

塩害劣化過程にある RC 桁の時系列性能評価

京都大学大学院工学研究科 学生員○長谷田貴士 関西大学大学院理工学研究科 学生員 小浦拓人
 パシフィックコンサルタンツ(株) 正会員 森崎 啓 香川大学工学部 正会員 白木 渡
 関西大学環境都市工学部 正会員 堂垣正博

1. まえがき

今日の技術者不足や財政難といった社会状況を鑑みれば、効率的な維持管理のための構造物の「健全度評価」が重要になる。ここでは、塩害による劣化過程下の RC 桁を対象に、その健全度を多段階性能評価法 (Multi State System : 以下 MSS と略す) によって行う。

2. 性能評価のための MSS 指標

MSS は多くの状態量変数からなるシステムがある種の性能に対して最適な性能を発揮するに相応しい状態量変数の組み合わせを探索する方法である。

MSS の信頼性指標¹⁾には、つぎの3つがある。

1) 稼働率 $A(t)$: 構造物が正常に機能している確率。

$$A(t) = \sum_{k=1}^n p_k(t) \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (1)$$

2) 期待性能率 $E(t)$: システムが有する性能の期待値。

$$E(t) = \sum_{k=1}^n g_k p_k(t) \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2)$$

3) 性能不足率 $D(t)$: 要求される性能に対する不足率。

$$D(t) = \sum_{k=1}^n p_k(t) \max(w - g_k, 0) \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (3)$$

ここに、 $p_k(t)$: 状態 k の状態確率、 w : 設計荷重で降伏する時の性能値、 g_k : 状態 k の性能値で、

$$g_k = \frac{S_k - S_d}{S_0 - S_d} \quad (4)$$

で定義した。 S_k : 塩害劣化の進行度によって区分される状態 k でのはり内の鉄筋がすべて降伏する時の作用荷重強度、 S_d : 死荷重、 S_0 : 健全な状態での降伏する時の作用荷重強度。

3. 性能低下モデル

MSS によって時系列的にその性能を評価する場合、性能を多段階に定義する必要がある。ここでは、塩害劣化によって損傷したはりの状態を4段階で表現する。

①状態Ⅰ : RC 構造の表面から塩化物イオンが内部に浸透し、鉄筋が腐食し出すまでの期間。

②状態Ⅱ : 鉄筋の腐食が進み、鉄筋腐食に伴う膨張圧によって、コンクリートにひび割れが発生するまでの期間。

③状態Ⅲ : ひび割れの発生後、鉄筋の腐食速度が加速され、耐力喪失の危険性がある期間。一般に、鉄筋の断面積が 20%程度減少すると、はりの耐力が急激に失われるといわれる²⁾。ここでは、鉄筋の断面積が 20%減少した時点 t_f を加速期の終了とする。

④状態Ⅳ : 急激に耐力が減少していく期間。

4. RC 桁の終局強度解析とその考察

塩害の影響を受けやすい新潟県の沿岸部に建設された旧板貝橋を参考に、設計時の荷重組合せに従って、単純支持された RC 桁を弾塑性曲げ解析する。旧板貝橋の橋長は 13.6m、桁の横断面は図 1 のとおりである。

劣化過程下にある RC 単純桁の耐荷性能を評価するため、コンクリートをソリッド要素、鉄筋鋼棒をトラス要素でモデル化し、橋軸方向、桁高方向、橋軸直角方向にそれぞれ 34, 23, 38 分割した。ソリッド要素の数は 6,392、トラス要素の数は 340 である。解析に汎用有限要素解析プログラム“MARC2010.2”を適用し、設計活荷重を α 倍しながら漸増載荷で応答を追跡した。非線形方程式の解法に弧長増分法を用いた。コンクリートの降伏条件に線形 Mohr-Coulomb 則を適用した。材料特性を表 1 に示す。

塩害による鉄筋の腐食は鉄筋断面が一様に減少すると仮定し、その断面の残存面積を 100~50%に変化

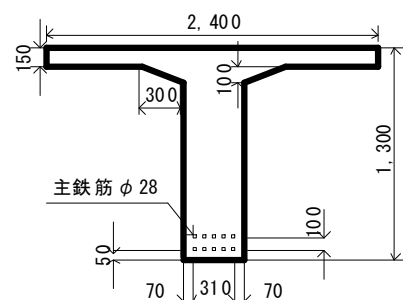


図 1 旧板貝橋の桁断面

キーワード : RC 桁, 塩害, MSS, 信頼性評価

連絡先 : 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35 TEL.06-6368-0882/FAX.06-6368-0882

させて解析したところ、図2に示す作用荷重とスパン中央でのたわみとの関係を得た。図中、横線は死荷重と設計時の活荷重との組合せ荷重強度を示す。図から明らかなように、荷重強度が220kN付近で引張り側のコンクリートにひび割れが発生した。その後、断面の剛性が急激に低下し、最高荷重に到達した。その大きさは設計荷重の約1.7倍である。鉄筋の断面が60%程度に減少すれば、やはり設計荷重に相当する荷重で終局状態に達する。

5. MSSによるRC桁の性能評価

状態Ⅰ～状態Ⅳの劣化過程をマルコフ過程でモデル化する。初期条件が $p_1(0)=1, p_2(0)=p_3(0)=p_4(0)=0$ の状態確率を算出すれば、図3を得る。また、式(1)～式(3)により信頼性評価を行った結果、図4～図6を得る。

図4に示す稼働率によれば、たとえば、 $t=15$ 年目のそれは約0.6である。これは、鉄筋断面が20%減少した箇所が約60%の確率でない、言い換えれば、約40%の確率で20%を超える箇所があることを示す。

つぎに、期待性能率の算出結果を図5に示す。図中、破線(e)は性能低下モデルに従って理論的に求められた鉄筋径が要求性能を満たさなくなる鉄筋径に達した時点を示す。また、太線で示される横線(f)は要求性能(設計荷重で降伏する時の性能)を表す。期待性能率を算定するにあたって、Ⅰ～Ⅳの状態がそれぞれ幅を有しているため、各状態の開始年での性能をその状態中の性能として期待性能率を求めるか(図5(a))、最終年での性能をその状態中の性能として期待性能率を求めるか(図5(d))など種々考えられる。ここでは、

図中の曲線(c)を対象橋梁の期待性能率とする。ちなみに、直線は理論上、この年から要求性能を下回ることを、直線(f)とそれぞれの曲線の交点はそれらの年までは要求性能を満たすことが期待できることを意味する。すなわち、直線(e)と(f)の交点が一致している曲線(c)は、両者を同時に満足し、対象橋梁の性能を最もよく表している。

図5の曲線(c)に対応する、要求性能で正規化された性能不足率を描けば、図6を得る。たとえば、 $t=15$ 年目のそれは0.16であり、これは構造物の最悪の状況を想定すると、要求性能が16%不足している可能性を示している。

6. あとがき

塩害による劣化過程下のRC桁を対象に、その耐力評価をMSSの3指標で示した。得られた結果を要約すれば、つぎのようである。

- 1) 対象橋梁が要求性能を満足しているか否かを稼働率によって評価できることを示した。
- 2) 対象橋梁が要求性能をどの程度満足しているかを期待性能率で表すことができた。
- 3) 性能不足率によって、対象橋梁の最悪の状態が想定できることを示した。

参考文献

- 1) 森崎啓：Multi State System (MSS) に基づく橋梁構造システムの性能評価および信頼性設計に関する基礎的研究，香川大学学位請求審査論文，2008-3。
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，1998-10。

表1 材料特性(N/mm²)

	圧縮強度	引張強度	ヤング率
鉄筋	295	295	200,000
コンクリート	27.5	2.1	26,750

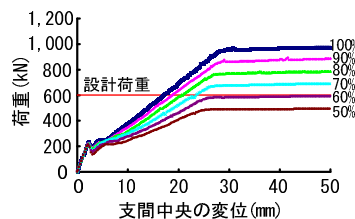


図2 荷重と支間中央のたわみの関係

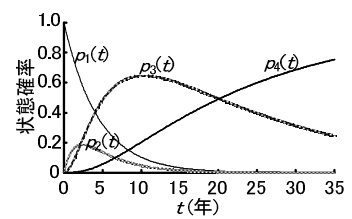


図3 状態確率

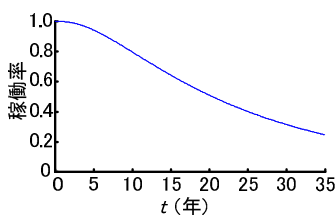


図4 稼働率

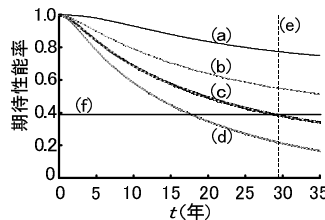


図5 期待性能率

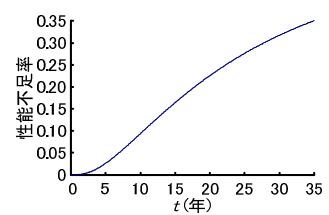


図6 性能不足率