

劣化過程下にある RC 桁の耐荷性能の時系列評価

関西大学[院]

○小浦拓人 京都大学[院] 長谷田貴士

パシフィックコンサルタンツ(株) 森崎 啓 香川大学 白木 渡

関西大学 堂垣 正博

Life time oriented assessment of deteriorating reinforced concrete beams

T. KOURA, T. HASEDA, H. MORISAKI, W. SHIRAKI and M. DOGAKI

1 まえがき

わが国の深刻な財政難が公共投資の減少を加速している。一方、老朽化する社会基盤施設の数が増え続け、その劣化度は着実に進行している。このような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」が極めて重要である。

本研究では、塩害による RC 桁の経年劣化に着目し、時々刻々と変化する性能を Multi State System (以下 MSS と称す) によって評価する。

2 性能評価のための MSS 指標

MSS は、従来、上水や電力などの配給システムの設計の際に用いられてきた信頼性評価手法である。経年変化する構造物を一つのシステムとして捉え、それが規定以上の性能を発揮しているのであれば、部分損傷も許容できる。構造物の部分的な損傷で供用の可否を判断するのは不合理で、部分損傷を許容する中で、真の供用の可否を評価しようとする手法である。

MSS の信頼性指標には、つぎの3つがある¹⁾。

1) 稼働率 $A(t)$: 構造物が正常に機能している確率で

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

2) 期待性能率 $E(t)$: 構造物が保有する性能の期待値で

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

3) 性能不足率 $D(t)$: 要求される性能に対する不足率で

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

3 劣化過程下の性能モデル

劣化過程下にある構造物を MSS 手法で信頼性評価する場合、その性能を多段階に定義する必要がある。ここでは、塩害による劣化で時々刻々と変化する状態をつぎの4段階で仮定する。すなわち、

(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。腐食を開始する時点 t_{cr} は、表面での塩化物イオン濃度が一定とした Fick の拡散方程式から算出される。

(2) 進展期 (状態 II): 鉄筋の腐食が進み、それ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。ひび割れが発生する時点 t_r は、RC 構造の表面での引張応力と鉄筋の腐食生成物による膨張圧のつり合いから算出される。

(3) 加速期 (状態 III): ひび割れ発生後、鉄筋の腐食速度が徐々に加速し、耐力を喪失するまでの期間。一般に、鉄筋の断面積が 20% 程度減ると、鉄筋とコンクリートの付着がなくなる²⁾と言われる。それゆえ、それ以降、急激に耐力が低下すると考えられる。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) 劣化期 (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

塩害の影響が著しいとされる新潟県の沿岸部に建設された旧板貝橋を参考に、設計荷重の組合せを考え、その状態での単純支持 RC 桁の弾塑性曲げ強度を解析的に明らかにする。橋梁モデルは橋長が 13.6m で、その桁断面は Fig.1 に示すとおりである。

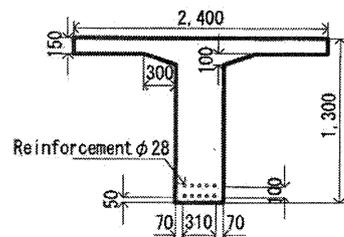


Fig.1 Cross-section of Kyu-Itagai highway bridge

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離散化し、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。ソリッド要素の数は 6,392、トラス要素の数は 340 である。数値解析を汎用有限要素解析プログラム“MARC2010.2”によって行い、建設時の設計活荷重を α 倍しながら漸増载荷形式で応答を追跡した。なお、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 Table1 に示す。

Table 1 Material properties(N/mm²)

	Yield strength	Tensile strength	Young's modulus
Reinforcement	295	295	200,000
Concrete	-27.5	2.1	26,750

劣化損傷過程下の鉄筋鋼棒の残存断面積を 100~50% に変化させて解析したところ、Fig.2 に示す作用荷重（死荷重を含む）とスパン中央でのたわみの関係を得た。図中、横線は死荷重と設計活荷重との組合せ強度を示す。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。その影響が図に現れている。その後、断面の剛性が徐々に低下しつつ最高荷重に達した。その大きさは設計荷重の約 1.7 倍である。

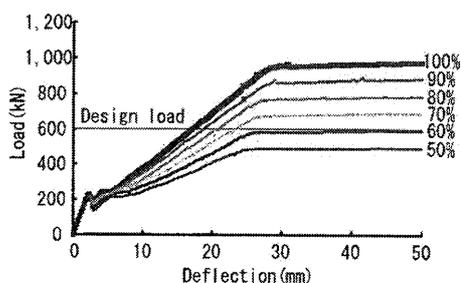


Fig.2 Load-deflection relationship

5 MSS による RC 桁の性能評価

状態 I~状態 IV で与えられる劣化過程をマルコフ過程で表現する。初期条件が $p_1(0)=1, p_2(0)=p_3(0)=p_4(0)=0$ の状態確率を求めれば、Fig.3 を得る。

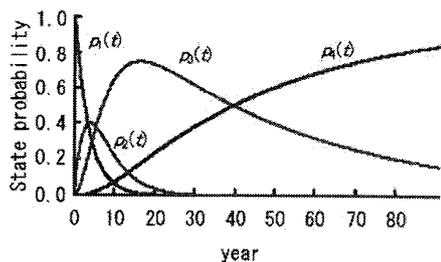


Fig.3 State probability

つぎに、式(1)~式(3)によって信頼性評価を行った結果、時間とともに変化する稼働率、期待性能率、性能不足率が Fig.4~Fig.6 のように求められた。

Fig.4 から $t=30$ 年での稼働率は約 0.6 である。これは、鉄筋の断面積が約 20% 程度減少した部分が桁内に約 40% の確率で生じていることを意味している。

Fig.5 において、破線で描いた 3 本の縦線⑥~⑧はそれぞれ腐食が開始する時期、ひび割れが発生する時期、劣化の進行に伴って要求性能を満たさなくなる鉄筋径に達した時期を示す。また、太線で示す横線⑨は規定性能（設計荷重時に降伏する時の性能）を表す。

周知のとおり、状態 I~状態 IV はそれぞれ開始から終点までの幅を持つ。それゆえ、期待性能率の算定にあたっては、各状態の開始年での性能を用いて期待性能率を求める場合（Fig.5①）や、その状態の最終年での性能を用いて期待性能率を求める場合（Fig.5⑤）など、種々考えられる。ここでは、直線⑧、直線⑨、曲線④の交点を対象橋梁の期待性能率とした。

Fig.6 から $t=30$ 年での性能不足率は 0.2 である。これ

は、構造物の状況が最悪であるとした場合、その性能が要求性能から 20% 不足している可能性を示している。

6 あとがき

塩害劣化下にある 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。すなわち、

- (1) 稼働率によって、要求された性能をどの程度満足しているかを確率論によって示した。
- (2) 期待性能率によって、部分損傷を容認した構造物の性能を示した。
- (3) 性能不足率によって、任意の時点での最悪の状況が起こりうる確率を示した。

これら 3 指標の総合的評価によって、維持管理の意思決定が可能となることを示した。

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，香川大学博士（工学）審査請求論文，2008-3.
- 2) 福本直也・白木渡・井面仁志・松島学：時系列 MSS 信頼性評価手法による RC 構造物の補修最適化，土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集，pp.102-107, 2011.

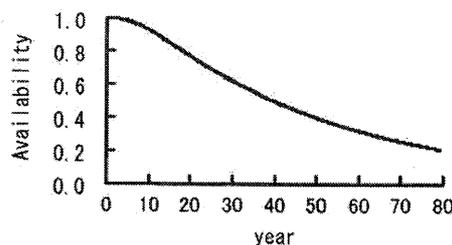


Fig.4 Availability

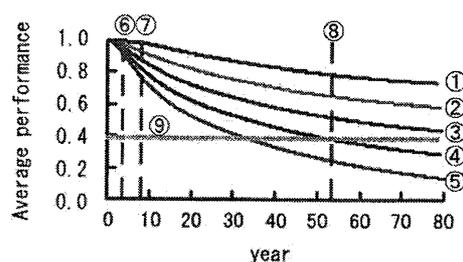


Fig.5 Average performance

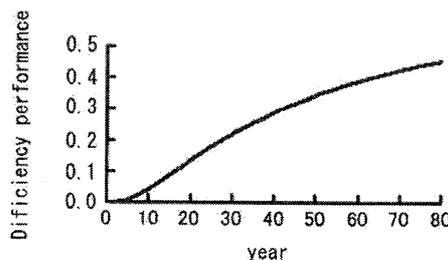


Fig.6 Dificiency performance