タイルの剥離評価に関する研究 その2

－確率論に基づく剥離率推定手法の提案－

STUDY ON EVALUATION METHOD FOR DELAMINATION OF TILES AND MORTAR

－ Stochastic model for delamination ratio －

稲葉 洋平*, 佐々木 正治**, 閑田 徹志***

Yohei INABA, Masaharu SASAKI and Tetsushi KANDA

To understand the quantitative delamination behavior of an external wall consisting of concrete, mortar, and tiles, the authors have proposed a stochastic model for the delamination ratio (that is, number of delaminated tiles/total number of tiles) and have verified it with experimental data. The stochastic model involves the successive estimation of the following 5 values: 1) the temperature change in each material; 2) the thermal strain change in each material; 3) the stress distribution in the delamination layer; 4) the delamination probability distribution in the delamination layer; and 5) the delamination ratio.

To verify the model, the delamination ratio of an external wall consisting of concrete, mortar, and tiles was measured for 1 year. The measurements confirmed that the model provided an accurate estimate of the delamination ratio..

Keywords : Delamination, Tiles, Mortar, Analysis Model, Evaluation, Bond Model

剥離, タイル, モルタル, 解析モデル, 評価方法, 付着モデル

1. はじめに

タイルは最も身近な建築材料の一つであり、様々な場所に使用されている。これはタイルが、意匠性、耐久性、メンテナンス性に極めて優れた仕上げ材料であることと深い関係がある。様々な色、テクスチャーを表現可能な意匠性があり、耐衝撃性、耐候性、耐熱・耐火性、耐水性、耐汚染性、耐薬品性等の点で優れた耐久性及びメンテナンス性を有する。

このように非常に優れた性能をもつタイルであるが、モルタルで接着される湿式工法により張り付けられたタイルは基本的に剥離・剥落する可能性を否定できない。そのため、剥離・剥落を低減するための研究がこれまでも多くなされ、タイルの剥離を定量的に評価する方法がいくつか提案されている。引張強度で評価する方法、タイルを張り付けた角柱供試体を圧縮載荷する追従性試験により限界ひずみ差で評価する方法^{1) 2)} 等が代表的である。

このようにタイルの剥離を定量的に評価する方法はいくつか提案されているが、最も重要なことは剥離率を低減することである。ここで剥離率とは、対象とするタイル全数に対する剥離しているタイル数の割合として定義する。引張強度の評価や限界ひずみ差による評価は、それらの指標が剥離率と相関が高いことを前提としており、その目的とするところは剥離率の低減といえる。

しかし、現状では剥離のリスクを定量的に推定する手法が構築されていないため、剥離の予測や対策を合理的に行うことが難しい状況にある。剥離率を推定する手法が構築できれば、タイルの剥離低

減や外壁の補修計画等に有益な情報を得られる可能性がある。筆者らは前報³⁾において、力学モデルに立脚した剥離モデルを構築し、タイルの剥離を対象とした解析手法を提案したが、剥離率の推定手法までは理論を拡張できていなかった。

そこで本研究では、環境条件、使用材料の物性値及び形状から剥離率を推定する手法を提案する。剥離率を推定する手法は大きく5つのステップから構成され、①温度変化→②温度ひずみ→③界面せん断応力分布→④界面の剥離確率分布→⑤剥離率を順次計算するものとなっている。さらに、推定される剥離率の妥当性を検証するための実験を行い、その結果について考察する。また、既存建物外壁タイルの健全度について、剥離率から評価する簡易な手法を提案する。

2. 剥離率の推定手法

(1) 検討対象

今回検討の対象とするタイルの施工法は、タイルの直張工法とする。直張りとは、コンクリート躯体に下地モルタルを施工せず、直接張付けモルタルによりタイルを張り付ける工法である。下地モルタルがないため施工の省力化につながる。直張りを検討対象とした理由は、これがタイルの接着機構として最もシンプルな構成でモデルの構築に適しており、躯体とモルタルの界面で剥離が生じる限りにおいて、下地モルタルを施工する場合にも容易に拡張できると考えられるためである。

* 鹿島技術研究所建築生産グループ 主任研究員

** 鹿島建設建築管理本部 課長

*** 鹿島技術研究所建築生産グループ グループ長・Ph. D.

Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute
Manager, Building Construction Management Div., Kajima Corporation
General Manager, Kajima Technical Research Institute, Ph. D.

(2) 剥離率推定手法の概要

タイルの剥離率を算定するために図1に示すように大きく5つのステップに分けて考える。なお、剥離率を推定するために以下の5つを仮定した。Ⅰ. 1日の温度ひずみの変動を剥離の主たる駆動力とする。Ⅱ. 温度ひずみの違いにより、界面にせん断応力が発生する。Ⅲ. 剥離のクライテリアとして強度基準を用いる。Ⅳ. 応力、強度にはばらつきがあり、剥離発生は確率的に扱う。Ⅴ. 剥離面積の期待値を全面積で除したものを剥離率とする。

対象は、タイル仕上げされたコンクリート外壁とし、構成材料は、タイル、モルタル、コンクリートの3種類とする。外壁であるため、それぞれの構成材料の温度は外気温及び日射により変動し、温度ひずみを生じる。なお、乾燥収縮などの長期的なひずみ変動はクリープにより緩和されるものとし、短期的な1日の温度ひずみを剥離の主たる駆動力と仮定した。タイル、モルタル、コンクリートの温度ひずみが異なるため、それぞれの材料界面にはせん断応力が発生する。剥離条件を最大応力が破壊強度を上回ることとし、応力及び強度にばらつきがあることを考慮すれば、界面における剥離確率分布が得られる。界面における剥離確率分布を界面方向に積分することで、剥離するタイルの枚数（または面積）を推定する。剥離するタイルの枚数（タイルの剥離面積）をタイルの全数（全面積）で除してタイルの剥離率とする。以下で、5つのステップそれぞれについて概要を示す。なお、本概要はタイルの剥離に限らず、温度変動による剥離全般を取り扱うことができる内容であるため、材料についてはタイルやモルタルに限定せず、一般材料を念頭に説明することとする。タイルの剥離を対象とする場合は、タイルとモルタルを付着材、コンクリートを被付着材とする2材から構成されるものとする。タイルの剥離は、コンクリートと張付モルタル界面で生じる場合が多く、このように単純化しても現象の本質を保持しているものとする。

モデルを用いた場合の概念を図2に示す。なお、付着材の反りなどにより界面に対し垂直方向に生じる剥離については、これに先行して付着材の曲げ破壊が生じるために発生しないものとして、今回の検討対象としていない。

① 初期条件

構成材料として付着材と被付着材の2材が存在するものとする。初期条件では、この2材の長さは同じであり、2材同士で相互の応力伝達はないものとする。

① 構成材料の温度変化

剥離現象の主要因は、構成材料の温度変化であることを前提とする。日射及び外気温の変動により、構成材料の温度は変動する。温度変化は、構成材料の熱伝達率、熱伝導率、厚さ、外気温、日射量等により影響を受けると考えられる。

② 構成材料の温度ひずみ

構成材料が温度変化をすると、温度ひずみを生じる。温度ひずみは、温度変化量に熱膨張係数を乗じることによって推定することができる。付着材と被付着材とは温度ひずみが異なるためにそれぞれ異なる長さに変形する。

③ 界面せん断応力分布

構成材料の変形量がそれぞれ異なるため、構成材料の界面にはせん断応力が発生する。温度ひずみから応力を推定するためには、力

図1 剥離率推定の手順

図2 界面せん断応力発生モデル

図3 界面せん断応力分布

図4 バネの剛性と界面せん断応力分布

学モデルが必要になるため、ここでは付着モデル⁴⁾を用いることとする。これは界面にバネを設定することで、バネの変位量から応力を推定するものである。簡単のために以下の説明では、材料は弾性、バネは完全脆性（弾性挙動後、塑性せずに破壊）と仮定する。

a. 応力分布の一般的形状

長さの異なる部材それぞれの対応する位置にバネを相互に接続した場合、バネは部材の長さを等しくするように作用し、バネにはその剛性に応じた応力が発生する。力の釣りによるため、バネは中心位置で変位が0となり、端部で最大になるため、界面せん断応力分布は図3に示すように端部から中心に向かって下がる分布型となる。

b. バネの剛性と界面せん断応力分布

図4にバネの剛性が増減した場合の界面せん断応力分布を示す。バネの剛性が高い場合、端部のバネに作用する力が大きくなる一方、力が作用する区間が短くなる。これは以下のように考えられる。付

着材と被付着材の長さを同じにするためにPの力を作用させる必要があるとする。バネに作用する力の端部からの累計がPに達した時点で、それより内側では2材の変位差はなくなり、バネに作用する界面せん断応力は0となる。界面せん断応力の累計は、界面せん断応力分布のグラフを界面方向に積分することで得られ、この力（グラフでは面積にあたる）がPに達した時点で界面せん断応力は0となる。バネの剛性が高い場合、端部の界面せん断応力が大きくなり、短い区間でPに達するため、界面せん断応力の作用する区間が短くなる。すなわち、界面せん断応力の分布はバネの剛性により異なり、剛性が高い場合は、端部の界面せん断応力が大きく、応力作用区間が短くなる。一方、剛性が低い場合は、端部の界面せん断応力が小さく、応力作用区間が長くなる。

バネの剛性をさらに低下していくと、中心位置まで界面せん断応力を積分してもPに達しなくなる。このような場合、図5に示すように界面せん断応力分布は中心位置に達するまで0にならない。これは、バネの剛性に対して、付着長さが十分でない場合に生じる。バネの剛性を小さくしても、付着長さを十分に長くすれば、いずれ積分値はPに達するため、このような場合を「付着長さが十分でない」と表現することにする。また、図4のように、中心位置以前に界面せん断応力が0になる場合を「付着長さが十分である」と表現することにする。付着長さが十分でない状態とは、タイルの例では、弾性接着材で張り付けた場合（バネの剛性が低い）やタイルの張付枚数が数枚程度しかない（付着長さが十分でない）等のかなり極端な場合であり、一般的な場合には考慮しなくても問題は少ない。

c. 付着長さを長くした場合の応力分布

付着長さが十分であれば、付着長さ（付着材と被付着材が付着している長さ）を長くしても、端部の界面せん断応力分布の形状は図6に示すように変化しない。界面せん断応力0の区間が長くなるだけである。付着長さが十分でない場合には、界面せん断応力分布そのものが変化し、いずれ付着長さが十分な状態に達する。

d. 剥離が進展した場合の界面せん断応力分布

これまででは、剥離が進展する以前の応力状態について検討してきたが、剥離を扱うためには剥離が進展した場合の界面せん断応力分布について検討する必要がある。最初に、付着長さが十分であり、端部から剥離が進展する場合について検討する。剥離のクライテリアとして、応力が強度を超えた場合に剥離が生じるとする強度基準を用いる。これは、付着モデルでいえば、バネの応力がバネの強度を超えた時点で、バネが切れて剥離が進展すると考えるものである。

付着長さが十分である場合、剥離進展前の界面せん断応力分布は図7の点線で示されるものとなる。端部のバネが切れて、剥離が進展したとき、剥離先端が新たな端部を形成することとなり、新たな界面せん断応力分布をつくる。新たな界面せん断応力分布は、端部が移動しただけであり、剥離進展前の界面せん断応力分布を剥離が進展した分だけ平行移動したものとなる。

次に、端部から離れた位置から剥離が進展する場合について図8に示す。一般的には応力の大きい端部から剥離は進展すると考えられるが、強度にばらつきがある場合、端部以外から剥離が進展する可能性もあり、これを考慮する。端部から離れた位置から剥離が進展する場合についても同様であり、剥離の進展した位置からの界面せん断応力分布が剥離の進展した分だけ平行移動したものとなる。

図5 付着長さが十分でない場合の界面せん断応力分布

図6 付着長さを長くした場合の界面せん断応力分布

図7 端部からの剥離進展による界面せん断応力分布の変化

図8 端部以外からの剥離進展による界面せん断応力分布の変化

図9 界面せん断応力分布と剥離確率分布

以上、付着長さが十分である場合について検討した。付着長さが十分でない場合、基本的に界面せん断応力分布は平行移動せず、分布形状自体が変化するため、正確には数値解析によって求める必要がある。

④ 剥離確率分布

破壊クライテリアである強度基準を用いる際、応力が強度を超えた場合に確率100%で破壊することを仮定していることが多い。しかし、現実のタイルの剥離を考察した場合、すべてのタイルが剥離していることは少なく、全体の何割かが剥離している場合がほとん

どである。そのため、剥離率を推定する際には確率的な検討をした方が実現象に近い結果が得られると考えられる。そこで、界面の剥離確率を S-R モデル⁵⁾ を用いて検討する。

S-R モデルとは、応力と強度の平均値及び変動係数を用いて、破壊確率を推定する手法である。応力及び強度のばらつきが正規分布等と仮定し、破壊確率を推定する手法であり、ひび割れ発生確率を算出する際等に用いられている。

S-R モデルを用いることにより、界面の応力と強度の平均値及び変動係数から界面の剥離確率分布を推定する。界面せん断応力分布を端部から中心に向かって漸減すると仮定した場合、界面の剥離確率分布も同じように端部から中心に向かって漸減する分布型となる。図 9 に示すように応力分布と剥離確率分布は基本的に正の相関を持ち、同様の分布型を示す。なお、図 10 及び図 11 に示されるように、界面せん断応力分布と剥離確率分布が同様の分布型を示すことは剥離が進展する場合についてもあてはまる。

⑤ 剥離率

本研究の目的は、剥離率を推定する手法を提案することである。これまでに界面の剥離確率分布まで検討してきたが、これは剥離率とは異なる指標である。そのため、界面の剥離確率分布から剥離率を推定する手法について検討する必要がある。前述したように、剥離率とは、剥離面積を全面積で除した値として定義する。一方、剥離確率とは、界面の応力分布及び強度分布から推定されるもので、ある位置において剥離が生じる確率である。

最初に、界面の剥離確率分布と剥離率との関係について検討する。界面の剥離確率分布が分かれば、剥離面積の期待値は剥離確率の積分として推定できるはずである。単位幅界面の各位置における剥離確率を界面方向に積分し、剥離面積の期待値を推定する。式で表すと式(1)となる。これは剥離確率分布の面積に相当する。剥離率は式(2)に示すように、剥離面積の期待値を全面積で除すことにより推定できる。

$$E_D = \int P(x) dx \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$P_D = \frac{E_D}{E_A} \cdots \cdots \cdots (2)$$

E_D : 剥離面積の期待値

E_A : 全面積

$P(x)$: 単位幅界面の位置 x における剥離確率

P_D : 剥離率

しかし、これは $P(x)$ が剥離の進展に伴って変化しない場合については正しいが、 $P(x)$ が剥離の進展に伴って変化する場合には正しくない。前述したように、端部から剥離が進展した場合、剥離の進展した位置が新たな端部となり、 $P(x)$ が大きくなる。そのため、 $P(x)$ は位置の関数として一定値をとるものではないことが分かる。これが与える影響について検討する。

具体例として、端部の剥離確率が 100% の場合について、その挙動を検討する。端部の剥離確率が 100% であっても、剥離確率の分布は、中心に向けて漸減する分布を示す。上式の計算によれば、端部の剥離確率が 100% であっても、全体的な剥離率は 100% とならな

図 10 端部からの剥離進展による剥離確率分布の変化

図 11 端部以外からの剥離進展による剥離確率分布の変化

い。これは、剥離の進展を考慮していないためである。

実際には、端部が剥離した場合、剥離が進展することで新たな端部が形成される結果、新たな端部の剥離確率が 100% に大きくなる。この現象が、剥離の進展とともに次々に生じるため、無限に長い場合であっても、剥離率は 100% になると考えられる。すなわち、剥離確率から剥離率を推定するためには、剥離の進展とともに剥離確率が動的に変化することを考慮する必要がある。

剥離確率の変化を考慮し、剥離確率分布から剥離率を推定する方法を以下に提案する。最初に、付着長さが十分であり、端部から剥離が進展する場合を検討する。端部からある区間 Δx の平均剥離確率を $P(0)$ とした場合、 $n \times \Delta x$ まで剥離が進展する確率は $P(0)$ の n 乗となる。これは、前述したように、剥離が進展した場合、剥離の進展した位置が新たな端部となるため、付着長さが十分であれば、界面せん断応力分布及び剥離確率分布は平行移動するためである。

次に端部は剥離しないが、端部から離れた位置から剥離が進展する場合について検討する。端部から離れた位置より剥離が進展する場合、剥離を開始した位置の剥離確率と剥離が進行している位置における剥離確率は同じになると考えられる。すなわち、端部から離れた位置 m において、ある区間 Δx の平均剥離確率を $P(m)$ とした場合、その位置から $n \times \Delta x$ まで剥離が進展する確率は $P(m)$ の n 乗となる。このとき、位置 m までは剥離していないので、さらに $(1-P(m-1))(1-P(m-2)) \cdots (1-P(0))$ を乗じる必要がある。

このように、付着長さが十分である場合、比較的簡単に剥離が進展する場合の剥離確率を推定できる。あらゆる剥離進展の場合について、剥離面積の期待値を計算し総和することで、剥離が進展する場合の剥離面積の期待値が計算できることとなり、剥離率を推定できる。

3. 実験

(1) 実験背景

これまででは、剥離率を推定するための手法について検討を行ってきた。この結果、温度変化、温度ひずみ、界面せん断応力分布、剥離確率分布、剥離率と大きく 5 つのステップを経ることで、剥離率

を推定できる可能性のあることが分かった。しかし、これらは多くの仮定を前提としており、推定される剥離率の妥当性については実際のタイルの剥離率との比較により確認する必要がある。本実験の目的は、暴露環境下におけるタイル仕上げ外壁の剥離率を測定することにより、剥離率の推定手法の妥当性を検証することである。

妥当性の検証については、環境条件、施工条件、タイル、モルタルの物性等を管理できる実模擬実験によるのが望ましいと考えられる。そこで、地上3階建物の屋上南面外壁でタイルの暴露実験を行うこととした。屋上南面であるため、他の建物の影になることなく、一年を通じて日射を受ける環境である。

(2) 実験要因

1) 実験要因概要

実験要因を表1に示す。実験要因は、モルタルの種類(標準(N), 低弾性係数(L)の2種類)及び付着面積割合(100, 50, 25, 12, 6, 3%)である。以下、試験体記号として、N(モルタル種類)-100(付着面積割合)のように表現する。モルタルの調合表を表2に示す。標準タイプは樹脂量がセメント量に対して4%, 低弾性係数タイプは16%である。これらは、前報³⁾において用いられたモルタルと同じである。ここで付着面積割合とは、タイルを張り付ける際に、コンクリート外壁と直接付着した面積の割合である。付着面積割合が100%の場合、タイル仕上げされた面積すべてがコンクリート外壁に直接に張り付けられていることを示す。付着面積割合を実験要因とする目的は、モルタルの界面せん断強度の変化が剥離率に与える影響を把握するためである。直接的には、モルタルの界面せん断強度を増減させればよいのであるが、モルタルの界面せん断強度を増減させるために調合を変えると、強度以外の物性も変化する可能性が高いため、実験方法としては適切でないと判断した。そこで、モルタル強度の増減に替えて、付着面積割合の増減により間接的に界面せん断強度を増減させることとした。

2) タイルについて

タイルは磁器の50角タイルを使用した。色は薄い灰色であり、特に熱を吸収しやすいものではなく、標準的であると考えられる。目地幅は一般的な数値である5mmとしているが、目地深さは0mmとし、一般的な3mmとは異なっている。目地深さを0mmとしている理由は、目地深さの存在による応力伝達の不連続性を排除し、力の伝達を明快にするためである。前報³⁾においても、目地深さは0mmとしているため、今回もこれにならう。

各要因につきタイルの張付け枚数は、144枚としている。これは、タイルシート(6×6枚、300mm×300mm)の4枚分(縦600mm×横600mm)に相当し、付着長さが十分であるように設定したものである。本実験は剥離率の測定が主目的であるが、タイル枚数が少ないと、1枚分の剥離の有無が剥離率に大きな影響を及ぼし、ばらつきが大きくなると考えられる。1枚分の剥離の有無が剥離率に与える影響を1%以下に抑えるために、1要因につきタイルの張付け枚数を100枚以上とした。

3) 付着面積割合

付着面積割合を制御するために、付着させない部分には外壁コンクリートにセロファンテープを貼り、外壁コンクリートと張付モルタルを絶縁した。付着面積割合に応じて、図12に示すようにセロファンテープを貼り付け、その上にタイル仕上げを行った。図12のよ

写真1 実験風景（3階建物屋上，南向き）

図12 付着面積割合の制御（付着面積割合50%）

表1 実験要因

実験要因		備考		
モルタル種類	付着面積割合(%)	タイル種類	タイル数 (1要因あたり)	界面処理
標準 低弾性係数	100,50,25, 12,6,3	磁器タイル 50角	144	超高压洗浄

表2 調合表

モルタル種類	S/C	W/C	単位量(kg/m ³)			
			水	セメント	硅砂	樹脂
標準	50%	30%	335	1117	559	45
低弾性係数			294	979	490	157

うに絶縁した場合、縦方向については張付モルタルが連続性を保つのに対し、横方向については連続性がなくなるため、剥離状況に方向性を生じる可能性がある。しかし、すべての方向に対して同じ条件にすることは困難であるため、できるだけ簡便で付着面積割合の精度が高くなる図12の方法を採用している。なお、実験の結果、特に剥離状況に方向性はみられなかった。

(3) 測定項目

測定項目は、提案する剥離率推定手法により剥離率を推定するために必要な項目とする。剥離率を推定するためには、タイル、モルタル、コンクリートの温度、熱膨張係数、弾性係数、界面せん断強度に関するデータが必要となる。また、推定される剥離率の妥当性を検証するために、剥離率の実測データが必要となる。

タイル、モルタル、コンクリートの温度については熱電対により測定した。タイル及びモルタルの温度は、タイル表面に貼り付けた熱電対の温度により代表し、外壁コンクリートの温度は、表面、中

図 1 3 剥離日数と剥離位置

心、裏面の 3 点の温度の平均値とした。

熱膨張係数及び弾性係数については材料試験により測定している。

界面せん断強度については、前報³⁾の結果を参考に定めた。

(4) 実験結果

1) 剥離日数と剥離位置について

剥離日数と剥離位置を図 13 に示す。それぞれの数値は、その位置のタイルが張付け後から剥離するまでに要した日数を示す。付着面積割合が 25%以上については、剥離が 1 年経過時点でほとんど生じていないために省略している。剥離の判定はタイルの打診検査により行っており、検査日は、タイル張り付け後、1, 3, 7, 14, 28, 42, 56, 91, 182, 365 日としている。なお、張り付け後 1 日で剥離したものに関しては、初期欠陥として最初から付着していなかった場合と、付着していたが 1 日以内に剥離した場合の 2 通りの可能性があるが、それらを判別することができないため、初期欠陥として取り扱う。ただし、剥離率には含めるものとする。また、剥離はすべて張付モルタルと外壁コンクリートの界面近傍で生じている。

図 13 より、付着面積割合が小さくなると、剥離率が大きくなる傾向にあることが分かる。付着面積割合が小さいということは界面せん断強度が小さいことと同じと考えられるため、界面せん断強度が小さくなると、剥離率が大きくなる傾向にあると考えられる。

剥離は、端部から中心方向に向かって進展する傾向にある。これは、付着面積割合 3%及び 6%の剥離日数と位置を検討すれば分かる。新たな剥離は、端部または端部から進展して形成される新たな端部からのみ進展している。

図 1 4 付着面積割合と剥離率の関係

初期欠陥が内部にあった場合、剥離は進展しない、または進展しにくい。これは、低弾性係数の付着面積割合 12%の結果から分かる。内部に初期欠陥と思われる剥離が、張り付け後 1 日でみられるが、この剥離はほとんど進展していない。端部からの剥離の進展に比べ、端部から独立して存在する剥離の進展は生じにくいと考えられる。

付着面積割合 3%のように 1 年後の剥離率がほぼ 100%であっても、最終的には 2 枚程度のタイルは剥離しないで残る。これは、付着長さが十分でなくなったため、剥離に必要な界面せん断応力が発生しなくなったためと考えられる。

以上の剥離の傾向はすべて、今回提案している剥離率推定手法から予想される傾向と一致しており、本手法の妥当性を示すものと考えられる。

えている。

2) 剥離率と付着面積割合の関係

タイル張付け後365日の剥離率と付着面積割合の関係を図14に示す。剥離率は剥離しているタイルの枚数を全タイルの枚数で除した数値としている。今回使用したモルタルの場合、付着面積割合が25%以上であれば、剥離率は小さい傾向にある。ただし、今回の実験では測定期間が1年間とRC建物の平均寿命である30年より短く、経年劣化による影響が小さいことは考慮しておく必要がある。

3) 剥離率の経時変化

剥離率の経時変化を図15に示す。剥離率は、付着面積割合が低い場合には、経時とともに上昇する傾向にあるが、付着面積割合が25%以上では、剥離率は概ね0%であり、経時による変化はほとんどみられない。

4) 温度の経時変化

温度の経時変化を図16に示す。温度の測定は、1時間おきに1年間計測している。タイル表面の年間最高温度は51℃、コンクリートの年間最高温度は43℃であった。図16より、夏よりも冬の方が、タイルの温度とコンクリートの温度の差は大きい。なお、6月下旬から7月上旬にかけて、一部データが取れていない期間がある。

4. 考察

(1) 概要及び温度

提案する剥離率推定手法に基づいて、剥離率の推定を行う。付着材をタイル及びモルタル、被付着材をコンクリートとすれば、提案する剥離率推定手法を適用できる。

温度については測定値をそのまま用いることとする。以下、図1の②以降について検討を加えていく。

(2) 温度ひずみ

温度ひずみは、タイル及びモルタルとコンクリートの温度に、各材料の熱膨張係数を乗じて算出する。文献⁶⁾より、タイルとモルタルが一体となった場合の熱膨張係数は $8.0\mu/\text{℃}$ であったため、本考察においてもこの値を採用する。コンクリートの熱膨張係数は外壁コンクリートの表裏に貼り付けたひずみゲージの値と温度の関係から最小二乗法により算出した $9.0\mu/\text{℃}$ (図17)を採用する。コンクリートの熱膨張係数は、実建物の外壁コンクリートの場合は柱や梁の拘束により小さくなるため、測定することが望ましい。

タイル及びモルタルの温度ひずみと外壁コンクリートの温度ひずみの差を算出し、界面に生じる温度ひずみ差を算定する。図18に1日の最大温度ひずみ差(以下、日最大温度ひずみ差と呼ぶ)を求めたものを示す。1日の間でも、太陽が移動するため、温度ひずみ差は変化する。その最大値を計算したものが、日最大温度ひずみ差である。日最大温度ひずみ差は、夏場に小さな値をとり、冬場に大きな値をとっている。日最大温度ひずみ差の年間最大値は 118μ であった。剥離率との相関を検討するために、打診検査日までに生じた日最大温度ひずみ差の最大履歴を図19に示しておく。

(3) 界面せん断応力分布

界面せん断応力分布は、付着モデルを用いて、数値解析により算出する。解析方法は、前報³⁾に示したとおりであり、付着材と被付着材の間にバネ要素を組み込んだ2次元FEMモデルを構築し、バネ要素の破壊により剥離を表現するものである。ただし、前報では界

(a)標準モルタル

(b)低弾性係数モルタル

図15 剥離率の経時変化

図16 温度の経時変化

図17 外壁コンクリートの熱膨張係数

図18 日最大温度ひずみ差の分布

図19 日最大温度ひずみ差の最大値履歴

面のバネを非線形バネとし、その物性に強度、強度時変位および剥離時変位を設定したが、今回の解析では、界面のバネは完全脆性とした。これは、剥離確率分布の計算においてS-Rモデルを用いるため、剥離の判定基準を変位ではなく、強度としたためである。判定基準を変位とするためには、S-Rモデルの強度を剥離時変位に、発

生応力を発生変位にそれぞれ置き換える必要があるが、現時点ではこれらのデータが十分ではないため、強度を判定基準とした。

使用材料についても前報³⁾で使用したものと同じであることから、物性値についても同じ値を用いている。使用する物性値の一覧を表3に示す。なお、解析結果の一例として、118 μ の温度ひずみ差が生じた場合の標準モルタル (N) および低弾性係数モルタル (L) の界面せん断応力分布を図20に示す。横軸は端部からの距離を示し、300mmの位置が中心位置になる。端部からの距離xが200mm程度で、応力が概ね0になっており、付着長さが十分であることが分かる。また、タイルの幅は1枚あたり50mmであることから、1枚目に比べ、2枚目に作用する界面せん断応力は、標準モルタルの場合、かなり小さいことがうかがえる。

(4) 界面の剥離確率分布

S-R モデルを用いて、界面せん断応力分布から界面の剥離確率分布を推定する。今回は、界面せん断強度及び界面せん断応力の分布が正規分布と考えて検討することとし、以下の式を使用する。

$$P = \Phi \left[\frac{\eta - 1}{\sqrt{COV[R]^2 + \eta^2 COV[S]^2}} \right] \dots \dots \dots (3)$$

なお、P:ひび割れ発生確率、 Φ :標準正規確率分布関数、COV[S]:応力の変動係数、COV[R]:強度の変動係数、 η :応力強度比(=応力/強度)とする。S-R モデルを用いて剥離確率を算定する際には、強度及び応力の変動係数を定めておく必要がある。強度及び応力の変動係数については確たるデータがないのが現状であるため、文献⁵⁾を参考に強度の変動係数 0.15、応力の変動係数 0.20 と定めた。ただし、文献⁵⁾では強度の変動係数 0.15 の根拠として割裂引張強度の変動係数を参考にしているが、せん断強度の変動係数はこれより高い可能性があるため、強度の変動係数 0.30 についても検討する。

S-R モデルにより推定した付着面積割合 6%、標準モルタル使用の剥離確率分布を図21に示す。付着面積割合については、強度が付着面積割合に比例するとして、その影響を考慮した。凡例の数字は、(強度の変動係数-応力の変動係数)を示している。強度の変動係数の違いが剥離確率分布に与える影響は比較的小さい。また、1枚目のタイル(0-50mm 区間)に比べ、2枚目のタイル(50-100mm 区間)の剥離確率はかなり小さいことが分かる。

(5) 剥離率

剥離確率分布が得られたため、剥離率を推定する。タイル1枚の剥離確率をその区間の剥離確率の平均値で代表する。剥離確率分布より、端部から1枚目の剥離確率に比し、2枚目以降の剥離確率は小さいため、端部以外(2枚目以降のタイル)からの剥離の進展については、考慮しなくても大きな誤差は生じないと考えられる。また、これは端部から剥離は進展するという実験結果とも一致する。

剥離率の解析結果を実験結果とともに図22に示す。解析結果は、強度の変動係数に関わらず、概ね同じとなる。また、実験結果との整合性も高い。

剥離率の経時変化の解析結果(付着面積割合 3, 6, 12%のみ)を実験結果とともに図23に示す。解析結果を実線、実験結果を点線で表している。解析は、図19の履歴を使用し、強度の変動係数 0.15、応力の変動係数 0.20 の値を用いている。実験結果との整合性は比較的高いと判断している。

以上、提案する剥離率推定手法による解析結果は屋外暴露実験の

表3 物性値一覧

材料	種類	弾性係数 (GPa)	界面バネ	
			強度(MPa)	強度時変位(mm)
モルタル	標準	24.0	5.5	0.03
	低弾性係数	13.9	2.1	0.05
コンクリート	-	29.8	-	-
タイル	-	47.8	-	-

図20 界面せん断応力分布

図21 界面の剥離確率分布

図22 実験値と解析結果の比較(付着面積割合と剥離率)

(a)標準モルタル

(b)低弾性係数モルタル

図23 実験値と解析結果の比較(剥離率の経時変化)

結果と高い精度で一致し、その妥当性が確認できたと考えている。

5. 既存建物外壁タイルの簡易健全度評価手法

(1) 概要

これまでの検討で、確率論に基づく剥離率推定手法を用いることによって、使用材料や環境条件から高い精度で剥離率の推定が可能となることを示した。新築建物の設計段階において本手法を用いる

ことで、剥離率の低いタイルの外壁を計画することが可能となる。一方、既存の外壁タイルの健全性についても、同手法を逆に辿ることにより、定量的に評価できる可能性があるため、以下で検討を加える。本手法によれば、外壁の診断により得られたタイルの剥離率からタイルに作用している応力強度比を逆算することが可能となる。

(2) 剥離率と端部のタイルの剥離確率

剥離率に影響を与えるのは、端部のタイルの応力強度比、応力および強度の変動係数、そしてタイルの張付枚数である。応力および強度の変動係数を一定とすれば、剥離率は、端部のタイルの応力強度比とタイルの張付枚数の2つで定まる。ここで、タイルの張付枚数とは構造目地などにより区切られた連続した1列の張付枚数とする。ここで注意が必要なのは、剥離率と端部のタイルの剥離確率が比例するのは、タイルの張付枚数が2枚の場合だけであり、一般的な外壁タイルの場合は剥離率と剥離確率はほとんど比例関係にないということである。以下に具体例を示す。

タイルの張付枚数が2枚であれば、それぞれが端部のタイルとなり、端部の剥離確率が99%であれば、剥離率も99%となる。一方、タイルの張付枚数が無限であれば、端部の剥離確率が99%であっても剥離率は0%となる。これは、剥離確率が100%未満であれば、剥離の進展は有限範囲で止まるため、有限の剥離面積を無限の全面積で除した剥離率は0%となるためである。すなわち、本手法によれば、端部の剥離確率が同じであっても、タイルの張付枚数が多いほど剥離率は小さくなる。

そこで、連続した1列の張付枚数(2, 12, 24, 60, 120枚)を要因にした剥離率と端部のタイルの剥離確率の関係を図24に示す。なお、この関係は50角タイルについて、2. (2) ⑤の考え方により検討したものである。張付枚数の増加に伴い、端部の剥離確率が同じであっても、剥離率が小さくなっていく。この図から以下のことが言える。例えば、連続した1列の張付枚数が60枚(連続列の長さは60枚×50mm=3000mm)の場合に、その面の剥離率が6%であったとする。剥離率は6%であるが、図24より、このときの端部の剥離確率は50%程度となる。すなわち、剥離率は小さい値であっても、端部の剥離確率はかなり厳しい条件になっていることが分かる。

(3) 端部のタイルの剥離確率と応力強度比

次に、式(3)のS-Rモデルによる端部のタイルの剥離確率と応力強度比の関係を図25に示す。計算には、強度の変動係数0.15、応力の変動係数0.20の値を用いている。これらの関係から、端部の剥離確率が50%の場合の応力強度比は、1.0であることが分かる。すなわち、張付枚数60枚の50角タイルが張られた外壁の剥離率が6%であった場合、発生応力と強度はほぼ等しい状態であり、健全性の観点からは健全ではない状態と言える。

以上より、図24および図25を用いることにより、既存建物外壁タイルの健全度について、剥離率から評価する簡易な手法を示した。実際の外壁タイルの剥離はさまざまな要因の複合した結果であり、考察の不十分な部分もあると思われるが、既存建物外壁タイルの健全度をある程度評価できる簡易な手法として、有用と考えている。

6. まとめ

タイルの剥離率を力学及び確率論に基づいて検討した。その結果、以下の結論が得られた。

図24 剥離率と端部のタイルの剥離確率の関係

図25 端部のタイルの剥離確率と応力強度比の関係

- ①付着モデル及びS-Rモデルを用いた剥離率推定手法を提案した。剥離を定量的に評価することで、剥離の予測や対策に活用できると考えられる。
- ②本手法を用いた剥離率推定値は、屋外暴露実験結果と高い精度で一致し、提案手法の妥当性を確認することができた。
- ③既存建物外壁タイルの健全度について、剥離率から評価する簡易な手法を提案した。

参考文献

- 1) 名知博司, 小野正: タイル直張り仕上げのひずみ追従性に及ぼすタイル要因の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.563, pp.15-22, 2003.1.
- 2) 起橋孝徳, 榊田佳寛ほか: 既存建物におけるタイル仕上げの剥離危険性評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.681, pp.1623-1628, 2012.11.
- 3) 稲葉洋平, 佐々木正治ほか: タイルの剥離評価に関する研究—ひずみ追従性試験および剥離モデルの提案, 日本建築学会構造系論文集, No.667, pp.65-70, 2011.9.
- 4) 六車熙, 森田司郎ほか: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, No.131, pp.1-8, 1967.1.
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御指針・施工指針(案)・同解説, 丸善株式会社, p.75, 2006.
- 6) 稲葉洋平, 佐々木正治ほか: 外壁タイルの付着性能に関する検討(その2) 外壁タイルの温冷繰返し試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.959-960, 2006.7.

(2013年7月3日原稿受理, 2013年10月15日採用決定)