

論文 剥離形態が赤外線サーモグラフィによる剥落予測に与える影響

中村 繁貴^{*1}・高谷 哲^{*2}・阿川 清隆^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨: 近年, かぶりコンクリートの剥落による第三者被害の防止と, 打音検査の効率を図る観点から, 赤外線サーモグラフィを用いた構造物の点検が行われるようになってきている。しかし, かぶりコンクリートの剥落を定量的に予測する手法は未だ確立されていないのが現状である。本研究では鉄筋腐食膨張圧再現実験を行い, 各損傷段階における赤外線サーモグラフィ測定を行うことにより, 劣化の進行やかぶり/鉄筋径比の違いが赤外線画像に与える影響を検討した。また, その結果を用いて, 赤外線サーモグラフィによる剥落予測モデルの構築を試みた。

キーワード: 鉄筋腐食, 赤外線サーモグラフィ, 剥離ひび割れ, 劣化予測

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋が腐食すると膨張圧が発生し, かぶりコンクリートにひび割れが生じることが知られている。このひび割れは劣化の加速や美観・景観の面で問題となるだけではなく, かぶりコンクリートの剥落による第三者被害や耐力低下の原因ともなる。

近年, かぶりコンクリートの剥落による第三者被害の防止と打音検査の効率を図る観点から, 赤外線サーモグラフィを用いた構造物の点検が行われるようになってきている。赤外線サーモグラフィは, コンクリート中に剥離ひび割れが生じると剥離部の空隙が断熱層となり, 日射や気温変化により生じる表面温度の日変動の中で剥離部と健全部との間に表面温度差が生じる時間帯があるのを利用して, 外壁の表面温度分布から剥離を検知する手法である。剥離部と健全部との間に検知可能な表面温度差が生じるためには, 十分な日射量と気温変化が必要となる。気温の日較差は, その日の天候によりほぼ決まり, 季節によって若干の差異はあるものの, 快晴日の気温の日較差はおおむね 10°C前後と考えてよい。一方, 日射量は, 季節, 外表面の方位, 天候, 大気透過率など様々な気象条件や周囲の環境に影響される^{1),2)}。

また, 使用する赤外線カメラの種類によって測定波長やノイズの影響が異なり, Short Wave機(測定波長3~5 μm)は太陽反射や日なたと日陰の混在の影響を受けやすく, Long Wave機(測定波長8~13 μm)は天空反射や対面建造物等の常温から低温の物体の反射の影響を受けやすいとされている。また Mid Wave機(測定波長5~8 μm)は太陽反射, 天空反射, 対面物体の反射等の影響をほとんど受けないが, 中間波長は大気透過率が小さいため遠距離撮影に適さないことも知られている³⁾。

撮影環境の違いによる欠陥検知限界に関する研究が多く報告されているものの, 劣化度評価や劣化予測に関する検討はほとんど行われていないのが現状である。そこで, 本研究ではかぶり, 鉄筋径を実験要因として, 鉄筋腐食膨張圧再現実験を行い, 赤外線カメラで劣化過程を観察することで, 剥離ひび割れの進展を定量評価する手法を検討し, その結果を用いて赤外線サーモグラフィを用いた剥落予測モデルの構築を試みた。これに関しては, 既報⁴⁾と重複する部分もあるが, 本論文では剥落予測モデルの改良を行い, さらに破壊形態の違いについても検討を行うこととする。かぶり/鉄筋径比(C/D)の大きい供試体の場合, 剥離ひび割れは供試体正面に現れず, 鉄筋間をつなぐ形で進展し, 本供試体では側面に現れる⁵⁾。このようなひび割れをここでは水平ひび割れと定義し, 剥離ひび割れと区別することとする。

2. 実験概要

2.1 供試体

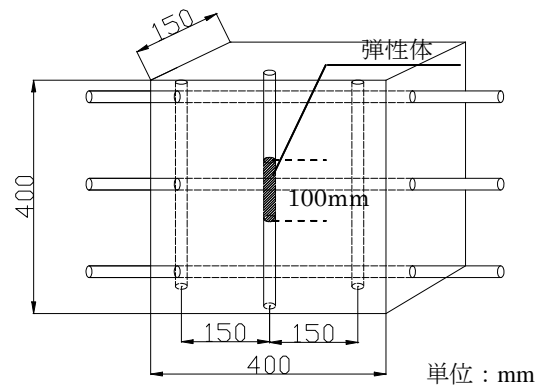


図-1 供試体概要

*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 助教 工博 (正会員)

*3 西日本高速道路(株) 技術本部技術部 専門役

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 工博 (正会員)

寸法は 400×400×150mm の角型供試体を用いた。図-1に示すように、鉄筋を150mmピッチで直交配筋し、弾性体挿入のための円柱空洞を1本設けた。実験要因は、かぶり C (10, 20, 30mm の3種類)、鉄筋径 D (D13, D19 の2種類) とした。使用したコンクリートの水セメント比は 62% で、載荷時のコンクリートの圧縮強度は 28.8N/mm²、引張強度は 3.03N/mm² であった。

2.2 載荷方法

円柱空洞に設置する弾性体は、弾性係数 1.39N/mm²、ポアソン比0.49のシリコンゴムを成型して作成し、位置決め治具を用いて円柱空洞中央 100mm 区間に設置した。弾性体挿入後、鋼棒を挿入し、鋼棒の挿入深さにより弾性体が着底していることを確認した。載荷はシャフトをモーターで降下させることにより行い、測定項目は鉛直荷重、鉛直変位、ひび割れ目視観察および赤外線カメラによる表面温度とした。載荷は鉛直変位で制御し、シャフトの降下速度を 0.01mm/s とした載荷の様子を図-2に示す。

得られた鉛直変位(dL)および鉛直荷重(P)は、次式により、半径変化量(dr)および内圧(pi)に変換することができる⁵⁾。

$$dr = \frac{v \cdot dL \cdot r_0}{L_0} \quad (1)$$

$$pi = \frac{v \cdot E}{v-1} \left(\frac{dL}{L_0} - \frac{P}{E \cdot r_0^2 \cdot \pi} \right) \quad (2)$$

ここで、dL：鉛直変位(mm)、P：鉛直荷重(kN)、v：弾性体のポアソン比、r₀：鉄筋の元半径(mm)、L₀：弾性体の元長(mm)、E：弾性体の弾性係数(N/mm²)、dr：半径変化量(mm)、pi：内圧(N/mm²)とする。

2.3 赤外線カメラによる撮影

赤外線カメラを用いてひび割れや欠陥部の検知を行うためには、コンクリート表面と欠陥部との温度差が必要になる。本実験は、実験室内で行ったため、夜間撮影を模擬して供試体を背面から熱源（ホットカーペット）で加熱した。実構造物における測定条件に近づけるために、加熱温度、加熱時間は、コンクリート表面の温度が周囲の温度よりも 3～5℃ 高くなるように調整した。

使用した赤外線カメラの仕様を表-1に示す。本実験では夜間撮影に適していると言われている量子型センサを搭載した short wave 機を使用し、素子数 640×512、最小検知温度差 0.025℃、検出波長帯は 3～5 μm である。撮影は供試体から約 4.0m 離れた地点から 20 秒間隔で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 内圧および半径変化量

式(1)、式(2)を用いて算出した内圧と半径変化量の関

係についてかぶりごとに整理した結果を図-3に示す。鉄筋径が D19 のものについても図-3と同様の傾向が見られた。最初に生じた目視可能なひび割れ（幅約 0.05mm）は軸方向ひび割れであり、概ね内圧が最大となった時点で確認された。最大内圧以降は、軸方向ひび割れが進展し、かぶり表面に剥離ひび割れが発生する時点で、内圧の急落が確認された。また、最大内圧、剥落を生じるまでの半径変化量とともに、かぶりが大きくなると大きくなる傾向が見られた。水平ひび割れが発生した C30D13 でも最大内圧付近で軸方向ひび割れが確認されたが、最大内圧以降は表面に剥離ひび割れの発生は確認されず、内圧が急落する時点で水平ひび割れが進展していたと考えられる。

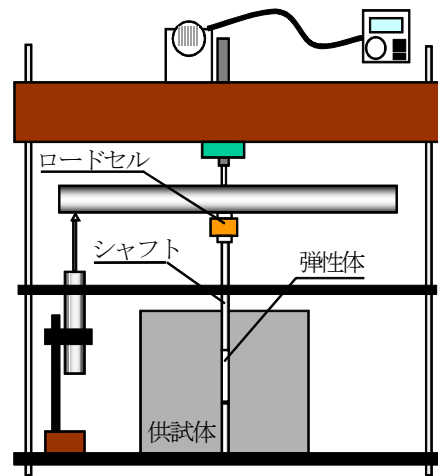


図-2 載荷の様子

表-1 赤外線カメラの仕様

測定温度範囲	-40～70℃
最小検知温度差	0.025℃
検出波長帯	3～5μm
検出素子	Indium Antimonide
表示画素数	640×512
測定視野	水平 35.5°、垂直 28.5°

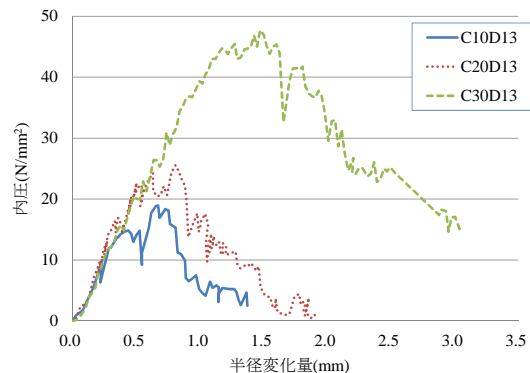


図-3 内圧 - 半径変化量関係

3.2 赤外線画像

剥離ひび割れがかぶり表面に現れる直前の赤外線画像を図-4に示す。図を見ると、中央部に薄く影のようなものが見られるが、はっきりとは確認できない。図-4中のラインA-Bにおける温度分布を見ると、中心部の温度が少し低下しているが、剥離ひび割れが内部で進行している様子は分かりにくい(図-5)。この剥離ひび割れが赤外線画像に現れなかった理由としては、室温により供試体端部が冷やされ、端部の温度が低下している可能性が挙げられる。そこで、この温度低下の影響を検討するために、荷重開始直後のラインA-Bにおける表面温度分布を確認したところ、荷重開始直後からコンクリート表面に温度分布が見られた(図-6)。これは実験で用いた供試体の寸法が小さかったことや、中央部に設けた円柱空洞の影響によるものと思われる、実構造物では問題にならないと考えられる。そこで、この温度分布の影響を除くために試験開始直後の温度差を見ることとした(図-7)。

3.3 剥離ひび割れ発生・進展が温度分布に与える影響

剥離ひび割れの発生・進展が表面温度分布に与える影響を検討するために、剥離部周辺の最も温度が高い箇所と最も温度が低い箇所の差の絶対値(例えば図-7のC-Dの差)を取り、これを半径変化量ごとに整理することとした。その結果を図-8に示す。C30D13以外の供試体については表面に剥離ひび割れが現れたが、C30D13は供試体表面に剥離ひび割れが現れなかったため、打音検査を行い、剥離ひび割れの発生を確認した。

図を見ると、C30D13以外の供試体については、荷重開始から徐々に剥離ひび割れと周辺部の温度差が大きくなり、剥離ひび割れ発生時にかぶり小さい10mmの場合では約0.1°Cの温度差が、かぶり大きい20~30mmの場合では約0.2~0.3°Cの温度差が生じていることが分かる。また、剥離ひび割れが発生してから温度変化が急激に大きくなることや、かぶりによらず剥落直前には剥離ひび割れと周辺部の温度差が1.0°C以上にまで大きくなることも分かる。

C30D13の場合は、浮き音発生までは他の供試体と同様に少しずつ温度差の上昇が見られたが、浮き音確認以降は半径変化量が大きくなっても温度差の上昇は見られなかった。C30D13については5. 水平ひび割れの進展の項で詳述する。

4. 剥落予測モデルに関する検討

弾性体実験により得られた半径変化量 dr は次式により腐食量に換算することができる⁹⁾。この式は弾性体が

円断面を維持している場合のみ適用可能であり、剥離ひび割れ発生以降は弾性体の断面が円形ではなくなっている可能性があるが、円断面と仮定して換算を行った。また腐食膨張倍率は一般的に言われている2.5倍とした。

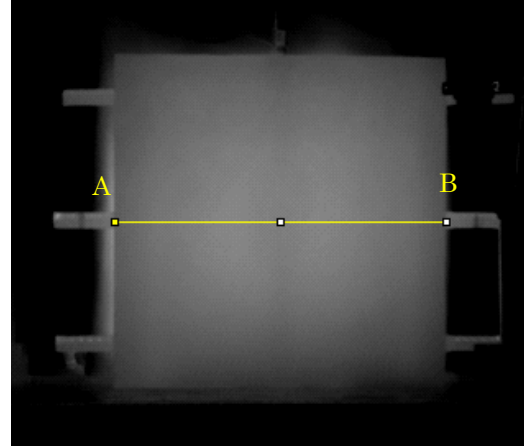


図-4 剥離ひび割れ発生直前の赤外線画像

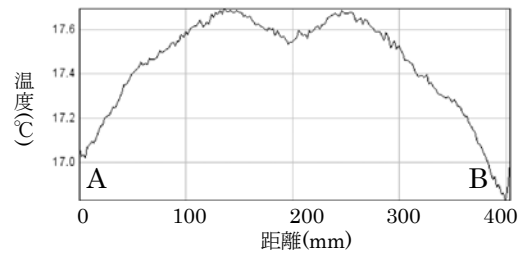


図-5 剥離ひび割れ発生直前の温度分布

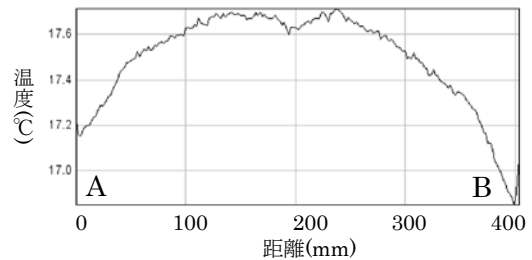


図-6 荷重開始直後の温度分布

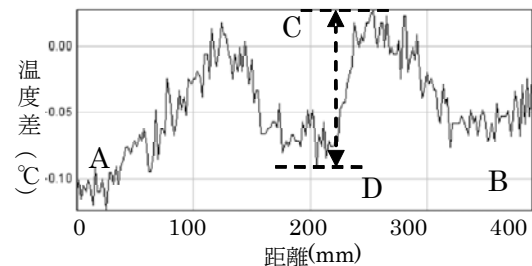


図-7 剥離ひび割れ発生直前と荷重開始直後の温度差分布

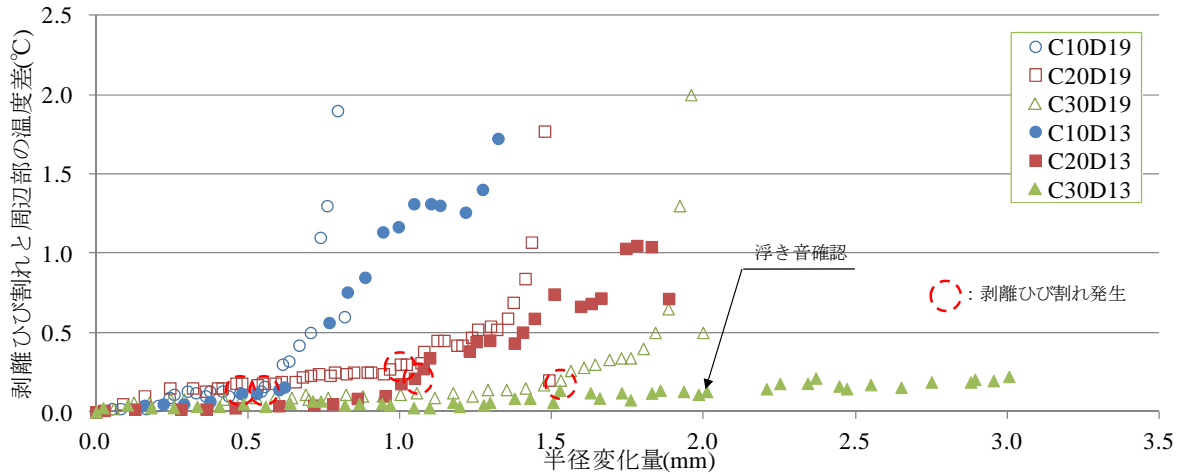


図-8 剥離ひび割れと周辺部の温度差と半径変化量

$$W_{\text{loss}} = \frac{\rho}{2r_0} (2\Delta r \cdot r_0 - \Delta r^2) \cdot 100 \quad (3)$$

$$\Delta r = r_0 - \sqrt{\frac{\gamma r_0^2 - (r_0 + dr)^2}{\gamma - 1}} \quad (4)$$

ここで、 W_{loss} ：換算腐食減量、 ρ ：鉄の比重 (7.85mg/mm^3)、 γ ：腐食膨張倍率 (2.5 倍) とする。

C30D13 のような水平ひび割れが生じる場合を除けば、図-9 に示すような剥落予測モデルを用いることで、剥落に至るまでの期間を推定することができることになる。例えば、温度差 0.1°C から 0.2°C に至るまでの腐食量 ΔW_1 は本実験から算出することができ、定期点検により温度差 0.1°C から 0.2°C に至るまでの期間 t_1 (実測値) が分かれば腐食速度を推定できる。さらに本実験により ΔW_2 、 ΔW_3 も算出できるので、推定した腐食速度を用いて t_2 、 t_3 を推定することができ、これらの推定結果を元に剥落時期を予測することもできる。また、 t_2 、 t_3 の実測値 (点検データ) を元に腐食速度の修正を行っていけば、剥落時期予測の精度を高めることができると考えられる。鳥取ら^{7),8)}の提案している腐食速度の式を用いれば、 t_1 をある程度推定することもできる。図-9 に示すような剥落予測モデルを考える際に必要となる腐食量 ΔW を、式(3)、式(4) によって算出した結果を表-2 に示す。C30D13 については温度差上昇がほとんど見られず、表-2 からは除外している。弾性体実験により算出される腐食量は、電食実験などの実際に鉄筋を腐食させる実験の結果に比べると大きい傾向にあると言われている⁹⁾。この原因としては、弾性体の膨張は周方向に均一に膨張すると仮定しているが、実構造物ではかぶり表面に近い部分の腐食が進行することや、使用した弾性体の弾性係数が錯層に

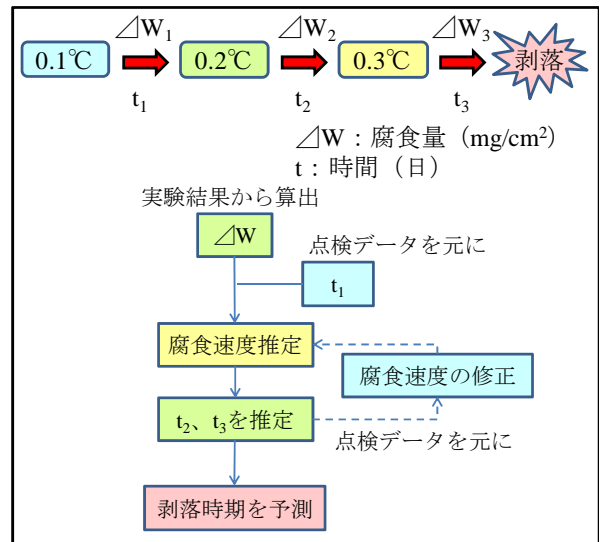


図-9 剥落予測のフローチャート

表-2 各温度差が確認される劣化段階から剥落に至るまでの腐食量の変化

劣化段階	供試体				
	C10D19	C20D19	C30D19	C10D13	C20D13
ΔW_1	135	275	567	82	57
ΔW_2	52	213	73	32	30
ΔW_3	106	290	239	419	500

mg/cm²

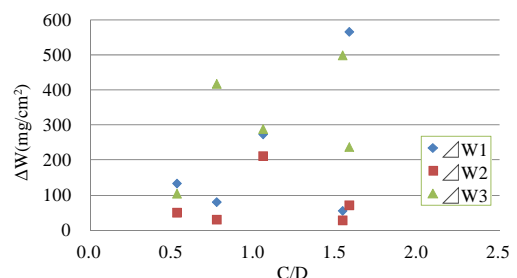


図-10 ΔW に与える C/D の影響

比べて小さかったために必要な膨張量が大きくなったこと、などが考えられる。また、各温度差が確認される腐食量と C/D の関係を図-10 に示す。C/D と ΔW の相関はあまり見られなかった。この原因として、熱流の移動に時間がかかるため、短時間で行う本実験では実構造物よりも剥離部と周辺部の温度差が小さいことや、供試体によって周辺の空気と供試体の温度差が違うことなどが考えられる。また、本実験では夜間撮影を想定しているが、昼間撮影と夜間撮影では欠陥部を判別するための閾値が異なる場合があるため注意が必要である。

5. 水平ひび割れの進展

図-8 において浮き音確認後も温度差の上昇が見られなかった C30D13 について考察する。一般に C/D の値が大きくなるにつれてひび割れ角度は大きくなり、本実験では C30D13 のみ剥離ひび割れが供試体正面に現れず、水平ひび割れが確認された。C30D13 の破壊形態を図-11 に示す。左の写真のように荷重終了時に剥落したのは供試体右下の部分であるが、荷重終了後にハンマーで衝撃を加えたところ、右の写真のように左下部分も剥落した。

浮き音確認時と荷重開始直後の温度差を可視化した画像を図-12 に、ライン A-B 上での温度差分布を図-13 に示す。図を見ると、いずれも健全部と異常部の判別が難しく、評価が難しいことが分かる。そこで図-12 のように x 軸、y 軸を、z 軸に温度差をとって供試体表面の温度差分布を示したのが図-14 である。図を見ると、供試体の左上以外の領域で水平ひび割れが進展している可能性があることが分かり、図-11 の叩き落しの結果と概ね一致していることが分かる。しかし、図-14 では左上部を除く広範囲で剥落危険箇所と診断されるのに対し、荷重終了時点で剥落したのは図-11 の左の写真のように右下部のみであった。水平ひび割れが進展している場合には、かぶり全体の剥落が起こるよりも前に、曲げひび割れによる部分的な剥落が起こる可能性もあり、部分的剥落を赤外線サーモグラフィで診断する手法については今後検討する必要がある。

これらの結果を踏まえて供試体左上部が健全であると考え、健全部と欠陥部の温度差が分かるように図-14 の A'-B' ライン上 (図-12 の A'-B' ラインと同一) での温度差分布を半径変化量ごとに整理したものを図-15 に示す。図を見ると、A-B ライン上での温度差よりも、健全部の位置を考慮した A'-B' ライン上での温度差の方が大きくなっていることが分かる。しかし、浮き音確認以降の温度差上昇が見られず、この理由としては、水平ひび割れは供試体表面に向かって進展しないため、劣化が進行しても断熱層となる剥離部の厚さが大きくなならない

ことが考えられる。水平ひび割れが生じる場合には、実構造物上で劣化の進行度合いを表すパラメータとして健全部と欠陥部の温度差を用いることができるかどうかについては今後検討する必要があると考えられる。

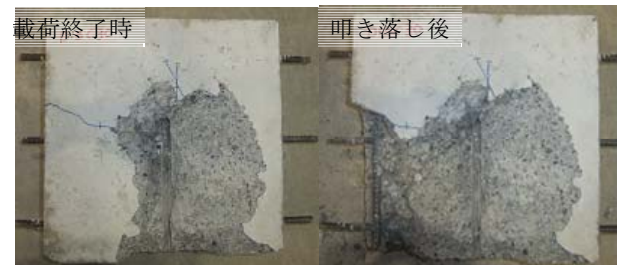


図-11 破壊形態

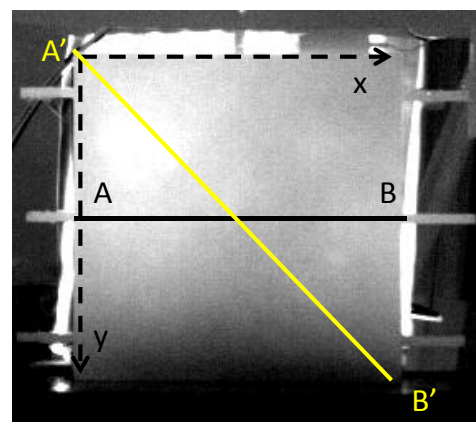


図-12 浮き音確認時と荷重開始直後の温度差を可視化した画像

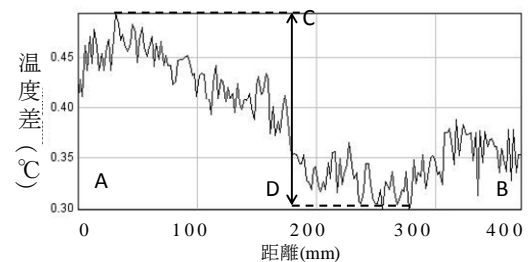


図-13 浮き音確認時と荷重開始直後の温度差分布(C30D13, A-B ライン上)

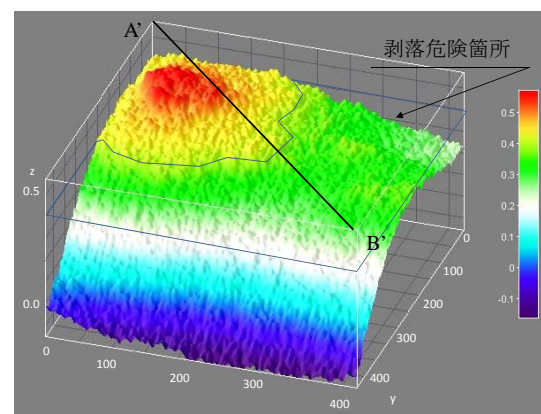


図-14 浮き音確認時と荷重開始直後の表面温度差分布

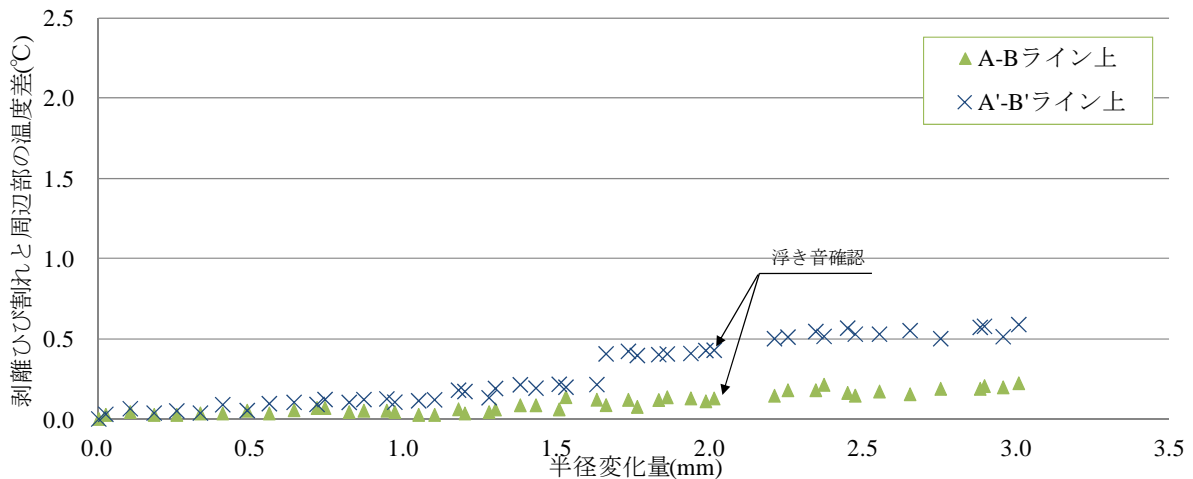


図-15 C30D13 剥離ひび割れと周辺部の温度差と半径変化量

6. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 赤外線サーモグラフィにより剥離ひび割れを確認できる温度差の閾値はかぶりによって大きくなり、かぶり 10mm では約 0.1°C、かぶり 20~30mm では約 0.2°C の温度差が必要である。
- (2) 水平ひび割れが発生しない場合では、剥離ひび割れと周辺部の温度差は載荷開始から徐々に大きくなり、剥離ひび割れ発生後急激に大きくなる。この温度差は、最大で 1.0°C~2.0°C まで大きくなる。
- (3) 水平ひび割れが発生しない場合では、弾性体実験により得られる半径変化量から腐食量に換算する手法についてはさらに検討する必要はあるものの、赤外線サーモグラフィを用いて定量的な剥落予測が行える可能性を示せたと考えられる。
- (4) 水平ひび割れが発生する場合では、広範囲での剥落が起こるよりも前に部分的な剥落が起こる可能性がある。また、劣化が進行しても剥離ひび割れと健全部の温度差が上昇しないため、注意が必要である。

謝辞

赤外線サーモグラフィ測定を行うに当たり、西日本エンジニアリング四国(株)の方々に多大なご協力を頂いた。また、京都大学工学研究科社会基盤工学専攻准教授の山本貴士先生には論文の作成にあたり多大なご助言を頂いた。ここに謝意を表したい。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'05[基礎編]，2001.3

- 2) 込山貴仁，中野米蔵，谷川恭雄：サーモグラフィ法による外壁仕上げ材の剥離検知の適用限界に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.484，pp.13-20，1996.6
- 3) 西川忠：中間波長帯を利用した赤外線法による外壁剥離診断の実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.575，pp.31-36，2004.1
- 4) 高谷哲，阿川清隆，山本貴士，宮川豊章：赤外線サーモグラフィを用いたはく離ひび割れの定量評価に関する基礎的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，vol.11，pp.279-284，2011.10
- 5) 高谷哲，元濱浩人，山本貴士，宮川豊章：隣接鉄筋が腐食ひび割れの発生・進展メカニズムに与える影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.9，pp.281-288，2009.10
- 6) 荒木弘祐，服部篤史，宮川豊章：鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.209-222，2005.11
- 7) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.35-46，2004
- 8) 鳥取誠一，宮川豊章：初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.781/V-66，pp.157-170，2005
- 9) 齊藤亮介，高谷哲，山本貴士，宮川豊章：軸方向腐食分布が腐食ひび割れ発生腐食量に与える影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.11，pp.123-128，2011.10