

実構造物におけるコンクリートの品質の空間変動が 耐久性評価に及ぼす影響に関する研究 報告書

新潟大学 佐伯竜彦

1. はじめに

現在、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の老朽化が急速に進んでおり、今後、限られた予算、人員で膨大な数の構造物の機能を将来にわたって維持していく必要があり、適切な維持管理を行うことが求められている。

実構造物は、型枠工、鉄筋工、打設、締固め、打ち継ぎ、表面仕上げ、養生といった多くの過程を経て供用に至る。そのため人為的または偶発的な初期欠陥により構造物の性能を低下させる可能性がある。また、目視で確認できるような初期欠陥だけでなく、目視では確認できないコンクリートの不均一性が構造物内における劣化進行のばらつきを部材内または、部材ごとに引き起こし、劣化進行予測の障害となる可能性もある。

供用中の構造物では、特にコア採取などの破壊を伴う測定は難しく、十分な調査ができないのが現状である。また、撤去や更新の際に実構造物を大規模な破壊試験等により調査する研究は現状少なく、データの蓄積は不十分であり、劣化性状の把握は進んでいない。

このため、劣化性状の把握において材料分離によるコンクリートの不均一性についても検討を行う必要がある。コンクリートの材料特性や施工方法、構造細目により、構造物中のコンクリートには不均一性が発生する。そのため構造物におけるコンクリートの品質やその不均一性を把握することが求められる。

今後、構造物の詳細な調査を行い、十分な点検データを蓄積することで、適用基準や部材種類、環境条件から構造物の分類を行うことができ、維持管理・点検を行う際、劣化予測の信頼性を高めることができると考えられる。

本研究では、そのデータ蓄積のための一研究として、新潟県内で撤去された道路橋について材料分離によるコンクリートの不均一性の調査を行った。

2. 調査対象

A橋、B橋、C橋、D橋、E橋の5橋からコア採取を行った。なお、コア採取位置は、ブリーディング、また骨材の偏在の影響を評価するため、部材毎にコンクリート打設の1リフトの上部、下部から複数のコアを採取した。なお、打設リフトは、打ち継ぎ目を目視することにより確認した。以下に、調査橋梁の概要を示す。

(1) A橋

A橋は、昭和50年に竣工した全32径間6主桁のPCT桁橋である。径間P4-5のG4桁の2.7m×1.5mを調査対象とした(図-1参照)。コア採取位置を図-2に示す。コア採取位置図における上、下は、部材毎の1リフトの上部下部を示しており、コア採取位置の下の番号は、コア番号を示している。以降の橋梁のコア採取位置図も同様である。

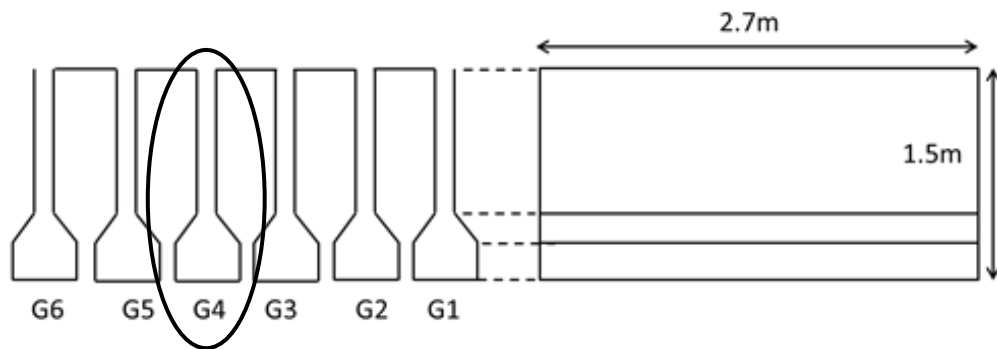
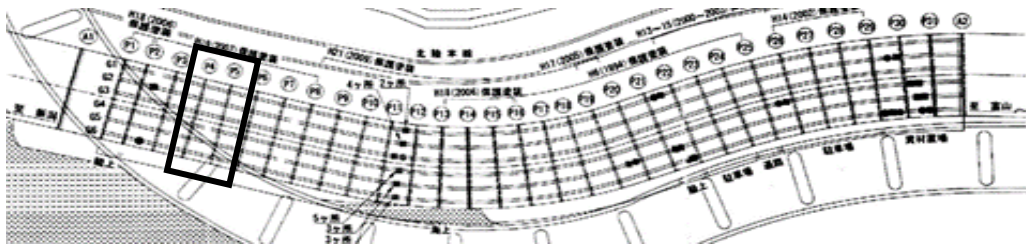


図-1 A橋コア採取部位図

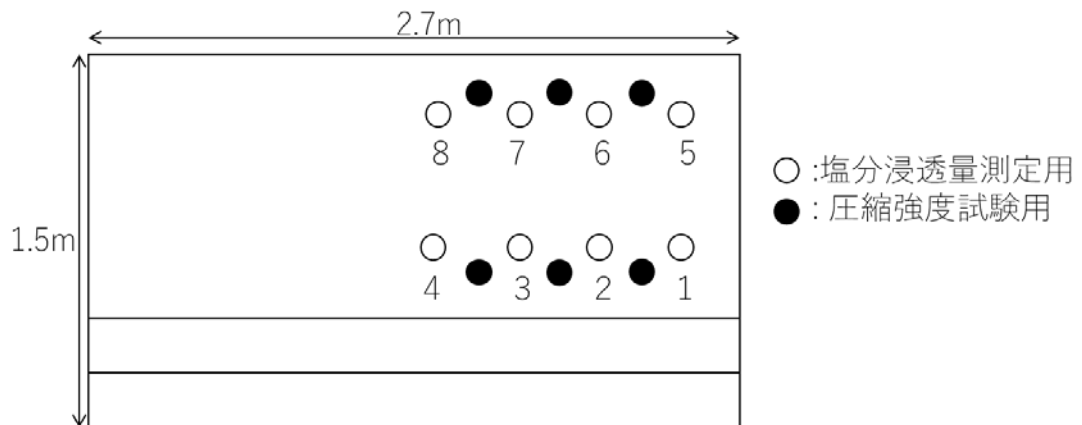


図-2 A橋コア採取位置図

(2) B橋

B橋は、昭和47年に竣工したPCT桁橋である。コア採取は、径間P2-3におけるG1, G2桁の側面にて行った（図-3参照）。コア採取位置を図-4に示す。

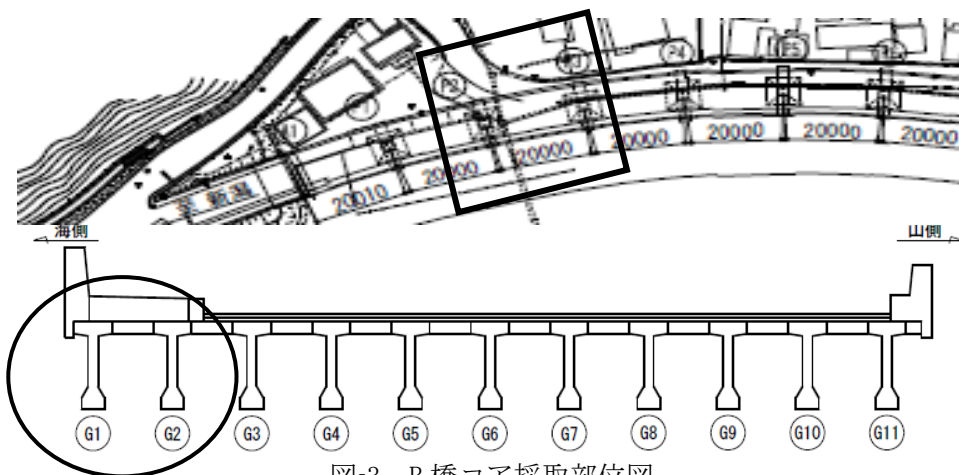


図-3 B橋コア採取部位図

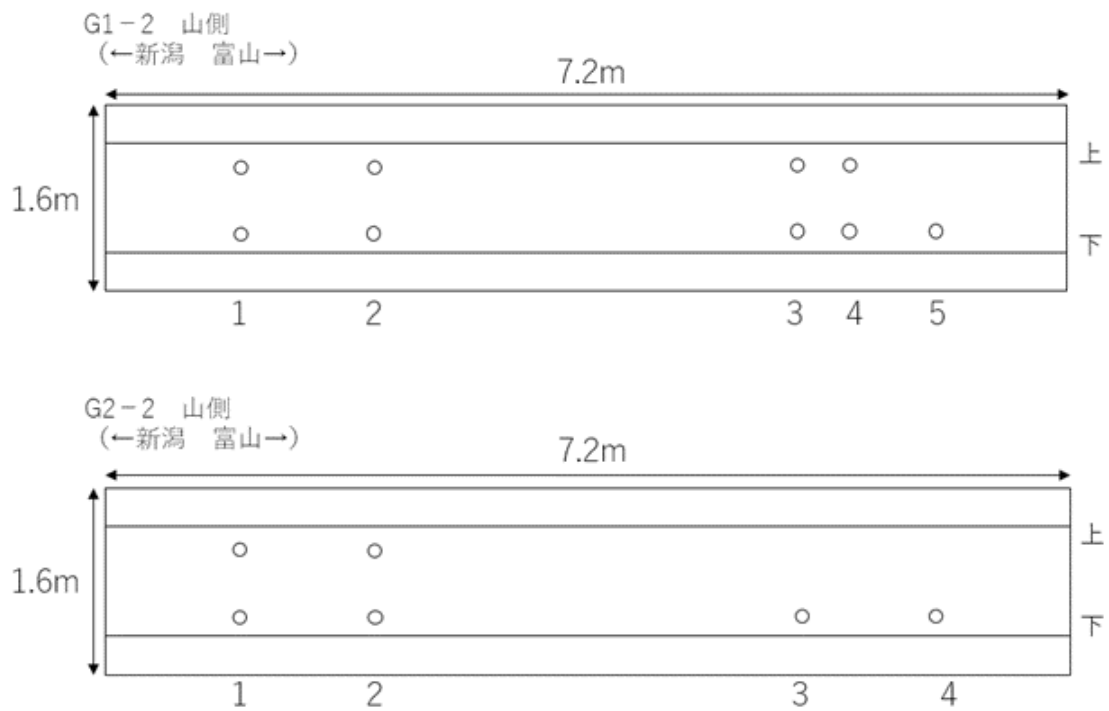


図-4 B橋コア採取位置

(3) C橋

C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。コア採取は、図-5中の黒く塗りつぶした位置の桁と橋脚にて行った。コア採取位置を図-6, 7に示す。

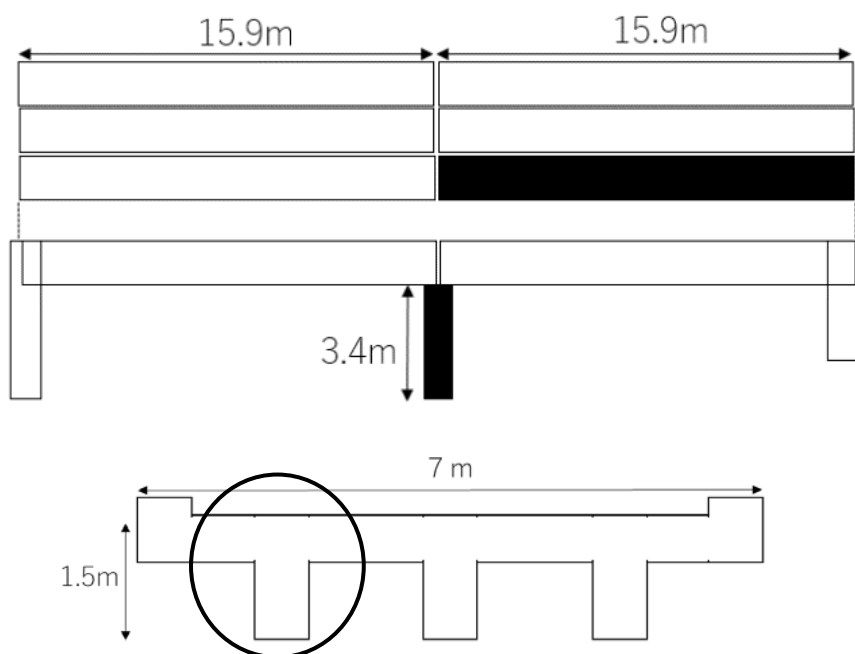


図-5 C橋コア採取部位図

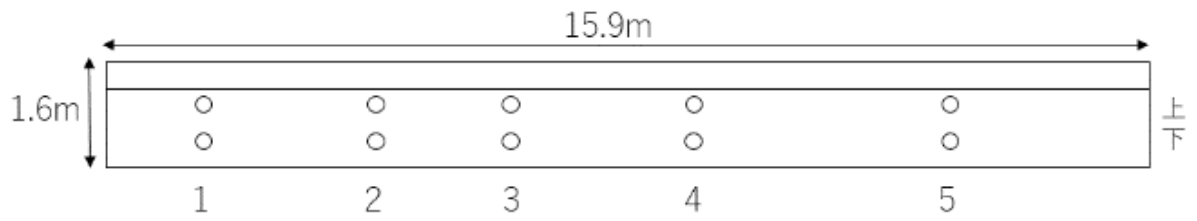


図-6 C橋コア採取位置図（桁）

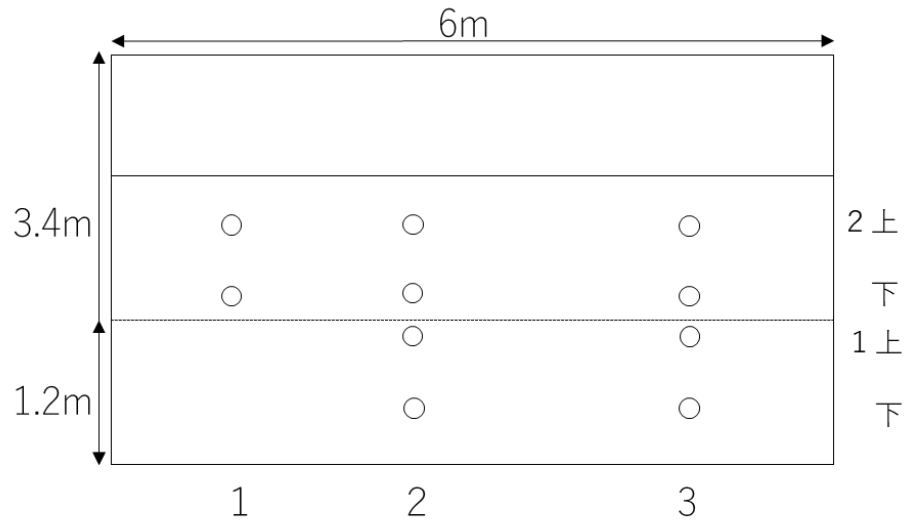


図-7 C橋コア採取位置図（橋脚）

（4） D橋

D橋は、昭和46年に竣工された吊り橋である。コア採取は、左岸側の橋台にて行った、コア採取位置を図-8に示す。

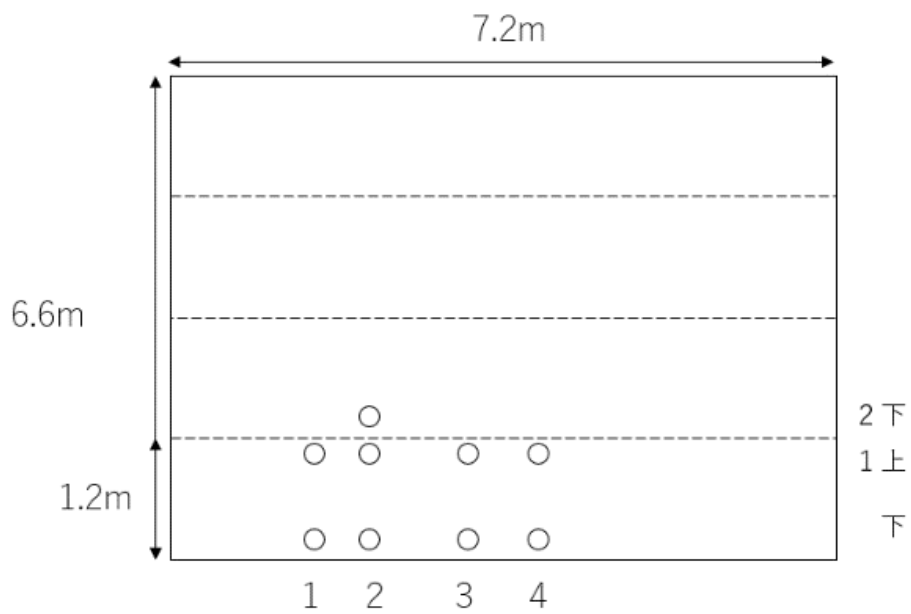


図-8 D橋コア採取位置図

(5) E橋

E橋は、昭和47年に竣工された道路橋である。コア採取は、図-9に示されるP5の橋脚の①～⑤ブのロックにて行った。

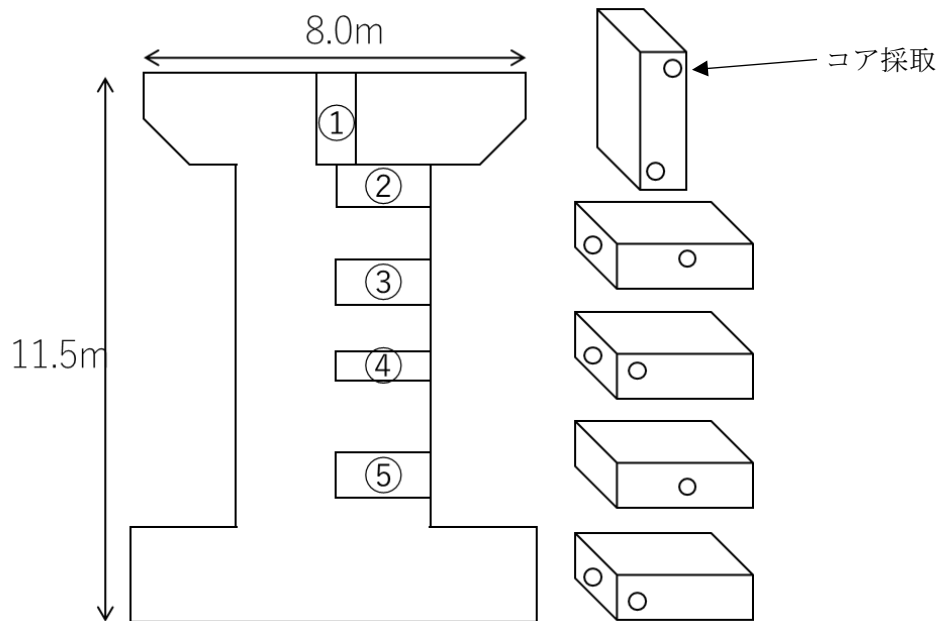


図-9 E橋コア採取位置図

3. 実験概要

撤去道路橋部材と角形供試体（ $35 \times 55 \times 25\text{cm}$ ）（以下、模擬供試体）からそれぞれコア採取を行い、コンクリート品質の不均一性、材料分離について評価した。

採取したコアを用いて、A橋においては塩分浸透量および圧縮強度の測定、その他の橋梁および模擬供試体では、コンクリートの緻密性を評価するため酸素拡散試験と、画像解析によりコア断面の粗骨材面積率の測定を行った。なお、E橋については、コアの欠損が多く、粗骨材面積率の測定のみ行った。

（1）模擬供試体から採取したコアの不均一性の評価

模擬供試体による実験は、コンクリート本来の不均一性を評価するためのものであり、材料分離がないと判断されるコンクリートにおいても、局所的な骨材の偏在やコア採取によっても生じるばらつきの程度を評価するために行った。

また、土木構造物では、粗骨材の最大寸法が40mmの場合があり、一方で、点検の際に採取する一般的なコアの直径は100mmが多いことから、圧縮強度試験に必要とされる粗骨材の最大寸法の3倍の直径を満たさない可能性がある。そこで、粗骨材の最大寸法が40mmの供試体を作製し、直径100mmのコア採取を行い、実構造物における点検結果のコア直径の影響の評価を行った。

供試体の配合は、表-1に示すように、3種類の水セメント比と粗骨材最大寸法20mmと40mmの2種類の計6種類とした。打設から脱型までは1日1回以上の散水を行い、材齢28日まで屋外にて養生を行った後、コア採取を行った。コア供試体数は1条件につき6個とした。

表-1 コンクリートの計画配合

記号	W/C (%)	粗骨材最 大寸法	単位量 (kg/m ³)			
			セメント	水	細骨材	粗骨材
45-20	45	20	383	172	742	1079
55-20	55	20	314	172	803	1075
65-20	65	20	265	172	857	1059
45-40	45	40	356	160	657	1233
55-40	55	40	291	160	714	1230
65-40	65	40	246	160	765	1213

(2) 塩分浸透量測定

試料の採取は、JIS A 1154附属書 A 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン分析用試料の採取方法 に準拠し行った。表面から5mmごとに試料を採取し、全塩化物イオン量の測定は、電位差滴定法により行った。

(3) 酸素拡散試験

酸素拡散試験は、JCI-DD5「酸素の拡散試験方法(案)」により準拠し行った。コア供試体の上下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により切断を行い、110℃乾燥で恒量とし、酸素拡散試験に用いた。

(4) 骨材面積率の測定

酸素拡散試験に用いた供試体の切断面の表、裏それぞれをデジタルカメラで撮影した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コア上面、下面の値から平均値を算出した。

4. 模擬供試体の実験結果

(1) 酸素拡散係数

模擬供試体コアにおける酸素拡散係数の測定結果を表-2に示す。酸素拡散係数の変動係数は、4～7%程度であり、粗骨材最大寸法の影響はそれほど大きくなかった。

表-2 模擬供試体コアの酸素拡散係数試験の結果

供試体種類	酸素拡散係数 (m ² /s) × 10 ⁻⁸		
	平均値	標準偏差	変動係数
45-20	16.8	0.90	5.4
55-20	19.0	0.90	4.7
65-20	23.2	1.02	4.4
45-40	15.1	0.73	4.9
55-40	17.2	1.24	7.2
65-40	21.2	1.45	6.8

(2) 粗骨材面積率

模擬供試体コアにおける粗骨材面積率の測定結果を表-3に示す。粗骨材最大寸法40mmの場合、単位粗骨材容積が粗骨材最大寸法20mmの場合と比較し大きくなるため、粗骨材面積率は大きくなる結果となった。粗骨材面積率の変動係数は、2～3%程度であり、水セメント比や粗骨材最大寸法による大きな変化は見られなかった。

表-3 模擬供試体コアの粗骨材面積率の測定結果

供試体種類	粗骨材面積率 (%)		
	平均値	標準偏差	変動係数
45-20	60.8	1.39	2.3
55-20	60.3	1.15	1.9
65-20	59.5	1.56	2.6
45-40	72.1	1.86	2.6
55-40	71.8	1.92	2.7
65-40	69.1	2.31	3.3

5. 実構造物の調査結果

(1) 塩分浸透量

A橋における塩分浸透量測定の結果を図-10に示す。桁の下部から採取したコア1～4と上部から採取したコアの5～8を比較すると上側の方が内部まで塩分が浸透しており、濃度分布の形状から上部のコアの方が拡散係数が大きいことが推定された。上部、下部からコア採取を行い、圧縮強度を測定した結果を図-11に示す。上部より下部の強度が20%程度大きくなった。部位による塩分浸透量の違いは、塩分付着量の違いとコンクリートの塩分拡散係数の違いが原因として考えられるが、A橋では、材料分離によるコンクリートの品質の違いの影響が大きいと考えられる。

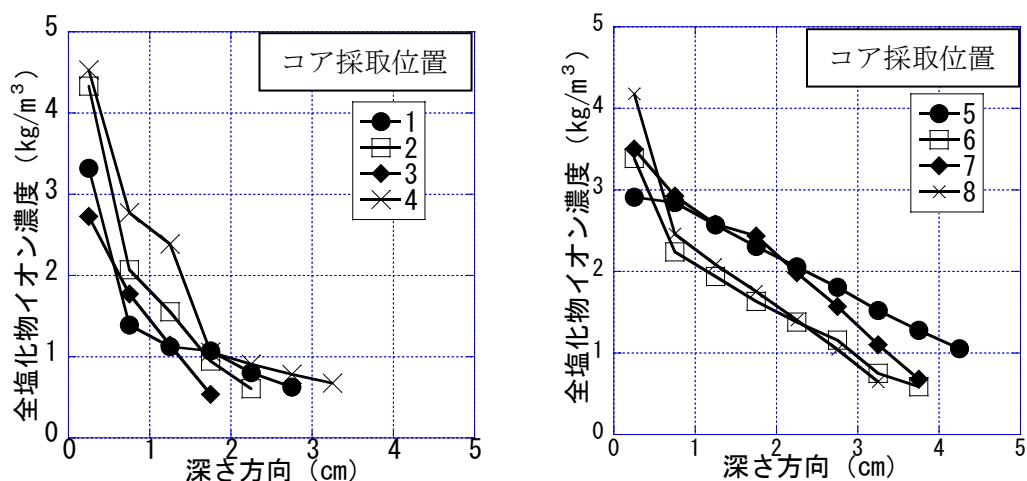


図-10 A橋の塩化物イオン浸透量測定の結果

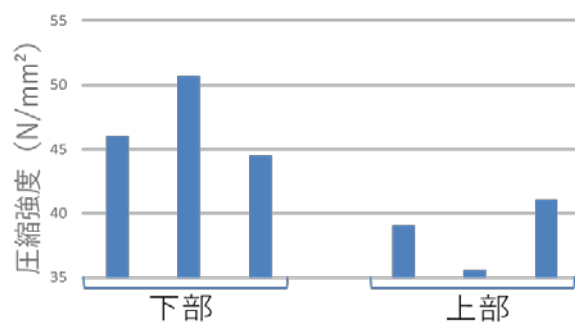


図-11 A橋の圧縮強度試験の結果

(2) 酸素拡散係数

実構造物における酸素拡散試験の結果を、表-4に示す。全ての橋梁、部材において下部よりも上部の平均値が大きく、上部の平均値は、下部より15%～30%程度大きい結果となった。変動係数については下部が19%～21%に対し上部は24%～27%と、下部より上部の変動係数が大きい結果となった。

また、コア採取位置を区別していない部材内における変動係数は、24%～28%と、いずれの橋梁、部材において同程度の値となった。

表-4 実構造物における部材内の上部下部の酸素拡散係数の測定結果

	位置	供試体数	平均値(m²/s) × 10 ⁻⁸	標準偏差	変動係数 (%)
B橋-桁	上	6	32.7	8.5	25.8
	下	9	28.6	5.8	20.1
C橋-桁	上	5	34.6	8.3	24
	下	5	30.8	6.6	21.3
C橋-橋脚	上	5	38.2	9.5	24.8
	下	5	32.7	6.2	18.8
D橋-橋台	上	4	42.3	11.3	26.7
	下	5	32.6	6.8	20.7

表-5 実構造物における部材内全体の酸素拡散係数の測定結果

	平均値(m²/s) × 10 ⁻⁸	標準偏差	変動係数 (%)
B橋-桁	30.3	7.3	23.9
C橋-桁	32.7	7.7	23.6
C橋-橋脚	36.0	8.7	24.3
D橋-橋台	36.9	10.3	27.8

本研究の調査結果の範囲で，材料係数の算定を行った．最も変動係数が大きいD橋を対象とし，模擬供試体における酸素拡散係数の変動係数は，最も大きい 55-45 の 7.2%を用いた．同一配合の場合の供試体と実構造物における分布を比較するため，模擬供試体における平均値をD橋と同一と仮定し，標準偏差を算出した．

表-6 材料係数の算出に用いる酸素拡散係数の値

	平均値(m ² /s) × 10 ⁻⁸	標準偏差	変動係数 (%)
D橋-橋台	36.9	10.3	27.8
模擬供試体	36.9	2.66	7.2

模擬供試体における仮の分布を図-12 に示す．施工の影響のない，コンクリート本来のばらつきを表している．酸素拡散係数の特性値を超過する確率を 5%と仮定すると，超過部分は図-12 中の斜線部となり式 (1) が成り立つ．

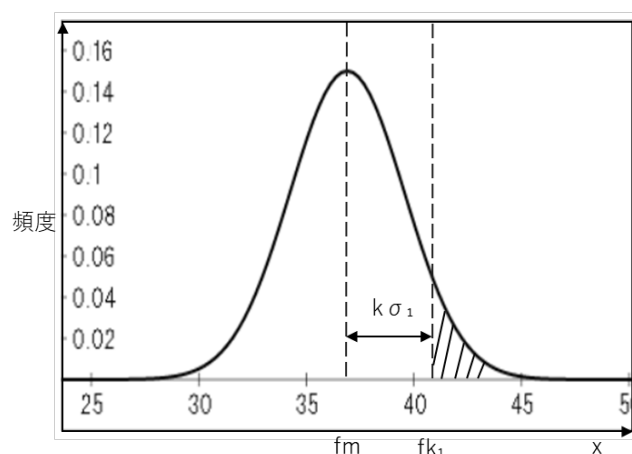


図-12 模擬供試体の酸素拡散係数の仮定した分布 $f(x)$

$$0.05 = \int_{f_m + k\sigma_1}^{\infty} f(x) dx \quad (1)$$

ここに，

f_m : 酸素拡散係数の平均値

k : 特性値を上回る可能性を 5%とした場合の係数．ここでは，1.645

σ_2 : 模擬供試体における酸素拡散係数の標準偏差

実構造物における分布を図-13 に示す．この場合は施工の影響を受けて標準偏差が大きくなると仮定している．酸素拡散係数の特性値を超過する確率を 5%と仮定すると，超過部分は図-13 中の斜線部となり式 (2) が成り立つ．模擬供試体と同様の配合のコンクリートを施工したと仮定し，特性値を同一の値として特性値を超過する確率を同様の 5%とするには，酸素拡散係数の平均値を小さくする必要がある．

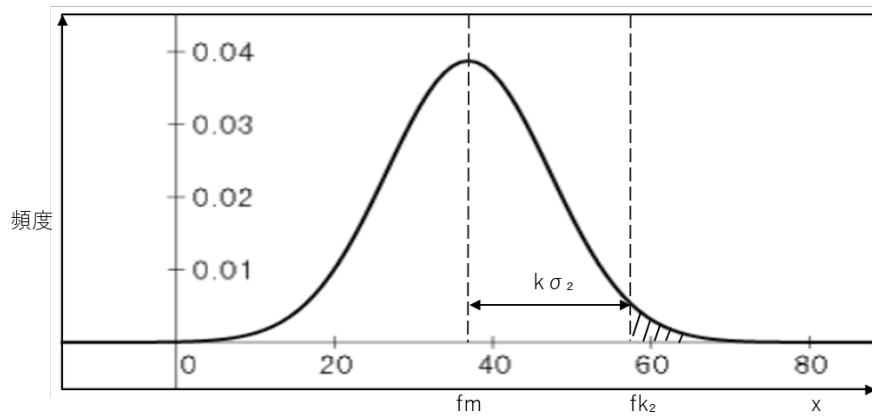


図-13 実構造物の酸素拡散係数の分布 $f'(x)$

$$0.05 = \int_{f_m + k\sigma_2}^{\infty} f'(x) dx \quad (2)$$

ここに、

f_m : 酸素拡散係数の平均値

k : 特性値を上回る可能性を 5%とした場合の係数. ここでは, 1.645

σ_2 : 実構造物における酸素拡散係数の標準偏差

施工の影響のみを考慮した特性値は, 式(3)により表される. 式(4)が成り立つように $(k\sigma_1 - k\sigma_2)$ の値分 $f'(x)$ の平均値 f_m を引き下げることで, コンクリート本来の不均一性を除き, 施工の影響のみを考慮した (図-14 参照).

$$\begin{aligned} f_k &= f_m - (k\sigma_1 - k\sigma_2) \\ &= 36.9 - 1.645 (10.3 - 2.66) \\ &= 24.3 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、

f_k : 施工によるばらつきのみを考慮した特性値

f_m : 酸素拡散係数の平均値

k : 特性値を上回る可能性を 5%とした場合の係数. ここでは, 1.645

σ_1 : 模擬供試体における酸素拡散係数の標準偏差

σ_2 : 実構造物における酸素拡散係数の標準偏差

$$0.05 = \int_{f_m + k\sigma_1}^{\infty} f(x) dx = \int_{f_k + k\sigma_2}^{\infty} f'(x) dx \quad (4)$$

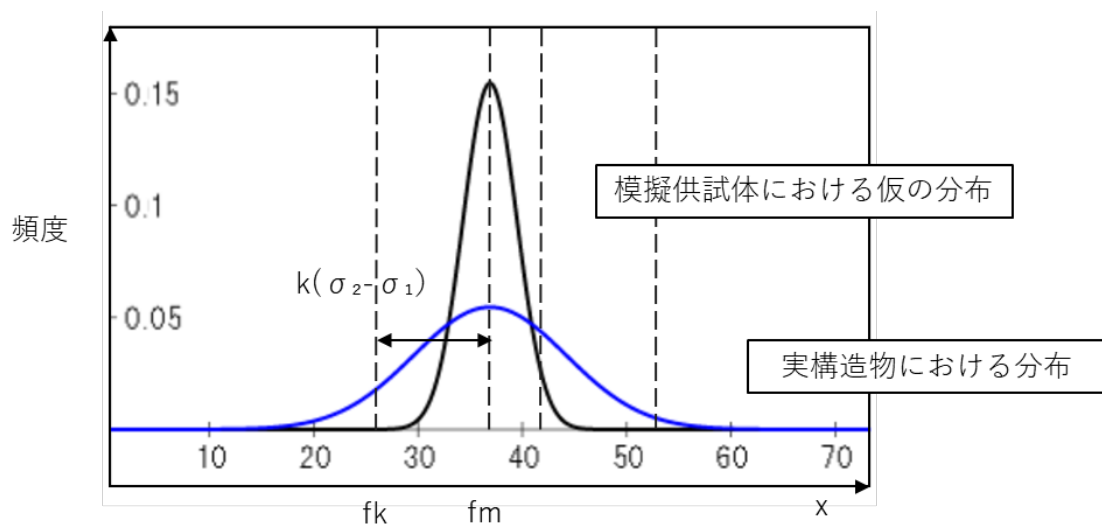


図-14 材料の特性値

材料係数 γ_c は、式 (5) により表される。式 (5) から材料係数は、1.52 となった。現在コンクリート標準示方書で適用されている材料係数は、1.3 であるため、本研究の調査結果の範囲では、材料係数をより高く設定する必要性が示唆された。

$$\begin{aligned}\gamma_c &= f_m / f_k \\ &= 36.9 / 24.3 \\ &= 1.52\end{aligned}\quad (5)$$

ここに

f_k : 施工によるばらつきのみを考慮した特性値

f_m : 酸素拡散係数の平均値

各コア採取位置における酸素拡散係数を図-15に示す。各部材内の横方向での品質の変動について見ると、一方向から徐々に酸素拡散係数が大きくなる傾向が見られた。一般的に壁・梁部材は一方向から打ち込みが行われ、打ち込み部直下と比較し、先端部は材料分離が発生しやすいとされている。このため一方向から徐々に酸素拡散係数が大きくなる傾向が見られたと推察される。

以上より、実構造物からコア採取を行い、酸素拡散試験を行い、品質を調査する場合、1リフト内における打ち込み先端部の上部からコアを採取することで、最も低い品質の値を得ることができ、安全側の評価を行えるものと考えられる。

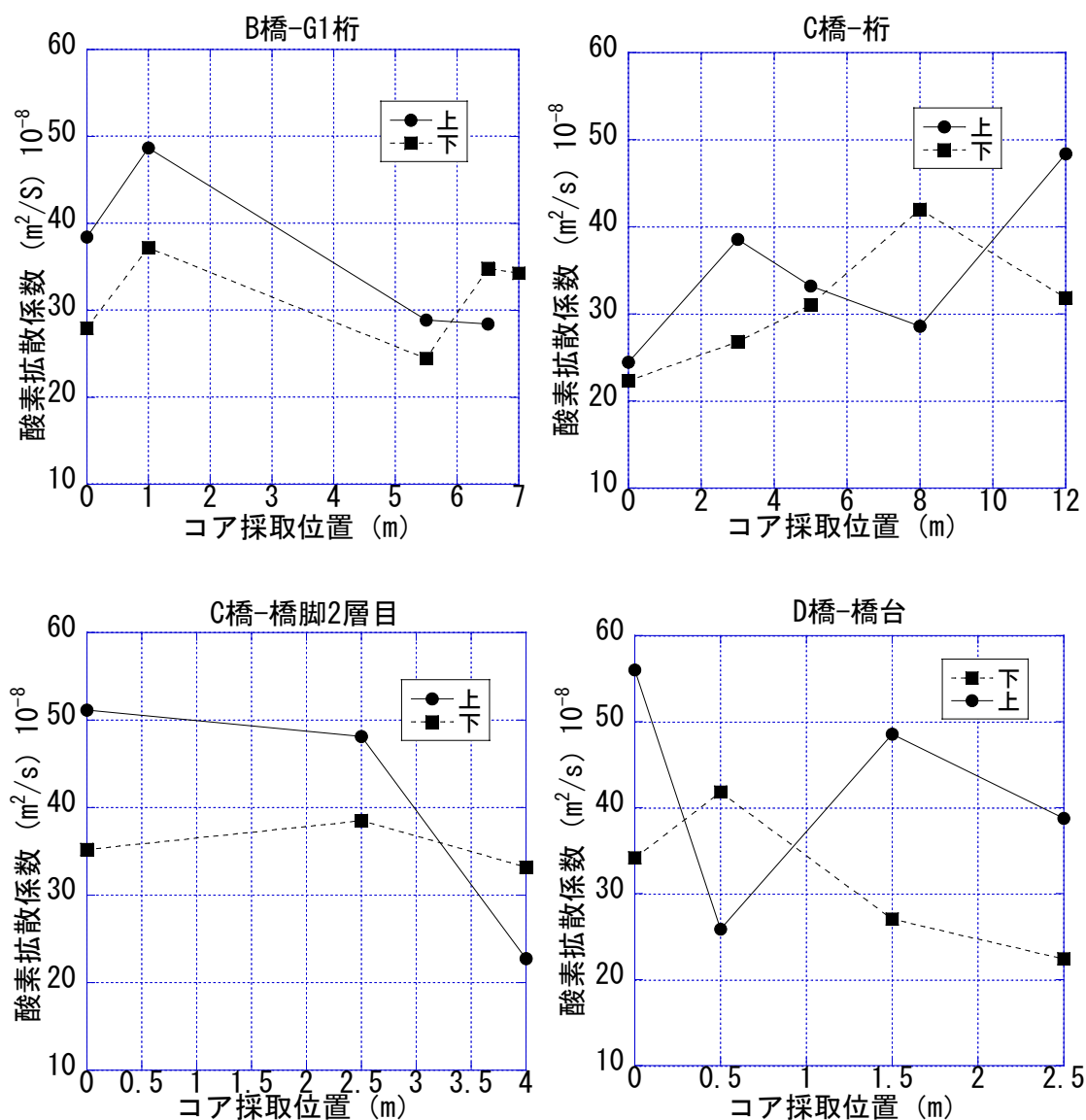


図-15 各コア採取位置における酸素拡散係数

(3) 粗骨材面積率

実構造物コアにおける粗骨材面積率の測定結果を表-7に示す。全ての構造物、部位において下部より上部の粗骨材面積率が小さい結果となった。下部より上部の粗骨材面積率は最大で6%程度小さい結果となった。また、変動係数については、下部が3%~4%に対し、上部は4%~10%と大きい結果となった。特にB橋上部は、他の部材と比較して特に変動係数が大きくなる結果となった。

図-16に各コア採取位置における粗骨材面積率を示す。B橋の桁は、横方向の粗骨材面積率の変動が大きい結果となった。粗骨材の横方向の変動は、一般的に斜めシュートの利用により粗骨材が打ち込み先端部へ向かって流れることで発生するとされているため、B橋の桁における打設には、斜めシュートを利用した可能性が示唆された。他の部材は横方向の粗骨材面積率の変化は、明確には、見られなかった。

表-7 実構造物の粗骨材面積率測定結果

	位置	供試体数	平均値(%)	標準偏差	変動係数 (%)
B橋-桁	上	6	49.7	5.0	10
	下	9	52.4	2.0	3.9
C橋-桁	上	5	60.5	3.4	5.7
	下	5	64.8	1.8	2.8
C橋-橋脚	上	5	69.4	2.6	3.8
	下	5	70.2	1.8	2.6
D橋-橋台	上	4	59.5	2.8	4.8
	下	5	65.5	2.7	4.1
E橋-橋脚	全体	9	65.2	3.2	4.9

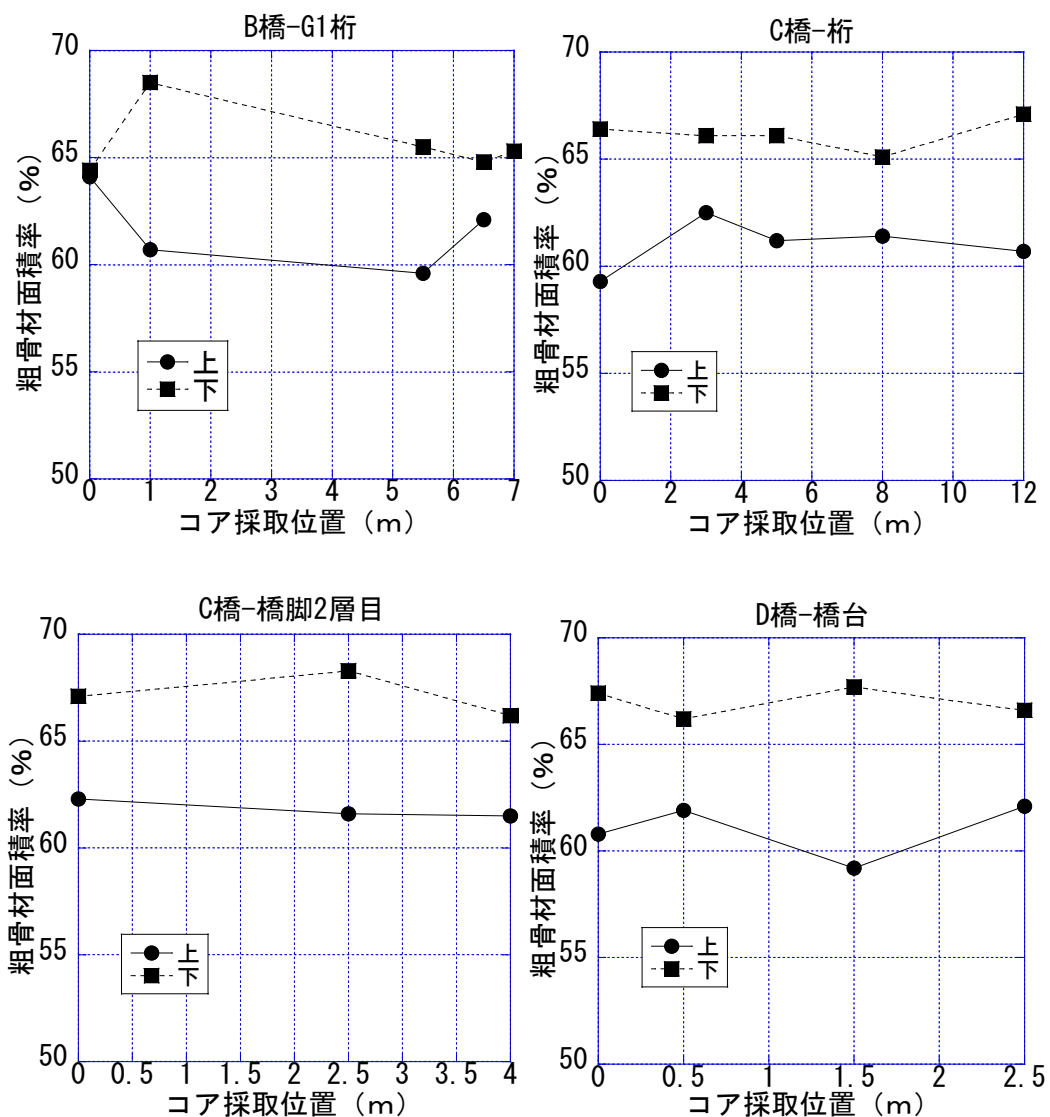


図-16 各コア採取位置における粗骨材面積率

(4) 粗骨材面積率と酸素拡散係数の関係

図-17に、粗骨材面積率と酸素拡散係数の関係を示す。図より、両者には高い相関が見られる。施工時の粗骨材の沈降により、下部より上部の酸素拡散係数が大きくなったと推察された。さらにB橋においては、横方向の粗骨材面積率と酸素拡散係数の変化の傾向が一致した。その他の部材では、粗骨材面積率の横方向の変化は少なく、打ち込み先端部では、打ち込み部直下より水セメント比が大きくなる可能性が考えられる。

(5) 統計的手法による評価

データ数が十分ではないが、酸素拡散係数、粗骨材面積率を統計的手法により評価した。実構造物において、それぞれの部材内で上部群と下部群の2群に分類し、等分散性の検定（F検定）、t検定を行った。F検定、t検定は、対象とする2群の分散および平均値が統計的にみて差があると判断できるか評価する検定である。検定は、帰無仮説を分散および平均値に差が無いとし、有意水準0.05で行った。

酸素拡散係数の検定結果を表-8に示す。B橋の分散のみ有意差があり、その他全ての部材で、分散、平均ともに有意差はなかった。

粗骨材面積率の検定結果を表-9に示す。分散についてはB橋の桁に、平均値についてはD橋の橋台に有意差が確認された。

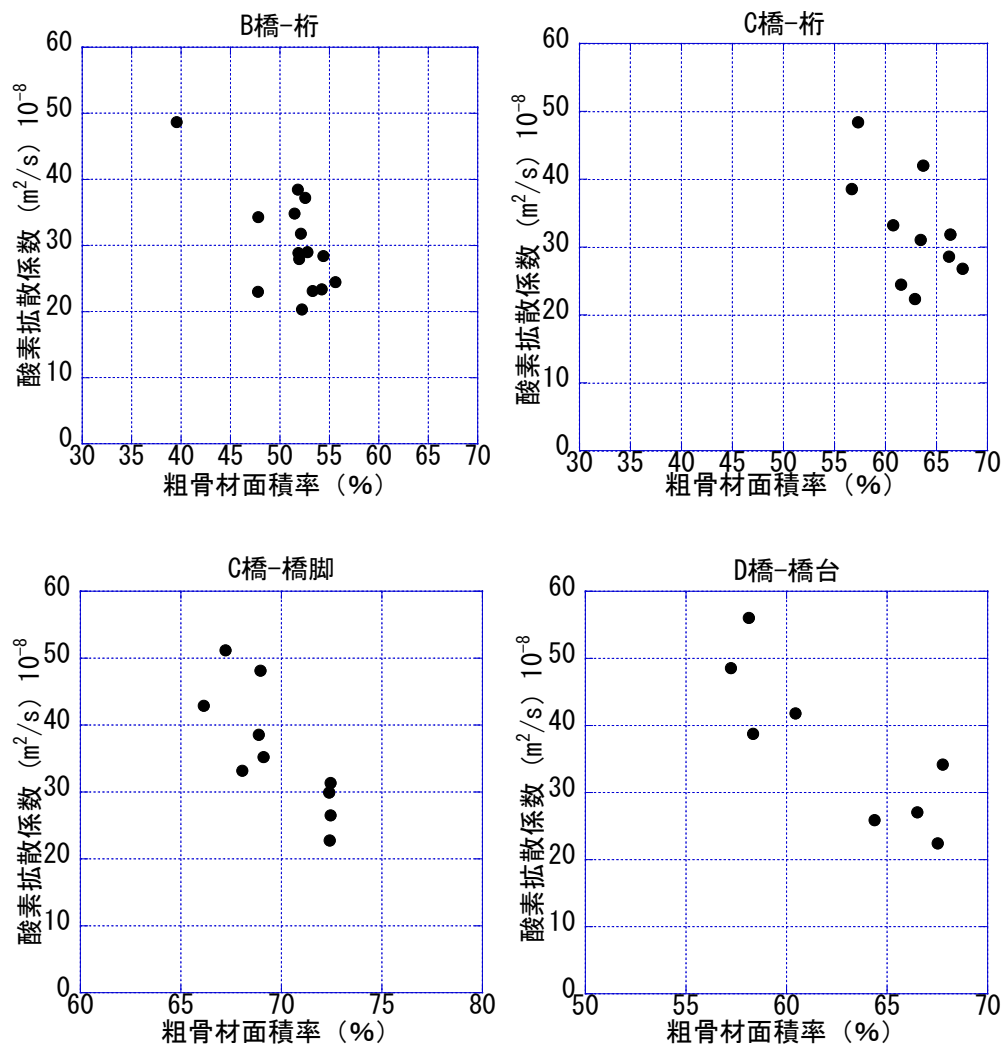


図-17 酸素拡散係数と粗骨材面積率の関係

表-8 酸素拡散係数の検定結果

実構造物における上部と下部の2群による酸素拡散係数のF検定				実構造物における上部と下部の2群による酸素拡散係数のt検定			
	F 値	F 0.05	有意差		t 値	t 0.05	有意差
B橋-桁	2.16	3.69	なし	B橋-桁	0.77	2.16	なし
C橋-桁	1.61	6.39	なし	C橋-桁	0.54	2.31	なし
C橋-橋脚	2.37	5.41	なし	C橋-橋脚	0.80	2.31	なし
D橋-橋台	2.79	6.59	なし	D橋-橋台	1.03	2.37	なし

表-9 粗骨材面積率の検定結果

実構造物における上部と下部の2群による粗骨材面積率のF検定				実構造物における上部と下部の2群による粗骨材面積率のt検定			
	F 値	F 0.05	有意差		t 値	t 0.05	有意差
B橋-桁	6.03	3.69	あり	B橋-桁	0.95	2.16	なし
C橋-桁	3.51	6.39	なし	C橋-桁	1.98	2.31	なし
C橋-橋脚	1.96	6.39	なし	C橋-橋脚	0.41	2.31	なし
D橋-橋台	1.12	6.59	なし	D橋-橋台	2.72	2.36	あり

6. まとめ

本研究では、新潟県内で撤去された道路橋から、複数のコア採取を行い、塩分浸透量と圧縮強度、酸素拡散試験と粗骨材面積率の測定を行い、材料分離によるコンクリートの不均一性の調査を行った。以下に本研究の調査範囲内で得られた知見をまとめる。

(1) 塩分浸透量測定、酸素拡散試験、圧縮強度試験の結果からコンクリート打ち込み1リフトの下部と比較し上部の品質が低下していることが確認された。これはブリーディングや粗骨材の沈降の影響と推察される。

(2) 各部材それぞれで一方向から徐々に酸素拡散係数が大きくなる傾向が見られた。打ち込みが一方向から行われるため、打ち込み先端部に材料分離が発生し、酸素拡散係数が増加したと考えられる。

(3) 実構造物からコアを採取して、コンクリート品質を評価する場合、1リフト内における打ち込み先端部の上部からコアを採取することで、最も品質の低いコンクリートを評価でき、ひいては安全側の耐久性の評価が行えると考えられる。

(4) 本研究で行った調査のみではデータが十分でないため断言はできないが、コンクリート標準示方書の材料係数を引き上げる必要があることが示唆された。今後のデータの蓄積が重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研究助成を受けて行ったものであり、本研究の調査にあたっては、国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所、新潟県地域振興局津川地区振興事務所、新潟県佐渡地域振興局地域整備部、新潟市西部地域土木事務所のご協力いただきました。記して謝意を表します。