

固体 - 流体モデルを用いた均質化法に基づく舗装構造物の粘弾性解析手法の構築

中央大学大学院 学生員 中村 慎也
 アーク情報システム 正会員 久保田 聖
 鹿島建設 正会員 宇尾 朋之
 中央大学 正会員 檜山 和男
 東北大学 正会員 寺田賢二郎

1. はじめに

近年土木構造物の一つである舗装構造物において、アスファルト混合物（表層）のひび割れやわだち掘れが問題となっている。そこで著者らはアスファルト混合物内部の力学的特性を把握するために、弾性体を仮定した舗装構造物に対して均質化法を適用した動的有限要素解析を行ってきた¹⁾。しかしながら、粘弾性体であるアスファルト混合物は瞬間的に荷重がかかる場合には弾性的な挙動を示すものの、長期的に荷重がかかる場合には応力緩和やクリープといった粘弾性挙動が生じることとなる。このことから、厳密に数値解析を行うにはアスファルト混合物内部の力学的特性を考慮した上で粘弾性挙動を評価することが重要であるといえる。

そこで本論文では、粘弾性体を固体と粘性の大きな流体の混合体と仮定した際に得られる構成式²⁾に対して均質化法³⁾を適用し、交通荷重等の動的荷重にも対応できるよう動的解析手法を取り入れた新しい数値解析手法の構築を目的とする。また本手法では、アスファルト混合物の厳密なモデル化により生じる膨大な計算時間と計算機容量を削減するために並列化手法を取り入れている⁴⁾。数値解析例として、FWD 試験の動的数値シミュレーションを取り上げ、実験値との比較のもと本手法の有効性について検討を行った。

2. 均質化法に基づく動的粘弾性解析

(1) 仮想仕事の原理式

固体と流体の混合モデルを仮定した粘弾性体の動的な仮想仕事の原理式は、式 (1) のように表される。

$$a\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \omega\right) + b(u, \omega) + c\left(\frac{\partial u}{\partial t}, \omega\right) = \int_{\Gamma_t} \bar{t} \omega d\Gamma + \int_{\Omega} \rho \bar{b} \omega d\Omega \quad (1)$$

$$\begin{cases} a(u, \omega) = \int_{\Omega} \rho u \omega d\Omega \\ b(u, \omega) = \int_{\Omega} b_{ijkh}(x) \varepsilon_{ij}(u) \varepsilon_{kh}(\omega) d\Omega \\ c(u, \omega) = \int_{\Omega} c_{ijkh}(x) \varepsilon_{ij}(u) \varepsilon_{kh}(\omega) d\Omega \end{cases}$$

ここに、 $b_{ijkh}(x)$, $c_{ijkh}(x)$ は係数テンソルであり以下に示す通りである。

$$b_{ijkh}(x) = \begin{cases} E_{ijkh}(x) & \text{in } \Omega_s \\ \frac{1}{3} K^f \delta_{ij} \delta_{kh} & \text{in } \Omega_f \end{cases} \quad (2)$$

$$c_{ijkh}(x) = \begin{cases} 0 & \text{in } \Omega_s \\ 2\mu(\delta_{ik} \delta_{jh} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{kh}) & \text{in } \Omega_f \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 E_{ijkh} は固体部 (Ω_s) の弾性テンソルを、 K^f , μ はそれぞれ流体部 (Ω_f) における体積弾性係数、粘性係数を示している。また、固体部は線形弾性体を、流体部は圧縮性 Newton 流体を仮定している。

(2) 均質化法の適用

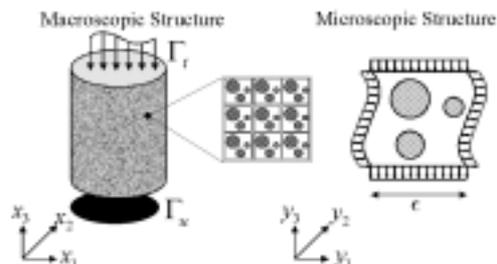


図-1 均質化法の概略図

アスファルト混合物内部の力学的特性を考慮した数値解析を行うために均質化法²⁾を適用する。図-1に均質化法の概略図を示す。互いに独立した巨視的座標系 X と微視的座標系 Y の関係は、スケール比 ϵ を用いると $y = x/\epsilon$ として定義される。各座標系の変位関数について、関係尺度 ϵ を用いて漸近展開形を行い式 (1) に代入し整理すると、最終的に微視的構造や巨視的構造における方程式、微視的応力の方程式が得られる。

微視的方程式

$$\begin{aligned} & \int_Y b_{ijlm}(y) \frac{\partial \Pi_l^{kh}(y, t)}{\partial y_m} \frac{\partial \omega_i^1}{\partial y_j} dy \\ & + \int_Y c_{ijlm}(y) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \Pi_l^{kh}(y, t)}{\partial y_m} \right) \frac{\partial \omega_i^1}{\partial y_j} dy \\ & = \delta(t) \left[\int_Y b_{ijkh}(y) \frac{\partial \omega_i^1}{\partial y_j} dy \right. \\ & \left. - \int_Y (b_{ijlm}(y) + c_{ijlm}(y)) \frac{\partial \Pi_l^{kh}(y, 0+)}{\partial y_m} \frac{\partial \omega_i^1}{\partial y_j} dy \right] \quad (4) \end{aligned}$$

また、 $\Pi_l^{kh}(y, t)$ は、微視的変位と巨視的ひずみを結びつける特性変位関数である。

巨視的方程式

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \rho^H \frac{\partial^2 u_k^0(x, t)}{\partial t^2} \omega_i^0 dx + \int_{\Omega} b_{ijkh}^H \frac{\partial u_k^0(x, t)}{\partial x_h} \frac{\partial \omega_i^0}{\partial x_j} dx \\ & - \int_{\Omega} g_{ijkh}^{bH}(0+) \frac{\partial u_k^0(x, 0+)}{\partial x_h} \frac{\partial \omega_i^0}{\partial x_j} dx \\ & + \int_{\Omega} c_{ijkh}^H \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_k^0(x, t)}{\partial x_h} \right) \frac{\partial \omega_i^0}{\partial x_j} dx \\ & - \int_{\Omega} g_{ijkh}^{cH}(t) \frac{\partial u_k^0(x, 0+)}{\partial x_h} \frac{\partial \omega_i^0}{\partial x_j} dx \\ & - \int_{\Omega} g_{ijkh}^{bH}(t) \frac{\partial u_k^0(x, t)}{\partial x_h} \frac{\partial \omega_i^0}{\partial x_j} dx \end{aligned}$$

KeyWords: 均質化法, 動的解析手法, 固体 - 流体モデル

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1815 FAX 03-3817-1803

$$\begin{aligned}
 & - \int_{\Omega} g_{ijkh}^{cH}(t) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_k^0(x,t)}{\partial x_h} \right) \frac{\partial \omega_i^0}{\partial x_j} dx \\
 & = \int_{\Gamma_t} \bar{t}_i \omega_i^0 d\Gamma + \int_{\Omega} \rho^H \bar{b}_i \omega_i^0 dx \quad (5)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\rho^H, b_{ijkh}^H, c_{ijkh}^H, g_{ijkh}^{bH}(t), g_{ijkh}^{cH}(t)$ は各均質化されたテンソルである。また、巨視的方程式の時間方向の離散化については Newmark の β 法を用いている。

3. 数値解析例

数値解析例として、FWD 試験の動的数値シミュレーションを取り上げた。解析に用いた舗装断面の概要について図-2に示す。舗装断面は表層、路盤、路床の3層で構成されており、表層部分を粘弾性体、その他の層については弾性体と仮定して扱うことにする⁵⁾。本解析では、路盤：250MPa、路床：140MPaを採用している。微視的構造については図-3に示す。微視的構造にはX線CT値によるデータに基づいて作成した実画像モデル(80*80*80分割)を用いている。また、本解析で使用した荷重はピーク値が約49kNであり図-4に示す通りであり、微小時間増分量は $\Delta t=0.0008$ である。

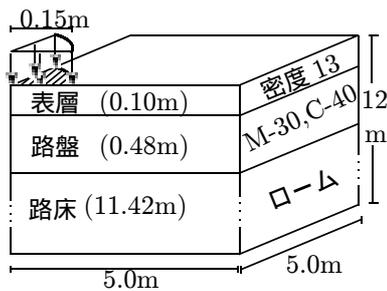


図-2 舗装構造物全体の1/4モデル

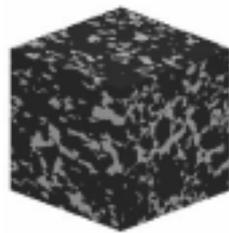


図-3 微視的構造

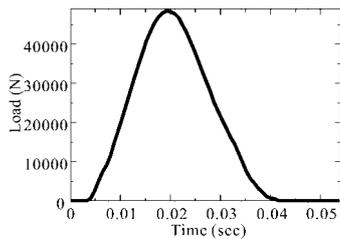


図-4 荷重の時間履歴

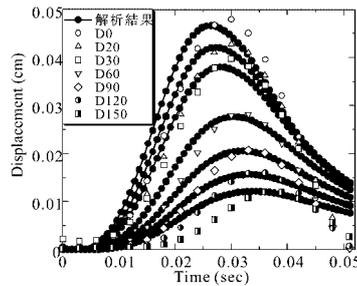


図-5 実験値と変位量の時間履歴の比較

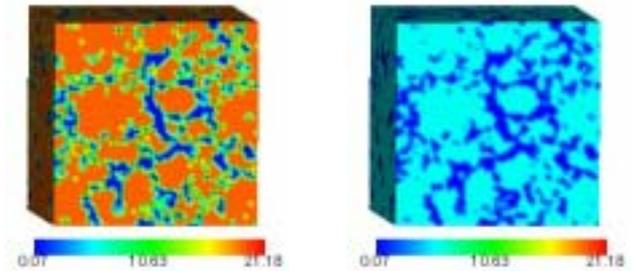
舗装表面における各変位量の時間履歴を図-5に示す。また、図の凡例における、例えばD20は中心から20cm離れた地点を表す。実験値と比較して、本解析結果は位相差について定量的に一致しているとは言い難いことがわかる。しかしながら、各たわみ量のピーク値に着目すると、実験値との比較において良い一致を示していることが確認された。舗装構造物の表層部における変位量の分布について、また微視的応力の時間履歴について図-6、図-7に示す。これらの図から、時間の経過におけるアスファルト混合物内部での個々の材料特性を考慮した上で表層部における変位分布を捉えられたことが確認された。



Time=0.028(sec)

Time=0.036(sec)

図-6 表層部の変位分布 (cm)



Time=0.028(sec)

Time=0.036(sec)

図-7 微視的相当応力時間履歴 (MPa)

4. 結論と今後の課題

本論文では、舗装構造物の応力解析手法として、固体と流体の混合モデルを仮定した構成式に対し均質化法と動的解析手法を取り入れた動的粘弾性解析手法の構築を行なった。本手法の有効性について検討するために、実験値との比較を行い以下の結論を得た。

- 均質化法を導入したことにより、アスファルト混合物内部の固体部と流体部における力学的特性を考慮した上で巨視的な粘弾性挙動を評価できたことが確認された。また、動的解析手法を導入したことにより、舗装構造物の表層部における変位分布の時間履歴を捉えることが可能となった。
- 変位量の時間履歴の比較のうち最大変位量については、本手法による結果は実験値と良い一致を示していることが確認された。ただし、解析結果と実験結果に位相のずれがみられ、この点については今後検討する必要がある。

今後の課題として、本手法のその他の数値解析例への適用によるさらなる精度の検証や移動荷重問題に対する有効性について検討を行うことが挙げられる。

参考文献

- 1) 伊田徹士, 宇尾朋之, 榎山和男: 積層 Mindlin 板要素を用いた均質化法による道路舗装体の有限要素解析, 応用力学論文集, Vol.5, pp.243-252, 2002
- 2) 寺田賢二郎, 伊藤孝, 菊池昇: 均質化法によって導かれる粘弾性体の構成則と数値解析, 計算工学会論文集, Vol.2, pp.1119-1122, 1997
- 3) 泉谷隆志, 宇尾朋之, 榎山和男, 寺田賢二郎, 田中弘: 固体-流体混合モデルを用いた均質化法による粘弾性解析, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.53, pp.420-421, 1998
- 4) 榎山和男, 西村直志, 牛島省: 並列計算入門, 日本計算工学会
- 5) 董勤喜, 姫野賢治, 八谷高好, 坪川将丈, 松井邦人: 動的荷重を受ける粘弾性多層構造の有限要素解析, 土木学会舗装工学論文集, 第8巻, pp.207-213, 2003, 12