

論文 劣化要因の分類に基づくコンクリート橋の健全度評価結果に関する一考察

菊池 創太*1・久保 善司*2

要旨: 橋梁点検データを有効活用し, 劣化機構を考慮した適切な維持管理の実施に向けて, 劣化要因の観点から地方自治体の橋梁点検結果(健全度評価)に関する検討を行った。その結果, 橋梁点検データベースの情報に, 同自治体における劣化調査結果(アルカリシリカ反応), 凍結防止剤散布の管理データなどを加えて, 橋梁の劣化要因の分類(推定)を行った。それらに基づき劣化要因ごとの健全度の割合, 推移を検討し, 飛来塩分および ASR が健全度の推移に影響を与え, 劣化速度を高めることを確認できた。

キーワード: アルカリ骨材反応, 凍結防止剤, 飛来塩分, 点検, 健全度

1. はじめに

我が国の橋梁は, その多くが 1955 年からの高度経済成長期に建設されており, 建設後 50 年を経過する橋梁数は急激に増加している。全国には 2012 年 4 月 1 日時点で約 68 万橋の橋梁が存在し, そのうち 95% を地方自治体が管理しており¹⁾, これらの自治体では将来多額の更新費用が必要になると考えられている。このような状況の中で効果的な維持管理を行うために, アセットマネジメントの考え方が広がりつつある。構造物の劣化状態を把握し必要な対策の検討を行うため, 国土交通省では 2004 年に「橋梁定期点検要領(案)」²⁾を作成し, 地方自治体もこれを参考に各自の定期点検マニュアルを整備しつつある。

他方, コンクリート構造物においては, 塩害およびアルカリシリカ反応などの劣化原因による早期劣化の問題もあり, 劣化原因および使用・環境条件等の影響も大きく受け, それらの劣化原因の特定およびその後の劣化進行予測に基づき, 適切な対策の実施が重要とされる。現状では, 定期点検結果はアセットマネジメントに用いることを前提とし, 適切な予算配分と予算平準化による財政的な側面における維持管理の適正化を主たる目的としている。そのため, 橋梁の健全度の将来予測においては, マルコフ連鎖モデルが代表的な手法として適用され³⁾, 橋梁郡全体の劣化予測の精度向上等のために各種検討が行われ, データの拡充がなされるとともに, 維持管理財政の適正化に寄与するものとなりつつある⁴⁾。

しかし, 実際の構造物の維持管理においては, 個々の橋梁あるいは部材の劣化速度は, 使用・環境条件によって大きく異なり, 環境条件や劣化要因などを考慮しつつ, 点検, 評価, および対策を実施することが必要となる。点検には大きな労力を要することから, 使用・環境条件および劣化要因を考慮した劣化推移あるいは対策優先度の選定などに, 現状の点検データあるいは, 既往の調査

データなどの有効活用を模索することで, より経済的かつ合理的な維持管理が可能となるものと考えられる。例えば, 統計的手法を用いて橋梁点検結果の主成分分析を行い, 主要部材の健全度を目的変数とし, 橋梁諸元, 環境条件などを説明変数とした重回帰分析を行い, 関連性の高い点検項目(損傷)とその損傷原因についての検討がなされている⁵⁾。また, 劣化機構を考慮した RC 床版における健全度評価手法に, 橋梁点検データベースの統計解析を活用した検討も報告されている⁶⁾。

本研究では, 橋梁点検データを有効活用し, 劣化機構を考慮した適切な維持管理の実施に向けて, 劣化要因の観点から地方自治体の橋梁点検結果(健全度評価)の考察を行った。劣化機構の分類においては, 橋梁点検データベースの情報に, 同自治体における劣化調査結果(アルカリシリカ反応), 凍結防止剤散布の管理データなどを加えて, 劣化要因を分類した(推定を含む)。

2. 検討方法

2.1 検討の概要

検討を行う対象自治体は石川県とした。同自治体が位置する北陸地域は飛来塩分による塩害およびアルカリシリカ反応によるコンクリート構造物の劣化が厳しい地域として知られている。また, 寒冷積雪地域であり, スパイクタイヤの禁止以降, 冬季の凍結防止剤の散布量も増加し, 凍結防止剤による影響も同時に受ける橋梁も多い。そのため, 劣化要因として, 飛来塩分, ASR, および凍結防止剤の影響の有無に着目した。

橋梁点検データに, 既往の調査データおよび維持管理データを加えて, 橋梁ごとに劣化要因の分類を行うこととした。それらの分類に基づき, 橋梁および部材(主桁, 下部工)の健全度評価結果およびその架設年次ごとの分布について, 劣化要因との関連性について検討を行った。

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 橋梁数の内訳

PC橋	RC橋	鋼橋	混合橋 ¹⁾	BOX	その他	合計
654 (627) ²⁾	954 (726)	286 (278)	26 (26)	367 (282)	27 (19)	2314 (1958)

*1. 鋼とPC(RC)の混合橋

*2. ()内は座標情報確認済み

表-2 健全度と一般的な状況⁷⁾

健全度	一般的な状況
5	損傷は認められない
4	ささいな劣化損傷のみで、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・補修をする
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、安全確保に支障となる恐れがあり、緊急対応が必要

石川県では 2005 年に「石川県橋梁点検要領(案)」⁷⁾を作成し、5年に1回の頻度で点検を行っている。今回提供されたデータは2003年から2013年の間に点検された2314橋のデータをまとめたものである。各橋梁に対し、橋梁番号、橋梁名、架設年次、上部工材料、座標情報、健全度などがまとめられている。ただし、橋梁名および座標情報について未確認である橋梁も一部存在した。橋梁数の内訳を表-1に示す。

コンクリート部材を検討対象とし、主桁についてはPC橋およびRC橋を対象とした。下部工については全橋梁を対象とした。定期点検によって得られた部材の損傷の状態は、その大きさと位置により径間ごとに5段階の健全度によって評価され、多径間の場合は最も低い径間の値をその橋梁の部材の健全度とされている。また、橋梁の健全度は、橋梁の部材別健全度の最低値とされている。表-2に健全度別の一般的な状態を示す。

2.2 劣化要因の分類(推定)

(1) 飛来塩分の有無の影響

飛来塩分の影響を効率的に考慮するため、地理情報システム(GIS)を利用した。GISの利用により橋梁位置での地理的要因が容易に抽出・統合・分析する事が可能となる。今回はGISソフトとしてフリーソフトであるQGISを使用し、位置情報をGISに入力し、飛来塩分の影響を受ける橋梁を抽出することとした。

飛来塩分の影響範囲を検討するため、土木学会標準示方書⁸⁾の方法を用いて塩化物イオンの拡散予測を行った。なお、表面塩化物イオン濃度、見かけの拡散係数、鋼材腐食発生限界濃度はそれぞれ同示方書⁸⁾に従い求めた。水セメント比については、RCは55%と60%、PCは40%と45%として計算した。また、主桁・下部工のかぶり深さをそれぞれ4cm、8cmとした。計算結果を表-3に示す。

表-3 海岸距離と腐食発生年数

海岸距離[m]		0~10	~50	~100	~250	~500
表面Cl ⁻ 濃度[kg/m ³]		13.0	6.5	4.5	3.0	2.0
W/C=40%	4cm	18	37	70	-	-
	8cm	12	24	43	-	-
W/C=55%	4cm	6	10	16	40	-
	8cm	21	38	63	-	-
W/C=60%	4cm	4	7	10	22	-
	8cm	14	25	39	85	-

* (-)は100年以上

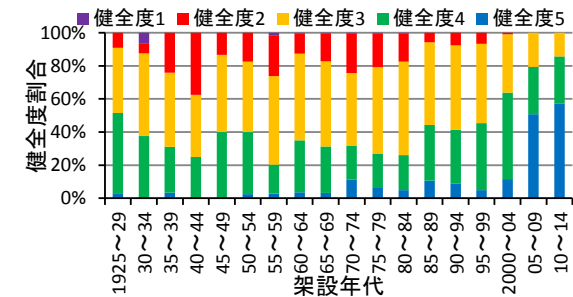


図-1 架設年代と健全度

す。今回は供用開始から100年以内に腐食が生じる範囲を飛来塩分の影響範囲とする。表-3より、RC主桁では海岸線から250m以内、PC主桁および下部工では100m以内を飛来塩分の影響範囲とし、この範囲にある橋梁をGISにより抽出し、飛来塩分の影響を受ける橋梁と分類した。

(2) 凍結防止剤の有無の影響

飛来塩分と同様にGISを活用した。凍結防止剤の影響範囲については、石川県から提供された凍結防止剤の散布区域地図および年度別散布量のデータより、GIS上に散布区域レイヤを作成した。これと交差する橋梁は凍結防止剤の影響を受ける橋梁と分類した。

(3) ASRの有無

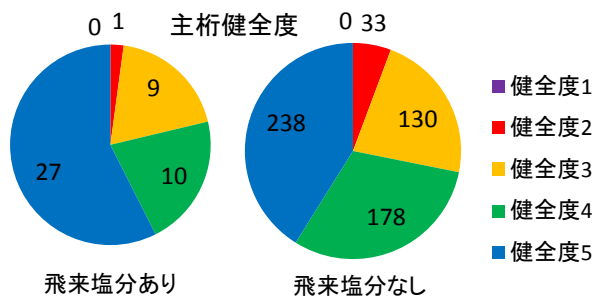
ASRについては、定期点検とは別に行われたASR調査によるデータより、ASR発生の有無を区別した。なお、ASR調査は未実施の橋梁や、調査後にASRが発生した可能性もあり、ASR発生無しとされたものでも一部にはASRを発生しているものも含まれる可能性がある。

3. 検討結果および考察

3.1 架設年代ごとの橋梁健全度

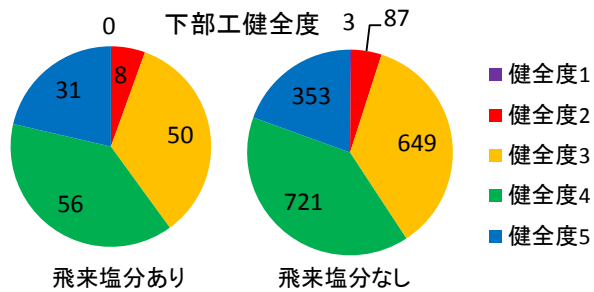
座標情報が確認され、かつ架設年次が分かっている1877橋を対象とした。架設年代別の橋梁健全度を図-1に示す。ここでは、劣化要因を反映する前の架設年代別の橋梁健全度を概観することとした。

架設年代が古いほど、健全度4以下、すなわち劣化が生じている割合は増加し、架設年代の新しいものは健全度5のものが多い。これは供用年数の増加とともに、橋梁の部材のいずれかに劣化が発生したためと考えられる。他方、2010年以降に建設された新しい橋においても健全



飛来塩分あり

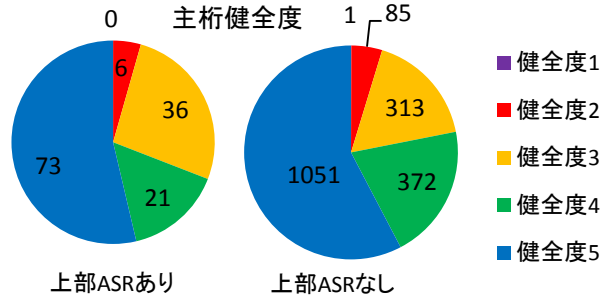
飛来塩分なし



飛来塩分あり

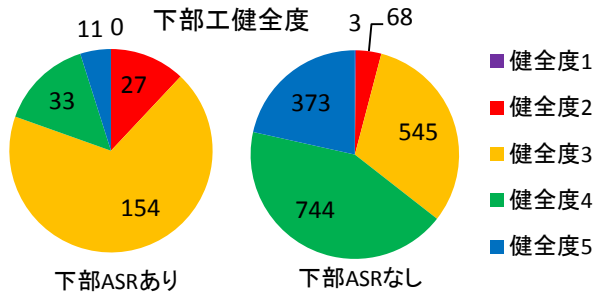
飛来塩分なし

図-2 飛来塩分の有無と健全度



上部ASRあり

上部ASRなし



下部ASRあり

下部ASRなし

図-4 ASRの有無と健全度

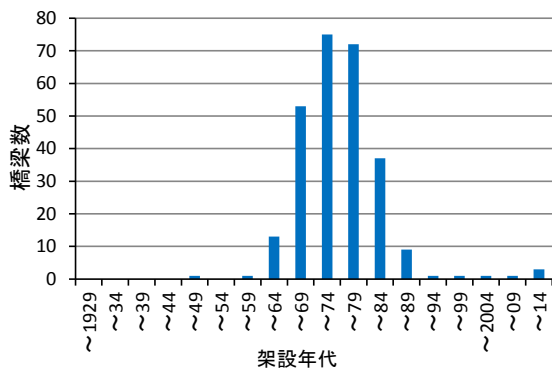


図-3 ASR発生橋梁の架設年

度が4以下となっている橋梁が存在しており、今後の予防保全に向けて劣化原因を把握しておく必要がある。

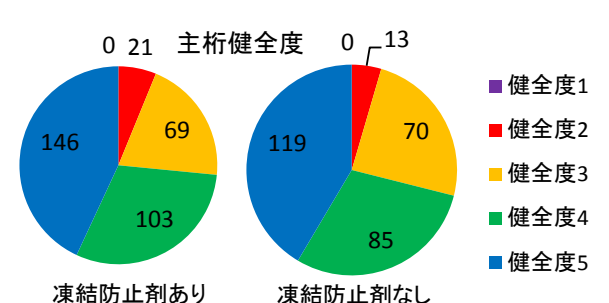
3.2 劣化要因ごとの検討

飛来塩分、ASR、凍結防止剤が健全度（割合）に与える影響について検討を行った。

上部工については、座標情報がありコンクリート系（PC 桁および RC 桁）である 1353 橋を対象とし、下部工は 1958 橋を対象とした（3.3 も同様）。

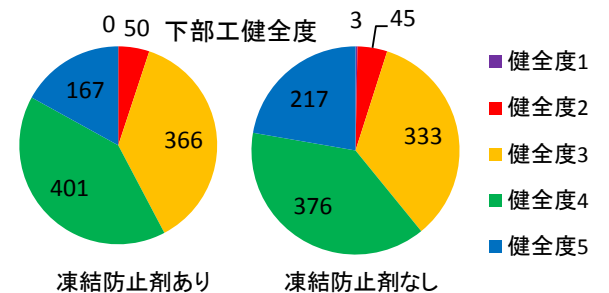
飛来塩分の有無を区別した橋梁健全度（割合）を図-2 に示す。主桁では、飛来塩分の影響ありのものの方が影響なしのものより健全度が高い傾向にあった。他方、下部工で健全度は概ね同様の割合であったものの、飛来塩分の影響ありでは、影響なしのものより健全度2の割合が多かった。主桁においては、飛来塩分の影響を受け早期劣化を生じたものには既に対策が実施され、健全度が回復したことで、飛来塩分なしと区分されたものでも他の劣化要因によって健全度の低下が生じた可能性が考えられる。

ASR 発生が確認されている橋梁の架設年次ごとの橋



凍結防止剤あり

凍結防止剤なし



凍結防止剤あり

凍結防止剤なし

図-5 凍結防止剤の有無と健全度

梁数を図-3 に示す。発生橋梁は 1970 年代に建設された橋梁に多く見られ、1985 年代以降はほとんど発生しておらず、ASR 抑制対策以降、ASR の発生がきわめて少ないことが確認された。なお、きわめて少数であるが、抑制対策以降において ASR が発生したものもあり、同様に施工された構造物については注意を払い、維持管理を行う必要がある。

ASR 発生の有無を区別した主桁、下部工の健全度（割合）を図-4 に示す。下部工については ASR が発生したものでは、健全度は ASR 発生無しより低い傾向にあり、ASR が大きな影響を与えたものと考えられる。主桁においては、ASR 発生の有無にかかわらず、両者に大きな相違は認められなかった。

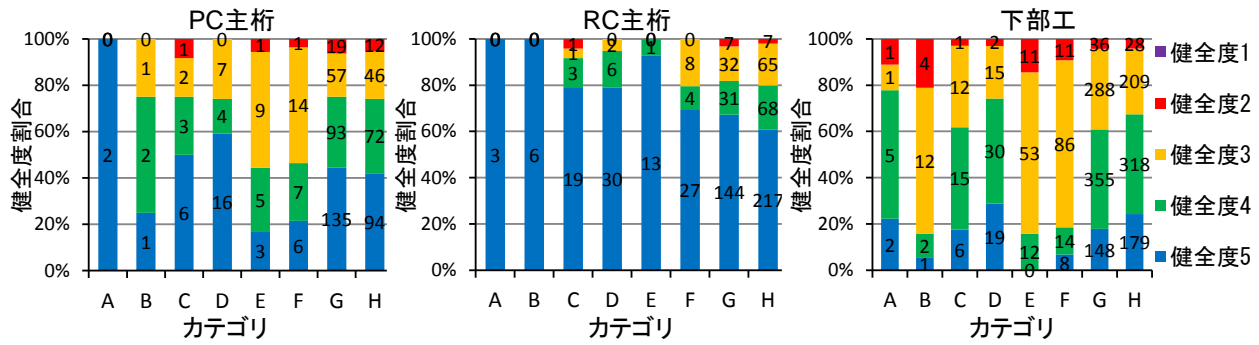


図-6 カテゴリ別健全度（部材別）

表-4 カテゴリごとの橋梁数

飛来塩分	有				無				
	ASR		凍結防止剤		ASR		凍結防止剤		
カテゴリ	A	B	C	D	E	F	G	H	
主桁	PC	2	4	11	25	17	28	307	226
	RC	3	9	24	39	14	36	213	356
下部工	13	24	102	103	72	114	764	700	

凍結防止剤の影響の有無を区別した主桁、下部工の健全度（割合）を図-5 に示す。凍結防止剤の影響を受ける橋梁数は984橋であった。主桁および下部工ともに、凍結防止剤の影響は健全度には認められなかった。後述するように、散布量が高速道路等に比べて少なかったため、健全度とその影響が認められなかったものと考えられる。

3.3 カテゴリ別検討

(1) カテゴリ分類と健全度

劣化要因として飛来塩分・ASR・凍結防止剤の3つに着目した。橋梁には、これらのすべての要因の影響を受けるものからその全てに影響を受けないものまで存在する。各劣化要因の有無によってカテゴリを8つに分類した。カテゴリごとの橋梁数を表-4 に示す。他のカテゴリの橋梁数に比較し、カテゴリGとカテゴリHの橋梁数がきわめて多い。劣化原因が複合している橋梁数は全体の中でそれほど大きな割合ではなかった。きわめて厳しい条件にあり（劣化要因が複数存在するもの）、かつ、重要度の高い橋梁から点検強化やモニタリングを実施するものを選び、それらの結果から最もリスクの高いものを効率的に維持管理するための情報を得ることで効率的かつ合理的な維持管理を支援することが可能となると考えられる。また、それらのカテゴリにおいて健全度の推移を注視することも同様の効果が得られるものと考えられる。なお、今回はカテゴリごとの健全度の推移の分析までには至っていないため、これについては今後の検討によって明らかにする必要がある。

部材ごとのカテゴリ別健全度割合を図-6 に示す。

ASRの影響を受けるカテゴリA, B, E, Fの健全度が低い傾向にあった。当該地域におけるASRの影響が大きいことの証左であるものと考えられる。顕著に劣化が生じたものには既に対策が実施されている。その上でもなお、他の原因に比べて健全度が低い傾向にあるため、維持管理において留意する必要がある。なお、同自治体では、対策等の優先度において塩害およびASRを生じているものについては通常のものとは区別し、維持管理を行うこととしており、これまでの調査等の実績が維持管理に活用されている。

また、下部工は上部工（PC橋、RC橋）と比較して、健全度が低い傾向にあった。補修等の対策が構造安全性の観点から上部工を優先的に実施している可能性が高く、そのため下部工の健全度が相対的に低くなったものと考えられる。

(2) 飛来塩分の影響

飛来塩分の影響を比較するため、飛来塩分のみの影響を受けるカテゴリDと、劣化要因なしのカテゴリHを比較した（図-6, 7, 8中のカテゴリD, H参照）。カテゴリDのものでは橋梁数が少ないこともあるが、PC桁については、耐久性の高い構造であるため、飛来塩分による劣化が生じにくく、橋梁数の多いカテゴリHのものの方が架設年次の古いものほど健全度が低くなる傾向を示した。RC桁においては、カテゴリDのものでは供用年数が短いものでも健全度の低下が認められるのに対して、カテゴリHのものでは、1949年～1994までの健全度の低下程度は同程度を示した。また、それ以前の1940-1944年架設のもの健全度2を示すものが多かった。RC桁では飛来塩分の影響が若干認められた。カテゴリDのものでは既に対策が実施されたものも含まれることから、飛来塩分の影響は小さくないものと考えられる。

下部工においても、カテゴリHは供用年数に伴う健全度の低下傾向が認められるが、カテゴリDでは、比較的早期に健全度が低下しているものもあるため、上部工よりも大きなかぶりが確保されているにもかかわらず、塩害の影響はあるものと考えられる。

なお、前述したとおり、カテゴリDの橋梁数は少ない

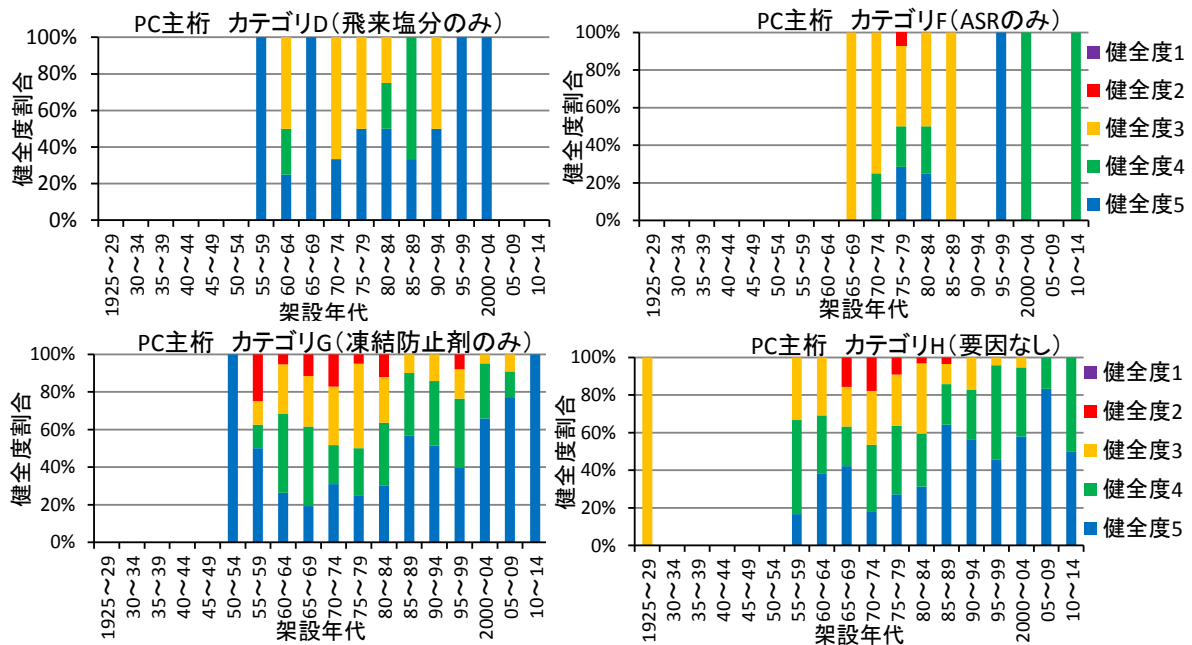


図-7 カテゴリ別健全度（PC主桁）

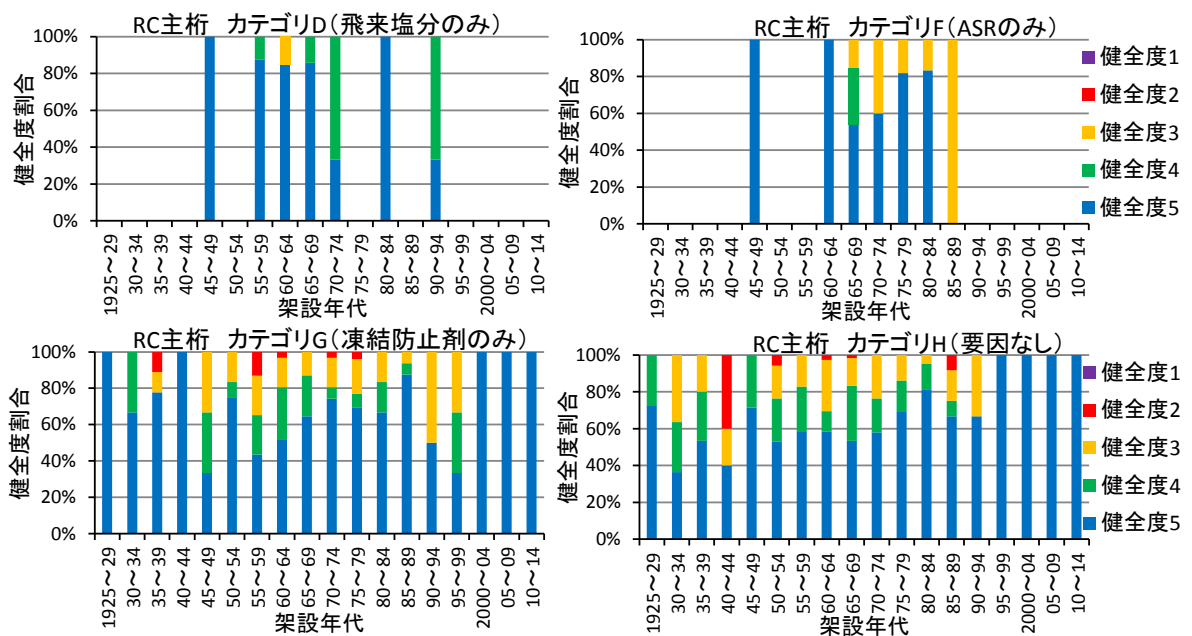


図-8 カテゴリ別健全度（RC主桁）

こと、また、補修履歴等の詳細については現状の橋梁データベースからは確認が困難であるため、更なる分析を行い、上記内容について明らかにする必要がある。なお、カテゴリの橋梁数が少なく、また、補修履歴の詳細が不明な点については以下のカテゴリ F についても同様である。

(3) ASR の影響

ASR の影響を検討するため、ASR のみの影響を受けるカテゴリ F とカテゴリ H を比較した（図-7, 8, 9 中のカテゴリ F, H 参照）。ASR 発生橋梁は前述のように 1965～1980 年までに集中しているため、カテゴリ H との比較は、この期間の架設年次のものを対象とした。

PC 桁では、カテゴリ F の健全度はカテゴリ H より高い。ASR が発生した時点で補修等が実施され、健全度が回復していることと、対策対象とならなかった場合には比較的軽微な状態に保たれたためと考えられる。RC 桁では、両者の健全度に大きな相違は認められなかった。RC 桁の健全度割合は概ね PC 桁と同様であり、対策等が PC 桁同様に行われたものと考えられる。

他方、下部工においては、カテゴリ H よりカテゴリ F の健全度は低い。3.3.(1)で述べたように、上部工よりも対策優先度が低いため、対策が未実施の橋台が多く残されているものと考えられる。そのため、ASR の影響が下部工では比較的明確に現れたものと考えられる。カテ

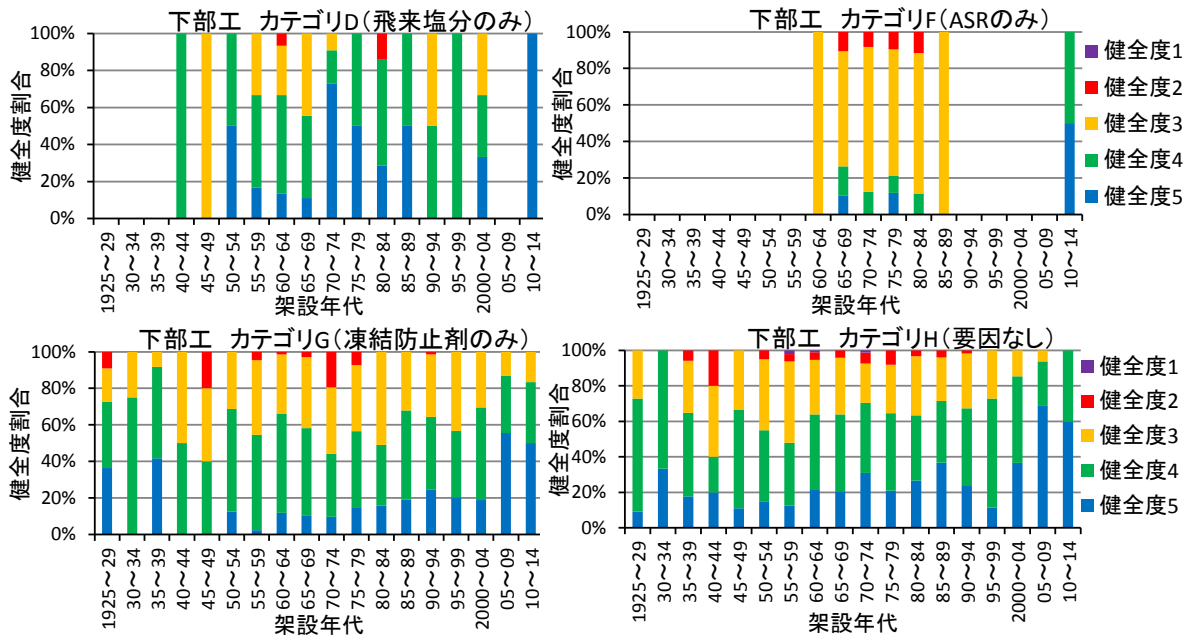


図-9 カテゴリ別健全度（下部工）

り H の時間的な推移に比較すると、劣化速度はかなり大きいものと考えられる。

(4) 凍結防止剤の影響

ASR の影響を検討するため、凍結防止剤のみの影響を受けるカテゴリ G とカテゴリ H を比較した (図-7, 8, 9 中のカテゴリ G, H 参照)。主桁、下部工のいずれにおいても、カテゴリ G とカテゴリ H の健全度の傾向に顕著な相違は認められなかった。凍結防止剤の散布量が急増した時期は、スパイクタイヤ禁止以降の 1990 年前後からであるため、現状では健全度にはその影響が認められなかったものと考えられる。なお、凍結防止剤散布の影響については高速道路などにおいては短期間に顕著な劣化が生じた事例が報告されており、散布量の問題もあるが、凍結防止剤の影響は大きいとしておくのが妥当である。そのため、健全度に顕著には現れていない現状の段階において、影響の程度について把握しておくことは今後の維持管理に極めて重要であるものと考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を下記に示す。

- (1) 橋梁点検データベースに、座標情報、既往の調査データおよび凍結防止剤の散布データ等を加味することで、橋梁の劣化要因（飛来塩分、ASR、および凍結防止剤）の分類（推定）が行えた。
- (2) 飛来塩分が健全度に与える影響が認められ、劣化速度を高めることが確認できた。PC 桁では飛来塩分を受ける場合にも優れた耐久性によって健全度の低下が維持される傾向が確認できた。
- (3) ASR の発生が健全度に与える影響は大きく、劣化速度を高めることが確認できた。下部工において

はその影響が顕著に現れた。

- (4) 凍結防止剤の影響については健全度において確認することができなかった。
- (5) 補修履歴等の情報が不足しているため、本研究範囲内で明らかにならなかった点についてはさらなるデータ等の補完を行い、明らかにすることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 玉越隆史, 横井芳輝:平成 25 年度道路構造物に関する基本データ集, 国総研資料第 822 号, 2015.01
- 2) 国土交通省:橋梁定期点検要領 (案), 2004
- 3) 近田康夫, 鈴木慎也, 小川福嗣:点検結果に基づく劣化予測のためのマルコフ遷移確率推定方法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.61A, pp70-80, 2015.03
- 4) 竹田俊明, 大島俊之, 佐藤誠, 三上修一:橋梁点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1157-1167, 2005.03
- 5) 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, Vol.67, No.2, I_813-I_824, 2011
- 6) 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, Vol.68, No.3, pp.683-695, 2012
- 7) 石川県:石川県橋梁点検要領 (案), 2005.03
- 8) 土木学会:コンクリート標準示方書[維持管理編], 2013