

平成30年6月28日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420434

研究課題名(和文) 中性子を用いた温湿環境変化を受けるセメント硬化体中の水分と体積変化の定量的評価

研究課題名(英文) Quantitative Estimate of Moisture Content and Volume Change of Hardened Cement Paste Exposed at Changing Thermal and Humidity Condition by using Neutron Radiography.

研究代表者

沼尾 達弥 (NUMAO, TATSUYA)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：90164649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)： コンクリートなどのセメント硬化体は、その中の水分の乾燥や湿潤により収縮や膨張の体積変化が生じる。収縮や膨張の繰り返しは、ひび割れの発生などによりコンクリートの長期的耐久性に影響する。そのため、セメント硬化体内の水分と体積変化の関係を捉えることは重要となっている。一方、中性子ラジオグラフィは、中性子が物質を透過するときの減衰性を利用することで、特に、セメント硬化体内部の水分を非破壊で測定することができる方法である。

本研究では、中性子ラジオグラフィを用いて、セメント硬化体内部の水分を計測する方法を提案するとともに、収縮などの体積変化と関連付ける方法を提案している。

研究成果の概要(英文)： Hardened cement paste (HCP) such as a concrete shrinks with dehydration or swells with hydration. This repeated shrinking and swelling of the HCP makes some cracks in the surface and affects the its long-term durability. Therefore, it is important to characterize the moisture distribution inside HCP and the deformation associated with moisture movement.

On the other hand, the neutron radiography is a non-destructive visualization technique in which the attenuate characteristic caused by the interaction of the nucleus and the neutron when the neutron penetrates the material. Especially, it is suitable for the measurement of the moisture existence situation for hydrogen to show the action of strong absorption and scattering.

The purpose of this research is to discuss and to propose the quantitative relationship between the moisture content and volume change of the HCP specimen by the neutron radiography.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：中性子ラジオグラフィ セメント硬化体 水分移動 体積変化 表面撮影

## 1. 研究開始当初の背景

社会基盤ストック重視による構造物の高耐久化への要求から、鉄筋コンクリート構造のひび割れへの社会的な関心が高まっている。コンクリートのひび割れは、鉄筋腐食進行の大きな要因となり構造物の耐久性を損なうことから、その抑制および制御方法の確立が重要視されている。

コンクリート構造物においては、外部環境条件が影響し、水分逸散・湿潤による収縮や膨張と温度変化による熱膨張や収縮等の体積変化を示す。これらの膨張と収縮の繰り返し作用は、コンクリート構造物における、ひび割れ等の劣化の一要因となっている。水分移動、熱伝導および物理的性質の関係を図1に示す。水分・熱移動、物理的性質の変化、および劣化は、各々が相互に影響を及ぼす非常に複雑な挙動を示すものである。即ち、コンクリートのマトリクスであるセメント硬化体において、乾燥収縮や熱伝導による膨張・収縮は、マトリクスの微視的な構造を変化させることになるが、また、その微視的構造の変化が水分移動や熱伝導に影響を与える関係にある。

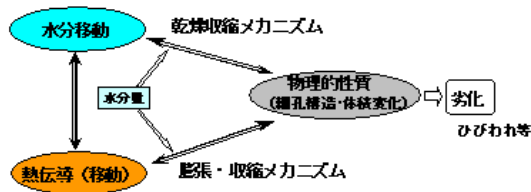


図1 水分移動、熱伝導および物理的性質の関係

ここで、乾燥収縮はセメント硬化体中に含まれる水分が、時間の経過とともに逸散することにより直接引き起こされる現象であるため、水分移動と密接な関係を持っている。時間によって変化するセメント硬化体内の湿度分布により、セメント硬化体内部に収縮量の変化をもたらす、自己釣り合い的な内部応力を発生させるため、硬化体表面のひび割れ発生の原因となる。更に、内部の含水状態は、熱伝導係数や熱膨張係数を変化させるため、その熱的性質へも影響を与えることになる。したがって、水分移動を正確に捉えることと共に、体積変化の関係を定量化することは、セメント硬化体の物理的特性を把握する上で重要な課題となる。

従来から行われている研究の多くは、巨視的な挙動についての実験的研究が主になさ

れ、その結果を基に経験則を見出すことを目的としてきた。しかし、従来の経験則の範囲を超える通常の温度以上の領域では、セメント硬化体内部の含有湿度分布が大きく異なり、しかも時々刻々と変化していくので、試験体全体に均して評価された含有湿度では、その挙動を正確には表現できないのが現状である。

一方、中性子ラジオグラフィとは、中性子が物質を透過する際に原子核と中性子の相互作用(捕獲・散乱・核反応)により生じる減衰特性を利用した非破壊可視化技術である。中性子は試料の密度や厚さ、物質固有の値である質量吸収係数を因子として減衰するが、特に水素に対しては強い吸収・散乱の作用を示すため、水分存在状況の測定に適している。

本研究では、セメント硬化体内部の水分挙動の測定を行と共に、環境温湿度の変化に伴う試験体の体積変化を、中性子透過画像と通常のカメラによる表面の画像解析により求めることにより、これまで不可能であった同一試験体を用いて、その水分量と体積変化の関連を評価することにある。これにより、実際のコンクリート構造物に生じる乾湿繰返しによる乾燥収縮と湿潤膨張及び太陽光や気温変化などによる熱膨張・収縮が同時に作用する現象を定量的に表現することが可能となる。

## 2. 研究の目的

本研究は、これまでの研究成果として示されている、セメント硬化体中の水分の定量的評価手法および水分量と体積変化の関係を基に、実際のコンクリート構造物に生じる乾湿繰返しによる収縮と膨張、ならびに太陽光や気温変化などによる熱膨張・収縮が同時に作用する現象を定量的に表現するとともに、コンクリートの骨材境界の拘束ひずみを含めた物理的性状を評価することを目的として実験的研究を行った。

## 3. 研究の方法

本研究では、これまでの基礎的な実験を踏まえて、より応用的な研究を行った。まず、試験体のひずみ変化を、同一試験体の中性子透過画像や表面可視画像(通常カメラ撮影)から解析し算出する手法を検討・確立する。次に、この方法を用いて、セメント硬化体内

の水分移動が生じる環境下での実験に適用して、境界相を含め各種骨材の影響を評価する。

更に、セメント硬化体周囲の温湿度環境を任意に変化させ、乾燥収縮挙動、水分変化量を測定することにより、供試体内部の含有水分分布と体積変化を定量的に評価した。

中性子照射実験は、京都大学原子炉実験所の研究炉（KUR）内にある中性子ラジオグラフィ装置を用いて、以下の実験的研究を行った。

(1) 試験測定の概要と温湿度のコントロール方法

ここでは、図2の様に温湿度をコントロールしながら、図3の様に、中性子透過画像や表面可視画像を撮影した。

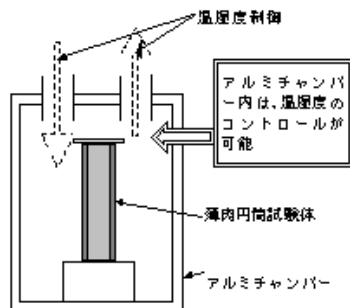


図2 実験概要

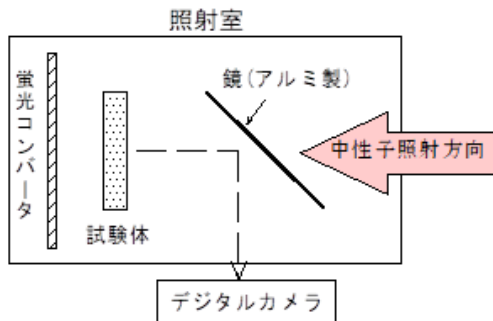


図3 中性子ラジオグラフィと表面可視画像

(2) セメント硬化体の変形計測方法の検証

コンクリートを想定して骨材を模擬的に配置したモルタル平板試験体を作製し、中性子透過画像及び通常のカメラ撮影を行い、画像解析により変形と水分変化の関係を考察した。

(3) セメント硬化体の水分測定と検証

H27, H28年と原子炉実験所の使用ができなかったため、H29年の実験再開に際して、これまでの実験結果の再確認を行った。その結果、これまでの定量化手法の妥当性を確認すると共に、セメント硬化体内の水分の状態と、それを体積変化に結びつけるためのより正

確な水分量の把握には、水分状態が異なる試験体端部の水分分布も含めて、全体の水分をより正確に計測する必要があり、その為には、試験体全体の水分分布を立体可視化することが効果的であると考えた。そこで、従来実験に用いた軸方向回転体である円筒供試体の端部の影響も含め、任意の不整形の試験体にも対応できるように、コンピュータ・トモグラフィ（CT）手法を用いて、様々な形状のセメント硬化体内部の水分挙動を、360度回転させた試験体のラジオグラフィ画像を取得することで、3次元で表現することを試みた。

(4) 水分逸散と体積変化の測定と評価

試験体内の水分が時々刻々変化する逸散（乾燥）過程を、(3)による方法を用いて測定することで、水分変化と体積変化との比較を実験的に行った。尚、この実験では、原子炉実験所実験炉が2年間休止し、十分な計測時間がとれないため、水分逸散に伴う体積変化は、照射炉内と同じ環境においた試験体を用いて、差動トランス型変位計で測定すると共に、中性子ラジオグラフィ画像より求めた結果との比較を行った。この結果により、水分量と体積変化の関係について考察を行った。ここでは、環境湿度と比較的早く平衡状態になり、内部の水分分布が小さくなるように、厚さ1mmの薄肉円筒供試体を用いることとして、1ヶ月程度の期間測定を行った。

4. 研究成果

(1) セメント硬化体の変形計測方法に関する成果

撮影時間の関係で、水分の移動時間を十分にとることはできなかったものの、中性子ラジオグラフィ画像と表面可視画像（通常カメラ撮影）との比較により次の成果を得ることができた。

- ① 骨材まわり境界層の細孔構造の変化は、水分移動にも影響を及ぼし、骨材周囲の水分は、他の部分と異なり水分移動が促進されることが示された。
- ② 水分逸散に伴う水分変化を起因とする試験体の変形は、表面可視画像の解析により定量的な扱いが可能となることが示された。
- ③ その変形解析精度は、測定面の濃淡や撮影時の明るさなどに影響を受けるため、照度などの測定条件の統一や、補助点を

用いた方法により、測定可能である事が示された。

- ④ 中性子ラジオグラフィ画像から得られた水分量の変化と、表面可視画像により得られた試験体表面の変形は、高い相関性を持ち、水分移動と体積変化の関係を同一試験体で測定できる事が示された。
- (2) セメント硬化体内部含有水量の定量化に関する成果

これまでの研究成果として、中性子ラジオグラフィ画像の解析結果と従来の重量法の測定結果との比較により、時々刻々変化する試験体内部の含水量を、ラジオグラフィ画像の補正を行うことで精度良く定量評価できる事が示されている。

本研究では、応用的利用を考えて、任意の不整形の試験体にも対応できる様に、CT手法を用いて、3次元画像化を試みた。その研究成果は次の様にまとめられる。

- ① 試験体厚さが1mm程度のもので、環境温湿度の変化により、表面からの水分逸散が生じ、試験体内部に水分分布が発生することが示された。
- ② この湿度勾配は、比較的長時間存在し、乾燥収縮や湿潤膨張の試験体の変形挙動に影響することが示された。特に、乾燥過程では水中浸漬等による湿潤膨張変化よりも水分の変化は小さく、より長時間の測定が必要であることが示された。
- ③ CT画像により、不整形の試験体端部(角部)からの水分逸散が多いこと、更に、内部欠陥を有する試験体においては、その位置や大きさなどを可視的に表現できることが示された。
- ④ 今までの平面画像より求めた場合に比べ、重量法との比較において、試験体内部の水分量の誤差が小さくなる結果が得られたことで、CT法の有用性が示された。
- ⑤ CT法のための画像取得には、360°の画像が必要となる。しかしながら、撮影時間の間に湿度変化が発生する場合などは、CT画像の精度が悪くなると想定される。その為、1枚のラジオグラフィ画像を取得するための時間管理や、回転角度の管理が必要となることが示された。このために、より短時間の撮影と、回転角度によるCT画像の精度の関係を捉える必要があることが示された。

- (3) セメント硬化体中の水分と体積変化に関する成果

原子炉実験所の使用が制限されたため、十分な検証ができなかったものの、以下の様に成果をまとめることができる。

- ① CT法による水分分布の3次元画像化により、セメント硬化体の内部水分をより直接的に定量化できるため、従来の方法に比べ、より実際の対象に近い形状の場合でも、内部応力の発生と関連付けて体積変化を議論できることが示された。
- ② セメント硬化体のひび割れは、硬化体内部の水分変化や分布に起因する内部応力により発生する。その内部応力に対する抵抗力(引張り強度など)は、試験体内部の細孔構造とそれに含まれる水の状態によっても変化することが、中性子散乱計測により示された。更に、温度変化による膨張収縮についても、水分が大きく影響する傾向を示すため、実構造物への応用においては、より詳細な検討が求められる。
- ③ セメント硬化体の水分逸散過程での体積変化は、初期の場合と乾燥が進んだ場合では、その傾向に差があることが示された。この原因として、②に関連する細孔構造とその内部の水分状態の関係で議論が必要であり、今後は、中性子ラジオグラフィと共に、中性子弾性散乱法の併用も検討が求められる。

中性子による非破壊試験を、セメント硬化体へ適応する研究事例は、国内外において少ない。かつ、建設材料分野以外の原子力関連分野においても、その中性子照射の空間的・時間的バラツキにより、得られた結果は定性的であるとされている。

本研究では、セメント硬化体内部の含水量を中性子ラジオグラフィを用いて定量化する手法を提案すると共に、より実構造物に対応できる様に、CT法の有用性を確認した。更に、これらの結果を実構造物まで適応できることを示している。

また、中性子法の一つである、中性子弾性散乱法等により、中性子を用いたセメント硬化体の物性評価の有用性のための基本的データを提供している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 当銘葵、沼尾達弥、『中性子準弾性散乱を利用したセメント硬化体の水和過程における結合水量の割合と圧縮強度および細孔径分布の関係』、コンクリート工学年次論文集、pp.2205-2210、2016、査読有

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① 小沼遥佑、沼尾達弥、木村 亨、久保美春『中性子ラジオグラフィを用いた多孔質材料内の含有水分量の定量化手法』、第70回土木学会大会、2015
- ② 沼尾達弥、当銘 葵、木村 亨、仲井 和之、中村 薫『中性子準弾性散乱を利用したセメントの硬化過程における結合水の割合と細孔径分布の関係』、第70回土木学会大会、2015
- ③ 当銘葵、沼尾達弥、木村亨、『中性子準弾性散乱を利用したセメント硬化過程における結合水量の割合と圧縮強度の関係』第70回土木学会大会、2015
- ④ 沼尾達弥、舟川勲、木村亨、久保美春、『中性子ラジオグラフィ画像を用いた含水量測定に及ぼす影響要因』、第69回土木学会大会、2014
- ⑤ 久保美春、沼尾達弥、舟川勲、木村亨、『中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体中の含有水分量の同定手法』、第69回土木学会大会、2014
- ⑥ 沼尾達弥、舟川勲、木村亨、久保美春『中性子ラジオグラフィを用いた水分測定に関する画像処理方法の提案』、第69回土木学会大会、2014

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

沼尾 達弥 (NUMAO, Tatsuya)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号：90164649

### (2) 研究分担者

渡辺 健 (WATANABE, Ken)  
鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部  
コンクリート構造・研究員  
研究者番号：40450746

大野 又稔 (ONO, Yuto)  
鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部コ

ンクリート構造・研究員

研究者番号：50649390

齋藤 泰司 (SAITO, Yasushi)  
京都大学・原子炉実験所・教授  
研究者番号：40283684

原田 隆郎 (HARADA, Takao)  
茨城大学・工学部・教授  
研究者番号：00241745

### (3) 連携研究者

無し

### (4) 研究協力者

木村 亨 (KIMURA, Toru)

久保美春 (KUBO, Miharuru)