

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V&V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、まず、モデルV&Vという観点で、対象から実施手順に

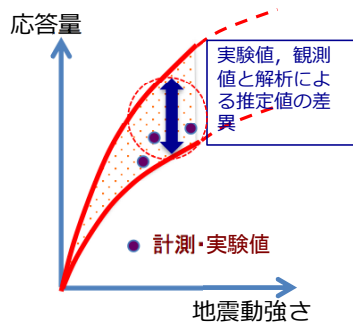


図-1 再現性の評価イメージ

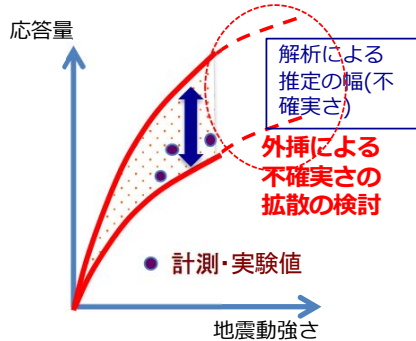


図-2 予測性能の評価イメージ

関する基本的な考え方を示す。次に、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⁵⁾など関連情報が豊富な東京湾埋立地を対象として、地盤の1次元モデルに対する解析手法の妥当性確認の事例を示す。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⁾による機能を用いた。

2. 妥当性確認の基本的考え方

(1) 適用範囲と対象

ここでは、社会基盤施設の建設、設計、維持管理および安全性評価に適用される地盤工学分野、構造工学分野における地震作用に対する数値解析に用いるモデルおよび解析手法を適用範囲とする。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である。モデルには、例として、次元(1, 2および3次元)に応じた地盤モデル、橋脚-基礎-地盤系のモデルとしてSRモデル、地盤パネ-杭基礎-構造物モデル、有限要素-杭基礎-構造物モデルなどを挙げることができる。

(2) 妥当性確認の考え方

妥当性確認とは、解析モデルを含む解析手法が再現性、

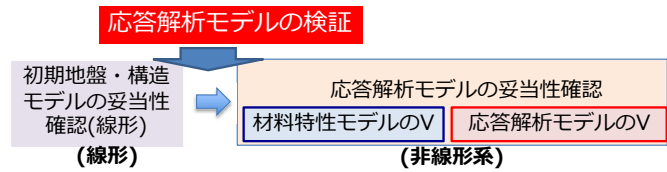


図-3 妥当性確認の実施手順

予測性能から、対象とする実現象を満足できる幅で推測できることを確認するプロセスであると定義する。また、対象とする解析手法が組み込まれた解析コードは検証が行われているものとする。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。

妥当性確認における再現性は図-1に示すように既存観測、実験結果と解析モデルのシミュレーション結果との推定誤差 Δ_{model} により表される。ここで、その推定誤差は次式のように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_{Exp} の差異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限り観測/実験で得られた結果を真値と仮定すると、(1)のように Δ_{model} はモデルの不確実さを表す 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実さとモデル自体の不確実さを含むモデルの不確実さであると考えられることができるが、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、モデル自体の不確実さと考えられることができる。また、モデルの不確実さを表す指標はシミュレーションの目的を適切に表すことが重要で、最大加速度や最大速度などの最大値指標のみならず、周波数特性なども踏まえ、複数の指標を設定することが必要となる。

$$\Delta_{\text{model}} = Y_{\text{Sym}} - Y_{\text{Exp}} = \delta_{\text{Sym}} - \delta_{\text{Exp}} \equiv \delta_{\text{model}} \quad (1)$$

次に、予測性能は、図-2に示すようにシミュレーションモデルを用い、再現性に基づき妥当性を確認した条件を超える地震作用に対する計算結果の不確かさを表す。強非線形領域におけるモデルの不確実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作用条件を越える場合、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

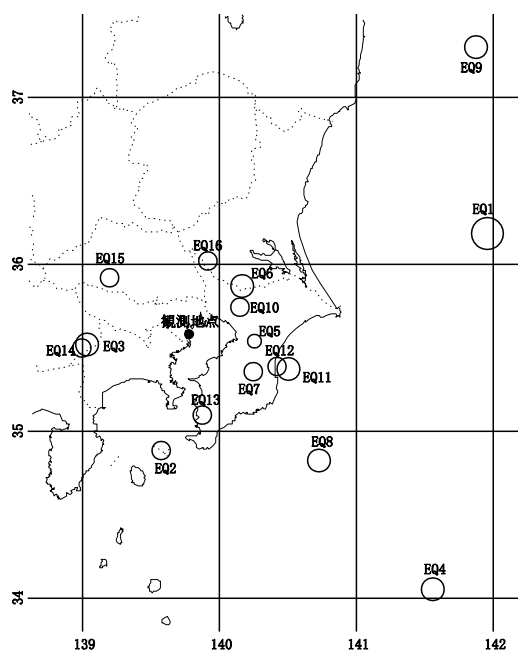


図-4 観測された16地震の震源位置分布

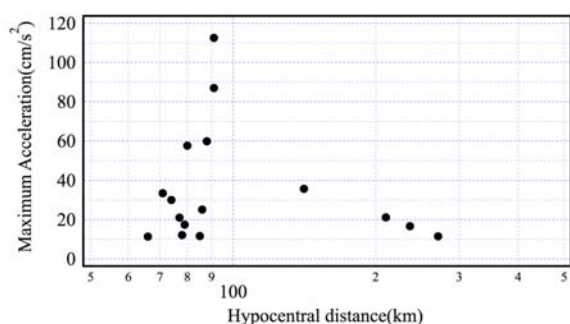


図-5 観測記録の地表における最大加速度と震源距離の関係

実さおよび地震作用の不確実さ（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，モデルの不確実さも加味して，予測性能の評価を行う。ここで，モデルの不確実さは，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。

(3) 妥当性確認の手順

妥当性確認は，図-3に示したようにまず初期地盤・構造モデルの選定という観点も含む妥当性確認，次に非線形材料特性モデルの不確実さの影響も含む応答解析モデルの妥当性確認という2段階の手順で実施する。

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，モデルの不確実さとともに，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，モデルの不確実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，モデルの不確実さとともに，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良モデル(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無い場合には，適切にその不確実さを考慮することが必要であるが，モデルの不確実さには材料特性の統計的な不確実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(Mj=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デの受振器間隔が1mとなっているため，測定ゾンデを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

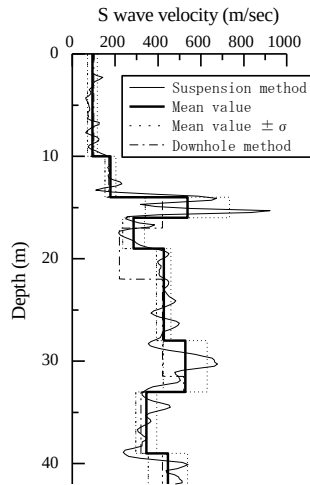


図-6 調査法に応じた S 波速度構造の比較

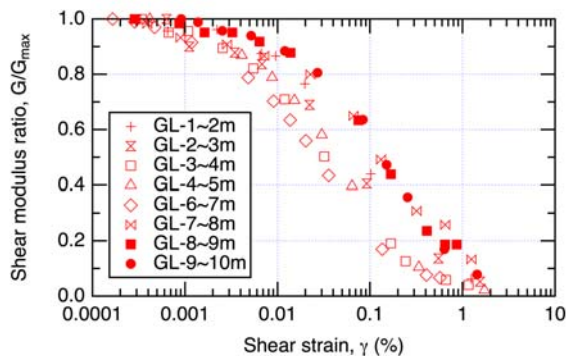


図-7 繰り返しせん断特性試験結果の一例

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. 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。

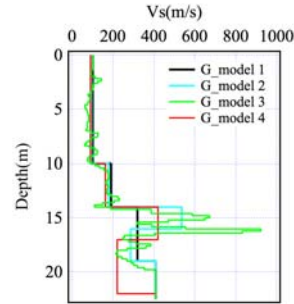


図-8 各地盤モデルの S 波速度の深度分布の比較

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

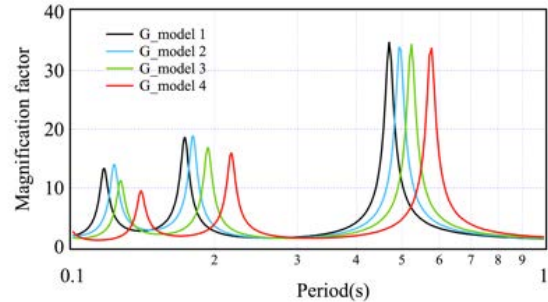


図-9 各地盤モデルに応じた周波数応答関数の比較

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

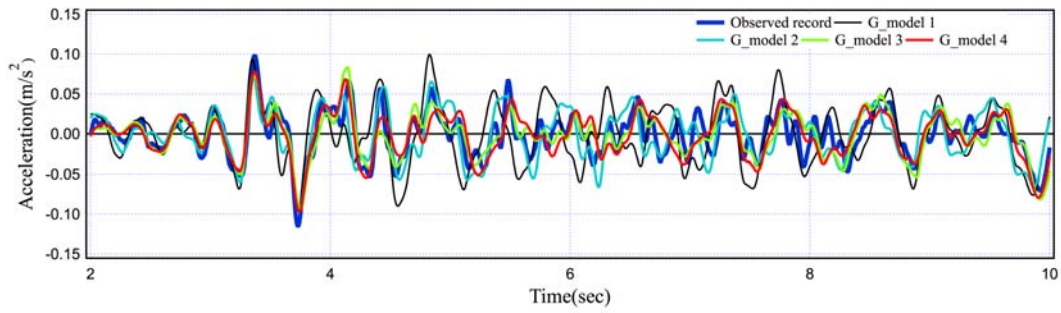


図-10 地表における観測記録と応答解析により得られた加速度波形の比較の一例

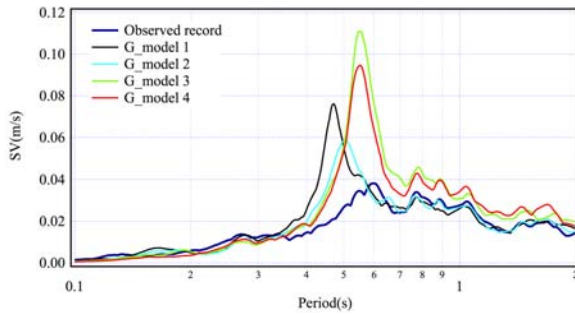
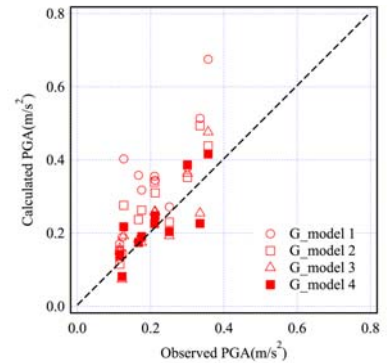


図-11 速度応答スペクトルの比較の一例

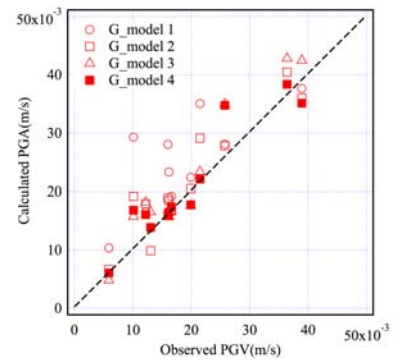
る入力地震動は、地中GL-22.3mにおける観測記録中で最大加速度が得られた方向の成分とし、その成分に関する地表の応答解析結果と観測値の比較を再現性の評価に用いる。また、解析に用いる初期減衰にはRayleigh減衰を用い、 α は0、 β は0.01を用いた。また、比較に用いる評価指標として、最大値指標はPGA、PGVおよびアライアス強度、周波数指標はスペクトル強度SI、2つの周期における速度応答スペクトルを用いた。

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、最大加速度が10Gal程度の地震($M_j=5.7$, 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言いがたい。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。

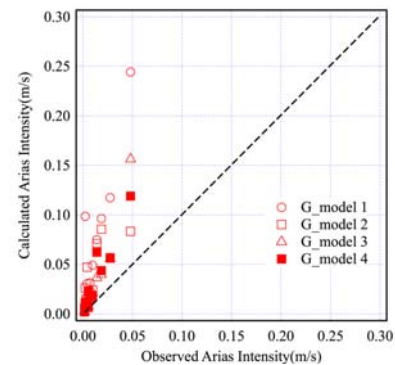
次に、再現性の評価として、12地震に対する応答解析より得られた評価指標のうち、最大値指標についての観測値との比較を図-12に示す。地盤モデルによる差異は、いずれの指標についても認められるが、PGAとPGVの応答解析結果は観測地と同程度またそれ以上、アライアス強度については観測値に比べ応答解析結果が地盤モデルによらず大きな値となっている。次に、評価指標のうち



a) PGA



b) PGV



c) アライアス強度

図-12 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

周波数応答指標について観測値との比較を図-13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、速度応答スペクトルのうち0.5秒

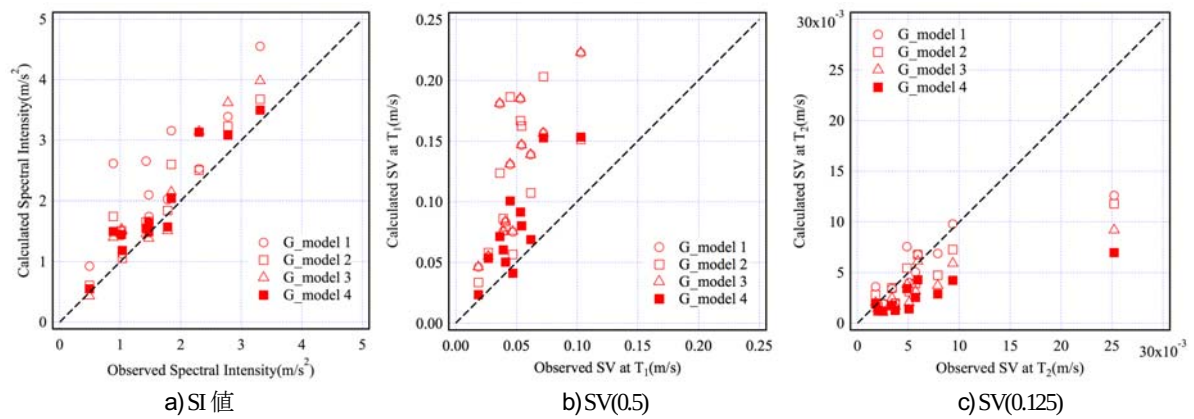


図-13 周波数応答指標に関する地表の観測値と応答解析結果の比較

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

Index \ G_model	G_model 1	G_model 2	G_model 3	G_model 4
PGA	1.70(0.33)	1.37(0.24)	1.12(0.25)	1.09(0.27)
PGV	1.47(0.35)	1.18(0.25)	1.14(0.21)	1.11(0.20)
AI	8.07(1.36)	4.30(0.83)	2.61(0.31)	2.88(0.43)
SI	1.53(0.35)	1.24(0.21)	1.20(0.21)	1.18(0.18)
SV1	2.57(0.35)	2.43(0.36)	1.44(0.28)	1.59(0.27)
SV2	1.22(0.35)	1.01(0.32)	0.78(0.32)	0.63(0.37)

については、応答解析結果が観測値より大きな値、0.125秒について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、応答解析結果と観測値の比を求め、その平均値と変動係数（表中の括弧内）を表-2に示す。また、表には指標毎に平均値が1.0に近い順に薄い青、黄緑でハッチしている。さらに、各評価指標の平均値を視覚的に比較するため、図-14にレーザチャートに示す。これより平均値という観点でみると、同定より得られた地盤モデルはPGA、PGVおよびSIの3指標で最適の結果となり、他2指標についても2番目となっている。サスペンション法により得られた詳細地盤モデルは、アライアス強度と速度応答スペクトル（0.5秒）の2つの平均値が1.0に近いという結果であり、同定された地盤モデルに次いでいる。図-8より、同定より得られた地盤モデルもサスペンション法により得られた値ほどではないが、GL-14～16mにおいて大きなS波速度、その下部でそれより小さなS波速度の構造となっており、基本的な傾向は類似している。また、変動係数という観点でみても、同定より得られた地盤モデルは平均値と同様に再現性の高いPGA、PGVおよびSIにて最も小さな値となっているが、0.18（SI）から0.27（PGA）となっており、ばらつきが大きいことが分かる。

以上より、3指標で最適の結果となった同定より得られた地盤モデルは、周波数増幅特性が地震動の特性を満

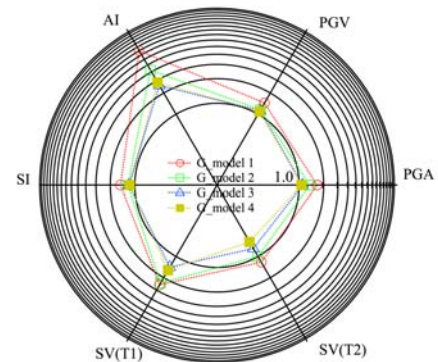


図-14 各評価指標に関する応答解析結果と観測値との比の平均値に関するレーザチャートによる比較

足するようなモデルであり、サスペンション法のS波速度分布と類似の傾向を有していることもあわせると、最適な地盤モデルと考えることができる。

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

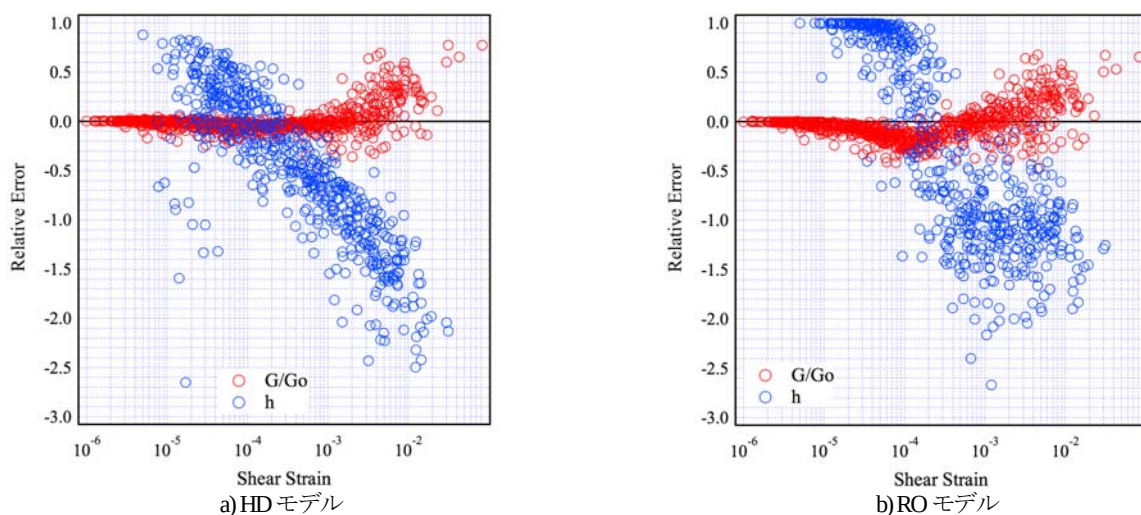


図-15 実験による繰り返しせん断特性と材料特性モデルによる計算値の相対誤差とせん断ひずみの関係の比較

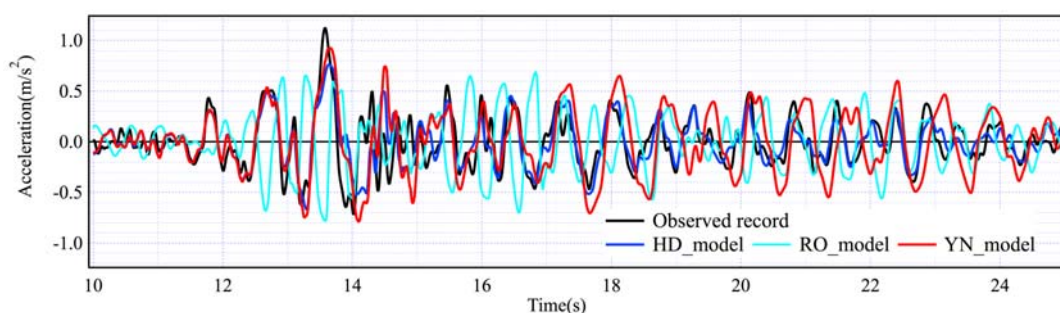


図-15 地表における観測記録と応答解析により得られた加速度波形の比較の一例

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実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) 応答解析の妥当性確認

応答解析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、各地震に関する入力地

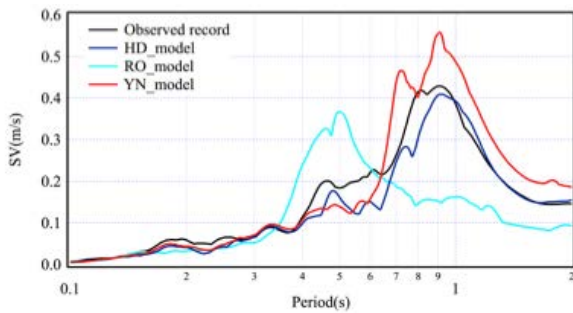


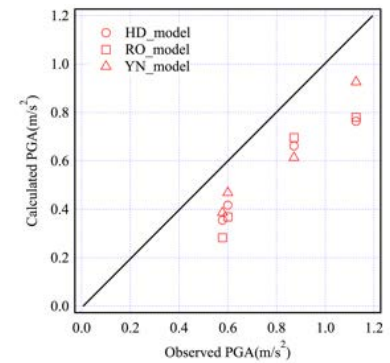
図-16 速度応答スペクトルの比較の一例

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。

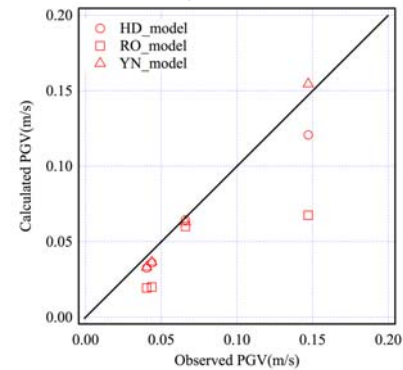
地盤モデルには前章で得られた最適地盤モデルを初期地盤モデルとして用いる。非線形の1次元地盤応答解析における不確かさには、前項で示した3つの材料特性モデルを考慮した。

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。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言いがたい。ROモデルは応答解析より得られた波形の位相が観測波形と異なっている。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 ($\eta=5\%$) の比較を図-16に示す。応答解析によるピークを与える周期における値は吉田モデル、HDモデルとも観測値と同程度であるが、スペクトル振幅はHDモデルが同程度、吉田モデルが少し大きな値となっている。一方、ROモデルは応答解析による卓越周期が観測値よりかなり短く、初期地盤モデルの値に近く、非線形化による剛性低下が生じていないと考えられる。これは、図-15で示したROモデルによる繰り返しせん断特性と実験値との比較において、せん断ひずみレベルが 10^{-4} 前後にてROモデルの方が剛性を大きく評価しているため、非線形化の進展が他のモデルに比べて小さいと推測される。

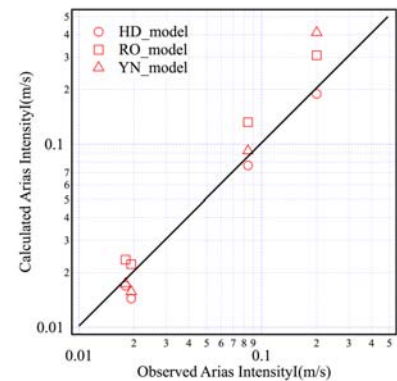
次に、再現性の評価として、4地震に対する応答解析より得られた評価指標のうち、最大値指標についての観測値との比較を図-17に示す。材料特性モデルの差異の影響は、いずれの指標にも見られる。PGAについては、いずれも応答解析結果が観測値より小さく、その差異はPGAの大きさによらず同程度である。PGVについては材料モデルの差異が顕著に顕れ、吉田モデルは観測値の大きさによらず応答解析結果と観測値が同程度となって



a) PGA



b) PGV



c) アライアス強度

図-17 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

いる。HDモデルは、観測値が小さい場合、応答解析結果が観測値より少し小さい程度であるが、観測値が大きくなるとその差異が増加している。ROモデルもHDモデルと同様の傾向にあるが、観測値が大きくなると、応答解析結果が観測値よりHDモデルより小さいという結果となった。アライアス強度については、材料モデルにより異なるものの、応答解析結果と観測値は比較的良好な対応をしており、初期構造・地盤モデルにおけるS波速度構造モデルの不確かさの影響とは大きく異なっている。次に、周波数応答指標の比較を図-18に示す。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、速度応答スペクトル(0.9秒)については類似の傾向が見られ、吉田モデルによる応答解析結果

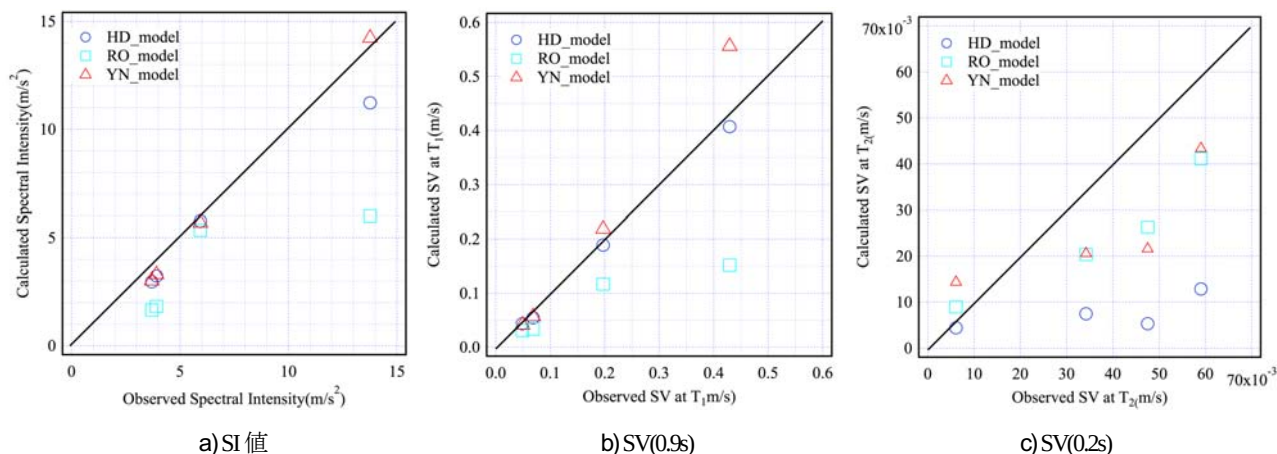


図-18 周波数応答指標に関する地表の観測値と応答解析結果の比較

表-3 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

Index \ Non_linear model	HD_model	RO_model	YN_model
PGA	0.69	0.65	0.74
PGV	0.86	0.58	0.92
AI	0.89	1.39	1.23
SI	0.85	0.56	0.91
SV1	0.90	0.64	1.02
SV2	0.83	0.97	1.04

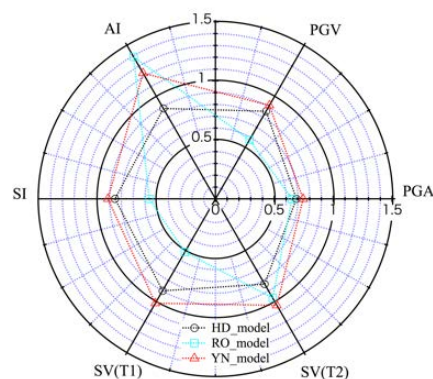


図-19 各評価指標に関する応答解析結果と観測値との比の平均値に関するレーダーチャートによる比較

と観測値は同程度、HD モデルによる応答解析結果は観測値と同程度またそれより少し小さい。RO モデルでは、観測値の増加とともに、応答解析結果が観測値よりかなり小さいという結果になっている。速度応答スペクトル（0.2秒）は吉田モデルとROモデルによる応答解析結果が同定であるが、観測値より小さい。さらに、HD モデルによる応答解析結果は観測値よりかなり小さいという結果になっている。

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、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。観測値の大きさ、つまり非線形化の程度に依存している材料モデルや指標はあるが、ここでは平均値に着目する。表中のハッチは表-2と同様の考えで示している。さらに、各評価指標の平均値を視覚的に比較するため、図-19にレーダーチャートに示す。これより、吉田モデルはアライアス強度を除き、他のモデルに比べて応答解析結果は観測値の再現性がよく、かなり観測値に近い評価を実施していることが分かる。

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。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程度であり、耐震設計などへの適用という観点での妥当性確認という意味では予測性能の評価が必要不可欠である。その評価は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⁴⁵⁾、および鉛直アレー地震観測により地震観測データ⁹⁾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。再現性は不確かさの特性を表す平均や変動係数などの特性値により表される。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の委員の皆様に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.