

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 -

(独)北海道開発土木研究所 正会員 佐藤 睦治
 (独)北海道開発土木研究所 正会員 皆川 昌樹
 (株)ダイヤコンサルタント 正会員 杉浦 高広
 (株)ダイヤコンサルタント 正会員 吉田 力

1. はじめに

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。トンネルの覆工コンクリートを対象とする場合、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必要がある(図-1)。

筆者らは既に理論的考察と模型実験により、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ることも実証しているが²⁾、壁面の汚れ、湧水等により、計測不能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、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検討した。

2. 二次元非定常熱伝導解析

文献1)で実施した室内検証実験では、剥離部が浅層にある場合は、剥離部と健全部の表面温度の境界が明瞭であったが、深層のものでは不明瞭であったので、この境界を精度良く検出可能かどうかを、剥離幅と深度の関連について二次元非定常熱伝導解析により検討した。解析モデルは、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、熱収支は一様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0.45m)のみとした。剥離は空隙(5mm厚)とし、背面は空洞が無く温度は一定(7℃)とした。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℃)に換算した(図-2、表-1、2)。

その結果、剥離深度 20mm(図-3a, b)では剥離部の温度は健全部より 2~5℃ 高く、剥離範囲の端部も明瞭であるのに対し、50mm(図-3c, d)では約 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。また、剥離範囲が狭いと高温部の温度低下が著しく、20mm では最大 2℃ 程度、50mm で約 1℃、健全部との温度差が小さくなっており、剥離範囲が狭いほど検出が困難であることを示している。

剥離範囲の端部では、深度が深くなるほど剥離部と健全部の表面温度

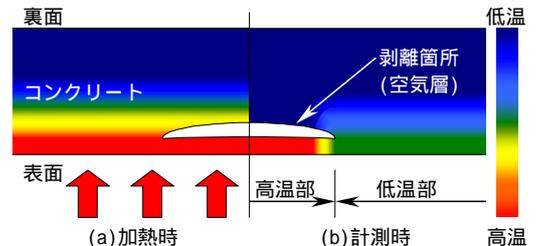


図-1 熱赤外線映像法による剥離検出原理

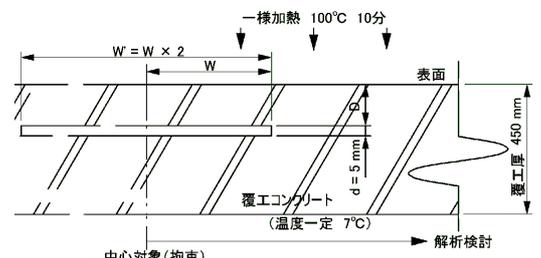


図-2 解析モデル

表-1 計算ケース(二次元モデル)

剥離範囲 (mm)	剥離深度 D(mm)						
	W	W'	10	20	30	50	100
25	50						
50	100						
100	200						
200	400						

コンクリート - 空気熱伝達率: 12.8W/(m²·K)
 加熱温度: 100℃, 加熱時間: 10分

表-2 熱に関する入力物性値

	コンクリート	空気
熱伝導率 [W/(m·K)]	1.512	0.027
密度 [kg/m ³]	2,300	1.3
比熱 [J/(kg·K)]	0.256	0.279

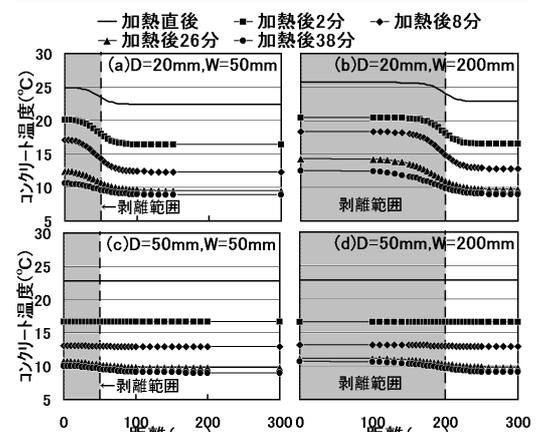


図-3 コンクリート表面温度分布の経時変化

キーワード: トンネル点検, コンクリート探傷法, 熱赤外線映像法, サーモグラフィ, 非破壊検査

連絡先: 〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目 北海道開発土木研究所, TEL(011)-841-1698, FAX(011)-820-2714

差の勾配が小さくなり、判定が困難となるが、図-3(b, d)の温度差勾配を微分し接線勾配をグラフ(図-4)に表すと、接線勾配の変曲点位置と剥離範囲がほぼ一致していることが分かる。また、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たところ(図-5)、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いることから、剥離部と健全部の表面温度の境界が明瞭に捉えられなくても、剥離範囲の推定が可能だと考えられる。

3. コンクリート表面の汚れおよび水の影響

既設トンネルの覆工コンクリート表面は、排ガスにより付着したカーボン等で汚れており、これらが当該計測に及ぼす影響を、覆工コンクリートを模した供試体を用いた室内実験により検討した(図-6)。加熱は4台の灯油式遠赤外線ヒータ(37.2kW)を供試体から2m離して10分間加熱し、加熱終了後、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。

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。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、剥離箇所の検出時間が短くなっている(図-7)。以上から、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、コンクリート表面の汚れによる当該計測への影響は比較的小さいといえる。

また、コンクリートは含水率が大きくなると熱伝導率が大きくなり(表-3)、加熱するとより高温となるため、覆工コンクリート表面の含水率の違いが測定結果に及ぼす影響を解析により検討した。解析は2.で用いた手法を一次元化して、各剥離深度におけるコンクリート表面温度(剥離部と健全部との温度差)の時刻歴を調べた(図-8)。その結果、乾燥状態および含水率0.06の場合で全体的な傾向は変わらないが、剥離深度10~20mmではピーク時温度が2~3℃高くなっているあり、50mmではピークを迎える時間が乾燥状態より早く温度差も約2℃あり、100mmでも温度差が0.5℃以上生じ、明確に識別可能となっている。以上から、コンクリート表面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と考えられるが、コンクリート表面を完全に水が覆っている場合は、温度変化がほとんど無いため、本方法での剥離検出は不可能と考えられる。

4. まとめ

本検討により得られた知見は、1) 剥離深度が深く健全部との表面温度の境界が明瞭に捉えられなくても、剥離範囲の推定が可能だと考えられる、2) コンクリート表面の汚れや含水が計測結果に与える影響は小さいと考えられる。今後は効率的な加熱計測手法の検討を行う予定である。
[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，pp.840-843，2002.1
- 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，pp.415-416，2002.9
- 3) M. Kumar KUMARAN：MATERIAL PROPERTIES，IEA ANNEX 24 HAMTIE，Final Report，vol.3，pp.15，1996.

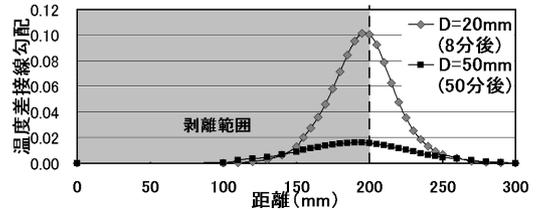


図-4 剥離端部周辺の温度分布勾配

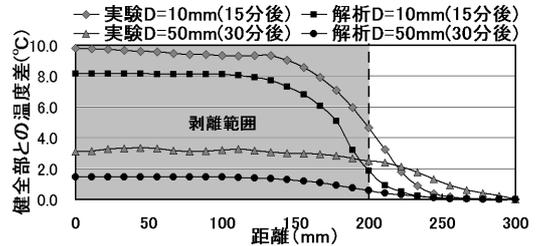


図-5 剥離箇所付近の温度変化(解析と実験)

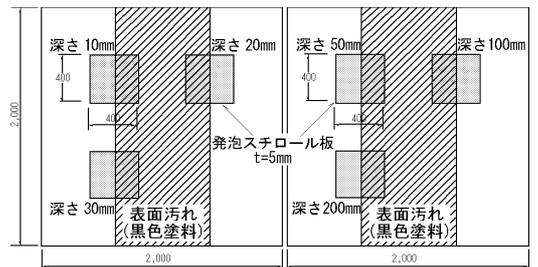


図-6 供試体(単位：mm)

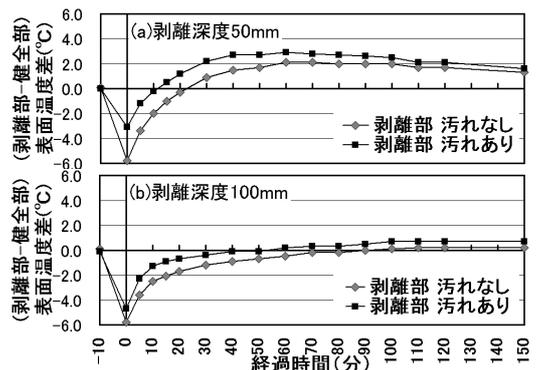


図-7 コンクリート表面温度の時刻歴

表-3 コンクリートの含水率と熱伝導率³⁾

含水率	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
熱伝導率	1.35	2.20	2.61	2.86	3.04	3.15	3.23

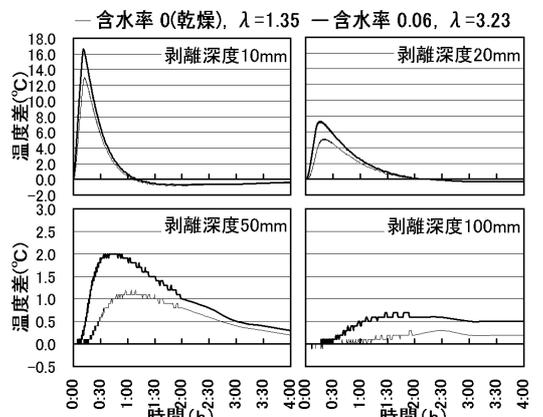


図-8 各剥離深度における表面温度時刻歴