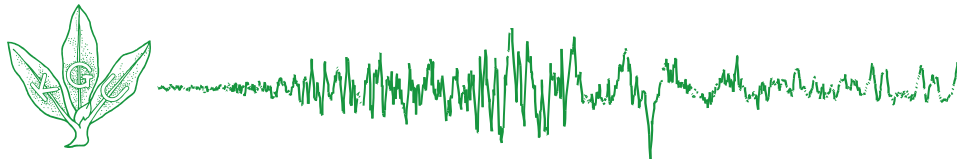


等価線形解析の最終形 Duncan-Changの一般化



関東学院大学・工学総合研究所
吉田 望

1

自己紹介

- 1974年 京都大学工学研究科建築専攻 博士課程
- 1977年 京都大学防災研究所研修員
- 1979年 佐藤工業
 - University of British Columbia
- 2002年 応用地質
- 2005年 東北学院大学
 - 環境建設工学科
 - 名誉教授, 客員教授(2017~)
- 2017年 関東学院大学
 - 総合研究推進機構(~2020)
 - 防災・減災・復興学研究所 所員(2020~2023)
 - 工学総合研究所(2023~)
- 2024年 国立臺灣科技大學
 - 客員教授

2

等価線形解析の最終形

3

SHAKEの問題点

- 査読論文がない
 - 単なる大学の報告
 - 既往の研究のレビューがない
 - 式を間違えている
 - 用語の使い方がおかしい
- 工学的価値を否定するつもりはまったく無い
- SHAKEが固有名詞の様に使われている
 - オリジナルのSHAKEを使っている人はいない
 - ▶ SHAKE91でも理論の枠組みは変わっていない
- いくつかの欠点とその改良
 - せん断応力の過大評価(1)(2)
 - 高振動領域での増幅の過小評価

4

用語の問題

■ 等価

- Equivalent
 - ▶ having the same value, purpose, job etc. as a person or thing of a different kind (Longman 英英辞典)
 - ▶ 価値や価格が同じであること (デジタル大辞泉)
 - ▶ 与えられた2つ項がある同値関係を満たすこと。(Wikipedia)
 - ▶ 与えられた2つの命題の真理値が互いに等しいこと。(Wikipedia)
- 結果が同じでなければ「等価」ではない
 - ▶ SHAKEでは結果な等価ではない
 - ▶ 単なる近似法
- 最近では、線形に置き換えたものを等価線形というケースも
 - ▶ 言葉は時代と共に変わる?

■ 他は、理論のところで

5

地震応答解析における複素剛性法

■ 重複反射理論

- 妹澤克惟(1932): 振動論

■ 複素剛性

- Sorokin(1957): Internal and external friction by vibrations of rigid bodies
 - ▶ Sorokinの仮設, Sorokinの減衰

■ 実用的解法

- Schnabelら(1972): SHAKE
- 周波数領域の解法
- 等価線形化法

6

SHAKEの方法: 応力-ひずみ関係

■ Voigtモデル

$$\tau = G\gamma + C\dot{\gamma}$$

■ 調和振動

$$\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$$

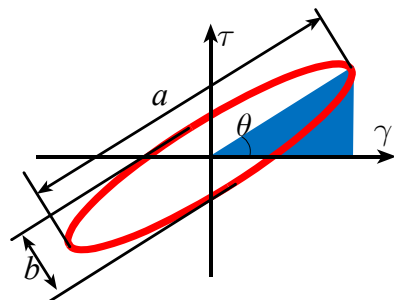
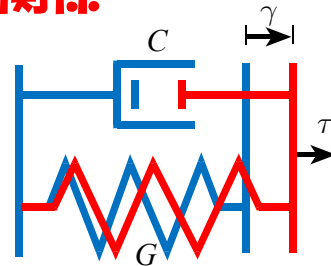
$$\tau = G\gamma \pm C\omega \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2}$$

● 応力-ひずみ関係は周波数依存

- ▶ 実材料は周波数に依存しない
- ▶ Cを周波数依存

$$C = 2\beta G / \omega$$

$$\tau = G\gamma \pm 2\beta G \sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2}$$

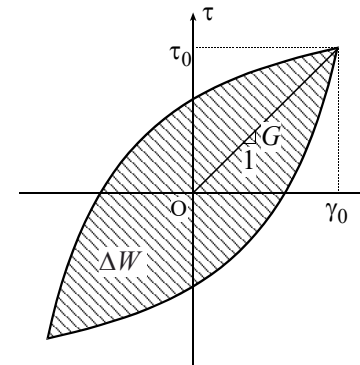


7

地盤材料の非線形性(地震応答解析用)

■ 繰返しせん断試験

- 一定応力载荷試験
- 10サイクル目の履歴曲線



ひずみ依存性
割線剛性 G
減衰定数 h

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}, \quad W = \frac{1}{2} G \gamma_0^2$$

G - γ , h - γ 関係

8

■ 減衰定数

$$\Delta W_V = \int_{-\gamma_0}^{\gamma_0} \left\{ (G\gamma + 2\beta G\sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2}) - (G\gamma - 2\beta G\sqrt{\gamma_0^2 - \gamma^2}) \right\} d\gamma = 2\beta G\pi\gamma_0^2$$

$$\beta = h$$

$$2\beta G\pi\gamma_0^2 = 4\pi\beta \left(\frac{G\gamma_0^2}{2} \right) = 4\pi\beta W$$

■ 複素表示 (Sorokinモデル)

$$\bar{\gamma} = \gamma_0 e^{i\omega t}$$

● 応力-ひずみ関係

$$\bar{\tau} = G\bar{\gamma} + C\dot{\bar{\gamma}}$$

$$\bar{\tau} = G(1 + 2i\beta)\gamma_0 e^{i\omega t} = \bar{G}_S^* \bar{\gamma}$$

$$\bar{G}_S^* = G(1 + 2i\beta) \quad \text{: 複素剛性}$$

複素数にはアッパーバーをつける

9

■ β の名称

● 定義

$$\beta = \frac{C\omega}{2G} \quad C = 2\beta G / \omega$$

- critical damping ratio (Schnabelら)
- fraction of critical damping (Lysmer)

● 臨界減衰比

$$\beta_1 = \frac{C}{2\sqrt{mk}}$$

● どこにも臨界減衰はない

- ▶ 1自由度系の振動の用語を使った
- ▶ β は材料に固有の定数で、振動系の定数ではない

● 材料減衰定数 (Material damping constant)

- SHAKEの使い方では、たまたま $\beta = h$ となったので、減衰定数として意識されてきた

10

地盤の地震応答解析

■ 運動方程式

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + C \frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial t \partial z^2}$$

● 変数分離

$$\bar{u}(z, t) = \bar{U}(z) e^{i\omega t} \quad \frac{\partial \bar{\tau}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2}$$

● 上の式に代入すると

$$(G + i\omega C) \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial z^2} = -\rho\omega^2 \bar{U}(z)$$

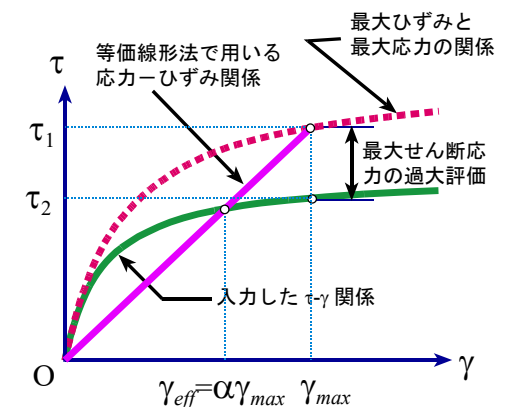
SHAKEのマニュアルには右辺のマイナスはない
もう一度間違えたので、最終の解は正しい

11

SHAKEの短所(1)

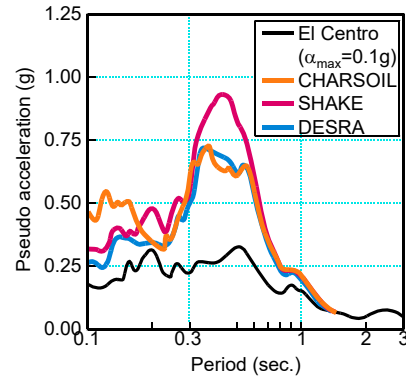
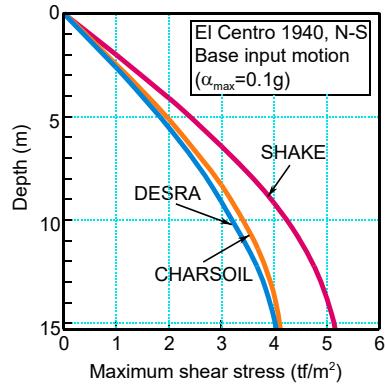
■ せん断応力の過大評価

- せん断強度を過大評価
 - ▶ $1/0.65=1.54$
- 最大加速度の過大評価



12

過去の研究



- 既往の研究では、特定周波数の共振と書いてある

13

等価線形化法と非線形法の比較

■ これまでにわかっていること

- 等価線形解析の欠点
 - ▶ 挙動が単調に変化するものには適用できない
 - ◆ 液状化
 - ▶ 最大せん断応力 → 最大加速度の過大評価
 - ▶ 高振動数領域で増幅の過小評価
 - ▶ 計算時間がかかる
- 等価線形解析の長所
 - ▶ 入力が簡単
 - ▶ 数値計算として安定
 - ◆ 軟弱地盤、逆増幅解析では収束しないことも
 - ▶ 周波数に依存する挙動が扱える

14

適用性に関する問題

■ 過去に多くの比較例

● 小数の例

- ▶ 適切な指標がないから、計算者の目的に合う結論
- ▶ たまたまということもある

■ 適切な評価には

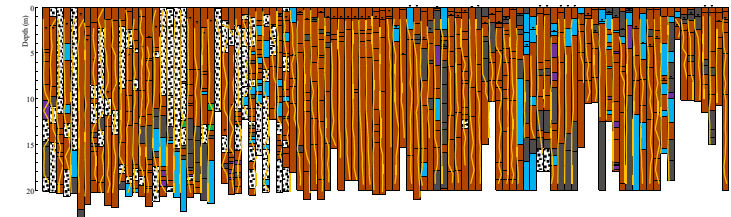
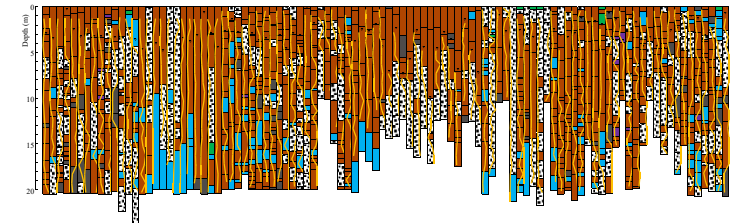
- メカニズムを明らかにする
- 多数の事例で評価

■ 液状化まで...

15

地盤

■ 286サイト



- Sandy soil
- Clayey soil
- Silty soil
- Gravelly soil
- Humic soil
- Other

16

地盤のモデル化

せん断波速度(道路橋の式)

$$V_s = 100N^{1/3} \quad (\text{clayey soil})$$

$$V_s = 80N^{1/3} \quad (\text{sandy soil, other soils})$$

単位体積重量

- データベース

せん断強度

- 砂質土(畑中らの式)

$$\phi = 20 + \sqrt{20N_1} \quad N_1 = \frac{170N}{\sigma'_v + 100} \quad (\sigma'_v \text{ in kPa})$$

- 粘性土(経験式の平均)

$$\tau_f = 19N$$

解析方法

等価線形解析

- SHAKE (DYNEQ)

非線形解析

- YUSAYUSA

応力-ひずみ関係

- 双曲線モデル
- Masing則

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \tau_f \gamma / G_0}$$

Rayleigh 減衰

$$[c] = \alpha [m] + \beta [k]$$

- Q=35 (h=1.43%) (0.5 ~ 6 Hz)

地震波

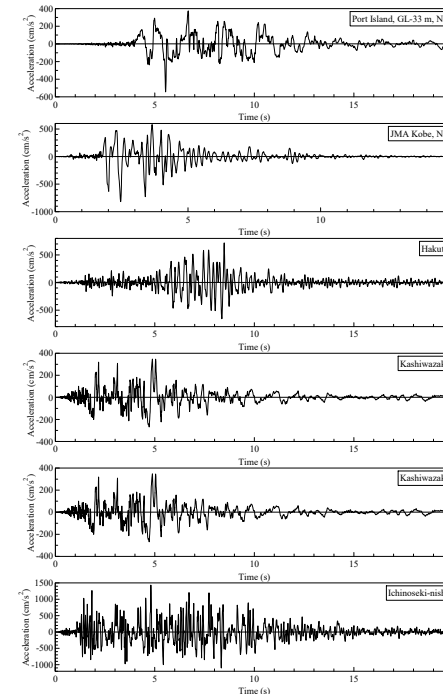
内陸型(内陸型地殻内地震)

- 1995年兵庫県南部地震 Port Island GL-33m NS
- 1995年兵庫県南部地震 JMA神戸海洋気象台NS
- 1999年鳥取県西部地震 伯太NS
- 2004年新潟県中越地震 JMA川口町EW
- 2007年新潟県中越沖地震 東電柏崎刈羽 サービスホールSG1-NS
- 2008年岩手宮城内陸地震 一関西EW

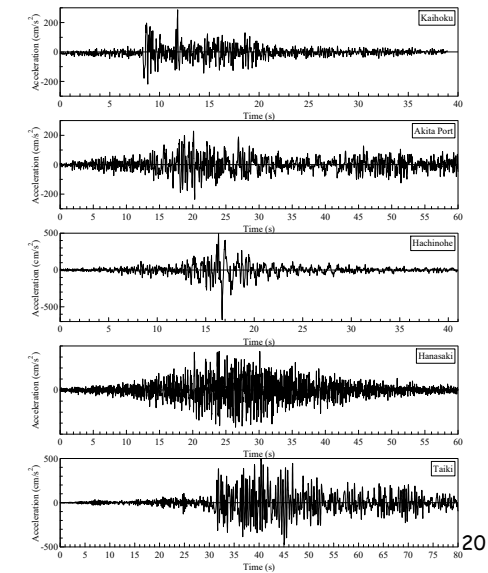
海溝型(海溝型地震)

- 1978宮城県沖地震 開北橋EW
- 1983年日本海中部地震 秋田港EW
- 1994年三陸はるか沖地震 八戸事務所 EW (こちらを使う)
- 1994年北海道東方沖地震 花咲港EW
- 2003年十勝沖地震 大樹EW

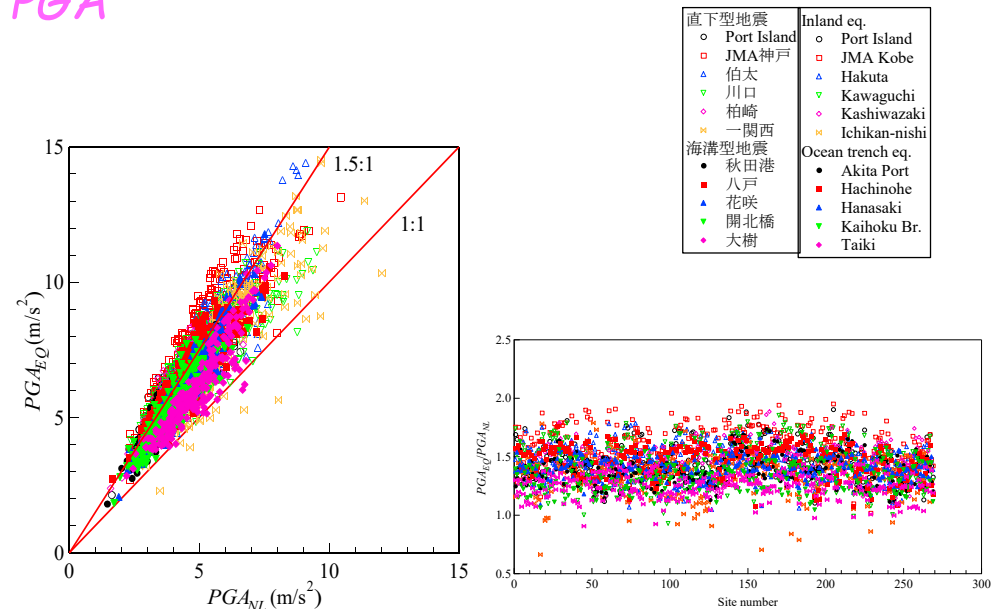
直下型



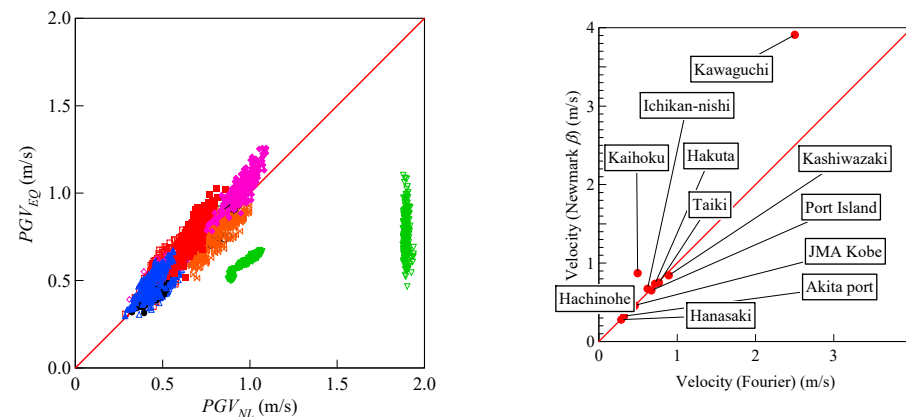
海溝型



PGA

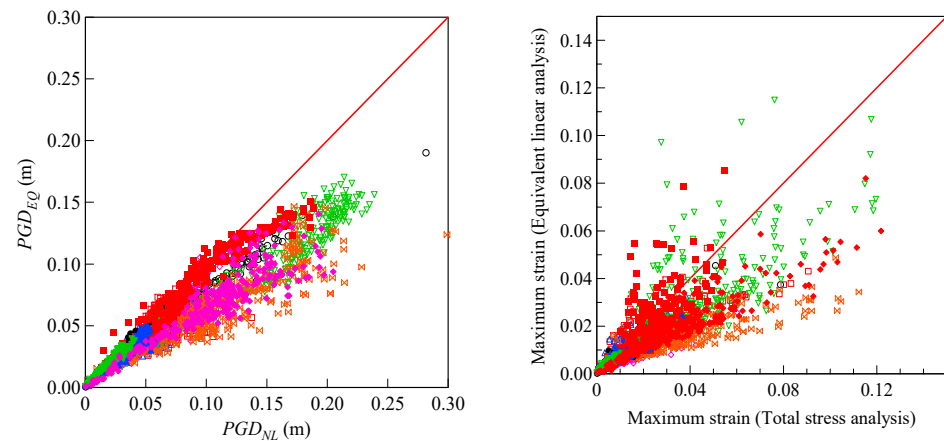


PGV



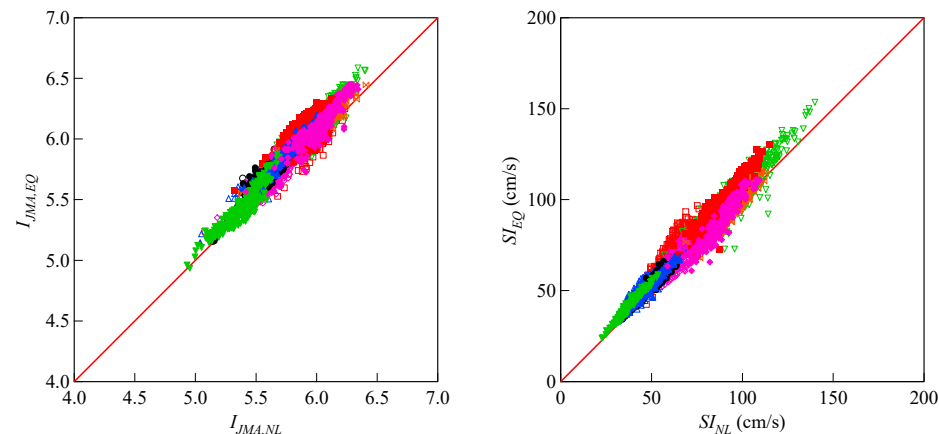
- 基線補正
- 積分方法 0.1HzでHigh pathフィルター

PGD, 最大ひずみ



- 同じ層ではないかも
- 変形モードも影響？

I_{JMA} と SI



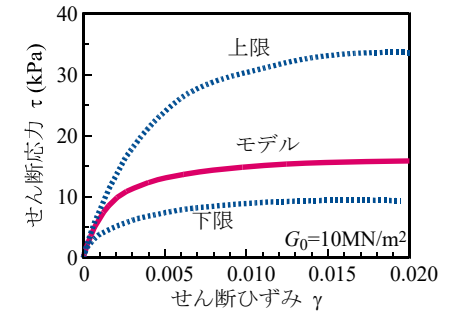
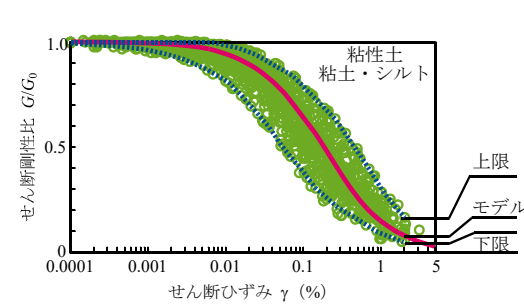
まとめ

- PGA: 50 %
- PGV: 大体OK
- PGD: 過小評価, 30 %, ばらつく
- I_{JMA} : 大体OK(やや過大評価)
- SI: 大体OK(やや過大評価)

25

SHAKEの悪影響

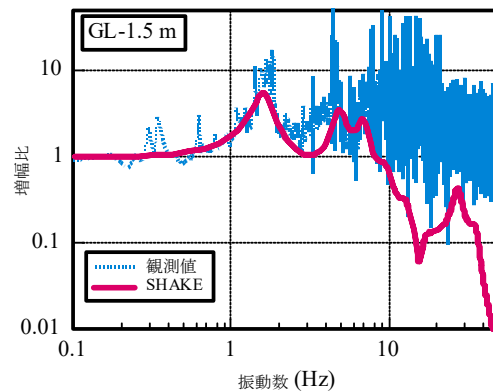
- 応力-ひずみ関係を書かなくなった
 - SHAKEの応力-ひずみ関係は線形
 - ▶ せん断ひずみ \times 収束剛性 = せん断応力
 - 複素の τ と γ の実部を書けば、楕円形の履歴曲線
- $G-\gamma$ 関係と応力-ひずみ関係と等価という意識がない



26

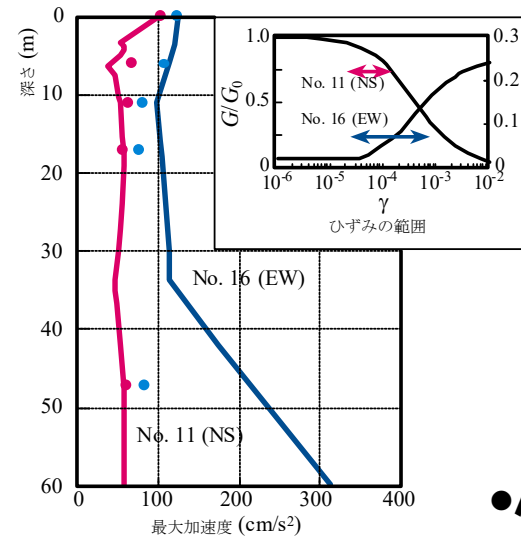
等価線形化法の短所(2)

- 高振動数の増幅の過小評価



27

増幅の過小評価の影響



- 八戸波の逆増幅解析は難しい
- 高振動数成分をカット

28

改良の方向性

■ 大地震

- 加速度の過大評価
 - ▶ せん断強度の過大評価
- $\alpha \rightarrow 1.0$ とすれば、改善できる

■ 中地震

- 加速度の過小評価
 - ▶ 高振動数での増幅の過小評価
 - ▶ せん断強度以内
- α を小さくすれば改善できる

■ ひずみに応じて α を変えるなどで少しは改良できるかも？

■ 同時に解決することはできない

- 特定のケースで合わせて、可能性があると書いた論文はある

29

等価線形法の改良

■ GRAMER

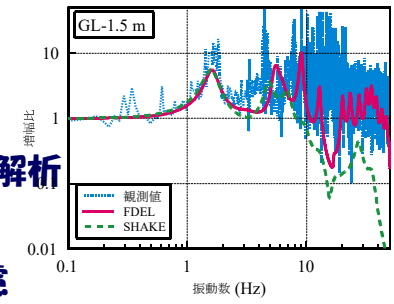
- 固有値解析 → 固有ベクトルごとの解析

■ FDEL

- 有効ひずみの周波数依存性を考慮

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} \frac{F(f)}{F_{max}}$$

- ▶ 現象をあわせるために用いただけで、意味がはっきりしない。
- 過大評価されるせん断応力と加速度をさらに過大評価する。
- $\alpha = 0.8$ を推奨: 1 ケースのみの事例
- $\alpha = 1$ は別の問題を起こすことがある
 - ▶ 卓越周期



30

剛性と減衰のどちらが大事

■ Case Study

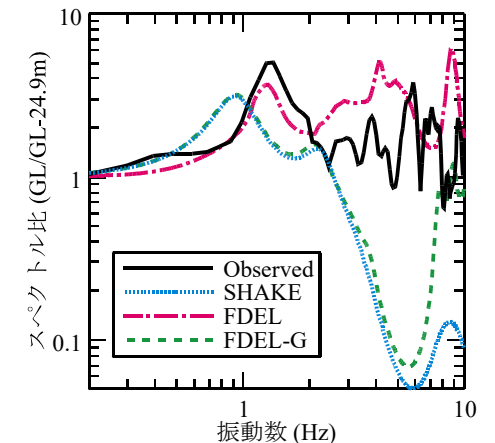
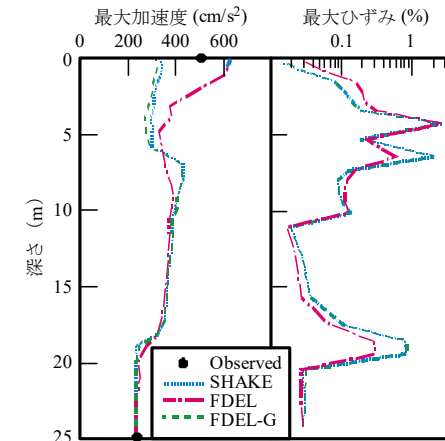
- SHAKE
- FDEL

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} \frac{F(f)}{F_{max}}$$

- FDEL-G: 減衰の周波数依存性をFDELで考え、剛性は一定

31

■ 応答値



1995年兵庫県南部地震, 関電技研

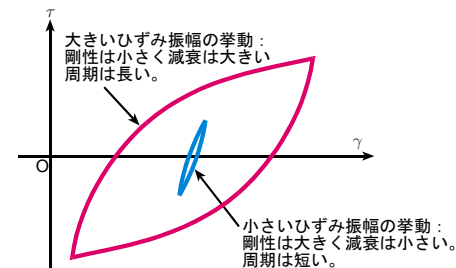
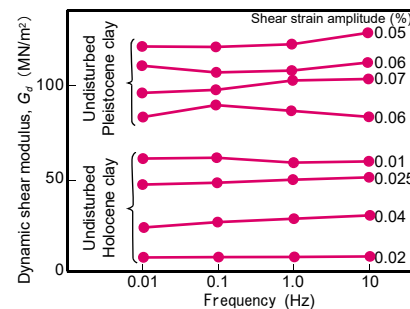
32

FDELの問題点

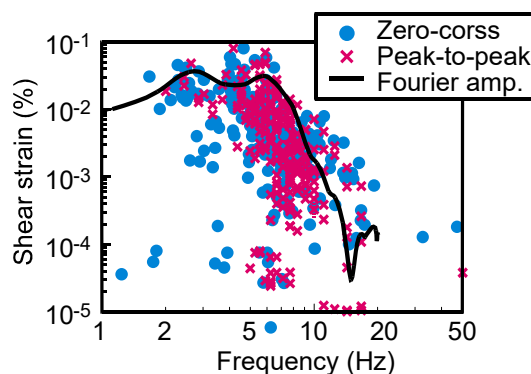
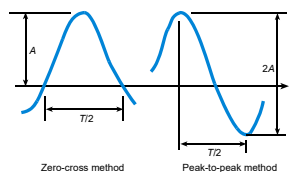
- 加速度の過大評価
 - SHAKEよりも大きい
 - ▶ 高振動数の増幅を大きくする
- なぜ、分散性
 - 振動数に応じて剛性変化
 - ▶ 波動の伝播速度も振動数依存

ひずみ時刻歴に見られる周波数依存性

- 材料としての動的変形特性には、周波数依存性はない。
- 時刻歴で見ると、周波数依存性がある。

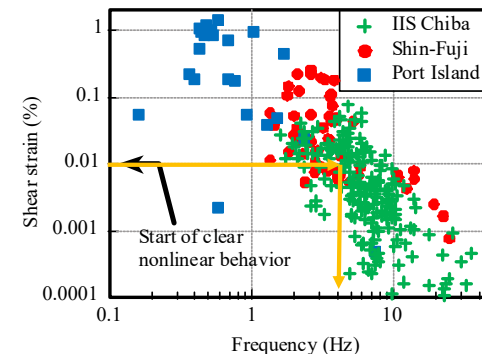
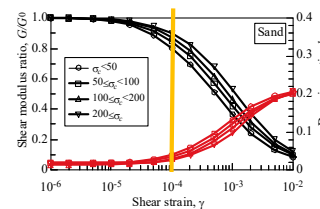
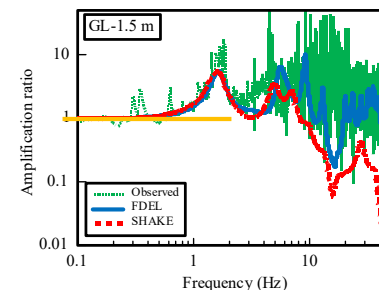


ひずみ時刻歴とFourier級数

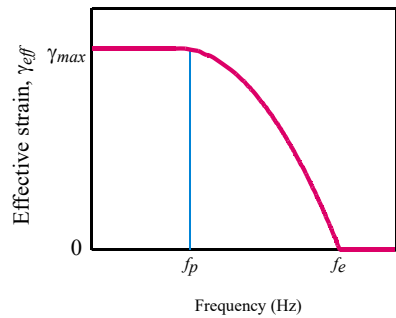


DYNEQの考え方

- 低振動数では増幅は一定
- 数Hzより大きいひずみは弾性挙動でよい。
- 数Hzまでの周波数域では、有効ひずみを大きくする必要がある。



有効ひずみの周波数依存

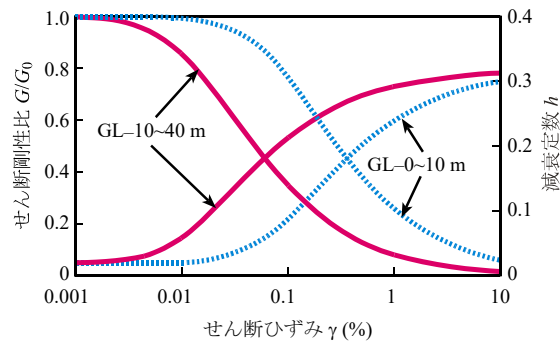
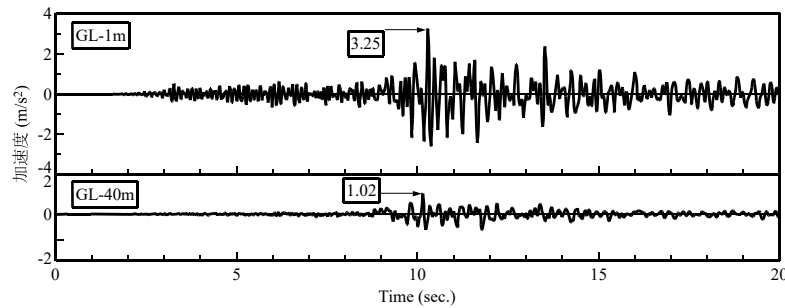
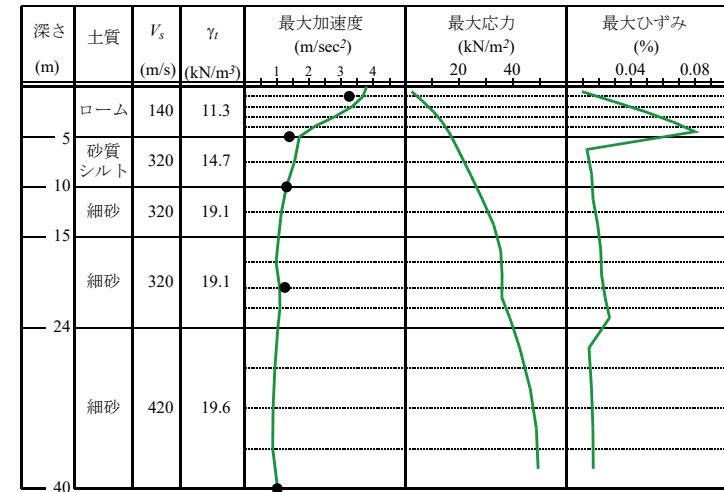


$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} - \left(\frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = 0 & f > f_e \end{cases}$$

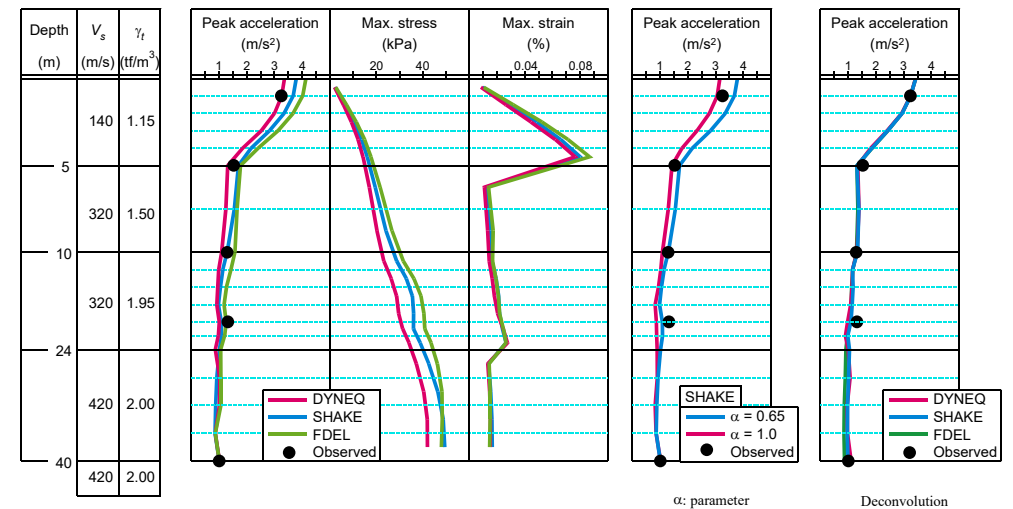
- 低振動数領域: 一定値 $f \leq f_p$
- 中振動数領域: 放物線 $f_p < f \leq f_e$
- 高振動数領域: 弾性 $f_e < f$

解析例(1): 中ひずみ (SHAKEの適用範囲)

- 東大生研千葉実験所
- 1987年千葉県東方沖地震



■ 各種の解析

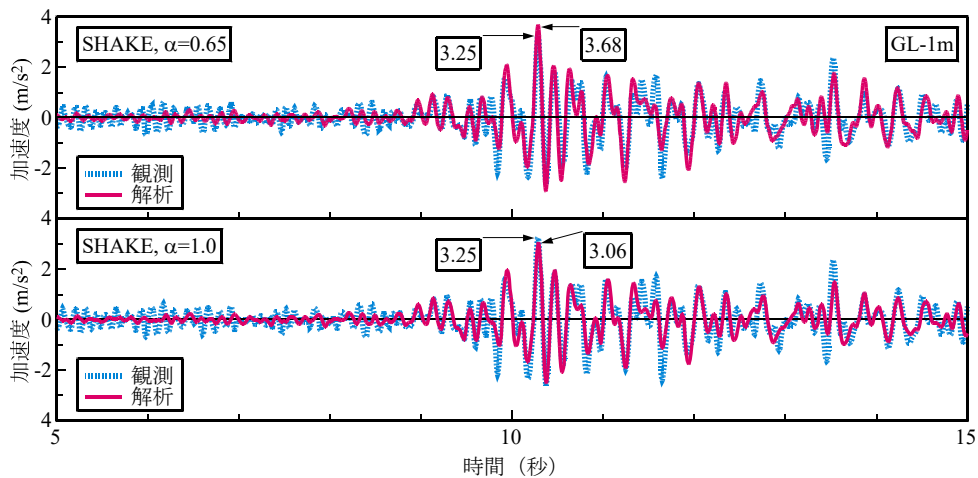


V_s : Shear wave velocity; γ_t : unit weight

α : parameter

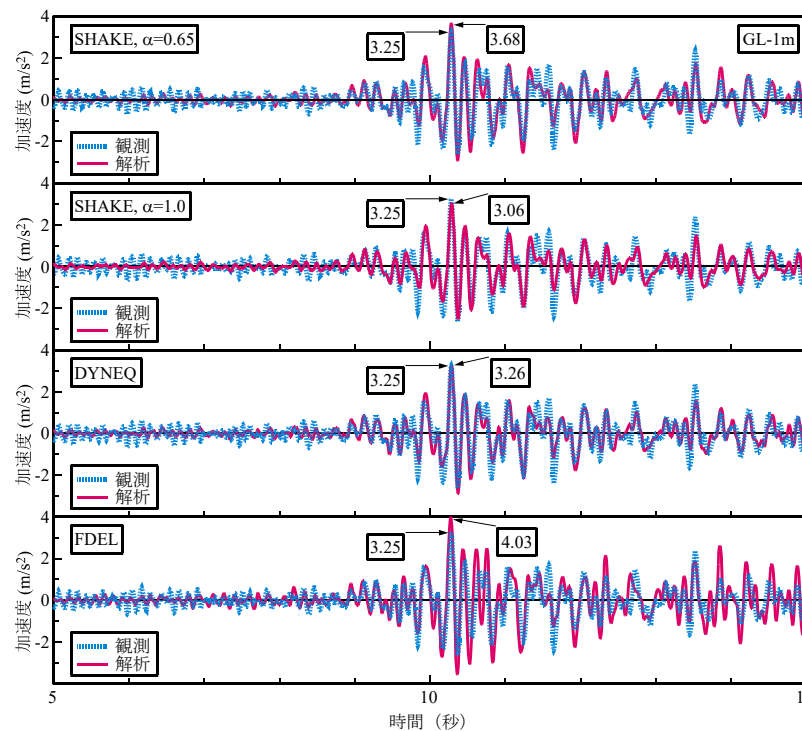
Deconvolution

■ α の値は



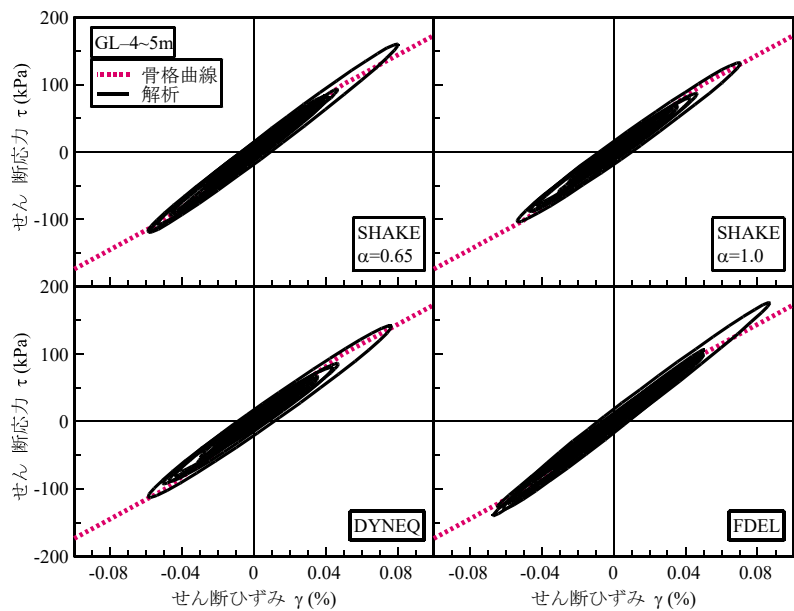
- $\alpha=1.0$ のどこが悪い?
- $\alpha=1.0$ では共振は?

41



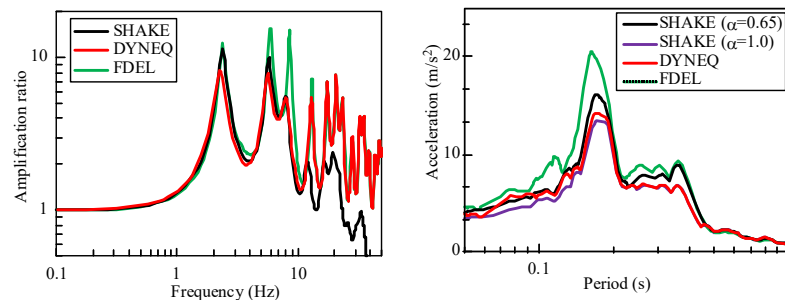
42

■ 応力-ひずみ関係

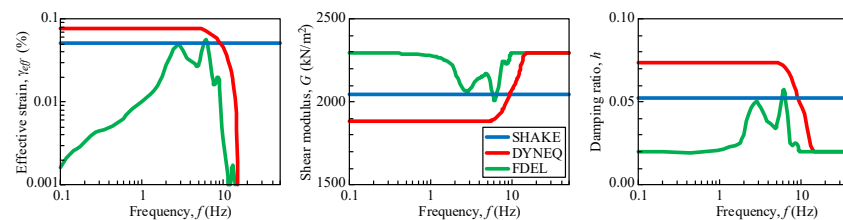


43

■ スペクトル



■ 周波数依存性



44

小まとめ

■ 最大ひずみ0.08%でもSHAKEの欠点は現れる

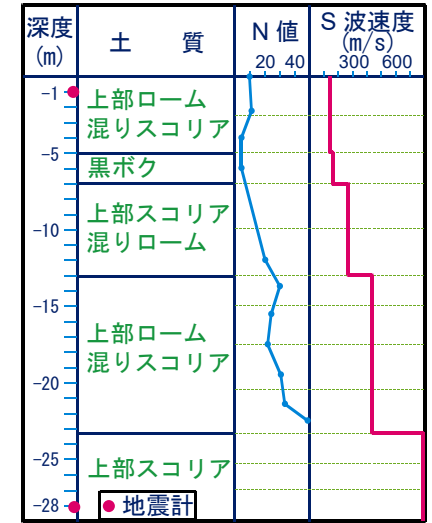
■ α の値は

- 0.65は小さすぎる
- 1.0は大きすぎる
- ▶ SHAKEの二つ目の欠点の影響

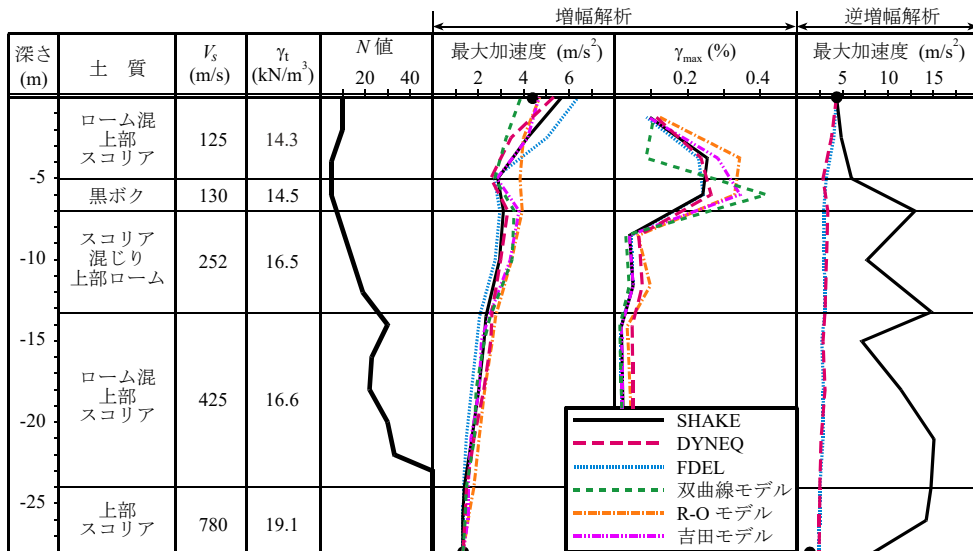
解析例(2):中ひずみ

■ 東電新富士変電所

- 1983年神奈川県・山梨県境地震
- M=6.0, 震源深さ22km
- 震央距離18km

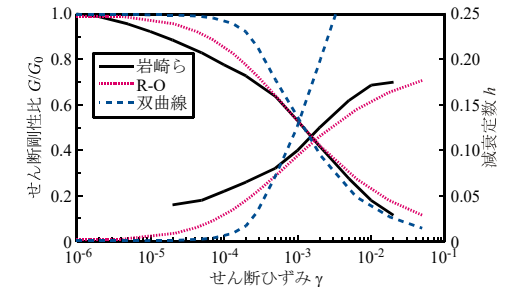
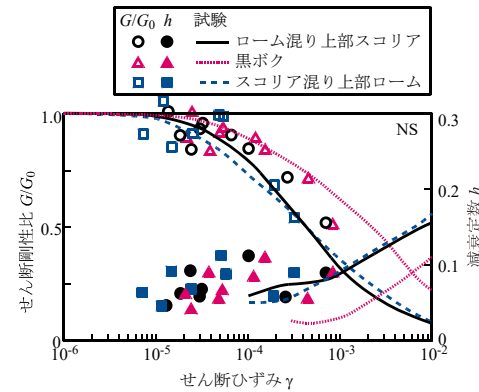


■ 最大応答値(等価線形, 逐次積分)

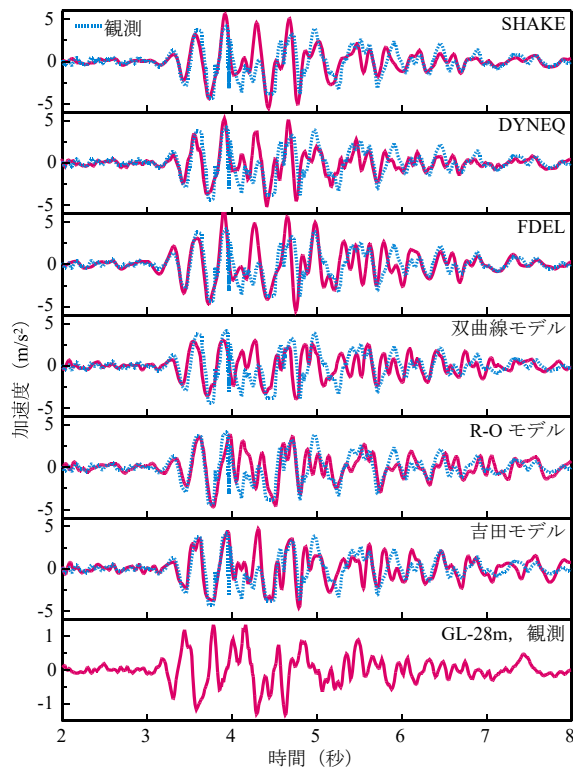


V_s : せん断波速度, γ_t : 単位体積重量 ● 地震観測

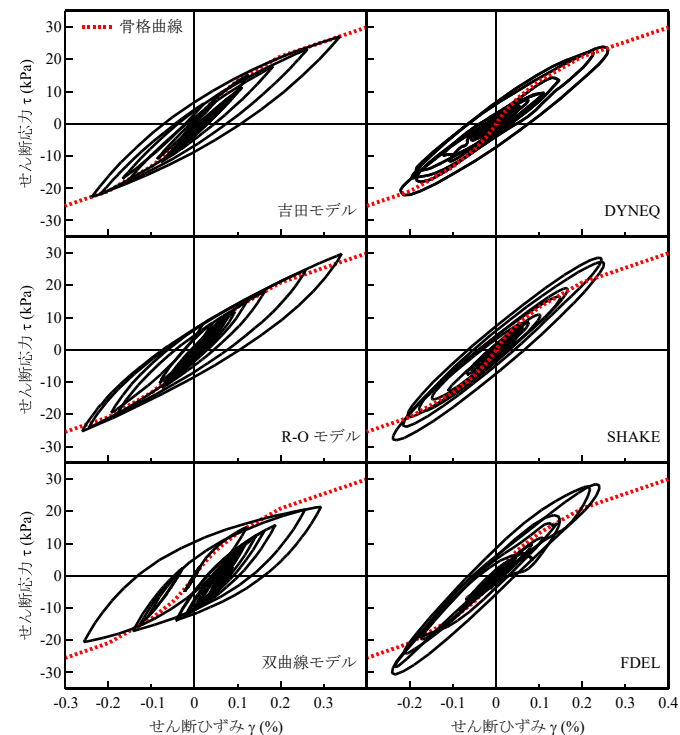
■ 非線形特性



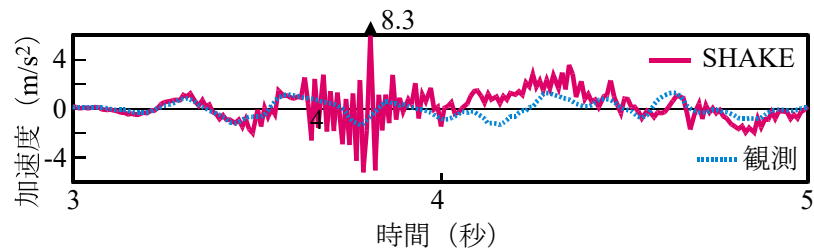
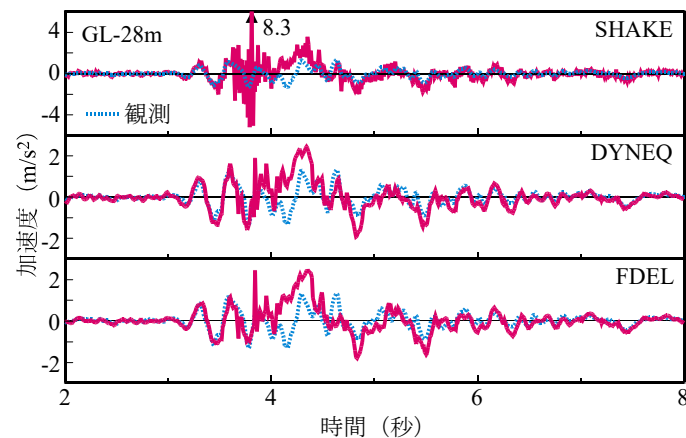
- 火山性堆積物
- ▶ 微小ひずみで減衰



- **SHAKE, FDELの過大評価**
 - 説明済み
- **双曲線の過小評価**
 - 上限加速度
- **DYNEQ, R-O, 吉田モデルはまずまず**



■ 逆増幅解析

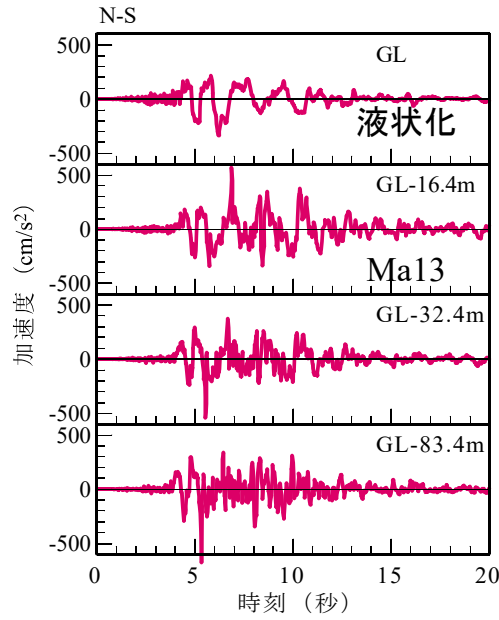
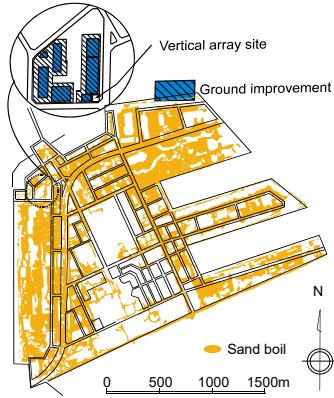


小まとめ

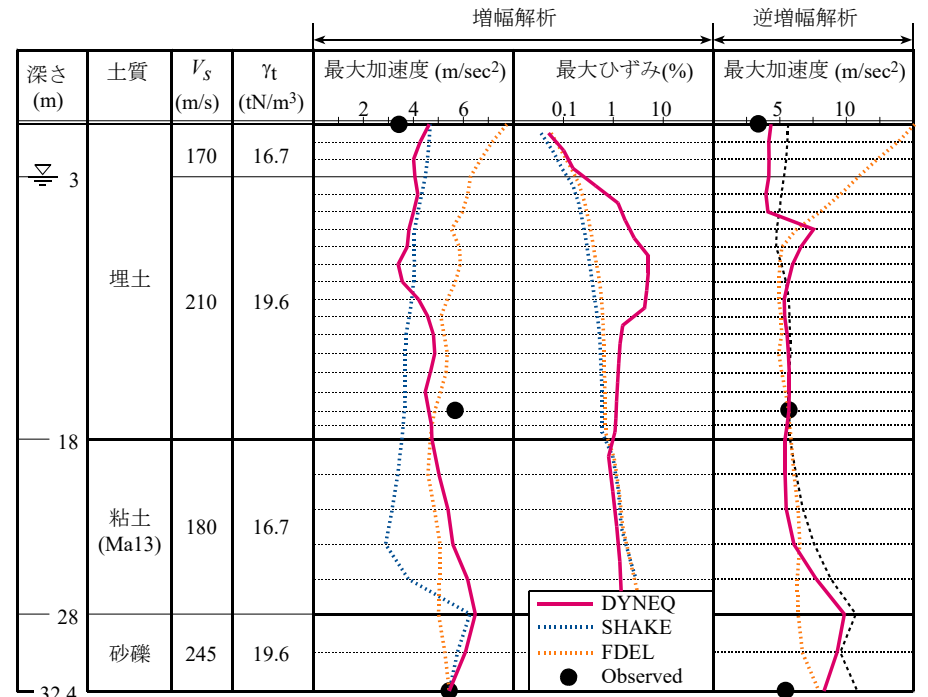
- **等価線形法は精度が悪い, 逐次積分非線形法は精度がよいと一概に言うことは出来ない。**
 - 応力-ひずみ関係のモデルが重要
- **逆増幅解析は, 通常の増幅解析よりセンシティブ。**

解析例(3):大ひずみ

- 1995年兵庫県南部地震
- ポートアイランド
 - 神戸市の液状化アレー



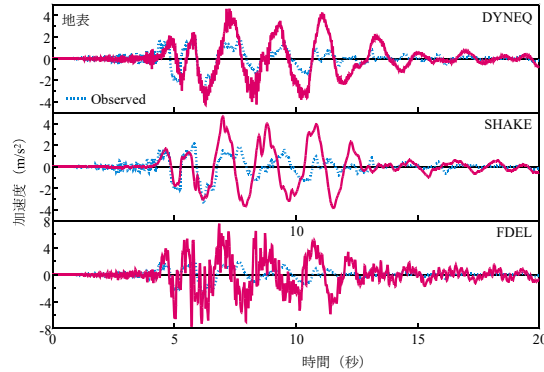
53



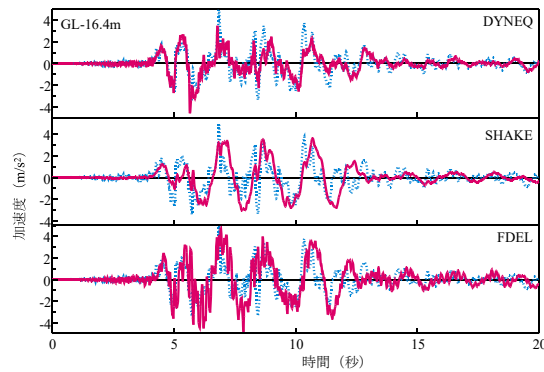
231

54

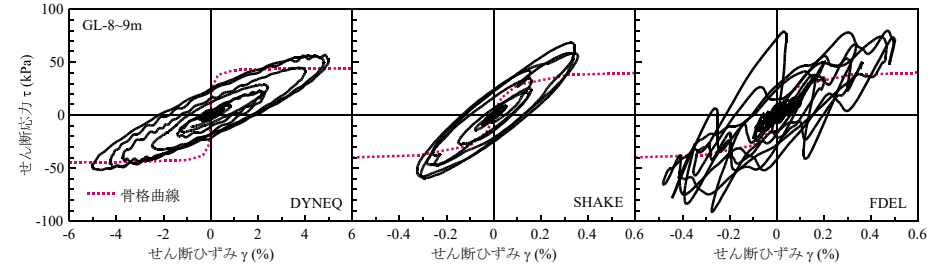
- 液状化層の解析は無理
- FDELの5Hz程度の振動の卓越



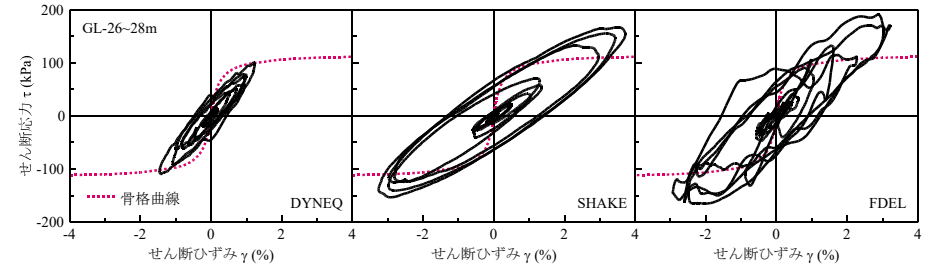
232



55



232

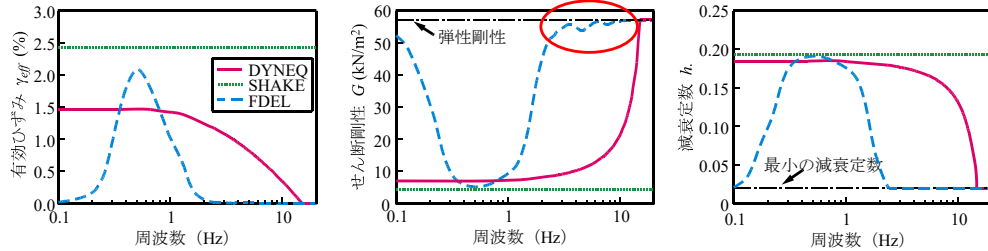


細かい振動の原因は？

56

■ 周波数に依存する諸量

大きな非線形



小まとめ

- 等価線形化法は液状化解析には不向き
- 改良された等価線形化法では、非線形を考慮する周波数が重要
 - FDELでは制御できないので、数Hzの過剰応答

Lysmerの指摘(1973)

■ 新しい複素剛性を提案, SHAKEのユーザーに連絡

SUPPLEMENT TO COMPUTER PROGRAM SHAKE*

by

T. Udaka and J. Lysmer

September 1973

Suggested corrections are shown framed on the attached segments of subroutines SHAKIT, EARTHQ, CXSOIL, MOTION, STRT, UTPR, RESP, STRAIN, REDUCE, FFT, RFFT and RFSN of program SHAKE.

The purpose of these changes are:

1. To decrease the execution time by up to 50% depending on the type of problem to be solved.

2. To redefine the complex modulus from $G^* = G(1+2i\beta)$ to $G^* = G(1-2\beta^2 + i 2\beta\sqrt{1-\beta^2})$.

(This change only influences subroutine CXSOIL.)

FFTの高速化

複素剛性の修正

■ 提案式

$$\bar{k}_L^* = k(1 - 2\beta_1^2 + 2i\beta_1\sqrt{1 - \beta_1^2})$$

β が小さい時は
SHAKEと一致

- 論文はない
- 4ページの資料
 - ▶ 大学の講義資料

◆ Introduction to Soil Dynamics

University of California, Berkeley

Geotechnical Engineering

MODAL DAMPING AND COMPLEX STIFFNESS

by John Lysmer 8/23/73

Even with this choice small deviations must be expected in the phase relationship between the two solutions. For small damping Eq. 16 can of course be simplified to

$$G^* = G(1+2i\beta) \tag{17}$$

Similarly the best choice of complex wave velocities are

$$v_s^* = v_s \cdot e^{-\frac{i}{2}\delta_s} \approx v_s (1 + i\delta_s) \tag{18}$$

and

$$v_p^* = v_p \cdot e^{-\frac{i}{2}\delta_p} \approx v_p (1 + i\delta_p) \tag{19}$$

Where the subscripts S and P correspond to S- and P-waves, respectively.

はじめ

最後

Lysmerの指摘した問題とその問題点

■ 1自由度系の定常振動

● Voigtモデル

$$u = \frac{\cos(\omega t - \phi)}{k\sqrt{(1-\alpha^2)^2 + (2\alpha\beta_1)^2}}, \quad \tan \phi = \frac{2\alpha\beta_1}{1-\alpha^2}$$

α : Tuning ratio
 $\alpha = \omega / \omega_0$

● SHAKEのモデル

$$u = \frac{\cos(\omega t - \phi)}{k\sqrt{(1-\alpha^2)^2 + (2\beta_1)^2}}, \quad \tan \phi = \frac{2\beta_1}{1-\alpha^2}$$

■ 変位が異なる, 位相も異なる

● そもそも, 臨界減衰比と材料減衰定数を混同している

$$\beta_1 = \frac{C}{2\sqrt{mk}} \quad \beta = \frac{C\omega}{2G}$$

61

■ Lysmerモデルの使用実態は?

● Lysmerから当初の購入者への手紙

- ▶ 内容は, 前述:1自由度系の変位を合わせる
- ▶ プログラム修正のすすめ

● SHAKE91

- ▶ 未使用

● 地震工学研究所

- ▶ 依頼され, 変更したことはあるが, 一般には未使用

● Kramer(1996), Christianら(1977)

- ▶ オリジナルモデルで充分

◆ $\beta < 0.3$ では影響は小さい ← Lysmerも指摘

- ▶ 履歴特性の議論はしていない

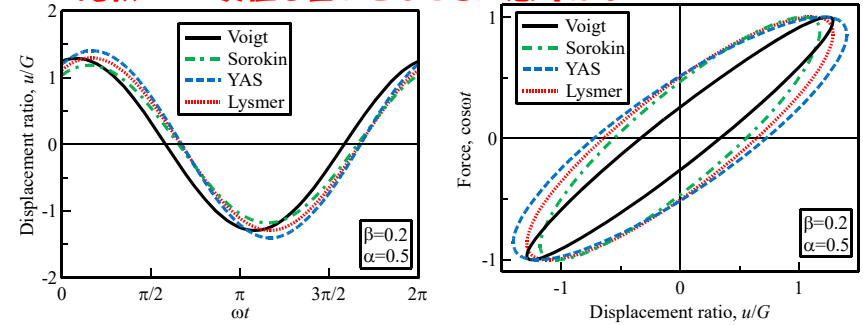
◆ SHAKEの応力-ひずみ関係は直線

63

● 位相が異なる

- ▶ 履歴曲線が異なる

- ▶ 比較して, 変位を合わせることに意味はない



■ 変位を合わせる複素剛性は無限にたくさんある

- 複素剛性を $\bar{k}^* = k(k_r + ik_i)$ とおくと変位が等しい条件は

$$1 - 2\alpha^2 + 4\alpha^2\beta_1^2 = k_r^2 - 2k_r\alpha^2 + k_i^2$$

- (おそらく) Tuning ratioを含まないのはLysmerモデルのみ
- 変位と位相の両方を合わせることはできない

62

Lysmerモデルの力学的特徴

■ 最大せん断応力

- 実験 $\tau_0 = G\gamma_0$

- Sorokinモデル (SHAKEのモデル)

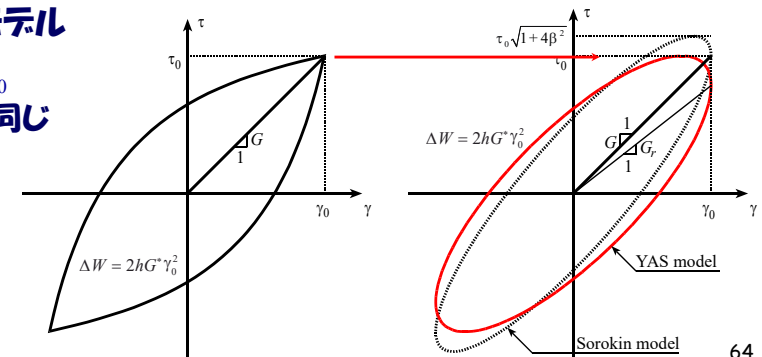
$$\tau_0 = \sqrt{1 + 4\beta^2} G\gamma_0$$

- ▶ 過大評価

- Lysmerモデル

$$\tau_0 = G\gamma_0$$

- ▶ 実験と同じ



64

■ 減衰特性

$$\Delta W_L = 2\beta G\gamma_0^2 \pi \sqrt{1-\beta^2}$$

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{2\beta G\gamma_0^2 \pi \sqrt{1-\beta^2}}{G\gamma_0^2 / 2} = \beta \sqrt{1-\beta^2}$$

● 材料減衰定数と減衰定数は同じではない

- ▶ これまで、同じとして計算してきた
- ◆ 過去の計算はすべて間違い!

$$\beta = \sqrt{\frac{1-\sqrt{1-4h^2}}{2}}$$

- ▶ この変換をしていれば、OK

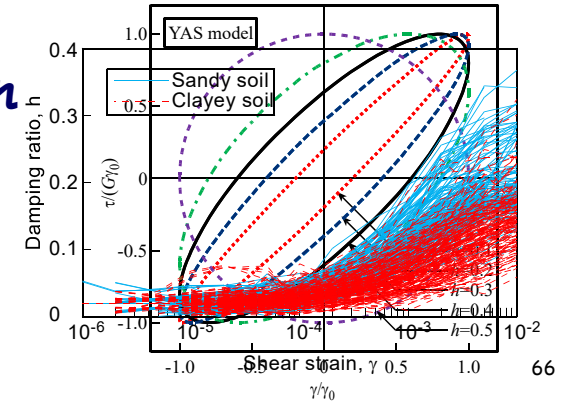
65

YAS(Yoshida-Adachi-Sorokin)モデル

■ 最大せん断応力 τ_0 と減衰定数 h を実験値と合わせる

$$G_Y^* = G_r + 2ihG$$

- Lysmerモデルで、 $\beta = \sqrt{\frac{1-\sqrt{1-4h^2}}{2}}$ とおくと同じ式に
- $\beta=h=0.5$ で真円
- $h=0.3\sim 0.4$ 程度までは応力-ひずみ関係はそれぞれに見える
- $h=0.3$ 程度が実験値の最大値

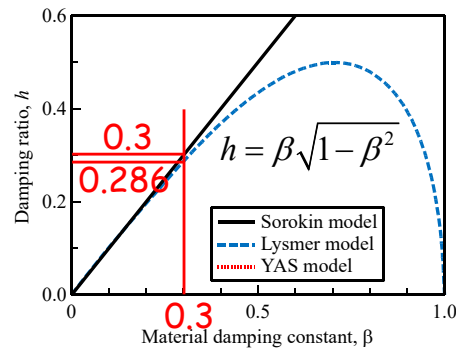
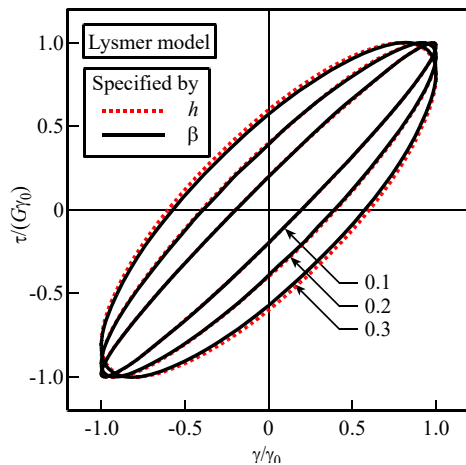


66

Lysmerモデルの誤差

■ $\beta=0.3$ (実材料の最大値)

- $0.014/0.3=0.047$
- 約5%の誤差 (過小評価)

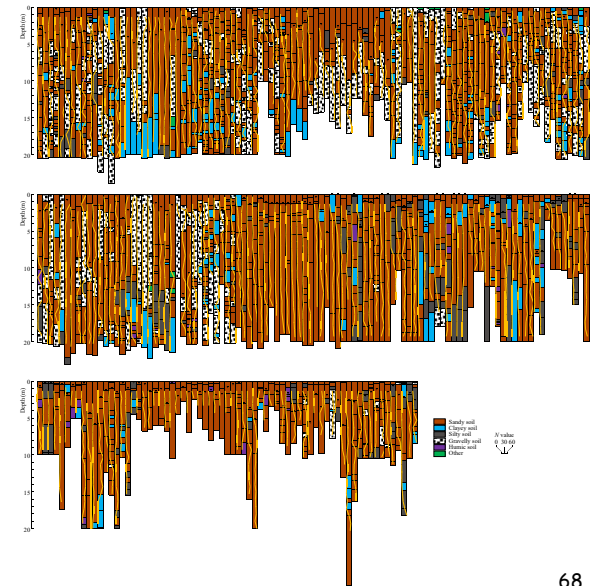


67

地震応答解析による検討

■ 地盤

- 286サイト
- 液状化検討用に土木研究所が1995年兵庫県南部地震後に集めた



68

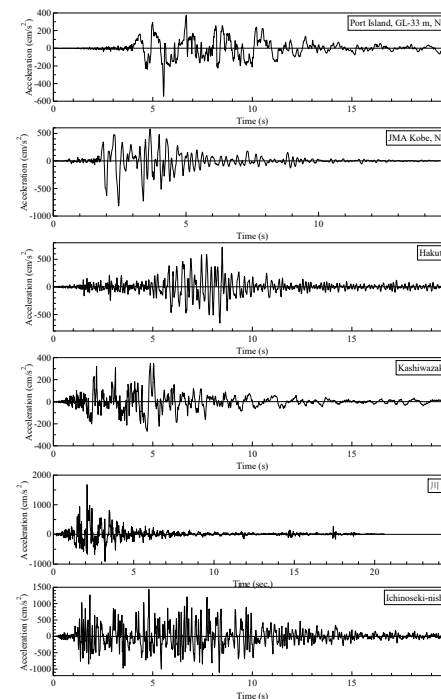
● 内陸型(内陸型地殻内地震)

- ▶ 1995年兵庫県南部地震 Port Island GL-33m NS
- ▶ 1995年兵庫県南部地震 JMA神戸海洋気象台NS
- ▶ 1999年鳥取県西部地震 伯木NS
- ▶ 2004年新潟県中越地震 JMA川口町EW
- ▶ 2007年新潟県中越沖地震 東電柏崎刈羽 サービスホールSG1-NS
- ▶ 2008年岩手宮城内陸地震 一関西EW

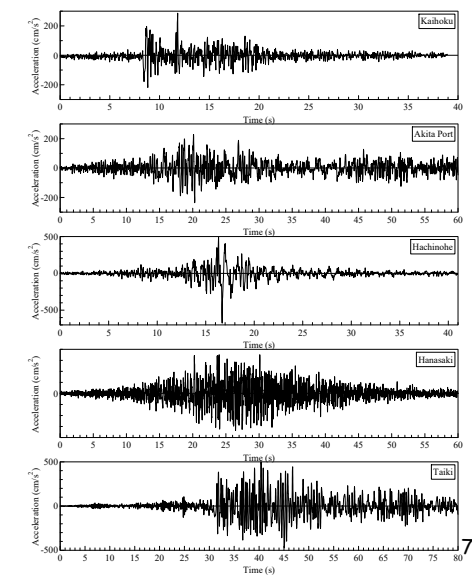
● 海溝型(海溝型地震)

- ▶ 1978宮城県沖地震 開北橋EW
- ▶ 1983年日本海中部地震 秋田港EW
- ▶ 1994年三陸はるか沖地震 八戸事務所 EW
- ▶ 1994年北海道東方沖地震 花咲港EW
- ▶ 2003年十勝沖地震 大樹EW

直下型

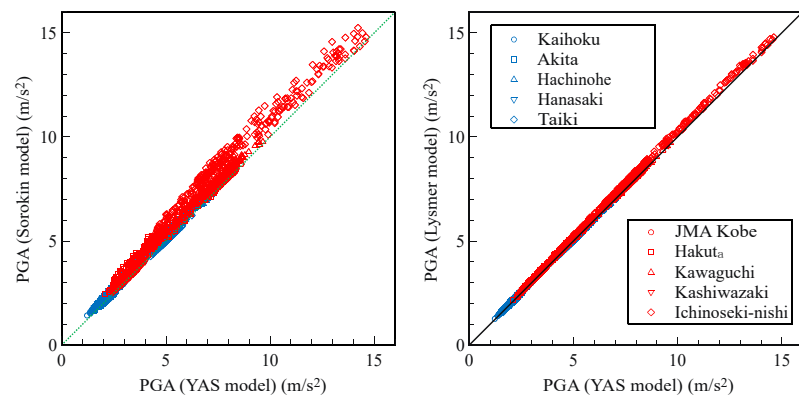


海溝型



弾性応答

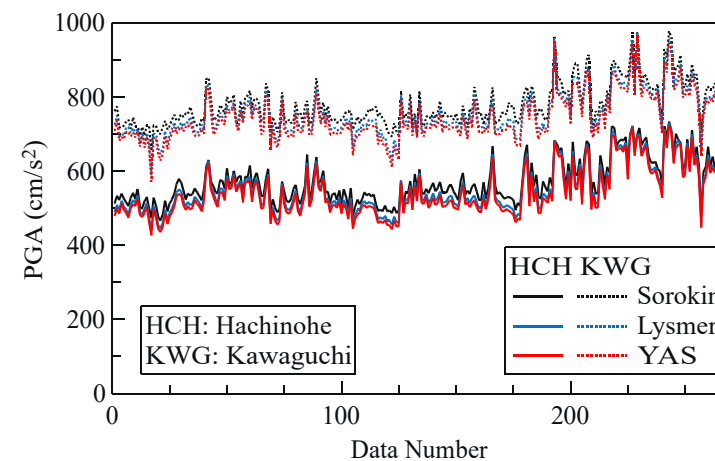
■ $\beta=0.3$, 非線形は考えない



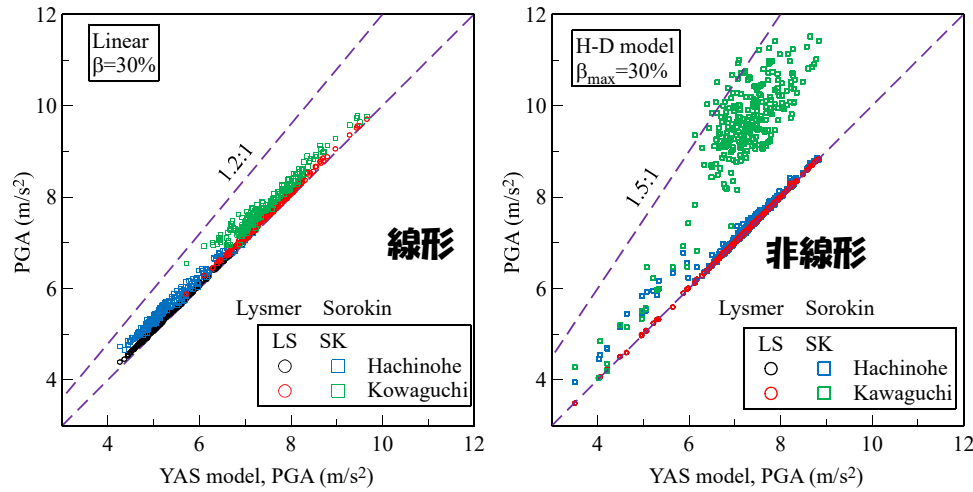
- Sorokin: 差がある
- Lysmer: 差は小さい

非線形応答

- Hardin-Drnevichモデル ($h_{max}=0.3$)
- 地震波
 - 2004年新潟県中越地震 JMA川口町EW
 - 1994年三陸はるか沖地震 八戸事務所 EW



■ 最大加速度

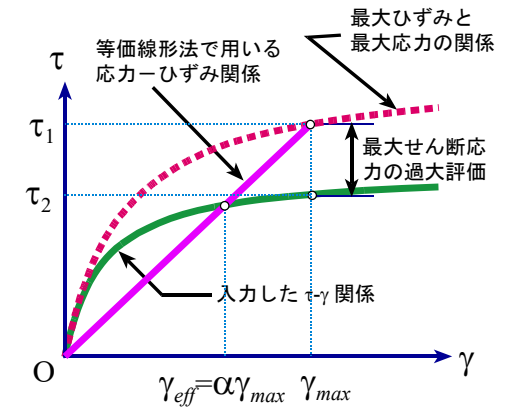


- Sorokinモデル (SHAKE) はかなり過大評価
- LysmerモデルとYASモデルの差は小さい

73

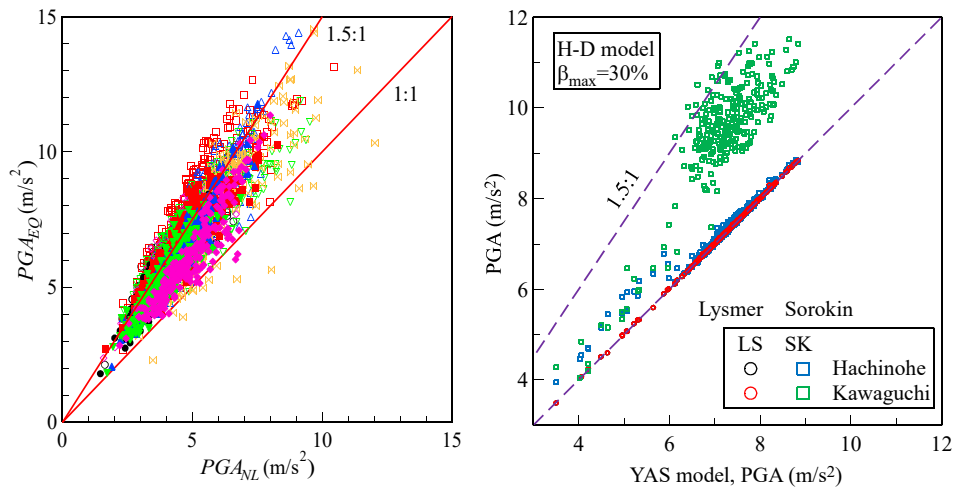
SHAKEの加速度の過大評価

- せん断強度を過大評価
 - $1/0.65=1.54$
- 最大加速度の過大評価



74

等価線形vs非線形



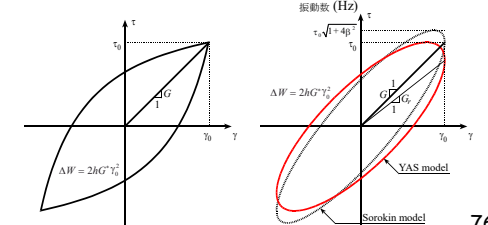
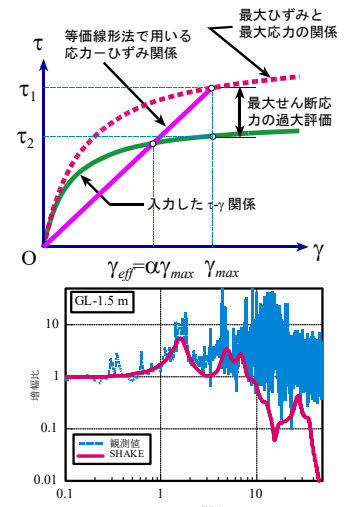
逐次積分との比較

YASモデルとの比較

75

等価線形法の最終形

- 最大せん断応力の過大評価(1)
 - $\gamma_{eff} = \alpha\gamma_{max}$
- 高振動数の増幅の過小評価
- 周波数依存 γ_{eff} で解決
- 最大せん断応力の過大評価(2)
- YASモデルで解決



76

まとめ

- γ_{eff} の周波数依存
- YASモデル
 - YASモデルの欠点
 - ▶ 双曲線モデルでは解析できないこともある
 - ◆ 最大減衰比は $2/\pi \approx 64\% >$ と50%
- ゴール
 - これまで: 等価線形化法は近似解法
 - ▶ 大ひずみには適用出来ない
 - 全応力解析では
 - ▶ 逐次積分非線形がOKなら, 等価線形化法もOK
- プログラムは公開しています
- <https://www.kiso.co.jp/yoshida/>
 - コンピュータプログラム公開

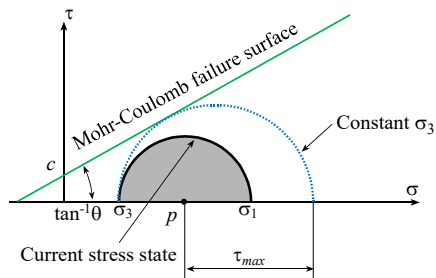
77

Duncan-Changモデルと吉田モデル

78

Duncan-Changモデル

- 世界で最も成功しているモデル(東畑)
- 三軸試験を元にした多次元の双曲線モデル



σ_3 を一定とすると

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

双曲線モデル

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\left[\frac{1}{E} + \frac{\varepsilon R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]}$$

$R_f \leq 1$ 強度調整用パラメータ

79

Duncan-Changモデルの特徴

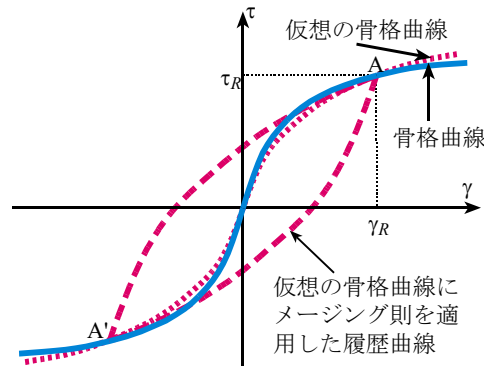
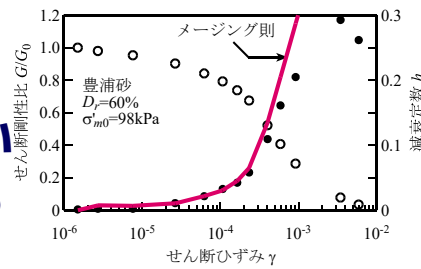
- 全ひずみ型モデル
 - 弾性成分と組成成分を分けないモデル
 - ▶ 双曲線モデル, Ramberg-Osgoodモデルなどと同じ
 - 接線剛性を $\eta = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と, 応力の関数として表示
- σ_3 を一定
 - おそらく, 実地盤の状況と異なる
 - 液状化解析等に出来ない
- 単調载荷のモデル
 - 履歴法則の提案がない
 - 地震応答解析には出来ない
 - ▶ Modified Duncan-Changモデルとして作ることは可能

80

吉田モデルの出発

- Masing則では減衰があわない
- 減衰特性を実験値とあわせる

- 仮定の骨格曲線
 - ▶ 減衰を合わせる
 - ▶ 折り返し点を通る
- 双曲線モデル
 - ▶ パラメータの数 = 2
 - ◆ G_0, γ_r
 - ▶ $h_{max} = 2/\pi$
- Ramberg-Osgoodモデル
 - ▶ パラメータの数 = 3
 - ◆ G_0, γ_r
 - ◆ 除荷剛性を制御



剛性も実験値とあわせられないか

- 任意のG-γ 関係を合わせる
 - 骨格曲線は部分線形

$$\tau = \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i} (\gamma - \gamma_i) + \tau_i \quad (\gamma_i \leq \gamma \leq \gamma_{i+1})$$

- 完全なモデルができた

- G-γ, h-γ 関係は(与えられたひずみ位置で)完全に設定値と同じになっている。

多次元への拡張

- せん断と体積変化を分離

- 必要ならダイレイタンスは別に考慮
- 体積変化

$$dp = K(d\varepsilon_v - d\varepsilon_{vd})$$

- せん断変形

- ▶ 相当応力 σ_e - 相当ひずみ e 関係
- ▶ せん断強度の求めかた

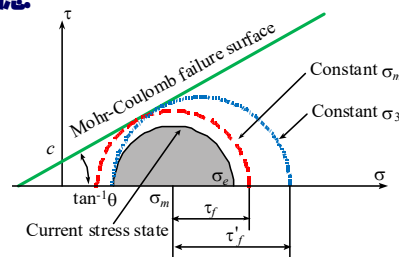
- ◆ σ_m を一定としてモール円を広げる

- ▶ 拘束圧依存性をなくすための無次元化

$$\eta = \sigma_e / \tau_{max}, \quad \xi = e \cdot G_0 / \tau_{max}$$

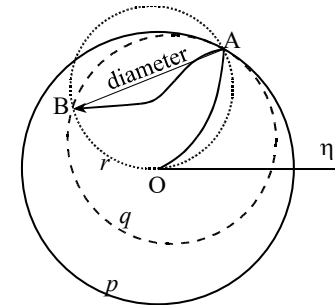
- ▶ 接線剛性 g を応力の関数として表現

- ◆ 双曲線モデル $g = \frac{d\eta}{d\xi} = (1 - \eta)^2$



繰返し载荷の扱い

- 後続の降伏条件を決めれば良い



- Masing則型

- 除荷点に戻ると元の曲線に
- 骨格曲線からの除荷のみ考慮

ダイレイタンスの考慮

■ 分離型

$$\{d\sigma\} = [K](\{d\varepsilon\} - \{I\}d\varepsilon_{vd})$$
$$\{I\} = \{\alpha \quad \beta \quad 0\}^T, \quad \alpha + \beta = 1$$

■ Stress-Dilatancy関係

参考文献

- 4) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, pp.88, 1972.
- ・ Idriss, I. M. and Sun, J. I.: User's manual for SHAKE91, A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits, University of California, Davis, 1992.
- 12) 吉田望 (1994) : 実用プログラム SHAKE の適用性, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 14-31
- 13) Finn, W. D. L., Martin, G. R. and Lee, M. K. W. (1978): Comparison of dynamic analyses for saturated sands, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, GT Special Conference, Vol. 1, pp. 472-491
- 16) 吉田望 : 全応力地震応答解析の適用性に関するケーススタディ, 大ひずみを考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム, pp.69-72, 2013
- 26) 古山田耕司ら (2003) : 多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 第38回地盤工学会研究発表会, pp. 2077-2078
- 28) Ueshima, T. (2000): Application of equivalent linear analysis method taking account of frequency dependent characteristics of ground strain to seismic data from Lotung, Taiwan, CD-ROM Proceedings of EM2000, 14th Engineering Mechanics Conference, ASCE, The University of Texas at Austin, Texas
- 30) 萩原庸嘉, 清田芳治 (1992) : 地盤の歪依存性を考慮したモード別等価線形地震応答解析手法 その1 理論的背景と逆応答の計算例, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), pp. 487-488
- ・ 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫 (1994) : 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No. 493/III-27, pp. 49-58
- 31) 末富岩雄, 吉田望 (1996) : 一次元等価線形解析における減衰の周波数依存性の考慮に関する一検討, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1119-1120
- 34) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 38) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 41) 吉田望 (1994) : 実用プログラム SHAKE の適用性, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 14-31
- 46) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 48) Satoh, T., Horike, M., Takeuchi, Y., Uetake, T. and Suzuki, H. (1997): Nonlinear behavior of scoria soil sediments evaluated from borehole record in eastern Shizuoka prefecture Japan, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 781-795
- 54) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002): Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 205-222
- 56) Udata, K. and Lysmer, J.: Supplement to computer program SHAKE, 1973
- 57) Lysmer, J.: Modal damping and complex stiffness, Lecture note, University of California, 1973
- 58) Kramer, S. L. (1996): Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall, 653pp
- ・ Christian, J. T., et al. (1977): Two-and Three-dimensional dynamic analyses (chapter 20), Numerical methods in Geotechnical Engineering, McGraw Hill, pp. 683-718
- 66) 吉田望, 安達健司 : 地盤の地震応答解析のための複素剛性, 日本地震工学会論文集, 第21巻, 第1号, pp.65-81, 2021