

鉄筋コンクリート建築物における表面部材 設計のための日常想定外力の予測手法

馬場明生 (感性デザイン工学科)

佐藤俊介 (感性デザイン工学専攻 2002 年度修了生)

渡部嗣道 (大阪市立大学)

田原督弘 (感性デザイン工学専攻)

A Method for Predicting External Forces in Designing the Surface Components Bonded on Reinforced Concrete Buildings

Akio BABA (Department of Perceptual Design and Engineering)

Shunsuke SATO (2002 Graduate student of Division of Perceptual Design and Engineering)

Tsugumichi WATANABE (Osaka City University)

Masahiro TABARA (Division of Perceptual Design and Engineering)

A predictive method is proposed for axial strains and curvatures of thermal movements of surface components on the basis of one dimensional steady heat transmission model and unsteady one, which are the causes of exfoliation failure phenomena of surface components. Thermal movements of two types of surface components with actual specifications are calculated. As a result, thermal movements due to shifts of surface temperatures in time are clarified.

Key Words: *Surface component, Thermal movements, Axial strain, Curvature, Exfoliation failure phenomena, Reinforced concrete buildings*

1. はじめに

鉄筋コンクリート建築物には、仕上げ材としてセラミックタイルやセメントモルタル等の表面部材を躯体に接着させる場合が多く見られる。それは、建築物の美観だけでなく、耐久性の向上を図る上で重要である。一方、躯体コンクリートとタイルやモルタル等の接着一体性を確保するためには、表面部材設計において安全性能を重要な機能の一つとして取り扱わなければならない。その場合の設計用外力として乾湿・温冷ムーブメントが考えられているが、関連する要因が複雑であり、そのためもあってその大きさの予測手法に関する研究は、著者らの知る限りほとんど行われていない。そこで、その予測手法の確立に関する足がかりとして、直達日射および室内外の温度差を考慮したと

きの温冷ムーブメントに着目した。本研究では、温冷ムーブメントの予測方法を提案し、現実的な表面部材と躯体とを考慮した壁体モデルについての予測結果の一例を示した。また、現実的な値を予測するためのケーススタディを実施した。そこで、表面部材の外気側温度条件と現実的な壁体の構成条件を設定した解析モデルについて、断面内の温度分布を非定常伝熱モデルにおける差分法近似によって算定し、その結果から設計外力としての表面部材の無拘束状態における変形状を予測した。

2. 表面部材の剥落安全設計基本フローの提案

Figure 1 に、鉄筋コンクリート建築物の表面部材の安全性に関する設計における外力およ

び要因についてのフローを示す。鉄筋コンクリート建築物の表面部材には、日常想定外力として乾湿・温冷ムーブメント（ディファレンシャルムーブメント： ϵ_D ）が作用している。表面部材における ϵ_D の経年変化の決定要因としては、部材の含水率が関係しており、地域・部位条件からの部材断面における温度分布および経時変化によって決定される。一方、恒温恒湿での乾湿ムーブメントは材料要因および調合要因によって決定でき、それと ϵ_D の経年変化とによって ϵ_D の日変化の基準点を決定できる。また、 ϵ_D の経年および日変化の合成より求められる表面層の歪および界面応力と表面部材の剥離および崩壊メカニズムから表面部材の潜在応力を求めることができる。さらに、この結果求められる表面部材の潜在応力に、地震動時の強制変形による応力を加え、表面部材の剥落安全設計を行う。本研究の範囲は、フローの 2 重線で囲まれた外力作用の部分である。

3. 定常状態による平均歪と曲率の算定方法とその適用例

3.1 温冷ムーブメントの予測方法

3.1.1 予測方法の概要

表面部材の断面内の温度分布は、実際の室内外の温度条件と壁体の部材条件を考慮して予測した。したがって、表面部材と躯体の壁体構法を現実的な材料の種類と部材厚でモデル化した。また、室内温度と表面部材の外気側表面温度とを既知とした温度条件を与え、一次元壁体に関する定常熱伝導モデルにより断面内の温度予測を行った。温冷ムーブメントは、温度変化前の壁体温度と室内温度とが同一な状態とし、これに対する表面温度が変化した場合の相対量として評価するため、予測される表面部材内温度と室内温度との差異を求めた。

一方、表面部材の温冷ムーブメントは、Figure 2 に示すように躯体との境界条件が無拘束状態とした場合の変形量で評価することとした。ここで、表面部材の平均的な挙動を把握するため変形性状は初等はり理論で予測し、軸方向伸縮成分と反り成分とを求めた。

3.1.2 表面部材の温度分布の予測

室内温度を一定とし、表面部材の外気側表面温度を変化させた場合の一次元壁体モデルについて定常伝熱モデルにより断面内温度分布を予測した。n 層の構成材料からなる壁体モデルを Figure 3 に示す。

また、壁体の外気側表面温度について、表面

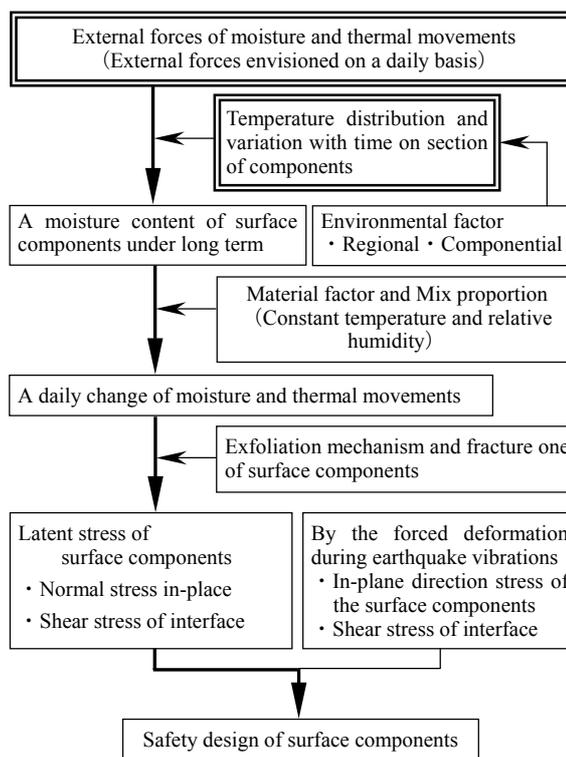


Figure 1 External forces and factors on safety design of the surface components of reinforced concrete buildings

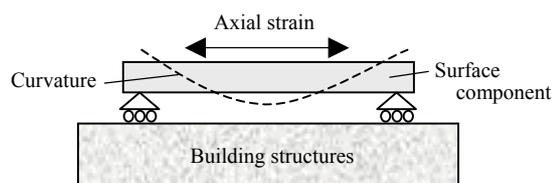


Figure 2 The model of the surface component

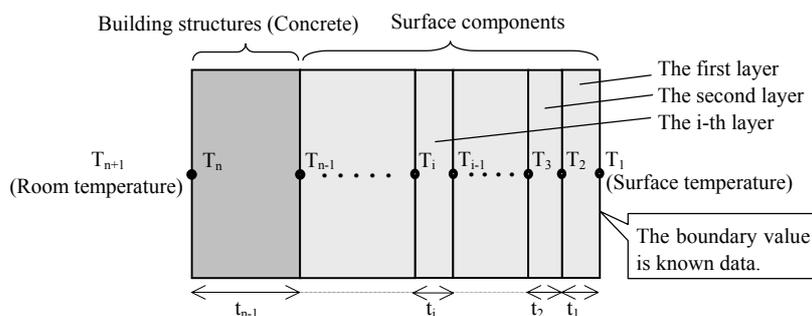


Figure 3 The model for predicting temperature in the wall of n layers

部材と躯体との間に浮きが生じている箇所は、浮きの生じていない箇所よりも表面温度が高いことはよく知られている。そこで、表面部材と躯体との間に生じた浮きが温冷ムーブメントに与える影響について検討することとし、浮きのある部分をある一定の厚さを持つ中空層として取り扱った。しかし、表面部材の浮きの部分の熱伝導特性に関する資料はない。ここで、これを対流が生じる程度の中空層（中空層の厚さが 10~15mm 以上であれば対流現象が生じる。）と同等として過大に評価すれば、予測される表面部材内の温度変化量は実際に起こりうる変化量よりも大きくなり、温冷ムーブメントの予測値としては安全側となる。したがって、浮きによる中空層の熱抵抗 γ を $0.1\text{m}^2\text{K/W}$ （半密閉型の壁の中空層の値で中空層厚さに影響しない。）とした¹⁾。

以上の算定条件により、表面温度を T_1 ・室内温度を T_{n+1} とすれば、第 $i-1$ 層材と第 i 層材の境界温度 T_i は (1) 式となる¹⁾。なお、浮きのない場合には熱抵抗 γ は零である。ここで、 t_i ：第 i 層材の厚さ [m]， λ_i ：第 i 層材の熱伝導率 [W/mK]， α ：室内側の総合熱伝達率 [W/m²K] とする。

$$T_i = T_{i-1} - \frac{t_{i-1}}{\lambda_{i-1}} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{t_i}{\lambda_i} + \gamma + \frac{1}{\alpha}} (T_1 - T_{n+1}) \quad (1)$$

3.1.3 温冷ムーブメントの予測

(1) 軸方向伸縮成分の算定

表面部材が温度変化によって軸方向に伸縮するときの軸方向平均歪 ϵ_c は (2) 式となる。ここで、 t_i ：第 i 層材の厚さ， E_i ：第 i 層材のヤング係数， α_i ：第 i 層材の熱膨張係数， ΔT_i ：第 i 層材の温度変化量の断面内平均値とする。

$$\epsilon_c = \frac{\sum_{i=1}^n E_i t_i \times \alpha_i \Delta T_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i} \quad (2)$$

(2) 反り成分の算定

表面部材の中立軸からの距離を y とし、この位置における温度変化量 ΔT_y を求めると、第 i 層材に存在する場合の拘束応力 σ_{iy} は (3) 式となる。したがって、表面部材が温度変化によって反る場合の曲率の算定式は (4) 式となる。ここで、 E_i ：第 i 層材のヤング係数， A_i ：第 i

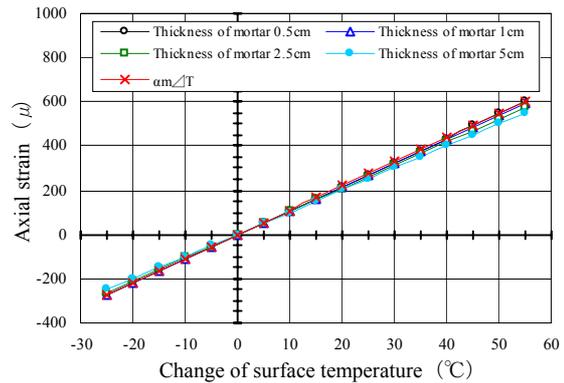


Figure 4 Relationships between axial strain and change of surface temperature on cement mortar finishings

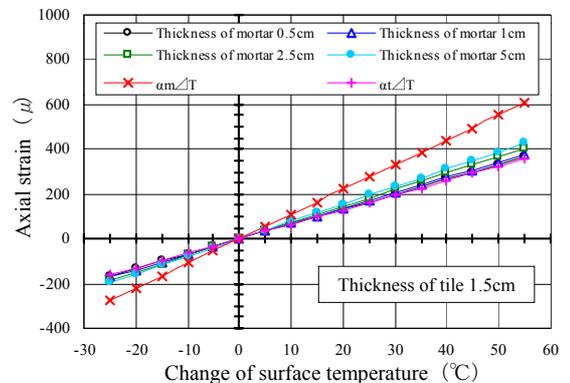
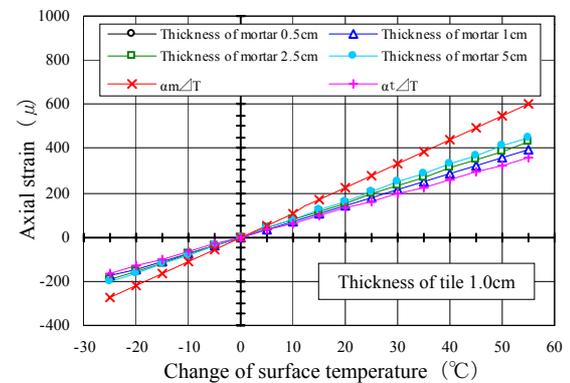
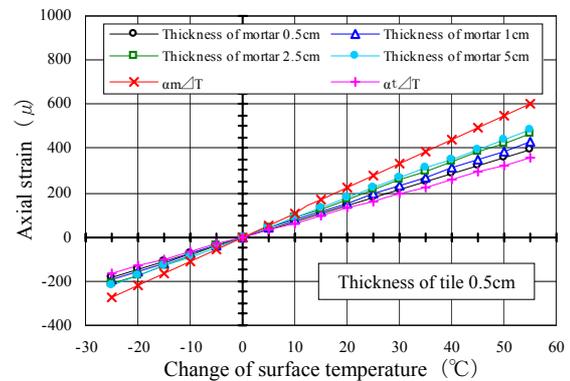


Figure 5 Relationships between axial strain and change of surface temperature on ceramic tile finishings

層材の断面積， ρ ：曲率半径， I_i ：表面部材の中立軸に関する第 i 層材の断面二次モーメントとする。

$$\sigma_{iy} = E_i(\alpha_i \cdot \Delta T_y - \varepsilon_c) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{A_i} \sigma_{iy} \cdot y dA}{\sum_{i=1}^n E_i I_i} \quad (4)$$

3.2 解析結果

3.2.1 解析モデル

壁体の温度予測モデルは、表面部材の構成材料が 1 層材からなる場合と 2 層材からなる場合の 2 種類の仕上げ構法について検討した。仕上げ構法はセメントモルタル仕上げ、セラミックタイル仕上げ（セラミックタイル+セメントモルタル）とした。ただし、躯体は普通コンクリートで厚さは 15cm とし、室内温度（基準温度）は 25°C とした。また、室内側の総合熱伝達率は 9W/m²K とした。構成材料の物性値を Table 1 に示す。

3.2.2 解析結果

(1) 表面上昇温度と軸方向平均歪の関係

表面部材の表面温度変化量 ΔT を -25~55°C としたときの ΔT と軸方向平均歪との関係について、Figure 4 にセメントモルタル仕上げの場合、Figure 5 にタイル厚 0.5, 1.0, 1.5cm のセラミックタイル仕上げの場合についてそれぞれ示す。両者ともに表面温度の変化量に比例して軸方向平均歪は増大する。また、セラミックタイル仕上げの場合、同一温度変化量における軸方向平均歪について、セラミックタイル厚の差異による影響はほとんどないが、下地セメントモルタル厚の影響については薄塗りになるほど軸方向平均歪は僅かに小さくなる傾向を示した。 $\Delta T=55^\circ\text{C}$ での平均歪の差異は、仕上げとも最大で 60 μ 程度となった。

一方、軸方向平均歪の予測について、セメントモルタル仕上げの場合は、セメントモルタル

Table 1 Physical properties of surface components and building structures

Kinds	Young's modulus (GPa)	Coefficient of thermal expansion ($10^{-5}/\text{K}$)	Coefficient of thermal conductivity (W/mK)	Thickness (mm)
Ceramic tile	63.7	0.65 (α)	1.278	5~15
Cement mortar	14.7	1.1 (α_m)	1.087	0~50
Ordinary concrete	20.6	1.1	1.637	150

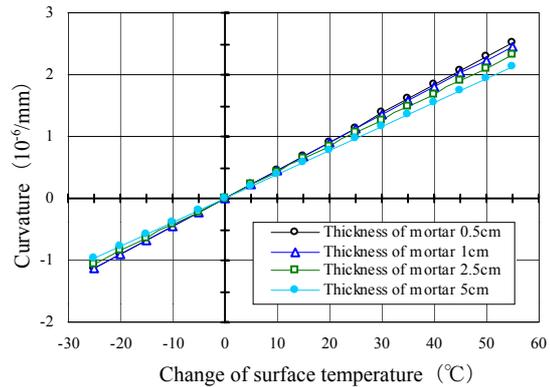


Figure 6 Relationships between curvature and change of surface temperature on cement mortar finishings

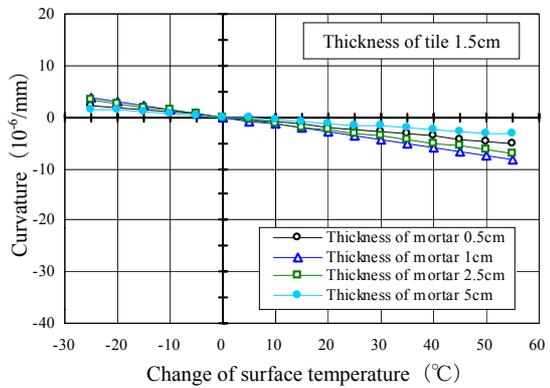
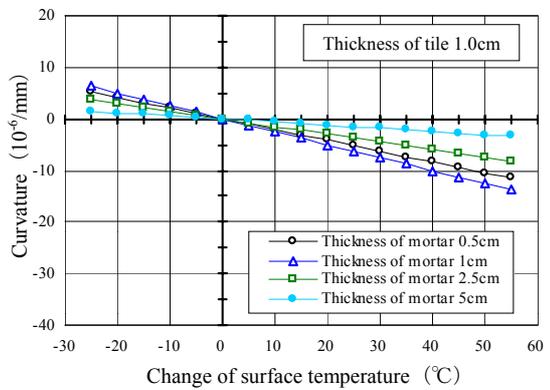
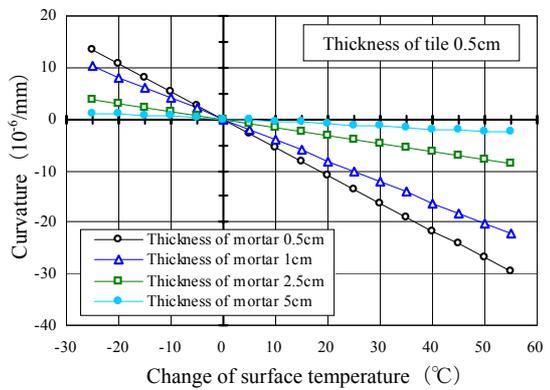


Figure 7 Relationships between curvature and change of surface temperature on cement mortar finishings

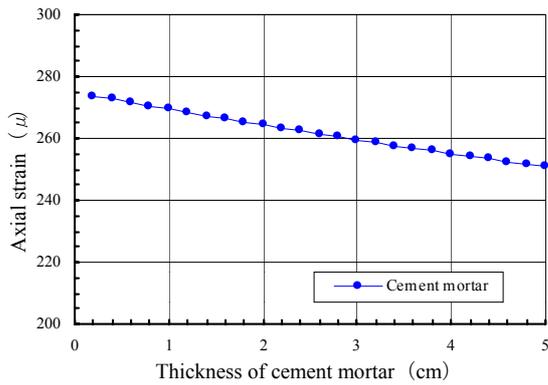


Figure 8 Relationships between axial strain and thickness of cement mortar on cement mortar finishings

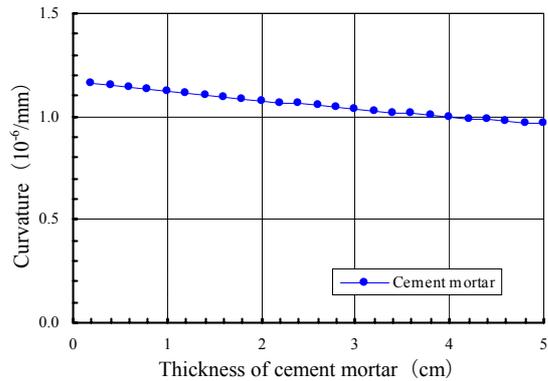


Figure 10 Relationships between curvature and thickness of cement mortar on cement mortar finishings

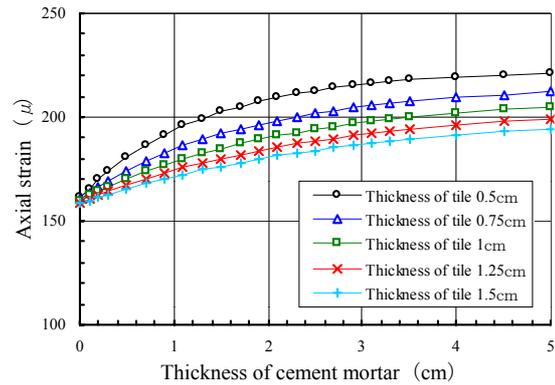


Figure 9 Relationships between axial strain and thickness of cement mortar on ceramic tile finishings

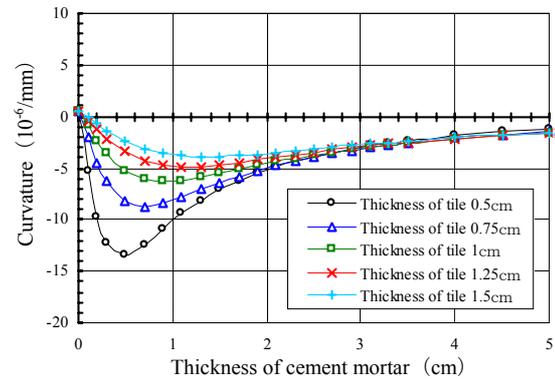


Figure 11 Relationships between curvature and thickness of cement mortar on ceramic tile finishings

の線膨張係数に表面温度変化量を乗じた値で評価しても大きな差異はないものと考えられる。また、セラミックタイル仕上げの場合は、現実的な下地セメントモルタルの厚さを本解析条件の範囲内である 0.5~2.5cm であるとすると、セラミックタイルと下地セメントモルタルの線膨張係数との平均値に表面温度変化量を乗じた値で概ね安全側に評価できるものと考えられる。これは、本研究の範囲内では、下地セメントモルタルよりもセラミックタイルの方が表面部材の軸方向平均歪に与える影響が大きいことを示している。

(2) 表面上昇温度と曲率の関係

Figure 6 にセメントモルタル仕上げの場合、Figure 7 にタイル厚 0.5, 1.0, 1.5cm のセラミックタイル仕上げの場合について、それぞれ表面温度変化量 ΔT を $-25 \sim 55^\circ\text{C}$ とした場合の ΔT と曲率との関係について示す。セメントモルタル仕上げのときは、表面温度変化量に比例して曲率は増大し、表面温度変化量が正の場合の曲率は正の値を示し、外気側に凸の状態となる。一方、セラミックタイル仕上げの場合の曲率は表面温度変化量に比例して減少し、表面温度変化量が正の場合の曲率は負の値を示し、外気側に凹

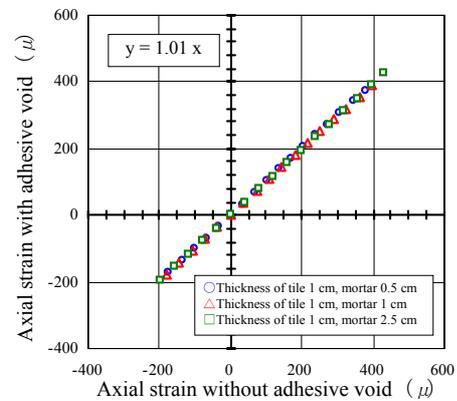


Figure 12 Effects on axial strain of adhesive void

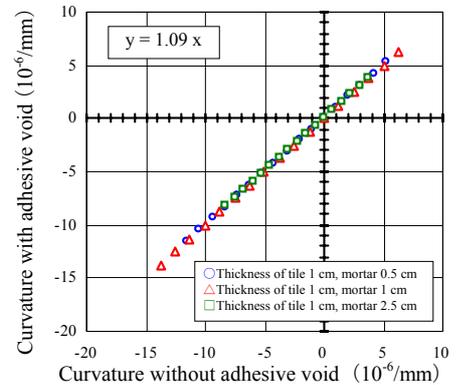


Figure 13 Effects on curvature of adhesive void

の状態となる。ここで、下地セメントモルタルよりもセラミックタイルの方の温度変化量が大きいにも関わらず曲率が負となるのは、下地セメントモルタルの線膨張係数が大きく、その自由歪がセラミックタイルよりも大きくなるためである。また、セラミックタイル厚が小さくなるほど、下地モルタル厚が曲率の差異に与える影響は大きくなる。

(3) 構成材料の厚さと軸方向平均歪との関係

表面温度 50°C・室内温度 25°Cとした場合の構成材料の厚さと軸方向平均歪との関係を、セメントモルタル仕上げの場合を Figure 8 に、セラミックタイル仕上げの場合を Figure 9 に示す。

セメントモルタル仕上げにおけるセメントモルタル厚は 0.1~5cm の範囲内で検討した。軸方向平均歪はセメントモルタル厚に比例して小さくなる傾向を示した。

一方、セラミックタイル仕上げにおける下地セメントモルタル厚を 0~5cm、セラミックタイル厚を 0.5~1.5cm とした範囲内で検討した。下地セメントモルタル厚が零のときに軸方向平均歪が 160 μ 程度に収束している。これは表面部材がセラミックタイルのみの1層となる場合で、そのときのセラミックタイルの軸方向平均歪を示している。さらに、セラミックタイル厚が一定のもとでは、下地セメントモルタルを厚塗りにすると軸方向平均歪は大きくなり、下地セメントモルタル厚一定のもとでは、セラミックタイル厚が薄いほど軸方向平均歪は大きくなる傾向を示した。これはセラミックタイルの線膨張係数が下地セメントモルタルのそれよりも小さいことが影響している。

(4) 構成材料の厚さと曲率との関係

表面温度 50°C・室内温度 25°Cとした場合の構成材料の厚さと曲率との関係を、セメントモルタル仕上げの場合を Figure 10 に、セラミックタイル仕上げの場合を Figure 11 にそれぞれ示す。

セメントモルタル仕上げにおける表面部材の曲率はセメントモルタル厚に比例して減少する傾向を示した。

一方、セラミックタイル仕上げの場合、すべてのセラミックタイル厚について曲率が極小値を示す下地セメントモルタル厚が存在した。特に、セラミックタイル厚が最小の 0.5cm の場合、下地セメントモルタル厚が約 0.46cm のときの曲率は約 $-13.5 \cdot 10^{-6}/\text{mm}$ の極小値を示した(外気側に凹)。セラミックタイル厚が薄いほどその極小値の絶対値は大きくなる傾向を示した。また、

極小値を示す下地セメントモルタル厚よりもその厚さが大きくなる場合には(本研究の範囲内では約 0.5~1.5cm 以上の場合)、曲率はセラミックタイル厚にほとんど影響を受けず緩やかに増大し、下地セメントモルタル厚が無限大となる場合には曲率は零に収束する傾向を示した。

(5) 浮きのある場合の軸方向平均歪と曲率

セラミックタイル仕上げの場合について、表面部材と躯体との間に浮きが生じている場合と生じていない場合の比較を、軸方向平均歪と曲率について Figure 12 および 13 にそれぞれ示す。

軸方向平均歪および曲率ともに、表面部材に浮きが生じている場合と生じていない場合は同等の値を示した。したがって、本研究の範囲内において、表面部材の外気側表面温度が予測できるならば、浮きが生じている場合の温冷ムーブメントは浮きのない壁体モデルで予測することが可能であることが確認できた。

4. 一次元非定常によるムーブメントの予測

4.1 ムーブメントの予測方法

(1) 解析モデル

解析に用いたモデル図の概要を Figure 14 に示す。対象とする表面部材は現実的な仕様の仕上げ構法とし、躯体であるコンクリート表面に後張りタイル工法によって接着したセラミックタイル仕上げとした。そこで、セラミックタイル層と下地セメントモルタル層の2層からなるモデルを設定した。コンクリートは普通コンクリートとし、厚さを 15cm とした。また、セラミックタイル層と下地セメントモルタル層の厚さをいずれも 1cm とした。

(2) 温度分布の予測方法

解析モデルは一次元壁体とし、非定常における断面内温度分布を差分法によって予測した。

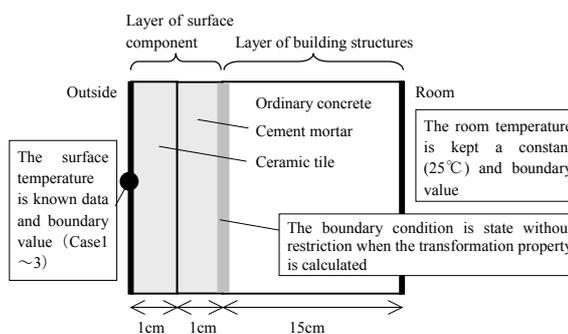


Figure 14 Analysis model

境界値は室内温度と表面部材の外気側表面温度とし、これを経過時間ごとに既知の値として与えた。境界値となる表面部材の外気側表面温度条件を Figure 15 に示す。表面温度の経時変化は最高温度と温度上昇率を変化させて設定し、バイリニア型とした。これはセラミックタイル仕上げの壁体モデル試験体による屋外暴露実測値に基づいて決定したものであり⁵⁾、日射側の表面温度は最高温度に達するまでの温度変化をほぼ直線的に近似しても差し支えないことと、さらに夏期の南側に表面部材を垂直に向けた場合には表面温度が上昇し始めて5時間程度経過した後最高温度に達したことが確かめられた。また、最高温度に達してからは、表面部材の平均歪が設計上安全側に評価されるように(定常状態が最も大きくなる)一定温度を保つ状態とした。

ケース1は5時間でタイル表面温度を最大値にした場合で、5時間から10時間の間は最高温度のまま一定とした。ケース2は最大表面温度を80℃とし、温度上昇率を変化させた場合である。ケース3は表面温度の初期設定をある温度にした場合で、温度は初期設定のまま3時間一定とした。

また、差分法によって近似計算するときの表面部材層の分割間隔 Δx を1mm、計算間隔 Δt を1秒とし、解析精度を考慮して、 $a\Delta t/\Delta x^2 < 0.5$ となるようにした。ここで、 a : 温度熱伝導率 [m^2/s] ($a = \lambda/c\rho$)、 λ : 熱伝導率 [W/mK]、 $c\rho$: 容積比熱 [J/m^3K] である。表面部材を構成する材料の物性値を Table 2 に示す。

(3) ムーブメントの予測方法

表面部材のムーブメントを表面部材全体の平均的な挙動として把握するため、初等はり理論によって変形状を評価し、躯体層との境界条件は無拘束状態とした。そして、表面部材内部の温度変化による変形状として軸方向伸縮成分とそり成分とを算定した。

(a) 軸方向伸縮成分

差分法における各分割層について、外気側表面から i 層目の微少区間の j 番目の計算時間における平均上昇温度 ΔT_{ij} 、その熱膨張係数 α_i およびヤング係数 E_i から、表面部材の軸方向平均歪 ϵ_{cj} は (5) 式で求めた。

$$\epsilon_{cj} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \Delta x \times \alpha_i \Delta T_{ij}}{\sum_{i=1}^n E_i \Delta x} \quad (5)$$

(b) 反り成分

表面部材内部に作用する拘束応力から表面部材全体の曲げモーメントを求め、それによる表面部材の曲率を (6) 式で求めた。ここで、中立軸位置から微少区間の中心までの距離を y_i 、 i 番目の微少区間層の中立軸に対する断面2次モーメントを I_i する。

$$\frac{1}{\rho_j} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i (\alpha_i \cdot \Delta T_{ij} - \epsilon_{cj}) y_i}{\sum_{i=1}^n E_i I_i} \quad (6)$$

4.2 計算結果

非定常による場合と比較するために、定常による場合の表面部材の軸方向平均歪と曲率を同じ構法条件で算定した結果を Table 3 に示す。

ケース1による解析結果を Figure 16 (a) および Figure 17 (a) に示す。表面温度を5時間かけて上昇させた場合、表面部材に生じる温度はほとんど定常状態で推移し、軸方向平均歪や曲率も定常状態での算定結果と同等な値が得られた。なお、いずれの経過時間ともに、反りの状態は外気側に対して凹(曲率:負)となった。

ケース2による解析結果を Figure 16 (b) および Figure 17 (b) に示す。軸方向平均歪は経過時間とともにほぼケース1と同様に直線的に増加した。一方、曲率は急激な表面温度の上昇により表面部材内に大きな温度差ができたため温度上昇領域では約40分まで正の値を示す

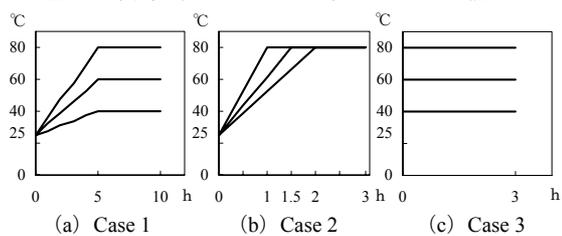


Figure 15 Surface temperature factors

Table 2 Physical properties of components

Kinds	Young's modulus (GPa)	Coefficient of thermal expansion ($10^{-5}/K$)	Coefficient of thermal conductivity (W/mK)	Volumetric specific heat capacity (kJ/m^3K)
Ceramic tile	63.7	0.65	1.278	2612
Cement mortar	14.7	1.1	1.087	2306
Ordinary concrete	20.6	1.1	1.637	2013

Table 3 The transformation property on steady condition

Surface temperature (°C)	Room temperature (°C)	Axial strain (μ)	Curvature ($10^{-6}/mm$)
40	25	107	-3.76
60		250	-8.78
80		393	-13.8

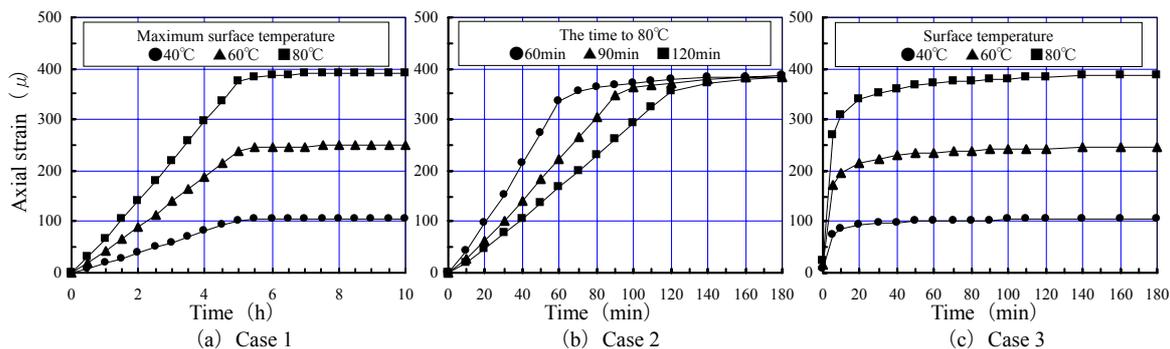


Figure 16 Relationships between axial strain and time

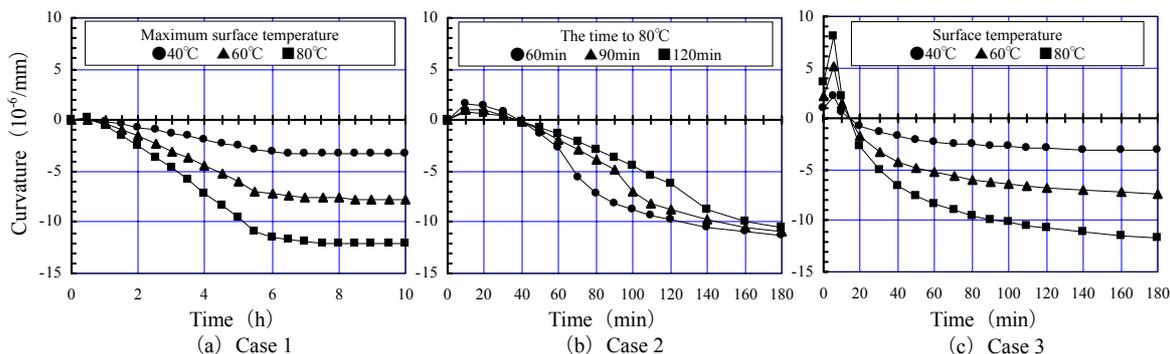


Figure 17 Relationships between curvature and time

ものの、その後はケース 1 と同様に負の値を示す結果となった。

ケース 3 による解析結果を Figure 16 (c) および Figure 17 (c) に示す。軸方向平均歪はケース 1 および 2 とは異なり、最初の 20 分間で急速に増加したが、それ以後は緩やかに増加し、2~3 時間後には定常による場合と同等な値を示す結果となった。一方、曲率の場合は、最初の 5 分間で大きく増加して極大値を示したが、それ以後は緩やかに減少し、3 時間後には軸方向平均歪と同様に定常による場合と同等な値を示す結果となった。

また、いずれのケースとも、軸方向平均歪および曲率の絶対値の最大値は定常伝熱モデルの場合と同等な値を示した。

5. まとめ

本研究では、温冷ムーブメントについて軸方向伸縮成分と反り成分の簡易予測方法を提案し、現実的な表面部材としてセメントモルタル仕上げとセラミックタイル仕上げの場合を取り上げ、その変形性状の予測結果を示した。また、セラミックタイル仕上げを一例として取り上げ、表面温度条件をパラメータとして非定常熱伝導解析による温度予測を行い、表面部材の変形性状算定した。その結果、以下の知見が得

られた。

- (1) 軸方向平均歪は、いずれの仕上げ構法ともに表面部材の外気側表面温度変化量に比例して増大する。
- (2) 曲率は、セメントモルタル仕上げの場合には表面部材の外気側表面温度変化量に比例して増大するが、セラミックタイル仕上げの場合にはそれに比例して減少する傾向を示す。
- (3) 浮きのある場合の温冷ムーブメントは、軸方向平均ひずみおよび曲率ともに浮きのない場合の予測値で評価できる。
- (4) 表面温度条件をパラメータとして非定常熱伝導解析による温度予測を行い、表面部材の変形性状を算定し、表面部材の温度変化の性状とムーブメントの関係の概要を把握することができた。

[参考文献]

- 1) 例えば、中村泰人,松尾陽ら: 新建築学大系 10-環境物理, 彰国社刊, 1994 年
- 2) 例えば、宮本 博著: 材料力学, 裳華房, 1999 年
- 3) 山崎健一, 馬場明生他 2 名: タイル直張り工法の安全性に関する研究, 日本建築工学会研究発表論文集, 1993 年 9 月
- 4) 馬場明生, 渡部嗣道他 3 名: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000 年 9 月
- 5) 熊谷敏男: 外壁タイル仕上げの剥離・剥落性状に関する研究, 九州大学学位論文, 1994 年
- 6) 二村忠元ら: 建築学体系 8, 彰国社

(平成 15 年 8 月 29 日受理)