均質化法によるコンクリート材料中の物質移動に関する基礎的研究

○東北大学大学院　学生員　小島　隆嗣
東北大学大学院　学生員　車谷　麻緒
東北大学大学院　正　員　寺田賢二郎

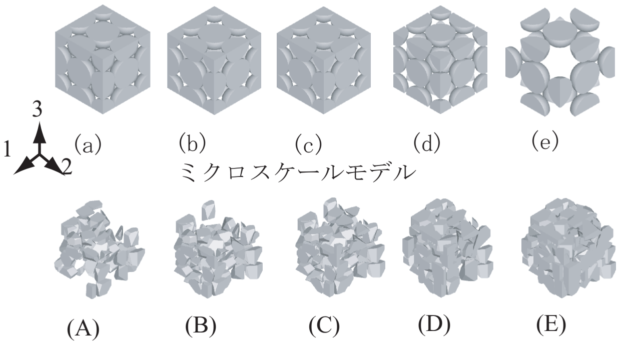
1.　序論

塩害[1]は，鉄筋コンクリート構造物の代表的な早期劣化現象であることから，現在塩害劣化に関する数多くの研究報告があるにも関わらず，未だ実用レベルの塩害評価手法を提供できるまでに至っていない．それは，コンクリートはミクロ的には細骨材，粗骨材，空隙，水分など様々な材料から構成されてる複合材料である．このため，塩害劣化などの拡散現象を正しく予測するためには，構成材料それぞれの拡散係数や体積分率，分布性状だけでなく，環境，時間への依存性までも考慮する必要があるが，従って，劣化を促進させる物質のマクロな移動現象を評価することは容易なことではない．そこで本研究では，拡散現象を，コンクリートペースト・細骨材・粗骨材・遷移帯より構成されるマクロ・メゾ・ミクロスケールモデルを作成し，それぞれの拡散係数を均質化法により関連付け，微視構造内の非均質性を考慮したコンクリート構造物の平均的な拡散係数を算定し，その結果をふまえてコンクリート材料内部における物質移動機構について考察を加える．

2.　ミクロ解析によるメゾ拡散係数の評価

本研究ではコンクリート内部のミクロ，メゾスケールの構造を 3D-CAD でモデル化し，これを VOXELCON[2] で分割し骨材の周囲の 1 要素を遷移帯と等価な働きをするよう設定した．既存の研究[5]により，空隙率，水セメント比，温度，相対湿度を考慮したコンクリートペーストおよび遷移帯の塩化物イオンの拡散係数は，**表–1** のように設定した．温度と湿度は平均的な, 25 度, 80%とした．細骨材量と均質化拡散係数の関係を検証するために，細骨材量の変化に伴う均質化拡散係数の変化を調査する．**図–1** 上のような細骨材量が 30%から 70%のミクロスケールモデルを作成した．便宜上，細骨材は球で表現した．骨材以外の部分はペーストで充填されているものとする．細骨材量は多少の差はあるが，ほぼ 30, 40, 50, 60, 70%である．

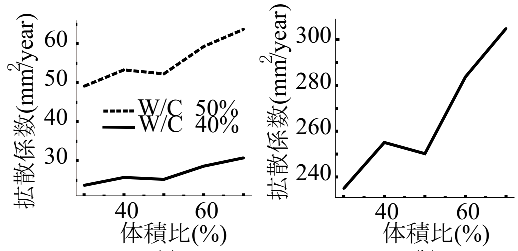
それぞれのモデルに均質化法を適用し均質化メゾ拡散係数を求めた結果は**図–2** のようになった. この拡散係数の値は 11, 22, 33 方向の均質化拡散係数に比べて他の拡散係数はかなり小さいため 0 とみなし 11, 22, 33 方向の平均を取ったものを均質化拡散係数の代表値とした．**図–2** より細骨材増加に伴うメゾ拡散係数への影響は，骨材率が約 40%を境に骨材増加の影響は遷移帯増加より物質移動経路の遮断の方が大きくなり，拡散係数は減少する．しかしそれ以降に骨材同士が接し始めると，遷移帯の連結により，他に比べて拡散係数が格段に高い物質移動経路が生成され，均質化拡散係数を高める効果が高くなる．さらに細骨材混入の影響を大きく受けるのは骨材率が 30%から 60% であることが分かった．この傾向は実験的な報告[4]とも整合するものである．また，水セメント比がメゾ拡散係数に与える影響としては，水セメント比が大きい程，骨材混入により，メゾ拡散係数に与える影響が大きいことも分かった．



図–1 解析モデル

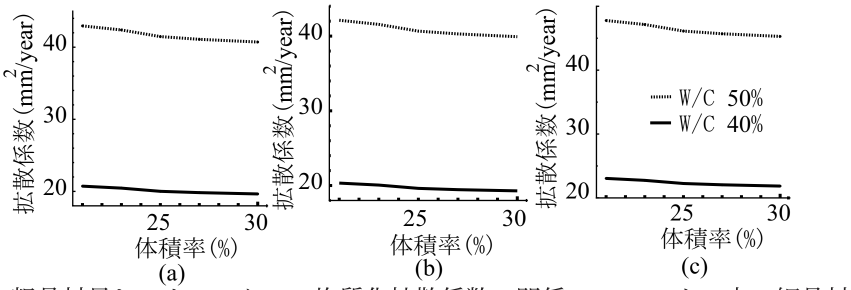
表–1 コンクリートペーストと遷移帯の拡散係数 (mm^2/year)

W/C	コンクリートペースト	遷移帯
40%	1.89×10^1	5.67×10^2
50%	39.2×10^1	1.17×10^3
60%	1.87×10^2	5.62×10^3

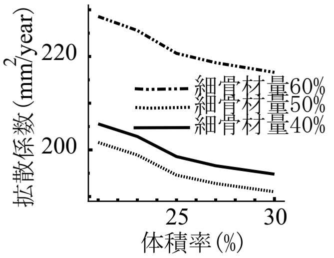


図– 2 細骨材量とメゾスケール均質化拡散係数の関係；(a)W/C 40,50%の均質化拡散係数, (b)W/C60%の均質化拡散係数

キーワード：塩害，物質移動, 均質化法, 遷移帯
〒 980-8579　仙台市青葉区荒巻字青葉 06,　TEL 022-217-7126, FAX 022-217-7127 URL: http://www.nde.civil.tohoku.ac.jp/



図–3 粗骨材量とマクロスケール均質化拡散係数の関係；(a) モルタル中の細骨材が 40%，(b) モルタル中の細骨材が 50%，(c) モルタル中の細骨材が 60%



図–4 W/C60%におけるモルタル中の粗骨材量とマクロスケール均質化拡散係数の関係

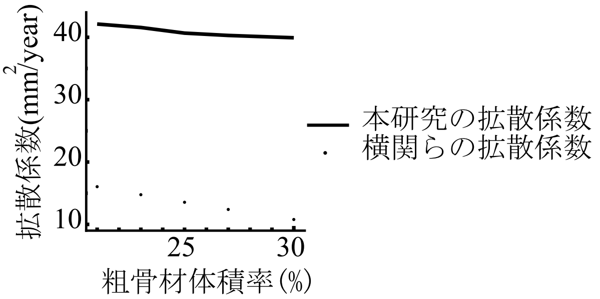
3. メゾ解析によるマクロ拡散係数の評価

次に，粗骨材量と均質化拡散係数の関係を検討する．ミクロスケールと同様に粗骨材量と，マクロ均質化拡散係数の関係を調べ，モルタル中の細骨材量が粗骨材量の変化による拡散係数の変化に与える影響についても考察する．一般に，コンクリート構造物中で 7 割弱が骨材であるり，粗骨材はコンクリート構造物中で 3 割弱とされているので，2 割から 3 割の粗骨材が含まれている**図–1** 下のような粗骨材モデルを作成しメゾスケールモデルとした．なお，ミクロスケールと同様に骨材以外の部分はペーストで充填されているものとし，1voxel 分だけ仮想的な遷移帯としてモデル化した．ただし，このスケールにおけるモルタルの拡散係数は前節の結果を用い，遷移帯モデルの拡散係数も同様に遷移帯と等価な働きをするように設定した．

それぞれの細骨材量での水セメント比と粗骨材量と拡散係数の関係は**図–3**, **図–4** のようになった．この拡散係数は 11, 22, 33 方向の拡散係数の平均を代表値とした．**図–3**(a)〜(c) からわかるように，細骨材の増加に伴いメゾスケールの均質化拡散係数は増加するのとは対照的に，マクロスケールの均質化拡散係数は減少した．この傾向は既存の研究[4)] とも整合しており，粗骨材の増加は遷移帯による拡散を助長する効果よりも，移動経路の遮断や屈曲などの影響をコンクリートに与えることを示唆している．また，**図–4** から粗骨材量の増加に伴うマクロスケール拡散係数の減少はモルタル中の細骨材量 60%の場合に最も大きく，細骨材量が 40%，50%の順に小さいことがわかる．モルタルの拡散係数は細骨材量が 60%，40%，50%の順に大きいため，粗骨材量の増加に伴いモルタルの拡散係数が大きい程，マクロスケールの拡散係数が減少する．そして，モルタルの拡散係数は，ミクロスケールの細骨材量に大きく影響されているため，マクロスケールの拡散係数はミクロスケールの非均質性にも大きく影響されている可能性が指摘される．

4. 既存の研究との比較

ここで，横関らの提案しているモデルにより算出した骨材量を考慮した拡散係数，およびコンクリート標準[6)] 示方書により表記されている拡散係数と，本研究で算出したマクロ拡散係数とを比較した結果を，**図–5** に示す．本研究で算出した拡散係数の方がかなり大きめに見積もられているが，これは本研究では骨材モデルを作成し，それをもとに



図–5 拡散係数の比較

拡散係数に大きく影響を与える遷移帯や細骨材同士が接しているか否かを考慮しかのに対し，横関らのモデルは骨材の体積のみから遷移帯の影響を考慮していることが原因と考えられる．次に，示方書に表記されている拡散係数と比較した．その結果，本研究で算出した拡散係数の方が小さかった．これは，示方書では既存の構造物を調査した結果のため，本研究では考慮していない拡散に大きい影響を及ぼすひび，濡れ，乾きなどの経時変化が作用しているためであると考えられる．

5. 結論

本研究では，均質化法を適用してコンクリート材料の微視的構造の非均質性を考慮して塩化物イオンのマクロスケールの拡散係数の評価を行った．本研究により，均質化法による物質移動の数値解析シミュレーションの妥当性を確認した．しかし，より現実的な物質移動現象を予測するためには，実測値とのキャリブレーションや，より現実的な骨材モデルの構築とともに，水分移動や環境の変化によるコンクリートの状態変化，ひび割れ発生等コンクリートの変化について考慮する必要がある．

参考文献

1) 岸谷孝一，西沢紀昭，大即信明，樫野紀元，片脇清士，小林明夫，宮川豊章：コンクリート構造物の耐久性シリーズ，塩害 ( )，技報堂出版，1993
2) 日本コンクリート工学協会：反応モデル解析研究委員会，報告
3) 寺田賢二郎，菊池昇：均質化法入門，丸善株式会社，2003
4) 久田真，大即信明，Diola，N.B.，桐山和晃：コンクリート中の塩化物イオンの電気泳動に及ぼす骨材の影響，土木学会論文集，NO.599/V-40, pp.71-80, 1998.
5) 横関康祐，渡邉賢三，林大介，坂田昇，大即信明：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 25/V-58, 131-142, 2003
6) 土木学会編：平成 11 年度コンクリート標準示方書 (施行編)，土木学会，2000