

# 論文 鉄筋コンクリートのモデル化とそれを用いた塩害評価シミュレーション

山口 明伸\*1・武若 耕司\*2・LEELALERKIAT Veerachai\*3・安田 寛生\*4

**要旨**：塩害劣化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り、その実用的な評価手法が望まれている。これに対し著者らは、既往の知見に基づく塩害劣化シミュレーションによる評価手法を提案しているが、さらに考慮、改良すべき点も少なくない。本研究では、配合条件や初期欠陥等に関する諸条件を追加することにより、より実地的な鉄筋コンクリートモデルの構築を試みるとともに、それらの塩害劣化に与える影響を検討した。

**キーワード**：塩害劣化シミュレーション, 鉄筋コンクリート, 腐食ひび割れ, 耐久性

## 1. はじめに

コンクリート構造物の設計が仕様規定型から性能規定型への移行期にある現在、各種劣化現象に対する適切な耐久性評価手法はこれまで以上に重要な技術となる。特に塩害劣化に関しては、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、その中長期的な耐久性評価手法の必要性については言うまでもない。ところが、塩害劣化に関する数多くの研究報告があるにも拘らず、未だ実用レベルの塩害評価手法を提供できるまでには至っていない。この理由としては、塩害自体が極めて複雑な劣化現象であることはもちろん、コンクリート品質のばらつきを始めとする各種要因の影響が十分に把握できていないこと、実験が長期に亘るため収集できるデータに限りがあること等が挙げられる。さらに、既往の評価技術が高度な専門知識と経験を必要とするため、専門家以外にはその適用が困難であることも大きな原因と言える。これに対して著者らは、鉄筋コンクリートを解析用にモデル化し、それを利用した塩害劣化シミュレーション手法を提案している<sup>1)</sup>。しかし、この鉄筋コンクリートモデルには骨材や初期欠陥等の影響について十分考慮されておらず、

改良すべき点が残されていた。そこで本研究では、これらの要因に関する諸条件を追加することにより、より現実的な鉄筋コンクリートモデルの構築を試みるとともに、それを用いた塩害評価結果の妥当性について検討した。

## 2. 鉄筋コンクリートのモデル化

### 2.1 概要

解析モデルは、図-1に示す2次元の鉄筋コンクリートモデルであり、コンクリートの品質は、主として内部に存在する細孔球と骨材球の分布状況によって表現されている。また、品質のばらつきを考慮するため、それぞれの球の位置や径は条件範囲内でランダムに決定した。

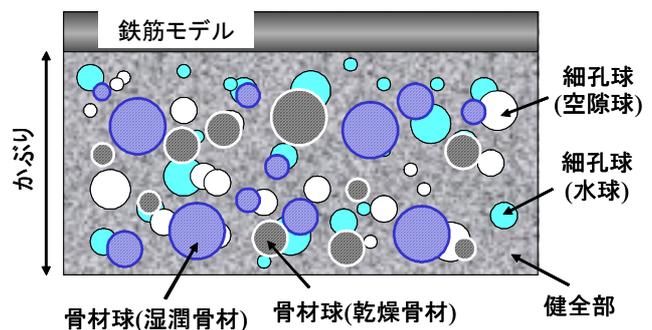


図-1 鉄筋コンクリートモデル

\*1 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科 博士(工学) (正会員)

\*2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)

\*3 熊本大学大学院 自然科学研究科 工修 (学生会員)

\*4 富士通鹿児島インフォネット ソリューション開発部 (非会員)

## 2.2 細孔分布と骨材分布

### (1) 細孔分布

コンクリート中の空隙は、ゲル空隙、毛細管空隙、および欠陥空隙に大別できる。本モデルでは、このうちコンクリートの耐久性に影響を与えると考えられる毛細管空隙と欠陥空隙の2種類を考慮した。なお、便宜上、毛細管空隙によって構成されるものを細孔分布、欠陥や気泡によって構成されるものを欠陥分布と称する。コンクリート中に存在する細孔および欠陥分布のモデル化には、下村らの提案する式(1)の細孔容積分布密度関数 ( $V'(r)$ ) を用いた<sup>2)</sup>。

$$V'(r) = V(\infty)B \cdot C \cdot r^{C-1} \cdot \exp(-Br^C) \quad (1)$$

ここで、 $r$ : 細孔半径(m),  $V(\infty)$ : 単位体積当りにおける総細孔容積( $m^3/m^3$ ),  $B, C$ : 係数(本モデルでは  $W/C$  の関数として扱う)<sup>1)</sup> である。

図-2に、本モデルにおける  $W/C$  ごとの細孔分布および欠陥分布の例を示す。

### (2) 骨材分布

骨材は、その密度差や施工状態によりコンクリート中に不均一に分布する。このうち粗骨材は、その径の大きさと遷移帯の存在によりコンクリートの品質に与える影響が大きいと考えられる。そこで本モデルでは、コンクリートモデル中に骨材球をランダムに配置することにより粗骨材の影響を取り入れることとした。なお、粗骨材の総量と粒度分布は、コンクリート標準示方書の標準配合と標準粒度に準じて表-1, 2のように設定した<sup>3)</sup>。

## 2.3 相対含水率

本モデルでは、モデルコンクリート中に配置した細孔分布と欠陥分布を水球と空隙球に分け、総細孔容積に対する水球容積の比によって相対含水率を表現した。なお、通常のコンクリートは内部に向かって相対含水率が増加する。そこで、モデルコンクリートを深さ方向に2分割し、全体の平均が設定相対含水率となるように各ブロックの相対含水率に差を付ける(±10%) ことで含水状態の違いを表現した。

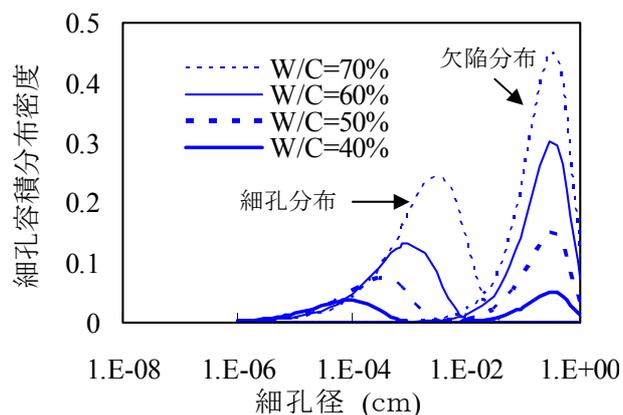


図-2  $W/C$  ごとの細孔および欠陥分布

表-1 コンクリートモデルの粗骨材量

W/C	0.4	0.5	0.6	0.7
粗骨材体積 ( $m^3/1000m^3$ )	366.4	382.6	393.3	401.0

表-2 粗骨材の粒度分布

ふるいの呼び寸法 (mm)	25	20	10	5	2.5
通過質量の百分率	100	90-100	20-55	0-10	0-5

(本解析では、上記範囲内でランダムに設定)

表-3 ひび割れ内部の拡散係数の設定

ひび割れ幅(mm)	拡散係数
0 ~ 0.05	1倍
0.05 ~ 0.1	10倍
0.1 ~	10 <sup>3</sup> 倍

(拡散係数は健全部に対する倍率)

また、粗骨材表面に存在する遷移帯は、その含水状態によって腐食因子の拡散性状に大きな影響を及ぼすと考えられる。したがって、骨材球は、コンクリートの相対含水率に応じて乾燥骨材量と湿潤骨材量の割合を設定した。

## 2.4 初期ひび割れ

通常、コンクリート表面には様々な原因により材齢初期の段階でひび割れが発生していることが少なくない。初期ひび割れの存在は腐食因子の侵入を容易にし、塩害に対する構造物の耐久性を著しく低下させる。本モデルでは、拡

散セル試験の結果を参考にし、初期ひび割れの影響を拡散係数の違いとして表現した<sup>4)</sup>。解析に用いた初期ひび割れ幅と拡散係数の関係を表-3に示す。なお今回は解析例として、位置をコンクリートモデル中央部、形状を図-3に示すような5パターンの初期ひび割れ設定を用意し、その影響を検討した。

### 3. 塩害劣化シミュレーション

#### 3.1 腐食因子の拡散条件の設定

##### (1) 塩分の拡散

コンクリート中への塩分の浸透性状は、内部鉄筋の腐食開始時期や腐食量算定のための腐食領域を推定する上で極めて重要となる。本解析では、塩分の浸透速度を拡散係数で表すこととし、鉄筋に到達するまでの塩分拡散経路は簡単のため直線を仮定した。ただし、拡散経路が細孔球や骨材球を通過する場合、その水分状態に応じて図-4に示すような各々特有の拡散経路と拡散速度を持つと仮定した。この手法により、空隙や粗骨材の分布状況によって生じ得るコンクリート断面内の塩分拡散性状のばらつきを再現することができる。以上を踏まえ、鉄筋が腐食を開始するために必要な量の塩分が内部鉄筋に到達する時間  $T$  は、式(2)によって算定するものとした<sup>5)</sup>。

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

ここで、 $L$ ：拡散経路の全長、 $D$ ：健全部分の塩分拡散係数、 $C_L$ ：不働態皮膜を破壊する鉄筋表面の塩分量、 $C_0$ ：コンクリート表面の塩分量である。なお、式(2)の  $L$  を最小かぶり厚さに代え、求めた塩分到達時間  $T$  を代入すれば、一般に使われる見かけの塩分拡散係数が逆算できる。図-5は、本解析における見かけの拡散係数と  $W/C$  との関係を実測データと比較した結果である。見かけの拡散係数は、細孔分布、欠陥分布、粗骨材分布の各要因を加えるに従って大きくなっており、それぞれの影響が示され

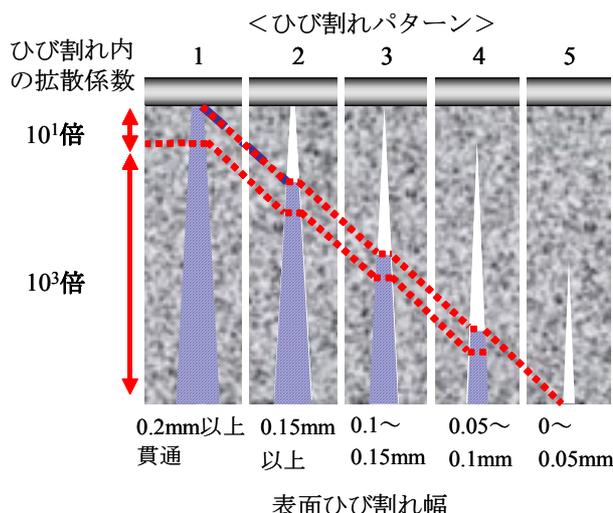
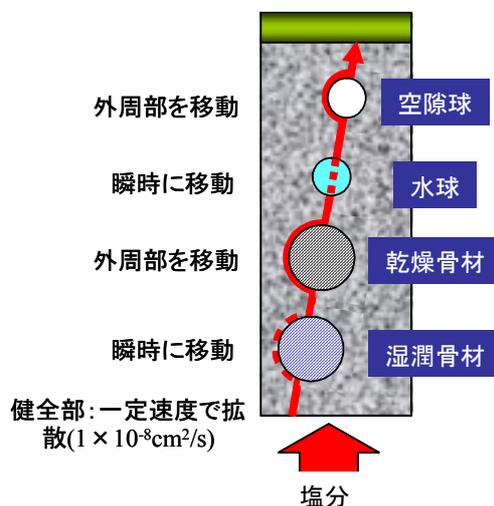
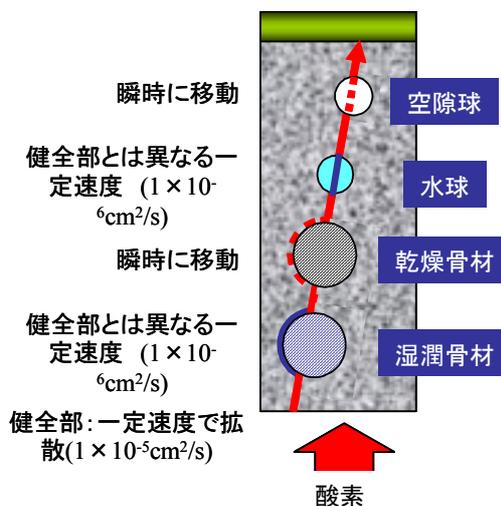


図-3 初期ひび割れモデルの例



(1) 塩分の拡散経路



(2) 酸素の拡散経路

図-4 腐食因子の拡散モデル

ている。また全要因を加えた拡散係数は実測データに非常に良く対応しており、本コンクリートモデルの妥当性が確認できる。

### (2) 酸素の拡散

酸素も腐食反応の影響要因であり、その拡散速度を算定することは、腐食速度、腐食量を把握する上で重要である。酸素の拡散についても、塩分と同様の直線経路を仮定しているが、図-5に併せて示したように、細孔球や骨材球を通過する場合の処理は塩分の場合と異なる。ここでも塩分同様に、式(2)を用いて酸素到達時間を求め、見かけの酸素拡散係数を逆算することができる。

### 3.2 鉄筋腐食と腐食ひび割れ発生の条件

鉄筋の腐食条件は、通常支配的となるマクロセル腐食の考え方に基いて設定した。まず、鉄筋モデルは、1cm毎のセクションに分割された分割鉄筋モデルであり、各鉄筋セクションについて、塩分と酸素の全長経路(L)が最短となる到達経路を選択する。鉄筋腐食は、図-6のように最短経路を通過して到達する塩分量が許容量に達した鉄筋セクションから順次腐食が開始するものとした。ここで、各解析ステップにおいて、腐食セクションをアノード部、非腐食セクションをカソード部として取り扱った。

各セクションの腐食反応速度は、酸素の供給速度とアノード、カソード面積比に基いて算定され、その結果を用いて最終的な腐食量を求める。腐食量が限界腐食量(体積膨張率やクリープ係数等により設定)を超えると腐食ひび割れが発生すると仮定している<sup>1)</sup>。

### 3.3 環境条件の設定

塩害劣化は、当然ながら環境条件によって大きな影響を受ける。本解析では、対象構造物の環境条件(海岸からの距離)の影響をコンクリート表面の塩分濃度の違いとして表現することとし、その設定値はコンクリート標準示方書に準じた<sup>3)</sup>。表-4に各環境における設定条件を示す。

### 3.4 データの入出力状態

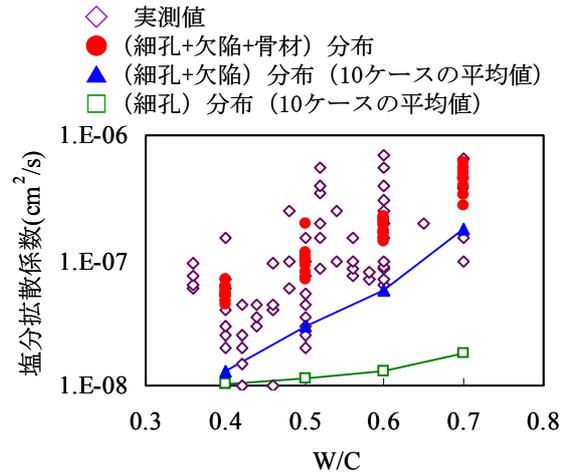


図-5 見かけの拡散係数と水セメント比の関係

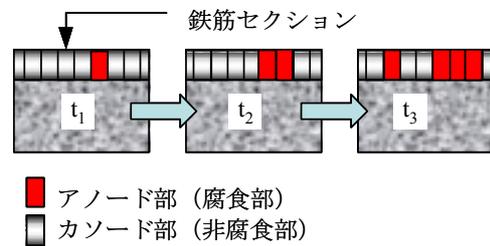


図-6 腐食進行の概念図

表-4 環境条件に対する設定値

飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
	汀線付近	0.1	0.3	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

コンクリート表面における塩分濃度 (Kg/m<sup>3</sup>)

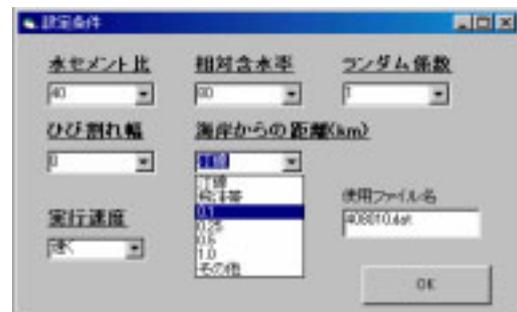


図-7 設定条件入力画面

本シミュレーションにおける諸条件の入力は、図-7に示す設定条件入力画面においてプルダウン式の極めて簡単な操作を行うことができる。また、シミュレーションによる塩害劣化の進行過程は、メイン画面により確認

することができる。図-8 に一例として、基本モデルと初期ひび割れモデルにおける、腐食ひび割れ発生時のシミュレーション画像を示す。

#### 4. 解析結果と考察

##### 4.1 環境条件の影響

図-9 は、各環境と W/C における、鉄筋腐食開始年数のシミュレーション結果である。また、図-10 は、腐食ひび割れ発生年数に関するシミュレーション結果である(かぶりは全て 5cm)。

何れの結果についても、海岸に近い場所程、塩害劣化の進行が早くなることが示されており、実際の現象に即した結果が得られている。また腐食開始年数については、海岸に近い程、環境条件の影響度が増しており、W/C の影響が見かけ上小さくなっている。その結果 W/C が小さい程、すなわち高品質なコンクリート程その促進度合いが高まるとい現象が表れている。

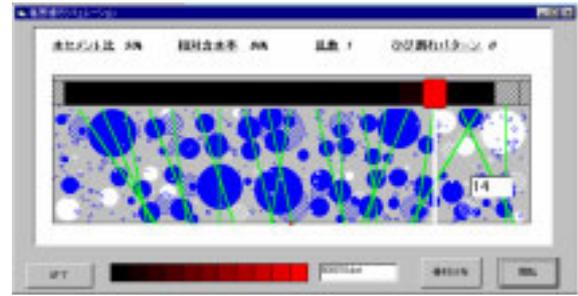
また海岸から 250m 以内の位置では、いずれの W/C においても、腐食ひび割れ発生年数が一般環境の 1/3~1/5 に減少し、構造物の耐久性が大きく損なわれる予測結果が示されている。

##### 4.2 初期ひび割れの影響

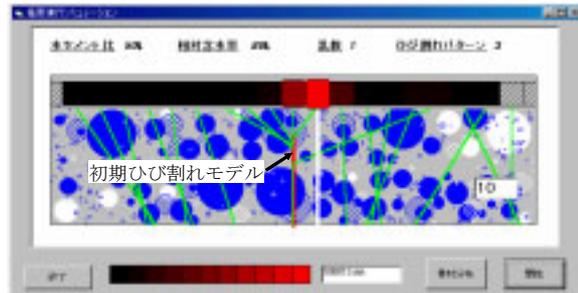
図-11 は、初期ひび割れが腐食ひび割れ発生年数に与える影響を検討した結果である。なお、環境条件として、汀線付近と飛沫帯を与えてある。鉄筋コンクリートに今回仮定したような三角形の初期ひび割れが存在する場合、その表面ひび割れ幅が 0.05mm 程度以下ならば耐久性に与える影響は殆んどないものの、汀線付近においては 0.1mm を、また飛沫帯において 0.05mm を越えると、部材の急激な耐久性低下が生じ得ることが示されている。また、この現象も、高品質なコンクリートモデルにおいて顕著に現れていることに注意すべきである。

##### 4.3 骨材粒度の影響

図-12 にコンクリートモデルの骨材粒度が異なる場合の、鉄筋腐食開始年数のシミュレーション結果を示す(ただし骨材容積は全て同一で、環境条件は汀線付近の場合)。図から、使



(1) 基本モデル



(2) 初期ひび割れモデル

図-8 メイン画面(腐食ひび割れ発生時)

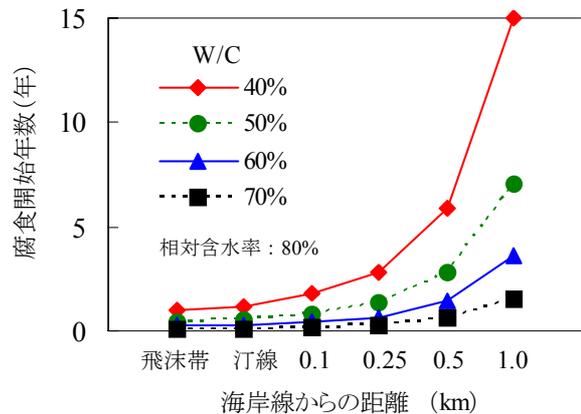


図-9 各環境における鉄筋腐食開始年数

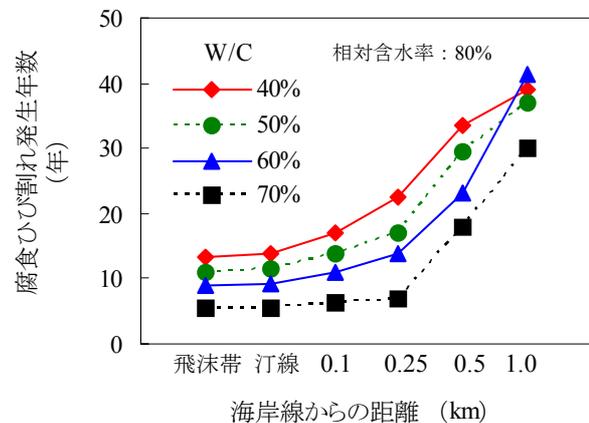


図-10 各環境における腐食ひび割れ発生年数

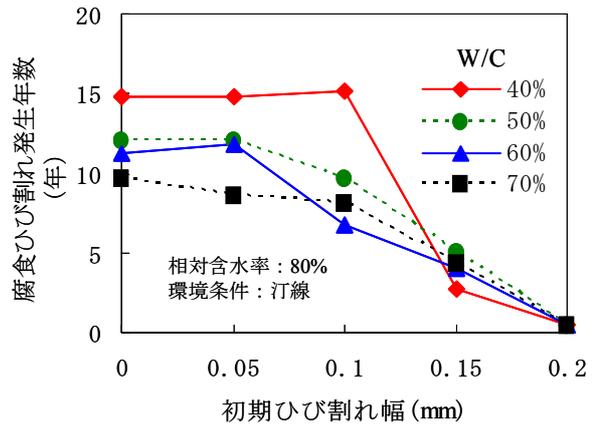
用する骨材径が小さくなるに従い、鉄筋の腐食開始時期が延びる傾向が見られる。また、骨材径に関しても低 W/C ほどその影響を受けやすいようである。これらの現象は、骨材の粒径が大きいほど、塩分の拡散経路における遷移帯領域の割合が多くなりやすく、そのため塩分の見かけの拡散速度が増加したためと考えられる。ただし、この現象は相対含水率が比較的高い状態を想定した場合の結果であり、コンクリート中に乾燥骨材の割合が増えると、全く逆の傾向となる可能性がある。

### 5. まとめ

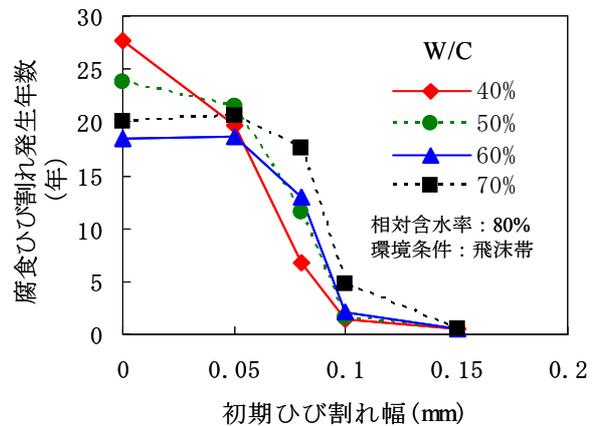
本研究は、著者らの提案する塩害劣化シミュレーション手法に、これまで考慮されていなかった新たな要因あるいは条件を追加し、より現実的な鉄筋コンクリートモデルの構築を試みるとともに、その妥当性について検討を行ったものである。その結果、本モデルの塩害劣化現象に対する再現性とその適用性が向上したことを確認した。しかしながら、実用的な塩害評価手法とするためには、コンクリート中の水分移動や各種化学反応の影響、3次元化へ改良等について今後さらに検討する必要がある。

### 参考文献

- 1) 松武進太郎, 武若耕司: 鉄筋コンクリート構造物の塩害評価に関するコンピュータシミュレーション, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.197-202, 1998.6
- 2) 下村匠, 陳丙学, 小沢一雅: コンクリートの細孔構造と収縮特性, 土木学会第 46 回年次学術講演会, pp.478-479, 1991
- 3) 土木学会編: 平成 11 年度コンクリート標準示方書 (施工編), 土木学会, 2000.1
- 4) 安田寛生, 山口明伸, 武若耕司, 丸野大輔: ひび割れを有する鉄筋コンクリートの鉄筋腐食シミュレーション, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, V-288, 2000.9
- 5) Bazant, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures Theory, Journal of the Structural Division, Vol.105, pp.1137-1166, 1979

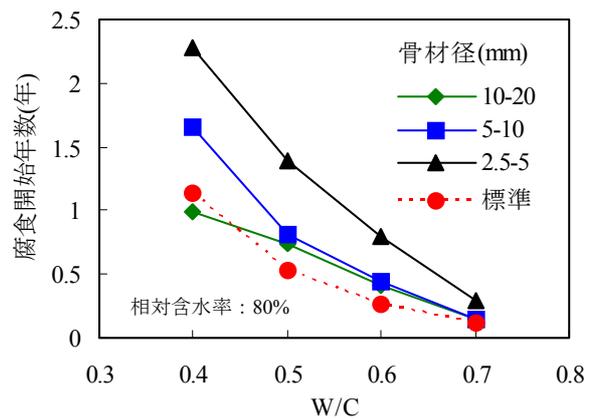


(1) 汀線付近



(2) 飛沫帯

図-11 初期ひび割れが耐久性に与える影響



(標準: 土木学会による標準粒度分布)

図-12 腐食開始年数に与える骨材粒径の影響