

論文

[1132] 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

武若耕司 *¹

1. まえがき

最近、コンクリート構造物の耐久性設計が注目を集めている。特に、塩害の影響が大きい海洋コンクリート構造物ではこの耐久性設計の必要性は極めて高い。しかし一方、コンクリート構造物の劣化現象に対する解析や実験が活発化しているにも拘らず、未だに、これらの理論的あるいは実験的見解と実構造物での劣化状況とが一致しない状況もかなり多い。その最大の原因は、構造体コンクリートの品質のばらつきを十分に評価し得ていないことにあると思われる。劣化作用の厳しい環境では、コンクリートの品質のわずかな差が構造物の耐久性においては大きな差に繋がりがかねない。すなわち、コンクリート構造物の耐久性設計は、構造体コンクリートの品質を正當に評価し、その品質のばらつきを数値的に表すことができ初めて可能となるといえる。

本研究の最終目的は、コンクリート構造物の耐久性能の的確な把握と、耐久性設計に必要な具体的資料の提示にある。ただし、この際に必要となる構造体コンクリートの品質評価および、その評価品質と耐久性の因果関係の把握を、実験的にしかも系統立てて行うには限度がある。そこでここでは、コンピューターシミュレーションによりケーススタディーを繰り返す行うことによってこれらを把握できないかと考え、そのシミュレーション手法について検討を行った。

2. シミュレーション手法の概要

2. 1 コンクリートのモデル化

コンピューターシミュレーションによって構造体コンクリートの品質を評価し、耐久性との関連を把握するためには、まず、対象となる構造体コンクリートのモデル化が必要となる。ここでは、このモデル化の前提として、構造体コンクリートの品質は、コンクリート中に種々の形で存在する欠陥によって支配されると考えた。そして、この欠陥を、その種類にかかわらず球状の欠陥（以下、欠陥球と称す）の集合としてモデル化し、その大きさと数の組み合わせによってコンクリートの品質は表されるとした。

図-1に、この欠陥球をコンクリートのモデル断面に配置するためのフローを示す。その手順は、まず、モデル断面を必要に応じて幾つかのブロックに分割し、各ブロック中に設定する欠陥球の大きさの範囲と数をあらかじめ指定する。その上で、実際の欠陥球の設定位置や大きさについては、欠陥存在の任意性を考慮して、乱数を用いてランダムにブロック内に配置されるものとした。なお、あらかじめ指定する欠陥球の大きさの範囲や数は、構造体コンクリートの配合条件や施工条件によってその値に変化を持たせるべき条件となり得るものである。

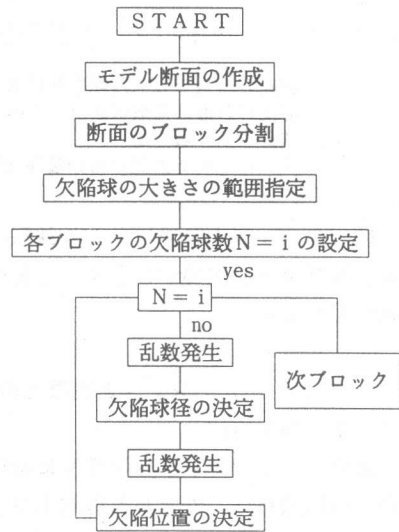


図-1 欠陥球設定のためのフロー

*1 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科、工博（正会員）

2. 2 耐久性の評価手法

上記でモデル化されたコンクリート断面の耐久性を、塩害に対する感受性によって評価することにした。図-2にその評価手法の概要を示す。欠陥球を設定したモデル断面において、欠陥球の内部と外側で塩分拡散性が大幅に異なると仮定すると、最小かぶりの箇所でも最早塩分が鉄筋に到達するとは限らず、最短距離ではないが欠陥の存在する経路の方がかえって早くなる場合も考えられる。この塩分到達最短時間の経路は、厳密には、塩分の浸透し易い箇所を辿る屈曲した経路となり、欠陥のほか骨材の存在状況によっても影響を受けるものと予想される。しかしここでは、簡略化のため、これがコンクリート表面から鉄筋へ至る直線上にあると見なし、図-2に示すようにこの直線経路上の塩分到達時間を順次計算し、その最短時間を求め、これを欠陥の影響を考慮したモデル断面の塩害感受性の指標とした。計算にあたっては、欠陥部以外のコンクリートの塩分拡散係数は 10^{-8} cm²/sec一定とし、一方、欠陥球の内部では塩分は瞬時に拡散する(拡散係数=∞)と仮定し、次式により[1]、塩分到達時間 t を求めた。

$$t = L^2 / [12D \cdot (1 - \sqrt{C_L / C_0})^2] \quad (1)$$

- L: 経路の全長-Σ欠陥球を横切る長さ
- D: 健全部の塩分拡散係数(10^{-8} cm²/sec)
- C_L: 鉄筋表面の塩分量
- C₀: コンクリート表面の塩分量(0.9%/コンクリート重量)

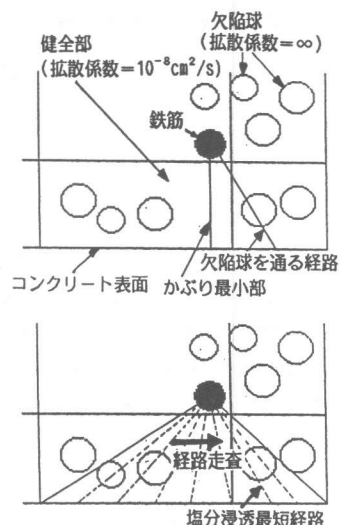


図-2 塩害感受性評価手法の概要

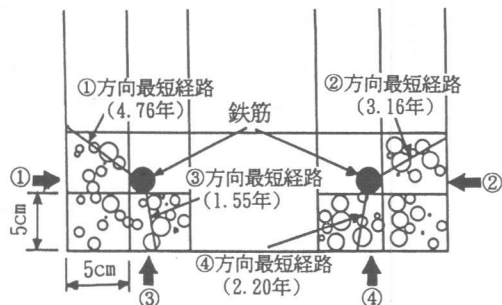


図-3 鉄筋への塩分到達最短時間のシミュレーション例

図-3は、以上の手法により鉄筋への塩分到達最短時間のシミュレーションを行った一例である。本結果は、欠陥が存在すると最小かぶりでも構造物の塩害抵抗性を評価できなくなる状況を明確に示している。

3. シミュレーションと実際との整合性に関する一検討

3. 1 検討方法

上述のシミュレーション手法における最大の問題点は、モデルと実施工コンクリートの整合性の問題である。ここでは、この点に関して次のような検討を試みた。

図-4は、海洋環境下の構造体コンクリートや暴露供試体で測定された塩分量分布からそれぞれのコンクリートの塩分拡散係数を求め、これを水セメント比との関係で示した一例である[2]。水セメント比の増大に伴って塩分拡散係数は急激に増加する傾向が認められるが、同時

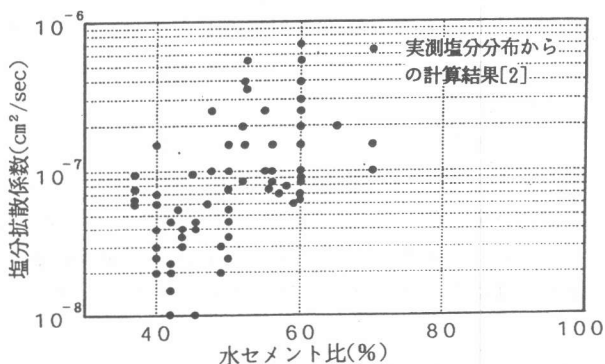


図-4 コンクリートの塩分拡散係数の実測結果

に、同一水セメント比における拡散係数の1桁近いばらつきも見られる。実コンクリートで起こるこの状況を今回提案の手法を用いて再現することができれば、ここで考えた欠陥球モデルが、構造体コンクリートの品質をシミュレーションするモデルとしてある程度の適用性を有していると思わせる。そこで、以下に示す仮定のもとに図-4の再現を試みた。

(i) 水セメント比について：水セメント比の増加に伴うコンクリートの品質低下は、コンクリート中の余剰水（ここでは、取り敢えず結合水以外を称す）の増加に伴う欠陥の増加によると考え、図-5に示すように、コンクリートモデル断面内に設定する欠陥球のうち一定割合をこの余剰水による欠陥と見なした。一方、欠陥球以外の箇所を完全水と部と考慮してこの部分の水セメント比を20%、セメント量を 750 kg/m^3 とすると、次式によりコンクリートモデル全体の水セメント比が算出できる。

$$\text{モデルの水セメント比} = \text{実質単位水量}(W) / \text{実質単位セメント量}(C) \quad (2)$$

$$C = (\text{欠陥球以外の容積} / \text{モデルの総容積}) \times 750$$

$$W = (\text{欠陥球以外の容積} / \text{モデルの総容積}) \times 150$$

$$+ (\text{余剰水と見なす欠陥球の総容積} / \text{モデルの総容積}) \times 1000$$

(ii) 塩分拡散係数について：上記図-3に示した解析結果の一例からも明らかのように、欠陥の存在によって、鉄筋への塩分到達時間は最小かぶり部において必ずしも最短とはならない。当然、実施工コンクリートにおいてもこのような状況は予想されるが、他方、塩分の正確な浸透経路を類推することは困難である。このため、実測のコンクリート中の塩分量分布から拡散係数を算定する場合には、通常は最も距離の短い経路を浸透経路と見なして見かけの値を計算する。この見かけの塩分拡散係数と対応する値を本モデルの解析から得るため、次の処理を行った。すなわち、まず、欠陥球を有するモデル断面に対して上記2.2に示す手法を用い、鉄筋への塩分到達最短時間を求め、次に、この最短時間を、その時の経路ではなく最小かぶりを用いて逆算して拡散係数を求め直し、この値を図-4の拡散係数に対応させることにした。

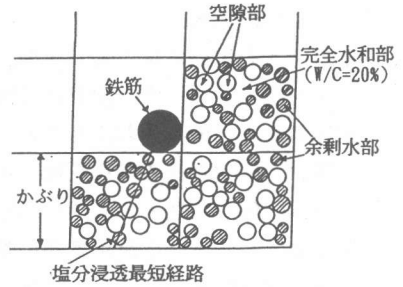


図-5 モデルコンクリートの水セメント比の考え方

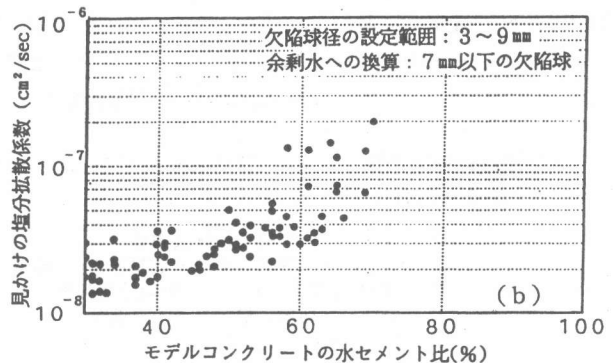
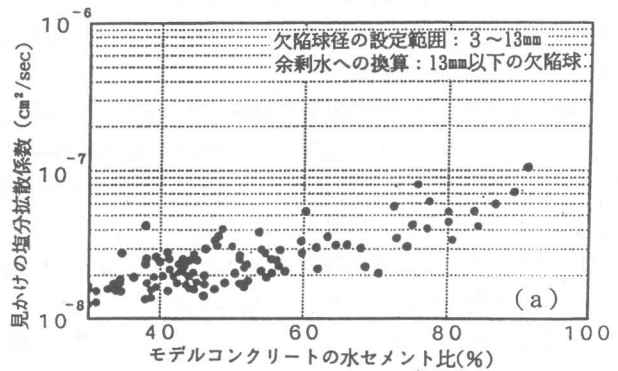


図-6 塩分拡散係数と水セメント比の関係のシミュレーション結果の例

3. 2 検討結果

本モデルを用いたシミュレーションより得られた見かけの塩分拡散係数と水セメント比の関係の一例を図-6に示す。検討には図-3で示したモデル断面を使用した。各作図ではそれぞれ、欠陥球の大きさの範囲およびそのうちの余剰水と見なす範囲を一定とし、欠陥球の数およびランダム係数を変化させる試行を繰り返して、合計約50~80個のデータを取得した。幾つかの作図を行ったが、例えば図-6(b)に示したケースなどでは比較の実測に近い状況を再現できており、少なくとも、欠陥球の設定条件の調整によって、今回提案のコンクリートモデルと構造体コンクリートの整合性をとることは十分に可能と考えられる。

4. 鉄筋腐食モデルへの応用

4. 1 応用の概念

コンクリート構造物の塩害評価にあたっては、2.2で示した塩分拡散性の評価とともに、内部鋼材の腐食進行とこれに伴うコンクリート劣化の可能性に関する評価も重要となり、最近では、その理論解析による評価も試みられている。ただし、ここで考慮しておか

なければならないことは、コンクリート中の鋼材腐食が通常マクロセル腐食により支配的であり、解析にあたってはマクロセルを形成するアノードおよびカソード領域の設定が不可欠となることである。コンクリート中の鋼材でマクロセルを形成する理由は、種々の欠陥の存在によるコンクリートの不均一性にある。そこでここでは、コンクリート中で生じるマクロセル腐食の状況を上述のモデルを用いてシミュレーションすることを試みた。

4. 2 解析手法の概略

解析に使用したモデル断面を図-7に示す。鉄筋を幅1cmごとのセクションに分割し、先ず、各セクションごとにその箇所の塩分濃度が許容限界量に達する最短時間を上記2.2の手法によって求めると、これがそれぞれのセクションが腐食し始める時間となる。この腐食開始時間の最も短いセクションが鉄筋における最初の腐食箇所となり、その後は順次、腐食領域(アノード領域)が拡大し、逆に非腐食領域(カソード領域)は減少する。なお、この場合の許容限界塩分量は、取り敢えずコンクリート重量の0.1%とした。

鉄筋腐食量の算定にあたっては、各セクションの腐食反応がカソード支配あるいはアノード支配のいずれかの支配形態をとると仮定し、カソード支配では、カソード表面で生じる反応 $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ において、また、アノード支配では、アノード部の近傍において生じる $4Fe^{2+} + 8OH^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$ においてそれぞれ、必要となる酸素の供給速度が反応を律速させると考えた。このとき、各支配形態における腐食電流密度は次式で与えられるとした。

$$\text{カソード支配の場合の腐食電流密度 } i_{c,or}^c = 4F \cdot C_{o,c} \cdot A^c / [(\delta/D_o)^\delta + L/D_{o,c}] \cdot A^A \quad (3)$$

$$\text{アノード支配の場合の腐食電流密度 } i_{c,or}^A = 2F \cdot C_{o,c} \cdot (D_{o,c}/L) \quad (4)$$

$C_{o,c}$: コンクリート表面の酸素濃度

L : かぶり、 δ : 鉄筋周辺の拡散層厚さ(0.05cmとする)

$D_{o,c}$: かぶりコンクリートの酸素拡散係数、 D_o : 拡散層の酸素拡散係数

A^c : カソード面積、 A^A : アノード面積

F : ファラデー定数

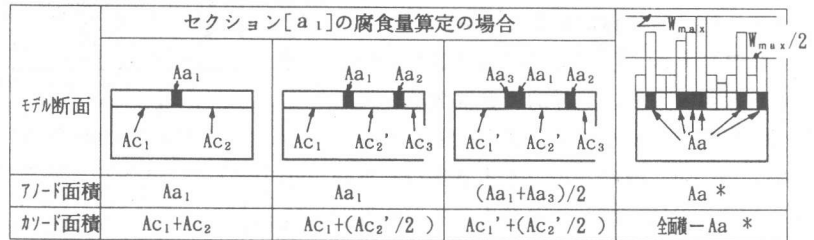
また、腐食反応支配形態の判断は、 Fe^{2+} イオンの生成速度($V_{Fe^{2+}}$)と消費速度($V'_{Fe^{2+}}$)のバランスから、(5)式の条件で決まると考えた。最終的な腐食量 W は(6)式となる。

$$V_{Fe^{2+}} \begin{matrix} > \\ \geq \end{matrix} V'_{Fe^{2+}} \begin{matrix} \text{カソード支配} \\ \text{アノード支配} \end{matrix} \quad (5)$$

ここで、 $V_{Fe^{2+}} = i_{cor}^c / 2 \cdot F$ $V'_{Fe^{2+}} = i_{cor}^a / 4 \cdot F$

$$W = (i_{cor}^c (\text{あるいは } i_{cor}^a) / 2 \cdot F) \cdot [\text{Fe(OH)}_3] \text{分子量} \quad (6)$$

腐食量の算定にあたって用いるアノードおよびカソード面積は逐次変化する。本解析において各セクションの腐食量を算定する場合に用いるアノードおよびカ



Aa1, Aa2...: 腐食部、Ac1, Ac2...: 非腐食部 * : 鉄筋が全て腐食状態となった後について

図-8 腐食量解析に用いるアノードおよびカソード面積の考え方

ソード面積についての考え方を図-8に示す。また、鉄筋位置の塩分量が全てのセクションで許容値を越えると、その時点でカソード領域はゼロとなり、計算上は腐食が起こらないことになる。そこでこの場合には、取り敢えず新たなアノードおよびカソード領域を次のように仮定した。すなわち、カソード領域がゼロになった時点の各セクションの腐食量のうち、最大腐食量の50%以上となっている箇所をアノード領域とし、残りの箇所をカソード領域と見なした(図-8中の右端図参照)。

なお、酸素拡散性については、今回は直接的に欠陥球の影響を考慮するまでには至らなかった。したがって、取り敢えずコンクリート中が飽水状態の場合の酸素拡散係数の実験値を参考とし[3]、図-9に示すように、欠陥球の有無にかかわらず酸素拡散係数を $10^{-5} \text{cm}^2/\text{sec}$ とした場合と、モデルコンクリートの水セメント比が増加すると酸素拡散係数も増加すると仮定した場合の2ケースについて、それぞれ鉄筋腐食性を検討した。

4.3 解析結果と考察

図-10に、鉄筋腐食量分布およびその変化の状況のシミュレーション例を示す。この場合、

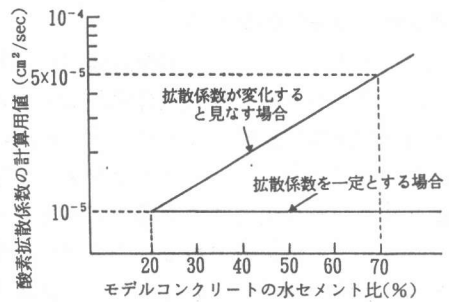
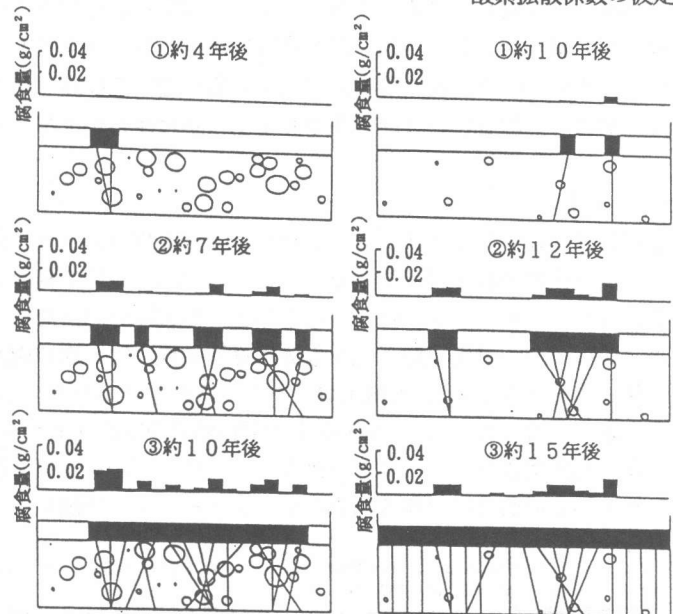


図-9 モデルコンクリートの酸素拡散係数の仮定



(a) 欠陥球径の設定範囲: 0~1.5cm 欠陥球数: 30個/100cm² (b) 欠陥球径の設定範囲: 0~1cm 欠陥球数: 10個/100cm²

図-10 鉄筋腐食量分布のシミュレーション結果の例

欠陥が全く存在しないと約15年で初めて鉄筋に腐食が発生する。これに対して欠陥が存在する場合には、塩分の到達速度の違いで生じるマクロセルによって、かなり早い時期から部分的に腐食が集中する状況を明確に把握できる。例えば、鉄筋腐食によってコンクリートにひびわれが生じる時の腐食量を 0.02 g/cm^2 と仮定すると、比較的大きな欠陥がある(a)の場合には10年で、また欠陥が極めて少ない(b)の状況においても15年目には、コンクリートにひびわれが発生する可能性が生じる。腐食量の推定精度についてはさらに検討の余地があるが、コンクリート中の鋼材腐食に関しては、このような状況での腐食性評価がより实际的である。

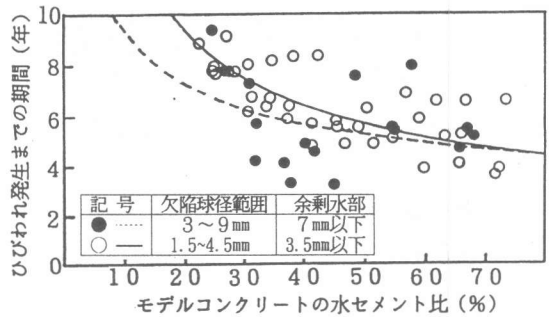
図-11は、上記3.の検討において実際のコンクリートと比較的整合性がよいと認められた欠陥球の設置条件を図-7の断面に適用し、モデルコンクリートの水セメント比と腐食ひびわれ発生までの期間の関係をシミュレーションしたものである。ここでは、欠陥球径の大きさの範囲が異なる2ケースについてそれぞれ、欠陥の個数あるいはランダム係数を変えた20~40回の試行を行いデータとした。なお、欠陥球径の範囲が異なっても水セメント比が同程度となる場合には、モデル断面中に占める全欠陥球容積はほぼ同じとなる。それにもかかわらず本解析結果では、欠陥球径が相対的に大きな場合の方が、水セメント比が同じで欠陥球径が小さな場合よりも、明らかに鉄筋腐食によるコンクリートの劣化可能性は高くなり、またその劣化速度のばらつきも大きくなった。これは、欠陥が大きい場合に、腐食が部分的に集中して生じる可能性がより高くなることを表している。

5. まとめ

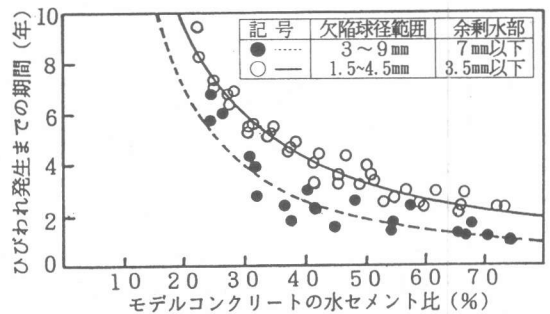
本研究は、コンピューターシミュレーションを用いたケーススタディーによって、構造体コンクリートの性能評価を行うことを考え、その手法について検討を行ったものである。ここでは、まず、コンクリートの中に種々の形で存在する欠陥を球と見なしたコンクリートモデルを作成し、次に、このモデルの塩害感受性を塩分浸透性と鉄筋腐食性の両面から評価することを試みた。その結果、本モデルが、① 実施工コンクリートにおけるばらつきを考慮した品質性能をある程度再現できること、② コンクリート中の鋼材腐食を支配するマクロセルの形成過程を再現するのに有効に利用できること、などを確認し、このモデルを用いた塩害評価手法と合わせて、構造体コンクリートの耐久性評価のためのシミュレーション手法の1つとなり得ると予想された。

参考文献

- 1) Bazant Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures -Application-, Journal of the Structural Division, Vol.105, pp.1137-1166, 1979
- 2) 武若耕司: 海洋環境下のコンクリートの含有塩分量に関する既往調査結果の整理と分析、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集、第V部、pp.36-37、1988
- 3) 小林一輔ほか: 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究、コンクリート工学、Vol.24, No.12, pp.91-106、1986
- 4) 土木学会編: コンクリートの現状と将来、コンクリートライブラリー-68、1990
- 5) 武若耕司ほか: コンクリート中の欠陥を考慮した塩害定量化手法に関する検討、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集、第V部、pp.394-395、1992



(a) 酸素拡散係数を一定とした場合



(b) 水セメント比によって拡散係数が変化する場合

図-11 水セメント比と腐食ひびわれ発生年数の関係のシミュレーション結果