潜熱蓄熱内装左官材の圧縮強度と施工性に関する研究

A STUDY ON THE EVALUATION BY THE COMPRESSIVE STRENGTH AND WORKABILITY OF A PCM PLASTERED WALL

草間友花 ——— *1 石戸裕二 ——— *2

Yuka KUSAMA ——— *1 Yuji ISHIDOYA ——— *2

キーワード：

潜熱蓄熱材 (PCM), 内装左官材, 圧縮強度, フロー試験, 主観評価, 施工性

Keywords:

Phase change materials (PCM), Interior plastering materials, Compressive strength, Flow test, Subjective evaluation, Workability

In previous studies, we developed a phase-change material (PCM) plastered wall, which is a novel finishing material with high thermal storage capacity. The PCM-plastered wall exhibited significant improvements in indoor environments and energy saving through an experimental module.

This paper presents measurement results of tests conducted to determine the physical property of the PCM plastered wall under several Japanese Industrial Standards (JIS). The workability of the PCM plastered wall was evaluated using our subjective test to encourage the widespread use of PCM microencapsulated building thermal storage materials.

1. はじめに

住宅の熱環境性能及び省エネルギー性能を向上させるための手法として、断熱性能の強化や、室の熱容量を高める方法などが挙げられ、生活温度帯で室内の熱容量を増大させることが可能な潜熱蓄熱材 (以下、PCM) を適用した蓄熱建材が注目されている¹⁻⁴⁾。これらの既往の研究¹⁻⁴⁾では、PCM を含む石膏をボード状に成型して内装建材として利用した場合の室内環境改善効果及び省エネルギー効果について、詳細な検討が行われてきた。筆者らは⁵⁻⁸⁾、マイクロカプセル PCM (以下 mPCM) を内装左官材料に混和した PCM 内装左官材を開発し、湿式工法で室内に施工した時の熱的諸性能及び省エネルギー効果について検証を行ってきた。しかし mPCM を適用した PCM 内装左官材の実用化に向けて、母材と mPCM の混和率が材料の圧縮強度、乾燥収縮量やフロー値など施工性に及ぼす影響など、技術的な諸課題についても明らかにする必要がある。

本研究では、 β 石膏、軽量セメントモルタル及び石膏プラスターを母材とした乾式・湿式の両工法に適用可能な数種類の PCM 内装左官材のサンプルを作製し、mPCM の混和率をパラメータとしたときの材料的な諸性能を調べて実用化への可能性を検討した。

2. PCM 内装左官材

2.1 PCM 内装左官材の概要

本研究で取り上げた mPCM (FP-25: M 社製) は比較的マイクロカプセル化し易いノルマルパラフィンを内包し、構成する炭素数によって生活温度近辺における融点設定が可能という特徴がある。PCM の組成⁹⁾は、n-オクタデカン (95wt.%)、n-ヘキサデカン (5wt.%) であり、融解温度は 25℃である。また測定結果より、真密度は 890kg/m³であった。本実験で採用した mPCM は容態がパウダー状、固形成分率は 70%程度でアクリル樹脂によりマイクロカプセル化されている。

mPCM の外観を写真 1 に、顕微鏡による拡大図を写真 2 に示す。また、母材には β 石膏 (Plaster: P)、既調合軽量セメントモルタル (Lightweight Cement Mortar: LCM)、既調合石膏プラスター (Ready-mixed Gypsum Plaster: RGP) を採用した。これらの内装左官材料に mPCM を混和させることで蓄熱性能を向上させた種々の PCM 内装左官材を作製してその材料的な諸性能を調べた。

写真 1 マイクロカプセル PCM

写真 2 顕微鏡写真^{注1)}

2.2 PCM 内装左官材の試験体作製

β 石膏を母材とした場合の試験体の基本的な作製方法を以下に示す。NC 値とは、PCM 内装左官材の母材に対する水の重量比であり、PCM 混和率とは、mPCM と母材との全重量に対する mPCM の重量百分率である。NC 値が高すぎると乾燥収縮が大きく割れやすいため、NC=1.0~1.3 の範囲で調合設計を行った。型枠 (内法寸法 300×300×12mm) を作成したのち、設計 mPCM 混和率、NC 値となるよう β 石膏、mPCM、水を準備する。混練容器に β 石膏と水を加え、泡立たせないようにヘラで約 7 分^{注2)}間練り混ぜる。さらに mPCM を加えて約 3 分間^{注2)}程度、材料がペースト状になるまで練混した。乾式工法への適応性の検討もできるよう、ペースト状にした材料を型枠に流し込んで表面を均して自然乾燥させた (写真 3)。この際、乾燥収縮や亀裂等が生じないかを目視で経時観察した。また、湿式工法に関わる検討では、同様に作製したペースト状の材料をラスボードにコテで塗り付け、作業のし易さなどを検討するとともに、自

¹⁾ 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 博士課程・修士 (工学)
(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

²⁾ 室内気候研究所 主席研究員・博士 (工学)

¹⁾ Doctoral Course, Dept. of Architecture, School of Engineering, The Univ. of Tokyo, M. Eng.

²⁾ Principal Investigator, Institute of Indoor Climate, Dr. Eng.

然乾燥させて、ひび割れ等の発生がないかを目視で観察した(写真4)。 β 石膏を母材とした湿式工法の検討では、硬化遅延剤としてクエン酸ナトリウムを使用し、0.5g/kgで40～90分程度の硬化遅延効果を確認した。 β 石膏を母材とした乾式工法用のPCM内装左官材は混和率10～40wt.%の範囲でひび割れなどの障害なく作成することができた。また、湿式工法の検討では β 石膏及び下塗り既調合石膏プラスターを同量混ぜたものを母材とすることで、PCM内装左官材の混和率30 wt.%以下の範囲で、ひび割れ等の発生がないことを確認した。さらに、湿式工法施工時には混合軽量骨材を混和することで、材料のコテからの離れが良好になり施工性が向上した。ただし、実際の温湿度等の施工環境が実験結果に与える詳細な影響については、今後さらなる検証が必要である。

写真3 乾式工法

写真4 湿式工法

3. 粉末材料のふるい分け試験

図1に既調合石膏プラスター(RGP)と既調合軽量セメントモルタル(LCM)のふるい分け試験結果の比較を示す。RGPは0.075mm以下の微細な粒子が70%以上を占めた構成となっており、LCMと比べて骨材の粒径が全体として小さいことがわかる。

図1 ふるい分け試験の結果

表1 嵩比重試験結果

No.	名称	種類	比重 [kg/m³]
1	PCM	潜熱型蓄熱材料 (mPCM)	455
2	P	β 石膏 (JIS R 9111)	815
3	LCM	既調合軽量セメントモルタル(LCM)	797
4	B	下塗り既調合石膏プラスター (JIS A 6904)	892
5	RGP	RGP	1377
6	P10	β 石膏 + PCM10 wt.%	732
7	P20	β 石膏 + PCM20 wt.%	686
8	P30	β 石膏 + PCM30 wt.%	642
9	P40	β 石膏 + PCM40 wt.%	591
10	B10	下塗り既調合石膏プラスター + PCM10 wt.%	828
11	BP30	下塗り既調合石膏プラスター + β 石膏 + PCM30 wt.%	680
12	LCM10	LCM + PCM10 wt.%	749
13	LCM20	LCM + PCM20 wt.%	707
14	LCM30	LCM + PCM30 wt.%	662
15	LCM40	LCM + PCM40 wt.%	623
16	RGP10	RGP + PCM10 wt.%	1219
17	RGP20	RGP + PCM20 wt.%	1103
18	RGP30	RGP + PCM30 wt.%	1025
19	RGP40	RGP + PCM40 wt.%	970

4. PCM内装左官材の嵩比重計測試験

PCM内装左官材の熱性能試験における基礎資料を得る目的で、成形したPCM内装左官材の嵩比重を測定した。mPCM、粉末材料及びPCM内装左官材の嵩比重のそれぞれの測定結果を表1に示す。表1中のNo.2は市販の石膏ボードであり、No.6～9の母材は β 石膏(JIS R 9111)、No.4は下塗り既調合石膏プラスター(JIS A 6904)、No.10は β 石膏とNo.4の下塗り材を同量混ぜたものを母材とし、これにmPCMを混和した。水の密度の温度特性¹⁰⁾は、式(1)で近似して求めた。単体のmPCMはLCMに比べて比重が小さいので、mPCM混和率を高くするほどPCM内装左官材の比重は小さくなる傾向があることがわかる。また、RGPにmPCMを混和すると硬化遅延が生じ、それに起因するひび割れ・そりなどの品質の低下が目視により確認された。これを解決するために、3種類の硬化促進剤を採用して各試験体に添加し硬化時間を調整した。下塗りと仕上げの施工では硬化時間の要求が異なるため、遅延剤に関する適合実験及び施工段階ごとの最適な調合設計が必要となる。

$$\rho = -0.0027\theta^2 - 0.1534\theta + 1001.6 \quad (1)$$

ρ : 水の密度 [kg/m³], θ : 水の温度 [°C]

写真5 曲げ強度試験

写真6 圧縮強度試験

図2 曲げ強度試験結果

図3 圧縮強度試験結果

5. PCM 内装左官材の強度試験

5.1 曲げ・圧縮試験の概要

JIS R 5201¹¹⁾、¹²⁾に準拠して、 β 石膏(P)、既調合軽量セメントモルタル(LCM)、既調合石膏プラスター(RGP)を母材とした材齢 21 日の PCM 内装左官材の曲げ及び圧縮強度試験を行った(写真 5、写真 6)。曲げ強度試験の試験体数は各 3 本、圧縮強度試験は各 6 片である。P20 は、断面欠損があったため、圧縮試験の内 1 片を除外した。

5.2 曲げ・圧縮の試験結果

曲げ強度及び圧縮強度の試験結果をそれぞれ図 2 及び図 3 に示す。既調合軽量セメントモルタル(LCM)は β 石膏(P)と比べて硬化後の強度が高いため、曲げ強度が他の母材よりも高いことがわかる。下塗り用既調合プラスターの JASS 規格強度¹³⁾ (2N/mm²)と比較すると、LCM を母材とした PCM 内装左官材の各強度は、混和率 30wt.%以下の範囲で内装材として十分な強度を有すると考えられる。また、RGP 母材では混和率 10wt.%で JASS 規格強度¹³⁾を満足する結果となった。 β 石膏は mPCM を混和すると急激に強度が低下するのに対して、LCM ではその傾向が抑制されている。RGP は、 β 石膏を母材とした P シリーズと同様に、mPCM を混和すると強度が低下する傾向がみられたが、PCM 混和率 10~40 wt.%の範囲でいずれも目視によるひび割れ、そりや剥離などの欠陥は見られなかった。また、RGP を母材とした PCM 混和率 30 wt.%の試験体で、硬化遅延剤添加と強度の関係を比較したところ、遅延剤を入れたものは入れなかったものに比べて強度が約 25%低下した。ここから、硬化遅延剤は内装材の強度を低下させる可能性があることが確認された。

6. PCM 内装左官材の乾燥収縮試験

セメントモルタル塗りは、建築物の各種構造と仕上げ材とを一体化し、建築物の寸法精度を向上する役割を果たしているが¹⁴⁾、LCM は乾燥収縮によるひび割れや反りが生じやすいことが知られており、本研究で開発した PCM 内装左官材も例外ではない。そこで、LCM を母材とした PCM 内装左官材の乾燥収縮に関する性状を知る目的で、JIS¹¹⁾に基づいて以下の試験を実施した。図 4 に各混和率における材齢ごとの長さ変化率を示す。図から、PCM 混和率を高くするほど材齢に伴う収縮が大きくなることがわかり、基準値以下に抑制するためには膨張剤の添加等の検討が必要となる。

図 4 長さ変化(PCM 混和率比較)

7. フロー試験

7.1 試験概要

PCM 内装左官材の施工性を検討するためには、用途に応じた適切な水分量を検討する必要がある。ここでは、PCM 内装左官材に混合

する水分量を検討するため、NC 値とフロー値の関係を定量化した。フロー試験は JIS A 6904¹²⁾に基づき、写真 7、写真 8 のように実施した。母材を LCM、RGP としたときの、各 NC 値におけるフロー試験の結果を以下のように整理した。

写真 7 フロー試験の様子① 写真 8 フロー試験の様子②

7.2 試験結果

LCM と RGP を母材としたときの各フロー試験の結果を図 5、図 6 に示す。図から、LCM 母材のフロー値は NC 値と線形的な関係を有しており、PCM 混和率を高くするとフロー値は低下する傾向があることがわかった。一方、RGP 母材では、NC 値とフロー値の間に比例的な関係が確認できず、PCM 混和率が高い程高い NC 値を高める必要であることが明らかになった。RGP の硬化速度が 60 分程度と LCM と比較して高いことが結果に影響を与えた可能性も考えられる。混練温度条件などの影響についても今後検討の予定である。

図 5 フロー試験結果 (LCM)

図 6 フロー試験結果 (RGP)

8. 左官施工時の施工性に関する主観的評価

8.1 主観的評価法の概要

PCM 内装左官材の、フロー値を含む施工に関連する要因を総合的に評価するために、主観的評価実験を試みた。なお、母材は前章で NC 値とフロー値の関係が概ね捉えることができた LCM を採用した。まず、フロー試験を行った直後の試験体の硬性、粘性、施工性について主観的申告による評価を実施した。尺度は、硬性、粘性、施工性とし、硬性及び施工性を 7 段階、粘性を 4 段階として、両極尺度を用いて評価を行った(図 7)。

8.2 施工性に関する主観的評価

図8から、硬性は、フロー値に対して線形的な相関関係を有することが分かった。硬性の主観的評価は、高フロー域に向かうに伴って直線的に減少した。一方、粘性は、低フロー域と高フロー域において評価が低くフロー140～180で粘り感が極大となる。同様に施工性に関する評価においても、フロー値が160で施工性が極大化する。図9は、硬性、粘性と施工性の関係を示しているが、いずれの指標とも施工性と密接な関係を有していることが示唆された。

図7 主観的評価の尺度

図8 フロー値と主観的評価 (LCM)

図9 硬性・粘性と施工性の主観的評価 (LCM)

9. おわりに

本研究では、JIS規格に基づいて潜熱蓄熱(PCM)内装左官材の諸性能を定量化するとともに、左官施工時における施工性を主観的評価により検討して、本材の実用化に向けた技術的な検討を行った。

本報で得られた知見を以下に要約する。

1. mPCMの比重は母材より小さいことから、mPCMの混和率を高めるほどPCM内装左官材の比重は小さくなる。
2. β 石膏(P), 既調合軽量セメントモルタル(LCM)及び既調合石膏プラスター(RGP)を母材としたPCM内装左官材を作成し、混和率40wt.%以下の範囲において、ひび割れや剥離などの欠陥が起らないPCM内装左官材を作成した。

3. β 石膏母材のPCM内装左官材はmPCM混和率の増加に伴い著しく強度が低下したが、既調合軽量セメントモルタル(LCM)では30wt.%以下の範囲で強度低下は比較的抑制された。
4. PCM内装左官材のmPCMの混和率が高くなる程、材齢に伴う乾燥収縮は大きくなる。
5. 既調合軽量セメントモルタル(LCM)母材の時、NC値とフロー値は線形的な関係を有することを明らかにした。
6. 硬性、粘性、施工性に関する主観的申告評価を提案し、PCM内装左官材の施工性を主観的に評価したところ、フロー値160[mm]近傍で施工性が極大化することを確認した。

今後、膨張剤等の検討に加え、TVOC、SVOC放散量、耐火性能等、建築内装材の検討に必要な諸性能を継続して明らかにしていく。

謝辞

本研究は、北海道職業能力開発大学校における卒業研究の一環として実施されたものです。本研究を行うにあたり、当時北海道職業能力開発大学校の大坪未生氏、西條佑紀氏、内匠美訪子氏、田畑雅幸教授、(有)村井左官工業の村井来宏氏、三菱製紙㈱の皆様にご協力を頂きました。ここに記して心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 近藤武士 他：潜熱蓄熱壁体による躯体蓄熱システムに関する研究 潜熱蓄熱ボードの性能把握および適用効果の検討、日本建築学会計画系論文集第540号, pp23-29, 2001.2
- 2) 添田晴生 他：PCMを利用した室内熱環境調整に関する研究(第3報)夏期及び冬期におけるPCM壁ボードの熱的性能評価、空気調和・衛生工学会論文集(2003), pp1-11, 2014.2
- 3) 添田晴生 他：躯体蓄熱をベース空調とした省エネルギー住宅に関する研究、その3 夏期におけるPCMボード壁の室温上昇抑制効果に関する数値解析的研究、環境工学総合シンポジウム講演論文集 2001(11), pp437-440, 2001.7
- 4) 佐藤友紀 他：潜熱蓄熱内装建材による暖房負荷の削減効果に関する研究 模型箱実験・試験家屋実験および数値シミュレーションによる検討、日本建築学会環境系論文集 第77巻 第678号, pp651-659, 2012.8
- 5) 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材(PCM)を適用した放射暖冷房システムに関する研究(第1報 β 石膏にPCMを混和した潜熱蓄熱内装材と毛細管マット(CTM)を組み合わせた放射暖冷房システムの基本的性能)、北海道職業能力開発大学校紀要第26号, pp.33-43, 2009.12
- 6) 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材(PCM)を適用した放射暖冷房システムに関する研究(第2報 潜熱蓄熱内装材を施工した木造住宅の熱容量と室温抑制効果)、北海道職業能力開発大学校紀要第26号, pp.45-55, 2009.12
- 7) 石戸谷裕二：潜熱蓄熱材(PCM)を適用した放射暖冷房システムに関する研究(第3報 PCMを適用した放射暖冷房システムの省エネルギー性能に関する検討)、北海道職業能力開発大学校紀要第27号, pp24-37, 2012.2
- 8) 草間友花 他：潜熱蓄熱材を利用した躯体蓄熱空調の負荷削減効果に関する研究、その2 潜熱蓄熱建材を適用したパッシブ住宅における性能評価手法の提案、日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集, pp539-540, 2014.9
- 9) 石黒守：蓄熱カプセルの用途紹介、三菱製紙㈱総合研究所R&Dセンター、2007
- 10) 西川兼康、藤田恭伸：伝熱学、理工学社、pp.457, 1981.12
- 11) JISハンドブック 2005 建築Ⅱ 試験・設備、日本規格協会、2005.1
- 12) JISハンドブック 2005 建築Ⅱ 材料編、日本規格協会、2005.1
- 13) JASS 15 左官工事、日本建築学会、2007.6
- 14) 守明子他：セメントモルタル塗り仕上げ材の乾燥収縮に及ぼす塗り構成の影響、日本建築工学会論文報告集、第10巻、第3号、2003.5

注1) 電子顕微鏡写真は、三菱製紙㈱から提供を受けた。

注2) 練り混ぜ時間は経験則から求めた。

[2016年2月2日原稿受理 2016年9月20日採用決定]