

熱赤外線映像装置によるコンクリート構造物 の欠陥の非破壊調査に関する基礎実験

後藤 恵之輔*・陳 運明**
大田 哲男*

A Fundamental Experiment on Detecting Deficiency of Concrete Structure with Infrared Thermography

by

Keinosuke GOTOH*, Yun-ming CHEN**
and Tetsuo OOTA*

The deficiency inside concrete structures which induces deterioration of concrete structures is a serious problem all over the world. In many cases, the deficiencies are hidden inside the concrete structures, and it is impossible to observe the deficiencies with unaided eyes. The usual detection was performed by destructive testing methods. But destructive testing methods decrease the structures, and so are not good measurement.

For not to destroy the structures, however, research concerned with the development of non-destructive testing of concrete has nearly all taken place during the past 46 years¹⁾. But the applied infrared thermography to detect the deterioration of concrete structures was only 23 years²⁾. Infrared thermography has been found capable of detecting delamination because there is a difference in the surface temperature of sound and delaminated concrete structures under heated conditions. This article describes the fundamental experiment of detecting the cavities inside concrete structures with infrared thermography.

1. はじめに

コンクリート構造物の内部には、施工不良等の原因により空洞が存在することがある。このような空洞が構造物の受圧部分に位置する場合には、構造物の受圧面積が不足する。そのため、その位置に応力集中が発生する。よって、コンクリート構造物の設計計算において必要とされた安全性を、確保することができなくなる。また、コンクリートと鉄筋の付着がないので、その部分の鉄筋は腐食し易い。以上の原因により、コンクリート構造物の耐久性は著しく低下する。

コンクリート構造物の内部の空洞の有無を判断することができないことは、工期を遅れさせる原因となる。一例を示せば、著者の一人（陳）が以前設計した中国広東省広東工學院の教師宿舍学生食堂（8階の建物、3階以下は学生食堂、4階以上は教師宿舍である）の工事中、1階の3本の柱は施工不良により柱の内部に空洞が存在するのではないかということが考えられた。しかし、目測による空洞部発見は不可能であり、空洞の位置を確定することはできなかった。建物の耐久性の確保のために、3本の柱はそのまま除去された。

平成4年4月30日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**大学院修士課程土木工学専攻 (Graduate School of Engineering, Division of Civil Engineering)

柱の除去作業は工期を遅れさせた。さらに、この数十年来の世界のコンクリート構造物建設の実績から、将来老齢化の域に入る欠陥のある建物は、急激に増えるであろう。よって、コンクリート構造物の相次ぐ被害が起こる可能性が高くなる。以上のような社会的背景を考えれば、早期にこの欠陥を探し当て、補強する必要があるが、今後ますます高くなることは間違いない。

従来、コンクリート構造物の内部空洞の調査では、打音法などの主観的で定性的な判断が用いられてきた。しかし打音法は必ずしも正確ではない。また、弾性波法や超音波法等の非破壊性手法もあるが、これらの手法では調査の省力化はできない。これら従来の調査法に対して、熱赤外線映像装置を用いた調査法は正確かつ省力化が可能である。この手法がコンクリート構造物に対する調査で有利な点は、広範囲の温度分布が画像としてリアルタイムに撮られることである。また、熱赤外線映像装置を用いた調査法の利点として次のようなものが挙げられる。

- ① 離れた場所から検査可能である。
- ② 広範囲の温度分布を1回の計測でとらえることができる。
- ③ 計測を迅速に正確に行うことができる。ある温度領域においては0.1℃の温度差を検知することができる。
- ④ 計測において熱放射のパターンが乱されない。
- ⑤ 物体表面の温度分布を画像として確認できる。

これらのことから、熱赤外線映像装置を応用したコンクリート構造物の内部空洞調査の手法が考えられる。本論は熱赤外線映像装置を用いるための基礎実験を行い、その結果を報告するものである。

2. 熱赤外線映像装置利用の着目点

2.1 熱赤外線映像装置について

赤外線とは、1800年イギリスの F. W. Herschel によって発見された電磁波の一種であって³⁾、どんな物質でも温度が絶対零度以上であれば、原子と分子の振動回転などによって放射されているものである。絶対零度以上の温度をもつ物体はその表面から赤外線を出している。そして、その放出量は物体の温度と密接な関係をもっていることが知られており、物体から放出される赤外線の量を測ることで、その物体の温度を知ることができる。Fig. 1 により、赤外線は約0.8~1.000 μm の範囲の波をもち、マイクロ波と可視光線の間の領域の電磁波である。また、Fig. 2 に示すように、物体はその表面温度により放射する赤外線の波長のピークが異なり、一般的なコンクリート構造物の表

面温度は、60~10℃ (絶対温度: 333~263°K) 程度であるから、8~12 μm に波長のピークを持って、赤外線の放射を行っている。熱赤外線映像装置は赤外線領域の電磁波のみを感知する素子を持っている。このため、熱赤外線映像装置は、一般の光学的なビデオカメラと同じような方法で赤外線画像、すなわち対象物の温度分布画像を得ることができる。また、赤外線は紫外線や可視光線と比較して波長が長く、微粒子による反射や吸収が少ないため、空气中をよく透過し、かなりの遠方からでも観測可能である。

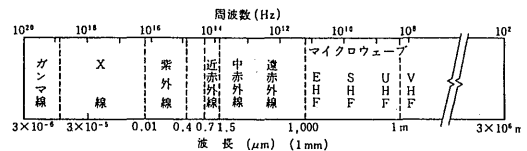


Figure 1 Electromagnetic spectrum and relationship.

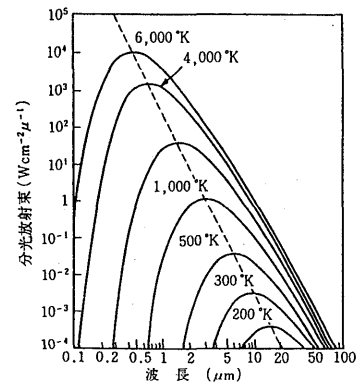


Figure 2 Spectral energy distribution of black bodies.

2.2 調査の原理

コンクリート構造物は、外気温、太陽の輻射熱、あるいは人工熱源の輻射熱の変化に応じて、構造物の材料の熱伝導率や比熱などの物理的性質の違いや、表面形状の違い、および表面近傍における空洞の有無などによって異なる温度変化を示す。外部の熱源の温度が上昇すると、コンクリート構造物は表面から暖められ温度が上昇し、熱は徐々にコンクリート構造物内部に伝わっていく。

ここで、一様に同材質からなるコンクリート構造物の壁面では、内部に空洞がある場合、その部分の熱伝導が低い空気層により熱の移動が妨げられる。よって、表面に熱がたまり、表面温度が健全部に比べ高くなる。外気温度が低下すると、上昇の場合とは逆に表面温度が健全部に比べ早く低下する。この様子をFig. 3, Fig. 4に示す。

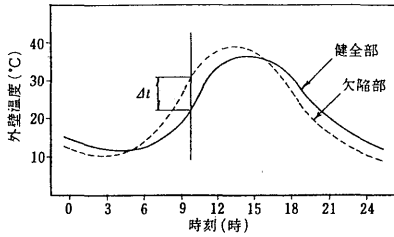


Figure 3 Fluctuations of temperature in surface of concrete structure.

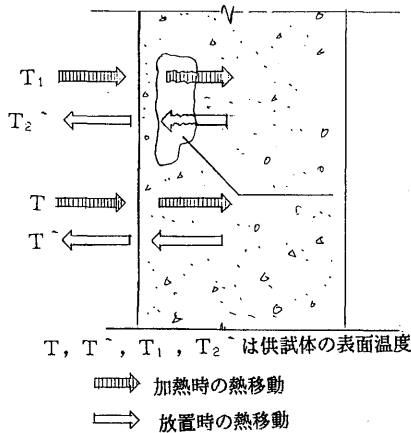


Figure 4 Schematic income and expenses of conduct heat.

Fig. 5 に健全部および空洞の存在する欠陥部の温度勾配を示す。外表面上で生ずる温度差を Δt とすれば、それらの部分から放射される熱赤外線量の差を、熱赤外線映像装置でとらえることで空洞が検出される。その温度差 Δt が大きくなるような条件で計測を行うと、空洞の検出に、より有利である。Fig. 6 は熱赤外線映像装置によるコンクリート構造物の観測の概念図である。

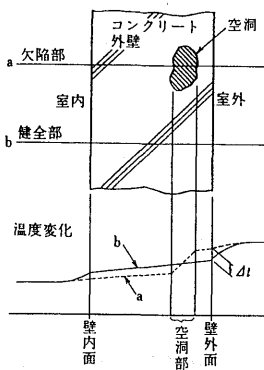


Figure 5 Difference in temperature between solid and delaminated concrete structure.

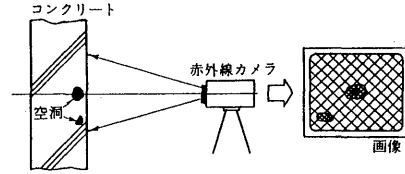


Figure 6 Schematic system of infrared thermovision equipment with instant camera attached.

3. 実験の目的と方法

3. 1 実験の目的

本実験は、熱赤外線映像装置を用いたコンクリート構造物内部の空洞の検出性能について、基礎的データを得ることを主な目的として実施する。

コンクリート構造物の内部欠陥の検出性能は、構造物の表面から欠陥までの深さ H 、あるいは表面から欠陥までの深さ H と欠陥の幅の比 H/D に関係がある。実験では、これらの関係性について、構造物の表面温度特性を把握することとした。

3. 2 方法

実験では、梁部材を対象として、Fig. 7, Fig. 8 に示す供試体Aと供試体Bを作製した。供試体Aの中の空洞の直径を50mmとして、空洞の深さを $H=25\text{mm}$, 75mm, 125mm, 175mm と変化させた。供試体のBの中には、空洞の深さ=50mmとして、直径は $D=60\text{mm}$, 114mm,

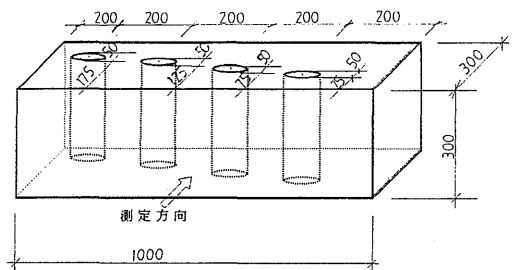


Figure 7 Test sample A.

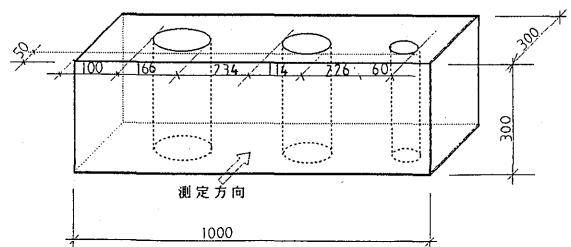


Figure 8 Test sample B.

Table 1

$$30 \times 30 \times 100 - \pi \times 5^2 \div 4 \times 4 = 89921.46018 \text{ cm}^3$$

	水wkg	セメントCkg	細骨材Skg	粗骨材Gkg
単体量 1 m ³	175	350	743	1154
89921.4cm ³	16.24	32.48	68.96	107.11

Table 2

$$30 \times 30 \times 100 - \pi \times 6^2 \div 4 \times \pi \times 11.4^2 \div 4 - \pi \times 16.6^2 \div 4 = 89653.231 \text{ cm}^3$$

	水wkg	セメントCkg	細骨材Skg	粗骨材Gkg
単体量 1 m ³	175	350	743	1154
89653.2cm ³	16.19	32.39	68.75	106.79

説明

粗骨材の最大寸法cm	エントラップエア(%)	最骨材率s/a(%)	単位水馬wkg
25	1.5	41	175

166mmと変化させた。コンクリートの材料配合はJIS-118Aによって作製(強度=240kgf/cm²)した。材料配合についてはTable 1, Table 2にそれぞれ示す。供試体は、それぞれ脱枠後、28日間水中養生を行い、その後15日ほど室内放置し、自然乾燥させた。

実験時は、空洞中の熱の外への伝熱防止のために、供試体の空洞の両端を発砲スチロールを用いて密封した。熱赤外線映像装置は、日本アビオニクス(株)製TVS-2000(最小検出温度差0.1℃, 検出波長3~5.4μm, RGB表示)を用いた。熱源には、500Wのライト2個を用いた。測定方法は熱赤外線映像装置を各測定面の正面に設置し、5時間測定した。初めの3時間は、測定面に対してライトを照射し、後の2時間については、ライトを消して放置した。データは、30分毎に記録した。実験概要をFig. 9に示す。

4. 実験結果および考察

4.1 実験A(加熱源と供試体の距離: 400mm)

Photo. 1は供試体の実験前の写真および供試体に加

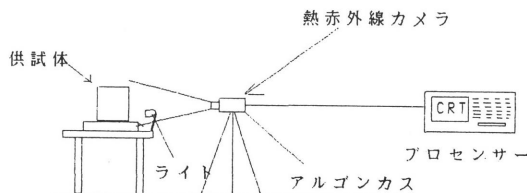


Figure 9 Schematic system of experiment.

熱を行った実験中のものである。この供試体には、Fig. 7に示すように、内部欠陥として左から175mm, 125mm, 75mm, 25mmの深さの空洞が存在している。

加熱前は、熱赤外線 Photo. 1に示すように供試体の表面温度と室内の温度は同じである。欠陥部と健全部の有無判断はできない。

これに対して、加熱中は、熱赤外線 Photo. 2, Photo. 3に示すように、加熱後30分, 60分の放射温度の画像では、明確な温度分布が表れた。この写真により、深さ H=25mmの欠陥がある位置の供試体の表面温度には、山形の温度分布が鮮明に見られた。他の深さの欠陥がある位置の供試体の表面温度は、均一で平坦な温度をもっており、欠陥の存在を見ることができない。熱赤外線 Photo. 4は、放置開始時の熱赤外線写真である。熱赤外線 Photo. 5により、放置後60分経過しても、山形の温度分布の映像は明確に保存され、深さ H=25mmの欠陥部を判断することができる。

熱赤外線 Photo. 6は、放置後120分の熱画像である。この時の供試体の表面温度は平坦に分布しており、放置後120分の欠陥部と健全部の有無判断はできなかった。

以上の熱赤外線写真では、供試体の下部の温度が比較的高く観測された。この原因は加熱源が、供試体の下部近くに位置したため、熱源からの伝熱が大きかったものと考えられる。

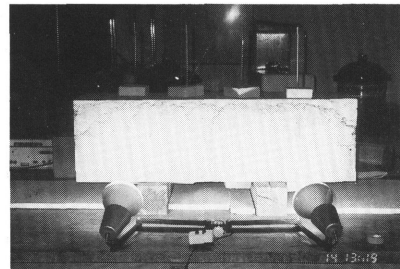
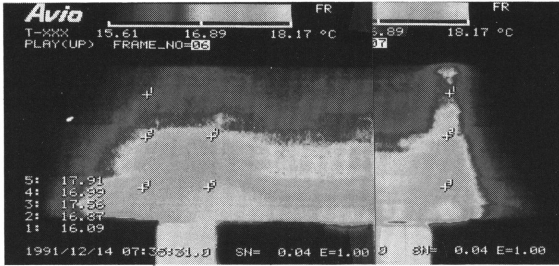


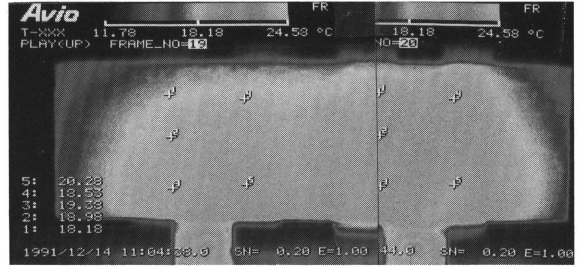
Photo. 1



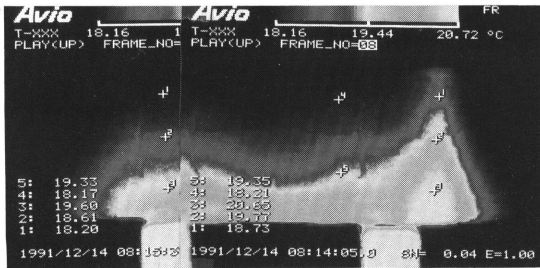
Infrared image Photo. 1



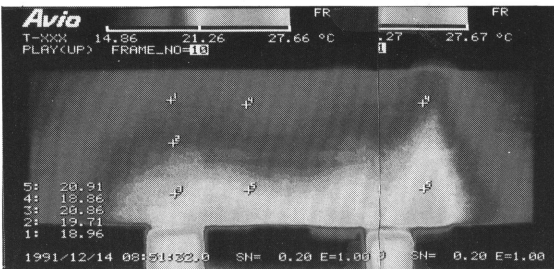
Infrared image Photo. 2



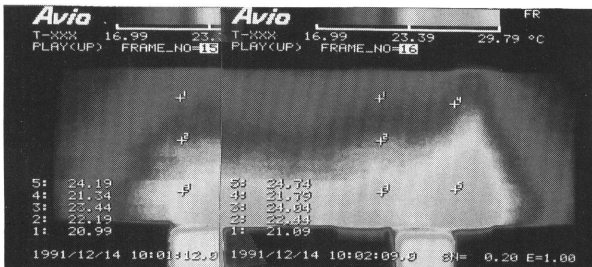
Infrared image Photo. 6



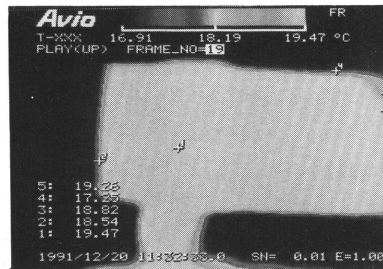
Infrared image Photo. 3



Infrared image Photo. 4



Infrared image Photo. 5



Infrared image Photo. 7



Infrared image Photo. 8

4. 2 実験B (加熱源と供試体の距離: 150mm)

実験Bの供試体表面から欠陥部までの深さ H と欠陥の幅 b の比は $H/b=1.2, 2.28, 3.32$ である。

熱赤外線 Photo. 7, Photo. 8は、加熱後30分と210分に記録された熱画像である。この写真では、欠陥部と健全部の温度分布が同じであるため、欠陥部と健全部の判断はできなかった。この原因として、深さ $H=50\text{mm}$ 以上の内部欠陥は、熱赤外線映像装置では検出できない、あるいは、加熱源と供試体の距離が近すぎることによって、供試体の欠陥部と健全部の熱収支差異が検出できないということが考えられる。また、この現象と実験Aの熱赤外線写真により、供試体の下

部がいつも高温となっているため、欠陥部と健全部が判断できないということも考えられる。

5. 実験の結論および実験に関する検討

実験Aの結果により、ライト加熱法でコンクリート構造物は深さ $H=25\text{mm}$ 、直径 $D=50\text{mm}$ の内部空洞であれば、熱赤外線映像装置を用いて検出できることが明らかとなった。また、深さ $H=75\text{mm}$ 以上、直径 $D=50\text{mm}$ の空洞は検出できないことが分かった。

実験Aと実験Bの結果により、加熱源と供試体の距離が一定の距離内になると、供試体の欠陥部と健全部の熱収支差異ができないことがわかる⁴⁾。よって、熱赤外線映像装置で構造物の内部空洞の判断をすることは困難である。

また、今回の実験において、次のような留意点が認められた。

(1) 供試体は一定の熱量を吸収した後、欠陥部と健全部の表面温度の分布には鮮明な差異が見られた。

この現象により、熱赤外線映像装置でコンクリート構造物の検出を行う場合は、最適な温度点が存在することが考えられる。

(2) 加熱源と供試体の距離は一定の範囲以外にしなければならない。

(3) 供試体の表面温度の分布は不均一なため、欠陥部の判断は困難である。それに、ライトの熱放射は扇形のようになり、ライト加熱法で供試体の表面を均一な温度分布にすることは困難である。供試体の表面温度を均一分布にするためには、加熱装置を改善しなければならない。

6. 結 語

本論では、熱赤外線映像装置のコンクリート構造物の内部欠陥の非破壊調査への適用性について、室内における基礎的な実験を行った。

今後、実験装置等を改善し、熱赤外線映像装置によるコンクリート構造物の内部欠陥の判断について、実験による検討を継続していく予定である。

最後に、本研究を実施するに当り、神栄工業(株)に熱赤外線映像装置を借用し、助力を頂いたことを記し、謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Elvery, F. H. "Non-Destructive Testing of Concrete," The Construction Industry Handbook, Medical and Technical Publishing Co., Ltd., Aylesbury 1971.
- 2) Arnold, R. H., Furr, H. L. and Rouse, J. W., Jr., "Infrared Detection of Concrete Deterioration," Technical Report No. RSC-02, Texas A and M University, College Station, 21 p., 1969.
- 3) 長内軍士：耐久性診断と非破壊検査方法 一赤外線一，コンクリート工学，Vol.26，No.7，1988. 7.
- 4) 一川宏也：土木工学分野における熱赤外線リモートセンシングの非破壊探査への実利用に関する研究，長崎大学海洋生産科学研究科，博士学位論文，p. 4，1991. 12.