

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

EJEC REPORT

初期地盤モデルの妥当性確認 (地盤・構造モデルのV&V)



 EJEC 株式会社
エイト日本技術開発

2019年2月13日
未富 岩雄

価値ある環境を未来に

1

1-1 不確かさの定量化



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」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。

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。



【不確かさの定量化及び統合】

シミュレーションモデルの妥当性確認実験において、a)評価指標の選定、b)評価指標の総括不確かさに対する影響因子の同定、c)シミュレーションによる再現結果と実験データの比較による総括不確かさの定量化、が要求される。

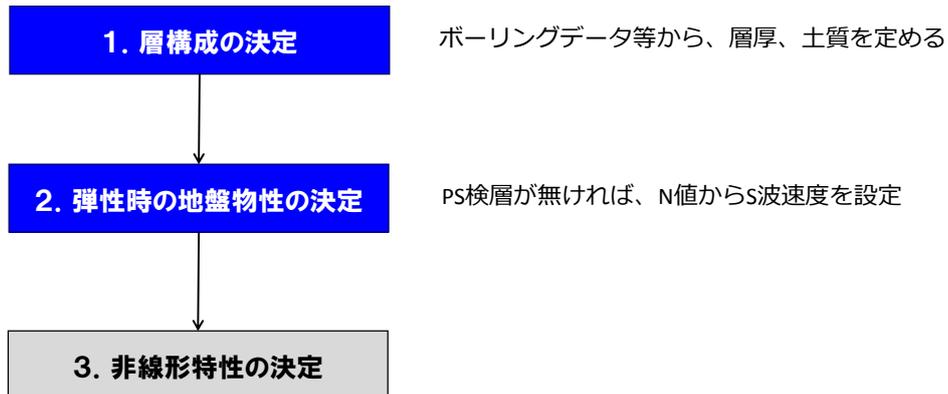


一次元鉛直アレーの弱震記録の解析（線形）という簡単でかつ統計的に扱える問題で、a)については各種の地震動指標での比較、b)c)について入力地震動特性や地盤条件など影響因子について考察を加える。⇒予測性能の定量化

1-2 一次元解析におけるデータ作成手順



一般的には解析地盤データを作成する手順は下記のようなことになる。
ここでは、1、2、の初期地盤モデルについて考える。



EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

3

1-3 本日の話題



鉛直アレーの弱震観測記録を用いた検討（再現性）

- 地盤モデルの最適化
理論伝達関数と観測記録のスペクトル比（地表/地中）
- 評価指標としての地震動強度指標の比較
地盤モデルの差異の影響の受けやすさ
- 期待できる精度と影響因子
- 用いる鉛直アレー観測記録
横浜市強震観測網(READY)：9地点
KMMH16：KIK-net益城（2016年熊本地震）

ガイドラインでは、下記の点にも記述を予定

- ・ N値からS波速度を推定する誤差の影響（実務では多くの場合、標準貫入試験のみ）
- ・ その場合の常時微動観測等により妥当性の根拠を補強する方法

EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

4

1-4 初期地盤モデル（s波速度構造）の設定



地盤調査結果の妥当性確認⇒鉛直アレー観測記録
鉛直アレー観測記録の場合、弱震観測記録の地表／地中のスペクトル比に
対する最適化によって、初期モデルを修正する

- 拡張ベイズ法
- GA（遺伝子アルゴリズム）
- 焼きなまし法

層厚を固定してs波速度を最適化することが多い。
減衰は安定性が高くない。
実際の観測スペクトルも卓越周期は安定するが、増幅率はばらつくので当然。

設計等の実務で地震観測記録がない場合、常時微動のH/Vスペクトルで卓越周期を確認し、必要に応じて初期モデルを修正することが考えられる

この場合は、s波速度の修正のみ。
本委員会では想定すべきは、この条件。微動のアレー探査や表面波探査で、さらにs波速度の精度を高めることも今後は考えられる。
ただし、実務上はそこまでするならPS検層実施かとも考えられる。

2-2 最適化モデルの例（KMMH16）



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ている。

ここでは、KMMH16（益城）の例を示す。

下記の3通りのモデルで比較する。

- m0：PS検層の値、一律2%の減衰
- m1：PS検層の値、散乱減衰考慮（福島・翠川(1994)）
- m2：栗田(2017)による最適化モデル

弱震記録として、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（4月の余震は本震の影響の可能性があるので避けた）。

【検討方法】

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(Dynej)、地表波を観測波と比較する。

2-3 栗田によるKMMH16モデルの最適化



GA (遺伝的アルゴリズム) による最適化 S波速度と減衰を未知量、層厚と密度を既知として実施。

$$J = \frac{1}{\sum_{i \in A} \sum_{j=1}^{N_f} w_j(\omega_j) \{ \ln |R_i(\omega_j)| - \ln |H_j(\omega_j)| \}^2} \quad (1)$$

ここで、 $R_i(\omega_j)$: 観測記録のS波群部分のフーリエスペクトル比、 $H_j(\omega_j)$: SH波の理論伝達関数、 $w_j(\omega_j)$: 重み係数、 N_f : 周波数領域における伝達関数のデータ数、 A : スペクトル比および伝達関数の組合せの集合、をそれぞれ表している。

減衰は、ひずみ依存の項と散乱による周波数依存の項でモデル化

$$h = h_0(\gamma) + h_1(f) \quad (2a)$$

$$h_1(f) = \alpha \cdot f^\beta \quad (2b)$$

ここで、 h : 全減衰定数、 $h_0(\gamma)$: ひずみ依存減衰、 $h_1(f)$: 周波数依存減衰、 γ : せん断ひずみ、 f : 周波数、 α : 周波数依存減衰の係数、 β : 周波数依存減衰のべき乗項、である。

表3 弱震動時の最適地盤モデルの減衰定数

方向	減衰定数
NS	$h_1 = 0.026f^{0.600}$
EW	$h_1 = 0.023f^{0.608}$

EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

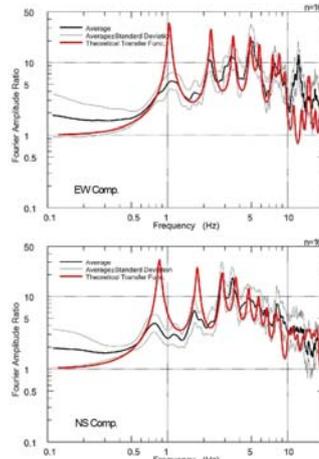


図8 弱震動記録の平均フーリエスペクトル比と弱震動時の最適地盤モデルの理論伝達関数の比較 (G1.0m/G1-252m)

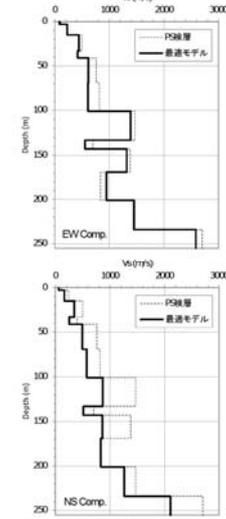


図9 弱震動時の最適地盤モデルのV分布図

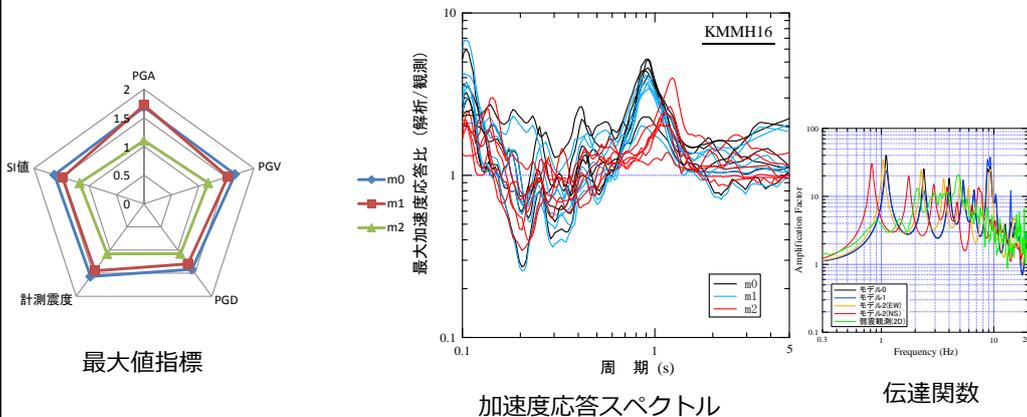
出典: 栗田哲史, Kik-net益城における2016年熊本地震の記録に基づく表層地盤の非線形増幅特性、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.73、No.4、2017年

2-4 最適化モデルの例 (解析結果の比較)



6地震での最大値指標の平均を、レーダーチャートで示す。
 ⇒最適化モデルの誤差は1割程度だが、PS検層モデルでは5割程度である。散乱減衰を考慮した方がやや誤差は小さい。指標ではPGAの誤差がやや大きいが大差はない。

最適化モデルも一次のピークは過大ではあるが、1秒以下は変動幅が収まっている



EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

3-1 PS検層モデルの不確かさ（対象地点）



横浜市強震観測点鉛直アレー

横浜市強震観測点150点のうち、9点で鉛直アレー

（現在の観測点は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全地点でPS検層が実施されている

1点での結果で精度の定量的な議論は困難だが、9点で共通の地震で検討すれば議論は可能。

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・三角州	14.9	保土ヶ谷区
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

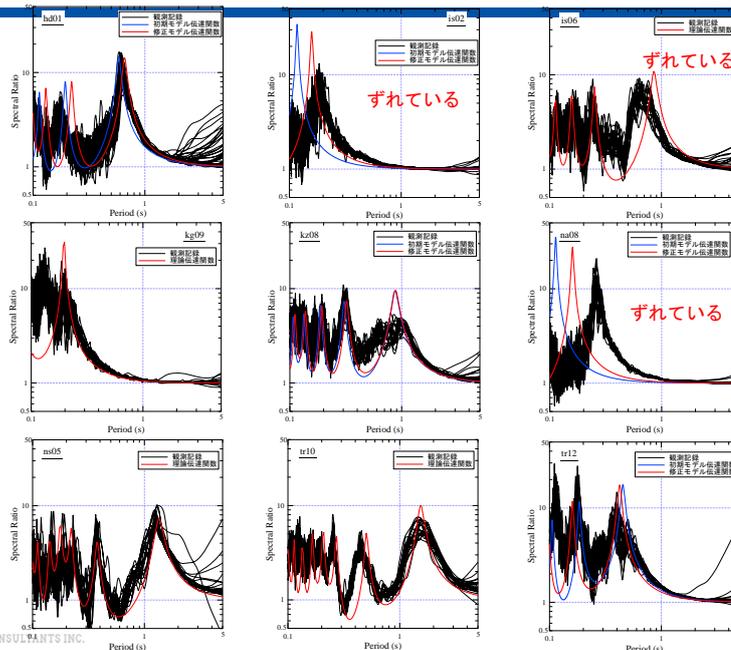
EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

9

3-2 スペクトル比と伝達関数



9点のうち3点で卓越周期がずれている。浅い方がずれやすい？
全体としては、PS検層の精度は高い



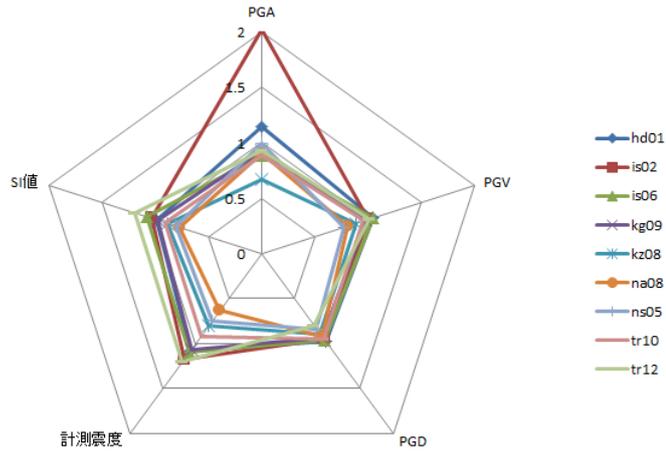
EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

10

3-3 最大値指標のレーダーチャート



一次元重複反射理論（線形、Dyreq）により、地中波を入力して、地表波を算定。
 計算値/観測値、計測震度はレーダーチャート化する上では、加速度に戻して比の形にした
 5-6地震の結果を平均してレーダーチャート作成
 最大加速度PGAは幅が大きい（いわゆる倍半分）が、他は2割程度
 ピークがずれていると誤差も大きい



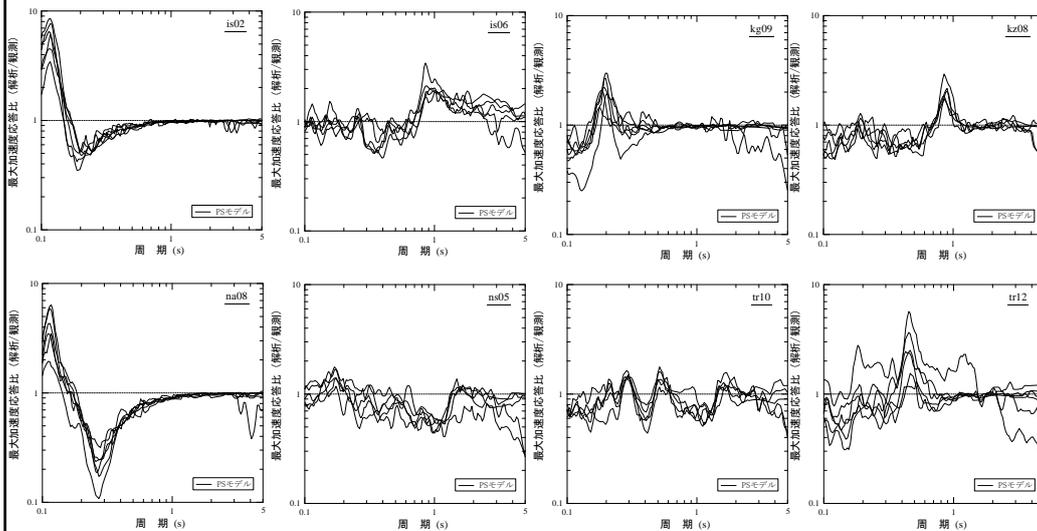
EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSU

11

3-4 加速度応答スペクトル（減衰5%）



伝達関数のピークの箇所では山谷（観測値のピークで谷）
 表層が薄く卓越周期が短い地点で観測との差が大きい⇒PGAのばらつき



EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

hd01は後掲するので省略

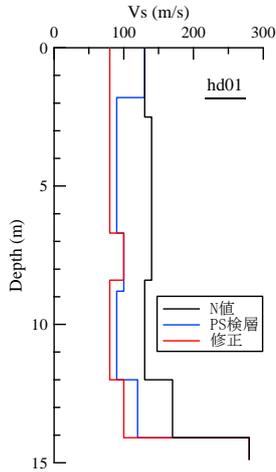
12

4-1 PS検層とN値モデルの比較例（対象地点）

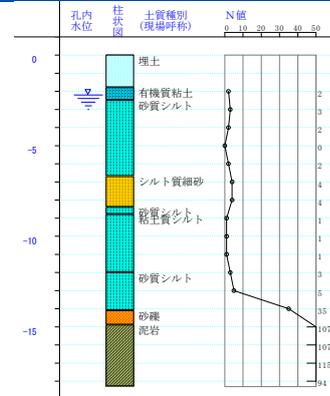


実際はPS検層もなく、標準貫入試験によるN値から設定することも多い。

横浜市9点のうち、hd01を例に比較計算を実施



EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.



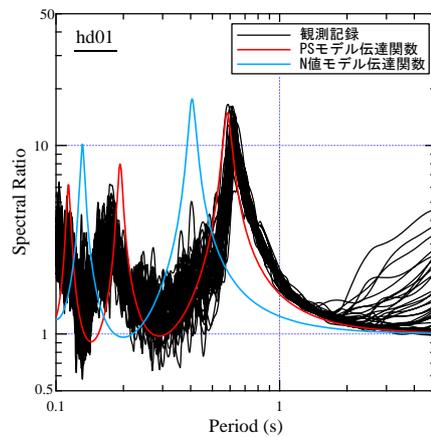
No.	土質	層厚(m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	平均N値	換算S波速度 (m/s)
1	埋土	1.8	1.7	130	—	130
2	有機質粘土	0.7(2.5)	1.6	90	2	130
3	砂質シルト	4.2(6.7)	1.7	90	3	140
4	シルト質細砂	1.7(8.4)	1.7	100	5	140
5	砂質シルト	0.4(8.8)	1.7	100	2	130
6	粘土質シルト	3.2(12.0)	1.6	90	2	130
7	砂質シルト	2.1(14.1)	1.7	120	5	170
8	砂礫	0.8(14.9)	2.0	280	35	—
9	泥岩・土丹	3.4(18.3)	2.0	600	—	—

13

4-2 PS検層とN値モデルの比較例（地盤モデルの差異）



PS検層モデルは概ね一次のピークが観測と合っているが、N値モデルはずれている。必ずしもN値推定でずれるわけではないが、この程度の差異は十分あり得る。



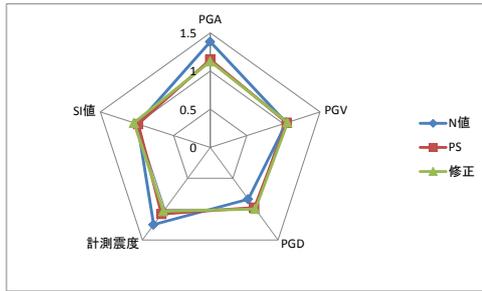
EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

14

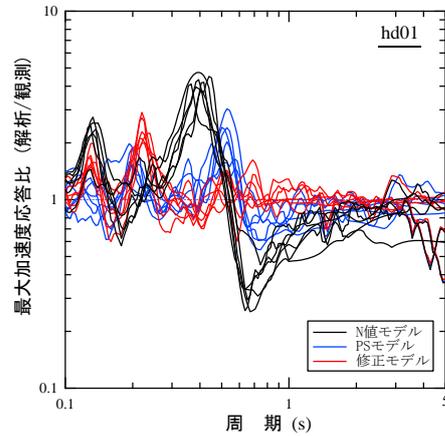
4-3 PS検層とN値モデルの比較例（結果）



N値モデルは卓越周期がずれているので、応答スペクトルの比で山谷が大きい指標値でもN値モデルでは誤差がある



最大値指標

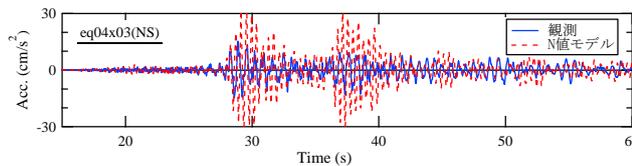


加速度応答スペクトル (減衰5%)

EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

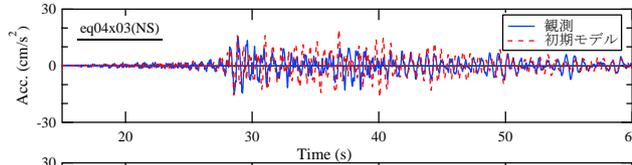
15

4-4 PS検層とN値モデルの比較例（波形）

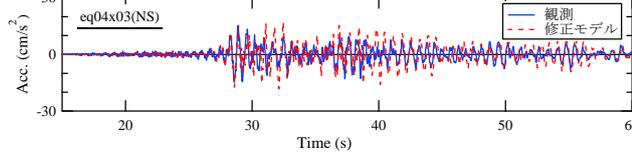


$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_t (x_{obs} - x_{cat})^2}{N}}$$

N値モデル
RMS=8.032



PS検層モデル
RMS=5.229



修正モデル
RMS=4.536

EIGHT-JAPAN ENGINEERING CONSULTANTS INC.

16

5-1 線形問題における予測性能



- 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。
- 評価指標として何がいいかは難しい。
- 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）。
- 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。
- 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。



ご清聴いただきありがとうございました