

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360172

研究課題名(和文)実構造物コンクリートにおいて劣化予測に用いる定量的指標を得るための点検方法の開発

研究課題名(英文)Development of inspection method to obtain qualitative index on deterioration prediction at real structure concrete

研究代表者

氏家 勲(UJIKE, ISAO)

愛媛大学・理工学研究科・教授

研究者番号：90143669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は現場透気試験から求まる透気係数と含水率の関係より、中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数を適切に推定するための点検方法を開発することを目的としている。

透気係数と含水率の間には線形関係が得られ、この直線の勾配を用いることで含水率の影響を排除してかぶりコンクリートの密実性が定量的に評価できた。そして、この直線の勾配と同じコンクリートから得られた促進中性化速度係数は水セメント比あるいは養生の違いによらずほぼ直線関係なることが得られて、評価が可能となった。しかしながら、塩化物イオンの実効拡散係数では養生条件によって異なった直線関係となり、拡散係数の経時変化の機構を明らかにする必要がある。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study develops the inspection method to estimate appropriately the carbonation progress rate coefficient and the chloride ion diffusion coefficient from the air permeability measurement at in-site.

The tightness of cover concrete was quantitatively evaluated without the effect of moisture content by using the gradient of the linear relation between air permeability coefficient and moisture content. For the accelerated carbonation progress rate coefficient, a good correlation was between the gradient and the coefficient independent of W/C and curing condition, and the evaluation of the coefficient became possible from the air permeability in-site test. However, for the effective diffusion coefficient, the linear relation between diffusion coefficient and the gradient is different depending the curing condition. It is necessary to clarify the mechanism of a change with the time of the diffusion coefficient.

研究分野：工学

キーワード：コンクリート 鉄筋腐食 透気試験 現場試験 劣化予測 含水率

### 1. 研究開始当初の背景

土木学会コンクリート標準示方書において、耐久性に関しても性能照査型設計法に移行し中性化と塩害による鉄筋腐食においては中性化速度係数と塩化物イオン拡散係数を用いた劣化予測に基づく耐久性設計が取り入れられたことから、設計どおり施工されたことを竣工検査で確認するためにはこれら係数を評価する必要がある。しかしながら、これら係数を測定する検査方法はない。

また、かぶりコンクリートの物質移動特性を非破壊で行う手法として、透気試験の適用が試みられている。透気試験は装置が大がかりとならず、簡便に測定でき、透気係数によってコンクリートの密実性を定量評価できる。しかしながら、コンクリート内部の空隙構造と直接関係する透気係数が得られているにもかかわらず、透気係数自身が直接耐久性の評価に使えないため、コンクリートの品質は“優れている”“良い”“悪い”などのグレーディングによる評価にとどまっておき、劣化予測に用いることができない。

従って、コンクリート構造物の品質評価を行う上で、劣化予測に資することができる物質移動特性を定量的に評価する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は以下のとおりである。

現場透気試験方法において、透気測定の範囲を変えられることおよび表面からの透気係数の分布を測定できることを、実際のコンクリートで検討・確認する。

透気係数と塩化物イオン拡散係数の関係および透気係数と中性化速度係数の関係を、種々の材料や配合のコンクリートにおいて実験によって把握し、さらに細孔径測定やX線CTスキャンなどからコンクリート内部の空隙構造をモデル化し、そのモデルを用いて実験で得られた物質移動特性値間の関係を解析により検討し確認する。

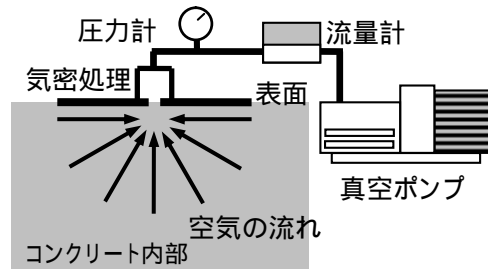
透気係数と含水率の関係図に物資移動特性値の補助線を設定し、透気係数から劣化予測に利用できる物質移動特性値を得る方法を提案し、得られた物質移動特性値が妥当であることを確認する。

### 3. 研究の方法

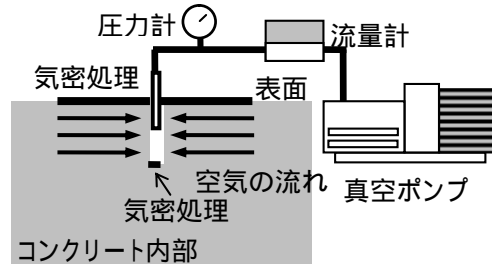
本研究で用いる現場透気試験方法は図1に示す研究代表者が開発した2種類の試験方法を用いる。この試験方法の他に実績の多いトレント博士が開発したダブルチャンバー法も現場透気試験方法として実施した。

物質移動特性値としては、コンクリート中の鉄筋腐食の主要因である中性化と塩害に関係する中性化速度係数と塩化物イオン拡散係数を取り上げた。透気試験に用いるコンクリートと同じバッチから供試体を作製し、中性化促進試験から促進中性化速度係数を、電気泳動試験から実効拡散係数を求めた。

解析に用いた立体構造モデルは試料の X



シール法の概要



シール削孔法の概要

図1 現場透気試験方法

線 CT 画像から作成した。立方体構造モデルモデルの空隙部分は、画素値度数分布(ヒストグラム)を使用し、しきい値を設け画素を2値化することでモデル化した。しきい値は、空隙とする気相部分とセメント硬化体とする固相部分の境界値であり、本研究では体積乾燥空隙率を4%、5%、6%に設定した voxel モデルおよび、水銀圧入法で測定した値に設定した絶乾状態の voxel モデルを作成した。

### 4. 研究成果

#### 1) コンクリート表面からの透気係数の分布の測定

研究代表者が開発したシール削孔法では空気の流入経路である透気領域を削孔側面の中空円柱状と仮定して、透気係数を算出している。しかしながら、削孔下部領域からの空気の流入があり、算出される透気係数は過大評価されることとなる。そこで削孔下部領域からの流量が削孔深さによらずほぼ同じであることから、削孔深さの大きい場合の透気流量から小さい場合の透気量を減ずると、下部領域からの透気量を相殺する事ができ、中空円柱状の透気領域だけの透気流量を算出できると考えた。すなわち、一度の削孔で  $a$ cm 掘り進めた場合において、深い方の削孔深さを  $x$ cm とすると、浅い方の削孔深さが  $x-a$ cm となる。また、削孔深さ  $x$ cm までの透気領域から流入する透気流量を  $Q_x$ 、削孔深さ  $x-a$ cm までの透気領域から流入する透気流量を  $Q_{x-a}$  とすると、両者の下部領域の範囲が同等であるならば、両者の透気流量の差である  $Q_a$  は、削孔深さ  $a$ cm の削孔分の中空円柱の透気領域を通過する気体の流量となる。削孔深さ  $x$ cm の部分の透気係数は次式で求められる。

$$k(x) = \frac{\eta P_2 \log_e (r_2/r_1)}{\pi a (P_2^2 - P_1^2)} (Q_x - Q_{x-a}) \quad (1)$$

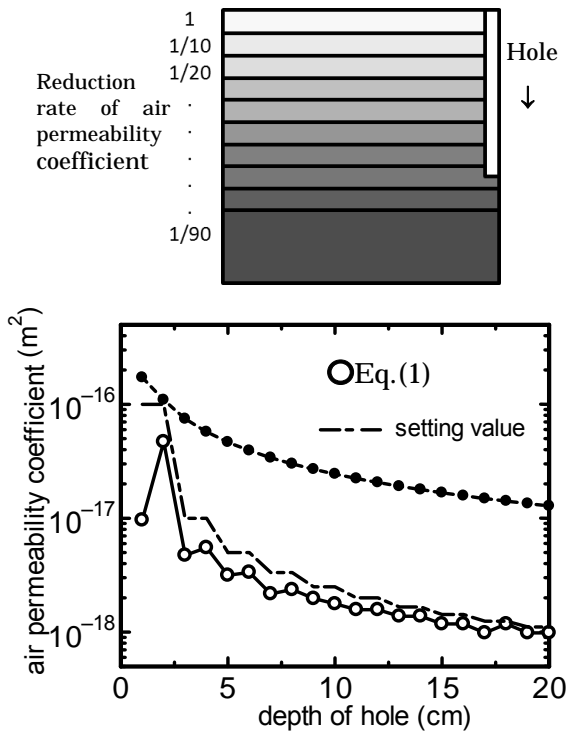


図2 数値計算による検討結果

図2は数値計算により、シール削孔法において段階的に透気量を測定し、(1)式によってそれぞれの深さでの統計係数が求まることを示した図である。差分法による3次元コントロールボリューム供試体モデルにおいて、表面から10層のコントロールボリュームの透気係数を段階的に小さく設定し、削孔位置あたるコントロールボリュームからの透気量を(1)式に代入して各削孔深さでの透気係数を計算した。図2に示すように設定された透気係数と(1)式から求めた透気係数はほぼ一致している。次に実験において、シール削孔法の有用性について検討した。

図3にシール削孔法と(1)式により求めた3層コンクリート供試体の透気係数分布を示す。3層コンクリートは各層に明確な品質の差をつけるため、W/C、使用材料及び養生条件の異なる3パターンのコンクリートを深さ方向に対して、水平に3層に分けて打設した。W/C40%側から2cmごとに削孔し透気量を計測して掘り進めた。なお、図中の破線および一点鎖線は3層コンクリート供試体の各層のコンクリートの透気係数の参考値である。一点鎖線のCaseBはそれぞれの配合のコンクリートに関して15×15×7cmの直方体供試体を作製し、3層供試体と同じ条件下で乾燥させたのちにアウトプット法で透気係数を求めたものである。破線のCaseAはそれぞれの配合のコンクリートに関して15×15×7cmの直方体供試体を作製し、3層供試体と同じように積

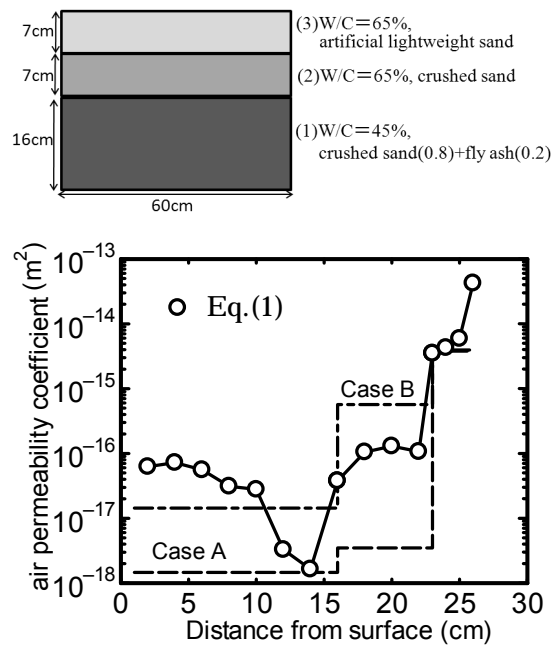


図3 3層コンクリート供試体の透気係数分布

み上げて側面をシールして同じ条件下で乾燥させた。なお、W/C40%の部分は15×15×9cmの直方体供試体を追加して厚さは一致させた。まずは、削孔深さ2cm~10cmまでは、差分透気係数は緩やかに減少しているが、10cm以降急激に減少し、14cmで最も落ち込んでいる。これは、コンクリート供試体では表面から水分が逸散する事によりコンクリート内部の含水状態が均一ではなく、コンクリート供試体の透気係数も、表面から深くなるにつれて小さくなる分布を形成するためである。2cm~10cmまでは透気係数がCaseBに近い事からも表面に近い含水状態であり、削孔深さ12cm~14cmの差分透気係数は、CaseAの透気係数に近い事から、表層に比べて含水率が非常に高いため、透気係数が低下したと思われる。次に、削孔深さ18cm~22cmまでの差分透気係数はCaseAとCaseBの間にある。最後に3層目の削孔深さ24cm~26cmの差分透気係数は、参考値の透気係数に近く、適切に透気係数分布の推定が出来ているといえる。以上のことから、シール削孔法と(1)式を用いることによりかぶりコンクリートの透気係数の分布を評価することができると言える。

## 2) 透気係数と塩化物イオン拡散係数および中性化速度係数との関係

本研究では、コンクリート中の物質移動抵抗性を示す透気係数と塩化物イオンの拡散係数および中性化速度係数の関係性を評価することを目的に、電気泳動法による実効拡散係数と高温高炭酸ガス濃度のチャンバーを用いて促進中性化速度係数をそれぞれ求めた。実験に用いたコンクリートの水セ

メント比は40、50、60%で、初期養生は28日まで水中養生と3日まで型枠存置とその後は温度20の室内で気中養生とした。

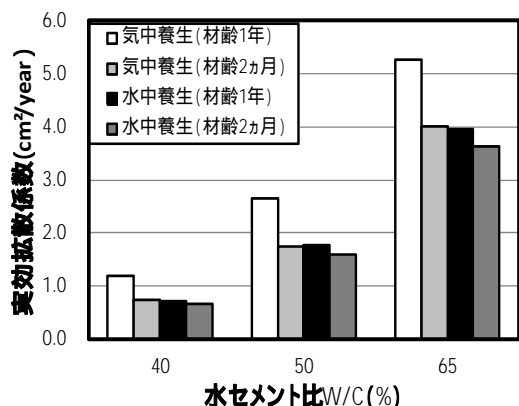


図4 塩化物イオンの実効拡散係数

図4は電気泳動試験より求めた塩化物イオンの実効拡散係数を示す。これまでの一般的な傾向と同様に、水セメント比が大きくなると、また気中養生の方が水中養生よりそれぞれ、実効拡散係数が大きくなっている。ただし、水中養生28日のコンクリートでは材齢2か月と材齢1年での実効拡散係数はほとんど変化していないが、気中養生したものは材齢経過によっても実効拡散

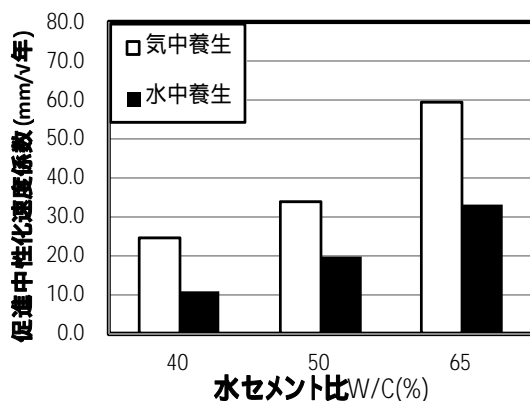


図5 促進中性化速度係数

係数が増加している。

図5は促進中性化速度係数を示す。促進中性化速度係数も実効拡散係数と同様に、水セメント比が大きくなると、また気中養生の方が水中養生よりそれぞれ、中性化速度係数が大きくなっている。次に、図4および図5で得られた実効拡散係数と促進中性化速度係数、それぞれとコンクリートの透気係数と関係について検討する。

図6は透気係数と含水率の関係を示す。図に示すようにコンクリートの透気係数は同じコンクリートであっても含水率によって透気係数の値が変化する。これは透気においてはコンクリート内部の水分が乾燥により逸散した空隙が空気の通路となるためである。そこで、含水率の影響を排除して

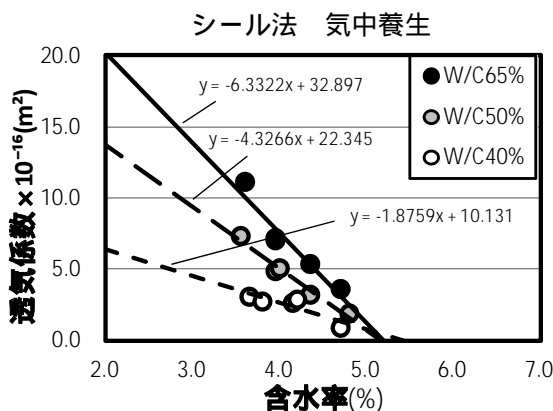


図6 透気係数と含水率の関係

コンクリートの透気性を評価する必要があるので、透気係数と含水率が直線関係であるとみなして、透気係数と含水率の線形関係の傾きを用いて、コンクリートの密実さを透気性で評価する。なお、傾きは右下がりであるが、以下では絶対値を用いている。すなわち、傾きの値が大きいことは空隙の増加が同じであっても透気係数の増加が大きいことから、内部の空隙の連続性が良いなど、定性的には粗なコンクリートであることを表している。

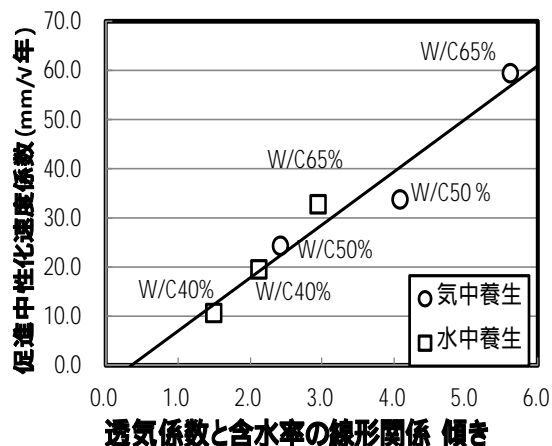


図7 促進中性化速度係数と透気性との関係

図7は透気係数と含水率の線形関係の傾きと促進中性化速度係数の関係を示す。透気係数と含水率の線形関係から得られる傾きが大きいほど促進中性化速度係数は大きくなることが確認できる。そして、異なる水セメント比のコンクリートを水中養生または気中養生した供試体における促進中性化速度係数と透気試験の関係は、ほぼ直線になることが認められる。これは、透気試験および促進中性化試験は、圧力勾配による透気と濃度勾配による拡散の違いはあるものの、どちらもコンクリート中の気体の移動でありことから、空隙構造を介してよい相関関係が得られたものと考えられる。

図8は透気係数と含水率の線形関係の傾きと実効拡散係数の関係を示す。促進中性

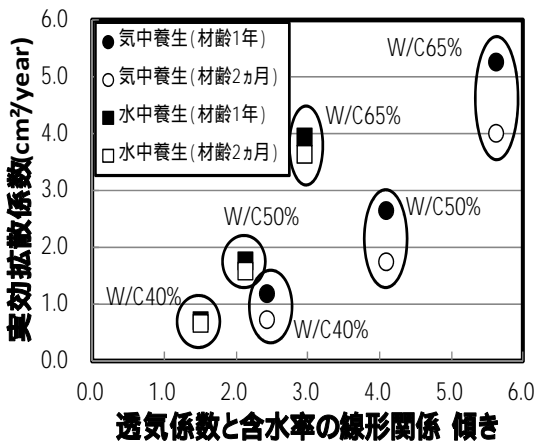


図8 実効拡散係数と透気性の関係

化速度係数と同様に線形関係の傾きが大きいほど実効拡散係数は大きくなることが確認できた。しかしながら、養生方法の違いによって透気係数と含水率の線形関係の傾きと実効拡散係数の関係が異なっている。これは電気泳動試験においてはコンクリートを飽水させて試験を行うことから、コンクリート内部の全ての空隙が塩化物イオンの移動に関係するが、透気試験ではすでに述べたように乾燥によって水分が逸散した空隙のみが関与するためと考えられる。従って、気中養生した供試体における実効拡散係数が同じ透気係数の傾きであっても比較的小さい値となることや、実効拡散係数自身が材齢による変動する現象が観察されており、耐久性能に関わる物質移動抵抗性を適切に示す指標について検討が必要である。なお、本研究では以上の検討課題はあるけれども、材齢1年の水中養生と気中養生それぞれの関係を用いてコンクリートの耐久性能を表す手法について検討した。

なお、X線CTスキャンを用いてコンクリート内部の空隙構造をモデル化し、そのモデルを用いて実験で得られた透気係数と比較した結果、X線CTスキャンの分解能が大きく透気に関する小さな空隙構造を含んだモデルを構築できなかったため、含水率の低下による透気係数の増加は表現できたが、解析された透気係数の値自体が実験結果に比べて大きく、また、空隙構造の連続性に関する定量的な指標を得ることができず、物質移動特性値間の関係を解析により検討することができず、今後の課題となった。

### 3) 透気係数から劣化予測に利用できる物質移動特性値を得る方法の提案

図6に示した透気係数と含水率の関係と図4および図5に示した実効拡散係数と促進中性化速度係数それぞれとの透気係数との関係を用いて品質評価図を作成する。図6の透気係数と含水率の関係から、任意の含水率における透気係数が得られるので、各水セメント比における所定の含水率を推定し、そのコンクリートが図4に示す実効拡散係

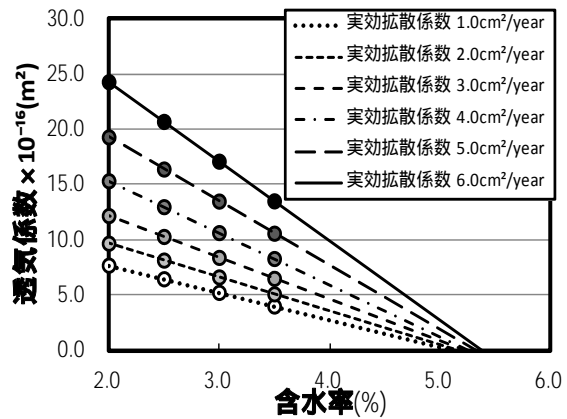


図9 品質評価図の一例

数を有しているとする。そして例えば、 $1.0\text{cm}^2/\text{year}$ 、 $2.0\text{cm}^2/\text{year}$ 、 $3.0\text{cm}^2/\text{year}$ 、 $4.0\text{cm}^2/\text{year}$ 、 $5.0\text{cm}^2/\text{year}$ 、 $6.0\text{cm}^2/\text{year}$ となる透気係数と含水率を再度、図6のようにプロットし直線を引いたものが図9である。図中の直線がコンクリートの品質、この場合には実効拡散係数を表わす。

そこで、作成した品質評価図の適用性を確認するため、愛媛県宇和島市内の6橋梁15カ所を対象として透気試験および含水率測定試験を実施した。調査した橋梁は建設から20年~26年経過した橋梁で、グレーディング指標を用いて別途目視による点検調査が行われたものである。

図10は促進中性化速度係数に関する品質評価図に実測された橋梁に関するデータをプロットしたものである。なお、図中の目視判定3は安全性には問題が無いが2次部材が損傷、目視判定4は損傷が軽微で健全、目視判定5は損傷なしである。

建設後の経過年数が20年から30年程度の目視点検により5と評価された橋梁は、促進中性化速度係数が小さく推定される傾向にあることが確認できる。一方で、目視点検により3と評価された橋梁は、促進中性化速度係数が大きく評価される傾向にあ

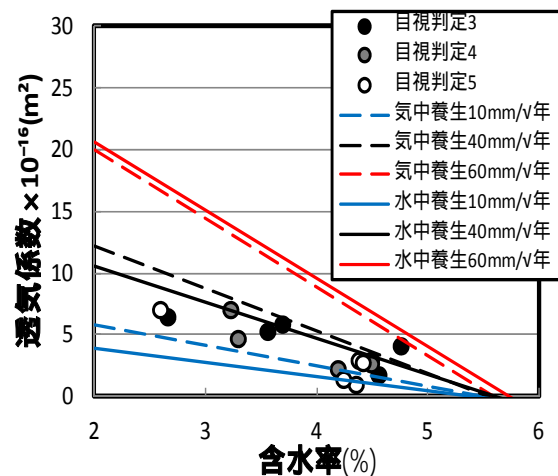


図10 品質評価図の実構造物への適用 (促進中性化速度係数)

ることが認められ、物質移動抵抗性は低いと評価される。しかしながら、促進中性化速度係数は高いが目視点検によって劣化を呈していないと評価されるものや、促進中性化速度係数は低いが目視点検により劣化を呈していると評価されるものが存在していることが確認できる。また、品質評価図による耐久性評価では、含水率が高く、透気係数も大きいグラフの右上にあるプロット点ほど耐久性が低いと評価される。特に、含水率が4.5%以上の高含水状態にあるケースでは、わずかな透気係数の相違であっても推定される促進中性化速度係数は大きく変動するため注意が必要である。

以上のことから、品質評価図により、コンクリートの密実性だけでなく、実構造物の耐久性を評価することが可能であると示唆された。品質評価図の精度や妥当性については実構造物における透気係数と含水率の測定データを蓄積し、また実構造物のコンクリートから得られた拡散係数や中性化速度係数と検討する必要があるが、本研究より、透気係数と含水率の関係から実構造物の耐久性を推定する手法の適用可能性を示すことができたと考える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

- 1) Effect of curing condition on air permeability coefficient measured by in-situ test method, K.Kawai, I.Ujike, S.Kunikata and S.Okazaki, Proceedings of the forth international symposium on life-cycle civil engineering, pp.1207-1214, 2014. (査読有)
- 2) 現場透気試験によるかぶりコンクリートの耐久性評価手法の検討、河合慶有、國方翔太、氏家勲、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.1、pp.2140-2145、2014. (査読有)
- 3) Acquisition of capillary pore structure by X-ray CT and visualization of flow by numerical analysis, M.Shibata, S.Okazaki and I.Ujike, Advanced Materials Research, Vol.845, pp.163-167, 2014. (査読有)
- 4) コンクリート中の含水を考慮した非破壊透気係数の物質移動係数への換算、岡崎慎一郎、氏家勲、國方翔太、コンクリート構造物の非破壊検査論文集、Vol.4、pp.53-62、2012. (査読有)
- 5) 実構造コンクリートの透気係数を測定する手法の開発、岡崎慎一郎、氏家勲、コンクリート工学、Vol.51、No.4、pp.327-334、2013. (査読無)
- 6) An in-situ test to measure the distribution of air permeability coefficient of concrete, I.Ujike and S.Okazaki, Proceedings of the 5<sup>th</sup>

International Conference of Asian Concrete Federation, CD-ROM, 2014. (査読有)

〔学会発表〕(計6件)

- 1) 現場透気試験による構造体コンクリートの耐久性評価指標の検討、國方翔太、氏家勲、河合慶有、土木学会四国支部第20回技術研究発表会、徳島大学(徳島市)、2014.5.31
- 2) 透気試験方法の違いが養生条件の異なるコンクリートの透気係数と含水率の関係に及ぼす影響、柴田真帆、氏家勲、河合慶有、太田賢治、土木学会四国支部第20回技術研究発表会、徳島大学(徳島市)、2014.5.31
- 3) 構造体コンクリートの耐久性能評価のための透気係数-含水量関係の確立に関する検討、國方翔太、氏家勲、岡崎慎一郎、砂田郁弥、土木学会四国支部第19回技術研究発表会、愛媛大学(松山市)、2013.5.11
- 4) X線CTによる毛細管空隙構造の取得と数値解析による流れの可視化、柴田真帆、岡崎慎一郎、氏家勲、土木学会四国支部第19回技術研究発表会、愛媛大学(松山市)、2013.5.11
- 5) 多孔体における水分移動モデルの構築、春日翔平、氏家勲、岡崎慎一郎、土木学会四国支部第19回技術研究発表会、愛媛大学(松山市)、2013.5.11
- 6) 透気係数を用いた構造体コンクリートの品質評価手法の提案、國方翔太、氏家勲、岡崎慎一郎、土木学会四国支部第18回技術研究発表会、高知工科大学(香美市)、2012.5.19

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cee.ehime-u.ac.jp/~zairyuu/index.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

氏家 勲 (UJIKE ISAO)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：90143669

(2) 研究分担者

岡崎 慎一郎 (OKAZAKI SHINICHIRO)

独立行政法人港湾空港技術研究所・構造研究領域・研究官  
研究者番号：30510507

(3) 連携研究者

なし