赤外線映像装置を利用した構造物壁面より漏洩する 流体の漏出箇所の検出に関する研究*

稲垣照美**, 中村弘史***, 岡本芳三**

Detection of a Leak on a Surface of the Structure using Infrared Radiometer

Terumi INAGAKI, Hiroshi NAKAMURA and Yoshizo OKAMOTO

ABSTRACT

In the constructional fields, the detection of a leak on a surface is important to maintain and manage various structures such as bank, dam, tunnel and so on. When fluid is leaking out a surface of the structure, its temperature is not generally consistent with the environmental temperature. Furthermore, expansion flow of high-pressure gas jetted from a nozzle lessens its temperature and cools a surface around a nozzle. With the aid of infrared thermograph, we can detect the leak point where the temperature difference between the solid surface and the leaking fluid is remarkable. In this paper, the availability of the infrared radiometer was experimentally studied to establish a more effective detection method of leak.

Key words : Thermal Visualization, Infrared Radiometer, Leak, Detection Method, Remote Sensing, Non Destructive Testing

1. 緒 論

建設分野における堤防、ダム、トンネルおよび水路等の水利構造物からの湧水および漏水箇所や、機械分野における配管、容器、断熱層等の機器構造物からの水、空気、ガス等の漏洩箇所を検出し、その漏洩量を求めることが構造物の維持・管理を行う上で重要になる。特に地下トンネルなどで発生する漏洩箇所の早期診断は、交通・輸送手段の安全性を確保する上でも極めて重要な事柄である。

一般に流体が容器や流路等の壁面やその継ぎ目を通して外側に湧出あるいは漏洩する場合、漏洩流体の温度は外気に接した壁面の表面温度とは一致していないことが多い。また、気体が高圧で噴出する場合には、気体の膨張によりその温度は低下し、噴出孔周辺の壁面温度を低下させる。したがって、漏出箇所周辺の温度場を観察することにより、その画像から壁面との温度差の大きい箇所にひび割れなどの漏出箇所を検出することが可能となる。

本研究では、これらの湧出箇所の検出に赤外線映像装置を適用することで、本手法の有効性を検証するとともに、漏洩流量の検出やその伝熱機構について併せて検討することにした^{1)~3)}。赤外線

*原稿受付 1994年 4月20日

**正会員 茨城大学工学部

***茨城大学大学院

映像装置は、物体表面から放射される赤外線エネルギーを遠隔非接触で捕らえ、2次元の放射温度画像として表示することを特色としている。そのため本手法は、機器や構造物を広い範囲に計測・診断するための有効な手段と考えられる。

2. 実験装置と可視化法

実験装置の基本構成を Fig. 1 (a)および(b)に示す。周辺からの反射の影響を防止するため、赤外線カメラと試験体は断熱材で覆われた暗室空間の中に入れ、温度調節器と熱交換器により暗室空間内部の空気と試験体の温度が一定に保たれるように制御した。また、試験体のモデル形状を Fig. 2 に示す。試験体は、縦 300 mm、横 180 mm、厚さ 50 mm のモルタル製基板で構成され、コンクリートと砂の混合比は 7 : 3 である。実験は、試験体内部に断熱材で覆われた内径 1.0 mm の漏洩用パイプを埋め込み、そこから流体を漏洩させて実施した。漏洩孔は、試験体下端から 240 mm の位置に設定してある。漏洩水は、試験体上方に設置した水槽から自由落下させ、流量計および流

Fig. 2 Test piece

量制御弁により漏出量を制御・計測した。本研究では、まず第一に垂直面と水平面について、それぞれ温度と流量の組合わせを変えたモデル実験をいくつか行い、漏洩箇所検知に関する基礎的な考察を加えることにした。垂直面の実験では、実際の状況を反映させるため、試験体表面全体を水で濡らした状態で実験を行った。また、水平面の実験では、試験体全体を水槽の中に沈め、水位を試験体の上方より 5, 10, 15, および 20 mm の位置に取り、水槽内部の水と試験体の温度を一定にした。本実験は、トンネル底面など、水面下から地下水が湧水する状況を想定したモデルによる基礎実験である。

つぎに実際の亀裂面への応用として、任意形状の亀裂より湧水している試験体表面を可視化し、本検出法の有効性を検証した。さらに地層面からの漏洩箇所の検知への応用として、土中から漏洩水が湧き出す場合の実験を実施した。

実験は垂直・水平面のいずれの場合も表面温度を一定にした後、湧水面の温度の経時変化を赤外線映像装置で可視化し、その映像をコンピューターに記録した。漏洩水の温度およびその周囲の温度は、放射温度画像および CA 熱電対を用いて測定した。水は赤外線を表面で吸収するために黒体と考えてよく、水の放射温度はほぼ実際の温度と考えて差し支えない。したがって、水で濡らしたコンクリート表面の放射温度は実際の温度と考えてよい。本研究では、実際の表面温度に基づいて放射温度の検定を行い、真の温度を同定している。

3. 可視化結果および考察

3.1 垂直面における漏洩モデル実験

(a) Experimental apparatus for vertical surface

(b) Experimental apparatus for horizontal surface

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig. 3 (a)および(b)は、赤外線映像装置で可視化した垂直面上の湧水の放射温度画像をそれぞれ示したものであり、湧水開始3分後の結果である。壁面および漏洩水の温度は、それぞれ(a)は30°Cおよび20°C、(b)は35°Cおよび20°Cである。また漏洩流量は、上から順に10, 20および30 cm³/minである。漏洩水は垂直に下降し、流れに沿

ってその幅を広げながら落下して行く様子がわかる。写真中の左側と下側のグラフは、画面十字線上の温度分布を示している。壁面より温度の低い漏洩水は壁面から熱を得ることにより、その温度は漏洩箇所からの距離が大きくなるほど上昇し、壁面の温度に近づいていくことがわかる。また、これらの写真を比較することにより、漏洩水温と

10 cm³/min 10 cm³/min 20 cm³/min 20 cm³/min 30 cm³/min 30 cm³/min

(a) Wall temp. 30°C, Water temp. 20°C

(b) Wall temp. 35°C, Water temp. 20°C

Fig. 3 Thermograph on a vertical surface

壁温との温度差が大きいほど、また漏洩流量が少ないほど、漏洩水温は壁面温度に早く漸近することがわかる。

Fig. 4 (a), (b)および(c)は、縦軸に無次元温度 $\theta = (T_x - T_0)/(T_w - T_0)$ を、横軸に漏洩孔からの距離 x mm を取って上記実験結果を整理したものである。(a), (b)および(c)は、壁面および漏洩水の温度が、それぞれ 20°C と 15°C , 30°C と 20°C および 35°C と 20°C の場合である。また図中の記号 $\square \circ \Delta$ は、漏洩流量がそれぞれ 10, 20 および $30 \text{ cm}^3/\text{min}$ の場合を示している。一連の図

(a) Wall temp. 20°C , water temp. 15°C , $10 \text{ cm}^3/\text{min}$

(b) Wall temp. 30°C , water temp. 20°C , $20 \text{ cm}^3/\text{min}$

(c) Wall temp. 35°C , water temp. 20°C , $30 \text{ cm}^3/\text{min}$

Fig. 4 Non-dimensional temperature along a vertical surface

から、無次元温度分布 $\theta(x)$ は、流量が小さくなるとともに増加する傾向にあると言える。

Fig. 5 は、Fig. 4 の結果を漏洩流量が 10, 20 および $30 \text{ cm}^3/\text{min}$ のそれぞれ場合について一つの図にまとめたものである。ハッチングされた部分は、一連の実験の標準偏差を考慮した範囲を示す。 θ による無次元整理から、漏洩流量が温度分布に対する主要なパラメータとなっていることがわかる。なお壁面と漏洩水との温度差が 2°C 以下の場合、漏洩箇所の特が困難であった。この場合、漏洩箇所周辺に温水や冷水をかけて一時的に壁面と漏洩水との温度差を大きくし、温度場の経時変化を可視化することにより、漏洩箇所を検知することが可能となる。

Fig. 6 は、より一般化を図るため、無次元温度 θ を縦軸に、無次元距離 $\xi = (X/L)Re$ を横軸にとって漏洩水の温度分布を整理し直したものである。また図中の直線は最小二乗法によって求めたものであり、 $\theta = 8.3 \times 10^{-5} \cdot \xi^{1.2}$ で表わされる。図から明らかなように、無次元整理を行うことで、実験諸条件に関係なく温度分布を整理できる

Fig. 5 Non-dimensional temperature along a vertical surface

Fig. 6 Non-dimensional temperature along a vertical surface

ことが明らかになった。

つぎに Fig. 7 は、漏洩水の伝熱機構を調べるため、 $Nu = [\{\rho C_p(T_w - T_0)/A(T_x - T_0)\} \cdot L] / \lambda$ で定義される無次元数を縦軸にとり、無次元距離 ξ を横軸にとったものである。ただし、ここで求めた無次元数は、流れ方向の温度上昇が壁面からの熱移動のみによるものという仮定の下に求めたものである。図中の直線は、最小二乗法によってもとめたものであり、 $Nu = 4.0 \times 10^4 \cdot \xi^{-1.2}$ で表現することができる。図より、漏洩流量が多いほどあるいは漏洩箇所に近い上流ほど無次元数が 1 より大きく、熱移動は対流熱伝達による支配が強いことがわかる。しかしながら下流に行くほど流れが広範囲に拡散するため、対流熱輸送量が減少し、伝導による熱輸送支配が強まると考えられる。このことは、無次元数が下流ほど小さくなることから確認できる。

3.2 水平面における漏洩モデル実験

Fig. 8(a)および(b)は、漏洩試験体を水平におき、水面下 5 mm の水槽の中に沈めた状態で漏洩孔より水を湧き出させ、漏洩箇所および一連の湧水の広がり様子を可視化したものである。壁面温度、漏洩水温および漏洩水量は、(a)は 18°C、10°C および 30 cm³/min で、上から順に実験開始から 5、30 および 180 秒後、(b)は 30°C、25°C および 10 cm³/min で、上から順に 5、20 および 120 秒後の写真である。漏洩孔は水面下にあるため直接肉眼では観察できないが、赤外線映像装置を利用することにより、周囲との温度差からその位置を明確に検知することができる。湧き出した冷水は約 5 秒後に低温点として現われ、その後 2 方向

に分岐して広がっていく。この現象は流量が多いほど、水面の高さが高いほど顕著に現われるが、分岐する方向は一定しない。特に水面の高さが 15 mm 以上で流量が 30 cm³/min の場合、数秒ごとに分岐する方向が変化するのが観察された。漏洩水が 2 方向に分岐するのは、試験体の形状によるものではなく、水の表面張力あるいは水面のわずかな擾乱によるものと考えられる。

3.3 実際の亀裂面への応用

以上、一連の基礎的実験では、モデル化された漏洩孔に対する漏洩箇所の検出に関する検討を行い、赤外線映像装置利用の適用性・有効性を検証することができた。したがって、本節ではより実際の漏洩形態に近い試験体を検出対象とし、本検出法の応用例を具体的に考えてみることにした。

Fig. 9 は、本実験で使用した試験体を示す。これは、縦 250 mm、横 250 mm、厚さ 50 mm の市販コンクリートブロックを二つに割り、再度接着したものである。ここでは、亀裂形態の異なる試験体を 2 個制作し、それぞれを試験体 A、試験体 B として使用した。試験体の側面および裏面には、防水塗料を塗布し、表面からのみ漏洩するようにした。Fig. 10(a)および Fig. 11(a)は、試験体 A および B の表面を赤外線映像装置で可視化した放射温度画像であり、Fig. 10 および Fig. 11 の(b)はこれらの画像における温度の測定感度と範囲を変化させたものである。まず試験体 A に関する Fig. 10(a)の画像から、3 か所の漏洩筋が見られ、この部分から漏洩していることが分かる。しかし、(b)のように温度の測定感度と測定範囲を変更することで、最初 1 か所からの漏洩と思われた最右翼の漏洩筋が、実際は上部漏洩箇所からの漏洩筋の中にさらに一つの漏洩箇所が隠れており、漏洩孔が二つあることが確認できる。ここで、画像中の英小文字は、温度の測定範囲を少しずつ変化させていくことで確認された低温点（漏れ箇所）の位置と、その順番を表わしている。その結果、最終的に漏洩箇所は a～g の 7 か所が特定でき、さらに低温部分の広がり方から c～d 間に微少な漏れが生じていることが予想できる。同様にして、試験体 B についても 7 か所の漏洩箇所が特

Fig. 7 Non-dimensional heat transfer rate along a vertical surface

After 5 second

After 5 second

After 30 second

After 20 second

After 180 second

After 120 second

(a) 30 cm³/min, Wall temp. 18°C, Water temp. 10°C

(b) 10 cm³/min, Wall temp. 30°C, Water temp. 25°C

Fig. 8 Thermograph on a horizontal surface

定できた。

Fig. 12(a)および Fig. 12(b) は、試験体AおよびBの表面の写真で、試験体表面に放射温度画像から確認できた亀裂の位置a～gを書き入れてある。試験体Aの写真(a)では、試験体中央に比較的

Fig. 9 Test piece for an application

大きな亀裂が確認できるが、放射温度画像によるとこの亀裂からは漏洩していないことが分かる。これに対して、放射温度画像で確認できた漏洩箇所に、亀裂を目視できない箇所、例えば a や e など、が数箇所あった。これは、試験体 B についても同様のことが言える。例えば、b など。

3.4 土中漏洩箇所の検知

一般に地下水の湧水は、建築構造物壁面のみからではなく、地層中から表面に漏洩する場合もある。したがって本研究では、土中からの湧水箇所の検出に赤外線映像装置を利用した実験も併せて行った。

Fig. 13 (a)および(b)は、砂の中に漏洩パイプを埋めて、湧水の広がる様子を赤外線映像装置で可

(a) 30 cm³/min

(b) 30 cm³/min

Fig. 10 Thermograph on a mortar surface of test piece A

(a) 30 cm³/min

(b) 30 cm³/min

Fig. 11 Thermograph on a mortar surface of test piece B

(a) Test piece of A

(b) Test piece of B

Fig. 12 Photograph of mortar surface

(a) 5 mm below

(b) 10 mm below

Fig. 13 Thermograph on a sand surface

視化した放射温度画像である。(a)と(b)はそれぞれ砂の表面から 5 mm および 10 mm 下に漏洩孔を設置したものであり、漏洩流量はともに $10 \text{ cm}^3/\text{min}$ である。写真から分かるように漏洩水は、漏洩箇所を中心に、ほぼ円形に広がっており、漏洩孔の位置が浅いほど、広がり方は大きくなっている。

4. 結 論

本研究は、漏洩箇所検出に赤外線映像装置を適用することで、その適用性および有効性を検証したものである。ここでは、堤防壁面の湧き水やコンクリート地下壁からの湧水など、湧き出し箇所が直接目視では特定できないような対象を取り上げ、赤外線映像装置で可視化し、漏洩水の温度分布を調べた。その結果、本手法は漏洩箇所を特定する上で有効な手段であることが明らかになった。また、壁面と漏洩水との温度差が 2°C 以下の場合、漏洩箇所とその周辺の温度差が曖昧になり、漏洩箇所を周辺を含めた範囲として検知することしかできない。この場合、漏洩箇所周辺に温水や冷水をかけて一時的に壁面と漏洩水との温度差を大きくし、漏洩筋の経時変化を可視化することにより、漏洩箇所を点として検知することが可能であることがわかった。また実際の亀裂面や土中漏洩に関する実験から、亀裂の有無を目視できない箇所でも赤外線映像装置を利用することで、漏洩箇所の検知が可能であることが明らかになっ

た。

本検出法は、機器構造物の保守・管理だけでなく、交通・輸送手段の安全性を確保する上で有効な手段となるものと考えられる。

記号表

A : 試験体上の濡れ面積, C_p : 比熱, d : 漏洩口径, L : 代表長さ (試験体全長), m : 体積流量, T_0 : 漏洩水入口温度, T_w : 壁面温度, T_x : 漏洩孔からの距離 $X \text{ mm}$ における漏洩水温度, U_d : 漏洩速度, X : 漏洩孔からの垂直方向の距離, $\zeta: \frac{X}{L} \cdot \frac{1}{Re}$ で定義される無次元距離,

$\theta: \frac{(T_x - T_0)}{(T_w - T_0)}$ で定義される無次元温度, λ : 熱

伝導率, ρ : 密度, $Nu: \frac{\rho C_p (T_w - T_0) m \cdot L}{A (T_x - T_0) \lambda}$ で

定義される無次元熱伝達率, $Re: \frac{U_d \cdot d}{\nu}$ (レイノルズ数)

参 考 文 献

- 1) 岡本他: 赤外線による射度係数の測定とその応用, 日本機械学会論文集, B編, 57, 534, (3.1992)
- 2) 岡本他: 赤外線による材料放射特性について, 日本機械学会論文集, B編, 57, 544, (12.1991)
- 3) 岡本他: 赤外線サーモグラフィー法によるモルタル試料表面の放射温度画像, 日本コンクリート協会, サーモグラフィー法に関するコンファレンス論文集, 409, (4.1992)

(a)左手の運動時

(b)右手の運動時

口絵5 超高速MR撮像法による運動野の賦活イメージング

(株東芝研究開発センター 久原重英)(本文229頁参照)

(a)30cm³/min

(a)30cm³/min

(b)30cm³/min

(b)30cm³/min

口絵6 Thermograph on a mortar surface of test piece A

口絵7 Thermograph on a mortar surface of test piece B

(茨城大学 稲垣照美, 中村弘史, 岡本芳三)(本文235頁参照)