

均質化法を用いた不均質地盤の地震応答解析に関する基礎的検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○上田 恭平
正会員 室野 剛隆

1. はじめに

地震時の地盤挙動を有限要素法 (FEM) 等により評価する場合、地盤をある複数の領域に分割し、一般的には各領域内では一様な物性値を仮定することが多い。しかし、ミクロに見れば地盤は様々な大きさや形状の土粒子から構成され、本質的に空間的な不均質性を有している。また、地盤全体をマクロに捉えた場合、地盤改良としての柱状改良 (SCP 等) や格子状改良 (TOFT 等) もミクロな不均質性と解釈できる。佐藤ら¹⁾は、SCP 改良地盤を均質化法で平均化して地震応答解析を実施し、均質化法の有効性について検討している。しかし、これまで動的問題に対する均質化法の適用性、特に適用可能な振動数帯域に関しての議論はあまりなされていない。そこで、本研究では地震応答解析における均質化法の適用性について基礎的な検討を行った。

2. 均質化法の概要

均質化法^{例えば、2), 3)}は、ミクロ構造とマクロ構造をつなぐマルチスケール解析法の一手法であり、周期性を持ったミクロ構造からなる複合材料 (マクロ構造) を解析対象としている。ここに、ミクロ構造の一周期に相当する構成単位はユニットセルと呼ばれている。紙面の都合上、詳細な定式化の流れは省略するが、均質化法を用いた解析手順は以下のようになる。なお、ここでは2次元の線形弾性問題を対象とすることとする。

- ①: ミクロ構造の特性変位を求め、マクロ解析のための均質化された等価な弾性係数を算定する。
- ②: 手順①で得られた等価な弾性係数を用いて、(汎用 FEM プログラムにより) マクロモデルの解析を行う。
- ③: (必要に応じて) マクロモデルの解析結果より、ユニットセル内のミクロ的なひずみ・応力を評価する。

3. 均質化法を用いた2次元地震応答解析

地震応答解析に先立ち、マクロモデルを構成するミクロ構造 (図1参照) の特性変位を求め、マクロ解析のための等価な弾性係数を算定した。本検討では未改良部および改良部のせん断剛性をそれぞれ 1.26×10^5 , 1.26×10^6 kPa と設定しており、等価なせん断剛性は 6.97×10^5 kPa と評価された。このようにして得られた等価な弾性係数を FEM 解析プログラム FLIP⁴⁾ の線形平面要素に適用し、図1のマクロモデルを対象に2次元地震応答解析を実施した。まず、入力地震動として振動数 1Hz および 5Hz の正弦波を与えた結果、図1のモデル①では1Hz の場合は詳細モデルと簡略化された均質化モデルの地表面応答 (加速度、速度、変位) が概ね等しくなったが、5Hz の場合は両者で異なる結果が得られた (一例として、応答変位波形を図2に示す)。一方、モデル②においては、振動数に依らず詳細モデルと均質化モデルの結果が一致することが確認された (図3)。

続いて、鉄道の耐震標準⁵⁾に示す L2 地震動スペクトル II を用いて地震応答解析を実施した。その結果、モデル①では詳細モデルと均質化モデルの地表面応答波形が完全には一致せず (図4(a))、地表面加速度のフーリエスペクトル (図5(a)) から 3~4Hz よりも高い振動数

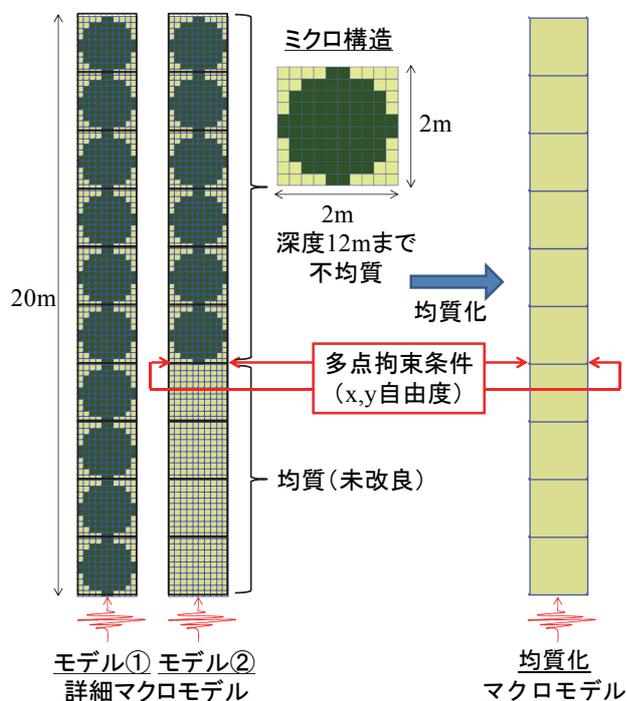


図1 解析で対象としたマクロモデル (2次元)

キーワード 地盤の不均質性, 均質化法, 地震応答解析

連絡先 〒185-8540 東京都分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7394

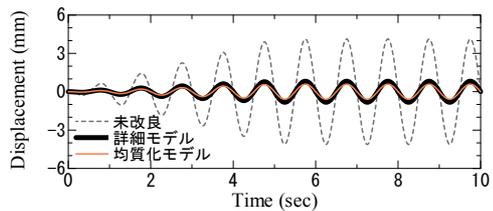
領域で両者の差が生じていることが確認された。一方、モデル②の場合、地表面応答の時刻歴波形は詳細モデルと均質化モデルで概ね一致し(図4(b))、地表面加速度のフーリエスペクトル(図5(b))より全振動数領域において均質化法の有効性が確認される結果となった。

4. まとめ

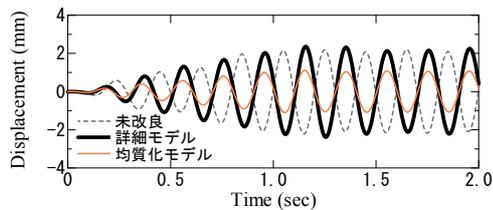
本研究では、不均質地盤の地震応答解析における均質化法の適用性について基礎的な検討を行った。均質化法による2次元動的FEMの結果、不均質性を有するミクロな地盤構造(地盤改良としての柱状改良や格子状改良等も含む)を均質化してマクロな物性値に置き換えることで、線形領域における地震時挙動を簡易に評価できることがわかった。これにより、ミクロ構造のスケールでマクロモデルのメッシュ分割を行う場合と比較して、解析に要する時間とコストは大きく低減されるものと考えられる。ただし、対象とするマクロモデルによっては、特に高振動数領域において均質化法の精度が低下するケースもあり、この点については今後さらに検討が必要である。

参考文献: 1) 佐藤ら: 3次元解析によるSCP改良地盤の均質化法を用いた平均化の妥当性に関する検討, 第40回地盤工学研究発表会, pp. 2255-2256, 2005. 2) 高野直樹: 均質化法による新しい数値シミュレーション, 日本複合材料学会誌, 27巻, 1号, pp. 4-11, 2001. 3) 石川ら: 均質化法を用いた部分改良地盤の等価S波速度の簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第613号, pp. 67-72, 2007. 4) Iai et al.:

Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992. 5) (公財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善出版, 2012.

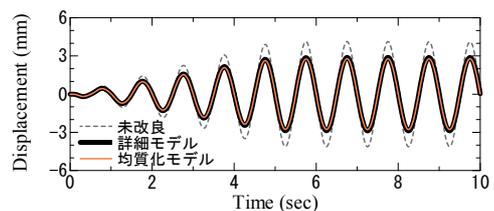


(a) 正弦波 1Hz 加振

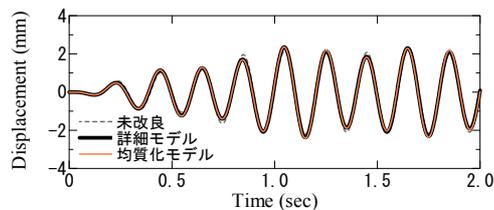


(b) 正弦波 5Hz 加振

図2 マクロモデル①の解析結果

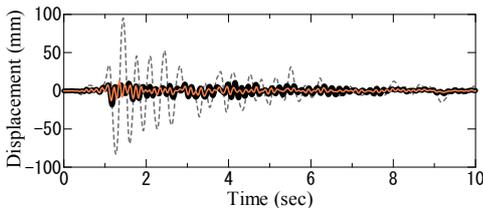
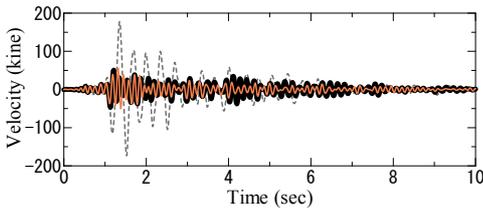
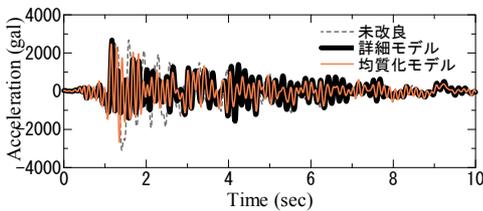


(a) 正弦波 1Hz 加振

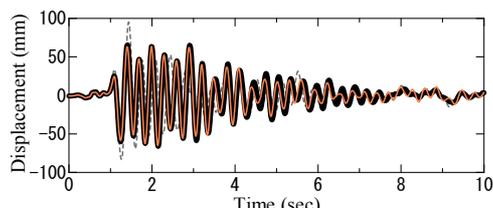
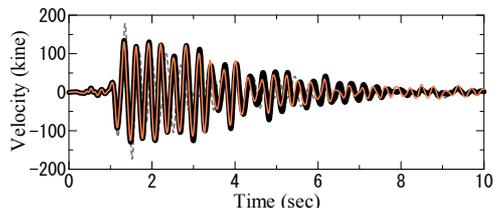
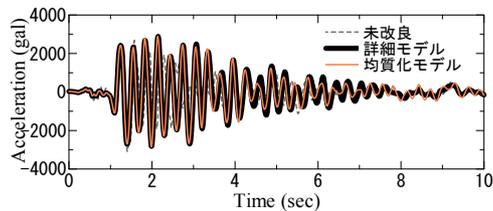


(b) 正弦波 5Hz 加振

図3 マクロモデル②の解析結果

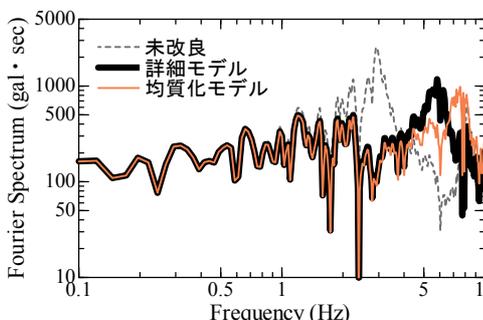


(a) マクロモデル①

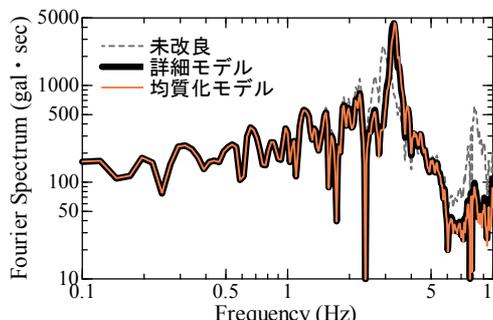


(b) マクロモデル②

図4 地震応答解析の結果 (L2地震動スペクトルII)



(a) マクロモデル①



(b) マクロモデル②

図5 地表面加速度のフーリエスペクトル (L2地震動スペクトルII)