

塩害環境下にあるコンクリート桁橋の 構造性能劣化曲線と構造信頼性評価への応用

東北大学大学院 学生会員 ○中嶋啓太
東北大学大学院 フェロー 鈴木基行

東北大学大学院 正会員 秋山充良
鹿島建設(株) 正会員 大木文宏

1. はじめに

劣化コンクリート構造物の構造性能評価に関する研究が精力的に進められている¹⁾。これら既往の研究に基づくことで、構造性能劣化曲線のモデル化、その評価に伴う大きな不確定性のデータベース化、および劣化構造物の安全性の低下程度の定量的な表現が可能になる。そこで本研究では、塩害環境下にあるコンクリート桁橋の曲げ耐力の低下曲線を求め、そこに介在する不確定要因を信頼性理論を用いて処理することで、劣化構造物の安全性を信頼性指標(損傷確率)として表現した。

2. コンクリート構造物の構造性能劣化曲線

(1) 概説

本章では、コンクリート構造物の構造性能劣化曲線の算定手順を示す。まず、既往の実験データから、鋼材を腐食させた RC 部材の曲げ耐力と鋼材質量減少率 ΔW の関係を整理する。次に、塩化物イオンの拡散や鋼材腐食速度を求め、供用開始後 t 年における鋼材質量減少率 ΔW を得る。これにより、供用開始後 t 年における曲げ耐力の低下率を得ることができる。

(2) 鋼材質量減少率と曲げ耐力の関係

鋼材を電食等により腐食させた RC 部材の曲げ載荷実験(例えば²⁾)を収集し、実験後に測定された鋼材質量減少率 ΔW と鋼材腐食による曲げ耐力の低下率の関係を整理した。そして、回帰分析により式(1)を得た。

$$g(\Delta W) = -1.635 \times 10^{-4} \cdot \Delta W^2 - 9.726 \times 10^{-3} \cdot \Delta W + 1 \quad (1)$$

なお、この曲げ耐力評価に伴う不確定性として、 $A_1 = (\text{実験値}) / (\text{式(1)による計算値})$ の統計量(平均値 1.0, 変動係数 7.6%)を求め、これを確率変数として扱った。

(3) 鋼材質量減少率の経時変化

鋼材腐食の発生までおよび腐食ひび割れ発生の判定は参考文献 3)および 4)と同様のモデルを用いた。腐食ひび割れ発生以前の腐食速度 V_1 については、中川ら⁵⁾の調査結果に基づき、平均値 6.10 mg/cm²/year, 変動係数 58%を持つ対数正規変数とした。腐食ひび割れ発生後の腐食速度 V_2 も中川らの調査結果に基づき、平均値 78.9 mg/cm²/year, 変動係数 58%を持つ対数正規変数とした。

参考文献⁴⁾と同様の手順で求められる供用開始後 t 年の鋼材質量減少率 ΔW を式(1)に代入することで、 t 年での曲げ耐力の低下率を評価できる。海岸線からの距離が 0.1 km の地点における構造性能劣化曲線の平均値の一例を図-1 に示す。海風比率や平均風速の違いから、塩害の危険度および構造性能の劣化の程度は地域により異なる。また、構造性能劣化曲線の変動係数は供用期間内において地点ごとに 10~30%程度まで経時的に増加し、大きな不確定性を有する結果となった。

3. 構造信頼性評価への応用

(1) 損傷確率算定式

飛来塩分と交通荷重の作用を同時に受けるコンクリート構造物の供用開始後 t_L 年における損傷確率 pf は式(3)により求めることができる。なお、本研究における損傷確率は作用曲げモーメントが曲げ耐力を超過する確率である。また、 pf は式(4)により信頼性指標 β に変換する。

$$L(t_{i-1}, t_i) = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \exp \left[-\lambda_{S_1} \left[\Delta t_i - \int_{t_{i-1}}^{t_i} F_{S_1} \{ r \cdot a_i \cdot g(t) - s_2 \} dt \right] \right] \cdot f_{S_2}(s_2) f_{R_0}(r) f_{A_1}(a_i) ds_2 dr da_i \quad (2)$$

Key Words : 塩害による腐食劣化, 構造性能劣化曲線, 信頼性評価, 信頼性指標

連絡先 : 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL : 022(795)7449 FAX : 022(795)7448

$$pf = 1 - \prod_{t_{i-1}=0}^{t_i=t_L} L(t_{i-1}, t_i) \quad (3)$$

$$\beta = -\Phi^{-1}(pf) \quad (4)$$

ここで、 R_0 は構造物の初期耐力、 S_1 は時間依存性のある作用(例えば、活荷重による作用)、 S_2 は時間依存性のない作用(例えば、死荷重による作用)で、 f_{R_0} 、 F_{S_1} 、 f_{S_2} はそれぞれの確率密度関数および累積分布関数(CDF)である。 $g(t)$ は構造性能劣化曲線で、 A_i はその不確定性を考慮する係数、 f_{A_i} はその確率密度関数、 λ_{S_1} は単位時間内で S_1 が生起する平均回数、 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ である。また、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布の累積分布関数である。

(2) 解析対象橋梁

解析対象橋梁は、支間長 30 m の PC 単純 T 桁橋とし、本研究では主桁の信頼性評価を行う。なお、この主桁は現行のコンクリート標準示方書⁶⁾のかぶりをもち、道路橋示方書⁷⁾の曲げに関する照査を満足するものである。

(3) 活荷重の累積分布

参考文献⁸⁾にある交通データを用いた活荷重シミュレーションにより求めた作用曲げモーメントの CDF の一例を図-2に示す。この形状は交通量と大型車混入率の大きさにより異なる。

(4) 信頼性評価

全国 23 地点を選定し、各地点で飛来塩分量のハザード評価および活荷重シミュレーションを行い、式(2)を用いて解析対象 PC 桁の信頼性評価を行った。解析の際は、各地点で海岸線からの距離 0.1 km を想定し、また初期耐力 R_0 および死荷重 S_2 の値は地点に関係なく同じ値を用いている。愛知県名古屋市などを対象とした解析結果の一例を図-3に示す。飛来塩分の大きさ、および交通量や大型車混入率の違いにより信頼性指標の減少の程度が異なっている。

4. まとめ

本研究は、従来、個別に検討されてきた構造性能と耐久性能の照査を統合し、材料劣化による構造性能の低下が生じた構造物の安全性の大きさを信頼性理論により定量化した。本研究の手法に基づくことで、地域の塩害環境や交通量などに関わらず、ある一定の安全性をライフタイムにわたり確保した構造物の設計が可能になる。

参考文献

- 1)土木学会コンクリート委員会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 71，2006.
- 2)岩波光保，横田弘，佐藤文則：鉄筋腐食が RC はりの耐荷性能に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp. 1501-1506，2002.
- 3)秋山充良，伊東佑香，鈴木基行：塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.385-401，2006.
- 4)佐藤広和，李月鳳，秋山充良，鈴木基行：腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 29，No.1，pp. 1071-1076，2007.
- 5)中川貴之，瀬下雄一，鬼束俊一，堤知明：海洋環境下における RC 構造物の鉄筋腐食速度の評価，コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム，pp. 325-330，2004.
- 6)土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，2002.
- 7)日本道路協会：道路橋示方書・同解説(I 共通編・III コンクリート橋編)，2002.
- 8)玉越隆史，中洲啓太，石尾真理：道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書 - 全国活荷重実態調査 - ，国土技術政策総合研究所資料，No.295，2006.

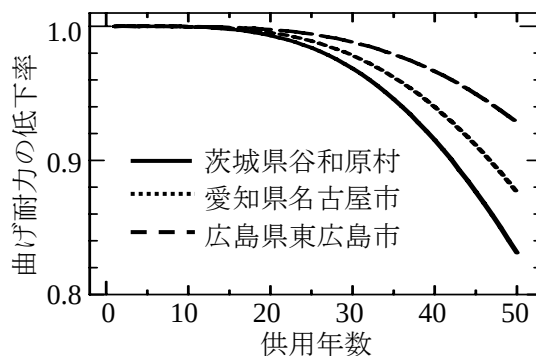


図-1 構造性能劣化曲線の平均値

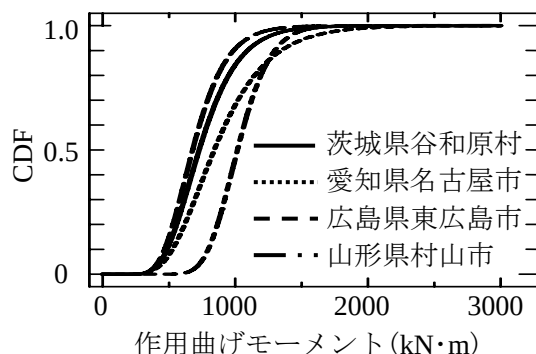


図-2 作用曲げモーメントの CDF

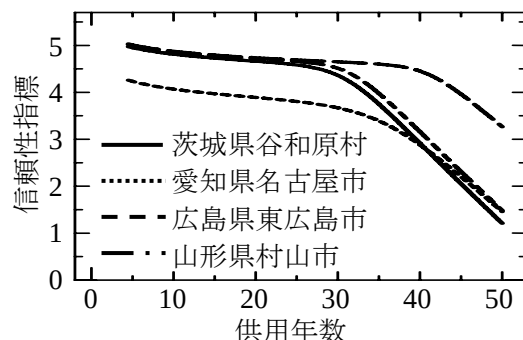


図-3 信頼性指標の経時変化