

論文 アクティブ赤外線法における照射光源の影響に関する基礎的研究

田中 寿志^{*1}・仁平 達也^{*2}・鳥取 誠一^{*3}・栗田 耕一^{*4}

要旨：アクティブ赤外線法に用いる照射設備は、はく離検知の程度に大きな影響を及ぼす。そこで、本研究では、遠赤外線、キセノンランプ、およびハロゲンランプを用いた場合のコンクリート平板の照射試験および非定常熱伝導解析を行い、熱伝導の挙動を確認した。また、照射条件を検討するために、模擬空隙を有する供試体の非定常熱伝導解析および照射試験を行った。その結果、一定の照射間隔で繰り返し照射することにより、照射エネルギー密度を従来の 15kW/m^2 の $1/3$ である 5.0kW/m^2 にしてもはく離検知が可能であることを確認した。

キーワード：アクティブ赤外線法、はく離検知、照射光源、キセノンランプ

1. はじめに

コンクリート表面に生じている温度差を赤外線カメラにより把握し、はく離を検知する赤外線法は効率的な検査が可能なることから、近年、注目を集めている。コンクリートに温度差を生じさせる方法には、太陽光等の気象条件を利用する方法（以下、パッシブ赤外線法という）と、コンクリート表面を人工的に加熱する方法（以下、アクティブ赤外線法という）がある。

アクティブ赤外線法はパッシブ赤外線法と違い、照射設備を必要とするが、コンクリート構造物における日照による気象条件に影響されずに測定を行える利点がある。この利点を活用して、地上からの遠隔操作によって高架橋のように背の高い構造物の検査に適用するために、室内試験および現地試験が行われている¹⁾。しかしながら、アクティブ赤外線法において、照射光源の影響、照射エネルギー密度、照射時間等の

パラメータがコンクリート内の温度分布に与える影響はほとんど検討されていない。そこで、本研究では、光源の種類とコンクリートの厚さをパラメータとしたコンクリート板の熱伝導解析を行い、照射試験により測定した表面と裏面の温度の時間変化と比較することにより、熱伝導メカニズムの検討を行う。また、模擬空隙を有するコンクリートを対象とした熱伝導解析とキセノンランプを用いた照射試験により、照射方法の検討を行う。

2. 照射による熱伝導メカニズムに関する検討

2.1 実験の概要

(1) 実験に用いた光源

照射光源として、遠赤外線照射装置、キセノンランプ、ハロゲンランプを用いた。光源の照射エネルギーが一定 (55kJ/m^2) になるように照射時間を設定した（表 - 1）。

表 - 1 照射光源

光源	遠赤外線照射装置	キセノンランプ	ハロゲンランプ
光照射エネルギー密度 (kW/m^2)	7.3	13.7	6.8
光照射時間 (s)	7.5	4.0	8.0
光源の照射エネルギー (kJ/m^2)	55	55	55

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造副主任研究員 工修 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究員 工修 (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造研究室長 工博 (正会員)

*4 三菱重工業 (株) 技術本部広島研究所運搬機・物流研究室主席研究員 工博

コンクリート表面の光吸収率については、光源の波長分布により異なるため、本研究で利用した各光源に対するコンクリート表面の光吸収率をパワーメータにより計測した（表 - 2）。

(2) 実験方法

図 - 1 に示す厚さ $d = 10, 20, 30$ mm のコンクリート平板供試体に一定エネルギー (55kJ/m^2) を照射し、照射後のコンクリート平板テストピースの表と裏の温度を赤外線カメラで撮影し温度の経時変化を測定した。図 - 2 に試験で利用した装置配置を示す。なお、試験は気流の影響を受けない屋内で実施した。

2.2 非定常熱伝導解析

各光源(遠赤外線照射装置、キセノンランプ、ハロゲンランプ)で得られた実験結果と 2 次元 FEM による非定常熱伝導解析で得られた結果を比較する。

解析で使用する数値は以下のように決定した。コンクリートの熱伝導率については、一般に骨材の岩種や単位量により変化することが知られているが、通常 $7.5 \sim 13.0 \text{ kJ/mhK}$ ($2.08 \sim 3.61 \text{ W/mK}$) の範囲にあるとされており、土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕²⁾では 9.2 kJ/mhK (2.55 W/mK) の値が示されている。そこで、本研究では熱伝導率の値としてこれを使用することにした。一方、コンクリートの比熱については、土木学会コンクリート標準示方書に示されている 1.05 kJ/kgK の値を使用した。密度は $2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とし、密度と比熱の積は $2.31 \times 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$ とした。

熱伝導解析ではまず、第一ステップとして試験で照射した照射エネルギー密度に実験で得られている吸収率を掛けた値を熱流束(単位面積当たり単位時間内に流れる熱エネルギー)として用いて照射直後の温度分布を求めた。この際、表面輻射(コンクリート表面から放射される熱流束)による影響を考慮する。放射量 E は物体の温度 T と放射率に依存し、放射率が 1 の場合、放射量 E は式 (1) で表されるステファン・ボルツマンの式で与えられる。

表 - 2 コンクリート表面の光吸収率

光源	光吸収率 (%)
遠赤外線照射装置	96
キセノンランプ	83
ハロゲンランプ	63

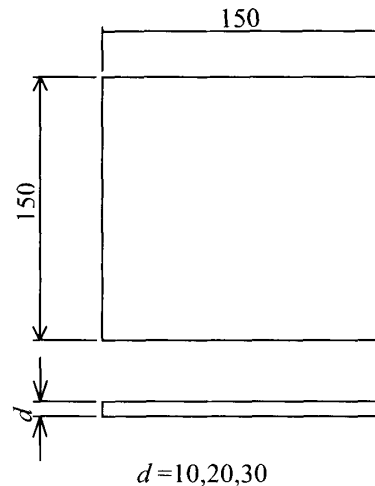


図 - 1 コンクリート平板供試体

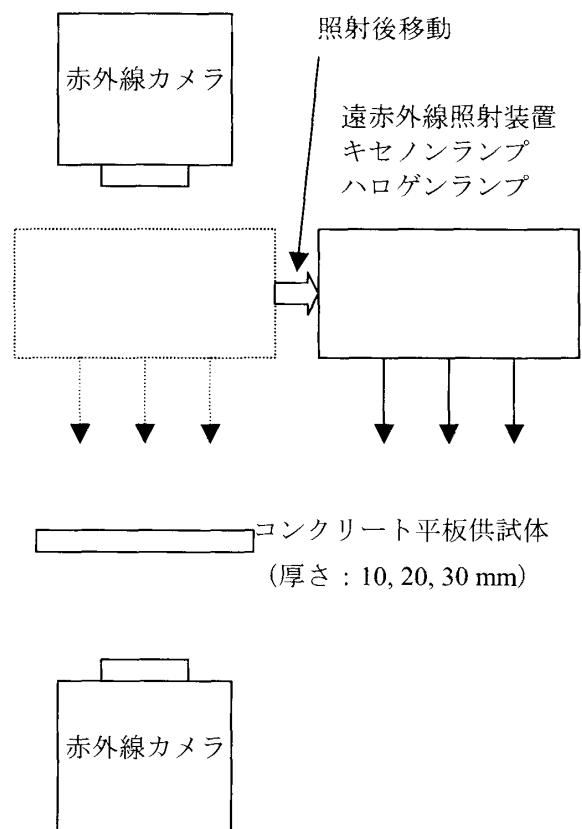


図 - 2 装置配置図

$$E = \sigma T^4 \quad (1)$$

ここに、 σ : ステファン・ボルツマン定数

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

この式によると、物体の温度が 20°C(293 K)の

とき、放射量 E は 417.8 W/m² 程度であることが分かる。本来、放射量 E はコンクリート表面の温度 T の関数であるが、解析では温度依存性を無視し、コンクリートの表面から放射エネルギーの 10% の 41.78 W/m² が放熱されていると仮定

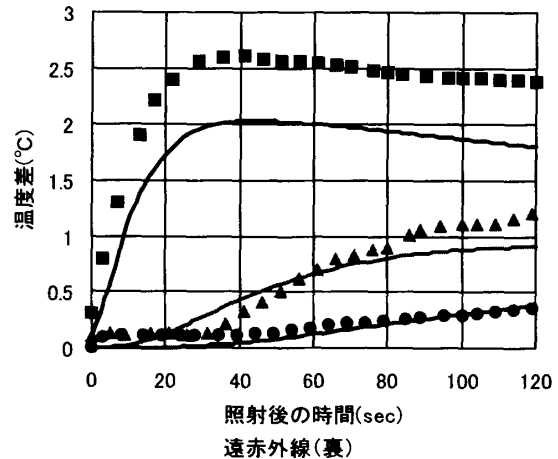
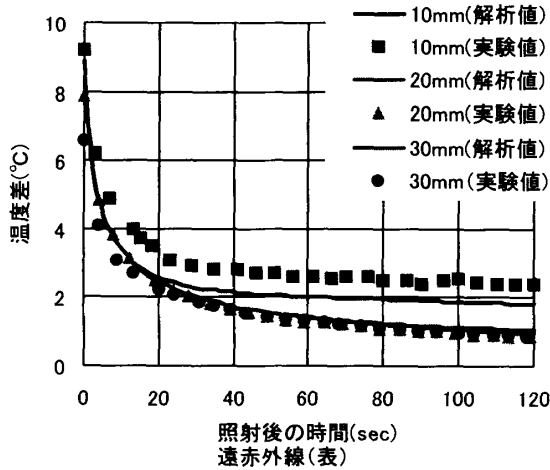


図 - 3 照射後の時間と温度差の関係 (遠赤外線)

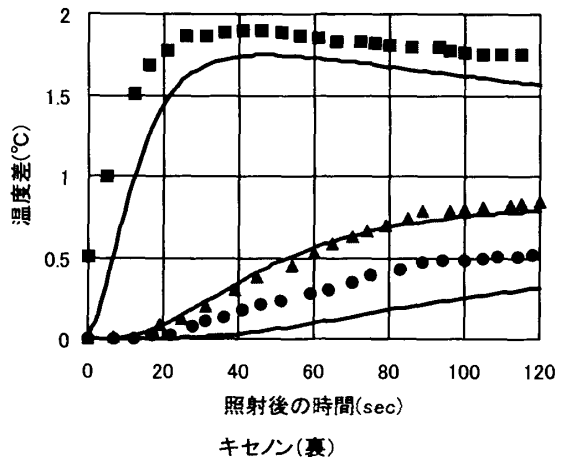
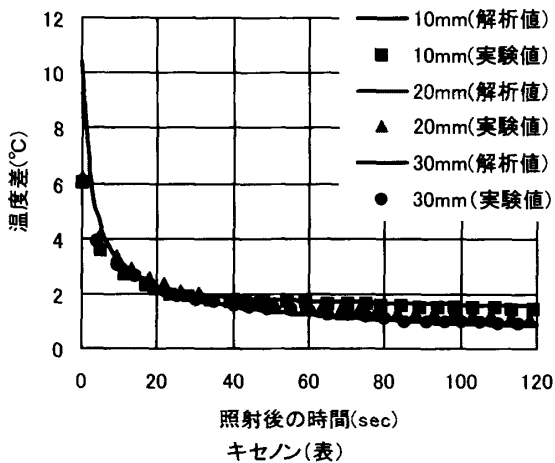


図 - 4 照射後の時間と温度差の関係 (キセノン)

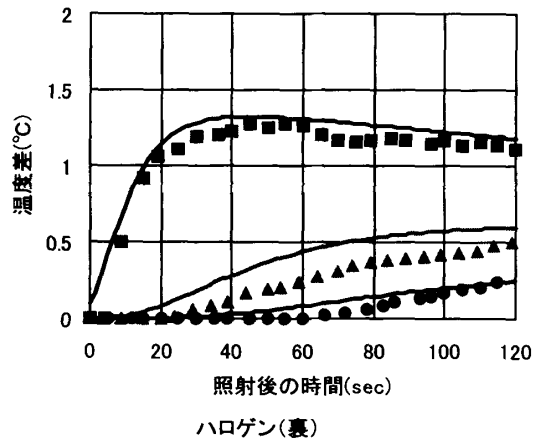
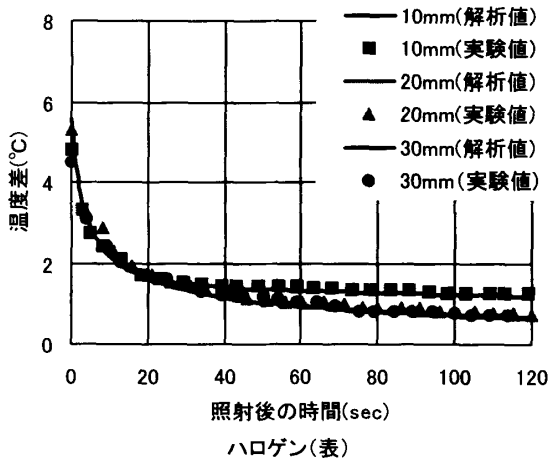


図 - 5 照射後の時間と温度差の関係 (ハロゲン)

した。

第二ステップでは照射終了直後のコンクリート温度分布の計算結果を初期条件として、コンクリート温度分布の経時変化を求める。この際、表面輻射(コンクリート表面から放射される熱流束)による影響を考慮した。

2.3 実験と熱伝導解析の結果による照射光源の検討

実験で得られたコンクリート表面と裏面の実測温度と照射前の温度の差と FEM で得られた計算結果を比較する。遠赤外線の結果を図 - 3 に、キセノンランプの結果を図 - 4 に、ハロゲンランプの結果を図 - 5 にそれぞれ示す。

実験結果と解析結果は、細部に不一致が見られるが、温度上昇と下降の傾向はおおむね一致している。光源による温度上昇の違いは実測した吸収率の違いを反映して、遠赤外線照射装置が最も大きく、次いでキセノンランプ、ハロゲンランプの順になっている。このことから、コンクリート表面の温度差を大きくするためには、光源の照射エネルギー密度のみではなく、光源の光吸収率が大きいほうが有利であることが分かる。以降の検討では、高架橋を対象とした遠隔照射への適用を考慮して、集光性が高く実証試験¹⁾により実績があるキセノンランプを対象

として解析および照射試験を行う。

3. キセノンランプを用いた模擬空隙検知試験

3.1 非定常熱伝導解析

上述した解析手法は、実験により得られた単純なコンクリート板の光照射による伝熱の挙動とおおむね一致している。したがって、この計算手法をはく離検知の手法に適用し、模擬空隙を有するコンクリートの空隙部と健全部との温度差の導出に適用し、照射条件を検討することにした。

通常、高架橋スラブではく離が生じる場合の実際のかぶりは 10~30 mm 程度である場合が多

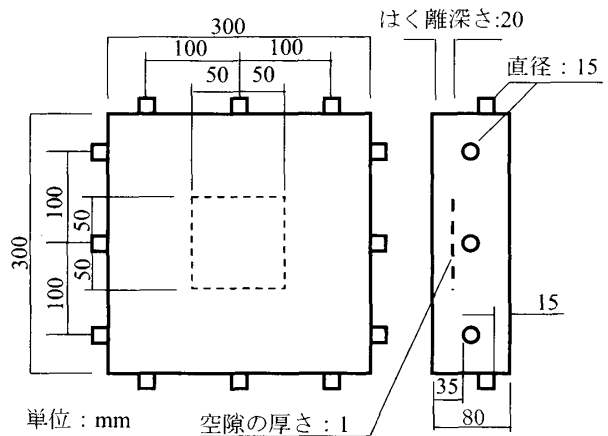
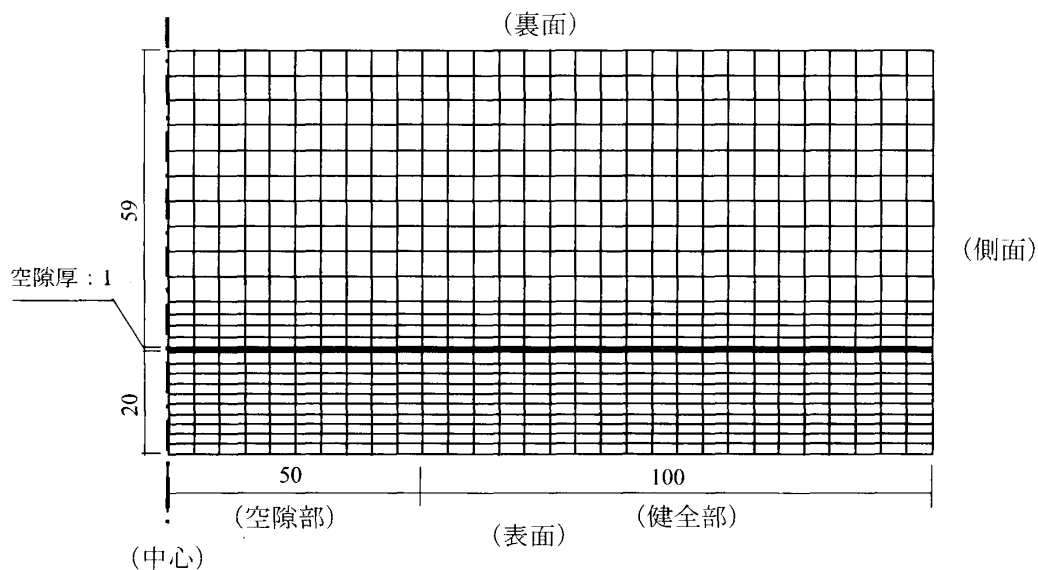


図 - 6 模擬空隙を有する供試体



※境界条件は表面以外を断熱境界とした。

図 - 7 解析に使用したメッシュ構造

く、はく離検知は主に鉄筋部のコンクリートかぶりのはく離を対象としている。そこで、高架橋スラブ下面ではく離が生じる場合の平均的なかぶりを想定して、はく離深さを 20 mm とし、キセノンランプをコンクリート構造物に照射した場合のコンクリート表面に生じる空隙部と健全部の温度差を検討するために、2次元 FEM 非定常熱伝導解析を実施した。

解析に使用した模擬空隙を有するコンクリート供試体を図 - 6 に示す。また、図 - 7 に解析に使用したメッシュ構造を示す。計算で使用したコンクリートの熱物性値については先に示した値を使用した。空隙部の空気の物性値としては表 - 3 の値を使用した。解析では鉄筋を無視してすべてコンクリート断面とした。また、前章と同様に表面からの放射を考慮した。

図 - 8 に示すように一定時間照射した後、次の照射までの時間間隔をパラメータとした照射直後の健全部と空隙部の温度差を解析した。空隙部と健全部との温度差は照射直後に最大となることが知られており、この解析では2回目の照射直後の値を照射回数 1 回目として計算している。

照射エネルギー密度は既往の実証試験¹⁾で実績のある 15 kW/m² とし、照射時間は 1 s とした。さらに、照射エネルギー密度が小さい場合として、7.5 kW/m² と 5.0 kW/m²、照射時間をそれぞれ 2 s と 3 s とし、解析を行った。

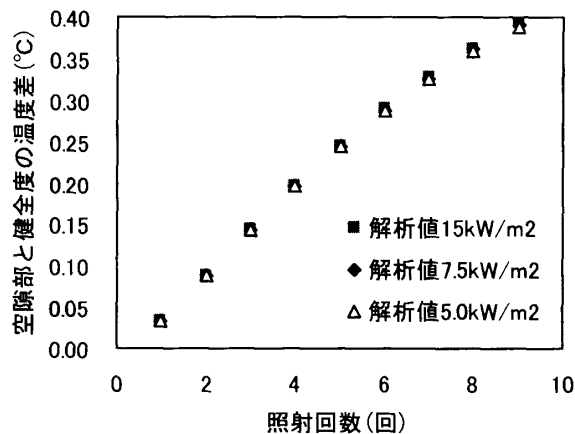


図 - 9 照射回数と温度差の関係

これらの各照射エネルギー密度で照射した場合の、照射直後のコンクリート表面の空隙部と健全部との温度差を解析した結果を図 - 9 に示す。空隙部と健全部の温度差は照射回数に

表 - 3 空気の物性値

熱伝導率 (W/mK)	0.0257
密度 (kg/m ³)	1.166
比熱 (J/gK)	1.005

表 - 4 試験に用いた照射条件

照射エネルギー密度(kW/m ²)	5.0
照射時間 (s)	3
照射走査速度 (m/s)	0.106
照射時間間隔 (s)	140
照射距離 (m)	10

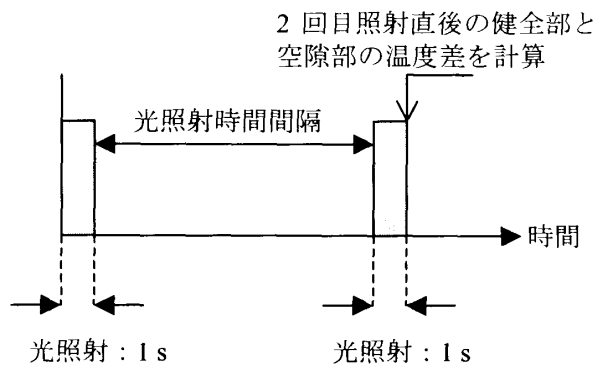


図 - 8 照射のタイミング

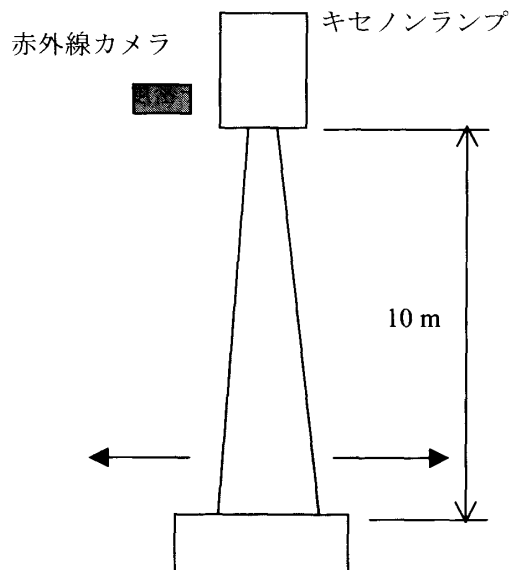


図 - 10 コンクリート剥離検知計測配置図

ほぼ比例して増加している。また、照射エネルギー密度と照射時間の積が一定であれば、照射エネルギーを小さくしても空隙部と健全部の温度差はほぼ同じになっている。これらの結果から、照射エネルギー密度を小さくしても、1回当たりの照射時間を長くし、一定時間間隔で照射を繰り返すことにより、空隙部と健全部の温度差を大きくできることが分かった。

3.2 検証実験

上記の解析結果による空隙部と健全部との温度差を検証するために解析で用いた条件での照射試験を実施した。試験では照射エネルギー密度を解析で用いた最小の 5.0kW/m^2 とした。キセノンランプを使用した検証試験では、ランプを走査しながら計測を行うため、照射走査速度を計算で使用した条件に一致させて試験を実施した。試験に使用した装置の照射距離 10m におけるビーム直径は 320 mm であることを考慮し、照射時間と照射走査速度の関係から、表 - 4 に示す照射条件とした。図 - 10 は試験の装置配置を模式的に示している。

3.3 実験結果と熱伝導解析の比較検討

模擬空隙が存在する中心部と周囲の健全部との温度差を求め計算値と比較した結果を図 - 11 に示す。実験値は解析で得られた温度差より小さい値になっているが、実験値においても 8 回以上照射することにより、一般に変状検知に必要な温度差 (0.2°C) 以上が生じている。このことから、従来の光照射エネルギー密度 15kW/m^2 の $1/3$ である 5.0kW/m^2 でもはく離検知が可能であることが明らかになった。

4. まとめ

地上からの遠隔照射によっても、コンクリート構造物の高所部のはく離検査が可能なアクティブ赤外線法の照射光源の影響について検討するため、非定常熱伝導解析を実施し、得られた条件に基づき検証試験を実施し、以下の結果を得た。

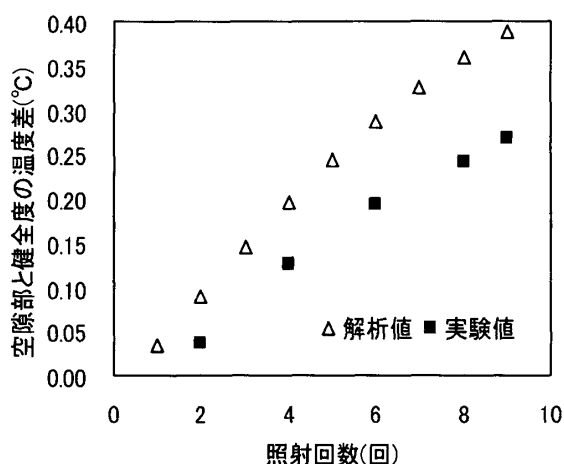


図 - 11 温度差の照射回数依存性

- (1) 光源として遠赤外線照射装置、キセノンランプ、ハロゲンランプを選定し、厚さ 10, 20, 30 mm のコンクリート板の照射試験を行うとともに、これらのコンクリート表面における光吸収率を考慮した 2 次元非定常熱伝導解析を実施し、実験と解析で温度差の時間変化の挙動はほぼ一致した。
- (2) 模擬空隙を有するコンクリート供試体を対象として、2 次元非定常熱伝導解析を行い、光照射エネルギー密度が小さくても、一定間隔をおいて繰り返し照射することにより、健全部と空隙部の温度差は、照射回数に応じて増加した。
- (3) 解析と同一の条件で実証試験を実施し、従来の光照射エネルギー密度 15kW/m^2 の $1/3$ である 5.0kW/m^2 でもはく離検知が可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 鎌田卓司ほか: 遠隔加熱によるアクティブ赤外線法を用いたコンクリート高架橋の検査, コンクリート工学年次論文集, vol. 25, No.1, pp.1763-1768, 2003
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造的機能照査編], 2002