

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13812

研究課題名（和文）セメント系材料の水和・劣化プロセスを網羅したマルチスケール力学モデルの開発

研究課題名（英文）The Development of Multi-Scale-Mechanical Model Considering Hydration and Deterioration Process of Cementitious Material

研究代表者

三浦 泰人 (Miura, Taito)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：10718688

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、セメント系材料の材料劣化前後の力学挙動を評価可能なマルチスケール力学モデルを構築することを目的とした実験・解析的研究を行った。その結果、セメントペーストの力学特性を同定する上で最適な前処理方法を決定し、Ca溶脱後のセメントペーストの固相の変質に伴う力学特性の変化を同定した。また、熱力学的相平衡計算を導入したCa溶脱と硫酸劣化のシミュレーションを開発して、Ca溶脱、硫酸劣化、硫酸塩劣化による固液相の変質プロセスを簡易に再現できることを確認した。また、骨材を直接モデル化した複合相モデルの開発に成功し、セメントペースト・モルタル・コンクリートのスケール相互互換を可能とする枠組みを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

セメント系材料は、種々の環境作用を受けてミクロスケールにおいて材料の変化が生じ、これがマクロスケールにおける劣化の要因となるケースが多い。これが、コンクリート構造物の耐久性予測・余寿命予測の弊害のひとつである。本研究では、セメント系複合材料の水和による強度発現と劣化による力学特性の低下のトリガーとなる固相情報を取得すること大きな目的の一つとして行った。さらに、ミクロとマクロを連続的に扱うマルチスケールの力学モデルの構築を目指した。これらの成果は、様々な要因で劣化するコンクリート構造物の構造耐久性評価手法の確立と高精度化につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the experimental and analytical studies were carried out to develop multi-scale mechanical model representing the change in mechanical behaviors before and after material deterioration of cementitious materials. As a result, the optimum pretreatment method for identifying mechanical behaviors of cementitious material was established and the change in mechanical behaviors corresponding to the transformation of solid phase due to Ca leaching was clarified. In addition, the numerical simulation system introduced with thermodynamic phase equilibrium calculation was developed. By this system, the transformation process of liquid-solid phase of cementitious material due to chemical deteriorations can be simply reproduced. Furthermore, the development of multi-phase model by 3D-RBSM that cementitious material can be described by cement paste phase or mortar and aggregate phase was succeeded.

研究分野：セメント材料

キーワード：セメント系複合材料 固相の変質 力学特性 メソスケール構造解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

インフラ整備に不可欠な建設材料であるセメント系材料の経年劣化は世界的な課題である。1996年にはRILEM TC 130-CSLにおいて耐久性設計に関する方法論がまとめられ、構造耐久性設計の骨子が提唱された。以来、20余年に渡る成果として、耐久性と構造性能の両者を考慮した構造耐久性の評価・予測手法がまさに提案されているところである。特に、鉄筋腐食、乾燥収縮、ASRといったひび割れが生じる劣化現象に関する手法は、数値解析技術の発展との相乗効果によって目覚ましい成果を残している。その一方で、セメント系材料の変質を伴う硫酸（塩）劣化、Ca溶脱、火害などの材料劣化の構造耐久性の議論は非常に遅れている。

材料劣化に関する構造耐久性の議論が停滞している主な問題は次の2つであると考えられる。①材料劣化によるセメント系材料の変質と力学特性の変化との因果関係が不明瞭、②劣化に適した平均化領域の設定、である。①に関して、下水道管路施設のコンクリート管路は、硫酸劣化に伴う部材の耐力低下による道路の陥没事故が年間4000件を超える。加えて、局所領域で材料劣化が生じると設計上考慮しない破壊モードになる可能性は十分にある。材料劣化が構造性能に影響することが社会問題になっているものの、構造耐久性に関する議論は未だ成熟していない。これは、材料劣化による固相の変質と力学特性の変化の関連性の十分な理解がなされておらず、構造解析において時間軸上で進行する劣化の影響を組み込むことができないためである。②は、材料劣化が議論されるセメント固相（数十 μm 以下）と構造性能が議論されるコンクリート（100mm以上）とで、その平均化領域のスケールのオーダーが大きく異なることである。これは、構造解析によって材料劣化した部材の構造性能を評価する際に最もクリティカルな問題となる。すなわち、これらの問題を解決することが、材料劣化に関する構造耐久性の評価・予測手法の技術革新を起こすためのブレークスルーとなる。

2. 研究の目的

本研究では、セメント系材料の材料劣化前後の力学挙動をセメント固相の変化から解明し、実験と数値解析を駆使しながらそれらの関連性を統一的に評価可能なマルチスケール力学モデルを構築することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究で着目する材料劣化はCa溶脱と硫酸劣化（pH=2程度）である。Ca溶脱はセメント水和物中のCaイオンの溶解に伴って空隙が粗大化する現象、硫酸劣化は硫酸と液相中のCaイオンなどと反応し、二次鉱物が沈殿することでセメント水和物が溶解して水和組織の脆弱化が生じる現象である。これら材料劣化後のセメント固相のいずれかの変化が、力学挙動（圧縮強度、引張強度、弾性係数、破壊エネルギー）の変化に直接的に関連すると考えられる。Ca溶脱と硫酸劣化といった二次鉱物の析出の有無によるセメント固相と空隙構造の変質プロセスが異なるセメント系材料の力学挙動を実験的に評価し、その鍵となるセメント固相の変化（例えば、力学特性に直接影響を及ぼす細孔径など）を抽出して、材料劣化を統一的に解釈できるマルチスケール力学モデルを目指す。

本研究はセメントペーストからコンクリートまでの階層を有しており、各領域で実験と数値解析を組み合わせるマルチスケール力学モデルを構築する。さらに、セメントペースト領域で構築した力学モデルを連成解析に導入することで、骨材を含むモルタル・コンクリート領域の変化へとスケールアップしていく。

実験Ⅰ：水分状態：RH90%～105°C乾燥、W/Cなどの影響によるセメントペーストの材料劣化前の力学挙動（引張特性・圧縮特性）とセメント固相（水酸化カルシウム、二次鉱物、空隙率、細孔径分布、Ca/Si比）の変化を把握する。初年度後半から、本研究期間内で実施可能で最も効果的な実験変数（水分状態、W/C）を選定し、浸漬実験によって材料劣化後の力学挙動とセメント水和物・空隙構造の変化を把握する。なお、引張特性評価には5mm厚の試験体を使用する。

実験Ⅱ：細骨材と粗骨材を含むモルタル・コンクリート領域の材料劣化前後の実験データを蓄積する。引張特性評価にはモルタルは10mm厚、コンクリートは100mm厚の試験体を用いる。

解析Ⅰ：骨材情報（骨材径、分布、粒度）をランダムに配置可能なメッシュプログラムを構築し、モルタルとコンクリートを、セメントペースト・細骨材とモルタル・粗骨材の複合材料として表現する複合相モデルを構築する。

解析Ⅱ：単一相モデル（セメントペースト・モルタル・コンクリート）による申請者が開発した連成解析を駆使して、それぞれの平均化領域で適用可能なマルチスケール力学モデルを構築する。

解析Ⅲ：複合相モデルにモルタルの場合はセメントペースト、コンクリートの場合はモルタルの力学モデルを導入した連成解析によって実験結果の再現性を評価し、各領域の力学モデルの妥当性を検証する。

4. 研究成果

実験的研究では、セメントペーストの力学特性を同定する上で最適な前処理方法（水和停止＋乾燥処理）を決定し、W/Cと前処理環境の相対湿度によるセメントペーストの力学特性評価を行った。その結果、乾燥処理におけるRHに応じて曲げ強度が4倍以上変化することを明らかにするとともに、水和停止をしなければ乾燥処理において乾燥収縮の影響によって力学特性が大き

く低下することを明らかにした。また、硝酸アンモニウム溶液を用いた Ca 溶脱後のセメントペーストの固相の変質を評価した。固相の変質として、TG-DTA および SEM/EDS によって水酸化カルシウム量と Ca/Si 比を測定して断面内の劣化分布を評価した。断面内の劣化分布がある状態での Ca 溶脱後のセメントペーストの力学特性の同定は成功した。

解析的研究では、複合相モデルの開発と連成解析システムの再構築・高度化を図った。熱力学的相平衡計算を導入した Ca 溶脱と硫酸劣化のシミュレーションを開発して、Ca 溶脱、硫酸劣化、硫酸塩劣化による固液相の変質プロセスを簡易に再現できることを確認した。また、骨材を直接モデル化した複合相モデルの開発に成功し、骨材の径、数をランダムに配置可能な解析手法を構築した。これによりセメントペースト-モルタル-コンクリートのスケール相互互換を可能とする枠組みが完成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 三浦泰人、中村光、山本佳士	4. 巻 41
2. 論文標題 セメントペーストの力学特性に及ぼす前処理方法の影響に関する実験的検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----