

(I-24) 均質化法を用いたアスファルト混合物の内部応力解析に関する研究

中央大学大学院 学員 ○宇尾 朋之
中央大学 正員 樫山 和男

1. はじめに

アスファルト混合物は、時間依存性を持つ不均質な粘弾性複合材料であり、その非線型性を正確に示す数値モデルはいまだ確立していない。そこで本報告では、複合材料解析の一手法である均質化法を用いて、アスファルト混合物の周期的な微視構造を考慮した内部応力解析を行い、その妥当性を一軸圧縮試験の結果との比較により検討した。

2. 基礎方程式

2.1 ラプラス空間における構成式

基礎方程式の定式化においては、時間依存性を持つ線形粘弾性体の構成則^[1]が、ラプラス空間 s での弾性体の構成則と同じ形であることを利用して、ラプラス空間において均質化法を適用した線形解析を行い、得られた結果に対してラプラス逆変換^[4]を行うことで内部応力等の時間空間における値を得るものである。

ラプラス空間における粘弾性体の構成式及び支配方程式は次式(1),(2)で与えられる。

$$\bar{\sigma}_{ij}(s) = K_{ijkl} \bar{\epsilon}_{kl}(s) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}(s)}{\partial x_i} + \bar{f}_i(s) = 0 \quad (2)$$

ここに、 $[K]$ は係数マトリックスであり、次式で与えられる

$$[K] = s[E] + [D^e][\eta^{-1}][D^e]$$

また $[E]$ は単位マトリックス、 $[D^e]$ は弾性係数マトリックス、 $[\eta]$ は粘性係数マトリックスである。

2.2 均質化の適用

均質化法^[2]では、対象とする巨視構造がある周期的な微視構造(ユニットセル)から成り立つと仮定して微視構造及び巨視構造における定式化を行う。また微視構造と巨視構造の間に成り立つパラメーター(特性変位)を定めることで、微視構造を考慮した巨視構造の材料定数を定め、得られた結果から微視構造の断面力及び変位が算定される。次にラプラス空間において均質化法を適用し、微視構造及び巨視構造に関する仮想仕事の原理式を導く。

ラプラス空間における支配方程式及び材料構成式から仮想仕事の原理式は

$$\int_v K_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial v_l}{\partial x_j} dV = \int_s \bar{f}_i v_i dS \quad (3)$$

となる。ここでユニットセルのスケール ϵ に関して変位 $u(x, y, s)$ の漸近展開を行うと

$$\begin{aligned} \bar{u}^\epsilon(x, y, s) &= \bar{u}^0(x, y, s) + \epsilon \bar{u}^1(x, y, s) \\ &+ \epsilon^2 \bar{u}^2(x, y, s) + \dots + \epsilon^n \bar{u}^n(x, y, s) \end{aligned} \quad (4)$$

さらに上式に関して特性変位 χ_i^{kl} を用いるとラプラス空間における巨視変位及び微視変位は

$$\begin{aligned} \bar{u}_i^0(x, y, s) &= \bar{u}^0(x, s) \\ \bar{u}_i^1(x, y, s) &= -\chi_i^{kl}(y, s) \epsilon_{kl}^x(\bar{u}^0) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。以上を(3)式に代入し、微視構造及び巨視構造に関してそれぞれの仮想変位 v をとって整理すると最終的に次式のように仮想仕事の原理式が得られる。

巨視構造

$$\int_v K_{ijkl}^H \frac{\partial \bar{u}_k^0}{\partial x_i} \frac{\partial v_l}{\partial x_j} dV = \int_s \bar{f}_i v_i dS \quad (6)$$

ただし、 K_{ijkl}^H は均質化された粘弾性テンソルであり次式(7)で与えられる。

$$K_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y (K_{ijkl} - K_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n}) dY \quad (7)$$

ここで、 χ^{kl} は、以下の微視構造に関する式(8)により求められる。

微視構造

$$\int_v K_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial x_n} \frac{\partial v_j(y)}{\partial x_i} dV = \int_Y K_{ijkl} \frac{\partial v_i(y)}{\partial y_j} dY \quad (8)$$

3. 実験概要

本報告においては、数値解析の妥当性検討及び数値解析に用いる材料定数の決定を目的として実験を行った。実験1では、材料定数の決定を行うためにストレートアスファルト、フィラー、細骨材(2.36mm-425 μ m)を、それぞれ40:36:24の割合で配合した供試体を作り一軸圧縮試験を行った。供試体の寸法は、直径101.6mm、高さ63.5mmである。ここで得られた荷重-変位曲線より各材料定数を求めた。次に実験2として、数値解析の妥当性検討のための比較実験を行った。用いた供試体は実験1の供試体と同様の配合率で作ったアスファルト混合物と、骨材(13.2mm-4.75mm)を7:3の割合で配合したものである。なお実験1,2ともに、温度は25℃一定で行い、変位速度は1.0mm/minで与えている。表1に実験条件を示す。

表-1 実験条件

実験1	アスファルト：フィラー：細骨材(425 μ m-2.36mm) = 40 : 36 : 24	
実験2	アスファルト混合物：骨材(4.75mm-13.2mm) = 7 : 3	
	比重(g/cm ³)	供試体直径：101.6mm
アスファルト	1.063	供試体高さ：63.5mm
骨材	2.600	実験温度：25℃
		変位速度：1.0 mm/min

4. 数値解析例

数値解析例における巨視構造には、一軸圧縮試験に用いた供試体と同様に、直径101.6mm高さ63.5mmのモデルを作成した。また微視構造は一個の骨材(直径5mmの球体)とアスファルト混合物(ストレートアスファルト、フィラー、細骨材)の2つの材料からなると仮定してモデルを作成した。また巨視構造に関しては、節点数228,要素数144,微視構造に関しては節点数4913,要素数4096に要素分割を行った。図-1に解析モデルを示し、図-2に要素分割図を示す。ここでアスファルト混合物の材料定数は、実験から得られた荷重-変位曲線を用いて決定した。また骨材の材料定数は実験からは得られないため、骨材を安山岩として、そのヤング率を文献^[3]から選定し $7.3e+05(kgf/cm^2)$ として数値解析を行った。また骨材の材料定数が数値解析に与える影響を検討するために同じオーダーで10種類のヤング率を取って計算した。なおポアソン比に関しては文献より0.25を用いている。また本解析においては簡単のために温度一定、体積変化による粘性係数を無限大としてこれに関する項を無視している。表-2に解析条件及び各定数値を示す。ただし表において η_g, η_k はせん断変形及び体積変形に関する粘性係数である。

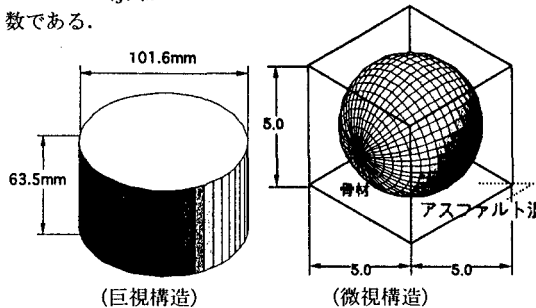
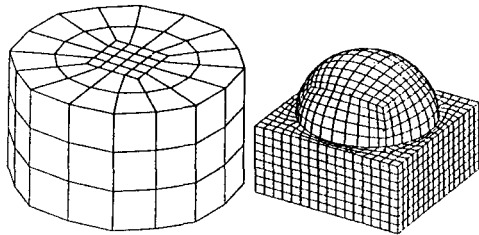


図-1 数値解析モデル



要素数:144 節点数:228 要素数:4096 節点数:4913
(巨視構造) (微視構造)

図-2 要素分割図

表-2 解析条件

骨材 (φ 60mm)	アスファルト混合物
$E(t) = 730000(kgf/cm^2)$	$E(t) = \sigma(t)/\epsilon(t)$
$\nu(t) = 0.25$	$\nu(t) = -\epsilon_y(t)/\epsilon_x(t)$
$\eta_g(t) = \infty$	$\sigma_x(t) = 0.07 * (1 - e^{-0.005t}) + 0.0001t$
$\eta_k(t) = \infty$	$\epsilon_x(t) = 0.000265t$
	$\epsilon_y(t) = 0.000112t$
	$\eta_g(t) = 100 * E(t)/2(1 + 2\nu(t))$
	$\eta_k(t) = \infty$

5. 数値解析結果及び考察

図-3aに実験結果及び本解析における軸方向応力の時間履歴を示す。ここで実験結果は荷重-変位曲線から荷重の時間履歴を求め、その荷重を受け持つ断面積で割ることにより軸方向応力を求めた。また数値解析結果は、骨材のヤング率が $7.3e+05(kgf/cm^2)$ の場合を示しており、実験と同様に荷重を断面積で割ることにより軸方向応力を決定した。図-8aより数値解析結果は定性的に粘弾性的な挙動を捉えている事がわかる。次に骨材の材料定数を変化させた場合の軸方向応力の時間履歴を図-8bに示す。この図より骨材の材料定数が数値解析結果に大きく影響することがわかる。

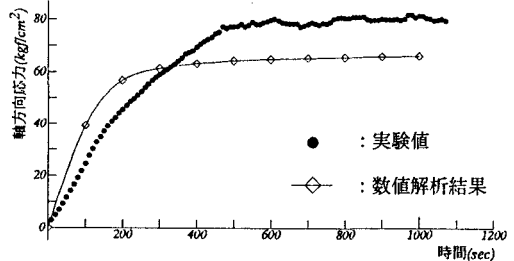


図-3a 軸方向応力の時間履歴
(骨材：ヤング率 $7.3e+05(kgf/cm^2)$)

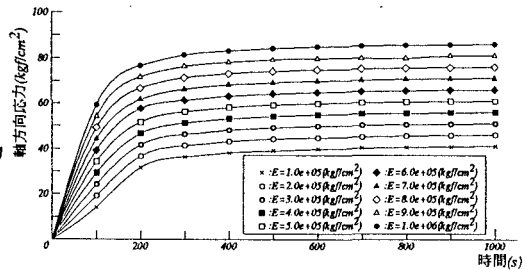


図-3b 軸方向応力の時間履歴
(骨材：ヤング率変化)

6. おわりに

本報告において、アスファルト混合物の内部応力解析における均質化法の適用の妥当性を、一軸圧縮試験との比較のもとに検討した結果、計算結果は実験結果と定性的には一致する傾向を示した。また骨材の材料定数が数値解析結果に大きく影響を与えることがわかった。今後は本手法におけるモデルの検討及び構成則の検討を行い、また骨材の影響が大きいことから材料定数についても検討を重ねる予定である。

参考文献

[1] 富田佳宏, 数値弾塑性力学, (1990), 養賢堂 [2] Jose Miranda Guedes and Noboru Kikuchi, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering 83 p.p. 143-198, (1990) [3] 鈴木隆介, 地質工学基礎図表集, (1991), 創造社 [4] R.A. Schapery, Approximate methods of transform inversion for viscoelastic stress analysis. Proceedings of the 4th U.S. national congress of Applied Mechanics vol.2 1075-1085, (1962) [5] 市川康明, 粘弾性材料の均質化解析, 土木学会第50回年次学術講演会. cs-16, (1995)