

非破壊弾性波計測に基づく補修コンクリート構造物の安全性診断法の開発

新潟大学自然科学系（農学部） 鈴木哲也・稲葉一成
株式会社福田組 藤井伸之・西脇健志・小嶋篤志

キーワード：道路橋，維持管理，損傷度診断，非破壊検査，赤外線サーモグラフィ，空間統計指標

概要

道路工に代表される既存施設に衝撃荷重が作用する供用条件では，構造部材の損傷状況を含めた状態評価が不可欠である。本報では，「北陸地域の活性化に関する助成事業」の援助（継続研究）を受けて実施した，補修工施工直後からの補修材硬化過程を非破壊計測し，熱・弾性波特性の観点から損傷橋梁の性能回復過程を同定するための方法論の構築の試みを報告する。

1. はじめに

コンクリート構造物は，ひび割れ損傷の発生に伴い，強度低下や塩化物の侵入による鉄筋腐食が発生し，耐久性の低下が顕在化する。ひび割れ損傷の補修には，樹脂充填工法による空隙部分の充填が提案されており，エポキシ樹脂の物性や接着性による水や塩分等の劣化因子の侵入の抑制や，ひび割れとの一体化による性能回復を目的とした工法である¹⁾。

ひび割れに対する充填が不十分な場合，付着力による耐力を損なうほか，空隙部から劣化因子が侵入し，補修部に再劣化が発生，改善効果は損なわれるため充填率の把握は必要不可欠である。筆者らは，樹脂に中空粒子（グラスバブルス（3M社）を用いたため以後，GBと記す）を混和した充填材の物性と熱特性による充填率の非破壊評価を試みている。

そこで本報では，樹脂充填材にGBを混和した充填材をモデル供試体に適用し，赤外線サーモグラフィ計測に基づく熱特性を用いた充填率評価方法を構築した結果を報告し，北陸地域の活性化に関する助成事業の成果報告とする。

2. 充填材特性

2.1 材料特性

本研究に用いた充填材はエポキシをベースとした熱硬化性樹脂（以後，HPと記す）を使用した。

本研究では，HPを対象にGBの混和によるGB-樹脂複合充填材（以後，HPGと記す）の温度応答の変化と，充填部とその充填率の検討を行った。

表-1にGBの仕様を示す。体積含有率は0.5に設定した。体積含有率は，本検討の前に行った引張試験で最も

強度上昇した配合とした（表-2）。引張強さは長さ115.0 mm，幅10.0 mm，厚さ5.0 mmのダンベル型供試体を作成し，一軸引張試験を行い算出した（JIS K7161準拠）。

2.2 温度特性

コンクリート-樹脂複合材を用いた熱容量測定試験に先立ち使用樹脂の比熱容量の測定試験を行った。比熱容量は物体にエネルギーを与えた場合，1gの物体の温度を1℃上昇させるために必要なエネルギー量を指す。比熱容量が大きい物質ほど温まりにくく，冷めにくい。式(1)に熱容量の算出式を示す。

$$C = cm = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1)$$

ここで， c は比熱容量（J/g℃）， Q は入力熱量（J）， ΔT は温度変化量（℃）， C は比熱容量 c （J/g℃）と質量 m （g）の積である熱容量を示す。

表-1 GB仕様一覧

試験体	真密度 (g/mm ³)	耐圧強度 (Mpa)	メジアン径 (μm)
S	0.6	186	16

表-2 引張試験結果一覧

	体積含有率	荷重 (N)	変位 (mm)	応力 (N/mm ²)	応力比 HPG/HP
HP	—	49.38	1.41	0.25	—
HPG_0.1	0.1	109.69	2.17	0.55	2.22
HPG_0.18	0.18	92.50	1.57	0.46	1.87
HPG_0.5	0.5	144.37	1.14	0.72	2.92

比熱容量の測定は JIS K 7123 に準拠し、示差走査熱量測定 (DSC) を用いた²⁾。基準物質にはアルミナを用いた。HP と HPG それぞれ 16.85 °C から毎分 10°C の間隔で 146.85 °C まで加熱し比熱容量を求めた。図-1、表-3 に HP と HPG の比熱容量の測定結果を示す。表中には解析に用いた範囲のみ記載する。HPG の比熱容量が HP より小さくなった。これは GB 内部の空洞が断熱効果を発揮したためと考えられる。16.85 °C、26.85 °C は測定機器の仕様上取得不能であったので計測値の線形近似の結果より推定した。

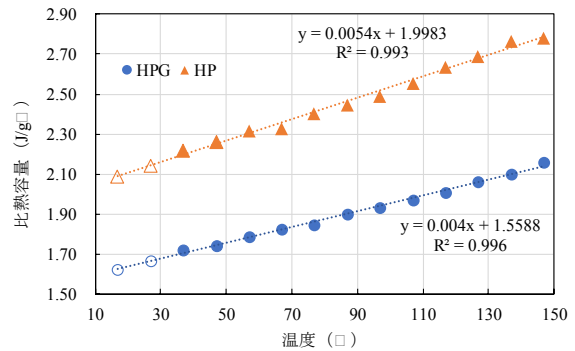


図-1 比熱容量測定結果

3. 実験方法

3.1 放射による伝熱の原理

赤外線サーモグラフィ法による温度測定は、熱放射と関係している³⁾。赤外線サーモグラフィ法は物体の放射する赤外線放射エネルギーを測定することで、物体の温度を測定する⁴⁾。

物体の温度変化は、赤外線の吸収と放射が関係している。全ての赤外線を吸収する仮想物体は、黒体と呼ばれる。黒体は同じ温度の物体と比較した場合、放射する赤外線放射エネルギーが、最も多くなる。ある物体の赤外線放射エネルギー E は、その物体と同一温度である黒体の赤外線放射エネルギーとの比である放射率 ε を用いて算出される。 ε は式 (2) で示される⁵⁾。

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2)$$

ここで E_b は全放射能と呼ばれ、黒体が単位面積で単位時間あたりに放射する全ての放射エネルギーを示す。 E_b は式 (3) で示される。

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数、 T は絶対温度を示す。

一般的に、放射率は測定表面の粗さや、色により値が変化するため、放射を利用した温度測定を正確に行うためには、測定面の均質化が必要不可欠である。

3.2 供試体概要

図-2 に赤外線サーモグラフィ試験使用供試体の概要を示す。樹脂のひび割れ充填材としての性質を検討するためコンクリート-樹脂合材を作成し供試体とした。先行して行った共鳴振動法 (JIS A 1127 (2010)) に準拠するため 1000×2000×1000 mm の直方体コンクリート 2 本の間にシリンジを用いて充填可能な厚さ 2 mm の空隙を作成し人工的なひび割れ部とし、樹脂を充填した。また実構造物における充填不良部を模擬するために樹脂充填率を 20, 50, 80, 100 % とし、樹脂のみを充填したものを HP, GB 混和樹脂を充填したものを HPG とし HP,

表-3 比熱容量測定結果

	HPG	HP
温度 (°C)	比熱容量 (J/g°C)	
16.85 (近似)	1.63	2.09
26.85 (近似)	1.67	2.14
36.85	1.72	2.22
46.85	1.74	2.26
56.85	1.79	2.32
66.85	1.83	2.33
76.85	1.85	2.40
86.85	1.90	2.45
96.85	1.93	2.49

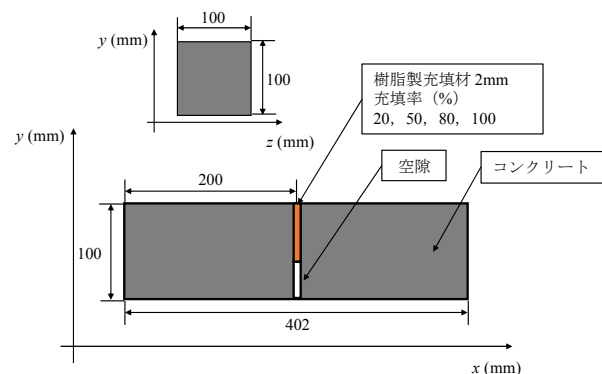


図-2 供試体概要

HPG 共に各充填率で作成し、計 8 本の供試体と、比較対象に同寸法の健全コンクリート供試体を加熱し赤外線サーモグラフィ法を用いて温度特性の測定を実施した。以降、供試体名は「HP (G) 充填率」で表す。

3.3 赤外線サーモグラフィ試験概要

赤外線サーモグラフィ法による欠損部検出の原理は、対象構造物が放射している赤外線放射エネルギーを測定し、表面温度分布の異常部を検出するものである。

図-3 に試験装置の概要を示す。試験は 2017 年 9 月 20 日に新潟大学農学部で実施した。測定は赤外線カメラ (R300SR : 日本アビオニクス社製) を用いた。供試体は画像の背景を均一にするため水槽内に静置し、両端から 150 mm の位置を発泡スチロールにより断熱し供試体中心から 50 mm の範囲のコンクリート樹脂複合材を撮影範囲とした。発泡スチロールは溶解しないよう放射率が低い金属テープで被覆した。表-4 に測定条件一覧を示す。断熱温度場に基づく赤外線サーモグラフィ測定の際、供試体に温度変化を生じさせる必要がある。供試体に積極的な熱負荷を与えるアクティブ法を用い HP, HPG の充填率の検出を試みた。ハロゲンランプ (800 W) を用い供試体の表面 1 m から均一に加熱した。赤外線画像の撮影は、加熱過程 15 分、ヒーターを停止した除熱過程 10 分を 30 秒に 1 枚の間隔で計 50 枚撮影した。測定放射率は乾燥コンクリートの値 0.94 を用いた。図-4 に赤外線画像の一例を示す。65×55 pixel の範囲で解析を行った。

無機中空粒子を混和した有機材は中空粒子の高い断熱効果と放射率により熱容量と放射率が上昇することが既往の研究により示されており⁶⁾、赤外線サーモグラフィ法で測定される温度は上昇する。

3.4 空間統計学解析

空間統計学解析の一手法であるセミバリオグラムモデルを用いて樹脂充填部の熱特性を空間データとして評価した。セミバリオグラムは、物理量の空間依存性に関する解析に一般的に用いられ、解析範囲内の任意の 2 点の物理量の相関性を求めることができる。本研究においては温度データと位置データ (pixel) のみの関数である。セミバリオグラムモデルは式 (4) で示される。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-h)} \sum_{i=1}^{n-h} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (4)$$

ここで、 $Z(x_i)$ が実測データ、 h が測定間隔であるラグ (lag)、 $\gamma(h)$ がばらつきの指標であるセミバリエンス (semi-variance) を示す。

データが空間的に連続して変化する場合セミバリオグラムモデルは図-5 に示す形をとる。 h の増加に伴い $\gamma(h)$ が上昇し、ある特定の距離において最大値に達する。この時の h の値がレンジ (range)、 $\gamma(h)$ の最大値がシル (sill) と定義される。レンジはデータが内挿可能な空間依存性の限界を示す。ラグ 0 における $\gamma(h)$ はナゲット効果 (nugget effect) と定義され、測定誤差やデータから把握不可能な微小なばらつきを示す。データにばらつきが無いときセミバリオグラムモデルは線形に近似しレンジ、シルは算出されない。一般には球形モデル、ガウスモデル、指数モデルが用いられるが、本研究では実測値と良

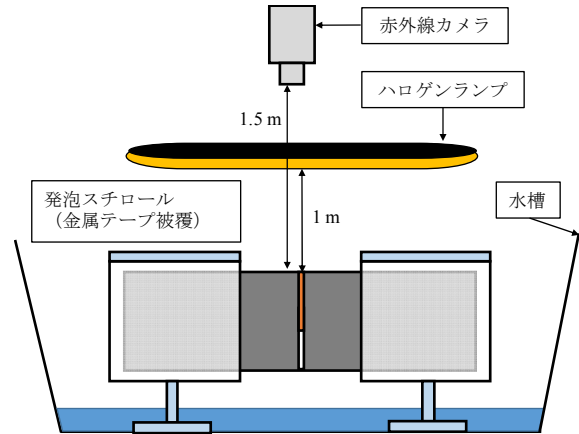


図-3 赤外線サーモグラフィ法試験概要

表-4 赤外線カメラ測定条件

型番	R300SR (日本アビオニクス社製)
測定範囲	-40 °C ~ 500 °C
最小温度分解能	0.03 °C ~ 0.3 °C
センサ	2次元非冷却 マイクロボロメーター
センサ解像度	横320×縦240 (pixel)
測定波長	8~14 μm
入熱装置	ハロゲンヒーター (800W)
撮影枚数	50枚 (1枚/30 sec)
測定放射率	0.94

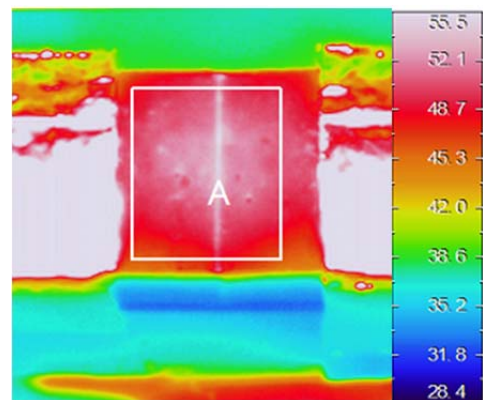


図-4 赤外線画像解析範囲 (HPG_100)

好な適合を示した指数モデルを用いた。

屋外での計測に赤外線サーモグラフィ法を適用する場合、測定範囲の汚れや影、傷等の環境ノイズにより見かけの温度が変化し測定値に誤差が生じる場合がある。樹脂充填部の正確な検出にはノイズの影響の排除が必要不可欠である。セミバリオグラムから得た熱画像の空間分布特性を用いクリギングによりノイズの影響の除去を試みた。

クリギングは空間的に連続で広がる対象の、任意に設けた複数の観測点での既知データを用い未知データの予測補完を行う手法である^{7),8)}。式(5)よりクリギングでは補完点 s_0 の確率変数の推定値 $Z(s_0)$ は重み付き平均から求める。

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(s_i) \quad (5)$$

ここで $\hat{Z}(s_0)$ は未知点データ、 $Z(s_0)$ は既知点データを表す。 $\hat{Z}(s_0)$ は $Z(s_0)$ の普遍推定値を表し、その分散が既知点同士のどの線形近似より小さくなるよう得ると仮定する。 w_i は重みを表し、ばらつきの指標 $\gamma(h)$ から求める。式(6)、(7)に w の算出式を示す。

$$\sum_{j=1}^n w_j \gamma(s_i - s_j) + m = \gamma(s_0 - s_i) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (7)$$

ここで m はラグランジュ定数を表す。

本研究において、解析面にノイズの影響があったと仮定し、一定範囲の温度データを除去し未知点の温度の推定を行った。

4. 結果および考察

4.1 熱特性検討結果

赤外線サーモグラフィ法により熱特性の観点から充填部の検討を行った結果について示す。表-5に各供試体を加熱した際の温度勾配(°C/min)と、樹脂部の熱容量をコンクリート部の熱容量で除した熱容量比を示す。コンクリートの温度勾配は各供試体の樹脂部を挟んだ両端温度の平均値を、熱容量は既往研究を参考に比熱容量0.92(L/g°C)を用い⁹⁾算出し、樹脂部両端の値の比を用いた。小数点以下の0.08は実験誤差である。温度勾配は温度変化に必要な時間を、熱容量比はコンクリート部との温度応答の差を表す。

HP, HPG共に充填率が低下すると温度勾配が上昇する傾向を示した。これは、体積の減少に伴い樹脂部の熱

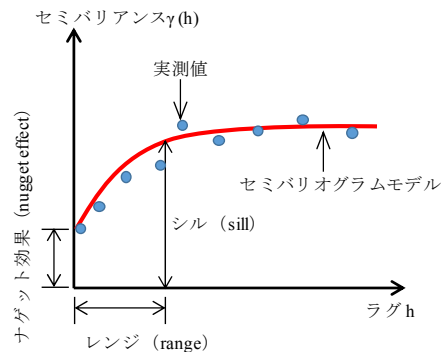


図-5 セミバリオグラムモデル概念図

表-5 表面温度測定結果

	温度勾配 (°C/min)		熱容量比 コンクリート/ 樹脂
	樹脂	コンクリート	
HP_20	2.37	1.85	1.28
HP_50	2.35	1.86	1.26
HP_80	2.38	1.87	1.27
HP_100	2.24	1.89	1.19
HPG_20	2.48	1.87	1.33
HPG_50	2.42	1.90	1.28
HPG_80	2.25	1.89	1.19
HPG_100	2.23	1.91	1.17
コンクリート		1.90	1.08 ^{※1}

※1 コンクリートの熱容量比は樹脂部左右の値を使用

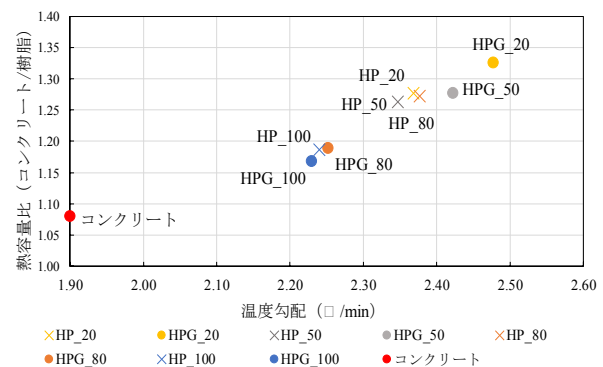


図-6 温度特性比較結果

容量が低下し、短時間でより大きな温度変化が起こったことに起因する。同様に熱容量比も樹脂部の体積の減少によりコンクリートとの差が大きくなり充填体積に反比例し上昇した。図-6に各供試体の温度勾配と熱容量比を用いた温度特性の比較結果を示す。図よりHP, HPG共にコンクリート部と異なる熱特性を検出し、赤外線サーモグラフィ法を用いた樹脂充填部の検出が可能であ

ることが示された。充填率の推定は、HP では充填率毎の傾向は得られなかった。HP_20 が熱容量比 1.28，温度勾配 2.37 で，HP_100 が熱容量比 1.19，温度勾配 2.24 となり未充填部検出は可能であった。HPG では充填率の低下に比例して熱容量比および温度勾配が上昇し充填率毎の差を検出した。これは GB の混和により比熱容量が低下し，温度上昇しやすくなったためと考えられる。以上の結果より，赤外線サーモグラフィ法を用いて熱特性の観点から GB 混和ひび割れ充填材の検出と充填率のおおよその推定が可能であることが示唆された。

4.2 セミバリオグラム結果

熱特性解析と同範囲の画像を用いてセミバリオグラムによる空間分布特性を検討した結果について示す。図-7，図-8 に HP，HPG の充填率毎のセミバリオグラムモデルの比較結果を示す。各検討ケースでセミバリエンス $\gamma(h)$ とラグ h の関係，レンジとシルの値を用い検討した。実測値から算出した $\gamma(h)$ は，HPG_100 以外の全てで h の増加に伴い分布範囲が拡大しレンジに達した。 $\gamma(h)$ が大きいほどの空間分布のばらつきが大きくなる。HPG_100 はセミバリオグラムモデルが線形となり最もばらつきが小さくなった。HP 供試体は各充填率で $\gamma(h)$ の傾向は確認できなかった。HPG では充填率の減少に伴い $\gamma(h)$ が増加する傾向を示した。これは GB の混和により樹脂の温度応答性が向上したためと考えられる。既往の研究で，ひび割れや欠損部の赤外線画像の $\gamma(h)$ は健全部に対し増加し，欠損が大きいほど $\gamma(h)$ も増加することが示されている^{10), 11)}。本研究においても HPG_20 の $\gamma(h)$ が最も大きくなり，充填率毎の検出が可能であった。

表-6 に各供試体のレンジ，シルの一覧を示す。HP は充填率毎のレンジ，およびシルの傾向は確認できなかった。HPG は充填率に比例してレンジが増加し，シルが減少する傾向を示した。HPG_100 はばらつきが検出されずレンジに達しなかった。レンジはデータの内挿可能な空間依存性の限界を示しレンジが低いほど局所的な温度変化を示す。シルはレンジに達した時の $\gamma(h)$ を表しデータの内在的なばらつきを示す。これによりレンジとシルの値を用いて HPG 供試体の充填率の検出が可能であった。

以上より空間統計学解析を用いた GB 混和樹脂充填材の充填率推定の可能性が示唆された。

4.3 クリギング結果

クリギングによりノイズの影響の除去精度を検討した結果について示す。ノイズは測定データの値を削除し疑似的な測定不能部として推定を行った。温度データ残存率 100%，80%，50%，30%の結果を用いて推定を行った。図-9 にデータ残存率 50%時のクリギングによる推定温度と実測値との比較結果を示す。HP，HPG 共に各

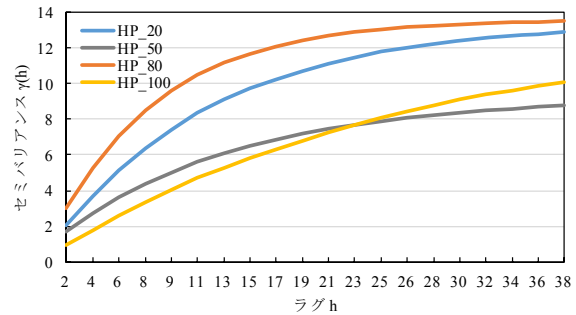


図-7 セミバリオグラム結果 (HP 供試体)

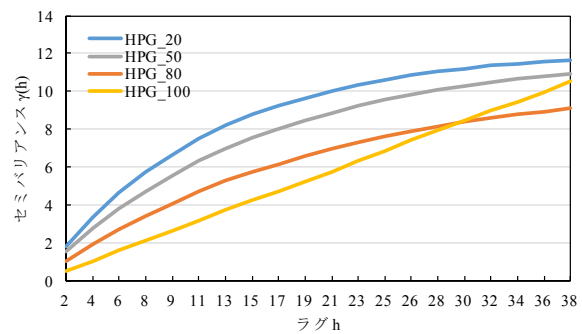


図-8 セミバリオグラム結果 (HPG 供試体)

表-6 レンジ，シル結果一覧

	レンジ range	シル sill
HP_20	11.7	13.4
HP_50	13.1	9.3
HP_80	7.7	13.6
HP_100	25.8	13.2
HPG_20	11.8	12.2
HPG_50	15.4	11.9
HPG_80	19.7	10.7
HPG_100	—	—

充填率でノイズ部による欠損データの推定値の良好な精度を確認した。セミバリオグラムの結果より，充填率が大きくなると温度のばらつきが減るため推定値の精度も向上した。全供試体でクリギングを用いたノイズ部の温度推定は有効であった。

図-10 に HP，HPG 共に充填率 20，100 の時のデータ残存率毎の比較結果を示す。比較には実測値と推定値の平均絶対誤差を用いた。結果は，残存率の低下に比例して誤差は増加したが平均絶対誤差の最大値は HP_20 供試体のデータ残存率 30%時の温度 0.35 °C となりすべての残存率で樹脂部の高精度な推定が可能であった。また

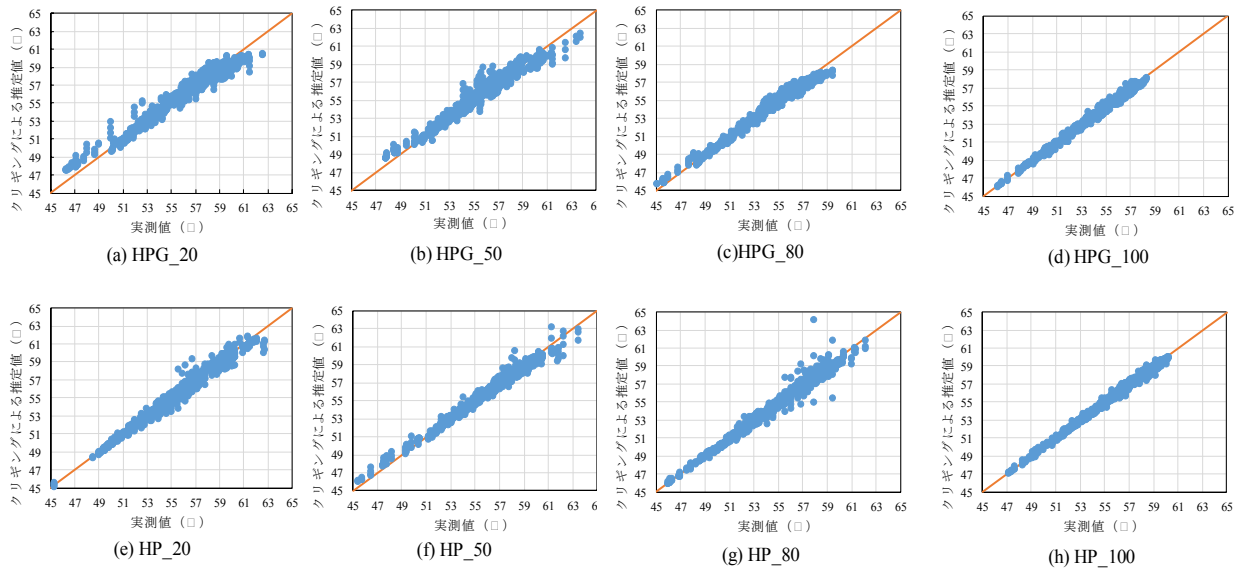


図-9 クリギング結果一覧（データ残存率50%）

GB の混和により各データ残存率で平均絶対誤差が減少し検出精度が向上した。セミバリオグラムが線形に近似した HPG_100 では残存率毎の推定値に差は見られなかった。以上の結果よりクリギングを用いた高精度なノイズ除去の可能性が示唆された。

5. まとめ

コンクリート内の人工ひび割れ部に中空粒子混和樹脂を異なる充填率で充填しコンクリート-樹脂複合材を作成し、熱特性の観点から中空粒子混和ひび割れ充填材の応答特性の検出とクリギングによるノイズ除去の精度の検証を行った。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 赤外線サーモグラフィ法を用いて、樹脂部とコンクリート部の熱特性の差の観点から充填率のおおよその推定が可能であった。また中空粒子の混和により検出精度が向上した。
- 2) セミバリオグラムモデルを用いた空間分布特性の検討の結果、レンジ、シル、セミバリエンス $\gamma(h)$ を用い HPG 樹脂の充填率の検出が可能であった。

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，2016
- 2) 斎藤一弥，阿竹徹，斎藤安俊：古典的 DTA，入力補償 DSC および熱流束 DSC の理論的考察，熱測定，Vol.14，No.1，pp.2-11，1987
- 3) 北村健三，大竹一友：基礎伝熱工学，共立出版，1995
- 4) 日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィ試験 I 2011，pp.3-12，2011
- 5) 日本非破壊検査協会：赤外線サーモグラフィ試験 II 2012，pp.85-97，2012

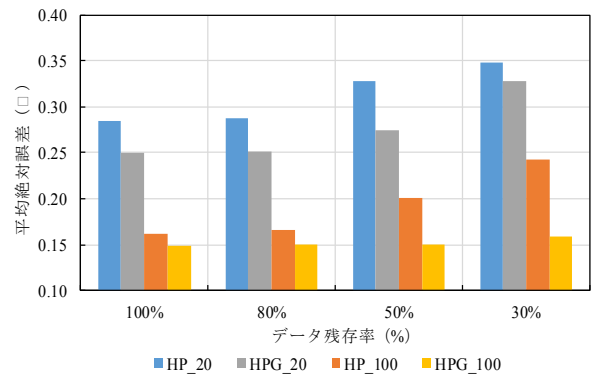


図-10 クリギング結果（データ残存率変更）

- 3) クリギングを用いたノイズの除去精度の検討の結果，全供試体において温度データの推定が可能であった。最低 30% のデータ残存率の場合でも高精度な温度データの推定が可能であった。

- 6) 高橋実，藤正督，Sheng, H. Y.：中空粒子の合成とその応用，Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol.12, No.315, pp.87-96, 2005
- 7) 地球統計学研究委員会：地球統計学，森北出版株式会社，pp.79-119，2003
- 8) Laslett, G. M. and Mcbratney, A. B.：Comparison of several spatial prediction methods for soil pH, Journal of Soil Science, Vol.38, pp.325-341, 1987
- 9) 柳内睦人，魚本健人：熱赤外線計測技術によるコンクリート構造物内空隙・鉄筋の判読に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.16, No.442, pp.91-100，1992

10) 小林秀一, 鈴木哲也, 森井俊広: 熱画像データの空間統計処理に基づく鋼矢板水路の腐食実態評価, 土木学会論文集, Vol.70, No.2, pp.137-142, 2014

11) 小林秀一, 鈴木哲也: 赤外線画像のセミバリオグラム特性に基づくコンクリートひび割れの定量評価, 土木学会論文集, Vol.70, No.2, Vol.17, pp.107-114, 2014