

Workshop:
非線形地震応答解析の検証と妥当性確認の方法と事例

1次元地震応答解析法に関する検証と妥当性確認事例

平成31年2月13日

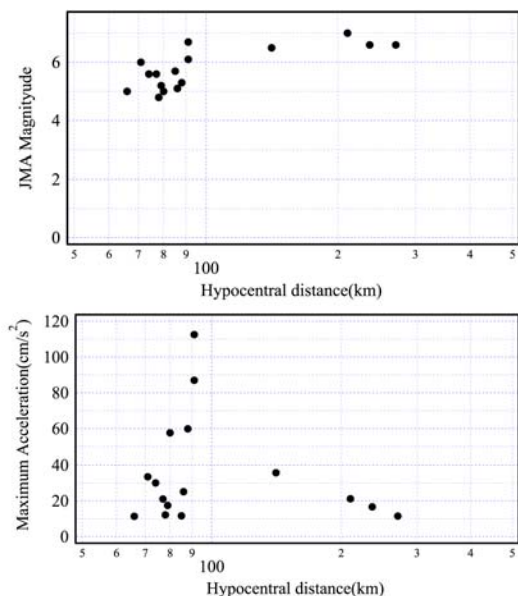
地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の
体系化に関する研究小委員会

中村 晋(日本大学工学部土木工学科)

対象解析法とその検証と妥当性確認の実施手順

- 対象コード：時間領域での1次元地震応答解析コー「Dynes3D」
- 妥当性確認の対象：鉛直アレー地震観測と詳細な地盤調査・土質試験が実施されている新太田変電所
- 検証と妥当性確認の実施手順
 - 材料モデル, 全体解析モデルの検証(済み)
 - yusayusa, Desraとの比較(HD, RO):除荷時の処理が異なっている.
 - 初期地盤・構造モデル, 全体解析モデルの検証と妥当性確認
 - 初期地盤・構造モデルの妥当性：初期地盤・構造モデルに係わる不確実さを考慮し, 低加速度レベルの記録の再現性と最適な初期地盤・構造モデルの選択
 - 全体解析モデルの妥当性確認
 - 材料特性モデルの妥当性確認：材料特性モデルに係わる不確実さを考慮し, 複数のモデルに対する実験の再現性
 - 全体解析モデルの妥当性確認：地盤・構造モデルや材料特性モデルに係わる不確実さを考慮し, 地震観測記録の再現性(中・高加速度レベルの記録)

新太田変電所で観測された地震



観測期間に1987年千葉県東方沖地震を含む16地震観測されている。

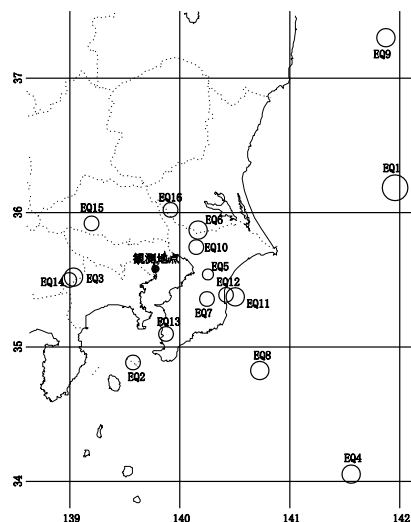


図 地表最大加速度，Mjと震源距離の関係

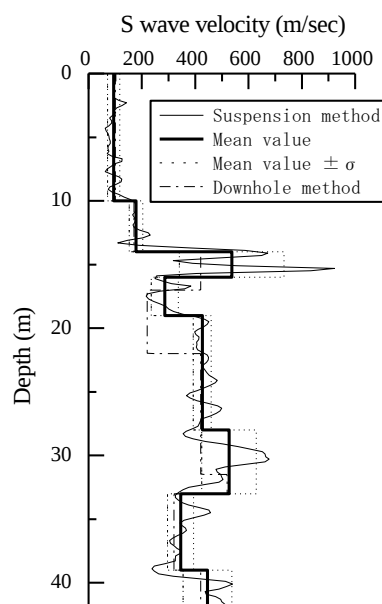
図 震源位置

地震観測地点周辺における地盤のS波速度構造

■地震計の設置位置：GL-1.5m,
GL-22.3m, GL-38.5m, GL-80m

■地盤調査：

- 地震観測地点でダウンホールPS検層(通常法)
- そこから約40m離れた点 (No.A 孔) でダウンホールPS検層(0.5m 間隔)とサスペンションPS検層



初期地盤・構造モデルの妥当性確認

■目的：地盤構造モデルの不確かさを踏まえた再現性の確認
解析モデルの妥当性確認に用いる地盤構造モデルの選定

➤初期地盤構造・地盤物性モデルの不確かさ

◆構造(S波速度)：

- 地盤調査・探査データに応じた推定 {N値, PS検層(ダウンホール法, サスペンション法)} など → **不確かさを考慮**

◆地盤物性

- せん断波速度(せん断弾性係数)：水平成層近似，探査データに応じた推定 {N値, PS検層(ダウンホール法, サスペンション法)} など

→ **不確かさを考慮**

- 単位体積重量：土質・地質などに応じて → **確定量**
- 減衰定数 → **確定量**
- 地下水位 → **確定量**
- その他

不確かさを考慮した初期地盤・構造モデル

➤不確かさを考慮した地盤モデル

- PS検層に基づくモデル(G_model 1)
- サスペンション法に基づくモデル(平均モデル：G_model 2)
- サスペンション法に基づくモデル(詳細モデル：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)

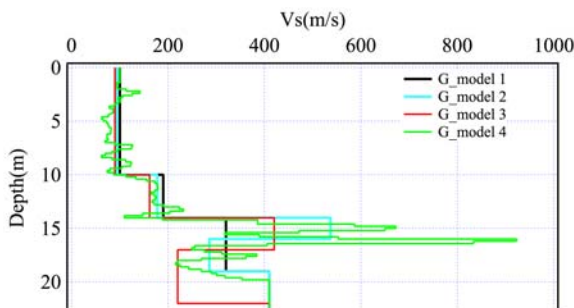


図 S波速度構造モデルの比較

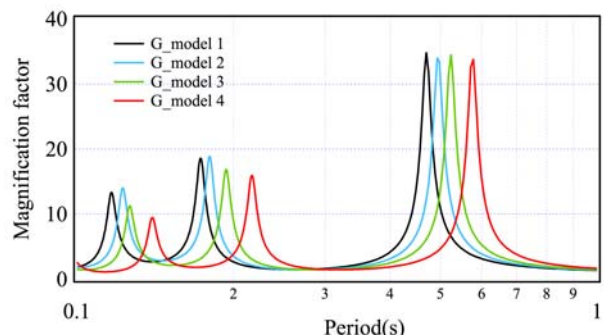


図 周波数応答関数(地表/GL-22.3m)の比較

解析条件および再現性評価指標

■解析条件

- ・層分割：1要素高さ 1m
- ・減衰特性：Rayleigh減衰 $\alpha=0$, $\beta=0.01$
- ・時間積分：Newmark β 法

■再現性の評価指標

- 評価対象の地震動特性
 - ・最大値：PGA, PGV, アライアス強度
 - ・周波数特性:スペクトル強度,複数周期における応答スペクトル
- 評価対象地震：GL-22.3mにてPGAが 0.04m/s^2 以下の地震
- 評価指標：各地震動特性に関する解析による推定値/観測値

観測と解析による地表(GL-1.5m)位置における加速波形, 速度応答スペクトルの比較(地震2)

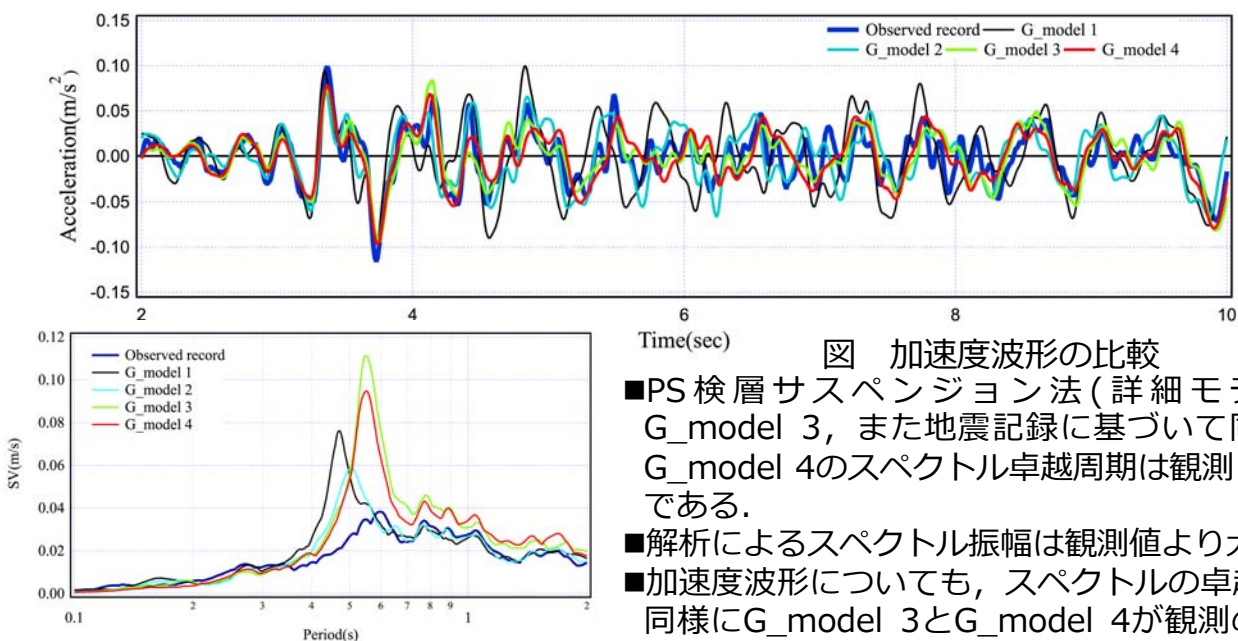


図 速度応答スペクトルの比較

図 加速度波形の比較

- PS 検層サスペンション法(詳細モデル)の G_model 3, また地震記録に基づいて同定した G_model 4のスペクトル卓越周期は観測と同程度である.
- 解析によるスペクトル振幅は観測値より大きい.
- 加速度波形についても, スペクトルの卓越周期と同様にG_model 3とG_model 4が観測の再現性が高い.

各評価指標に関する観測値と計算値との比較 (最大値指標)

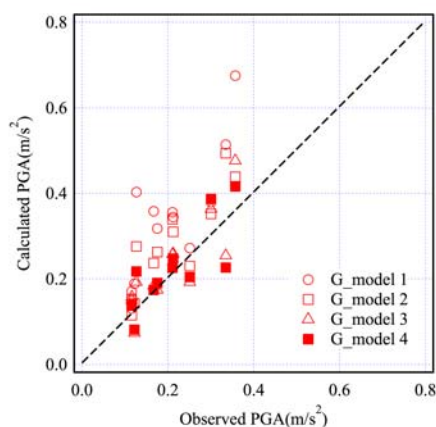


図 PGAの比較

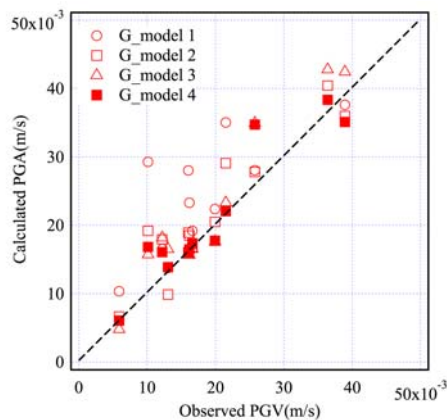


図 PGVの比較

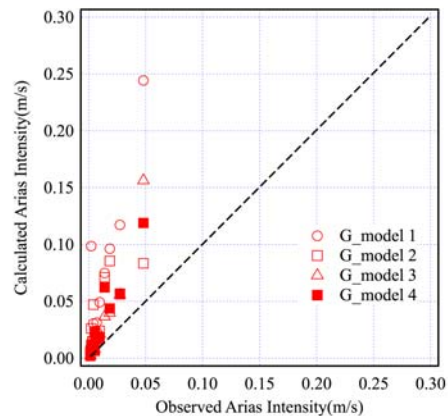


図 アライアス強度の比較

各評価指標に関する観測値と計算値との比較 (スペクトル指標)

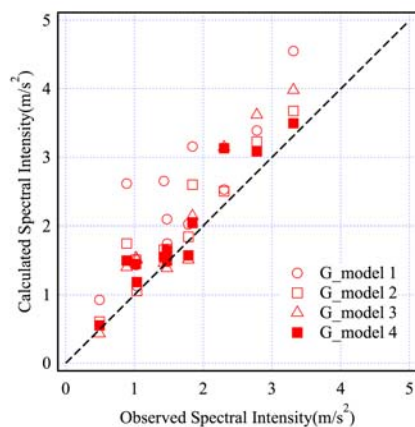


図 スペクトル強度の比較

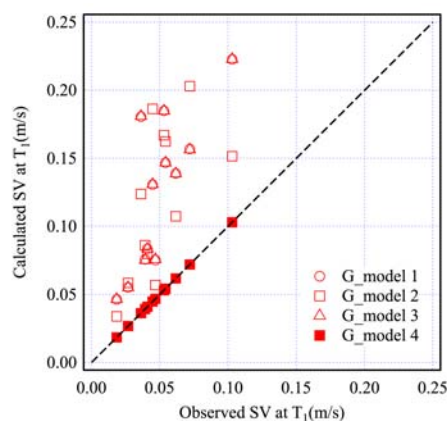


図 特定周期(0.5秒)の
スペクトル比較

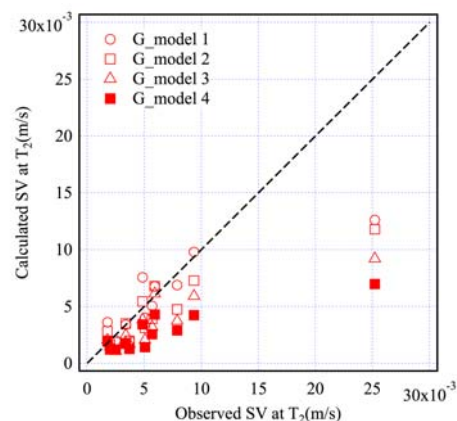


図 特定周期(0.125秒)の
スペクトル比較

再現性の評価とモデル選択

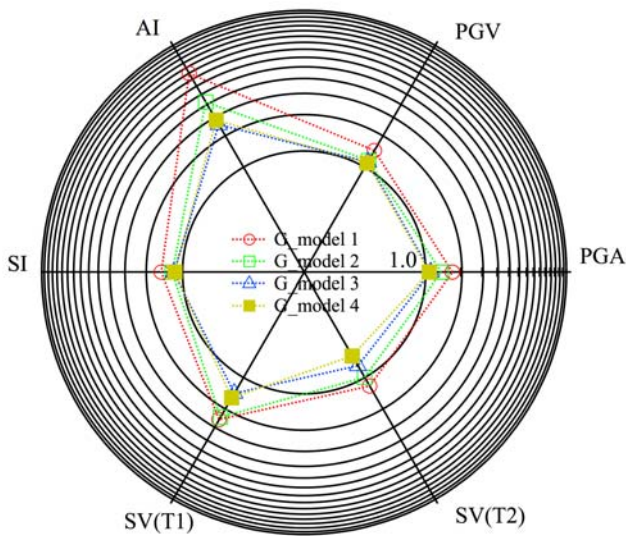


図 地盤モデルに応じた評価指標平均値の比較

表 再現性評価指標の比較

G_model Index	G_model 1	G_model 2	G_model 3	G_model 4
PGA	1.70	1.37	1.12	1.09
PGV	1.47	1.18	1.14	1.11
AI	8.07	4.30	2.61	2.88
SI	1.53	1.24	1.20	1.18
SV1	2.57	2.43	1.44	1.59
SV2	1.22	1.01	0.78	0.63

- 再現性評価指標 = 解析値/観測値 (12地震の平均)
- Arias強度は全モデルで解析値が観測値の2倍以上の大きさ
- G_model 4 は他の model に比べ、PGA,PGV,SI値の推定結果がすぐれている(1.2以下) → **G_model 4を選択**

応答解析モデルの検証と妥当性確認： 材料特性モデルの妥当性確認

■目的：材料特性モデルの不確実さを踏まえた非線形挙動の再現性確認

➤地盤材料モデルの非線形挙動に関する不確実さ：

◆初期剛性 → 確定量(初期地盤・構造モデルで選定されたVsより推定)

◆強度特性 → 未知量

◆応力-ひずみモデルとパラメータ：応力-ひずみモデル(関数近似モデル，弾塑性論モデルなど)，骨格曲線(繰返しせん断特性)に関するパラメータ，履歴に関するパラメータ，間隙水圧の発生に関するパラメータ

→ **モデル設定の不確実さを考慮（関数近似モデル：HDモデル，ROモデル，吉田モデル，各モデルパラメータの設定）**

■再現性の評価：地盤材料モデルの推定値と繰返しせん断特性との比較

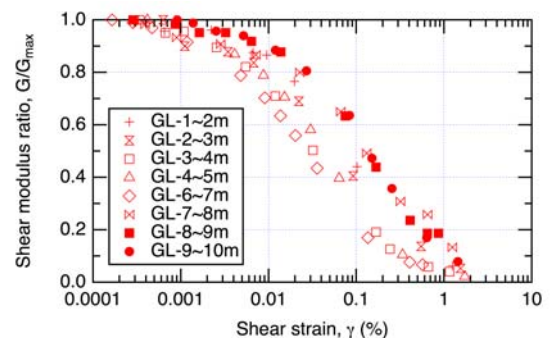


図 繰返しせん断特性

材料特性モデルのパラメータ設定

■**基本**：得られている条件に応じ，各モデルの特性を踏まえて，各モデルのパラメータ設定方法を適用 → Best Estimate

■**HDモデルのパラメータ**：せん断弾性係数，基準ひずみ γ_r or せん断強度

- せん断弾性係数：初期地盤・構造モデルのVsより算出
- 基準ひずみ γ_r → 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/G_0 が 0.5 のひずみを基準ひずみとして設定(実験の不確かさの影響も含まれる)

■**ROモデルのパラメータ**：せん断弾性係数，せん断強度， α ， β

- せん断弾性係数：初期地盤・構造モデルのVsより算出
- せん断強度：HDモデルと同様に基準ひずみより推定
- α ：破壊ひずみ($\gamma_f=1.0\%$)として推定($\gamma_f=(1+\alpha)\gamma_r$)
- β ：得られた α より $\alpha=2^{\beta-1}$ より推定

■**吉田モデルのパラメータ**：繰り返しせん断特性，基本骨格

HDモデルの妥当性確認

■**再現性の評価指標**：相対誤差 =
(実験値(γ)-推定値(γ))/実験値(γ)

➤**G/Goについて**

- せん断ひずみがほぼ 10^{-3} まで ± 0.2 の範囲である。
- 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。

➤**hについて**

- 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。
- せん断ひずみがほぼ 10^{-3} 以上にて0.5から1.0程度の相対誤差，ひずみの増加により相対誤差が大きくなっている。

• **実験の再現性**：G/Goはある程度有している(相対誤差には実験値の不確かさも含まれている)。

減衰定数	$h = \frac{4}{\pi} \left(1 + \frac{\gamma_r}{\gamma} \right) \left[1 - \frac{\gamma_r}{\gamma} \cdot \ln \left(1 + \frac{\gamma_r}{\gamma} \right) \right] - \frac{2}{\pi}$
$\frac{G}{G_0}$	$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma / \gamma_r}$

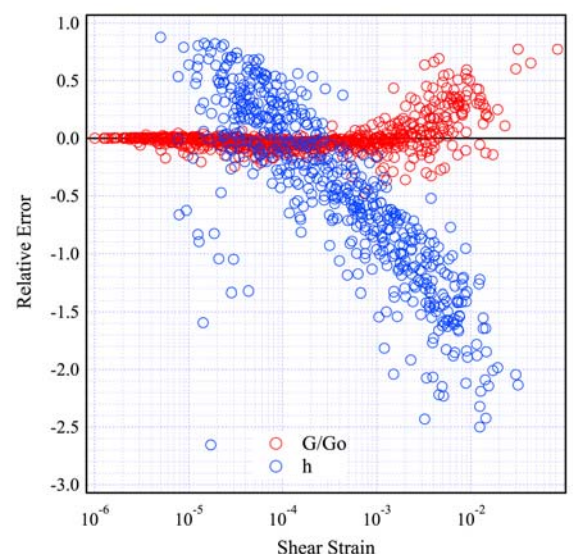


図 G/Go, h の相対誤差とせん断ひずみの関係

ROモデルの妥当性確認

■再現性の評価指標：相対誤差＝
(実験値(γ)-推定値(γ))/実験値(γ)

➤G/Goについて

- せん断ひずみが 10^{-4} 前後にて実験値より0.1から0.4程度大きい.
- 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.

➤hについて

- 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.

➤ **実験の再現性**：よいとはいえない(相対誤差には実験値の不確かさも含まれている).

$$\text{減衰定数} \quad h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta-1}{\beta+1} \left(1 - \frac{G}{G_{max}} \right)$$

$$G/Go = 1 - \frac{G}{G_{max}} \left[1 + \alpha \left(\frac{G}{G_{max}} \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^{\beta-1} \right]$$

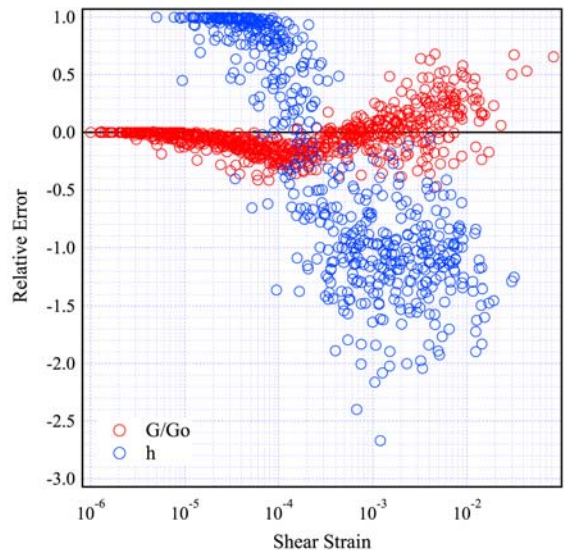


図 G/Go, hの相対誤差とせん断ひずみの関係

応答解析モデルの妥当性確認

■目的：妥当な初期地盤構造モデルを用い，地盤材料の非線形モデルの不確かさを踏まえた再現性の確認

➤応答解析モデルの不確かさ

◆地盤・構造モデル：初期地盤・構造モデルの妥当性確認に基づいて選択されたモデル(地震観測記録より同定された地盤構造モデル;不確かさを考慮)

◆地盤物性の材料特性モデル

- モデルの不確かさの影響を考慮(HDモデル，ROモデルおよび吉田モデル) ← せん断弾性係数などの不確かさについては初期地盤・構造モデルの結果を考慮

•留意事項：水平成層近似が非線形応答に及ぼす不確かさ(例えば，強度の設定など)については考慮していない。 → **重要な課題**

解析条件および再現性評価指標

■解析条件

- ・層分割：1要素高さ 1m
- ・減衰特性：Rayleigh減衰 $\alpha=0$, $\beta=0.01$
- ・時間積分：Newmark β 法
- ・間隙水の影響：全応力解析

■再現性の評価指標

➤評価対象の地震動特性

- ・最大値：PGA, PGV, アライアス強度
- ・周波数特性:スペクトル強度,複数周期における応答スペクトル

➤評価対象地震：GL-22.3mにてPGAが 0.04m/s^2 以上の地震

➤評価指標：各地震動特性に関する解析による推定値/観測値

観測と解析による地表(GL-1.5m)位置における加速波形, 速度応答スペクトルの比較(地震11:千葉県東方沖地震)

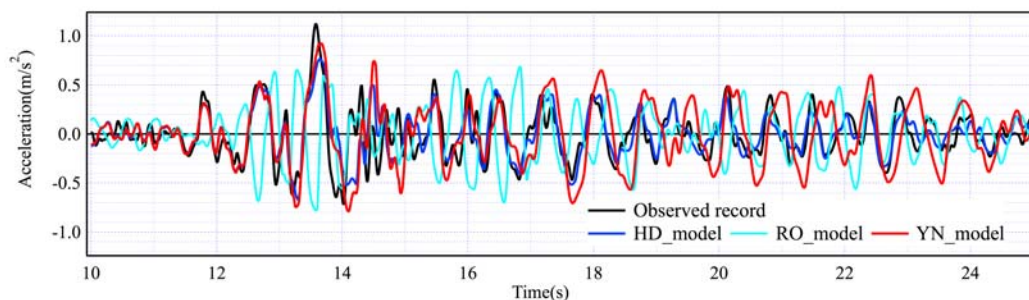


図 加速度波形の比較

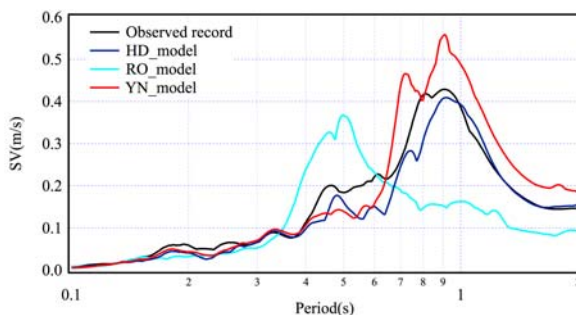


図 速度応答スペクトルの比較

■RO_modelによる応答は非線形化の程度が小さく卓越周期が大きくことなり, 波形形状も異なっている。

■HD_model, YN_modelとも比較的再現性が高い。

■YN_modelは最大加速度を与える時刻以外で観測記録より大きな値, HD_modelは同程度の値となっている。

各評価指標に関する観測値と計算値との比較（最大値指標）

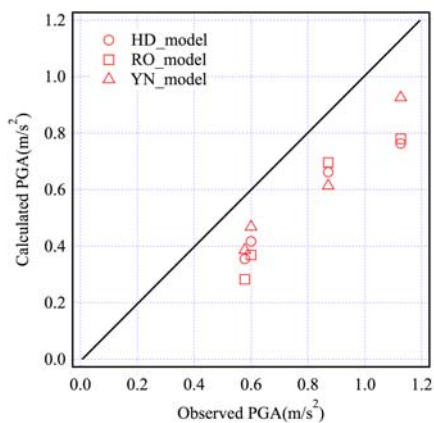


図 PGAの比較

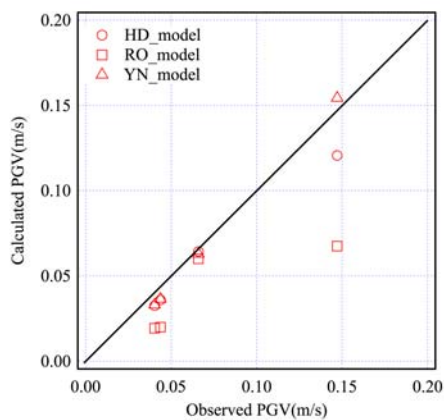


図 PGVの比較

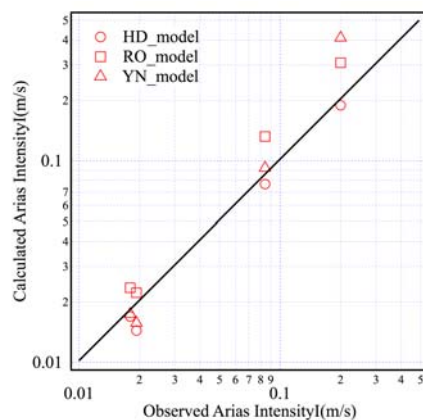


図 アライアス強度の比較

各評価指標に関する観測値と計算値との比較（スペクトル指標）

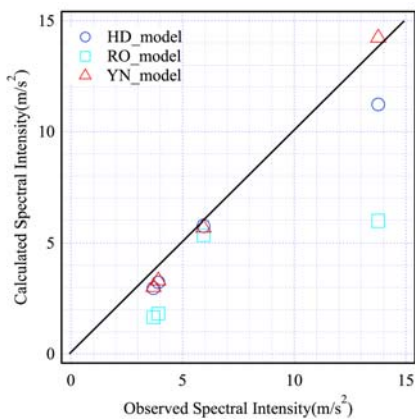


図 スペクトル強度の比較

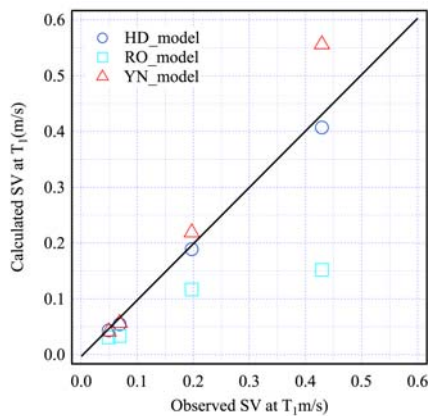


図 特定周期(0.9秒)の
スペクトル比較

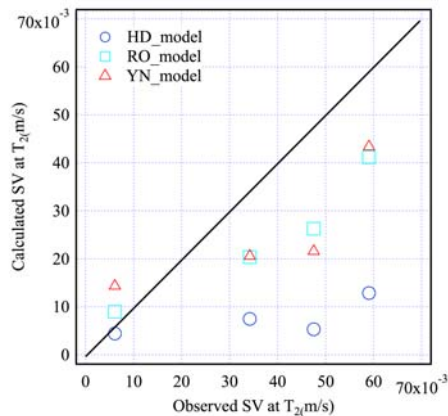


図 特定周期(0.2秒)の
スペクトル比較

再現性の評価

表 再現性評価指標の比較

Non_linear model Index	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
SV(T1)	0.90	0.64	1.02
SV(T2)	0.83	0.97	1.04

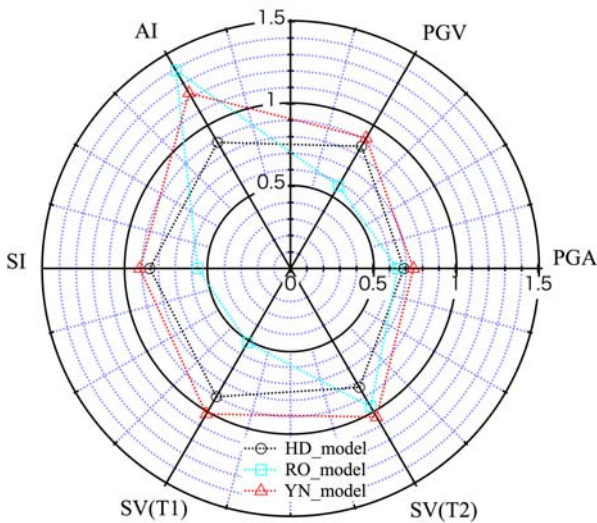


図 材料特性モデルに応じた評価指標平均値の比較

- 再現性評価指標 = 解析値/観測値 (4地震の平均)
- ROモデルは応答ひずみレベルがせん断剛性を実験値より大きく推定している 10^{-4} から 10^{-3} とは小さく、最大値、周波数応答性状とも大きく異なっている。
- 骨格曲線と減衰を表す履歴特性が実験による繰り返しせん断特性を表す吉田モデルが最も再現性がよい(6指標平均の平均=0.98)。

予測性能の評価

- シミュレーションモデルを用い、再現性能を評価し妥当性を確認した条件を超える条件(地震作用)に対する計算結果の不確かさ
- 解析手法、モデルの評価対象とする事象によって、対象とする不確かさは異なる：地震作用の評価、地盤の崩壊挙動、地盤の変形挙動、基礎構造物の応答挙動など
- Ex:1次元地震応答解析：地震作用の評価
- 再現性の評価で考慮した不確かさ
 - 初期地盤・構造モデル：水平成層近似、地盤探査など
 - 全体解析モデル：材料特性モデル
- 予測性能の評価で考慮する不確かさ(今後の検討)
 - 地震作用