

博 士 学 位 論 文

内 容 の 要 旨

及 び

審 査 の 結 果 の 要 旨

第 25 号

令 和 6 年 9 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 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)	博甲第 21 号	KIPKEMBOI BENSON	Study on Improvement of Fresh Properties, Cracking Resistance and Durability of High Flow Concrete Using Industrial By-Products for Eco-Friendly Construction Materials (産業副産物を用いた高流動コンクリートのフ レッシュ性状、ひび割れ抵抗性および耐久性の 向上に関する研究 - 環境配慮型建設材料を目 指して) 1
博士(工学)	博乙第 17 号	永尾 徹	風力発電機の形状決定における設計とデザイン の融合に関する研究 9

氏 名（本 籍）	^{キ ャ ッ プ ケ ン ボ イ} KIPKEMBOI ^{ベ ン ソ ン} BENSON （ケニア）
学 位 の 種 類	博 士（工 学）
学 位 の 番 号	甲 第 2 1 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9月10日
学 位 論 文 題 目	Study on Improvement of Fresh Properties, Cracking Resistance and Durability of High Flow Concrete Using Industrial By-Products for Eco-Friendly Construction Materials （産業副産物を用いた高流動コンクリートのフレッシュ 性状、ひび割れ抵抗性および耐久性の向上に関する研究 ー環境配慮型建設材料を目指して）
学位論文審査委員	主 査 足利大学教授 齋 藤 宏 昭 副 査 足利大学学長 末 武 義 崇 副 査 足利大学教授 仁 田 佳 宏 副 査 足利大学名誉教授 宮 澤 伸 吾

論文内容の要旨

本研究の目的は、環境に優しい建設資材の利用拡大を通じて環境保全と持続可能性を促進することである。セメント産業における CO₂ 排出量の最大の要因は普通ポルトランドセメント（OPC）の生産であることから、OPC の使用を削減することは、環境の持続可能性に向けた有効な一歩となる可能性がある。本研究では、コンクリートの施工性の向上、労働コストの削減、設計の柔軟性、作業環境の改善など、従来のコンクリートに比べて利点がある高流動コンクリートを使用してこの目的を追求している。具体的には2種類の高流動コンクリート、すなわち OPC の一部を産業副産物で置換した自己充填コンクリートおよび OPC を全く用いずアルカリ活性材料（AAM）を用いたコンクリートを対象として研究を行っている。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章では、本研究の対象である粉体系高流動コンクリートに分類される自

自己充填コンクリートおよび AAM を用いたコンクリートの技術的な背景を概説している。また、それらのコンクリートの用途および利点について述べるとともに、利用促進に向けた課題について議論している。

第 2 章では、本研究の対象とする自己充填コンクリートおよび AAM に関連する技術的な課題について論述している。自己充填コンクリートの場合、大量の結合材の使用が温度ひび割れの最大の原因であることが証明されている。これまでの拘束応力解析モデルでは、自己充填コンクリートでよく発生する温度ひび割れに乾燥収縮がどの程度寄与するかが正確に評価されていない。OPC の代替材料として提案されている AAM は、流動性が低いなど、フレッシュ特性に課題があることを指摘している。AAM のフレッシュ特性を向上させる最適な粉末の配合比率を推定するための指標として、粒子の充填特性に着目した既往の報告はないことを述べている。

第 3 章では、本研究で着目した課題の解決を図るために重点を置くべき具体的な目標を概説している。また、各目標をどのように達成するかについての詳細な研究計画を示している。すなわち、三次元有限要素法（3D-FEM）による自己充填コンクリートの温度ひび割れ抵抗性の評価方法、AAM を構成する粉末の組合せの提案と分析方法、AAM のフレッシュ特性と耐久性を評価するための研究計画について概説している。

第 4 章では、本研究で使用した産業副産物として、高炉スラグ、フライアッシュ、シリカフェームの品質について述べるとともに、実験方法および解析方法についても説明している。自己充填コンクリートについては、コンクリート特性の実験結果を入力パラメータとして使用し、その温度ひび割れ抵抗性を数値解析により評価している。乾燥収縮に起因する拘束応力は、一軸拘束コンクリート試験体で測定され、解析結果と比較することで 3D-FEM 解析モデルの精度を評価している。異なる粉末の混合比を持つ AAM ペーストと AAM モルタルのフレッシュ特性および硬化特性を試験するとともに、混合粉末の粒子充填率が AAM の流動性に及ぼす影響について実験および理論により議論している。

第 5 章では、高炉スラグの置換率が異なる自己充填コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性について壁厚 1 m の部材の温度応力解析結果に基づいて議論している。コンクリートのクリープによって引き起こされる乾燥収縮応力の緩和の影響を考慮するために、ヤング率の低減係数の値を提案している。温度応力解析結

果に基づいて、高炉スラグ置換率が高い 50%～70%の範囲では温度上昇速度が低くなり、このことが収縮ひび割れ抵抗性の向上に寄与していることを示唆している。

第 6 章では、AAM モルタルによる実験結果から、高炉スラグとフライアッシュの混合比にかかわらず、シリカフュームの添加量 5%のケースで良好な流動性が達成されることを示している。混合粉末の充填率の実験結果と理論的検討では、シリカフュームの添加量 5%で最大の粒子充填率が得られることを示している。これは、高炉スラグとフライアッシュの混合比にかかわらず、SF 添加量が 5%で良好な流動性が達成される理由であることを説明している。高炉スラグの混合比が 50% を超える AAM の塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、従来のセメントよりも著しく優れていることを示している。

第 7 章では、本研究から得られた結論の概要を示している。産業副産物の粉末の種類、組合せおよび混合比を最適化することで、AAM を用いた高流動コンクリートのフレッシュ特性と耐久性を改善できると結論付けている。また、高炉スラグを使用した自己充填コンクリートは優れた温度ひび割れ抵抗性を示し、提案されたヤング係数低減係数を使用することで乾燥収縮応力を正確に解析できることを示している。これらの知見から、環境保全と持続可能性を向上させる対策として産業副産物を有効利用した高流動コンクリートの使用が増加することが期待されると述べている。

Study on Improvement of Fresh Properties, Cracking Resistance and Durability of High Flow Concrete Using Industrial By-Products for Eco-Friendly Construction Materials

KIPKEMBOI BENSON

Summary

The general objective of this study is to promote environmental conservation and sustainability through adoption of eco-friendly construction materials. Since the largest cause of CO₂ emissions in the field of cement industry is the production of ordinary Portland cement (OPC), the reduction of usage of OPC may be a step in the right direction towards environmental sustainability. This study pursues this objective by using high flow concrete which has added advantages over conventional concrete such as improvement of concrete workability, reduction in labor cost, flexibility in design, improved working environment among others. To study the effects of partial replacement of cement (OPC) on high flow concrete, self-compacting concrete was used. To study high flow concrete using exclusively industrial by-products, alkali activated material (AAM) concrete was used.

In chapter one, the study introduces briefly the technological background of self-compacting concrete and alkali activated materials concrete as classified under high flow concrete based on their flowability and large amount of powder utilization. This section also introduces their applications, advantages and disadvantages.

Chapter two focusses on the study gaps that currently exists in self-compacting concrete and alkali activated materials. For self-compacting concrete, utilization of large amount of binder has been proved to be the greatest contributor to thermal cracking. Previously restraint stress analysis models did not precisely evaluate how much drying shrinkage contributes to cracking in massive concrete that often occur in self-compacting concrete. The challenge with alkali activated material proposed as an alternative to OPC is its poor fresh properties such as low flowability. There is no clear report investigating particle packing property as an index to estimate optimum powder combination ratios for improving fresh property.

Chapter three outlines specific objectives to be focused on the study to realize tangible findings. It also gives a detailed execution plan of how to achieve each of the objective. It outlines a plan of how thermal cracking resistance of self-compacting concrete will be

analyzed using 3D-FEM and the proposed powder combination of AAM materials and tests to be carried out on AAM to evaluate its fresh and durability properties.

Chapter four discusses on the materials used in the study which are majorly industrial by-products such as blast furnace slag, fly ash and silica fumes. Experiments and analysis methods used are also discussed. For self-compacting concrete, experimental results of concrete properties were used as input parameters to analyze its thermal cracking resistance. Restraint stress due to drying shrinkage was measured on uniaxially restrained concrete specimens and 3D-FEM model was evaluated for accuracy by comparing the results. For fresh and hardened properties of AAM paste and mortar with different blend ratio of the powers were tested. Particle packing of blended powder was experimentally and theoretically investigated to discuss its effects on flowability of AAM.

In chapter five, thermal stress analysis was done on 1m thick wall members, and shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete with different replacement ratio of blast furnace slag was discussed. The value of reduction factor for Young's modulus was also proposed to consider the effect of relaxation of drying shrinkage stress caused by creep of concrete. It was suggested from the thermal stress analysis that the low rate of temperature rise caused by the high replacement ratios of blast furnace slag at 50% and 70% respectively contributed to improved shrinkage cracking resistance.

In chapter six, experimental results for AAM mortal indicate that good fresh properties as measured in terms of flowability was achieved at 5% dosage of silica fume in all the blast furnace slag to fly ash blend ratios. Experimental and theoretical results of void fraction of blended powder exhibited the highest particle packing ratio at 5% dosage of silica fume. This explains why good flowability was achieved at 5% dosage of SF on all blast furnace slag to fly ash blend ratios. Resistance to chloride ion penetration of AAM with blast furnace slag blend ratio more than 50% is better than conventional cement.

Chapter seven outlines the conclusions derived from the study. It can be concluded from the studies that fresh properties and durability of high flow AAM concrete, can be improved by optimizing the types, combination and blend ratio of powders from industrial by-products. It can also be concluded that self-compacting concrete with blast-furnace slag gives a good thermal cracking resistance and that drying shrinkage stress can be precisely analyzed by using the proposed reduction factor for Young's modulus. These approaches are therefore expected to increase usage of high flow concrete with industrial by-products as countermeasures to improve environmental conservation and sustainability.

論文審査結果の要旨

1. 本論文の内容と評価

本研究の目的は、環境に優しい建設資材の利用拡大を通じて環境保全と持続可能性を促進することである。セメント産業における CO₂ 排出量の最大の要因は普通ポルトランドセメント (OPC) の生産であることから、OPC の使用を削減することは、環境の持続可能性に向けた有効な一歩となる可能性がある。本研究では、コンクリートの施工性の向上、労働コストの削減、設計の柔軟性、作業環境の改善など、従来のコンクリートに比べて利点がある高流動コンクリートを使用してこの目的を追求している。具体的には2種類の高流動コンクリート、すなわち OPC の一部を産業副産物で置換した自己充填コンクリートおよび OPC を全く用いずアルカリ活性材料 (AAM) を用いたコンクリートを対象として研究を行っている。

本論文は以下の7章から構成されている。

第1章では、本研究の対象である粉体系高流動コンクリートに分類される自己充填コンクリートおよび AAM を用いたコンクリートの技術的な背景を概説している。また、それらのコンクリートの用途および利点について述べるとともに、利用促進に向けた課題について議論している。

第2章では、本研究の対象とする自己充填コンクリートおよび AAM に関連する技術的な課題について論述している。自己充填コンクリートの場合、大量の結合材の使用が温度ひび割れの最大の原因であることが証明されている。これまでの拘束応力解析モデルでは、自己充填コンクリートでよく発生する温度ひび割れに乾燥収縮がどの程度寄与するかが正確に評価されていない。OPC の代替材料として提案されている AAM は、流動性が低いなど、フレッシュ特性に課題があることを指摘している。AAM のフレッシュ特性を向上させる最適な粉末の配合比率を推定するための指標として、粒子の充填特性に着目した既往の報告はないことを述べている。

第3章では、本研究で着目した課題の解決を図るために重点を置くべき具体的な目標を概説している。また、各目標をどのように達成するかについての詳細な研究計画を示している。すなわち、三次元有限要素法 (3D-FEM) による自己充填コンクリートの温度ひび割れ抵抗性の評価方法、AAM を構成する粉末の組合せの提案と分析方法、AAM のフレッシュ特性と耐久性を評価するための研究計画について概説している。

第4章では、本研究で使用した産業副産物として、高炉スラグ、フライアッシュ、シリカフュームの品質について述べるとともに、実験方法および解析方法についても説明している。自己充填コンクリートについては、コンクリート特性

の実験結果を入力パラメータとして使用し、その温度ひび割れ抵抗性を数値解析により評価している。乾燥収縮に起因する拘束応力は、一軸拘束コンクリート試験体で測定され、解析結果と比較することで 3D-FEM 解析モデルの精度を評価している。異なる粉末の混合比を持つ AAM ペーストと AAM モルタルのフレッシュ特性および硬化特性を試験するとともに、混合粉末の粒子充填率が AAM の流動性に及ぼす影響について実験および理論により議論している。

第 5 章では、高炉スラグの置換率が異なる自己充填コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性について壁厚 1 m の部材の温度応力解析結果に基づいて議論している。コンクリートのクリープによって引き起こされる乾燥収縮応力の緩和の影響を考慮するために、ヤング率の低減係数の値を提案している。温度応力解析結果に基づいて、高炉スラグ置換率が高い 50%~70%の範囲では温度上昇速度が低くなり、このことが収縮ひび割れ抵抗性の向上に寄与していることを示唆している。

第 6 章では、AAM モルタルによる実験結果から、高炉スラグとフライアッシュの混合比にかかわらず、シリカフュームの添加量 5%のケースで良好な流動性が達成されることを示している。混合粉末の充填率の実験結果と理論的検討では、シリカフュームの添加量 5%で最大の粒子充填率が得られることを示している。これは、高炉スラグとフライアッシュの混合比にかかわらず、SF 添加量が 5%で良好な流動性が達成される理由であることを説明している。高炉スラグの混合比が 50% を超える AAM の塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、従来のセメントよりも著しく優れていることを示している。

第 7 章では、本研究から得られた結論の概要を示している。産業副産物の粉末の種類、組合せおよび混合比を最適化することで、AAM を用いた高流動コンクリートのフレッシュ特性と耐久性を改善できると結論付けている。また、高炉スラグを使用した自己充填コンクリートは優れた温度ひび割れ抵抗性を示し、提案されたヤング係数低減係数を使用することで乾燥収縮応力を正確に解析できることを示している。これらの知見から、環境保全と持続可能性を向上させる対策として産業副産物を有効利用した高流動コンクリートの使用が増加することが期待されると述べている。

本研究では、マスコンクリート構造物の温度応力解析において、乾燥収縮の影響を考慮する新たな実務的手法を提案している。この成果は、コンクリート構造物のひび割れ制御の信頼性向上に貢献するものであり、工学的有用性を有している。また、コンクリートへの高炉スラグの利用拡大を促進しうる成果も示されている。さらに、高炉スラグおよびフライアッシュ等の産業副産物を利用し、セメントを全く使用しない新たな結合材を従来のコンクリートに代わる建設材料として提案している。これらの成果は、セメント産業における CO₂ 削減及び資源有効利用に大きく貢献することが期待される。

2. 論文審査の結論

本学位申請論文に対して、令和 6 年 4 月 25 日の建設・環境工学専攻による予備審査、令和 6 年 6 月 3 日の審査委員会による本審査（最終審査）を経て、令和 6 年 7 月 3 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。

氏 名（本 籍）	^{ナガオ} 永尾 ^{トオル} 徹（栃木県）
学 位 の 種 類	博 士（工 学）
学 位 の 番 号	乙 第 1 7 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	令和6年9月10日
学 位 論 文 題 目	風力発電機の形状決定における設計とデザインの融合に関する研究
学位論文審査委員	主 査 足利大学教授 安 藤 康 高 副 査 足利大学教授 根 本 泰 行 副 査 足利大学教授 小 林 重 昭 副 査 足利大学教授 横 山 和 哉 副 査 足利大学特任教授 中 條 祐 一

論文内容の要旨

本研究では、大型風力発電機の形状における技術的に決定される設計要素と、美的観点から決定されるデザイン要素の領域を明らかにすることを目的として、申請者が設計統括者として担当したデザイン性の高い大型風力発電機の開発過程及び、足利大学学生を対象とした「風力発電機に対する視認者の印象」に関するアンケート調査結果を分析し、風力発電機形状と視認者の印象との相関関係を定性的に評価している。

本論文は以下の8章から構成されている。

第1章では、風力発電の社会的受容性向上を図る上での形状の重要性、形状と性能を両立するうえでの技術的な課題について概説している。

第2章では、風力発電機の形状に関する決定要素について詳細な説明がなされており、風力発電機の視認性に影響を与える部位のうち「タワー」、「ロータ」は技術的判断のみで決定されるため形状の決定が不可能であり、「ナセル」が唯一視認性を考慮した形状決定が可能であることを明らかにしている。

第3章では、申請者らの開発グループが日本の南西諸島への導入を目的とした風力発電機を開発するにあたり、インドや日本で相次いだ国際標準規格に準

拠した風力発電機の熱帯低気圧による倒壊事故を自ら調査し纏めた結果が報告されている。さらに、調査結果に基づいた新たな設計環境条件が提案されている。

第4章では、工程ごとに技術者が開発しデザイナーが形状を修正する方法で開発を進めた事例について説明されている。この方法では、作業性やデザインについて十分な配慮が反映できず、結果として大きな設計変更が必要となる事が明らかとなっている。

第5章では、インダストリアルデザインの見地から形状を決定する考え方や方法を、4章で述べた技術的なアプローチと比較し、問題点を明らかにしている。

第6章では、風力発電機の視認性を決定づける要素について、技術的な判断から決定される要素（設計）と視認性で決定される要素（デザイン）を、NEDO 離島用風力発電システム開発を例に取り明らかにしている。さらに、風力発電の形状における設計とデザインの判断基準、方法について分析を行い、開発現場で発生する設計とデザインの問題を切り分け、両者を高いレベルで融合する方法が提案されている。

第7章では、風力発電機の視認性に影響を与える部位のうち唯一視認性を考慮した形状決定が可能である「ナセル」に着目し、様々な形状のナセルに対する印象調査を行い、95名の調査結果をSD法により分析したことが報告されている。その結果、ナセル形状と視認性（視認者の印象）には深い相関関係があることを明らかにしている。

第8章では、本研究で得られた知見を総括し、研究成果の工学的重要性について記述している。

Study on engineering and aesthetic design in shape determination of wind turbine

TORU NAGAO

Summary

This study was conducted to clarify the areas of engineering design elements and aesthetic elements in determining the shape of large wind turbine generators.

The author proposed a solution method to a problem that straddles technology and aesthetic design that arose during the development process of a large wind turbine generator with a high design quality for which the author was in charge as total development supervisor. Furthermore, the results of a questionnaire survey of Ashikaga University students on “viewers’ impressions of wind turbines” were analyzed to qualitatively evaluate the correlation between the shape of the wind turbine and the viewers' impressions.

This paper consists of eight chapters.

Chapter 1 provides explanation on importance of wind turbine’s shape for promotion of social acceptability and mismatch between engineering design and aesthetic design in development of wind turbine.

Chapter 2 provides explanation on important factors for decision of wind turbine’s shape in detail. In this chapter, it was proved that only the nacelle reveals that the shape can be optimized.

In Chapter 3, investigation results on wind turbines collapsed by typhoon in India and in Nansei islands of Japan were reported. Although these wind turbines were designed along international standard in those days, these wind turbines were collapsed because the standard was not proper for the regions mentioned above. The authors proposed a draft of improved standard based on this investigation.

In Chapter 4, the author’s previous case of wind turbine development was explained. In this case, aesthetic design was taken into account after engineering design was finished in every process. Consequently, drastic design changes were required to reflect aesthetic design requirements at almost the end of development.

In Chapter 5, the cause of the problem mentioned in Chapter 4 was proved by comparing the approach for shape decision from the viewpoint of aesthetic minded industrial design with that from the viewpoint of engineering design.

In Chapter 6, the author distinguished between the factors dominated by engineering

design and the factors dominated by aesthetic design in the factors determine wind turbine's visibility through the case of the wind turbine developed by the author's group. Besides, the method for proper integration of technical design and aesthetic design obtained by the analysis of these factors was proposed.

In Chapter 7, the author reported the results of a survey of 95 Ashikaga University students on their impressions of wind turbines with respect to nacelle shape, which characterizes the impression of wind turbines. Consequently, from the results of this survey, it was proved that there was the significant relationship between the shape of the nacelle and the viewers' impressions.

Chapter 8 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

本博士論文は、大型風力発電機の形状における技術的に決定される設計要素と、美的観点から決定されるデザイン要素の領域を明らかにする目的で、申請者が設計統括者として担当したデザイン性の高い大型風力発電機の開発過程及び、足利大学学生を対象とした「風力発電機に対する視認者の印象」に関するアンケート調査の分析結果を纏めたものである。

風力発電機に対する視認者の印象は、風力発電機が社会に受容されるための重要な要素であり、風力発電の導入拡大に伴い、風力発電機におけるデザインの重要性も高まってきている。

従来、風力発電機開発において、設計とデザインは独立して行い、最終段階で整合させるという手法を取るのが一般的であった。しかし、当該手法を取る場合にはお互いに齟齬が生じた場合双方が大幅な変更を余儀なくされ、膨大な時間的損失を招くという問題を抱えていた。申請者は、この問題を解決するため、設計統括者として開発初期段階よりデザイン責任者との調整を行い、最適化を図りながら開発を推進した。その結果、双方の要求を満たす風力発電機の開発が可能となったうえ、開発に要する時間の大幅な短縮が可能となった。当該風力発電機は、「2001 グッドデザイン賞」、「第6回新エネ大賞（資源エネルギー長官賞）2001 年度」を受賞し、デザイン、技術共高い評価を受けた。なお、博士論文では、主な設計要素である風車形式、ロータ直径、耐風速、タワー形式、発電機の最適化を行う過程が詳細に報告されている。

さらに本研究では、風力発電機のデザインが視認者に与える影響を定性的に評価するため、足利大学学生を対象とした「風力発電機に対する視認者の印象」に関するアンケート調査を行った。アンケート調査では、最も視認者にデザインの影響を強く与える構成部材であるナセルに注目し、ナセル形状の好感度評価を被験者に依頼した。その結果、好感度の高い形状、低い形状に個人差は少なく、デザインが視認者の印象に大きな影響を与える事が明らかとなった。

以上、本研究では、今後の風力発電機の開発に資する数々の有益な知見が得られている。

2. 論文審査の結論

本学位論文に対して、審査委員会による予備審査が2024年4月15日、本審査（最終試験）が2024年6月3日に行われ、2024年7月6日に公聴会を開催した。公聴会では十分な議論がなされ、終了後の審査委員会にて、本論文は学術的

に価値があり、工学の面から見て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。