

4. タイルの浮きと含水率との関係

－その2 乾燥実験の解析－

Relationship between Tile Exfoliation and Moisture Content

－ Part2 Analysis of Drying Experiments －

恩村 定幸*¹

要 旨

コンクリート外壁に施工されたタイルの浮きと含水率との関係を把握するために、タイル張りコンクリート試験体の乾燥実験を行った。その結果、試験体の含水率がある程度まで低くなるとタイルに浮きが生じることが分かった。このことから、壁体の含水率がタイルの浮き発生の評価指標となる可能性が考えられる。そこで、乾燥実験に供した試験体内の含水率分布を解析し、評価指標となる含水率値を推定した。

キーワード：コンクリート外壁／タイル／浮き／含水率／乾燥実験／数値解析／熱水分同時移動

1. はじめに

外壁タイルの浮きは、雨漏りや外壁の耐久性などに大きな影響を及ぼす。さらに、浮きが進行してタイルが剥落した場合には、人命に関わるような大事故を引き起こすこともある（写真－1）。そのため、以前より、タイルの浮きを防ぐ対策が様々に講じられているが、タイルの浮きは完全には無くなっていない。それは、タイルの浮きの原因が以下に示すように多岐にわたり¹⁾、原因相互の複雑な関係が必ずしも明確にされていないためと考えられる。

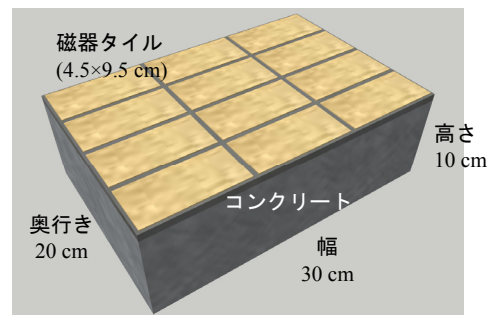
- ・壁体の温度や含水状態の変化にともなう膨張、収縮量の相違で生じる張り付けモルタルと躯体コンクリートとの界面で働くせん断力
- ・壁体の含有水分の凍結、融解による水分の体積膨張、収縮で生じる壁体内部の圧力変化
- ・紫外線による伸縮目地等の劣化

本研究では上記の原因のうち、特に水分の乾燥、すなわち張り付けモルタルを含むコンクリート外壁内の含水率の変化とタイルの浮きとの関係について検討する。

前報²⁾では、タイル張りコンクリート試験体の乾燥実験結果について報告した。図－1に示すようなタイル張りコンクリート試験体3体を60℃、75℃、90℃で乾燥したときの重量変化を測定し、同時に、タイルの浮きの発生状況を打診法によって調査し、次のことが分かった（図－2）。



写真－1 タイル剥落の実例



図－1 タイル張りコンクリート試験体

- ① 比較的低温度の乾燥でも、含水率がある程度まで低くなるとタイルに浮きが生じる。
- ② 乾燥温度が変わっても、浮きは隅のタイルから発生する。

タイル張りコンクリート試験体の含水率が、ある程度の低い値になったときにタイルに浮きが発生したことか

*¹ 技術研究所環境・生産研究グループ

ら、含水率の値がタイルの浮き発生の一つの指標になると考えられる。しかし、前報で示した含水率は試験体全体の含水率であるため、タイルの浮きに直接関係すると考えられる張り付けモルタルとコンクリートとの界面の含水率分布の経時変化について解析を行った。

2. 乾燥実験の解析

2.1 概要

解析対象を図-3に示す。計算は3次元の系で、対称性を考慮して全体の1/4の部分について行った。基礎式には熱水分同時移動方程式³⁾を用いた。

境界条件に関しては、周辺空気面に面するコンクリート面（目地および張り付けモルタル部分を含む）とタイル面をすべて第3種境界条件とした。ただし、タイルは水を通さないものとし、熱移動のみを計算した。したがって、タイルと目地との界面およびタイルと張り付けモルタルとの界面については、水分を断湿とする第2種境界条件である。

周辺空気温度には乾燥温度（60℃、75℃、90℃）を与えた。湿度は、乾燥機が設置された室内の空気（20℃、70%）が乾燥機に取り入れられるので、その水蒸気圧（1636Pa）と乾燥温度より相対湿度を算定して与えた（60℃乾燥：8.2%、75℃乾燥：4.2%、90℃乾燥：2.3%）。

温度の初期条件は20℃とした。含水率の初期条件には、前報²⁾で求めた初期の含水率を用いた（60℃乾燥：0.051 m³/m³、75℃乾燥：0.096 m³/m³、90℃乾燥：0.090 m³/m³）。

コンクリートの諸物性には、測定結果や解析により推定した値を用いた⁴⁾。コンクリートの熱伝導率、平衡含水率関係および水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率を図-4、図-5および図-6に示す。図-6ではコンクリートの物性のばらつきを考慮し、2種類の水分伝導率（最小の場合と最大の場合）を示しているが、本報では最大の方を計算に用いた。計算に用いた密度および比熱は、それぞれ 2163kg/m³、837.21J/kgK である⁴⁾。なお、目地および張り付けモルタルの物性については、コンクリートと大きな差異はないと考え、コンクリートと同じ値を用いた。

水の密度と比熱は 1000kg/m³、4186.05J/kgK である。タイルの熱伝導率、密度および比熱は 1.3W/mK、2400kg/m³ および 837.21J/kgK である。

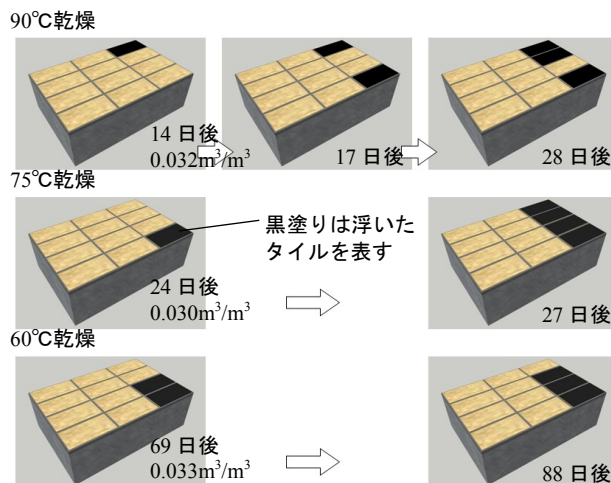


図-2 タイル張りコンクリート試験体
(タイルの浮きの発生状況)

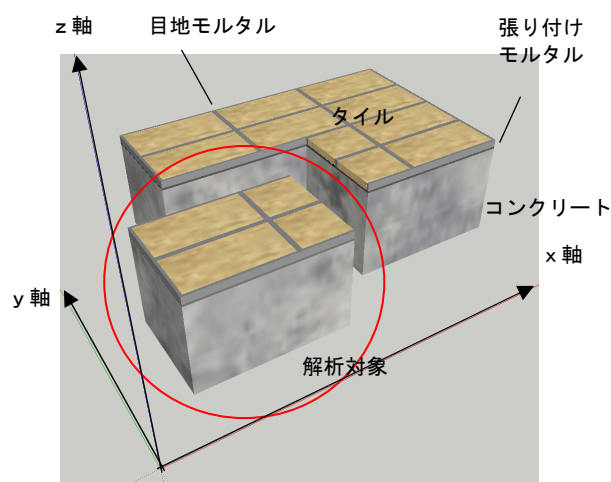


図-3 解析対象

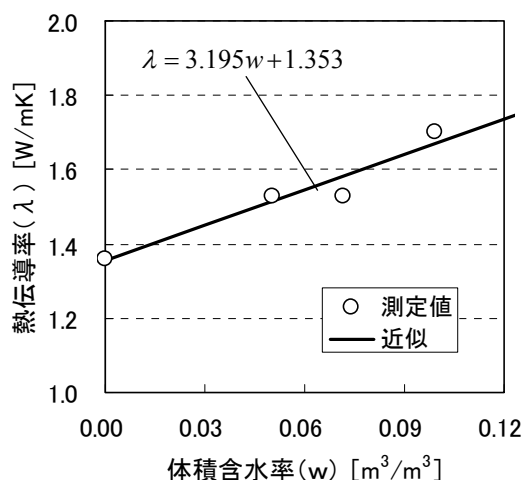
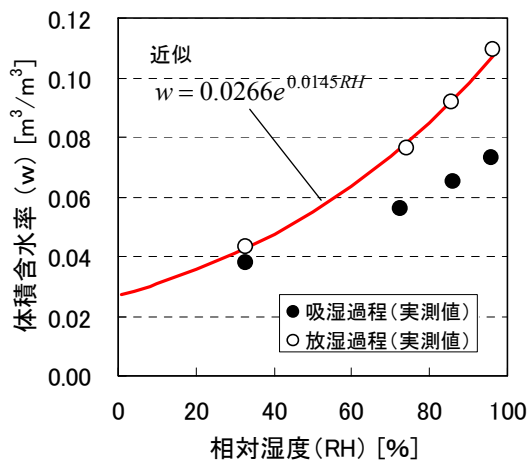


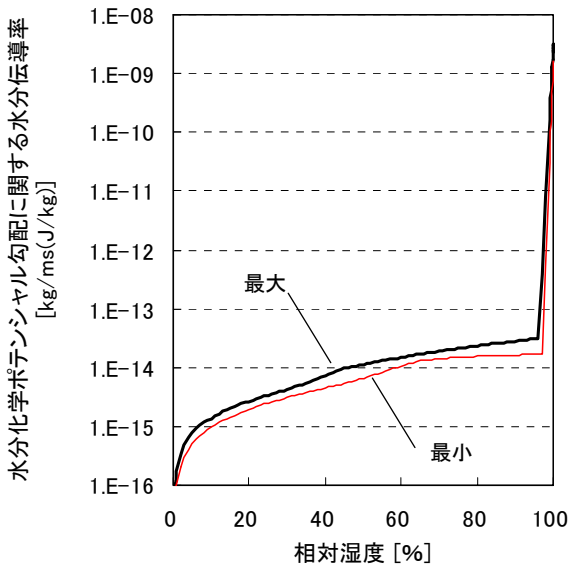
図-4 コンクリートの熱伝導率

対流熱伝達率は、乾燥機内の風速（3m/s）よりユルゲスの実験式を用いて $17.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ とした。放射熱伝達率を $5.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ としたので、総合熱伝達率は $22.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ となる。また、湿気伝達率はルイス則より総合熱伝達率を用いて算定して $1.46 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2\text{sPa}$ となる。

なお、コンクリート（モルタル）の熱容量には水分の影響を、相変化熱には温度効果を考慮した。飽和水蒸気圧には Goff-Gratch の近似式を用いた。



図－5 コンクリートの平衡含水率関係



図－6 コンクリートの水分伝導率

計算には前進型有限差分法を用いた。位置刻みは $0.001 \sim 0.016 \text{ m}$ の不等分割とし、境界近傍の位置刻みを小さくしている（分割数は、x 方向が 27（質点数：28 点）、y 方向が 29（質点数：30 点）、z 方向が 25（質点数：26 点）である）。このように位置刻みが小さい場合、通常の差分式を用いた計算では時間刻みを極めて小さくする必要があり、計算時間が莫大となる。そこで、時間微分項を差分しない方法、すなわち、隣接する差分点の状態量を定数とした常微分方程式の解を用いて計算を行った⁵⁾。時間刻みは 1 秒とした。

2.2 結果と考察

試験体の体積含水率の計算結果と測定結果との比較を図－7 に示す。計算結果と測定結果とは良く一致している。

図－8 に 60°C 乾燥で最初にタイルに浮きが生じた時点（図－7 中、矢印で表示、69 日後）における張り付けモルタルとコンクリートとの界面での含水率の水平分布（計算値）を示す。隅部が他の場所よりも含水率が低い（最大で約 $0.033 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ）。

隅のタイルを A、端のタイルを B および C、中央のタイルを D とした場合（図－9 参照）、それぞれのエリアにおける、 60°C 乾燥での張り付けモルタルとコンクリートとの界面の含水率の最大値の経時変化を図－9 に示す。A（隅部）の乾燥速度が他の場所よりも速く、最初にタイルに浮きが生じたときの含水率は約 $0.033 \text{ m}^3/\text{m}^3$ である。

なお、図示していないが 75°C 乾燥、 90°C 乾燥におけるこの値は、それぞれ $0.030 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.031 \text{ m}^3/\text{m}^3$ であった。

以上の解析結果から、タイルの浮きは体積含水率が少なくとも $0.033 \text{ m}^3/\text{m}^3$ よりも高ければ発生しにくいと言える。すなわち、含水率を一定以上に確保することがタイルの浮き発生を防ぐことにつながると考えられる。

3. まとめ

タイル張りコンクリート試験体を用いた乾燥実験（乾燥温度 60°C 、 75°C 、 90°C ）について、3 次元の熱水分同時移動解析を行った。その結果、最初の浮き発生時における体積含水率の最大値（場所は張り付けモルタルとコンクリートとの界面）は、 60°C 乾燥で $0.033 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 75°C 乾燥で $0.030 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 90°C 乾燥で $0.031 \text{ m}^3/\text{m}^3$ であった。

このことから、体積含水率が少なくとも $0.033 \text{ m}^3/\text{m}^3$ よりも高ければタイルに浮きが発生しないと言える。すなわち、含水率の制御によってタイルの浮き発生を防ぐことができる可能性が高いと考えられる。

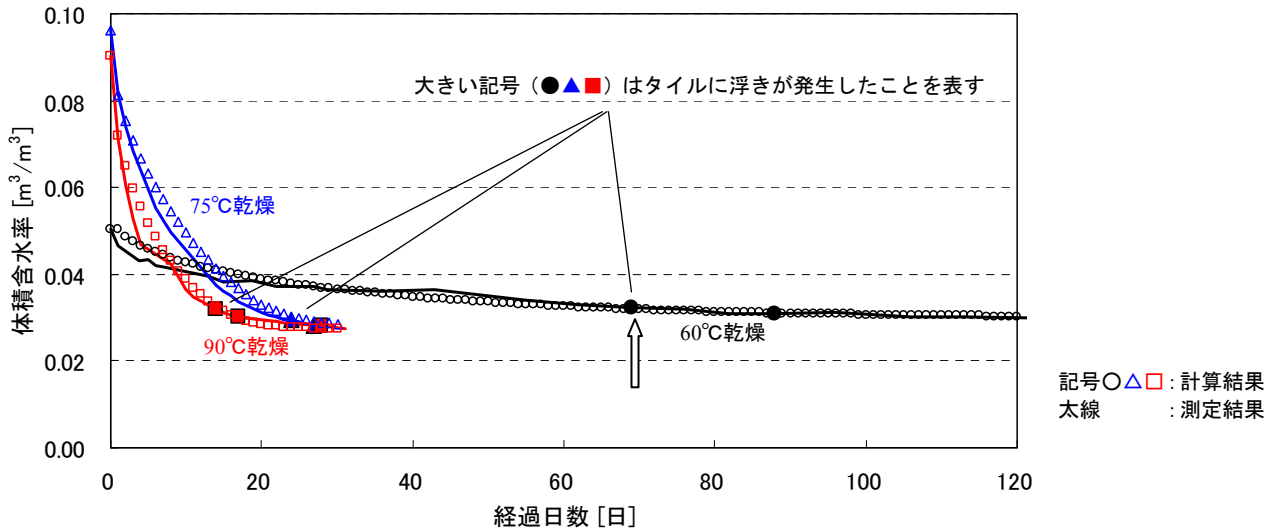


図-7 含水率の比較 (計算結果と測定結果)

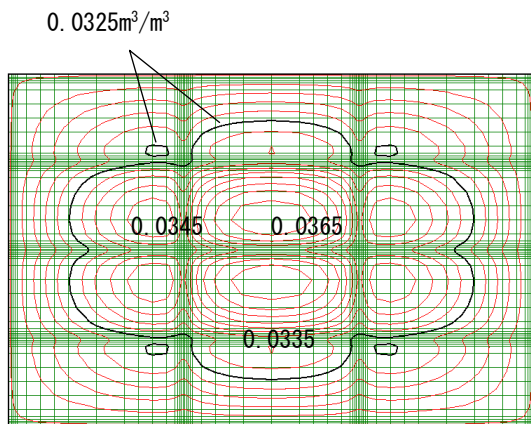


図-8 張り付けモルタルとコンクリートとの界面 (浮きが生じる場所) における 含水率分布 (計算結果、60°C乾燥)

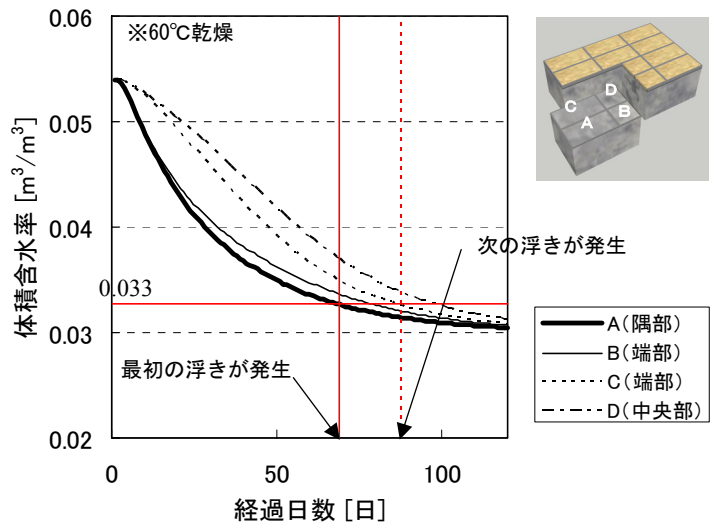


図-9 各エリアの張り付けモルタルとコンクリートとの界面 (浮きが生じる場所) における 最大含水率変動 (計算結果)

[謝 辞]

本研究に際し、ご指導いただいた京都大学大学院工学研究科の鈴木修一教授と小椋大輔准教授に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 「外壁仕上げ剥落防止対策の現状と提案」、日本建築仕上学会編、pp.49～51、1991.3.
- 2) 恩村定幸:「タイルの浮きと含水率との関係」、浅沼組技術研究報告、No.23、pp.7-1～7-5、2011.
- 3) 松本衛:「建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究」(博士論文)、1978.
- 4) Onmura S, Hokoi S, Matsushita T, Ogura D, Kominami K, and Yasui Y: "Concrete Hygrothermal Properties and the Influence of Their Variability on Moisture Movement in Concrete Walls", Journal of ASTM International, Heat-Air-Moisture Transport, 2nd Volume, STP 1519, pp. 56～82, 2009.9.
- 5) 中沢康明:「建築の熱的設計に関する基礎的研究」(博士論文)、1978.