

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820177

研究課題名(和文) 硫酸作用を受けたセメント系材料のマイクロ-メソレベルの緻密化・膨張破壊モデルの開発

研究課題名(英文) Development of micro and meso scale densification and expansion model of cementitious material damaged by sulfuric acid solution

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：実験的検討：二次鉱物である二水セッコウの力学特性を評価することを目的として、二水セッコウが析出する細孔溶液中の拘束条件に着目して、二水セッコウ作製時の拘束圧の作用が二水セッコウの力学特性と密度に及ぼす影響を調査した。その結果、二水セッコウの力学特性と作製時の拘束圧には非常に高い相関関係があることを確認した。

解析的検討：硫酸塩劣化に伴う固液相の変質と膨張ひび割れ発現・進展挙動を再現可能な解析モデルを構築した。本解析モデルが非常に特徴的な膨張ひび割れ挙動を再現可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Experimental investigation: The influence of confinement pressure during making gypsum to mechanical behavior and density of gypsum was investigated to evaluate mechanical behavior of gypsum in pore solution. As a result, it was found that mechanical behavior of gypsum was strongly related to confinement pressure during making gypsum.

Analytical investigation: The analytical model that can reconstruct transformation of solid-liquid phase and manifestation and propagation of expansion cracking behaviors due to sulfate attack was proposed. It was confirmed that the proposed model can describe the signature cracking behavior due to sulfate attack.

研究分野：コンクリート材料

キーワード：硫酸塩劣化 剛体バネモデル 反応-拡散方程式 水和反応モデル 膨張ひび割れ エトリンサイト  
二水セッコウ

1. 研究開始当初の背景

下水道管路施設に用いられるコンクリート管路が硫酸作用を受けることで、道路などが陥没する事例が多数報告されている。現在、硫酸作用だけでなく自重や土圧などを常時受けるコンクリート管路の構造性能照査手法の確立が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、複合的な外力が作用するコンクリート管路の陥没現象を評価・予測可能な数値解析手法の確立を最終的な目的とした実験的・解析的研究を行う。具体的には、二次鉱物の力学特性を実験的に同定し、それらの関連からマイクロ・メソレベルの緻密化・膨張破壊モデルを開発する。さらに、硫酸作用の数値解析と準微視的構造解析から成る化学・力学連成解析システムの構築を行う。

3. 研究の方法

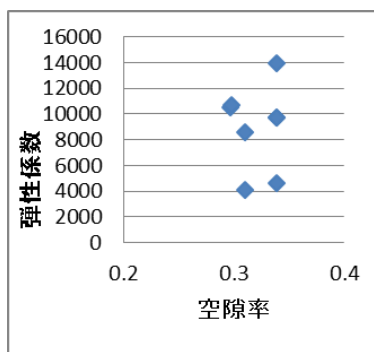
本研究では、水和物・モルタルレベルの力学特性の硫酸塩劣化による変化を把握するための実験的検討と、水和反応モデル、拡散-反応モデル、ひび割れ進展解析を連成させた解析システムの構築を目的とした解析的研究を行った。

4. 研究成果

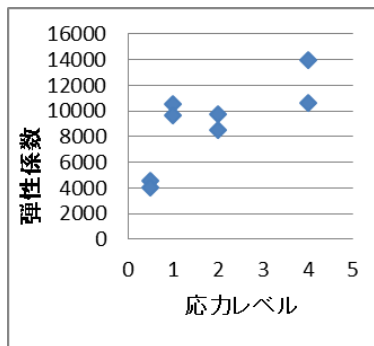
実験的検討・解析検討ごとに得られた研究成果を示す。

(1) 実験的検討

実験的検討では、マイクロ・メソレベルの領域を対象として各種実験を検討した。まず、マイクロレベルでは、二次鉱物である二水セッコウの力学特性の析出環境による影響を検討することを目的として、二水セッコウ作製時の外部拘束圧を種々変化させたときの硬



(a) 空隙率



(b) 応力レベル

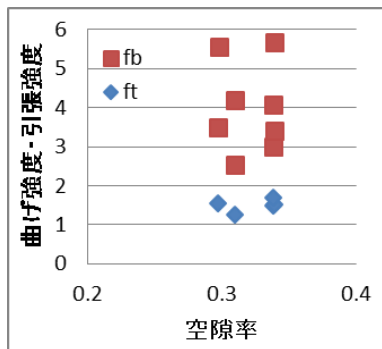
図-1 二水セッコウの弾性係数の推移

化後の力学特性と密度を同定した。その結果、図-1 に示すように、二水セッコウの力学特性と密度には相関は見られず、作製時に負荷した応力レベルと強い関係があることを確認した。すなわち、密度よりも析出環境の拘束状態によって力学特性が変化することを確認した。硫酸塩劣化に伴う力学特性の変化を予測可能なモデルは、当初、固相の変質から関連付けることを予定していたが、新たに析出環境の影響が大きく力学特性に及ぼす可能性が出てきた。

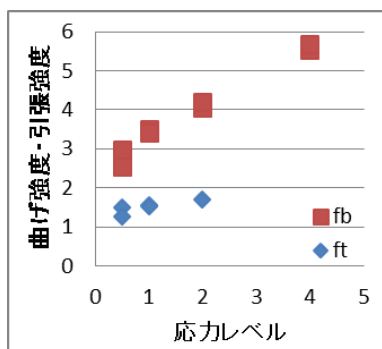
これには、二水セッコウの微細構造を分析するなどの多方面からのアプローチが必要であると考え、研究期間内では解明困難であることを踏まえて、解析的検討を主軸とした検討を行った。

(2) 解析的検討

解析的検討では、硫酸塩劣化によって生じる特徴的なひび割れ進展挙動を表現可能な解析モデルの構築を試みた。提案する解析手法はセメント種、配合、硫酸イオン濃度、pHといった材料条件、環境条件を表現可能なモデルであり、水和反応モデル、拡散-反応モデル、ひび割れ進展解析とを連成した解析システム(図-2)である。水和反応モデルは、丸山らの提案したCCBMを搭載した。硫酸イオンに関する拡散-反応モデルは、図-3に示すように、要素内に配置した一次元のパイプ要素によって拡散を考慮し、各タイムステップにおいて要素体積ごとの固相との反応をモデル化した。ひび割れ進展解析は三次元の剛体バネモデル(図-4)を用いて、エトリンガイトの析出量に応じた膨張ひび割れ発



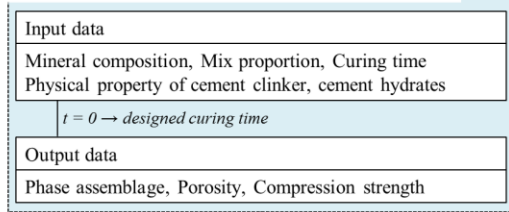
(a) 空隙率



(b) 応力レベル

図-1 二水セッコウの曲げ・引張強度の推移

CCBM: Computational Cement-Based Material Model



Diffusion-Reaction Model for External Sulfate Attack

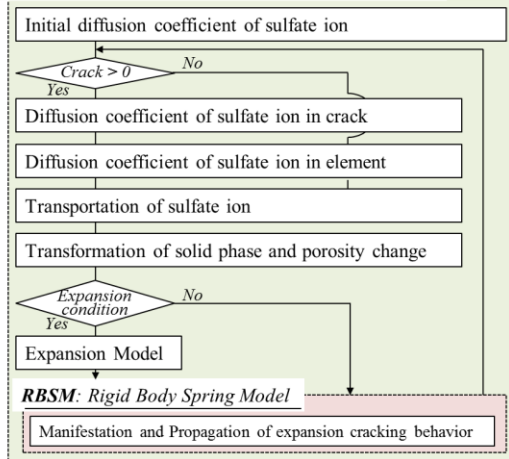


図-2 連成解析システムのフロー

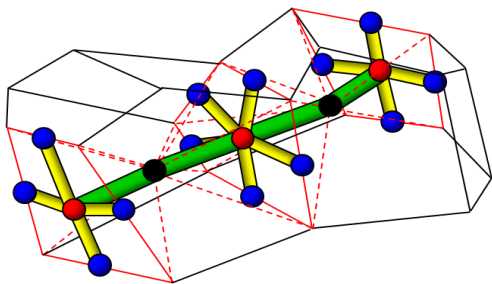


図-3 パイプ要素による拡散-反応モデル

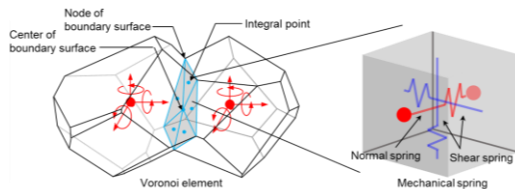
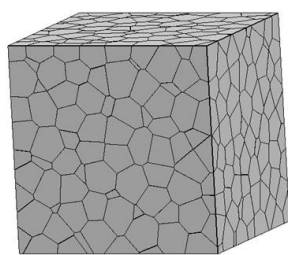


図-4 剛体バネモデル (RBSM)

現・進展挙動を再現した。なお、本提案モデルの特徴は、ひび割れ中のイオン移動を考慮可能である点である。

前述の通り、劣化に伴う固相の力学特性の変化は拘束状態の影響を受けることから、膨

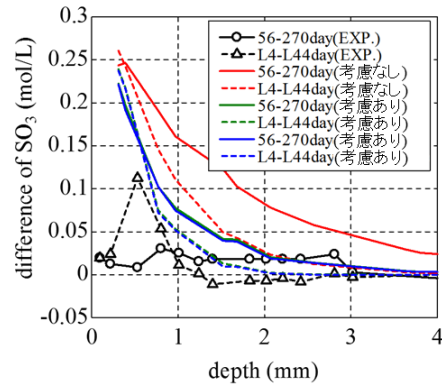


図-5 固相  $SO_3$  量の分布

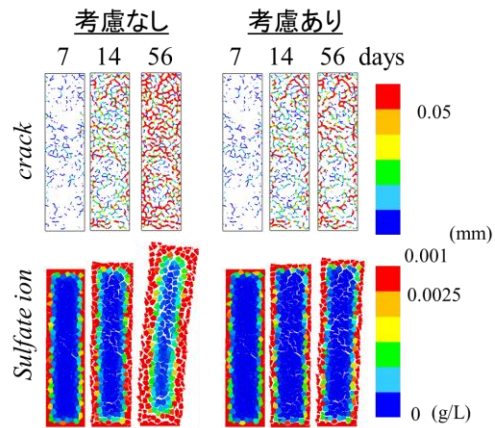


図-6 膨張ひび割れ進展挙動と硫酸イオン濃度の分布

張性を呈するエトリングイトによる膨張ひび割れを対象とし、そのひび割れ進展挙動に影響を及ぼしうる各種パラメータを解析的に評価した。その結果、硫酸塩劣化では、材料条件、環境条件の影響を顕著に受けてそのひび割れ性状が変化することを確認した。さらに、膨張ひび割れ自体が硫酸塩劣化のメカニズムに大きく関与している可能性を見出した。

膨張ひび割れ自体が硫酸塩劣化の現象に関与するメカニズムとしては、ひび割れ中に硫酸イオンが浸入することで、硫酸イオンに関する拡散・反応プロセスに影響を及ぼすというものである。具体的には、ひび割れ中のイオン移動を考慮することで、ひび割れが硫酸イオンの内部への拡散を抑制するバッファの役割を果たすというものである。このひび割れによるバッファ効果を考慮すると、実験で観察された膨張ひび割れ挙動と固相の変質領域を高精度に再現可能であることを確認した (図-5, 6)。

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 1 件)

- ① 三浦泰人, 山本佳士, 中村光, 外部硫酸

塩劣化による膨張ひび割れ進展挙動に関する解析的検討, 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, 査読有, Vol.16, 2016, 323-328

[学会発表] (計 1 件)

- ① Miura Taito, Yamamoto Yoshihito, Nakamura Hikaru, Fundamental Study of Crack Propagation of External Sulfate Attack with Mesoscale Analysis System for Coupled Chemo-Mechanical Behaviors, 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2016 (DOI: 10.21012/FC9.085)

[その他]

ホームページ等

[http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100007041\\_ja.html](http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100007041_ja.html)

## 6. 研究組織

### (1) 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