

I-7

均質化法によるコンクリート中の物質移動に関する基礎的研究

○東北大学工学部 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

コンクリートはマクロ的には均質な材料にみえるが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いる複合材料である。そのためイオンのマクロの見かけの拡散を調べるためにはそれぞれの拡散係数や構成材料の体積分率や分布性状を考慮することが必要である。現在報告されている予測式は、それぞれの材料の拡散係数および混入量は考慮しているものの、1, 2 次元的な見かけの拡散や速度を求めるにとどまっており、3 次元的な拡散を材料の非均質性を特徴づけるマクロの構造特性まで考慮した検討は見当たらない。

本研究では、コンクリート構造物の代表的な物質移動による劣化現象である塩害に着目し、代表的な移動物質である塩化物イオンについて、均質化法¹⁾を用いて微視的非均質性を考慮して3次元の拡散予測を行う。ここで、コンクリート構造物・材料をmacro, meso, microの3スケールに分割して考える。具体的には、macroスケールをコンクリート構造物、mesoスケールをモルタル、粗骨材、遷移体、microスケールをペーストと細骨材、遷移体からなる構造体とみなし、実際に近いコンクリートモデルの構築を試みる。コンクリートペーストと細骨材の拡散係数をデータとする均質化法による解析からmesoスケールのモルタルの拡散係数を求め、その拡散係数と粗骨材の拡散係数から同様に均質化法を適用して、macroスケールの拡散係数を求める。その結果を受けてコンクリート材料の物質移動現象に対するmicro, mesoスケールにおける非均質性の影響について考察する。

2. 物質移動予測に対するマルチスケール解析

本研究ではmicro, macroスケールの構造を3D-CADでモデル化し、これをVOXELCON²⁾でvoxel分割し骨材の周囲の1要素を遷移体としてモデル化した。

2.1 micro 解析による meso 拡散係数の評価

横関⁴⁾らのモデルにより、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体の塩化物イオンの拡散係数は、表-1のように設定した。温度と湿度は日本の平均的なものである、25度、80%とした。ただし、遷移体の拡散係数はその体積と等価なvoxel要素となるように調整した。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のような細骨材量が30%から70%のmicroスケールモデルを作成した。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拡散係数を求めた結果は図-3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

表-1 コンクリートペーストと遷移体の

拡散係数 (mm ² /year)		
W/C	コンクリートペースト	遷移体
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

表-2 モルタル中の細骨材量と水セメント比の違いによるモルタルの拡散係数 (mm²/year)

		40%	50%	60%
W/C	40%	2.572×10^1	2.522×10^1	2.860×10^1
W/C	50%	5.330×10^1	5.227×10^1	5.927×10^1
W/C	60%	2.551×10^2	2.501×10^2	2.837×10^2

表-3 モルタル中の細骨材量と水セメント比の違いによる遷移体の拡散係数 (mm²/year)

		40%	50%	60%
W/C	40%	7.715×10^1	7.566×10^1	8.580×10^1
W/C	50%	1.599×10^2	1.568×10^2	1.778×10^2
W/C	60%	7.652×10^2	7.503×10^2	8.510×10^2

いため0とみなし11, 22, 33方向の均質化拡散係数の平均である。図-3より水セメント比によらず細骨材の増加に伴い遷移体、つまり拡散係数が格段に高い物質移動経路の増加の影響の方が細骨材の増加による物質移動経路の屈曲や遮断の影響より大きいことがわかる。また細骨材が40%から50%に増加する場合は物質移動経路の屈曲や遮断による影響の方が大きいため拡散係数が減少している。これは実験的な報告³⁾と整合するものである。

2.2 meso 解析による macro 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。microスケールと同様に粗骨材量を変化させ、均質化拡散係数の変化を調べる。また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6割から7割が骨材であるとされ、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-2のようなモデルを作成しmesoスケールモデルとした。ただし、このスケールにおけるモルタルおよび遷移体の拡散係数は表-2, 3のように設定した。

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-4, 5のようになった。この拡散係数はmicroスケールと同様に11, 22, 33方向の拡散係数の平均である。図-4から分かるように、細骨材の増加に伴いmesoスケールの均質化拡散係数は増加するのとは対称的であ

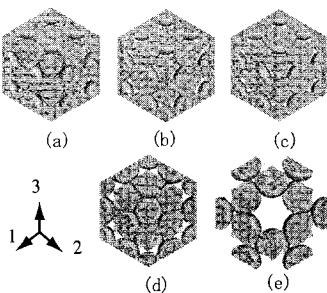


図-1 micro スケールモデル

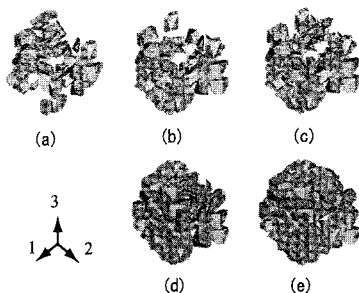


図-2 meso スケールモデル

る。すなわち、水セメント比に依らず、粗骨材の増加に伴い拡散係数は減少する。このことは粗骨材の増加は遷移体の増加よりも骨材の増加による移動経路の遮断や屈折に大きく影響を及ぼしていることを示唆している。この結果は実験的な報告³⁾と整合している。また、図-5 から粗骨材量の増加に伴う macro 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。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、macro スケールの拡散係数が減少する。

3. 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 micro および meso スケールの非均質性を考慮して塩害の主要因である塩化物イオンの macro スケールの拡散係数の評価を行った。その結果、現在報告されているものと整合するの結果を得ることができ、均質化法による内部構造の非均質性を考慮した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。本研究により、コンクリート材料の非均質性および経時変化を考慮した、より現実的な物質移動現象の評価を行える可能性を見出すことができた。しかし、より現実的な物質移動現象を評価するためには、実測値とのキャリブレーションと共に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。

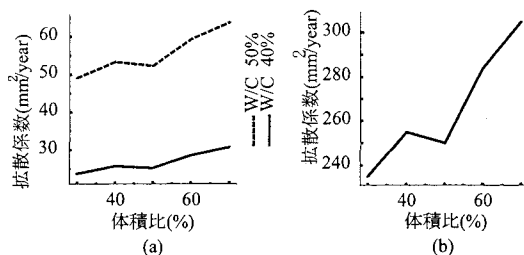


図-3 細骨材量と meso スケール均質化拡散係数の関係; (a) W/C40, 50% の均質化拡散係数, (b) W/C60% の均質化拡散係数

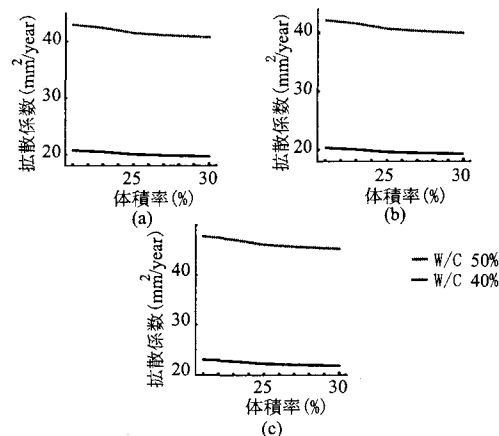


図-4 粗骨材量と macro スケール均質化拡散係数の関係; (a) モルタル中の細骨材が 40%, (b) モルタル中の細骨材が 50%, (c) モルタル中の細骨材が 60%

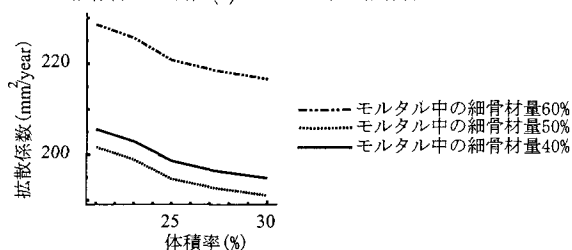


図-5 W/C60%における粗骨材量と macro スケール均質化拡散係数の関係

参考文献

- 1) Benssonusan, A., Lions, J.-L. and Papanicoulau, G.: *Asymptotic Analysis for Periodic Structure*, North-Holland, Amsterdam, 1978.
- 2) <http://www.quint.co.jp/>
- 3) 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.
- 4) 横関康祐, 渡邊賢三, 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