

# 論文 赤外線サーモグラフィによる中空粒子混和樹脂を用いたコンクリートひび割れ補修材の充填率の非接触評価

萩原 大生\*1・鈴木 哲也\*2

**要旨:** コンクリートのひび割れに対する樹脂充填の評価において、中空粒子混和樹脂の温度応答を考慮し、赤外線サーモグラフィと熱伝導シミュレーションを組み合わせ、充填率の非接触評価を試みた。実験的検討では、2 mm 幅の模擬ひび割れに樹脂を充填した供試体を作成し、アクティブ法による人為的な加熱・冷却を行った。樹脂として、中空粒子の混和の有無による HP および HPG の 2 種類を用意し、充填率を 20 %, 50 %, 80 % および 100 % に設定した。検討の結果、冷却過程直後の熱画像のばらつきの変動は、充填率が低いほどその値が大きく、これに伴い供試体内部の鉛直方向の熱流束の変化も大きくなることが確認された。

**キーワード:** 中空粒子混和樹脂, ひび割れ補修, 充填率, 赤外線サーモグラフィ, 熱伝導シミュレーション

## 1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れ補修工法のひとつとしてひび割れへの補修材の充填がある<sup>1)</sup>。エポキシ樹脂をひび割れ箇所へ充填することで、劣化因子の侵入抑制やコンクリート・樹脂の一体化による強度改善が期待される。筆者らは、補修材の物性改善に加えて、補修後の充填率の検査精度の向上を目指し、中空粒子を混和した樹脂（以下、中空粒子混和樹脂と呼ぶ）の開発を行っている<sup>2),3)</sup>。物性改善では、中空粒子を混和することによる力学特性の改善に関する報告がなされている<sup>4),5)</sup>。補修材の充填においては、未充填部の存在が課題のひとつとして考えられ、補修箇所の再劣化や補修効果の低下につながる恐れがある。中空粒子を混和する更なる利点として、樹脂中に空隙を与えることで、熱容量が低下して温度変化しやすくなることである。その温度応答を捉えることにより、短時間で充填率評価が可能になり、検査精度の向上が期待される。未充填の評価として、赤外線サーモグラフィと空間統計を適用する非接触手法が、筆者らにより提案されている<sup>2)</sup>。

本研究では、赤外線サーモグラフィと樹脂内部の熱伝導シミュレーションを組み合わせた中空粒子混和樹脂の充填率の非接触評価を試みる。シミュレーションを援用して熱伝導現象を考慮することで、材料の熱特性の詳細な評価が可能と考えられる<sup>7)</sup>。将来的には、特定の範囲における補修材の充填率を非接触かつ面的に評価することにつながる。模擬ひび割れに対して中空粒子混和樹脂

を用いた充填率の異なる供試体を用意し、アクティブ法を適用することで、検査精度の向上に資する充填率評価の実験的な検討結果について報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試体

ひび割れしたコンクリートに樹脂の補修材の充填を模擬した供試体を用いた。使用した樹脂は、エポキシ樹脂を主剤とする熱硬化樹脂（以降、HP と記載）および中空粒子（図-1）を混和した樹脂（以降、HPG と記載）を用いた。なお、本研究で使用した中空粒子は、文献<sup>2)</sup>で提示されている中空粒子（3M 社）と同一である。HPG で

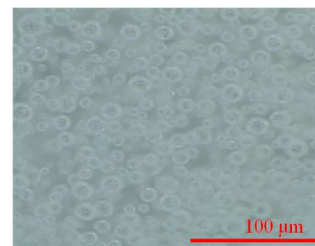


図-1 中空粒子の一例

表-1 樹脂の諸元

樹脂名称	粒子混和率 (%)	粘度 (mPa・s)	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	比重
HP	0	1,800	0.51	37.4	1.16
HPG	50	6,800	1.21	29.9	0.89

表-2 コンクリートの配合設計

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
15	12±2.5	43.1	5.5±1.5	39	155	360	678	1.92	2.52

\*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 博士（農学）（正会員）

\*2 新潟大学 自然科学系（農学部）教授 博士（工学）（正会員）

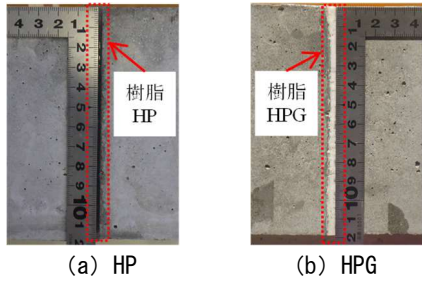


図-2 樹脂の外観

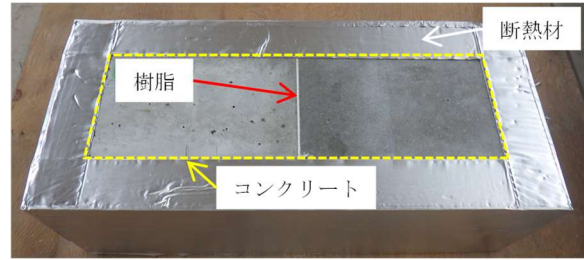


図-3 供試体の外観

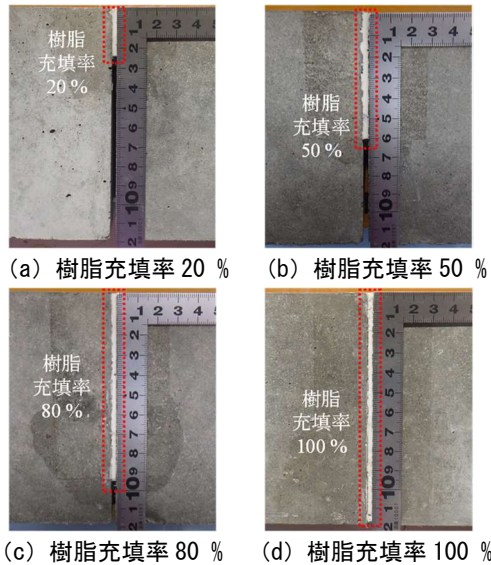


図-4 供試体側面から見た樹脂充填率の相違

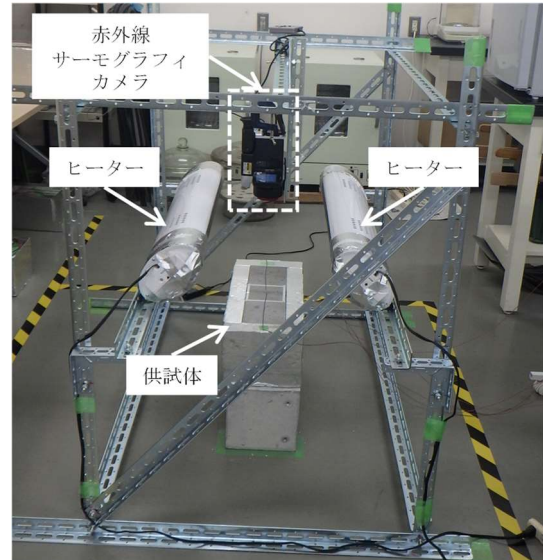


図-5 アクティブ法の実施状況

は体積比率として、軟質樹脂と中空粒子を 2:1 で混和した。樹脂の諸元を表-1 に示す。これらの樹脂を 2 体のコンクリートブロック (1 体あたり、幅 200 mm、奥行 120 mm および高さ 120 mm) の間に、2 mm 幅の隙間を設け、そこに充填した。コンクリートの配合設計を表-2 に示す。充填後に供試体の真上から見た樹脂の外観を図-2 に示す。供試体全体の外観を図-3 に示す。2.2 節で記すように、供試体の加熱・冷却の実験を実施する際に、その側面および底面の熱移動を防ぐため、供試体の周りを断熱材で覆ったうえにアルミテープを貼り付けた。

実験ケースとして、2 種類の樹脂それぞれに、充填率が異なる条件を与えた。供試体側面から見た充填率の相違を図-4 に示す。模擬ひび割れの高さが 120 mm に対して、充填率 20% の場合は 24 mm、50% の場合は 60 mm、80% の場合は 96 mm、100% の場合は 120 mm の分だけ樹脂を充填した。以降、実験ケースの名称として、充填率 20%、50%、80% および 100% に対して、HP の場合は HP20、HP50、HP80 および HP100、HPG の場合は HPG20、HPG50、HPG80 および HPG100 とする。

## 2.2 アクティブ法

供試体に対して人為的に熱負荷を与え、赤外線サーモグラフィカメラを用いてその温度変動を計測するアクテ

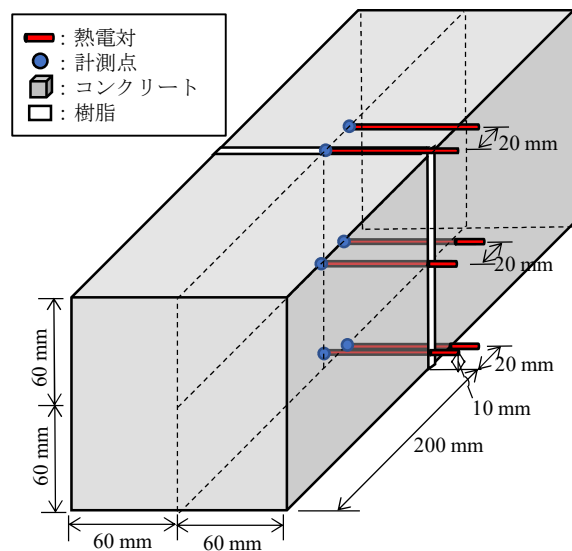


図-6 熱電対の配置の模式図 (充填率 100% の場合)

表-3 熱電対の配置条件

樹脂 充填率 (%)	樹脂			コンクリート		
	表面 (mm)	中間 (mm)	末端 (mm)	表面 (mm)	中間 (mm)	末端 (mm)
20	0	12	19	5	24	48
50	0	30	55	5	30	60
80	0	48	91	5	48	96
100	0	60	110	5	60	120

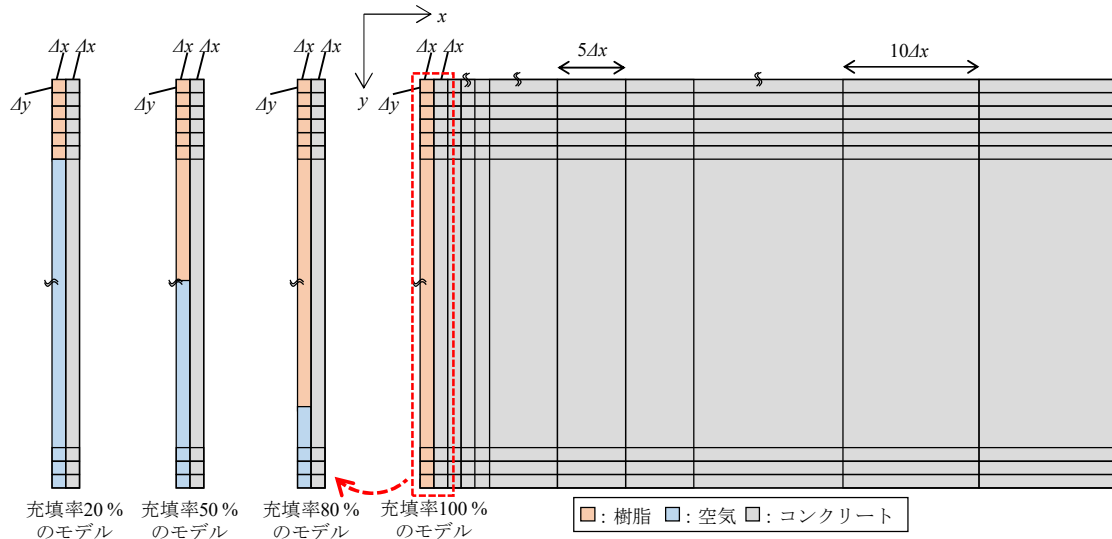


図-7 供試体の対称性を考慮した2次元非定常熱伝導シミュレーションのモデル

イブ法により、非接触での樹脂充填率の評価を試みた。アクティブ法の状況を図-5に示す。供試体1体あたり6箇所に熱電対を設置した温度計測も実施した。設置位置を図-6および表-3に示す。実験条件として、900 Wに設定した2台のヒーターで、供試体を20分の加熱を行い、その後にヒーターを止めて40分の冷却を行った。赤外線サーモグラフィカメラは供試体と0.3 m離して設置し、10秒に1枚の撮影間隔で計測を行った。熱電対も同様に、10秒に1度の間隔で計測を行った。

### 3. 解析方法

#### 3.1 2次元非定常熱伝導シミュレーション

アクティブ法による加熱・冷却過程における供試体内部の熱移動を、非定常熱伝導の数値シミュレーションにより検討する。同一寸法の2体のコンクリートブロックの間に樹脂を充填しているという供試体の対称性を考慮し、図-7に示すような水平方向と鉛直方向において供試体の半分を計算範囲とする2次元の計算モデルを設定する。計算範囲では、充填率に応じて、コンクリート、樹脂および空気の熱物性を設定する。2次元非定常熱伝導方程式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 $T$ は温度(K)、 $t$ は時間(s)、 $x$ は水平方向の位置(m)、 $y$ は鉛直方向の位置(m)、 $\rho$ は密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $c$ は比熱( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )、 $\lambda$ は熱伝導率( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )である。

式(1)の離散化では差分法を用いて、簡潔な検討を行った。図-7のように、水平 $x$ 軸方向では不等間隔、鉛直 $y$ 軸方向では等間隔に離散化した。陽解法により計算し、その安定条件を満たすように、時間ステップとして $\Delta t$ を0.01 s、空間ステップとして $\Delta x$ と $\Delta y$ を0.001 mに設定す

表-4 熱伝導シミュレーションにおける熱物性値

物質名称	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	比熱 ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ )	熱伝導率 ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
コンクリート	2,400 <sup>8)</sup>	1,155 <sup>8), 9)</sup>	2.7 <sup>8), 9)</sup>
空気	1.1763 <sup>8)</sup>	1007 <sup>8)</sup>	0.02614 <sup>8)</sup>
エポキシ樹脂	1,850 <sup>8)</sup>	1,100 <sup>8)</sup>	0.3 <sup>8)</sup>
中空粒子混和樹脂	926	1,100	0.14

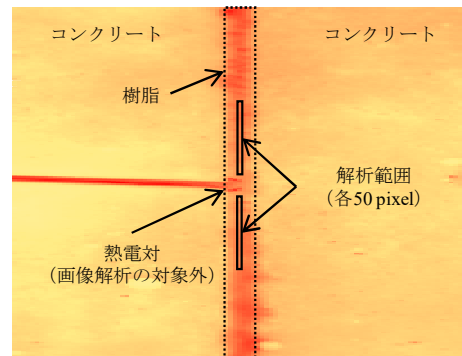


図-8 熱画像の解析範囲

る。水平 $x$ 軸方向の不等間隔として、樹脂を含む計算範囲の左端から幅31 mm分を $\Delta x$ 、次の幅30 mm分を $5\Delta x$ 、次の幅140 mm分を $10\Delta x$ (計201 mm)で与える。初期条件としては、加熱開始時の熱電対による温度を与える。境界条件としては、モデル表面の $y=0$ ではアクティブ法実施中の樹脂およびコンクリート表面の熱電対による温度境界、モデル表面以外では断熱境界を与える。

#### 3.2 熱物性値

熱伝導シミュレーションで用いる熱物性値を表-4に示す。コンクリートの比熱と熱伝導率については、文献<sup>8), 9)</sup>に記載された値の平均値を求めて用いた。中空粒子混

和樹脂について、エポキシ樹脂と空気の多孔質固体と仮定し、式(2)~(4)により見かけの熱物性値を求めた<sup>10)</sup>。

$$\rho_a = (1-e)\rho_s + e\rho_f \quad (2)$$

$$c_a = \frac{(1-e)\rho_s c_s + e\rho_f c_f}{(1-e)\rho_s + e\rho_f} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_a} = \frac{1-e^{1/3}}{\lambda_s} + \frac{e^{1/3}}{\lambda_s(1-e^{2/3} + \lambda_f e^{2/3})} \quad (4)$$

ここで、 $\rho$  は密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $c$  は比熱(J/(kg·K))、 $\lambda$  は熱伝導率(W/(m·K))、 $e$  は空隙率である。添え字の a は見かけの熱物性値、s は固体の熱物性値、f は流体の熱物性値を意味する。空隙率  $e$  は 0.5 を与える。添え字 s の熱物性値はエポキシ樹脂、添え字 f は空気とする。

### 3.3 熱画像解析

アクティブ法で取得した熱画像の解析範囲を図-8 に示す。図-8 に示すように、樹脂表面に設置した熱電対の範囲を除いた樹脂部分の 50 pixel を 2 箇所から計 100 pixel 分抽出する。各撮影時点の熱画像からこの範囲を抽出し、樹脂表面の温度変動を求める。

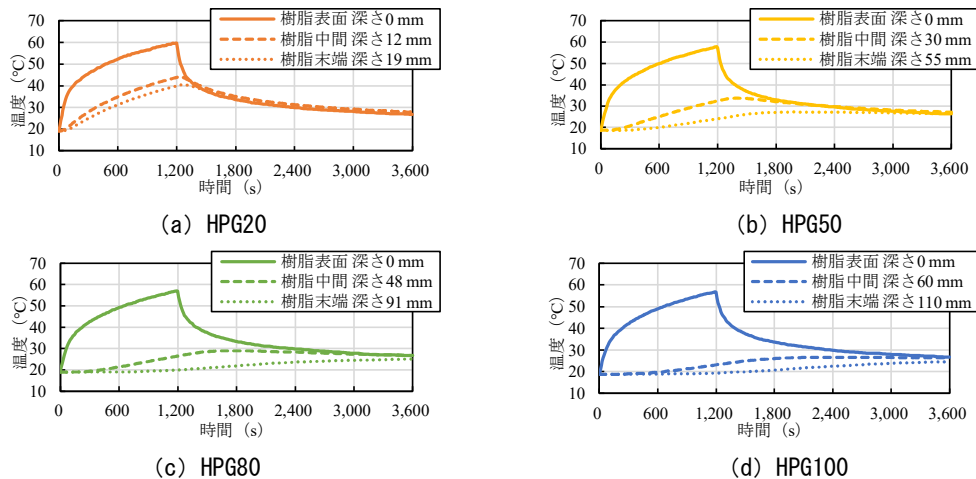


図-9 熱電対による HPG 供試体の温度変動の実測値

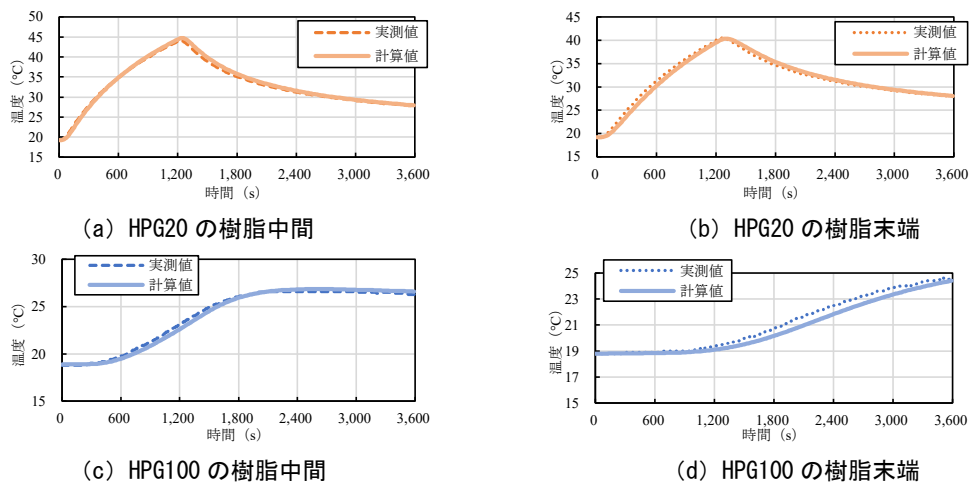


図-10 HPG 供試体における温度変動の実測値と熱伝導シミュレーションによる計算値の比較

## 4. 結果および考察

### 4.1 供試体内部の温度特性

アクティブ法にて熱電対で計測した温度変動の実測値を図-9 に示す。ここでは、HPG 供試体の場合のみ示す。1,200 秒より前は加熱過程、1,200 秒以降は冷却過程である。各ケースの樹脂表面の温度は加熱過程で上昇し、冷却過程で低下する傾向が確認できる。供試体内部では、熱電対位置が深くなるにつれて表面よりも温度の最大値に遅れて到達することから、熱伝導の様子が確認できる。

熱電対による温度変動の実測値と熱伝導シミュレーションによる計算値の比較を図-10 に示す。ここでは、HPG20 および HPG100 の場合のみ示す。計算値は、供試体内部の実測値と概ね一致する傾向が確認できる。

### 4.2 アクティブ法による樹脂充填率評価

熱画像の解析範囲より抽出した温度の平均値と標準偏差を図-11 に示す。図-8 に示す解析範囲における温度の平均値と標準偏差を表している。平均値により各ケースを比較すると、図-11 (a) の HP 供試体の場合、加熱終了直前の 1,190 s において、HP20 では 66.8 °C、HP100 では 63.8 °C である。ただ、同時点の標準偏差について、

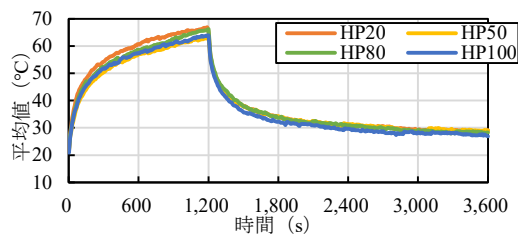
HP20は0.8℃でHP100は1.3℃であることから、ばらつきを考慮すると相違があるとは言えない。図-11(b)のHPG 供試体の場合、平均値による相違は確認できない。充填率の相違を熱容量の相違と考えると、充填率が低いと熱容量が小さいため、温度上昇しやすかつ温度低下しやすいと予想できるが、熱画像のばらつきを考慮すると、本実験結果ではそのように評価することが難しい。

そこで本研究では、冷却過程におけるばらつきの指標である解析範囲の標準偏差の時間変化に着目する。比較的短時間における充填率の相違の検出を目指し、冷却過程における1,200~1,260秒の60秒間の標準偏差の急激な変化に着目する。60秒間の標準偏差の変化はHP 供試体において、図-11(e)より、HP20では0.6℃(0.8℃→0.2℃)、HP50では0.3℃(0.8℃→0.5℃)、HP80では0.4℃(1.0℃→0.6℃)、HP100では0.6℃(1.3℃→0.7℃)である。HPG 供試体において、図-11(f)より、HPG20では0.6℃(1.2℃→0.6℃)、HPG50では0.4℃(0.7℃→0.3℃)、HPG80では0.4℃(0.6℃→0.2℃)、HPG100では0.2℃(0.5℃→0.3℃)である。60秒間の標準偏差の変化において、HP 供試体の場合は充填率ごとの規則性が確認できないが、HPGの場合は充填率が低いほど変化の値が大きい傾向が確認された。樹脂の充填が不十分の場合には、冷却直後の短時間において、温度のばら

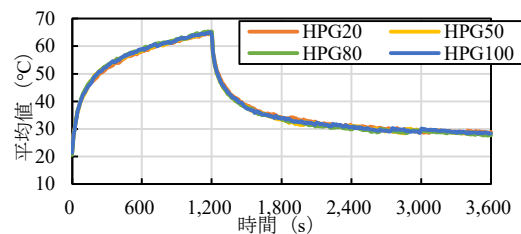
つきの減少の時間変化が大きくなる可能性が考えられる。4.3節では熱伝導シミュレーションにより求めた熱流束を用いて、この結果を考察する。

#### 4.3 樹脂充填率に応じた供試体内部の熱流束特性

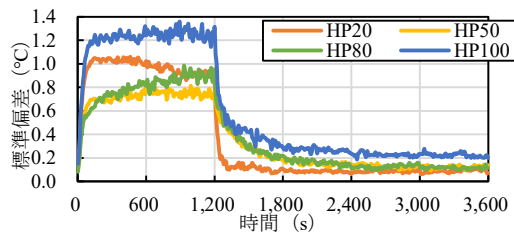
冷却過程の1,200~1,260秒の60秒間における、HPG 供試体内部の鉛直方向の熱流束を図-12に示す。供試体表面からの深さ20mm範囲における熱伝導シミュレーションによる熱流束の計算値を用いる。正の値は鉛直下向き(底面側)、負の値は鉛直上向き(表面側)を表す。シミュレーションの鉛直方向の空間ステップを考慮し、1,200~1,260秒の60秒間における表面近傍の深さ1mmでの熱流束の変化に着目する。図-12(a)のHPG20における変化は、4,430 W/m<sup>2</sup>(3,749 W/m<sup>2</sup>(1,200秒時点)から-681 W/m<sup>2</sup>(1,260秒時点))である。同様に、HPG50では4,032 W/m<sup>2</sup>(3,538 W/m<sup>2</sup>から-494 W/m<sup>2</sup>)、HPG80では3,902 W/m<sup>2</sup>(3,781 W/m<sup>2</sup>から-121 W/m<sup>2</sup>)、HPG100では3,062 W/m<sup>2</sup>(2,263 W/m<sup>2</sup>から-799 W/m<sup>2</sup>)である。これらの比較では、HPG20の熱流束の変化が最も大きいことが確認できる。これは、深さ3mmまでにおいて類似の傾向が確認できる。HPG20は最も充填率が低く、冷却開始直後に樹脂末端の温度が低下し始めることから(図-9(a)参照)、加熱過程において樹脂末端まで熱伝導が起きていると考えられる。そのため、冷却過程において表面



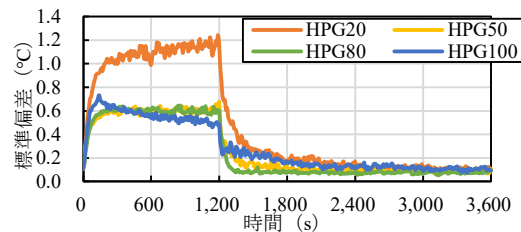
(a) HP 供試体の熱画像温度の平均値



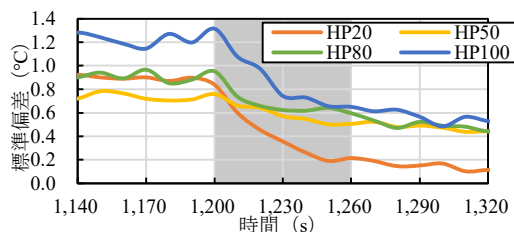
(b) HPG 供試体の熱画像温度の平均値



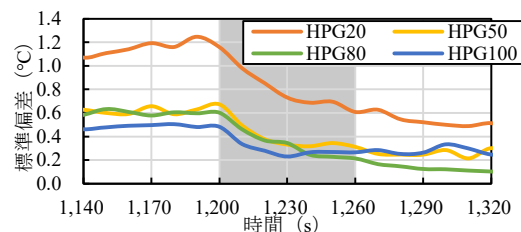
(c) HP 供試体の熱画像温度の標準偏差



(d) HPG 供試体の熱画像温度の標準偏差



(e) HP 供試体の冷却過程の開始前後の標準偏差



(f) HPG 供試体の冷却過程の開始前後の標準偏差

\* (e) および (f) の灰色の範囲は評価対象とした1,200~1,260秒の60秒間を表す。

図-11 アクティブ法による充填率に応じた供試体表面の温度特性

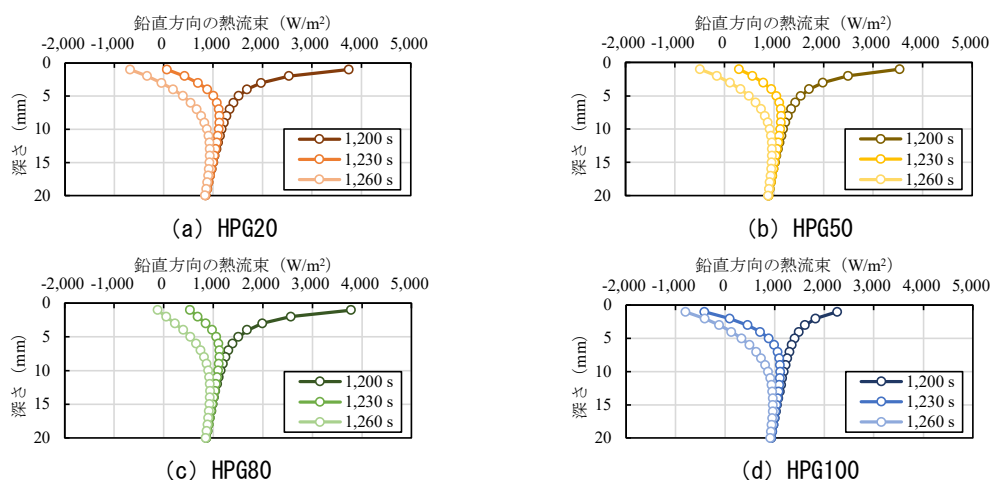


図-12 冷却過程における供試体内部の熱流束の変動

方向へ熱移動しやすいと考えられる。他ケースでは樹脂内部で、冷却過程において、ある程度の時間を経て温度の最大値に到達することから（図-9 (b)～(d) 参照）、下向きの熱移動があると考えられる。加えて、中空粒子を混和したことで熱伝導率が低下したことから、HPG20では表面方向へ熱移動しやすくなる可能性がある。

以上により、樹脂の充填が不十分の場合には、冷却直後の短時間で、温度のばらつきの減少の時間変化が大きくなる可能性がある。特に HPG20 では、供試体内部の熱流束の観点からこのことを説明することができる。

## 5. おわりに

本研究では、赤外線サーモグラフィと熱伝導シミュレーションにより、コンクリートのひび割れ補修における樹脂充填率の非接触評価を試みた。実験的検討では、2 mm 幅の模擬ひび割れに樹脂を充填した供試体を作成し、アクティブ法による人為的な加熱・冷却を行った。中空粒子混和の有無による HP および HPG の樹脂を用意し、充填率を 20%、50%、80% および 100% に設定した。異なる充填率に伴う熱画像の温度から、検査精度の向上に資する充填率評価を行った。検討結果を以下に列挙する。

- (1) 2次元非定常熱伝導シミュレーションにより、アクティブ法による供試体内部の温度変動を概ね再現することができた。
- (2) HPG 供試体においては、熱画像のばらつきの指標である標準偏差に着目すると、冷却直後の 60 秒間の時間変化では、充填率が低いほどその値が大きくなる傾向が確認できた。中空粒子を混和することにより、物性改善だけでなく、短時間での検査精度改善が確認されたと考えられる。
- (3) HPG20 では、冷却直後の 60 秒間で鉛直方向の熱流束の変化が最も大きいことから、充填率が低い場合に熱画像の標準偏差の時間変化が大きいと考えられる。

## 参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル 2022 年版，土木研究所資料，第 4433 号，2022.12
- 2) 小嶋篤志，高橋 航，鈴木哲也，藤井伸之：赤外線画像を用いた中空粒子混和樹脂材の充填率評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1803-1808，2018.6
- 3) 鈴木哲也，藤井伸之，小嶋篤志，須田 翼：中空微粒子を用いたひび割れ補修材料の高度化に関する研究，創立 90 周年記念 2019 年度（第 68 回）農業農村工学会大会講演会講演要旨集，pp.44-45，2019
- 4) Nielsen, L. E.: Mechanical Properties of Polymers and Composites, Marcel Dekker, pp.385-405, 1993
- 5) 三輪 実，大沢直志，小原庸博，中山 晃：粒子充てん高分子複合材料の弾性率に及ぼす粒子サイズの影響，高分子論文集，Vol.35，No.2，pp.125-129，1978.2
- 6) 足立忠晴，荒木稚子，樋口理宏：エポキシ樹脂複合材料の力学的特性に及ぼすシリカ粒子充填の効果，日本接着学会誌，Vol.46，No.6，pp.222-229，2010.6
- 7) 萩原大生，島本由麻，鈴木哲也，阿部幸夫，大高範寛，原田剛男，藤本雄充，川邊翔平，金森拓也：1次元熱伝導解析を適用した腐食鋼矢板の板厚推定に資する鋼材供試体での実験的検討，農業農村工学会論文集，Vol.90，No.2，pp.I-239-I-250，2022.12
- 8) 日本機械学会：伝熱工学資料改訂第 4 版，pp.320-322，p.329，1986
- 9) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書（設計編），p.40，2012
- 10) 日本熱物性学会：新編 熱物性ハンドブック，pp.189-190，p.195，養賢堂，2008