

博士學位論文

内容の要旨

及び

審査の結果の要旨

第24号

令和6年3月

足利大学

は し が き

本号は学位規則（昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号）第 8 条による公表を目的として、令和 6 年 3 月期に本学において博士の学位を授与した者の論文内容の要旨及び論文審査結果の要旨をここに公表する。

目 次

学位の種類	学位記番号	氏 名	論 文 題 目	頁
博士(工学)	博甲第 20 号	AGHIAD ALHAFEZ	Influence of Thermal, Autogenous and Drying Shrinkage on Cracking in Precast Concrete and Cast-in-Place Concrete with Fly Ash 1

氏名（本籍）	^{アギヤド} ^{アルハフェズ} AGHIAD ALHAFEZ （シリア）
学位の種類	博士（工学）
学位の番号	甲第20号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位授与の日付	令和6年3月19日
学位論文題目	Influence of Thermal, Autogenous and Drying Shrinkage on Cracking in Precast Concrete and Cast-in-Place Concrete with Fly Ash
学位論文審査委員	主査 足利大学教授 宮澤伸吾 副査 足利大学学長 末武義崇 副査 足利大学教授 齋藤宏昭 副査 群馬大学教授 小澤満津雄

論文内容の要旨

本研究では、コンクリート構造物の温度応力解析において乾燥収縮の影響を評価する方法を提案し、フライアッシュを用いたコンクリートの拘束応力発生に対する温度収縮、自己収縮、乾燥収縮の寄与率を明らかにしている。さらに、フライアッシュセメントの改質品を試作して、その初期強度および収縮ひび割れ抵抗性の改善効果について実験および数値解析によって評価している。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章では、コンクリートへのフライアッシュの利用に関する背景、既往の研究、および課題について概説している。

第2章では、場所打ちコンクリートとプレキャストコンクリート（PCa）について概説するとともに、コンクリートのひび割れ発生原因としての各種収縮について総括し、本研究との関連について記述している。

第3章では、フライアッシュコンクリートを用いた現場打ちコンクリートによる壁状構造物を対象としてFEM温度応力解析を行い、拘束応力の発生に及ぼす温度収縮、自己収縮及び乾燥収縮の寄与率を明らかにしている。

第4章では、新たな手法で初期強度と品質変動を改善したフライアッシュセメントを提案している。すなわち、エーライト量及び比表面積を増大させたセメ

ントを実機プラントで試作し、静電分離法により未燃炭素量を低減したフライアッシュを試作し、両者を混合したフライアッシュセメントを提案した。コンクリート実験の結果、試作フライアッシュセメントは、一般のセメントと比較して蒸気養生条件下での強度発現が優れており、PCa 製品に適していることが示された。

第 5 章では、提案したフライアッシュセメントを PCa 製ボックスカルバートに適用することを想定し、収縮ひび割れ抵抗性について検討している。コンクリートの物性値の実験値を用いた FEM 温度応力解析の結果、蒸気養生中のひび割れ発生の支配的な要因は断面内の温度差であること、また蒸気養生後の長期にわたる部材表面付近の湿度の低下により乾燥収縮応力が増大し、ひび割れの主要原因となることを示した。また、提案したフライアッシュセメントは一般のセメントと比較して、収縮ひび割れ抵抗性が優れていることを明らかにした。

第 6 章では、日本コンクリート工学会で開発された FEM 温度応力解析プログラムにおいて、乾燥収縮応力の影響を評価する新たな方法を提案した。すなわち、コンクリート供試体を用いた応力解放法により乾燥収縮応力を測定し、その応力測定値に基づいて乾燥収縮モデルの定数を決定する方法を示している。

第 7 章では、本研究で得られた知見を総括し、成果の工学的重要性について記述している。

Influence of Thermal, Autogenous and Drying Shrinkage on Cracking in Precast Concrete and Cast-in-Place Concrete with Fly Ash

AGHIAD ALHAFEZ

Summary

In this study, a method to evaluate the influence of drying shrinkage in thermal stress analysis of concrete structures was proposed and the contribution ratios of thermal shrinkage, autogenous shrinkage and drying shrinkage to the generation of restraint stress in fly ash concrete were clarified. Furthermore, a modified fly ash cement was produced as a prototype, and its improvement in initial strength and shrinkage cracking resistance was evaluated through experiments and numerical analysis.

This paper consists of the following seven chapters.

Chapter 1 provides an overview of the background, past research, and challenges regarding the use of fly ash in concrete.

Chapter 2 provides an overview of cast-in-place concrete and precast concrete (PCa), summarizes various types of shrinkage as the causes of concrete cracking, and describes how they relate to this research.

In Chapter 3, FEM thermal stress analysis is performed on a cast-in-place concrete wall structure using fly ash concrete, and the contribution ratios of thermal shrinkage, autogenous shrinkage and drying shrinkage to the generation of restraint stress are clarified.

In Chapter 4, fly ash cement with improved initial strength and quality variation was proposed by using cement with increased Alite content and specific surface area experimentally produced in an actual plant and fly ash with reduced amount of unburned carbon by electrostatic separation method. The results of experiments showed that the prototype fly ash cement exhibited superior strength development under steam curing compared to ordinary cement, and was therefore suitable for PCa products.

In Chapter 5, the proposed fly ash cement was expected to be applied to PCa box

culvert and its shrinkage cracking resistance was investigated. As a result of FEM thermal stress analysis using the observed physical properties of concrete, it was found that the dominant factor of cracking during steam curing is the temperature difference within the cross section, and that the increase in drying shrinkage stress after steam curing due to the decrease in relative humidity near the member surface was the main causes of cracking. It was also revealed that the proposed fly ash cement had superior shrinkage cracking resistance compared to ordinary cement.

In Chapter 6, a new method for estimating the influence of drying shrinkage stress in FEM thermal stress analysis program developed by Japan Concrete Institute was proposed. That is, a method is shown in which the drying shrinkage stress is measured by the stress release method using a concrete specimen, and the constant in the drying shrinkage model is determined based on the measured stress.

Chapter 7 summarizes the findings obtained in this study and describes the importance of the results from engineering point of view.

論文審査結果の要旨

1. 本論文の内容と評価

本研究では、コンクリート構造物の温度応力解析において乾燥収縮の影響を評価する方法を提案し、フライアッシュを用いたコンクリートの拘束応力発生に対する温度収縮、自己収縮、乾燥収縮の寄与率を明らかにしている。さらに、フライアッシュセメントの改質品を試作して、その初期強度および収縮ひび割れ抵抗性の改善効果について実験および数値解析によって評価している。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章では、コンクリートへのフライアッシュの利用に関する背景、既往の研究、および課題について概説している。

第2章では、場所打ちコンクリートとプレキャストコンクリート(PCa)について概説するとともに、コンクリートのひび割れ発生原因としての各種収縮について総括し、本研究との関連について記述している。

第3章では、フライアッシュコンクリートを用いた現場打ちコンクリートによる壁状構造物を対象としてFEM温度応力解析を行い、拘束応力の発生に及ぼす温度収縮、自己収縮及び乾燥収縮の寄与率を明らかにしている。

第4章では、新たな手法で初期強度と品質変動を改善したフライアッシュセメントを提案している。すなわち、エアライト量及び比表面積を増大させたセメントを実機プラントで試作し、静電分離法により未燃炭素量を低減したフライアッシュを試作し、両者を混合したフライアッシュセメントを提案した。コンクリート実験の結果、試作フライアッシュセメントは、一般のセメントと比較して蒸気養生条件下での強度発現が優れており、PCa製品に適していることが示された。

第5章では、提案したフライアッシュセメントをPCa製ボックスカルバートに適用することを想定し、収縮ひび割れ抵抗性について検討している。コンクリートの物性値の実験値を用いたFEM温度応力解析の結果、蒸気養生中のひび割れ発生の支配的な要因は断面内の温度差であること、また蒸気養生後の長期にわたる部材表面付近の湿度の低下により乾燥収縮応力が増大し、ひび割れの主原因となることを示した。また、提案したフライアッシュセメントは一般の

セメントと比較して、収縮ひび割れ抵抗性が優れていることを明らかにした。

第 6 章では、日本コンクリート工学会で開発された FEM 温度応力解析プログラムにおいて、乾燥収縮応力の影響を評価する新たな方法を提案した。すなわち、コンクリート供試体を用いた応力解放法により乾燥収縮応力を測定し、その応力測定値に基づいて乾燥収縮モデルの定数を決定する方法を示している。

第 7 章では、本研究で得られた知見を総括し、成果の工学的重要性について記述している。

本研究では、コンクリート構造物のひび割れ制御の実務で多用されている温度応力解析プログラムの信頼性の向上に資する新たな成果が得られている。また、フライアッシュセメントの品質を独自の手法で改善する方法を提案しており、工学的有用性を有している。フライアッシュの PCa 製品への利用拡大を促進しうる成果も示されており、セメント産業における CO₂ 削減及び資源有効利用に繋がることも期待される。

2. 論文審査の結論

本学位申請論文に対して、令和 5 年 11 月 28 日の建設・環境工学専攻による予備審査、令和 6 年 1 月 25 日の審査委員会による本審査（最終審査）を経て、令和 6 年 2 月 19 日に公聴会を実施し、十分審議され、かつ検討された。

公聴会終了後に審査委員会を開催して審議した結果、本論文は独創性に富み、学術的に価値があり、工学の面から見て十分に有用性があると認められた。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められ、審査委員会全員一致で合格と判定した。