研究速報

骨材界面組織が物質拡散に及ぼす影響

The effect of interfacial zone between aggregate and cement paste on diffusion

出口知史*・舘石和雄*・魚本健人*
Satoshi DEGUCHI, Kazuo TATEISHI, Taketo UOMOTO

1. はじめに

コンクリートの耐久性はコンクリート構造物が置かれている環境条件とコンクリートの品質によって支配される．即ちコンクリートの耐久性低下を引き起こす物質の絶対量などは環境条件によって決定され，浸透・透過の程度はコンクリートの品質に左右される．また，現状ではコンクリートの透気性に関する既往の研究の多くは，炭酸ガスに代表されるセメント水和物との反応性を有する気体を扱ったものが多い．

そこで本研究ではコンクリート中の透気・物質移動現象は物質拡散と化学反応の兼ね合いによって進行していくと捉えた．即ち非反応性物質のような純粋な物質拡散についての正確な把握は反応性物質を考慮する際にも不可欠となるはずであるとし，既往の研究で活発に行われている炭酸ガスなどで生じる化学反応を伴う物質拡散についてではなく，酸素という非反応性物質を想定した物質拡散現象について考察を行った．

また，その現象を検討する際に無視出来ない遷移帯の持つ特性に着目した．その遷移帯の影響を考慮するため骨材配置のモンテカルロシュミレーションを適用し，有限要素法による二次元拡散解析プログラムを用いてシュミレートすることによって検討を行った．

2. 解析モデル

2.1 解析手法

本研究のコンクリート・モルタル中の非反応性物質の拡散現象を考えるにあたり，式（1）に表すフィックの第二法則に基づく二次元拡散方程式を用いた．

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

C^2：拡散係数　u：濃度

2.2 遷移帯の特性

水セメント比0.4前後を境として硬化モルタル及びコンクリート中では骨材とセメントペースト界面に他の部分とは不連続でありポーラスな遷移帯と呼ばれる幅25 μm[2]程度の領域が生成される．この遷移帯は直径50 nm以上[1]の粗大な空隙に富むとされており，材齢を経過してもほとんど減少せず硬化モルタル及びコンクリートなどの物質拡散を含む各種物性に多大な影響を与えるとされている．

2.3 有限要素法におけるメッシュ構築

本研究ではメッシュを用いて表現する対象としてセメントペースト領域・骨材領域・遷移帯領域の3種類とした．その中で遷移帯領域は他の2種類の領域とサイズが10^{-2}のオーダーで異なるために従来の解析に於いて非常に扱いにくい領域となっている．そこで本研究では二次元要素である骨材領域の周囲に一次元要素である遷移帯を張り付ける概念をプログラムに反映させる事によって解析を行った（図1）．

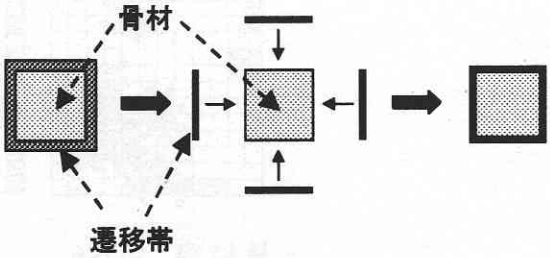

図1　遷移帯の取り扱い

*東京大学生産技術研究所　第5部

2.4　遷移帯の連結による影響

図2は水セメント比0.6で一定とし炭酸化させたモルタル試験体の，ある一定の粒度分布を持つ砂量を変化させて砂量と酸素及び二酸化炭素の拡散係数の関係を調べた結果[3]である．この結果に代表されるように骨材率が低い領域では，酸素にとっては拡散の遮蔽物となる骨材の増加に伴い拡散が阻害される．ところが骨材率の増加に伴い骨材間距離が縮まるあるいは骨材同士が接触する事によって酸素拡散が促進される領域である遷移帯の連結が生ずる．そして骨材率約40％～60％を境界に遷移帯の連結による拡散促進の影響力が骨材による拡散阻害の影響力を上回ることによって，測定される拡散係数に変化が生ずると言われている（図3）．

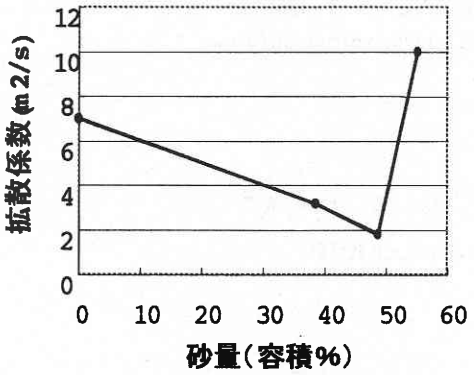

図2　モルタルの砂量と酸素拡散係数の関係

本研究では実構造で発生している骨材配置を反映させるために，配合に応じた骨材配置をモンテカルロシュミレーションによって再現して解析を行なった．

2.5　各種パラメータ設定

中性化に伴う鉄筋の腐食などは，大気と接している表面近くに位置している鉄筋から発生する．そこで本研究では構造物の表面近くを対象にする事とした．

全メッシュ領域を一辺60 mmの正方形領域とし，骨材領域も一辺5 mm～10 mmの正方形領域と設定している．

境界条件としては大気表面に接していると仮定した正方形領域の一辺から常に濃度1の酸素が時間パラメータと無関係に浸透するという条件を用いた．これらの条件を図4に示す．

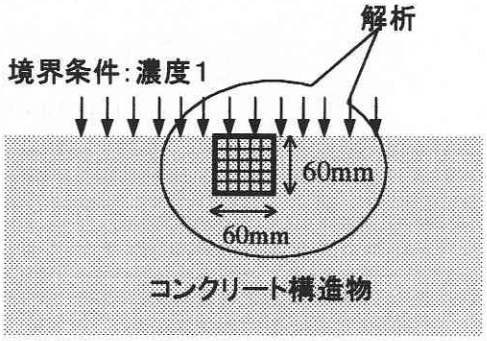

図4　解析イメージ図

酸素拡散係数は，骨材領域における拡散係数を0（mm^2/s），セメントペースト領域における拡散係数を1×10^{-2}（mm^2/s），遷移帯領域における拡散係数を2×10^{-2}～6×10^{-2}（mm^2/s）の間で解析ケースによって変化させた．その際に，ランダム配置によって骨材が隣接した場合の遷移帯の取り扱いについては，2つ重なってしまう遷移帯要素を1つにし，その1つの拡散係数を別途設定して処理を行った．

モンテカルロシュミレーションに基づくランダム配置の発生回数は200回とした．

2.6　測定項目

表面と平行なラインを引き，そのライン上の点の平均濃度が0.5を示すラインuが深さ60 mmに到達した時間t（hour）を計算する．更に深さ60 mmを時間tで除した拡散早さD（mm/hour）を計算し比較に用いた．

解析ケースは骨材のランダム配置を200回行っているの

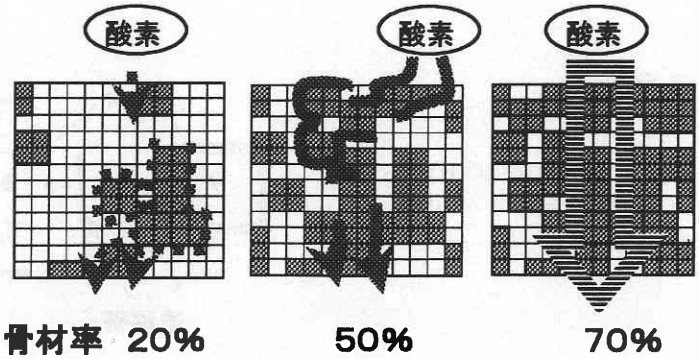

図3　酸素拡散イメージ図

で，そのD値を平均化したものをその解析ケースの結果とした（図5）．

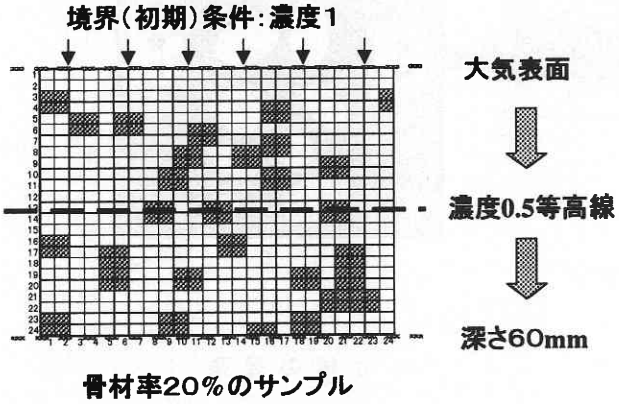

図5　測定項目

3. 解　析　結　果

3.1　遷移帯重複部の影響

遷移帯の酸素拡散係数を2×10^{-2}（hour），骨材の隣接により遷移帯同士が重なった場合には遷移帯の酸素拡散係数をペースト領域の2倍の2×10^{-2}（mm^2/s）（パターンA），同様に4倍・6倍の4×10^{-2}（mm^2/s）（パターンB）・6×10^{-2}（mm^2/s）（パターンC）として計算を行った．各パターンにおけるD値の結果と骨材率の関係を図6に示す．

遷移帯の重複によって酸素拡散を促進させる相乗効果の出現を表現したB，Cでは，それぞれ骨材率60％，50％においてD値が極値を取り，既往の研究と同様の挙動を示した．

しかし遷移帯重複による酸素拡散助長の効果を持っていないAに於いては，D値は骨材率80％～90％程度に於いて極値を取ると予想され，既往の研究とは異なる挙動を示した．

以上より，遷移帯の重複によって酸素拡散は助長されると考えられる．

4. 考察及び今後の課題

4.1　遷移帯重複

3.2で述べた遷移帯の重複によって酸素拡散が助長されるメカニズムとしては，図7で示す様に骨材の隣接により遷移帯の厚さに変化が生じた場合，空隙量の変化は遷移帯の厚さに比例しないことが考えられる．即ち骨材の隣接によって挟まれた遷移帯の空隙量は他の遷移帯よりも大きく

	A	B	C
遷移帯重複部 酸素拡散係数（mm^{-2}/hour）	$2*10^{-2}$	$4*10^{-2}$	$6*10^{-2}$

	A	B	C
遷移帯重複部 酸素拡散係数（mm^{-2}/hour）	$2*10^{-2}$	$4*10^{-2}$	$6*10^{-2}$

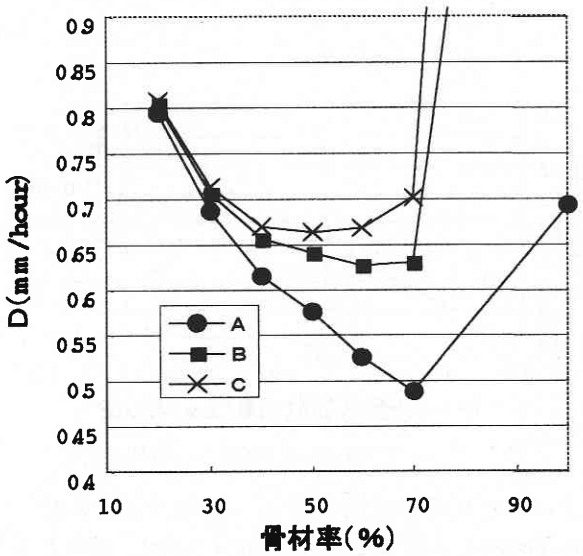

図6　解析結果

なる可能性があり，それによる相乗効果の現象を解析が表していたと考えられる．

4.2　遷移帯の影響力

3.2のパターンCにおいて，各骨材率のケースに於けるD値の変動係数は8～13（％）の値を取っていた．

その中でD値が最大値を取った骨材配置でD＝0.4767，最小値を取った骨材配置でD＝0.8775であった．即ち同じ骨材率等の条件下でD値は

$$0.8775-0.4767=0.4008$$

もの差をもつ．

そこでこのD値の0.4008の差は，ペーストの酸素拡散係数ではどの程度に相当するかを検討するために骨材率0％のプレーンペーストの酸素拡散係数を変化させ，そのD値の変化を図8に示した．

この結果から，D値に0.4008程度の差が発生するのは

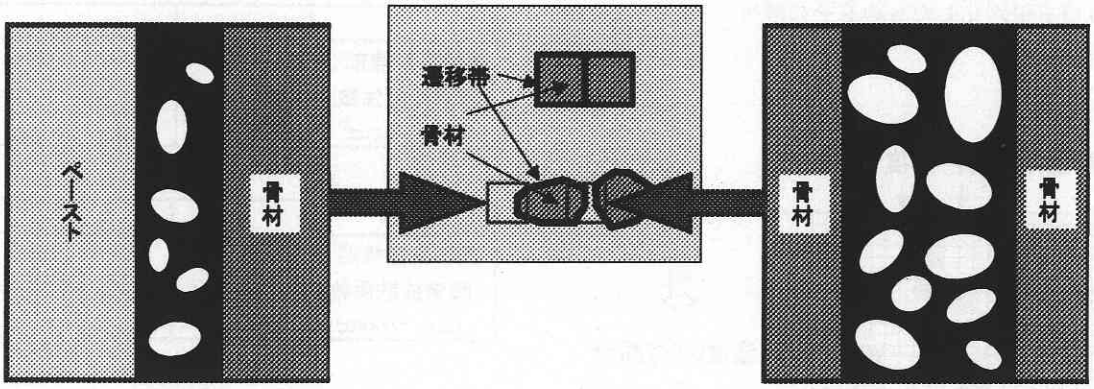

図7　遷移帯重複図

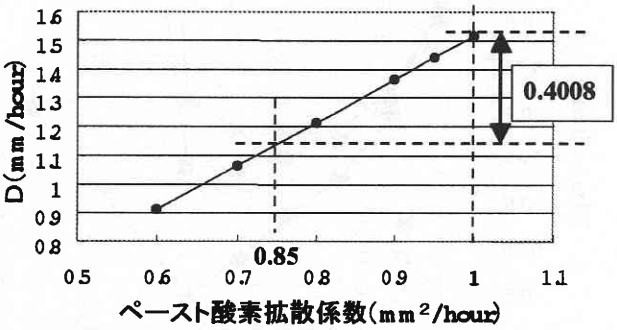

図8　ペーストの酸素拡散係数に伴うD値の変化

パターンCで適用していたペースト酸素拡散係数（1.0（mm^2/hour））と比較して0.15（mm^2/hour），15％にも相当することがわかった．

5. 結　　論

1：重複部遷移帯に於ける拡散係数の変化を発生させている原因として，骨材—セメントペースト間の遷移帯よりも骨材—骨材間の遷移帯の方が空隙率が大きく形成されているという可能性がある．

2：同条件下でも骨材率の噛み合わせ・遷移帯の連結による影響で，セメントペーストの酸素拡散係数に換算して15％にも相当する拡散携帯のばらつきを発生している可能性がある．

6. 今後の課題

既往の研究[2]に於いて，骨材周囲で一様に遷移帯が形成されているのではなく構造物下部から発生したブリージングの水分が骨材下面に溜まる事によって遷移帯が形成され，その下面から骨材周囲を取り巻くように遷移帯が広がっていくことが指摘されている．しかし本研究の解析では遷移帯が骨材周囲一様に分布していると仮定しているのでその点を考慮に入れ，更に同様に本解析では一様としていた粒度分布を考慮に入れるなどした，より精度の高い解析が望まれる．

（1998年4月10日受理）

参考文献

1) Uchikawa, H: Similarities and discrepancies of hardened cement paste, mortar and concrete from standpoints of composition and structure, Vol. 1, pp. 271-310, 1988.

2) 内川　浩，羽原俊介，沢木大介：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討，コンクリート工学論文集 vol. 4, No. 2, pp. 1-8, 1993.

3) Houst, Y. F: Influence of Aggregarte Concentration on the Diffusion of CO_2 and O_2, Interfaces in Cementitious Composites, pp. 279-288, 1992.