

外壁タイル張り層の日射による温度分布と接着界面応力の究明

熊谷敏男
(横浜支店)
中村雅彦
(電力・エネルギー本部)
入野一男
(電力・エネルギー本部)

§1. はじめに

外壁陶磁器質タイル張りは、市街地に立つ建築物の外装仕上げ材として多く用いられており、剥落事故が生じると建物の近傍を通行する第三者に危害を与える危険性が大きく、それによる社会的な影響度も大きい。

建物の外装仕上げ材の地震時の剥落事故が社会的問題として注目され始めたのは、宮城県沖地震（昭和53年6月、1978年）以降からと言われている¹⁾²⁾。宮城県沖地震は、近代的な地方の大都市を襲った初めての地震とされている。この際注目されたのは、構造躯体にはほとんど被害を受けていないのに、タイル張り・モルタル塗りおよび窓ガラスなどの非構造部材に大きな被害が生じた点である¹⁾³⁾。

一方、地震時以外に起こる剥離故障や剥落事故も、同様に問題視されてきている⁴⁾。陶磁器質タイル張り仕上げは、地震などの外力が加わらなくても経年により平常時、剥離・剥落事故が生じ易いと言われている外装仕上げ材の一つである。平成元年11月に北九州市でタイル張り層と下地モルタルとが剥落した事故は、通行人3人が死傷するという痛ましい災害で記憶に新しい。その後も毎年何件かの剥落事故が、新聞紙上などで報道されている。

外壁タイル張りの剥離故障は、主として日射による繰返し応力によって、タイルと張付けモルタルとの間の接着が低下して生じると推定されている。しかしながら、日射によって接着界面にどの程度の応力が働くかについては、今までのところ定性的な検討は行なわれているが、定量的な検討は十分なされていない^{8)~11)}。

そこで本検討では、タイルの色や形状等を変えたタイルを張付けたPCパネルを製作し、日射によってタイル張り層の温度変化を計測した。それらの温度測定結果を分析すると共に、測定された温度性状

を用いてタイルの接着界面に生じる応力を検討したものである。

§2. タイル張り層の温度分布の測定

2.1 実験方法

実験要因とその水準は、表-1に示す通りである。温度測定に用いたタイルは、表-2に示すように要因Aと要因Bとを組合わせた5種類とした。これらのタイルは、建築物に一般的に用いられている材質・形状および色調のものから選定した。

温度測定用の供試体は、図-1に示すように厚さ10cmの1m角のPCパネルの上に、タイルを総塗厚30

	要 因	水 準
可 変 要 因	A.タイルの厚み	6mm(モザイク), 8mm(小口平), 11mm(小口平)
	B.タイルの色	白, 薄茶, 茶
	C.方 位	東, 南, 西, 北
	D.測定時期	夏, 秋, 冬, 春
固 定 要 因	コンクリート下地の厚み	: 100mm
	タイルの材質	: 磁器質
	タイル張り層の厚み	: 30mm

表-1 実験要因とその水準

タイル番号	タイルの形状	タイルの表面色
No. 1	モザイク (45×45×6mm) 裏足の出 0.6mm	薄茶
No. 2	小口平 (60×108×8mm) 裏足の出 1.2mm	茶
No. 3	小口平 (60×108×8mm) 裏足の出 1.0mm	白
No. 4	小口平 (60×108×8mm) 裏足の出 1.3mm	薄茶
No. 5	小口平 (60×108×11mm) 裏足の出 2.4mm	薄茶

表-2 測定に使用したタイルの性状

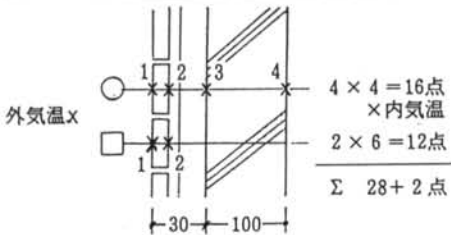


図-1 供試体の形状および温度測定点

mmとして張付けたもので4体製作した、これらを東・南・西および北に向くように組立て、建物の外壁に近い状況になるよう屋根を取付け、かつ裏面側の換気にも配慮した。

温度の測定は、図-1の断面図に示すようにタイル表面・タイル裏面・コンクリート外側表面および内側表面とし、さらに外部気温および内部気温を測定点として、JIS C 1602のT (旧記号CC) 熱電対を用い自記記録計で記録した。

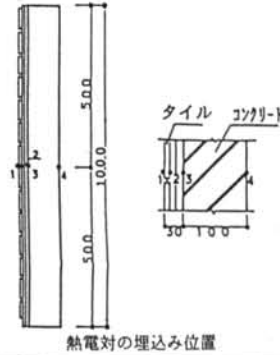
供試体は技術研究所内に設置し、昭和62年9月から昭和63年8月までの約1年間計測を行なった。

2.2 実験結果および考察

(1) タイル張り壁体の温度性状

本節で示す温度性状は、各季節において晴天日で、かつほぼ最高の温度性状を示すものの中から代表的なものとして示した。

一例として夏期においての東・南・西および北面の温度性状を示すと、図-2の通りである。本実験の温度測定は、実験方法でも記したようにタイル張り面を東・南・西および北に向くように設置し、供試体の裏面となるコンクリート面は、建物の室内側を想定し屋根を架けた状態で実施している。そのため図-2に示したように朝方は、供試体の断面方向の温度差がほとんどない状態になっている。日中は日射の影響および気温変化の影響を受け、供試体全



熱電対の埋込み位置

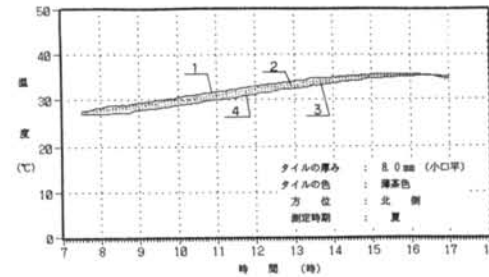
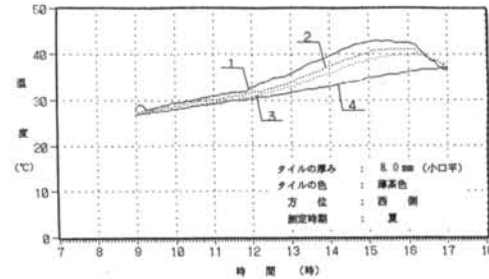
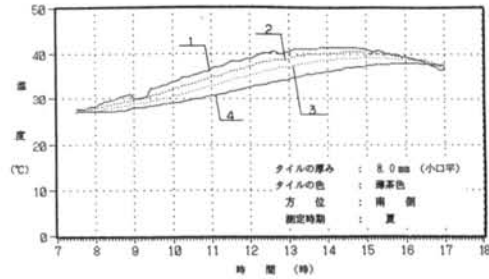
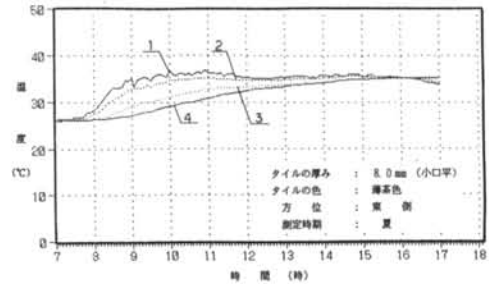


図-2 タイル張り壁体の温度性状 (夏期・各方位)

方位		東			南			西			北
タイルの番号		No.1	No.4	No.5	No.3	No.4	No.2	No.1	No.4	No.5	No.4
タイルの形状		モザイク	小口平	小口平	小口平	小口平	小口平	モザイク	小口平	小口平	小口平
タイルの厚さ		6mm	8mm	11mm	8mm	8mm	8mm	6mm	8mm	11mm	8mm
タイルの色		薄茶	薄茶	薄茶	白	薄茶	茶	薄茶	薄茶	薄茶	薄茶
温度測定点	①	—	2.6	6.2	4.0	3.5	3.2	2.4	3.5	3.5	1.2
"	②		5.9			3.2			1.8		0.6
春	③		4.1/			5.3/			5.3/		0.9/
(S63.5.13)	④		12.6			12.0			10.6		2.7
温度測定点	①	4.1	2.4	4.7	2.1	2.4	2.9	2.1	5.9	2.9	1.2
"	②		4.1			2.4			2.1		0.9
夏	③		2.4/			3.2/			5.9/		1.8/
(S63.8.22)	④		8.9			8.0			13.9		3.9
温度測定点	①	3.2	2.9	5.0	2.6	3.8	3.8	1.5	2.4	2.4	0.9
"	②		3.8			3.5			1.5		0.6
秋	③		2.6/			5.0/			3.2/		0.9/
(S62.10.16)	④		9.3			12.3			7.1		2.4
温度測定点	①	2.9	2.9	5.9	4.1	4.1	4.7	2.1	2.4	2.1	1.2
"	②		4.7			3.8			1.2		0.6
冬	③		2.4/			5.6/			2.6/		0.9/
(S63.1.29)	④		10.0			13.5			5.2		2.7

表—3 各層間の最大温度差

(注)単位 °C

方位 タイルの種類	東			南			西			北
	No.1 モザイク 6mm 薄茶	No.4 小口平 8mm 薄茶	No.5 小口平 11mm 薄茶	No.3 小口平 8mm 白	No.4 小口平 8mm 薄茶	No.2 小口平 8mm 茶	No.1 モザイク 6mm 薄茶	No.4 小口平 8mm 薄茶	No.5 小口平 11mm 薄茶	No.4 小口平 8mm 薄茶
季節										
春 (S63.5.13)	30	30	32.5	30	28	33	34	33.5	—	25.5
夏 (S63.8.22)	40.5	37	38.5	40	42	45	44	43	44	36
秋 (S62.10.16)	31.5	28	29.5	26.5	30	34	30.5	30	31.5	24
冬 (S63.1.29)	16	15	16	22	25.5	28.5	18	16.5	17.5	14

表—4 タイル表面の最高温度

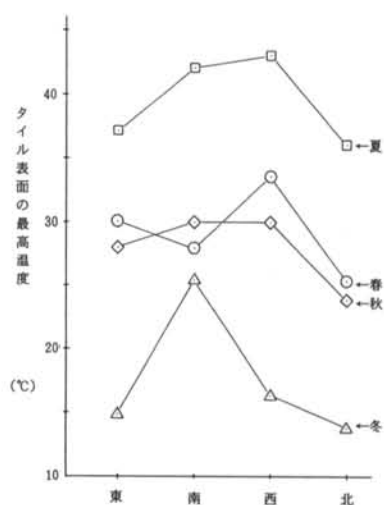
(注)単位 °C

体に温度上昇が生じるが、夕方になると温度下降が生じ、夜間の自然冷却過程を経て朝に至っている。

東・南および西面の温度は、日射が直接当たる時間に特徴的な変化が生じている。特に、東面は太陽高度との関係で南面と西面に比べて、朝方において温度変化が大きくなっている。また、西面では日の沈む時点で大きな温度下降を示している。さらに北面は日中を通じてなだらかな温度変化を示している。

一方、温度の下降段階は、一般に上昇段階よりなだらかな性状を示しているが、一部急下降を示しているケースもある。

タイル張り壁体の断面方向に最も大きな温度差の生じている時点の各層の温度差は、表—3に示す通りである。タイル表面と裏面との温度差（温度測定点①—②）は、北面の1℃前後を除き、ほぼ2～6℃となっている。また、モルタル層とコンクリート躯体の各々の温度差（温度測定点②—③、③—



図—3 タイル表面の最高温度 (No.4, 小口平, 薄茶)

方位 ↓ タイルの種類 ↓ 温度性状 ↓ 季節	東						南						西						北	
	No.1 モザイク 6mm 薄茶		No.4 小口平 8mm 薄茶		No.5 小口平 11mm 薄茶		No.3 小口平 8mm 白		No.4 小口平 8mm 薄茶		No.2 小口平 8mm 茶		No.1 モザイク 6mm 薄茶		No.4 小口平 8mm 薄茶		No.5 小口平 11mm 薄茶		No.4 小口平 8mm 薄茶	
	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)	温度上昇係数 (°C/hr)	継続時間 (hr)
春(S63.5.13)	5.6	1.5	6.8	1.5	6.5	1.5	2.7	5.0	2.4	4.5	3.5	4.5	3.5	3.0	3.8	2.5	—	—	1.6	5.0
夏(S63.8.22)	7.5	1.5	6.8	1.5	9.4	1.5	2.4	5.0	2.7	5.0	3.5	5.0	3.5	3.5	3.3	3.5	3.9	3.0	1.2	6.0
秋(S62.10.16)	8.7	1.5	6.1	1.5	7.9	1.5	4.0	3.0	4.7	2.5	6.1	2.5	2.7	4.5	2.8	4.5	3.1	4.5	1.4	5.0
冬(S63.1.29)	16.7	0.5	16.7	0.5	19.7	0.5	4.3	2.5	5.2	2.0	6.3	2.0	2.5	4.0	2.0	3.5	2.5	3.5	1.9	2.5

*1) 温度上昇係数は図 12に示すように、タイル表面温度の上昇がほぼ直線的かつ急上昇する部分の単位時間当りの上昇温度を意味す。
 *2) 継続時間は上記タイル表面温度の上昇がほぼ直線的かつ急上昇する部分の継続時間を意味す。

表-5 タイル表面の温度上昇係数*1) およびその継続時間*2)

表-5 タイル表面の温度上昇係数およびその継続時間

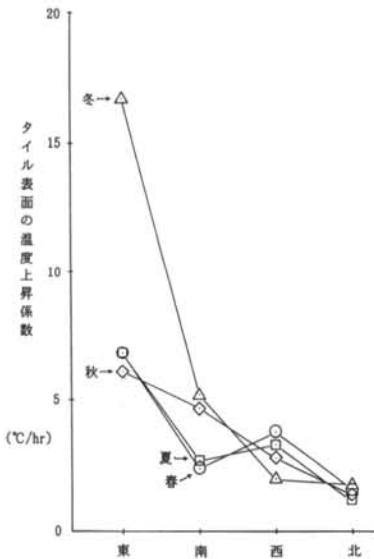


図-4 タイル表面の温度上昇係数 (No.4, 小口平, 薄茶)

④) は、北面の)0.5~2°Cを除き、ほぼ2~6°Cになっている。

タイル張り壁体全体の最大温度差(温度測定点I-L)は、東・南・西面で7~14°C、北面で2.5~4°Cになっている。

(2) タイル表面の最高温度

タイル張り表面の各方位・各季節ごとの最高温度を示すと、表-4および図-3の通りである。

図-3に示すようにタイルの色が薄茶の場合の最高温度は、各季節ごとの差が明らかで、夏>春・秋>冬の順になっており、夏期は35~45°Cの範囲で春・秋期に比べ10~15°C程度高くなっている。方位ごとの最高温度は、冬期を除くと南面より西面の方

が多少高い値となっている。冬期は南面のみが25°C程度まで上昇するが、他の面では15°C前後と低い温度になっている。

タイルの色の違い(白~薄茶~茶)による温度差は5~10°Cとなっており、濃色になる程タイルの表面温度は大となっている。

(3) タイル表面の温度上昇係数

タイル張り面が日射を受け温度上昇がほぼ直線的、かつ急上昇する部分の勾配の程度を、ここでは温度上昇係数(図-12および表-5参照)と呼ぶことにする。タイル張り表面の各方位・各季節ごとの温度上昇係数を示すと、表-5および図-4の通りである。これらの値は天気の良い日の値であり、各方位・各季節での最大値を示している。

方位による温度上昇係数は、東面が最も大きく5~20°C/hr、次に南面および西面が2~6°C/hr、北面は1~2°C/hrと低い値になっている(北面の温度上昇は主として気温変化に伴うもの)。東面は朝の気温の低い段階で日射を受けるので、温度の上昇勾配は他の方位に比べて大きな値となっている。特に冬期は短時間ではあるが、他に比べ16~20°C/hrと極めて大きな値となっている。

季節による温度上昇係数は、最高温度と違って一部を除き(冬期の東面)季節による差は、あまり大きくはなっていない。

タイルの色の違いによる温度上昇係数は、最高温度と同様に濃色になる程大きな値となっている。

(4) タイル張り壁体の基準温度

図-2のタイル張り壁体の温度性状に示すように、日射を受ける前の壁体の断面方向の温度分布は、ほぼ一定の値になっている。この温度を図-12に示す

ように基準温度と称し、整理すると表-8 および図-5の通りである。

これによると冬期は2~3℃、春期および秋期は13~16℃、夏期は26~27℃になっており、各季節によって各方位(東面・南面・西面および北面)ごとにはほぼ一定の値になっていると言える。

§3. タイル張り層の温度応力の検討

3.1 解析方法

(1) タイルとコンクリートの熱膨張の違いによる接着界面の剪断応力

本式の前提条件は、以下の通りである。

- i) タイル張りされたコンクリート壁体は、反り変形(曲率)を生じない、軸方向の伸縮は生じる。
- ii) 接着層の温度による熱膨張が、タイルおよびコンクリート(下地モルタルを含む)の軸方向の力の釣り合いに影響を与えない、すなわち、接着層の軸剛性 E_1t が、タイルの軸剛性 E_2t_2 およびコンクリートの軸剛性 E_1t_1 よりも十分小さいことが本式の適用条件である。
- iii) タイルとコンクリートは剪断変形しないものとしており、両者の変位差はすべて接着層が剪断変形して釣り合うものとする。実際にはタイル、コンクリートとも多少は剪断変形するため、本式で求められた剪断応力より小さくなる。
- iv) タイルとタイルとの間には目地が詰まらされていない状態での剪断応力であり、タイルの目地なしもしくは深目地を想定しており、最もきびしい条件下での剪断応力と言える。目地が詰まっている状態でも経年により、タイルと目地の密着が切れることが十分考えられる。また、目地がタイルと十分密着している場合には、タイルの伸縮が拘束され剪断応力は少なくなる。

接着層両表面の変位差 δ は、

$$\delta = (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2)x - (u_2 - u_1)$$

ここで、 u_1, u_2 : 力に対応する変位

全変位は $u_1 + \alpha_1 T_1 x$, $u_2 + \alpha_2 T_2 x$ となる。

T_1 : コンクリート層の平均温度-基準温度

T_2 : タイル層の平均温度-基準温度

α_1, α_2 : コンクリートとタイルの線膨張係数

接着層の剪断応力 τ は、

$$\tau = G\gamma = G \frac{\delta}{t}$$

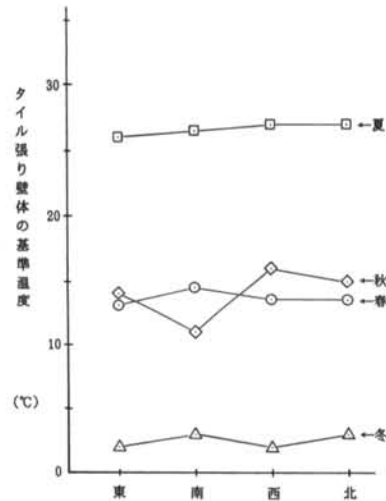


図-5 タイル張り壁体の基準温度

$$= G \frac{(\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2)x - (u_2 - u_1)}{t}$$

ここで、 G : 接着層の剪断弾性係数

γ : 接着層の剪断変形角

力の釣り合いより

$$\begin{cases} dP_2 + \tau dx = 0 \longrightarrow \frac{dP_2}{dx} + \tau = 0 \\ dP_1 - \tau dx = 0 \longrightarrow \frac{dP_1}{dx} - \tau = 0 \\ P_1 = E_1 t_1 \frac{du_1}{dx} \\ P_2 = E_2 t_2 \frac{du_2}{dx} \end{cases}$$

以上の式を整理すると

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_1}{dx^2} - \frac{G}{E_1 t_1 t} \{ (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2)x - (u_2 - u_1) \} = 0 \\ \frac{d^2 u_2}{dx^2} + \frac{G}{E_2 t_2 t} \{ (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2)x - (u_2 - u_1) \} = 0 \end{cases}$$

上式より u_2 を消去すると

$$\frac{d^4 u_1}{dx^4} - \frac{G}{t} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right) \frac{d^2 u_1}{dx^2} = 0$$

さらに上式を解くと

$$u_1 = C_1 + C_2 \frac{x}{l} + C_3 \sinh \beta \frac{x}{l} + C_4 \cosh \beta \frac{x}{l}$$

$$\text{ここで、 } \beta = Cl = \sqrt{\frac{G}{t} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)} \cdot l$$

境界条件

i) 中央ではタイル、コンクリートとも変位がゼロより

$$x=0 \text{ において } u_1=0, \quad u_2=0$$

ii) タイル端部において機械ひずみ(力に対応するひずみ)がゼロより

$$x=\frac{l}{2} \text{ において } \frac{du_1}{dx}=0, \quad \frac{du_2}{dx}=0$$

積分定数4つ ($C_1 \sim C_4$) に対して境界条件式4つで $C_1 \sim C_4$ が定まるので

$$\delta = \frac{1}{C \cosh(\beta/2)} (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2) \sinh \beta \frac{x}{l}$$

剪断応力 τ は

$$\tau \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right) = \frac{1}{C (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2)} \sinh \beta \frac{x}{l}$$

$$\therefore \tau = \frac{C (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2)}{\left[\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right] \cosh(\beta/2)} \sinh \beta \frac{x}{l}$$

(2) タイルの温度勾配による接着界面の法線方向応力本式の前提条件は、次の通りである。

i) モルタルの力学的および熱的特性がコンクリートと同じと言う仮定で、モルタル層はコンクリートの一部として扱っている。

ii) 接着層(張付けモルタル層)はタイル層に比べて十分薄い。

iii) コンクリートがタイルより十分厚い場合に適用できる。ただしコンクリートの厚さが十分でない場合は、コンクリートの変形がタイルに追従する方向にあるため、法線方向応力は小さくなる。

iv) コンクリートが撓まない(全体的に曲率をもたない)と仮定している。実際にはコンクリートも完全拘束されていない限り、温度勾配による熱曲げ変形が生じる。

タイルの温度勾配とコンクリートの温度勾配(基準温度分布からの温度変化による勾配)が同じ符号であれば、コンクリートの変形がタイルに追従する方向にあるため応力は小さくなる。

弾性床版上の梁のたわみ曲線の微分方程式より

$$y = \frac{\cosh \beta x \cdot \cos \beta x + \phi \sinh \beta x \cdot \sin \beta x}{2 \beta^2 (\sinh \frac{\beta l}{2} \cdot \sin \frac{\beta l}{2} - \phi \cosh \frac{\beta l}{2} \cdot \cos \frac{\beta l}{2})} \cdot \frac{\alpha_2 \Delta T_2}{t_2}$$

$$\text{ここで、} \phi = \frac{\sinh \frac{\beta l}{2} \cdot \cos \frac{\beta l}{2} + \cosh \frac{\beta l}{2} \cdot \sin \frac{\beta l}{2}}{\sinh \frac{\beta l}{2} \cdot \cos \frac{\beta l}{2} - \cosh \frac{\beta l}{2} \cdot \sin \frac{\beta l}{2}}$$

タイル接着層の法線方向応力 σ は $\sigma = yK$

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -Ky$$

ここで、 K : コンクリートの法線方向反力係数

コンクリートの厚さがタイルの厚さに比べて大きい場合

$$K = \frac{E_1}{m l d_2 (1 - \nu_1^2)}$$

d_2 : タイルの奥行方向の長さ

m : タイルの形状に関する係数

正方形 0.95

小口平 (108×60) 0.93

二丁掛 (227×60) 0.85

この微分方程式の一般解は

$$y = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x)$$

ここで、 $\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4 E_2 I_2}}$: 弾性床版上の梁の相対的曲げ剛さ

$$I_2 = \frac{t_2^3}{12} \text{ (単位幅)}$$

力の釣り合いより、法線方向応力の総和はゼロより

$$\int_0^{l/2} Ky dx = 0$$

境界条件

i) 中央では勾配がゼロ

$$x=0 \text{ において } \frac{dy}{dx} = 0$$

ii) 端部では剪断力 ($Q = -EI \frac{d^3 y}{dx^3}$) がゼロ

iii) 端部では曲率が熱曲げによるものだけとなる

$$x=\frac{l}{2} \text{ において } \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = \frac{\alpha \Delta T}{t}$$

積分定数4つ ($C_1 \sim C_4$) に対して、力の釣り合い式と境界条件式が合計4つあり、 $C_1 \sim C_4$ が定まるので

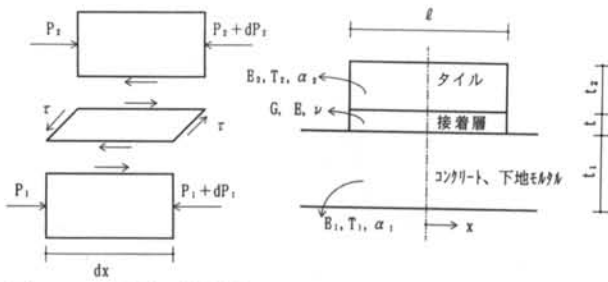


図-6 接着層の剪断応力

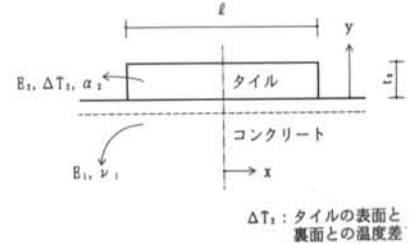
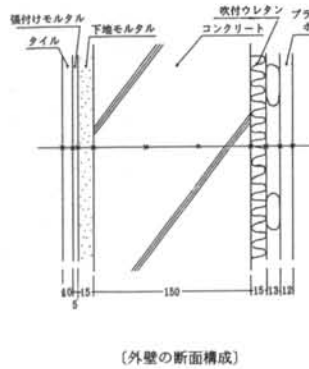


図-7 タイルの温度勾配による法線方式応力

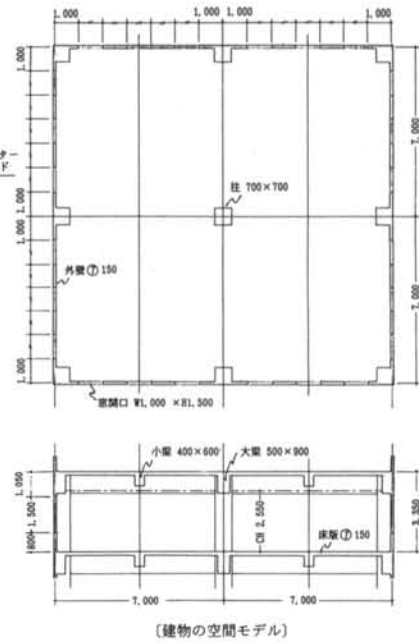
3.2 剪断応力

(1) 接着界面の剪断応力

タイル張り壁体の一日の温度変化は、2.2の(1)で記述したように深夜から朝方の数時間は、壁体の断面方向に温度差がほとんど生じない状態になっている。本検討では長期レンジで発生する応力は、クリープで失われると仮定し、日射による温度変動によって温度応力が生じると考え、日射を受ける直前の温度を基準温度とした。



(外壁の断面構成)



(建物の空間モデル)

図-8 熱伝導解析用の建物および外壁モデル

今回の温度計測ではコンクリート厚が10cmと薄く、かつコンクリート裏面が直接外気温の影響を受ける状態であったため、コンクリートの裏面温度は通常の建物より変動が大きくなっている。実際の建物では外壁の躯体コンクリートは15~18cmで、建物自体が外気からクローズされた状態であったり、空気調和がなされている。そこで、§2.で計測されたタイル表面温度と室内側の各季節ごとの空気調和温度(春・秋24℃、夏26℃、冬22℃)を与えて、タイル張り外壁躯体の温度分布を推定するため、一般的な建物の空間モデルを想定し、熱回路網法による動的熱移動解析(伝導・伝達・輻射・換気などの熱移動形態から成る伝熱系において動的に熱移動の量および温度を求めるもの)を行った。

解析に用いた建物モデルは図-8に、また熱回路シミュレーションモデルは図-9に、さらに解析に

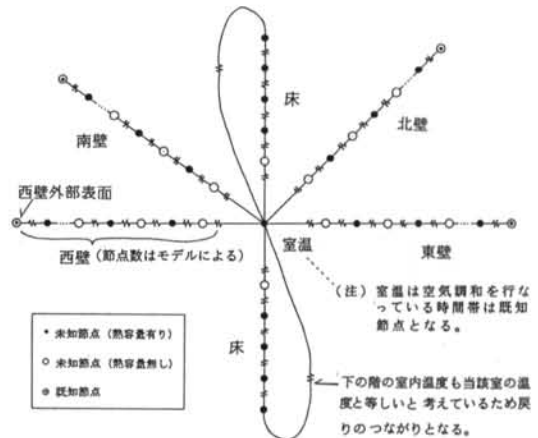


図-9 熱回路シミュレーションモデル

用いた熱定数は、表-6に示す通りである。解析結果の一例は、図-10に示す通りである。室内側のコ

材料名	熱伝達率 (Kcal/ m ² h°C)	熱伝導率 (Kcal/ mh°C)	比熱 (Kcal/ kg°C)	密度 (kg/m ³)
タイル	—	1.099	0.26	2280
モルタル	—	1.200	0.27	2020
コンクリート	—	1.408	0.21	2290
硬質ウレタンフォーム	—	0.024	0.29	40
プラスターボード	—	0.183	0.27	863
ビニル床タイル	—	0.160	0.32	1500
密閉空気層	10.0	—	—	—
室内側	8.0	—	—	—

表-6 熱伝導解析に用いた熱定数

物理定数	剪断応力	法線方向応力
ヤング率 (kgf/cm ²)		
E ₁ (コンクリート)	2.1×10 ⁵	2.1×10 ⁵
E (張付けモルタル)	2.0×10 ⁵	—
E ₃ (タイル)	5.6×10 ⁵	5.6×10 ⁵
ポアソン比 (-)		
ν ₁ (コンクリート)	1.0×10 ⁻⁵	—
ν (張付けモルタル)	0.17	—
線膨張係数 (1/°C)		
α ₁ (コンクリート)	1.0×10 ⁻⁵	—
α ₂ (タイル)	0.4~0.6×10 ⁻⁵	0.4~0.6×10 ⁻⁵
タイル寸法 (cm)		
l (長辺)	45, 95, 108, 227	45, 95, 108, 227
d (短辺)	—	45, 60
形状係数 (-)		
m (タイル)	—	正方形 0.95 小口平 0.93 二丁掛 0.85
厚層 (cm)		
t ₁ (コンクリート)	10~25	—
l (張付けモルタル)	0.1~1.0	—
t ₂ (タイル)	0.5~2.0	0.5~2.0
タイル芯からの距離 (cm)		
X	0~	0~
温度差 (°C)		
T ₁ (コンクリート)	0~10	—
T ₂ (タイル)	0~15	—
ΔT ² (タイル)	—	0~10

(注)物理定数は文献12等による。

表-7 接着界面の温度応力計算用物理定数

コンクリート表面温度は、実測値より空気調和（午前8時から午後5時まで）等の影響で、その変動が小さくなっている。

タイルの接着界面の剪断応力を算定する場合、外壁の温度上昇過程のどの時点で最大になるかを検討しておく必要がある。その検討結果の一例を示すと図-11の通りである。最大剪断応力は、図-12のタ

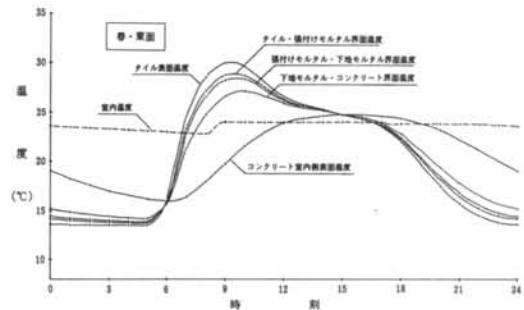


図-10 タイル張り壁体の熱伝導解析による温度分布

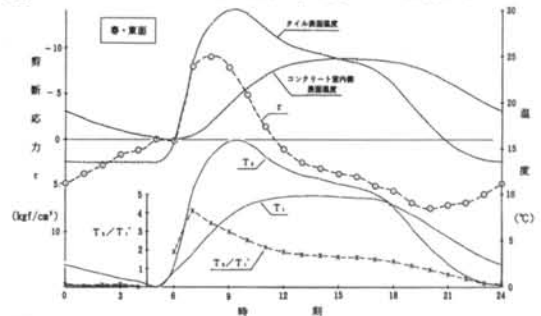


図-11 タイル張り壁体の温度性状と発生剪断応力との関係

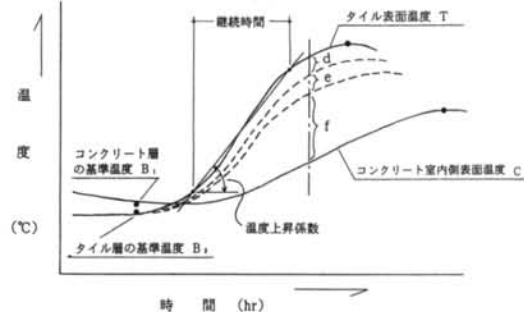


図-12 タイル張り壁体の温度上昇モデル

イル張り壁体の温度上昇モデルに示すように、タイルの表面温度がほぼ直線的に急勾配で上昇した後から、表面温度が最大になるまでの間で発生している。

また、剪断応力τに大きく影響するのがコンクリートとタイルの線膨張係数α₁, α₂であり、αの値の大小関係でτの絶対値が決まってくる。コンクリートのα₁として1.0×10⁻⁵を、またタイルのα₂として0.45~0.50×10⁻⁵を用いているので、T₂/T₁≒2.0~2.2の状態の時τ≒0となる。それゆえ上記の値より大きい場合（温度上昇）、もしくは小さい場合（温度下降）に剪断応力τが大きくなる。

タイルと張付けモルタルとの接着界面の剪断応力を求めるための物理定数は、表-7の値を用いた。タイル張り壁体を構成する各層のヤング率・ポアソ

方位	季節	基準温度 (°C)		各層の平均温度-基準温度 (°C)		剪断応力 τ (kgf/cm ²)	
		コンクリート層 T_1	タイル層 T_2	コンクリート層 T_1' ^{*)}	タイル層 T_2	$\alpha_1=0.45 \times 10^{-5}$	$\alpha_2=0.5 \times 10^{-5}$
東	春	15.0	13.6	4.1	14.2	-6.86	-8.99
	夏	26.9	26.5	2.3	8.6	-4.70	-5.99
	秋	15.6	14.7	3.1	10.8	-5.27	-6.89
	冬	4.1	2.6	3.1	9.9	-4.06/-5.22	-5.54/-6.85 ^{**}
南	春	15.1	13.6	3.1, 4.1	9.9, 12.1	-4.06	-5.84
	夏	27.1	26.6	4.0	12.2	-4.46	-6.29
	秋	15.8	14.6	3.6	12.5	-6.07	-7.94
	冬	4.3	2.6	3.6, 5.3	12.6, 16.5	-6.30/-5.22	-8.76/-7.21
西	春	15.0	13.6	5.7	16.1	-4.63	-7.04
	夏	27.0	26.5	5.7	16.1	-4.63	-7.04
	秋	15.6	14.8	4.4	13.0	-4.34	-6.29
	冬	4.1	2.7	2.6	8.0	-3.15/-4.19	-4.42/-6.20
北	春	15.0	13.6	2.5	7.4	-2.49	-3.60
	夏	26.9	26.5	1.5	5.1	-2.38	-3.15
	秋	15.5	14.6	1.7	5.3	-2.05	-2.85
	冬	4.1	2.6	2.8	8.2	-2.82/-2.44	-4.04/-3.41

*) $T_1' = T_1(1-R)$
 ここで R: 外壁の拘束率 0.3 (文献41より)
 **) 平均値

(注) 小口平タイル (No.4) の場合

表-8 日射による温度上昇時のタイル接着界面の最大剪断応力

表-8 日射による温度上昇時のタイル接着界面の最大剪断応力

ン比を固定値とし、タイルの長さ・層厚・温度差および線膨脹係数などを可変値とした。

接着界面の剪断応力の算定に用いるコンクリート層およびタイル層の温度差 T_1 および T_2 は、基準温度からの温度上昇分である。温度差 T_1 および T_2 は、図-12に示すコンクリート室内側表面温度 (C) およびタイル表面温度 (T) より、前者についてはコンクリート層の温度差の1/3を、また後者についてはタイル層の温度差の1/2を加算もしくは差引くことにより求めた。

さらにコンクリート層の基準温度からの温度差 T_1 による挙動は、外壁躯体の拘束度に応じてその伸縮が抑制される。ここでは外壁躯体の拘束率Rを考慮し¹³⁾、修正を行ない T_1' を求め剪断応力の計算に用いた。

外壁躯体の温度推定結果より求めた各方位・各季節ごとの日射による温度上昇時の最大剪断応力は、表-8に示す通りである。表-8にはNo.4のタイルの温度性状を示したが、他のタイルにおいてもほぼ同様の温度性状が得られていることから代表として示した。タイルの線膨脹係数 α_2 が 0.5×10^{-5} の場合、東面・南面および西面の剪断応力の平均値は $6.2 \sim 7.2 \text{ kgf/cm}^2$ になっている。また北面は、その約半分の 3.4 kgf/cm^2 になっている。

このような条件および図-13~図-20なども加味

すると、タイル端部の接着界面の日射による剪断応力の最大値は $4 \sim 9 \text{ kgf/cm}^2$ となり、日射を受ける東面・南面および西面で接着強度の劣化が生じることが十分考えられる。この剪断応力は通常のタイル張りの剪断保有接着強度 $20 \sim 40 \text{ kgf/cm}^2$ (実験式 $\sigma = 0.013\tau^2$) に比べると $1/10 \sim 1/2.5$ の値になっており、日射による繰返し応力によりタイル端部より剥離が生じうる値と言える。

(2) タイル形状等による剪断応力

表-8で得られたコンクリート層の最大に近い温度差 ($T_1 = 5^\circ\text{C}$) とタイル層の同様の温度差 ($T_2 = 15^\circ\text{C}$) を用いて、タイルの形状や層厚等を変化させ接着界面の剪断応力の検討を行なった。

タイルの種類によるタイルの長手方向の剪断応力は、図-13に示す通りである。タイルの長さが大きくなる程、タイルの端部の応力が大きくなり、逆にタイル中央部の応力は小さくなっている。小口平タイルの厚さを変化させた場合の剪断応力を示すと図-14の通りであり、タイル層の温度差が同一であればタイル厚が大きい程剪断応力は大きくなる。

図-15に示すようにタイル厚を一定にし、タイルの寸法を大きくしていくと、タイル中央部では剪断応力がほとんどゼロになり、タイル端部にのみ応力が生じるようになる。また、タイル辺の長さが 20 cm 近辺からタイル端部に生じる応力は、ほぼ一定値に

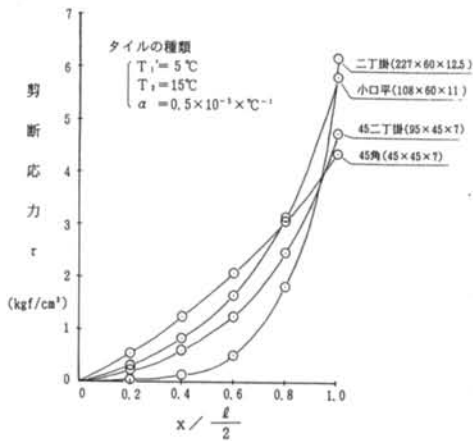


図-13 タイルの種類と剪断応力

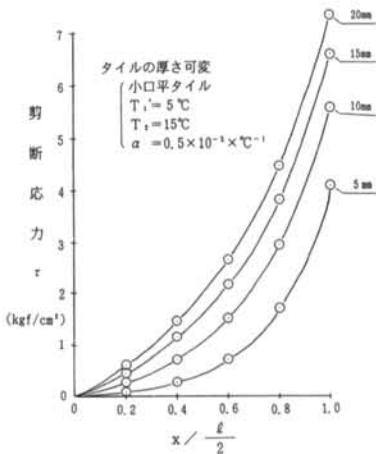


図-14 小口平タイルのタイル厚さを変化させた場合の剪断応力

近づく傾向が見られる。

タイルの寸法と厚さをリンクさせて変化した場合の剪断応力は、図-16に示すように寸法が大きくなるほど大となり、寸法が50cmを超えるあたりから10kgf/cm²を超える剪断応力が生じている。しかし実際はタイルの厚さが大きくなると、タイル層に生じる温度差 (T_2) は小さくなるので、剪断応力はより小さくなると考えられる。

タイルの線膨脹係数 α を変化させた場合の剪断応力は、図-17に示す通りである。外装に採用されるタイルは磁器質系のものがほとんどであり、その線膨脹係数はほぼ $0.45 \sim 0.55 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ の範囲である。線膨脹係数の大小により $5 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ の差が生じており、その影響が大きいことがうかがわれる。

張付けモルタルの塗り厚を変化させた場合の剪断

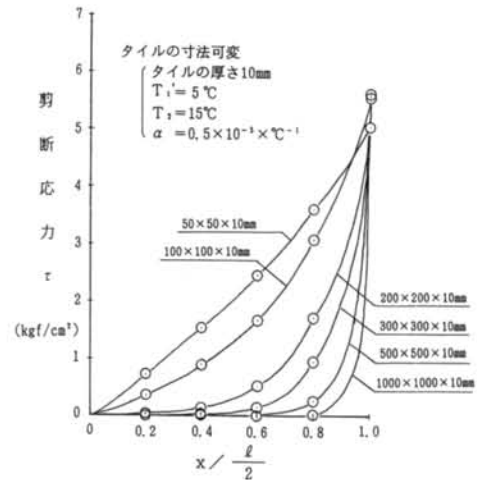


図-15 タイル厚さを一定にしタイル寸法を変化させた場合の剪断応力

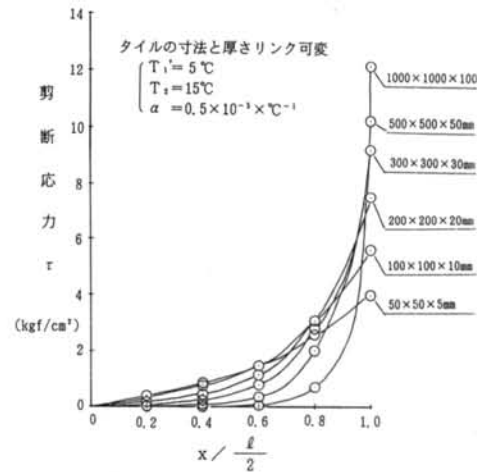
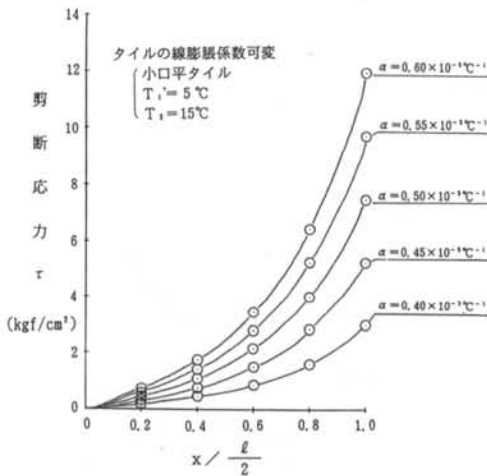


図-16 タイルの寸法と厚さをリンクし変化させた場合の剪断応力

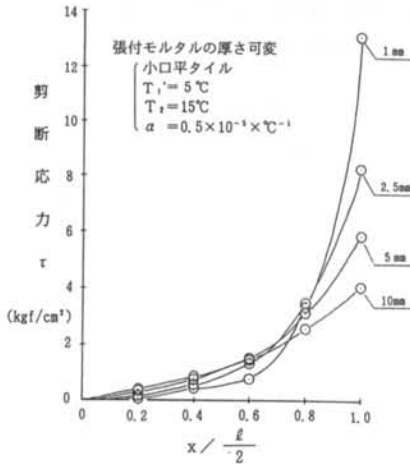
応力は、図-18に示す通りである。塗り厚が薄くなると剪断変形能が小さくなるので、逆に剪断応力は急激に大きくなる。

また、張付けモルタルのヤング率を変化させた場合の剪断応力は、図-19に示す通りである。ヤング率が小さくなると剪断変形能が大きくなるので、剪断応力は小さくなる。しかしヤング率の低い張付けモルタルは、一般にタイルとの接着強度も小さくなり、かつ耐久性上の課題も残るので、外壁のタイル張りにおいては現実的な方策とはなりにくいところがある。

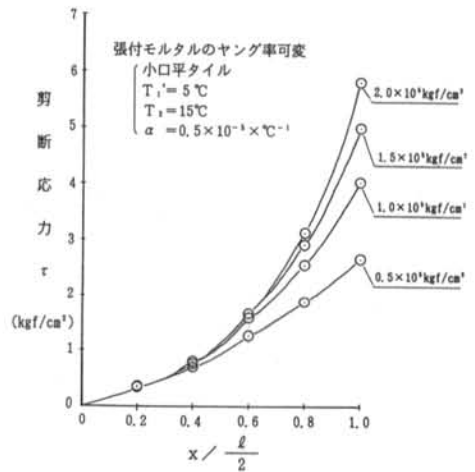
図-20に示すように、コンクリートの厚さを10cmから25cmまで変化しても剪断応力は、ほとんど変わ



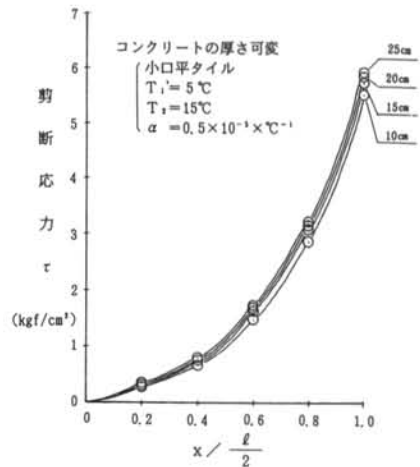
図—17 タイルの線膨張係数を変化させた場合の剪断応力



図—18 張付けモルタルの塗り厚を変化させた場合の剪断応力



図—19 張付けモルタルのヤング率を変化させた場合の剪断応力



図—20 コンクリートの厚さを変化させた場合の剪断応力

らない結果が得られている。

3.3 法線方向応力

(1) 接着界面の法線方向応力

タイル接着界面の法線方向応力を求めるための物理定数は、表—7に示した通りである。

タイルの温度が上昇する時、タイルは凸状に反りタイルの端部に圧縮の法線方向応力が生じる。また温度が下降する時、タイルは凹状に反りタイル端部に引張の法線方向応力が生じる。

タイルの温度勾配、すなわちタイルの表面温度と裏面温度との差 ΔT_2 は、2章で実測された結果によ

るとタイルの厚みや色によって異なるが、通常、北面の1°C前後を除くと他の東面・南面および西面は、ほぼ2~6°Cになっている(表—3参照)。

実測されたタイルの表面と裏面との温度差のほぼ最大の6°Cを用いて、種々の条件の法線方向応力を算定すると、図—21~図—25に示す通りであり、タイル端部で1.0~1.5kgf/cm²の法線方向応力が生じている。通常のタイルの引張接着強度は、6~20kgf/cm²である。日射によって生じる温度応力は、引張保有接着強度の1/20~1/4であり、タイルの法線方向応力(主として引張応力)によってタイルの剥離が生じる可能性は、剪断応力に比べ多少低いと考えられる。

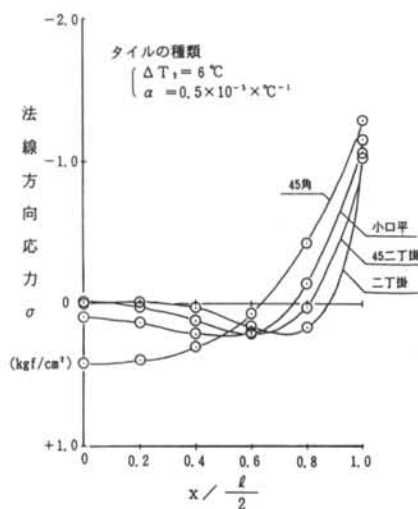


図-21 タイルの種類と法線方向応力

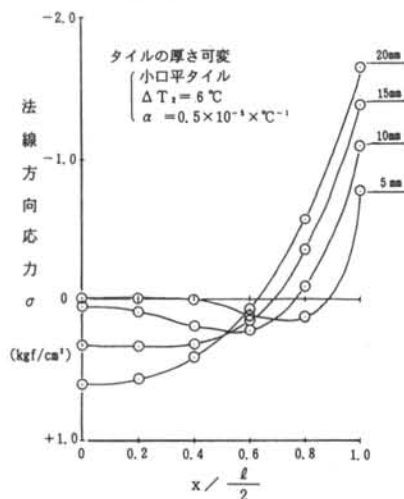


図-22 小口平タイルのタイル厚さを変化させた場合の法線方向応力

(2) タイル形状等による法線方向応力

タイルの種類による法線方向応力は、図-21に示す通りである。45角タイルのような小さい形状のタイルと小口平タイルのような大きい形状のタイルとでは、応力分布が異なっている。小さい形状のタイルでは、タイル中央部および端部で大きな応力が生じる傾向がある。

同一形状のタイルでタイルの厚さを変化させた場合の法線方向応力は、図-22に示すようにタイルが厚い程、タイル中央および端部で大きな応力が生じている（さらに厚さを増し30mm以上にすると、逆に応力は小さくなる）。

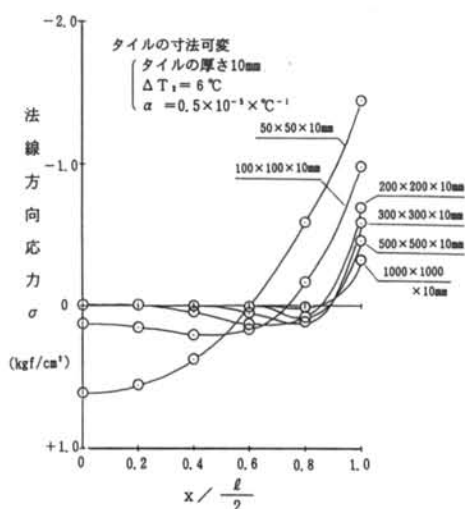


図-23 タイル厚さを一定にしタイル寸法を変化させた場合の法線方向応力

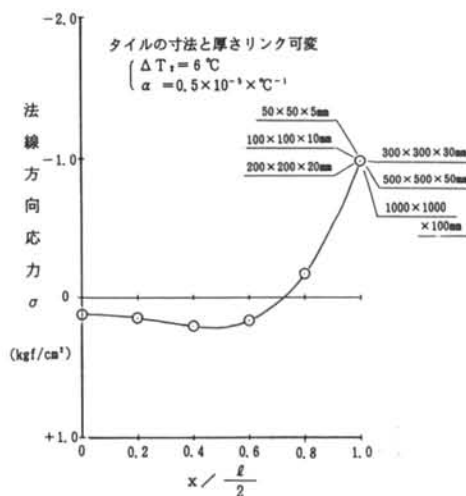
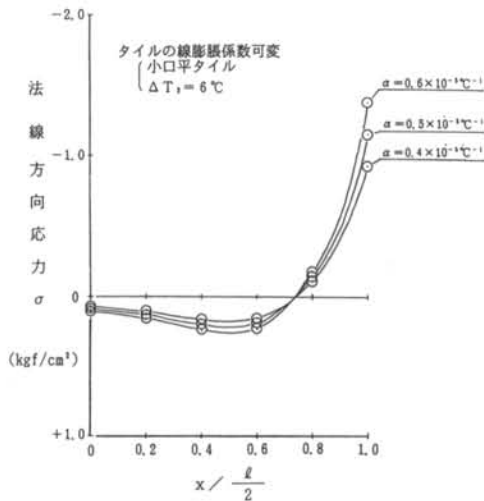


図-24 タイルの寸法と厚さをリンクし変化させた場合の法線方向応力

図-23に示すようにタイルの厚さを一定にしタイルの寸法を変化させた場合、温度差が生じることによる法線方向応力は、タイル寸法が小さいほどタイル中央および端部の応力は大きくなる。タイルの寸法が大きくなるとタイル端部にのみ法線方向応力が生じる傾向にある。図-24には、タイルの寸法と厚さとをリンクさせて変化させた場合の応力分布を示すが、寸法と厚さがあるバランスを保つと、法線方向応力分布は同じパターンになっている。

タイルの線膨脹係数 α を変化させた場合の法線方向応力は、図-25に示す通りである。当然のことな



図—25 タイルの線膨張係数を変化させた場合の法線方向応力
から線膨張係数が大きくなるほど、法線方向応力は大きくなっている。

以上、外壁タイル張り面の日射による温度上昇性状を用いて、タイルの接着界面の剪断応力および法線方向応力の検討を行なった。日射による温度上昇過程で降雨におそわれた場合は、急激な温度下降が生じるためより大きな熱応力が生じることが予測される。

§4. まとめ

外壁タイル張りの日射による温度分布性状およびタイルの接着界面に生じる温度応力解析により、以下のような点が明確になった。

(1)日射による温度分布性状

1)外気の状態が屋内に影響する状態でのタイル張

りされた壁体の温度は、日中においては日射および気温の影響により温度上昇が生じ、夕方から夜間にかけて自然冷却により温度下降が生じる。朝方には壁体全体が断面方向にほぼ一定の温度分布状態になる。

2)タイル表面は日射により温度上昇が生じ、最高温度は夏期の南面と西面で40~45°Cに達する。タイルの色による温度差は、5~10°C程度である。日射を受けている時点での温度上昇係数(温度上昇勾配)は、東面で5~10°C/hr、特に冬期は大きく16.5~20°C/hrになる。南面および西面は、2~6°C/hrの範囲になっている。

3)タイルの表面と裏面との最大温度差は、北面の1°Cを除き、東面・南面および西面では2~6°Cになっている。

(2)タイルの接着界面の温度応力

1)朝方のタイル張り壁体の温度を基準温度と考え、通常の建物における接着界面の剪断応力の最大値は4~9 kgf/cm²、また法線方向応力は1.0~1.5 kgf/cm²が日射の影響により生じる。

2)日射によって生じるタイルの接着界面の剪断応力は、通常のタイルの剪断接着強度の1/10~1/2.5に、また法線方向応力のそれは1/20~1/4になり、繰返し応力により接着劣化が生じる可能性が十分ありうると言える。

謝辞 接着界面応力の検討においては、九州大学工学部建築学教室の松藤泰典教授および小山智幸講師に、さらに当社技術研究所の山崎庸行主任研究員にその考え方等について御指導・御助言をいただいた。また熱回路網法による動的熱移動解析においては、当社技術研究所の小林昌弘部長および川島実研究員に全面的に協力をいただいた。ここに深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 建築業協会宮城県沖地震調査団:「宮城県沖地震被害状況調査報告書」建築業協会(昭和53年)
- 2) 建築物とその周辺の防災対策調査委員会:「建築物とその周辺の防災対策調査(地震時における外装材の落下対策調査)報告書」建設省住宅局(昭和56年)
- 3) 熊谷敏男:「日本海中部地震(1983年)における外装仕上材の被害状況」建築防災(1984年1月)
- 4) 田辺昭次:「なぜ多い外装材の剥落事故、設計・施工も築後への配慮欠く」日経アーキテクチャ 1月18日号(1982年)
- 5) 熊谷敏男:「外装陶磁器質タイル張りの剥離故障分析」日本建築学会構造系論文報告集 第422号(1991年4月)
- 6) 丸一俊雄:「接着工法における建築仕上材料の剥離防止に関する研究」清水建設研究所研究報告 第5号(1971年)

- 7) 望月秀敏ほか：“官庁営繕工事における事故例とその原因” 施工, No104 (1975年)
- 8) 吉川一三：“熱応力によるタイル張り壁体のタイルの変形と応力” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1977年)
- 9) 平居孝之ほか：“タイルの貼付け面の温度応力の解析 (その1, 2)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1991年)
- 10) 高田栄治ほか：“建築物の外壁におけるディファレンシャルムーブメントに関する研究 (その1, 2)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1991年, 1992年)
- 11) 松藤泰典ほか：“直達日射を受けるタイル張り壁面の挙動に関する基礎的研究(その1, 2)” 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1992年)
- 12) 熊谷敏男ほか：“床陶磁器質タイル張り仕上げの衝撃破壊性状” 日本建築学会構造系論文報告集 第374号 (1987年)
- 13) 中西正俊：“周辺拘束を受けるコンクリート壁体の収縮ひびわれに関する研究” 清水建設研究所研究報告 第10号 (1979年)