

路上再生セメント安定処理路盤の 理論的設計法による評価

1. はじめに

道路舗装事業における新設工事が減り維持修繕工事が増えるなか、比較的交通量の少ない道路における維持修繕工法の一つである「路上再生路盤工法」の評価がコストおよび循環型社会の形成に寄与する舗装材料のリサイクルとCO₂削減の観点から再度見直される状況にある。

当社は、これまでの路上再生セメント安定処理路盤の施工経験から、路上再生セメント安定処理路盤材の品質指標である一軸圧縮強さを上層路盤 2.9MPa (等値換算係数 $a=0.55$)、下層路盤 0.98MPa (同 $a=0.25$) を採用した舗装断面でなく、セメント安定処理路盤の硬化収縮により発生する表層のリフレクションクラックの防止と経済性を勘案し、一軸圧縮強さを 1.2～2.0MPa と低く抑えて路盤厚を 20cm 以上とした舗装断面を推奨してきた。しかしながら、当社の推奨する舗装断面は、通常の舗装設計法 (経験的設計法) では必ずしも公に認められたものではない。

一方、舗装の技術基準は、従来の材料や構造を規定する仕様規定から、技術革新に柔軟に対応できる性能規定に変更され、平成 13 年 12 月に社団法人日本道路協会から発行された「舗装設計施工指針」から、理論的設計法の中でも比較的多くの実績をもつ多層弾性理論による理論的設計法による舗装の構造設計法が取り入れられている。

そこで、セメント路上再生路盤工法における経験的手法による舗装断面と当社の推奨する舗装断面について理論的設計法による構造比較評価を行った一例を報告するものである。

2. 比較検討条件

2-1 設計比較断面

ここでは、図-1 に示す交通量区分 N_3 (大型車交通量: 40 以上 100 台未満 台/日・方向)、設計 CBR=8、舗装厚 $H=25\text{cm}$ 、 $T_A=11.0\text{cm}$ の舗装構造で、置換工法による 1 断面とセメント安定処理路盤の強度および路盤厚を変化させた 3 断面の計 4 断面を取り上げた。

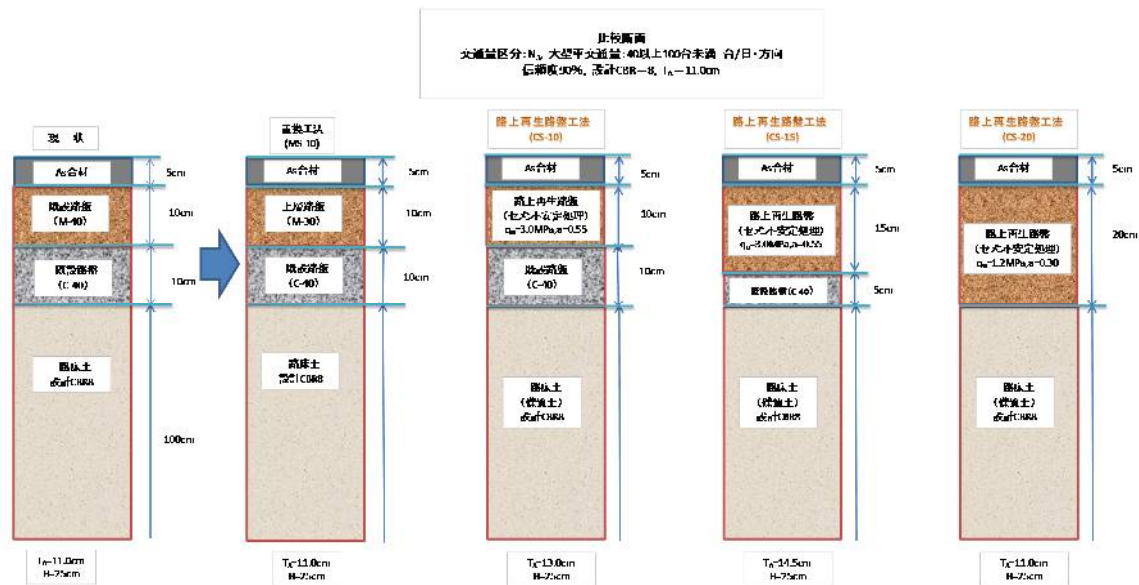


図-1 比較検討断面

2-2 使用材料

各層に使用する材料の弾性係数（変形係数ともいう）およびポアソン比は表-1 のとおり設定した。

表-1 理論的設計法に用いた材料定数

材料	仕様	弾性係数 Mpa	ポアソン比	摘要
アスファルト混合物		6,000	0.35	一般的な値: 600~12,000MPa
セメント安定処理路盤	$q_u=1.2\text{MPa}$	690	0.20	一般的な値: $q_u=3\sim15\text{MPa}$ のとき 1,000~15,000MPa
	$q_u=1.5\text{MPa}$	770		
	$q_u=2.0\text{MPa}$	880		
粒度調整碎石		300	0.35	一般的な値: 100~600MPa
クラッシャーラン		200	0.35	
路床材		80	0.40	$10 \times \text{CBR} = 10 \times 8.0 = 80\text{MPa}$

注1) アスファルト混合物層の弾性係数は舗装体の温度で変化するが、ここでは各断面の相対的比較が目的であることから、アスファルト混合物の一般的な弾性係数である 600~12,000MPa のほぼ中央値である 6,000MPa とした。

注2) 一般に、理論的設計法で用いられるセメント安定処理路盤の弾性係数は、表-2 の資料-1 にあるとおり、一軸圧縮強さ 3~15MPa で 1,000~15,000MPa の範囲にある。しかし、今回当社が提案するセメント安定処理路盤材の目標一軸圧縮強さは 1.2MPa~2.0MPa であることから、以下のとおり各一軸圧縮強さにおける弾性係数を設定した。

表-2 セメント安定処理材の弾性係数に関する文献

出典資料		弾性係数 Mpa	ポアソン比	摘要
資料-1	舗装設計便覧 (平成18年2月)	p.117, 表-5.3.1 1,000~15,000 ($q_u=3\sim15\text{MPa}$)	0.10~0.30 (代表値0.20)	
資料-2	第8回空港技術報告会 「現地発生材を利用したセメント安定処 理工法について」(平成19年12月)	静岡空港建設 事務所 2,600	—	配合強度3MPa, $t=15\text{cm}$ 小型FWD試験による逆解析
資料-3	土木学会第47回学術講演会 「FWDによる再生CAE路盤の弾性係数 の評価」(平成4年9月)	V-15 雑賀義夫ほか 600~6,400 (平均3,000)	—	$t=10\sim27\text{cm}$ (平均20cm) 交通量:A~C交通
資料-4	土木学会第58回学術講演会 「安定処理路盤材のレジリエントモデ ュラスに関する一検討」 (平成15年7月)	V-703 吉村啓之ほか $q_u=1.0\text{MPa}:400$ $q_u=1.2\text{MPa}:450$ $q_u=1.5\text{MPa}:500$ $q_u=2.0\text{MPa}:580$ $q_u=3.0\text{MPa}:650$	—	①現行の試験方法では圧力条件が適正 でないことから、安定処理路盤材にそのま ま適用することは困難 ②一軸圧縮強さ2.0MPa以上は試験条件 を含めた検討が必要

① 繰返し三軸圧縮試験 (ASSTO T-307) から求めたセメント安定処理材の弾性係数に関する文献が資料-4である。この資料で一軸圧縮強さ (q_u) とレジリエントモデュラス (弾性係数: M_r) の関係が図-2である。ただし、試験は非安定処理路盤の圧力条件で試験を実施したため、強度が高い供試体での試験法としては検討の余地があるとしている。

② そこで、他の文献を参照に今回の検討に用いたセメント安定処理路盤材の M_r を次のように推定した。すなわち、図-2の一軸圧縮強さ 3MPa のときの $M_r=650\text{MPa}$ が資料-1 で示されている 1,000MPa に相当するものとして修正した値 ($1,000/650 \approx 1.54$ 倍、表-3 参照) を用いた。

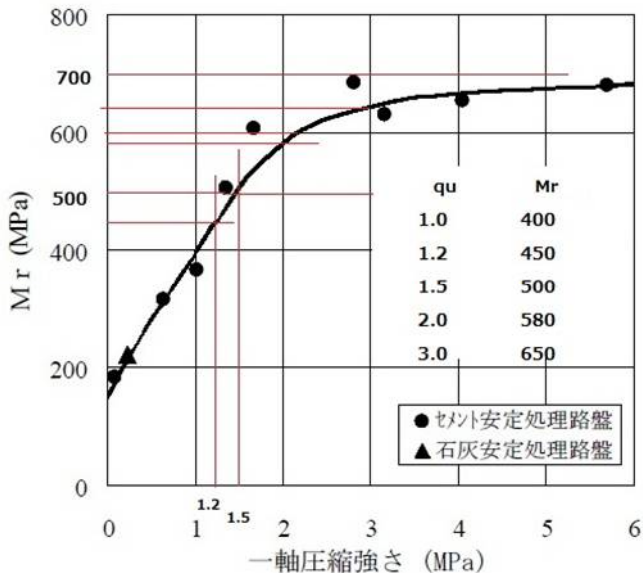


表-3 修正 M_r 算定表

一軸圧縮強さ q_u (Mpa)	M_r (MPa)	修正 M_r (Mpa)
1.0	400	620
1.2	450	690
1.5	500	770
2.0	580	890
3.0	650	1,000

図-2 一軸圧縮強さとレジリエントモデュラス (M_r) の関係 (資料-4 の図-2 に加筆修正)

3. 理論的設計法の構造設計条件

3-1 交通条件

交通荷重は、図-3 に示す大型車後軸の複輪荷重（49kN）とした。

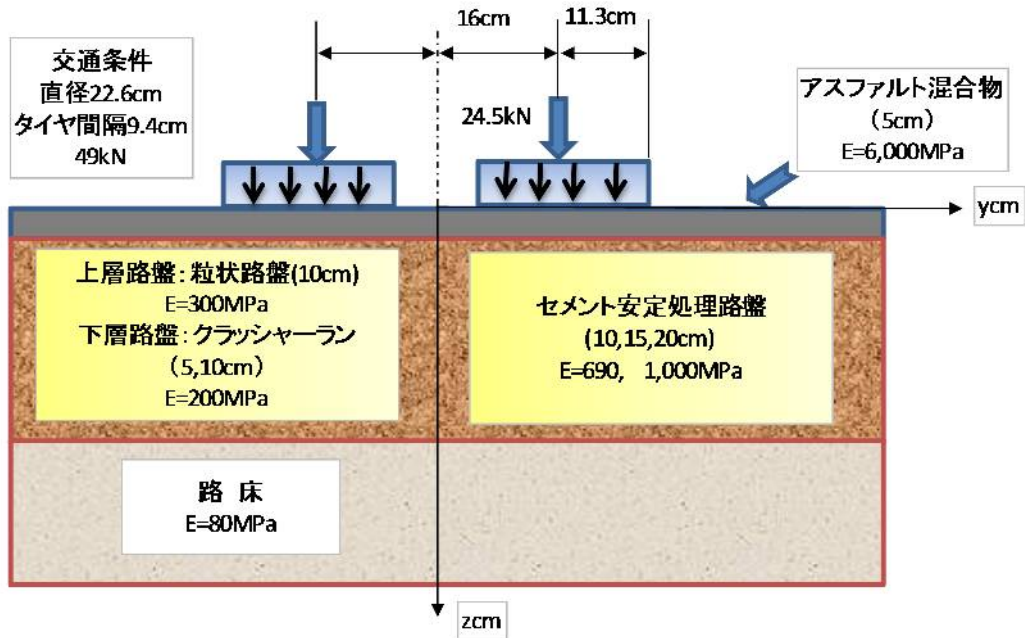


図-3 舗装構造モデル

3-2 破壊基準式

アスファルト舗装の理論的設計法に適用する破壊基準式は、日本道路協会、「舗装設計便覧」の下式を用いた。以下の式は、アスファルト混合物層の疲労によるひび割れ率が20%、路床を含めた舗装各層の圧縮による永久変形量が15mmの場合を構造的な破壊と仮定している。

(1) アスファルト混合物層の暫定破壊基準式

$$N_{fa} = \beta_{ai} \times (C) \times (6.167 \times 10^{-5} \times \varepsilon_t^{-3.291\beta a^2} \times E^{-0.854\beta a^3}) \quad (\text{式-1})$$

ここに、

N_{fa} : 許容 49kN 輪数

C : アスファルト混合物層の最下層に使用する混合物の容積特性に関するパラメータ

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \times \left[\frac{VFA}{100} - 0.69 \right] \quad (\text{式-2})$$

VFA : 飽和度 (%) ⇒ 今回の検討では、74%とした。

ε_t : アスファルト混合物最下層の引張りひずみ (μ)

E : アスファルト混合物層の最下層に使用する混合物の弾性係数 (MPa)

β_{a1} , β_{a2} , β_{a3} : わが国の経験による AI 基準に対する補正係数

$$\beta_{a1} = K_a \times \beta_{a1}^{\wedge}$$

K_a : (式-3) によるアスファルト混合物層の厚さによるひび割れ伝播速度に対する補正係数

$$K_a = \frac{1}{8.27 \times 10^{-11} + 7.83 \times e^{-0.11Ha}} \quad (\text{式-3})$$

$$\beta_{a1}^{\wedge} = 5.229 \times 10^4, \beta_{a2} = 1.314, \beta_{a3} = 3.018$$

(2) 路床の暫定破壊基準式

$$N_{fs} = \beta_{s1} \times (1.365 \times 10^{-9} \times \varepsilon_z^{-4.477\beta_{s2}}) \quad (\text{式-4})$$

ここに,

N_{fs} : 許容 49kN 輪数、 ε_z : 路床上面の圧縮ひずみ (μ)

β_{s1} , β_{s2} : わが国の経験による AI 破壊基準式に対する補正係数

$$\beta_{s1} = 2.134 \times 10^3, \beta_{s2} = 0.819$$

3-3 舗装断面の力学的評価

舗装断面の力学的評価は信頼度 (今回は 90%) に応じた係数 (γ_R) を用いて下記式を満足すれば力学的な安全性をもつと評価される。

$$\frac{N_{fa,d}}{\gamma_R} > N \quad (\text{式-5}), \quad \frac{N_{fs,d}}{\gamma_R} > N \quad (\text{式-6})$$

ここで, $N_{fa,d}$: アスファルト混合物層の破壊回数、 $N_{fs,d}$: 路床の破壊回数

γ_R : 信頼度に応じた係数 (信頼度 90% のとき, 4.0)

N : 疲労破壊輪数, 舗装計画交通量 N_3 のとき 30,000 回

3-4 舗装断面の経済性評価

舗装断面の最終的な評価は、構造的設計条件を満足する断面のライフサイクルコストをも含め検討したうえで行うが、今回は舗装体の破壊輪数に到達した時点で建設当初と同じ金額で補修工事を行うものとして試算した。

4. 多層弾性理論によるひずみの計算

4-1 ひずみの計算

舗装破壊基準式に用いるひずみの計算条件および使用プログラムは以下のとおりである。

- 1) 交通荷重は、49kN の複輪荷重とした。(図-3 参照)
- 2) ひずみの着眼点は、表面たわみ量、表層下面の引張ひずみおよび路床面の圧縮ひずみとした。
- 3) ひずみの計算には、多層弾性理論に基づくソフトウェア「GAMES : General Analysis of

Multi-layerd Elastic Systems」を用いた。(土木学会、舗装工学委員会、舗装構造小委員会、「多層弾性理論による舗装構造解析入門」、平成 17 年 4 月参照)

4-2 計算結果

以上の条件での計算結果を表-4 に、各舗装断面における信頼度 90%での疲労破壊輪数を図-4 に示す。

表-4 計算結果一覧表

舗装断面		置換工法 (MS-10)	路上再生 (CS-10)	路上再生 (CS-15)	路上再生 (CS-20)	摘 要
各層の厚さ (cm)	アスファルト混合物	5	5	5	5	
	粒度調整砕石	10	0	0	0	
	セメント安定処理砕石	0	10	15	20	
	クラッシャーラン	10	10	5	0	
	路床		∞			
各層の弾性係数 (MPa)	アスファルト混合物	6,000	6,000	6,000	6,000	
	粒度調整砕石	300	-	-	-	
	セメント安定処理	-	1,000	1,000	690	
	クラッシャーラン	200	200	200	-	
	路床	80	80	80	80	
表面たわみ量(cm)	アスファルト混合物上面	0.074	0.061	0.054	0.054	
アスファルト混合物層の 破壊回数	引張ひずみ ϵ_x	2.60E-04	8.77E-05	5.90E-05	8.92E-05	GAMESの計算結果より
	アスファルト混合物の 許容49kN N_B	7.19E+05	7.90E+07	4.39E+08	7.34E+07	(式-1)より
	信頼度に応じた係数(γ_R):信頼度90%	4.0	4.0	4.0	4.0	
	① $N_{B,d}/\gamma_R$	179,750	19,750,000	109,750,000	18,350,000	(式-5)より
路床の 破壊回数	圧縮ひずみ ϵ_z	1.09E-03	8.51E-04	7.35E-04	7.27E-04	GAMESの計算結果より
	路床の許容49kN N_B	2.12E+05	5.26E+05	9.01E+05	9.38E+05	(式-4)より
	信頼度に応じた係数(γ_R):信頼度90%	4.0	4.0	4.0	4.0	
	② $N_{B,d}/\gamma_R$	53,092	131,577	225,183	234,403	(式-6)より
破壊輪数 ($N_{B,d}$, $N_{B,d}$ の小さい方)		53,092	131,577	225,183	234,403	①, ②の小さい方

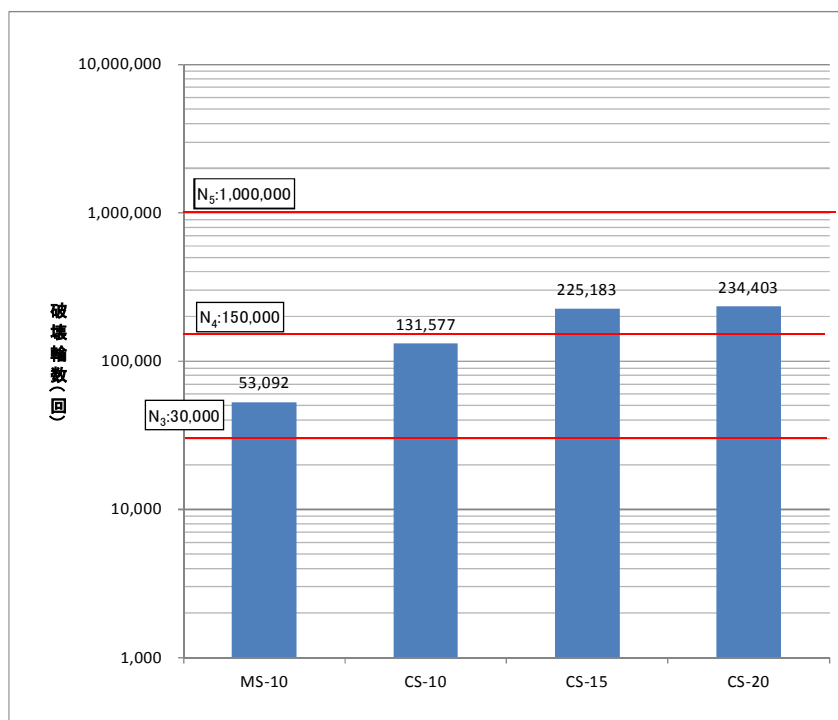


図-4 疲労破壊輪数計算結果

4-3 まとめ

1) 各舗装断面とも、舗装の寿命はアスファルト混合物層のクラックでなく、路床土の永久変形量により決まる。

2) 舗装表面のたわみ量は、各舗装断面とも 0.074cm 以下となっているが、経験的設計法による標準断面 (CS-10) の 0.061cm と当社が提案する断面 (CS-20) のたわみ 0.054cm を比較すると、断面 (CS-20) における表面たわみ量は、 $0.054 \div 0.061 = 0.89$ で断面 (CS-10) に比べ約 11% 小さくなっている。

3) 今回設定した条件では、各舗装断面とも計画交通量 N_3 の疲労破壊輪数 $N = 30,000$ 回を上回っているが、断面 (CS-10) と断面 (CS-20) を比較すると、破壊輪数で $234,403 \div 131,577 = 1.8$ 倍となっている。

4) 各断面のコスト比較は、4-2 の計算結果に基づき破壊輪数をパラメータとして試算した。積算条件および結果を表-5 および図-5 に示す。

表-5 各工法の施工費の一例

種別	置換工法 (MS-10)	路上再生 (CS-10)	路上再生 (CS-15)	路上再生 (CS-20)
工法内容	舗装版掘削・搬出 ↓ 上層路盤掘削 ↓ 路盤材運搬処分 ↓ 路盤工 ↓ 舗装工	舗装版掘削・搬出 ↓ セメント安定処理工 (散布:25kg袋、人力) ↓ 舗装工	舗装版掘削・搬出 ↓ セメント安定処理工 (散布:25kg袋、人力) ↓ 舗装工	舗装版掘削・搬出 ↓ セメント安定処理工 (散布:散布車使用) ↓ 舗装工
セメント安定処理 路盤厚(cm)	—	10	15	20
セメントの種類	—	一般軟弱土用セメント系固化材		
一軸圧縮強さ (MPa)	—	3MPa		
セメント 使用量	—	80kg/m ³		
施工費 (円/m ²)	2,430	2,410	2,490	2,560
破壊輪数 (回)	53,092	131,577	225,183	234,403

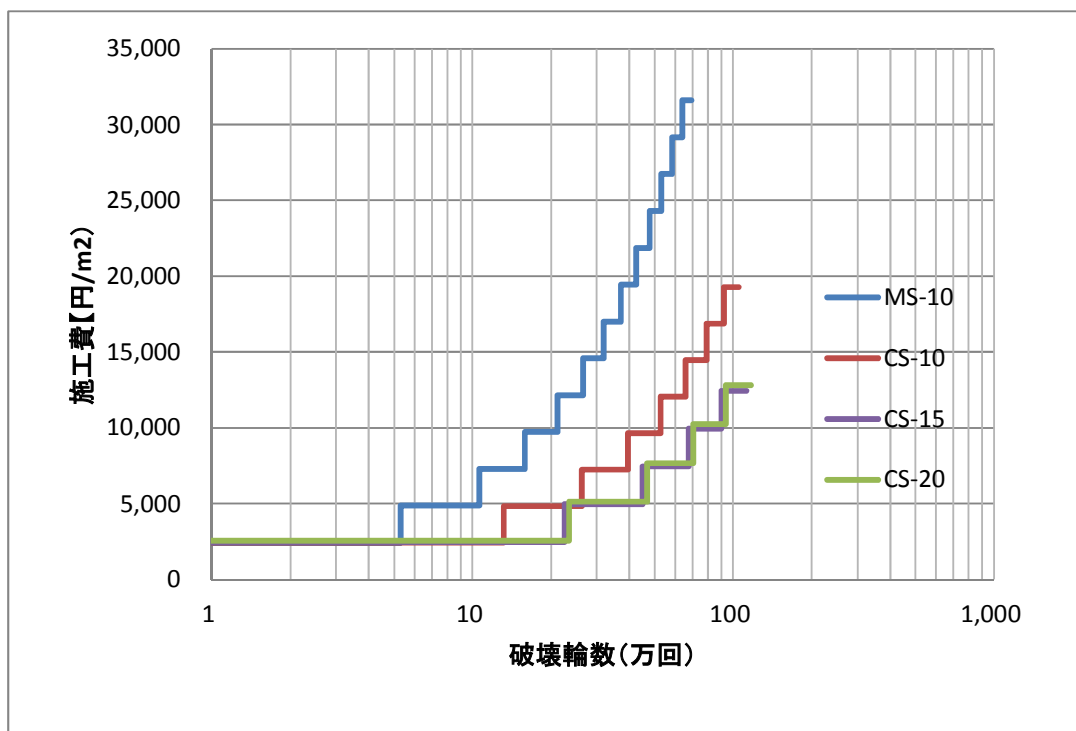


図-5 ライフサイクルを考慮したコスト比較の一例

図-5 からわかるとおり、ライフサイクルコストを考慮した場合、置換工法よりも再生セメント安定処理路盤工法が、安定処理路盤厚が 10cm より、15cm が有利である。また、 $q_u=1.2\text{MPa}$ で路盤厚 20cm の断面 (CS-20) は、 $q_u=3.0\text{MPa}$ で路盤厚 15cm の断面 (CS-15) とコスト面ではほぼ同じといえよう。

5. おわりに

これまでの検討結果から、路上再生セメント安定処理路盤工に関してまとめると以下のとおりである。

- (1) 理論的設計法による試算の結果、強度を低く抑え処理厚を大きくすることは、舗装の寿命およびライフサイクルを考慮したコスト面から有効である。
- (2) 理論的設計法では、路床や路盤材の弾性係数により算出される破壊輪数が変わるので、この弾性係数の設定が妥当なものかどうか、今後とも実施工における追跡調査等で確認してデータを蓄積する必要がある。

最後に、これまでの舗装設計法は、1962 年 (昭和 37 年) にまとめられた AASHO 道路試験という大規模で膨大な実験結果を踏まえて我が国に適用するよう調査研究が行われ、昭和 42 年版アスファルト舗装要綱にいわゆる経験的手法の T_A 法の導入という形で実を結んでいる。その後、昭和 45 年頃から舗装構造を理論的に解析しようとする動きが活発化し、コンピュータの発達と

相まって、理論解析における数値計算が簡単に実施できるようになってきた。

一方、冒頭にも述べたように、舗装の技術基準は、従来の材料や構造を規定する仕様規定から、技術革新に柔軟に対応できる性能規定に変更され、平成 13 年 12 月発行の「舗装設計施工指針」に理論的設計法の中でも比較的多くの実績をもつ多層弾性理論による理論的設計法による舗装の構造設計法が取り入れられている。

このような背景を踏まえ、今回取り上げた路上再生路盤工法は、すでに確立された技術であるが、施工面からセメント安定処理路盤特有のリフレクションクラックの発生の問題を解決すべく提案した断面について理論的設計法を試みたものである。今後、建設投資が維持修繕に振り向けられざるを得ない状況にあるなかで、種々の維持修繕工法の評価においてこの報文がより経済的な工法検討の一助になれば幸いである。

以上

参考文献（本文記載以外）

1. 阿部頼政、「特集・アスファルト舗装技術の高度化に向けて、わが国の構造設計法に対する基本的考察」、日本アスファルト協会、アスファルト、Vol. 28 NO. 144 (1985 年)
2. 三宅克哉、丸山暉彦、林正則、「V-36 路盤層及び安定処理層の弾性係数」、土木学会第 45 回年次学術講演会、平成 2 年 9 月
3. 阿部長門、雑賀義夫、丸山暉彦、「V-426 粒状路盤材・路床土のレジリエントモデュラス」、土木学会第 48 回年次学術講演会、平成 5 年 9 月
4. 高橋真一、坪川将文、水上純一、齋藤泰、「空港舗装における理論的設計法パラメータの感度分析」、国土技術政策総合研究所資料、NO. 633、2011 年 3 月