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

南 貴大¹・藤生 慎²・中山 晶一郎³・高山 純一⁴

¹学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: takahoro1993@gmail.com

²正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: fujiiu@se.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

⁴フェロー 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

高度経済成長期に一斉に建設された橋梁が耐用年数を迎え、架け替えや長寿命化の検討がなされている。このような中、自治体では5年に1度の頻度で定期点検を行うことで予防保全的な維持管理を目指している。しかし維持管理で扱う予算には限りがあるため、補修の優先度を決定する必要がある。橋梁が置かれている環境条件は異なっているため、健全度の低下速度が異なる可能性がある。既存の補修の優先度決定手法には健全度と重要度のみを考慮して環境要因が考慮されていないものが少なくない。本研究では、石川県が管理する橋梁のうち供用年数20年以上のコンクリート桁を対象とし、数量化理論I類を用いて劣化に影響を与える環境要因について分析を行った。その結果、供用年数によって劣化速度や劣化速度に影響を与える要因が異なることが分かった。

Key Words : bridge, maintenance, regular inspection, natural environments, deterioration rate

1. はじめに

日本では高度経済成長期以降に整備したインフラが今後一斉に老朽化し、今後20年間で建設後50年以上経過する施設の割合が加速的に高くなることが予測される。橋長2m以上の道路橋は約70万橋あり、そのうち建設年度不明橋梁30万橋を除いた約40万橋の道路橋において、建設後50年以上を経過する橋梁の割合は平成25年3月では約18%であるのに対し、10年後には約43%、20年後には約67%に急増する¹⁾。このように一斉に老朽化する橋梁を戦略的に維持管理する必要があると考えられる。このような中、自治体では橋梁の定期的な点検を行うことで事後保全的な維持管理から予防保全的な維持管理に転換し、既存の橋梁を長持ちさせるという長寿命化を図っている。そのため定期点検において橋梁の損傷状況を把握、記録し、その情報によって必要な修繕・更新を実施している。しかし予算には限りがあるため、補修の優先度を決定する必要がある。補修の優先度の決定

について損傷の状況（健全度）と橋梁の重要度を考慮して行われている自治体が少なくない。石川県が管理する橋梁においては、各部材の健全度から橋梁全体の橋梁健全度指標 BHI (Bridge Health Index) が算出されている。BHI は定量的な指標として、各部材の健全度と部材間の重み係数を用いて加重平均法によって計算される。橋梁の重要度については、路線の重要度及び交通量を総合評価した指標である橋梁重要度指標 BPI (Bridge Public Index) によって評価される。BPI は路線の重要度（緊急輸送道路、跨線橋・跨道橋）と交通量（交通種別）に着目し、それぞれに重み係数を設定し、加重平均法によって算出する。これらの2つの指標 BHI と BPI の合成値によって橋梁保全更新の優先度 P (Priority) が決定されている。

しかし、これらの補修の優先度決定手法には各橋梁が置かれている環境条件が考慮されていない。環境条件が異なる橋梁では、劣化の進行速度が大きく異なることが予想される。そのため環境条件を考慮しない維持管理で

あると、劣化の進行速度を考慮した適切な補修の優先度決定を行うことができない。そこで本研究では、過去2回分の橋梁定期点検結果を用いて、コンクリート桁の健全度に影響を与える環境要因について統計的に分析する。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

これまでに橋梁定期点検結果を用いた研究は数多く行われているため、既往研究をまとめるとともに本研究の位置づけを行う。

過去の目視点検結果を用いた統計的な劣化予測モデルの構築は、橋梁群全体としてのマネジメント戦略や予算管理を検討する場合に必要なため、多くの研究がなされている。

貝戸らは、NY市がここ9年間に実施した829橋梁に対する目視点検結果を用いて劣化速度に着目することで、過去の検査・補修等の情報が不十分な既存の構造物に対しても適応可能であることを示し、マルコフ過程による個別の橋梁の劣化予測を提案している²⁾。また劣化速度の過分散が施設グループ間における劣化速度の異質性と、グループを構成する個々の施設間における異質性という2つの異なる異質性が混合されることによって発生すると考え、階層的異質性を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルを定式化し、そのベイズ推計法を提案している³⁾。

津田らは健全度間の推移過程を指数ハザードモデルを用いて表現することで構造特性や使用環境、検査状況が異なる異質な検査データを用いて劣化特性を非集計的に推定することを可能としている⁴⁾。また劣化予測モデルの推計精度を逐次改良するために新しく利用可能となった点検データに基づいてベイズ推計する方法論の提案も行っている⁵⁾。

小林らは健全度の測定結果に誤差が発生するメカニズムを隠れマルコフ劣化モデルを用いて表現できることを示し、真の健全度により定義されるマルコフモデルをマルコフ連鎖モンテカルロシミュレーションによりベイズ推計する方法論を提案している⁶⁾。また互いに双方の劣化過程に影響を及ぼすような複合的劣化過程を表現するために複合的マルコフ劣化モデルの開発を行い、さらに調査情報が同時に獲得できないという時間的不整合性の問題に関して、体系的なデータ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ劣化モデルの提案を行っている⁷⁾。

また本研究と同様に橋梁定期点検結果を用いて統計的分析から劣化要因の検討を行った研究もある。

玉越ら⁸⁾は、国が管理する全国の道路橋の定期点検結果を用いて、重回帰分析により環境条件や橋梁形式、適用基準など多岐にわたる属性との関連に着目して劣化に支配的な要因の抽出を行っている。

大竹ら⁹⁾は、岐阜県が管理する鋼橋RC床版の点検結果を用いて主成分分析を行い、離散量として与えられた従来の健全度を連続量として評価し、算出した指標を目的変数、橋梁の台帳データベースに記載されている橋梁諸元や環境条件を説明変数とし線形重回帰分析を用いて影響因子の抽出を行っている。

大島ら¹⁰⁾は、橋梁の老朽化に影響する諸因子を解析し、数量化理論II類を用いて、それらと部材損傷との関係について検討を行い、各因子が部材損傷に影響する関係を把握している。

また著者ら¹¹⁾も地方自治体の2期分の橋梁の定期点検結果を用いて劣化速度を算出し、GISを活用して橋梁台帳に記載されていない環境条件を把握し、数量化理論I類を用いて環境要因と橋梁の諸元（橋長、上部工材料、供用年数）が健全度に与える影響を分析している。分析結果によると、橋梁の諸元（橋長、上部工材料、供用年数）が劣化速度に大きな影響を与える要因であることが分かった。

以上のように、様々なデータ・方法を用いて、橋梁の劣化に影響を与える諸因子の分析は数多くなされている。その結果、橋梁の劣化において、橋梁の諸元に比べて、環境条件の影響は比較的小さいことが分かっている^{8) 11)}。そこで本研究では、「橋梁の諸元」と「環境条件」を比

図-1 石川県における架設年次別の橋梁数

図-2 石川県が管理する橋梁における材料種別割合

表-1 石川県における橋梁定期点検の一例

橋梁名	緊急輸送道路	上部工材料	架設年次	橋長	日交通量	大型車日交通量	主桁健全度	床版健全度	下部工健全度	支承健全度	伸縮装置健全度	橋面工健全度	BHI	BPI	P	緯度	経度
A	第2次緊急輸送道路	RC橋	1977	3.1	7300	328	5	3	3	5	5	5	74	55	37.6	36.374	136.581
B	第2次緊急輸送道路	RC橋	1976	3.6	7300	328	5	5	5	5	5	5	100	45	18	36.374	136.581
C	第2次緊急輸送道路	RC橋	1975	4	7300	328	5	5	4	5	5	5	90.5	45	23.7	36.372	136.581
D	第2次緊急輸送道路	RC橋	1975	7	7300	328	5	4	5	5	5	5	96.5	45	20.1	36.372	136.580
E	第2次緊急輸送道路	RC橋	1975	7	7300	328	5	5	4	5	5	5	90.5	45	23.7	36.580	136.577
F	第2次緊急輸送道路	RC橋	1975	4.8	7300	328	5	4	4	5	5	4	86	45	26.4	36.372	136.578
G	第2次緊急輸送道路	RC橋	1973	9.5	7300	328	5	4	4	5	5	3	85	45	27	36.370	136.575
H	第2次緊急輸送道路	RC橋	1973	3	7300	328	5	5	4	5	5	3	88.5	45	24.9	36.370	136.575
I	第2次緊急輸送道路	RC橋	1974	10.6	7300	328	5	4	4	5	3	3	82	45	28.8	36.370	136.575
J	第2次緊急輸送道路	RC橋	1974	10.6	7300	328	5	4	4	5	5	3	85	45	27	36.370	136.575
K	第2次緊急輸送道路	RC橋	1957	4.2	7326	725	3	5	3	5	5	5	62	55	44.8	36.374	136.566
L	第2次緊急輸送道路	RC橋	1968	17.7	7326	725	3	5	3	5	3	5	59	55	46.6	36.375	136.553
M	第2次緊急輸送道路	RC橋	1966	18.6	7326	725	3	3	4	5	4	5	63	55	44.2	36.375	136.553
N	第2次緊急輸送道路	RC橋	1986	7	7326	725	3	5	5	5	4	5	79.5	55	34.3	36.374	136.547
O	第2次緊急輸送道路	PC橋	1970	93	7300	328	5	3	4	4	5	4	81	45	29.4	36.397	136.517
P	第2次緊急輸送道路	鋼橋	1997	83	0	0	3	4	4	5	4	4	65.5	45	38.7	36.397	136.517
Q	第2次緊急輸送道路	その他	1996	5	7326	725	5	3	3	5	5	5	74	55	37.6	36.391	136.517
R	指定なし	鋼橋	2000	17.5	100	10	5	5	5	5	5	5	100	35	14	36.172	136.524
S	指定なし	鋼橋	1998	12.5	100	10	4	5	4	5	5	4	80	35	26	36.177	136.521
T	指定なし	鋼橋	1995	10.5	100	10	4	5	4	4	4	4	78.5	35	26.9	36.180	136.524
U	指定なし	鋼橋	1983	31	100	10	4	4	4	4	5	5	76	35	28.4	36.186	136.523
V	指定なし	RC橋	1970	4.6	100	10	5	5	3	5	5	4	80	35	26	36.191	136.525
W	指定なし	RC橋	1964	2.8	100	10	4	5	3	5	5	5	71.5	35	31.1	36.191	136.526
X	指定なし	RC橋	1957	4.8	100	10	4	5	3	5	5	4	70.5	35	31.7	36.192	136.526
Y	指定なし	RC橋	1956	2.5	100	10	5	5	3	5	5	5	81	35	25.4	36.196	136.525
Z	指定なし	RC橋	1964	6.8	100	10	5	5	4	5	5	2	87.5	35	21.5	36.204	136.525
AA	指定なし	鋼橋	1973	36	100	10	4	3	4	3	5	4	70	35	32	36.217	136.530
AB	指定なし	PC橋	1970	10	100	10	4	4	3	3	4	4	64	35	35.6	36.222	136.532
AC	指定なし	鋼橋	1972	20	100	10	4	4	3	4	4	4	65.5	35	34.7	36.227	136.530
AD	指定なし	鋼橋	1971	58	100	10	4	4	3	4	4	4	65.5	35	34.7	36.229	136.532
AE	指定なし	RC橋	1963	19.1	100	10	5	5	4	5	4	4	88	35	21.2	36.247	136.537
AF	指定なし	RC橋	1959	22	100	10	5	5	4	5	5	5	90.5	35	19.7	36.251	136.539
AG	指定なし	RC橋	1990	7.5	100	10	5	5	4	5	5	4	89.5	35	20.3	36.251	136.539
AH	指定なし	RC橋	1965	6.1	100	10	5	5	4	5	5	5	90.5	35	19.7	36.256	136.538
AI	指定なし	RC橋	1966	6	100	10	4	5	5	5	5	5	90.5	35	19.7	36.256	136.538
AJ	指定なし	RC橋	1957	3	100	10	4	5	3	5	5	4	70.5	35	31.7	36.251	136.539
AK	指定なし	RC橋	1960	2.8	100	10	3	5	5	5	5	3	79	35	26.6	36.251	136.539
AL	指定なし	RC橋	1957	2.5	100	10	5	5	3	5	5	2	78	35	27.2	36.301	136.534

表-2 石川県における橋梁の健全度の評価基準

健全度	損傷状況
5	劣化・損傷が認められない
4	些細な劣化・損傷のみで、点検記録を継続する
3	軽度の劣化・損傷があり、計画的に維持管理補修を行う
2	重度の劣化・損傷があり、早急な補修対策が必要
1	甚大な損傷で安全確保に支障をきたす(通行止め)

較するのではなく、劣化に大きな影響を与えている諸元でグルーピングし、環境要因分析を行うことで、諸元によって環境条件が橋梁の劣化に与える影響の程度が異なるのかについて定量的に明らかにすることを目的とする。

予算に制約がある中、数多くの橋梁を管理する自治体において、諸元に応じた劣化速度に影響を与える環境要因を把握することで、より効率的かつ効果的な維持管理計画の策定支援が可能になる。

3. 使用データ

石川県の架設年次別の橋梁数を図-1に示す。石川県が管理する橋梁約2314橋のうち供用年数が20年以上の橋梁は平成28年で約86%を占めており、今後加速的に高齢化することが予想される。また図-2に示すように石川県が管理する橋梁のうち約80%はコンクリート橋であり、コンクリート橋の対策を講じることの影響は大きいと考える。そこで本研究では石川県が管理する橋梁のうち供用年数が20年以上のコンクリート橋を対象に健全度に影響を与えている環境要因について分析を行った。石川県は日本海に面しており冬の気象特性に起因する飛来塩分、

山岳部を中心に冬季交通を確保するための凍結防止剤の散布、交通量の多い都市部における通行車両の重量や衝撃などによる疲労など、劣悪な環境下にさらされている。このように劣化に影響を与えうる環境要因が多様である石川県における環境要因分析は効率的な維持管理を行う上で有用であると考ええる。

(1) 石川県における橋梁定期点検データ

石川県の橋梁定期点検では点検結果だけでなく表-1に示すように架設年次、上部工の材料、径間数、橋長、幅員、最大支間長、道路交通センサス結果（日交通量・大型車日交通量）、所在地、緯度経度などの橋梁の諸元も記されている。定期点検は5年に1度の頻度で行われており点検項目としては主桁、床版、下部工、伸縮装置、支承、橋面工を対象にしており、表-2に示すように損傷状況に応じて損傷の見られない健全なものから5、4、3、2、1と5段階で健全度が離散的に評価されている。また前述したように、その点検結果と重要度によって補修・補強の優先度が計算されている。

(2) 地理空間情報データ

GISを活用し各橋梁が置かれている環境条件について把握を行った。実際、橋梁は橋長と幅員があるため、ポイントデータではなくポリラインデータで表すことができる、しかし橋梁定期点検データでは位置情報について代表的なポイントで記載されている。ここでの橋梁の代表的な位置情報というものは、橋梁を点検した点に相当しており、必ずしも橋梁の中央点に相当するものではない。本研究では代表的な位置情報を橋梁の代表点として

用いることとする。

本研究では、地理空間情報として、全国総合開発計画、国土利用計画、国土形成計画などの国土計画の策定や推進の支援のために国土に関する様々な情報を整備、数値化した「国土数値情報」を用いた¹²⁾。

a) 飛来塩分による影響

海岸線近くに位置するコンクリート橋において塩分が浸透し、内部の鋼材が腐食することでコンクリートがひび割れ・剥離が生じる塩害が深刻化している¹³⁾。本研究では国土数値情報の海岸線データを用いて、風向きや風力などを考慮せず、単純に海岸線からの距離を飛来塩分の代替指標とすることとした。

b) 凍結防止剤の散布による影響

冬季における路面の走行安全性を確保するために土木事務所ごとに凍結防止剤を散布している。そのため石川県では凍結防止剤によって塩害による損傷を受けたコンクリート橋がみられ、特に桁端部、床版の張出部、下部工などに劣化が顕著にみられる¹⁴⁾。本研究では、土木事務所ごとに細かい記録の形式は異なるが、凍結防止剤を散布した道路に色付けして記録している凍結防止剤散布履歴マップを用いて散布の有無の把握を行った。しかし散布量の記録は土木事務所によって記録が徹底されていないため、凍結防止剤の量については国土数値情報の平年メッシュにある年最深積雪量を指標として代替した。

c) 交通量による影響

自動車交通等による外力の繰り返しによって構造物に損傷が累積され、コンクリート橋梁ではひび割れが主たる損傷となっている¹⁵⁾。疲労の原因として考えられる自動車加重を考慮するため、本研究では橋梁定期点検データに記載されている道路交通センサスの日交通量を指標として用いることとした。

d) 降水量による影響

降水量が多いほど概ね付着塩分量は、減少する傾向にあることが知られている¹⁶⁾。これは雨風による桁の洗い流しや飛来塩分自体の減少の影響であると考えられている。一方、降雨などによる高湿度環境下のコンクリートではアルカリ骨材反応の原因であるゲルの吸水・膨張を促進させることが知られている¹⁷⁾。本研究では国土数値情報の平年値メッシュデータを用いた。平年値メッシュデータとは降水量、気温、最深積雪、日照時間、全天日射量の5種類の気象要素について、過去30年間の観測地から1kmメッシュ（3次メッシュ）ごとの平年値を算出したものである。その中で降水量の年合計値である年降水量を指標として用いることとした。

e) 温度変化による影響

コンクリート橋の温度分布は気象条件によって複雑に変化し部材に温度差が生じると温度応力が発生することが知られている¹⁸⁾。本研究では温度の変化を考慮するた

め、国土数値情報の平年値メッシュデータを用いた。平年値メッシュデータには月別の最高気温、最低気温、平均気温の3種類の温度が記載されているが、年間を通しての温度変化を考慮するため、石川県で最も暑い月である8月の最高気温と最も寒い月である2月の最低気温のデータと年平均全天日射量のデータを用いることとした。

f) 標高による影響

高い標高に位置する橋梁は標高が低い地域に比べ積雪や降水、低気温など橋梁の健全度に影響しうる要因が数多く存在する。本研究では、各橋梁が位置する地点の標高として、国土数値情報の標高・傾斜度5次メッシュデータの平均標高を用いることとした。

4. 橋梁の劣化速度に影響を与える環境要因分析

本章では環境要因が供用年数20年以上のコンクリート桁の健全度に与える影響の程度について統計的に分析する。本研究では健全度にいたった損傷・劣化については、記録が複雑であることから考慮せずに代替的な総合指標である健全度のみを対象として分析を行った。前述した通り、石川県の橋梁定期点検では主桁、床版、下部工、伸縮装置、支承、橋面工の6部材を点検対象部材としているが、部材材料が明確である主桁を対象とした。

(1) データ欠損を考慮した劣化指標

石川県の橋梁定期点検では5年に1度の頻度で橋梁の損傷程度を健全度として5段階で評価している。健全度は点検時点の損傷状況を表しており、点検以前の健全度の変化に関する情報が含まれていない。補修・補強の記録が欠損しているデータを用いる場合、単に健全度を劣化指標として用いることは過度に安全側に評価される可能性があるため危険である。しかし近年では、点検データの記録が蓄積されており、石川県では2巡目の点検を終えた橋梁が多く存在する。そこで本研究では健全度を劣化指標として用いるのではなく、2回分の健全度を用いた指標を劣化指標とした。具体的には式(1)に示すように1巡目の定期点検から得られる健全度から2巡目の定期

図-3 コンクリート桁における供用年数別の劣化速度

点検から得られる健全度の差を点検スパンで除したものを劣化速度として定義した。劣化速度を指標とすることで、劣化速度が0より大きいとき通常劣化、劣化速度が0のとき劣化なし、劣化速度が0より小さいとき補修・補強の可能性ありとして扱うことができる。そのため補修・補強の記録が欠損している石川県の橋梁定期点検データにおいても、劣化速度が0より小さい補修・補強の可能性のあるサンプルを除くことで実質的な劣化を把握することができる。実際には、劣化速度が0より小さいサンプルは劣化が顕著であるサンプルであるため、除いて分析を行うと安全側に評価してしまう恐れがある。しかし本研究では補修履歴が欠損しているデータを扱うため、健全度が回復したサンプルの扱いは今後の課題とし、劣化速度が0以上のサンプルのみを分析する。図-3は各部材における劣化速度別の橋梁数を示している。供用年数50年以上のコンクリート桁においては劣化速度が負である割合が比較的高く、補修・補強がすでになされていることが分かる。

$$v = \frac{s_1 - s_2}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

ここに、 v : 劣化速度
 s_1 : 1巡目点検結果の健全度
 s_2 : 2巡目点検結果の健全度
 t_1 : 1巡目の点検年次
 t_2 : 2巡目の点検年次

(2) 分析手法

コンクリート桁の健全度に影響を与える環境要因について数量化理論を用いて分析を行った。本研究では、供用年数別にコンクリート桁を分類し、それぞれ劣化速度を目的変数とし、水準に分類した環境要因を説明変数とすることで数量化理論I類を適応している。環境要因は量的データであり、質的データに変換することで情報を減らしてしまうが、具体的な数値が解析にあまり影響を受けなくなるため外れ値の影響を無視することができるため本研究では数量化理論I類を採用した。

(3) 環境要因の水準分け

数量化理論I類における説明変数の水準とは各要因の中のそれぞれの設定条件のことである。設定条件には各環境要因別に根拠となる基準を設定することが望ましいが、各環境要因で根拠となる基準がないこと、また全国の基準値を基に水準を決定してしまうと、石川県が全国の基準より特出している環境要因における水準のサンプル数の偏りが生じてしまうことを考慮して各環境要因で各水準のサンプル数が等しくなるように5つの水準に分

類することとした。ただし凍結防止剤の散布は有無のデータであるため、散布ありと散布なしの2つの水準とした。また海岸線からの距離については300m以内、300m～1km、1km～3km、3km～10km、10km以上の5水準、日交通量につきましては1000台/日以下、1000～4000台/日、4000～10000台/日、10000～20000台/日、20000台/日以上5水準に設定した。水準数を少なくしてしまうと説明変数間で相関がみられやすくなったため、説明変数間の相関が0.6未満となるように5水準に設定した。そのため多重共線性による回帰係数の符号が本来なるべきものと逆の符号になるといった問題が発生する可能性は低いと考えられる。

5. 分析結果

数量化理論I類では説明変数の目的変数に対する貢献度、つまり環境要因がコンクリート桁の劣化速度に与える影響の程度をレンジとして評価される。また1つの環境要因でに着目した場合に、どの水準がコンクリート桁の劣化速度に与える影響度合いを定量的に表す指標としてカテゴリースコアが算出される。本章ではコンクリート桁の健全度に影響について環境要因について供用年数別にみることで、各段階で考慮すべき環境要因について考察を行う。

まず、数量化理論I類によって得られた定数項（劣化速度の平均）と各環境要因の影響度の合計値（レンジの合計値）、分析精度（重回帰係数）について表-3に示す。

供用年数が経過するほど平均劣化速度が大きくなることが想定されるが、供用年数30～40年のコンクリート桁の平均劣化速度が最も大きい結果となった。理由としては図-3からもわかるように供用年数50年以上のコンクリート桁において健全度が回復しているサンプルの割合が高く、前述したように著しい劣化が起こっているサンプルを除いていることが考えられる。

レンジの合計は各環境要因が劣化速度に与える影響度（レンジ）の和であり、環境要因を考慮することによる劣化速度の変動度合いを表す指標として算出した。供用年数が経過するほどレンジの合計値は減少傾向にあることから、比較的新しいコンクリート桁の方が環境要因の

表-3 数量化理論分析の結果

	平均劣化速度 (定数項)	レンジの合計	重回帰係数
供用年数 20-30年	0.057	1.082	0.631
供用年数 30-40年	0.088	0.938	0.467
供用年数 40-50年	0.078	0.677	0.478
供用年数 50年以上	0.057	0.557	0.409

図4 供用年数20～30年のコンクリート桁におけるレンジ

図6 供用年数40～50年のコンクリート桁におけるレンジ

図5 供用年数30～40年のコンクリート桁におけるレンジ

図7 供用年数50年以上のコンクリート桁におけるレンジ

影響を受けやすいことが分かる。

分析の精度を表す重回帰係数においては、諸元（供用年数、材料種別）の条件を合わせずに分析を行っている既往研究¹¹⁾に比べ、コンクリート桁に着目し供用年数別に分類することで高い結果となっている。最も低い重回帰係数であっても0.4以上あり、橋梁の供用年数で対象を限定することで、より精度よく劣化速度を再現することが可能となっている。

次にコンクリート桁の劣化速度に影響を与えている環境要因について供用年数別に考察する。数量化理論I類によって得られたレンジを供用年数別に図4、図5、図6、図7に示す。図4から供用年数が20～30年のコンクリート桁の劣化速度には最も最深積雪量が影響度が大きく、次に2月最低気温、海岸線からの距離が影響を与えていることが分かる。図5から供用年数が30～40年のコンクリート桁の劣化速度に最も海岸線からの距離が影響を与えており、次に年最深積雪量、年降水量が影響を与えていることが分かる。図6から供用年数が40～50年のコンクリート桁の劣化速度に最も2月最低気温の影響が大きく、次に日交通量、年降水量の影響が大きいことが分かる。図7から供用年数が50年以上のコンクリート桁の劣化速度に最も2月最低気温の影響が大きく、次に年降水量、年最深積雪量の影響を受けていることが分かる。供用年数によってコンクリート桁の劣化速度が影響を与え

る環境要因は異なっていることがわかったため、供用年数に応じた環境要因対策が必要であることが示唆された。

次に供用年数別でコンクリート桁に影響を与えている環境要因について各水準でどのような影響を与えているのかについてカテゴリースコアを用いて考察する。本研究では最もレンジが大きい環境要因について考察を行う。数量化理論I類によって得られたカテゴリースコアを供用年数別に図8、図9、図10、図11に示す。図8は供用年数が20～30年のコンクリート桁の劣化速度に最も影響を与えている年最深積雪量のカテゴリースコアを示している。積雪量が増加するほどカテゴリースコアが増加傾向にあり、積雪量が多いほど劣化しやすい傾向がみられる。積雪量が多い地域では冬季の凍結防止剤の散布量が増加することが考えられる。図9は供用年数が30～40年のコンクリート桁の劣化速度に最も影響を与えている海岸線からの距離のカテゴリースコアを示している。海岸線からの距離が最も近い300m以内の橋梁が最も飛来塩分の影響を受けることが予想されるが、カテゴリースコアによると海岸線から300m～1kmの距離に位置するコンクリート桁が最も劣化を速める影響を受けていることが分かる。原因としては海岸線から300m以内のコンクリート桁はすでに塩害対策を行っていることが考えられるため、対策が不十分である海岸線から300m～1kmのコンクリート桁に影響を与えていることが考えられる。図10

図-8 年最深積雪量におけるカテゴリースコア
(供用年数20～30年のコンクリート桁)

図-10 2月最低気温におけるカテゴリースコア
(供用年数40～50年のコンクリート桁)

図-9 海岸線からの距離におけるカテゴリースコア
(供用年数30～40年のコンクリート桁)

図-11 2月最低気温におけるカテゴリースコア
(供用年数50年以上のコンクリート桁)

は供用年数が40～50年のコンクリート桁の劣化速度に最も影響与えている2月の最低気温のカテゴリースコアを示している。図-11は供用年数が50年以上のコンクリート桁の劣化速度に最も影響与えている2月の最低気温のカテゴリースコアを示している。供用年数が40～50年と50年以上のコンクリート桁において2月の最低気温が高くなるほど劣化しやすい傾向がみられる。2月の最低気温が高い場合、年間の温度変化が小さいことが考えられるため、温度変化による劣化であることは考えにくい。

6. まとめと今後の課題

本研究では道路構造物の予防保全的な維持管理を行う上で必要となる定期点検結果を用いて、石川県が管理する橋梁のうち、供用年数が20年以上のコンクリート桁の健全度に影響を与えている環境要因について数量化理論I類を用いて統計的に分析を行った。その結果、供用年数によって劣化速度が異なること、環境要因の影響の受けやすさが異なること、影響を与える環境要因が異なることが分かった。そのため、供用年数に応じた環境要因対策を行うことが必要であり、劣化速度への影響度が高い環境要因に対しては補修の優先度を高くすることで予防保全的維持管理を効率的かつ効果的に行うことが求められる。

本研究では劣化指標である劣化速度を算出する際に単純に健全度を間隔尺度として扱っているが、健全度間が等間隔、等距離であることは考えにくい。そのため今後健全度間の間隔を考慮した劣化速度の算出が必要である。

また本研究では、石川県が管理する橋梁のみに着目しているため各環境要因の水準設定の際、橋梁の劣化に関する根拠が不足している。今後の課題として各環境要因における水準について水準のパターンをいくつか設定し、適切な水準の決定が必要である。

また定期点検は橋梁によって点検者が異なっている。したがって診断結果に点検者の経験やスキルによってばらつきが生じている¹⁸⁾。しかし本研究で取り扱うデータでは点検者の経験やスキルによるばらつきを取り除くことは難しい。そのため今後の課題として点検者の情報が記載されているデータを用いた分析を行い、点検者の経験やスキルの差による診断精度のばらつきを考慮することが求められる。

補修の履歴は橋梁の劣化の速度に対して影響を与えていると考えているが、本研究では補修の履歴が不十分であったため考慮していない。前述しているが健全度が回復しているデータの取り扱いが補修の履歴の有無で大きく変わる。補修の履歴が不完全である場合どのようにして補修の履歴を考慮するべきかについては補修履歴が残っているデータを用いて健全度が回復していた原因を明らかにする必要がある今後検討課題とした。

また本研究では供用年数によってコンクリート桁に影響を与えている環境要因が異なることは示されたが、異なる理由については明らかにできていない。そのため今後より詳細な分析を行い、明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通白書 H27 第2部第2節, <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h27/hakusho/h28/pdf/np202000.pdf> (2017)

年1月10日閲覧)

- 2) 貝戸清之, 阿部允, 藤野陽三: 実測データに基づく構造物の劣化予測, 土木学会論文集, No. 744, pp. 29-38, 2003.
- 3) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計, 土木学会論文集 D3, Vol. 68, No. 4, pp. 255-271, 2012.
- 4) 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. 69-82, 2005.
- 5) 津田尚胤, 貝戸清之, 山本浩司, 小林潔司: ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法: 土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 3, pp. 473-491, 2006.
- 6) 小林潔司, 貝戸清之, 林秀和: 測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D, Vol. 64, No. 3, pp. 493-512, 2008.9.
- 7) 小林潔司, 貝戸清之, 大井明, Nguyen Dinh THAO, 北浦直樹: データ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化モデルの推計, 土木学会論文集 E1, Vol. 71, No. 2, pp. 63-80, 2015.
- 8) 玉越隆史, 横井芳輝, 石尾真理: 全国規模の点検データに基づく道路橋のコンクリート部材の劣化の特徴, コンクリート工学論文集, Vol. 25, pp. 167-180, 2014.
- 9) 大竹雄, 流石堯, 小林孝一, 本城勇介: 橋梁点検データベースの統計解析に基づく劣化機構を考慮した鋼橋 RC 床版の健全度評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 3, pp. 683-695, 2012.
- 10) 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 丹波郁恵: 橋梁健全度評価に用いる評価方法の検討と影響要因の解析, 土木学会論文集, No. 675, pp. 201-217, 2001.
- 11) 南貴大, 藤生慎, 中山晶一郎, 高山純一, 近田康夫: 環境要因が橋梁の健全度を与える影響の分析—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, Vol. 72, No. 5, pp. 251-260, 2016.
- 12) 国土数値情報ダウンロードサービス, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/other/details.html> (2016年8月11日閲覧)
- 13) 国総研資料第 55 号, コンクリート橋の塩害対策資料集—実態調査に基づくコンクリート橋の塩害対策の検討—, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0055.htm> (2016年8月11日閲覧)
- 14) 金沢大学 SIP: 塩害および ASR によるコンクリート橋梁の劣化とメンテナンスマネジメント開発, http://sip-hokuriku.com/wp-content/uploads/2015/04/lecture_150420_1.pdf (2016年8月11日閲覧)
- 15) 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター CAESAR, <https://www.pwri.go.jp/caesar/overview/02-04.html> (2016年8月13日閲覧)
- 16) 既存耐候性橋梁の付着塩分量とさび厚に関する相関分析, <http://www.ubemachinery.co.jp/research/gijutu/bridge/05.pdf> (2016年8月13日閲覧)
- 17) 温度応力によるひび割れを防ぐ, <http://www.beton.co.jp/pdf/books/115-tatchiyomi.pdf> (2016年8月11日閲覧)
- 18) 点検業務の IoT の利活用をめざして 自治体橋梁における橋梁点検業務実態調査報告書【課題・ニーズ調査編】, http://www.socialinfra.org/p_activity/questionnaire/Bridge_tenken_Digest.pdf (2017年7月8日閲覧)

(2017. 2. 24 受付)

ANALYSIS OF RELATIONSHIP BETWEEN DETERIORATION RATE OF CONCRETE GIRDER AND NATURAL ENVIRONMENTS USING INSPECTION DATA

Takahiro MINAMI, Makoto FUJII, Shoichiro NAKAYAMA
and Jyunichi TAKAYAMA

Recently, the study of extending the service life of bridges has gained attention. Many bridges have been built during high economic-growth periods, and have reached their service life. Therefore, their rebuilding and the extending of their service life must be considered. Within this situation, local municipal governments are also conducting regular inspections once every five years as part of preventative maintenance, rather than performing corrective maintenance. In this study, we will shed light on which bridges are most prone to rapid deterioration by using data from the regular inspection of bridges. We will do this by calculating the deterioration rate from inspection data from two inspection cycles in order to determine the environmental factors that affect the deterioration rate. In regards to analysis methods, we used Hayashi's Quantification Method Type I to examine the level of influence each factor has on the deterioration rate of concrete girder.