トンネル窯焼成における粘土瓦の「冷め割れ」 についての熱光弾性的研究

田 中 稔・隅 田 卓

(兵庫県立工業試験場)

Photothermoelastic Studies on the Thermal Fracture of Roofing Tiles during Cooling in Tunnel Kiln

By

Minoru TANAKA and Suguru SUMITA

(Industrial Research Institute of Hyogo Prefecture)

The thermal fracture of roofing tiles during cooling in tunnel kiln was studied by means of the photothermoelastic technique.

The models of roofing tiles were made of epoxy resin plates. The isochromatic photographs of the fringe patterns showed the stress concentrations in the parts of notches and nail holes.

For the purpose of decrease of stress concentration, some suggestions regarding the shape of notch and the position of nail hole were obtained. So as to avoid the thermal fracture, wide space setting of roofing tiles on the kiln-car is more effective than modification of cooling schedules.

The temperature differences causing failure for the monotonous plate were theoretically estimated at from 160° to 170°C.

[Received October 9, 1972]

1. 緒 言

前報において¹⁾、粘土瓦素地の焼成性状ならびに熱破壊について、瓦に対して熱が均一に与えられる焼成条件での検討結果を報告した。

しかし、現在本邦において行なわれているトンネル窯での粘土瓦焼成は、粘土瓦が焼成台車の進行方向に對面するように積載されていることがほとんどで、焼成帯を通過するときは別として、予熱帯、冷却帯では、瓦はトンネル窯のガス流れを遮断するような形で窯内を通過する。

この場合、被熱物である瓦の周縁はガス流れに接するが、連続して 10~20 mm の間隔で並べられた瓦の面は、ガス流れには接し難く、温度分布は瓦の面の中心から周

縁に対して放射状に分布すると考えねばならない。

たとえば、図-1 は、前報における熱伝達係数の測定と同じ方法で、温度勾配炉に 100×100×16(mm) の試料を、間隔 20, 10, 5 mm と変えて並べて送りこんだ場合、試料の平面中央と、周縁に近接した位置でのガス温度を示すもので、5 mm 間隔では、最高で約 100°C の温度差があることが認められる。

また、実際のトンネル窯で粘土瓦が焼成されているとき、予熱帯と冷却帯側壁の覗き孔より、熱電対を挿入して、瓦の窯詰間隙と周縁部を流れるガス温度を測定すると、予熱帯ガス温度 700°C で瓦間隙の中央部ガス温度 610°C、冷却帯でガス温度 550°C で間隙中央部 670°C と、90~120°C の温度差が認められている。この場合の瓦の窯詰間隙は 17 mm 程度である。

これらの温度差は、炉圧の具合で多少縮まっている窯炉であろうと考えられるが、実際の焼成では、まずこの程度の温度差があるとして考えなければならない。

このような条件下におかれた粘土瓦が、焼成中にうける熱応力によって破壊することを検討するのに、その形状も考慮して、理論式によって解くことは極めて困難である。そのような場合、一般的には熱応力を実験的に解

Fig. 1. Gas temperature curves during firing in tunnel kiln.

1~5: points of temperature measurement
Fig. 2. Roofing tile models of epoxy resin.

決する方法として、抵抗線歪計や光弾性実験による方法^{3),4)}が行なわれている。

筆者らはトンネル窯による粘土瓦の焼成が、前述のような焼成条件であることから、焼成中に瓦に働く熱応力の分布を知るのに、熱光弾性法による模型実験が最も適切かつ簡便であり、定性的に破壊を検討しようとの考えに立って実験を行なった。その結果、瓦の形状から「冷め割れ」を発生させる応力分布とその集中のようすが明らかになり、「冷め割れ」の解決について有用な知見を得たので報告する。

2. 実験方法

2.1 試料

理研製、エポキシ樹脂板を図-2のごとき形状に切りとり、また、瓦の釘孔に模して孔をあけた場合も検討した。

エポキシ樹脂板は、現在の光弾性材料のうちでは、最も高い温度（約 80°C）まで使用しうる材料とされており^{3),4)}、表-1 のような性質を有する。

2.2 温度勾配の設定

2.2.1 氷冷 試料を電気恒温器に入れ、約 70°C に保ち、恒温器より取り出すと同時に、同じく恒温器に入れてあった厚さ約 30 mm の発泡スチロール板 2 枚でもって、試料の両面をはさむ。発泡スチロールは図-2の試料と全く同型に角を切り欠いたものである。このようにサンドイッチ状にしたものを離れないようにセロテープで固定した。

次に氷のう（直径約 30 mm、長さ約 400 mm のゴム製）に氷水を入れたもので、中央にはさまれている試料の周縁部を密着するように巻いて、試料が外周から冷却される状態を設定した。

2.2.2 空冷 外周と中央部の温度勾配の緩い場合を設定する目的で、発泡スチロールではさんだ試料の外周に、氷のうによらずに、送風機によって空気を吹きつ

ける方法をとった。

2.3 温度分布の測定

図-2 に示したように、試料面の 5 点を測定点とし、0.2 mmφ の銅—コンスタンタン熱電対をセロテープで貼りつけ、冷接点器を通して温度変化を記録した。

2.4 光弾性写真と縞応力

試料を冷却後、直ちに光弾性測定装置にセットし、等色線写真および等傾線写真を撮影した。等色線写真に現われた縞次数によって、主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_2$ ）を求め、周辺の応力分布図を作成した。また、等傾線写真を重ね合わせて等傾線図を作成し、それにより主応力線図を描いた。

光弾性感度 a [mm/kg] と縞次数 N [—] は、板の厚さを t [mm]、主応力差を $\sigma_1 - \sigma_2$ [kg/mm²] とすると、次の関係を有する。

$$a = \frac{N}{(\sigma_1 - \sigma_2)t}$$

本実験の試料に用いたエポキシ樹脂板の光弾性感度は

Fig. 3. Isochromatic photographs and patterns of stress distribution on edge. Ice water-cooling 3 min.

Table 1. Properties of epoxy resin plate used for models of roofing tile.

Modulus of elasticity E [kg/cm ²] (-5.6°C)	Coefficient of linear expansion α [1/°C]	Density ρ [kg/cm ³]	Specific heat C_p [kcal/kg·°C]	Thermal conductivity λ [kcal/cm·h·°C]	Photoelastic sensitivity a [mm/kg]	Fringe stress f [mm/kg]	Secondary transition temp. [°C]
3.5×10^4	6.5×10^{-5}	1.24×10^{-3}	0.27	1.50×10^{-3}	1.0	0.17	120

Fig. 4. Isochromatic photographs and patterns of stress distribution on edge. Air-cooling 3 min.

Fig. 5. Isochromatic photograph and pattern of stress distribution on edge. Ice water-cooling 10 min.

Fig. 6. Isochromatic photograph and pattern of stress distribution on edge. Air-cooling 20 min.

約 1 mm/kg, 試料厚みは 6 mm であるから, 1 次の縞で示される主応力差は約 0.17 kg/mm² である。

3. 実験結果

得られた光弾性等色線写真とその温度分布および周辺応力分布, そして, その代表的な場合についての等傾線図と主応力線図を以下に示す。

図-3 は氷冷 3 分間, 図-4 は空冷 3 分間の冷却であり, 図-5 は氷冷 10 分間, 図-6 は空冷 20 分間の冷却結果である。図-7 は図-3 の直角切り欠きの場合の等傾線図および主応力線図 (共に対称的なので, 各々その半分ずつを合せて示した) である。図-8 は釘孔を模して設けた円孔 (3 mmφ) の周辺の等色線写真および図に示した線に沿った垂直方向の応力分布図である。

4. 考 察

熱光弾性法は, 1938 年に Weibel⁵⁾ が成功して以来

Fig. 7. Patterns of isoclinic lines and principal stress lines. Ice water-cooling 3 min.

Fig. 8. Isochromatic photograph and pattern of stress distribution showing stress concentration around a nail hole. Ice water-cooling 3 min.

さかんに研究され、ことに低温における試験は、熱光弾性材料の物理的性質が室温以下で比較的安定していることから、我国でも浜田ら³⁾の報告がある。浜田らは冷却したメチルアルコールを冷媒としているが、この場合、エポキシ樹脂板表面に水滴が付着して、写真撮影が困難であるため、乾燥した空気を満たした気密構造容器中に試験片を収める方法をとっているが、本実験ではこのような困難はなかった。

また、織田⁴⁾は材料の熱伝導率が小さいため、熱電対で温度分布を測定すると、外乱があるとして、サーモカラーを用いているが、本実験のような冷却法の場合には、サーモカラーの可逆性のものが見当らなかったため、熱電対によらざるを得なかった。

また、光弾性では材料に存在する初期応力によって、端面における縞の方向が異なる問題があり、光弾性材料の形状を製作してのち、2,3 時間以内に測定する必要があるが提議されているが⁵⁾、本実験が定性的な検討であり、また、応力集中部分を主たる観察点としていることから、これらの点は許容されるものと判断した。

図-9 はトンネル窯で焼成する場合、平瓦にもっとも発生しやすい亀裂の箇所を示したもので、割れ口の観察により冷却過程で入ることが明かか、いわゆる「冷め割れ」と呼ばれるものである。

ここで図-3~6 に示した実験結果を、トンネル窯における瓦の焼成にあてはめて考えると、図-3 は台車積載で瓦と瓦との間隙がせまく窯詰され、瓦の外周のみを冷却空気が流れている場合で、間隙間の空気温度に対し、外周を流れる空気温度が相当低い場合に対応すると考えることができる。

すなわち、トンネル窯で「冷め割れ」がもっとも起り易い場合の応力分布が、定性的に示されていると考えられる。

この図の切り欠きのない方の角の写真で明らかのように、瓦の周縁で分担されている応力は、切り欠きが存在すると、その底部に集中することが認められる。一方、図-7 に示した切り欠きが、直角である場合の主応力線図において、周縁で垂直方向で連なる主応力線群は圧縮応力を、周縁と平行方向に走る主応力線群は引っ張り応力の方向を示すものであるが、この図の切り欠き部の主応力線に注目すると、明らかに切り欠き底部を中心にして、引っ張り応力が両側に向けて働いているのが認められる。これらは図-9 に示されている切り欠き底部を

Fig. 9. Instance of cracks in roofing tile in tunnel kiln during cooling.

起点にして瓦の中心部方向へ走る亀裂が、実際に発生しやすい理由をよく説明するものである。

図-3 および 図-4 に見られるように、切り欠きに丸味をもたせると、切り欠きが直角である場合と異なり、丸味の底部全体に応力が分担されていることが解り、先に述べた切り欠きから生じる亀裂の発生防止に有効であることが明かである。さらに、この応力集中の緩和は、丸味の半径 r が大きいほど、また、切り欠きの辺 t (図-2) が小さいほど効果的である^{7),8)}とされている。

平瓦の切り欠きは、この位置で瓦をつき合せ、45°の斜め方向に連続して並べ、切り欠きの合わせ目に他の瓦が被さって葺かれるもので、瓦の働きの寸法を決定する。一般にはほとんど底部に丸味をとらずに切り欠かれて作られているが、切り欠きを必要とする目的からは、底部に丸味をとることは一向にさしつかえないものである。

図-4 を同じく実際の焼成にあてはめて考えると、瓦の間隙はせまく台車積されているが、外周を流れる空気の温度と間隙中央部の空気の温度との差が、図-3 の場合より少ない場合であり、トンネル窯では冷却帯のガス流速が緩い場合、または台車進行速度も前に比べて遅い場合としてよい。瓦に生ずる応力は、図-3 よりはるかに小さいことが認められるが、等色線写真の縞次数が低いだけで、分布は図-3 とほとんど同じ傾向である。

これに対して、図-5 は、外周を流れる空気と間隙間の空気との温度差はあっても、瓦の周縁部と中心との温度勾配が、図-3,4 の場合より緩やかで、実際の窯に当てはめると、瓦積みの間隔が広くとられている場合に対応すると考えられ、図-6 は外周と間隙間の空気の温度差がさらに小さい場合で、台車進行速度とガス流速はちょうど図-3 に対する図-4 と同じ関係にあると考えてよい。

ただ、図-5,6 は図-3,4 に比べて、周辺から内部への温度勾配が緩いだけに、応力は縞次数をみても明らかに減少し、また、その分布は全体的に拡がるが、切り欠きの応力集中は依然として大差はなく、切り欠きの形状が重要であることが解る。

以上より瓦の周縁を流れる空気温度、瓦積みの間隙間温度との差が大きくならないよう、冷却速度、すなわち、台車進行速度などの操炉上の注意も肝要ではあるが、それ以上に、台車に瓦を積載する間隔を広くとり、瓦の周縁から中心に対する温度勾配を緩やかにする考慮が、「冷め割れ」防止に有効であると考えられる。

図-8 は平瓦に設けられた釘孔の周辺に応力集中のあることを示す。図-9 のような釘孔から周辺にわたって入る亀裂は、「冷め割れ」と言えないくらいに現場では多く見られ、1 つは成形時の孔の開け方などにも問題があると考えられている。

Table 2. Thermal properties of the roofing tile bodies during cooling¹⁾.

Thermal properties	K-body temperature (°C)						C-body temperature (°C)					
	300	400	500	560	600	700	300	400	500	566	600	700
Density [g/cm ³]	2.08	2.07	2.06	2.06	2.05	2.05	2.15	2.15	2.14	2.13	2.13	2.13
Specific heat [cal/g·°C]	0.19	0.20	0.20	0.26	0.21	0.22	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25
Thermal diffusivity [cm ² /sec]	×10 ⁻³	4.8	4.6	4.7	4.9	5.7	5.7	2.8	2.8	2.8	3.5	5.2
Coefficient of linear thermal expansion [1/°C]	×10 ⁻⁶	6.9	7.8	11.2	32.9	3.2	1.1	6.9	8.0	8.9	30.4	6.4
Thermal conductivity [cal/cm·sec·°C]	×10 ⁻³	1.9	1.9	2.0	2.1	2.5	2.6	1.21	1.27	1.33	1.74	2.70
Modulus of rupture [kg/cm ²]		235	240	240	236	220	320	175	180	190	200	230
Modulus of elasticity [kg/cm ²]	×10 ⁴	5.8	6.3	7.0	7.2	6.7	11.0	5.5	5.6	5.8	5.6	6.4
Coefficient of heat transfer [cal/cm ² ·sec·°C]		4.7	4.9	5.1	5.25	5.33	5.55	4.60	4.85	5.05	5.20	5.50

K-body: kaolinite clay body (Akashi roofing tile) fired at 1110°C

C-body: chlorite clay body (Awaji roofing tile) fired at 1060°C

(1) $d/D=0.9$, (2) $d/D=0.7$, (3) $d/D=0.5$ Fig. 10. Instance of reinforcement to plate with a hole for stress relaxation and its stress concentration factor^{7),8)}.

釘孔周辺の応力集中の緩和には、図-10 のような補強が有効であり、孔の位置が周辺からの距離が大きいほど、緩和されるとされている⁷⁾ことは、当然、粘土瓦に活用されねばならないと考えられる。

以上のような熱弾性実験から、トンネル窯焼成での瓦の「冷め割れ」の要因である熱応力の分布、ならびに、それが集中する状態を定性的に明らかにし得た。

ここで、前報に報告した瓦の素地、K素地（カオリン質素地）、C素地（緑泥石質素地）の冷却過程での熱特性値を表-2 に示し、熱破壊について近似的な検討を行なってみる。

いま 図-11 のような、厚さ方向に温度差がなく、瓦の平面内に y 方向にのみ、 $T=T(y)$ の温度変化を受け、瓦の周囲にはなんら拘束がなく、外力も作用しない場合を考える。

端面では、 $\sigma_x = \sigma_z = \alpha ET(y)$ の引っ張り応力が作用

Fig. 11. Temperature distribution, $T(y)$ of plate.

し、端から十分離れた位置では、 x 方向の垂直応力成分 σ_x のみが存在し、その値は次式で与えられることが知られている^{2),8)}。

$$\sigma_x = -\alpha ET(y) + \frac{1}{2C} \int_{-C}^C \alpha ET(y) dy + \frac{3y}{2C^3} \int_{-C}^C \alpha ET(y) y dy \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 α : 熱膨脹係数 [°C⁻¹],

E : 弾性率 [kg/cm²].

ここで簡単のために、温度分布が、端面から一定速度で冷却される場合に対応する $T=T_0(1-y^2/C^2)$ のような放物線分布であると仮定すると、(1) 式の第3項は消失し、次のように書くことができる。ここでは、温度変化 T は端面で 0、中心部で T_0 となる。

$$\sigma_x = \frac{2}{3} \alpha ET_0 - \alpha ET_0 \left(1 - \frac{y^2}{C^2}\right) \dots\dots\dots (2)$$

前報にも示したように、K 素地、C 素地は、ともに 560°C 付近の冷却が、熱破壊に最も危険であることからこの温度での熱特性値を用いて (2) 式によって T_0 を計算すると、K 素地は約 161°C、C 素地は約 176°C の温度差を受けると、560°C 付近で破壊を生じることが近似的に求められる。

しかし、さきに示した光弾性等色線写真と周辺応力分布図から明らかなように、切り欠き底部においては、周辺から内部にかけて発生する熱応力よりもさらに大きい、場合によっては、2,3 倍の応力が生じるので、この部分には、これらの温度差よりずっと小さい温度差によっても亀裂が入ることが当然考えられる。

一方、前報では、瓦に対して熱が均一に与えられる焼成条件で、冷却過程で急激な温度変化をうける際の熱破壊を生じる温度差 ΔT_f を熱伝達係数 $h=0.0027$ cal/cm²·sec·°C として (3) 式によって求めた^{9),10)}。

$$\Delta T_f = \frac{3.25 \lambda \sigma_f (1-\nu)}{E \alpha r_m h} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 σ_f : 破壊強度 [kg/cm²],

λ : 熱伝導率 [cal/cm·sec·°C],

r_m : 瓦の厚さの 1/2 [cm],

ν : ポアソン比 [-].

その結果、560°C 付近の冷却では、K 素地 264°C、C 素地 258°C の熱破壊許容最大温度差を得ている。この場合の瓦焼成は倒焰窯（シャトル窯を含む）、半倒焰窯、登り窯、だるま窯、および連続焼成では間歇式トンネル窯、トップファイヤー式トンネル窯などによる場合である。なお、登り窯の場合でも、瓦の窯詰りがガス流れを遮断するようにして窯詰されると、トンネル窯の場合と同様な結果をきたすことに注意する必要がある。

なお、(2), (3) 式には、破壊強度に引っ張り強度を入れて計算するのが理論上正しく、曲げ強度によった本報の結果は、真の値より相当大きく示されており、前報に述べたのと同様に考慮しておく必要がある。

5. 総 括

瓦の周縁はガス流れに接するが、連続して並べられた瓦の面の中央部は、ガス流れに接し難いと考えられる一般のトンネル窯での、瓦の冷却過程の熱破壊現象を熱光弾性の模型実験によって検討した。

結果を要約すると、次のとおりである。

1) 熱光弾性等色線写真と、それより求めた周辺応力分布図より、平面応力集中が理解され、瓦の切り欠きの形状、釘孔の形状、および位置について改善点が明らかになった。

2) 周縁から平面中央部に対するさまざまの温度分布と応力分布の考察により、操窯上の考慮の必要性はいうまでもないが、それ以上に窯詰の間隔を広くとることが、

熱破壊防止に有効であることがわかった。

3) 粘土瓦素地の両面に熱が均一に与えられる場合、560°C 付近の冷却で 250°~260°C の温度差をうけると、瓦が破損するのに対し、トンネル窯では、同じく 560°C 付近では破損に対する危険温度差は、約 160°~170°C と前者より低く、しかも、瓦の切り欠きが直角であると、さらに低い温度差で切り欠き底部より亀裂が発生すると考えられる。

謝 辞 光弾性について、ご助言いただいた大阪府立工業技術研究所 駒井徳三郎氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 田中 稔, 隅田 卓, 窯協 81 [9] 369-78 (1973).
- 2) 竹内洋一郎, “熱応力” 日新出版 (1971) p. 12.
- 3) 浜田 実, 原 裕, 機械学会誌 68 [556] 599-606 (1965).
- 4) 織田昌信, 機械学会誌 68 [562] 1659-72 (1965).
- 5) 竹内洋一郎, “熱応力” 日新出版 (1971) p. 313.
- 6) 辻 二郎, 西田正孝, 河田幸二, “光弾性実験法” 日刊工業新聞社 (1965).
- 7) 中原一郎, “材料力学” 養賢堂 (1966).
- 8) 川田雄一, 河本 実, 横堀武夫, 宮川松男編, “材料強度工学ハンドブック” 朝倉書店 (1966).
- 9) W.D. Kingery, “Introduction to Ceramics” Chap. 18, John Wiley & Sons Inc. (1960) p. 628-46.
- 10) W.D. Kingery, *J. Am. Ceram. Soc.* 38 [1] 3-14 (1955).

(10/9/1972 受付)