I－A72　均質化法を用いたアスファルト混合物の粘弾性解析のための大規模並列計算手法の研究

中央大学大学院　学生会員　○牧野　孝久
中央大学理工学部　正会員　樫山　和男
鹿島建設（株）　正会員　宇尾　朋之

1. はじめに

アスファルト混合物などの複合材料の内部微視的構造を考慮に入れた数値解析手法として，近年，有効性が示されている均質化法がある．均質化法では，内部微視的構造を考慮に入れた巨視的挙動を求めるために，微視的構造の幾何形状を厳密にモデル化することが重要となる．近年では，X 線 CT から得られた実画像データを用いて微視モデルを作成するという研究も進められている．しかしながら，この様なモデル化に伴い，記憶容量や計算時間が大幅に増大し，実用上の問題となっている．

そこで本報告は，均質化法に基づくアスファルト混合物の応力解析を行うにあたり，計算時間の短縮及び記憶容量の削減を行うための効率的な並列処理手法を構築し，その有効性について検討を行うものである．数値解析例には，粘弾性解析を行い，微視的構造モデルには X 線 CT により得られたアスファルト混合物の断面画像データから 3 次元の画像データを作成し用いている．

2. 基礎方程式と均質化法

粘弾性体の支配方程式，構成式は次式で与えられる．

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_{ij}(t)}{\partial x_j} + \dot{f}_i(t) = 0 \tag{1}$$

$$\dot{\sigma}_{ij}(t) = D^e_{ijkl}\dot{\epsilon}_{kl}(t) - \dot{A}_{ijkl}\epsilon_{kl}(t) \tag{2}$$

次に仮想仕事の原理式を示す．ここで $t = 0+$ においては実空間上で式（3），$t > 0+$ においてはラプラス空間上で式（4）のように表される．$t = 0+$ では線形弾性体と同様の定式化となる．

$t = 0+$

$$\int_v D_{ijkl}\frac{\partial u_k}{\partial x_l}\frac{\partial \nu_i}{\partial x_j}dV = \int_s f_i \nu_i dS \tag{3}$$

$t > 0+$

$$\int_v (D_{ijkl} + s\eta_{ijkl})\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_l}\frac{\partial \nu_i}{\partial x_j}dV = \int_s \bar{f}_i \nu_i dS \tag{4}$$

次に $t > 0+$ において均質化法の適用を行う．均質化法では，対象とする巨視的構造が任意の周期性を持つ微視的構造で構成されているものと仮定する（図 1）．この巨視的構造と微視的構造の間に成り立つ特性変位関数 χ を定めることで，微視的構造を考慮した巨視的構造の材料定数を決定し，その結果から微視的構造の断面力及び変位が得られる．

$t > 0+$ における微視的方程式は Laplace 変換を用いた定式化[1]を行う．ラプラス空間上で得られた微視的方程式に対して逆ラプラス変換を行うことにより，$t > 0+$ における微視的方程式は次式となる．

$$\int_Y D_{ijkl}\frac{\partial \chi_k^{mn}(t)}{\partial y_l}\frac{\partial \nu_i^1}{\partial y_j}dY + \int_Y \eta_{ijkl}\frac{\partial \dot{\chi}_k^{mn}(t)}{\partial y_l}\frac{\partial \nu_i^1}{\partial y_j}dY = 0 \tag{5}$$

本報告では，特性変位関数 χ の計算が全計算時間の大部分を占めるため，微視的構造に関する計算部分に並列処理を行った．従って巨視的方程式に関する説明は省略する．詳しい定式化については参考文献 (1) を参照願いたい．

3. 並列計算手法

本報告では，Element by Element SCG 法を用いた微視的構造の計算部分 (図 1) に並列処理を行った[3]．

Element by Element SCG 法部分においては，次の 3 種類の通信を発生させることにより，並列計算が行われる．

①隣接領域間通信：領域境界上の節点に対して要素の重ね合せを完成させるための通信．

②周期境界条件通信：周期境界条件が 2 つ以上のプロセッサに別れている場合において，その要素の持つ情報の足し合せを行うための通信．

③全領域間通信：全領域でのスカラー量の総和を求めるために，全てのプロセッサ間で行われる通信．

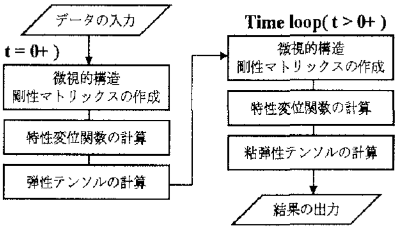

図 1 フローチャート

3.1. 領域分割

本並列化手法は領域分割法に基づいて構築されている．領域分割の注意点としては，(1) 計算負荷の均等化，(2) 通信量の最少化の 2 つが挙げられる．(1) に関しては，各小領域での要素数の均等化，(2) に関しては領域境界上の節点数の最少化を行えば良い．また，通信量が同等の場合でも，データをまとめて 1 度に通信したほうが，数回に分けて通信するより速い．つまり通信回数の低減のため，

KeyWords: 並列計算，均質化法，アスファルト混合物
〒112-8551　東京都文京区春日 1-13-27,
Tel:03(3817)1815，Fax:03(3817)1803

隣接領域数の最少化も重要である．

ここで，本報告で用いる2通りの領域分割例を図2に示す．図2 - 左のサイの目状に分割を行った場合，領域境界上の節点数の最少化が行える．一方，図2 - 右のスライス状の分割を用いた場合では，領域境界上と周期境界上での通信を最少回数で行える．以下，それぞれブロック分割，スライス分割と呼ぶ．

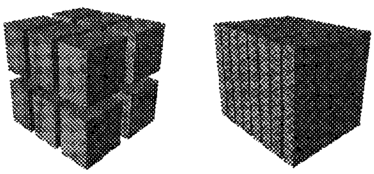

図2　領域分割モデル図

3.2.　領域分割の違いによる検討

領域分割の仕方が通信に及ぼす影響を調べるため，先に示した2通りの分割法を用いて通信時間の比較を行う．図3は，ＣＧ法1回における計算時間および各通信時間を示したものである．これらは各プロセッサの平均値である．図3よりブロック分割とスライス分割では，各通信時間の占める割合は異なるものの，全通信時間はほぼ等しく，並列化の効果には影響なかった．

本報告では分割の容易なスライス分割を用いて検討を行う．分割法を限定することにより，領域分割および通信データ作成のアルゴリズムが容易に構成できる．また，一般に並列処理では通信などのデータを事前に得ておく必要があるが，本手法では，領域分割データ，各通信データを，各プロセッサが主プログラム内で自分の領域のデータのみ作成させている．そのため，これらの膨大なデータをハードディスクに置く必要が無く，実用上の効率向上を図っている．また，これらの各データ作成アルゴリズムにはボクセル情報を利用しているので，非常に短時間で行える．

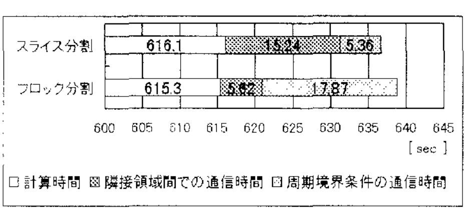

図3　各通信時間の比較

4.　数値解析例

微視的構造モデルには，X線CTにより得られたアスファルト混合物の断面画像データから画像処理を行うことにより3次元の画像データを作成し用いている[2]．また，要素数の異なる2種類のメッシュ，Mesh-L(要素数：120 × 120 × 120)，Mesh-S（要素数：64 × 64 × 64）を用いて解析を行う（図4）．

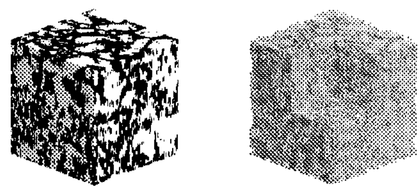

図4　微視的構造モデル（Mesh-L）

4.1.　並列処理の効果

並列処理を行った効果として，Mesh-L及びMesh-Sの並列化効率を図5に，実行ファイルのサイズを図6に示す．並列化効率は16プロセッサで95 %（対4プロセッサ）となり，高い速度向上が得られた．また，実行ファイルサイズに関しては，領域分割による記憶容量の分散により，単体で868[MB]に対して16プロセッサ使用時で129[MB]となった．

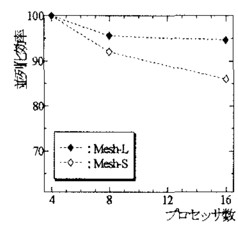

図5　並列化効率

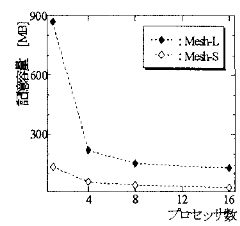

図6　記憶容量負荷

5.　おわりに

本報告では，均質化法に対する並列計算法を構築しその有効性を検討すべく粘弾性解析を行った．その結果，以下のことがわかった．

(1) 領域分割に基づく並列計算手法の構築を行い，高い速度向上と省メモリーな解析が実現できた．これにより均質化法に対する本手法の有効性が示せた．

(2) ブロック分割およびスライス分割では，隣接領域間での通信時間と周期境界条件の通信時間の割合は異なるが，全通信時間としてはほとんど差は無く，並列化の効果には影響は無かった．

(3) 領域分割データ及び通信データ等を主プログラム内部で作成することにより，実用上の効率向上が行えた．

今後の課題は，アスファルト混合物の巨視的および微視的な応力について，実験値等との定性的，定量的な比較検討を行う．

参考文献

1) 宇尾朋之,樫山和男,寺田賢二郎:ラプラス変換を用いた均質化理論に基づくアスファルト混合物の粘弾性解析, 応用力学論文集,Vol.1,p195-202,1998

2) 北田靖典, 泉谷隆志, 樫山和男: X線CTを利用したアスファルト混合物のモデリング手法の構築, 第26回関東支部技術研究発表会講演概要集,1999,3

3) 牧野孝久,宇尾朋之,樫山和男:均質化法による弾性解析のための高性能並列計算手法の開発, 土木学会第53回年次学術講演会,CS-210,p418-419,1998