

# 論文 熱赤外線を利用した壁面損傷の判定指標の構築と定量化に関する研究

金光寿一<sup>\*1</sup>・柳内睦人<sup>\*2</sup>・原 洋平<sup>\*3</sup>・宮崎誉士<sup>\*4</sup>

**要旨：**熱映像を利用したトンネル壁面の損傷診断では、熱映像内に損傷状態の相違を示す特徴的な温度分布パターンが現れるが、損傷を検知するための判定指標をどこに設定すれば良いかの問題があった。そこで、本研究は損傷の判定評価に影響する因子として外気温、加熱条件、冷却時間、損傷面積などが温度分布特性に及ぼす影響を明確にし、トンネル環境に適応した損傷検知指標の構築を行った。

その結果、外気温に対して損傷を分離できる最適な上昇温度と冷却時間が存在し、閾値の定量化により検知したい損傷を精度良く抽出できることが分かった。

**キーワード：**損傷診断指標、熱映像、温度特性曲線、閾値、トンネル壁面

## 1. はじめに

熱赤外線センサを利用してトンネル壁面の損傷診断を行う場合には、損傷の判定評価は映像内の相対的な温度差から損傷の有無を識別するため、損傷を検知するための判定指標をどこに設定すれば良いかの問題があった。また、損傷の検知精度を向上させるためには、事前にトンネル環境に適応した最適な加熱条件や冷却時間等、各種温度要因の選定と温度分布特性との関係や損傷面積に対する相関を明確にして実用化へ向けた損傷診断の指標を構築する必要がある。

そこで、本研究では基礎実験として外気温が異なるタイルへの加熱条件が損傷を有するタイルの表面温度分布に及ぼす影響を明らかにする。その損傷の判定指標は、検知したい損傷部の鮮明な画像を抽出するために、温度特性値<sup>1)</sup>及び温度分散値を2値化処理法の閾値へ適用してノイズを除去し定量化を図るものである。さらに、既存のトンネル壁面を想定した試験体にこの判定指標を適用することにより実用面での

有効性について報告する。

## 2. 実験概要

本実験は、既存のトンネル環境を想定してタイル裏面の損傷を定量評価できる最適な加熱条件や冷却時における熱映像の選択について、タイル1枚当たりの温度分布特性より検討した。

### 2.1 試験体

基礎実験に供した T 試験体は、RC プレキャスト版(横 600 × 縦 450 × 厚さ 50mm)に既存のトンネル壁面に張られたものと同じ二丁掛タイル(227 × 60 × 10.5mm、磁器質、白色、艶有り)をモルタル下地に張り付けたものである。タイル裏面の損傷は、浮きや空隙を想定した疑似損傷を厚さ 15mm の発泡スチロールにて製作し、タイルと RC プレキャスト版との間のモルタル中に埋め込み配置した(図-1参照)。損傷の大きさはタイル1枚当たり(A: 60、B: 40、C: 20、D: 10%)を有する損傷面積とした。

ここに、タイルの補修は建設省の指針<sup>2)</sup>によ

\*1 中央工学校専任講師 土木開発科 工修(正会員)

\*2 日本大学助教授 生産工学部土木工学科 工博(正会員)

\*3 東亜建設工業(株) 工修

\*4 日本大学 大学院生産研究科

ると、補修を要する損傷の程度はタイルの面積に対する損傷比率が 30 % 以上に進展した場合に実施することを目安としている。そこで、本研究では、この補修条件に準じて損傷比率 30 % 前後が定量的な評価ができるように、損傷比率 20 及び 40 % で得られた温度分布特性を用いて検討した。

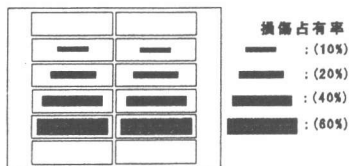


図-1 損傷配置図 (T試験体)

## 2.2 観測条件

熱赤外線センサ (782LW・光導電型、応答波長領域 8.0~12.0  $\mu$  m、感度 30  $^{\circ}$ C で 0.1  $^{\circ}$ C) による温度測定は、T 試験体のタイル表面を 1.0m 離れた位置から表-1の性能を有する温風ヒーターで均一に加熱し、加熱停止直後 5 秒経過時から 7 分間連続して時系列の熱映像を得ることにした。なお、加熱条件は、表-2に示すとおりで各外気温に対してタイルをそれぞれ 1~7 分間まで 1 分間隔毎で上昇させた。

表-1 温風ヒーターの仕様

発熱量 (kJ/h)	139940(最大)~83970(最小)
燃料消費量 (lh)	4.0(最大)~2.4(最小)
熱風吐出量 ( $m^3/h$ )	5.6
外形寸法 (mm)	990 x 1149 x 564
燃焼方式	高压噴霧式

表-2 基礎実験の加熱及び測定条件

実験要因 NO	加熱時間 (min)	加熱距離 (m)	測定距離 (m)	外気温(初期壁面温度) ( $^{\circ}$ C)
CaseT5-1	1.0	1.0	1.7	5 (5.6) 10 (10.8) 20 (19.5) 30 (29.2)
CaseT5-2	2.0			
CaseT5-3	3.0			
CaseT5-4	4.0			
CaseT5-5	5.0			
CaseT5-6	6.0			
CaseT5-7	7.0			

ここに、実験要因を表す記号は、CaseT の後の数字は外気温を、-の後は加熱時間を示す。

## 3. 実験結果

### 3.1 実験要因が及ぼす熱映像への影響

図-2は、無損傷タイルが表-2の加熱時間によって上昇した加熱停止直後の表面温度である。ただし、外気温と初期タイル壁面温度には若干の差が見られ、その値を併記する。写真-1(a)~(d) は、CaseT20-1 及び CaseT20-7 における加熱停止後 1 及び 3 分経過時に得られた熱映像である。

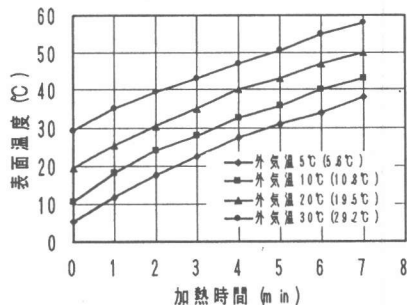
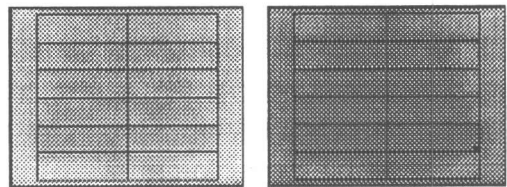
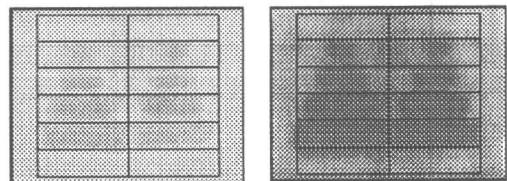


図-2 加熱時間毎の上昇温度



(a) CaseT20-1 (1分経過時)

(b) CaseT20-7 (1分経過時)



(c) CaseT20-1 (3分経過時)

(d) CaseT20-7 (3分経過時)

写真-1 表面温度分布画像

CaseT20-1 の加熱停止後 1 分経過時の熱映像を見ると、大きな損傷を有するタイル表面には高温部を示す灰色が現れているが、小さい損傷面積を有するタイルは無損傷タイルとほぼ同様の熱映像であり、視覚的に検知しようとする場合には不適切である。一方、CaseT20-7 の加熱停止後 1 分経過時の熱映像は、加熱過多の影響で観測面全体が黒色の高温部を示し、損傷状態の違いを明確に判読するまでには至らない。また、加熱停止後 3 分経過時の熱映像を見ると、CaseT20-1 は加熱

不足のために更に画像が不鮮明となり、CaseT20-7 は損傷をある程度明瞭に確認できるものの損傷が無く正常なタイル表面にも加熱過多あるいは損傷部からの熱伝導及び拡散の影響で黒色な高温部が現れ、無損傷を損傷と判断する可能性もある。また、いかに速やかに観測するかの問題点が残る。

### 3.2 外気温に対する最適冷却時間

熱映像を利用した損傷診断では識別できる相対温度差が必要であり、外気温に対して適切な加熱温度あるいは冷却時間があることを示唆している。しかし、外気温に対する最適な上昇温度時の冷却時間として指標を構築しようとする場合、ある損傷以上を検知するために指標となる上昇温度を正確に得るためには実務的に考えると困難である。

そこで、まず初めに各外気温に対して損傷を容易に判読できる冷却時間の選定について温度特性曲線<sup>1)</sup>を用いて検討した。図-3にその一例として CaseT20-4 の温度特性曲線を示す。温度特性曲線は、各損傷タイルの平均温度と無損傷タイルの平均温度との差分を時系列で示したものである。従って、冷却時間の選定は、加熱条件及び損傷面積の違いによって冷却時に放熱される熱エネルギーが無損傷あるいは各損傷間で最も大きな相対差となって現れるピーク時の冷却時間を検証すれば良いことになる。図-3に示した温度特性曲線から、損傷比率 20% 及び 40% が無損傷と明瞭に分離できる冷却時間は、温度特性値の相対差が大きくなる 3 分程度と確認できるが、本項では各外気温に対する最適冷却時間を、式(1)によって得られる相対温度差が最大となる時の冷却時間として算出した。

$$Tp = (Tt20 - Tt0) + (Tt40 - Tt0) \quad (1)$$

ここに、Tp：相対温度差、Tt0・Tt20・Tt40：無損傷、損傷 20、40% の温度特性値

その結果、外気温の差よりもむしろ加熱時間によって若干の差異が見られ、概ね 2-4 分以内に相対温度差のピーク（最大）を迎えた。

本項では、この冷却時間内に得られた熱映像の実用面への簡便さを考慮し 3 分経過時として十分精度良く損傷を検知できるものと考え、これを最適冷却時間とした。

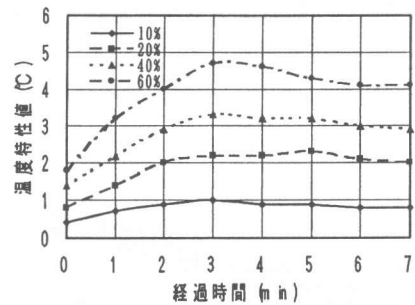


図-3 温度特性曲線 (CaseT20-4)

### 3.3 外気温に対する最適加熱条件

最適加熱条件は、最適冷却時間とする 3 分経過時に得られたヒストグラムにて検討した。熱映像から求めたヒストグラムは、表面温度とその画素数との関係を示し、タイル裏面の損傷状態を表すものである。ここに、図-4は無損傷、損傷比率 20% 及び 40% における表面温度と画素数のヒストグラムモデルである。

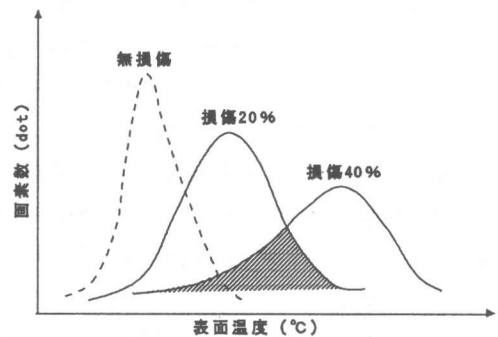


図-4 ヒストグラムのモデル

最適加熱時間は、各外気温に対してこのヒストグラムが示す損傷比率 20% 及び 40% の温度分布が最も分離する（斜線部の面積が最小となる）最適冷却時間 3 分経過時の加熱時間として算出した。その結果、各外気温に対して加熱時間が 4 及び 5 分において最大の分離を示した。ただし、各外気温に対する 4 及び 5 分の上昇温度範囲は約 4°C であり、実務的にこの温度範囲に上昇さ

せることは非常に困難である。そこで、本項では、この上昇温度を得る実務的な簡便さ及びいかに速やかに観測を終了するかを考慮して、各外気温に対する加熱条件の範囲を3～5分（CaseT-3～T-5）に広げ、最適加熱範囲として検討した。各外気温に対する加熱条件（CaseT-3～T-5）での上昇範囲（最適加熱範囲）の結果を図-5に示す。

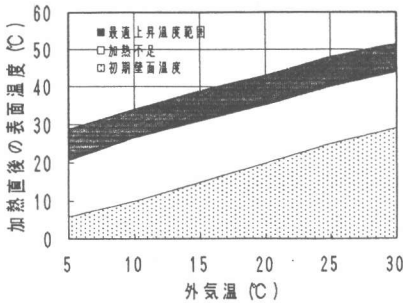


図-5 最適上昇温度範囲

#### 4. 画像処理法による損傷の抽出

熱映像による損傷診断では、検知精度の向上を図るために画像処理を施してノイズを除去することが不可欠である。なお、ここでの画像処理は前処理及び閾値によるクリッピング処理である。前処理とは、(1)輝度値から温度への変換、(2)タイルのマスキング、(3)カラーバーの貼付、(4)画素の数値化などである。現在、熱赤外線データとして温度分布のパターン化ならびに差分画像などの画像処理によって損傷の抽出が試みられているが、精度良く損傷を抽出するまでには至っていない。また、既往の研究<sup>3)</sup>においてもクリッピング処理の閾値へ熱映像から求めた平均表面温度、近傍平均温度、温度特性値などを適用して損傷の抽出を試みたが最善の手法を見いだすまでには至らなかった。

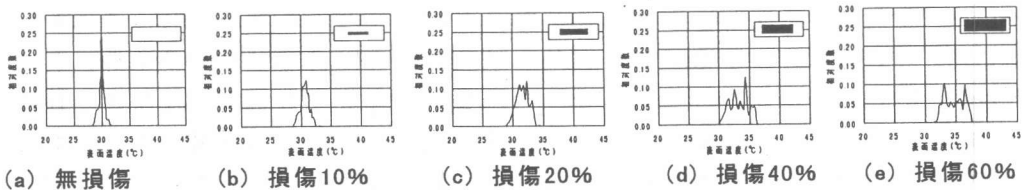


図-6 損傷別のヒストグラム

そこで、本項では表面温度ならびに温度分布の分散をクリッピング処理の閾値へ適用して損傷を抽出することにした。

#### 4.1 温度特性と閾値処理

図-6(a)～(e)に無損傷及び各損傷の表面温度と画素数のヒストグラムを示す。図はタイル裏面の損傷状態の相違を特徴的に示しているものの、表面温度は分散し、検知したい損傷以上を抽出するためには閾値をどこで引けば良いかの問題がある。そこで、損傷比率を区分する指標は熱映像から損傷を確認できる信頼指標として、計測された各表面温度の分布状態を基に検知係数  $k$  を式(2)により検討し温度閾値  $T_h$  を算出した。

$$T_h = T_{ave} + k \cdot (T_{max} - T_{ave}) \quad (2)$$

$$0 \leq k \leq 1$$

ここに、 $T_h$ : 温度閾値(°C)、 $T_{ave}$ : 検知したい損傷タイル1枚の平均温度(°C)、 $k$ : 検知係数、 $T_{max}$ : 最大温度(°C)

この検知係数  $k$  は確率変量であり、値が大きくなれば損傷を検知できる信頼確率は低下するものの、確実にノイズを除去し特定の損傷面積以上を判読することができる。本項では、実務的な簡便さを考慮して検知係数  $k$  を0.5の一定とし、損傷比率20及び40%の温度閾値の中間値として損傷比率30%の温度閾値を算出した。

外気温に対する最適加熱条件（CaseT-3～T-5）の最適冷却時間3分における温度閾値  $T_h$  を表-3に示す。しかし、この温度特性値はあくまで実験要因での値を示し、実務的には様々な外気温（初期タイル温度）や上昇温度によって異なってくる。ここに、表-3で得られた上昇温度と外気温（初期壁面温度）及び温度閾値との相関

を図-7に示す。図-2に示す加熱時間と上昇温度との相関あるいは図-3の経過時間と温度特性値の挙動を見ると、得られた回帰式により精度良く温度閾値を算出できるものと考えらる。

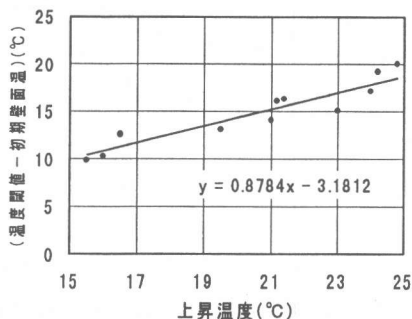


図-7 温度閾値と上昇温度との関係

#### 4.2 温度分散と閾値処理

温度分散は、各損傷面積に対する熱放射の違いにより表面温度分布が異なり、得られた温度データが平均値の付近ではばらつく程度を示すものであり、無損傷と比較することで損傷検知の指標となる。損傷比率 30 %以上を検知する分散を表-3に示す。温度分散は、外気温よりもむしろ上昇温度に強い相関を示す。温度閾値と同様に表-3の上昇温度と温度閾値の関係より求めた回帰式を式 (3) に示す。

$$y = 4.16x + 10.61 \quad (3)$$

ここに、y : 上昇温度、x : 分散閾値

表-3 温度閾値及び分散閾値

実験要因	外気温5℃		外気温10℃		外気温20℃		外気温30℃	
	To	Th/Sh	To	Th/Sh	To	Th/Sh	To	Th/Sh
Case1-3	16.5	18.6/1.31	16.5	22.5/1.34	16.0	30.2/1.33	15.5	36.8/1.49
Case1-4	21.4	21.3/2.34	21.2	27.1/2.55	21.0	33.1/2.46	19.5	40.0/2.21
Case1-5	24.8	25.0/3.08	24.2	29.2/3.31	24.0	36.1/3.47	23.0	41.8/3.04

注) To : 上昇温度 (°C)、Th : 温度閾値 (°C)

Sh : 分散閾値

#### 4.3 2値化処理による損傷の抽出

2値化処理は、最適な熱映像に対して画像処理を施し、検知したい損傷面積以上を抽出するものである。まず、一次処理は、得られた損傷比率 30 %以上を有する損傷を抽出する温度閾値 Th (表-3参照) を適用してクリッピング処理を行った。また、クリッピング処理は式(4)

によって求めている<sup>3)</sup>。一次処理によって得られた画像処理による判定では、若干のノイズが含まれているために改善の余地が残る。

$$f_t(i,j) = \begin{cases} f(i,j) & : f(i,j) \geq t \text{ のとき} \\ 0 & : f(i,j) < t \text{ のとき} \end{cases} \quad (4)$$

従って、二次処理は、この判定画像に対して温度分布の分散値 (表-3参照) の損傷比率 30 %以上を検知する閾値へ適用して再度クリッピング処理を施すことにした。その処理画像を写真-2に示す。

写真-2は、損傷比率 30 %以上の損傷を有するタイルのみを2度のクリッピング処理を施して抽出した判定画像である。その結果、検知しようとする所定の損傷比率を設定すれば、それ以上の損傷のみを精度良く的確に抽出した判定画像を得ることができた。

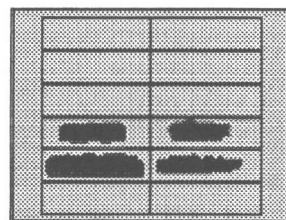


写真-2 評価画像

#### 5. トンネル壁面への適応性

基礎実験では、損傷比率 30 %が抽出できる2値化処理の定量値を示した。そこで、この判定指標を既存のトンネル壁面を想定した U 試験体に適用することで実用面の有効性について検討することにした。

U 試験体は、道路用 RC 製 U 字型側溝 (横 2,000 × 縦 800 × 幅 610、厚さ 150mm) の表面に二丁掛タイルを貼り付け、損傷比率 (A : 88、B

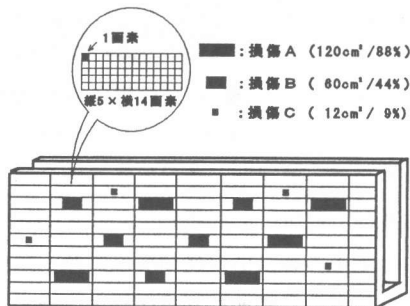


図-8 損傷配置図 (U試験体)

: 44、C : 9 %) を有する損傷を下地コンクリートに接着し配置した (図-8参照)。熱赤外線センサによる温度測定は、観測距離 5.5m の位置から 7 分間連続して時系列の熱映像を得た。また、加熱条件は、各外気温において最適上昇温度 (図-5参照) を得るために加熱距離 1.0m の位置より加熱した。なお、各加熱条件による上昇温度は、加熱直後の無損傷タイルに対してそれぞれ表-4に示すとおりに上昇させた。この U 試験体の上昇温度と基礎実験で得られた T 試験体における無損傷の上昇温度とを比較して、損傷比率 30 % 以上を精度良く検知できる温度閾値及び分散閾値を図-7の回帰式及び式(3)より算出した結果を表-4に併記する。

表-4 U試験体の測定条件

実験要因	加熱時間 (min)	初期壁面温度 (°C)	上昇温度 (°C)	温度閾値 (°C)	分散閾値
Case U-1	4.0	8.7	16.0	19.5	1.3
Case U-2	8.0	8.3	20.8	23.2	2.4
Case U-3	6.0	13.2	18.1	25.0	1.8
Case U-4	8.0	12.5	22.1	28.7	2.8
Case U-5	6.0	24.6	17.8	37.1	1.7
Case U-6	8.0	23.5	22.8	40.3	2.8

写真-4は、CaseU-6 における加熱停止後 3 分経過時の熱映像で、写真-5は、前項の温度閾値、写真-6は分散閾値を適用した 2 値化処理画像である。U 試験体におけるタイル 1 枚当たりの損傷比率 30 % 以下の温度分

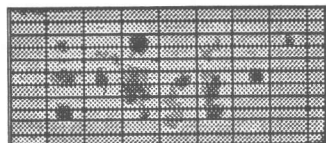


写真-4 熱映像 (CaseU-6)

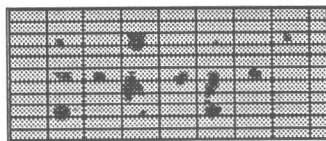


写真-5 温度閾値処理画像

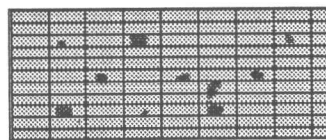


写真-6 分散閾値処理画像

布データを削除し、損傷 B 以上を強調した判定画像である。表-5は、各加熱条件における温度閾値及び分散閾値を適用してクリッピング処理を施した後の各損傷の検知結果である。このように実用面でも事前に判定指標を構築することでノイズを大幅に除去でき、検知したい損傷

比率以上の鮮明な判定画像を得ることができた。

表-5 各閾値処理後の検知結果

実験要因	温度閾値処理後				分散閾値処理後			
	損傷A	損傷B	損傷C	検知数	損傷A	損傷B	損傷C	検知数
Case U-1	5/5	5/5	0/4	7	5/5	4/5	0/4	2
Case U-2	5/5	5/5	0/4	3	5/5	5/5	0/4	1
Case U-3	5/5	4/5	0/4	2	5/5	4/5	0/4	1
Case U-4	5/5	5/5	0/4	4	5/5	5/5	0/4	2
Case U-5	5/5	5/5	0/4	10	5/5	5/5	0/4	2
Case U-6	5/5	5/5	0/4	12	5/5	5/5	0/4	2

## 5. まとめ

本研究はタイル裏面の損傷を検知する判定評価に影響する温度要因として外気温、加熱条件、損傷面積が温度分布特性に及ぼす影響を明確にし、トンネル環境に適応した損傷検知指標の構築を行った。その結果は以下のとおりである。

- (1) 温度特性曲線の線形の相違により最適な冷却時間が選択できた。
- (2) ヒストグラムより損傷を精度良く検知できる最適な上昇温度範囲が確認できた。
- (3) 温度閾値及び分散閾値を適用したクリッピング処理では、熱映像内のノイズを大幅に除去し、検知したい損傷比率以上の鮮明な判定画像を得ることができた。
- (4) 検知したい損傷を抽出する判定指標の構築により、実用面での有効性が検証できた。

## 参考文献

- 1) 柳内睦人・魚本健人：熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究, 土木学会論文, No442/V-16, pp.91-100, 1992.2
- 2) 建設大臣官房技術調査室監修：外装仕上げ及び防水の補修・改修技術, 第 4 編, p.38, (財) 日本建築センター, 1992.
- 3) 柳内睦人・原 洋平・金光寿一：熱映像によるトンネル壁面の損傷診断に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文, Vol.18, No1, pp.1209-1214, 1996.