

平成 25 年度研究実施

(一財)港湾空港総合技術センター研究開発助成

助成番号 : 平成 25 年 1 月 22 日付 第 12-3 号

研究開発項目 : (指定) ①港湾、海岸及び空港の施設の健全度評価に関する研究

塩害劣化を受ける RC 構造物の 耐久性設計と維持管理の連係

平成 26 年 4 月 30 日

東京理科大学 理工学部

土木工学科

加藤 佳孝

目次

1. はじめに.....	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究の概要	1
2. 各種要因と鋼材腐食速度の体系的整理	2
2.1 試験体概要および測定項目	2
2.2 自然電位の測定結果	4
(1) 塩化物イオン濃度の影響	4
(2) 環境の影響	5
2.3 Tafel 近似曲線による腐食の検討	6
(1) 各示方配合における塩化物イオン濃度の影響	6
(2) 環境のカソード勾配への影響	9
2.4 乾燥期間の影響	10
3. 現場計測手法を活用したかぶりコンクリートの品質評価	12
3.1 試験体概要および測定項目	12
(1) 表面透気試験	13
(2) 中性化促進試験	13
3.2 測定高さによる中性化深さへの影響	13
(1) 打重ね無し	13
(2) 打重ね有り	14
3.3 測定高さによる表層透気計数への影響	14
(1) 打重ね無し	14
(2) 打重ね有り	15
3.4 中性化深さと表層透気係数の関係	15
3.5 けい酸塩系表面含浸工法がコンクリートの表層品質に与える影響の把握	16
(1) kT による改質効果の検討	18
(2) 中性化促進試験による改質効果の検討	19
4. 現場計測手法を活用した耐久性設計と維持管理の連係	23
4.1 配合や養生がかぶりコンクリートの品質に与える影響	23
4.2 回帰分析による中性化速度係数の把握	24
4.3 回帰分析による塩化物イオンの見かけの拡散係数の把握	28
(1) 単回帰結果	29
(2) 重回帰結果	31
5. おわりに	34
5.1 各種要因が鋼材腐食速度に与える影響	34
5.2 現場計測手法を活用した耐久性設計と維持管理の連係	34

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

港湾の RC 構造物は、塩害による劣化が最も深刻な課題である。中性化、ASR や凍害などとの複合劣化も生じるが、構造物の健全度を支配するのは、塩害による鋼材腐食が最も重要な視点となる。なぜなら、腐食ひび割れの発生や、構造物の耐力低下（構造安全性）は、鋼材の腐食量によって評価することが可能であることによる。最近では、鋼材の腐食状況が分かれば構造物の耐力をシミュレートすることも可能であるが、根本となる鋼材腐食の状況を得ることが極めて難しい状況にある。

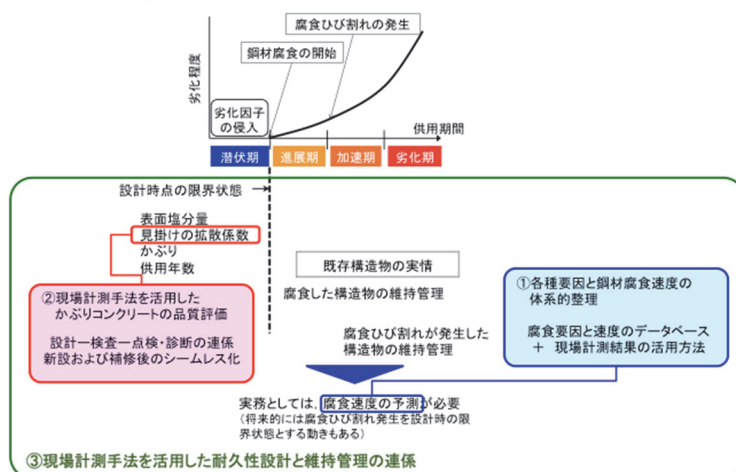
設計—施工後の検査—維持管理の連係を実現するためには、コンクリート構造物の耐久性を照査・検査するとき用いる指標の統一化が重要となるが、現状では設計—施工—維持管理が連係していない状況にある。また、性能規定化が導入される前の構造物の設計では、設計で想定している耐久性が曖昧な状態にある。

塩害による鋼材の腐食速度を把握するため、主要因である鋼材表面の塩分濃度、pH、酸素濃度、含水率や、主要因の濃度を支配する、かぶりコンクリートの品質と環境外力を変化させ、これらの関係を定量的に把握し体系化する。また、設計—施工—維持管理の連係による合理的な維持管理を行うため、現場計測可能な指標である表層透気係数を用いて、施工によるかぶりコンクリートの品質変動に及ぼす影響を把握する。また、中性化および塩害の耐久性指標（特性値）である中性化速度係数、および塩化物イオンの見かけの拡散係数との関係を検討することで、竣工時検査結果を維持管理で活用できる枠組みを構築するための基礎情報を整備することを目的とした。

1.2 研究の概要

本研究では、現場計測可能な物理化学的な指標と、耐久性設計、検査、維持管理（劣化予測）との定量的な関係を体系的に整理するため、①として、各種要因が鋼材腐食速度に与える影響の把握をする。次に②として、施工や補修による影響として、打重ねや表面含浸工法による影響を表面透気試験から検討する。また、コンクリートの表層透気係数と、中性化速度係数や塩化物イオンの見かけの拡散係数との関係性に対して検討する。①、②の結果を踏まえ、③として表層透気係数と耐久性指標の関係、および各種特性値を用いて耐久性との関係を重回帰分析により整理した。研究全体の位置づけを図に示す。

RCの耐久性設計と維持管理(塩害)

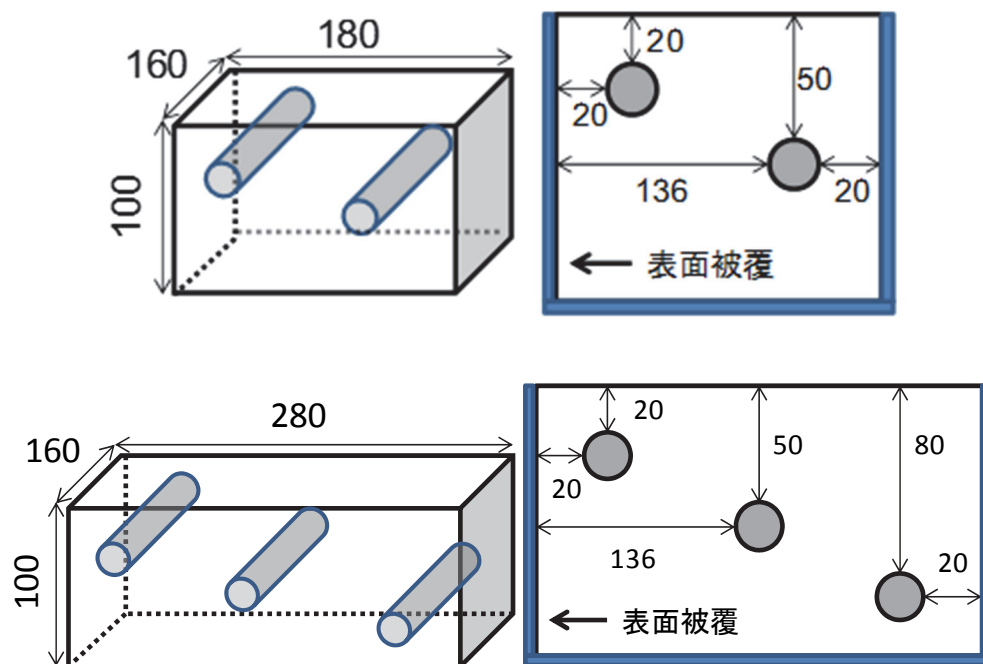


2. 各種要因と鋼材腐食速度の体系的整理

2.1 試験体概要および測定項目

鋼材表面の塩分濃度，pH，酸素濃度および水分量を変化させた場合の鋼材腐食速度を把握するため，材料，配合，かぶり，環境条件を変化させた供試体の作製を行った．試験体形状を図－1 に示し，試験に用いた示方配合を表－1 に示す．試験体は $100\times 160\times 180\text{mm}$ ， $100\times 160\times 280\text{mm}$ のコンクリート角柱内部に $\phi 16$ の磨き丸鋼を埋め込んだものである．かぶりは 20，50mm を基本とし，一部の試験体は 20，50，80mm と設定した．

試験体は打込み 1 日後に脱型し，その後 14 日間の水中養生，塩化ナトリウムを混入させた試験体は塩化物イオン濃度が同濃度の塩水にそれぞれ浸せきさせた．養生終了後，測定面以外の 5 面をエポキシ樹脂で被覆し，乾湿繰り返しと連続浸せきの 2 つの環境で水分供給を行った．乾湿繰り返しは，温度 20°C ，湿度 60% の環境に 3 日気中乾燥，4 日塩水浸せきをした．



図－1 供試体形状および鉄筋配置位置(mm)

表－1 示方配合

種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							AE	AE 減水
			W	C	BSF	石膏	FA	S	G	C×%	
OPC	40	42	175	438	—	—	—	717	1016	0.008	—
	50	45		350	—	—	—	801	1005	0.005	—
	60	45		292	—	—	—	823	1032	0.006	—
BB	40	45		241	188	8	—	760	953	0.006	0.18
	50	46		193	151	7	—	812	978	0.011	—
	60	45		160	126	6	—	818	1026	0.008	—
FA	40	45		372	—	—	66	759	953	0.06	—
	50	49		298	—	—	53	865	924	0.026	—
	60	52		248	—	—	44	945	895	0.026	—

コンクリート中の鋼材腐食の状態を把握するため、電気化学測定法を用いた。測定項目は、自然電位と分極曲線とした。

自然電位は写真－１に示すように、携帯型鉄筋腐食診断機（四国総合研究所 SRI-CM-III）を用いて JSCE-E 601-2007 に準じて測定した。通常、電気化学的測定は測定対象のコンクリートを湿潤状態にして実施される。そのため測定環境条件は、湿潤状態および測定環境温度 20℃を基準とし、水中浸せき終了後に測定した。

分極曲線測定は写真－２に示すように、ポテンショ・ガルバナスタットを用いた。測定条件として、浸せきサイクル終了後の湿潤状態の試験体を用いて、測定環境温度 20℃で測定した。測定状況を写真－３に示す。照合電極として銀塩化銀電極を用いて、掃引速度は 60mV/min とした。また、測定値は IR ドロップの影響を含んでいる。



写真－１ 携帯型鉄筋腐食診断機



写真－２ ポテンショ・ガルバナスタット

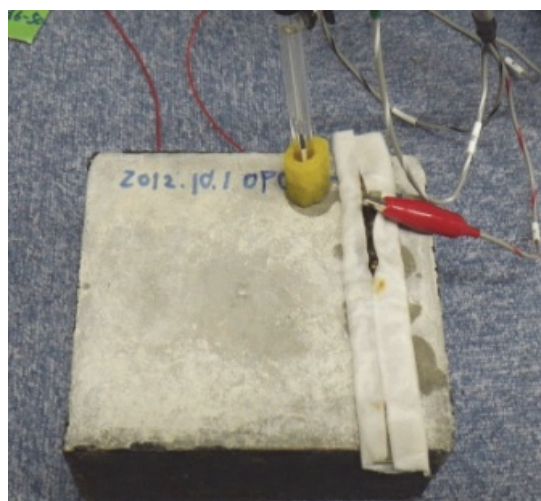


写真-3 測定状況

2.2 自然電位の測定結果

(1) 塩化物イオン濃度の影響

図-2, 3, 4 に, 塩化物イオン量が自然電位に及ぼす影響を, 結合材種類 (OPC: 普通ポルトランドセメント, FA: フライアッシュ, BB: 高炉スラグ) 毎に示す. なお, かぶり 20mm, 乾湿繰り返し条件下の試験体の結果である. 図の凡例は塩化物量 (kg/m^3) を示している. OPC と FA は, 塩化物量の増加に伴い自然電位は卑になる傾向である. 塩化物イオンの少ない 0, 1.2 kg/m^3 では -100mV, 10.8 kg/m^3 は -400mV で推移した. また, OPC の塩化物イオン濃度が 10.8 kg/m^3 や FA では, 材齢が経過することで電位が貴化する傾向が見られた. BB は, 塩化物イオン濃度の違いによる明確にみられず, -500 ~ -600mV で推移している. このことは, 塩化物イオンがフリーデル氏塩として固定されることで, 鋼材近傍の自由塩化物イオン濃度が少ないことや, スラグの酸化によりコンクリート中の溶存酸素が消費されたため, 自然電位が塩化物イオン濃度に関わらず卑になったと考えられる. 今後も継続した測定を行うことが必要である.

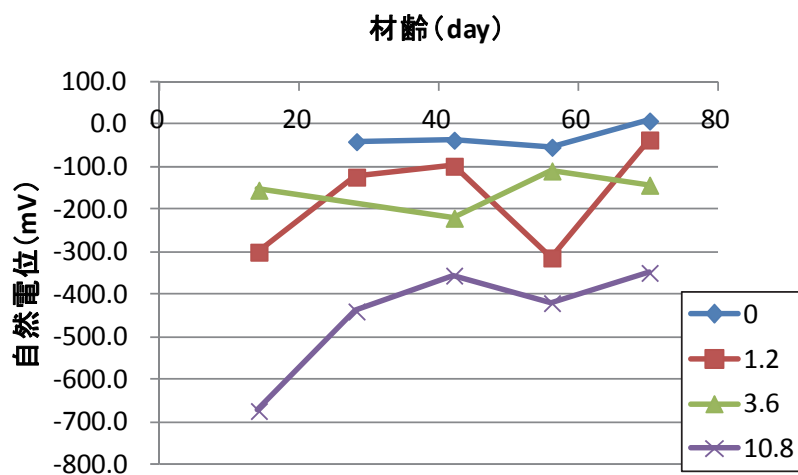


図-2 OPC の自然電位

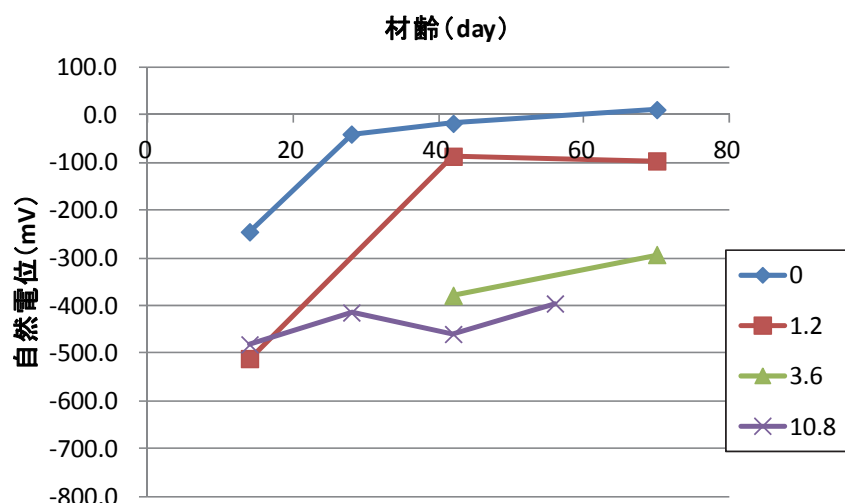


図-3 FAの自然電位

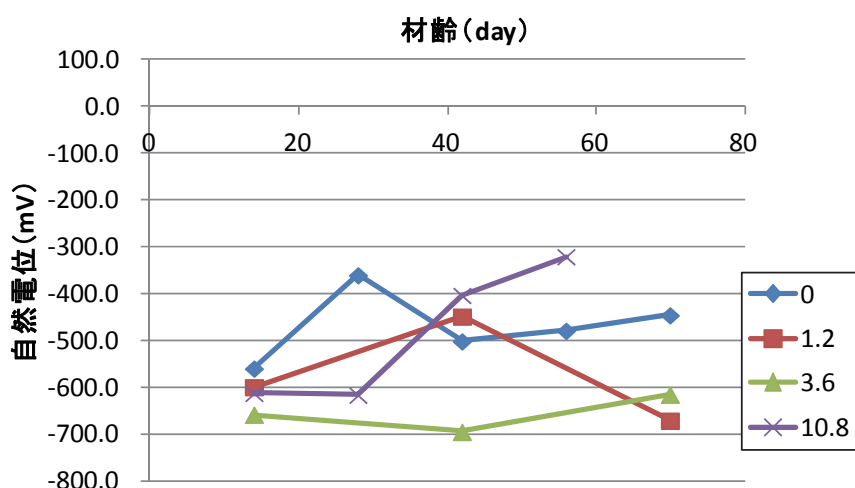
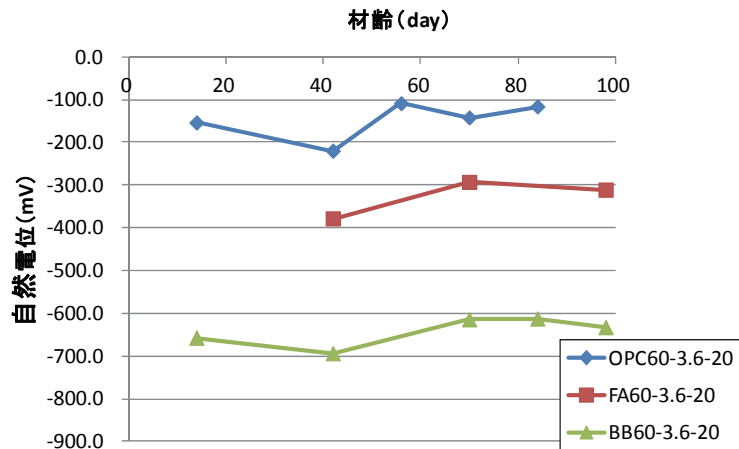


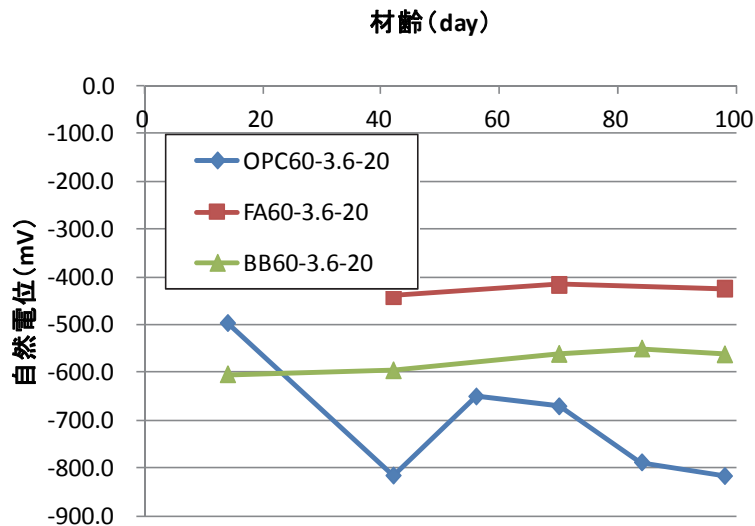
図-4 BBの自然電位

(2) 環境の影響

図-5, 6 に環境条件が乾湿繰り返し、連続浸せきの結果を示す。図の凡例は、結合材種類と水結合材比(%)—塩化物量(kg/m³)—かぶり(mm)を示している。乾湿繰り返しでは、自然電位が卑な順に、BBは-600mV、FAは-300mV、OPCは-100mVとなった。連続浸せきでは、自然電位が卑な順に、OPCは-800mV、BBは-600mV、FAは-400mVとなった。環境条件による影響は、FAとBBでは見られず、ほぼ同程度の自然電位となった。一方、OPCは連続浸せきをすることで、-700mV電位が卑になった。このことは、FAとBB試験体の組織がOPCよりも緻密であったことから、環境の影響が小さかったと考えられる。また、コンクリートの空隙が水で満たされて酸素の供給が著しく悪くなり、鋼材の電位が卑になるが、鋼材の腐食速度は酸素の拡散速度に律速されるため、腐食速度は小さいと考えられる¹⁾。その他、含水率の影響を検討していないため、今後は含水率の測定も行う予定である。



図－5 乾湿繰り返し



図－6 連続浸せき

2.3 Tafel 近似曲線による腐食の検討

Tafel 外挿法より，Tafel 近似曲線を導出し，各種要因が近似曲線に与える影響について検討した．なお，近似曲線の勾配が小さくなるほどコンクリート中の鋼材は，腐食していると考えられる．

(1) 各示方配合における塩化物イオン濃度の影響

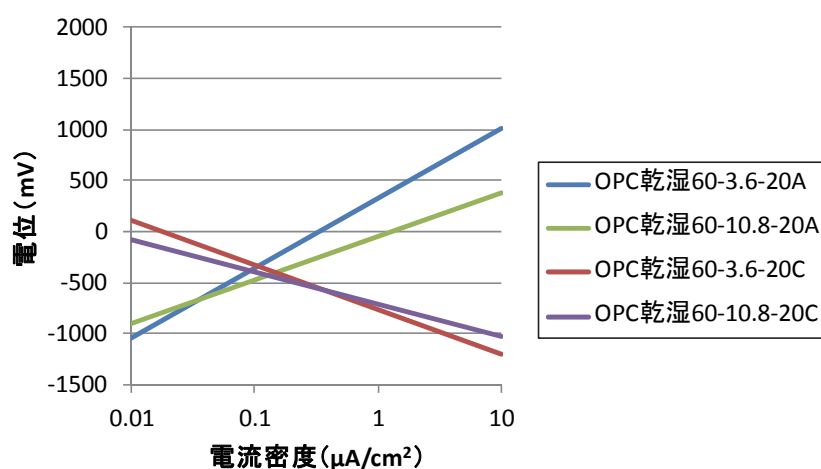
図－7～12 に Tafel 近似曲線を示す．図の凡例は結合材種類と環境，水結合材比 (%)－塩化物量 (kg/m^3)－かぶり (mm) と勾配の種類 (A：アノード勾配，C：カソード勾配) を示している．

OPC の乾湿繰り返しは，塩化物イオン濃度が高くなることで，アノード勾配が変化することで，腐食電流密度が大きくなることが分かる．連続浸せきでは，塩化物イオン濃度が 3.6kg/m^3 の腐食電流密度が大きくなった．環境が腐食速度に与える影響を比較すると，塩化物イオン濃度が 3.6kg/m^3 の腐食電流密度が最も大きくなった．既往の研究で

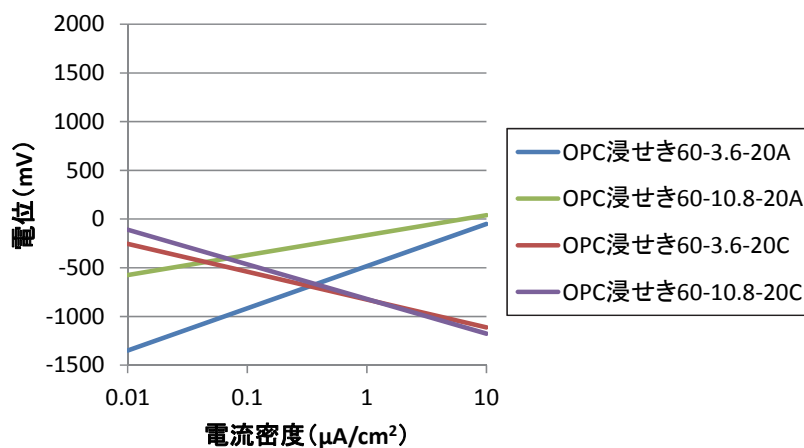
は、塩化物イオン濃度が高く、腐食の進行に必要な酸素の供給が多い、乾湿繰り返しの腐食電流密度が大きくなる結果であったが、本研究では逆の傾向となった。今後も継続した測定を行うことで、測定結果の妥当性を検討する。

BB の乾湿繰り返しは、塩化物イオン濃度に関わらず、腐食電流密度は同程度となった。連続浸せきでは、塩化物イオン濃度 3.6kg/m^3 の腐食電流密度が小さいことが分かる。塩化物イオンの固定化や、組織が緻密なため酸素の供給量が少ないことで、塩化物イオン濃度や環境による影響が小さいと考えられる。

FA では、環境の影響に関わらず、塩化物イオン濃度が高くなることで腐食電流密度が大きくなり、乾湿繰り返しにより大きくなった。全体的な傾向として、塩化物イオン濃度によりアノード勾配が変化した。また、腐食電流密度は概ね $0.1\sim 1\ \mu\text{A/cm}^2$ となった。



図－7 OPC 乾湿繰り返し



図－8 OPC 連続浸せき

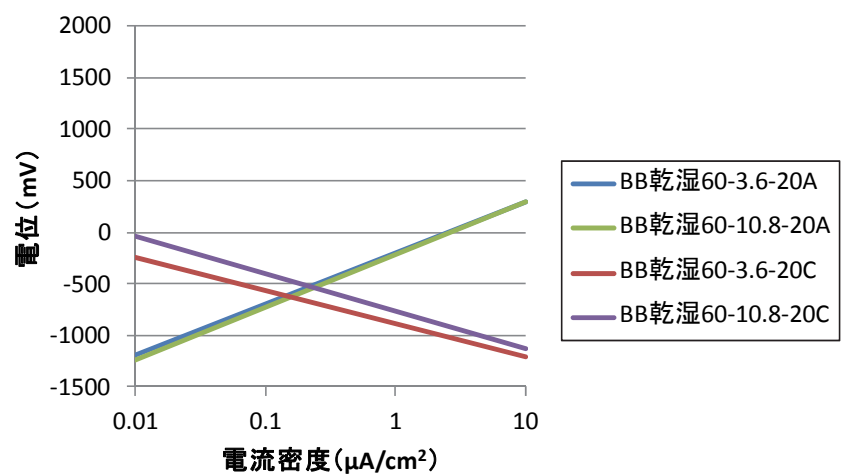


図-9 BB 乾湿繰り返し

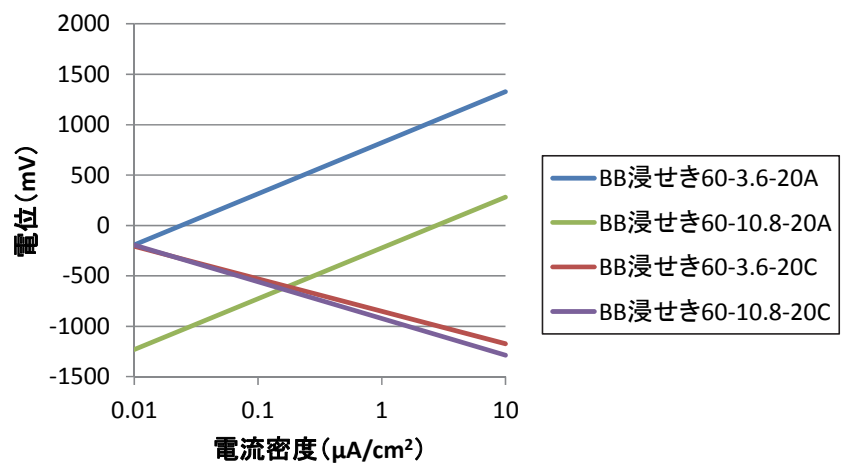


図-10 BB 連続浸せき

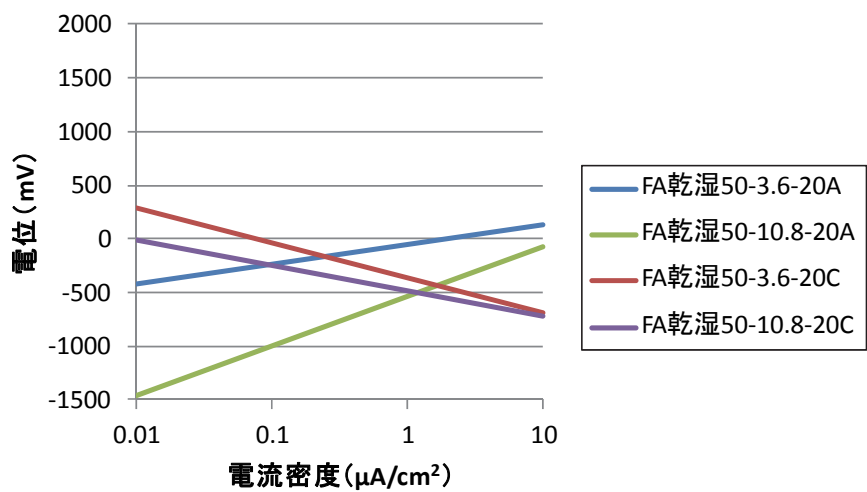
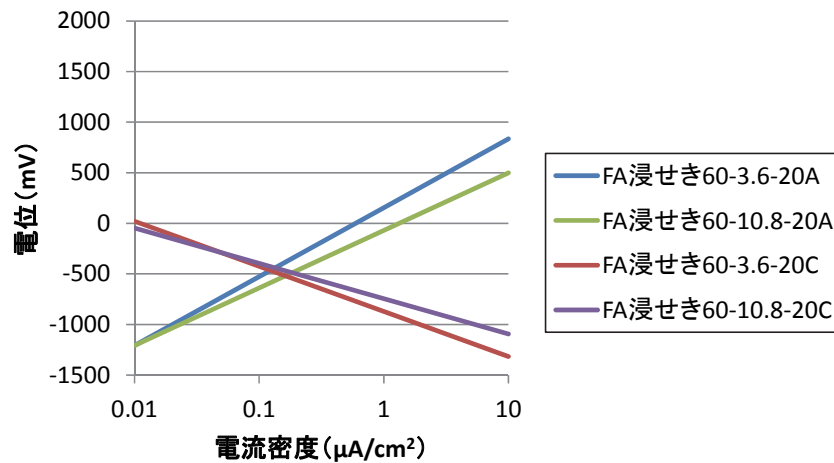


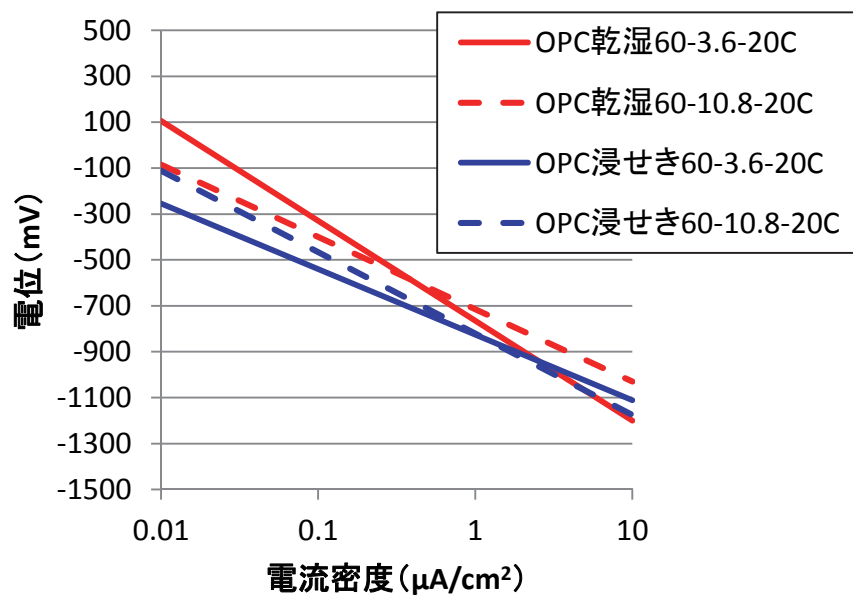
図-11 FA 乾湿繰り返し



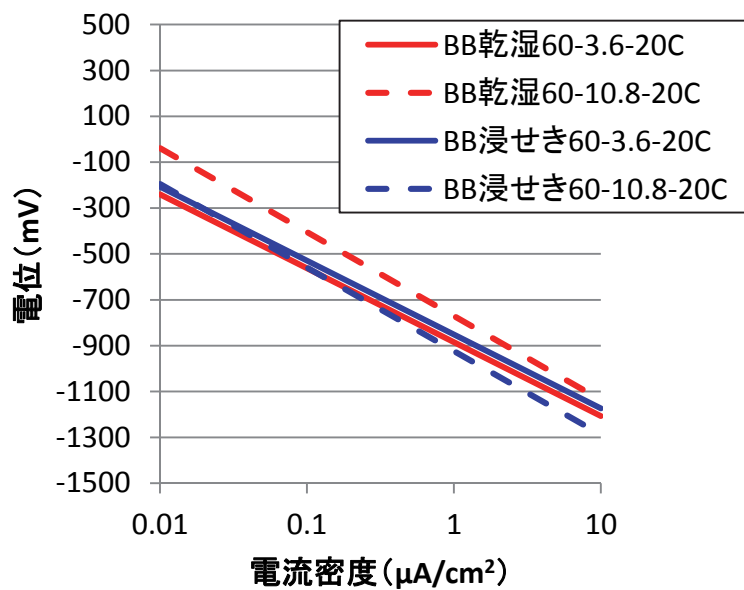
図－12 FA 連続浸せき

(2) 環境のカソード勾配への影響

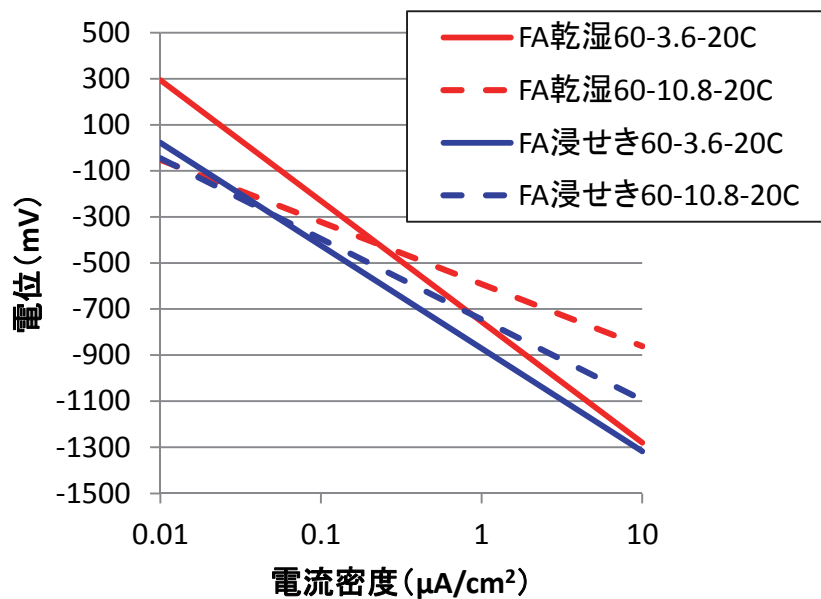
図－13, 14, 15 に環境条件の違いによるカソード勾配を示す．OPC, FA は環境条件がカソード勾配に与える影響は見られず，塩化物イオン濃度によりカソード勾配が変化することが分かる．一方，BB は環境条件や塩化物イオン濃度によらず，カソード勾配はほぼ同程度となった．このことから，コンクリート中の鋼材腐食を予測する場合，BB の影響を考慮する必要があると考えられる．



図－13 OPC カソード勾配



図－14 BB カソード勾配



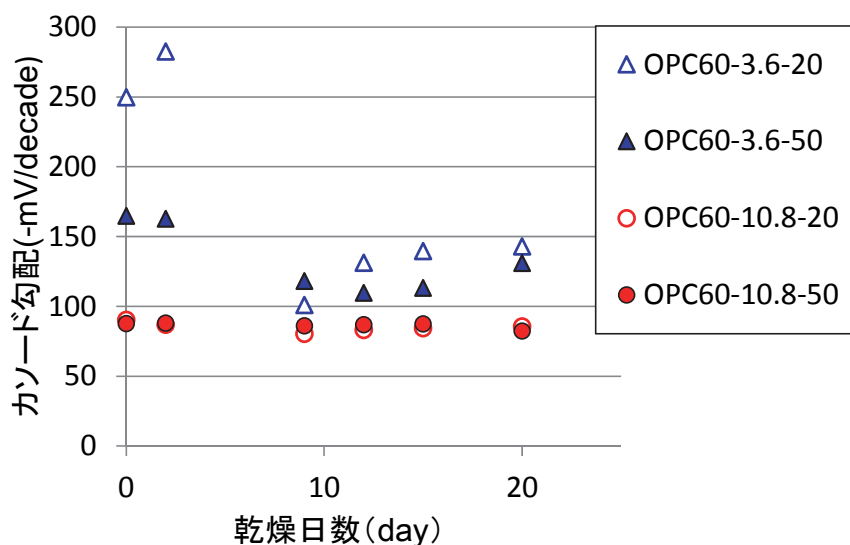
図－15 FA カソード勾配

2.4 乾燥期間の影響

カソード勾配に変化が見られた OPC に着目し、かぶりや乾燥によるカソード勾配への影響を検討する。カソード勾配は水および酸素の供給量により変化するため、湿潤状態の試験体を連続乾燥させ、乾燥期間がカソード勾配の変化に与える影響について検討した。図－16 に乾燥によるカソード勾配の変化を示す。凡例は塩化物量(kg/m³) - かぶり(mm)を示し、水結合材比 60%の OPC 試験体の結果を示す。

乾燥期間が長くなると、空隙中の水分が乾燥することで酸素の供給量が増加し、酸素と水分によりカソード勾配が小さく点があると考えられる。図より、カソード勾配は一定値に収束していることがわかる。これより、乾燥によるカソード勾配の変化は小さいことが分かった。また、塩化物イオン濃度 10.8 kg/m^3 のカソード勾配は、乾燥によらずほぼ一定値となった。

実際に水および酸素の供給量を測ることは難しく、今後はコンクリート組織に着目し、空隙量や測定時の含水状態を含めた検討が必要であると考ええる。



図－16 乾燥の影響

3.現場計測手法を活用したかぶりコンクリートの品質評価

新設構造物に対応するため，打重ねがコンクリートの表層品質に及ぼす影響を検討する．そこで，水セメント比，打重ねるコンクリートの高さを変えた試験体を用いて，表層透気係数および中性化深さの関係を把握するために実施した実験概要を以下に示す．

3.1 試験体概要および測定項目

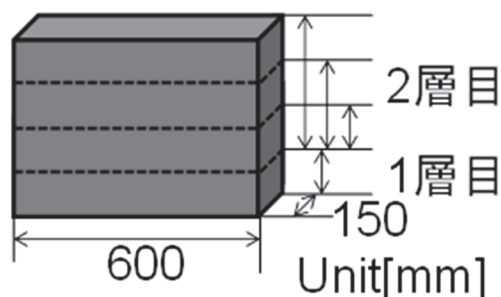
コンクリートの示方配合を表－2に示す．コンクリートの透気性に及ぼす単位水量の影響が大きいことに着目し，全ての水セメント比で単位水量を一定とした．目標スランプを $10\pm 2.5\text{cm}$ ，目標空気量を $4.5\pm 1.5\%$ に設定し，目標のフレッシュ性状が得られるように，s/aおよび化学混和剤の使用量を調整した．W/Cを35，40，50，60%の4配合に設定した．

表－2 示方配合

Gmax (mm)	Air (%)	SL (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				単位量(g/m ³)	
					W	C	S	G	A ₁	A ₂
20	4.5	10.0	60	45	175	292	823	1032	14.6	—
			50	45		350	801	1005	17.5	
			40	42		438	717	1016	35.0	
			35	45		500	744	934	10.0	125

打重ねの影響を把握するために，打重ねの無い試験体と，2層で打ち込む試験体の2種類を作製した．本研究では，打重ね時間間隔を示方書に記載された標準の範囲内である1時間とし，打重ね処理は行わずに下層コンクリートに打重ねを行った．試験体概要を図－17に示す．各層の高さを表－3に示す．試験体の寸法は幅600×奥行き150mmを一定とし，2層目の高さを変えた角柱供試体を用いた．棒状バイブレーターを用いて3か所各5秒間締固め，上層打ち込み時には下層へ挿入せずに締固めた．なお，コンクリート標準示方書では打重ね上層と下層が一体となるようにバイブレーターを下層に挿入するように施工標準が記載されている．表面気泡の発生を防ぐため，スペーシング処理した後に型枠振動機で振動させた．

打設後材齢5日で型枠から脱型し，材齢56日まで恒温室（温度20℃）で気中養生を施した．材齢28日後から各試験を順次開始した．



図－17 試験体概要

表－3 層ごとの高さ

	1 層目 (mm)	2 層目 (mm)
打重ね有り	150	0, 150, 300, 450
打重ね無し	300, 450, 600	—

(1) 表面透気試験

表面透気試験は、打設後 5 日で脱型し、材齢 28 日まで気中（温度 20℃，R.H.60～80％でコントロールされていない）養生を施し、表面透気試験を行った。

(2) 中性化促進試験

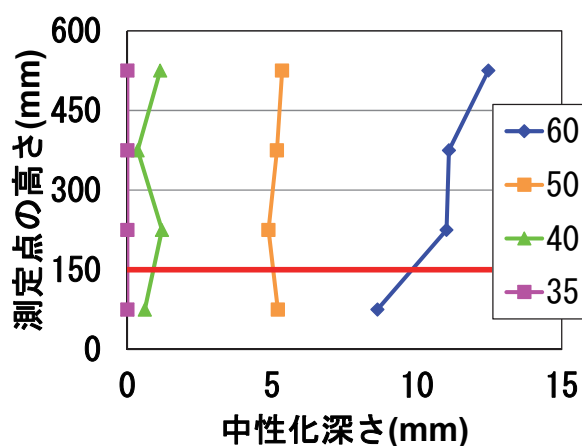
中性化促進試験は、材齢 56 日で表面透気試験後に表層透気試験位置と同位置からφ100mmのコアを採取したものを供試体とし、打設側面であった面以外をアルミテープでシールした。JIS A 1153 に準拠して、試験環境を温度 20℃，R.H.60%，CO₂ 濃度 5%とし、中性化促進期間後（28 日）に割裂し、割裂面にフェノールフタレイン法を用いて中性化深さを測定した。試験面（打設側面）1 面の中性化深さを各 5 点計測したものの平均値とした。

3.2 測定高さによる中性化深さへの影響

(1) 打重ね無し

図－18 に水セメント比を変化させた試験体の測定高さごとの中性化深さを示す。凡例は水セメント比である。図中の赤線は打重ね位置である。

全体として水セメント比が小さいほど中性化深さも小さくなる傾向がある。これは、水セメント比が小さいほど緻密な組織を形成し、気体の透過抵抗性が向上することや、単位体積あたりの CH 含有量が多くなり、CO₂ の反応消費に対する抵抗性が高いことが理由であると考えられる。また、水セメント比 60%は、最下層と最上層の中性化抵抗性に差異が生じている。中性化抵抗性に差異が生じる原因は、ブリーディング等の材料分離が原因と考えられる。水セメント比が 50%以下の配合では、上下層での中性化抵抗性の差異はほぼ生じなかった。



図－18 測定高さごとの中性化深さ(水セメント比の変化)

(2) 打重ね有り

図-19 に、打重ね有りと打重ね無しの試験体（水セメント比 60%）の測定高さごとの中性化深さを示す。凡例は 1 層目高さ(mm)-2 層目高さ(mm)を示している。

打重ねの有無に関わらず、測定点の高さが高いほど中性化深さは大きく、測定点の高さが低いほど中性化深さは小さくなった。下層部では上層コンクリートの自重による圧密や、ブリーディングによる脱水効果があり、上層と比較して中性化抵抗性が向上したと考えられる。また、上層部では下層部からのブリーディング水の上層により、見かけの水セメント比が増加し、下層部と比較して中性化抵抗性が低くなったものと考えられる。

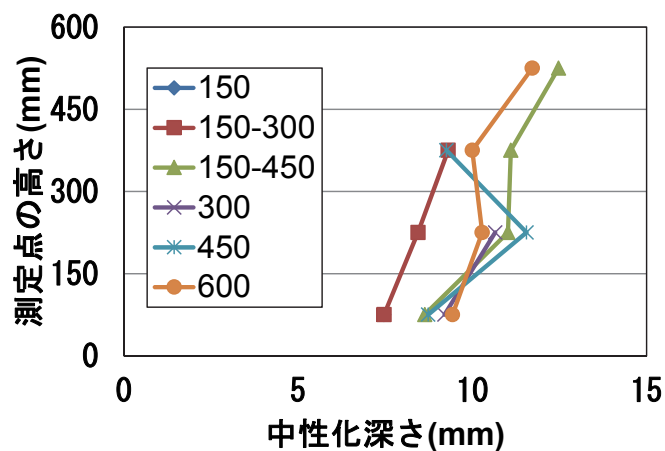


図-19 測定高さごとの中性化深さ(W/C=60%)

3.3 測定高さによる表層透気計数への影響

(1) 打重ね無し

図-20 に、水セメント比を変化させた試験体の測定高さごとの表層透気係数を示す。凡例は水セメント比、図中の赤線は打ち重ねた位置を示している。

配合によらず、測定高さの増加に伴い、表層透気係数が概ね大きくなるのがわかる。これは、ブリーディングによって表層品質の低下が生じたためと考えられる。

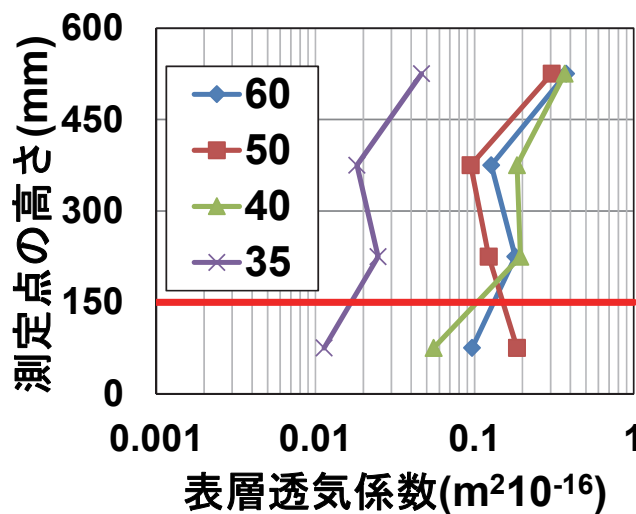


図-20 測定高さごとの表層透気係数(水セメント比の変化)

(2) 打重ね有り

図-21 に試験体高さ 600mm, 水セメント比 60%の測定高さごとの表層透気係数を示す。凡例は1層目高さ(mm)-2層目高さ(mm)である。

打重ねがある試験体では、1層目高さが150, 300mmの何れの場合でも、測定点の高さが高くなるほど表層透気係数が大きくなる傾向がある。ここで、打重ね1層目の高さの違いについて考察する。300-300の最上層の表層透気係数は、150-450の最上層の表層透気係数より大きい結果となっている。阿部ら⁴⁾の研究では、打設高さが高いほどブリーディング量は大きくなると報告している。このことから、300-300では打重ね面に滞留するブリーディング水が150-450と比較して多く、滞留したブリーディング水が型枠界面を上昇するため、最上層の表層透気係数は著しく大きくなったと考えられる。

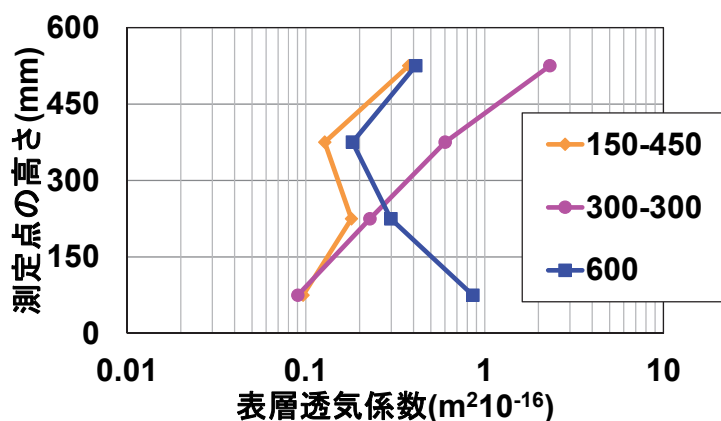


図-21 測定高さごとの表層透気係数(W/C=60%)

3.4 中性化深さと表層透気係数の関係

図-22 に、材齢 28 日での表層透気係数と中性化速度係数の関係を示す。概ね表層透気係

数の増加に伴い、中性化速度係数も増加する傾向が確認された。傾向から外れているのは、打重ね無し 450 の測定高さ 0~150mm, 300~450mm, 600 の測定高さ 0~150mm である。表層透気係数と中性化速度係数が対応しないケースとして、打込み高さが高く、打重ねを行っていないもの、かつ、測定高さが低い場合であると考えられる。

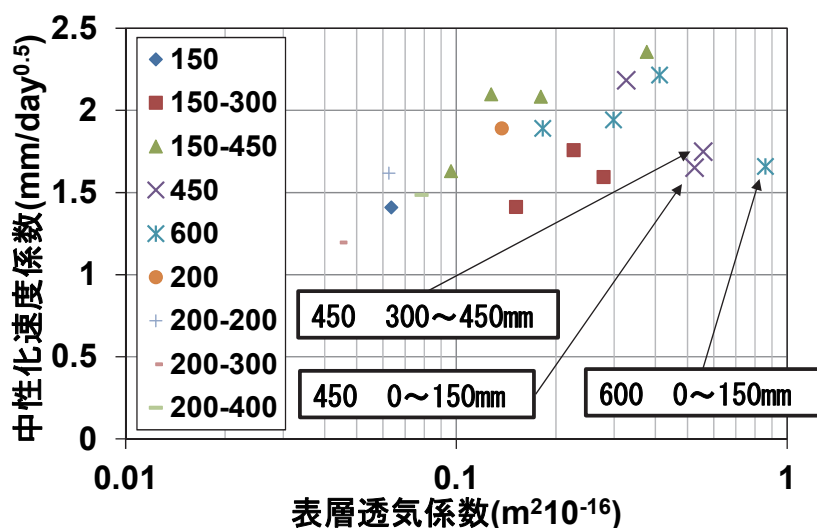


図-22 中性化速度係数と表層透気係数の関係

3.5 けい酸塩系表面含浸工法がコンクリートの表層品質に与える影響の把握

補修の影響として、けい酸塩系表面含浸工法が、コンクリートの表層組織の改質効果に及ぼす影響を検討するため、混和材を使用した試験体を用いて、表層透気係数、中性化深さ、および塩化物イオン浸透深さの関係を把握するために実施した実験概要を以下に示す。試験の流れについて図-23 に示す。



図-23 試験の流れ

表-4 に使用した 4 種類の含浸材の種類および塗布量を示す。また、含浸材の反応補助材として水酸化カルシウム水溶液（以下、補助材）を用いた。含浸材の塗布には刷毛を用いて、製品の規定に沿って塗布した。なお、補助材の塗布方法には規定がないため、含浸材のコンクリートへの浸透を抑制させないために、含浸材塗布後に補助材を塗布した。図-24 に含浸材の塗布方法を示す。

結合材に普通ポルトランドセメント、フライアッシュ（JIS A 6201 II 種灰）、高炉スラグ微粉末を用いた。また、表-5 に示す配合で、スランプ $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ のコンクリートを作製した。

表－4 使用した含浸材の種類

略称	主成分	塗布量 (g/m ²)
Na	けい酸ナトリウム	120
Li	けい酸リチウム	120
Na+K	けい酸ナトリウム＋カリウム	120
Li+K	けい酸リチウム＋カリウム	120
補助材	飽和水酸化カルシウム水溶液	120

塗布工程													
補助材 無し	下地 処理	→	含浸材 塗布	→	散 水	→	含浸材 塗布	→	散 水				
補助材 有り	下地 処理	→	含浸材 塗布	→	補助材 塗布	→	散 水	→	含浸材 塗布	→	補助材 塗布	→	散 水

* 含浸材塗布，補助材塗布，散水の後に 1 時間の乾燥期間を設けた

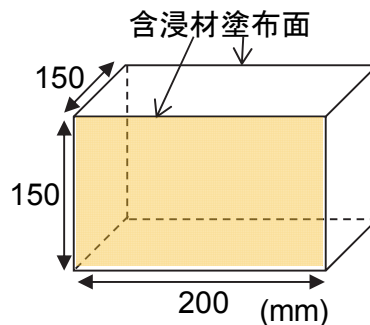
図－24 含浸材の塗布方法

表－5 示方配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
			W	C	FA	BS	石膏	S	G	AE
N	60	45	175	292	—	—	—	804	1025	C×0.6%
FA	60	52	175	248	44	—	—	923	888	(C+F)×1.3%
BB	60	45	175	160	—	126	6	799	1018	(C+BSF)×0.8%

実験に使用した試験体形状を図－25 に示す．150×150×200mm の角柱供試体を用いて，試験体打設後の水中養生 14 日が終了した後に，含浸材を打設側面（2 面）に塗布した．含浸材塗布後，水中養生 14 日，封緘養生後 7 日後に気中養生 7 日，気中養生 14 日の 3 種類の養生を行った後に，含浸材を塗布した面以外をアルミテープでシールしたものを試験体とした．

測定は，2.1 の（1），（2）と同様に表面透気試験，中性化促進試験を行った．

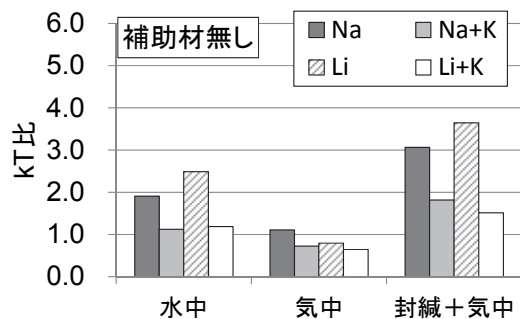


図－25 供試体形状

(1) kT による改質効果の検討

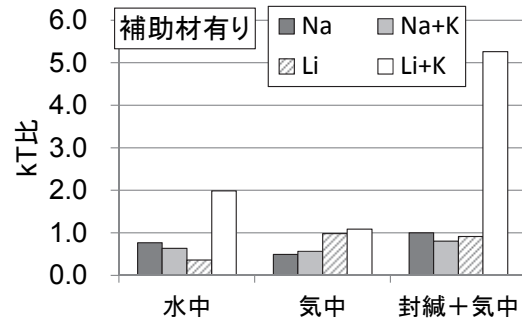
図-26、図-27 に OPC における補助材無し、補助材有りの、無塗布に対する kT 比を示す。補助材無しでは、含浸材の種類によらず気中養生を行うことで、無塗布よりも kT 比が小さくなった。一方、水中養生や封緘養生+気中養生では、無塗布と比較して同程度か大きくなった。

補助材有りにおいて、けい酸リチウムとカリウム混合 (Li+K) を除いて、補助材無しとは異なり、含浸材の種類によらず水中養生を行うことで、無塗布よりも kT 比が小さくなった。補助材である水酸化カルシウムを塗布することにより、含浸材の反応が促進され、表層組織が緻密化したことが考えられる。よって、水中養生においても含浸材の溶出が抑えられ、改質効果が見られたのではないかと考えられる。含浸材の種類に注目すると、けい酸ナトリウム (Na)、けい酸ナトリウムとカリウム混合 (Na+K) では、水中養生と気中養生という水分供給の異なる養生方法において、改質効果が見られた。



(OPC, 中性化期間 56 日)

図-26 補助材無しの kT 比

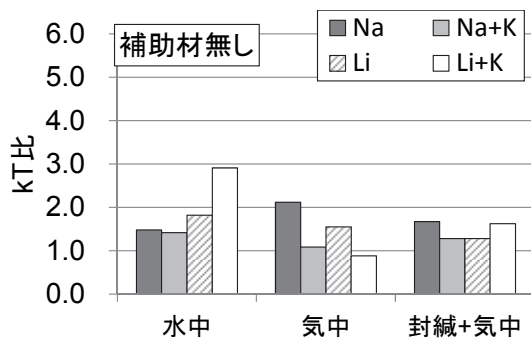


(OPC, 中性化期間 56 日)

図-27 補助材有りの kT 比

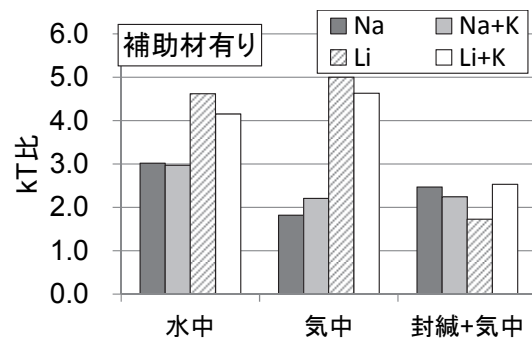
図-28、図-29 に FA における補助材無し、補助材有りの kT 比を示す。補助材無しでは、気中養生を行うことで、無塗布と同程度の kT 比のものもあった。ここで、無塗布の kT は気中養生で大きくなったため、気中養生の kT 比は小さくなった。一方、水中養生や封緘養生+気中養生の kT は、無塗布と比較して大きくなった。

補助材有りでは、養生方法によらず無塗布よりも大きくなったが、封緘養生+気中養生の場合に、他の養生方法に比べて kT 比は小さくなる傾向が見られた。含浸材の種類による違いは見られず、無塗布より大きいことがわかる。けい酸リチウム (Li)、けい酸リチウムとカリウム混合 (Li+K) において、特に大きくなる場合があった。



(FA, 中性化期間 56 日)

図-28 補助材無しの kT 比

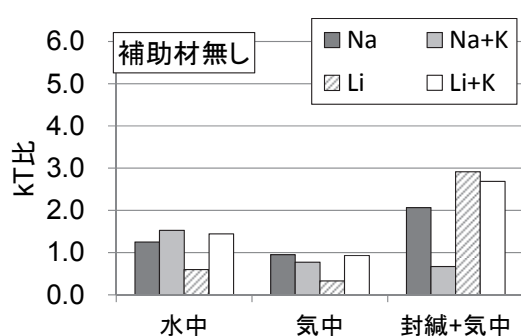


(FA, 中性化期間 56 日)

図-29 補助材有りの kT 比

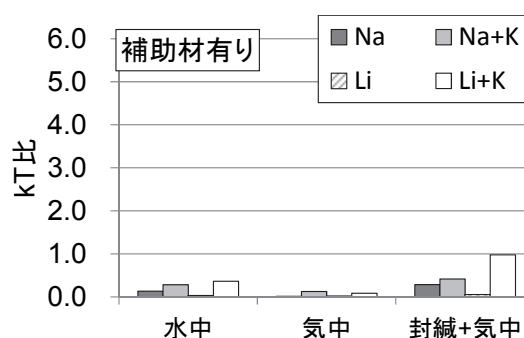
図-30, 図-31 に BB における補助材無し, 補助材有りの kT 比を示す. 補助材無しでは, 含浸材の種類によらず気中養生を行うことで, 無塗布よりも kT 比が小さくなった. 一方, 封緘養生+気中養生では, 無塗布と比較して同程度が大きくなった. ここで, 本研究で用いている kT 比は, 無塗布に対する効果の程度であるため, 無塗布の場合の気中養生では kT が大きい, 塗布した場合の気中養生では, 他の養生に比べてそれほど大きくないため, 結果として気中養生の kT 比は, ほとんどの場合で 1 を下回っている. 一方, 水中養生や封緘養生では, 水和反応が進むことによる組織の緻密化の影響が, 含浸材の改質効果よりも大きくなったためと考えられる.

補助材有りにおいて, 養生方法や含浸材の種類によらず kT 比は無塗布よりも小さくなった. これは, 微細ひび割れが補助材と含浸材による改質効果により閉塞したことによるためと考えられる.



(BB, 中性化期間 56 日)

図-30 補助材無しの kT 比



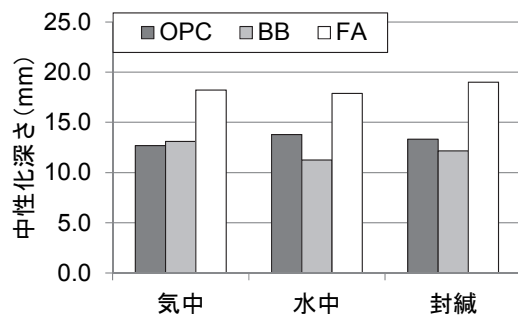
(BB, 中性化期間 56 日)

図-31 補助材有りの kT 比

(2) 中性化促進試験による改質効果の検討

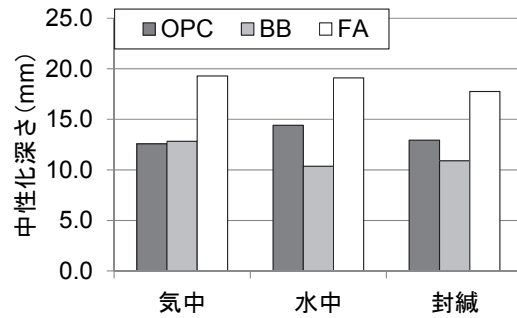
図-32, 図-33 に補助材無しの中性化深さ, 図-34, 図-35 に補助材無しの中性化深さ比を示す. 中性化深さから, けい酸ナトリウム (Na) を塗布した場合の中性化深さは, FA が最も大きくなった. また, いずれの養生方法でも FA の中性化深さが大きくなった. 水中養生, 封緘養生+気中養生では BB に塗布することで中性化深さは小さくなった. ここで, FA はポズラン反応で, 水酸化カルシウムが消費されたことにより, 中性化深さが大きくなったと考えられる. 中性化深さ比では, OPC の水中養生を除いて, 無塗布と同程度となった. このことから, 含浸材塗布による養生の効果は, 小さいと考えられる.

けい酸リチウム (Li) を塗布した場合は, 中性化深さから, けい酸ナトリウム (Na) と同様の結果になった. 中性化深さ比においても, けい酸ナトリウム (Na) と同様の結果になった. ただし, BB にけい酸リチウム (Li) を塗布後, 封緘養生+気中養生を行うことで, けい酸ナトリウム (Na) 塗布に比べ, 含浸材の改質効果が大きくなった.



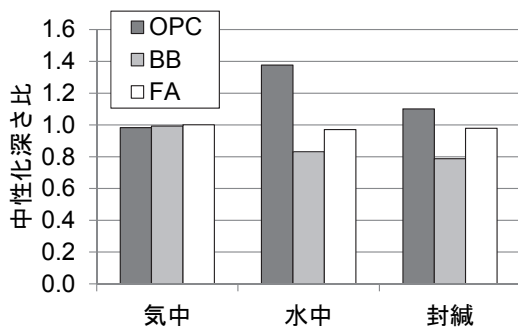
(Na 塗布, 中性化期間 56 日)

図-32 補助材無しの中性化深さ



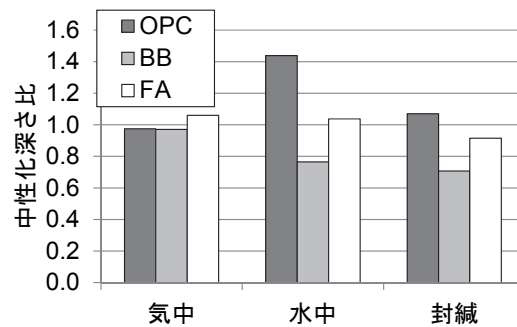
(Li 塗布, 中性化期間 56 日)

図-33 補助材無しの中性化深さ



(Na 塗布, 中性化期間 56 日)

図-34 補助材無しの中性化深さ比

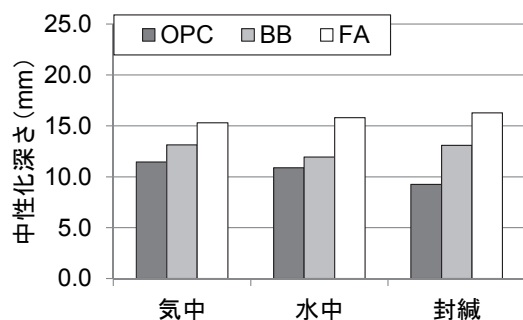


(Li 塗布, 中性化期間 56 日)

図-35 補助材無しの中性化深さ比

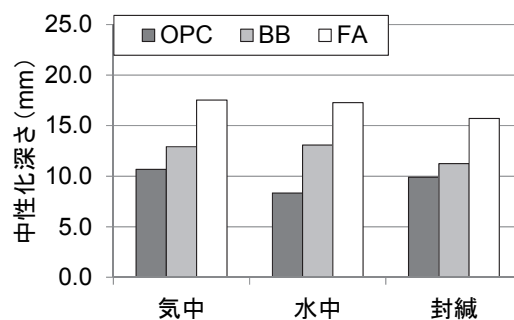
図-36, 図-37 に補助材有りの中性化深さ, 図-38, 図-39 に補助材有りの中性化深さ比を示す。けい酸ナトリウム (Na) を塗布した場合の中性化深さは、養生方法によらず FA が最も大きくなった。中性化深さ比では、含浸材塗布後の養生として、封緘養生+気中養生を行うことで、最も改質効果が見られた。これは、適度な水分の供給環境と、水酸化カルシウムが供給されたためと考えられる。

けい酸リチウム (Li) を塗布した場合は、けい酸ナトリウム (Na) の結果と同様な傾向の中性化深さとなった。中性化深さ比では、結合材の種類による改質効果の差は見られるが、全ての結合材で含浸材の改質効果があった。特に、封緘養生+気中養生を行うことで、改質効果が見られた。これは、けい酸リチウム (Li) の改質に必要な、反応初期での水酸化カルシウムの供給や、含浸材の初期の反応後に乾燥期間があるため、けい酸リチウム (Li) が改質しやすい環境となったと考えられる。



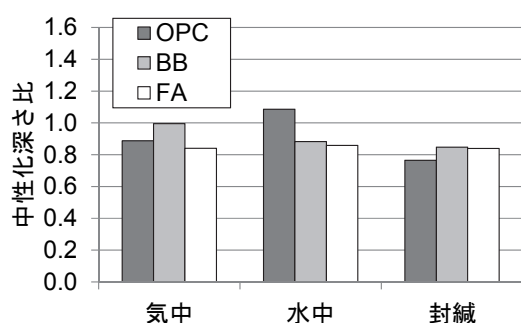
(Na 塗布, 中性化期間 56 日)

図-36 補助材有りの中性化深さ



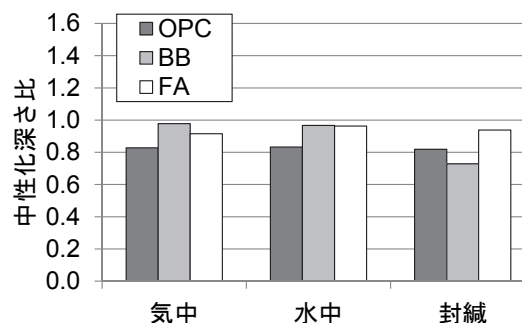
(Li 塗布, 中性化期間 56 日)

図-37 補助材有りの中性化深さ



(Na 塗布, 中性化期間 56 日)

図-38 補助材有りの中性化深さ比

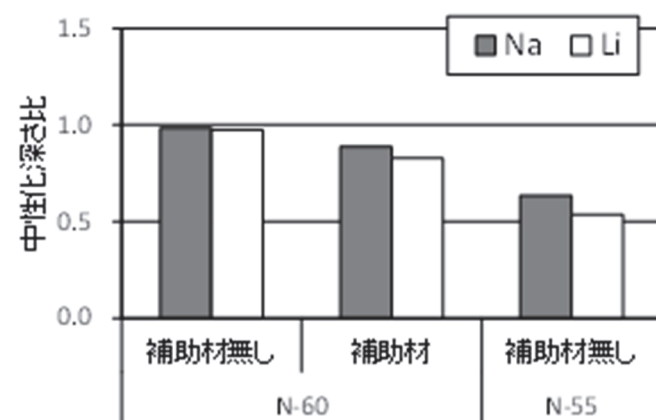


(Li 塗布, 中性化期間 56 日)

図-39 補助材有りの中性化深さ比

前述の結果から、OPC の W/C=60% (N-60) の試験体に含浸材を塗布しても改質効果が小さいことが分かる。W/C=55% (N-55) で同様に検討した試験結果⁵⁾も踏まえて、含浸材の改質効果について検討を行う。

中性化促進期間 56 日での OPC の中性化深さ比を図-40 に示す。中性化深さ比は、無塗布試験体に対する含浸材塗布試験体の中性化深さの比とした。補助材無しの N-60, N-55 の結果をみると、中性化深さ比は N-55 で無塗布の 5 割程度、N-60 は無塗布と同程度となった。N-55 の場合、中性化深さ比は 1 より小さいことから、表層組織の緻密化により CO₂ の侵入が抑制されたと考えられる。N-60 の補助材無しは、中性化深さ比が無塗布と同程度であり、含浸材塗布による改質効果が見られなかった。次に N-60 補助材有りは、中性化深さ比が無塗布の 8 割程度であり、含浸材塗布による表層組織の改質が認められるが、N-55 より改質効果は小さいことがわかる。これらのことから、コンクリート中の水酸化カルシウム量が多いと考えられる試験体の、改質効果が大きいことがわかる。



図一40 中酸化深さ比 (OPC, 中酸化期間 56 日)

4.現場計測手法を活用した耐久性設計と維持管理の連係

4.1 配合や養生がかぶりコンクリートの品質に与える影響

図-41 に、普通セメントや高炉スラグ置換率 45%の配合の、水結合材比（以下、W/B）および養生を変化させたコンクリートの材齢 56 日での表層透気係数を示す。凡例は結合材種類－水結合材比である。

結合材種類によらず、水結合材比の増加に伴い表層透気係数は大きくなる傾向が確認できる。また、高炉セメントの場合、W/B が 50、60%の場合は普通セメントよりも表層透気係数は大きく、W/B が 40%で封かんおよび気中養生の場合、普通セメントを使用したものより表層透気係数は小さくなった。

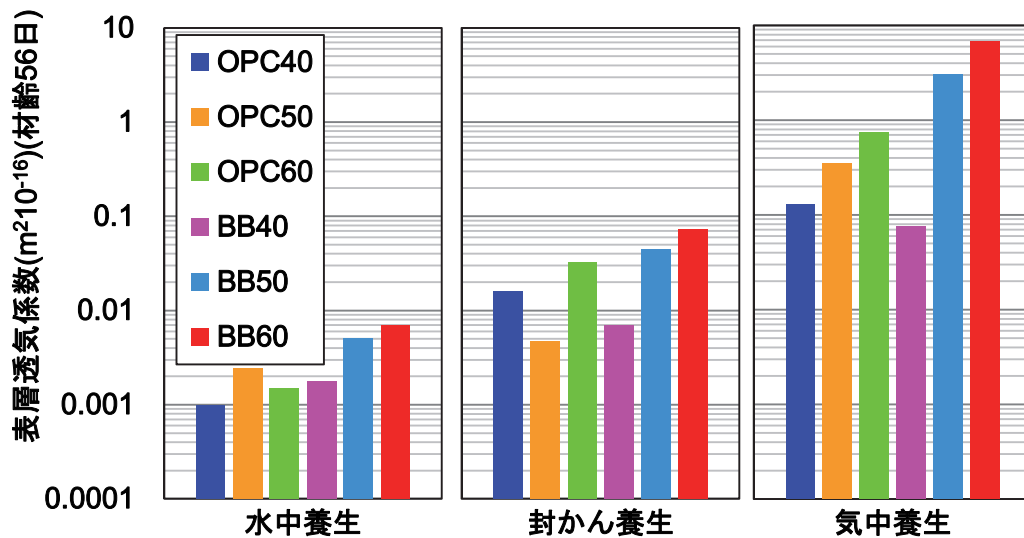


図-41 水結合材比ごとの表層透気係数(材齢 56 日)

図-42 にセメント種類ごとの、水結合材比および養生を変化させたコンクリートの中性化速度係数を示す。凡例は結合材種類－水結合材比である。

結合材種類によらず、初期養生時の水分供給が乏しく、水セメント比が大きいほど、中性化速度係数は大きくなる傾向がある。以上の結果から、中性化速度係数は置換率、養生、水結合材比の影響を受けるものと考えられる。

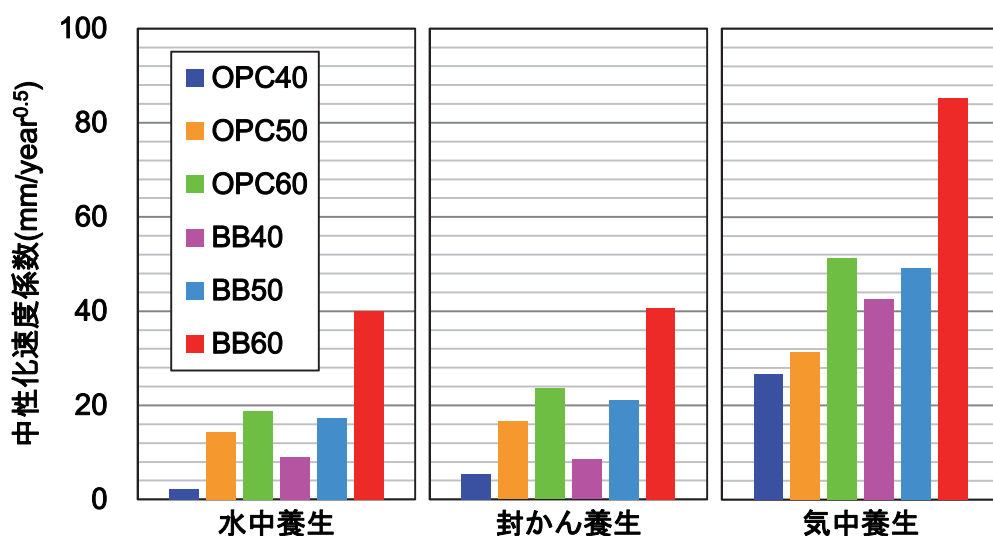


図-42 水結合材比ごとの中性化速度係数

図-43 に普通セメントおよび高炉スラグ置換率 45%の配合の、水結合材比および養生を変化させたコンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数を示す。凡例は結合材種類－水結合材種類である。

前記したとおり、高炉セメントは遮塩性が高いため、水結合材比が増加しても見かけの拡散係数は顕著に増加する傾向は無い。一方で、普通セメントでは水結合材比の増加に伴い、見かけの拡散係数も増加する傾向がある。これは水結合材比の増加に伴い空隙構造が粗になり、物質移動抵抗性が低下したためであると考えられる。

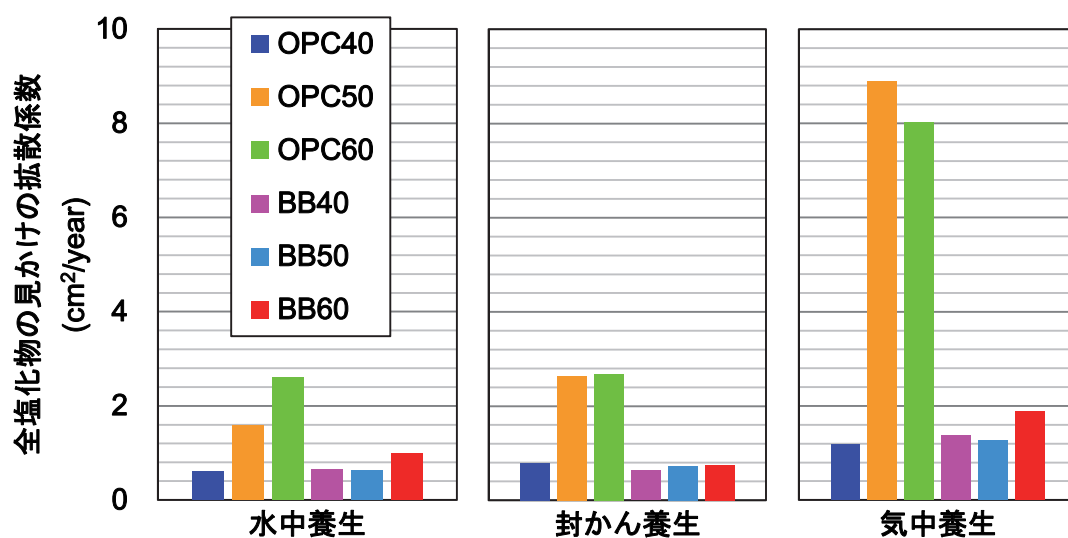


図-43 水結合材比ごとの見かけの拡散係数

4.2 回帰分析による中性化速度係数の把握

図-44 に本実験中の中性化速度係数および表層透気係数への影響要因を示す。表層透気

係数は気体の物質移動抵抗性の指標であり，中性化速度係数との相関関係は数多く検討している．しかし，厳密には中性化は気体の透過（CO₂の濃度勾配による拡散）と水酸化カルシウムと炭酸イオンの反応により進行するため，化学反応の影響を反映していない表層透気係数と中性化速度係数の関係は，影響要因の種類や程度によっては，相関が無い場合もあると考えられる．そこで，中性化の耐久性指標である中性化速度係数を目的変数とし，非破壊試験結果である表層透気係数，養生の程度の指標となる結合水量，圧縮強度，空隙率，ブリーディング量および配合上のパラメータを説明変数とし，重回帰分析を実施した．

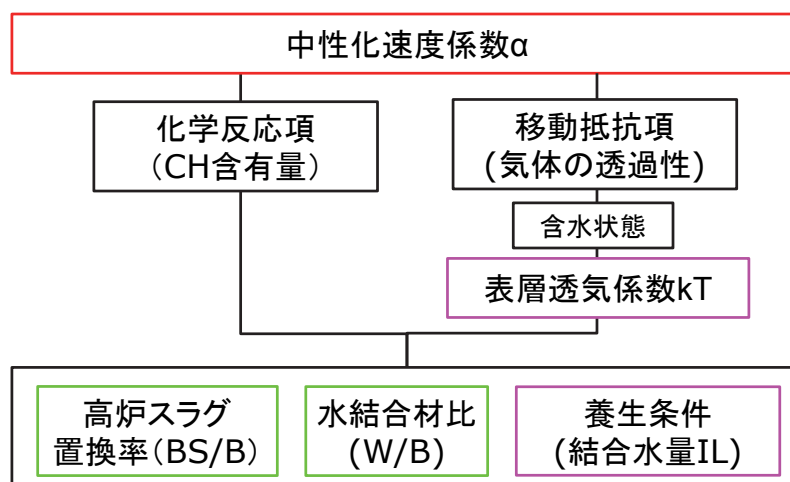


図-44 中性化および表層透気係数に影響を及ぼす要因

表-6 に本研究で用いたパラメータを示す．表層透気係数，圧縮強度，結合水量および空隙率は前述の実験結果を用い，水結合材比および高炉スラグ置換率は配合中の質量割合（％）を用いた．

表-6 説明変数として用いたパラメータ

番号	説明変数	表記
1	材齢 56 日表層透気係数(log ₁₀ m ²)	kT ₅₆
2	炉乾燥後表層透気係数(log ₁₀ m ²)	kT _{dry}
3	圧縮強度(N/mm ²)	f' ₂₈
4	空隙率(%)	ε
5	水結合材比(%)	W/B
6	高炉スラグ置換率(%)	BS/B
7	結合水量(%)	IL

表-7 に回帰分析に用いた配合群を示す．配合群 1, 2 はそれぞれ普通セメント，高炉セメント（置換率 45%）を使用した配合を対象とし，水結合材比，養生を変化させている．配合群 3 は水結合材比を 50%で一定とし，高炉スラグ置換率を 0, 30, 45, 60%の 4 水準に，また養生を変化させている．配合群 4, 5 はそれぞれ配合群 3 から置換率 60%，0%を除いたものである．配合群 4 は，置換率の増加に対する諸物性の挙動が他の置換率と異なる高置換率 60%の配合を除いたものであり，配合群 5 は水結合材比 50%の配合の中で高炉スラグを用いた配合のみを抽出したものである．配合群 6 は高炉スラグを用いた配合全てを用

いたものであり、配合群 7 は全配合を対象としている。配合群 8~10 は全配合の結果を養生ごとに分けたものである。

表-7 回帰分析に用いた配合群

番号	配合群	配合・養生数	サンプル数
1	普通セメント	3 配合 3 養生	9
2	高炉セメント(置換率 45%)	3 配合 3 養生	9
3	W/B=50%置換率変動	4 配合 3 養生	12
4	W/B=50%置換率 0, 30, 45%	3 配合 3 養生	9
5	W/B=50%置換率 30, 45, 60%	3 配合 3 養生	9
6	全高炉セメント	5 配合 3 養生	15
7	全配合	8 配合 3 養生	24
8	水中養生	8 配合 1 養生	8
9	封かん養生	8 配合 1 養生	8
10	気中養生	8 配合 1 養生	8

図-45 に中性化速度係数を目的変数とした、セメント種類ごとの重回帰結果を示す。単回帰結果で決定係数が高く、実用的な指標である表面透気試験結果と、養生の管理に用いられている圧縮強度を、説明変数としているものを選択した。表層透気係数に説明変数として水結合材比を加えたものは、決定係数が 0.8 程度に上昇した。これは、物質移動抵抗性の評価指標である表層透気係数に、コンクリート中の CH 量に影響を及ぼす水結合材比のパラメータが加わったことにより、中性化進行時の化学反応による抵抗を考慮できているものと考えられる。しかし、圧縮強度に説明変数として水結合材比を加えた場合は、決定係数に変化が見られなかった。

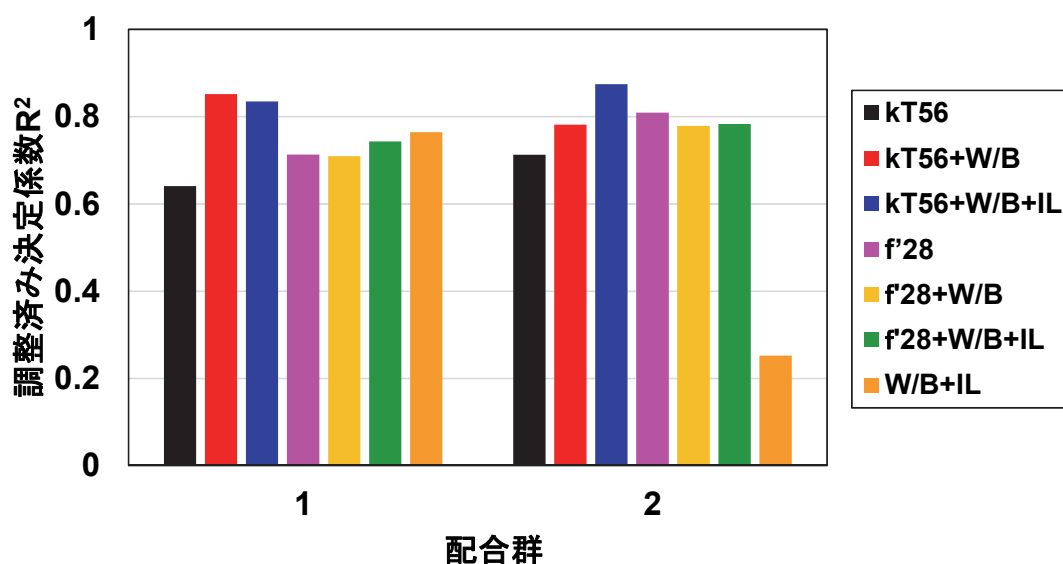


図-45 セメント種類ごとの重回帰結果（中性化速度係数）

図-46 に、中性化速度係数を目的変数とした置換率ごとの重回帰結果を示す。置換率を

変化させた配合群の重回帰結果では、表層透気係数を用いたものの決定係数が高い結果となった。しかし、説明変数に置換率や結合水量を加えた場合、配合群 3 では決定係数は低下する結果となった。これは、中性化速度係数は置換率と線形関係にないことが原因であると考えられる。また、配合群 3 から置換率 0、60%を除いた配合群 4、5 では、置換率や結合水量を加えた重回帰結果であっても、決定係数は低下しないことがわかる。これらの結果から、置換率を説明変数として加えた場合であっても、決定係数は概ね同等であることから、表層透気係数が最も置換率による影響を受けるパラメータであることがわかる。

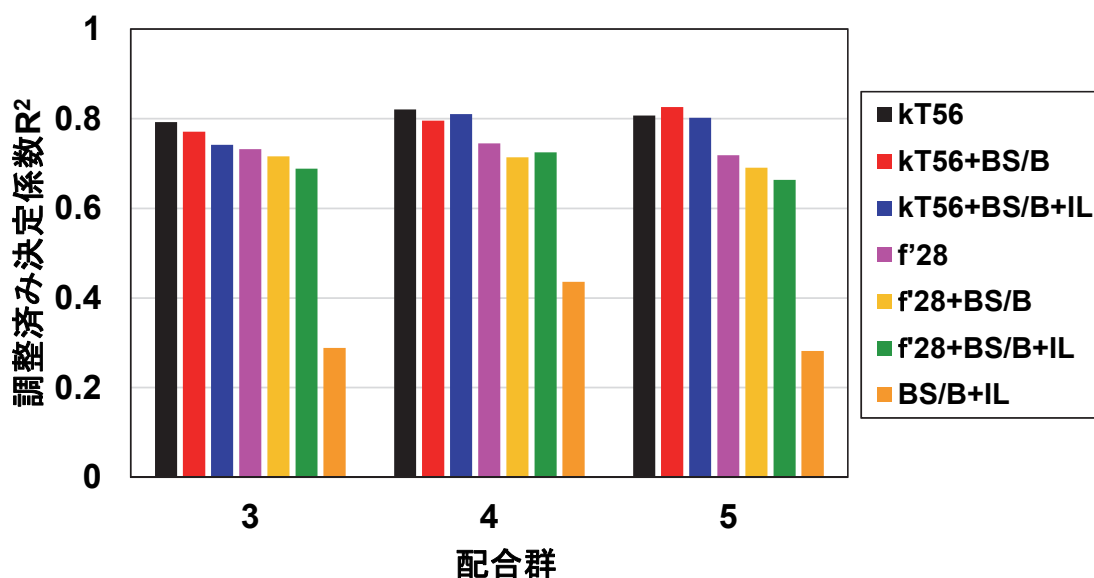
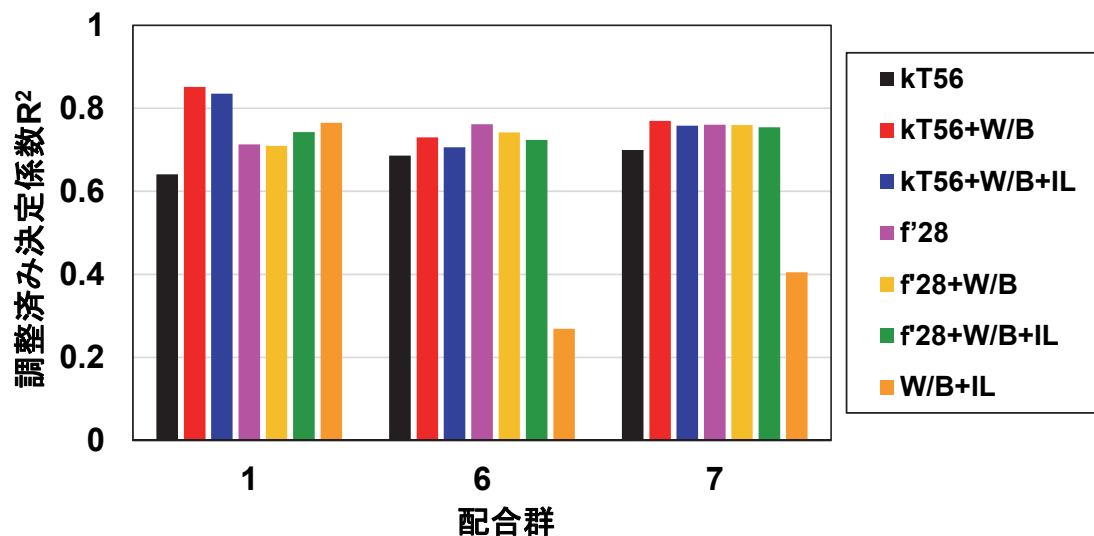


図-46 置換率ごとの重回帰結果（中性化速度係数）

図-47 に、結合材種類ごとの重回帰結果を示す。普通セメントのみを対象とした場合、表層透気係数と水結合材比を用いた決定係数が最も高い結果となった。高炉スラグを用いた配合群 6 では、圧縮強度のみの回帰結果が最も決定係数が高い結果となった。普通セメントでは水結合材比が反応抵抗性を示しているが、高炉スラグを用では水結合材比が CH 量と関係ない指標であるためと考えられる。

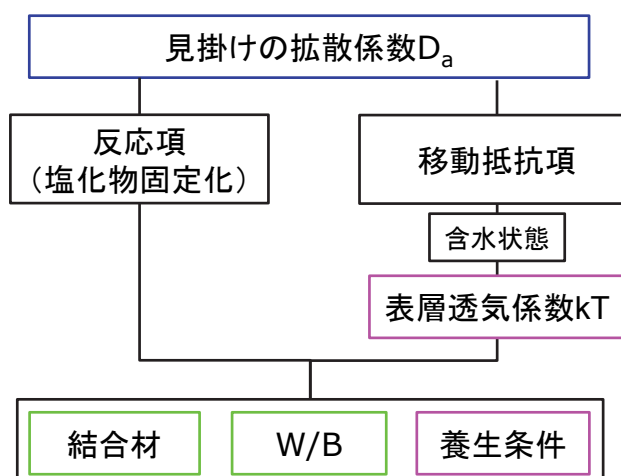
全配合を対象とした回帰結果では、表層透気係数のみの決定係数と、水結合材比と結合水量を用いた決定係数を除いて 0.7 程度の決定係数を示した。全配合を統一的に評価する上では、表層透気係数と水結合材比を用いた回帰式、もしくは圧縮強度を用いた回帰式を用いることが有効であると考えられる。



図－47 結合材種類ごとの重回帰結果（中性化速度係数）

4.3 回帰分析による塩化物イオンの見かけの拡散係数の把握

図－48 に、本実験中の塩化物イオンの見かけの拡散係数および、表層透気係数への影響要因を示す。表層透気係数は気体の物質移動抵抗性の指標であり、塩化物イオンの拡散係数との相関関係は低いと考えられる。このことは、表層透気係数と塩化物イオンの見かけの拡散係数の関係は、それぞれ物質移動の対象とする媒体が異なるため、影響要因の種類や程度によっては、相関が無い場合もあると考えられる。そこで、塩害の耐久性指標である塩化物イオンの見かけの拡散係数を目的変数とし、非破壊試験結果である表層透気係数、養生の程度の指標となる結合水量、圧縮強度および配合上のパラメータを説明変数とし、重回帰分析を実施した。



図－48 塩化物イオンの見かけの拡散係数と表層透気係数に及ぼす要因

(1) 単回帰結果

図-49 にセメント種類ごとの単回帰結果を示す。普通セメントを対象とした配合群 1 では、圧縮強度が最も決定係数が大きくなった。表層透気係数は含水率の影響を受けることから、正確な細孔構造の評価ができず、圧縮強度より決定係数が小さくなったものと考えられる。高炉セメントを対象とした配合群 2 では、空隙率の決定係数が大きくなった。高炉スラグは塩化物固定化の影響が大きいいため、細孔構造の緻密さや、屈曲度が塩化物固定化量に影響し、表層透気係数の決定係数が高くなったと考えられる。

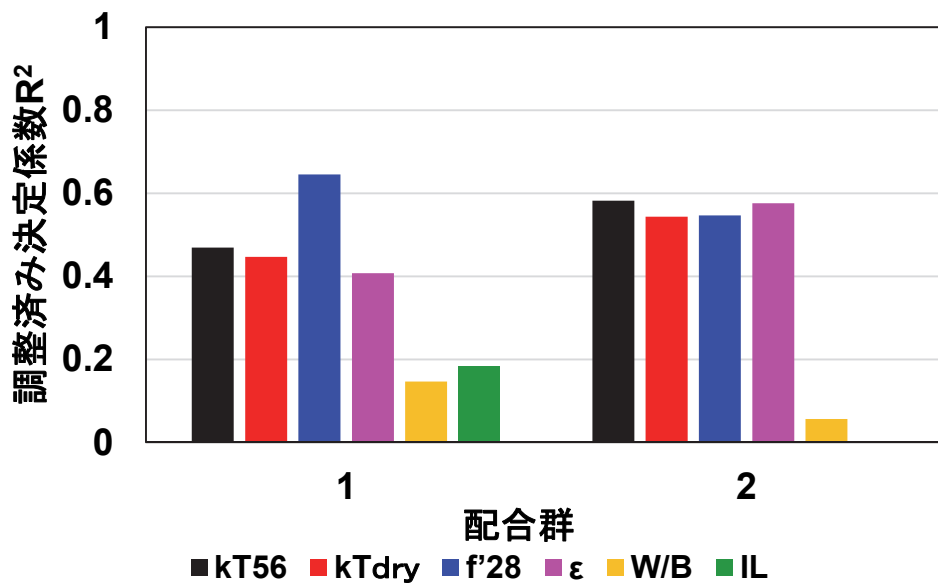
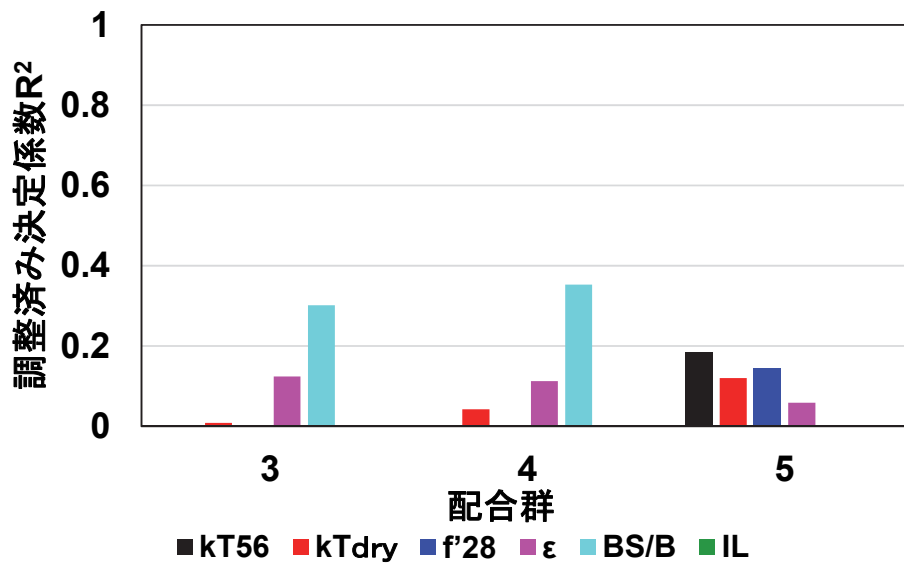


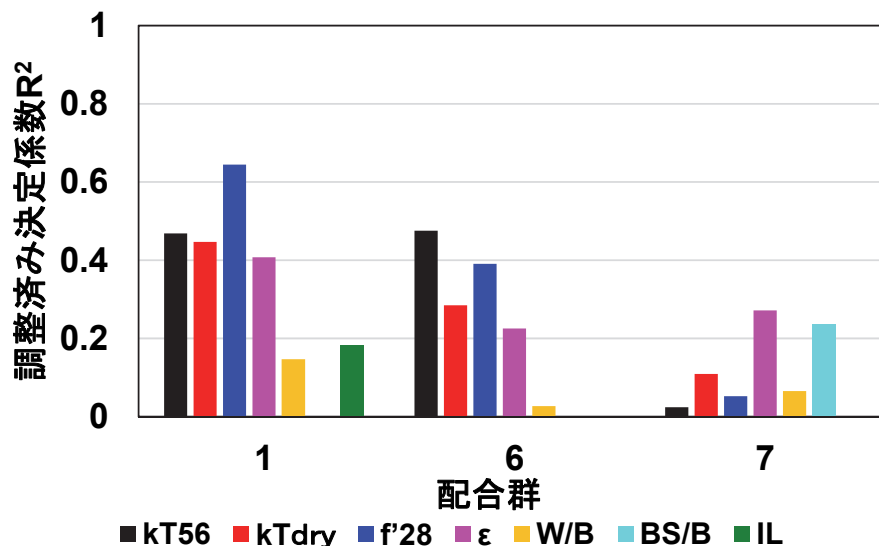
図-49 セメント種類ごとの単回帰結果（見かけの拡散係数）

図-50 に置換率ごとの単回帰結果を示す。置換率の変化を含んだ配合群では、いずれの説明変数でも決定係数が低く、相関関係は見られなかった。置換率の変化は、細孔構造の緻密さと塩化物固定化能力に大きく影響するため、置換率や結合水量のパラメータ単独で表現できないものと考えられる。



図－50 置換率ごとの単回帰結果（見かけの拡散係数）

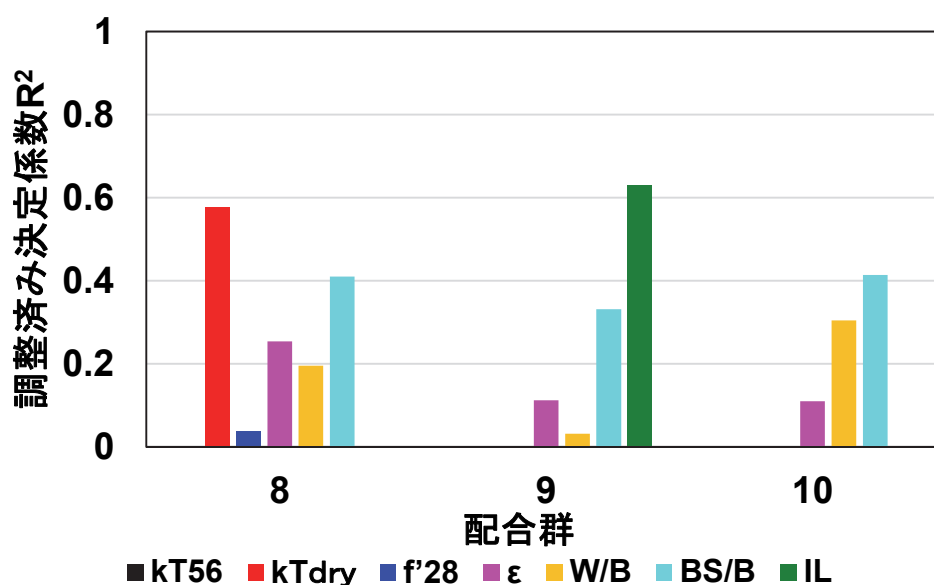
図－51 に結合材種類ごとの単回帰結果を示す．高炉セメントを用いた配合では，表層透気係数と圧縮強度は 0.4 程度の決定係数となった．全配合を対象とした配合群 7 では，いずれの説明変数でも決定係数は 0.3 未満であった．これらのことから，単回帰結果から全配合の見かけの拡散係数を統一的に評価できる説明変数は存在しないことがわかる．



図－51 結合材種類ごとの単回帰結果（見かけの拡散係数）

図－52 に，養生ごとの単回帰結果を示す．置換率の決定係数は，養生方法によらず 0.4 程度であることから，高炉スラグによる塩化物固定化が，見かけの拡散係数に大きく影響していることがわかる．56 日表層透気係数は，養生によらず決定係数はほぼ 0 であるのに対し，炉乾後の表層透気係数は，水中養生の場合のみ決定係数が 0.6 程度となった．このこ

とから、封かん養生や気中養生では、塩水浸せきによって再水和が生じ、表層透気係数測定時と塩水浸せき終了時で細孔組織に変化が生じたことが考えられる。



図－52 養生ごとの単回帰結果（見かけの拡散係数）

(2) 重回帰結果

図－53 にセメント種類ごとの重回帰結果を示す。セメント種類によらず決定係数が最大 0.7 程度であり、表層透気係数や圧縮強度に、水結合材比や結合水量のパラメータを加えたとしても決定係数は増加しないことが分かる。よって、水結合材比や結合水量が、見かけの拡散係数に及ぼす影響は小さく、セメント種類ごとに分類した回帰式は有効ではないことがわかる。

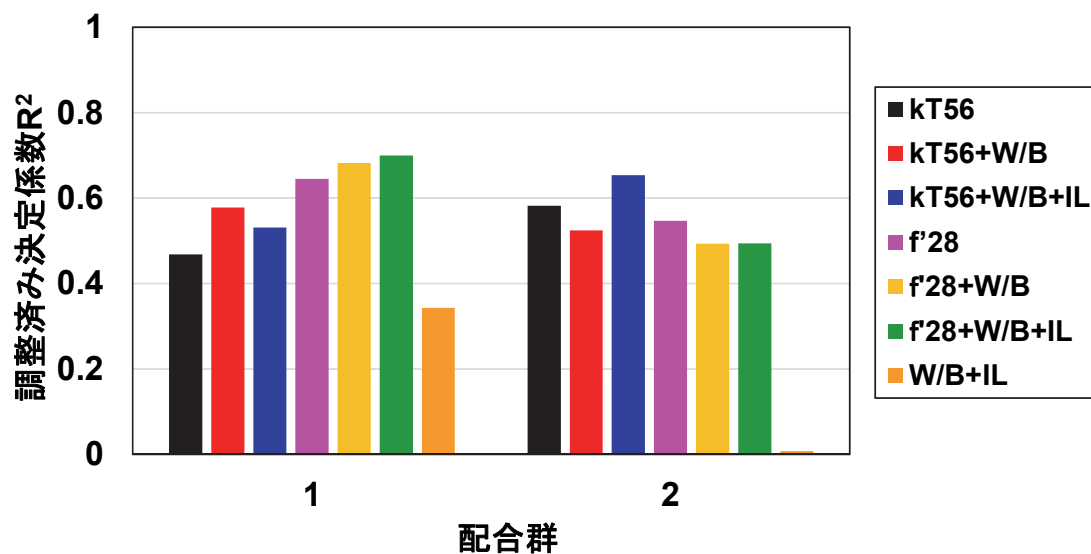


図-53 セメント種類ごとの重回帰結果（見かけの拡散係数）

図-54 に，置換率ごとの重回帰結果を示す．高炉スラグのみを対象とした，配合群 5 の決定係数が低くなる傾向がある．このことは，高炉スラグを含んだ配合では，見かけの拡散係数が，初期養生の違いによる塩化物固定化の影響を大きく受けることが原因であると考えられる．

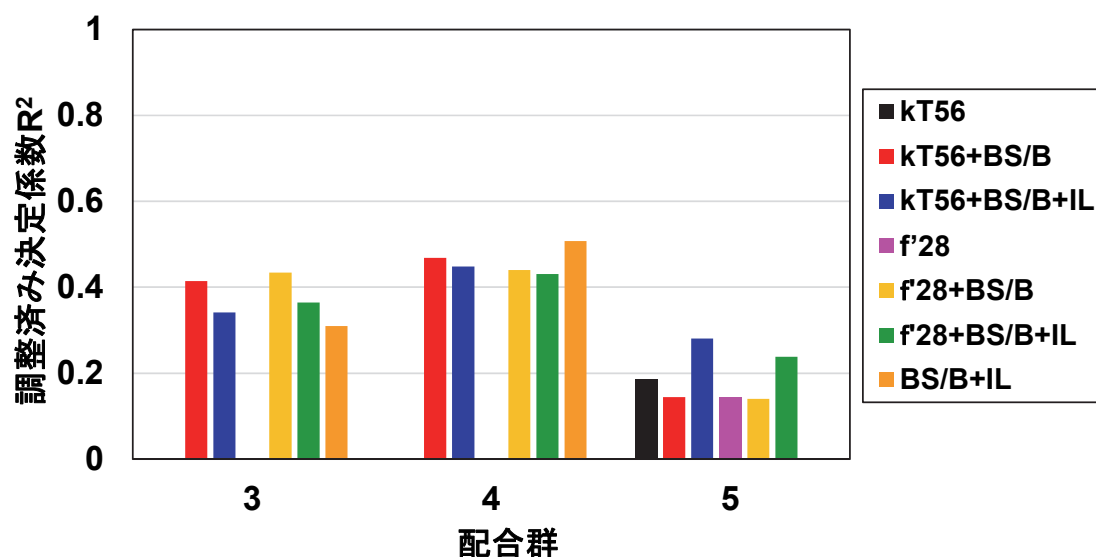
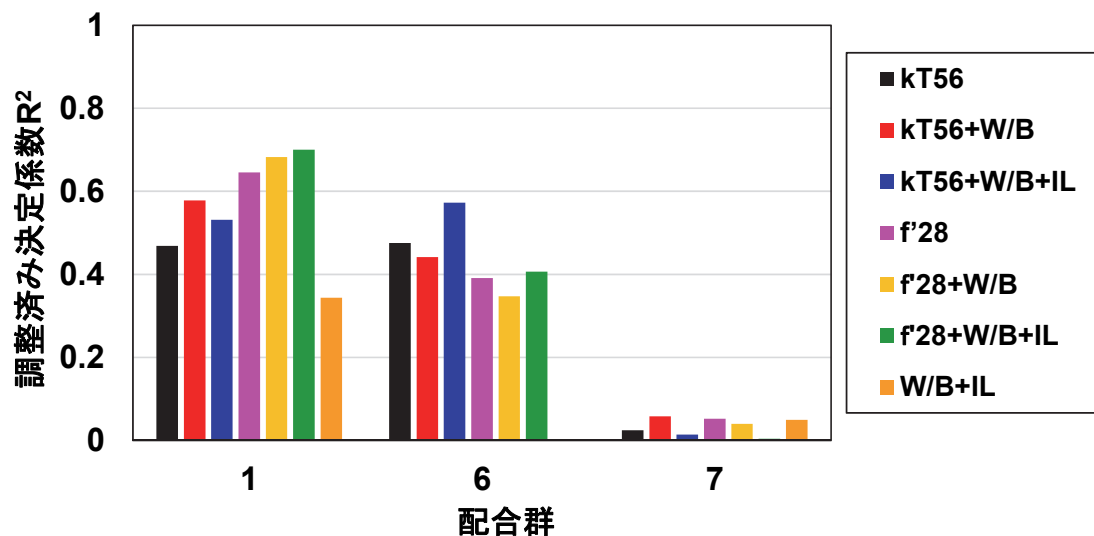


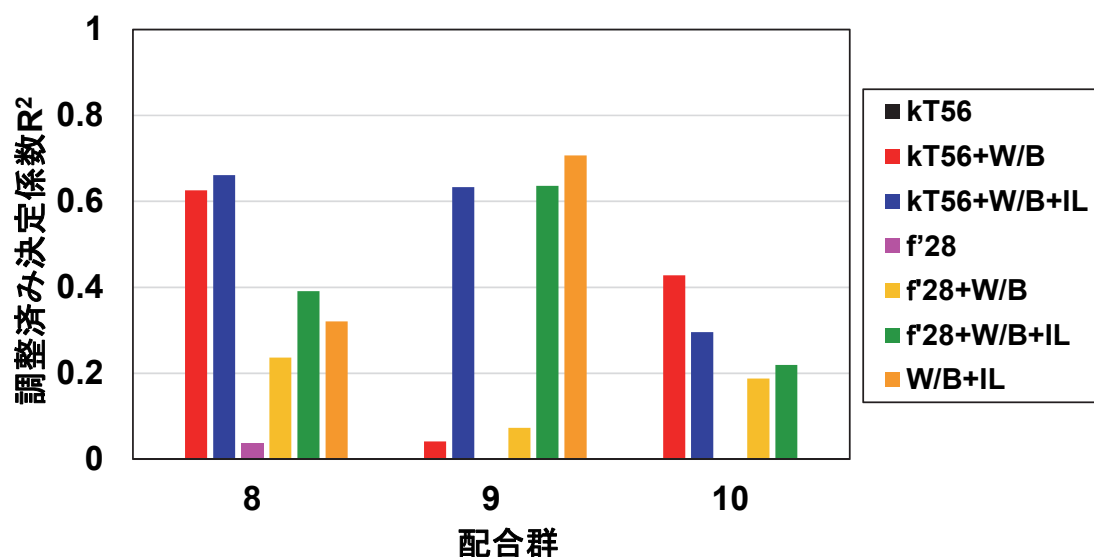
図-54 置換率ごとの重回帰結果（見かけの拡散係数）

図-55 に結合材種類ごとの重回帰結果を示す．普通セメントや高炉スラグを用いた配合群では決定係数が 0.4 程度であり，全配合を対象とした配合群 7 は，決定係数は 0.1 に満たない結果となった．このことから，説明変数を組み合わせた回帰式を用いたとしても，全配合を統一的に予測することは困難であると考えられる．



図－55 結合材種類ごとの重回帰結果（見かけの拡散係数）

図－56 に養生ごとの重回帰結果を示す．表層透気係数，水結合材比および，結合水量を説明変数に用いた回帰結果では，水中養生や封かん養生を行った配合群 8，9 では決定係数は 0.6 程度となった．また，気中養生では決定係数は 0.3 程度に低下している．このことから，気中養生の試験では塩水浸せきにより，再水和した可能性が考えられる．



図－56 養生ごとの重回帰結果（見かけの拡散係数）

5. おわりに

5.1 各種要因が鋼材腐食速度に与える影響

コンクリート中の鋼材腐食の検討から、OPC、FA の自然電位の推移や腐食速度は、同様な傾向が見られた。BB では、自然電位や腐食速度の傾向は異なっており、カソード勾配の変化は小さい事が分かった。このことは、高炉スラグの酸素の消費による電位の卑化や、高い遮塩性が影響していると考えられる。

今回の検討では、測定期間が最長で 100 日程度であり、今後も継続した測定を行う必要がある。また、実構造物の鋼材腐食は、コンクリートが潜在的な不均質性を持つ事から、マクロセル腐食が生じていると考えられる。そこで、マクロセル腐食の発生要因を把握するため、塩化物イオン濃度や示方配合を部分的に変化させ、コンクリート中の不均質性を模擬した試験体での検討を行う必要がある。

5.2 現場計測手法を活用した耐久性設計と維持管理の連係

コンクリートの表層品質の変化に与える影響のうち、打重ねおよび補修の影響については表面透気試験から概ね把握する事ができた。また、中性化の場合は、設計、竣工検査、および維持管理をつなぐ中性化速度係数を概ね予測する事が可能であった。一方で、塩分浸透は、実効拡散係数の試験がうまくいかなかった事等から当初予定の成果を得られず、表層透気係数と見かけの拡散係数との関係性を示すに留まってしまった。当初は、実効拡散係数が測定できる事で、中性化の予測と同様な枠組みを構築できると予想していたが、現時点では構築する事ができなかった。

今後の検討として、実効拡散係数の測定に加えて、吸水試験や、電気抵抗等を実施する事で、予測精度を向上させる予定である。また、施工の要因としては、鉄筋間の通過により配合が変化する報告⁶⁾があるため実施する予定である。以上の検討に基づき、塩害を対象にした耐久性設計と維持管理の連係を実現する。

参考文献

- 1) 山本悟：自然電位方によるコンクリート中鉄筋の腐食モニタリング，防錆管理，Vol.16，pp.157-162，1998.5
- 2) 西方篤，高橋岳彦，候保栄，水流徹：乾湿繰り返し環境における炭素鋼の腐食速度のモニタリングとその腐食機構，材料と環境，No.43，pp.188-193，1994
- 3) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，pp.115，2013.3
- 4) 阿部道彦，斎藤正城：モルタルによるブリーディング試験方法に関する検討，日本建築学会大会学術講演概要集，A-1，材料施工，pp.277-278，2004
- 5) 染谷望，三上宏之，三田勝也，加藤佳孝：表面含浸材の適用時期がコンクリートの物質移動に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1618-1623，2012
- 6) 尾上幸造，亀澤靖，松下博通：鉄筋間通過によるコンクリートの配合変化，土木学会論文集 E，Vol.62，No.1，pp.119-128，2006.2