

論文 トンネル内部の環境が及ぼす熱情報への影響と診断手法について

金光寿一*1・柳内睦人*2・宮崎誉士*3

要旨：熱映像を利用したトンネル壁面の損傷診断では、タイル裏面の損傷に対応した温度分布として現れるが、その損傷診断では損傷の大きさや厚みといった内的要因と外的要因である壁面の汚れなどが混在し、検知精度や画像処理に影響を及ぼすことになる。そこで、本研究はこれらの要因が及ぼす熱映像への影響を明確にし、検知したい損傷部の抽出に各種確率変数を用いて損傷診断指標の構築を図った。その結果、上昇温度と温度分布のバラツキ及びその形状には特徴があり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：熱映像、トンネル環境、確率変数、損傷診断指標、閾値

1. はじめに

熱赤外線センサを利用してトンネル壁面に張られたタイル裏面の損傷診断を行う場合、その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ことになり、経験的な判断に依存することが多く、検知精度や再現性に問題を残している。この熱映像に影響する要因は、観測対象となるタイル裏面の状態として、1) 損傷面積、2) 厚さ、また、観測を行うトンネル内の環境では、1) 外気温、2) 風、3) 汚れ、4) 反射光などが考えられ、これらの要因が熱映像に与える影響を明確にしなければ検知精度に多大な影響を及ぼすことになる。

そこで、本研究では検知したいタイル裏面の損傷部として損傷面積と厚みを取り上げて、タイルへの加熱条件及び冷却時間が損傷を有するタイルへの表面温度分布に及ぼす影響を明らかにする。その損傷検知では、確率変数である平均温度、標準偏差、変動係数、尖度及び歪度を用いて加熱時間とその冷却時間及び検知したい損傷部の鮮明な画像を抽出するための判定指標の有効性について検討する。さらに、既存のト

ンネル内部の環境を想定した外的要因については、タイヤが巻き上げる粉塵や車輛の排気ガスが与えるタイル壁面の汚れを取り上げ、サーモグラフィ法の測定条件及び損傷検知精度への影響を明確にした。

2. 実験概要

本実験は、既存のトンネル壁面を想定したタイル裏面の損傷について、タイル1枚当たりの温度分布特性を各種確率変数を用いて定量的な評価を行い、損傷検知の有効性について検討したものと、タイル面の各種汚れが熱映像に及ぼす影響について明確にしたものである。

2.1 試験体

実験に供した試験体は、RCプレキャスト版に既存のトンネル壁面に張られたものと同じ正方形タイル(100×100×5mm、陶器質、白色、艶有り、 $\lambda=1.3\text{W/m}\cdot\text{K}$)をモルタル下地に張付けたものである。

2.2 内的要因(損傷面積と厚さ)

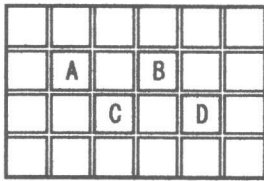
内的要因とする浮きやはらみを想定したタイル裏面の損傷は、タイル1枚当たりの損傷比率

*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 日本大学 大学院生産工学研究科

(A : 60、B : 40、C : 20、D : 30 %) を有するように発泡スチロールを加工してタイル裏面に一時的に配置し、タイルの張付け施工時に除去してその上部にタイルを張付け配置した。また、損傷の厚さについてはそれぞれの損傷面積に対して 10、5、3、1mm とした (図-1 参照)。ここに、タイルの補修条件は、建設省の指針¹⁾に準じて損傷比率 30 %以上が定量的に評価できるように、温度分布特性で得られた確率変数を用いて検討した。



A、B、C、D :
疑似損傷の配置位置

図-1 損傷配置図 (S試験体)

2.3 外的要因 (タイルの汚れ)

熱映像による損傷診断では、得られた相対温度差から損傷の有無を識別するため、特にトンネル内部の環境が熱映像に及ぼす外乱ノイズの要因とその影響を明確にしておく必要がある。そこで、本実験でのタイル壁面の汚れは、関東ローム及びグラファイト (黒鉛粉末) を塗布して、その塗布量を変化させ無汚染で得られた温度分布特性とを比較しながら熱映像への影響について検討を行った。なお、試験体は内的要因の実験に供したものと同一であるが、損傷の厚さ 1 mm の試験体を使用し、加熱時間は 5 分間として比較した。

2.4 観測条件

熱赤外線センサ (光導電型、応答波長領域 8.0~12.0 μ m、感度 30 $^{\circ}$ C で 0.1 $^{\circ}$ C) による温度測定は、試験体のタイル表面を 1.0m 離れた位置から表-1の性能を有する高圧噴霧式温風ヒータで均一に加熱し、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とした。なお、加熱条件は、表-2に示すとおりでタイル初期壁面温度 (以下、外気温と記す) に対して 1~4 分まで 1 分間隔毎で上昇させた。

表-1 温風ヒータの仕様

発熱量 (kJ/h)	139940(最大)~83970(最小)
燃料消費量 (l/h)	4.0(最大)~2.4(最小)
熱風吐出量 (m ³ /min)	5.6
外形寸法 (mm)	990×1149×564
燃焼方式	高圧噴霧式

表-2 基礎実験の加熱及び測定条件

実験要因	加熱時間 (min)	測定距離 (m)	外気温 ($^{\circ}$ C)	加熱直後 ($^{\circ}$ C)
CaseS1-1	1	1.7	15.8	38.90
CaseS2-1	2		15.2	47.90
CaseS3-1	3		16.5	53.44
CaseS4-1	4		18.5	60.75

※実験要因を表す記号は、CaseSの後の数字は加熱時間を、-の後は損傷の厚さを示す。

3. 実験結果

3.1 内的要因が及ぼす熱映像への影響

表-2は、無損傷タイルがそれぞれの加熱時間によって上昇した加熱停止直後の平均値である。

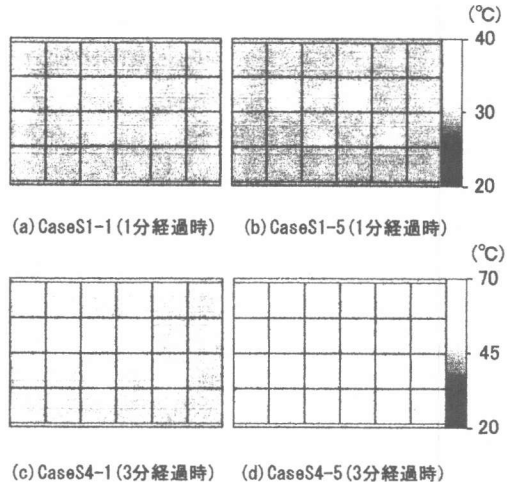


写真-1 表面温度分布画像

写真-1(a)~(d)は、CaseS1-1及びCaseS1-5における加熱停止後 1 分経過時に、CaseS4-1及びCaseS4-5は 3 分経過時に得られた熱映像である。CaseS1-1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部が現れてはいるが、視覚的に検知しようとする場合には不相当であった。一方、CaseS4-1及びCaseS4-5の熱映像を見ると、両画像はよ

り鮮明に現れてはいるが、損傷厚さによる影響は視覚的には確認できなかった。

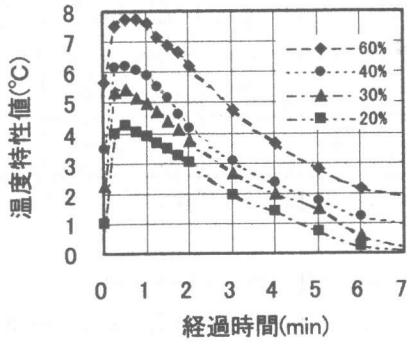


図-2 温度特性曲線 (CaseS4-5)

3.2 熱映像から求めた温度特性値

図-2に CaseS4-5 の温度特性曲線²⁾を示す。特に、各損傷と無損傷タイルの平均温度との差分を温度特性値と称する³⁾。この温度特性値が示す最大値と経過時間の関係では、損傷面積が増加するほど最大値を迎える経過時間は遅くなる傾向にある。図から、損傷 30%以上を明瞭に分離できる冷却時間は、1分程度と確認できるが、外気温及び上昇温度の違いによってその線形は若干異なってくる。

3.3 表面温度分布の形状

図-3は、CaseS3-5の2分経過時に得られた表面温度と画素数の関係である。タイル面を加熱すると平均温度は、損傷面積の大きさに対応して高温を示し、また分布形状のバラツキも損傷面積に対応した特徴を示す。分布形状の特徴は、健全タイルは表面温度分布幅の小さい凸形状の分布であり、損傷 60%のタイルでは温度分布幅は広がり、高温部を示す分布と健全部を

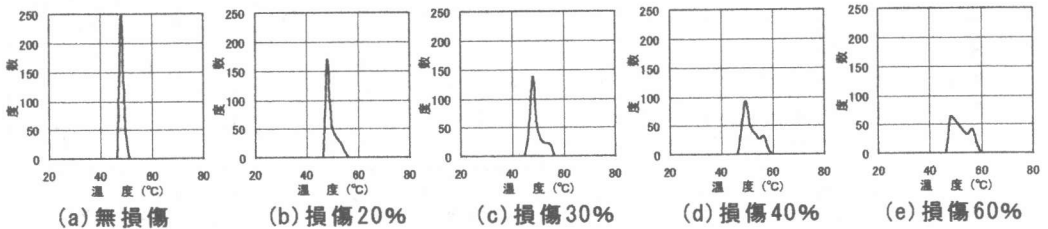


図-3 表面温度分布曲線

示す分布が明瞭に分離している⁴⁾。

3.4 表面温度分布特性の確率変数

本項では各損傷の特徴を示す表面温度分布のバラツキ及び形状の数値化として、確率変数である標準偏差、尖度、歪度を用いた。特に、尖度は分布の平坦度を示す値で、数値が大きいほどその分布形状は凸の形状となる。式(1)に尖度の算出法⁵⁾を示す。また、歪度は分布の対称性を示す指標で、正の値を取るときには右にすその長い分布形状を示す。式(2)に歪度の算出法⁵⁾を示す。

$$a_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S} \right)^3 = \frac{\sqrt{N} \sum (x_i - \bar{x})^3}{\left\{ \sum (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{3/2}} \quad (1)$$

$$a_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{x}}{S} \right)^4 = \frac{N \sum (x_i - \bar{x})^4}{\left\{ \sum (x_i - \bar{x})^2 \right\}^2} \quad (2)$$

ここに、 a_3 :歪度、 a_4 :尖度、 N :画素数

s :標準偏差、 x :画素温度 \bar{x} :平均温度

3.5 実験要因に対する冷却時間の選定

熱映像から損傷を識別するためには、各損傷間に相対温度差が必要であり、損傷面積とその厚さが混在する要因に対して適切な加熱温度あ

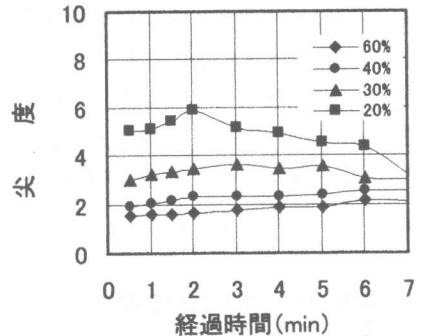


図-4 尖度と経過時間

るいは冷却時間が存在する。図-4に3分加熱における尖度と冷却時間の関係を示す。この尖度は、損傷厚さ1～10mmの平均値であり、損傷比率30%以上を検知するためには、損傷比率20と30%で得られた相対差が最も大きくなる時の冷却時間として算出すれば良いことになる。その結果、加熱時間によって若干の経時変化が認められるものの、概ね1分から3分経過時において相対差が最大値を迎えて推移する。そこで、この冷却時間内に得られた各損傷が示す尖度の変化率が小さいことから中間値である2分経過時を冷却時間として選択した。

3.6 実験要因に対する加熱条件の選定

加熱条件は、冷却時間2分経過時に得られた各統計量にて検討した。図-5に損傷厚さ(1mm～10mm)の3分加熱時で得られた標準偏差と損傷面積との関係を示す。同様に、図-6に尖度と損傷面積、図-7に歪度と損傷面積の関係を示す。従って、損傷比率30%以上を検知するために必要な上昇温度は、各加熱時間で得られた各統計量の損傷比率20%の最小値と30%の最大値が互いに分離するときの上昇温度を算出すれば良いことになる。その結果一覧を表-3に示す。つまり、この相対差が正の値であれば、損傷比率20と30%が重なりあっていることを示し、負の値であれば損傷比率20と30%が完全に分離し、2分冷却時の最適な加熱条件であることを示唆している(表-3参照)。

4. 確率変数を用いた閾値処理

熱映像による損傷比率30%以上を抽出する

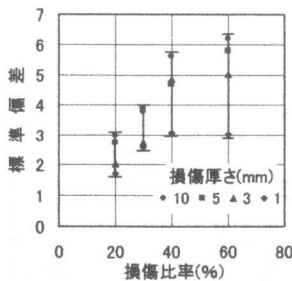


図-5 標準偏差と損傷比率の関係

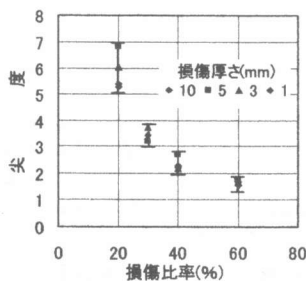


図-6 尖度と損傷比率の関係

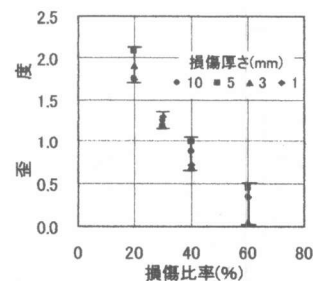


図-7 歪度と損傷比率の関係

表-3 確率変数の相対差一覧

確率変数	加熱時間 (min)	上昇温度 (℃)	損傷30%		損傷20%		相対差
			最大	最小	最大	最小	
標準偏差	1.0	27.1	0.81	0.92	0.11		
尖度			4.26	2.96	1.30		
歪度			1.25	0.65	0.60		
標準偏差	2.0	32.7	2.05	2.35	0.30		
尖度			3.92	3.32	0.60		
歪度			1.29	1.13	0.17		
標準偏差	3.0	36.9	2.56	2.96	0.40		
尖度			3.75	5.30	-1.55		
歪度			1.30	1.75	-0.45		
標準偏差	4.0	42.3	1.34	3.99	2.65		
尖度			3.85	3.29	0.56		
歪度			1.29	1.07	0.21		

ための検知指標は、各種確率変数を用いて検出する。

4.1 標準偏差を用いた損傷検知

標準偏差を利用した閾値処理では、図-5及び表-3に示したとおり、実験に供した全ての厚みまでを考慮して損傷比率30%を抽出することは困難である。

4.2 尖度及び歪度を用いた損傷検知

図-6、図-7及び表-3に示す3分加熱で2分経過時に得られた尖度と歪度は、損傷比率30%を明瞭に分離することが可能である。尖度を用いた閾値は、表-3から損傷比率20と30%の中間値として求めると4.5となり、歪度は1.5となる。この閾値は、表-2から無損傷タイルが示す加熱停止直後の表面温度53.44℃、上昇温度36.9℃の冷却時間2分経過時に得られたものである。以上、加熱時間2、3、4分で得られた尖度及び歪度の推移曲線から、損傷比率20と30%の相対差が負の領域(完全分離)を示す上昇温度範囲を算出すると 37 ± 3.6 ℃となる。

5. タイルの汚れが及ぼす影響

5.1 外的要因の概要

タイル壁面の汚れとして使用した各材料の物性は、表-4に示すとおりであり、その塗布量はタイル1枚当たりに換算した被覆重さである。

表-4 汚れの物性

実験要因	汚れの種類	塗布量 (mg)	密度 (g/cm ³)	熱伝導率 (W/m·K)
CaseK-1	関東ローム	208	2.25	1.05
CaseK-2		596		
CaseK-3		1217		
CaseG-1	グラファイト	38	2.78	16.00
CaseG-2		92		
CaseG-3		146		

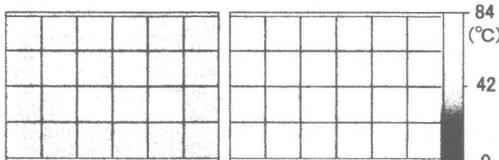
表-5 汚れの相違による上昇温度

汚れの種類		外気温 (°C)	加熱直後 (°C)	1分経過時 (°C)
無汚染	CaseN-1	19.6	61.32	46.80
	CaseK-1	21.0	63.42	52.35
関東ローム	CaseK-2	20.0	65.99	54.26
	CaseK-3	18.5	68.45	58.40
	CaseG-1	18.1	65.81	52.82
グラファイト	CaseG-2	18.6	69.66	57.15
	CaseG-3	18.3	72.81	59.82

熱赤外線センサによる観測は、タイル表面へ被覆した各材料が絶乾状態となった時点において実施した。なお、実験条件は2.4項と同一である。表-5は、観測面への加熱条件及び上昇温度で、表中の上昇温度は各観測面から無作為に抽出した無損傷タイル4枚の平均温度として求めた。その結果、同加熱時間において両汚れとも塗布量が、増加するほどタイル面上昇温度は高くなった。

5.2 熱赤外線センサで得られた汚れタイルの熱映像

写真-2(a)、(b)は、汚れの無いタイル（以下、無汚染タイルと記す）及びグラファイトの1分経過時に得られた熱映像である。



(a) CaseN-1 (b) CaseG-1

写真-2 表面温度分布画像

上昇温度は、タイル表面に被覆したグラファイトの量が多くなるほど明瞭な温度差となって現れている。一般に、この相違は通常のタイル

が白色でグラファイトは黒褐色であるため熱吸収が高く、グラファイトの塗布量及び熱伝導率に起因したものと考えられる。熱映像からは、無汚染タイルと比較しても汚れによる影響はなく、逆により高温となることで損傷を抽出するのに適した鮮明な画像となって現れた。

5.3 熱映像から求めた温度特性値

図-8は CaseG-2の温度特性曲線で、無汚染タイルとグラファイトの損傷比率 30% を比較すると、表面温度は後者の方がより高温を示すにも拘わらず温度特性値は小さくなっている。

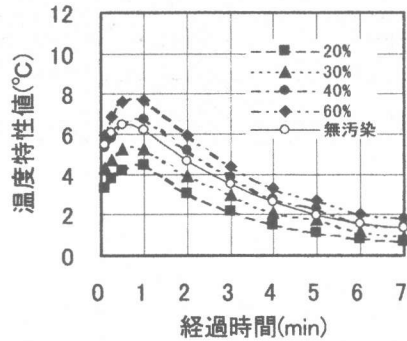


図-8 温度特性曲線 (CaseG-2)

5.4 汚れによる表面温度分布への影響

本項では、上昇温度によって得られる表面温度分布は、加熱時間が増加するほど各損傷間に相対差が生じることを考慮して加熱時間は5分間とした。また、冷却時間の選択は温度特性曲線及び図-9に示す標準偏差と経過時間の関係により、各損傷間の相対差が大きくなる及び汚れの種類による熱流速の相違を考慮して1分経過時とした。一方、各種汚れを有するタイル裏面の損傷検知は、1分経過時におけるタイル1枚当たりの温度分布特性を確率変数を用いて定量化し、損傷比率30%以上が判定評価できるかを検討した。損傷比率30%の温度特性値とともに統計処理の算出結果を表-6に示す。図-10及び図-11にその上昇温度比と標準偏差及び変動係数との関係を示す。特に、変動係数は良好な相関性を示しており、損傷比率30%を明

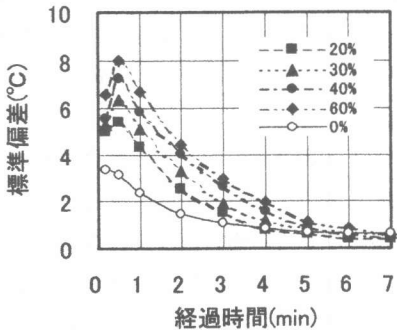


図-9 標準偏差の経時変化 (CaseG-2)

表-6 統計処理結果一覧

実験要因	温度特性値 (°C)	上昇温度 (°C)	標準偏差(°C)			変動係数(%)		
			20%	30%	40%	20%	30%	40%
CaseN-1	6.21	41.72	3.95	4.60	5.22	4.00	4.63	5.65
CaseK-1	5.15	42.42	4.00	4.62	5.29	4.16	5.10	6.12
CaseK-2	4.10	45.99	4.49	5.17	5.77	5.20	6.46	7.57
CaseK-3	3.09	49.95	4.90	5.54	6.10	6.84	8.16	9.12
CaseG-1	5.61	47.71	4.36	4.83	5.58	5.75	7.03	7.93
CaseG-2	5.24	51.06	4.53	5.28	5.84	6.68	7.91	9.05
CaseG-3	4.81	54.51	4.97	5.81	6.35	7.47	8.99	9.82

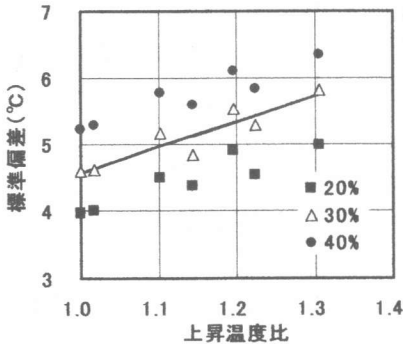


図-10 標準偏差と上昇温度比

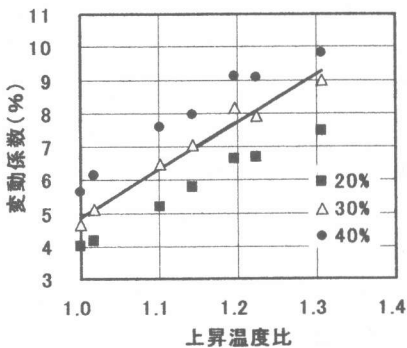


図-11 変動係数と上昇温度比

隙に分離することができる。このように標準偏差及び変動係数は、汚れの種類及び塗布量の違

いによる相違は認められず、上昇温度に強い依存性が認められた。

6. まとめ

本研究は、内的及び外的要因を取り上げて、温度分布特性に及ぼす影響を確率変数から明確にした。その結果は以下のとおりである。

- (1) 温度分布の形状を尖度及び歪度を用いて定量化することで、損傷比率 30 % の損傷検知に有効性が認められた。
- (2) 損傷検知を行うための加熱及び冷却時間はある程度の幅を持つ範囲として提示することが可能である。
- (3) 加熱による上昇温度は、汚れの種類及び塗布量によって大幅に異なり、塗布量が大きくなるほど上昇温度が高く鮮明な熱映像を得ることができた。
- (4) グラファイトの塗布量が増加するほど、逆に温度特性値は小さくなった。
- (5) 無汚染タイルを基準として観測面を加熱し測定時間を早めることで、上昇温度の割合と変動係数の関係から汚れによる影響を除去することができた。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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
- 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。
- 4) 金光寿一・柳内睦人・宮崎誉士：熱赤外線を利用したトンネル壁面の損傷検知指標の構築と定量化に関する研究、赤外線サーモグラフィによる非破壊評価特別研究委員会、pp.7-14、(社)非破壊検査協会、1999.3
- 5) 石村貞夫：すぐわかる統計解析、pp.66-67、東京図書