逆解析手法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同定に関する研究*鄭 子 揚^{*1}, 阪上 隆 英^{*2}, 久保 司 郎^{*3}Estimation of Delamination Depth in Concrete by Passive
Thermography Using Inverse AnalysisTzu-Yang CHENG^{*4}, Takahide SAKAGAMI and Shiro KUBO^{*4} Department of Mechanical Engineering, Osaka University,
1-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

Passive infrared thermography is an effective technique for detecting delamination in concrete structures. However, the method is dependent on weather conditions, when solar radiation is used. This research investigates the possibility of quantitative estimation of delamination depth in concrete by using the passive infrared thermography under solar radiation. An inverse approach is introduced for the quantitative estimation from transient temperature distribution on concrete surface under various weather conditions. In the inverse method the time series thermographs of observed surface are compared with those obtained by the FEM analyses. The inverse analysis is applied to experimental data obtained by infrared camera. It is found that delamination depth can be quantitatively estimated by using the inverse analysis.

Key Words: Nondestructive Testing, Passive Thermography, Inverse Analysis, Concrete, Delamination Defect

1. 緒 言

赤外線に基づく非破壊試験は、熱負荷の与え方によってアクティブ赤外線サーモグラフィ法(アクティブ法)およびパッシブ赤外線サーモグラフィ法(パッシブ法)に大別される。パッシブ法は人工熱源を使用せず、日射や外気温の変動による試験体の表面温度変動を計測することにより、欠陥を検出する方法である。屋外で計測する時には、パッシブ法の適用事例が多い。アクティブ法は日射等による熱負荷が利用できず、人工的加熱が必要かつ可能な場合に用いられる。

赤外線サーモグラフィ法によるコンクリートのはく離検出については、アクティブ法を用いて、はく離の深さ評価ができることが示されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、パッシブ法を用いた場合には、アクティブ法に用いられる熱源のように加熱条件が制御できるものではなく、試験体の表面温度変動は試験中の環境条件に依存するので、はく離深さ同定がアクティブ法に比べ困難であると考えられる。パッシブ法の検査結果に影響を与え

る日射量、外気温、風速等のパラメータに関して、込山ら⁽³⁾は各パラメータを変化させた場合の実験およびシミュレーションの結果から、サーモグラフィ法によるはく離検出の適用限界について検討を行っている。しかしながら、パッシブ法によりはく離深さの同定を行った結果は、これまでに報告されていない。

そこで、著者ら⁽⁴⁾は、パッシブロックイン赤外線サーモグラフィ法を、はく離欠陥を挿入したコンクリート試験体に対する赤外線計測結果に適用し、数時間の温度変動データに関する計測結果に対して、フーリエ級数展開によるブロックイン処理を施し、処理結果からはく離深さを評価する方法を提案した。本手法ははく離部と健全部との温度変動のフーリエ級数係数 a_n 、 b_n および位相 θ_n の差、すなわち Δa_n 、 Δb_n および $\Delta \theta_n$ に着目し、これらの値からはく離の深さを同定する手法である。しかしながら、同手法は日射による加熱および放射冷却を熱負荷とした場合の熱画像に対し、ブロックイン処理を行う手法であるため、アクティブ法のような急激な熱変動を必要としていた。このため、適用できる天候条件が限られるという問題があった。

そこで本研究では、逆解析手法を用いることにより、多様な熱負荷による温度変動に対応できるはく離深さ同定する手法を提案し、その有効性を検討する。

* 原稿受付 2010年4月2日。

^{*1} 正員、大阪大学工学研究科(☎ 565-0871 吹田市山田丘1-1)。^{*2} 正員、フェロー、神戸大学(☎ 657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)。^{*3} 正員、フェロー、大阪大学工学部。

E-mail: chen@saos.mech.eng.osaka-u.ac.jp

2 実験および数値解析方法

2・1 実験装置の設置と試験体 本実験に用いたコンクリート試験体の形状寸法を図1に示す。試験体の寸法は1000mm×1000mm×300mmであり、模擬はく離として、空気にできるだけ近い低い熱伝導率を有するポリエチレン板を挿入した。模擬はく離としては、図1に示すように、大きさを150mm×150mm、厚さを5mmとし、はく離深さを10mm、20mm、30mmおよび50mmの4種類とした。試験体に使用した材料および配合を表1に示す。また、コンクリートの水セメント比は57%である。

Fig. 1 Specimen geometry[mm]

Table 1 Details of concrete specimen

Specifications	Unit quantity[kg/m ³]
Portland cement	304
Sand(Density 2.58, F.M2.70, less than 2.5mm)	390
Crushed sand(Density 2.90, F.M2.90, less than 5mm)	387
Crushed rock(Density 2.63, solid content 58.0%)	1007
Air entraining and water reducing agent	3.34
Industrial water	173

試験体は図2に示すように屋外に設置した。コンクリート構造物に対するパッシブ法の適用性を検討するため、計測は試験体に日射が当たる朝から、夕刻まで実施した。試験体の上面および側面部からの日射、気温、風などによる熱収支の影響を低減するため、試験体の上面および側面に断熱材として発泡スチロールを貼り付けた。さらに、地面からの熱の影響を低減するために、コンクリートブロックで試験体を支えた。

Fig. 2 Experimental setup

計測には、マイクロボロメータセンサーを搭載した赤外線カメラ(NECAvio TS7302)を用い、熱画像を 60

秒ごとに撮影した。赤外線カメラの仕様を表2に示す。さらに試験体の計測表面に日射計を設置し、赤外線撮像時における日射強度を計測した。

Table 2 Specification of employed infrared camera

Temperature[°C]	-40~+100
Temperature resolution(NETD)[°C]	0.08
Wavelength[μm]	8~14
Number of pixels	320×240

2・2 有限要素法による非定常熱伝導解析 本研究に用いた熱伝導解析モデルは図3に示すような厚さ300mmのコンクリート平板を模擬した2次元モデルとした。要素の大きさを5mm×5mmとし、時間増分値を30secとした。欠陥として150mm×5mmの空気層を挿入した。非定常熱伝導解析モデルを2次元化したことで、数値解析結果の妥当性が疑われるため、はく離深さ10mm、20mm、30mm、40mmおよび50mmに対して3次元モデルによる数値解析を行い、2次元モデルと3次元モデルによる温度分布計算結果を比較した。その結果、2次元モデルと3次元モデルの温度差は、最大でも0.11°C(はく離深さ30mm)であり、2次元モデルと3次元モデルの数値解析結果の差は小さいことがわかった。このため、有限要素解析の計算時間を低減させることを目的に、2次元モデルを用いた。

はく離深さ d については、現場で問題となるはく離は鉄筋腐食によるものであり、はく離が問題となる鉄筋の埋没深さ(かぶり)は深いもので50mmである。また、表面温度をもとにしたコンクリートはく離欠陥の評価限界が50mmである。これらをもとに、試験体の人工欠陥も50mmまでとしている。これにより、はく離深さ d の仮定範囲を5mmから50mmにした。側面の温度境界条件は断熱境界、表面および裏面は熱伝達境界として、有限要素法によって非定常熱伝導解析を行うことにより、環境変化に対応するコンクリート試験体の表面温度を求めた。熱伝導解析モデルの表面に与える熱流束としては、相当外気温度あるいはソルエア温度(SAT)と呼ばれる日射強度変化に相当する気温変化⁽⁵⁾とした。相当外気温度は式(1)に基づいて計算される。

$$\theta_{solair} = \theta_a + R_{s0}(\varepsilon_{sun} J_{sun} + \varepsilon J_{nit}) \quad (1)$$

θ_{solair} は相当外気温度[°C]、 θ_a は空気温度[°C]、 R_{s0} は表面の総合熱伝達抵抗 [(m²・°C)/W]、 ε_{sun} は外壁表面の日射吸収率、 ε は外壁表面の放射率、 J_{sun} は日射量 [kW/m²]、 J_{nit} は夜間放射量 [kW/m²]である。また、有限要素解析において用いた各パラメータの値を表3に示す。

Fig. 3 Thermal conduction analysis model [mm]

Table 3 Physical quantities given in FEM analyses

Item	Concrete	Air
Conductivity k [W/m $\cdot$ °C]	1.4	0.0257
Specific heat C_p [kJ/kg $\cdot$ °C]	0.88	1.0046
Mass density ρ [kg/m 3]	2100	1.166

3 実験結果および数値解析結果

3.1 パッシブ赤外線サーモグラフィによる実験結果

本研究ではパッシブ法による計測を行うため、日射のある日に限って実験を行った。実験日の天候および計測持続時間を表4に示す。健全部およびはく離欠陥の中心部において得られた表面温度変動曲線を日射強度変動曲線とともに図4に示す。その横軸に時間、縦軸に温度および日射強度を示す。図4より、試験体の計測開始時の温度は計測時期によって異なっていることが分かる。また、健全部の表面温度変動量は欠陥部より小さく、はく離が深いほどその変動量が小さくなっていることが分かる。

また、図4に示した日射強度変動曲線からは、日射強度の最大値が1月の0.95kW/m 2 から5月の0.47kW/m 2 まで、毎月減少していることが分かる。そのため、夏至に近づくほど日射による試験体表面温度の上昇は減少し、代わりに外気温の変動による試験体表面温度の変動量が相対的に増加すると考えられる。3月30日および5月9日の実験結果によると、試験体表面温度が最大になる時刻と日射強度が最大になる時刻が違ってくることから、試験体の熱収支は日射によるものだけではなく、周辺気温の影響を受けていると考えられる。一日の最高気温が常に午後2時から3時までの間に現れることから、外気温が試験体表面温度に影響していることが分かる。

3.2 非定常熱伝導解析の解析結果

本研究で行った非定常熱伝導解析では、図4に示した日射強度および気象庁ウェブサイトに記載されている、大阪府枚方市の外気温を式(1)に代入し、算出した相当外気温を熱伝達境界の入力値として、図3に示した熱伝導解析モデルを用いた解析を行った。ここで、試験体表面の総合熱伝達抵抗は0.043(m 2 ·°C)/Wとし、外壁表面の日射吸収率を0.9とし、夜間放射量はないものとした。熱伝導解析モデルの裏面には外気温の変動

による熱伝達を与えた。

Table 4 Weather condition in experiment

Date	Weather	Duration
2009/01/11	Fine, Occasionally cloudy	08:28 ~ 17:50
2009/02/04	Fine, cloudy later	07:30 ~ 17:53
2009/03/30	Fine	07:30 ~ 18:30
2009/05/09	Fine	06:10 ~ 18:30

(a) January 11

(b) February 4

(c) March 30

(d) May 9

Fig. 4 Specimen surface temperature and solar energy at experiment

結果の一例として、1月11日の環境条件をもとにした解析結果および健全部および各欠陥部の表面温度の数値解析値と実験値の比較を行った結果を図5に示す。コンクリートの配合が変わるとその熱物性も変わり、さらに屋外で実験を行うため、環境条件の変化および試験体の熱物性の変化は避けられないので、解析値と実験値を完全に一致させることは不可能と考えられる。また、本手法による深さ同定は、健全部と欠陥部の温度変動の相対値の変化をもとにしても可能となることから、健全部における温度変動曲線をもとに、逆問題解析に用いる実験値および解析値が比較できるようにするため、図5(b)に示した健全部の温度変動曲線は、実験値に基づく曲線と解析値の曲線の最大値および最小値が一致するように縦軸のスケールを調整して描いた。図の横軸は時間を示し、左と右縦軸はそれぞれ解析結果の温度および実験結果の温度を示す。また、図5(c)-(f)に示したはく離部曲線の縦軸のスケールを図5(b)と同じにした。

図5(a)に示した温度変動曲線から、健全部の温度変動は欠陥部のそれより小さく、はく離の深さが深いほど温度変動が小さいことが分かる。図5(c), (d)および(e)に示した欠陥深さ10mm, 20mm および 30mm に対する温度変動曲線を見ると、実験値と数値解析値の温度変動の傾向がよく一致していることが分かる。図5(f)に示した欠陥深さ50mmの温度変動曲線では、実験値と数値解析値の温度変動の傾向は一致したが、実験値と数値解析値の差は浅いはく離の場合より大きくなっている。この原因としては、解析プログラムに入力したコンクリートの熱物性、あるいは面外熱拡散および時系列温度変動に影響を及ぼす熱伝達率、放射率等の熱物性が実際値と異なっていることが考えられる。

以上より、解析に用いる外気温データを気象庁ウェブサイトから得られた外気温データにすることでも、数値解析により得られた温度変動曲線の変動傾向は、実験により得られたものと概ね一致していることが分かった。

4. 非定常熱伝導解析による逆問題解析手法

本項では、逆問題解析手法の一つである残差最小化法を利用してはく離深さを同定した。すなわち、非定常熱伝導有限要素解析で得られた温度変動曲線と実験により得られた温度変動曲線を比較し、二つの曲線の残差平方和が最小となるような欠陥深さを求めた。残差平方和 M_d は次式で与えられる。

$$M_d = \sum_{i=1}^m [u_i - \bar{u}_{i,d}]^2 \quad (2)$$

ここで、 u_i は実験で得られた測定面温度であり、 m は計算に用いたステップ数である。また、 $\bar{u}_{i,d}$ は有限要素解析において、はく離深さを d と仮定して算出した、ステップ i におけるはく離部表面温度を表している。

欠陥パラメータの同定結果を表5に示す。表中の太い線に囲まれた値が残差平方和の最小値を示している。はく離深さが10mmの場合には、残差平方和が最小になる仮定したはく離深さはすべて10mmになっており、はく離深さが正しく同定されていることが分かる。はく離深さが20mmの場合には、仮定したはく離深さは15mm~20mmに同定され、はく離深さが30mmおよび50mmの場合には、仮定したはく離深さは20mm~30mmおよび30mm~50mmの間に同定された。表5に示した残

Fig. 5 Comparison between analysis results and experimental results on January 11

差平方和を仮定したはく離欠陥深さに対してグラフ化した結果を図6に示す。図6の中に、残差平方和の最小値を示している記号を黒色で塗りつぶした。図6に示す残差平方和の分布に注目すると、その最小値のピークは一つしかないことが分かる。

そこで、残差平方和の最小値近傍における分布は2次曲線で近似できるという特性を利用して、残差平方和の2次近似曲線を求めた。近似曲線のピークに対応する推定はく離深さおよび真値との間の同定誤差を表6に示す。表6により、2月4日の同定結果における誤差は他の日の誤差と比べ、少し高いことが分かる。この原因としては、2月3日には夜まで雨が降ったため、試験体の含水率が上昇したことによって、試験体の熱伝導率が文献⁽⁶⁾に記載しているように上昇したことが考えられる。2月4日を除いては、表6に示した同定結果では、深さ10mmおよび20mmのはく離欠陥は同定誤差10%以下で精度良く同定された。また、深さ30mmのはく離欠陥に対しては推定誤差は20%以下になり、深さ50mmのはく離欠陥に対しては推定誤差は40%以下になった。

この結果より、逆問題解析に用いる温度データを非定常熱伝導解析の解析結果の相対値にするだけでも、深さ推定に十分であるため、本研究提案した方法ははく離深さを概ね正しく同定することが可能であることを確認した。また、より深いのはく離ほど実際より浅く同定され、誤差も大きくなることが分かった。

5. まとめ

本研究では日射条件によらず適用可能な、コンクリートのはく離深さ推定方法として、逆解析手法を用いたパッシブ赤外線サーモグラフィによるはく離深さ同定手法を提案した。日射のある日に計測された日射強度および気象庁ウェブサイトに記載されている外気温を用いて、非定常熱伝導解析を行い、解析結果と実験結果を比較した。その結果、浅い欠陥に対する赤外線強度変動曲線の解析値は実験値と概ね一致していることが分かった。そこで、逆解析手法として残差最小化法を利用して、はく離深さを推定した。残差平方和の分布は単峰性を示しており、残差平方和に基づいた本手法により、コンクリートのはく離深さを一意に推定することができた。同定結果では、浅い欠陥に対しては、高い精度ではく離深さが推定できた。これに比べて、深い欠陥については数値解析の精度を向上させても、実験で得られる試験体表面温度変動が健全部と同じ程度に小さくなるため、誤差の影響を受けやすくなり、欠陥パラメータ同定の精度が悪化している。さらに、コンクリートの含水率が深さ方向に変化していることもさらに同定精度を悪化させる一因であると考えられる。

本研究の遂行にあたり、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻鎌田敏郎教授の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

Table 5 Square sum of residuals M_d for various assumed delamination depths

Simulation			Square sum of residuals, M_d [$^{\circ}\text{C}^2$]									
			Assumed defect depth d [mm]									
			5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Real	1/11	10	1682	406	1106	2184	3242	4191	5011	5689	6224	6627
		20	4974	1607	731	618	786	1090	1454	1819	2146	2413
		30	6822	2493	958	448	401	601	926	1286	1624	1909
		50	9965	4751	2338	1103	496	287	319	477	677	873
	2/04	10	922	642	2159	4225	6141	7688	8870	9751	10395	10858
		20	3084	1085	814	1319	2029	2713	3311	3813.6	4222	4543
		30	4959	2196	1138	963	1152	1468	1820	2164	2478	2742
		50	8539	4758	2582	1413	829	592	569.6	674	839	1017
	3/30	10	1409	309	1289	2961	4676	6228	7567	8680	9573	10263
		20	5461	2328	1201	967	1115	1461	1913	2398	2858	3257
		30	7492	3497	1631	853	643	777	1118	1555	2004	2411
		50	12032	7017	4015	2170	1060	487	300	357	540	767
	5/09	10	544	187	584	1349	2255	3183	4066	4862	5545	6107
		20	2615	1448	913	724	740	899	1155	1461	1774	2063
		30	4020	2350	1357	786	506	451	561	771	1024	1278
		50	6663	4557	3039	1918	1118	609	346	263	294	383

Fig. 6 The relation between assumed defect depths d and square sum of residuals M_d .

Table 6 Estimate of delamination depth based on the quadratic approximation curve of square sum of residuals

		Delamination depth d [mm]				
		Actual	10	20	30	50
01/11	Estimated	11	20	24	32	
	Error	10%	0%	20%	36%	
02/04	Estimated	8	14	20	34	
	Error	20%	30%	33.3%	32%	
03/30	Estimated	10	21	26	36	
	Error	0%	5%	13.3%	28%	
05/09	Estimated	10	22	29	41	
	Error	0%	10%	3.3%	18%	

文 献

- (1) Nakamura, S., Sakagami, T., Harada, S., Kubo, S., Three-dimensional Shape Evaluation of Delaminations in Concrete Structures by Infrared Thermography, *Japan Concrete Institute, Concrete Research and Technology*, Vol. 19, No.3(2008), pp. 51-60.
- (2) Ibarra-Castaneda, C., Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography : Depth Retrieval with the Phase, *Laval University Ph.D Thesis*, (2005), pp.63-107.
- (3) Komiyama, T., Nakano, Y., Tanigawa, Y., Experimental Study on Limitation of Thermographic Survey Applied to Detection of Delamination of Finishing Materials on External Wall, *Transactions of AIJ, Journal of Structural*

and Construction Engineering, No.484(1996-6), pp.13-20.

- (4) Cheng, T.Y., Sakagami, T., Kubo, S., Sato, D., Nakamura, S., Estimation of Delamination Depth in Concrete by Passive Lock-in Thermography, *Proceedings of the 3rd Symposium on Nondestructive Testing Method for Concrete Structure*, Vol. 3(2009-8), pp.89-98.
- (5) Saito, H., *Building climate*, (1993), pp.18-20, Kyoritsu Shuppan.
- (6) Yasui, Y., Matsumoto M., Hokoi, S., Matsushita, T., Ogura, D., Kominami, K., Onmura, S., Relationship between Heat and Moisture Properties of Concrete and Strength : Part 2 Measurements of Thermal Conductivity and Water Vapour Permeability, *Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. D-2, Environmental Engineering II*, (2004), pp.405-406.