

博士學位論文

内容の要旨

及び

審査の結果の要旨

第 23 号

令和 5 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 5 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 19 号 | 長村 貞治 | 雨掛かりを考慮した外壁通気構法の 水分挙動に関する研究 | 1 |
| 博士(工学) | 博乙第 16 号 | 畑 実 | 産業副産物を起源とする硬化体のプレ キャストコンクリートへの適用に関する 研究 | 8 |

| | |
|----------|--|
| 氏名（本籍） | <small>オサムラ</small> <small>サダハル</small> 長村 貞治（京都府） |
| 学位の種類 | 博士（工学） |
| 学位の番号 | 甲 第 19 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5年3月16日 |
| 学位論文題目 | 雨掛かりを考慮した外壁通気構法の水分挙動に関する研究 |
| 学位論文審査委員 | 主 査 足利大学教授 齋 藤 宏 昭 副 査 足利大学教授 宮 澤 伸 吾 副 査 足利大学教授 渡 邊 美 樹 副 査 京都大学教授 小 椋 大 輔 |

論文内容の要旨

本研究では、窯業系サイディングを用いた外壁通気構法において散見される、雨水由来の水分に起因する内部結露と木部の劣化に対し、建築物理に基づいた予測モデルを構築し、現象を解明したうえで、定量的な対策と要求性能を検討したものである。

論文は、第1章から第7章で構成されており、各章の内容は概略以下のとおりである。

第1章では、外壁通気構法の放湿型結露に関する既往研究を整理したうえで、実物件の調査事例から雨水由来の水分による壁内結露の発生メカニズムを推定するとともに、建築環境工学と材料施工の両分野を横断的に検討する必要性と課題を述べた。

第2章では、雨掛かりによって通気層に浸入する水分に着目し、外装材であるサイディングの防水性能及び吸水特性を検討した。防水性能に関しては、サイディングの施工性が影響する、勘合部から通気層への雨水浸入率を水密試験により定量化した。次に、組成の異なるサイディングに対し、吸水係数や水分拡散係数などの湿気物性値を測定するとともに、実物件から劣化したサイディ

ングを採取し、塗膜の経年劣化の影響を確認した。

第 3 章では、通気層仕様による乾燥性能への寄与を把握するため、通気層の排水性能及び通気特性を測定した。排水性能に関しては通気層内への注水試験を行い、注水量と排水量の差分から通気層内の滞留率を求め、工法によって通気層内に滞留する水分量が大きく異なることを確認した。次に通気特性試験により、通気層全体の相当開口面積、及び通気層を構成する各部位（水切り、通気層、軒天部）の通気特性値を測定し、任意の建物高さ・通気層厚さに対応した圧力損失算出に資するデータを収集し、その影響を示した。

第 4 章では、実験棟における外壁内の温湿度を測定し、通気層仕様の違いによる通気風量や結露性状への影響について、検証データを収集した。最も通気量の多い仕様では夏期の壁内相対湿度が 90%以下に抑えられる一方、通気量の少ない仕様では防湿層界面における結露水の流下が確認された。次に年間を通じた測定結果から、防湿層界面で相対湿度が飽和に達した積算時間を示し、相当開口面積が大きく、滞留率が小さい仕様ほど飽和状態に至り難いことがわかった。

第 5 章では、雨掛かりによって外装材及び通気層に形成される付着水の水分収支を考慮した熱水分移動予測モデルを提案し、実験棟の温湿度測定結果との比較からその再現性を検証した。また、防湿層界面における高湿度状態（相対湿度 98%以上）の継続日数より、相当開口面積が大きく浸入雨水の滞留率が小さい仕様ほど、高湿度状態に至り難い傾向を確認した。

第 6 章では、これまでに得た浸入率や物性値などのパラメータを予測モデルに適用し、実気象条件下における放湿型結露防止に必要な相当開口面積を検討した。通気層への雨水浸入率が高く、表面塗膜の経年劣化により吸水係数が高くなったサイディングを使用した場合、排水・通気性能の高い金具仕様でも、相当開口面積 12 cm²/m 以上が要求性能として必要なことを示した。

第 7 章では、本研究で得られた主な知見をまとめて述べ、今後の課題と展望について述べた。

Study on hygrothermal behavior of wall assembly with vented cavity in consideration of driving rain

SADAHARU OSAMURA

Summary

Rainwater and moisture control are key factors for maintaining the durability of wooden houses. Vented cavities are installed on wall assemblies with sidings to ensure durability of wood structures. In general, it is said that moisture condensation does not occur behind a vapor retarder in walls assembled with a vented cavity. However, structural decay caused by the moisture condensation have been reported by a field investigation in actual dwelling house; therefore, both unraveling the phenomenon and taking countermeasures are significant issues.

Based on the authors' investigation of the structural decay, this dissertation focuses on the moisture behavior within the wall assemblies caused by driving rain. Water penetration rate and water absorption coefficient of sidings were quantified, and the drainage and airflow rates were obtained through water injection and airflow tests. The moisture damage shown in the field investigation was demonstrated in an experimental house. In addition, numerical analyses of simultaneous heat and moisture transfer were conducted, and thereby unraveling the mechanism of internal condensation caused by the driving rain. Considering these phenomena, requirements for the vented cavity to prevent the moisture condensation was proposed. This dissertation consists of seven chapters, which are briefly described as follows:

In chapter 1, previous studies on various internal condensations were reviewed. The mechanism of internal condensation caused by driving rain was assumed from the field investigation. To unravel the mechanism of internal condensation, it is necessary to cross-study hygrothermal behavior and construction factors related to rain penetration and ventilation.

In chapter 2, the water penetration rate and water absorption coefficient of sidings were examined, focusing on the moisture source within the wall assemblies caused by

driving rain. Water penetration rate from siding joints was quantified using a water spray test. This result indicates that intermittent rain penetration occurs with high frequency on rainy days.

A water absorption coefficient from siding surfaces suggests that the aging of surface coatings increases this value. In addition, compositions of sidings affect moisture properties such as the water sorption isotherm, water diffusivity, and water permeability.

In chapter 3, the drainage and airflow rates were examined for evaluating the performance of the vented cavity. The drainage rates in two types of vented cavities were measured using the water injection test. The horizontal furring strip case, where the injected water was held, had a 40% drainage rate. The corresponding value for the case involving panel clips, in which the drainage route was secured, was 10%.

The impact of the components in the vented cavity of the exterior system on the airflow rate was evaluated through the airflow test. The equivalent opening areas for the cases involving horizontal furring strips, and 6- and 15-mm panel clips were 2, 6, and 20 cm²/m, respectively. In the 15 mm panel clip case, the equivalent opening area was halved because of the opening area of the starter bar. These results indicate that the overall components in the vented cavity should be considered to evaluate the equivalent opening area correctly, in addition to the thickness of the vented cavity.

In chapter 4, the water accumulation that occurred in an actual house was observed in the cases involving horizontal furring strips, and 6 mm panel clips in the experimental house. The verification data regarding the drainage and drying performances for the three vented cavity cases were compared. To assess risk of moisture damage, the summation time for saturation in the wall assemblies was determined from the annual measurement data. The summation times for the cases involving horizontal furring strips and a 6 mm panel clip were approximately 1500 and 650 hours, respectively. Relative humidity in the case of the 15 mm panel clip did not reach saturation point through the annual measurement. The wall assembly with larger equivalent opening area and drainage rate tends to be a lower probability of saturation occurrence.

In chapter 5, the prediction model that considers the moisture balance of adhering water formed on the face and back surfaces of the siding and the vented cavity caused by driving rain was proposed. The accuracy of the prediction model was verified in

comparison with the temperature and humidity measurement results in the experimental house. The calculated period for near saturation point at a vapor retarder was good agreement with the measured period. It was confirmed that the proposed prediction model is available for understanding the hygrothermal behavior of wall assemblies induced by driving rain.

In chapter 6, requirement of the equivalent opening area in the vented cavity was determined to prevent moisture damage caused by driving rain under actual weather conditions. Various simulation studies were implemented using obtained parameters: rain penetration rate, material properties, and airflow rate.

The results showed that an equivalent opening area should be more than $12 \text{ cm}^2/\text{m}$ in the case of siding with higher water absorption and water penetration rate. In addition, the condensation mechanism assumed in the field investigation of chapter 1 was clarified.

In chapter 7, the findings from this dissertation are summarized, and prospects and challenges are discussed.

論文審査結果の要旨

1. 本論文の内容と評価

窯業系サイディングを用いた外壁通気構法は、サイディング嵌合部等からの浸入雨水に加え、居室から浸入した水蒸気を速やかに排出する構法であり、多くの木造住宅で採用されている。しかし、近年はデザイン優先による外壁への雨がかりの増加や断熱構造化の影響もあり、壁内への水分滞留による劣化事例が散見され、現象の解明と対策が急務となっている。本研究は、このような背景を鑑み、雨水由来の結露に起因する劣化現象を解明するため、建築物理に立脚した予測モデルを構築し、要求性能を検討したものである。

論文は、第1章から第7章で構成されており、各章の内容は概略以下のとおりである。

第1章では、外壁通気構法の放湿型結露に関する既往研究を整理したうえで、実際の建物で発生している雨水由来の壁内結露の発生メカニズムを推定し、建築環境工学と材料施工分野を横断的に検討する必要性に言及した。

第2章では、雨掛かりによって通気層に浸入する水分に着目し、外装材であるサイディングの防水性能及び吸水特性を検討した。従来、防水性能は雨水の浸入の有無のみが評価されていたが、本研究では風圧力と浸水率の関係を求め、後述する予測モデルに適用しうる定量的なパラメータを提案した。また、経年劣化した塗膜の物性値も求めており、より実態に即した観点からデータを収集・整理した。

第3章では、通気層の仕様と性能の関係を明示するため、通気層の排水性能及び通気特性を測定した。排水性能に関しては排水経路上に配置される横胴縁等の保水性、通気特性に対してはスターター等の付属部材の閉塞度に着目し、注水試験及び圧力損失試験によって、これらの影響を実験的に明らかにした。

2章、3章では、過去の熱水分解析ではほとんど配慮されていない、外装システムのディテールや付属部材などの影響を定量化し、予測モデルの入力パラメータとして整理しており、高い新規性が見受けられる。

第4章では、実験棟における外壁内の温湿度を測定し、通気層仕様の違いに

よる通気風量や結露性状への影響について、検証データを収集した。過去に、多くの研究で外壁内の温湿度測定が行われているが、外装システムの施工性や防水性能の経年劣化を想定した研究は皆無であった。また、通気層への雨水浸入を再現した実験方法を提案・実施し、雨水由来の放湿型結露の発生を再現するとともに、予測モデルの検証にも使用できるデータを収集した。

第 5 章では、雨掛かりによって外装材及び通気層に形成される付着水の水分収支を考慮した熱水分移動予測モデルを提案し、実験棟の温湿度測定結果との比較からその再現性を検証した。提案された予測モデルでは、2 章、3 章の実験で得られた浸入水の挙動を再現するため、外装材裏面等に付着する水滴の吸水・伝達・流下を定式化し、4 章で得られた測定データと比較・検証した。また、相当開口面積や浸入雨水の滞留率等のパラメータと湿潤時間の関係を、シミュレーションの結果より提示した。

第 6 章では、拡張アメダス気象データを用いて実際の気象条件下における長期のシミュレーション計算を行い、放湿結露防止に必要な相当開口面積を検討し、相当開口面積 $12 \text{ cm}^2/\text{m}$ 以上という、要求性能を提示した。

第 7 章では、本研究で得られた主な知見をまとめて述べ、今後の課題と展望について述べた。

以上のように本研究は、外壁における雨水由来の劣化現象を解明するため、建築物理に加え施工性や経年劣化等を考慮した予測モデルを構築し、分野横断的な観点から外壁通気構法に対する要求性能を検討しており、独創性と工学的実用性が高いものと評価できる。

2. 論文審査の結論

本学位申請論文に対して、令和 4 年 11 月 22 日の建設・環境工学専攻による予備審査、令和 5 年 1 月 13 日の審査委員会による本審査（最終審査）を経て、令和 5 年 2 月 14 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） | 畑 実（埼玉県） |
| 学位の種類 | 博士（工学） |
| 学位の番号 | 乙 第 16 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5年3月16日 |
| 学位論文題目 | 産業副産物を起源とする硬化体のプレキャスト コンクリートへの適用に関する研究 |
| 学位論文審査委員 | 主 査 足利大学教授 宮 澤 伸 吾 副 査 足利大学教授 末 武 義 崇 副 査 足利大学教授 齋 藤 宏 昭 副 査 足利大学名誉教授 横 室 隆 副 査 群馬大学教授 小 澤 満 津 雄 |

論文内容の要旨

本研究は、コンクリート分野における CO₂ 排出量削減、資源有効利用及び社会基盤施設の長寿命化に資することを目的とした、セメントを使用しない硬化体「Industrial By-Product Materials」（以降 IBPM と称する）の開発に関するものである。IBPM は、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、下水汚泥焼却灰の粒度調整灰、膨張材及びアルカリ刺激剤を使用するもので、これを各種プレキャストコンクリート製品へ適用することを検討したものである。

論文は第1章から第6章で構成されており、各章の内容は概略以下のとおりである。

第1章では、研究の背景及び研究の目的について述べるとともに、プレキャスト製品として IBPM コンクリートに要求される性能を示した。

第2章では、IBPM の構成材料の混合比率及びアルカリ刺激剤の選定に関するモルタル実験について示した。IBPM モルタルは高温蒸気養生を行うことで、材齢 1 日で十分な脱型強度を確保できることを示すとともに、高強度化を図るための配合条件を検討し、単位水量の大幅削減と水結合材比の低減等の配合の調整によって、80N/mm² 程度までの高強度化が可能であることを示した。また、一般のセメントコンクリートと同様に、水結合材比と圧縮強度の線形関係が成

り立つことを示すとともに、その関係を用いることによって、 $30\sim 80\text{N/mm}^2$ の幅広い圧縮強度の範囲で配合設計を行うことが可能であることを示した。

第3章では、**IBPM** コンクリートの耐久性を確認するために、収縮性状、耐硫酸性、耐塩化物イオン浸透性、凍結融解抵抗性、すり減り抵抗性、アルカリシリカ反応抑制効果に関する研究を行い、いずれも一般のセメントコンクリートと同等以上の性能が得られた。特に、耐硫酸性及び耐塩化物イオン浸透性が極めて高いことを明らかにした。さらに、硬化体の細孔径分布の測定結果から **IBPM** の緻密な組織が耐久性向上に寄与していることを示した。

第4章では、**IBPM** 製の鉄筋コンクリート部材による静的曲げ載荷試験を行ってその力学特性について検証した。その結果、一般のセメントコンクリートを用いた鉄筋コンクリートと同等の曲げ耐荷性能と変形性能を有していることが明らかとなった。また、従来の鉄筋コンクリートの曲げ理論を用いて曲げ耐力や変形量の算定が可能であり、従来の鉄筋コンクリート部材の設計方法が適用できることを示した。

第5章では、**IBPM** 製プレキャストコンクリートの実物大供試体により各種製品の性能評価を行い、ヒューム管、マンホール、ボックスカルバート、セグメントにおいてセメントコンクリート製品と同等の力学特性を有することを示した。また、**IBPM** 製ヒューム管の下水道管としての流水性能試験を行い、塩化ビニル製管と同等の良好な流水性能を有することを示した。さらに、**IBPM** 製プレキャストコンクリート製品の材料起源の CO_2 排出量の試算を行い、セメントコンクリート製品と比較して約 80% の CO_2 削減効果を有することを示した。

第6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た。すなわち、本研究で開発した **IBPM** コンクリートは、結合材の 90% が産業副産物であり、セメントコンクリートよりも CO_2 排出量を約 80% 削減できるとともに、従来のセメントコンクリートに比べて耐硫酸性は 10 倍以上、耐塩害性は 5 倍以上の耐久性を有すること示した。これらのことから、プレキャストコンクリート製品に適用可能なセメント代替の建設材料として **IBPM** を提案した。

Application of hardened body with industrial by-products to precast concrete

MINORU HATA

Summary

This research aims to contribute to the reduction of CO₂ emissions in the concrete field, the effective use of resources, and the extension of the service life of infrastructures. It concerns the development of the cementless material, with industrial by-products such as fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume, granularity-controlled sewage sludge incineration ash, expansive agent and alkaline stimulant, hereinafter referred to IBPM. The target is to apply IBPM to various precast concrete products.

The paper consists of Chapters 1 to 6, and the outline of each chapter is as follows.

In Chapter 1, the background and purpose of the research were described, and the performance required for IBPM concrete as a precast product was shown.

In Chapter 2, mortar experiments on the blend ratio of constituent materials of IBPM and the selection of alkaline stimulants were shown. It was shown that IBPM mortar had enough demolding strength at the age of one day when it was subjected to high-temperature steam curing. It was also shown that compressive strength up to about 80N/mm² could be obtained by reducing both water content and water-binder ratio. In addition, it was proved that a linear relationship between water-binder ratio and compressive strength was established, and that mix design could be carried out in a wide range of compressive strength from 30 to 80 N/mm² by using the relationship.

In Chapter 3, in order to confirm the durability of IBPM concrete, shrinkage properties, sulfuric acid resistance, chloride ion permeability resistance, freeze-thaw resistance, abrasion resistance, and alkali-silica reaction suppression effects were experimentally investigated. The experimental results show that the performance equivalent to or better than general cement concrete was confirmed. Particularly, IBPM concrete showed extremely high sulfuric acid resistance and chloride ion permeability resistance. Furthermore, from the measurements of pore size distribution of the hardened material showed that the dense structure of the IBPM contributed to the improvement of

durability.

In Chapter 4, a static bending load test was performed on reinforced concrete member made of IBPM to verify its structural properties. As a result, it was clarified that it has the same bending load capacity and deformation performance as reinforced concrete using general cement concrete. In addition, it was shown that it is possible to calculate the bending capacity and deformation using the conventional theory of reinforced concrete, and that the conventional design method of reinforced concrete members can be applied.

In Chapter 5, IBPM concrete full-scale specimens were used to evaluate the performance of various precast concrete products. As a result, it was shown that Hume pipes, manholes, box culverts and segments had the same mechanical properties as cement concrete products. In addition, IBPM Hume pipes were tested as sewage pipes, and it was shown that they had good water flow performance equivalent to PVC pipes. In addition, the CO₂ emissions originating from the materials of IBPM precast concrete products was calculated, and it was shown that they had CO₂ reduction by about 80% compared to cement concrete products.

Chapter 6 summarizes the main findings obtained in this research and presents future developments and issues. In the IBPM concrete developed in this research, 90% of the binding materials are industrial by-products and CO₂ emissions are reduced by about 80% compared to cement concrete, while sulfuric acid resistance is 10 times higher and salt damage resistance is more than 5 times higher than those of conventional cement concrete. Based on these facts, IBPM was proposed as a cement alternative construction material that can be applied to precast concrete products.

論文審査結果の要旨

1. 本論文の内容と評価

本研究は、コンクリート分野における CO₂ 排出量削減、資源有効利用及び社会基盤施設の長寿命化に資することを目的とした、セメントを使用しない硬化体「Industrial By-Product Materials」（以降 IBPM と称する）の開発に関するものである。IBPM は、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、下水汚泥焼却灰の粒度調整灰、膨張材及びアルカリ刺激剤を使用するもので、これを各種プレキャストコンクリート製品へ適用することを検討したものである。

論文は第 1 章から第 6 章で構成されており、各章の内容は概略以下のとおりである。

第 1 章では、研究の背景及び研究の目的について述べるとともに、プレキャスト製品として IBPM コンクリートに要求される性能を示した。

第 2 章では、IBPM の構成材料の混合比率及びアルカリ刺激剤の選定に関するモルタル実験について示した。IBPM モルタルは高温蒸気養生を行うことで、材齢 1 日で十分な脱型強度を確保できることを示すとともに、高強度化を図るための配合条件を検討し、単位水量の大幅削減と水結合材比の低減等の配合の調整によって、80N/mm² 程度までの高強度化が可能であることを示した。また、一般のセメントコンクリートと同様に、水結合材比と圧縮強度の線形関係が成り立つことを示すとともに、その関係を用いることによって、30~80N/mm² の幅広い圧縮強度の範囲で配合設計を行うことが可能であることを示した。

第 3 章では、IBPM コンクリートの耐久性を確認するために、収縮性状、耐硫酸性、耐塩化物イオン浸透性、凍結融解抵抗性、すり減り抵抗性、アルカリシリカ反応抑制効果に関する研究を行い、いずれも一般のセメントコンクリートと同等以上の性能が得られた。特に、耐硫酸性及び耐塩化物イオン浸透性が極めて高いことを明らかにした。さらに、硬化体の細孔径分布の測定結果から IBPM の緻密な組織が耐久性向上に寄与していることを示した。

第 4 章では、IBPM 製の鉄筋コンクリート部材による静的曲げ載荷試験を行ってその力学特性について検証した。その結果、一般のセメントコンクリートを用いた鉄筋コンクリートと同等の曲げ耐荷性能と変形性能を有していることが

明らかとなった。また、従来の鉄筋コンクリートの曲げ理論を用いて曲げ耐力や変形量の算定が可能であり、従来の鉄筋コンクリート部材の設計方法が適用できることを示した。

第5章では、IBPM製プレキャストコンクリートの実物大供試体により各種製品の性能評価を行い、ヒューム管、マンホール、ボックスカルバート、セグメントにおいてセメントコンクリート製品と同等の力学特性を有することを示した。また、IBPM製ヒューム管の下水道管としての流水性能試験を行い、塩化ビニル製管と同等の良好な流水性能を有することを示した。さらに、IBPM製プレキャストコンクリート製品の材料起源のCO₂排出量の試算を行い、セメントコンクリート製品と比較して約80%のCO₂削減効果を有することを示した。

第6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た。すなわち、本研究で開発したIBPMコンクリートは、結合材の90%が産業副産物であり、セメントコンクリートよりもCO₂排出量を約80%削減できるとともに、従来のセメントコンクリートに比べて耐硫酸性は10倍以上、耐塩害性は5倍以上の耐久性を有することを示した。これらのことから、プレキャストコンクリート製品に適用可能なセメント代替の建設材料としてIBPMを提案した。

以上のことから、本研究では、セメントを使用しない新たな建設材料のプレキャストコンクリート製品へ適用性が示されており、その成果はコンクリート構造物における耐久性向上及び地球環境負荷の低減に大きく貢献することが期待され、新規性及び実用的価値も高いものと評価される。

2. 論文審査の結論

本学位申請論文に対して、令和4年11月22日の建設・環境工学専攻による予備審査、令和4年12月26日の審査委員会による本審査（最終審査）を経て、令和5年1月27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。