

平成 26 年度（一財）港湾空港総合技術センター 研究開発助成 成果報告書

助成番号 ：平成 26 年 5 月 9 日付 第 14－1 号

研究開発項目：（指定課題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 27 年 4 月 30 日

東京理科大学
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. コンクリート中の不均質性がマクロセル腐食機構に及ぼす影響.....	3
2.1 実験概要	3
(1) 使用材料	4
(2) 示方配合	4
(3) 試験体形状	5
(4) 試験体の作製	5
2.2 試験方法.....	7
(1) 自然電位	7
(2) 分極曲線	7
3. 実験結果および考察.....	7
3.1 塩化物イオン浸透深さ	7
3.2 自然電位の測定結果.....	7
(1) 環境の影響.....	7
(2) 配合の影響	8
a)水セメント比.....	8
b)混和材.....	9
(3) かぶりの影響	10
(4) 補修方法の影響	10
a)けい酸 Li 系表面含浸材.....	10
b)けい酸 Na 系表面含浸材.....	11
c)シラン系表面含浸材.....	11
d)断面修復材.....	12
(5) 自然電位による腐食の判定.....	12
3.3 分極曲線測定結果.....	13
(1) 環境の影響.....	13
(2) 配合の影響	14
a)水セメント比.....	14
b)混和材.....	14
(3) 補修方法の影響	15
a)けい酸 Li 系表面含浸材.....	15
b)けい酸 Na 系表面含浸材.....	15
c)シラン系表面含浸材.....	16
d)断面修復材.....	16
(4) 腐食電流密度による局部腐食の可能性.....	17
(5) 自然電位と腐食電流密度の相関関係.....	18
4. 不均質性が自然電位や腐食電流密度に与える影響の検討.....	19
4.1 実験概要.....	19
(1) 試験体の組み合わせ.....	19
(2) 電気化学的測定.....	19
4.2 異なる塩化物イオン濃度の試験体の組み合わせ.....	20
(1) 自然電位の変化.....	20

(2) 分極曲線測定結果および腐食電流密度の算出.....	21
4.3 まとめ.....	22
5. 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.....	23
5.1 供試体概要および測定項目.....	23
(1) 養生および配合の影響.....	23
(2) 施工による品質変動の影響.....	24
5.2 養生および配合の影響.....	25
(1) 各種測定条件と結果.....	25
(2) 現場計測結果と特性値の関係性.....	31
5.3 施工による品質変動の影響.....	33
(1) 締固め	33
(2) 鉄筋間通過.....	34
(3) 打重ね.....	37
5.4 まとめ.....	38
6. 結論	38

1. はじめに

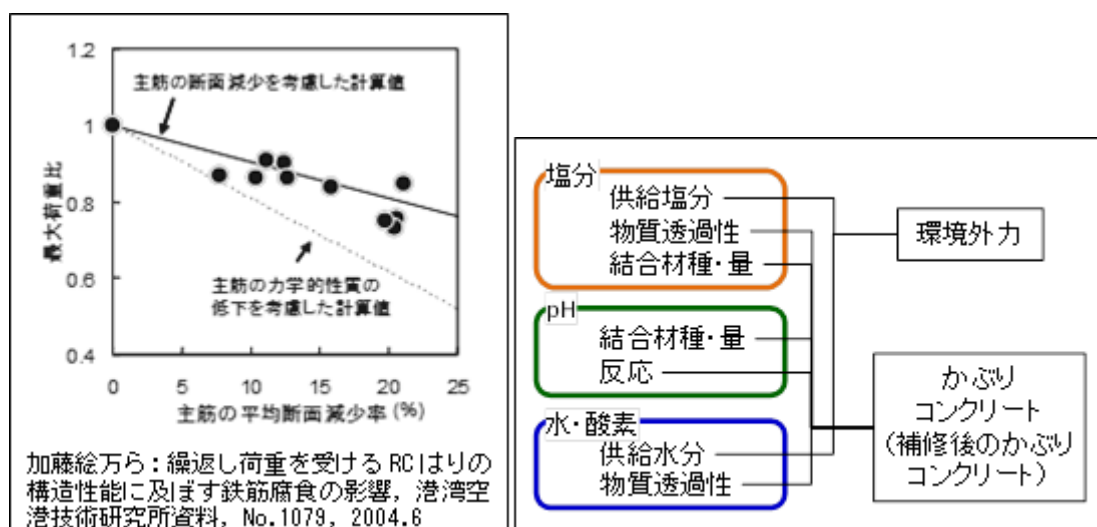
1.1 研究の背景と目的

現在のコンクリート構造物の設計、施工、維持管理は、性能規定の概念が適用され始めているが、示方書あるいはその他関連報告書で指摘されているように、設計～維持管理までの関係がなされているとは言い難い。くわえて、仕様規定下で構築された既存構造物に対しては、現行の性能規定の体系を、そのまま適用することは困難な状況にある。このような現状に対して、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ことにより、設計～維持管理、新設と既設をシームレスに連係させることで、戦略的で合理的な維持管理が実施できる。

1.2 研究の概要

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、塩害であるといえる。塩害を受ける RC 構造物の劣化プロセスは、塩化物イオンが侵入し（潜伏期）、鋼材腐食が促進され（進展期）、腐食によるひび割れに伴い腐食速度がさらに加速し（加速期）、その後、構造安全性が低下する（劣化期）。このような構造物の健全度を評価するためには、「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（図参照）。最近では、3次元の解析手法も向上し、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。

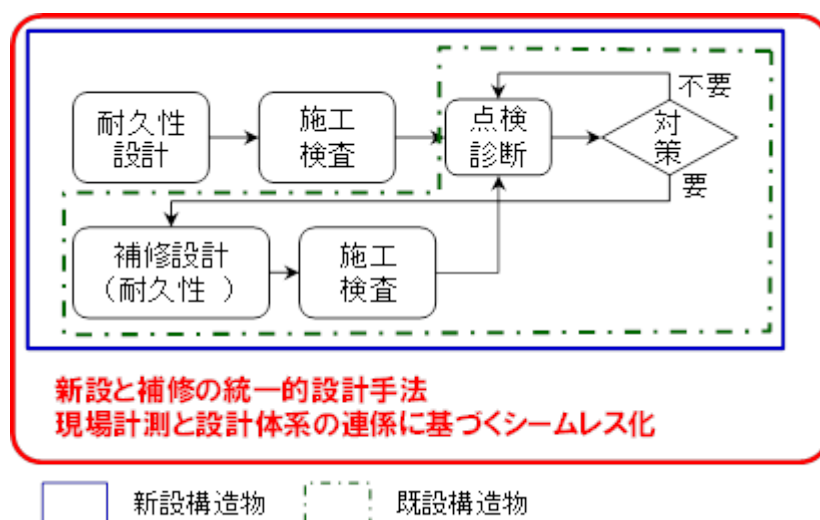
鋼材の腐食速度は、鋼材表面の塩分濃度、pH、酸素濃度、水量によって支配されており、これら主因の濃度を支配するのは、かぶりコンクリートあるいは補修を施されたかぶりコンクリートの品質と環境外力である（図参照）。そのため、これらの関係を定量的に体系化することが重要である。



さらに、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・検査するときに用いる指標の統一化が重要となる。塩害の場合、塩化物イオンの侵入は Fick の拡散方程式の理論解を用いることが一般的であり、このとき、重要な指標は表面塩分量と見掛けの拡散係数である。設計では、環境条件によって表面塩分量を設定し、結合材の種類と水セメント比から見掛けの拡散係数を見積もり、耐久性照査を実施する。施工後の検査では、生コンクリートの受入れ検査の水セメント比の記録を検査する程度であり、実構造物において、設計で想定した見掛けの拡散係数が達成されているか検査してはいない。維持管理の点検・診断では、コアサンプルを用いるなどして塩分プロファイルを計測し、見掛けの拡散係数を算出するのが一般的である。このように、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。

このような問題を解決するためには、既存構造物のかぶりコンクリートの品質を現場計測可能な非破壊計測で用いられる指標で表現し、非破壊計測の結果と耐久性の関係を整理することで、劣化予測が可能となる。なお、既存構造物にはすでに劣化が顕在化している構造物もあるため、補修に対しても同様に、補修設計—補修後の検査—補修後の点検・診断の連係を、前記した方法と同様に達成することが望ましいといえる。これにより、新設と既設を問わず、設計—施工—維持管理の連係が達成され、より合理的な維持管理が実現できる。



H24 年度申請の研究成果で、コンクリート構造物の塩害劣化を対象とした、設計—施工—維持管理の連係を実現する基本フレームを提案した。ただし、実構造物を想定すると、マクロセル腐食に対応する必要がある。マクロセル腐食は、各種不均質性によってもたらされるが、その腐食機構を定量的に理解することと、不均質性の主要因である施工の影響も把握する必要がある。

上記を踏まえて本研究は、3つの項目（①コンクリート中の不均質性がマクロセル腐食機構に及ぼす影響の把握、②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、③現場計測手法を活用した耐久性設計と維持管理の連携）を実施した。

2. コンクリート中の不均質性がマクロセル腐食機構に及ぼす影響

本項では、コンクリート中の不均質性が、鋼材のマクロセル腐食に及ぼす影響を検討するため、塩分量、水セメント比、混和材、かぶり、補修方法を変化させ、意図的に不均質な状態とした試験体を作製し、電気化学的測定を行った。測定項目は、自然電位、分極曲線、AC インピーダンスの周波数特性である。

2.1 実験概要

(1) 使用材料

使用したセメント、細骨材、粗骨材、混和材および断面修復材の物性値を表-1~4 に示す。練混ぜ水は水道水を使用し、スランプおよび空気量を調整するためAE剤(マイクロエア 303A)、AE減水剤(No.70)を使用した。また、断面修復材として用いたポリマーセメント系モルタル材(PCM)の配合表を表-5 に示す。PCMはプレミックス製品で、配合は1m³あたりの標準使用量(PCMを 1750kg/m³、練混ぜ水 301kg/m³)を参考とした。含浸材は、けい酸塩ナトリウム系表面含浸材、けい酸塩リチウム系表面含浸材、シラン系表面含浸材を使用した。含浸材の物性値を表-6 に示す。

表-1 セメントの物性値

種類	略称	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)
普通ポルトランドセメント	C	3.15	3320

表-2 細骨材の物性値

種類	略称	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率	実績率(%)
富士川産川砂	S	2.62	1.28	2.73	65.4

表-3 粗骨材の物性値

種類	略称	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率	実績率(%)
秩父産碎石	G	2.72	1.66	6.74	62.1

表-4 高炉スラグ微粉末の物性値

種類	略称	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)
高炉スラグ微粉末 6000	BFS	2.92	5860

表-5 断面修復材の配合表

単位量(kg/m ³)		可使時間 (20℃)
エマコ S99P	水量	
1750	301	約 60 分

表-6 含浸材の物性値

略称	主成分	密度(g/cm ³)	乾燥固形分率(%)
Na	けい酸ナトリウム	1.2	23
Li	けい酸リチウム		
シラン	アリキルアルコキシシラン	-	-

(2) 示方配合

コンクリートの示方配合を表-7に示す。スランブは $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ を目標とし、水セメント比 60% の示方配合を基準とした。基準の配合に対して、塩化ナトリウムの混入や、混和材を変化させた。塩分量を変化させる試験体には、単位水量当たり 3, 10% ($\text{NaCl} : 4.95, 16.5\text{kg/m}^3$) となるように塩化ナトリウムを練混ぜ水に混入した。結合材は普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種(高炉スラグ置換率 45%)を使用した。

表-7 示方配合表

W/B(%)	s/a(%)	単位量(kg/m^3)						
		W	B	C	S	G	AE 剤	AE 減水剤
40	45	165	-	413	783	986	$\text{C} \times 0.35\%$	$\text{C} \times 0.07\%$
50			-	330	814	1025		$\text{C} \times 0.055\%$
60	40		-	275	742	1147		$\text{C} \times 0.3\%$
	45		-	275	835	1051		$\text{C} \times 0.3\%$
	45		124	151	882	1110		$\text{C} \times 0.2\%$
	50		-	275	928	956		$\text{C} \times 0.3\%$

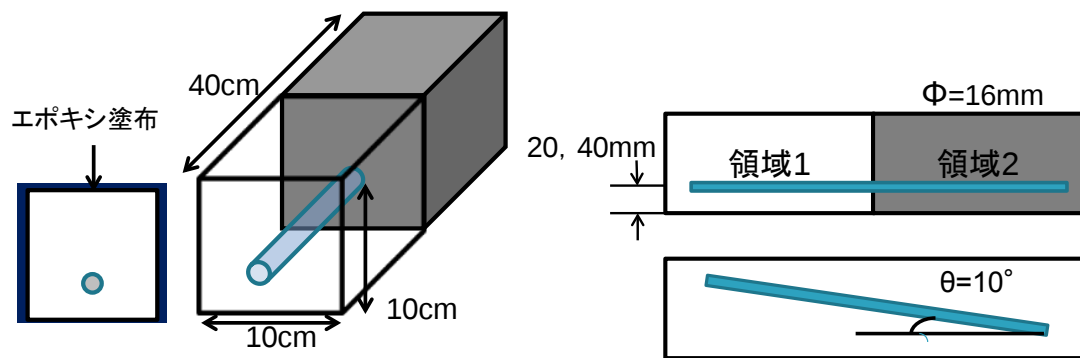
(※スラグ置換のみ高性能 AE 減水剤を使用)

(3) 試験体形状

試験体は、中央で配合を変化させたものを基本とした。変化項目の組み合わせを表-8に示し、試験体概要を図-1に示す。各試験体のかぶりは 20mm とした。鋼材を斜めに配置し、かぶりを変化させる試験体は、配筋角度を 10° (かぶり 20mm~90mm) と設定した。

表-8 変化項目の組み合わせ

水準	領域 1	領域 2
環境	NaCl0%	NaCl10%
	NaCl3%	
かぶり	20～90mm	
配合	W/C=40%	W/C=60%
	W/C=50%	
	OPC	BB
補修	OPC	PCM
	Li	無塗布
	Na	
	シラン	



図－1 試験体概要

(4) 試験体の作製

試験体は写真－1のように、鋼製型枠の中央を壁で隔て、片方ずつ打込みを行い作製した。埋設した鋼材は写真－2のような、 $\phi 16\text{mm}$ 、 $l=280, 380\text{mm}$ とし、両端からそれぞれ 15mm をブチルゴムテープで巻き絶縁した。被測定面積は鋼材全周から求め、それぞれ $125.6, 175.3\text{mm}^2$ である。

試験体は打込み 1 日後に脱型し、その後 14 日間の水中養生を行った。ここで、塩分を混入させた試験体は、あらかじめ含む塩分量と同じ濃度の塩水(塩分量 3, 10%)に浸せきさせた。養生終了後、試験面以外の 5 面をエポキシ樹脂で被覆し、腐食促進のため乾燥 4 日間、塩水浸せき 3 日間を 1 サイクルとした乾湿繰り返しを行った。



写真－1 試験体の設置状況



写真－2 前処理後の鋼材

2.2 試験方法

本研究では、自然電位、分極曲線の測定を行った。測定状況は図-2に示すように、各測定位置、測定位置近傍に照合電極として銀塩化銀電極(Ag/AgCl)、対極としてステンレス鋼(SUS304, 50×100mm)を設置し、照合電極、対極、および作用極をポテンシヨ・ガルバノスタット(以下、P/G)に接続して行った。また、各領域や、境界部近傍での鋼材腐食に及ぼす影響を検討するため、図-3に示す各測定位置で計測を行った。P/Gおよび、測定の様子を写真-3、4に示す。

コンクリート中の含水状態の変化による、測定結果の変動を減らすため、塩水浸せき終了後の試験体を用いて、コンクリート中の含水状態が均一状態で、測定温度 20℃ 環境下で測定を行った。

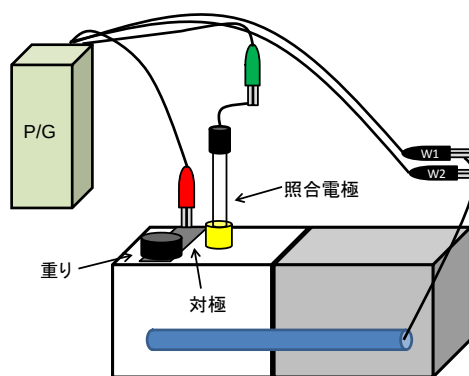


図-2 電気化学的測定概要

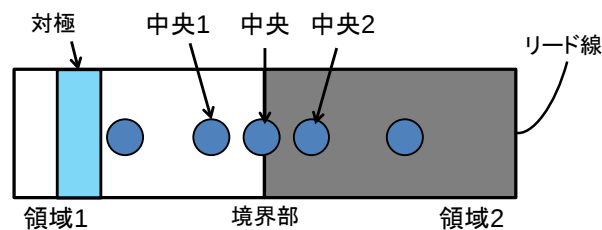


図-3 測定位置（対極の設置箇所）



写真-3 ポテンシヨ・ガルバノスタット

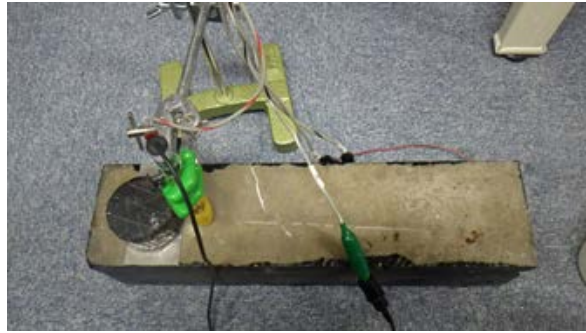


写真-4 測定の様子

(1) 自然電位

測定前処理後に、 Ag/AgCl や、作用極を P/G に接続し、自然電位を測定した。

(2) 分極曲線

走査速度を $60\text{mV}/\text{min}$ とし、自然電位からそれぞれ 100mV 、カソード側に分極させた後に、アノード側に分極させ、アノード分極曲線、カソード分極曲線を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 塩化物イオン浸透深さ

図-4 に、基本となる示方配合の水セメント比 60%，コンクリートの深さ方向の全塩化物イオン量を示す．表面からの深さ 20mm で 2.07kg/m^3 ，40mm で 0.419kg/m^3 の全塩化物イオン量となった．水セメント比 60% の普通ポルトランドセメントにおける，腐食発生限界濃度は 1.6kg/m^3 となり¹⁾，鋼材位置での全塩化物濃度が 1.6kg/m^3 に達する時点を腐食開始とすると，かぶり 20mm の供試体で腐食が進行しやすい環境であると考えられる．また，既往の研究²⁾では，全塩化物濃度 0.5kg/m^3 程度においても，鋼材腐食が発生していると報告があるため，かぶり 40mm の供試体においても鋼材腐食の可能性が考えられる．

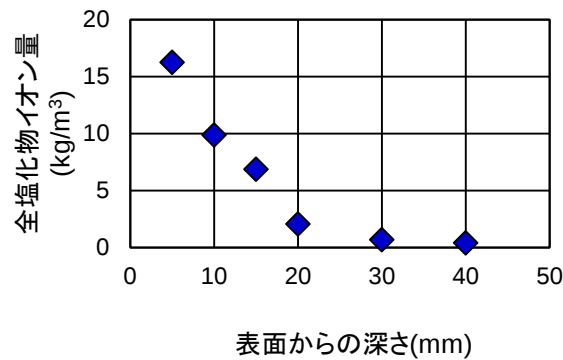


図-4 深さ方向の全塩化物イオン量(W/C60%)

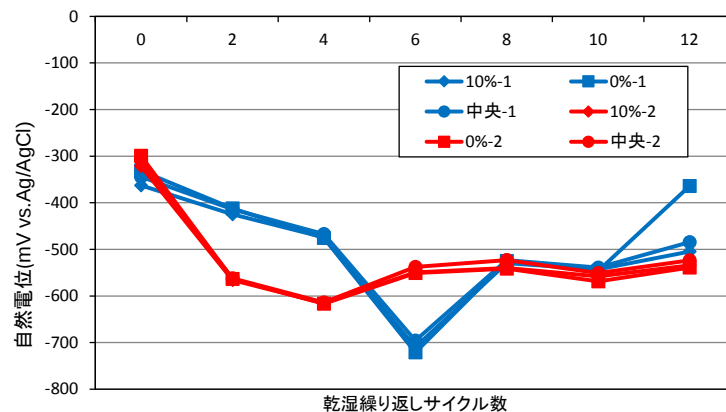
3.2 自然電位の測定結果

(1) 環境の影響

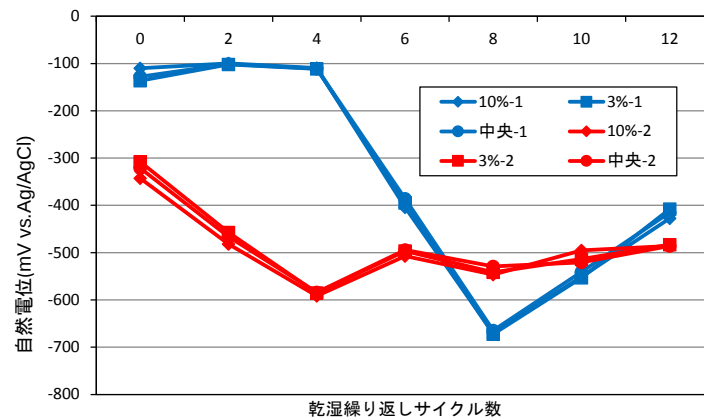
単位水量当たりの塩化物イオン量 0，3，10%(コンクリート単位体積当たりの塩化物濃度 0，4.95，16.5 kg/m^3)を練り込んだコンクリートを用いて，10%と 0%(NaCl10-0)，10%と 3%(NaCl10-3)を組み合わせた試験体の，測定位置毎の自然電位の経時変化を図-5，6 に示す．図の凡例は，測定位置-試験体番号(No.)を示している．

10-0 は，初期から-300mV 程度の電位であり，サイクルの経過に伴い緩やかに卑な電位に推移し，8 サイクル以降では-500mV 程度の電位で推移した．

10-3 は試験体番号No.1 が初期に-100mV程度，No.2 が-300mV程度の電位を示し，サイクルの経過に伴い卑な電位に推移した．ここで，自然電位が安定したと考えられる 8 サイクル以降の電位は-500mV程度であり，ASTM判定基準³⁾から，90%以上の確率で腐食が生じていると予測される．



図－5 自然電位経時変化(NaCl10－0)



図－6 自然電位経時変化(NaCl10－3)

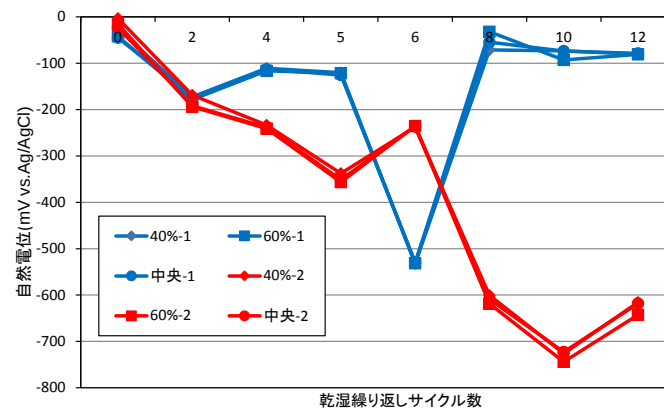
(2) 配合の影響

a) 水セメント比

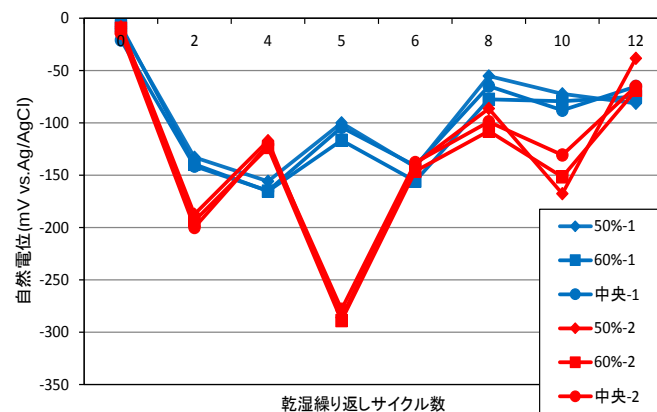
水セメント比 40, 50, 60%のコンクリートを用いて、40%と 60%(W/C40－60), 50%と 60%(W/C50－60)を組み合わせた試験体の、自然電位の経時変化を測定位置毎に図－7, 8に示す。40-60は、試験体 No.1 は 6 サイクル目で一旦、-500mv の卑な電位に推移したが、概ね-100mv 程度の電位で推移している。No.2 は、サイクル初期から卑な電位に推移し続ける傾向を示した。

50-60 は、40-60 と同様に、測定位置によらずサイクル初期では、卑な電位で推移した。その後、5, 6 サイクル以降は貴な電位で推移し、概ね-100mv 程度の電位となった。

ASTM 判定基準より、90%以上の確率で腐食していないと予測される。このことから、水セメント比の違いによる空隙構造や、塩分浸透性の違いによる不均質性の影響は小さいと考えられる。



図－7 自然電位経時変化(W/C40－60)

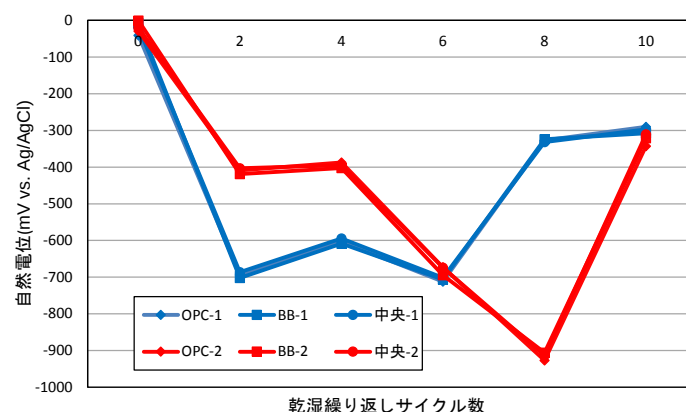


図－8 自然電位経時変化(W/C50－60)

b) 混和材

高炉スラグ微粉末の混和と、無混和を組み合わせた場合(OPC－BB)の自然電位の経時変化を図－9に示す。測定位置にかかわらず、サイクルの経過に伴い-700mV～-900mv程度の卑な電位で推移し、6サイクル目以降は-300mV程度まで貴な電位に推移した。

ASTM 判定基準より、10 サイクル目では 90%以上の確率で腐食が生じている可能性がある。しかし、高炉スラグ中に含まれる Fe が酸化する事で、鋼材界面の酸素が消費され、-700～-900mV と卑な電位になったと考えることから、鋼材腐食は生じていない可能性がある。また、測定位置による電位の差は小さく、混和材による電位の影響は確認できなかった。

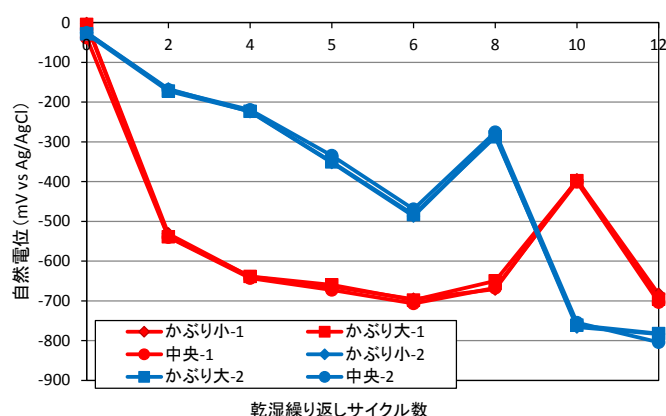


図－9 自然電位経時変化(OPC－BB)

(3) かぶりの影響

鋼材を斜めに配筋し、かぶりを変化させた場合の自然電位の経時変化を図－10 に示す。サイクルの経過に伴い卑な電位に推移し、8, 10 サイクルで貴な電位となった。その後は、卑な電位に推移し、No.1 は-600mV～-700mv, No.2 は卑な電位で推移し続け-800mV 程度の電位となった。

ASTM判定基準から、90%以上の確率で腐食が生じていると予測される。しかし、塩化物イオン量は表面からの深さ方向 20mm位置で 2.0kg/m^3 程度、40mmで 0.4kg/m^3 程度であり、「かぶり大」のかぶりは 90mmあることから、腐食が生じていないと考えられる。このことから、測定位置による電位の差は見られず、かぶりによる影響は、電位から確認することはできなかった。



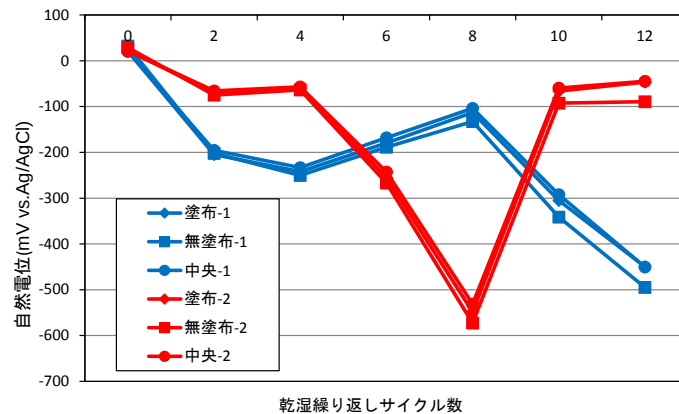
図－10 自然電位経時変化(斜め配筋)

(4) 補修方法の影響

含浸材を試験面の半面に塗布した場合の、自然電位の経時変化を図－11～13 に示す。

a) けい酸 Li 系表面含浸材

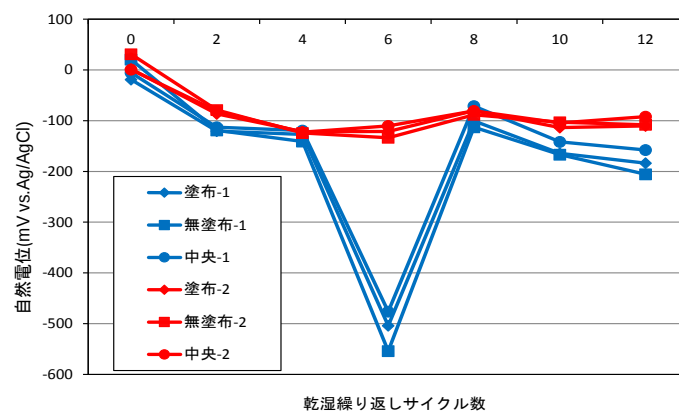
測定位置にかかわらず、サイクルの経過に伴い卑な電位に推移した。No.1 は 8 サイクル以降、卑な電位に推移する傾向を示し、No.2 は 8 サイクル以降、貴な電位に推移した。



図－11 自然電位経時変化(Li)

b) けい酸 Na 系表面含浸材

測定位置によらず，Li と同様に電位が推移した．また，サイクルの経過に伴い，卑な電位に推移し，概ね-100mV 程度となった．



図－12 自然電位経時変化(Na)

c) シラン系表面含浸材

測定位置によらず Li, Na と同様な傾向を示し，-50mV 程度の電位で推移している．

Li系，Na系，シラン系は，サイクルの経過によって，概ね-200～-100mV程度の電位となった．ASTM判定基準から，全ての場合で，90%以上の確率で腐食が生じていないと予測される．また，含浸材種類のよらず無塗布と比較し，塗布は最大で 50mV程度の貴な電位となった．このことは，改質効果により水分の浸透が抑制され，コンクリート中が乾燥状態に保たれたことで，貴な電位になったと考えられる⁴⁾．

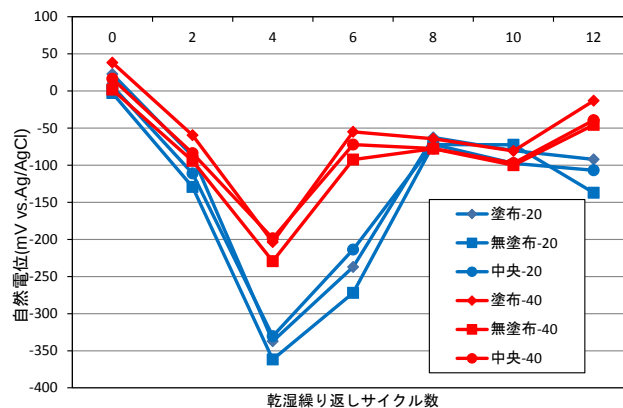


図-13 自然電位経時変化(シラン)

d) 断面修復材

断面修復材として、PCM をコンクリートと組み合わせた(OPC-PCM)の、自然電位の経時変化を図-14 に示す。測定位置によらず、サイクルの経過に伴い卑な電位に推移し、6サイクル目以降は-400mV 程度まで貴な電位に推移した。

ASTM 判定基準より、90%以上の可能性で腐食が生じている可能性があるとして予測される。

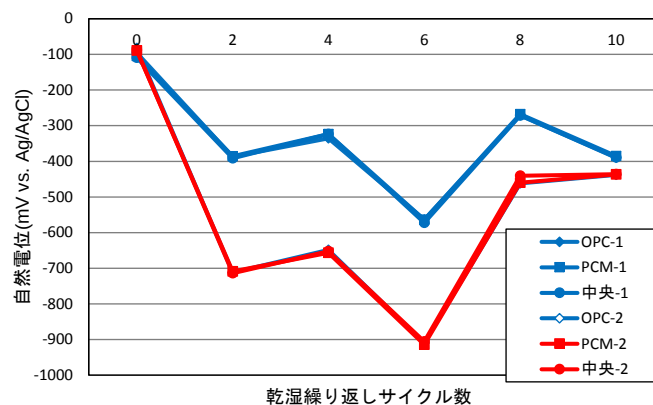


図-14 自然電位経時変化(OPC-PCM)

(5) 自然電位による腐食の判定

自然電位が安定した 8 サイクル以降に着目し、鋼材腐食の可能性が高い場合、低い場合の試験体を表-9 に示す。鋼材腐食の可能性が高い試験体は測定位置によらず、概ね-300mV 以下で推移し、腐食の可能性が低い試験体は-100mV 程度で推移した。これらの結果から、鋼材腐食の可能性は検討できるが、局部腐食の影響を把握することはできなかった。

表-9 自然電位法による腐食の可能性判定

腐食している可能性	
高い	低い
塩分量	水セメント比
断面修復	混和材
-	含浸材

3.3 分極曲線測定結果

(1) 環境の影響

10-0、10-3 の測定位置毎の腐食電流密度の経時変化を図-15、16 に示す。10-0 は測定位置によらず、8 サイクル以降の電流密度の変動は小さく、10%のみ 12 サイクル目で増加した。測定位置による影響は、塩化物イオン量の小さい 0%と、10%で $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の差が生じていた。このことから、0%がカソード、10%がアノードとなり、局部的に腐食が生じていると考えられる。CEB判定基準⁵⁾より、腐食速度は 10%において中～大程度と予測される。

10-3 は、3%でサイクルの経過に伴い腐食電流密度は若干減少する傾向を示し、 $0.25\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となった。10%や中央近傍では、腐食電流密度の変動は小さく、 $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となった。測定位置による影響は、3%と比較し 10%の腐食電流密度は大きいことから、10%がアノード、3%がカソードとなり、局部的に腐食が生じていると考えられる。腐食速度はCEB判定基準より、低～中程度と予測される。

10-0 での腐食電流密度の差が、10-3 と比較して $0.2\sim 0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度大きいことから、塩化物イオン量の差が大きいことで、不均質な腐食が生じやすいと考えられる。既往の研究では⁶⁾塩化物イオン量の増加に伴い、腐食速度は大きくなると報告されており、同様な結果となった。

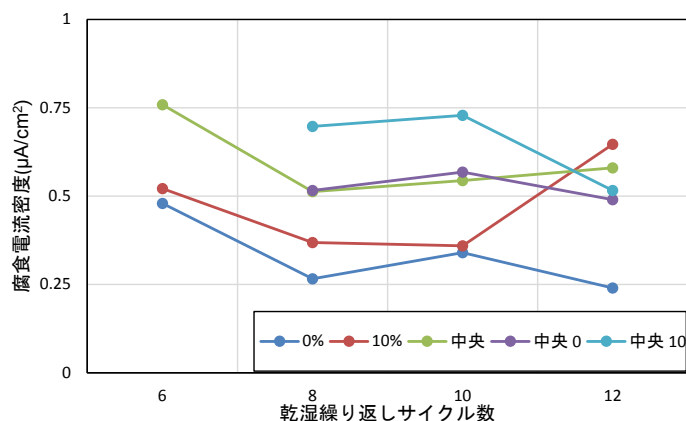


図-15 腐食電流密度経時変化(NaCl10-0)

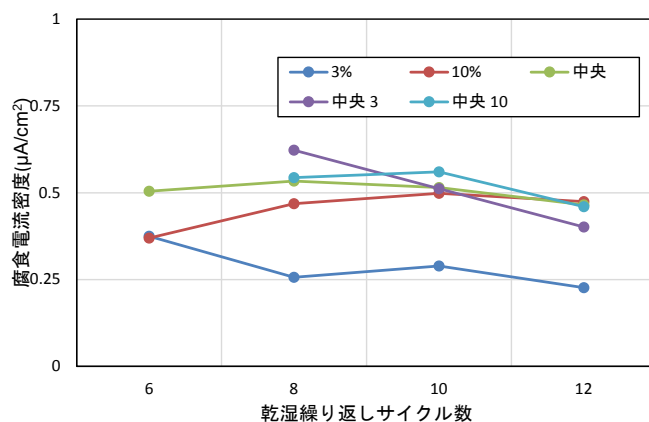


図-16 腐食電流密度経時変化(NaCl10-3)

(2) 配合の影響

a) 水セメント比

測定位置毎の腐食電流密度の経時変化を図-17, 18に示す。W/C40-60は測定位置にかかわらず、サイクルの経過に伴い腐食電流密度が増減を繰り返している。8サイクル以降、40%の腐食電流密度は概ね $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度、60%や中央近傍は $0.6\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となった。

50-60は測定位置にかかわらず、8サイクル以降の腐食電流密度の変動は小さく、 $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となった。

測定位置による影響は、40-60の40%と中央近傍で、腐食電流密度が $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の差が生じたことから、40%がカソード、中央から60%がアノードとして作用し、局部的な腐食が生じている可能性があると考えられる。CEB判定基準より、40-60は中～高程度、50-60では低～中程度の腐食速度であると予測される。腐食電流密度の結果から、水セメント比の違いによる局部的な腐食が確認された。

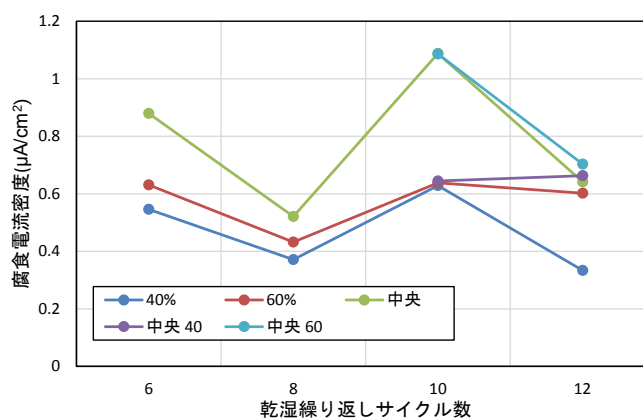


図-17 腐食電流密度経時変化(W/C40-60)

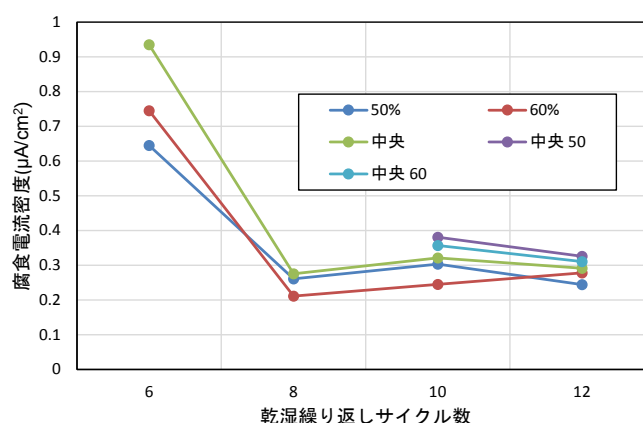


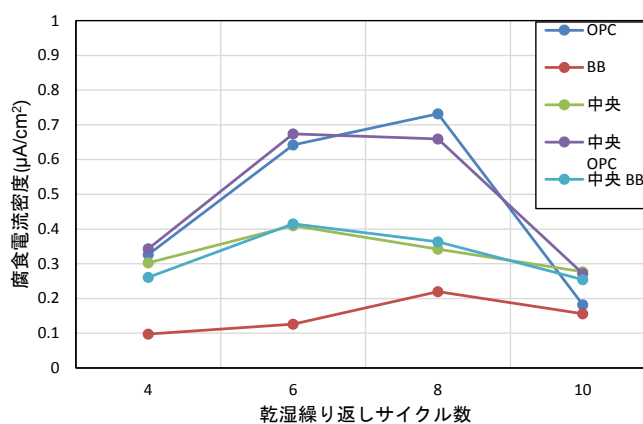
図-18 腐食電流密度経時変化(W/C50-60)

b) 混和材の影響

腐食電流密度の経時変化を図-19に示す。OPCや中央OPCで、サイクルの経過に伴い腐食電流密度が増減し、8サイクル以降は $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となった。BBや中央BBは、サイクルの経過に伴う腐食電流密度の変動は小さく、 $0.1\sim 0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となった。

既往の研究から⁷⁾、高炉スラグ微粉末を混和させた試験体は、潜在水硬性によりコンクリート中の組織が緻密になることで、劣化因子の侵入が抑制され、鋼材腐食は抑制されると

報告されている。本研究でもBBの腐食速度 $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度と小さく、同様な結果となった。

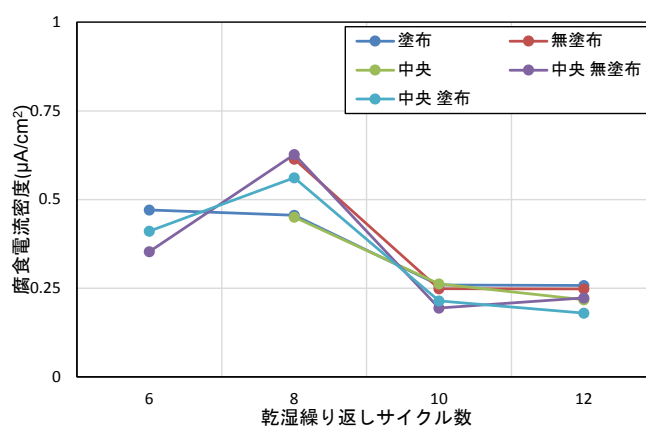


図－19 腐食電流密度経時変化(OPC－BB)

(3) 補修方法の影響

a) けい酸 Li 系表面含浸材

けい酸 Li 系表面含浸材を試験面の半面に塗布した場合の、腐食電流密度の経時変化を図－20 に示す。測定位置にかかわらず、サイクルの経過に伴い腐食電流密度が減少する傾向を示した。



図－20 腐食電流密度経時変化(Li)

b) けい酸 Na 系表面含浸材

けい酸Na系表面含浸材を試験面の半面に塗布した場合の、腐食電流密度の経時変化を図－21 に示す。測定位置にかかわらず、腐食電流密度の変動は小さく、概ね $0.25\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度で推移している。

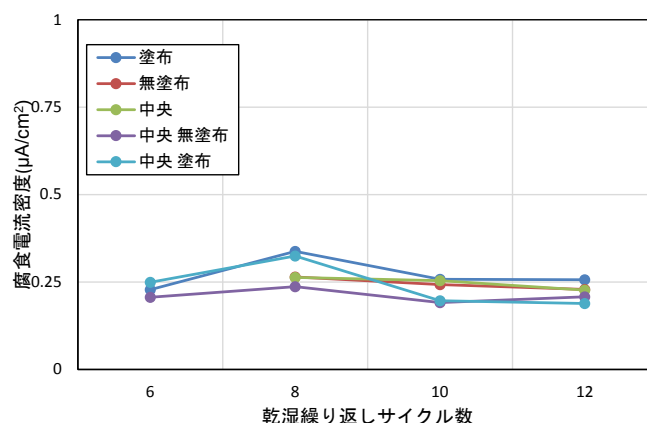


図-21 腐食電流密度経時変化(Na)

c) シラン系表面含浸材

シラン系表面含浸材を試験面の半面に塗布した場合の、腐食電流密度の経時変化を図-22に示す。Na系含浸材と同様に、測定位置にかかわらず、サイクルの経過に伴う腐食電流密度の変動は小さく、8サイクル以降で概ね $0.25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度で推移する傾向を示した。

含浸材を半面に塗布した試験体の、8サイクル以降の腐食速度は、概ね $0.25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度で推移した。CEB判定基準より腐食速度は、低～中程度であると予測される。本研究では、含浸材塗布による腐食電流密度の差は見られず、含浸材による不均質性は見られないと考えられる。

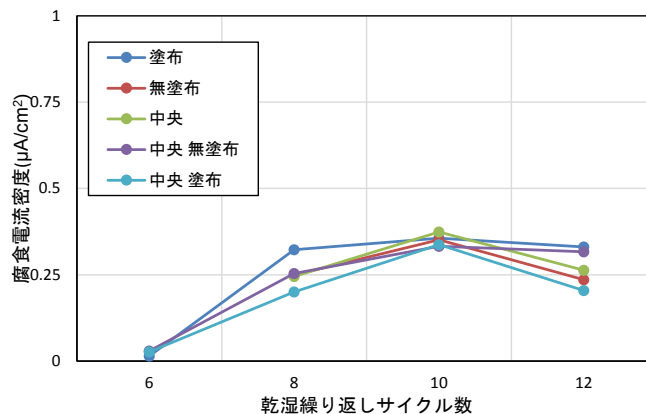


図-22 腐食電流密度経時変化(シラン)

d) 断面修復材

腐食電流密度の経時変化を図-23に示す。かぶり 20mm の OPC は、サイクルの経過に伴い腐食電流密度が増加する傾向を示し、6サイクル以降で減少する傾向を示した。PCM では腐食電流密度の変動は小さくなった。

かぶり 40mm では測定位置にかかわらず、サイクルの経過に伴い腐食電流密度は減少する傾向を示した。かぶりによる影響は、かぶり 20mm, 40mm とともに、8サイクル以降、測定位置にかかわらず腐食電流密度は概ね $0.25 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となるため、かぶりによる影響は小さいと考えられる。

測定位置による影響は、OPC、中央近傍と比較してPCMの腐食電流密度は小さくなった。これは、コンクリートと比較して、PCMは物質移動抵抗性が高いため、高い防錆性をもつ

ことから、腐食抑制効果が見られたと考えられる⁴⁾⁸⁾。PCMとOPCの腐食電流密度は $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の差が生じており、OPCがアノード、PCMがカソードとして作用し、局部的な腐食が生じていると考えられる⁴⁾⁹⁾。腐食速度はCEB判定基準より、低～中程度であると予測されるため、腐食は軽微であると考えられる。

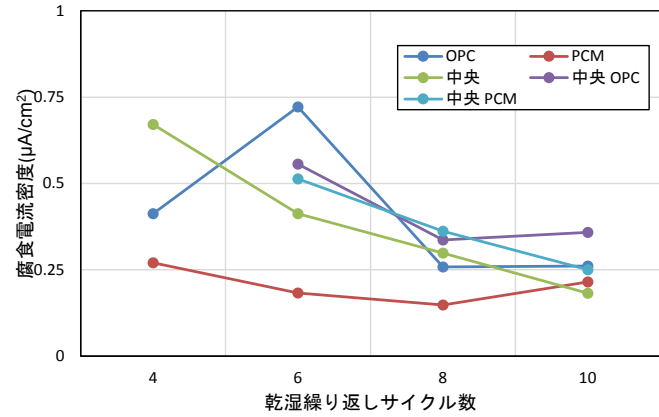


図-23 腐食電流密度経時変化(OPC-PCM)

(4) 腐食電流密度による局部腐食の可能性

測定位置の違いによる腐食電流密度の差から、局部的な腐食が生じている場合と、局部的な腐食が生じていない場合の分類を表-10に示す。また、局部腐食していると考えられる場合のアノード部、カソード部を表-11に示す。具体例として、12サイクルにおけるNCI10-0の測定位置毎の腐食電流密度を図-24に示す。鋼材腐食が生じていると考えられる場合、腐食電流密度は測定位置で $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の差が生じており、腐食電流密度が大きい箇所がアノード部、小さい箇所がカソード部となり、局部的な腐食が生じていると考えられる。

表-10 局部腐食の可能性

腐食している可能性	
有り	無し
塩分量	水セメント比
断面修復	混和材
-	含浸材

表-11 局部腐食 反応箇所

	アノード部	カソード部
塩分量	10%	0%
		3%
断面修復材	OPC	PCM

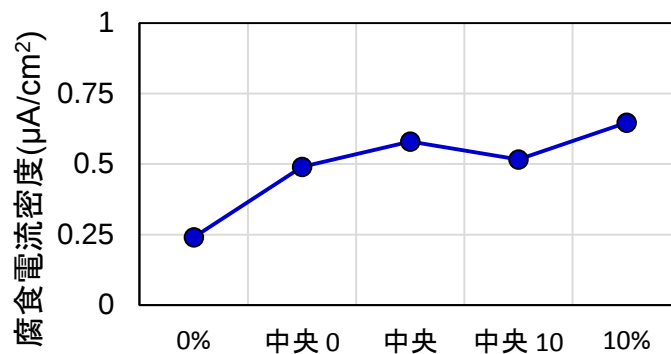


図-24 腐食電流密度の分布(NaCl10-0)

(5) 自然電位と腐食電流密度の相関関係

鋼材腐食が生じている場合、生じていない場合の自然電位と腐食電流密度の関係を図-25, 26 に示す。図の凡例は、試験体の種類一かぶりを示す。鋼材腐食が生じている場合は、自然電位が卑であるほど、腐食電流密度は大きい値を示す傾向が分かる。しかし、自然電位が-400mV～-600mVの範囲において、同程度の自然電位であっても、腐食電流密度が大きく異なっていることが分かる。この結果より、自然電位は腐食の可能性は予測できるが、局所的な腐食状態を予測することは難しく、腐食電流密度を測定することで、局所的な腐食状態を把握することができると考えられる。

腐食が生じていないと考えられる場合、自然電位は概ね-100～-200mV程度となり、腐食電流密度は $0.2 \sim 0.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度の小さい値を示す。ここで、自然電位ではASTM判定基準より腐食が生じていると予測されるが、腐食電流密度からはCEB判定基準より腐食は軽微であると考えられ、自然電位と腐食電流密度の傾向が異なっていることが分かる。かぶりの影響に着目すると、かぶりが大きいことで鋼材近傍の酸素の拡散が律速となり、カソード部の反応が抑制され、それに伴いアノード部の反応も抑制されたと考えられる。そのため、自然電位は-700mV程度となり、腐食電流密度は小さくなったと考えられる。

以上の結果より、腐食が生じていると考えられる場合、自然電位から腐食の可能性を予測し、腐食電流密度により測定位置による局所的な腐食状態を予測する方法が良いと考えられる。長期的な計測を行うことで、どのような組み合わせにおいて自然電位と腐食電流密度に相関関係があるのかについて、検討を行う必要があると考えられる。

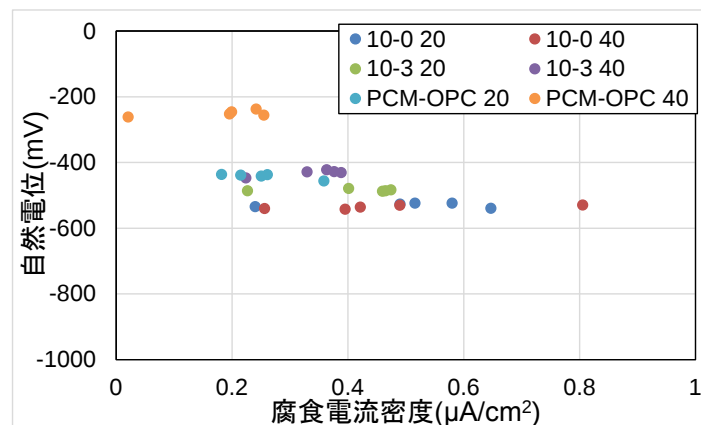
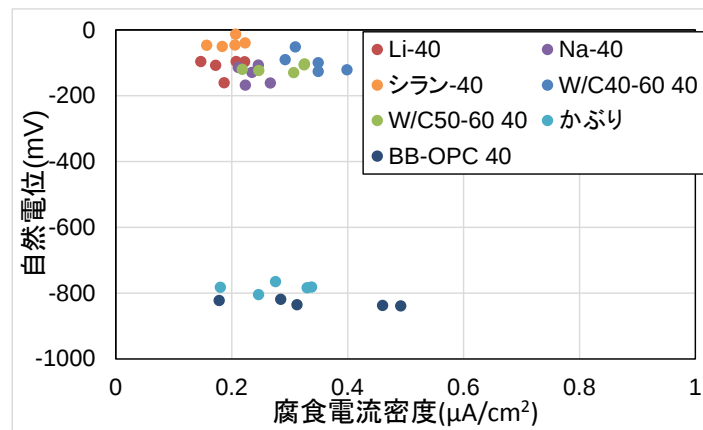


図-25 腐食鋼材の自然電位と腐食電流密度の関係(12 サイクル)



図ー26 腐食無し鋼材の自然電位と腐食電流密度の関係(12 サイクル)

4. 不均質性が自然電位や腐食電流密度に与える影響の検討

前述の結果より，コンクリート中の不均質性が，鋼材腐食の進行に影響を与えることが分かった．ここで，試験体左右で鋼材の腐食環境が異なる場合，鋼材同士が電氣的に導通していると考えられる．そこで，腐食程度の異なる鋼材動詞の電氣的導通の影響を把握するため，試験体の塩化物イオン量を変化させた試験体を組み合わせ，自然電位や腐食電流密度に与える影響を検討した．

4.1 実験概要

(1) 試験体の組み合わせ

試験体の組み合わせを表－12 に示す．塩化物イオン量でアノード部を設定し，試験体を組み合わせ，以下の水準で電氣的導通の影響を検討した．

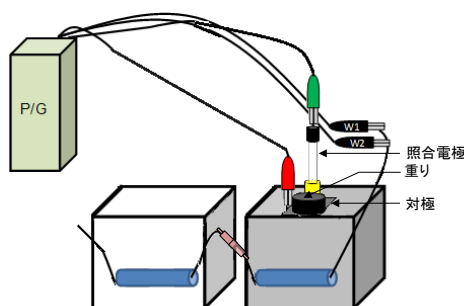
かぶりを 20mm に固定し，コンクリートに練り込む塩化分イオン量を単位水量に対し 0, 3, 10% と変化させた OPC を組み合わせる．なお，塩化物イオン量 3, 10% をアノード部，0% をカソード部とする．塩化物イオン量の影響を検討するため，コンクリートの品質や，かぶりを固定し，アノード部とカソード部の面積比の影響や，アノード部とカソード部の配置による鉄筋腐食の進行に与える影響を検討した．

表－12 試験体の組み合わせ

変化項目	略記	試験体 1	試験体 2
NaCl	N0-N10	OPC0%	OPC10%
	N3-N10	OPC3%	

(2) 電気化学的測定

前述と同様に自然電位，分極曲線の測定を行った．なお，電氣的導通による分極の影響を把握するため，鋼材同士を電氣的に導通した状態(E_{on})，および短絡を外して 24 時間後(E_{off})に測定した．電気化学測定の測定状況を図－27 に示す．



図－27 電気化学的測定概要

4.2 異なる塩化物イオン濃度の試験体の組み合わせ

(1) 自然電位の変化

塩化物イオン濃度の異なる試験体を組み合わせ，電氣的導通の有無による自然電位の変化を定量的に把握した．N0-N10, N3-10 の自然電位の経時変化を図－28, 29 に示す．N0-N10 のサイクル初期の E_{off} はN0 が-90mV，N10 は-370mVとなり，サイクルの経過とともに貴な

電位に推移した。E_{on}はN0が-190mV、N10は-370mVとなり、サイクルの経過とともに貴な電位に推移する傾向を示した。また、N3-N10のE_{off}は、N0が-90mV、N10は-380mV程度で推移した。E_{on}のサイクル初期はN3が-260mV、N10は-370mVとなり、サイクルの経過とともに貴な電位に推移した。ASTM判定基準よりN0のE_{off}は90%以上の確率で腐食なし、N3のE_{off}は不確定、N10のE_{off}はN0-N10、N3-10どちらも90%以上の確率で腐食ありと予測される。

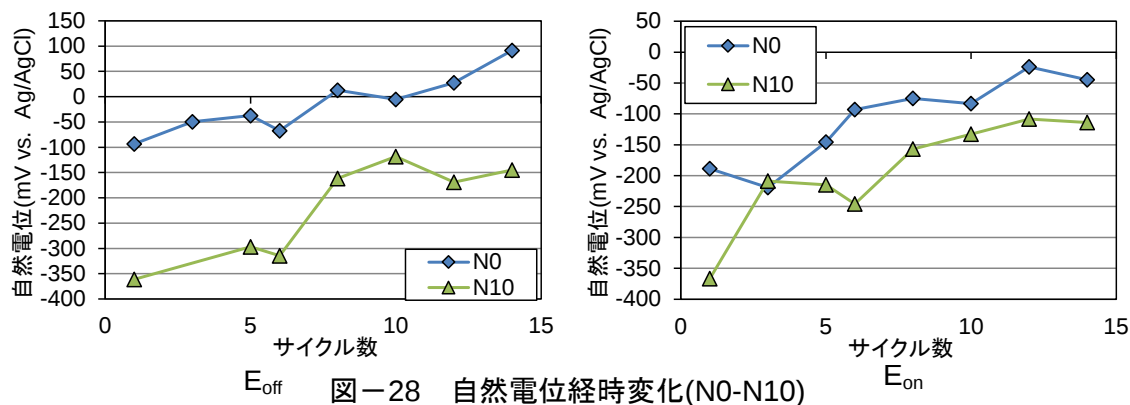


図-28 自然電位経時変化(N0-N10)

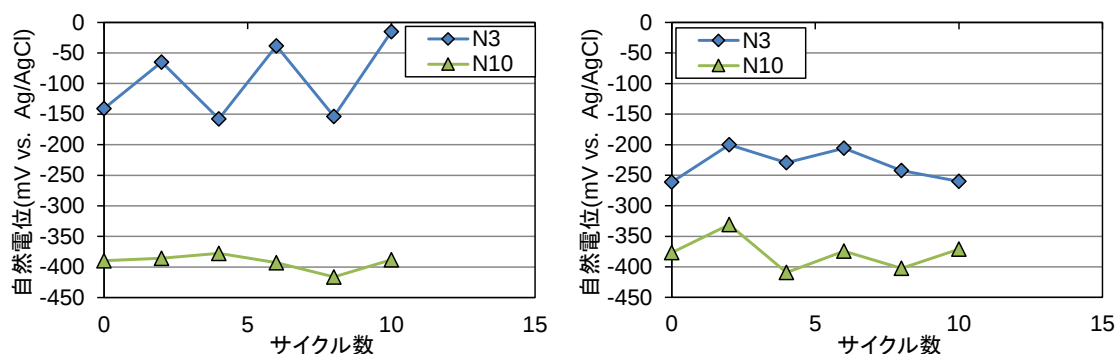


図-29 自然電位経時変化(N3-N10)

N0-N10, N3-N10 の自然電位の変化量(E_{on}-E_{off})を図-30, 31 に示す。塩化物イオン濃度の違いによりアノード部とカソード部を設定した場合、E_{off}からE_{on}に変化することで、アノード部のN10はN0-N10で-20~80mV程度、N3-N10で-30~60mV程度の貴な電位となり、カソード部のN0は-100mV、N3は-150mV程度の卑な電位となった。塩化物イオン濃度を変化させた、アノード部とカソード部を短絡した場合、アノード部は20~60mVの貴な電位、カソード部は-100~-160mVの卑な電位に分極された。

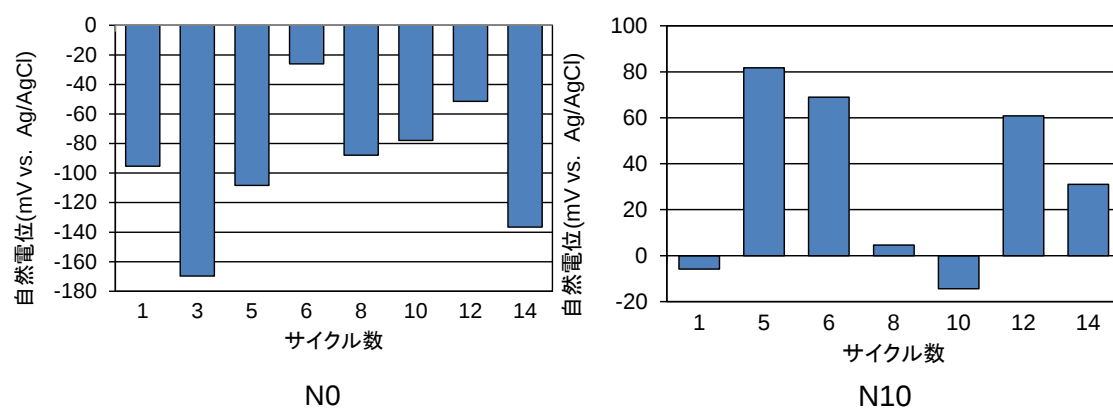


図-30 自然電位の変化量(N0-N10)

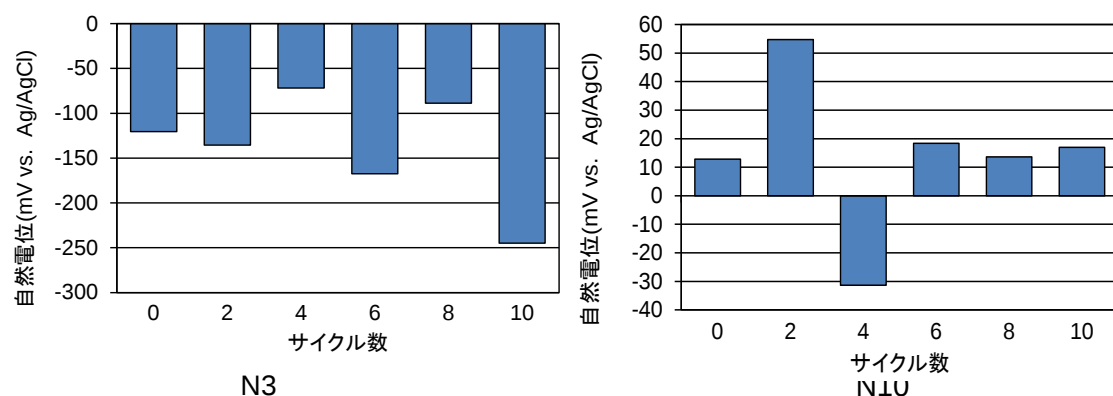


図-31 自然電位の変化量(N3-N10)

(2) 分極曲線測定結果および腐食電流密度の算出

N0-N10 の分極曲線を図-32 に、 E_{off} および E_{on} の腐食電流密度の変化を図-7 に示す。 E_{off} の分極曲線の勾配は、N10 がN0 より緩やかであることから、N10 の腐食電流密度がN0 より大きいことがわかる。次に、 E_{off} と E_{on} の分極曲線を比較すると、アノード部とカソード部のお互いが分極の影響を受けるため E_{on} では電位が変化し、N10 の分極曲線は貴な電位となり、N0 は卑な電位となった。ここで、 E_{on} の時の腐食形態はアノード部とカソード部が異なる鉄筋要素に跨りマクロセル腐食が形成されると考えられ、アノード部であるN10 のアノード分極曲線とカソード部であるN0 のカソード分極曲線との交点から E_{on} の腐食電流密度を求める⁸⁾⁹⁾。

図-33 の腐食電流密度の変化より、 E_{off} と E_{on} の腐食電流密度を比較すると、 E_{off} から E_{on} に変化することで、アノード部のN10 は $0.04\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、カソード部のN0 は $0.07\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度、腐食電流密度が大きくなった。これは、短絡によりアノード部(Aa)とカソード部(Ac)の表面積比 A_c/A_a が大きくなったと考えられる。なお、マクロセル電流はカソード部のN0 から、アノード部のN10 へ電流が流れていると考えられる。CEB判定基準より、 E_{off} の腐食電流密度はN10 で $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ となり中～高程度の腐食速度、N0 では $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ で低～中程度の腐食速度となった。

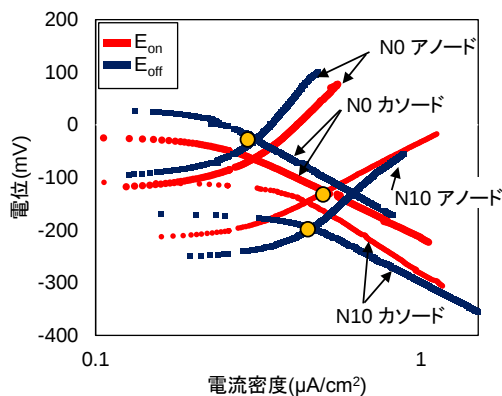


図-32 分極曲線
(N0-N10, 11 サイクル)

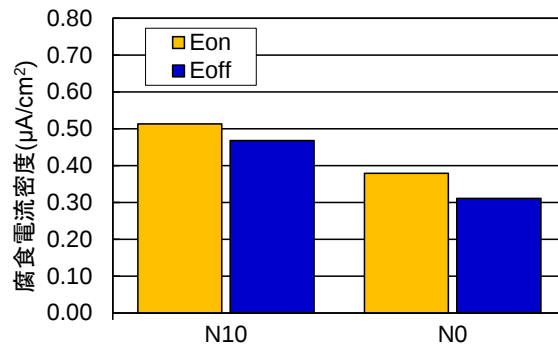


図-33 腐食電流密度
(N0-N10, 11 サイクル)

4.3 まとめ

本研究では、環境、配合、かぶり、および補修方法によって、pH、空隙率、および塩化物イオン濃度を意図的に変化させた試験体を作製し、これらの不均質性が鋼材腐食に及ぼす影響を検討した。また、腐食環境が異なる試験体を組み合わせ、短絡による分極の影響を検討した。以下に、得られた知見をまとめる。

- (1) 自然電位の経時変化より、塩化物イオン量や、断面修復材を行った試験体において、全ての測定位置で自然電位が卑に移行し、ASTM 判定基準より腐食している可能性が高い可能性が示された。測定位置による自然電位の差は見られず、自然電位による鋼材腐食の不均質さを確認することはできなかった。
- (2) 腐食電流密度の経時変化より、全ての試験体で腐食が進行していると予測された。これらのうち、塩分量を変化させた試験体では、塩分量の大きい箇所、断面修復材を用いた供試体においては、母材コンクリート側で腐食電流密度が増加し、測定位置による腐食電流密度に差が見られた。この結果より、腐食電流密度が大きい箇所がアノード、小さい箇所がカソードとして作用し、局所的な腐食が生じていると予測される。

5.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

施工条件がコンクリートの表層品質に及ぼす影響を検討する。また、現場計測手法によるかぶりコンクリートの品質は特性値と関係があると報告されている。そこで、かぶりコンクリートの品質と特性値の関係性についても検討する。

5.1 供試体概要および測定項目

(1)養生および配合の影響

コンクリートの示方配合を表-13、表-14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。また、検討例を多くすることを目的に、測定を行った。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、化学混和剤の使用量を調整した。W/C を 40, 50, 60% の 3 配合に設定した。

表-13 示方配合(2013 年度)

Gmax (mm)	Air (%)	SL (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
					W	C	F	S	G	A ₁	A ₂	A ₃
20	4.5	10.0	40	45	165	413		783	986	2.6	125	
			50			330		806	1015	6.6		135
			60			275		890	994	5.5	275	
			50			231	99	851	1072	4.6		50
			40			227	186	853	1074	3.3		60
			50			182	149	870	1095	3.6		62.5
			60			151	124	882	1110	3.3		100
			50			132	198	889	1119	2.6		92.5

F : 高炉セメントB種, A₁ : AE剤, A₂ : AE減水剤, A₃ : 高性能AE減水剤

表-14 示方配合(2014 年度)

Gmax (mm)	Air (%)	SL (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					単位量(g/m ³)	
					W	C	F ₁	S	G	A ₁	A ₂
20	4.5	10.0	40	45	165	413		771	986	2.07	0.99
			50		165	330		802	1025	0.56	0.66
			60		165	275		822	1051	1.1	3.3
			50		165	182	149	799	1022	1.99	0.53

供試体は、表面透気試験や4プローブ法を行うための供試体(以下、type1)、塩水浸せき試験や圧縮強度試験を行うための供試体(以下、type2)、中性化促進試験を行うための供試体(以下、type3)、吸水試験を行うための供試体(以下、type4)の4種類を作製した。供試体寸法はtype1では150×150×150mm角の角柱供試体、type2ではΦ100×200mmの円柱供試体、type3では100×100×400mmの角柱供試体、type4では100×100×80mmの角柱供試体とした。

打設は、突棒を用いて2層で打ち込んだ。また、表面気泡の発生を防ぐため、スパーング処理を行った。打設翌日に脱型を行い、材齢28日まで水中養生(温度20℃)、封かん養

生および気中養生(温度 20℃, R.H.60%)を行った。

(2)施工による品質変動の影響

コンクリートの示方配合を表-15 に示す。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，化学混和剤の使用量を調整した。W/C を 40，50，60% の 3 配合に設定した。

表-15 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	40	45	165	413	771	986	2.07	0.99
			50		165	330	802	1025	0.56	0.66
			60		165	275	822	1051	1.1	3.3

施工の影響を把握するため，締固め時間や鉄筋間通過，打重ねに注目して検討した。供試体は，図-34，図-35および図-36に示す。いずれの供試体の場合も，打設翌日に脱型を行い，材齢28日まで湿布養生を行った。その後，乾燥期間として14日間気中環境(温度20℃, R.H.60%)に静置し，表面透気試験を行った。

締固め時間の検討では，棒状バイブレータを用いて0，15および30秒と変化させて検討した。なお，締固め時間0秒は，突棒を用いる方法とした。

鉄筋間通過の検討では，配筋の内側から棒状バイブレータを用いて締固めを行うことで，かぶり部にコンクリートを充填させた。

打重ねの検討では，1層目打設後，コンクリート標準示方書施工編に準じて，2層目の打設を行った。なお，1層あたりの締固めは，棒状バイブレータを用いて5秒間行った。

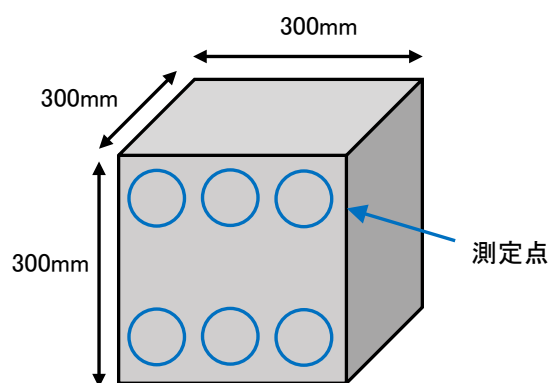
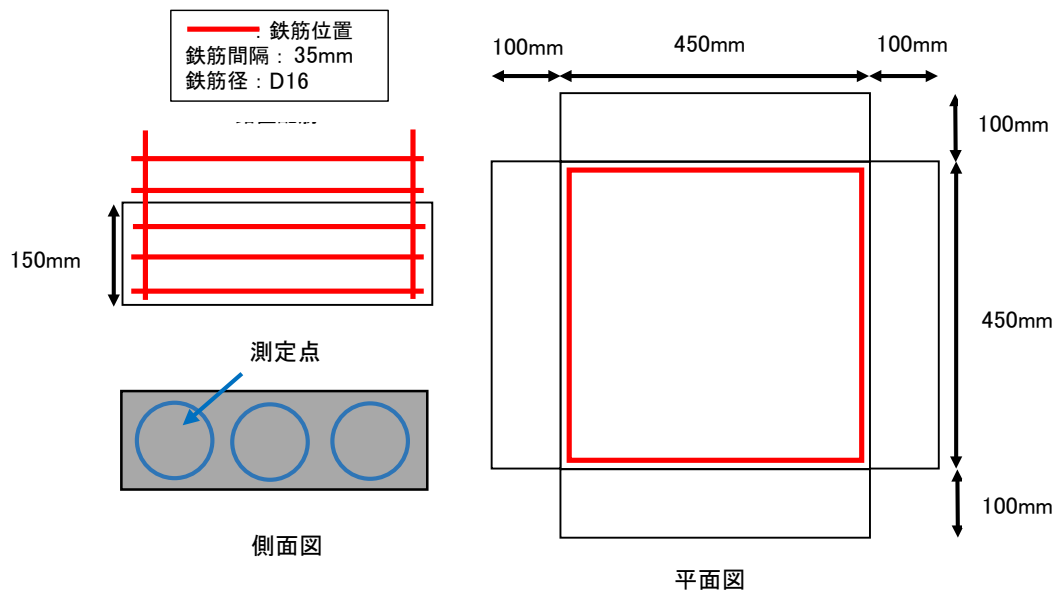
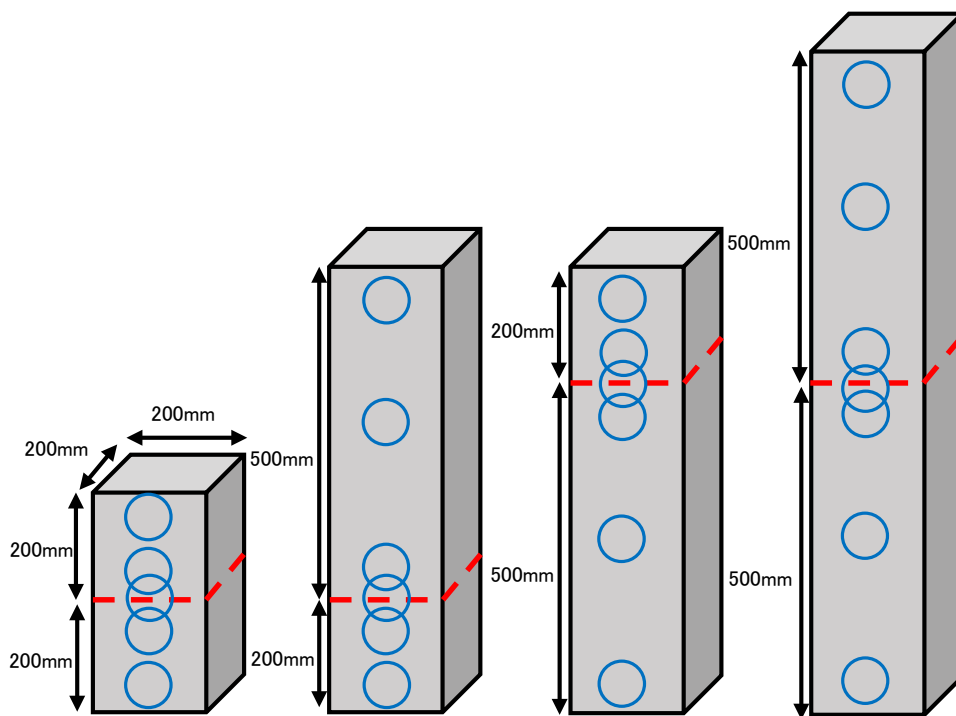


図-34 締固め時間の検討の供試体



図－35 鉄筋間通過の検討の供試体



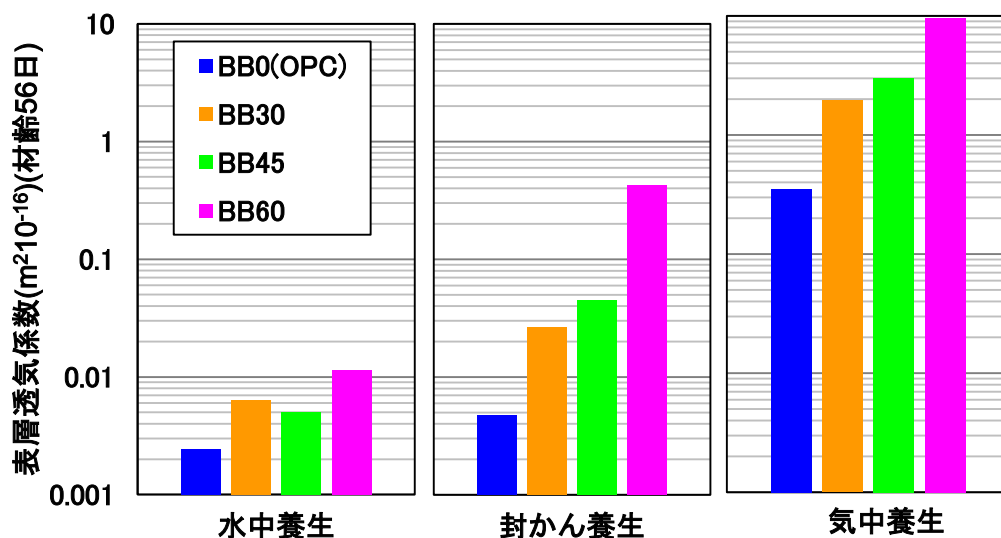
図－36 打重ねの検討の供試体

5.2 養生や配合の影響の検討

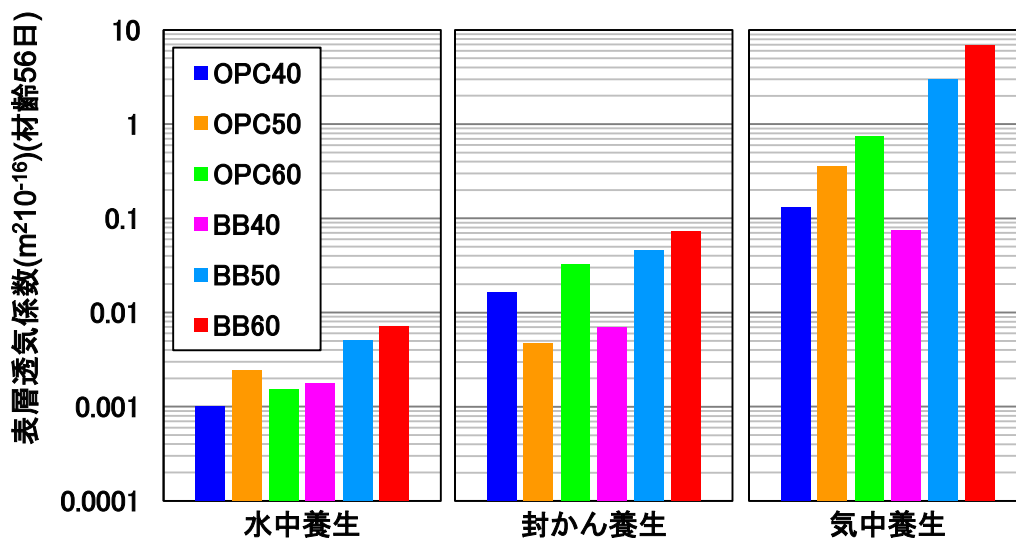
(1) 各種測定条件と結果

28 日間養生終了後，乾燥期間として 28 日間気中環境(温度 20℃，R.H.60%)に静置した．

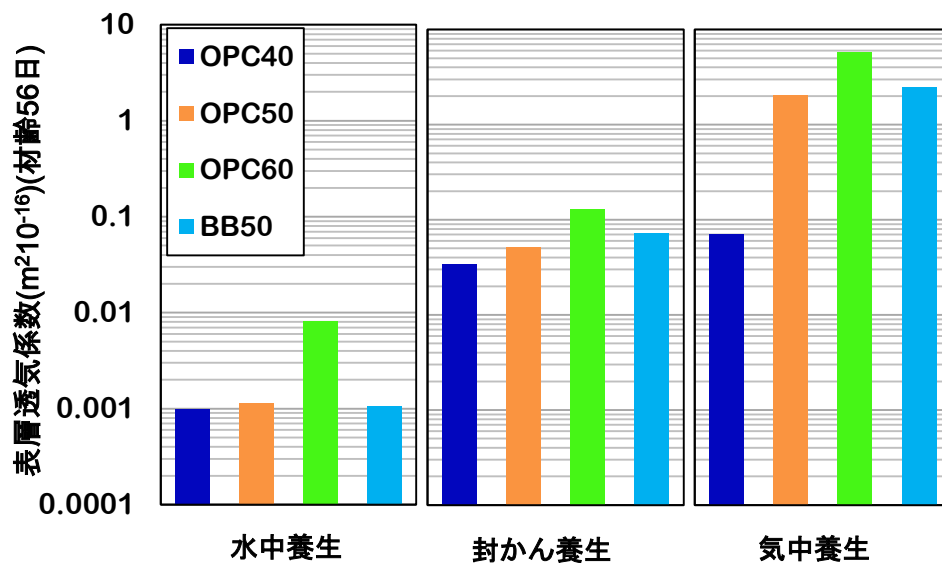
材齢 56 日における表層透気係数の関係を図－37，図－38 および図－39 に示す．いずれの結果も，水中養生，封かん養生，気中養生の順に表層透気係数の増加が確認された．また，混和材の置換率や水結合材比の増加に伴い，表像透気係数は概ね増加する傾向が確認された．



図－37 材齢 56 日における表層透気係数の関係(置換率の違い)



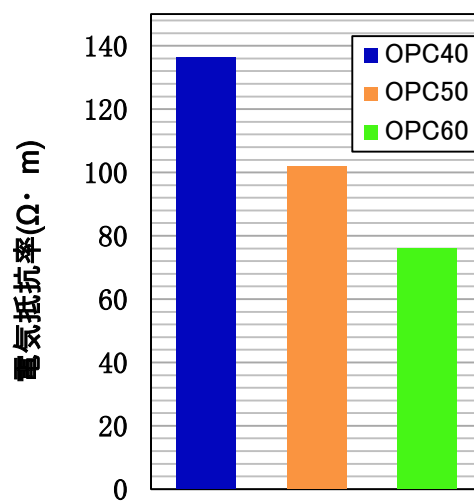
図－38 材齢 56 日における表層透気係数の関係(水結合材比の違い)



図－39 材齢 56 日における表層透気係数の関係(2014 年度)

表層透気係数測定後の供試体に飽水处理を行い、4 プローブ法を用いて電気抵抗率を測定した。

電気抵抗率の関係を図－40 に示す。なお、養生による違いが確認されなかったため、水中養生の結果を示す。水結合材比の増加に伴い、電気抵抗率の低下が確認された。

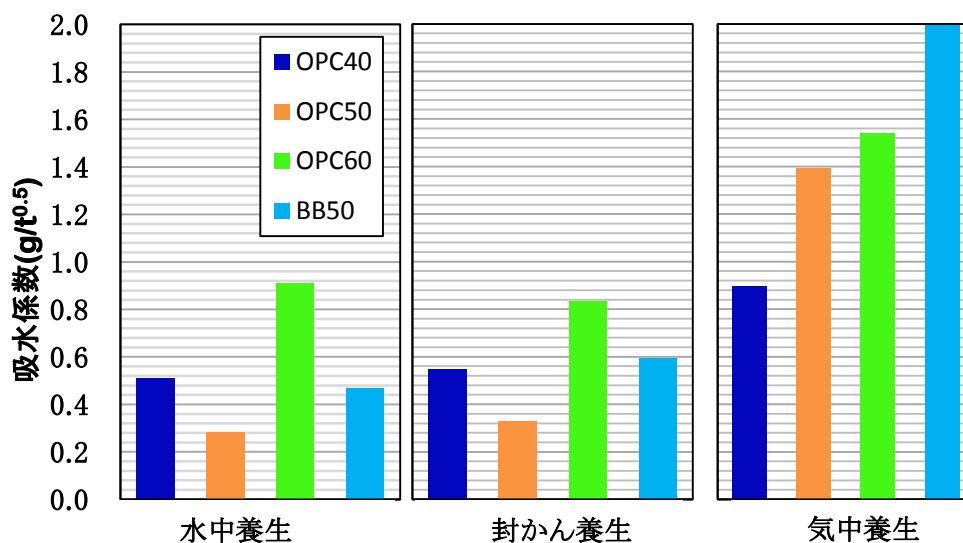


図－41 電気抵抗率の関係

28 日間養生終了後、供試体を 40℃炉乾燥に静置し、前日との質量比が 0.01%以下になるまで乾燥させた。乾燥期間終了後、ASTM C 1585-04 に準じて吸水試験を行い、質量増加量と時間の平方根の関係より近似曲線を求め、吸水係数を算出した。

吸水係数の関係を図－42 に示す。いずれの配合でも、気中養生では、水中養生や封かん養生と比較して吸水係数が大きくなった。また、水中養生と封かん養生の吸水係数は同程

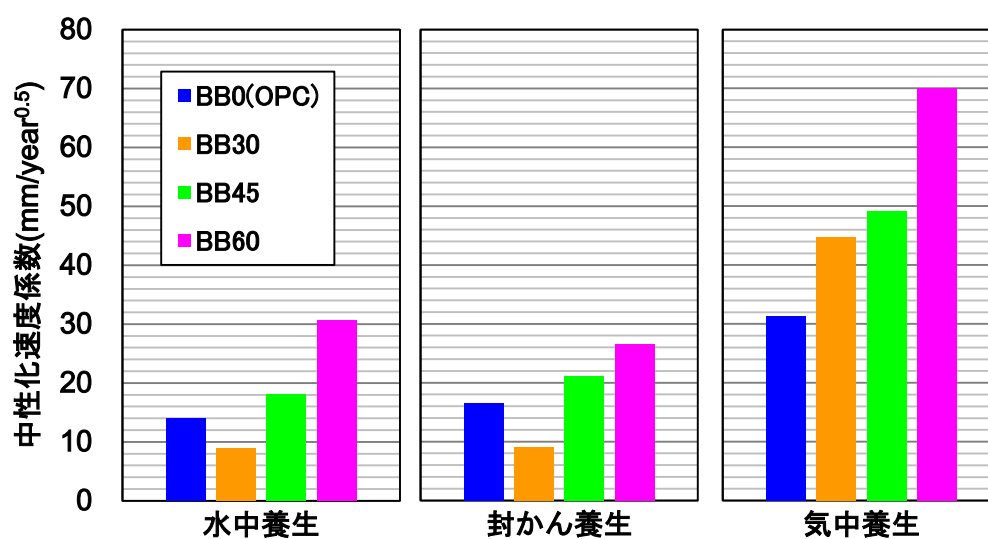
度となった。



図－42 吸水係数の関係

28 日間養生終了後, JIS A 1153 に準じて中性化促進試験を行った。試験条件は, 温度 20℃, 相対湿度 60%, CO₂濃度 5%とし, 促進期間(1, 4, 8, 13 週)ごとに供試体を割裂し, 切断面にフェノールフタレインを噴霧して中性化深さを測定した。両側面 5 箇所(計 10 箇所)の平均を測定結果とした。その後, 中性化深さの増加量と時間の平方根の関係より近似曲線を求め, 中性化速度係数を算出した。

中性化速度係数の関係を図－43, 図－44 および図－45 に示す。いずれの結果も, 水中養生, 封かん養生, 気中養生の順に中性化速度係数の増加が確認された。また, 置換率や水結合材比の増加に伴い, 中性化速度係数は概ね増加する傾向が確認された。



図－43 中性化速度係数の関係(置換率の違い)

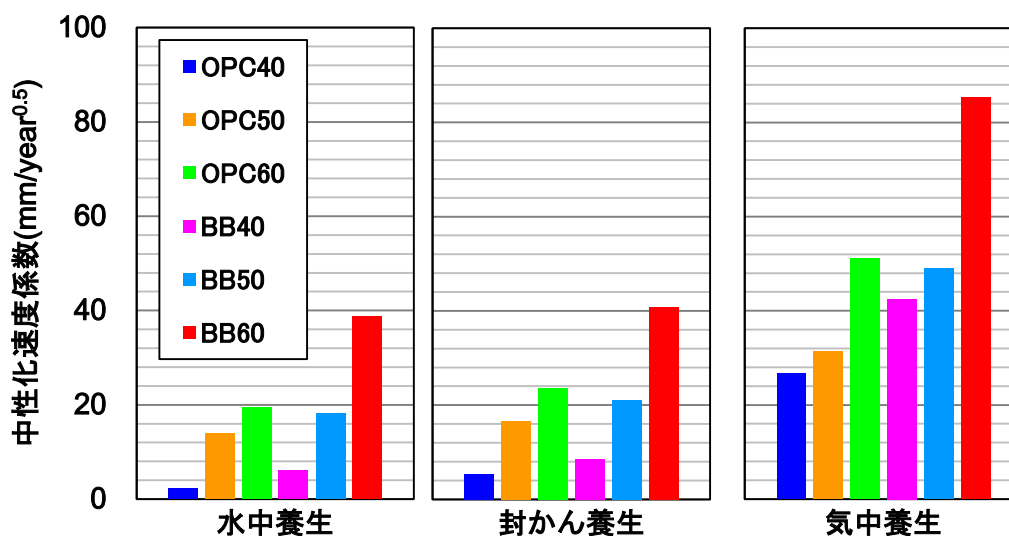


図-44 中性化速度係数の関係(水結合材比の違い)

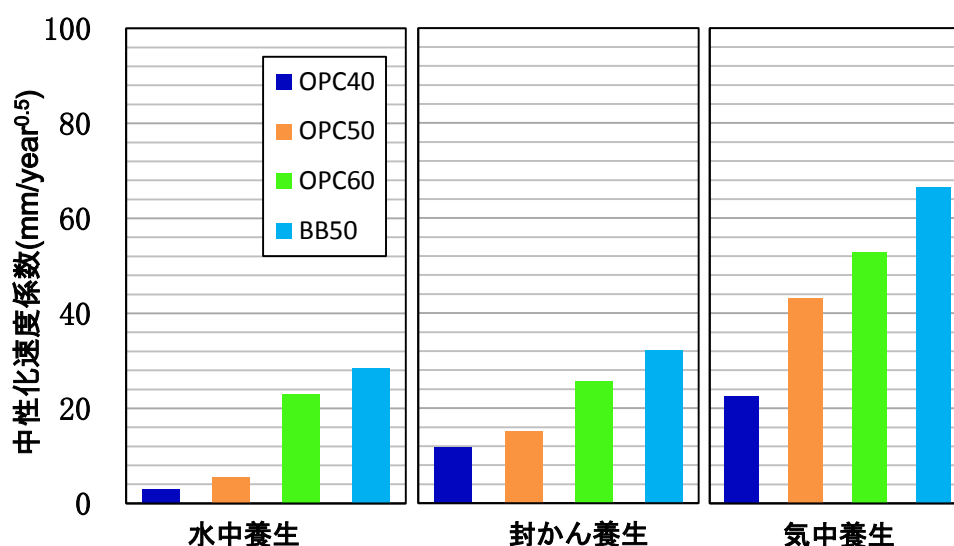
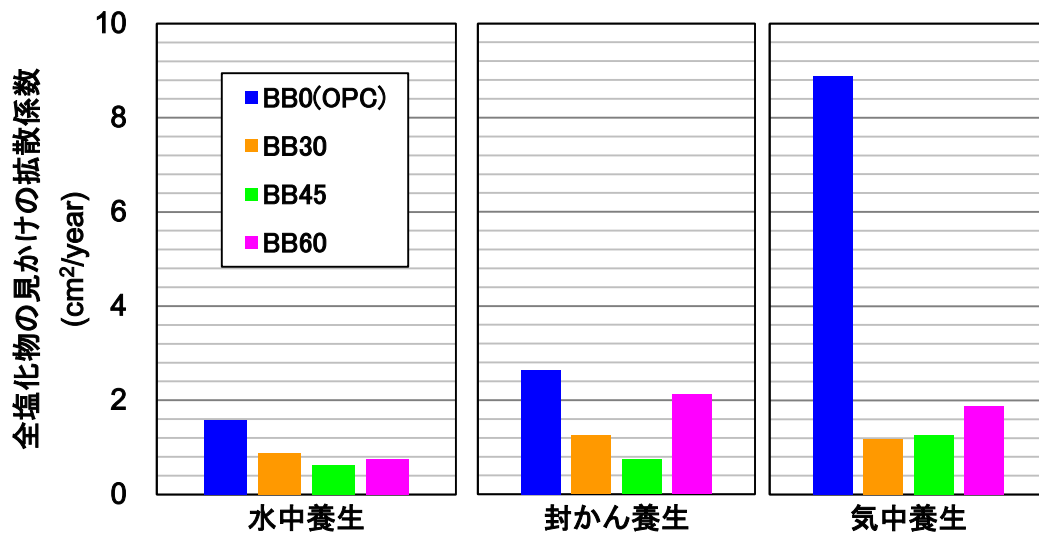


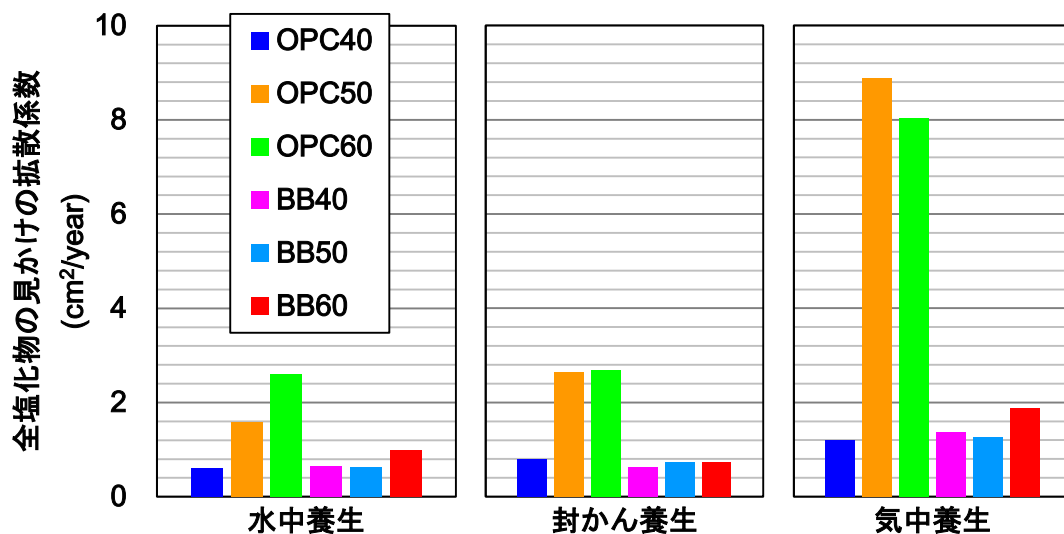
図-45 中性化速度係数の関係(2014 年度)

28 日間養生終了後、JSCE-G 572-2007 に準じて塩水浸せき試験を行った。Type2 の供試体を $\phi 100 \times 100 \text{mm}$ に切断し、打設面と側面にエポキシ樹脂を被覆した後に塩水浸せきした。浸せき直後に、移流による塩水の急激な侵入を防ぐために、事前に飽水処理を行った。浸せきを行う期間は 2013 年度では 3 ヶ月、2014 年度では 4 ヶ月とし、水に対する塩分濃度を 10wt% とした。浸せき期間終了後、表面から 5 層目(1 層あたり 10mm)まで切断した。その後、粗骨材を取り除き、粉砕することで試料を作成し、電位差滴定装置を用いて全塩化物量を測定した。測定結果とフィックの第 2 法則に基づいた拡散方程式の解より、見かけの拡散係数を算出した。

全塩化物物見かけの拡散係数の関係を図-46、図-47 に示す。いずれの結果も、水中養生、封かん養生、気中養生の順に見かけの拡散係数の増加が確認された。また、置換率や水結合材比の増加に伴い、見かけの拡散係数は概ね増加する傾向が確認された。



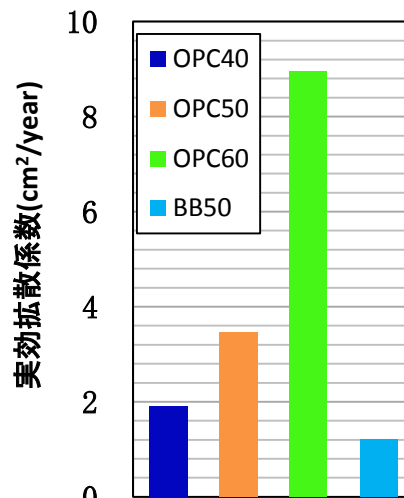
図－46 全塩化物の見掛けの拡散係数の結果(置換率の違い)



図－47 全塩化物の見掛けの拡散係数の結果(水結合材比の違い)

28 日間養生終了後、JSCE-G 571-2003 に準じて電気泳動試験を行った。type2 の供試体を $\Phi 100 \times 50 \text{mm}$ に切断し、側面にエポキシ樹脂を被覆したものを使用した。供試体をセルの中心に設置し、水酸化ナトリウム(0.3mol/l)を入れたセルを陽極、塩化ナトリウム(0.5mol/l)を入れたセルを陰極とし、一定電圧(15V)を流すことによって電位勾配によって塩化物イオンを移動させた。測定は、コンクリートの細孔を通過し陽極に移動する塩化物イオン量の時間変化が定常状態になるまで行い、定常状態の増加割合を用いて実効拡散係数を算出した。なお、定常状態は陽極側の塩化物イオン量の増単位時間当たりの増分が一定となった時点と判断する。

実効拡散係数の関係を図－48 に示す。なお、養生による違いが確認されなかったため、水中養生の結果を示す。水結合材比の増加に伴い、実効拡散係数の増加が確認された。

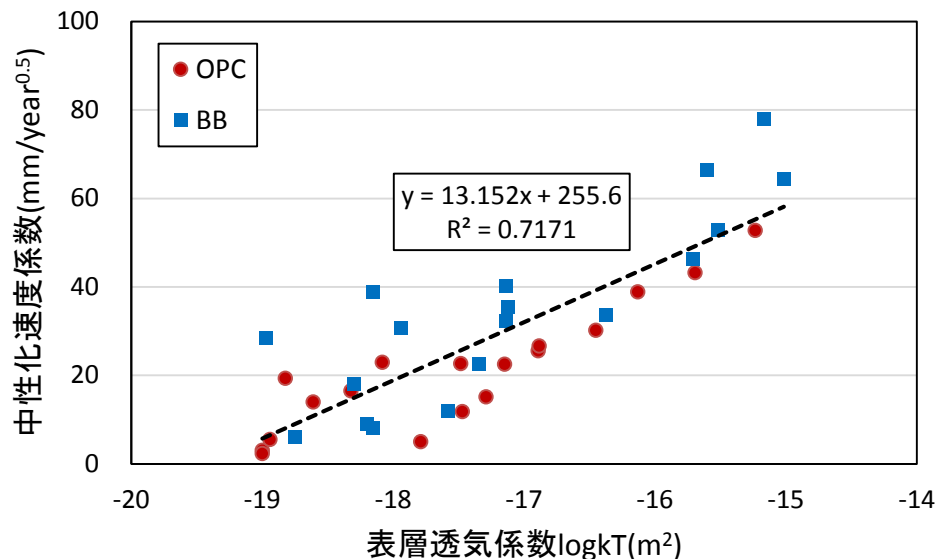


図－48 実効拡散係数の関係

(2) 現場計測結果と特性値の関係性

表層透気係数 ($\log kT$) と中性化速度係数 A の関係を図－49 に示す．表層透気係数の増加に伴い，中性化速度係数の増加が確認された．また，セメント種類や養生，水結合材比に関わらず，高い相関性が確認された．両者の関係式を式 1) に示す．

$$A = 13.2l(\log kT) + 255.6 (R^2 = 0.72) \quad \text{式 1)}$$



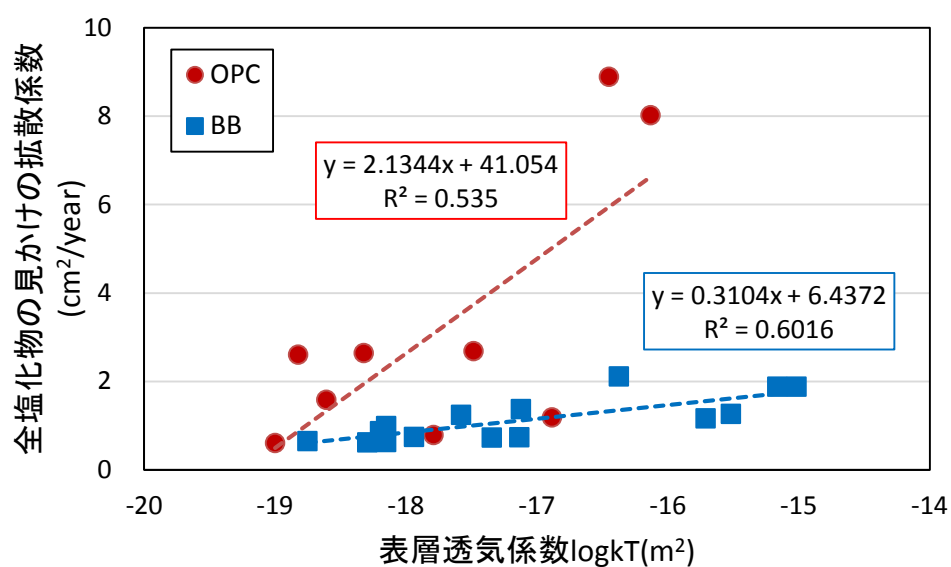
図－49 表層透気係数と中性化速度係数の関係

表層透気係数 ($\log kT$) と全塩化物の見かけの拡散係数 (D_a) の関係を図－50 に示す．表層透気係数の増加に伴い，見かけの拡散係数の増加が確認された．また，OPCでは，浸せき期間によって傾向が異なることが確認された．一方，BBでは，浸せき期間に関わらず同様

な傾向が確認された。OPCにおける浸せきの関係式を式 2)に、BBにおける両者の関係を式 3)示す。

$$D_a = 2.13(\log kT) + 41.0(R^2 = 0.54) \quad \text{式 2)}$$

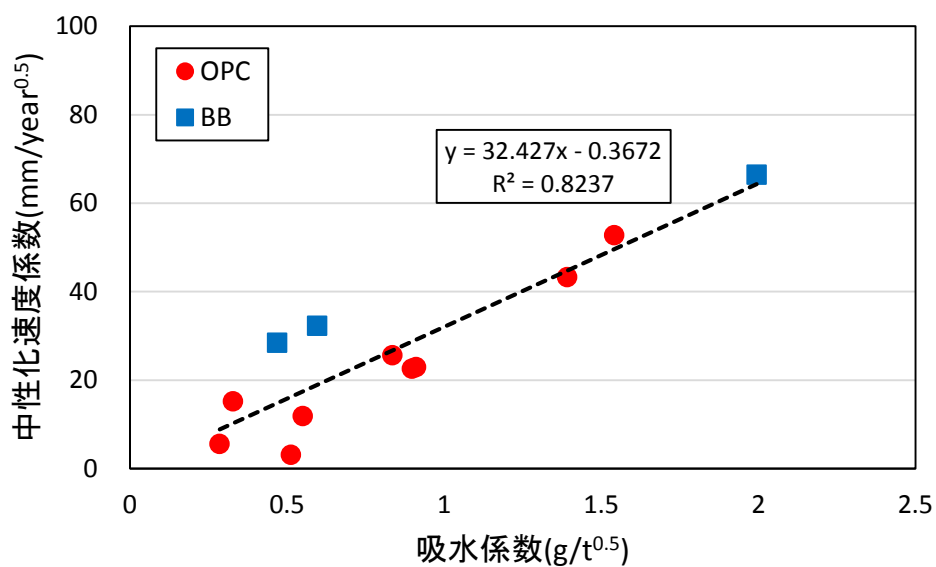
$$D_a = 0.31(\log kT) + 6.43(R^2 = 0.60) \quad \text{式 3)}$$



図－50 表層透気係数と全塩化物の見かけの拡散係数の関係

吸水係数 B と中性化速度係数 A の関係を図－51 に示す。吸水係数の増加に伴い、中性化速度係数の増加が確認された。両者の関係式を式 4)に示す。

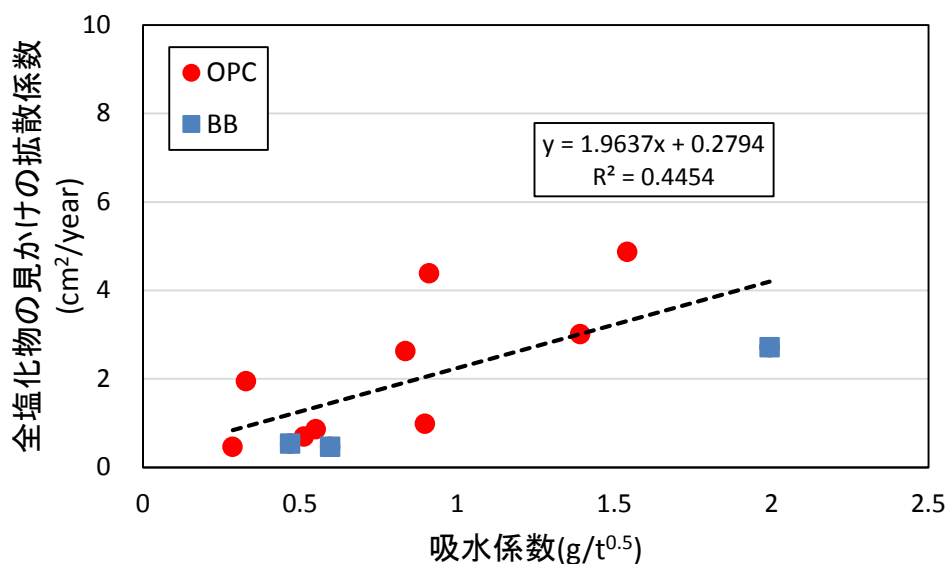
$$A = 32.4B - 0.37(R^2 = 0.82) \quad \text{式 4)}$$



図－51 吸水係数と中性化速度係数の関係

吸水係数 B と全塩化物の見かけの拡散係数 D_a の関係を図－52 に示す。吸水係数の増加に伴い、見かけの拡散係数の増加が確認された。両者の関係式を式 5)に示す。

$$D_a = 1.96B - 0.28 (R^2 = 0.45) \quad \text{式 5)}$$



図－52 吸水係数と全塩化物の見かけの拡散係数の関係

5.3 施工の影響の検討

(1) 締固め

締固め時間と表層透気係数の関係を図－53 に示す。締固め時間の増加に伴い、表層透気係数の増加が確認された。また、この関係は、下部より上部の方が顕著となった。

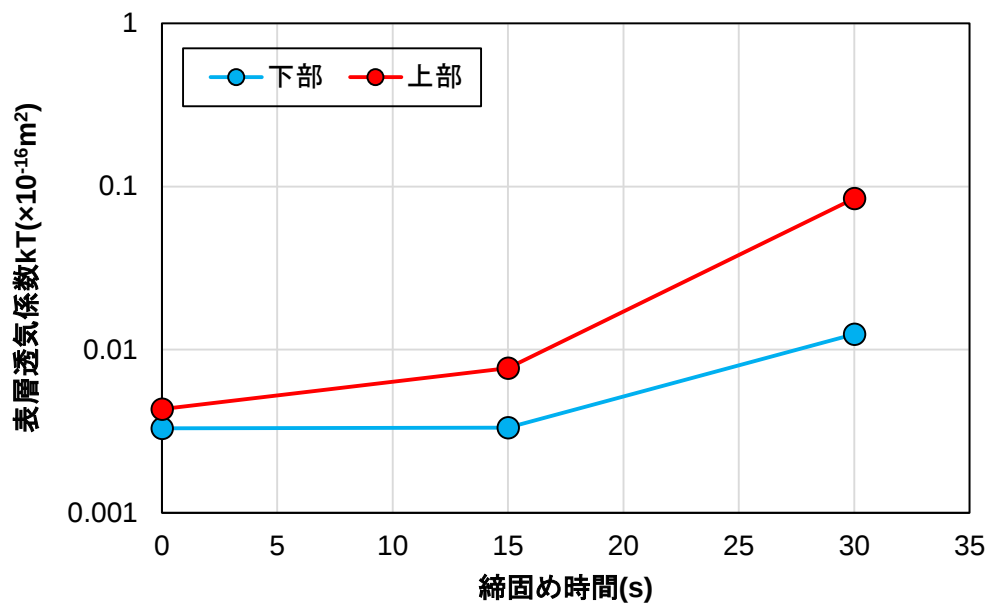


図-53 締固め時間と表層透気係数の関係

(2)鉄筋間通過

鉄筋間通過前後の表層透気係数の関係を図-54 に示す. いずれの配合でも, かぶり部の表層透気係数の増加が確認された.

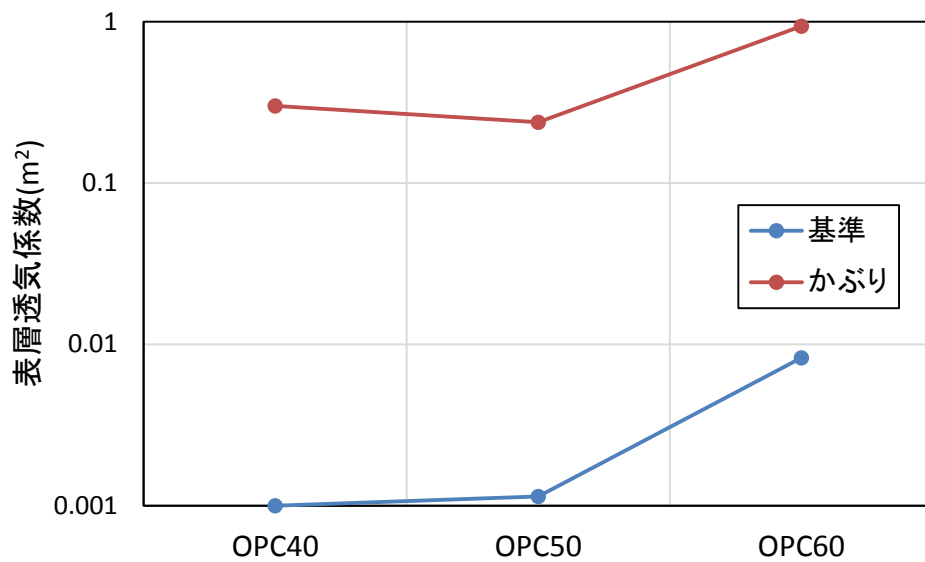


図-54 鉄筋間通過前後の表層透気係数の関係

(3)打重ね

測定高さと表層透気係数の関係を図-55 に示す. 全体的にバラツキは大きい, 200-200を除けば上層の表層透気係数は増加しており, また水セメント比 50%の場合も 40%と同様に上層が 500mm の場合, 下層の表層透気係数は小さいことが確認できる.

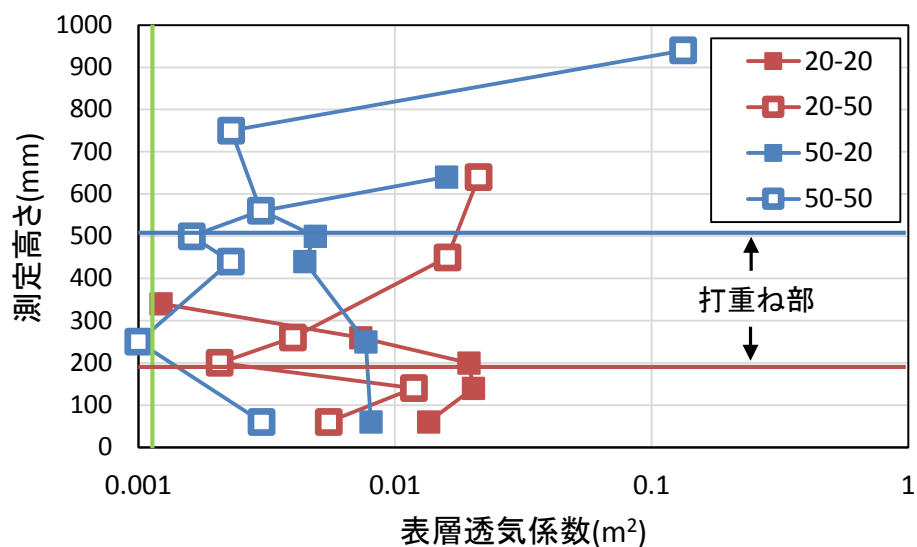


図-55 測定高さ と 表層透気係数の関係

5.4 まとめ

本研究では、配合や養生、施工方法の影響がコンクリートの表層品質や耐久性に及ぼす影響を検討した。また、非破壊計測手法の結果である表層品質と耐久性の関係性についても検討を行った。以下に、得られた知見をまとめる。

- (1) いずれの計測結果も、水結合材比の低下に伴い表層品質や耐久性が高くなる傾向が確認された。さらに、養生の影響は電気抵抗率と実効拡散係数を除き、水中養生、封かん養生、気中養生の順に表層品質と耐久性が高くなる傾向が確認された。
- (2) 表層透気係数や吸水係数は中性化速度係数と高い相関性が確認された。また、表層透気係数と見掛けの拡散係数は、セメント種類に分類することである程度の相関性が確認された。
- (3) 締固め時間の増加や鉄筋間通過によって、品質の低下が確認された。また、コンクリート標準示方書に準じて打重ね処理を行った場合、打重ね部の品質低下は確認されなかった。

6. 結論

5.の実験結果より，構造物のかぶりコンクリートの品質を表層透気係数として評価した結果，コンクリートの特性値との相関性が高いことが確認された．施工の影響を受けていない試験体の結果より，見かけの拡散係数(D_a)と表層透気係数($\log kT$)の関係は，線形的に増加することが確認された．

$$D_a = 2.13(\log kT) + 41.0(R^2 = 0.54)$$

$$D_a = 0.31(\log kT) + 6.43(R^2 = 0.60)$$

実構造物を想定した施工の影響の検討から，締固め時間の増加によって，表層透気係数は最大で約 10 倍増加していた．鉄筋間を通過させたかぶりにコンクリートの場合，かぶりの表層透気係数は約 100 倍であり，大きく品質が低下していた．打重ねを行った場合では，打重ね部よりも上層で品質が低下していることが分かった．

以上より，施工の影響を表面透気試験で評価可能であることから，本研究では実際に施工の影響を受けたかぶりコンクリートの耐久性試験を実施していないため，今後の検討課題ではあるものの，実構造物の品質を非破壊計測可能な表層透気係数で評価し，耐久性を予測することが可能であることが示唆された．ただし，表面透気試験は，コンクリートの含水率の影響を受けることが既往の研究で指摘されているが，本研究では，含水率の影響を考慮していないため，この影響についても継続して検討する必要がある．

実構造物中の鋼材は，腐食部と健全部が電氣的に導通しており，腐食部がマクロアノード，健全部がマクロカソードとなるため，マクロカソードは卑な電位になると考えられる．このことから，自然電位を測定した箇所の，表層透気係数と表面付近の塩化物イオン量を測定し，表層透気係数から見かけの拡散係数を推測した結果を用いて，鋼材位置の塩化物イオン量を予測する．その結果，鋼材位置の塩化物イオン量の違いから，マクロアノードとマクロカソードの概ねの位置を把握できると考えられる．マクロアノードは腐食速度が大きく，断面欠損が生じる可能性が考えられる．そのため，さらに詳細に鋼材腐食の進行を予測する場合は，鋼材腐食速度を把握するために，腐食部の分極曲線から腐食電流密度を求めることや，センサを設置しモニタリングするなどの対応が必要になると考えられる．

本研究の成果から，現場計測可能な表面透気試験および電気化学的手法を用いることで（一部，表面の塩化物イオン量については破壊試験となるが），設計 - 施工 - 維持管理の連携を行うことが可能と考えられる．

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 設計編，2013.3.
- 2) 堀口賢一，丸屋剛，武若耕司：自然電位連続モニタリングによる発錆時期推定手法の検討と腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1007-1012，2006.
- 3) ASTM C 876-91 (Reapproved 1999): Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, pp457-462, 1999.
- 4) 外岡広紀，久保善司，若尾純也，村下剛：含浸処理による水分制御が腐食抑制効果に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.529-534，2007.

- 5) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft 4), BBRI CSTC WTCB, Dec. 1997.
- 6) 審良善和, 山路徹, 小林浩之: 電気化学的測定による鉄筋腐食と塩化物イオン濃度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1133-1138, 2011.
- 7) 中村士郎, 小林孝一, 服部篤史, 宮川豊章: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の鉄筋腐食に関する電気化学的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.305-310, 1998.
- 8) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰祐: 分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.547-552, 2001
- 9) 長谷川裕介, 宮里心一, 親本俊憲, 横関康祐: ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食速度解析モデルの提案, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.1, pp.31-40, 2006.1