

熱赤外線映像法を用いたコンクリート健全度評価に関する検討

独立法人北海道開発土木研究所	正会員	池田 憲二 (Kenji Ikeda)
独立法人北海道開発土木研究所	正会員	畑山 朗 (Akira Hatakeyama)
独立法人北海道開発土木研究所	○正会員	渡邊 一悟 (Kazunori Watanabe)
独立法人北海道開発土木研究所	正会員	藤野戸宏樹 (Hiroki Fujinoto)
(株)ダイヤコンサルタント	正会員	杉浦 高広 (Takahiro Sugiura)
(株)ダイヤコンサルタント	非会員	原 享 (Susumu Hara)

1. まえがき

近年、トンネル内覆工などコンクリート片崩落事故が相次いで発生し大きな社会問題となり、これ以降、点検・調査等に用いる新技術の開発が行われている。

熱赤外線映像法（サーモグラフィ）は、物体から放射される熱赤外線エネルギーを検出し、その表面温度を平面的に映像化することによって物体内部の状態や性質を調査する非破壊検査の一手法で、コンクリートの浮きや剥離などを検出する診断方法として着目されている。既に吹付のり面や建物外壁の診断には、一部実用化されている¹⁾。この場合、日射による温度上昇、夜間の冷氣による冷却があり、健全なコンクリート部分と欠陥部分（浮きや剥離、空洞のある部位）で表面温度に差異が生じる。これをサーモグラフィにより判別するものである。

一方、トンネルや覆道、床版下部などでは、日射を受けることがなく、温度変化に乏しい。このため、人為的に加熱して熱赤外線映像法によりコンクリートの健全度評価を行なう。図-1に示すように、コンクリート表面を一樣に加熱し（a）、加熱を終了すると（b）、健全部では熱が前後方向に伝達し表面温度が低下するが、剥離箇所では空気層の断熱効果により裏面への熱伝達が遮断され、健全部に比べ高温となる。この温度差をサーモグラフィで検知し、剥離等の有無を判定する。

そこで、加熱時間やその方法、熱伝達時間と検出可能な剥離深さについて、熱伝導解析による理論的考察、およびコンクリート模型を用いた検証実験を実施して、加熱式遅延計測による熱赤外線画像法の検討を行なった。以下、これらの結果を報告するとともに、道路トンネルでの実用性についても、提案を行なうものである。

2. 非定常熱伝導解析による理論的考察

コンクリート表面の加熱は一定時間行い、その後自然冷却するため、非定常熱伝導問題として扱う。

2.1 解析モデル

在来工法のトンネルを対象とし、熱収支は一樣に行われるものとして、図-2に示す一次元モデルに単純化した。覆工厚は一般的な巻厚 ($L_1=45\text{cm}$) とし、地山は土被り 10m 以上での年振幅が $\pm 2^\circ\text{C}$ 以下とな

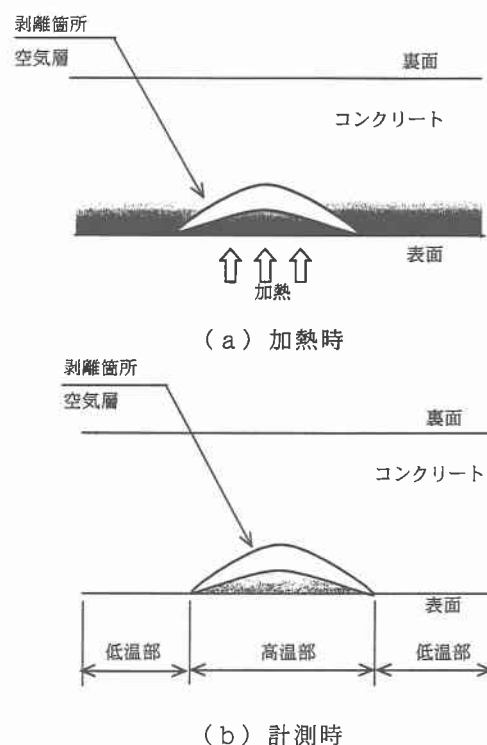


図-1 加熱式熱赤外線映像法によるコンクリートの剥離検出原理

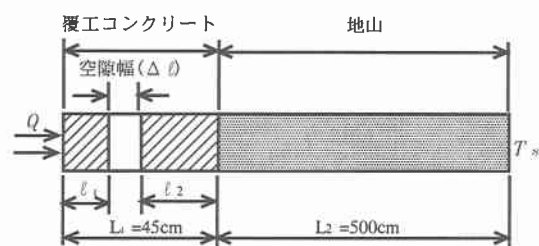


図-2 解析モデル

る 5m の深度までを対象とした²⁾。剥離は空隙（空気層）とし、背面空洞はないものとした。

2.2 解析条件

熱に関する入力物性値は、表-1に示すとおりで、初期温度は 7°C ($=T_s$: 地山温度) とする。

(1) 輻射熱の代替入力

次章で後述するが、室内検証実験での加熱は、道路トンネル等での計測を考慮し、熱出力が約 $32,000\text{kcal/h}$ の灯油式遠赤外線ヒーターを 4 台用いる。主に輻射熱による加熱と考え、コンクリート表

面に入射するエネルギー量を壁面に触れる空気温度に換算する。空気温度に換算された輻射エネルギー量を「相当外気温度」という。一般には、日射を受ける外壁面への熱収支の計算に用いる手法であり³⁾、次式で与えられる。

$$\theta_{solair} = \theta_a + R_{so} (\alpha_{sun} \cdot J_{sun} + \alpha \cdot J_{nit})$$

ここで、 θ_{solair} ：相当外気温度（℃）。 θ_a ：実際の空気温度（7℃とする）。 R_{so} ：表面熱伝達抵抗（加熱による上昇気流 6m/s 程度を考慮し、0.033 m²h deg / kcal）。 α_{sun} ：輻射吸収率（0.9 : コンクリート）。 J_{sun} ：輻射入射量（3000kcal / m²h）。熱効率を 0.5 と仮定し、輻射熱の有効放射角度を水平方向、鉛直方向とも 90° とすると、ヒーターから 2 m 離れた 1 m² の壁面が受ける輻射熱は、次のように求められる。

$32000 \times 0.5 \times 4 \times 1 / (2 \pi \times 2^2) \div 3000$ (kcal / m²h)

α ：夜間放射率（0.9 : コンクリート）。 J_{nit} ：夜間放射量（0 kcal / m²h とする）。以上を上式に代入する。

$$\theta_{solair} = 7 + 0.033 \times 0.9 \times 3000 \div 100 \text{ (℃)}$$

したがって、ヒーターの照射は 100℃ の空気がコンクリートに接するものとし、両者の熱伝達係数は、11 kcal / m²・h・℃ とする。

(2) 解析ケース（表-2 参照）

空隙幅（ Δl ）の影響を確認するため、加熱条件を 100℃ - 15 分、剥離深度（ l_1 ）を 5cm と固定し、 Δl は 0.0、0.3、0.5、1.0cm と変化させ、case1 ~ 4 を実施した。

また、剥離深度（ l_1 ）の影響を確認するため、空隙幅（ Δl ）を 0.5cm に固定し、0、1、2、5、10、20cm と変化させ、case3、5 ~ 8 を実施した。この際、加熱条件は、高温・短時間のケース（100℃ - 15 分）、および低温・長時間のケース（50℃ - 60 分）の 2 とおりを組み合わせた。

2.3 解析結果

(1) 空隙幅（ Δl ）の影響

空隙幅の違いによるコンクリート表面温度の時刻暦を図-3に示す（case1~4）。空隙のある場合のコンクリート表面温度は、空隙のない場合（健全部）に比べ、加熱終了後から約1時間後に、最大2℃程度高くなっている。幅については、最大 0.5℃程度しか変化が現れず、本解析においては顕著な差が生じなかった。

(2) 剥離深度（ l_1 ）の影響

剥離深度の違いによるコンクリート表面温度の時刻暦を図-4に示す（case1、3、5~8、加熱条件は 100℃、15 分）。剥離深度 1cm、2cm の場合には、加熱時点で健全部より約 5 ~ 17℃ 高くなり、顕著な差が見られる。深度 5cm では、加熱終了後15分まではあまり差がないが、それ以降3時間後くらいまで健全部より2℃以上高温となっている。深度 10cm では約 2 時間後に 0.5℃程度の温度差がついたが、深度 20cm で

表-1 熱に関する入力物性値

	地山	コンクリート	空気
熱伝導率(kcal/m・h・℃)	1.000	1.300	0.023
密度(kg/m ³)	2000	2300	13
比熱(kcal/kg・℃)	0.25	0.22	0.24

表-2 解析ケース

case	加熱(℃)	時間(min)	Δl (cm)	l_1 (cm)	l_2 (cm)
1	100	15	0.0	0.0	45.0
2	100	15	0.3	5.0	39.7
3	100/50	15/60	0.5	5.0	39.5
4	100	15	1.0	5.0	39.0
5	100/50	15/60	0.5	1.0	43.5
6	100/50	15/60	0.5	2.0	42.5
7	100/50	15/60	0.5	10.0	34.5
8	100/50	15/60	0.5	20.0	24.5

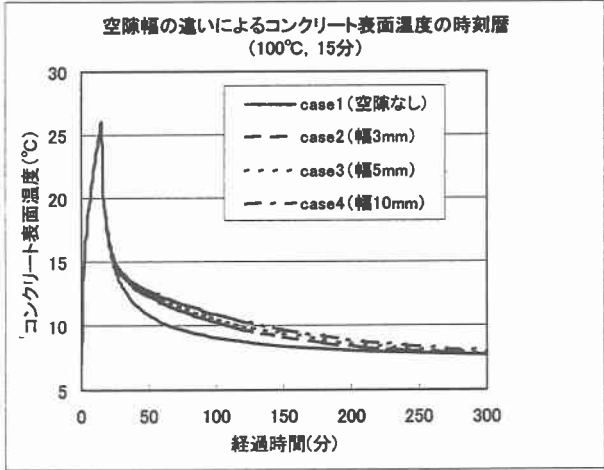


図-3 空隙幅の違いによるコンクリート表面温度の時刻暦（100℃，15分）

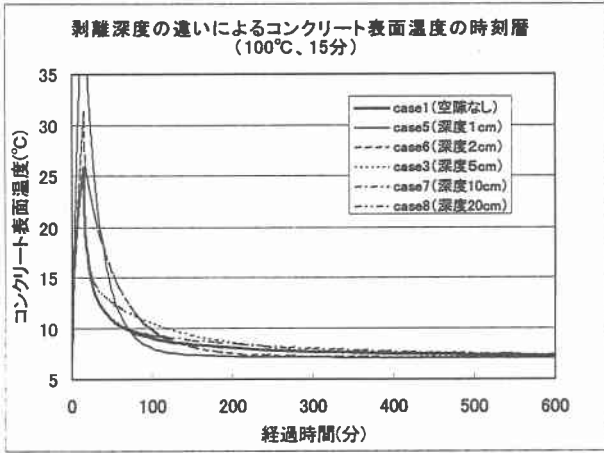


図-4 剥離深度の違いによるコンクリート表面温度の時刻暦（100℃，15分）

はほとんど変化がなかった。

低温・長時間のケース（50℃ - 60 分）では、加熱終了後 1 時間後に健全部より約 1℃ 高い温度を記録した。この場合でも、深度 20cm ではほとんど変化がなかった。

(3) まとめ

以上の解析結果をまとめると、加熱式熱赤外線法

の性能として次のことがいえよう。

コンクリートの剥離があれば、その空隙幅にあまり関係がなく、短時間の加熱・計測（30 分以内）で深度 5cm までの剥離を検出することが可能で、長時間の加熱・計測（120 分以上）で深度 10cm 程度までの検出が可能と考えられる。

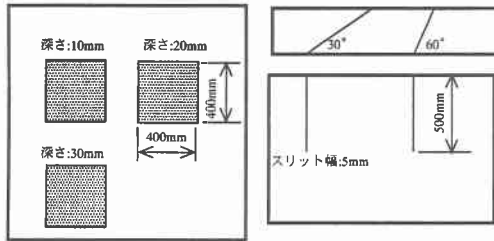
3. 室内検証実験

解析で得られた結果を検証するために、剥離やコールドジョイントを模擬したコンクリート模型を用いて、次のような室内実験を行なった。

3.1 供試体

図－5 に示すように、剥離モデル（a）とスリットモデル（b）の 2 種類を実験に供した。ともに在来トンネルの覆工コンクリートの一部と考え、標準的な配合（18－8－40）で厚さ 45cm に仕上げた。

剥離モデル（a）は、2,000 × 2,000 × 450 の大きさで、打設時に厚さ 5mm の発泡スチロール板（400 × 400）を埋設し、剥離層の代替とした。このモデ



(a) 剥離モデル (正面図) (b) スリットモデル (上：平面図、下：正面図)

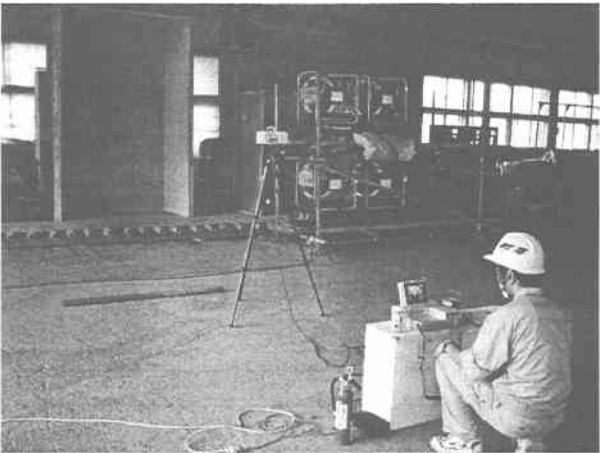
図－5 室内検証実験の供試体

ルは 2 個作成し、それぞれの剥離深さを 10、20、30mm と、50、100、200mm とした。

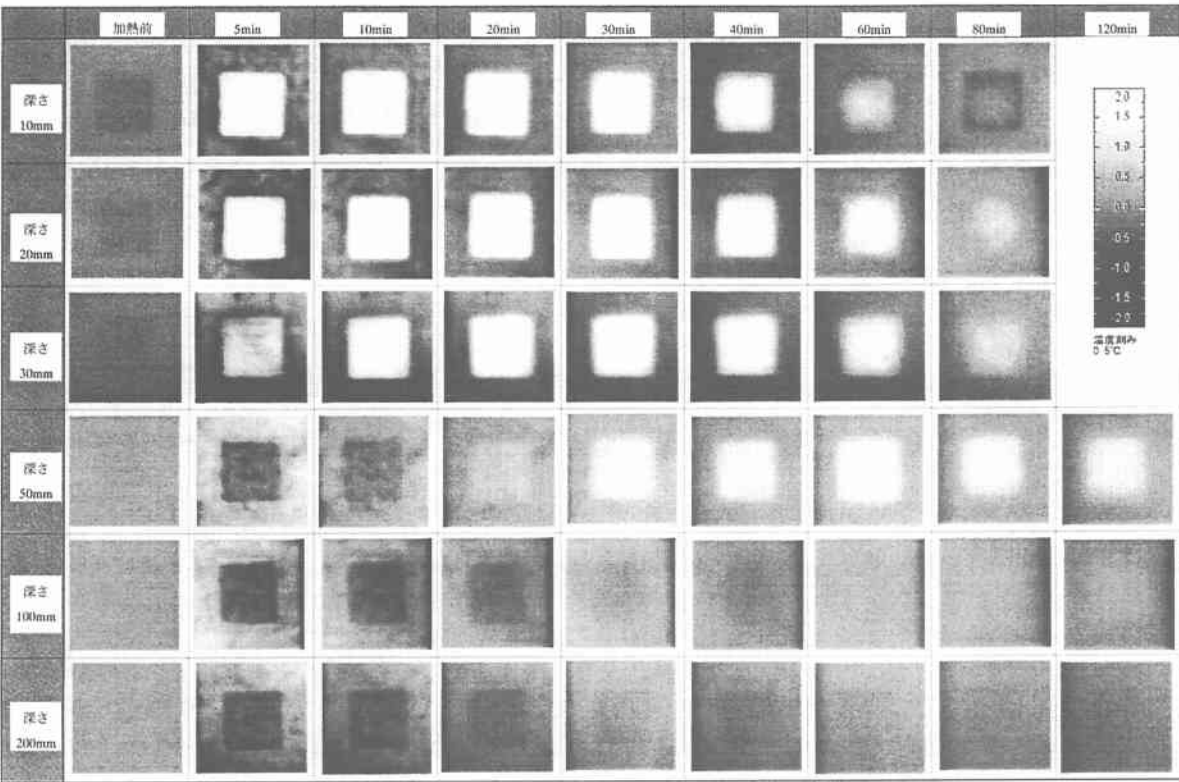
スリットモデル（b）は、2,000 × 1,000 × 450 の大きさで、表面に 30 ° および 60 ° の角度をなすスリット（幅 5mm）を打設時に作成した。

3.2 実験方法

実験は実用性を考慮し、供試体とヒーターの距離を 2m、熱出力が約 32,000kcal / h の灯油式遠赤外線ヒーター 4 台を配置し加熱した。図－6 に示すようにに配置し、10 分及び 60 分加熱した。加熱終了後ヒーターは設置台ごとスライド移動し、赤外線カメラを供試体正面に据え付け計測を行った。また、計測に使用した赤外線カメラは、測定温度範囲は-20 ～ 80 °C、最小検知温度差は 0.15 °C である。



図－6 計測状況



図－7 剥離深度によるコンクリート表面温度分布の経時変化（加熱時間 10 分）

3.3 実験結果

剥離モデル（加熱時間 10 分）の実験結果をまとめて図－ 7 に示す。この図は、剥離深度ごとの温度状況の経時変化をモノトーンの濃淡として表示しており、白色が高温で黒色ほど低温となっている。剥離深度 10mm では、加熱終了後 1 分経過すると周辺の健全部より 2℃以上高くなる。深度 20mm では 3 分後に 1℃以上の温度差が生じる。深度 30mm では 5 分後に健全部より約 1℃高温となる。剥離部の深度が 50mm になると、30 分経過してようやく 0.5℃以上の温度差が生じ明瞭化する。100mm 以上は、120 分経っても健全部と変わらなかった。なお、60 分加熱した場合には、深度 100mm でも加熱終了後 90 分経つと、1℃程度の温度差が見られた。深度 200mm では、この場合でも変化は見られなかった。

スリットモデル（30°）15 分加熱の場合の温度分布経時変化を図－ 8 に示す。鋭角的にスリットが入る側にピークがあり、時間経過とともに温度が下がるが、その位置はコンクリート厚の薄い方から厚い方へと移行していくのがわかる。

3.4 まとめ

前節の解析結果と同様に、短時間の加熱（10 分）・計測（30 分以内）で深度 5cm までの剥離を検出することが可能で、長時間の加熱（60 分）・計測（120 分以上）で深度 10cm 程度までの検出が可能なが検証された。また、斜めに入ったクラックでは、表面からのコンクリート厚により、それぞれの計測時間で差異が出る。つまり、5 分以内であれば深度

3cm 以下、30 分程度で 5cm 程度と判別が可能である。

4. 現場への応用について

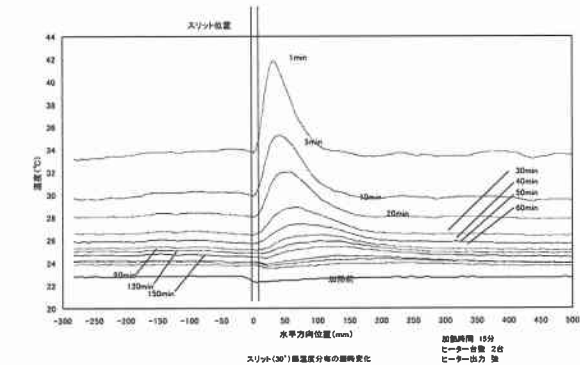
最後に、トンネル覆工コンクリートの剥離等検出の可能性について言及する。本方法は、加熱・計測に多大な時間を要するため、図－ 9、10 に示すような逐時加熱・計測方法を提案する。これは、加熱車両により 10－15 分程度の一様加熱後、後方の赤外線カメラを逐次移動させ、各箇所ごとに 15、30、60 分後の 3 回計測する。これにより、15 分後で 3cm 以下の剥離を、30 分に 5cm 程度の剥離が検出可能であろう。本方法で連続計測が可能で、5 時間加熱すれば、片側 200m の検査ができ、詳細な打音検査に匹敵する。

5. あとがき

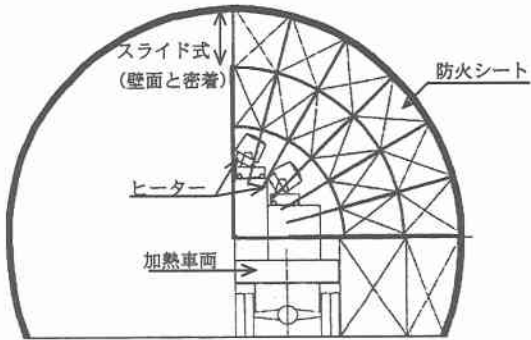
この加熱式遅延計測方法は、理論的にも室内検証実験でもその妥当性が確認されたといえよう。今後、現場への適用についても検討を進め、打音点検に替わる剥離検出の一手法として研究を深めたい。

参考文献

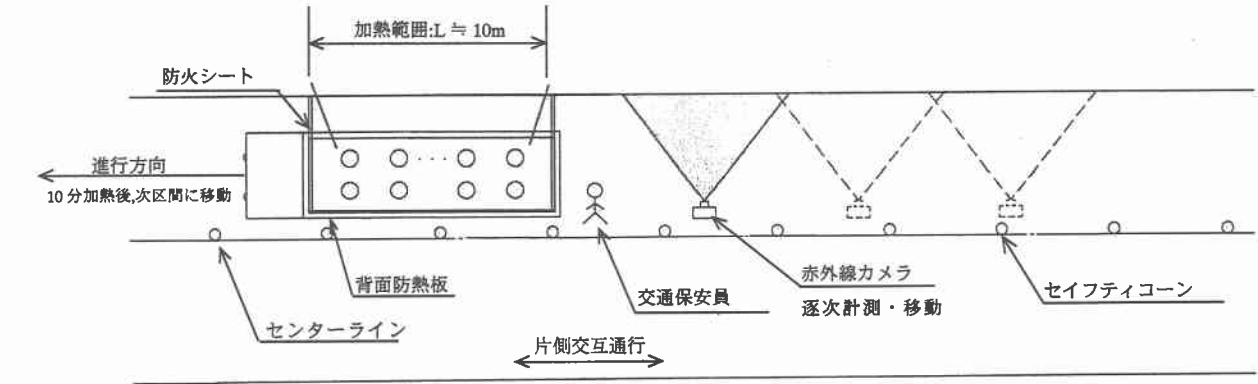
1)建設省土木研究所：熱赤外線映像法による吹付のり面老朽化診断マニュアル,pp.13-16,1996.
2)岡田勝也：鉄道トンネルにおける断熱処理によるつらら防止工法に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1324(施設編第 579 号),pp.61,87,1986.
3)齊藤平蔵：建築気候,共立出版,1974.



図－ 8 スリット（30°）付近の表面温度分布の経時変化



図－ 9 加熱車両（案）の断面図



図－ 10 トンネル内での加熱・計測方法（案）模式図（平面図）