

熱赤外線映像法を用いた健全度評価に及ぼす外的影響について
—トンネル覆工コンクリートを対象とした解析および実験的検討—

The influence of environment inside tunnel on thermography judgement for soundness
— Tunnel lining model studies by experiment and numerical analysis —

(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	吉田 力 (Chikara Yoshida)
独立行政法人北海道開発土木研究所	正会員	皆川 昌樹 (Masaki Minakawa)
独立行政法人北海道開発土木研究所	正会員	畑山 朗 (Akira Hatakeyama)
独立行政法人北海道開発土木研究所	正会員	渡邊 一悟 (Kazunori Watanabe)
独立行政法人北海道開発土木研究所	正会員	池田 憲二 (Kenji Ikeda)

1. まえがき

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。覆工コンクリートを対象とすると、坑内は温度変化が乏しいので、人為的に加熱して強制的に温度差を生じさせるのが望ましい。

上記に関しては既に理論的考察と模型実験を行い、十分な加熱と遅延式の計測を施すことで、深度10cm内の剥離検出が可能であることを確認している¹⁾。また範囲を限定した逐次加熱と遅延計測を組み合わせ、現場での健全度評価に応用が可能なことも実証している²⁾。しかしながら、現場計測では、壁面の汚れ・湧水、坑内風により、計測不能な箇所や不安定な結果しか得られないなどの問題が残った。

そこで、壁面状況や坑内環境が計測の結果に与える影響について、熱伝導解析による理論的考察、および覆工コンクリート模型を用いた室内実験を行い検討を加えた。以下、これらの結果を報告するとともに、熱赤外線映像法による健全度評価の性能と限界について言及するものである。

2. 剥離範囲と深度の影響

筆者らが行った室内実験で¹⁾、剥離部が浅層にある場合（深度20mm以下）には加熱終了後数分内に健全部より高温として捉えられ、深層（深度30～50mm）の場合には15～30分程度遅れて検出された。

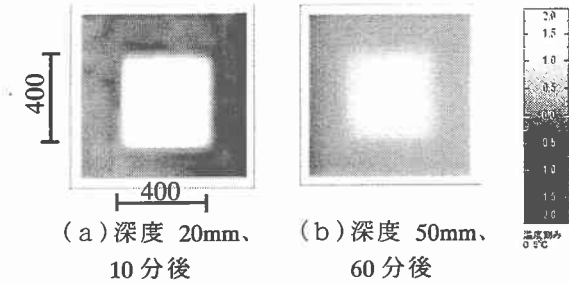


図-1 剥離深度と表面温度（健全部との温度差）
（室内検証実験結果、文献1）より抜粋）

この際、図-1に示すように、浅層のものは剥離部と健全部の境界が明瞭であるが、深層のものではかなり不明瞭となっていた。この境界をうまく検出できるのかどうか、剥離幅と深度について2次元非定常熱伝導解析を行って検討してみた。

2.1 解析モデルおよび解析条件

在来工法のトンネルを対象とした二次元（線対称）モデルとし、熱収支は一樣に比較的短時間で行われ、地山には及ばないものとして、覆工コンクリート（巻厚 $L = 0.45\text{ m}$ ）のみとした（図-2参照）。剥離は空隙（5mm厚）とし、背面は空洞が無く温度は一定（ 7°C ）とした。剥離深度（ D ）は10、20、30、50、100mm、剥離範囲（ W ）は25、50、100、200mmと、それぞれ変化させた。

熱に関する入力物性値を表-1に示す。加熱は、既述の室内検証実験を考慮し、熱出力が約37.2kWの灯油式遠赤外線ヒータを4台用いた場合の輻射熱を、コンクリート表面に接触する空気温度（ 100°C ）に換算した。加熱時間は10分、コンクリートと空氣の熱伝達係数は、 $12.8\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした。

表-1 熱に関する入力物性値

	コンクリート	空気
熱伝導率 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	1.512	0.027
密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	2300	1.3
比熱 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	0.256	0.279

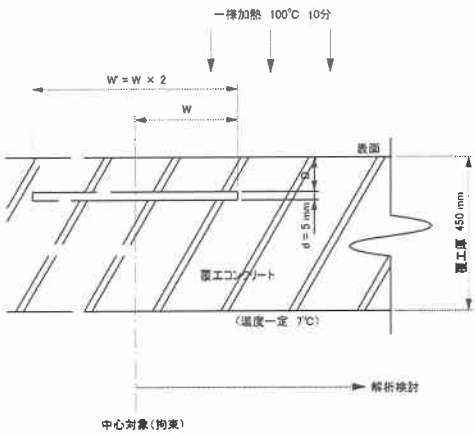
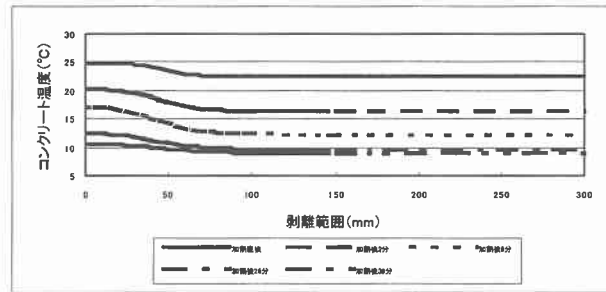


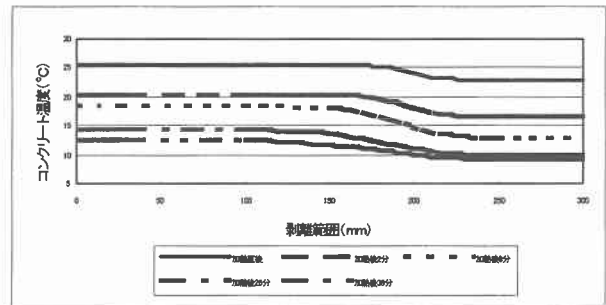
図-2 解析モデル

2.2 解析結果

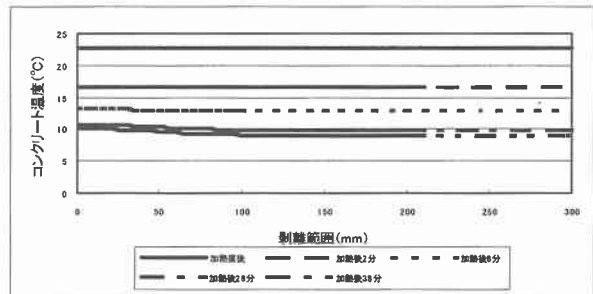
剥離深度 (D) が 20mm あるいは 50mm、剥離範囲 (W) がそれぞれ 50mm と 200mm のケースで、コンクリート表面温度分布の経時変化 (加熱直後、2、8、26、38 分後) を図- 3 に示す。コンクリート表面は時間とともに冷却するが、剥離深度の浅い 20mm のもの (図中 a、b) は、健全部より 2 ～ 5℃ 高く、剥離範囲の端部も明瞭である。これに対し、剥離深度の深い 50mm のもの (図中 c、d) は、約 30 分経過した後に 1 ～ 2℃ 高温部として捉えられるが、その端部は不明瞭となっている。



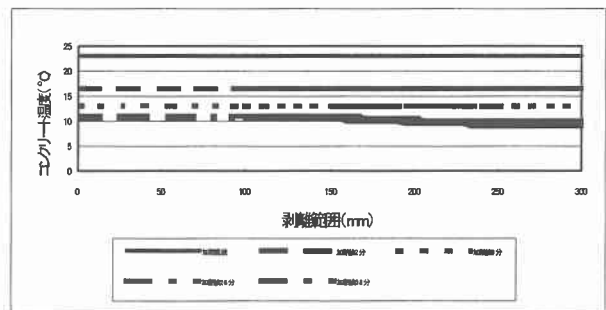
(a) D=20, W=50mm



(b) D=20, W=200mm



(c) D=50, W=50mm

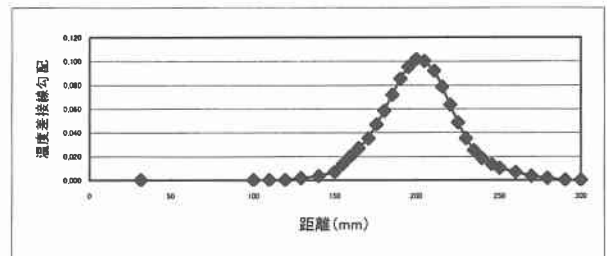


(d) D=50, W=200mm

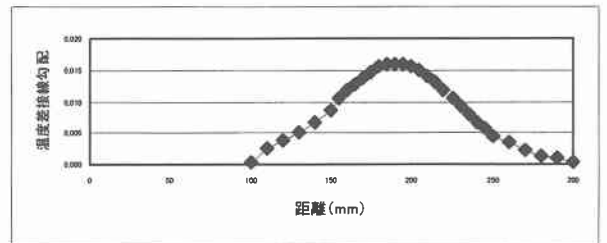
図- 3 コンクリート表面温度分布の経時変化 (加熱直後、2、8、26、38 分後)

剥離範囲が狭いと、高温部の温度低下が著しく、健全部との温度差がやや小さくなる。剥離深度 20mm では最大 2℃ 程度、50mm で約 1℃ 低くなっている。これは剥離範囲が狭いほど、検出が困難であることを示唆している。

剥離範囲の端部では、深度が深くなるほど温度勾配が小さくなる。図- 4 は図- 3(b、d)をそれぞれ微分し接線勾配を表したグラフである。剥離範囲 (W=200mm) は、変曲点の位置とほぼ一致している。したがって、剥離範囲が明瞭に捉えられなくても、推定が可能だと考えられる。

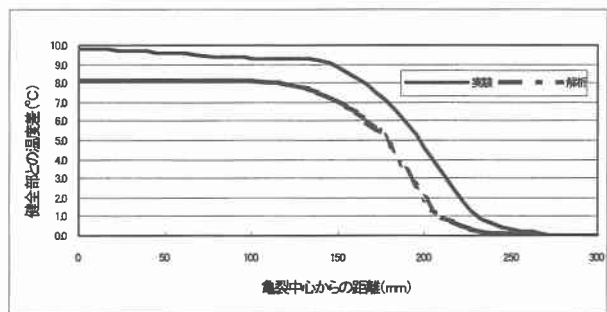


(a) D=20mm (8 分後)

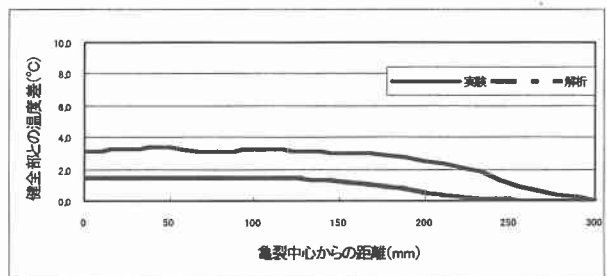


(b) D=50mm (50 分後)

図- 4 剥離端部周辺の温度勾配分布



(a) D=10mm (15 分後)



(b) D=50mm (30 分後)

図- 5 剥離箇所付近の温度変化 (解析と実験結果)

2.3 室内検証実験との比較

文献 1) で実施した室内検証実験で得られたコンクリート表面の温度分布と上記の解析結果を比較してみる。図-5 は、剥離深度 10mm (加熱終了 15 分後) と 50mm (同 30 分後) の場合について、実験と解析結果それぞれの剥離箇所端部の温度変化 (健全部との温度差で表示) を示している。実験と解析で、1 ~ 2℃ の温度の相違はあるものの、傾向的にほぼ一致しており、変曲点の位置から剥離範囲を推定できることが裏付けられた。

3. コンクリート表面の汚れの影響

竣工後数十年経過した既設トンネルの覆工コンクリート壁面は、湧水で生成した遊離石灰や、排ガスにより付着したカーボン等で、汚れているのが一般的である。これらは当該計測にどのような影響を及ぼすか検討してみる。

遊離石灰については現場計測でもあまり大きな影響は与えなかった (図-6)。これはあくまで表面に水がない場合のみであるが、色や基本的材質がコンクリートに近いためではないかと考えられる。

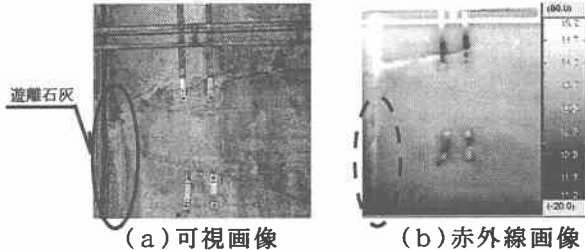


図-6 遊離石灰の状況 (左下部)²⁾

カーボン付着については、適当な現場計測ができなかったので、覆工コンクリートの局部模型を用いた室内実験を行い検討を加えた。

3.1 供試体および実験方法

供試体は在来トンネルの覆工コンクリートの一部と考え、2,000×2,000×450mmの大きさとした。使用コンクリートは、通常のトンネル覆工に用いられる配合とし、1年以上の養生期間を置いている。打設時に厚さ 5mm の発泡スチロール板 (400×400mm) を埋設し、剥離部位の代替とした。供試体の平面図は図-7 に示す。供試体は 2 個作成し、図に示すように、それぞれ剥離部位を 3 箇所ずつ設け、各剥離深さを 10、20、30mm と 50、100、200mm とした。表面の汚れについては、供試体中央部 (図中斜線部) をカーボン入りのスプレー式黒色塗料を均等に重ね塗りすることで模擬した。

供試体表面の加熱は、4 台の灯油式遠赤外線ヒータ (熱出力 37.2kW) を用いて行う。これらのヒータは、台車付きの設置台上に据え置き、供試体から 2m 離して、10 分間加熱する。加熱終了後ヒータは設置台ごとスライド移動し、赤外線カメラ (測定温度範囲: -20~80℃、最小検知温度差: 0.15℃) を供試体正面に据え付け、コンクリート表面温度計測を行った。赤外線画像データは、適当な時間間隔で記録した。

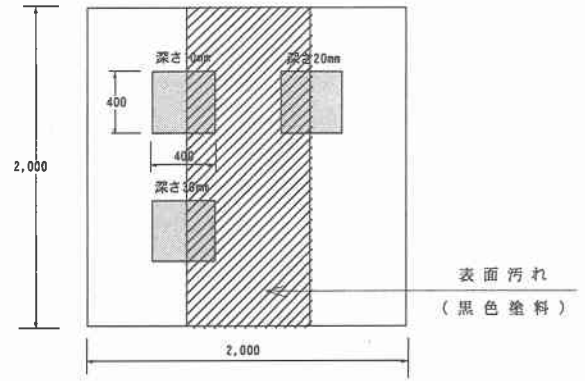


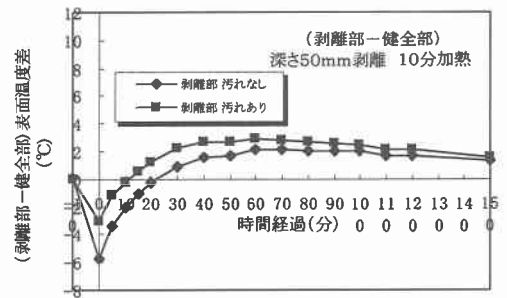
図-7 供試体

3.2 実験結果

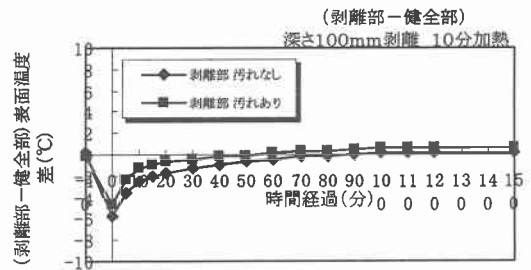
剥離深度 50mm および 100mm の場合のコンクリート表面温度の時刻歴を図-8 に示す。図には、剥離部の汚れのある箇所、ない箇所と健全部 (汚れあり) のデータを示している。

傾向的には文献 1) で得た結果とほぼ同様に、浅層剥離部は加熱終了後数分内に高温部として捉えられ、深層のものはさらに十数分遅れて検出された。剥離深度 200mm は検出不能であった。

汚れのある箇所は、そうでない箇所に比べ温度が高くなっており、この傾向は浅層に剥離部が存在する箇所ほど顕著で最大 10℃ 程度高温となっている。このため、剥離箇所の検出時間が短くなっている。剥離深度 50mm の場合、汚れのない箇所では 30 分以上経過しないと健全部と 0.5℃ 以上の温度差がつかないのに対し、汚れがあれば 15 分程度で見分けがつく。剥離深度 100mm の場合、短時間の加熱では検出が困難であったのにもかかわらず、汚れがあれば 90 分程度で 0.5℃ 以上の温度差が得られた。



(a) 剥離深度 50mm



(b) 剥離深度 100mm

図-8 コンクリート表面温度の時刻歴

3.3 汚れの影響

以上のことから、コンクリート表面が黒色に汚れている場合、元来の灰白色に比べ熱吸収率が高いため、輻射熱を効率よく吸収しているものと考えられる。結果的に、数値的に大小はあるものの、傾向的に同様で、汚れの影響は比較的小さいといえる。一方、汚れとコンクリートとの間に空気層が生じているケースには、異常な高温部として捉えられる危険性はあるが、極めて表層部に限られるので、時刻歴の変化を見ればコンクリートの剥離部とは見分けがつくものと考えられる。

4. 水の影響

一般にトンネル内は多湿で（湿度 80 ～ 100 %）、湧水箇所やコンクリート表面に滲水のある箇所は多数見られる。自然状態の赤外線画像からは、こうした箇所は健全な部位より約 1℃低温区域として捉えられる。また、覆工背面に滞水がある場合でも同様の結果が得られることも確認している。

本章ではコンクリートの含水率の違いで、測定結果にどのような影響を及ぼすのかを解析により検討する。解析は、2 章で用いた手法を一次元化して各剥離深度ごとにコンクリート表面温度の時刻歴を調べてみた。

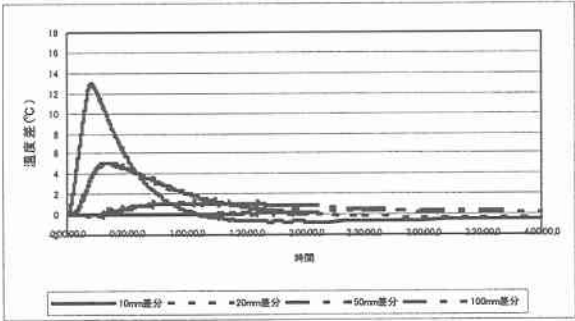
コンクリートの含水率と熱伝導率の関係は表－2 に示すとおりである。含水率が多くなるほど、熱伝導率が大きくなるので、加熱すると、より高温となる。図－9 は、各剥離深度における、乾燥状態および含水率 0.06 のコンクリート表面温度（健全部との温度差）時刻歴を示している。全体的な傾向は変わらないが、剥離深度 10、20mm ではピーク時に 2 ～ 3℃高くなっている。また、剥離深度 50mm では、ピークを迎える時間が乾燥状態より約 60 分は早く（加熱終了後 30 分）、温度差も 2℃もある。さらに剥離深度 100mm の場合でも、温度差が 0.5℃以上生じ、明確に識別が可能になっている。

ただし、本解析では加熱時における水の気化熱を考慮していない。現実には、解析どおりに表面温度が上昇するとは考えにくい。また、コンクリート表面を完全に水が覆っている場合には、温度変化がほとんどないので、本方法での剥離検出は不可能と考えられる。

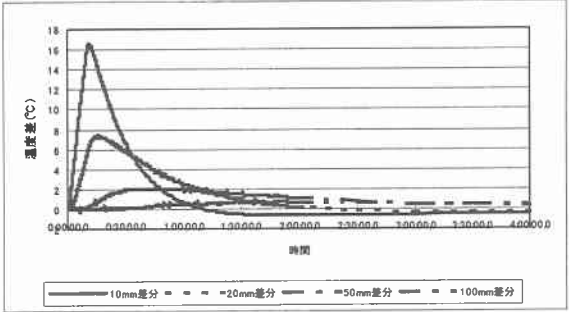
以上から、コンクリートが湿った程度であれば、本方法で剥離の検出は可能である。

表－2 コンクリートの含水率と熱伝導率

含水率 kg/kg	熱伝導率(λ) W/(m・K)
0	1.35
0.01	2.20
0.02	2.61
0.03	2.86
0.04	3.04
0.05	3.15
0.06	3.23



(a)含水率 0 λ = 1.35 (乾燥)



(b)含水率 0.06 λ = 3.23W/(m・K)

図－9 各剥離深度における表面温度時刻歴

5. あとがき

熱赤外線映像法と遅延式計測を用いて、コンクリート健全度評価を行う手法に関し、理論的考察や室内検証実験を加え、トンネル覆工コンクリートの表面状態による影響を検討し、本方法の計測性能について幾つかの知見を得た。剥離箇所の検出に当たっては、コンクリートの多少の汚れや含水はあまり気にしないで良いと考えられる。ただ、状況によっては、全く使えないケースもあり得ることを確認した。また坑内風の影響については、実測で± 0.5 ～ 1℃ばらつくが、平均化計測によって解消できる。今後は、現場計測例を増やし、効率的な計測機器の改良を進めていきたい。

参考文献

- 1) 池田、畑山、渡邊、藤野戸、杉浦、原：「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」土木学会北海道支部論文報告集 第58号、V-25、pp.840-843、2002.
- 2) 渡邊、池田、原、杉浦：「熱赤外線映像法による覆工コンクリート健全度評価について（その2）－併用中のトンネルでの実測事例－」土木学会第57回年次学術講演会講演概要集、V-208、pp.415-416、2002.
- 3) M. Kumar KUMARAN：MATERIAL PROPERTIES、IEA ANNEX 24 HAMTIE、Final Report、vol.3 pp.15、1996.