

アスファルト舗装の 構造設計における最近の動向(1)

阿部 頼 政*

1. はじめに

本ノートではこれまで、クラックの問題と、わが国の設計法を検討してきた。これらは、今回からのテーマの序曲にあたるものと考えていただいてよい。

1977年8月に米国のミシガン大学において、第4回アスファルト舗装構造に関する国際会議が開かれた。この会議は1962年以来、5年ごとに開催されてきたもので構造設計に関する最も重要な情報を提供するものといつてよからう。第4回は、実験的な検証のある設計法が会議の中心課題であり、世界各国から優秀な論文が発表されている。

今回からは、この国際会議に発表された論文を中心に、最近の設計法の動向を検討していく予定である。テーマが大きいため、当初予定した1回毎に完結という形は無理になったが、あえてそれにこだわらない方が、詳細にわたって論じられるかと思う。今回は、まず、シェルの設計法“Asphalt Pavement Design - The Shell Method, by A.I.M. Claessen, J.M. Edwards, P. Sommer and P. Uge”をとりあげた。内容が豊富なため、2~3回にわたって検討したいと考えている。

なお、本論に入る前に、2章において、国際単位系(SI)を紹介する。読者の参考になれば幸いである。

2. 国際単位系について

我々が外国文献を読む場合、長い間悩まされてきたのはヤードポンド法による表示である。それが、最近になってさらに厄介者が増えた。すなわち、国際単位系(Système International d'Unités SIと呼ばれている)である。もっとも、これを厄介者扱いするのは、尺貫法になれた者がメートル法を嫌うようなものであるが、現在のところ我々にとって違和感のあることに変わりはない。

* 日本大学理工学部

しかし、イギリスが従来のヤードポンド法からSIへと完全に切换えたこと等もあり、SI表示による論文が多くなってきた。今回対象とするシェルの設計法も、SI表示なので、これを機会に簡単に紹介しておこうと思う。

我々が通常使用している単位系は、重力単位系であり、高校の物理学で習ったCGS単位系や、MKSA単位系と同じメートル法に属している。同じメートル法でも、これら10以上の単位系が使われていて不便なことから、すべての領域をカバーする実用単位系としてSIが作られたわけである。重力単位における基本単位は、メートル:m(長さ)、重量:キログラム:kgf(重量)、および秒:s(秒)であるが、これとSI単位との最大の違いは後者が重量のかわりに質量であるキログラム:kgを使っているところにある。質量と重量の相違については、高校時代一般力学で誰しも苦勞した経験があるかと思うが、土木関係では、静止した物体の力学を扱うため、kgと言えば重量という感覚が身につけてしまっているのではなからうか。現在、我々が使用しているkgという表示は、実は重量を意味するkgfのことであり、SIとの換算においては、質量のkgと厳密に区別しなければならない。

力の単位はSIではN(ニュートン)であらわされる。これは単位質量(kg)に単位加速度(m/s^2)が働いたときの力であるから、

$$1 N = 1 kg \cdot m/s^2 \dots\dots\dots(1)$$

となる。また単位質量に重力加速度 $g_g (=9.80665m/s^2)$ が働いたときの力が1kgfであるから、

$$1 kgf = 9.80665 kg \cdot m/s^2 \dots\dots\dots(2)$$

となる。(1)、(2)より、

$$1 kgf = 9.80665 N \dots\dots\dots(3)$$

この(3)式が最も重要な点であるが、SI単位の概要について表-1~表-6に示す。

以上は、三木²⁾ 3) 4) が土木学会誌に発表した報文をもとに、アスファルト関係者に必要と思われる部分を要約して紹介したものである。したがって、さらに詳しく知

表-1 SIの構成³⁾

SI	SI単位	基本単位 (7個)	組立単位 (17個)
		補助単位 (2個)	
		固有の名称をもつ組立単位 (17個)	
	組立単位	その他の組立単位	
接頭語 (16個) およびSI単位の10の整数乗倍			

表-2 基本単位³⁾

量	単位の名称	単位記号	量	単位の名称	単位記号
長さ	メートル	m	熱力学温度*	ケルビン	K
質量	キログラム	kg	物質質量	モル	mol
時間	秒	s	光度	カンデラ	cd
電流	アンペア	A			

注: *印, セルシウス温度 t (°C) もSI単位であり,
 $t = T (K) - 273.15 (K)$ 。

表-3 補助単位³⁾

量	単位の名称	単位記号
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表-4 組立単位³⁾

(a) 固有の名称をもつ組立単位

量	単位の名称	単位記号	定義
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$kg \cdot m/s^2$
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$N \cdot m$

(b) 基本単位および補助単位を用いて表される組立単位の例

量	単位の名称	単位記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
角速度	ラジアン毎秒	rad/s
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²

(c) 固有の名称を用いて表される組立単位の例

量	単位の名称	単位記号
粘度	パスカル秒	Pa·s
力のモーメント	メートルニュートン	N·m
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m

表-5 接頭語³⁾

単位に乘せられる倍数	接頭語の名称	接頭語の記号	単位に乘せられる倍数	接頭語の名称	接頭語の記号
10^{18}	エクサ	E	10^{-1}	デシ	d
10^{15}	ペタ	P	10^{-2}	センチ	c
10^{12}	テラ	T	10^{-3}	ミリ	m
10^9	ギガ	G	10^{-6}	マイクロ	μ
10^6	メガ	M	10^{-9}	ナノ	n
10^3	キロ	k	10^{-12}	ピコ	p
10^2	ヘクト	h	10^{-15}	フェムト	f
10	デカ	da	10^{-18}	アト	a

表-6 SIと併用される単位

量	単位の名称	単位記号	SI単位での値
時間	分	min	1 min = 60s
	時	h	1 h = 60min = 3,600s
	日	d	1 d = 24h = 86,400s
平面角	度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
	分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10,800) \text{ rad}$
	秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648,000) \text{ rad}$
体積	リットル	l	$1 l = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
	トン	t	$1 t = 10^3 \text{ kg}$

りたい方は三木の解説を一読されることをおすすめする。

力の単位は, (3)式から容易に換算できる。すなわち, Nで表示されている数値をほぼ1/10倍すれば従来のkgfとなるからである。しかし, 我々の分野で最も多く使用される応力の換算は, 色々と難点がある。SIでは, 応力の単位はPa (パスカル) であるが, これは N/m^2 で定義されており, 重力単位の kgf/cm^2 (今は一般に kg/cm^2 と書かれている) と単位面積のとり方が異なるため, $\times 10^4$ という形が常につきまとうからである。さらに, KN (キロニュートン), MN (メガニュートン), GN (ギガニュートン) という表示もあるため, かなり混乱しかねない。

わが国では, まだSI表示でものを書くというケースが少ないと思われるので, 外国文献を読むのに必要な換算だけ示しておこう。

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1.02 \times 10^{-5} \text{ kg/cm}^2 \dots\dots\dots(4)$$

$$1 \text{ KPa} = 1 \text{ K/m}^2 = 1.02 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2 \dots\dots\dots(5)$$

$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ M/m}^2 = 1.02 \times 10^1 \text{ kg/cm}^2 \dots\dots\dots(6)$$

$$1 \text{ GPa} = 1 \text{ G/m}^2 = 1.02 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2 \dots\dots\dots(7)$$

なお前述の三木がまとめた換算表を表-7に示した。以上の概要を記憶しておればSI単位で表示された文獻も比較的容易に読めるかと思う。

表-7 力関係の換算表³⁾

a) 力

N	dyn	kgf	lbf
1	1×10^5	1.01972×10^{-1}	2.2481×10^{-1}
1×10^{-5}	1	1.01972×10^{-6}	2.2481×10^{-6}
9.80665	9.80665×10^3	1	2.20462
4.44822	4.44822×10^5	4.5359×10^{-1}	1

(b) 圧 力

Pa	bar	kgf/cm ²	atm	lbf/in ²
1	1×10^{-2}	1.01972×10^{-5}	9.86923×10^{-6}	1.4504×10^{-4}
1×10^5	1	1.01972	9.86923×10^{-1}	1.4504×10
9.80665×10^4	9.80665×10^{-1}	1	9.67841×10^{-1}	1.4223×10
1.01325×10^5	1.01325	1.03323	1	1.470×10
6.89476×10^3	6.89476×10^{-2}	7.031×10^{-2}	6.804×10^{-2}	1

(c) 応 力

kPa	MPaまたは N/mm ²	kgf/mm ²	kgf/cm ²	lbf/in ²
1	1×10^{-5}	1.01972×10^{-4}	1.01972×10^{-2}	1.4504×10^{-1}
1×10^3	1	1.01972×10	1.01972×10	1.4504×10^2
9.80665×10^3	9.80665	1	1×10^2	1.4223×10^3
9.80665×10	9.80665×10^{-2}	1×10^{-2}	1	1.4223×10
6.89476	6.89476×10^{-3}	7.031×10^{-4}	7.031×10^{-2}	1

3. 弾性理論について

シェルの設計法の基本となるものは弾性理論である。すなわち、アスファルト舗装の各層を弾性体と仮定し、舗装の破壊に結びつく要因（歪等）を弾性理論から計算して設計を行なうものである。弾性理論そのものは数十年前からほぼととのった形で存在していたのであるが、数値計算がきわめて複雑なため、舗装設計への応用はほとんど考えられていなかった。これは、当時（現在でもかなりその風潮が強いが…）舗装は経験的な工学であり、学問的には取り扱い難いと考えられていたためでもあろう。舗装設計への実用化に最初の突破口を開いたのは、周知のようにBurmisterである。彼は、舗装体と路床を2層の弾性体と仮定して、表面変位の計算値を使用し便利な図表の形で発表した。これを契機とし、その後、2層、3層に関する応力、歪、変面変位等の図表が、Fox Jones, Peattie等によって次々と発表されるようになった。これら図表の利用により、最初にまとまった形で発表された設計法が、1963年の“Shell Design Charts for Flexible Pavement”である。そして、その後、1977年に至るまでの研究成果が今回発表された設計法であろう。この10数年間に起った大きな技術的变化は、電子計算機の発達とその一般化であり、これまで、複雑であった弾性理論の数値計算もプログラムさえあれば、きわめて容易に計算できるようになった。これは、従来、特殊な方法として敬遠されがちだった弾性理論による設計法

を急激に発展させた原動力と言えよう。

なお、これまで一度も計算されたことのない人のために、プログラムの使用法を簡単に紹介しておこう。まずプログラムを入手したら、利用しようとする電子計算機の言語に合致するようにプログラムの一部を多少調整する必要がある。これは自分でできなければ、専門家にまかせればよい。専門家にとってはきわめて容易な調整である。次はいかなる計算をするかの命令（インプット）で、一般的に次のような項目がある。

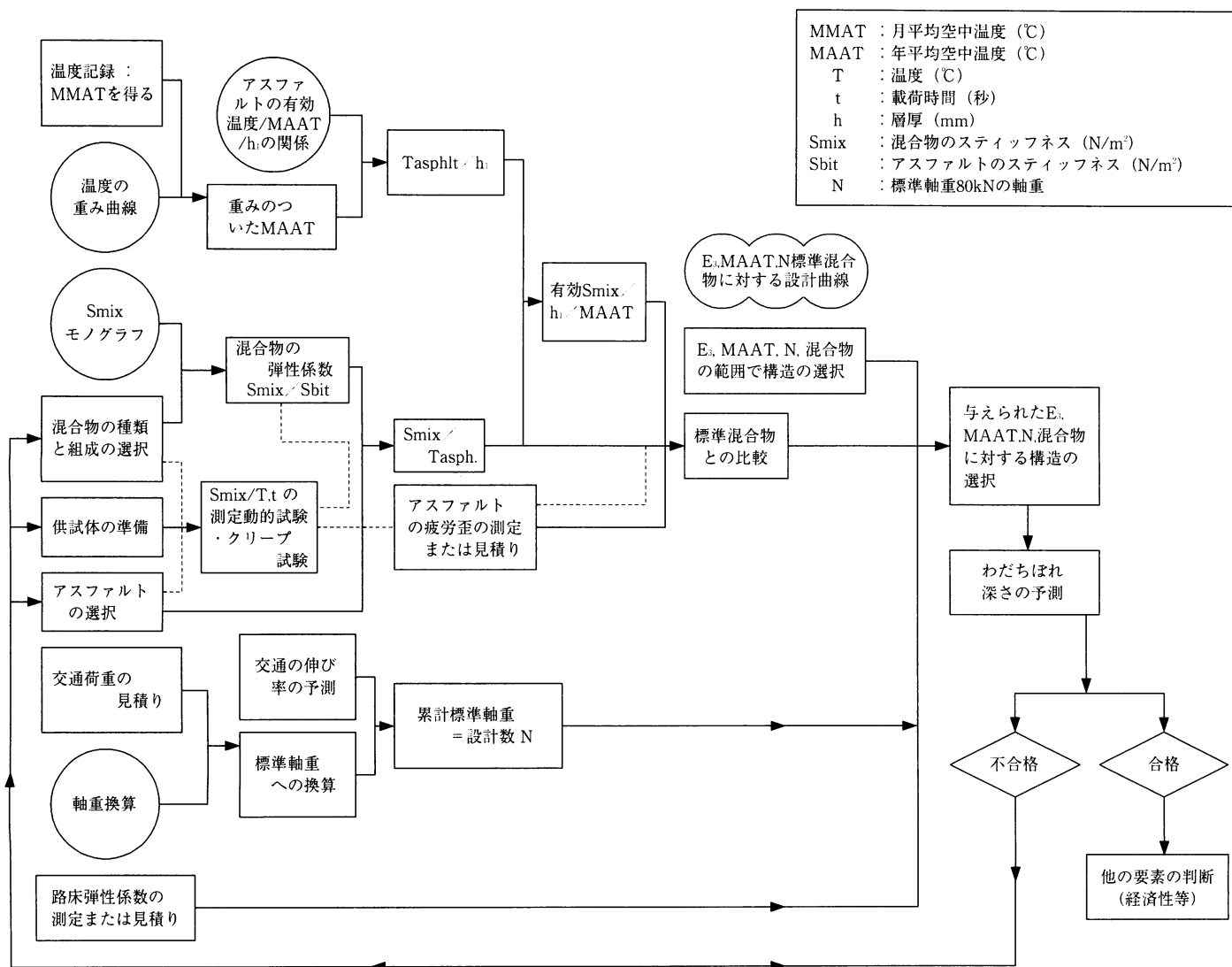
- ① 輪荷重（円形等分布）の大きさと半径または接地圧
- ② 輪荷重の位置
- ③ 層の数（一般に5層までできる）
- ④ 各層間の摩擦（一般に完全に滑らか又は密着の場合のみ）
- ⑤ 各層の弾性係数、ポアソン比、厚さ
- ⑥ 計算の対象とする点の位置

以上の項目をパンチする程度のことは電子計算機をこれまで一度も使用したことのない人でも30分程度でマスターできるし、これをプログラムと一緒に電子計算機の担当者に渡せば、応力、歪、変位等の計算結果（アウトプット）がタイプされてでてくる。要するに、電子計算機が身近にあり、計算してみようという意欲さえあれば、誰でもプログラムを利用できると言えよう。そしてプログラムは、公開されたものがいくつかあり、無料で入手できる。一般に弾性理論や電子計算機というと頭から毛嫌いされる傾向にあるが、我々舗装技術者にとってそのすべてを理解する必要はなく、単なる道具と見なせばよいと筆者は考えている。道具が出した結果の利用法こそ、技術者の重点をおくべきところであろう。

4. シェルの設計法の概要

設計法の手順と概要を図-1に示す。これは、筆者らの示した図をそのままとり、言葉だけを訳して、記号の注釈を筆者がつけ加えたものである。各項目についての詳細は後に紹介するとして、ここでは全体的な考察をおこう。まず言えることは、前設計法に比較して非常に細かい点まで配慮が行き届き、実用段階に達してきたことを示すとともに、我々にとっても参考になる点が多いということであろう。従来 シェルグループの研究は材料面において極めて高く評価されてきたが、本設計法によって、さらにそれが生かされた感がある。前設計法との主な相違点は、温度の影響をとり入れて、広範囲の

図-1 シェルの設計法の概要¹⁾



MMAT : 月平均空中温度 (°C)
 MAAT : 年平均空中温度 (°C)
 T : 温度 (°C)
 t : 載荷時間 (秒)
 h : 層厚 (mm)
 Smix : 混合物のスティッフネス (N/m²)
 Sbit : アスファルトのスティッフネス (N/m²)
 N : 標準軸重80kNの軸重

地域に適用できるように改良したこと、各種の代表的なアスファルト混合物をいずれも利用できるようにデータをつけ加えたこと、そして設計の最終段階でわだちぼれによる採否の判定を設けたことであろう。そして、それぞれの問題につき、かなりのバックデータの蓄積がうかがわれる。

設計法全体を支配する舗装のモデルを図-2に示す。ここで、舗装は、線形弾性体の多層構造 (linear elastic multi-layered system) で、材料は弾性係数 (ヤング率) とポアソン比で特徴づけられる。また、材料は、等方、等質で各層は水平方向に無限であり、鉛直 (又は水平) に作用する荷重は、一つ以上の円形等分布荷重であると仮定している。

このようなモデルの任意の点における応力、歪、変形

量を計算するために、シェルでは先にBISTRO、そして最近BISARというプログラムを開発した。BISARは、BISTROを改良したものであるが、この改良によって水平荷重がかかった場合や、層間の摩擦がない場合、部分的な摩擦のある場合も計算可能になったものである。しかし、本設計法では層間の摩擦は完全 (層と層が完全に固定されている) としている。

図-2に示したように、舗装構造は三層として取り扱われている。すなわち、アスファルト層、路盤及び路床である。なお、路盤では、粒状材ばかりでなく、セメントや石灰のような結合材を使用したもの及びスラグも含まれている。筆者らも述べているように、アスファルト層から路床までをいずれも弾性体と仮定することは、常識的に無理であるが、実際の荷重 (車) の載荷時間が極めて短いこと、変位が小さいことなどから、各材料は弾

性的に挙動すると考えられ、これまでも多くの研究者によってその妥当性が認識されてきた。本設計法では、この点をさらに厳密にするため、アスファルト混合物に対して、スティッフネス（一種のヤング率）という考え方を導入し、荷重時間と温度によってアスファルト層に使用する弾性係数を選択できるように配慮してある。なお、さらに複雑な構造や荷重条件（たとえば、空港舗装）に対しては別に取り扱っている。

4. 設計に必要な因子

舗装体の各層で応力や歪が最大になる点を、広範囲にわたる弾性率及び層厚について計算した結果、次の2因子が支配的要因であると判明した。

- (1)路床上面における圧縮歪：これは路床の永久変形を支配する。
- (2)アスファルト層の水平方向引張歪：これはアスファルト層のクラックを支配する。

通常の荷重状態（複輪による鉛直方向荷重）では、いずれの最大値も、荷重の中心または2つの荷重の対称軸下に生ずることが見出された。しかし路盤とアスファルト層の弾性係数が極端に異なる場合、引張歪はアスファルト層の下面ではなく、かなり層内部の上方で最大値の生ずる例もあった。この点についてさらに詳細な計算を行なった結果、アスファルト層に最大引張歪の生ずる位置は次の因子によって支配されることが判明した。

$$C = h_1 \cdot \frac{E_2}{E_1} \text{ mm} \dots\dots\dots(8)$$

- E_1 ：アスファルト混合物の弾性係数（N/m²）
- E_2 ：路盤の弾性係数（N/m²）
- h_1 ：アスファルト層の厚さ（mm）

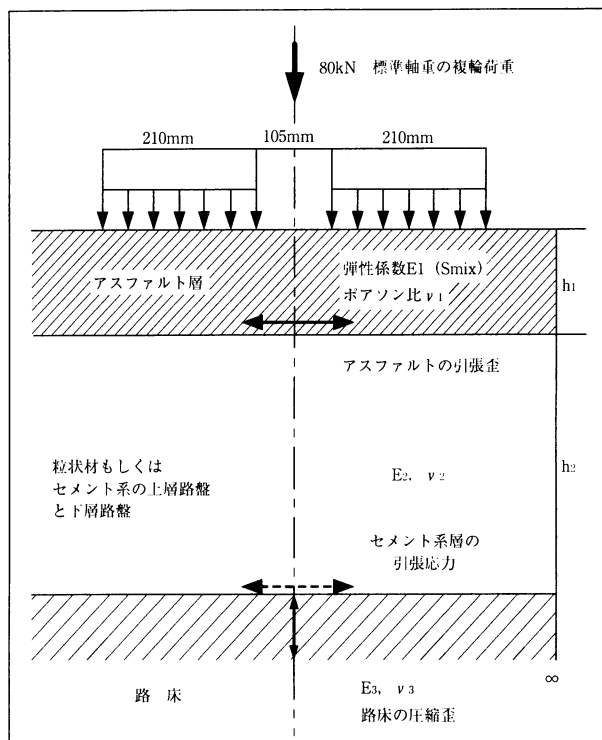
ここで $C > 133\text{mm}$ になると引張歪の最大値はアスファルト層の下面に生じなくなる。この場合、 h_1 が200mm以下では、最大値が h_1 の下半面内に生じ、200mmを超えると h_1 の上半面内に生じる。これは実験的にも確認され、設計曲線にとり入れられている。

二次的な条件としては、安定処理路盤の下面に生ずる引張歪、個々の層に生ずる変位の和としての変形量、さらに粒状材の品質等があるが、これは別に論じられる。

以上は、筆者ら（Claeseen他）の説明であるが重要な問題がいくつか含まれているので以下に考察しよう。

まず、舗装設計の基本的境界条件として、路床上面の

図-2 舗装のモデル¹⁾



圧縮歪とアスファルト層の水平方向引張歪をとりあげているが、これは、必要条件であって十分条件でないことは言うまでもない。筆者らも述べているとおり、この結論に到達するまでには、かなり広範囲の計算が必要であったと思われるが、その詳細については発表されていないので、ここで検討できないのが残念である。しかし、1963年の設計曲線以来、この2要素を中心に設計を行なってきており、今回またこの2要素をとりあげているということは、変更を必要とする程の問題が起っていなかったと受けとめてよからう。ただ、現在世界的に大きな問題となっているアスファルト層のみの永久変形（アスファルト混合物の流動）については、この2要素でチェックすることはできない。そもそも、弾性理論と、混合物の流動とは、全く相いれない異種のものであり、弾性理論による設計法の一つのネックと見なされてきたが、今回のシェルの設計法では、2要素を中心として構造設計が完了した後、最終的なチェックポイントとしてこの問題をとりあげているので、その効果が注目される。

本稿の目的からは、多少はずれるかと思うが、わだちぼれに関して日頃筆者が感じていることをここで述べてみたい。一般にわだちぼれと見なされる現象は、その原因から三種に大別されるかと思う。すなわち、混合物の流動、路床を含めた各層の沈下（永久変形）、表層のすりへりの三種である。これらのうち、流動はかなり目立

った形態（周囲のもりあがり）をとるため、他と区別しやすいが、沈下とすりへりの区別は路面を見ただけではなかなか困難である。わが国では、寒冷地においてすりへり、その他の地域で流動が問題にされてきた。特に最近では、流動が大きくなりあげられて、アスファルト協会をはじめ、各研究機関でその対策が熱心に検討されているが、筆者の疑問は、第2種の沈下に対する調査がなおざりにされていないかということである。高架橋の舗装やアスファルト層厚の十分な舗装（たとえば高速道路）等のわだちは、流動が支配的であろうが、その他の舗装では、沈下によるわだちを流動やすりへりとしてとらえているケースがかなり多いのではなかろうか。たとえば、混合物の流動としてわだちの周囲にもりあがった部分の体積は、基準面からへこんだ部分の体積と等しいであろうか。もし、等しくないとすれば、沈下またはすりへりによる影響も入っているはずであり、事実、流動と称される現場を見ても、へこんだ体積に比べ、もりあがり方がかなり少ないケースをよく見かける。また、寒冷地においては、横断方向の凹凸はすりへりによるものと短絡されやすい。

沈下によるわだちと混合物の流動やすりへりとは、その対策が根本的に異なる。すなわち、前者は、舗装の構造的な欠陥であるため、舗装厚を増すなど構造の強化が必要であるのに対し、後二者は材料的な欠陥であるため、材料の選定が中心となるからである。したがって、原因のとりえ方を誤ると、その対策も誤ることになり、補修もあまり効果のないものになってしまうおそれがある。その意味でも、わだちの原因を一度詳しく調査する必要があろう。その方法としては、補修直前の舗装をコアカッターまたはドリル等で穴をあけ、厚さの分布状態を調べれば、ある程度、見当がつくかと思われる。

なお、以上の筆者の見解は、ほとんど賛同者がいない。委員会等で、折あるごとに注意を喚起しているのであるが、そっぽを向かれがちである。決して一般的見解ではないので、誤解のないように念のためつけ加えておく。

それにしても、わが国の舗装関係者は、材料の問題になると熱中するが、舗装構造の問題に関しては比較的冷淡になるように思える（これも筆者のやぶにらみか…）。あるいは、アスファルト舗装要綱の規定が厳格すぎて技術者の判断を加えにくく、いつのまにか、舗装構造に関する改良への意欲を奪ってしまったのであろうか。それとも、また、技術者が現在の設計法に満足しているのであろうか。

蛇足が長くなったのでこの辺で本論にもどることにしよう。

筆者らの説明で、もう一つ興味深い点は、引張歪の最大値の生ずる位置が、アスファルト層の弾性係数と路盤の弾性係数の比によって変わってくるということである。従来の一般的な考え方としては、アスファルト層の下面に生じたクラックが進展して表面に及ぶとされていた。また、これが今でもクラックの代表的な形態であろう。しかし、最近、アスファルト層の比較的厚い舗装で表面から発生するクラックが話題になっているが、この現象は従来の考え方からは説明できない。筆者らは、この原因を舗装表面に生ずる引張歪のためではないかと考え、タイヤプリントをいくつかの円で近似し、現在計算中であるが、これまでに、アスファルト層の弾性係数が小さい場合には、複輪タイヤの中間と外側付近にかなり大きい引張歪の生ずることが判明している。その詳細はいずれ折を見て紹介したいと思っているが、(8)式は、すでに、表面付近からクラックの生ずる可能性があることを示していると言ってよいと思われる。いま、路盤（粒状材）の弾性係数を4,000kg/cm²、アスファルト層の弾性係数を冬期で40,000kg/cm²、夏期で10,000kg/cm²程度と仮定して、(8)式による試算を行なってみよう。

$$\text{冬期の場合： } C_1 = h_1 \cdot \frac{E_2}{E_1} = 0.1 h_1 \dots\dots\dots(9)$$

$$\text{夏期の場合： } C_2 = h_1 \cdot \frac{E_2}{E_1} = 0.4 h_2 \dots\dots\dots(10)$$

アスファルト層厚（安定処理層を含めて）300mmとすれば、 $C_1 = 30$ (mm) $C_2 = 120$ (mm) となり、いずれも133mmより小さいから、引張歪の最大値はアスファルト層の下面に生ずる。数値の与え方はきわめてラフであるが、このように $C < 133$ mm が一般的な傾向であろう。しかし、路盤の弾性係数が、これ以上に高くなり、アスファルトの弾性係数がこれ以下になるケースは当然考えられるから、場合によっては $C > 200$ mm になることもありうることになる。その極端な例が、セメントコンクリート舗装上のオーバーレイであろう。セメントコンクリートの弾性係数を300,000kg/cm²、オーバーレイ厚を5cmとして計算すると、

$$\text{冬期の場合： } C_1 = 375 \text{ mm}$$

$$\text{夏期の場合： } C_2 = 1,500 \text{ mm}$$

となり、いずれも200mmを大中に超えるから、クラックは表面から入るのが当然という結果になる。もちろん、これは筆者の机上の計算であって、現実と一致するかどうかは今後の検討となるが、いずれにしろ、(8)式はこれまでに説明のつかなかった問題に対するアプローチの一方を示している重要な提案であると言えよう。

(以下次号)

あとがき

シェルの設計法では、この後、路床の圧縮歪、アスファルト層の引張歪等、各項目の詳細が論じられているが、紙面の都合もあり中途半端になりかねないので、全体的な解説の済んだこの段階で筆をとめ、以下は次号にゆずることにする。今回は、筆者の個人的見解が多くなり、御不満の方もあるかと思うが、ノートということで、お許しいただきたい。

参考文献

- 1) A.I.M.Claessen, J.M.Edwards and P.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) 三木五三郎「単位の規格」土木学会誌 P.81~85, 1973年9月号
- 3) 三木五三郎「新しい単位と土木技術」土木学会誌 P.65~69, 1976年2月号
- 4) 三木五三郎「SIの外国における導入現況とわが国の対応策」土木学会誌, P.62~66, 1977年11月号