The Society of Materials Science, Japan

局所的不均質部を有する構造体のグローバル/ローカルモデリング

大阪大学　正　高野 直樹　大阪大学　正　座古 勝
大阪大学[院]　学　○石園 学

1. はじめに

材料あるいは構造体中の不均質性について，計算手法の観点から分類を行うと図1のようにまとめられる．複合材料に代表される大域的な不均質性を有する場合は，ミクロな不均質性を均質化して等価なマクロモデルに置き換えるという研究が多く見られる．一方，異物や空孔欠陥などの局所的な不均質性を有する構造体の挙動解析を行う場合は，構造全体のグローバルな変形挙動だけでなく，その不均質部の近傍の三次元的な応力・ひずみ分布の把握が必要である．しかしながら，大規模な構造体中のごく限られた局所領域のモデル化を優先させると，構造全体を三次元要素で細かく分割しなければならなくなるという問題がある．

そこで本研究では，局所的不均質部に対し，不均質部を詳細にモデル化した局所メッシュを粗い大域メッシュに節点の整合性を無視して重ね合わせるだけでモデル化することが可能な有限要素メッシュ重ね合わせ法を用いて詳細解析を行う．さらに，三次元的な応力・ひずみ分布の把握が必要な不均質部付近に対しては三次元ソリッド要素でモデル化を行うが，全体構造に対してはシェル要素でモデル化を行うシェル－ソリッド結合による有限要素モデリング手法を導入する．著者らはこれまでに，メッシュ重ね合わせ法による細分割に関する基礎検討を行ってきた[1]が，さらにこの手法を一般化し，局所的な不均質性の問題に適用する．

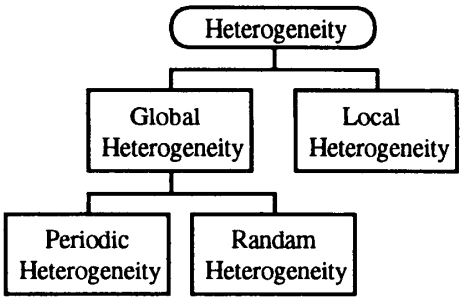
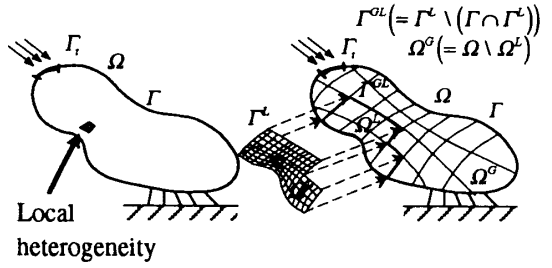


Fig.1 Classification of heterogeneity

2. 数値解析手法

本研究では，不均質部の詳細解析にメッシュ重ね合わせ法を用いることにより，粗い大域メッシュではとらえらることのできない局所的不均質部の応力・ひずみ集中をとらえることを目指す．この手法は，Fish[2]によってアダプティブ有限要素法の一連の研究としてhp法を発展させたs法と名付けられた手法に基づいており，類似の手法であるズーミング法と比較し，理論的な信頼性や精度[3]の点で優る．詳細な定式化[4]は割愛するが，図2に示す三次元弾性体領域Ωにおいて，大域メッシュのみを用いる領域Ω^G，局所メッシュを重ね合わせる領域Ω^L，それらの境界面Γ^{GL}の各領域での変位は$\{u^G\}$と$\{u^L\}$より式(1)で定義され，式(2)の剛性方程式から得られる．ここで$\{f^G\}$は外力，$[K^G]$，$[K^L]$はそれぞれ大域メッシュ，局所メッシュに対する剛性マトリックスであり，$[K^{GL}]$は両メッシュの相関を表す剛性マトリックスである．それぞれの剛性マトリックスは，具体的には式(3)から式(5)のようになる．ここで，$[D^G]$は均質材料（均質化された等価材料モデルを含む）よりなる領域Ω^Gの応力・ひずみマトリックスであり，一方$[D^L]$は異材から構成される不均質部を含む局所メッシュ要素毎に材料種類に応じて定義されるものである．本報では$[D^G]\neq[D^L]$という一般的な場合の定式化を示し，本手法が局所的に不均質部を有する構造体へも適用可能であることを示す．



(a) Problem domain　(b) Finite element model

Fig.2 Definition of the problem domain for global/local modelling

$$\{u\}=\begin{cases}\{u^G\} & on\ \ \Omega^G\\ \{u^G\}+\{0\} & on\ \ \Gamma^{GL}\\ \{u^G\}+\{u^L\} & on\ \ \Omega^L\end{cases}\quad\cdots(1)$$

$$\begin{bmatrix}[K^G] & [K^{GL}]\\ [K^{GL}]^T & [K^L]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{a^G\}\\ \{a^L\}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\{f^G\}\\ \{0\}\end{Bmatrix}\quad\cdots(2)$$

$$[K^G]=\int_{\Omega\setminus\Omega^L}[B^G]^T[D^G][B^G]d\Omega+\int_{\Omega^L}[B^G]^T[D^L][B^G]d\Omega\quad\cdots(3)$$

NII-Electronic Library Service

The Society of Materials Science, Japan

$$[K^L]=\int_{\Omega^L}[B^L]^T[D^L][B^L]d\Omega \quad \cdots (4)$$

$$[K^{GL}]=\int_{\Omega^L}[B^G]^T[D^L][B^L]d\Omega \quad \cdots (5)$$

また，全体構造寸法と局所的不均質部の寸法の差をつなぐため，シェルーソリッド結合を導入する．詳細な定式化[4]は割愛するが，全体構造のモデル化に用いるシェル要素と，局所的不均質部に用いるソリッド要素間をシェルーソリッド遷移要素で結合する．

3. 解析例

図3のように局所的に異材が含まれている平板を想定し，平板が引張り負荷を受けた場合に平板中に含まれる異材近傍の応力・ひずみを精度よく解析することを目的とする．提案するグローバル/ローカルモデリングによる有限要素モデルと境界条件を図4に示す．平板中に含まれる異材近傍を詳細にモデル化した局所メッシュを図のように重ね合わせ，詳細解析を行う．平板のヤング率E_1と異材のヤング率E_2の比は，2：1の場合を考えた．

不均質部近傍のひずみ分布（X方向垂直ひずみ，ZXせん断ひずみ）を図5，図6に示す．図には，提案手法による解析結果と全体をソリッド要素により細かく分割した従来の有限要素メッシュによる詳細結果の比較を示す．定量的な比較も詳細に行った結果，ひずみの相対誤差は0.4%程度であり，提案するグローバル/ローカルモデリングによる解析結果は，全体を細かく分割した従来の有限要素メッシュによる詳細解析結果とよく一致していた．

また，板のヤング率E_1と異材のヤング率E_2の比を10000：1まで変化させたが，応力・ひずみとも相対誤差は高々4%以内であった．ヤング率の比が10000：1の例は，空孔欠陥のような場合への適用可能性を示唆していると考える．

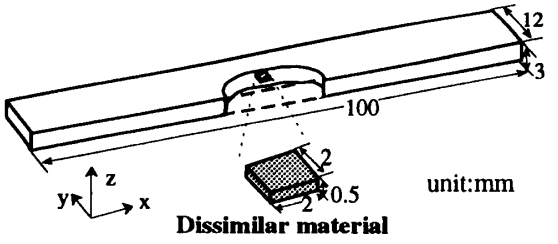
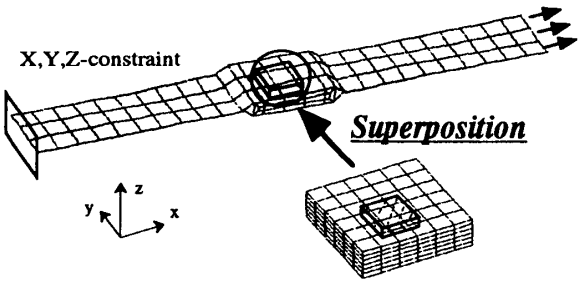
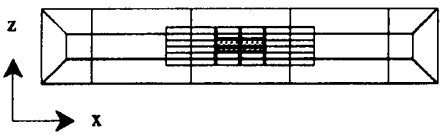


Fig. 3 Plate structure that contains dissimilar material in a local portion

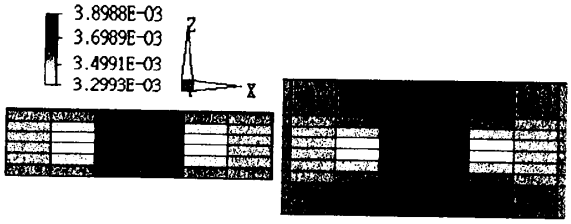


(a) Shell-solid connection and local mesh superposition



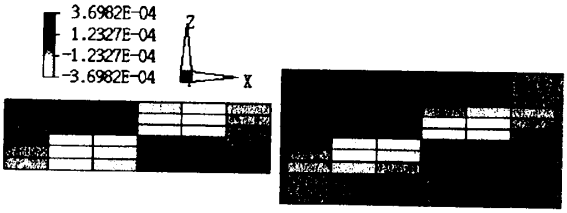
(b) Cross section nearby the dissmilar material

Fig. 4 Finite element model



(a) Proposed (b) Conventional fine mesh

Fig. 5 Distribution of X-strain



(a) Proposed (b) Conventional fine mesh

Fig. 6 Distribution of ZX-strain

4. 結言

本報では，局所的に異材が混合された平板を例に取り上げ，提案モデリング手法による解析結果を示し，詳細なソリッドモデルによる解析結果と比較することにより精度検証を行った．提案手法は，局所的不均質部の応力評価を目的とした場合，従来法に比べてデータ作成の手間が少なく精度良い解析結果が得られることから，種々の構造体の数値解析に有効であると考える．

今後，均質化法と組み合わせることにより，既報[1]で扱った大域均不均質性と，本報で取り扱った局所的不均質性が混在するような複合材料構造体への適用が可能となる．

参考文献

1. 高野直樹，柏木有希雄，大西慶弘，座古　勝，日本機械学会論文集(A編)，**65**，印刷中(1999).
2. J. Fish, S. Markolefas, R. Guttal and P. Nayak, Applied Numerical Mathematics, **14**, 135(1994).
3. 鈴木克幸，白石卓士郎，関勝載，大坪英臣，第48回理論応用力学講演会講演論文集，379(1999).
4. 高野直樹，座古　勝，石園　学，日本機械学会論文集，投稿中.

NII-Electronic Library Service