

# コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析

コンクリート研究室 小林 悟志  
指導教官 下村 匠  
丸山 久一

## 1. はじめに

塩害によるコンクリート中の鉄筋の腐食に関して多くの研究がなされ、貴重な研究成果が蓄積されている<sup>1)</sup>。土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕—耐久性照査型—<sup>2)</sup>では、鋼材腐食に関する定量的な照査が導入され、一般的な技術として根付きつつある。

示方書では、かぶりコンクリート中の塩化物イオンの移動を一次元移動モデルにより予測し、鋼材位置における塩化物イオン濃度が、鋼材腐食発生限界値に達するかどうかを照査する方法が提案されている。この方法は、簡便かつ物理的意味が明瞭であるので、示方書の照査式に適していると考えられる。しかし、技術的なバックグラウンドを固めるため、および将来より優れた照査法を開発するためには、精緻な予測手法を整備しておく必要がある。換言すれば、簡便で実用的な照査法を持つ一方で、多少複雑であっても、条件を詳細に考慮できる精度の高い予測手法の開発も続けなければならない。

本研究は、かぶりコンクリート中の鋼材腐食促進物質（水分、塩化物イオン、酸素）の移動と鋼材の腐食進行予測に関する数値計算モデルの開発に取り組んだものである。曲げひび割れの影響を考慮するために物質移動を二次元解析とし、鉄筋の軸方向に沿った腐食分布を計算可能としたこと、物質移動モデルはコンクリートの品質の影響を合理的に反映できる細孔構造に立脚したモデルを用いたこと、電気化学的機構に注意を払い腐食反応モデルを定式化したことが特徴である。

## 2. コンクリート中の鉄筋腐食

菱田<sup>3)</sup>は、電気化学的理論に基づき、一定の pH の水溶液中での鉄の腐食進行予測式を定式化している。しかし、コンクリート細孔溶液の性質やコンクリート中

で起る複雑な化学反応のために、コンクリート中の鉄筋の腐食は水溶液中の腐食と異なる可能性がある。そこで、本研究では菱田の予測式に pH の影響を導入した。次に水溶液中における鉄の腐食とコンクリート中における鉄筋腐食のメカニズムの違いを考察し、コンクリート中の鉄筋の腐食に適用可能な腐食モデルを定式化する。

まず、腐食反応物質である水の量的な側面については、溶液中にある状態と同じと考えることにした。実際に腐食反応に使用される水は微量であること、相対湿度が 0 でない限りコンクリート細孔中には微視的には常に水が存在することから、鉄筋の周辺には常に水が存在するとみなしてよいと考えたためである。

コンクリート中の細孔溶液は強アルカリ性となるが、小数点以下まで問題にすると、正確な pH 値は明らかではない。ここでは、飽和水酸化カルシウム溶液の pH 値 (20°C, pH12.67~12.72) を参考に、コンクリート細孔溶液の pH 値は 12.5 とした。

また、ペースト上澄み液 (pH 約 12.65) は、水酸化カルシウム飽和溶液 (pH 約 12.70) と pH が同程度であるにも関わらず、溶液中の鉄筋の腐食速度が約 1/5 となる実験結果が報告されている<sup>4)</sup>。枝広らは、その理由としてセメントペースト中に含まれる水酸化アルカリによる不動態化の影響を指摘している<sup>4)</sup>。本研究では、水溶液中を想定して算定した鉄筋の腐食速度に係数 1/5 を乗じて、コンクリート中の鉄筋の腐食速度とした。

## 3. コンクリート中の物質移動解析

### 3.1 水分の移動

コンクリート中の水分移動は、コンクリートの細孔構造に立脚したモデルを用いて予測する<sup>5)6)</sup>。水分の移

動流束として、分子拡散による水蒸気の拡散移動流束  $J_v$ 、不飽和領域における熱力学的圧力低下の勾配を駆動力とした液状水の移動流束  $J_l$  に加えて、コンクリート表面が直接液状水に接した湿潤時に、表面張力により流入する液状水の流束（吸水）  $J_{pen}$  を考慮している。

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} = -\text{div}(J_v + J_l + J_{pen}) \quad (1)$$

ここに、 $w_l$ ：コンクリート単位体積中の水分量( $\text{kg/m}^3$ )である。各流束は移動メカニズムの考察に基づき定式化されているが、本論文では割愛する。

曲げひび割れの影響を検討するため、水分をはじめコンクリート中の物質移動は、二次元解析により評価した。

### 3.2 塩化物イオンの移動

コンクリート中の塩分は既往の多くの研究と同様に、液状水中にイオンの形態で存在する自由塩化物とセメント硬化体に固定される塩化物に分類する。塩分の移動流束は、液状水中における塩化物イオンの拡散移動流束  $J_{difCl}$  と、液状水の移動ともなって輸送されるバルク移動流束  $J_{bulkCl}$  を考える。

$$\frac{\partial C_{total}}{\partial t} = -\text{div}(J_{bulkCl} + J_{difCl}) \quad (2)$$

ここに、 $C_{total}$ ：コンクリート単位体積中の全塩化物量( $\text{kg/m}^3$ )である。コンクリート中の塩化物イオン濃度と全塩化物量との関係は、丸屋<sup>7)</sup>が実験的に導出した平衡則を用いて表現する。

### 3.3 酸素の移動

酸素は、コンクリート細孔中の気相部分に存在する気体酸素と液相中に存在する溶存酸素を考慮する。それぞれの濃度勾配による拡散移動を考える。

$$\frac{\partial C_o}{\partial t} = -\text{div}(J_{ov} + J_{ol}) \quad (3)$$

ここに、 $C_o$ ：酸素濃度( $\text{kg/m}^3$ )、 $J_{ov}$ ：気体酸素の拡散流束( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ )、 $J_{ol}$ ：溶存酸素の拡散流束( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ )である。気体酸素と溶存酸素は、局所的には常にヘンリーの法則に基づいた平衡状態にあるとする。

コンクリート中の酸素の移動は、定常状態を仮定した。コンクリート表面における酸素濃度は環境条件より与え、鉄筋位置では腐食反応に全て消費されるとした<sup>1)</sup>。この条件のもとで得られる定常解より、鉄筋に供給される酸素量を求め、腐食反応速度の計算に用いた。

## 4. 実験結果と解析結果の比較

### 4.1 一面暴露試験

まず、一面暴露の実験結果と提案手法による解析結果とを比較検討する。検証には、笹渕らにより行われた実験結果<sup>8)</sup>を用いる。実験に用いたコンクリートを表-1に示す。コンクリート練混ぜ時に、3段階の量の塩分が混入されている。供試体は、一面暴露となるように他の面をコーティングされ、塩分が飛来しない環境に9年間置かれた。

暴露9年目における鉄筋腐食量の実験結果と解析結果を、水セメント比50%、65%のシリーズについて、図-1、図-2にそれぞれ示す。解析モデル中の種々の材料パラメータの値は、試行錯誤により決定した。ただし、同一配合のシリーズには同じ値を用いている。

表-1 実験に使用したコンクリート<sup>8)</sup>

| 水セメント比(%) | 混入塩化物量<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 単位量<br>( $\text{kg/m}^3$ ) |      |
|-----------|-------------------------------|----------------------------|------|
|           |                               | 水                          | セメント |
| 50        | 0.75                          | 185                        | 370  |
|           | 2.25                          |                            |      |
|           | 3.75                          |                            |      |
| 65        | 0.85                          | 185                        | 285  |
|           | 2.55                          |                            |      |
|           | 4.24                          |                            |      |

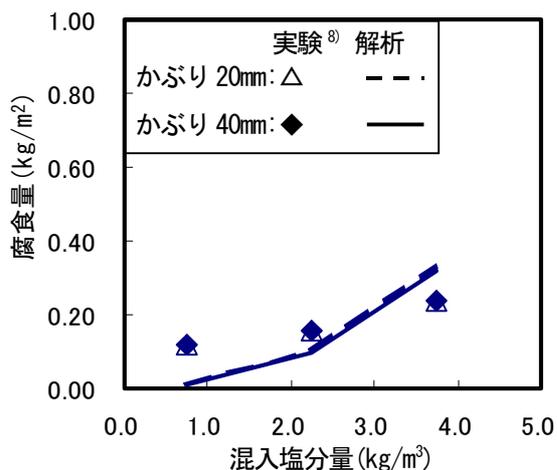


図-1 腐食量と混入塩分量の関係(W/C=50%)

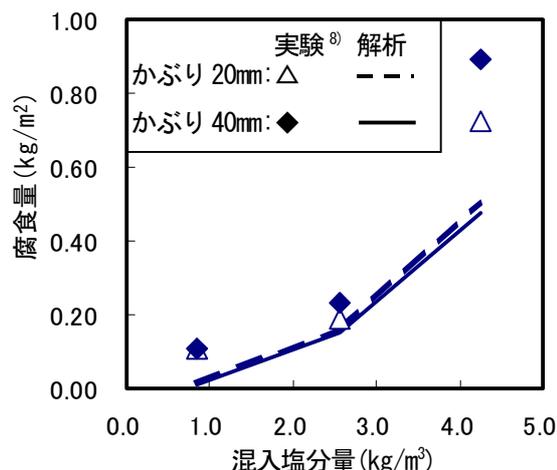


図-2 腐食量と混入塩分量の関係(W/C=65%)

一面暴露試験であるので、物質移動は一次元解析により評価した。環境条件は一定とした。

実験結果では、初期混入塩分量が増えるにしたがって腐食量が大きくなっている。この実験では、腐食量に及ぼす初期混入塩分量の影響が大きく、かぶり厚さの影響は小さい。解析においてもこれらの傾向を表現できている。

#### 4.2 塩分飛来環境下における暴露試験

次に、著者らが行った暴露試験の結果を用いて検討する。供試体を図-3に、実験に使用したコンクリートを表-2に示す。最長暴露期間は9年間で、設置環境は塩分が飛来する海岸から数十メートルの距離の屋外である。供試体は全面を大気に曝している。供試体は多数暴露し、実験期間中の適当な時点で、順次腐食量を測定した。

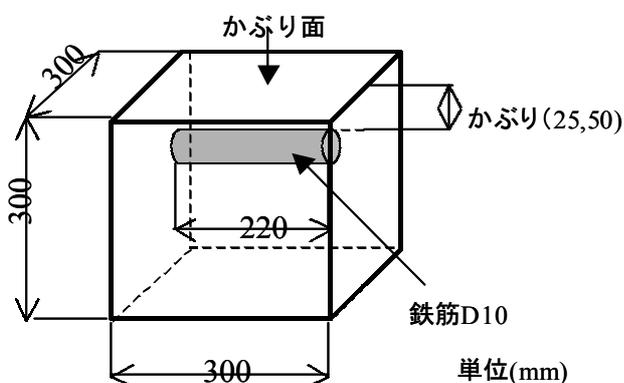


図-3 暴露実験供試体

本シリーズの解析では、かぶり面と鉄筋軸方向の端面からの物質の流入出を考慮する二次元解析を行った。境界における塩化物イオンの移動流束の評価において、飛来塩分の影響を考慮した。

図-4に時間と腐食量の関係の実験結果と解析結果を示す。図に示されているのは、初期混入塩分がある供試体の結果である。初期混入塩分がない場合は、9年間では、実験、解析ともに腐食が生じない結果となった。解析結果によると、塩分が混入されている供試体では暴露初期から腐食が開始し、時間の経過にしたがってほぼ線形に腐食量が増加した。実験値には、ばらつきが見られるものの、平均値の傾向は解析結果と一致しているといえる。

なお、本シリーズでは、比較のために物質移動をかぶり面からの一次元解析で評価した例も検討した。その結果、塩分を混入している供試体の場合でも、二次元解析の結果とほとんど変わらなかった。つまり、外部から飛来する塩分が腐食に及ぼす影響を検討するに

表-2 実験に使用したコンクリート

| 水セメント比 (%) | 混入塩化物量 (kg/m³) | 単位水量 (kg/m³) | 単位セメント量 (kg/m³) |
|------------|----------------|--------------|-----------------|
| 63         | 0.0            | 210          | 333             |
|            | 6.51           |              |                 |

は、本シリーズは不十分であり、より長い暴露期間か、より厳しい環境条件の実験が必要である。

## 5. 数値シミュレーションによる検討

### 5.1 コンクリートの品質の影響

水セメント比が低く組織が緻密なコンクリートは、物質移動抵抗性が高いため、内部鉄筋の腐食が起りにくい。一方、コンクリートにひび割れが発生すると、ひび割れ内に腐食促進物質が侵入し、ひび割れ部分の鉄筋が容易に腐食するとともに、ひび割れ面からコンクリート中へ物質が侵入する。このように、コンクリートの品質とひび割れは、ともに内部鉄筋の腐食の支配要因であるので、それらの影響を把握しておくことが重要である。本研究で開発した解析手法は、両者が鉄筋の腐食に及ぼす影響を数値実験により検討するのに有効である。

まず、コンクリートの品質が鉄筋軸方向の腐食の分布に及ぼす影響について検討した。解析対象供試体は、かぶり厚さ 50mm、ひび割れ幅 0.2mm、ひび割れ間隔 200mm とした。環境条件は、温度 20°C、相対湿度 75%、外部から塩分が飛来する環境とした。

水セメント比 30%、50%、70%を想定したケースを解析した。水セメント比に応じて、細孔構造と物質移動に関する各種材料パラメータの値を設定した<sup>9)</sup>。

20年暴露した時点における腐食状況を図-5に示す。横軸に鉄筋軸方向に沿ったひび割れからの距離をとっている。左端がひび割れ面、右端がひび割れ間の中心である。水セメント比が高く細孔構造の粗いケースは、鉄筋に沿った腐食量の分布の傾斜が緩やかで、腐食量の平均値が高いのに対し、水セメント比が低く組織の緻密なケースは腐食量の分布の勾配が急になっている。組織が緻密なコンクリートほど、ひび割れが鉄筋の腐食に及ぼす影響が大きい。この結果は、高品質なコンクリートほどひび割れ制御が工学的に意味を持つことを示唆している。

### 5.2 ひび割れ幅の影響

続いて、ひび割れ幅が鉄筋軸方向の腐食の分布に及ぼす影響について検討した。解析対象供試体はかぶり

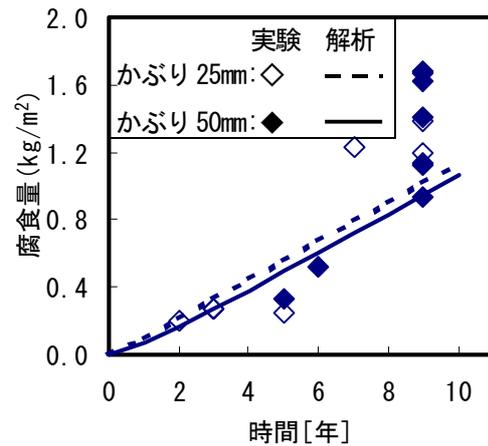


図-4 経年変化と腐食量の関係

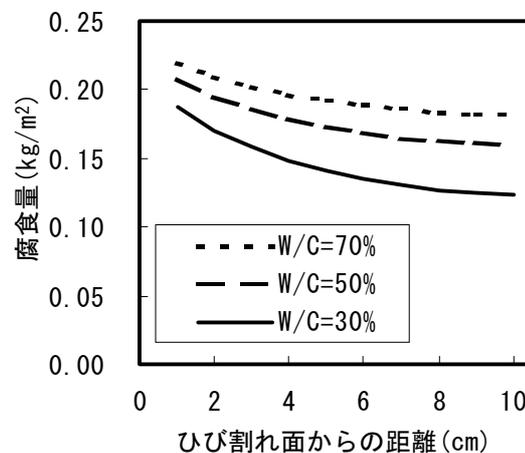


図-5 W/Cの違いによる腐食分布の違い

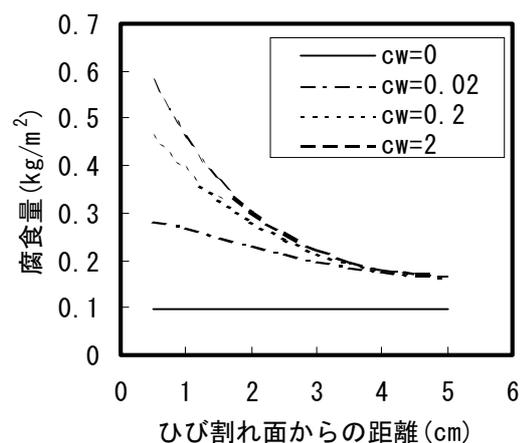


図-6 ひび割れ幅の違いによる腐食分布の違い

厚さ 30mm, ひび割れ間隔 100mm とし, 温度, 相対湿度は前節と同じである。環境条件は, ひび割れ幅の影響が顕著に現れるよう, 乾湿繰り返し環境とした。乾燥日数 29.75 日, 湿潤日数 0.25 日の繰り返しとし, 湿潤時には海水が接するとした。コンクリートの水セメント比を 50% とし, ひび割れ幅を 0, 0.02, 0.2, 2.0mm と設定して計算を行った。

5 年暴露した時点における腐食状況を図-6 に示す。図-5 と同様に, 横軸に鉄筋軸方向に沿ったひび割れからの距離をとっている。設定したひび割れ幅 (0, 0.02, 0.2, 2.0mm) では, ひび割れ幅の影響は顕著に現れた。ひび割れ近傍では, ひび割れ幅の大きい方が腐食量が大きくなる。

## 6. 検証実験

### 6.1 実験概要

曲げひび割れが発生した鉄筋コンクリートの鉄筋腐食性状を観察する実験を行い, ひび割れ幅, コンクリートの品質が鉄筋腐食に及ぼす影響について検討した。水セメント比の異なる 2 種類の供試体にひび割れを導入し, 塩水を散布することにより, 内部の鉄筋を腐食させた。実験に用いた供試体を図-7 に, コンクリートの配合を表-3 に示す。

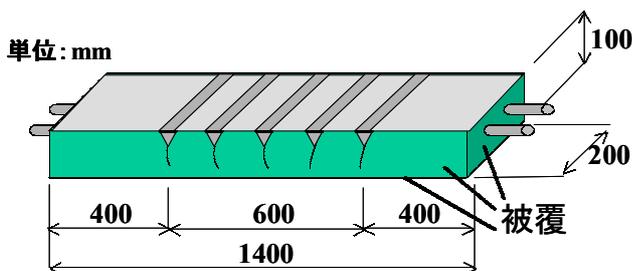


図-7 実験供試体

供試体は合計 3 体作成した。また, ひび割れの導入を容易にするため, あらかじめ切り欠きを設け, 曲げ荷重を与えてひび割れを発生させた。発生したひび割れにステンレス板を挟み込み, ひび割れが閉じるのを防止した。ひび割れの測定にはゲージを用いた。測定したひび割れ幅を表-4 に示す。ひび割れ導入後, 供試体は, コンクリートかぶり面以外の 5 面を樹脂で被覆し, かぶり面とひび割れ面からのみ物質の流出入が起るようにした。供試体はかぶり面を上向きに設置し, 毎日 3%NaCl 溶液を散水した。

### 6.2 実験結果

約 1 ヶ月間供試体を暴露した後, コンクリートを解体し, 取り出した鉄筋の腐食状況を観察した。水セメント比 30% での腐食状況を図-8 に, 水セメント比 70% での腐食状況を図-9 に示す。水セメント比が低い, 組織が緻密なコンクリート中の鉄筋にはほとんど発錆はみられなかった。しかし, 水セメント比が高いコンクリート中の鉄筋には, ひび割れ付近で著しい発錆が観察された。これは, 数値シミュレーションで得られた結果と, 傾向が一致する。ひび割れ幅が異なるケースについては, 明確な傾向を確認することはできなかった。これは, 試験期間中に, 導入したひび割れが, 挟み込んだステンレス板の変形等により閉じてしまったためと考えられる。

表-4 導入したひび割れ幅

| ひび割れ番号  | ひび割れ幅(mm) |        |        |        |        |
|---------|-----------|--------|--------|--------|--------|
|         | 1         | 2      | 3      | 4      | 5      |
| 供試体No.1 | 0.2233    | 0.2032 | 0.2106 | 0.2508 | 0.1335 |
| 供試体No.2 | 0.2157    | 1.2941 | 0.6353 | 0.1207 | 0.2417 |
| 供試体No.3 | 0.1717    | 0.1496 | 0.1883 | 0.065  | 0.0555 |

表-3 コンクリートの配合

| 供試体No. 1          |         |         |                          |     |     |      |       |      |   |
|-------------------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|-------|------|---|
| 粗骨材の最大寸法 (mm)     | W/C (%) | s/a (%) | 単位数 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |       |      | 圧縮強度 $\sigma_{28}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|                   |         |         | W                        | C   | S   | G    | AE減水剤 | AE助剤 |   |
| 20                | 30      | 45      | 180                      | 600 | 683 | 851  | 1.80  | 1.80 | 67.8                                    |
| 供試体 No. 2 , No. 3 |         |         |                          |     |     |      |       |      |   |
| 粗骨材の最大寸法 (mm)     | W/C (%) | s/a (%) | 単位数 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |       |      | 圧縮強度 $\sigma_{28}$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|                   |         |         | W                        | C   | S   | G    | AE減水剤 | AE助剤 |   |
| 20                | 70      | 45      | 180                      | 257 | 812 | 1011 | 0.77  | 0.77 | 27.1                                    |



図-8 腐食状況 (W/C30%, ひび割れ幅 0.223mm)

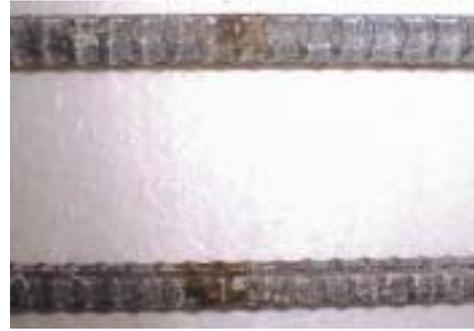


図-9 腐食状況 (W/C30%, ひび割れ幅 0.242mm)

## 6 まとめ

本研究の内容をまとめると以下のようになる。

- (1) コンクリート中の物質移動モデルと腐食モデルを組み合わせて、コンクリート中の鉄筋腐食を数値計算により予測する手法を構築した。
  - (2) 暴露実験の結果と比較した結果、提案手法は初期混入塩分がある供試体の腐食量を予測することができることを確認した。しかし用いた実験データでは、飛来塩分による腐食の予測精度を検証することはできなかった。
  - (3) 提案手法を用いて、鉄筋の軸方向に沿った腐食分布に及ぼすコンクリートの品質と曲げひび割れ幅の影響を解析した結果、妥当と判断できる解析結果を得ることができた。
  - (4) ひび割れ幅とコンクリートの品質が鉄筋の腐食性状に及ぼす影響を、実験により検証した結果、コンクリートの品質に関して、定性的な傾向が解析結果と一致することを確認した。また、ひび割れ幅に関しては、これを継続的に保持、測定できる手法が必要である。
- 4) 枝広英俊, 依田彰彦: 促進試験と屋外自然暴露によるコンクリート中の各種鉄筋の腐食性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No1, pp757-762, 1992.
  - 5) T.Shimomura and K.Maruyama: Service Life Prediction of Concrete Structures Subjected to Chloride Attack by Numerical Simulation, Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures - Edited by D.Naus, RILEM Proceedings PRO 16, pp.25-34, Oct. 2000.
  - 6) 桜井哲哉, 桑名淳一, 五角亘, 下村匠: 曲げひび割れを有するかぶりコンクリート中の乾湿繰り返し水分移動現象の解析, 土木学会第56回年次学術講演会概要集, V-284, 2001.10.
  - 7) 丸屋 剛: コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析手法の構築, 東京大学学位論文, 1995.9.
  - 8) 笹渕優樹, 舛田佳寛, 中村成春: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する暴露試験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.317-322, 1998.
  - 9) 下村 匠, 福留和人, 前川宏一: 微視的機構モデルによるコンクリートの乾燥収縮挙動の解析, 土木学会論文集, No.514/V-47, pp.41-53, 1995.5.

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(III), 1996.10.
- 2) 土木学会: 平成11年版コンクリート標準示方書[施工編]-耐久性照査型-, 2001.1.
- 3) 菱田 亮: コンクリート中の鉄筋の腐食に関するモデル化, 長岡技術科学大学修士論文, 2000.2