

寒冷地における橋梁の劣化環境と RC 床版の劣化予測に関する研究

Study on deterioration environment of bridges and deterioration prediction of RC slabs in a cold region

竹田俊明*, 三上修一**, 大島俊之***, 鈴木広大****

Tosiaki TAKEDA, Syuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Kouta SUZUKI

*工修 財北海道道路管理技術センター (〒060-0807 札幌市北区北 7 条西 2 丁目 20 番地)

**博(工学) 北見工業大学助教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

***工博 北見工業大学教授 工学部土木開発工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

****修(工学) 株式会社復建技術コンサルタント (〒980-0012 仙台市青葉区錦町 1 丁目 7 番 25 号)

Evaluation of bridge slab deterioration and its degradation prediction based on actual inspection data are dealt with in this paper. To evaluate the slab deterioration, the effects of traffic loads, salt damage, freezing and thawing and so on, are the elements of evaluation. Especially, deterioration of the slab in a cold region is changing with a freezing and thawing action or enlargement of vehicles. Inspection data on the slab may include the effect of those elements and be useful to analyze the magnitude of the effects. Depending upon the analytical results using actual inspection data, overall prediction method of deterioration is investigated and its prediction will be utilized in Bridge Management System (BMS).

Key Words: Bridge Management System (BMS), Bridge inspection data, reinforced concrete slab, deterioration prediction, environmental condition

キーワード: BMS, 橋梁点検データ, RC 床版, 劣化予測, 環境条件

1. はじめに

既設橋梁を維持管理していく上で、床版の劣化は重要な問題である。RC 床版の劣化に関しては、松井ら^{1),2)}や角田ら³⁾の研究が著名であり、多くの研究が実施されてきている^{4),5),6)}。一方で RC 床版の環境耐久性に関しても、塩害や凍結融解、アルカリ骨材反応や中性化などによる影響に関する研究⁷⁾が実施されており、これらの成果は設計指針に反映されてきている。

松井らによる床版に関する研究報告では、主に重量交通地域である温暖な都市域においての疲労による床版劣化に主眼を置いており、北海道のような寒冷地特有の環境を考慮した床版劣化に関する報告は少ない。だが、寒冷地における床版を取り巻く環境は、積雪や低温など自然環境によるものや凍結防止剤散布などによる複合的な劣化環境にあり、その影響度を解析するとともに、劣化メカニズムの解明が必要である。

著者らはこれまで、既設橋梁の効率的な維持管理を目的とした橋梁維持管理システム (Bridge Management System) の開発^{8),9),10)}に取り組んでおり、その構築発展を目指し、床版部材の劣化予測手法の検討を行ってきた^{11),12)}。その中で、松井らによる研究成果に基づいた疲労劣化予測手法の検討¹¹⁾や、マルコフ理論を用いた確率的な部材劣化予測¹²⁾などを行っているが、劣化予測精度の

更なる向上が BMS 実用化へ向けた大きな課題である。

したがって本論文では、これまでに RC 床版の劣化に関して発表されている研究成果に基づくとともに、橋梁点検の際に得られている RC 床版に関する点検データと実橋から測定した実測データを詳細に解析して、既存の BMS における著者らの提案する床版劣化の推定精度を向上しようとするものである。また、床版の劣化に影響を及ぼすとされる積雪寒冷地特有の劣化影響因子の影響を、これまで北海道で蓄積されてきた点検データ¹³⁾を用いて、解析を行っている。

以下に本論文の構成を示す。

2 章では、床版の劣化に結びつくと考えられる各劣化環境の検討と、その影響度を解析しており、解析手法と得られた解析結果について述べる。

3 章では、実測した床版コンクリート強度を用いた予測手法について述べるとともに、寒冷地において床版の劣化へ影響のある環境条件を考慮した劣化予測手法について説明し、その結果を述べる。また、予測結果とこれまで北海道で蓄積されてきた点検データによる比較を行い、予測の妥当性に関して検討する。

2. 寒冷地における橋梁の劣化環境の検討

寒冷地に架設された橋梁の劣化環境として、まず凍結

融解作用がある。また、融雪によって水の供給が増加することも一因となる。さらには路面凍結防止のための散布が行われている凍結防止剤による劣化への影響も近年報告されている^{14),15)}。これらの様々な劣化影響因子が介在する寒冷地環境に架設された橋梁は、必然的にそれらの因子が複合的に作用し、厳しい環境条件にあると言える。そのため、北海道のような積雪寒冷地における床版の劣化予測には、これらの環境を考慮した劣化予測が必要であり、各因子の連成状況を把握することが大きな課題である。

本論文では、これらの寒冷地環境の中で水の影響を評価するために、コンクリート部材中の水分量を測定するとともに、その水分量と橋梁周辺の温湿度環境との関連性を探るために温湿度の測定を行い、検討している。また、凍結融解作用や凍結防止剤散布の影響に関しても、北海道で蓄積されてきた点検データにより解析を行った。

2.1 北海道における降雨データ

橋梁構造物において、水が部材の劣化に及ぼす影響は周知の通りである。実橋における水の供給は主に降雨によるものであると言える。そこで、本論文では降雨による劣化への影響を定量的に把握するために、降雨データの集計を行った。降雨データは気象庁ホームページ¹⁶⁾に観測地点毎の観測データが集積されており、容易に入手が可能である。観測データは北海道の場合、約230地点で観測されており、観測項目は降水量、積雪量、気温を基本とする全10項目である。そのうち、札幌市や網走市といった主要な観測地点は約25箇所あり、観測項目は前述の項目に加え、湿度や日射量といった19項目が観測されている。以上のことをふまえ、降雨データをBMSデータベースに蓄積するとともに、降雨量の違いによる劣化環境の検討を行った。

なお、本論文では降雨と積雪、融水の影響をそれぞれ個別に取り扱うものとする。降雨は冬期を除く期間において主たる水分供給源である。また、冬期においては、積雪が主たる水分供給源となる。そのため、冬期を除く期間は降雨による影響のみが構造物に作用するものと考えられるが、冬期においては積雪による水分供給が寒冷地特有の劣化影響因子である凍結融解作用、さらには凍結防止剤散布による影響を増進させるものと思われる。

凍結融解作用はコンクリート中の水分量が増加するほど、凍結融解による影響も大きくなると考えられる。また、路面上に散布される凍結防止剤は路面に堆積した雪を溶かし、塩化イオン濃度の比較的高い融雪水として路面上を移動する。また、北海道のような寒冷地では地域にもよるが、積雪が記録されてから気温が上昇しない限りは、ほぼ路面上に堆積された状態となるのが一般的である。そのため、融雪期には気温が上昇して融雪水となる。

したがって、本論文では降雨、積雪、融水の影響をそれぞれ個別に考え、影響を検討している。

2.2 橋梁周辺の水分による劣化環境

水が部材の劣化にもたらす影響に関する報告は多い^{17),18),19)}。しかし、構造物の中で水の供給がどれほどあるのか、部材や部位の違いによって水分量がどう変化するかを定量的に評価している報告はそれほどないのが現状である。そこで、実橋における水分量、部材や部位の

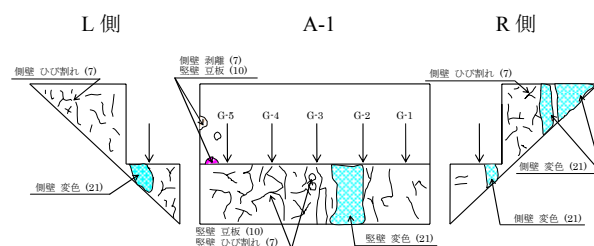


図-1 A橋損傷図（橋台部A-1側）

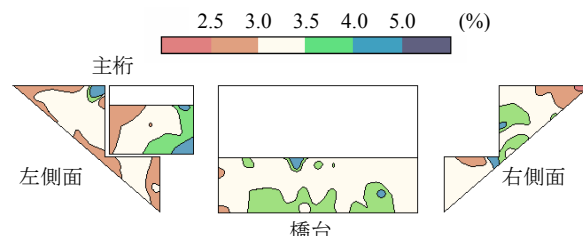


図-2 水分値測定結果（晴天時）

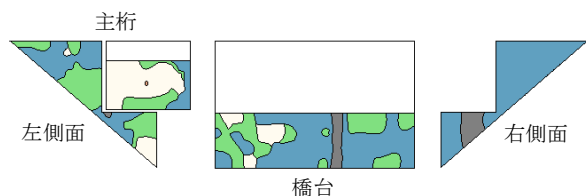


図-3 水分値測定結果（雨天時）

違いによる水分量の変化を測定し、これら水分量がどの程度、部材の損傷に影響を及ぼすのかを定量的に評価するために、冬期期間、実橋での水分量測定を行った。また、水分値の測定とともに実橋における温湿度の測定も行っており、温湿度変化と水分値の関連を検討した。その結果を基に、水分値とコンクリート部材の損傷との関連を考察していく。

(1) 橋梁周辺の温湿度と水分量

①水分量の測定概要

水分量の測定は、凍害との因果関係を検討するために、凍害性を有していると思われる橋梁を選定し、道東に位置する北見市内の市道に架設されているA橋にて測定を行った。A橋は、中央4径間連続鋼桁橋、両側径間RC桁橋、橋長541.1m、供用21年の直線橋である。測定は水分値測定器（株式会社科学研究所、HI-500）を用いて行った。測定箇所は、主にA1側床版底部と主桁側面、A1側橋台の各部材より、計19箇所を測定箇所とした。測定期間は2005年10月19日～2006年1月16日の約3ヶ月間である。部材の損傷と水分値の関連を調査するために、まず始めに、測定を行う部材の橋梁点検を行った。点検から得られた橋台部分の損傷図を図-1に示す。主な損傷としては、橋台部において、ひび割れと変色・劣化が発生しており、床版・主桁においてはひび割れ、遊離石灰の発生が見られた。A橋の架設環境と損傷内容から、損傷発生要因として、降雨、降雪による水の供給や凍結融解作用による凍害の影響と推察される。

コンクリート表面の水分量測定は、天候による測定値の変動を比較するために、晴天時と雨天時の比較を行った。また、水分量測定値に関しては、測定器のばらつきなどを考慮して、同一測定箇所ですべての測定を行い、その平均値を測定値として用いた。

表-1 測定橋梁の環境・形式および測定期間

橋梁名	架設環境	構造形式	測定期間
A 橋	河川環境	RC 桁橋	2005.12.16～2006.3.16
B 橋	河川環境	鈑桁橋	2003.11.11～2003.12.15
C 橋	海岸環境	鈑桁橋	2004.5.6～2004.6.6
D 橋	一般環境	鈑桁橋	2004.6.13～2004.7.14
E 橋	河川環境	トラス橋	2004.7.27～2004.8.27
F 橋	河川環境	箱桁橋	2004.8.11～2004.9.11

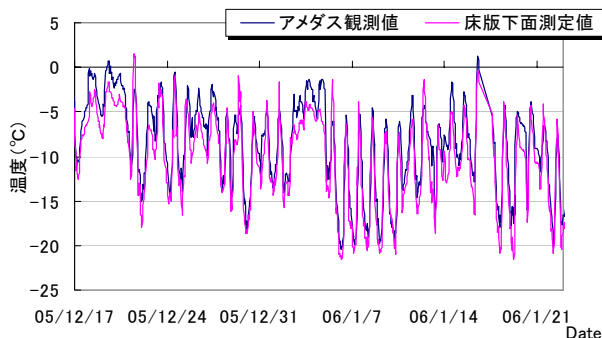


図-4 温度測定値とアメダス観測値の比較（床版下面）

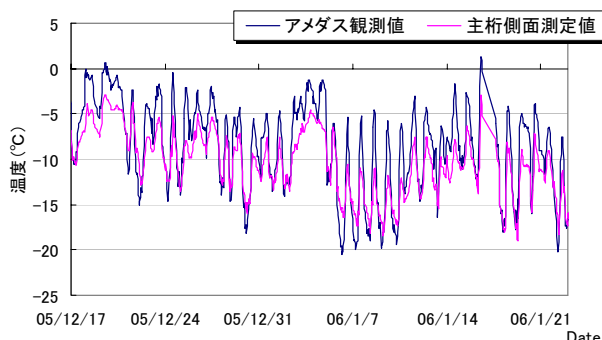


図-5 温度測定値とアメダス観測値の比較（主桁側面）

②水分量測定結果

図-2,3 に晴天時と雨天時の水分量測定結果を示す。雨天時には、各測点の水分値が上昇しており、特に変色部などにおいて、水分値が高くなる傾向が得られた。これは、変色の発生要因として水の供給が主に考えられるため、実橋での測定データにより、劣化のメカニズムとして水の供給との関連を示すことができたものとする。

③温湿度測定概要

水分量と同様に実橋における劣化環境を定量的に把握するために、水分量の測定を行った A 橋を含む計 6 橋において温湿度の測定を行った。測定には、温湿度計（株式会社栄製:品番 RHD-J122×2 台、THT-E×1 台）を用いており、表-1 に各測定橋梁の架設環境や形式、測定期間を示す。測定箇所としては、A 橋が床版下面、桁側面、橋台の 3 箇所、A 橋を除く 5 橋は桁外側と桁内側、下フランジの計 3 箇所で開催している。

④温湿度測定結果

A 橋における温度測定結果の一部を図-4,5 に示す。この温度測定結果は、アメダスの北見市における温度観測値と非常に相関がある（図-6、表-2）。このことは実橋における温度測定を行わずとも、アメダス観測データを基

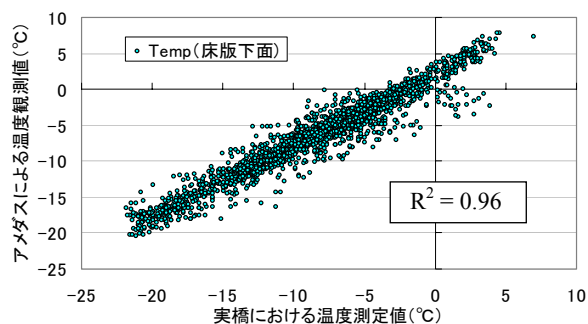


図-6 温度測定結果とアメダス観測値の相関（A 橋）

表-2 温度測定結果とアメダス観測値の相関係数一覧

橋梁名	設置箇所	相関係数	橋梁名	設置箇所	相関係数
A 橋	床版下面	0.957	D 橋	桁外側	0.914
	桁側面	0.923		桁内側	0.966
	橋台	0.883		下フランジ	0.904
B 橋	桁外側	0.761	E 橋	桁外側	0.915
	桁内側	0.817		桁内側	0.951
	下フランジ	0.974		下フランジ	0.915
C 橋	桁外側	0.952	F 橋	桁外側	0.790
	桁内側	0.964		桁内側	0.927
	下フランジ	0.957		下フランジ	0.964

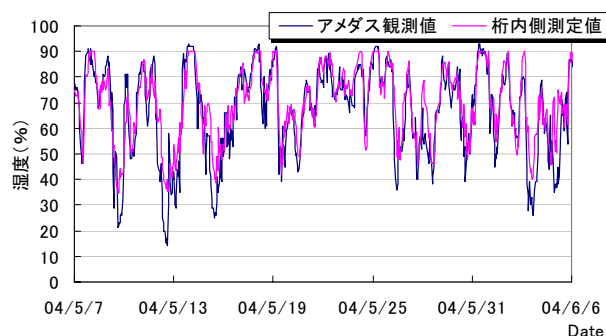


図-7 湿度測定値とアメダス観測値の比較（C 橋）

表-3 湿度測定結果とアメダス観測値の相関係数一覧

橋梁名	設置箇所	相関係数	橋梁名	設置箇所	相関係数
A 橋	床版下面	0.653	D 橋	桁外側	0.652
	桁側面	0.522		桁内側	0.726
	橋台	0.545		下フランジ	0.678
B 橋	桁外側	0.613	E 橋	桁外側	0.575
	桁内側	0.647		桁内側	0.636
	下フランジ	0.697		下フランジ	0.509
C 橋	桁外側	0.865	F 橋	桁外側	0.750
	桁内側	0.882		桁内側	0.794
	下フランジ	0.857		下フランジ	0.720

に実橋温度環境の推定が可能であることを示唆する結果であると考えられる。

温度と同様に湿度の測定結果とアメダス観測値の比較を図-7、測定値とアメダス観測値との相関係数を表-3 に示す。この測定結果に用いているアメダス観測値は、北見市における観測データには湿度の観測項目が記録されていないために、最も近い観測地点である網走市の観測値を用いている。観測地点の違いや環境の違いから、温度ほどの良い相関は得られていないが、網走市に近い海岸環境に架設されている C 橋においては高い相関が得ら

れている。本来、橋梁の劣化環境を検討する上で、橋梁架設地点における温湿度測定データを用いた検討が必要となるが、全ての橋梁においてこれらの気象データを測定することは不可能である。しかし、本測定結果から得られたように、両者に高い相関があるのならば、アメダス観測データを用いた実橋環境の推定も可能であると思われる。

⑤温湿度の関連性

温度と湿度、両者の関係について検討した内容を述べる。一般的には温度と湿度の関連性は、空気が暖かいほど多くの水蒸気を含むことができ、冷たいほど少量の水蒸気しか含むことができない。つまり、一定量の空気に一定量の水蒸気が含まれている場合は、気温が高くなれば湿度は低下し、逆に気温が低下すれば、湿度が上昇する。本測定で得られた温湿度測定結果(図-8)から、温度と湿度は概ね逆相関の関係にあることがわかる。また、気温が氷点下の場合に着目すると、その逆相関の傾向はより強い傾向にあると言える。

⑥水分量と温湿度の関係

水分量と温湿度の関係に関して検討した内容を述べる。

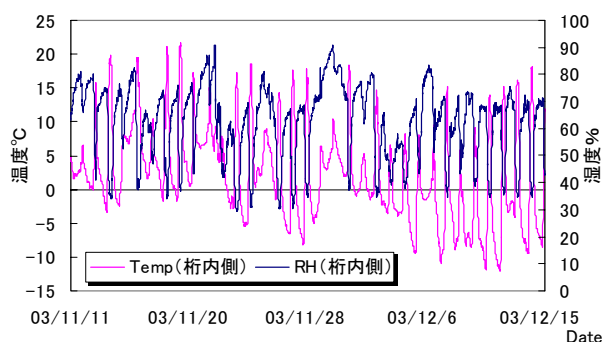


図-8 測定結果による温度と湿度の関係 (B 橋)

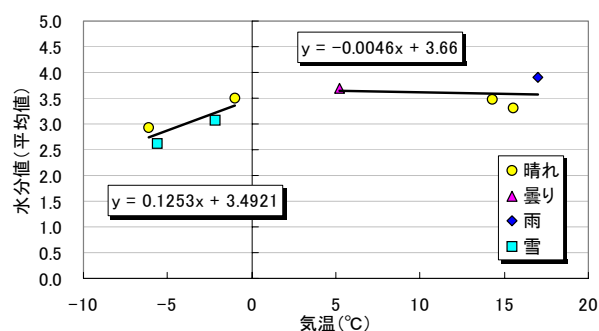


図-9 表層水分量(平均値)と温度の関係

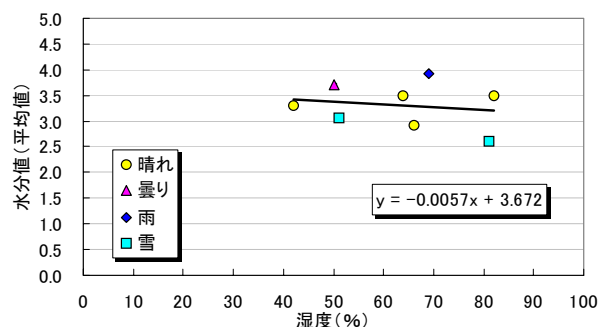


図-10 表層水分量(平均値)と湿度の関係

表層水分量と測定した温湿度は、同じ日の測定データがないため、アメダスの観測値を用いて表層水分量との比較を行った。このアメダス観測値は、実橋における測定値と高い相関が得られていたため、十分な信頼性がある値であると考えられる。図-9 に水分量と温度の関係を示す。同図の水分値は、測定を行った部位全ての水分値を測定日毎に平均した値を用いている。同図から、氷点下以下では温度が下降するにつれて水分値が減少する傾向が見られる。水分値の減少要因として、コンクリート表面付近の水分が乾燥したことによる影響と、凍結による影響が考えられる。コンクリート中の水分は約 -2°C 以下で凍結することから、凍結によって表面付近の減少と関連が深いと考えられる。

また、図-10 に温度と同様に表層水分量と湿度の関係を示す。湿度に関しては、前述の通り北見市のアメダス観測データが存在しないために、網走市の観測データを用いている。このため、両者の相関はほとんど表れていない。また、既往の研究報告から、コンクリート中の含水量は、湿度による影響や関連は少ないとの報告²⁰⁾があり、本測定結果はそれを裏付ける結果である。

(2) 橋梁の表層水分量と劣化

前項で述べた表層水分量の測定結果を基に、劣化要因の考察を以下に述べる。変色や遊離石灰といった損傷は、主な発生要因として水の供給が挙げられる。本測定結果からもわかるように、変色や遊離石灰といった損傷部は、他の部位よりも水分値が高く、損傷の発生に影響したものと推察される。しかし、本測定結果はA橋1橋当たりの測定結果であるため、信頼性の低さなどが課題であり、更なるデータの蓄積による検討が必要である。

2.3 凍結融解による劣化環境

積雪寒冷地のコンクリート構造物は、コンクリート内部の水分が凍結融解を繰り返すことで、ポップアウトやスケーリングによるかぶりの減少が起こる。また、既存ひび割れに進入した水によって、ひび割れ幅の増大を招く危険性もある。このような凍結融解作用の影響を考慮するために、年間の凍結融解回数によって橋梁架設地域を4段階に分類した(表-4)^{21),22),23)}。凍結融解作用による凍害は凍結融解回数が主な要因となるが、これに加えて凍結融解には水の供給が不可欠である。さらに、冬期の水の供給は主に降雪によるものであると推察される。そこで、凍結融解作用による影響を助長させるであろう水の供給を考慮するために、次のような検討を行った。

表-4 凍結融解ランク

凍結融解ランク	1	2	3	4
凍結融解回数(回/年)	~20	20~40	40~60	60~80

(1) 湿潤係数²³⁾

冬期期間の実橋における水の供給を検討するために、冬期期間の水の供給源である降雪量を地域毎に係数化した湿潤係数Sを次のように設定した。

$$S = w/w_0 \quad (1)$$

w : 各地域の降雪量

w_0 : 最大の降雪量を示す地域の降雪量

この湿潤係数Sは、最大積雪量の地域に対する相対的

な相違を係数化したものである。これにより各地域の冬期の水分供給を考慮している。湿潤係数 S の算出に必要な降雪量の集計には、降雨と同様に気象庁の観測データ¹⁶⁾を用いている。この湿潤係数を基に、凍結融解作用の影響を受けるとされる床版の損傷データ、その中でも特に、路面上の水が集中的に作用すると思われる端部パネルのデータを用いて、以下の検討を行った。なお、損傷データとは北海道で橋梁点検要領(案)¹³⁾に基づき、実施されている橋梁点検データの一部分である。データベースには、各橋梁の部材毎の損傷内容、形式や架設年などの橋梁仕様、さらに、交通量などの環境データが蓄積されている¹¹⁾。

(2) 湿潤係数による劣化への影響

湿潤係数と床版端部の損傷ランクの関係を図-11 に示す。この損傷ランクは、北海道で定期的に行われてきた橋梁点検¹³⁾により得られた床版端部における剥離・鉄筋露出ランク（以下：床版剥離ランク）を用いている。なお、凍害による劣化は、スケーリングとして表面化するものと推察されるため、剥離の損傷を対象としている。同図は横軸に湿潤係数 S 、縦軸に床版剥離ランクを橋梁毎に平均化した値をとっている。この平均化は、橋梁毎に部材の点検ランクを平均したものであり、部材毎の点検結果のばらつきを橋梁毎に平準化させるための意味合いを持つ。同図から湿潤係数が大きくなるほど、ランクが低下する傾向が見て取れる。このことから、凍結融解作用に大きく影響する冬期の水の供給が多い床版端部ほど、損傷を受けやすい傾向にあると考えられる。

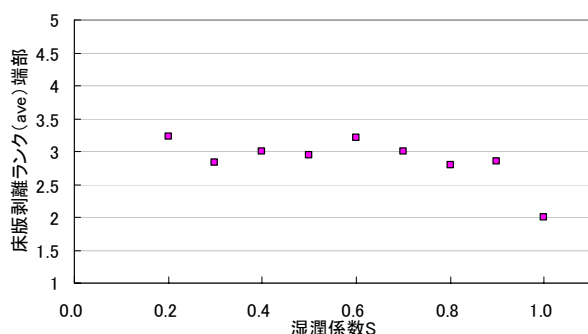


図-11 床版剥離ランク（端部）と湿潤係数 S の関係

2.4 凍結防止剤による劣化環境

北海道のような寒冷地では、冬期路面管理に凍結防止剤が散布されており、その散布量は年々増加傾向にある。そのため、凍結防止剤に含まれる塩分の供給・浸透によるコンクリート構造物の塩害が懸念されている。さらに、この塩分浸透と凍結融解作用との複合作用により、コンクリートの凍害を一層促進させるとの事例も報告されている^{14),15)}。

このような凍結防止剤による劣化は、今後より一層増大していくものと考えられる。したがって、この問題を未然に防ぐためにも、凍結防止剤散布による劣化への影響を定量的に把握することが必要である。

本論文では、この凍結防止剤散布の影響を直接的に受けると考えられる地覆コンクリート部に着目し、その影響を明確にするとともに、床版部材への影響に関しても検討を行い、凍結防止剤の影響を床版劣化に結び付けている。

(1) 凍結防止剤散布量（散布実績）

凍結防止剤散布量は、劣化への影響を検討する上で、個々の橋梁に直接散布された量を把握することが望ましいが、散布に関しては路線毎に行われるため、1 橋当たりの厳密な散布量を算出することは困難である。そこで、本論文では北海道開発局の開発建設部毎の散布実績データを基に、凍結防止剤散布比率を算出した（図-12）。この散布比率とは、開発建設部毎の散布実績を基にして、最大散布量との比率で表したものである。本論文では、この散布比率を基にして、凍結防止剤散布の劣化への影響を検討するものとした。同図の散布比率を見ると、F 建設部と H 建設部において散布比率が突出しているのがわかる。この凍結防止剤散布比率は交通量と非常に良い相関があり、2 つの建設部は交通量の多い地域であったことがこの結果をもたらしたと考える。

(2) 地覆部における凍結防止剤散布の影響

① 地覆剥離ランクと凍結防止剤散布比率の関係

湿潤係数と同様に、凍結防止剤散布比率と地覆剥離ランクを比較したグラフを図-13 に示す。凍結防止剤による塩害の影響に関しても、凍害と同様に断面欠損として表面化するものとし、剥離の損傷を対象としている。また、この損傷ランクは 2.3 節と同様に、対象橋梁毎にランクを平均化した値を用いている。同図を見ると、散布量が多くなるほど、ランクが若干右下がりの傾向にあるものの、明確な差は表れていない。これは、路面上の薬剤が地覆部へ付着するものと想定されたが、北海道では除雪された雪が地覆部を覆いかぶさるように堆積していることが多い。そのため、この除雪により地覆部へ堆積した雪が薬剤の付着を防ぐ効果をもたらしたのではないかと考えられる。また、凍結防止剤が散布され始めてから間もないために、損傷として表面化するまでの年数に至っていないことも要因と考えられる。

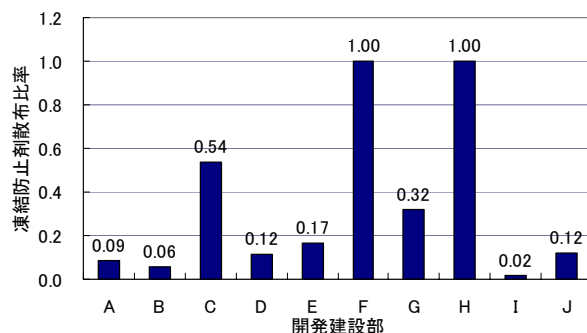


図-12 開発建設部毎の凍結防止剤散布比率

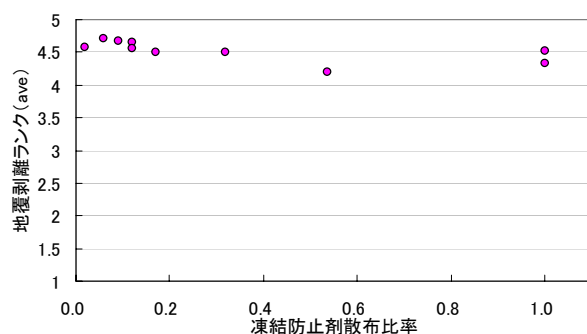


図-13 地覆剥離ランクと凍結防止剤散布比率の関係

表-5 地覆剥離ランクの主成分分析結果

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
固有値	1.575	1.157	0.800	0.468
寄与率	0.394	0.289	0.200	0.117
累積寄与率	0.394	0.683	0.883	1
固有ベクトル	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
積雪ランク	-0.660	-0.239	0.174	-0.690
凍結融解ランク	0.637	0.325	0.179	-0.676
凍結防止剤散布比率	-0.288	0.651	0.667	0.218
地覆剥離ランク	0.276	-0.643	0.702	0.136

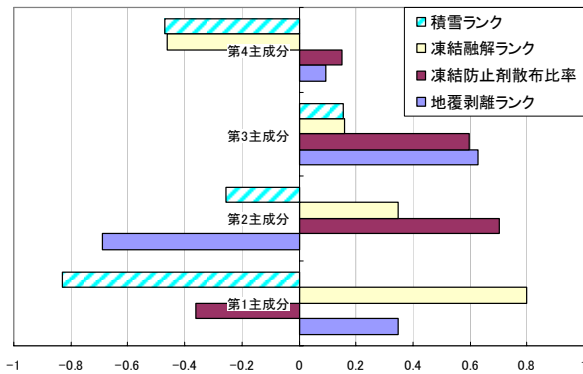


図-14 主成分と固有ベクトルの関係（地覆剥離ランク）

②主成分分析による解析結果

凍結防止剤の地覆への影響度を評価するために、地覆部の点検データを基に、劣化傾向が得られているケースを弁別して、劣化影響因子を検討するために、主成分分析を行った。その結果を表-5、図-14に示す。

ここで図表中に示した各因子について説明する。まず地覆剥離ランクは2～5の値をとり、値が大きいほど健全な部材であることを示す。凍結融解ランク（表-4）と凍結防止剤散布比率（図-12）は値が大きいほど、劣化に対して厳しい環境であることを示す。また、積雪ランク¹⁾とは、橋梁架設地域の最大積雪量に従って6段階に分類²⁾したものであり、ランクが高くなるほど積雪の多い地域であり、相対的に湿潤係数も大きく、厳しい環境と言える。

表-5は4つの主成分におけるそれぞれの分散（固有値）と寄与率、および主成分を各因子で合成するための固有ベクトルを示しており、図-14は同係数を主成分毎にまとめたものである。寄与率が最も大きい第1主成分に着目すると、地覆剥離ランクはプラスの係数、凍結防止剤散布比率と積雪ランクの項目はマイナスの係数で合成された指標になっている。これは、積雪量が少なく、散布量が少ない地域は地覆の劣化が少ないことを表している。

同様に、第2主成分では劣化影響因子として凍結防止剤と凍結融解作用（凍害）の影響が考えられる。第3主成分では、全ての項目がプラスの係数になっており、散布比率や凍結融解ランクが高い厳しい環境であり、劣化していないグループの存在を示した結果であると考えられる。

なお、第3主成分までの累積寄与率は80%を越えているため、第4主成分の影響は小さいものと解釈できる。

(3) 床版への凍結防止剤散布の影響

前項で凍結防止剤散布による地覆への影響を示したが、散布の影響が床版にも同様に表れるとは考えにくい。路面に散布された凍結防止剤が床版へ付着するには、水の流れを伴った薬剤の移動により起きるものと考えられる。そ

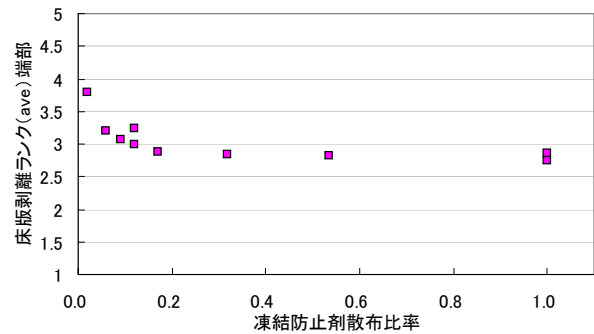


図-15 床版剥離ランク（端部）と散布比率の関係

表-6 床版剥離ランク（端部）の主成分分析結果

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
固有値	1.680	1.040	0.741	0.540
寄与率	0.420	0.260	0.185	0.135
累積寄与率	0.420	0.680	0.865	1
固有ベクトル	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
積雪ランク	-0.803	-0.216	0.052	0.554
凍結融解ランク	0.709	0.291	0.536	0.353
凍結防止剤散布比率	-0.700	0.273	0.583	-0.310
床版剥離ランク(端部)	0.207	-0.913	0.333	-0.111

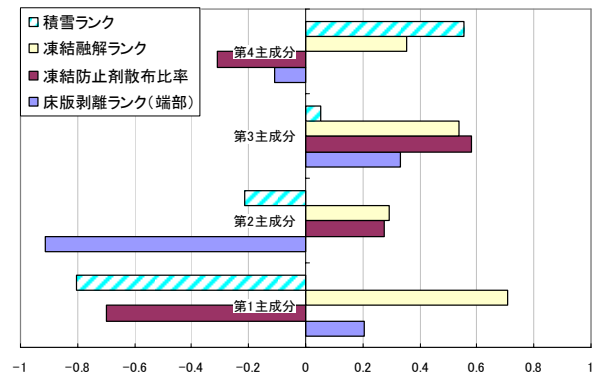


図-16 主成分と固有ベクトルの関係（床版剥離ランク）

こで、床版の点検データより、伸縮装置に近い端部に位置するパネルのみを抽出し、地覆部と同様の検討を行った。床版端部の損傷ランクと凍結防止剤散布比率の関係を図-15に示す。

同図は横軸に凍結防止剤散布比率、縦軸に伸縮装置に近い端部に位置するパネルの床版剥離ランクの平均値をとっており、散布量が多くなるほど、ランクが低下、つまり損傷が進行する傾向が得られた。これにより、凍結防止剤が散布されることによる床版の劣化への影響が証明されたものと考えられる。

地覆と同様に主成分分析による床版端部パネルの解析結果を表-6、図-16に示す。表-6の第1主成分に着目すると、床版剥離ランクはプラスの係数、凍結防止剤散布比率はマイナスの係数を示しており、第1主成分は床版剥離ランクが低く、散布量の高い方が高得点になることを示している。つまり、床版への凍結防止剤散布の影響を地覆同様に示した結果である。

3. 寒冷地における床版の劣化予測

これまで述べてきたように、北海道に架設されている橋梁の効率的な維持管理を行っていくためには、積雪寒

冷地特有の環境条件を考慮した劣化予測が必要不可欠である。しかし、寒冷地特有の環境条件が床版に対してどれだけの作用を及ぼすのか解明には至っておらず、特に複合的な作用の影響度が大きな課題である。そこで、本章ではこれまで述べてきた寒冷地環境が床版へ影響する程度を予測する手法を検討している。

3.1 RC 床版の疲労劣化予測手法^{2),5),6),11),24)}

RC 床版の劣化予測手法として、著者らは松井らの疲労予測式（以下：松井式）²⁾に基づき、BMS へ用いるための予測手法を提案している¹¹⁾。本論文では、文献¹¹⁾の予測手法に加えて、著者らが実橋から測定を行った床版の圧縮強度と、北海道における交通荷重測定データを用いて予測の補正を行っている。また、2 章で述べた寒冷地環境を考慮した予測手法として、松井式を基本として予測を行うものとする。

(1) マイナー則の適用と予測式

RC 床版の疲労には、マイナー則が適用できる。松井らは輪荷重走行試験により得られた S-N 曲線にマイナー則を適用し、疲労寿命の推定を行っている。

輪荷重走行試験より得られた S-N 式を式(2)⁵⁾に示す。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.520 \quad (2)$$

ここに、

P：任意の輪荷重

P_{sx} ：有効幅 B のはりの押し抜きせん断耐力(N)

$$P_{sx} = 2B(\tau_{max} \cdot X_m + \sigma_{max} \cdot C_m)$$

B：はりの有効幅(cm)

$$B = b + 2d_d$$

X_m ：主鉄筋断面の中立軸深さ(cm)

C_m ：主鉄筋の有効高さ(cm)

τ_{max} ：コンクリートの最大せん断応力度(kgf/cm²)

$$\tau_{max} = 0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$$

σ_{max} ：コンクリートの最大引張応力度(kgf/cm²)

$$\sigma_{max} = 0.583 \sigma_{ck}^{2/3}$$

σ_{ck} ：コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)

b：載荷板の配力鉄筋方向の辺長(cm)

d_d ：配力鉄筋の有効高さ(cm)

実橋において荷重 $P_1, P_2, \dots, P_n$ がそれぞれ $n_1, n_2, \dots, n_n$ 回作用する場合、これら全ての荷重による載荷繰返しを、基本となる荷重 P_0 に換算した等価繰返し回数は式(3)で表される。また、式(3)の等価繰返し回数と一定荷重 P_0 によって実験を行った破壊回数 N_f との比が、式(4)に示す疲労寿命 T 年となる。

$$N_{eq} = \sum (P_i/P_0)^m \cdot n_i \quad (\text{ただし } m=1/k) \quad (3)$$

$$T = N_f / N_{eq} \quad (4)$$

ここに、

T：疲労寿命

N_{eq} ：等価繰返し回数

N_f ：S-N 曲線から求める等価破壊回数

$$N_f = 10^{\left\{ \log 1.520 - \log (P/P_{sx}) \right\} \div 0.07835}$$

P_0 ：基本輪荷重

P_i ：作用荷重（ある確率密度関数 $f(p)$ に従う）

P：任意の輪荷重

n_i ：1 年間に作用する輪荷重の総載荷回数

k：log-log 表示された S-N 曲線の傾き

(2) 実橋への適用法

前述の計算式(3)は、実橋における床版支間、載荷される輪荷重等の条件が輪荷重走行試験と同じで、かつ走行車両のタイヤが支間中央の一定点上を通った場合に限定される。しかし、実橋での床版支間は様々であり、通行位置も任意である。そのため、実橋における予測を行うには式(5)⁵⁾に示す各種の影響を考慮した補正を行う必要がある。

$$N_{eq} = \alpha^m \cdot (1+i)^m \cdot (Q_{max}/Q_0)^m \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot N_i \quad (5)$$

ここに、

α ：載荷面積のちがいによる補正係数

i：衝撃係数

m：log - log 表示された S-N 曲線における傾きの絶対値の逆数

Q_{max} ：通常走行時の平均輪荷重通行位置に基本輪荷重を作用させたときの主鉄筋断面に作用するせん断力

Q_0 ：床版支間中央に 1 つの基本輪荷重を作用させたときの主鉄筋断面に作用する垂直せん断力

C_1 ：通行位置による補正

C_2 ：輪荷重頻度分布による補正

N_i ：車両軸数を乗じた単位期間の交通量

(3) モデル橋梁による補正

前項で示した各補正を、実橋全てにおいて行なうことは不可能である。そのため、測定できる項目は測定を行い、測定が困難なデータは推定値を用いることが有用であると考えられる。そこで、モデル橋梁の条件を用いて予測を行うものとし、文献¹¹⁾と同様に文献²⁵⁾の示方書の維持管理例を参考とする。表-7 に予測に用いた床版諸元を示す。

(4) 衝撃の影響

衝撃係数に関しては、現行示方書に示されている衝撃係数 $i=20/(50+L)$ （ただし L は床版支間(m)）の式を用いるものとする。

(5) 輪荷重の影響

輪荷重に関する実橋の交通荷重は、重量交通地域である東海地域等においては、測定報告²⁴⁾⁻²⁹⁾があるが、北海道における交通荷重測定結果報告は少ない。しかし、予測を行う上で輪荷重の影響は無視できないため、本論文では札幌市国道 12 号線に架設されている東橋の交通荷重測定結果³⁰⁾を用いるものとする。

表-7 予測に用いた床版諸元

床版厚		200mm
床版支間		3000mm
配筋	主鉄筋	D19 - 125mm間隔
	配力筋	D16 - 200mm間隔
適用示方書		昭和47年道路橋示方書

3.2 床版の圧縮強度の分布を考慮した劣化予測

3.1 節で説明した予測式(2)~(5)には、鉄筋間隔やかぶりなどの詳細な床版諸元が必要となるため、これまで詳細な諸元を全て用いた松井式の BMS への応用は困難であった。そこで、本論文では松井らによる床版部材の疲労予測式を BMS へ応用する手法を検討するとともに、予測式において、予測結果に大きく作用する床版コンクリートの圧縮強度（以下：床版圧縮強度）を実橋から測

定し、測定値の分布に基づいた、マクロ的な床版の疲労劣化予測手法を検討した。

(1) 床版圧縮強度の推定方法

前述のように、松井式に用いられる橋梁諸元の中でも予測に大きな影響を及ぼすのが床版圧縮強度であり、予測精度向上には必要不可欠なファクターである。そこで、本論文ではこの床版圧縮強度を簡易的に推定できる手法としてシュミットハンマーを用いた測定をこれまで行ってきた³¹⁾。具体的な測定方法としては、床版下面のコンクリートをシュミットハンマーで打撃し、その反発度から床版コンクリートの圧縮強度を推定するというものである。測定から得られた反発度からの強度推定式としては、何種か提案されているが、本論文では測定値の補正が容易であることから日本材料学会式(6)³²⁾を用いて圧縮強度を推定している。

$$F = \alpha \cdot [13 \cdot \{R_0 + (R_1 + R_2)\} - 184] \quad (6)$$

F：圧縮強度(kgf/cm²)

α ：材令補正值

R₀：シュミットハンマーの反発度

R₁：含水状態の補正值

R₂：打撃角度の補正值

(2) 床版圧縮強度の測定結果

これまでに蓄積した圧縮強度値の測定橋梁数は、道東地域を中心とした国道橋約 250 橋である。その測定値の分布を図-17 に示す。同図の縦軸は圧縮強度測定値、横軸は測定対象橋梁の供用年をとっている。図から、圧縮強度値はほぼ均等にばらついているのがわかる。これは、測定橋梁毎に構造形式が異なることや、シュミットハンマー自体の精度によるばらつきなど様々な要因が作用し、幅広い範囲を持ちばらつく結果となったと言える。しかし、このばらつきが生じることを想定して予測に用いることは可能であり、本論文では強度の分布を構造形式別に分類し、正規分布と仮定することで、予測への適用を図る。

(3) 圧縮強度測定値の分類

前項で示したように、測定した橋梁毎に構造形式が異なるため、測定値は橋梁種別や形式毎にばらつくことが考えられる。そこで、測定値を測定橋梁の上部形式別に分類するものとした。強度の違いを考慮した分類法として、まずコンクリート橋と鋼橋の2種類に大別できる。

次に上部形式であるが、鋼橋では表-8 に示した適用示方書の変遷からもわかるように、合成桁と非合成桁で大きく強度の規定が異なる。さらに、プレストレスの場合は基準強度が 30N/mm² 以上と規定されていることから、この示方書の規定に基づき、測定橋梁を鋼橋の場合は合成と非合成に分類し、コンクリート橋の場合は RC 構造と PC 構造に分類するものとした。それぞれ分類した測定値のばらつきを表す統計値を表-9 に示す。

ここで、床版圧縮強度の測定を行った橋梁に関しては、その測定値から疲労予測を行うことが可能となるが、測定を行っていない橋梁に関する予測は不可能である。また、北海道内に架設されている橋梁全てにおいて圧縮強度の測定を行なう事も労力を伴い、非常に困難である。しかし、シュミットハンマーによる測定は測定の簡易性からも有用であり、コアを抜いて行う圧縮強度試験と比較しても、実橋の圧縮強度を推定するための現実的な手

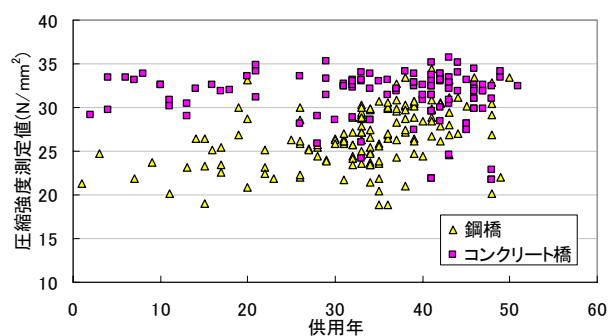


図-17 圧縮強度測定値分布図

表-8 適用示方書の変遷³³⁾

年・月 (西暦)	道路橋示方書	床版コンクリート σ_{ck} (N/mm ²)
S48・2 (1973)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	非合成>21 合成>28 プレストレス>30
S55・2 (1980)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	非合成>21 合成>27 プレストレス>30
H2・2 (1990)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	同上
H6・2 (1994)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	非合成>21 合成>27 プレストレス>30
H8・12 (1996)	道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	同上

表-9 シュミットハンマーによる測定結果統計値

	測定橋梁 全体	コンクリート橋		鋼橋	
		PC床版	RC床版	合成	非合成
平均値	28.6	31.8	29.9	27.5	24.5
標準偏差	3.9	2.5	3.7	3.4	2.0
最小値	18.9	22.8	21.7	18.9	21.3
最大値	35.7	35.7	33.8	34.4	26.7
標本数	250	85	34	91	11

法であると考える。

そこで、本論文では BMS への応用を目的とした予測手法を検討していることから、これらの測定結果を基に全ての橋梁を対象としたマクロ的な予測を行うために、構造形式毎に分類した4通りのデータそれぞれが表-9 に示した統計値を持つ正規分布であると仮定した。シュミットハンマーによる測定結果は、その測定値自体がある程度の誤差を含んでいることが考えられるため、その誤差や測定橋梁の構造上のばらつきを考慮するために、確率的に取り扱うものとする。これは、健全なコンクリートの圧縮強度の確率分布は正規分布することが想定されるためである。実際に本測定から得られた圧縮強度測定

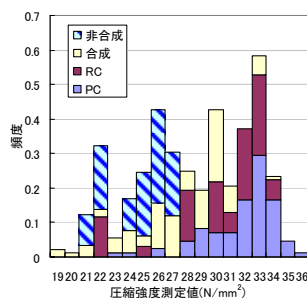


図-18 測定値頻度分布

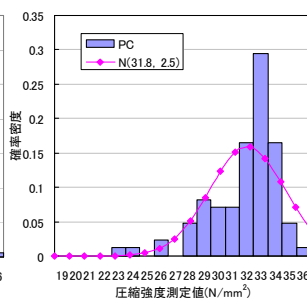


図-19 正規分布との比較

値の頻度分布を図-18 に示す。同図は縦軸に測定値の頻度を、横軸に測定圧縮強度値をとっており、性質の異なるいくつかの分布が重なり合っていると思われる分布形状をしている。これは鋼橋とコンクリート橋、PC 構造といった複数の構造形式が混在しているためであると考えられる。また、比較として図-19 にコンクリート橋 PC 構造に分類される測定値のヒストグラムと測定値の結果から得た統計値による正規分布の確率密度を示す。測定値は正規分布と若干異なる分布を示している。分布の形状に関しては、前述の通り測定数を増やし検討が必要である。そこで、本論文では測定値を構造形式別に分類し得られた統計値や分布に基づき、それらを圧縮強度の取りうる範囲、つまり予測結果の範囲として用いるものとする。予測手法や予測結果に関しては、次項(5)に記載する。

(4) 予測結果と点検データの比較方法^{1),11)}

著者らは疲労予測結果との比較手法として、松井らのひび割れ密度による劣化度判定法¹⁾を用いた手法を提案している¹¹⁾。本論文でも予測結果と点検データの比較には同手法を用いて行っている。3.1 節で述べた疲労劣化予測の対象となる指標は、等価に換算した繰返し回数であり、破壊回数と累積走行回数の比で劣化度を評価している。一方で、比較に用いた点検ランクはひび割れ密度を対象に劣化度を判定している^{13),34)}。両者を比較するには、両者の判定基準を同一にする必要がある。

点検要領(案)ではひび割れの点検ランクを判定するためのひび割れ密度の目安が示されている。松井らは車両走行比とひび割れ密度の関係を示している。点検ランクは、このひび割れ密度を用いて、劣化度との関連付けを行っている¹¹⁾。

(5) 圧縮強度分布を用いた予測結果と点検データの比較

床版圧縮強度の測定を北海道に架設されている全ての橋梁において行うことは不可能であるため、約 250 橋の実測値を基に、強度の分布を予測の範囲として適用した。

H 建設部における鋼橋合成桁の橋梁の予測結果例を図-20 に示す。同図は縦軸に疲労劣化度を示す累積 N_{eq} と N_f の比をとっており、この値が 1 に達した場合、床版が疲労破壊することを意味している。また、横軸には予測における累積の通過台数を示し、プロットした点検データにおいては対象橋梁の日平均大型車交通量に供用日数を乗じて算出した供用開始からの累積大型車通過台数をとっている。図中 ave の曲線が表-9 に示した圧縮強度の平均値による予測結果であり、high が中心値から誤差を考慮した強度の上限値と low が下限値の予測結果である。上限値と下限値に際しては、強度の平均値から標準偏差

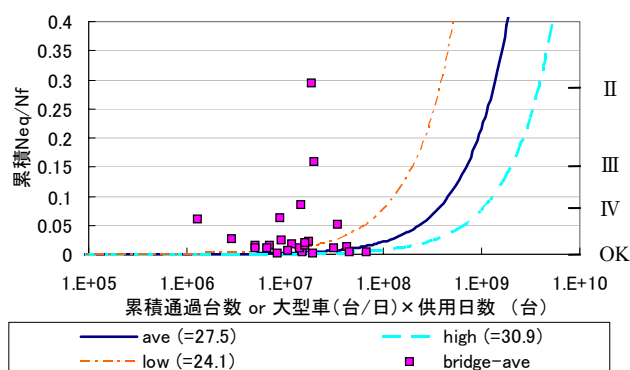


図-20 H 開発建設部における予測結果(鋼橋合成桁)

を増減した値を設定して用いている。

なお、プロット (bridge-ave) は H 開発建設部に架設されている橋梁の鋼橋合成桁のみを抽出し、各橋梁の床版ひび割れの点検ランクを橋梁毎に平均したランクを図中右軸(点検ランク)上にプロットしている。この結果、点検データは予測よりも危険側に分布しているものが多く、疲労以外の要因による影響を受けた可能性を示す結果であると言える。特に H 開発建設部は、海岸近傍地域に位置しており、交通量の多い路線が多数存在しているため、海からの飛来塩分や凍結防止剤散布による塩害の被害を受けているものと推察される。

以上の結果をふまえ、強度による分布だけではなく、本論文で検討した環境条件の影響を予測に考慮して評価する必要があるものと考えられる。

3.3 降雨を考慮した床版の劣化予測

(1) 床版への水の影響

実橋床版における水の影響は、2 章で述べたように劣化との関連性やその影響度に関しても様々な報告がなされている^{17),18)}。また、実橋における水の供給はほぼ降雨によるものであると考えられる。そこで、本論文ではこの降雨の影響を疲労による水の供給として考慮し、水の影響として評価している。RC 床版の疲労においても水の影響は甚大であり、その影響は松井らにより報告されている。松井らは水の影響の検証として、輪荷重走行試験を水張り状態の RC 床版供試体で行った結果、疲労寿命が約 1/40 に低下したとされている^{17),18)}。

本論文では、この疲労劣化への水の影響を実橋における水の供給、すなわち降雨に置き換えて検討している。具体的には、松井らの水張り状態の試験では供試体床版上に常時 1~2mm の水を張っている状態で試験を行っていた¹⁷⁾。本論文では、床版がこの水張り状態と同じ環境の降雨状態になる年間累積雨量を水張り年降水量とする。そこで、水張り年降水量は最大日降水量が 24mm/day 以下になるように調整して、これを累積し年降水量とした。ここで日雨量 24mm は、時間雨量 1mm が 24 時間継続した場合の雨量に相当する。時間雨量は大きく変動する事が考えられるが、路面上に降雨が滞水する時間や舗装から雨水の浸透する時間など不明な点が多いため、本論文ではこのように仮定した。この仮定に基づき、以下の計算により降雨の影響度を求めた。

$$\begin{aligned} & \text{水張り年降水量 } 1300\text{mm} \text{ の地点に架設されている場合} \\ & [1300\text{mm}/(365\text{days} \times 24\text{hour} \times 1\text{mm})] \times 40 \\ & = (1300\text{mm}/8760\text{mm}) \times 40 \\ & = 0.148 \times 40 = 5.94 \div 6.0 \end{aligned}$$

つまり、水張り年降水量 1300mm の地域に架設されている橋梁に関しては、降雨による影響により、疲労寿命が約 1/6 に低下するものとした。架設地域の水張り年降水量と松井らの試験を想定した降雨条件の比により、疲労寿命の低下率を求めている。なお、本論文では疲労寿命が 1/40 に低下した事例を参考にしているが、この低下率は適用する示方書によって異なるものと考えられるため、今後検討すべき課題である。なお、予測結果に関しては次項(2)に記載する。

(2) 降雨の影響を考慮した予測結果と点検データの比較

前項で説明したように、床版への水の影響は松井らの報告に基づき、応用している。得られた予測結果と点検

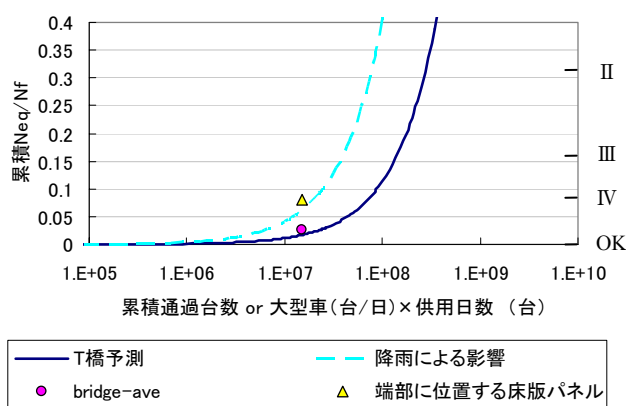


図-21 降雨による影響を考慮したT橋予測結果

データの比較の一例として、T橋における予測を図-21に示す。同図は3.1節と同様に、横軸に対象橋梁の供用開始からの累積大型車通過台数をとっており、縦軸には疲労劣化度を示す累積 N_{eq} と N_f の比をとっている。また、図中のbridge-aveプロットは橋梁点検によって得られた床版ひび割れの損傷ランクを橋梁全体で平均化した指標である。図中の実線が通常の予測結果を示しており、破線が降雨による影響を考慮した予測結果である。

この結果から、実橋の損傷は通常の予測結果と降雨による影響を考慮した予測結果の中間にプロットされており、予測自体の妥当性を示す結果であると思われる。しかし、降雨による影響を考慮した予測結果は、実橋の損傷よりも危険側（図中左側）に推移している。これは、降雨による水の影響を最も受ける端部に位置するパネルのような最も厳しい予測評価であることが要因として挙げられる。つまり、図中のプロットは橋梁全体のランクを平均化して用いているために、最も損傷の進行しているパネルよりも、ランクが高い（健全な）方に引っ張られたものと考えられる。その裏づけとして、T橋の端部に位置するパネルのランクのプロット（図中三角）は、降雨による影響を考慮した予測結果と概ね一致している。このことから、床版において予測を行う場合、パネル単位で予測を行い、そのパネルの位置によって予測曲線を補正する必要があると考えられる。

3.4 寒冷地環境を考慮した床版の劣化予測

(1) 凍結融解作用による影響

凍結融解作用による影響を考慮した劣化予測手法としては、相対動弾性係数を用いた凍害による劣化の評価手法³⁵⁾や、供試体を用いた凍結融解試験による耐凍害性に関する試験結果が報告されているが³⁶⁾、本論文では2.3節で述べたように凍結融解作用を促進させる冬期の水の供給を係数化した湿潤係数を用いて、評価を行った。近年、塩分を含んだ水が凍結融解作用（凍害）を促進させるとの報告事例¹⁴⁾もあり、凍結融解作用による影響を考える上で水の供給が重要な意味合いを持つものと考えられる。したがって、本論文では凍結融解作用の影響を冬期の水の供給（湿潤）時間の増加として考慮する。

(2) 凍結防止剤による融雪水の影響

凍結防止剤散布の劣化への影響に関しても、2.4節に点検データに基づく影響を示した。凍結防止剤には、塩化物イオンが含まれており、床版劣化のメカニズムとしては鉄筋腐食への影響として表れることが予想される。し

かし、現状では鉄筋腐食への影響として、塩化物含有量などによる検討が必要であるが、未だ疲労と塩害の複合的な劣化メカニズムの評価には至っていないため、凍結防止剤散布の影響を次に示す手法で予測に対して考慮している。

凍結防止剤散布の影響に関しても、凍結融解作用と同様に、散布により路面で圧雪状態にある積雪が溶け出し、水の供給量が増加するものとして、劣化予測へ適用する。この水の供給の増加分としては、冬期期間の気温が0度以下を観測時、つまりマイナスの気温である時の降雪量を集計し、その間に記録した降雪を増加分とみなしている。したがって、凍結防止剤散布により冬期の降雪は全て融解し水となったものと仮定している。

(3) 寒冷地環境を考慮した予測結果

図-22に前項で述べた仮定を基に、凍結融解作用と凍結防止剤散布による融雪水の影響を考慮した予測結果を示す。同図は、これまで示した予測結果と同様の軸をとっており、それぞれ通常の予測結果、降雨による影響、融雪水による影響を考慮した各予測を示す。なお、既設橋から切り出したRC床版に関して輪荷重走行試験を行った既往の研究¹⁸⁾では、初期乾燥ひび割れの影響により、約15%静的耐力が減少すると報告されている。したがって、本予測においても、初期乾燥ひび割れの影響を考慮した予測結果を付記している。この結果から、凍結防止剤散布によって融解した水の影響は床版の生涯寿命に換算すると、微々たる影響であることがわかる。しかし、散布による影響は溶け出した融雪水の影響よりも、含有している塩化物イオンによる影響が主たるものであると考えられる。そのため、この塩化物イオンによる鉄筋腐

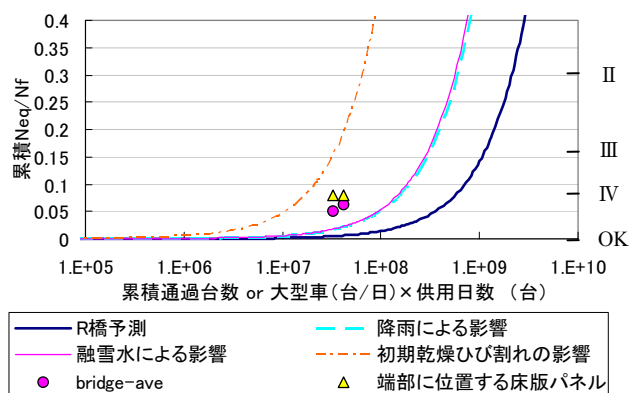


図-22 融雪水による影響を考慮したR橋予測結果

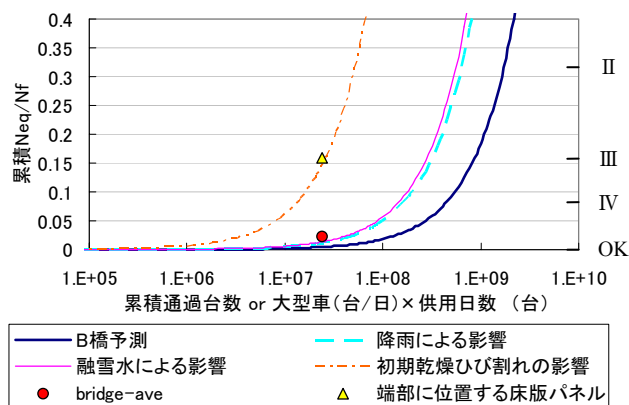


図-23 融雪水による影響を考慮したB橋予測結果

食などの塩害をどう評価していくのが今後の検討課題である。

また、R 橋との比較として、B 橋の予測結果を図-23 に示す。この B 橋は、R 橋とはほぼ同様の環境条件に架設された橋梁である。降雨や降雪といった気象条件は、同等の値であると同時に、シュミットハンマーにより測定した床版圧縮強度に関しても、両者の差は僅か（約 1N/mm^2 ）であり予測のパラメータの観点や作用する環境条件からも、ほぼ等しい橋梁であると言える。しかし、両者の予測結果を比較すると、橋梁全体の床版パネルの損傷ランクを平均化した **bridge-ave** プロットは R 橋の方が、若干ではあるが、劣化の進行を示す結果となった。これは、B 橋が地方に架設された橋梁であり、交通量が少ない路線であるのに対し、R 橋は比較的、大きな都市近郊に架設された橋梁であり、交通量も B 橋の倍近い路線であることが要因であると考えられる。2.4 節で述べたように、凍結防止剤散布量と交通量は相関があり、交通量が多い路線ほど、散布量は多くなるものと推察される。そのため、B 橋に比べ、交通量の多い路線に架設されている R 橋は相対的に凍結防止剤が多く散布されており、その影響が表れたものではないかと考えられる。本来であれば、散布量の多い地域と少ない地域における比較を行い、検討を加えるべきであるが、著者らが床版圧縮強度の測定を行った橋梁群は、散布量の少ない地域に位置していたため、今後の検討課題である。

4. 結論

本研究では道路橋 RC 床版を対象として、これまで蓄積されてきた橋梁点検データに基づき、積雪寒冷地である北海道の環境条件を考慮した床版劣化の検討を実施するとともに、それらの結果を BMS へ応用することを目的として、各影響因子の床版に対する影響度を解析した。さらに、得られた環境条件の劣化への影響度を用いて、著者らがこれまで検討を行ってきた予測式への適用を試みた。得られた結果および考察のまとめを以下に述べる。

- (1) 橋梁周辺の水分値測定結果から、表層水分値が高い部位に関して、損傷との相関が見られ、実橋において損傷の発生と水分量の関係を結びつけることができた。
- (2) 実橋環境での温湿度測定結果と部材の表層水分値の関係として、温度との相関がやや見られ、湿度との相関はそれほど得られなかった。しかし、この関係に関しては十分なデータを用いてさらなる検討が必要である。
- (3) 凍結融解作用による劣化への影響を、北海道で蓄積されてきた点検データを用いることで、凍結融解作用を促進する冬期の水の供給量との関連を得ることができた。
- (4) 凍結防止剤の部材への影響を、開発建設部毎の散布実績に基づいた散布比率と蓄積された地覆の点検結果、床版の端部に位置するパネルの点検結果を基に、関連付けた。
- (5) シュミットハンマーによる約 250 橋の実橋床版圧縮強度の測定結果を基に、構造形式別の強度の確率分布を得た。

- (6) 強度測定結果から得た確率分布を基に疲労予測を行った結果、疲労予測の範囲を示すことができた。また、実橋の点検結果との比較を行った結果、環境因子によってより大きな劣化が発生することを示した。
- (7) 寒冷地特有の環境条件である、凍結融解作用や凍結防止剤散布の影響を、融解する水の影響として床版の予測に考慮することを提案した。しかし、そのメカニズムに関しては解明できていないため、今後検討が必要である。

最後に今後の課題として、更なる予測精度の向上のためには次のようなデータの蓄積が必要である。実測例が少ない寒冷地北海道における実交通荷重測定データと、本論文で示した実橋床版の圧縮強度の蓄積が重要である。寒冷地特有の劣化影響因子である凍結融解作用、凍結防止剤の影響を促進させる実橋床版への水の供給メカニズムの解明が必要不可欠と考える。

謝辞

本研究を行うにあたり、株式会社フジエンジニアリング 松本正信氏、大阪工業大学松井繁之教授に大変有益なアドバイスを頂きました。本論文をまとめるにあたり、樋口匡氏(トピー工業㈱)、岩渕直氏(㈱構研エンジニアリング)には、多くのご助力を賜りました。ここにお名前を掲載させていただき、感謝の意を表します。

また、本研究は平成 18 年度文部科学省科学研究費(代表者 大島俊之)の補助を受けて行われました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松井繁之、前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案、土木学会論文集 No.374/ I -6, pp.419-426, 1986.
- 2) 松井繁之、小島敬克、島田功、清水誠一、福井降晴、福田収、前田昌俊：RC 床版の耐荷力と耐久性、土木学会関西支部昭和 60 年度講習会テキスト「既存橋梁の耐荷力と耐久性」(委員長 前田幸雄), pp.25-116, 1985.
- 3) 角田与史雄、藤田嘉夫：RC 床版の疲労押し抜きせん断強度に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第 317 号, pp.149-157, 1982.
- 4) 鉄筋コンクリート床版疲労設計委員会：鉄筋コンクリート床版の損傷と疲労設計へのアプローチ、土木学会関西支部, 1977.
- 5) 阪神高速道路公団：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性、阪神高速道路管理技術センター, 1991.
- 6) 内田賢一、西川和廣：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討、第 1 回 鋼橋床版シンポジウム講演論文集、土木学会, pp.37-42, 1998.
- 7) 鋼橋床版の調査研究小委員会編：道路橋床版の新技術と性能照査型設計、土木学会 鋼構造委員会, 1998.
- 8) 土木学会誌特集：社会資本へのアセットマネジメント導入に向けて、Vol.89-8, 土木学会誌, pp.9-47, 2004.
- 9) 宮本文穂、串田守可、足立幸朗、松本正人：Bridge Management System (BMS) の開発、土木学会論文集, No.560/VI-34, pp.91-106, 1997.
- 10) 大島俊之、三上修一、丹波郁恵、佐々木聡、池田憲二：橋梁各部材の資産的評価と橋梁健全度指数の解

- 析, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp.53-65, 2002.
- 11) 佐藤誠, 大島俊之, 三上修一, 樋口匡: 点検データに基づく床版劣化の推定とBMSへの応用, 構造工学論文集, Vol.51A, pp1147-1155, 2005.
 - 12) 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, pp1157-1167, 2005.
 - 13) 建設省土木研究所: 橋梁点検要領(案), 土木研究所資料, 第2651号, 1988.
 - 14) 小尾稔, 田口史雄, 嶋田久俊: 路面凍結防止剤がコンクリート橋の塩害, 凍害に及ぼす影響, 寒地土木研究所月報, No.635, 2006.4
 - 15) 鳥居和之, 奥田由法, 松田康孝, 川村満紀: 凍結防止剤の影響を受けたASR損傷コンクリート橋脚の調査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.173-178, 1998.
 - 16) 気象庁: 電子閲覧室, <http://www.data.kishou.go.jp/>
 - 17) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート年次論文報告集, 9-2, pp.627-632, 1987.
 - 18) 石井孝男, 谷倉泉, 庄中憲, 國原博司, 松井繁之: 23年供用したRC床版の損傷実態・残存寿命と維持管理との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No.537/I-35, pp.155-166, 1996.4.
 - 19) 竹田俊明, 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 岩渕直: ACMセンサを用いた鋼桁塗装劣化予測手法の検討, 構造工学論文集, Vol.51A, pp1129-1138, 2005.
 - 20) 松村光太郎: 気象観測データを考慮したコンクリートの含水変化の推定, コンクリート工学年次論文集, pp527-532, 2003.
 - 21) 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会: 北海道における鋼道路橋の設計および施工指針, 北海道土木技術会鋼道路橋研究委員会, 1995.
 - 22) 富板崇, 浜幸雄, 田畑雅幸, 鎌田英治: コンクリートの凍害を対象とした気象環境評価の一提案, 自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, pp.279-284, 1993.
 - 23) 長谷川寿夫, 藤原忠司: 凍害, コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 技報堂出版, 1998.2
 - 24) 松井繁之, El-Hkaim: RC床版のひび割れの開閉量による輪荷重の測定に関する研究, 構造工学論文集, Vol.35, pp407-418, 1989.
 - 25) 土木学会コンクリート委員会: 2001年度制定コンクリート標準示方書[維持管理編], 土木学会, 2001.
 - 26) 西川和廣, 村越潤, 宮崎和彦: 橋梁を用いた車両重量の計測(WIN)システムの開発, 土木技術資料 38-1, pp.8-9, 1996.
 - 27) 小塩達也, 山田健太郎, 深津伸: BWINによる大型車両の実態調査と橋梁の疲労損傷度評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1055-1062, 2002.
 - 28) 米田昌弘, 板元勝哉: GAを適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.755-765, 2003.
 - 29) 石井孝男, 篠原修二: 東名高速道路の交通荷重測定と荷重特性について, 土木学会論文集 No.453/VI-17, pp.163-170, 1992.
 - 30) 三田村浩, 安達優, 石川博之: 橋梁床版を用いた車両軸重測定と測定データから推定した床版の残存寿命, 寒地土木研究所月報, No.637, 2006.6.
 - 31) 鈴木広大, 大島俊之, 三上修一, 山崎智之, 佐藤誠, 竹田俊明: 床版の圧縮強度分布と簡易疲労劣化予測手法の研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第62号, I-35.
 - 32) シュミットハンマーによる実施コンクリートの圧縮強度判定方法指針(案), 日本材料学会, 1958.
 - 33) 多田宏行: 橋梁技術の変遷 道路保全技術者のために, 鹿島出版会, 2001.
 - 34) 松井繁之, 大田孝二, 西川和廣: 既存橋梁床版の維持管理(その1), 橋梁と基礎, vol.32, No.1, 1999.
 - 35) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造構造物の耐久設計施工指針(案)・同解説, 2004.3.
 - 36) 洪悦郎: コンクリートの凍結融解試験方法, コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp29-32, 1985.3.

(2006年9月11日受付)