

非線形 1 次元地震応答解析法の妥当性確認手法 に関する一考察

中村 晋¹・吉田 望²・末富岩雄³

¹ 正会員 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

E-mail: s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

² 正会員 関東学院大学 総合研究推進機構 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東 1-50-1)

E-mail: nyoshida@kanto-gakuin.ac.jp

³ 正会員 株式会社エイト日本技術開発 東京支社防災保全部 (〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11)

E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp

ここでは、既往の解析手法やモデルに関する検証と妥当性確認の考え方をふまえ、まず、地盤・構造物の非線形地震応答解析の対象、その解析モデルや手法の妥当性確認を行うために基本的な考え方と手順を示した。次に、その考え方に基づき、地盤を水平成層と仮定した地盤の 1 次元モデルを対象とし、妥当性確認の評価事例を示した。評価の対象とした地点は、地盤構造、地盤材料特性、地震観測などの豊富な東京湾埋立地である。また、妥当性確認に用いた解析手法は、吉田により提案されている時間領域における解析コード「DYNES3D」による機能を用いた。妥当性確認は、地盤モデルの不確かさを踏まえ、応答解析結果と観測値の再現性により評価した。不確かさの程度は、初期モデルとしての最適モデル、応答解析に用いる最良モデルの評価に用いた。

Key Words: model v&v, validation, 1D ground model, non-linear seismic response analysis

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、各種社会基盤施設の耐震設計に関する基準類は、非線形地震応答解析を利活用し、耐震性能の評価を行う体系に改訂された。しかし、非線形地震応答解析を利用した設計や評価の信頼度という観点で、精度を保证するための枠組みは示されていない。米国機会学会、日本計算工学会および日本原子力学会では数値解析の妥当性確認と検証方法に関する学会標準¹⁾²⁾を作成し、構造解析や流体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利活用するためには、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。さらに、非線形地震応答解析法は、有限要素法、DEM、さらに最近の粒子法など、より複雑な挙動を評価できる手法の開発が実施されていることから、解析結果の精度を踏ま

え、品質や信頼性を保証する体系を早期に構築することは、それらの適切な発展を促進する意味でも重要となる。

これまでに作成された学会標準は大きくシミュレーションの品質保証を目的としたものと実験との比較などによる不確かさの評価など踏まえた解析モデルの検証と妥当性確認(以後、モデルV&Vと呼ぶ)に関するものに分けられる。土木分野においても、その2つの試みが行われている。前者は、土木学会技術推進機構が実施している技術評価制度の中で「土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕の規定に基づく数値解析」という分野が設けられ、数値解析の対象事例ごとにコンクリート標準示方書〔設計編〕に基づいたモデル化、入力値および応答値算定結果の解釈などの認証を行うというものである。後者としては応用力学委員会や地震工学委員会における関連小委員会でモデル検証(Verification)と妥当性確認(Validation)(以後、モデルV&Vと呼ぶ)に関する評価手法の構築などにむけた取り組みが行われている。

ここでは、地盤・構造物の非線形地震応答解析を対象とし、その妥当性確認のための手法の体系化を目的とし、

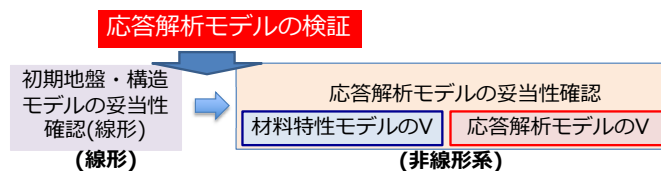


図-3 妥当性確認の実施手順

まず、モデルV&Vという観点で、土木学会地震工学委員会に設けられた「地盤と構造物系を対象とした非線形地震解析法の検証と妥当性確認のための研究小委員会（以後、V&V小委員会と呼ぶ）」で検討が進められている解析モデルの検証と妥当性確認に関する実施手順の基本的な考え方を示す。次に、その考え方に基づいた事例として、地盤の1次元非線形地震応答解析の解析モデルと解析手法に対する妥当性確認の評価事例を示す。対象は、地盤構造や地盤材料特性に関する情報⁴⁾、および鉛直アレー地震観測による地震観測データ⁹⁾など関連情報が豊富な東京湾埋立地とした。また、ここで用いた解析手法は、吉田により提案されている時間領域における1次元地震応答解析コード「DYNES3D」⁷⁾による機能であり、既存コードとの比較などにより検証が実施されているものとした。

2. 妥当性確認の基本的考え方

(1) 基本的考え方

前述の V&V 小委員会で検討を実施している V&V では、地震作用等に対する数値解析に用いる解析モデルおよび解析手法としている。ここで、数値解析の対象は、地震作用の評価、地盤の変形から崩壊に至る挙動、地盤-基礎-構造物の応答挙動、地盤-地中構造物の応答挙動などとなる。解析モデルとは、解析の対象となる地盤や構造物の挙動を、利用目的に即して必要となる数理モデルとして数学的に表現され概念モデルのことである。例えば、様々な次元（1、2 および 3 次元）の地盤モデル、構造物を含むモデルとして、橋脚-基礎-地盤系を表す SR モデル、地盤バネ-杭基礎-構造物モデル、有限要素-杭基礎-構造物モデルなどの対象物の挙動を踏まえた力学モデルのことである。解析手法また解析コードはそれを数値モデルとしてデジタル計算機に実装したものである。

対象としている V&V の考え方は、ASME の V10 など示されているモデル V&V の考え方を基本としているが、機器を主対象とした ASME 基準と異なり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 のフローに示したように2段階の

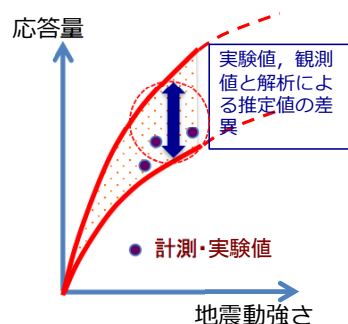


図-2 再現性の評価イメージ

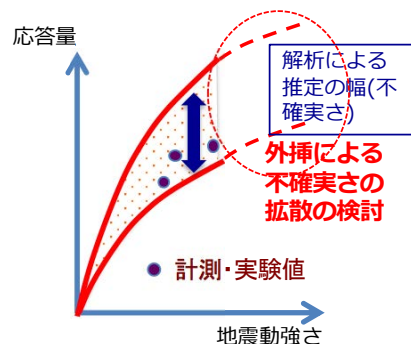


図-3 予測性能の評価イメージ

手順で実施することを基本としている。まず、解析モデルの初期地盤・構造モデルに関する不確実さを踏まえ、最適モデルを選定するという観点での妥当性確認を実施する。次に非線形材料特性モデルの不確実さの影響も含む解析モデルの妥当性確認を実施する。

検証とは、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プロセスと定義する。

妥当性確認とは、対象とする実現象に対して、解析モデルによる数値解析結果が、所期の利用目的に照らして、その再現性と予測性能という観点で満足できる程度の精度を有していることを確認するための実施プロセスと定義する。ここで、再現性とは、図-2に示したように既存観測、実験結果と不確実さを考慮した解析モデルのシミュレーションで得られた応答の評価指標に関する不確かさの程度を表す。また、予測性能は、図-3に示すように、再現性に基づき妥当性を確認した条件と異なる条件に対して、不確実さを考慮した解析モデルのシミュレーションより得られた応答の評価指標の不確かさを表す。再現性に基づき妥当性を確認した条件と異なる条件に対して、確認した解析モデル(BE)の評価指標に関する計算結果の不確かさの程度を表す。ここで、再現性の確認と異なる条件とは、例えば異なる構造形状、異なる入力条件、さらに、構造物全体の挙動、地盤と構造物の相互作用の

影響を踏まえた挙動などの条件が対象となる。強非線形領域におけるモデルの不確かさが計算結果に及ぼす影響、例えば極端な値の変化を含む不安定性に関する確認などを把握する。ここで、対象とするモデルは観測/実験において、観測や実験で実施した条件と異なる場合、実被害挙動の評価モデル、設計対象のモデルがある。いずれも、再現性の確認に際して設定した最良モデル(Best estimate model)を用い、構成材料特性の不確かさおよび地震作用の不確かさ(波形、強度特性など)を考慮したシミュレーションによる評価指標の不確かさにより評価する。その結果に、モデルの不確かさも加味して、予測性能の評価を行う。ここで、モデルの不確かさは、再現性の評価に際して得られた値より大きな値になると考えられるので、適宜設定することが必要となる。

(2) 評価指標

再現性や予測性能の確認に必要な解析モデルのシミュレーションより得られる応答量のうち、その確からしさの程度を評価に必要な物理量を応答指標、確からしさの評価を評価基準とし、応答指標と評価基準を合わせて評価指標と呼ぶことにする。

ASMEによるガイドラインでは、評価指標の確からしさの評価として、2つの方法が示されている。いずれも、応答量の計測基準 M^{SQR} (SQR : System quality of response) を評価基準として評価している。ここでApproach2と呼ばれている複数の実験データなどがある場合には、実験データの不確かさやシミュレーション結果に基づく解析モデルの不確かさ(偶然的な不確かさ)より、 M^{SQR} を式(1)により推定することにより評価する方法である。ここで、 M^{SQR} は平均の相対誤差を正確に表す量である。

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

ここで、 $F_{SQR^{sym}}(y)$ 、 $F_{SQR^{exp}}(y)$ は評価指標 y に関する確率密度関数の累積分布関数、 $|\overline{SQR}^{exp}|$ は実験値の平均値を表す。

式(1)中にも示されている既存観測、実験結果と解析モデルのシミュレーション結果との差は、解析モデルによる推定誤差 Δ_{model} と考えることができる。ここで、次式のように評価指標 Y に対するシミュレーション結果 Y_{Sym} 、観測/実験結果 Y_{Exp} との差異が真値からのシミュレーション結果のばらつき δ_{sym} と真値からの観測/実験結果のばらつき δ_{model} として表すことができる。後者は主として観測/実験の計測誤差などに起因し、それは真値に対して小さいつまり観測/実験で得られた結果を真値と仮定すると、式(2)のように Δ_{model} はモデルの不確かさを表す δ_{model} と考えることができる。ここで、 δ_{model} は地

盤や構造材料の特性を表すモデルやそのパラメータの不確かさとモデル自体の不確かさを含むモデルの不確かさであると考えることができる。しかし、観測/実験、特に実験においては材料特性に関するモデルやパラメータを設定できる場合には主として、モデル自体の不確かさと考えることができる。

$$\Delta_{model} = Y_{Sym} - Y_{Exp} = \delta_{Sym} - \delta_{Exp} \doteq \delta_{model} \quad (2)$$

すると、ASMEで示されている基準のみならず、次式に示す推定誤差と実験値との比やシミュレーション値と実験値との比のように相対誤差を表す基準なども、評価基準(Mrq : Merics of response quality)有用であると考えられる。

$$Mrq = \Delta_{model}/Y_{Exp} \text{ OR } = Y_{Sym}/Y_{Exp} \quad (3)$$

(3) 妥当性確認の手順

図-1に示したフローのうち、初期地盤・構造モデルの妥当性確認は、初期状態、つまり線形応答の範囲における地盤構造および地盤/構造材料の弾性定数を対象として、観測/実験との比較による再現性の評価により、モデルの不確かさとともに、最適モデル(Best estimate model)の設定を行う。ここで、最適モデルとしてのモデルは、あくまで対象とした解析モデル、例えば地盤モデルについては1次元モデル、2次元モデル、また3次元モデルといった解析モデルに応じて地震波の伝播の再現性がもっとも良いモデルのことであり、地質モデルとは必ずしも対応しない場合もある。また、比較に用いる観測/実験データについても、その特性を分析し、再現性の評価に有用なデータの抽出を行うことが必要である。

応答解析モデルの妥当性確認は、非線形応答の範囲における地盤/構造材料の非線形モデル、そのパラメータおよびそれを用いた非線形応答解析結果の妥当性を再現性、および予測性能という観点で、モデルの不確かさを確認することである。観測/実験との比較による再現性の評価に際して、モデルの不確かさとともに、地盤材料の特性を表すモデルとそのパラメータなどの最適モデル(Best estimate model)の設定を行う。地盤/構造材料の妥当性確認に必要な材料特性に関する実験データなどがない場合には、適切にその不確かさを考慮することが必要であるが、モデルの不確かさには材料特性の統計的な不確かさの影響を考慮していることに留意が必要となる。

3. 検討に用いた観測地震および地盤条件の概要

ここでは、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

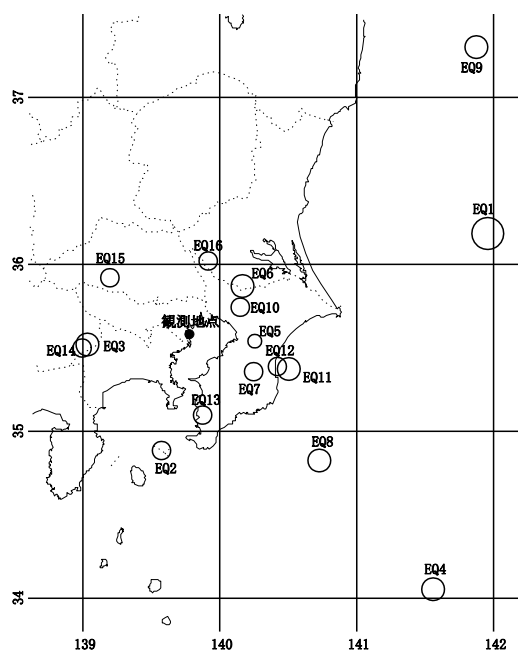


図-4 観測された16地震の震源位置分布

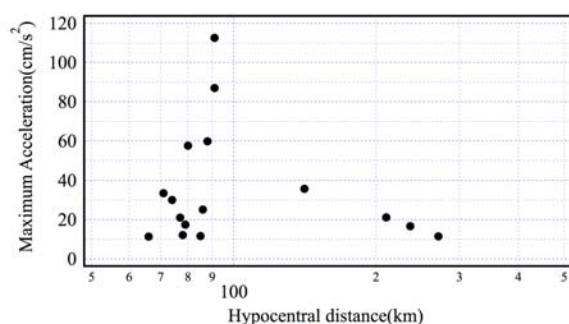


図-5 観測記録の地表における最大加速度と震源距離の関係

て実施された詳細な地盤調査データを用いる。

地震観測は地表 (GL-1.5m) から深度方向にGL-22.3m, GL-38.5m, GL-80.0mまでの4点の鉛直アレー観測が実施された。観測期間中、1987年千葉県東方沖地震 ($M_j=6.7$) を含む16地震が観測され、それらの震源位置を図-4、震源距離と最大加速度との関係を図-5に示す。ここで、最大加速度は水平2成分のうち大きな値を示している。震源位置の分布には大きな偏りも認められず、最大加速度も10Galから110Gal程度と特異な値を有する記録は認められない。このことから、全ての観測記録を妥当性確認に活用することにした。

また、地盤調査として、地震観測地点から約40m離れた点で実施されたダウンホールPS検層とサスペンションPS検層の結果を図-6に示す。ダウンホール法は受振点間隔を50cmとし、サスペンション法は測定ゾンドの受振器間隔が1mとなっているため、測定ゾンドを20cm間隔で移動しながら重複して測定が実施された。ダウンホール法とサスペンション法により得られたS波速度を比較すると、GL-14~16mの位置で著しく異な

っている。その深度位置におけるN値も30~40と大きくなっており、サスペンション法によるS波速度の変化は局所的な地盤の変化と対応している。さらに、地盤材料の非線形特性に係わる繰り返しせん断特性試験も図-7に一例を示すように1.0m間隔で詳細に実施されている。残念ながら強度特性試験は実施されていないが、繰り返しせん断特性試験より得られたせん断剛性比とせん断ひずみの関係より推定する。

4. 評価指標

ここでは、水平成層近似された1次元地盤モデルを解析モデルとし、解析コード「DYNES3D」によるシミュレーションを実施する。1次元地盤モデルは、地表における設計震度などの評価に用いる最大加速度 (PGA)、地震時の震度と関連する最大速度 (PGV) などの最大値指標がその応答指標として良く用いられている。最近では、地震動の有するエネルギーと関連するアライアス強度 (AI)、スペクトルのスカラー指標であるスペクトル強度 (SI) なども、地盤災害などと関連づけられる指標として用いられている。さらに、スペクトル強度 (SI) と合わせて周波数特性を直接表す特定周期のスペクトル振幅なども、応答指標として用いられている。

ここでは、多様な視点から最大値指標として PGA, PGV, さらにアライアス強度、周波数特性として、スペクトル強度と速度応答スペクトルにおける地盤の1次、より高次の3次卓越周期近傍の速度振幅を応答指標、その確からしさの評価基準として、ASMEによる応答量の計測基準、およびシミュレーションによる応答量と観測値の比の2種類の評価基準を評価指標として用いる。

5. 初期地盤・構造モデルの妥当性確認

(1) 確認に用いる地盤モデル

ここでは、モデルの不確実さを踏まえた再現性の確認および応答解析モデルの妥当性確認に用いる最適モデルの選定を行う。モデルとは地盤材料特性を含む地盤モデルのことであり、以後、地盤モデルと呼ぶ。

用いる解析手法は1次元の非線形地震応答解析コードであり、対象地盤を水平成層近似した地盤モデルを検討の対象とする。その地盤モデルの初期モデルとして妥当性確認を行う際、地盤応答の再現性に影響を及ぼす不確実さ因子として、地盤構造、特にS波速度構造、単位体積重量、減衰定数、地下水位などがある。ここでは、不確実さ因子として、応答に及ぼす影響が大きく、図-6に示したように調査法による不確実さも大きなS波速度構造のみを考慮し、他は確定値とした。

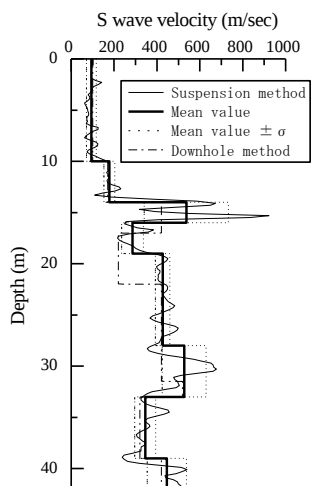


図-6 調査法に応じた S 波速度構造の比較

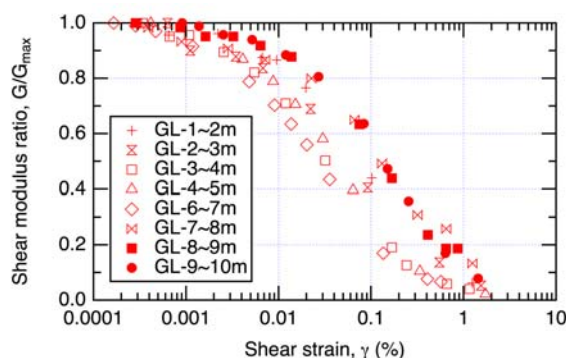


図-7 繰り返しせん断特性試験結果の一例

地盤モデルは、S波速度構造を考慮し、以下に示す4つのモデルを対象とした。また、各モデルは設計基盤位置に相当する地表から2番目の地震観測点より上の地盤を対象とした。ここで、サスペンション法は前章で示した20cm間隔で求めた結果を詳細モデルとし、その局所的な変化を平均化したモデルを平均モデルとした。さらに、地盤調査に基づくモデルではないが、安中らが最大加速度の小さな地震観測記録に基づいて同定した地盤モデルを検討に加えた。各地盤モデルのS波速度の深度分布の比較を図-8、地盤モデル3を除く各地盤モデルの層厚および単位体積重量を表-1、さらに各地盤モデルより得られる周波数応答関数の比較を図-9に示す。地盤モデル作成に際して、層厚は1.0mを基本とし、地盤モデル3は速度の得られた最小厚さ0.2mとした。

- ・PS 検層に基づく地盤モデル(G_model 1)
- ・サスペンション法に基づく平均地盤モデル(G_model 2)
- ・サスペンション法に基づく詳細地盤モデル(G_model 3)
- ・地震観測記録に基づいて同定された地盤モデル(G_model 4)

地盤モデルに応じた周波数応答性状のうち、1次固有周波数に着目すると、同定による地盤モデルが0.58秒程度からPS検層に基づく地盤モデルの0.47秒まで0.1秒程

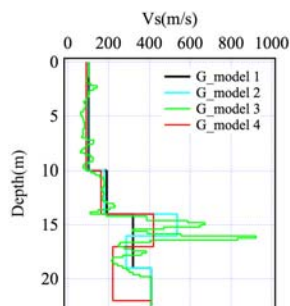


図-8 各地盤モデルの S 波速度の深度分布の比較

層厚 (m)		単位体積重量 (kN/m ³)
G_Model	G_Model.	
.1,2	4	
2	2	16.66
8	8	16.66
4	4	18.62
2	3	17.15
3	5	17.15
-	-	17.64

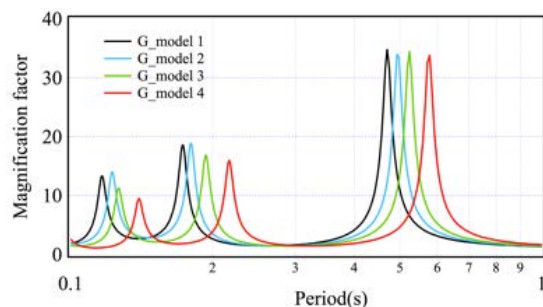


図-9 各地盤モデルに応じた周波数応答関数の比較

度の差異が認められる。

(2) 再現性の評価と最適地盤モデル

再現性の評価は、地盤内の応答が線形応答の範囲と見なすことができる地表における最大加速度が40Gal以下の12地震の記録を用いて実施する。また、各地震における入力地震動は、地中GL-22.3mにおける観測記録中で最大加速度が得られた方向の成分とし、その成分に関する地表の応答解析結果と観測値の比較を再現性の評価に用いる。また、解析に用いる地盤材料特性は弾性体とし、初期減衰にはRayleigh減衰を用い、 α は0、 β は0.01を用いた。

まず、地表で観測された記録と線形応答解析により得られた加速度波形の比較の一例として、最大加速度が10Gal程度の地震(Mj=5.7、関東南沖)について図-10に示す。3.5秒付近の最大加速度発現時刻については、正負のピーク時刻とその時に振幅レベルが概ね対応している。しかし、それ以降の時刻においては観測記録に見られる1次固有周期に近い震動成分を除き、短周期成分の再現性は必ずしも十分とはいえない。さらに、比較の一例として示した加速度波形より得られた速度応答スペクトル(h=5%)の比較を図-11に示す。いずれも応答解析によるピークを与える周期における値は観測値よりかなり大きな値となっているが、地盤モデル3と4は卓越する周期は概ね対応している。さらに、12地震に対する2つの地盤モデルG_model 1とG_model 4の線形応答解析より得られた最大加速度および最大せん断ひずみの深度分布の比較を図-12に示す。GL-15m以深のS波速度構造の差異に

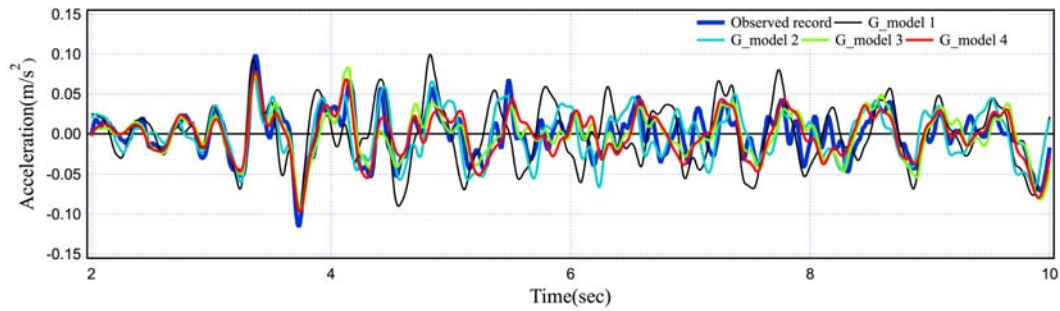


図-10 地表における観測記録と応答解析により得られた加速度波形の比較の一例

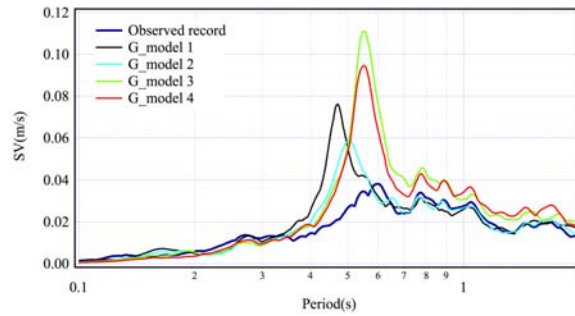


図-11 速度応答スペクトルの比較の一例

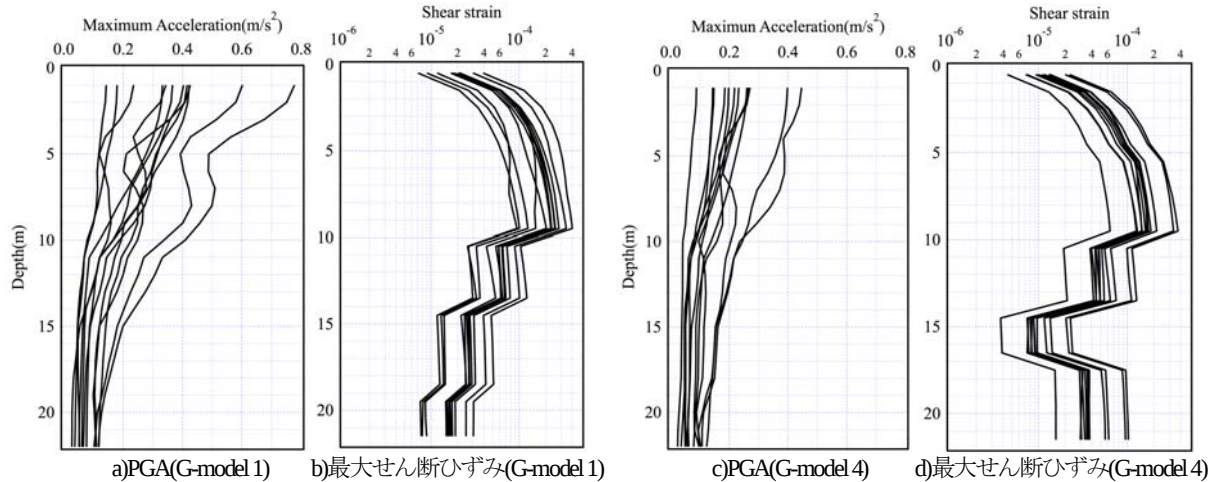


図-12 応答解析より得られた最大加速度(PGA), 最大せん断ひずみの深度分布

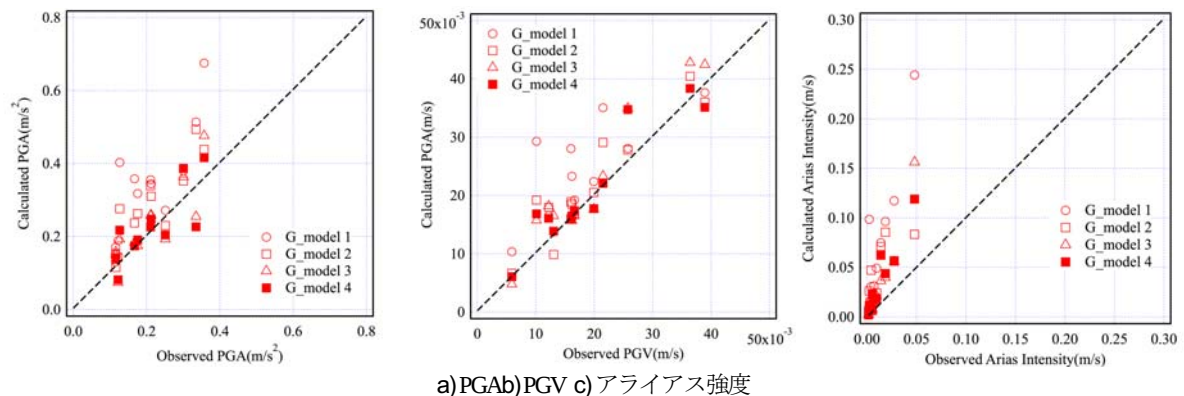


図-13 最大値指標に関する地表の観測値と応答解析結果の比較

起因し、それ以深、またGL-10m以浅の表層における最大せん断ひずみがG-model 4の方が少し小さく、最大加速度も小さな値となっている。

次に、12地震に対する応答解析より得られた評価指標

のうち応答指標として、最大値指標についての観測値との比較を図-12に示す。地盤モデルによる差異は、いずれの指標についても認められるが、PGAとPGVの応答解析結果は観測地と同程度またそれ以上、アライアス強度

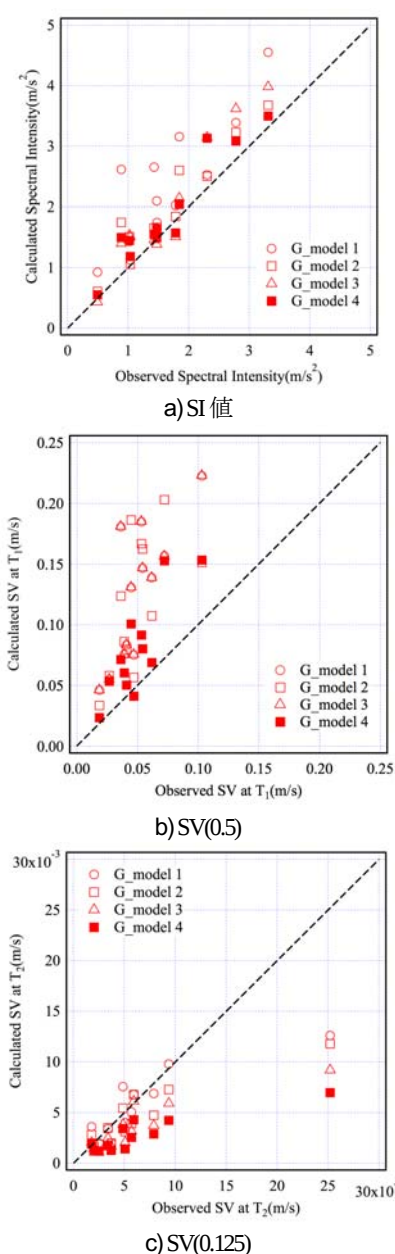


図-14 周波数応答指標に関する地表の観測値と
応答解析結果の比較

については観測値に比べ応答解析結果が地盤モデルによらず大きな値となっている。次に、応答指標のうち周波数応答指標について観測値との比較を図-14に示す。ここで速度応答スペクトルは各地盤モデルの1次、3次固有周期の平均的な値0.5秒、0.125秒の2周期について比較を行った。最大値指標と同様に地盤モデルに応じた差異が認められ、スペクトル強度の応答解析結果は観測地と同程度またそれ以上、0.5秒の速度応答スペクトル振幅は、応答解析結果が観測値より大きく、0.125秒の振幅は応答解析結果が観測値より小さな値となっている。

最後に、得られた最大値指標および周波数応答指標について再現性を定量的に評価するため、ASMEによる評価基準(MSQR)と応答解析結果と観測値の比(Ratio)による

表-2 各評価指標に関する応答解析結果と観測値との比の平均
と変動係数の比較(青ハッチ：最小，黄色ハッチ：最小から2番目)

Response Index	Evaluation Metrics	Ground structure model of shear wave velocity			
		G_Model 1	G_Model 2	G_Model 3	G_Model 4
PGA	MSQR	0.71	0.39	0.11	0.08
	Ratio(Sym/obs)	1.70(0.33)	1.37(0.24)	1.12(0.25)	1.09(0.27)
PGV	MSQR	0.29	0.07	0.09	0.02
	Ratio(Sym/obs)	1.47(0.35)	1.18(0.25)	1.14(0.21)	1.11(0.20)
AI	MSQR	1.72	1.04	0.74	0.81
	Ratio(Sym/obs)	8.07(1.36)	4.30(0.83)	2.61(0.31)	2.88(0.43)
SI	MSQR	0.16	0.08	0.08	0.06
	Ratio(Sym/obs)	1.53(0.35)	1.24(0.21)	1.20(0.21)	1.18(0.18)
SV1	MSQR	2.13	2.01	1.24	1.39
	Ratio(Sym/obs)	2.57(0.35)	2.43(0.36)	1.44(0.28)	1.59(0.27)
SV2	MSQR	2.48	2.46	2.44	2.42
	Ratio(Sym/obs)	1.22(0.35)	1.01(0.32)	0.78(0.32)	0.63(0.37)

評価基準の2つについて算出し、表-2に示す。後者の評価基準については、その平均値と変動係数（表中の括弧内）を示す。また、表には、MSQRが小さい順、またRatioの平均値が1.0に近い順に薄い青，黄緑でハッチしている。これより確からしさという観点でみると、地盤モデルG_model 4はPGA，PGVおよびSIの3指標は相対誤差を表すMSQRが10%以下，Ratioも平均値が1.0に近い値であり、かなり確からしいといえる。他指標については、他の地盤モデルに比べて各応答指標の評価基準値より確からしさが2番目となっている。合わせてサスペンション法により得られた詳細地盤モデルG_model 3は、PGA，PGVおよびSIの3指標はG_model 4に次いで確からしい評価基準となっており、他の応答指標と比べても、G_model 1に次いで確からしさを有している。

以上より、同定より得られた地盤モデルG_model 4は、それに次ぐ確からしさを有するサスペンション法による詳細モデルG_model 3ほどではないが、図-8よりGL-14～16mとその下部におけるS波速度の基本的な傾向は類似しており、周波数増幅特性も含めて地震動の特性を最も確からしく再現できるモデルである。一般に、1次元地盤モデルを対象とした解析モデルは地盤構造を水平成層近似したモデルであり、そのような地盤モデルを対象とした重複反射理論を用いて地震記録に基づいて同定された地盤構造モデルは地盤の剛性について適切にモデル化していると考えられる。しかし、このような同定地盤モデルが得られている地点は多くないので、G_model 3を次善の地盤モデルとすることもできるが、ここではG_model 4を最適な地盤モデルとして、応答解析モデルの妥当性確認に用いる。

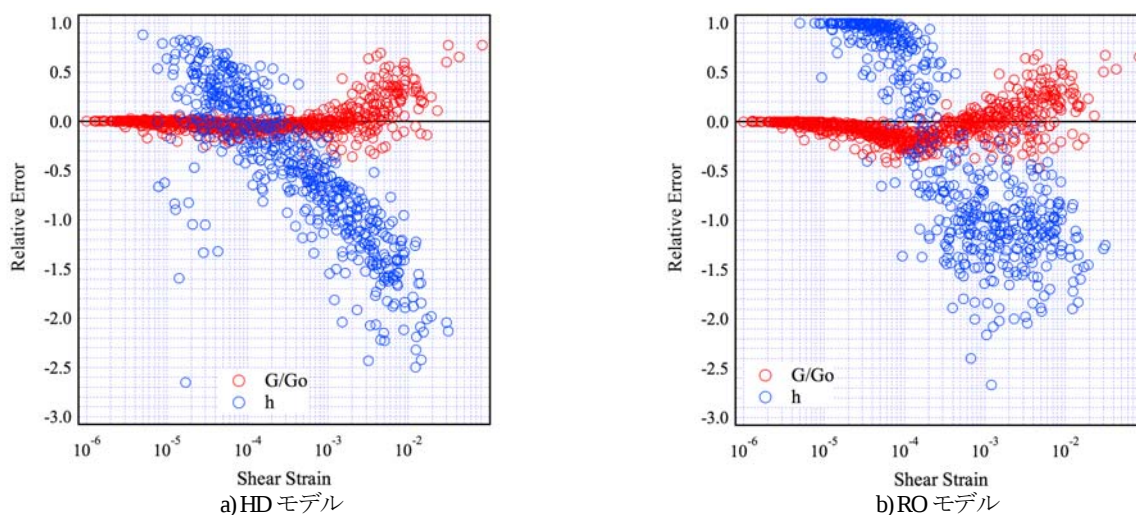


図-15 実験による繰り返しせん断特性と材料特性モデルによる計算値の相対誤差とせん断ひずみの関係の比較

5. 応答解析モデルの妥当性確認

(1) 材料特性モデルの妥当性確認

ここでは、材料特性モデルの不確かさを踏まえた非線形挙動の再現性の確認を実施する。構造材料のうち地盤材料の非線形特性を表すモデルには、HD モデルなどの数式モデルから複雑な応力-ひずみ関係の推定が可能な弾塑性構成モデルまである。非線形特性のモデルの選択は、破壊を伴う大変形挙動、また繰り返し強非線形挙動など対象とする現象に応じて実施することが必要である。さらに、対象地点より採取した不攪乱資料を用いた繰り返しせん断特性や強度特性などの土質試験結果が得られていることは多くないため、得られる情報の程度も加味して、非線形特性のモデルを選択することが必要となる。

ここでは、地盤モデルの深度方向に繰り返しせん断試験が実施されているので、非線形特性の不確かさとして、数式モデルである HD モデル (HD_model)、RO モデル (RO_model) および吉田モデル (YN_model)⁸⁹⁾の3モデルを非線形特性のモデルとして用い、それらの再現性を確認する。

各モデルのパラメータのうち、まず、HD モデルはせん断弾性係数、基準ひずみ γ_b 、またせん断強度の2つである。せん断弾性係数は、前章で設定して最適地盤モデルのS波速度 V_s と単位体積重量より算出する。基準ひずみ γ_b は強度特性が得られていないため、繰り返しせん断特性より G/Go が0.5のひずみを基準ひずみとして設定する。この値には、試料採取や実験自体の不確かさの影響も含まれている。次に、RO モデルのパラメータはせん断弾性係数、せん断強度および α 、 β の4つである。せん断弾性係数はHD モデルと同様に設定し、せん断強度はHD モデルと同様の方法で推定した基準ひずみにせん断弾性係数を乗じることにより求める。 α は破壊ひず

み($\gamma_f=1.0\%$)として推定 ($\gamma_f=(1+\alpha)\gamma_b$)、 β は得られた α より推定 ($\alpha=2^{\beta-1}$) した。吉田モデルは繰り返しせん断特性を骨格曲線として用いた。

材料特性モデルの再現性を評価するための指標として、実験により深度方向の各地層モデル毎に得られた繰り返しせん断特性によるせん断ひずみに応じた剛性比 (G/Go)、減衰定数 (h) と推定値の差と実験値の比である相対誤差を用いた。HDモデル、ROモデルの相対誤差とせん断ひずみの関係を図-15に示す。 G/Go とせん断ひずみの関係についてみると、HDモデルはせん断ひずみがほぼ 10^3 まで ± 0.2 の範囲であり、せん断ひずみがほぼ 10^3 以上にて、実験値より小さく、せん断ひずみの増加とともに誤差は大きくなっている。ROモデルはせん断ひずみが 10^4 前後にて実験値より0.1から0.4程度大きく、せん断ひずみがほぼ 10^3 以上にて、実験値より小さく、せん断ひずみの増加とともに誤差は大きくなっている。減衰定数とせん断ひずみの関係についてみると、HDモデルはせん断ひずみがほぼ 10^4 以下で、実験値より小さく、それ以上で実験値より大きな推定となっている。ROモデルはせん断ひずみがほぼ 10^4 以下で、実験値よりかなり小さく、それ以上で実験値より大きな推定となっている。せん断ひずみがほぼ 10^3 以上にて0.1から2.5程度の相対誤差が生じている。

再現性という観点でみると、HDモデルは G/Go とせん断ひずみの関係はある程度の再現性を有しているが、減衰定数については実験と差異が認められる。また、ROモデルの再現性はよいと言えないことが分かる。

(2) 応答解析モデルの妥当性確認

応答解析モデルの妥当性確認は再現性および予測性能の評価により実施しなければならないが、ここでは再現性の評価のみを示す。予測性能の評価は、今後の課題とす

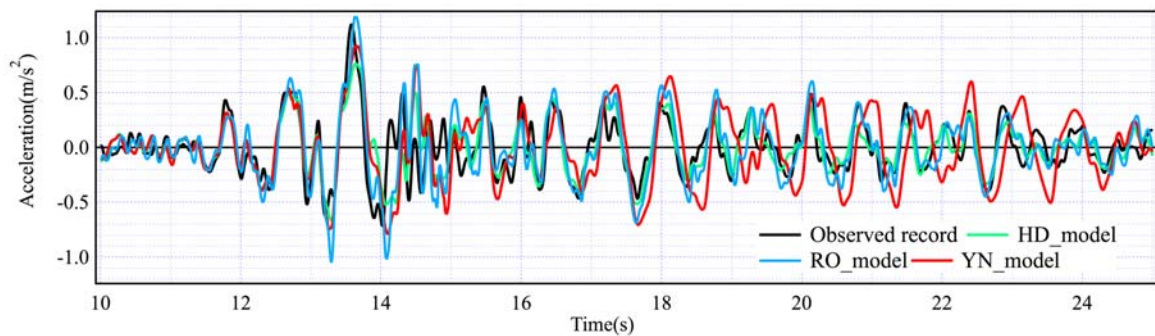


図-15 地表における観測記録と応答解析により得られた加速度波形の比較の一例

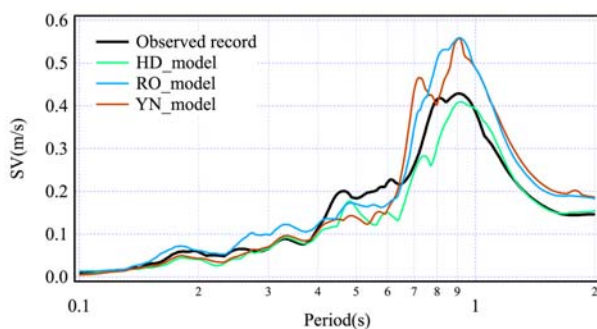


図-16 速度応答スペクトルの比較の一例

る。評価には、初期地盤・構造モデルの妥当性確認に用いた12地震以外の4地震を用いた。また、各地震関する入力地震動、初期減衰の設定、再現性の評価およびそれに用いる6つの評価指標は、前章と同様とした。

地盤モデルには前章で得られた最適地盤モデルを初期地盤モデルとして用いる。非線形の1次元地盤応答解析における不確実さには、前項で示した3つの材料特性モデルを考慮した。

まず、地表で観測された記録と応答解析により得られた加速度波形の比較の一例として、観測期間中に地表で最大加速度を観測した1984年千葉県東方沖地震について図-15に示す。13.5秒付近の最大加速度発現時刻については、吉田モデル、HDモデルについて正負のピーク時刻と振幅レベルが概ね対応している。ROモデルは観測記録に比べ少し大きな振幅となっている。しかし、それ以降の時刻においては観測記録に見られる1次固有周期に近い震動成分を除き、HDモデル、ROモデルに比べ、吉田モデルは短周期成分の再現性は必ずしも十分とは言いがたい。比較の一例として示した加速度波形より得られた速度応答スペクトル ($\eta=5\%$) の比較を図-16に示す。図-11と比べ、観測記録のスペクトル振幅のピークを与える周期が、非線形化に起因して0.46秒から0.9秒に長周期化している。HDモデルは、観測値のピークを与える周期、およびそれ以外の周期においても、観測値の振幅と応答解析による振幅が同定度となっている。一方、ROモデルと吉田モデルは、観測値のピークを与える周期における振幅より応答解析による振幅が大きな

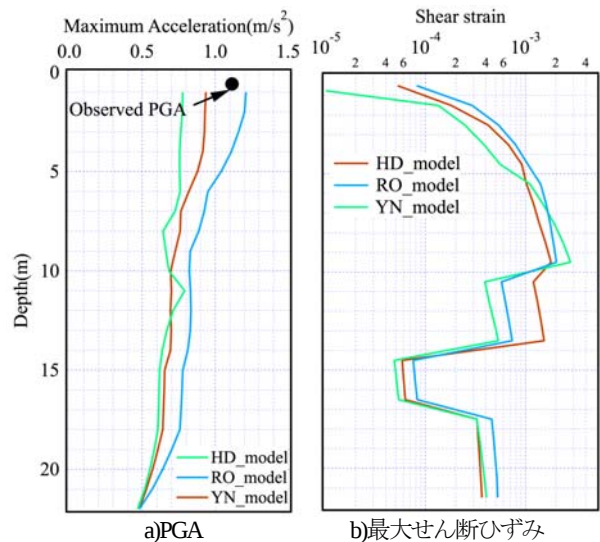


図-17 応答解析より得られた千葉県東方沖地震による最大加速度(PGA)、最大せん断ひずみの深度分布

値となっているが、他の周期では両者が同定度となっている。さらに、比較の一例として示した地震に対する応答解析より得られた最大加速度、最大せん断応力の深度分布について、各材料特性モデルの差異を図-17に示す。観測最大加速度に比べ、ROモデルによる応答解析の最大加速度は観測値より大きく、吉田モデル、HDモデルは観測値より小さな値となっている。最大せん断ひずみについてみると、GL-10~14mにおけるせん断ひずみが10⁻³レベルの前後におけるモデルによる差異が大きいものの、その差異が地表の最大加速度にそのまま影響を及ぼしているとは言えず、応答ひずみレベルに応じたモデルの確からしさのバランスが関連していると考えられる。

次に、再現性の評価として、4地震に対する応答解析より得られた応答指標のうち、最大値指標、周波数応答指標についての観測値との比較を図-18に示す。まず、最大値指標に着目する。材料特性モデルの差異の影響は、いずれの指標にも見られる。PGAについては、1984年千葉県東方沖地震に対するROモデルを除き、いずれも応答解析結果が観測値より小さい。PGVについては、1984年千葉県東方沖地震に対するROモデル、吉田モデル

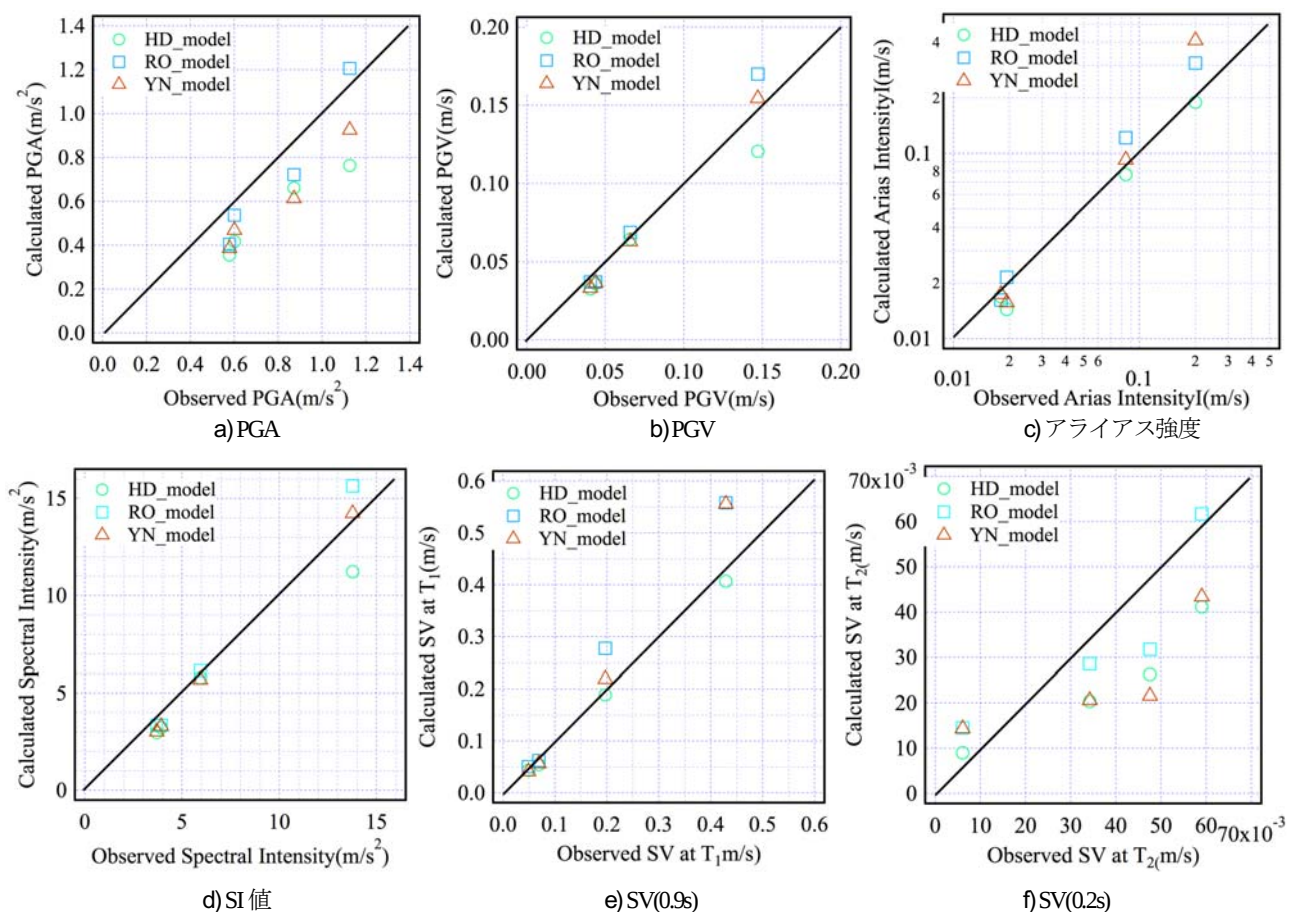


図-18 最大値指標、周波数応答指標に関する地表の観測値と応答解析結果の比較

ルを除き、いずれも応答解析結果と観測値は同定度り小さい。AIについては、HDモデルが観測値と同定度であるものの、他のモデルは観測値より応答解析より得られた値が大きくなっている。図-15に示した材料特性モデルに応じた時刻歴の比較に見られるようにピーク値近傍以外の再現性の程度と対応している。次に、周波数応答指標に着目する。ここで、速度応答スペクトルの評価に用いる周期は図-16を踏まえ、1次卓越周期は0.9秒、他の周期は0.2秒とした。スペクトル強度は、1984年千葉県東方沖地震の地震動に対する応答解析結果が観測値に比べ、吉田モデルが同定度、HDモデルが小さく、ROモデルは大きく、材料特性モデルによる差異が顕著となっている。速度応答スペクトル（0.9秒）については1984年千葉県東方沖地震のみならず、次いで地中の最大加速度の大きな1985年茨城県南西部地震に対しても、図-16に示したスペクトルのピーク周期における材料特性モデルの差異と同じ傾向が認められる。速度応答スペクトル（0.2秒）は再現性の確認という意味で、工学的意味がみられないものの、材料特性モデルによらず、観測値に比べて応答解析結果が小さいという結果になっている。

いずれの応答指標とも、地中の最大加速度が最も大きな1984年千葉県東方沖地震に対する材料特性モデルに

表-3 各評価指標に関する評価基準の比較

Response Index	Evaluation Metrics	Non-linear model		
		HD-model	RO-model	YN-model
PGA	MSQR	0.32	0.10	0.26
	Ratio(Sym/obs)	0.69	0.65	0.74
PGV	MSQR	0.16	0.03	0.05
	Ratio(Sym/obs)	0.86	0.58	0.92
AI	MSQR	0.08	0.07	0.04
	Ratio(Sym/obs)	0.89	1.39	1.23
SI	MSQR	0.18	0.01	0.07
	Ratio(Sym/obs)	0.85	0.56	0.91
SV(T1)	MSQR	0.05	0.02	0.02
	Ratio(Sym/obs)	0.90	0.64	1.02
SV(T2)	MSQR	0.07	0.09	0.00
	Ratio(Sym/obs)	0.83	0.97	1.04

応じた応答解析結果と観測値の差異は大きな値となっている。特に、PGAは地盤の強度特性と関連している。HDモデルと吉田モデルは得られた繰り返しせん断特性試験の結果を再現するようにモデルし、ROモデルではその試験結果から得られる強度の発現ひずみを調整し、それ以上の強度の発生も考慮しているモデルである。つ

まり、水平成層近似における剛性の評価については先の初期地盤・構造モデルの再現性により評価できているものの、近似地盤モデルにおける強度の評価については適切な評価が行われていないのが現実である。よって、地盤材料モデルによる差異が、地震動レベルの大きな1984年千葉県東方沖地震にて顕れていると考えられる。一方、1次元地盤モデルにより得られた応答解析結果の利活用の際に必要となる特性が異なることから、ここで示したように多様な応答指標を用いて評価することが必要となると考えられる。

最後に、得られた最大値指標および周波数応答指標について再現性を定量的に評価するため、表-2に示したASMEによる評価基準(MSQR)と応答解析結果と観測値の比(Ratio)による評価基準の2つについて算出し、表-3に示す。後者の評価基準については、その平均値のみ表-3に示す。また、表には、MSQRが小さい順、またRatioの平均値が1.0に近い順に薄い青、黄緑でハッチしている。応答解析結果と観測値の比を求め、その平均値を表-3に示す。表中のハッチは最小値のみ青でハッチしている。これより、材料特性モデルのうちROモデルは評価基準(MSQR)のPGA、PGV、SIおよび1次卓越周期の速度応答スペクトルにて最小となり、吉田モデルは評価基準RatioのPGAから1次卓越周期の速度応答スペクトルすべてで最小、評価基準(MSQR)のAIおよび1次卓越周期の速度応答スペクトルについても最小となっている。再現性という観点でみると、総合的には吉田モデルの方が確からしいと考えられるが、ROモデルも同程度の確からしさを有していると考えられる。

以上より、同定により得られた地盤モデルを初期地盤モデルとして用い、吉田モデルを材料特性として用いた地盤モデルは対象地点における地盤調査、土質試験および地震観測データを最も再現できる最良モデルであることが分かった。ここで、吉田モデルは対象地盤において繰り返しせん断特性などの地盤情報があるがある場合に有効であり、技儒者の質にモデル化が依存しないという利点がある。ROモデルの適用に際して、パラメータの設定は技儒者の質に依存する。このように、解析モデルや材料特性モデルの設定は技術者の質にも強く依存していることにも留意が必要である。妥当性確認の手順は、解析モデルの作成に対する技術者の質を向上される手段でもあることも重要と考えられる。また、観測された地震記録の最大加速度は千葉県東方沖地震により地表で観測された110Gal程度である。妥当性確認という意味で、初期の目的は耐震設計などへの適用であり、より地震動レベルの大きな作用に対する予測性能の評価が必要不可欠であり、今後の課題としたい。

7. あとがき

ここでは、既往の解析手法やモデルに関する検証と妥当性確認の考え方をふまえ、まず、地盤・構造物の非線形地震応答解析の対象、その解析モデルや手法の妥当性確認を行うために基本的な考え方と手順を示した。次に、その考え方にに基づき、地盤を水平成層と仮定した地盤の1次元モデルを対象とし、妥当性確認の評価事例を示した。評価の対象とした地点は、地盤構造や地盤材料特性に関する情報⁴⁾、および鉛直アレー地震観測により地震観測データ⁶⁾が豊富な東京湾埋め立て地である。また、妥当性確認に用いた解析手法は、吉田により提案されている時間領域における1次元地震応答解析コード「DYNES3D」⁷⁾による機能を用いた。

妥当性確認は2段階は実施し、各段階で解析モデル、ここでは地盤モデルの不確かさを踏まえ、応答解析結果と観測値の再現性は複数の評価指標に基づいて評価することになる。再現性は確からしさの程度を表す評価基準により表される。確からしさの程度は、初期モデルとしての最適モデル、応答解析に用いる最良モデルの評価に用いるが、評価対象とした解析手法やモデルの適用性は、用途に応じて、それを活用する解析の実施者が判断することになる。

事例として示した地盤は、地盤構造、地盤物性および地震観測など極めて多くの情報を有しているが、情報が限られた条件、例えばN値など情報しかない場合なども含めて、再現性の評価を行うことは初期地盤・構造モデルや応答解析に係わる不確かさを評価する上で重要と考える。予測性能の評価と合わせて今後課題としたい。さらに、妥当性確認に用いた1次元地盤モデルは地盤構造を水平成層近似したモデルであり、線形応答時の地盤モデルつまり剛性分布のみならず、非線形応答時の強度分布についても近似評価が必要となる。その点に関する検討も今後の課題としたい。

謝辞：本論は土木学会地震工学委員会における「地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員会」でのWG1地盤の1次元解析WGでの議論を取り纏めたものであり、記して小委員会委員およびWG1の委員の皆様へ感謝の意を表します。

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) 一般社団法人日本計算工学会, 日本計算工学会標準 工学シミュレーションの標準手順, 2015.5
- 3) 日本原子力学会 : 学会標準「シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン : 2015」, 2015
- 4) 安田進, 増田民夫, 永瀬英生, 小田真也 : 深さ方向に連続的に採取した不攪乱資料における動的変形係数, 第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.835-840, 1994.
- 5) 吉田望, 安田進, 増田民夫 : 地盤の不均質さが地震応答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論文集, pp.223-228, 1994.
- 6) 安中正, 都築富雄, 増田民夫, 嶋田昌義, 岡留孝一 : 鉛直アレー記録から推定した表層地盤の剛性率及び減衰定数のひずみ依存性, 第 9 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.493-498, 1994.
- 7) 吉田望 : DYNES3D, A computer program for dynamic response analysis of level ground by effective stress-nonlinear method, Version 2.61, https://www.kiso.co.jp/yoshida/Japanese_02.html, 2004
- 8) Ishihara, K., Yoshida, N., and Tsujino, S. : Modelling of stress-strain relations of soil in cyclic loading, Proc. 5th International Conference for Numerical Method in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp.373-380, 1985
- 9) 石原研而, 吉田望, 辻野修一, 応力-ひずみモデルの履歴法則の改良に関する一提案, 第 39 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 1 部, pp.735-736, 1984

STUDY ON VALIDATION PROCEDURE OF 1D NON-LINEAR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS METHOD

Susumu NAKAMURA, Nozomu YOSHIDA and Iwao SUETOMI

First of all, based on the existing approach for the verification and the validation about numerical analysis method and model, basic idea and procedure to validate numerical model and method by use of non-linear seismic response analysis are proposed. Next, based on the procedure which consist of two stages, an evaluation example of the validation for a one-dimensional model of the ground which supposed the ground to be horizontal layer. The applied site of the procedure is reclaimed land in Tokyo Bay where information such as ground structure, ground materials properties, observed seismic records is abundant. In addition, a function by seismic analysis cord "DYNES3D" which is proposed by Dr. Yoshida is used for this validation. Based on uncertainty of ground model, validation was evaluated by reproducibility of a response analysis result and the observation value. The degree of uncertainty at each stage was used for evaluation of the best estimate model for response analysis as well as the most suitable model for initial ground model.