

論文 剛体バネモデルによるひび割れたコンクリートの塩分浸透解析

早田 光孝*1・上田 多門*2

要旨：本論文では、水分浸透解析で信頼性を確認したトラスネットワークを用いた解析により、塩分浸透解析を骨材との界面およびひび割れでの浸透性を考慮して、解析できることを示した。またその際、界面とひび割れでの拡散係数を検討し、妥当と思われる数値を用いた。ひび割れ解析は、ひび割れをより忠実に離散的に表現することのできる剛体バネモデルで行った。界面とひび割れでの浸透性がコンクリートの拡散係数に意味のある影響を与えることを、影響の度合いとともに、解析的に示した。

キーワード：塩分浸透，水分浸透，拡散係数，界面，骨材

1. はじめに

鉄筋コンクリートへの塩分浸透はその耐久性に大きな影響を及ぼすために、塩分の浸透性状を知ることは重要である。従来から塩分浸透解析は良く行われてきたが、その多くがコンクリートを均質的なものとみなした簡素な解析が多くを占めている。しかし、実際には骨材とモルタルの間に存在する界面が、塩分の浸透に大きな影響を及ぼすことが報告されている。またコンクリートにひび割れが生じている場合には、そこを通じて塩分浸透が促進されるために、それによる影響も考慮に入れなければならない。そこで今研究では、塩分浸透に及ぼす重要な要素としてひび割れと界面の影響を解析の中に取り入れる。ひび割れをより忠実に離散的に表現することのできる剛体バネモデル(以下, RBSM)で構造解析を行い、また塩分浸透解析には一次元のトラス間で物質移動が行われると仮定したトラスモデルを使用する。

解析を行った。各剛体要素は重心において横方向、縦方向、回転方向の三自由度を持ち、また、剛体要素分割面に対して垂直方向およびせん断方向にそれぞれバネ要素が連結される (Fig.1)。ここに、 k_n , k_s は垂直バネ、せん断バネの弾性係数である。剛体バネモデルにおいてクラックは剛体要素間の境界上に発生する。よって、クラックの進展方向が要素の分割方法に左右される。本解析ではこの影響を取り除くために、解析対象の要素分割に対して Voronoi 分割 (Fig.2) を適用した。

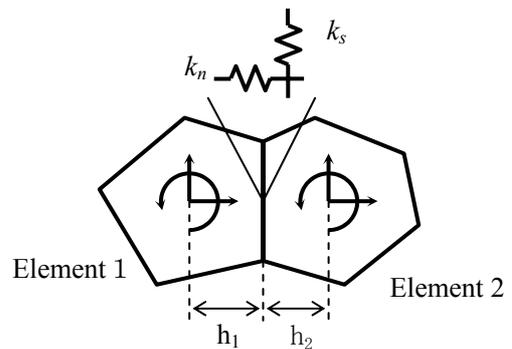


Fig.1 Mechanical model

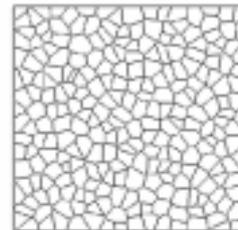


Fig.2 Voronoi diagram

2. 解析方法

2.1 ひび割れ発生解析に使用する RBSM¹⁾

(1) 剛体バネモデル

本研究ではコンクリート供試体に対して、離散解析のひとつである剛体バネモデルを用いて

*1 北海道大学大学院 維持管理システム研究室 (正会員)

*2 北海道大学大学院 維持管理システム研究室教授 工博 (正会員)

(2) 連結バネの構成則

長井らは、巨視的な弾性係数、ポアソン比とメソレベルにおける弾性係数、ポアソン比との関係を定めた¹⁾。垂直バネおよびせん断バネは、引張強度または τ_{max} 基準に達するまで弾性である。垂直バネの応力-ひずみ関係を(Fig.3)に示す。圧縮域においては完全弾性となる。垂直バネの応力が引張強度 $f_{t elem}$ に達したときバネは破壊し、その後ひび割れ幅に対して線形の軟化挙動を持つ。本研究では最大ひび割れ幅を 0.03mm とした。また、原点と結ぶ直線を除荷・再載荷経路としている。せん断バネの応力-ひずみ (τ - γ) 関係に関しては、垂直バネが未破壊の場合は(Fig.4)に示す弾塑性挙動となる。 τ_{max} は垂直バネの状態によって定められる。垂直バネ破壊後は(Fig.5)に示す構成則に従うものとした。 γ はせん断変位である。

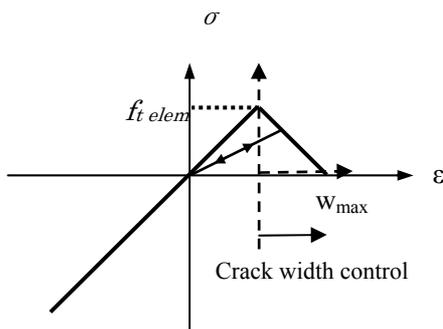


Fig.3 Model of normal spring

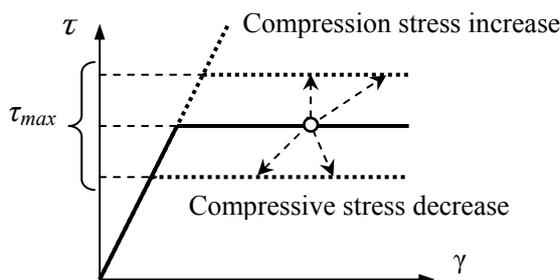


Fig.4 Model of shear spring

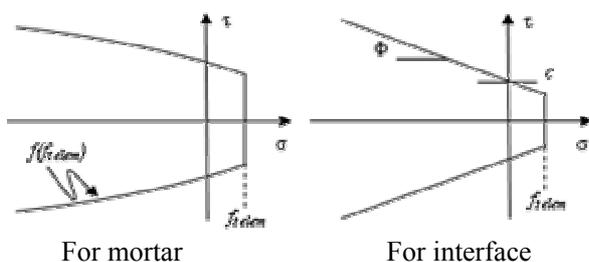


Fig.5 τ_{max} criterion for mortar and interface

2.2 浸透解析で用いるトラスモデル

(1) トラスモデル

トラスモデルは1次元の拡散方程式を解くだけで物質移動を考慮できる。骨材要素を含まない浸透解析の際は Fig.6 で示すように、RBSM 解析で使用した Voronoi 要素の中心点を1つの節点とし、要素境界辺の中心点とをトラスで結び辺長に応じた平均の断面積を与える。Voronoi 要素の各頂点にも新たな節点を置きそれらを境界のトラスとしてつなぐ。そしてひび割れ幅に応じた断面積を境界トラスに与えることによってひび割れの中の移動も考えることが可能になる。また Fig.7 で示すように骨材要素を含んだ浸透解析の為に、骨材要素とモルタル要素の間に界面トラスを設置する。ここに界面の情報を取り入

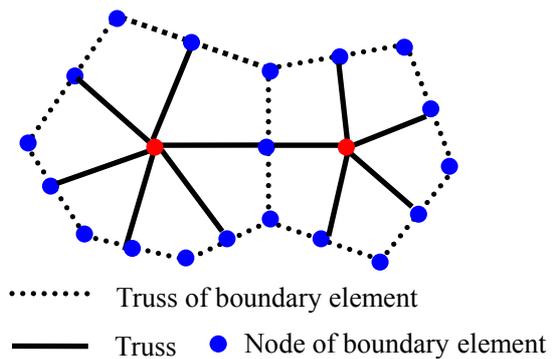


Fig.6 Truss network

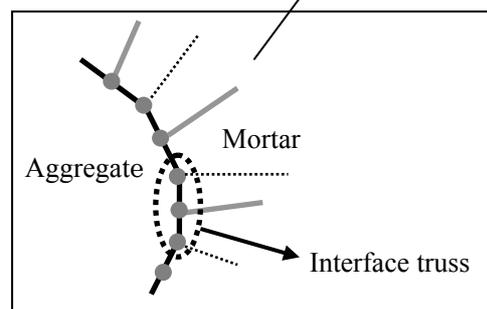
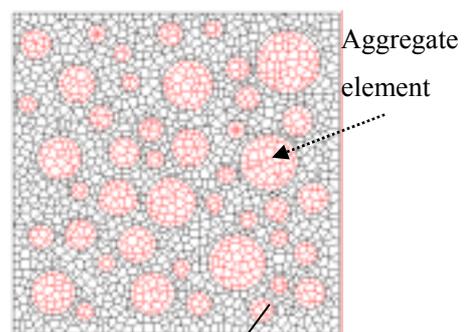


Fig.7 Interface truss and node

れることで界面の影響を考慮することのできる浸透解析が可能になる。

(2) 拡散方程式の離散化

フィックの第二法則は、非定常拡散、すなわち拡散における濃度が時間に関して変わる時に使われ次式で示される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで D を拡散係数といい、 T は濃度、 x は位置で、 t は時間である。この偏微分方程式は境界条件(3)と初期条件を与えることによって解くことができる。

$$\alpha(T - T_{fluid}) = - \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

ここで α は伝達率で、 n は境界上の外向きの法線ベクトル、 T_{fluid} は周囲濃度である。

ここで支配方程式をガラーキン法によって離散化する。そうすることによって要素間の有限要素式がでてくる。これを要素ごとに足し合わせていくと、系全体の有限要素式を得ることができる。この有限要素式をクラークニコルソン法で、時間に関しても離散化を行うことで、非定常の拡散問題は逐次解くことができる。

(3) 水分浸透解析によるプログラムの検証

本プログラムの妥当性を検証するために Bazantらの²⁾最も物性値等の信頼性が高いと考えられる相対湿度による予測モデルの値と比較する。解析条件および解析供試体を **Table 1, Fig.8** に示す。相対湿度から相対含水率への変換式は秋田らによって示され変換実験式³⁾を使用した。予測モデルとの比較結果を **Fig.9** に示す。二つの値は良い一致を示しており、本研究での浸透解析プログラムの有効性が確認された。

Table 1 Analysis condition

Moisture diffusion coefficient (mm ² /day)	Rate of moisture transfer (mm/day)	External relative humidity (%)
100	10	80

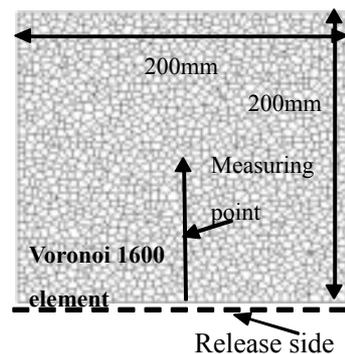


Fig.8 Analytical model

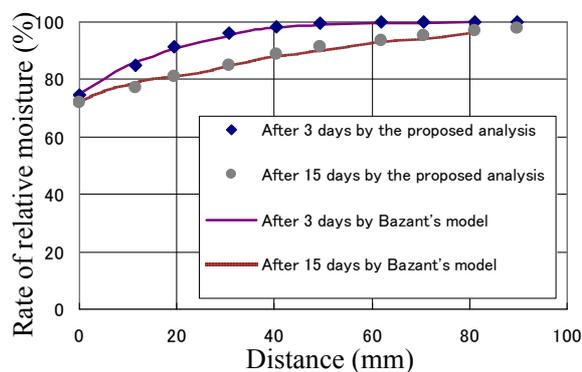


Fig.9 Rate of relative moisture distribution

3. 塩分浸透解析

3.1 解析値の検証

本研究でのトラスモデルによる塩分浸透解析を行い、その値と既往の研究による実験値との比較検証を行った。実験においては、飽和状態でのモルタルへの塩化物イオンの浸透試験を行っており、拡散係数と表面濃度は実験結果から算定している⁴⁾。解析においても条件を実験に合わせるために、これらの値を使用することとし、表面濃度は常に一定であるとした。解析条件を **Table 2** に、Voronoi 分割図及び塩化物イオン濃度計測位置を **Fig.10** に示す。

Table 2 Analysis condition

Diffusion coefficient (mm ² /day)	Surface concentration (g ⁻³ /cm ³)
0.88	4.86

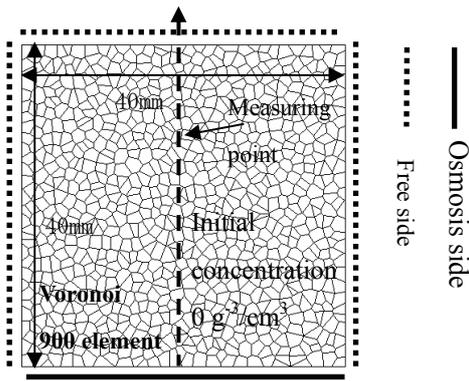


Fig.10 Analytical model

結果を Fig.11 に示す。二週間後、六週間後の塩化物イオンの濃度分布は実験値と解析値で良く一致しており、塩分浸透解析における本プログラムの妥当性が確かめられた。

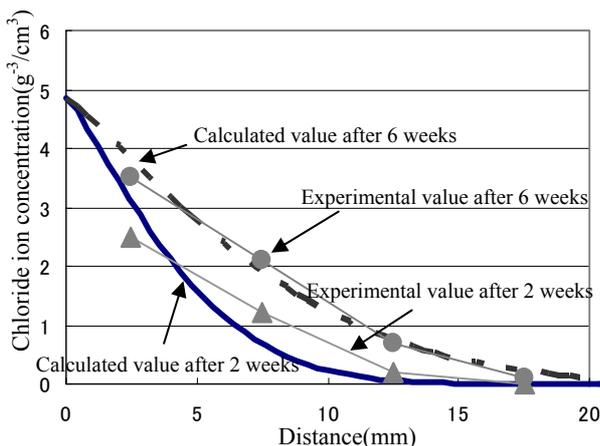


Fig.11 Chloride ion concentration distribution

3.3 骨材要素を考慮した塩分浸透解析

(1) はじめに

一般的に示されている塩化物イオンの拡散係数はコンクリートを均質的なものとみなしたものが大半である。しかし実際の拡散現象ではコンクリート-モルタル間の界面が浸透を促進させているものだと考えられる。そこでここでは界面の拡散係数についての検証を行ってみた。

(2) 水セメント比と拡散係数の関係

今研究では、骨材、界面、モルタルの3つの拡散係数を設定して、それをトラスモデルの中に組み込んだ。ただ骨材内部での浸透はほぼ無いものとして骨材の拡散係数は微小な値とした。

コンクリートの拡散係数は普通ポルトランドセメントを使用した場合の水セメント比との関係が次式⁵⁾で示されている。

$$\log D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (3)$$

しかしながらモルタルの拡散係数は水セメント比との関係式という形で示されたものが無い。そこで様々な文献、資料からモルタルの拡散係数を集め式(4)との関係とも合わせて Fig.12 に示す。この図からモルタルの拡散係数は資料によってばらつきが大きい、ほとんどの水セメント比においてコンクリートの拡散係数がモルタルの値より低くなっていることが明らかになっている。例えば、水セメント比が50%でのモルタルとコンクリートの拡散係数は Table 3 示すようである。

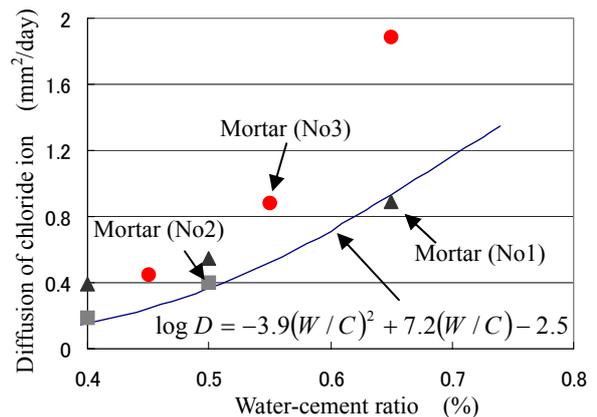


Fig.12 Relation between W/C and diffusion coefficient

これらの値を使用して水セメント比が50%における塩分浸透解析を行った。モルタルの拡散係数を特定するために、まず、界面の拡散を無視して解析した。解析には三種類のタイプを準備しそれぞれを TYPE1,2,3 とした。TYPE1 は骨材要素を含まない均質的なコンクリートだとみなし、拡散係数に Table 3 で示したコンクリートの値を使用した。また TYPE2,3 は骨材要素を含ませてモルタルの拡散係数には Table 3 の値をそれぞれ使用した。骨材の容積率は TYPE2,3 とともに約40%とし、骨材径10,8,6,4mmのものをそれぞれ25%の割合で配置した。浸透面の濃度は常に一定で $4.86\text{g}^3/\text{cm}^3$ とした。解析供試体と結果

を Fig.13 と Fig.14 に示す。TYPE3 は界面の影響を無視しているにもかかわらず、コンクリートの拡散状況を示す TYPE1 よりも拡散するという結果になった。そこでモルタルの拡散係数は TYPE2 の値を使用することにする。

Table 3 Diffusion coefficient

W/C=50%	TYPE1 Concrete	TYPE2 Mortar	TYPE3 Mortar
Diffusion coefficient (mm ² /day)	0.365	0.402	0.543

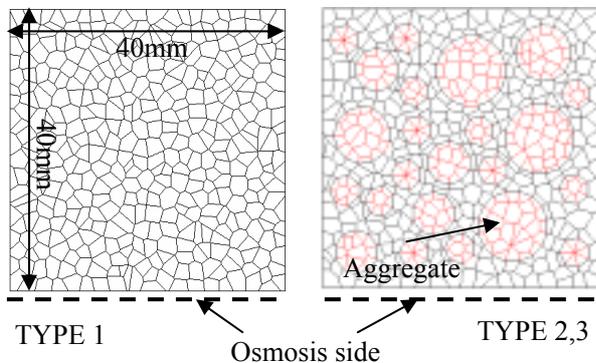


Fig.13 Analytical model

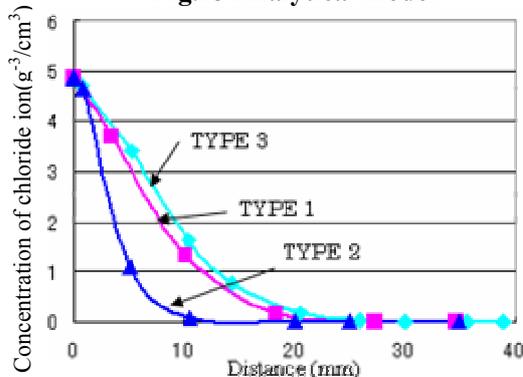


Fig.14 Analytical model

(3) 骨材の界面の拡散係数

水セメント比が 50%での界面の拡散係数を検証するために、4つの界面の拡散係数を使用し解析を行い、コンクリートの拡散係数を使用した場合と比較した。界面の厚さは Bentz ら⁹⁾によって骨材径によらずほぼ 20 μm 程度であると結論づけられているために、今研究ではこの値を使用する。解析条件を Table 4 に、解析結果を Fig.15 に示す。この図からコンクリートの拡散係数を使用した値より No.1 は内部へ深く浸透し、逆に

No.4 は浸透が浅かった。しかし界面の拡散係数 No.1 よりも下げていくにしたがって、コンクリートの拡散係数を使用した値に近づき、No.3 では完全に一致した。このことから、水セメント比が 50%での界面の拡散係数として妥当な値はモルタルの約 200 倍ということが判明し、これからの解析ではこの値を使用する。

Table 4 Analysis condition

W/C=50%	Diffusion of interface (mm ² /day)
No.1	0.402×10 ³
No.2	0.402×3×10 ²
No.3	0.402×2×10 ²
No.4	0.402

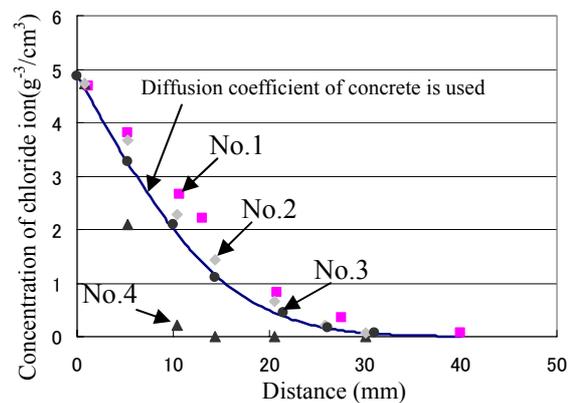


Fig.15 Distribution of chloride ion concentration after 200 days

3.3 ひび割れを考慮した塩分浸透解析

(1) 解析概要

コンクリートの圧縮強度の 80%の荷重をかけた静的圧縮荷重試験を RBSM 解析で行い、荷重方向を浸透面として塩分浸透解析を行った。塩分浸透解析におけるひび割れ部分での拡散係数は実験によりコンクリートの拡散係数の 10⁵ 倍程度であると示されており、本研究ではこの値を使用することにした。骨材の容積率は約 40%とし、骨材径 10,8,6,4mm のものをそれぞれ 25%の割合で配置した。解析条件及び解析供試体をそれぞれ、Table 5 と Fig.16 に示す。表面濃度はひび割れ部分でも常に一定とし、塩分濃度を比較する箇所としてはひび割れが顕著に現れた部分とした。

Table5 Analysis condition

Compressive strength (MP)	Compressive load (MP)	Surface concentration ($\text{g}^{-3}/\text{cm}^3$)
47.2	37.9	4.86

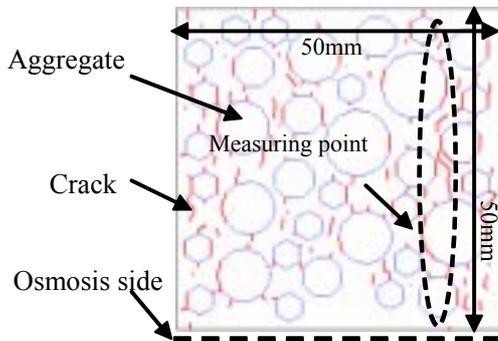


Fig.16 Analytical model

(3) 解析結果

結果を **Fig.17** に示す。ひび割れの発生により塩分浸透が促進され、ひび割れが発生していないものよりも深く浸透していることが確かめられる。また今回の測定点では骨材、ひび割れの影響による値の局所的なばらつきは見受けられなかった。迫井⁸⁾らは水セメント比が 50%のコンクリートで静的圧縮荷試験を行い拡散係数の変化を調べ、圧縮強度の 80%で静的圧縮荷試験を行ったときの拡散係数は、荷重を行わなかったものの約 1.67 倍であることを示している。このコンクリートの拡散係数の実験値を用いて塩分浸透の予測値を出すと、ひび割れがある場合の解析結果とは完全には一致しなかったものの、近い値であることが示された。

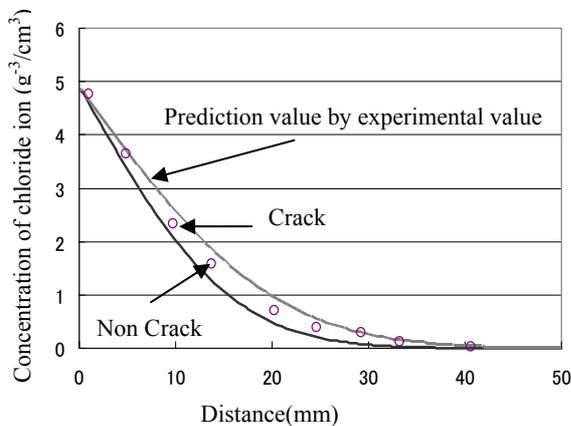


Fig.17 Distribution of chloride ion concentration after 200 days

4. まとめ

- (1) 新たに提案するメソスケールの離散的解析手法により、コンクリートの塩分浸透解析を骨材との界面およびひび割れでの浸透性を考慮して行えることを示した。
- (2) 界面とひび割れでの浸透性がコンクリートの浸透性に意味のある影響を与えることから、この種の解析の必要性が示された。
- (3) 今後、様々なレベルの応力状態、骨材量の性状、多方向からの塩分浸透を行い、拡散性状への影響を検証していく。

参考文献

- 1) Kohei Nagai, Yasuhiko Sato and Ueda Tamon, “Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 2D RBSM”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.2, No.3, pp359-374,2004.10
- 2) Bazant, Z. P and L. J. Najjar : Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972.
- 3) 秋田宏ほか: 乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, *土木学会論文集* Vol.23, No.490, pp.101-110, 1994.5.
- 4) 佐伯竜彦ほか: 不飽和モルタル中の塩化物イオンの移動, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.18, No.1, pp.963-968, 1996
- 5) *コンクリート標準示方書 [施工編]* 1999.
- 6) Garboczi, E. J and Bentz, D. P. : Digital Simulation of the Aggregate-Cement Paste Interfacial Zone in Concrete, *Journal of Materials Research*6,pp.196-201 1991
- 7) 塚原絵万ほか: ひび割れ有するコンクリート中の塩化物イオン移動評価手法の提案, *土木学会論文集*, Vol.59, No.732, pp.109-120, 2003.5
- 8) 迫井祐樹ほか: コンクリートの塩分浸透に及ぼす静的圧縮荷の影響, *土木学会第 60 回年次学術講演会* Vol.5, No.193, pp.385-386, 2005.9