

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560546

研究課題名(和文) 中性子を用いたセメント硬化体中の水分測定と体積変化に関する研究

研究課題名(英文) Measurement of Water Content and Volume Change of Hardened Cement Paste by Neutron Imaging

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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：セメント硬化体は、乾燥や湿潤等の水分移動に伴い収縮や膨張などの体積変化が生じる。この繰返しは、長期的な耐久性に影響を与えることになるため、セメント硬化体内の水分分布を調べることは重要な課題である。

本研究では中性子ラジオグラフィを用いて、セメント硬化体の含有水分量の測定に影響する要因を取り除くための補正式を提案し、その補正式を用いてセメント硬化体の含有水分量を定量的に算出した。さらに、水分の移動と体積変化との関連についても調べた。

研究成果の概要(英文)：Hardened cement paste shrinks with drying or swells with wetting. This repeated shrinking and swelling of the paste affects the paste's long-term durability. Therefore, it is important to characterize the moisture distribution in the hardened cement paste and the deformation associated with moisture movement.

In this study, the experiments were carried out to measure the water content in hardened cement paste by using neutron radiography of KUR. The authors developed a correction formula and adjusted the formula for each test result to identify the moisture volume by using some parameters, and discuss the relationship between water content and volume change of Hardened Cement Paste.

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 含有水量 体積変化

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性化への要求から、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・湿潤による乾燥収縮や湿潤膨張、および、温度変化による熱膨張や熱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・熱移動、物理的性質の変化、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は、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。

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（乾燥収縮変形）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。

また、セメント硬化体内の水分の移動は塩化物イオン等に代表される外部劣化因子の能動態として、また、アルカリ骨材反応による劣化の要因、高温下環境においては、内部気孔内の存在状態（蒸気や流体）によっては、爆裂破壊の要因になることもあり、耐久性的な観点からも水分の挙動を把握することは重要である。

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、この技術をセメント硬化体内部の水分挙動の測定に用いることとする。

2. 研究の目的

本研究では、薄肉試験体（セメント硬化体）を用いて、従来の重量法では正確に捉えることのできない内部の含有湿度分布を、中性子ラジオグラフィにより測定し、供試体内部の含有水量を定量化する手法を開発する。それを基に、セメント硬化体内部の水分移動に係わる諸係数をより精度良く追求する。

更に、含有湿度と体積変化の関係を明らかにし、ひび割れ抑制と制御技術の確立、及び劣化診断への展開を図ることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、主に京都大学原子炉実験所の研究原子炉 KUR の中性化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) 供試体内部の含有水量の定量化手法

予め既知の水分強度値（含有湿度）のセラミック試験体について撮影を行い、水分強度値と画像から得られる値を相関付けることにより、画像値から水分量を定量化する解析方法を検討する。

(2) 撮影画像に及ぼす他の影響要因の検討

中性化ラジオグラフィ画像には、実験装置毎に特徴が存在する。ここでは、その特徴を評価しその補正方法を検討する。影響要因は次の様になる。

幾何学的要因

中性子が通過するコリメータの特性や、

通過後の非並行成分による、試験体と中性子を光りに変えるコンバーターとの位置関係により画像が「ボケ」る現象であり、試験体表面付近の水分量測定に影響する。

透過中性子の散乱要因

試験体を透過する中性子は減衰するが、透過過程で散乱成分が存在し、コンバーターに近いほどその影響が大きくなり、透過強度値に影響を及ぼす。

中性子線の捕獲による影響要因

照射する中性子線はエネルギー分布を持ち、透過する過程で低エネルギーのものから減衰するため、水分が多いものほど、中性子減衰変化が小さくなり、結果として水分を小さく見積もることになる。その影響は一般にビームハードニングと称される。

撮影画像の解像度と歪み要因

中性子はコンバーターで光に変わり、カメラにより撮影された画像の濃淡でその強度が求められる。このコンバーターの精度やレンズの歪みが画像の精度に影響を及ぼす。

以上の影響は、正確な水分測定に影響を与えることが分かったために、当初の計画に加えて、その影響を評価し、補正する方法を(1)の方法に加えて実験的に検討した。

尚、これらの要因は装置毎の特性に依るところが大きいため、理化学研究所 RANS の結果と比較を行い、補正方法の検証を行った。

(3) セメント硬化体の水分測定と検証

前記(1)(2)で求めた方法を、薄肉円筒供試体や薄片供試体に応用し、時々刻々と変化するセメント硬化体中の含有湿度分布を測定・定量化の検証を行った。即ち、「精密空気発生装置」を用いて、中性子照射炉内外に設置したチャンバ - 内を一定の温度・湿度に保つ環境を実現して、中性化ラジオグラフィにより求めた水分量と、別に用意した試験体を用いた従来の重量法による値との比較により検証を行った。

(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と変化する逸散（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。

ここで、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。

尚、この実験では、環境湿度と比較的早く平衡状態になり、内部の水分分布が少なくなるように、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。

(5) 応力下の水分逸散の測定

実構造物の水分移動に伴うひび割れ発生メカニズムを考察するために、実構造物の状態に近い、応力下の水分移動を測定した。

試験体は、内部に水分分布が生じる中実の円柱形の試験体として、強度の4割程度の荷重が加わるように鉛を重りとして使用した。応力下の試験体内の水分が時々刻々と変化する逸散（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。

(6) 水分変化とひび割れ発生メカニズムの考察

以上の結果を取りまとめて、水分逸散過程における体積変化と内部応力の関係を考察した。

4. 研究成果

(1) セメント硬化体内部の含有水量の定量化に関する成果

従来の重量法では正確に捉えることのできないセメント硬化体内部の含有湿度分布を、測定した中性子透過画像値を用いて、供試体内部の含有水量を定量化する手法の検討を行った。

その結果、現在まで明確に報告がなされていない水分を含むセメント硬化体特有の質量減衰係数を求めた上で、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、時々刻々と変化する試験体内部の含水量を精度良く定量評価できる事が示された。

このことにより、非破壊で試験体内部の水分を直接求めることができることになり、セメント硬化体の水分に関わる諸性質を試験体によるバラツキを考慮せずに、同一の試験体を用いて調べることができることになり、セメント水和物に限らず、広く応用的研究の基礎となる結果を得た。

(2) 撮影画像に及ぼす他の影響の検討成果
この成果は、以下の様にまとめることができる。

影響要因の中で、幾何学的要因、透過中性子散乱の影響、中性子捕獲の影響については、各々が複合的に影響し合うために、その影響を分離して考察することができなかった。

そのために、それらの影響をまとめて考察し、試験体とコンバーターの距離と装置による係数をパラメータとした補正式を求めた。これにより、試験体内部の水分量を定量的に評価できる事を示した。

更に、中性子照射装置が違った場合においても、同一の補正式で表現できることを示した。

試験体端部の「ボケ」については、端部近傍の散乱の影響を、にじみ効果とエッジ効果に分けて考察し、たたみ込み計算法により除去、鮮明化できる事を示した。

カメラレンズの収差に伴う撮影画像の歪みについては、撮影中心からの誤差の除去方法を検証し、補正方法を求めた。

(3) セメント硬化体中の水分と体積変化の関連およびひび割れメカニズムに関する成果

この成果は、以下の様にまとめることができる。

セメント硬化体の水分逸散過程での体積変化は、初期の水分逸散過程と、乾燥が進んだ場合の水分逸散量と収縮量の関係ではその傾向に差があり、初期から水分逸散が進むほど、逸散量に対して、収縮量が大きくなることが示され、逸散水量と収縮量の関係は非線形になることが分かった。

圧縮応力下の水分逸散過程においては、応力が無い場合に比べ初期の水分逸散量が多くなる傾向を示すものの、その後は、試験体内部の水分変化は少なくなり、水分の移動が抑えられる様になる。その為、実構造物への応用には、応力の影響も考慮する必要があることが分かり、より詳細な検討が必要であることが示された。

セメント硬化体のひび割れは、硬化体

内部の水分量変化や分布に起因する内部応力により発生する。

本研究では、温度変化について検討していないため、実構造物に適用する場合には、含有水分と熱膨張等を含めた熱物性についても考慮する必要がある。

中性子ラジオグラフィをセメント硬化体へ適応する研究事例は、国内外において多くない。かつ、建設材料分野以外の原子力関連分野においても、その中性子照射量の空間的・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、含水量が既知のセラミック試験体を一つのスケールとして用いることで、画像の結果を定量的に評価可能であることを示すと共に、その結果を実構造物まで適応できることを示している。

更に、セメント硬化体以外にも広く応用することが可能であり、その為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 3件)

大野又稔、渡辺健、沼尾達弥、舟川勲、『中性子ラジオグラフィにおける中性子強度の補正方法の提案』、応用力学シンポジウム、pp.1-8、2014、査読有

舟川勲、沼尾達弥、飯倉寛、『中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体中の水分評価に関する基礎的研究』、土木学会論文集 E2 , vol.67, No.4. pp.596-604, 2011、査読有

Y. Kawabata and Y. Saito, "Current activities of neutron imaging facilities in KUR". Physics Procedia No.43, pp.42-47,2013, 査読無

[学会発表](計 10件)

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、2014.9.10、大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)
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量の同定手法に

ついて』、第 69 回土木学会大会、2014 . 9.10、大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)

松島由布子、沼尾達弥、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 .9.10、大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)

大野又稔、渡辺健、沼尾達弥(他 10 名、3 番目) 『中性子ラジオグラフィにおける散乱線の影響』、68 回土木学会大会、2013 . 9.4、日本大学津田沼キャンパス(千葉県・習志野市)

沼尾達弥、(他 9 名 1 番目) 『中性子ラジオグラフィによるセメント硬化体中の含有水分分布の測定』、68 回土木学会大会、2013 . 9.4、日本大学津田沼キャンパス(千葉県・習志野市)

熊倉識政、沼尾達弥(他 5 名、2 番目) 『中性子ラジオグラフィを用いたセメント硬化体内の含有水分分布の測定』、第 67 回土木学会大会、2012、9.5、名古屋大学東山キャンパス(愛知県・名古屋市)

舟川 勲、沼尾達弥(他 5 名、2 番目) 『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量の定量的評価』、第 67 回土木学会大会、2012、9.5、名古屋大学東山キャンパス(愛知県・名古屋市)

沼尾達弥、舟川 勲(他 7 名、1 番目) 『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量測定における試験体とコンバータ間距離の影響』、第 67 回土木学会大会、2012、9.5、名古屋大学東山キャンパス(愛知県・名古屋市)

沼尾達弥、舟川勲、板倉寛、井上貴博、鈴木雅人、Lee S. W、『中性子イメージングを用いたセメント硬化体中の水分評価』、第 39 回可視化情報シンポジウム、2011. 7 .19、工学院大学新宿校舎(東京都・新宿区)

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

川端 祐司 (KAWABATA YUJI)

京都大学・原子炉実験所・教授

研究者番号：00224840

原田 隆郎 (HARADA TAKAO)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：00241745

(3)連携研究者

無し

(4)研究協力者

舟川 勲 (FUNAKAWA ISAO)

茨城大学・大学院・理工学研究科博士後期課程・学生