

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

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、
寒地技術推進室

研究担当者：田高淳、熊谷政行、石田樹、丸山記美雄、金子雅之、
清野昌貴、千葉学、吉井昭博、西 弘明、今野久志、
三田村浩、佐藤 京、澤松俊寿、横山博之、高玉波夫

【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。

舗装に関しては、マルコフ遷移確率モデルの作成や最新のデータに基づいて路面性状予測式の作成を行い、積雪寒冷地の地域特性を考慮に入れた将来予測や対策工法の選定などを高い精度で行うことができる舗装マネジメントシステムを構築した。

橋梁マネジメントに関しては、健全性評価について毎年実施されている橋梁定期点検結果から状態を数量化し、マルコフ遷移確率を基に提案している劣化予測手法を確立するとともに、劣化損傷状態分析を実施した。さらに、限られた予算の中で、予防保全として最適な維持修繕・補強計画シナリオを提供するための補修優先順位付けに関する検討を実施した。その研究結果より、Web で運用する橋梁維持管理システムを構築した。

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わだち掘れやすり減り、クラックなどの舗装路面の劣化、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 路面性状予測精度向上手法の検討

マルコフ遷移確率を用いたネットワークレベルにおける路面性状予測モデルについて、路面性状調査値（わだち掘れ量、ひび割れ率、平坦性）と維持管理指数 (MCI) の予測値と実測値を比較検討し、モデルの適合性を評価した。

さらに、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、現在使用している予測式との比較を行っ

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 橋面舗装内部の損傷および水分検知技術の開発

橋面舗装内部に水が浸入することが原因で、混合物層がはく離してポットホールやひび割れが発生するなどの損傷形態が橋面舗装に散見される。舗装内部の水の浸入状況を非破壊で検知する技術の開発が望まれるところである。電磁波レーダ測定による橋面舗装内部の損傷検知および水分検知技術に着目した。既存の電磁波レーダによる測定は、測定範囲が狭いことおよび解析に時間がかかること、水分の検知の可否やその精度についても明確でないことが課題であった。そこで、新たに開発された電磁波レーダ探査機を用いて、はく離損傷が発生している実際の橋面舗装において、橋面舗装の打換修繕が実施される前と後でレーダ調査を実施し、打換修繕実施後のデータを健全箇所との測定データとみなしてデータの変化を比較し違いを検証した。比較の際の着眼点は以下のとおりである。

- a) ポットホール発生箇所付近や混合物のはく離損傷が疑われる箇所の修繕前後の変化
- b) 水分滞留が疑われる箇所の修繕前後の変化

2. 1. 4 橋梁定期点検結果による健全度評価の検討

橋梁の健全度評価手法として、橋梁の構造各部の資産的価値（建設費用）に着目して、資産価値を用いるとともに、点検結果から得られた損傷ランクを資産価値の低下を示す指標とした評価方法を検討し、それらを積み上げることによって、橋梁全体の評価値と定義した。評価を行うにあたっては、橋梁定期点検要領(案)¹⁾を（旧橋梁点検要領(案)²⁾）基に全国での国道橋に対して統一的な評価手法にて行われている橋梁点検結果を用いて検討を行い、健全度評価値の合理性について考察を行った。

2. 1. 5 橋梁の劣化推定技術に関する検討

橋梁の劣化予測はそれを構成する部材の材料に着目した場合、コンクリートでは塩化物イオン濃度、中性化深さ、塩分付着量、アルカリ骨材反応、耐荷性を考慮した検討があり、鋼材では腐食面積率、塗装の膜厚測定、板厚測定結果を評価することで、劣化予測が

可能となっている。また、示方書や診断マニュアルなどの理論式を用いることでも個別の対応は可能となっている。しかし、実構造物の損傷は複合的に生じていることが多いことから、橋梁維持管理のための劣化予測は、予測のモデル化や実験結果から導き出した回帰式、標準的な理論式の利用、マルコフ理論などの確率論、エキスパートや遺伝的アルゴリズムなども研究されている。

本調査研究では、一般国道を対象とした橋梁定期点検結果より、腐食、塗装劣化とひび割れ損傷に着目し、塩害、凍害がそれらに与える影響として劣化損傷の進展傾向や地域性などを各損傷、部材、地域別にとりまとめるとともに、合理的な劣化予測手法に関し、得られるデータから最適な手法を設定し、その予測値の評価を実施した。

2. 1. 6 RC床版の劣化推移に関する実験的検討

橋梁維持管理システム（CBMS: Civil Engineering Research Institute Bridge Management System）³⁾における当初の劣化予測は、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。劣化予測の精度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。その中でも、コンクリート床版の劣化損傷は、その他部材と比較して劣化損傷進行要因に大きく影響を受けることが、本研究調査中に解明され始めた。

そこで、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実験的検討を実施し、その導入について考察を行った。

2. 2 補修補強シナリオの検討

2. 2. 1 最適な舗装維持修繕シナリオの検討

マルコフ遷移確率モデルを使用し、今後約25年後までの構造物保全率[舗装]および路面性状調査値（わだち掘れ量、ひび割れ率、平坦性）とMCIの将来推移を予測して、長期的な維持修繕の方針を検討した。

2. 2. 2 舗装の予防的修繕工法に関する検討

舗装の維持管理において、シーリング材の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、コスト削減を図ろうとするのが予防的修繕工法である。

シーラ材の注入に関しては、発生形態が異なるひび割れ箇所においてシーラ材の注入を行い、追跡調査を行っている。ここで、発生形態が異なるひび割れとは、舗装表面から下層に向かって伸びる「トップダウンクラック」と、舗装下面から上層に向かって伸びる「ボトムアップクラック」である。シーラ材の残存率、路面性状の変化について継続調査を行い、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。シーラ材注入工法の評価は、注入したシーラ材の残っている割合を式(1)によって算定する残存率によって行った。

$$\text{残存率(\%)} = \frac{\text{測定時のシーラ材残存延長(m)}}{\text{シーラ材注入延長(m)}} \times 100 \quad (1)$$

また、タイプの異なる数種類のシーラ材を同一区間内のトップダウンクラックに連続的に注入し、経年変化に伴うひび割れの増加延長やシーラ材の残存率の変化を測定している。使用したシーラ材の一覧表を表-1に示す。加熱注入型は4タイプ9種類、常温注入型2タイプ3種類、計12種類を施工している。また、シーラ材注入を行わない工区も併設した。

切削工法に関しては、切削工法施工区間と、比較のために切削オーバーレイを行った区間を隣接して設けた試験施工箇所において、わだち掘れ量やFWDによるたわみ量を追跡調査している。

2. 2. 3 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、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. 4 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⁴⁾。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。

表-1 シーラ材一覧表

| シーラ材種類 | | 種類 |
|--------|---------------|----|
| 加熱注入型 | 高弾性タイプ | 3 |
| | 低弾性タイプ | 3 |
| | ファイバー入りアスファルト | 1 |
| | その他 | 2 |
| 常温注入型 | 樹脂系 | 2 |
| | 瀝青系 | 1 |
| 合計 | | 12 |

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がある。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⁶⁾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。重要度評価にユーザーの視点も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し、管理者および一般ユーザー、双方の視点を考慮した優先度を決定するための重み付け項目の設定と重み設定について検討を行った。

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改良

現在、舗装の長寿命化と維持管理のコスト削減を目的とした予防的修繕の導入が検討されている。予防的修繕では、既存舗装の破損状況を評価する指標として、MCIのような総合指標ではなく路面性状単指標(わだち掘れ量とひび割れ率)が挙げられている。

そこで、予防的修繕工法にも対応した舗装マネジメントシステムの作成・改良を行う。特に、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に改良を行った。改良したサブシステムの使いやすさや要望点を道路管理者からヒアリングした。

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 健全度評価・劣化予測手法の開発

3. 1. 1 路面性状予測精度向上手法の検討

これまで用いられてきた回帰による路面性状予測式では、予測値がある一つの値に収まるため予測値と実測値が乖離することは不可避である。しかし、マルコフ遷移確率モデルを用いると、回帰式では乖離する値も確率付きで表現できるため、予測と実測の適合度は100%となる(図-1)。このことから、回帰予測式を用いると予測精度には限界があるが、マルコフ遷移確率モデルを使用することにより、ネットワークレベルで予測精度の向上が期待できる。なお、一般国道の路面性状調査における同一箇所計測間隔は3年間であることから、図-1の予測-実測比較では3年遷移確率モデルを用いている。

また、最新のデータから作成した予測式は単回帰式1種類と重回帰式3種類(交通量、舗装厚、交通量と舗装厚を変数としたもの)であり、作成した予測式と現行の予測式を用いて算出した予測値と実測値を比較した結果(表-2)、作成した予測式の的中率が改善している事がわかる。しかし、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-3に、予測誤差の度数分布を図-2に示す。現行のひび割れ率予測式に比較して、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分かる。また、図-2からは、改良した予測式によって、誤差0付近のデータ数が増え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。

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

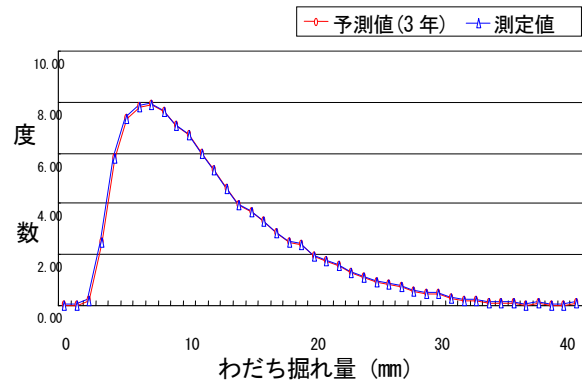


図-1 マルコフ遷移確率モデルによる予測/実測比較

表-2 作成した予測式の的中率

| | 現行予測式 | | 単回帰式 | | 重回帰① | | 重回帰② | | 重回帰③ | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 的中データ数 | 的中率(%) | 的中データ数 | 的中率(%) | 的中データ数 | 的中率(%) | 的中データ数 | 的中率(%) | 的中データ数 | 的中率(%) |
| ひびわれ | 13,121 | 45.0 | 9,135 | 31.3 | 9,285 | 31.8 | 9,830 | 33.7 | 9,814 | 33.6 |
| わだち掘れ | 23,048 | 78.9 | 27,148 | 92.9 | 27,210 | 93.2 | 27,068 | 92.7 | 27,201 | 93.1 |
| 平坦性 | 19,207 | 92.2 | 19,897 | 95.5 | 19,901 | 95.5 | 19,911 | 95.5 | 19,893 | 95.5 |
| MCI | 16,527 | 57.0 | 20,446 | 70.5 | 20,731 | 71.5 | 20,375 | 70.3 | 20,692 | 71.4 |

表-3 的中率および平均ひび割れ率結果

| 現行式 | データ件数 | 計 | 平均ひび割れ率 |
|-----------------------------|-------|--------|---------|
| | 的中率 | 45.0% | |
| 改良予測式① (べき+単回帰) | データ件数 | 14,106 | 4.01 |
| | 的中率 | 48.4% | |
| 改良予測式② (べき+重回帰 (交通量)) | データ件数 | 14,102 | 4.02 |
| | 的中率 | 48.3% | |

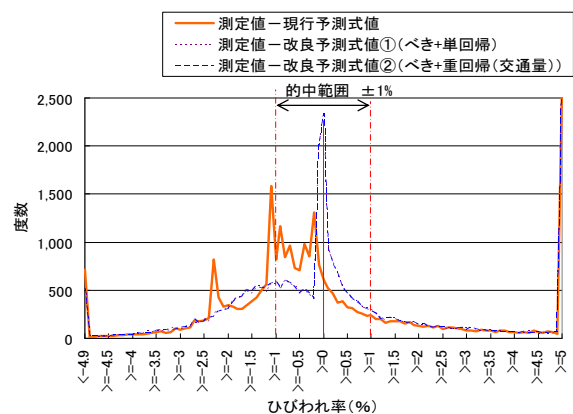


図-2 予測誤差の度数分布図

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(2))。

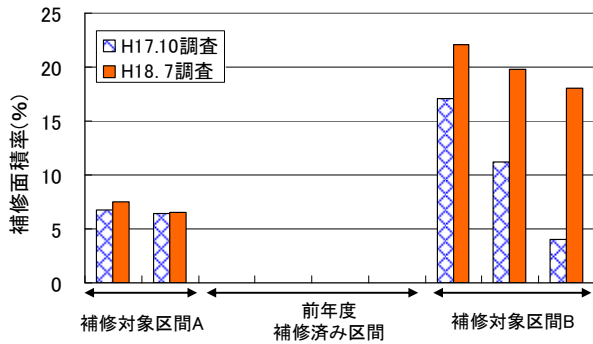


図-3 補修面積率評価結果

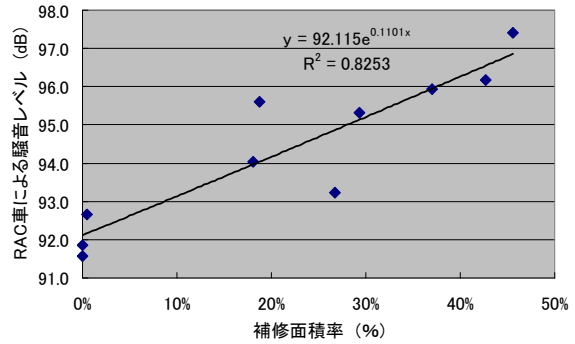


図-4 補修面積率評価結果

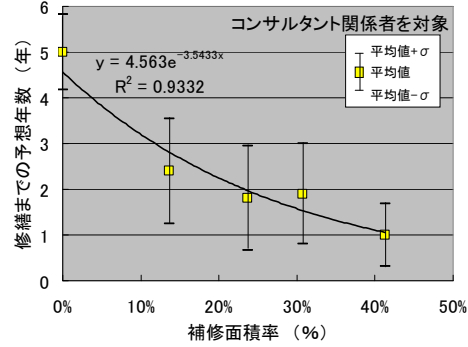
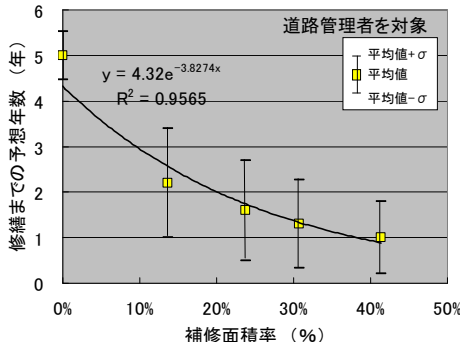


図-5 補修面積率と修繕予想年数の関係 (左図：道路管理者、右図：コンサルタント関係者)

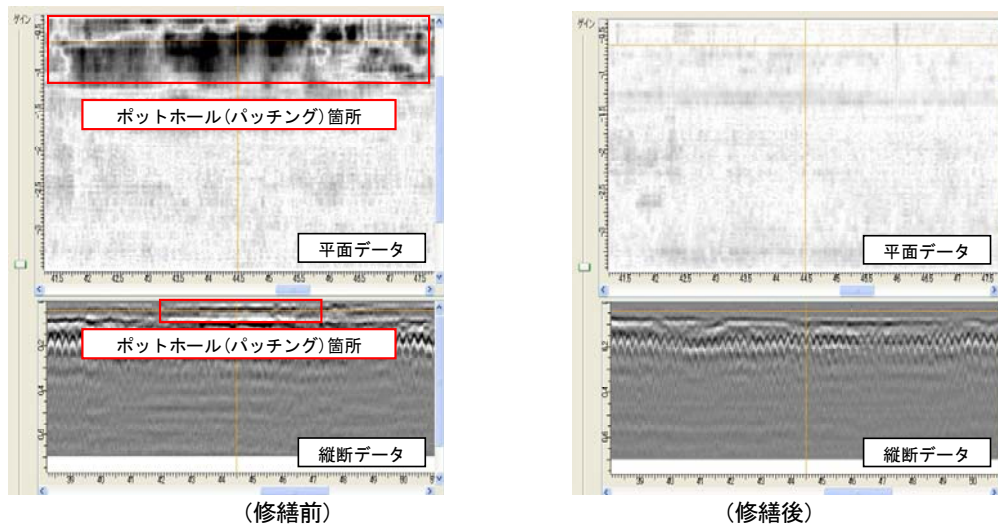


図-6 ポットホール発生箇所付近の測定結果

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

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-3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-4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。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

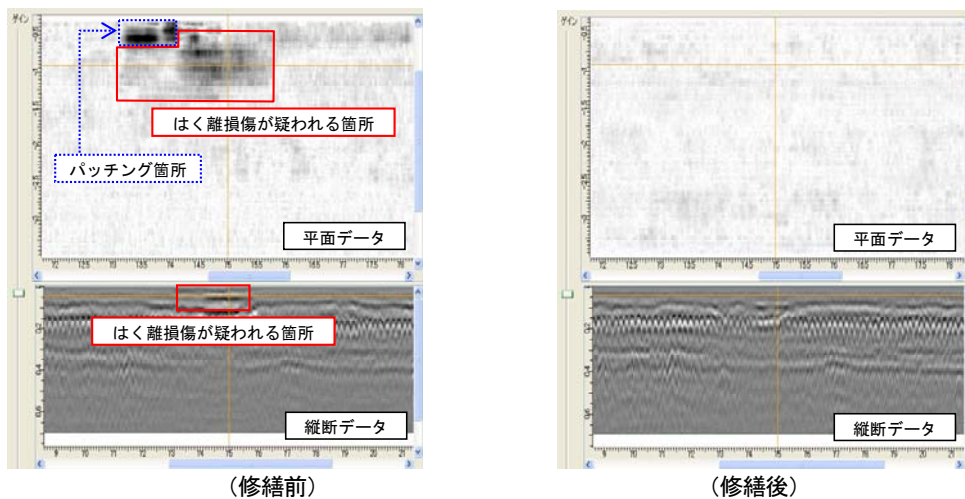


図-7 はく離が疑われる箇所の測定結果

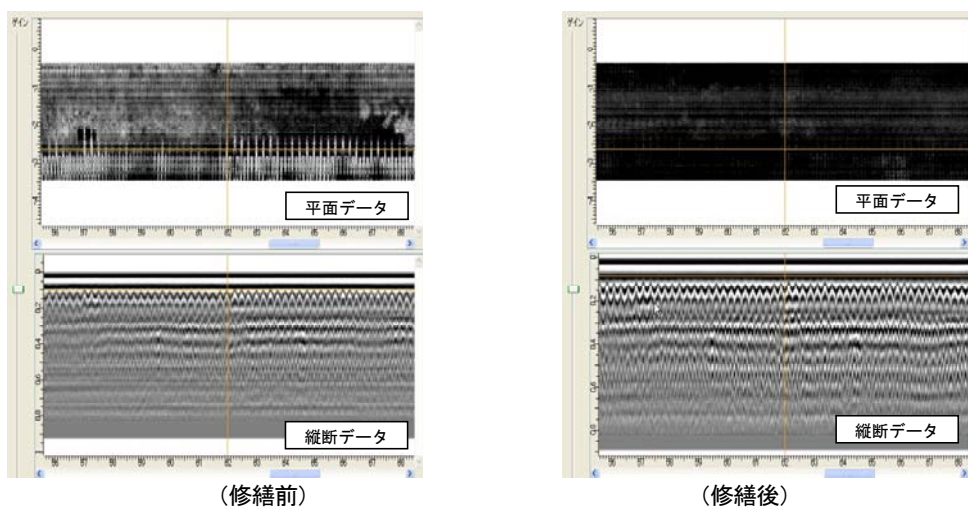


図-8 健全だが水分の存在が疑われる箇所の測定結果

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。

3. 1. 3 橋面舗装内部の損傷および水分検知技術の開発

橋面舗装におけるポットホール発生箇所付近の修繕前後のレーダ測定結果を図-6に示す。修繕前ではポットホール（パッチング）を示す異常信号の分布を確認した。修繕後では異常信号の分布が消失していることを確認した。また、基層混合物のはく離損傷が疑われる箇所の修繕前後のレーダ測定結果を図-7に示す。修繕前では混合物のはく離損傷が疑われる箇所で異常信号の分布があったが、修繕後では異常信号の分布が消失していることが確認された。

次に、舗装混合物または床版コンクリートの損傷が見られない健全な箇所では、図-6や図-7で見られるよ

うな顕著な異常信号は見られないが、図-8に示すように、修繕前後のレーダデータには違いが見られた。修繕前のデータは修繕後のデータに比べ、混合物層とコンクリート床版の境界部付近が白っぽく表示され、それより深い位置の反射信号が不明瞭となっている。このような違いは、混合物層内部や混合物層とコンクリート床版の境界部に滞留している水分の存在に起因するものと推測され、レーダ測定によってある程度の水分滞留を示す信号も得ることができると考えられた。

以上のように、混合物層内部のはく離損傷や、内部に滞留する水分の検知もある程度可能であることが確認できた。また、新たに開発された電磁波レーダ探査機は、橋面舗装を面的に測定することが可能で、測定所要時間や解析時間が大幅に短縮されていることも確認できた。

3. 1. 4 橋梁定期点検結果による健全度評価の検討

本研究では、部材健全度（EHI: Element Health Index）の評価と、それらを基に橋梁の健全度（BHI: Bridge

表-4 健全度指数対応表

| 損傷ランク | OK | IV | III | II | I |
|-------------|------|------|------|------|------|
| 健全度指数 (Wfi) | 1.00 | 0.75 | 0.50 | 0.25 | 0.00 |

Health Index) を評価した。BHI は、橋梁各部材の資産評価価値に着目して、橋梁全体の建設当初の総資産価値に対する、供用後の現在の残存資産価値（現在資産）の比として式(3)のように表される。

$$BHI = \text{現有資産} / \text{初期資産} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

ここで、

現有資産：現在（部材に損傷を有する状態）の橋梁全体の建設費

初期資産：全ての部材が健全な状態（建設当初）の橋梁全体の建設費

橋梁全体の現有資産の評価は、各部材の現有資産の総和として考え、各部材の現有資産は橋梁点検結果による物理的劣化を資産の低下と見なして算出する。この物理的劣化を定量的に示す指標として、表-3 に示すように旧要領の損傷ランクごとに健全度指数 (Wfi) を設けた。各部材の現有資産は各部材の初期資産に健全度指数を掛け合わせることで算出するが、点検時には必ずしも1部材に対し損傷ランクが1つとは限らない。そのため、各損傷ランクが存在する数量の割合を考慮し、式(4)のように総和として算出する。この値を1部材全体の健全度指数とし、これを部材健全度 (EHI) と呼ぶ。

以上より、各部材の現有資産は EHI を用いて式(5)のように表わされる。

$$EHI = \sum (\text{損傷ランク } i \text{ の数量割合} \times Wfi) \cdot \cdot (4)$$

ここで、

i：損傷ランク (OK～I)

Wfi：損傷ランクごとの健全度指数

$$\text{部材の現有資産} = \text{部材の初期資産} \times EHI \cdot \cdot \cdot (5)$$

ここで、部材の初期資産は式(6)のように算出するが、算出に用いる部材単価は、前述したように、現在と将来の資産の比率として用いることを目的としていることから、経年による物価の変動や、社会的割引率等による価格変動は考慮せず一定としている。

$$\text{部材の初期資産} = \text{部材単価} \times \text{部材数量} \cdot \cdot \cdot (6)$$

表-5 健全度算出例

| 損傷ランク(i) | 損傷ランクiの数量割合 | | | | | EHI (A) | 全数量 (B) | 単位 (C) | 部材単価 (D) | 初期資産 (E) (=B×C) | 現有資産 (F) (=D×A) |
|----------|-------------|-------|-------|-------|-------|------------|------------|----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| | OK | IV | III | II | I | | | | | | |
| 主桁 | 0.000 | 0.250 | 0.562 | 0.188 | 0.000 | 0.516 | 60 | t | 500 | 30,000 | 15,465 |
| 床版 | 0.700 | 0.200 | 0.100 | 0.000 | 0.000 | 0.900 | 10 | t | 300 | 3,000 | 2,700 |
| 橋台 | 0.500 | 0.125 | 0.188 | 0.187 | 0.000 | 0.735 | 330 | m ² | 50 | 16,500 | 12,119 |
| 橋脚 | 0.000 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.625 | 700 | m | 60 | 42,000 | 26,250 |
| 橋台基礎 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 300 | m ² | 55 | 16,500 | 16,500 |
| 橋脚 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.875 | 200 | m | 60 | 12,000 | 10,500 |
| 橋脚基礎 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 100 | m | 55 | 5,500 | 5,500 |
| 支保 | 0.000 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.625 | 8 | 個 | 1000 | 8,000 | 5,000 |
| 高欄 | 0.000 | 0.800 | 0.200 | 0.000 | 0.000 | 0.700 | 60 | m | 30 | 1,800 | 1,260 |
| 防護欄 | 0.000 | 0.800 | 0.200 | 0.000 | 0.000 | 0.700 | 60 | m | 30 | 1,800 | 1,260 |
| 地盤 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 10 | m | 60 | 600 | 600 |
| 舗装 | 0.000 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.000 | 0.625 | 300 | m ² | 4 | 1,200 | 750 |
| 伸縮装置 | 0.000 | 0.000 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.375 | 20 | m | 50 | 1,000 | 375 |
| 合計 | | | | | | | | | | 139,900 | 98,279 |

BHI = 98,279 / 139,900 = 0.702

これらを橋梁 13 部材に対し、それぞれ部材健全度の算出を行うが、荷重を支持するなど重要な役割を持った部材が、形状保持を目的とする2次部材よりも重要性が高いことに着目した場合、部材毎の重み付けが必要となるものと考えられる。多種多様な部材や材料で構成される橋梁では、部材の重み係数を決定するのは難しいが、CBMS では主桁や床版のように、部材の重要度が高いほど建設費が高く、高欄等の橋梁構造部材としての重要度が低い部材は建設費も安価と考え、部材の再調達価格の考えを用いることで部材の重要度が BHI に反映している。

本項において述べた健全度評価手法による健全度の算出例を表-5 に示す。

3. 1. 5 橋梁の劣化推定技術に関する検討

構造物の劣化予測は橋梁を構成する部材の材料に着目した場合、コンクリートでは塩化物イオン濃度、中性化深さ、塩分付着量、アルカリ骨材反応、耐荷性を考慮した検討があり、鋼材では腐食面積率、塗装の膜厚測定、板厚測定結果を評価することで、劣化予測が可能となっている。このことから個々の部材に対しては、詳細な調査や設計資料から必要となる条件を揃えることで理論的に劣化予測が可能である。また示方書や診断マニュアルなどの理論式を用いることで個別の対応は可能となっている。しかし、実構造物の損傷は複合的に生じている場合が多く、その要因解明にはサンプルの採取や実橋での調査等が必要となり多くの時間を要する。加えて架設年次の古い橋梁では、設計資料がそろわないケースもあり、机上の予測も難しい場合がある。したがって橋梁維持管理へ劣化予測を適用する場合は、予測のモデル化や実験結果から導き出した回帰式、標準的な理論式の利用、マルコフ理論などの確率論、エキスパートや遺伝的アルゴリズムなどを利用する手法が取られている。CBMSはこのうち、単純マルコフ理論に着目した劣化予測手法を導入した。

(1) マルコフ過程

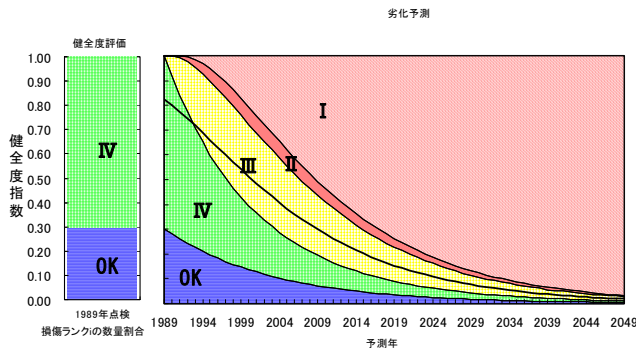


図-9 健全度評価結果と劣化予測への移行

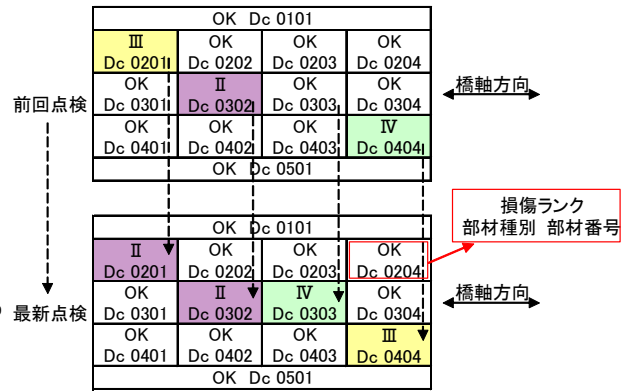


図-10 劣化状況イメージ（床版下面の点検結果）

表-6 床版の遷移確率年(N)

| | OK | IV | III | II | I |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| OK | 9.730 | | | | |
| IV | | 5.470 | | | |
| III | | | 6.060 | | |
| II | | | | 1.000 | |
| I | | | | | 1.000 |

表-7 床版の遷移確率(P)

| | OK | IV | III | II | I |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| OK | 0.931 | 0.069 | | | |
| IV | | 0.881 | 0.119 | | |
| III | | | 0.892 | 0.108 | |
| II | | | | 0.500 | 0.500 |
| I | | | | | 1.000 |

国道に架橋されている橋梁の点検は、近接目視により実施されている。確認される損傷は、いくつかの劣化要因により損傷が発生している複合劣化の場合は、損傷要因別の劣化式を選定するのは困難である。また、劣化要因に着目した予測式や確率的劣化曲線では、点検ランクに沿った複合劣化による損傷状態を複数の予測式での値と関連づけることが困難であると言える。

しかしながら、確率論的健全度評価手法を用いれば、複合劣化の状態を加味した健全度評価として表すことができ、その結果がそのまま劣化予測の初期値として利用可能である。例えば図-9の劣化予測結果（太い実線）を床版劣化予測の例に当てはめると、床版の各パネルの損傷ランクをそのパネル数に応じて平均した予測の結果となる。すなわち1989年には全パネルのうち約70%が損傷ランクIV（損傷係数0.75）、30%がOK（損傷係数1.00）で床版全体としての健全度が0.825（ $=0.75 \times 0.7 + 1.00 \times 0.3$ ）であったものが時間の経過とともに各損傷ランクのパネル数の変化として推移し、健全度が低下する状況が理解できる。点検による健全度の評価結果は、ひび割れや腐食といった損傷状態を種類分けしてそれぞれランク付けしている。

以上のように、マルコフ理論に基づいた遷移確率を用いる手法は、劣化予測を損傷ランク毎に推定可能であり、平均化された健全度の推移だけではなく、損傷の大きさ、範囲などを考慮した予測が可能であることから導入した。

(2) 遷移確率算出手法

劣化の進行を表す遷移確率行列は、昭和63年から平成14年までの15年間に3369橋（複数回点検含む）に対して実施された橋梁点検の結果を用い、新旧の点検結果から損傷ランクの比較を行い、健全度低下の推移を集計することで算出したものである。劣化予測の集約単位は、主桁と横桁や対傾構で区分された床版パネル単位に集約し、ランクごとに比率を算出している。図-10には、その比較集計した床版下面の劣化推移をパネル毎に比較したイメージを示している。前回の点検結果と最新点検結果を比較し、ランクの推移を部材要素別部材番号毎に整理を行っている。このように1パネルを1部材とし、それぞれのパネルに対して劣化を追跡する方式を採用し、新たに集計した結果を基に遷移確率を算出した。なお、前回の点検結果より損傷ランクが高くなっている（健全性が回復している）データは補修、補強の結果として除外している。

(3) 遷移確率算出結果

(2)で述べた算出手法に基づき、コンクリート床版についての遷移確率を算出した結果を以下に示す。

表-6、表-7はそれぞれコンクリート床版の遷移確率年と遷移確率を示したもので、損傷ランク毎の劣化速度（年）の違いを把握することができる。遷移確率算出に用いたデータは48,053部材を対象とした。例えば表-6の遷移確率年N(IV, IV)=5.470は全データ48,053個のうち各点検間隔においてIVがIVに留まっていたデ

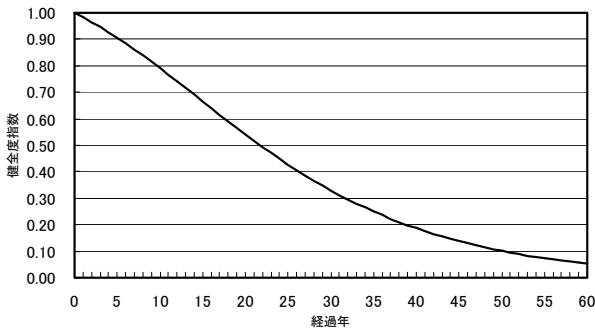


図-11 コンクリート床版の劣化予測結果

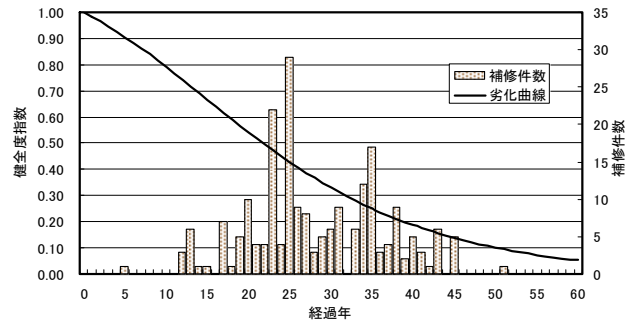


図-12 コンクリート床版の補修実績との比較

表-8 ひび割れ密度と損傷ランクの関係

| 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 |
| II | | 0.5 m 程度 格子状直前もの | 0.2 mm 以下が主で あるが一部に 0.2mm 以上も存在する |
| 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 |
| 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 |

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正する程度に用いるがよい。

表-9 橋梁定期点検の損傷度評価との比較一覧

| 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^2) | 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(ヘアークラック程度) | | 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従、かつ格子状でない 【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、格子状直前もの 【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以上がかなり目立ち連続的な角落ちが生じている | | 10~ | |

一タ数の統計分析により経過年毎に現状に留まる年数を示す。そして、表-7の遷移確率 $P(IV, IV)=0.881$ は $N(IV, IV)$ の 5.470 年を基に、IVが翌年にIVに留まっていた確率に換算したものである。ここで、 $N(I, I)$ の 1.000 は、計算上は無限大となるが、実際のデータでは、この項は分析の対象外としているため、便宜上 1.000 としている。

図-11は表-7の結果を縦軸に健全度指数、横軸に経過年とした健全度指数の経年推移を劣化予測式としてグラフ化したものである。このグラフから35年後には健全度指数が0.25となることを示している。これは表-3に示すように損傷ランクIIに相当するもので、橋梁点検要領(案)では「損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの検討を行う必要がある。」と判定されるランクである。

(4) 補修データとの相関

図-12は、図-11に折れ線グラフで示した劣化予測結果と一緒に、コンクリート床版の経過年毎の補修件数を棒グラフで示したものである。

参考とした補修データは北海道開発局で取りまとめたものである。これまで北海道開発局にて実施されてきた補修は、損傷が顕著となってから補修を行う対

症療法的なものが主であることから、図-12に示す補修データにおいてもその様な考えをもとに実施されてきた結果であると考えられる。一方でCBMSにおける対症療法的補修は主に健全度指数でいう0.5から0.25に設定しているため、劣化曲線により経過年に換算すると22年から35年の13年間となる。この13年間で補修された割合は全体6割を占めることから、この劣化曲線の妥当性を示す一指標になると考えられる。

3. 1. 6 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)1)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。

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-8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

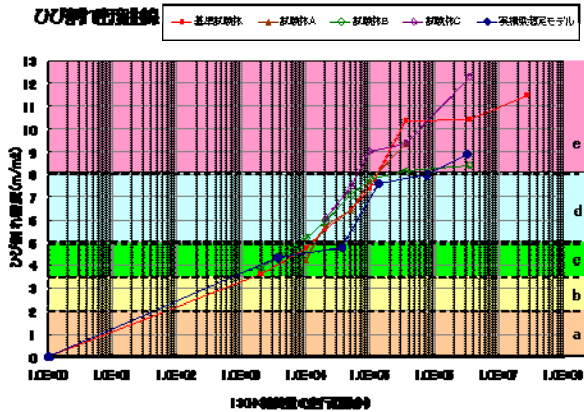


図-13 疲労载荷試験結果

(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)

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⁵⁾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、疲労耐久性と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-8 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-9 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-13 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 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-13 に示した結果を基に回帰分析を行い、図-14 に示すような、ひび割れ密度と走行回数との関係式(6)を提案した。

$$Y=0.02Z^4-0.195Z^3+0.95Z^2-0.75Z \cdots (6)$$

ここで、

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

Y：ひび割れ密度 (m/m²)

N₁₃₀：130kN における走行回数

130kN における走行回数 N₁₃₀ 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

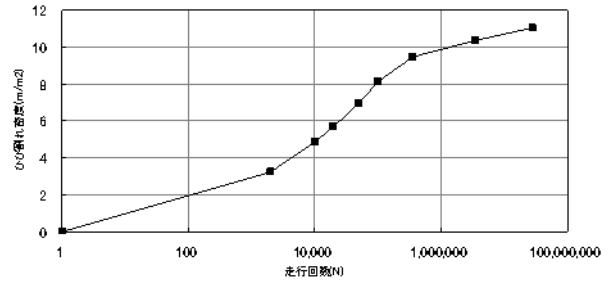


図-14 ひび割れ密度－走行回数曲線

表-10 ひび割れ密度と健全度指数の対応表

| ひび割れ密度(m/m ²) | 0.0-2.0 | 2.0-3.5 | 3.5-5.0 | 5.0-8.0 | 8.0- |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|------|
| 損傷ランク | OK | IV | III | II | I |
| 健全度指数 | 1.00 | 0.75 | 0.50 | 0.25 | 0.00 |

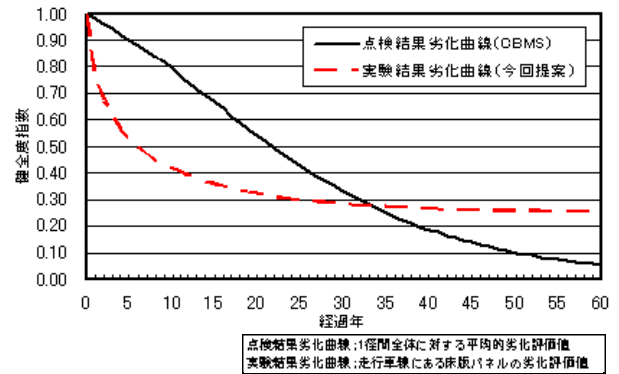


図-15 劣化曲線の比較

道路橋の疲労設計指針を参考に 130kN 換算の年間交通量を式(7)により 4,380 台/年と算出した。

$$X_{130} = (\text{大型車交通量} / \text{車線数}) \times \gamma_n \times 365 \cdots (7)$$

ここで、

$$X_{130} = \text{実橋における標準的 130kN 換算走行回数}$$

大型車交通量：交通量×大型車混入率

交通量：4,000 台/日

大型車混入率：20%

車線数：片側 2 車線

γ_n ：頻度補正係数 (0.03)

さらに、N₁₃₀ 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(8)となる。

$$T_{130} = N_{130} / X_{130} \cdots (8)$$

ここで、

T₁₃₀：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

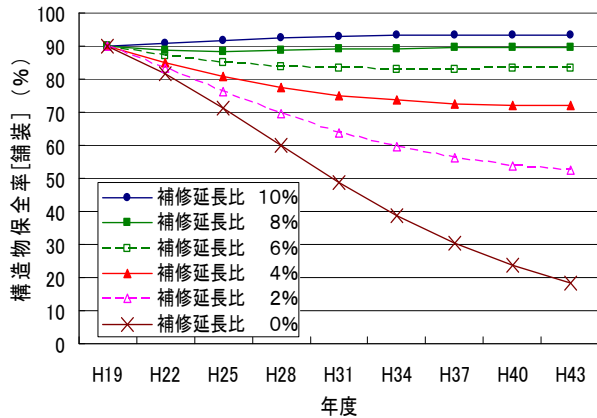


図-16 構造物保全率[舗装]の推移予測



写真-1 シール材が剥がれた状況

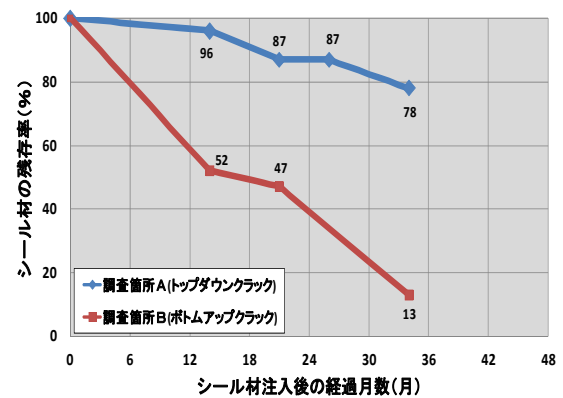


図-17 発生形態の異なる箇所のシール材残存率



写真-2 現地経過写真 (トップダウンクラック箇所)



写真-3 現地経過写真 (ボトムアップクラック箇所)

次に、表-8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-10)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-15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。

3. 2 補修補強シナリオの検討

3. 2. 1 最適な舗装維持修繕シナリオの検討

北海道の国道の路面性状データを基に、舗装維持修繕を全く行わない場合の路面性状の推移と最適な維持修繕延長をマルコフ遷移確率モデルで試算した結果を図-16に示す。維持修繕を全く行わない場合には、現在の構造物保全率[舗装]が90%であるのが約10年後の平成28年度に60%を下回り、約20年後には約25%まで低下すると推測される。構造物保全率[舗装]を国

交省の達成度目標である90%以上に保つためには、全延長に対して年間の維持修繕延長は約8% (全延長約6,400kmに対して500km)程度とすることが望ましいと試算された。

3. 2. 2 舗装の予防的修繕工法に関する検討

(1) 発生形態の異なるひび割れへのシール材注入効果の評価

発生形態の異なるひび割れ箇所のシール材残存率

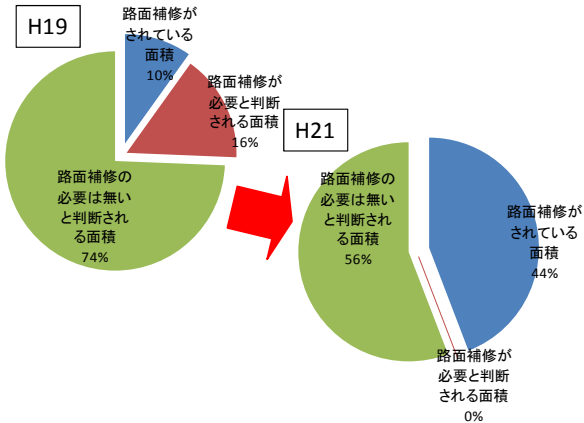


図-18 路面補修・破損状況割合 (ボトムアップクラック)

を図-17 に示す。施工後約3年経過後のトップダウンクラック箇所では78%であったのに対し、ボトムアップクラック箇所での残存率は約13%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ラ材が道路路肩に飛散している状況も見られた。シーラ材が飛散した原因としては、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。写真-2、写真-3 に調査開始後2ヶ月後および、34ヶ月後に撮影した現地路面状況写真を示す。トップダウンクラック箇所の34ヶ月後の現地は、ひび割れの伸長は認められたが、シーラ材が注入され残存している部分は、ひび割れの角欠けや幅の拡大が抑制されており、路面補修を行うまで破損は進んでいなかった。一方、ボトムアップクラック箇所の34ヶ月後は、路面に破損が進み、パッチングの路面補修が行われていた。図-18 にボトムアップクラック箇所における路面補修および破損状態を面積率に表した円グラフを示す。路面補修が行われている面積は、平成19年の測定時には、10%だったのに対し、平成21年の測定時には44%まで増加した。ボトムアップクラック箇所でのシーラ材注入は、早期に剥離や飛散を生じ、ひび割れ幅の拡大や角欠けを抑制することができないだけでなく、ポットホールなどの路面の破損が進行し、路面補修が行われたためであると考えられる。

また、シーラ材施工後の新たなひび割れの伸張を整理した結果を図-19 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伸張度合いが激しい。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が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ラ

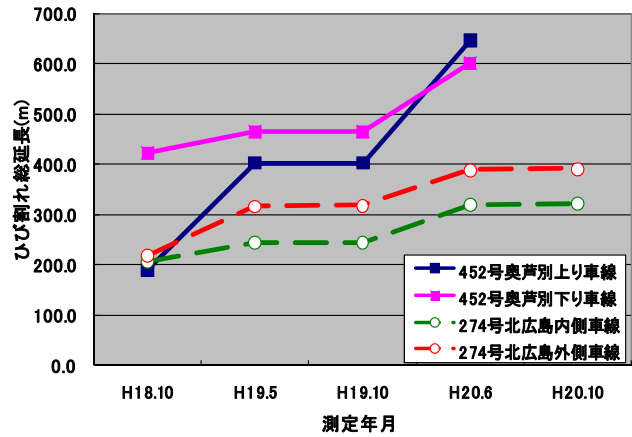


図-19 ひび割れ総延長の測定結果

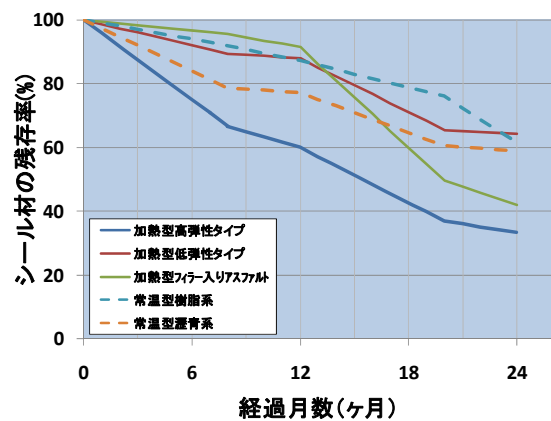


図-20 各種シーラ材の残存率調査結果

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ラ材注入によって破損の進行を抑制する効果が認められ、2~3年程度の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延命効果は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ラ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る。

(2) 種類の異なるシーラ材を使用した注入工法の評価

種類の異なるシーラ材を注入した箇所のシーラ材残存率を図-20 に示す。施工後24ヶ月後の調査において、加熱注入型のシーラ材の低弾性タイプ、常温注入型樹脂系と瀝青系は、60%程度の残存率となった。高弾性タイプ、フィラー入りアスファルトは、40%程度となった。この結果より、各種のシーラ材を比較すると、加熱注入型低弾性タイプ、および常温型樹脂系・瀝青系は、高弾性、フィラー入りアスファルトより残存率が優れる値となった。加熱注入型のみに着目すると、低弾性タイプが、高弾性タイプ、およびフィラー入りアスファルトより優れていることから、積雪寒冷

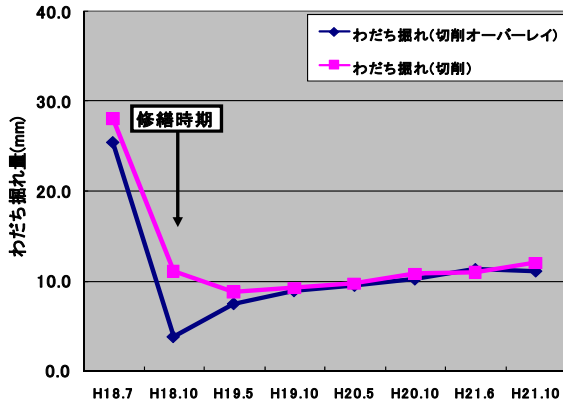


図-21 わだち掘れ量調査結果

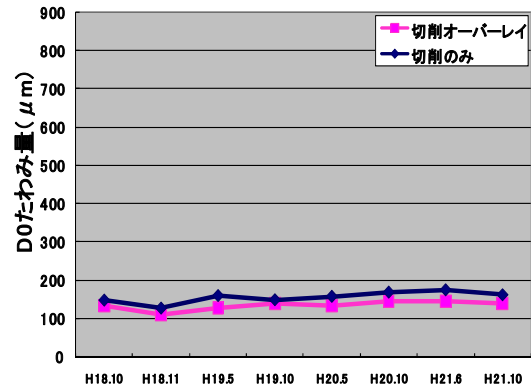


図-22 FWDによるD0たわみ量調査結果



写真-4 凍害損傷（砂利化）状況

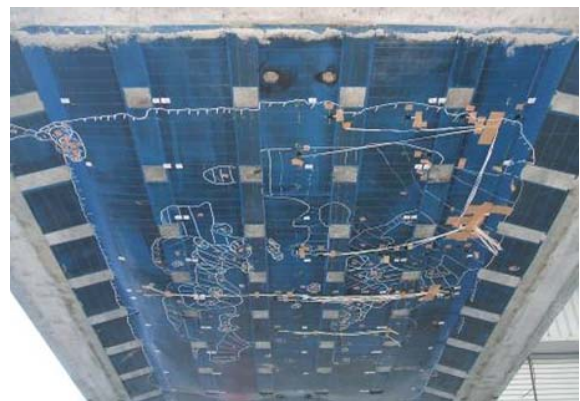


写真-5 補強供試体下面

地において、低弾性タイプの適用が有効であると言える。また、常温型については、加熱注入型低弾性タイプ同等の残存率の結果を得た。

(3) 切削工法の評価

図-21 にわだち掘れ量の調査結果を示す。本区間は交通区分N7、混合物層厚35cmの区間であり、切削区間および切削オーバーレイ区間ともにわだち掘れ量の経年変化に差が無い結果を得た。図-22 にFWDによるD0たわみ量を示す。切削区間、および切削オーバーレイ区間とも同等のたわみ量であり、両区間とも舗装の支持力として、たわみ量が200 μ m以下なので問題のない値を示していると評価できる。切削工法は、交通区分N7のようにアスファルト混合物層が厚い場合、切削に伴いアスファルト混合物層が部分的に薄くなっても、舗装体に与える影響は小さいと判断される結果を得た。

2. 2. 3 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

道路橋のRC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-4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-5参照)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。

図-23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、120kNから階段状漸増载荷を行い、载荷荷重を200kN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の時点で押し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、

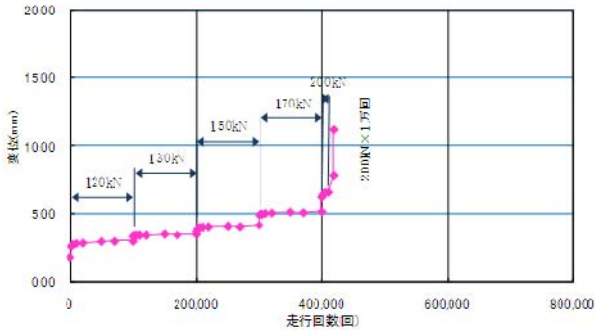


図-23 基準供試体の走行回数と変位関係

$$N_{150} = \sum \left(\frac{\text{載荷荷重}}{150\text{kN}} \right)^{12.76} \times \text{載荷回数}$$

= 1,008,600 回 となる。

図-24 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 の時点で押し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 (7) により予測できる可能性が示唆された。

$$\text{Log}(P/\text{Psx}) = -0.07835 \cdot \text{Log } N + \text{Log } C \quad (7)$$

ここに、

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

$$B = b + 2d_d$$

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

Psx : はり状化した床版の押し抜きせん断耐力

B : 輪荷重に対する床版の有効幅

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度(kgf/cm²)

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

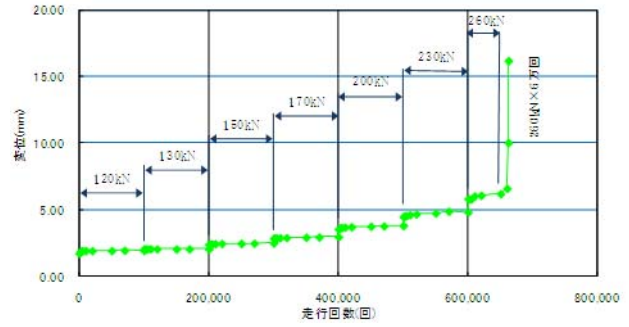
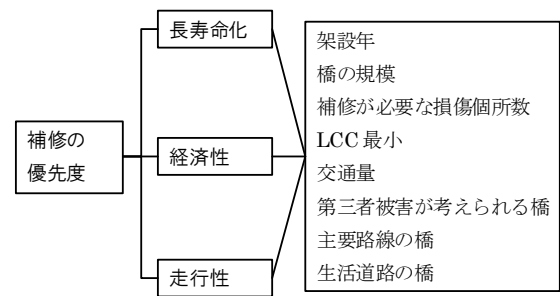


図-24 補強供試体の走行回数と変位関係



【レベル1】 問題 目的
【レベル2】 評価基準
【レベル3】 評価基準

図-25 評価項目の再設定結果

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度(kgf/cm²)

$$(\sigma_{\text{tmax}} = 0.269(\sigma_{\text{ck}})^{2.3})$$

A, b : 載荷板の主筋方向、配力筋方向の辺長 (cm)

X_m : 引張側コンクリートを無視した場合の中立軸 (cm)

d_m, d_d : 引張側主筋、配力筋の有効高さ (cm)

C_m, C_d : 主筋、配力筋のかぶり厚さ (cm)

3. 2. 4 橋梁補修優先順位付けに関する検討

平成 20 年度度実施した補修優先順位を決定するための予備調査結果を基に評価項目の設定し、道路管理者視点とユーザー視点での優先度設定のための項目およびその重要度について、Web 上でのアンケート調査結果から階層化分析法 (AHP) を用いて検討を実施した。AHP は、複雑な意志決定プロセスを階層構造にブレー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、今回の調査についても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。評価項目を図-25 に示

表-11 回答者数

| | 全回答者数 | 有効回答 | 無効回答 |
|-----|-----------|-----------|------|
| 一般 | 90 (18%) | 58 (16%) | 32 |
| 技術者 | 397 (82%) | 297 (84%) | 100 |

表-12 レベル2の重みづけ結果

| | 中心市街地 | | 郊外地 | | 山間部 | |
|-----|-------|------|-------|------|-------|------|
| 一般 | 長寿命化 | 0.36 | 長寿命化 | 0.40 | 長寿命化 | 0.44 |
| | 経済性 | 0.21 | 経済性 | 0.25 | 経済性 | 0.28 |
| | 走行性 | 0.43 | 走行性 | 0.34 | 走行性 | 0.28 |
| | CI | 0.05 | CI | 0.06 | CI | 0.07 |
| 技術者 | 長寿命化 | 0.50 | 長寿命化 | 0.51 | 長寿命化 | 0.52 |
| | B/C確保 | 0.16 | B/C確保 | 0.17 | B/C確保 | 0.18 |
| | 走行性確保 | 0.35 | 走行性確保 | 0.32 | 走行性確保 | 0.30 |
| | CI | 0.06 | CI | 0.05 | CI | 0.06 |

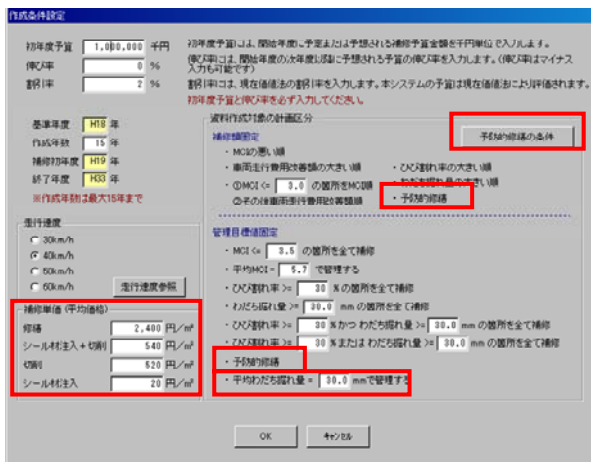


図-26 開発したシステムの初期入力画面

す。

調査対象の被験者の立場としては、表-11に示したように一般利用者が18%、技術者が82%となっている。なお、今回の分析において、回答者が多いことにより一部ばらつきの大きい値があることを考えて、AHPにおける整合度を表すCI値について、各設問にて0.3以上の値を持つ回答は、各回答の分析から除外することとした。

表-12にレベル2の重み付けを示す。表より、一般の回答者は、橋梁架橋地点に対して、中心市街地では走行性、その他の地域では経済性と長寿命化を重視、郊外地は中心地と山間部の折衷的な評価となっている。一方、技術者は、長寿命化を重視し、地域間での差はあまり見られない。

表-13にレベル3の重みづけ結果を示す。これによると、一般の回答者では、長寿命化では補修箇所の大さきなど、経済性では、橋の規模、走行性では、交通量、生活道路を重視する。一方、技術者は、補修箇所、損傷箇所が多いという2点を重視し、重視する指標(長寿命化、経済性、走行性)を変えても、その傾向にほとんど差がない結果となっており、レベル2の傾向とあ

表-13 レベル3の重みづけ結果

| | 長寿命化を重視 | | 経済性を重視 | | 走行性を重視 | |
|-----|---------|------|--------|------|--------|------|
| 一般 | 架設年 | 0.08 | 架設年 | 0.13 | 架設年 | 0.09 |
| | 橋の規模 | 0.10 | 橋の規模 | 0.12 | 橋の規模 | 0.11 |
| | 損傷箇所多 | 0.23 | 損傷箇所多 | 0.18 | 損傷箇所多 | 0.18 |
| | 補修箇所 | 0.31 | 補修箇所 | 0.27 | 補修箇所 | 0.28 |
| | 交通量 | 0.17 | 交通量 | 0.17 | 交通量 | 0.20 |
| | 生活道路 | 0.11 | 生活道路 | 0.12 | 生活道路 | 0.14 |
| CI値 | 0.15 | CI値 | 0.11 | CI値 | 0.12 | |
| 技術者 | 長寿命化を重視 | | 経済性を重視 | | 走行性を重視 | |
| | 架設年 | 0.05 | 架設年 | 0.06 | 架設年 | 0.06 |
| | 橋の規模 | 0.05 | 橋の規模 | 0.07 | 橋の規模 | 0.06 |
| | 損傷箇所多 | 0.18 | 損傷箇所多 | 0.16 | 損傷箇所多 | 0.17 |
| | 補修箇所 | 0.23 | 補修箇所 | 0.19 | 補修箇所 | 0.21 |
| | LCC最小 | 0.07 | LCC最小 | 0.09 | LCC最小 | 0.07 |
| | 交通量 | 0.10 | 交通量 | 0.11 | 交通量 | 0.12 |
| | 交差 | 0.13 | 交差 | 0.13 | 交差 | 0.12 |
| | 代表路線 | 0.09 | 代表路線 | 0.10 | 代表路線 | 0.10 |
| | 生活道路 | 0.09 | 生活道路 | 0.09 | 生活道路 | 0.10 |
| | CI値 | 0.16 | CI値 | 0.13 | CI値 | 0.13 |

| ひび割れ率 | わだち掘れ量 | | | | | |
|--------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|
| | 0 mm以上 10 mm未満 | 10 mm以上 20 mm未満 | 20 mm以上 30 mm未満 | 30 mm以上 35 mm未満 | 35 mm以上 40 mm未満 | 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-27 予防的修繕の工法区分

わせて、補修すべき橋梁の管理を最重要視する結果が強く出ていると考えられる。

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

(1) 作成したシステムの概要

わだち掘れ量、ひび割れ率、平坦性、MCIおよび複合条件による優先順位付けを可能とし、LCCと車両走行費用の改善額を算出して管理目標値や予算に応じた補修箇所選定や年度計画作成を支援する舗装マネジメントシステムの作成を行った。その際、従来型の維持修繕と予防的修繕の両方の考え方に対応でき、積雪寒冷地特有の路面状況の推移を考慮したシステムとなるよう検討を進めた。

作成したシステムは、ひび割れ、わだち掘れ、平坦性、MCIなどの路面性状調査データベースを基に、図-26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)を入力するものである。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-26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

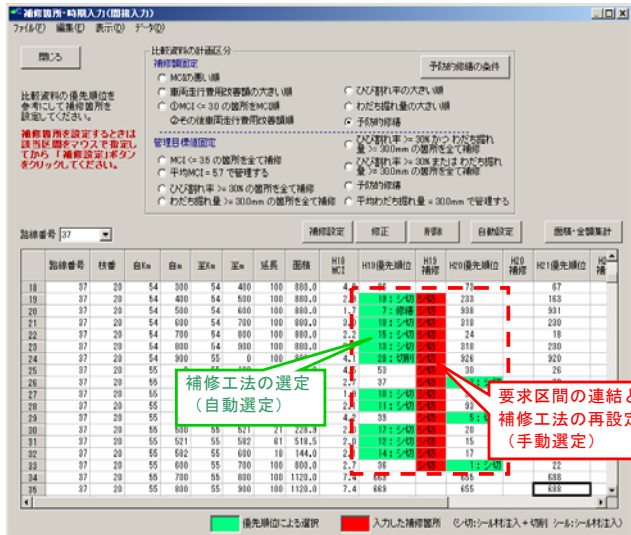


図-28 補修箇所・時期選定機能のフロー

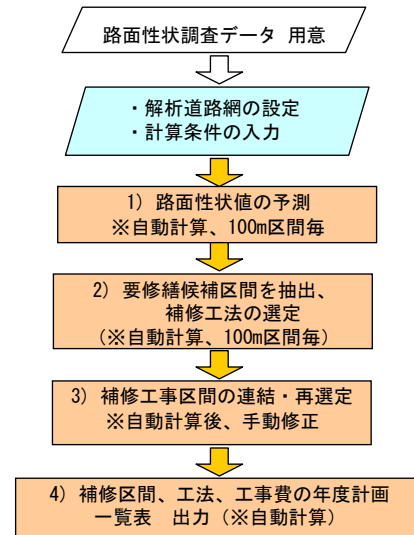


図-29 補修箇所・時期選定画面

| 年度 | 事務所 | 路線番号 | 距離自 | 距離至 | 区間数 | 区間長 | 面積 | 工法 | 金額 | 平均ひび割れ率 | 平均わだち掘れ量 |
|-----|--------|------|--------|--------|-----|-------|--------|--------|------------|---------|----------|
| H21 | 〇〇事務所 | 〇〇 | 22.974 | 24.1 | 12 | 1.126 | 7.882 | 修繕 | 18,916,800 | 85.3 | 22.6 |
| H21 | 〇〇事務所 | 〇〇 | 39.3 | 40.4 | 11 | 1.100 | 8.360 | 修繕 | 18,240,000 | 64.4 | 22.6 |
| H21 | □□事務所 | □□ | 89.74 | 90.9 | 14 | 1.160 | 8.612 | 修繕 | 19,488,000 | 67.1 | 23.6 |
| H21 | 〇〇事務所 | 〇〇 | 23.5 | 24.5 | 10 | 1.000 | 7.200 | 修繕 | 15,552,000 | 60.1 | 14.9 |
| H22 | 〇〇事務所 | 〇〇 | 26.3 | 27.444 | 14 | 1.144 | 8.008 | 修繕 | 18,883,200 | 66.5 | 30.7 |
| H22 | △△事務所 | △△ | 3 | 4 | 10 | 1.000 | 9.600 | 切削 | 4,492,800 | 4.2 | 39.2 |
| H22 | △△事務所 | △△ | 17.2 | 18.3 | 11 | 1.100 | 8.360 | 切削 | 3,952,000 | 4.4 | 37 |
| H23 | ◎◎事務所 | ◎◎ | 13.6 | 14.199 | 7 | 599 | 9,244 | 切削 | 4,681,924 | 1.7 | 51.5 |
| H23 | △△事務所 | △△ | 14.199 | 16.338 | 30 | 2.139 | 37,826 | 切削 | 19,660,576 | 6.3 | 39 |
| H23 | △△事務所 | △△ | 43.1 | 45.1 | 30 | 2.000 | 30,000 | 切削 | 14,820,000 | 8.9 | 41 |
| H23 | ■ ■事務所 | ■ ■ | 104.1 | 105.6 | 17 | 1.500 | 12,659 | 切削 | 6,145,620 | 2.3 | 38.9 |
| H23 | ■ ■事務所 | ■ ■ | 109.6 | 110.6 | 10 | 1.000 | 8.200 | シール材注入 | 3,985,200 | 23.1 | 37.7 |
| H23 | ■ ■事務所 | ■ ■ | 111.6 | 112.6 | 10 | 1.000 | 10,040 | シール材注入 | 4,924,800 | 27.8 | 38.7 |
| H23 | ■ ■事務所 | ■ ■ | 114.8 | 116 | 12 | 1.200 | 10,080 | 切削 | 4,804,800 | 1.3 | 39.1 |
| H23 | □□事務所 | □□ | 2.3 | 3.4 | 13 | 1.100 | 19,800 | 切削 | 9,360,000 | 5.2 | 37.8 |
| H23 | □□事務所 | □□ | 10.8 | 11.9 | 13 | 1.100 | 10,580 | 切削 | 5,054,400 | 4.4 | 38.1 |
| H23 | ◎◎事務所 | ◎◎ | 5.3 | 6.444 | 19 | 1.144 | 28,600 | 切削 | 13,572,000 | 3.1 | 40.1 |
| H23 | ■ ■事務所 | ■ ■ | 9.3 | 10.9 | 16 | 1.600 | 14,180 | 切削 | 6,910,800 | 7.9 | 37 |
| H23 | △△事務所 | △△ | 0.018 | 1.4 | 16 | 1,382 | 13,223 | 切削 | 6,424,080 | 6.3 | 42.5 |

図-30 補修箇所と工事費の出力帳票例

率とわだち掘れ量の予測値に応じて、図-27 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。

(2) 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-28 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-29 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、工事費を図-30 のように一覧表の形式で帳票表示できる。

所、工法、工事費を図-30 のように一覧表の形式で帳票表示できる。

(3) 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。

本システムにより、補修箇所の選定や、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、維持補修戦略に適合した解析を行うことが可能となった。

2. 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

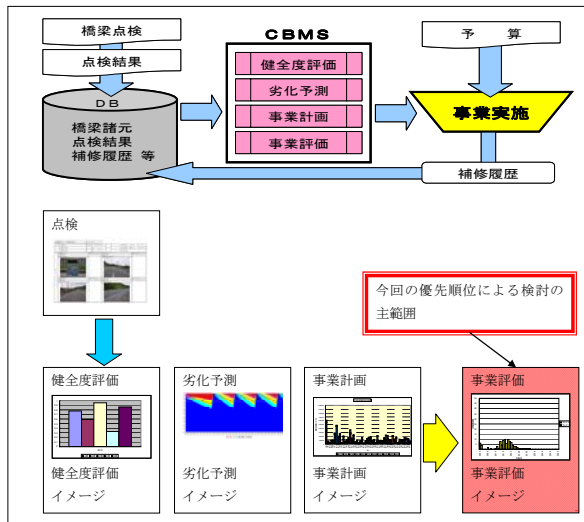


図-31 CBMS 機能概要

計画」の機能で構成されている。本検討で追加される機能が分かるように図-31にCERIの機能概要を示す。また、橋梁個別の分析結果を出力したレポートの出力例を図-32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、点検時での健全度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に係わる業務の効率化を図ることが出来ると考えられる。

優先順位を考慮した維持補修計画機能について、システム仕様設計まで検討し、システムへの導入準備を整えた。

4. まとめ

4.1 健全度評価・劣化度予測手法の開発

4.1.1 路面性状予測精度向上手法の検討

ネットワークレベルの路面性状予測において、マルチコフ遷移確率モデルの有用性を確認した。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。

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

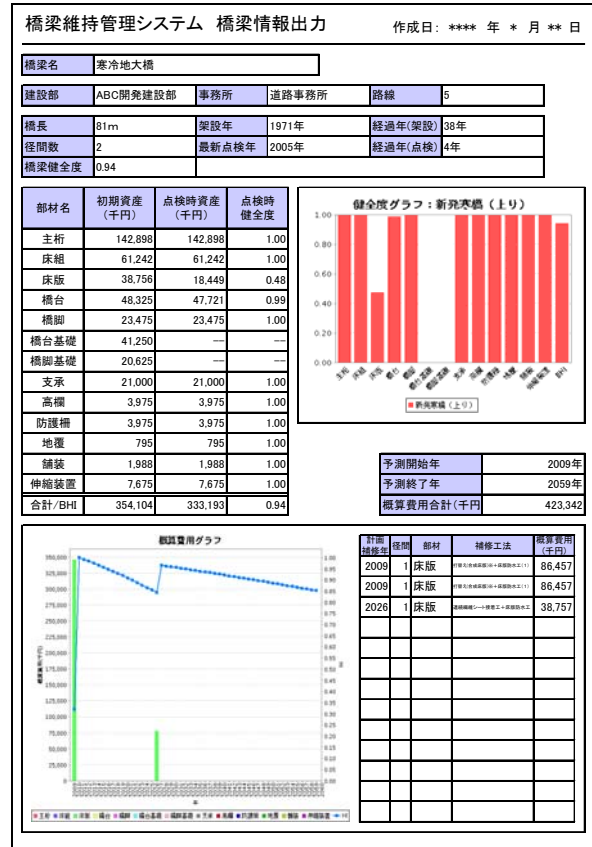


図-32 橋梁個別の事業計画レポート出力例

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 橋面舗装内部の損傷および水分検知技術の開発

橋面舗装のはく離損傷や舗装内部に滞留する水分の状況を電磁波レーダ測定によってある程度把握することが可能と考えられた。ただし、その精度や損傷程度の判断の正確性といった点については今後も引き続き検討が必要である。

4.1.4 橋梁定期点検結果による健全度評価の検討

本調査研究では、橋梁定期点検結果を用いて、EHIを評価し、その積み上げによる橋梁健全度を算定した。算定した健全度は、物理的劣化を資産の低下と見なし、橋梁の残存資産価値を評価することで定量化出来る。また、健全度には部材に対して重要度を決定することが必要であるが、重要な部材ほど建設費が高くなる傾向がある。本手法では、部材毎の建設費を積み上げて健全度を算定していることから、重要度を加味した健全度となっており、本算定方法は、システムを構築するためには、効率的であると考えられる。

4.1.5 橋梁の劣化推定技術に関する検討

本研究で開発したシステムでは、マルコフ理論に着目して劣化予測式を検討した。また、理論式による劣化予測技術が進みつつある RC 床版部材については、実験的アプローチによる予測式の検討を行った。

マルコフ遷移確率理論を用いた部材別劣化予測式は、橋梁点検結果を基にして、遷移確率を同定出来システムに導入できた。本劣化予測は、北海道の国道橋梁における補修実績と健全度を比較すると、設定した劣化予測は妥当であると考えられる。

4. 1. 6 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、橋梁点検手法に沿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、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。

4. 2 補修補強シナリオの検討

4. 2. 1 最適な舗装維持修繕シナリオの検討

マルコフ遷移確率モデルを用い、構造物保全率[舗装]の目標値を達成するために必要な年間維持修繕延長を求めた。構造物保全率[舗装]を目標水準に維持するために必要な修繕戦略について試算をした。

4. 2. 2 舗装の予防的修繕工法に関する検討

シーラ材注入工法の効果に関しては、シーラ材残存率と路面状況から評価すれば、トップダウンクラックに対してはシーラ材注入による破損の進行を抑制する効果が認められ、2~3 年程度の延命効果が得られた。ボトムアップクラックに対する延命効果は得られていない。一方、ひび割れ率から評価すれば、両工区共にシーラ材注入によりひび割れの伸長を完全に抑制することはできておらず、予防的修繕工法の基準に照らせば切削オーバーレイ等の修繕対象となるため、延命効果は2年程度と評価することができる。しかし、シーラ材が健全に残存し、ひび割れ幅の拡大や角欠けを抑制している部分を、ひび割れ率に計上するか否かで評価が異なる。

試験施工におけるシーラ材残存率の結果から、加熱注入型低弾性タイプ、常温型樹脂系、常温型瀝青系は、加熱注入型高弾性タイプとフィラー入りアスファルト

より残存率が高く、剥離に対する抵抗性に優れると言える。

また、加熱注入型の低弾性、フィラー入りアスファルト、常温注入型の樹脂系は、加熱注入型の高弾性、その他と比較して、供用後の剥離に対する抵抗性に若干、優位であると推察される。今後も継続して調査を行う必要がある。

切削工法については、交通量区分 N7 において切削オーバーレイ工法と比べて、わだち掘れ量とたわみ量に大きな差が無いことが確認された。交通区分 N7 のように、アスファルト混合物層が 35cm と厚い場合、切削に伴いアスファルト混合物層が部分的に薄くなっても、舗装体に与える影響は小さいと判断される結果であり、切削工法の適用は許容できるものと考えられる。

4. 2. 3 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。

4. 2. 4 補修橋梁の優先順位付けに関する検討

本検討では、Web を利用したアンケート調査を実施し、補修橋梁の優先順位付けを行うために基礎データを約 500 名から得られた。その結果より、一般及び技術者の優先順位付けの指標に関する考え方の違いが確認でき、各立場の意志を加味した優先順位を決定するための重み係数を設定することが出来た。

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改良

積雪寒冷地の地域特性を考慮に入れた舗装マネジメントシステムを作成した。本システムにより、舗装補修箇所の選定や、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、維持補修戦略に適合した解析を行うことが可能となった。

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。

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

参考文献

- 1) 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
- 2) 橋梁点検要領(案) 建設省 土木研究所 昭和 63 年 7 月
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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.