

橋梁の劣化進行過程を考慮した 二次元マルコフ連鎖による劣化予測

湯舟 広海¹・審良 善和²・小林 翔一³・佐野 恵美子³・岩波 光保⁴

¹学生会員 鹿児島大学大学院 理工学研究科 (〒890-8580 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-24)

E-mail:k1594367@kadai.jp

²正会員 工博 鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授 (〒890-8580 鹿児島県鹿児島市郡元1-21-24)

³正会員 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 (〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

⁴正会員 工博 東京工業大学 環境・社会理工学院 教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

現在、我が国においては、老朽化するインフラが急速に増加すると懸念され、戦略的な維持管理が求められている。その中で、筆者らは地域の安全・安心を守る地域アセットマネジメント実現のための検討を自治体の協力のもと進めている。インフラの維持管理においては、得られた点検データから橋梁の経年的な劣化進行を適切に評価できる予測が必要であり、維持管理限界を明確にしたうえで、管理する橋梁群に対して補修時期や費用等を含む補修計画を策定しなければならない。そこで、劣化の状態を分かり易くとらえることのできるn次元マトリクスを作成しマルコフ連鎖により将来予測することを検討している。今回は、点検結果のうち「ひび割れ」および「剥離・鉄筋露出」の2種類を取りあげた結果について報告する。

Key Words : Maintenance, Prediction method, Markov chain model, Transition probability, Durability

1. はじめに

我が国のインフラは高度経済成長期に集中的に整備され、今後、老朽化するインフラが急速に増加することが懸念され、何らかの対策が必要になる。このような中で、地方自治体においては、施設の維持修繕に使える予算の制限もあり、戦略的な維持管理によってコストの縮減や平準化を図る必要がある。

現在、橋梁は長寿命化修繕計画のもと計画的な維持管理が実施されており、今回研究対象とする薩摩川内市では、平成30年度で全ての道路橋の定期点検が終了した。これにより、管理する橋梁の老朽化の実態を詳細に把握することができた。筆者らは、この貴重なデータを活用することで、地域アセットマネジメント実現のために、管理する橋梁群の今後の維持管理に対して活用しやすい将来予測手法を構築することを目的に検討を進めている。そこで、本研究では、第一段階として、実施された点検データの整理、分析を行い、管理する橋梁の現状を把握した。その後、構造物の老朽化は経年的な劣化現象であることを念頭に置いて点検データを再整理した。劣化の進行を分かりやすくとらえることができるように、損傷や変状の種類を組み合わせたn次元マトリクス（以下、劣

化進行マトリクスと称す）を作成し、n次元マルコフ連鎖を用いた将来予測を試みている。本稿では、点検結果のうち「ひび割れ」および「剥離・鉄筋露出」の2種類を取り上げた結果について報告する。

2. 橋梁の現状

定期点検では、対象とする損傷の種類ごとに劣化の状況が損傷程度によって判定される¹⁾。したがって、それぞれの損傷状態の把握や対策を検討する上で貴重なデータとなる。しかし、同じ損傷等級であっても、損傷の種類によって劣化の程度が異なる。経年劣化現象となる劣化の進行を評価するためには劣化進行過程に対応させる必要がある。そこで本検討では、表-1に示すように、それぞれの損傷（ここでは、ひび割れ、うき、剥離・鉄筋露出）の等級と劣化過程を対応させて整理した。劣化過程との対応は、劣化を受ける鉄筋コンクリート構造物の外観上のグレードと劣化の状態²⁾を参考にした。また、鹿児島県の橋梁長寿命化修繕計画において、損傷程度を損傷等級で区分されており、本検討では損傷等級を用いることとした。損傷等級は、「a」～「e」からなり、順番に損傷の程度が大きくなる³⁾。また、整理する際に初

表-1 損傷等級と劣化進行過程の関係

劣化進行過程	潜伏期 進展期	加速期 前期		加速期 後期	劣化期
損傷等級	a	b	c	d	e
割ひれび	損傷なし				
損傷等級	a			e	
うき	損傷なし			損傷あり	
損傷等級	a			c	e
鉄筋剥離	損傷なし				

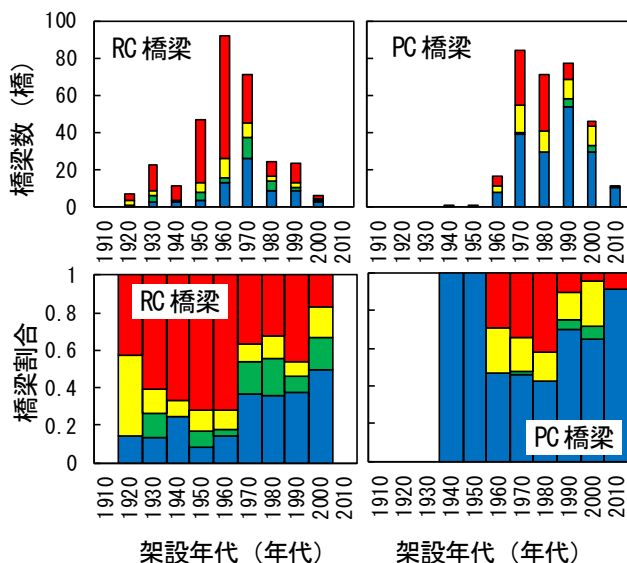


図-1 橋梁の年度別の劣化状況

期欠陥（初期ひび割れ、かぶり不足など）については、構造物の経年劣化と異なるため判定結果から除外した。

薩摩川内市が管理する橋梁（全橋梁 680 橋、内訳：RC 橋梁 285 橋 307 径間、PC 橋梁 253 橋 309 径間、その他 142 橋梁）について、図-1 に架設年度ごとの主構の評価結果を橋梁数および割合で示す。RC 橋梁と PC 橋梁ともに供用年数が増えるにつれて劣化橋梁の割合が大きくなる傾向にあり、PC 橋梁に比べ RC 橋梁の方が劣化の進行が速いようである。また、RC 橋梁は 1950 年代～60 年代の、PC 橋梁は 1970 年代～80 年代の橋梁の劣化橋梁の割合が大きくなる傾向にあるが、これについては別途検討する。いずれにしても多くの橋梁において劣化が顕在化していることが分かる。

3. マルコフ連鎖による劣化予測手法

(1) 劣化進行マトリクスの作成方法

橋梁の劣化予測を行うにあたって要求性能に応じた維持管理限界を設定しやすいように工夫し、図-2に示すように、縦軸にひび割れの損傷等級を横軸に剥離・鉄筋露出の損傷等級をとるマトリクスを作成した。これを劣化

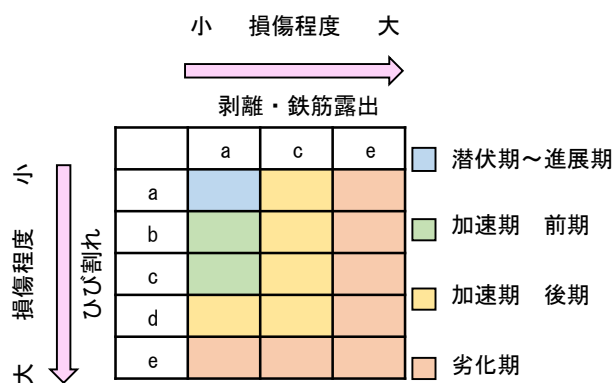


図-2 劣化進行マトリクス上の劣化進行過程

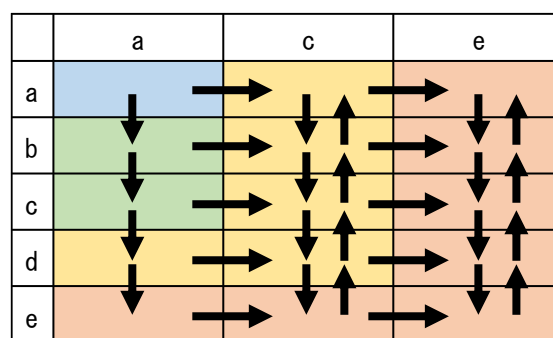


図-3 遷移確率の遷移方向

進行マトリクスと呼ぶ。

このマトリクスは疲労やアルカリ骨材反応などひび割れが進展する劣化や塩害などのひび割れ、鉄筋露出などが進行する構造物に対して、その変状を自由に遷移することを表現することができる。したがって、対象とする橋梁群の劣化原因を限定することなく、全体的な劣化進行を確率的にとらえることができる。

それぞれの橋梁で要求される性能が異なる中での維持管理を考える場合、それぞれの性能限界を設定する必要があり、この劣化進行マトリクスでは、その性能限界を自由に決定することが可能である。このマトリクスは、マトリクスの遷移確率を算出することにより、橋梁の劣化進行予測を行えることに加え、いつ維持管理を必要とする橋梁が増加するかという予測を行うことも可能となった。この予測により、将来的な予算やいろいろなシナリオを組むことができ、その結果、LCCを考慮した評価が可能となる。

(2) 劣化進行マトリクスの遷移確率の算出方法

縦軸にひび割れ、横軸に剥離・鉄筋露出をとった劣化進行マトリクスにおける遷移方向（劣化の進行方向）を図-3に示す。まず、剥離・鉄筋露出が生じていないa列の遷移は、ひび割れの進展および剥離の発生が考えられるため、下方向および右方向のみとした。剥離およびひび割れが生じているセル（c列）については、左方向の遷移はない。それ以外の方向については、剥離の発生に

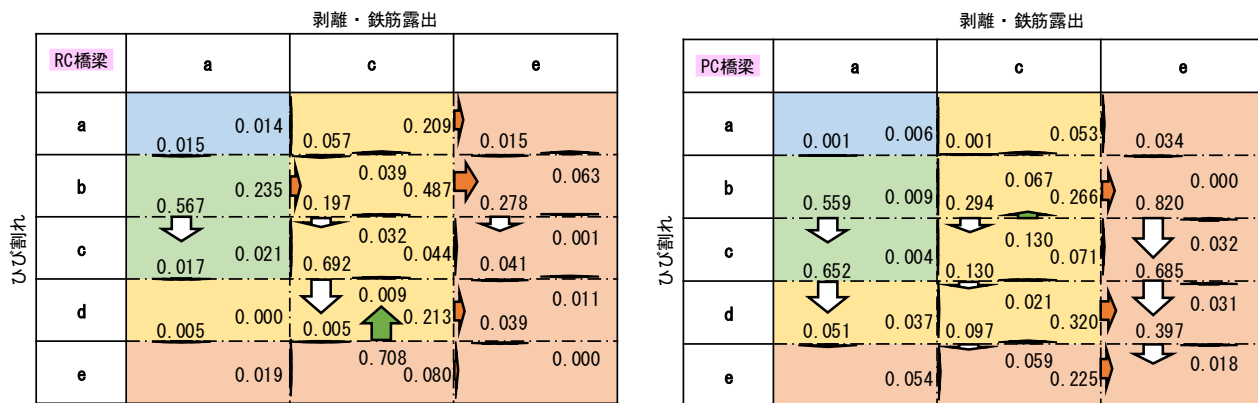


図-4 算出された遷移確率の結果

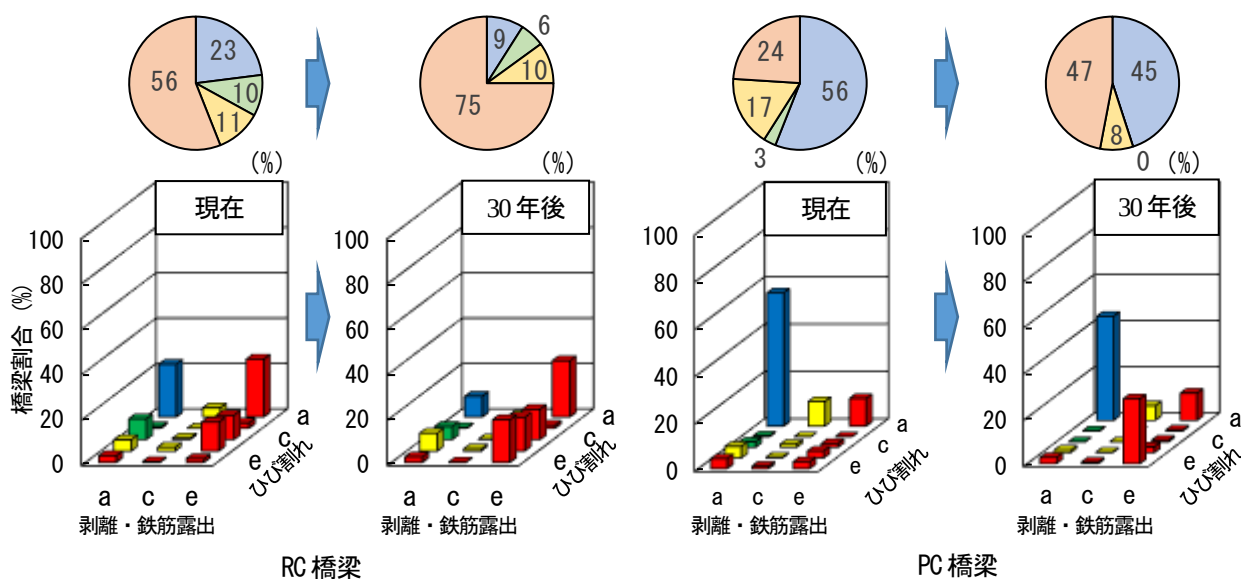


図-5 遷移確率に基づく橋梁割合の変化（劣化予測結果）

よりひび割れが減少する方向として上方向，剥離が鉄筋露出に至る方向として右方向，剥離発生後もひび割れが進展する下方向の遷移を考えた。鉄筋露出が生じた箇所（e列）についても同様の考え方で，左方向の遷移はなく，上下方向のみ遷移することとした。

この遷移方向に関する遷移確率の算出には，2次元マルコフ連鎖を適用し，遷移確率の算出を行った。以下に，遷移確率の算出方法について示す。なお，今回の遷移確率の算出には，刻み時間を10年として遷移確率を算出した。

- 1) 劣化進行マトリックスの各セルに入る橋梁数を刻み時間ごとに整理する。
- 2) 刻み時間ごとの劣化進行マトリックスの各セルの橋梁数と全橋梁との比を算出し，セルに存在する橋梁を割合として再整理する。
- 3) マルコフ連鎖の遷移確率⁴⁾を最小二乗近似による回帰分析を行い算出する。

(3) 橋梁群の劣化進行の予測方法

(2) で算出した遷移確率を用いて，橋梁群の現状の

損傷状態からの劣化予測を以下の方法により行った。

- 1) 全橋梁の対象となる部材の点検結果を用いて，劣化進行マトリックスの各セルに入る橋梁数を整理する。
- 2) (2)で算出した遷移確率を用いて，n回の繰り返し計算を行い，n年後までのマトリックス内の橋梁割合を算出する。
- 3) 対象橋梁数を各セルに乘じることで，各セルにある橋梁数を算出する。なお，橋梁数の小数点以下は切り捨てとした。

4. 結果および考察

(1) 劣化進行マトリックスの遷移確率

図-4に算出されたRC主構およびPC主構の遷移確率を示す。ここで，矢印の大きさはそれぞれの遷移確率の大きさを示している。損傷等級a行 - a列からの遷移確率は，RC橋梁に比べPC橋梁のほうが小さく，橋種の違いによる劣化進行の変化を十分にとらえていると考えられる。全体的な傾向として，RC橋梁は初期の軽微なひび割れ

(b行 - a列) 発生以降、ひび割れが進展するものと腐食が進行するものに分けられるようである。一方、PC橋梁に関しては、ひび割れ発生以降にひび割れが進展する中で、徐々に腐食による剥離、鉄筋露出が生じる傾向にある。また、いずれの橋梁も、剥離が生じた段階 (c列) からの鉄筋露出 (e列) への遷移は速いことが分かる。

(2) 30年後の劣化予測結果

図-5にRCおよびPC主構の劣化進行マトリクスの橋梁割合の現状および30年後の予測結果を示す。30年間補修を行わなかった場合、潜伏期または進展期にあるRC主構は1割程度に減少し、75%の橋梁が劣化期に至る予測結果となった。PC主構も同様に、潜伏期または進展期にある橋梁が56%から45%に減少し、劣化期の構造物が半分程度まで増加する予測結果となった。あくまで、本モデルを用いた予測結果であり、次回の定期点検結果により予測精度の確認を行う必要があると考えられるが、適切な対策の実施が急務であると予想される。

(3) 維持管理への活用

図-6に劣化進行マトリクスの維持管理への活用案を示す。補修計画の検討では、例えば、剥落などの第三者影響を考慮しなければならない場合は赤線で示すシナリオ①を維持管理上の限界として、ある程度の劣化は許容するが安全上問題のない範囲の維持管理上の限界として青線で示すシナリオ②など、個々の構造物の要求される性能の限界を設定することができる。

これら性能の限界を適切に設定することで、予測結果に基づいて補修時期を設定することができる。また、各セルの劣化の程度が明確であるため、各セルでの対策費用を設定することで補修費用も算出することができる。以上より、管理される橋梁群全体の戦略的な維持管理計画の策定が可能になると考えられる。

		剥離・鉄筋露出		
		a	c	e
ひび割れ	a		①	
	b			②
	c			
	d			
	e			

図-6 維持管理への活用案

5. 結論

本研究では、劣化の状態を分かり易くとらえることのできる劣化進行マトリクスを作成し、これを用いてマルコフ連鎖による劣化予測手法を構築することができた。これより、橋梁群の劣化進行を把握でき、適切な管理水準を設定することで戦略的な維持管理が期待される。

謝辞：本研究は、薩摩川内市の多大なるご協力をいただいて実施したものである。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：橋梁点検要領，pp.10-20，2019
- 2) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'18，日本コンクリート工学会，pp.224-225，2018
- 3) 鹿児島県：鹿児島県橋梁長寿命化修繕計画，pp.17-19，2014
- 4) 藤田素弘ほか：社会基盤の計画学，理工図書，pp.83-88，2013

(2019.10.21 受付)

PREDICTION METHOD OF DETERIORATION PROGRESS BY TWO-DIMENSIONAL MARKOV CHAIN MODEL BASED ON DETAILED INSPECTION RESULTS OF BRIDGES

Komi YUFUNE, Yoshikazu AKIRA, Shoichi KOBAYASHI,
Emiko SANO, Mitsuyasu IWANAMI

In this study, as a method to make the most use of the inspection data, the transition probability was calculated employing the two-dimensional Markov chain model. Deterioration prediction was performed employing the transition probability. This deterioration prediction took up the two kinds of damage of cracks and spalling of cover concrete. We decided to call that "Deterioration Progress Matrix." As a result of prediction, it can be confirmed to grasp the progress of deterioration of the bridge group. In addition, the limits of performance of maintenance can be set suitable. From this, we consider that efficient maintenance can be done by using Deterioration Progress Matrix.