

神戸大学工学部

学生員 ○新村貴史

神戸大学大学院

学生員 中村大史

神戸大学都市安全研究センター

正会員 吉田信之

## 1. 序論

近年、アスファルト舗装の構造設計を従来の半経験的な設計法から力学的解析に基づく設計法へと移行しようとの動きがある。舗装の構造解析をする上で、各舗装構成材料の変形特性の評価が重要な要因となることは言うまでもない。本研究では、現在路盤材について提案されている種々の変形特性式の違いが如何にアスファルト舗装の変形及び疲労寿命に影響を及ぼすかについて有限要素解析による例題解析を通して考察を加えた。

## 2. 路盤材の変形特性

路盤材の変形特性は、一般に、幾つかの応力条件下で実施した繰返し三軸圧縮試験を行って評価される。例えば、復元軸ひずみと軸差応力から求まる復元変形係数 $M_r$ 、復元軸ひずみと復元側方ひずみから求まる復元ポアソン比 $\nu_r$ である。また、 $M_r$ や $\nu_r$ ではなく体積弾性係数 $K$ とせん断弾性係数 $G$ で評価する場合もある。ここでは、路盤材の変形特性式として現在最も広く用いられていると考えられる $M_r$ の式 $M_r = k_1 \theta^{k_2}$ と $\nu_r = 0.3$ （以降、 $K$ - $\theta$ モデル<sup>1)</sup>）、当研究室で従来から用いてきた $M_r$ と $\nu_r$ の式 $M_r = k_1 p^{k_2} / q^{k_3}$ と $\nu_r = a_0 + a_1 \eta + a_2 \eta^2$ （以降、 $M_r$ - $\nu_r$ モデル）、 $K$ と $G$ を用いた代表的な式 $K = (p/p_a)^{1-n} / \{1/K_a - \beta(p/p_a)^2 / K_a\}$ と $G = G_a(p/p_a)^{1-n}$ （以降、Boyceモデル<sup>2)</sup>）を検討対象とした。ここで、 $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 、 $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ 、 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 、 $\eta = q/p$ 、 $\beta = (1-n)K_a/(6G_a)$ 、 $p_a = 100\text{kPa}$ であり、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $K_a$ 、 $G_a$ 、 $n$ =材料パラメタである。

## 3. 非線形弾性有限要素構造解析及び疲労寿命算定

表層がアスファルトコンクリート、路盤が粒調砕石、路床がマサ土である三層構造で設計CBRが6%であるという想定で、AとDの二つの交通条件についてアスファルト舗装要綱<sup>3)</sup>に従って解析の対象とする舗装断面を設計した。その結果、各層の厚さは、A交通の場合表層50mm、路盤320mm、路床1000mm、D交通の場合表層200mm、路盤490mm、路床1000mmとなった。また、各舗装構成層の変形特性は以下のように設定した。

表層の復元変形係数は、一年を4分割してそれぞれに対応した2941MPa（春）、588MPa（夏）、1961MPa（秋）、5884KPa（冬）とし、復元ポアソン比は一律0.40とした。また、路床の復元変形係数は60MPa、復元ポアソン比は0.333とした。次に、路盤については、欧州で行われた粒状路盤材の繰返し三軸圧縮試験の一斉試験結果のうち公表されているデータ<sup>2)</sup>を用いて、まず $M_r$ と $\nu_r$ を算定し、さらに $G$ と $K$ を求めて、回帰分析により表-1のように各モデルの材料パラメタを決定した。なお、実験結果から得られた $M_r$ と $\nu_r$ のそれぞれの平均値を用いた解析も行ったのでそれらの値も線形モデルと称して載せてある。

解析対象舗装断面は、深さ4000mm、半径2000mmの軸対称断面でモデル化し、節点数1254、要素数391の8節点四辺形アイソパラメトリック要素で離散化した。境界条件は、両側面がローラー支承、底面が完全固定である。載荷重は49.03kNの複輪荷重（タイヤ中心間距離320mm）を想定し、解析ではその単輪荷重が半径106.3mm、圧力690.58kPaの円形等分布荷重として路面に作用するものとし、あとで重ね合わせによって複輪の影響を考慮するものとした。

疲労寿命の算定は、従来通り<sup>4)</sup>、各季節ごとに有限要素構造解析で得られた表層下面の引張ひずみ量を用いてアスファルト協会が提案するアスファルト混合物の疲労破壊式とマイナーの累積損傷則を適用して算定した。

## 4. 解析結果と考察

図-1と2に、一例として、A交通の場合の夏と冬のたわみ量の水平分布図を示す。たわみ量は載荷中心で

最大値をとり、中心から遠ざかるに連れて漸減していくことがわかる。また、荷重中心からの距離に係らず  $K-\theta$ モデルと  $M_r-\nu_r$ モデルのたわみ量はほぼ同じになっており、同様に Boyceモデルと線形モデルのたわみ量はほぼ同じであることがわかる。さらに、Boyceモデルと線形モデルのたわみ量は、 $K-\theta$ モデルと  $M_r-\nu_r$ モデルのほぼ半分の大きさである。また、夏と冬ではたわみの分布傾向は同じであるがその大きさが違う。ここでは示していないが、D交通の場合、たわみ量の大きさは小さくなっているが分布形状は同じである。

図-3と4は、それぞれA交通の場合の夏と冬の表層下面での引張りひずみの水平分布である。荷重中心直下で引張りひずみが最大となり、中心から離れるとともにひずみは引張り側から圧縮側へ急変し荷重線直下で最大圧縮ひずみとなったのち漸減していくことがわかる。荷重中心での引張りひずみ量は、 $K-\theta$ モデルと  $M_r-\nu_r$ モデルの方が他の2モデルよりも大きい。たわみ量の場合と同様、 $K-\theta$ モデルと  $M_r-\nu_r$ モデルが、また Boyceモデルと線形モデルが同じような結果を示している。ここでは示していないが、復元変形係数の深さ方向の変化が、 $K-\theta$ モデルと  $M_r-\nu_r$ モデルでは路盤上面から下面にかけて急激に減少するが、Boyceモデルではその傾向が非常に緩慢になっており、線形モデルの値とそれほど変わらない。

算定疲労寿命は、表-2の通りである。上述の結果から予想できるように、 $K-\theta$ モデルと  $M_r-\nu_r$ モデルの疲労寿命、また Boyceモデルと線形モデルの疲労寿命がほぼ同じになっている。また、 $K-\theta$ モデルと  $M_r-\nu_r$ モデルの方が、長めの疲労寿命を算定する傾向にある。なお、いずれが妥当なモデルかは現段階ではわからない。今後、模型実験や試験舗装での実験結果との比較によって検討していく予定である。

#### 4. 結論

$K-\theta$ モデルと  $M_r-\nu_r$ モデルが、また Boyceモデルと線形モデルが類似の応答を示すことがわかった。また、Boyceモデルでは応力変化に伴う復元変形係数や復元ポアソン比の変化が非常に小さく、応力変化に関して感度が悪いことが示唆された。

#### 参考文献

1) AASHTO: Resilient modulus of subgrade soils and unbound base/subbase materials. Stand. Spec. for Trans. Mat. Meth. of Sampling and Testing, pp. 1057-1071, 1998. 2) Correia, A.G. et al.: Review of models and modeling of unbound granular materials. Proc., Inter. Workshop on Model. Advanced Testing for Unbound Granular Materials, Lisbon, pp. 3-15, 1999. 3) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱, 1992. 4) Nishi, M. et al.: Performance of flexible pavements with slag bases. Proc., 7th Asian Reg. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engng., Haifa, Vol. 1, pp. 125-130, 1982.

表-1 材料パラメタ

| 線形モデル                                | $k-\theta$ モデル | $M_r-\nu_r$ モデル | Boyceモデル   |
|--------------------------------------|----------------|-----------------|------------|
| $M_r=210159(\text{kPa})$             | $k_1=5813.2$   | $k_1=11498$     | $Ka=90124$ |
| $\nu_r=0.1711$                       | $k_2=0.6208$   | $k_2=0.6208$    | $Ga=95368$ |
| (ただしこの値は<br>実験データから<br>の平均値であ<br>る。) | $\nu_r=0.3$    | $k_3=0.0$       | $n=0.927$  |
|                                      |                | $a_0=-0.1206$   |            |
|                                      |                | $a_1=0.3246$    |            |
|                                      |                | $a_2=-0.0417$   |            |

表-2 算定疲労寿命

|             | A交通 | D交通 |
|-------------|-----|-----|
| 線形          | 42  | 8   |
| $k-\theta$  | 17  | 2   |
| $M_r-\nu_r$ | 16  | 2   |
| Boyce       | 43  | 7   |

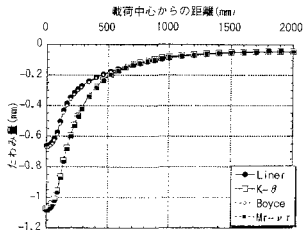


図-1 たわみ量の水平分布  
(A交通・夏)

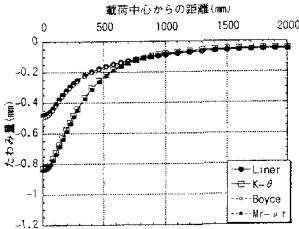


図-2 たわみ量の水平分布  
(A交通・冬)

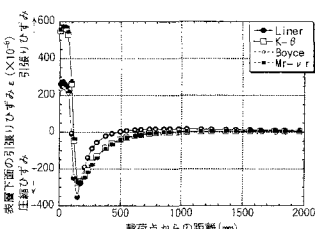


図-3 引張りひずみの水平分布  
(A交通・夏)

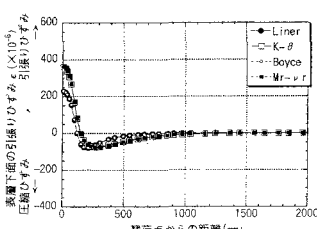


図-4 引張りひずみの水平分布  
(A交通・冬)