

報告 遠隔加熱によるアクティブ赤外線法を用いたコンクリート高架橋の検査

鎌田 卓司*1・鳥取 誠一*2・中村圭二郎*3・栗田 耕一*4

要旨: コンクリート高架橋のように背の高い構造物に適用可能なアクティブ赤外線法を開発するために、照射設備の検討、模擬空隙を有する供試体による室内試験および現地試験を行った。照射設備については、遠隔距離においても高い照射エネルギーを確保する観点から、集光性の高いキセノンアークランプを用いるのが有利と考えられた。このランプを用いた室内および現地試験の結果、一定の変状検出性能が得られることが確認された。

キーワード: 非破壊検査, アクティブ赤外線法, 高架橋, 照射光源

1. はじめに

コンクリート内に生じている温度差を把握することにより、浮き、はく離等の変状を検出する赤外線サーモグラフィ法は、効率的な検査が可能なことから近年、注目を集めている。

コンクリートに温度差を生じさせる方法には、太陽光等の気象条件を利用する方法（以下、パッシブ赤外線法という）と、コンクリート表面をランプ照射等により強制加熱する方法（以下、アクティブ赤外線法という）がある。パッシブ赤外線法では、照射設備が不要であるため測定が容易である反面、気象条件によっては変状検知に必要な温度差が生ぜず、測定が不能となる場合がある。このような背景から、近年、パッシブ赤外線法の適用可能な気象条件を把握しようとする研究が行われている¹⁾。

一方、アクティブ赤外線法はパッシブ赤外線法とは逆に照射設備を必要とするが、照射によってコンクリートの温度差が拡大されるため、測定を確実にできる利点がある。このアクティブ赤外線法に関しては、トンネル覆工を対象としたハロゲンランプ照射による方法が帝都高速交通営団において実用化されている²⁾。このトンネル覆工を対象としたアクティブ赤外線法

は、検査車両がトンネル内の軌道を走行しながら測定が行われるため、照射設備をトンネル覆工に近接させることが容易であり、これにより変状検知に必要なコンクリートの温度差を確保することができる。

しかしながら、高架橋のように背の高い構造物に対しては、照射設備を検査面に近接させることが容易でなく、トンネル覆工の検査方法をそのまま高架橋に適用するのは困難である。

そこで、筆者らは地上等からの遠隔照射によっても、所要のコンクリートの温度差が確保できるアクティブ赤外線法を開発することを目標に、照射設備の検討、模擬空隙を有する供試体による室内試験および鉄道高架橋を対象とした現地試験を実施した。本論はこれらの結果について報告するものである。

2. 照射設備の検討

2.1 照射光源

アクティブ赤外線法に用いる照射光源の役割は、コンクリート表面を強制加熱（光照射）することにより、コンクリートのはく離部と健全部に生じる熱の非平衡状態（温度差）を拡大させることである。はく離部と健全部の温度差を

*1 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造研究室 研究員 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造研究室 主任研究員 工博 (正会員)

*3 西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部 施設部土木技術 担当マネジャー 工修

*4 三菱重工業(株) 広島研究所 応物・振動研究室 主席研究員 工博

大きくするには、光のエネルギー密度が大きいほど有利であるが、高架橋検査を想定した場合、これに加えて、ある程度照射距離が長くても検査面において所要の照射エネルギー密度が確保できることが必要条件となる。

そこで、このような条件を満足する光源として、図-1に示すように反射鏡を取り付けたキセノンアークランプを用いることとした。キセノン光の波長（スペクトル）分布を図-2に示す。計測はマルチ測光システム（大塚電子製IMAC7000G, 最小波長分解能：0.15nm）を用いて行った。キセノンの波長領域はハロゲンとほぼ同様であるが、通常のタングステンフィラメントを有する光源やメタルハライドランプのようにガス状の金属ハロゲン化合物が発光する光源と異なり、図-1に示すように発光部がスポットに近い点光源となっている。このため、特に集光性に優れるという特長を有しており、反射鏡の曲率を調整することにより、遠隔距離でも必要な一定の照射エネルギー密度が確保できる。

また、キセノンアークランプおよび反射鏡の仕様を表-1に示す。通常、出力の小さなランプの場合にはレンズを用いたコリメート（光束を同一方向にする）がなされるが、出力が大きいとレンズの大型化や加熱等の問題が懸念されるため、反射鏡を用いることとした。

遠隔照射における有効性を検証するため、熱電対型パワーメータ（コヒーレント社製）を用いて、反射鏡によりコリメートされたキセノン光のエネルギー密度を計測した。その結果、キセノンアークランプから 10m 離れた位置において、直径約 28cm の範囲で照射エネルギー密度が $1.5\text{W}/\text{cm}^2$ 一定の光を得ることができた。これにより、コンクリートを遠隔で照射加熱するための光源としてキセノンアークランプが有効であることが確認された。

2.2 車載型検査装置の製作

高架橋の検査対象面を均一に照射するためには、検査面全体にわたり一定の間隔（時間）で照射加熱する必要がある。そこで、ランプの照

表-1 照射装置の仕様

キセノンアークランプ	ランプ出力(kW)	6
	最大電流(A)	155
	全光束(lm)	200,000
反射鏡	品質・形状	放物面 Al コートミラー
	口径(mm)	500

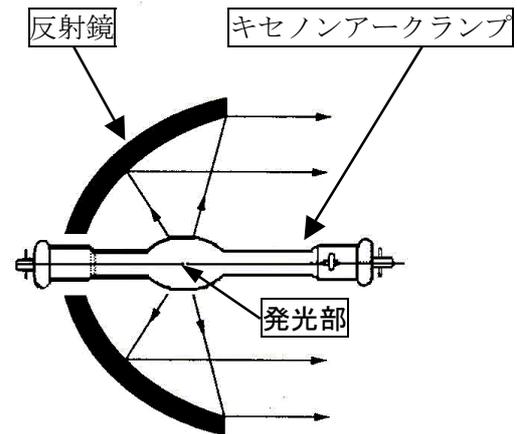


図-1 キセノン光源照射装置

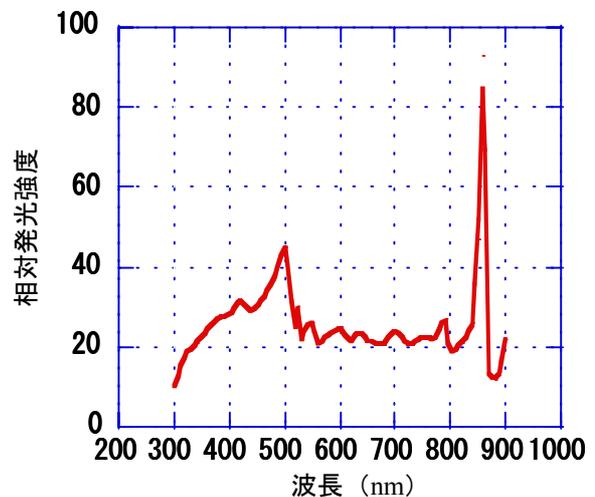


図-2 キセノン光のスペクトル分布

射方向を上下 85° 、左右 180° まで一定速度で方向制御可能な車載型検査装置を製作した（図-3）。これは、検査対象の光照射範囲をあらかじめレーザーポインタで確認し、照射軌跡を設定してコンピュータに記憶させた後、キセノンアークランプを点灯して一定速度で光照射を行う仕組みである。

2.3 赤外線カメラ

キセノンアークランプの光をコンクリート表面に照射し、はく離部と健全部で生じる熱の非平衡状態は赤外線カメラを用いて撮影する。コンクリート表面は、照射により 3℃程度しか温度上昇がなく、常温と同程度の温度領域なので、常温近傍で高い温度分解能を有する応答波長 8.0~13.0 μm 帯の赤外線カメラを使用した。赤外線カメラの仕様を表-2に示す。

表-2 赤外線カメラの仕様

検知器	水銀・カドニウム・テルル 液体窒素冷却型
応答波長	8.0~13.0 μm
感度(温度分解能)	30℃で 0.05℃
測定温度範囲	0~40℃
表示画素数	横 512×縦 480

3. 模擬空隙供試体による室内試験

実高架橋検査に先立ち、キセノンアークランプを用いた赤外線法によるはく離検知の基本性能を把握するため、模擬空隙を有する供試体を作成して室内試験を実施した。

3.1 供試体

図-4に示すように、模擬空隙として発泡スチロール (100×100×1mm³) を表面から深さ 10, 20, 30mm の位置に埋め込んだ鉄筋コンクリート供試体を 1 体ずつ、計 3 体作成した。なお、鉄筋は φ16 を用いた。

3.2 試験方法

供試体照射前のパッシブ赤外線画像をあらかじめ撮影しておき、供試体より 10m 離れた位置からキセノンアークランプで供試体を 10 秒間照射した。照射直後から 10 秒間隔で 1 分間、アクティブ赤外線画像を撮影し、表面温度の上昇部をコンクリート内部のはく離 (模擬空隙) として評価した。

3.3 室内試験結果

模擬空隙供試体におけるキセノンアークランプ照射前および照射後の赤外線画像を写真-1 (a), (b) に示す。照射前のパッシブ画像では空隙部の温度上昇は観測されなかったが、照射後のアクティブ画像ではいずれの供試体も中心部 (空隙部) に温度上昇が観測された。

空隙深さに対する空隙部と周囲の健全部との温度差を図-5に示す。空隙深さ 10mm で、はく離部と健全部との温度差が最も大きくなり、20, 30mm と深くなるほど温度差が小さくなっ

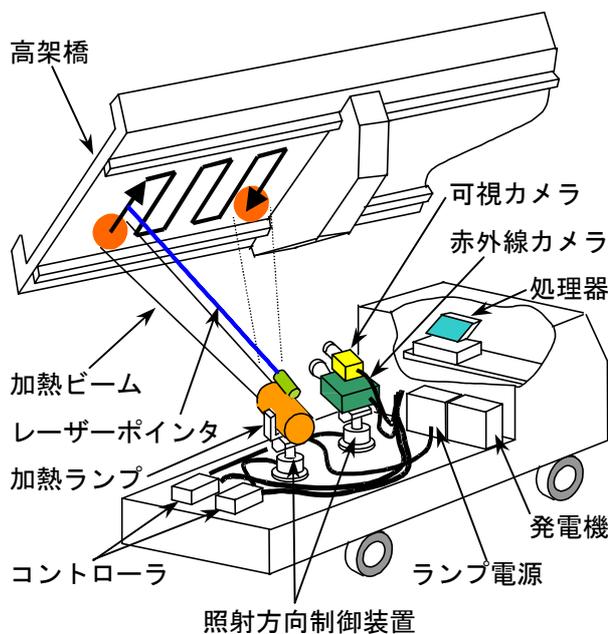


図-3 車載型検査装置

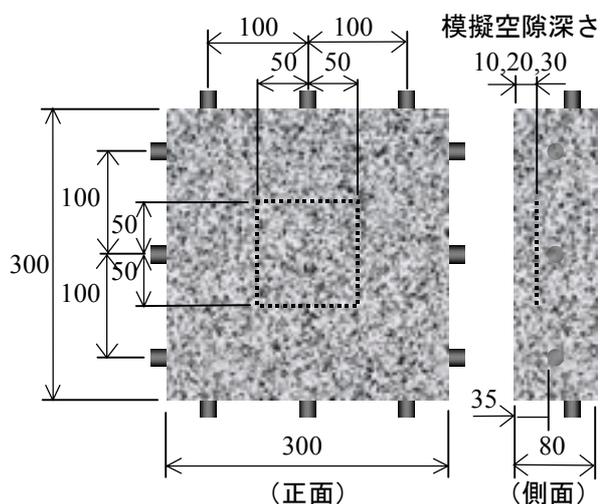
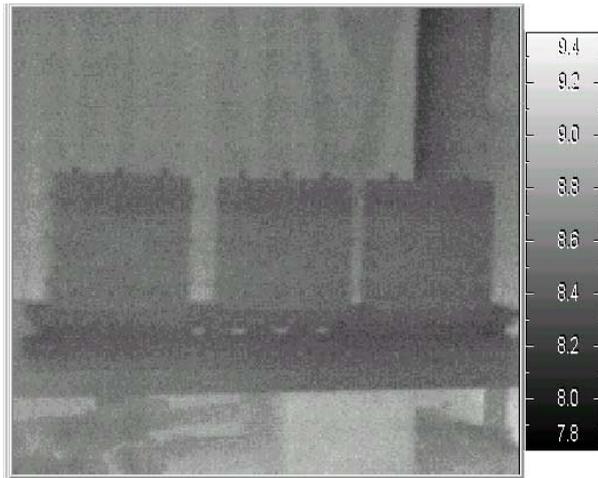
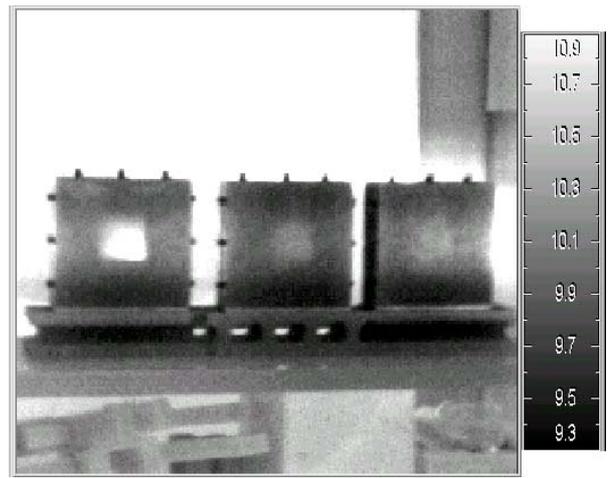


図-4 模擬空隙供試体 (単位 : mm)

ていくが、一般に変状検知に必要なコンクリートの温度差 (0.2℃程度) を生じさせることができた。これにより、照射光源としてキセノンアークランプを用いた場合、空隙深さ 30mm 程度までは変状検知が可能であることを確認した。



(a) 光照射前



(b) 光照射後 (20 秒経過)

写真-1 赤外線画像 (模擬空隙供試体 : 左から空隙深さ 10, 20, 30mm)

4. 鉄道高架橋を対象とした現地試験

実高架橋における検査の適用性を検証するため、検査対象は事前に実施された打音検査結果から、浮きまたははく離の存在が判明している高架橋を選定した。

4.1 試験方法

2.2 で製作した車載型検査装置を高架橋の下に移動させ (写真-2)、あらかじめ照射軌跡をインプットした後、キセノンアークランプの光を移動させながら検査対象範囲を約 1m/s の速度で一様に加熱した (写真-3)。これを 10 回繰り返して 1 検査面あたり約 400 秒間照射し、照射直後から 10 秒間隔で 1 分間、赤外線画像を撮影した。

検査当日 (2002/12/10) の天候は晴れ、最高気温は 13℃、風速 2~3m/s で、日没時の気温は 3℃まで低下した。

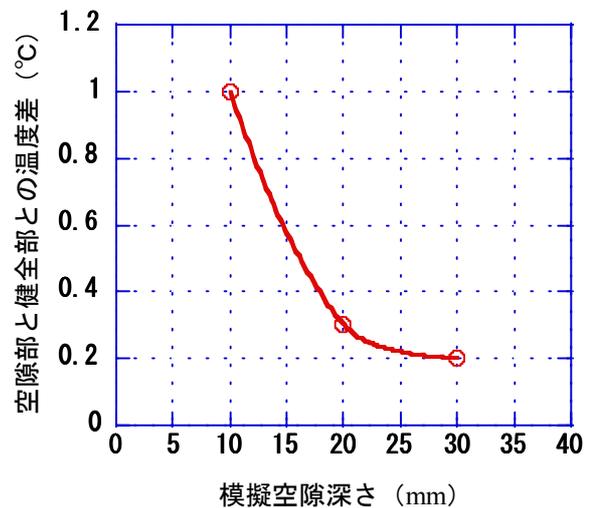


図-5 模擬空隙深さと温度差の関係 (照射後 20 秒経過時点)



写真-2 検査状況

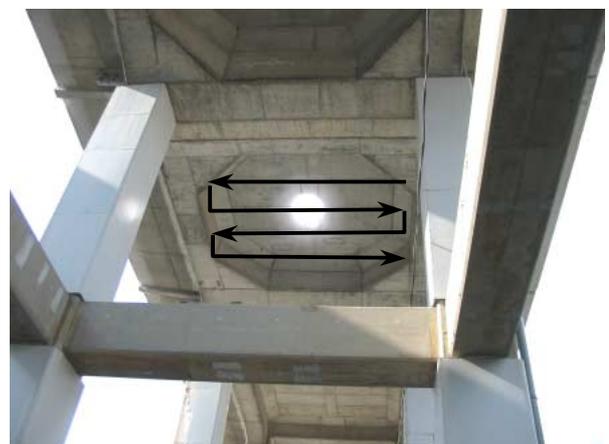


写真-3 ランプの照射軌跡

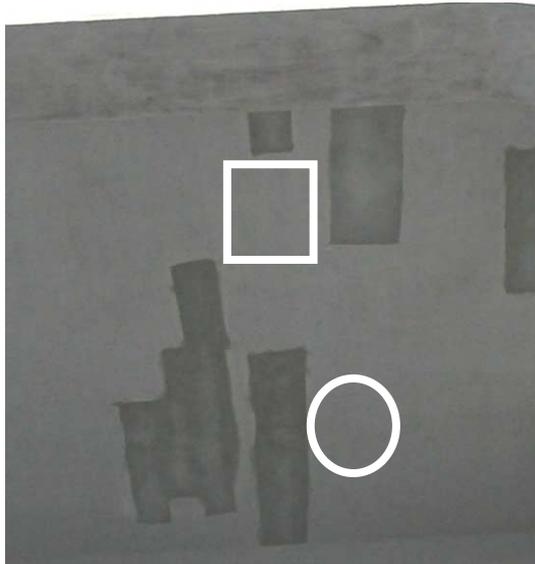


写真-4 可視画像（検査面 A）

4.2 現地試験結果

(1) 検査面 A（検査時間 15 : 30～16 : 00）

可視画像を写真-4に示す。高架橋高さは約7.0mで、すでに数箇所補修された跡がある。

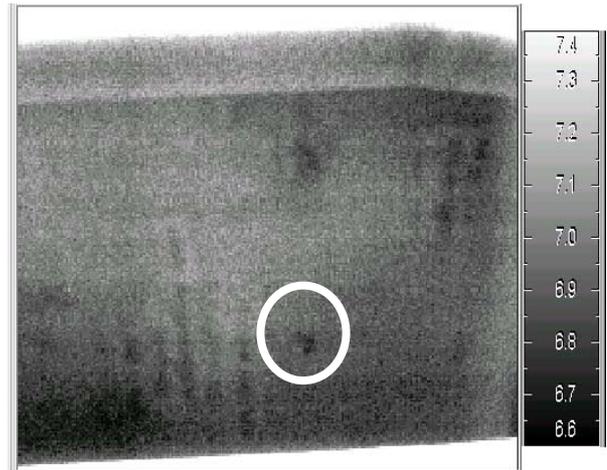
キセノンアークランプ照射前のパッシブ赤外線画像（写真-5(a)）では、補修跡やはく離は明瞭に観測されなかったが、照射後のアクティブ赤外線画像（写真-5(b)）では、数箇所の補修跡およびはく離が明瞭に観測された。また、アクティブ画像中□印の箇所では、パッシブ画像では観測できなかったはく離も検出できているのが分かる。

さらに、画像中○印の位置に対し、15秒間のスポット照射を実施し、赤外線カメラに望遠レンズを取り付けてスポット画像を撮影した（写真-5(c)）。スポット照射によるアクティブ望遠画像では、さらに明瞭な温度差分布が得られ、実高架橋検査においても変状検出が十分可能であることが確認された。

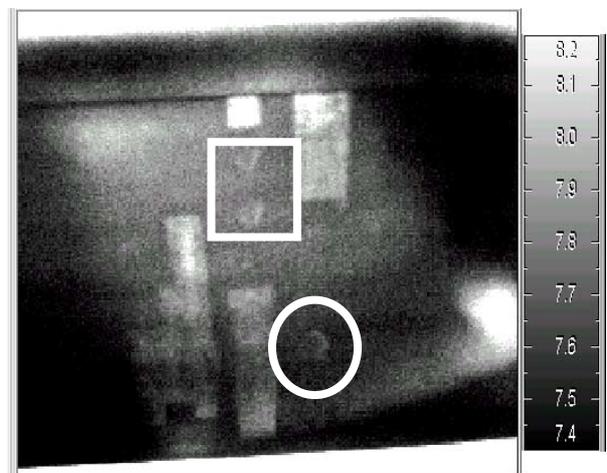
なお、これらの変状箇所は、打音検査のデータと一致しており、キセノンアークランプを用いたアクティブ赤外線法が、打音法に代わる検査方法として十分有効であることが実証できた。

(2) 検査面 B（検査時間 17 : 00～17 : 30）

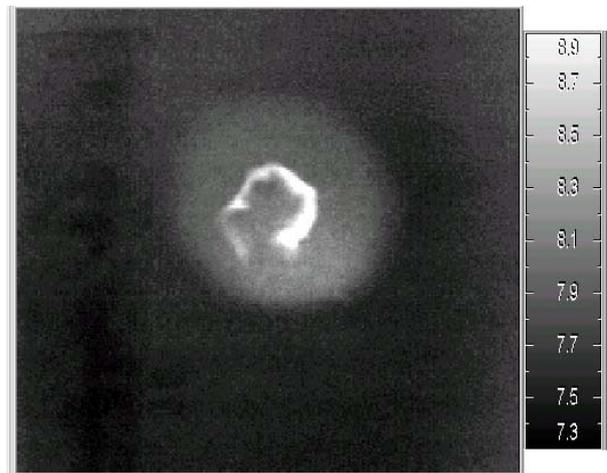
可視画像を写真-6に示す。高架橋高さは約4.5mで、検査面 A と同様、補修跡がある。



(a) 光照射前



(b) 光照射後（18 秒経過）



(c) スポット照射後（17 秒経過）

写真-5 赤外線画像（検査面 A）

キセノンアークランプ照射前のパッシブ画像（写真-7(a)）では、日没に伴い外気温が低下したことにより、健全部の温度より補修跡の温度のほうが低くなる現象が生じているのが分かる。この状況下においては、キセノンアークラ

ランプで照射しても、アクティブ赤外線画像（写真－7 (b)）から分かるように、はく離部を温度上昇させることは困難で、逆に不明瞭な画像となってしまった。このことから、健全部よりはく離部の温度が低くなる条件下では検知性能が十分に発揮できず、適用できる時間帯がある程度限られることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、アクティブ赤外線法を用いて高架橋検査を行う際、地上からの遠隔照射によってもはく離等の変状検出が可能となる方法を開発することを目標として検討を行った。具体的には、遠隔でコンクリートを加熱するための照射光源の検討および検査装置の製作を行い、基本性能の確認のための供試体による室内試験、および実用性の検証のための実高架橋を対象とした現地試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 照射光源は、被照射体からの距離が離れていても必要な一定の照射エネルギー密度が得られるキセノンアークランプが優位である。
- (2) 室内試験の結果から、キセノンアークランプはコンクリートの変状検出に必要な温度差を確保でき、所要の検知性能を有する。
- (3) 実高架橋を対象とした現地試験結果から、パッシブ赤外線法では検出が困難であったはく離をアクティブ赤外線法により検出することが可能である。ただし、健全部よりはく離部の温度が低い条件下においては、検知性能を発揮することが困難である。

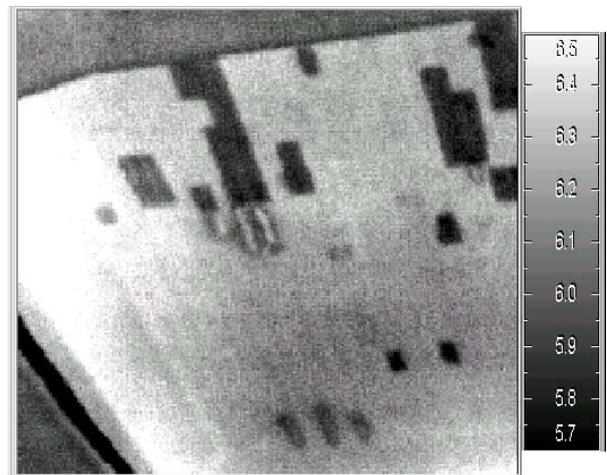
なお、本研究では一般的に赤外線法による検査が適用しやすい（健全部とはく離部の温度差が生じやすい）冬期に現地試験を実施したが、比較的溫度差の生じにくい夏期における適用性については今後の検討課題としたい。

参考文献

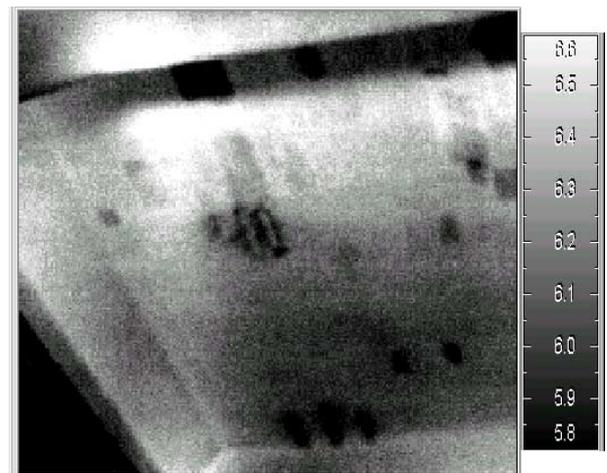
- 1) 長田文博ら：赤外線カメラによる高架橋コンクリートの剥離診断法，土木学会第 56 回年次



写真－6 可視画像（検査面 B）



(a) 光照射前



(b) 光照射後（20 秒経過）

写真－7 赤外線画像（検査面 B）

学術講演概要集 V-418, pp.836-837, 2001

- 2) 宮田信裕：トンネル検査車の開発，JREA, 42(7), pp.36-39, 1999