

# コンクリート舗装の構造設計における 多層弾性論の適用性

## ON THE APPLICATION OF MULTI-LAYERED ELASTIC THEORY FOR THE STRUCTURAL DESIGN OF RIGID PAVEMENTS

阿 部 頼 政\*

By Yorimasa ABE

### 1. はじめに

舗装はアスファルト舗装とセメントコンクリート舗装に大別できる。両者は“たわみ性舗装”，“剛性舗装”とそれぞれ異なった名称が与えられているように，構造設計の考え方にも大きな相違がみられる。すなわち，アスファルト舗装においては，舗装を構成する各層が交通荷重を軽減して路床に伝達する役割を果たすと考えられているのに対し，セメントコンクリート舗装においては，主としてコンクリート版が版作用によって交通荷重を支持するものと考えられている。したがって両者の構造設計法には歴然とした差があり，アスファルト舗装では各層の価値の評価，セメントコンクリート舗装では版に発生する応力の検討が主たる課題となっている。

両者の構造設計法はそれぞれ独自の発達を遂げ，現在ではほぼ確立されたものとなっているが，アスファルト舗装においては数多くの現場試験から得られた実験式，セメントコンクリート舗装においては弾性床上の版として導かれた理論式が構造設計の基本式となっている。このように両者の設計法の体系が大きく異なるため，アスファルト舗装にコンクリート版を併用したサンドイッチ舗装やコンポジット舗装，あるいはセメントコンクリート舗装のオーバーレイなど，両者を混合したタイプの舗装の構造設計は確立されておらず主として経験に頼っているのが現状である。

アスファルト舗装とセメントコンクリート舗装の構造設計に関するこのような相違は，両者の表層材料であるアスファルト混合物とセメントコンクリートの性質に対する評価の相違に起因することはいうまでもない。すなわち，セメントコンクリートは剛性が高く弾性体に近い挙動をするが，アスファルト混合物は剛性が低く弾性体とは異なった挙動をするということである。

しかし，最近では，アスファルト舗装の分野において，舗装を多層からなる弾性体として取り扱う解析手法（以下，多層弾性論と称す）が発達し，一応の評価を得てきている。したがって，アスファルト混合物よりも弾性体に近い材料を使用するセメントコンクリート舗装においても，多層弾性論の適用性があることは当然期待できるものと思われる。そして，もし，適用可能ということになれば，アスファルト舗装とセメントコンクリート舗装の構造設計が多層弾性論という共通の基盤で結ばれたことになり，現在のようにそれぞれが単独に存在している時点では望めないような技術の交流が可能となろう。

本研究は以上のような背景をふまえ，多層弾性論がセメントコンクリート舗装の構造設計にも適用できることを明らかにし，その効用を 2, 3 の例をもって示そうとするものである。

著者は本論文に先立ち，「アスファルト舗装構造の合理的設計法に関する研究」<sup>1)</sup>（以下，前論文と略す）において次のような結論を得ている。

(1) わが国のアスファルト舗装の構造設計法は多層弾性論からみれば路床上面に作用する垂直応力を基準にしていると推定できる。

(2) 上記の解析に使用するアスファルト混合物のヤング率は  $63\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $6.2 \times 10^6\text{ kPa}$ ) 程度である。

(3) 路床の CBR からヤング率  $E_s$  への換算は次式が合理的である。

$$E_s = 100\text{ CBR kg/cm}^2\ (9.8 \times 10^3\text{ kPa}) \dots\dots(1)$$

本論文は前論文の結論を受け，セメントコンクリート舗装への多層弾性論の適用性を垂直応力を基準として検討するものである。まず 2. においては本論文の根拠となる AASHO 道路試験の概要と成果をとりまとめ次章以下の準備とする。3. では，2. のまとめをもとにセメントコンクリート舗装の構造設計も多層弾性論で近似できることを明らかにする。4. は 3. で得た結論をセメントコンクリート舗装要綱<sup>2)</sup>の設計法と比較検討するもの

\* 正会員 工博 日本大学助教授 理工学部土木工学科

であり、5. ではさらに 3. の応用として、コンクリート層と路盤の等値換算係数を推定する。最後の 6. においては、2.~5. で得た結果を要約する。

2. AASHO 道路試験について

(1) AASHO 道路試験の概要

AASHO (American Association of State Highway Officials) の道路試験は、その計画から試験終了までに 10 年の歳月をかけた舗装史上最大の規模を有する道路試験であり、1962 年に公表されたその報告書は、以後、きわめて多くの国々の各種設計法に影響を与えてきている。わが国でも試験の概要は 1966 年まづ高橋ら<sup>3)</sup>により「AASHO 道路試験」(日本セメント技術協会)として紹介され、さらに 1973 年にはその再版において AASHO の成果とわが国の舗装設計法が比較検討されている。なお、本章以下の解析に使用する AASHO 関係のデータはすべて上述の文献に基づいたものである。

AASHO 道路試験(以下、単に AASHO と略す)で行われた試験の種類は表-1 に示す 6 種類であるが、因子の組合せが多く、試験舗装区間の総数はアスファルト舗装で 468、コンクリート舗装で 368 となっている。以上の試験のうち、中心となるものは「舗装構成因子の組合せ試験」であり、その概要を次に示す。

a) 試験道路

試験道路はループ状に 6 箇所あり、ループ 1~ループ 6 と名づけられ、同一ループにアスファルト舗装とコンクリート舗装の両方を

表-1 試験の種類

試験	内容
1	舗装構成因子の組合せ試験
2	路層舗装の試験
3	路層舗装および路層の有無に関する試験
4	上層路盤の試験
5	舗装の季節的な強度変化に関する試験
6	表面処理の試験

表-2 荷重車の軸重

ループ番号	車線	記号	軸荷重 t
2	1	L-2-1	S 0.9 (8.8×10 <sup>3</sup> N)
	2	L-2-2	S 2.7 (2.6×10 <sup>4</sup> N)
3	1	L-3-1	S 5.5 (5.4×10 <sup>4</sup> N)
	2	L-3-2	T 10.9 (1.07×10 <sup>5</sup> N)
4	1	L-4-1	S 8.2 (8.0×10 <sup>4</sup> N)
	2	L-4-2	T 14.5 (1.40×10 <sup>5</sup> N)
5	1	L-5-1	S 10.2 (1.00×10 <sup>5</sup> N)
	2	L-5-2	T 18.2 (1.78×10 <sup>5</sup> N)
6	1	L-6-1	S 13.6 (1.33×10 <sup>5</sup> N)
	2	L-6-2	T 21.8 (2.14×10 <sup>5</sup> N)

表-3 舗装を構成する各層の厚さ (cm)

表層	アスファルト舗装			コンクリート舗装	
	上路盤	下路盤	層盤	コンクリート版	路盤
2.5				6.4	
5.1	0			8.9	0
		7.5	10	16.5	7.5
7.6				12.7	
		15.0	20	24.1	15.0
10.1				20.3	
		23.0	30	28.0	23.0
12.7				31.8	
			40		
15.2					

含む。

b) 交通荷重

各ループごとに走行させる荷重車の軸重は表-2 のとおりである。なお、ループ 1 には荷重をまったく通さずにおいて、季節変動などの影響を後に考慮している。

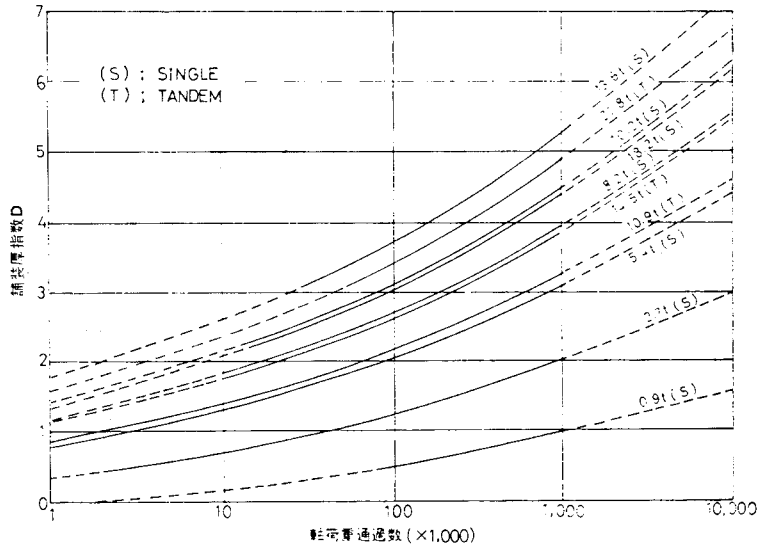


図-1 アスファルト舗装の供用成績 (PSI=2.5)

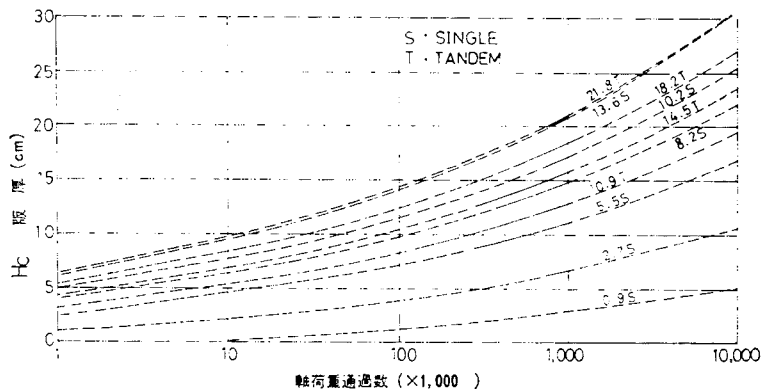


図-2 コンクリート舗装の供用成績 (PSI=2.5)

c) 舗装の構成

アスファルト舗装とコンクリート舗装のそれぞれの構成、および各層の厚さを表-3に示す。試験舗装の構成は表-3に示す厚さの組合せとなっている。

以上の試験舗装区間に対し、AASHOでは各車線ごとに軸荷重を約  $1.1 \times 10^6$  回通過させ、軸荷重通過数と破壊の進行程度との関係の評価するサービス指数という新しい尺度を導入して舗装の供用成績を判定している。AASHOではこの評価法によるサービス指数が2.5になればオーバーレイなどの補修を必要とする段階に達したと判断し、この時点までに通過した軸数と軸荷重および舗装厚の関係を図-1, 2のようにまとめている。図中の実線は実測値のある部分、点線は推定部分である。なお、図-2でコンクリート層厚  $H_c$  は、路盤厚 7.5~23 cm における値であり、この範囲の路盤厚による有意差は見出せなかったと報告されている。本研究は図-1, 2を基礎として解析を進める。

(2) AASHOの成果の考察

図-1, 2から通過軸数  $10^6$  回に対応するアスファルト舗装の舗装厚指数  $D$  とコンクリート舗装の版厚  $H_c$  (cm) を各単軸荷重ごとに読み取り表-4に示した。本研究で  $10^6$  回を基準にとったのは、軸荷重の通過数が多いこと、および実測値の多いことによる。またタンデム軸については、半分の荷重をもつ単軸が2回通過したものと考え、タンデム軸 50 万回における値を読み取って表-5に示した。なお、表には  $D$  とともに  $T_A$  (舗装を構成する各層をアスファルト混合物に換算した厚さ, cm) を示してあるがこれは次の式で計算した値である<sup>4)</sup>。

$$T_A = D/0.176 \text{ (cm)} \dots\dots\dots(2)$$

表-4 単軸:  $N=10^6$  (PSI=2.5) に対する  $T_A$  と  $H_c$

記号	軸荷重 $W(t)$ (N)	舗装厚指数 $D$	アスファルト版厚 $T_A$ (cm)	コンクリート版厚 $H_c$ (cm)	路盤厚の中央値 $\bar{H}_c$ (cm)
L-2-1	0.91 ( $8.9 \times 10^3$ )	0.98	5.57	2.90	7.5
L-2-2	2.72 ( $2.66 \times 10^4$ )	2.02	11.5	6.68	7.5
L-3-1	5.45 ( $5.34 \times 10^4$ )	3.09	17.6	10.9	15
L-4-1	8.17 ( $8.01 \times 10^4$ )	3.95	22.4	14.8	15
L-5-1	10.2 ( $1.00 \times 10^5$ )	4.49	25.5	17.2	15
L-6-1	13.6 ( $1.33 \times 10^5$ )	5.29	30.1	20.8	15

表-5 タンデム軸:  $N=5 \times 10^5$  (PSI=2.5) に対する  $T_A$  と  $H_c$

記号	軸荷重 $W$ $t$ (N)	舗装厚指数 $D$	アスファルト版厚 $T_A$ (cm)	コンクリート版厚 $H_c$ (cm)
L-3-2	10.9 ( $1.07 \times 10^5$ )	2.61	14.8	11.5
L-4-2	14.5 ( $1.42 \times 10^5$ )	3.14	17.8	14.0
L-5-2	18.2 ( $1.78 \times 10^5$ )	3.74	21.3	16.5
L-6-2	21.8 ( $2.14 \times 10^5$ )	4.06	23.1	18.5

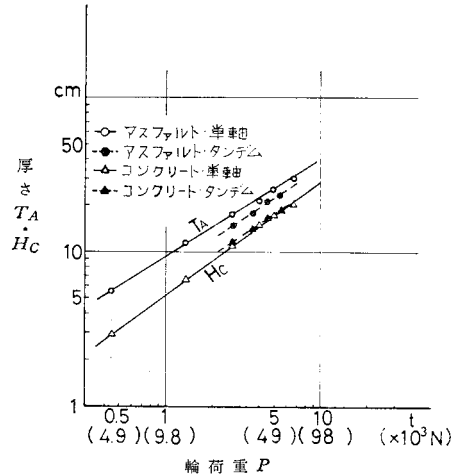


図-3  $N=10^6$  に対する  $T_A$  と  $H_c$

図-3は、表-4, 5をもとにアスファルト舗装の  $T_A$  と軸荷重  $P$  の関係およびコンクリート舗装の版厚  $H_c$  と  $P$  の関係を示したものである。コンクリート舗装では単軸とタンデム軸とでほとんど同一の直線上にあるが、アスファルト舗装では  $T_A$  にして 20% 程度の差が現われている。

単軸に関する  $T_A$  と  $P$ ,  $H_c$  と  $P$  の図-3における直線関係は次のような回帰式で表わすことができる。

$$T_A = 9.33 P^{0.620} \dots\dots\dots(3)$$

$$H_c = 5.28 P^{0.726} \dots\dots\dots(4)$$

なお、両式とも相関係数は 0.99 である。

わが国のアスファルト舗装の構造設計において基本となっている式は次のとおりである<sup>5)</sup>。

$$T_A = \frac{3.84 N^{0.16}}{CBR^{0.3}} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、

$N$ : 供用予定期間における通過全軸荷重を 5t ( $4.9 \times 10^4$  N) 軸荷重に換算した数 (輪/1方向)

CBR: 設計 CBR

これは、AASHOの結果から式(3)を誘導したと同様の手法で軸荷重の影響を取り入れ、さらにわが国の実績から CBR の影響を考慮して作成されたものである。

3. 多層弾性論のコンクリート舗装への適用

著者は前論文<sup>1)</sup>において、わが国のアスファルト舗装の構造設計法が各層弾性論からみれば路床上面に作用する垂直応力を基準としていると推定できることを明らかにしたが、本章はこの考え方をさらにコンクリート舗装にも適用してその妥当性を検討するものである。解析にあたっての基本方針は、表-4における等価のアスファ

ルト舗装とコンクリート舗装（同一軸荷重を同一回数通すことのできる舗装）の路床上面に作用する垂直応力が等しくなるようなコンクリート層のヤング率を見出すことにある。もし、この方法によってヤング率の一定値が得られれば、これは逆にそのヤング率を計算に使用することにより、コンクリート舗装も多層弾性論で合理的に解釈できることを意味する。

(1) 計算上の仮定

図-4 (a), (b) に示すような2種の舗装の路床上面に作用する垂直応力を計算するにあたって仮定した条件は次のとおりである。

① 舗装構造

表-4 に示す厚さを有する6組のアスファルト舗装とコンクリート舗装。ただし路盤厚  $H_g$  は3種類の厚さの中央値（表-4）をとる。

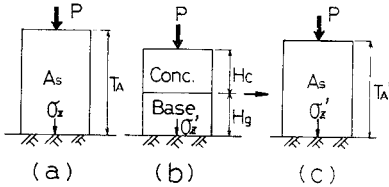


図-4 計算結果の整理方法

② 輪荷重と接地圧

AASHO のデータ<sup>3)</sup> を使用した。輪荷重は軸荷重の1/2 とし、載荷面は輪荷重と接地圧をもとに単一円に置き換えた。計算に使用した数値は表-6 のとおりである。

表-6 輪荷重と接地圧

記号	輪荷重 $P$ t (N)	接地圧 $kg/cm^2$ (kPa)
L-2-1	0.46 ( $4.5 \times 10^4$ )	2.05 ( $2.01 \times 10^2$ )
L-2-2	1.36 ( $1.33 \times 10^5$ )	2.97 ( $2.91 \times 10^2$ )
L-3-1	2.73 ( $2.68 \times 10^5$ )	4.62 ( $4.53 \times 10^2$ )
L-4-1	4.09 ( $4.01 \times 10^5$ )	4.75 ( $4.66 \times 10^2$ )
L-5-1	5.09 ( $4.99 \times 10^5$ )	4.67 ( $4.58 \times 10^2$ )
L-6-1	6.81 ( $6.67 \times 10^5$ )	4.90 ( $4.80 \times 10^2$ )

③ ヤング率

アスファルト層、路床のヤング率は前論文の結果をもとにそれぞれ  $E_a = 63\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $6.2 \times 10^6\text{ kPa}$ ),  $E_s = 100\text{ CBR kg/cm}^2$  ( $9.8 \times 10^3\text{ kPa}$ ) を使用した。なお、AASHO の路床土の平均的 CBR は 2.9 であるから  $E_s$  は  $290\text{ kg/cm}^2$  ( $2.8 \times 10^4\text{ kPa}$ ) となる。下層路盤のヤング率は一般に  $1\,000 \sim 3\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $9.8 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^5\text{ kPa}$ ) の値が使用されるが、ここでは  $2\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $2.0 \times 10^5\text{ kPa}$ ) を使用した。

コンクリート層のヤング率は、100 000, 150 000, 200 000, 250 000, 300 000, 350 000  $kg/cm^2$  (それぞれ  $9.8 \times 10^6, 1.5 \times 10^7, 2.0 \times 10^7, 2.5 \times 10^7, 2.9 \times 10^7, 3.4 \times 10^7\text{ kPa}$ ) の6種に変化させた。

④ ポアソン比

コンクリート層のポアソン比は 0.20, アスファルト層、路盤、路床のポアソン比は 0.35 とした。

⑤ 各層間の摩擦

層と層との間にすべりはないものとした。

垂直応力の計算は ELSYM 5 (カリフォルニア大学) のプログラムにより、日本大学理工学部の HITAC 8700 を使用して行った。

(2) 計算結果の整理方法

図-4 (a), (b) において、両舗装が等価ならばそれぞれの垂直応力  $\sigma_z$  と  $\sigma'_z$  は等しいはずであることを本研究は基本としている。しかし、前節の計算においては、コンクリート層のヤング率が変化しているため  $\sigma_z$  と  $\sigma'_z$  は一般に等しくならず、(b) の舗装と同一の垂直応力を有するアスファルト舗装 (c) の層厚は  $T_{A'}$  となる。この  $T_{A'}$  は、図-5 のようにあらかじめ作成しておいたアスファルト層厚と垂直応力の関係から (b) の  $\sigma'_z$  をもとにして求めることができる。

以上のようにして求めた  $T_{A'}$  と  $T_A$  の関係を、コンクリート層のヤング率ごとに図-6 に示した。図-6 で明らかのように、 $T_A$  と  $T_{A'}$  の関係はヤング率によって少しずつ傾きの異なる直線群となり、 $T_A = T_{A'}$  となる 1:1 の対応線 (傾き 45° の直線) に最も近い直線は、ヤング率が  $150\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $1.5 \times 10^7\text{ kPa}$ ) の場合である。すなわちヤング率をこの程度に選べば、図-4 (a), (b) の垂直応力はほぼ一致することになる。

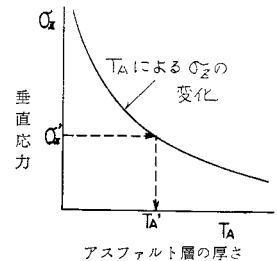


図-5  $T_{A'}$  の求め方

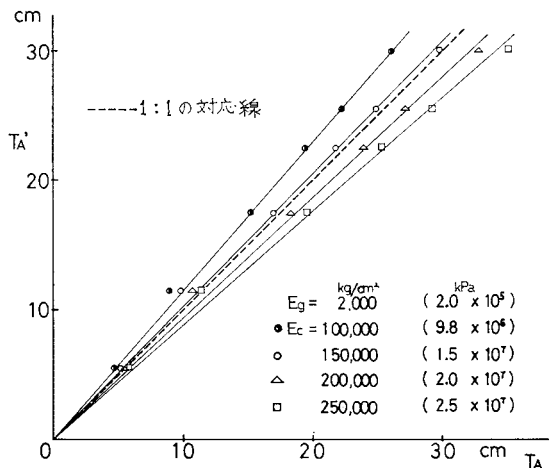


図-6  $T_A$  と  $T_{A'}$  の関係

(3) コンクリート層と路盤のヤング率の推定

前節までの結果をもとに、本節ではさらにコンクリート層のヤング率  $E_C$  と路盤のヤング率  $E_g$  を次のように変え垂直応力  $\sigma_z'$  の計算を (1) と同様に行った。

- $E_C$  : 140 000, 150 000, 160 000, 170 000  $\text{kg/cm}^2$   
 ( $1.4 \times 10^7$ ,  $1.5 \times 10^7$ ,  $1.6 \times 10^7$ ,  $1.7 \times 10^7$  kPa)  
 $E_g$  : 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000  $\text{kg/cm}^2$   
 ( $9.8 \times 10^4$ ,  $2.0 \times 10^5$ ,  $2.9 \times 10^5$ ,  $3.9 \times 10^5$ ,  $4.9 \times 10^5$  kPa)

以上の組合せに対する計算結果は、アスファルト舗装の垂直応力  $\sigma_z$  (図-4 (a)) とコンクリート舗装の垂直応力  $\sigma_z'$  (図-4(b)) の比  $\sigma_z'/\sigma_z$  の形に直して、図-7

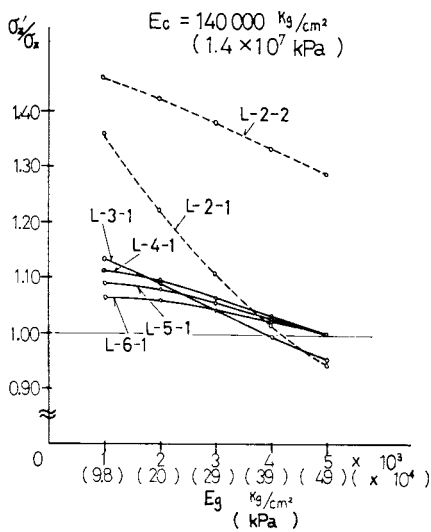


図-7  $E_g$  と  $E_C$  の求め方

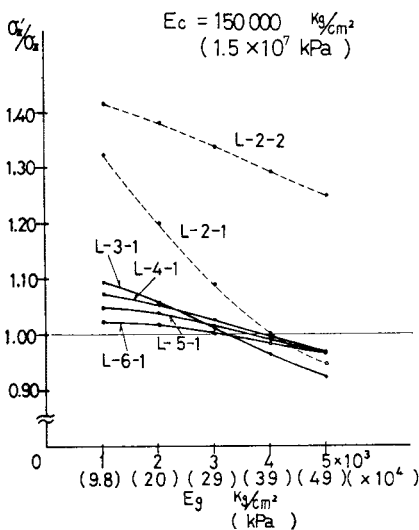


図-8  $E_g$  と  $E_C$  の求め方

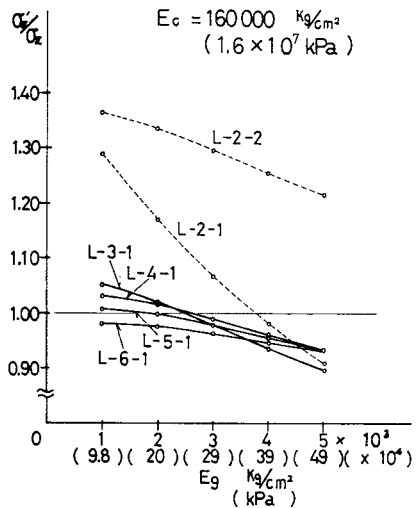


図-9  $E_g$  と  $E_C$  の求め方

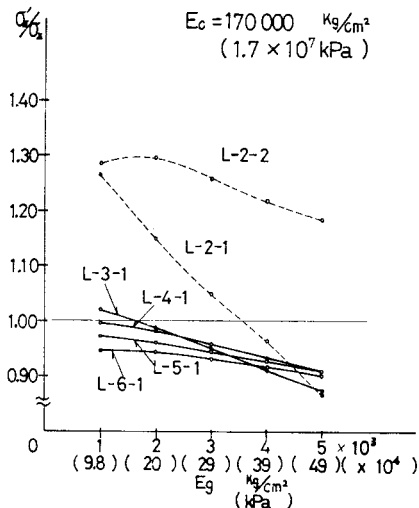


図-10  $E_g$  と  $E_C$  の求め方

表-7  $E_g$  と  $E_C$  の組合せ

コンクリートのヤング率 $E_C$ $\text{kg/cm}^2$ (kPa)	140 000 ( $1.4 \times 10^7$ )	150 000 ( $1.5 \times 10^7$ )	160 000 ( $1.6 \times 10^7$ )	170 000 ( $1.7 \times 10^7$ )
路盤のヤング率 $E_g$ $\text{kg/cm}^2$ (kPa)	5 000 ( $4.9 \times 10^5$ )	3 500 ( $3.4 \times 10^5$ )	2 000 ( $2.0 \times 10^5$ )	1 000 ( $9.8 \times 10^4$ )

~10 に示す。

いずれの図においても、軸荷重が小さく、舗装厚も薄い (表-4) ループ2のデータ L-2-1, L-2-2 は他と掛け離れた値をとっているが、これらはコンクリート層厚が 10 cm 未満、路盤厚も 0, 7.5, 15 cm と非常に薄いため、路盤厚の平均値のとり方やヤング率によって大きく影響を受けるためと思われる。他の4ループのデータはきわめて近接した挙動をとっており、これらが 1.0 を切る点の平均的なヤング率を求めれば 表-7 のように  $E_C$  と  $E_g$  の4種類の組合せが得られる。表-7 の組合

せはいずれも AASHO のコンクリート舗装に関する成果を多層弾性論で近似できる  $E_C$  と  $E_g$  の組合せであるが、 $E_g$  は通常  $1\,000\sim 3\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $9.8\times 10^4\sim 2.9\times 10^5\text{ kPa}$ ) の範囲にあることから、この範囲に含まれる値  $2\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $2.0\times 10^5\text{ kPa}$ ) をとり、次の組合せを代表値として採用することにする。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{コンクリート層のヤング率 } E_C : 160\,000\text{ kg/cm}^2 \\ \hspace{10em} (1.6\times 10^7\text{ kPa}) \\ \text{路盤のヤング率 } E_g : 2\,000\text{ kg/cm}^2 (2.0\times 10^5\text{ kPa}) \end{array} \right.$$

なお、 $E_C$  をそのままにして  $E_g$  を  $1\,000\sim 4\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $9.8\times 10^4\sim 3.9\times 10^5\text{ kPa}$ ) に変えても、また  $E_g$  を固定して  $E_C$  を  $150\,000\sim 170\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $1.5\times 10^7\sim 1.7\times 10^7\text{ kPa}$ ) に変えても、 $\sigma_z'/\sigma_z$  の変化は  $\pm 5\%$  以内である。これは  $T_A$  の値でみると  $\pm 2.5\%$  以内となる。

以上の解析によりコンクリート層と路盤のヤング率が定まった。これらの値を使用すればコンクリート舗装もアスファルト舗装と同様に多層弾性論で取り扱えることは本章の経緯から明らかであり、セメントコンクリートとアスファルト混合物の差はおもにヤング率やポアソン比の差として反映されることになる。

(4) ポアソン比の影響

前節までの計算においてはコンクリート層のポアソン比  $\mu_c$  を 0.20、アスファルト層、路盤、路床それぞれのポアソン比  $\mu_a, \mu_g, \mu_s$  を 0.35 に固定してきた。これらの値の一部を変更した場合、前節で対象とした 6 組の舗装の路床上面に作用する垂直応力がどの程度変化するかを検討した結果が表-8, 9 である。表-8 の最上段はアスファルト層のポアソン比のみを 0.35 から 0.25 に変更した場合、垂直応力は平均で 4.4% 大きくなったことを意味する。

表-8 ポアソン比による応力の変動 (アスファルト舗装)

各層の構成	ポアソン比	最大値 (%)	最小値 (%)	全体の平均 (%)
アスファルト層	0.25	4.6	3.9	4.4
	0.45	-5.5	-6.3	-6.1
路床	0.25	1.9	1.0	1.6
	0.45	1.2	0.4	0.7

表-9 ポアソン比による応力の変動 (コンクリート舗装)

各層の構成	ポアソン比	最大値 (%)	最小値 (%)	全体の平均 (%)
コンクリート層	0.15	1.1	0.6	0.9
	0.25	-0.8	-1.4	-1.2
路盤	0.25	1.5	0.2	1.1
	0.45	-0.1	-1.7	-1.3
路床	0.25	2.1	1.5	1.9
	0.45	0.0	-0.3	-0.2

たことを意味する。全体的にポアソン比の影響は、 $\pm 6\%$  以内であり、 $T_A$  で  $\pm 3\%$  以内となる。

なお、前論文においては  $\mu_a, \mu_g, \mu_s$  をすべて 0.5 にとっていた。本論文ではこれを 0.35 に変更したが、このようにポアソン比を 0.5 から 0.35 に変えて

も、また粒状路盤のヤング率を  $2\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $2.0\times 10^5\text{ kPa}$ ) と一定にとっても前論文の結論にはほとんど影響がないことを確認してあるのでここに付記しておく。

4. セメントコンクリート舗装要綱における設計法の検討

本章ではわが国のコンクリート舗装の設計法と前章までの解析結果との比較を行う。

(1) わが国のコンクリート舗装の設計法

セメントコンクリート舗装要綱 (以下コンクリート舗装要綱と略す) によれば、コンクリート版厚は交通量区分 ABC のとき 25 cm、D のとき 30 cm と定められており、路盤の厚さは路床の CBR によって表-10 のように与えられている。コンクリート版厚がこのように 25 cm または 30 cm の 2 種類に限定してあるのは、設計・施工の標準化を図ったものであるが、その理論的根拠は同要綱の付録に記載された設計公式にある。この設計方法はコンクリート版の縦縁部 (自由縁部または突合せ目地縁部) の輪荷重応力および温度応力の両方を考慮して設計する方法で次の 2 式が与えられている。

表-10 コンクリート舗装の路盤厚

路床の設計 CBR	2	2.5	3	4	5	10以上
粒状材料のみによる場合の路盤厚 (cm)	60	50	40	35	25	20

$$\sigma_e = (1 + 0.54 \mu) \cdot C \cdot \frac{P}{h^2} (\log l - 0.75 \log a - 0.18) \dots\dots\dots (6)$$

$\sigma_e$  : コンクリート版縦縁部の最大応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

C : 係数、縦自由縁部に対して 2.12、適当量のタイバーを用いた縦目地縁部に対して 1.59

P : 輪荷重 (kg)

a : タイヤの接地半径 (cm)

h : コンクリート版の厚さ (cm)

$\mu$  : コンクリートのポアソン比

l : コンクリート舗装の剛比半径  $= \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)K_{75}}}$  (cm)

E : コンクリートのヤング率 (kg/cm<sup>2</sup>)

$K_{75}$  : 路盤の支持力係数 (kg/cm<sup>2</sup>)

$$\sigma_t = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot E \cdot \theta' \dots\dots\dots (7)$$

$\sigma_t$  : コンクリート版縦縁部の温度応力度 (kg/cm<sup>2</sup>)

$C_w$  : そり拘束係数

$\alpha$  : コンクリートの膨張率 (°C<sup>-1</sup>)

$\theta'$  : コンクリート版の温度差 (表面温度 - 底面温

表—11 疲労抵抗の計算に使用した諸数値

直径 75 cm 載荷板による路盤の支持力係数	$K_{75}=3, 7, 10 \text{ kg/cm}^2$ (29, 69, 98) $\text{N/cm}^2$
コンクリート版の曲げ強度	$\sigma_{bb}=45 \text{ kg/cm}^2$ ( $4.4 \times 10^6$ ) $\text{kPa}$
コンクリートのヤング率	$E=350\,000 \text{ kg/cm}^2$ ( $3.4 \times 10^7$ ) $\text{kPa}$
コンクリートのポアソン比	$\mu=0.25$
コンクリートの膨張率係数(縦自由縁部に対し)	$\alpha=10 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$
収縮目地間隔	8.0 (m)
拘束係数 $C_w$	温度差が正の場合
	温度差が負の場合
	0.95
	0.78

度  $^\circ\text{C}$ )

この設計公式を用いてコンクリート版厚を求める方法は例題や必要な数表とともに付録で詳しく説明されている。本節では、その例題を参考としながら温度差の大小と交通量の影響を検討し、25 cm, 30 cm の版厚規定との比較を行う。

版厚を求める方法は、まず版厚をいくつか仮定して疲労抵抗を計算し、疲労抵抗が 1.0 になるときの版厚を設計版厚とするものであるが、この疲労抵抗の計算に使用した諸数値を表—11 に示す。

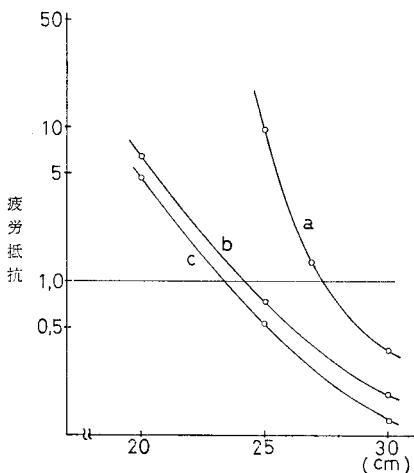
表—12 与えられた交通荷重

荷重量 $t$ ( $\times 10^4 \text{ N}$ )	1 日交通量	20年間の全度数 ( $N_t$ )
0 ~ 1.0 (0 ~ 9.8)	14 007	$102\,251 \times 10^3$
1.1 ~ 2.0 (10.8 ~ 19.6)	1 670	$12\,191 \times 10^3$
2.1 ~ 3.0 (20.6 ~ 29.4)	922	$6\,731 \times 10^3$
3.1 ~ 4.0 (30.4 ~ 39.2)	348	$2\,540 \times 10^3$
4.1 ~ 5.0 (40.2 ~ 49.0)	191	$1\,394 \times 10^3$
5.1 ~ 6.0 (50.0 ~ 58.8)	139	$1\,015 \times 10^3$
6.1 ~ 7.0 (59.8 ~ 68.6)	70	$511 \times 10^3$
7.1 ~ 8.0 (69.6 ~ 78.4)	35	$256 \times 10^3$
8.1 ~ 9.0 (79.4 ~ 88.2)	17	$124 \times 10^3$
9.1 ~ 10.0 (89.2 ~ 98.0)	3	$22 \times 10^3$

要となる。

表—12 の交通量をアスファルト舗装要綱で使用している手法で 5t ( $4.9 \times 10^4 \text{ N}$ ) 換算輪数  $N$  に直すと  $7.6 \times 10^6$  が得られる。この場合は荷重群の中央値すなわち 1.1~2.0t ( $1.1 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4 \text{ N}$ ) では 1.5t ( $1.5 \times 10^4 \text{ N}$ ) を代表値としているが例題のように上限値をとると  $1.1 \times 10^7$  となる。10 年間の交通量を単純に 20 年間の半分とすれば、 $N$  として  $3.8 \times 10^6 \sim 5.5 \times 10^6$  が得られ、これは B 交通と C 交通の中間程度の交通量と推定できる。この場合、コンクリート舗装要綱の規定は 25 cm で設計公式による計算値からみれば 2 cm 程度薄めになっている。

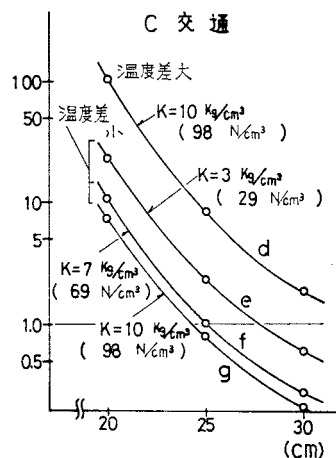
図—11 の曲線 b は輪荷重 5t ( $4.9 \times 10^4 \text{ N}$ ) のものが



コンクリート版の厚さ

図—11 疲労抵抗の計算結果 (1)

$1.1 \times 10^7$  輪通過するものとして疲労抵抗を計算した結果である。この場合は設計版厚として 24.2 cm が得られるが、これは表—12 の混合交通による計算値とは 3 cm 程度の差がある。曲線 c は  $N=7.6 \times 10^6$  として計算したものであるが曲線 b とは 1 cm 程度の差となっている。



図—12 疲労抵抗の計算結果 (2)

図—12 は C 交通 ( $N=1.4 \times 10^7$ ) で温度差が大きい場合 (曲線 d) と小さい場合 (曲線 e, f, g), および路盤支持力係数  $K_{75}$  値が異なる場合を比較したものである。温度差が大きい場合は版厚が 30 cm でもまだ不足している。一方、温度差が小さい場合、 $K_{75}$  値がかなり小さいもの (e) を除いた常識的な値 (f, g) では版厚の規定 25 cm にほとんど一致している。これは、D 交通の場合 (図は省略) も同様でこの 2 種の  $K_{75}$  値に対しては設計版厚 30 cm が得られる。

以上の計算例のみを限り、設計公式は温度差の大小による版厚の差がきわめて大きく、温度差を重視していることがわかる。また、表—12 の混合交通で計算した値とこれを 5t ( $4.9 \times 10^4 \text{ N}$ ) 換算で計算した値との間に 3 ~ 4 cm 程度の差があるのは、交通量の輪荷重分布にもまた大きな影響を受けることが明らかであり、それによ

って 図-11 の例のように版厚規定を超えたり (a), 規定内に入った (b, c) することもあるといえよう。

(2) 多層弾性論からの検討

本節では、前章で得られた結論すなわちコンクリート層と路盤のヤング率がそれぞれ  $160\,000\text{kg/cm}^2$  ( $1.6 \times 10^7\text{kPa}$ ),  $2\,000\text{kg/cm}^2$  ( $2.0 \times 10^5\text{kPa}$ ) であることを利用するとともに、アスファルト舗装の構造設計に採用されている基本式 (5) を使用してコンクリート舗装の構造を設計する。前章における結論は CBR =

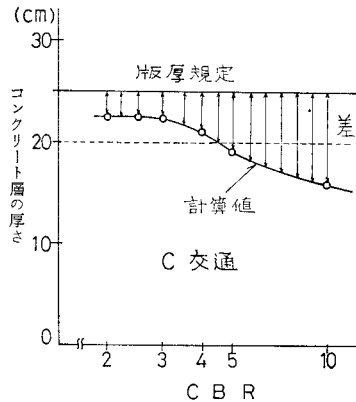


図-13 コンクリート層厚の計算結果 (C交通)

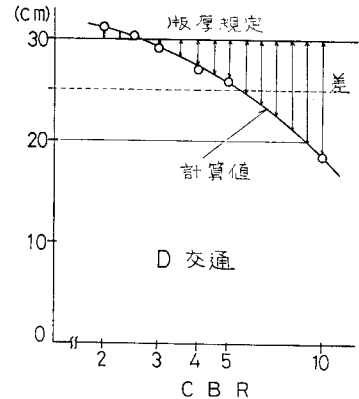


図-14 コンクリート層厚の計算結果 (D交通)

2.9 の場合に限られているが本節ではこれをさらに一般

的な CBR へ拡張している。

この計算の手順と方法の概略は次のとおりである。

㊸  $N=1.4 \times 10^7, 7.0 \times 10^7$  (それぞれ C, D 交通の 20 年間の交通量) を式 (5) に代入し, CBR ごとに  $T_A$  を求める。この結果を 表-13 に示す。

㊹ 表-13 の厚さをもつ

アスファルト舗装の路床上面に作用する垂直応力を多層弾性論により計算する。この場合、輪荷重は  $5\text{t}$  ( $4.9 \times 10^4\text{N}$ ) に統一し、ヤング率は前章の結果を使用、さらに他の条件は 3.(2) に準じて計算する。

㊺ コンクリート舗装の路盤の厚さは CBR に応じた 表-10 の値とし、コンクリート層厚を変化させて垂直応力を計算する。

㊻ 交通量区分および路床の CBR が対応するアスファルト舗装とコンクリート舗装の垂直応力を比較し、両者が一致する点からコンクリート舗装の層厚を求める。これは 3.(3) とはちょうど逆の整理方法となっている。

㊼ 以上の手順により、設計期間 20 年のアスファルト舗装に等価となるコンクリート舗装の層厚が、交通量区分、路床 CBR ごとに推定できたことになる。

計算結果を 図-13, 14 に示す。CBR が 2~5 の範囲で計算値は 19~23 cm (C交通), 26~31 cm (D交通) となっている。設計・施工を標準化するため層厚を 5 cm 単位に選ぶこととし、かつ上記のような理論値が得られたとすれば、C 交通は 25 cm, D 交通は 30 cm という値がほぼ妥当な線と判断できよう。言い換えれば多層弾性論による計算値はコンクリート舗装要綱の版厚規定を合理的に説明できるということである。さらに付け加え

れば、本節での解析はアスファルト舗装の構造設計式 (5) を基準としており、これによってコンクリート舗装の構造を設計できたということは、両者が決して異質なものであることを示しているといつてよからう。

また、前章で得られたヤング率は AASHTO のおかれた条件、すなわち路床の平均的な CBR は 2.9 であること、荷重はループによって異なること、層厚は軸荷重通過数  $10^6$  であることなど種々の制約条件がある。本節ではこれを CBR 2~10、荷重は  $5\text{t}$  ( $4.9 \times 10^4\text{N}$ ) に統一、交通量は  $N$  でとっているなど前章の結果を種々の点で拡張のうえ、使用している。それにもかかわらず、上記のような結論が得られたということは、AASHTO の制約条件をはずし一般化できる可能性が高いことを意味するものであろう。しかし、図-13, 14 をそのまま設計に使用することが無理であることはいうまでもなく、図-13, 14 を得るまでの仮定条件の検討、設計公式とのさらに具体的な比較などまだまだ多くの課題が残されている。

5. コンクリート層と路盤の等値換算係数

AASHTO のコンクリート舗装に関する成果が多層弾性論で近似できたということは、単なるモデル化にとどまらず種々の発展性を付与するものである。本章では、その応用の一例としてコンクリート版の等値換算係数を推定し、あわせて粒状路盤の等値換算係数について従来とは異なつたとらえ方を試みる。

(1) AASHTO の成果からの推定

わが国のアスファルト舗装の構造設計においては、舗装を構成する各層の厚さをアスファルト混合物の厚さに換算し、その換算厚の合計すなわち  $T_A$  が式 (5) によ

表-13 必要なアスファルト層の厚さ  $T_A$

CBR	アスファルト層の厚さ $T_A$ (cm)	
	C交通	D交通
2	43.4	56.1
2.5	40.6	52.5
3	38.4	49.7
4	35.2	45.6
5	33.0	42.6
10	26.8	34.6



表-14 路盤厚による  $\alpha_c$  の変化

記号	$\alpha_g=0.16$			$\alpha_g=0.25$		
	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値
L-2-1	1.92	1.50	1.09	1.92	1.28	0.63
L-2-2	1.72	1.54	1.36	1.72	1.44	1.16
L-3-1	1.50	1.39	1.27	1.44	1.26	1.08
L-4-1	1.44	1.35	1.27	1.40	1.26	1.13
L-5-1	1.41	1.34	1.27	1.38	1.26	1.15
L-5-2	1.39	1.33	1.27	1.36	1.26	1.17

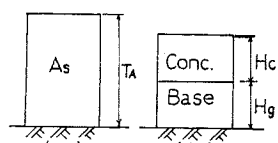


図-15 等値換算係数の計算

て求められる値を下回らないように設計を行う。この場合、各層 1 cm がアスファルト混合物の何 cm に相当するかを示す値が等値換算係数であり、AASHO やわが国の経験をもとに各種材料・工法の等値換算係数がアスファルト舗装要綱<sup>3)</sup>に定められている。本節は、このアスファルト舗装における考え方をコンクリート舗装に適用した場合、コンクリート層の等値換算係数がいくらになるかを表-4 のデータから検討するものである。

図-15 (a), (b) は AASHO のアスファルト舗装、コンクリート舗装をモデル化したものである。  $T_A$  および  $H_c, H_g$  として表-4 における同一荷重の対応する値をとれば、図-15 (a), (b) は舗装として同等の価値を有すると考えられる。したがって次式が成立するといえよう。

$$\alpha_A \cdot T_A = \alpha_c \cdot H_c + \alpha_g \cdot H_g \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$H_c$  : コンクリート層の厚さ (cm)

$H_g$  : コンクリート舗装の路盤の厚さ (cm)

$\alpha_A, \alpha_c, \alpha_g$  : それぞれアスファルト層、コンクリート層、路盤の等値換算係数、 $\alpha_A=1$

AASHO でコンクリート舗装の路盤に使用された材料と同等の砂まじり砂利の等値換算係数は、アスファルト舗装における解析から上層路盤で約 0.16, 下層路盤で約 0.25 と推定されている<sup>3)</sup>。したがって、コンクリート舗装の路盤を上層路盤と見なすか下層路盤と見なすかにより  $\alpha_g$  として採用する値が異なる。また、AASHO では路盤の厚さ  $H_g$  を 7.5 cm, 15 cm, 23 cm (ループ 2 では 0 cm, 7.5 cm, 15 cm) の 3 種に変えて試験しているが、供用性に対する路盤厚の有意差は見出せなかったとしている。以上の点を考慮し、 $\alpha_g$  は 0.16, 0.25 の 2 種、路盤厚は最小値、平均値、最大値の 3 種の組合せに対し、表-4 と式 (8) をもとにコンクリート層の等値換算係数  $\alpha_c$  の計算を行った。表-14 をみると全体的に  $\alpha_c$  は 0.63~1.92 の範囲にあり、路盤厚の代表値によ

り変化の大きいループ 2 のデータを除いても 1.10 ~1.50 の範囲となる。供用性に対する路盤厚の有意差が見出せなかったということは、【AASHO ほどの大規模な試験でも 7.5~23 cm の路盤厚の差は誤差範囲ということであり、舗装の現場試験の難しさを意味するものであろう。なお、路盤厚の平均値でみると、 $\alpha_g=0.16$  のとき  $\alpha_c=1.35$ ,  $\alpha_g=0.25$  のとき  $\alpha_c=1.26$  とほぼ一定した値が得られる。

(2) 多層弾性論からの推定

本節ではコンクリート舗装の層厚、路盤厚、路床 CBR を種々に変えて垂直応力を計算し、コンクリート層と路盤の等値換算係数を推定する。計算の対象としたコンクリート舗装の構造は表-15 のすべての組合せ 210 種である。また荷重、ヤング率などの諸条件は 4.(2) と同様である。

表-15 舗装構成因子の組合せ

コンクリート層厚	$H_c$ (cm)	10, 15, 20, 25, 30,
路盤厚	$H_g$ (cm)	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60
路床	CBR	2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0

a) コンクリート層の等値換算係数

図-16(a) に示すように、路床上に直接コンクリート層を設置した舗装構造 ( $H_g=0$ ) において路床上面に作用する垂直

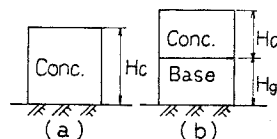


図-16 コンクリート舗装の構造

応力を計算し、これと等しい垂直応力を有するアスファルト舗装の厚さ  $T_A'$  を求めれば、コンクリート層の等値換算係数  $\alpha_c$  は次の式によって定まる。

$$\alpha_c = T_A' / H_c \dots\dots\dots (9)$$

図-17 は以上の方法で求めた  $\alpha_c$  をプロットしたものである。CBR が 2~10,  $H_g$  が 10~30 cm の範囲でコンクリート層厚による若干の変化はあるが、平均値を丸めた値として 1.35 が得られる。これは前節の AASHO の結果のうち、 $\alpha_g=0.16$  の場合の  $\alpha_c$  の値と一致するものである。

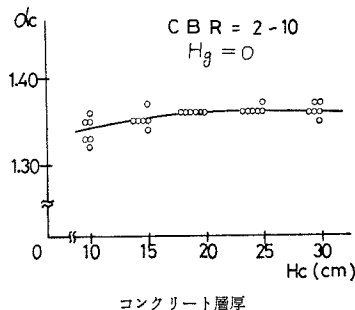


図-17 コンクリート層厚による  $\alpha_c$  の変化

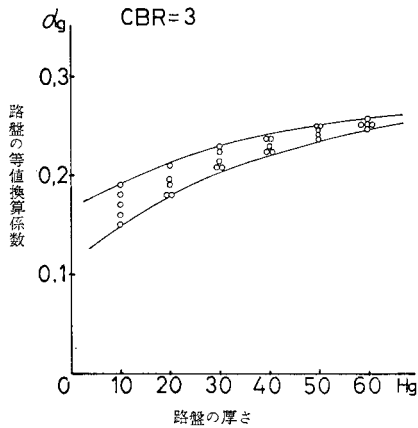


図-18  $\alpha_g$  の路盤厚による変化

b) 路盤の等値換算係数

図-16(b)の舗装構造について同様の手法により  $T_A'$  を求めれば、路盤の等値換算係数  $\alpha_g$  は次の式によって定まる。

$$\alpha_g = (T_A' - \alpha_c \cdot H_c) / H_g \dots\dots\dots(10)$$

$\alpha_c$  として 図-16(a) の構造で求めた値を使用すれば  $H_c, H_g, CBR$  の変化に対応した  $\alpha_g$  が計算できる。

図-18 は AASHO の路床に近い CBR=3 の場合について  $\alpha_g$  の計算値をプロットしたものである。  $H_c$  による変動は小さいが、  $H_g$  が大きくなるにつれて  $\alpha_g$  は 0.17 から 0.25 へと変化している。この両端の値は AASHO で得られた  $\alpha_g$  の値 0.16, 0.25 にほぼ一致している。図-18 および前項の結果から判断すれば、路盤の等値換算係数は、路盤の厚さによって変わるものと考えた方が合理的と思われる。

c) 路盤の等値換算係数の路盤厚による変化

AASHO では試験 1 において上層路盤、下層路盤の厚さを種々に変え、これらの組合せによる数多くの試験舗装区間を設けている。以下の解析においては、上層路盤、下層路盤に使用された粒状材の厚さがそれぞれ試験 1 の組合せの平均値であったと仮定して検討を進めることにする。

試験に供用された路盤の厚さを  $H_1, H_2, \dots, H_n$ , 対応する個数をそれぞれ  $N_1, N_2, \dots, N_n$  とし、路盤厚の平均値  $H$  を次の式によって求めた。

$$H = (N_1 H_1 + N_2 H_2 + \dots + N_n H_n) / (N_1 + N_2 + \dots + N_n) \dots\dots\dots(11)$$

計算結果は上層路盤厚 13.4 cm, 下層路盤厚 21.9 cm であった。

いま、路盤の等値換算係数がコンクリート版下面からの深さ  $h$  によって対数的に変化し、次の式で表わされるものと仮定する。

$$\alpha_g' = a \cdot \log h + b \dots\dots\dots(12)$$

そして、さらに  $h$  が上層路盤、下層路盤それぞれの

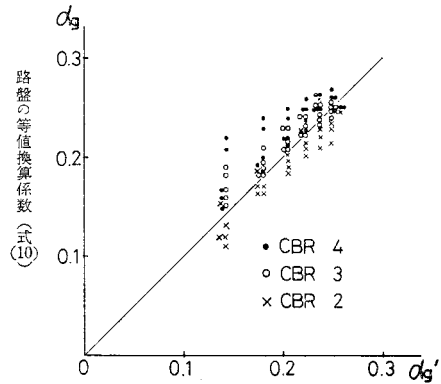


図-19  $\alpha_g$  と  $\alpha_g'$  の関係

平均深さ 13.4/2 cm, (13.4 + 21.9/2) cm のとき、  $\alpha_g$  が AASHO の結果 0.16, 0.25 になったとすれば、  $a, b$  が確定し次の式が得られる。

$$\alpha_g' = 0.16 \log h + 0.03 \dots\dots\dots(13)$$

これは、コンクリート版からの深さ  $h$  の点における等値換算係数の値を推定する式である。この式を利用して路盤の厚さが  $H_g$  であるときの平均的な等値換算係数を求めると 表-16 の値が得られる。

表-16 路盤厚による  $\alpha_g'$  の変化

路盤厚 $H_g$ (cm)	等値換算係数 $\alpha_g'$
10	0.142
20	0.180
30	0.205
40	0.223
50	0.237
60	0.249

図-19 は、表-16 の値を横軸にとり、式 (10) で得た値を縦軸にとって路盤厚の対応する点をプロットしたものである。図面がやや見にくくなるが、AASHO の路床条件に近い CBR=2, 3, 4 の場合を同時に示した。全体的には 45° の線上に分布しているが、  $\alpha_g$  は路床の CBR にも影響を受けるようである。したがって式 (13) はさらに今後の検討を必要とする。

以上のような解析が可能となったのはコンクリート舗装の構造設計が多層弾性論で近似できたためであり、今後、アスファルト混合物とセメントコンクリートを併用したタイプの舗装構造も同様に解析できる可能性がある。また、アスファルト舗装とコンクリート舗装が多層弾性論という共通の場をもったことから、それぞれ独自に行われてきた研究の成果を相互に利用しあえることとなる。

6. ま と め

本論文は、AASHO 道路試験の成果から通過軸数  $10^6$  に対応するアスファルト層厚  $T_A$  とコンクリート版厚  $H_c$  を求め、これをもとにコンクリート舗装にも多層弾性論が適用可能であることを示し、さらにその延長とし

てアスファルト舗装で確立されている構造設計式や等値換算係数の考え方をコンクリート舗装に応用しその妥当性を検討したものである。以上の解析は、舗装が路床上面に作用する垂直応力を基準に設計されているという前論文<sup>1)</sup>の結論を基本としている。

本論文で明らかになった事項は次のとおりである。

(1) コンクリート舗装においてもアスファルト舗装と同様に多層弾性論の適用が可能である。この場合、コンクリート層と路盤のヤング率はそれぞれ  $160\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $1.6 \times 10^7\text{ kPa}$ ),  $2\,000\text{ kg/cm}^2$  ( $2.0 \times 10^5\text{ kPa}$ ) を標準とする。

(2) アスファルト舗装の構造設計式から多層弾性論によってコンクリート舗装のコンクリート層厚を推定した結果、コンクリート舗装要綱における版厚規定から判断してほぼ妥当な値が得られた。

(3) コンクリート版の等値換算係数はほぼ 1.35 と

推定できる。

(4) 粒状路盤の等値換算係数はコンクリート層やアスファルト層からの距離によって変化すると考えた方が合理的である。なお、これは路床の CBR によっても影響を受けるため、さらに詳しい検討を要する。

なお、本研究を現実の設計に利用するためには、温度応力、目地、適用限界など各種の問題についてさらに詳しい検討が必要と思われる。今後の研究課題としたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 阿部頼政：アスファルト舗装構造の合理的設計法に関する研究，土木学会論文報告集，pp. 109~122, 247, 1976.
- 2) セメントコンクリート舗装要綱，日本道路協会，1978.
- 3) AASHO 道路試験，日本セメント技術協会，1966, 1973.
- 4) 阿部頼政：アスファルト舗装の構造設計における考え方，アスファルト，pp. 5~13, 20, 113, 1977.
- 5) アスファルト舗装要綱，日本道路協会，1978.

(1981.2.17・受付)