



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Multi-stage model for predicting the mechanical and durability characteristics of cement-based material [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	Siventhirarajah, Krishna
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14888号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85374
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Siventhirarajah_Krishnya_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博士 (工学)	氏名	Siventhirarajah Krishnya
審査担当者	主 査 准教授	エラクネス	ヨガラジャ
	副 査 教 授	佐藤 努	
	副 査 教 授	杉山 隆文	
	副 査 准教授	北垣 亮馬	

学位論文題名

Multi-stage model for predicting the mechanical and durability characteristics of cement-based material

(マルチステージモデルによるセメント系材料の力学特性及び耐久性予測)

モルタルやコンクリートなどのセメント系材料は世界の建設業界で最も広く使用されている建設材料である。セメント系材料は水和物、骨材、遷移帯などの多様なコンポーネントにより複雑な微細構造を形成している。セメントの組成に応じて、カルシウムシリケート水和物 (C-S-H)、水酸化カルシウム、エトリンサイト、ハイドロタルサイト、AFm 相などのさまざまな種類の水和生成物が形成される。主な水和生成物である C-S-H は、比表面積が大きく複雑な細孔構造を有し、さらに C-S-H は低密度 C-S-H(LD C-S-H) と高密度 C-S-H(HD C-S-H) の 2 つの異なる形態で存在することがよく知られている。また、セメント-骨材界面 (遷移帯) は、セメント粒子による通常の充填が妨げられるため骨材表面における壁効果によって形成され、遷移帯は、高い空隙率によりコンクリートやモルタル中の骨材やセメントマトリックスに比べて脆弱相と見なされる。前述のようにセメント系材料の微細構造は、機械的およびイオン拡散を支配する最も重要な要因です。また、セメント系材料の力学特性及び拡散性を予測することは非常に複雑なプロセスを伴っている。そのため、これまでに提案されているモデルの多くは、いくつかの仮定と簡略化を行っており、モデルの適用範囲やさらなる開発が制限されている。したがって、セメントの反応を現実に即してシミュレートするためには、水和反応のすべての構成要素を統合したモデルが必要である。そこで、本研究の目的は、微細構造からセメント系材料の機械的特性と拡散性能を予測するモデルを開発することである。

第 1 章では、本研究の背景と目的及び論文の構成・位置づけを示した。

第 2 章では、本研究に関連する既往の研究をレビューし、問題点を明らかにした。本章では、セメント、コンクリート、微細構造、ITZ および水和物の基礎について詳細に説明した。また、さまざまな環境条件におけるイオン (海水からの塩化物イオンと大気からの CO₂ ガス) 拡散後の水和生成物と細孔溶液中のイオン濃度の変化について詳しく説明した。さらに、セメント系材料の力学特性及び拡散性を予測する先行研究モデルの説明とその限界について述べた。

第 3 章では、HyMeC (Hydration and Mechanical properties of Cement-based material) と呼ばれる 2 ステージモデルを提案し、微細構造からセメントペーストの力学特性を予測した。まず、相対湿度、熱力学相平衡、セメント水和および体積変化のモデルを統合して水和生成物の体積分率を正確に予測した。続いて、セメントペーストの機械的特性を計算するために、C-S-H マトリックスから

始まり、2種類の C-S-H(低密度および高密度 C-S-H) の形成を考慮してセメントペーストに至るまで、3つの階層レベルによってマルチスケールモデルを開発した。C-S-H の体積分率と毛細管空隙による空隙率は、セメントペーストの機械的特性を決定する最も重要な要素であるため、ここでは C-S-H の空間比率を考慮した。提案したモデルによって予測した、相対湿度、化学収縮率、毛細管空隙率、圧縮強度、ヤング率、ポアソン比は、既往の実験結果とよく一致することを確認した。

第4章では、モルタルやコンクリートのヤング率およびポアソン比などの力学特性をナノスケールからコンクリートまでの拡張マルチスケールモデルによって評価した。提案したマルチスケールモデルでは、モルタル・コンクリートの微細構造は、骨材相(細骨材および粗骨材)、骨材界面にある ITZ 相、ペースト・モルタル相の3相と見なされる。主な入力項目は、セメントペーストと ITZ の微細構造であり、セメント水和-熱力学連成モデルを用いて養生時間の関数として予測され、ITZ の体積分率は、骨材の粒度分布に基づいて解析的に算出される。モルタルとコンクリートの力学特性を予測するためにマルチレベル均質化法(2相複合材料の3相球モデルに基づく)を実装した。ここでは、モルタル・コンクリートの第1レベルおよび第2レベルの均質化法によりペースト・モルタルおよび ITZ で構成される等価マトリックスが得られる。モルタルとコンクリートのモデルの予測を検証するため、予測値を既往の実験結果と比較した。また、モルタルとコンクリートの特性に ITZ が及ぼす影響についても検討を行った。

第5章では、セメントペースト中の塩化物イオンと二酸化炭素の拡散について検討を行った。セメント系材料の多次元・多種イオン輸送をシミュレートするために、MATLAB 言語をベースとした COMSOL-IPHREEQC インターフェースを開発した。イオン輸送計算には COMSOL Multiphysics を使用し、熱力学データベースを用いて IPHREEQC によって化学反応をシミュレートした。熱力学的な知見に基づき、物理的・化学的な相互作用を表現するために、相平衡モデルと表面錯形成モデルを用いた。提案したイオン輸送モデル (COMSOL-IPHREEQC) はセメント水和モデル (HyMeC-COMSOL-IPHREEQC) と統合され、輸送反応を伴いながら水和反応をシミュレートすることを可能とした。炭酸ガスと塩化物イオンの拡散は、飽和度、曝露溶液(塩化物イオンと大気中の炭酸ガス)の濃度、セメントマトリックスの空隙率に影響される。提案したモデルの妥当性を確認するために、過去に開発されたモデルと同様に、異なる実験結果を用いて検証を行った。

第6章では、本研究の成果を総括し、今後の課題について述べた。提案した HyMeC モデルと HyMeC-COMSOL モデルによって予測した計算結果は実験結果とよく一致すること示し、実現象をよくシミュレートできることを示した。さらに、モルタルとコンクリートの圧縮強度予測、モルタルとコンクリートの多種イオン拡散予測、混和材の影響などのモデル拡張を今後の研究課題として示した。

以上、これを要するに、著者はコンクリート中のナノスケールであるカルシウムシリケート水和物 (C-S-H) の種類とそれらの特性がセメント系材料の力学特性に及ぼす影響に関して、新しいモデルを提案し、加えてコンクリート劣化機構である塩化物イオンの拡散及び炭酸化を予測するマルチスケールモデルを提案した。これは資源工学およびコンクリート工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。