

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	高浸透性型けい酸塩系改質材を用いた火害を受けたコンクリートの補修技術に関する研究
氏名(Name)	北田 達也

近年、環境負荷やライフサイクルコストの低減の観点から、既存の構造物を補修・補強しながら使い続けることが求められている。コンクリートの主要な劣化機構としては、中性化、塩害、アルカリシリカ反応、凍害、および火害などが挙げられる。これらの劣化は、コンクリートやその内部の補強材に化学的・物理的变化をもたらし、コンクリート構造物の耐力や耐久性を低下させる。構造物の健全性を保ち、長寿命化を図るには、劣化要因に応じて適切な補修・補強を施すことが必要である。

火害を受けたコンクリートは、表層に限らず内部まで劣化が生じ、構造物の性能低下を引き起こす。表面含浸工法やひび割れ注入工などの既往技術では、内部の劣化を補修できず、コンクリートの力学性能や耐久性を回復させることは難しい。そのため、火災後の対策としてコンクリートの強度が要求値以下になった場合、劣化部をはつり取って打ち直すことが一般的である。

本研究では、火害を受けたコンクリートを表層から内部にわたって改質し、力学性能および耐久性を回復させる補修技術の開発を目的に、高浸透性を有するけい酸塩系改質材を検討した上で、高温加熱を受けたコンクリート供試体を用いて補修効果とその影響要因を考察した。さらに、改質材を圧入工法に適用して高温加熱を受けた大型供試体の補修実験を行い、補修効果や補修範囲について、詳細に検討した。また、改質材の火害以外への適用検討として、低品質のコンクリート供試体に改質材を適用し、その効果を検証した。

本論文は全6章で構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第1章 序論

コンクリートの劣化要因、国内の火災発生状況、火災後の診断・補修方法の現状および取り組むべき課題を整理した。また、火災後のコンクリートの劣化および性能回復、コンクリートの改質材について既往研究をレビューした。さらに、本研究の目的と内容、論文の構成および各章の概要を述べた。

第2章 高浸透性型けい酸塩系改質材の検討

けい酸塩系表面含浸材の1種であるけい酸リチウムに、水酸化ナトリウムを添加した高浸透性とコンクリートの改質効果を有する改質材を検討した。改質材の適切な調合を明らかにするために、けい酸リチウムに添加する水酸化ナトリウムの量と、改質材のコンクリートへの浸透性の関係に着目して実験を行った。さらに、改質材とコンクリート中の水酸化カルシウムの反応に着目し、熱重量示差熱分析およびX線回折分析を行い、水酸化ナトリウムの添加による改質材の浸透性向上と改質のメカニズムを考察した。その結果、浸透性の観点から、改質材のNa/Siモル比が0.50~1.25の範囲が適切であることが分かった。

第3章 加熱で劣化した小型供試体の改質材による補修実験

第2章で開発した改質材を用いて, 300~650°Cで加熱した普通強度から高強度の5種類のコンクリート供試体の補修実験を行った. 加熱前の強度, 加熱温度, 加熱後の冷却方法および養生方法を影響要因とし, 改質材による補修がコンクリートの力学性能, 中性化抵抗性および耐凍害性などに与える影響について考察を行った. その結果, 改質材を用いた補修により, 高温加熱で劣化したコンクリートの力学性能および耐久性が回復することを明らかにした.

第4章 加熱で劣化した大型供試体の改質材による補修実験

改質材による火害を受けたコンクリートの補修技術の実用化を目的に, 改質材を簡易型亜硝酸リチウム内部圧入工法に用いられる圧入工法に適用し, 火災を模して ISO834 標準加熱曲線に準じて2パターンの加熱持続時間で加熱した大型供試体の補修実験を行った. 補修前後の性能比較(圧縮強度, 中性化抵抗性, 塩化物イオン浸透抵抗性など)を行い, 補修効果と圧入工法への適用性を考察した. その結果, 浸透範囲は注入孔から中心に水平方向に直径430~500mm程度と良好な結果が得られ, 圧入工法に適用可能なことが認められた. また, 改質材の浸透が十分であった範囲の圧縮強度と耐久性は, 加熱前と同水準まで回復したことを明らかにした.

第5章 改質材の火害以外への適用に関する検討

改質材の火害以外への適用可能性の検討として, 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説(JASS5)を満たさない調合で作製した低品質のコンクリート供試体の改質を行い, 改質前後の力学性能, 中性化抵抗性, 耐凍害性および体積変化などについて考察した. その結果, 強度20~25N/mm²程度のコンクリートは改質により力学性能が向上することが分かった. また, 中性化抵抗性, 耐凍害性および緻密性も改善することが認められた.

第6章 結論および今後の課題

本研究で得られた知見をまとめるとともに, 実用化に向けた今後の課題について整理した.

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目
(Dissertation Title)

Development of Repair Technology for Fire-Damaged Concrete with Highly Permeable Silicate Modifier

氏 名(Name)

Tatsuya KITADA

In recent years, repair existing structures for extending the lifespans of structures has been emphasized from the perspectives of reducing environmental impact and cost in life cycle. Major deterioration of concrete includes carbonation, chloride attack, alkali-silica reaction (ASR), frost damage, and fire damage, etc. The chemical and physical degradation in concrete and embedded steel reinforcement, reduces the strength and durability of reinforced concrete structures. Ensuring structural integrity and extending service life require appropriate repair and reinforcement strategies.

Although fire damage is less frequent compared to other deterioration, it significantly affects both surface layer and internal concrete, leading to a substantial decline in structural performance. Current repair techniques, such as surface impregnation and crack repairing, cannot address internal damage of concrete, making it difficult to restore mechanical properties and durability of whole concrete. Consequently, deteriorated areas are typically removed and rebuilt.

This study focuses on developing an effective repair technology for fire-damaged concrete from surface to interior. A series of experiment were conducted to restore the mechanical properties and durability of fire-damaged concrete using the highly permeable silicate modifier developed in this study. Furthermore, the applicability of the modifier to improve the properties of low-quality or generally deteriorated concretes was explored.

This doctoral thesis consists of six chapters, which were summarized, respectively, as follows:

Chapter 1: Introduction

The deterioration factors of concrete, domestic fire situation, current repair methods of concrete after fire, and associated challenges were described. Related studies were reviewed to clear up the issues of property recovery of fire-damaged concrete. Finally, the objectives, and chapter outlines of this thesis were presented.

Chapter 2: Development of Highly Permeable Silicate Modifier

Lithium silicate, a typical silicate-based surface impregnation material of concrete, was modified by adding sodium hydroxide to enhance its permeability and modification effect on concrete. Experiments were conducted to determine the optimal mix proportions, through examining the relationship between the blending amount of sodium hydroxide and the penetration depth in various strength concretes, including heated concrete. Analytical techniques, including thermogravimetric-differential thermal analysis (TG-DTA) and X-ray diffraction (XRD), were used to investigate the high permeability mechanism of this new modifier, through examining the reaction behaviors between the new modifier and calcium hydroxide in concrete. The experimental and analytical results indicated that the modifiers with a Na/Si molar ratio of 0.50–1.25 have high permeability, and the addition of

NaOH retards the reaction between Si^{4+} of Lithium Silicate and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in concrete, thus increasing the permeability of Lithium Silicate.

Chapter 3: Repair Experiments of Heat-Damaged Concrete Specimens

Repair experiments were conducted on the concrete specimens, which were produced with five different mixtures ranging from normal to high strength, used for the JIS property test of concrete, and heated to 300–650°C. The effects of heating temperature, cooling method, and re-curing condition, and repair with the new modifier on the property recovery of heated concrete were investigated, including mechanical properties, carbonation resistance, and freeze-thaw resistance. The experimental results indicate that the highly permeable modifier significantly restored both the mechanical properties and durability of heated concrete.

Chapter 4: Repair Experiments of Large-Scale Fire-Damaged Concrete Panels

To achieve the practical application of the new modifier for post-fire concrete, the pressure injection method, which has been used in lithium nitrite injection for ASR measure, were adapted in the concrete repair with the new modifier. Large-scale concrete panels were heated under two scenarios of heat-lasting time, according to the ISO834 standard heating curve. The new modifier solution was injected under sustained pressure (0.8MPa) for up to 45 hours, achieving a penetration range of approximately 430–500 mm from per injection hole. The results demonstrate that the pressure injection method was applicable for the new modifier, and the compressive strength and durability of concrete in sufficiently penetrated areas can recover to the levels before heating.

Chapter 5: Application of the Repair Material to Non-Fire-Damaged Concrete

To broaden the applicability of the new modifier to non-fire-damaged concrete, the modifier was applied to the concretes with low quality, which were fabricated with the mix proportions that do not meet the specifications of the Japan Architectural Standard Specification for Reinforced Concrete Work (JASS5). The mechanical properties, carbonation resistance, freeze-thaw resistance, and length change, etc. before and after the application of the new modifier were investigated. The results revealed that the application of the new modifier can improve the mechanical properties of low-quality concrete. The improvements in carbonation resistance, freeze-thaw resistance, and air permeability were also confirmed, but the size of concrete almost did not change after the modification.

Chapter 6: Conclusions and Future Works

The findings of this study were summarized, and future works for the practical application of the new modifier were described.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	北田 達也
審 査 委 員	主 査： 李 柱国
	副 査： 中村 秀明
	副 査： 吉武 勇
	副 査： 山田 和彦
	副 査： 山田 悠二
	副 査： 小澤 満津雄 (外部審査委員)
論 文 題 目	高浸透性型けい酸塩系改質材を用いた火害を受けたコンクリートの補修技術に関する研究 (Development of Repair Technology for Fire-Damaged Concrete with Highly Permeable Silicate Modifier)
<p>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</p> <p>近年、環境負荷やライフサイクルコストの削減の観点から、既存の構造物を補修・補強しながら長寿命化を図ることが求められている。コンクリート構造物は長年の使用に伴い、初期欠陥や外的要因により力学性能や耐久性が低下する劣化が生じる可能性が高く、補修・補強技術が不可欠である。しかし、既存のひび割れ補修や表面含浸の技術では、内部の劣化部分を含むコンクリート全体の補修や改質は困難であり、現状では劣化部をはつりとった後に打ち直す処理が一般的である。特に、火災により内部にまで劣化が及んだコンクリートに対する補修方法は、まだ確立されていない。</p> <p>そこで、本研究では、火害を受けたコンクリートの補修技術開発という課題に取り組み、表層から内部まで改質することで、力学性能および耐久性を回復させる補修技術の開発を目指している。この目的を達成するため、高浸透性ケイ酸塩改質材を開発し、高温加熱により劣化したコンクリートテストピースおよび大型コンクリート試験体を用いた補修実験を実施した。さらに、火害以外の要因で劣化をしたコンクリートへの、本改質材の適用性についても検討を行った。</p> <p>本論文は5章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。</p> <p>第1章では、コンクリートの劣化要因、国内の火災発生状況、火災後の診断・補修方法の現状と課題について整理した。また、コンクリート改質材に関する既往研究をレビューし、問題点を明らかにした。さらに、本研究の目的と内容を述べた。</p> <p>第2章では、けい酸塩系表面含浸材の1種類であるけい酸リチウムに水酸化ナトリウムを添加することで高浸透性けい酸塩系改質材を開発した。水酸化ナトリウムの添加量が改質材の浸透性およびセメント成分と混合した後の固化時間に与える影響を実験的に調べ、適切な調合を明らか</p>	

(様式 9 号)

にした。重量示差熱分析および X 線回折分析により、水酸化ナトリウム添加による改質材の浸透性向上と改質機構を考察した。その結果、Na/Si モル比が 0.50~1.25 の範囲で良好な浸透性が得られることが分かった。

さらに、第 2 章で開発した改質材を用い、高温加熱により劣化したコンクリートの補修効果を検証した。第 3 章では、普通強度から高強度 (5 種類) の小型コンクリート供試体を 300~650°C で加熱後、改質材で補修し、強度、加熱温度、冷却方法、養生方法を影響因子として、力学性能、中性化抵抗性、耐凍害性、乾燥収縮抵抗性への影響を評価した。その結果、改質材の適用により、高温加熱で劣化したコンクリートの力学性能および耐久性が回復することを明らかにした。第 4 章では、火災を模擬した ISO834 標準加熱曲線で加熱した大型コンクリート供試体に対し、内部圧入工法を用いて改質材による補修を実施した。補修前後の圧縮強度、中性化抵抗性、耐凍害性、塩化物イオン浸透抵抗性を比較し、有効な補修範囲を検討した結果、最大 45 時間の連続加圧注入により、改質材は注入孔から水平方向に直径 430~500mm の範囲に浸透した。さらに、改質材が十分に浸透した範囲では、圧縮強度と耐久性が加熱前と同水準まで回復したことから、本改質材と内部圧入補修工法の有効性と実用性が確認された。

第 5 章では、改質材の火災以外の劣化への適用可能性を検討するため、日本建築学会 建築工事標準仕様書・同解説 (JASS 5: 鉄筋コンクリート工事) に適合しないコンクリート供試体を用いて、改質材による力学性能、中性化抵抗性、耐凍害性、体積変化への影響を評価した。その結果、圧縮強度 20~25N/mm² のコンクリートは、改質により力学性能が向上し、中性化抵抗性、耐凍害性、緻密性も改善することが確認された。

第 6 章では、本研究で得られた知見を総括し、実用化に向けた今後の課題を整理した。

対面とオンライン併用の形式で開催された公聴会には、学内外から 34 名が参加した。公聴会では、火災に対する改質材と補修工法の適用範囲、混合セメントを用いたコンクリートや鉄筋コンクリートへの適用性、コンクリートの微視的構造の変化による改質効果の確認、コンクリートの付着強度および靱性などへの影響、補修効果の非破壊検査技術、補修後の二次火災への対応、内部圧入補修工法の検討目標、本補修材料と技術の今後の展開などについて、活発な質疑応答が行われた。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

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、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである (4 編)。

- 1) Tatsuya Kitada and Zhuguo Li, Development of Silicate-Based Surface Impregnation Solution with High Permeability for Restoration of Degraded Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 22, pp. 294-310, 2024.6
- 2) 北田達也, Nguyen Van Son, 李柱国: 大型供試体を用いた高浸透型含浸材による火災損傷コンクリートの補修効果の検討, 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, Vol.24, pp.113-118, 2024.10
- 3) 李柱国, 北田達也: 高浸透型けい酸塩含浸材による低品質コンクリートの性能向上技術に関する研究, 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. 24, pp. 257-262, 2024.10
- 4) Zhuguo Li and Tatsuya Kitada, Performance Recovery of Fire-damaged Concrete by Impregnation of NaOH-added Lithium Silicate, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.22, pp.751-768, 2024.12.