

平成 24 年 9 月修了

博士（工学）学位論文

劣化のばらつきを有する構造物の将来予測と補修シナリオ

Prediction Concept And Maintenance Scenario For
Infrastructures Having Variation In Deterioration

平成 24 年 8 月 22 日

高知工科大学 工学研究科 基盤工学専攻

学籍番号 1 1 3 8 0 0 2

工藤 徹郎

Tetsuro KUDO

劣化のばらつきを有する構造物の将来予測と補修シナリオ

Prediction Concept And Maintenance Scenario For Infrastructures Having Variation In Deterioration

目 次

1 章 序論

1.1	研究背景	1
1.2	既往研究の概要	2
1.3	研究目的	4

2 章 BMS の概要

2.1	BMS 開発経緯	5
2.2	BMS の構成	5
2.3	各モデルの概要	6

3 章 ばらつきを考慮した劣化予測モデルと点検結果による補正

3.1	劣化がばらつく原因	13
3.2	劣化予測モデルにおけるばらつきの考慮方法	13
3.3	点検結果による補正方法	16

4 章 点検結果の誤差の考慮方法

4.1	概要	19
4.2	測定誤差の考慮	19
4.3	時間的な誤差の考慮	20
4.4	具体的な考慮の方法	21

5 章 ばらつきを考慮した補修シナリオ

5.1	概要	25
5.2	ばらつきを考慮した補修タイミング	25
5.3	ばらつきを考慮した補修範囲	26
5.4	補修シナリオ設定方法	27
5.5	補修数量および補修費用の算出	29

6 章 実橋における解析と検証

6.1	概要	33
6.2	初期解析条件	33
6.3	高知県における点検システム概要	35
6.4	点検結果における測定誤差の補正	37
6.5	初期解析における任意倍数の設定	45
6.6	点検結果を用いた劣化予測の補正	51
6.7	ばらつきを考慮した補修シナリオ	72

7章 戦略的な点検方法の提案

7.1 概要	83
7.2 劣化予測と補修シナリオ作成機能の活用	83
7.3 劣化予測と補修シナリオの精度を向上させる調査の提案	85

8章 総括

8.1 結論	87
8.2 今後の課題	88

1 章 序論

1.1 研究背景

我が国では、高度経済成長期に建設された道路・橋梁等のインフラ構造物が多く、これらの構造物は更新の時期を迎えている。建設投資額は年々減少する傾向にあるが、今後必要となる維持管理費、更新費は、急速に増加していくことが想定されており、今後も厳しい財政状況が続けば、真に必要な社会資本整備だけではなく、既存施設の維持管理、更新にも支障を来すおそれが指摘されている。同時に、高齢化した施設の割合が増大していくと、重大な事故や致命的な損傷等が発生するリスクが飛躍的に高まることが予想されている^{1.1)}。

このため、従来、損傷等が発生した後に対処するという「事後的管理」から、事前に点検し、異常が確認または予測された場合、致命的欠陥が発現する前に速やかに措置するという「予防保全的管理」へと転換し、戦略的に維持管理を実施することで、国民の生命と財産を守り安全・安心を確保するとともに、施設の寿命を伸ばすことでライフサイクルコスト（以下 LCC）の低減を図ることが求められる。

橋梁の戦略的な維持管理手法としては、ブリッジマネジメントシステム（以下 BMS）に注目が集まっており、BMS の精度向上のための研究が進められている。BMS の精度を向上させるためには LCC 算出の精度を向上する必要がある、そのためには劣化予測の精度向上が欠かせない。劣化予測モデルは、物理モデルと点検データの判別結果を基に、その劣化を統計的に予測するモデル（代表的なものにマルコフ連鎖モデル）^{1.2)}があり、統計的に予測するモデルが主流となっている（以下統計モデルと呼ぶ）。統計モデルは劣化過程を単純なモデルで表現できる利点があるが、下記の問題点が指摘されている。

- 1) 橋梁の維持管理は予防保全を行うことで LCC が小さくなることが一般的に知られているが、その根拠となりにくい。
- 2) 外部環境の変化（環境の変化、技術の変化）等への対応が困難である。
- 3) 技術の進歩に伴う予測精度の向上が見込めない。

一方、物理化学モデルは、統計モデルと比較して計算が煩雑となるデメリットはあるものの、下記のメリットが挙げられる。

- 1) 劣化の予測を明確に説明できる。
- 2) 様々な補修工法やその組み合わせを考慮することができる。
- 3) 予防保全の論理的根拠を明確に説明できる。
- 4) 環境や技術の外部環境をモデルに組み込むことができる。

以上から、将来の技術進歩により、劣化予測の精度向上が見込める物理モデルが今後主流になると考えられる。ただし、物理モデルによる劣化予測は材料や環境条件にばらつきがあるため、現実の劣化と大きく異なる予測結果となることがある。よって、劣化予測の精度向上には、ばらつきを考慮する必要がある。また、実橋の劣化のばらつきは点検により知ることができるため、解析による劣化のばらつきは点検結果による確認や補正を行うことで精度向上が見込める。本論文では劣化予測にばらつきを導入する方法および点検結果による補正方法を提案する。なお、現在、構造物の劣化において

は、コンクリート構造物に対する塩害劣化が注目されており、精度の良い劣化予測ができていない状況にある。よって、本論文では塩害を受けるコンクリート構造物に着目する。

1.2 既往研究の概要

1.2.1 劣化予測モデル

1) BMS に対する劣化予測の位置づけ

BMS の活用目的は効率的な維持管理を行い、橋梁群の補修等からなる維持・修繕費用を最小化することにある。橋梁群の補修費用を算出するためには、劣化予測によって補修工法と補修タイミングを設定する必要があり、劣化予測の精度が最適な補修工法の選定や補修回数に大きな影響を与える。よって、精度の良い橋梁群の維持・修繕費用を算出するためには劣化予測の精度を上げる必要がある。物理モデルは、表-1.1^{1,3)}に示す劣化の状態毎に様々な予測モデルが提案されている。

表-1.1 構造物の外観上のグレードと劣化の状態

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ-1(潜伏期)	外観上の変化が見られない，腐食発生限界塩化物イオン濃度以下
状態Ⅰ-2(進展期)	外観上の変化が見られない，腐食発生限界塩化物イオン濃度以上，腐食が開始
状態Ⅱ-1(加速期前期)	腐食ひび割れが発生，錆汁が見られる
状態Ⅱ-2(加速期後期)	腐食ひび割れが多数発生，錆汁が見られる，部分的なはく離・はく落が見られる，腐食量の増大
状態Ⅲ(劣化期)	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，はく離・剥落が見られる，変位・たわみが大きい

例えば、潜伏期の挙動で良く使われる塩化物イオン浸透過程の予測では式(1.1)に示す Fick の第 2 法則（拡散方程式）などがある。

$$C(x,t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] + C(x,0) \quad (1.1)$$

2) 劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測システム

一方、劣化予測のモデルは多数提案されているが、時間と腐食量の関係は確定的なモデルがほとんどである。しかし、図-1.1 に示す様に、実橋の劣化は実際の橋梁が受ける飛来塩分や温度等の環境条件は同じ橋梁でも場所によって大きなばらつきがあり、材料条件についても施工誤差等に起因するばらつきがあるため、劣化は場所によってばらつく。この場所によってばらつく劣化を 1 本の劣化速度で予測しても、その結果が実橋と整合しないことは明白である。

ばらつきを考慮した劣化予測としては岡村ら^{1,4)}が、劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測とそれによる全国規模の橋梁群に対する劣化予測例を示した。具体的には我が国の既存の RC 橋梁約

1000 桁に対する 2030 年までの劣化予測を塩害劣化に対して行った。劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測としては松島^{1.5)} や Thoft-Christensen^{1.6)}の研究があるが、岡村らは個別橋梁の劣化予測ではなく数百といった橋梁群の劣化予測に対して劣化要因のばらつきを考慮することで国や自治体といった維持管理組織に必要な劣化予測の精度向上方法を提案した。図 1.2 に岡村らの提案した橋梁群に対する劣化予測の手順と概要を示す。

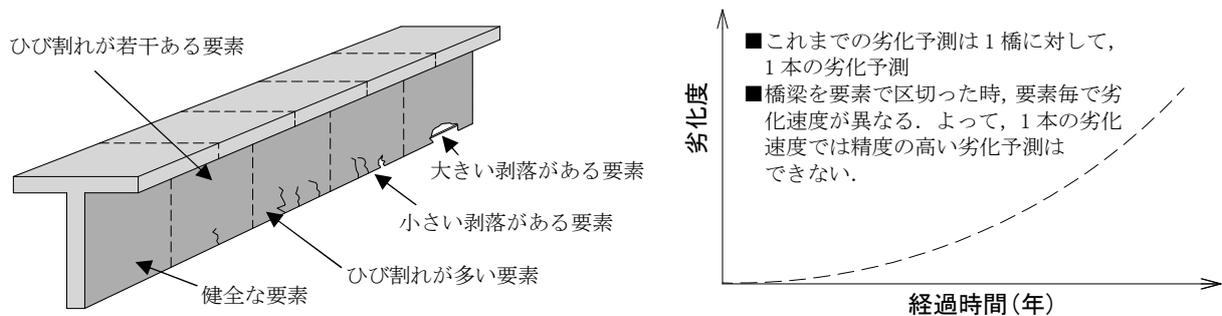


図-1.1 劣化速度が 1 本しかない劣化予測の課題

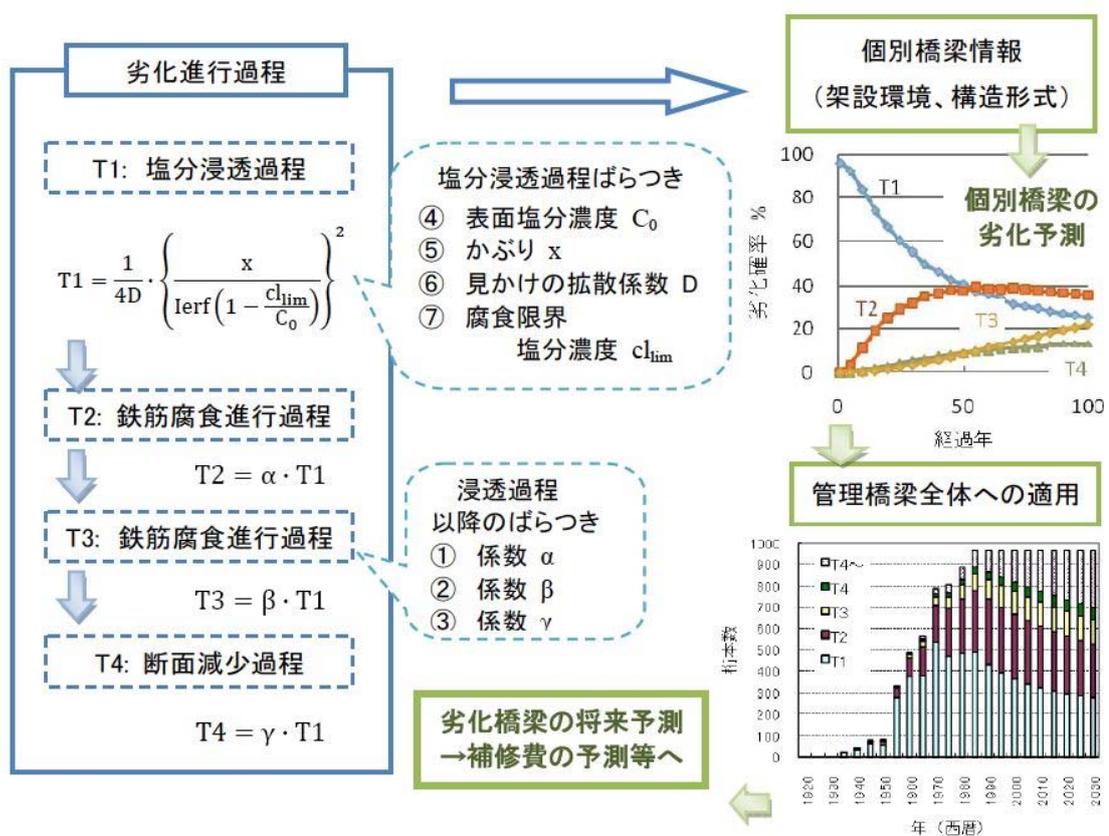


図-1.2 劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測手順と概要

1.2.1 補修シナリオおよび補修費用の算出

これまで、様々な劣化予測モデルを用いた最適な補修タイミングや補修工法の推定（以下補修シナリオ）および補修費用の算出方法が提案されている。しかし、劣化予測と同様に劣化のばらつきを考慮していない補修シナリオは、実構造物の補修シナリオと合わないため、精度の良い補修費用の算出はできない。また、ばらつきを考慮した補修シナリオの作成については伊庭・松島らの研究¹⁷⁾がある。伊庭・松島らは塩害を受けるコンクリート構造物のLCC計算方法として、確率論的手法により、実構造物の持つ不確定性を考慮した劣化予測を用いて期待費用最小の法則を用いてコスト計算のためのフローを提示している。

補修シナリオおよび補修費用の算出について伊庭・松島らの研究では、確率論的手法で劣化予測を実施しているため、補修が必要と判断される確率を対象とする部材の表面積全体に対する表面積の比率と解釈し、「劣化顕在化率」と表現した上で、「劣化顕在化率」が所定の率に達した時に全部材を断面修復するものとして補修費用を算出している。

1.3 研究目的

目標とするBMSは下記の通りである。

1)現場技術者の感覚に馴染むBMSを構築する。

個々の橋梁の健全度管理を行う現場技術者と、橋梁群全体の予算管理者の双方にとって実用的な物理劣化モデルおよび修繕計画を構築する。

3)持続的な精度向上によるシステムメンテナンスシステムの確立

物理劣化モデル、環境モデル等のデータ蓄積に基づく精度向上を組み込んだシステム設計を行う。

4)外部環境の変化に対応するシステムメンテナンス方法

自然環境、技術環境等、社会環境、経済環境、の変化に対応して、BMSの経営目標、予算の配分方式などのシステム変更を行うことで、市民のニーズに応える行政経営システムを構築する。

目標とするBMSを構築するための課題のひとつとして、以上で述べたBMSの精度向上が必要であり、そのためには劣化予測の精度向上が必要となる。実構造物は劣化がばらつくため、劣化予測もばらつきを考慮できるシステムとする必要があり、既往の研究においてもばらつきを考慮した劣化予測が行われているが、実構造物の劣化のばらつきとの整合の度合い（精度）は不明である。よって、実構造物の劣化のばらつきと劣化予測のばらつきを整合させることが劣化予測の精度向上に繋がると考えられる。また、実構造物の劣化分布を知るための情報としては点検結果がある。よって、本研究は点検結果を用いて劣化予測の劣化分布を補正する方法を提案し、精度が向上することを検証する。なお、点検結果においても測定誤差や判断ミスおよび、いつその劣化状態になったかの時間的な誤差が生じるため、これらの点検結果に対する誤差についても考慮する。

また、実構造物の補修のタイミングや補修工法および補修費用は、面的に劣化がばらつくため、場所や部材によって補修タイミングや工法が異なる。また、補修範囲も様々であり、これまでのBMSでは補修タイミング、工法の範囲を考慮できなかった。よって、本研究では範囲毎に補修タイミング、補修工法を予測する手法を提案するとともに、これらの予測に基づいた定量的な補修費用の算出を提案する。以上の補修シナリオに基づいたLCCを低減するための戦略的な維持管理手法を提案する。

2章 BMS の概要

2.1 BMS 開発経緯

1章で述べた目標とする BMS を開発するため、2009 年から高知工科大学において研究に着手している。BMS の特徴は表-2.1 に示す様に、「膨大なシナリオ作成機能」「飛来塩分量予測システム」「物理化学劣化モデル」「各種補修工法による再劣化モデル」「複数橋梁を対象とした予算制約機能」の 5 つの基本機能を装備している。

表-2.1 高知工科大学 BMS の特徴

高知工科大学 BMS の特徴	概 要
膨大なシナリオ作成機能	補修タイミング、補修工法（単独・組み合わせ）により、橋梁のたどる将来（シナリオ）が異なるが、考えられる全てのシナリオを自動作成する機能を搭載
飛来塩分量予測システム	GIS（橋梁の位置）、気象・波浪データから時系列の飛来塩分量を予測できるシステムを搭載
物理化学的劣化モデル	環境（塩分量、水分、pH）の変化、電気防食の効果や補修効果を考慮できる電気化学腐食モデルを採用。
各種補修工法による再劣化モデル	表面被覆、電気防食、断面修復等の補修工法適用後の再劣化を表現できるモデルを採用。
複数橋梁を対象とした予算制約機能	予算制約の中で最適な補修順序を自動で設定できる機能を搭載

2.2 BMS の構成

本研究で開発する BMS の構成を図-2.1 に示す。BMS の特徴で述べた 5 つの基本機能は外部環境の影響を受け、実用性の高い BMS とするためには、外部環境の変化に対応できるシステムとする必要がある。外部環境の変化には、経済環境や社会環境の変化、技術環境の変化(新技術の開発などの技術革新)および平均気温、風雨などの自然環境の変化があり、これらの外部環境の変化は BMS の各メインモデルの入力条件に影響を与える。入力条件としては予算制約や構造物をどのように管理するか管理基準、補修工法と補修効果、劣化予測に大きな影響を与える飛来塩分量、かぶりや水セメント比などの材料や橋梁諸元がある。経済環境や社会環境の変化は国や自治体などの予算制約と管理基準に影響を与え、技術環境の変化は補修工法や補修効果に影響を与える。飛来塩分量予測モデルは気象データや地形データを入力条件とするサブモデルであるが、自然環境の変化は気象データや地形データなどに影響を与える。

これらの外部環境の変化に対応できるシステムとするためには、汎用性の高いモデルを採用する必要がある。例えば新技術の開発により、補修工法が変わる場合、その補修工法の再劣化モデルを従来の補修工法の再劣化モデルと入れ替えるだけで、システム全体のバランスを維持したまま、外部環境

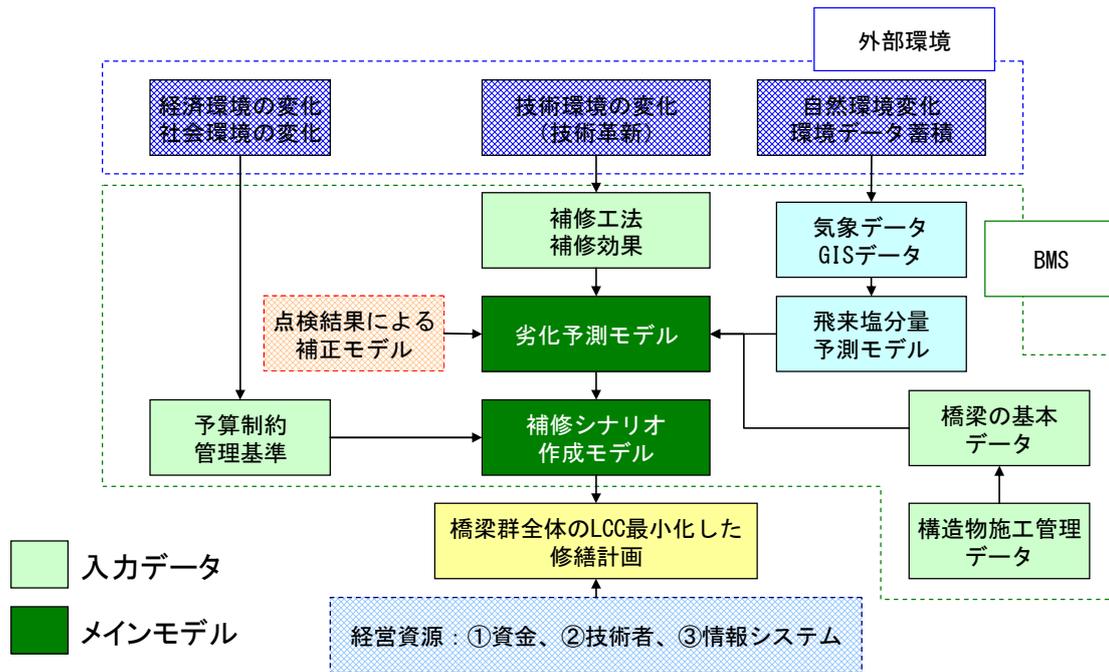


図-2.1 BMSの構成

の変化に対応できるようなシステムを汎用性の高いシステムとする。

また、メインモデルである劣化予測モデルに対しては、劣化予測の精度を向上させるために点検結果による補正モデルを反映させている。補修シナリオ作成モデルは、予算制約を入力条件として、膨大なシナリオの中からLCCを最小化する修繕計画を導き出すシステムとしている。

2.3 各モデルの概要

2.3.1 飛来塩分量算出モデル

飛来塩分量算出モデルは小窪・岡村らが提案^{2.1)}している予測モデルを採用する。飛来塩分量の予測モデルの概要としては、陸上構造物に到達する塩化物イオンは「海水飛沫」として海洋より発生し輸送されるものとし、「波力による発生量」「輸送過程は飛沫粒径に左右」「海岸の地形状況が飛沫径分布や発生状況に大きく影響」の3つに着目している。

なお、海岸で発生した陸上構造物へ有意となる飛沫を大粒径飛沫、海上から発生する飛沫を小径飛沫とし、大粒径飛沫の輸送過程のモデルを提案している。

大粒径飛沫の総個数は波高の関数としており、風により輸送される。また、海岸の地形状況を堤防、岩礁などの入射波に対する障害物が存在する海岸として「波浪障害海岸」と砂浜など障害物の存在しない海岸として「海浜」の2分類を提案し、障害物がある場合とない場合で破碎の形態が異なることによる発生飛沫個数や飛沫粒径、鉛直分布高の違いを考慮している。

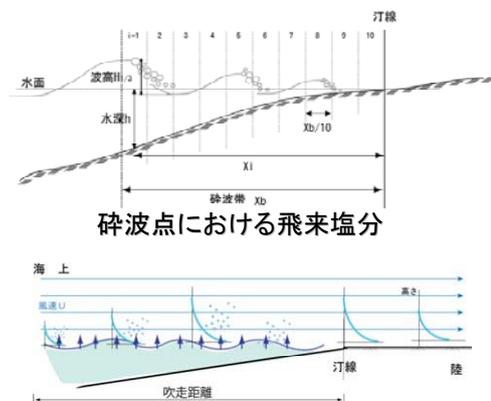


図-2.2 飛来塩分予測モデル概要

2.3.2 劣化予測モデル

1) 塩化物イオン付着モデルおよび塩分浸透モデル

コンクリート内部へ浸透する塩分は移動モデルの境界条件として与える。境界条件の設定方法は図-2.3 に示す様に 2 つを考える。

ディレクトリ条件は表面の塩分濃度(C_0)として与える方法であり、外部から表面への塩分供給が不足しない場合では妥当な条件となるが、外部から入ってくる量と内部へ浸透する量の物質保存関係は確保できない。

ノイマン条件は表面での塩分流束として与える方法であり、コンクリート内部へ進入する表面での塩分の流束を直接与える方法である。進入流束が変動する様な飛来塩分の場合は物質保存関係に配慮する必要がある。

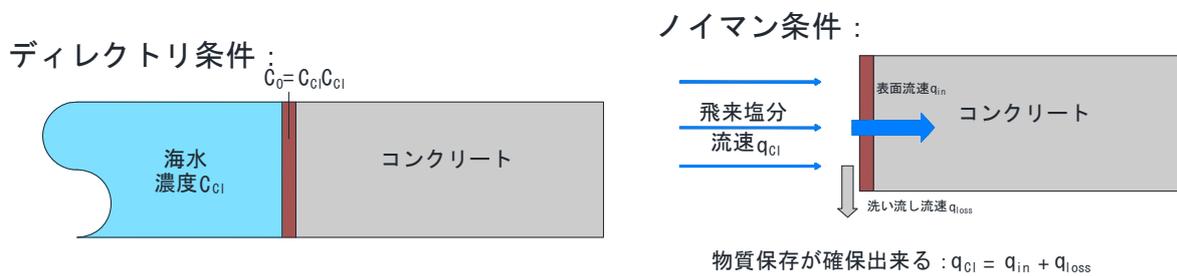


図-2.3 塩化物イオン付着モデル概要

なお、塩化物イオンと水分の移動モデルは式(2.1)に示す 1 次元の物質移動方程式を用いるものと、要素の長さ、拡散係数が一様でないことを考慮するため、Shortley-Weller 近似法を用いる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{Cl} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.1)$$

2) 塩化物イオン付着モデルおよび塩分浸透モデル

再劣化モデルにおける電気防食等の補修効果をモデル化するため、電気化学腐食モデルを用いる。図-2.4、図-2.5 に示す様に、アノード反応とカソード反応が同じ電流となる時を腐食電流と言う。腐食電流が大きいほど腐食速度(Faraday 法則)が早くなる。塩分濃度の変化によって Anode process の勾配が変化するモデルを用いる。同じ環境において、塩分濃度が高い方が腐食電流が増加し、腐食速度が大きくなる。

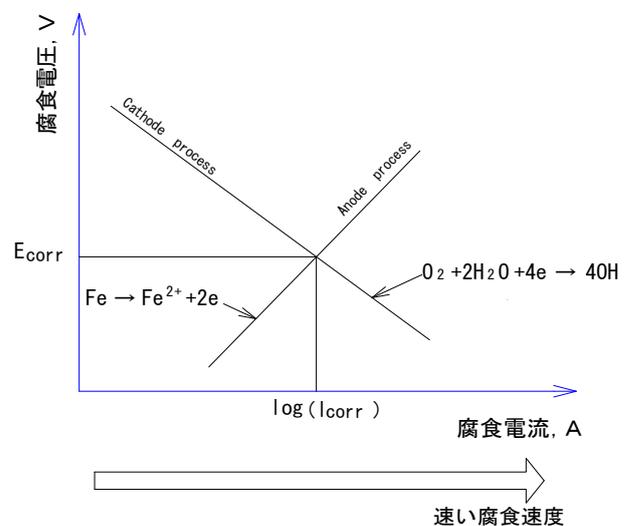


図-2.4 腐食電流モデル

$$R_{corr} = \varphi S \frac{M_{Fe} \cdot i_{corr}}{z_{Fe} F} \quad (2.2)$$

3) ひび割れモデル

ひび割れモデルは、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析により、かぶり、鉄筋径、コンクリート強度の各種要因を考慮した鉄筋腐食によるひび割れ幅と鉄筋腐食量の算定式を提案した Lukuan Q、関らのモデル^{2.2)}を採用する。Lukuan Q、関らはコンクリートの引張軟化特性を考慮した分布ひび割れモデルによる解析から得られたひび割れ発生状況より、ひび割れ発生位置・ひび割れ本数の解析を行うことを可能にした。この解析結果から得られたひび割れ発生モードは実験結果で妥当性を証明している。また、分布ひび割れモデルで判断した結果に基づいて定めたひび割れ発生位置及び本数を離散ひび割れモデルで発生するひび割れと仮定することにより、ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係を求めている。かぶり、鉄筋直径、コンクリート圧縮強度の各種要因を考慮した算定式を式(2.3)に示す。

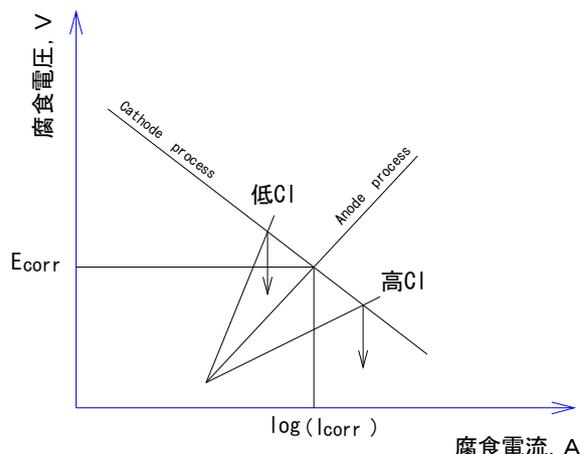


図-2.5 塩分濃度と腐食電流

$$W = (Ra \cdot \frac{\pi(\rho - 1)}{\gamma} - \alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \{ .22 + \varphi \}^2 + \varphi^2}{E(c + \varphi)} \cdot f_c^{2/3}) / (\alpha_1 \beta_1 \frac{(c + \varphi)}{(5c + 3\varphi\varphi)}) \quad (2.3)$$

4) コンクリート剥落モデル

腐食ひび割れ発生からコンクリートの剥離・剥落が生じるまでのモデルとして、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必ずしも明確ではないが、鳥取・宮川^{2.3)}らはひび割れを有する鉄筋コンクリート供試体を新潟県塩沢町に約 40 年間暴露した結果^{2.4), 2.5)}および柘田ら^{2.6)}実験結果を参考にして、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さを式(2.4)に設定した。図-2.6 には、この鉄筋腐食深さ $\Delta \gamma_{sp}$ を示してある。

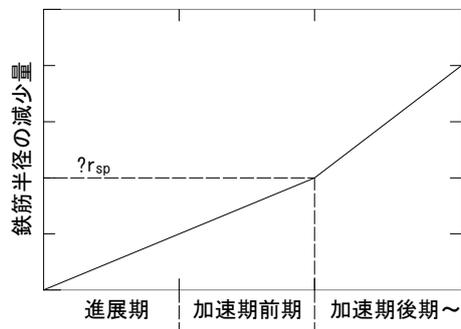


図-2.6 鉄筋の腐食過程

$$\Delta \gamma_{sp} = 56(c/\varphi) \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (2.4)$$

2.3.2 補修シナリオ作成モデル

1) 再劣化予測、補修工法と補修効果及び組み合わせ

補修工法と再劣化モデルは、表-2.2に示す様に、一般的な実務で用いられている工法を参考に設定した。また、これらの補修工法は、これまでの研究^{2.5)}により補修効果と再劣化の過程が明確になってきている。また、実務上の実績から補修工法について下記の組み合わせは考慮しないこととした。

- 1)電気化学的脱塩と電気防食の組み合わせは考慮しない。
- 2)表面含浸と表面被覆の組み合わせは考慮しない。

また、補修工法について単独で実施する場合と組み合わせで実施する場合を表-2.3に整理する。表

-2.3に示す様に、本研究で考慮する補修工法は単体で実施する場合と組み合わせを踏まえ23種類を考慮する。また、今後新技術・新工法が開発され再劣化のメカニズムが明確になれば追加も容易にできるシステムとしている。

表-2.2 補修工法と補修効果（再劣化モデル）および工事費

①	補修工法	工事費 円/m ²	補修効果と解析モデル
A	電気化学的脱塩	90,000	8週間でコンクリート内塩分量を40%除去
B	断面修復	65,000	腐食を初期化、拡散係数を修復材に設定
C	表面含浸	13,000	拡散係数等を保護材料に設定。補修効果は20年
D	電気防食	95,000	腐食電圧を下げる。補修効果は40年
E	表面被覆	10,000	Cと同様。保護材料に違い。補修効果は20年
F	ひび割れ注入	10,000	ひび割れ幅を0にする。
G	架替	400,000	架け替え
H	何もしない	0	無補修

表-2.3 補修工法単体と組み合わせ整理一覧表

j	①	j	①	j	①	j	①
0	H	7	G	14	B, C	21	B, C, D
1	A	8	D, E	15	A, B	22	D, E, F
2	B	9	C, D	16	A, F	23	C, D, F
3	C	10	B, D	17	C, F		
4	D	11	A, E	18	D, F		
5	E	12	A, C	19	E, F		
6	F	13	B, E	20	B, D, E		

※ iは補修工法識別記号(表-1参照)、jは組み合わせを考慮した補修番号

2) 補修タイミング

補修を実施するタイミングは次の4つのタイミングを考慮する。

- 劣化予測開始時であり、予防保全を実施することでLCC最小となる場合に実施する(LCC最小とならない場合は「何もしない(表-2.2参照)」を適用する)。
- 劣化状態に対応する許容管理レベルを橋梁毎に設定し、劣化が許容管理レベルを超える直前に補修を実施する。許容管理レベルと劣化状態の関係およびイメージを表-2.4、図-2.7に示す。
- 電気防食等の補修効果が持続する工法の補修効果を発揮している期間が終わる時とする。
- 管理レベルに達する直前よりも早いタイミングで補修を実施することで、LCCを最小化できる可能性があるため、任意の時間に補修を実施する場合も考慮する。ここで、任意の時間とは図-2.8に示す様に、許容管理レベルに達するまでの時間をaとした場合、a/n(図-2.8はn=2としている)のタイミングで補修する場合を考慮するためのものであり、nを任意に設定できる様にする事によって、許容管理レベルに達する前に補修した場合のシナリオを考慮できる。

なお、劣化状態に応じて適用できる補修工法も異なる。次頁の表-2.5に劣化状態に対応する補修工

法(単体・組み合わせ)を示す。ここで劣化状態の「0」とは劣化開始前であり、供用開始時にあたる。

表-2.4 許容管理レベルと劣化状態の関係

管理レベル	劣化状態	備考
レベル1	ひび割れ発生限界	点検の劣化区分「a」に該当
レベル2	ひび割れ幅0.2mm以下	点検の劣化区分「b」に該当
レベル3	ひび割れ幅0.3mm以下	点検の劣化区分「c」に該当
レベル4	剥落しているが鉄筋の腐食は軽微	点検の劣化区分「d」に該当
レベル5	剥落しており、著しく鉄筋が腐食	点検の劣化区分「e」に該当

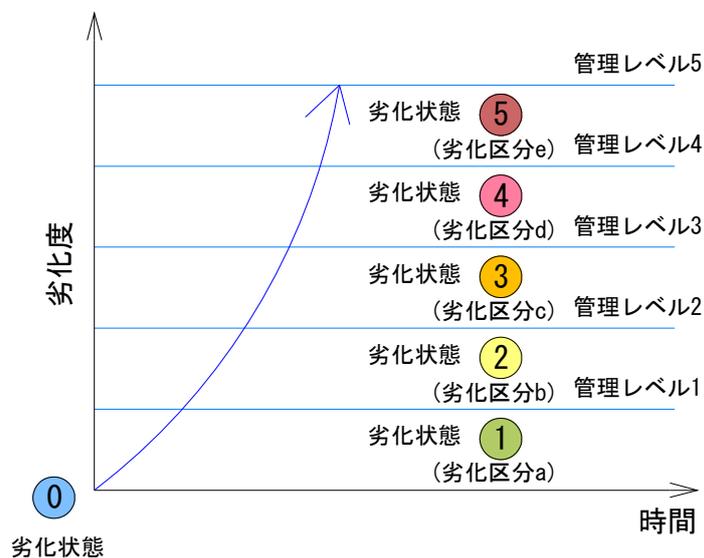


図-2.7 劣化度・管理レベル・劣化状態イメージ

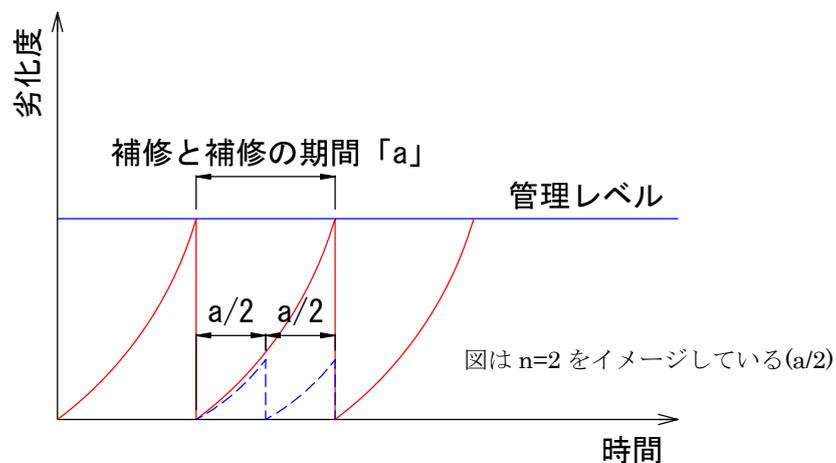


図-2.8 補修の期間を任意の時間で補修するイメージ

表-2.5 劣化状態に応じた補修工法の組み合わせ

劣化状態	組み合わせを考慮した補修番号	j
① } 劣化区分 a	3, 4, 5, 8, 9, 0	
②	1, 3, 4, 5, 8, 9, 11, 12	
③ 劣化区分 b	1, 3, 4, 5, 8, 9, 11, 12	
④ 劣化区分 c	1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 22, 23	
⑤ 劣化区分 d	2, 10, 13, 14, 15, 20, 21	
⑥ 劣化区分 e	2, 10, 13, 14, 15, 20, 21	

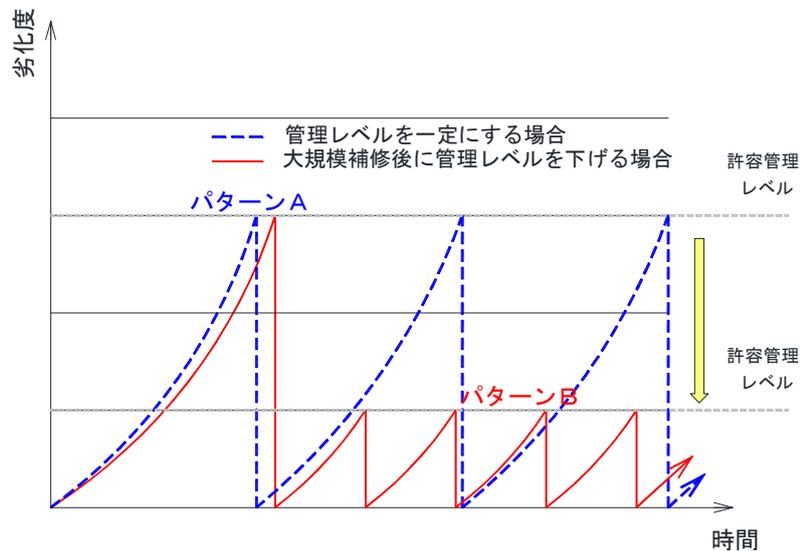


図-2.9 管理レベル一定のパターン A とレベルを下げるパターン B

劣化状態「1」とは許容管理レベル1になる直前の状態であり、塩化物イオンが浸透し、鉄筋の発錆限界を超え、鉄筋が腐食してひび割れが発生する直前までを示す。劣化状態「2」とは許容管理レベル2になる直前の状態であり、ひび割れ幅が0.2mm以下の状態を示す。劣化状態「3」は許容管理レベル3になる直前の状態であり、ひび割れ幅が0.3mm以下の状態を示す。劣化状態「4」は許容管理レベル4になる直前の状態でありコンクリートが剥落した状態（ただし、鉄筋の腐食は耐力に影響与えるほど進展していない軽微な状態）を示す。劣化状態「5」はコンクリートが剥落し鉄筋の腐食も著しい状態を示す。許容管理レベル5は橋梁の耐荷力限界とする。また、上記2)の劣化が管理レベルを超える直前に補修を実施する場合には、図-2.9に示す様に、管理レベルを一定にする場合(パターンA)と大規模補修後に管理レベルを下げる場合(パターンB)を考慮する。

3) 補修シナリオの考え方

補修シナリオは劣化予測が補修タイミングに達した時に、表-2.5に示す補修工法（単体・組み合わ

せ)を適用する。具体例を示すと、表-2.5に示す劣化状態「0」の時の組み合わせを考慮した補修番号(j)において、「3」は表-2.3から補修工法Cを指す。表-2.2より補修工法Cは表面含浸工法であることが分かる。ここで、劣化状態「0」の時の補修工法は予防保全を指す。この様に補修タイミング毎に複数の補修工法(単体・組み合わせ)を適用することから、補修工法の数だけシナリオが派生することとなる。派生したシナリオは補修タイミングに達するたびに派生し、数多くのシナリオが生じる。そのシナリオの全てのLCCを算出し、最も経済的なシナリオを選定する。

以上のシステムは既に完成していることから、以上の BMS の劣化予測および補修シナリオに対して「ばらつき」を考慮することによって、目標としている BMS の完成に大幅に近づくと考えられる。

2.3.3 複数橋梁を対象とした予算制約機能

複数橋梁の維持管理計画において、予算制約は大きな影響を与える。予算が十分にある場合は、許容管理レベル以下の劣化度で十分な維持管理が可能であるが、年度によっては予算が不足する場合も考えられる。その場合は1年過去又は1年未来で補修するシナリオを考慮する。図-2.10に示す様に、1年過去に実施することで、予算を満足する場合は許容管理レベル以下の劣化度で管理できるが、1年未来に先送りする場合は許容管理レベルを超えてしまう。よって、まずは1年過去を検索し、予算に余裕が無い場合は1年先送りするシナリオとする。なお、本論文では1橋に特化した研究を実施している。橋梁群に対する予算制約を考慮した補修シナリオ作成機能は今後の課題とする。

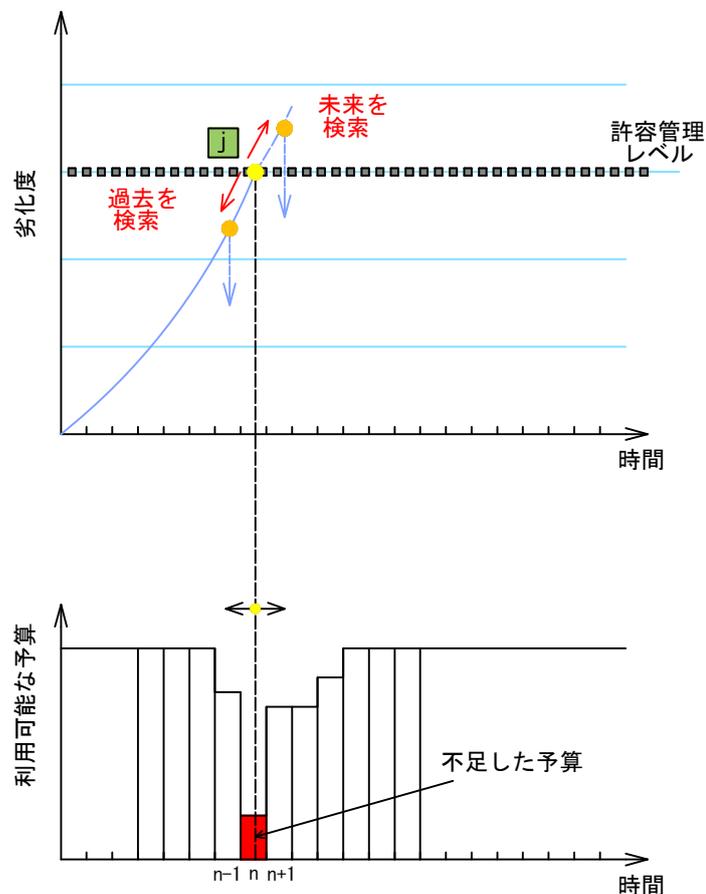


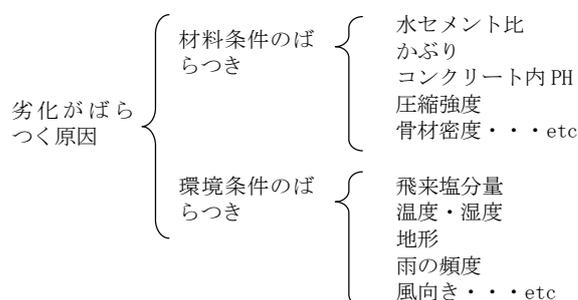
図-2.10 予算制約を考慮した補修計画イメージ

3章 ばらつきを考慮した劣化予測モデルと点検結果による補正

3.1 劣化がばらつく原因

劣化がばらつく原因は大きく2つあり、材料条件と環境条件のばらつきに分けられる。表-3.1に示す様に、材料条件のばらつきとは水セメント比やかぶりなど、設計値に対する施工誤差に起因すると考えられる。一方環境条件のばらつきとは飛来塩分量や温度湿度および雨を受ける頻度など橋梁の部材や場所により変化することに起因すると考えられる。

表-3.1 劣化がばらつく原因



3.2 劣化予測モデルにおけるばらつきの考慮方法

1) ばらつきの整理

より実用性のある劣化予測とするためには、上記で示した劣化のばらつきや、時間とともに変化する材料・環境条件の変化を考慮する必要がある。第1章で述べた様に実際には同じ橋梁であっても面的に劣化状態はばらつく。よって、劣化予測にこの様なばらつきを反映させるためには、「確定的な劣化予測にばらつきをもたせること」が必要となる。以下に劣化のばらつきを考慮する方法を示す。

2) 劣化のばらつきを考慮する方法

a) ばらつき考慮の着眼点

実橋の劣化がばらつくのは、温度、湿度、飛来塩分量のばらつきや材料のばらつきおよび部材の場所の違いによる風雨の受け方、橋梁周辺の地形の微妙な違いによる温度や湿度の違い等が原因である。これらの原因を個別に考慮するためには、橋梁毎にこれら原因の特性をつきとめる必要がある。さらに、現在の研究成果で考慮することができていない不確定な誤差要因も考えられるため、橋梁毎に材料条件や環境条件のばらつきの特性をつきとめても、劣化予測の精度を向上することは困難である。一方劣化速度は材料条件や環境条件などの入力条件によって、その速度に影響を受ける。以上から、飛来塩分量、温度、湿度、材料や周辺環境のばらつきを別個に考慮するよりも、それらを考慮した結果である「劣化速度」について、ばらつきを考慮する方がモデルを単純化できる。よって、劣化予測におけるばらつきは「劣化速度」にばらつきをもたせることで考慮する。

b) ばらつき分布の考慮方法と補正方針

実橋を点検すると、図-3.1 に示すような面的(要素毎)にばらついた劣化の状態が得られる。また、要素毎の劣化速度は図-3.2 に示す様なイメージとなる。ここで、図-3.2 の縦軸は累積腐食量(mg/m²)とあるが、腐食速度(mg/m²/時間)は時間とともに変化することを示す。また、「劣化度」は累積腐食量から求められ、累積腐食量を劣化度に変換したイメージも示している。図-3.2 は図-3.1 に示している各要素の劣化速度(累積腐食量および劣化度)を示しており、その要素の材料条件・環境条件によりばらつくことになる。なお、全部で 20 要素あることから、1 本あたり表面積の 5%の割合を表現していると言える。本研究では、この劣化予測 1 本あたりが表現している表面積の割合を「劣化表現率」と定義する。ただし、この指標では劣化している部位を具体的に示すことはできない。

従来の劣化予測による劣化速度は図-3.3 に示すように確定的であるため、劣化のばらつきを考慮することができない。そこで、下記に示すように、確定的に算出した劣化速度を 1 倍速として、任意の倍数にばらつかせる。

- 1)実橋の中で全く劣化しない箇所も存在する可能性があるため、一番遅い劣化速度としては、「0 倍速」とする。
- 2)最も早い劣化速度としては、確定的な劣化予測と実橋の劣化分布を比較し、実橋の最も劣化速度が速い要素と同じ劣化度となる倍速とする。

1-d	2-d	3-c	4-d	5-e
6-b	7-b	8-a	9-c	10-d
11-b	12-b	13-a	14-b	15-c
16-b	17-b	18-b	19-c	20-c

橋梁を 20 個の面要素に分割して点検を実施したイメージ

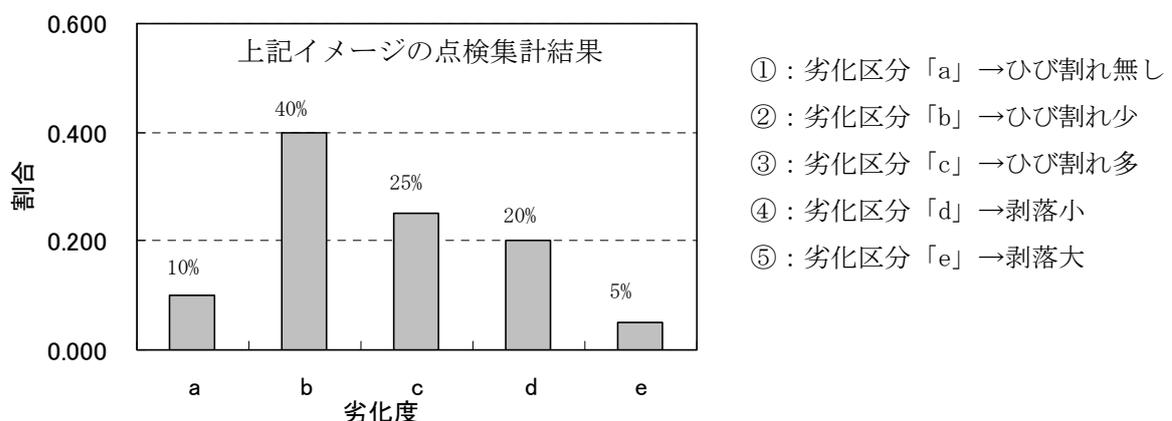


図-3.1 点検結果と集計結果のイメージ

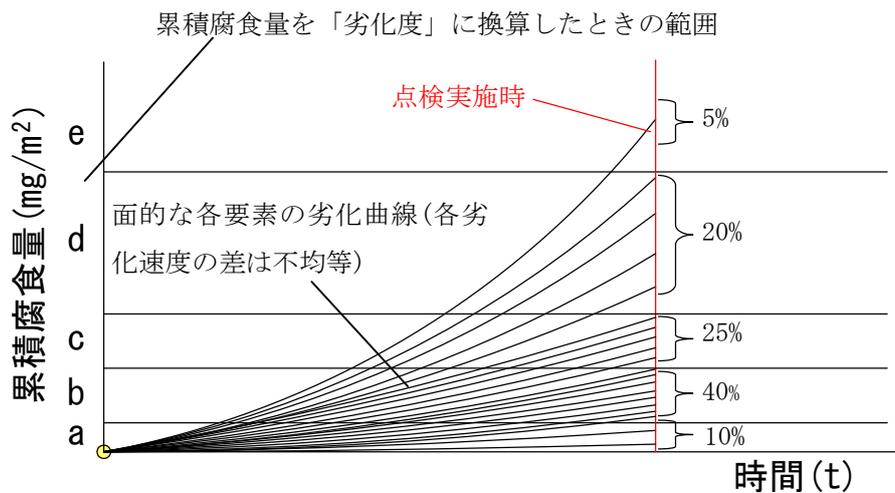


図-3.2 実橋における劣化度のばらつきのイメージ

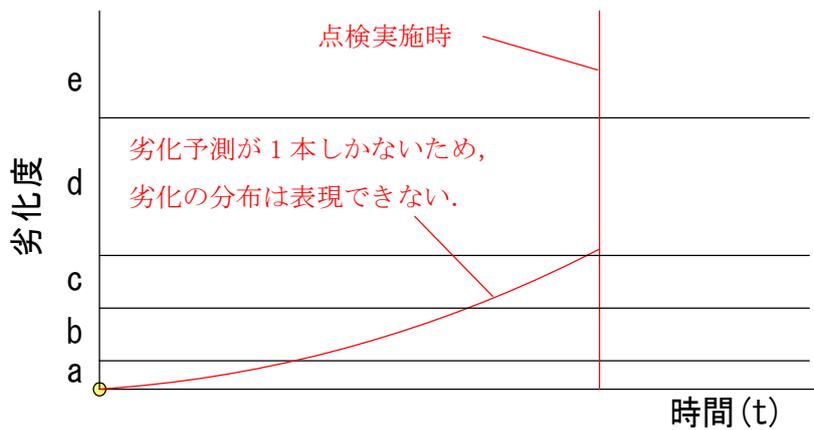


図-3.3 従来の劣化予測(1本の予測)

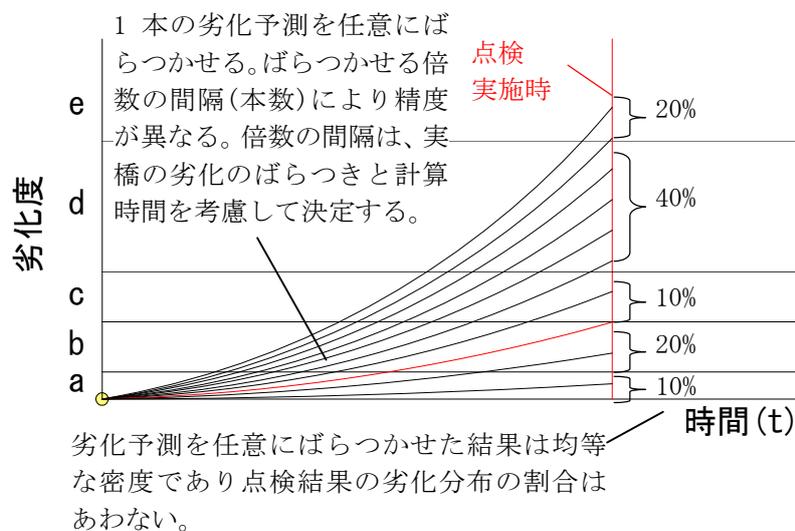


図-3.4 任意にばらつかせた劣化予測

3)倍数の間隔は、一番遅い劣化速度(0 倍速)と最も早い劣化速度の間で、実橋の劣化分布を十分にカバーできる間隔とする。ここで、実橋の劣化度分布は a~e の間でばらついているが、倍率の間隔を空けすぎると a と e の間である b、c または d となる劣化速度が存在しない状況になるケースもある。「十分にカバーできる範囲」とは、全ての劣化度を表現できるという意味である。図-3.4 は以上の要領でばらつかせたイメージであり、確定的な劣化予測に対して、0 倍速~4 倍速まで 0.4 倍速刻みにばらつかせている。10 本にばらつかせているため、1 本の「劣化表現率」は 10%となる。しかし、この方法で任意にばらつかせた場合、均等なばらつきとなり、不均等なばらつきである実橋の劣化度分布とは整合しない。よって、補正が必要となる。

3.3 点検結果による補正方法

1)補正のイメージ

劣化予測の均等なばらつきは実橋の不均等なばらつきと整合しないが、この補正方法としては劣化曲線 1 本あたりの「劣化表現率」を補正することで実橋と整合させることができる。図-3.5 に劣化予測における「劣化表現率」のイメージを示しているが、図-3.6 に示すように、その「劣化表現率 (橋面積の割合)」を点検結果に合うように補正する。ここで、本論文の劣化予測は劣化分布の割合を予測するものであり、具体的な部位等を示すことはできない。

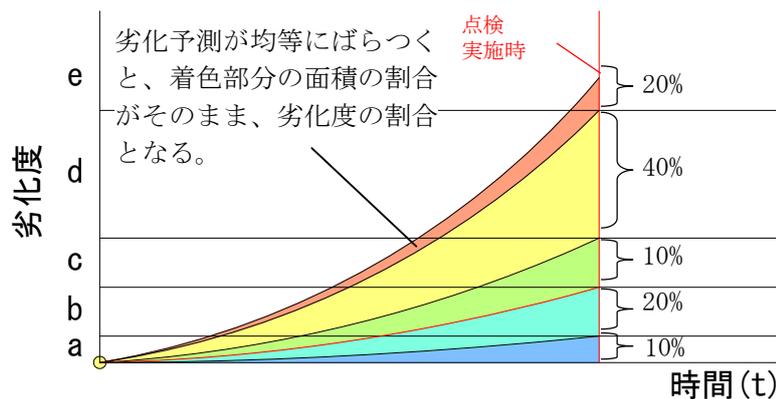


図-3.5 劣化予測における「劣化表現率」のイメージ

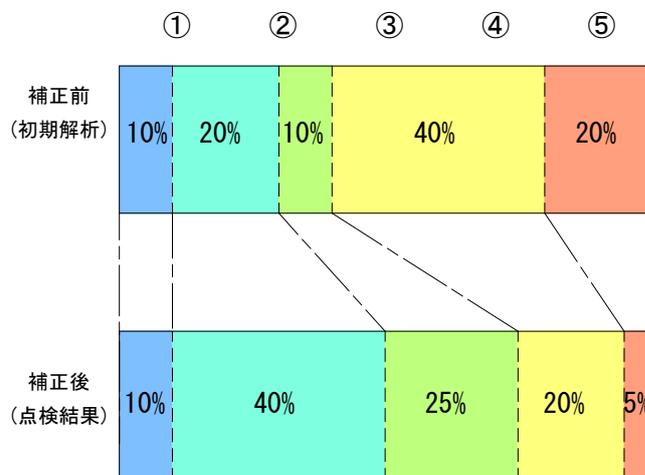


図-3.6 「劣化表現率」補正のイメージ

2) 具体的な補正方法

図-3.1 に示すモデルと図-3.4 に示す劣化予測を用いて、具体的な補正方法を示す。図-3.4 は劣化曲線を 10 本にばらつかせているため、均等に考えた場合、1 本あたり橋面積の 10%を表現することとなる(1 本あたりの劣化表現率は 10%)。しかし、その場合、前述した様に点検結果の劣化度分布と整合しないため、1 本あたりの「劣化表現率」を 10%から点検結果に合うように補正する。補正方法を下記に示す。

- a)点検結果における劣化度「a」の割合は 10%であり、劣化予測の「劣化表現率」も 10%であるため、「a」については点検結果と劣化予測の割合は整合しているため、補正を実施する必要はない。
- b)点検結果における劣化度「b」は 40%である。劣化予測において「b」となる劣化速度は 2 本あるため、均等に考えた場合の「劣化表現率」は 20%となるが、点検結果の 40%に整合させるために、この劣化速度 1 本につき、「劣化表現率」を 10%から 20%($40 \div 2 = 20\%$)に補正する。以上により点検結果と劣化予測の劣化度分布は整合する。
- c)同様に劣化予測において劣化度が「c」となる劣化速度は 1 本であるため、均等に考えた場合の割合としては 10%存在することとなるが、点検結果では 25%存在する。よって、この 1 本あたりの「劣化表現率」は 10%から 25%に補正することで、劣化度「c」の割合は点検結果と整合する。
- d)同様に劣化予測において劣化度が「d」となる劣化速度は 4 本あるため、均等に考えた場合の割合としては 40%存在することとなるが、点検結果では 20%しか存在しない。よって、この 1 本あたりの「劣化表現率」は 10%から 5%($20 \div 4 = 5\%$)に補正することで、劣化度「d」の割合は点検結果と整合する。
- e)最後に劣化予測において劣化度が「e」となる劣化速度は 1 本あるため、割合としては 10%存在するが、点検結果では 5%しか存在しない。よって、この 1 本の割合は 10%から 5%に補正することで、劣化度「e」の割合は点検結果と整合する。

以上の方法により、任意にばらつかせた劣化予測と点検結果の劣化度分布は整合する。この劣化予測 1 本あたりの「劣化表現率」を補正した上で、将来の劣化を予測することによって、より精度の高い予測が可能になると考えられる。

3) 劣化評点による表示

劣化予測にばらつきを考慮し、将来の劣化予測を行うために、劣化予測の劣化度の分布を点検結果の劣化度の分布に補正するが、累積腐食量と時間の表示では劣化度に換算する必要があるなど煩雑となる。よって、本論文では、構造物の劣化度や劣化速度を「劣化評点」に置き換えて表示する。以下に劣化評点の算出方法を示す。

- a)劣化度に応じて点数を下記の様に定義する。

区分「a」ひび割れ無し	: 0 点
区分「b」ひび割れ幅 ~0.2mm	: 1 点
区分「c」ひび割れ幅 0.2~0.3mm	: 2 点
区分「d」ひび割れ幅 0.3mm~	
剥落しているが鉄筋の腐食は軽微	: 3 点
区分「e」剥落し、著しい鉄筋の腐食	: 4 点

b)a)で定義した劣化度毎の点数に、点検結果や劣化予測で算出された劣化表現率を乗じる。その合計を劣化評点と定義する。

以上から算出した劣化評点と、劣化度の分布により、その橋梁の劣化状態を表現することが出来る。

図-3.7 に劣化評点と劣化度分布で表示した場合のイメージを示す。

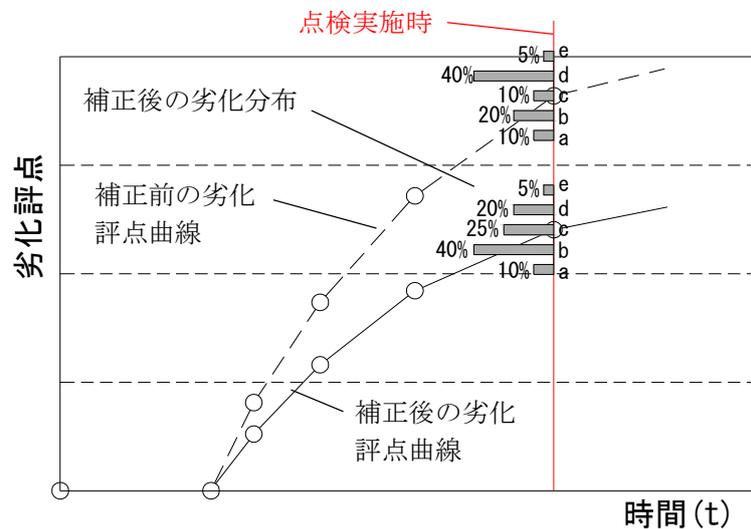


図-3.7 劣化評点と劣化度分布による表示

なお、点検結果には点検者による測定誤差は、いつその劣化状態になったかの時間的な誤差がある。点検結果を用いた劣化予測の補正には、これらを考慮する必要がある。これらの考慮方法は第 4 章および第 6 章において点検に測定誤差および時間誤差を考慮した「誤差ボックス」について述べている。複数点検がある場合は、「誤差ボックス」を考慮した劣化予測とする必要がある。

4章 点検結果の誤差の考慮方法

4.1 概要

ここまで、点検結果を用いた劣化予測の補正方法を示してきた。実橋の劣化の情報は点検結果から得られ、劣化の状態に応じて「a」～「e」の5段階で整理される。点検は技術者の判断で劣化度が決定されるが、ひび割れの計測誤差や技術者の判断の誤差が生じる。また、劣化は経時的に変化しており、点検で発見した「ひび割れ」がいつその状態になったか等、点検時とひび割れ発生時の時間的な誤差も生じる。図-4.1 に点検結果による測定誤差と時間的な誤差のイメージを示す。この測定誤差と時間的な誤差の範囲を本論文では「誤差ボックス」と定義する。点検結果で補正した劣化予測はこの誤差ボックスの中でばらつくこととなる。

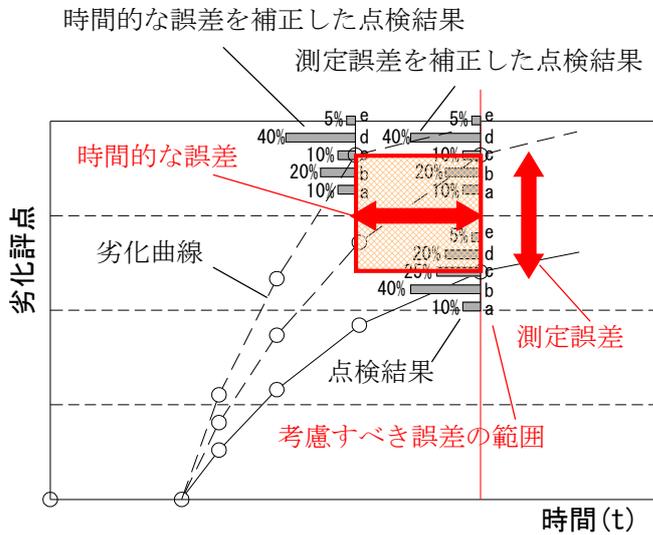


図-4.1 測定誤差と時間的な誤差の概要図

4.2 測定誤差の考慮

高知県では職員による定期点検を実施している。職員の教育訓練の一環として、職員が判定した劣化度と専門家が判定した劣化度を比較し、職員の測定誤差の傾向を分析している。最新の平成 23 年度においては、図-4.2.4.1)に示す傾向となっている。

本論文の測定誤差はこの資料の傾向を用いて測定誤差を考慮する。測定誤差の傾向において、正評価は 38%、3 段階危険側への評価は 4%、2 段階危険側の評価は 9%、1 段階危険側の評価は 18%、1 段階安全側の評価は 31%であった。ここで、職員が評価した劣化度(a～e)が専門家のそれより大きい場合を「安全側」、小さい場合を「危険側」と表現している。この傾向を用いた具体的な誤差補正の考慮方法は、職員が a 評価とした場合、これ以上安全側の評価はできないため、正評価と

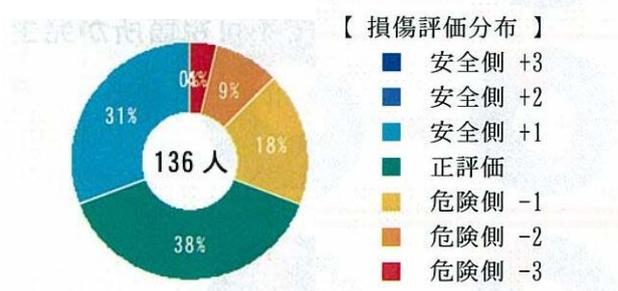


図-4.2 高知県職員の測定誤差傾向

安全側の評価を合わせた割合を「正評価 31+38=69%」とする。また、1段階危険側のb評価とする割合を18%、2段階危険側のc評価とする割合を9%、3段階危険側のd評価とする割合を4%とする。同様に職員がb評価とした場合、1段階安全側のa評価とする割合を31%、正評価であるb評価とする割合を38%、1段階危険側となるc評価とする割合を18%、2段階危険側のd評価とする割合を9%、3段階危険側のe評価とする割合を4%とする。同様に職員がc評価とした場合、1段階安全側のb評価とする割合を31%、正評価であるc評価とする割合を38%、1段階危険側となるd評価とする割合を18%、2段階危険側のe評価とする割合を9%、3段階危険側には評価できないため、4%は正評価に加える。同様に職員がd評価とした場合、1段階安全側のc評価とする割合を31%、正評価であるd評価とする割合を38%、1段階危険側となるe評価とする割合を18%、2段階危険側と3段階危険側には評価できないため、9%と4%は正評価に加える。最後に職員がe評価とした場合、1段階安全側のd評価とする割合を31%、正評価であるd評価とする割合を38%、危険側には評価できないため、18%、9%と4%は正評価に加える。図-4.3に益野二の橋における点検結果を、図-4.4に以上の方法で補正した点検結果を示す。

モデル要素			
単位	データ総数	16	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	2	0.125	0.125
c	7	0.438	0.563
d	7	0.438	1.000
e	0	0.000	1.000

モデル要素			
単位	データ総数	16	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0.62	0.039	0.039
b	2.93	0.183	0.222
c	5.47	0.342	0.564
d	5.01	0.313	0.877
e	1.97	0.123	1.000

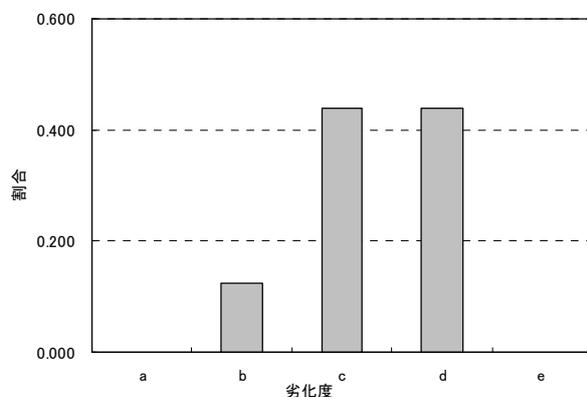


図-4.3 益野二の橋点検結果(供用34年)

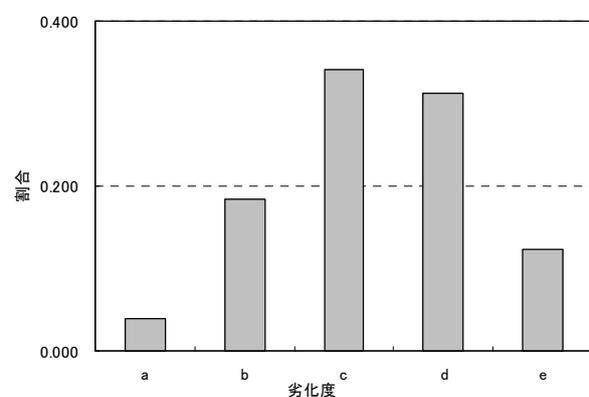


図-4.4 益野二の橋 測定誤差を修正した点検結果(供用34年)

4.3 時間的な誤差の考慮

これまでの点検結果を用いた補正は、点検実施時の劣化分布を基に劣化予測の「劣化表現率」を補正してきた。現時点では、点検実施時に測定した劣化状態が、いつその状態になったかを正確に把握する方法は無いため、本論文では時間的な誤差を確率関数にモデル化して考慮することとする。モデルの概要を下記に示す。

1)時間的な誤差は1年単位で考慮する。

2)定期点検は5年毎に実施されるため、誤差を考慮する期間は点検実施年から4年まで遡る可能性が

あると仮定する。

3)現時点では点検回数が1回の場合の時間的な誤差を生じる確率は不明であるが、図-4.5に示す様に、点検結果時の劣化分布となる確率は、5年前の時点は「0」、点検実施時までには「1」となる。よって、確率分布関数は、下記の式の通りとなる。

$$P(x)=0.2x \quad (4.1)$$

ここに、 $P(x)$ は累積確率

x は前回の点検実施から時間(年)

式(4.1)を微分すると0.2と定数になるため、点検実施時の劣化分布になる確率は4年前～点検実施時まで各年で20%となる。

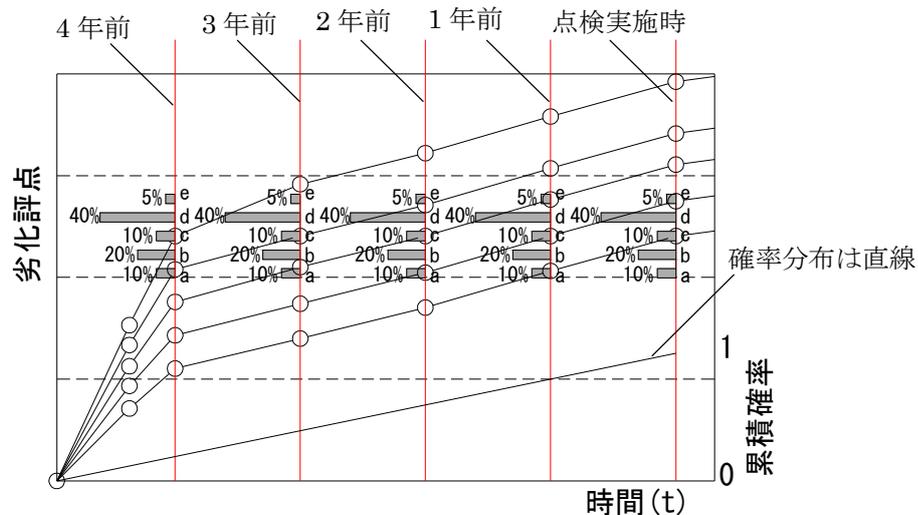


図-4.5 測定誤差と時間的な誤差の概要図

4.4 具体的な考慮の方法

1)実橋を用いた考慮例

以上を踏まえて、益野二の橋に対して測定誤差および時間的な誤差を考慮した劣化予測を実施する。測定誤差に対する補正は「4.2」で述べた通りとなる。時間的な誤差の考慮は下記の通りとする。

a)図-4.6に示す点検実施時である供用34年の劣化予測解析結果に対して、「4.2」の図-4.4に示してある測定誤差を考慮した点検結果を用いて「劣化表現率」の補正を行う。

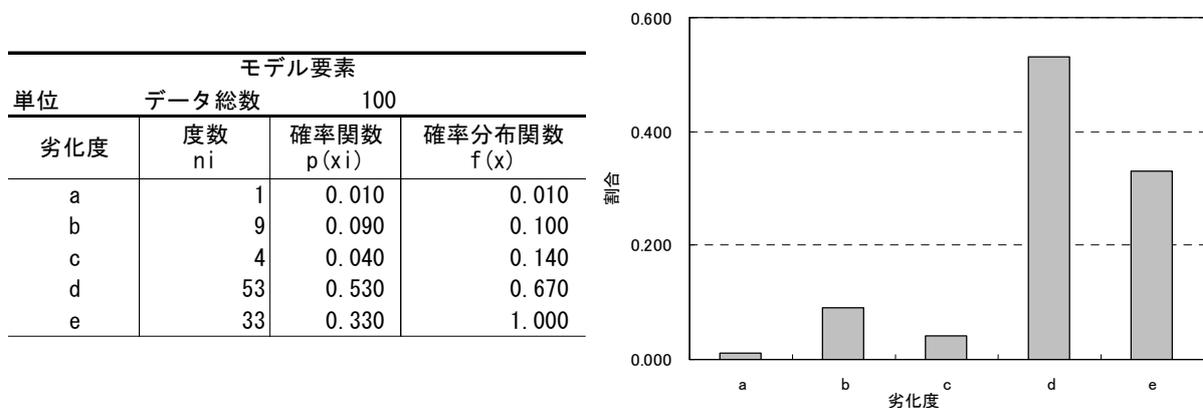


図-4.6 益野二の橋供用34年時の劣化予測解析

b)同様に、点検実施時の1年前である供用33年から4年前である供用30年の劣化予測解析の結果に対しても「4.2」の図-4.4に示してある測定誤差を考慮した点検結果を用いて「劣化表現率」の補正を行う。各解析結果と図-4.4で補正した結果を図-4.7に示す。

【劣化予測】

モデル要素			
単位	データ総数	100	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	9	0.090	0.100
c	4	0.040	0.140
d	53	0.530	0.670
e	33	0.330	1.000

【劣化予測を測定誤差・時間誤差で補正した結果】

モデル要素					
単位	データ総数 100				
劣化度	①ばらつき シナリオ数	②シナリオ 1本の劣化 表現率	③度数 (①×②× 100) n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関 数 $f(x)$
a	1	0.039	3.875	0.03875	0.03875
b	9	0.020	18.313	0.183125	0.221875
c	4	0.085	34.188	0.341875	0.56375
d	53	0.006	31.313	0.313125	0.876875
e	33	0.004	12.313	0.123125	1

点検実施時

モデル要素			
単位	データ総数	100	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	10	0.100	0.110
c	5	0.050	0.160
d	57	0.570	0.730
e	27	0.270	1.000

モデル要素					
単位	データ総数 100				
劣化度	①ばらつき シナリオ数	②シナリオ 1本の劣化 表現率	③度数 (①×②× 100) n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関 数 $f(x)$
a	1	0.039	3.875	0.03875	0.03875
b	10	0.018	18.313	0.183125	0.221875
c	5	0.068	34.188	0.341875	0.56375
d	57	0.005	31.313	0.313125	0.876875
e	27	0.005	12.313	0.123125	1

点検実施1年前

モデル要素			
単位	データ総数	100	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	11	0.110	0.120
c	5	0.050	0.170
d	64	0.640	0.810
e	19	0.190	1.000

モデル要素					
単位	データ総数 100				
劣化度	①ばらつき シナリオ数	②シナリオ 1本の劣化 表現率	③度数 (①×②× 100) n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関 数 $f(x)$
a	1	0.039	3.875	0.03875	0.03875
b	11	0.017	18.313	0.183125	0.221875
c	5	0.068	34.188	0.341875	0.56375
d	64	0.005	31.313	0.313125	0.876875
e	19	0.006	12.313	0.123125	1

点検実施2年前

図-4.7.1 劣化予測に時間誤差を考慮した点検結果で補正した結果(その1)

モデル要素			
単位	データ総数 100		
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	12	0.120	0.130
c	6	0.060	0.190
d	70	0.700	0.890
e	11	0.110	1.000

モデル要素					
単位	データ総数 100				
劣化度	①ばらつき シナリオ数	②シナリオ 1本の劣化 表現率	③度数 (①×②× 100) n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関 数 $f(x)$
a	1	0.039	3.875	0.03875	0.03875
b	12	0.015	18.313	0.183125	0.221875
c	6	0.057	34.188	0.341875	0.56375
d	70	0.004	31.313	0.313125	0.876875
e	11	0.011	12.313	0.123125	1

点検実施 3 年前

モデル要素			
単位	データ総数 100		
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	13	0.130	0.140
c	7	0.070	0.210
d	78	0.780	0.990
e	1	0.010	1.000

モデル要素					
単位	データ総数 100				
劣化度	①ばらつき シナリオ数	②シナリオ 1本の劣化 表現率	③度数 (①×②× 100) n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関 数 $f(x)$
a	1	0.039	3.875	0.03875	0.03875
b	13	0.014	18.313	0.183125	0.221875
c	7	0.049	34.188	0.341875	0.56375
d	78	0.004	31.313	0.313125	0.876875
e	1	0.123	12.313	0.123125	1

点検実施 4 年前

図-4.7.2 劣化予測に時間誤差を考慮した点検結果で補正した結果(その 2)

上記の様に 1 橋につき、劣化予測モデル（補修シナリオ）は 5 本派生し、それぞれの劣化予測が有する確率は点検回数が 1 回の場合は 20%となる。どの補修シナリオを選定するかは橋梁管理者の判断となるが、複数の点検結果がある場合、図-4.1 に示す「誤差ボックス」も複数存在することとなるが、この誤差ボックスを通過させる必要がある。

以上を踏まえ、劣化評点と時間の経過を図-4.8 に示す。図-4.4 に示した測定誤差の補正を考慮した点検結果を用いて、初期解析を補正した結果、補正した解析の方が、初期解析より劣化速度が遅くなる結果となった。また時間的な誤差として、1 年前に点検した劣化状態になったケースから 4 年前に点検した劣化状態になったケースまで考慮した解析を実施した。「1 年前に点検した劣化状態になる」とは図-4.8 を例にすると、供用 34 年で点検した劣化分布が供用 33 年で、その劣化分布になることを言う。当然、その劣化状態が過去になったとすればするほど、劣化評点は高くなる。

本来、複数の点検結果がある場合は、点検結果毎の「誤差ボックス」を通過する様に補正することが正しい。しかし、その際のパラメーターの補正は複雑である。本論文の解析結果からは複数点検がある場合、複数点検結果の平均で補正しておけば複数の誤差ボックスを通過することが検証されているため、図-4.8 に示す様に、本論文で用いる劣化予測は「誤差ボックス」を通過する平均値を用いて劣化予測および補修シナリオを作成することとする。

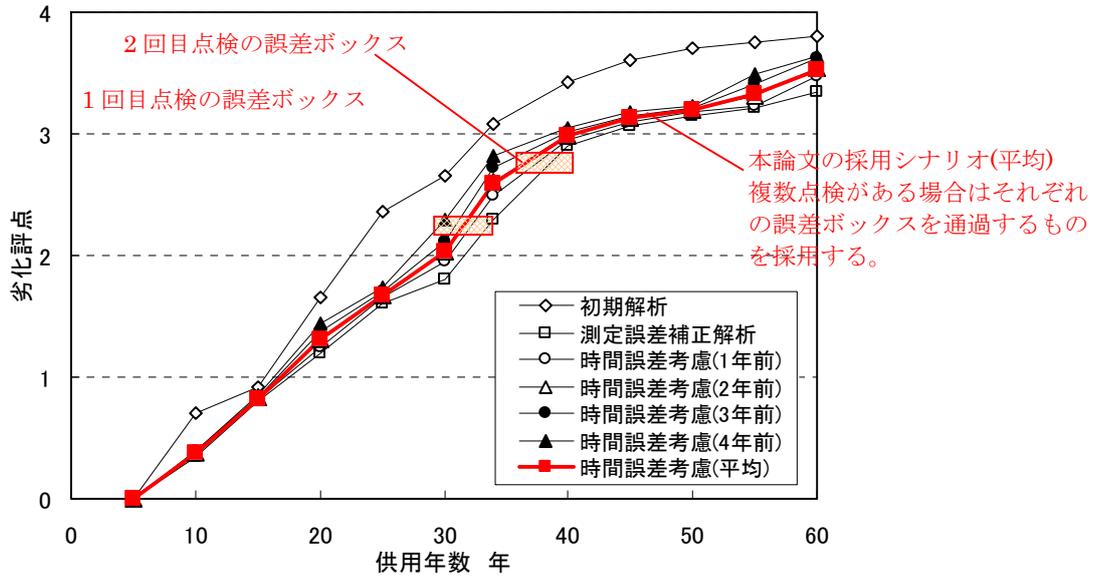


図-4.8 測定誤差と時間誤差による誤差ボックスおよび劣化予測の概要図

なお、第 6 章の中で「新野根橋」について複数の点検が実施されている。第 6 章で複数点検がある場合の劣化予測の考え方を述べる。

5章 ばらつきを考慮した補修シナリオ

5.1 概要

これまで、ばらつきを考慮した劣化予測と点検結果による補正方法および点検結果の測定誤差や時間的な誤差の考慮方法について述べてきた。これまでは大きく図-2.1のシステム構成で示す「劣化予測モデル」に関する研究であり、ここからは「補修シナリオ作成モデル」について述べる。

「補修シナリオ作成モデル」はこれまで述べてきた劣化予測モデルを用いて補修工法、補修タイミングおよび補修範囲を決定する。よって、劣化予測にばらつきを持たせることによって、「補修シナリオ作成モデル」もばらつきを考慮できるモデルにする必要がある。第2章では確定的な劣化予測に対して、補修シナリオ作成モデルを紹介した。以下にばらつきを考慮した補修シナリオ作成モデルの概念を述べる。

5.2 ばらつきを考慮した補修タイミング

劣化予測および補修シナリオが1つしかない場合、基本的な補修タイミングは第2章で示した様に許容管理レベルを超える直前となるが、劣化予測に面的なばらつきをもたせ、面要素分の複数の劣化予測が生じることとなったため、補修タイミングをどの様に決定するかが問題となる。

複数の劣化予測に対して、補修タイミングは下記に示す2つがあると考えられる。

- 1) 図-5.1に示すように、ばらつかせた劣化予測の内、最も劣化速度が速いものが許容管理レベルの直前となった時に補修する。
- 2) 図-5.2に示すように、劣化予測の中で、管理者が設定した劣化予測が許容管理レベルに達する時に補修する。この考え方では、劣化の速い劣化予測が許容管理レベルを超えた状態であり、これらの要素は安全性が懸念されるほど腐食することも考えられる。

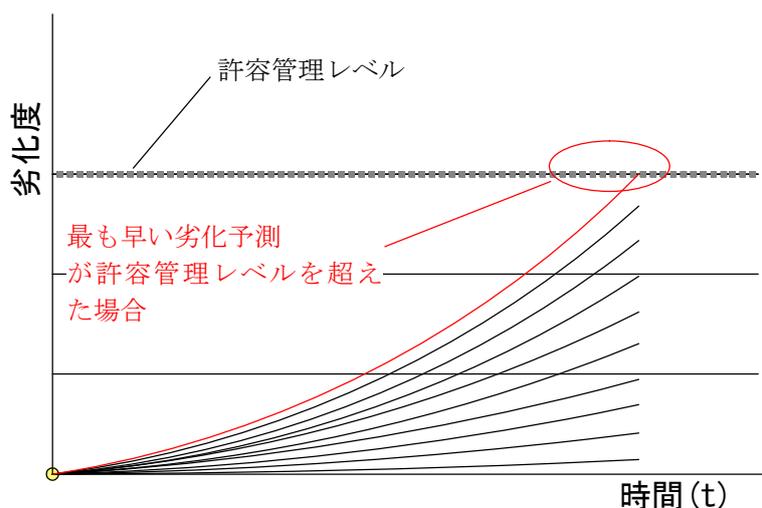


図-5.1 最も早い劣化予測が許容管理レベルを超えた場合の補修タイミング

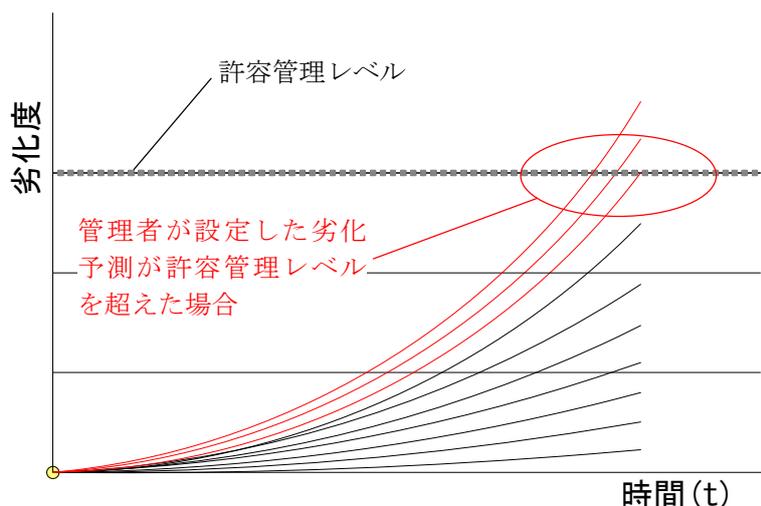


図-5.2 管理者が設定した劣化予測が許容管理レベルを超えた場合の補修タイミング。図は3番目の劣化予測が許容管理値を超えた時を補修タイミングとしている。

管理レベルは橋梁の安全・安心な活用を目的としたものであり、橋の重要度に応じて設定される。2)の考え方では、管理レベルを超える部材が生じてしまい、最も劣化が早い要素については安全・安心な活用ができない場合も考えられる。以上から、ばらつきを考慮した場合の補修タイミングは、劣化予測のうち、「最も劣化速度が速いシナリオが許容管理レベルの達した状態」に実施する。

5.3 ばらつきを考慮した補修範囲

ばらつかせた劣化予測は劣化の面的なばらつきを示しており、橋梁全体に対する比率となっている(本論文では劣化表現率と言う)。すなわち、ばらつかせた1本の劣化表現率が1%であった場合、その劣化予測の劣化状態となる範囲は橋梁全体の1%を示す。また、補修タイミングについて、橋梁の補修を「最も劣化速度が速い劣化予測が許容管理レベルの直前の状態」としたとき、補修範囲をどのように考えるかが課題となる。橋梁全体を「最も劣化速度が速い劣化予測が許容管理レベルの直前の状態」に合わせて補修すると、過度な補修になるとともに実務上、その様な補修は実施しない。また、劣化予測1本毎に補修を実施すると、補修回数が極めて多くなることから、不経済かつ実務上、やはりその様な補修を発注することは無い。以上から、図-5.3に示す様に、補修範囲は最も早い劣化予測が許容管理レベルを超えた際、同じ劣化状態にある範囲を補修するものとする。なお、表面含浸、表面被覆、電気防食、電気化学的脱塩工法は部材単位で用いる場合もあるが、劣化範囲が明確であれば部分的に用いる場合もある。部材単位で考慮することも可能であるが、本論文ではLCC最小のシナリオを選定する観点から部分的に用いることとする。

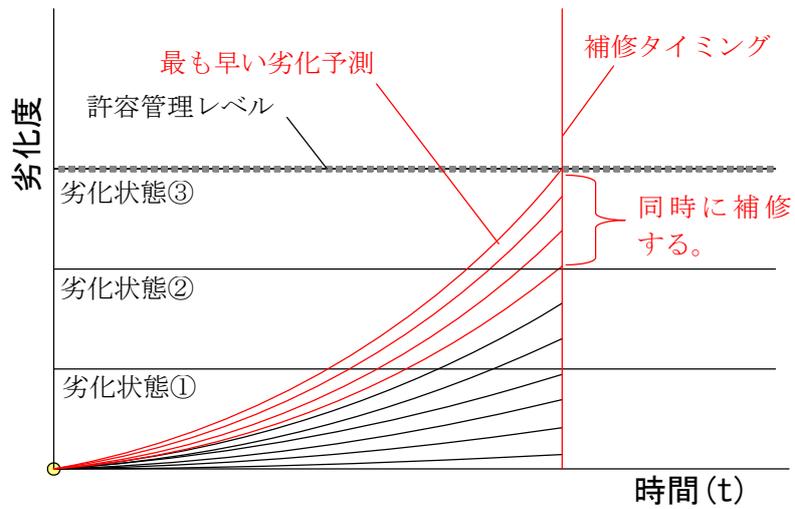


図-5.3 補修範囲の概念

5.4 補修シナリオ設定方法

本研究におけるばらつきを考慮した補修シナリオは下記の方針に基づいて作成する。

- 1)劣化予測で求められる確定的な劣化予測に対して 0 倍～実橋の劣化状態を網羅できる範囲の倍速まで任意にばらつかせる。ばらつかせた劣化予測に No.1～任意数までの番号を付ける。
- 2)点検結果による補正を加え、ばらつかせた劣化予測の劣化表現率を補正する。補正後、ばらつかせた劣化予測の中で、最も劣化速度の速いものに対して LCC 最小となる補修工法の組み合わせを計算し、そこで選定した補修工法と補修タイミング(いつ実施したか)を保存する。
- 3)劣化速度が 2 番目以降の劣化予測は、保存していた補修タイミングに到達した際、最も速い劣化予測と同じ劣化状態となる場合は同じ補修工法で補修を実施する。

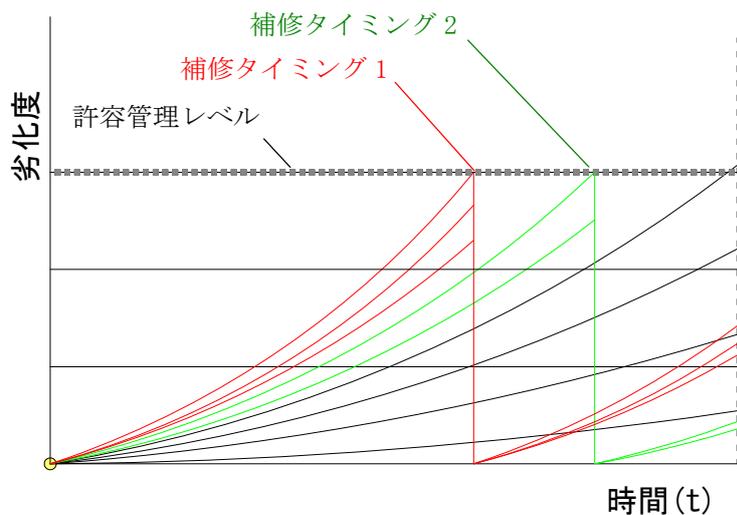


図-5.4 補修タイミングと補修範囲の概念

- 4) 図-5.4 の赤線は最も早い劣化予測が許容管理レベルに達した時に、同じ劣化状態にある劣化予測群を示す。緑線は赤線のグループと同じ劣化状態に無い劣化予測を示す。緑線のグループの中で最も早い劣化予測は、別途、最も経済的となる補修工法の組み合わせを計算し、そこで選定した補修工法を補修タイミング 2 で実施する。後の劣化予測は上記を繰り返すことになる。
- 5) 図-5.5 に示す様に、劣化予測が再度管理レベルの直前に達した時、再劣化した劣化予測と同じ劣化状態となる場合がある。この場合、お互いの劣化予測は、大きく劣化速度が異なるため、同じ補修工法を必ずしも採用できない。よって、この場合においては、お互いの最適補修工法が同じで、補修タイミングのずれが定期点検の間隔である 5 年未満であれば同時に補修するが、補修工法が異なれば、別々の補修工法を適用する。

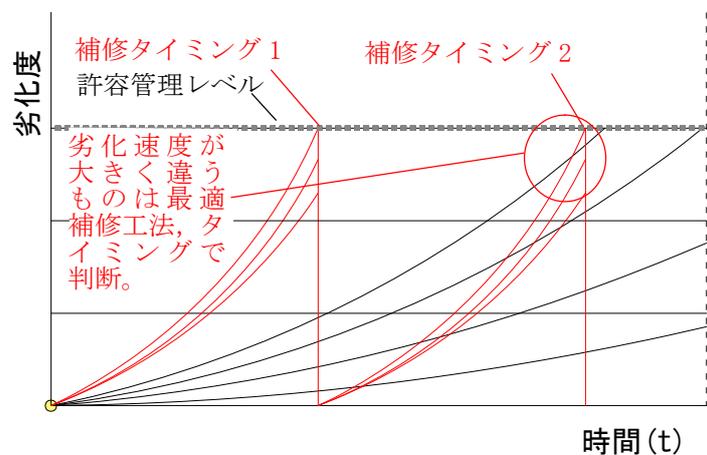


図-5.5 最も早い劣化予測が再劣化した場合の補修範囲・タイミングの考え方

- 6) 同様に図-5.6 の補修タイミング 2 に示す様に、一度も補修していない劣化予測が初めて管理レベルの直前に達した時に、再劣化した劣化予測が同じ劣化状態になるケースも考えられる。この場合についても 5)と同様の理由から同じタイミングで同じ補修工法を適用せずに、経過観察とし、初めて管理レベルの直前に達した劣化予測のみを補修する。

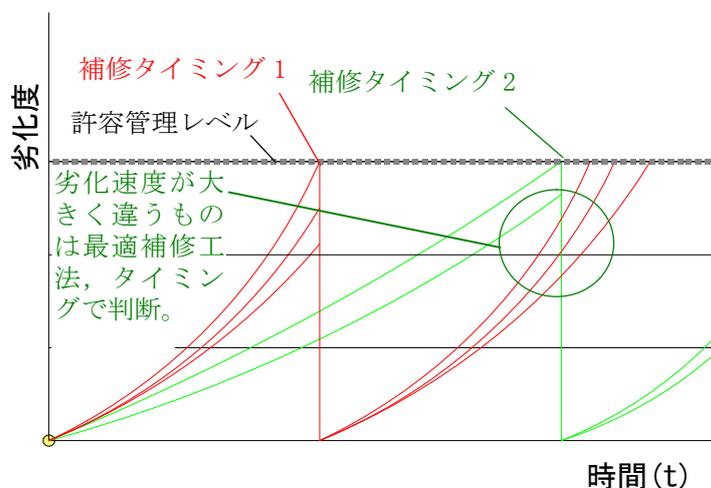


図-5.6 初めて許容管理レベルに達する劣化予測と再劣化する劣化予測の補修範囲・タイミングの考え方

7)現在の道路橋示方書では、橋梁の耐用年数を100年としている。供用から100年間際で許容管理レベルを超える場合、実務では補修を実施しないことも考えられる。ここでは図-5.7に示すように定期点検の間隔が5年であることから、供用から95年を超えて、許容管理レベルを超える場合は補修を実施しないこととする。

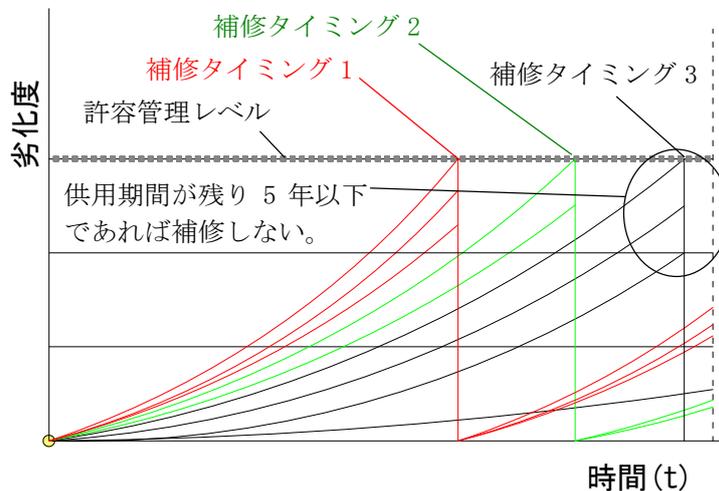


図-5.7 供用期間の残り と補修タイミングの関係

以上により、当該劣化予測自体が管理レベルを超える直前か、当該劣化予測より劣化速度が速い劣化予測が補修を実施する時で、同じ劣化状態になっている時に補修することを考慮できる。また、補修数量の設定としては、同時に補修する劣化予測の「劣化表現率」の合計を橋梁の全面積に乗じることで、現実的な補修数量とできる。

5.5 補修数量および補修費用の算出

1)補修数量の算出

ばらつきを考慮した劣化予測および補修シナリオの選定により、補修数量を算出する。本研究ではばらつかせた劣化予測1本毎に「劣化表現率」を与えることで、面的な劣化のばらつきを表現している。この「劣化表現率」を用いて、具体的な補修費用算出方法を示す。

具体的な補修数量を算出モデルケースとして、図-5.8を用いる。図-5.8は橋梁表面積を100m²と想定する。

1-d	2-d	3-c	4-d	5-c
6-b	7-b	8-a	9-c	10-d
11-b	12-b	13-a	14-b	15-c
16-b	17-b	18-b	19-c	20-c

図-5.8 橋梁展開図イメージ部分

図-5.8 は要素毎に劣化の進行が異なるが、補修数量に必要な情報は「どこの部位がどの程度劣化している」ではなく、「どの程度の劣化がどの程度の割合」と考えられる。よって、図-5.8 を補修数量算出に必要な情報として再整理すると図-5.9 の様になる。

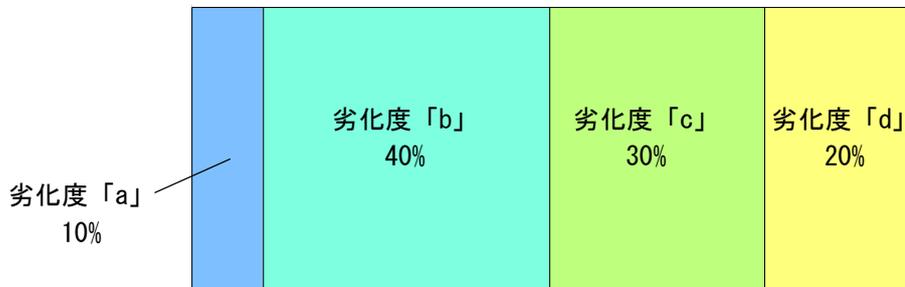


図-5.9 図-5.8 を劣化度の割合を集計・整理したイメージ

上記の実橋モデルに対し、劣化予測解析の結果を図-5.10 に示す。なお、この具体例では分かりやすくするために、点検実施後、直ぐに補修を実施する場合を想定する。すなわち点検実施時と補修タイミング 1 は同じであると考える。

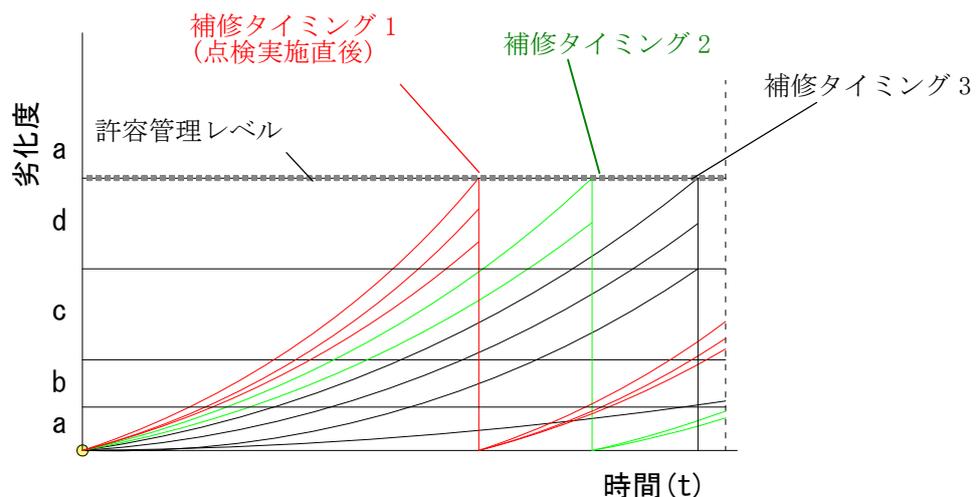


図-5.10 図-5.9 で補正した劣化予測モデルの補修シナリオ

図-5.10 は 9 本の劣化予測にばらつかせている。点検実施時において劣化度「d」の割合は図-5.9 より 20%存在する。ばらつかせた劣化予測は 3 本が劣化度「d」となっていることから、この 3 本の「劣化表現率」は 1 本当たり $20 \div 3 = 6.66\%$ となる。同様に点検実施時の劣化度「c」は図-5.9 から 30%存在し、劣化予測は 4 本が劣化度「c」となっていることからこの 4 本の「劣化表現率」は 1 本当たり $30 \div 4 = 7.5\%$ となる。同様に点検実施時の劣化度「b」は図-5.9 から 40%存在し、劣化予測は 1 本が劣化度「b」となっていることからこの 1 本の「劣化表現率」は 40%となる。最後に点検実施時の劣化度「a」は図-5.9 から 10.0%存在し、劣化予測は 1 本が劣化度「a」となっていることからこの 1 本の「劣化表現率」は 10.0%となる。

以上から、9本の劣化予測の各「劣化表現率」が求まる。次ぎに補修数量の算出方法は、図-5.9より、補修タイミング1で最も早い劣化予測が許容管理レベルに達している。この時、劣化度「d」にある部分をまとめて補修することとなる。この時、劣化度「d」となっている劣化予測は3本あり、この3本の「劣化表現率」全て6.66%である。式(5.1)から、このときの補修数量A1は20.0m²となる。

$$\begin{aligned} A1 &= 100.0 \times (6.66 \times 3) \\ &= 20.0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

同様に補修タイミング2で次ぎに早い劣化予測が許容管理レベルに達することとなる。この時、劣化度「d」にある部分を補修タイミング1と同様にまとめて補修することとなる。この時、劣化度「d」となっている劣化予測は2本あり、この2本の「劣化表現率」全て7.5%である。式(5.2)から、このときの補修数量A2は15.0m²となる。

$$\begin{aligned} A2 &= 100.0 \times (7.5 \times 2) \\ &= 15.0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

最後に補修タイミング3で次ぎに早い劣化予測が許容管理レベルに達することとなる。この時、劣化度「d」にある部分を補修タイミング1や2と同様にまとめて補修することとなる。この時、劣化度「d」となっている劣化予測は3本あり、この内2本の「劣化表現率」は7.5%であり、1本の「劣化表現率」は40%である。式(5.3)から、このときの補修数量A3は55.0m²となる。

$$\begin{aligned} A3 &= 100.0 \times (7.5 \times 2 + 40.0 \times 1) \\ &= 55.0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

点検実施時に劣化度が「a」であった劣化予測は、供用期間中に補修が必要となるまで劣化が進行することは無いシナリオとなる。その劣化予測の「劣化表現率」は10%である。よって、10m²は供用期間中に補修を実施しなくて良いこととなる。以上を整理すると、このモデルにおける補修数量は表-5.1の通りとなる。

表-5.1 補修数量総括

補修タイミング	補修数量(m ²)
補修タイミング1	20
補修タイミング2	15
補修タイミング3	55
補修無し	10
合計	100

2)補修工費の算出

補修数量の算出結果を基に、補修工費を算出する。補修工費に用いる補修工法および補修単価は表-2.2を用いる。補修工法は最もLCCが小さくなる補修工法を算出するが、算出方法は第2章で述べた方法を用いる。図-5.10に示す各補修タイミングのうち最も早い劣化予測に対して、第2章の方法により補修工法を選定する。

例えば補修タイミング1で電気防食工法、補修タイミング2で断面修復工法、補修タイミング3も断面修復工法が選定されたとすると、補修タイミング1における補修工事費S1は式(5.4)で算出される。

$$\begin{aligned} S1 &= 20.0 \times 95000 \\ &= 1,900,000(\text{円}) \end{aligned} \quad (5.4)$$

同様に補修タイミング2における補修工事費S2は式(5.5)で算出される。

$$\begin{aligned} S2 &= 15.0 \times 65000 \\ &= 975,000(\text{円}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

最後に補修タイミング3における補修工事費S3は式(5.6)で算出される。

$$\begin{aligned} S3 &= 55.0 \times 65000 \\ &= 3,575,000(\text{円}) \end{aligned} \quad (5.6)$$

この工事費は一般的な間接費(足場などの仮設費)も含んでいる。また、補修タイミングの間隔が5年以内になる場合は、同時期に補修を実施するシナリオとすることで、間接費を考慮した補修タイミング・工法選定となっている。

以上を踏まえた本モデルにおける供用期間中の補修工事費を表-5.2に示す。

表-5.2 補修工事費総括

補修タイミング	補修工事費(千円)
補修タイミング1	1,900
補修タイミング2	975
補修タイミング3	3,675
合計	6,550

6章 実橋における解析と検証

6.1 概要

これまで述べてきた「ばらつきを考慮した劣化予測」「測定誤差や時間誤差を考慮した点検結果を用いた劣化予測の補正」「ばらつきを考慮した補修シナリオ」を BMS に導入し、実橋に対して解析を実施する。実橋のデータとしては、高知県管内の橋梁を対象とする。

高知県からの情報提供により、約 1374 橋について解析対象橋梁を抽出した。ただし、高知県から得た情報のうち、位置を特定できないデータ等を除いた結果、位置を特定出来た橋梁は 729 橋であった。その 729 橋に対して、表-6.1 に示す 2 つの抽出条件から解析対象橋梁を抽出した。

表-6.1 抽出条件

抽出項目	該当条件	該当条件根拠
橋梁形式	PC 橋または RC 橋	塩害をうけるコンクリート橋
海岸からの距離	250m 程度以内	道路橋示方書の塩害を考慮する範囲

729 橋に対する表-6.1 の抽出条件から PC 橋または RC 橋に該当する橋梁は 311 橋あり、海岸からの距離が 250m 程度以内の橋梁は 25 橋となった。さらに 25 橋のうち、主桁の点検結果が残っている橋梁は 15 橋となったため、本研究ではこの 15 橋を対象に解析と検証を実施した。

6.2 初期解析条件

前節で抽出した 15 橋に対して、初期解析を実施するためには「かぶり」、「水セメント比」、「コンクリートの設計基準強度」、「飛来塩分量」、「最外縁の鉄筋径」などの情報が必要となる。しかし、抽出した橋梁は、ほとんどが昭和時代に架設されており、設計図面等の詳細な情報は残っていなかった。ただし、架設年度は橋梁台帳から明確に分かっていたため、設計時に使用されていた設計基準^{6.1~6.7}および標準図集^{6.8}等を用いて、上記の条件を設定した。

また、飛来塩分量についてはコンクリート標準示方書維持管理編を参考に表-6.2 に示す条件を設定した。

表-6.2 飛来塩分量の目安(コンクリート標準示方書維持管理編)

解説 表10.3.5 表面における塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m³)

		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道, 東北, 北陸, 沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東, 東海, 近畿, 中国, 四国, 九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

海岸付近の高さ方向に付いては、高さ 1 m が汀線からの距離 2.5 m に相当すると考えて C_0 を求めてよい。

表-6.4 解析対象橋梁および設定条件一覧

橋梁名	架設年月	PC or RC	プレテン or ポステン	海岸からの 距離 (m)	解析条件					
					かぶり	水セメント比	飛来塩分量	鉄筋径	圧縮強度	単位セメント量
下川口大橋	昭和58年01月	PC	ポステンT	0	35mm	0.43	800	10	40	300
久百々橋	昭和48年03月	PC	ポステンT	0	35mm	0.43	800	10	40	300
益野ニの橋	昭和48年03月	RC	—	250	35mm	0.5	300	13	24	250
小才角大橋	昭和47年03月	PC	ポステンT	0	35mm	0.43	800	10	40	300
片粕大橋	昭和59年09月	PC	ポステン箱	0	35mm	0.43	800	10	40	300
新野根橋	昭和54年02月	PC	プレテンT	200	35mm	0.36	350	10	50	350
出見橋	昭和33年03月	RC	—	0	35mm	0.5	800	13	24	250
汐入橋	昭和47年03月	RC	—	90	35mm	0.5	400	13	24	250
志和川橋	昭和46年03月	PC	ポステンT	0	35mm	0.43	800	10	40	300
厚生橋	昭和36年03月	PC	ポステンT	0	35mm	0.43	800	10	40	300
五台山橋	昭和40年03月	PC	ポステンT	250	35mm	0.43	300	10	40	300
泊浦川橋	昭和54年08月	RC	—	0	35mm	0.5	800	13	24	250
大津大橋	昭和62年03月	PC	ポステン箱	30	35mm	0.43	600	10	40	300
新柏島大橋	平成05年08月	PC	ポステン箱	0	35mm	0.43	800	10	40	300
水島橋栈道橋	平成08年	PC	プレテン床版	16	25mm	0.36	800	10	50	350

以上の解析条件から、対象橋梁 15 橋は表-6.5 に示すように解析条件から 8 つのグループに分けられる。

表-6.5 対象橋梁におけるグループ化

No.	グループ (かぶり-W/C-飛来塩分量)	対象橋梁
1	25mm-0.36-800mg/m ²	水島橋栈道橋
2	35mm-0.36-350mg/m ²	新野根橋
3	35mm-0.43-300mg/m ²	五台山橋
4	35mm-0.43-600mg/m ²	大津大橋
5	35mm-0.43-800mg/m ²	下川口大橋、久百々橋、小才角大橋、片粕大橋、志和川橋、厚生橋、新柏島大橋
6	35mm-0.50-300mg/m ²	益野ニの橋
7	35mm-0.50-400mg/m ²	汐入橋
8	35mm-0.50-800mg/m ²	出見橋、泊浦川橋

6.3 高知県における点検システム概要

点検データは高知県で 5 年に 1 回実施する定期点検のデータ^{6.9)}を用いる。高知県では職員による点検を実施しており、H23 年 10 月現在で、1 巡目(1 回目)の点検が終了した状況である。現在 2 順目の点検を実施しており、「新野根橋」の 2 巡目点検のみ整理されているが、その他の橋梁は、まだ点検結果の整理がなされていない状況である。高知県の点検システムでは、図-6.2 に示す指標によって、図-6.3 に示す要素毎に劣化度を判定する。よって、要素毎の劣化度を集計することで、ばらつきの情報を得ることとなる。

b) 最小ひびわれ間隔に着目した程度

程度	一般的状況
大	ひびわれ間隔が小さい(最小ひびわれ間隔が概ね0.5m未満)
小	ひびわれ間隔が大きい(最小ひびわれ間隔が概ね0.5m以上)

【損傷程度の評価と記録】

(1) 損傷程度の評価区分

損傷程度の評価は、次の区分によるものとする。

区分	一般的状況
a	損傷なし
b	—

【損傷程度の評価と記録】

(1) 損傷程度の評価区分

損傷程度の評価は、次の区分によるものとする。

なお、区分にあたっては、損傷程度に関係する次の要因毎にその一般的状況から判断した規模の大小の組合せによることを基本とする。

1) 損傷程度の区分

区分	最大ひびわれ幅に着目した程度	最小ひびわれ間隔に着目した程度
a	損傷なし	
b	小	小
c	小	大
	中	小
d	中	大
	大	小
e	大	大

2) 損傷の程度

a) 最大ひびわれ幅に着目した程度

程度	一般的状況
大	ひびわれ幅が大きい(RC構造物0.3mm以上、PC構造物0.2mm以上)
中	ひびわれ幅が中位(RC構造物0.2mm以上0.3mm未満、PC構造物0.1mm以上0.2mm未満)
小	ひびわれ幅が小さい(RC構造物0.2mm未満、PC構造物0.1mm未満)

図-6.2 高知県点検マニュアル(劣化度定義)

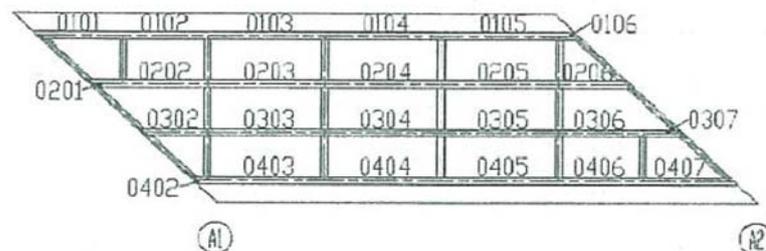


図-6.3 高知県点検マニュアル要素区分例

6.4 点検結果における測定誤差の補正

次に、得られた点検結果に対して第4章に示した方法により測定誤差を考慮する。今回考慮するのは解析対象橋梁とする。第4章の方法を各対象橋梁の点検結果に適用した結果を図-6.4～図-6.18に示す。

下川口大橋 点検集計表 (供用25年)			
データ総数 6			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	0	0.000	0.000
d	5	0.833	0.833
e	1	0.167	1.000

モデル要素			
データ総数 6			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	1.55	0.258	0.258
d	2.86	0.477	0.735
e	1.59	0.265	1.000

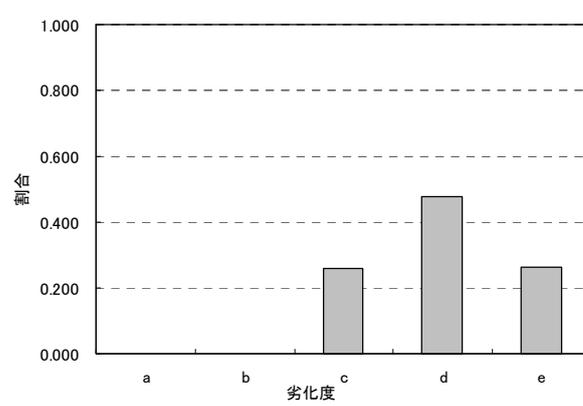
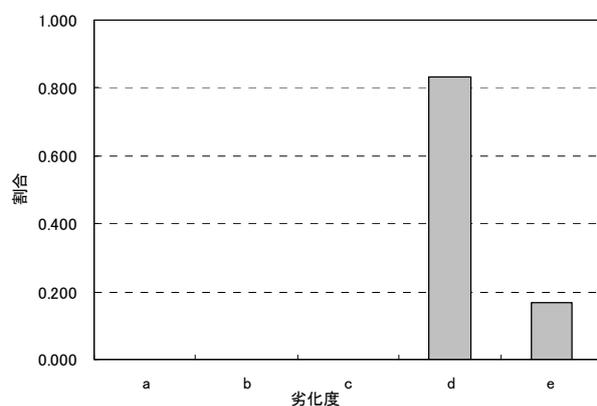
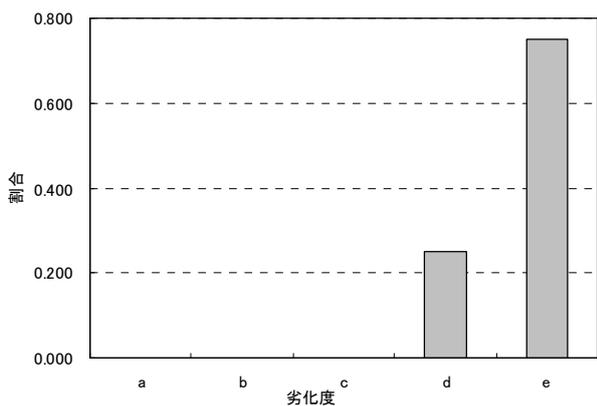


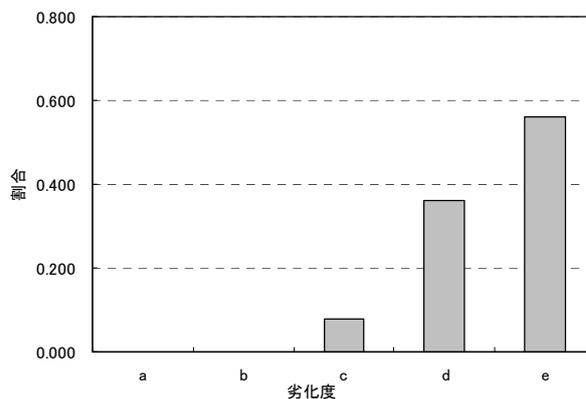
図-6.4 下川口大橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

小才角大橋 点検集計表 (供用36年)			
データ総数 8			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	0	0.000	0.000
d	2	0.250	0.250
e	6	0.750	1.000



測定誤差考慮前

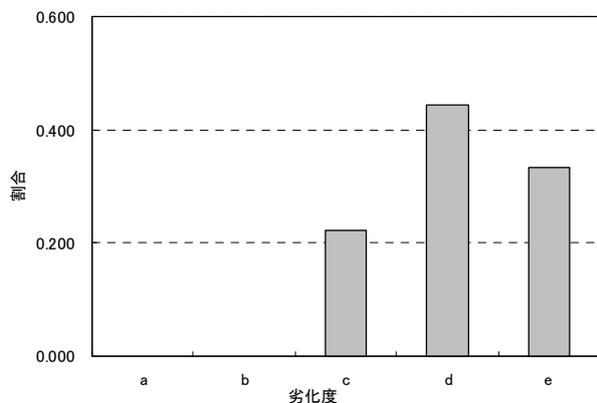
モデル要素			
データ総数 8			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	0.62	0.078	0.078
d	2.88	0.360	0.438
e	4.5	0.563	1.000



測定誤差考慮後

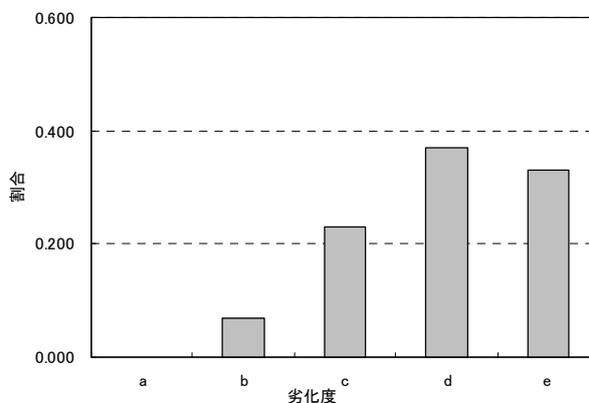
図-6.7 小才角大橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

片粕大橋 点検集計表 (供用24年)			
データ総数 9			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	2	0.222	0.222
d	4	0.444	0.667
e	3	0.333	1.000



測定誤差考慮前

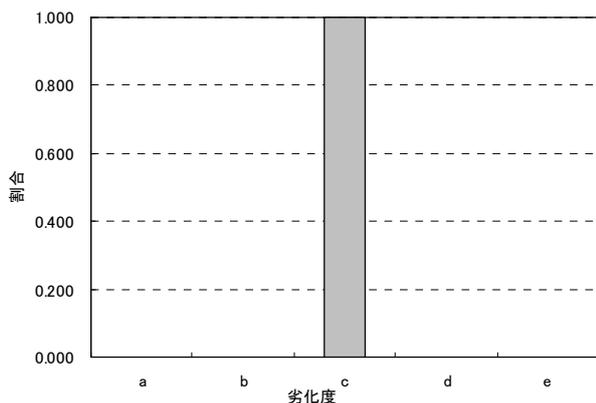
モデル要素			
データ総数 9			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0.62	0.069	0.069
c	2.08	0.231	0.300
d	3.33	0.370	0.670
e	2.97	0.330	1.000



測定誤差考慮後

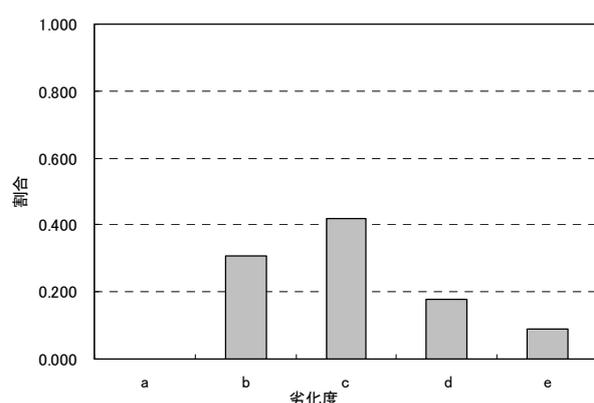
図-6.8 片粕大橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

新野根橋 点検集計表 (供用28年)			
データ総数		3	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	3	1.000	1.000
d	0	0.000	1.000
e	0	0.000	1.000



測定誤差考慮前

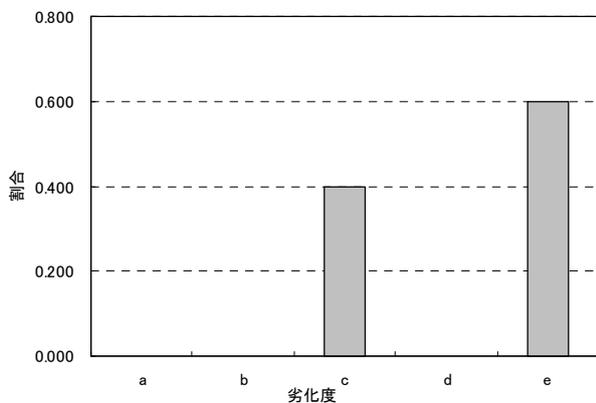
モデル要素			
データ総数		3	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0.93	0.310	0.310
c	1.26	0.420	0.730
d	0.54	0.180	0.910
e	0.27	0.090	1.000



測定誤差考慮後

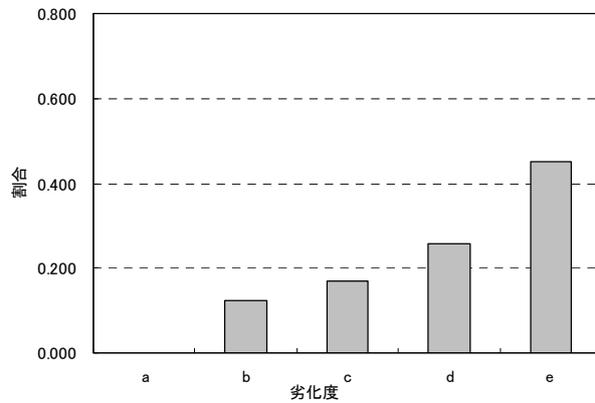
図-6.9 新野根橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

出見橋 点検集計表 (供用23年)			
データ総数		40	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	16	0.400	0.400
d	0	0.000	0.400
e	24	0.600	1.000



測定誤差考慮前

モデル要素			
データ総数		40	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	4.96	0.124	0.124
c	6.72	0.168	0.292
d	10.32	0.258	0.550
e	18	0.450	1.000



測定誤差考慮後

図-6.10 出見橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

汐入橋 点検集計表(供用53年)			
データ総数 9			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	1	0.111	0.111
c	0	0.000	0.111
d	8	0.889	1.000
e	0	0.000	1.000

モデル要素			
データ総数 9			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0.31	0.034	0.034
b	0.38	0.042	0.077
c	2.66	0.296	0.372
d	4.17	0.463	0.836
e	1.48	0.164	1.000

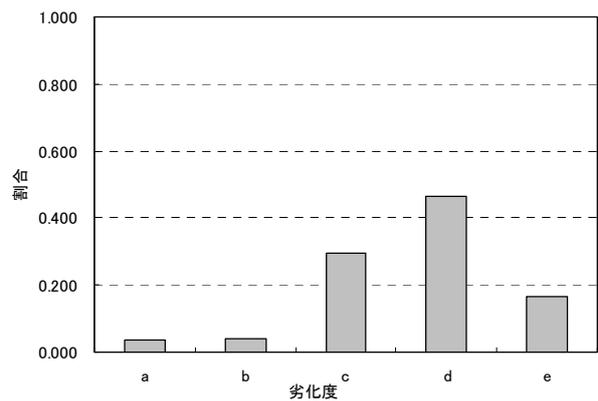
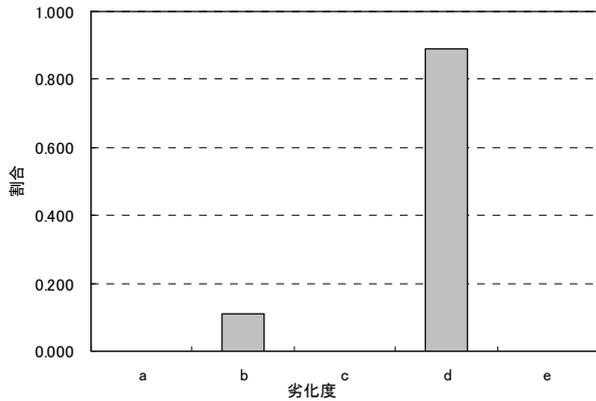


図-6.11 汐入橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

志和川橋 点検集計表(供用37年)			
データ総数 12			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	12	1.000	1.000
b	0	0.000	1.000
c	0	0.000	1.000
d	0	0.000	1.000
e	0	0.000	1.000

モデル要素			
データ総数 12			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	8.28	0.690	0.690
b	2.16	0.180	0.870
c	1.08	0.090	0.960
d	0.48	0.040	1.000
e	0	0.000	1.000

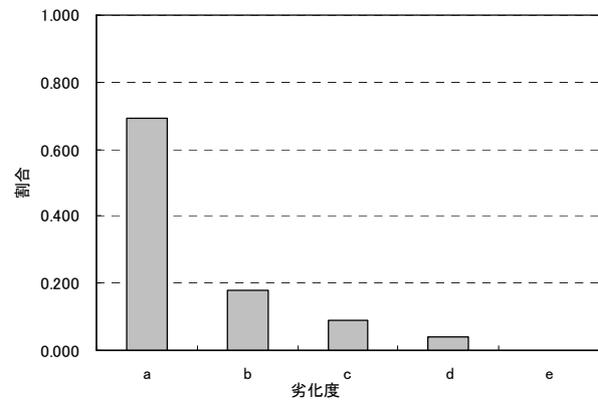
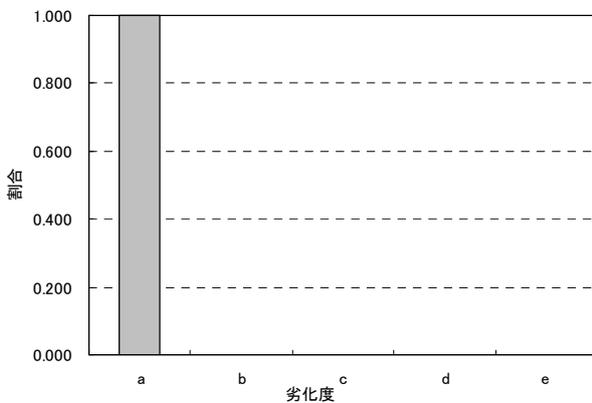
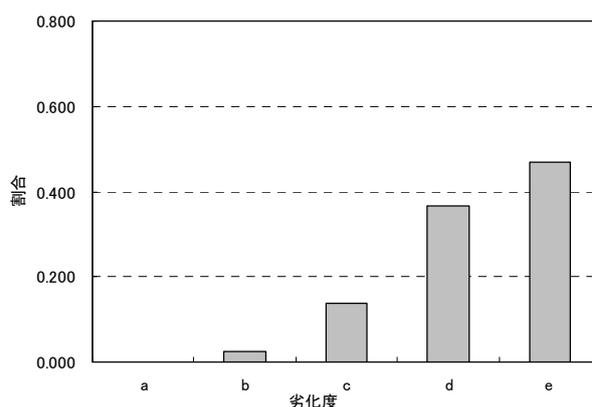
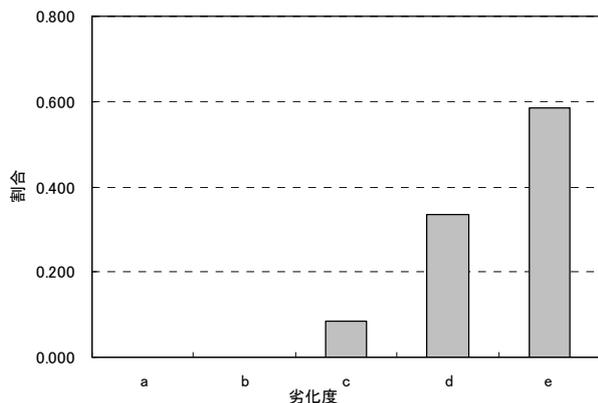


図-6.12 志和川橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

厚生橋 点検集計表(供用38年)			
データ総数 12			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	1	0.083	0.083
d	4	0.333	0.417
e	7	0.583	1.000

モデル要素			
データ総数 12			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0.31	0.026	0.026
c	1.66	0.138	0.164
d	4.39	0.366	0.530
e	5.64	0.470	1.000



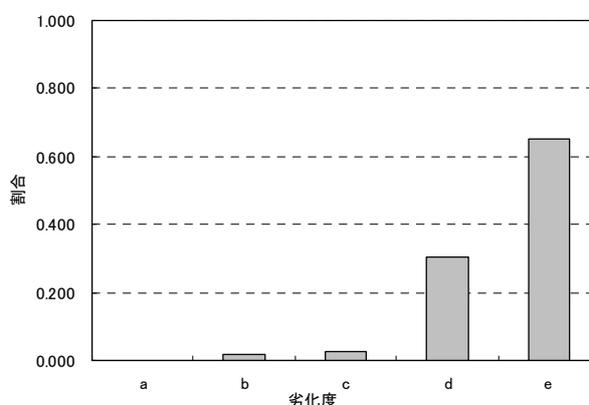
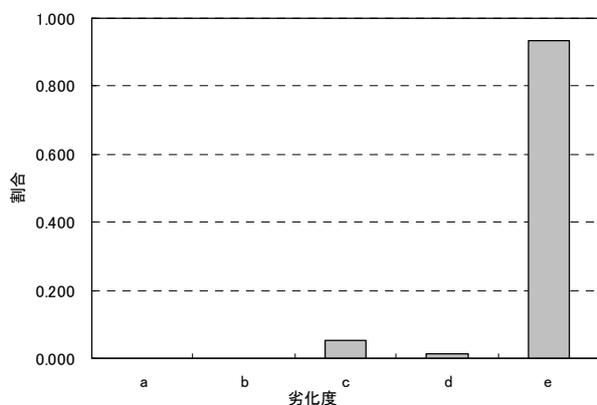
測定誤差考慮前

測定誤差考慮後

図-6.13 厚生橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

五台山橋 点検集計表(供用47年)			
データ総数 76			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	4	0.053	0.053
d	1	0.013	0.066
e	71	0.934	1.000

モデル要素			
データ総数 76			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	1.24	0.016	0.016
c	1.99	0.026	0.043
d	23.24	0.306	0.348
e	49.53	0.652	1.000



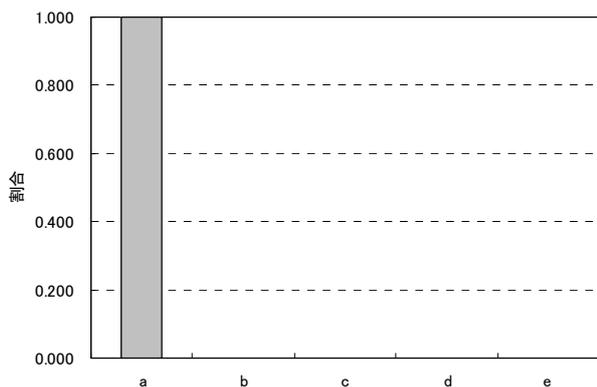
測定誤差考慮前

測定誤差考慮後

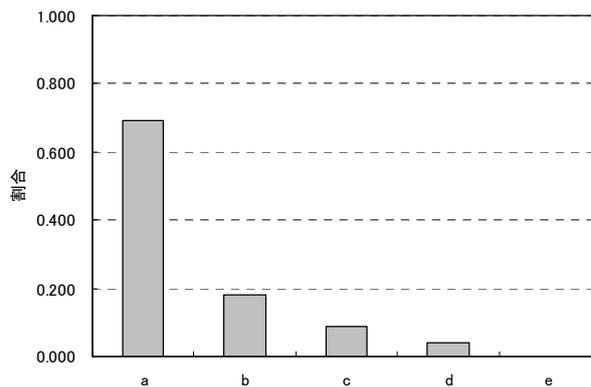
図-6.14 五台山橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

泊浦川橋 点検集計表 (供用32年)			
データ総数		2	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	2	1.000	1.000
b	0	0.000	1.000
c	0	0.000	1.000
d	0	0.000	1.000
e	0	0.000	1.000

モデル要素			
データ総数		2	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1.38	0.690	0.690
b	0.36	0.180	0.870
c	0.18	0.090	0.960
d	0.08	0.040	1.000
e	0	0.000	1.000



測定誤差考慮前

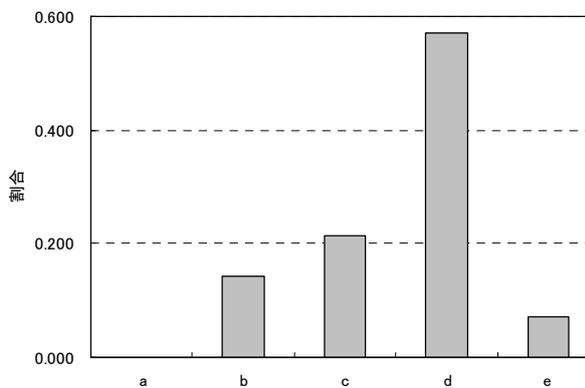


測定誤差考慮後

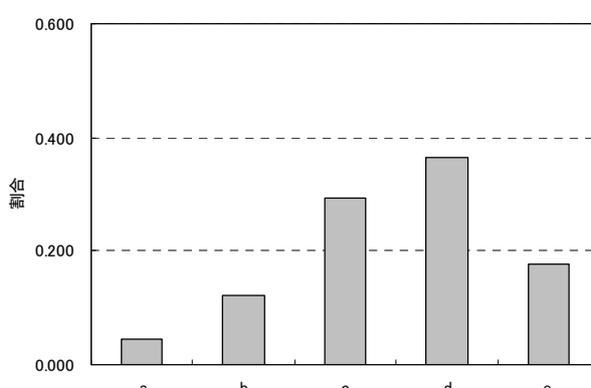
図-6.15 泊浦川橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

大津大橋 点検集計表 (供用22年)			
データ総数		14	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	2	0.143	0.143
c	3	0.214	0.357
d	8	0.571	0.929
e	1	0.071	1.000

モデル要素			
データ総数		14	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0.62	0.044	0.044
b	1.69	0.121	0.165
c	4.1	0.293	0.458
d	5.11	0.365	0.823
e	2.48	0.177	1.000



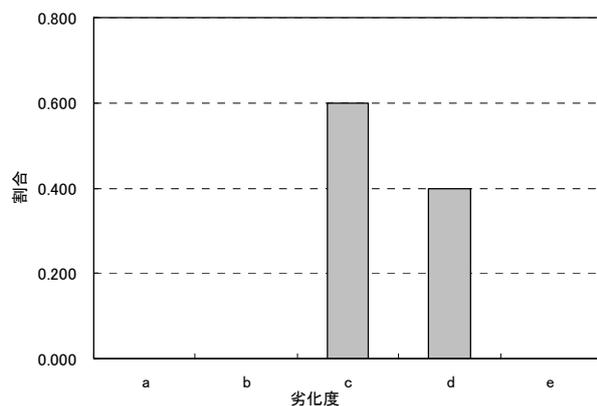
測定誤差考慮前



測定誤差考慮後

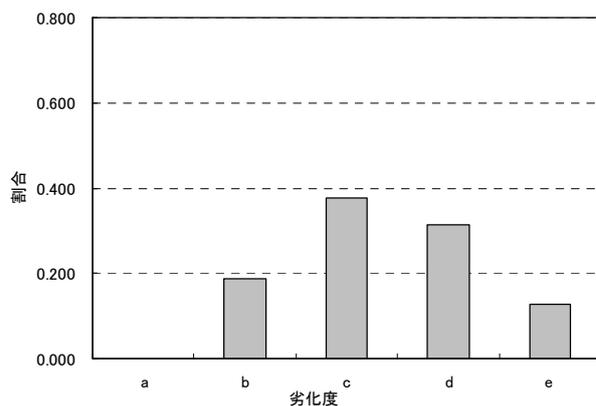
図-6.16 大津大橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

新柏島大橋 点検集計表 (供用18年)			
データ総数 10			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	0	0.000	0.000
c	6	0.600	0.600
d	4	0.400	1.000
e	0	0.000	1.000



測定誤差考慮前

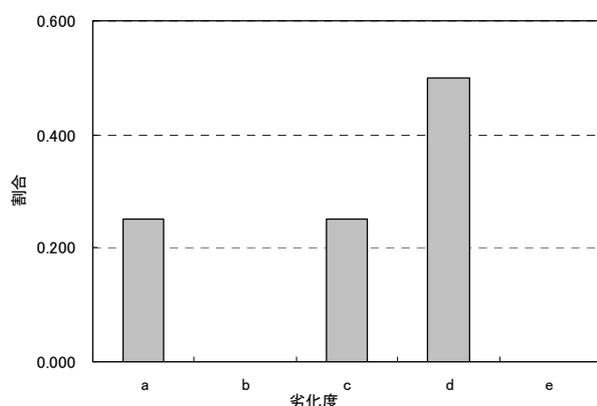
モデル要素			
データ総数 10			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	1.86	0.186	0.186
c	3.76	0.376	0.562
d	3.12	0.312	0.874
e	1.26	0.126	1.000



測定誤差考慮後

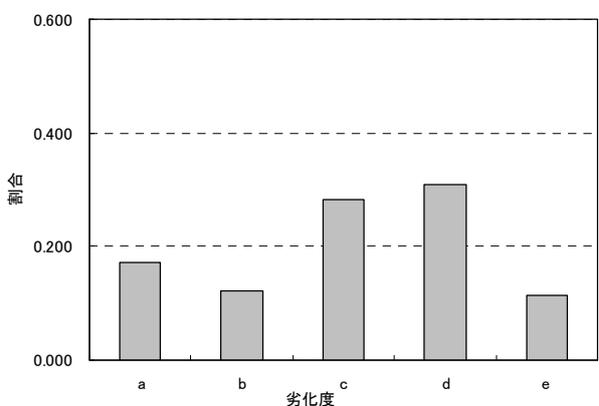
図-6.17 新柏島大橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

水島橋栈道橋 点検集計表 (供用12年)			
データ総数 4			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.250	0.250
b	0	0.000	0.250
c	1	0.250	0.500
d	2	0.500	1.000
e	0	0.000	1.000



測定誤差考慮前

モデル要素			
データ総数 4			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0.69	0.173	0.173
b	0.49	0.123	0.295
c	1.13	0.283	0.578
d	1.24	0.310	0.888
e	0.45	0.113	1.000



測定誤差考慮後

図-6.18 水島栈道橋の測定誤差考慮前と考慮後の点検結果

6.5 初期解析における任意倍数の設定

1)解析対象橋梁の倍数設定結果

本研究では、確定的な劣化予測に対して任意の倍数を与えて実橋のばらつきに補正することを提案している。ここでは、解析対象橋梁の確定的な劣化予測解析に「0 倍速～実橋の劣化分布を網羅できる範囲の倍速」で任意にばらつかせ、測定誤差を考慮した点検結果を用いて補正する。

ここで、実橋の劣化分布を網羅できる範囲の倍速とは、ばらつかせた劣化予測で最も進行している劣化度と実橋の点検結果で最も進行している劣化度が同じになる倍速をいう。なお、実橋の劣化分布は点検結果から得られるが、点検結果には測定誤差と時間誤差を考慮したものをを用いる。すなわち、劣化予測の解析時は点検実施時から4年遡った状態との比較によりおこなう。

対象橋梁に対して、「0 倍速～実橋の劣化分布を網羅できる範囲の倍速」でばらつかせた結果を表-6.6 および図-6.19～6.33 に示す。

表-6.6 対象橋梁における倍数

橋梁名	架設年月	PC or RC	プレテン or ポステン	海岸からの 距離 (m)	倍数
下川口大橋	昭和58年01月	PC	ポステンT	0	1.83
久百々橋	昭和48年03月	PC	ポステンT	0	0.50
益野二の橋	昭和48年03月	RC	—	250	4.95
小才角大橋	昭和47年03月	PC	ポステンT	0	0.70
片粕大橋	昭和59年09月	PC	ポステン箱	0	1.55
新野根橋	昭和54年02月	PC	プレテンT	200	9.90
出見橋	昭和33年03月	RC	—	0	1.55
汐入橋	昭和47年03月	RC	—	90	0.40
志和川橋	昭和46年03月	PC	ポステンT	0	0.06
厚生橋	昭和36年03月	PC	ポステンT	0	0.50
五台山橋	昭和40年03月	PC	ポステンT	250	3.41
泊浦川橋	昭和54年08月	RC	—	0	0.10
大津大橋	昭和62年03月	PC	ポステン箱	30	5.50
新柏島大橋	平成05年08月	PC	ポステン箱	0	7.61
水島橋棧道橋	平成08年	PC	プレテン床版	16	24.75

下川口大橋 初期解析集計表 (供用21年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	12	0.120	0.130
c	6	0.060	0.190
d	72	0.720	0.910
e	9	0.090	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

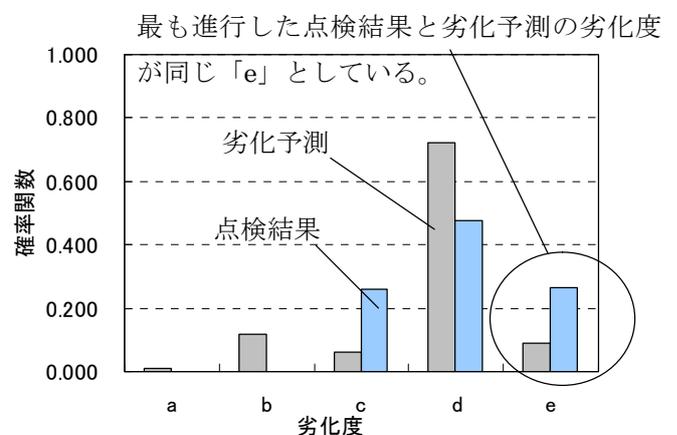


図-6.19 下川口大橋の点検結果(供用 25 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 21 年)

久百々橋 初期解析集計表 (供用30年)			
データ総数 50			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.020	0.020
b	6	0.120	0.140
c	3	0.060	0.200
d	38	0.760	0.960
e	2	0.040	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

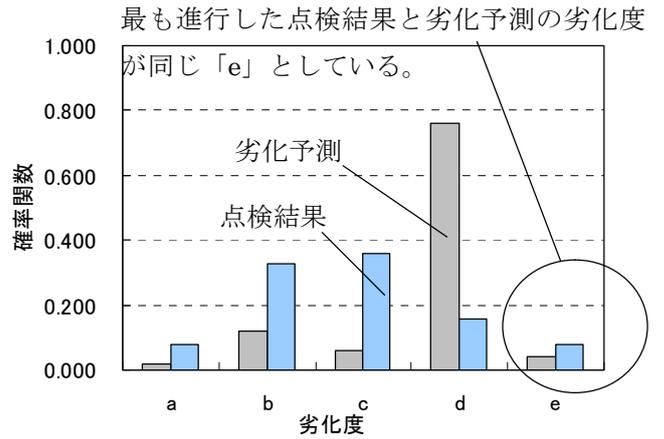


図-6.20 久百々橋の点検結果(供用 34 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 30 年)

益野二の橋 初期解析集計表 (供用30年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	13	0.130	0.140
c	7	0.070	0.210
d	77	0.770	0.980
e	2	0.020	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

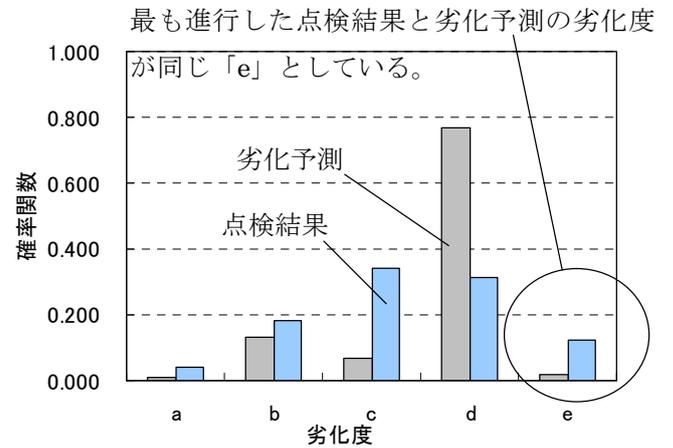


図-6.21 益野二の橋の点検結果(供用 34 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 30 年)

小才角大橋 初期解析集計表 (供用32年)			
データ総数 70			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.014	0.014
b	6	0.086	0.100
c	2	0.029	0.129
d	35	0.500	0.629
e	26	0.371	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

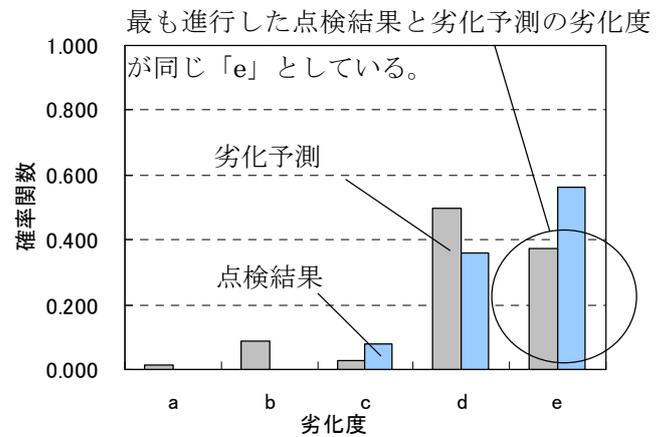


図-6.22 小才角橋の点検結果(供用 36 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 32 年)

片粕大橋 初期解析集計表(供用20年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	12	0.120	0.130
c	6	0.060	0.190
d	71	0.710	0.900
e	10	0.100	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

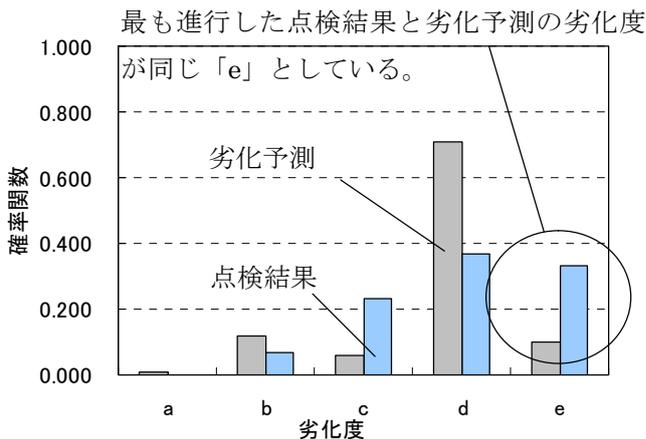


図-6.23 片粕大橋の点検結果(供用24年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用20年)

新野根橋 初期解析集計表(供用24年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	12	0.120	0.130
c	6	0.060	0.190
d	73	0.730	0.920
e	8	0.080	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

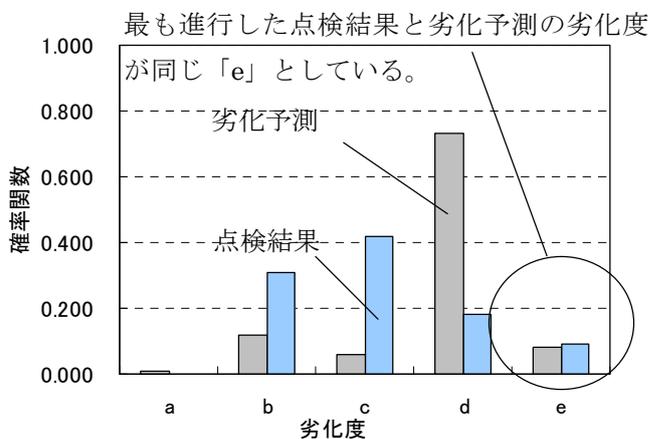


図-6.24 新野根橋の点検結果(供用28年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用24年)

出見橋 初期解析集計表(供用19年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	2	0.020	0.020
b	13	0.130	0.150
c	7	0.070	0.220
d	77	0.770	0.990
e	1	0.010	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

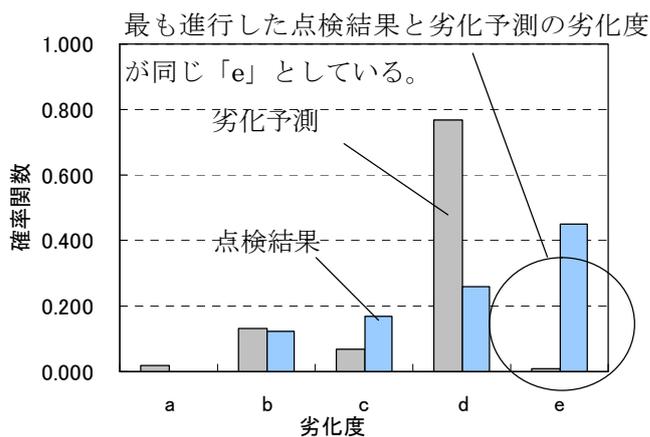


図-6.25 出見橋の点検結果(供用23年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用19年)

汐入橋 初期解析集計表 (供用49年)			
データ総数		40	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.025	0.025
b	5	0.125	0.150
c	3	0.075	0.225
d	30	0.750	0.975
e	1	0.025	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

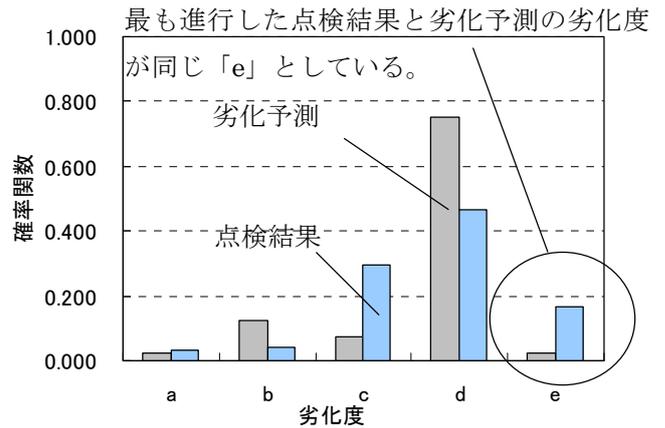


図-6.26 汐入橋の点検結果(供用 53 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 49 年)

志和川橋 初期解析集計表 (供用33年)			
データ総数		10	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.100	0.100
b	5	0.500	0.600
c	3	0.300	0.900
d	1	0.100	1.000
e	0	0.000	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

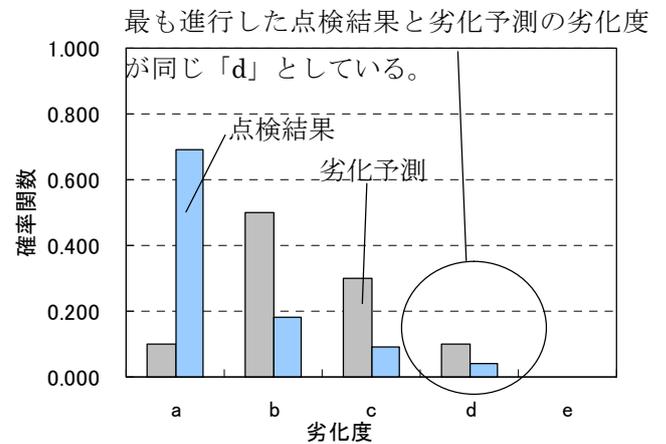


図-6.27 志和川橋の点検結果(供用 37 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 33 年)

厚生橋 初期解析集計表 (供用34年)			
データ総数		50	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.020	0.020
b	5	0.100	0.120
c	2	0.040	0.160
d	28	0.560	0.720
e	14	0.280	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

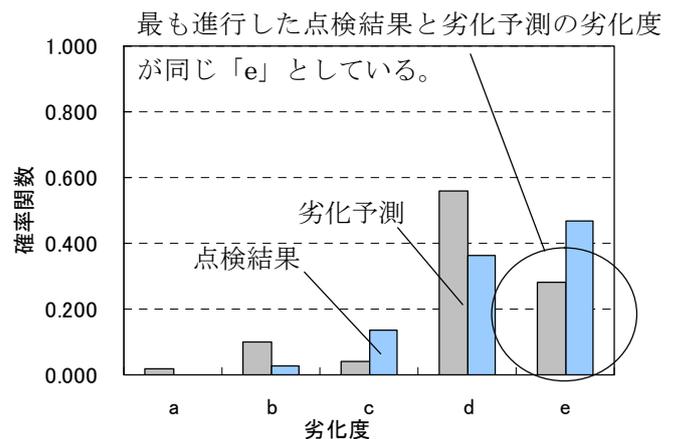


図-6.28 厚生橋の点検結果(供用 38 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 34 年)

五台山橋 初期解析集計表(供用43年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	6	0.060	0.070
c	2	0.020	0.090
d	34	0.340	0.430
e	57	0.570	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

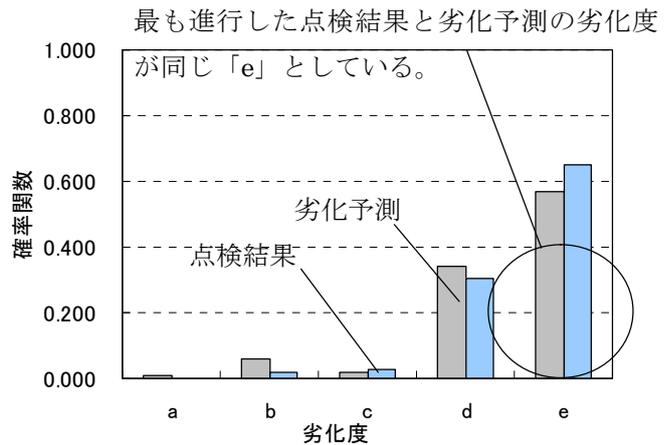


図-6.29 五台山橋の点検結果(供用 47 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 43 年)

泊浦川橋 初期解析集計表(供用28年)			
データ総数 11			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.091	0.091
b	6	0.545	0.636
c	3	0.273	0.909
d	1	0.091	1.000
e	0	0.000	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

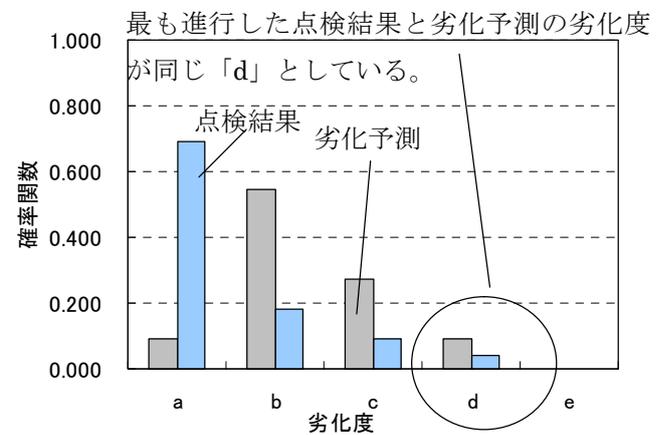


図-6.30 泊浦川橋の点検結果(供用 32 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 28 年)

大津大橋 初期解析集計表(供用18年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	13	0.130	0.140
c	6	0.060	0.200
d	77	0.770	0.970
e	3	0.030	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

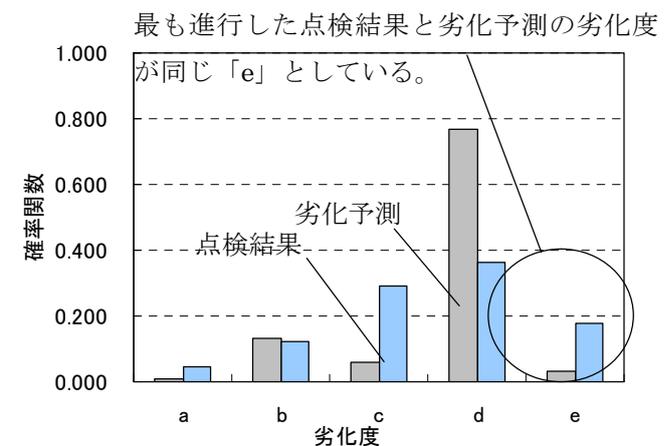


図-6.31 大津大橋の点検結果(供用 22 年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用 18 年)

新柏島大橋 初期解析集計表(供用14年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	12	0.120	0.130
c	6	0.060	0.190
d	74	0.740	0.930
e	7	0.070	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

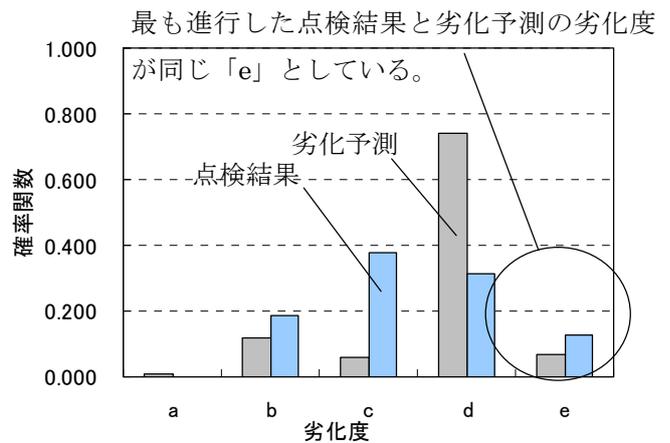


図-6.32 新柏島大橋の点検結果(供用18年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用14年)

水島橋棧道橋 初期解析集計表(供用8年)			
データ総数 100			
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	1	0.010	0.010
b	12	0.120	0.130
c	6	0.060	0.190
d	71	0.710	0.900
e	10	0.100	1.000

任意にばらつかせた劣化予測結果

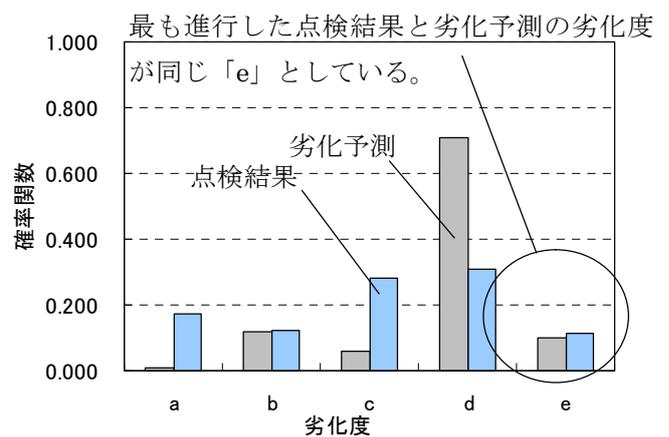


図-6.33 水島橋棧道橋の点検結果(供用12年)と任意にばらつかせた劣化予測(供用8年)

2)初期解析における倍数設定の傾向分析

以上の解析対象橋梁 17 橋は、「かぶり」、「水セメント比」、「飛来塩分量」の条件から 8 種類のグループに分けることができる。グループに分類した結果を表-6.7 に示す。表-6.7 から各グループの平均倍速が算出される。これは点検結果が存在しない新設橋の劣化予測に対する適用が考えられる。

表-6.7 対象橋梁におけるグループ化と平均倍速

No.	グループ (かぶり-W/C-飛来塩分量)	対象橋梁	平均倍速
1	25mm-0.36-800mg/m ²	水島橋栈道橋	24.75
2	35mm-0.36-350mg/m ²	新野根橋	9.90
3	35mm-0.43-300mg/m ²	五台山橋	3.41
4	35mm-0.43-600mg/m ²	大津大橋	5.50
5	35mm-0.43-800mg/m ²	下川口大橋、久百々橋、小才角大橋、片粕大橋、志和川橋、厚生橋、新柏島大橋	1.81
6	35mm-0.50-300mg/m ²	益野ニの橋	4.95
7	35mm-0.50-400mg/m ²	汐入橋	0.40
8	35mm-0.50-800mg/m ²	出見橋、泊浦川橋	0.83

6.6 点検結果を用いた劣化予測の補正

1)概要

次に解析対象橋梁に対して点検結果を用いて劣化予測の補正を実施する。点検結果を用いた劣化予測の補正の考え方は第 3 章の方法を用いるものとする。ここでは、先ほどグルーピングした 8 グループの代表橋梁について補正例を示す。代表橋梁は各グループで最も要素数が多い橋梁とし、「水島橋栈道橋」、「新野根橋」、「五台山橋」、「大津大橋」、「新柏島大橋」、「益野ニの橋」、「汐入橋」、「出見橋」とする。これらの橋梁の解析条件は表-6.4 にも示しているとおりでである。また、現時点で 2 巡目点検を実施しているのは「新野根橋」のみである。よって、「新野根橋」については 1 回目の点検結果で劣化予測の補正を行い、2 回目点検で検証を実施する。

2)水島橋栈道橋の点検結果を用いた補正例

a)初期解析における水島橋栈道橋の劣化予測結果

水島橋栈道橋について、任意にばらつかせた劣化予測解析を実施した結果、確定的な劣化速度に 0 倍速から 24.75 倍で実橋の点検結果を網羅できる倍数となった。この 24.75 倍は非常に大きな数値であるが、この様な数値になった考察は後述する。なお、劣化速度の本数は 100 本としている。点検実施時(供用 12 年)における解析結果と実橋の測定誤差、時間誤差を含んだ点検結果との劣化度分布の比較は図-6.33 に示している。また、劣化度と経年における解析結果を図-6.34 に示す。以上の図に示す様に、点検実施時(供用 12 年)における解析結果と点検結果の劣化度分布は、いくつかの違いが確認できる。点検結果では「a」の判定区分の割合は 17.25%、「b」の判定区分の割合は 12.25%

となっているが、解析結果の劣化表現率では「a」区分が 1.0%、「b」区分が 3.0%と点検結果に対して、非常に小さい。また、点検結果では「c」の判定区分が 28.25%、「d」の判定区分は 31.0%および「e」の判定区分が 11.25%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が 1.0%、「d」が 19.0%、「e」が 76.0%となっており、解析の「劣化度」の分布を補正する必要がある。よって、ばらつかせた劣化速度の 1 本当たりの「劣化表現率」を補正し、劣化度の分布を点検結果の分布と整合させる。

b) 点検結果を用いた水島橋栈道橋の補正方法、補正結果

第 3 章に示した補正方法を用いて下記の通り解析における劣化度分布を補正する。なお、点検結果に時間誤差があることは示しているが、下記の補正は時間誤差を考慮する前の点検結果に対する補正例を示す。時間誤差を含めた補正は c)に示す。

- i) 点検を実施した供用 12 年の時の劣化度について「a」は、解析でばらつかせた劣化速度が 1 本あるため、補正前の劣化表現率としては 1%となるが、点検では「a」区分が 17.25%となっている。よって、解析における「a」となる 1 本の劣化速度の「劣化表現率」を 17.25%と置き換えることで、点検結果と整合する。
- ii) 同様に「b」は、解析でばらつかせた劣化速度が 3 本あるため、補正前の劣化表現率としては 3.0%となるが、点検では「b」区分が 12.25%となっている。よって、解析における「b」となる 3 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $12.25 \div 3 = 4.08\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- iii) 同様に初期解析において、劣化度が「c」となる劣化速度は 1 本あるため、補正前の劣化表現率としては 1.0%となるが、点検結果では 28.25%存在する。よって、この劣化速度の「劣化表現率」は 1 本当たり 1%から 28.25%に補正することで、点検結果と整合する。

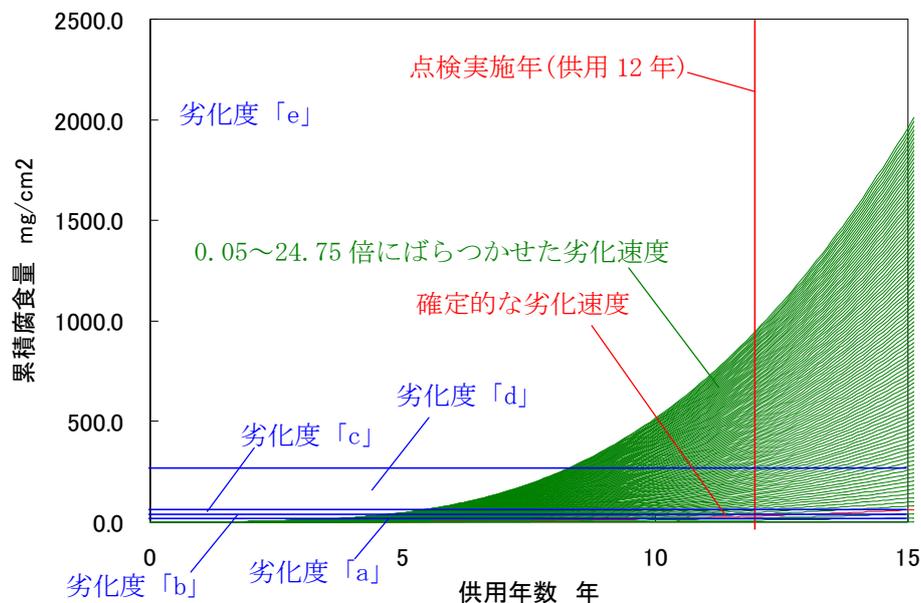


図-6.34 水島橋栈道橋の解析における「予想劣化速度」と劣化度の状況

- iv) 同様に「d」は、解析でばらつかせた劣化速度が 19 本あるため、補正前の劣化表現率としては 19.0%となるが、点検では「d」区分が 31.0%となっている。よって、解析における「d」となる 19 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $31.0 \div 19 = 1.63\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- v) 同様に「e」は、解析でばらつかせた劣化速度が 76 本あるため、補正前の劣化表現率としては 76.0%となるが、点検では「e」区分が 11.25%となっている。よって、解析における「e」となる 76 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $11.25 \div 76 = 0.15\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- c) 点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測の補正

ここで、第 4 章で示した点検結果の時間誤差を考慮した補正を実施する。第 4 章に示した様に、点検結果には、実際にその劣化状態になった時間と点検実施時の時間が異なるため、誤差が生じる。これを考慮して 1 年前～4 年前に点検結果の状態になった可能性を考慮した補正を実施する。最終的な劣化予測は図-6.35 に示すように、点検実施時～4 年前で補正した結果の平均を採用する。

また、表-6.8 に点検実施時～4 年前で補正した結果を平均した劣化評点一覧(採用値)を示す。

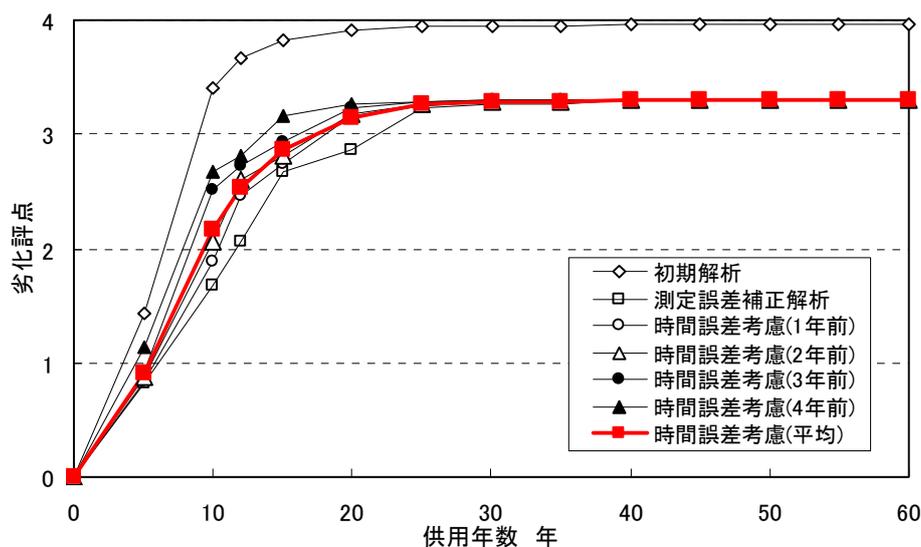


図-6.35 水島橋棧道橋の劣化予測解析における時間誤差考慮した劣化評点

表-6.8 時間誤差を考慮した点検結果で補正した劣化予測の劣化評点一覧

劣化度	劣化度 点数	測定誤差および時間的誤差を考慮した解析(平均)													
		0	5	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
a	0	1.00	0.22	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
b	1	0.00	0.67	0.19	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
c	2	0.00	0.08	0.11	0.07	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d	3	0.00	0.03	0.36	0.41	0.32	0.12	0.05	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
e	4	0.00	0.00	0.17	0.27	0.45	0.68	0.78	0.80	0.80	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
劣化度評点		0	0.917	2.16	2.534	2.863	3.14	3.261	3.285	3.285	3.31	3.31	3.31	3.31	3.31

3) 新野根橋の点検結果を用いた補正例

a) 初期解析における新野根橋の劣化予測結果

新野根橋について、任意にばらつかせた劣化予測解析を実施した結果、確定的な劣化速度に 0 倍速から 9.90 倍で実橋の点検結果を網羅できる倍数となった。なお、劣化速度の本数は 100 本としている。点検実施時(供用 28 年)における解析結果と実橋の測定誤差、時間誤差を含んだ点検結果との劣化度分布の比較は図-6.24 に示している。また、劣化度と経年における解析結果を図-6.36 に示す。以上の図に示す様に、点検実施時(供用 28 年)における解析結果と点検結果の劣化度分布は、いくつかの違いが確認できる。点検結果では「a」の判定区分の割合は 0.0%、「b」の判定区分の割合は 31.0%となっているが、解析結果の劣化表現率では「a」区分が 1.0%、「b」区分が 12.0%となっている。また、点検結果では「c」の判定区分が 42.0%、「d」の判定区分は 18.0%および「e」の判定区分が 9.0%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が 6.0%、「d」が 73.0%、「e」が 8.0%となっており、解析の「劣化度」の分布を補正する必要がある。よって、ばらつかせた劣化速度の 1 本当たりの「劣化表現率」を補正し、劣化度の分布を点検結果の分布と整合させる。

b) 点検結果を用いた新野根橋の補正方法、補正結果

第 3 章に示した補正方法を用いて下記の通り解析における劣化度分布を補正する。なお、点検結果に時間誤差があることは示しているが、下記の補正は時間誤差を考慮する前の点検結果に対する補正例を示す。時間誤差を含めた補正は c)に示す。

- i) 点検を実施した供用 28 年の時の劣化度について「a」は、解析でばらつかせた劣化速度が 1 本あるため、補正前の劣化表現率としては 1%となるが、点検では「a」区分が 0.0%となっている。よって、解析における「a」となる 1 本の劣化速度の「劣化表現率」を 0.0%と置き換えることで、点検結果と整合する。

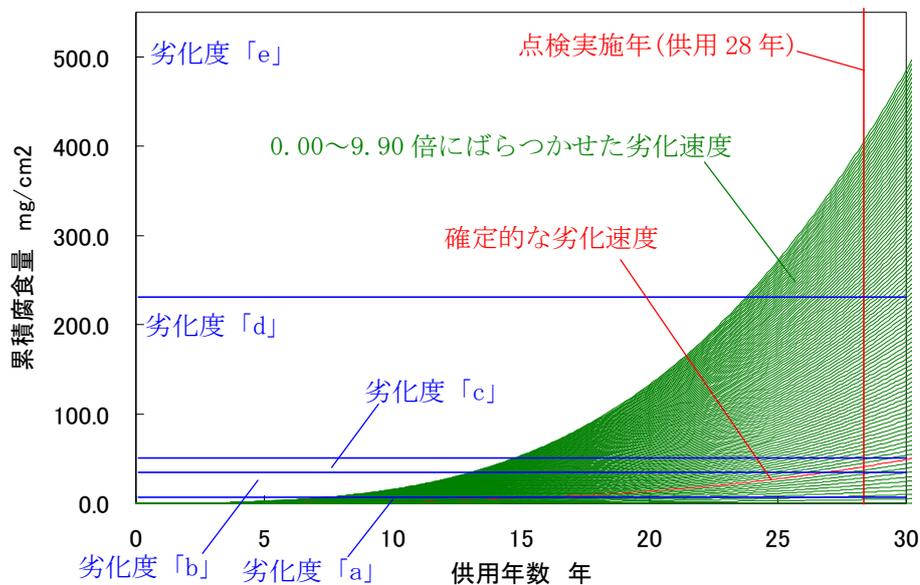


図-6.36 新野根橋の解析における「予想劣化速度」と劣化度の状況

- ii) 同様に「b」は、解析でばらつかせた劣化速度が 7 本あるため、補正前の劣化表現率としては 7.0% となるが、点検では「b」区分が 31.0%となっている。よって、解析における「b」となる 7 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $31.0 \div 7 = 4.43\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- iii) 同様に初期解析において、劣化度が「c」となる劣化速度は 4 本あるため、補正前の劣化表現率としては 4.0%となるが、点検結果では 42.0%存在する。よって、この劣化速度の「劣化表現率」は 1 本当たり 4%から 42.0%に補正することで、点検結果と整合する。
- iv) 同様に「d」は、解析でばらつかせた劣化速度が 44 本あるため、補正前の劣化表現率としては 44.0%となるが、点検では「d」区分が 18.0%となっている。よって、解析における「d」となる 44 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $18 \div 44 = 0.41\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- v) 同様に「e」は、解析でばらつかせた劣化速度が 44 本あるため、補正前の劣化表現率としては 44.0%となるが、点検では「e」区分が 9.0%となっている。よって、解析における「e」となる 44 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $9.0 \div 44 = 0.20\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。

c) 点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測の補正

ここで、第 4 章で示した点検結果の時間誤差を考慮した補正を実施する。第 4 章に示した様に、点検結果には、実際にその劣化状態になった時間と点検実施時の時間が異なるため、誤差が生じる。これを考慮して 1 年前～4 年前に点検結果の状態になった可能性を考慮した補正を実施する。最終的な劣化予測は図-6.37 に示すように、点検実施時～4 年前で補正した結果の平均を採用する。

また、表-6.9 に点検実施時～4 年前で補正した結果を平均した劣化評点一覧(採用値)を示す。

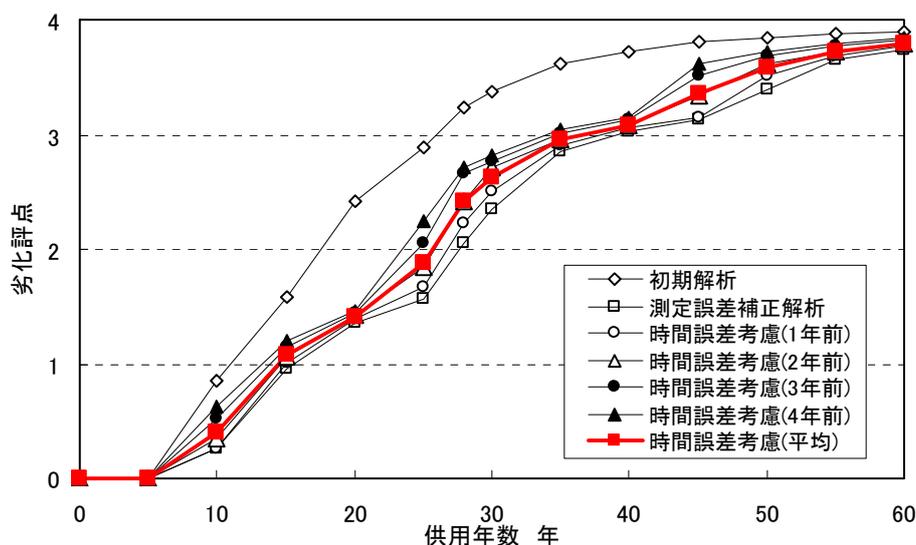


図-6.37 新野根橋の劣化予測解析における時間誤差考慮した劣化評点

表-6.9 時間誤差を考慮した点検結果で補正した劣化予測の劣化評点一覧

劣化度	劣化度 点数	測定誤差および時間的誤差を考慮した解析(平均)													
		0	5	10	15	20	25	28	30	35	40	45	50	55	60
a	0	1.00	1.00	0.60	0.14	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
b	1	0.00	0.00	0.40	0.72	0.72	0.49	0.24	0.21	0.10	0.07	0.03	0.03	0.00	0.00
c	2	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04	0.22	0.25	0.15	0.07	0.03	0.03	0.00	0.03	0.03
d	3	0.00	0.00	0.00	0.07	0.21	0.22	0.38	0.48	0.60	0.64	0.48	0.31	0.21	0.14
e	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.14	0.17	0.23	0.26	0.45	0.65	0.76	0.83
劣化度評点		0	0	0.405	1.073	1.417	1.873	2.411	2.632	2.952	3.084	3.351	3.585	3.725	3.794

4) 五台山橋の点検結果を用いた補正例

a) 初期解析における五台山橋の劣化予測結果

五台山橋について、任意にばらつかせた劣化予測解析を実施した結果、確定的な劣化速度に 0 倍速から 3.41 倍で実橋の点検結果を網羅できる倍数となった。なお、劣化速度の本数は 100 本としている。点検実施時(供用 47 年)における解析結果と実橋の測定誤差、時間誤差を含んだ点検結果との劣化度分布の比較は図-6.29 に示している。また、劣化度と経年における解析結果を図-6.38 に示す。以上の図に示す様に、点検実施時(供用 47 年)における解析結果と点検結果の劣化度分布は、いくつかの違いが確認できる。点検結果では「a」の判定区分の割合は 0.0%、「b」の判定区分の割合は 1.63%となっているが、解析結果の劣化表現率では「a」区分が 1.0%、「b」区分が 4.0%となっている。また、点検結果では「c」の判定区分が 0.26%、「d」の判定区分は 30.57%および「e」の判定区分が 65.17%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が 2.0%、「d」が 26.0%、「e」が 67.0%となっており、解析の「劣化度」の分布を補正する必要がある。よって、ばらつかせた劣化速度の 1 本当たりの「劣化表現率」を補正し、劣化度の分布を点検結果の分布と整合させる。

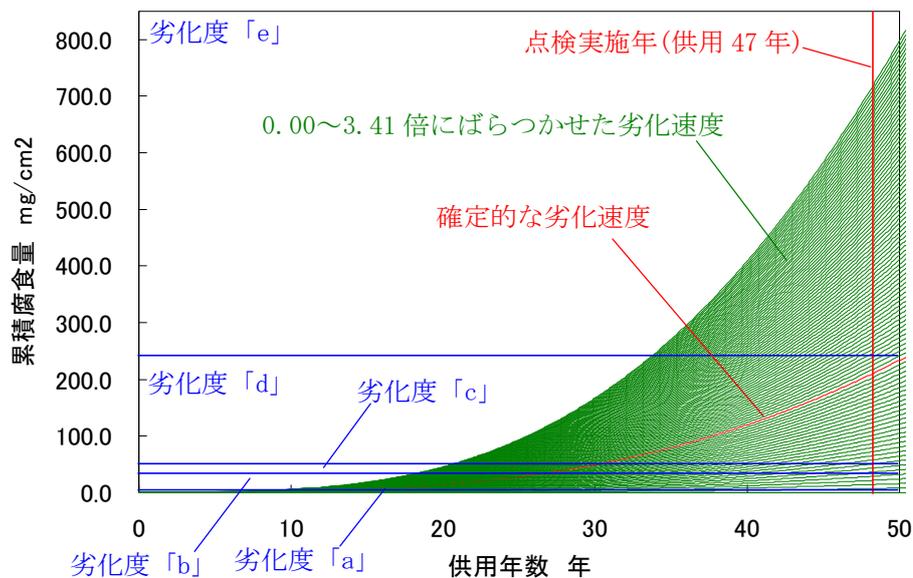


図-6.38 五台山橋の解析における「予想劣化速度」と劣化度の状況

b) 点検結果を用いた五台山橋の補正方法、補正結果

第 3 章に示した補正方法を用いて下記の通り解析における劣化度分布を補正する。なお、点検結果に時間誤差があることは示しているが、下記の補正は時間誤差を考慮する前の点検結果に対する補正例を示す。時間誤差を含めた補正は c) に示す。

- i) 点検を実施した供用 47 年の時の劣化度について「a」は、解析でばらつかせた劣化速度が 1 本あるため、補正前の劣化表現率としては 1%となるが、点検では「a」区分が 0.0%となっている。よって、解析における「a」となる 1 本の劣化速度の「劣化表現率」を 0.0%と置き換えることで、点検結果と整合する。
- ii) 同様に「b」は、解析でばらつかせた劣化速度が 4 本あるため、補正前の劣化表現率としては 4.0%となるが、点検では「b」区分が 1.63%となっている。よって、解析における「b」となる 4 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $1.63 \div 4 = 0.41\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- iii) 同様に初期解析において、劣化度が「c」となる劣化速度は 2 本あるため、補正前の劣化表現率としては 2.0%となるが、点検結果では 0.26%存在する。よって、この劣化速度の「劣化表現率」は 1 本当たり 2%から 0.26%に補正することで、点検結果と整合する。
- iv) 同様に「d」は、解析でばらつかせた劣化速度が 26 本あるため、補正前の劣化表現率としては 26.0%となるが、点検では「d」区分が 30.57%となっている。よって、解析における「d」となる 26 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $30.57 \div 26 = 1.18\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- v) 同様に「e」は、解析でばらつかせた劣化速度が 67 本あるため、補正前の劣化表現率としては 67.0%となるが、点検では「e」区分が 65.17%となっている。よって、解析における「e」となる 67 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $65.17 \div 67 = 0.98\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。

c) 点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測の補正

ここで、第 4 章で示した点検結果の時間誤差を考慮した補正を実施する。第 4 章に示した様に、点検結果には、実際にその劣化状態になった時間と点検実施時の時間が異なるため、誤差が生じる。これを考慮して 1 年前～4 年前に点検結果の状態になった可能性を考慮した補正を実施する。最終的な劣化予測は図-6.39 に示すように、点検実施時～4 年前で補正した結果の平均を採用する。

また、表-6.10 に点検実施時～4 年前で補正した結果を平均した劣化評点一覧(採用値)を示す。

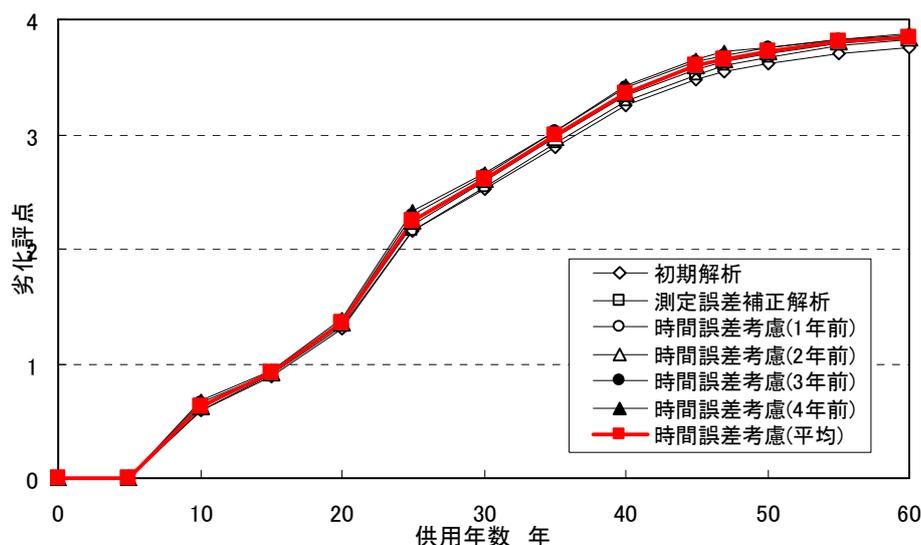


図-6.39 五台山橋の劣化予測解析における時間誤差考慮した劣化評点

表-6.10 時間誤差を考慮した点検結果で補正した劣化予測の劣化評点一覧

劣化度	劣化度 点数	測定誤差および時間的誤差を考慮した解析(平均)													
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	47	50	55	60
a	0	1.00	1.00	0.37	0.08	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
b	1	0.00	0.00	0.63	0.92	0.64	0.29	0.15	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
c	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.15	0.08	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00
d	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.55	0.76	0.67	0.43	0.31	0.27	0.23	0.16	0.12
e	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.49	0.65	0.70	0.75	0.83	0.87
劣化度評点		0	0	0.633	0.918	1.356	2.245	2.605	2.985	3.363	3.591	3.658	3.722	3.804	3.848

5) 大津大橋の点検結果を用いた補正例

a) 初期解析における大津大橋の劣化予測結果

大津大橋について、任意にばらつかせた劣化予測解析を実施した結果、確定的な劣化速度に 0 倍速から 5.50 倍で実橋の点検結果を網羅できる倍数となった。なお、劣化速度の本数は 100 本としている。点検実施時(供用 22 年)における解析結果と実橋の測定誤差、時間誤差を含んだ点検結果との劣化度分布の比較は図-6.31 に示している。また、劣化度と経年における解析結果を図-6.40 に示す。以上の図に示す様に、点検実施時(供用 22 年)における解析結果と点検結果の劣化度分布は、いくつかの違いが確認できる。点検結果では「a」の判定区分の割合は 4.42%、「b」の判定区分の割合は 12.07%となっているが、解析結果の劣化表現率では「a」区分が 1.0%、「b」区分が 6.0%となっている。また、点検結果では「c」の判定区分が 29.28%、「d」の判定区分は 36.5%および「e」の判定区分が 17.71%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が 4.0%、「d」が 38.0%、「e」が 51.0%となっており、解析の「劣化度」の分布を補正する必要がある。よって、ばらつかせた劣化速度の 1 本当たりの「劣化表現率」を補正し、劣化度の分布を点検結果の分布と整合させる。

b) 点検結果を用いた大津大橋の補正方法、補正結果

第 3 章に示した補正方法を用いて下記の通り解析における劣化度分布を補正する。なお、点検結果に時間誤差があることは示しているが、下記の補正は時間誤差を考慮する前の点検結果に対する補正

例を示す。時間誤差を含めた補正は c) に示す。

- i) 点検を実施した供用 22 年の時の劣化度について「a」は、解析でばらつかせた劣化速度が 1 本あるため、補正前の劣化表現率としては 1%となるが、点検では「a」区分が 4.42%となっている。よって、解析における「a」となる 1 本の劣化速度の「劣化表現率」を 4.42%と置き換えることで、点検結果と整合する。
 - ii) 同様に「b」は、解析でばらつかせた劣化速度が 6 本あるため、補正前の劣化表現率としては 6.0%となるが、点検では「b」区分が 12.07%となっている。よって、解析における「b」となる 6 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $12.07 \div 6 = 2.01\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
 - iii) 同様に初期解析において、劣化度が「c」となる劣化速度は 4 本あるため、補正前の劣化表現率としては 4.0%となるが、点検結果では 29.28%存在する。よって、この劣化速度の「劣化表現率」は 1 本当たり 4%から 29.28%に補正することで、点検結果と整合する。
 - iv) 同様に「d」は、解析でばらつかせた劣化速度が 38 本あるため、補正前の劣化表現率としては 38.0%となるが、点検では「d」区分が 36.5%となっている。よって、解析における「d」となる 38 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $36.5 \div 38 = 0.96\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
 - v) 同様に「e」は、解析でばらつかせた劣化速度が 51 本あるため、補正前の劣化表現率としては 51.0%となるが、点検では「e」区分が 17.71%となっている。よって、解析における「e」となる 51 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $17.71 \div 51 = 0.35\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- c) 点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測の補正

ここで、第 4 章で示した点検結果の時間誤差を考慮した補正を実施する。第 4 章に示した様に、

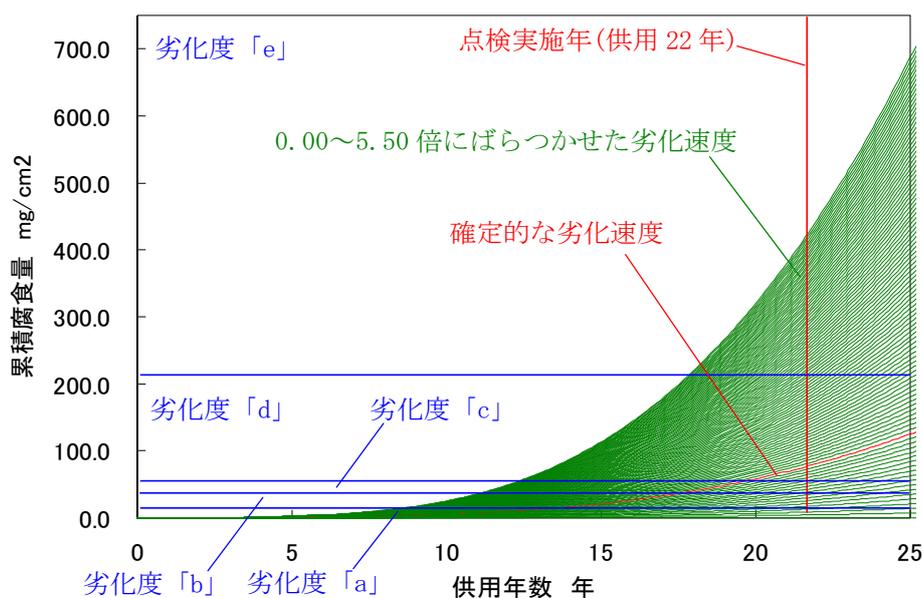


図-6.40 大津大橋の解析における「予想劣化速度」と劣化度の状況

点検結果には、実際にその劣化状態になった時間と点検実施時の時間が異なるため、誤差が生じる。これを考慮して1年前～4年前に点検結果の状態になった可能性を考慮した補正を実施する。最終的な劣化予測は図-6.41に示すように、点検実施時～4年前で補正した結果の平均を採用する。

また、表-6.11に点検実施時～4年前で補正した結果を平均した劣化評点一覧(採用値)を示す。

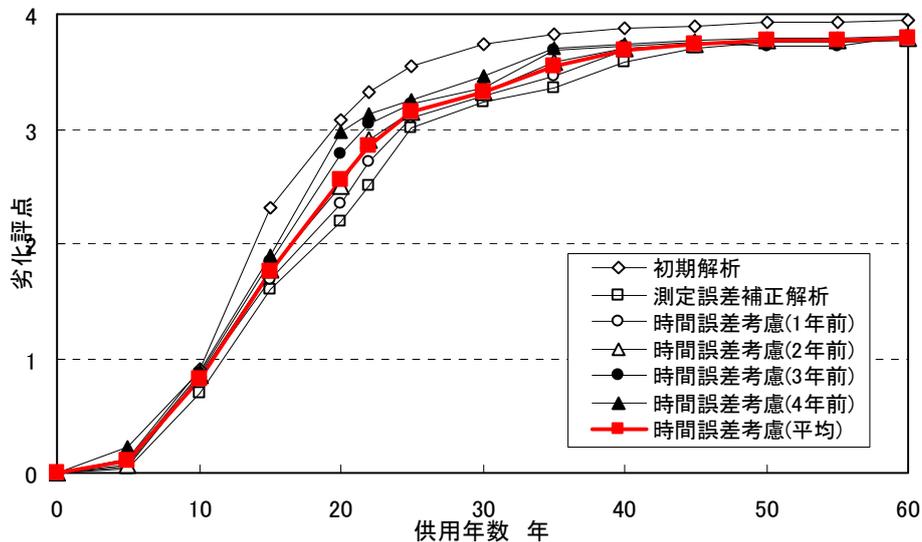


図-6.41 大津大橋の劣化予測解析における時間誤差考慮した劣化評点

表-6.11 時間誤差を考慮した点検結果で補正した劣化予測の劣化評点一覧

劣化度	劣化度 点数	測定誤差および時間的誤差を考慮した解析(平均)													
		0	5	10	15	20	22	25	30	35	40	45	50	55	60
a	0	1.00	0.90	0.18	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
b	1	0.00	0.10	0.82	0.49	0.17	0.08	0.06	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
c	2	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	0.14	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
d	3	0.00	0.00	0.00	0.37	0.43	0.43	0.46	0.38	0.20	0.09	0.06	0.04	0.04	0.03
e	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.30	0.42	0.53	0.73	0.85	0.89	0.91	0.91	0.93
劣化度評点		0	0.098	0.824	1.761	2.563	2.858	3.146	3.33	3.556	3.688	3.74	3.768	3.768	3.795

6)新柏島大橋の点検結果を用いた補正例

a)初期解析における新柏島大橋の劣化予測結果

新柏島大橋について、任意にばらつかせた劣化予測解析を実施した結果、確定的な劣化速度に0倍速から1.81倍で実橋の点検結果を網羅できる倍数となった。なお、劣化速度の本数は100本としている。点検実施時(供用18年)における解析結果と実橋の測定誤差、時間誤差を含んだ点検結果との劣化度分布の比較は図-6.32に示している。また、劣化度と経年における解析結果を図-6.42に示す。以上の図に示す様に、点検実施時(供用18年)における解析結果と点検結果の劣化度分布は、いくつかの違いが確認できる。点検結果では「a」の判定区分の割合は0.0%、「b」の判定区分の割合は18.6%となっているが、解析結果の劣化表現率では「a」区分が1.0%、「b」区分が5.0%となっている。また、点検結果では「c」の判定区分が37.6%、「d」の判定区分は31.2%および「e」の判定区分が12.6%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が2.0%、「d」が29.0%、「e」が

63.0%となっており、解析の「劣化度」の分布を補正する必要がある。よって、ばらつかせた劣化速度の1本当たりの「劣化表現率」を補正し、劣化度の分布を点検結果の分布と整合させる。

b) 点検結果を用いた新柏島大橋の補正方法、補正結果

第3章に示した補正方法を用いて下記の通り解析における劣化度分布を補正する。なお、点検結果に時間誤差があることは示しているが、下記の補正は時間誤差を考慮する前の点検結果に対する補正例を示す。時間誤差を含めた補正はc)に示す。

- i) 点検を実施した供用18年の時の劣化度について「a」は、解析でばらつかせた劣化速度が1本あるため、補正前の劣化表現率としては1%となるが、点検では「a」区分が0.0%となっている。よって、解析における「a」となる1本の劣化速度の「劣化表現率」を0.0%と置き換えることで、点検結果と整合する。
- ii) 同様に「b」は、解析でばらつかせた劣化速度が5本あるため、補正前の劣化表現率としては5.0%となるが、点検では「b」区分が18.6%となっている。よって、解析における「b」となる5本の劣化速度の「劣化表現率」を1本当たり $18.6 \div 5 = 3.72\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- iii) 同様に初期解析において、劣化度が「c」となる劣化速度は2本あるため、補正前の劣化表現率としては2.0%となるが、点検結果では37.6%存在する。よって、この劣化速度の「劣化表現率」は1本当たり2%から37.6%に補正することで、点検結果と整合する。
- iv) 同様に「d」は、解析でばらつかせた劣化速度が29本あるため、補正前の劣化表現率としては29.0%となるが、点検では「d」区分が31.2%となっている。よって、解析における「d」となる29本の劣化速度の「劣化表現率」を1本当たり $31.2 \div 29 = 1.08\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- v) 同様に「e」は、解析でばらつかせた劣化速度が63本あるため、補正前の劣化表現率としては

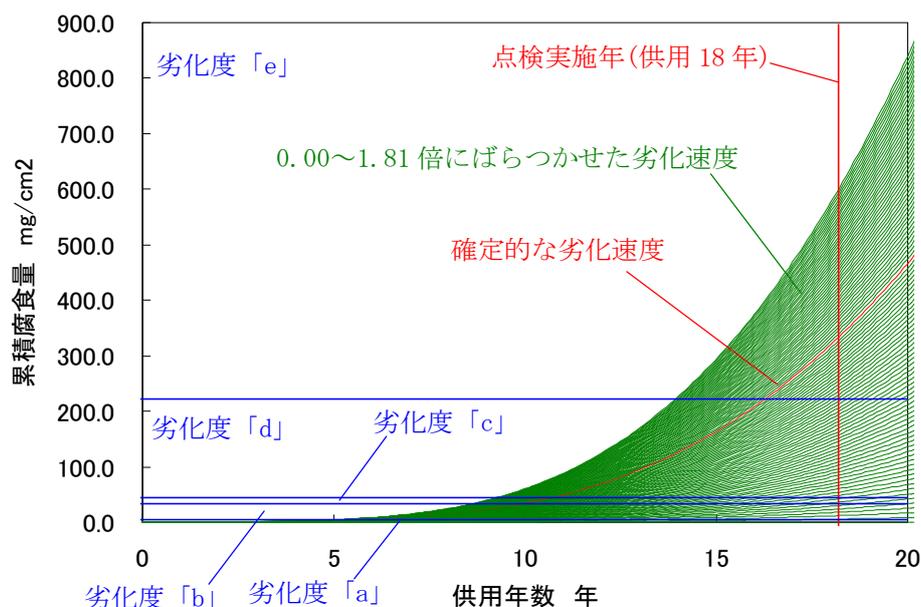


図-6.42 新柏島大橋の解析における「予想劣化速度」と劣化度の状況

63.0%となるが、点検では「e」区分が 12.6%となっている。よって、解析における「e」となる 63 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $12.6 \div 63 = 0.2\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。

c) 点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測の補正

ここで、第 4 章で示した点検結果の時間誤差を考慮した補正を実施する。第 4 章に示した様に、点検結果には、実際にその劣化状態になった時間と点検実施時の時間が異なるため、誤差が生じる。これを考慮して 1 年前～4 年前に点検結果の状態になった可能性を考慮した補正を実施する。最終的な劣化予測は図-6.43 に示すように、点検実施時～4 年前で補正した結果の平均を採用する。

また、表-6.12 に点検実施時～4 年前で補正した結果を平均した劣化評点一覧(採用値)を示す。

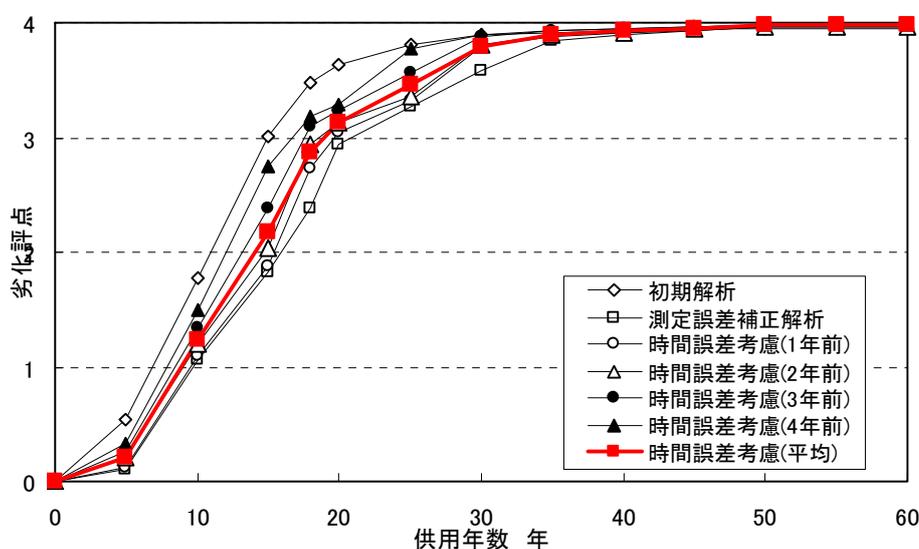


図-6.43 新柏島大橋の劣化予測解析における時間誤差考慮した劣化評点

表-6.12 時間誤差を考慮した点検結果で補正した劣化予測の劣化評点一覧

劣化度	劣化度 点数	測定誤差および時間的誤差を考慮した解析(平均)													
		0	5	10	15	18	20	25	30	35	40	45	50	55	60
a	0	1.00	0.79	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
b	1	0.00	0.21	0.73	0.39	0.13	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
c	2	0.00	0.00	0.08	0.15	0.13	0.05	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
d	3	0.00	0.00	0.12	0.35	0.49	0.54	0.42	0.16	0.10	0.08	0.05	0.03	0.03	0.03
e	4	0.00	0.00	0.00	0.11	0.25	0.33	0.53	0.82	0.90	0.92	0.95	0.97	0.97	0.97
劣化度評点		0	0.205	1.235	2.173	2.865	3.127	3.456	3.789	3.897	3.923	3.948	3.974	3.974	3.974

7) 益野二の橋の点検結果を用いた補正例

a) 初期解析における益野二の橋の劣化予測結果

益野の二橋について、任意にばらつかせた劣化予測解析を実施した結果、確定的な劣化速度に 0 倍速から 4.95 倍で実橋の点検結果を網羅できる倍数となった。なお、劣化速度の本数は 100 本としている。点検実施時(供用 34 年)における解析結果と実橋の測定誤差、時間誤差を含んだ点検結果との劣化度分布の比較は図-6.21 に示している。また、劣化度と経年における解析結果を図-6.44 に示

す。以上の図に示す様に、点検実施時（供用 34 年）における解析結果と点検結果の劣化度分布は、いくつかの違いが確認できる。点検結果では「a」の判定区分の割合は 3.87%、「b」の判定区分の割合は 18.31%となっているが、解析結果の劣化表現率では「a」区分が 1.0%、「b」区分が 9.0%となっている。また、点検結果では「c」の判定区分が 34.18%、「d」の判定区分は 31.31%および「e」の判定区分が 12.31%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が 4.0%、「d」が 53.0%、「e」が 33.0%となっており、解析の「劣化度」の分布を補正する必要がある。よって、ばらつかせた劣化速度の 1 本当たりの「劣化表現率」を補正し、劣化度の分布を点検結果の分布と整合させる。

b) 点検結果を用いた益野二の橋の補正方法、補正結果

第 3 章に示した補正方法を用いて下記の通り解析における劣化度分布を補正する。なお、点検結果に時間誤差があることは示しているが、下記の補正は時間誤差を考慮する前の点検結果に対する補正例を示す。時間誤差を含めた補正は c) に示す。

- i) 点検を実施した供用 34 年の時の劣化度について「a」は、解析でばらつかせた劣化速度が 1 本あるため、補正前の劣化表現率としては 1%となるが、点検では「a」区分が 3.87%となっている。よって、解析における「a」となる 1 本の劣化速度の「劣化表現率」を 3.87%と置き換えることで、点検結果と整合する。
- ii) 同様に「b」は、解析でばらつかせた劣化速度が 9 本あるため、補正前の劣化表現率としては 9.0%となるが、点検では「b」区分が 18.31%となっている。よって、解析における「b」となる 9 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $18.31 \div 9 = 2.03\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- iii) 同様に初期解析において、劣化度が「c」となる劣化速度は 4 本あるため、補正前の劣化表現率としては 4.0%となるが、点検結果では 34.18%存在する。よって、この劣化速度の「劣化表現率」は 1 本当たり 4%から 34.18%に補正することで、点検結果と整合する。

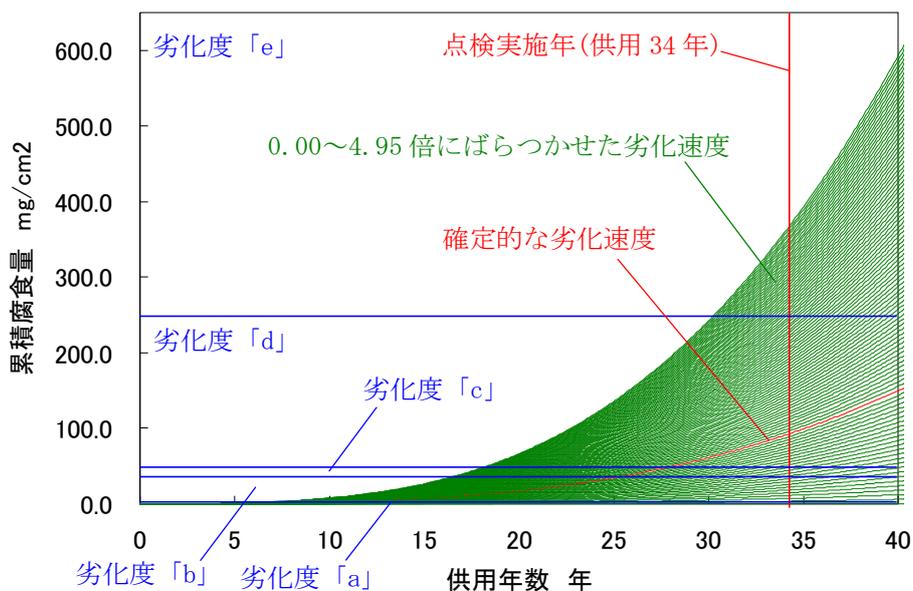


図-6.44 益野二の橋の解析における「予想劣化速度」と劣化度の状況

- iv) 同様に「d」は、解析でばらつかせた劣化速度が 53 本あるため、補正前の劣化表現率としては 53.0%となるが、点検では「d」区分が 31.31%となっている。よって、解析における「d」となる 53 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $31.31 \div 53 = 0.59\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- v) 同様に「e」は、解析でばらつかせた劣化速度が 33 本あるため、補正前の劣化表現率としては 33.0%となるが、点検では「e」区分が 12.31%となっている。よって、解析における「e」となる 33 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $12.31 \div 33 = 0.37\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- c) 点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測の補正

ここで、第 4 章で示した点検結果の時間誤差を考慮した補正を実施する。第 4 章に示した様に、点検結果には、実際にその劣化状態になった時間と点検実施時の時間が異なるため、誤差が生じる。これを考慮して 1 年前～4 年前に点検結果の状態になった可能性を考慮した補正を実施する。最終的な劣化予測は図-6.45 に示すように、点検実施時～4 年前で補正した結果の平均を採用する。

また、表-6.13 に点検実施時～4 年前で補正した結果を平均した劣化評点一覧(採用値)を示す。

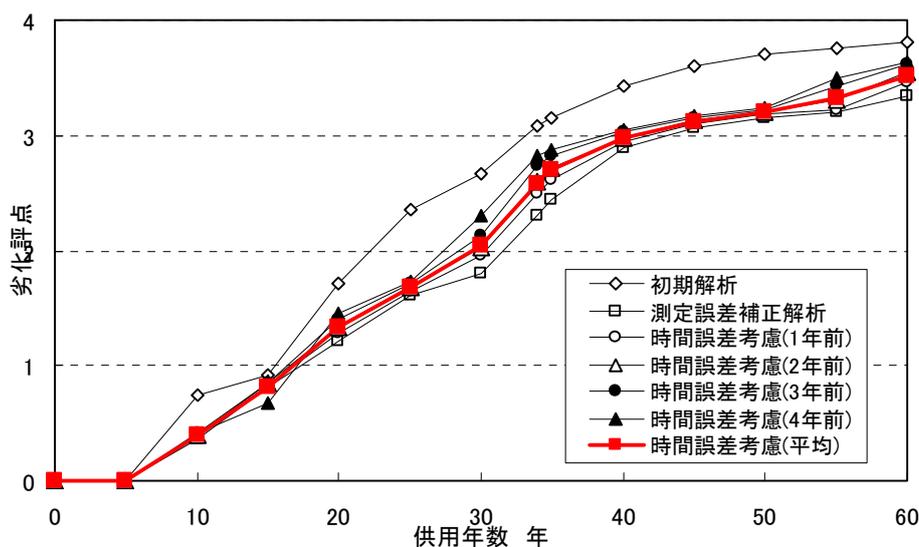


図-6.45 益野二の橋の劣化予測解析における時間誤差考慮した劣化評点

表-6.13 時間誤差を考慮した点検結果で補正した劣化予測の劣化評点一覧

劣化度	劣化度 点数	測定誤差および時間的誤差を考慮した解析(平均)													
		0	5	10	15	20	25	30	34	35	40	45	50	55	60
a	0	1.00	1.00	0.60	0.16	0.09	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
b	1	0.00	0.00	0.40	0.81	0.64	0.55	0.33	0.15	0.14	0.08	0.05	0.03	0.04	0.02
c	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.06	0.21	0.18	0.14	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02
d	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.34	0.38	0.44	0.47	0.51	0.50	0.48	0.38	0.24
e	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.19	0.22	0.32	0.38	0.42	0.53	0.69
劣化度評点		0	0	0.397	0.807	1.338	1.678	2.042	2.587	2.693	2.98	3.125	3.198	3.333	3.521

8) 汐入橋の点検結果を用いた補正例

a) 初期解析における汐入橋の劣化予測結果

汐入橋について、任意にばらつかせた劣化予測解析を実施した結果、確定的な劣化速度に 0 倍速から 0.40 倍で実橋の点検結果を網羅できる倍数となった。なお、劣化速度の本数は 100 本としている。点検実施時(供用 53 年)における解析結果と実橋の測定誤差、時間誤差を含んだ点検結果との劣化度分布の比較は図-6.26 に示している。また、劣化度と経年における解析結果を図-6.46 に示す。以上の図に示す様に、点検実施時(供用 53 年)における解析結果と点検結果の劣化度分布は、いくつかの違いが確認できる。点検結果では「a」の判定区分の割合は 3.44%、「b」の判定区分の割合は 4.22%となっているが、解析結果の劣化表現率では「a」区分が 1.0%、「b」区分が 4.0%となっている。また、点検結果では「c」の判定区分が 29.55%、「d」の判定区分は 46.33%および「e」の判定区分が 16.44%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が 2.0%、「d」が 25.0%、「e」が 8.0%となっており、解析の「劣化度」の分布を補正する必要がある。よって、ばらつかせた劣化速度の 1 本当たりの「劣化表現率」を補正し、劣化度の分布を点検結果の分布と整合させる。

b) 点検結果を用いた汐入橋の補正方法、補正結果

第 3 章に示した補正方法を用いて下記の通り解析における劣化度分布を補正する。なお、点検結果に時間誤差があることは示しているが、下記の補正は時間誤差を考慮する前の点検結果に対する補正例を示す。時間誤差を含めた補正は c) に示す。

- i) 点検を実施した供用 53 年の時の劣化度について「a」は、解析でばらつかせた劣化速度が 1 本あるため、補正前の劣化表現率としては 1%となるが、点検では「a」区分が 3.44%となっている。よって、解析における「a」となる 1 本の劣化速度の「劣化表現率」を 3.44%と置き換えることで、点検結果と整合する。
- ii) 同様に「b」は、解析でばらつかせた劣化速度が 4 本あるため、補正前の劣化表現率としては 4.0%

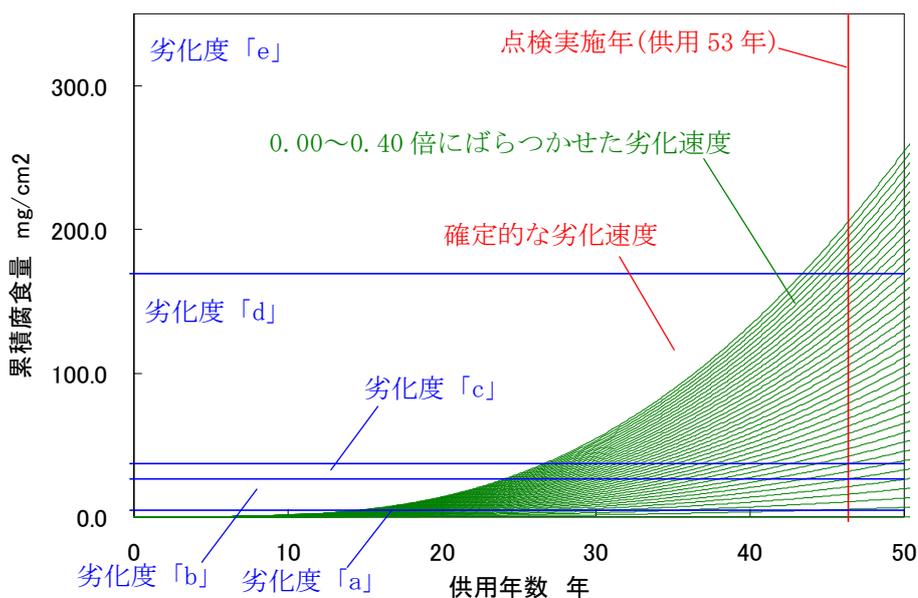


図-6.46 汐入橋の解析における「予想劣化速度」と劣化度の状況

となるが、点検では「b」区分が4.22%となっている。よって、解析における「b」となる4本の

劣化速度の「劣化表現率」を1本当たり $4.22 \div 4 = 1.06\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。

iii) 同様に初期解析において、劣化度が「c」となる劣化速度は2本あるため、補正前の劣化表現率としては2.0%となるが、点検結果では29.55%存在する。よって、この劣化速度の「劣化表現率」は1本当たり2%から29.55%に補正することで、点検結果と整合する。

iv) 同様に「d」は、解析でばらつかせた劣化速度が25本あるため、補正前の劣化表現率としては25.0%となるが、点検では「d」区分が46.33%となっている。よって、解析における「d」となる25本の劣化速度の「劣化表現率」を1本当たり $46.33 \div 25 = 1.85\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。

v) 同様に「e」は、解析でばらつかせた劣化速度が8本あるため、補正前の劣化表現率としては8.0%となるが、点検では「e」区分が16.44%となっている。よって、解析における「e」となる8本の劣化速度の「劣化表現率」を1本当たり $16.44 \div 8 = 2.06\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。

c) 点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測の補正

ここで、第4章で示した点検結果の時間誤差を考慮した補正を実施する。第4章に示した様に、点検結果には、実際にその劣化状態になった時間と点検実施時の時間が異なるため、誤差が生じる。これを考慮して1年前～4年前に点検結果の状態になった可能性を考慮した補正を実施する。最終的な劣化予測は図-6.47に示すように、点検実施時～4年前で補正した結果の平均を採用する。

また、表-6.14に点検実施時～4年前で補正した結果を平均した劣化評点一覧(採用値)を示す。

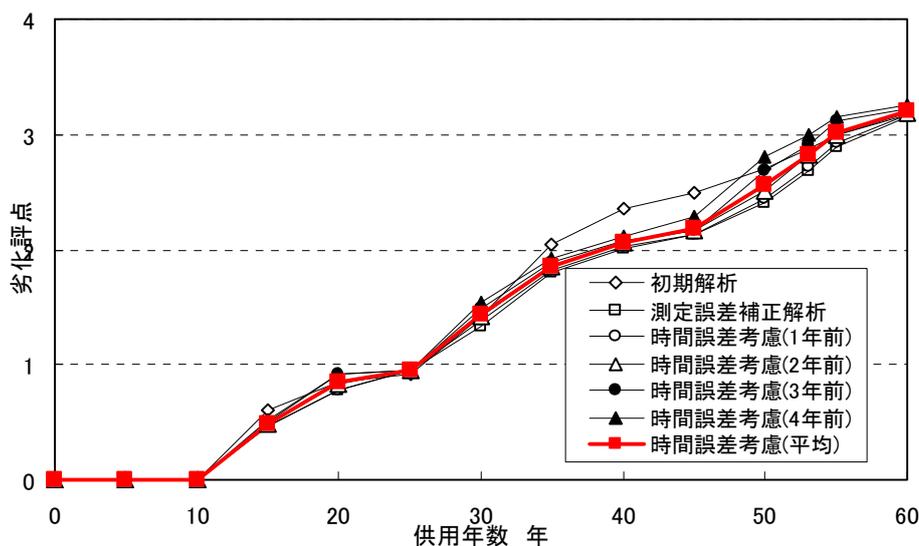


図-6.47 汐入橋の劣化予測解析における時間誤差考慮した劣化評点

表-6.14 時間誤差を考慮した点検結果で補正した劣化予測の劣化評点一覧

劣化度	劣化度 点数	測定誤差および時間的誤差を考慮した解析(平均)													
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	53	55	60
a	0	1.00	1.00	1.00	0.51	0.16	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
b	1	0.00	0.00	0.00	0.49	0.84	0.95	0.62	0.46	0.38	0.33	0.12	0.04	0.03	0.03
c	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.12	0.08	0.07	0.20	0.21	0.09	0.01
d	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.39	0.51	0.57	0.52	0.50	0.57	0.56
e	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.22	0.27	0.37
劣化度評点		0	0	0	0.489	0.844	0.946	1.436	1.859	2.061	2.179	2.57	2.827	3.015	3.199

9) 出見橋の点検結果を用いた補正例

a) 初期解析における出見橋の劣化予測結果

出見橋について、任意にばらつかせた劣化予測解析を実施した結果、確定的な劣化速度に 0 倍速から 0.83 倍で実橋の点検結果を網羅できる倍数となった。なお、劣化速度の本数は 100 本としている。点検実施時(供用 23 年)における解析結果と実橋の測定誤差、時間誤差を含んだ点検結果との劣化度分布の比較は図-6.25 に示している。また、劣化度と経年における解析結果を図-6.48 に示す。以上の図に示す様に、点検実施時(供用 23 年)における解析結果と点検結果の劣化度分布は、いくつかの違いが確認できる。点検結果では「a」の判定区分の割合は 0.0%、「b」の判定区分の割合は 12.4%となっているが、解析結果の劣化表現率では「a」区分が 1.0%、「b」区分が 7.0%となっている。また、点検結果では「c」の判定区分が 16.8%、「d」の判定区分は 25.8%および「e」の判定区分が 45.0%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が 4.0%、「d」が 43.0%、「e」が 45.0%となっており、解析の「劣化度」の分布を補正する必要がある。よって、ばらつかせた劣化速度の 1 本当たりの「劣化表現率」を補正し、劣化度の分布を点検結果の分布と整合させる。

b) 点検結果を用いた出見橋の補正方法、補正結果

第 3 章に示した補正方法を用いて下記の通り解析における劣化度分布を補正する。なお、点検結果に時間誤差があることは示しているが、下記の補正は時間誤差を考慮する前の点検結果に対する補正例を示す。時間誤差を含めた補正は c) に示す。

- i) 点検を実施した供用 23 年の時の劣化度について「a」は、解析でばらつかせた劣化速度が 1 本あるため、補正前の劣化表現率としては 1%となるが、点検では「a」区分が 0.0%となっている。よって、解析における「a」となる 1 本の劣化速度の「劣化表現率」を 0.0%と置き換えることで、点検結果と整合する。
- ii) 同様に「b」は、解析でばらつかせた劣化速度が 7 本あるため、補正前の劣化表現率としては 7.0%となるが、点検では「b」区分が 12.4%となっている。よって、解析における「b」となる 7 本の劣化速度の「劣化表現率」を 1 本当たり $12.4 \div 7 = 1.77\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。
- iii) 同様に初期解析において、劣化度が「c」となる劣化速度は 4 本あるため、補正前の劣化表現率としては 4.0%となるが、点検結果では 16.8%存在する。よって、この劣化速度の「劣化表現率」は 1 本当たり 4%から 16.8%に補正することで、点検結果と整合する。
- iv) 同様に「d」は、解析でばらつかせた劣化速度が 43 本あるため、補正前の劣化表現率としては 43.0%となるが、点検では「d」区分が 25.8%となっている。よって、解析における「d」となる

43本の劣化速度の「劣化表現率」を1本あたり $25.8 \div 43 = 0.6\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。

v) 同様に「e」は、解析ではばらつかせた劣化速度が45本あるため、補正前の劣化表現率としては45.0%となるが、点検では「e」区分が45.0%となっている。よって、解析における「e」となる45本の劣化速度の「劣化表現率」を1本あたり $45 \div 45 = 1.0\%$ と置き換えることで、点検結果と整合する。

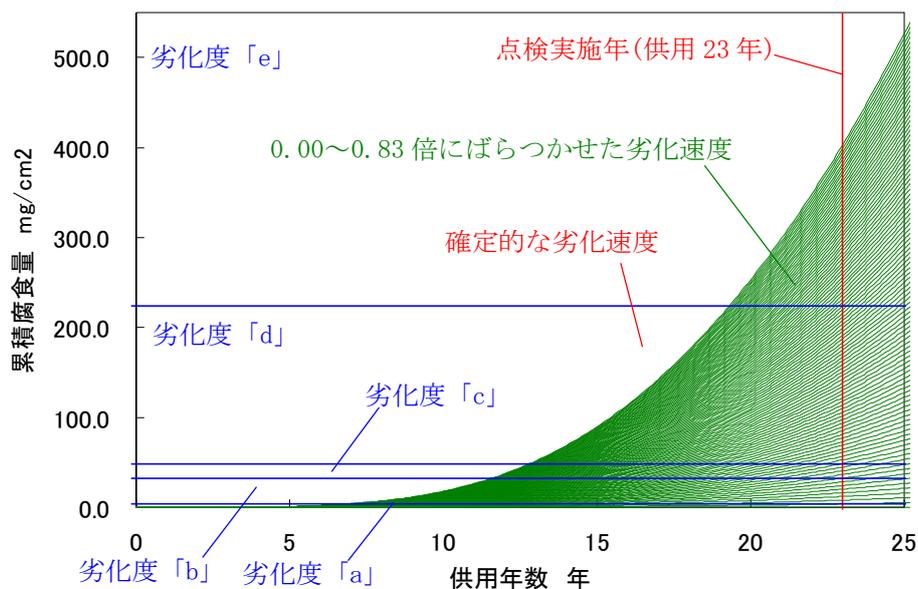


図-6.48 出見橋の解析における「予想劣化速度」と劣化度の状況

c) 点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測の補正

ここで、第4章で示した点検結果の時間誤差を考慮した補正を実施する。第4章に示した様に、点検結果には、実際にその劣化状態になった時間と点検実施時の時間が異なるため、誤差が生じる。これを考慮して1年前～4年前に点検結果の状態になった可能性を考慮した補正を実施する。最終的な劣化予測は図-6.49に示すように、点検実施時～4年前で補正した結果の平均を採用する。

また、表-6.15に点検実施時～4年前で補正した結果を平均した劣化評点一覧(採用値)を示す。

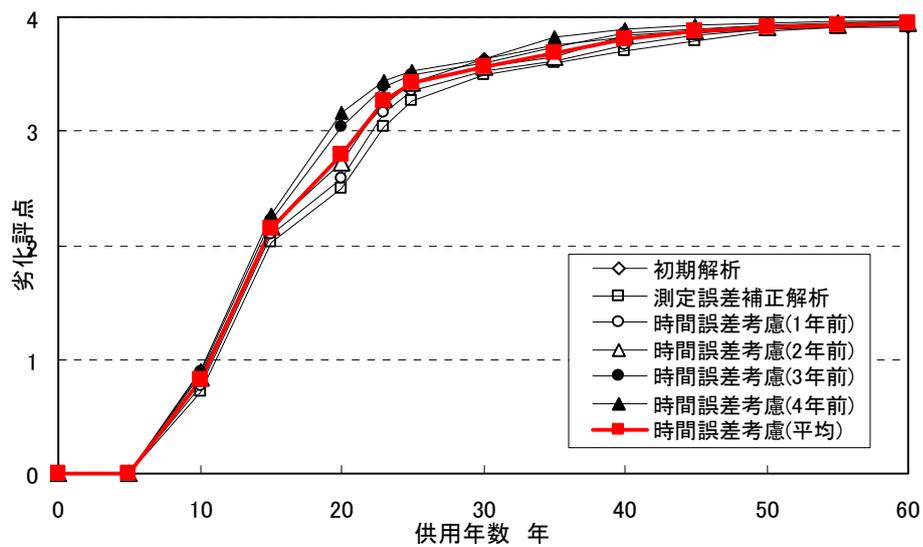


図-6.49 出見橋の劣化予測解析における時間誤差考慮した劣化評点

表-6.15 時間誤差を考慮した点検結果で補正した劣化予測の劣化評点一覧

劣化度	劣化度 点数	測定誤差および時間的誤差を考慮した解析(平均)													
		0	5	10	15	20	23	25	30	35	40	45	50	55	60
a	0	1.00	1.00	0.18	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
b	1	0.00	0.00	0.82	0.35	0.20	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
c	2	0.00	0.00	0.00	0.07	0.10	0.09	0.04	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
d	3	0.00	0.00	0.00	0.55	0.41	0.29	0.30	0.27	0.22	0.13	0.10	0.07	0.04	0.05
e	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.53	0.59	0.67	0.75	0.85	0.89	0.92	0.95	0.95
劣化度評点		0	0	0.823	2.154	2.802	3.263	3.417	3.565	3.685	3.812	3.87	3.912	3.938	3.949

10) 補正の妥当性検証

a) 概要

高知県管内の橋梁で 2 巡目点検を実施している新野根橋について、点検結果で補正した劣化予測の妥当性を検証する。妥当性の検証方法は 1 巡目点検結果で補正しない劣化予測と補正した劣化予測について、2 巡目点検結果との整合性を比較する。なお、2 巡目点検結果に対しても測定誤差の補正を実施する。

b) 2 巡目点検結果の測定誤差の補正

新野根橋について、2 巡目点検結果に対して第 4 章で示した考え方を導入し、測定誤差を考慮する。図-6.51 に第 4 章の方法を新野根橋の 2 巡目点検に適用した結果を示す。

新野根橋 点検集計表(供用32年)			
データ総数		13	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0	0.000	0.000
b	1	0.077	0.077
c	7	0.538	0.615
d	5	0.385	1.000
e	0	0.000	1.000

モデル要素			
単位	データ総数	13	
劣化度	度数 n_i	確率関数 $p(x_i)$	確率分布関数 $f(x)$
a	0.31	0.024	0.024
b	2.55	0.196	0.220
c	4.67	0.359	0.579
d	3.9	0.300	0.879
e	1.57	0.121	1.000

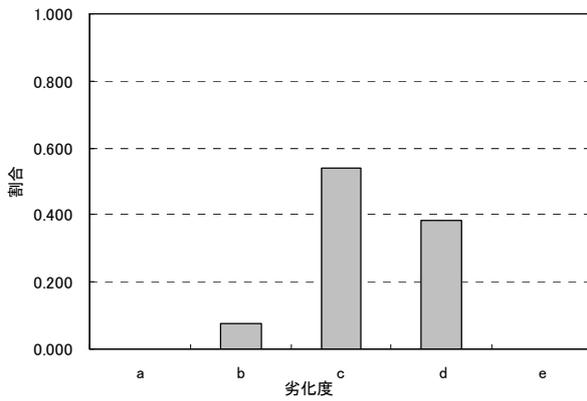


図-6.50 新野根橋 2 巡目点検結果(供用 32 年)

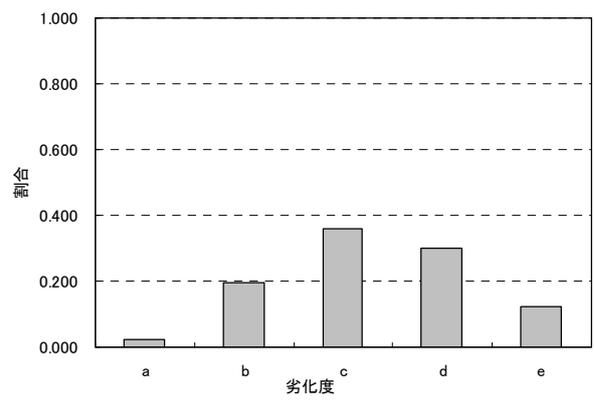


図-6.51 新野根橋 測定誤差を考慮した 2 巡目点検結果(供用 32 年)

図-6.51 に示す測定誤差を考慮した点検結果の劣化評点を図-6.37 に示す劣化予測にプロットした結果を図-6.52 に示す。

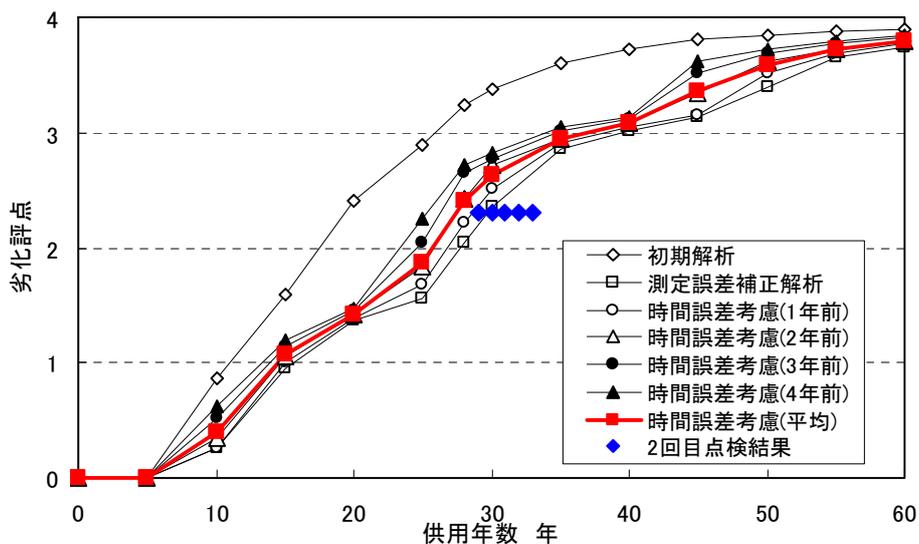


図-6.52 新野根橋の 1 回目点検結果で補正する前の初期解析および補正後解析と 2 回目点検結果(時間誤差を考慮) との劣化評点比較

図に示す様に、2 回目点検結果は供用 33 年で劣化評点 2.298 となる。これに時間誤差を考慮すると、供用 29 年～33 年の間で劣化評点が 2.298 になると考えられる。初期解析結果と比較すると、補正した劣化予測は 2 回目点検結果に近い値をとっていることが分かる。また、時間誤差に着目すると、1 回目点検の点検時で補正した結果および 1 年前で補正した結果と 2 回目点検の 4 年前および 3 年前の点検結果が非常に近い値をとるため、時間誤差の確率はこのあたりが高くなると考えられる。

c)点検 2 回による補正

2 巡目点検を実施している橋梁は新野根橋のみであることから、新野根橋について 2 回目点検結果も考慮した補正を実施する。補正方法は第 3 章で示したように 1 回目点検結果と 2 回目点検結果の平均値を用いることとする。方法としては 1 回目点検結果と同様に 2 回目点検結果も時間誤差を考慮した上で補正を実施し、2 回目点検結果における平均の劣化予測を算出する。2 回目点検結果の時間誤差を考慮した劣化予測を図-6.68 に示す。さらに、1 回目点検結果における平均の劣化予測と 2 回目点検結果における平均の劣化予測を平均することで、2 回の点検を考慮した劣化予測となる。

全ての誤差を考慮した劣化予測において、本論文では「平均」を用いているが、複数の点検結果がある場合、実際に採用する劣化予測は第 4 章で述べた「誤差ボックス」を通過するものを採用する必要がある。本論文で採用した平均の劣化予測はこの「誤差ボックス」を通過する。図-6.54 に採用する劣化予測と誤差ボックスを示す。

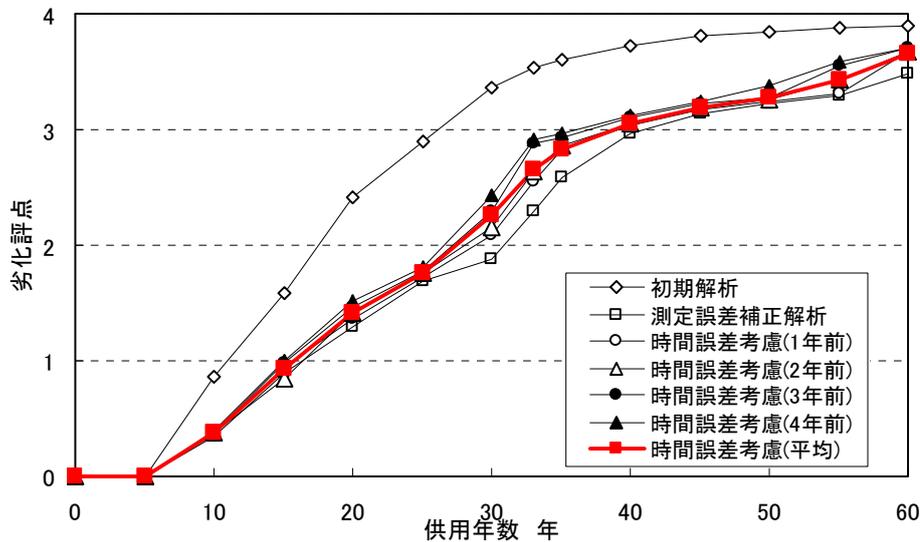


図-6.53 新野根橋の時間誤差を考慮した 2 巡目点検結果で補正した劣化予測解析における劣化評点

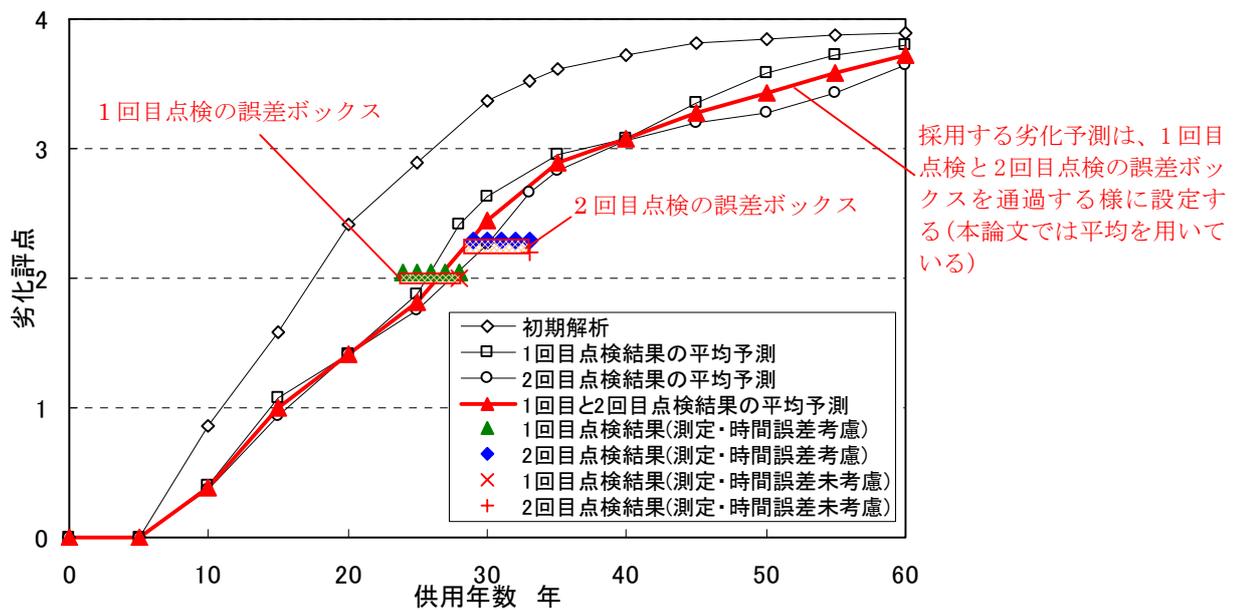


図-6.54 新野根橋の時間誤差を考慮した1巡目と2巡目点検結果で補正した平均劣化予測解析における劣化評点

11) 水島橋栈道橋の異常値についての考察

水島橋栈道橋は、実橋の劣化分布となるように確定的な劣化予測に任意の倍数を乗じた結果、24.75倍必要となり、他橋と比較して非常に大きい値となった。この原因としては下記が考えられる。

- a) 水島橋栈道橋は供用12年で比較的新しく健全と思われるが、点検結果においてはd判定があり、供用年数の割には劣化が速い
- b) 今回用いた測定誤差の補正モデルは危険側(実際より劣化が進んでいないと判定)の点検結果を補正する傾向が強いため、測定誤差の補正を実施するとさらに劣化が進む結果となる。

以上から、水島橋栈道橋は供用年数に対して非常に劣化が進行していると判定されたため、倍数が異常値となったと考えられる。

6.7 ばらつきを考慮した補修シナリオ

1) 概要

これまで、実橋に対して、ばらつきを考慮した劣化予測と測定誤差や時間誤差を考慮した点検結果による補正方法について述べてきた。ここからは以上の劣化予測を基に、実橋に対する「ばらつきを考慮した補修シナリオ」について解析結果を示す。

実橋に対する「補修シナリオ作成」は解析対象橋梁の内、点検結果が唯一2回有する新野根橋に対して実施する。なお、新野根橋の補修シナリオ解析の結果、維持管理費を最小とするシナリオは管理レベルを「4」で一定とした場合であるが、環境条件が変化することにより、管理レベルを下げた補修シナリオが採用される可能性もあることから、下記の4案について解析・検証を実施する。

- a) 飛来塩分量を 100mg/m²とした場合
- b) 飛来塩分量を 350mg/m²（現況解析）とした場合
- c) 飛来塩分量を 600mg/m²とした場合
- d) 飛来塩分量を 800mg/m²とした場合

2)飛来塩分量を 100mg/m²とした場合の最適補修シナリオ

これまで述べてきたばらつきを考慮し、点検結果で補正した劣化予測に対して、飛来塩分量を 100mg/m²として第 5 章の方法に基づき、「新野根橋」について補修シナリオ解析を実施した。その結果、管理レベルは「4」で一定とし、表-6.16 および図-6.55 に示す補修工法、補修タイミングおよび補修範囲で維持管理することが最も経済的となる結果となった。

表-6.16 新野根橋補修選定一覧表

シナリオNo.	1回目補修		2回目補修	
	供用年	補修工法	供用年	補修工法
No. 1～No. 70	0	何もしない	54.2	断面修復
No. 71～No. 91	0	何もしない	88.8	断面修復
No. 92～No. 99	0	何もしない	—	—
No. 100	—	—	—	—

具体的な補修パターンは、最も劣化速度が速い劣化予測の補修シナリオは供用開始時に「なにもしない」を適用し、供用開始から 54.2 年目に劣化度が管理レベル 4 に達する。その時の補修工法は「断面修復工法」を併用している。

また、劣化速度が 2 番目以降のシナリオについては、シナリオ No.2～No.60 までは最も劣化速度が速い劣化予測と同じ補修シナリオとなった。シナリオ No.61 は供用開始から 54.2 年目でもコンクリートの剥落に達しない劣化状態で、管理レベル 4(ひび割れ幅 0.3mm 以上)にも達していない。よって、シナリオ No.61 は別途に最適シナリオ解析を実施することとなる。最適シナリオ解析の結果、シナリオ No.61 は供用開始時に「なにもしない」を適用することにより変わりは無いが、供用開始から 78.9 年目に初めて管理レベル 4(コンクリートが剥落するまで)に達する。その時の補修工法は断面修復工法とを採用しており、その後の劣化度は管理レベルに達する前に供用期間である 100 年を迎える。シナリオ No.62～No.84 まではシナリオ No.81 と同じ補修シナリオとなる。

同様にシナリオ No.85 についても供用開始から 78.9 年目でもコンクリートの剥落に達しない劣化状態で、管理レベル 4(ひび割れ幅 0.3mm 以上)に達していない。よって、シナリオ No.85 も別途に最適シナリオ解析を実施することとなる。最適シナリオ解析の結果、シナリオ No.85 以降は何もなくても、劣化度が管理レベルに達する前に供用期間である 100 年を迎える。シナリオ No.86～No.99 まではシナリオ No.85 と同じ補修シナリオとなる。なお、シナリオ No.100 は常に劣化しない状態である。

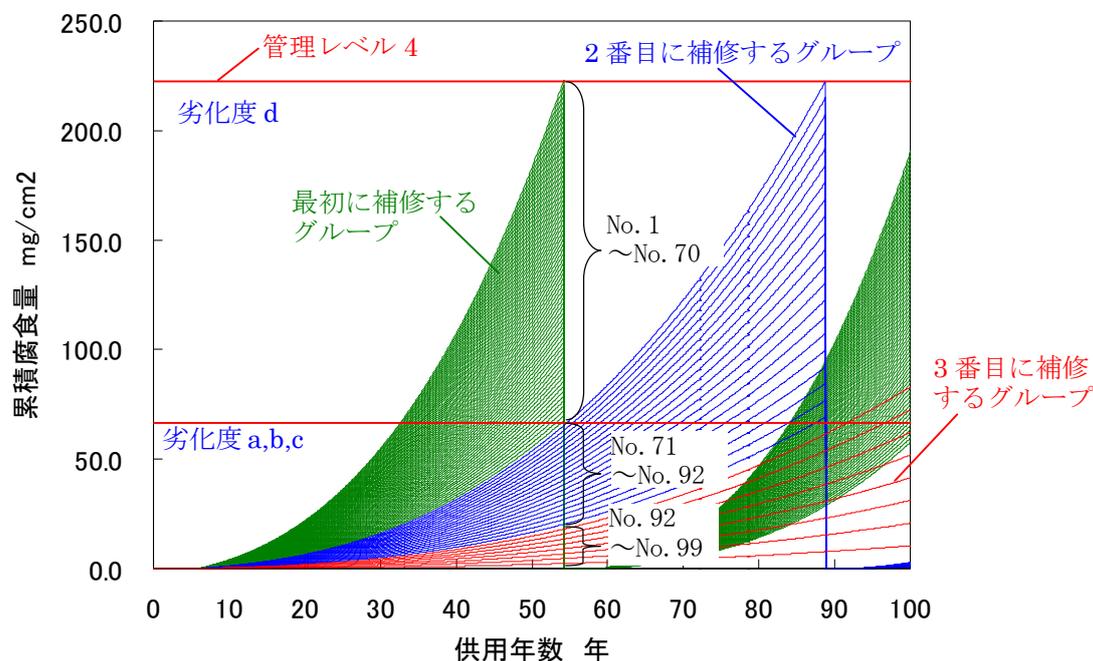


図-6.55 新野根橋に飛来塩分量 100mg/m²におけるシナリオ解析結果

3) 飛来塩分量 100mg/m²の場合の最小 LCC の算出

a) これまでの LCC 算出における課題

LCC の算出は BMS の精度に影響を与える。これまで LCC 算出に用いる補修工法の単価(m²/円)は、ある程度の精度があるものの、補修数量については明確な考え方が無かった。従来の LCC の算出は桁の展開面積に、選定した補修工法の単価を乗じることとなり、1つの補修工法を橋梁全体に適用する考えが主流となっていたため、LCC が割高に算出される傾向にあった。本研究では劣化の面的なばらつきを考慮することにより、明確な補修数量算出根拠を示すことが出来る。

b) 補修数量算出方法

LCC の算出は下記の方法により行う。

- i) 橋梁一般図または実測から、桁の展開面積を算出する。
- ii) 展開面積に同じ補修シナリオである劣化予測の劣化表現率の合計を乗じる。なお、ばらつかせた劣化予測 1 本毎の劣化表現率は点検結果による補正を考慮する。
- iii) ii) に各シナリオで採用している補修工法の単価を乗じる。
- iv) 足場等の間接工事費を算出するためには各橋梁の現場状況を把握する必要があり煩雑となる。間接工事費は直接工事費に対する一般的な割合が示されている^{6.10)}ため、単価にこれを含める。また、間接工事費は補修回数を少なくした方が経済的になることが一般的に知られているため、解析上同じ補修工法を 5 年以内を実施するシナリオについては、同じ補修として実施する。

以上の方法により補修による LCC を算出することが可能となる。以下に「新野根橋」について補修数量及び LCC 算出を行う。

c) 新野根橋の飛来塩分量 100mg/m²の時の LCC 算出

新野根橋の飛来塩分量 100mg/m²の場合について、上記に示すシナリオ、表-6.17 のシナリオと劣化表現率および表-2.2 に示す補修単価を用いて LCC を算出する。

表-6.17 新野根橋の同じ劣化状態の箇所を補修する場合の劣化表現率

1回目補修	2回目補修	シナリオ No.	シナリオ数	劣化表現率合計
何もしない	断面修復	No. 1~70	70	0.2213
何もしない	断面修復	No. 71~91	21	0.3724
何もしない	—	No. 92~99	8	0.3942
—	—	No. 100	1	0.0119

表-6.18 新野根橋における従来の考え方で補修する場合の劣化表現率

1回目補修	2回目補修	シナリオ No.	シナリオ数	劣化表現率
何もしない	断面修復	No. 1~100	100	1.0000

表-6.19 新野根橋維持管理費比較（展開面積 585.0m²）

比較案	供用100年維持管理費 (千円)	比率
同じ劣化状態の要素を同時補修	22,575	1.000
従来の考え方によるLCC	38,025	1.684

新野根橋の展開面積は一般図より下記の通りとなる。

$$\text{展開面積}=585.0\text{m}^2 \quad (6.1)$$

供用開始時は No.1～No.100 まで何もしなため、補修工事費は発生しない。

最初の補修は断面修復工法が No.1～No.84 のシナリオに用いられるため、補修工事費は下式の通りとなる。

$$\text{補修面積} : 585.0 \times 0.338 (\text{No.1} \sim \text{No.84} \text{ の劣化表現率合計}) = 197.7\text{m}^2 \quad (6.2)$$

$$197.7 \times (65,000) = 12,848 \text{ 千円} \quad (6.3)$$

以上より、新野根橋の LCC は式(6.3)より 12,848 千円となる。

また表-6.19 に示す様に、従来の考え方である最も早い劣化予測の補修シナリオを用いて LCC を算出した場合と比較した場合、約 25,177 千円経済的となる。

4) 飛来塩分量を 350mg/m² (現況解析) とした場合の解析結果

同様に新野根橋に対して、飛来塩分量が 350mg/m² の場合の解析結果を表-6.20～6.23 および図-6.56 に示す。

表-6.20 新野根橋補修選定一覧表

シナリオNo.	1回目補修		2回目補修		3回目補修	
	供用年	補修工法	供用年	補修工法	供用年	補修工法
No. 1～No. 70	0	表面含浸	39.1	断面修復 表面含浸	73.7	断面修復 表面含浸
No. 71～No. 91	0	表面含浸	50.4	断面修復 表面含浸	92.8	断面修復
No. 92～No. 97	0	表面含浸	68.9	断面修復 表面含浸	—	—
No. 98～No. 99	0	表面含浸	—	—	—	—
No. 100	—	—	—	—	—	—

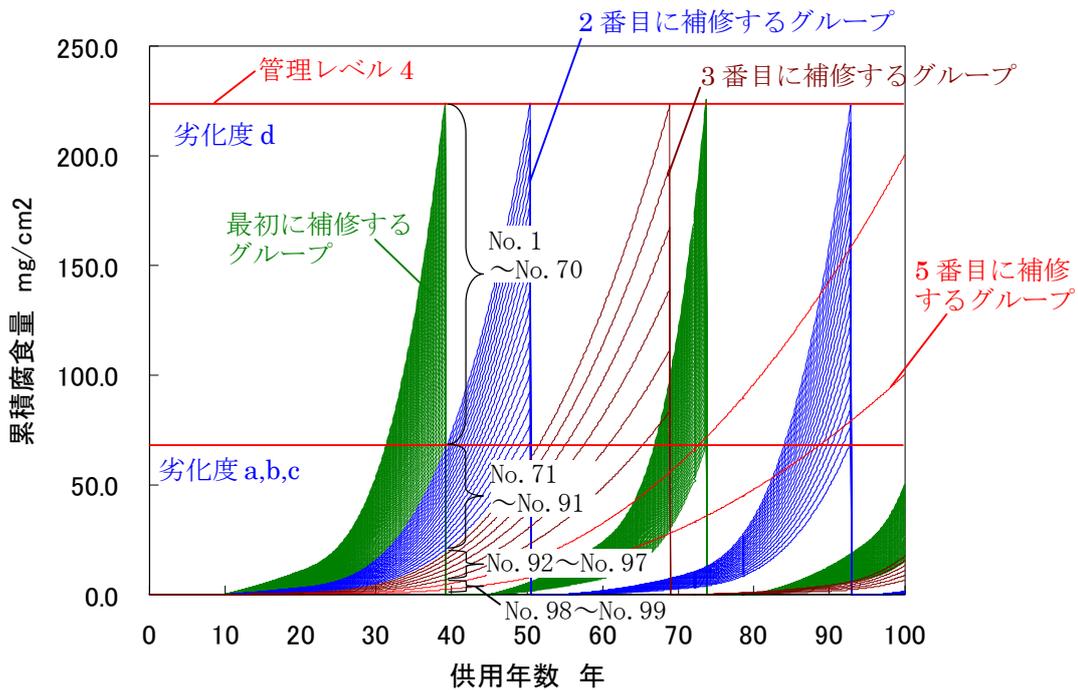


図-6.56 新野根橋に飛来塩分量 350mg/m²におけるシナリオ解析結果

表-6.21 新野根橋の同じ劣化状態の箇所を補修する場合の劣化表現率

1回目補修	2回目補修	3回目補修	シナリオ No.	シナリオ数	劣化表現率合計
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復 表面含浸	No. 1~70	70	0.2213
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復	No. 71~91	21	0.3724
表面含浸	断面修復 表面含浸	—	No. 92~97	6	0.3214
表面含浸	—	—	No. 98~99	2	0.0728
—	—	—	No. 100	1	0.0119

表-6.22 新野根橋における従来の考え方で補修する場合の劣化表現率

1回目補修	2回目補修	3回目補修	シナリオ No.	シナリオ数	劣化表現率
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復 表面含浸	No. 1~100	100	1.0000

表-6.23 新野根橋維持管理費比較（展開面積 585.0m²）

比較案	供用100年維持管理費 (千円)	比率
同じ劣化状態の要素を同時補修	73,527	1.000
従来のお考え方によるLCC	98,865	1.345

5) 飛来塩分量を 600mg/m² とした場合の解析結果

同様に新野根橋に対して、飛来塩分量が 600mg/m² の場合の解析結果を表-6.24～6.27 および図-6.57 に示す。

表-6.24 新野根橋補修選定一覧表

シナリオNo.	1回目補修		2回目補修		3回目補修		4回目補修	
	供用年	補修工法	供用年	補修工法	供用年	補修工法	供用年	補修工法
No. 1～No. 54	0	表面含浸	32.4	断面修復	45.9	断面修復	61.6	電気防食
No. 55～No. 70	0	表面含浸	32.4	断面修復 表面含浸	48.9	断面修復 表面含浸	65.5	電気防食
No. 71～No. 91	0	表面含浸	39.7	断面修復 表面含浸	74.7	断面修復 表面含浸	—	—
No. 92～No. 97	0	表面含浸	51.5	断面修復 表面含浸	94.8	断面修復	—	—
No. 98～No. 99	0	表面含浸	73.8	断面修復 表面含浸	—	—	—	—
No. 100	—	—	—	—	—	—	—	—

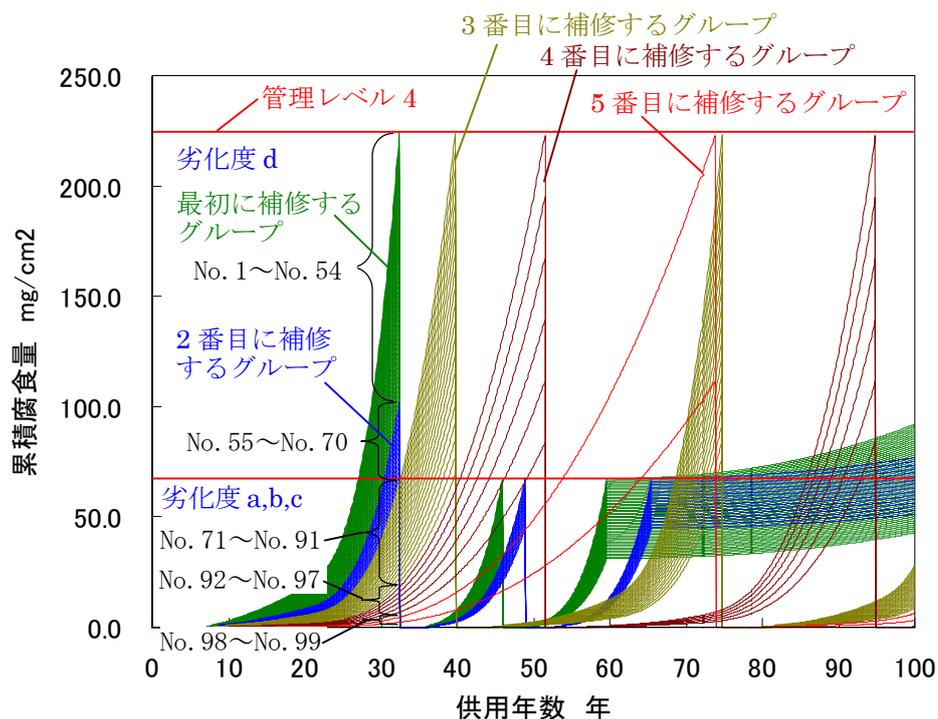


図-6.57 新野根橋に飛来塩分量 600mg/m²におけるシナリオ解析結果

表-6.25 新野根橋の同じ劣化状態の箇所を補修する場合の劣化表現率

1回目補修	2回目補修	3回目補修	4回目補修	シナリオ No.	シナリオ数	劣化表現率合計
表面含浸	断面修復	断面修復	電気防食	No. 1~54	54	0.1434
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復 表面含浸	電気防食	No. 55~70	16	0.0779
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復 表面含浸	—	No. 71~91	21	0.3724
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復	—	No. 92~97	6	0.3214
表面含浸	断面修復 表面含浸	—	—	No. 98~99	2	0.0728
—	—	—	—	No. 100	1	0.0119

表-6.26 新野根橋における従来の考え方で補修する場合の劣化表現率

1回目補修	2回目補修	3回目補修	4回目補修	シナリオ No.	シナリオ数	劣化表現率
表面含浸	断面修復	断面修復	電気防食	No. 1~100	100	1.0000

表-6.27 新野根橋維持管理費比較（展開面積 585.0m²）

比較案	供用100年維持管理費 (千円)	比率
同じ劣化状態の要素を同時補修	102,020	1.000
従来の考え方によるLCC	139,230	1.365

6) 飛来塩分量を 800mg/m² とした場合の解析結果

同様に新野根橋に対して、飛来塩分量が 800mg/m² の場合の解析結果を表-6.28～6.31 および図-6.58 に示す。

表-6.28 新野根橋補修選定一覧表

シナリオNo.	1回目補修		2回目補修		3回目補修		4回目補修	
	供用年	補修工法	供用年	補修工法	供用年	補修工法	供用年	補修工法
No. 1～No. 55	0	表面含浸	29.8	断面修復	41.8	断面修復	53.9	電気防食
No. 56～No. 70	0	表面含浸	29.8	断面修復 表面含浸	44.3	断面修復	58.9	電気防食
No. 71～No. 91	0	表面含浸	35.7	断面修復 表面含浸	67.7	断面修復	88.8	断面修復
No. 92～No. 97	0	表面含浸	45.1	断面修復 表面含浸	84.1	断面修復	—	—
No. 98～No. 99	0	表面含浸	63	断面修復 表面含浸	—	—	—	—
No. 100	—	—	—	—	—	—	—	—

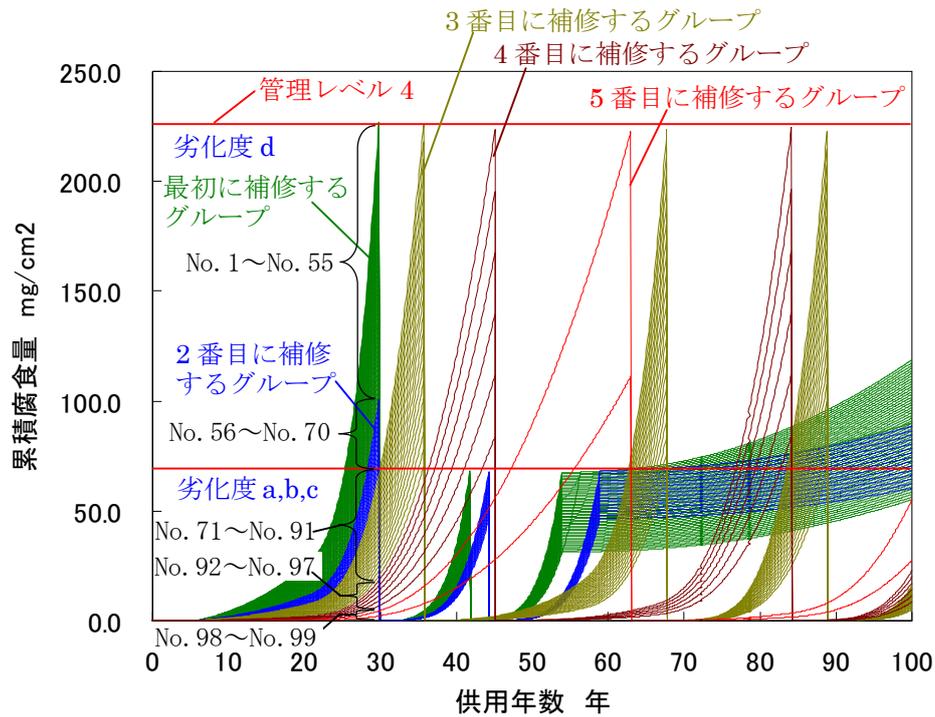


図-6.58 新野根橋に飛来塩分量 800mg/m²におけるシナリオ解析結果

表-6.29 新野根橋の同じ劣化状態の箇所を補修する場合の劣化表現率

1回目補修	2回目補修	3回目補修	4回目補修	シナリオ No.	シナリオ数	劣化表現率合計
表面含浸	断面修復	断面修復	電気防食	No. 1～55	55	0.1465
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復	電気防食	No. 56～70	15	0.0747
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復	断面修復	No. 71～91	21	0.3724
表面含浸	断面修復 表面含浸	断面修復	—	No. 92～97	6	0.3214
表面含浸	断面修復 表面含浸	—	—	No. 98～99	2	0.0728
—	—	—	—	No. 100	1	0.0119

表-6.30 新野根橋における従来の考え方で補修する場合の劣化表現率

1回目補修	2回目補修	3回目補修	4回目補修	シナリオ No.	シナリオ数	劣化表現率
表面含浸	断面修復	断面修復	電気防食	No. 1～100	100	1.0000

表-6.31 新野根橋維持管理費比較（展開面積 585.0m²）

比較案	供用100年維持管理費 (千円)	比率
同じ劣化状態の要素を同時補修	112, 717	1. 000
従来のお考え方によるLCC	139, 230	1. 235

7) 考察

以上の解析結果から、飛来塩分量が 100mg/m² と 350mg/m² の場合は管理レベルを「4」で一定とすることで維持管理費用を最小とでき、飛来塩分量が 600mg/m² と 800mg/m² の場合は最初の管理レベルを「4」として、2回目以降の管理レベルを「3」に下げた方が経済的となる結果となった。以上から、環境条件が厳しく無い場合は、管理レベルを高く設定した方が経済的となるが、環境条件が厳しい場合は、早めの補修を実施する方が経済的となることが分かった。

なお、任意のタイミングで補修を実施する機能について、今回の解析では $n=2(a/n=2)$ で実施したが、今回の解析では採用に至らなかった。このことについては、まだ不明な点があるため、今後の研究課題とする。

また、従来維持管理費用の算出は、最も速い劣化速度が補修のタイミングに達したときに、全部材を同じ補修工法で補修する方法をとっていた。適切な範囲を補修する本論文の補修費用の算出方法は従来算出方法と比較して3割～2倍程も経済的となることが分かった。

7 章 戦略的な点検方法の提案

7.1 概要

6章まで劣化予測および劣化予測を用いた補修シナリオの作成を述べてきた。劣化予測と補修シナリオの精度はばらつきを考慮し、点検結果による補正を実施することで向上を図れることが、ある程度実証できた。一方、現在の点検システムは5年に1回の定期点検が主流であり、高知県においても同様のシステムとしている。劣化予測と補修シナリオ作成機能を活用し、点検頻度を少なくすることで維持管理費用の縮減を図れる可能性がある。また、この点検回数を減らすための前提条件となるのが劣化予測と補修シナリオ作成機能の精度を良くすることであるため、より劣化予測と補修シナリオ作成機能の精度を高めるための情報収集を目的とした試験項目を提案する。試験項目は点検時に実施できるものを前提とする。

7.2 劣化予測と補修シナリオ作成機能の活用

(1) 検討概要

6章までに述べてきた劣化予測および補修シナリオ作成機能は点検結果を踏まえた補正により精度が向上した。このことにより、橋梁が将来どの時点で補修を実施すれば良いかある程度知ることができる。補修のタイミングが分かるということは、ある意味「点検を実施する必要がない」と言える。ここでは、2回点検を実施している新野根橋を対象に劣化予測と補修シナリオ作成機能を活用した点検回数の縮減計画を示す。

(2) 新野根橋における従来の定期点検と劣化予測、補修シナリオ機能を活用した点検計画

仮に新野根橋が今から供用を開始すると仮定する。新野根橋の実橋は、予防保全を実施していない状態で、供用28年時と33年時に2回点検を実施している。この情報で補正した劣化予測解析および補修シナリオ解析を実施すると、表-6.15に示す様に供用開始時に予防保全として表面含浸工法を適用しており、供用39.1、55.5、73.7、91.1年に補修を実施するシナリオとなっている。本研究では以上の予測モデルを対象に戦略的な点検計画を提案する。

1) 従来の点検計画における維持管理費用の算出

従来の点検計画とは現在用いている5年に1回の頻度で定期点検を実施することを言う。供用100年まで定期点検を実施すると仮定した場合、その回数は $100 \div 5 = 20$ 回程度となる。定期点検の維持管理費用は既往研究成果^{6.10)}を参考にすると橋長に対して約330千円/mとなっている。新野根橋の橋長は60mであるため、1回当たりの点検費用は約2,000千円/式となる。以上を踏まえると従来の点検計画では供用期間100年の定期点検費用合計は $20 \times 2,000$ 千円=40,000千円となる。

2) 劣化予測、補修シナリオ機能を活用した点検計画

劣化予測、補修シナリオ機能を活用した場合の点検計画を用いる場合、供用開始間もない時期は健全であるため、点検を実施してもひび割れ等の性状が明確にでない。よって、点検結果を用いた劣化予測の補正もできないため、ひび割れ等の性状がでるまでは従来計画と同様に5年に1回の定期点

検を実施する。図-7.1 や劣化予測・補修シナリオ解析から新野根橋は供用開始 12.5 年でひび割れが発生する。劣化予測の精度を向上するためには、ひび割れ等の性状を確認できる様になってから、少なくとも 2 回以上の点検結果がある方が望ましいため、供用開始 20 年の点検結果まで用いる。この意図としては、2 回以上の点検結果を用いることで、第 6 章に示した様に点検の時間誤差の影響を軽減できるためである。

供用 20 年以降は劣化予測および補修シナリオを用いて、将来の補修時期を考慮した点検計画を立案する。図-6.56 に対して、補修時期を明確にしたものを図-7.1 に示す。図-7.1 に示す様に補修時期は供用 39.1、55.5、73.7、91.1 年である。劣化予測の精度もまだ完全ではないため、補修開始時期の 5 年前程度に 1 度点検を実施することを提案する。それと補修開始時に点検を実施することで、劣化予測の誤差を含めた情報を得られると考えられる。

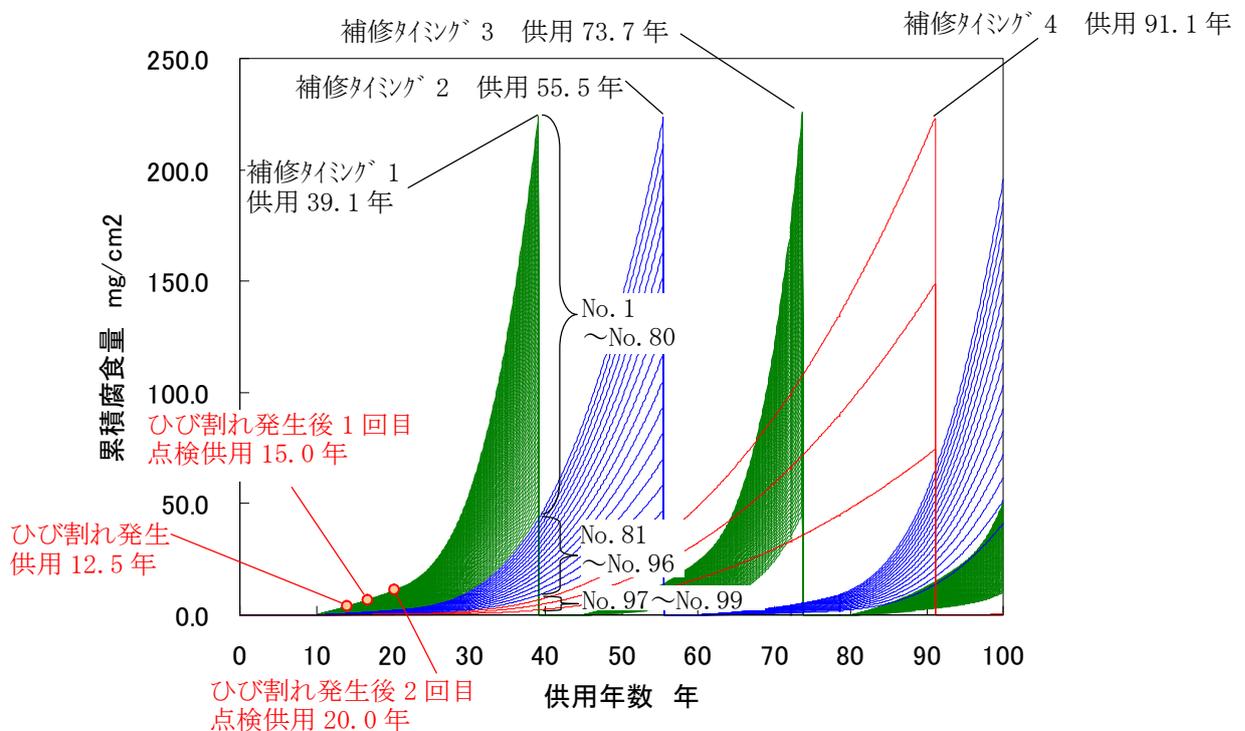


図-7.1 ひび割れ発生、点検および補修タイミング

表-7.1 新野根橋 劣化予測と補修タイミングを活用した点検計画

点検回数	実施時期	実施理由
点検 1 回目～4 回目	供用開始～供用 20 年目	定期点検および劣化予測精度向上
点検 5,6 回目	供用 34 年目, 供用 39 年目	補修タイミング 1 の妥当性確認
点検 7,8 回目	供用 45 年目, 供用 50 年目	補修タイミング 2 の妥当性確認
点検 9,10 回目	供用 63 年目, 供用 68 年目	補修タイミング 3 の妥当性確認
点検 11 回目	供用 68 年目, 供用 73 年目	補修タイミング 4 の妥当性確認
点検 12,13 回目	供用 86 年目, 供用 91 年目	補修タイミング 5 の妥当性確認

以上の頻度点検を実施した場合、新野根橋の点検回数と時期は表-7.1 に示す様 12 回となる。前述した様に、点検費用は 1 回あたり 2,000 千円/式であるため、 $12 \times 2,000$ 千円=24,000 千円となる。よって、従来の点検計画にかかる費用に対して約 16,000 千円のコスト縮減となる。

7.3 劣化予測と補修シナリオの精度を向上させる調査の提案

本研究に用いる劣化予測に必要な情報としては、主に表-7.2 に示す情報が予測精度に大きな影響を与える。これらの情報は竣工図書などが残っている場合は比較的精度の良い情報が得られるが、20～30 年以上前に建設された橋梁では竣工図書や場合によっては一般図まで無い場合がある。これらの橋梁に対して、表-7.2 に示す情報を精度良く得るためには「調査」や「試験」をすることが望ましい。ただし、表-7.2 に示す情報の中でも、かぶりや塩化物イオン濃度などは場所によって代わり、費用も高くなる。よって、ここでは表-7.2 の中でも簡単な調査で得られ、劣化予測に対する影響が大きいものを定期点検時に実施することを提案する。

表-7.2 劣化予測解析の精度に影響を与える条件一覧

項目	単位	記号
架設年	年	
解析期間	年	
飛来塩分流速	mg/mm ²	qCl
初期含有塩化物イオン濃度	kg/m ³	Ci
鉄筋径	mm	φ
かぶり	mm	cov
水セメント比	%	WC
飽和度	—	SS
ヤング係数	N/mm ²	E
圧縮強度	N/mm ²	fc
コンクリート内pH	—	pH
骨材比率	—	Vagg
単位セメント量	kg/m ³	Ccon
温度	K	temp

表-7.2 の項目に対して、提案する調査・試験を表-7.3 に示す。

表-7.3 定期点検時に提案する実施すべき調査・試験一覧

項目	単位	提案内容
飛来塩分流束	mg/mm ²	小窪モデルとの整合確認のため実施する。
初期塩化物イオン濃度	kg/m ³	費用の関係上実施しない
鉄筋径	mm	全容を把握することが困難なため実施しない
かぶり	mm	全容を把握することが困難なため実施しない
水セメント比	%	全容を把握することが困難なため実施しない
飽和度	—	全容を把握することが困難なため実施しない
ヤング係数	N/mm ²	圧縮強度から推定が可能であるため実施しない
圧縮強度	N/mm ²	反発硬度試験は容易であるため実施する
コンクリート内 pH	—	全容を把握することが困難なため実施しない
骨材比率	—	全容を把握することが困難なため実施しない
単位セメント量	kg/m ³	全容を把握することが困難なため実施しない
温度	K	変動が大きいため実施しない

以上の調査結果を劣化予測に反映させることで、さらなる精度向上を図ることができる。また、それによって、点検回数の縮減による維持管理費の縮減や予算配分の精度向上を図ることができる。

8 章 総括

8.1 結論

本論文は実用的な BMS を開発するために課題の一因となっていた、ばらつきを考慮した劣化予測と補修シナリオの作成モデルの構築、および測定誤差や時間的な誤差を考慮した点検結果を用いた劣化予測の補正方法を提案し、劣化予測の精度向上の検証を行った。

第 1 章では本研究の目的に至る背景や既往の研究状況を整理し、BMS の精度向上のためにはばらつきを考慮した劣化予測や補修シナリオ作成モデルの構築が必要であることを示した。

第 2 章では BMS の構成や劣化予測モデルの概要および補修シナリオを作成するための補修工法や管理レベルの考え方を示した。

第 3 章では、確定的な予測に対してばらつきを与え、点検結果を用いて劣化予測のばらつきの分布を点検結果のばらつきの分布に補正する方法を示した。ばらつきの考慮方法は確定的な劣化予測を 0 倍から実橋の劣化を網羅できる任意の倍数にばらつかせる方法を提案した。また、ばらつかせるだけでは点検結果の劣化分布と整合しないため、ばらつかせた劣化予測に「劣化表現率」と言う重みを与え、それを点検結果の分布に合うように補正する方法を提案した。

第 4 章では、補正に用いる点検結果にも測定誤差や時間的な誤差が含まれているため、点検結果に対して測定誤差を考慮するとともに、いつその劣化状態になったかの時間誤差を考慮し、誤差ボックスの概念を示した。

第 5 章では、第 3 章や第 4 章で示した。ばらつきを考慮した劣化予測と測定誤差や時間誤差等の誤差ボックスを考慮した点検結果を用いて、最適な補修シナリオ作成モデルを提案した。補修の範囲としては、ばらつかせた劣化予測について同じ劣化状態ものをグループに分け、グループの中で最も速い劣化予測が管理レベルに達する時にグループ毎補修する方法を提案した。グループに着目するとともに、劣化表現率を用いることによって、面的な補修範囲を表現することが可能となった。

第 6 章では、高知県管内の塩害を受ける橋梁に対して第 5 章までのモデルを適用して解析を実施した。かぶり、材料、飛来塩分量毎に確定的な劣化予測に与える任意倍数を示すとともに、2 回点検を実施している橋梁に対して、1 回目の点検で補正した劣化予測結果と 2 回目点検結果の劣化分布を比較し、精度が向上したことを示した。また、補修シナリオについては塩害環境が厳しい橋梁ほど早めの補修が有効であることを示すとともに、従来の確定的な劣化予測で作成した補修シナリオより、本論文で提案したばらつきを考慮した補修シナリオの方が経済的になることを示した。

第 7 章では、補修シナリオ作成モデルを用いて点検回数を減らし、BMS を活用した維持管理費用の縮減効果を示した。また、劣化予測の精度向上に有効で定期点検でも実施可能な調査についても提案した。劣化予測および補修シナリオ作成モデルの精度が向上すれば、1 橋につき 15 百万円程度のコスト縮減効果があることを示した。

8.2 今後の課題

以上よりばらつきを考慮した構造物の劣化予測および補修シナリオ作成モデルの構築、および測定誤差や時間的な誤差を考慮した点検結果を用いた劣化予測の補正方法を提案し、劣化予測の精度向上の検証を行った。劣化予測の精度向上および従来にない定量的な補修数量を算出できる補修シナリオモデルを構築したが、より実用的な BMS とするためには下記に示す課題を解決する必要がある。

- 1) 本論文の劣化予測モデルは点検結果で補正することによって、ある程度精度のある劣化予測が可能となる。全く点検の無い新設橋の劣化予測を行う際、劣化分布をどのように設定するのか今後検討を行う必要がある。検討の方法としては実橋に対する解析を数多く実施し、環境条件、材料条件等で類似事例を抽出し、その分布傾向を用いる等が考えられる。
- 2) 点検結果の測定誤差については、まだ事例が少ないため誤差の傾向は不明な点が多い。これについても多くの事例や傾向分析を行うなど、今後詳細な検討が必要となる。また、時間誤差についても本論文では点検して得られた劣化分布が、実際はいつその分布となったか不明な点が多い。これについても調査を数多く実施し、傾向を把握する必要がある。
- 3) 本論文では劣化速度から最適な補修シナリオを選定する機能があり、複数の補修工法を用いることも考慮している。より現実性のある維持管理計画とするためには、異なる工法を用いることによる実際の施工性や仮設費用の算出方法をより詳細に検討する必要がある。
- 4) 目標とする BMS とするためには予算制約を考慮する必要がある。現時点の BMS は確定的な劣化予測における予算制約を考慮した橋梁群の維持管理計画を策定できる機能は備えているが、本論文で提案したばらつきを考慮した劣化予測モデルおよび補修シナリオモデルについての機能は備えていない。今後考慮する必要がある。
- 5) 確定的な補修シナリオにおいて、環境条件が厳しい場合、任意の時間で補修することが経済的になることが報告されている。本論文では飛来塩分量 100~800mg/m² で検証した結果、採用されなかった。これはばらつきを考慮した場合の補修シナリオに対する適用性に問題があると考えられる。ばらつきを考慮した場合の任意の時間における補修シナリオについて研究を進める必要がある。

謝辞

本論文に際して、終始適切な助言を賜り、また丁寧に指導して下さった那須 清吾先生（高知工科大学教授）、ならびにボンコッゲサクル ナタコーン先生（高知工科大学助教）に深く感謝いたします。また、点検データ等の資料提供や貴重なご意見を下さいました高知県職員の方々にひとかたならぬお世話になりました。心より御礼申し上げます。

那須先生には本研究における問題点や私が気づかない課題点を数多く指摘していただきました。また、維持管理やマネジメントといった視点によるアドバイスからモデル細部の定式化にまでご助言をいただきました。中間発表や公開論文審査時においても最後まで粘り強く指導して頂いたことについて深く感謝いたします。

ナタコーン先生については博士課程学生として三年間の長きに渡り、コードの書き方から研究への取組姿勢、論文構成や図・表の書き方まで様々な点について、今後の私の職業人生にも活かされる指導やアドバイスをたくさん頂きました。先生から教えて頂いたことを今後の私の人生に活かすことが何よりものご恩返しと考えておりますが、本論文に対する謝辞としてここに深くお礼申し上げます。

本論文中で参考にしました資料の一部を高知県土木部道路課保全班様から提供して頂きました。必要データの収集のみならず点検の実地研修も体験させていただきました。担当者の方をはじめ皆様のご協力に深く感謝いたします。

最後に本研究に参加するに当たって理解を示して頂き学費や交通費の支援をして頂いた会社、研究に協力して頂いた同僚および休日の時間を研究に費やすことに理解を示してくれた家族に深く感謝致します。

参考文献

- 1.1) 国土交通省：国土交通白書,pp.110,2011
- 1.2) 津田尚胤,貝戸清之,青木一也,小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移の推定,土木学会論文集, No.801/ I -73,pp.69-82,2005
- 1.3) 土木学会：コンクリート標準示方書 維持管理編,pp109,2007
- 1.4) S.Nasu, H.Okamura and S.Kokubo, “Maintenance and Management of Concrete Bridges”, IANMAS’04 Kyoto, 2004
- 1.5) 松島学「コンクリート構造物の塩害劣化とライフサイクルコスト」第8回信頼性技術ワークショップ, 平成13年
- 1.6) P.Thoft-Christensen, “Modelling of the Deterioration of Reinforced Concrete Structures”
- 1.7) 伊庭孝充,松島学,関博,川田秀夫:塩害を受ける RC 構造物のライフサイクルコスト算定手法に関する基礎的研究,土木学会論文集, No.704/V -55,pp.1-11,2002
- 2.1) 小窪 幸恵,岡村 甫:海水飛沫の発生過程に着目した飛来塩化物イオン量の算定モデル,土木学会論文集 B, vol.65 No.4,pp.259-268,2009
- 2.2) Lukuan Q,関博:鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究,土木学会論文集, No.669/V -50,pp.161-171,2001
- 2.3) 鳥取誠一,宮川豊章:初期塩化物イオン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, No781/V -65,pp.157-170,2005
- 2.4) 鳥取誠一:鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測,京都大学博士論文,2002
- 2.5) 鳥取誠一,土田伸治,宮川豊章:ひび割れと鉄筋腐食に関する暴露試験に基づいたコンクリート構造物の劣化予測,コンクリート工学論文集,第10巻第3号,pp.1~15,1999
- 2.6) 榎田佳寛,原謙治,松林裕二,田中斉ほか:表面被覆材および浸透性吸水防止材による鉄筋コンクリートの塩害劣化抑制効果に関する実験,日本建築学会構造系論文報告集,第433号,pp. 1~10, 1992
- 4.1) 高知県 土木部 道路課:橋梁分科会 第2回アドバイザー会議 会議資料,2012
- 6.1) 日本道路協会:鉄筋コンクリート道路橋示方書,1964
- 6.2) 日本道路協会:プレストレストコンクリート道路橋示方書,1968
- 6.3) 日本道路協会:道路橋示方書・Ⅲコンクリート橋編,1978
- 6.4) 日本道路協会:道路橋示方書・Ⅲコンクリート橋編,1978
- 6.5) 日本道路協会:道路橋示方書・Ⅲコンクリート橋編,1990
- 6.6) 日本道路協会:道路橋示方書・Ⅲコンクリート橋編,1994
- 6.7) 日本道路協会:道路橋示方書・Ⅲコンクリート橋編,1998
- 6.8) 建設省:土木構造物標準設計 17 PC 橋(その 5),pp13-53,1969
- 6.9) 高知県:高知県提供平成 22-23 年度点検結果
- 6.10) 国土交通省 土木研究所:ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(I)-ライフサイクルコスト算出手法に関する検討-,pp.96-pp.102,2000