

# 論文 橋梁の点検データを用いた2次元マルコフ連鎖による劣化予測手法

湯舟 広海\*1・審良 善和\*2・小林 翔一\*3・岩波 光保\*4

**要旨：**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ことが懸念され、戦略的な維持管理が求められている。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手法が必要であり、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対策費用等を含む補修計画を策定しなければならない。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2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試みた。今回は、点検結果のうち「ひび割れ」「うき」「剥離・鉄筋露出」の3種類を取りあげた結果について報告する。

**キーワード：**維持管理, 劣化予測手法, 点検データ, マルコフ連鎖, 遷移確率

## 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、抜本的な対策が必要になる。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性がある。

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可能となった。筆者らは、この貴重な点検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、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2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、2次元マルコフ連鎖を用いた将来予測を試みた。本稿では、点検結果のうち「ひび割れ」「うき」「剥離・鉄筋露出」の3種類を取り上げた結果について報告する。

## 2. 使用した定期点検データと解析データの抽出方法

本研究では、平成26年から平成30年の間で実施された薩摩川内市が管理するコンクリート橋(RC橋梁436橋、PC橋梁308橋)の橋梁定期点検結果(橋梁台帳、橋梁点検調査票、損傷図、損傷写真台帳)を用いた。点検

結果データから検討に用いた解析データの抽出および修正のフローを図-1に示す。まず、解析に使用できる橋梁の条件としては、橋梁台帳に架設年度が記載されているもの、また補修履歴のない橋梁であることとした。その結果、解析に使用できる橋梁の部材ごとの内訳は、RC橋梁の主構(以下、RC主構と称す)334橋362径間、PC橋梁の主構(以下、PC主構と称す)285橋363径間、RCの床版321橋405径間、下部工619橋1338基である。

次に、解析に用いるために点検結果の再整理を行った。定期点検では、対象とする変状の種類ごとに劣化の状態が判定区分によって判定される<sup>1)</sup>。この判定区分のひとつとして損傷等級があり、今回対象とする薩摩川内市では、劣化状態の判定を損傷等級を用いて行っている。損傷等級は、変状の程度に応じて「a」～「e」の5段階に区分されており、順番に変状の程度が大きくなる<sup>2)</sup>。損傷等級は図-2および表-1に示すようにひび割れに関しては、最大ひび割れ幅と最小ひび割れ間隔によって評価される。うきに関してはうきの有無によって「a」と「e」の2段階で評価され、剥離・鉄筋露出に関しては「損傷なし」、「剥離のみが生じている」および「鉄筋露出および鉄筋腐食がみられる」の3段階で評価されている。

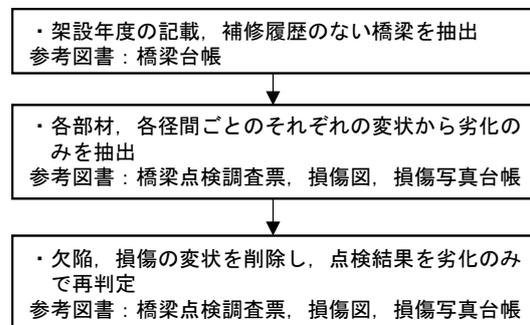


図-1 解析データの抽出および修正のフロー

\*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (学生会員)

\*2 鹿児島大学 学術研究院理工学域工学系 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 三菱電機(株) 先端技術総合研究所

\*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 博士(工学) (正会員)

この損傷等級によって、それぞれの変状の程度を把握できることから、対象となる変状に対する適切な対策を策定できると考えられる。しかしながら、劣化予測を行うにあたっては、それぞれの変状に対して判定される損傷等級を一律に比較し最悪値をとった場合、劣化の進行の程度を適切に判定しているとはいえず、予測結果のばらつきの原因になると考えられる。そこで、劣化進行過程を考慮した予測を行うためにデータの再整理を行った。まず、図-3 に示すようにコンクリートの変状には欠陥、劣化、損傷の3つに分類できる<sup>3)</sup>。現状の点検診断では、全ての変状が同じ損傷程度で判定されている。しかし、経年的な劣化予測を行うにあたって欠陥や損傷などの変状を加えると予測精度に影響を及ぼす可能性が高い。そこで、本研究では、損傷図や損傷写真台帳を参考に橋梁に生じている変状のうち劣化のみを抽出し、劣化による変状に対して損傷等級を再判定した。次に、図-2 に示すように各部材、各径間の損傷等級の最悪値と塩害の劣化進行過程との結び付けを行った。なお、劣化進行過程との対応は、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<sup>4)</sup>を参考にした。まず、外観上の変化を確認することができない潜伏期から進展期に関しては一つにまとめた。また、加速期に関しては現行の定期点検では、経過観察が必要な橋梁、予防保全的観点からの補修が必要な橋梁、早期の補修が必要である橋梁、早急に補修を行う必要がある橋梁の4段階で構造物の健全性の評価を行っており、この評価区分と対応させるために加速期を前期と後期の2段階に分けた。このように、劣化進行過程を4つに区分し、ひび割れ、うきおよび剥離・鉄筋露出の損傷等級を図-2 に示すように対応させた。

### 3. 橋梁の現状

薩摩川内市の橋梁環境について離島である甌島以外の地域において別途で環境外力調査を行った結果、飛来塩分によって大きな影響を受ける地域は確認されなかった。したがって、本検討では甌島の橋梁群を除外し、そのほかの地域を1つの橋梁群とみなして評価を行った。

図-4 に架設年度ごとの主構、床版および下部工の劣化の状況を評価した結果を示す。なお、部材の劣化状態は図-2 の下表を用いて、その最悪値をとった。主構に関してはRC主構とPC主構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経年的な劣化が進行していることが考えられ、劣化進行速度に関してはPC主構に比べRC主構の方が劣化の進行が速い。また、床版、下部工に関しても、主構と同様に時間の経過とともに劣化が進行していることが認められる。床版の劣化速度は主構と概ね同程度であると考えられるが、下部工の劣化

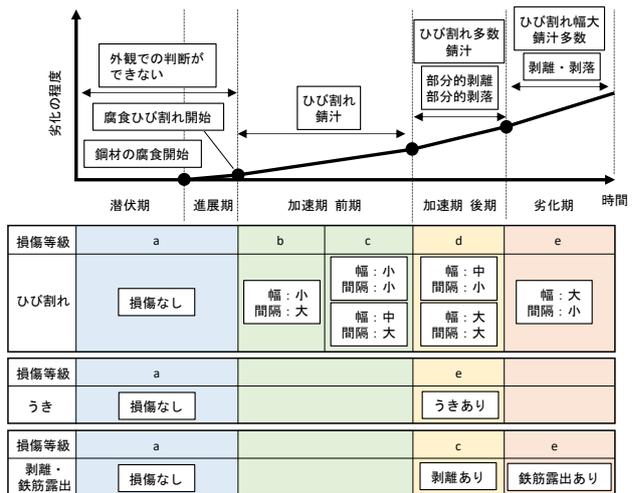


図-2 損傷等級と劣化進行過程の対応

表-1 ひび割れの分類

最大ひび割れ幅(X)に着目した程度		
損傷程度	RC構造物	PC構造物
大	$0.3\text{mm} \leq X$	$0.2\text{mm} \leq X$
中	$0.2\text{mm} \leq X < 0.3\text{mm}$	$0.1\text{mm} \leq X < 0.2\text{mm}$
小	$X < 0.2\text{mm}$	$X < 0.1\text{mm}$
最小ひび割れ間隔(Y)に着目した程度		
大	$0.5\text{m} \leq Y$	
小	$Y < 0.5\text{m}$	



図-3 変状の分類<sup>3)</sup>

進行速度はほかの部材と比べて大きく異なることが確認できる。また、下部工の場合は劣化期にある部材の割合が1920年代から1980年代にかけて同程度であり、ほかの部材と異なる傾向が見受けられた。年代ごとの割合に着目すると、主構に関してはRC主構は1950年代から1960年代、PC主構は1970年代から1980年代にかけて劣化が生じている主構の割合が大きい傾向にある。床版および下部工に関しても主構と同様な傾向が見受けられる。年代的な特徴として、1950年代～1970年代は我が国の高度経済成長期であり、短い期間で多くの橋梁を架設する必要があった。また、コンクリート中の塩分総量規

制やアルカリシリカ反応暫定対策以前の橋梁である。これら歴史的な背景からコンクリートの品質低下、施工不良、初期欠陥などの影響を受けたことにより、劣化橋梁数が増加した可能性が考えられる。このように、年代によって劣化の進行が異なる可能性が示唆されるが、全体的な傾向として経年的な劣化が徐々に進行していることは図-4 から明らかであり、再整理したデータを用いて劣化予測を行うこととした。

#### 4. 2次元マルコフ連鎖による劣化予測手法

##### 4.1 劣化進行マトリクスの作成

現状の劣化予測に関しては、損傷等級と供用年数の関係から代表損傷等級に区分された橋梁の平均供用年数を算出し、近似した線を劣化予測式と定義している。しかし、損傷等級は図-2に示すように同じ損傷等級であっても劣化の程度が大きく異なる場合が考えられる。そのため、劣化予測を行うにあたって劣化進行過程を考慮し、かつ、橋梁の要求性能に応じた維持管理限界を設定しやすいように、図-5に示すように縦軸に「ひび割れ」の損傷等級を、横軸に「うき」および「剥離・鉄筋露出」の損傷等級をとるマトリクスを作成した。これを劣化進行マトリクスと呼ぶ。ここで、図-2より、うきの損傷等級「e」と剥離・鉄筋露出損傷等級「c」が劣化進行過程において同等であることから今後の検討においてうきの損傷等級「e」と剥離・鉄筋露出損傷等級「c」は同等とした。

このマトリクスは疲労やアルカリシリカ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、それぞれの変状の程度によって自由に遷移することができる。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。そのため、橋梁全体がどのような劣化進行の傾向があるのかを把握することが可能で、これに基づいた予測を行うことができる。また、個々の橋梁に対しても、現時点の劣化状態からの遷移を予測することが可能であり、また、今後の点検結果の蓄積により予測精度の向上が期待できると考えられる。

また、それぞれの橋梁に要求される性能が異なる中で戦略的な維持管理を考える場合、それぞれの橋梁に対して性能限界を設定する必要がある。この劣化進行マトリクスでは、各セルが損傷等級によって設定されており、劣化の程度が明確化していることから、その性能限界を適切に設定することが可能になると考えられる。

##### 4.2 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

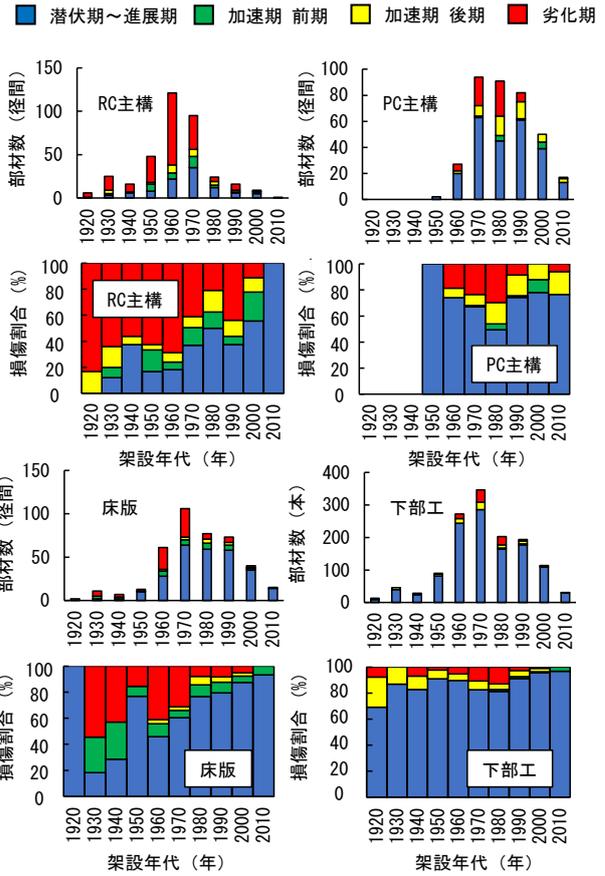


図-4 薩摩川内市の橋梁の現状

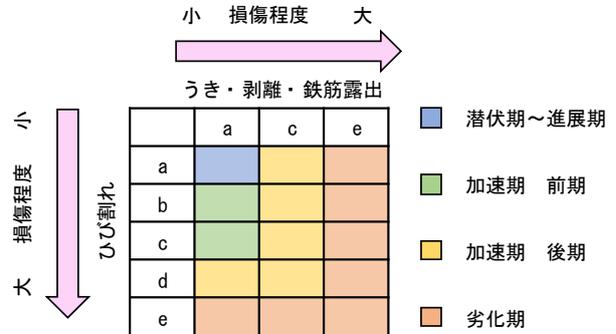


図-5 劣化進行マトリクス

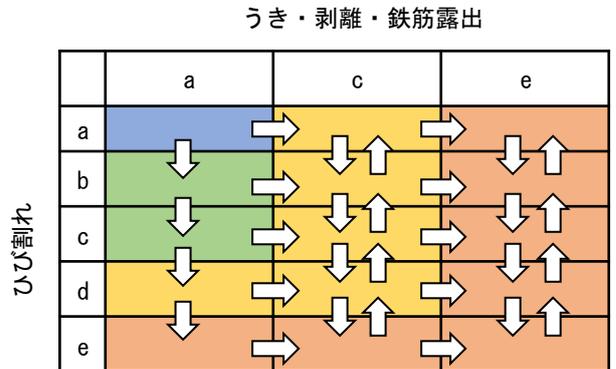


図-6 劣化進行マトリクス上の劣化進行方向

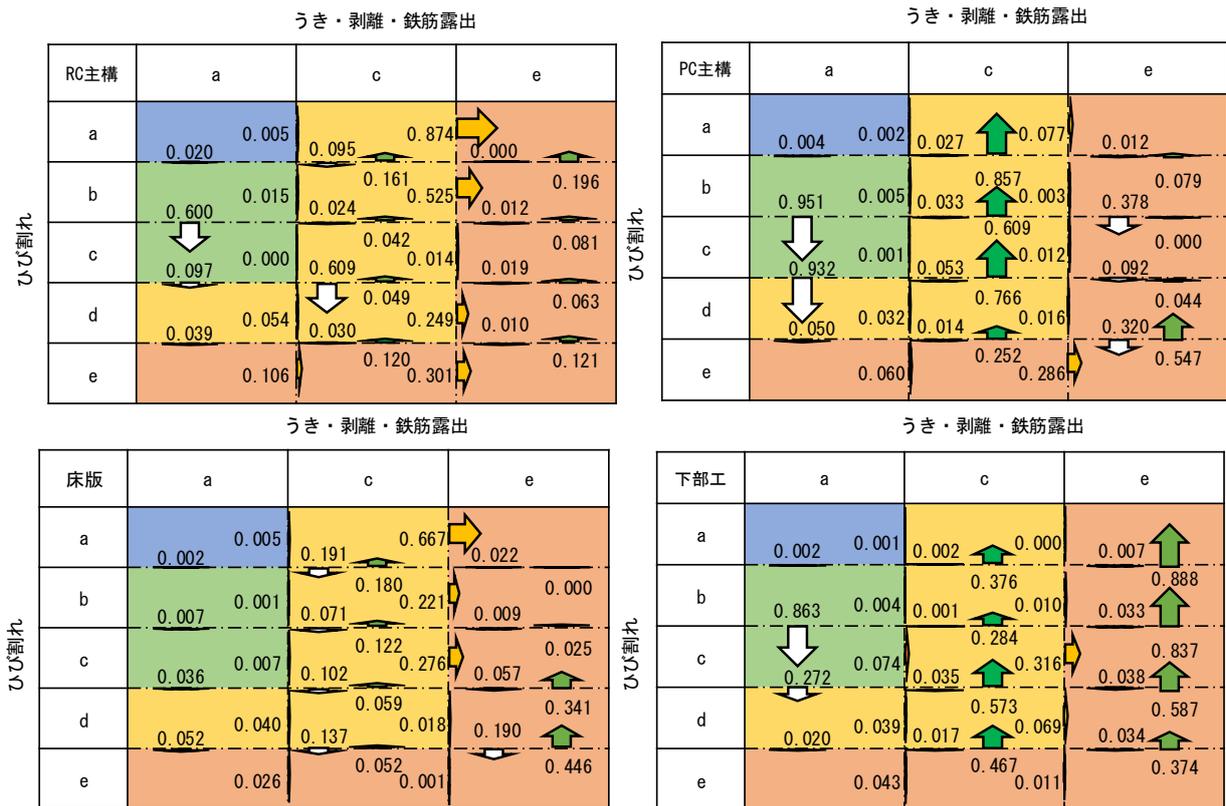


図-7 遷移確率の算出結果

図-6に示す。まず、うき、剥離・鉄筋露出が生じていないセル（a列）の遷移は、ひび割れの進展およびうき、剥離の発生が考えられるため、下方向および右方向に遷移するとした。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ものとした。それ以外の上下および右方向については、剥離の面積が拡大することにより鉄筋腐食によるひび割れが減少すること、うき、剥離が鉄筋露出に進展すること、剥離発生後もひび割れが進展することが考えられるため遷移することとした。鉄筋露出が生じているセル（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。

この遷移方向の遷移確率の算出方法について示す。はじめに、劣化進行マトリクス各セルに入る部材数を年代（10年）ごとにまとめ、その年代の割合分布として整理した。この整理した割合分布をその年代の5年次の値とする。その後、式（1）式（2）に示す2次元マルコフ連鎖を用いて、各セルから1年毎に遷移する確率を上述した各年代の割合分布との最小二乗近似により算出した。

$$p_{ij} = P\{X_j(k+1)|X_i(k)\} = P\{X_j(l+1)|X_i(l)\} \quad (k \neq l) \quad (1)$$

$$P\{X_j(k+1)\} = \sum_{i=1}^r p_{ij} \cdot P\{X_i(k)\} \quad (2)$$

ここで、 $p_{ij}$  は状態  $i, j$  での遷移確率、 $k$  および  $l$  は時刻、 $X_j(k+1)$  は時刻  $k+1$  をパラメータとする状態  $j$  での出現事象、 $X_i(k)$  は時刻  $k$  をパラメータとする状態  $i$  での出現事象、 $P\{X_j(k+1)\}$  は時点  $k+1$  で出現事象  $X_j$  が生じる確率を示している。

#### 4.3 橋梁群の劣化進行の予測方法

4.2で算出した遷移確率を用いてn年後の橋梁群の劣化進行の状態を予測する。まず、点検結果から得られた全部材の割合分布を初期状態とする。劣化進行マトリクスのそれぞれのセルの割合に対して4.2で算出した遷移確率を乗じることで1年間で遷移方向に移る割合が算出される。セルに留まる割合および遷移する割合を各セルで整理し1年間の予測結果が得られる。これをn回行うことで、劣化進行マトリクスにおけるn年後の割合分布を予測することができる<sup>5)</sup>。

### 5. 結果および考察

#### 5.1 劣化進行マトリクスの遷移確率

図-7に算出されたRC主構、PC主構、床版および下部工の遷移確率の算出結果を示す。ここで、矢印の大きさはそれぞれの遷移確率の大きさを相対的に示している。損傷等級 a 行-a 列からの遷移確率は、RC主構に比べPC

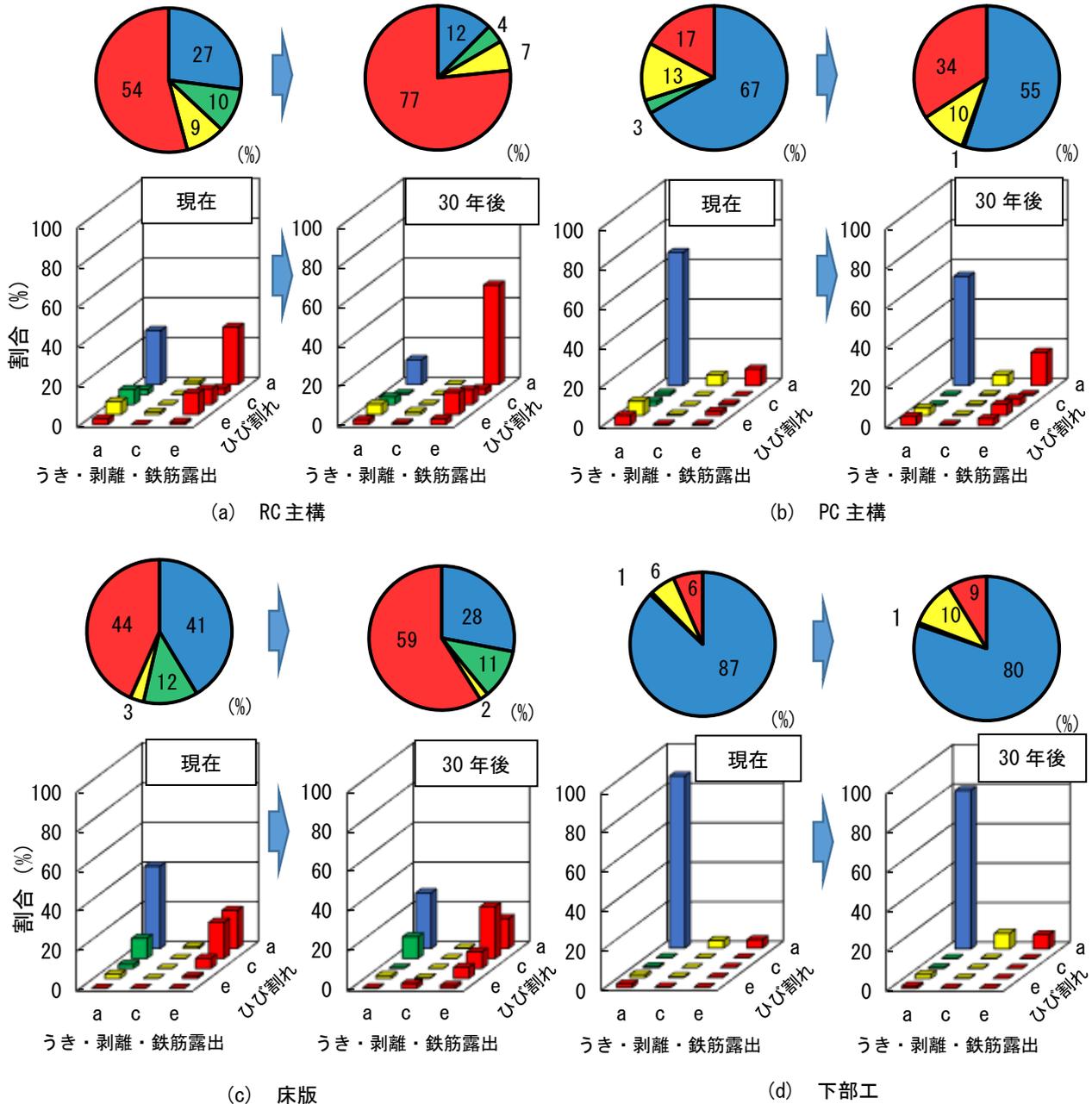


図-8 遷移確率に基づく橋梁割合の変化

主構のほうが小さく、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主構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。また、ひび割れbからひび割れcへの遷移は速いものの、ひび割れdおよびeへの遷移は遅くなる傾向にある。腐食側に着目すると、ひび割れ進展に比べ進行速度は遅いが、うき、剥離へ遷移した橋梁については、剥離が生じた段階（c列）からの鉄筋露出（e列）への遷移は速くなる事が分かる。一方、PC主構に関しては、外観の変状が発生するまでの期間はRC主構に比べて1/5程度の遷移確率になり劣化の顕在化は遅くなる傾向にある。しかし、ひび割れ発生以降はひび

割れの進展が急激に進み、その後、腐食の進行に伴ってうき、剥離の範囲が急激に進むまたは鉄筋露出が進行する傾向にある。

床版および下部工は主構と比較すると、劣化の進行速度は小さい傾向がみられる。床版の劣化の遷移確率の特徴としては、RC主構と概ね同様な劣化進行パターンを示すことが予想される。最終的には、大規模な鉄筋露出を伴う劣化（aまたはb行-e列）が進行していくと予測された。一方で、下部工に関しては、構造形式に関してはRC構造であるが、PC主構と同様な劣化進行パターンを示すことが予想される。

## 5.2 30年後の劣化予測結果

図-8にRC主構、PC主構、床版および下部工の劣化

進行マトリクスを用いた割合の現状および 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、77% が劣化期に至る予測結果となった。また、30 年後 a 行-e 列に劣化期の主構の割合が集中していることから、RC 主構は鉄筋露出が全体に広がっていき広範囲に鉄筋露出を起こす可能性があるとして予測された。PC 主構も同様に、潜伏期または進展期にある橋梁が 67% から 55% に減少し、劣化期の構造物が 34% まで増加する予測結果となった。PC 主構に関しては RC 主構と同様に劣化期の a 行-e 列に集中していく傾向がみられるが、ひび割れ e 行に劣化が進行していく傾向もみられた。これより、PC 主構の劣化期は広範囲の鉄筋露出を起こす可能性がある場合と、激しいひび割れが生じる劣化の 2 パターンに分かれて劣化が進行していくと推察される。

床版に着目すると、現在、健全な橋梁は 41% であるが、30 年後をみると 28% 程度まで減少していることが分かる。また、30 年後は RC 主構と概ね同様な傾向がみられるが、b 行-a 列の橋梁数が減少していないことから軽微なひび割れが表れているだけの床版が多い可能性があるとして予測された。下部工は 30 年後も健全な状態が 80% あることから、劣化の進行速度は速くないが a 行-c 列および a 行-e 列に劣化が進行している予測結果となった。しかしながら、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、主構においては、床版および下部工と比較して適切な対策の実施が急務であると予想される。

### 5.3 維持管理への活用

図-9 に劣化進行マトリクスの維持管理への活用を示す。補修計画の検討では、例えば、予防保全的な観点で維持管理を行う場合は、赤線を維持管理上の限界と設定し、ある程度の劣化は許容するが安全上問題のない範囲での維持管理を行う場合、青線を維持管理上の限界として設定するなど、個々に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。このように劣化進行マトリクス上ではそれぞれの橋梁に対して要求される性能を各セルの間に設定することで維持管理限界を様々な形で設定することが可能である。これより、適切な維持管理限界の設定を行うことで、予測結果に基づいた補修時期の予測を行うことも可能である。また、各セルの劣化の程度が明確化しているため、それぞれのセルごとに補修工法の設定が可能である。なお、今回は一例としてひび割れ注入工法と断面修復工法を選定し、それぞれの補修面積に応じて小規模から大規模の3段階に設定した。このよう

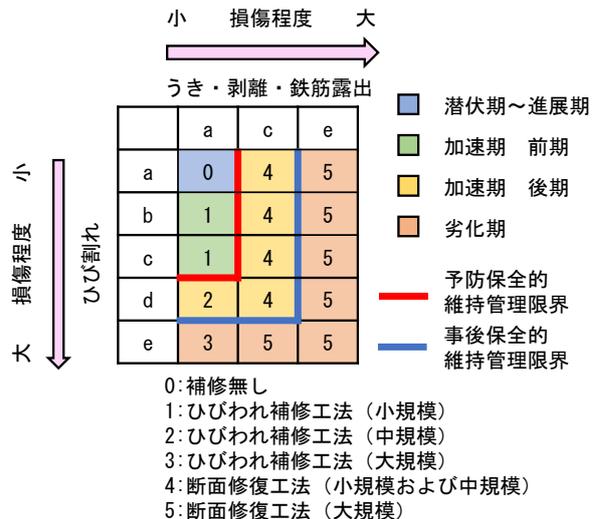


図-9 維持管理への活用案

に補修工法を設定することにより、単位面積当たりの単価から橋梁ごとに設定される補修において必要な平均的な費用を設定することで、将来的な補修費用を算出することも可能である。その結果、劣化進行マトリクスを用いると、橋梁の劣化進行予測を行うことに加え、それと同時に橋梁群の劣化が現在どの程度進行しているか把握でき、その劣化の進行の度合いに応じた適切な補修工法の選定および補修費用の予測を行うことができる。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。

## 6. 結論

本研究では、劣化の状態を分かりやすくとらえることのできる劣化進行マトリクスを作成し、橋梁群の劣化進行を把握した適切な管理水準を設定することで将来的な補修費用の算出を行うことが可能となり、戦略的な維持管理の実現が期待される。

## 謝辞

本研究は、薩摩川内市の多大なるご協力をいただき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：橋梁定期点検要領，pp.10-20，2019
- 2) 鹿児島県：鹿児島県橋梁長寿命化修繕計画，pp.17-19，2014
- 3) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，土木学会，pp.16-17,2018
- 4) 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
- 5) 藤田素弘ほか：社会基盤の計画学，理工図書，pp.83-88，2013