

個々の鋼橋の劣化曲線に基づく橋梁アセットマネジメントの試み

東京都 正会員 ○沼田 学
広島大学大学院 正会員 藤井 堅
広島大学大学院 フェロー会員 中村 秀治

1. 背景と目的

わが国の社会基盤施設は戦後の復興から高度経済成長に急速な勢いで整備されたが、その多くが更新時期を迎えつつあり、今後維持管理費が急激に増大するのは明らかである。そこで、限られた財源を可能な限り有効に活用してそれらの延命化を図るアセットマネジメントの考え方が採用され始めている。現在の橋梁アセットマネジメントで使用されている劣化曲線は、外観検査に基づいて予測・評価されているが、橋梁が安全であるか否かの観点から見ると、外観の損傷状態だけで補修計画を立てることは、必ずしも強度の安全性を保証するわけではないと考えられる。

そこで本研究では、現在の損傷度評価¹⁾による手法が構造物の強度を保証できるかどうかを、強度の視点から検討する。ここでは、橋梁ごとに種々の部材の強度を評価して劣化曲線を求め、強度に基づいたアセットマネジメントを、ケーススタディーを通して試みる。そして、強度に基づく試算結果と、損傷度評価に基づく試算結果を、強度の安全率の観点から比較する。

2. 研究方法

鋼橋を対象とし、構成部材である床版と主桁の劣化曲線を強度の安全率で評価することを試みる。ここでは一例として、RC 床版の中性化による劣化曲線について考えることにする。中性化による劣化曲線を、経年と共に RC 床版の主鉄筋が腐食減肉すると仮定して求める。

2-1. 床版の強度の安全率

中性化による劣化に対する安全率 γ は、式(1)を用いて評価する。

$$\gamma = M_u / M_d \quad (1)$$

ここに、

M_u : 床版の保有曲げモーメント

M_d : 床版の設計曲げモーメント

である。

ここでは、約 20 年前に建設された鋼橋の設計図を基に、Fig.1 に示すような床版を対象とする。単位幅当たりの床版の断面における設計曲げモーメント M_d は道路橋示方書³⁾に則り求めた。また、保有曲げモーメント M_u は、以下の①から④の仮定のもと、主鉄筋が許容引張応力度となる曲げモーメントとする。

- ①コンクリートおよび鉄筋は弾性体
- ②コンクリートと鉄筋の付着は完全でずれはない
- ③断面のひずみ分布は平面保持の法則に従う
- ④コンクリートの引張抵抗は無視する。

2-2. 中性化による劣化曲線

中性化による RC 床版の劣化予測は鳥取ら²⁾が提案した方法を用いた。中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食過程をモデル化すると、Fig.2 となる。図中の各鉄筋

腐食過程を以下のように考えている。

①潜伏期：中性化残りが 10mm に達した段階で鉄筋が腐食し始めるものと仮定する。

②進展期：鉄筋純間隔が鉄筋半径より大きい場合、腐食ひび割れが生じる鉄筋の腐食深さを、式(2)で表すとする。

$$\Delta r_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (2)$$

ここに、

Δr_{cr} : 腐食ひび割れが生じる鉄筋の腐食深さ(mm)

c : かぶり

ϕ : 鉄筋径

である。

鉄筋の腐食速度算定式に関しては 3×10^{-3} mm/年程度を用いるとする。なお、腐食速度の設定に際してコンクリートの水セメント比等の影響を考慮してない。

③加速期前期：現状では、コンクリートの剥離・剥落が生じる際の鉄筋腐食量は明確ではないが、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さを式(3)で表すとする。

$$\Delta r_{sp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (3)$$

④加速期後期以降：この期間の腐食速度には裸鋼材の腐食速度を用いるとし、ここでは裸鉄筋の腐食速度を 7×10^{-3} mm/年と推測して用いる。

上に示した仮定の基に RC 床版の中性化による劣化予測を行うと、中性化による劣化曲線は Fig.3 となる。

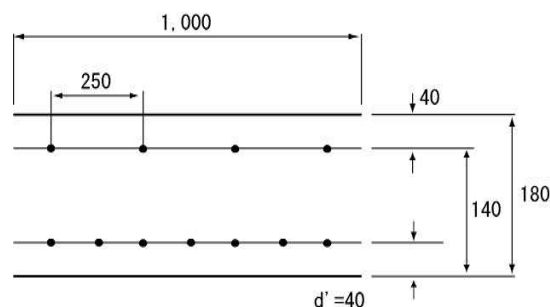


Fig.1 単位幅(1m)当たりの主鉄筋の配筋法

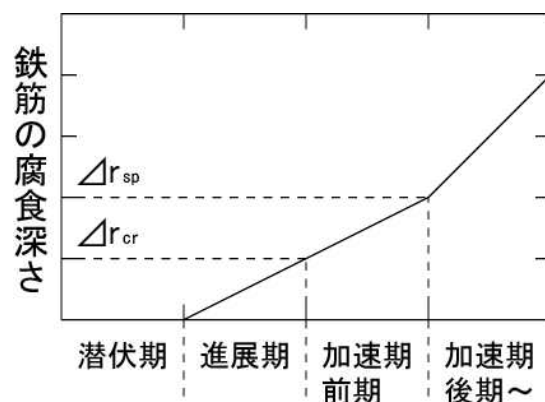


Fig.2 中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食過程

2-3. 強度の安全率と健全度の関係

例として、中性化による劣化について説明する。損傷度評価による中性化の健全度と、鳥取らが提案した鉄筋の腐食過程の関係を、Table.1 に示すように仮定した。特に、強度の安全率が1.0となる時を健全度が1となると仮定している。これより Fig.1 の RC 床版について、Fig.2 と Table.1 を参考に、強度評価による劣化曲線に健全度を併せて示すと Fig.3 となる。つまり、強度の安全率 1.05 で補修する場合、35 年経過時に、点検健全度 3 における補修が必要であることになる。

3. 強度評価を考慮したアセットマネジメント

3つの鋼橋の RC 床版を資産とした場合の、アセットマネジメントについて検討する。

3-1. 解析条件

以下の仮定および条件のもとで検討する。

- 1) LCC の試算期間は 100 年とする
- 2) 中性化のみが劣化要因
- 3) 3 橋とも経過年を 10 年とする
- 4) 床版の補修工法・単価は Table.2 を用いる
- 5) Table.2 に示す二つの補修案について検討する
- 6) 床版の構造形式を Table.4 に示す
- 7) 床版 A の床版厚は 140mm とし、昭和 39 年当時⁴⁾の示方書に則り設計した
- 8) 床版 B の床版厚は 160mm とし、昭和 53 年当時⁵⁾の示方書に則り設計した
- 9) 床版 A と B のそれぞれの設計曲げモーメントの算出は現在の示方書³⁾に則り算出した
- 10) 床版 A～C の初期の強度の安全率は異なる
- 11) 中性化の劣化曲線のパラメーターとなるかぶり・水セメント比・鉄筋径はそれぞれ異なる
- 12) 強度の安全率と経過年の関係は、Table.3 となる
- 13) 床版 A を更新する場合、強度の高い床版 C に取り替えると仮定し、その後床版 C の劣化曲線を辿る

3-2. 解析結果

解析結果を Table.5 に示す。

補修案 1 の場合は、強度の安全率 1.0 の段階で補修するが、床版 A は 72 年供用すると安全率が 1.0 を下回ることになる。ここでは強度の安全率を確保するため、床版 A は床版 C に更新すると仮定して費用を算出した。強度の安全率と経過年を見ると、3 つの床版とも強度の安全率 1.0 を保証していることがわかる。

補修案 2 の場合、すなわち強度の安全率 1.1 の段階で補修するが、床版 A はすでに安全率 1.1 を有していない。そのため、経過年 0 年で床版 C に更新することになる。また、床版 B は 70 年で安全率が 1.1 を下回ることになるが、ここでの工法は床版の主鉄筋の断面積を補修したことにはならないため、腐食したままである。よって、補修後も腐食深さは一定であるが、安全率は約 1.1 を保証して 100 年経過することになる。

以上、鋼橋の構成部材ごとに、設定した強度を保証するアセットマネジメントのシステムが可能であることを示した。

ここでは中性化を劣化要因とした RC 床版のアセットマネジメントを仮定して試算したが、床版に関しては塩害と疲労、さらに主桁に関しては腐食を考慮した強度評価による劣化曲線を用いることで、橋梁アセットマネジメントが可能となる。

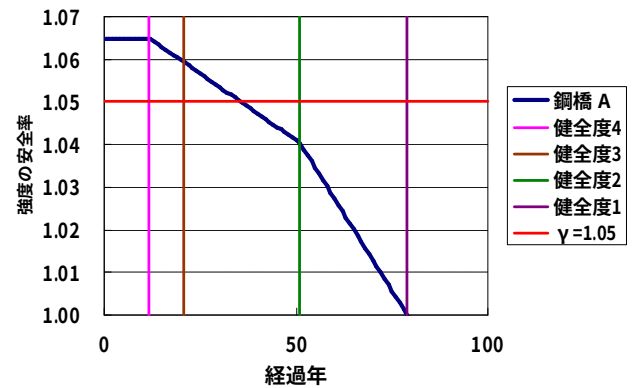


Fig.3 強度の安全率と経過年の関係

Table.1 健全度評価と鉄筋の腐食過程の関係

健全度	損傷状態	鉄筋の腐食過程
5～4	・外観上の変状が見られない	・潜伏期 鉄筋は腐食減肉しない
4～3	・腐食ひび割れが発生	・進展期 鉄筋の腐食速度： 3×10^{-3} mm/年
3～2	・腐食ひび割れが発生 ・錆汁が見られる ・部分的な剥離、剥落が見られる	・加速期前期 鉄筋の腐食速度： 3×10^{-3} mm/年
2～1	・腐食ひび割れが多数発生 ・ひび割れ幅が大きい ・錆汁が見られる ・連続的に剥離、剥落が見られる	・加速期後期 鉄筋の腐食速度： 7×10^{-3} mm/年
1以降	・腐食ひび割れが多数発生 ・ひび割れ幅が大きい ・錆汁が見られる ・連続的に剥離、剥落が見られる ・鋼材の断面欠損が著しい	強度評価による劣化曲線の安全率 γ が 1.0 にまで低下すると、「健全度 1」であると評価する

Table.2 強度評価による補修計画案

補修案	補修期間	補修工法	補修単価
1	強度の安全率 1.0	床版 A 更新	75.0 千円/m ²
		床版 B 更新	75.0 千円/m ²
		床版 C 更新	75.0 千円/m ²
2	強度の安全率 1.1	床版 A 更新	75.0 千円/m ²
		床版 B かぶりコンクリートの補修	45.0 千円/m ²
		床版 C かぶりコンクリートの補修	45.0 千円/m ²

Table.3 強度評価による安全率と経過年の関係

安全率	1.0	1.1
床版 A	72 年	強度を保証していない
床版 B	169 年	80 年
床版 C	171 年	107 年

4. 損傷度評価を用いた場合の安全性の検証

損傷度評価による劣化曲線を用いた場合のアセットマネジメントが、構造物の安全性を保証するかどうかを検討する。ここでは、3つの鋼橋のRC床版を資産とした場合として検討する。

4-1. 解析条件

以下の仮定のもとで検討する。

- 1) LCCの試算期間は100年とする
- 2) 中性化のみが劣化要因
- 3) 床版の構造形式をTable.4に示す
- 4) 3橋とも経過年を10年とする
- 5) Table.6に示す補修案について検討する
- 6) 床版の補修工法・単価はTable.6を用いる
- 7) 床版A~Cの初期の強度の安全率は異なる
- 8) 中性化の劣化曲線のパラメーターとなるかぶり・水セメント比・鉄筋径はそれぞれ異なる
- 9) 健全度と経過年の関係はTable.7となる
- 10) 補修時期は損傷度評価によって求めた値を用いる
- 11) 各々の床版ごとに、強度評価による劣化曲線に従って強度が低下する

4-2. 解析結果

解析結果をTable.8に示す。

補修案1は、損傷度評価による健全度が1となる場合に補修することになる。ここでは供用年数が102年経過すると、3橋とも外観の健全度が1になると考える。しかし、強度の安全率と経過年の関係を見ると、鋼橋Aは経過年が62年以降に安全率が1.0を下回る状態である。すなわち、設計曲げ耐力を満足していない橋梁を使用し続けることになるので、落橋といった事故の発生する可能性もある。同様に、補修案2・3についても、設計曲げ耐力を満足していない橋梁を使用し続けることになる可能性がある。

したがって、現在の損傷度評価による劣化曲線を用いて維持管理を行う場合は、強度の安全率1.0を下回る橋梁を供用し続ける可能性がある。

一方、維持管理費は、事後保全よりも予防保全で維持管理を行う場合のほうが費用を抑えることができることがわかる。

5. まとめ

本研究では、3つの床版を例に挙げ、強度の劣化曲線を用いてアセットマネジメントを試みた。得られた結論を以下に示す。

- 1) 鋼橋を構成する部材ごとに、強度を保証するアセットマネジメントのシステムを提案した。
- 2) 強度の安全率の視点から見ると、損傷度評価による劣化曲線を用いた場合のアセットマネジメントは、必ずしも強度を保証することにはならない可能性があることを示した。
- 3) 橋梁ごとに強度を保証したアセットマネジメントが、これからの維持管理に必要であることを示した。

Table.4 床版の構造形式

床版の種類		単位	床版 A	床版 B	鋼橋 C
経過年		年	10	10	10
橋格			B活荷重	B活荷重	B活荷重
構造形式			道路橋合成桁	道路橋合成桁	道路橋合成桁
支間		m	37.2	25.5	38
幅員		m	7	11	7
床版の支間		m	2	2.2	3
床版厚	h	mm	140	160	220
圧縮縁から主鉄筋までの距離	d	mm	110	120	180
かぶり	d'	mm	30	40	40
水セメント比	W/ C		0.6	0.55	0.5
鉄筋径	φ	mm	16	19	19
引張鉄筋量	A _s	mm ²	2292	2292	2292
圧縮鉄筋量	A _s '	mm ²	2001	1146	1146
コンクリートの品質	σ _{ck}	[kN/mm ²]	24	24	24
保有モーメント	M _u	[kN・m]	28.41	31.14	48.75
設計モーメント	M _d	[kN・m]	26.71	26.91	41.94
強度の安全率	γ		1.06	1.16	1.16

Table.6 損傷度評価による補修計画案

補修案	補修期間	補修工法	補修単価
1	健全度1	更新	75.0千円/m ²
2	健全度2	かぶりコンクリートの補修	45.0千円/m ²
3	健全度3	かぶりコンクリートの補修	37.0千円/m ²

Table.7 損傷度評価による健全度と経過年の関係

健全度	5	4	3	2	1
床版A~C	0年	15年	71年	93年	102年

謝辞

本研究の試算を進めるに当たり、広島県の正田氏には広島県の橋梁データと橋梁図面をご提供頂き、加えて惜しまぬご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 広島県土木部：第4回広島県橋梁維持管理検討委員会資料，2007.
- 2) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.35-46，2004
- 3) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編，2002.
- 4) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋設計示方書，1964.
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ 共通編Ⅱ 鋼橋編，1978.

Table.5 強度評価による解析結果

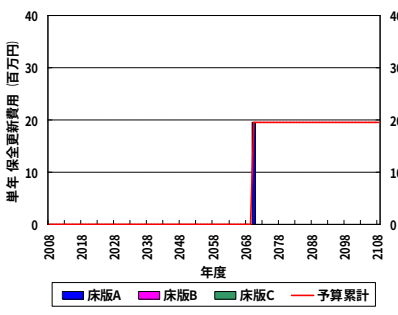
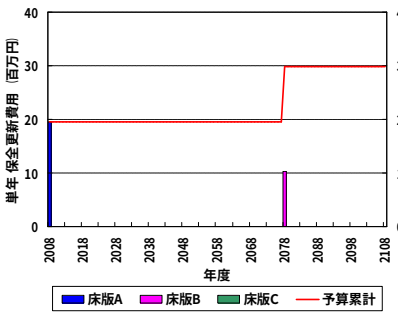
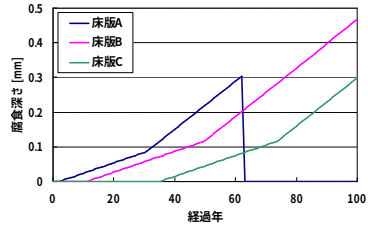
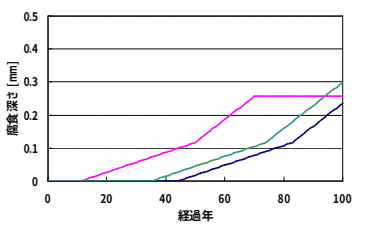
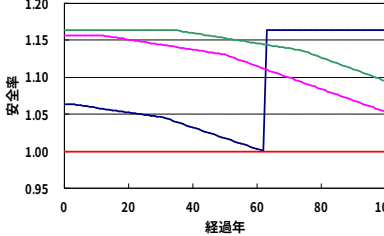
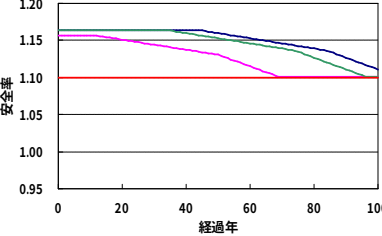
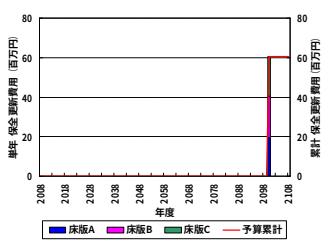
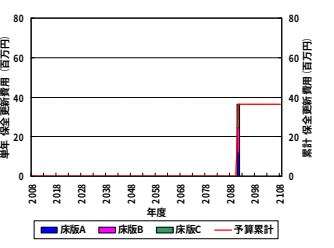
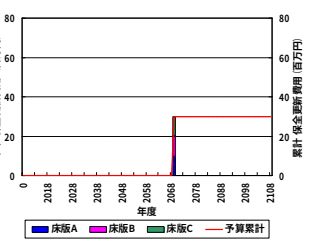
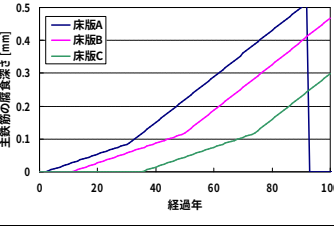
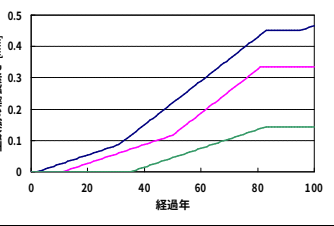
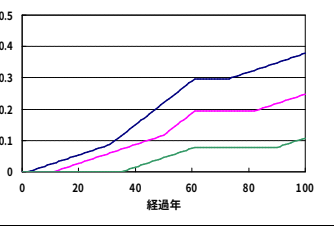
シナリオ	補修案 1	補修案 2
	強度の安全率 1.0 の段階で補修	強度の安全率 1.1 の段階で補修
強度評価による 保全更新費用		
維持管理費	20 百万円	30 百万円
主鉄筋の 腐食深さと 経過年の関係		
強度の安全率 と 経過年の関係		

Table.8 損傷度評価による解析結果

シナリオ	補修案 1	補修案 2	補修案 3
	損傷度評価による健全度 1 の段階で補修	損傷度評価による健全度 2 の段階で補修	損傷度評価による健全度 3 の段階で補修
損傷度評価による 保全更新費用			
維持管理費	61 百万円	36 百万円	30 百万円
主鉄筋の 腐食深さと 経過年の関係			
強度の安全率 と 経過年の関係	