

赤外線画像を用いた鋼矢板-コンクリート複合材に発生した ひび割れ検出に関する研究

小林秀一*・鈴木哲也・森井俊広

(平成26年1月31日受付)

要 約

コンクリート表層の劣化は外部環境の影響により顕在化し、物性値の変質を引き起こす。材料損傷は一般的に表層欠損により評価されることが多く、既存施設の維持管理においては力学特性の検出に加えて、構造欠損の同定が不可欠である。本報では、赤外線サーモグラフィ法とセミバリオグラム解析により、鋼矢板-コンクリート複合材に発生したひび割れ損傷の検出を試みた結果を報告する。セミバリオグラム解析は、物性値の空間分布特性を定量評価する手法である。検討の結果、セミバリオグラムは検討ケースによりひび割れ損傷の影響を受けたと考えられる異なるセミバリエーションが確認された。このことから、材料損傷はセミバリオグラムにより簡易かつ定量的に評価できるものと推察され、赤外線画像を用いたセミバリオグラム解析によりコンクリート表層の定量的損傷度評価が可能になるものと考えられる。

新大農研報, 66(2):147-154, 2014

キーワード：空間統計学、鋼矢板-コンクリート複合材、赤外線サーモグラフィ法、セミバリオグラム

はじめに

戦後から高度経済成長期に集中的に整備された鋼矢板を護岸とした農業用排水路は、長期供用に伴い矢板材の腐食が進行し、断面減少や欠損が顕在化している。施工後10年から40年経過した鋼矢板水路を対象に腐食状況調査を行った既往の研究では、供用から20年程度経過した施設において、設計水深付近における水位の変動域での腐食の顕在化が報告されている(鈴木ら, 2012)。したがって、この部位において腐食代が消失する前に、適切な補修工を施す必要がある。一般的に腐食鋼矢板の補修工は、腐食した鋼矢板表面の錆や付着物をブラスト除去した後、防錆剤を塗布し樹脂等で保護する有機系被覆工法が多用されているが、多くの施設で被覆層の剥離や紫外線による再劣化が顕在化している。これらの点を踏まえて、筆者らは、コンクリートを被覆材とした補修工を提案している(小林ら, 2013)。被覆材にコンクリートを選定した理由は、既存の補修工と比較してLCC(Life Cycle Cost)低減の観点から優位にあることと、鋼矢板-コンクリート複合材による既設鋼矢板の補強効果が期待できることにある。補修工が施された鋼矢板水路は、空間的な広がりを持っているため、補修の適用性や有効性などの検証には効率的で信頼性の高い非破壊検査手法の開発が急務な課題である。本研究では、腐食の進行した鋼矢板水路に鋼矢板-コンクリート複合材による補修工を適用する際に問題となる施工不良や、表面の変状部(はく離、ひび割れ、漏水など)を簡易かつ定量的に評価できる非破壊検査手法を検討することを目的としている。コンクリート表層における定量的損傷度評価の基礎的検討として、赤外線サーモグラフィ法により計測した赤外線画像を用いてコンクリート表層におけるひび割れ部位の熱特性を検討した。赤外線画像は、パッシブ法(太陽光を熱源とした自然状態での加熱)により計測した。赤外線サー

モグラフィ法による変状部可視化の原理は、対象構造物の赤外線画像を計測し、表面温度の異常部から変状部を抽出するものである。既往の研究でも示されている通り、空間的な広がりを持つコンクリート水路構造物での面的な変状部可視化には有効である(鈴木ら, 2008)。しかし、温度異常部を変状部として評価するための判断基準や判断のためのデータ処理方法については、確立していないのが現状である。

本報では、赤外線画像を用いた変状部の評価手法を確立するための先駆的な試みとして、空間統計学手法の一つであるセミバリオグラム解析(間瀬ら, 2001; 間瀬, 2010)により鋼矢板-コンクリート複合材に発生したひび割れ損傷の検出を試みた結果を報告する。

空間統計学手法を用いた解析

1. セミバリオグラムを用いた空間分布特性評価

空間統計学では、データを確率場における実現値と見なし、領域 D 上の確率場 $Z(x)$ を考える。計測位置 x_1, x_2, \dots, x_n における確率変数 $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$ を計測データとした場合、本手法を適用するには、以下の(A)、(B)に示す仮定が成立する必要がある。

$$(A) \quad E[Z(x)] = \mu$$

対象とする領域で変数の期待値が一定であること。

$$(B) \quad E[\{Z(x) - Z(x+h)\}^2] = 2\gamma(h) < \infty$$

ベクトル h だけ離れた2点間の変数値の差の期待値は有限であり、 h のみの関数である。 2γ がバリオグラム(variogram)であり、 γ がセミバリオグラムである。セミバリオグラムを用いた空間分布特性評価は、主に資源工学分野において進められてきたが、近年では環境科学などにおいても応用研究が取り

組まれており、時・空間的に変動する物理量を定量的に評価する手法として用いられている。

2. セミバリオグラムモデル

空間統計学において物理量の空間依存性に関する解析には、一般的にセミバリオグラムが用いられる。モデルの概要を図1に示す。本モデルは、横軸にラグ (lag, h : サンプル間隔)、縦軸にセミバリエンス (semi-variance, $\gamma(h)$) をとり、その関係性を評価するものである。ラグ h のセミバリエンス $\gamma(h)$ は、距離 h だけ離れた全ての組み合わせ $N(h)$ の評価値間のばらつきの程度を表す。

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

直線上を等間隔に n 点計測を行い、地点 x_i, x_{i+h} での計測値がそれぞれ $Z(x_i), Z(x_{i+h})$ である場合は、式(2)が得られる。

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

本研究対象である鋼矢板-コンクリート複合材では、局所的な損傷が無い限り、空間的に連続して物性値が変化すると考えられる。その際、セミバリオグラムは連続し、図1のような形状を示す。セミバリエンスは、ラグの増加に伴い上昇し、ある特定の距離で最大値に達する場合が多い。この最大値はシル (sill) と定義され、データの内在的なばらつきを示している。シルに達する時のラグはレンジ (range) と定義されている。レンジは、空間依存性の限界を示している。換言すると、データの内挿が可能な範囲を示すものである。ラグ0におけるセミバリエンスは、ナゲット効果 (nugget effect) と定義され、実験誤差等の偶然のばらつきを示している。ナゲット効果は、非常に近い計測点において計測されたデータの一定のばらつきを示しており、局所的な損傷が大きい場合ナゲット効果は増加すると考えられる。

各パラメータは、ラグとセミバリエンスの関係から最小二乗法による回帰分析により解析的に評価される。一般的には、球形モデル、指数モデルおよびガウス型モデル等が用いられている。本研究では、球形モデルを用いて解析を行った。球形モデルを以下に示す。

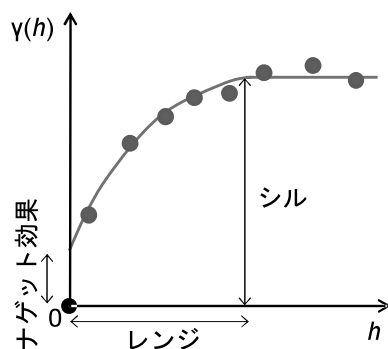


図1 セミバリオグラムモデル

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (0 < h \leq a) \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad (h > a) \quad (4)$$

ここで、 C_0 : ナゲット効果、 C_0+C : シル、 a : レンジである。

計測施設の概要

計測対象の鋼矢板水路は、新潟県新潟市南区に位置する施工後15年が経過した白根郷地区新村排水路である。自立式護岸形式の農業用水路で、水路幅5.5m、水路高1.7m(水路渠底～笠コンクリート天端)である。既設鋼矢板の板厚について、超音波厚さ計を用いて鋼矢板1枚につき15点の測定を実施した。その結果、設計板厚10.3mmに対して、平均板厚は9.9mm、板厚減少率は6.5%であった。腐食に伴う板厚減少は、河床から50cmの高さに位置する部位で卓越しており、最小板厚で9.3mmの結果を得た。以上から、本施設における鋼矢板の腐食は、既往の研究(鈴木ら, 2012)と同様に設計水深付近における水位の変動域において、局所的に断面減少が顕在化していることが確認され、2011年11月～2012年1月の期間に鋼矢板-コンクリート複合材による補修工を適用した。適用後に行ったモニタリング調査の結果、供用開始11ヶ月後(2012年11月)に鋼矢板-コンクリート複合材表面にひび割れによる変状を確認した。ひび割れ発生箇所は、既存の笠コンクリート目地部の直下であり、ひび割れ幅は0.2mmである(図2)。

計測方法・条件

本研究では、モニタリング調査の結果ひび割れが確認された箇所を対象として、赤外線サーモグラフィ(日本アビオニクス社製)により赤外線画像を計測した(図3)。赤外線サーモグラフィの仕様を表1に示す。セミバリオグラムモデルを用いた空間分布特性評価は、ひび割れが発生した鋼矢板-コンクリート複合材(以後、“損傷部”と記す)、未発生の鋼矢板-コンクリート複合材(以後、“健全部”と記す)およびコンクリートパネルの接合部(以後、“目地部”と記す)を選定し、検討ケースの熱特性を比較した(図4)。

現地調査は、2013年6月13日の5時から17時までの12時間の時系列変化を定点計測した。計測時の気象条件は、計測対象近傍で温湿度ロガー(日置電機(株)社製)により計測した。

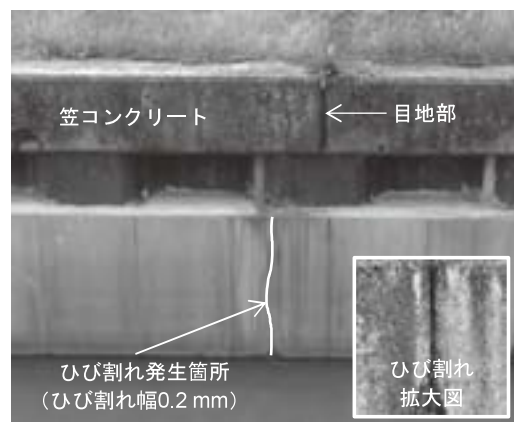


図2 鋼矢板-コンクリート複合材表面のひび割れ

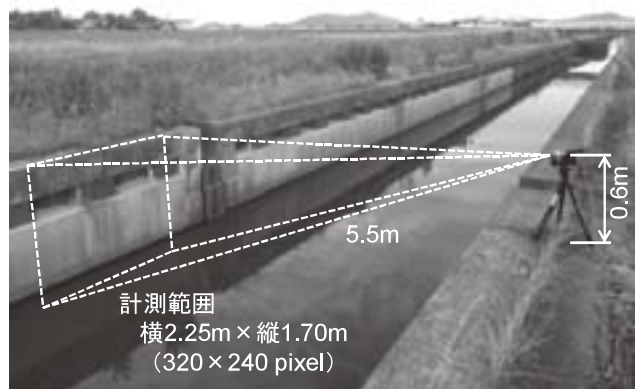
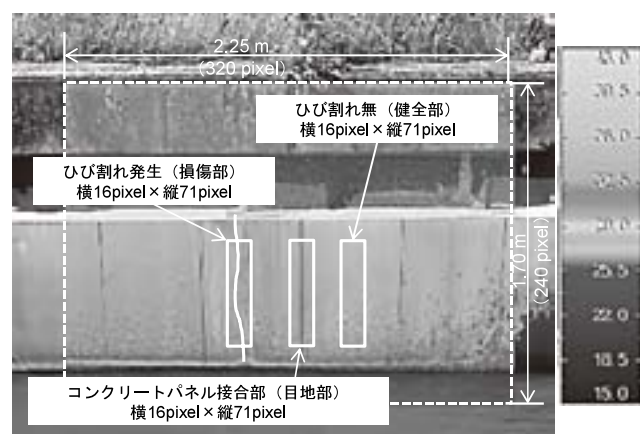


図3 赤外線画像の計測状況

表1 赤外線サーモグラフィ仕様

型番	R300SR
測定範囲	-40℃～500℃
最小温度分解能	0.03℃～0.3℃
センサ	2次元非冷却マイクロボロメータ
センサ解像度	横320×縦240



合成画像 (熱画像+可視画像)

図4 赤外線画像の解析範囲

計測期間中の平均値は、気温 30.6℃ (最大: 37.4℃、最小: 25.0℃)、湿度 53.5% (最大: 63.0%、最小: 37.0%)、水温 23.2℃ (最大: 27.0℃、最小: 19.5℃) である。赤外線画像の計測は、30分に1枚の間隔で行った。赤外線サーモグラフィは、鋼矢板-コンクリート複合材表面から 5.5m 離れた地点に設置し、横 320 × 縦 240pixel (横 2.25m、縦 1.70m) の範囲で赤外線画像を計測した。計測した赤外線画像を損傷部、健全部および目地部に分類し、それぞれ横 16pixel × 縦 71pixel の範囲で表面温度を検討した。図5は、損傷部・健全部・目地部における表面温度分布の最高値と最低値との温度差の時系列変化を示しており、損傷部の温度差範囲は、最大 5.2℃～最小 2.2℃、健全部の温度差範囲は、最大 4.5℃～最小 1.9℃、目地部の温度差範囲は、最大 4.8℃～最小 2.1℃であった。図6は、表面温度分布の最高値から求めた変動値の時系列変化を示しており、本研

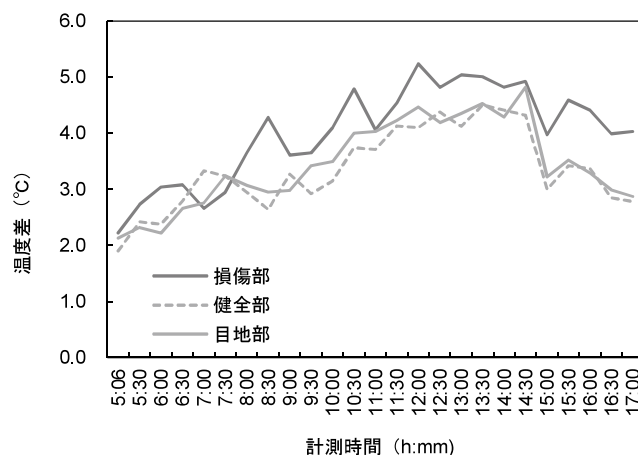


図5 温度差 (最高温度-最低温度) の時系列変化

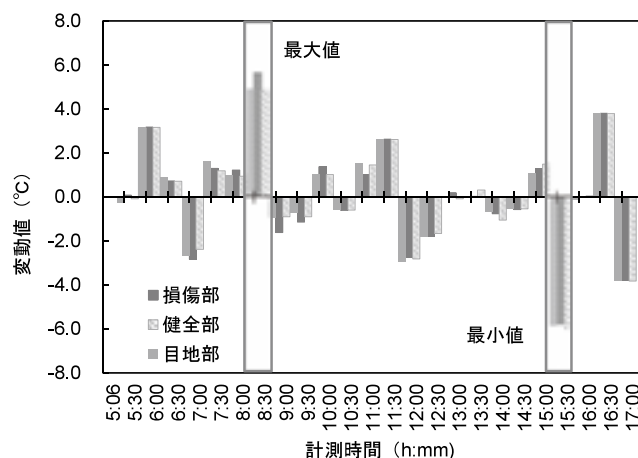


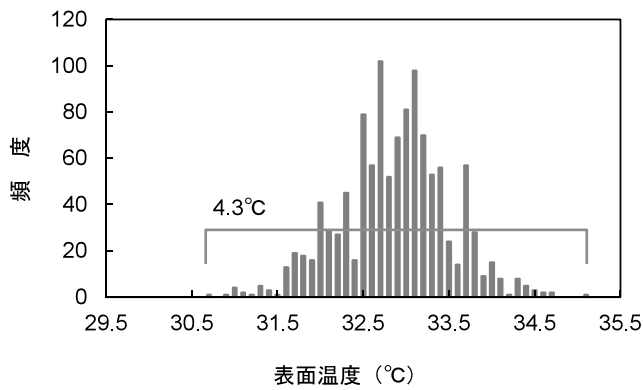
図6 変動値 (最高温度) の時系列変化

究では、30分毎の最高温度と、その30分前の最高温度との差分を変動値と定義した。損傷部の変動値は、最大 5.7℃ (8時30分)～最小 -5.8℃ (15時30分)、健全部の変動値は、最大 4.9℃ (8時30分)～最小 -6.0℃ (15時30分)、目地部の変動値は、最大 4.9℃ (8時30分)～最小 -5.9℃ (15時30分)であった。解析に用いる統計量は、変動値の最大値を記録した8時30分の赤外線画像から最小値を記録した15時30分の赤外線画像を減算処理し、表面温度差として算出した。

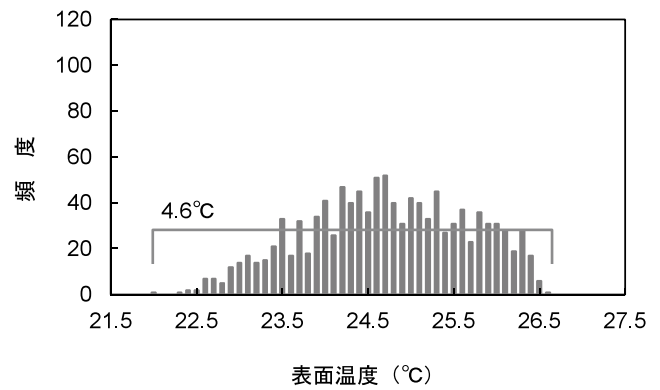
結果および考察

1. 鋼矢板-コンクリート複合材表面の熱特性

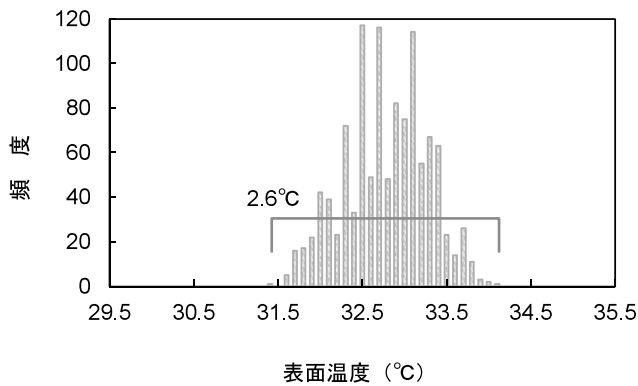
検討の結果、鋼矢板-コンクリート複合材表面の熱特性は、検討ケースにより異なる傾向が確認された (図7～図9)。8時30分における損傷部の表面温度は、平均値 32.8℃ (最大: 35.0℃、最小: 30.7℃)、範囲 4.3℃ (図7(A))、健全部の表面温度は、平均値 32.7℃ (最大: 34.0℃、最小: 31.4℃)、範囲 2.6℃ (図7(B))、目地部の表面温度は、平均値 33.2℃ (最大: 34.5℃、最小: 31.5℃)、範囲 3.0℃ (図7(C)) であった。一方、15時30分における損傷部の表面温度は、平均値 24.7℃ (最大: 26.5℃、最小: 21.9℃)、範囲 4.6℃ ((図8(A))、健全部の表面温度は、平均値 24.7℃ (最大: 26.4℃、最小: 23.0℃)、範囲 3.4℃ ((図8(B))、目地部の表面温度は、平均値 25.0℃ (最大:



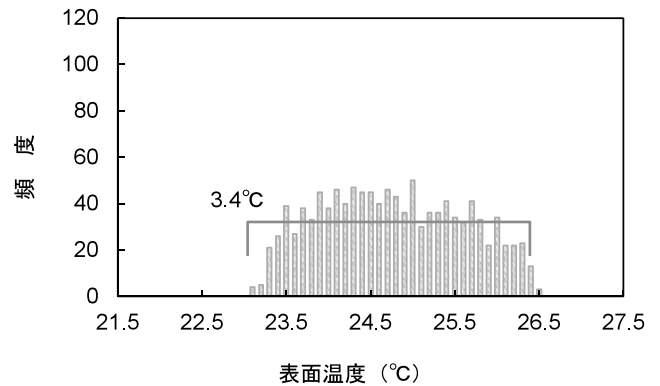
(A) 損傷部



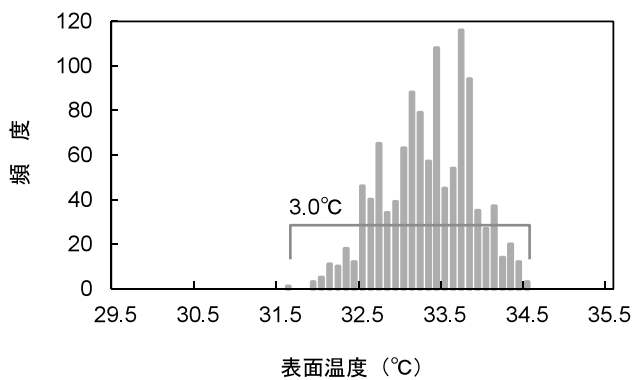
(A) 損傷部



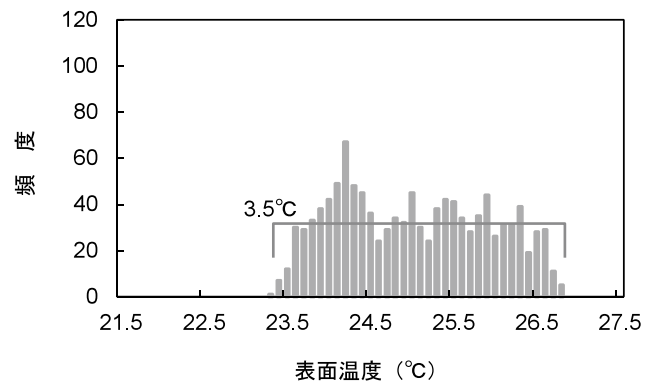
(B) 健全部



(B) 健全部



(C) 目地部



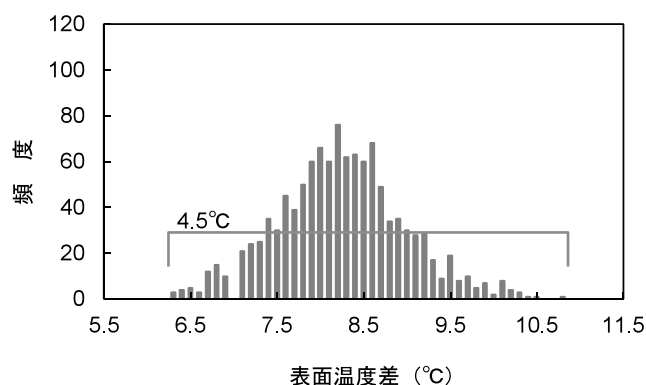
(C) 目地部

図7 鋼矢板-コンクリート複合材表面の熱特性 (8:30)

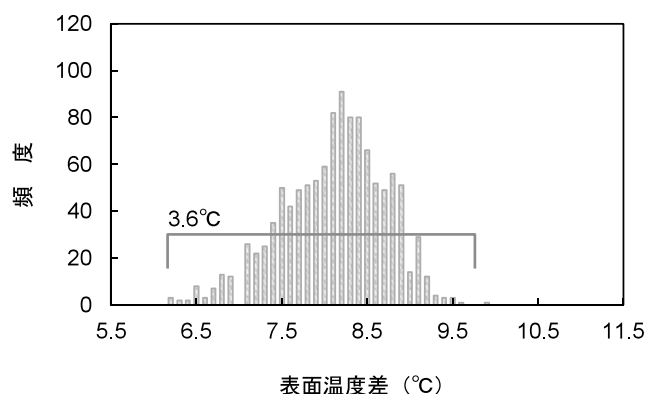
26.8℃、最小:23.3℃)、範囲 3.5℃ (図8 (C)) であった。また、8時30分と15時30分との表面温度差を検討した結果、損傷部では平均値 8.2℃ (最大:10.8℃、最小:6.3℃)、範囲 4.5℃ (図9 (A))、健全部では、平均値 8.0℃ (最大:9.8℃、最小:6.2℃)、範囲 3.6℃ (図9 (B))、目地部では、平均値 8.3℃ (最大:10.0℃、最小:6.3℃)、範囲 3.7℃ (図9 (C)) であった。損傷部における表面温度の熱特性が他の検討ケースと異なるのは、

図8 鋼矢板-コンクリート複合材表面の熱特性 (15:30)

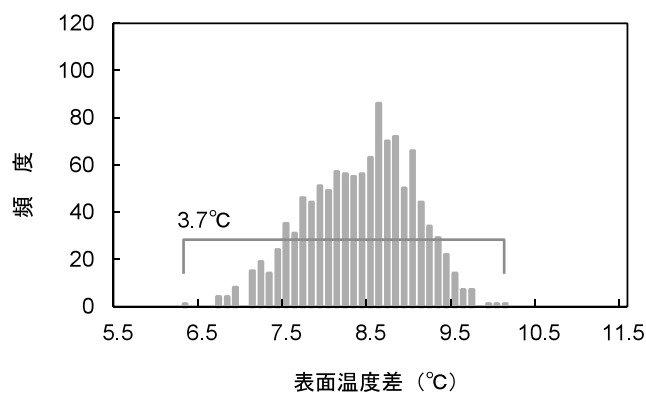
既往の研究 (日本非破壊検査協会, 1994; JCI, 2001) から明らかにように熱容量の相違に起因しているものと考えられる。一般的に、表面にひび割れが発生したコンクリートは、表層部に損傷が発達する。コンクリートのひび割れ部位は、熱容量が低いことから、温度変化が拡大する傾向にある。本研究においても、損傷部ではひび割れの進行に伴う空隙量の増加が、健全部や目地部と異なる熱特性を顕在化させたものと考えられる。



(A) 損傷部



(B) 健全部



(C) 目地部

図9 鋼矢板-コンクリート複合材表面の熱特性 (8:30-15:30)

2. 赤外線画像の統計的特性

計測対象である鋼矢板-コンクリート複合材表面の熱特性が検討ケースにより異なることが図7～図9から明らかになったことから、表面温度の面的な相違を統計的特性から考察する。

8時30分の赤外線画像を図10(A)、15時30分の赤外線画像を図10(B)に示す。8時30分の赤外線画像では、損傷部において表面温度の高温化によりひび割れ部位が可視化できる

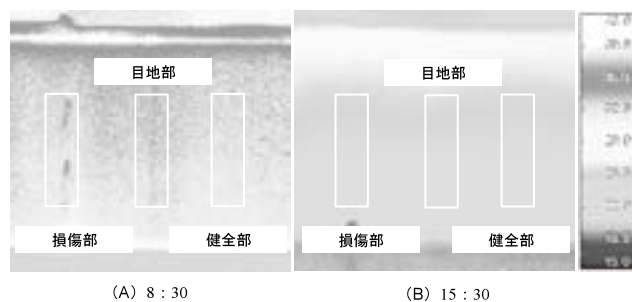


図10 赤外線画像の比較

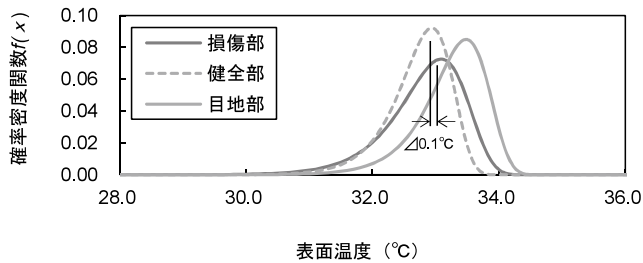
が、15時30分の赤外線画像では、若干の違いはあるものの明確な差は確認できなかった。本研究では、赤外線画像のスパン（温度表示幅）や温度レンジ（表示温度の中心値）の調整だけでは可視化できない差異の少ない赤外線画像の特性を検討するため、確率分布の一つであるワイブル分布を用いて確率密度関数を求め、局所的な熱特性を評価した。ワイブル分布とは、信頼工学の分野で物体の体積と強度との関係を定量的に記述するための確率分布として用いられている(荻谷, 2010)。一般的に、物体の破壊現象は、材料の最も弱い部位に生じた損傷が拡大する現象としてモデル化されている。ワイブル分布の確率密度関数 $f(x)$ は、

$$f(x) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{x}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\eta} \right)^m \right] \quad (5)$$

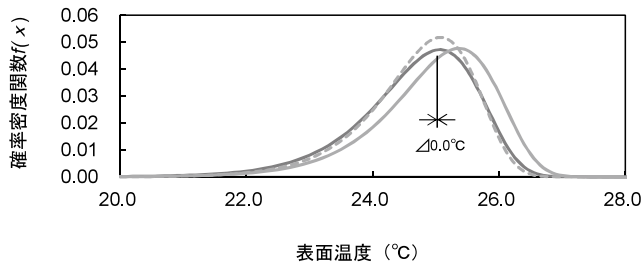
ここで、 x : 表面温度または表面温度差、 m : 形状パラメータ、 η : 尺度パラメータである。

ワイブル分布を図11(A)～図11(C)に示す。検討の結果、8時30分における損傷部の確率密度関数の極大値は0.073 (33.1°C)、健全部は0.092 (33.0°C)、目地部は0.085 (33.5°C)であった(図11(A))。一方、15時30分における損傷部の極大値は0.047 (25.1°C)、健全部は0.052 (25.1°C)、目地部は0.048 (25.4°C)であった(図11(B))。また、8時30分と15時30分の表面温度を減算処理した表面温度差では、損傷部の極大値は0.060 (8.4°C)、健全部は0.074 (8.2°C)、目地部は0.071 (8.5°C)であった(図11(C))。確率密度関数の極大値における損傷部と健全部の表面温度は図11(A)では $\Delta 0.1^\circ\text{C}$ であり、図11(B)では $\Delta 0.0^\circ\text{C}$ であることが確認された。これに対して、表面温度差は図11(A)、図11(B)と比較して $\Delta 0.2^\circ\text{C}$ に拡大することが確認された(図11(C))。このことから、赤外線画像を減算処理することにより、ワイブル分布から求めた確率密度関数の極大値における損傷部と健全部との若干の分布範囲の相違が検出可能であることが示唆された。しかし、損傷部と目地部との比較では、図11(A)が $\Delta 0.4^\circ\text{C}$ 、図11(B)が $\Delta 0.3^\circ\text{C}$ 、図11(C)が $\Delta 0.1^\circ\text{C}$ となり、損傷部と健全部との比較とは異なる結果となった。このことから、ワイブル分布では損傷部と目地部のような差異の少ない赤外線画像から局所的な熱特性の相違を評価することは困難なことが示唆された。

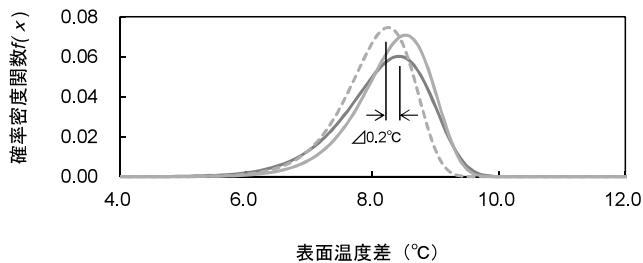
以上の結果から、鋼矢板-コンクリート複合材表面における差異の少ない赤外線画像から局所的な損傷度の相違を評価するには、物性値の空間分布特性を定量評価する必要がある、本研究では、セミバリオグラムモデル解析を用いて検討を試みた。本モデルは、異常点（本論ではひび割れ部位）の空間位置をセミバリエーションとラグの関係を用いて評価し、その特性からデー



(A) 8 : 30

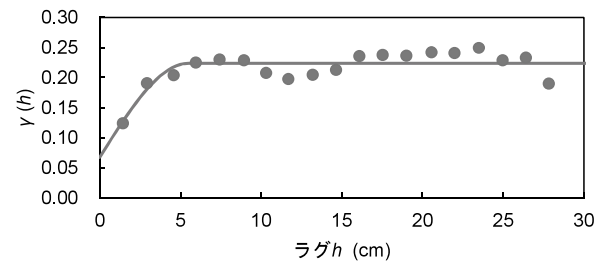


(B) 15 : 30

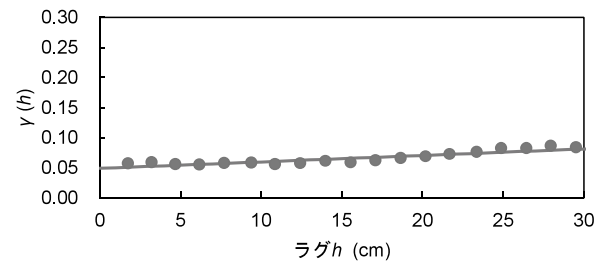


(C) 8 : 30 - 15 : 30

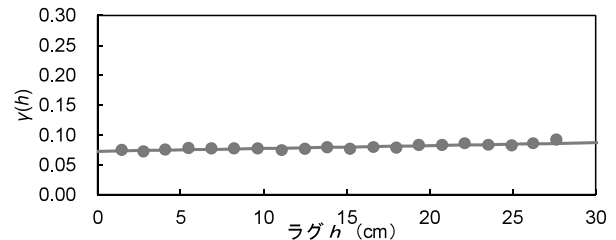
図11 ワイブル分布



(A) 損傷部 (8 : 30 - 15 : 30)



(B) 健全部 (8 : 30 - 15 : 30)



(C) 目地部 (8 : 30 - 15 : 30)

図12 セミバリオグラムモデル

タの空間構造を評価するものである。

3. 赤外線画像のセミバリオグラムモデル特性

セミバリオグラムの特徴は、計測データの空間依存性を評価できることにある。損傷部のセミバリオグラムを図12(A)、健全部のセミバリオグラムを図12(B)、目地部のセミバリオグラムを図12(C)に示す。セミバリアンス $\gamma(h)$ は、式(2)を用いて算出した。表面温度差の実測値は、図11の確率密度関数の極大値より高温部にあるデータを対象として評価した。解析値は、球形モデル(式(3)および式(4))を用いて評価した。算出したセミバリアンス $\gamma(h)$ は、特定距離(例えばラグ $h=10\text{cm}$ など)における評価値間のばらつきの程度を表す指標である。つまりセミバリアンス $\gamma(h)$ が大きいほど計測値のばらつきも拡大することになる。

検討の結果、損傷部では、ラグ $h=0\sim6\text{cm}$ において $0.12\sim0.23$ のセミバリアンス $\gamma(h)$ を記録し、ひび割れなどの局所的な高温部の影響により物性値間の空間的依存性が低下することが示唆された。これに対して健全部のセミバリアンス $\gamma(h)$ は $0.05\sim0.09$ 、目地部のセミバリアンス $\gamma(h)$ は $0.07\sim0.09$ の範囲にあり明確なレンジ範囲は確認されなかった。

空間統計学におけるセミバリオグラムを鋼矢板-コンクリート複合材表面の熱特性の評価に適用した結果、損傷部では、明確なレンジに基づくセミバリオグラムが確認された。ひび割れにより熱特性が明らかに変質する損傷部では、物性値の空間的連続性が無くなることにより、ラグ h の低い段階でのセミバリアンス $\gamma(h)$ の増加が確認された。健全部および目地部では、レンジの明確なセミバリオグラムは確認できないが、ラグ h の増加に伴いセミバリアンス $\gamma(h)$ が増加する傾向が確認された。このことから、ひび割れ損傷はセミバリオグラムにより簡易かつ定量的に評価できるものと推察され、赤外線画像を用いたセミバリオグラム解析によりコンクリート表層の定量的損傷度評価が可能になるものと考えられる。今後の課題は、セミバリオグラム特性を考慮した計測範囲の定量化及び計測精度の向上であると考えられる。

おわりに

本研究では、赤外線サーモグラフィ法により計測した赤外線画像を用いて鋼矢板-コンクリート複合材表面に発生したひび割れ損傷を、赤外線画像の空間分布特性の観点から評価した。

評価手法には、空間データの評価手法の一つである空間統計学におけるセミバリオグラム解析を用いた。以下に、本研究から得られた結果を列挙する。

- 1) 鋼矢板-コンクリート複合材表面における損傷度の違いは、熱特性の観点から評価可能である。
- 2) ひび割れが顕在化した損傷部では、健全部や目地部と比較して表面温度の熱特性が変質する可能性が示唆された。
- 3) 損傷部におけるセミバリオグラムでは、明確なレンジ範囲が確認されたことから、材料損傷はセミバリオグラムにより簡易かつ定量的に評価できるものと推察され、赤外線画像を用いたセミバリオグラム解析によりコンクリート表層の定量的損傷度評価が可能であることが示唆された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご協力を頂いた新潟大学大学院自然科学研究科山岸様、上野様および新潟大学農学部生産環境科学科の館様、鶴見様、寺井様に深く感謝申し上げます。

参考文献

a) 雑誌

鈴木哲也・青木正雄・大津政康. 2008. バリオグラムによる表

面被覆工を施したコンクリートの熱特性評価. コンクリート工学年次論文集, **Vol.30(No.2)**: 763-768.

鈴木哲也・森井俊広・原齊・羽田卓也. 2012. 地域資産の有効活用に資する鋼矢板リサイクル工法の開発. 農業農村工学会誌, **80(10)**: 21-24.

小林秀一・鈴木哲也・長崎文博・佐藤弘輝・山岸俊太郎. 2013. 鋼矢板水路の腐食実態を踏まえた保全対策. 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), **Vol.69(No.4)**: I_129-I_136.

b) 単行本

日本非破壊検査協会 (編). 1994. コンクリート構造物の非破壊検査法. pp.73-97. 日本非破壊検査協会, 東京

間瀬茂・武田純. 2001. 空間データモデリング - 空間統計学の応用 -. pp.135-149. 共立出版, 東京.

JCI TC994. 2001. コンクリート構造物の診断のための非破壊検査方法研究委員会報告書. pp.83-131. 日本コンクリート工学会, 東京

間瀬茂. 2010. 地球統計学とクリギング法-Rと geoR によるデータ解析 -. pp.11-32. 共立出版, 東京.

蓑谷千風彦. 2010. 統計分布ハンドブック. 朝倉書店, 東京

Detection of Concrete Cracks in Steel Sheet Pile – Concrete Composite by Infrared Image Data

Shuichi KOBAYASHI^{1*}, Tetsuya SUZUKI² and Toshihiro MORII²

(Received January 31, 2014)

Summary

Degradation of concrete surface layers could occur due to external effects, which normally lead to change physical properties. The degree of damage, in most case, evaluated as defects of structural surface. In order to maintenance and management of concrete structures, it is desirable to evaluate not only mechanical properties but also detection of defects. In this study, detection of concrete crack in steel sheet pile – concrete composite is proposed by applying infrared thermography method and the semi-variogram analysis of geo-statistics. The semi-variogram analysis is a quantitative evaluation method of the spatial distribution of physical properties. Thus, the semi-variogram appeared different semi-variance characteristics depending on the damage degree. The damage level could be reasonably quantified with the semi-variogram. By evaluating the damage from the semi-variogram analysis using infrared image, the damage of concrete surface layer is quantitatively evaluated.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 66(2):147-154, 2014

Key words : spatial statistics, steel sheet pile – concrete composite, infrared thermography method, semi-variogram