

関西大学環境都市工学部 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、効率的に維持管理するための構造物の「健全度評価」が重要である。具体的には、構造物の性能低下を時系列に捉え、定量的に予測することで補修などが必要な構造物を見出し、その優先順位をつけながら維持管理することである。本研究では、塩害による RC 桁の経年劣化に着目し、時系列的に変化する性能を多段階の性能に置き換え、多段階性能評価法 (Multi State System : 以下, MSS と称す) によって RC 桁の信頼性評価を行う。

2. 性能低下モデル

MSS 手法によって信頼性評価する場合、性能を多段階の状態 で定義する必要がある。本研究では、塩害劣化によって時々刻々と変化する状態をつぎの 4 段階に区分する。

- ①潜伏期 (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進展期 (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加速期 (状態 III) : ひび割れが発生した後、鉄筋が腐食する速度が加速され、耐力を喪失する危険性のある期間。ここでは、鉄筋の断面が 20%減少した時点 t_f をもって加速期の終了とする。
- ④劣化期 (状態 IV) : 急激に耐力が減少していく期間。

3. MSS に用いられる性能評価指標

MSS とは、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し出す方法である。

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。

$$A(t) = \sum_{k=1}^n p_k(t) \quad (n = 1.2.3...) \quad (1)$$

本研究における正常な機能とは、鉄筋の断面が 20% 程度減った状態を限界に稼働することを意味する。

- 2) 期待性能率 $E(t)$: システムが保有する性能の期待値。

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

- 3) 性能不足率 $D(t)$: 要求される性能に対する不足率。

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

ここに、 $p_k(t)$: 状態 k における状態確率

g_k : 状態 k における性能値

である。

4. 設計荷重系による RC 桁の終局強度解析結果とその考察

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で載荷された単純支持の RC 桁を弾塑性曲げ解析する。参照した旧板貝橋は橋長が 13.6m で、桁の断面は図 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、桁高さ方向、橋軸直角方向にそれぞれ 34, 23, 38 分割した。すなわち、ソリッド要素の数は 6,392、トラス要素の数は 340 である。解析には、汎用有限要素解析プログラム“MARC2010.2”を用い、建設時の設計活荷重を α 倍し、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。

コンクリートと鉄筋の降伏条件に線形 Mohr-Coulomb 則と von Mises 則を適用した。材料特性を表 1 に示す。

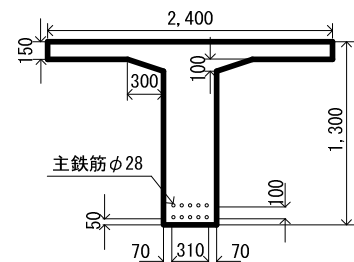


図 1 旧板貝橋の桁断面

塩害による鉄筋の腐食モデルは、その断面が橋軸方向全長にわたって一様に減少するとした。断面の残存面積を100~50%に変化させて解析したところ、図2に示すスパン中央での作用荷重とたわみの関係を得た。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。図から明らかのように、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1.3倍である。鉄筋の断面が60%程度に減少すれば、はりには設計荷重相当で終局状態に到達する。

5. MSS による RC 桁の性能評価

状態 I~状態 IV で表される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。つぎに、式(1)~式(3)を用いて信頼性評価を行った結果、図4~図6を得た。

図5中の破線(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到達した時点を示す。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ような状態の時の性能)を表す。

図4に示す稼働率によれば、 $t=15$ 年目のそれは約0.6である。これは、20%程度減少した鉄筋断面の箇所が約60%の確率でない、逆にいえば、約40%の確率で20%を超える箇所があるということを示している。

期待性能率を算定するにあたって、状態 I~状態 IV がそれぞれ年数に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の性能として期待性能率を求めるか(図

5(a)、その状態の最終年での性能をその状態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5中の曲線(c)を対象橋梁の期待性能率とする。ちなみに、曲線(5)は理論上、この年に要求性能を下回ることを、曲線(f)とそれぞれの曲線の交点はその年までの間は要求性能を満たすことが期待できることを意味する。

図6は図5の曲線(c)に対応する性能不足率である。ただし、要求性能で正規化し、要求性能からの不足を表す指標とした。たとえば、 $t=15$ 年目のそれは0.16であることから、構造物の最悪の状況を考慮すると、要求性能から16%の不足がみられる可能性があるということになる。

6.あとがき

塩害による劣化環境下にあるRC桁を対象に、橋梁の維持管理に活用できるMSSの3指標を算出した。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確率論的に展開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でき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, pp.24-35, 2008-3.

表1 材料特性(N/mm²)

	降伏強度	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

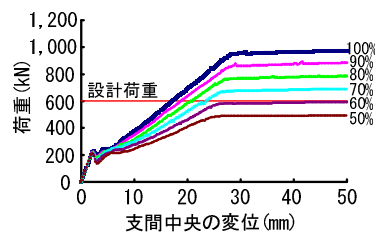


図2 作用荷重と支間中央のたわみの関係

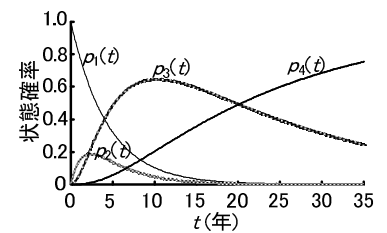


図3 状態確率

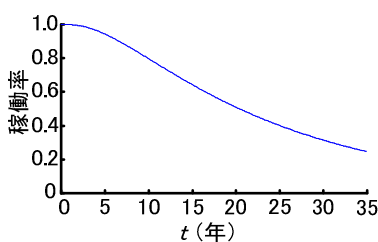


図4 稼働率

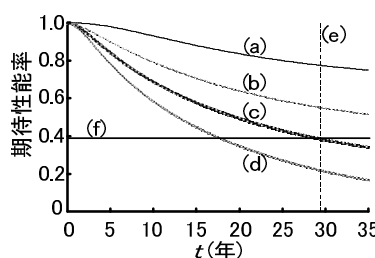


図5 期待性能率

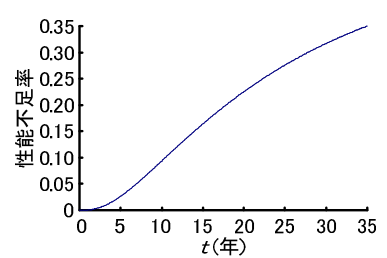


図6 性能不足率