

非線形地震応答解析の妥当性確認手法構築の試み -1次元地震応答解析事例-

日本大学 正会員 ○中村 晋

1. はじめに

米国機会学会¹⁾、日本原子力学会などは数値解析の妥当性確認と検証方法に関する学会標準を作成し、構造解析などの工学シミュレーションに対する品質や信頼性の保証に関する取り組みを実施している。これまでの取り組みの流れとして、社会基盤施設の施工に係わる品質保証と同様に、地震時挙動のような複雑な現象の設計や評価に数値解析を活用するためには、その品質や信頼性を向上させるための枠組みを構築することが必要不可欠と言える。

ここでは、数値解析のうち非線形解析に関する妥当性確認の体系の構築の試みとして、その考え方と事例について報告する。評価事例として、1次元地盤モデルに対する非線形地震応答解析を対象とした検討結果を報告する。対象とする解析コードは、時間領域での1次元非線形地震応答解析コード「DYNES3D」²⁾である。

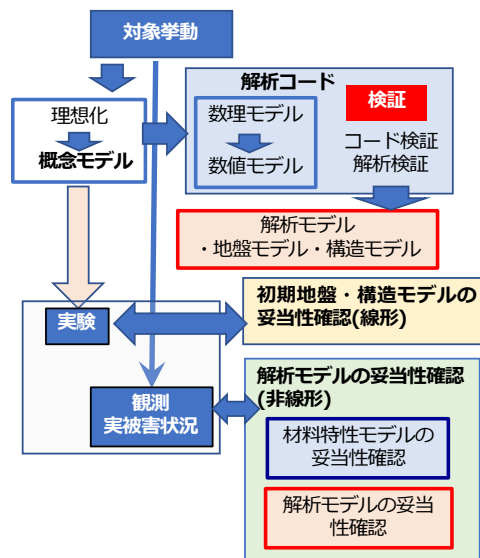


図-1 妥当性確認の実施手順

2. 検証と妥当性確認の考え方

解析モデルの妥当性確認の考え方は、ASMEのモデルV&Vの考え方を基本としているが、地盤や構造材料などの強非線形挙動のシミュレーションを対象としていることから、図-1のフローに示す手順を基本としている。ここで、対象挙動は、まず、所期の利用目的に即して必要となる力学系の概念モデルとして表される。概念モデルは、概念的に理想化した対象挙動の力学モデルに基づき、数理モデルとして数学的に表現され、数値モデルとしてデジタル計算機に実装されたモデルのことである。デジタル計算機に実装されたプログラムが解析コードとなる。その解析コードを用いたシミュレーションの実行に必要な対象全体の形状イメージを含む入力情報が解析モデルとなる。検証は、数値モデルが、その基礎となる数理モデルを忠実に表現し、かつ数値モデルの解をデジタル計算機の性能の範囲において導くことを確認する実施プロセスである。妥当性確認は、検証された解析コードを用い、対象地盤や構造物の構造や材料特性の非線形特性などの不確かさを踏まえて適切に設定した解析モデルのシミュレーションより得られた結果について、再現性による確からしさの程度、予測性能によるばらつき幅が所期の利用目的に即した判断基準を満足していることを評価する。その際、解析モデルの、まず、初期地盤・構造モデル、次に非線形材料特性モデルを含む解析モデルの妥当性確認をそれぞれの不確かさを適切に考慮して2段階で実施し、最適な解析モデル(最適モデル)が得られる。

3. 妥当性確認の検討対象概要

妥当性確認に関する評価事例作成には、東京湾内の埋め立て地にて実施された地震観測により得られた観測記録および地震計設置と合わせて実施された詳細な地盤調査データを用いた。対象地点では、鉛直アレー観測と、PS検層を含む詳細な地盤調査と、採取した地盤材料の特性を明らかにするため繰り返しせん断試験等の室内試験が行われた。鉛直アレー観測として表層の2点(GL-1.5m, 22.3m)で観測期間中に得られた16地震の観測記録を用いた。また、地盤情報として複数のPS検層によるS波速度構造、採取した地盤材料を用いた繰り返しせん断試験結果などが得られている。

4. 妥当性確認の評価事例

初期地盤・構造モデルの妥当性確認では、解析モデルに係わる不確かさのうち、地盤モデルのS波速度構造

キーワード 妥当性確認, 1次元地震応答解析, 非線形, 最適モデル

連絡先 〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1

日本大学工学部 Tel:024-956-8600

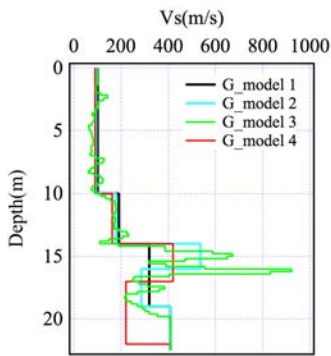


図-2 各地盤モデルのS波速度の深度分布の比較

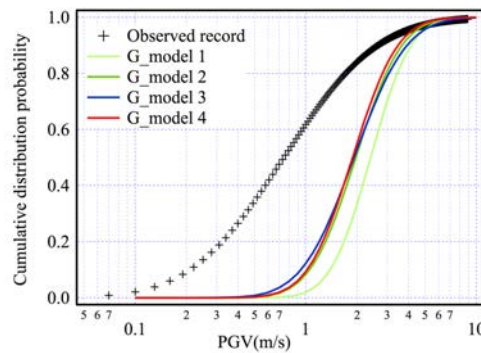


図-3 PGVに関する累積分布関数の比較

表-1 各地盤モデルに応じた周波数応答関数の比較

Response Index	Linear model				Non-linear model		
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	HD-model	RO-model	YN-model
PGA	0.71	0.39	0.11	0.08	0.32	0.10	0.26
PGV	0.29	0.07	0.09	0.02	0.16	0.03	0.05
AI	1.72	1.04	0.74	0.81	0.08	0.07	0.04
SI	0.16	0.08	0.08	0.06	0.18	0.01	0.07
SV1	2.13	2.01	1.24	1.39	0.05	0.02	0.02
SV2	2.48	2.46	2.44	2.42	0.07	0.09	0.00

(Linear model)に示す。これより同定された地盤モデル(Gmodel4)が各指標のうち4つの指標で最小値となり最適モデルとなった。

$$M^{SQR} = \frac{1}{|SQR^{exp}|} \int_{-\infty}^{\infty} |F_{SQR^{sym}}(y) - F_{SQR^{exp}}(y)| dy \quad (1)$$

次に、非線形応答に関する解析モデルの再現性の確認として、3つの非線形モデル (HDモデル, ROモデル, 吉田モデル) と繰り返しせん断特性との比較, 地表位置における40Gal以上の5地震について解析モデルのシミュレーション結果のうちPGA, PGVやSIなどの6つの評価指標についてASMEによる評価の考え方にに基づき評価を算出し, 表-1(Non-linear model)に示す。この結果, ROモデル, 次いで吉田モデルが最良もモデルとなった。他の評価基準値などの結果も踏まえると, 再現性という観点で, 同定された地盤モデル(Gmodel4)を地盤モデルとし, 吉田モデルを非線形材料特性モデルとした解析モデルが最良のモデルと得られた。

最後に, 得られた最良の解析モデルを用い, その検討と異なる条件, 地震動強さの大きな地震に対する地表面応答の感度分析を踏まえ予測性能の評価を行った。検討には既往の被害地震の中から観測された地震波の周波数特性や継続時間の異なるプレート境界地震, 内陸地震あわせて12地震, 17観測波を用いた。検討は, 解析モデルの基盤位置に入射波(2E)入力に対するシミュレーションより得られた地表位置のPGA, PGVおよびPGRD(相対変位)に着目した。入力波は最大値(2E)を100Gal, 300Gal, 500Gal, 700Galに振幅調整を実施した。その結果, 地震波の周波数特性に応じてPGA, PGVの大きさの幅は認められるが, これらは一般的な非線形応答の傾向であり, 不適切な解析結果が得られていないことから, 適切な予測性能を有していることを確認することができた。

参考文献: 1)ASME: Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME V&V 10-2006, The American Society of Mechanical Engineers, 2007., 2)吉田望: DYNES3D: 有効応力に基づく一元地震応答解析.2006, 3)吉田望,安田進,増田民夫: 地盤の不均質さが地震応答解析に与える影響に関するケーススタディ.第9回日本地震工学シンポジウム.1994.pp.223-228.

に着目し。地盤の調査結果を踏まえ, 図-2に示すPS検層に基づく地盤モデル(Gmodel 1), サスペンション法に基づく平均地盤モデル(Gmodel 2)と詳細モデル(Gmodel 3)および地震観測記録に基づいて同定された地盤モデル(Gmodel 4)の4つのモデル³⁾を用いた。地震記録のうち, 深度1.5mの位置で観測された加速度が40Gal以下の11地震を地象とし, シミュレーションで得られたPGA, PGVやSIなどの6つの評価指標について式(1)に示すASMEによる評価の考え方にに基づき評価値を算出した。式(1)における SQR^{exp} は平均値の差分を表す。また, 累積分布関数は対数正規分布によりモデル化し, 一例としてPGVに関する解析 $F_{SQR^{sym}}(y)$ および観測 $F_{SQR^{exp}}(y)$ の結果を図-2, 得られた地盤モデルに応じた評価値 M^{SQR} の比較を表-1