

論文審査の結果の要旨

バト-エルデネ プレブ-エルデネ
氏名：Bat-Erdene PUREV-ERDENE

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名： RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CONCRETE CONTAINING PHASE CHANGE MATERIALS (PCM)
[相変化材料 (P C M) 混合コンクリートに関する研究開発]

審査委員：(主査) 教授 サンジェイ パリーク
Sanjay PAREEK

(副査) 教授 浦部 智 義 教授 濱田 幸 雄
京都大学教授 小 椋 大 輔 東京大学教授 石 田 哲 也

生活水準の向上と冷暖房需要の増加により、建築部門のエネルギー消費は重大な関心事となっている。国際エネルギー機関 (IEA) の報告によると、建築部門のエネルギー消費量はすでに全体の 30% を超えており、今後 50 年間で特に住宅においてこの割合はさらに上昇すると予想されている。そのため、建物の冷暖房負荷を減らし、エネルギー効率を高めることが急務となっている。

建物の冷暖房負荷を最小限に抑えるために、様々な解決策が導入されている。この増大する問題に対する有望な解決策のひとつが、再生可能エネルギー源の建築部門への統合である。例えば、太陽熱エネルギーを利用することで冷暖房エネルギー需要を減少させることが可能である。これを達成するために、熱エネルギーを貯蔵・放出する顕著な能力を持つ PCM の導入が有望なアプローチとして考えられている。PCM の相転移プロセスは融解と凝固の状態を含み、PCM が冷暖房システムとして機能することを可能にする。周囲の温度が上昇すると、PCM はエネルギーを吸収して固体から液体へと相転移し、温度が下がると固化して蓄積されたエネルギーを周囲に放出する。このプロセスにより、住宅建築において室温を維持し許容可能な熱的快適性を生み出すことが可能になると言われている。この研究は、主に持続可能で省エネルギー住宅の開発に焦点を当てたもので、全 8 章から構成されている。

第 1 章「序論」では、PCM とそのセメント構造への統合について紹介する。

建築分野では、PCM の特性を統合することでこれらの材料を壁、屋根、床に組み込んで室温を効果的に調整するなど、様々な応用が可能になる。PCM の統合によく使われる 2 つの方法は直接含浸法とマイクロカプセル化である。1 つ目の直接含浸法は、多孔質骨材に PCM を吸収させるものであるが、PCM の漏れや蓄熱能力の低下につながる可能性がある。2 つ目の方法であるマイクロカプセル化は、PCM を保護殻で覆うことでこの問題に対処し、加熱・冷却サイクル中もその特性を維持する。しかし、PCM のマイクロカプセル化にはコンクリートの練混ぜ中に摩擦等により割れるという重大な欠点がある。保護殻は機械的剛性が限られたポリマーで構成されるため、内部の PCM が損傷する可能性がある。このような損傷は実質的なエネルギー損失につながる。

第 2 章「PCM を含むフライアッシュフォームコンクリート」では、主にコンクリート構造物に PCM を適用する際に直面する課題について幅広く取り上げた。主な目標は、相変化温度範囲の異なる数種類の PCM を、損傷やエネルギー損失なしに使用する革新的なフライアッシュフォームコンクリートを開発することであった。これを達成するために、本研究ではフライアッシュフォームコンクリートの基本的な材料特性と熱挙動を分析し以下の結果を得た。

(1) OM ミキサーという特殊な練混ぜ機を使用することで、マイクロカプセル化された PCM は、コンク

リートマトリックス内でひび割れを生じたり損傷を受けたりすることなく、その構造的完全性を維持できることが立証された。

- (2) PCM は室内温度の変動を低減し、建物のエネルギー節約と熱的快適性の可能性を示すことが明らかになった。

第3章「PCMによるコンクリートのエネルギー貯蔵能力の強化」では、PCMフォームコンクリートの省エネの可能性を確認する先行研究を進展させる。PCMを組込んだコンクリートのエネルギー貯蔵能力を高めることに焦点を当て、2方向からのアプローチを紹介する。第一のアプローチは、PCMコンクリートの熱伝導率を高め、相変化過程における熱伝達を促進することである。フォームコンクリート、普通コンクリート、超重量コンクリートなど、様々なタイプのコンクリートについて熱伝導率と蓄熱能力を分析した。第二のアプローチは、対応可能な温度帯を拡張するために、各種PCMの混合物をコンクリートに組み込むことである。本研究では、エネルギー貯蔵能力に重点を置き、材料特性と熱挙動に焦点を当てている。

- (1) 2種類のPCMを普通コンクリートと合わせた場合、混合PCMフォームコンクリートとは対照的に、熱伝導率が19%増加することが示された。
- (2) 同様の比較において、蓄熱容量が34%増加することが示された。

第4章「PCMのプレキャストコンクリート壁パネルへの応用」では、プレキャストコンクリート工場との共同研究について述べる。この研究の主眼は、外断熱PCa工法を採用した集合住宅に見られる重大な問題への対処にある。外気温の変化や日射に起因する外壁のひび割れや異音が報告されている。根本的な問題は、タイル、外壁材、基礎構造間の膨張率の温度差によって発生する応力に関連している。

プレキャストコンクリート工場は、これらの問題に対処するため外壁温度の過昇を防ぐこと、接着強度が0.4MPaを超えるようにすること、構造内のPCMの形状完全性を保つことなど、正確な基準を設けた。これらの要件を満たすため、本研究では接着強度とその他の機械的特性を高めることに焦点を当てた。

これらの課題を克服するために、本研究ではポリマーセメントモルタルを使用した。構造物の接着強度とその接着力を高めることができるとともに、温度過昇に関する問題に対応するため、ポリマーセメントコンクリートにPCMを組み込むことを検討し、以下の知見を得た。

- (1) PCMを添加した場合でも、モルタルにポリマーを添加することにより機械的強度が大幅に向上し、前述の要件を満たした。
- (2) PCMを添加したモルタルは、特に熱的性能の向上と温度過昇の抑制に関して有利な特性を示した。

第5章「超軽量PCMエネルギー(NRG)フォームコンクリート」では、ドイツのダルムシュタット工科大学との共同研究を通じて、超軽量PCMフォームコンクリート「NRGフォーム」の革新的な分野を探る。NRGフォームとは、ダルムシュタット工科大学で開発中の特殊PCM(改質鉱物断熱材)であり、その主な利点は、断熱性能と熱エネルギーの貯蔵能力を高めることにある。この研究の目的は2つある。第一に、PCMと一体化した超軽量フォームコンクリートを開発すること。第二に、実際の用途でNRGフォーム混合物の実装とスケーリングを成功させるための実用的な工学設計モデルを作成し、NRGフォームコンクリートの材料特性と熱挙動を詳細に分析することである。主なパラメータには、発泡体の空隙率とリボンの厚さが含まれる。これにより得られた知見を以下に示す。

- (1) 発泡体の空隙率(RP)とリボンの厚さ(RF)の間に $RF=f(RP)$ という明確な関係を確立する経験的モデルの定式化に成功した。このモデルは、NRGフォームの断熱性とエネルギー貯蔵能力を最適化するものである。

第6章「PCMコンクリートの数値シミュレーション解析」では、PCMコンクリートのエネルギー効率を調査するため、包括的な数値シミュレーション解析を実施した。本章の主な目的は、数値計算によって実験データを検証し、コンクリートのエネルギー効率に関する予測モデルを確立することである。これらの目標を達成するため、PCMコンクリートにおける熱伝導の研究から得られた実験に基づき、1次元モデルを開発した。コンクリート内の熱伝導は、フーリエの法則に基づく熱伝導方程式を用いて計算した。これにより得られた知見を以下に示す。

- (1) 数値シミュレーションを実行し、その結果を実験データと綿密に比較した結果、両者の間に顕著な整合性があることが明らかになった。その後、検証された数値的アプローチを PCM 発泡コンクリートの挙動を探るために拡張した。
- (2) 数値シミュレーションにより、様々な PCM フォームコンクリートにおいて室温変動を効果的に緩和する上で、PCM が極めて重要な役割を果たすことが明らかになった。このシミュレーションプロセス全体が、Matlab 2023a ソフトウェアを使って綿密に実行されたことは注目に値する。この成果は、PCM コンクリートシステムにおけるエネルギー効率の理解と予測を進める上で有望である。

第 7 章「PCM を適用した住宅のエネルギー解析シミュレーション」では、PCM コンクリートに関するエネルギー分析シミュレーションの詳細な検討を行う。建築材料としての PCM コンクリートの統合に関するエネルギー効率と費用対効果の評価を掘り下げている。これらの複雑なエネルギー分析を行うために、本研究では高度なエネルギー・シミュレーション・プログラム・ソフトウェアである「EnergyPlus」を活用した。このツールは、建物内の熱エネルギー動態を綿密に比較・精査するために使用される。この評価は主に、従来の壁材と PCM フォームコンクリートの温度変化を比較することに主眼を置いている。これらのエネルギー分析シミュレーションから同時に得られた以下の結果は洞察に富んでいる。

- (1) 住宅における PCM 利用の有効性として、気候が PCM 材料の相変化温度と密接に一致する地域では、特定の気候帯と本質的に結びついていることを示した。しかし、使用する PCM の種類を気候帯に合わせて適切に調整すれば、シミュレーション結果に基づき、冷暖房エネルギー負荷の約 20～30%の削減が達成可能である。

第 8 章「結論」では、本研究の結果を総括し、今後の挑戦的な展望を示した。

この結果は、PCM が室内温度の変動を最小限に抑え、省エネルギーと建物の快適性を改善できることを示している。本研究は、PCM コンクリートを用いたエネルギー効率の高い建築を明らかにし、将来の持続可能な建築研究に貢献するものである。

このような研究成果が得られたことは、論文提出者の豊富な学識と優れた研究能力を裏付けるものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和 6 年 2 月 2 2 日