

I - A 30 均質化法による内部構造を考慮したアスファルト混合物の粘弾性解析

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、主にアスファルトと骨材によって構成される粘弾性複合材料である。したがって、数値解析においてアスファルト混合物の力学的性質を正確に示すためには、内部に介在する個々の材料の非線形性を評価する手法の導入が必要である。

本報告では、複合材料の応力解析の一手法である均質化法を粘弾性解析に適用し、内部微視構造を考慮に入れたアスファルト混合物の数値解析を行い、本手法の妥当性を検討した。

2. 基礎方程式

粘弾性体の構成式及び支配方程式¹⁾は次式(1),(2)で与えられる。

$$\dot{\sigma}_{ij}(t) = D_{ijkl}^e \dot{\varepsilon}_{kl}(t) - \dot{A}_{ijkl} \varepsilon_{kl}(t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_{ij}(t)}{\partial x_j} + \dot{f}_i(t) = 0 \quad (2)$$

ここに、 $[\dot{A}]$ は次式で示される見かけの応力変化率ベクトルである。

$$[\dot{A}] = [D^e][\eta]^{-1}$$

支配方程式、及び構成方程式を初期条件及び境界条件の基に解くことにより時間依存性を持つ粘弾性体の有限要素解析が行えるが、この場合微小時間増分 Δt を非常に小さくする必要があり計算時間に大きな負担を掛けてしまう。そこで、ここでは接線係数法を用いて有限要素解析を行うこととする。ここで粘性ひずみの時間変化率を次式のように Δt 間の線形補間を用いて近似する。

$$\dot{\varepsilon}^c = (1 - \theta)\dot{\varepsilon}_{(t)}^c + \theta\dot{\varepsilon}_{(t+\Delta t)}^c \quad (3)$$

$$(t > 0, 0 \leq \theta \leq 1)$$

ここで

$$\theta = \begin{cases} 0 & : \text{Explicit Euler scheme} \\ 1/2 & : \text{Crank-Nicolson scheme} \\ 1 & : \text{Implicit Euler scheme} \end{cases}$$

であり、本報告では $\theta = 0$ とする。

Key Words : Homogenization Method, Visco - Elasticity, Composite Material, Asphalt Concrete, FEM

〒112 東京都文京区春日 1-13-27,
Tel:03(3817)1815, Fax:03(3817)1803

支配方程式及び構成式を増分形で示すと次式が得られる。

$$\Delta \sigma_{ij} = D_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl} - \Delta t \eta_{ijkl}^{-1} \sigma_{kl} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Delta \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \Delta f_i = 0 \quad (5)$$

以上より仮想仕事の原理式は時間増分 Δt の区間で次式が成り立つ。

$$\int_v D_{ijkl} \frac{\partial \Delta u_k}{\partial x_l} \frac{\partial \nu_i}{\partial x_j} dV - \Delta t \int_v A_{ijkl} \sigma_{kl} \frac{\partial \nu_i}{\partial x_j} dV = \int_s \Delta f_i \nu_i dS \quad (6)$$

3. 均質化の適用

均質化法²⁾³⁾⁴⁾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。ユニットセルのスケール ϵ に関して全変位増分 Δu_i^e の漸近展開を行うと次のようになる。

$$\Delta u_i^e(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \Delta u_i^0(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) + \epsilon \Delta u_i^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) + \epsilon^2 \Delta u_i^2(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) + \dots + \epsilon^n \Delta u_i^n(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) \quad (7)$$

さらに上式に関して弾性変位に関する特性関数 χ_i^{kl} 、及び粘性による変位に関する特性関数 $\Delta \varphi_i$ を用いて、巨視的変位増分及び微視的変位増分が次式のように表される。

$$\Delta u_i^0(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \Delta u_i^0(\mathbf{x}, t)$$

$$\Delta u_i^1(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = -\chi_i^{kl}(\mathbf{y}, t) \frac{\partial \Delta u_k^0}{\partial y_l} + \Delta \varphi_i \quad (8)$$

以上を(6)式に代入して微視構造、巨視構造に関してそれぞれの仮想変位 ν をとって整理すると仮想仕事の原理式が次式のように得られる。

巨視構造

$$\int_v D_{ijkl}^H \frac{\partial \Delta u_k^0}{\partial x_l} \frac{\partial \nu_i}{\partial x_j} dV - \int_v \Delta \sigma_{ij}^H \frac{\partial \nu_i}{\partial x_j} dV = \int_s \Delta f_i \nu_i dS \quad (9)$$

ただし、 $D_{ijkl}^H, \Delta \sigma_{ij}^H$ は均質化された粘弾性テンソルであり次式で与えられる。

$$D_{ijkl}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y (D_{ijkl} - D_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial y_n}) dY \quad (10)$$

$$\Delta \sigma_{ij}^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y D_{ijrs} (\eta_{rskl} \sigma_{kl} \Delta t - \frac{\partial \Delta \varphi_r}{\partial y_s}) dY \quad (11)$$

ここで, $\chi_i^{kl}, \Delta\varphi_i$ は, 以下の微視構造に関する次式により求められる。

微視構造

$$\int_v D_{ijmn} \frac{\partial \chi_m^{kl}}{\partial x_n} \frac{\partial \nu_i(y)}{\partial x_j} dV = \int D_{ijkl} \frac{\partial \nu_i(y)}{\partial y_j} dY(12)$$

$$\int_v D_{ijkl} \frac{\partial \Delta\varphi_k}{\partial x_l} \frac{\partial \nu_i(y)}{\partial x_j} dV = \Delta t \int D_{ijrs} \eta_{rskl} \sigma_{kl} dY(13)$$

4. 数値解析例

数値解析例における巨視構造には, 直径101.6mm高さ63.5mmのモデル, 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(ストレータスファルト, フィラー, 細骨材)からなるモデルを作成した。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343, 要素数216の要素分割を行った。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については実験を行っていないため, 骨材を安山岩として, そのヤング率を文献⁵⁾から選定し $7.3 \times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ として数値解析を行った。なおポアソン比に関しては, 文献より0.25を用いている。ただし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-1に解析条件及び各定数値を示す。

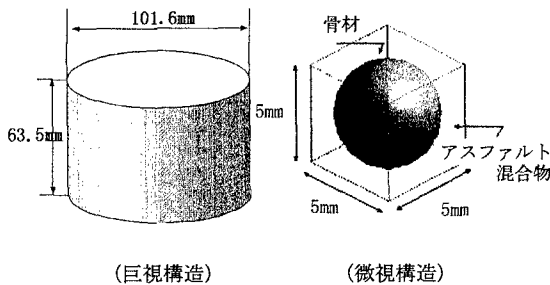
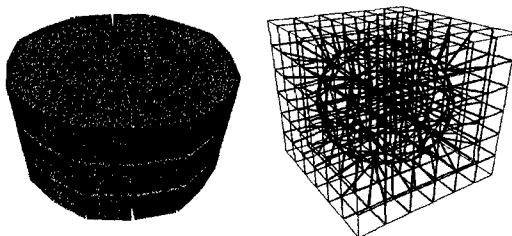


図-1 数値解析モデル



要素数:144 節点数:228 要素数:216 節点数:343
(巨視構造) (微視構造)

図-2 要素分割図

表-1 解析条件

骨材 (φ 5mm)	アスファルト混合物
$E(t) = 7.3 \times 10^5 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	$E(t) = \sigma(t)/\epsilon(t)$
$\nu(t) = 0.25$	$\nu(t) = -\epsilon_y(t)/\epsilon_x(t)$
$\eta_g(t) = \infty$	$\sigma_x(t) = 0.07 * (1 - e^{-0.005t}) + 0.0001t$
$\eta_k(t) = \infty$	$\epsilon_x(t) = 0.000265t$
	$\epsilon_y(t) = 0.000112t$
	$\eta_g(t) = 100 * E(t)/2(1 + 2\nu(t))$
	$\eta_k(t) = \infty$

5. 数値解析結果

図-3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。ここで実験結果における軸方向の応力は, 荷重値の時間履歴から, その荷重を受け持つ断面の総面積で割ることにより求めた値である。また数値解析結果においては, 実験とは異なり巨視構造の全要素の軸方向応力の平均値より応力値を決定している。この図から, 粘弾性体の定性的な挙動が捉えられることが分かる。

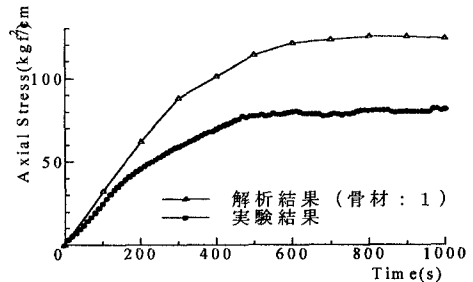


図-3 軸方向応力の時間履歴

6. おわりに

本報告では, 粘弾性複合材料の応力解析に対する均質化法の適用法を示し, その妥当性を検討すべくアスファルト混合物の一軸圧縮解析を行った。その結果, 内部に介在する材料の力学特性を考慮に入れた粘弾性体の定性的な挙動が捉えられた。また各材料の応力状態を知ることができた。

今後の課題として, 骨材の材料定数の違いによる検討を行い, 定量的に粘弾性体の挙動を捉えていく事。また微視構造の周期性を十分考慮に入れられる周期領域の取り方の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 富田佳宏:数値弾塑性力学, 養賢堂, 1990
- 2) J.M.Guedes and N.Kikuchi: Preprocessing and post-proccedsing for materials based on the homogenization method with adaptive finit element methhods. *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*. Vol.83 ,p143-198,1990
- 3) 寺田賢二郎, 菊池昇, 弓削康平:均質化法による複合材料の非線形解析, 構造工学における数値解析シンポジウム論文集 第19巻, p231-236, (1995)
- 4) 七田裕, 山田貴博, 和田章:均質化法による微視構造を考慮したコンクリート材料解析, 計算工学講演会. vol.1 ,p505-508,1996
- 5) 鈴木隆介:地質工学基礎図表集, 創造社, 1991