

# 論文 RC 高架橋スラブ下面の中性化速度係数の空間分布特性

松岡 弘大\*1・曾我部 正道\*2・仁平 達也\*3・河村 佳英\*4

**要旨:** ひび割れや剥離・剥落の劣化予測を実務へと適用していくためには、中性化進行が隣接地点で類似する空間的な類似性（空間分布特性）を考慮することが重要である。本研究では RC 高架橋スラブ下面における中性化進行の空間分布特性を明らかにするために、実態調査および空間スペクトル分析を実施した。その結果、(1) 中性化速度係数の変動の空間パワースペクトルは右肩下がりであり、その傾きは両対数軸上で概ね-0.842 であること、(2) 同様の傾きで両対数軸上の切片を 95%信頼域上限となるよう設定した提案式は、中性化速度係数の線的、面的な変動傾向をとともに安全側かつ良好に再現可能であることを確認した。

**キーワード:** RC 高架橋スラブ, 中性化深さ, 分布特性, 空間パワースペクトル, 2 変量フーリエ変換

## 1. はじめに

中性化深さは、ひび割れや剥離・剥落といった劣化を引き起こす鉄筋腐食に大きく影響することから、鉄筋コンクリート（以下、「RC」という）構造物の維持管理において重要な項目である。特に、スラブ下面の剥離・剥落は第三者被害を引き起こす可能性を有しており、事前に対策を行ううえでも、中性化の進行を把握することが重要である<sup>1)</sup>。しかしながら、構造物の中性化深さは、種々の要因から同一の部材内であってもばらつくことが知られている。特にスラブのような面部材では測定箇所による差が大きくなるために、スラブ下面全体の中性化の進行予測は多大な不確実性を伴う。


中性化進行の不確実性を考慮するために、既存手法ではコンクリート表面を複数のメッシュに分割し、調査結果から求めた正規分布に従う乱数として中性化深さを各メッシュで独立に発生させている<sup>2), 3)</sup>。しかしながら、各メッシュで独立に発生させることにより、隣接するメッシュ間で中性化深さが全く異なるなど、現実離れした値が設定される場合も存在する。スラブ下面における中性化の進行が施工条件や環境条件に依るならば、隣接する地点の中性化深さはある程度の類似性を有すると考えられる。本研究ではこのような中性化進行の空間的な類似性を空間分布特性と定義する。空間分布特性を明らかにするとともに利用可能な式を提案することで、既存のメッシュ分割法による劣化予測から現実離れした仮定を取り除くことができ、より実現性に則した劣化予測が可能となる。しかし、スラブ下面における中性化の空間分布特性に関しては、松橋ら<sup>4)</sup>の実態調査結果が存在する程度であり、詳細な検討はなされていない。

このような問題意識のもと、本研究では、スラブ下面

における中性化進行の空間分布特性を明らかにするために、(1) 実高架橋から切り出したスラブ部材の中性化深さを詳細に調査するとともに、中性化速度係数の変動に着目した空間スペクトル分析を実施する。(2) 空間スペクトル分析の結果を踏まえ、スラブ部材の空間分布特性を簡易に表現可能な式を提案する。(3) 提案式が、実際の中性化速度係数に見られる空間分布特性を精度よく再現できることを確認する。以下、2. で調査および分析方法を、3. で調査結果を述べたうえで、4. で空間分布特性を表現した式を提案するとともに、提案式と調査結果を比較することでその妥当性を検証する。最後に 5. で得られた結果をまとめる。

## 2. 調査概要

### 2.1 調査対象構造物

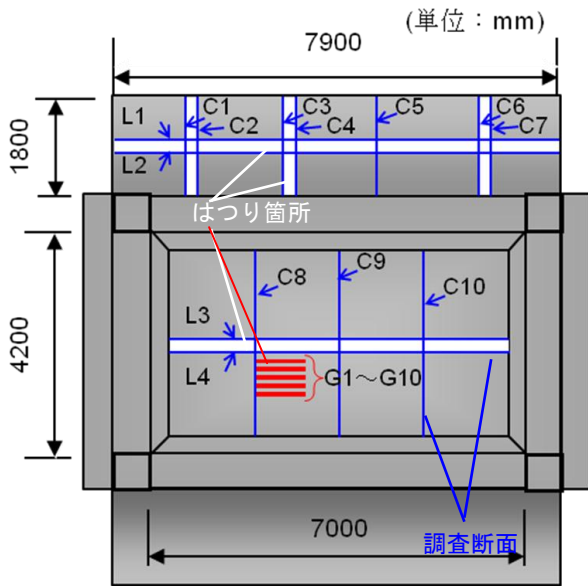
対象構造物は、建設後 40 年が経過した鉄道高架橋の、-1 に示す形状寸法を持つ中間スラブおよび張出スラブの下面側である。かぶりや腐食の調査対象となる最外縁鉄筋は、中間スラブには D25 と D22 の径の異なる鉄筋が 150mm 間隔で交互に配置されており、張出スラブには  $\phi 13$  が 300mm 間隔で配置されている。また、現存資料には、コンクリートの設計基準強度は  $f'_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ 、水セメント比は  $W/C = 50\%$  と記載されている。目視で確認された高架橋の変状は、張出スラブに 1~2 本程度の鉄筋腐食によると考えられるひび割れが見られる以外は健全な状態であった。対象構造物は海岸線から数 km 離れた市街地に立地していることと、別途調査により、初期塩化物イオン濃度が  $0.30 \text{ kg/m}^3$  程度以下であったことから、塩害による鉄筋腐食は生じ難く、中性化が主な腐食の原因であると推定された<sup>4)</sup>。

\*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 研究員 工博 (正会員)

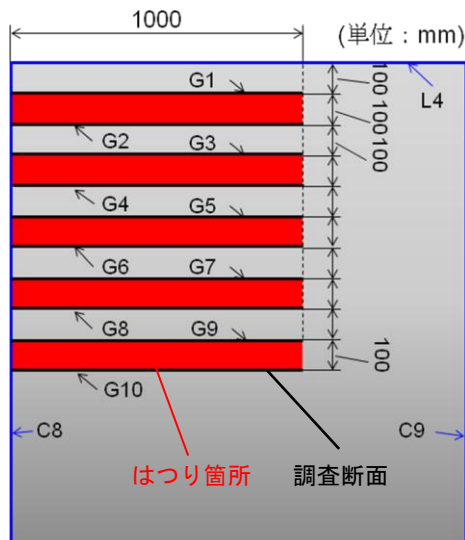
\*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 構造力学 室長 工博 (正会員)

\*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 副主任研究員 工修 (正会員)

\*4 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)



(a) はつり箇所と調査断面



(b) 面的調査

図-1 スラブ下面の調査箇所

## 2.2 調査方法

スラブ下面における中性化進行の分布性状を調べるために、スラブ下面のコンクリート（図-1(a)白塗範囲）を最外縁鉄筋が完全に露出するまではつり、同図中に青線で示すはつり面（L1~L4, C1~C10）を調査断面と設定した。なお、白塗となっていない箇所はスラブを切断している。これらの調査断面に対して 100mm 間隔で、フェノールフタレイン法により中性化深さを測定した。また、中性化進行の面的性状を調べるために、図-1(b)に赤塗で示す範囲を深さ 300mm 程度はつり、はつり面（G1~G10）を調査断面に設定するとともに、100mm 間隔でフェノールフタレイン法により中性化深さの測定を行った。なお、調査断面 L1~L4 および C1~C10 の測定から 6 年経過の後に調査断面 G1~G10 の測定を実施して

いる。また、調査では中性化深さの他にも露出させた鉄筋の腐食度等が取得されている<sup>4)</sup>。

## 2.3 調査データの分析方法

図-1 中に青線で示す範囲の中性化深さを対象とした分析は文献<sup>4)</sup>で実施されているものの、平均値や標準偏差、最大値、最小値の算出に留まっている。本研究では調査データに基づき空間分布特性を明らかにするために、スペクトル分析<sup>5)</sup>を実施する。スペクトルはフーリエ逆変換などにより任意の空間分布特性を有した乱数が生成できるため、乱数を利用して不確実性を表現する既存の劣化予測に簡易に組込むことができる。スペクトル分析に先立って事前処理として、調査時点の相違の影響を除去する目的で得られた中性化深さ  $y$  をルート  $t$  則

$$y = \alpha\sqrt{t} \quad (1)$$

に基づいて中性化速度係数  $\alpha$  に変換する。さらに、スラブ下面内における中性化進行の変動成分とスラブ下面全体の平均的な中性化進行とを分離する目的で、

$$x = \alpha - \bar{\alpha} \quad (2)$$

の処理を調査断面ごとに実施した。なお、 $\bar{\alpha}$  は各調査断面の中性化速度係数の平均値を表わす。調査と事前処理により得られた中性化速度係数の変動  $x$  は、図-1 に示調査断面に沿って一定間隔  $\Delta l$  (100mm) ごとに得られた系列データ  $x(l)$  ( $l = \Delta l, 2\Delta l, \dots, L$ ) と考えることができる。したがって、フーリエ変換

$$X(f) = \frac{1}{2\pi L} \sum_{l=\Delta l}^L x(l) \cdot \exp\left(-\frac{i2\pi lf}{L}\right) \quad (3)$$

を施すことで調査断面に沿った中性化速度係数の空間スペクトル  $X(f)$  ( $f = \Delta f, 2\Delta f, \dots, F$ ) を算出できる。なお、 $f$  は空間周波数  $\text{mm}^{-1}$  であり、 $f^{-1}$  は中性化速度係数の系列  $x(l)$  内に含まれる波形の波長  $\text{mm}$  を表わしている。さらに、実際の分析においては、各空間周波数における振幅情報に着目するため、

$$P(f) = \frac{1}{2\pi L} \left| \sum_{l=\Delta l}^L x(l) \cdot \exp\left(-\frac{i2\pi lf}{L}\right) \right|^2 \quad (4)$$

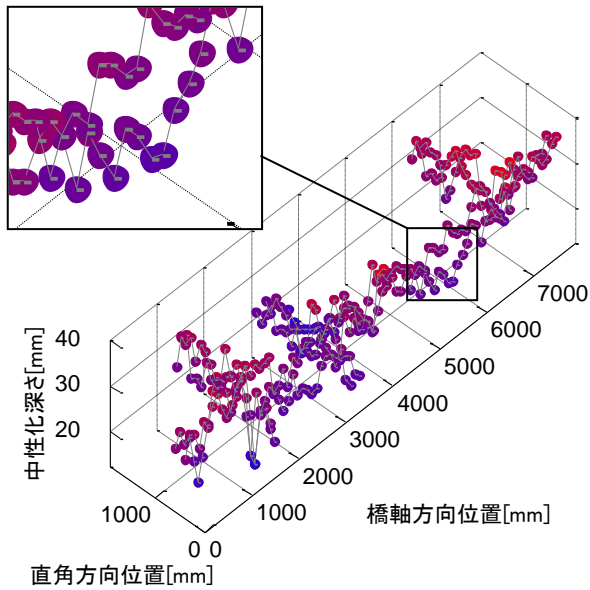
で表わされる空間パワースペクトル<sup>5)</sup>を利用する。

なお、本研究では後述する分析結果を踏まえ、スラブ面における中性化速度係数の空間パワースペクトル（3次元空間中の曲面）を提案する。2次元から3次元への拡張については、4.1で詳細に説明する。

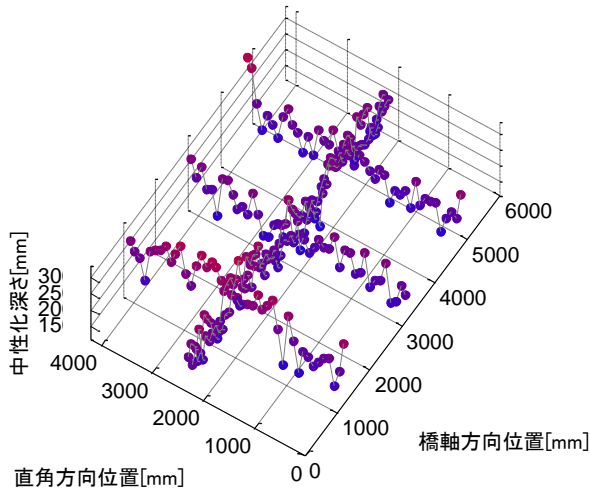
## 3. 調査結果

### 3.1 中性化深さ

調査断面 L1~L3, C1~C10 で取得した中性化深さを図-2 に示す。図-2(a)に示す張出スラブの中性化深さは平均値 26.1mm, 最大値 40.1mm, 最小値 12.6mm, 標準偏差 5.1mm, 図-2(b)に示す中間スラブの中性化深さは平均値 21.3mm, 最大値 33.8mm, 最小値 10.6mm, 標



(a) 張出スラブ (L1, L2, C1~C7)



(a) 中間スラブ (L3, L4, C8~C10)

図-2 スラブ下面の調査箇所

準偏差 4.6mm であった。図-2(a)には張出スラブの橋軸方向 5000 から 6000mm 地点の調査結果の拡大図を示している。当該箇所の中性化深さは下に凸の弧状の変動を有していることが確認でき、上述の基本的な統計量のみでは表現できない分布特性を有していることがわかる。

### 3.2 中性化速度係数

調査断面 L1~L3, C1~C10 で取得した中性化深さを供用年数 40 の平方根 6.32 で除することで中性化速度係数  $\alpha$  に変換した。さらに調査断面ごとの平均  $\bar{\alpha}$  を引き 2.3 で述べた中性化速度係数の変動成分  $x$  を算出した。算出した変動成分  $x$  の例として図-3 に張出スラブ橋軸直角方向の調査断面 C1~C7 を示す。中性化速度係数の変動は概ね  $\pm 1.5$  の範囲で分布している。なお、この傾向は他の調査断面でも同様であった。各断面に共通した変動傾向を確認することはできないが、数サンプルが連続して

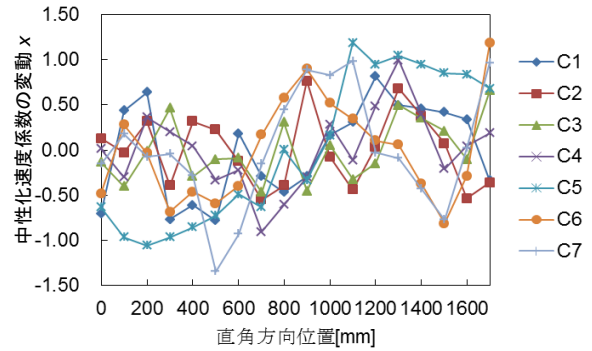
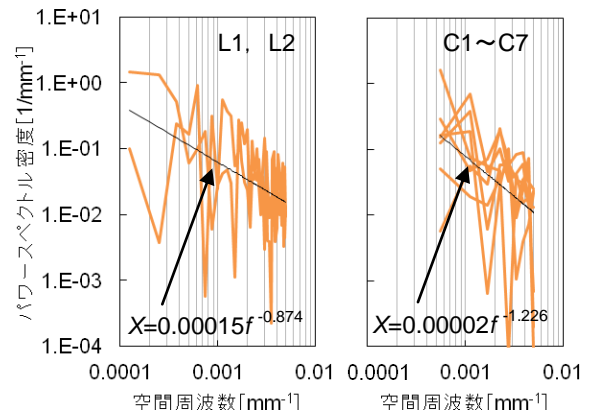
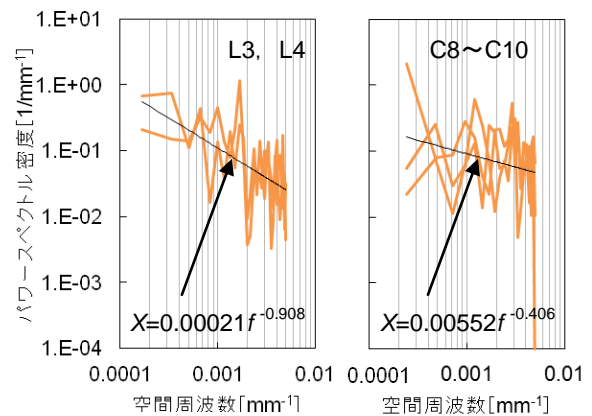


図-3 中性化速度係数の変動  $x$  (C1~C7)



(a) 橋軸方向 (b) 直角方向

図-4 中性化速度係数の変動の空間パワースペクトル (張出スラブ)



(a) 橋軸方向 (b) 直角方向

図-5 中性化速度係数の変動の空間パワースペクトル (中間スラブ)

同一符号側に位置するなど、隣接調査地点の値が類似する空間分布特性を感覚的に確認することができる。

### 3.3 空間スペクトル

空間分布特性を定量化するために、式(4)により空間パワースペクトル  $P(f)$  を算出する。図-4 には張出スラブ橋軸直角方向および橋軸方向の調査断面の空間パワースペクトルを、図-5 には中間スラブ橋軸直角方向および

橋軸方向の調査断面の空間パワースペクトルをそれぞれ示す。図-4 および図-5 に示すいずれの空間パワースペクトルも空間周波数の増加とともにパワースペクトル密度が減少する傾向を確認できる。これは、マルコフ性（任意箇所値が隣接箇所値に依存する性質）を有する系列のスペクトルにおける典型的な特徴である<sup>5)</sup>。すなわち、図-4 および図-5 に示した空間パワースペクトルにより、スラブ下面の中性化進行には空間分布特性（中性化の進行に見られる近傍箇所の類似性）が存在することが確認できる。

### 3.4 空間分布特性

スペクトル分析ではピーク周波数の同定などを目的とする場合が多い<sup>4)</sup>。しかし、本研究では部材寸法の制約により一つの調査断面で得られるサンプル数に限界があるため、スペクトルは多大な不確実性を有する。これを踏まえ、空間分布特性の定量化に際しては、3.3 で述べたパワースペクトルの傾きに着目する。

図-4 および図-5 には累乗近似により算出した近似曲線、および曲線式をともに示している。なお、累乗近似は両対数軸上での線形近似を表す。対象とした中間スラブでは橋軸方向と橋軸直角方向で施工条件、環境条件に起因した相違は見当たらないため、図-5 に示す空間分布特性も大きく変化しない。このことから、図-5 の近似曲線の傾きの相違（橋軸方向：-0.908，橋軸直角方向：-0.406）は誤差の範囲内であると考えられる。さらに、図-4 に示す張出スラブの近似曲線の傾き（橋軸方向：-0.874，橋軸直角方向：-1.226）と図-5 に示す中間スラブの近似曲線の傾きの相違も誤差の範囲を出ない。以上を踏まえ、本研究では実用的な側面からすべて調査断面を同一の空間分布特性として整理する。

図-6 には全調査断面の空間パワースペクトルとその累乗近似曲線を示す。各調査断面におけるばらつきは大きいものの、空間周波数の増加に伴うパワースペクトル密度の減少を確認することができる。このような中性化の進行における空間分布特性は同図に見られる近似曲線、

$$X = 0.00024f^{-0.842} \quad (f > 0) \quad (5)$$

として表わすことができる。ただし、系列  $x$  は平均値を 0 としているために、

$$X = 0 \quad (f = 0) \quad (6)$$

である。

## 4. 空間分布特性の定式化

### 4.1 利用における問題点

本研究で得られた中性化進行の空間分布特性は、1. で述べたようにメッシュ分割法による劣化予測への適用を前提としている。これを踏まえると、式(5)で表される空間分布特性には以下の問題が存在する。1) 式(5)は実際

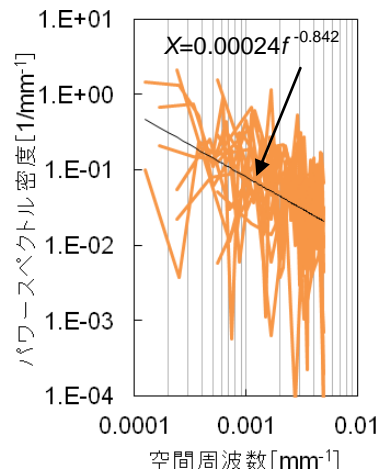


図-6 中性化速度係数の変動の空間パワースペクトル（全調査断面）

のスラブに見られる平均的な空間分布特性を表しているが、シミュレーションにおいては中性化速度が平均値と比較して早い箇所を包括する必要がある。2) 面的形状を有するスラブ部材に空間分布特性を利用する場合、任意の1方向だけでなく、橋軸・橋軸直角の2方向に広がりを持つ面としての空間分布特性が必要であることである。本研究では、1) に対して調査結果をサンプルとして考え、信頼性の観点から式を提案するとともに、空間パワースペクトルを3次元空間上の曲面に拡張することで2) の解決を図る。

### 4.2 提案式

パワースペクトルのスペクトル振幅の大きさは元の系列データの変動の大きさを表す。このことから、空間分布特性の不確実性を包括するためには、空間パワースペクトルの上限を表わす式を設定する必要がある。本研究では調査断面の空間パワースペクトルを母集団からのサンプルであると考え、統計的信頼水準として利用される95%信頼域を変動範囲とする。また、95%信頼曲線  $X_{95}$  を信頼区間の上限として採用する。さらに、3.4 で考察した空間分布特性（パワースペクトルの傾き：式(5)中の0.842）が保存されるように、95%信頼曲線  $X_{95}$  を設定する。このとき、95%信頼曲線の設定は、

$$\frac{\#(P(f) > X_{95} = \beta f^{-0.842})}{\#(P(f))} = 0.05 \quad (7)$$

を満たす  $\beta$  の設定問題に帰着する。 $\#(\cdot)$  は括弧内の条件を満たすサンプル数を表す。これにより、空間分布特性の利用における提案式は、

$$X_{95} = 0.00176f^{-0.842} \quad (8)$$

$$X_{95} = 0 \quad (f = 0) \quad (9)$$

となる。図-7 には提案式(8)を空間パワースペクトル、

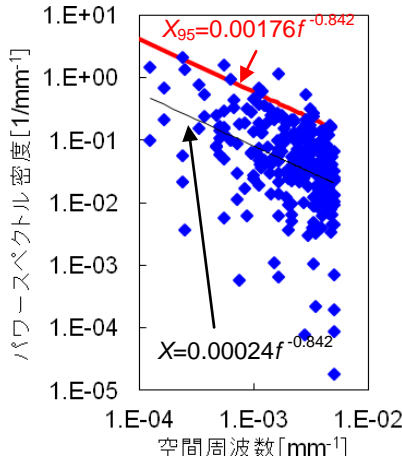


図-7 中性化速度係数の変動の空間パワースペクトルの提案式

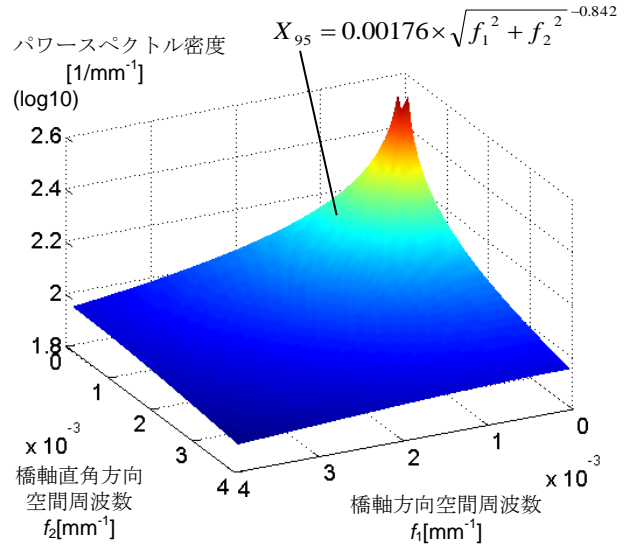


図-8 拡張した中性化速度係数の変動の空間パワースペクトルの提案式

式(5)とともに示す。式(5)で表される空間分布特性(傾き)を有したまま、空間パワースペクトルを包括するように平行移動されていることが確認できる。

#### 4.3 空間分布特性の拡張

式(8), (9)は任意の1方向の周波数 $f$ により記述される。しかし、4.1で述べたように面的な形状を有するスラブ部材における中性化の空間分布特性を表現するためには、空間パワースペクトルを2方向に広がりを持つ3次元空間中の曲面として再定義する必要がある。そこで、空間パワースペクトルを橋軸方向の空間周波数 $f_1$ と橋軸直角方向の空間周波数 $f_2$ の関数へと拡張する。このとき3.4で考察したように、スラブ部材における中性化進行の空間分布特性が無指向性であることを利用する。空間パワースペクトルが原点からの距離のみに依存すると仮定すれば、式(8)および式(9)を包括した形で、

$$X_{95} = 0.00176 \sqrt{f_1^2 + f_2^2}^{-0.842} \quad (10)$$

$$X_{95} = 0 \quad (f_1 = 0, f_2 = 0) \quad (11)$$

として3次元空間中の曲面へと拡張できる。図-8に式(10), (11)で表される拡張した空間パワースペクトルを示す。式(10), (11)は図-7における空間分布特性の $f = 0$ を軸とした回転展開形であることが確認できる。

#### 4.4 提案式の妥当性検証

##### (1) 2次元での検証

式(10), (11)の検証に先立ち、式(8), (9)の妥当性を検証する。空間パワースペクトルはフーリエ逆変換

$$x(l) = 2\pi F \sum_{f=\Delta f}^F \left( \sqrt{X_{95}(f)} + i\theta(f) \right) \cdot \exp\left(-\frac{i2\pi f l}{F}\right) \quad (12)$$

を用いて中性化速度係数の変動成分の系列 $x(l)$ に変換することができる。このとき、空間スペクトルの位相情報 $i\theta(f)$ をランダム生成することで、空間分布特性を有した

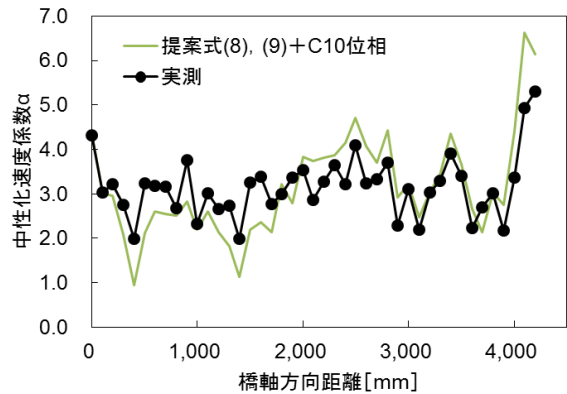


図-9 提案式(8), (9)の検証結果(調査断面C10)

中性化速度係数のランダム系列 $x(l)$ を得ることができる。ここでは検証のために、調査断面C10の位相情報を利用する。調査断面C10の位相情報を用いて算出した中性化速度係数と調査断面C10の調査結果を合わせて図-9に示す。提案式に基づく中性化速度係数の変動と実測結果の変動は非常に整合的であるとともに、提案式に基づく中性化速度係数の方が若干大きな変動を示している。以上より、式(8), (9)は現象の特徴を捉えつつも劣化の評価に際して安全側の評価式となっていることが確認できる。

##### (2) 3次元での検証

式(10), (11)の妥当性を検証する。3次元空間中の曲面として提案された式(10), (11)を2方向 $l_1, l_2$ に広がりを持つ中性化速度係数の変動 $x(l_1, l_2)$ に変換するためには2変量フーリエ逆変換<sup>6)</sup>

$$x(l_1, l_2) = \pi F_1 F_2 \cdot$$

$$\sum_{f_1=\Delta f_1}^{F_1} \sum_{f_2=\Delta f_2}^{F_2} \left( \sqrt{X_{95}(f_1, f_2)} + i\theta(f_1, f_2) \right) \cdot \exp\left\{-i2\pi \left( \frac{l_1 f_1}{F_1} + \frac{l_2 f_2}{F_2} \right)\right\} \quad (13)$$

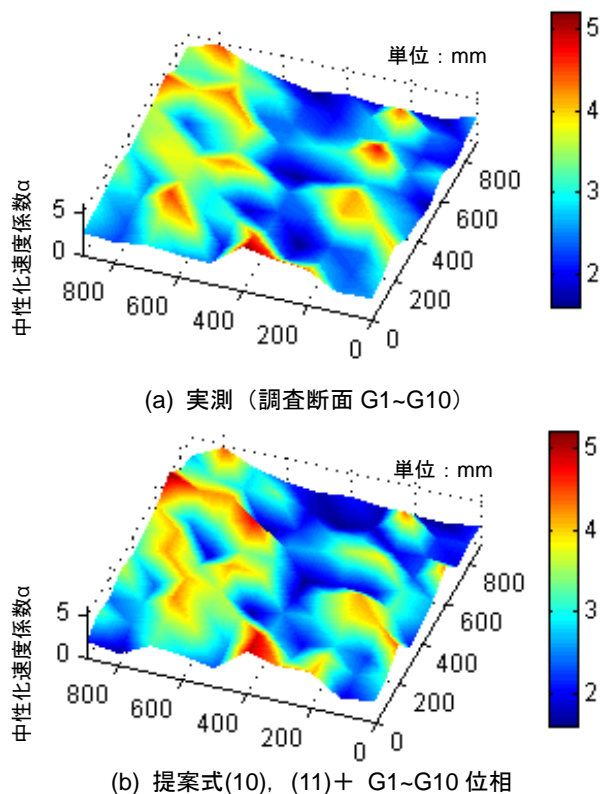


図-10 提案式(10),(11)の検証結果(調査断面 G1~G10)

を利用する。このとき、前項と同様に空間スペクトルの位相情報  $i\theta(f_1, f_2)$  をランダム生成することで、空間分布特性を有した中性化速度係数の2方向ランダム系列(行列)  $x(l_1, l_2)$  を得ることができる。ここでは検証のために、調査断面 G1 から G10 の位相情報を利用する。調査断面 G1 から G10 の調査結果は橋軸方向、橋軸直角方向ともに 100mm 間隔の格子状として取得されている。これらの調査結果と調査断面 G1 から G10 の位相情報を用いて算出した中性化速度係数を合わせて図-10 に示す。式(10), (11)の提案においては空間分布特性に指向性がないことを仮定しているが、提案式に基づく中性化速度係数の変動と実測結果の変動は2次元の場合と同様に非常に整合的であるとともに、提案式に基づく中性化速度係数の方が若干大きな変動を示している。このことから、提案式は現象の特徴を捉えつつ、劣化シミュレーションにおいて安全側となっていることがわかる。

以上より、式(10), (11)として提案した空間分布特性を式(13)に示す2変量フーリエ逆変換することで、空間分布特性を考慮した面としての中性化速度係数を得ることができる。上述したように、位相情報として乱数を用い、モンテカルロシミュレーションを行うことで、既存のメッシュ分割法の枠組みに適合可能であるとともに、独立乱数では表現できない実現象の分布特性を考慮した劣化予測が可能である。具体的な利用事例については別途検討を実施しているが、本研究の範疇を大きく超えるため

に、別の機会に発表することとする。

## 5. おわりに

本研究では、実高架橋から切り出したスラブ部材の中性化深さを詳細に調査するとともに、中性化速度係数の変動に着目した空間スペクトル分析を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) 中性化深さの進行には隣接箇所との類似性といった空間分布特性が存在することを確認した。
- (2) 空間分布特性を空間パワースペクトルにより定量化した結果、周波数の増加とともにスペクトル密度が減少する傾向が確認された。
- (3) 空間分布特性を表現する式を提案するとともに、無指向性を仮定したうえで、3次元空間中の曲面に拡張した。
- (4) 実測結果に基づき提案式の妥当性を検証した結果、提案式は中性化速度係数の空間的な変動傾向を安全側かつ良好に再現可能であることを確認した。

なお、本研究で提案した空間分布特性は一調査結果に基づく。より一般化した結果を得るためには、年代、形式の異なる高架橋を含め、さらなる調査結果の蓄積が不可欠であるとともに、調査範囲や調査方向、位相情報にも着目した分析が重要であると考えられる。また、本研究では劣化予測シミュレーションに用いる目的で中性化深さを 100mm 間隔で取得している。しかしながら、現象解明の観点では 100mm 以下の空間分布特性についても今後検討していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 谷村幸裕, 長谷川雅志, 曾我部正道, 佐藤勉: 鉄道 RC ラーメン高架橋の中性化に関する耐久性照査法の適用に関する研究, 土木学会論文集, No.730/V-63, pp.147-157, 2004
- 2) 曾我部正道, 谷村幸裕, 松橋宏治, 宇野匡和: 鉄道高架橋の RC 高欄の変状調査とその劣化予測, コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.16-24, 2009
- 3) SANCHAROEN, P. and UOMOTO, T.: Life Cycle Repairing Cost Considering Uncertainties of Deterioration Prediction Model, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.25, No.2, pp.1639-1644, 2006
- 4) 松橋宏治, 宇野匡和, 谷村幸裕, 曾我部正道: 中性化が進行した既設鉄道高架橋の詳細な調査と劣化予測法に関する一考察, 土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, pp.107-108, 2007
- 5) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 2010
- 6) 新井仁之: フーリエ解析学, 朝倉書店, 2003