高速道路におけるアスファルト舗装の補修設計手法の開発に向けた合理的アプローチ

風戸崇之¹・田中敏弘²・米来哲之³・高橋茂樹⁴

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

E-mail: t.kazato.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

⁴正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 舗装研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

NEXCO が管理する高速道路のうち、約 4 割は供用年数 30 年を超過している。これに伴い近年は下層路盤を含む舗装の構造的な損傷事例が顕在化している。構造的な損傷の増大が想定される中で、効果的かつ効率的な舗装補修を実施するためには、供用路線が求める現実的な補修要件に適合した新たな設計手法の構築が求められる。本研究では、まず補修時の設計に必要な要素を設計手法のフレームワークとして提案し、次に問題箇所を実施した FWD 測定と開削調査の結果から、既設舗装の構造的な健全度が低下した箇所を検出する指標を設定した。更に健全状態を推定したレジリエントモデュラス試験と損傷状態を推定した FWD 測定値の逆解析結果により材料定数を設定し、提案する補修時の舗装構成に応じた補修効果を確認した。

Key Word : repair design, resilient modulus, falling weight deflectometer, evaluation of structure.

1. はじめに

都市間を結ぶ高速道路は、東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株) (以下、NEXCO) により運営管理されており、NEXCO が管理する高速道路のうち、供用年数が 30 年を超過する路線は約 4 割を占める。高速道路の機能を支える道路構造物には、高齢化に伴う損傷が顕在化しており、既に橋梁、土工およびトンネル構造物は、大規模更新・修繕が事業化され、道路構造物の更新が進められている。一方で、これまでの舗装補修は、主に路面の機能的な性能維持を目的とした補修を主体としており、その対象は表層または基層に留まることが一般的である。しかし、近年は写真-1 に示すような下層路盤を含む舗装全厚に至る損傷が発生した事例が報告されている¹⁾。供用年数の累積に伴い舗装の構造的な損傷の増大が想定される中で、効果的かつ効率的な補修を実施するためには、予め路盤を含む既設の舗装内部の構造的な健全度を把握し、最適な時期に効果的な補修を実施することが求められる。

本文は、供用路線が求める現実的な補修要件に適合した新たな設計手法 (以下、補修設計) の構築を目的として、補修設計に必要な要素を設計手法のフ

写真-1 損傷事例¹⁾

レームワークとして構成したうえで、設計条件となる各要素を具現化する手法を検討した。以下、2.においては、補修設計の構成を述べ、3.では既設アスファルト舗装の構造的な健全度を診断する手法を述べる。4.では補修に用いる混合物の強度特性を示す材料定数を設定する手法を述べ、5.では補修効果の定量的な評価方法を試みる。

2. 補修設計の構成

(1) T_A 設計法の特徴と課題

高速道路のアスファルト舗装の構造設計には、 T_A 設計法を適用している。本設計法は、AASHO 道路試験で得られた知見をもとに構築された設計手法である。この道路試験は、実物大の道路を構築し、実車による荷重を载荷させた実証実験であり、供用後の舗装構造への影響を直接的に模擬した実験である。後に日本の路床条件を考慮した換算舗装厚、等値換算係数の設定など、日本特有の設計条件を踏まえて設計手法の改良が行われてきた。このことから、 T_A 設計法は、合理的で安全性の高い設計手法といえる。

一方で T_A 設計法は、供用履歴を受けた既設舗装の補修設計として適用するうえで、いくつかの課題を有する。AASHO 道路試験の荷重条件である等値換算軸数は最終的に 200 万台未満で終了しており、これを越える交通荷重に対する耐久性は明らかではない。これを考慮して高速道路では、舗装の構造に関する技術基準・同解説²⁾ に示す信頼性 90% の T_A 設計曲線を準拠し、設計期間を 10 年として設計している。しかし、構造的な健全度の低下は、同様の設計法を適用した路線でも一律ではなく、供用後早期に構造的な損傷が生じるケースもある。また前述したとおり高速道路舗装の多くは、設計期間を越え長期に渡り利用されている状況にある。このことから、路線ごとの舗装の構造的な健全度を定期的に診断し、診断結果に応じた補修を実施できる設計法として改善することが求められる。

施工上の課題としては、供用後に交通量が増加した場合、 T_A 設計曲線から現状の交通量に必要な T_A を求め、不足する舗装厚を補う必要が生じる。舗装厚さを増厚するには、オーバーレイによる方法か、既設舗装を打換えて、舗装構成を変更する方法がある。オーバーレイの場合は、路面高さの変更が生じることから、防護柵の嵩上げなどが必要となり、舗装補修費以外の仮設費を要する場合がある。また供用履歴を受けた未補修の既設舗装を基盤とすることから、補修効果が十分に期待できない懸念が生じる。一方、既設舗装を打換えする場合は、路線に応じて工事車線規制が可能な時間帯に制約があるため、施工時間が限られ施工の効率が著しく低下するケースが生じる。また、 T_A 設計法で用いる等値換算係数は、一般的に 1.0 を上限とすることから、従来よりも高耐久な混合物を用いたとしても、その補修効果が定量化されないため、新しい材料や長寿命化につながる補修工法が選択され難く、補修サイクルの低減につながりにくい。

図-1 補修設計のフレームワーク

図-2 FWD たわみ曲線と舗装各層の強度の関連^{3) 4)}

以上のように、補修設計を構築するためには、このような現行設計法の課題を踏まえ、合理的な補修につながる設計方法を検討しなければならない。

(2) 補修設計のフレームワーク

補修設計手法の構築には、 T_A 設計法の課題を考慮した新たな設計手法のフレームワークが必要と考えた。そこで図-1に示す補修時の設計に必要な要素を設計手法のフレームワークとして具現化した。このフレームワークは、舗装を人体として仮定したときに、医学における医療行為の手順を参考に、舗装の補修設計に必要と考えられる設計要素を具体化したものである。まず第1要素は、既設舗装の舗装構成を踏まえた構造的な健全度を診断する指標（以下、構造指標）の設定である。この指標により供用路線ごとに異なる既設舗装の現状における構造的な健全度を診断する。このことにより、路線の供用状況に応じた損傷状況の把握が可能となる。これは医療行為における問診・診断に該当する。

第2要素は、各種アスファルト混合物（以下、As混合物）、下層路盤および路床に応じた健全時、補修直後および損傷時の強度を定量的に示す定数（以下、材料定数）の設定である。この要素により、載荷・温度条件を考慮した各種混合物の配合特性に応じた健全時または補修直後の強度、既存層を残置する場合の残存強度を定量化する。このことにより、補修

に用いる混合物の強度係数を定量化し、設計時に補修サイクルの低減につながる補修材料を選択する判断基準を定める。これは医療行為における処方箋に該当する。

第3の要素は、補修後の回復率や期待寿命などの補修効果を定量化するマネジメント指標の設定である。これにより適用する混合物、各層の厚さと組合せからなる補修時の舗装構成に応じた補修効果を定量的に比較し、合理的な補修工法を選択につなげる。これは医療行為における合理的な治療方針の選定に該当する。現実的には、施工制約やコストを比較指標として加え、補修効果と現場実務の与条件を総合的に評価できる補修方法の選択手法を考案する。

本文では、各要素のうち、構造指標と材料定数の設定および補修効果を定量化する手法について検討した結果を述べる。

3. 構造指標の設定方法

(1) 舗装全厚に適応した構造指標の設定

補修設計の第1の要素となる構造指標の設定には、供用中の高速道路で測定したFWD測定値を活用した。高速道路の舗装構成は、表層と基層にAs混合物を、上層路盤にアスファルト安定処理路盤を用いて、表層から上層路盤までを一体に敷設した層（以下、As層）により構成し、下層路盤には、粒状路盤またはセメント安定処理路盤を用いている。既往の研究^{3) 4)}から、FWD測定値には、図-2に示すように D_{150} から路床の強度を、 D_{90} と D_{150} の測定値の差から下層路盤の強度を、 D_0 と D_{90} の測定値の差からAs層の強度を評価できることが報告されている。またNEXCOの技術基準⁵⁾ではFWD測定値を用いた診断指標として、アスファルト層の損傷指標（以下、 D_i (AS層)）を規定している。この指標は、既往の研究⁶⁾から、FWD測定値に及ぼすAs層の厚さの違いによる影響を考慮するうえで、有効であることが報告されている。ただし D_i (AS層)は、現状の高速道路の舗装補修において一般的に補修している表層、基層並びに上層路盤までのAs層に対する健全度を判定する指標であり、下層路盤は対象としていない。よって、写真-1に示した下層路盤を含む変状の影響を考慮するためには、舗装全厚に適応した構造的な健全度を把握する新たな構造指標の設定が必要となる。このことから、 D_i (AS層)に対し、下層路盤の強度を示す D_{90} と D_{150} の測定値の差も加味することで、舗装全厚に対応した構造指標（以下、 D_i (全厚)）として式(1)のとおり新たに提案した。

$$D_i \text{ (全厚)} = (D_0 - D_{150}) / t \quad (1)$$

図-3 D_i (全厚) と D_i (AS層) の関係
(As層の設計厚 22cm 以上から 26cm 未満の場合)

表-1 D_i (AS層) による評価区分の例⁵⁾

アスファルト層の 設計厚 (cm)	アスファルト層の損傷指標 ($\times 10^{-6}$)		
	表層: 高機能舗装 I 型, 下層路盤: 粒状路盤		
	損傷区分A	損傷区分B	損傷区分C
18以上~22未満	1500以上	1500未満~800以上	800未満
22以上~26未満	800以上	800未満~500以上	500未満
26以上~28未満	500以上	500未満~200以上	200未満

表-2 D_i (全厚) の指標値

路盤種別	アスファルト層の 設計厚 (cm)	構造指標値 (案) ($\times 10^{-6}$)
粒状路盤 セメント安定処理路盤	18以上~22未満	800
	22以上~26未満	500
	26以上~28未満	400

ここに、 D_i (全厚) : 舗装全厚の損傷指標
 $D_0 - D_{150}$: D_0 と D_{150} の測定値の差 (mm)
 t : 舗装の厚さ(mm)

ここで提案する D_i (全厚) の適合性を確認するため、高速道路で測定したFWD測定値を用いて、前述した D_i (AS層) との関係、表層の混合物種別、路盤の種別およびAs層の設計厚さに分類して分析した。図-3は、 D_i (全厚) と D_i (AS層) の関係を示している。図中のデータは、表層が高機能舗装 I 型混合物（以下、高機能 I 型）、路盤が粒状路盤の組合せで、アスファルト層の設計厚が 22cm 以上 26cm 未満の場合における事例を示している。 D_i (全厚) は D_i (AS層) と相関があることから、As層内部の損傷深さの進行との関連性は保持している指標と考えられる。既往の研究から、高速道路では D_i (AS層) を As 層の損傷層を判定する指標として、As 層の全体が損傷した状態を損傷区分 A、基層まで損傷した場合を損傷区分 B、構造的に健全な場合を損傷区分 C として分類し、表-1 に示す基準値を既に定めている⁵⁾。本検討では、これに加え舗装全厚の構造的な健全度が著しく低下し

た箇所を検出するための指標値を新たに設けるため、表-1の損傷区分Aの分布領域に着目し、 D_i (全厚) の指標値を表-2のとおり設定した。表-2に示す D_i (全厚) の指標値の設定は、図-3に示す矢印の D_i (AS層) の値が損傷区分Aと判定される値(図-3のアスファルト層の設計厚の場合は D_i (AS層) 800)を閾値とし、図中に示す回帰式を用いて算定した値を目安に設定した。

(2) 供用路線での適合性の確認

前節で設定した指標値の現場における適合性を確認するため、表層・基層に加え上層路盤を含む舗装打換えを計画している路線で、開削調査を実施し、舗装内部の損傷状態を確認した。開削箇所の舗装構成は、As層厚が25cm、下層路盤が粒状路盤で20cmである。開削位置は、事前にFWD測定を実施し、表-2に示す指標値を超過する位置を検出して決定した。開削調査の事例を写真-2から写真-4に示す。

写真-2は、開削箇所から版状に採取したAs層を底面から撮影した状況を示す。舗装底面には、舗装に交通荷重が繰返し作用することで生じた曲げ疲労ひび割れが発生しており、舗装の構造的な寿命を迎えていることが分かる。また、基層と上層路盤の界面には水平方向のひび割れが進行しており、層間剥離を引き起こしていた。この場合、舗装各層が一体となり発揮する荷重分散効果が期待できない。このような層間剥離を残した状態で補修した場合は、その補修効果は低減されることが考えられる。

写真-3は、As層撤去後の下層路盤状況を示す。開削調査では、水を使用せずに舗装を切断したが、上層および下層路盤付近は湿潤状態であった。特に下層路盤は含水比が高く、材料分離が生じている状況にあり、含水比が高い状態で繰返し交通荷重を受けることで、材料強度が低下する状況におかれていることが分かった。

開削箇所では、過去に路盤を含む補修を実施した層が残っていた。しかし補修深さは、上層路盤の一部までに留まっており、写真-4に示す未補修の混合物層が取り残されていた。未補修の混合物層は、舗装版を撤去する際に層間ではなく離した。写真-4の右上に示す拡大写真は、は

写真-2 舗装版の底面状況 (OWP)

写真-3 路盤の滞水状況 (OWP～路肩)

写真-4 残置した混合物層 (OWP)

図-4 開削調査箇所のひび割れ展開図

く離れた面を上方から撮影した状況を示す。この層を上面から観察すると、面状のひび割れが発生した状態であり、上層路盤としての支持力を期待できる状況ではなかった。このような未補修の混合物層を残した状態で、上層を補修したとしても、その補修効果は低減される。

開削箇所ひび割れ展開図を図-4に示す。図中の(a)は路面のひび割れ状況の記録で、図中の数値は D_i (全厚) の測定値を、括弧内は D_i (AS層) の測定値および損傷区分を示す。図中の(b)は開削した舗装版を反転して舗装版底面のひび割れを撮影した写真、図中の(c)は舗装版底面のひび割れ状況を記録した図で、図中には採取した舗装版の記号を示す。ひび割れは、路面に比較して舗装版底面の方が多く発生していることが分かる。このような箇所では、基盤となる下層路盤の強度低下による影響が示唆される。図中の(a)および(c)の車輪通過位置のひび割れに着目すると路面にひび割れは発生していないが、舗装版底面には縦断方向のひび割れが発生していることが分かる。このことから、ひび割れの発生は、交通荷重の作用により底面から路面に進行するボトムアップクラッキングであると考えられる。車輪通過位置で路面および舗装版底面にひび割れが発生した箇所の D_i (全厚) は、前節で設定した指標値以上の値を示している。一方、同様の箇所において D_i (AS層) の損傷区分は、一部で損傷区分Bを示した。また、車輪通過位置を外れた中央分離帯側の舗装版には、ひび割れが発生しておらず、 D_i (全厚) および D_i (AS層) は車輪通過位置に比較して低い値を示している。表-3に開削箇所の下層路盤上で測定した小型FWDの測定値を示す。たわみの測定値は、C6を除き車輪通過位置の測定値の方が非車輪通過位置よりも大きな値を示している。C6は、他の測定箇所に比較して測定値の変動係数が高かったことが影響している。調査箇所の下層路盤は写真-3に示したような状況であり、交通荷重を受ける位置では、より強度低下が生じやすいことから、たわみが増加したと考えられる。

以上のことから、開削箇所では、舗装内部に構造的な損傷が発生しており、この開削位置の特定に用いた構造指標 D_i (全厚) は、舗装内部の損傷状況を事前に検出できていることが明らかとなった。

4. 材料定数の設定方法

(1) As混合物の健全時における材料定数

舗装の補修は、既設舗装の損傷状態に応じて使用する混合物、各層の厚さおよび組合せからなる舗装構成を適切に設計しなければならない。よって合理

表-3 下層路盤における小型FWDの測定値

車輪通過位置(OWP)			非車輪通過位置(BWP)		
舗装版記号	D0	D30	舗装版記号	D0	D30
B2	0.440	0.042	C2	0.281	0.031
B4	0.415	0.045	C4	0.372	0.025
B6	0.393	0.051	C6	0.533	0.029

表-4 レジリエントモデュラス試験の条件

供試体の直径	100mm (切取コア)		
荷重波形	ハーバーサイン波		
載荷条件	周波数	載荷時間	休止時間
	1Hz	0.1秒	0.9秒
	0.5Hz	0.3秒	1.7秒
温度条件	0.33Hz	0.5秒	2.5秒
	5°C, 25°C, 40°C

図-5 M_R 試験結果(高機能 I 型の例) ⁷⁾

図-6 試験温度と係数の関係(高機能 I 型の例) ⁷⁾

的な補修設計とするためには、補修時の舗装構成に応じた構造的な強度を定量化し、補修効果を客観的に評価する必要がある。舗装を構成する各種As混合物の材料特性を把握する方法として、レジリエントモデュラス試験(以下、 M_R 試験)がある。既往の研究⁷⁾では、供用後比較的早期である路線を対象としたFWD測定値による逆解析値およびFWD載荷位置から採取したコアを用いた M_R 試験値と、室内作製供試体を用いた M_R 試験値の関係を分析した結果、新

規または健全時の As 混合物の材料定数の推定には、 M_r 試験が適用できることを確認している。よって、本文で提案する材料定数は、既往の研究⁷⁾と同様に M_r 試験により得られる変形係数のひとつである全復元レジリエントモデュラス(以下、 M_r)を用いた。試験条件を表-4 に示す⁸⁾。 M_r は As 混合物の特性から載荷時間、温度により異なる。また前述した構造指標として用いる高速道路で測定した FWD 測定値と M_r 試験の結果に関連性を持たせる必要がある。よって、高速道路における走行速度(80~100km/h)、FWD 測定時の載荷速度(0.01~0.03 秒)⁹⁾および FWD 測定値の基準温度(20℃)に着目し、載荷時間が 0.02 秒、温度が 20℃の条件での M_r を材料定数として設定した。ただし、 M_r 試験では載荷時間を直接的に 0.02 秒に制御して試験することはできない。よって載荷および温度条件を変化させた試験結果から、任意の載荷時間、温度に応じて M_r が求められる一般式を作成し、前述の条件に適応した M_r を算定した。各混合物の M_r は、式(2)および図-5 に示す試験温度ごとに載荷時間の関数として定式化できる⁷⁾。

$$M_r = A \times \ln(\text{time}) + B \quad (2)$$

ここに、 M_r : 全復元レジリエントモデュラス (MPa)

A, B : 係数

time : 載荷時間 (秒)

次に、この係数 A と B は、図-6 に示す試験温度の関数として表すことができる。よって係数 A と B は、それぞれ試験温度の二次関数として式(3)で定式化できる⁷⁾。

$$A = a_1 \times T^2 + b_1 \times T + c_1$$

$$B = a_2 \times T^2 + b_2 \times T + c_2 \quad (3)$$

ここに、 $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$: 混合物により決まる定数

T : 試験温度 (℃)

上記の方法により求めた各混合物に対する定数の一覧を表-5 に示す。式(2)に式(3)を代入すると式(4)になり、この式に表-5 の定数を用いることで、任意の載荷時間、温度に応じた健全時の M_r を算定できる⁷⁾。

$$M_r = A \times \ln(\text{time}) + B$$

$$= (a_1 \times T^2 + b_1 \times T + c_1) \times \ln(\text{time}) + (a_2 \times T^2 + b_2 \times T + c_2) \quad (4)$$

以上の手法を適用することで、新たな配合特性を有する混合物が開発された場合でも、任意の載荷時間および温度条件で M_r が算定可能となる。

(2) As 混合物の損傷時における材料定数

前述した開削調査の結果から、補修時の舗装構成によっては、未補修の混合物層を残した状態で補修することがある。この影響を設計条件として反映するために、構造強度の低下を考慮した損傷時の材料

表-5 定数一覧 (新規混合物: 室内供試体)⁷⁾

混合物の種類	係数A			係数B		
	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2
高機能舗装 I 型	-1.4961	126.43	-2867.7	1.2534	-85.469	1552.8
基層用混合物 (スレトAS 60/80)	2.0952	-47.657	-1959.1	4.2107	-295.49	5120.6
基層用混合物 (改質AS)	1.7258	-18.724	-2671.5	2.5866	-192.38	3588.7
アスファルト安定処理	1.2177	4.2686	-2674.8	2.879	-213.73	4019.6
大粒径混合物 (改質AS)	-0.191	68.931	-3061.9	0.9307	-114.22	3239.2

図-7 逆解析と合成 M_r の比較例

表-6 検討に用いた材料定数

適用層	混合物種別	材料定数 (MPa)	
		健全時	損傷時
表層	高機能 I 型	4000	1500
基層	基層(スレト)	9000	3500
	基層(改質)	9900	4100
	厚層混合物(30)	13000	4700
	アス安定処理	9100	3500
上層路盤	大粒径混合物(改質)	8200	-
	上層路盤用混合物(30)	9000	3500
	セメント安定処理	1900	80
下層路盤	粒状路盤	170	40
	路床	460	220

定数を設定する必要があると考えた。本来は構造的な損傷が発生している箇所からコアを採取し、そのコアを用いた M_r 試験の結果から、健全時の材料定数の設定方法に準じて損傷時の材料定数を設定することが望ましい。しかし M_r 試験は非破壊試験であり、ひび割れ部から採取したコアを用いて試験することは出来ない。既往の研究⁷⁾では、ひび割れ部を外した近傍の車線軌道部からコアを採取して M_r 試験を実施したとしても、損傷時の弾性係数を把握することは困難であるとしている。そこで損傷時の As 層の材料定数は、補修箇所における FWD 測定値を用いた逆解析の結果と室内試験による M_r を比較して設定することとした。

損傷時の As 層の材料定数を推定するため、路盤を含む舗装の補修を計画している路線を選定し、路面にひび割れが顕在化した箇所 FWD 測定を実施

した。取得した FWD 測定値を用いて多層弾性理論に基づく構造解析プログラム（以下、ELSA）により As 層、下層路盤、路床の 3 層構造で逆解析し、損傷時の As 層の弾性係数を推定した。次に逆解析により求めた As 層の弾性係数と、 M_r 試験により求めた健全時の材料定数を比較するため、舗装設計便覧に示されている路床の平均弾性係数の算定に用いる式を引用した式 (5) により、As 層に相当する材料定数（以下、合成 M_r ）を算定した⁷⁾。なお各混合物の M_r は、載荷時間を 0.02 秒とし、温度を変化させて算定した。

$$\text{合成 } M_r = \{((M_{r_{su}})^{1/3} \times h_{su} + (M_{r_{bi}})^{1/3} \times h_{bi} + (M_{r_{Aba}})^{1/3} \times h_{Aba}) / (h_{su} + h_{bi} + h_{Aba})\}^3 \quad (5)$$

ここに、合成 M_r ：アスファルト層の構造強度

$M_{r_{su}}$ $M_{r_{bi}}$ $M_{r_{Aba}}$ ：それぞれ表層、基層、上層路盤の M_r (MPa)

h_{su} h_{bi} h_{Aba} ：それぞれ表層、基層、上層路盤の厚さ (mm)

逆解析により求めた As 層の弾性係数と合成 M_r を比較した結果を図-7 に示す。図中の破線は、健全時の材料定数である合成 M_r の算定値を回帰した曲線を示す。補修箇所で取得した FWD 測定値を用いた逆解析の結果は、図中の破線よりも下側の位置に散布している。このことから、損傷時の材料定数は、健全時の場合よりも低い値を示していることが分かる。図中の実線は、前述した破線の傾きを変えず、最小二乗法により逆解析で求めた弾性係数の中央値付近に移動することで、逆解析値の回帰を模擬した曲線を示している。実線は、破線より下側に位置しており、健全時と損傷時の As 層の弾性係数を区分することが可能と考えられる。以上のことから、逆解析の結果により、未補修の混合物層の強度を想定した損傷時の材料定数を推定することとした。表-6 に As 混合物の損傷時における材料定数を示す。

(3) 下層路盤および路床の材料定数

路盤・路床の健全時および損傷時における材料定数としては、実路における FWD の測定値を逆解析し、それぞれの弾性係数を算定した。なお損傷時の逆解析に用いた FWD 測定値は、路面にひび割れが顕在化した箇所でも測定した値を用いた。これに対し健全時の逆解析に用いた FWD 測定値は、前述した損傷箇所の近傍の路面にひび割れが生じていない箇所でも測定した値を用いた。各材料定数は、逆解析により算定した個々の弾性係数を相乗平均し、表-6 に示す材料定数として設定した。

		Case2			
建設時	Case1	高機能Ⅰ型 (t=4cm)	Case3	Case4	Case5
	高機能Ⅰ型 (t=4cm)	高機能Ⅰ型 (t=4cm)	高機能Ⅰ型 (t=4cm)	高機能Ⅰ型 (t=4cm)	高機能Ⅰ型 (t=4cm)
	基層(ストアス) (t=6cm)	基層(改質) (t=6cm)			
	アス安定処理 (t=8cm)	既設路盤 (t=25cm)	大粒径混合物 (改質)(t=8cm)	厚層混合物(30) (t=14cm)	上層路盤用 混合物(30) (t=8cm)
	粒状路盤 (t=17cm)				
路床	既設路床	既設路床	既設路床	既設路床	既設路床

図-8 建設時と補修時の各舗装構成

図-9 合成 M_r の比較

5. 補修効果の定量的な評価方法

(1) 補修時の舗装構成

適用する混合物、各層の厚さと組合せからなる補修時の舗装構成に応じて、その補修効果を定量的に比較するために図-8 に示す建設時並びに補修時の舗装構成として複数のケースを設定した。図中に示す建設時とは、供用時点に T_A 設計法で設計した舗装構成を示す。一方、補修時の舗装構成として設定した Case1 から Case5 の各補修ケースは、既設舗装の補修厚、使用する混合物の組合せにより分類している。図中の網掛け部分は、補修ケースごとに補修深さが異なることから、補修せずに残置する層を示している。図中に示す各層の厚さは、高速道路で最小厚となる舗装構成での標準的な値を示す。以下の検討では、前章の手法により設定した表-6 に示す材料定数を用いた。建設時の舗装構成には、健全時の材料定数を使用し、各補修ケースでは、補修した層には健全時の材料定数を、補修せずに残る層には損傷時の材料定数を用いて各補修ケースの補修効果を比較することとした。

(2) As 層の補修深さが補修効果に及ぼす影響

図-8 に示す建設時および補修時の各舗装構成において、先ず As 層の構造的な強度を示す合成 M_r に

着目した補修効果を比較した例を図-9に示す。図中の合成 M_r は、建設時および Case3 から 5 のように全ての As 層を打換える場合は、図-8に示す混合物に応じた健全時の M_r を用いて合成 M_r を算定した。一方、Case1 および Case2 は、表層と基層の補修に使用する混合物に応じた健全時の M_r を用い、補修対象としない既設の上層路盤（アスファルト安定処理）には、損傷時の M_r を用いて合成 M_r を算定した。As 層の厚さは、NEXCO の技術基準で規定している As 層の最小厚 18cm の場合と、前述した開削調査箇所の As 層厚である 25cm の場合で比較した。As 層厚が 18cm の場合、各補修ケースの合成 M_r は、Case1 を除き建設時の合成 M_r と同等以上の値を示している。Case1 は、補修深さを基層までとし、既設の上層路盤を残置するため、補修による改善効果が低減されている。これは開削調査で確認した未補修の混合物層の影響により、補修効果が低減することを示している。次に、As 層厚が 25cm の場合は、建設時の合成 M_r と Case2 の合成 M_r との差が、As 層厚が 18cm の場合に比べて小さくなっていることが分かる。これは、オーバーレイにより舗装厚は増加するものの、残置する強度低下した路盤の割合が増えることにより、補修による合成 M_r の増加量が小さくなったことが原因である。このように補修時に適用する舗装構成の特性を合成 M_r として定量化することで、混合物の質や As 層厚の差が補修効果に与える影響を比較することが可能となる。

(3) 補修時の舗装構成と舗装内部のひずみ低減効果

補修時の舗装構成に応じて舗装内部に及ぼす力学的な影響を把握するために、理論的設計法に基づく構造解析により補修厚に応じた舗装内部のひずみを比較した事例を図-10に示す。各舗装構成のひずみは、ELSA を用いた静的順解析により路面、表層・基層および上層路盤の下面、並びに路床の上面を着目点として算定した。解析に用いた材料定数は、図-8に示す舗装構成に応じて、建設時または補修対象とする層には健全時の M_r を用い、未補修の層には損傷時の M_r を用いた。解析の結果、舗装内部のひずみは、いずれの舗装構成もアスファルト層下面の引張ひずみが最大値を示した。アスファルト層下面の引張ひずみに着目すると、Case1 は補修厚が薄いことが影響したことで、比較対象の中で最も大きな引張ひずみが生じており、逆に補修厚が最も厚い Case5 は、それを大きく低減できている。建設時の最大ひずみと各補修ケースの最大ひずみを比較すると、Case4 または Case5 の補修方法を選択すれば、同等以上の引張ひずみに低減できている。このことは、高耐久な素材の使用や混合物の配合特性を改善することで材料定数を向上させることができれば、舗装

図-10 補修による舗装内部のひずみ低減効果

図-11 補修による舗装内部のひずみ低減効果
(補修時に上層路盤厚を 10cm 厚くした場合)

内部に発生するひずみを低減でき、舗装構造の長寿命化につなげることができることを意味する。図-11は、建設時の舗装厚が 35cm の箇所、補修時に Case3 から 5 の上層路盤の補修深さを 10cm 深くした場合を仮定し、補修効果を比較した事例を示す。各層の材料定数の設定方法は、図-10 と同様である。図-10 と比較すると、いずれの補修ケースも大幅に引張ひずみを低減できることが分かる。また、建設時の最大ひずみと各補修ケースの最大ひずみを比較すると、同等以上の引張ひずみに低減できている。このように補修時に既設の舗装構成を変更することで、より補修効果を高めることが可能となる。

以上のように理論的な構造解析手法と供用路線における開削調査での取得データを融合させた評価手法により、供用路線の構造的な健全度に応じて、長期的な構造耐久性を維持するために最適な舗装構成を選択できる可能性がある。

6. まとめ

本文では、供用路線における FWD 測定および開削調査から得られたデータを活用し、理論的な構造解析手法と融合させることで、供用路線の舗装補修で求められる現実的な補修要件に適合した補修設計手法構築に向けた検討結果を述べた。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 補修設計に必要な要素として、既設舗装の構造的な健全度を診断する構造指標、各種 As 混合物・下層路盤・路床の健全時と損傷時の強度を示す材料定数、補修効果を定量化するマネジメント指標の 3 要素を具現化し、補修設計手法のフレームワークとして構成した。
- (2) 高速道路で取得した FWD 測定値を用いて、既往の研究に基づき As 層の強度に下層路盤の強度を加味した構造指標を設定し、供用路線における開削調査の結果からその有効性を確認した。
- (3) 供用路線の開削調査により確認した未補修の混合物層の影響を構造設計に考慮するため、健全時の材料定数と補修箇所において取得した FWD 測定値を用いた逆解析値とを比較して、損傷時の As 層の弾性係数を推定した。
- (4) 補修時に適用する舗装構成に応じた合成 M_r を比較することで、混合物の質やアスファルト層厚の差により As 層の補修深さが補修効果に及ぼす影響を客観的に評価した。
- (5) 健全時および損傷時における材料定数を用いた構造解析により、高耐久な素材の使用、混合物の配合特性の改善および補修時に舗装厚を変更することにより、舗装内部に発生するひずみの低減効果を明らかにした。

参考文献

- 1) 高橋茂樹：高速道路におけるアスファルト舗装の「解体新書」プロジェクト，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.71,No.3,I-93-101，2015
- 2) (社)日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説 2001.
- 3) 阿部勝義,神谷恵三,佐藤正和：高速道路舗装の構造的損傷に関する一考察,土木学会舗装工学論文集第九巻, pp.179-180, 2004. 12
- 4) 神谷恵三, 風戸崇之：高速道路舗装の損傷評価方法に関する研究，土木学会舗装工学論文集第 13 巻，pp.171-178，2008. 12
- 5) 東日本高速道路(株)，中日本高速道路(株)，西日本高速道路(株)：設計要領 第 1 集 舗装編，(株)高速道路総合技術研究所，pp.137-140，2015.
- 6) 風戸崇之，神谷恵三：高速道路舗装の補修設計に関する研究，土木学会舗装工学論文集第 15 巻，pp.73-79，2010. 12
- 7) 松本大二郎：高速道路におけるアスファルト舗装の補修設計に用いる材料定数に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 18 巻，pp.101-108，2013
- 8) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 2007.
- 9) (社)土木学会：FWD および小型 FWD 運用の手引き 2002.

A RATIONAL APPROACH TOWARD DEVELOPMENT OF REPAIR DESIGN METHOD OF PAVEMENTS ON JAPANESE EXPRESSWAYS

Takayuki KAZATO, Toshihiro TANAKA, Satoshi YONEKI,
and Shigeki TAKAHASHI

Over 40 percent of the nationwide toll expressways operated by NEXCO has been in operation for 30 years or more. Recently some sections reveal structural damages deeper into the subbase layers. In order to take into practice an efficient and effective repair of pavements, amid structural deterioration being speculated on the increase, a new rational design approach that can match realistic requirements for repair that are demanded by each operating road. In this study, essential elements for the repair design is first to be proposed as its framework. Next, based on FWD measurements followed by an open-cut research at problematic sections, a structural index for detecting structurally damaged portions is presented. Further, by setting coefficients of materials in condition, based on laboratory resilient modulus tests, assumed as safe conditions, and FWD back calculated values as damaged conditions, effectiveness in a repair case in accordance with its proposed design structure.