

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	SiO ₂ ・Al ₂ O ₃ を高含有する微粒子混和材を用いたコンクリートの各種性状に関する実験的研究
氏 名	大和 功一郎

海岸付近あるいは凍結防止剤が散布される地域の鉄筋コンクリート構造物では、塩化物によって著しい鋼材腐食が引き起こされる場合がある。また、今後の更新費・修繕費を低減するためには、耐塩害性だけでなく耐久性の高いコンクリート構造物を構築する必要がある。コンクリート材料による耐久性向上策として、これまで、高炉スラグ微粉末・フライアッシュ・シリカフューム、あるいはこれらをプレミックスしたセメントなどが用いられてきた。このような材料を取り扱う場合、所要量が比較的多いことから、サイロなどの設備が必要となったり、コンクリートの初期強度が低くなったりするなどの問題があった。そこで本研究では、コンクリートミキサへ直接人力で投入できる程度に少量の使用量（コンクリート 1m³あたりのセメント質量置換で 20～40kg）で塩化物浸透抵抗性、強度発現性およびその他の耐久性に優れる混和材（耐塩害性の向上を主目的とすることから、以下、耐塩害用混和材と称する）を開発した。この混和材は、SiO₂、Al₂O₃などの化学成分を含む、BET 比表面積が 13 万～14 万 cm²/g の鉱物質微粉末であり、ポゾラン反応性を有するものである。

本研究では、開発した混和材をセメントに対して質量置換したコンクリートの塩化物浸透抵抗性、その他の耐久性および強度発現性などを実験的に評価した。さらに、細孔構造を調べ、硬化体の緻密さを評価するとともに、フリーデル氏塩などとして固定される塩素量などを調べ、塩化物浸透抵抗性が向上するメカニズムについて考察した。

本論文は、全 6 章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。

第 1 章「序論」では、耐塩害性をはじめとしたコンクリート構造物の耐久性が必要とされている背景を述べるとともに、コンクリートの耐塩害性を向上させるための既往技術とその問題を整理し、本研究で取り扱う耐塩害用混和材の特長を示した。そのうえで、本研究の目的を示した。

第 2 章「既往の研究」では、各種混和材を使用したコンクリートの塩化物浸透抵抗性とその機構、およびその他の耐久性に関する諸性状について既往の研究を調査・整理した。既往の研究を整理することで本研究の位置づけと目的を明確にしている。特に耐塩害用混和材を用いたコンクリートの塩化物浸透抵抗性および諸性状の評価と、塩化物浸透抵抗性が向上する機構を解明するための参考とした。

第 3 章「耐塩害用混和材を用いた蒸気養生コンクリートの塩化物浸透抵抗性および諸性状」では、耐塩害用混和材をプレキャストコンクリート製品へ適用することを想定し、本混和材をセメントの一部に置換したコンクリートを蒸気養生した場合の塩化物浸透抵抗性、強度発現性およびその他の耐久性を実験により評価した。塩化物浸透抵抗性について、耐塩害用混和材を普通ポルトランドセメントに置換したコンクリートは、汎用的な他の混和材を用いたコンクリートよりも拡散係数は小さくなった。また、本混和材を用いたコンクリートは、強度発現性やその他の耐久性にも優れることがわかった。

第 4 章「耐塩害用混和材を用いた標準養生コンクリートの塩化物浸透抵抗性および諸性状」では、耐塩害用混和材を現場打ちコンクリートで活用することを想定し、標準養生したコンクリートを対象として、耐塩害用混和材を使用した配合について、塩化物浸透抵抗性、その他の耐久性および強度発現性を実験により評価した。塩化物浸透抵抗性について、耐塩害用混和材

を普通ポルトランドセメントに置換したコンクリートは、他の混和材を置換したコンクリートよりも拡散係数は小さくなった。また、初期強度発現性に加え、その他の耐久性にも優れることがわかった。以上から標準養生した場合も蒸気養生した場合と同様に、耐塩害用混和材の使用がコンクリートの諸性質の向上に寄与することがわかった。

第5章「耐塩害用混和材を用いたコンクリートの耐塩害性向上のメカニズム」では、耐塩害用混和材を使用したコンクリートの塩化物浸透抵抗性向上の機構について、実験的に調べた。本研究では塩化物浸透抵抗性向上の機構として、硬化体の緻密化による物理的作用および塩化物イオンの固定化作用に着目した。物理的作用については細孔径分布を測定し、直径 $0.1\mu\text{m}$ 以上の細孔容積が減少し、 $0.01\mu\text{m}$ 以下の微細な空隙が増加するなど、緻密化することがわかった。固定化作用については、セメントペーストによる塩水浸せき試験により、耐塩害用混和材の置換率が大きいほど、フリーデル氏塩等として固定される塩化物イオン量が増加することがわかった。これらの機構により塩化物浸透抵抗性が向上できるものと考えられた。

第6章「結論」では、本研究で得られた結果をまとめるとともに、今後の課題や展望について言及した。

以上

(様式17号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院創成科学研究科

報告番号	創科博甲 第 4 号	氏名	大和 功一郎
最終試験担当者	主査 吉武 勇 審査委員 中村 秀明 審査委員 麻生 稔彦 審査委員 李 柱国 審査委員 高海 克彦		
【論文題目】 SiO ₂ ・Al ₂ O ₃ を高含有する微粒子混和材を用いたコンクリートの各種性状に関する実験的研究			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 海岸付近あるいは凍結防止剤が散布される地域の鉄筋コンクリート構造物では、塩化物によって著しい鋼材腐食が引き起こされる場合がある。また、今後の更新費・修繕費を低減するためには、耐塩害性だけでなく耐久性の高いコンクリート構造物を構築する必要がある。コンクリート材料による耐久性向上策として、これまで、高炉スラグ微粉末・フライアッシュ・シリカフューム、あるいはこれらをプレミックスしたセメントなどが用いられてきた。このような材料を取り扱う場合、所要量が比較的多いことから、サイロなどの設備が必要となったり、コンクリートの初期強度が低くなったりするなどの問題があった。そこで大和氏の研究では、コンクリートミキサへ直接人力で投入できる程度に少量の使用量（コンクリート1m ³ あたりのセメント質量置換で20～40kg）で塩化物浸透抵抗性、強度発現性およびその他の耐久性に優れる混和材（耐塩害性の向上を主目的とすることから、以下、耐塩害用混和材と称する。）を開発し、その特性について調べている。なお、この混和材は、SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ などの化学成分を含む、BET比表面積が13万～14万cm ² /gの鉱物質微粉末であり、ポゾラン反応性を有するものである。 本研究では、開発した混和材をセメントに対して質量置換したコンクリートの塩化物浸透抵抗性、その他の耐久性および強度発現性などを実験的に評価している。さらに、細孔構造を調べ、硬化体の緻密さを評価するとともに、フリーデル氏塩などとして固定される塩素量などを調べ、塩化物浸透抵抗性が向上するメカニズムについて考察している。 本論文は、全6章の構成であり、各章の内容は以下のとおりである。 第1章「序論」では、耐塩害性をはじめとしたコンクリート構造物の耐久性が必要とされている背景を述べるとともに、コンクリートの耐塩害性を向上させるための既往技術とその問題点を整理している。そして本研究で取り扱う耐塩害用混和材の特長を示した上で、本研究の目的を明らかにしている。 第2章「既往の研究」では、各種混和材を使用したコンクリートの塩化物浸透抵抗性とその機構、およびその他の耐久性に関する諸性状について既往の研究を調査・整理している。特にこの章では、耐塩害用混和材を用いたコンクリートの塩化物浸透抵抗性および諸性状の評価と、塩化物浸透抵抗性が向上する機構を解明するために参考とした研究を中心にレビューしている。これらの既往の研究のレビューを通じて、本研究の位置づけと目的を明確にしている。 第3章「耐塩害用混和材を用いた蒸気養生コンクリートの塩化物浸透抵抗性および諸性状」では、耐塩害用混和材をプレキャストコンクリート製品へ適用することを想定し、本混和材をセメントの一部に置			

換したコンクリートを蒸気養生した場合の塩化物浸透抵抗性、強度発現性およびその他の耐久性を実験により評価している。研究結果より塩化物浸透抵抗性について、耐塩害用混和材を普通ポルトランドセメントに置換したコンクリートは、汎用的な他の混和材を用いたコンクリートよりも拡散係数は小さくできることを示している。また、耐塩害用混和材を用いたコンクリートは、強度やその他の耐久性にも優れることを報告している。

第4章「耐塩害用混和材を用いた標準養生コンクリートの塩化物浸透抵抗性および諸性状」では、耐塩害用混和材を現場打ちコンクリートで活用することを想定し、標準養生したコンクリートを対象としている。この章では耐塩害用混和材を使用した配合について、塩化物浸透抵抗性、その他の耐久性および強度発現性について実験の評価を行っている。その結果、塩化物浸透抵抗性に関して、耐塩害用混和材を普通ポルトランドセメントに置換したコンクリートは、他の混和材を置換したコンクリートよりも拡散係数は小さくできることを報告している。さらに、初期強度発現性に加え、その他の耐久性にも優れることも示している。これらの結果から、標準養生した場合も蒸気養生した場合と同様に、耐塩害用混和材の使用がコンクリートの諸性質の向上に寄与できると結論づけている。

第5章「耐塩害用混和材を用いたコンクリートの耐塩害性向上のメカニズム」では、耐塩害用混和材を使用したコンクリートの塩化物浸透抵抗性向上の機構について調べている。特に本研究では、塩化物浸透抵抗性向上の機構として、硬化体の緻密化による物理的作用および塩化物イオンの固定化作用に着目している。物理的作用については細孔径分布を測定し、直径 $0.1\mu\text{m}$ 以上の細孔容積が減少し、 $0.01\mu\text{m}$ 以下の微細な空隙が増加するなど、緻密化することが確認されている。また固定化作用については、セメントペーストによる塩水浸せき試験により、耐塩害用混和材の置換率が大きいほど、フリーデル氏塩等として固定される塩化物イオン量が増加する結果を得ている。これらの機構により塩化物浸透抵抗性が向上できるものと考察している。

第6章「結論」では、本研究で得られた結果をまとめるとともに、今後の課題や展望について整理している。

公聴会には、学内外から 48 名の聴講者があった。公聴会での主な質問は、(本混和材を混ぜることによる)減水率などの配合設計に関する事項、練混ぜ性能や攪拌時間への影響、自己収縮ひずみについて、強度発現性の特徴、中性化の懸念と塩化物抵抗性への影響、塩化物イオンの固定機構について、エトリンガイトの遅延生成 (DEF) の可能性について、他の化学成分の役割、などであった。いずれの質問に対しても発表者から適切な回答がなされた。

以上より、本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士 (工学) の論文に十分値するものと判断した。論文内容及び審査会、公聴会での質疑に関する応答などから、最終試験を合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである (関連論文：計 4 編、参考論文：計 8 編)。

【主な関連論文】

1. 大和功一郎, 石田剛朗, 山地功二, 津郷俊二, 吉武 勇: 耐塩害用混和材を用いた蒸気養生コンクリートの耐久性, 材料, Vol.66, No.5, pp.328-333, 2017.
2. 大和功一郎, 山地功二, 吉武 勇: 耐塩害用混和材を用いたコンクリートの諸性状, セメント・コンクリート論文集, 2017, No.71, 2018. (掲載決定) ほか