

表面部材の接着一体性および崩壊の限界予測に関する 理論的研究

馬場明生 (感性デザイン工学科) 渡部嗣道 (大阪市立大学) 守 明子 (名古屋工業大学)
森田和宏 (感性デザイン工学専攻 2002 年度修了生) 川手 洋 (感性デザイン工学専攻)
佐藤俊介 (感性デザイン工学専攻 2002 年度修了生)

Theoretical Methods for Predicting Fracture Criteria of Surface Finishings Bonded on Concrete and Masonry Structures

Akio BABA (Perceptual Science and Design Engineering) Tsugumichi WATANABE (Osaka City University)
Akiko MORI (Nagoya Institute of Technology) Kazuhiro MORITA (2002 Graduate student of Division of Perceptual Science
and Design Engineering) Hiroshi KAWATE (Graduate student of Division of Perceptual Science and Design Engineering)
Shunsuke SATO (2002 Graduate student of Division of Perceptual Science and Design Engineering)

This paper deals with the exfoliation mechanisms of surface layers usually bonded to concrete and masonry components in order to establish the safety design methods of buildings, that is to say, preventing from any damage under daily external forces, standard disasters such as rare earthquakes and any exfoliation under extremely rare earthquakes. Three fundamental mechanisms are clarified to control a whole process through the initiation to the final fracture. As a result, the effects on normal stresses in surface layers and shear stresses on boundary surface of the layers are predicted quantitatively on the basis of geometry, mechanical properties and various kinds of differential movements.

Key words: Surface layer, Exfoliation mechanism, Safety design, Shear lag theory, Buckling theory

1. はじめに

後付け仕上げ材層・打込み型枠層および躯体コンクリート表層といった表面部材の剥離・落下事故は、人命に直接的な危害を加えるにもかかわらず、効果的な解決策の確立といった面から考えると今ひとつの感があり、絶えず発生していることも周知の事実である。また、これらの事故は建築物の外観に関わることであることもあって表面部材およびそれを支える下地部材のそれぞれの種類が多い上に両者の組合せも多く、結果としてその発生メカニズムを複雑としている。さらに、そのような複雑さが原因の究明を妨げているともいえよう。

一方、表面仕上げを中心とした表層部材の剥離に

関しては、これまで多くの研究がされてきている。しかし、安全性に関するこの種の事故に関しては、系統的な研究が少なく、事故の多様性に対応できる現実味のあるメカニズムが解明されているとはいえない。

これまで行われてきた表層部材の剥離に関する研究においては、そのほとんどが仕上げ層の端部における面内剪断力によるものである。しかし、実際の剥離または剥落の症状を観察すると端部だけではなく中央部においてもその現象が見られる。著者らは、この現象のメカニズムを解明するために座屈理論を適用することとした。本報告では、この座屈理論による表面部材の剥離現象のメカニズムの解明とタイ

ル仕上げを想定した剥離限界のケーススタディを試みた。

また、表面部材端部に関しては、これまで面内剪断応力や面外垂直応力などの剥離応力に関する研究が多く行われているが、これらは、煩雑な解析方法を用いなければならないため、安全性評価方法の定式化が難しく¹⁾、簡易的な予測方法の開発が現在望まれている。そこで、本研究ではコンクリート表面部材の剥落安全性評価方法の定式化を目的として、表面部材端部に生じる面内剪断力に着目し、その簡易解析手法としてよく知られているシアラグ理論による予測式をも提案した。²⁾

2. 基本メカニズムの提案

2. 1 既往の研究における問題点

これまで実施されてきた研究では、特定の仕上げと特定の下地との組合せに限り解析的な研究がされることが多く、以下の事項において現実的でないことが多かったと考える。

- 1) 表層部材と下地部材との界面に不可避的存在する非接着部の影響を考慮しない。
- 2) 表面部材のムーヴメントの大小の評価を組み入れない。
- 3) 施工の寸法精度の悪さから表面部材および接着層の厚さおよび変動を正確に算定しない。
- 4) 剥離と落下という異なる現象を混同する。
- 5) 引張り接着力および一面剪断力試験と剥落現象との関連において不明確さが存在する。

日常想定外力作用である乾湿温冷ムーヴメント作用下における以上の問題の他に、それと地震動など

の標準および最大想定外力作用との関連性の科学的な解明が全くなされていなかったことがあげられる。

2. 2 剥離メカニズム

表面部材は、一般に薄い板状であり、その厚長比は小さい。したがって、長方形板を仮定した応力解析結果は、その厚長比が大きい場合であり、一部の結果を除いて現実性において欠けていると考えられる。したがって、ここでは、Figure1に示すように剪断剛性を無限大とした下地部材に、接着層を媒介として取り付けられたムーヴメントを生じてしかも剪断剛性を無限大とした表層部材について、それを端部領域および中央部に分けて、端部の接着層には剪断力のみ中央部の接着層には面外剥離力のみが発生すると仮定した。前者にシアラグ理論・後者に座屈理論を適用できると仮定した。

ここで、座屈理論による剥離発生メカニズムはFigure2aに示すように中央部の潜在的な非接着部の長さを部材長とする両端固定版にムーヴメントの伸縮成分に対応する軸方向力と反り成分に対応する曲げモーメントを加えた時の座屈発生の関係式を求める。ここでの影響要因および剥離に対する方向性(促進または緩和)は以下のとおりとなる。

- 1) 非接着部の長さ (精度の悪さ)
(自由度1)促進
- 2) 表面部材の厚さ・ヤング係数
(自由度2)緩和
- 3) 表面部材の下地に対する相対ムーヴメント (伸縮・反り成分)
(自由度2)促進
- 4) 接着強度
(自由度1)緩和

次に、シアラグ理論による剥離発生メカニズムはFigure2bに示すように、表面部材および下地部材の相対ムーヴメントの伸縮成分をずれ量とするとときに、ある厚さの接着層の剪断強度と同等の剪断応力を発生させる接着破壊時の関係式を求める。ここでの影響要因および剥離に対する方向性(促進または緩和)は以下のとおりとなる。

- 1) 下地の厚さ・ヤング係数
(自由度2)促進
- 2) 表面部材の厚さ・ヤング係数
(自由度2)促進
- 3) 表面部材の下地に対する相対ムーヴメント (伸縮・反り成分) (自由度2)
.緩和
- 4) 表面部材の下地に対する一面剪断接着強度 (自由度1)促進

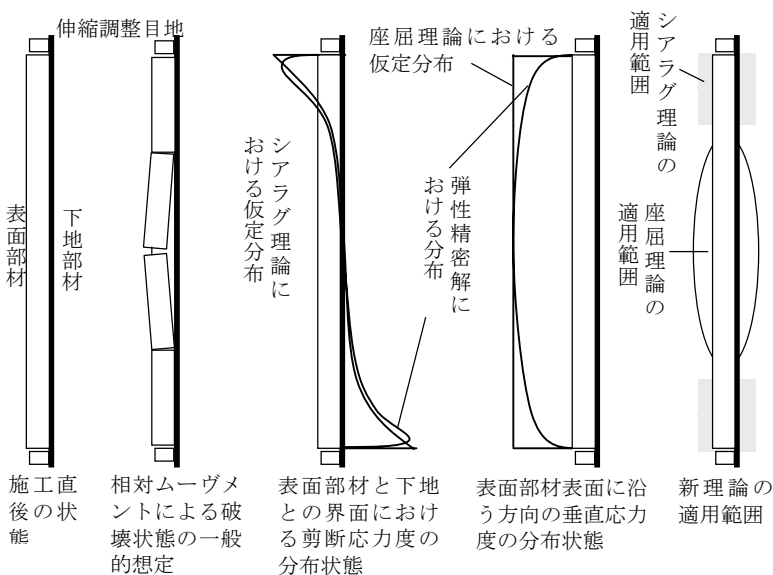


Figure1 Stress distributions between surface finishings and boundary ones in order to predict typical phenomena of destructions

- 5) 接着層の薄さ・ヤング係数
(自由度2) 促進
- 6) 接着強度 (自由度1) 緩和

2. 3 崩壊メカニズム

落下は、Figure2c に示すように剥離メカニズムのところ述べて座屈理論においてある曲げ強度を有する表面部材の面外方向に面外接着強度に等しい等分布荷重が作用しているときの座屈長を求める。ここでの影響要因および剥離に対する方向性（促進または緩和）は以下のとおりとなる。

- 1) 崩壊時の座屈長さ (自由度1) 緩和
- 2) 表面部材の厚さ・ヤング係数・曲げ強度
(自由度3) 緩和
- 3) 表面部材の下地に対する相対ムーブメント
(伸縮・反り成分) (自由度2) 促進
- 4) 表面部材の下地に対する面外引張り接着強度
(自由度1) 緩和

2. 4 評価のフロー

Figure3 は、上述の3つのメカニズムに基づいて、表面部材の安全性を評価するときのフローの概要について示している。ここで、表面部材の応力は表面部材が接着していないときのムーブメントを発生するに必要な曲げモーメント・軸力であり、表面部材の形状によっては剪断力が問題となることもある。

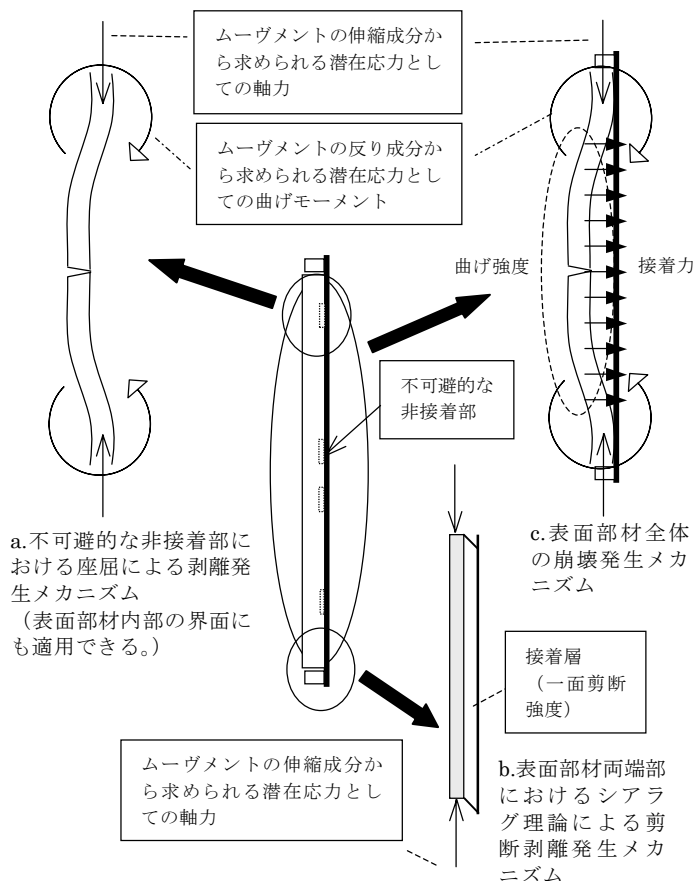


Figure2 Exfoliation and fracture mechanisms

剥離限界を決定する座屈では、表面部材全体または非接着・位置不良などの局所的幾何学的諸元・ムーブメントおよびヤング係数・曲げ強度のどの力学的諸元によって与条件に対する座屈長や許容ムーブメント量に対応する座屈荷重が求められる。同様に、シアラグ理論による剥離・表面部材全体の崩壊についても、必要な一面剪断強度や引張り接着強度などがそれぞれ求められる。

以上のメカニズムを活用することによって、日常想定外力・標準想定外力および最大想定外力という包括的な条件を取り入れて表層部材の危険度評価が可能となった。

3. 理論による剥離限界の予測方法の提案とタイトル仕上げの剥離に関するケーススタディ

3. 1 表面部材の座屈理論による剥離メカニズム

サンドイッチ板のように剛性の大きな表面材料と比較的剛性の小さな心材からなる複合部材においては、その破壊現象として表層材料の座屈現象が生じることがよく知られている。これはリンクリンク (wrinkling) 現象といわれているもので、Figure4 に示すように小波形の多くの座屈波を発生させる。

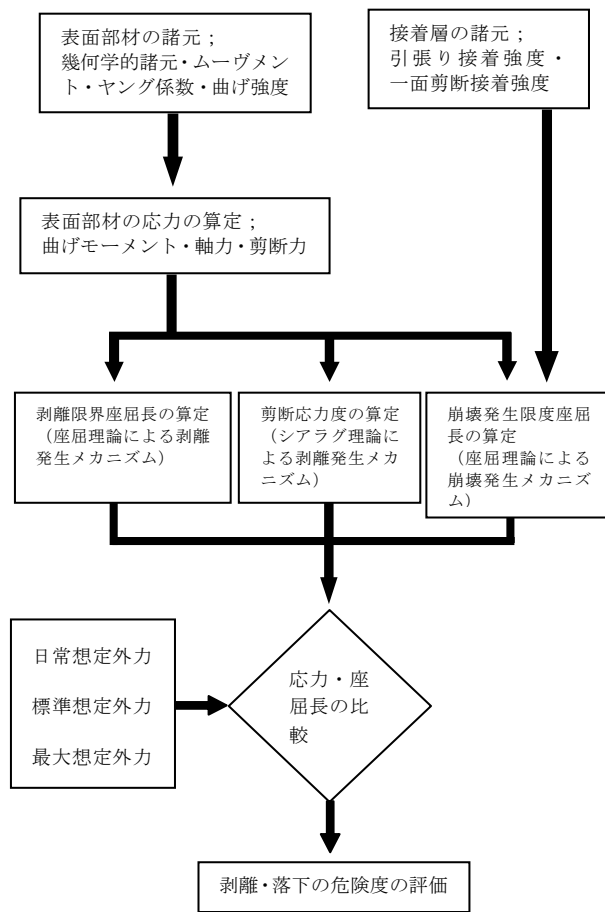


Figure3 Flowchart of risky evaluation on exfoliation/falling

また、実際には界面の面外引張強度が小さく、表面材に初期たわみなどがあると、サンドイッチ板表面部材は圧縮負荷初期から面外のとわみや剥離を生じ、リンクリンク応力も低下することがある。

Figure5 に示すように、コンクリートなどの躯体上に表面部材が接着されている場合には、表面部材がその温度上昇や過度な吸水によって膨張すると相対ムーヴメントが生じ、その伸縮成分によって表面部材に大きな軸圧縮力が作用する。この種の応力が大きいとリンクリンク現象と同様に表面部材が剥離する座屈現象が生じる恐れがある。特に表面部材が複層となっており、外部に存在する材料の剛性が大きくて、躯体とその層とに存在する中間層の剛性が小さな場合などはその現象が生じる危険性が大きい。また、断面内の体積変化の勾配などによる潜在曲げ応力や初期たわみなどにより許容軸圧縮力は、座屈荷重よりも小さくなることも考慮しなければならない。

3. 2 タイルの剥離現象の定式化

ここではモデルケースとして、タイル仕上げの場合として Figure6 に示すようなモデルを想定する。タイル仕上げは、コンクリートの躯体・下塗りモルタル層・タイル層の3層からなるものとし、タイル層についてはそのヤング係数が大きいことと目地が存在することにより、タイルを剛体・目地をピン接合として取り扱い、タイルの曲げおよび剪断変形は無視するものとする。また、タイルの剥離現象における変形モードは、最も単純な2枚のタイルのみが対象的に外部へ変形する状態とする。また、以下に述べる計算結果はすべて単位幅当たりの値とする。

(1) 座屈荷重の予測

タイルの面外微小変形角 ψ を、タイル端部からの距離を X 、下地・コンクリート境界面からの面外位置を y 、下地厚を h とすると、面外微小変形量 v は (1) 式で表される。

$$v = \psi X \frac{y}{h} \tag{1}$$

剥離を生ずる座屈荷重の算定には、エネルギー法のする仕事 W と系に蓄えられるひずみエネルギー U とが等しくなる点といえる。そこで、下地層の引張ひずみエネルギー U_ϵ および剪断ひずみエネルギー U_τ は、(2)式および(3)式でそれぞれ求められる。また、軸圧縮荷重のなす仕事量 V は(4)式となるため、タイルの曲げ変形は無視できるものとする、ひずみエネルギーと仕事量とは等しいから(5)式が与えられ、これらの関係式から剥離発生のための座屈荷重 P_B を求めることができる。

$$U_\epsilon = 2 \cdot \frac{E_c}{2} \int_0^L \int_0^h \epsilon y^2 dx dy = E_0 \frac{\psi^2}{h} \frac{1}{3} L^3 \tag{2}$$

$$U_\tau = 2 \cdot \frac{G_c}{2} \int_0^L \int_0^h \gamma^2 dx dy = \frac{1}{3} G_c \psi^2 L \cdot h \tag{3}$$

$$V = P_B (1 - \cos \psi) \cdot L \cdot 2 = P \psi^2 L \tag{4}$$

$$V = U_\epsilon + U_\tau \tag{5}$$

$$P_B = \frac{1}{3} E_0 \frac{L^2}{h} + \frac{1}{3} G_c h \tag{6}$$

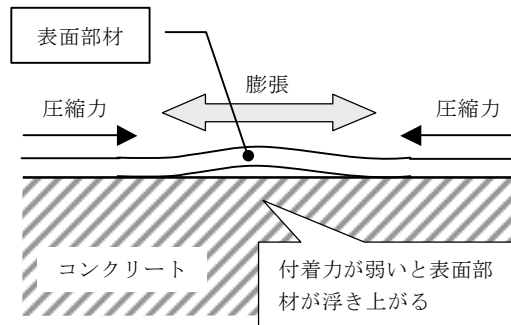


Figure5 Buckling phenomenon and exfoliation on surface finishings

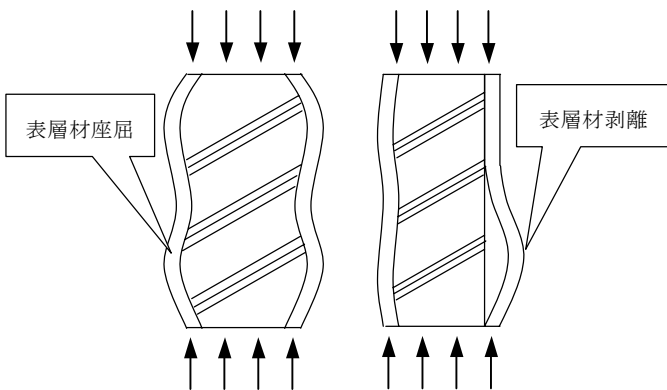


Figure4 Wrinkling phenomenon

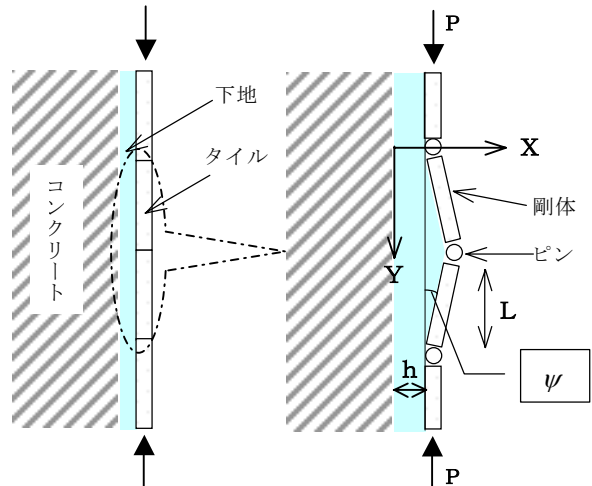


Figure6 Buckling model of ceramic tile exfoliation

(2)初期たわみの影響

初期たわみが存在する場合には、軸圧縮力に対する抵抗力は座屈応力よりも低下することがよく知られている。初期の凹凸は圧縮荷重の増加に伴って拡大されるので、座屈剥離する前に剥離することになる。ここで、初期たわみを δ 、初期たわみ角を $\psi_0(=\delta/L)$ とすれば、タイル端部におけるモーメント M は零であるから、このときの相対ムーヴメントによる軸圧縮力を P_D 求めると(8)式となる。また、タイルの接着強度を σ_D とし、タイルの剥離条件を(9)式のようにすると、剥離限界を与える所要付着強度を(10)式で求めることができる。所要付着強度は初期たわみと軸圧縮力 P_D に比例し、タイル長に反比例する。

$$M = -P_D \cdot \delta + \int_0^L E_0 \varepsilon_y (L - \lambda) dx = 0 \quad (7)$$

$$P_D = \frac{1}{6} E_0 \frac{\psi}{\delta} \frac{1}{h} L^3 \quad (8)$$

$$\varepsilon_y = \psi \frac{L}{h} \geq \frac{\sigma_D}{E_0} \quad (9)$$

$$\sigma_D \geq \frac{6}{L} \psi_0 P_D \quad (10)$$

(3)所要付着強度のフィジビリティスタディ

ここでは、タイルの相対ムーヴメントにおける伸縮成分を 600μ とした。軸圧縮力 P_D は(6)式より求められる座屈荷重 P_B を下回る必要がある。ここに通常実施されているタイル仕上げの表面層の条件を代入すると(6)式では座屈現象は生じないことが分かる。

一方、(10)式で求められる所要付着強度を Figure7 に示す。タイル長が 5cm 程度のモザイクタイルの場合の所要付着強度は、 ψ_0 を 0.03 まで許容する場合には、0.7MPa 程度必要である。なお、本検討に用いた条件は、危険側としてタイルのヤング係数：10GPa（大き目）、タイル厚：0.3cm（小さ目）とした。

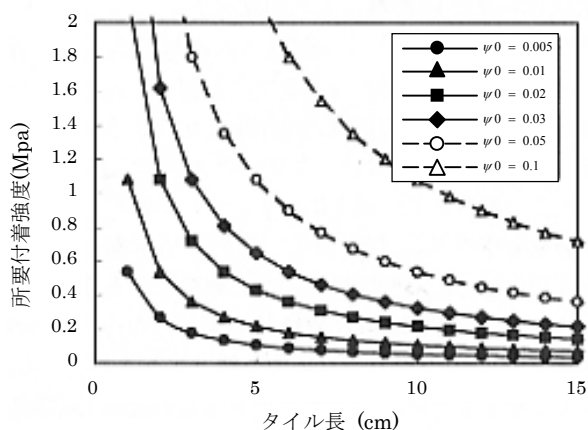


Figure7 Buckling bond strength based on wrinkling phenomenon

3. 3 まとめ

本提案により、相対ムーヴメントが生じたときの表面部材の座屈理論による崩壊限界条件の求め方と、タイル仕上げのときの所要付着応力度を求めることができた。

4. 座屈理論による崩壊限界の予測方法の提案

4. 1 座屈理論におけるモデル化と崩壊メカニズム

躯体に接着していない状態の表面部材に軸圧縮力が作用した場合には、Figure8 に示すようにその崩壊形は表面部材を両端固定の直線棒とした単純な座屈問題として取り扱うことができる。この場合の軸圧縮力は相対ムーヴメントの伸縮成分によって求めることができる。軸圧縮力が増大し、表面部材が崩壊に至るクリティカルな条件として第一に考えられるのは、その軸圧縮力がオイラー荷重に達する時点である。また、この軸圧縮力がオイラー荷重に達しない場合でも相対ムーヴメントの反り成分や初期たわみなどの影響を十分に考慮して座屈荷重を求める必要がある。この場合においては、軸圧縮力の増大とともに面外変形も進行し、材端部または中央部に生じた曲げ応力によって降伏する現象、すなわち曲げ座屈によって崩壊するものとして取り扱う。

4. 2 崩壊限界の理論的定式化

(1)オイラー荷重

初期たわみなどなく表面部材の材軸上に軸圧縮力が作用するときの座屈問題の基礎方程式は(11)式であり、両端固定の場合の解は(12)および(13)式で表され、それぞれ面外変位 v とオイラー荷重 P_E を示している。座屈による表面部材の崩壊が生じないためには、オイラー荷重 P_E を下回る必要がある。ここで、 P ：軸圧縮力、 EI ：表面部材の曲げ剛性、 a ：振幅、 x ：端部からの軸方向距離

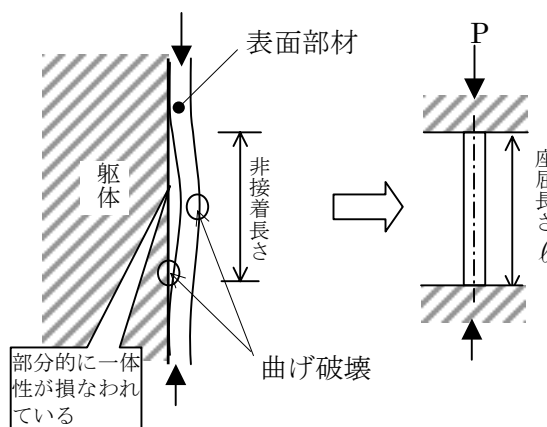


Figure8 Buckling model of non-bonded surface finishings

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + P \frac{d^2 v}{dx^2} = 0 \quad (11)$$

$$v = a \left(\cos \frac{2\pi}{\ell} x - 1 \right) \quad (12)$$

$$P_E = 4 \frac{\pi^2}{\ell^2} EI \quad (13)$$

(2)初期たわみの影響

初期たわみ v_0 は Figure9 に示すようにオイラー荷重が作用したときと同波長に湾曲したものとし、(14)式で表すものとする。これは、初期たわみの波長がオイラー座屈の波長と一致すれば面外変形に対して最も危険な場合を想定できるからである。また、この場合の基礎方程式は(15)式で表され、(12)・(14)および(15)式から表面部材の最大変形量 a が(16)式のように求まり、面外変形 v は(17)式となる。

ここで、表面部材の面外変形の総和は(18)式で求められる。続いて、表面部材に作用する曲げモーメントは(17)式を微分した値を用いて(19)式とすることができ、一体性の損なわれている表層部材の端部と中央部の曲げモーメントの絶対値はそれぞれ最大値を示し、境界条件を代入すると(20)式を得る。ここで、 a_0 ：初期たわみの振幅

$$v_0 = a_0 \left(\cos \frac{2\pi}{\ell} x - 1 \right) \quad (14)$$

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + P \left(\frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{d^2 v_0}{dx^2} \right) = 0 \quad (15)$$

$$a = a_0 \frac{P}{P_B - P} \quad (16)$$

$$v = a_0 \frac{P}{P_B - P} \cdot \left(\cos \frac{2\pi}{\ell} x - 1 \right) \quad (17)$$

$$v_1 = v_0 + v = a_0 \frac{P_B}{P_B - P} \cdot \left(\cos \frac{2\pi}{\ell} x - 1 \right) \quad (18)$$

$$M_B = - \frac{d^2 v}{dx^2} EI = a_0 \frac{P_B}{P_B - P} \left(\frac{2\pi}{\ell} \right)^2 EI \cos \frac{2\pi}{\ell} x \quad (19)$$

$$M_{\max} = |(M)_{x=0}| = |(M)_{x=\frac{\ell}{2}}| = a_0 \frac{P_B \cdot P}{P_B - P} \quad (20)$$

(3)相対ムーヴメントの反り成分の影響

表面部材断面内に湿度差や温度差が生じている場

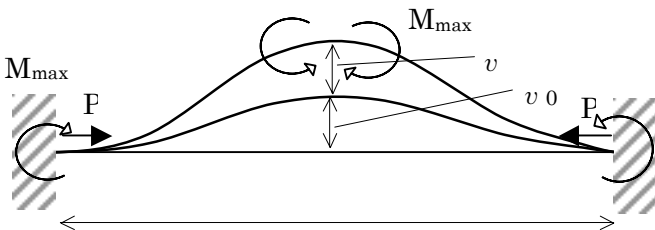


Figure9 Out of plane

合には相対ムーヴメントの反り成分の影響を受け、部材の安全設計には潜在曲げモーメント M_0 が内力として存在するものとしなければならない。したがってこの場合の表面部材に作用する曲げモーメントは(21)式で求めることができる。

$$M_x = M_0 - EI \frac{d^2 v}{dx^2} = M_0 + a_0 \frac{P_B \cdot P}{P_B - P} \cdot \cos \frac{2\pi}{\ell} x \quad (21)$$

(4)崩壊限界条件

①オイラー荷重による場合の崩壊限界条件

相対ムーヴメントによる軸圧縮力 P で座屈荷重に至らない条件としての座屈長は(22)式で求めることができる。

$$L \leq \ell = 2\pi \sqrt{\frac{EI}{P}} \quad (22)$$

②曲げ破壊による場合の崩壊限界条件

相対ムーヴメントによる軸圧縮力で表面部材が曲げ破壊しない条件は、曲げ応力による引張縁ひずみが曲げ強度または引張り強度時の引張りひずみを超えないこととし、(23)式によってその条件を求めることができる。ここで、 M_D ：表面部材の曲げ耐力、 \bar{y} ：中立軸位置から引張縁までの断面内距離、 EA ：軸方向弾性剛性

$$(M_D / EI) \cdot \bar{y} \geq (M_{\max} / EI) \cdot \bar{y} - \frac{P_D}{EA} \quad (23)$$

4. 3 オイラー荷重による崩壊限界ケーススタディ

(22)式より得られる崩壊限界条件としての許容座屈長さをタイル仕上げを表面部材としたモデルケースについて検討した。表面部材はタイルと下地モルタルとの相対ムーヴメント $\Delta \varepsilon$ と軸弾性剛性 EA とから軸圧縮力 P を求め、それと曲げ剛性 EI を(22)式に代入し、許容座屈長さを求めた。Table1 に表面部材として使用する構成条件を、Figure10 に許容座屈長さの計算結果をそれぞれ示す。許容座屈長さは相対ムーヴメントの増加に伴い減少する。タイル厚よりも下塗りモルタルの厚さの影響が大きく、下塗りモルタルの厚さが小さいほど許容座屈長さは短くなる結果となった。これは一体性が損なわれたときに薄塗になるほど危険側になることを示している。

4. 4 まとめ

躯体と部分的に一体性が損なわれている表面部材について、相対ムーヴメントが生じた場合の表面部材の崩壊メカニズムとその限界を座屈理論により提案を行い、崩壊限界予測の一般的な定式化を行った。

5. シェアラグ理論による剪断剥離限界の予測方法の提案

5. 1 シェアラグ理論における面内剪断応力解析
 シェアラグ理論による1次元の解析手法は、複合

材料端部の構成層の間に生じる面内剪断剥離力の予測のために、古くから実用的で簡易的な方法として多く利用されている。

Figure11 にシエララグ理論の解析で用いる代表的なモデルを示す。これは、第1層材・第2層材および接着層の3層からなる積層複合材料をモデル化したものである。ここで生ずる面内剪断剥離力は、各層に作用する外力ではなく、第1層材および第2層材間の相対ムーヴメントのひずみ差による内力によって生ずるものとする。さらに、このモデルは、第1層材および第2層材には材軸方向応力(X軸)のみ作用し、接着層は第1層材および第2層材の間の面内剪断力のみ伝達させる機能を持つものとする。ここで、第1層材と第2層材との層間変位を δ 、各構成材料の力学特性を Table1 に示す通りとし、単位幅当りの応力について考える。従って次式の基礎方程式が得られる。

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} = \frac{G}{t} \cdot \left(\frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} \right) \cdot \delta \quad (24)$$

また、相対ムーヴメントを各層の自由ひずみの差として $\Delta\varepsilon$ とすれば、次式が得られる。

$$\delta = \Delta\varepsilon \cdot x - \int_0^x \left(\frac{F_2}{t_2 \cdot E_2} - \frac{F_1}{t_1 \cdot E_1} \right) dx \quad (25)$$

上式を解くと、一般解は(26)および(27)式となり、

$$\delta = C_1 \cdot \cosh \beta \frac{x}{L} + C_2 \cdot \sinh \beta \frac{x}{L} \quad (26)$$

Table1 Geometries and elastic modulus of ceramic tile finishings

タイル		下塗りモルタル	
①モザイク	厚さ：0.5cm	A:薄塗	厚さ：1.0cm
②小口平	厚さ：1.0cm	B:3回塗	厚さ：2.5cm
③2丁掛	厚さ：1.5cm	C:過太厚	厚さ：5.0cm
ヤング係数：1.5GPa		ヤング係数：7.0GPa	

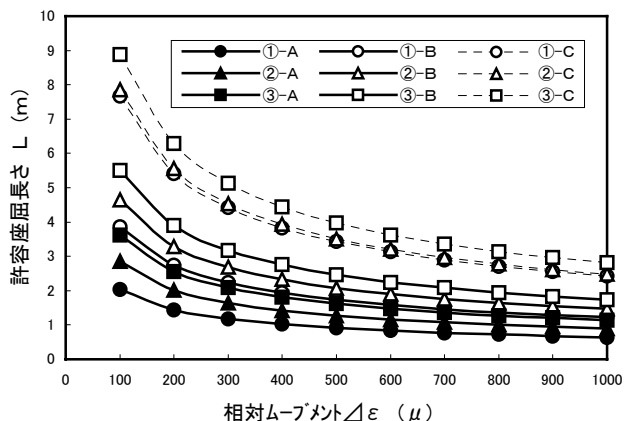


Figure10 Differential movement and buckling length

$$\beta = D \cdot L = \sqrt{\frac{G}{t} \cdot \left(\frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} \right)} \cdot L \quad (27)$$

境界条件を(28)式のようにすると、解は(29)・(30)式となる。

$$(\delta)_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{d\delta}{dx} \right)_{x=L/2} = 0 \quad (28)$$

$$\delta = \frac{\Delta\varepsilon}{D \cdot \cosh(\beta/2)} \cdot \sinh\left(\beta \frac{x}{L}\right) \quad (29)$$

$$\tau = \frac{D \cdot \Delta\varepsilon}{\left(\frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} \right) \cdot \cosh(\beta/2)} \cdot \sinh\left(\beta \frac{x}{L}\right) \quad (30)$$

さらに、面内剪断応力 τ と表面部材に作用するX軸方向力 σ_1 を求めると次式のようなになる。

$$\sigma_1 = \frac{\Delta\varepsilon}{\left(\frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} \right) \cdot t_1} \cdot \left(1 - \frac{\cosh\left(\beta \frac{x}{L}\right)}{\cosh\left(\frac{\beta}{2}\right)} \right) \quad (31)$$

まず、接着層の面内剪断力 τ の分布を見るために、(30)式の D 、 $\Delta\varepsilon$ および $(1/t_1 E_1 + 1/t_2 E_2)$ を左辺に移項して無次元化した(32)式の $P(x)$ を求めた。これをFigure12に示す。 $P(x)$ は、複合部材中央部で零となり、最端部で最大となる。また、端部になるほど $P(x)$ は大きくなり、その傾向は β が大きくなるほど顕著になる。これは、面内剪断応力が端部に集中することを示している。また、Figure13に β と $P(x)$ との関係を示す。材軸中央部において、 β が5以上になると $P(x) \approx 1$ となる。このように、 β は積層複層材料に関する一種の形状係数を表しており、これがある値以上になると、面内剪断応力の最大値は、(27)式の C が同じであればほぼ一定の値となることを示している。

$$P(x) = \frac{\sinh\left(\beta \frac{x}{L}\right)}{\cosh(\beta/2)} \quad (32)$$

同様に、第1層の軸方向応力 σ_1 の分布を見る

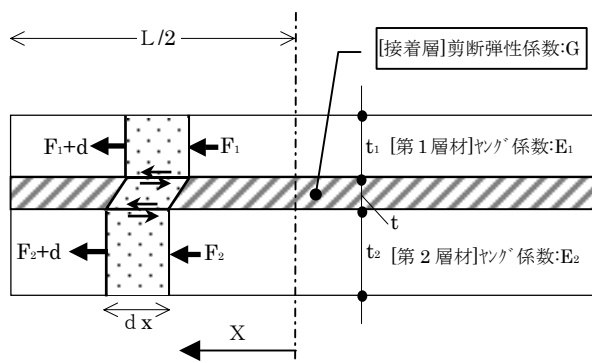


Figure11 Shear lag model

ために、(31)式について D 、 $\Delta\varepsilon$ 、 t_1 、 β および $(1/t_1E_1+1/t_2E_2)$ を右辺から左辺に移項させると、無次元化された(33)式の $Q(x)$ との関係を示す。これを Figure14 に示す。 $Q(x)$ は、材中央部から端部になるほど小さくなり、最端部では零となる。また、Figure15 に β と $Q(x)$ との関係を示す。これも β の大きさの影響が大きく、これが大きくなるほど端部近傍まで軸方向応力は一定の値を示す。ここで $Q(x) \approx 1$ を満たす β を β_p (約 10 以上の値) とする。

$$Q(x) = 1 - \frac{\cosh\left(\beta \frac{x}{L}\right)}{\cosh(\beta/2)} \quad (33)$$

5. 2 建築部材のモデル化の考え方

コンクリート建築物の表面には、打込型枠などの単層やタイル仕上げなどの複層となっているものなど様々な形態の表層部材が接着されている。しかし、ここで提案するモデルは、Figure16 に示すように表層部材と剛性の大きなコンクリート層からなる 2 層材とに分かれる。コンクリート層は第 2 層材とする。一方、表層部材については、変形性能を材軸方向変形成分と剪断変形成分とに分け、それぞれ Figure16 に示す第 1 層材と接着層とし、Figure11 と同じシエアラグ理論のモデルとする。

5. 3 まとめ

ここでは、相対ムーブメントによって表面部材端部に発生する面内剪断力の簡易計算方法と建築部材でのモデル化の考え方を提案した。

(参考文献)

- 1) 馬場明生・平石久廣：仕上げ材料のひび割れ剥離応力の弾性解析，日本建築学会関東支部研究報告集，1980年5月
 - 2) 渡部嗣道・馬場明生：シエアラグ理論によるコンクリート構造物の表面部材端部に生じる面内剪断剥離力の計算方法の提案，日本建築学会九州支部研究報告，2000年3月
- (平成 15 年 8 月 29 日受理)

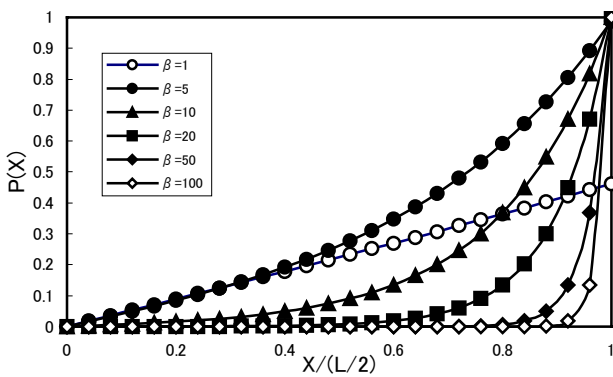


Figure12 Distributions of $P(x)$

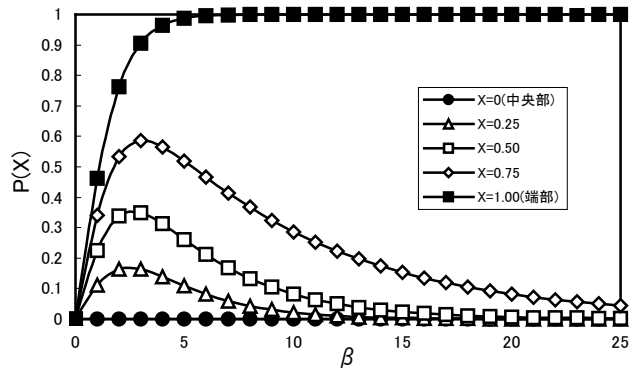


Figure13 Relationships between β and $P(x)$

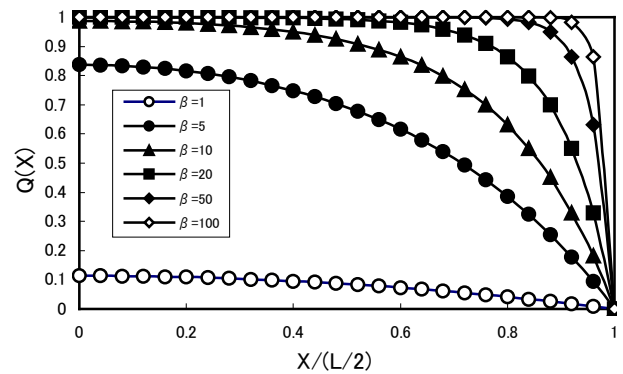


Figure14 Distributions of $Q(x)$

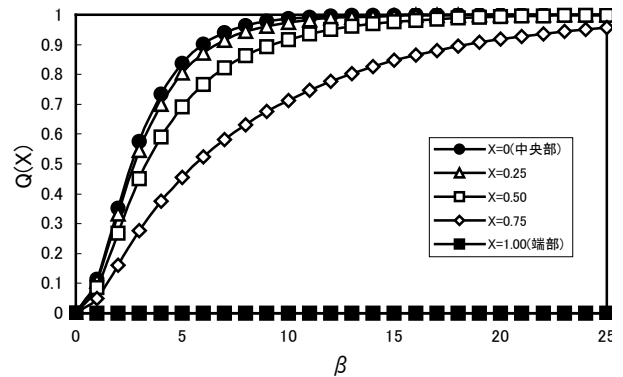


Figure15 Relationship between β and $Q(x)$

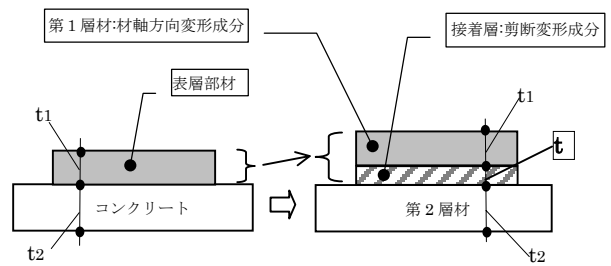


Figure16 Shear lag model for building components