

博 士 学 位 論 文

内 容 の 要 旨

及 び

審 査 の 結 果 の 要 旨

第 19 号

平成 29 年 9 月

足 利 工 業 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、平成29年9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)	博乙第15号	佐 藤 英 明	重力式コンクリートダム の 温度ひび割れ制御に 及ぼす自己収縮ひずみの影響に関する研究	…… 1

氏名(本籍)	^{サトウ} 佐藤 ^{ヒデアキ} 英明 (東京都)
学位の種類	博士(工学)
学位の番号	乙第15号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位授与の日付	平成29年9月9日
学位論文題目	重力式コンクリートダム ^の 温度ひび割れ制御に及ぼす自己収縮ひずみの影響に関する研究
学位論文審査委員	主査 足利工業大学教授 宮澤伸吾 副査 足利工業大学教授 横室隆 副査 足利工業大学教授 末武義崇 副査 法政大学教授 溝渕利明

論文内容の要旨

近年、一般のマスコンクリート構造物における温度ひび割れ制御においては、コンクリートの水和発熱に起因する温度変化及び自己収縮による体積変化を考慮した検討が行われるのが一般的となってきた。しかし、貧配合のダムコンクリートについては、国内外において自己収縮の研究事例や測定データは極めて少なく、これまでコンクリートダムの設計・施工においては自己収縮の影響は考慮されていないのが現状である。

本論文では、コンクリートの水和発熱に起因する温度上昇の新たな低減技術として、パイプクーリングによる冷却効果の数値解析手法を提案するとともに、骨材の気化冷却法による新たなプレクーリング技術を提案している。また、ダムコンクリートの自己収縮ひずみの実用的な試験方法を提案し、その試験結果に基づいて、セメントの種類及び水結合材比の影響を考慮できる自己収縮ひずみの予測式を提案している。さらに、重力式コンクリートダムを対象として、水和発熱に起因する温度ひずみ及び自己収縮ひずみを考慮した三次元FEM温度応力解析を実施して、温度応力に及ぼす両者のひずみの影響を定量的に評価した。これらの実験結果及び温度応力解析の結果から、自己収縮がコンクリートダムの温度ひび割れの発生原因となり得ることを明らかにした。

本論文は、以下のとおり第1章～第8章により構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的及び本論文の構成について示している。

第2章では、重力式コンクリートダムの温度ひび割れについて、その発生メカニズムと特徴的なひび割れの形態について概説し、既往の温度ひび割れ制御技術について議論している。

第3章では、水和発熱に起因する温度上昇の制御に関して新たな技術を提案している。パイプクーリングによる冷却技術については、三次元有限要素法による数値解析手法及び簡便な二次元解析モデルを提案し、実構造物におけるコンクリート温度の実測値と比較することでその適合性を示している。プレクーリングについては、骨材の新たな冷却技術として気化冷却法を開発し、実際のコンクリートダムの施工現場に導入してその効果を実証している。

第4章では、コンクリートの自己収縮について、その発生メカニズム及び一般的な測定方法について概説している。また、複数のダム施工現場において、ウェットスクリーニングしたコンクリートによる自己収縮特性の試験を行うことによって、ダムコンクリートの自己収縮の特性を明らかにしている。

第5章では、骨材最大寸法が150mmのフルサイズ骨材を用いたダムコンクリートについて、新たに大型円柱供試体による試験方法を提案して、従来の試験方法と比較することでその適合性を確認している。また、フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートに対応した埋込型ひずみ計を新たに開発して、その測定精度を検証している。これに基づき、大型供試体によるフルサイズ骨材を用いた自己収縮試験を実施し、各種ダム用セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮特性を明らかにしている。

第6章では、ウェットスクリーニングしたコンクリートによる小型供試体の試験結果からフルサイズ骨材によるダムコンクリートの自己収縮特性を推定する方法を提案するとともに、その推定精度の検証を行っている。さらに、温度応力解析で用いるための自己収縮ひずみの設計値を提案し、4種類のダム用セメントを用いた場合について実験結果との適合性を示している。

第7章では、コンクリートダムにおける既往の温度ひび割れ制御技術の概要について整理し、施工段階での温度ひび割れ制御の課題について議論している。これを踏まえて、中規模の重力式コンクリートダムを対象として三次元FEM温度応力解析を実施して、温度応力に及ぼす自己収縮の影響について定量的に示している。

第8章では、本研究で得られた主な知見をとりまとめて示すと共に、今後の展望と課題について示している。

Influence of Autogenous Shrinkage Strain on Control of Thermal Cracking in Concrete Gravity Dams

Hideaki Sato

Summary

In recent years, thermal crack control for concrete structures has generally been carried out on the basis of volume change of concrete due to hydration heat and autogenous shrinkage. In design and execution of concrete dams, however, the effect of autogenous shrinkage of concrete is not taken into account, since there are few existing researches and experimental data in Japan and the other countries.

In this thesis, new techniques of reduction of temperature rise due to cement hydration were developed; a method for numerical simulation of effect of pipe-cooling and a new pre-cooling technique by vaporization of aggregate. A prediction model for autogenous shrinkage strain of dam concrete with different types of cement and with various water-binder ratio was proposed on the basis of experiments which were conducted according to the proposed test method. Furthermore, three dimensional FEM thermal stress analyses were carried out on a concrete gravity dam taking consideration of thermal strain due to hydration heat and autogenous shrinkage strain and effect of each strain on thermal stress was estimated. From the experimental results and thermal stress analysis, it was proved that autogenous shrinkage can be a cause of thermal cracking in concrete dams.

This thesis consists of eight chapters as follows.

In chapter 1, the background, the purpose and the contents of this thesis are shown.

In chapter 2, the feature and the mechanism of thermal cracking in concrete gravity dams are summarized and existing technologies of thermal crack control are discussed.

In chapter 3, new techniques for controlling concrete temperature increase due to hydration heat were proposed. As for pipe-cooling technique, a numerical simulation technique by three-dimensional FEM and two-dimensional simple model were proposed and their applicabilities were demonstrated by comparison with observed temperature in real structures. A new pre-cooling technique by

vaporization of aggregate was developed and the effect was confirmed in execution of a real concrete dam.

In chapter 4, the mechanism and general test method of autogenous shrinkage of concrete are summarized. The property of autogenous shrinkage of dam concrete was made clear by observations of autogenous shrinkage of sieved concrete at several dam construction sites.

In chapter 5, a new test method for measurement of autogenous shrinkage of dam concrete with full-sized aggregate up to 150 mm using large cylindrical specimens was proposed and its applicability was confirmed by comparison with a conventional test method. And an embedded strain gauge, which can be applied to dam concrete with full-sized aggregate, was developed and its precision was confirmed. Then the properties of autogenous shrinkage of dam concrete with various types of cement were made clarified on the basis of experiments on concrete with full-sized aggregate using the large specimens.

In chapter 6, a prediction method of autogenous shrinkage of dam concrete with full-sized aggregate based on the experiments with small specimens made of sieved concrete was proposed and its precision was confirmed. And the design values of autogenous shrinkage strain to be used for thermal stress analysis were proposed and its applicability to four types of cement, which are generally used for dams, was shown.

In chapter 7, the conventional techniques for thermal crack control in concrete dams were summarized, and problems in crack control on execution stage were discussed. Based on these discussions, three dimensional FEM thermal stress analyses were conducted on a middle sized concrete gravity dam and the effect of autogenous shrinkage on thermal stress was quantitatively investigated.

In chapter 8, the findings in this study were summarized and the prospects and the problems in the future were suggested.

論文審査結果の要旨

1. 本論文の内容と評価

近年、一般のマスコンクリート構造物における温度ひび割れ制御においては、コンクリートの水和発熱に起因する温度変化及び自己収縮による体積変化を考慮した検討が行われるのが一般的となってきた。しかし、貧配合のダムコンクリートについては、国内外において自己収縮の研究事例や測定データは極めて少なく、これまでコンクリートダムの設計・施工においては自己収縮の影響は考慮されていないのが現状である。

本論文では、コンクリートの水和発熱に起因する温度上昇の新たな低減技術として、パイプクーリングによる冷却効果の数値解析手法を提案するとともに、骨材の気化冷却法による新たなプレクーリング技術を提案している。また、ダムコンクリートの自己収縮ひずみの実用的な試験方法を提案し、その試験結果に基づいて、セメントの種類及び水結合材比の影響を考慮できる自己収縮ひずみの予測式を提案している。さらに、重力式コンクリートダムを対象として、水和発熱に起因する温度ひずみ及び自己収縮ひずみを考慮した三次元FEM温度応力解析を実施して、温度応力に及ぼす両者のひずみの影響を定量的に評価した。これらの実験結果及び温度応力解析の結果から、自己収縮がコンクリートダムの温度ひび割れの発生原因となり得ることを明らかにした。

本論文は、以下のとおり第1章～第8章により構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的及び本論文の構成について示している。

第2章では、重力式コンクリートダムの温度ひび割れについて、その発生メカニズムと特徴的なひび割れの形態について概説し、既往の温度ひび割れ制御技術について議論している。

第3章では、水和発熱に起因する温度上昇の制御に関して新たな技術を提案している。パイプクーリングによる冷却技術については、三次元有限要素法による数値解析手法及び簡便な二次元解析モデルを提案し、実構造物におけるコンクリート温度の実測値と比較することでその適合性を示している。プレクーリングについては、骨材の新たな冷却技術として気化冷却法を開発し、実際のコンクリートダムの施工現場に導入してその効果を実証している。

第4章では、コンクリートの自己収縮について、その発生メカニズム及び一般的な測定方法について概説している。また、複数のダム施工現場において、ウェットスクリーニングしたコンクリートによる自己収縮特性の試験を行うことによって、ダムコンクリートの自己収縮の特性を明らかにしている。

第5章では、骨材最大寸法が150mmのフルサイズ骨材を用いたダムコンクリートについて、新たに大型円柱供試体による試験方法を提案して、従来の試験方法と比較することでその適合性を確認している。また、フルサイズ骨材を用いたダムコンクリートに対応した埋込型ひずみ計を新たに開発して、その測定精度を検証している。これに基づき、大型供試体によるフルサイズ骨材を用いた自己収縮試験を実施し、各種ダム用セメントを用いたダムコンクリートの自己収縮特性を明らかにしている。

第6章では、ウェットスクリーニングしたコンクリートによる小型供試体の試験結果からフルサイズ骨材によるダムコンクリートの自己収縮特性を推定する方法を提案するとともに、その推定精度の検証を行っている。さらに、温度応力解析で用いるための自己収縮ひずみの設計値を提案し、4種類のダム用セメントを用いた場合について実験結果との適合性を示している。

第7章では、コンクリートダムにおける既往の温度ひび割れ制御技術の概要について整理し、施工段階での温度ひび割れ制御の課題について議論している。これを踏まえて、中規模の重力式コンクリートダムを対象として三次元FEM温度応力解析を実施して、温度応力に及ぼす自己収縮の影響について定量的に示している。

第8章では、本研究で得られた主な知見をとりまとめて示すと共に、今後の展望と課題について示している。

本論文の成果によって、自己収縮がコンクリートダムの温度ひび割れの発生原因となり得ることが明らかにされた点は、全く新しい知見であり特筆に値する。また、本論文で提案されたダムコンクリートの自己収縮ひずみの試験方法および予測式は、新規性・独創性があるとともに、コンクリートダムの温度ひび割れの制御計画および照査に適用できる汎用性を有している。さらに、本論文で提案しているパイプクーリングの温度低減効果の解析方法、骨材冷却によるプレクーリング手法、セメントの種類を選定による温度応力低減方法は、コンクリートダムの新たな温度ひび割れ制御方法として実用的価値を有しているといえる。

以上のように、本論文は、コンクリートダムの設計・施工技術の向上に大きく寄与することが期待され、学術面からも貢献するところが大きく、工学的実用性も高く評価することができると判断した。

2. 論文審査の結論

本学位申請論文に対して、平成29年4月19日の建設・環境工学専攻による予備審査、平成29年6月24日の審査委員会による本審査（最終審査）を経て、平成29年7月8日に公聴会（参加者は学内外より29名）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。

