

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560560

研究課題名(和文) 準微視的視点に立脚した環境作用を受けたコンクリートの力学特性モデリング

研究課題名(英文) Mechanical characteristics modeling of concrete under environmental action based on meso-scale perspective

研究代表者

佐藤 靖彦 (sato, yasuhiko)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60261327

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)：温泉地に置かれる構造物、地下構造物、下水構造物は、地震などの力学作用とともに化学的な作用を同時に受ける。しかし、力学作用とか化学的な作用を同時に受ける場合のコンクリートの力学特性に関する理解は進んでいない。そこで本研究は、環境作用(溶脱や化学的侵食)を受けるコンクリートの水和物量と空隙構造変化を予測できる物質移動-反応解析法と、環境作用による強度、弾性係数、破壊エネルギーの低下を考慮できる破壊解析法を組み合わせた準微視的統合解析法を開発し、セミマクロのコンクリートの力学特性のモデル化を可能にした。

研究成果の概要(英文)：Concrete structures in hot spring area, underground structures, sewerage structures are suffered from mechanical actions such as earthquake and at the same time environmental actions. However, understandings on the mechanical characteristics of concrete under combined actions are not progressing. In this study, therefore, a mass transfer model; chemical reaction analysis method for prediction of cement hydrates and porosity change under environmental actions (Ca leaching and acid attack) and a fracture analysis method considering reduction in strength, Young's modulus and fracture energy based on meso scale perspective are developed and those methods are integrated so as to predict the mechanical characteristics of semi-macro concrete.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 環境作用 力学特性 モデル化

### 1. 研究開始当初の背景

モルタルやコンクリートなどのセメント系複合材料に生ずる劣化現象として、Ca 溶脱および硫酸による劣化などがある。Ca 溶脱は、セメント系複合材料が淡水などと接すると、外部溶液と細孔溶液とのイオン濃度差を駆動力としてセメント水和物中の  $\text{Ca}^{2+}$  が溶出し、空隙構造の粗大化が起こる現象である。一方、硫酸による劣化は、硫酸とセメント水和物との化学反応により、セメント水和組織の脆弱化や析出物の生成による膨張ひび割れを生じさせる現象である。

温泉地に置かれるコンクリート構造物、地下コンクリート構造物、下水コンクリート構造物は、地震などの力学作用とともに上述の化学的な作用を受ける。しかし、力学作用と化学的な作用を同時に受ける場合のコンクリートの力学特性に関する理解は進んでいない。

### 2. 研究の目的

環境作用（溶脱や化学的侵食）を受けるコンクリートの水和物量と空隙構造変化を予測できる物質移動-反応解析法と、環境作用による強度、弾性係数、破壊エネルギーの低下を考慮できる破壊解析法を組み合わせた準微視的統合解析法を開発し、セマクロのコンクリートの力学特性のモデル化ができるようにする。

### 3. 研究の方法

メソスケール試験装置を用いて、環境作用を受けたコンクリートの準微視的な力学特性を実験的に明らかにした。その上で、開発した数値計算プログラムを用いて目的を達成した。

### 4. 研究成果

イオン交換水による浸漬実験では、経時的に CH 量と C-S-H 量が減少し、それに伴って空隙率が増加した。EPMA による試験体断面の成分分析を行ったところ、浸漬面となる試験体表面からの Ca、Si の溶出が確認された。この物理化学的性質（CH、C-S-H、空隙率）の変化に伴って、力学的性質（弾性係数、引張強度、破壊エネルギー、せん断強度）は経時的に減少した。これらの物理化学的性質と力学的性質の関連性を評価したところ、いずれの物理化学的性質においても力学的性質との強い関連性がうかがえた。特筆すべき点として、CH および C-S-H の減少に伴う力学的性質の変化の挙動は異なった。すなわち、CH の減少による力学的性質への影響は、弾性係数、引張強度、破壊エネルギー、せん断強度の順に小さくなり、これに反比例する形で C-S-H のそれは弾性係数、引張強度、破壊エネルギー、せん断強度の順に大きくなった。

NaCl 溶液による浸漬実験では、イオン交換水に浸漬した場合の物理化学的性質と力学的性質の推移と同様の傾向を有しており、水

和物量の減少速度ならびに空隙率の増加速度は比較的大きかった。これに伴って、力学的性質の経時変化においてもイオン交換水に浸漬した場合よりその低下傾向は大きかった。このように、物理化学的性質と力学的性質の減少、もしくは、低下傾向は比較的早かったものの、その関連性は同様の傾向であった。

供試体寸法が小さいと Ca 溶脱予測解析によって CH 量と C-S-H 量の予測は精度のよいものであったが、5mm 厚さ試験体およびセマクロ試験体のように供試体寸法が大きいと Ca 溶脱による水和物の減少速度より未水和セメントの水和による水和物の増加速度の方が上回り、物理化学的性質の経時変化を予測する精度が低下した。現段階では、セメント水和物の水和を考慮していないことから、RBSM（剛体パネモデル）によって力学性能を精度よく評価することはできなかった。

解析対象を単一材料モデルおよび複合材料モデルによって構築することで、適切なマルチスケールモデルリングの第一歩となる試みを行った。複合材料モデルのように骨材と骨材界面の領域を直接モデル化することで、スケールと材料が異なったとしても空隙率や水和物量といった物理化学的性質の情報を基に、力学性能の予測が可能であることを確認した。

5mm 厚さ試験体を用いた場合では、物理化学的性質と力学的性質とを平均化可能な硫酸による劣化の分布性状を得た。すなわち、浸漬期間に伴って試験体表面の白色化ならびに断面減少が進行し、CH 量と C-S-H 量は経時的に減少した。XRD による結果から浸漬 30 日の時点では、エトリンサイトと二水セッコウの析出が、浸漬 60 日では二水セッコウのみの析出が確認された。これに伴って、試験体の空隙率は浸漬 30 日まで低下し、それ以降は浸漬前より増加した。

このような物理化学的性質の変化に伴って、弾性係数、引張強度、破壊エネルギー、せん断強度はそれぞれ異なる挙動を示した。弾性係数と引張強度は CH 減少量との関連性が高いことが確認された。一方で、破壊エネルギーとせん断強度は空隙率との関連性が高く、これは析出物の影響を反映したものと推察される。すなわち、破壊エネルギーとせん断強度は本実験において主に析出した二水セッコウの有する高い伸び能力の影響を受ける可能性がある。

硫酸による劣化予測解析によって、試験体断面の CH 量、C-S-H 量、エトリンサイト析出量、二水セッコウ析出量、硫酸イオン量、pH の経時変化を算出することができ、実験結果とのある程度の再現性を確認することができた。硫酸による劣化予測解析から得られた物理化学的性質の分布から RBSM による力学性能予測を試みたところ、5mm 厚さ試験体による曲げ試験およびセマクロ試験体の圧縮試験体による圧縮試験結果を再

現することが確認された。しかしながら、セマク口試験体の曲げ試験体による実験では、劣化性状が異なったことからその再現性は低いものであった。

以上まとめるに、環境作用（溶脱と化学的侵食）を受けるコンクリートの水和物量と空隙構造変化を予測できる物質移動-反応解析法と、環境作用による強度、弾性係数、破壊エネルギーの低下を考慮できる破壊解析法を組み合わせた準微視的統合解析法を開発し、セマク口のコンクリートの力学特性のモデル化を可能にした。

#### 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 7 件)

- 1) 三浦泰人, 佐藤靖彦, 中村光, 硫酸劣化したモルタルのセメント水和組織の変質と準微視的力学的性質との関係, コンクリート工学論文集, Vol.26, pp.1-9, 2015 (査読有)
- 2) 三浦泰人, 佐藤靖彦, メソスケールでのCa 溶脱により変化するモルタルの力学的性質と物理化学的性質の関係性評価, コンクリート工学論文集, Vol.25, pp.109-118, 2014 (査読有)
- 3) 三浦泰人, 佐藤靖彦, エトリンガイトおよび二セッコウの影響を考慮したモルタルの硫酸劣化解析, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.216-223, 2014 (査読有)
- 4) 今野克幸, 小野達仁, 佐藤靖彦, メソスケールでの引張強度のばらつきがコンクリートの圧縮破壊に及ぼす影響の解析的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.67-72, 2014 (査読有)
- 5) 城ヶ崎雄太, 横田弘, 橋本勝文, 佐藤靖彦, 三浦泰人, 塩化物イオンによるセメント硬化体の変質および物質透過性, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.13, pp.71-76, 2013 (査読有)
- 6) 三浦泰人, 佐藤靖彦, 今野克幸, Andreas Gerdes, イオン交換水に浸漬させたモルタルの物理化学的性質と力学的性質の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.355-360, 2013 (査読有)
- 7) 橋本勝文, 横田弘, 佐藤靖彦, 杉山隆文, 凍害および凍結防止剤散布に伴う水和生成相および引張特性の変化, セメント・コンクリート論文集, 第 65 号, pp.400-405, 2012 (査読有)

〔学会発表〕(計 8 件)

- 1) Taito Miura, Yasuhiko Sato and Hikaru Nakamura, Modeling of Physico-Chemical Property and Mechanical Characteristics of Meso-Scale Mortar Deteriorated by Ca

Leaching, Proceedings of 4<sup>th</sup> International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, November 17, 2014 (リーガロイヤルホテル・東京)

- 2) Taito Miura, Yasuhiko Sato, Takafumi Sugiyama, Katsufumi Hashimoto, and Hikaru Nakamura, Numerical Approach to Physico-Chemical Properties of Mesoscopic Mortar Deteriorated by CA Leaching, Proceedings of Third International Conference of Asian Concrete Federation, pp.862-868, September 22, 2014 (ソウル・韓国)
- 3) Taito Miura and Yasuhiko Sato, Modeling of tensile behavior of mortar immersed in solutions including chloride ions, Proceedings of the 2nd International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, April 11, No.30, 2012 (アムステルダム・オランダ)
- 4) Katsufumi Hashimoto, Hiroshi Yokota, Yasuhiko Sato and Taito Miura, Evaluation of Tensile Softening Behavior of Mortar under Freeze-Thaw Cycles with Different Temperature History, Proceedings of International Congress on Durability of Concrete, C4-3, June 19, 2012 (トロンハイム・ノルウェー)
- 5) 渡部孝彦, 佐藤靖彦, 準微視的スケールでの物理・化学的性質に及ぼす硫酸濃度の影響, 土木学会第 69 回年次学術講演概要集, pp.329-330, 2014/9/10 (大阪大学・豊中市)
- 6) 三浦泰人, 佐藤靖彦, 準微視的スケールに基づく直接二面せん断試験法に関する実験的検討, 第 67 回年次学術講演概要集, 505-506, 2012/9/6 (名古屋大学・名古屋市)
- 7) 渡部孝彦, 佐藤靖彦, 化学的劣化がメソスケールモルタルの寸法効果に及ぼす影響に関する解析的検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 70 号, E-30, 2014/2/1 (札幌コンベンションセンター・札幌市)
- 8) 大河内孝彦, 三浦泰人, 佐藤靖彦, 配合条件がモルタルの引張軟化特性に及ぼす影響, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 69 号, E17, 2013/2/2 (函館工専・函館市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

佐藤 靖彦 (SATO, Yasuhiko)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：60261327

##### (2) 研究分担者

杉山 隆文 (SUGIYAMA, Takafumi)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：70261865

##### (2) 研究分担者

橋本 勝文 (HASHIMOTO, Katsufumi)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：30609748