

アスファルト舗装の 構造設計における最近の動向(4)

阿部 頼 政*

1. はじめに

前回までで、シェルの設計法¹⁾に関する要点の紹介は、ほとんどすんだ。今回は特殊なケースとして、路床の弾性係数が季節によって変動する場合の計算法とフルデプスアスファルト舗装の設計法を考察するとともに、オーバーレイの設計法²⁾を簡単に紹介して締めくくりとしたい。

2. 路床の弾性係数が変化する場合

路床の弾性係数は、アスファルト混合物の弾性係数ほど顕著ではないが、年間を通じて変化することはいうまでもない。舗装の破壊が特に春先に生じやすい原因は、路床の支持力が低下するためであろうと言われている。シェルの設計法では、このように最も弱いと思われる期間の弾性係数をもとにして設計すればよいとしながらも、特に弾性係数の変化を考慮する必要がある場合について、次のような方法を提案している。

いま、路床の弾性係数がそれぞれ異なる n 個の期間について舗装を設計するものとする。それぞれの期間における標準軸重の累積数を N_1, N_2, \dots, N_n とする。ここで、

$$N_{tot} = N_1 + N_2 + \dots + N_n \dots \dots \dots (1)$$

N_{tot} : 設計期間中の標準軸重累積数

n 個の期間について、それぞれの舗装厚は、各期間ごとの路床弾性係数、平均気温、載荷回数および混合物の種類から決定することができる。このうち、最も厚い舗装構造をストートにとり、この舗装構造について、 n 個の期間それぞれの条件に対応する寿命 (N_1', N_2', \dots, N_n') を求める。

累積ダメージ (cumulative damage) D_{tot} を次のようにして求める。

$$D_{tot} = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_i'} \dots \dots \dots (2)$$

この D_{tot} は 1 より大きくなるので、次々と舗装厚を厚

くして D_{tot} が 1 になるまで計算を繰り返す。1 になったときの舗装厚が適切な舗装厚である。

著者ら¹⁾の説明は以上のように簡単なものであるが、一読しただけでは理解しにくいと思われるので、以下、筆者の推定を加えながらこの手法を考察してみよう。

いま、(1)式の N_1, N_2, \dots, N_n に対応して求められた各舗装厚のうち、 N_1 に対応する舗装厚 H_1 が最も薄く、 N_n に対応する舗装厚 H_n が最も厚いと仮定する。

最初のストートにとる仮の設計厚が H_n である。他の条件を同じにして H_1 のところに H_n を使用すれば、当然のことながら寿命は伸びて N_1' の交通量を通せることになる ($N_1' > N_1$)。他も同様である ($N_2' > N_2, N_3' > N_3, \dots$)。しかしこれらの比を合計した値は、1 より大きくなり、一般に次の式が成立する。

$$\frac{N_1}{N_1'} + \frac{N_2}{N_2'} + \dots + \frac{N_n}{N_n'} \geq 1 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、設計厚を H_n より大きくしていくと各項はしだいに小さくなり、ある厚さ H_n' になったとき、上式の左辺が 1 になるであろう。この H_n' が求める設計厚である。

以上のように、個々のダメージを累積するという手法は路床土が変化する場合にかぎらず、舗装ではよく使用されるので、記憶にとどめておかれるとよいと思う。

3. フルデプスアスファルト舗装

わが国では、4、5年前までフルデプス舗装の優劣がさかんに論じられ、日本アスファルト協会でも「フルデプス分科会」を設けて研究にあたっていた。しかし、石油ショック以来、アスファルトを大量に使用するフルデプス舗装はいつのまにか、敬遠されてしまった感がある。

この傾向は、諸外国でも同様らしく、著者ら¹⁾も、「アスファルトの値段が高くなったため、最近ではアスファルト層をできるだけ薄くしようとする傾向がある」と述べている。著者らは、アスファルト層をあまり薄くすることの危険性について述べると同時に、フルデ

* 日本大学理工学部助教授

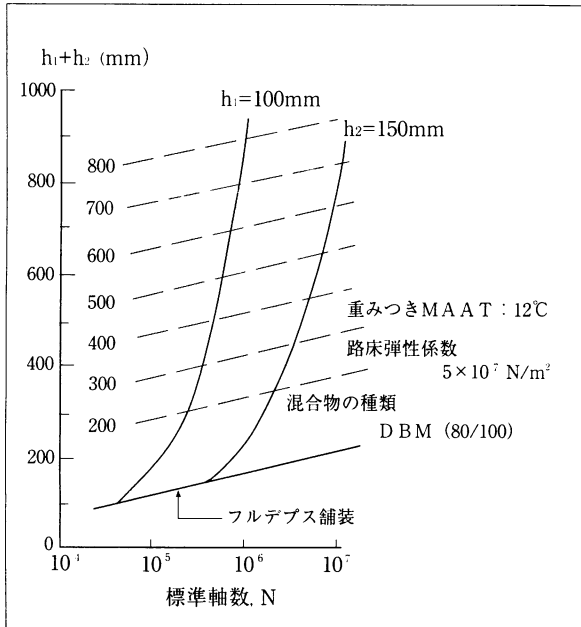


図-1 舗装厚に与える交通量の影響

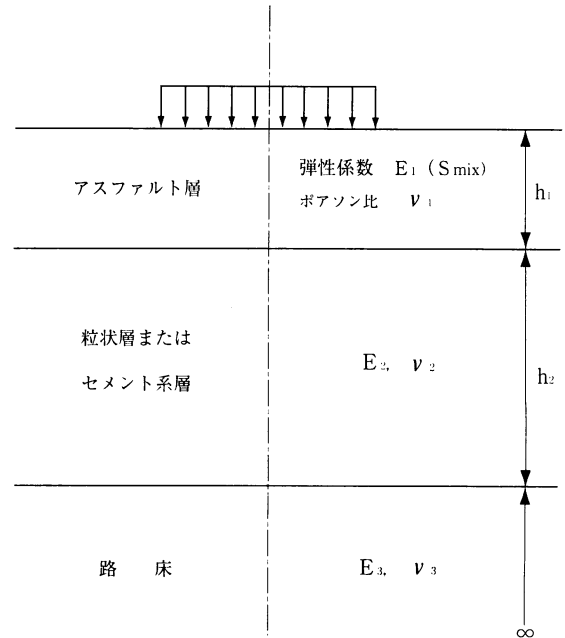


図-4 舗装のモデル

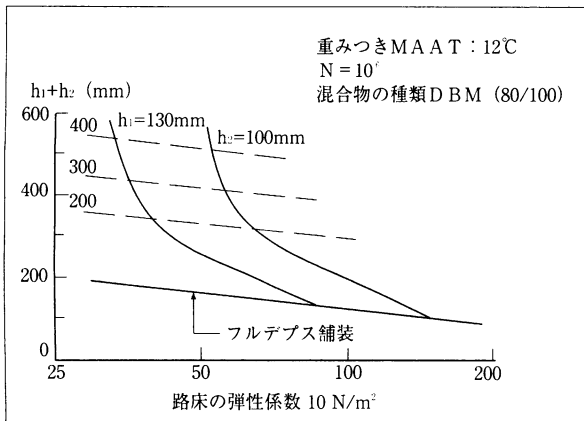


図-2 舗装厚に与える路床弾性係数の影響

プス舗装を特に推奨するわけではないとしながらも、一般的に言われている利点の他に、フルデプスには次のような特徴があるとしている。すなわち、図-1、図-2から明らかなように、薄いアスファルト層を持つ舗装と比較して、フルデプス舗装は、設計寿命や路床の弾性係数にあまり影響を受けない。これは、交通の質と量や、路床の弾性係数の推定にともなう精度から考えると、きわめて重要な意味を持つものである。

なお、フルデプス舗装が経済的と判断された場合は、図-3のような簡略化された設計曲線を使用すればよいとしている。

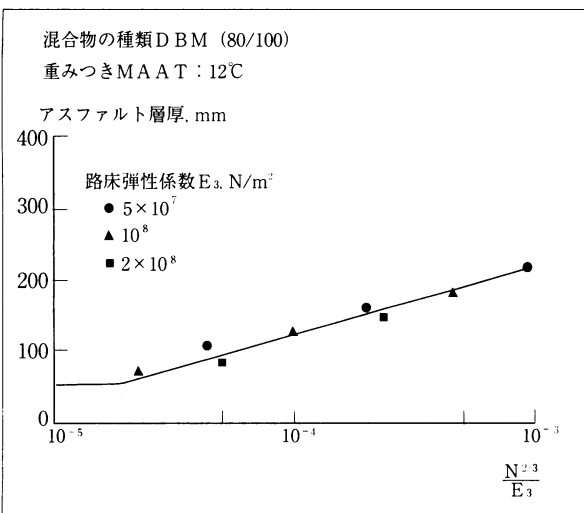


図-3 フルデプス舗装の代表的な設計曲線

4. 舗装の評価

アスファルト舗装の力学的特性を評価する手段としては古くからベルケルマンビームによるたわみ測定が利用されてきた。著者ら²⁾は、これにかわる新しいたわみ測定法として、FWD (Falling Weight Deflectometer) を開発し、測定の迅速化をはかるとともに、たわみ曲線の形状を考慮する指標をとり入れ、さらにFWDの測定値をオーバーレイの設計に利用する手法を示した。以下、この概要を紹介する。

(1). 基本的な考え方

アスファルト舗装は、図-4のように、多層からなる弾性体と仮定して取り扱う。これはシェルの設計法全体に使用されているモデルである。なお、簡単のためポアソン比は一定にしている。(ν₁ = ν₂ = ν₃ = 0.35)

FWDの荷重に対する舗装の応答は、最大たわみと、たわみ曲線の形状 (Deflection Bowl) でとらえるが、後者は、荷重から γ の距離にあるたわみ δ_γ と荷重直下のたわみ δ_0 との比 Q_γ を指標にとっている。

$$Q_\gamma = \frac{\delta_\gamma}{\delta_0} \dots\dots\dots(4)$$

種々の E_2 , h_2 , E_3 および荷重に対応して、 E_1 , δ_0 , Q_γ , h_1 の間の関係を示すグラフがBISARの計算結果から準備されている (図-5)。したがって、たわみ測定から δ_0 , Q_γ の値が得られれば、次のような手順により必要とする未知数を決定することができる。

粒状路盤の弾性係数 E_2 は h_2 と E_3 より次の式から求める。

$$E_2 = k \cdot E_3 \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $k = 0.206 \times h_2^{0.45}$ ($2 < k < 4$, h_2 は mm 単位)。

この関係式を使用すれば、 E_3 を固定することにより E_2 は自動的に求められる。

通常、 E_1 と h_2 は既知と見なせる。すなわち、 h_2 は、施工時の記録あるいはコアサンプリング等から推定できるし、 E_1 は図-6のような実験値から決定できるからである。以上の方法で E_1 , E_2 , h_2 , δ_0 , Q_γ が既知となり、オーバーレイに必要な値 h_1 , E_3 を決定することができる。

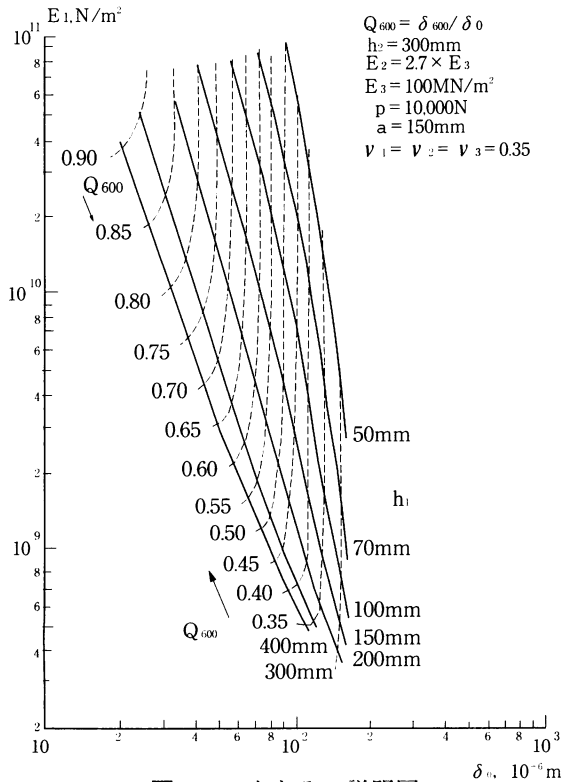


図-5 たわみの説明図

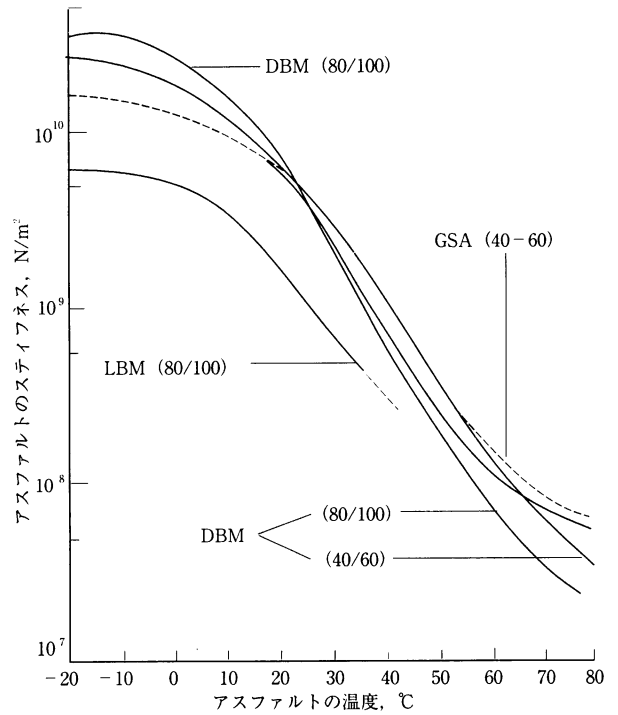


図-6 FWDの荷重条件に応じた各種混合物のステイフネス (20Hz)

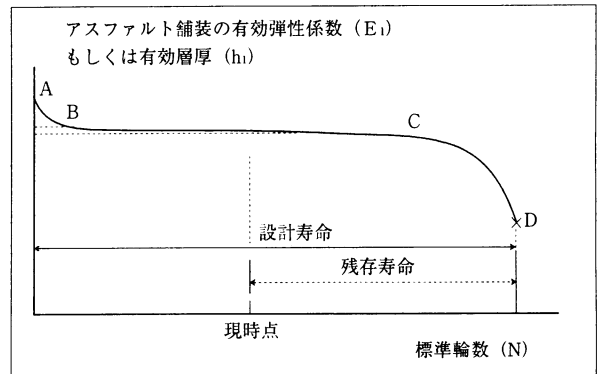


図-7 舗装寿命の概念図

なお、セメント系路盤についても述べられているがここでは省略する。

(2) たわみ測定法FWDについて

FWDは、150kgの質量を、任意の高さからスプリングを介して直径300mmの剛性板に落下させ、transducerにより電氣的にたわみを測定するものである。これまでに行われた数多くの実験から、この方法によりたわみ曲線の形状が正確にとらえられることが判明している。また、測定値は、自動的に記録されるようになっている。

FWDによるたわみ測定の誤差は1地点につき5% 1区画につき10%~30%程度である。

(3). 残存寿命の決定

正常な舗装の残存寿命 (residual life) は、過去の交通履歴を知らなければ求めることができない。これは、図-7を用いて説明できる。図-7は、アスファルト層の有効弾性係数 (effective modulus) およびアスファルト層の有効厚 (effective layer thickness) を荷重の累積数Nの関数として示したものである。初期の低下 (A-B) のあと、弾性係数は徐々に低下していくが、その勾配はきわめて小さく (B-C)、C点に至って急激に低下する。これは室内実験の疲労特性に似ており、また現実の舗装のたわみ履歴も図-7のような傾向を示す。B-Cの期間中にたわみを測定しても、たわみはNに関係なくほぼ一定であるため、残存寿命を決定することができないわけである。なお、図-7で、有効なアスファルト層厚がNの増加につれて減少していくというのは奇異な感じを受けるかと思うが、これは、アスファルト層の価値が徐々に低下していくものと解釈すればよい。

残存寿命は、初期の設計寿命とこれまでに使用した期間 (いずれもNであらわしたもの) の差である。初期におけるアスファルト層の有効弾性係数の低下は比較的小さいから、たわみ測定から求めた E_1 , h_1 の値を用いてシェルの設計曲線から設計寿命を求めることができる (図-8)。こうして求めた設計寿命とこれまでの交通量を比較すれば、現時点でオーバーレイを必要とするか否かの判定が可能になる。

5. オーバーレイの設計法

オーバーレイの設計にもシェルの設計曲線が使用できる。しかしながら、オーバーレイ後でも、最大歪は一般に下層 (在来の層) に生ずるため、在来層の疲労を考慮に入れる必要がある。これは次のような方法による。

在来舗装の設計寿命を N_{D1} 、これまでの交通量を N_{A1} (標準軸重にて) とすれば、相対的消費量は

$$N_{A1}/N_{D1}$$

であり、相対的残存量は

$$1 - N_{A1}/N_{D1}$$

となる。この残存寿命は、今後予想される交通量 N_{A2} に使用することができるから、新しい設計寿命Nは次の式で示されるはずである。

$$N_{A2}/N_{D2} = 1 - N_{A1}/N_{D1} \dots\dots\dots(6)$$

または、

$$N_{D2} = N_{D1} \cdot N_{A2} / (N_{D1} - N_{A1}) \dots\dots\dots(7)$$

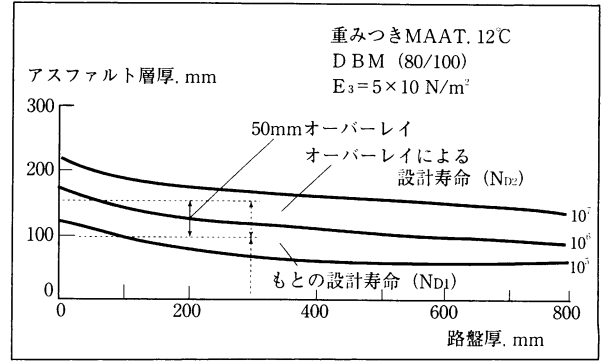


図-8 オーバーレイの設計法

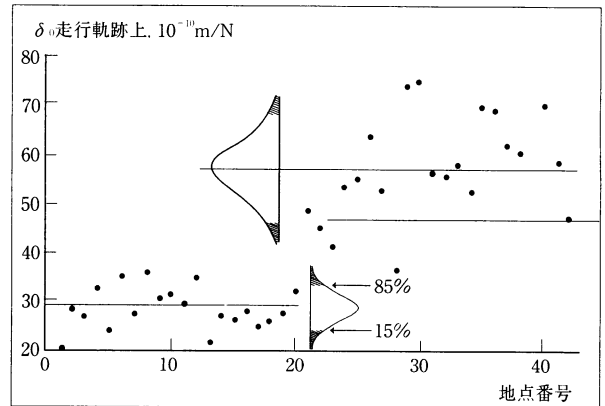


図-9 たわみ測定値

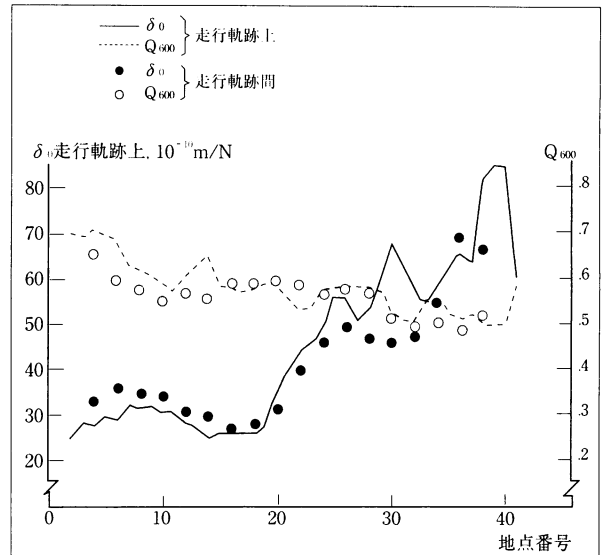


図-10 たわみ測定値 (100m間隔)

オーバーレイに使用する混合物が在来層と同一種のものであれば、 N_{D2} に必要なオーバーレイ厚は、 N_{D1} を定めた設計曲線から直接求めることができる (図-8)。

以上に述べた、舗装の評価およびオーバーレイの設計法は、かなり抽象的なのでなかなか理解しにくいと思う。次に計算例を紹介して一助としたい。

6. 計算例

この例は、オランダのGelderlandにある地方道（S-7）で1976年4月に測定した結果に関するものである。

測定結果は図-9、図-10に示されているが、図-10の点は測定値3個の移動平均（3-point moving average, $(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) / 3$, $(\delta_2 + \delta_3 + \delta_4) / 3$, $(\delta_3 + \delta_4 + \delta_5) / 3$, etcで示されている。

δ_0 と Q_7 の限界値（critical value）は、求められたアスファルト層厚および路床の弾性係数とともに表-1にあげられている。表-1は、走行軌跡上（in wheel tracks）と走行軌跡間（between wheel tracks）に分けて測定値等が示してある。これは、交通荷重が数多く作用した部分とあまり作用しなかった部分を比較するためである。

表より、 δ_0 の大きなもの、たわみ比 Q_{600} の小さなものの組合せから、次の寿命が推定できる。

Section 1（地点番号1-20）： $N_{D1} = 2 \times 10^7$

Section 2（地点番号21-42）： $N_{D1} = 2 \times 10^6$

これまで80KNの通過軸数は次のようであったとする。

$$N = 1.1 \times 10^6$$

したがって、残存寿命は

$$\text{Section 1} : N_{D1} - N_{A1} = 1.9 \times 10^7$$

$$\text{Section 2} : N_{D1} - N_{A1} = 9 \times 10^5$$

図-8のような設計曲線を利用することにより、オーバーレイの設計厚は、表-2のように求められる。

表-1 Gelderland, Road S-7におけるたわみ測定

Position No.	1 - 20		21 - 42	
	走行軌跡上	走行軌跡間	走行軌跡上	走行軌跡間
$\delta_{0, 10^{-10}} \text{m/N}$	28	31	56	53
$\delta_{0, 10^{-10}} \text{m/N}$	4.1	4.3	10.5	13.8
Q_{600}	0.63	0.60	0.55	0.53
Q_{600}	0.066	0.058	0.057	0.075
$\delta_{0, 85, 10^{-10}} \text{m/N}^*$	33		68	
Q_{85}	0.70		0.61	
$h_{1, 85}$, mm	340		180	
E_3 , MN/m ²	160		115	
N_{D1}	$\geq 10^8$		4×10^6	
$\delta_{0, 15, 10^{-10}} \text{m/N}$	24		46	
Q_{15}	0.56		0.49	
$h_{1, 15}$, mm	265		175	
E_3 , MN/m ²	340		230	
N_{D1}	1.2×10^8		8×10^6	
$\delta_{0, 85, 10^{-10}} \text{m/N}$	33	36	68	67
Q_{85}	0.56	0.54	0.49	0.45
$h_{1, 85}$, mm	230	200	145	135
E_3 , MN/m ²	260	240	155	185
N_{D1}	4×10^7	2×10^7	2×10^6	2×10^6
$\delta_{0, 15, 10^{-10}} \text{m/N}$	24		46	
Q_{15}	0.70		0.61	
$h_{1, 15}$, mm	400		220	
E_3 , MN/m ²	100		165	
N_{D1}	$\geq 10^8$		2×10^7	

* $\delta_{0, 85}$ と Q_{85} はそれぞれ $\delta_{0, 10^{-10}}$ 、 Q_{600} の値のパラッキで85%を占める点を示す。(図-9参照)

7. まとめと感想

シェル設計法で基本となる考え方は、弾性理論を利用してアスファルト層下面の引張歪と路床上面の垂直歪を規定し、これらが限界値を超えないように舗装厚を決定しようとするものである。前者がクラックの防止であり、後者が路床に起因するわだち掘れの防止であることは言うまでもない。以上のように、アスファルト層の引張歪と路床の圧縮歪を設計の基準にとるという考え方は、シェルだけではなく、多くの研究者によって採用されているものであるが、シェルの特徴は、これをきわめて広範囲の実験から裏付けしていることであろう。

次に温度の影響を数量化して設計にとり入れたことも重要な特徴としてあげられる。アスファルト層の力学特性が温度に大きく影響されることは舗装技術者の常識となっているが、この影響を設計にとり入れるのは、なかなか困難であった。シェルの提案している方法が完全なものとは言えないであろうが、今後この種の研究の基礎になるものと思われる。

温度の影響を考慮することにより、アスファルト層

表-2 Gelderland, Road S-7のオーバーレイ

これまでの交通量： N_{A1} ：	1.1 × 10 ⁶			
今後の交通量： N_{A2} 5年間	6.8 × 10 ⁵			
10年間	1.5 × 10 ⁶			
20年間	3.7 × 10 ⁶			
地点番号	1 - 20	21 - 42		
決定条件 $h_{1, 85}$ mm	200	145		
E_3 MN/m ²	240	155		
当初の設計寿命： N_{D1}	2 × 10 ⁷	2 × 10 ⁶		
残存寿命： $N_{D1} - N_{A1}$	1.9 × 10 ⁵	9 × 10 ⁵		
		5年間	10年間	20年間
5, 10, 20年間にオーバーレイは必要か？	no	no	yes	yes
今後の設計寿命：			3.3 × 10 ⁶	8.2 × 10 ⁵
$N_{D2} = N_{D1} \times N_{A2} / (N_{D1} - N_{A1})$			160	190
N_{D2} に対するアスファルト層の合計厚： $h_{1, 15}$ mm			160	190
オーバーレイ厚： $h_0 = h_{1, 15} - h_{1, 85}$ mm			(15)	45

の流動もかなり具体的に理解できるようになっている。今後、現場との対応がいかなるものか、さらに検討を加えていくものと思われるが、アスファルト層の流動に頭を痛めているわが国にとって、色々な意味で参考になるかと思う。

従来、舗装は経験工学的色彩が濃く、ともすれば理論的なアプローチは軽視されがちであった。弾性理論を一つの軸としたシェルの設計法がこれまでに充実してきたことは、その意味でも注目に値すると言えよう。

8. あとがき

これまで4回にわたり、シェルの設計法を紹介してきたが、まだまだ紹介しきれない部分がたくさんある。きわめて内容が豊富なのである。筆者の研究室では、卒業研究の学生4人が、7月からこの設計法にとりくんできたが、まだその全容及び計算法を完全には理解しきれないようである。図表等を含めたManualが約300頁からなるものであり、学生自身が英文に弱いためでもあろう。ただ、興味のある解析結果がぼつぼつ出はじめているので、いずれ機会を改めて紹介したいと思っている。

研究ノートも今回で6回目になった。当初、「将来は執筆者のグループをつくり……」と述べたがようやくその体制ができあがったようである。すなわち、本号の特集に紹介されている「アスファルト舗装技術研究グループ」である。次回からは、筆者を含めてこのグループのメンバーがノートを担当する予定である。そして、さらに将来のことになるが、一般からの応募原稿もとり入れて本欄を充実していきたいと考えている。

参考文献

- 1) A.I.M.Claessen, J.M.Edwards and Sommer, "Asphalt Pavement Design-The Shell Method" Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, p.39~73, 1977
- 2) A.I.M.Claessen and R.Ditmarsch, "Pavement Evaluation and Overlay Design-The Shell Method." 同上, p.649~662
- 3) "Shell Pavement Design Manual" Shell International Petroleum Company Limited, London.