

論文 マルチプルクラックを有する複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の塩害に対する耐久性

久保田 憲^{*1}・林 承燦^{*2}・森山 守^{*3}・宮里 心一^{*4}

要旨：本研究では、RC 構造物の補修材料などへ活用が期待される複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下、HPFRCC と称す）の、発展および普及の一助となることを目的とし、(1)複数の微細ひび割れ（以下、マルチプルクラックと称す）の幅および深さが Cl^- 拡散係数に及ぼす影響、および(2)混入繊維の種類の違いが塩害耐久性に及ぼす影響、について実験的検討により評価した。その結果、(1)通常の使用では、0.3mm 程度のひび割れを有する状態においても Cl^- 拡散係数は小さい、(2)HPFRCC は、応力負荷を受けてもマルチプルクラックが発生するため鉄筋腐食速度が遅くなることが明らかとなった。

キーワード：HPFRCC, 塩害, Cl^- 拡散係数, 鉄筋腐食, マルチプルクラック

1. はじめに

近年、セメント材料の持つ長所を生かしたまま短所の改善を図るため、有機材料などを混合したセメント複合材料の研究および開発が、頻繁になされている。その一つに、セメント材料にポリビニルアルコール（以下、PVA と称す）やポリエチレン（以下、PE と称す）などの合成繊維を混入し高靱性化を図った、HPFRCC がある。HPFRCC は、国内外を問わず様々な機関において研究および開発がなされ、その力学的特長が明らかにされている¹⁾。

HPFRCC の特徴の一つとして、応力負荷によるマルチプルクラックの発生がある。本来、通常のセメント材料は、応力の集中する部分に局部的なひび割れが発生するが、HPFRCC は繊維の架橋効果によりマルチプルクラックが発生する。したがって、ひび割れを有する状態における両者の鉄筋腐食性状は異なり、平石らが行った塩害耐久性の研究²⁾によると、前者は局部的で速度の速い鉄筋腐食（図-1）が発生し、後者は全面的で速度の遅い鉄筋腐食（図-2）が発生することが解明されている。

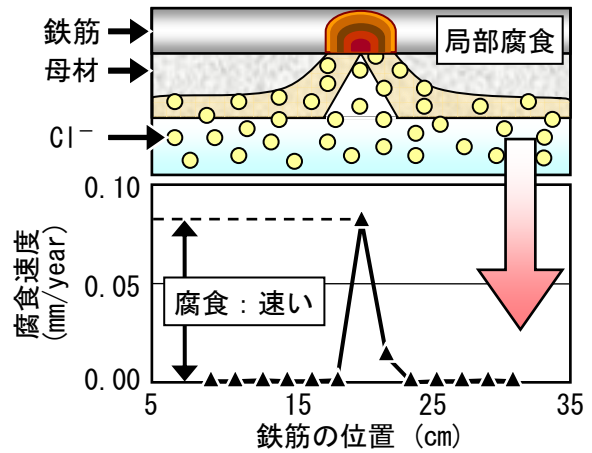


図-1 普通モルタルの腐食性状²⁾

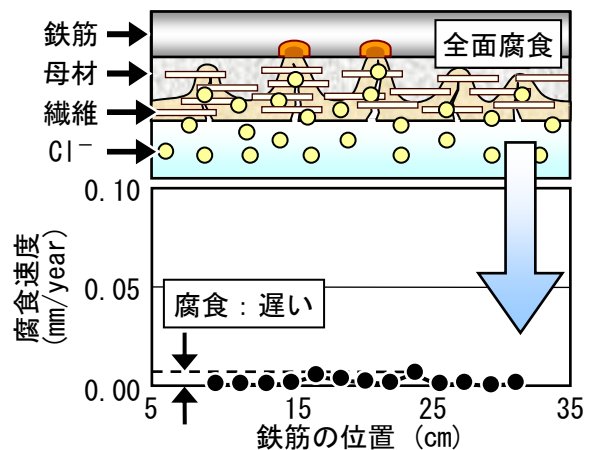


図-2 HPFRCC の腐食性状²⁾

*1 株式会社デーロス メンテナンス事業本部材料研究室 工修 (正会員)

*2 株式会社デーロス メンテナンス事業本部材料研究室 工博 (正会員)

*3 中日本高速道路株式会社 中部支社・清見工事事務所飛騨工事長 工修 (正会員)

*4 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科助教授 工博 (正会員)

表-1 Cl⁻拡散用供試体の配合条件, 使用材料および PVA 繊維の基本特性

繊維混入率 (Vol%)	W/B (%)	S/B (%)	単位量 (kg/m ³)		PVA 繊維				
			水	ポリマー	長さ (mm)	径 (μm)	引張強度 (GPa)	引張弾性率 (GPa)	密度 (g/m ³)
2.0	28	60	259	71	12	40	1.6	40	1.3

・セメント：普通ポルトランドセメント ・細骨材：7号珪砂 ・ポリマー：固形分量 40% (SBR 系)

しかしながら、従来の研究では以下の課題が残されていた。(1)HPFRCC の場合、初期ひび割れ発生直後においてはひび割れが狭くかつ浅いが、引張終局ひずみ付近では応力集中により局部的にひび割れが広くかつ深くなる。したがって、Cl⁻拡散性状にも影響を及ぼすことが予想され、定量的に評価する必要がある。(2)HPFRCC に用いられる短繊維には幾つかの種類があり、供用環境や使用条件などによって使い分けがなされると考えられる。しかしながら、混入繊維の違いによる塩害耐久性への影響は、十分な検討がなされていない。

以上の背景から本研究では、HPFRCC の発展および普及の一助となることを目的とし、マルチプルクラックの幅および深さが Cl⁻拡散係数に及ぼす影響、および混入繊維の違いと塩害耐久性の関係について評価した。

2. ひび割れの形状と Cl⁻拡散係数の評価

2.1 実験概要

(1) 供試体概要

作製した供試体の配合条件, 使用材料および混入した PVA 繊維の基本特性を, 表-1 に示す。

ひび割れの幅および深さが Cl⁻拡散係数に与える影響を把握するために、曲げあるいは引張応力により、マルチプルクラックを導入した。曲げ応力によるひび割れは、3点曲げ載荷(図-3)により導入した。したがって、ひび割れは引張側のみにおいて開口しており、圧縮側までのひび割れの貫通は認められなかった(写真-1)。一方引張応力によるひび割れは、一軸直接引張(図-4)により導入した。したがって、ひび割れの一部は両面において開口しており、ひび割れの貫通が認められた(写真-2)。

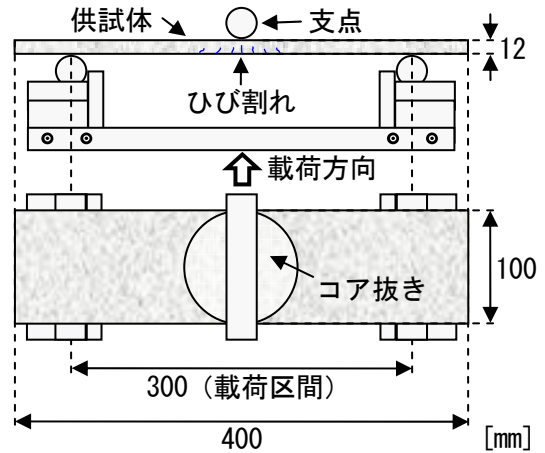


図-3 曲げひび割れの導入方法の概略図

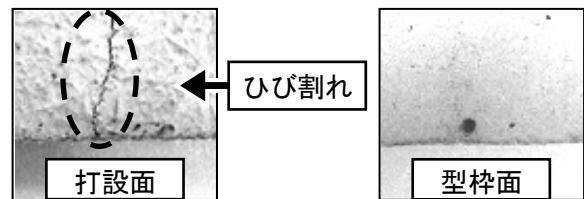


写真-1 曲げによるひび割れ

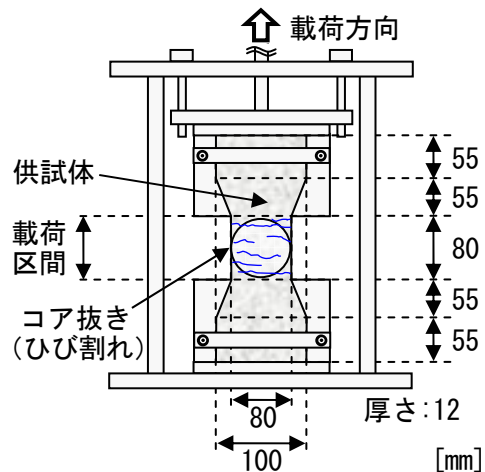


図-4 引張ひび割れの導入方法の概略図

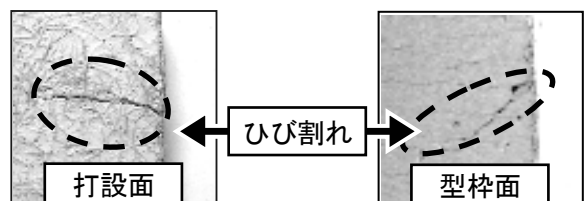


写真-2 引張によるひび割れ

荷重載荷後、各供試体の載荷区間をコア抜き（図-3 および図-4）し、曲げひび割れ導入供試体：4 体、引張ひび割れ導入供試体：3 体、および比較のためのブランク（無ひび割れ）：1 体の計 8 体を、径が 80 または 100mm、厚さが 12mm の円板状に成形した。

(2) 測定概要

Cl⁻拡散係数の同定は、写真-3 に示すセル実験装置を用い、JSCE-G571³⁾に準じた拡散セル法によって行った。ここで Cl⁻濃度を測定する側のセルには蒸留水を、反対側のセルには NaCl 水溶液 (0.5mol/L) を注入した。また Cl⁻濃度の測定は、Cl⁻の移動速度（濃度勾配）が定常状態になった後から 3 日おきに行った。

なお実験中いずれの供試体も、セメント分の溶脱などによる、最大残留ひび割れ幅（応力負荷により生じたマルチプルクラックの中で、荷重除荷後の最大ひび割れ幅）の変化は、ほとんど認められなかった。

2.2 実験結果および考察

図-5 に、曲げあるいは引張応力によるマルチプルクラックを有する HPFRCC の最大残留ひび割れ幅と Cl⁻拡散係数の関係を示す。なお図中には、前田ら⁴⁾および塚原ら⁵⁾が報告した、割裂引張試験による貫通ひび割れを有する普通モルタルおよび普通コンクリートの拡散セル実験結果も加えた。

これによると、無ひび割れ状態における HPFRCC の Cl⁻拡散係数は、普通モルタル (W/C : 40%) の値⁴⁾の 3 分の 1 以下 (0.16cm²/year) と

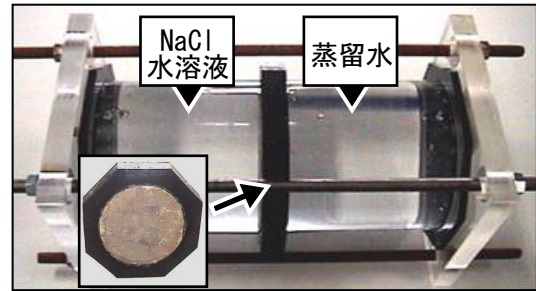


写真-3 セル実験装置

なり、高い Cl⁻浸透抵抗性を有することが認められた。このことは、ポリマー混入によるポリマーフィルムの形成が原因であると考えられる。

また、マルチプルクラックを有する HPFRCC は、ひび割れが増幅するに伴い Cl⁻拡散係数も増加する傾向にあることが認められる。しかしながら、いずれの供試体においても最大残留ひび割れ幅が 0.00~0.15mm 以下ならば、Cl⁻拡散係数は 0.16~2.00cm²/year となった。この値は、

同等のひび割れを有する普通コンクリート (W/C : 39%および 50%) などに比べ、著しく小さい。また、貫通ひび割れの有無による Cl⁻拡散係数への影響は、ほとんど認められなかった。これらは、(1)曲げによるマルチプルクラックは、未貫通なため Cl⁻が移動するためには必ず母材部分を通らなくてはならないこと、(2)引張によるマルチプルクラックは、一部において貫通しているが、両面における貫通ひび割れの形状および幅が必ずしも一致しなかった（例：打設面のひび割れが 0.12mm の場合でも、対応する型枠面では 0.06mm）こと、が原因であると考えられる。

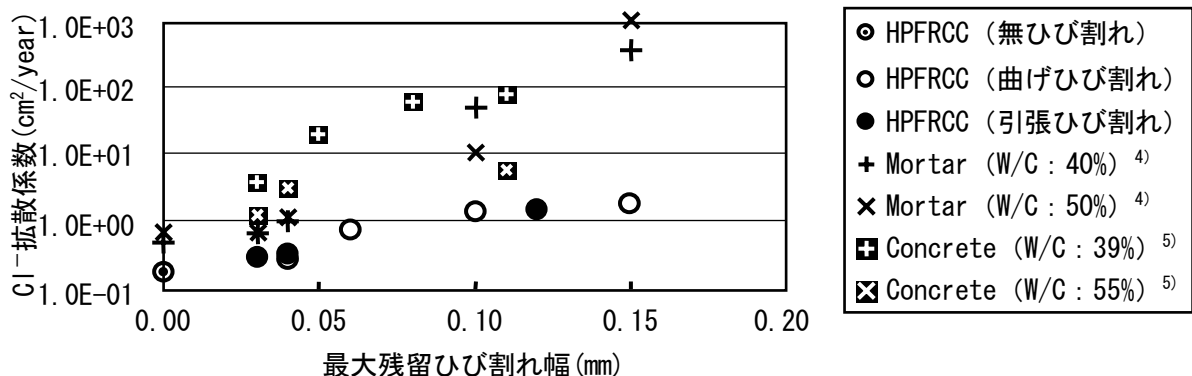


図-5 最大残留ひび割れ幅と Cl⁻拡散係数の関係

表-2 塩害耐久性実験用供試体の配合条件

繊維		W/B (%)	A/B (%)	単位量 (kg/m ³)		
種類	混入率 (Vol%)			粗骨材	水	ポリマー
PVA	2.0	28	60	323	259	71
PE+PVA						
PE	1.6					
無混入	0.0					

・粗骨材：川砂利 (Gmax=10mm)

表-3 PE 繊維の基本特性

長さ (mm)	径 (μm)	引張強度 (GPa)	引張弾性率 (GPa)	密度 (g/m ³)
9	12	2.6	88	1.0

3. 混入繊維の種類と塩害耐久性

3.1 実験概要

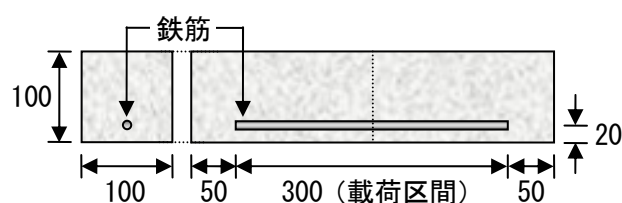
(1) 供試体概要

各供試体の配合条件および使用材料（粗骨材以外は表-1に同じ。）を表-2に、混入したPE繊維（PVA繊維は表-1に同じ）の基本特性を表-3に示す。また供試体は、Cl⁻浸透深さ測定用および鉄筋腐食速度測定用の2種類（図-6）を供試体4種類ごとに2体ずつ、計16体作製した。なお腐食速度測定用供試体には、マクロセル腐食電流とミクロセル腐食電流を区別して測定するため、分割鉄筋を埋設した⁶⁾。

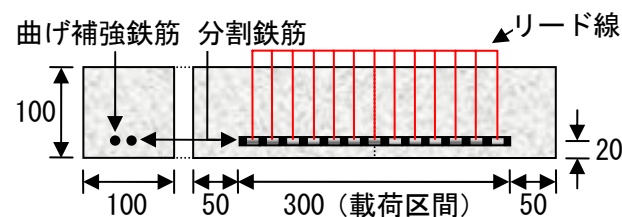
また各供試体は、3等分点曲げ荷重によりひび割れを導入した。約25kNの荷重を載荷したところ、無混入供試体は荷重区間（図-6）内でひび割れ（最大幅：0.30mm程度）が1本、繊維混入供試体にはマルチプルクラック（最大幅：0.04mm程度）が生じた。その後、ひび割れ開口面のみからのCl⁻浸透を評価するため、側面および圧縮側の5面は樹脂により被覆した。

(2) 測定概要

各供試体に対して、腐食要因物質であるCl⁻、O₂およびH₂Oを十分に供給させるために、濃度3%のNaCl水溶液中に2日間、乾燥気中（湿度60%）に5日間の7日間サイクルで乾湿を繰り返す塩害促進暴露を28日間行った。その後、



(1) Cl⁻浸透深さ測定用



(2) 鉄筋腐食速度測定用 [mm]

図-6 各供試体の概略図

長軸方向に割裂したCl⁻浸透深さ測定用供試体の割裂面に0.1N硝酸銀水溶液を噴霧して、銀白色を呈した部分の長さを測定した⁷⁾。

また腐食速度測定用供試体は、文献⁶⁾を参考にしてマクロセル腐食電流とミクロセル腐食電流を測定し、総腐食速度の算定を行った。

3.2 実験結果および考察

表-4に、各供試体におけるCl⁻浸透深さおよび内部鉄筋の腐食性状（供試体数は各種2体

表-4 各供試体におけるCl⁻浸透深さおよび内部鉄筋腐食性状

繊維	荷重区間内-浸透深さ (mm)		荷重区間外-平均浸透深さ (mm)	鉄筋腐食性状	
	最大	平均		箇所	範囲 (cm ²)
PVA	7.9	5.8	3.4	0	-
PE+PVA	20.0 以上	7.9	4.8	2	0.27
PE	20.0 以上	10.4	7.5	2	0.52
無混入	20.0 以上	4.9	2.3	1	4.65

表-5 各供試体における空気量

繊維	無混入	PVA	PE+PVA	PE
空気量 (%)	3.5	6.8	7.4	20.0

作製したが、同様の傾向が認められたため1体分のみ)を示す。これによると、荷重区間における最大Cl⁻浸透深さは、PVA繊維混入供試体が最も小さくなった。このことは、2章で示したように、PVA繊維を混入したHPFRCCは、マルチプルクラックを有する状態においてもCl⁻浸透抵抗性が高いことによると考えられる。また荷重区間外における平均Cl⁻浸透深さは、無混入供試体に比べ、繊維混入供試体では深くなる傾向が認められた。ここでCl⁻の浸透および拡散は、組織構造の緻密性に影響を受ける⁸⁾ことから、表-5に示すとおり各供試体における空気量を調査した。これによると繊維混入供試体は、無混入供試体よりも空気量が高く、特にPE繊維を混入した場合の空気量は20.0%となり、その他の供試体の約3倍となった。本実験で用いた供試体は、短繊維の分散を助けるため、ポリマーを混入し粘性を高めている。したがって、稲岡ら⁹⁾の実験結果と同様に、練混ぜ時に連行された大量の空気がそのまま内包され、Cl⁻浸透抵抗性を低下させたと考えられる。なお、荷重区間内における平均Cl⁻浸透深さも、無混入供試体が最も小さくなった。このことは、荷重区間内におけるひび割れ本数の違いと、上記のように内包空気量の増加が原因と考えられる。

またCl⁻浸透深さの最大値は、PVA繊維混入供試体以外すべて鉄筋位置(かぶり:20mm)までの浸透が確認された。ただし、繊維混入供試体の鉄筋における腐食範囲は、無混入供試体と比べ狭かった(表-4および写真-4)。よってHPFRCCでは、局部的で速度の速い危険な腐食よりも、全面的で速度の遅い安全な腐食が起こりやすいことが認められる。

次に、各供試体における内部鉄筋の腐食速度の測定結果を図-7から図-10(表-4と同様の理由から1体分のみ)までに示す。これらによ

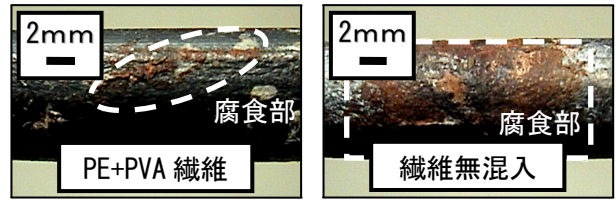


写真-4 内部鉄筋の腐食性状

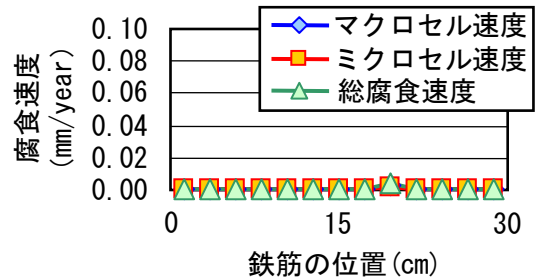


図-7 PVA繊維混入供試体の腐食速度

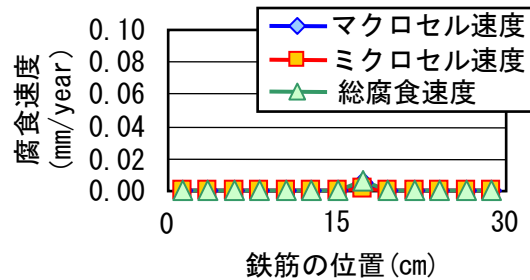


図-8 PE+PVA繊維混入供試体の腐食速度

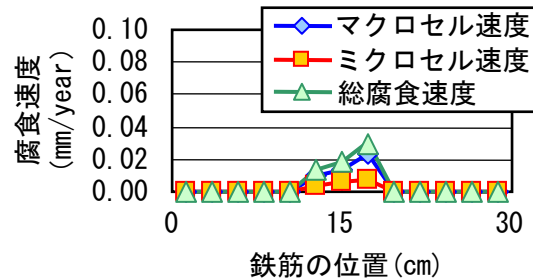


図-9 PE繊維混入供試体の腐食速度

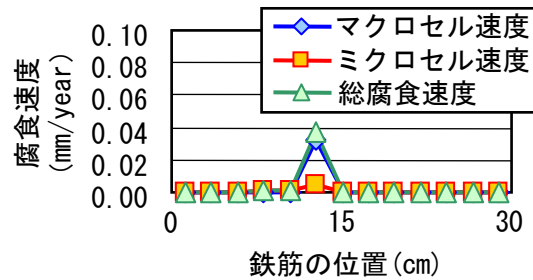


図-10 無混入供試体の腐食速度

ると既往の研究成果²⁾と同様に、PVA繊維混入供試体およびPE+PVA繊維混入供試体は、無

混入供試体に比べ腐食速度が遅くなる傾向が認められたが、PE 繊維混入供試体は無混入供試体と同等の腐食速度を示した。なお既往の文献¹⁰⁾において、PE 繊維を混入したセメント材料が著しい腐食を呈した結果は皆無である。したがって表-5 に示したように、繊維混入による内包空気量の増加が原因であったと考えられる。すなわち PE 繊維混入供試体は空気量が著しく大きく、母材を通して Cl^- を含む腐食要因物質の浸透が容易だったため、鉄筋の腐食速度が無混入供試体と同等となったと推測される。

以上より、応力負荷によるひび割れが生じた場合においても、HPFRCC はマルチプルクラックが生じるため Cl^- 浸透抵抗性が高く、遅い腐食が発生することが認められた。しかしながら、内包空気により母材組織が粗な場合は、繊維種類に関係なく Cl^- 浸透抵抗性が低下し、速い腐食が発生する可能性があると考えられるため、消泡剤の添加等の対策を図るべきと思われる。

4. 結論

HPFRCC の塩害に対する耐久性についての評価を以下にまとめる。

- (1) マルチプルクラックを有する HPFRCC の Cl^- 拡散係数は、最大残留ひび割れが増幅するに従い増加する。しかしながら、その値は、普通モルタル (W/C : 40%および 50%) および普通コンクリート (W/C : 39%および 50%) と比べ著しく低い。
- (2) マルチプルクラックを有する HPFRCC は、同等の応力負荷により生じたひび割れを有する繊維無混入のセメント材料と比べ、鉄筋腐食速度が著しく遅い。
- (3) 本研究の配合では PE 繊維を混入した HPFRCC は、母材に内包する空気量が増加するため組織が粗になり、 Cl^- 浸透および鉄筋腐食速度は進行する。

参考文献

- 1) Li. V. C, and Kanda. T : Engineered Cementitious

Composites for Structural Applications, ASCE J. Materials in Civil Engineering, Vol.10, No.2, pp.66-69, 1998

- 2) 平石陽一, 本間貴光, 箱山宗幸, 宮里心一 : 高性能繊維補強セメント系複合材料の曲げひび割れ部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度, コンクリート工学論文集, 第 16 巻, 第 3 号, pp.31-38, 2005.9
- 3) 土木学会 : コンクリート技術シリーズ コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向, pp.66-71, 2003
- 4) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸, 北畠裕之 : ひび割れを有するコンクリート中への塩化物イオン拡散に関する基礎的研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部門, pp.1343-1344, 2002
- 5) 塚原絵万, 加藤佳孝, 魚本健人 : 塩化物イオンの移動評価におけるひび割れのモデル化, コンクリート工学年次論文集 第 24 巻, pp.573-578, 2002
- 6) 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, 第 23 巻, 第 2 号, pp.547-552, 2001
- 7) Otuki. N, Nagataki. S, and Nakashita. K: Evaluation of AgNO_3 solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials, ACI Material, J, 89(6), pp.587-592, 1992
- 8) 日本コンクリート工学協会 : コンクリート診断技術'02 (基礎編), pp.38-44, 2002
- 9) 稲岡和彦, 上田隆雄, 水口裕之 : 配合条件が高じん性セメント複合材料の基礎的物性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, 第 28 巻, 第 1 号, pp.287-291, 2006
- 10) 日本コンクリート工学協会 : 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会 報告書 (2), pp.162-173, 2004