

V-278

熱赤外線を利用して壁面損傷を抽出する検知指標の定量化に関する実験的研究

中央工学校 正会員○金光 寿一
 日本大学 正会員 柳内 睦人
 東亜建設工業㈱ 原 洋平

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、気温変化が微小なためにタイル壁面を人為的に加熱し、冷却時に得られる熱映像から損傷を判断することになる。その観測に当たっては、いかに短時間に人為的な加熱を完了させ、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点がある。

そこで、本研究はトンネル壁面の環境に適応した最適な加熱条件や冷却時の選定について、温度特性値及び温度分布の分散を指標として損傷検知の定量化を図り、実用面でも適用できる損傷診断指標の構築を行った。特に、検知しようとするタイル裏面の損傷面積及び外気温を設定すれば、最適な加熱条件や冷却時間、さらに、2値化処理の閾値となるべき最適な温度閾値及び分散閾値が選択され、鮮明な評価画像が得られるところに特徴がある。

2. 実験概要

基礎実験に供した T 試験体は、損傷タイル 1 枚当たりの温度分布特性を検証するもので、RC プレキャスト側溝蓋に既存のトンネル壁面に張られたものと同じ二丁掛けタイル(磁器質、白色、艶有り)を張付けたものである。また、タイル裏面の損傷は、浮きや空隙を想定した疑似損傷を発泡スチロールにて加工し、タイル 1 枚当たりの損傷比率(損傷 A : 60, B : 40, C : 20, D : 10 %)を有する損傷をコンクリート下地に接着した(図-1 参照)。熱赤外線センサ(LWB 型, 応答波長領域 : 8.0 ~ 12.0 μm)による温度測定は、温風ヒーターで観測面を均一に加熱し、加熱停止直後からリアルタイムに 7 分間連続して熱映像を得ることにした。なお、加熱及び測定条件を表-1 に示す。

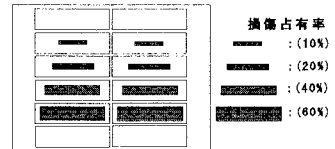


図-1 損傷配置図 (T試験体)

表-1 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) (℃)
Case 15-1	1.0			
Case 15-2	2.0			
Case 15-3	3.0			5 (5.6)
Case 15-4	4.0	1.0	1.7	10 (10.8)
Case 15-5	5.0			20 (19.5)
Case 15-6	6.0			30 (29.2)
Case 15-7	7.0			

3. 実験結果及び考察

得られた熱映像には、加熱不足のために画像が不鮮明なものや損傷をある程度確認できるものの正常なタイル表面にも高温部が現れ、無損傷を損傷と判断するものもある。このように熱映像を利用した損傷診断では、識別できる熱容量があり、外気温に対して適切な加熱温度及び冷却時間があることを示唆している。

3. 1 最適冷却時間及び加熱条件の設定

各外気温に対して損傷を容易に判読できる冷却時間は、熱映像から求めた温度特性曲線¹⁾を用いて検討するもので、無損傷及び各損傷間で最も大きな相対温度差となって現れる冷却時間として選定した。その結果、概ね 2 ~ 4 分以内に相対温度差の最大値を迎え、本項では 3 分経過時を最適冷却時間とした。最適加熱条件は、最適冷却時間である 3 分経過時に得られた表面温度と画素数の関係を示すヒストグラムにて検討した。すなわち、無損傷と各損傷間の温度分布が最も分離する加熱時間として上昇温度を算出すると、各外気温に対する最適上昇温度範囲は図-2 に示すとおりとなる。

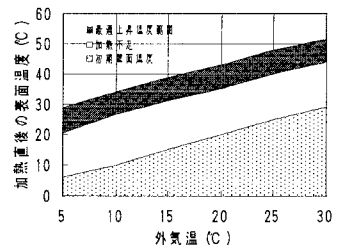


図-2 最適上昇温度範囲

キーワード：熱映像、損傷評価、閾値、検知指標、温度係数

連絡先：〒275-8575 習志野市泉町1-2-1 日本大学生産工学部土木工学科 柳内研究室 TEL, FAX. (0474) (74) 2441

3. 2 温度分布特性と閾値処理

熱映像による損傷診断は、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。検知したい損傷以上を抽出する閾値は、損傷比率を区分す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(1)により温度閾値 T_h を算出した。

$$T_h = T_{ave} + k \cdot (T_{max} - T_{ave}), \quad 0 \leq k \leq 1 \quad \dots \dots (1)$$

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)

なお、本項では実務的な簡便さを考慮して検知係数 k を 0.5 の一定として算出した。図-3 は、各外気温に対する最適冷却時間 3 分における温度係数と初期壁面温度及び温度閾値との関係で良い相関性を示す。

3. 3 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の「バラツキ」程度を示し、無損傷と比較することで損傷検知の指標となり得るものである。図-4 に温度係数と分散閾値の相関関係を示す。

4. 既存トンネル壁面を想定した試験体への適応

基礎実験では、各外気温に対して鮮明な処理画像を得ることができる最適な加熱条件や冷却時間及び温度閾値や分散閾値の定量値を示した。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した。U 試験体は、道路用 RC 製 U 字型側溝（横 2,000 × 縦 800 × 横 610 × 厚さ 150mm）の表面に二丁掛タイルを張付け、損傷比率（A：88，B：44，C：9 %）を有する損傷を下地モルタルに接着し配置した（図-5 参照）。熱赤外線センサによる温度測定は、観測距離 5.5m の位置から時系列の熱映像を得た。また、加熱条件は各外気温（初期壁面温度）において最適上昇温度を得るために加熱距離 1.0m の位置より加熱し、無損傷タイルに対して表-2 に示すとおりに上昇させた。なお、温度閾値及び分散閾値は、図-3、4 の回帰式により算出し、その結果を表-2 に併記する。写真-1 は、CaseU-1 における損傷比率 40 % 以上を抽出した 2 値化処理画像である。表-3 の検知結果に示すとおり、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。

5. まとめ

本研究では、以下に示す結果が得られた。(1)温度特性曲線の線形の相違により最適な冷却時間が設定できた。(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)損傷面積及び外気温を設定すれば、2 値化処理の閾値となるべき最適な温度閾値及び分散閾値が選択され、熱映像内のノイズを大幅に除去できた。

＜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洞・鉄筋の判読に関する基礎的研究、土木学会論文集、NO442/V-16、pp.91-100、1992.2

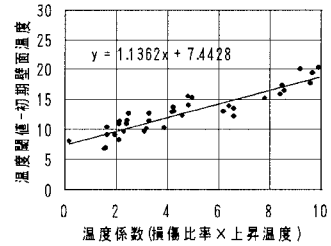


図-3 温度閾値と温度係数の関係

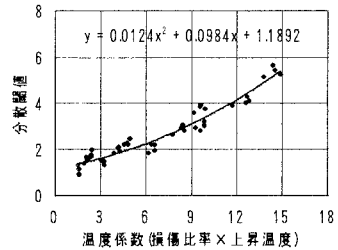


図-4 分散閾値と温度係数の関係

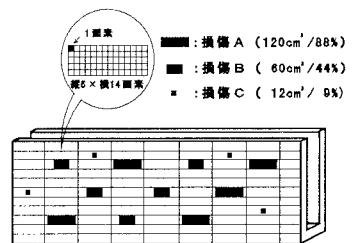


図-5 損傷配置図 (U試験体)

表-2 加熱及び測定条件 (U試験体)

実験要因	加熱時間 (min)	外気温 (°C)	上昇温度 (°C)	温度閾値 (°C)	分散閾値
Case U-1	4.0	6.2	16.0	20.9	2.3
Case U-2	8.0	6.7	20.6	23.5	2.8
Case U-3	6.0	12.2	18.1	27.9	2.6
Case U-4	8.0	11.8	22.1	29.3	3.0
Case U-5	6.0	28.6	17.8	44.1	2.5
Case U-6	8.0	28.1	22.8	45.9	3.1

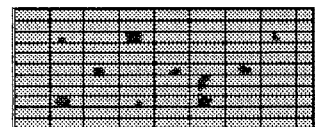


写真-1 2値化処理画像 (閾値:40%)

表-3 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			
	検出A	検出B	検出C	誤診数	検出A	検出B	検出C	誤診数
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