

## 11.6 積雪寒冷地における土木施設のマネジメント手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：寒地道路保全チーム

寒地構造チーム

研究担当者：田高 淳、石田 樹、丸山記美雄、金子雅之  
石川博之、西 弘明、三田村浩、佐藤 京

### 【要旨】

積雪寒冷環境下での舗装や橋梁構造物の部材の劣化傾向を的確に予測し、それらの維持修繕・補強を予防保全の観点から戦略的に行い、ライフサイクルコストを低減する技術が必要不可欠である。本研究では、積雪寒冷地における舗装構造体および橋梁構造物の健全度評価と劣化を精度よく予測する手法と、維持修繕費などの道路管理者費用と道路利用者費用のライフサイクルコスト(LCC)解析等により最適な維持修繕・補強計画シナリオを提供するためのシステムを構築することを目的とする。

舗装マネジメントに関しては、劣化予測手法に関して最新の路面性状データを用いて重回帰分析により路面性状値の予測精度を向上させた。また、積雪寒冷地における排水性舗装に対して、路面損傷程度を評価する手法を提案した。さらに、舗装の予防的修繕工法の効果に関する調査を行うとともに、予防的修繕工法を適用した場合の将来予測機能と補修年度計画立案機能を有するシステムを現場担当者向けに改良した。

橋梁マネジメントに関しては、健全性評価について橋梁定期点検結果を用いて数量化し、それを基にした劣化度推定とマルコフ遷移確率を基にした劣化予測手法をとりまとめるとともに、輪荷重走行試験による RC 床版の余寿命予測に関する研究成果を活用した、RC 床版の経験的劣化曲線の提案を実施した。さらに、補修・補強に関する機能回復度や劣化推移に関する実験的検討により、補修・補強による延命化の効果を明確にするなど予防保全として最適な維持修繕・補強計画シナリオの提供のためのとりまとめを実施した。

キーワード：舗装マネジメント、劣化予測、ライフサイクルコスト、優先順位、橋梁維持管理システム（BMS）、  
予防保全型補修、事業計画

### 1. はじめに

厳しい経済状況の下で公共事業の一層のコスト縮減と品質を確保するには、その地域の条件にあった技術を用い、規格を適切に設定することが必要である。供用中の橋梁をはじめとする道路構造物の多くは高度経済成長期に建設され、建設後数十年を経過していることから、今後維持管理費が急増することは明らかであり、これまで以上に効率的な維持管理が求められる。また北海道は全国的にみて極めて特殊な気象特性をもつため、土木施設の維持管理を行う場合、積雪寒冷環境下に対応した特有の技術が求められる。たとえば舗装では凍結融解作用、凍上、低温クラック等、橋梁では凍害、塩害といった積雪寒冷地特有の劣化要因の影響を受けるため、これらに対応した技術が求められる。今後より効率的に道路施設を保全してゆくためには、積雪寒冷環境下での劣化傾向を的確に予測する手法と、それらの維持修繕・補強を予防保全の観点から戦略的

に行い、LCC を低減する技術が必要不可欠である。本研究では、積雪寒冷地における舗装構造体および橋梁構造物の健全度評価と劣化を精度よく予測する手法と、維持修繕費などの道路管理者費用と道路利用者費用の LCC 解析により最適な維持修繕・補強計画シナリオを提供するためのシステムを構築する。

### 2. 調査研究の手法

#### 2.1 健全度評価・劣化予測手法の開発

##### 2.1.1 舗装劣化度予測手法の開発

前年度までに、平成 11 年から 18 年までの路面性状調査データを用いて、ひび割れ、わだち掘れ量、平坦性の予測式を作成しているが、平成 20 年度は、予測精度の更なる向上が必要と考えられたひび割れ率予測式に絞って精度向上のための検討を行った。

##### 2.1.2 排水性舗装の路面損傷程度評価手法の検討

積雪寒冷地における排水性舗装路面の損傷形態は

骨材飛散やポットホールが大半を占めるため、ひび割れ率やわだち掘れ量などの従来の評価指標によって損傷状態を評価することが難しい。そこで、現場調査と道路管理者への調査等を実施し、積雪寒冷地の排水性舗装に対して有効な路面評価指標を検討した。

### 2.1.3 RC床版の劣化推移に関する実験的検討

昨年度までに構築してきている橋梁維持管理システム(CBMS: Civil Engineering Research Institute Bridge Management System)<sup>1)</sup>における劣化予測は、平成14年までの橋梁点検結果を基に統計的に確率論で算出する手法であるため、その精度は母集団に大きく影響される。劣化予測精度の向上を図るためには、データの蓄積を待たなければならない。また、橋梁の利用状況による分類分けを行い、分析するなどのケース別検討が必要となる。そこで、平成20年度は、確率論によらず劣化予測が可能な部材に着目し、劣化予測精度向上のための検討を実施した。

## 2.2 補修補強シナリオの検討

### 2.2.1 舗装予防的修繕工法に関する検討

舗装の維持管理において、シール材のクラック注入や切削工法を適用し、一定期間(3年程度以上)同工法の効果を持続させることによって舗装を延命し、コスト縮減を図ろうとするのが予防的修繕工法である。平成18年度に現道においてシール材注入工法と切削工法を施工した箇所において、追跡調査結果を実施し、積雪寒冷地における予防的修繕工法の適用性、舗装の延命化の効果及び耐久性について検討した。

### 2.2.2 橋梁補修・補強の機能回復度と劣化推移に関する実験的検討

橋梁の現況のみならず、補修や補強した際の橋梁の力学的機能の回復や劣化推移は、利用する材料や工法によって異なることは、容易に想定できる。しかしながら、それらの機能回復度や劣化推移は、促進試験等の実験的検討が安価で容易に出来る場合以外は、実構造物の調査結果を待たなければならない。

そこで、平成20年度は、補修や補強の対応が多いRC床版の補修・補強後の劣化予測の精度向上を目的にRC床版の劣化促進実験により、機能回復度や劣化推移について検討を行った。

### 2.2.3 橋梁補修優先順位付けに関する検討

補修事業計画の立案においては「予防保全型」で補修を行うのがLCCの低減につながる事が既往の検討などから明らかである<sup>2)</sup>。これまでの対症療法型から予防保全型に移行した場合、健全度を高い水準で推

移させることになるため、移行初期に多くの補修計画が立案され、予算を大幅に超えることが想定される。厳しい財政状況を鑑みると、優先的に補修をすべきものと後回しにするものを選定する必要性が生じる。CBMSでは事業計画機能のシミュレーションにより補修時期を変更することは可能であるが、補修橋梁を選定するには複雑に連鎖している機能性や重要度を比較する必要があるため、明確な選定根拠を示すことは容易ではない。そこで、事業計画における補修橋梁の選択支援機能として、機能的な面から客観的に橋梁を評価し、補修の優先度に対する定量化が必要となる。

これまでに橋梁構造物の重要度による補修の検討<sup>3)</sup>や管理者の視点に立った重要度評価方法を検討してきた。今年度は、ユーザーの視点を考慮するための調査方法として、AHP(Analytic Hierarchy Process)を用いたアンケート調査を実施すべく重要度設定の比較項目の検討をするために予備アンケート調査を行った。

## 2.3 マネジメントシステムの改良

### 2.3.1 舗装マネジメントシステムの検討・改良

前年度までに作成したシステムを基に、予防的修繕工法に関する現場調査結果を基に、積雪寒冷地に適した予防的修繕工法の適用方法を考慮した修繕箇所選定や修繕計画策定、および将来の路面性状予測ができるよう、前年度までに作成したシステムに改良を加えた。

### 2.3.2 橋梁マネジメントシステムの改良

CBMSに、本格的な運用を考慮した事業計画作成のための橋梁健全度評価、劣化予測、補修事業計画予算等をまとめてレポート形式に出力する機能を追加するとともに、実験結果より整理したRC床版の劣化予測手法について、多くの点検結果と比較評価を行うための機能を追加し、実運用に向け精度向上を図る管理者機能を改良として追加した。

## 3. 調査研究の成果

### 3.1.1 健全度評価・劣化予測手法の開発

#### 3.1.1 舗装劣化度予測手法の開発

現行のひび割れ率予測式および、昨年度作成したひび割れ率予測式は、ひび割れ率が0~1%程度と小さい場合の予測精度が低いことが問題であると考えられた。そこで、ひび割れ率が1.2%以下のデータはべき乗式で、ひび割れ率が1.2%以上のデータは単回帰式または重回帰式で予測を行う手法について検討を進めた。改良した予測式を用いて3年後のひび割れ率を計算した予測値と、測定値の差が±1mmの範囲内に含まれるデー

タ割合を的中率と定義して検討を行った。的中率を表-1に、予測誤差の度数分布を図-1に示す。現行のひび割れ率予測式に比較して、今年度改良したひび割れ率予測式は予測精度が若干向上していることが表-1から分かる。また、図-1からは、改良した予測式によって、誤差0付近のデータ数が多くっており予測精度が改善していることが分かる。しかし、大局的に見ればひび割れ率の的中率は高いとはいえ、特定の式で予測を行うことが困難な性質があると認識する必要がある。

表-1 的中率および平均ひび割れ率結果

		計	平均ひび割れ率
現行式	データ件数	13,121	4.25
	的中率	45.0%	
改良予測式 (べき+単回帰)	データ件数	14,106	4.01
	的中率	48.4%	
改良予測式 (べき+重回帰 (交通量))	データ件数	14,102	4.02
	的中率	48.3%	

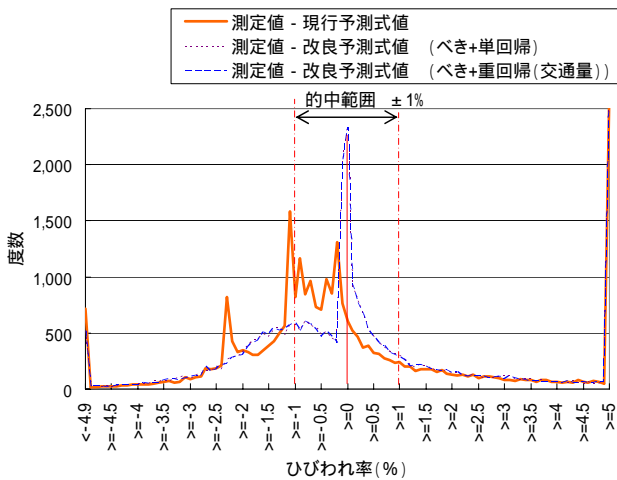


図-1 予測誤差の度数分布図

### 3.1.2 排水性舗装の路面損傷程度評価手法の検討

排水性舗装の場合、損傷形態の大半を占めるのが骨材飛散やポットホールであるため、その維持的対処法として密粒度アスファルト混合物等によるレール状のパッチングが行われることが多い。そこで、評価を行う路面の全面積に対して密粒度混合物で補修が実施されている面積の割合を補修面積率と定義し、この指標で路面の損傷程度を評価することを考案した(式(1))。

$$\text{補修面積率(\%)} = \frac{\text{密粒度混合物で補修されている面積}(m^2)}{\text{評価を行う路面の全面積}(m^2)} \quad (1)$$

排水性舗装が損傷したために切削オーバーレイが実施される予定の区間(以下、補修対象区間)に対して補修面積率を算出した結果を図-2に示す。補修面積率は補修対象区間Aでは約7%、補修対象区間Bでは20%前後となっている。特に補修対象区間Bでは、H17年調査からH18年調査までの間に補修面積率が大きく増加し損傷が進んでいる。前年度に切削オーバーレイ済み区間の補修面積率は0%であり、補修面積率は排水性舗装の損傷程度に対応していると考えられる。また、補修面積率と路面騒音レベルの関係は、図-3に示すように補修面積率が高いほど騒音レベルは高くなる相関関係にある。これらのことから、補修面積率は排水性舗装の路面損傷評価の指標として有効と考えられる。

次に、補修面積率と補修判断との関係を検討した。車両からの目視調査によって評価者が定性的に評価したランク評価(A~C)に対し、補修面積率の数値範囲を対応させた結果を図-4に示す。この結果から、補修面積率と修繕の要否判断は相関関係があり、ランクA(健全な状態-補修の必要がない状態)の定性的な定義に対し、目視評価者は補修面積率0~35.6%の範囲をランクAと評価し、また、17.6~40.2%の範囲をランクB(少し悪い状態-3年後には補修が必要となる状態)と評価していることがわかる。また、セマンティック・ディファレンシャル法(SD法)によって、道路管理者10名、コンサルタント関係者10名を対象とした調査を行った結果、補修面積率は振動苦情と平坦性および走行性に関わる評価と関係が高いことや、補修面積率と修繕実施までの予想年数には図-5に示すような相関関係があることがわかった。以上のことから、補修の要否を判断する上でも補修面積率が有効であることが確認できた。

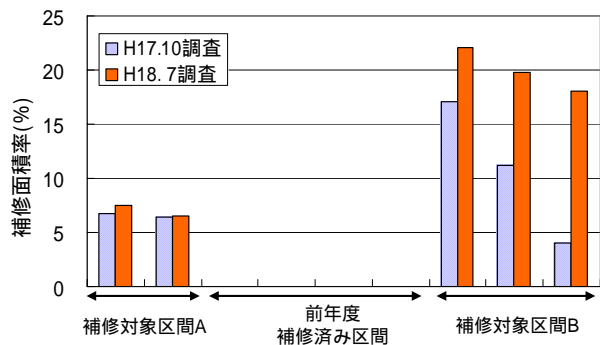


図-2 補修面積率評価結果

### 3.1.3 RC床版の劣化推移に関する実験的検討

CBMS に導入している構造物の劣化予測には、橋梁点検結果を基にしたマルコフの遷移確率を用いている。この遷移確率は、昭和 63 年度に建設省土木研究所から出された橋梁点検要領（案）<sup>4)</sup>に従って実施された平成 14 年度までの橋梁点検結果から整理されているものであり、これらの精度向上を図るには、多くの点検結果を待たなければならない。

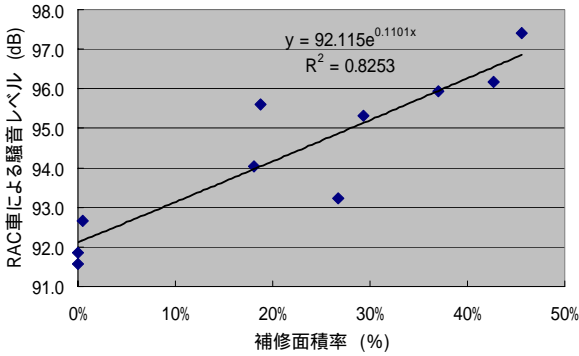


図 - 3 補修面積率評価結果

表 - 2 ひび割れ密度と損傷ランクの関係<sup>5)</sup>

詳細調査パネルの損傷ランク判定表

ランク	項目	ひびわれ間隔・形状	ひびわれ幅	ひびわれ密度
0		1.0 m 以上 1 方向のみ	0.06 mm 以下 (ヘアークラック)	
I		1.0~0.5 m 1 方向が主で直角 方向は従	0.1 mm 以下が主で あるが一部に 0.1mm 以上も存在する	2~4 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
II		0.5 m 程度 格子状直前のもの	0.2 mm 以下が主で あるが一部に 0.2mm 以上も存在する	4 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> 程度
III		0.5~0.2 m 格子状	0.2 mm 以上かなり 目立ち部分的な角落 ちもみられる	4~8 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
IV		0.2 m 以下 格子状	0.2 mm 以上が目立 ち連続的な角落ちが 生じている	8 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> 程度

注)本書ではこの判定法を、損傷を多角的にとらえる目的において、参考データとして使用している。したがって、用いる際には十分注意し基本的判定法を補足する程度に用いるがよい。

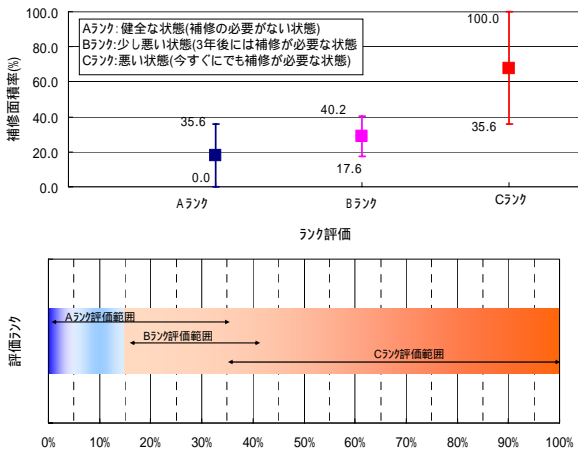


図 - 4 補修面積率と路面評価結果の関係

現在実施されている橋梁点検で損傷を多く確認される代表的な部材は、直接輪荷重を受ける RC 床版である。RC 床版の健全度評価を行う際には、表 - 2 に示すように、ひび割れの広がりやひび割れ幅を基本としたひび割れ密度でランク分けが可能となっており、他の部材と比較するとある程度は、定量的な評価を実施している部材といえる。

一方、RC 床版の主な損傷は、疲労損傷であり、この損傷メカニズムは輪荷重走行試験機を用いた研究<sup>7)</sup>で明らかとなってきた。さらに北海道特有の疲労促進要因を加味した疲労耐久性についても検討を行っており、RC 床版の余寿命予測について整理してきている。そこで、これまでの検討結果を活用し、疲労耐久性及びひび割れ密度に着目した分析を行い、RC 床版の定量的な劣化予測式の提案を試みた。

まず、表 - 2 に示した関係を基に現在の橋梁定期点検結果とひび割れ密度の対応を表 - 3 に定義する。これを基に、実験結果から整理した走行回数とひび割れ密度の関係に損傷ランクを加えた図の一例として図 - 6 に示す。横軸には、実験で適用している大型車の後輪 2 軸分荷重 100kN に衝撃係数 1.3 を乗じた 130kN

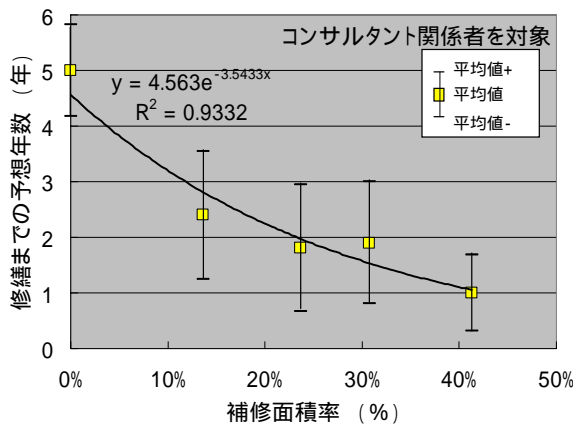
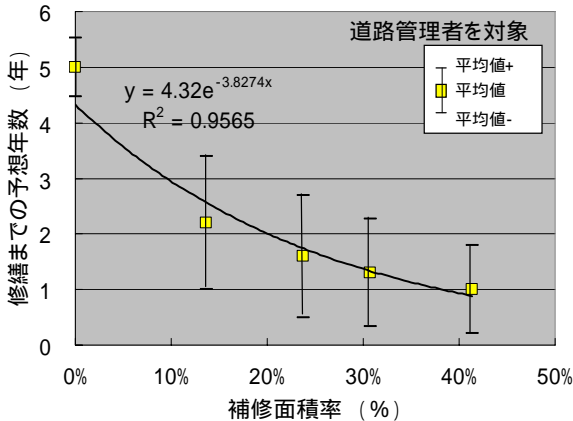


図 - 5 補修面積率と修繕予想年数の関係

での走行回数を取り、縦軸にはひび割れ密度をとっている。図 - 6 に示した結果を基に回帰分析を行い、図 - 7 に示すような、ひび割れ密度と走行回数との関係式(2)を提案した。

$$Y=0.02Z^4-0.195Z^3+0.95Z^2-0.75Z \cdots (2)$$

ここで、

$$Z=\log N_{130}$$

Y：ひび割れ密度(m/m<sup>2</sup>)

N<sub>130</sub>：130kN における走行回数

130kN における走行回数 N<sub>130</sub> を経過年に換算するには、個々の橋梁の輪荷重頻度分布を測定する必要があるが、全橋に対して測定することは困難であるため、大型車交通を後輪 2 軸分の荷重を 100kN、衝撃係数を 1.3 とし、標準的な輪荷重として 130kN を設定し、鋼道路橋の疲労設計指針<sup>9)</sup>を参考に 130kN 換算の年間交通量を式(3)により 4380 台/年と算出した。

$$X_{130}=(\text{大型車交通量} / \text{車線数}) \times Y_n \times 365 \cdots (3)$$

ここで、

X<sub>130</sub>=実橋における標準的 130kN 換算走行回数

大型車交通量：交通量 × 大型車混入率

交通量：4000 台/日

大型車混入率：20%

車線数：片側 2 車線

Y<sub>n</sub>：頻度補正係数 (0.03)

さらに、N<sub>130</sub> を 130kN 換算の年間交通量で割り戻すことで経過年を算出したものが式(4)となる。

$$T_{130}=N_{130}/X_{130} \cdots (4)$$

ここで、

T<sub>130</sub>:実橋における交通荷重を 130kN 一定荷重に換算したときの経過年

次に、表 - 2 を参考に設定したひび割れ密度と損傷ランクの関係、損傷ランクと健全度指数の関係(表 - 4)からひび割れ密度を健全度指数に置換し、経過年と健全度指数の関係を整理した。さらに、直接システムに導入するため、この曲線式を遷移確率に置き換えた。

以上の方法により、条件付のひび割れ密度と経過年を遷移確率に置き換え算出した RC 床版の劣化予測を図 - 8 に示す。図には、点検結果より算出している確率論的劣化曲線も比較できるように合わせて示している。

表 - 3 橋梁定期点検の損傷度評価<sup>6)</sup>との比較一覧

区分	ひびわれ幅に着目した程度	ひびわれ間隔に着目した程度	ひびわれ密度 (m/m <sup>2</sup> )	状態
a	〔ひびわれ間隔と性状〕 ひびわれは主として 1 方向のみで、最小ひびわれ間隔が概ね 1.0m 以上 〔ひびわれ幅〕 最大ひびわれ幅が 0.05mm 以下(フチ部程度)		0 - 1	
b	〔ひびわれ間隔と性状〕 1.0m < 0.5m, 1 方向が主で直交方向は混、カマコチ状でない 〔ひびわれ幅〕 0.1mm 以下が主であるが、一部に 0.1mm 以上も存在する		1 - 2	
c	〔ひびわれ間隔と性状〕 0.5m 程度、格子状直線のもの 〔ひびわれ幅〕 0.2mm 以下が主であるが、一部に 0.2mm 以上も存在する		2 - 4	
d	〔ひびわれ間隔と性状〕 0.5m < 0.2m, 格子状に発生 〔ひびわれ幅〕 0.2mm 以上が目立ち部分的な角落ちもみられる		4 - 10	
e	〔ひびわれ間隔と性状〕 0.2m 以下、格子状に発生 〔ひびわれ幅〕 0.2mm 以上が目立ち角落ちもみもみられている		10 -	

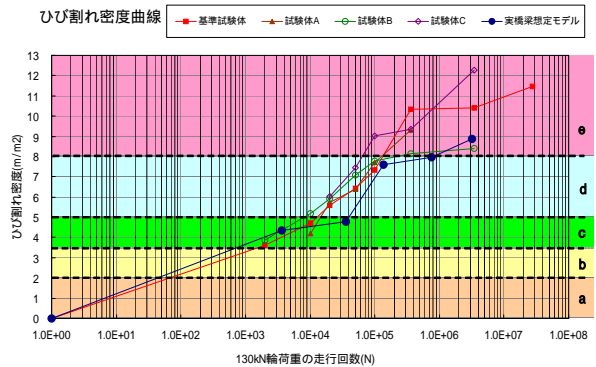


図 - 6 疲労載荷試験結果

(走行回数とひび割れ密度および新点検要領の損傷ランクの関係)

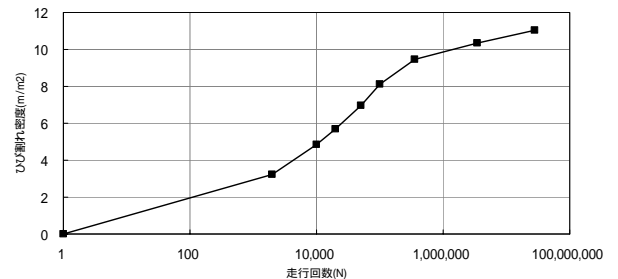


図 - 7 ひび割れ密度 - 走行回数曲線

表 - 4 ひび割れ密度と健全度指数の対応表

ひび割れ密度(m/m <sup>2</sup> )	0.0-2.0	2.0-3.5	3.5-5.0	5.0-8.0	8.0-
損傷ランク	OK				
健全度指数	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00

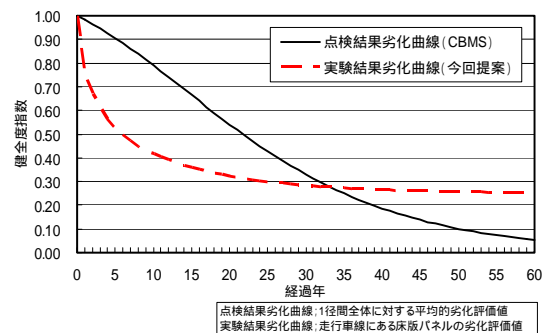


図 - 8 劣化曲線の比較

### 3.2 補修補強シナリオの検討

#### 3.2.1 舗装の予防的修繕工法に関する検討

シール材注入工法の評価は、式(5)によって算定する残存率によって行った。すなわち、注入したシール材の残っている延長を測定し、経年後の残存率を式(1)により算出した。経年変化によるひび割れの増加量やシール材の残存率を計算した。

$$\text{残存率(\%)} = \frac{\text{測定時のシール材残存延長(m)}}{\text{シール材注入延長(m)}} \times 100 \quad (5)$$

シール材注入の施工箇所は、クラックの種類によってトップダウンクラック箇所とボトムアップクラック箇所の2種類に分けられ、トップダウンクラック箇所のシール材残存率を図-9に、ボトムアップクラック箇所のシール材残存率を図-10に示す。トップダウンクラック箇所では約80%のシール材が残存していることが確認された。一方、ボトムアップクラック箇所では二冬期間経過後の残存率は約50%と大幅に低下しており、写真-1に示すように剥がれたシール材が道路路肩に飛散している状況である。なお、残存しているシール材には、健全に残っているシール材とシール材の付着は悪化しているがクラック内部にシール材が残っているものを含めている。これは、シール材の付着は悪化しているものの、ひび割れ部の角欠けや幅の拡大は抑制しており、シール材としての機能を有していると判断したからである。付着を悪化させる要因としては、車両走行や積雪寒冷地特有の除雪作業の影響をあげることができる。

また、シール材施工後の新たなひび割れの伸張を整理した結果を図-11に示す。トップダウンクラック箇所、ボトムアップクラック箇所ともにひび割れは伸張しており、特に、ボトムアップクラックの進展度合いが激しい。また、ひび割れの伸張は秋期から翌春までの期間に発生していることがわかり、積雪寒冷地でのひび割れ進展時期に特徴があると考えられる。

以上のことから、ひび割れの発生形態によりシール材の残存率や路面破損の進行度合いに差があり、トップダウンクラックに対してはシール材の効果が期待でき延命化につながっていると考えられるが、ボトムアップクラックに対する効果はあまり期待できないと言える。また、積雪寒冷地である北海道においてシール材注入工法を適用する場合には、その地域特性を考慮する必要があると考えられた。

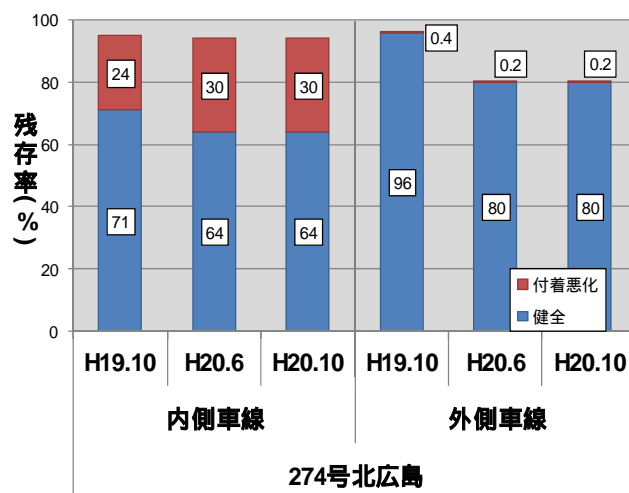


図-9 トップダウンクラック箇所のシール材残存率

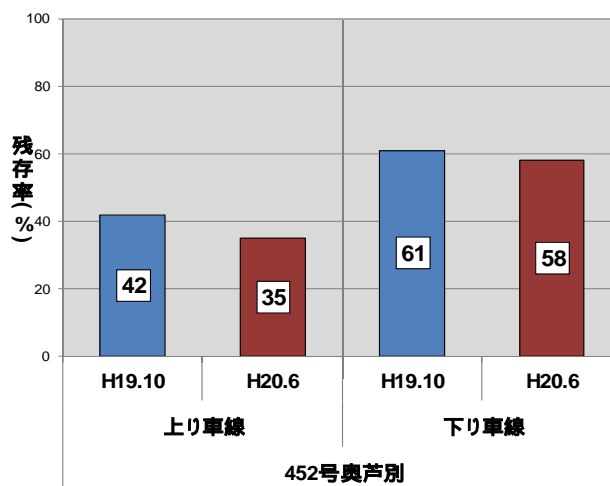


図-10 ボトムアップクラック箇所のシール材残存率



写真-1 シール材が剥がれた状況

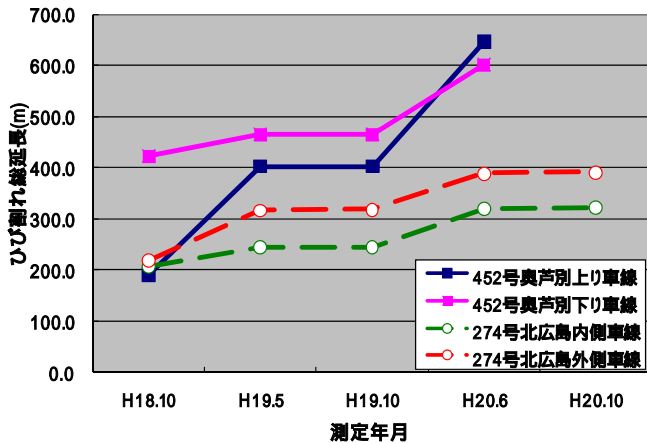


図 - 11 ひび割れ総延長の測定結果

### 3.2.2 RC床版の補修・補強の機能回復度と劣化推移に関する実験的検討

道路橋の鉄筋コンクリート床版の劣化因子としては、大型車両の輪荷重の繰り返し作用による疲労が主に考えられてきた。しかし、積雪寒冷地である北海道の橋梁床版では、写真 - 2 に示すように滞水による凍結融解の繰り返し作用により、床版上面のかぶりコンクリート部分がスケーリングによりコンクリートの砂利化が見られ有効床版厚が減少し、疲労耐久性が大きく低下することが判ってきた。このような床版に対する補修としては、凍害損傷を受けた上面の断面修復のみでは、床版の機能回復が見込まれない場合も考えられ、床版本体に補強を実施しなければならないケースも想定される。

ここでは、無補修・無補強の基準供試体と、模擬劣化させた上面側の修復と下面側を炭素繊維シートで補強した供試体(写真 - 3 参照)を用いて実施した輪荷重走行試験結果より、その疲労耐久性等に関する検討を実施した。

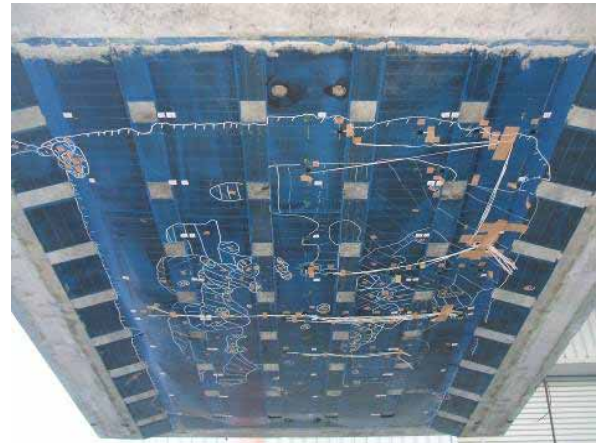


写真 - 3 補強供試体下面

図 - 12 に基準供試体の走行回数とたわみの変化についての結果を示す。基準供試体については、120 kN から階段状漸増载荷を行い、载荷荷重を 200 kN に増加させてから、たわみが急増し、41.8 万回・活荷重たわみ 11.2mm の時点で押抜きせん断破壊により終局に至った。

これを、150kN 荷重による走行回数 ( $N_{150}$ ) に換算すると、

$$N_{150} = \sum ((\text{载荷荷重} / 150\text{kN})^{12.76} \times \text{载荷回数}) = 1,008,600 \text{ 回} \quad \text{となる。}$$

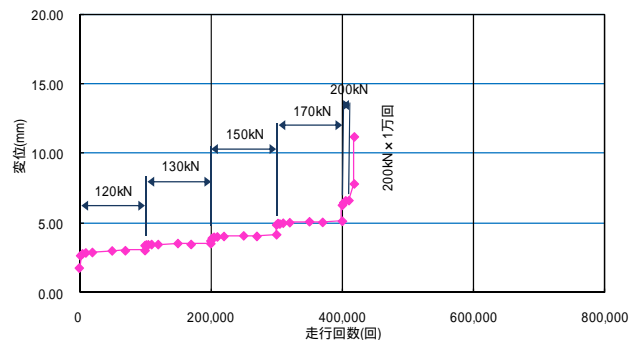


図 - 12 基準供試体の走行回数と変位関係

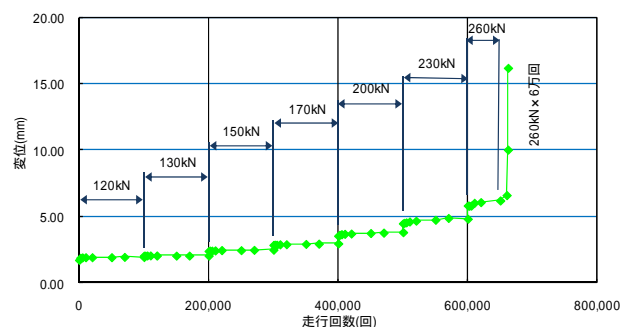


図 - 13 補強供試体の走行回数と変位関係

図 - 13 に補強供試体の走行回数とたわみの変化を示す。補強供試体は、各荷重段階での活荷重たわみが基準供試体よりも小さくなり、荷重を上げた段階毎で増加は見られるが荷重が一定の間はたわみの増加は殆ど少なく安定している。260kN に荷重を増加させてから、たわみが急増し 66.2 万回・活荷重たわみ 16.2mm の時点で押抜きせん断破壊により終局に至った。

これを、同様に 150kN 荷重による走行回数に換算すると、

$$N_{150} = 94,950,330 \text{ 回}$$

となる。

一方、松井らにより提案されている、配力鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮したせん断耐力から載荷回数を算出する手法を適用してみたところ、150kN に換算した終局走行回数は 8,081 万回となり、上述の 9,495 万回と近い値であることがわかった。そのため、本工法による補修及び補強を行った場合の終局に至る走行回数 (150kN 換算) は、以下の式(6)により予測できる可能性が示唆された。

今後は、この結果を CBMS に適用できるよう検討を進めていくこととする。

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \text{Log } N + \text{Log } C \quad (6)$$

ここに、

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) + 2\{0.25\sigma_{tmax} \cdot C_d (a + 2d_m)\}$$

$$B = b + 2d_a$$

N : 載荷回数

C : 定数 乾燥時 C = 1.52, 湿潤時 C = 1.24

P : 載荷荷重

P<sub>sx</sub> : はり状化した床版の押抜きせん断耐力

B : 輪荷重に対する床版の有効幅

$\tau_{smax}$  : コンクリートの最大せん断応力度(kgf/cm<sup>2</sup>)

$$(\tau_{smax} = 0.656\sigma_{ck}^{0.606})$$

$\sigma_{tmax}$  : コンクリートの最大引張応力度(kgf/cm<sup>2</sup>)

$$(\sigma_{tmax} = 0.269(\sigma_{ck})^{2/3})$$

a, b : 載荷板の主筋方向、配力筋方向の辺長(cm)

X<sub>m</sub> : 引張側コンクリートを無視した場合の中立軸 (cm)

d<sub>m</sub>, d<sub>a</sub> : 引張側主筋、配力筋の有効高さ(cm)

C<sub>m</sub>, C<sub>d</sub> : 主筋、配力筋のかぶり厚さ(cm)

### 3.2.3 橋梁補修優先順位付けに関する検討

これまで、CBMS の補修事業決定において使用され

る補修優先順位については、橋梁の重要度等、管理者の視点での重要度評価方法に関する検討を実施してきた。これらの評価法に加え、今年度は、利用者からの評価を追加すべく、予備調査を実施した。

実施するアンケートは、階層化分析法 (AHP) を用いて実施した。AHP は、複数の代替案から意志決定者によって最良な代替案を選択するための手法で以下の特徴を有している。

- 1) 評価基準が多く共通尺度が無い場合でも判断が可能
- 2) 不明瞭な要因を持つ定量分析が不可能な問題も可能
- 3) データの種類に影響されず、かつ修正が容易

AHP は、複雑な意志決定プロセスを階層構造にブレイクダウンして単純な言語の対一比較を基本として、この判断を統合して全体としての優先順位や配分率を決定することが可能であることから、今回の調査に最適と判断しこの手法を採用した。

ここでは、補修の優先度の設定を最終目的として、さらにその評価に必要な項目を、橋梁の管理者、使用者双方から分析し、より効果的な優先順位付けが行われることを主たる目的とした。まず今回設定した評価項目を図 - 14 に示すとおりである。

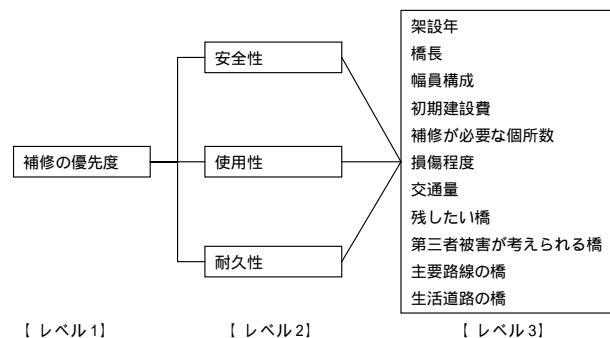


図 - 14 評価項目の設定

試行対象の被験者の立場としては、図 - 15 に示したように一般利用者が 64%、道路管理事業者が 29%、設計者が 7%であった。試行ということで、被験者の居住地は、概ね中心市街地という状況である。今回はまず、アンケート内容の不備、わかりにくさなどの問題を抽出するための試行である。また、レベル 2 においては、今後の利用イメージから予算制約がある場合とない場合の 2 つのシナリオを設定し、結果にどのような変化があるかも併せて試行した。



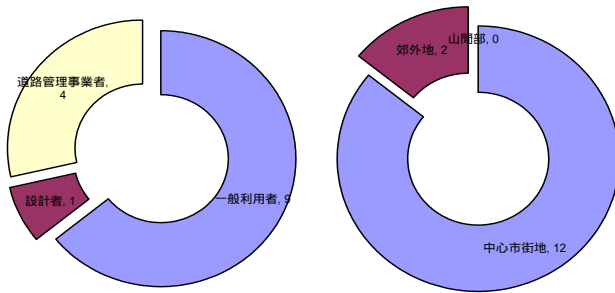


図 - 15 アンケート試行対象者とその居住地内訳

表 - 5 にレベル 2 の評価結果を示す。表より、おおむね、安全性が高い結果となっている。予算制約がある場合には、その傾向は顕著であることが分かる。予算の制約がある場合と無い場合での比較において、使いやすさは大きな変動が無く、一定の重要度あることが伺える。一方、回答者へのヒアリングより、耐久性や安全性をどうとらえるかで、それぞれの評価は大きく異なるという指摘があった。

表 - 6 にレベル 3 の重みづけ結果を示す。結果の妥当性としては、CI 値が 0.1 以上となり、AHP の実施結果としては、望ましくない結果となっている。これは、耐久性と安全性の定義の問題があると考えられる。アンケート結果からもそれが伺え、耐久性と安全性についての結果は、同一の項目を重要視していることが示されている。

表 - 5 レベル 2 比較 (上: 予算制約なし、下: あり)

中心市街地		郊外部		山間部	
耐久性	23%	耐久性	30%	耐久性	38%
安全性	58%	安全性	58%	安全性	50%
使いやすさ	19%	使いやすさ	12%	使いやすさ	12%
CI	0.05	CI	0.06	CI	0.08

中心市街地		郊外部		山間部	
耐久性	21%	耐久性	24%	耐久性	24%
安全性	71%	安全性	69%	安全性	69%
使いやすさ	8%	使いやすさ	7%	使いやすさ	7%
CI	0.08	CI	0.08	CI	0.08

表 - 6 レベル 3 の重みづけ結果

	耐久性	安全性	使いやすさ
架設年	54%	40%	25%
橋長	54%	61%	40%
幅員	39%	39%	36%
初期建設費	39%	39%	54%
補修箇所数	46%	66%	41%
損傷程度	53%	59%	61%
交通量	45%	53%	70%
残したい橋	37%	26%	57%
第三者	46%	43%	64%
主要	46%	46%	64%
生活	7%	7%	12%
CI	0.30	0.25	0.19

### 3.3 マネジメントシステムの改良

#### 3.3.1 舗装マネジメントシステムの検討・改良

予防的修繕工法の適用が今後進めば、修繕計画立案のために、従来の修繕工法に加えて予防的修繕の視点が欠かせなくなるものと考えられる。そこで、わだち掘れやひび割れなどの舗装路面の機能低下に対して、積雪寒冷地である北海道の地域特性を考慮しながら予防的修繕工法などの維持修繕工法を適用する場合の将来路面状況の推移予測や、舗装維持修繕の年度計画立案を支援するマネジメントシステムを開発するために、前年度までに作成したシステムに改良を加えた。

主要な改良点を挙げると以下のとおりである。

- 1) 北海道の地域特性を考慮した予防的修繕工法の適用。
- 2) 任意の工事区間長に対する工事区間の選定が出来るように改良。
- 3) 維持修繕の年度計画を自動で立案し出力。

本システムは、ひび割れ、わだち掘れ、平たん性、MCI などの路面性状調査データベースを基に、図 - 16 に示す初期入力画面において計算に必要な各種条件 (初年度の補修予算、将来の予算伸び率、社会的割引率、車両走行速度、LCC 解析年数、補修の参考補修費) を入力する。従来の切削オーバーレイ工法だけでなく、予防的修繕を考慮した条件設定が行えるように、図 - 16 の赤枠で示す予防的修繕を適用した場合の項目を設けているのが特徴であり、ひび割れ率とわだち掘れ量の予測値に応じて、図 - 17 に示すとおりシール材注入、シール材注入+切削、切削、修繕 (切削オーバーレイ等) の 4 種類の工法を適用する。システムの機能を大別すると以下の 2 つの機能に分けられる。

機能 1) 補修箇所・時期選定支援機能

機能 2) 路面性状将来予測機能

なお、路面性状値の劣化予測には積雪寒冷地のデータに基づいて作成された劣化予測式を用いている。また、予防的修繕工法が適用された箇所は、その後 3 年間は修繕対象箇所として計上しない扱いとしている。

#### (1) 補修候補箇所・時期選定支援機能

補修候補箇所・時期選定支援機能における具体的な作業フローを図 - 18 に示す。最初に、対象とする道路網や各種の計算条件を入力すると、路面性状調査データを基に、システムが将来の路面性状を自動予測し、予測結果に基づいて最大 15 年後までの補修候補箇所の選定と補修実施時期の選定を自動的に行う機能である。必要に応じて、図 - 19 に示すようにシステムによる自動選定の後に道路管理者が計画を修正できるよう

にもなっている。最終的に、確定した各年度の補修箇所、工法、工事費を表-20のように一覧表の形式で帳票表示できる。

(2)路面性状将来予測機能

予防的修繕をはじめ、予算や管理目標など様々な条件で維持修繕を行った場合の、将来的な路面性状値の推移を予測する機能である。予測は最大40年まで可能である。この機能により、道路管理者が中長期的な道路の管理計画を立案する場合に、路面性状や費用の推移を試算することによって、施策の妥当性を検討することができる。

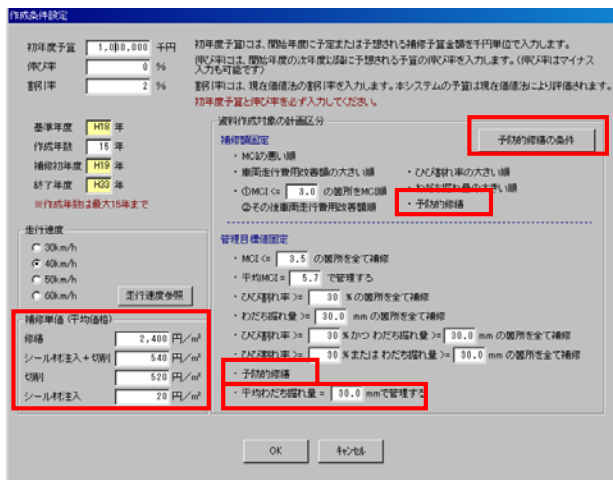


図-16 開発したシステムの初期入力画面

ICV劣化率	わだち割れ量					
	0 mm以上	10 mm以上	20 mm以上	30 mm以上	35 mm以上	40 mm以上
0 %以上						
10 %未満						
10 %以上						
20 %未満						
20 %以上						
30 %未満						
30 %以上						
35 %未満						
35 %以上						
40 %未満						
40 %以上						

図-17 予防的修繕の工法区分

本システムにより、予防的修繕箇所などの選定や、年度計画の立案作業の効率化を図ることができると考えられる。

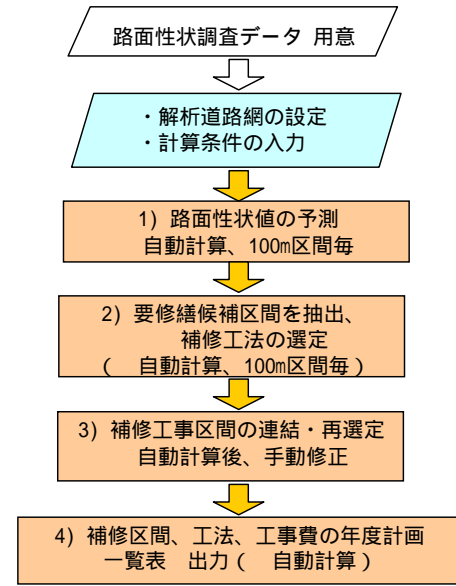


図-18 補修箇所・時期選定機能のフロー



図-19 補修箇所・時期選定画面

年度	事務所	路線番号	路線枝番	距離自	距離至	区間数	区間長	面積	工法	金額	平均ひび	平均わだ	最大ひび	最大
H21	千歳道路事	337	20	22.974	24.1	12	1126	7.882	修繕	18,916,800	85.3	22.6	100	
H21	千歳道路事	337	20	39.3	40.4	11	1100	8,360	修繕	18,240,000	64.6	22.6	100	
H21	滝川道路事	452	20	89.74	90.9	14	1160	8,612	修繕	19,488,000	67.1	23.6	100	
H21	千歳道路事	453	20	23.5	24.5	10	1000	7,200	修繕	15,552,000	60.1	14.9	86.8	
H22	千歳道路事	337	20	26.3	27.444	14	1144	8,008	修繕	18,883,200	66.5	30.7	100	
H22	岩見沢道路	452	20	3	4	10	1000	9,600	切削	4,492,800	4.2	39.2	6.4	
H22	岩見沢道路	452	20	17.2	18.3	11	1100	8,360	切削	3,952,000	4.4	37	6.7	
H23	札幌道路事	12	20	13.6	14.199	7	599	9,244	切削	4,681,924	1.7	51.5	6.1	
H23	岩見沢道路	12	20	14.199	16.338	30	2139	37,826	切削	19,660,576	6.3	39	16.7	
H23	岩見沢道路	12	20	43.1	45.1	30	2000	30,000	切削	14,820,000	8.9	41	35.9	
H23	深川道路事	12	20	104.1	105.6	17	1500	12,659	切削	6,145,620	2.3	38.9	9.1	
H23	深川道路事	12	20	109.6	110.6	10	1000	8,200	シール材注	3,985,200	23.1	37.7	46.2	
H23	札幌道路事	12	20	111.6	112.6	10	1000	10,040	シール材注	4,924,800	27.8	38.7	43.1	
H23	深川道路事	12	20	114.8	116	12	1200	10,080	切削	4,804,800	1.3	39.1	3.5	
H23	滝川道路事	38	20	2.3	3.4	13	1100	19,800	切削	9,360,000	5.2	37.8	13.4	
H23	滝川道路事	38	20	10.8	11.9	13	1100	10,580	切削	5,054,400	4.4	38.1	6.6	
H23	札幌道路事	231	20	5.3	6.444	19	1144	28,600	切削	13,572,000	3.1	40.1	7	
H23	深川道路事	233	20	9.3	10.9	16	1600	14,180	切削	6,910,800	7.9	37	17.8	
H23	岩見沢道路	452	20	0.018	1.4	16	1382	13,223	切削	6,424,080	6.3	42.5	15.9	

図-20 補修箇所と工事費の出力帳票

### 3.3.2 橋梁マネジメントシステムの改良

本システムの目的は、維持補修計画を最適化し提案することにある。本システムは、橋梁の健全性と今後の健全度の推移を定量的に評価する機能「健全度評価」、「劣化予測」を有し、その結果を元に最適な補修時期、補修工法を選択し、補修費用の算出を行う「補修事業計画」の機能で構成されている。図-21に本システムの機能概要を示す。プロトタイプがほぼ完成したことを受け、本システムの運用を想定し、どのような部材の劣化が進行し、いつ補修をすることが最適で、その費用をどのくらい確保すべきかを一目で分かるようなレポート印刷機能を追加した。

橋梁個別の分析結果を出力したレポートの出力例を図-22に示す。

レポート上段部は、橋梁架設年や最新点検年とその時点における健全度を示している。中段には、各部材における点検時資産と健全度を示し、点検時での橋梁の状況を直感的に理解できるようにグラフ化も実施した。下段には、事業計画シミュレーションによる補修計画とその実施による健全度推移を同一グラフに示し、補修部材や補修工法を一覧表に示すなど、予算要求や事業執行の業務に対する効率化を図ることが出来ると思われる。

また、劣化予測精度向上を目的として、異なる劣化予測手法による各結果を比較する管理者機能を追加した。これは、遷移確率の係数が劣化予測のバックデータにより使い分けが出来るロジックとしており、橋梁定期点検結果から算定している遷移確率の他に前述(3.1.3)のRC床版の劣化推移に関する実験的検討結果を基とした、RC床版の劣化遷移確率を用いている。

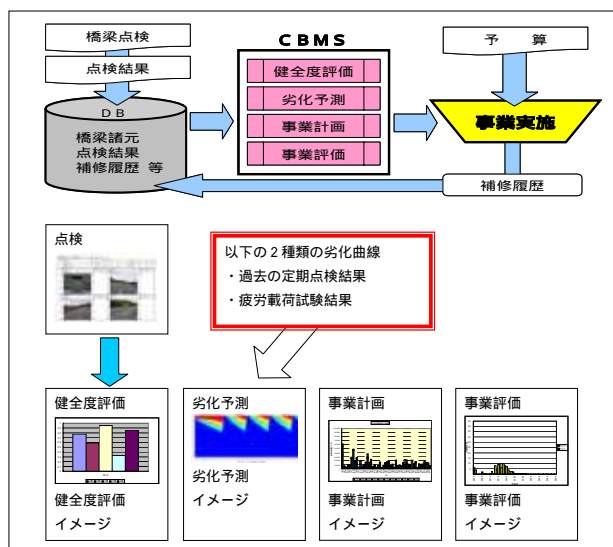


図-21 CBMS 機能概要



図-22 橋梁個別の事業計画レポート出力例

## 4. まとめ

### 4.1 健全度評価・劣化度予測手法の開発

#### 4.1.1 舗装劣化度予測手法の開発

最新のデータに基づき、従来の予測式よりも精度の高い予測式を作成した。これにより、将来の路面性状の把握や、対策工法の立案などの精度も高まることが期待できる。

#### 4.1.2 排水性舗装の路面損傷程度評価手法の検討

積雪寒冷地における排水性舗装路面の損傷程度を評価する手法について、補修面積率による手法を提案し、補修面積率と補修判断との間に関係があることを確認した。積雪寒冷地の排水性舗装に対して有効な路面評価指標と考えられる。

#### 4.1.3 RC床版の劣化推移に関する実験的検討

効率的維持管理を実施するには、的確な劣化予測が必要不可欠となる。今回、これまで行ってきたRC床版の疲労寿命に関する実験的研究成果を、橋梁点検手法にそった疲労耐久性に関する整理を実施した。その結果、課題はあるものの、蓄積されてきた知見をシステムに導入可能な段階までに到達することができた。現

在システムに導入している確率論的劣化予測手法と比較した結果、提案した劣化曲線は建設初期段階において傾きが大きく急激に健全度指数が低下した後、傾きが小さくなり健全度指数の低下が緩やかになることが分かった。今後は、CBMS に追加した比較分析機能を活用しながら、また、多くの点検結果が整理出来ることも加味して、遷移確率と実験結果からの予測式と比較評価を実施しながら精度向上を図る。

#### 4.2 補修補強シナリオの検討

##### 4.2.1 舗装の予防的修繕工法に関する検討

ひび割れの発生形態によりシール材の残存率や路面破損の進行度合いに差があり、トップダウンクラックに対してはシール材の効果が期待でき延命化につながっていると考えられるが、ボトムアップクラックに対する効果はあまり期待できない。また、積雪寒冷地である北海道においてシール材注入工法を適用する場合には、その地域特性を考慮する必要があると考えられた。

##### 4.2.2 RC 床版の補修・補強の機能回復度と劣化推移に関する実験的検討

疲労劣化を模擬し、繊維シートにより下面補強した RC 床版を用いた輪荷重走行試験結果より、本工法による補修・補強を行った場合の終局に至る走行回数(150 kN 換算)を数式により予測算出できる可能性が示唆された。今後は、この結果を CBMS に適用できるよう検討を進めていくこととする。

##### 4.2.3 補修橋梁の優先順位付けに関する検討

アンケート結果より、重要度を設定する項目として妥当ではない比較評価項目を設定していることや曖昧な設定等の課題が抽出でき、本調査に向けて有用な結果が得られた。これらの意見から、以下の検討を行い、本調査を実施する予定である。

- 1) レベル3の評価項目の絞り込み
- 2) 一般の方にわかりやすい表現方法
- 3) 比較項目の見直し

#### 4.3 マネジメントシステムの改良

##### 4.3.1 舗装マネジメントシステムの検討・改良

前年度までに作成した、現場利用を想定した舗装マネジメントシステムのプロトタイプを、北海道の地域特性を考慮に入れて予防的修繕を行った場合の補修計画立案や将来推移予測ができるように改良した。さらに、現場での操作性を高めるために、任意の工事区間設定を可能とし、維持修繕の年度計画を自動出力する機能を付加した。

##### 4.3.2 橋梁マネジメントシステム改良

平成19年度までに構築した、CBMS のプロトタイプに劣化予測精度向上を目的とした異なる劣化予測手法を計算し比較検討するための機能を追加すると共に、システム運用に向けた予算計画立案や事業執行の効率化を図るための計算結果レポート出力機能を追加した。

#### 参考文献

- 1) 渡邊 一悟,石川 博之,佐藤 京: BMS の構築と運用における課題,独立行政法人北海道開発土木研究所月報,技術資料, pp.35-39, 2005
- 2) 道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会 提言 国土交通省 道路局 平成15年
- 3) 安達優,石川博之,佐藤京,北海道 BMS における優先順位付けの検討,平成18年度土木学会年次講演会概要集,VI 部門, No.025, PP.49-50, 2006
- 4) 橋梁点検要領(案) 建設省 土木研究所 昭和63年7月
- 5) 道路橋の点検および補修・補強設計施工要領(案) 北海道開発局 道路維持課 P1-117 平成10年10月
- 6) 橋梁定期点検要領(案) 国土交通省 道路局 国道防災課 平成16年3月
- 7) 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・残存疲労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.

## MANAGEMENT METHODS FOR CIVIL ENGINEERING INFRASTRUCTURES IN COLD, SNOWY REGIONS

**Abstract** : A deterioration prediction method and rehabilitation in view of preventive maintenance are absolutely imperative in reducing the life cycle cost (LCC) of pavements and bridge structures under snowy and cold climate conditions. The objectives of this study include the development of a method to evaluate the soundness of pavements and bridge structures and to predict deterioration of them. Another objective is to establish a pavement and bridge management system suitable for cold, snowy regions that can provide the most relevant maintenance and rehabilitation scenario based on life-cycle cost analysis.

With regard to pavement management, the accuracy of the current performance curves was updated using the latest pavement surface data, and an evaluation method for porous pavements in cold, snowy regions was developed. Furthermore, the prototype pavement management sub-system was improved to accommodate the concept of preventive maintenance. The new system, which is designed for field administrative engineers, can be used to plan a pavement rehabilitation and maintenance schedule based on the estimation of future pavement performance.

In the area of bridge management, the soundness of structures was evaluated quantitatively based on regular inspection results, and a deterioration prediction method was developed based on the above soundness and the Markov transition probability. A proposal was also made regarding empirical deterioration curves for RC floor slabs based on the results of studies into the residual life prediction of such slabs by means of wheel-running tests. Furthermore, the study for proposing the optimum maintenance and rehabilitation scenario for preventive maintenance were conducted through experimental studies into the levels of functional recovery and deterioration prediction in relation to rehabilitation.

**Key words** : pavement management system, deterioration prediction, life-cycle cost analysis, maintenance priority, CERI Bridge Management System(CBMS), preventive repair, bridge management plan