

サーモグラフィー法を適用した コンクリートの内部探査

NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF INTERNAL DEFECT IN CONCRETE BY THERMOGRAPHY METHOD

山田 和夫
Kazuo YAMADA

ABSTRACT In this study, the applicability of thermography method on the evaluation of inclusion embedded in a concrete was examined by the experiment and by the three dimensional finite element method for the heat conduction analysis. The relationships between the type and embedded depth of inclusion and the temperature distribution of concrete surface were discussed. Following results were obtained in this study:

1) The three dimensional finite element method for the heat conduction analysis is useful to examine comprehensively the effect of inclusion on the temperature distribution of concrete surface, because the analytical results agree well with the experimental results on the temperature distribution of concrete surface.

2) It is necessary to clarify the combined effects of solar irradiances, indoor and outdoor air temperatures on the temperature distribution of concrete surface, so as to evaluate exactly the inclusion embedded in concrete by the thermography method, because the temperature of concrete surface is very affected by these factors, even if the type and embedded depth of inclusion have the same conditions.

3) When the sol-air temperature is higher than the indoor one, the surface temperature at inclusion portion is higher than that of non-inclusion portion in the case of styrene foam as a inclusion, but the former becomes lower than the latter in the case of steel plate as a inclusion.

1. はじめに

従来、コンクリートに関する非破壊試験方法は、構造体に打設されたコンクリートの強度を推定することを目的としたものが多かったが、近年はコンクリート構造物の劣化度診断や外壁タイルの剥落による人身事故が大きな社会問題となったことなどとも関連して、コンクリートの強度推定以外の内部探査

の試験方法も重要となってきている¹⁾。

筆者は、この点を踏まえて、先に弾性波法を適用した外壁タイルの剥離評価の可能性と適用性について実験的および解析的検討を行い^{2), 3)}、検出波形の周波数特性と低周波数領域における共振周波数の出現状況に着目することによって、タイルの剥離状況をある程度正確に評価できる可能性のあることを報告した。また、別報⁴⁾では最近注目を集めているサーモグラフィー法による外壁タイルの剥離評価方法を確立するための基礎的研究として、タイルの剥

離状況と外壁温度の分布状況との相互関係について解析的に検討を行い、その可能性について報告した。本研究は、これら一連の研究の延長線上のもので、サーモグラフィ法によるコンクリートの内部探査の適用性を明らかにすることを目的として、実験的および解析的に検討を行ったものである。

2. 実験および解析方法

2.1 実験の概要

実験の概要を Table.1 に示す。本実験では、Fig.1 に示すように、大きさ10(縦)x10(横)x0.5(厚さ)cmの介在物が試験体中央の所定深さに埋設されている

Table.1 Inclusion embedded in specimen.

Type	Depth (cm)	Size (cm)
Styrene foam	3.0	10x10x0.5
Steel plate	6.0	
No inclusion	9.0	

[Unit : mm] d=30, 60, 90 mm

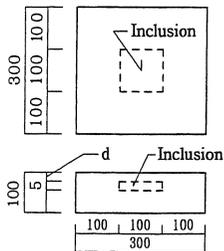


Fig.1 Example of specimen.

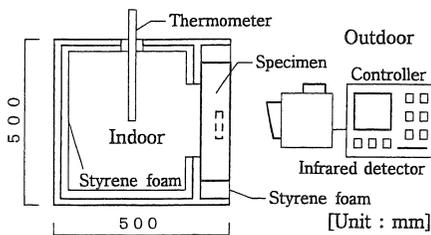


Fig.2 Measuring system.

Table.2 Specification of infrared detector.

Item	Specification
Temperature range	-20℃~+1,600℃
Scanning lines	240 lines
Scanning time	2.0 seconds
Sensitivity	0.1℃/div.

寸法30(縦)x30(横)x10(厚さ)cmの平板モルタル試験体を用いて、試験体の表面温度分布と介在物の埋設状況との関係について調査を行った。実験要因としては、介在物の種類(介在物無し、発泡スチロールおよび鉄板の3種類)および介在物の埋設深さ(3、6、9および10(介在物無し)cmの4種類)を取り上げた。試験体は、コンクリート外壁が接している室内および室外の環境を再現することを目的として、測定開始約15時間前(前日の時刻17:00)に側面を発泡スチロールで断熱した試験体を表面温度測定用試験箱(Fig.2参照)にセットした後、測定表面を真南の方向に向け、赤外線カメラを試験体の真正面に設置して時刻8:00~16:00まで1時間毎に外気温、内気温、南側鉛直面日射量および試験体表面温度を測定した。試験体表面の温度測定には、偏向変調表示モードで撮影された赤外線写真を使用し、試験体表面の縦・横方向をそれぞれ1cm間隔に分割した各ポイントの温度を0.01℃の精度で読み取った。使用した計測システムおよび赤外線カメラの性能を、それぞれFig.2およびTable.2に示す。なお、測定は、愛知工業大学2号館屋上で1993年11月30日~12月9日までの晴天日に行った。Fig.3に各測定日の内・外気温、日射量、日射吸収率を0.7、熱伝達率を0.00072cal/cm²・℃と仮定して算定した相当外気温の経時変化を示す。

2.2 解析の概要

本解析では、前掲の Fig.1 に示した平板モルタル試験体の対称性を考慮して Fig.4 に示すような1/4解析モデルを使用し、8節点アイソパラメトリック要素を用いた3次元定常および非定常熱伝導有限要素解析を行った。本解析で用いた構成材料の各種物性値⁵⁾を Table.3 に示す。なお、解析に必要な各時刻における内・外気温および日射量として、より実現象に近い境界条件を与えるために各試験体測定時の実測値を用いた場合、並びに解析結果に及ぼす介

Table.3 Material constants.

Material	Density (g/cm ³)	Specific heat (cal/g・℃)	Thermal conductivity (cal/cm・s・℃)	Heat transfer coefficient (cal/cm ² ・s・℃)
Mortar	2.0	0.19	0.0031	Out : 0.00072 In : 0.00024
Styrene foam	0.028	0.30	0.000088	
Steel plate	7.86	0.11	0.107	

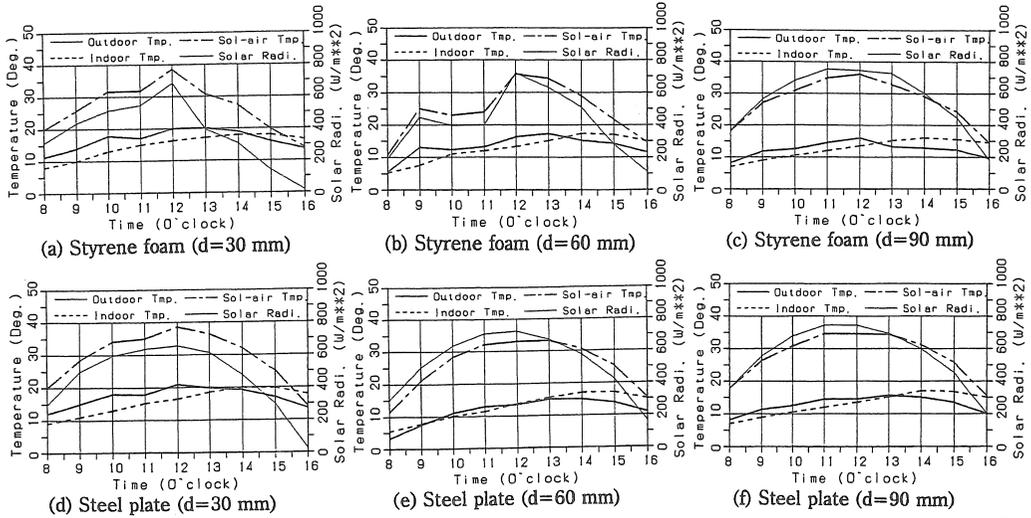


Fig.3 Air temperature and solar radiation.

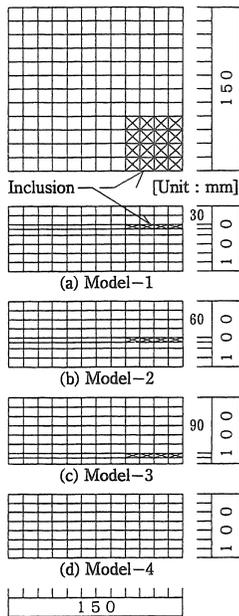
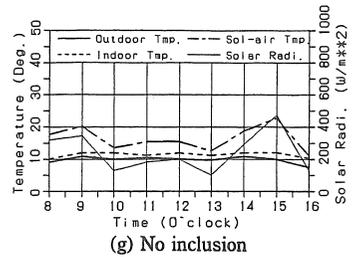


Fig.4 Analytical model.

在物の種類および埋設深さの影響を相互に比較できるようにするために日射量を0でかつ内気温を20℃の一定とし、時刻8:00、12:00および16:00における外気温をそれぞれ20、40および10℃、かつその間の外気温が直線的に変化するように設定した場合について解析を行った。ただし、コンクリートの日射吸収率は0.7とした。解析に際しては、モデル試験体側面の境界条件は予備解析の結果に基づいて不完全断熱状態（この場合、試験体側面の熱伝達率は内壁面



の1/2（Table.3参照）、境界温度は各時刻における内気温と外気温の平均温度とした）と仮定して、まず時刻8:00における内・外気温に対して定常熱伝導解析を行い、その時点での試験体内部の温度分布を求めた。次に、定常熱伝導解析によって得られた温度分布結果を試験体の初期内部温度分布と仮定し、時間増分を10分に設定して時刻16:00までの非定常熱伝導解析を行った。

3. 結果とその考察

3.1 測定結果

Fig.5は、介在物が発泡スチロールで埋設深さが3cmの試験体によって実測された試験体の表面温度分布の経時変化を示したものである。なお、表面温度は測定結果の対称性を考慮して平均化処理が施してある。この図によれば、相当外気温が最高となる時刻12:00まで（Fig.3(a)参照）の範囲では、試験体中央部（介在物埋設部）と周辺部との表面温度差（以下、単に表面温度差と呼ぶことにする）は時間の経過とともに増大していくが、その後相当外気温が低下すると表面温度差も減少するようになり、遂

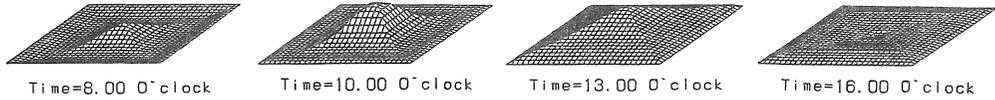


Fig.5 Temperature distribution (Styrene foam, d=30mm).

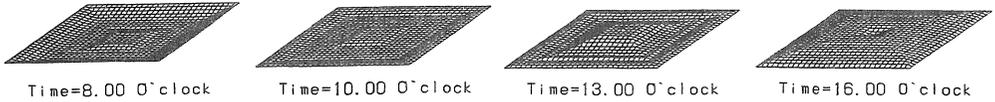


Fig.6 Temperature distribution (Styrene foam, d=60mm).

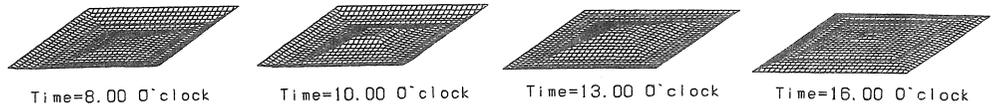


Fig.7 Temperature distribution (Steel plate, d=30mm).

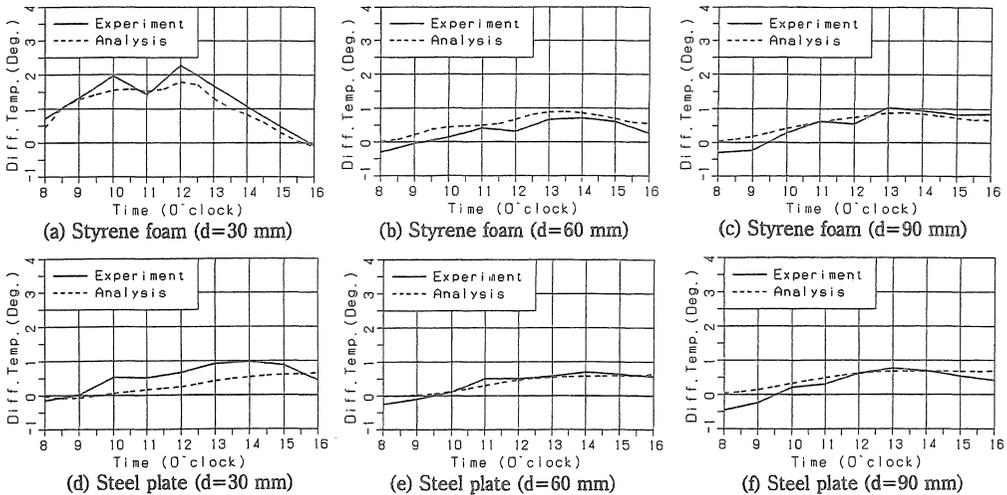


Fig.8 Difference of surface temperatures.

に相当外気温が内気温よりも低くなる時刻16:00には、介在物埋設部の表面温度は周辺部の表面温度よりも低くなっているのが読み取れる。Fig.6は、介在物が発泡スチロールで埋設深さが6cmの場合の結果を示したものであるが、表面温度差は前掲のFig.5の場合と比較してかなり小さくなっており、介在物の検出精度が埋設深さによって影響を受けることを示している。一方、Fig.7は、介在物が鉄板で埋設深さが3cmの場合の結果を示したものである。この図によれば、介在物が発泡スチロールの結果を示した前掲のFig.5の場合とは逆に、相当外気温と内気温との差が大きい範囲では介在物埋設部の表面温度は周辺部の表面温度よりも低くなっているが、その差が小さくなるに従って介在物埋設部の表面温

度の方が次第に高くなっていく傾向にあることがわかる。

3.2 介在物の検出性能

Fig.8(a)～(g)は、表面温度差の経時変化に関する測定結果と解析結果との比較を試験体別に示したものである。これらの図によれば、測定結果と解析結果とはいずれの場合もよく一致しており、本解析

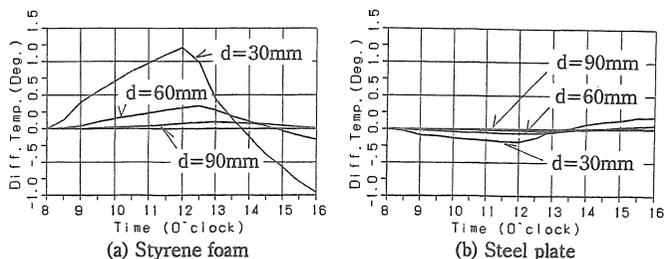


Fig.9 Analytical results on difference of surface temperatures.

手法を用いることによってコンクリート表面の温度分布の経時変化に及ぼす埋設介在物の影響をかなりの精度で追跡できることがわかる。ただし、各試験体の測定環境が前掲の Fig.3 に示すようになり相違しているため、これらの図に示されている結果を定量的に相互比較するには若干の問題があるものと思われる。そのため、以下では内・外気温および日射量が同一条件となるように設定した場合の解析結果を用いて、コンクリート表面の温度分布性状に及ぼす介在物の影響について考察することにする。

Fig.9(a) および (b) は、それぞれ介在物として発泡スチロールおよび鉄板が埋設されているモルタル試験体の表面温度差の経時変化に及ぼす介在物の埋設深さの影響を示したものである。介在物が発泡スチロールの場合の結果を示した Fig.9(a) によれば、表面温度差の経時変化の状況は、介在物の埋設深さによって著しく相違することがわかる。すなわち、埋設深さが3cmの場合の表面温度差は、外気温が最高となる時刻12:00までの範囲では時間の経過に伴う外気温の上昇とともにほぼ直線的に増大し、時刻12:00において1.21°Cの最高表面温度差を示すが、その後外気温の低下に伴って表面温度差も減少に転じている。特に、時刻13:50になると表面温度差が正から負へと移行しており、それまで試験体周辺部よりも介在物埋設部の表面温度の方が高かったのが、この時刻を境にして逆に低くなるという逆転傾向を示している。なお、この表面温度差が正から負に移行する時刻13:50は、外気温が内気温（20°C）よりも低くなる時刻14:40と比べて50分も早くなっている。これに対して、介在物の埋設深さが6および9cmの場合の表面温度差が最高となる時刻およびその表面温度差は、埋設深さが6cmの場合がそれぞれ12:30および0.34°C、9cmの場合がそれぞれ13:00および0.10°Cで、埋設深さが深くなるに従って最高表面温度

差は著しく減少し、かつ最高温度差を示す時刻は遅くなる傾向を示している。また、表面温度差が正から負に移行する時刻も埋設深さが深くなるとともに遅くなる傾向があり、埋設深さが6cmの場合には時刻14:50で正から負へ移行し、9cmの場合には時刻16:00までの範囲では表面温度差が正から負に移行する現象は観察されなくなっている。一方、介在物が鉄板の場合には、Fig.9(b) に示すように温度差の符号が正負逆転していることを除けば、定性的な表面温度差の経時変化の傾向は前述の発泡スチロールの場合と同様であるが、埋設深さが3、6および9cmの場合の最高表面温度差は、それぞれ-0.19、-0.06および-0.03°Cと発泡スチロールの場合の約15.7~30%程度と極端に小さくなっている。このことから、介在物が鉄板の場合には発泡スチロールの場合と比べて介在物の検出が極めて難しいといえる。

なお、図には示していないが、外気温が内気温よりも高い環境下では、介在物が発泡スチロールの場合の表面温度は埋設深さが深くなるに従って低下するが、鉄板の場合には逆に上昇し、また埋設発泡スチロールが表面温度に及ぼす影響の程度は、埋設鉄板の約6倍であることがわかった。

4. 結論

本研究では、サーモグラフィー法によるコンクリートの内部探査方法を確立するための基礎的研究として、介在物の種類および埋設深さと表面温度の分布状況との関係について実験的および解析的に検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 内気温、外気温および日射量の影響を考慮に入れた3次元熱伝導有限要素解析の結果は、実測結果と極めてよく一致し、本解析手法は、コン

クリート外壁の表面温度分布性状に及ぼす埋設物の影響を総合的に調査する解析手法として有効である。

- 2) 介在物の種類および埋設深さが一定であっても、介在物埋設部の表面温度は外気温、内気温および日射量によっても著しく影響を受けるため、介在物の検出を精度よく行うためには、これらの気温および日射量の影響を十分に認識しておく必要がある。
- 3) 相当外気温が内気温よりも高いという環境下で、かつ介在物が発泡スチロールの場合には埋設部の表面温度は健全部の表面温度よりも高くなるが、介在物が鉄板の場合には逆に低くなる。ただし、介在物が鉄板の場合は介在物埋設部と健全部との表面温度差が発泡スチロールの場合と比較して極めて小さく、埋設鉄板の検出は難しい。

【謝辞】

本実験に際してご助力を得た愛知工業大学大学院生の桃木佳子嬢、愛知工業大学学部学生の池田弘治君、稲富孝之君および立川みどり嬢に対して謝意を表します。また、本研究の実施に際して、赤外線カメラを快く提供して頂いた愛知工業大学・神谷清仁助教授、並びに気温および日射量観測データを提供

して頂いた愛知工業大学・比嘉俊太郎教授に対して謝意を表します。なお、本研究費の一部は東海学術振興財団の研究助成金によったことを付記する。

【参考文献】

- 1) コンクリートの非破壊試験法研究委員会：コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書（コンクリートの非破壊試験法に関する技術の現状）、日本コンクリート工学協会、pp. 1-243、1992. 3
- 2) 山田和夫・山本正岳：弾性波法による外壁タイルの剝離およびコンクリートのひび割れ評価に関する実験的検討、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 394-399、1991. 12
- 3) 山田和夫・山本正岳：弾性波法による外壁タイルの剝離およびコンクリートのひび割れ評価に関する解析的検討、セメント・コンクリート論文集、No. 45、pp. 400-405、1991. 12
- 4) 山田和夫・桃木佳子：サーモグラフィ法を適用した外壁タイルの剝離評価に関する解析的研究、セメント・コンクリート論文集、No. 47、pp. 266-271、1993. 12
- 5) 日本建築学会：建築設計資料集成 1（環境・熱）、pp. 97-134、1978

（受理 平成6年3月20日）