

コンクリート骨材分布の不均質性のモデル化に関する基礎的研究

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 栗林和希

新潟大学自然系(工学部) 正会員 大竹 雄

(株)ネクスコ・エンジニアリング新潟 土木事業部 土木技術部

星野雅幸

1. はじめに

近年、長年にわたり供用されてきたコンクリート構造物は、老朽化が激しく、長寿命化・延命化を実現するためには、構造物の劣化状況を正確に把握し、劣化の進行を予測することが重要となる。

コンクリート構造物の劣化要因の1つである塩害は、コンクリート表面部からの塩化物イオンの浸透・蓄積により発生する。塩害劣化予測について、既往の研究の多くは、コンクリート内部が均質材料であると仮定し、塩化物イオンの浸透予測を行っている。一方、実際のコンクリートは、骨材、セメントペースト、遷移帯など多相材料とみなすこともできる。もし、この立場からコンクリート構造物をみると、骨材分布の分析が、コンクリートの劣化速度を支配する説明要因となる可能性もある。

本研究は、実橋から採取したコンクリートコアの骨材分布特性を統計的に整理することにより、コンクリート構造物の維持管理の有用な基礎資料を得ることを目的とする。

2. 研究方法

本研究は、3 橋梁 (A, B, C) から塩化物含有量試験用に採取したコンクリートのコア (φ 50, 43 供試体) を用いて分析を行った。採取部位 (方向) は、床版の上面/下面/橋脚側面の3種類が含まれている。

まず、φ 50 で採取したコアの側面の展開写真を撮影した後、写真画像を 1mm×1mm メッシュに分割し、メッシュ毎に、材料の種類 (粗骨材と細骨材とセメントペースト) を割り当てる作業を行う。この作業は、写真から視覚的に骨材の位置を判断し、骨材の形状をポリゴン化したのち、メッシュと重ね合わせる。その上で、メッシュ内に骨材が 0.005mm² 以上含まれている場合には骨材が”ある”と判断している。

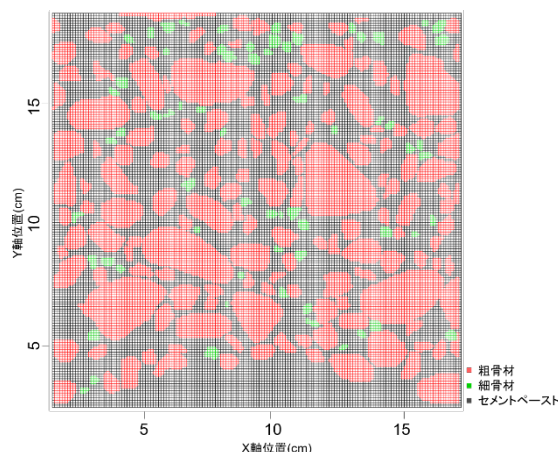


図 1 デジタルデータ化のイメージ図

粗骨材と細骨材の判別は、ポリゴン化した骨材の形状 (サイズ) から判断して割り当てた。具体的には、ポリゴンの最大長さが 5mm 以上を粗骨材とした。この分類は分類上の便宜的な判断である。また、解像度の問題から細骨材を見落としている可能性もあることに留意する必要がある。図 1 にコアのデジタルデータ化の一例を示す。

3. 骨材分布の統計的性質の把握

3.1 周面線分率

周面に沿った線分率 (周面線分率と呼称) を式(1)で定義する。

$$S_r(z) = \frac{S_{obs}(z)}{S_o} = \frac{S_{obs}(z)}{2\pi R} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} I[g] \quad (1)$$

ここで、 $S_{obs}(z)$ は、ある深度 z における、対象とするある材料が観測された長さを表している。 $I[g]$ はインジケータ関数であり、下記の通り定義される関数である。この式にあるように、メッシュ毎に割り当てられている材料の数をカウントして周面方向 1 行のメッシュ全数 N_s で除すことにより、線分率を計算している。

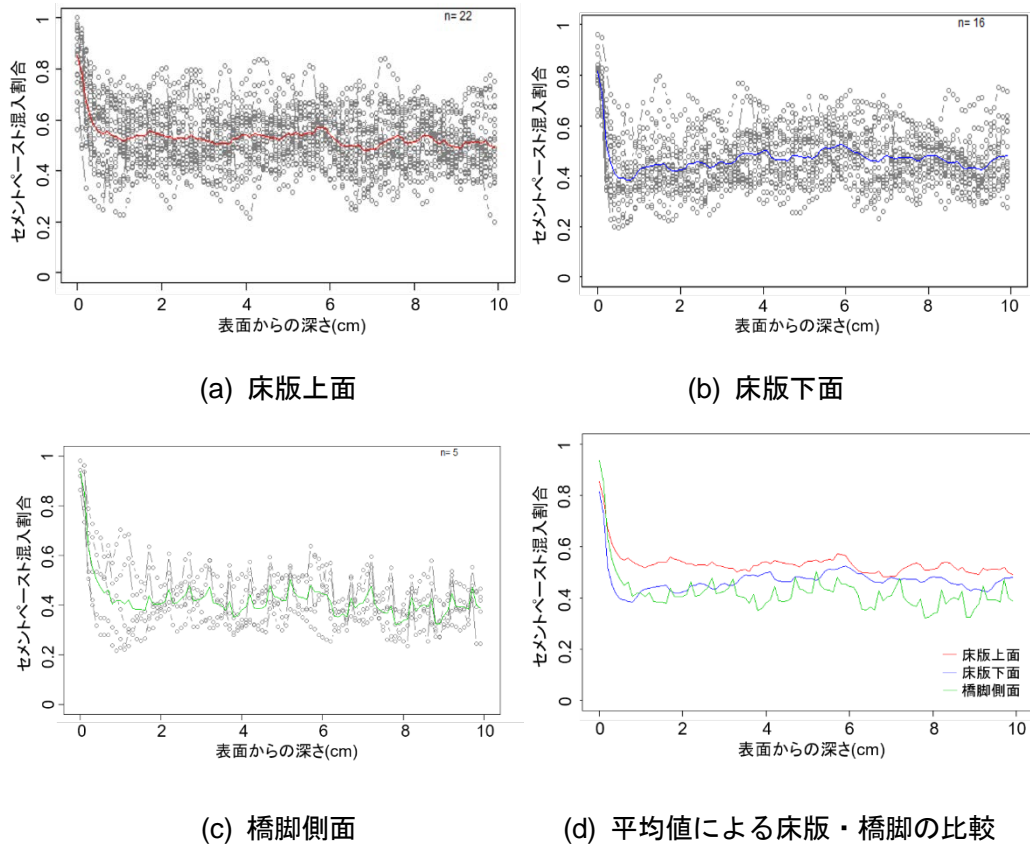


図 2 セメントペーストの周面線分率の特性

$$I[g] = \begin{cases} 1 & \text{メッシュに割り当てられている場合} \\ 0 & \text{メッシュに割り当てられていない場合} \end{cases}$$

3.2 深度線分率

同様に、深度方向に沿った線分率（深度線分率と呼称）を式(2)で定義する。

$$L_r(r, \theta) = \frac{L_{obs}(r, \theta)}{L_o} = \frac{1}{N_L} \sum_{j=1}^{N_L} I[g] \quad (2)$$

ここで、 $L_{obs}(z)$ は、ある位置 $r = R$ における深度方向線分に対して、対象とするある材料が観測された長さを表している。 N_L は周面方向1行のメッシュ全数を表している。

3.3 骨材・モルタル線分率の特性

図 2 は、採取部位毎に、セメントペーストの周面線分率の深度分布特性を整理した結果である。コア毎に大きなバラツキを有するが、いずれの部位においても、採取表面から 1cm 程度まで急激にセメントペーストの混入割合が減

少する傾向があり、それ以深では一定値になる傾向がある。部位毎の平均特性に着目すると、床版下面では、セメントペーストの混入割合が最も急激に減少するのに対して、床版上面では、やや緩やかである。橋脚側面ではその中間的な特性を有していることが分かった。

3.4 骨材粒径分布の特性

次に、骨材の粒径分布の特性を分析する。先に示した通り、骨材毎にポリゴン化処理を行い、それぞれの骨材に対して最大長さをデータ化している。この最大長さを粒径とみたとて、粒径の累積分布を描き、骨材の粒径の特性を分析することとする。

ここでは、1つの供試体に含まれている骨材を最大長さが小さい順に並べ替えて、コア毎に累積骨材比 R_t を式(3)により計算した。

$$R_t = \frac{\sum_{k=1}^{N_t} N_k}{N_{all}} \quad (3)$$

ここで、 N_t は、任意の骨材に与える数字で、骨材の最大長さが小さい順を表している。全数

N_{all} と対象骨材よりも最大長さが小さい骨材の数の累積値の比である。この指標は、骨材の粒径の特性を表す指標として用いる。

図3はデータ整理結果を表している。粒径(横軸)最小値はセメントペーストの混入割合を与えているため、分布の開始位置が異なっている。部位別の平均特性に明瞭な違いは確認されないが、床版上面では、粒度分布のバラツキが大きいことが分かる。特に床版上面部では、骨材の混入割合だけでなく、骨材の大きさの影響が塩分浸透特性に影響を及ぼす可能性がある。

4. 骨材・モルタル面積比率と体積比の関係

4.1 周面線分率 S_r の期待値

周面線分率の特性を期待値の考え方から分析する。

$$\begin{aligned} E[S_r] &= \int_0^L S_r(z) f_{S_r}(z) dz \\ &= \int_0^L \frac{S_{obs}(z)}{2\pi R} f_{S_r}(z) dz \quad (4) \end{aligned}$$

$f_{S_r}(z)$ は、 $S_r(z)$ の確率密度である。ここでは、材料の混入割合が、深度に依存せず一様であることを仮定して、一様分布で与えることにする。これにより、式(4)は式(5)のように記述される。

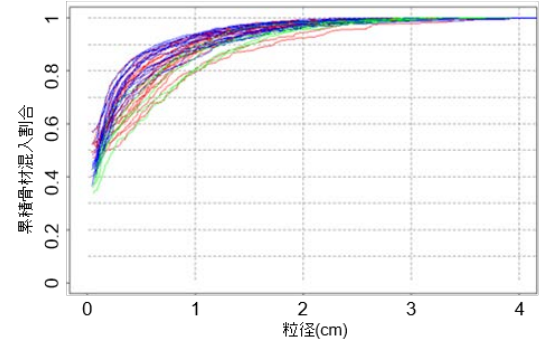
$$\begin{aligned} E[S_r] &= \int_0^L \frac{S_{obs}(z)}{2\pi R} \frac{1}{L} dz \\ &= \frac{1}{2\pi RL} \int_0^L S_{obs}(z) dz \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、 S_{obs} の深度方向の積分値は、対象としている材料の線分の集合であるので表面積 A_{obs} に対応する。

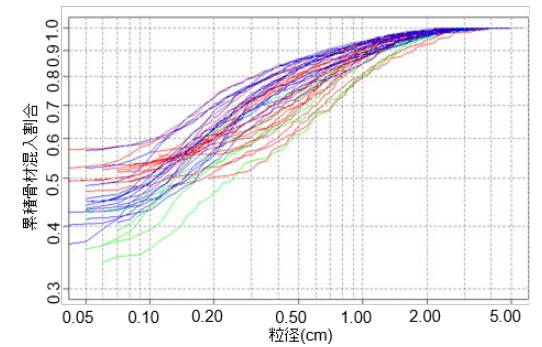
$$\int_0^L S_{obs}(z) dz = A_{obs} \quad (6)$$

従って、式(7)を得ることができ、周面線分率を測ることは、表面積比を分析していることに対応することが分かる。ここで、 A_o は、周面全体の表面積を表す。

$$E[S_r] = \frac{A_{obs}}{2\pi RL} = \frac{A_{obs}}{A_o} \quad (7)$$



(a) 実数グラフ



(b) 対数グラフ

図3 骨材粒度分布の特性

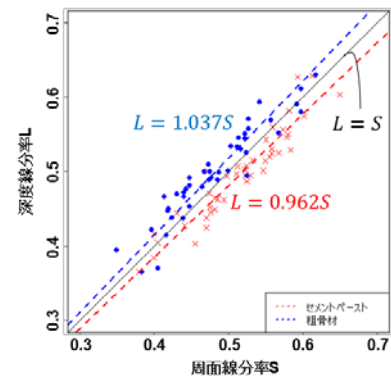


図4 周面線分率と深度線分率の関係

4.2 深度線分率 L_r の期待値

同様に、深度線分率の特性を期待値の考え方から分析する。

$$\begin{aligned} E[L_r] &= \int_0^{2\pi} \int_0^R L_r(r, \theta) f_{L_r}(r, \theta) r dz d\theta \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{L_{obs}}{L_o} f_{L_r}(r, \theta) r dr d\theta \quad (8) \end{aligned}$$

$f_{L_r}(r, \theta)$ は、 $L_r(r, \theta)$ の確率密度である。ここでは、材料の混入割合が、深度に依存せず一様で

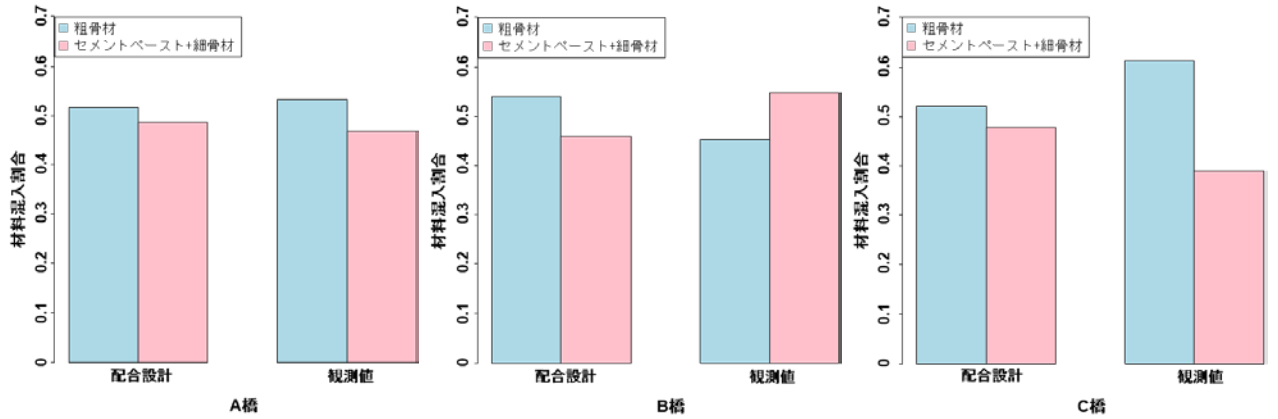


図 5 配合設計と観測値の比較(粗骨材・セメントペースト+細骨材)

あることを仮定して、一様分布で与えることにする。これにより、式(8)は式(9)のように記述される。

$$E[L_r] = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{L_{obs}}{L_o} \frac{1}{\pi R^2} r dr d\theta \quad (9)$$

ここで、 L_{obs} の円全体の積分値は、対象としている材料の線分の集合であるので体積 V_{obs} に対応する。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R L_{obs} r dr d\theta = V_{obs} \quad (10)$$

従って、式(11)を得ることができ、深度線分率を測ることは、体積比を分析していることに対応することが分かる。ここで、 V_o は、周面全体の表面積を表す。

$$E[L_r] = \frac{V_{obs}}{\pi R^2 L_o} = \frac{V_{obs}}{V_o} \quad (11)$$

4.3 表面積比と体積比の関係

ここで、 $r = R$ で計測した周面面積比 S_r が任意の r に対して変化しないと仮定される場合を考える次式を得る。

$$V_r = \int_0^R 2\pi r S_r dr \times L = S_r \pi R^2 L = S_r V_o \quad (12)$$

この仮定に基づくと、面積比と体積比は一致することが分かる。すなわち、先に示した周面線分率の正当性を示すものと考えられる。

$$S_r = \frac{V_r}{V_o} \quad (13)$$

4.4 周面線分率と深度線分率の関係

図 4 はコア 43 データの周面線分率と深度線分率の標本平均を回帰分析した結果である。

周面線分率と深度線分率は概ね一致しているが、深度線分率が周面線分率に比べてやや大きい傾を示すことが分かった。また、周面線分率が小さい場合 (0.4 程度) や大きい場合 (0.65 程度) に両者は一致した。

5. 配合設計との関係

図 5 は各橋梁の配合設計と、観測値を比較したグラフである。解像度の問題より細骨材を拾い切れていない可能性が示唆されるが、粒径の小さい細骨材はセメントペーストと同様に塩化物イオンを透過するものと仮定すれば、塩分浸透を阻害する粗骨材とセメントペースト+細骨材の2つで比較できる。この場合、観測値は配合設計を概ね表現できているといえる。

6. まとめと今後の展望

本研究では、高架橋実データを統計的に分析することにより、2次元データ(コア展開写真)の分析は、3次元データ(配合設計)の分析に対応することが分かった。

今後は、CT-SCANなどにより、体積を直接確認する調査を行いベンチマークとする必要がある。また、周面線分率、深度線分率の分析から考察された骨材分布が塩分浸透に及ぼす影響を、有限要素法を用いた浸透解析を行うことにより検討していく。