論文 外気環境変化に伴うモルタル仕上げコンクリート壁面内の 温冷ムーブメントに関する基礎研究

根本かおり^{*1}・松本慎也^{*2}・佐藤大輔^{*3}・大久保孝昭^{*4}

要旨:本研究は左官モルタル仕上げを施したコンクリート壁面において,外気環境に伴う温 冷ムーブメントが左官モルタルとコンクリートとの間の剥離発生に及ぼす影響を評価する ことを目的として実施した。実験は試験体の置かれた外気環境を変化させ,試験体内部の温 度分布の経時変化を測定し,温度分布の変化を測定した。また,解析では FEM による熱伝 導解析が試験体内部の温度変化や温度分布を精度良く算定できることを示した。さらに,弾 性解析により左官モルタルとコンクリートとの層間に生じる応力を算定し,外気温が急激に 低下するときに剥離が発生しやすいことを明かにした。

キーワード:左官モルタル, RC 壁面,温冷ムーブメント,温度分布,層間応力,弾性解析

1. はじめに

2005 年 6 月に東京都内の建築物の斜め外壁仕 上げ材が落下して通行人に被害を与え,これを 機に全国的な斜め外壁の調査が行われた。斜め 外壁は垂直外壁に比べて「日射量が多くなり大 きな熱応力が作用すること」が剥離の生じやす い一因と指摘されている¹⁾。温冷ムーブメントが 仕上げ材の剥離発生の重要な要因であることは, 広く認識されており,多くの実験がなされてい るものの^{2)~4)},壁面内の温度分布とその分布に 伴う剥離応力に関する系統的な研究は少ない。

本研究は外気環境変化により壁面内に生じた 温度差が躯体内部の左官モルタルとコンクリー トとの層間応力に及ぼす影響を検討するもので ある。本報では RC 外壁を想定した左官モルタル とコンクリートとの複層試験体を作製し,外気 環境に伴う試験体内部の温度変化を検討した。 さらに外気環境の変化に伴うモルタルとコンク リートとの層間応力を FEM 解析により算定し, 外気温変動と剥離応力の関係を定量的に検討し た。また,アクティブ熱付加によるサーモグラ フィー法により試験体の剥離発生位置を推定した実験結果も併せて示している。

- 2. 実験概要
- 2.1 試験体

試験体の仕様を表-1 に示す。試験体は建築物 の外壁を模したもので,左官モルタル仕上げ面 を屋外側,コンクリート面を室内側と想定して

| 試験体寸法(mm) | コンクリート基盤∶300 × 300 × 100 モルタル仕上げ∶300 × 260 × 10 |
|-----------------|---|
| コンクリート基盤 | 調合は表-2に示すとおり。脱型後は20 水中で28 日間養生し,左官モルタル施工前7日間気中で養 生。 |
| モルタル施工 下地の処理 | せき板(塗装合板)を脱型したコンクリート面に 水湿しを施す。 |
| 左官モルタル | 表-3に示すポリマーセメントモルタルを一層塗りで 金ごて仕上げ。施工後は20 ,65±5%Rhの気中で 14日間養生。 |
| 形状 | 20mm 260mm 20mm 10mm 100mm |

表 - 1 試験体の仕様

*1 独立行政法人建築研究所 建築生産研究グループ 研究員(正会員) *2 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 助手 博士(工学) (正会員)

*3 株式会社コンステック 技術研究本部 工修 (正会員)

*4 広島大学大学院 工学研究科 社会環境システム専攻 教授 工博 (正会員)

いる。試験体 を構成するコ ンクリート基 盤には,表-2に示す品質 のレディーミ

表 - 2 基盤コンクリートに使用したレディミクストコンクリートの調合と品質(受け入れ検査時)

|] + | コンクリート | 水セメント比 | 細骨材率 | 単位量 (kg/m ³) | | | | スランプ 試験結果 | 空気量 | 圧縮強度試験 結果材齢28日 | |
|--------|----------------------|--------|------|--------------------------|------|-----|-----|-------------------------------|---------------|-------------------|------------|
| Ł | | (%) | (%) | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤 | (cm) | (%) | (N/mm^2) |
| | 普通- 24-18- 20N | 60 | 49 | 176 | 293 | 865 | 920 | 減水剤 0.733 AE剤 0.0044 | 18.5 | 4.3 | 34.2 |

クストコンクリートを用いた。基盤作製用せき 板には塗装合板を用い,基盤は脱型後28日間, 水中で養生した。仕上げ層の左官モルタルには 表-3に示すポリマーセメントモルタルを用いた。 仕上げは十分に乾燥したコンクリート基盤の合 板脱型面に水湿しのみを行い,左官モルタルを1 層塗りで仕上げた。

2.2 測定項目

(1)タイプ 試験体における温度測定

タイプ 試験体では図-1 に示す位置で試験 体内部の温度を測定した。同図に示すように, 測定点 ~ の12カ所(試験体中央の断面にお いて仕上げ表面から裏側のコンクリート表面ま で10mm間隔)に CC 熱電対を埋設して温度を計 測した。すなわち,測定点 はモルタル表面,

はモルタルとコンクリートとの界面, はコ ンクリート表面であり, ~ ではコンクリー ト内部の温度を 10mm 間隔で測定した。

(2) タイプ 試験体における計測

タイプ 試験体では強制(アクティブ)熱付加によ るサーモグラフィー法を用いて仕上げの剥離測 定を行った。図-2に試験体形状の仕様を示す。 タイプ 試験体は,コンクリート基盤表面に 20 mm・厚1 mmのスチレンボードで作成した模擬剥離材 を初期欠陥とし,同図に示す位置に貼付けた後, 左官モルタルを施した。なお,サーモグラフィ ー法による測定に先立ち剥離測定に必要な試験 体の表面温度差を得るため,図-3に示す熱付加 のキャリブレーション実験を行い,この結果に 基づき剥離発生の判定を行った。

2.3 外気環境の変化

試験体は図-4に示すような室内,屋外環境を それぞれ設定できる試験装置の境界に左官モル タル仕上げ面を屋外側に向けて設置した。な 表-3 左官モルタルの調合(質量比)

| セメント | 砂 | 水 | ポリマー(P/C) |
|----------------|------|-------|-----------|
| (普通ボルトランドセメント) | (珪砂) | (W/C) | (EVA系) |
| 1 | 3 | 42% | 0.16 |



図 - 1 タイプ 試験体の温度設定位置





図-3 アクティブ熱付加法の検討フロー

お,試験体側面は四面ともロウによる防水を施 し,10 cm厚のポリスチレンフォーム断熱材を張り付けて設 置した。試験体は20の環境下で温度を安定さ せた後,屋外環境のみ図-5 に示す赤外線照射・ 散水の環境変化を 120 回繰返し与えた。室内側 は 20 ・湿度 50%Rh 一定の環境を保つように設 定した。タイプ 試験体ではこの環境下におい て 15 分間隔で温度を計測し,タイプ 試験体で は照射・散水繰返し終了後にサーモグラフィー 法による計測を行った。

3.実験結果および考察

3.1 試験体内部の温度変化

(1)試験体内部温度の経時変化

2.3節に示した方法で試験体の外気環境を変化 させたとき,試験開始より5サイクルまでの試 験体温度の経時変化を図-6に示す。同図は試験 体の温度として,モルタル表面(),モルタル とコンクリートとの境界面(), コンクリート 内部温度()およびコンクリート表面()の 温度の経時変化を示している。屋外側に接する モルタル表面温度()は赤外線照射により急 激に上昇し, 散水開始とともに試験体温度は低 下している。また,室内側に近いほど温度変化は 緩やかになっている。なお,同図において試験 体の温度変化は3~5サイクルの間はほぼ同様の 経時変化を示しており,以降 120 サイクルまで 同様であった。1,2 サイクル目は試験体の初期 温度が影響したものと考えられる。

(2) 試験体内部の温度分布

照射・散水繰返し中の試験体内部の温度分布 を図-7に示した。同図は5サイクル目の温度を 示したものである。赤外線照射時は,モルタル 表面(屋外側)からコンクリート表面(室内側) に向かっての温度が低下して分布している。散 水時は,特にモルタル表面温度が急激に低下し ており,コンクリートの温度変化は緩やかであ る。散水開始30分後では,モルタル表面は照射 時よりも10 近く温度が低くなっており,コン クリート表面(室内)側は照射時よりもむしろ 温度が高くなっている。これは照射による熱の 伝導に時間を要していることを示している。

図-7において温度変化が最も大きいのは試 験体屋外側の ~ の部分であり,この間で断 面内の相対温冷ムーブメントが大きくなってい るものと考えられる。図-8にモルタルとコンク リートの層間を挟む位置 ~ の温度差とコン



間を挟ん 凶 - 4 試験

図 - 4 試験体の設置方法と試験環境









だ温度差(-)の絶対値が最も大きい。こ の温度差は照射開始とともに急激に低下し,照 射を継続するとほぼ一定値を保っている。次に 散水を開始するとこの温度差は急激に上昇し散 水を継続しても1.5 程度で一定値を保つ。すな わち外気環境の変化時に温冷ムーブメントは急 激に変化し,その環境が継続すると相対ムーブ メントは一定に保たれると推測される。

4. FEM解析の結果と考察

4.1 熱伝導解析の概要

試験体内部の温度分布を FEM によって解析す る。このとき,解析では四辺形要素を用いて試 験体内部のモデル化を行い,熱伝導方程式の解 法にはガラーキン法を用いた。解析は,試験体 を図-9 に示すように断面方向に要素数 330 の有 限要素に分割して,実験と同じ屋外環境に対す る熱伝導解析を行った。このとき外部から試験 体への熱の流入は,屋外環境においてモルタル 表面で計測された実験値を用いることとし,室 内側のコンクリート面から屋外環境側に対する 熱伝達,熱放射の影響は簡単のため解析では考 慮していない。また,乾湿繰返しによる含水率変 化に伴う物性値の変化も今回は解析が複雑とな るため考慮しなかった。モルタルおよびコンク リートの材料定数は既往の実験結果を参考に, 表-4に示すような値を用いて解析を行った。

図-10 に試験体の外気環境を変化させたとき の試験開始から 5 サイクルまでの試験体温度の 経時変化を示す。図中,実線および破線が実験 値を示し,マーカーが解析値を示している。ま た,図中の丸数字は測定位置を表している。図 -11 には1サイクル目の照射・散水繰返し中の試 験体内部の温度分布を示した。図中,実線およ び破線が実験値を示し,マーカーが解析値であ る。よって図-10,11から,室内側のコンクリー ト表面付近における温度解析値は実験値と若干 異なるものの,本解析は実験結果の温度変化と 概ね良好に対応していることが分かる。





図 - 9 解析モデル(総要素数330)

表 - 4 材料定数

| 種類 | モルタル | コンクリート |
|-------------------------|------|--------|
| 熱伝導率 ⊮/(m) | 1.28 | 1.51 |
| 密度 kg/m ³ | 2000 | 2300 |
| 比熱 <i>c</i> J/kg | 837 | 837 |



図 - 10 試験体温度の経時変化(実験結果と解析値の比較)

4.2 剥離応力解析の概要

4.1 節に示した熱伝導解析によって求めた温 度分布に対する熱応力解析を行い,試験体内部 に生じる応力および熱による試験体の変形を FEM 解析によって解析した。このとき解析に用 いたモルタル及びコンクリートの材料定数は表 -5に示す通りである。

図-12 に試験体の代表的な変形状態を示す。 同図より,外気温上昇時には,モルタル側が膨 張し,図-12.a.のように変形し,外気温低下時 には図-12.b.のように変形していることがわか る。また,これらの変形時(外気温上昇時及び 低下時)におけるモルタル中央部の主応力状態 を図-13に拡大して示す。同図より,モルタルと コンクリートとの境界付近の主応力は,外気温 上昇時にはモルタルとコンクリートの境界に直 交する方向(面外方向)に圧縮応力が作用する のに対し,外気温低下時にはモルタルとコンク リートの境界に直交する方向に引張応力が作用 することがわかる。参考までに,コンクリート 境界付近のモルタルに生じる面外方向応力の解 析値は、外気温上昇時は約0.18N/mm²の圧縮応力, 外気温低下時は約 0.16N/mm²の引張応力を示し た。すなわち、本解析結果は左官モルタルとコ ンクリートとの層間に生じる応力は,外気温が 急激に低下するときに引張応力となる傾向にあ り,仕上げ層が面外方向に凸となる時に剥離が 発生することと考え合わせれば、より剥離が発 生しやすい状況であることがわかる。

5.サーモグラフィー法による測定結果

赤外線放射カメラの撮影に適した熱付加方法 についてキャリブレーション実験した結果を表 -6に示す。この結果に基づきタイプ 試験体の 照射・散水繰返し促進劣化前後について仕上げ 表面から赤外線放射カメラで撮影し,写真-1の 結果を得た。また、写真-1には打診検査により検 知した剥離位置についても太線で記入した。写 真の促進劣化後の赤外線画像から試験体の左側, 特に上端部の色が濃くなっており周辺よりも温



温度測定位置

図 - 11 試験体温度分布(実験結果と解析値の比較)

| 衣-5 材科 正剱 | | | |
|----------------------------|------------------------|------------------------|--|
| 種類 | モルタル | コンクリート | |
| ヤング係数 N/mm ² | 2.50 × 10 ⁴ | 4.32 × 10 ⁴ | |
| ポアソン比 | 0.15 | 0.15 | |
| 線膨張係数 1/ | 9.5 × 10 ⁻⁶ | 9.6 × 10 ⁻⁶ | |







度が高いことが分かる。これは写真画像と照 合し剥離検知位置とほぼ一致していること が分かる。また,模擬剥離材の色画像と比較 して,左端部は同程度の色の濃さであること から剥離は接着面において発生したと推測 できる。前出のひずみ差の結果から試験体端 部には面外方向に大きな引張り力が働いて いたことに起因して剥離が生じたと考えら れる。また,中央部については面内方向への 伸びが大きく,面外方向に対しては凹となっ ていたことから剥離が生じなかったことと 一致している。

6まとめ.

本研究では左官モルタル仕上げを施した コンクリート壁面模擬試験体の外気環境を 変化させ,試験体内部の温度分布の経時変化 を測定し,温度分布の変化を測定した。赤外 線照射時,散水時の試験体内部の温度変化を 測定し,また,解析では FEM による熱伝導

解析が試験体内部の温度変化や温度分布を精度 良く算定できることを示した。さらに,弾性解 析により左官モルタルとコンクリートとの層間 の面外方向に生じる剥離応力を算定し,外気温 が急激に低下するときに剥離が発生しやすいこ とを明かにした。

本研究成果は最近,社会問題化した建築物の 斜め外壁の仕上げ材など,温冷ムーブメントに より生じる仕上げ材の剥離・剥落の防止に役立 つものであると考える。

謝辞

本稿をまとめるにあたり広島大学大学院修士課 程・森田翔君にはご協力いただいた。ここに記し て謝意を表す。

参考文献

 近藤照夫,斜め外壁の標準的な施工法と保全の 考え方,BELCA NEWS,Vol.18 13, pp.55-59, 2006.7

表 - 6 アクティブ熱付加による剥離判別条件

| 項目 | 撮影に適した熱付加条件 |
|-------------------------------------|--|
| 赤外線画像の検知範囲 | 表面から深さ1cmまでの位置に発生した剥離を対象 |
| 熱付加方法 | 室内の雰囲気温度変化 仕上げ表面からの温度上昇による熱付加 |
| 温度変化条件 〔室内容積:6m ³ 対象〕 | 仕上げ面側(撮影面): 20 40 /5min後 40 一定持続 コンクリート面側(裏面):20 ·50%Rh一定 |
| 撮影時間 | 熱付加開始から20分経過後 |
| 剥離部と健全部の温度 差条件 | 最適撮影温度差∶0.4 (検知可能温度差∶0.2 以上) |
| 剥離検知可能条件 | 剥離面積:幅2cm以上 (1 深さに対し幅が1/2以上あれば検知可能) 剥離厚さ:1.0mm以上 (2 空気層が存在すれば0.5mmでも検知可能) |





- 2) 能登谷恭一,馬場明生,近藤照夫,原田進:セ メントモルタル塗り用吸水調整材の性能評価 (その3日本建築仕上げ学会品質基準案による 性能評価のまとめ),日本建築仕上学会大会学術 講演会研究発表論文集,pp.141-144,1993.9
- 3)大久保孝昭,根本かおり,新井正満:左官モルタ ルとして軽量モルタルを用いたタイル張り壁面 の耐久性,コンクリート工学年次論文集,Vol.21, No.2, pp.889-894,1999
- 4)小笠原和博,山崎健一:モザイクタイル裏連結ユ ニットの接着性に関する検討,日本建築学会大 会学術講演梗概集材料施工,pp.1039-1040,1999.9