

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560504

研究課題名（和文） 塩害を受けるコンクリート構造物の劣化予測手法の開発

研究課題名（英文） Development on estimation on deterioration of concrete structure attacked chloride ion

研究代表者

松島 学 (MATSUSHIMA MANABU)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：00130302

研究成果の概要（和文）：

本研究では、塩害劣化の予測モデルを開発している。開発したシステムは、塩害劣化の潜伏期、進展期、加速期をモデル化したものである。潜伏期は、Fick の拡散方程式を用いている。鉄筋の腐食速度は、拡散係数、温度、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度の3つの要因から求められる式でモデル化した。ひび割れは、はく離ひび割れ、はく落ひび割れおよび鉄筋に沿ったひび割れの3つのモードを考慮できるモデルをかぶりCと鉄筋径 ϕ の関数で求めている。

本システムは、瀬戸内海に面した35年経過した土木構造物の劣化状況を適切に推定できるかを予測した。その結果、実用的な塩害劣化の予測推定モデルを開発することができた。

研究成果の概要（英文）：

In this paper, the prediction model for chloride induced damage is developed. The developed system consists of three segments, incubation period, progressive period and developed period. Incubation period is modeled using Fick's diffusion equation. Corrosion speed of reinforcement is modeled using three parameters, diffusion coefficient, temperature, chloride ion density close to reinforcement. The cracking model is considered by three mode, cracking along reinforcement, peeling off and horizontal cracking along reinforcement.

This system is verified using existing concrete structure which has passed 35 years received chloride induced damage. This system coincides with the estimate data and the data in situ on corrosion rate, chloride ion density close to reinforcement and cracking mode.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：維持管理工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：塩害劣化、鉄筋腐食、劣化予測、ひび割れモード

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の塩害とは、コンクリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を引き起こしたり、鋼材の断面減少を伴うことにより、構造物の性能が低下し構造物が所定の機能を果たすことができなくなる現象である。劣化の進行を予測するために様々な研究が行われている。しかし、定量的な予測手法が確立されていないため、現場調査により構造物の外観変状から構造物の現状の性能を半定量的に評価するしかない。最適な維持管理対策を行い、コンクリート構造物の性能を維持するためには、現在の劣化状況から今後の劣化状況を予測することが必要となる。

2. 研究の目的

本研究は、コンクリートの拡散係数の時間依存モデル、腐食発生限界塩化物イオン濃度のコンクリートの品質依存モデル、鉄筋腐食速度モデルの再構築を行い、確率論的アプローチにより実構造物の劣化現象の予測を行う予測システムを確率論的な手法を用いて行う。

3. 研究の方法

既往の実験の整理、室内実験、現場での計測などをもとに予測システムを構築した。

室内試験では、電食によるひび割れモードを確認した。ひび割れモードには、はく離ひび割れ、鉄筋に沿ったひび割れおよび水平ひび割れの3つをモデル化するために、かぶりと鉄筋間隔を試験の因子として行った。さらに、腐食した梁の載荷実験も行い、塩害劣化による耐力力の低下、じん性の低下を調べた。

4. 研究成果

提案する評価システムを説明する。現在、維持管理が推奨されているのは土木学会の示方書にある腐食発生限界塩化物イオン濃度(1.2kg/m³)前後に達した時であり、潜伏期の終わりから進展期のはじめの部分である。また、現在は、ひび割れ発生による美観の悪化やはく離・はく落を考慮して、コンクリート表面のひび割れ幅が0.4mmに達した時点が補修基準として定められているが、この基準は加速期の位置にあたる。栈橋などの構造物では、美観が悪化することの影響は小さく、はく離・はく落による第三者障害の可能性も考えにくい。現在の維持管理手法では安全側の基準であり必ずしも最適であるとは言えない。最適な維持管理を行うためには潜伏期から加速期まで精度よく予測する必要がある。

そこで一連の研究で加速期まで考慮した予測モデルの構築を行ってきた。提案した劣化モデルは、腐食が開始するまでを潜伏期、腐食ひび割れ発生までの進展期、腐食速度の増加する加速期に区分した予測モデルを構築した。構築した塩害劣化予測モデルは、予測に必要な条件を確定値として用いた確定論的な手法で予測を行っていた。さらに、コンクリート中の鉄筋の腐食はマクロセル腐食であるので、構造物全体の鉄筋が一様に腐食することはない。また、鉄筋のかぶりも場所によりばらついた状態であると考えられる。そのため必然的に劣化の進行は一様でなく、不確実性を考慮した確率論的手法の予測モデル構築が必要となる。既往の研究結果から拡散係数は時間の経過とともに小さくなることがわかっている。また、腐食発生限界塩化物イオン濃度はコンクリートの品質により変化することも考えられる。これらの理論を反映させ、確率論的手法で精度の高い予測モデルの構築を行った。以降に、劣化モデルの各期の詳細を示す。

（潜伏期）

現実では表面の塩化物イオン濃度は時間の経過に伴い変化するものである。そこで、外部から一定の塩化物イオン量が連続して浸透してくるものとして解いた。この場合、表面での塩化物イオン濃度は時間の経過とともに増大する。表面での塩化物イオン濃度は時間の経過とともに大きくなる。深さ方向の塩化物イオン濃度は深くなるほど小さくなっているが、時間の経過とともに深い位置でも塩化物イオン濃度が徐々に大きくなる傾向がある。拡散係数、表面塩化物イオン濃度は採取したコアの塩化物イオン濃度分布を回帰分析して求める

（腐食開始の条件）

これまでの研究結果から腐食発生塩化物イオン濃度は約1.2~2.5kg/m³であることが予想される(コンクリートの品質や環境条件によって値は異なる)。2001年コンクリート標準示方書【維持管理編】では「対象とする構造物の点検で、鋼材の腐食状態と鋼材位置における塩化物イオン濃度から腐食発生限界塩化物イオン濃度が求まる場合には、その値を用いることを原則とする。ただし、これができない場合は、平成11年版コンクリート標準示方書【施工編】にある腐食発生限界塩化物イオン濃度1.2kg/m³を用いてもよい。」としている。しかし、本モデルでは実現象を再現することを目的としているため腐食発生限界塩化物イオン濃度を試験によ

り検討することとした。試験では乾湿繰返と浸水させた試験体を開始から1ヵ月後試験体を割り、腐食面積率を調べた。結果の整理では、鉄筋の断面積の%以下の場合を腐食発生の塩化物イオン量と考えた。これらの実験結果をもとに腐食発生限界塩化物イオン濃度を決定した。

(進展期)

ニューラルネットワークを用い、現場で計測できる項目から腐食速度を推定できる回帰式の構築が行われている。この回帰式では、気温、塩化物イオン濃度、コンクリートの品質の3つの入力項目から回帰式を構築している。これらの項目は、相互に関連しあっており、腐食速度の回帰式を求めている。この式を用いて、1ヶ月刻みで腐食速度を求める。

(ひび割れ発生時期の腐食量)

ひび割れ発生時の腐食量 M_{cr} については、コンクリート標準示方書[維持管理編]には $10\text{mg}/\text{cm}^2$ が掲示されている。この値は安全側と思われ、業務上実際に即した値が必要である。荒木は、コンクリート供試体に 20mm の空洞を設け、その中で男性体の周方向に変形させることにより腐食膨張を模擬してひび割れ発生時の変形量を求めている。その変形量から鉄筋腐食量を換算しひび割れ発生時の腐食量とした。実験では弾性体の長さも変えている。本研究室での研究定の乾湿繰返し実験のかぶり供試体下限鉄筋の腐食量の加減である $40\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度、鉄筋間隔供試体の腐食量の平均程度およびかぶりが大きくなるほど腐食量が増加する傾向を考慮し評価した。この式では、かぶり C が大きくなると限界腐食量の値も大きくなり、鉄筋径が大きくなると限界腐食量は小さくなる。

(ひび割れモード)

腐食ひび割れの発生を鉄筋の周辺コンクリートの平均引張応力が鉄筋の腐食膨張によって、コンクリートの引張強度を超えると発生する腐食ひび割れ発生モデルを構築した。腐食ひび割れはかぶり厚や鉄筋間隔の大きさによってひび割れモードを変化させる。かぶり厚が極めて小さく、鉄筋間隔が大きければひび割れモードは表面はく離ひび割れとなる。かぶり厚が小さく、鉄筋間隔が大きければ鉄筋に沿ったひび割れ、かぶり厚が大きく、鉄筋間隔が小さければ水平はく離ひび割れになる。この形状はかぶりの区分境界 C/div 、鉄筋間隔の区分境界 L/div によって区分される。また、鉄筋に沿ったひび割れ、水平はく離ひび割れは発生した後に、ひび割れがそれぞれ進展し、はく落を引き起こすひび割れモードとなる。これにより、塩害劣化予測にひび割れモードによる劣化モードの違いを予測することが可能になった

(加速期)

加速期はひび割れの発生で塩化物イオンや溶存酸素を含んだ水が鉄筋と接しやすくなるため、腐食速度は、既往の現場調査から進展期での腐食速度の 3.6648 倍と表すことができる。「晴天時などのひび割れ部に水分が供給されない場合の腐食速度は進展期と同じとする。ただし、満潮時や荒天時に海水と接する部位や降雨時に雨水がかかる部位においては、前に述べたように進展期での腐食速度の 3.7 倍とする。」というように、天候によって腐食速度を随時変化させる方法もある。

(ばらつきを伴う劣化進行の予測)

鉄筋の腐食はマクロセル腐食であるため、例えば構造物全体の鉄筋が一樣に腐食することはない。よって必然的に腐食速度等は鉄筋位置によって異なり、その結果劣化の進行は一樣ではなくばらついた状態となる。本研究では実構造物に生じる不確実性を考慮し、劣化予測モデルへの適用を試みた。確率論的手法に基づいて、かぶり、鉄筋間隔、拡散係数の3つの項目のばらつきを考慮した。他に不確実性が予想される付着塩分量については感度解析により、付着塩分量の変動係数を増加させても予測結果に大きな影響は及ばず、確定値として取り扱ってもよいと考えている。かぶり、鉄筋間隔、拡散係数の3つの項目のばらつきを考慮することで予測結果も大きくばらつく。これらの平均、標準偏差を求め実構造物のデータと比較し結果の妥当性の検討を行う。

次に予測システムの妥当性を説明する。

本システムは、瀬戸内海に面した35年経過した土木構造物の劣化状況を適切に推定できるかを予測した。

(塩化物イオン濃度)

供用開始から35年経過時では、最も実測値分布の密集している $2.0\sim 3.0$ (kg/cm^2) は、平均値の 4.4 (kg/cm^2)、標準偏差を含めると $2.6\sim 6.0$ (kg/cm^2) の範囲から少し外れた。これは、拡散係数の標準偏差を設定した際の、変動係数によるものであると考えられる。腐食速度のばらつきが抑えられ、腐食の進行が遅い部分の予測があてはまらず、結果的に鉄筋位置での塩化物イオン濃度のばらつきが小さく、平均値の高い予測結果になったと考えられる。これは、大きな自然界の不確実性を考慮すると妥当であるといえる。

(ひび割れ発生割合)

S発電所の供用年数である経過年数35時での予測結果をみると、ひび割れなし、はく落の割合が非常によく一致した。これは、拡散

係数の標準偏差を設定した際の、変動係数によるものであると考えられる。case2 では拡散係数のばらつきに変動係数 $\delta = 0.92$ を用いている。このため予測結果は、拡散係数の小さい部分のばらつきが広がり、腐食の進行が現実に近いものとなったと考えられる。これは、大きな自然界の不確実性を考慮すると妥当であるといえる。また、鉄筋に沿ったひび割れの割合がずれているが、これは case1 のときと同じで、劣化予測による鉄筋に沿ったひび割れへの感度の良さによるものであると考えられる。実測値は、目視で確認したひび割れ幅 0.4mm 以上（推定幅）のものを記録しているのに対し、劣化予測では、鉄筋の腐食膨張によって発生するコンクリートへの引張力が引張強度を超えた瞬間にひび割れの発生と判断される。これにより、予測値と実測値の鉄筋に沿ったひび割れの割合に誤差が生じたものと考えられる。

（腐食減量）

供用開始から 35 年経過時では、予測平均値の 300 (kg/cm²)、標準偏差を含めると 0.0 ~ 800 (kg/cm²) の範囲から大きく外れた。これは鉄筋の腐食減量調査の際に、かぶりコンクリートがはく落した鉄筋が剥き出しになっている箇所を採取しているためである。腐食が最も進行しているため、ばらつきの中の最も端に位置すると考えられる。これにより実測値は予測の標準偏差内に収まらなかったと考えられる。

（塩化物イオン濃度）

供用開始から 35 年経過時では、最も実測値分布の密集している 2.0~3.0 (kg/cm²) は、予測平均値の 3.8 (kg/cm²)、標準偏差を含めると 1.9~5.6 (kg/cm²) の範囲に良くあてはまった。これは、拡散係数の標準偏差を設定した際の、変動係数によるものであると考えられる。case2 では拡散係数の変動係数 $\delta = 0.92$ を用いている。このため予測結果は、拡散係数の小さい部分のばらつきが広がり、腐食の進行が現実に近いものとなったと考えられる。これは、大きな自然界の不確実性を考慮すると妥当であるといえる。

本研究は、塩害劣化を受ける構造物の劣化モードを推定する確率論的手法の構築を行った。

構築した劣化予測手法の精度を検証するため、実構造物の調査結果をもとに比較・考察を行った。劣化予測は、拡散係数の変動係数を 2 パターン考え、case1, case2 について検証した。case1 は変動係数 $\delta = 0.44$ を用いた。これにより腐食速度のばらつきが抑えられ、結果的に鉄筋に沿ったひび割れの割合が小さく、はく落の割合が大きく予測された。

case2 は変動係数 $\delta = 0.92$ を用いた。このため予測結果は、拡散係数の小さい部分のばらつきが広がり、腐食の進行が現実に近いものとなった。case1, case2 の劣化予測は、ばらつきの中にあり、これは、大きな自然界の不確実性を考慮すると妥当であるといえる。また、今後の課題として、今回は、実測値のひび割れ発生割合を設定する際、全体の面積から各ひび割れモードの面積比を用いた。これにより、実測値のひび割れ発生割合は確定値となった。そこでブートストラップ法など、実測値をメッシュ分割して結果をばらつかせることにより、予測値との更なる整合性が期待できる。以上より、本研究で構築した塩害劣化予測手法によって実構造物の劣化状況を精度良く予測することが出来た。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び（連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- 1) 中川裕之, 田中大博, 横田 優, 松島 学: 塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量, 土木学会論文集E, Vol.64, No.1, pp.744-757, 2008
- 2) 松田耕作, 横田 優, 米澤和宏, 松島 学: 塩害劣化を受ける鉄筋コンクリート梁の耐荷性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.834~843, 2012 .3 .
- 3) 松田耕作, 金谷誠也, 横田優, 松島学: 塩害劣化を受ける構造物の劣化モードを推定する確率論的手法の構築, 第7回 構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム, pp.440~445, 2011.10.

〔学会発表〕（計 4 件）

- 1) Manabu Matsushima, Masaru Yokota: Study on Repairing Timing of Concrete Structures Received Chloride Induced Damage by Considering Life Cycle Cost, 6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, June 22-25, 2010, Kyoto, Japan.
- 2) Manabu Matsushima, Masaru Yokota, Hiroyuki Nakagawa: Study on Prediction Model for deterioration of RC Structure Received Chloride induced Damage based on Reliability Theory, The 10th International Conference on Structural Safety and Reliability, September 13-17, 2009, Japan
- 3) 河井 勇樹, 松島 学, 横田 優, 松田耕作: 塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中の鉄筋腐食速度の予測, 土木学会第 66 回年次学術講演会, V-254, pp.507-508、

2011, 9.

4) 金谷誠也, 松島 学, 横田 優: 塩害劣化を受ける構造物の劣化モードを推定する確率論的手法の構築、土木学会第 66 回年次学術講演会、V-162、pp. 323-324、2011, 9.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松島 学 (MATSUSHIMA MANABU)

香川大学・工学部・教授

研究者番号: 00130302