

論文 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

鈴木 哲也*1・青木 正雄*2・大津 政康*3

要旨: コンクリート構造物の損傷は、局所的に進行し、構造体の耐力を低下させる。本研究では、損傷が進行したコンクリート水路構造物の補修効果を熱特性の空間的分布構造の観点から評価した。評価手法には、推計統計学指標に加えて、空間データの評価手法の一つである地質統計学のセミバリオグラムを用いた。検討の結果、表面被覆工を施したコンクリート壁面の熱特性は、明確なセミバリアンスとラグの関係が得られ、コンクリート構造物の補修効果の検証へのセミバリオグラムの有効性が明らかになった。損傷部の検出には、セミバリアンスと統計指標である尖度と歪度との関係が有効であることが示唆された。

キーワード: コンクリート水路構造物, 表面被覆工, 地質統計学, セミバリオグラム, 表面熱特性

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が社会問題化し、補修・改修工の需要が増大している。補修効果の検証には、弾性波法や電磁波法など各種の非破壊検査が適用されているが、非破壊計測により検出されたデータが構造物の代表値であるか否かの議論は少ない。一般的に、ばらつきを含む計測値は、「計測値全体としての散らばり」と「計測値の空間的分布」の2つの側面を持つ。前者は、推計統計学と度数分布により評価される。後者は、セミバリオグラム (semi-variogram) などを用いて空間的相関構造が地質統計学 (geostatistics) により評価される¹⁾。コンクリート物性は、供用後、外部環境の影響により変質し、鉄筋腐食などの局所的な損傷が顕在化する。既設構造物において、現況を踏まえたコンクリート物性を評価するためには、平均的な物性値評価に加えて、局所的な損傷を計測データから抽出する必要がある。その際、物性値の空間構造を評価することは有効であり、地質統計学はその有効な手法であると考えられる。

筆者らは、コア供試体を用いたコンクリート損傷の定量化を損傷力学理論の観点から進めている^{2,3)}。既往の研究では、コア供試体の破壊過程をAE法によりモニタリングし、AE発生挙動からコンクリート損傷を評価している。既設構造物では、前述の通り、損傷が局所的に発生しており、平均的な物性値と極度に損傷が進行した部位とが同一構造物において共存している。構造物の破壊挙動は、最弱部から進行する。このことから、損傷度評価に用いるコア供試体の採取は、対象構造物の平均的部位に加えて、最弱部で行なうことが重要となる。既往の研究成果をよりの確な部位に適用するためには、コンクリート損傷の空間的分布構造を把握する必要がある

と考えられる。

本研究では、コンクリート物性の空間的分布特性を評価するための基礎的検討として、損傷状況の異なるコンクリート水路構造物の壁面を対象に、赤外線サーモグラフィ法により計測した熱画像を用いて補修前後の物性値の空間的分布構造の評価を試みた。計測した熱画像は、部位による相違を明確にするために1画像を80分割し、その統計指標から損傷部位の特性を明確にすることを試みた。統計指標には、尖度と歪度との関係とセミバリオグラムを用いた。これらの指標値を用いて補修工前後のコンクリート壁に関する熱特性の空間的分布構造から補修効果を評価した。

2. コンクリート水路構造物の損傷特性と検出法

水流の影響下にあるコンクリート材料は、磨耗や成分溶出の影響により、中性化と表面粗度の増加が進行する。その主な原因となる水理現象には、土砂礫の流下やキャ



写真 - 1 損傷の進行したコンクリート水路壁面 (昭和9年施工, 損傷部)

*1 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科助手 博士 (工学) (正会員)

*2 日本大学 生物資源科学部生物環境工学科准教授 博士 (農学)

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)

びテーションなどがあり、これらがコンクリート表面の損傷を促進させる。施工後 74 年経過したコンクリート水路表面の変状の一例を図 - 1 に示す。粗骨材や鉄筋の露出が確認できる。

このような既設コンクリート水路では、構造的特徴から壁面と底版が水流の影響を受け、鉄筋露出などが局所的に顕在化する。コンクリート構造物の表層部は、外部環境の影響や施工不良に伴う鉄筋腐食ないしクラックの進展など構造体の損傷現象が顕在化する。近年、非破壊検査の中でも電磁波法に分類される赤外線サーモグラフィ法が面的な広がりを持つ構造物の損傷度評価に有効であることが認められてきている^{4),5)}。

赤外線サーモグラフィ法による欠損検出の原理は、対象構造物の表面温度分布を計測し、表面温度の異常部から欠損を評価するものであり、空間的な広がりを持つ土木構造物での面的な損傷部位の検出には有効である。計測精度の観点からは、欠損の検出深度は構造物表面から約 10cm 程度⁴⁾であり、検出深度は計測面の水分状態や損傷度により計測精度は異なる。コンクリート水路構造物の場合、コンクリート壁と底版が線の構造物として連続的に構築されていることから、本手法を適用する場合、測定範囲と水分状態に留意する必要がある。

3. 解析手法^{1),6)}

3.1 バリオグラムによる物性値の空間的分布構造評価

地質統計学では、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、地質統計学を適用するには、以下に示す 2 つの仮定が成立する必要がある。

$$(ア) \quad E[Z(x)] = \mu$$

対象とする領域で変数の期待値が一定であること。

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

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。

2 γ がバリオグラム (variogram) であり、 γ がセミバリオグラムである。本論では次項に示すセミバリオグラムモデルを用いて検討を行う。セミバリオグラムを用いた空間構造評価は、環境管理や土壌物性値評価、鉱物資源評価など、時・空間的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。

3.2 セミバリオグラムモデル

地質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を用いられる。これ

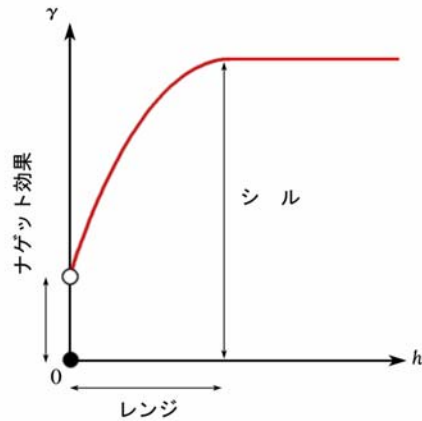


図 - 1 セミバリオグラム概念図

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、その関係を評価するものである (図 - 1)。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。

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

式(1)は、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。

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

本研究対象であるコンクリート壁では、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、ラグの増加に伴って上昇し、ある特定の距離で最大値に達する場合が多い。この最大値をシル (sill) といい、データの内在的なばらつきを表す。シルに達する時のラグをレンジ (range) という。レンジは空間依存性の限界を表す。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をナゲット効果 (nugget effect) と呼び、実験誤差等の偶然のばらつきを示している。

各パラメータを解析的に求めるには、ラグとセミバリエンスの関係から最小 2 乗法による回帰分析により求められる。一般的には、球形モデル、指数モデルおよび直線モデル等が用いられている。本項では、本論において用いた球形モデルを示す。

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

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

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

4. 計測施設の概要と補修工法

4.1 計測対象施設

計測対象施設は、神奈川県中央部約 20km を縦断している相模川左岸幹線水路である。計測対象部位は、昭和 9 年および昭和 36 年に施工された区間である。構造型式は、コンクリート 3 面張り水路である（写真 - 2）。現況施設の損傷状況は、水流による磨耗や鉄筋腐食に伴うコンクリート壁面の剥離・剥落が顕在化している。

本論では、損傷状況の異なるコンクリート壁面を対象に計測を実施した。計測対象の選定には、損傷が局所的に顕在化した部位と一般的な既設構造物区間を選定した。計測対象施設の概要を表 - 1 に示す。損傷が顕在化した昭和 9 年施工区間（以後、“損傷部”と記す）では、磨耗の進行と鉄筋露出が確認された（写真 - 1）。昭和 36 年改修区間（以後、“通常部”と記す）では、顕著な損傷は確認されず、通常利用時の水位線以下の範囲で水流による軽微な磨耗が確認されるのみであった（写真 - 3）。

4.2 補修工法

計測対象施設は、2006 年 12 月にウレタン樹脂表面被覆工（セメント系材料使用）により補修が施されている（写真 - 2）。施工は、現況施設を排水後、高压洗浄工により表面の汚れ及び脆弱部分の除去を行なった後に、素地調整材により側壁表面と底版表面の磨耗の修復が行なわれた。その後、プライマーおよび表面被覆材を側壁および底版に塗布している。

5. 計測方法・条件

本研究では、コンクリート水路壁面の表面状況の相違を赤外線サーモグラフィ法による熱特性から評価した。熱画像の取得は、コンクリート水路壁面から 1.0m の部位において赤外線サーモグラフィ（NEC 三栄（株）社製）により赤外線放射エネルギーを検出して行った（図 - 2）。計測条件は、現況（日陰）から強制加熱（500W×2 台、壁面より 40cm）を 3 分間行い、強制加熱終了後 12 分間の計測である。熱画像は 30 秒/枚で取得した。計測対象範囲は、縦 40cm×横 50cm の範囲である。熱画像データの統計処理は、80 分割（1 要素：縦 5cm×横 5cm、縦 10 要素×横 8 要素）した後に統計量を算出した。1 要素当たりのデータ数は 960 である。現地計測は、現況（補修前）と表面被覆工を施した後の 2 回行なった。いずれの



写真 - 2 補修後の計測対象水路



写真 - 3 コンクリート水路表面
（通常部、昭和 38 年改修）

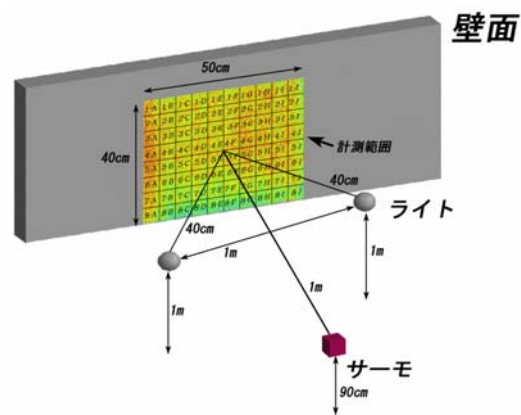


図 - 2 赤外線サーモグラフィ計測位置
（●：ライト，■：サーモグラフィ）

表 - 1 計測部位の概要

名称	施工年	損傷概要	圧縮強度 (N/mm ²)	補修・改修状況
損傷部	昭和 9 年（未改修）	断面欠損や鉄筋露出が顕在化している（写真 - 1）。鉄筋露出部と磨耗部に区分	16.2	表面被覆工実施（写真 - 2）
通常部	昭和 36 年改修 （施工：昭和 9 年）	軽微な磨耗のみが確認されている（写真 - 3）。	27.6	現況利用

測定も晴天時に計測面が直射日光の照射を抑制した状態で行なった。水分条件は、水路内を排水後3ヶ月経過し、乾燥状態である。

計測時の気象条件は、計測値近傍で気象観測装置（江藤電気（株）社製）で計測した。計測期間中の平均値は、気温 20.04℃、風速 4.21m/s および日射 0.49kW/m² である。

6. 結果および考察

6.1 損傷コンクリート壁面の温度変化特性

コンクリート壁面の温度変化特性は、損傷状況により異なる傾向が確認された（図 - 3）。損傷部では、鉄筋露出位置において、平均温度 28.7℃（最大：30.2℃、最小：27.5℃）であった。磨耗が顕在化した部位では、鉄筋露出部と異なり平均温度 22.9℃（最大：24.6℃、最小：22.1℃）であった。損傷が顕在化していない通常部では、平均温度 23.4℃（温度範囲：2.8℃）であり、磨耗部との差が 0.5℃に留まった。磨耗部と通常部の相違は、加熱後 12 分間の放熱過程で異なる傾向が確認された。過熱終了直後は、表面温度 24.6℃と同一であったのに対して 12 分後には磨耗部が 22.1℃に対して通常部 23.4℃と、1.3℃の温度差が確認された。加熱終了後、磨耗部では温度下降速度 $3.47 \times 10^{-3} \text{℃/s}$ であるのに対して、通常部では約 48% の $1.66 \times 10^{-3} \text{℃/s}$ であった。これらの結果から、磨耗などの損傷が顕在化したコンクリートでは、通常部と比較して、表面温度の変化特性が相違することが明らかになった。これは、既往の研究^{4),5)}からも明らかなように壁表面に露出している材料特性に加えて、同一材料においても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、損傷が進行したコンクリートでは、内部に微小クラックの集積に伴う空隙が蓄積される。コンクリート空隙は、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、磨耗部では損傷の進行に伴う空隙量の増加が、通常部と異なる熱特性を顕在化させたものと考えられる。

6.2 熱特性の統計的特性

計測対象であるコンクリート水路壁面の熱特性が損傷状況により相違することが図 - 3 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。

加熱前の熱画像を図 - 4（可視画像：写真 - 1）および図 - 5（可視画像：写真 - 3）に示す。損傷部では、鉄筋が露出する部分や剥離部の高温化が顕著であった。通常部では、底版近傍と比較してコンクリート壁上部の高温化が顕著であった。表面温度分布を図 - 6 および図 - 7 に示す。通常部では表面温度 21～23℃であるのに対して、損傷部では 20～30℃に計測値が分布していた。損傷が進行したコンクリート壁面では、表面温度の分布範囲が拡

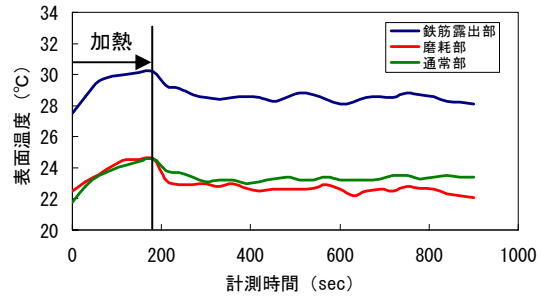


図 - 3 表面温度の変化特性

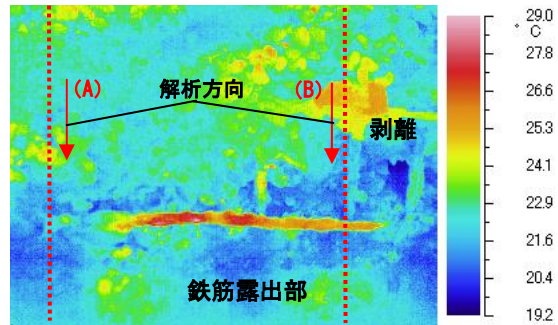


図 - 4 熱画像（損傷部）

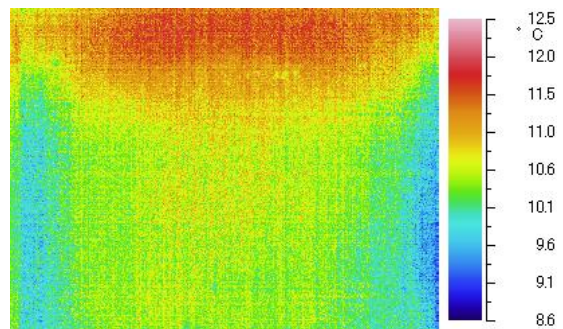


図 - 5 熱画像（通常部）

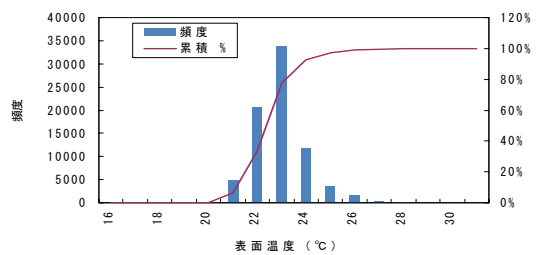


図 - 6 表面温度分布（損傷部）

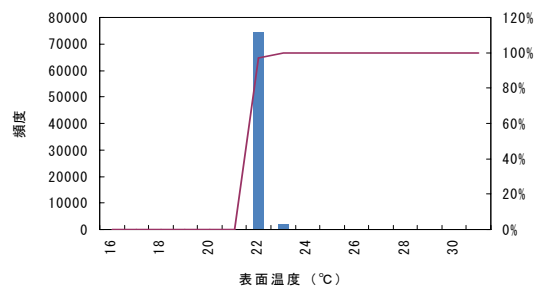


図 - 7 表面温度分布（通常部）

大するとともに、損傷原因により微視的な熱分布特性に影響があることが図 - 4 と図 - 6 の結果から示唆された。

そこで、熱画像を 80 分割した統計量における尖度と歪度の関係から局所的な熱分布特性を評価した。図 - 8 および図 - 9 に尖度と歪度の関係を示す。尖度とは、データの分布特性の指標である。評価対象と正規分布とを比較し、尖度が正の数になる場合、度数分布曲線が相対的に鋭角になっていることを表し、負の数になる場合は、相対的になだらかになっていることを示す。歪度とは、分布の非対称性を評価する指標である。正の歪度は対称となる分布が正の方向へ延びる非対称な側面を持つことを示す。負の歪度は、逆に対称となる分布が負の方向へ延びる非対称な側面があることを示す。したがって、ゼロに近いほど、正規分布に近いことになる。検討の結果、通常部では、歪度、尖度ともに 0.0 近傍に集中した（図 - 8）。磨耗部では、歪度-0.5~1.0、尖度-1~4 となった。鉄筋露出部では、磨耗部と比較して歪度が高くなる傾向が確認された。損傷部を表面被覆工により補修した結果、通常部と比較して若干分布範囲は広いが、歪度、尖度ともに 0.0 近傍に集中していた（図 - 9）。

以上の結果から、水流の影響下にあるコンクリート壁面の熱特性は、局所的な損傷現象により表面温度の分布範囲を拡大するとともに（図 - 6, 図 - 7）、データの分布パターンが変質することが統計指標である歪度や尖度の関係から示唆された（図 - 8）。表面被覆工処理後と通常部とが類似な分布範囲であったことから、補修効果の検証には、表面温度の分布特性が活用できることが示唆されたものと考えられる（図 - 9）。したがって、熱特性の観点から、コンクリート損傷の検出には、熱画像による異常点の抽出と空間的分布構造の評価が重要になると考えられる。本研究では、セミバリオグラムのセミバリアンスとラグの関係を用いて空間的な特性評価を試みた。

6.3 熱画像データのセミバリオグラム特性

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。本項では、表面被覆工により補修した損傷部のセミバリオグラム特性を評価した後、損傷部と通常部の補修後断面との相違を比較する。

補修後断面のセミバリオグラムを図 - 10 に示す。セミバリアンス $\gamma(h)$ は、評価対象の縦 40cm×横 50cm の範囲を横方向に 5cm ピッチで 10 分割し、各区分ごとに壁面上端から底版方向に 5cm ピッチのラグ h を設定し、式(2)を用いて評価した。解析値は、球形モデル（式(3)および式(4)）を用いて評価した。その際、ナゲット効果は 0.0 と仮定した。実測値から算出したセミバリアンス $\gamma(h)$ は、ラグ h の増加に伴い、分布範囲が拡大した。この指標は、特定距離（例えばラグ $h=20\text{cm}$ など）における評価値間

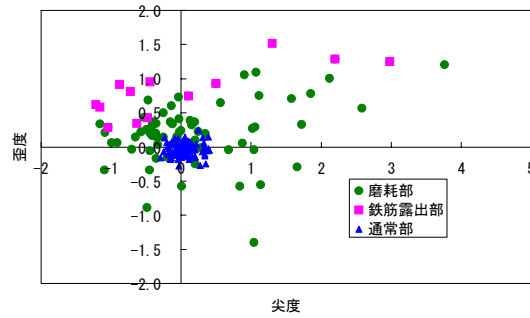


図 - 8 歪度と尖度の関係（損傷部と通常部の比較）

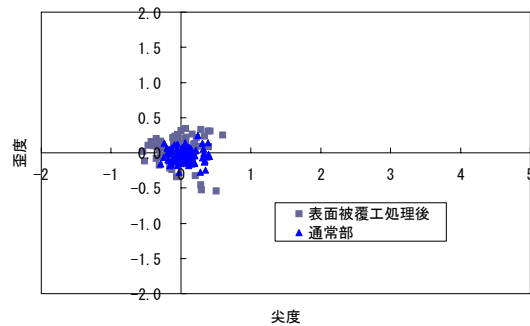


図 - 9 歪度と尖度の関係
（表面被覆工を施した損傷部と通常部の比較）

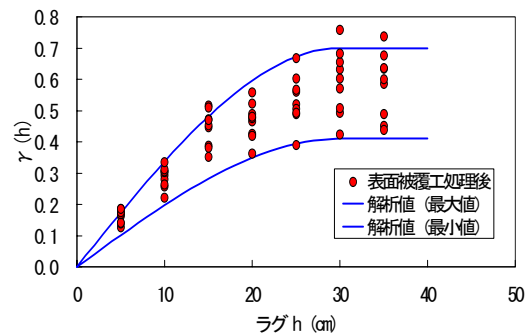


図 - 10 セミバリオグラム（表面被覆工処理後損傷部）

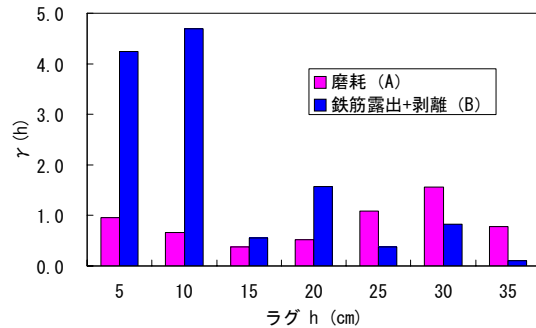


図 - 11 セミバリオグラム（損傷部）
（表面被覆工を施した損傷部と通常部の比較）

のばらつきを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。球形モデルを用いた解析の結果、表面被覆工を施した損傷部では、ラグ h が 30cm までは物性値間の空間的依存性を有することが示唆された。

補修前の損傷部におけるセミバリオグラムを図 - 11 に示す。セミバリアンス $\gamma(h)$ は、図 - 4 に示す磨耗のみの箇所 (A) と鉄筋露出 (B) の位置で図 - 10 と同一条件で算出した。その結果、磨耗のみが顕在化した部位 (図 - 4 (A)) では、セミバリアンス $\gamma(h)$ が 0.38~1.56 の範囲にあり、明確なレンジ範囲は確認されなかった。鉄筋が露出した部位 (図 - 4 (B)) では、ラグ $h=5\sim 10\text{cm}$ において 4.24~4.70 のセミバリアンス $\gamma(h)$ を記録した。これは、鉄筋腐食などの局所的高温部の影響により熱画像データの空間的依存性が低下したことに起因すると考えられる。磨耗部 (図 - 11 (B)) と同様の傾向を通常部においても確認した。セミバリアンス $\gamma(h)$ は、ラグ $h=5\sim 45\text{cm}$ の範囲で水位線以下の部位では 0.01~0.04 を示し、水流の影響の無い範囲では 0.001~0.01 であった。

以上のことから、地質統計学におけるセミバリオグラムをコンクリート壁の熱特性解析へ適用した結果、健全な状態のコンクリート壁 (補修後壁面) 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 (図 - 10)。鉄筋腐食などの熱特性が他の部位と比較して明らかに変質する部位では、物性値の空間的連続性が無くなることにより、明確なレンジは確認されず、ラグ h の低い段階でのセミバリアンス $\gamma(h)$ の増加が鉄筋腐食部において確認された (図 - 11)。これは、ラグ h を細かく取ることにより、局所的な損傷と基準点とを比較し、その結果としてセミバリアンス $\gamma(h)$ の増加を引き起こしているものと考えられる。磨耗のみのコンクリート断面では、新設ないし補修・改修直後のコンクリート断面で作成できるレンジの明確なセミバリオグラムは確認できないが、断面の損傷が進行するにつれてセミバリアンス $\gamma(h)$ が増加する傾向が確認された。

したがって、セミバリオグラム特性を用いて健全部と局所的損傷との相違に着目した比較検証が可能であることが、本研究結果から示唆されたものと考えられる。

6.4 セミバリオグラムを用いた補修効果の定量的評価

以上の結果から、表面被覆工を施した損傷コンクリート壁では、セミバリオグラムによる熱特性の空間依存性評価が可能であることが確認されたものと考えられる。コンクリート補修効果の照査へ熱画像を用いる場合、損傷が進行した計測対象では、表面温度の分布範囲の拡大に加えて、尖度と歪度の関係が 0.0 からプラス側へ拡大する傾向にある。特に鉄筋腐食が顕在化した部位では、磨耗のみと比較して歪度が高くなる傾向が確認された (図 - 8)。補修後の損傷部では、尖度と歪度の関係が 0.0 近傍に集中することが確認された (図 - 9)。

したがって、適切な補修工が施された損傷コンクリートでは、熱特性の分布範囲が縮小し、尖度と歪度の関係が 0.0 近傍に集中する。同時に、セミバリアンス $\gamma(h)$ とラグ h の関係においてレンジの明確なセミバリオグラムが確認できるものと考えられる。

7. 結論

本研究では、損傷が進行したコンクリート水路構造物の補修効果を熱特性の空間分布の観点から評価した。評価手法には、推計統計学指標 (平均値、ヒストグラム、尖度、歪度) に加えて、空間データの評価手法の一つである地質統計学におけるセミバリオグラムを用いた。以下に、本研究から得られた結果を列挙する。

- (1) コンクリート水路構造物は、磨耗などにより表面構造が損傷を受ける。その程度は、表面熱特性の観点から評価可能である。
- (2) 鉄筋腐食や磨耗が顕在化した部位では、通常部と比較して熱データの高温化が顕著であった。
- (3) 表面温度に関する尖度と歪度の関係から、健全ないし補修後断面では、0.0 近傍に評価値が集中する。損傷部では、鉄筋腐食や磨耗など損傷の進行により両指標の分布範囲が変化することが確認された。
- (4) 補修後断面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、セミバリオグラム特性を用いた補修効果の検証が可能であることが示唆された。
- (5) 補修効果の照査指標には、推計統計学における統計指標に加えて、地質統計学におけるセミバリオグラムを用いた空間依存性評価が有効である。

参考文献

- 1) 青木謙治監訳：地球統計学，森北出版株式会社，2004.3.
- 2) 鈴木哲也，米野現樹，池田幸史，大津政康：コア・コンクリートの AE レートプロセス解析に基づく損傷度評価に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1, pp.95-106，2006.2.
- 3) 鈴木哲也，池田幸史，米野現樹，大津政康：データベース構築に基づく AE レートプロセス解析による劣化コンクリートの定量的損傷度評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1791-1796，2004.7.
- 4) JCI TC994：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.83-131，2001.3
- 5) (社)日本非破壊検査協会編：コンクリート構造物の非破壊検査法，pp.73-97，1994.12.
- 6) 松岡俊文，地球統計学，物理探査，第 51 巻，pp.96-98,1998.5.