

13.5 既設舗装の長寿命化手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）

研究担当者：久保和幸、渡邊一弘、堀内智司

【要旨】

効率的な舗装管理に向け、既設舗装の修繕に関して従来の原形復旧一辺倒ではなく、道路の性格や管理レベルに応じた戦略的な維持管理手法が必要となっている。本研究においては、路面性状の効率的取得技術、既設舗装の構造的健全度評価方法、幹線道路におけるライフサイクルを見据えた維持修繕手法、及び生活道路における簡略的な維持修繕手法の提案を通じ、効率的な舗装管理の実現に寄与することを目的としている。

平成 24 年度は、既設舗装の構造的健全度の評価方法の提案に向け、土圧計等各種計測機器を埋設した舗装の実大供試体における繰り返し載荷試験を継続して行った。また、幹線道路のライフサイクルを見据えた維持修繕手法の提案に向け、実道における路面性状データの分析を通じ、補修工法等がその後の供用性の与える影響について確認した。さらに、路面性状の効率的取得に向け、三次元点群データの集合体による路面の把握手法について検討を行った。これらの結果、舗装の繰り返し載荷に伴いアスコン層・路盤の疲労は蓄積していくこと、その傾向は路面への雨水の進入の有無等により差が生じうること、また切削オーバーレイの繰り返しとその後の供用性に影響を及ぼしうること、さらに三次元点群データを基にしたコンター図により路面の変動が確認可能であることを明らかにした。

キーワード：舗装、構造的健全度、繰り返し載荷、ライフサイクル、路面性状

1. はじめに

国内の道路延長は 120 万 km を超えるに至り、ストックとして蓄積された舗装面積も膨大なものとなっている。また、生活道路から幹線道路に至るまで、道路の性格・特性も様々である。一方で、人口・社会構造の変化に伴う予算的制約も顕在化し、舗装も新設から維持修繕の時代へととなっている。このような中、幹線道路については既設舗装を効率的に調査し、その構造的健全度を適切に評価し、ライフサイクルを見据えた修繕を実施することが、また生活道路については簡略的な維持管理技術を適用することにより、効率的に舗装管理をしていくことが求められている。本研究は、舗装管理のこれら各段階での適用手法の検討や技術開発を通じ、従来の原形復旧一辺倒ではなく、道路の生活や管理レベルに応じた戦略的な維持管理手法の適用を通じた効率的な舗装管理の実現に資することを目的としている。

平成 24 年度は、既設舗装の構造的健全度の評価方法の提案に向け、土圧計等各種計測機器を埋設した舗装の実大供試体における繰り返し載荷試験を継続して行った。また、幹線道路のライフサイクルを見据えた維持修繕手

法の提案に向け、実道における路面性状データの分析を通じ、補修工法等がその後の供用性の与える影響について確認した。さらに、路面性状の効率的取得に向け、三次元点群データの集合体による路面の把握手法について検討を行った。

2. 実大供試体の繰り返し載荷試験

2.1 試験概要

舗装の修繕としては、ひび割れやわだち掘れの進行に伴い切削オーバーレイ（以下、「切削 OL」という。）を実施するのが一般的である。路盤まで打換えることは少なく、いわば原形復旧の考え方を適用している。一方で、雨天後にひび割れに沿った路盤材の細粒分の噴き上がりの発生など、舗装の破損の進行に伴う路盤以下へも損傷も懸念される。

そこで、舗装各層に土圧計等の各種計測機器を埋設した舗装の実大供試体を作製し、繰り返し載荷試験に伴う舗装内の荷重伝達状況の変化・疲労蓄積傾向等を確認することとした。試験装置は写真-1 に示す土木研究所内の「舗装繰り返し載荷試験装置」であり、同写真の下半分

にあるピット内に実物大の舗装供試体を構築し、実際の車道で舗装が受けるものと同様な荷重を繰り返し載荷するものである。なお、本装置は舗装の実大供試体内に任意の高さまで地下水位を発生させることが可能なものである。



写真-1 繰り返し載荷試験装置

作製した実大供試体は、図-1、2 に示すものである。平成 24 年度は、N5 断面の 2 載荷点 (図-2 における載荷点 No.1 と No.3) において、約 1,700 万回ずつ繰り返し載荷試験を行った。繰り返し載荷試験条件は表-1 に示すとおりである。

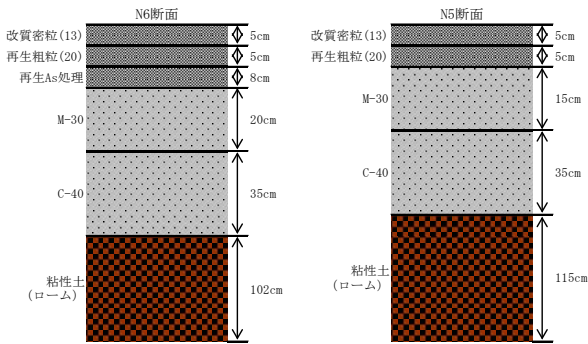


図-1 実大供試体舗装断面図

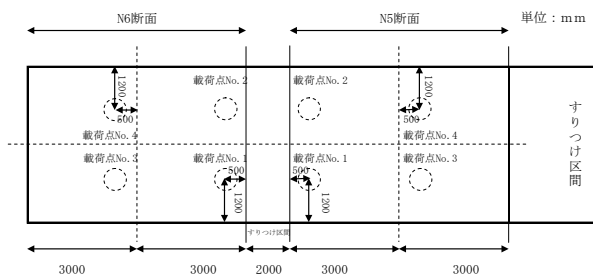


図-2 実大供試体舗装平面図

表-1 繰り返し載荷試験条件

項目	載荷点No.1	載荷点No.3	備考
載荷板φ	30.0cm	32.5cm	路面とはゴム載荷板で設置(ゴム厚10mm)
載荷板設置圧	0.59MPa		49kN輪荷重相当の接地圧
載荷荷重	1~42kN	1~49kN	設置圧および載荷板面積より算出
載荷波形	正弦波		定点載荷
載荷周波数	2Hz		—
載荷時期	H24.2~ H24.10	H24.11~ H25.3	
載荷回数	約1,760万回	約1,730万回	載荷点No.1は押し抜きせん断状に破壊、No.3は試験継続中
載荷路面への雨水	進入する	進入しない	載荷点No.1は路面湛水・自然乾燥の繰り返し

2.2 試験結果

2.2.1 試験前後の載荷点の状況

載荷点における路面の試験前後の状況を図-3 に示す。載荷点 No.1 の約 1,700 万回載荷後は、路盤の細粒分やはく離によるアスコンのフィラー分などによるものと想定される噴出跡が確認でき、また載荷板に沿って押し抜きせん断状に破壊されている (路面沈下量 50mm 以上)。一方、載荷点 No.3 は、5~6mm 程度の路面沈下は認められるが、目立った損傷はない。

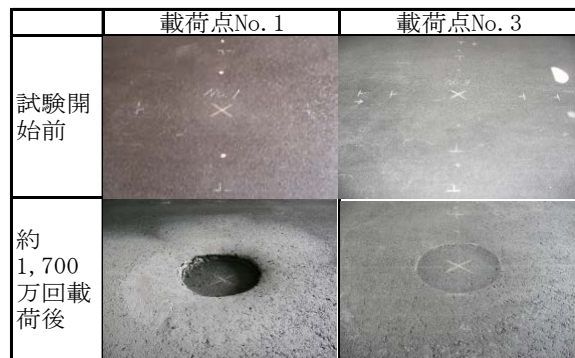


図-3 試験前後の載荷点状況

2.2.2 各層弾性係数の推移

試験期間中に、随時載荷点で FWD たわみ量調査を行い、そのたわみ量をもとに多層弾性理論に基づく静的逆解析プログラム (BALM) より舗装各層の弾性係数を求めた。各層のポアソン比は、解析等で一般的に用いられている数値 (アスコン層 : 0.35、路盤 : 0.35、路床 : 0.4) としている。その結果を図-4、5 に示す。アスコン層弾性係数は 20°C 温度補正を行ったものである。載荷点 No.1 では、アスコン層及び路盤の弾性係数は繰り返し載荷に伴い低下し、路床の弾性係数は上昇している。載荷点 No.3 では、約 1,700 万回載荷後もアスコン層は 6,000MPa 程度以上と健全な状態を保ったままで、路盤

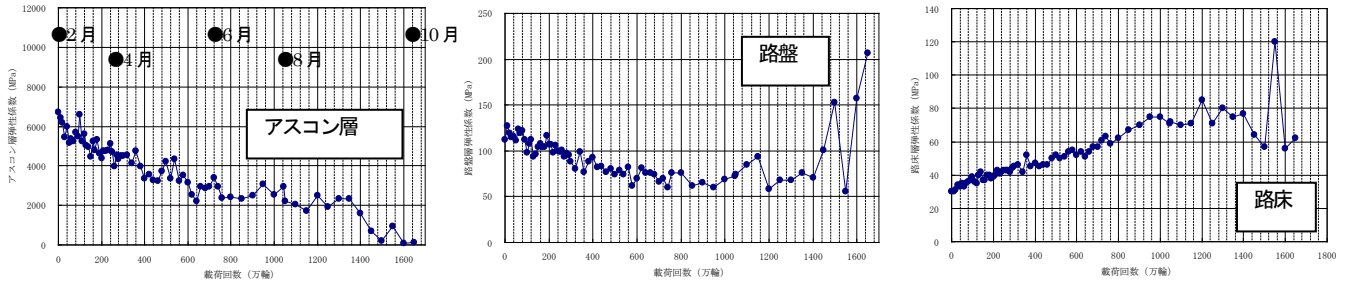


図-4 荷点 No. 1 における各層の弾性係数の推移

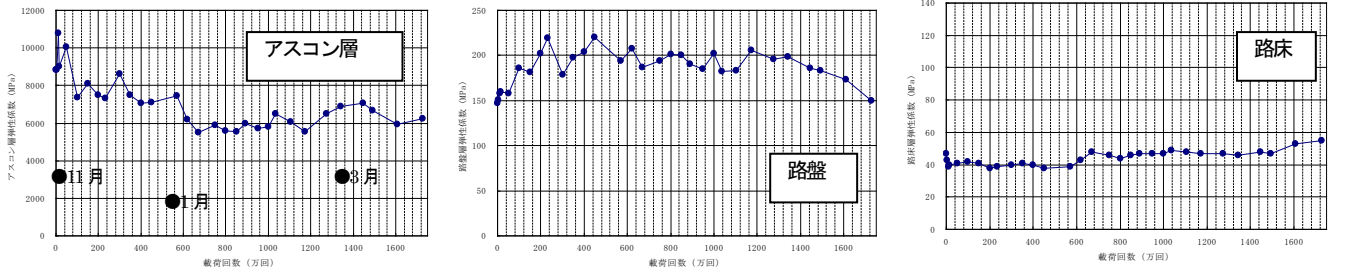


図-5 荷点 No. 3 における各層の弾性係数の推移

及び路床の弾性係数の変化も明確には確認されない。なお、荷点 No.1 については、1,400 万回荷重を超えたあたりから特に路盤以下の弾性係数の逆解析結果の変動が大きくなっている。これは、荷点に沿った路面沈下が著しく、荷点と FWD 荷重板（半径は同一の 30cm）のずれや、アスコン層が押し抜きせん断状の破壊形態であるため層状の弾性体という逆解析の仮定に不整合が生じていることによるものと考えられる。

2.2.3 計測土圧の推移

荷点直下の上層路盤上面と路床上面での計測土圧の推移を図-6に示す。荷点 No.1 は、荷重とともに上層路盤上面及び路床上面で受ける土圧が上昇する。これは、前節で述べた FWD たわみ量の静的逆解析から算出されるアスコン層弾性係数が低下していることから、アスコン層に疲労が蓄積することにより、荷重分散効果が減少して下層で受ける圧力が上昇すると説明できる。一方、荷点 No.3 は土圧に明確な変化はなく、これは前節で各層の弾性係数に明確な変化がないことと整合している。

2.2.4 順解析による計測土圧の検証

実測値である計測土圧を検証するため、FWD たわみ量の静的逆解析から算出されるアスコン層弾性係数を用い、多層弾性理論に基づいた舗装の構造解析プログラム

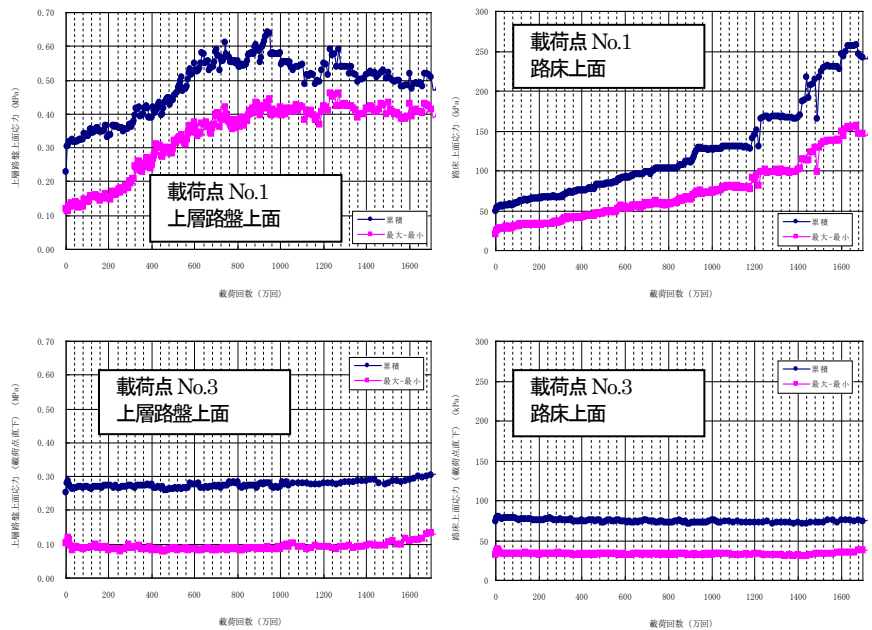


図-6 上層路盤上面及び路床上面の計測土圧の推移

(GAMES) を活用して順解析して得られる土圧を算出した。比較位置は、上層路盤上面である。各層のポアソン比は 2.2.2 項で示した値としている。なお、順解析に用いる弾性係数は温度補正前の逆解析弾性係数とし、比較する実測値は FWD たわみ量試験時の計測土圧（ピーク値土圧と FWD による衝撃荷重を与える直前の土圧の差分）を用いている。結果を図-7に示す。完全に一致している訳ではないが、荷点 No.1 では直上層のアスコン層の弾性係数の低下（疲労の蓄積）に伴い荷重分散効果が低下して、荷重回数と共に土圧が上昇していくことが実測値、解析値共に再現されている。一方で、1,700

万回載荷時も載荷時もアスコン層の弾性係数が6,000MPa以上と比較的健全な状態を保ったままである。載荷点 No.3 については、解析値でも実測値と同様に変動はほとんどない。これらより、FWD たわみ量を静的逆解析して求める各層の弾性係数を把握することにより、舗装の疲労蓄積の変動傾向は把握できることが確認された。

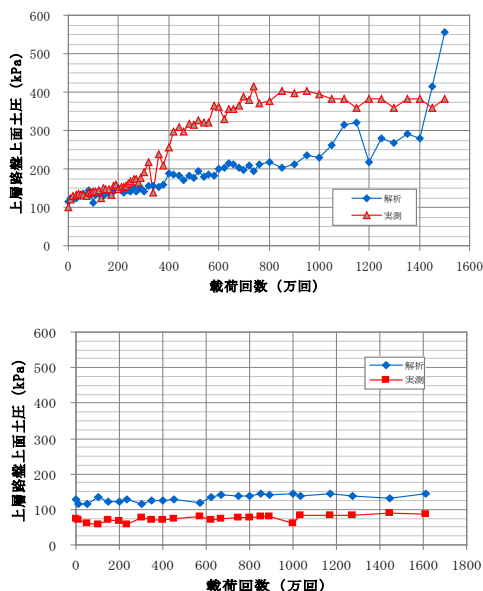


図-7 上層路盤上面土圧の実測値と解析値の比較
(上段：載荷点 No. 1、下段：載荷点 No. 3)

2.2.5 路面性状の推移

それぞれの載荷点における路面沈下量を図-8 に示す。載荷点 No.1 は載荷と共に載荷点の沈下が着実に進行して1,700 万回載荷時では50mm を超える一方、載荷点 No.3 は100~200 万回載荷時まで初期沈下が3~4mm 程度進行したがその後の沈下は極めて緩やかで、1,700 万回載荷時でも5~6mm 程度である。

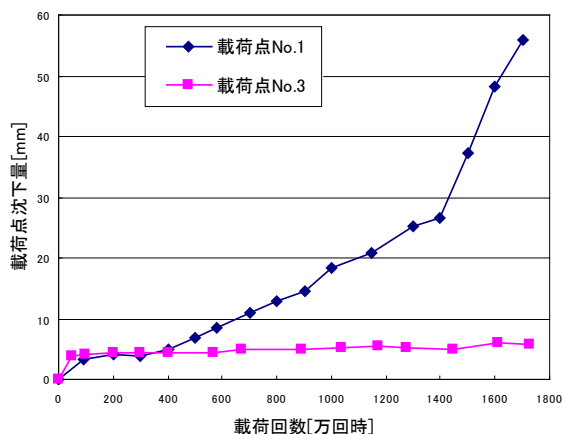


図-8 載荷点部路面沈下量の推移

ひび割れに関しては、載荷点 No.1 については押し抜きせん断状に破壊する時点では載荷板に沿ったせん断ひび割れは確認されたが、いわゆる疲労ひび割れは確認されなかった。ただし、360 万回前後の繰り返し載荷時(雨水進入による湿潤状態)には、乾燥路面状態では目視で確認できない程の微細なひび割れが、載荷板に対して放射状に、ひび割れへの水の出入りの形で確認された。これより、雨水によりはく離が進行し、アスコン層の健全度が早期の繰り返し載荷時から低下していることが伺える。また、図4、5 に示したアスコン層・路盤弾性係数の推移の結果とも併せると、載荷点 No.1 では弾性係数の低下と路面の継続的沈下が確認される一方、載荷点 No.3 では弾性係数も路面の沈下も大きく変動していない。これらより、路面の沈下を確認することにより舗装の構造的健全度が評価しうると考えられる。なお、No.1 載荷点にて路盤材の細粒分やはく離によるアスコンのファイラー分などによるものと想定される噴出後が明確に確認されたのは、1250 万回載荷終了時であった。載荷点 No.3 に関しては、常時乾燥路面状態であり、ひび割れは目視で確認されていない。

2.2.6 まとめ

前項までのとおり、同一断面でも異なる疲労蓄積傾向が観察された。載荷点 No.1 は1~42kN の載荷振幅、No.3 載荷点は1~49kN の載荷振幅にも関わらず、載荷点 No.1 は疲労が着実に蓄積し、載荷点 No.3 は疲労蓄積傾向が明確には確認されない。また、載荷点の路面沈下量についても、載荷点 No.1 は載荷と共に着実に進行して1,700 万回載荷時では50mm を超える一方、載荷点 No.3 は100~200 万回載荷時まで初期沈下が3~4mm 程度進行したがその後の沈下は極めて緩やかで、1,700 万回載荷時でも5~6mm 程度である。この理由として、①雨水の浸入による路面湛水下の載荷の有無によるはく離進行の有無 (No.1 載荷点：有り、No.3 載荷点：無し)、②試験時期による舗装体温度の影響(総じて、No.1 載荷点>No.3 載荷点)、③舗装各層の締固め度の差異 (No.1 載荷点の試験初期のアスコン弾性係数及び路盤弾性係数<No.3 載荷点のそれら) の影響と考えている。

今後は、破壊が進んでいない載荷点 No.3 において、舗装体温度の影響を確認するため試験を継続し、また、静的逆解析による弾性係数を用いて順解析した算出土圧と計測土圧の差異を確認しており、動的逆解析による各層弾性係数の検証を行う予定である。その他、路盤以下に地下水位を強制的に与えた試験の実施や、ひび割れ発生後の荷重伝達状況の変動等を明らかにし、既設舗装の

構造的健全度の評価方法を提案していく予定である。

3. 補修工法等が供用性に与える影響

3.1 検討内容

既設舗装を長寿命化させていくためには、適切な補修工法の選定が求められる。そこで、ライフサイクルを見据えた維持修繕手法の提案に向け、補修工法等がその後の供用性に与える影響について分析を行った。分析にあたっては、関東地方整備局で蓄積されている補修履歴データと路面性状データについて貸与を受け、当該データを用いて分析を行った。

分析手法は、膨大なデータ（評価区間）を有するものに対して劣化の不確実性による劣化速度の相違を取り扱うことが可能であるマルコフ連鎖モデルを用いた確率論的劣化予測モデルにより予測モデルを構築し、補修工法等によりそれらのモデルがどのように影響を受けるかを分析する手法とした^{1)、2)}。

なお、上記予測モデルは、最新路面性状調査結果と、前回調査結果又は直前補修結果の組合せで確率論的劣化予測モデルを構築するものである。本検討においては、期待寿命が現実的ではなくなる調査1回のみ区間と補修実績が存在しないにも関わらず路面性状が回復している区間のデータを除外して予測モデルを構築している。予測モデルの構築にあたっては、路面性状はひび割れとわだち掘れを対象として表-2のとおり離散化している。

損傷度ランク	ひび割れ率	わだち掘れ量
1	0%	0mm以上 5mm未満
2	0.1%以上 5%未満	5mm以上 10mm未満
3	5%以上 10%未満	10mm以上 15mm未満
4	10%以上 15%未満	15mm以上 20mm未満
5	15%以上 20%未満	20mm以上 25mm未満
6	20%以上 25%未満	25mm以上 30mm未満
7	25%以上 30%未満	30mm以上
8	30%以上	—

表-2 路面性状データの離散化

3.2 補修工法が供用性に与える影響

補修履歴データには、新設からその他・不明まで、補修工法が21区分に分類されて格納されている。このうち、データ数の多い「新設」「打換」「上層路盤打換」「表層・基層打換」「OL（オーバーレイ）」「切削OL」「その他」を抽出し、それらがその後の供用性に与える影響を分析した。なお、「切削OL」はデータ数が多く、別途舗

装構成データとの組合せにより、「切削OL（1層）」「切削OL（2層）」「切削OL（その他）」に分類した。分析結果を図-9、10に示す。

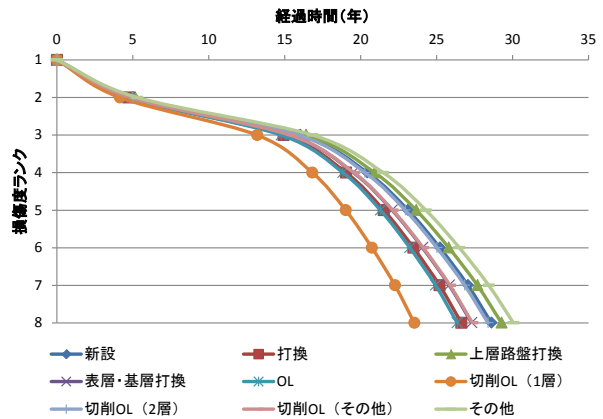


図-9 補修工法別平均劣化予測曲線（ひび割れ）

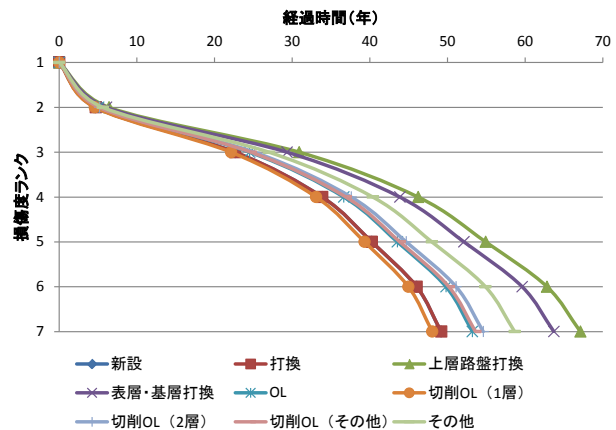


図-10 補修工法別平均劣化予測曲線（わだち掘れ）

これらより、新設同様の打換がその後の供用性上で最も良いといった傾向は見られず、一般的には補修工法が供用性に与える影響について大きな差異はない。大型車交通量や舗装材料の差等については分析の対象としていないが、これより、道路管理者が現場で適切に損傷状況の評価してほぼ一律の供用性を期待できる補修工法を選択していると考えられる。なお、ひび割れに関しては切削OL（1層）について寿命が短い傾向がある。この補修工法は表層5cm前後の切削OLであり、残存する中間層・基層以下にひび割れが残っていた場合、リフレクションクラック状に表層部に早期に影響を及ぼしうることが考えられる。つまり、表層切削OLの場合、アスコン層貫通クラックやボトムアップクラックか否かという判断や、応力緩和層の設置の検討の必要性を示唆するものである。

3.3 繰り返し補修が供用性に与える影響

既設舗装の補修については、接続道路等との関係で補修後の路面高に影響を与えない切削 OL が幹線道路では工事期間の制約からも一般的であり、関東地方整備局の補修履歴データでも最も多く切削 OL が占められている。

そこで、切削 OL の繰り返し数を対象として分析した結果を図-11、12 に示す。

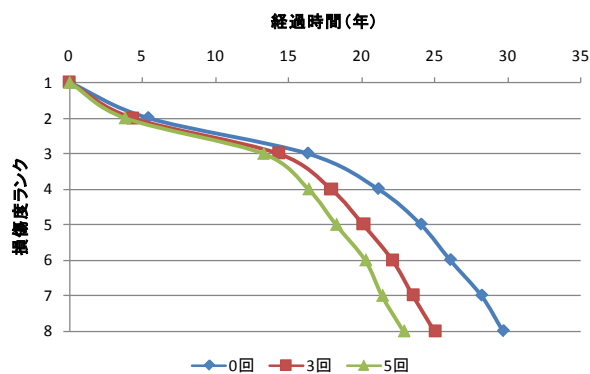


図-11 切削 OL 繰り返し数別平均劣化予測曲線
(ひび割れ)

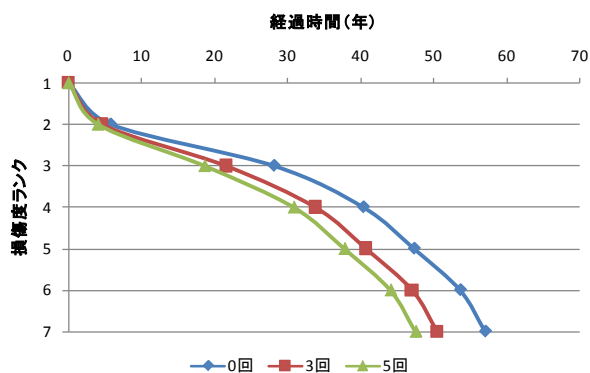


図-12 切削 OL 繰り返し数別平均劣化予測曲線
(わだち掘れ)

これらより、切削 OL の繰り返しが多くなる程その後はひび割れ・わだち掘れ共に早期に劣化していくことが分かる。ここでは切削 OL はデータ数の関係から何層までを対象としているかは分類していないが、いずれにせよ切削 OL は基層以下又は路盤以下には補修をしていないものである。2 章の実験結果より、疲労は路盤でも蓄積していく傾向があることから、切削 OL の範囲より下の層の疲労蓄積が影響していることが考えられる。これより、切削 OL の繰り返しがその後の供用性に影響を及ぼしうることを考慮して補修工法を選定する必要があると考えられる。

4. 三次元点群データの集合体による路面の把握手法

4.1 背景及び把握手法概要

幹線道路における路面性状調査は、路面性状測定車により調査し、区間内のひび割れ率、わだち掘れ量及び平坦性を指標としたデータを取得することが一般的である。しかし、人力調査を前提とした指標に関するデータを機械（路面性状測定車）調査により取得するものであり、以下の課題が挙げられる。

- ・わだち掘れ量及び平坦性については測線上の調査であり、局所的な損傷を検出できない場合がある
(平坦性：通常、左車輪通過部付近の縦断測線、わだち掘れ量：通常 20m 間隔の横断測線)
- ・ひび割れ率の算出については調査後人力での画像解読が通常必要であり、時間・コストがかかる

本研究では、路面性状の効率的取得技術に関して民間各社と共同研究を実施しているが、その一つとして、MMS (Mobile Mapping System) を用いた路面管理手法について検討を行っている。具体的には、路面を対象に高精度な三次元点群データを取得し、それを自動処理することにより省力化しながら路面の各種データを取得するものである。いわば、路面を線ではなく面として捉えた形としての舗装の評価手法のあり方を検討している。

4.2 舗装走行実験場における適用

路面管理用に改良した MMS について、路面の mm 単位の変状を把握可能かどうか検証すること等を目的として、舗装走行実験場中ループ (写真-1) で高精度な三次元点群データを取得した。評価方法としては、一定の区間を単位に仮想平面 (基準面) を設定し、そこからの路面の鉛直方向変位をコンター図で示す手法を採用した。図-13 に調査結果例を示す。なお、図では黄色を基準として、赤系統色が (-) (沈下部)、青系統色が (+) (盛り上がり部) である。

舗装走行実験場は、区間毎に試験舗装等が施工されており、敷設時期や舗装構成が異なっている。これにより、わだち掘れの程度もそれら区間毎に異なるものであるが、図-13 によって、これらわだち掘れの程度が地点毎に表現可能であることが分かる。さらに、三次元で路面を捉えることにより、従来指標であるわだち掘れ量では判別できなかったわだち掘れの種類 (例えば、流動わだちか沈下わだちか等) も推定が可能と考えられ、舗装の損傷とより関連性がある調査となりうると思われる。なお、横断測線上のわだち掘れ形状については、MRP や横断プロフィールメータによるわだち掘れ形状と比較して十分再現されているものであった。

また、図-13 中には、わだち掘れの程度が同様の 2 区間 (図の No.32 付近と No.48 付近) に着目し、49kN 換

算輪数で10万輪荷重車走行（ N_5 交通1年相当）前後で比較した結果を併せて示している。GPSを用いたMMSを活用することにより、同図のように経時変化を追跡することも容易になり、同じ損傷状況でもその損傷の進行性の差異を把握することが可能となる。

今後、これらの路面の変状の定量化や構造的健全度と路面の変状との確認について検討を続けていくこととしている。

5. まとめ

平成24年度の研究より得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 実大供試体の繰り返し載荷試験の結果より、舗装体への繰り返し載荷を通じアスコン層・路盤には疲労ダメージが蓄積され、その傾向はFWDたわみ量の逆解析から算出される弾性係数により把握可能である。
- 2) 同試験の結果より、舗装体への繰り返し載荷を通じたアスコン層・路盤の疲労蓄積傾向は、路面への雨水の進入の有無等により差が生じる。
- 3) 関東地方整備局の補修履歴・路面性状データの分析より、切削OLの繰り返し数が増加するに伴い、補修後の供用性の推移が低下する傾向がある。
- 4) 路面管理用に改良したMMSを用いて路面の三次元点群データを取得することにより、路面の高さ方向の変動を把握することが可能である。

次年度以降、舗装の構造的健全度の評価手法及びライフサイクルを見据えた維持修繕手法の提案に向け引き続き繰り返し載荷試験を行うと共に、路面性状の効率的取得技術の開発、生活道路における簡略的な維持修繕手法の提案に向け研究を行う予定である。

写真-1 舗装走行実験場中ループ

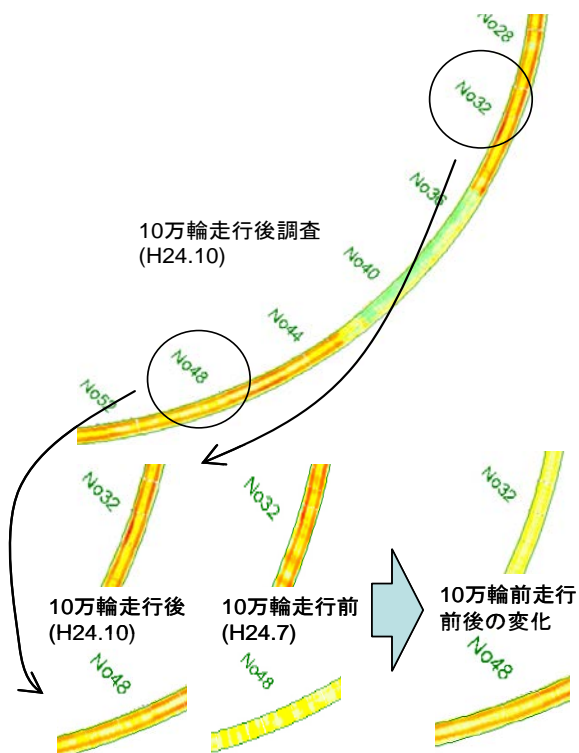


図-13 舗装走行実験場における調査結果例

参考文献

- 1) 小濱健吾、岡田貢一、貝戸清之、小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング、土木学会論文集 A、Vol.64、No.4、pp857-874、2008.11
- 2) 青木一也、熊田和彦、江口利行、貝戸清之、小林潔司：道路舗装のハザード率とライフサイクル費用のベンチマーキング評価、土木計画学研究・講演集 (CD-ROM)、Vol.39、2009.6

A STUDY ON METHOD FOR EXTENSION OF LIFE CYCLE ABOUT EXISTING PAVEMENT

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Road Technology Research Group
(Pavement)

Author : KUBO Kazuyuki

WATANABE Kazuhiro

HORIUCHI Satoshi

Abstract : The purpose of this study is contribution to realization of effective pavement management through suggestion of the effective technology of the road surface investigation, the evaluation method of durability about existing pavement, the maintenance repair method on the life cycle, and the simple repair method in light traffic road.

In fiscal year 2012, it was found out that not only the asphalt mixture but also the base course was damaged through repetitive loading, the fatigue accumulation tendency might be influenced by moisture, the number of repetition of cut and overlay increased the damage of its pavement, and using MMS could become one of the road surface condition survey.

Key words : pavement, durability, repetitive loading, life cycle, road surface condition