルタルの乾燥収縮ひずみの差を Gap strain-CM、モルタルとセメントペーストの乾燥収縮ひずみの差を Gap strain-MP と定義し、考察を行う。

図-12に本実験で得た相対湿度と Gap strain-CM 及び Gap strain-MP の関係を示した。また、傾向の再現性確認のため比較対象として参考文献3)から Gap strain の値を引用した。傾向は似ているものの、本実験の方がコンクリートとモルタルの乾燥収縮ひずみの差が大きくなっている理由は伊藤らの実験³⁾と比べ粗骨材の単位量が多く、粗骨材による拘束効果が高かったためである。

この Gap strain は、モルタル-粗骨材スケールのひび割れ、ペースト-細骨材スケールのひび割れをそれぞれ示すが、コンクリートの中の挙動としてはこれらが合わさった状況で生ずるので、図-12に示されるように79% RH から58% RH において Gap strain-CM および MP の増加量は同程度であるため、この間ではモルタル-粗骨材間のひび割れに集中し、細骨材スケールのひび割れはそれほど大きくないと考えられる。

Gap strain-CM の値は90% RH から58% RH までの高湿度環境下で大きくなっており、粗骨材の拘束効果に起因するひび割れが大きく進展したと考えられ、また、58% RH から11% RH までの中・低湿度環境下で Gap strain-CM はほとんど変化しないが、Gap strain-MP は増加していて、細骨材の拘束効果に起因するひび割れが大きく進展するものと考えられる。

以上の観点から、図-13に示す Gap strain-CM 及び Gap strain-MP と透気係数の関係から、透気係数変化について考察すると、Gap strain-CM では低湿度域に変化がないのに透気係数が大きく変化している、すなわち、Gap strain-CM だけでは現象を説明できないことが明瞭に確認できる。一方、Gap strain-MP においては高湿度域の変化ともある程度の整合性は確認できているが、この対応について議論するために参考文献4)から以下の式を引用する。

$$K' = C\epsilon d^2 \quad (3)$$

K' は多孔体の透過率、 ϵ は多孔体の空隙率、 d は多孔体の流管の半径、 C は定数である。 d がひび割れ幅や大きさに対応すると考えられるため、ひび割れ幅や大きさは大きいほど透気係数に鋭敏に影響する。そのため、Gap

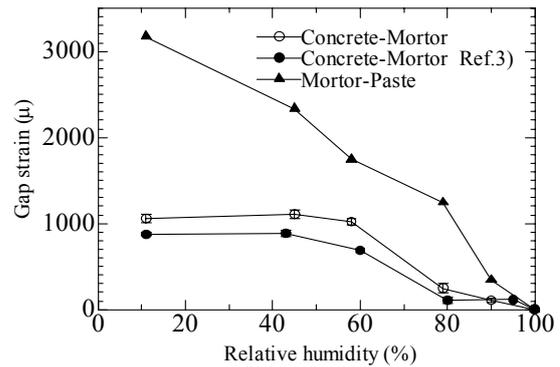


図-12 相対湿度と Gap strain の関係

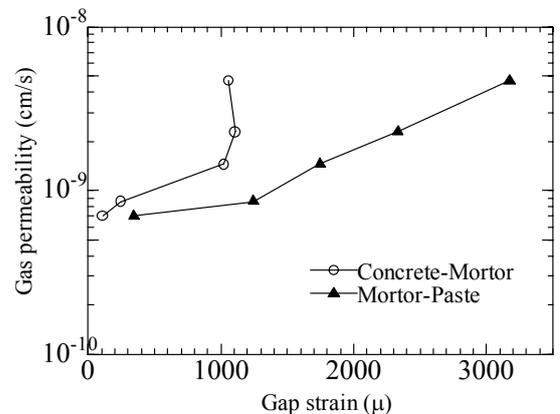


図-13 Gap strain と透気係数の関係

strain-MP の高湿度域における透気係数変化の対応は見かけのものである可能性が高いと筆者らは考えている。

粗骨材の拘束効果の検討として図-10において空隙率と透気係数の関係について本実験で得た値と参考文献6)から引用した値との比較についても議論したい。一般論として、コンクリートを透過する空気はコンクリート中の毛細管空隙とひび割れ部を流れるため、水セメント比が大きいと、毛細管空隙が多くなるので透気係数は大きくなる⁴⁾。本実験で用いたコンクリートの水セメント比は0.55であるので、空隙率に対する透気係数の値は河野らの値(W/C=0.50と0.60)のいずれと比較しても大きい、という事実は、水セメント比以上の大きな要因があることを意味している。すなわち、それが粗骨材のひび割れにあると推察できる。本実験のコンクリートは粗骨材として乾燥収縮ひずみが非常に小さい石灰岩を用いた。それに対し、河野らは岩種についての判断はできないが、石灰岩よりも乾燥収縮ひずみの大きい粗骨材を使ったため、本実験で用いたコンクリートはモルタル部分において生じる微細ひび割れの幅が大きくなったこと、新しく微細ひび割れが生じたこと、ひび同士が繋がったことが原因で空隙率に対して透気係数が比較的大きくなったと推測される。

5. まとめ

本研究ではコンクリート、モルタル、セメントペーストの乾燥収縮ひずみと透気性の関係から、Gap strain という指標を用いてコンクリートの内部に生じる微細ひび割れの性状について検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 1) コンクリートの透気係数は高湿度環境下では主に粗骨材の拘束効果に起因する微細ひび割れに影響を受け、低湿度環境下では細骨材の拘束効果に起因する微細ひび割れに影響を受けると推測される。
- 2) 石灰岩のように粗骨材の収縮量が少ない骨材を用いたコンクリートは、収縮量が多い粗骨材を用いたコンクリートと比べ、骨材の拘束効果により微細ひび割れが大きくなり、透気係数が大きくなると推測される。

本研究の仮説の妥当性を検討するために、モルタル及び乾燥収縮の大きい骨材を用いたコンクリートを本実験と同様に乾燥させ、透気試験を行い比較する必要がある。また、それと同時に本研究の試験体を含めて、ひび割れの可視化を行い、微細ひび割れの性状を確かめる必要がある。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省・科学研究費 15H04077 の助成を得た。

参考文献

- 1) 後藤幸正, 藤原忠司: コンクリートの乾燥収縮に

及ぼす骨材の影響, 土木学会論文報告集, No.286, pp.125-137, 1979.6

- 2) 最知正芳: 早期材齢において乾燥作用を受けたコンクリートの内部の微細ひび割れの定量的評価, 日本建築学会東北支部研究報告集 構造系, Vol.68, pp.63-66, 2005.6
- 3) 伊藤充希, 篠野宏, 丸山一平: 温度・湿度変化による乾燥を受けたコンクリートの割裂引張強度に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.382-387, 2014
- 4) 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, No.396/V-9, pp.79-87, 1998.8
- 5) Maruyama, I.: Origin of Drying Shrinkage of Hardened Cement Paste: Hydration Pressure, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.8, No.2, pp.187-200, Jun.2010
- 6) 河野俊一, 氏家勲: 乾燥によるコンクリートの透気係数の変化に関する研究, コンクリート工学会年次論文報告集, Vol.21, No.21, pp.847-852, 1999
- 7) 内川浩: 組成と構造の観点から見た硬化セメントペースト, モルタルおよびコンクリートの類似点と相違点, セメントコンクリート, No.507, pp.33-46, 1989
- 8) Maruyama, I.: Numerical Study on Drying Shrinkage of Concrete Affected by Aggregate Size, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.12, pp.279-288, Aug.2014