サーモグラフィー法による外壁仕上げ材の剥離検知の
適用限界に関する実験的研究EXPERIMENTAL STUDY ON LIMITATION OF THERMOGRAPHIC
SURVEY APPLIED TO DETECTION OF DELAMINATION OF
FINISHING MATERIALS ON EXTERNAL WALL

込山 貴仁*, 中野 米蔵**, 谷川 恭雄***

Tatsuhito KOMIYAMA, Yonezou NAKANO and Yasuo TANIGAWA

As a means of the detection of delaminated mortar or tile, thermographic survey using thermal imager has advantages of easiness, rate of data sampling, and safety. However, since this method is based on the lack of conductivity of the delaminated area in comparison with that of the sound area, the limitations of this method depend largely upon natural weathering.

In this experiment, in stead of exposing specimens to the sunlight, temperature differences equivalent to the heat which should be given to the specimens by solar radiation were made. As a result, the availability and limitations of this method were clarified.

Keywords : delamination, finish, mortar, thermography

剥離, 仕上げ, モルタル, サーモグラフィー

1. はじめに

近年, タイル・モルタル等の外壁仕上げ材の落下による災害が頻発し, 一種の社会問題となった。その結果, 外壁仕上げ材の剥離部を検知するためのさまざまな非破壊検査手法が開発され, その一部は既に実用に供されている。その中で, 赤外線映像装置を用いて外壁の表面温度分布を測定するサーモグラフィー法は, 足場の設置を必要とせず, 危険な高所作業も伴わず, 大面積の壁面を短時間に測定することが可能であることから注目を集め, 現在も盛んに使用されている。しかしながら, この手法は, その簡便さゆえに十分な基礎研究を経ずして実用化されたために, 知識や経験の不十分な測定者による誤診の事例が少なからず生じている。今日では徐々にサーモグラフィー法に関する基礎研究が進み, 本手法の問題点, それに対する対策, 適用限界などが次第に明らかにされつつあるが, まだ適用方法の標準化には至っていない。

サーモグラフィー法に関する基礎研究としては, 筆者

らによる実構造物大の試験体を用いた実験的研究¹⁾, 内山らによる最適検出波長帯に関する研究²⁾などがあり, 適用限界の確認に関しても新井ら, 筆者らにより, 有限要素法を用いた非定常熱伝導解析による検討がなされている³⁾⁴⁾。しかしながら, この手法は赤外線映像装置が表示する外壁の表面温度分布から, 測定者が自身の判断で, 健全部と剥離部を判定するものであるため, 解析上の適用限界が, 必ずしも肉眼での剥離の認識が可能な限界と一致するとは限らない。このような立場から, 実験的研究は不可欠であるにもかかわらず, まだ適用限界に関する研究はごく僅かしか行われていない⁵⁾⁶⁾。その理由は, 本手法の適用限界が日射量や気温など, 再現性のない気象条件を因子として持つことにある。本来, この手法はその原理上, 気象条件, 外壁の周囲の環境等, さまざまな影響因子により, その信頼性や適用範囲が大きく左右される。したがって, 自然の日射や気温変化を熱源とする実験的研究では, あくまで実験当日の気象条件

本論文の一部は, 引用文献5)および6)に発表した。

* 名古屋大学工学部建築学科 大学院生

** コンステック 専務取締役

*** 名古屋大学工学部建築学科 教授・工博

Graduate Student, School of Architecture, Faculty of Engineering, Nagoya University

Managing Director, Constec Co.

Prof., School of Architecture, Faculty of Engineering, Nagoya University, Dr. Eng.

下での適用限界を確認したことにしかならず、厳密な意味での適用限界を明らかにしたことはならない。そこで、本研究では、模擬的剥離を有する試験体に、東西南北の各方位の壁面が理想的な環境下で受熱する日射量および気温変化に相当する熱量を人工的に与え、サーモグラフィ法により剥離を検知することが可能なモルタル厚さの限界について実験的に検討した。以下に、その結果を報告する。

2. サーモグラフィ法に関わる外界気候

2. 1 外壁の熱収支

図1は、外界気候の変化に伴う外壁の熱収支を示したモデルである。図のように外壁の表面温度は、日射および空気中の分子からの対流熱伝達、放射熱伝達により変化する。したがって、空調等を考えない場合、外壁の表面温度は日射および気温に支配されると考えてよい。

2. 2 サーモグラフィ法の原理

サーモグラフィ法による剥離検知の原理図を図2に示す。同図からわかるように、サーモグラフィ法は、外壁の仕上げ材と躯体との間に生じた剥離部の空隙が断熱層となり、日射や気温変化に起因して生じる外壁の表面温度の日変動の中で、剥離部と健全部との間に表面温度差が生じる時間帯があることを利用して、外壁の表面

図1 外壁の熱収支モデル

図2 剥離検知の原理図

図3 春分の日射量

図4 夏至の日射量

図5 秋分の日射量

図6 冬至の日射量

表1 実験に用いた想定気象条件

方位	東面	西面	南面	北面
季節	春分	春分	冬至	夏至
天候	快晴	快晴	快晴	快晴
最低気温	5℃(6時)	5℃(6時)	5℃(6時)	20℃(5時)
最高気温	15℃(14時)	15℃(14時)	11℃(14時)	28℃(14時)
室内側気温	10℃(一定)	10℃(一定)	8℃(一定)	24℃(一定)
相対湿度	50%(一定)	50%(一定)	40%(一定)	70%(一定)
日射量	図7に示す	図7に示す	図7に示す	図7に示す

温度分布から剥離を検知する手法である。したがって、剥離部と健全部との間に検知可能な表面温度差が生じるためには、十分な日射量と気温変化が必要となる。気温の日較差は、その日の天候によりほぼ決まり、季節によって若干の差異はあるが、快晴日の気温の日較差はおおむね 10℃前後と考えてよい。一方、外壁に表面温度の日変動を生じさせるもう一つの因子である日射量は、季節、外壁の方位、天候により大きく変化し、また、大気透過率の違いから地方によっても差異が生じる。図3～6は、春分、夏至、秋分および冬至の東京における快晴日の日射量の日変動の一例である⁷⁾。同図より、同一地方の同一方位の外壁に与えられる日射量は季節により大きく変化し、南面については冬至、東西面については春分および秋分、北面については夏至に日射量が最大となることがわかる。

そこで、本研究では東西南北、それぞれの方位に面した外壁について、日射量および気温の日較差が最大となる季節、天候として表1に示す気象条件を仮定し、それぞれの外壁に図7に示すとおりの日射量が与えられるものとして実験を行った。

3. 実験概要

3.1 相当外気温度の概念

2.2で示した日射量および気温変化に相当する熱量を人工的に与えるためには、遠赤外線ヒータなどによる人工加熱が考えられるが、これらのヒータには指向性があり、日射のように試験体全体を均一に加熱することはできない。そこで、本研究では、以下に示す相当外気温度の概念に基づいて、外壁が受熱する熱量をすべて空気温度に換算し、図8に示すように、屋外側および室内側の空気温度を、それぞれ可変養生室および可変養生器を用いて制御することによって実験を行った。また、試験体の側面は、側面からの熱の進入を防ぐために、厚さ 300 mmの発泡材を用いて断熱した。相当外気温度とは、日射等により外壁に入射する熱量を、空気温度に換算して評価する概念であり、式(1)により与えられる⁸⁾。

図7 実験に用いた想定日射量

図8 実験状況

表2 相当外気温度の算出に用いた材料定数

	総合熱伝達抵抗 ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	日射吸収率 (%)	放射率 (%)	夜間放射量 (W/m^2)
無風時	0.108	75	90	0
風速2m時	0.051	75	90	0

$$\theta_{\text{solair}} = \theta_a + R_{so} (\varepsilon_{\text{sun}} \cdot J_{\text{sun}} + \varepsilon \cdot J_{\text{nit}}) \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

ここに、

θ_{solair} : 相当外気温度(℃)

θ_a : 空気温度(℃)

R_{so} : 外壁表面の総合熱伝達抵抗($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)

ε_{sun} : 外壁表面の日射吸収率(%)
 J_{sun} : 日射量(W/m^2)
 ε : 外壁表面の放射率(%)
 J_{ra} : 夜間放射量 (W/m^2)

式(1)に基づいて、表1に示した気温変化および図7に示した日射量変化を相当外気温度変化に換算した結果を図9に示す。しかしながら、実際にはこのような高温下での実験は不可能であるため、実験は試験体を風速2m/s程度の熱風により強制加熱し、受熱量を向上させることにより、図10に示す気温条件下で行った。なお、相当外気温度への換算に用いた材料定数は表2に示すとおりであり、気温は式(2)に基づく余弦変動をするものとした。

$$C = \frac{C_{max} + C_{min}}{2} - \frac{C_{max} - C_{min}}{2} \cdot \cos\left(\frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \cdot \pi\right) \quad \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

ここに、

C : 気温($^{\circ}C$)
 C_{max} : 最高気温($^{\circ}C$)
 C_{min} : 最低気温($^{\circ}C$)
 T : 時刻
 T_{max} : 最高気温時刻
 T_{min} : 最低気温時刻

3. 2 実験方法

実験に使用した試験体の形状・寸法を図11に示す。また、試験体の種類とモルタル厚さおよび剥離部の中空層の厚さを表3に示す。

図11 試験体の形状・寸法

3. 3 赤外線映像装置の仕様と表面温度の測定方法

実験に使用した赤外線映像装置の仕様を表4に示す。赤外線映像装置の感度は市販されている多くの赤外線映像装置の最小検知温度差である0.1 $^{\circ}C$ に設定し、10分毎に試験体の屋外側に相当する表面の熱画像を撮影した。なお、以下の記述において、剥離部の表面温度とは、図11

図9 相当外気温度換算値（無風時）

図10 相当外気温度換算値（強制加熱時）

表3 試験体の種類と形状

試験体記号	モルタル厚さ (mm)	中空層の厚さ (mm)
D30W1	30	1
D70W1	70	1
D70W0.5	70	0.5
D100W1	100	1

表4 赤外線映像装置の仕様

測定温度範囲	-50~2000 $^{\circ}C$
最小検知温度差 (30 $^{\circ}C$ 黒体測定時)	0.1 $^{\circ}C$ (16回積分時0.025 $^{\circ}C$)
検出波長帯	8~13 μm
測定視野	水平30 $^{\circ}$, 垂直28.5 $^{\circ}$
検出素子	Hg-Cd-Te
水平解像度	344本以上
瞬時視野	1.5mrad
走査線数	207本
フレームタイム	1秒 (16回積分時17秒)
冷却媒体	液体窒素

に示すように、赤外線映像装置により測定した剥離の中心部におけるモルタルの表面温度測定値であり、健全部の表面温度とは、試験体の四隅から50mm離れた4箇所におけるモルタルの表面温度測定値の平均値である。表面温度の測定に関しては赤外線映像装置の積分機能を用い、16回積分によるS/N改善を行うことによって、0.025℃の温度差まで読み取った。

4. 実験結果

4. 1 表面温度変化

実験開始からの経過時間と表面温度変化の関係を図12(健全部)および図13(剥離部)に示す。表面温度変化は東面が最も急激であり、南面は緩やかな変化を示している。西面は実験開始から270分までは緩やかな温度変化を示すが、その後、表面温度は急激に上昇する。北面の表面温度は実験開始後150分前後までは日射量の上昇に伴って上昇するが、その後、日射量の減少に伴って、下降傾向を示し、実験開始後270分前後から気温の上昇に伴って再び上昇している。実験開始から表面温度が最高となるまでの表面温度の変化量は南面では約22℃、東面では約16℃、西面では約17℃、北面では約5℃であり、モルタル厚さや剥離部の中空層の厚さの違いによる影響は顕著には現れていない。図14および図15には、それぞれ健全部および剥離部の

図12 健全部の表面温度変化

図13 剥離部の表面温度変化

図14 相当外気温度変化量と表面温度変化量の関係 (健全部)

図15 相当外気温度変化量と表面温度変化量の関係 (剥離部)

30分おきの相当外気温度変化量と表面温度変化量の関係を示す。また、相当外気温度の変化量と表面温度の変化量の関係についての回帰式を式(3)および式(4)に示す。

健全部: $y = 0.377x + 0.537$ 式(3)

剥離部: $y = 0.378x + 0.543$ 式(4)

ここに、 y : 表面温度変化量(°C)

x : 相当外気温度変化量(°C)

なお、相関係数 R は、健全部で0.789、剥離部で0.787であった。これは、外壁の表面温度の変化量は相当外気温度の変化量に関する1次の回帰式で表され、サーモグラフィ法の適用に必要な外力エネルギー量の定量的指標として、相当外気温度の変化量を用いることができることを示している。

4. 2 表面温度差

図16～図19にそれぞれ南面、東面、西面、北面の時刻と表面温度差(剥離部－健全部)の関係を示す。南面の試験体D70W1では、8時前後から健全部と剥離部の間に表面温度差が生じはじめるが、熱画像上で、肉眼でも表面温度差の発生を認識できるのは9時前後からであり、表面温度差が最大となる11時前後の熱画像では、明瞭に剥離が確認できる。また、10時前後から試験体D70W0.5に表面温度差が現れているが、熱画像上では、健全部と剥離部の境界部に肉眼で確認できるほど鮮明な輪郭は現れていない。東面の試験体D70W1については、7時30分前後から健全部と剥離部の間に表面温度差が生じはじめ、8時30分頃には肉眼でも剥離と認識できるようになる。また、10時00分前後には試験体D70W0.5に表面温度差が現れているが、南面同様に熱画像上での認識は難しい。西面については、13時前後から試験体D70W1に健全部と剥離部の間に表面温度差が生じはじめ、14時頃には、熱画像上でも肉眼で剥離を確認できるようになり、16時前後には試験体D70W0.5に表面温度差が現れる。しかし、この表面温度差は、熱画像上で肉眼により剥離の存在を認識できるものではない。北面の試験体D30W1では、0.2°C程度の微小な表面温度差しか現れないが、剥離部の輪郭が比較的明瞭で、熱画像上でも肉眼で剥離の存在を認識できる。また、いずれの方位に関しても試験体D100W1の剥離は検知できなかった。また、剥離が検知できた試験体に関しても、肉眼での剥離の認識が可能となる時刻は明瞭ではなく、剥離の中心部に生じた高温部の輪郭が次第に明瞭になり、剥離と確認できるようになるという傾向があった。図20～図29に実験で得られた各試験体の熱画像の代表例を示す。

図16 表面温度差(剥離部－健全部)：南面

図17 表面温度差(剥離部－健全部)：東面

図18 表面温度差(剥離部－健全部)：西面

図19 表面温度差(剥離部－健全部)：北面

図 20 D70W1 (南面)
11 時 00 分

図 21 D70W0.5 (南面)
11 時 00 分

図 22 D100W1 (南面)
11 時 00 分

図 23 D70W1 (東面)
10 時 00 分

図 24 D70W0.5 (東面)
10 時 00 分

図 25 D100W1 (東面)
10 時 00 分

図 26 D70W1 (西面)
15 時 30 分

図 27 D70W0.5 (西面)
15 時 30 分

図 28 D100W1 (西面)
15 時 30 分

5. まとめ

今回の実験で得られた知見を以下に列記する。

(1)東京において理想的な気象条件下で測定を行ったと想定した場合、最小検知温度差が 0.1°C 以下の赤外線映像装置を用いれば、東面、西面および南面に関しては、サーモグラフィ法による外壁仕上げ材の剥離検知は、剥離部の中空層の厚さが 1mm 以上、剥離の大きさが $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 以上であれば、モルタル厚さ 70mm までの外壁に適用できる。ただし、今回の実験は、 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ の比較的小さな試験体を用いて行ったため、試験体の四隅からの熱の回り込みの影響を受け、画像判読が困難な場合も見られた。十分に大きな試験体を用いて実験すれば、より深い位置に存在する剥離でも検知できる可能性が残る。しかしながら、実構造物の場合にも剥離の

図 29 D30W1 (北面)
12 時 00 分

周囲にはベランダや窓枠など熱の回り込みの原因となるものが存在するので、実構造物における測定時にもこれらの周囲に存在する剥離の検知は困難になることが予想される。

(2)サーモグラフィー法の適用に必要な日射量および気温変化量は相当外気温度の概念を用いることによって一つの外力エネルギー量にまとめることができる。これは、サーモグラフィー法の適用法の標準化を行う上で、相当外気温度変化量を定量的指標として用いることが可能であることを示している。

(3)サーモグラフィー法の適用が困難であるとされてきた北面でも、モルタル厚さが30mm以下であれば、剥離検知は可能である。

(4)赤外線映像装置の最小検知温度差は、必ずしも肉眼での剥離の認識が可能な限界と一致するとは限らない。つまり、赤外線映像装置が剥離部に生じた極めて微小な表面温度差を検知したとしても、肉眼でそれを剥離と認識するためには、表面温度差の分布が剥離の形状と一致した鮮明な形状で現れる必要がある。

(5)肉眼で剥離の存在を認識するためには、健全部と剥離部との間に赤外線映像装置で検知可能な表面温度差が生じると同時に、剥離部の輪郭が鮮明に現れる必要がある。熱画像における剥離部の輪郭の鮮明さとは、剥離部と健全部との境界部における表面温度勾配の大きさを意味し、モルタル厚さが薄い場合は剥離部と健全部との境界部に大きな表面温度勾配が生じるが、モルタル厚さが厚くなるほど、表面温度勾配がなだらかになるため、剥離の検知は困難になる。

6. あとがき

本報では、サーモグラフィー法の標準化を目的とする研究の一環として、理想的な環境下における本手法の適用限界について確認した。今後は解析的研究も交え、あらゆる環境下におけるサーモグラフィー法の適用性について明らかにしていく予定である。

[謝辞]

本実験は、住友大阪セメント(株)中央研究所で実施した。本実験に際してご協力を得た車田則充研究所長、小林哲夫副主任研究員をはじめ、同研究所の皆様ならびに名古屋大学大学院生・叶錦氏に謝意を表する。なお、本研究費の一部は、平成5～6年度文部省科学研究費補助金・試験研究(B)によったことを付記する。

引用文献

- 1)谷川, 森, 安: サーモグラフィーによるRC構造物の内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10-2, pp.349-354, 1988
- 2)内山: 熱画像を用いた環境計測法の建築外部空間への応用に関する研究, 東京工業大学博士論文, pp.129-145, 1994
- 3)新井: タイル仕上げ等の剥離検知器の開発, 建設省技術評価書, pp.36-42, 1983
- 4)T. Watanabe, Y. Kurokawa, H. Mori, and Y. Tanigawa: Analytical Study on Estimation of Internal Defect in Concrete Wall by Thermography, Trans. of Japan Concrete Institute, Vol. 15, pp. 281-287, 1993
- 5)葉, 谷川, 野田, 込山: 赤外線サーモグラフィー法による外壁仕上げ材のはく離検知の適用限界に関する実験的研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, No 33, pp.53-56, 1995
- 6)込山, 谷川, 葉, 中野: 赤外線サーモグラフィー法による外壁仕上げ材のはく離検知の適用限界に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.1341-1342, 1995
- 7)日本建築学会: 建築設計資料集成1 環境, 丸善, p105, 1978
- 8)斎藤: 建築気候, 共立出版, pp.19-20, 1993

(1995年9月10日原稿受理, 1996年1月17日採用決定)