## 粒状材層の弾性係数の応力依存性を 考慮した舗装の構造解析

藤波 潔<sup>1</sup>・James MAINA<sup>2</sup>・井上武美<sup>3</sup>・松井邦人<sup>4</sup>・菊田征勇<sup>5</sup>

」正会員 工修 東京電機大学 建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 東京電機大学 建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)
 <sup>3</sup>フェロー会員 博(工) (株)NIPPO コーポレーション(〒140-0002 東京都品川区東品川 3-32-34)
 <sup>4</sup>フェロー会員 Ph.D. 東京電機大学 建設環境工学科(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)
 <sup>5</sup>フェロー会員 博(工) 国士舘大学 都市システム工学科(〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1)

路盤は舗装表面に作用する荷重を分散する機能を担い 舗装の耐久性に大きく影響することが知られている.舗装の構造解析に線形多層弾性構造が用いられているが,路盤,路床の材料特性は線形モデルより,非線形の特性を表す *k* - *q* モデルが適切であるとして提案されている.本研究では,多層弾性構造の路床,粒状材の路盤層に線形モデルと非線形モデルとした場合について舗装の寿命予測の観点から比較しているまた路盤に浸透した水は荷重分散機能に影響するゆえ,飽和度が寿命予測に及ぼす影響も合わせて検討した.本結果から,粒状材の挙動を適切に表現できるモデル構築の重要性が確認できた.

*Key Words :* nonlinear, multilayered system, unbound materials, underground water, service life

#### 1.はじめに

路盤は,アスファルト混合物層やセメントコンク リート層に作用する交通荷重を支え,その力を分散 し,さらに路床へと伝える働きがある.長寿命舗装で は,路盤の弾性係数が十分に大きい時,アスコン層の 弾性係数があるレベル以上であると,供用後20年ほ ど経過してもほとんど破損が起こらないという報告も ある.このように,路盤は舗装の耐久性に大きく影響 を与える.また,路盤は荷重分散機能だけでなく,舗 装体内に浸透した降雨水や地下水を排水する機能も併 せ持つ 浸透した水の飽和度は荷重分散機能に影響す る<sup>1)</sup>.

Brown<sup>2)</sup>は,第36回ランキンレクチャにおいて「地 盤工学の研究成果は舗装の設計に十分反映される努力 がなされていない.路盤,路床の有効応力に対する理 解を深め,飽和・不飽和状態に適用することが将来に 向け舗装設計法改良の基礎となる」と述べている. ヨーロッパでは,1999年1月にLisbonにおいて舗装お よび地盤の研究者を対象としてInternational Workshop on Modeling and Advanced Testing for Unbound Materials<sup>3)</sup>が開催されている.この目的は,cost337の活動の 中で粒状材の非線形レジリエント挙動に関する過去の 室内実験や原位置試験,非線形モデルに関する研究を 整理し,アスファルト舗装の推奨解析モデルを確立す ることである.また,本年6月にはNottinghamにおい て The 6th International Symposium on Pavements Unbound が開催された.

路盤や路床のような粒状材をどのようにモデル化す るかは 舗装を理論的に設計する上で非常に重要であ る 粒状材の弾性係数は拘束圧に依存することが知ら れており、いろいろなモデルが提案されている.粒状 材層の代表的な非線形モデルとしてk-qモデルがあ る.吉村ら<sup>4)</sup>は、最近レジリエントモデュラスについ て試験機間のk-qモデルの違いについて成果報告を している.k-qモデルはAASHTO<sup>5)</sup>にも取り入れられ ている.Irwin と Fellers は CHEVLAY (Chevron Elastic Systems Program)を拡張してメインフレームで非 線形解析が行える NELAPAV (Nonlinear Elastic Layer Analysis for PAVements)を開発している.その後、 1985年にはIrwinとSpeck<sup>6)</sup>はこのマイクロコンピュー 夕版を開発した.この解析ソフトは逆解析ソフト MODCOMP<sup>7</sup> に組み込まれており,LTPP データの逆 解析の中心的なソフトになっている.これらのモデル では弾性係数は拘束圧の非線形関数で表されている. NELAPAVでは舗装の粒状材層を細分割し,個々の細 分割層の中央における上載圧と側圧から弾性係数を求 め,その値をその層の弾性係数として解析を行ってい る.したがって,弾性係数は拘束圧の非線形モデルで あるが,解析は線形である.

本研究では,Irwinらの考え方<sup>8)</sup>に基づき,すでに開 発されている多層弾性構造解析ソフトGAMES<sup>9)</sup>を拡 張する形で簡易非線形モデルのプログラム開発を行っ た.このプログラムを用いて不飽和時,路盤面上まで 飽和 路床面上まで飽和した状態に対する応答解析を 行い計算されたひずみから疲労破壊基準<sup>10)</sup>を用いて 線形モデルと非線形モデルによる耐久性の違いを評価 している.

2.舗装の簡易非線形モデル

(1)弾性係数の非線形モデル

舗装材料の弾性係数には、アスファルトコンクリート、ポルトランドセメントコンクリート、安定処理土のような弾性係数が一定と考えられる材料と 粒状材のような応力あるいはひずみに依存する材料とがある、後者の材料は非線形と呼ばれており、弾性係数は拘束圧の影響を受けると言われている.いわゆる k-qモデルと言われるものは、弾性係数と応力パラメータの間の関係を、

$$E = k_1 \boldsymbol{q}^{k_2} \tag{1}$$

で表している.ここに , $q = s_1 + s_2 + s_3$ ,  $k_1, k_2$  は弾性 係数を計算するときに用いる定数である.

このモデルは,k<sub>1</sub>,k<sub>2</sub>がqの単位に依存し 特にk<sub>1</sub>の 単位は左辺と右辺の単位が一致するように考える必要 があるので,適切なモデルとは言いがたい.ここで は,路盤,路床の弾性係数として,いろいろなモデル が提案されているが,本研究では文献7),11)を参考に 基準応力(p<sub>s</sub>=100kPa)で無次元化した次のモデルを 用いている.

路盤 
$$E_2 = k_1 p_s \left(\frac{\boldsymbol{q}}{3p_s}\right)^2$$
 (2)

路床 
$$E_3 = k_3 p_s \left(\frac{\boldsymbol{s}_1}{p_s}\right)^{k_i}$$
 (3)

ここに, $q = s_1 + s_2 + s_3$ , $s_1$ :鉛直方向の垂直応力 (kPa), $s_2$ , $s_3$ :水平方向の垂直応力(kPa)である. (2)上載圧による粒状材内部の応力度

材料の湿潤密度r,深さzにおける上載圧 $s_{z0}$ は式(4) により計算できる.

$$\boldsymbol{s}_{z0} = \boldsymbol{r} g z \tag{4}$$

ここに,gは重力加速度である.

舗装構造がn層からなるとき,各層の厚さと密度を それぞれ $h_i$ , $\mathbf{r}_i$ とすると,深さzにおける上載圧 $\mathbf{s}_{z_0}$ は, 式(5)により計算できる.

$$\boldsymbol{s}_{z0} = \left(\sum_{i=1}^{j-1} \boldsymbol{r}_i \ g \ h_i\right) + \boldsymbol{r}_j \ g\left(z - \sum_{i=1}^{j-1} h_i\right) \ (j \le n)$$
(5)

地下水面下では,土粒子は浮力の作用を受ける.したがって,そこでの土の密度r,は,式(6)で表される.

$$\boldsymbol{r}_{b} = \boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}_{w} \tag{6}$$

ここに, r<sub>w</sub>=1,000 kg/m<sup>3</sup> は水の密度である.

上載圧による水平方向の圧力 $s_{h0}$ は,横土圧係数 $K_0$ と上載圧 $s_{-0}$ を用いて式(7)により計算できる.

$$\boldsymbol{s}_{h0} = \boldsymbol{K}_0 \, \boldsymbol{s}_{z0} \tag{7}$$

ここで,自然に堆積し,自重により圧密している土の 場合,K<sub>0</sub>の値は0.4 ~ 0.6の範囲にある.内部摩擦角 fが分かっている時,あるいは推定できる時,K<sub>0</sub>は式 (8)により計算できる.

$$K_0 = (1 - \sin f)(OCR)^{0.7}$$
(8)

ここに,OCR は過圧密比であり,過去の最大上載圧  $s_{20max}$ を現在の上載圧 $s_{20}$ で除した値である.

$$OCR = \frac{\boldsymbol{S}_{z0 \max}}{\boldsymbol{S}_{z0}}$$
(9)

締固められた上層粒状路盤,下層路盤のような,過 圧密状態にある材料では $K_0$ は大きな値になる.実験 から求めた $K_0$ の値は,舗装材の場合 $0.7 \sim 1.3$ の範囲 にあることが知られている<sup>7</sup>.

(3) 解析モデル

本研究では,舗装を表・基層,路盤,路床の3層構 造でモデル化できるものとする.その寸法は図-1に 示す通りである.表・基層の厚さは0.2m,その弾性係 数は一定(*E*<sub>1</sub>=4,000 MPa)とし,路盤,路床の弾性係 数はそれぞれ式(2),(3)を用いて求めた.文献11)を参 考にして,これらの式で,*k*<sub>1</sub>=7230,*k*<sub>2</sub>=0.38,*k*<sub>3</sub>=2011,



k=0.55としている.路盤の厚さは0.55mで,0.05m刻 みで11層に分割し、細分割した層の中央における上 載圧から式(2)を用いて、その弾性係数を求めている. なお、このとき用いた各層の密度は、表・基層2,300 kg/m<sup>3</sup>,路盤1,900kg/m<sup>3</sup>,路床1,600kg/m<sup>3</sup>である.また, 水平土圧は,式(7)においてK<sub>0</sub>=1.0としている.路床 の厚さは10mとして,路床上面から0.05mは0.01m刻 みで5層に分割し,その下の0.15mは0.05m刻みで3 層,その下の1.8mを0.2m刻みで9層,さらにその下 の8mを1m刻みで8層に分割している.よって,路床 は全部で25分割されている.路床より下をベッド ロックとして,その弾性係数を固定(E<sub>4</sub>=3,500 MPa) としている .ポアソン比nは計算結果にあまり大きな 影響を与えないパラメータであり これまでの研究成 果から、およその値は分かっているので、解析ではそ の値を用いている.

3. 不飽和状態の寿命予測

(1)弾性係数と表面たわみ

路盤は最適含水比で締固められており、そのとき飽 和度はおよそ75% ~ 85%の範囲にある.この状態を 不飽和と考えている.また、応答解析は、図-1に示 すように舗装表面に49kNの鉛直荷重が半径r=0.15 m で円形等分布するとして解析を行い 表面たわみを求 めている.解析に使用する弾性係数は、式(2)、(3)を用 いて、

- Case1: 上載圧だけの場合
- Case2: 上載圧と作用荷重による応力増分を考慮し た場合



の2通りの方法で求め、その結果を図-2に示す.Case2 ではCase1で求めた弾性係数を初期値として、作用荷 重49kNによる内部応力をCase1の上載圧から求めた 応力に加え、再度、弾性係数を計算している.この作 業を弾性係数が収束するまで繰り返してCase2の最終 的な弾性係数としている.

式(2)のモデルによる路盤の弾性係数は,深さ方向 に対して Case1 では増加するが, Case2 では逆に減少 する傾向を示している.これに対して,路床に適用し た式(3)のモデルは, Case1,2 ともに深さ方向に弾性係 数が増加する傾向がある.

図 -2の2種類の弾性係数分布を用いて,作用荷重 49kNによる表面たわみを計算した結果を図-3に示 す.Case2の表面たわみはCase1よりも小さい.これ は,Case2における平均的な路盤の弾性係数がCase1 に比べて大きくなり,路盤の剛性が増すために, Case2の表面たわみが小さくなると考えられる.



#### (2)寿命予測

FWD試験では表面たわみを測定し,その値を用い て逆解析を行い表・基層,路盤,路床の弾性係数を推 定している.舗装が表・基層,路盤,路床の3層から なる場合,これまで,それぞれの層の内部で弾性係数 は変化しないと仮定し路床の深さは半無限として逆 解析を行ってきた.これは,各層の内部でばらついて いる弾性係数を等価な弾性係数で評価するという考え 方に基づいている.しかし,逆解析を行うと各層の弾 性係数は互いに影響し合っているため舗装構造シス テムとしては等価であるが,それぞれの層の等価な値 を求めているわけではない.現実問題として,地中深 くなるにしたがい剛性が高くなっていることを考える と路床の弾性係数を一定とする考え方は必ずしも適 切でないことは明らかである.

ここでは,路床上面より10mのところに固い層 (ベッドロック: $E_4$ =3,500 MPa)を挿入し,その弾性 係数を固定として4層モデルで図-3の表面たわみを 用いて逆解析を行った.得られた弾性係数を表-1に 示す.表・基層の弾性係数は,作用荷重を考慮した場 合,5~10%ほど大きく評価することになる.路盤, 路床の弾性係数はその変動範囲内の最小値付近の値に 収束している.

図-2の深さ方向に弾性係数が変動する断面と,表-1の表・基層,路盤,路床の弾性係数を用いて順解析 を行い,表・基層下面と路床上面のひずみを計算し た.これらのひずみを用いて,疲労破壊基準<sup>10</sup>に基づ き許容49kN輪数を計算し,図-4に示す.ここで,ア スファルト量12.5%,空隙率4.4%としている.アス ファルト混合物の弾性係数は一定としている.

表・基層では非線形モデルの方が線形モデルよりや や大きめの破壊回数を予測しているが 路床では逆に 線形モデルの方が大きめの破壊回数となる 線形モデ ルと非線形モデルによる破壊回数の違いは3倍程度で ある.

表-1 逆解析によって得られた弾性係数(不飽和)

弾性係数	E <sub>1</sub> [MPa]	E <sub>2</sub> [MPa]	E <sub>3</sub> [MPa]
Case1	4184.22	229.11	122.13
Case2	4428.99	320.01	131.19



### 4.飽和状態の寿命予測

(1)弾性係数と表面たわみ

路盤や路床のような粒状材の弾性係数は湿潤状態に より変化する.路盤,路床が飽和すると土粒子は浮力 を受ける.ここでは路盤上面まで飽和している場合 と,路床上面まで飽和している場合について考える.

図-5(a)はCase1における深さ方向の弾性係数の変 動を示している.路盤面上まで飽和しているとき,路 盤の弾性係数は不飽和の場合と比較して僅かに小さく なっている.浮力は水面から浅いところでは小さく, 深くなるほど大きくなる路盤は飽和時も水面から浅 いために浮力の影響は非常に小さく,不飽和時との差 は僅かである.路床面上まで飽和しているとき,路盤 は浮力の影響を受けないため路盤の弾性係数は、深くなる ほど不飽和の場合と比較してかなり小さな値となる.

Case2 において,路盤面上まで飽和しているとき と,路床面上まで飽和しているときについて,細分割 した層の弾性係数を求めて図-5(b)に示した.Case2 における路盤の弾性係数は,Case1の弾性係数と大き く異なっている.その変化の傾向は不飽和のときと同 様に路盤上面で大きく,下面で小さくなっている.路 床内の弾性係数の変動も不飽和の場合(図-2)とほぼ

荷重タイプ	地下水位	E <sub>1</sub> [MPa]	E <sub>2</sub> [MPa]	E <sub>3</sub> [MPa]
Case1	不飽和	4184.22	229.11	122.13
	路盤上面	4137.25	233.20	83.30
	路床上面	4075.02	248.92	96.26
Case2	不飽和	4428.99	320.01	131.19
	路盤上面	4357.54	311.96	92.89
	路床上面	4316.82	339.89	104.09

表-2 逆解析によって得られた弾性係数(飽和状態)



同様の傾向があり、その大きさは水の影響を受けて弾 性係数の値は、同じ深さでは小さく、深くなるほどそ の差が大きくなる.

(2) 寿命予測

飽和した路盤層内の水のある割合を一定期間内に排水するという考え方に基づいており,AASHTOでは, 排水レベルと飽和レベルにある時間割合とから排水係数m<sub>i</sub>を設け,層係数a<sub>i</sub>に乗じる形で舗装を評価している.一般に路盤や路床の湿潤状態により弾性係数が変化することが分っている.特に粒状材料では弾性係数の低下と排水の繰返しによる変位が増加する.

路盤上面まで常に満水の状態は存在しない.しか し不飽和の場合と比較する目的で水位が路盤上面ま





であるときと、路床上面まであるときの計算を行って いる.図-5のモデルで計算した表面たわみを図-6に 示す.同図より路盤や路床が飽和されているとき、表 面たわみはかなり増加する.Case2では弾性係数の増 加により、表面たわみがCase1と比べて15%ほど小さ くなる.

図 -6の表面たわみを用いて,各層内で弾性係数が 深さ方向に一定と仮定して逆解析を行った結果を表-2に示す.

図-5の深さ方向に弾性係数が変動する断面と,表-2の表・基層,路盤,路床の弾性係数を用いて順解析 を行い,表・基層下面と路床上面のひずみを計算した.これらのひずみを用いて,疲労破壊基準<sup>10</sup>に基づ き許容49kN輪数を計算して図-7に示す.ここで,ア



図-7 表・基層と路床の破壊回数(飽和状態)

スファルト量 12.5%, 空隙率 4.4% としている.アス ファルト混合物の弾性係数は一定としている.

Case1 の場合, 非線形モデルと線形モデルとでは 表・基層の破壊回数はほぼ同じで,路床では逆に線形 モデルの方が大きめの破壊回数となる線形モデルと 非線形モデルによる破壊回数の違いは路床で非線形 は線形の約半分である.Case2の場合, 非線形モデル の方が表・基層の破壊回数は大きく,路床の破壊回数 は線形モデルと非線形モデルとでほぼ同じである.

#### 5.結論

粒状材層の簡易的非線形モデルを用いて解析を行い、湿潤状態と路盤面上,路床上面まで飽和している 場合について破壊回数を求めた.その結果,以下の事柄が明らかになった.

- 1) 路盤の非線形モデルにおいて ,Case1では深さが増 すほど弾性係数が増加するのに対して ,Case2では 逆に減少する特性がある .
- 2) Case2 の場合,見かけの剛性が増加することにより,表面たわみは Case1 よりも小さくなる.
- 3) 非線形モデルと等価な線形モデルでは,表・基層の 弾性係数を最大10%ほど大きく評価する.
- 4) 非線形モデルと線形モデルで破壊回数を評価する
  と,表・基層ではほとんど同じであり,路床では非
  線形モデルは線形モデルの約1/2となる.
- 5) 路盤が飽和状態における路床の破壊回数は,湿潤 時の破壊回数と比べて 1/3 程度である.

本研究の結果は、弾性係数の応力依存モデルの影響 を大きく受ける.しかしながら,これらモデルのパラ メータの値は室内実験により決定されているのが現状 である現位置試験では引張応力が発生すると思われ るが,室内実験ではこのような状態を再現できない. 今後,信頼できる非線形モデルを構築することが非常 に重要であると考える.

#### 参考文献

- 井上武美:耐久的な路盤についての考察,舗装 29-6, pp.4-8, 1994.
- Brown, S.F.: Soil mechanics in pavement engineering, Geotechnique 46, No.3, pp.383-426, 1996.
- 3) Correia, A.G.: Review of models and modeling of unbound granular materials, *International symposium for unbound materials (ed. Correia, A. G.)*, pp.3-15, 1999.
- 吉村啓之,磯部雅紀,岡部俊幸,加納孝志:アスファ ルト舗装のレジリエントモデュラス,舗装 39-3, pp.7-14, 2004.
- 5) "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures" AASHTO, pp.II-22-26, AASHTO, 1986.
- Irwin L.H. and Speck : NELAPAV User's Guide, Cornel University, *Local Roads Program Report*, No.86-1, Revized March 2003.
- Irwin, L.,H.: Instructional Guide for Backcalculation and the Use of MODCOMP3 Version 3.6, Cornel University, Local Roads Program, March 1994.
- 8) Irwin L.H.: Backcalculation : An Overview and Perspective, A joint conference of the FWD and road profiler's groups,

Roanoke, VA, USA, Oct.21-25, 2002.

- 8) 松井邦人,マイナ・ジェイムス,董勤喜,小澤良明:鉛 直および水平方向に円形等分布荷重の作用を受ける舗 装構造の弾性解析,土木学会舗装工学論文集,第6巻, pp.100-109,2001.
- 10) (社)日本道路協会: 舗装設計施工指針, 平成13年12月.
- Lytton, R.L.: Backcalculation of Pavement Layer Properties, *Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*, STP 1026, Bush, A.J. III and Baladi, G.Y., eds., ASTM, pp.7-38, 1989.

#### PAVEMENT STRUCTURAL ANALYSIS CONSIDERING STRESS DEPENDENCY OF LAYER MODULI OF UNCONFINED MATERIALS

# Kiyoshi FUJINAMI, James MAINA, Takemi INOUE, Kunihito MATSUI and Yukio KIKUTA

It is well known that the function of base layer is to disperse the load acting on the pavement surface and this highly influences durability of the pavement. In pavement analysis, linear multi-layer elastic system is used and it is hereby proposed that k- $\theta$  nonlinear model be used to represent material properties for base and subgrade layers instead of a linear model. In this research, comparison between linear and nonlinear models for multi-layer elastic subgrade and unconfined base materials is made from the point of view of expected pavement life. Effects of percolation of water into base layer and degree of saturation on the load dispersion capacity and expected life, respectively, were evaluated. Results confirmed the importance of developing a model that properly represents behavior of unconfined materials.