初期地盤モデルの妥当性 一地盤応答のVV-

末冨 岩雄1・中村 晋2

 ¹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
 ²正会員 日本大学 工学部
 (〒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

土木学会地震工学委員会「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」では、地盤・構造物の非線形地震応答解析の品質や信頼性向上のための妥当性確認 (Validation)と検証(Verification)を実施するための手順と事例のとりまとめを行っているところである. 非線形特性,構造物との相互作用など様々な重要な事項がある中で、本論文ではそれらの基本となる一次 元の初期地盤モデル(線形モデル)の妥当性確認について、鉛直アレー観測記録、PS検層データのある観 測点、等を活用し、予測性能の定量化のための検討を行った.

Key Words : earthquake ground motion, 1-D analysis, initial elastic model, validation

1. はじめに

土木学会地震工学委員会「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(以下,地盤応答V&V委員会) では,地盤・構造物の非線形地震応答解析の品質や 信頼性向上のための妥当性確認(Validation)と検証

(Verification)を実施するための考え方を幾つかの 事例を示しながら、各対象に応じた妥当性確認/検 証方法の手順と事例のとりまとめに取り組んでいる¹⁾.

他分野では、例えばSargen²⁾、日本計算工学会³⁾、日本原子力学会⁴⁾、等で考え方をとりまとめている. 日本原子力学会標準⁴⁾「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」では、モデリン グ&シミュレーションにおけるモデルV&Vの手順と して、"エレメント1:概念モデルの開発"、"エ レメント2:数学的モデル化"、"エレメント3: 物理的モデル化"、"エレメント4:シミュレーシ ョンモデルの予測性能の判断"、を基本要素とし、 シミュレーションモデルの予測性能が利用目的に照 らして要求を満たすか否かを判断する基本手順を示 している.

地盤応答V&V委員会では、一次元の地盤応答解析 から三次元の地盤・構造物の連成解析まで幅広く扱 っているが、本論文では基本となる一次元の線形解 析を対象とする.一次元線形解析については、多く の知見があるので、ここでは、"エレメント4:シ ミュレーションモデルの予測性能の判断"に焦点を 当てる.予測性能を定量的に表すためには,a)評価 指標(地震動指標)の選定,b)地震動指標の不確か さへの影響因子の同定,c)シミュレーションによる 再現結果と観測データの比較による不確かさの定量 化,が要求される.

非線形解析でのV&Vを考える際,初期モデルと繰返しせん断特性が影響し合うため,どのパラメータが不適切なのか,の議論が複雑になる.そのため,本論文では、一次元鉛直アレーの弱震記録の解析

(線形)という簡単でかつ統計的に扱える問題で, a)については各種の地震動指標での比較,b)c)について入力地震動特性や地盤条件など影響因子について考察を加える.

一次元地盤応答解析におけるV&V

一次元地盤モデルの地震応答解析においては,1) 層構成の決定,2)初期剛性等の地盤物性の決定,3) 非線形特性の決定,の3段階で地盤モデルは構築さ れる.1)では標準貫入試験等の地盤調査結果に基づ き,層分割と各層の層厚・土質を定める.2)ではPS 検層等の実測値があればそれを用い,無ければ平均 N値からS波速度を推定,土質に応じた単位体積重 量の設定を行う.3)では時刻歴非線形解析を行うか, 等価線形解析を行うかに応じて(通常は1)の前に決 定するが地盤情報に応じて再確認),適切な構成則 や繰返しせん断特性を設定する. Validation のためには、予測性能を定量的に表現 することが必要となるが、地盤の非線形問題では同 様の条件で複数回の記録を得ることが困難であるた め、解析と観測の比較事例を示すことはできても、 予測性能とするのは容易でない、本論文では、非線 形解析の基本となる上記の 1)2)の初期(線形)地盤 モデルで複数の弱震記録を用いた解析で、予測性能 の定量化に向けて、観測記録の再現性をいくつかの 条件で行った事例を示す.

3章では鉛直アレー観測記録を用いて、観測記録 のスペクトル比に適合するように伝達関数を最適化 したモデルとPS検層モデルを比較する.

4章では横浜市内の鉛直アレー観測記録で共通の 地震のデータを用い,表層地盤の差異が再現性に及 ぼす影響について検討する.

5章では4章と同じく横浜市観測記録を用い,通常の設計と同様にN値からS波速度を推定して地盤モデルを設定した際とPS検層モデルで再現性の差異を検討する.

2. 最適化モデルとPS検層モデルの比較

地盤モデルの精度が予測精度に及ぼす影響につい ては、これまでに多数の検討が行われていることは、 1.で記した通りである.地盤調査については、サス ペンション式の PS 検層を行った新太田変電所建設 予定地(当時)⁵で多く行われている.鉛直アレー 観測記録が得られている場合、弱震観測記録の地表 と地中のスペクトル比に対する最適化(システム同 定)によって、初期モデルを修正することが数多く 行われてきている.特に、被害地震の後、強震記録 が得られた KiK-net で地盤モデルの最適化が行われ ることが多い.最適化手法としては、拡張ベイズ法、 GA(遺伝子アルゴリズム),焼きなまし法、など 様々な方法が用いられてきている^{例えば 6)7)8)}.また、 減衰の周波数依存性のモデル化も大きな論点であり、 まだ分からないことが多いのが現状である.

本章では、このような最適化を行ったことにより、 PS検層に基づく初期モデルからどの程度精度が向上 するか、という事例として、KMMH16(益城)の例 を示す.

多くの研究が行われているが、下記の3通りのモ デルで比較する.

m0:PS検層の値⁹⁾,一律2%の減衰

m1: PS検層の値, 散乱減衰考慮

m2:栗田(2017)¹⁰⁾による最適化モデル

m1では、福島・翠川(1994)¹¹⁾を用いて土質に応じ て散乱減衰を設定する.初期モデルの検証であるの で、本震等の強震でなく(4月の余震も避けた), 熊本地震より前の地震(2002-2015)で4地震,2016 年8月・9月の2地震を用いる.検討方法は、地中観 測波を入力として、重複反射理論による線形解析を 実施し(Dyneq)、地表波を観測波と比較するもので ある.

図-1は最大加速度(PGA),最大速度(PGV),最大変

位(PGD),計測震度,SI値,の5つの地震動の最大値 指標について,3つのモデルの解析結果と観測値の 比を示したものである.計測震度は最大加速度に戻 して,他の指標と同じように観測値に対する比で表 している.いずれの指標についても水平2成分の合 成値を算出している.m0,m1のPS検層の値を用い た場合,1.5倍程度となっているが,m2の最適化モ デルを用いた場合,1.1~1.2倍程度となっており,S 波速度の最適化により明らかに精度が向上している. いずれの最大値指標についても同様の結果となって いる.

図-2は加速度応答スペクトル(減衰5%)の解析結 果と観測値の比である.図-3は一次元重複反射理論 による伝達関数の比較である.栗田らではEW成分 とNS成分で異なるS波速度を設定しているので,2 成分で算定している(地震応答解析でも2方向でモ デルを変えている).この地点は、2方向で卓越周 波数が異なる特殊なケースであるが、最適化した方 が卓越周期を表現できている.一次のピークの大き さまでは最適化後でも誤差は小さくなく、図-2の比 の値は小さくはなく、減衰のモデル化については、 まだ課題が多いというのが現状である.





3. PS検層モデルの不確かさ

顕著な非線形化を伴う強震記録は得られていない ものの、150点で行われていた横浜市強震観測点¹²⁾ のうち、9点で鉛直アレー観測が行われていた(現 在の地表観測点は42地点で、鉛直アレーは2006年頃 までしか稼働していない).150の全観測地点でPS 検層が実施されている.KiK-netは、地中深度が 100m~200mでかつ岩盤が主となっているので、設 計で考える条件とは違いが大きいが、この横浜市の 鉛直アレーは、一部深いが10~30m程度であり、低 地でのものなので、知見を設計に活用可能と考えら れる.また、共通の地震で、9点で比較できる利点 がある.

9点の施設や地盤条件等の一覧を表-1に示す.地 震観測記録のフーリエ・スペクトル比(地表/地 中)と理論伝達関数の比較を図-4に示す.なお,修 正モデルは末富ら¹³⁾で行ったiz02に対するスペクト ル比に対して適合させたものである.9点のうち na08, is02, is06, の3点で観測と理論の卓越周期が 明らかにずれている.na08とis02は表層が薄いの で,地震計位置とボーリング位置での差異など様々 な要因の影響を受けやすい可能性がある.他の観測 点では卓越周期はほぼ対応しており,全体として は,PS検層の精度は高いと言える. 地中波を入力して、一次元重複反射理論による線 形解析を(線形)を行い、地表波を算定する.5-6 地震の結果を平均して、図-1と同様に最大値指標の 比較をレーダーチャート化して図-5に示す(hd01は 4章で示す).最大加速度 PGA は幅が大きいが、他 は2割程度である.図-4 でピークがずれている観測 点では誤差も大きくなっている.一次元地盤応答解 析では、一次の卓越周期を合わせることが精度確保 の基本であることが確認できる.

図-6 は観測点ごとに加速度応答スペクトル(減衰 5%)の比を示したものである.伝達関数のピーク の箇所で山谷(観測値のピークで谷)が見られる. 表層が薄く卓越周期が短い地点で観測との差が大き い傾向があり,このことが PGA のばらつきが大き いことと関係していると考えられる.

表-1 横浜市鉛直アレー観測点

	F1 8161		1940 4111	
コード	施設	地形分類	表層厚(m)	備考
hd01	保土ヶ谷消防署	海岸平野・	14.9	保土ヶ谷
		三角州		区
is02	磯子水上消防出張所	埋立地	5.7	磯子区
is06	南部下水処理場	埋立地	26.35	磯子区
kg09	神奈川下水処理場	埋立地	14.9	神奈川区
kz08	横浜ヘリポート	埋立地	52.5	金沢区
na08	本牧埠頭	埋立地	7.9	中区
ns05	臨港パーク	埋立地	56.9	西区
tr10	鶴見水上消防出張所	埋立地	58.3	鶴見区
tr12	北部第二下水処理場	埋立地	26.4	鶴見区









4. PS 検層と N 値モデルの比較例

実際の設計実務においては, PS 検層もなく標準 貫入試験による N 値から S 波速度を設定することが 広く行われている(道示等の設計基準もその前提で ある).前掲の横浜市 9 点のうち,hd01 を例にN値 から推定した S 波速度と PS 検層による S 波速度を 用いた際の地震応答解析結果の比較を行う.

図-7は土質柱状図とN値であり,表-2に示すよう に各層の平均N値を設定し(S波速度はPS検層), 道示の式を用いて推定したS波速度とPS検層によ るS波速度の比較を図-8に示す.赤線は図-4で示し た地震観測記録に基づき修正したS波速度である. N値からの推定値に比べ,PS検層,さらに修正S波 速度の方が小さな値となっている.

図-4と同様に伝達関数を比較した結果を図-9に示 す.PS検層モデル(赤線)は概ね一次のピークが観 測と合っているが,N値モデル(青線)はずれてい る.必ずしもN値推定でずれるわけではなく,1事例 に過ぎないが,微動観測等の様々な経験では,この 程度の差異は十分あり得るものである.この場合の N値モデルはS波速度を大きく評価しているので,N 値モデルの伝達関数は短周期側にずれているので, 図-10の最大値指標の比較で,PGAと計測震度は過 大に,PGDは過小に評価していることにつながって いる.図-11の応答スペクトルの比でも山谷が大き い.



図-7 土質柱状図

X Z HUOTICASI/ る地盤構造					
No.	土 質	層厚(m)	密度	S波速度	平均N值
			(t/m^3)	(m/s)	
1	埋土	1.8	1.7	130	_
2	有機質粘土	0.7(2.5)	1.6	90	2
3	砂質シルト	4.2(6.7)	1.7	90	3
4	シルト質細砂	1.7(8.4)	1.7	100	5
5	砂質シルト	0.4(8.8)	1.7	100	2
6	粘土質シルト	3.2(12.0)	1.6	90	2
7	砂質シルト	2.1(14.1)	1.7	120	5
8	砂礫	0.8(14.9)	2.0	280	35
9	泥岩・土丹	3.4(18.3)	2.0	600	_

表−2	hd01における地盤構造	
		_



Spectral Ratio

図-10 最大値指標の比較



加速度波形の比較を図-12に示す.青線が観測 波,赤線が修正モデルによる計算波である.やや計 算波の方が大きくなっている.地盤モデルによる差 異を式(1)のRMS値で比較した結果を表-3に示す.伝 達関数の適合がよいモデルほどRMS値が小さくなっ ていることがわかる.したがって,一次の卓越周期 を適切に評価することが重要であることとなるの で,そのための標準貫入試験を補う方法としては常 時微動観測の利用が考えられる.

$RMS = \sum_{i} \{x_{obs} - x_{obs}\}$	$-x_{cal}$ } ²	(1)
<u></u> =_?	RMS値の比較	

地盤モデル	RMS值
N値モデル	8.032
PS検層モデル	5.229
修正モデル	4.536

6.おわりに

本報では、地盤の地震応答解析における品質や信 頼性向上のための妥当性確認(Validation)について、 一次元の線形解析を対象に、アレー観測記録を用い て、初期モデルの精度と地震応答解析による地表面 地震動の精度について検討した。得られた知見を以 下に記す。今後、非線形解析等の事例も加え、成果 をとりまとめていく予定である。

- 1)最大加速度は倍半分のバラツキを有する可能性が あるが,他の指標は2割程度に収まっている.最 大加速度も計測震度のフィルター処理後なら3割 程度に収まる.
- 2)評価指標として何がいいかは難しい.
- 3)周波数依存の散乱減衰のモデル化精度も、今回の 線形問題では影響は小さくない.ただし、強震時 にはひずみ依存の内部減衰が卓越するので、実務 的には大きな問題にはならないと考えられる (FDEL等で考えると影響はあるが).
- 4)PS 検層は実務的には正解と見なせるものであり, 実際精度は高い.N 値からの設定だと,バラツキ は大きくなる可能性が高い.
- 5)卓越周期を適切に設定しているか否かが重要であ り、そのためには常時微動観測の利用が考えられ る.

謝 辞

本論の作成に当たっては、横浜市強震計ネットワ ーク、防災科学技術研究所の強震観測網による地震 波形記録を利用させて頂きました.関係各位に感謝 の意を表します.

参考文献

- 中村晋・吉田望・末冨岩雄: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, 第39回地震工学研究発表会,2019(投稿中).
- 2)R. G. Sargent: Verification and validation of simulation models, Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, pp.183-198,2011.
- 3)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.
- 4)一般社団法人 日本原子力学会:日本原子力学会 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.
- 5)増田民夫・森本巌・山本明夫:地盤震動解析法 の高精度化に関する研究 –地盤調査・試験につ いてー,第9回日本地震工学シンポジウム, pp.373-378, 1994.
- 6)辻原治・澤田勉:鉛直アレー観測記録を用いた 地盤のS波速度とQ値の同定精度に関する一考 察,構造工学論文集,Vol.45A,pp.801-808,1999.
 7)野口科子・笹谷努:KiK-net 観測点TKCH08にお

ける S 波速度構造の評価, 北海道大学地球物理学研究報告, No.67, pp.181-195, 2004.

- 8)佐藤智美:鉛直アレーデータに基づく S 波の斜 め入射を考慮した地盤の減衰定数の同定 –焼き 鈍し法の適用–,日本建築学会構造系論文集,第 569号, pp.37-45, 2003.
- 9) 防災科学技術研究所:強震観測網, http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/ (参照 2018-12-01).
- 10) 栗田哲史: KiK-net 益城における 2016 年熊本地 震の記録に基づく表層地盤の非線形特性,土木 学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.4 (地震工学論文集第 36 巻), I_74-I_82, 2017.
- 11) 福島美光・翠川三郎:周波数依存性を考慮した

表層地盤の平均的な Q-1 値とそれに基づく地盤 増幅率の評価,日本建築学会構造系論文集,第 460号, pp.37-46, 1994.

- 12)高秀秀信・阿部進・中島徹也・乾晋:高密度強 震計ネットワークを利用した深部地下構造調査, 日本地震工学会論文集,第2巻,第2号, pp.23-40, 2002.
- 13)末冨岩雄・福島康宏・石田栄介・猪股渉・乗藤 雄基・山崎文雄・鈴木崇伸:横浜市高密度アレ ー観測記録を用いた応答スペクトルの空間補間 精度の検討,土木学会論文集 A1(構造・地震工 学), Vol.68, No.4(地震工学論文集第 31-b 巻), I_126-I_137, 2012.

VALIDATION OF SIMULATIONS OF INITIAL MODEL FOR 1-D LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF SURFACE SOIL DEPOSITS

Iwao SUETOMI and Susumu NAKAMURA

The research subcommittee for performing validation and verification of The Earthquake Enginnering Committee of JSCE is collecting procedures and examples to improve the quality and reliability of nonlinear seismic response analysis of ground and structures.

In this paper, the validity of the one-dimensional initial ground model (linear model) is examined with observation records at the vertical arrays and the high dense strong motion seismograph network of Yokohama city. PS logging can be regarded as a correct answer in practice, and the accuracy is high. In the case of setting from N value, there is a high possibility that the variation of the calculation result will be large. It is important to set the prevailing period appropriately. For this purpose, the use of microtremor observation can be considered.