

論文 热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

柳内睦人^{*1}・金光寿一^{*2}・原 洋平^{*3}

要旨：本研究は、熱赤外線センサで得られる熱映像を利用してトンネル壁面の損傷診断を行う場合に考慮すべき要因について実験的な検討を行い、実用化を図るものである。基礎実験では、タイルの色彩、艶の有無、材質ならびに表面形状などによる表面温度への影響ならびに裏面の損傷との関係を明らかにした。既存のトンネル壁面を想定した実験供試体では、加熱後の冷却時に得られた熱映像の温度特性値から求めた閾値によって2値化画像を作成して損傷を抽出する手法について検討を行った。さらに、この手法をトンネル壁面に張られたタイルの損傷診断へ適用できることを検証した。

キーワード：熱映像、タイルの熱特性、損傷診断、温度特性曲線、画像処理

1. はじめに

近年、高速道路網の整備が一段と加速されてきた反面、既存の道路構造物は経年に伴い劣化現象が顕在化しつつある。特に、トンネル壁面や車道腰壁などに張られたタイルの劣化診断は、いかに速く損傷の進展状態を把握し補修の必要性を判断するかが重要である。万一、壁面内に発生した浮きや躯体コンクリートの剥離が進展してタイルが剥落した場合には、交通車両に対して多大な被害を与えることになる。これを未然に防止し安全性を確保するためには、定期的な損傷検査を実施することが不可欠である。しかし、タイルが一様に張られたコンクリート構造物の損傷診断は、迅速に観測データを収集し、即時に判定評価することが機種選定の条件である。これを満足する診断手法としては、非接触で、連続的に面的な熱情報を得ることができるサーモグラフィー法がある。この手法を利用した基礎実験では、人為的に加熱されたタイルの温度特性について検討を行い、タイルの色彩、艶の有無、材質および表面形状と温度分布との関係について明らかにした。次に、タイルで外装されたコンクリート構造物の損傷診断では、最も考慮しなければならない加熱条件、温度特性値から求めた閾値処理ならびに判定評価の表示画像の作成などについて検討を行った。

2. タイル壁面の温度特性の基礎実験

土木ならびに建築構造物の壁面に張られたタイルは、さまざまな色彩、艶の有無、材質および表面形状などが多種多様である。さらに、これらの各種要因と裏面に損傷がある場合には、温度分布がどのような影響を受けるかを事前に把握しておくことが必要である。基礎実験の供試体は、プレキャスト製品の側溝蓋（縦450×横600×幅50mm）に色彩、艶の有無、材質および表面形状などの各種要因を有する外装タイル（98×98×5mm）を張付けたものである。裏面には、発泡スチ

*1 日本大学 助教授 生産工学部 工博（正会員）

*2 中央工学校 専任講師 土木開発科

*3 日本大学大学院 生産工学研究科土木工学専攻

ロールを加工して疑似損傷 ($60 \times 60 \times 5\text{mm}$, $30 \times 30 \times 5\text{mm}$) を配置して、各種要因や損傷による温度分布への影響について検討を行った。写真-1は、裏面に損傷がある色彩および艶の有無が異なる外装タイルの可視像、図-1は裏面の損傷状態および写真-2は、同供試体を加熱し停止後 2分経過時に得られた熱映像である。なお、熱映像内の外装タイルは左から 2, 5列目が、損傷のない正常なタイルである。裏面に大きい損傷がある箇所のタイル表面には、白色の環状な高温部が明瞭に現れた。小さい損傷がある箇所のタイル表面には、白色の淡い環状の高温度が現れた。しかし、損傷が無く正常なタイル表面にはオレンジ色の均一な温度分布であった。このように熱映像の相対的な比較でタイル裏面の損傷状態を明瞭に識別することができた。

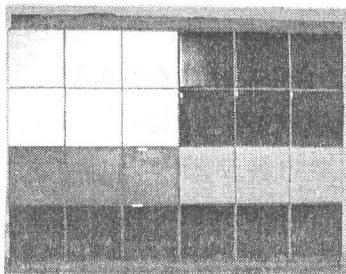
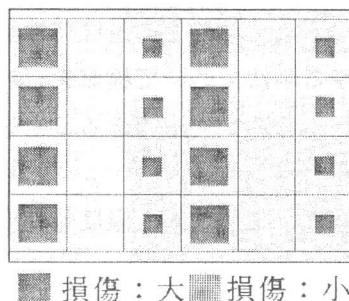


写真-1 外装タイルの可視像



■ 損傷：大 ■ 損傷：小

図-1 損傷の配置図

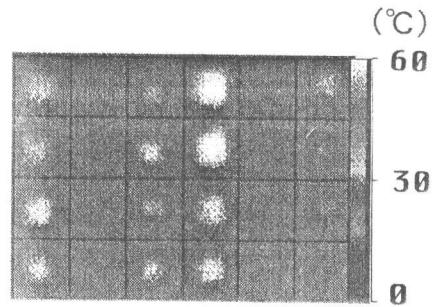


写真-2 外装タイルの表面温度分布画像

また、材質および表面形状が異なるタイルの表面温度分布は、裏面に損傷があるタイルと正常なタイルとの比較では、色彩の異なるタイルよりは不鮮明ではあるが損傷がある箇所のタイル表面に白色の環状な高温部が現れ熱映像から損傷を判読することは可能であった。しかし、材質および表面形状の異なるタイル表面の温度分布が不鮮明であったのは、タイルの厚さが色彩の異なるタイルの 2倍の厚さが影響したためと推察されるが、この程度の微小な温度分布でも同種類のタイル表面における比較ならば十分に損傷を診断することができる。表-1

は、加熱停止後 2分経過時における各種タイルの表面温度である。色彩の違いでは、黒色タイルが白色タイルより、艶の有無では艶無しが熱吸収が大きく高温度となった。材質の違いでは、表-2のよう

に石材質 ($\lambda = 2.8\text{W/m}\cdot\text{K}$) が磁器質 ($\lambda = 1.1\text{W/m}\cdot\text{K}$) より熱伝導率が大きく、

表面形状では平面型が凸型より比表面積が小さいために高温度となったものと考えられる。また、損傷および非損傷がある同種類のタイルの比較では、裏面に損傷があるタイル表面の方がどの種類でも高温度となった。これは、加熱によって一様な温度分布となったタイル表面が、冷却時ににおいて裏面の損傷が熱の不良導体となり熱収支に差が生じ、それが表面温度差となって現れたも

表-1 各種外装タイルの表面温度

(2分経過時)

各種要因	タイル表面 温度 (°C)	各種要因	タイル表面 温度 (°C)
色 材 質	白色	陶器質	45.6
	赤色	磁器質	46.5
	茶色	石器質	47.1
	緑色	石材質	47.9
	灰色		
	黒色		
艶	白色(艶有り)	凸型	43.7
	黒色(艶無し)	波形	44.6
	黒色(艶有り)	平面型	44.9
	白色(艶無し)	交差型	44.5

表-2 外装タイルの熱特性

種別	生成物質	寸法 (mm)	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)
色彩	陶器質	$97.8 \times 97.8 \times 5.0$	1.00	1.0~1.6
	陶器質	$97.8 \times 97.8 \times 5.0$	1.00	1.0~1.6
材質	石材	$100.0 \times 100.0 \times 11.0$	0.81	2.8
	陶器質	$94.0 \times 94.0 \times 10.0$	0.80	1.1~1.5
表面形状	陶器質	$94.0 \times 94.0 \times 11.0$	0.80	1.1~1.5
	陶器質	$94.0 \times 94.0 \times 11.0$	0.80	1.1~1.5

のである。

3. タイル裏面の損傷診断

既存のトンネル壁面を想定して、コンクリート構造物に張ったタイル裏面へ人為的に空隙を配置した供試体を作製し、供試体表面を一定時間加熱した後の冷却時におけるタイル面の熱分布状態を熱外線センサで観測して、得られた熱映像を基にタイル裏面の損傷診断を行った。実験に供したタイルは、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、陶器質、白色、艶有り)を道路用RC製U字型側溝(横2,000×縦800×幅610mm、コンクリート厚さ150mm)の表面に張付けたものである。タイル裏面の損傷は、浮きや空隙を想定した疑似損傷を発泡スチロールにて3種類の形状に製作し、コンクリート下地に接着し配置した(表-3、図-2 参照)。

3.1 タイル面の加熱条件

熱赤外線センサによる温度測定は、タイル表面を表-4に示す性能を有する温風ヒーターで均一に加熱し、加熱停止後1分経過時から測定距離1.7mの位置において10分間連続して行い、時系列の熱映像を得ることにした。なお、加熱条件は、表-5に示す5種類の加熱方法により恒温恒湿室(温度:20±2°C、湿度:80±5%)内に置いた供試体のタイル面を加熱した。Case1~Case5の加熱条件は、供試体表面をそれぞれCase1:13.0°C、Case2:16.0°C、Case3:23.0°C、Case4:19.0°CおよびCase5:13.0°Cに上昇させている。

表-4 温風ヒーターの仕様

熱出力	(Kcal/h)	33,430~20,060
	(KJ/h)	139,940~83,970
燃料消費量	(l/h)	4.0~2.4
	(Kg/h)	3.2~1.9
電源	100V	
消費電力	128/131	
サキュレーター風量	(m³/min)	5.6
燃焼方式	高圧噴霧式	
熱風吐出角度	自動首振方式	

3.2 表面温度分布画像

供試体タイル面の横2,000×縦800mmの範囲を各加熱条件で温風ヒーターを移動させながら均等に加熱した後、10.8~12.5μに応答する熱赤外線センサを利用して冷却時のタイル面を1分毎に観測し時系列の熱映像を得ること

表-3 疑似損傷の種類

疑似損傷	表示	表面形状	損傷面積(cm²)
損傷A	□	長方形	200.0
損傷B	■	正方形	100.0
損傷C	▨	ドーナツ状	56.0
非損傷	-	-	-

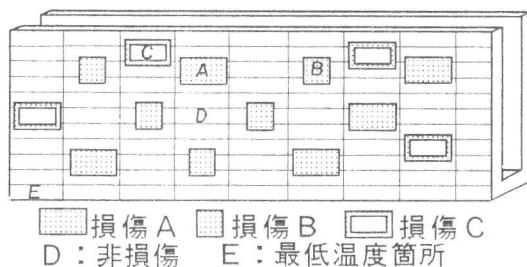


図-2 タイル裏面の損傷配置図

表-5 測定条件

測定条件	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
測定距離(m)	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
加熱距離(m)	1.0	1.0	1.0	0.5	1.5
加熱時間(min)	3.0	4.0	5.0	4.0	4.0
外気温(°C)	22.2	22.4	22.6	22.3	22.1
初期平均温度(°C)	21.9	22.0	22.1	21.5	21.7
壁面の平均温度(2分経過時)(°C)	32.5	36.3	41.4	39.6	29.6

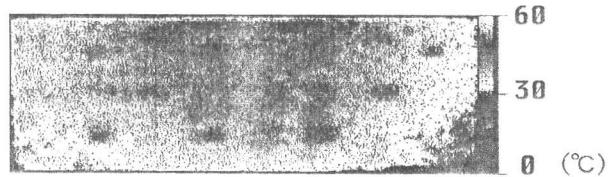


写真-3 タイル壁面の表面温度分布画像

とにした。写真-3は、本実験で得られた熱映像の中から、Case4における加熱停止後4分経過時の熱映像である。熱映像内には、タイル裏面に配置した発泡スチロールの位置に対応した大小さまざまな環状の高温域が点在する特徴的な温度分布パターンが現れている。表-6(a)～(e)は、熱映像から読み取った加熱条件Case1～Case5における各種発泡スチロールの設置および非設置箇所（図-2内に記号で表示）の表面温度、熱映像内の最低温度および平均温度を示した。

表-6 加熱条件毎に得られた表面温度

(a) Case 1

C a s e 1	表面温度 (°C)	加熱停止後の経過時間					
		2分	3分	4分	5分	6分	7分
損傷 A	37.3	36.2	35.8	34.9	33.6	33.0	
損傷 B	36.3	35.0	34.3	33.6	32.8	32.0	
損傷 C	35.9	34.3	34.0	33.1	32.3	31.2	
非損傷	33.1	31.7	31.6	30.7	29.8	28.6	
最低温度	26.2	26.5	26.9	26.3	25.6	25.0	
画像内の平均温度	32.5	31.3	31.5	30.9	29.9	29.3	

(b) Case 2

C a s e 2	表面温度 (°C)	加熱停止後の経過時間					
		2分	3分	4分	5分	6分	7分
損傷 A	42.0	39.4	38.0	37.9	37.0	34.0	
損傷 B	40.9	38.5	37.2	36.2	35.8	33.0	
損傷 C	39.3	37.5	36.0	34.8	34.5	31.5	
非損傷	38.8	36.0	35.0	33.8	33.5	30.6	
最低温度	29.4	28.6	28.2	28.1	28.0	25.0	
画像内の平均温度	36.3	34.6	33.4	32.4	31.7	31.0	

(c) Case 3

C a s e 3	表面温度 (°C)	加熱停止後の経過時間					
		2分	3分	4分	5分	6分	7分
損傷 A	49.2	46.0	42.9	42.5	41.6	41.2	
損傷 B	47.6	44.4	41.3	40.9	39.6	39.3	
損傷 C	45.8	43.2	40.0	39.8	37.9	37.0	
非損傷	40.2	38.0	35.1	34.5	33.7	33.4	
最低温度	32.5	31.7	30.3	30.2	30.0	30.2	
画像内の平均温度	41.4	38.9	36.6	36.5	35.1	35.0	

(d) Case 4

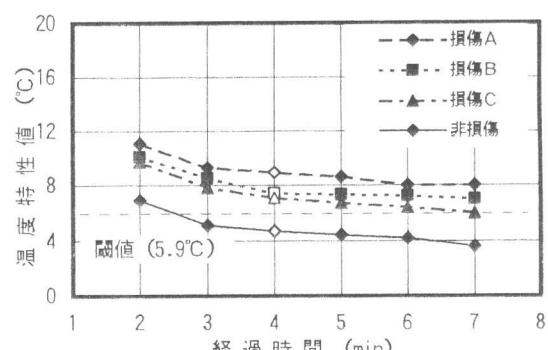
C a s e 4	表面温度 (°C)	加熱停止後の経過時間					
		2分	3分	4分	5分	6分	7分
損傷 A	48.9	46.5	43.7	41.2	40.2	38.3	
損傷 B	48.5	45.1	42.4	39.8	38.4	37.1	
損傷 C	46.7	43.3	41.5	38.3	37.4	36.0	
非損傷	45.2	43.0	40.1	37.9	36.5	35.2	
最低温度	31.1	30.7	30.2	29.8	29.5	28.4	
画像内の平均温度	39.6	37.3	35.8	34.1	33.2	32.5	

(e) Case 5

C a s e 5	表面温度 (°C)	加熱停止後の経過時間					
		2分	3分	4分	5分	6分	7分
損傷 A	34.6	34.2	34.0	31.9	31.3	31.0	
損傷 B	32.6	32.4	32.0	30.2	30.1	30.2	
損傷 C	32.0	31.7	31.6	30.0	29.8	29.9	
非損傷	31.6	31.4	31.2	29.4	29.5	29.6	
最低温度	25.7	25.5	25.5	25.2	25.2	25.1	
画像内の平均温度	29.6	29.4	29.0	28.8	28.7	28.7	

3.3 タイル面が示す温度特性曲線

図-3(a)～(e)は、熱映像から求めた発泡スチロールの設置および非設置箇所の表面温度と画像内最低温度との温度差の経時変化（加熱停止後2～7分間）である。本研究では、図中に示したこの曲線を温度特性曲線と称する。温度特性曲線は、表面の加熱によって内部に達した熱が冷却時に放熱する過程で再び表面に現れる熱分布の状態を表しているので、内部状態の違いによってその線形が異なる。したがって、この温度特性曲線は、その線形の違いを分析することによって、内部状態の違いを判読するのに利用することができる[1]。図中に示された各Caseの温度特性曲線を見ると、Case5は各曲線のうち損傷Bと損傷Cが重なり、損傷Aのみが分離している。Case1およびCase2は、各曲線の線形がほぼ類似



(a) Case 1

図-3 热映像から求めた温度特性曲線

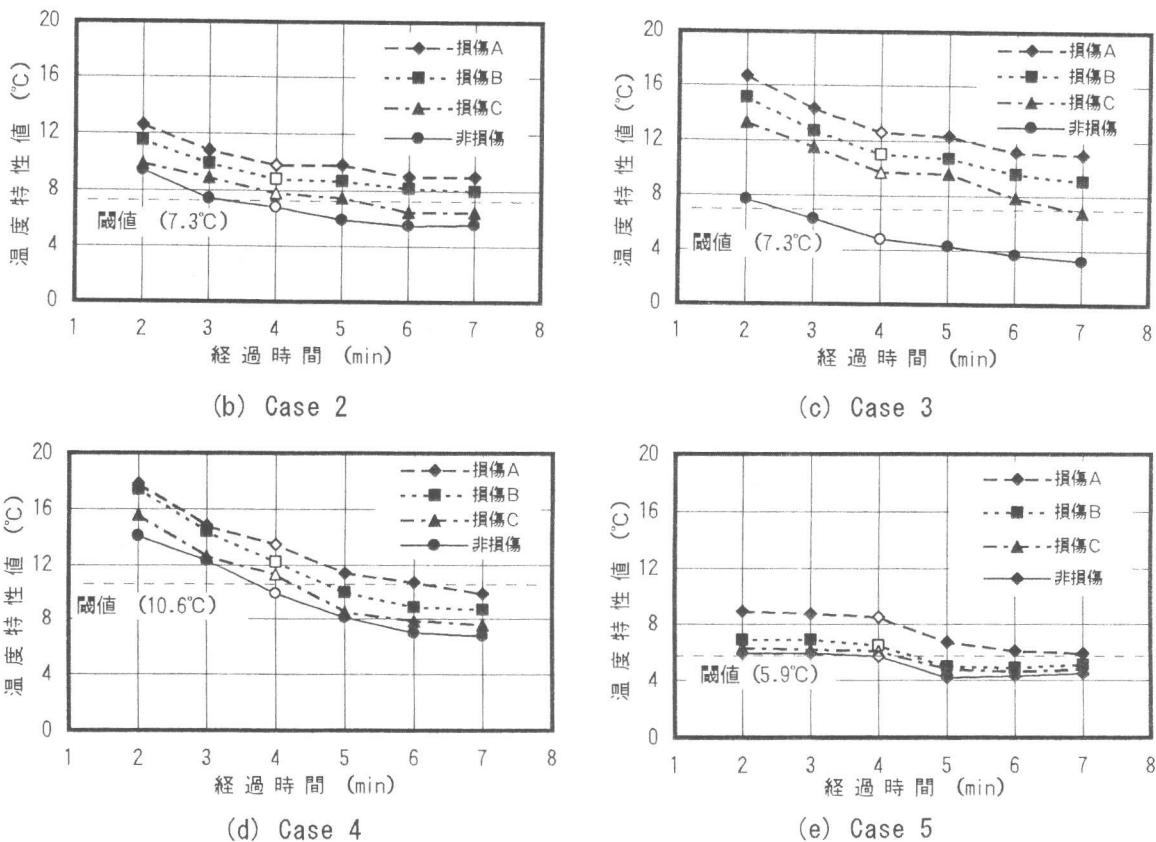


図-3 热映像から求めた温度特性曲線

似しており、発泡スチロールの設置および非設置箇所の線形の分離が困難である。また、各曲線が適当に分離しているCase3およびCase4では、加熱停止後 4分経過時において発泡スチロールの設置および非設置箇所の曲線の分離が最も明瞭であることが分かる。この温度特性曲線を利用してタイル裏面の損傷診断を行う場合には、4分経過時の熱映像へ閾値処理を施すことが最適である。

3.4 本研究で提案するタイル裏面の診断法

タイル面を一定時間加熱した後の冷却時における熱映像から作成した温度特性曲線の分析を基に、本研究で試みたタイル裏面の診断法は以下のとおりである。

- (1)温風ヒーターを使ってタイル面を1mの位置から均等に5分間加熱する。
- (2)加熱停止後、一定間隔で遠赤外線に対応する熱赤外線センサでタイル面を観測する。
- (3)熱赤外線センサで得られた時系列な熱映像を選び出し、その映像内の特異的な高温度部、低温部および全体の平均温度を計測する。
- (4)4分経過時の熱画像に対してその平均温度を閾値として2値化処理を施し、閾値より高温箇所を抽出して画像を作成する。
- (5)閾値より高温箇所を抽出した2値化画像に個々のタイル面をマスキングし、裏面が損傷したタイルを特定する。

この温度特性曲線を利用した損傷診断方法における閾値の決定法を各損傷が分離しているところの図-3(c)を使って説明すると以下のとおりである。Case3で加熱条件で得られた熱映像への閾値の設定は、まず特異的な温度分布を示す箇所の表面温度と観測面内で最も低温度を示す箇所

との温度差を求めて温度特性曲線を求める。次に、加熱停止後4経過時における損傷面積が小さい損傷Cと非損傷位置との中間点である閾値が、損傷箇所と非損傷の分離点となる。すなわち、中間点の温度特性値は $2.5(^{\circ}\text{C})$ であり、表面温度に換算すると中間点の表面温度は、非損傷の表面温度 ($35.1(^{\circ}\text{C})$) + 中間点の温度特性値 ($2.5(^{\circ}\text{C})$) = $37.6(^{\circ}\text{C})$ となる。この表面温度は、同経過時間の壁面の平均温度 ($36.6(^{\circ}\text{C})$) とほぼ同じ値である。以上の結果から、閾値は、ほぼ壁面の平均温度に相当するため各Caseで得られた平均温度を閾値として用いても妥当であると考える。

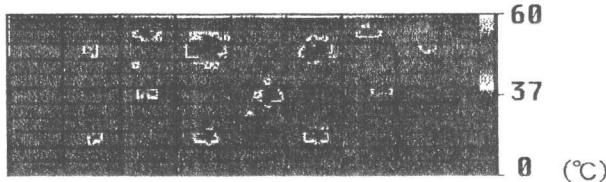


写真-4 2値化処理画像 (閾値 : $37.0(^{\circ}\text{C})$)

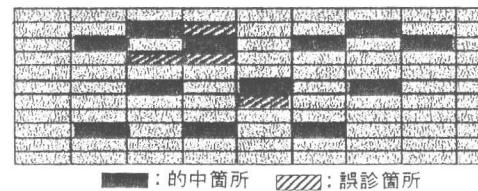


写真-5 損傷検知の表示画像

表-7 閾値設定による損傷の検知結果

写真-4は、Case3の熱映像に対して閾値を設定し、それ以下の画素は全て削除し閾値以上の画素のみを強調したものである。写真-5は、写真-4を強調した画像で損傷をタイルの大きさに当てはめ

て評価し、色付けして表示したものである。なお、損傷が発生したタイル面の補修は、タイル毎に交換するために、二丁掛タイルの大きさにメッシュを重ね合わせて表示している。表-7は、Case3およびCase4に閾値を適用して裏面の損傷を検知した結果である。Case3での閾値は $37.6(^{\circ}\text{C})$ となり、その検知率は損傷A : 5/5, 損傷B : 5/5, 損傷C:2/4, 誤診数:4個であった。Case4での閾値は $40.8(^{\circ}\text{C})$ となり、その検知率は損傷A : 2/5, 損傷B : 2/5, 損傷C:1/4, 誤診数:10個 であった。

実験 シリーズ	閾値 (°C)	検知率			誤診数
		損傷A	損傷B	損傷C	
Case 3	37.6	5/5	5/5	2/4	4
Case 4	40.8	2/5	2/5	1/4	10

4.まとめ

本研究は、熱映像を利用してトンネル壁面を想定した実験供試体の損傷診断を行い、得られた所見は以下のとおりである。

- (1) トンネル壁面の損傷診断への熱映像の適用では、温度変化が微小であるために人為的な加熱が不可欠である。この手法によって色彩、艶の有無、材質および表面形状の違いによる表面温度への影響ならびにタイル裏面の損傷を表面温度分布の相違として捉えることができた。
- (2) 热映像から求めた温度特性値の違いからタイル裏面の損傷を判読することができた。特に、温度特性値と損傷面積との間には、良い相関性があることが明らかとなった。
- (3) 热映像への閾値処理を施すことによって、裏面の損傷を精度良く抽出することができた。さらに、壁面の平均温度を閾値へ適用し、損傷を判読できることを検証した。
- (4) この診断から得られた判定結果は、観測面に張られたタイルの位置および大きさにメッシュを重ね合わせて、裏面の損傷状態をタイル毎に視覚的な表示画像として表現できた。

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, 土木学会論文集, No. 442/V-16, pp. 91~100, 1992. 2