

# 論文 実構造物における材料分離によるコンクリートの不均一性の調査

鈴木 章太\*1・佐伯 竜彦\*2・斎藤 豪\*3

**要旨**：構造物中のコンクリートは不均一であり、耐久性が部位によって異なる可能性がある。本研究では、撤去された構造物から採取したコンクリートコアを用いて、材料分離による同一部材内の骨材量の違いに着目して不均一性の調査を行った。また、物質移動抵抗性の指標としてコアの酸素拡散係数を測定した。

調査の結果、同一構造物の同一部材であっても、部位によって骨材量が異なることが確認できた。また、酸素拡散係数も部位によって異なり、骨材量と酸素拡散係数に相関があることが確認できた。このことから、コンクリートの不均一性が劣化抵抗性の不均一を引き起こしていることが示唆された。

**キーワード**：材料分離, 不均一性, 骨材体積率, 酸素拡散係数

## 1. はじめに

現在、高度経済成長期に建設された多くの構造物の劣化が急速に顕在化してきている。今後もさらに老朽化する構造物の割合が増えていく中で、少ない人員・予算で適切に維持管理を行うためには、劣化する部位を正確に把握し、その箇所を重点的に点検する、あるいは予防保全することが重要である。

構造物の部位によって劣化の進行が異なるのは、劣化作用と劣化抵抗性が部位によって異なるためである。どのような部位で構造物の劣化抵抗性が低くなりやすいかを把握することで効率的な維持管理が行えると考えられるが、実構造物を対象として各部位のコンクリートの不均一性と各種品質との関係を調査した研究は少なくデータが不足している。これは、供用中の構造物から多数のコアを採取することが困難であるため、十分に試験ができないためである。

効率的な維持管理を実現するための第1段階として本研究ではコンクリートの材料分離に着目し、新潟県内で撤去された橋梁の各部材からコアを多数採取し、基礎データを収集した。具体的には、各部位から採取したコア中の骨材量を求めた。また、材料分離により、コンクリートの物質移動抵抗性が低い部分が生じ、ひいては、劣化抵抗性も低下すると考えられるため、酸素拡散係数を物質移動抵抗性の指標として測定した。

## 2. 調査対象

新潟県内で撤去された4橋梁(A~D橋)からコア採取を行った。以下に、調査橋梁の概要を示す。

### 2.1 A橋

A橋は、昭和47年に竣工したPCT桁橋である。コア

は、径間P2-P3におけるG1, G2桁の側面から水平方向に採取を行った。コア採取部位を図-1、コア採取位置を図-2に示す。

### 2.2 B橋

B橋は、昭和42年に竣工した全2径間3主桁のRCT桁橋である。コアは、図-3中の黒く塗りつぶした位置の桁と橋脚から水平方向に採取を行った。コア採取位置を図-4,5に示す。

### 2.3 C橋

C橋は、昭和46年に竣工した吊り橋である。コアは、左岸側の橋台から水平方向に採取を行った。コア採取位置を図-6に示す。

### 2.4 D橋

昭和38年に竣工した2径間単純合成鋼板桁橋である。RC床版から鉛直方向にコア採取を行った。図-7に橋梁

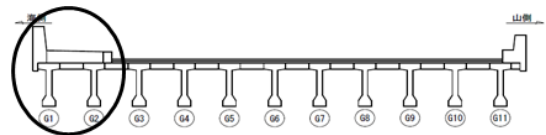


図-1 A橋コア採取部位

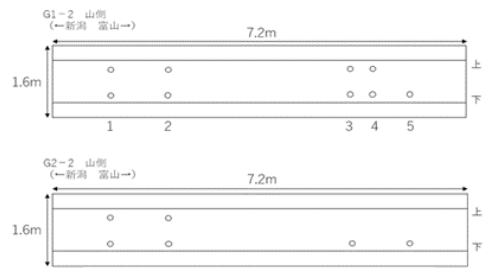


図-2 A橋コア採取位置(桁)

一般図、図-8にコア採取位置図を示す。A1-P1間、P1-A2間において等間隔で2列から同数のコア採取を行い、

\*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

\*2 新潟大学 工学部工学科教授 工博 (フェロー会員)

\*3 新潟大学 工学部工学科准教授 工博 (正会員)

合計 40 本のコアを用いて実験を行った。

A～D 橋の場所、環境、標高、コンクリートの設計基準強度を表-1 に、コア採取部材の採取方向の厚さを表-2 に示す。

また本研究では、実構造物の材料分離による不均一性と比較するため、実構造物よりも均一な模擬供試体を作製し、実構造物と同様にコアを採取し、比較した。表-3 に模擬供試体の配合を、図-9 に模擬供試体コア採取図を示す。

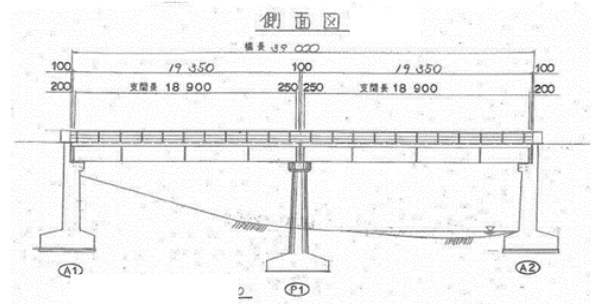


図-7 D橋一般図

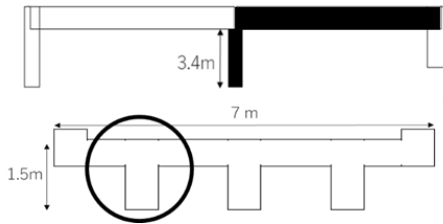


図-3 B橋コア採取部位

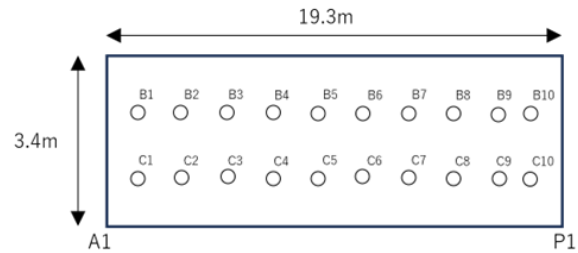


図-8 D橋コア採取位置(床版 A1-P1間)

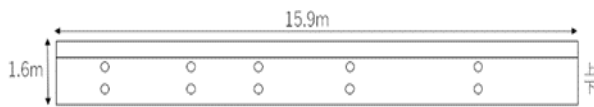


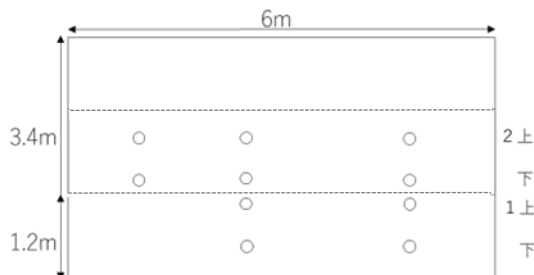
図-4 B橋コア採取位置(桁)

表-1 A～D 橋の情報

	A橋	B橋	C橋	D橋	
場所	新潟県糸魚川市	新潟県佐渡市	新潟県東蒲原郡	新潟県長岡市	
環境	海沿い	海沿い	内陸	内陸	
標高	7m	88m	1070m	52m	
調査部位	桁	桁 橋脚	橋台	床版	
コンクリートの設計基準強度	40N/mm <sup>2</sup>	36N/mm <sup>2</sup>	24N/mm <sup>2</sup>	18N/mm <sup>2</sup>	不明

表-2 コア採取部材の採取方向の厚さ

調査部位	A橋	B橋	C橋	D橋
厚さ	140mm	525mm 1125mm	1800mm	140mm

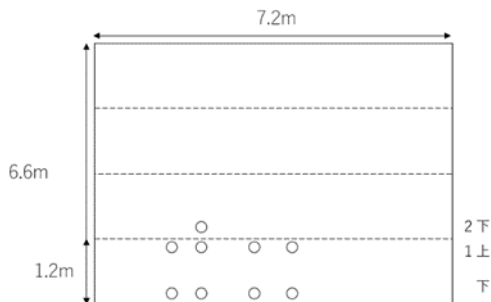


※図中の点線は打ち継ぎ目

図-5 B橋コア採取位置(橋脚)

表-3 模擬供試体の配合

記号	W/C (%)	粗骨材 最大寸法	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (g/m <sup>3</sup> )	
			セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE補助剤
45-20	45	20	383	172	742	1079	958	6.13
55-20	55	20	314	172	803	1075	784	5.02
65-20	65	20	265	172	857	1059	663	4.24
45-40	45	40	356	160	657	1233	1333	5.69
55-40	55	40	291	160	714	1230	873	4.19
65-40	65	40	246	160	765	1213	462	1.97



※図中の点線は打ち継ぎ目

図-6 C橋コア採取位置(橋脚)

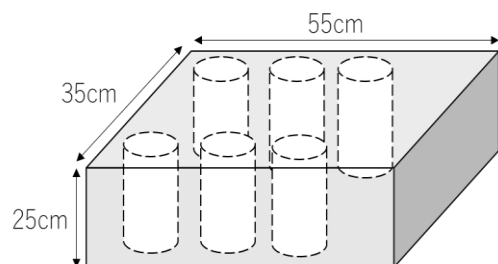


図-9 模擬供試体コア採取図

### 3. 実験概要

本研究では、コンクリートの不均一性としてコア中の骨材量の違いに着目した。採取したコアを用いて画像解析によりコア断面の骨材体積率の測定を行った。また、コンクリートの密実性を評価するために酸素拡散試験を行った。

#### 3.1 骨材体積率の測定

直径 10cm 長さ 15~20cm の円柱コア供試体の上下から 5cm を除いた部分から厚さ 4cm になるようにコンクリートカッターで切断し、A~C 橋はそのまま両断面を撮影し、70mm×70mm の範囲のカラー画像データを、解像度 1200dpi にて取り込んだ。目視判断により粗骨材の手動抽出を行い、粗骨材-モルタルの 2 値化画像を作成した。2 値化画像から粗骨材量を粗骨材面積/コンクリート面積を算出し、上面、下面の値から平均値を求めた。

D 橋では調査方法を見直し、切断したコアの両断面のセメントペースト部をフェノールフタレイン溶液で着色した後、デジタルカメラで撮影し、画像を 65mm×65mm の範囲でトリミングを行い、解像度 72dpi で取り込んだ。まず、フェノールフタレイン溶液で赤く着色されたセメントペースト部の HSV 値を求めた。次に、HSV 値を抜き出す閾値を設定して、セメントペースト部と骨材部の白黒二値化画像を取得した。最後に、白黒それぞれの面積率を算出した。本研究では、標準設定として H の閾値を約 100~360、S の閾値を約 20~100、V の閾値を約 40~100 とした。なお、中性化の程度により着色の濃さに差が出るため、閾値を変更して面積率の算出を行った。なお本手法では、骨材直径が 0.15mm 以上のものを骨材として認識している。また、五十嵐ら<sup>2)</sup>は、画像解析による骨材面積率と示方配合での骨材体積率は誤差 1~3%と、高い精度での解析が可能だと報告している。これより、本研究でも骨材面積率≒骨材体積率として評価を行った。

#### 3.2 酸素拡散試験

酸素拡散試験は、白川らが提案した方法<sup>2)</sup>に準拠して行った。骨材体積率の測定を行ったものと同じコアを 110°C 乾燥炉で恒量となるまで乾燥し、試験面が直径 90mm の正円になるように、それ以外の部分をシールした。N<sub>2</sub> 及び O<sub>2</sub> のガス流量はそれぞれ 130cm<sup>3</sup>/min とした。窒素ガス側及び酸素ガス側の境界膜厚さである δ<sub>o</sub> 及び δ<sub>N</sub> は拡散セルの形状に依存する定数である。本研究では、窒素ガス側及び酸素ガス側の境界膜厚さを 2.1mm とした。以下の式(1)により酸素拡散係数を算出した。

$$D_{\text{oxy}} = \frac{R_N(C_N - C_b)(L + \delta_N + \delta_o)}{\left\{ 1 + \frac{R_N(M_o)}{R_o(M_N)} \right\}^{1/2} (C_N - C_b) - C_N} A_c \quad (1)$$

ここに、

D<sub>oxy</sub> : 酸素拡散係数(cm<sup>2</sup>/s)

C<sub>N</sub> : 窒素ガス中の酸素濃度(%)

C<sub>b</sub> : 窒素ガスボンベ中の酸素濃度(%)

R<sub>N</sub>, R<sub>O</sub> : 窒素及び酸素のガス流量(cm<sup>3</sup>/s)

M<sub>N</sub>, M<sub>O</sub> : 窒素及び酸素分子量(g/mol)

L : 供試体厚さ(cm)

A<sub>c</sub> : 供試体面積(cm<sup>2</sup>)

δ<sub>N</sub>, δ<sub>o</sub> : 窒素ガス側及び酸素ガス側の境界膜厚さ(cm)

### 4. 実験結果と考察

#### 4.1 骨材体積率

A 橋、B 橋、C 橋の各部材における粗骨材体積率の測定結果を表-4に示す。表より、同一部材内でばらつきが生じていることがわかる。また、B 橋の橋脚以外の部材で上部よりも下部の粗骨材体積率の値が大きい結果となった。これは、高さのある部材では骨材が沈降し、下部に集中しやすいためと考えられる。

図-10に、A 橋、B 橋、C 橋の各コア採取位置における粗骨材体積率を示す。ここで、「水平位置」はそれぞれ、横方向への距離を表している。鉛直方向の変化は表-4で確認した通り、B 橋の橋脚以外の部材で上部よりも下部で粗骨材体積率が大きい値となった。

D 橋の床版における骨材体積率の測定結果を、表-5に示す。表より、同一部材内でもばらつきが生じていることがわかる。また、A1-P1間とP1-A2間で変動係数がほぼ同じ結果になった。これより、材料分離は配筋・配合・施工方法などが同一の場合は変動係数が近い値になるものと考えられる。

各コア採取位置における骨材体積率を、図-11に示す。ここで、「水平位置」は、A1橋台からA2橋台方向への距離を表している。図より、骨材体積率の値が高い箇所が複数あり、そこから横方向に徐々に値が小さくなっていることがわかる。このことから、骨材とセメントペーストの流動性の違いにより打ち込み位置で骨材量が多く、そこから横一方向に骨材量が減少していると推測できる。

表-4 粗骨材体積率の測定結果(A橋, B橋, C橋)

部材種類	位置	平均値(%)	標準偏差(%)	変動係数(%)
A橋 桁	上部	49.4	4.45	8.77
	下部	51.9		
B橋 桁	上部	60.5	3.49	5.57
	下部	64.8		
B橋 橋脚	上部	69.5	1.61	2.33
	下部	68.7		
C橋 橋台	上部	59.2	4.19	6.71
	下部	65.6		

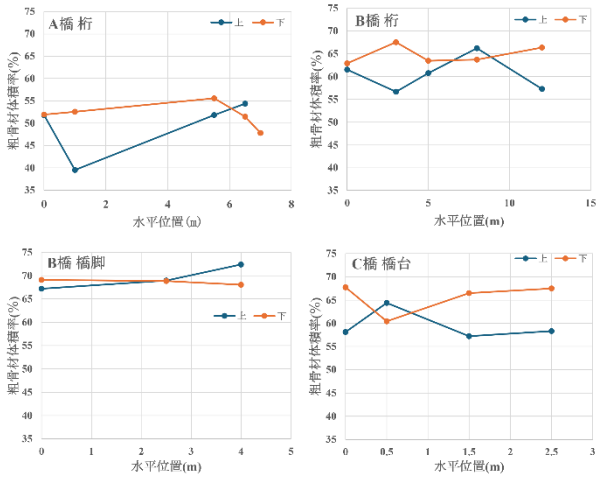


図-10 各コア採取位置における粗骨材体積率 (A, B, C橋)

表-5 骨材体積率の測定結果 (D橋床版)

位置	平均値(%)	標準偏差(%)	変動係数(%)
A1-P1	55.6	6.01	10.8
P1-A2	59.1	5.96	10.1

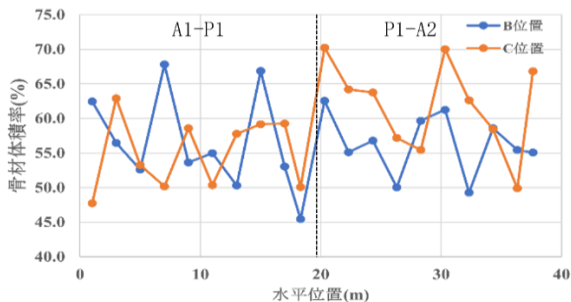


図-11 各コア採取位置における骨材体積率 (D橋床版)

また本研究では、多数のコアを採取したD橋床版における骨材体積率について空間的自己相関を求め、骨材体積率分布推定マップを作成した。まず、式(2)によりセミバリオグラムを求めた。セミバリオグラムは2地点の値の差の分散であり、セミバリオグラムをモデルに近似することで空間的自己相関を発見し、そのモデルに基づいて通常クリギングを行い、未計測地点を内挿した。

$$\gamma_h = \frac{1}{2} \text{Var}[Y(s+h)-Y(s)] \quad (2)$$

ここに、

$\gamma_h$  : 任意の2点間の距離hにおけるセミバリオグラム

$Y(i)$  : 位置iにおける実測値

s : 任意の点

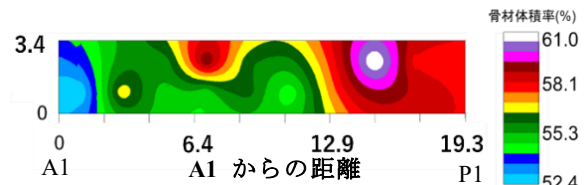


図-12 骨材体積率分布推定マップ (D橋床版 A1-P1間)

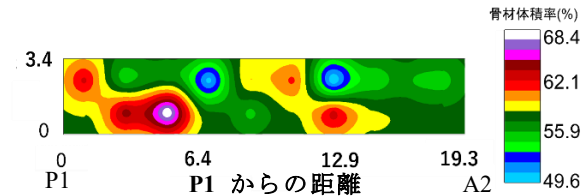


図-13 骨材体積率分布推定マップ (D橋床版 P1-A2間)

図-12にA1-P1間の骨材体積率分布推定マップを、図-13にP1-A2間の骨材体積率分布推定マップを示す。図より、周囲より骨材体積率が大きい2点から放射状に骨材体積率が減少していることが確認できる。寺西ら<sup>3)</sup>によると、コンクリート打込み部の骨材量が最も多くなることが分かっている。したがって、この2点がコンクリートの打込み部であると考えられる。

#### 4.2 酸素拡散係数

A橋、B橋、C橋の各部材における酸素拡散試験の結果を表-6に示す。表より、同一部材でもばらつきが生じていることがわかる。また、上部の方が下部よりも酸素拡散係数の値が大きいことがわかる。

図-14に、A橋、B橋、C橋の各コア採取位置における酸素拡散係数を示す。鉛直方向への変化は、表-6で確認した通り、上部の方が下部よりも酸素拡散係数が大きいことがわかる。また、各部材の横方向に一方から徐々に酸素拡散係数が大きくなる傾向が見られる。このことから、高さのある部材の劣化抵抗性を調査する場合は、一層の打ち込み高さ内の打ち込み位置から最も離れた位置の上部からコアを採取することで物質移動抵抗性の低い箇所を把握できると考えられる。

D橋の床版における酸素拡散試験の結果を、表-7に示す。変動係数をみると、同一部材内でもばらつきが生じていることがわかる。また、骨材体積率の変動係数と比較するとばらつきが大きくなる結果となった。

各コア採取位置における酸素拡散係数を、図-15に示す。図より、酸素拡散係数の値が小さい点が複数あり、そこから横方向に徐々に値が大きくなっていることがわかる。また、図-11の骨材体積率が大きい位置で酸素拡散係数の値が小さくなっている点が複数みられる。このことから、酸素拡散係数は骨材体積率に影響を受けることがわかる。

表-6 酸素拡散係数の測定結果(A橋, B橋, C橋)

部材種類	位置	平均値 (m <sup>2</sup> /s)・10 <sup>-8</sup>	標準偏差(%)	変動係数(%)
A橋 桁	上部	6.57	1.26	20.4
	下部	5.78		
B橋 桁	上部	6.31	1.41	23.7
	下部	5.61		
B橋 橋脚	上部	7.27	1.66	24.1
	下部	6.49		
C橋 橋台	上部	7.72	2.00	29.8
	下部	5.72		

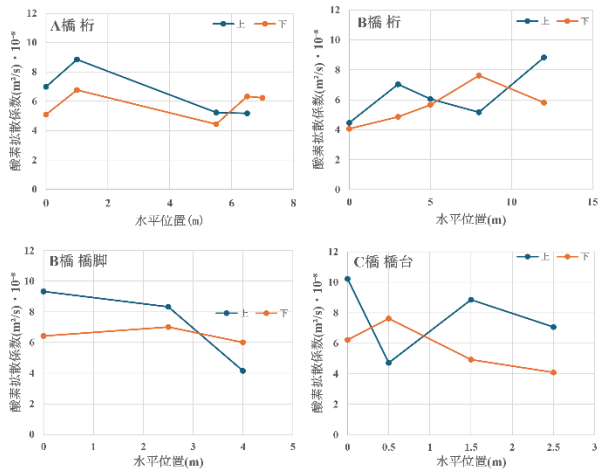


図-14 各コア採取位置における酸素拡散係数(A, B, C橋)

表-7 酸素拡散係数の測定結果(D橋 床版)

位置	平均値(m <sup>2</sup> /s)・10 <sup>-8</sup>	標準偏差(m <sup>2</sup> /s)・10 <sup>-8</sup>	変動係数(%)
A1-P1	6.1	2.27	37.32
P1-A2	6.0	1.71	28.55

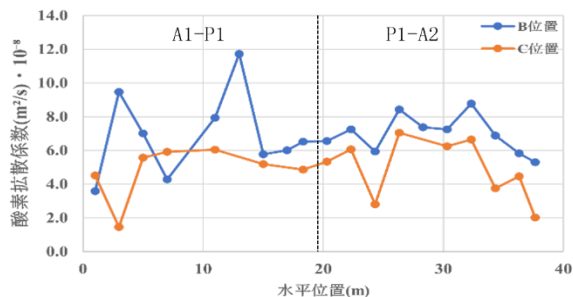


図-15 各コア採取位置における酸素拡散係数(D橋)

### 4.3 骨材体積率と酸素拡散係数の関係

図-16にA橋, B橋, C橋の粗骨材体積率と酸素拡散係数の関係を, 図-17にD橋床版の骨材体積率と酸素拡散係数の関係を示す。図より, 骨材体積率と酸素拡散係数には負の相関があることがわかる。しかし両者の相関はそれほど高くないことから, 酸素拡散係数は骨材体

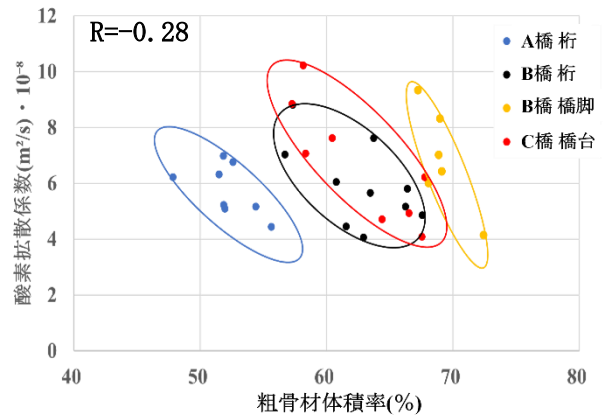


図-16 粗骨材体積率と酸素拡散係数の関係(A, B, C橋)

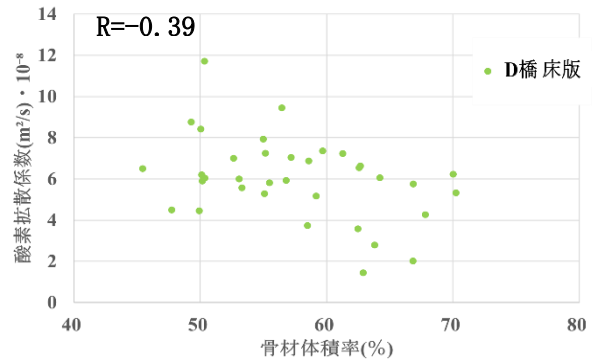


図-17 骨材体積率と酸素拡散係数の関係(D橋 床版)

積率の影響を受けるが, それだけでなく, セメントペーストの品質などの影響も受けると考えられる。A, B, C橋でD橋と同様の負の相関がみられることから, 酸素拡散係数は粗骨材による影響を強く受けると考えられる。また, 橋梁ごとに相関にばらつきがあるのは, 配合や水セメント比の違いが影響しているためと考えられる。

### 4.4 統計的手法による不均一性の評価

調査した実構造物の各部材の酸素拡散係数の変動係数を表-8に, 作製した模擬供試体の酸素拡散係数の変動係数を表-9に示す。表より, 実構造物では, 部位による劣化抵抗性の不均一性が大きいことがわかった。そこで, 設計値を危険側に上回る確率がどの程度となるかを評価した。

まず, 測定された酸素拡散係数の平均値を特性値と仮定し, 現在一般に使用されている $\gamma_c=1.3$ を用いて酸素拡散係数の設計値を式(3)により求めた。また, 求めた各部材の設計値を表-10に示す。

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k \quad (3)$$

ここに,

表一八 実構造物の各部材の酸素拡散係数の変動係数

部材種類	A橋 桁	B橋 桁	B橋 橋脚	C橋 橋台	D橋 床版 (A1-P1)	D橋 床版 (P1-A2)
変動係数(%)	20.5	23.7	24.1	29.8	37.3	28.6

表一九 各模擬供試体の酸素拡散係数の変動係数

部材種類	45-20	45-40	55-20	55-40	65-20	65-40
変動係数(%)	5.5	4.8	4.7	7.1	4.4	6.8

表一〇 各部材の設計値

部材種類	A橋 桁	B橋 桁	B橋 橋脚	C橋 橋台	D橋 床版 (A1-P1)	D橋 床版 (P1-A2)
設計値 (m <sup>2</sup> /s)・10 <sup>-8</sup>	7.97	7.74	8.94	8.74	7.90	7.80

表一一 酸素拡散係数が設計値を上回る確率

部材種類	A橋 桁	B橋 桁	B橋 橋脚	C橋 橋台	D橋 床版 (A1-P1)	D橋 床版 (P1-A2)
設計値を上回る確率(%)	21.7	23.8	25.4	27.7	27.7	24.5

D<sub>d</sub> : 酸素拡散係数の設計値(m<sup>2</sup>/s)・10<sup>-8</sup>

D<sub>k</sub> : 酸素拡散係数の特性値(m<sup>2</sup>/s)・10<sup>-8</sup>

γ<sub>c</sub> : 材料係数

次に、t 分布で設計値から危険側に上回る確率がどの程度か評価した。t 分布の式を式(4)に示す。

$$t = \frac{X - \mu}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad (4)$$

ここに

X : 酸素拡散係数の設計値

μ : 酸素拡散係数の平均値

s<sup>2</sup> : 酸素拡散係数の不偏分散

n : データ数

求めた t 値から設計値を上回る確率を算出した。表一〇に各部材の設計値を上回る確率を示す。表より、全ての構造物で設計値を上回る確率が 20%を超える結果となった。

データ数が少ないため、今後はデータを蓄積して検討する必要があるが、現状一般的に使用されている材料係数の値を用いてもコンクリートの品質のばらつき程度によっては設計値を上回る部位が存在することが想定され、

材料係数の値を見直すなどの対応が必要となる可能性もあるものと考えられる。

## 5. まとめ

(1) 調査した橋脚、橋台、桁では上部の方が下部よりも骨材体積率が少なかった。また、調査した床版においては、コンクリート打ち込み部から離れるほど骨材体積率が少なかった。

(2) 酸素拡散係数は骨材体積率の影響を受け、骨材体積率と酸素拡散係数には負の相関があった。また、調査した橋脚、橋台、桁においては、骨材体積率が最も大きい箇所を打ち込み部と想定すると、打ち込み部から離れたリフト内の上部で酸素拡散係数が大きくなっており、調査した床版においては、打ち込み部と想定される位置から離れている箇所で酸素拡散係数が大きくなっていった。

(3) コンクリート構造物の点検を行う際は、橋脚、橋台、桁のように高さのある部材では一層の打ち込み高さ内の打ち込み部から一番離れている位置の上部から、床版のように高くない部材では打ち込み部と想定される場所から最も離れた位置から、コアを採取することで劣化しやすい箇所を把握できると考えられる。

(4) 実構造物と模擬供試体のコアの変動係数の比較により、実構造物では部位による劣化抵抗性の不均一性が大きいことがわかった。また、耐久性照査に用いる設計値を算出するための材料係数の値について検討するためデータの蓄積が必要であると考えられる。

## 謝辞

本研究は、新潟県建設技術センターの調査研究助成金を受けて行ったものである。また、実験の実施には、当時、新潟大学学生であった平野康也氏および佐藤伸哉氏のご協力をいただいた。ここに付記し、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 池崎由典, 五十嵐心一, 川村博紀: 画像解析による硬化コンクリートの配合推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.2019-2024, 2004
- 2) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生實, 永松静也: コンクリートの気体拡散係数への骨材量の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 541 号, pp.17-22, 2001
- 3) 寺西浩司, 丹羽大地: 材料分離が構造体コンクリートの各種品質に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 巻, 第 749 号, pp.923-933, 2018