

論文 統計的手法に基づく橋梁定期点検データを用いた橋梁の健全度予測モデルの構築および将来の橋梁健全度推移予測への適用

石橋 寛樹*1

要旨：市町村が行う予防保全型の橋梁維持管理の合理化を目的として、橋梁定期点検データに基づく統計的手法により、福島県郡山市が管理する橋梁の健全度予測モデルを構築した。分析対象橋梁では、健全度が環境条件に大きく依存しないことを検証した上で、健全度の発生確率と供用年数の関係に着目し、橋梁の劣化速度の非線形性を表現可能な関数として対数正規分布を用いた回帰分析により予測モデルを推定した。さらに、予測モデルに基づく将来的な橋梁健全度推移予測を行った結果、多くの橋梁で健全度が急激に悪化する可能性の高い時期の同定や、橋梁の健全度分布評価が可能であることが示された。

キーワード：橋梁定期点検データ、統計的手法、橋梁健全度予測モデル、橋梁健全度推移予測、福島県郡山市

1. はじめに

橋梁の維持管理を行う上で、高度経済成長期に整備された橋梁の一斉老朽化や、少子高齢化・人口減少に伴う将来的な予算・労働力の減少が問題視されている。持続可能な橋梁維持管理体制の重要性が議論される中、多くの地方自治体では橋梁長寿命化修繕計画が策定され、従来の事後保全型から予防保全型の維持管理への転換が図られるなど、橋梁維持管理の高度化が進んでいる。

合理的な橋梁維持管理を実現するためには、点検データの分析とその活用が重要である。橋梁の劣化現象は、周辺環境や架設条件など種々の影響を受けるため、データ分析の目的に応じて、分析対象とする橋梁を適切に選定する必要がある。例えば、概略的に国内全域における橋梁の健全度分布を検証する場合、全国の橋梁データを総合的に分析する必要があり、特定地域に限定した橋梁の健全度評価を行う際は、対象地域内あるいは類似の環境下にある橋梁間の劣化特性を比較するべきである。全国の橋梁を対象とするデータ分析に関する取り組みとして、小林ら²⁾は、コンクリート橋における塩害・凍害・アルカリ骨材反応の被害状況とその傾向を都道府県別に整理している。都道府県内の橋梁を対象とした研究事例として、南ら³⁾は、石川県内の橋梁点検結果を活用し、コンクリート桁の劣化速度に影響を及ぼす環境要因を分析している。市町村単位における橋梁の健全度評価として、大竹ら⁴⁾は、岐阜市内の54橋の点検データを用いて統計解析を行い、構造諸元や環境条件の観点から橋梁の健全度に影響を及ぼす因子の同定を試みている。

橋梁点検データの分析により、橋梁の劣化因子やその影響度は解明されつつあるが、予防保全型の維持管理体

制を確立していくためには、環境条件の違いなど、対象地域の特性を考慮した橋梁の健全度推移予測が求められる。橋梁の劣化予測手法として、マルコフ劣化ハザードモデル⁵⁾やワイブル劣化ハザードモデル⁶⁾、生存時間分析⁷⁾に基づく手法など多くの研究がなされている。しかし、市町村レベルでの橋梁維持管理への実装を考えると、予測手法の扱いや得られる結果の解釈がより容易であることが望ましい。また、既往研究では、都道府県全域など、広域にわたる様々な環境条件下にある橋梁をまとめて分析対象としたケースが多く、橋梁長寿命化修繕計画を推進する市町村が担う橋梁維持管理の合理化に関する研究には依然として発展の余地がある。

本研究では、市町村レベルでの適用を想定した、合理的な橋梁維持管理体制の確立を目的に、福島県郡山市が管理するコンクリート橋および鋼橋の定期点検データを活用し、健全度と環境条件の関係性を整理・検証した上で、供用年数を変数とする橋梁健全度予測モデルを構築する。得られる予測モデルは、橋種や供用年数に応じた橋梁の劣化速度の非線形性を統計的に考慮可能な予測モデルである。構築された予測モデルに基づく将来的な橋梁の健全度推移予測を行うことで、郡山市における予防保全型の橋梁維持管理の重要性を提示する。

2. 分析対象橋梁の健全度と環境条件

2.1 郡山市における橋梁維持管理

郡山市では、2015年に橋梁長寿命化修繕計画を策定（その後、2018年に改訂）し、維持管理コストの削減を目指した予防保全型の維持管理を推進している⁸⁾。管理する橋梁の約8割が高度経済成長期に建設されており、そ

*1 日本大学 工学部土木工学科助教 博(工) (正会員)

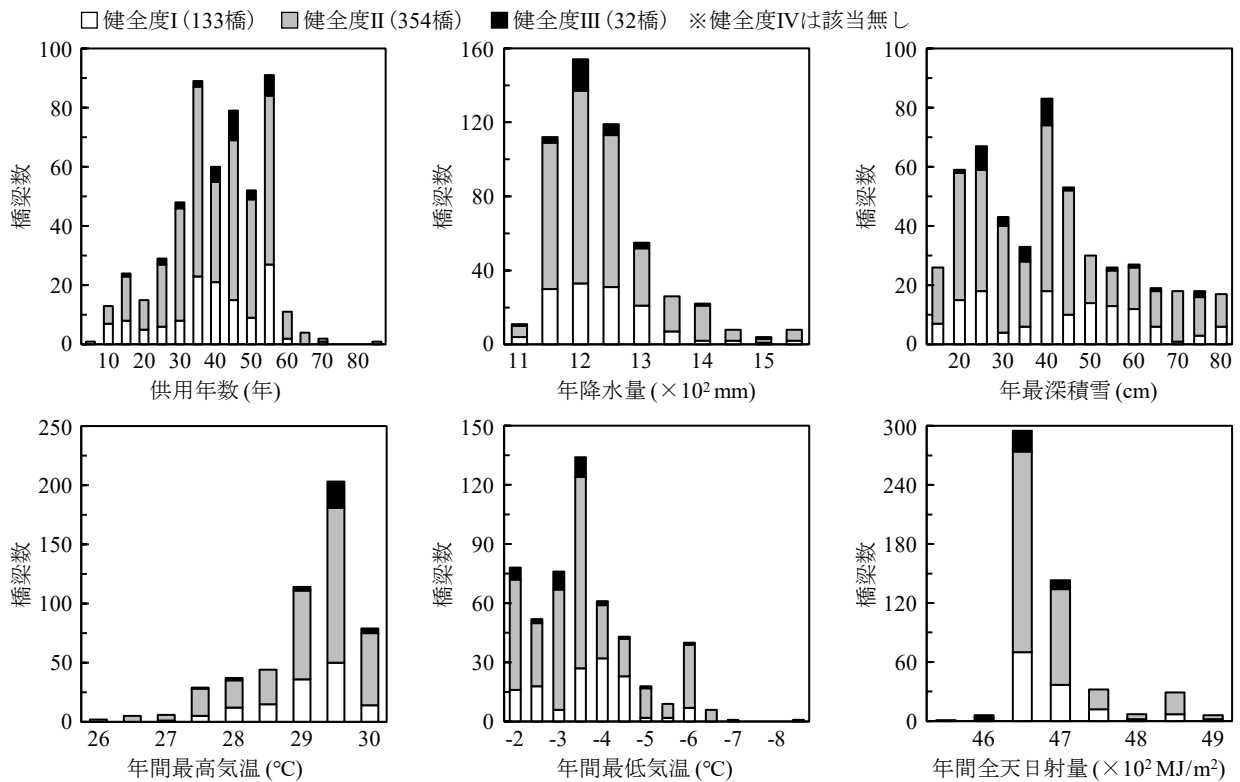


図-1 分析対象のコンクリート橋における健全度と供用年数および環境条件の関係

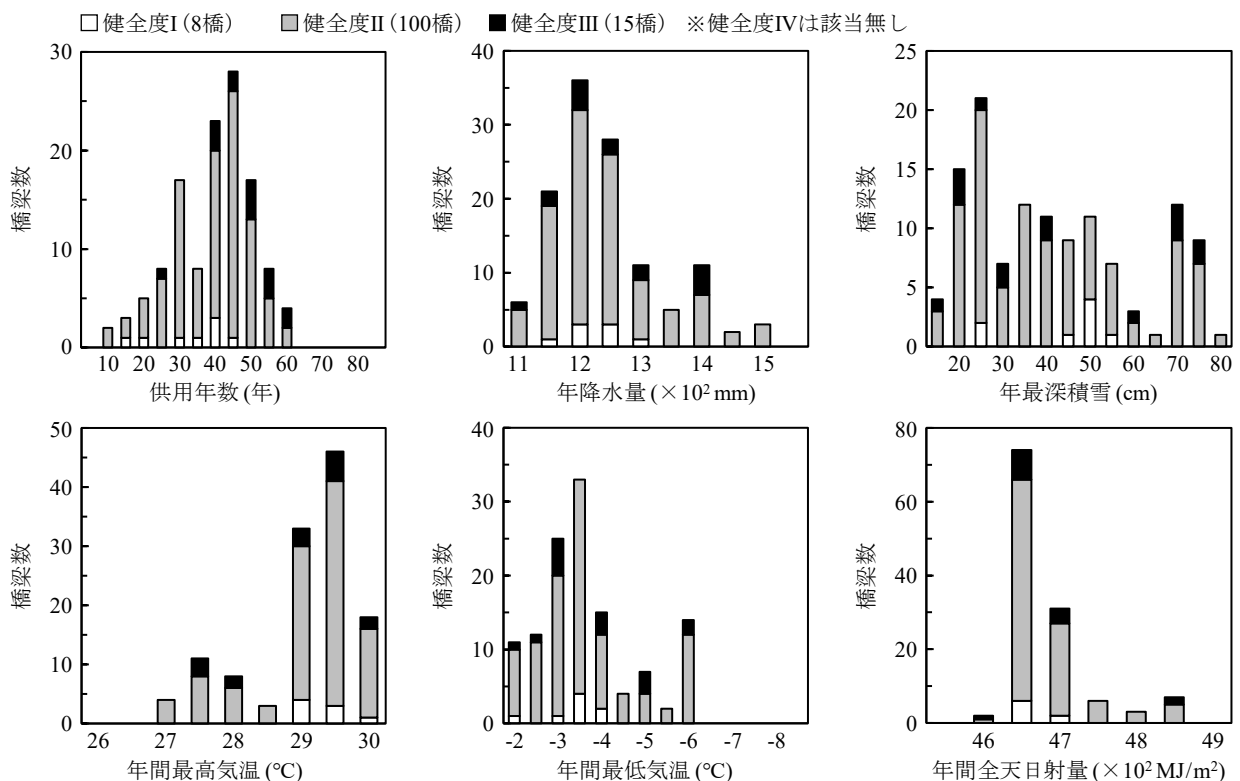


図-2 分析対象の鋼橋における健全度と供用年数および環境条件の関係

これらの将来的な一斉老朽化に対応するために、点検により判定される健全度と、架橋している路線や橋長等に応じて設定される各橋梁の重要度に基づく優先順位を設けた計画的な補修対策を進めている。橋梁間での環境条件

の差異など、郡山市の地域特性を踏まえた橋梁健全度予測モデルが構築されることで、より明確かつ定量的な根拠に基づく対策優先度判定や、管理費用の平準化を考慮した長期的な橋梁補修計画の策定・推進が容易になる。

2.2 分析対象橋梁における健全度と環境条件の関係

郡山市が管理する橋梁のうち、コンクリート橋（519 橋）および鋼橋（123 橋）からなる計 642 橋を分析対象とした。分析対象のコンクリート橋および鋼橋における健全度と供用年数および環境条件（年降水量・年最深積雪・年間最高気温・年間最低気温・年間全日射量）の関係をそれぞれ図-1 および図-2 に示す。橋梁の健全度は、国土交通省「橋梁定期点検要領」⁹⁾に準拠しており、2014 年から 2018 年の 5 年間で実施された定期点検の結果を使用した。環境条件に関するデータは、国土数値情報の公開データ¹⁰⁾を使用し、地理情報システム (GIS)を用いて橋梁情報と紐付けた。降水量や気温に代表される環境条件は橋梁の劣化現象に影響を及ぼすことが報告されている¹¹⁾。しかし、図-1 および図-2 より、郡山市は全域が内陸部に位置しており、個々の橋梁で環境条件に差異があるものの、橋梁間で劣化速度が大きく異なるほどの違いはないことから、健全度と環境条件には明確な相関性は確認できない結果となった。供用年数に着目すると、橋種に関係なく高度経済成長期に建設された橋梁（すなわち、点検時の供用年数が約 45～65 年の橋梁）の多くが健全度 II 以上になっており、これらの将来的な健全度推移予測が予防保全型の維持管理を達成する上で重要になる。

そこで本研究では、統計的手法により供用年数に対応する健全度の推移変化をマクロに定量評価することで橋梁の健全度予測モデルを構築し、予測モデルに基づく将来的な橋梁健全度推移予測を行う。なお、定期点検により判定された各橋梁の健全度は 2018 年時点のものとして扱い、2018 年を基準年として健全度推移予測を行う。

3. 橋梁の健全度予測モデルの構築および将来の健全度推移予測

3.1 橋梁の健全度予測モデル

コンクリート橋および鋼橋それぞれに対して、供用年数を説明変数、任意の供用年数における健全度の発生確率を目的変数とする回帰分析により健全度予測モデルを構築する。まず、点検データを基に、任意の供用年数に対する健全度の発生確率を次式により算出する。

$$P_r(R, y) = \frac{N_{R,y}}{N_y} \quad (1)$$

ここに、 $P_r(R, y)$ は点検結果より得られる供用年数 y 年の橋梁が健全度 R 以上になる確率、 $N_{R,y}$ は供用年数 y 年の橋梁のうち健全度が R 以上の橋梁数、 N_y は供用年数 y 年の橋梁数である。本研究では、分析対象の橋梁数および定期点検の周期を考慮し、供用年数を 5 年刻みで橋梁数を整理した。分析対象の橋梁には健全度 $R=4(=IV)$ の橋梁は存在せず、また、 $R=1(=I)$ のとき、供用年数 y に関係なく $P_r(1, y)=1.0$ であるため、健全度 R が $2(=II)$ ある

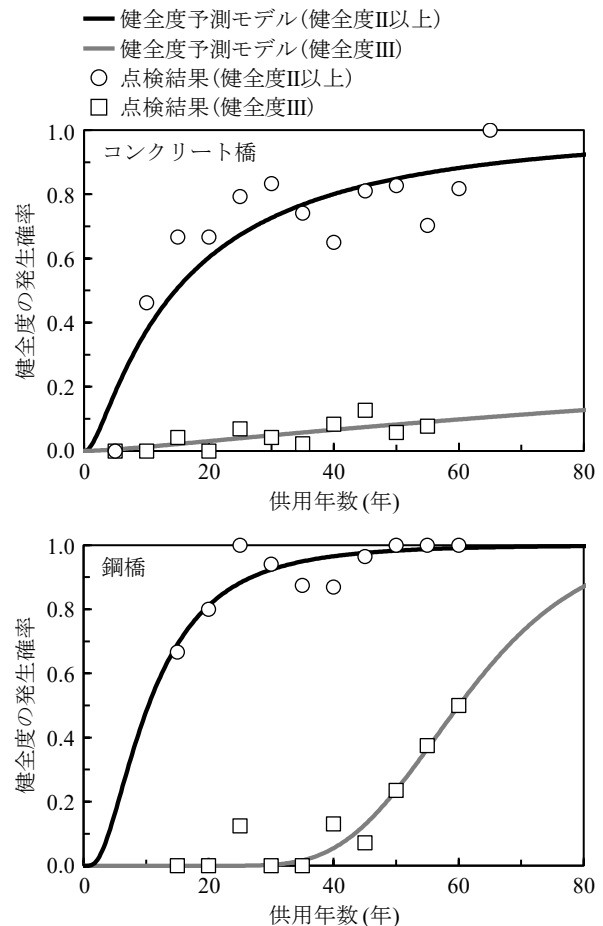


図-3 橋梁の健全度予測モデル

いは $3(=III)$ 以上となる確率 $P_r(R, y)$ を算出し、予測モデルを構築する。供用年数 y と $P_r(R, y)$ の関係をプロットし、対数正規分布を仮定した次式により回帰分析を行う。

$$P_d(R, y) = \int_0^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_R)^2}{2\sigma_R^2}\right] dx \quad (2)$$

ここに、 $P_d(R, y)$ は供用年数 y 年の橋梁が健全度 R 以上になる確率の推定値、 μ_R および σ_R はそれぞれ健全度 R に対応する定数のパラメータであり、Levenberg-Marquardt 法¹²⁾により推定した。

式(2)より得られるコンクリート橋および鋼橋における健全度予測モデルを図-3 に示す。各予測モデルの傾きは橋梁の劣化速度を表している。コンクリート橋では、健全度 III に至る確率は供用年数の増加に対して線形に近い増加傾向を示している。また、供用開始から約 15 年が経過したコンクリート橋は、約 50%の確率で健全度が II 以上になることが予想される。鋼橋に関しては、コンクリート橋に比べて劣化速度が大きく、供用年数が 40 年を超えた際に健全度が III に到達する確率が急激に高くなる。鋼橋では部材数が多く、鋼材の腐食は近接目視による確認が比較的容易である一方、コンクリート橋では剥離や鉄筋露出など、環境条件によっては橋梁の機能低下が生じるほどの劣化が確認されるまでに時間を要する

ことがある¹³⁾。本研究で構築された予測モデルでは、橋種による劣化現象の違いが反映されており、また、郡山市の環境条件下における橋梁の劣化速度の非線形性が表現されている。

3.2 将来の橋梁の健全度推移予測手法

図-3 に示される健全度予測モデルは、橋梁が任意の供用年数となる際に予想される健全度を確率的に表現している。構築された健全度予測モデルに基づく次式により、橋梁の将来的な健全度を期待値として推定できる。

$$R_d(y) = \sum_{i=R_n}^4 i(P_d(i, y) - P_d(i+1, y)) \quad (R_n = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

ここに、 $R_d(y)$ は供用年数 y 年における橋梁の健全度の期待値、 R_n は基準年における橋梁の健全度である。式(3)の便宜上、 $P_d(5, y)$ の値が必要になるが、扱う健全度の上限は4(=IV)であるため、 $P_d(5, y) = 0.0$ となる。

同一の健全度であっても、劣化が生じた部材や規模によって補修費用や工期が大きく異なり、さらには、橋梁の維持管理予算は社会情勢に応じて変動するため、補修可能な橋梁数は年度によってばらつくことが予想される。また、分析対象橋梁の環境条件下において、補修が施された橋梁の劣化速度は十分に定量評価されていない。本研究では、橋梁の補修等は想定せず、健全度は改善されることなく予測モデルに従って劣化進展するものとし、 $P_d(R_n, y) = 1.0$ として計算する。予防保全型の橋梁維持管理を達成する上で、橋梁の補修可能数や補修効果まで加味した健全度推移予測は今後の重要な検討課題である。

分析対象橋梁に健全度 IV の橋梁が存在しないため、健全度が IV 以上となる確率 $P_d(4, y)$ を表す予測モデルは構築できない。そこで、道路橋示方書¹⁴⁾の定める橋梁の設計供用期間 100 年を基準に、 $P_d(4, y)$ は次式に従うと仮定し、将来的な健全度推移予測を行う。

$$P_d(4, y) = \begin{cases} 0.0 & (y \leq 100 \text{年}) \\ 1.0 & (y > 100 \text{年}) \end{cases} \quad (4)$$

定期点検で判定される健全度は離散値であるが、式(3)より得られる健全度の推定値は連続値であり、式(4)の仮定の下では、推定値は供用年数が 100 年を経過するまで 3.0 に漸近する。そこで、架設から点検時までの供用年数を式(3)に入力することで推定される健全度と実際の定期点検結果を比較することで、点検による健全度判定基準と推定値の関係を検証する。定期点検結果と健全度の推定値の関係を図-4 に示す。定期点検で健全度 I と判定された橋梁では、式(3)による健全度の推定値が約 1.5 ～ 2.0 の範囲に多く分布している。健全度 II では、推定値は大きいもので 2.4 程度であり、多数の橋梁が健全度 2.0 ～ 2.1 と推定された。これらの結果は、点検時では健全度 I であるが、図-3 に示される各橋種の健全度予測モデルに基づく場合、劣化状態が健全度 II に近い橋梁が

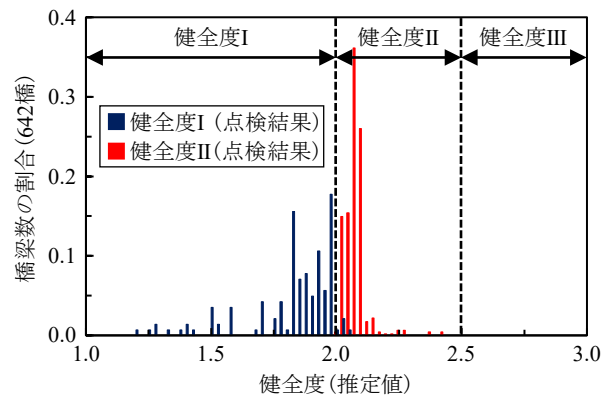


図-4 定期点検結果と健全度の推定値の関係

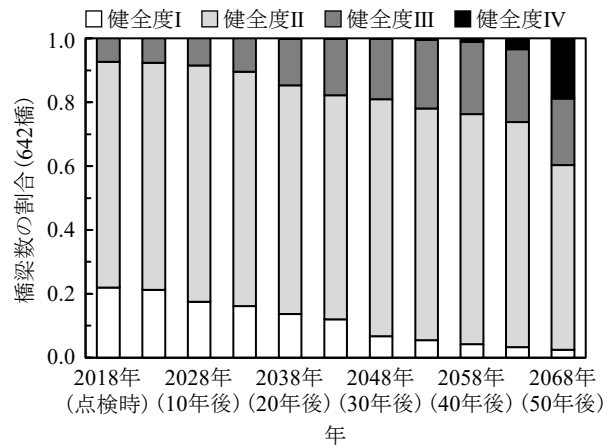


図-5 橋梁の健全度推移予測結果

多く存在することを示唆している。本研究では、健全度の危険側への誤分類を考慮し、定期点検による健全度判定基準と式(3)による推定値を次式により関連付ける。

$$R'_d(y) = \begin{cases} 1 & (1.0 \leq R_d(y) < 2.0) \\ 2 & (2.0 \leq R_d(y) < 2.5) \\ 3 & (2.5 \leq R_d(y) < 4.0) \\ 4 & (4.0 = R_d(y)) \end{cases} \quad (5)$$

ここに、 $R'_d(y)$ は供用年数 y 年における橋梁の健全度を離散的に表現した推定値である。

3.3 橋梁の健全度推移予測結果

分析対象の各橋梁に対して、図-3 に示される健全度予測モデルおよび式(3)～式(5)を適用することで、将来 50 年間における健全度推移予測を行った。分析対象橋梁全体における健全度数の推移予測結果を図-5 に示す。2028 年頃より健全度 I の橋梁数が減少し、2038 年頃には健全度 III となる橋梁数の増加速度が大きくなる懸念がある。また、2048 年頃に健全度 II の橋梁数が他の年に比べて大きく増加するなど、健全度が悪化する橋梁数は年によって異なることが確認できる。約 50 年後には、多くの橋梁が供用年数 100 年を超え、健全度 IV に至る橋梁数が急激に発生する可能性がある。比較的健全度 III 以上の橋梁数が少ない現時点から、橋梁の維持管理コスト

○健全度I ●健全度II ●健全度III ●健全度IV ※背景：Google Earth

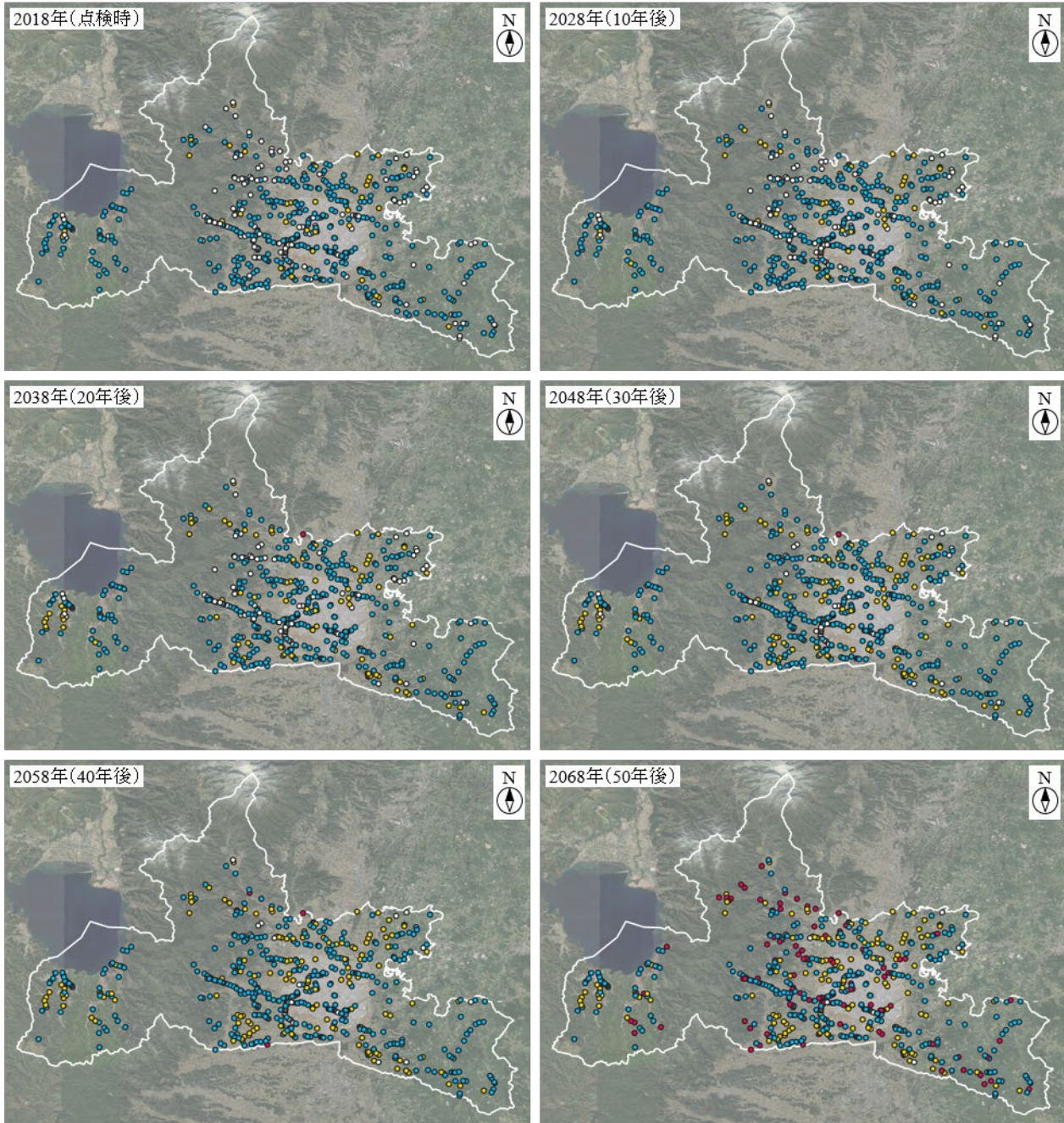


図-6 橋梁の健全度推移予測結果の分布

の平準化を目指した長期的な補修計画が求められる。

図-6 に、各橋梁における将来的な健全度予測結果の分布を示す。点検時における橋梁の健全度分布をみると、全域にわたって健全度 II の橋梁が分布しており、予測結果の分布図より、時間の経過に伴い健全度 III あるいは IV に達していく様子が確認できる。本研究で構築される健全度予測モデルおよびそれに基づく健全度推移予測手法を活用することで、対象橋梁全体の健全度推移だけでなく、個々の橋梁に対する健全度推移が可能である。今後、路線の重要度や橋長等の情報と組み合わせて活用することで、橋梁維持管理のさらなる合理化が期待できる。

4. 結論

福島県郡山市が管理するコンクリート橋および鋼橋を対象に、環境条件に関する種々のパラメータと健全度の関係を検証した上で、定期点検データを用いた統計的手法に基づく橋梁の健全度予測モデルを構築した。さらに、構築された予測モデルを活用し、分析対象橋梁の将来にわたる健全度推移予測を行った。

本研究で得られた知見は以下の通りである。

1. 橋梁の劣化速度は環境条件に依存するものの、分析対象橋梁は全て内陸部、かつ、郡山市という限定的な地域に位置するため、個々の橋梁の劣化状態に大

きな差異が生じるほどの環境条件の違いは橋梁間で確認されない。

- 2) 定期点検データに基づく回帰分析により、健全度の発生確率と供用年数の関係を表す橋梁健全度予測モデルを構築した。構築された予測モデルでは、郡山市の環境条件下における橋梁の劣化速度の非線形性が表現されており、橋種によって劣化速度が異なることが示された。
- 3) 構築された健全度予測モデルを個々の橋梁に対して適用し、将来 50 年間に於ける健全度推移予測を行った。例えば、約 20 年後から健全度 III 以上となる橋梁の発生数が増加し、その発生分布は郡山市全域にわたる可能性があるなど、本研究で得られた橋梁健全度予測モデルを活用することで、予防保全型の橋梁維持管理を進める上で重要な情報を提示できることが示された。

分析対象橋梁には健全度 IV の橋梁が存在せず、本研究では、設計指針に基づいて健全度 IV となる供用年数を仮定することで健全度推移予測を行った。周期的に実施される定期点検の結果を基に、予測モデルの妥当性の検証および更新を行うことで、橋梁健全度推移予測の精緻化を図ることが重要である。また、交通量など、全橋梁に対して正確なデータを入手することが困難なことから本研究では扱われていない劣化因子に関しても、継続したデータ収集および検証が必要である。今後は、郡山市の橋梁を対象に、より詳細な劣化因子の分析、および、蓄積されていく定期点検データを活用した予測モデルの精度向上に取り組むことで、市町村レベルでの実用可能性を考慮した、予防保全型の維持管理体制の確立に資する橋梁健全度予測モデルの構築を目指していく。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21K14235 の助成を受けたものです。また、本研究を進める上で、橋梁定期点検データをご提供いただきました郡山市建設部道路維持課および陸奥テックコンサルタント株式会社に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岩柳智之, 田中伸治, 中村文彦, 有吉亮, 三浦詩乃: 維持管理費用の縮減と地域の効用の低下の比較による廃橋を含めた橋梁管理のあり方に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5 (土木計画学研究・論文集第 35 巻), pp.I_1069-I_1079, 2018
- 2) 小林巧, 佐藤純弥, 山本和利, 石田雅博: 点検データ分析に基づくコンクリート橋の全国耐久性調査, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.1, No.1, pp.461-470, 2022
- 3) 南貴大, 藤生慎, 中品一朗, 高山純一: 定期点検結果を用いた既存コンクリート桁の劣化速度に影響を与える環境要因分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.73, No.5 (土木計画学研究・論文集第 34 巻), pp.I_323-I_330, 2017
- 4) 大竹雄, 流石堯, 本城勇介, 村上茂之, 小林孝一: 統計的手法を用いた橋梁点検データベースに基づく橋梁健全度評価に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.67, No.2 (応用力学論文集 Vol.14), pp.I_813-I_824, 2011
- 5) 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確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.68-82, 2005
- 6) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 劣化予測のためのハザードモデルの推計, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.111-124, 2005
- 7) 山崎崇央, 石田哲也: 生存時間解析を用いた東北地方における橋梁コンクリート部材の劣化定量分析, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.4, pp.I_11-I_22, 2015
- 8) 郡山市: 橋梁長寿命化修繕計画について, <https://www.city.koriyama.lg.jp/soshiki/124/6591.html> (閲覧日: 2022 年 11 月 30 日)
- 9) 国土交通省: 橋梁定期点検要領, https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf (閲覧日: 2022 年 11 月 30 日)
- 10) 国土交通省: 国土数値情報 平年値メッシュデータ (2012 年データ作成), <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G02.html> (閲覧日: 2022 年 9 月 29 日)
- 11) 南貴大, 藤生慎, 中山品一朗, 高山純一, 近田康夫: 環境要因が橋梁の健全度に与える影響の分析—石川県の橋梁定期点検データを用いて—, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5 (土木計画学研究・論文集第 33 巻), pp.I_251-I_260, 2016
- 12) Marquardt, D. W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol.11, No.2, pp.431-441, 1963
- 13) 田村洋, 若林ゆきこ, 山田均, 勝地弘: 道路橋を対象とした健全度判定結果ならびに保全工事費用の分析, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.464-478, 2021
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 丸善出版, 2017