

論文 コンクリート中の粗骨材を考慮した塩分移動に関する解析的研究

神田 康行^{*1}・富山 潤^{*2}・山田 義智^{*3}・伊良波 繁雄^{*4}

要旨 :本研究は, マクロセルの形成に関連性があると想定される粗骨材を考慮した鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布を FEM により定性的に考察するものである。数値解析例として, EPMA の面分析結果と FEM の解析結果との比較・検討を行い, 定性的ではあるが FEM により粗骨材の塩化物イオン遮断効果を解析できることを示した。次に, 粗骨材率及びかぶりをいくつか変化させた場合の解析を行った。その結果, 鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布は不均一となり, これに起因するマクロセルの形成が発生しえる可能性を示した。

キーワード : 塩化物イオン拡散, 粗骨材, マクロセル, かぶり, EPMA, 有限要素法

1. はじめに

塩害における鉄筋コンクリートの腐食は, 鋼材付近の不動態皮膜が拡散した塩化物イオンにより破壊されることに起因する。この時の鋼材腐食形態は, マクロセル腐食とミクロセル腐食の二つに大別される¹⁾。

武若²⁾は, コンクリート中の鋼材腐食を支配するマクロセル腐食による腐食速度を解析する際にアノードおよびカソード領域の設定が不可欠であることを指摘した。そして, 拡散した塩化物イオンが腐食発生の限界値に達した部位をアノード部とし, 限界値未満の部位をカソード部として腐食速度を解析的に求めることは, マクロセルの形成過程を再現するのに有効であるとしている。

ところで, 塩化物イオンは電子マイクロアナライザー (EPMA: Electron Probe Micro Analyzer) の面分析結果よりモルタル内の細孔には観察されるが, 粗骨材内部には観察されない。また, 既往の研究⁴⁾では, コンクリート中の粗骨材は塩化物イオンを遮断する効果が大いいとされている。この遮断効果により塩化物イオンは, コンクリート中で不均一に分散されると考えられる。

以上のことより, 鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布は不均一になると想定され, これに起因するマクロセルの形成も考えられる。

本研究は, 粗骨材による塩化物イオン遮断効果を有限要素法 (FEM: Finite Element Method) によって数値解析的に求め評価し, マクロセルの形成に関連性があると想定される鉄筋表面における塩化物イオン濃度分布の考察を行う。

2. 塩化物イオン拡散解析方法

2.1 解析上の仮定

本稿でも示す EPMA の面分析結果より, 塩化物イオンは粗骨材内部にはほとんど観察されない。また, 塩化物イオンに限らず, コンクリート中の物質移動には極めて複雑な要因が関わっている。本研究では塩化物イオンがコンクリート内部へ浸透する際の粗骨材のみの影響を考慮するため以下の6つの仮定を設けた。

1. コンクリート中の微細な構造は無視して, モルタル及び粗骨材のみを考慮する。
2. 中性化や拡散過程で発生する化学反応は考慮しない。
3. 塩化物イオン拡散現象は移流項を考慮しない。

*1 琉球大学 理工学研究科 修士(工学) (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 博士(工学) (正会員)

*4 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

い非定常拡散方程式により表現する。

- 見掛けの拡散係数は等方的でありかつ時間に依存せず一定である。
- 表面塩化物イオンは時間に依存せず一定である。
- 粗骨材内部には塩化物イオンは拡散しない。

これらの仮定であっても、粗骨材の塩化物イオン遮断効果が数値解析に反映できれば、それに起因するマクロセルの形成について、定性的に検討できると考えられる。

2.2 有限要素法による離散化

2次元問題における非定常拡散方程式は Fick の第一及び第二法則から、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

と与えられる。ここで、 C は塩化物イオン濃度 (%)、 t は時間 (年)、 D は見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$) である。本研究では、式(1)を空間に関してはガラーキン法による FEM、時間に関してはクランク・ニコルソン法により離散化した。

3. 解析手法に対する検討

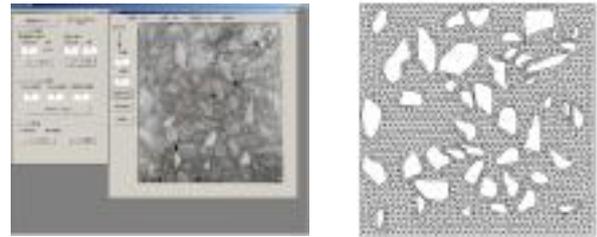
EPMA の面分析結果は FEM の解析結果⁵⁾と同様な分布状況であることに気づく。したがって、両者の比較・検討は大変興味深いものであり、筆者らの判断する限りこのような解析結果は他に見当たらない。

そこで、本章では EPMA の面分析結果と FEM の解析結果との比較を行い、解析手法の妥当性を検討する。

3.1 デジタル画像を用いた解析モデル作成方法

EPMA ではコンクリート断面を用いて面分析を行う。したがって、EPMA と FEM の結果を比較・検討するには、前者の分析断面のデジタル画像を用いた要素分割⁶⁾が必要である。本研究では、修正デローニー分割法⁷⁾によりデジタル画像から解析モデルを生成する方法を提案する。

まず、**図-1(a)**のように、モデリング対象のコンクリート断面を表示する。次に、デジタル画



(a) 粗骨材節点取得 (b) 作成モデル
図-1 デジタル画像よりモデリング作成方法

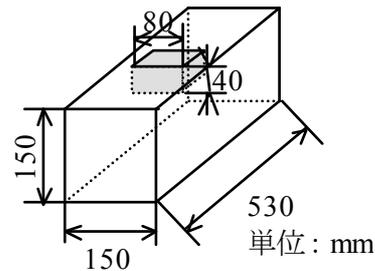


図-2 供試体と試験片の位置関係

像をマウスクリックすることにより、粗骨材形状を構成する節点を決定し、取得した節点を用いて修正デローニー分割法により要素分割を行う。以上の順序を取って作成した解析モデル例を**図-1(b)**に示す。

3.2 EPMA 及び FEM の比較・検討

本研究では、**図-2**に示す水セメント比 35% のコンクリート供試体に乾湿繰返し塩化物イオン浸透促進試験⁸⁾を行い、EPMA の面分析に用いた。その試験方法は、供試体を 4 日間 50°C の塩水槽に浸漬した後、乾燥機で 3 日間 50°C で強制乾燥させ、その後室温にて 1 日静置するまでの工程を 1 サイクルとし、合計 25 サイクル行ったものである。なお、EPMA の分析断面は**図-2**の斜線で囲まれている供試体中央付近である。実際の EPMA の分析断面を**図-3(a)**に、そのデジタル画像より作成した要素分割図を**図-3(b)**にそれぞれ示す。また、粗骨材の影響を調べるため EPMA の面分析結果を、

骨材なし：粗骨材の影響を考慮せず、粗骨材および空隙部分を除外して整理
骨材込み：粗骨材の影響を考慮して、粗骨材および空隙部分を除外せず整理
のようにデータを整理した。なお、FEM における塩化物イオン濃度分布曲線は、三角形一次要

素の形状関数により任意領域の塩化物イオン濃度を補完し、EPMAと同様な方法で求めた。

解析に必要となる表面塩化物イオン濃度 C 及び見掛けの拡散係数 D は、EPMAの面分析結果である骨材なしを用いて、

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (2)$$

から最小二乗近似⁹⁾して求めた。ここで、 t は経過時間(日)、 x は深さ(mm)、 $C(x,t)$ は経過時間 t での深さ x における塩化物イオン濃度(%)、 C_0 は表面塩化物イオン濃度(%)、 D は見掛けの拡散係数($\text{mm}^2/\text{日}$)、 $\operatorname{erf}()$ は誤差関数であり、本研究ではHastings⁹⁾の近似式を用いている。さらに、式(2)より求めた値を修正シンプレックス法により最適化することにより、最終的な表面塩化物イオン濃度 C_0 及び見掛けの拡散係数 D を求めた。その結果、 $C_0=1.032\%$ 、 $D=0.536\text{mm}^2/\text{日}$ であった。なお、FEMの境界条件は図-4のように底面を断塩境界としたが、今回の解析範囲では、底面に達する前に塩化物イオン濃度は0となっており、解析上問題ないものとした。

200日間(25サイクル)拡散させたEPMA及びFEMの表面(図-4において $y=40\text{mm}$)からの塩化物濃度分布結果を図-5に、供試体全体の塩化物濃度分布を図-6にそれぞれ示す。図-5より、深さ5~25mmにおいては、FEMの解析結果はEPMAの面分析結果より低い値を示している。この原因として、モルタル-粗骨材間の遷移帯⁹⁾を考慮していないことなどが考えられるが、図-6に示す供試体全体の塩化物イオン濃度分布は、EPMAおよびFEMともにほぼ一致した分布を示しているのがわかる。

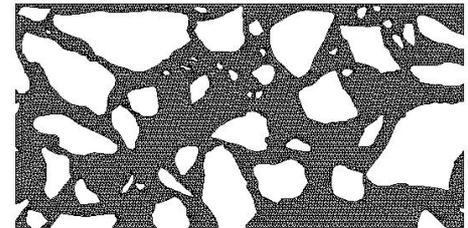
以上のことから、本研究は粗骨材の塩化物イオン遮断効果を考慮した解析が定性的に行える。

4. 粗骨材がマクロセルの形成に与える影響

粗骨材による塩化物イオン遮断効果は粗骨材体積含有率(以降、粗骨材率)と密接に関係すると考えられる。さらに、コンクリートのかぶり



(a) EPMAの分析断面



(b) FEMの要素分割図

図-3 EPMAの分析断面及び要素分割図

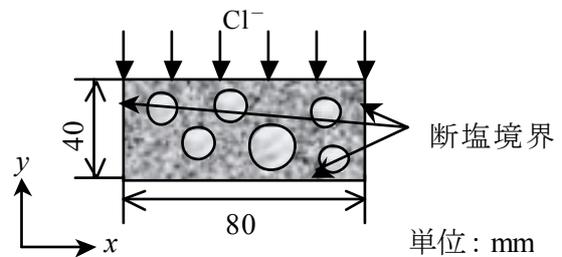


図-4 FEMに用いた境界条件

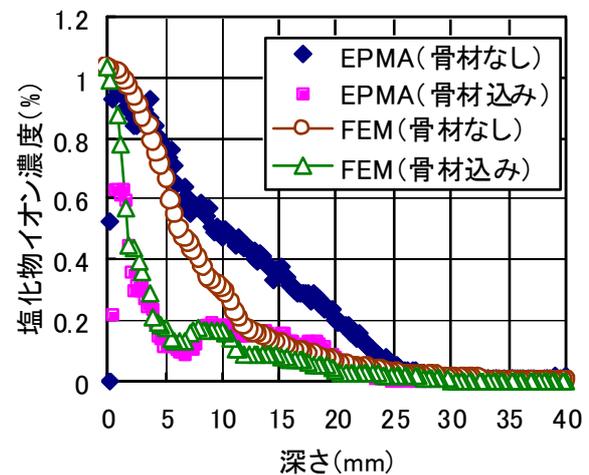


図-5 表面からの塩化物濃度曲線

りは塩化物イオン拡散距離に関わるため、鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布に大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって、本研究では、

ケース 1: かぶりを一定とし、粗骨材率を変化させた場合

ケース 2: かぶりを変化させ、粗骨材率を一定とした場合

の二項目について解析を行い、鉄筋表面における塩化物イオン濃度分布について考察する。

また、3.1節で提案した要素分割法は、本章のように粗骨材率を変化させる場合では、複数枚のデジタル画像を要するために不向きである。そのため、本章では山口³⁾らのように粗骨材分布を粒度曲線から決定する方法を適用し、図-7のような解析モデルによって検討を行う。

4.1 粗骨材分布を考慮した解析モデル作成方法

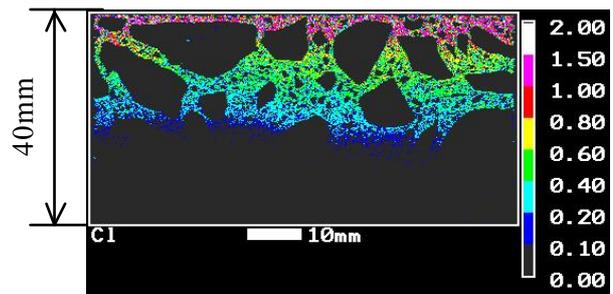
図-8に本研究で用いる粗骨材の粒度曲線を示す。粗骨材形状は簡易的に円形と仮定し、粒度曲線に従う個数の粗骨材を乱数を用いてランダムに配置することにより解析モデルを作成する。このとき、加藤ら¹⁰⁾のように複数回解析を行いその結果を平均化することが考えられる。しかし、今回はこのような処理をせず、1回の解析結果のみを評価する。加藤らのような評価方法については今後の課題としたい。

なお、粗骨材率は、粗骨材の総面積を解析領域の面積で除算したものとした。

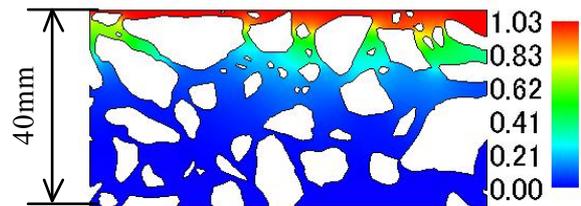
4.2 解析ケース1について

ここでは、図-7に示す鉄筋コンクリート供試体のかぶりを $c=50\text{mm}$ とし、モルタルのみと粗骨材率を14.5、31.7、45.1%とした場合の解析を行う。図-9に各解析モデルの要素分割図を示す。境界条件に用いる表面塩化物イオン濃度 C_0 および見掛けの拡散係数 D は、土木学会⁹⁾が提案している算出方法を用いた。なお、上述の見掛けの拡散係数はコンクリートを対象としているが、ここでは、モルタルの見掛けの拡散係数とした。算出条件は、水セメント比50%の普通ポルトランドセメントであり環境条件は汀線とした。その結果、 $C_0=9.0\text{kg/m}^3$ と $D=1.672\text{cm}^2/\text{年}$ であった。

10年間拡散させた鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布を図-10に示す。図-10から拡散速度としては、モルタルのみ、粗骨材率14.5、31.7、45.1%の順番で速い。これより、既往の研究通り⁴⁾塩化物イオン拡散現象において粗骨材率の影響は無視出来ない大きな要因であることがわかる。また、粗骨材率31.7%と45.1%では、両側面(左



(a) EPMAの面分析結果



(b) FEMの解析結果

図-6 供試体全体の塩化物濃度分布

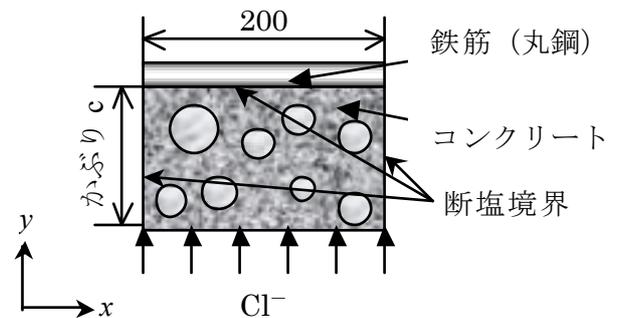


図-7 鉄筋コンクリート供試体

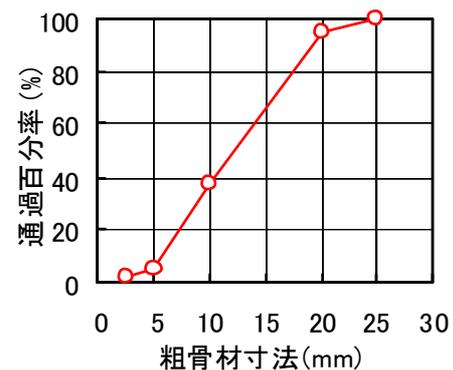


図-8 粗骨材の粒度曲線

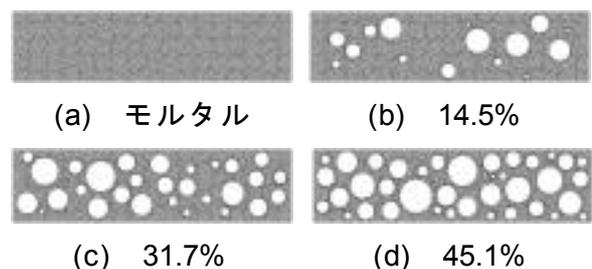


図-9 ケース1における要素分割図

側では 0~25mm, 右側では 175~200mm) の塩化物イオン濃度が高い。これは、本解析は外部境界においてフラックスを 0 としているため、塩化物イオンが流出せずその部位で蓄積されたものと考えられる。そこで、以降では 25~175mm 間において塩化物イオン濃度分布を検討する。

次に、鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布についてみると、モルタルのみで解析した場合は均一な分布になっている。実際には、本解析で考慮していない細孔や微細なひび割れ、鉄筋のふしの影響などにより、モルタルのみであっても不均一になると考えられる。

一方、粗骨材を考慮した場合は、その塩化物イオン遮断効果により不均一な分布になっている。また、粗骨材率が低い場合と高い場合では、後者の方が遮断効果は強いと想定でき、より不均一な塩化物イオン濃度分布になると考えられるが、図-10 では粗骨材率の違いによる分布の大きな差が見られない。これは、先に述べたように複数回解析を行えば、粗骨材率による差が見られる可能性があり、今後の検討課題とする。

4.3 解析ケース 2 について

ここでは、解析ケース 2 について、図-7 のかぶり位置を $c=30, 50, 70\text{mm}$ と変化させた場合の解析を行う。解析条件としては、4.2 節と同様な表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を用いた。また、拡散時間については、それぞれかぶりが異なるため、塩化物イオン濃度分布がおおよそ発錆限界値 1.2kg/m^3 前後になるように調整した。試行錯誤的にそれを求めた結果、 $c=30\text{mm}$ では 1 年、 $c=50\text{mm}$ では 3 年、 $c=70\text{mm}$ では 6 年であった。また、コンクリートの粗骨材率が 35~45% であること⁶⁾を考慮して、各モデルとも粗骨材率がおおよそ 40% になるようにした。それぞれの要素分割図を図-11 に示す。

解析から得られた各かぶりによる鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布図を図-12 に示す。図-12 から、全てのかぶりにおいて粗骨材の影響により塩化物イオン濃度は不均一になっている。また、 $c=30\text{mm}$ の場合は、他のかぶりと比較する

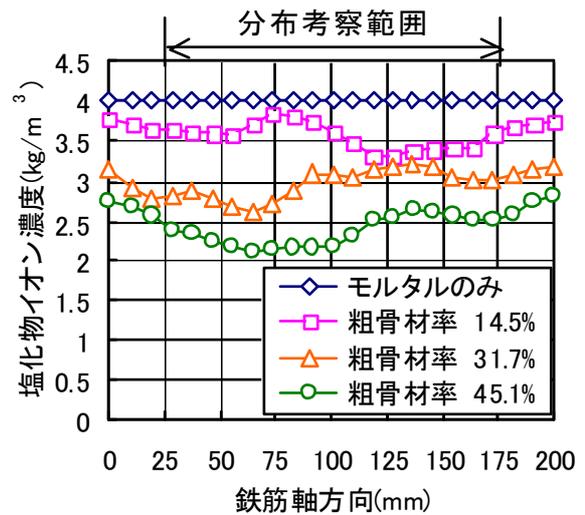


図-10 ケース 1 における鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布

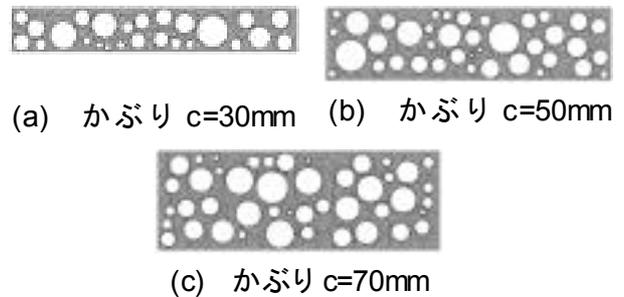


図-11 ケース 2 における要素分割図

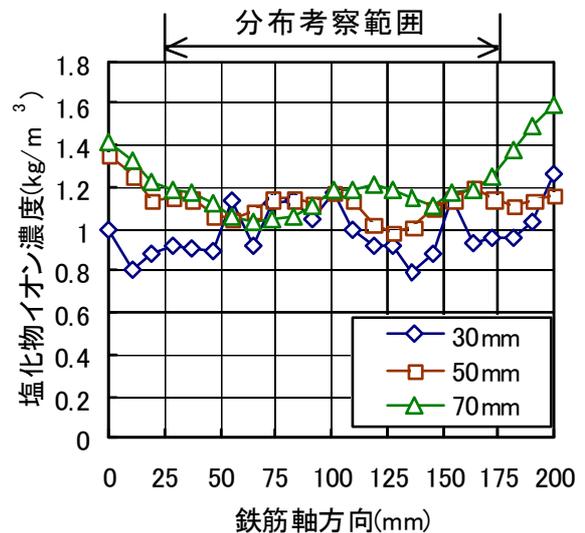


図-12 ケース 2 における鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布

と分布のばらつきが小さいことがわかる。これは、塩化物イオン拡散距離が短いため粗骨材の塩化物イオン遮断効果が鉄筋表面に顕著に現れたと考えられる。一方、かぶり $c=50, 70\text{mm}$ で

は、塩化物イオン濃度分布が不均一ではあるが、 $c=30\text{mm}$ と比較すると分布のばらつきが小さいことがわかる。したがって、かぶりが小さい場合、鉄筋表面は粗骨材の塩化物イオン濃度遮断効果を受けやすく、分布のばらつきが大きくなると考えられる。

以上の解析ケース 1 及び 2 の結果より、鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布は、粗骨材の影響により不均一になることが考えられ、特にかぶりは塩化物イオン濃度分布のばらつきに影響を与えると考えられる。このことから、鉄筋表面において塩化物イオン濃度が局所的に高い箇所ではアノード部を形成し、低い箇所ではカソード部を形成する可能性があり、これらの面積比から腐食速度が決まると考えられ、マクロセル形成に影響を与える可能性があると考えられる。

5. まとめ

本研究は、粗骨材の塩化物イオン遮断効果を FEM により数値解析的に検討し、マクロセルの形成に関連性があると想定される鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布を定性的に考察した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) EPMA の面分析結果と FEM の解析結果を比較・検討した。その結果、粗骨材の塩化物イオン遮断効果を FEM で定性的に表現出来ることを示した。
- (2) 鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布は粗骨材の影響により不均一になり、特にかぶりが小さい場合には分布のばらつきが大きくなる。
- (3) (2)より、鉄筋表面の塩化物イオン濃度分布が局所的に濃度が高い箇所ではアノード部を形成し、低い箇所ではカソード部を形成すると想定でき、これはマクロセルの形成に影響を与える可能性が高いと考えられる。

今後は、粗骨材率およびかぶりの影響による腐食速度の数値解析的な検討、ひびわれや粗骨材界面及び形状を考慮した解析、実験との整合性、三次元解析などを検討していく予定である。

謝辞：本研究において、EPMA の測定には太平洋セメント（株）のご協力を頂いた。ここに、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 大即信明（代表）著：コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害 (I)，技報堂出版，1986
- 2) 武若耕司：コンクリート中の種々の欠陥を考慮した塩害シミュレーションに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，1993
- 3) 山口明伸ほか：鉄筋コンクリートのモデル化とそれを用いた塩害評価シミュレーション，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002
- 4) 横関康祐ほか：水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル，土木学会論文集，No.725/V-58，pp.131-142，2003.2
- 5) 富山潤ほか：粗骨材分布を考慮した 3 次元塩分浸透解析に関する基礎的研究，土木学会第 59 回年次学術講演概要集，V-227，pp.451-452，2004.9
- 6) 永井学志，山田貴博，和田章：三次元実画像データに基づくコンクリート材料の有限要素解析手法，日本建築学会構造系論文集，第 509 号，pp.77-82，1998.7
- 7) 谷口健男著：FEM のための要素自動分割，森北出版，1992
- 8) ソーンウィーラほか：コンクリート中への塩化物イオンの浸透過程に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.801-806，2004
- 9) コンクリート建物改修事典編集委員会編：コンクリート建物改修事典，産業調査会事典出版センター，2005
- 10) 加藤佳孝，魚本健人：構成材料の空間的特性を考慮したコンクリートの有効拡散係数の予測モデル，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.1，pp.11-21,2005.1