

熱赤外サーモグラフィ装置を用いた構造物の劣化・被害検出に 関する基礎的検討

上田英臣¹⁾、山崎文雄²⁾

- 1) 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻、博士前期課程
e-mail : h.ueda@chiba-u.jp
- 2) 千葉大学大学院 工学研究科 建築・都市科学専攻、教授 工博
e-mail : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

要 約

多くの構造物が更新時期を迎え、劣化の修復・補強が求められる中、劣化構造物の外壁剥離による事故が問題視され、早急に劣化部分を検出し、改善していく必要がある。また、劣化構造物は地震時において被害を受ける可能性が高く、地震後の二次災害として壁面はく離などの事故が予想される。そのため、膨大な量の構造物の劣化状態、地震後の被害状況の把握を正確に、効率的に行っていくことが必要となる。そこで本研究では、構造物の点検手法の一つとして、一度に広範囲の内部空隙や損傷部分などの劣化検出が行えるサーモグラフィ装置に着目した。劣化が見られるコンクリート擁壁に対してサーモグラフィカメラによる診断を行い、打音検査、シュミットハンマーを用いた診断結果と比較した。

キーワード： サーモグラフィ、打音検査、シュミットハンマー、構造物、劣化

1. はじめに

現在、日本国内における多くの構造物が更新時期を迎え、劣化の修復・補強が必要となる構造物は今後も増加していく一方である。とくに、劣化構造物の外壁部分の浮きによるはく離事故は問題視され、早期発見・改善する手法が求められる。そして、地震が発生した際に、これらの壁面ははく離する可能性が高く、はく離壁が道路を走る車や人に当たるなど、二次災害につながることも考えられる。また、はく離だけではなく、地震後に目視では観察が難しい構造体内部の被害状況を把握することも重要であると考えられる。しかし、劣化・被害の調査対象となる構造物の数は膨大であり、逼迫する経済などを考慮しても、可能な限り効率的な調査方法が求められる。一般的に、調査方法には、打音検査が多く用いられているが¹⁾³⁾、高所においては足場が必要となること、広範囲の検査には時間がかかることなどの問題がある。

そこで本研究では、近年注目を浴びている、一度に広範囲の損傷部分や、内部空隙などの劣化検出ができる熱赤外サーモグラフィ装置に着目した。サーモグラフィ検査は、構造物の壁面などが加熱された時の表面温度分布や日較差などの熱挙動が、劣化部分と健全部分など内部の状態で異なることを用いて劣化診断を行う手法である⁴⁾⁵⁾。しかし、サーモグラフィ検査は頻繁に行われるようになってきたが、検査する日の天候に左右され、晴天時でなければ診断が難しいことが問題としてある。そこで、パッシブ

ソーラーの吸熱効果を利用した研究など改善方法が検討されている⁶⁾。また、太陽光の届かないトンネル内などでは、ヒーターなど測定面を加熱し、強制加熱による検査⁷⁾をする必要があるが、加熱むらなどから誤診断をする可能性も考えられる。そのため、多くの研究により正確な劣化診断、データの処理方法などが模索されている^{8),9)}。また、その他の診断方法と組み合わせることで精度向上を試みたもの¹⁰⁾⁻¹²⁾や、サーモグラフィ法による鉄筋の腐食評価を行ったもの^{13),14)}など、サーモグラフィ検査は多くの場面での活躍が期待される。

本研究では、熱赤外サーモグラフィ装置を用いた正確な劣化診断方法の確立を目的とし、実際に劣化している千葉大学構内のコンクリート擁壁を対象として、太陽光により加熱された時の温度変化を記録し劣化検出を行った。また、同じ場所において、打音検査とシュミットハンマーによっても劣化状態を調べ、サーモグラフィカメラによる劣化・被害検出の有効性を確かめた。

2. 劣化状況観測の概要

劣化している擁壁を対象として、サーモグラフィ法、シュミットハンマー、打音検査による劣化診断を行った。サーモグラフィカメラでは、太陽光加熱による一日の温度変化を記録し、各時刻における温度データを取り出した。そして、温度変化の様子や各時刻の熱画像から劣化部分の検出を行った。そして、サーモグラフィカメラによる診断で劣化が見られた範囲において、回転式打音検査器を用いた診断を行い、その時の音声をICレコーダーで記録し、劣化が疑われる範囲での音の特徴を解析した。また、シュミットハンマーを用いて圧縮強度の測定も行った。シュミットハンマーによるコンクリート圧縮強度 F_c の計算には、以下の日本材料学会式を用いた¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。

$$F_c = \alpha_n \{ 13(R_0 + R_1 + R_2) - 184 \} \quad (1)$$

ここで、 α_n は対象物の材令による補正係数であり、今回は0.6である。また、 R_0 、 R_1 、 R_2 は、測定した反発係数、含水状態補正、打撃角度補正の値である。今回の計測に使用した機材を図1に示す。



図1 本研究で使用した観測用機材. 左より熱赤外カメラ(日本アビオニクス InfReCR300SR-SS)、シュミットハンマー(富士物産 N形)、回転式打診棒(土牛産業 01738)

3. 観測結果

劣化したコンクリート擁壁の加熱時の観測は、2014年7月8日の午前11時00分から午後19時30分まで行い、30分間隔で温度の変化を記録した。対象とした擁壁の画像と温度データを取り出し平均値を計算した範囲、および選択範囲における擁壁表面の一日の温度変化を図2に示す。この図より、温度上昇が範囲B、範囲A、範囲Cの順に大きいことが分かる。とくに、範囲Bに注目すると、温度上昇が一番大きいことに加えて、太陽光による加熱が弱くなった夕方頃から急激に温度低下していることが読み取れる。壁面内部などに空隙がある場合、熱の伝達が遮られることにより、表面に熱がたまりやすくなり、その結果加熱時は温度上昇が早く、冷却時は表面にたまっていた熱がすぐに逃げていくことから温度低下が早

くなるという特徴がある。これらを踏まえ、それぞれの範囲の温度変化を見ると、範囲Bは擁壁の内部に空隙がある可能性が高いと考えられる。

次に、図3に示した加熱時と冷却時の熱画像を見る。熱画像からは選択した範囲A、B、Cにおいて温度分布がそれぞれ異なっていることがわかる。また、熱画像からの劣化検出では、どの位置にどのような形状の劣化部分があるのかを検出することができる。このように熱画像による劣化検出では、一度に広範囲の劣化を調査できる。また、劣化の状況により、温度変化の大きさも変わるため劣化の進行具合の判断にも有効な手法であることが確認できた。

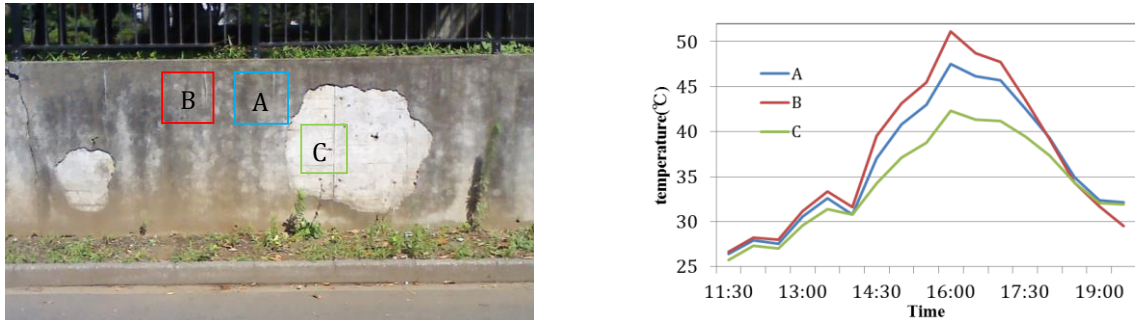


図2 観測対象とした擁壁の様子(左)と各範囲での一日の温度変化(右)

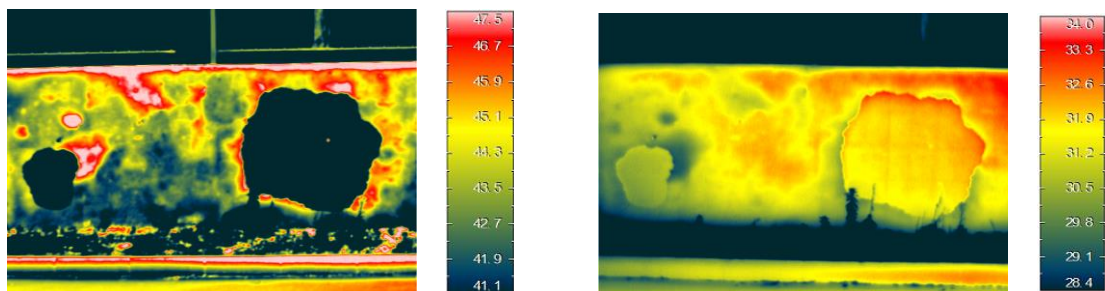


図3 15時30分における表面温度(左)と19時30分における表面温度(右)

次に、図4に示す範囲において、回転式打音検査機を用いて擁壁の劣化状態を調査した^{18),19)}。ライン α - α' は熱画像から劣化の疑いが見られた箇所であり、ライン β - β' は剥離箇所であるが内部に劣化が見られない箇所である。打音検査を行ったライン上での温度を求めると図5の温度分布になる。15時30分と19時30分における温度分布を比較すると、 α - α' のライン上で温度分布が不均一になっており、劣化部分の検出ができていることが分かる。また、昼に高温であった部分が夜に低温部になっていることがわかり、空隙部分の特徴がみられる。次に、二つのライン上において録音された音の波形、時間周波数解析の結果、周波数分布を図6、図7に示す²⁰⁾。時間周波数解析の図では、色が濃くなっている場所で音圧が大きいことを表している。二つの測定場所における周波数の分布を比較すると、ライン α - α' では低周波域が良く出ている範囲と高周波域まで出ている範囲があり、ライン β - β' では低周波域で音圧が大きく、高周波域が出ていないことが分かる。回転式打音検査では、正常箇所よりも異常箇所でも音圧が大きくなる傾向があり、また浮きなどがある場合は高周波域における音圧が大きくなる傾向がある。熱画像からの評価では、ライン α - α' の場所には剥離があり、ライン β - β' の場所には剥離がないと推定したが、回転式打音検査による評価でも同じ結果が得られたため、熱画像による劣化部分の評価は正しいことが分かった。また、各時間帯における周波数の分布から剥離している可能性が高いと思われる範囲は、加熱時の熱画像において、顕著な高温部分として表れている範囲とおおよそ一致している。

これら検証結果より、回転式打音検査を用いれば、従来のハンマーを用いた場合よりも比較的効率よく劣化診断が行えることが分かった。しかし、熱画像のように劣化の大きさや形状など劣化の広がり方などを正確に判断するのは難しく、また一回の測定では広範囲の劣化部分を評価することはできない。

さらに、音の解析などにより正確に劣化範囲の評価を行う場合は、ビデオカメラなどを用いて、各時間帯において打音している範囲と音の周波数分布を一致させながら診断する必要があると考えられる。

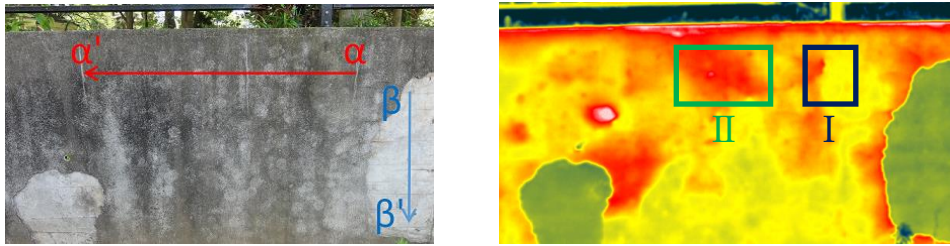


図4 打音検査の測定場所 $\alpha-\alpha'$ と $\beta-\beta'$ (左)と15時30分における熱画像の様子(右)

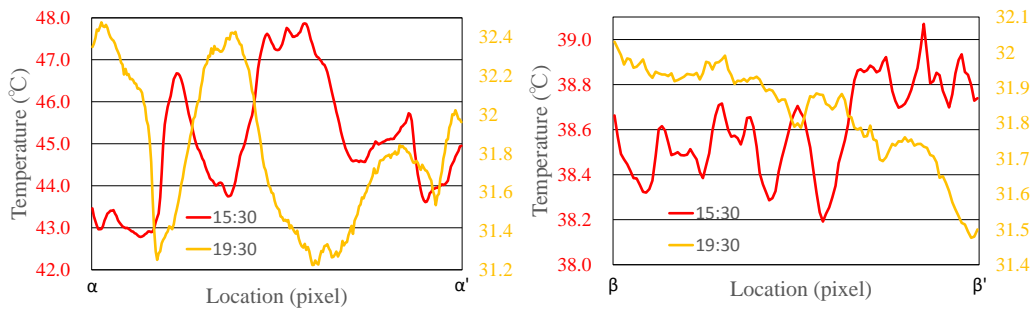


図5 観測対象の擁壁(図4)における、 $\alpha-\alpha'$ の温度分布(左)と $\beta-\beta'$ の温度分布(右)

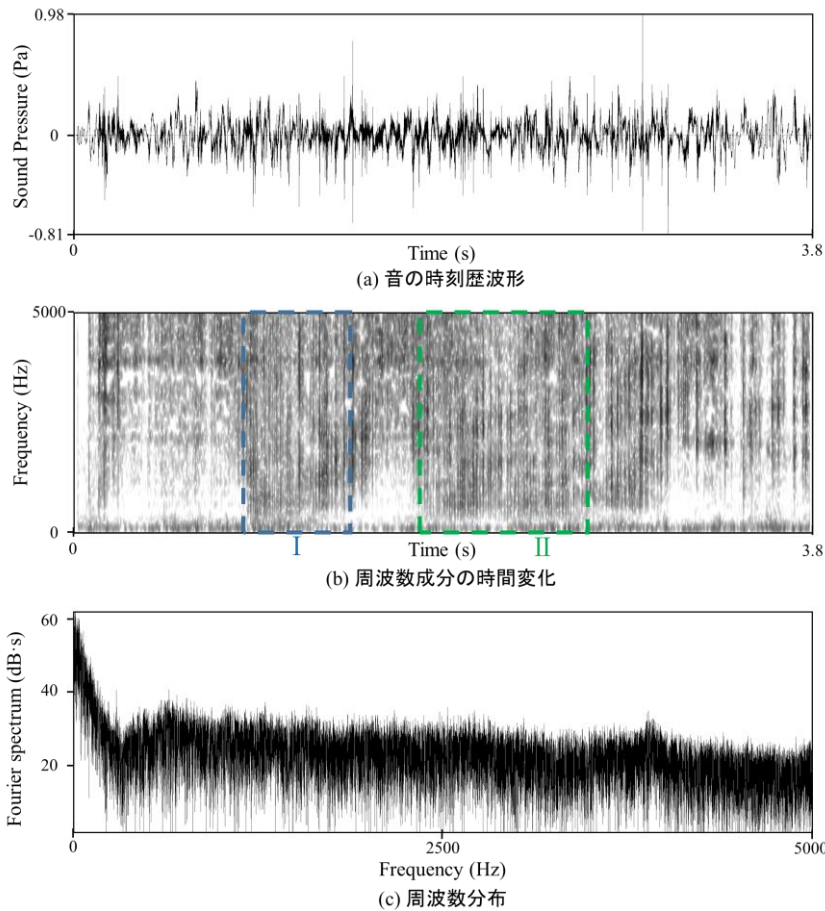
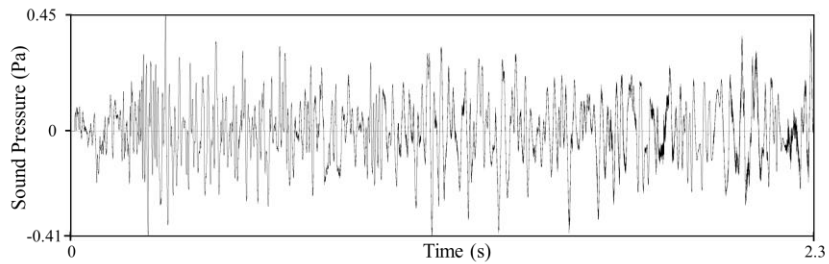
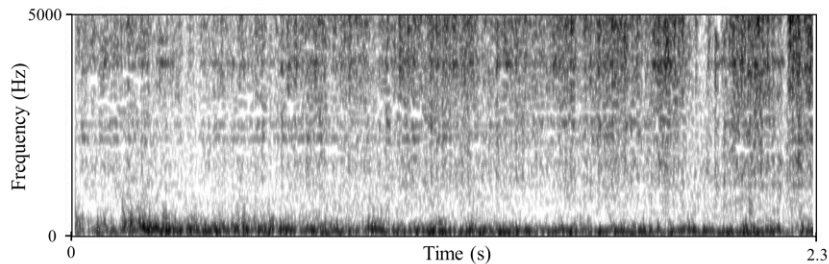


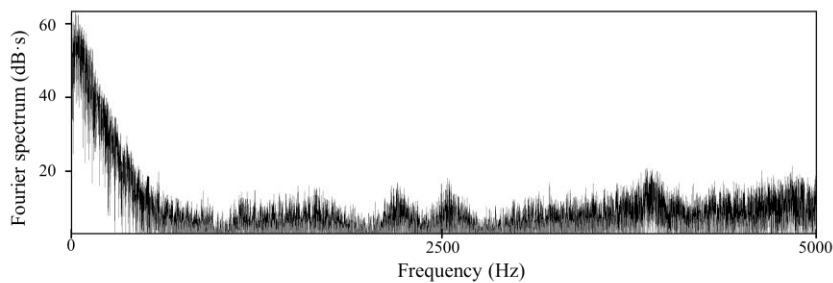
図6 観測対象の擁壁(図4)の $\alpha-\alpha'$ 範囲での打音検査時の録音データ



(a) 音の時刻歴波形



(b) 周波数成分の時間変化



(c) 周波数分布

図7 観測対象の擁壁(図4)の $\beta-\beta'$ 範囲での打音検査時の録音データ

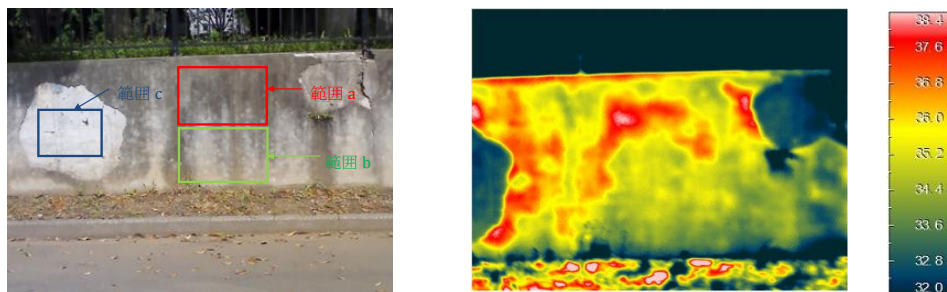


図8 シュミットハンマー測定範囲と熱画像(2013年6月27日に計測)

次に、2013年6月27日に行ったシュミットハンマーによる測定と、熱画像による劣化診断について述べる。シュミットハンマーによる測定範囲は図8に示す三つの範囲であり、それぞれ熱画像から得られた、内部空隙が疑われる範囲、正常だと考えられる範囲、すではく離している範囲を対象とした。まず初めに、範囲a、bにおいて、範囲aは反発係数の測定より、 $R=24.46$ として圧縮強度を計算すると、 $F_c=7.87[N/mm^2]$ であることが分かった。範囲bは反発係数の測定より $R=28.24$ となり F_c の値を計算すると $F_c=10.76[N/mm^2]$ であることが分かった。二つの範囲での測定結果には、約 $3[N/mm^2]$ の差があることがわかる。これは、上側の範囲aにおいて、内部空隙ができ、表面の化粧材が裏のコンクリートと一体化していないことにより測定される反発係数が小さくなったことが原因であると考えられた。次に、すではく離している範囲cでは、測定結果より、 $R=37.95$ となり、圧縮強度を計算すると、 $F_c=18.19[N/mm^2]$ であることが分かった。測定範囲a、bと比較すると、圧縮強度の値が大きく異なることがわかる。この結果

から、化粧材については、範囲a、bどちらも内部空隙があることが考えられ、特に範囲aの場所で顕著であると考えられた。熱画像からの評価では、範囲bは空隙がないと判断したが、今回の例のように全体的に劣化が進んでいる場合には、温度差などの比較対象の選定を慎重に行う必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、千葉大学構内の劣化が確認できるコンクリート擁壁に対して、熱赤外サーモグラフィカメラを用いた基礎的な劣化検出計測を行った。また、回転式打音検査とシュミットハンマーを用いた非破壊検査の劣化評価結果と比較をすることで、サーモグラフィ検査の有用性の確認を行った。打音検査とサーモグラフィ検査の劣化評価を比べると、どちらの方法でもおよそ同じ範囲に劣化があると評価ができた。そのため、サーモグラフィカメラによる劣化診断は正確にできていることが分かった。回転式打音検査は容易な診断方法であるが、内部劣化の大きさや形状などを確認し、広範囲の劣化診断を短時間で行う場合には、サーモグラフィカメラが適していると考えられた。

次にシュミットハンマーとの比較では、測定箇所の2つの範囲でシュミットハンマーはどちらも劣化していると評価したが、サーモグラフィカメラの結果では一方の範囲において劣化は見られないと考えられた。シュミットハンマーによる反発値の測定より、両方の範囲で内部に浮きがあると考えられ、今回対象とした擁壁は全体的に劣化が進んでいると考えられた。サーモグラフィカメラによる診断は、周りとの温度差から劣化を検出するため、対象場所が広範囲で劣化している場合に比較する対象を正確に選定しなければ劣化部分を見逃してしまう可能性がある。そのため、構造物などの劣化が進行する前の健全な状態の熱画像を記録しておき、常にそのデータと比較することで、正確な評価が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 金森正樹、飯坂武男、菊川浩治、梅原秀哲：コンクリートの打音による健全性の評価について、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、2001。
- 2) 鎌田敏郎、浅野雅則、国枝稔、六郷恵哲：コンクリート表層部欠陥の定量的非破壊検査への打音法の適用、土木学会論文集、No.704/V-55、2002.5、pp.65-79。
- 3) 川端健太、園田佳巨：コンクリート構造物の打音検査による劣化診断に関する基礎的考察、土木学会西部支部研究発表会、第54巻、第1号、2010.3、pp.7-8。
- 4) 長田文博、山田裕一、虫明成生、赤松幸生：熱画像による鉄道高架橋コンクリートの剥離診断手法の開発、土木学会論文集、No.760/V-63、2004.5、pp.121-133。
- 5) F. Cerdeira, M.E. Vázquez, J. Collazo, E. Granada: Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes, *Energy and buildings*, Vol.43, Issue8, 2011, pp.1845-1851.
- 6) 江藤亮、柳内睦人、金光寿一：パッシブソーラーの吸熱効果を利用したサーモグラフィ法によるコンクリートの損傷診断予測、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.2、2007、pp.673-678。
- 7) 金光寿一、柳内睦人、三星智典：舗装熱を利用したサーモグラフィ法によるRC床板内部の欠陥検出に関する研究、土木学会論文集、No.732/V-59、2003、pp.95-108。
- 8) 中村士郎、阪上隆英、原田修輔、久保士郎：アクティブ赤外線法によるコンクリート構造物の非破壊検査におけるデータ処理方法に関する研究、日本材料学会、Vol.57、No.8、2008、pp.846-851。
- 9) 鄭子揚、阪上隆英、久保司郎、佐藤大輔、中村士郎：フーリエ級数係数を用いたパッシブ赤外線サーモグラフィによるコンクリートのはく離深さ評価、*Journal of JSNDI*、Vol.61、No.2、2012、pp.78-83。
- 10) 岩城一郎、上原子晶久、子田康弘、内藤英樹、皆川浩、鈴木基行：著しい塩害を受けた道路橋PC桁内部のコンクリートおよび鋼材の物性評価、土木学会論文集E Vol.66、No.4、2010、pp.413-432。
- 11) 恒國光義、加藤佳孝、魚本健人：コンクリート構造物の劣化診断における非破壊検査の適用に関する研究、コンクリート工学年次論文集 Vol.26、No.1、2004。
- 12) D.G. Aggelis, E.Z. Kordatos, D.V. Soulioti, T.E. Matikas: Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.24, Issue10, 2010, pp.1888-1897.

- 13) 臼木悠祐、堀江宏明、谷口修、大下英吉：熱画像処理を用いた非破壊検査手法による部分的な鉄筋腐食評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、2005.
- 14) 大下英吉、長坂慎吾、倉橋貴彦、谷口修：コンクリート表面温度に基づく鉄筋腐食厚および腐食率の推定手法に関する研究、土木学会論文集 E Vol.65、No.4、2009.10、pp.442-458.
- 15) 富士物産株式会社：シュミットハンマーN形、NR形取扱説明書
- 16) 実施コンクリート強度判定法委員会：シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針（案）、材料試験、Vol.7、No.59、1958.
- 17) 佐藤周之、服部九二雄、緒方英彦、HASSAN Khaled：N型、M型シュミットハンマーの構造体コンクリートへの適用性および強度推定式の提案、農業土木学会論文集、Vol.70、No.4、2002、pp.515-521.
- 18) 山田裕志、川端健太、園田佳巨：コンクリート構造物の打音検査に関する時間一周波数解析を用いた基礎的研究、土木学会西部支部研究発表会、第54巻、第1号、2010.3、pp65-66.
- 19) 中山歩、園田佳巨、三好茜、吉田直紹：回転式打音の音圧特性に関する実験的考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、2008.
- 20) 北本渉、園田佳巨、森谷晋：打音検査によるコンクリート内部の健全度評価に関する基礎的考察、土木学会西部支部研究発表会、第52巻、第1号、2008.

Basic Study on Detection of Deteriorated Structures Using Infrared Thermography Camera

UEDA Hideomi¹⁾ and YAMAZAKI Fumio²⁾

1) Graduate Student, Department of Urban Environment Systems, Chiba University, Chiba, Japan

2) Professor, Department of Urban Environment Systems, Chiba University, Chiba, Japan

ABSTRACT

Infrastructures in the world get old in several decades of their service time. Falling-off of parts of deteriorated structures were often reported and sometimes caused casualties in Japan and many other countries. When an earthquake occurs, in particular, deteriorated structures have higher possibility to be damaged or collapsed. Thus assessing the health condition of structures is one of the important topics in civil engineering. Considering a large number of structures that have been in service more than 40 years in Japan, efficient evaluation methods are requested. Accordingly, this study focuses on the use of infrared thermography camera to detect internal deterioration of concrete structures. As a first step of investigation, thermography diagnosis, hammering test and Schmidt hammer test were carried out to detect internal deterioration of a concrete retaining wall and the results were compared to evaluate the capability of these methods.

Keywords: Thermography, Hammering test, Schmidt hammer, Infrastructures, Deterioration