

# 多層弾性理論による舗装構造設計の紹介

## Introduction of pavement structural analysis based on multilayer elastic theory

交通業本部 交通第1部 瀬藤 潮二



### 概要(Abstract)

アスファルト舗装設計の多くは、「経験による  $T_A$  法」により設計を行っている。近年の社会情勢の変化を受け、舗装設計は仕様規定から、性能規定へ変更となった。これに伴い、理論設計が舗装構造設計へ導入されている。本稿では、多層弾性理論による舗装構造設計の基本的な考え方、留意点について紹介するものである。

### 1. はじめに

我が国における道路舗装の構造設計は、アメ AASHO による経験に基づく  $T_A$  法により行われてきた。アメリカは 1997 年に「力学的理論に基づいた舗装構造設計の導入」を開始し、翌年にはヨーロッパにおいても舗装構造に対し、理論設計への高度化を目指した研究プロジェクトが開始された。我が国においても、社会情勢の変化や道路構造令の改訂により、舗装設計が仕様規定から性能規定に変更となった。現状の経験による  $T_A$  法では新材料や新工法の設計が困難となっている。本稿は、舗装理論設計の代表的な「多層弾性理論による舗装設計」に対し、基本的な考え方について述べる。さらに「解析ソフト GAMES」を用い、具体例を示す。

### 2. 舗装構造設計の歴史

多層弾性理論はブーシネスクの地盤応力の伝播解析モデルを舗装設計に取り入れている。理論設計の導入以前はどのような舗装設計をしていたのか？ 舗装設計(ここではアスファルト舗装設計)の歴史を表-1 に示す。

多層弾性理論の舗装構造への導入は古くから研究が進められており、現在も様々な研究が全国各地で行われている。

表-1 舗装設計の歴史

年	舗装設計	備考
1940	アメリカ陸軍による CBR 設計法	莫大な舗装設計データの解析
1960	アスファルト舗装要綱(第1版)	日本道路協会
1967	$T_A$ 法による設計手法	$T_A$ 法設計 日本
1988	多層弾性理論の紹介	AS 舗装要綱
1997	舗装設計への理論設計導入	米、欧州
2001	仕様規定から性能規定	道路構造令改訂
2006	多層弾性理論設計の具体的事例記載	舗装設計便覧 H18.2

### 3. 舗装の理論設計導入の背景

舗装構造は仕様規定から性能規定に変更となった。その背景には以下の要因がある。

- 1) 道路構造令の改訂による性能規定の導入
- 2) 土木、建築に掛る設計基本への対応
- 3) 品質確保とコスト縮減への対応
- 4) 新材料の仕様や設計自由度への対応
- 5) 環境保全への対応

### 4. 従来舗装設計との比較

舗装設計における  $T_A$  法と理論設計の比較を表-2 に示す。

表-2 舗装設計の比較

項目	経験法 ( $T_A$ 法)	理論的設計法 多層弾性理論を用いた設計 その他 ・動的応答解析(FEM) ・粘弾性理論解析
設計手法の概要	設定した信頼度と交通量に応じた舗装厚を、等値換算係数を用いて舗装厚を決定する	線形弾性理論を用い各舗装材料のひずみを計算し疲労回数内の舗装構成を決定する
長所	路床 CBR と舗装計画交通量、信頼度の設定で舗装設計が可能(単純な設計)	新材料、新工法の採用に対応可能 理論的な設計
短所	新材料は $T_A$ の評価が困難 コンポジットやサンドイッチ舗装の適用が困難	計算過程に用いる、舗装材料の弾性係数やポアソン比の設定が難しい。 係数を定める材料試験は、数値のバラツキが多い
その他	設計方法としては経験値によるため性能設計には不適	$T_A$ 法との比較を行い検証を行うことが望ましい。 FEM 解析は時間と経験を要する

## 5. 多層弾性理論の紹介

### 5.1 舗装構造設計の考え方

舗装の構造設計とは、供用すべき期間内に舗装に作用する交通荷重によって、舗装を構成する層が破壊しないように、舗装厚を決定することである。このことを概念図で表すと図-1 になる。

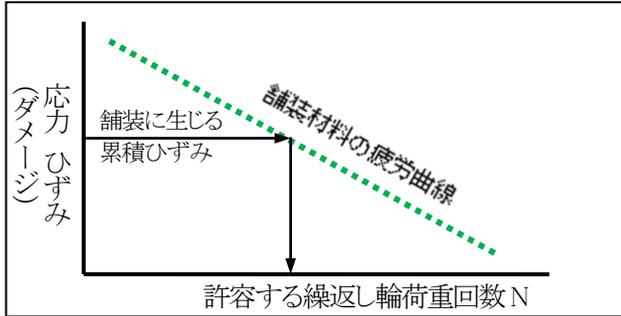


図-1 舗装ダメージと許容回数

### 5.2 弾性理論の基礎知識

舗装材料や路盤材料が弾性変形を生じるとき、以下のフックの法則が成り立つ。

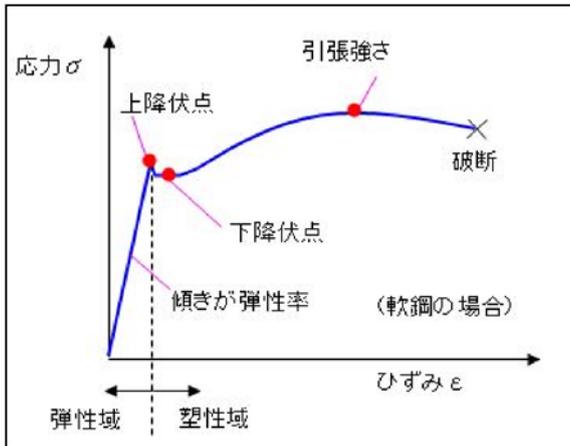


図-2 応力とひずみの関係

【舗装材料に応力が加わると弾性域では応力  $\sigma$  の増加に伴いひずみ  $\epsilon$  も増加する】 図-2

フックの法則  $\sigma = E \epsilon$  ここに  $\sigma$ : 応力  $\epsilon$ : ひずみ  $E$ : 弾性係数(ヤング率) 縦弾性係数とも呼ぶ。

弾性理論では、舗装に輪荷重(外部応力)が作用したときに生じるひずみを求め、このひずみ量から仮定した舗装構成の力学的安全性を検証する設計方法である。また材料に応力が加わると、横に伸び、縦に縮みを生じる。この「横の伸び」と「縦の縮み」の比をポアソン比と呼ぶ。図-3

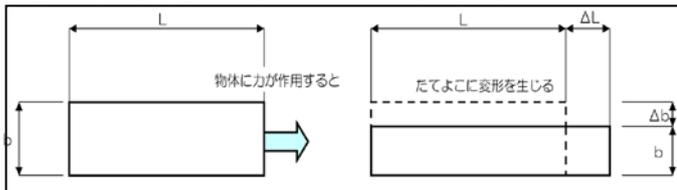


図-3 応力とひずみの関係 (縦横のひずみ)

$$\nu = (\Delta b / b) / (\Delta L / L) \quad \nu: \text{ウプシロン}$$

また材料にせん断力が生じた場合、 $\tau = G \cdot \nu$  で表すことができる。ここに  $\tau$ : せん断力  $G$ : 弾性係数  $\nu$ : ポアソン比

舗装材料のせん断力を求めるためには、 $G$  と  $\nu$  を材料試験によって求める。しかし試験における「純せん断状態」を作ることが困難であるため、 $G = E / (2 + \nu)$  の関係式を用いて  $G$  を導く。注) 垂直ひずみと  $90^\circ$  方向が異なる。

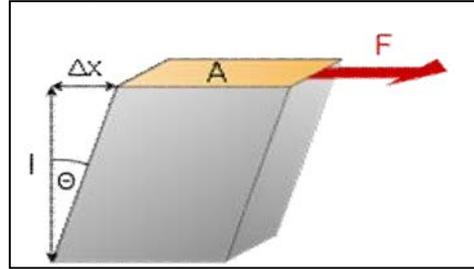


図-4 せん断力とひずみ角度

せん断ひずみは  $\nu = \Delta L / L$  と表され、 $\Delta L / L = \tan \theta$  となり  $\theta$  を微小とすれば、 $\tan \theta = \theta$  となる。図-4

すなわちひずみ角度  $\theta$  がせん断ひずみとなる。

この他の材料特性には、体積膨張率  $K$  がある。圧力  $P$  との関係は  $P = K \epsilon_v$  ここに  $\epsilon_v: \Delta v / V = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$  ( $\epsilon_{xx} \epsilon_{yy} \epsilon_{zz}$ ) は 3 次元の垂直方向ひずみを表す。また  $K$  には  $K = E / 3(1 - 2\nu)$  の関係式で表すことが可能である。このように、材料の特性値(弾性係数やポアソン比)を求めることで、荷重が作用した材料のひずみや応力を計算することが可能である。そのためには、舗装材料の弾性係数やポアソン比を正確に把握することが重要となる。

### 5.3 材料試験(レジリエントモデュラス試験)

前述のように舗装材料の弾性係数を求めるためには、舗装材料のレジリエントモデュラス試験を行う。試験内容は「舗装調査・試験法便覧 第 3、4 分冊」日本道路協会を参照願。材料試験は、路床や路盤の弾性係数を求める「繰返し三軸圧縮試験」とアスファルト(以下AS)混合物の弾性係数を求める「繰返し間接引張試験」に分類される。



写真-1 繰返し3軸圧縮試験器 前田道路 HP より



写真-2 繰返し間接引張試験器 大林道路 HP より

両者の材料試験機材は 道内の試験施設にはなく本州に試験材料を持ち込む必要がある。

この他に、AS材料の骨材の容積率から弾性係数を求める方法、FWDによる逆解析を用いた係数の設定などが採用されている。

## 5.4 多層弾性理論の原理

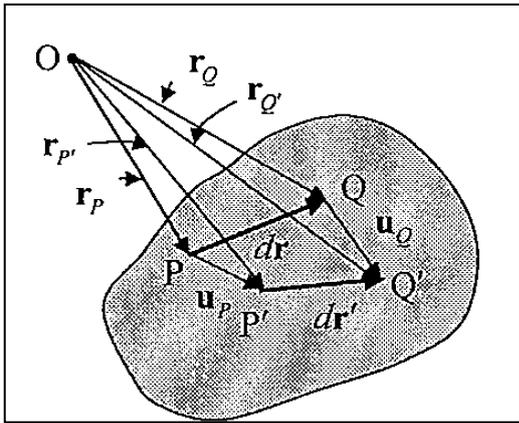


図-5 変位ベクトルの概念図 舗装工学ライブラリーより

図の物体内のP点、近傍にQ点があり、変形後にP'、Q'に移動すると【 $dr$ :P点の位置ベクトル  $dr'$ :P'点の位置ベクトルと定義】この時  $u_P$  ベクトルは変位ベクトルで  $u_Q$  も変位ベクトルである。ひずみは変位を偏微分して得られることから、これら変位ベクトルを整理し偏微分を行う。多層弾性理論では、変位とひずみの方向を、XYZの3次元で考え、応力とひずみを「線形理論」を用いて解析を行っている。線形理論は数値(座標)をベクトルに置換え、数学モデルとして計算を行っている。

$$d_r u_Q = u_P + d_r' \quad \text{「位置ベクトルと変位ベクトルの関係」}$$

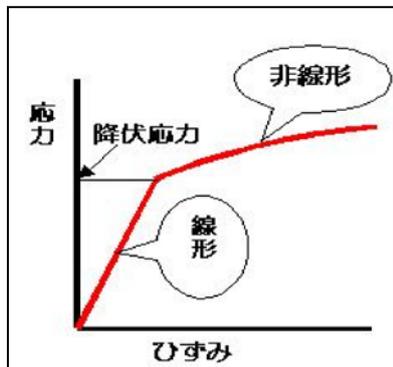


図-6 線形と非線形

## 6. 多層弾性理論による「GAMES」を用いた舗装設計

解析ソフトGAMESは土木学会からダウンロード可能なフリーソフトで、動作環境はWindows2000/XPである。本稿における舗装構造解析は、舗装設計便覧(日本道路協会)H18.2に準拠する。

### 6.1 設計条件

- 1) 舗装計画交通量 N6 1,000~3,000 台/日
- 2) 舗装設計期間 N=20 年
- 3) 舗装材料の弾性係数 単位:MPa

気温	表層・基層	アス安定処理
7°C	9,000	6,000
10°C	7,000	5,000
15°C	5,000	3,500
18°C	3,500	2,500
23°C	2,500	2,000

弾性係数は舗装設計便覧値を参考とし、気温補正を行う。月平均気温は過去20年アメダスデータから算出。ポアソン

比はAS材料を0.35とし路盤材は0.40とする。図-7に仮定した舗装検討断面を示す。舗装断面は従来の $T_A$ 法により決定した断面を示す。舗装構造検討では $T_A$ 法による断面の検証を行う。

層番号	舗装材料	厚さ	備考	
層1	表層	表層・基層	$t=4\text{cm}$	舗装材料はまとめる
	基層	AS混合物	$t=5\text{cm}$	
	中間層	基層:粗粒度AS $\Sigma t=14\text{cm}$	$t=5\text{cm}$	
層2	上層路盤	AS安定処理	$t=6\text{cm}$	弾性係数同じ
	上層路盤		$t=6\text{cm}$	
層3	下層路盤	40mm	$t=50\text{cm}$	弾性係数200 $\nu=0.4$
層4	凍上抑制層	80mm	$t=35\text{cm}$	弾性係数40 $\nu=0.4$

図-7 仮定した舗装断面 (TA法4層構造)

各AS層の弾性係数と荷重条件を座標入力し、ひずみ量と応力を求める。表-7 図-8 図-9

表-7 GAMESに入力する座標値

境界面のひずみ等	着目点	層番号	x軸方向	y軸方向	z軸方向
アスファルト混合物の表層	1	1	0	0	0
	2	1	16	0	0
	3	1	0	16	0
	4	1	-16	0	0
	5	1	0	-16	0
AS安層下面引張りひずみ	6	2	0	0	26
	7	2	16	0	26
	8	2	0	16	26
	9	2	-16	0	26
	10	2	0	-16	26
路床面での圧縮ひずみ	11	4	0	0	76
	12	4	16	0	76
	13	4	0	16	76
	14	4	-16	0	76
	15	4	0	-16	76

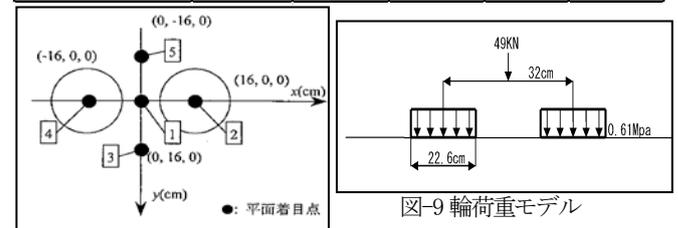


図-8 GAMESに入力する輪荷重座標(平面座標)

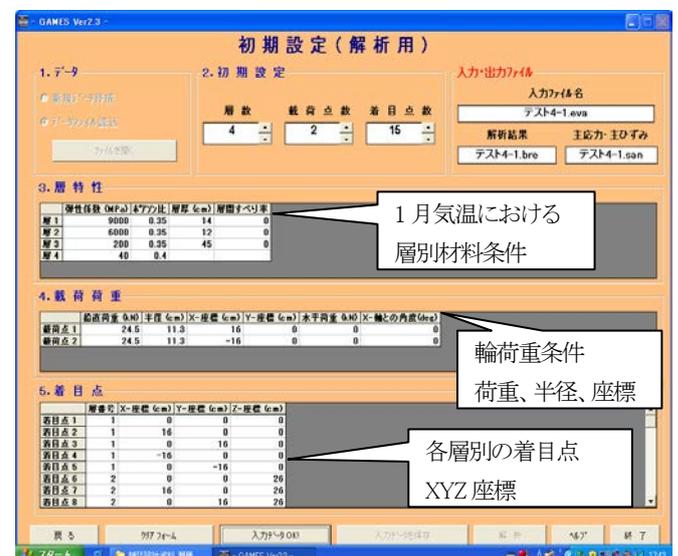


図-10 GAMESの入力画面

==== 層特性 ====

層の番号	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	層厚 (cm)	すべり率
1	9000	0.35	14	0
2	6000	0.35	12	0
3	200	0.35	50	0
4	40	0.40		

凡例

X,Y,Z 着目点座標  
 Ux, Uy, Uz 各着目点のx軸, y軸, z軸方向の応力  
 σx, σy, σz 各着目点のx軸, y軸, z軸方向のせん断応力  
 τxy, τyz 各着目点のx軸, y軸, z軸方向のせん断ひずみ  
 εx, εy, εz 各着目点のx軸, y軸, z軸方向のせん断ひずみ  
 γxy, γxz, γyz 各着目点のx軸, y軸, z軸方向のせん断ひずみ  
 ひずみ: +は引張, -は圧縮を表す

表-8 GAMES の計算結果 (1月の例)

==== 解析結果 ====

X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ux (cm)	Uy (cm)	Uz (cm)	σx (MPa)	σy (MPa)	σz (MPa)	τxy (MPa)	τxz (MPa)	τyz (MPa)	εx	εy	εz	γxy	γxz	γyz
0	0	0	0.00E+00	0.00E+00	3.85E-02	-5.14E-01	-7.75E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-2.70E-05	-6.61E-05	5.01E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	0	0	-7.03E-04	0.00E+00	3.86E-02	-1.09E+00	-1.18E+00	-6.11E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-5.09E-05	-6.54E-05	2.04E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0	16	0	0.00E+00	-8.67E-04	3.75E-02	-5.36E-01	-5.36E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.87E-05	-3.87E-05	4.17E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
-16	0	0	7.03E-04	0.00E+00	3.86E-02	-1.09E+00	-1.18E+00	-6.11E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-5.09E-05	-6.54E-05	2.04E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0	-16	0	0.00E+00	8.67E-04	3.75E-02	-5.36E-01	-5.36E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-3.87E-05	-3.87E-05	4.17E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0	0	26	0.00E+00	0.00E+00	3.82E-02	4.92E-01	5.97E-01	-3.03E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.88E-05	7.26E-05	-6.86E-05	0.00E+00	0.00E+00
16	0	26	8.10E-04	0.00E+00	3.77E-02	4.97E-01	5.78E-01	-2.94E-02	0.00E+00	-5.58E-03	0.00E+00	5.08E-05	6.90E-05	-6.76E-05	0.00E+00	-2.51E-06	0.00E+00
0	16	26	0.00E+00	1.00E-03	3.74E-02	4.15E-01	4.15E-01	-2.45E-02	0.00E+00	0.00E+00	-8.21E-03	4.64E-05	4.64E-05	-5.26E-05	0.00E+00	0.00E+00	-3.69E-06
-16	0	26	-8.10E-04	0.00E+00	3.77E-02	4.97E-01	5.78E-01	-2.94E-02	0.00E+00	5.58E-03	0.00E+00	5.08E-05	6.90E-05	-6.76E-05	0.00E+00	2.51E-06	0.00E+00
0	-16	26	0.00E+00	-1.00E-03	3.74E-02	4.15E-01	4.15E-01	-2.45E-02	0.00E+00	0.00E+00	8.21E-03	4.64E-05	4.64E-05	-5.26E-05	0.00E+00	0.00E+00	3.69E-06
0	0	76	0.00E+00	0.00E+00	3.28E-02	-1.54E-04	-6.51E-05	-7.13E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.81E-05	7.12E-05	-1.76E-04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
16	0	76	1.07E-03	0.00E+00	3.25E-02	-2.25E-04	-7.34E-05	-6.95E-03	0.00E+00	-6.54E-04	0.00E+00	6.46E-05	6.99E-05	-1.71E-04	0.00E+00	-4.58E-05	0.00E+00
0	16	76	0.00E+00	1.12E-03	3.25E-02	-1.59E-04	-1.59E-04	-6.92E-03	0.00E+00	0.00E+00	-7.09E-04	6.68E-05	6.68E-05	-1.70E-04	0.00E+00	0.00E+00	-4.96E-05
-16	0	76	-1.07E-03	0.00E+00	3.25E-02	-2.25E-04	-7.34E-05	-6.95E-03	0.00E+00	6.54E-04	0.00E+00	6.46E-05	6.99E-05	-1.71E-04	0.00E+00	4.58E-05	0.00E+00
0	-16	76	0.00E+00	-1.12E-03	3.25E-02	-1.59E-04	-1.59E-04	-6.92E-03	0.00E+00	0.00E+00	7.09E-04	6.68E-05	6.68E-05	-1.70E-04	0.00E+00	0.00E+00	4.96E-05

表-8 に計算結果(1月の例)を示す。計算は各月毎に弾性係数を入力しAS層の引張ひずみと路床における圧縮ひずみを算出する。

## 6.2 計算結果を用いた力学的評価

算出されたひずみをAS材料と路床において下式により許容49KN輪数を算出する。

式-1 AS材料の場合(舗装設計便覧 P124)

$$N_{fa} = \beta_{ai} \cdot (C) \cdot (6.167 \times 10^{-5} \cdot \epsilon_t^{-3.291 \beta a2} \cdot E^{-0.854 \beta a3})$$

式-2 路床の場合(舗装設計便覧 P125)

$$N_{fs} = \beta_{sl} \cdot (1.365 \times 10^{-9} \cdot \epsilon_z^{-4.477 \beta s2})$$

式-1 及び式-2 から温度条件を考慮した疲労度DaとDsを算出し疲労破壊回数を算出する。表-9 疲労破壊回数は信頼度に応じた係数で除し、破壊輪数の基準値内となっているかを検証する。

表-9 アスファルト混合物、路床の破壊回数

舗装断面 NO1 TA方による舗装断面 を理論設計で検証	月	アスファルト混合物層の破壊回数				
		引張ひずみ εt (× 10 <sup>-4</sup> )	許容49KN輪 数 Nfa (× 10 <sup>7</sup> )	Da計算	49KN輪荷重 1回通過による ダメージDa (× 10 <sup>-9</sup> )	
	1月	7.26E-05	1.10E+08	9.11E-09	9.57E-09	1.05E+08
表層4cm	2月	7.26E-05	1.10E+08	9.11E-09		
基層5cm	3月	7.47E-05	1.06E+08	9.44E-09		
中間層5cm	4月	8.34E-05	9.65E+07	1.04E-08		
上層路盤AS安定6cm	5月	9.81E-05	9.07E+07	1.10E-08		
上層路盤AS安定6cm	6月	1.35E-04	1.12E+08	8.90E-09		
路盤IRC-40 50cm	7月	1.49E-04	1.26E+08	7.91E-09		
	8月	1.64E-04	1.38E+08	7.26E-09		
	9月	1.20E-04	8.91E+07	1.12E-08		
	10月	9.81E-05	9.07E+07	1.10E-08		
	11月	8.34E-05	9.65E+07	1.04E-08		
	12月	7.26E-05	1.10E+08	9.11E-09		
	12月の合計		1.15E-07			
	合計/12		9.57E-09	Da合計/12 Daの逆数		

路床の破壊回数				
圧縮ひずみ εz (× 10 <sup>-4</sup> )	許容49KN輪 数 Nfsi (× 10 <sup>7</sup> )	Ds計算	49KN輪荷重 1回通過による ダメージDs (× 10 <sup>-8</sup> )	破壊回数 Nfd (× 10 <sup>7</sup> )
1.76E-04	1.70E+08	5.88E-09	1.28E-08	7.80E+07
1.76E-04	1.70E+08	5.88E-09		
1.80E-04	1.57E+08	6.38E-09		
1.92E-04	1.24E+08	8.09E-09		
2.11E-04	8.75E+07	1.14E-08		
2.46E-04	4.98E+07	2.01E-08		
2.59E-04	4.13E+07	2.42E-08		
2.72E-04	3.45E+07	2.90E-08		
2.37E-04	5.71E+07	1.75E-08		
2.11E-04	8.75E+07	1.14E-08		
1.92E-04	1.24E+08	8.09E-09		
1.76E-04	1.70E+08	5.88E-09		
12月の合計		1.54E-07		
合計/12		1.28E-08	Ds合計/12 Dsの逆数	

## 6.3 舗装構造の評価

テスト断面(TA法断面)では、アスファルト、路床ともに疲労破壊輪数に余裕がある結果となった。

AS破壊回数	信頼度90%	2.61E+07	>	1.40E+07	疲労破壊輪数
路床破壊回数	信頼度90%	1.95E+07	>	1.40E+07	疲労破壊輪数

## 7. 多層弾性理論を用いた舗装設計の留意点

理論設計における留意点と解決策を表-10に示す

表-10 多層弾性理論設計の留意点と解決

項目	留意点	解決策
舗装材料の弾性係数	厳冬期や凍結融解を考慮した数値の採用	道内における舗装材料の数値観測を行う
温度補正のための基本データ	近傍に気象観測所がない場合、どこのデータを用いるか?	路線全体で考えるのか、主要交差点、IC間で計画するかを決定する
層間境界面のすべり率の設定	舗装材料の層間すべりをどのように考慮するか? AS層はすべり率0.00とする	コンクリート舗装の場合は、路盤とのすべり率の値を試験等により適切値採用

## 8. おわりに

舗装構造設計に対し、多層弾性理論を用いた設計は、性能規定において今後必須となる。今回の検討では、舗装材料の弾性係数に対し、凍結融解を考慮していない。寒地土研はこうした地域の課題に対し、「理論的舗装設計支援システム」を開発している。今後は、舗装理論設計に対し、支援システムを活用していくと考える。理論設計は疲労ひび割れに着目した設計であるため、凍結融解に関する舗装の抵抗や、わだち掘れに対する舗装構造の考えも取り入れる必要がある。今後、理論設計による舗装施工箇所のデータを蓄積し、舗装材料や破壊回数計算式の改善を行っていく必要があると考える。

## 9. 参考文献

- 1) 舗装設計便覧 日本道路協会 H18.2
- 2) 多層弾性理論による舗装構造解析入門 舗装工学ライブラリー 2005.3
- 3) 積雪寒冷地の諸条件を考慮したアスファルト舗装の理論的設計法に関する検討 2012.1 寒地土研月報
- 4) 北の交差点Vol.5 技術レポート 舗装技術の変遷 1999