

## 審査の結果の要旨

氏名 金志訓

金志訓氏の博士論文「ケイ酸塩系補修材を用いたセメント硬化体の物性変化に関する研究」は、全7章で構成され、各章の概要及び主な内容が下記のように構成されている。

第1章では、本研究の背景・目的および論文の構成を整理している。

第2章では、既往研究に関する文献調査結果を整理している。まず、ケイ酸塩系補修材の適用状況および耐久性に関する文献調査から、ケイ酸塩系補修材の種類、添加目的、補修効果について整理している。ここでは、特に、補修された表面がアルカリ成分の投入により、C-S-H およびその他の水和物の化学的変化が予想され、またケイ酸塩系補修材によって新たに生成される水和物も C-S-H に近い特性を現すものの、ケイ酸塩系補修材が当初想定していた補修メカニズムと異なる変化が生じている可能性について報告している。さらに、ケイ酸塩系補修材によって生成された水和物が、二酸化炭素や塩素によってどのような変化をするか、といった長期的な物性変化に関する近年の研究動向についても報告しており、本研究の主旨である、ケイ酸塩系補修材とセメント系水和物の反応メカニズムの究明の必要性という方向性を的確に定めている。また、本研究で使った NMR の測定原理およびセメント・コンクリート分野に活用されている NMR の研究事例についても報告を行っている。

第3章では、ケイ酸塩系補修材を用いた補修反応によるセメント硬化体の化学的変化に関する検討を行っている。ケイ酸塩系補修材として、ケイ酸ナトリウムを用いてセメント硬化体との反応実験を行い、TG-DTA, XRD, NMR を用いた測定により、各水和物の化学的変化を観測している。また、粉末のサンプル以外にプレート状のサンプルを用いたケイ酸塩系補修材の浸漬実験を行い、FT-IR および Raman spectroscopy の測定により補修された表面の化学的な変化を観察している。ここで得られた結果により、ケイ酸ナトリウムがセメント硬化体中のアルミネート系水和物の構造を変化させ、そこで溶出した Al が C-S-H 中の Si 原子と置換して C-A-S-H と呼ばれる構造に変化した可能性がある点を実験データによって指摘している。

第4章では、ケイ酸塩系補修材を施したセメント硬化体の炭酸化反応について検討している。第3章で活用したセメントペーストサンプルおよびプレートサンプルを炭酸化促進装置を用いて促進炭酸化させ、炭酸化による変化およびケイ酸塩系補修材の影響を XRD, NMR, FT-IR および Raman spectroscopy の測定により化学分析している。ここで、得られた結果により、補修部分に形成された新しい固相は、補修されていないセメント硬化体よりも炭酸化反応が促進されやすく、補修材を塗ったにもかかわらず炭酸化抑制に悪影響を与える可能性がある点を指摘している。

第5章では、合成カルシウムシリケート水和物および合成アルミネート水和物とケイ酸塩系補修材の反応実験を行い、補修反応および炭酸化における変化のメカニズム究明に関する検討を行っている。これは、第3章および第4章において実施したセメント硬化体を用いた同様の実験によって、各合成水和物とケイ酸塩系補修材との反応を詳しく調べている。これは、補修材

が各水和物に与える影響や反応メカニズムをより正しく理解しようとする意図がある。その結果、ケイ酸塩系補修材は、確かに、Na の存在によってカルシウムアルミネート系水和物の構造を変化させ、そこで溶出した Al によってカルシウムシリケート系水和物が C-A-S-H 構造に変化することが実験的に確認されている。

第 6 章では、第 3 章から第 5 章で得られた結果に基づき、本研究で使ったケイ酸塩系補修材のアルカリ成分である Na がセメント硬化体に及ぼす影響を考察している。具体的には、補修後のセメント硬化体において外部水分などにより Na が溶出する可能性と、炭酸化によって Na が拡散する可能性について検討している。まず、ケイ酸塩系補修材を適用した実際のコンクリート構造物から採取した試験体を、XRD および EPMA によって分析することで補修材塗布表面からの深さ方向距離ごとに各成分の測定を行っている。その結果、Na 成分の内部拡散と表面部分からの外部溶出の可能性のあることを指摘している。さらに、外部水分および炭酸化による Na 溶出を実験的に確認するために、セメント硬化体を用いた溶出実験を行い、ケイ酸塩系補修材を施したセメント硬化体には溶出しやすい Na をもつ生成物が存在することを明らかにしている。

最後に、耐久性の性能評価指標として、ケイ酸塩系補修材を含む各種の補修材を塗布したプレートサンプルの炭酸化後の含水率経時変化および水蒸気拡散係数を算出し、ケイ酸塩系補修材で補修されたセメント硬化体表面が炭酸化された場の物質移動抵抗性の変化についても考察を加えている。

第 7 章では まとめとして、前章までに明らかにしてきたケイ酸塩系補修材とセメント硬化体の補修反応メカニズムや炭酸化における物性変化のメカニズムをもとに、既設のコンクリート構造物を補修するためにケイ酸塩系補修材が用いられる場合と、新設のコンクリート構造物の予防保全として用いられる場合とに分け、考えられるコンクリート構造物の表層部分の化学的変化とそれによって起こると考えられる具体的な現象を整理し、本研究の成果および今後の課題について総括している。

以上より、金 志訓 氏の博士論文では、これまで明らかにされてこなかったケイ酸塩系補修材によって補修されたセメント系水和物の変化を化学的に検討するため、ケイ酸ナトリウムを用いたケイ酸塩系補修材とセメント硬化体や純薬合成された各水和物との反応実験を実施している。さらに、NMR, XRD, FTIR, Raman といったセメント化学分野で基礎実験に近年用いられつつある先端的な分析手法を補修材とセメント硬化体の化学分析に適用している。その結果、アルミネート系水和物の構造変化により、カルシウムシリケート系水和物中の Si が Al に置換され C-A-S-H 構造が生成されることを明らかにし、さらに生成された物質が炭酸化反応に対して脆弱である可能性を指摘している。この反応メカニズムは、実際にケイ酸塩系補修材が適用された現場コンクリートとの比較においても整合性が取れるものであり、社会背景的にも極めて重要で、先端的な研究内容となっていると考えられる。

よって、本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。