

測定誤差，時間誤差を考慮した点検結果 を用いた構造物の将来予測方法

工藤 徹郎¹・那須 清吾²・前田 慎一³

¹正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ 九州支店技術二部
(〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前3-2-8 住友生命博多ビル)
E-mail: kudoh@oriconsul.com

²正会員 高知工科大学教授 大学院工学研究科 (〒780-8515 高知県高知市永国寺町2永国寺町2-22)
E-mail: nasu.seigo@kochi-tech.ac.jp

³正会員 工修 株式会社社長 社会システム事業部
(〒550-0013 大阪府大阪市西区新町2-20-6)
E-mail: maeda-s@chodai.co.jp

厳しい財政環境の中、橋梁の効率的な維持管理手法として、ブリッジマネジメントシステムに注目が集まっているが、物理モデルを用いた劣化予測は実橋の劣化と大きな乖離がある。その一因は、実橋の材料や環境条件が経年とともに変化し、同一構造物でも部材や場所によって劣化状態がばらつくことによると考えられる。本研究は劣化予測に任意のばらつきを持たせるとともに、ばらつきの分布を実橋に合わせることで、劣化予測がより実橋と整合する予測が可能になると考え、点検データを用いてばらつきを補正することに着目した。劣化分布を実橋に合わせる方法としては、高知県から点検データの提供を受け、任意にばらつかせた劣化予測の分布を橋面積の割合として、実橋の割合に補正することとした。しかし、点検結果は実施した技術者の測定誤差や、いつその劣化状態になったかの時間的な誤差が含まれる。本研究はばらつかせた劣化予測に対して、測定誤差と時間誤差を考慮した点検結果を用いて補正を実施する。なお、1回目点検結果で補正した劣化予測を、2回目点検結果と比較して、補正による効果を検証する。

Key Words : bridge management, deterioration prediction, variation, correction by inspection result

1. はじめに

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⁾。

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り、そのためには劣化予測と実際の劣化との整合、様々な補修工法の中からLCCを最小とする工法・タイミング選定の方法および精度の良い補修数量の算出が欠かせない。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）²⁾があるが、本研究では、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を用いることとした。なお、実際の構造物は劣化状態が部材や場所によってばらつくため、劣化予測も実際の構造物の劣化分布を予測できる様にばらつかせる必要がある。しかし、ばらつかせただけでは、劣化予測の劣化分布と実橋の劣化分布は整合しない。

よって、劣化予測の分布を実橋の分布と整合する様に補正する必要がある。実橋の劣化分布は点検結果により得られるが、点検結果には点検を実施した技術者の測定誤差が含まれる。また、ひび割れを測定しても、そのひび割れが、いつその状態になったか不明であるため、ひび割れが発生した時間と点検を実施した時間の誤差（時間誤差）も含まれる。本論文では、点検結果に以上の測定誤差や時間誤差を考慮した上で、ばらつかせた劣化予測に対して点検結果を用いて補正する。なお、点検データは高知県から提供されるデータ³⁾を用いるものとし、2 回点検を実施している片粕大橋については、1回目点検で劣化予測を補正し、2回目点検実施時の劣化予測と2回目点検結果を比較して、補正による効果を検証する。

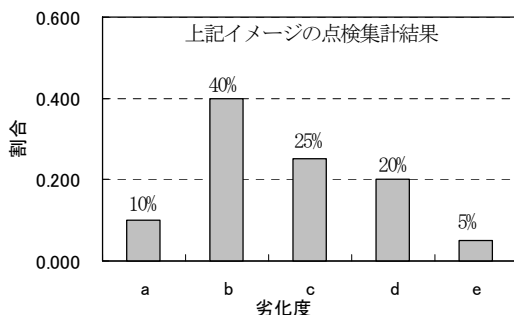
2. 劣化予測モデルにばらつきを考慮する方法

(1) 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

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



- (1): 劣化区分「a」→ひび割れ無し
- (2): 劣化区分「b」→ひび割れ少
- (3): 劣化区分「c」→ひび割れ多
- (4): 劣化区分「d」→剥落小
- (5): 劣化区分「e」→剥落大

図-1 点検結果と集計結果のイメージ

めても、劣化予測と実構造物の劣化分布を整合させ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て考慮する⁴⁾。

(2) ばらつき分布の考慮方法と補正方針

実構造物(本論文では橋梁)を点検すると、図-1 の例に示すような面的(要素毎)にばらついた劣化状態が得られる。また、要素毎の劣化速度は図-2 に示す様なイメージとなる。ここで、図-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-2 の劣化速度(時間と累積腐食量および劣化度の関数)は材料条件・環境条件によりばらつく。なお、図-1 の例は全部で 20 要素あることから、1 本あたり面積で 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。従来の劣化予測による劣化速度は図-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(要素)も存在する可能性があるため、それを表現するため、最も遅い劣化速度は「0倍速」とする。

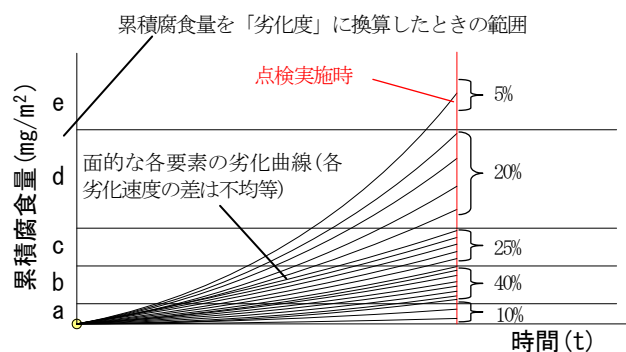


図-2 実橋における劣化度のばらつきのイメージ

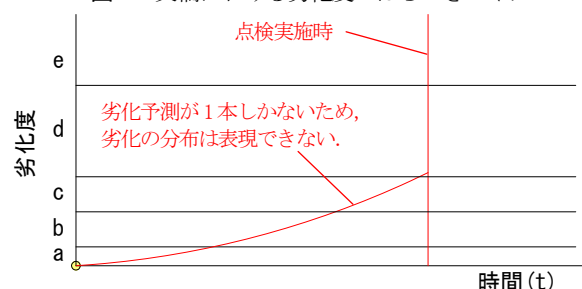


図-3 従来の劣化予測(1 本の予測)

2)最も速い劣化速度としては、実橋の劣化分布を把握した上で、確定的に算出した劣化速度と比較し、十分に実橋の劣化分布をカバーできる倍速とする。

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、倍率の間隔が大きすぎると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-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、劣化予測を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るため、図-2に示す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。

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-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-6に示すように、その「劣化表現率率(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。

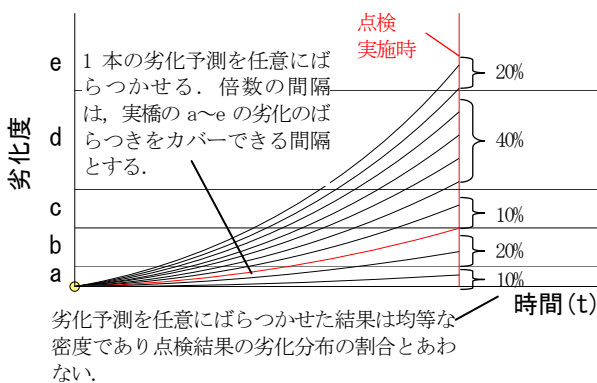


図-4 任意にばらつかせた劣化予測

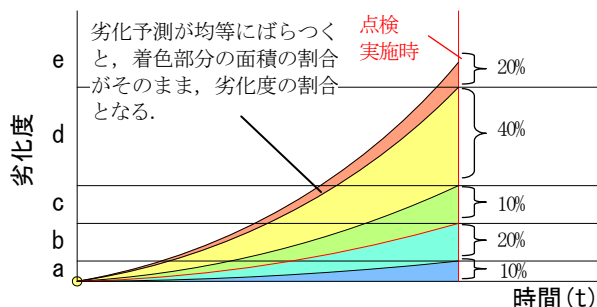


図-5 劣化予測における劣化度割合のイメージ

(3) 具体的な補正方法

図-1に示す実橋モデルと図-4に示す劣化予測を用いて、具体的な補正方法を示す。図-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。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本あたりの面積を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。

- 1)点検結果における劣化度「a」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。
- 2)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。
- 3)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。
- 4)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」を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。
- 5)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「劣化表現率」を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。

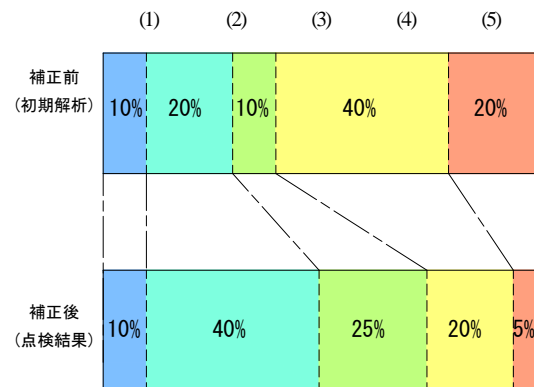


図-6 劣化度割合補正のイメージ

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で、実構造物の劣化のばらつきを考慮した予測が可能になる。

なお、図-1に示す面的な要素は、等分割されているが実橋の点検は図-7に示す様に要素毎に面積が異なる場合もある。この場合も面積を考慮した劣化度の割合を点検で得ることができれば、劣化予測の補正は上記の考え方をを用いて、補正可能である。

(4) 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。

- 1)劣化度に応じて点数を下記のように定義する。

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
- 2)1)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各劣化度の割合を乗じる。その合計を劣化評点と定義する。

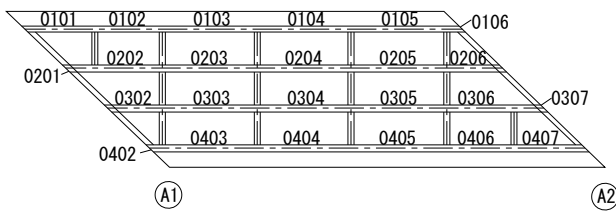


図-7 実橋の点検要素分割例

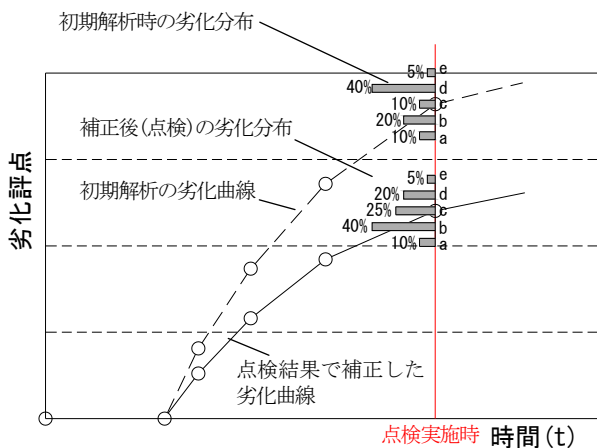


図-8 劣化評点と劣化度分布による表示

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-8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。

3. 点検結果の測定・時間誤差を考慮する方法

(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。しかし、点検結果には点検方法、点検条件および、定義した劣化度等の様々な要因によって、誤差が生じる。これらの要因について全てを考慮する方法もあるが、現在の研究成果では要因の中に不確定な要素もあり、モデルが煩雑となる上に精度向上に限界があるため、本研究では「測定誤差」に着目する。「測定誤差」は様々な誤差要因の作用として、技術者が劣化度を測定する際に生じるひび割れ幅の計測誤差や技術者の判断による誤差と考える。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。その誤差は点検が5年に1回実施されることを踏まえると最大4年の誤差があると考えられる。点検結果の誤差を大別すると、以上の2つの誤差と考えられる。図-9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。劣化予測は上記の様な大きな誤差を含むこととなるが、正しいと考えられる劣化予測はこの範囲にあり、誤差ボックスの範囲を狭めることで、劣化予測の精度は向上すると考えられる。

「時間的な誤差」は前回点検時から点検時までの間で、いつその状態になったか不明であることを示す。

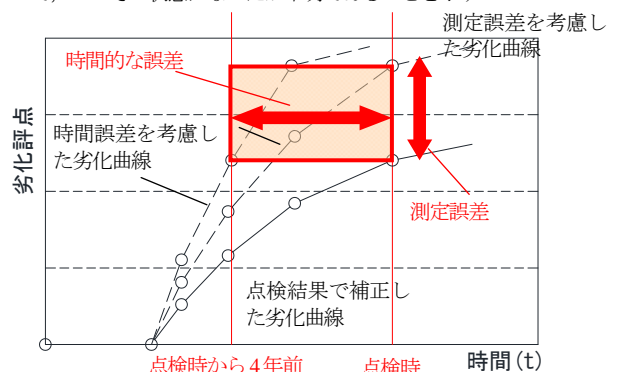


図-9 測定誤差と時間的な誤差の概要図

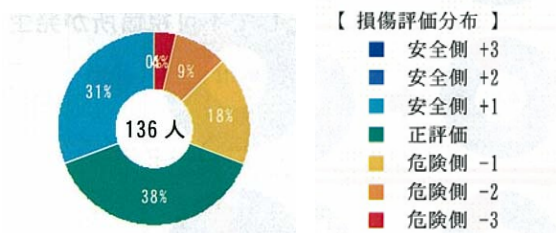


図-10 高知県職員の測定誤差傾向

データ総数 7			
劣化度	度数 ni	確率関数 p(xi)	確率分布関数 f(x)
a	1	0.143	0.143
b	0	0.000	0.143
c	2	0.286	0.429
d	3	0.429	0.857
e	1	0.143	1.000

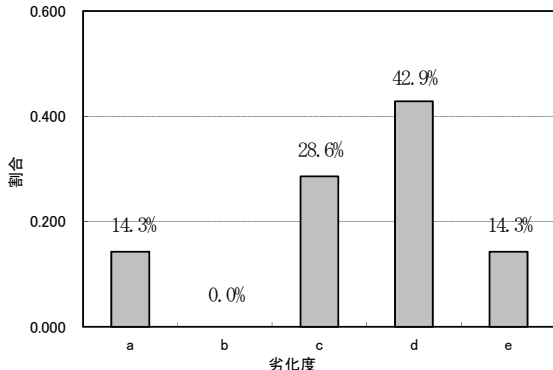


図-11 片粕大橋の橋点検結果(供用24年)

データ総数 7			
劣化度	度数 ni	確率関数 p(xi)	確率分布関数 f(x)
a	0.69	0.099	0.099
b	0.8	0.114	0.213
c	1.86	0.266	0.479
d	2.24	0.320	0.799
e	1.41	0.201	1.000

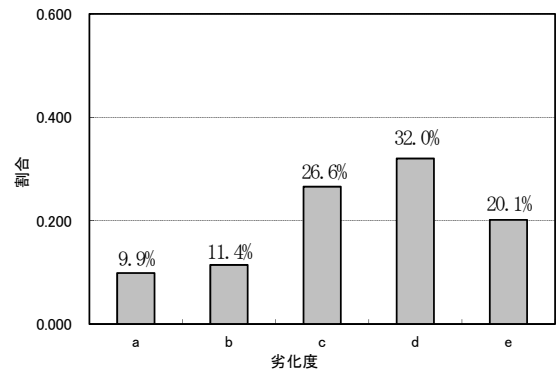


図-12 片粕大橋 測定誤差を修正した点検結果(供用24年)

(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-10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。b評価以下も上記と同様に補正を実施する。図-11に高知県管内の片粕大橋における点検結果を、図-12に以上の方法で補正した点検結果を示す。

(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

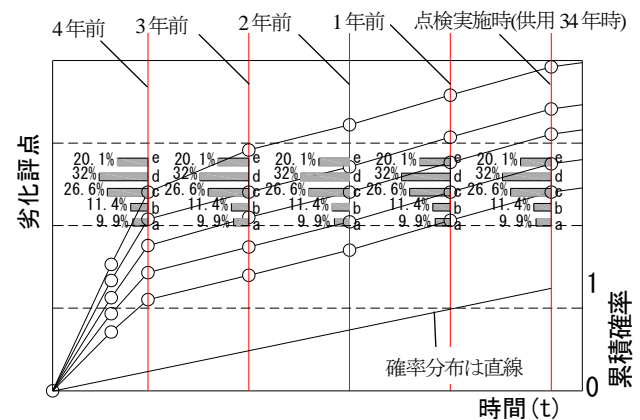


図-13 測定誤差と時間的な誤差の概要図

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)現時点では時間的な誤差を生じる確率は不明であるが、図-13に示す様に、点検結果時の劣化分布となる累積確率は、5年前の時点は「0」、点検実施時までは「1」となる。現時点では、いつその劣化が生じるのか不明であるため、この確率分布関数をもっとも簡単な1次関数で想定すると式(1)となる。

$$P(x) = 0.2x \quad (1)$$

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(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。

上記の様に時間的な誤差によって、1橋につき劣化予測モデルは5本派生し、各々の劣化予測が有する確率は20%となるため、「劣化表現率」にはこの確率も加味する必要がある。また、複数の点検結果がある場合、

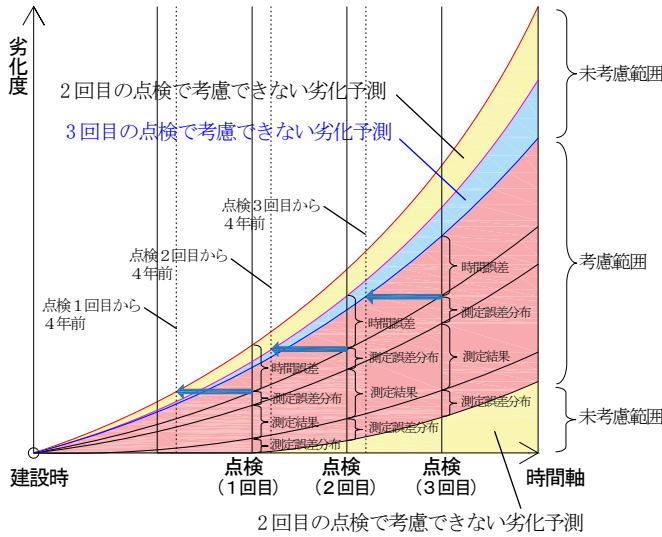


図-14 測定誤差と時間誤差による誤差ボックスおよび劣化予測の概要図

図-9に示す「誤差ボックス」も複数存在することとなる。劣化予測は誤差ボックスの範囲の誤差を含むが、逆に誤差ボックスの範囲をにない劣化予測は実橋の劣化と乖離したものとなるため、考慮しなくてよい。よって、誤差ボックスが複数ある場合、各誤差ボックスの範囲にある劣化予測のみを考慮すれば良いため、誤差の範囲は小さくとなると考えられる。誤差ボックスを考慮すべき劣化予測と考慮しなくて良い劣化予測の概要を図-14に示す。

4. 実橋における補正例

3章までに点検結果を用いた劣化予測の補正方法と点検結果が多いほど誤差の範囲が狭くなり、劣化予測の精度が向上する仮説を示した。ここでは高知県の点検データを用いて、実際の橋梁の劣化予測と点検結果を用いた補正と劣化予測の精度について検証する。

(1) 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³⁾を用いる。高知県では職員による点検を実施しており、H28年1月現在で、2項目(2回目)の点検が終了した状況である。現在3項目の点検を実施している状況である。高知県の点検システムでは、図-15に示す指標によって、劣化度を判定する。図-1や図-7に示す様な要素毎に劣化度を集計することで、橋梁毎の劣化のばらつきの情報を得ることができる。なお、本論文の解析は高知県管内の橋梁の中で、支間数3径間以上、支間長30m以上で点検結果が2回以上データベースに登録されているPC橋の「片粕大橋」を対象として実施した。劣化予測は点検結果の測定誤差および時間誤差を考慮した上で、点検結果による補正過程を示す。また、点検結果で補正しない劣化予測と1回目点検で補正した劣化予測を行い、2回目点検結果との比較により、補正した

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	—
c	剥離のみが生じている
d	鉄筋が露出しているが、鉄筋の腐食は軽微である。
e	鉄筋が露出しており、鉄筋が著しく腐食している。

【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-15 高知県点検マニュアル(劣化度定義)



図-16 解析対象橋梁位置図

ことで劣化予測の精度が向上することを示す。

(2) 実橋における解析と点検結果

a) 橋梁(解析)諸元

「片粕大橋」は昭和50年代に架設された橋梁で、PC3径間連続箱桁橋(橋長 $L=180.0\text{m}$)である。

また、詳細な構造図や配筋図が無い場合、建設省標準図集⁹⁾や同じ示方書(S36年道路橋示方書⁶⁾)により設計された同規模の類似橋梁の設計図等を参考に解析を実施する。表-1に解析諸元を示す。

b) 測定誤差を考慮した点検結果

「片粕大橋」は平成20年(供用24年)に1回目の点検を実施している。上述した方法で「片粕大橋」の1回目の点

表-1 片粕大橋 橋梁諸元

項目	単位	片粕大橋 (PC橋)
架設年	年	1984
解析期間	年	100
飛来塩分流速	mg/mm ²	800
初期塩化物イオン濃度	kg/m ³	0
鉄筋径	mm	13
かぶり	mm	35
水セメント比	%	43
飽和度	—	0.6
ヤング係数	N/mm ²	31000
圧縮強度	N/mm ²	40
コンクリート内pH	—	12.5
骨材比率	—	0.25
単位セメント量	kg/m ³	350
温度	K	20

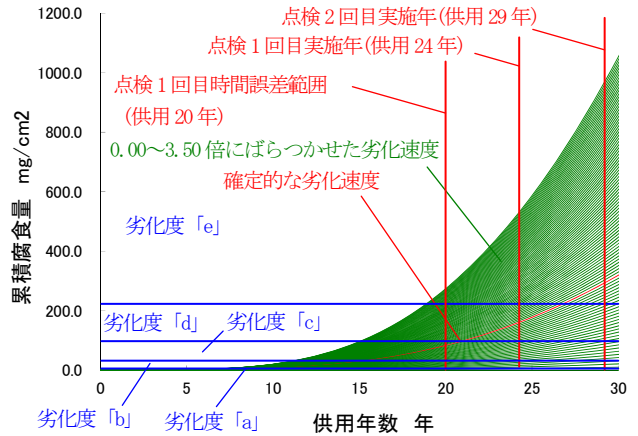


図-18 ばらつかせた劣化予測と劣化度分布の状況

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 ni	確率関数 p(xi)	確率分布関数 f(x)
a	1	0.010	0.010
b	12	0.120	0.130
c	22	0.220	0.350
d	51	0.510	0.860
e	14	0.140	1.000

3.5倍することで、点検結果と劣化予測の最も進行した劣化度は同じ「e」となる。

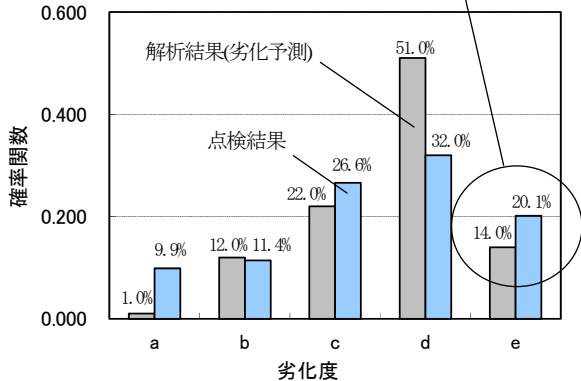


図-17 片粕大橋の点検結果と任意にばらつかせた劣化予測

検結果に対して、測定誤差を考慮した結果、前述した図-12に示す劣化分布となった。劣化度「a」の割合は9.9%であり、「b」は11.4%、「c」は26.6%、「d」は32.0%、「e」は20.1%となった。

c) 初期解析における任意倍数の設定

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、片粕大橋に対して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、点検結果には上述した様に測定誤差と時間誤差の誤差ボックスを考慮する必要がある。すなわち、劣化予測の解析は点検実施時から4年遡った状態と比較して倍速を決定する必要がある。

片粕大橋に対して、「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、確定的な解析結果に対して、0倍～3.5倍まで0.035倍間隔(100要素)でばらつかせた結果、図-17に示す様に解析結果の劣化分布は点検結果の劣化分布をカバーすることができる。

(3) 点検結果を用いた劣化予測の補正

a) 概要

次に片粕大橋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2章の方法を用いるものとする。また、片粕大橋について1回目の点検結果で劣化予測の補正を行い、2回目点検結果と比較し、予測精度の検証を実施する。

b) 初期解析における片粕大橋の劣化予測結果

片粕大橋について、劣化度と経年における解析結果を図-18に示している。図-17に示す様に、点検実施時(供用24年)における解析結果(4年遡った供用20年時)と点検結果の分布は、違いが確認できる。図-17に示す様に、点検結果では「a」の判定区分の割合は9.9%、「b」の判定区分の割合は11.4%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12.0%となっている。また、点検結果では「c」の判定区分が26.6%、「d」の判定区分は32.0%および「e」の判定区分が20.1%の割合となっているのに対し、解析結果では「c」が22.0%、「d」が51.0%、「e」が14.0%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。

c) 点検結果を用いた片粕大橋の補正方法, 補正結果

第2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d)に示す.

i) 点検を実施した供用24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9.9%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9.9%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12本あるため, 補正前の劣化表現率としては12.0%となるが, 点検では「b」区分が11.4%となっている. よって, 解析における「b」となる12本の劣化速度の「劣化表現率」を1本当たり $11.4 \div 12 = 0.95\%$ と置き換えることで, 点検結果と整合する.

片粕大橋 補正後解析集計表 (供用20年)					
データ総数 100					
劣化度	①劣化予測数	②劣化予測1本毎の劣化表現率	③度数 (①×②×100)ni	確率関数 p(x)	確率分布関数 f(x)
a	1	0.099	9.86	0.099	0.099
b	12	0.010	11.43	0.114	0.213
c	22	0.012	26.57	0.266	0.479
d	51	0.006	32.00	0.320	0.799
e	14	0.014	20.14	0.201	1.000

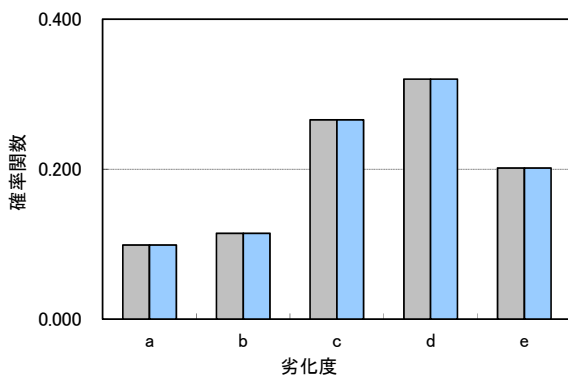


図-19 点検結果で補正した解析結果

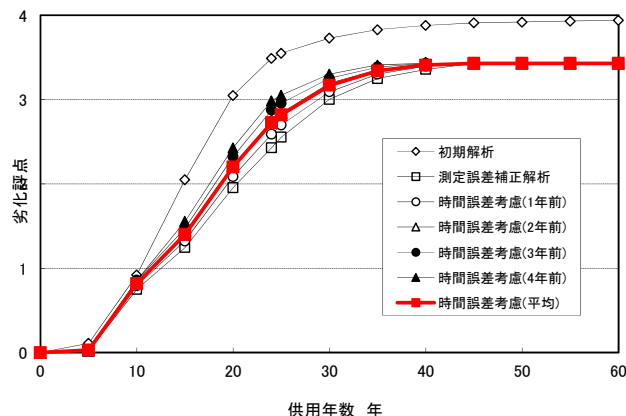


図-20 劣化予測における時間誤差考慮した劣化評点

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22本あるため, 補正前の劣化表現率としては22.0%となるが, 点検結果では26.6%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1%から1.21%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「d」区分が32.0%となっている. よって, 解析における「d」となる51本の劣化速度の「劣化表現率」を1本当たり $32 \div 51 = 0.63\%$ 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14本あるため, 補正前の劣化表現率としては14.0%となるが, 点検では「e」区分が20.1%となっている. よって, 解析における「e」となる14本の劣化速度の「劣化表現率」を1本当たり $20.1 \div 14 = 1.44\%$ と置き換えることで, 点検結果と整合する.

以上の方法で補正した結果を図-19に示す.

d) 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3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3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-20に示すように, 劣化予測は時間誤差のばらつきを持つこととなる.

e) 補正の妥当性検証

片粕大橋について, 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回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回目点検結果との整合性を比較する. また, 2回目点検結果に対しても測定・時間誤差の補正を実施した場合, 劣化予測のばらつき範囲がどのように変化するのか検証する.

片粕大橋の2回目点検結果に対して第3章で示した考え方を導入し, 測定・時間誤差を考慮する. 図-21に第3章の方法を片粕大橋の2回目点検に適用した結果を示す.

また, 図-21に示す測定誤差を考慮した点検結果の劣化評点を図-20に示す劣化予測にプロットした結果を図-22に示す.

図に示す様に, 2回目点検結果は供用29年で劣化評点2.714となる.これに時間誤差を考慮すると, 供用25年~29年の間で劣化評点が2.714になると考えられる.点検結果で補正をしていない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.

次に, 1回目点検結果に加え, 2回目点検結果も時間誤差を考慮した補正を実施する. 補正方法は第3章で

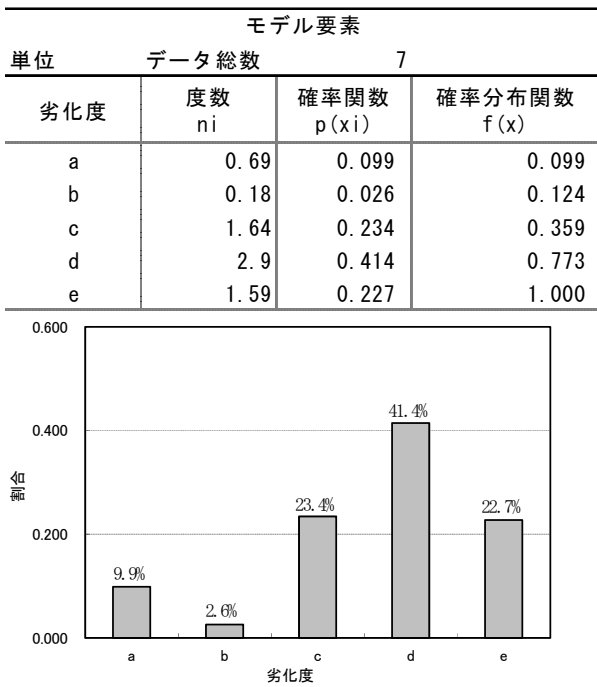


図-21 片粕大橋 測定誤差を考慮した2巡目点検結果(供用29年)

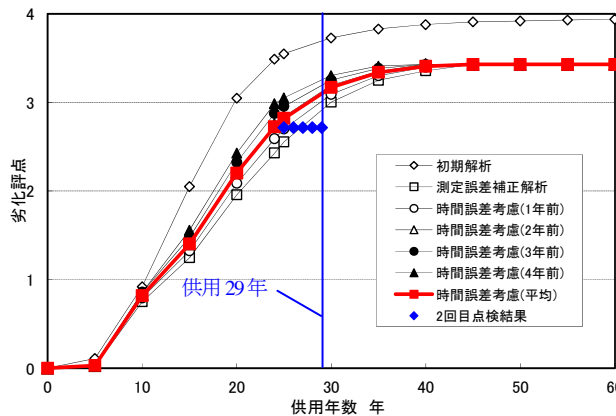


図-22 1回目点検による補正後解析結果と2回目点検結果(時間誤差を考慮)との劣化評点比較

示したように点検実施年の1年前～4年前までにその劣化状態になったことを考慮する。要素に着目し、点検結果における劣化状態の変化と劣化予測における劣化状態の変化が整合するものだけを考慮し、整合しない劣化予測は「劣化表現率」を0%, すなわち考慮しないこととする。そうすることによって、実橋の劣化状態の推移と整合する劣化予測だけが残り、精度向上が図れると考えられる。図-23に以上の方法で解析した結果を示す。1回目点検のみで補正した解析結果と比較して、時間誤差のばらつきが小さくなっていることが分かる。

5. 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、劣化予測にばらつきを考慮し、さらに

時間誤差のばらつき幅が図-22 より小さくなる。このことから劣化予測の精度が向上すると考えられる。

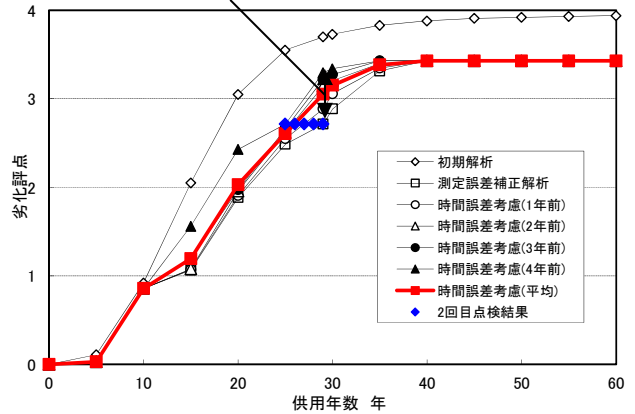


図-23 1回目と2回目点検結果で補正した平均劣化予測解析における劣化評点

測定誤差や時間誤差を考慮した点検結果を用いて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。

- (1) 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。
- (2) 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。
- (3) 高知県管内の塩害を受ける橋梁の中から、2回目点検を実施している片粕大橋に着目して、本論文の提案モデルを適用して解析を実施した。確定的な劣化予測に与える任意倍数を示すとともに、1回目の点検結果で補正した劣化予測結果は点検結果で補正しない解析と比較して2回目点検結果に近い予測をしていることを示した。また、1回目点検結果と2回目点検結果の両方で補正した劣化予測のばらつきの幅は1回目点検結果のみで補正した劣化予測より小さくなることを示した。このことにより、劣化予測はより多くの点検結果で補正することによって、ばらつきの幅を小さくする効果があり、劣化予測の精度向上に繋がる可能性を示した。

6. 今後の課題

以上より測定誤差、時間誤差を考慮した点検結果を用

いて劣化予測を補正するモデルを提案し、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) 本研究の目的は BMS を構築することにある。点検結果による補正は劣化の症状を点検で発見することで可能となるため、点検を受けていない若齢の橋梁に対しては維持管理費の予測精度が落ちる。今回の予測モデルを多くの橋梁に対して検証・補正していくことで、橋梁の材料や環境条件毎に劣化速度の傾向、維持管理の傾向を把握できると考えられるため、検証数を増やすとともに、劣化予測システムの向上を取り込める様に、ブリッジマネジメントシステムの全体バランスを図っていく必要がある。
- (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。これについても点検の間隔を短くするなど、調査を数多く実施し、傾向を把握する必要がある。
- (3) 実用に当たって、本論文の方法を適用するには十分な点検データや橋梁の諸元データが必要となる。しかし、自治体によっては古いデータの蓄積が無い場合や精度の粗いデータしか無い場合も考えられる。それらの自治体に対して劣化予測に必要なデータの補填方法が必要となる。
- (4) 今回解析を実施した橋梁は供用 29 年時点で補修を実施していない。補修を実施した箇所は劣化度が改善される。本論文の理論を用いれば、補修を行った橋梁についても、補修過程を復元し、それから劣化予測することが可能であるが、その場合に対する検証を今後実施する必要がある。

謝辞：本稿執筆に当たり、高知県職員の方々から点検データ等の資料提供を受け、また貴重なご意見をいただきました。ここに記して深謝致します。

付録 本研究で用いた劣化予測モデル

本研究で用いる劣化予測モデルはこれまでの既往研究成果を用いて構成している。劣化予測モデルは飛来塩分

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{cl} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$R_a = \int_0^t R dt \quad (2)$$

ひび割れモデル、剥落モデルから構成される。飛来塩分量算出モデル、塩化物イオン移動モデル、腐食モデル、水分の移動モデルは 1 次元の物質移動方程式を用いる。量算出モデルは小窪モデル⁷⁾を用いる。塩化物イオン・腐食モデルは環境の変化、電気防食や補修効果を考慮できる電気化学腐食モデル⁸⁾を用いる。

ひび割れモデルは FEM 解析と腐食ひび割れ実験から求めた提案式⁹⁾を用いる。

$$W = \left(R_a \cdot \frac{\pi(\rho-1)}{\gamma} - \alpha_0 \beta_0 \frac{0.22 \{ (2c + \phi)^2 + \phi^2 \}}{E(c + \phi)} \cdot f_c^{2/3} \right) \quad (3)$$

$$\left/ \left(\alpha_1 \beta_1 \frac{(c + \phi)}{(5c + 3\phi)} \right) \right.$$

剥落モデルは腐食深さが限界値を超えるとかぶりが剥落することを FEM 解析と実験から求めた提案式¹⁰⁾を用いる。

$$R_{sa} \geq 56(c/\phi) \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (4)$$

$$R_{sa} = R_a \cdot \left(\frac{\rho-1}{\rho \cdot \gamma} \right) \quad (5)$$

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書，pp.110, 2011.
- 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.
- 3) 高知県：高知県提供平成 22-23 年度点検結果
- 4) 工藤 徹郎，ボンコックゲサクル ナタコーン，那須 清吾：劣化のばらつきを考慮した構造物の補修シナリオ，土木学会論文集 E2, Vol.68 No.4, pp.316-329, 2012.
- 5) 建設省：土木構造物標準設計 17 PC 橋(その 5)，pp.13-53, 1969.
- 6) 土木学会：プレストレストコンクリート設計施工指針，pp.7-88, 1961.
- 7) 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.
- 8) 前川宏一，石田哲也，岸利治：Multi-Scale Modeling of Structural Concrete
- 9) 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.
- 10) 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，No.781/V-65, pp.157-170, 2005.

(2017.4.28 受付)

PREDICTION CONCEPT FOR STRUCTURAL CONDITION USING INSPECTION RESULT CONSIDERING MEASUREMENT ERROR AND TIME ERROR

Tetsuro KUDO, Nattakorn BONGOCHGESAKUL and Seigo NASU

Bridge management system (BMS) that serve an effective maintenance strategy became a popular issue especially in such severe financial circumstance. However, the deterioration prediction model that is a core component of BMS gives a big prediction gap from actual bridge condition. One of the reasons is from scattering of deterioration degree of the actual bridge, which is not considered in most of the prediction models. This paper proposes a methodology to consider the scattering of deterioration to mockup the actual bridge condition, and to correct prediction error by bridge inspection results (obtained from Kochi prefecture). The scattering range is controlled by corrosion speed that ranges from zero to a sufficient corrosion speed that able to represent the whole scattering. However, inspection result have the measurement error and the time error of when to have changed to the deterioration state. so to correct prediction have to take into consideration an error of measurement and a time error. This paper verifies the effect according the deterioration prediction which is a 1st inspection result and was rectified to compensation as compared with a 2nd inspection result.