



MIDAS  
液状化分野  
技術講座資料及び  
解析事例集 **1**/3

Global Leader in Providing Engineering Solutions & Services

# MIDAS ITは世界の技術者を支援します



**世界** 構造解析分野市場占有率1位(midas Gen/iGen)  
**韓国** 建築分野/土木分野/地盤分野CAEソフト占有率1位  
**中国** 土木/地盤構造解析分野市場占有率1位 (midas Civil, midas GTS)

建設業界	<b>No.1</b>	現地法人	<b>8</b>
海外代理店	<b>35</b>	使用国	<b>110</b>

## About MIDAS IT

MIDAS ITは、工学技術用ソフトウェア開発および普及、そして構造分野のエンジニアリングサービスとウェブビジネス統合ソリューションを提供する会社です。

2000年9月に設立、現在は約600名のグローバル専門技術者が在籍し、日本、アメリカ、中国、インド、ロシア、イギリス、ドバイ、シンガポールの現地法人や35ヶ国の代理店など、全世界ネットワークを通し、110ヶ国に工学技術用ソフトウェアを販売する世界的な企業として成長しました。

また、技術者の皆様の技術力向上のために各分野別に技術講座を実施しており、今後もこのような技術講座を定期的に開催していきたいと考えております。

このようなセミナーには是非ともご参加頂けますようお願い申し上げます。



Dubai Tower



Palazzo Versace & D1 Tower



Odeon Tower

# MIDAS

## 液状化分野

### 技術講座資料及び解析事例集 **1/3**

- |           |   |        |
|-----------|---|--------|
| <b>01</b> | 地震応答解析プログラムの使用上の留意点<br>東北学院大学工学部 吉田 望 教授                  | 03-52  |
| <b>02</b> | Landslide monitoring and early warning<br>東京大学 東畑 郁生 名誉教授 | 53-70  |
| <b>03</b> | 土の動的性質のモデル化と地盤の有効応力解析<br>清水建設株式会社 福武 毅芳 様                 | 71-128 |



# 01 地震応答解析プログラムの使用上の留意点

東北学院大学工学部 吉田 望 教授



## 地震応答解析 歴史と使用上の留意点



東北学院大学工学部  
吉田 望

### 内容

- 地盤の地震応答解析の歴史
  - SHAKEとその周辺
  - 有効応力地震応答解析
- 地盤の地震応答解析の留意点
  - Volume locking
  - 数値積分
  - 減衰の設定
  - 減衰に関する誤解
  - ジョイント要素
    - ▶ 定式化
    - ▶ 定数の設定
  - 軟岩の繰返しせん断特性
- 等価線形解析, 全応力解析の適用性

2

## 地盤の地震応答解析の歴史

### 地震応答解析とは

- 運動方程式を解く作業
- 運動方程式とは
  - 時間と空間に関する偏微分方程式
  - ▶ それぞれに対して厳密解と近似解
- 実用的な解法は近似解法

		空間	
		厳密解	近似解
時間	厳密解	解析解 (数自由度まで)	ニガムの方法 (応答スペクトルの計算)
	近似解	重複反射理論 (弾性)	有限要素法, 差分法, 境界要素法, ...

3

4

### 土の解析法の特徴

- 土の力学特性の特殊性
  - 地盤材料は小さいひずみから非線形挙動
    - ▶ 解析で非線形を考えるのは必須
  - 有効応力の原理
    - ▶ 強度, 剛性は有効応力に依存
  - ダイレクタンシー
    - ▶ せん断に伴う体積変化
- 土 = 土粒子と間隙 (空気, 水)
  - 全応力解析
    - ▶ 時間領域の解析
      - ◆ 非線形法
      - ◆ 等価線形化法
    - ▶ 周波数領域の解析 = 等価線形化法
  - 有効応力解析

5

### 有効応力解析と全応力解析

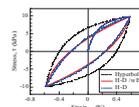
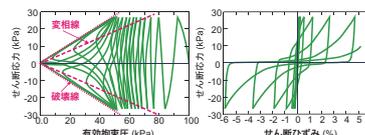
- 有効応力解析とは
  - 有効応力の原理に従う

$$G_0 = A \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma_m^{0.5}$$

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

$$\tau_f = c \cot \phi + \sigma \sin \phi$$

- ダイレクタンシーを考慮



ダイレクタンシーが無いと

SHAKEは等価線形解析?  
 ・地震前の有効応力に基づく  
 ・ダイレクタンシーを無視  
 ・地震中の有効力の**変化**無視

6

### 解析法の名称の混乱

- 二つの異なる視点
  - 微分方程式の近似解法
  - 非線形の取り扱い方
  - それぞれを自由に選べないもの, 選べるもの
- プログラム名 = 手法名
  - 特に, 構成モデルとペアで

空間	時間	非線形
有限要素法 ばね-マスモデル 重複反射理論	逐次積分法 (時間領域の解法) 変数分離法 (Fourier級数展開) (周波数領域の解法)	非線形 等価線形化 複素剛性

非線形法: 有限要素法, 逐次積分法

等価線形化法: 有限要素法 (ただし, SHAKE系は空間は厳密解), 周波数領域の解法, 複素剛性法

7

### 非線形挙動のとらえ方

- 非線形法 (truly nonlinear method)
  - 逐次変化する材料特性をきちんと追跡する
  - 理論的にはもっとも厳密
  - ただし, 応力-ひずみ関係のモデル化によっては...
- 複素剛性法
  - 等価線形化法
    - ▶ 応力-ひずみ関係を線形 + 減衰 = 履歴挙動
    - ▶ 等価でも線形でもないのだが...
  - 周波数領域の解析
    - ▶ 重ね合わせの原理
    - ◆ 線形の系

8

### 地盤を扱う地震応答解析プログラム

- 全応力解析
  - 等価線形化法
    - ▶ SHAKE, DYNEQ...
    - ▶ FLUSH
    - ▶ SASSI
  - 非線形法
    - ▶ QUAD4
    - ▶ 7S2
- 有効応力解析
  - DESRA
  - YUSAYUSA
  - FLIP, LIQCA, . . . . .
- SSIプログラム
  - 地盤は弾性
  - 土の構成モデルがない
- 一般的傾向
  - 地盤から
    - ▶ 構造物の非線形 △
  - 構造物から
    - ▶ 地盤の非線形 ×

9

### 等価線形化法 Equivalent linear method

10

### SHAKEとその発展

- Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972)
- 空間に関して解析解
  - 任意の位置での入射波、反射波が計算できる。
- 等価線形化法
- オリジナルのSHAKE
  - 最大加速度も指定した層だけ
  - 変位の出力なし
  - 応力-ひずみ関係は直線
    - ▶ 複素数で計算していない

11

### 波動方程式の解法(周波数領域)

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \leftarrow \gamma = \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \leftarrow u = U(x)e^{i\omega t}$$

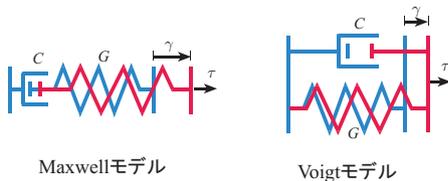
$$\frac{d^2 U}{dz^2} + \frac{\rho \omega^2}{G} U = 0 \quad \rightarrow u(z,t) = Ee^{i(kz+\omega t)} + Fe^{-i(kz-\omega t)}$$

$$U(z) = Ee^{ikz} + Fe^{-ikz}$$

- 重ね合わせの原理
  - 線形解析
- 非線形(履歴減衰)は？

12

### 複素剛性法による履歴挙動の線形化



- 履歴減衰をダッシュポット(速度比例項)で吸収させる。

13

### Maxwellモデル

- 一定応力正弦加振

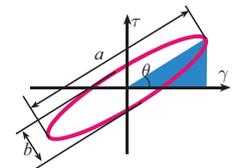
$$\tau = G\gamma_0 \sin \omega t$$

- ひずみの応答

$$\gamma = \gamma_0 \sin \omega t - \frac{G\gamma_0}{C\omega} \cos \omega t$$

- 等価減衰比

$$h = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{2} \left( \frac{G}{C\omega} \right) = \frac{\alpha}{\omega} \quad C = \frac{G}{2\beta\omega}$$



14

### Voigtモデルの複素表現

- 応力-ひずみ関係
 
$$\tau = G\gamma + i\omega C\gamma$$
- 正弦波加振
 
$$\tau = \tau_0 e^{i\omega t} \quad \gamma = \gamma_0 e^{i\omega t}$$
- 複素数の応力-ひずみ関係
 
$$\tau_0 = G(1 + 2ih)\gamma_0$$
- 複素剛性
 
$$G^* = G(1 + 2ih)$$

15

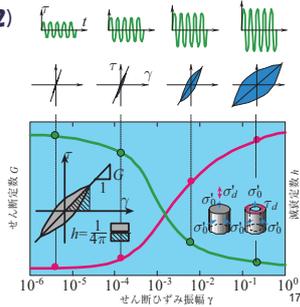
### 複素剛性の現在

- $h = 1 - 2h^2 + 2ih\sqrt{1-h^2}$ 
  - 位相差を調整
- SHAKEの旧バージョン、新バージョン
- DYNEQでは選択
  - 目に見えるほどの違いはない

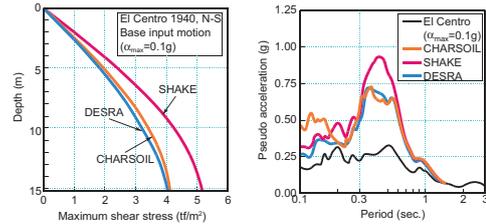
16

### SHAKEのための構成モデル

- 複素剛性法  $G^* = G(1 + 2ih)$
- Seed and Idriss (1970)
- Hardin and Drnevich (1972)



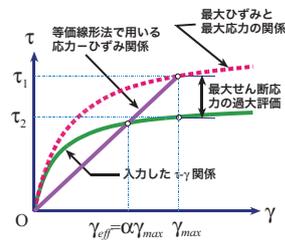
### SHAKEの短所(1)



- 既往の研究では、特定周波数の共振と書いてある
- 誰も応力-ひずみ関係を見ていなかった
  - $G-\gamma, h-\gamma$ 関係で事たれとしていた
  - SHAKEで応力-ひずみ関係を出力しても直線

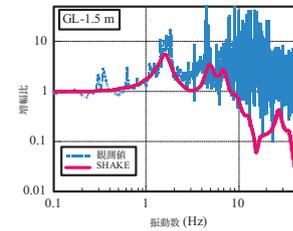
$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max}$$

- 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

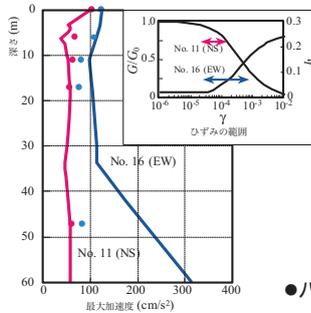


### SHAKEの短所(2)

- 高振動数の増幅の過小評価



### 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

### 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
  - $\alpha$ を小さくすれば改善できる
- 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

### 等価線形法の改良

- GRAMER
- FDEL
  - 有効ひずみの周波数依存性を考慮

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

- ▶ 適用範囲が非常に狭いが、その範囲では威力発揮。
- ▶ 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。
- $\alpha=1$ は別の問題を起こすことがある
  - ▶ 卓越周期

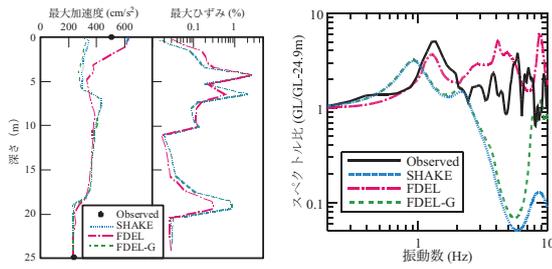
### 剛性と減衰のどちらが大事

- 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

**応答値**



1995年兵庫県南部地震, 関電技研

25

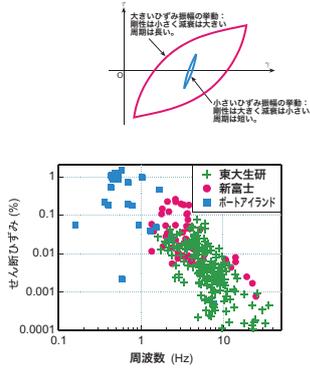
**改良法の問題点**

- 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

26

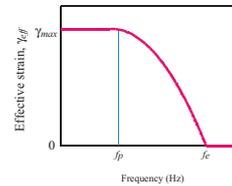
**DYNEQの考え方**

- 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。
- 数Hzより大きいひずみは弾性挙動でよい。



27

**有効ひずみの周波数依存**



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

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

28

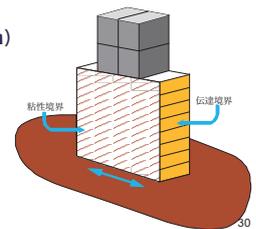
**等価線形解析の限界**

- SHAKE
  - 逆増幅解析はひずみ0.01%より少し大きめまで
  - ひずみ0.1%でも欠点は明らかになる
- 改良された方法 (DYNEQ)
  - 逐次積分全応力解析と同じ適用範囲
- 逆増幅解析はセンシティブ

29

**多次元の解析**

- SHAKEと多次元の違い
  - 空間に関し、解析解、近似解
- FLUSH
  - Fast LUSH
    - ▶ Lysmer, UdaKa, Seed, Hwang
    - ▶ FFT (Fast Fourier Transform)
  - エネルギー伝達境界
  - 近似三次元
    - ▶ 側方ダッシュポット境界
  - 剛基盤



30

**FLUSHの拡張**

- SuperFLUSH
  - 底面に粘性境界
- ALUSH, ASHSDZ
  - 軸対象構造物
- SuperFLUSH / Rayleigh, / Love
  - 表面波解析
- SASSI
  - 三次元解析
- Micro FLUSH
  - パソコン用

31

**Truly nonlinear method  
非線形解法**

32

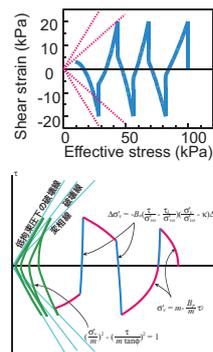
### 逐次積分法による全解析

- DESRA
- CHARSOIL (1974)
  - Ramberg-Osgoodモデル
 
$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} \left\{ 1 + \alpha \left( \frac{\tau}{\tau_f} \right)^2 \right\}$$
- MASH (1978)
  - Davidenkovモデル
 
$$\tau = \left( \frac{\gamma}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \right)^{1/B}$$

33

### 逐次積分法による液状化解析

- DESRA (1976)
  - 双曲線モデル
  - Masing則
  - Marfin-Finn-Seedモデル
    - ▶ 体積ひずみモデル
- YUSAYUSA (1980)
  - 双曲線モデル
  - Masing則
  - 応力経路モデル



34

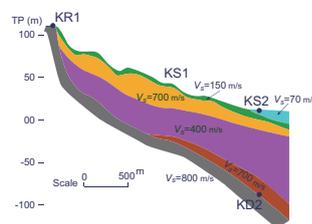
### 解析プログラムの比較

- 地盤工学会
  - 1989年
  - 1991年
  - .....
- EGS (Effect of Surface Geology)
  - 1992年
- 土木学会
  - 2003年
- 国土交通省
  - 2002年
- VELACS
  - 1993年

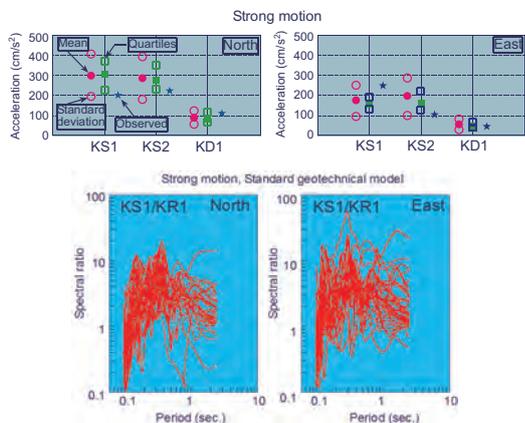
35

### 足柄フラインドテスト

- 全応力解析
- 地震記録



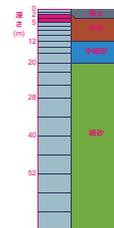
36



37

### 1989年の一斉解析

- 川岸町地盤
  - 液状化の発生
  - 加速度時刻歴
- 盛土
  - Cambridge大学の実験
  - 残留変形



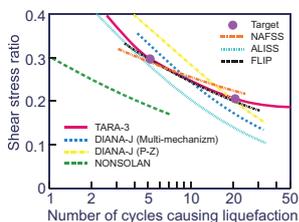
38

### 新しい試み

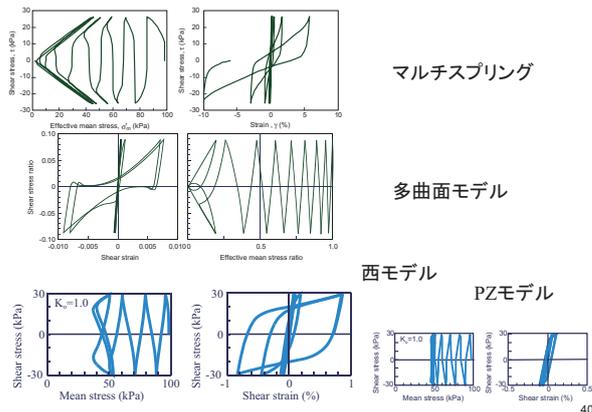
- 過剰間隙水圧比  $\alpha$ 

$$\alpha = u / \sigma'_0$$

$$\alpha = 1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$$
- 液状化強度曲線

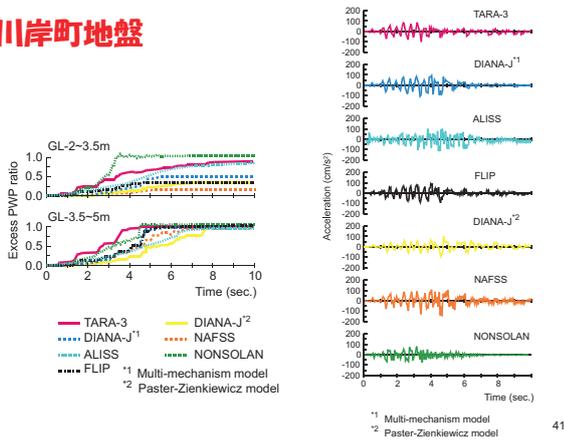


39



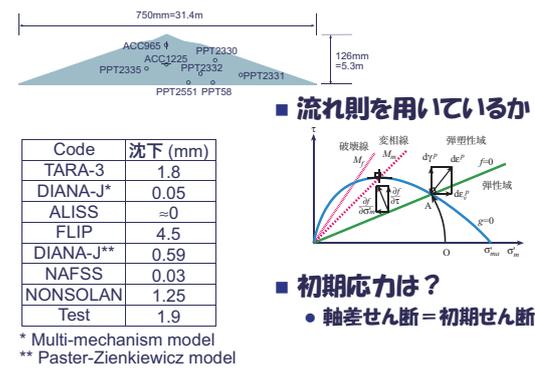
40

### 川岸町地盤



41

### 盛土(遠心载荷)

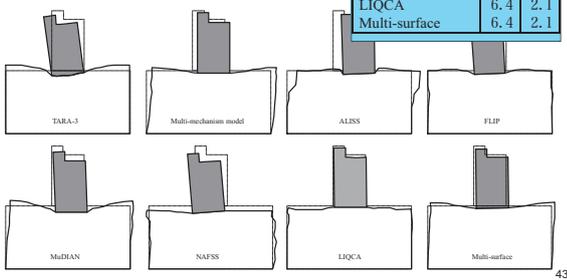


42

### 1991年の一斉解析

- 地震終了時の値
- ≠ 残留変形

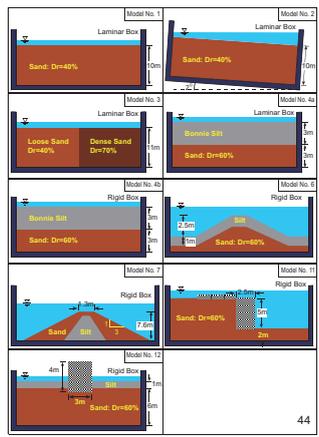
Code/Model	V	H
TARA-3	0.5	0.7
Multi-mechanism	2.4	6.2
ALISS	3.7	9.2
FLIP	15.4	18.1
MuDIAN	9.1	0.8
NAFSS	2.2	2.0
LIQCA	6.4	2.1
Multi-surface	6.4	2.1



43

### VELACS

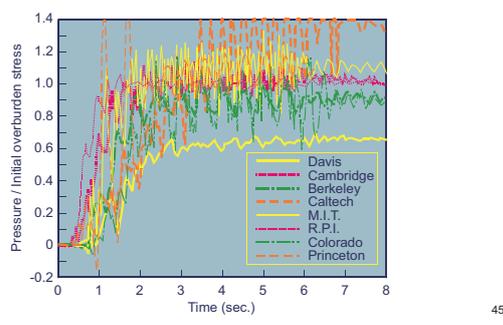
- 全てのモデルに成績のよかったコードはない。
- 全てのコードの成績がよかったモデルはない



44

### 実験結果は正しいか?

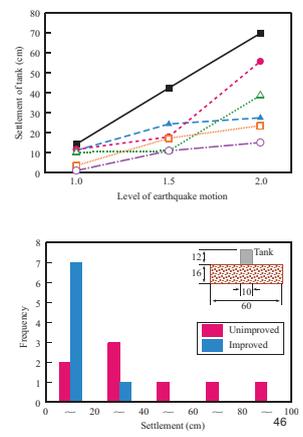
- 同じ土層, 同じ材料, 同じ入力



45

### 土木学会一斉解析

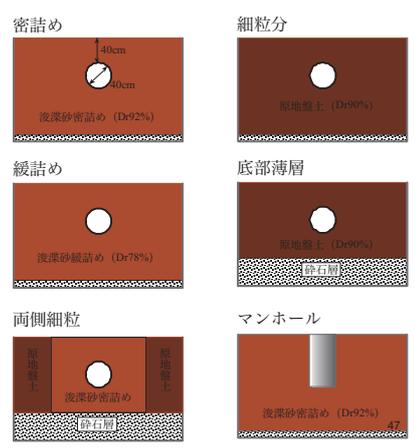
- タンクの沈下
- 昔より差は小さくなった



46

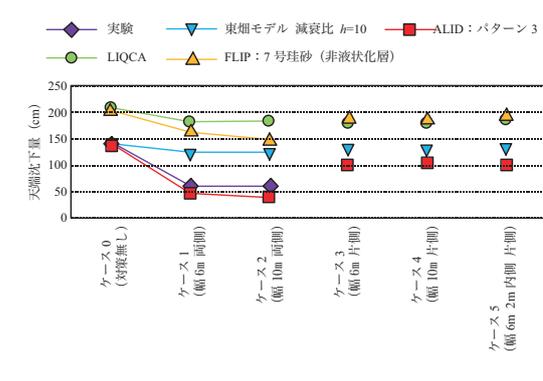
### 浮き上がり

- 差は10倍



47

### 河川堤防の沈下



48

## 比較解析とフラインドテスト

### ■ 比較解析

- 計算のやり直しが可能
- 結果が分かっていることも多い
- 結果を調整することもある

### ■ フラインドテスト

- 結果は未知
- 計算に必要な定数が与えられるとは限らない
- 条件と異なる地盤となることもある
- 実験はいつも正しいか
- 説明の機会が与えられない

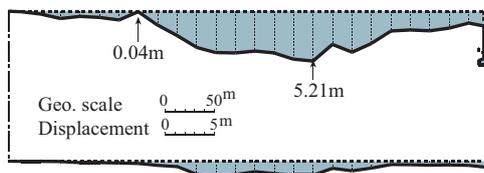
49

## 1964年新潟地震 川岸町アパート



傾斜角と方向・沈下量

## 函館港弁天地区ふ頭(函館ドック)



51

## FEMプログラムの使用に 対する留意事項

52

## メッシュ分割

53

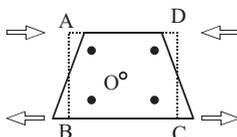
## メッシュの作成方法

- FEM = 連続体を離散化して解く手法
- 離散化誤差をメッシュごとに同じにする
  - 変化の激しいところは細かいメッシュに
- 地震応答解析用の特別ルール
  - 波動伝播に必要なメッシュサイズ
  - 質量の分布が偏らないように
  - 質量の分配法
    - ▶ 分布質量: 加速度と変位の補間関数が同じ
      - ◆ バンドマトリックス
    - ▶ 集中質量: 加速度はステップ関数
      - ◆ 対角マトリックス

54

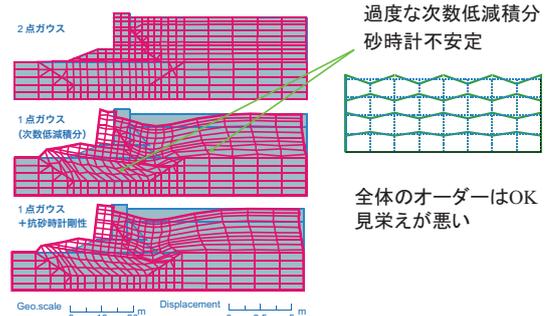
## ボリュームロッキング

- ポアソン比0.45以上(0.48以上?)
  - 積分点に対する等体積変形
  - 変形の過小評価
- 次数低減積分
  - 1点ガウス積分
  - SRI (Selected Reduced Integral)



55

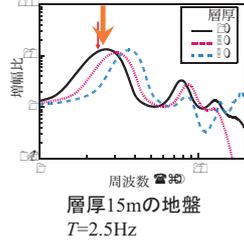
## ボリュームロッキングの影響



56

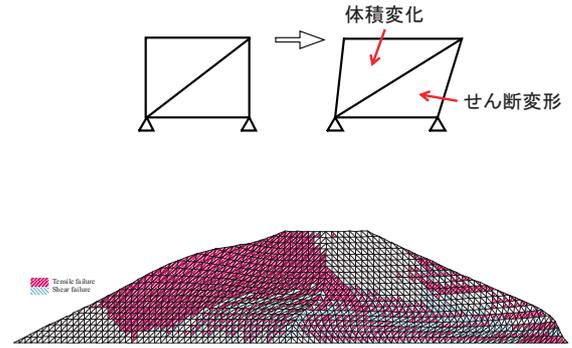
### メッシュサイズ

- 伝わる波の振動数に影響
  - 波長の1/5程度以下のサイズが必要
  - SHAKEには別の理屈(図書参照)
- 例
  - $V_s = 100\text{m/s}$ ,  $15\text{Hz}$
  - $l = 100 / 15 = 6.7$
  - $d < V_s / 100$
  - 非線形  $\rightarrow V_s$  低下
  - $d = 1\text{m}$
  - 必要層厚は  $V_s$  に比例



57

### メッシュ形状

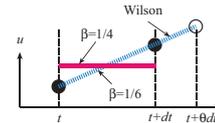


58

### 積分法

### 数値積分法

- 運動方程式の解は無限にある
  - 地震動が全時刻について与えられていない
    - ▶  $x = \dot{x} = 0, \ddot{x} = -\dot{i}_g$  は立派な解である
    - $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\dot{i}_g$
- 時間に関して厳密解を解くことは困難
  - 各種の近似法
  - 入力加速度ではなく、応答に近似解を使っている
    - ▶ 線形加速度法
    - ▶ Newmarkの $\beta$ 法
    - ▶ Wilsonの $\theta$ 法
    - ▶ 中央差分法

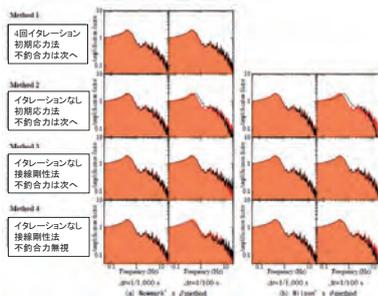


59

60

### 数値積分法の選択

- どれを使っても構わない
  - 積分時間間隔を小さくすれば、どれも同じ解に収束する
  - 1/100秒では一寸心配なときも
  - 差は高振動数領域
  - 心配なら、1ケース試してみる



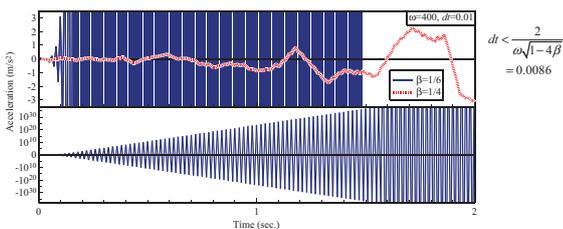
61

### 数値手法の選択(大きい積分時間間隔)

- 中央差分
  - 精度良い, 不安定問題大  
▶ 地盤だけならOK ( $\Delta t = 0.0001$ 程度)  $dt < \frac{2}{\omega}$
- 線形加速度法(Newmarkの $\beta$ 法,  $\beta = 1/6$ )
  - 精度良い, 不安定の可能性
- Newmarkの $\beta$ 法,  $\beta = 1/4$ 
  - 無条件安定  $dt < \frac{2}{\omega\sqrt{1-4\beta}}$
- Wilsonの $\theta$ 法,  $\theta = 1.37(1.4)$ 
  - 無条件安定, 精度悪くないが $\omega$  = 安定性が強い

62

### 数値積分の安定・不安定



- 最小の固有周期の??分の1以下
  - メッシュサイズが小さくなった
- 発散しなければ(数値積分の意味では)正解
- 無条件安定条件でも発散する事例も

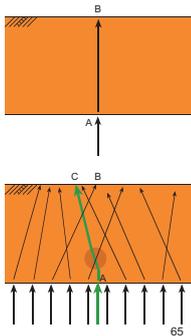
63

### 減衰の設定

64

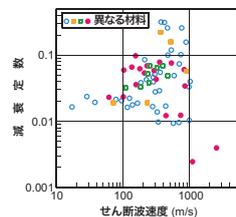
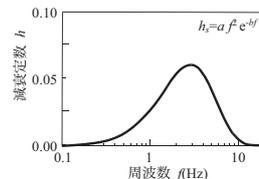
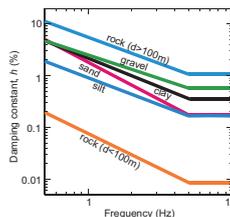
### 減衰の設定

- 履歴減衰
  - 応力-ひずみ関係のヒステリシス
- 散乱の減衰
  - 地盤は均質ではない→均質にモデル化
- 地下逸散減衰
  - 基盤から下に逃げた波は戻ってこない
- 数値積分による減衰
  - 応答を拘束する=振動を抑える

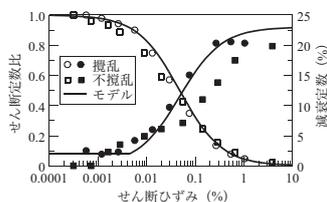


### 散乱の減衰

- 周波数に依存する減衰



### 履歴減衰と散乱減衰のトレード

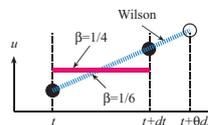


- 弾性 = (履歴)減衰なし
- 地盤では、弾性+減衰

67

### 数値減衰

- 数値積分により自然と導入される減衰
  - Wilson  $\theta > \text{Newmark } \beta (\beta = 1/4) > \text{Newmark } \beta (\beta = 1/6)$
- 数値積分による変形の拘束
  - 拘束が大きい:
    - ▶ 数値積分の安定性大
    - ▶ 数値減衰が大きくなる
- 数値積分時間間隔を小さくすれば、回避可能
  - 工学的に重要でない小さい周期



68

### 減衰項

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f(u) = -m\ddot{u}_g$$

- 実現象: 振動はいつか終わる=減衰
- 数値解析: 考慮しないと入らない
  - その全て(履歴減衰除く)を減衰項に持たせる。
  - メカニズムがわかっているもの、いないもの
    - ▶ 水中で振動
    - ▶ 地下逸散減衰
    - ▶ 散乱減衰
    - ▶ 土の変形=摩擦(有効応力の原理)

- 式で表現しないとイケない

- 粘性係数(c)と粘性定数(h)

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f(u) = -m\ddot{u}_g$$

$$\ddot{u} + 2h\omega_0\dot{u} + k\omega_0^2 = -\ddot{u}_g$$

69

### Rayleigh減衰 $c = \alpha m + \beta k$

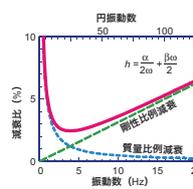
- 簡単に減衰マトリックスを作る手法

$$h = \frac{\alpha}{2\omega_0} + \frac{\beta\omega_0}{2}$$

- 内部減衰と外部減衰

$$[c] = \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix}, [c] = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}, [m] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$$



連続関数?

70

### 係数の決め方

- 1次モードで??%
  - 奇与分は半分ずつ
  - $\alpha = 0$
- 1次モードと2次モードを合わせる
- 工学的に有意な周波数領域で合わせる
  - 0.5~6Hz (計測震度で考慮しているおおよその範囲)
  - 0.1~2.5秒 (SI値で考慮している範囲)
- 何に対する減衰を考えているのか?
  - 波動の伝播時に発生する減衰

71

### 実減衰との対応

- Q値

$$Q = \frac{1}{2h}, h = \frac{1}{2Q}$$

- 地震波の伝播時の振幅減少から求めた減衰
- 均質領域で小さくなる?

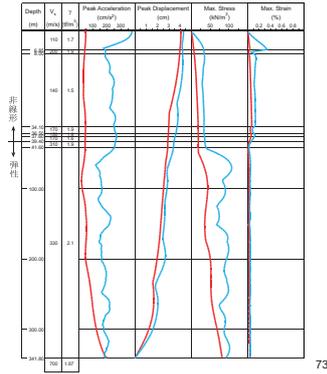
No.	H (m)	Q	h (%)
1	2.0	14	3.6
2	4.0	13	3.8
3	6.5	12	4.1
4	9.0	12	4.1
5	15.5	12	4.1
6	22.0	9	5.6
7	32.0	7	7.1
8	40.0	7	7.1
9	50.0	7	7.1
10	180.0	100	0.5
11	360.0	100	0.5
12	380.0	100	0.5
13		200	0.25

八戸の地盤

72

### モード減衰から決める欠点

- 表層:  $Q=35$ 
  - 1.43%
- 基盤:  $Q=100$
- 剛性比例減衰
  - 一次モードで  $Q=100$  ( $h=0.5\%$ )になるよう/を決める。
  - $V_s=300\text{m/s}$ 以上の層では差分 ( $h=0.93\%$ )を要素ごとに与える。

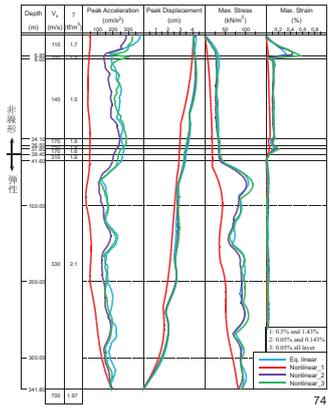


73

### 改良

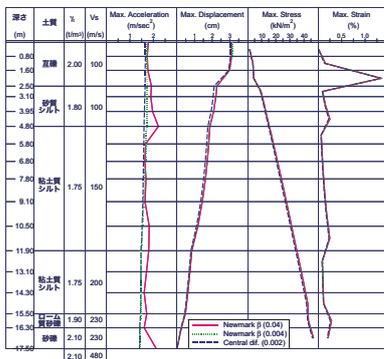
- 減衰は減衰係数で与えるべき
- 減衰定数=系の振動特性が含まれる

中央防災会議  
 表層  $Q=35$  ( $h=1.43\%$ )  
 重要周波数 0.5~6Hz  
 $\alpha=0.083, \beta=0.0007$   
 $\alpha=0.109, \beta=0.00092$   
 ( $h_{min}=1\%$ )

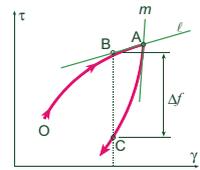
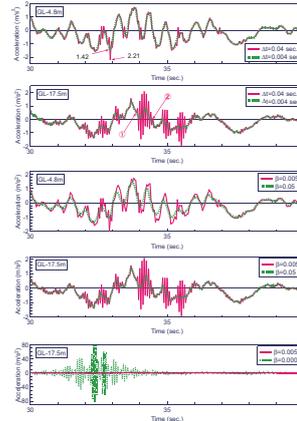


74

### 減衰のもう一つの役割



75



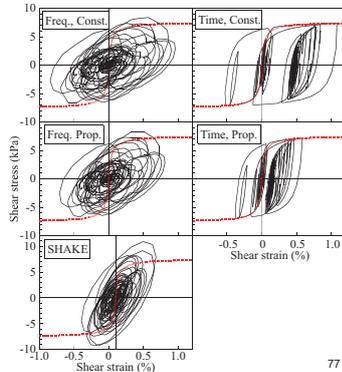
- 最適に選ぶと
  - パルスを押さえる
  - 全体応答は変えない

76

### Rayleigh減衰のもう一つの問題

- 減衰が系の応答に支配的になるところがある
  - 著しい非線形
  - 液状化
- 運動方程式の要素
  - 慣性力項  $m(\ddot{u} + \ddot{u}_g)$
  - 減衰項  $c\dot{u}$
  - 復元力項  $ku$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$$



77

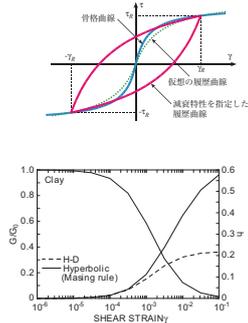
### 減衰に関する誤解

- 減衰が大きいと応答が抑制される
  - 双曲線モデルは減衰が大きいため、応答が小さい

78

### 履歴減衰

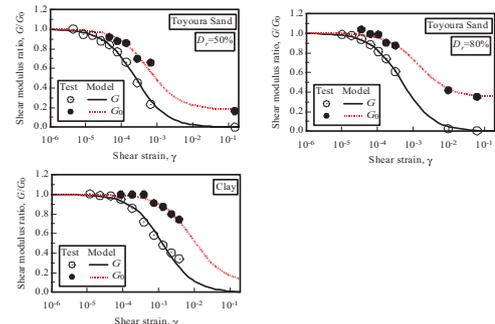
- Hardin-Drnevichのモデル
 
$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r}, \quad h = h_{max} \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right)$$
- Masing則で履歴曲線を作る
  - 減衰を過大評価
  - 応答も小さくなる?



79

### 除荷時の剛性

- 多くの構成則では弾性剛性



80

### 材料特性とモデル

$$\frac{G_0}{G_{max}} = \frac{1 - G_{min}/G_{max}}{1 + \gamma/\gamma_{r0}} + \frac{G_{min}}{G_{max}}$$

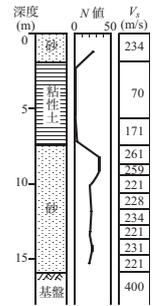
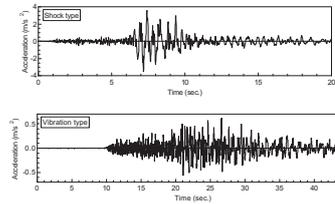
材料	$\gamma_r$	$\gamma_{r0}$	$G_{min}/G_{max}$
砂 ( $D_r=50\%$ )	0.00025	0.0006	0.18
砂 ( $D_r=80\%$ )	0.0005	0.0015	0.35
粘土	0.0013	0.013	0.1

- ・双曲線モデル
- ・H-Dモデル ( $h_{max}=25\%$ ) (吉田・石原のモデル化)

81

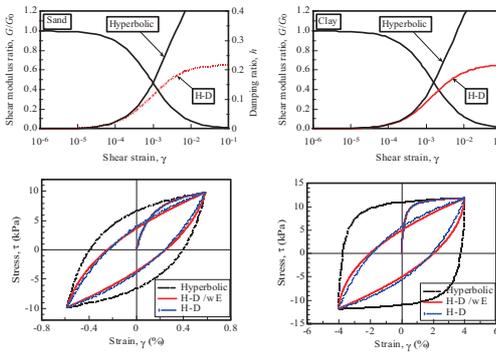
### 解析モデル

- 東京の代表的なモデル
- 衝撃型・振動型の地震動
  - 東京での観測波



82

### 材料特性



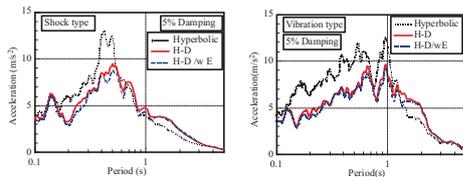
83

### 最大応答

Depth (m)	Soil Type	$V_s$ (m/s)	Unit weight (t/m³)	Peak Acceleration (m/sec²)	Peak Displacement (cm)	Max. Strain (%)
1.0	Sand	234	1.75			
1.9	Sand	234	1.95			
2.8		70	1.75			
3.8	Clay	70	1.75			
4.8		70	1.75			
5.8		70	1.75			
7.8	Clay	171	1.75			
8.8	Sand	261	2.00			
9.8	Sand	259	2.00			
10.8	Sand	221	1.95			
11.8	Sand	228	1.95			
12.8	Sand	234	1.95			
13.8	Sand	221	1.95			
14.8	Sand	231	1.95			
15.8	Sand	221	1.95			
16.0	Base	400	2.10			

84

### 応答スペクトル

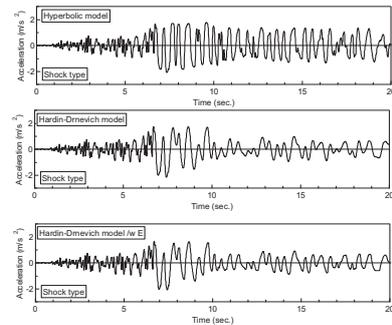


衝撃型

振動型

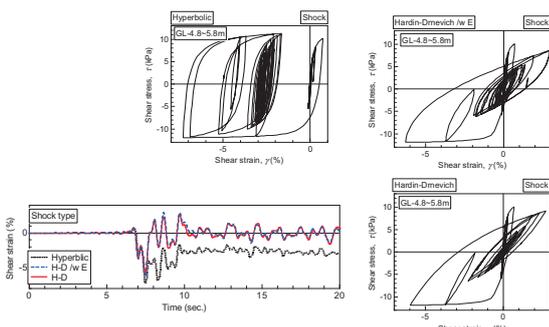
85

### 時刻歴 (衝撃型)



86

### 応力-ひずみ関係 (衝撃型)



87

### まとめ

- 減衰と加速度の頭打ち(上限)を区別する
  - 非線形性が卓越すると上限にいたる
    - ▶ 減衰には影響されない
  - 減衰は除荷後の挙動に利く
    - ▶ 除荷後大きな波が来れば差が発生
- 履歴減衰が大きいからといって応答が小さくなるわけではない
  - 剛性との相互作用で決まる。
  - 除荷時剛性は重要かもしれない
    - ▶ 減衰をあわせると、可能な履歴曲線の範囲は限られるので、重要では無いかもしれない

88

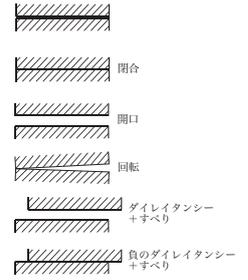
## ジョイント要素

89

## Goodmanのジョイント要素

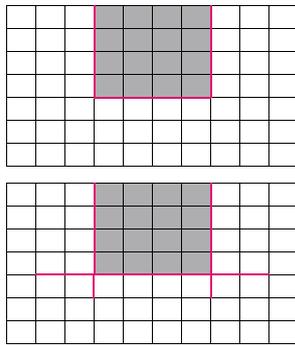
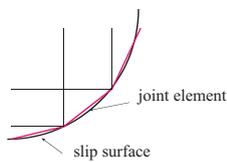
### ■ 二つの定式化

$$\begin{Bmatrix} F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \\ F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \\ F_{xj} \\ F_{yj} \\ F_{zj} \end{Bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -2k_x & 0 & 0 \\ 0 & 2k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -2k_x & 0 \\ k_x & 0 & 0 & 2k_x & 0 & -2k_z & 0 & -k_y & 0 \\ 0 & k_x & 0 & 0 & 2k_x & 0 & -2k_z & 0 & -k_y \\ -k_x & 0 & -2k_x & 0 & 2k_x & 0 & k_z & 0 & 0 \\ 0 & -k_x & 0 & -2k_x & 0 & 2k_x & 0 & k_z & 0 \\ -2k_x & 0 & -k_x & 0 & k_z & 0 & 2k_x & 0 & 0 \\ 0 & -2k_x & 0 & -k_x & 0 & k_z & 0 & 2k_x & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_j \\ v_j \\ w_j \end{Bmatrix}$$



90

## ジョイント要素の配置

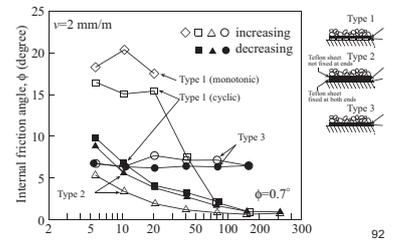


91

## ジョイント要素の特性

### ■ せん断強度

- 接触の摩擦が先か、土のせん断破壊が先か
  - ▶ 摩擦で定式化
  - ▶ 薄層の土要素



92

## 弾性定数の目安

- 剛性は無限大
- 直上の要素の変位-ひずみ関係式
 
$$u = \frac{h}{GL} \cdot F$$
- これと同じ変位を生じるジョイント要素の剛性
 
$$u = \frac{F}{k_s L}$$
- 変位を同じと置くと
 
$$k_s = \frac{G}{h}$$

93

## 弾性定数の確認

- 系の固有値が変わらない
- 構造物周辺の固有値が変わらない
- 剛性を大きくすると、計算時間は増加する

94

## 軟岩の繰返しせん断特性

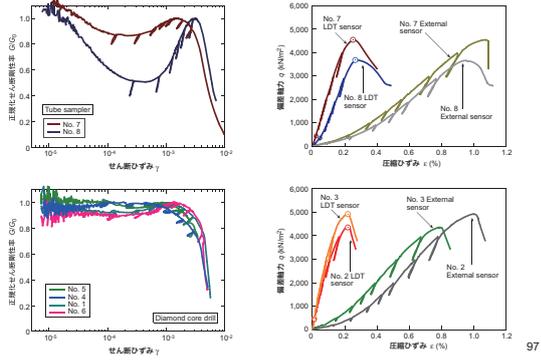
- 系の固有値が変わらない
- 構造物周辺の固有値が変わらない
- 剛性を大きくすると、計算時間は増加する

95

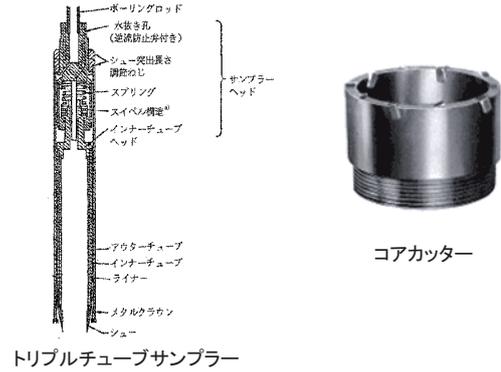
深度 (m)	地層区分	速度境界度 (m)	土質名	土質柱状図	N 値	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	試験採取位置	P波速度 V <sub>p</sub> (m/s)		ポアソン比 ν <sub>d</sub>	ヤング率 E <sub>d</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	
								1,000	2,000		500	1,000
1-2	Dc	1.75	砂		1.65		振振面	V <sub>p</sub> =380 V <sub>s</sub> =220	0.248	E <sub>d</sub> =199.4 G <sub>d</sub> =79.9		
3-4		3.50	砂		1.85		振振面	V <sub>p</sub> =2,280 V <sub>s</sub> =220	0.495	E <sub>d</sub> =260.5 G <sub>d</sub> =87.1		
5-7			砂				トリプルチューブ ソングラス による試験採取	V <sub>p</sub> =2,280 V <sub>s</sub> =480	0.477	E <sub>d</sub> =1,347.0 G <sub>d</sub> =456.2		
8-15	Ka	15.09	砂		1.98		ダイキモド・ コアリアル による試験採取					

96

### サンプリングとひずみ計測法の影響

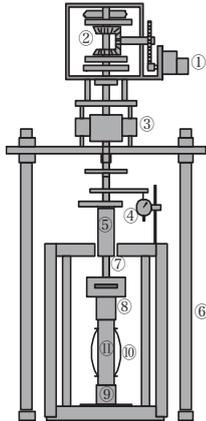


### 試料採取方法



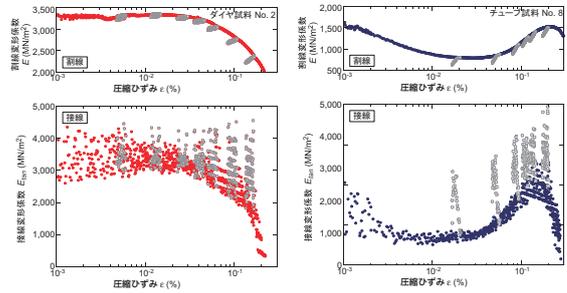
### 試験方法

- 燐青銅版
- $\pi$  ゲージ

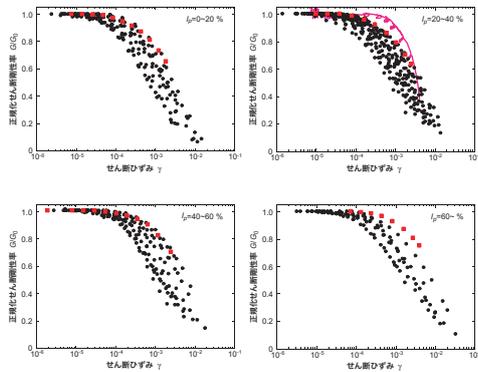


- ① モーター
- ② 縦返し装置
- ③ ベアリング
- ④ ダイアルゲージ
- ⑤ ガイドベアリング
- ⑥ フレーム
- ⑦ ロードセル
- ⑧ キャップ
- ⑨ ベアリング
- ⑩ LDT
- ⑪ 供試体

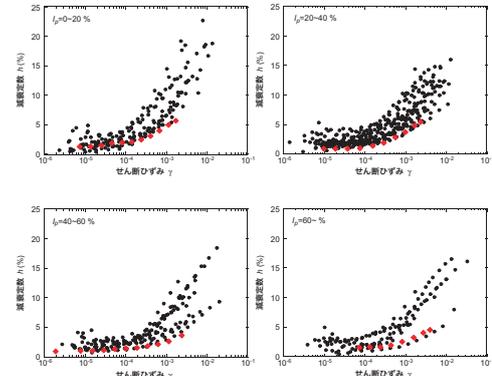
### 除荷時の剛性



### 繰返しせん断試験



### 減衰特性



### 等価線形解析の適用性 全応力解析の適用性

### これまでわかっていること

- 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

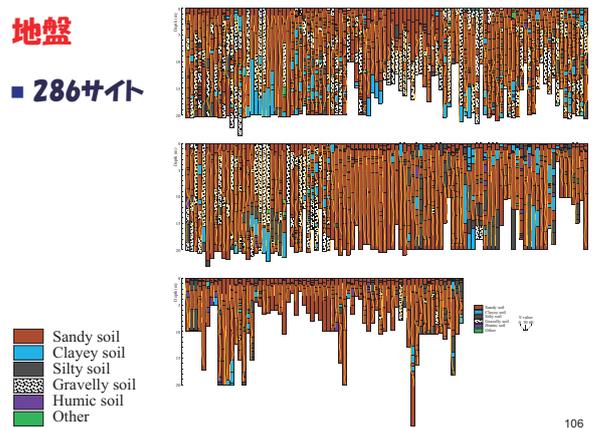
### 適用性に関する問題

- 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...

105

### 地盤

#### ■ 286サイト



106

### 地盤のモデル化

- せん断波速度(道路橋の式)
  - $V_s = 100N^{1/3}$  (clayey soil)
  - $V_s = 80N^{1/3}$  (sandy soil, other soils)
- 単位体積重量
  - テータベース
- せん断強度
  - 砂質土(畑中らの式)
    - $\phi = 20 + \sqrt{20N_1}$      $N_1 = \frac{170N}{\sigma'_v + 100}$  ( $\sigma'_v$  in kPa)
  - 粘性土(経験式の平均)
    - $\tau_f = 19N$

107

### 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)

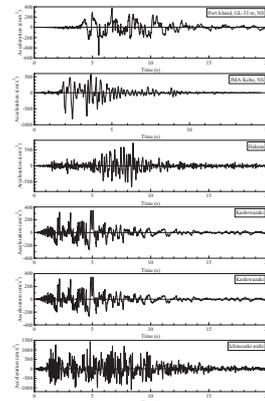
108

### 地震波

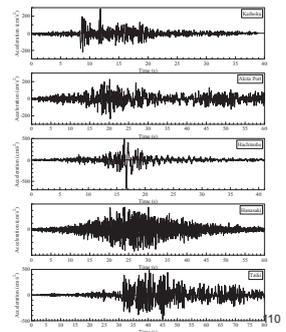
- 内陸型(内陸型地殻内地震)
  - 1995年兵庫県南部地震 Port Island GL-33m NS
  - 1995年兵庫県南部地震 JMA神戸海洋気象台NS
  - 1999年鳥取県西部地震 伯太NS
  - 2004年新潟県中越地震 JMA川口町EW
  - 2007年新潟県中越沖地震 東電柏崎刈羽 サービスホールSG1-NS
  - 2008年岩手宮城内陸地震 一関西EW
- 海溝型(海溝型地震)
  - 1978宮城県沖地震 開北橋EW
  - 1983年日本海中部地震 秋田港EW
  - 1994年三陸はるか沖地震 八戸事務所 EW (こちらを使う)
  - 1994年北海道東方沖地震 花咲港EW
  - 2003年十勝沖地震 大樹EW

109

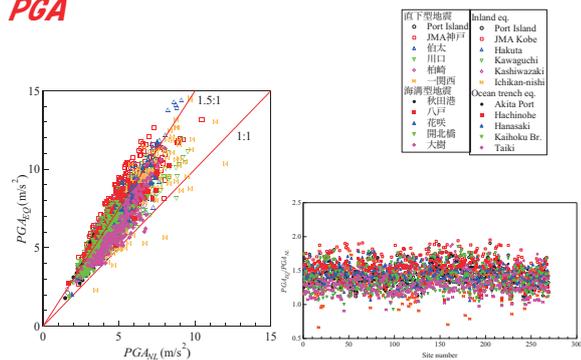
### 直下型



### 海溝型

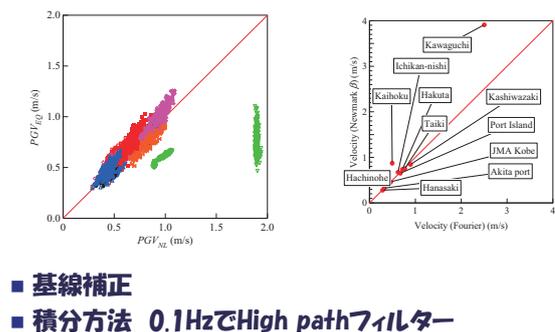


### PGA



111

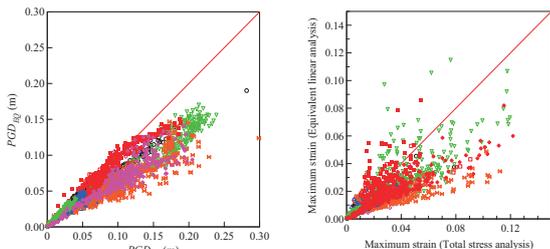
### PGV



- 基線補正
- 積分方法 0.1HzでHigh pathフィルター

112

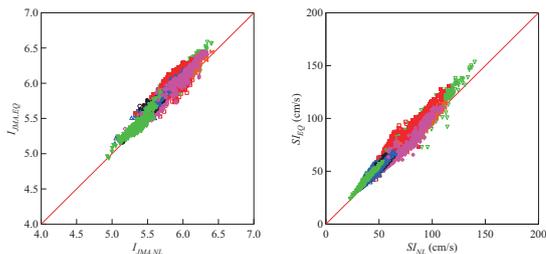
### PGD, 最大ひずみ



- 同じ層ではないかも
- 変形モードも影響？

113

### I<sub>JMA</sub> と SI



114

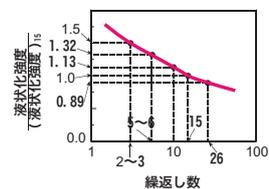
### まとめ

- PGA: 50 %
- PGV: 大体OK
- PGD: 過小評価, 30 %, ばらつく
- I<sub>JMA</sub>: 大体OK (やや過大評価)
- SI: 大体OK (やや過大評価)

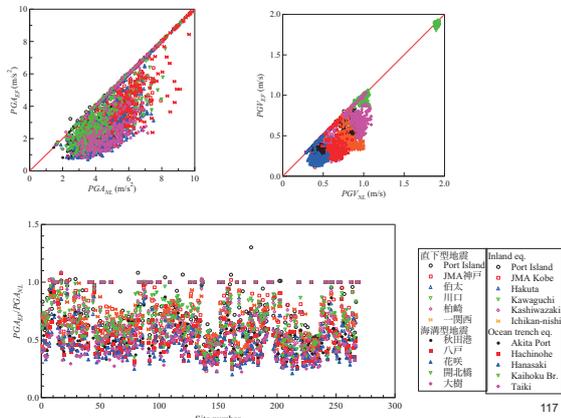
115

### 有効応力と全応力

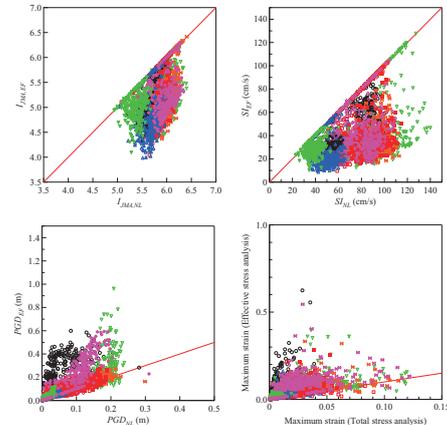
- 液状化強度
  - 道路橋示方書
  - Seedらの繰返し数との関係



116



117



118

### まとめ

- 全応力解析はほとんどの指標を過大評価
  - サイクリックモビリティの効果は？
- PGDのみ過小評価
  - YUSAYUSAは変位が出やすい？
- 安全側？

119

**参考文献** (数字は、スライド番号。「吉田望 (2010) : 地盤の地震応答解析, 鹿島出版会, 256pp.」は番号を示さず引用)

- 11) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley
- 16) Lysmer, J. (1973): Modal damping and complex stiffness, University of California Note, University of California, Berkeley; Desai, C. S. and Christian, J. T. (1977): Numerical methods in Geotechnical Engineering, pp. 696-699
- 17) Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970): Soil moduli and damping Factors for dynamic response analyses, Report No. EERC70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 40p.  
Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects, Proc. of the American Society of civil engineers, Vol. 98, No. SM6, pp. 603-624  
Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. (1972): Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Proc. of the American Society of civil engineers, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692
- 18) 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  
Streeter, V.VI, Wylie, E.B. and Richart, F.E: (1974): CHARSOIL, characteristics method applied to soils, NISEE/Computer Applications, University of California
- 19) 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
- 21) 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
- 23) 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
- 24) 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
- 30) Lysmer, J., Udaka, T., Seed, H. and Hwang, R. (1974): LUSH-a computer program for complex response analysis of soil-structure, EERC, Report No. EERC 74-4, University of California, Berkeley, 1974  
Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.-F. and Seed, H. B. (1975): FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley
- 31) SuperFLUSH/2D 理論説明書, 使用説明書, 構造計画研究所  
Berger, E, Seismic Response of Axisymmetric of Soil-Structures Systems, Ph.D Dissertation, University of California, Berkeley, California, 1975.  
Ghosh, S. and Wilson, E. (1969): ASHSD2 Dynamic stress analysis of axisymmetric structures under arbitrary loading, Report No. 69-10, University of California, Berkeley, Revised 1975  
Lysmer, J. M., Tabatanai-Rassi, Jajirian, F., Vadani, S. and Ostadan, F.: SASSI-A system for analysis of soil-structure interaction, Report UCB/GT/81-02, niversity of California, Berkeley, 1981

- 33) Streeter, V. VI, Wylie, E.B. and Richart, F.E: (1974): CHARSOIL, characteristics method applied to soils, NISEE/Computer Applications, University of California  
 Martin, P. P. and Seed, H. B. (1978): MASH, a computer program for the non-linear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered deposits, Report No. UCB/EERC-78/23, University of California, Berkeley
- 34) Finn, W. D. L., Byrne, P. L. and Martin, G. R. (1976): Seismic response and liquefaction of sands, J. Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, No. GT8, pp. 841-856  
 Ishihara, K. and Towhata, I. (1980): One-dimensional Soil Response Analysis during Earthquake Based on Effective Stress Method, Journal of the Faculty of Engineering, Vol. XXXV, No. 4, The University of Tokyo, pp. 656-700 ; Ishihara, K. and Towhata, I. (1982): Dynamic response analysis of level ground based on the effective stress method, Soil Mechanics - Transient and Cyclic Loads, Pande, G. N. and Zienkiewicz, O. C. ed., John Wiley and Sons, pp. 133-172
- 36) Proc. of International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Odawara, 1992, Vol. 1, Vol. 2, Vol. 3
- 38) 地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会 (1989) : 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会
- 43) 地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集, 1991年1月, 土質工学会
- 44) Arulanandan, K. and Scott, R. F. ed.: Proc. Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis, California, 1993,
- 45) Arulanandan, K. and Scott, R. F. (1993): Project VELACS - Control test results, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 8, pp. 1276-1292
- 46) 地震工学委員会レベル2地震動による液状化研究小委員会活動成果報告書, 土木学会, pp. 81-86, 2003
- 47) 地盤工学会 (2003) : 液状化による地中埋設構造物の浮き上がり被害に関する研究 (その2) 報告書 (平成14年度)
- 48) 国土技術研究センター (2002) : 河川堤防の地震時変形量の解析手法
- 51) Sugano, T. and Miyata, S. (2009): Satisfaction and dissatisfaction of port facilities designer facing to the performance based design methodology, Proc., Performance-based design in earthquake geotechnical engineering, pp. 221-225
- 58) H.Sakai, S.Sawada and K.Toki : Non-linear analyses of dynamic behavior of embankment structures considering tensile failure, 12th World Conference on Earthquake Engineering, No.678/5/A, 2000.12.
- 61) 酒井久和, 吉田望, 澤田純男(2005) : 非線形地盤振動解析における時間積分法の誤差, 土木学会論文集, No. 794/I-72, pp. 291-300
- 66) 福島美光, 翠川三郎 (1994) : 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  
 中村晋, 澤田純男, 吉田望 (2005) : 表層地盤の非線形応答のモデル化 (2) , 地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究 第3回シンポジウム論文集, pp. 101-104  
 原昭夫, 清田芳治 (1977) : 地盤震動解析のための土の動的性質の研究 - せん断弾性定数, 減衰定数の振動数依存性 -, 第14回土質工学研究発表会, pp.533-536
- 90) Goodman, R. E. and Taylor, R. L. (1968): A model for the mechanics of jointed rock, Jour. of SM, ASCE, Vol. 94, No. SM3, May, pp. 637-659  
 Goodman, R. E. (1976): Methods of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing Company ; グッドマン R. E. (赤井浩一, 川本眺万, 大西有三共訳) : 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978, 371pp

- Goodman, R. E. (1977): Behavior of Joint Masses, Chapter 4, Finite Element for Discontinuous Rock, Desai, C. S. and Christian J. T. ed. (1977): Numerical methods in Geotechnical Engineering, McGraw Hill
- 93) Aydan, O., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T. (1990): Numerical modelling of discontinuous and interfaces in rock mass, Proc., 4th Japan Computational Mechanics Symposium, Tokyo  
Tatsuoka, F. and Haibara, O. (1985): Shear Resistance Between Sand and Smooth or Lubricated Surfaces, Soils and Foundations, Vol. 25, No. 1, pp. 89-98
- 96) 福元俊一, 吉田望, 佐原守 (2009) : 堆積軟岩の動的変形特性, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第1号, pp. 46-64
- 103) 吉田望: 等価線形化法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.57-62, 2013  
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

2015.09.25

## 地震応答解析プログラムの使用上の留意点

東北学院大学 工学部 吉田 望

## 目 次

1. メッシュ分割
2. 積分法
3. 減衰の設定
4. 減衰に関する誤解
5. ジョイント要素
6. 軟岩の繰返しせん断特性
7. 等価線形解析, 全応力解析の適用性

## 参考文献リスト

参考文献の番号は, スライド番号。私の著書「吉田望 (2010) : 地盤の地震応答解析, 鹿島出版会, 256pp.」は番号を示さず引用。

No.	文献
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 吉田望 (1989) : 次数低減積分を用いた液状化による地盤の大変形解析, 第3回計算力学シンポジウム報文集, pp. 391-396</li> <li>・ Flanagan, D. P. and Belytschko, T. : A uniform strain hexahedron and quadrilateral with orthogonal hourglass control, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 17, pp. 679-706, 1981</li> <li>・ 例えば, Bathe, K. J. : Finite element procedures in engineering analysis, Prentice-Hall, New Jersey, 1982</li> <li>・ 大矢陽介, 吉田望 (2008) : ロッキングと砂時計不安定を避ける有効応力解析法の定式化, 構造工学論文集, Vol. 54B, pp. 45-50</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫 (1999) : 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 71-89</li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大矢陽介 (2009) : 地盤の液状化・流動解析の実用化に関する研究, 東北学院大学学位論文, 180pp.</li> </ul>
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ H.Sakai, S.Sawada and K.Toki : Non-linear analyses of dynamic behavior of embankment structures considering tensile failure, 12th World Conference on Earthquake Engineering, No.678/5/A, 2000.12.</li> </ul>
10	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 酒井久和, 吉田望, 澤田純男(2005) : 非線形地盤振動解析における時間積分法の誤差, 土木学会論文集, No. 794/I-72, pp. 291-300</li> </ul>

15	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 福島美光, 翠川三郎 (1994) : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な <math>Q^{-1}</math> 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</li> <li>・ 中村晋, 澤田純男, 吉田望 (2005) : 表層地盤の非線形応答のモデル化 (2), 地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究 第3回シンポジウム論文集, pp. 101-104</li> <li>・ 原昭夫, 清田芳治 (1977) : 地盤震動解析のための土の動的性質の研究—せん断弾性定数, 減衰定数の振動数依存性—, 第14回土質工学研究発表会, pp.533-536</li> </ul>
39	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Goodman, R. E. and Taylor, R. L. (1968): A model for the mechanics of jointed rock, Jour. of SM, ASCE, Vol. 94, No. SM3, May, pp. 637-659</li> <li>・ Goodman, R. E. (1976): Methods of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing Company ; グッドマン R. E. (赤井浩一, 川本眺万, 大西有三共訳) : 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978, 371pp</li> <li>・ Goodman, R. E. (1977): Behavior of Joint Masses, Chapter 4, Finite Element for Discontinuous Rock, Desai, C. S. and Christian J. T. ed. (1977): Numerical methods in Geotechnical Engineering, McGraw Hill</li> </ul>
41	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Aydan, O., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T. (1990): Numerical modelling of discontinuous and interfaces in rock mass, Proc., 4th Japan Computational Mechanics Symposium, Tokyo</li> <li>・ Tatsuoka, F. and Haibara, O. (1985): Shear Resistance Between Sand and Smooth or Lubricated Surfaces, Soils and Foundations, Vol. 25, No. 1, pp. 89-98</li> </ul>
43~46	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 東電設計資料</li> </ul>
47~53	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 福元俊一, 吉田望, 佐原守 (2009) : 堆積軟岩の動的変形特性, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第1号, pp. 46-64</li> </ul>
54~	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 吉田望 : 等価線形化法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.57-62, 2013</li> <li>・ 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</li> </ul>

## メッシュ分割

1

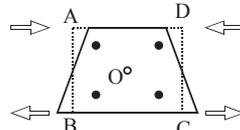
## メッシュの作成方法

- FEM = 連続体を離散化して解く手法
- 離散化誤差をメッシュごとに同じにする
  - 変化の激しいところは細かいメッシュに
- 地震応答解析用の特別ルール
  - 波動伝播に必要なメッシュサイズ
  - 質量の分布が偏らないように
  - 質量の分配法
    - ▶ 分布質量: 加速度と変位の補間関数が同じ
      - ◆ バンドマトリックス
    - ▶ 集中質量: 加速度はステップ関数
      - ◆ 対角マトリックス

2

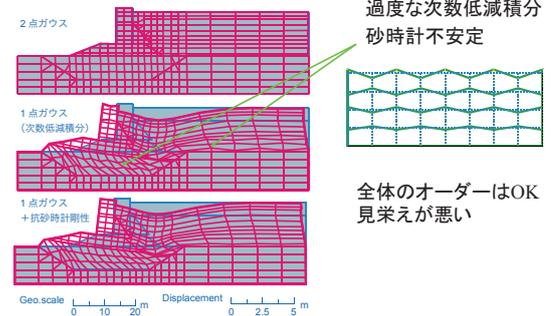
## ボリュームロッキング

- ポアソン比0.45以上(0.48以上?)
  - 積分点に対する等体積変形
  - 変形の過小評価
- 次数低減積分
  - 1点ガウス積分 (+ 抗砂時計剛性)
  - SRI (Selected Reduced Integral)
    - ▶ 体積変化とせん断変形に異なる変位関数
  - 間隙水と土骨格に分離 (有効応力解析)
    - ▶ 間隙水は体積変化のみ



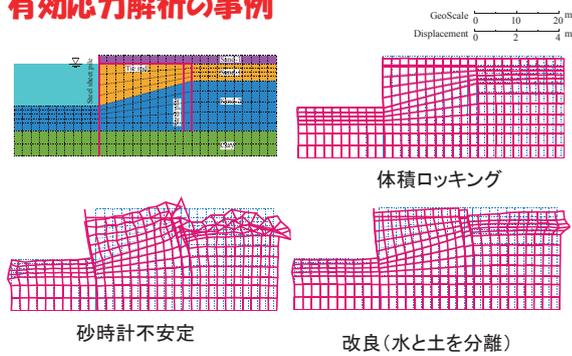
3

## ボリュームロッキングの影響



4

## 有効応力解析の事例

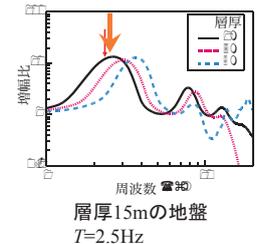


### ■ 秋田港大浜地区

3

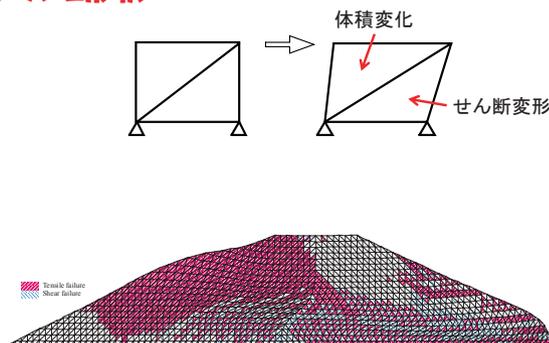
## メッシュサイズ

- 伝わる波の振動数に影響
  - 波長の1/5程度以下のサイズが必要
  - SHAKEには別の理屈 (図書参照)
- 例
  - $V_s = 100 \text{ m/s}$ ,  $15 \text{ Hz}$
  - $\ell = 100 / 15 = 6.7$
  - $d < V_s / 100$
  - 非線形  $\rightarrow V_s$  低下
  - $d = 1 \text{ m}$
  - 必要層厚は  $V_s$  に比例



6

## メッシュ形状



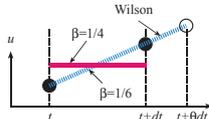
7

## 積分法

8

### 数値積分法

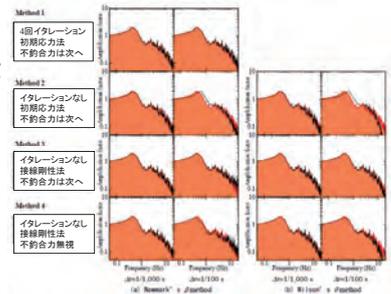
- 運動方程式の解は無数にある
  - 地震動が全時刻について与えられていない
    - ▶  $x = \dot{x} = 0, \ddot{x} = -\ddot{u}_g$  は立派な解である
    - $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}_g$
- 時間に関して厳密解を解くことは困難
  - 各種の近似法
  - 入力加速度ではなく、応答に近似解を使っている
    - ▶ 線形加速度法
    - ▶ Newmarkのβ法
    - ▶ Wilsonのθ法
    - ▶ 中央差分法



9

### 数値積分法の選択

- どれを使っても構わない
  - 積分時間間隔を小さくすれば、どれも同じ解に収束する
  - 1/100秒では一寸心配なときも
  - 差は高振動数領域
  - 心配なら、1ケース試してみる



10

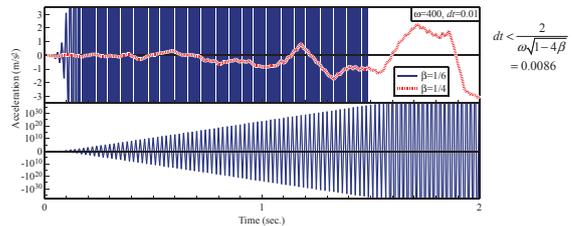
### 数値手法の選択(大きい積分時間間隔)

- 中央差分
  - 精度良い。不安定問題大
    - ▶ 地盤だけならOK ( $\Delta t = 0.0001$ 程度)
$$dt < \frac{2}{\omega}$$
- 線形加速度法 (Newmarkのβ法,  $\beta = 1/6$ )
  - 精度良い。不安定の可能性
- Newmarkのβ法,  $\beta = 1/4$ 

$$dt < \frac{2}{\omega\sqrt{1-4\beta}}$$
  - 無条件安定
- Wilsonのθ法,  $\theta = 1.37(1.4)$ 
  - 無条件安定。精度悪くないがα=安定性が強い

11

### 数値積分の安定・不安定



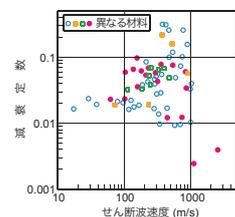
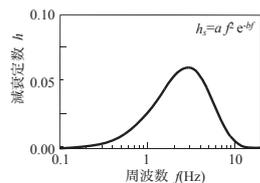
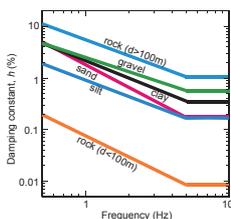
- 最小の固有周期の??分の1以下
  - メッシュサイズが小さくなった
- 発散しなければ(数値積分の意味では)正解
- 無条件安定条件でも発散する事例も

12

### 減衰の設定

#### 散乱の減衰

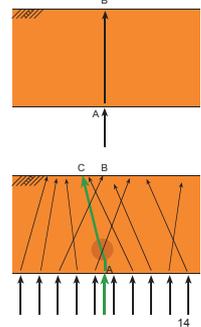
- 周波数に依存する減衰



13

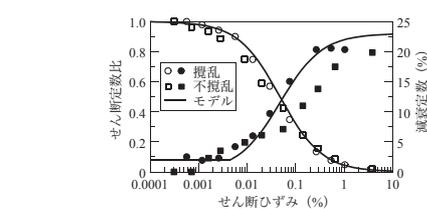
### 減衰の設定

- 履歴減衰
  - 応力-ひずみ関係のヒステリシス
- 散乱の減衰
  - 地盤は均質ではない→均質にモデル化
- 地下逸散減衰
  - 基礎から下に逃げた波は戻ってこない
- 数値積分による減衰
  - 応答を拘束する=振動を抑える



14

### 履歴減衰と散乱減衰のトレード

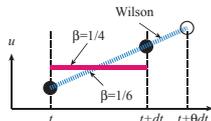


- 弾性=(履歴)減衰なし
- 地盤では、弾性+減衰

16

### 数値減衰

- 数値積分により自然と導入される減衰
  - Wilson  $\beta >$  Newmark  $\beta (\beta = 1/4) >$  Newmark  $\beta (\beta = 1/6)$
- 数値積分による変形の拘束
  - 拘束が大きい:
    - ▶ 数値積分の安定性大
    - ▶ 数値減衰が大きくなる
- 数値積分時間間隔を小さくすれば、回避可能
  - 工学的に重要でない小さい周期



17

### 減衰項

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f(u) = -m\ddot{u}_g$$

- 実現象: 振動はいつか終わる=減衰
- 数値解析: 考慮しないと入らない
  - その全て(履歴減衰除く)を減衰項に持たせる。
  - メカニズムがわかっているもの、いないもの
    - ▶ 水中で振動
    - ▶ 地下透散減衰
    - ▶ 散乱減衰
    - ▶ 土の変形=摩擦(有効応力の原理)
- 式で表現しないとけない
  - 粘性係数(c)と粘性定数(h)
 
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f(u) = -m\ddot{u}_g$$

$$\ddot{u} + 2h\omega_0\dot{u} + k\omega_0^2 = -\ddot{u}_g$$

18

### Rayleigh減衰 $c = \alpha m + \beta k$

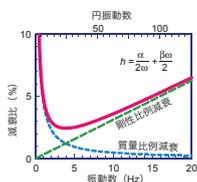
- 簡単に減衰マトリックスを作る手法

$$h = \frac{\alpha}{2\omega_0} + \frac{\beta\omega_0}{2}$$

- 内部減衰と外部減衰

$$[c] = \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix}, [c] = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix}$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}, [m] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$$



連続関数?

19

### 係数の決め方

- 1次モードで??%
  - 奇与分は半分ずつ
  - $\alpha = 0$
- 1次モードと2次モードを合わせる
- 工学的に有意な周波数領域で合わせる
  - 0.5~6Hz(計測震度で考慮しているおおよその範囲)
  - 0.1~2.5秒(SI値で考慮している範囲)
- 何に対する減衰を考えているのか?
  - 波動の伝播時に発生する減衰

20

### 実減衰との対応

- Q値

$$Q = \frac{1}{2h}, h = \frac{1}{2Q}$$

- 地震波の伝播時の振幅減少から求めた減衰
- 均質領域で小さくなる?

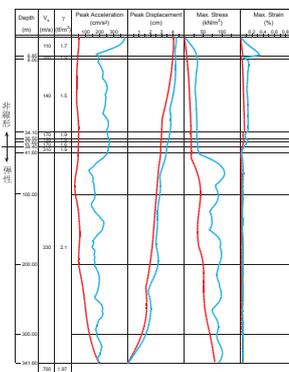
No.	H (m)	Q	h (%)
1	2.0	14	3.6
2	4.0	13	3.8
3	6.5	12	4.1
4	9.0	12	4.1
5	15.5	12	4.1
6	22.0	9	5.6
7	32.0	7	7.1
8	40.0	7	7.1
9	50.0	7	7.1
10	180.0	100	0.5
11	360.0	100	0.5
12	380.0	100	0.5
13		200	0.25

戸の地盤

21

### モード減衰から決める欠点

- 表層:  $Q=35$ 
  - 1.43%
- 基盤:  $Q=100$
- 剛性比例減衰
  - 一次モードで  $Q=100$  ( $h=0.5\%$ になるよう)を決める。
  - $V_s=300\text{m/s}$ 以上の層では差分 ( $h=0.93\%$ )を要素ごとに与える。

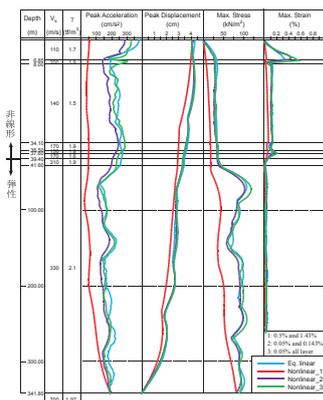


22

### 改良

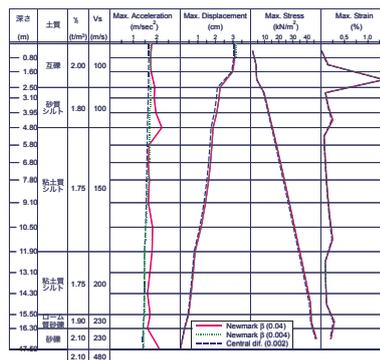
- 減衰は減衰係数で与えるべき
- 減衰定数=系の振動特性が含まれる

中央防災会議  
 表層  $Q=35$  ( $h=1.43\%$ )  
 重要周波数 0.5~6Hz  
 $\alpha=0.083, \beta=0.0007$   
 $\alpha=0.109, \beta=0.00092$   
 ( $h_{min}=1\%$ )

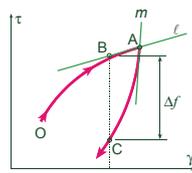
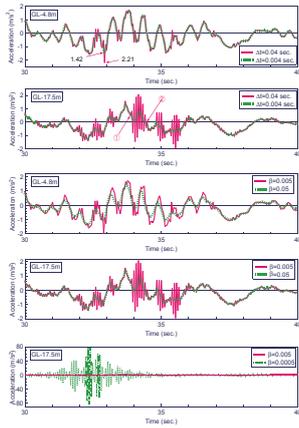


23

### 減衰のもう一つの役割



24

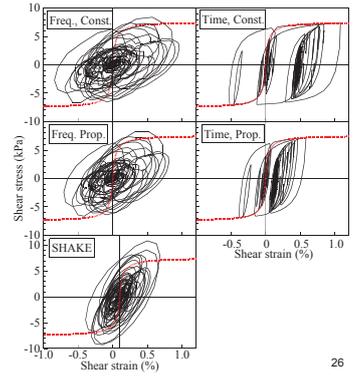


- 最適に選ぶと
  - パルスを押さえる
  - 全体応答は変えない

25

### Rayleigh減衰のもう一つの問題

- 減衰が系の応答に支配的になるところがある
    - 著しい非線形
    - 液化化
  - 運動方程式の要素
    - 慣性力項  $m(\ddot{u} + \ddot{u}_g)$
    - 減衰項  $c\dot{u}$
    - 復元力項  $ku$
- $$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$$



26

### 減衰に関する誤解

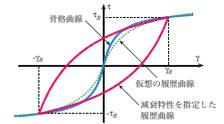
- 減衰が大きいと応答が抑制される
  - 双曲線モデルは減衰が大きいのので、応答が小さい

27

### 履歴減衰

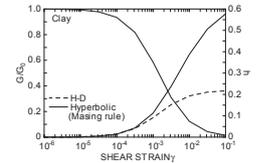
- Hardin-Drnevichのモデル

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r}, \quad h = h_{max} \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right)$$



- Masing則で履歴曲線を作る

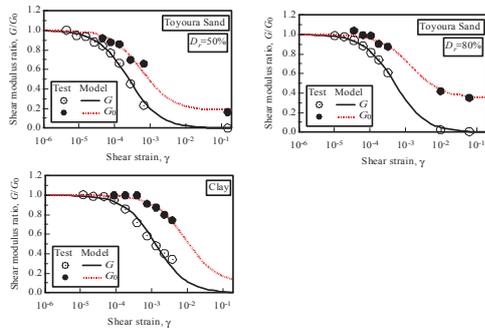
- 減衰を過大評価
- 応答も小さくなる？



28

### 除荷時の剛性

- 多くの構成則では弾性剛性



29

### 材料特性とモデル

$$\frac{G_0}{G_{max}} = \frac{1 - G_{min}/G_{max}}{1 + \gamma/\gamma_{r0}} + \frac{G_{min}}{G_{max}}$$

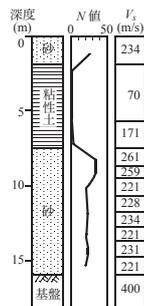
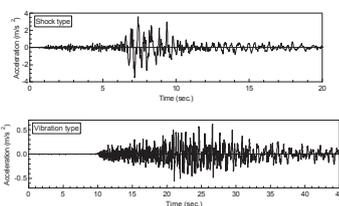
材料	$\gamma_r$	$\gamma_{r0}$	$G_{min}/G_{max}$
砂 ( $D_r=50\%$ )	0.00025	0.0006	0.18
砂 ( $D_r=80\%$ )	0.0005	0.0015	0.35
粘土	0.0013	0.013	0.1

- 双曲線モデル
- H-Dモデル ( $h_{max}=25\%$ ) (吉田・石原のモデル化)

30

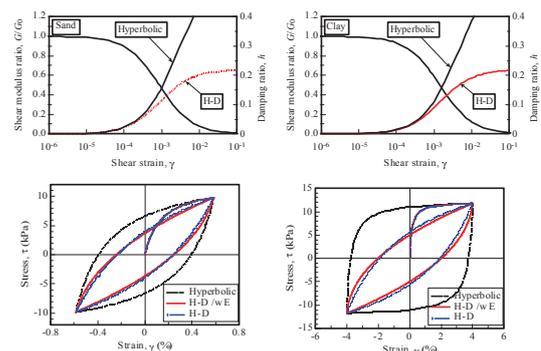
### 解析モデル

- 東京の代表的なモデル
- 衝撃型・振動型の地震動
  - 東京での観測波



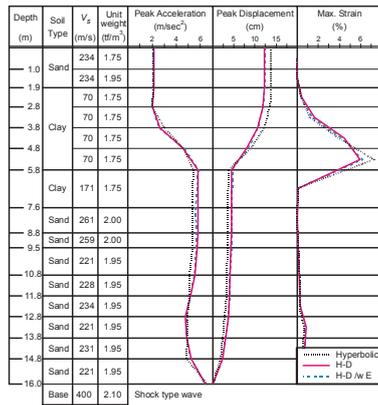
31

### 材料特性



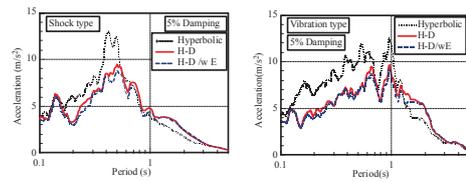
32

### 最大応答



33

### 応答スペクトル

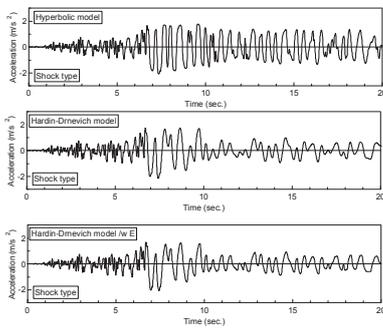


衝撃型

振動型

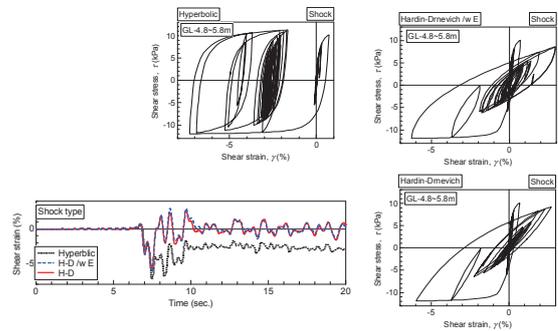
34

### 時刻歴(衝撃型)



35

### 応力-ひずみ関係(衝撃型)



36

### まとめ

- 減衰と加速度の頭打ち(上限)を区別する
  - 非線形性が卓越すると上限にいたる
    - ▶ 減衰には影響されない
  - 減衰は除荷後の挙動に利く
    - ▶ 除荷後大きな波が来れば差が発生
- 履歴減衰が大きいからといって応答が小さくなるわけではない
  - 剛性との相互作用で決まる。
  - 除荷時剛性は重要かもしれない
    - ▶ 減衰をあわせると、可能な履歴曲線の範囲は限られるので、重要では無いかもしれない

37

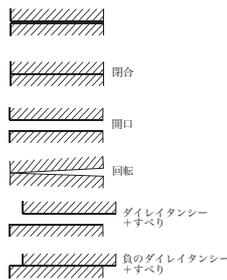
### ジョイント要素

38

### Goodmanのジョイント要素

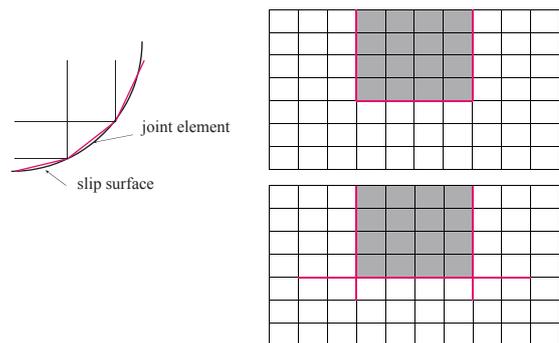
#### ■ 二つの定式化

$$\begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ F_{3x} \\ F_{3y} \\ F_{4x} \\ F_{4y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2k_x & 0 & k_x & 0 & -k_x & 0 & -2k_x & 0 \\ 0 & 2k_y & 0 & k_y & 0 & -k_y & 0 & -2k_y \\ k_x & 0 & 2k_x & 0 & -2k_x & 0 & -k_x & 0 \\ 0 & k_y & 0 & 2k_y & 0 & -2k_y & 0 & -k_y \\ -k_x & 0 & -2k_x & 0 & 2k_x & 0 & k_x & 0 \\ 0 & -k_y & 0 & -2k_y & 0 & 2k_y & 0 & k_y \\ -2k_x & 0 & -k_x & 0 & k_x & 0 & 2k_x & 0 \\ 0 & -2k_y & 0 & -k_y & 0 & k_y & 0 & 2k_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix}$$



39

### ジョイント要素の配置

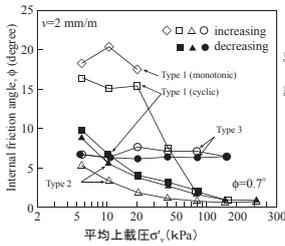


40

### ジョイント要素の特性

#### せん断強度

- 接触の摩擦が先か、土のせん断破壊が先か
  - ▶ 摩擦で定式化
  - ▶ 薄層の土要素



種類の違う  
砂  
シリコングリース  
テフロンシート

### 弾性定数の目安

#### 剛性は無限大

#### 直上の要素の変位-ひずみ関係式

$$u = \frac{h}{GL} \cdot F$$

#### これと同じ変位を生じるジョイント要素の剛性

$$u = \frac{F}{k_s L}$$

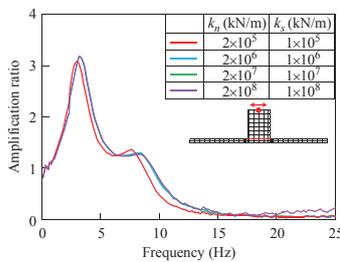
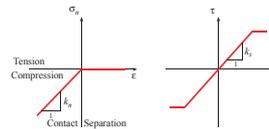
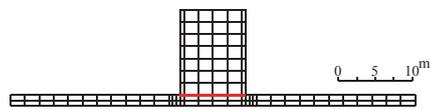
#### 変位を同じと置くと

$$k_s = \frac{G}{h}$$

### 弾性定数の確認

- 系の固有値が変わらない
- 構造物周辺の固有値が変わらない
- 剛性を大きくすると、計算時間は増加する

### 剛性: ケーススタディ



#### 弱振動

### 軟岩の繰返しせん断特性

深度 (m)	地層区分	速度境界度 (m)	土質名	土質柱状況	N 値	湿潤密度 (g/cm³)	試料採取位置	P波速度 $V_p$ (m/s)	S波速度 $V_s$ (m/s)	ポアソン比 $\nu_d$	ヤング率 $E_d$ (MN/m²)	剛性率 $G_d$ (MN/m²)
1.75	Dc	1.75	砂	掘削面	1.65	1.65	掘削面	$V_p=380$ $V_s=220$	0.3	0.4	$E_d=199.4$ $G_d=79.9$	$G_d=260.5$ $G_d=87.1$
3.50	Ka	3.50	砂	掘削面	1.85	1.85	掘削面	$V_p=2,280$ $V_s=480$	0.3	0.4	$E_d=1,347.0$ $G_d=456.2$	

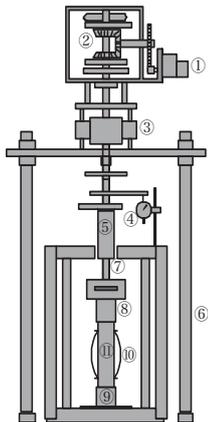
### 試料採取方法



トリプルチューブサンプラー

コアカッター

### 試験方法

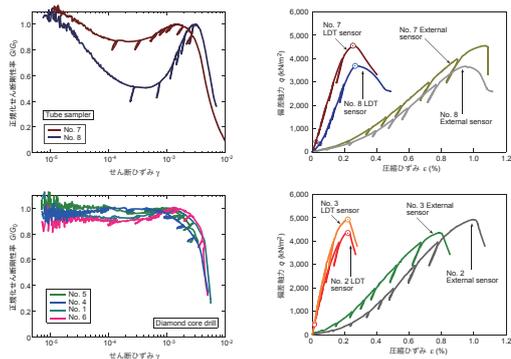


- ① モーター
- ② 繰返し载荷装置
- ③ ベアリング
- ④ ダイヤルゲージ
- ⑤ ガイドベアリング
- ⑥ フレーム
- ⑦ ロードセル
- ⑧ キャップ
- ⑨ ベアリング
- ⑩ LDT
- ⑪ 供試体

- 燐青銅版
- $\pi$ ゲージ

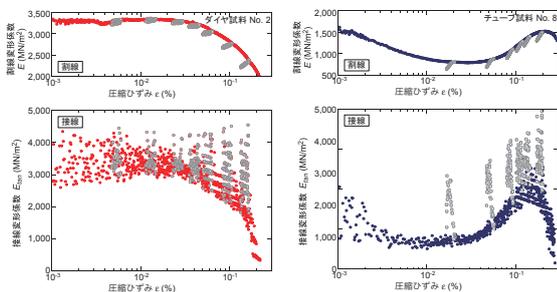
49

### サンプリングとひずみ計測法の影響



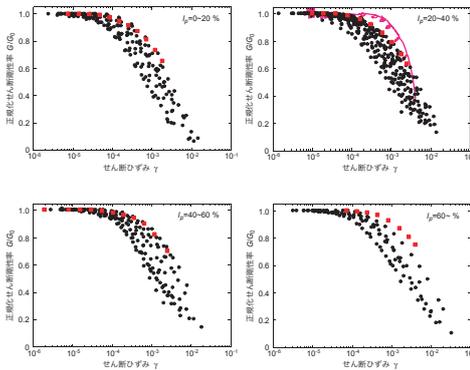
50

### 除荷時の剛性



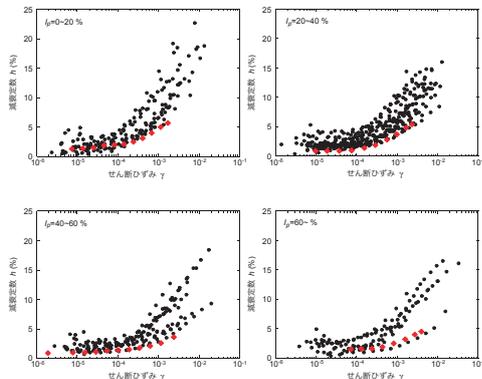
51

### 繰返しせん断試験



52

### 減衰特性



53

### 等価線形解析の適用性 全応力解析の適用性

54

### 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、逆増幅解析では取戻しないことも
  - 周波数に依存する挙動が扱える

55

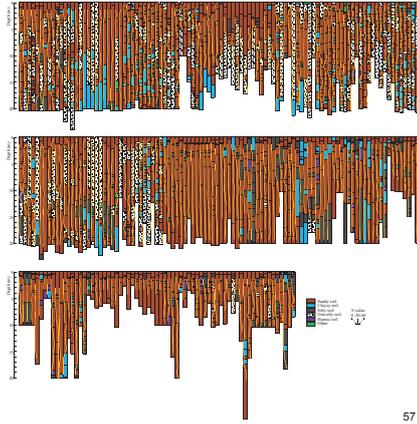
### 適用性に関する問題

- 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...

56

地盤

■ 286サイト



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

57

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

- テータベース

■ 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)

$$\tau_f = 19N$$

58

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)

59

地震波

■ 内陸型(内陸型地殻内地震)

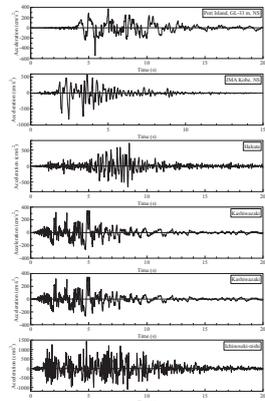
- 1995年兵庫県南部地震 Port Island GL-33m NS
- 1995年兵庫県南部地震 JMA神戸海洋気象台NS
- 1999年鳥取県西部地震 伯太NS
- 2004年新潟県中越地震 JMA川口町EW
- 2007年新潟県中越沖地震 東電柏崎刈羽 サービスホールSG1-NS
- 2008年岩手宮城内陸地震 一関西EW

■ 海溝型(海溝型地震)

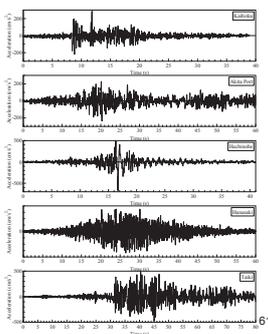
- 1978宮城県沖地震 開北橋EW
- 1983年日本海中部地震 秋田港EW
- 1994年三陸はるか沖地震 八戸事務所 EW (こちらを使う)
- 1994年北海道東方沖地震 花咲港EW
- 2003年十勝沖地震 大樹EW

60

直下型

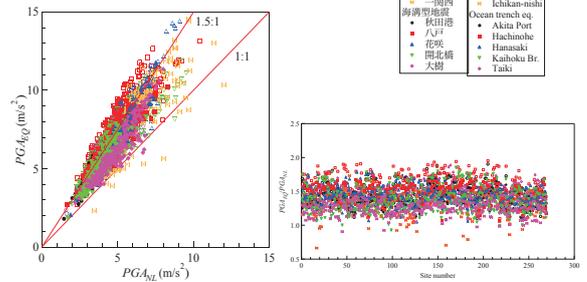


海溝型



61

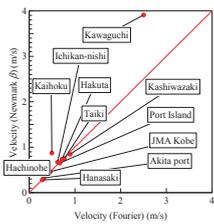
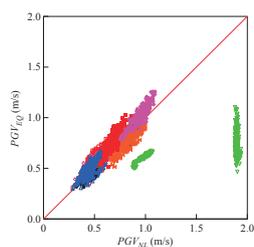
PGA



直下型地震	海溝型地震	内陸型 eq.	Ocean trench eq.
○ Port Island	○ JMA神戸	○ Port Island	○ JMA Kobe
△ 伯太	△ 川口	△ Hakita	△ Kashiwazaki
▽ 柏崎	▽ 一関西	▽ Kashiwazaki	▽ Ichikawa-nishi
◇ 八戸	◇ 花咲	◇ Akita Port	◇ Akita Port
● 大樹	● 大樹	● Hachinohe	● Hachinohe
		● Hanasaki	● Hanasaki
		● Kariboku Br.	● Kariboku Br.
		● Tsuki	● Tsuki

62

PGV

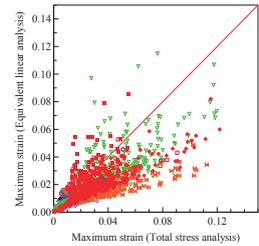
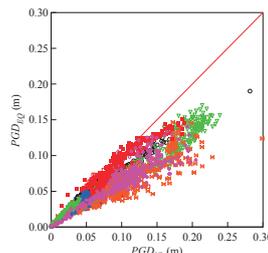


■ 基線補正

- 積分方法 0.1HzでHigh pathフィルター

63

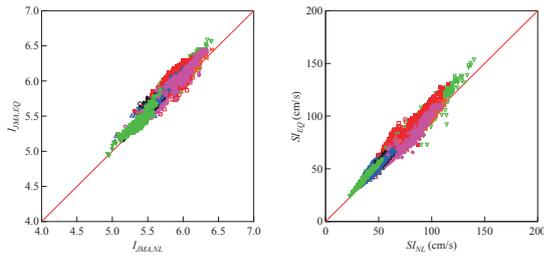
PGD, 最大ひずみ



- 同じ層ではないかも
- 変形モードも影響？

64

### I<sub>JMA</sub> と SI



65

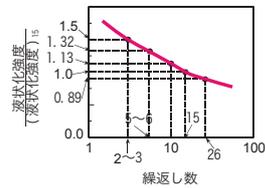
### まとめ

- PGA: 50 %
- PGV: 大体OK
- PGD: 過小評価, 30 %, ばらつく
- I<sub>JMA</sub>: 大体OK (やや過大評価)
- SI: 大体OK (やや過大評価)

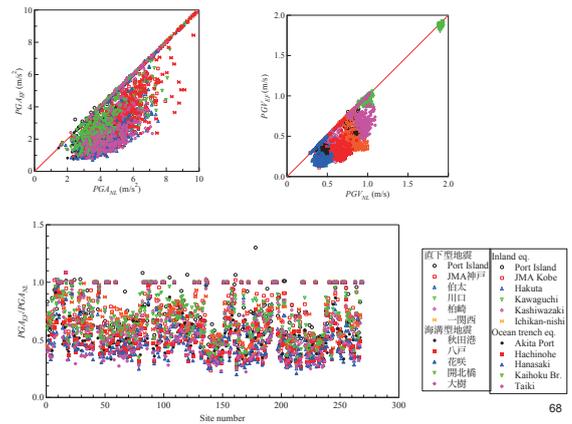
66

### 有効応力と全応力

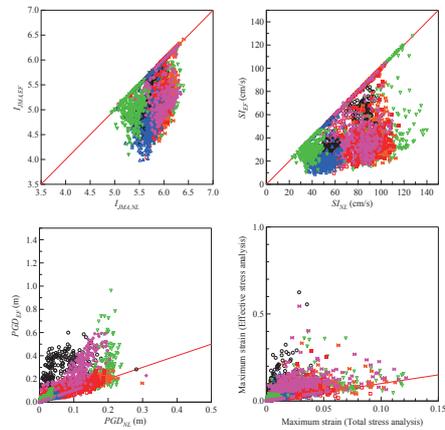
- 液状化強度
  - 道路橋示方書
  - Seedらの繰返し数との関係



67



68



69

### まとめ

- 全応力解析はほとんどの指標を過大評価
  - サイクリックモビリティの効果は?
- PGDのみ過小評価
  - YUSAYUSAは変位が出やすい?
- 安全側?

70

## 地震応答解析プログラムの使用上の留意点-3-

東北学院大学 工学部 吉田 望

## 目 次

1. ジョイント要素
2. 軟岩の繰返しせん断特性
3. 等価線形解析, 全応力解析の適用性

## 参考文献リスト

参考文献の番号は, スライド番号。私の著書「吉田望 (2010) : 地盤の地震応答解析, 鹿島出版会, 256pp.」は番号を示さず引用。

No.	文献
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Goodman, R. E. and Taylor, R. L. (1968): A model for the mechanics of jointed rock, Jour. of SM, ASCE, Vol. 94, No. SM3, May, pp. 637-659</li> <li>• Goodman, R. E. (1976): Methods of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing Company ; グッドマン R. E. (赤井浩一, 川本眺万, 大西有三共訳) : 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978, 371pp</li> <li>• Goodman, R. E. (1977): Behavior of Joint Masses, Chapter 4, Finite Element for Discontinuous Rock, Desai, C. S. and Christian J. T. ed. (1977): Numerical methods in Geotechnical Engineering, McGraw Hill</li> </ul>
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aydan, O., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T. (1990): Numerical modelling of discontinuous and interfaces in rock mass, Proc., 4th Japan Computational Mechanics Symposium, Tokyo</li> <li>• Tatsuoka, F. and Haibara, O. (1985): Shear Resistance Between Sand and Smooth or Lubricated Surfaces, Soils and Foundations, Vol. 25, No. 1, pp. 89-98</li> </ul>
10~11	• 東電設計資料
12~19	• 福元俊一, 吉田望, 佐原守 (2009) : 堆積軟岩の動的変形特性, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第1号, pp. 46-64
22	<p>Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1992): Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, 生産技術研究所報告, 東京大学, 第37巻, 第1号, pp. 1-136</p> <p>Ishihara, K. (1982): Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis, Proc., Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, pp. 237-259</p>
23	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
24	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
26	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
28	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
29～30	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
32～35	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
36	土の動的変形定数試験方法基準化委員会 (1994) : 動的変形定数を求める試験機および試験方法の現状調査報告 (国内), 地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性—試験法・調査法および結果の適用—に関する国内シンポジウム発表論文集, p. 76
39～	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
42～	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
53～	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
60～	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 吉田望 : 等価線形化法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.57-62, 2013</li> <li>・ 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</li> </ul>

# 地震応答解析プログラムの使用上の留意点



東北学院大学工学部  
吉田 望

## 内容

- ジョイント要素
  - 定式化と適用性
- 軟岩の繰返しせん断特性
  - 必要性
- 等価線形解析と全応力解析の適用性
  - 等価線形解析の方法
  - 事例に見る適用性
- 工学的基盤を考える。
  - 工学的基盤とは
  - 問題点

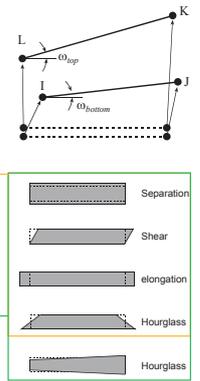
## ジョイント要素

## Goodmanのジョイント要素

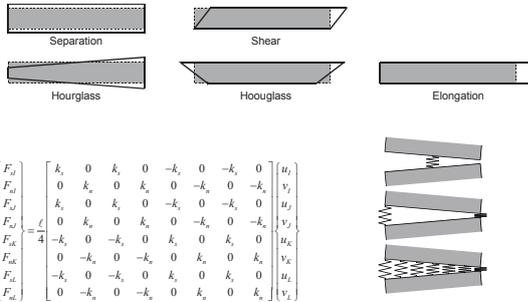
### ■ 二つの定式化

$$\begin{matrix} F_{Lx} \\ F_{Ly} \\ F_{Lz} \\ F_{Lx} \\ F_{Lz} \\ F_{Lz} \\ F_{Lz} \end{matrix} \begin{bmatrix} 2k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -2k_x & 0 \\ 0 & 2k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -2k_x \\ k_x & 0 & 2k_x & 0 & -2k_x & 0 & -k_y & 0 \\ 0 & k_x & 0 & 2k_x & 0 & -2k_x & 0 & -k_y \\ -k_x & 0 & -2k_x & 0 & 2k_x & 0 & k_y & 0 \\ 0 & -k_x & 0 & -2k_x & 0 & 2k_x & 0 & k_y \\ -2k_x & 0 & -k_x & 0 & k_x & 0 & 2k_x & 0 \\ 0 & -2k_x & 0 & -k_x & 0 & k_x & 0 & 2k_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ w_L \\ u_J \\ v_J \\ w_J \end{bmatrix}$$
  

$$\begin{matrix} F_{Lx} \\ F_{Ly} \\ F_{Lz} \\ F_{Lx} \\ F_{Lz} \\ F_{Lz} \\ F_{Lz} \end{matrix} \begin{bmatrix} k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -k_x & 0 \\ 0 & 2k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_x & 0 \\ k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -k_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2k_x & 0 & -2k_x & 0 & 0 \\ -k_x & 0 & -k_y & 0 & k_x & 0 & k_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2k_x & 0 & 2k_x & 0 & 0 \\ -k_x & 0 & -k_y & 0 & k_x & 0 & k_x & 0 \\ 0 & -2k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ w_L \\ u_J \\ v_J \\ w_J \end{bmatrix}$$



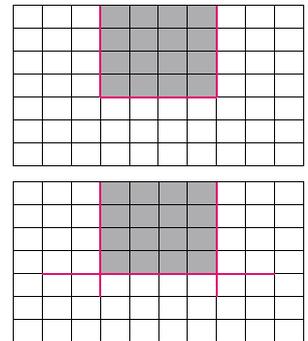
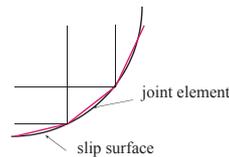
## もう一つの定式化



$$\begin{matrix} F_{Lx} \\ F_{Ly} \\ F_{Lz} \\ F_{Lx} \\ F_{Lz} \\ F_{Lz} \\ F_{Lz} \end{matrix} \begin{bmatrix} k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -k_x & 0 \\ 0 & k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -k_x \\ k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -k_x & 0 \\ 0 & k_x & 0 & k_y & 0 & -k_z & 0 & -k_x \\ -k_x & 0 & -k_y & 0 & k_x & 0 & k_x & 0 \\ 0 & -k_x & 0 & -k_y & 0 & k_x & 0 & k_x \\ -k_x & 0 & -k_y & 0 & k_x & 0 & k_x & 0 \\ 0 & -k_x & 0 & -k_y & 0 & k_x & 0 & k_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ w_L \\ u_J \\ v_J \\ w_J \end{bmatrix}$$

### ■ 非線形の考え方

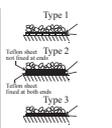
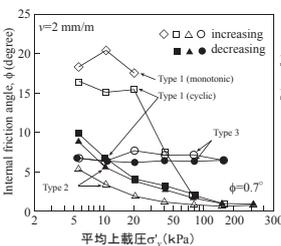
## ジョイント要素の配置



## ジョイント要素の特性

### ■ せん断強度

- 接触の摩擦が先か、土のせん断破壊が先か
  - ▶ 摩擦で定式化
  - ▶ 薄層の土要素



種類の違う砂  
シリコングリース  
テフロンシート

## 弾性定数の目安

### ■ 剛性は無限大

### ■ 直上の要素の変位-ひずみ関係式

$$u = \frac{h}{GL} \cdot F$$

### ■ これと同じ変位を生じるジョイント要素の剛性

$$u = \frac{F}{k_s L}$$

### ■ 変位を同じと置くと

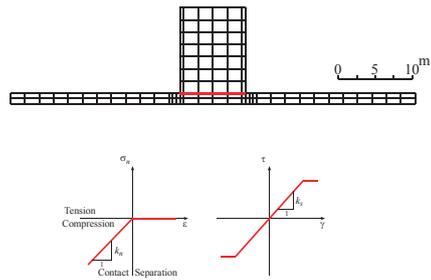
$$k_s = \frac{G}{h}$$

### 弾性定数の確認

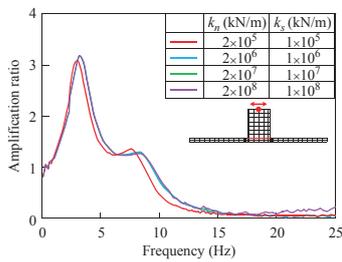
- 系の固有値が変わらない
- 構造物周辺の固有値が変わらない
- 剛性を大きくすると、計算時間は増加する

9

### 剛性: ケーススタディ



10



### 弱振動

11

### 軟岩の繰返しせん断特性

12

深度 (m)	地層区分	土質名	土質柱状図	N 値	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	試料採取位置	P波速度 V <sub>p</sub> (m/s)		ポアソン比 ν <sub>d</sub>	ヤング率 E <sub>d</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	
							1000	2000		0.3	0.4
1.5	Dc	1.75	1.65	1.65	1.65	1.65	V <sub>p</sub> =380 V <sub>s</sub> =220	0.248	E <sub>d</sub> =199.4 G <sub>d</sub> =79.9		
3	Ka	3.50	1.85	1.85	1.85	1.85	V <sub>p</sub> =220 V <sub>s</sub> =130	0.495	E <sub>d</sub> =260.5 G <sub>d</sub> =87.1		
5							V <sub>p</sub> =220 V <sub>s</sub> =130		E <sub>d</sub> =1347.0 G <sub>d</sub> =456.2		
15	15.09	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98	V <sub>p</sub> =2280 V <sub>s</sub> =480	0.477	E <sub>d</sub> =1347.0 G <sub>d</sub> =456.2		

13

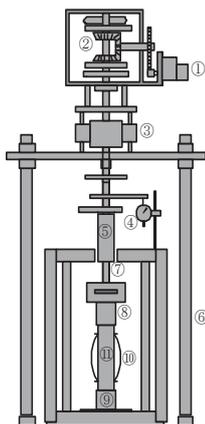
### 試料採取方法



トリプルチューブサンプラー

14

### 試験方法

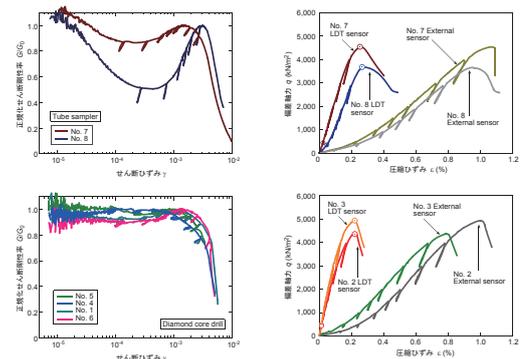


- 燃青銅版
- πゲージ

- ① モーター
- ② 繰返し載荷装置
- ③ ベアリング
- ④ ダイヤルゲージ
- ⑤ ガイドベアリング
- ⑥ フレーム
- ⑦ ロードセル
- ⑧ キャップ
- ⑨ ベアリング
- ⑩ LDT
- ⑪ 供試体

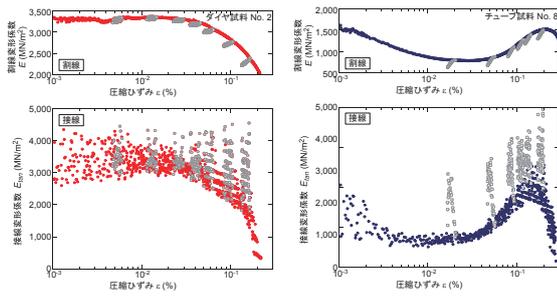
15

### サンプリングとひずみ計測法の影響



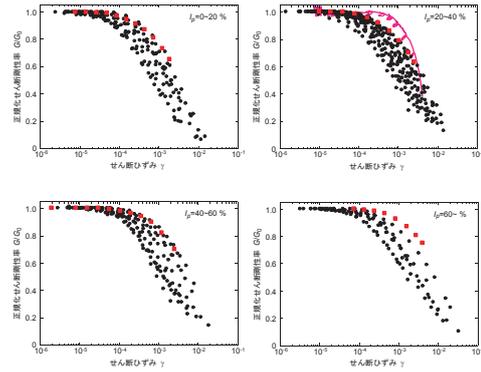
16

### 除荷時の剛性



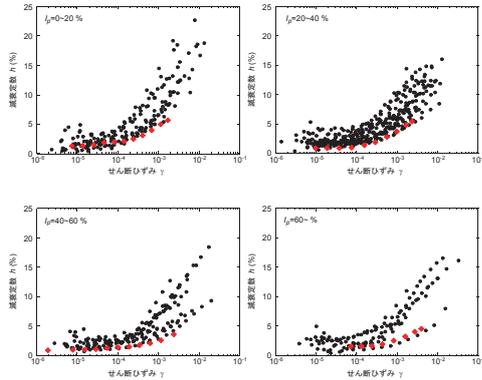
17

### 繰返しせん断試験



18

### 減衰特性



19

### SHAKEの発散

#### SHAKEの計算法

- 地表で1の振幅を仮定
- 漸化式により下層の応答を次々求める。
- 最下層まで到達したのち、入力値に合わせ比例配分

#### 軟弱地盤の増幅計算

- 軟弱地盤は増幅する  
▶ 下に行くにしたがって小さく→小さくなりすぎる

$$e^{-ik_s h_m} \quad k = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}}$$

#### 逆増幅計算(テコンボリューション)

- 地表で力を与える  
▶ せん断強度より小さいとき、計算ができない

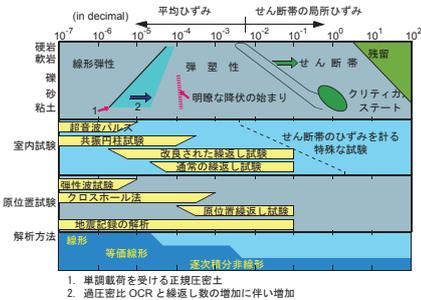
$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) e^{ik_s h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) e^{-ik_s h_m}$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) e^{ik_s h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) e^{-ik_s h_m}$$

20

### 等価線形解析の適用性 全応力解析の適用性

### 適用範囲は？



1. 単調載荷を受ける正規圧密土
2. 過圧密比 OCR と繰返し数の増加に伴い増加

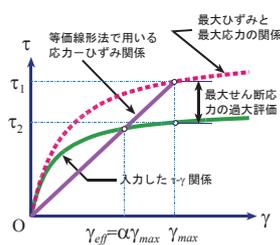
21

22

### 等価線形化法の短所(1)

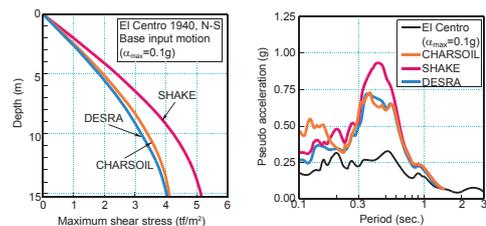
#### せん断応力の過大評価

- 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



23

### 過去の研究

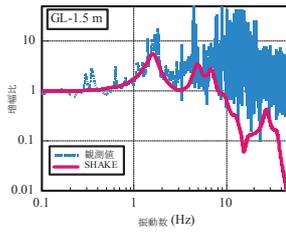


- 既往の研究では、特定周波数の共振と書いてある
- 誰も応力-ひずみ関係を見ていなかった  
●  $G-\gamma$ ,  $h-\gamma$  関係で事たれりとしていた

24

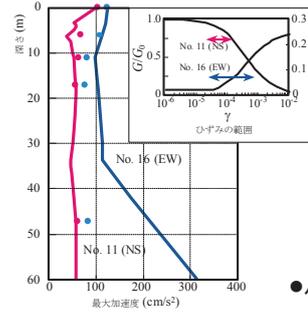
## 等価線形化法の短所(2)

### ■ 高振動数の増幅の過小評価



25

## 増幅の過小評価の影響



- 八戸の逆増幅解析は難しい
- 高振動数成分をカット

26

## 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
- $\alpha$ を小さくすれば改善できる

### ■ 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

27

## 等価線形化法の改良

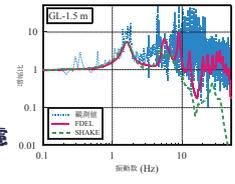
### ■ GRAMER

### ■ FDEL

- 有効ひずみの周波数依存性を考慮

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

- ▶ 適用範囲が非常に狭いが、その範囲では威力発揮。
- ▶ 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。
- $\alpha = 1$ は別の問題を起こすことがある
  - ▶ 卓越周期



28

## 剛性と減衰のどちらが大事

### ■ Case Study

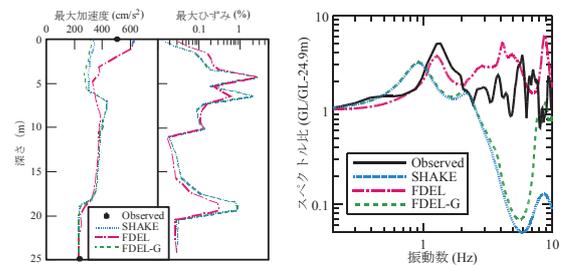
- SHAKE
- FDEL

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

- FDEL-G: 減衰の周波数依存性をFDELで考え、剛性は一定

29

## 応答値



1995年兵庫県南部地震、関電技研

30

## 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

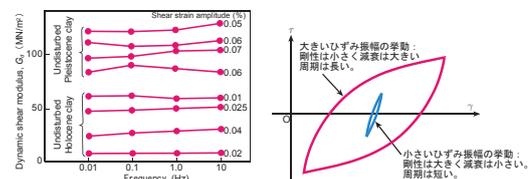
### ■ なぜ、分散性

- 振動数に応じて剛性変化
  - ▶ 波動の伝播速度も振動数依存

31

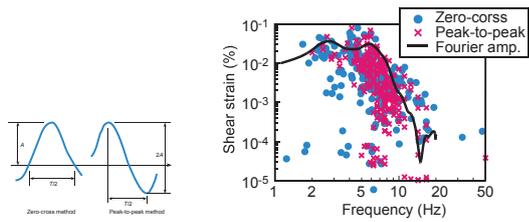
## ひずみ時刻歴に見られる周波数依存性

- 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。



32

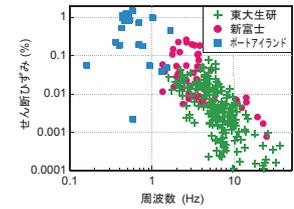
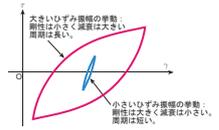
### ひずみ時刻歴とFourier級数



33

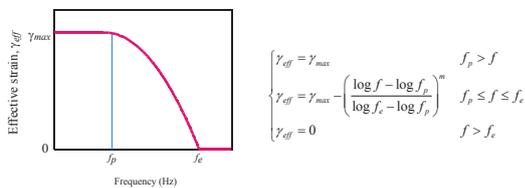
### DYNEQの考え方

- 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ります。
- 数Hzより大きいひずみは弾性挙動でよい。



34

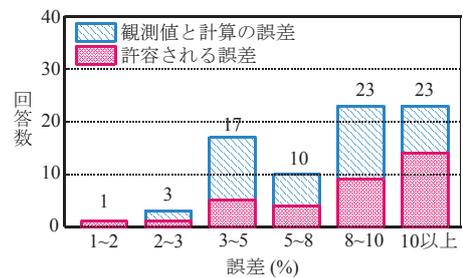
### 有効ひずみの周波数依存



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

35

### 期待される精度



### 兵庫県南部地震前

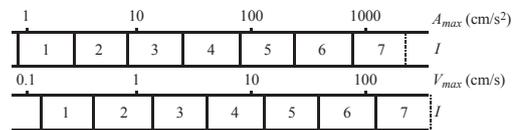
36

### 精度とは

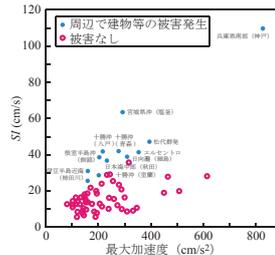
- 加速度、速度、変位
- 計測震度
- SI値
- 応答スペクトル、増幅比
- Ariasの地震危険度指標

- 何で判断するかで精度は大きく異なる
- 精度を判断するのは解析者の重要な役割
  - 合わせようとすれば合わせられる
  - 出来ないことも

37



旧気象庁震度



$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_{v,20} dt$$

注)このSIはHousnerの提案によるものではない

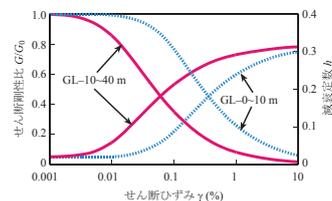
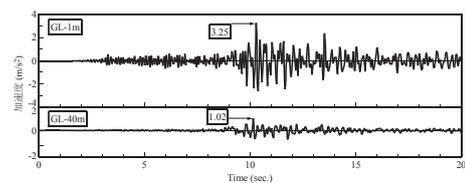
38

### 解析例(1):小ひずみ(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

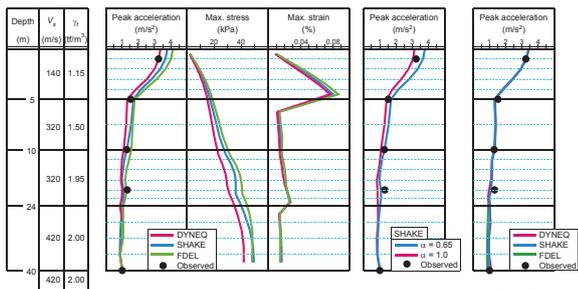
深さ (m)	土質	$V_s$ (m/s)	$\gamma_r$ (kN/m <sup>2</sup> )	最大加速度 (m/sec <sup>2</sup> )	最大応力 (kN/m <sup>2</sup> )	最大ひずみ (%)
0	ローソク	140	11.3	0.1	0.1	0.04
3	砂質シルト	320	14.7	0.2	0.2	0.08
10	細砂	320	19.1	0.3	0.3	0.04
15	細砂	320	19.1	0.4	0.4	0.08
24	細砂	320	19.1	0.5	0.5	0.04
40	細砂	420	19.6	0.6	0.6	0.08

39



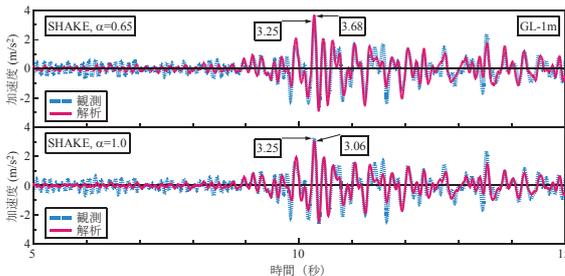
40

### 各種の解析

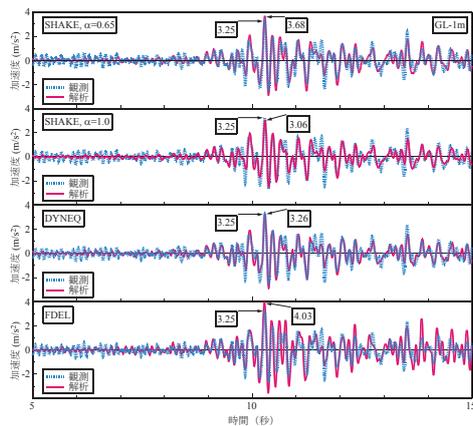


$V_s$ : Shear wave velocity;  $\gamma_u$ : unit weight

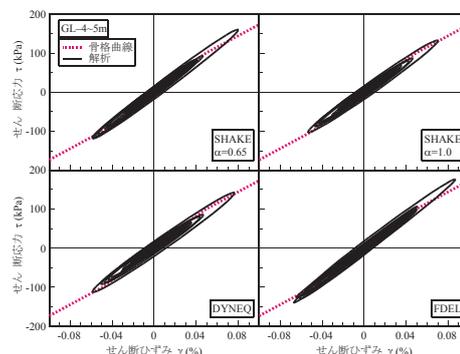
### $\alpha$ の値は



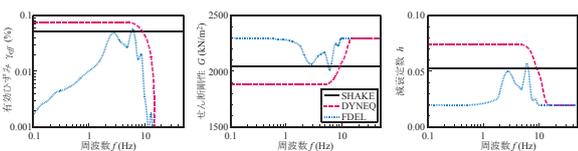
- $\alpha=1.0$ のところが悪い?
- $\alpha=1.0$ では共振は?



### 応力-ひずみ関係

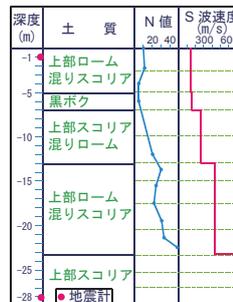


### 周波数依存性

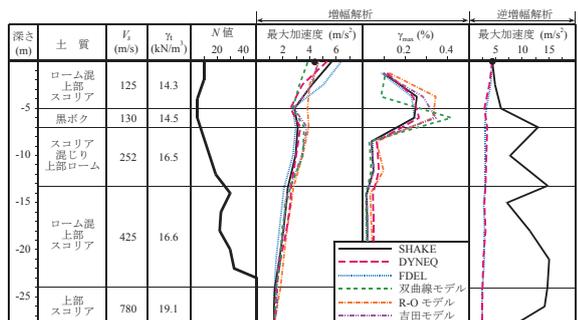


### 解析例(2): 中ひずみ

- 東電新富士変電所
  - 1983年神奈川・山梨県境地震
  - $M=6.0$ , 震源深さ22km
  - 震央距離18km

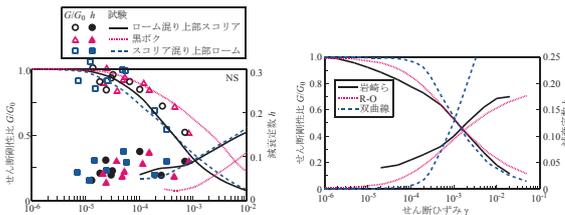


### 最大応答値(等価線形解析)

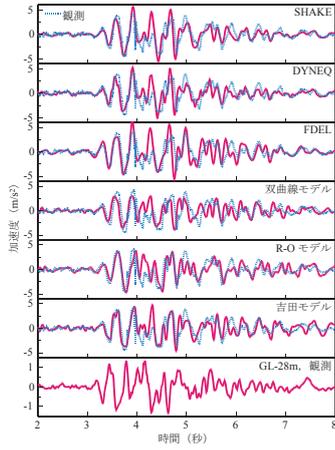


$V_s$ : せん断波速度,  $\gamma_u$ : 単位体積重量 ● 地震観測

### 非線形特性

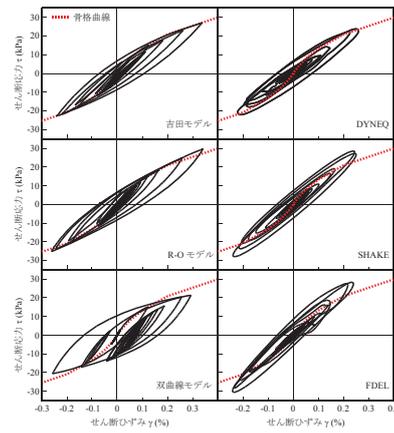


- 火山性堆積物
  - 微小ひずみで減衰



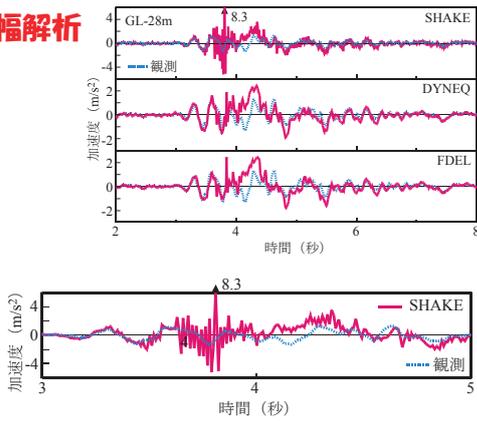
- SHAKI, FDELの過大評価
  - 説明済み
- 双曲線の過小評価
  - 上限加速度
- DYNEQ, R-O, 吉田モデルはまずまず

49



50

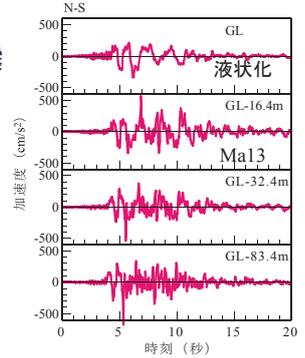
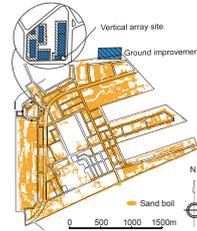
逆増幅解析



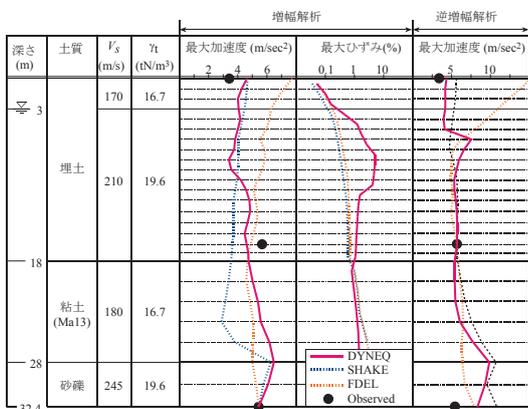
51

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

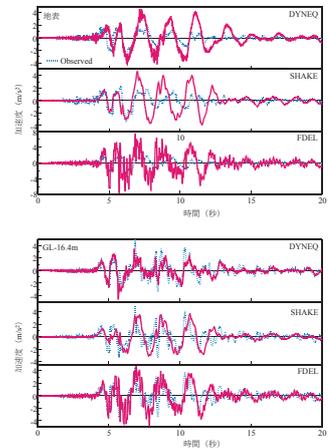


52

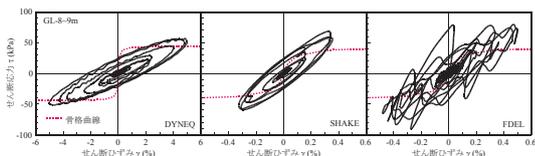


53

- 液状化層の解析は無理
- FDELの5Hz程度の振動の卓越



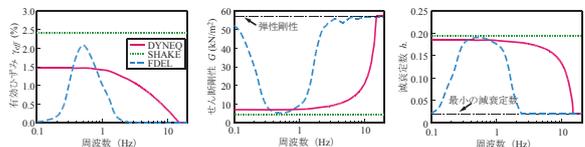
54



細かい振動の原因は？

55

- 重要な周波数領域



56

### 等価線形解析の限界

- SHAKE
  - 逆増幅解析はひずみ0.01%より少し大きめまで
  - ひずみ0.1%でも欠点は明らかになる
- 改良された方法(DYNEQ)
  - 逐次積分全応力解析と同じ適用範囲
    - ▶ 後で述べる
- 逆増幅解析はセンシティブ
- FDELを使うのなら、 $\alpha=1.0$ とする

57

### 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

58

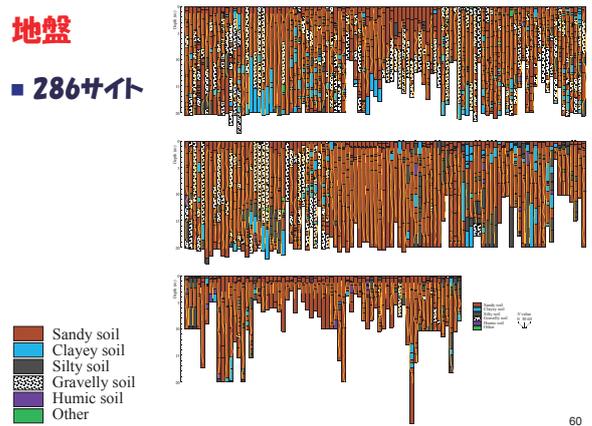
### 適用性に関する問題

- 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...

59

### 地盤

#### ■ 286サイト



60

### 地盤のモデル化

- せん断波速度(道路橋の式)
  - $V_s = 100N^{1/3}$  (clayey soil)
  - $V_s = 80N^{1/3}$  (sandy soil, other soils)
- 単位体積重量
  - テータベース
- せん断強度
  - 砂質土(畑中らの式)
    - $\phi = 20 + \sqrt{20N_1}$      $N_1 = \frac{170N}{\sigma'_v + 100}$  ( $\sigma'_v$  in kPa)
  - 粘性土(経験式の平均)
    - $\tau_f = 19N$

61

### 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     $[c] = \alpha[m] + \beta[k]$ 
  - $Q=35$  ( $h=1.43\%$ ) ( $0.5 \sim 6$  Hz)

62

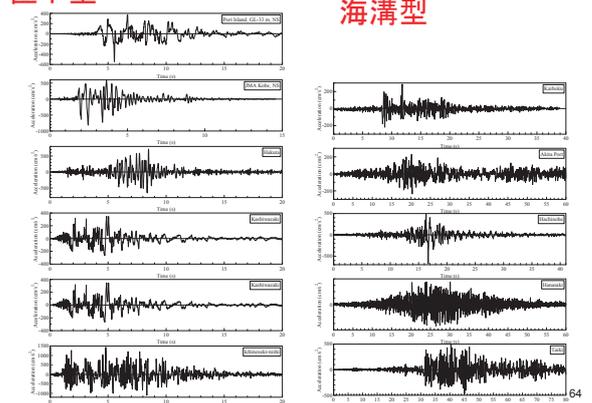
### 地震波

- 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LSG1-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

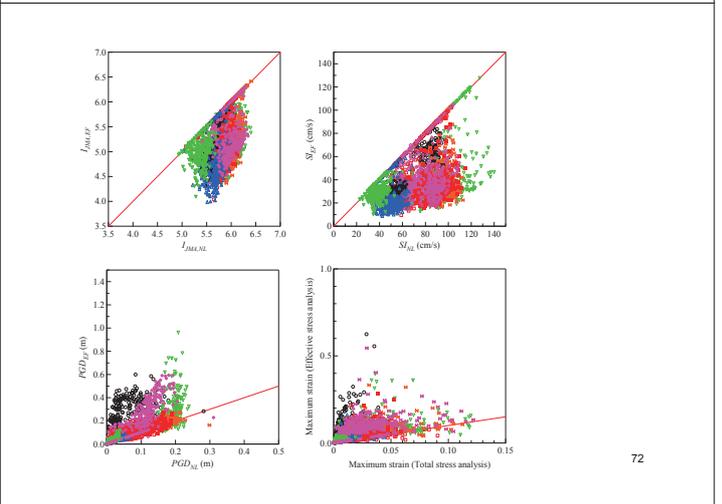
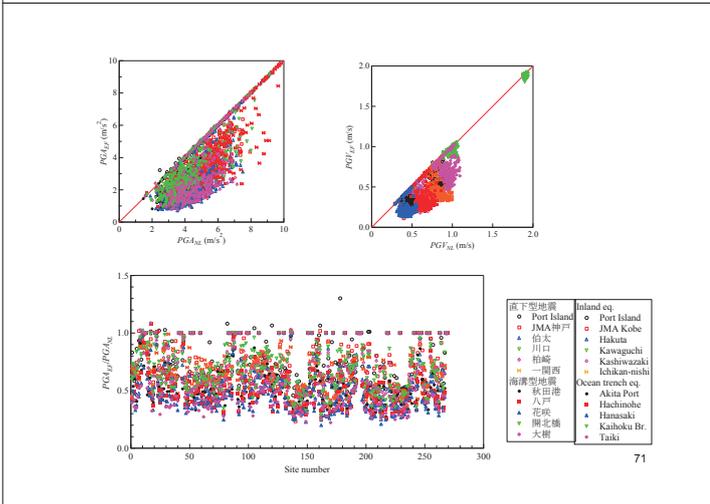
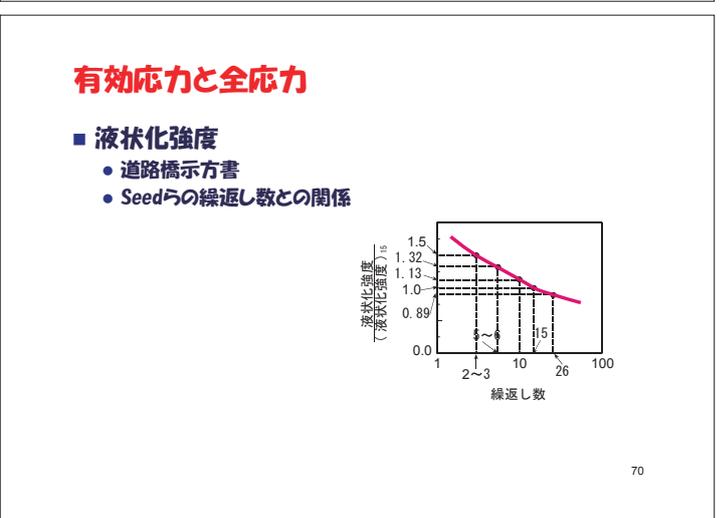
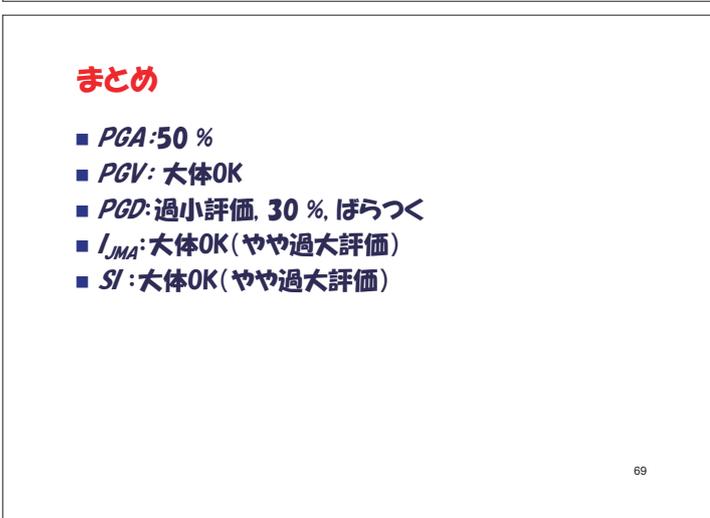
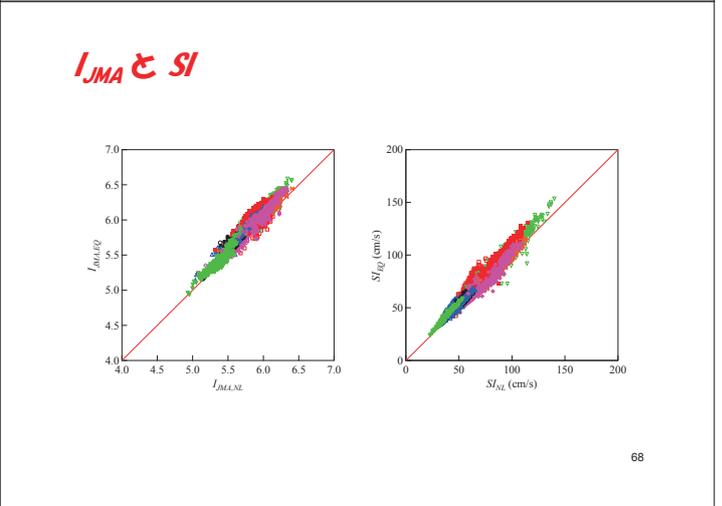
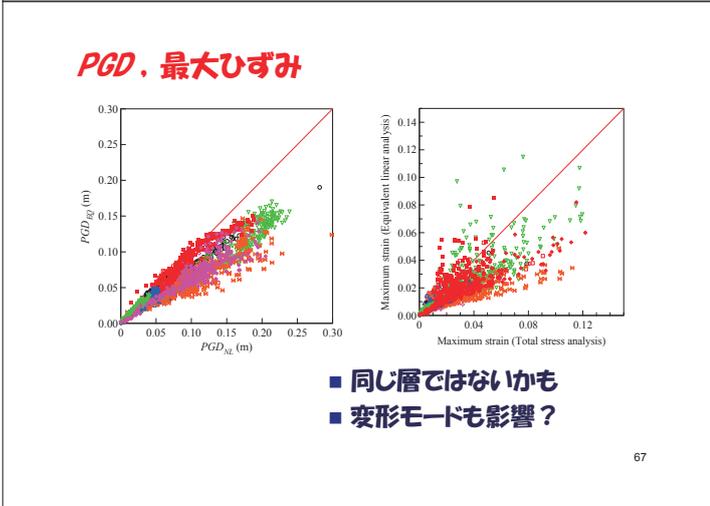
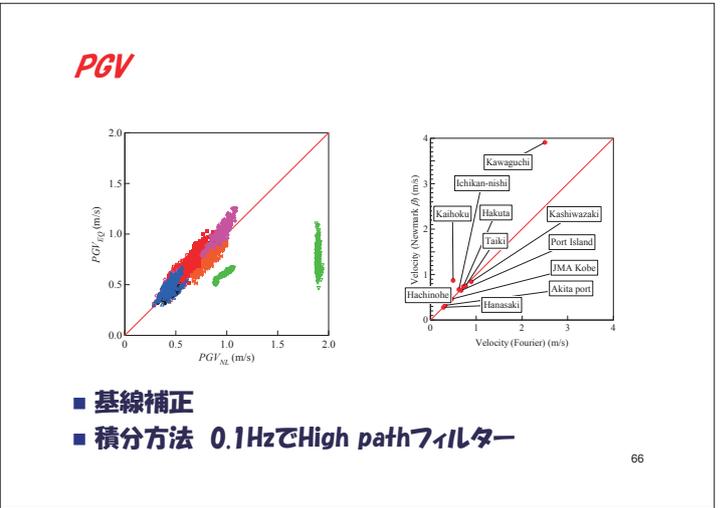
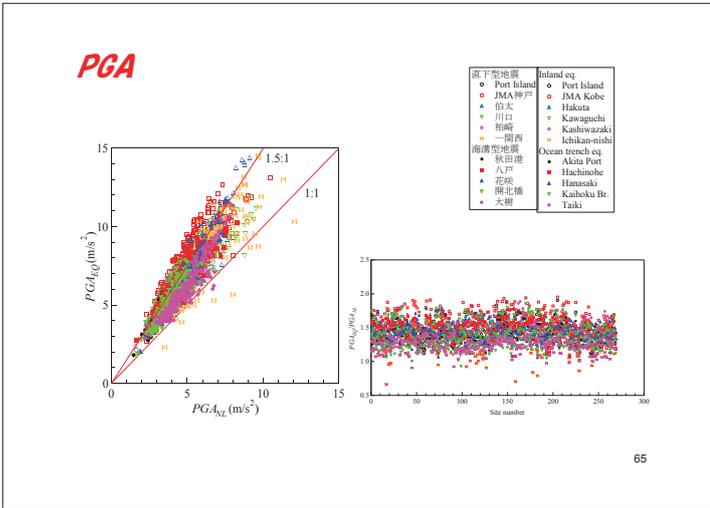
63

### 直下型

### 海溝型



64

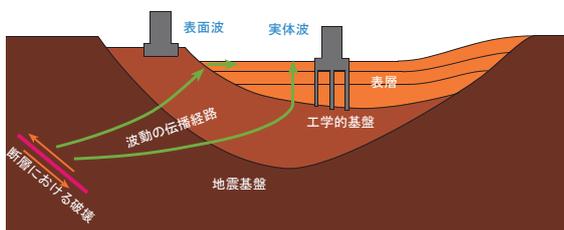


### まとめ

- 全応力解析はほとんどの指標を過大評価
  - サイクリックモビリティの効果は？
- PGDのみ過小評価
  - YUSAYUSAは変位が出やすい？
- 安全側？

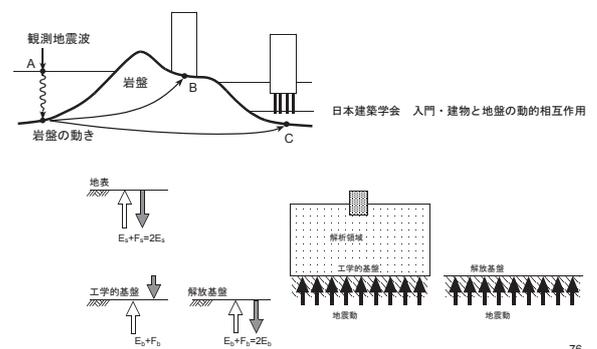
### 工学的基盤を考える

### 工学的基盤の役割



サイトの地震波(w)=断層特性x地震基盤までのパス特性  
x工学的基盤までのパス特性x表層地盤の特性

### 工学的基盤の使われ方



### 工学的基盤の歴史

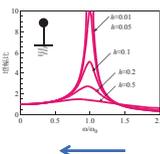
- 工学的基盤 = 地震基盤
  - 断層で発生する波動の性質を失わない、サイトに最も近い地点
- 研究が進むと
  - 地震基盤はどんどん深くなる
  - 工学的基盤は、余り深くできない
    - ▶ 深い位置までの地盤構造を求めるのが困難
    - ◆ コスト

### 地震基盤と工学的基盤

- 局所的な地盤構成にかかわりなく、ある地域では一律な挙動をするであろう地層：地表の応答には表層の挙動が大きく影響することからそれを排除した基盤
  - 基盤面は空間的にある広がりを持ち、かつ、この面での力学的性質は同一
  - 基盤面以深の地層は、以浅の地層に比べて構成、力学的性質の変化が小さい
- 建造物の耐震性を扱う際、震源での地震動の特性を反映させるための震源に近づく限界：建造物の設計の面からの定義で、考慮すべき最長の周期よりやや長い固有周期を持つ表層地盤の深さ  
→工学的基盤

### 設計のための基盤

- 長周期の波動は耐震設計には重要では無い
  - 建造物の固有周期に近い周期の波が設計上重要
- 地震基盤は、都市部では非常に深い
  - 観測事例がほとんど無い
  - 工学的基盤レベルなら多くの観測記録
- 関東平野・大阪平野・濃尾平野以外では地震基盤までの地下構造に関する情報が少ない



### 工学的基盤の定義

- 教科書的
  - 表層とのインピーダンスの差が十分ある
    - ▶ 昔と現在の定義の差がいつ入れ替わったのか
      - ◆ 地震基盤 = 工学的基盤の時代
      - ◆ 剛基盤しか解析できなかった時代
- 実務的
  - $V_s = 300 \sim 400 \text{ m/s}$ 
    - ▶  $N = 50$
  - $V_s = 700 \text{ m/s}$ 
    - ▶ 原子力
- 海外では工学的基盤はない
  - ISO: Firm ground (outcrop)
  - その他: Hard deposit, Rock,....

### 工学的基盤が工学的基盤として有効であるべき条件

- 広範囲に広がる基盤
  - 入射波が広範囲で同じ
- 工学的基盤以深では非線形挙動は起こらない
- 工学的基盤で地震動を設定しても大丈夫
  - 地表までを一体として解析しても、分離しても同じ結果が得られる。

81

### 地震動の設定方法

- 工学的基盤で設定
  - 多くの設計指針
    - ▶ 広域に存在する
    - ▶ 地震動が変わらない
- 地表で設定
  - 大阪府土木構造設計
  - 小地震合成法
    - ▶ 経験的グリーン関数
    - ▶ 理論的グリーン関数

82

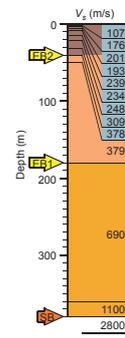
### 余り議論されていなかった問題

- 工学的基盤以深の非線形挙動
  - 工学的基盤以深は弾性
  - 入力地震動が大きくなってきた
- 地震動の卓越周期
  - 本当に卓越周期より大きければよいのか
- 入力地震動の問題
  - 個別地震波
    - ▶ 著名地震波
    - ▶ 模擬地震波
      - ◆ 地域波
        - » 臨海部、MM21、高層建物
      - ◆ サイト波
- 工学的基盤のインピーダンス

83

### 工学的基盤で波動を切れるか？

No.	D (m)	V <sub>s</sub> (m/s)	ρ (t/m <sup>3</sup> )	Q
1	2.0	107	1.80	14
2	4.0	176	1.80	13
3	6.5	201	1.90	12
4	9.0	193	1.90	12
5	15.5	239	1.70	12
6	22.0	234	1.70	9
7	32.0	248	1.80	7
8	40.0	309	1.80	7
9	50.0	378	1.80	7
10	180.0	379	1.70	100
11	160.0	690	2.00	100
12	380.0	110	2.10	100
13		2800	2.50	200



84 翠川 三郎, 小林啓美, 1978

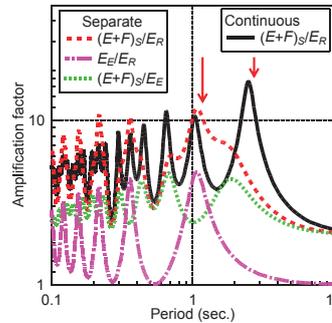
### 解析手法

- 全体解析
  - 地震基盤 (Seismic bedrock) → 地表
- 分離解析
  - 地震基盤 → 工学的基盤 (Engineering seismic base layer)
    - ▶ 解放基盤 = 入射波の倍
  - 工学的基盤 → 地表

$$\frac{(E+F)_S}{E_R} = \frac{(E+F)_S}{E_E} \cdot \frac{E_E}{E_R}$$

85

### Case 1: Vs=690m/s

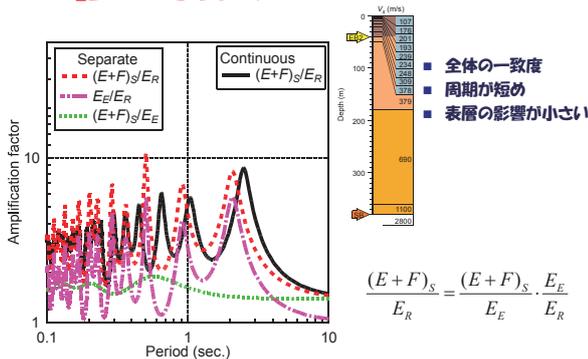


- 一体解析
  - T=2.5秒
- 分離解析
  - T=1.045秒

$$\frac{(E+F)_S}{E_R} = \frac{(E+F)_S}{E_E} \cdot \frac{E_E}{E_R}$$

86

### Case 2: Vs=378m/s

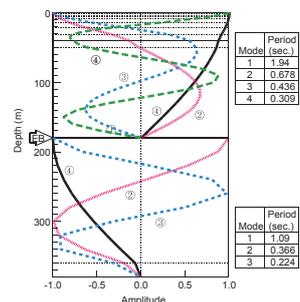
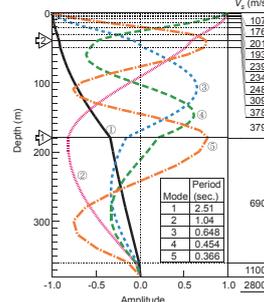


$$\frac{(E+F)_S}{E_R} = \frac{(E+F)_S}{E_E} \cdot \frac{E_E}{E_R}$$

87

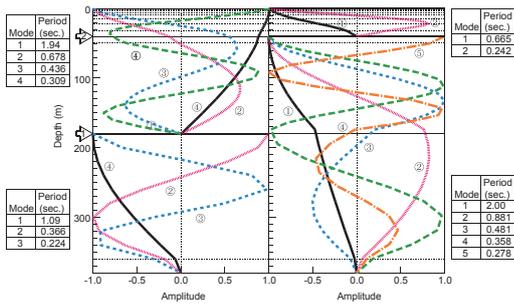
### 固有値解析

- 1次モード
  - 当然ない
- 2次モード
  - Case 1の1次



88

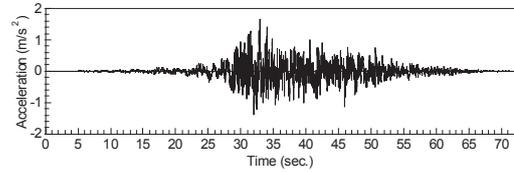
## 二つの分離法の違い



89

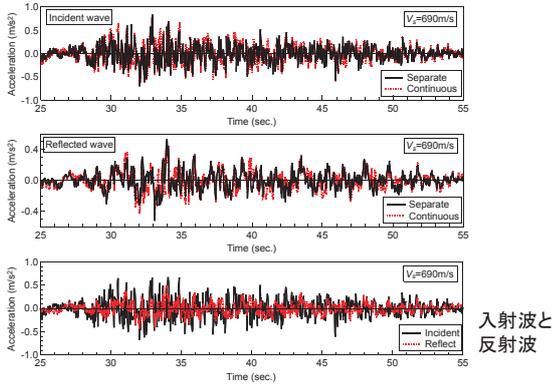
## 波動による検討

- 1983年日本海中部地震の際の不老不死の記録を工学的基盤複合波として、一旦地震基盤に戻した後入力



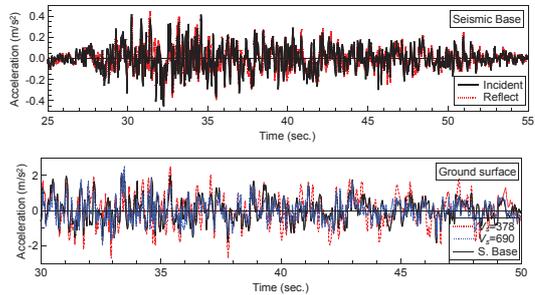
90

## Case 1: Vs=690m/s



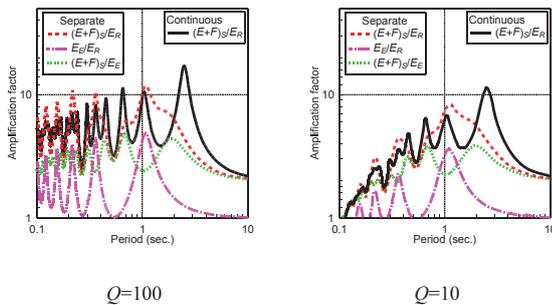
91

## 地震基盤と地表の加速度



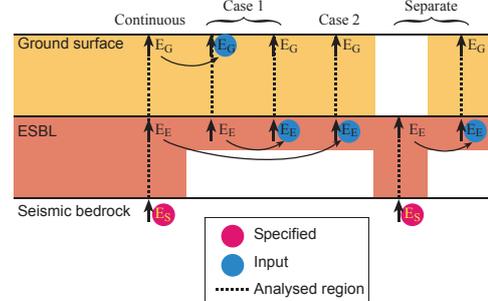
92

## 減衰再評価の結果



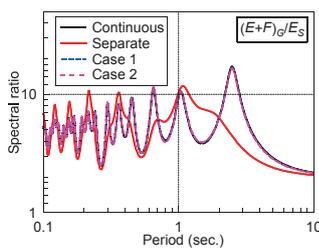
93

## どのように地震動を設定すべきか



94

## 弾性解析



- Case 1: 理論的に元の値と一致する
- Case 2: 工学的基盤より下で反射する波の影響は小さい

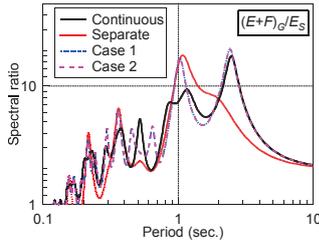
95

## 結論

- 工学的基盤で分離すると、表現できない増幅特性がある。
  - 地震基盤からの1次モード
  - 分離した増幅特性の山と谷
  - 数Hzより長周期領域で差が大きい
- 工学的基盤が完全な基盤として作用していないので、一旦逸散し、再度上昇してくる波がある。
- 地震基盤～工学的基盤の減衰が重要

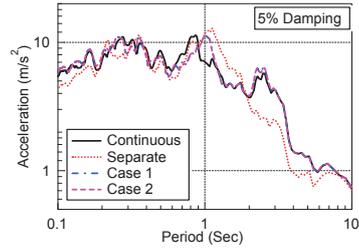
96

### 非線形解析



97

### 応答スペクトルでは



- 分離以外はそれなり

98

### 結論

- 地域に一律の工学的基盤があり、そこでの地震動が解法基盤(の半分)という考えは間違い。
- 工学的基盤で分離して波動を計算すると誤差が大きい。
  - 実用的には困難
    - ▶ 工学的基盤以深では斜め入射も無視できない
- 地盤基盤で定義する
- 地表で定義する
  - 地盤種別分類が必要
  - 弾性逆増幅解析, 非線形増幅解析
- 工学的基盤で定義する
  - 表層の影響を考えて定義する必要がある

99

### 地表で定義した波をどのようにして基盤に戻すか

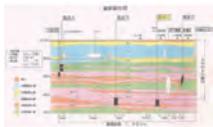
- 地盤構造
  - どの深さ(S波速度)まで
- 減衰定数
  - 弾性といひながら減衰はある
  - 等価線形解析では微小ひずみ時の減衰と非線形時の減衰は独立して作用する。
    - ▶ 減衰を大きくした方が入力力は小さくなる。
  - 散乱の減衰を正しく評価する必要がある？

100

### 工学的基盤の非線形・計算例

層番号	土質	厚さ(m)	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
1	沖積層	10	18	20
2	沖積層	10	18	20
3	沖積層	10	18	20
4	沖積層	10	18	20
5	沖積層	10	18	20
6	沖積層	10	18	20
7	沖積層	10	18	20
8	沖積層	10	18	20
9	沖積層	10	18	20
10	沖積層	10	18	20
11	沖積層	10	18	20
12	沖積層	10	18	20
13	沖積層	10	18	20
14	沖積層	10	18	20
15	沖積層	10	18	20
16	沖積層	10	18	20
17	沖積層	10	18	20
18	沖積層	10	18	20
19	沖積層	10	18	20
20	沖積層	10	18	20
21	沖積層	10	18	20
22	沖積層	10	18	20
23	沖積層	10	18	20
24	沖積層	10	18	20
25	沖積層	10	18	20
26	沖積層	10	18	20
27	沖積層	10	18	20
28	沖積層	10	18	20
29	沖積層	10	18	20
30	沖積層	10	18	20
31	沖積層	10	18	20
32	沖積層	10	18	20
33	沖積層	10	18	20
34	沖積層	10	18	20
35	沖積層	10	18	20
36	沖積層	10	18	20
37	沖積層	10	18	20
38	沖積層	10	18	20
39	沖積層	10	18	20
40	沖積層	10	18	20
41	沖積層	10	18	20
42	沖積層	10	18	20
43	沖積層	10	18	20
44	沖積層	10	18	20
45	沖積層	10	18	20
46	沖積層	10	18	20
47	沖積層	10	18	20
48	沖積層	10	18	20
49	沖積層	10	18	20
50	沖積層	10	18	20
51	沖積層	10	18	20
52	沖積層	10	18	20
53	沖積層	10	18	20
54	沖積層	10	18	20
55	沖積層	10	18	20
56	沖積層	10	18	20
57	沖積層	10	18	20
58	沖積層	10	18	20
59	沖積層	10	18	20
60	沖積層	10	18	20
61	沖積層	10	18	20
62	沖積層	10	18	20
63	沖積層	10	18	20
64	沖積層	10	18	20
65	沖積層	10	18	20
66	沖積層	10	18	20
67	沖積層	10	18	20
68	沖積層	10	18	20
69	沖積層	10	18	20
70	沖積層	10	18	20
71	沖積層	10	18	20
72	沖積層	10	18	20
73	沖積層	10	18	20
74	沖積層	10	18	20
75	沖積層	10	18	20
76	沖積層	10	18	20
77	沖積層	10	18	20
78	沖積層	10	18	20
79	沖積層	10	18	20
80	沖積層	10	18	20
81	沖積層	10	18	20
82	沖積層	10	18	20
83	沖積層	10	18	20
84	沖積層	10	18	20
85	沖積層	10	18	20
86	沖積層	10	18	20
87	沖積層	10	18	20
88	沖積層	10	18	20
89	沖積層	10	18	20
90	沖積層	10	18	20
91	沖積層	10	18	20
92	沖積層	10	18	20
93	沖積層	10	18	20
94	沖積層	10	18	20
95	沖積層	10	18	20
96	沖積層	10	18	20
97	沖積層	10	18	20
98	沖積層	10	18	20
99	沖積層	10	18	20
100	沖積層	10	18	20

大阪：西梅田シールド



層番号	土質	厚さ(m)	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	ν <sub>s</sub> (%)	E <sub>s</sub> (GPa)	E <sub>u</sub> (GPa)
1	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
2	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
3	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
4	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
5	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
6	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
7	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
8	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
9	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
10	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
11	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
12	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
13	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
14	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
15	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
16	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
17	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
18	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
19	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
20	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
21	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
22	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
23	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
24	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
25	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
26	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
27	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
28	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
29	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
30	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
31	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
32	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
33	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
34	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
35	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
36	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
37	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
38	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
39	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
40	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
41	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
42	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
43	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
44	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
45	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
46	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
47	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
48	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
49	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
50	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
51	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
52	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
53	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
54	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
55	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
56	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
57	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
58	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
59	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
60	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
61	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
62	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
63	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
64	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
65	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
66	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
67	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
68	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
69	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
70	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
71	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
72	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
73	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
74	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
75	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
76	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
77	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
78	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
79	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
80	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
81	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
82	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
83	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
84	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
85	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
86	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
87	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
88	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
89	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
90	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
91	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
92	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
93	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
94	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
95	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
96	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
97	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
98	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
99	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5
100	沖積層	10	18	20	0.3	0.5	0.5

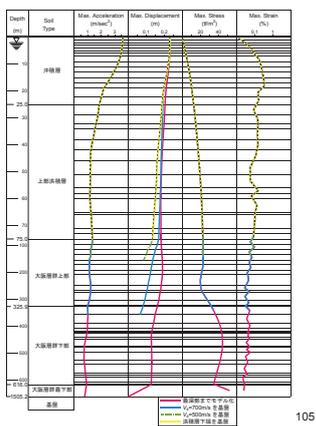
東灘深層ボーリング(関電)

101

### 地震動

- 模擬地震波4S-03NS
  - 地表面, 弾性

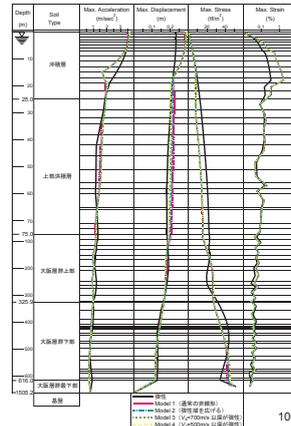
### 異なる基盤



105

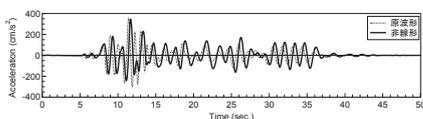
### 非線形の影響

- 弾性領域を  
変化させる



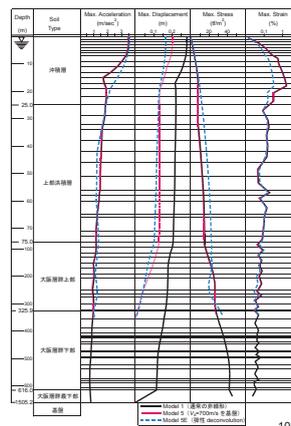
106

### 弾性と非線型



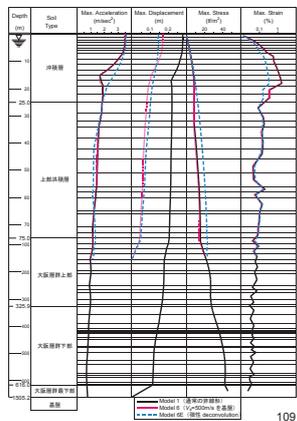
107

### Vs=700基盤



108

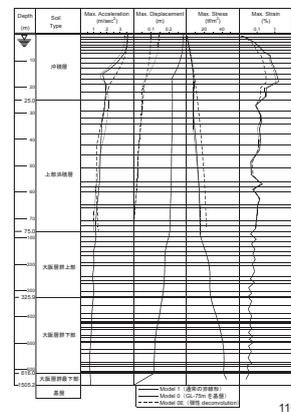
### Vs=500基盤



109

### GL-75m

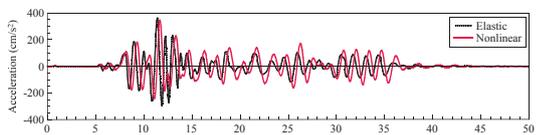
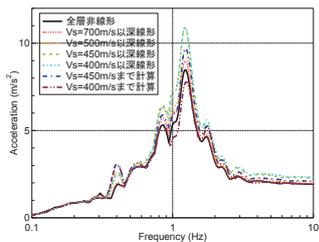
- 通常の基盤



110

### 比較

- 長周期化
- 増幅の変化



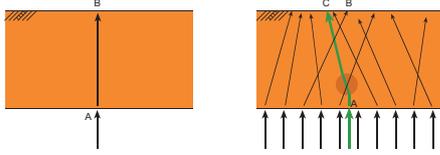
111

### 結論

- Vs=700m/sは基盤として十分
- Vs=500m/sもOK
- これより小さくなると、影響が現れ出すので、技術者が判断する。

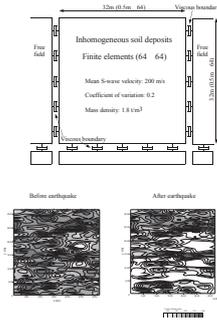
112

### 散乱の減衰の影響



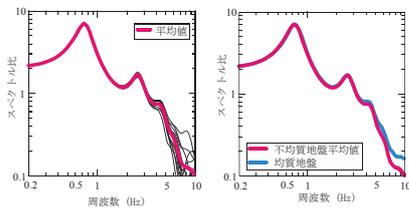
113

### 散乱の減衰の計算例



114

### 散乱の減衰の効果

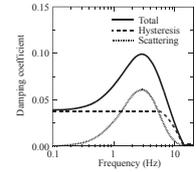


115

### 考慮した減衰

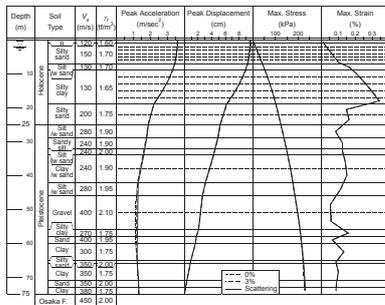
- 減衰を考慮しない。
- 3%の周波数に依存しない減衰を与える。
- 減衰に関する経験式を用いる。

$$\log Q^{-1} = -A \log f - B$$



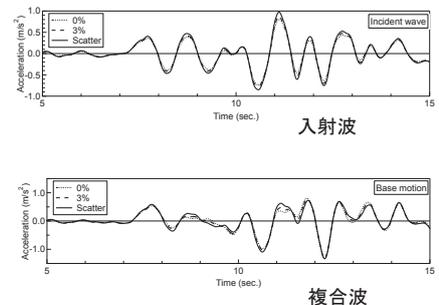
116

### 入射波の計算時 最大応答



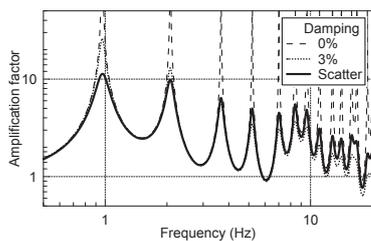
117

### 入射波の計算時 基盤の波形



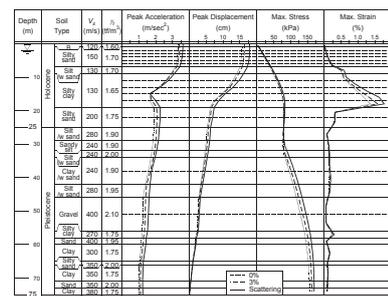
118

### 入射波の計算時 増幅比



119

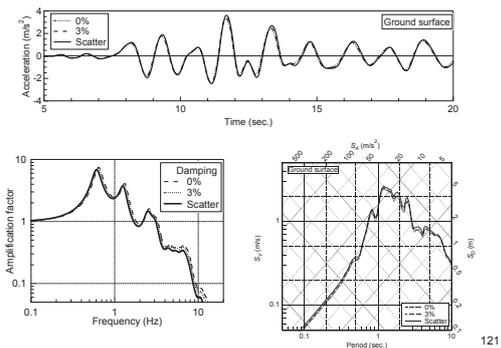
### 非線形解析 最大応答



SHAKE

120

### 地表の応答



121

### 結論

- 最大加速度で10%
- 応答スペクトルの最大誤差で15%
- 無視できると結論することもできない

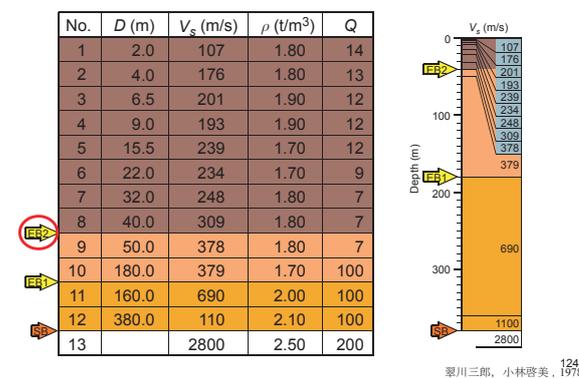
122

### 工学的基盤以深の地盤構造の影響

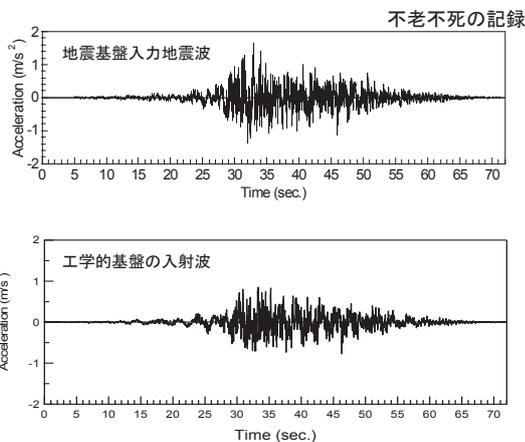
- 工学的基盤で設計用地震動を設定
  - ・ 道路橋示方書:  $V_s=350\text{m/s}$
  - ・ 建築基準法:  $V_s=400\text{m/s}$
- 工学的基盤以深の地盤構造
  - 表層の応答が受ける影響

123

### 地盤モデル

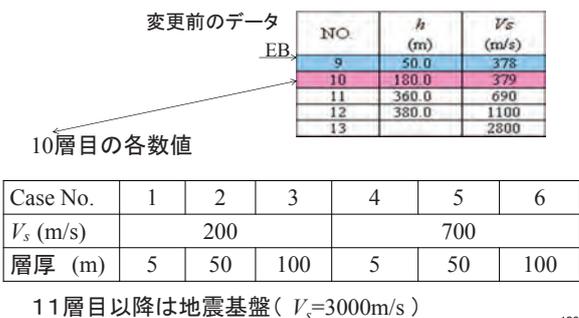


124 翠川三郎, 小林啓美, 1978



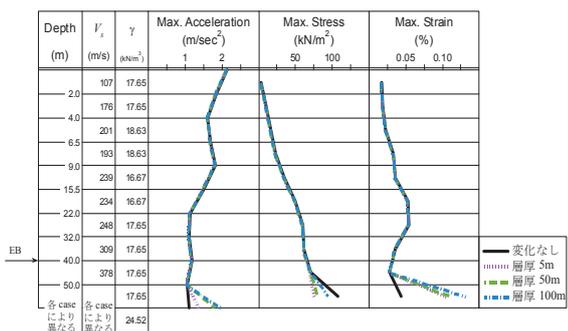
125

### 工学的基盤以深条件の変更



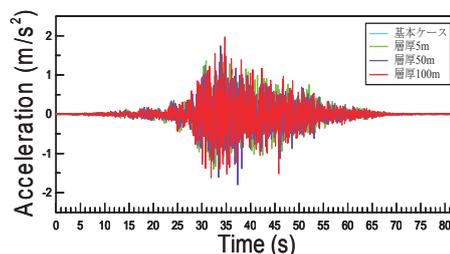
126

### $V_s=200\text{m/s}$ のケース



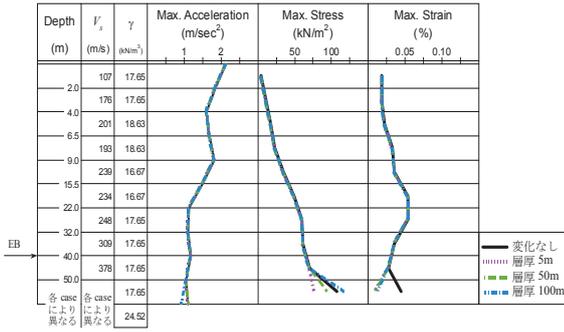
127

### 地震基盤の加速度の比較 ( $V_s=200\text{m/s}$ のケース)



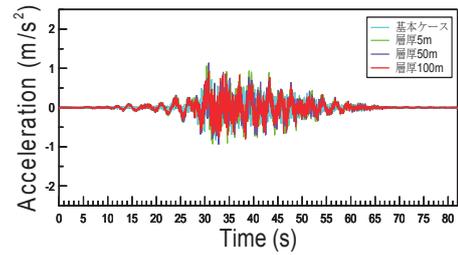
128

$V_s=700\text{m/s}$ のケース



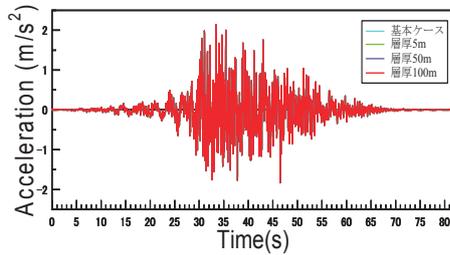
129

地震基盤の加速度の比較 ( $V_s=700\text{m/s}$ のケース)



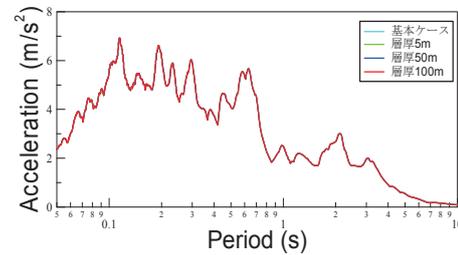
130

加速度時刻歴の比較 ( $V_s=200\text{m/s}$ のケース)



131

応答スペクトルの比較 ( $V_s=200\text{m/s}$ のケース)



132

まとめ

- 工学的基盤で入射波を与えるのであれば、表層地盤の応答は深部構造の影響は無く、ほぼ一定
- 工学的基盤以深では各ケースにより異なる  
→同じ地震に対して工学的基盤から表層に入射する地震波は同じであるというの間違い

133

工学的基盤に関する総まとめ

- 工学的基盤より深い情報は反映されない
  - 長周期地震動
  - 卓越周期も異なる
  - 工学的基盤より上の挙動は工学的基盤に支配されない
    - ▶単に定義する工学的基盤では好ましい性質か？
- 逆増幅解析では減衰を適切に評価する必要がある
- 工学的基盤以深でも非線形の影響が現れる
  - $V_s=500\text{m/s}$ あれば大丈夫？

134

## 02 Landslide monitoring and early warning

東京大学 東畑 郁生 名誉教授



# Landslide monitoring and early warning

**Ikuo Towhata**  
VP for Asia of ISSMGE  
President of Japanese Geotechnical Society  
Staying in Auckland with Seelye Fellowship

Acknowledgment to financial supports by the Ministry of Education (MEXT), Tokyo Metropolitan Government, Izu Oshima Municipal Government, Satoshi Goto, Wang Ling and Taro Uchimura among many others.



Weak geology in Nepal that I saw during my previous visit in 2012:



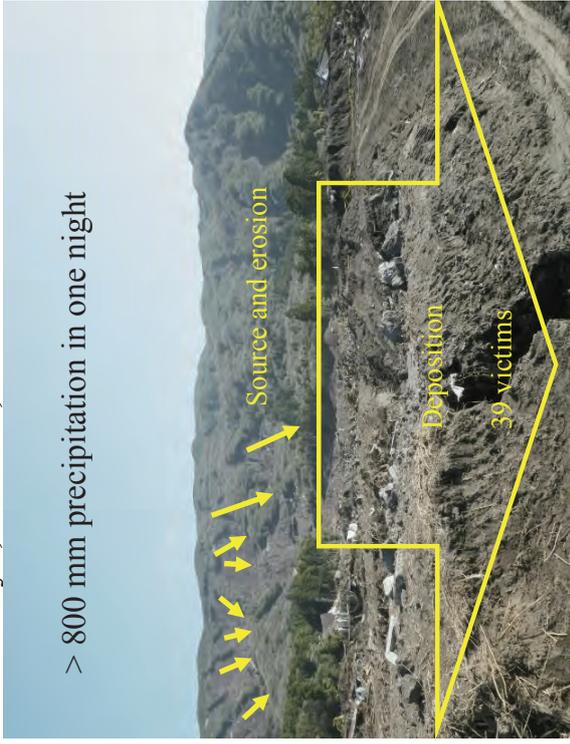
At Cohsmel between Pokhara and Lumbini; Himalayan tectonic action has ruptured rocks

Disturbed slope after big earthquake and repeated debris flows; Sichuan Province, China





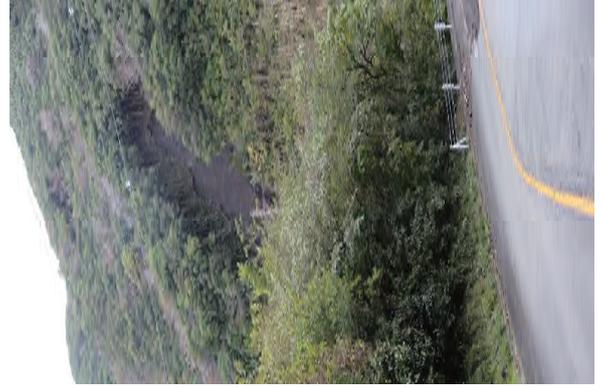
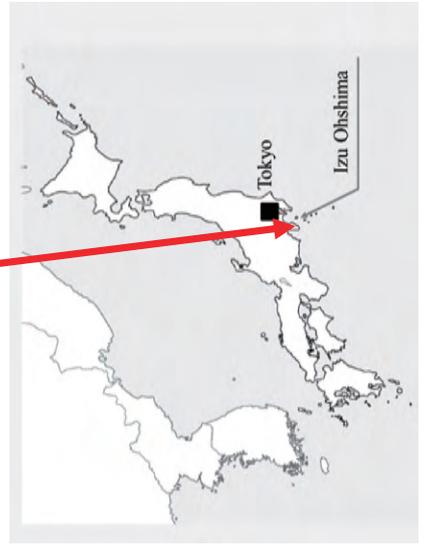
Rainfall-induced slope failure: Izu Oshima volcanic island near Tokyo, October, 2013.



## Contents

1. Recent slope disasters: **Izu Oshima** volcanic island
2. Mechanism of slope failure
3. Device for early warning
4. Difficulty in early warning

October 15-16, 2013  
 More than 800 mm in one night.  
 Rainfall concentrated in a small island → out of regional disaster warning.  
 Typhoon passed slowly near the island.



Initiated by shallow failures but evolved to a bigger size by erosion



Piping holes: mechanism of slope failure?



**Erosion** in the middle part of the slope  
→ increased volume of soil flow



Destroyed town



Rainfall induced slope failure



Taiwan, 2011

Heavy rain  
Slope failure  
Debris flow  
Bridge and bus were washed out

## Kinds of landslide mitigation

**Human life is saved by these.**

- Prevent landslide by Retaining wall, ground anchorage, drainage etc.; expensive
- Reduction of damage by relocation (people may not like this) and/or evacuation (early warnings; property may be lost).
- Post disaster recovery: all are lost but let's re-start.

## Soil-mechanic approach to early warning of slope failure during heavy rain

- Field investigation to determine strength parameters, or
- Undisturbed sampling for laboratory tests on stress-strain behavior
- Geohydrology to assess ground water flow
- Monitoring rainfall
- 3-D numerical analyses on slope deformation and ground water flow to evaluate effective stress, shear strength and factor of safety
- Too costly and too time consuming
- Soil mechanics is useless !??

## Issues of importance

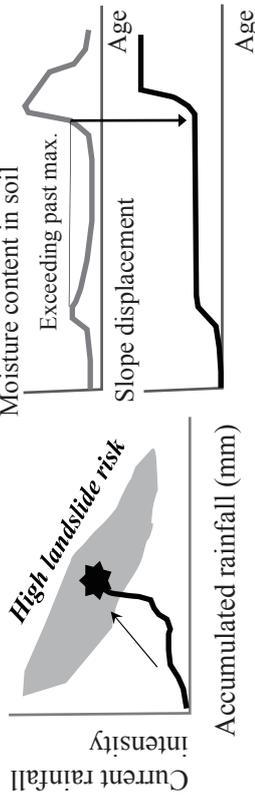
- Slope failure and c
- Inexpensive mitiga
- Warning in TV bas
- practiced but no co
- slope geometry
- not effective fo
- Monitoring a parti
- Detect minor defo
- Install many low-c
- do not know which



## Two kinds of early warning methodology

### 1. Rainfall record criterion

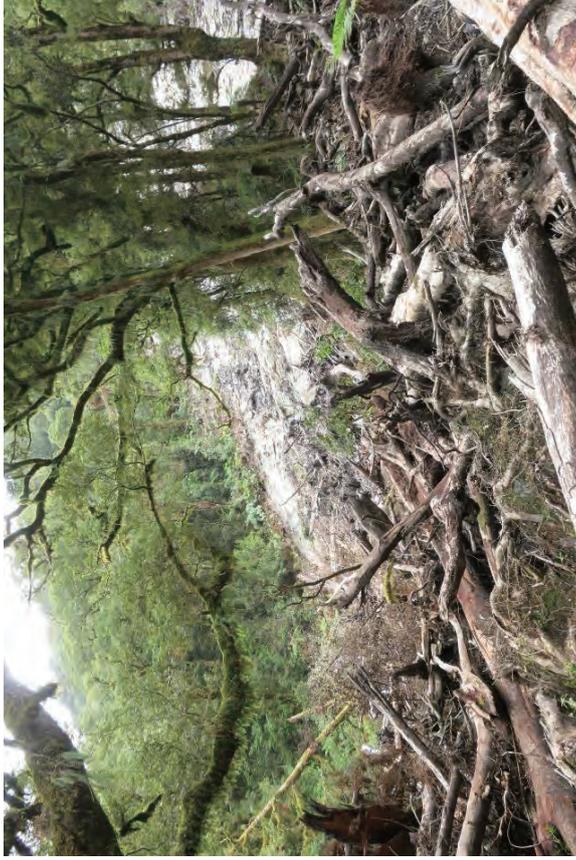
- 1) Current rainfall intensity; e.g. in the past 3 hours (mm)
- 2) Ever highest moisture content in soil triggers slope failure.



### 2. Displacement criterion

Monitoring displacement or else by extensometers, GPS or else.

If displacement time history reaches some critical level, warning is issued for evacuation.



Where tree roots are shallow, the entire surface soil is lost during heavy rain.

## Shallow slope failure is focused on



Kita-nigoro, Tochio, 2004

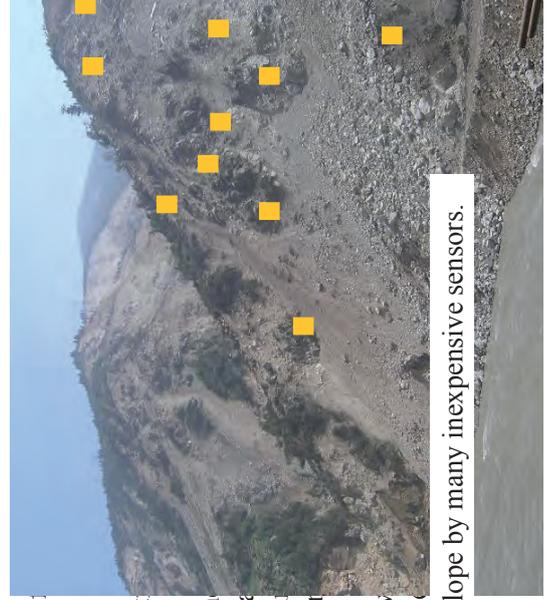
Sliding of surface weathered material.

Small in scale but many in number.

## Basic philosophy of early warning

Typical precursors of

- Surface crack
- Roaring sound
- Sound of root cutting
- Water boiling and
- ◆ All suggest ground
- ◆ It is difficult to warn
- ◆ rain or record sound
- ◆ Alternative idea: use
- ◆ sensor.
- ◆ We do not know where
- ◆ know where the sensors
- ◆ Cover the entire slope by many inexpensive sensors.



# Validation of technology by field monitoring

Current proposal: **Caution** if rate of angle  $> 0.005$  degree / hour & **Alert / Evacuation** if  $> 0.1$  deg/hour.



Artificial rainfall test in Sichuan Province, China



## Many inexpensive sensors cover a slope.

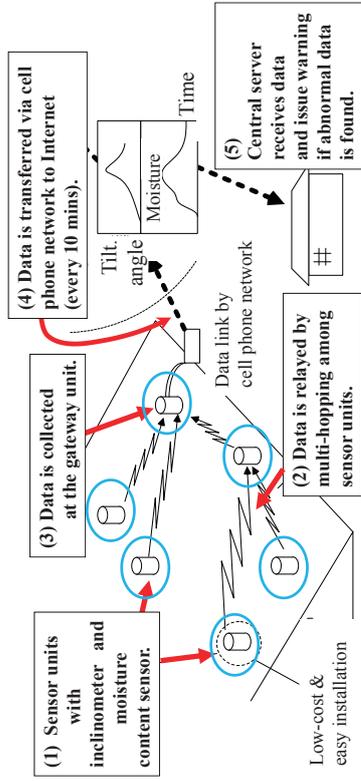
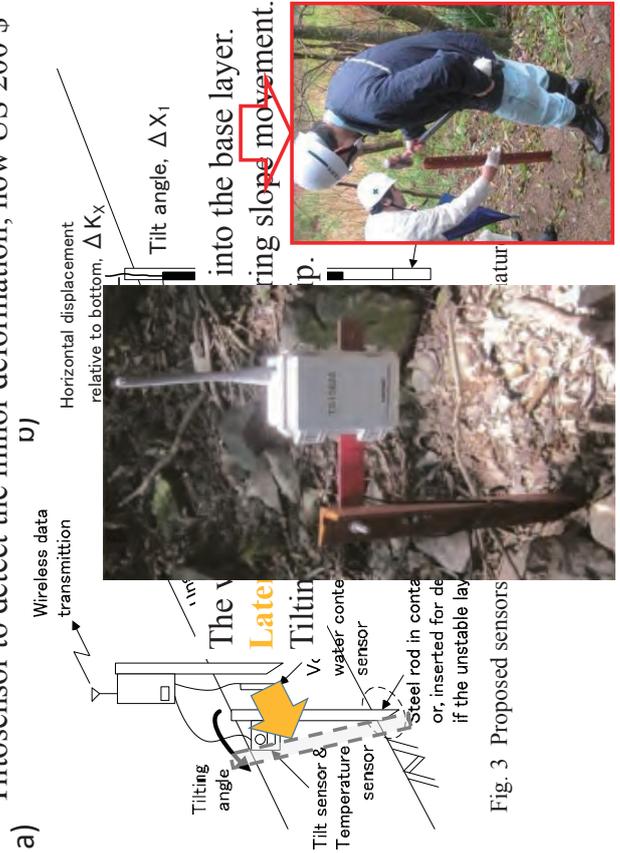
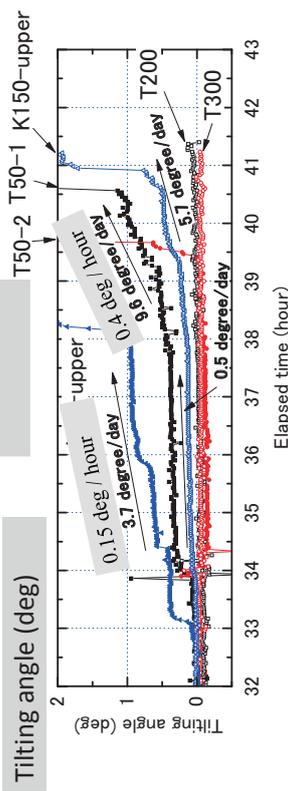
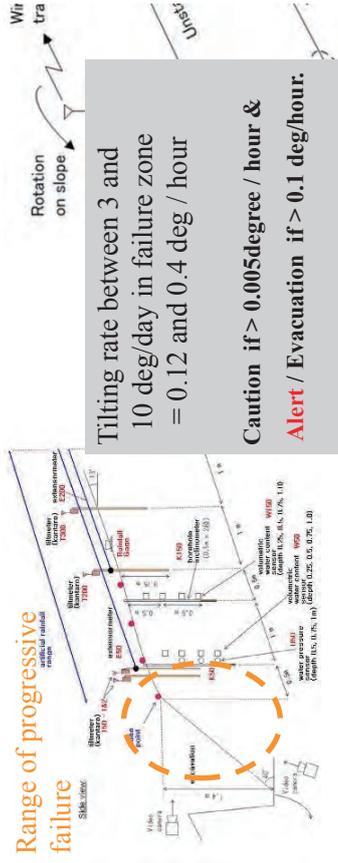


Fig. 1 Structure of the proposed wireless monitoring and early warning system

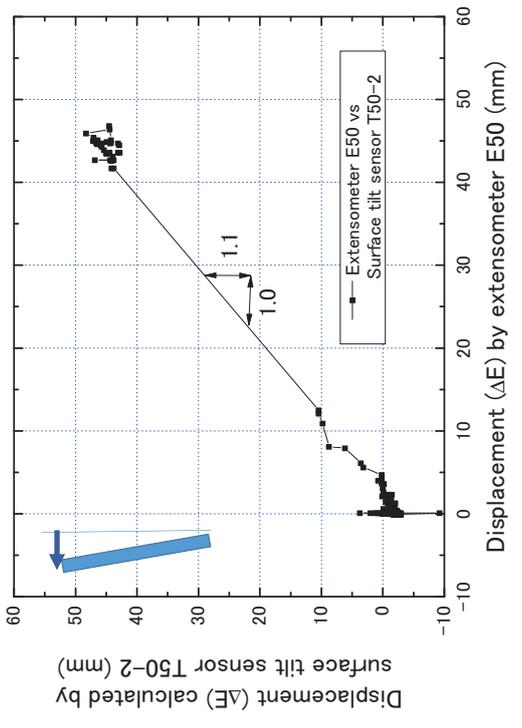
## Tiltosensor to detect the minor deformation; now US 200 \$







Tilting angle \* length of vertical rod = lateral displacement. It is **equivalent with** the data from a conventional (more expensive) **extensometer**.



Along Three Gorge Dam Reservoir, China, many landslides were going on during filling water.



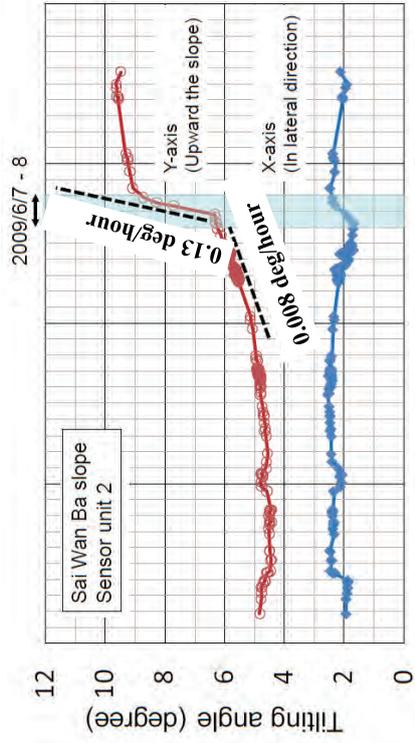
Monitored tilting angle in Three Gorges Dam Landslide Area



2009/5/12 2009/5/22 2009/6/1 2009/6/11 2009/6/21

Current proposal: **Caution** if rate of angle > 0.005degree / hour & **Alert / Evacuation** if > 0.1 deg/hour.

Monitored tilting angle in Three Gorges Dam Landslide Area



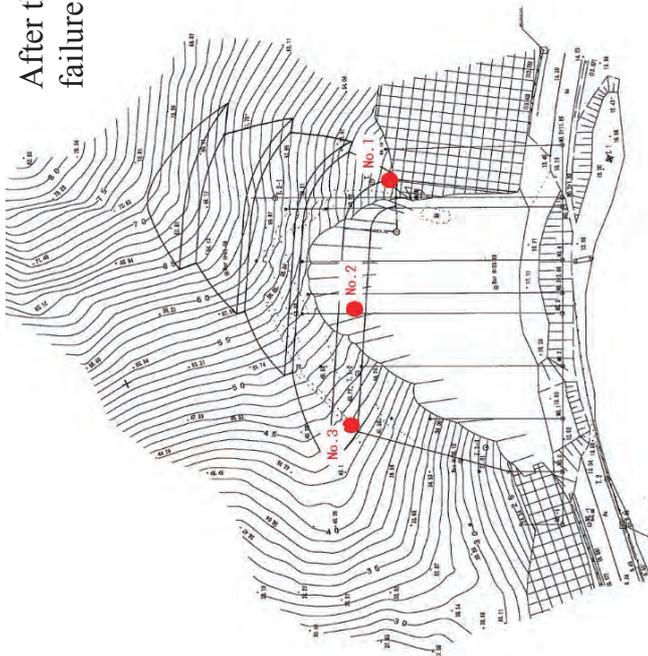
2009/5/12 2009/5/22 2009/6/1 2009/6/11 2009/6/21

Current proposal: **Caution** if rate of angle > 0.005degree / hour & **Alert / Evacuation** if > 0.1 deg/hour.

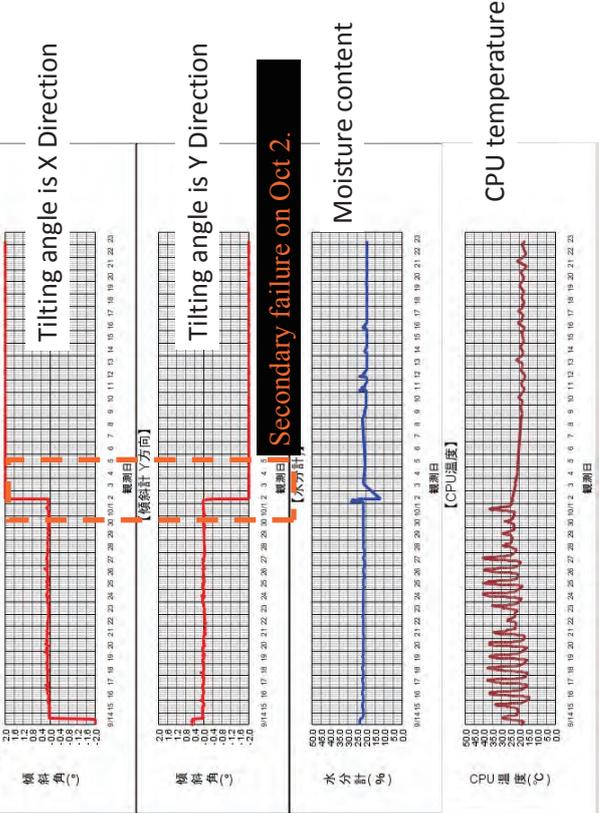
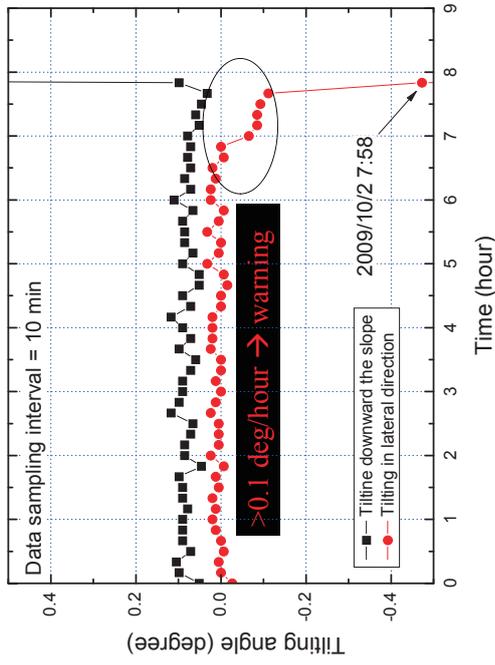
Monitoring during slope restoration.  
Avoidance of secondary accident.



After the first failure in July 2009:



More details of time history: every 10 minutes



Validation at Tagawa Site

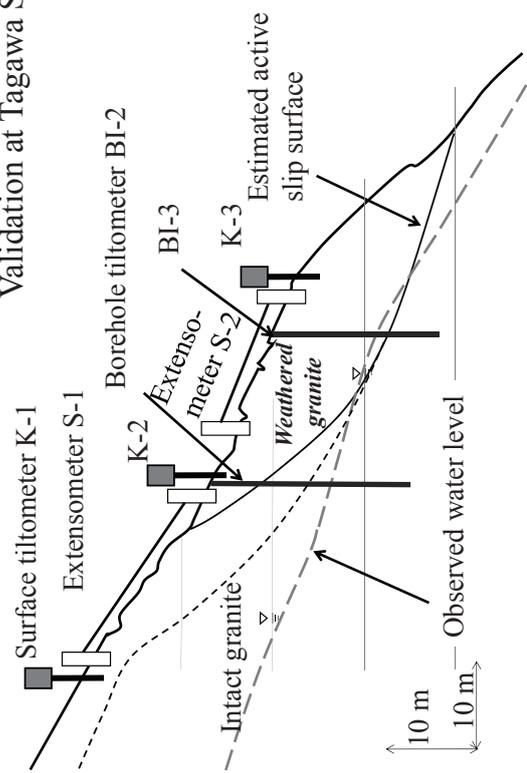


Fig. 17 Site of long-term monitoring along national road

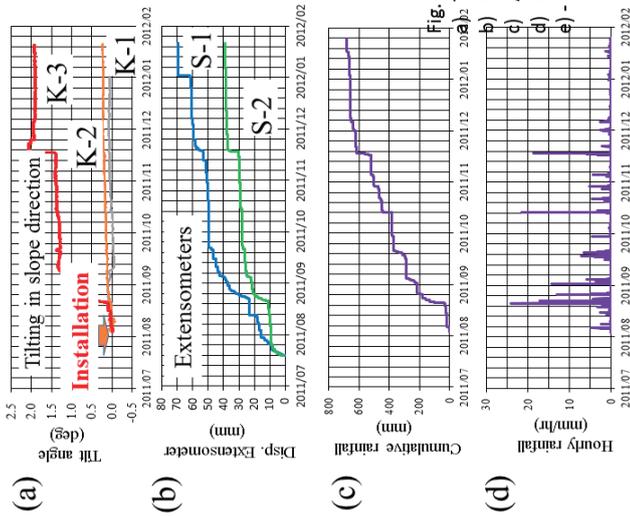
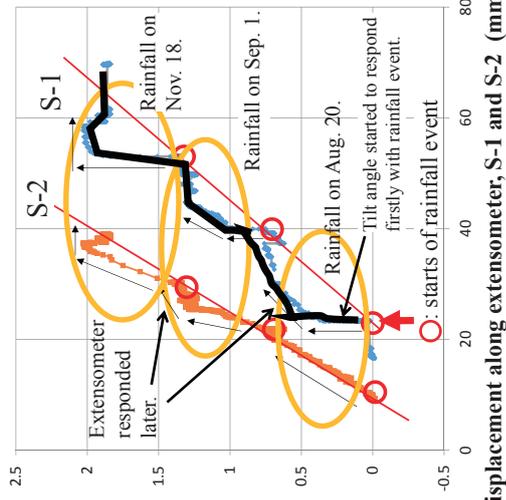


Fig. 18 Time histories of monitored items:  
 a) Tilt angles by surface tilt sensors;  
 b) Displacements by extensometers;  
 c) Accumulated amount of rain;  
 d) Rainfall intensity;  
 e) - h) Zoom up for heavy rainfall events.

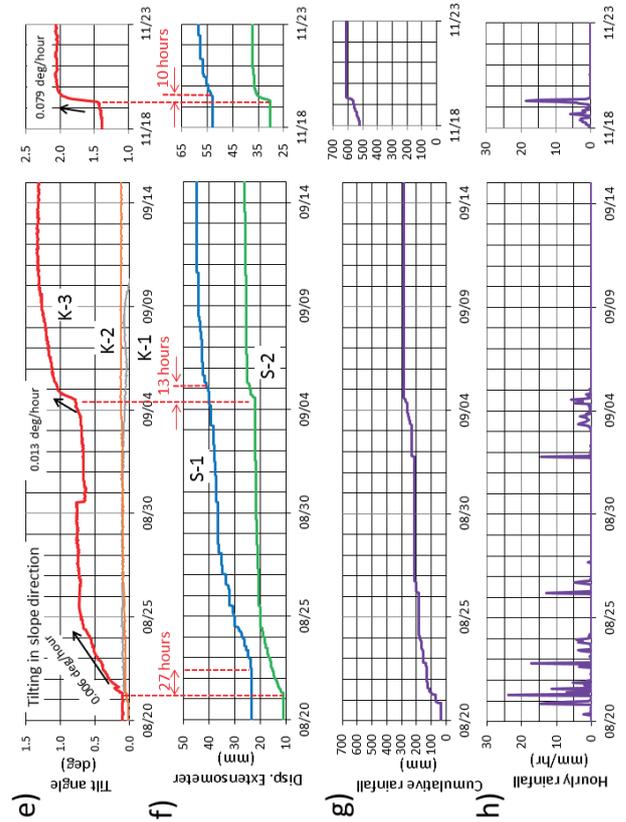
Extensometers started recording on Jul. 19, while tilt sensors started recording on Aug. 3.

Extensometers started recording on Jul. 19, while tilt sensors started recording on Aug. 3.

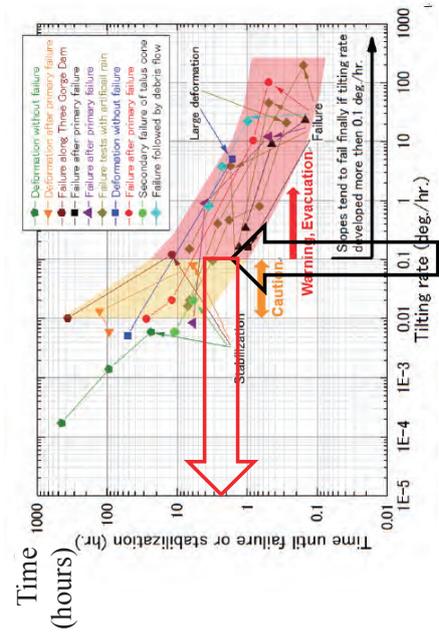
Tilting angle, K-3 (deg)



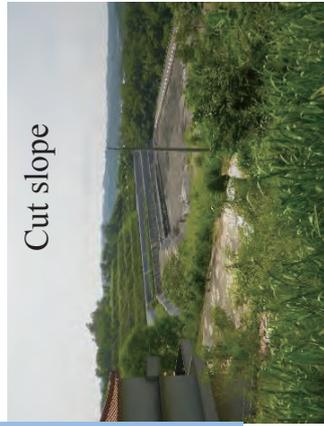
Tiltmeter responded prior to extensometer response.



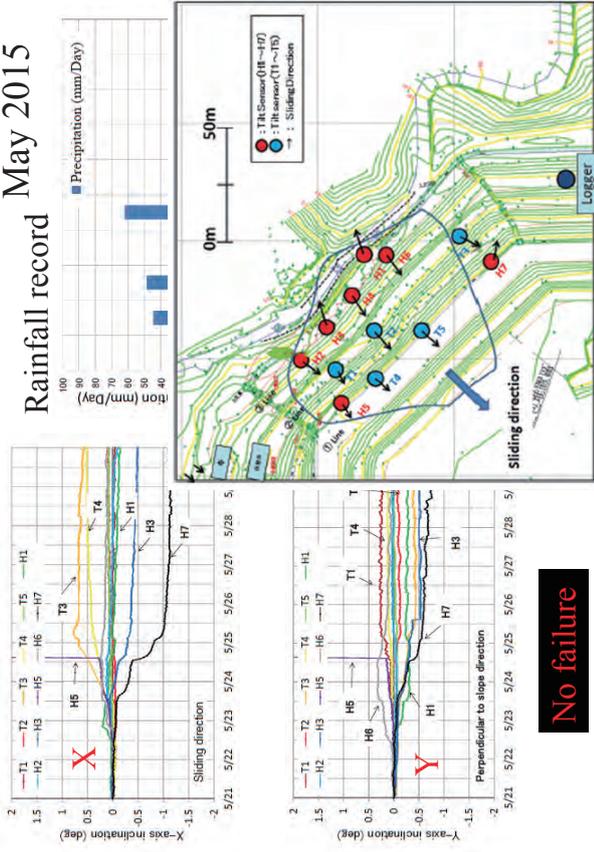
Relationship between monitored rate of tilting and time until final failure



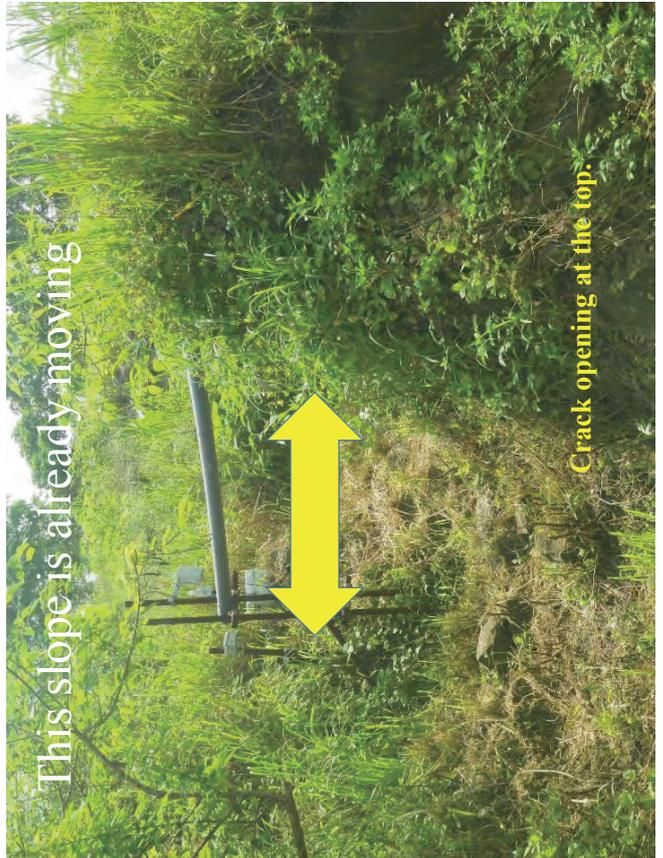
Attempts for multi-point monitoring (in Taiwan)



Records of tilting angle in X and Y directions  
May 2015



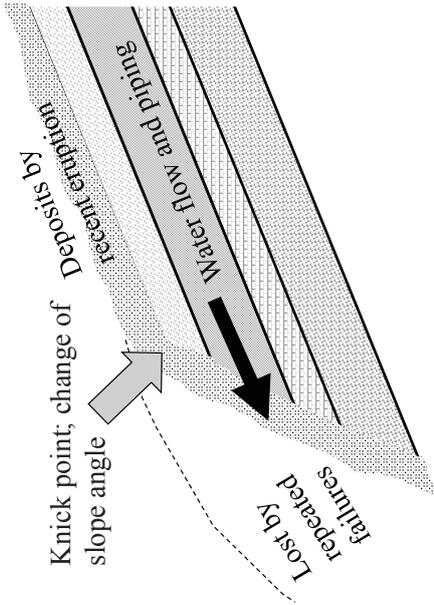
No failure



Monitoring of unstable stones



## Basic mechanism of slope failure

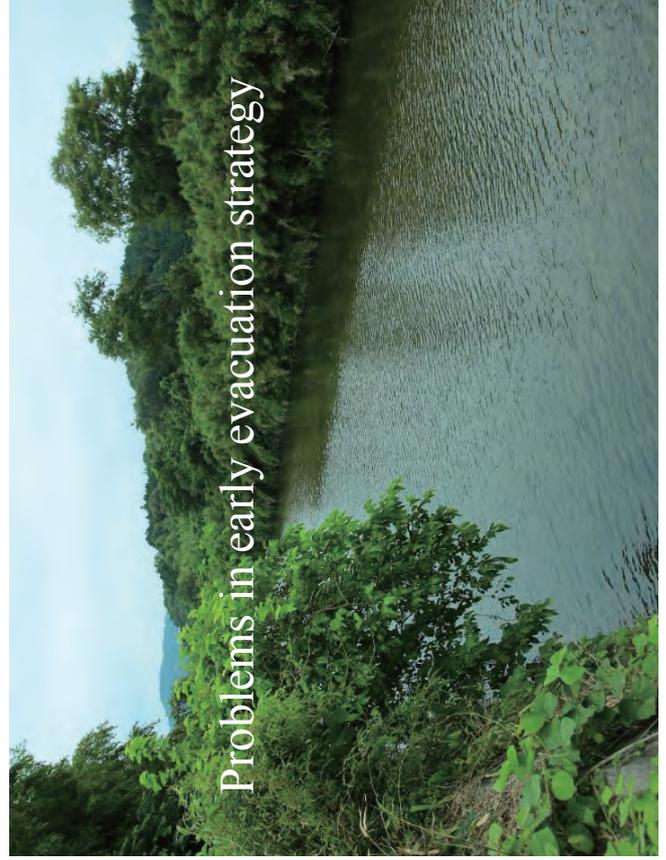
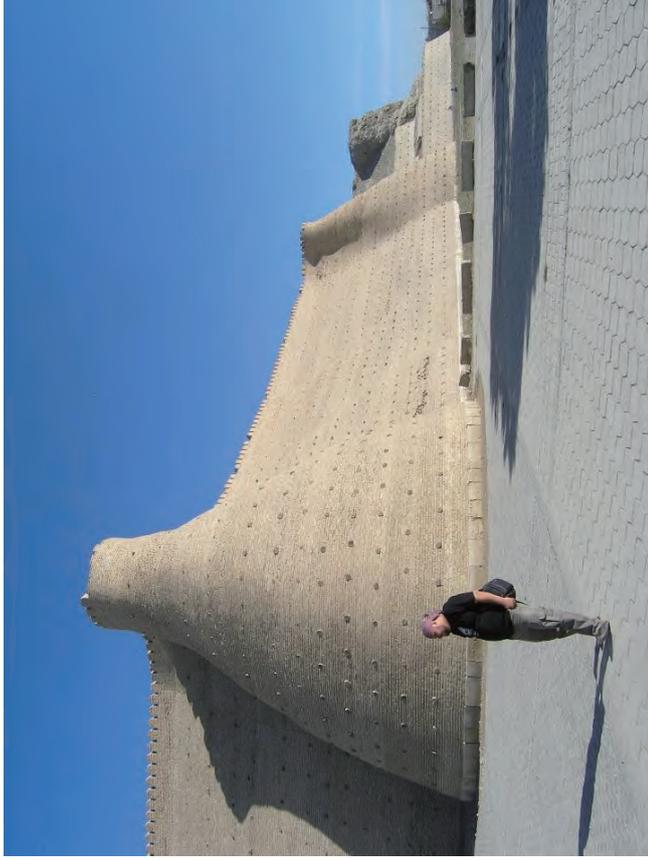
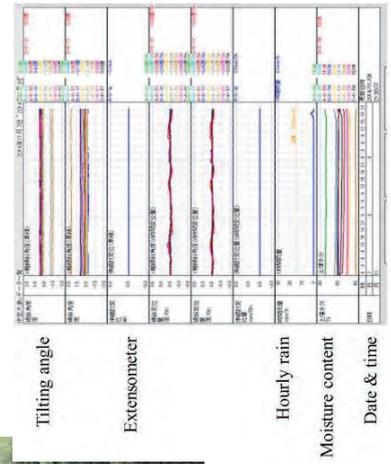


## Volcanic slope of Izu Oshima

Stratification makes the mechanism more complicated.

## Izu Oshima again

Tilting angle was monitored in a very unstable slope but nothing happened.



## Increasing hazards of heavy rain and slope disasters

### For Mitigation / Prevention,

**Slope reinforcement**  
(retaining walls, rock anchors)  
→ good but expensive

**Relocation;** moving to safer places; not preferred by people because they do not want to lose income



Brick production near Lahar (volcanic mud flow) stream; Philippines

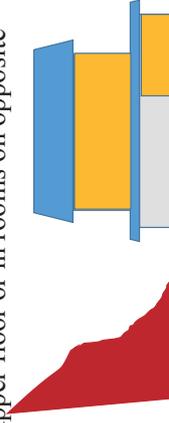
**Monitoring and early warning / evacuation;** better than other choices but evacuation during mid-night heavy rain is dangerous.

### Problems and possible solutions

Heavy rain in summer is likely in mid night: ground temperature is still high but air is cool at high altitude → rainfall.  
Evacuation at midnight is not a safe idea.

Early evacuation (many hours before rain starts).

Think about staying on the upper floor or in rooms on opposite side of the mountain



Prediction of slope failure is not very accurate.

False positive (not predict failure but it occurs) has to be avoided.

False negative (predict failure but it does not happen) is inevitable.

After several false negatives, people will not trust warning.

Also, evacuation is tiresome; staying overnight in shelter?

Enjoyable evacuation.

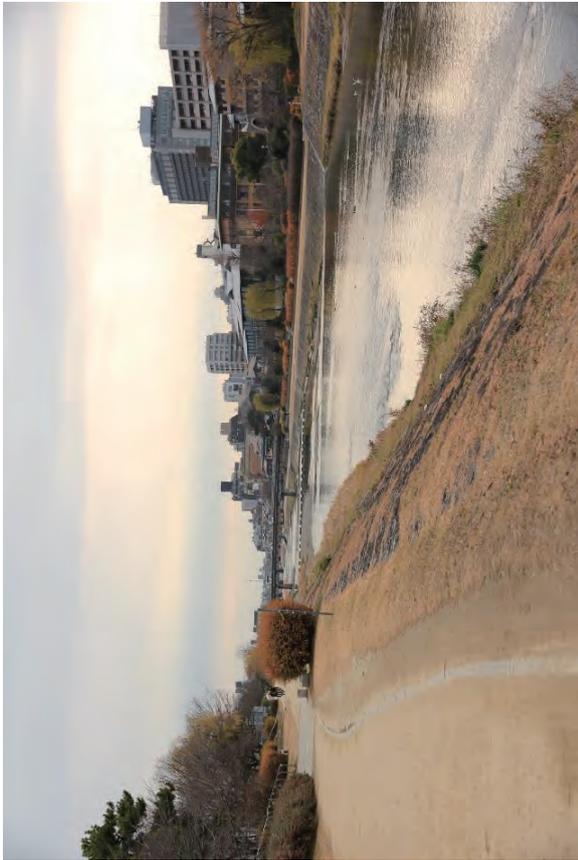
Evacuation drill should be combined with music events, cooking school etc.



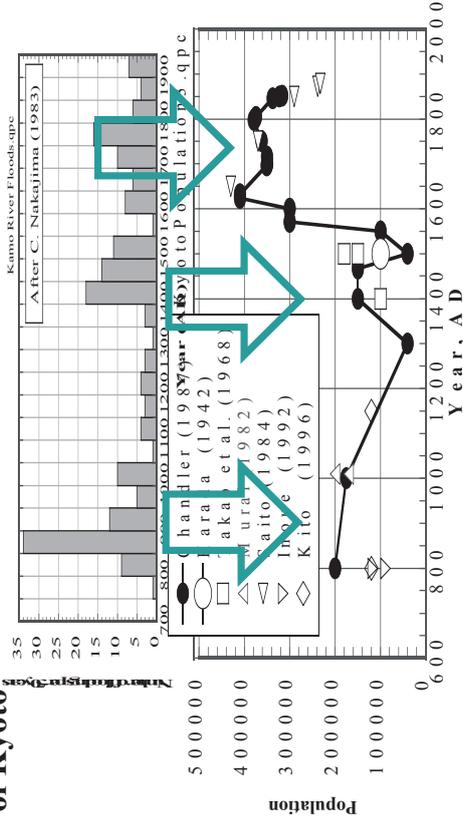
## Global climate change (warming) is an urgent issue?

1. Long-term record of flooding and global temperature change was studied.
2. Flooding: Kamo River in Kyoto, 1000-year capital of Japan.
3. As the capital, Kyoto provides many written records of flood.
4. Temperature: from tree ring.

# Kamo River in Kyoto



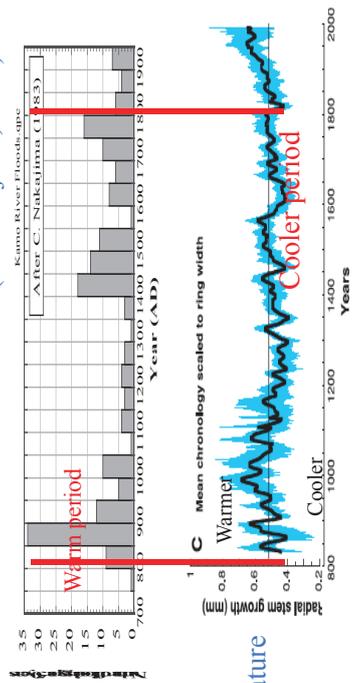
# Correlation between Kamo river flooding and population of Kyoto



Better correlation.  
People cut down trees in mountains and increased the risk of flooding.

## Frequency of flooding

Number of flooding as recorded by diaries (C. Nakajima, 1983)



Temperature

Esper et al. (2002) Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability, Science, 295, pp.2250-2253.

No good correlation between flooding and long-term climate change.  
Any other possibility?

## Consequence of 100-year tree planting (afforestation)

Disaster mitigation is not a topic of cost-benefit calculation.



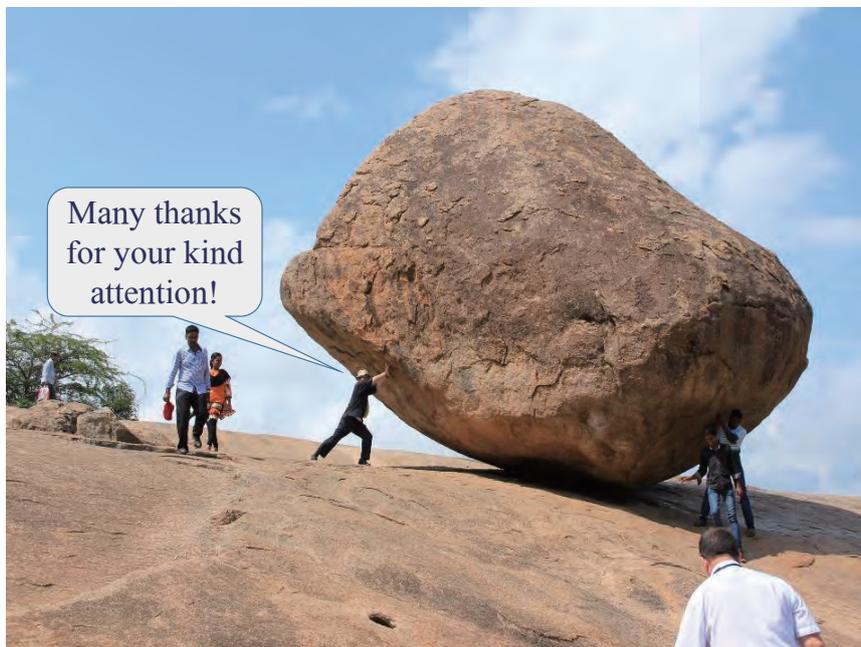
Rokko Mountain



Tanakami Mountain

## Conclusions

- MEMS tilting angle sensor has a **reasonable cost** and appropriate accuracy.
- **Many sensors** can be installed over an entire slope.
- **Increased chance to detect the precursor** (minor deformation) of ultimate failure.
- The displacement of a slope observed by **tilting sensor and extensometer are equivalent**.
- The **tilting sensor responds earlier** than the extensometer because of its installed location.
- Warning and evacuation **when rate of tilting  $> 0.1$  deg. / hour**.
- Global warming may not soon affect slope disasters. Protection of forest is more important.



## 03 土の動的性質のモデル化と地盤の有効応力解析

清水建設株式会社 福武 毅芳 様



# 土の動的性質のモデル化と 地盤の有効応力解析

清水建設(株) 福武毅芳

1

## 概 要

- ① 土の性質  
線形と非線形
  - ② 動的非線形のモデル化  
土の構成式
  - ③ 動的解析手法  
等価線形解析 & 非線形解析 & 有効応力解析
- ・補足:おわんモデル

2

## 土質材料の特徴

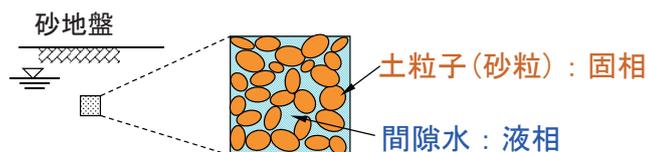


- **コンクリート**:  
クラック→破壊→瓦礫  
連続体となっていて初めて機能。
- **地盤**は初めから木っ端微塵に壊れている。  
しかしちゃんと構造物を支持している。Why?

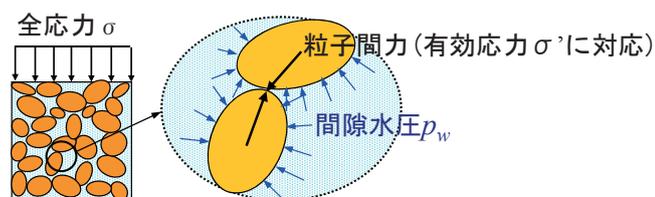
→

3

## 2相混合体に理想化した飽和土要素



全応力 $\sigma$ 、有効応力 $\sigma'$ 、間隙水圧 $p_w$



$$\text{全応力 } \sigma = \text{有効応力 } \sigma' + \text{間隙水圧 } p_w$$

(粒子間力)

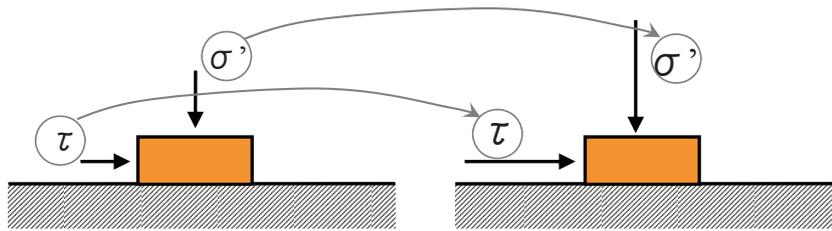
4

## 有効応力 $\sigma'$ に基づく摩擦則 (土粒子の滑動)

土粒子を滑動させるための  
応力比:  $\tau / \sigma' = \text{一定値}$

拘束力  $\sigma'$  大:

→ 滑動させる(変形させる)ための  $\tau$  も大



5

## ① 土の性質: 線形と非線形

- ・せん断ひずみ依存非線形
- ・応力依存非線形

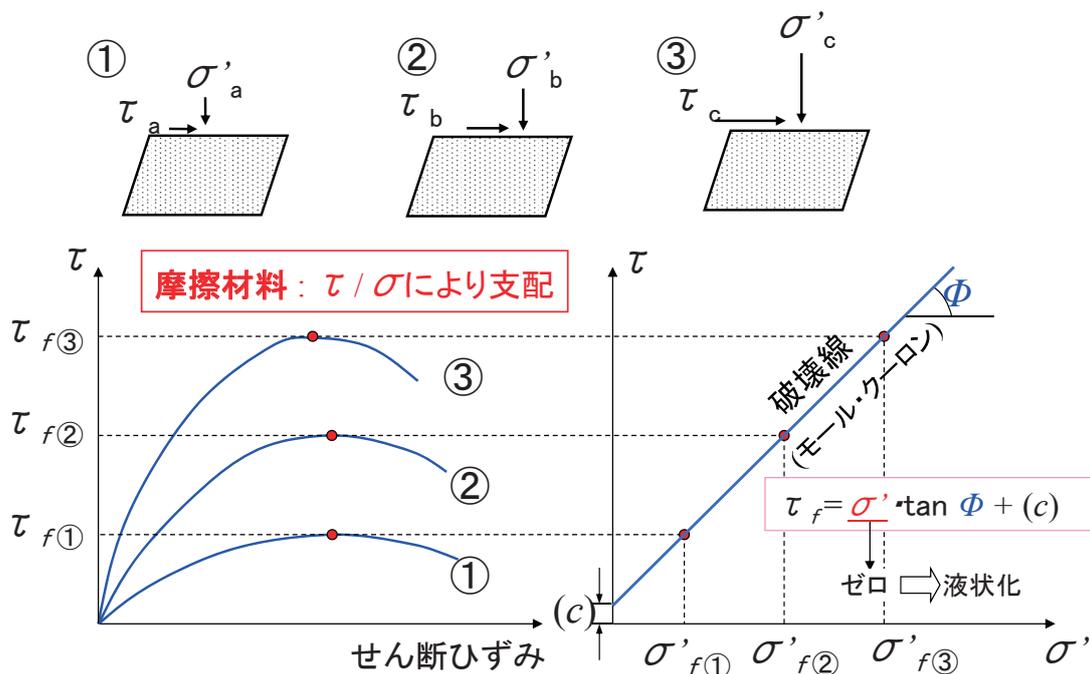
★二つの砂試料に触れてください

(豊浦標準砂)

- ① 少し真空引き
- ② 通常状態 (拘束圧=0)

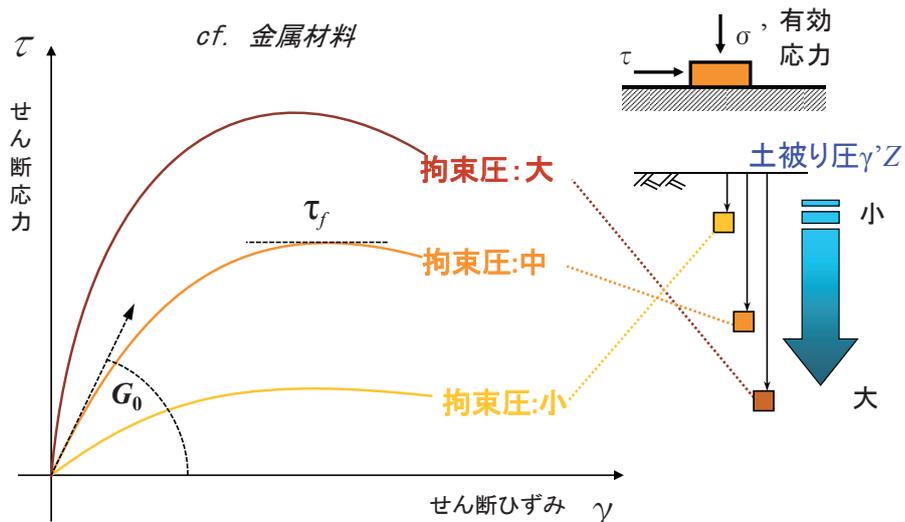
6

## 単純せん断試験結果



7

- ひずみ依存非線形 ..... 微小ひずみから非線形 (線形領域は無い)
- 応力依存非線形 ..... 摩擦則



- $\tau_f \propto \sigma'^{1.0}$  ... 摩擦則
- $G_0 \propto \sigma'^{0.5}$  ... ?

8

# 室内要素試験

## ① 波動法

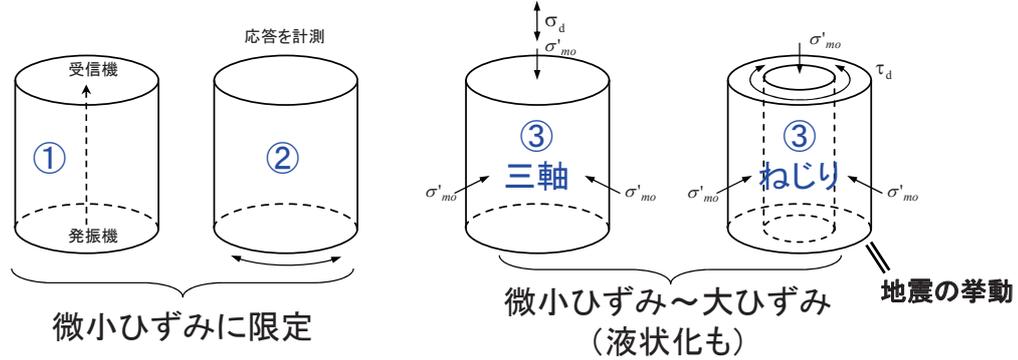
土試料を伝わる波の伝播速度と距離減衰などから波動論に基づいて求める方法

## ② 共振法

土試料の共振振動数と共振曲線等から振動論に基づいて求める方法

## ③ 繰返し試験

繰返し試験の応力-ひずみ関係から求める方法



## 非線形・液状化特性を求める試験

[規矩大義提供]

繰返し中空ねじりせん断試験装置



液状化試験:

要素レベルで液状化を発生させ、その時の土の強度(応力比)を測る

## 地盤材料の力学特性の特徴

### ■ 力学的な特徴

- ひずみの小さい間から非線形挙動。
- 有効応力 $\sigma'$ により性質が変化 (摩擦材料)。

### ■ 他の材料との違い

- 地盤材料の種類は多い。種類が違えば材料特性は異なる。同じ材料でもばらつき多い。
- 土中にあるので、試料を取り出すのが困難。取り出すことにより性質が変化。



一つの試験で試料のすべての性質を把握することは困難。

11

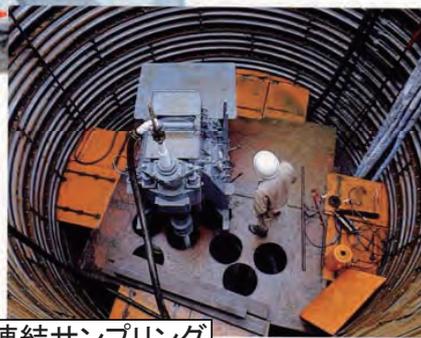
## 原位置地盤の評価と試料採取

### 凍結サンプリング法による試料採取



採取した凍結砂礫試料

- 粒径が大きくなると乱れやすい (砂, 砂礫)
- 液状化強度の評価には特に重要

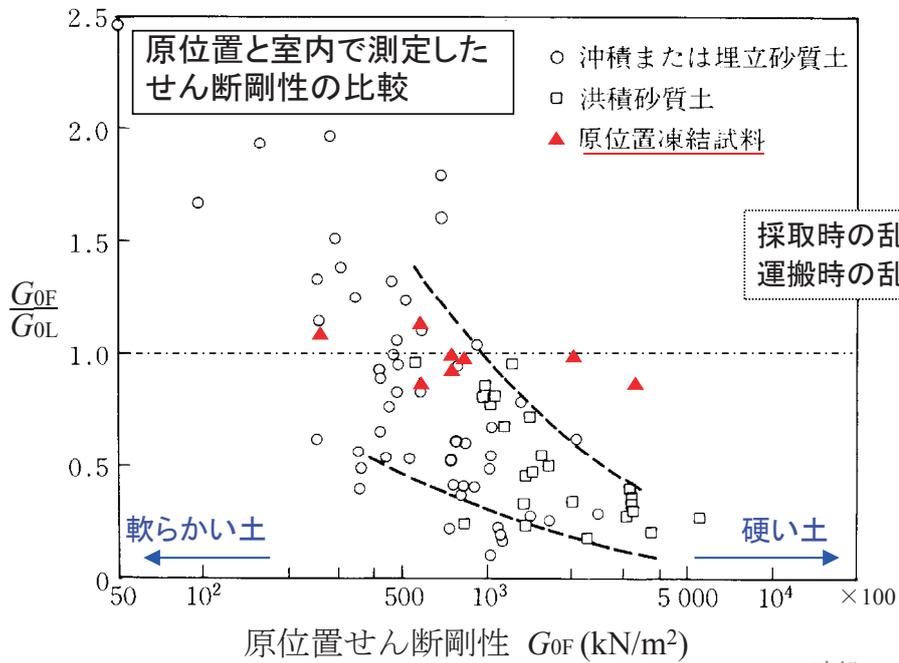


砂礫の凍結サンプリング

[清水建設  
パンフレット]

12

## 原位置試験と室内試験 初期せん断剛性 $G_0$

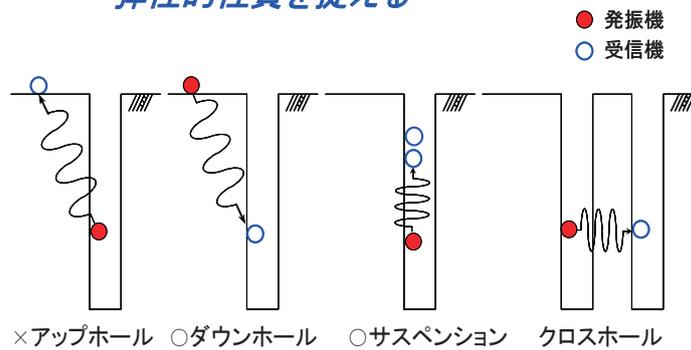


[時松, 1989]

13

## せん断弾性波速度 $V_s$ 原位置試験: 速度検層 (PS検層)

弾性的性質を捉える



$$G_0 = \rho V_s^2$$

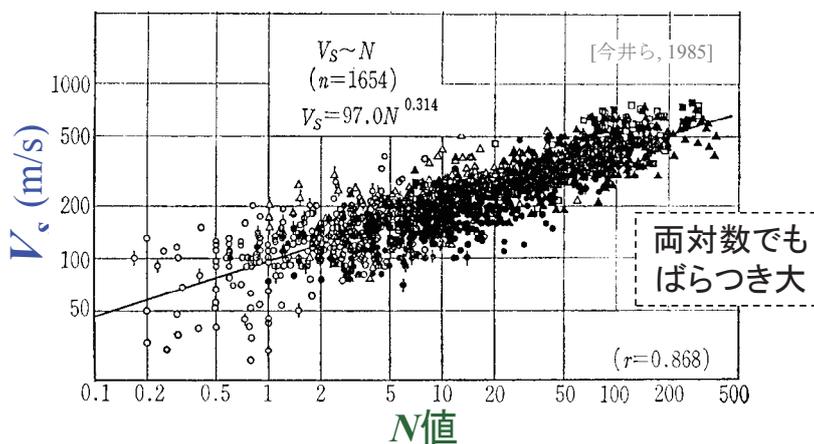
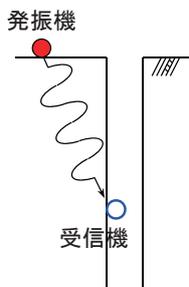
$$E = 2(1 + \nu) G_0$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left\{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right\}}$$

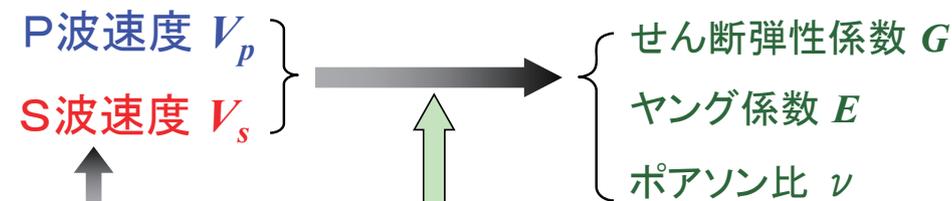
14

## 初期せん断剛性 $G_0$ の設定

- PS検層 →  $G_0 = \rho V_s^2$ ,  $\rho = \frac{\gamma_t}{g}$
- 標準貫入試験 →  $N$ 値 →  $G_0$



15



PS検層 (速度検層)  
M値から推定

動弾性理論の基本式

$$G = \rho \cdot V_s^2, \quad \rho = \gamma/g$$

$$E = 2(1 + \nu)G$$

$$\nu = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]}$$

$$V_p = V_s \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}, \quad \nu = 0.2 \sim 0.49$$

> 1.6

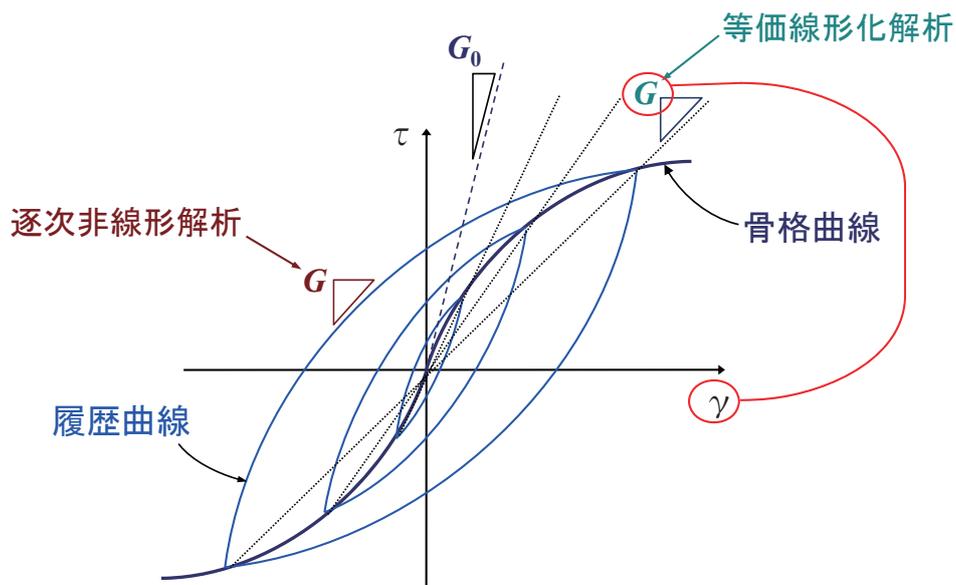
16

## ② 動的非線形のモデル化

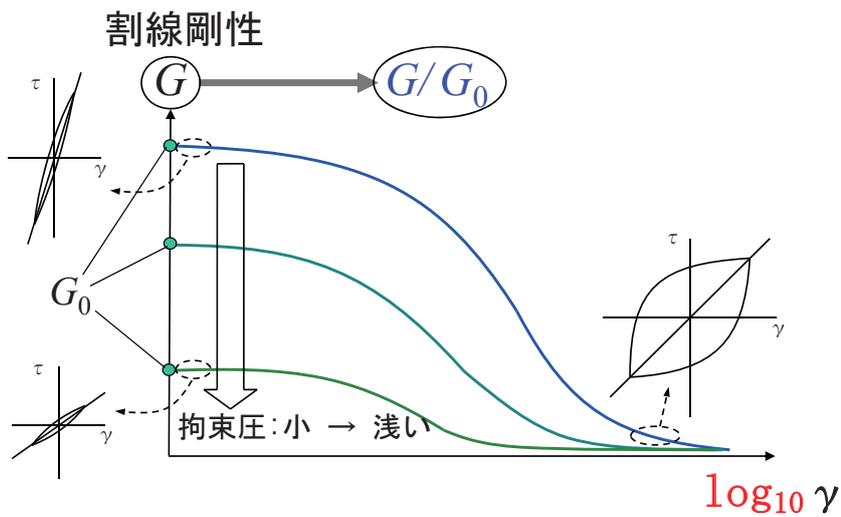
いよいよ  
「繰返し」、「非線形」  
のお話し

17

### 応力・ひずみ関係



18

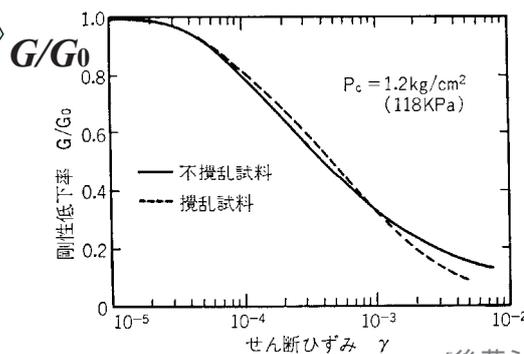
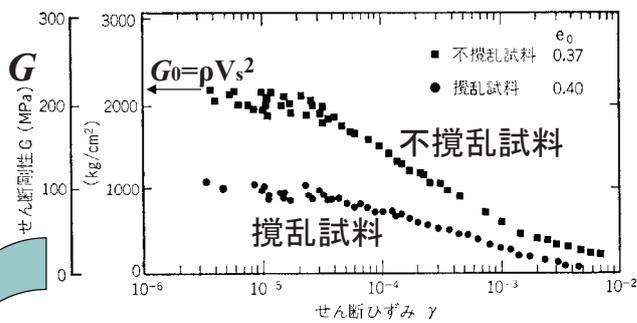


19

試料の乱れと非線形特性

砂礫の  
 $G \sim \gamma$ ,  
 $G/G_0 \sim \gamma$

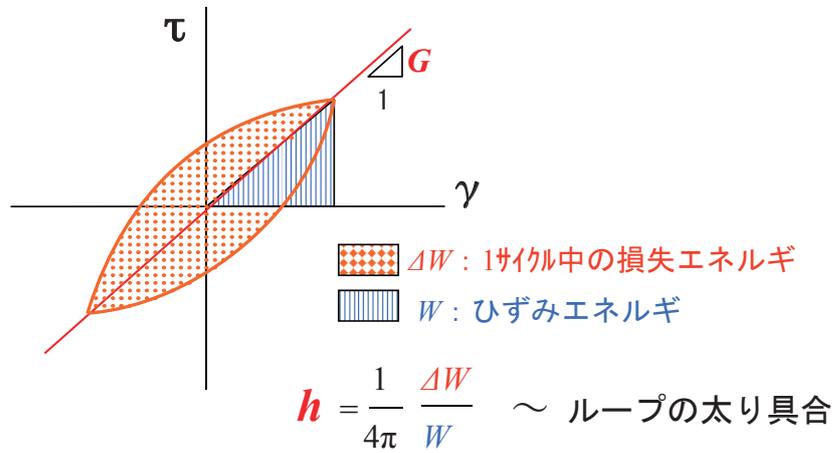
$G_0$ で基準化



[後藤ら, 1986]

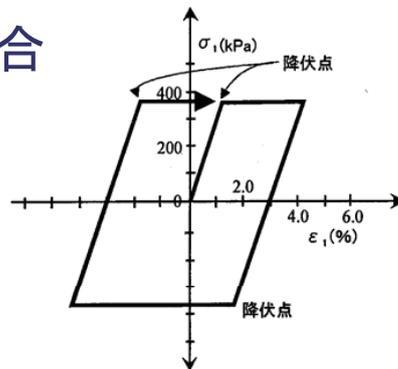
20

## せん断応力～せん断ひずみ関係と (割線)せん断剛性 $G$ , 減衰定数(履歴減衰率) $h$

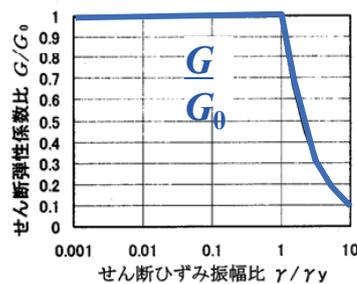


21

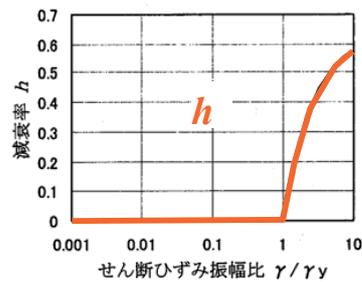
## 弾完全塑性体の場合



弾完全塑性体の応力ひずみ曲線の例 (繰返し載荷).



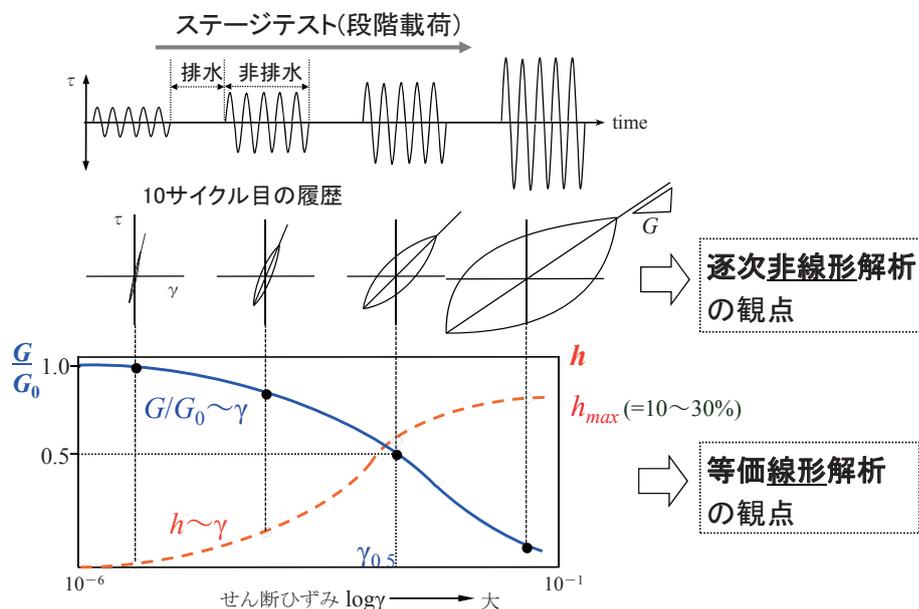
(a)  $G/G_0 - \gamma$  関係



(b)  $h - \gamma$  関係

22

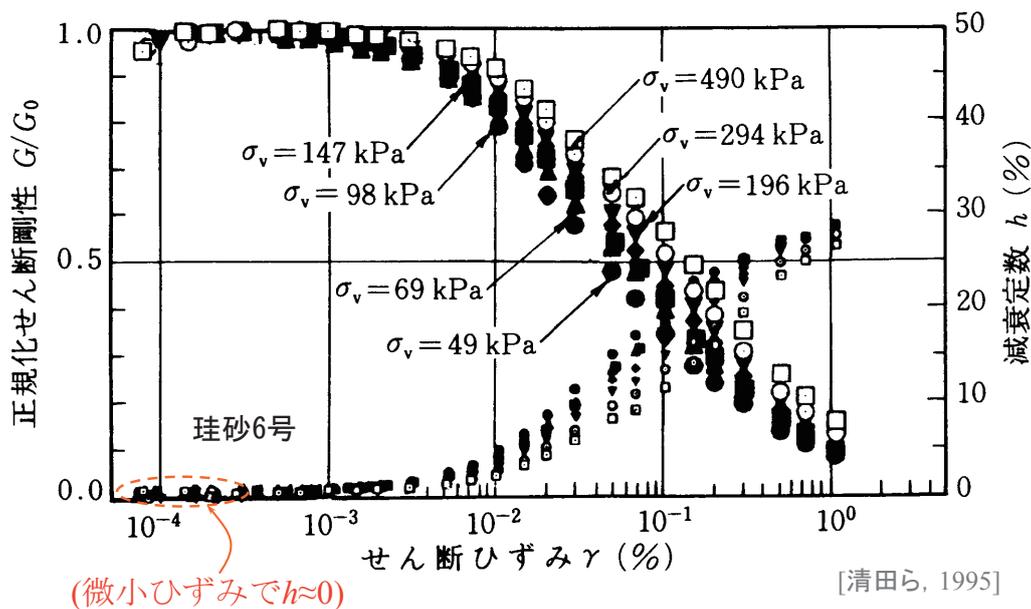
## 動的変形試験結果と材料定数のひずみ依存性 (非線形特性の表現方法: $G/G_0 \sim \gamma$ , $h \sim \gamma$ )



23

## 砂質土の動的変形試験結果

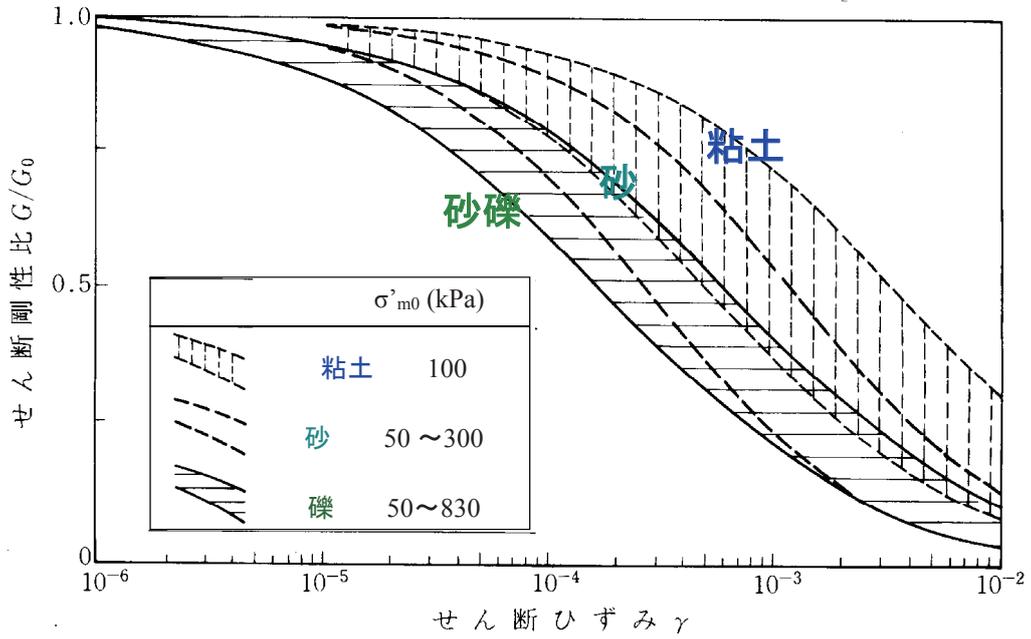
### $G/G_0 \sim \gamma$ , $h \sim \gamma$ 関係の拘束圧依存性



24

## 土の種類と $G/G_0 \sim \gamma$

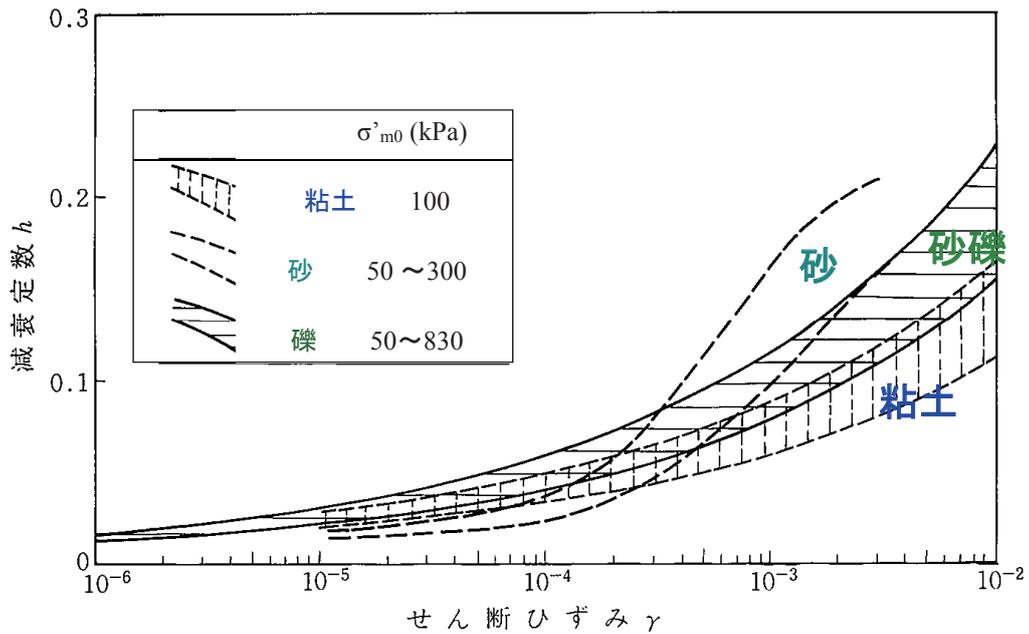
[今津・福武, 1986]



25

## 土の種類と $h \sim \gamma$

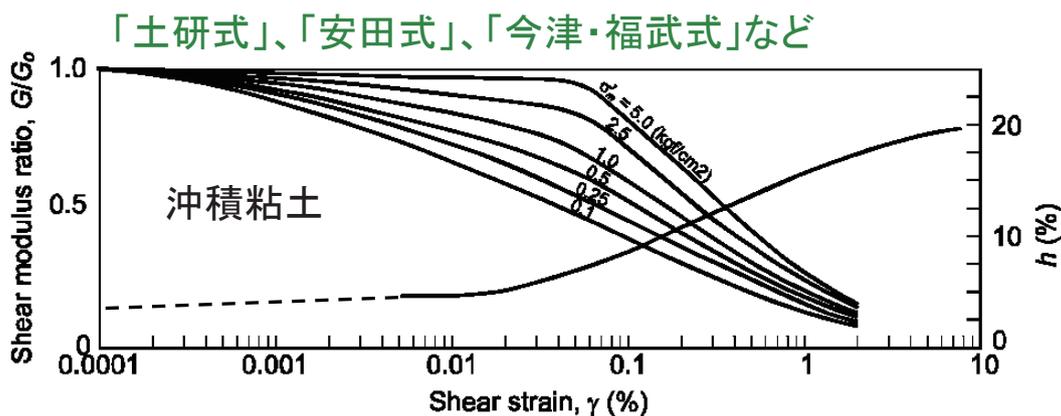
[今津・福武, 1986]



26

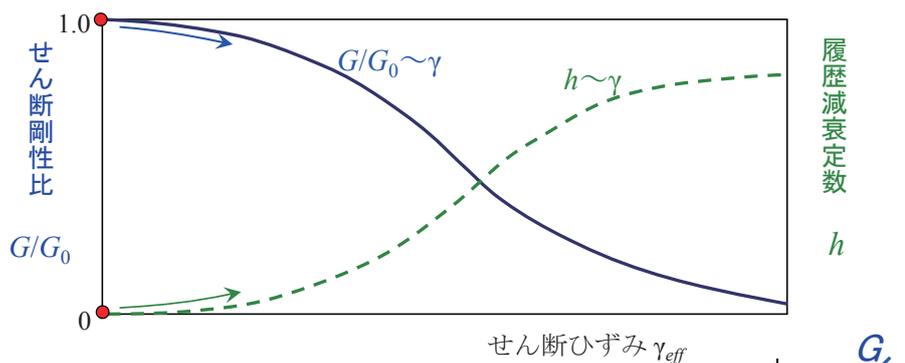
## $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ の式

- ・動的変形試験結果が無くても・・・  
既往の $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 式を用いることも多い。
- ・しかし動的変形試験は簡単であり、実施することが望ましい。



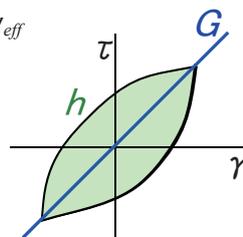
27

## $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係の応答解析での使い方



非線形性を大胆に設定

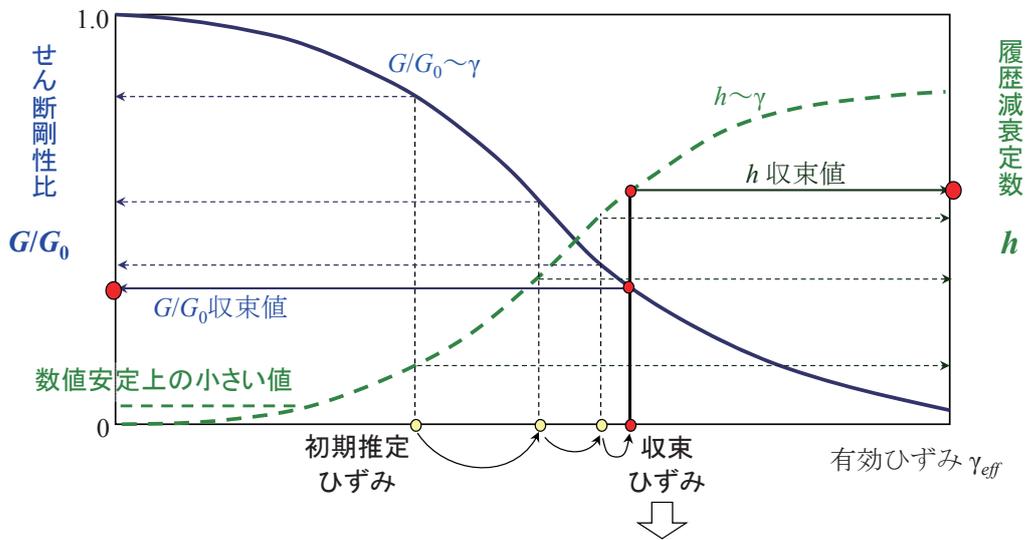
剛性を低減させた弾性定数  
⇒波動方程式を解く



「等価線形解析」

28

## 「等価線形解析」の解き方(イタレーション)



最終的に求められた収束値●を一貫して用いた線形計算

かなり大胆な簡略化！

29

## 等価線形解析

### ■ 有効ひずみ $\gamma_{eff}$

$$\gamma_{eff} = \alpha \cdot \gamma_{max}, \quad \alpha = 0.65$$

### ■ 等価ではなく、やや乱暴な近似手法

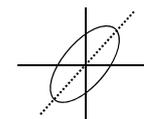
$G, h$ のイタレーション → 結局は、 $G, h$ 一定の線形計算

### ■ 既往コード (SHAKE, FLUSH, ALUSH) の特徴

○ データ入力が簡単 ( $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ )

○ 周波数領域での解法 (線形)

○ 複数剛性の導入  $G^* = G(1+2ih)$  →  $\tau$ と $\gamma$ の間に



位相差

○ FFT (高速フーリエ変換) → 計算速い

30

## 等価線形解析の特徴

### ■長所

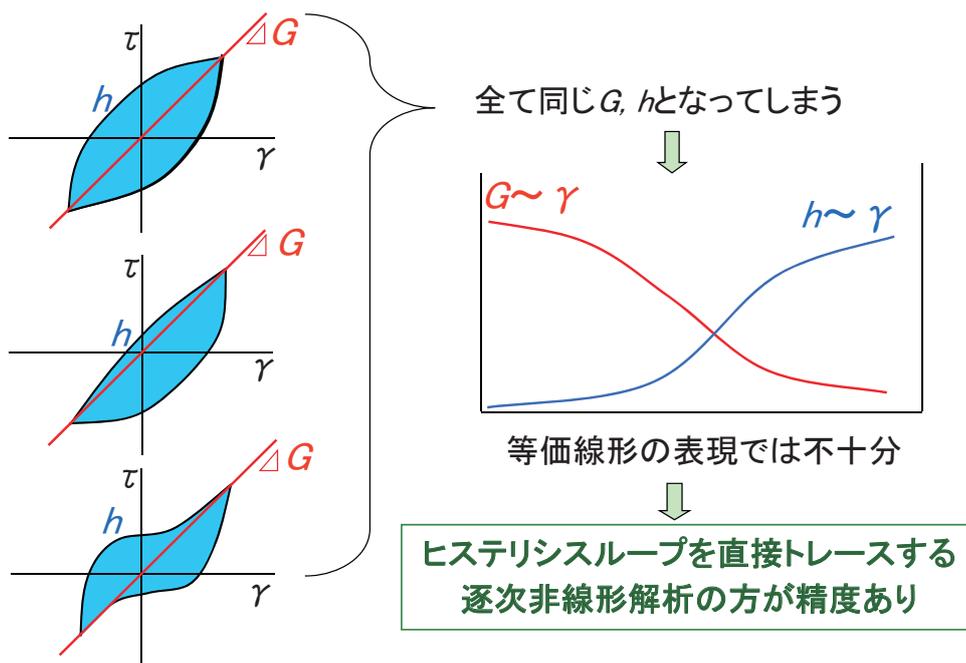
- 空間と時間との分離 → 理論的な扱いが易しい（理論解）  
入射波 $E$ と反射波 $F$ の分離が可能
- デコンボリューション: 地表の観測波から基盤入射波
- 増幅関数の補間

### ■短所

- 剛性の低下した「線形」→材料特性の急変時の挙動は捉えられない。(液状化も不可)
- 高周波数成分の減衰が大(短周期成分が消える)。改良も
- 系の固有周期付近で増幅が大

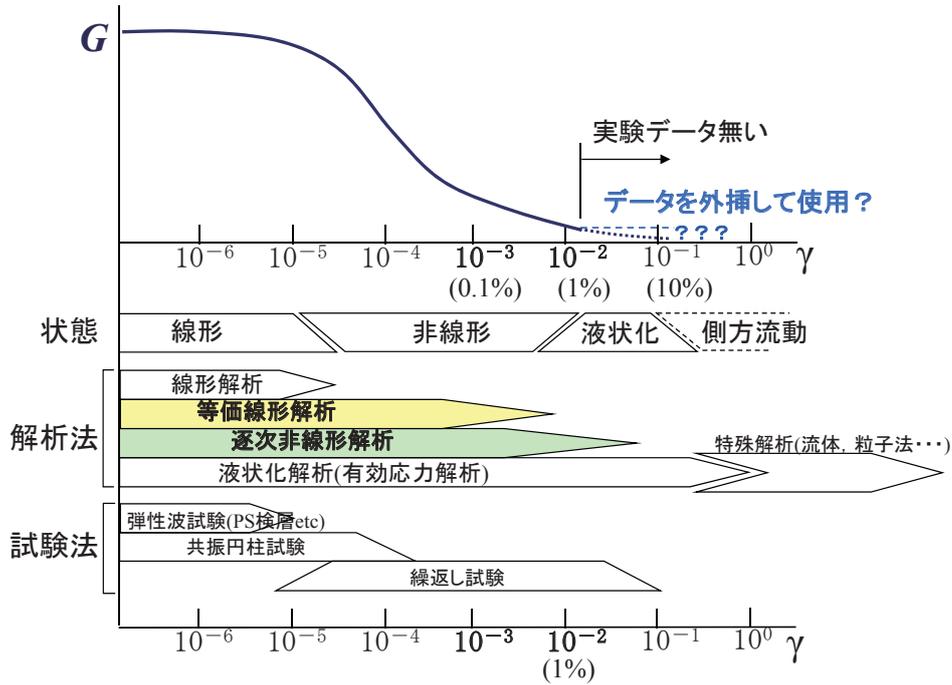
31

## $G \sim \gamma \cdot h \sim \gamma$ 関係のみで十分か



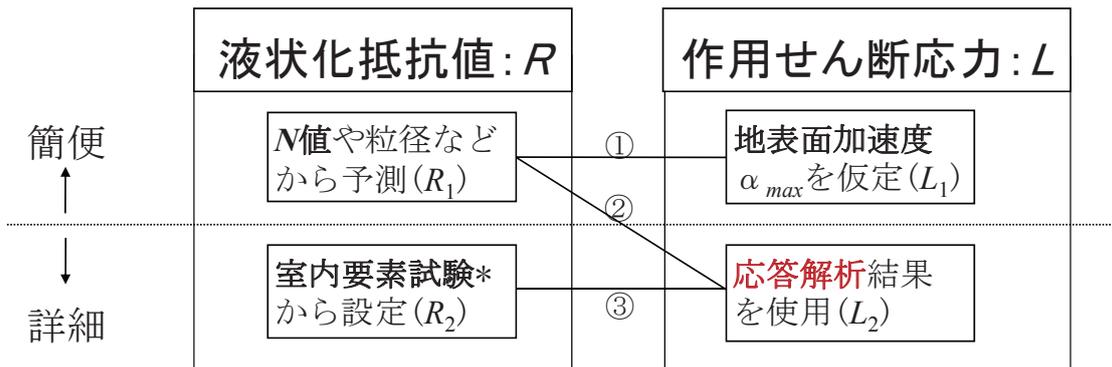
32

## G~γ関係と各解析法の適用範囲



33

## $F_L$ 値 (=R/L) の組合せ



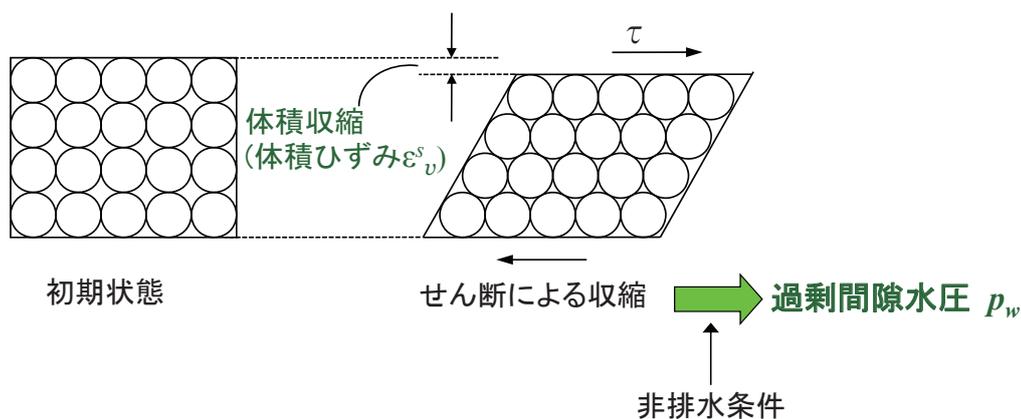
\*不攪乱試料でないと  
正確な $R_2$ は求められない

34

# 土に特有の もう一つの特徴 ダイレイタンスー (dilatancy)

35

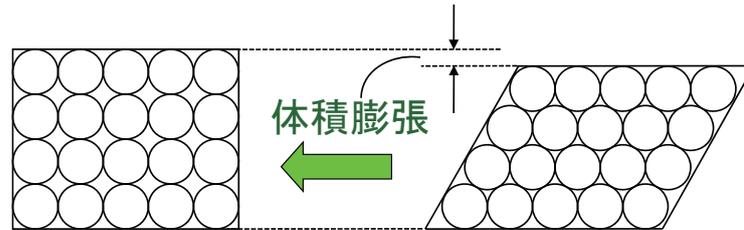
## せん断に伴う砂の体積変化 (負の)ダイレイタンスー



※乾燥砂の締固め(ダイレイタンスー)と  
飽和砂の液状化は表裏一体の関係

36

# ダイレイタンスー のビデオ



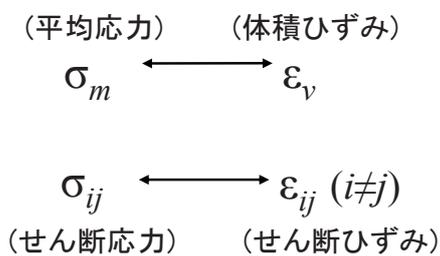
※豆知識

粉体の分野では「ダイラタンシー」  
片栗粉を混ぜた水の上を歩ける！

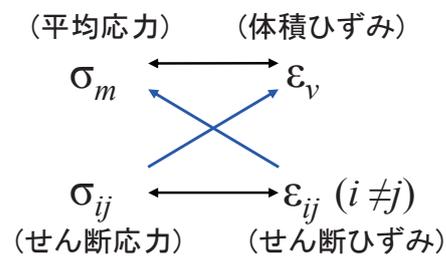
37

## 理想弾性体と粒状体の比較

(a) 理想弾性体



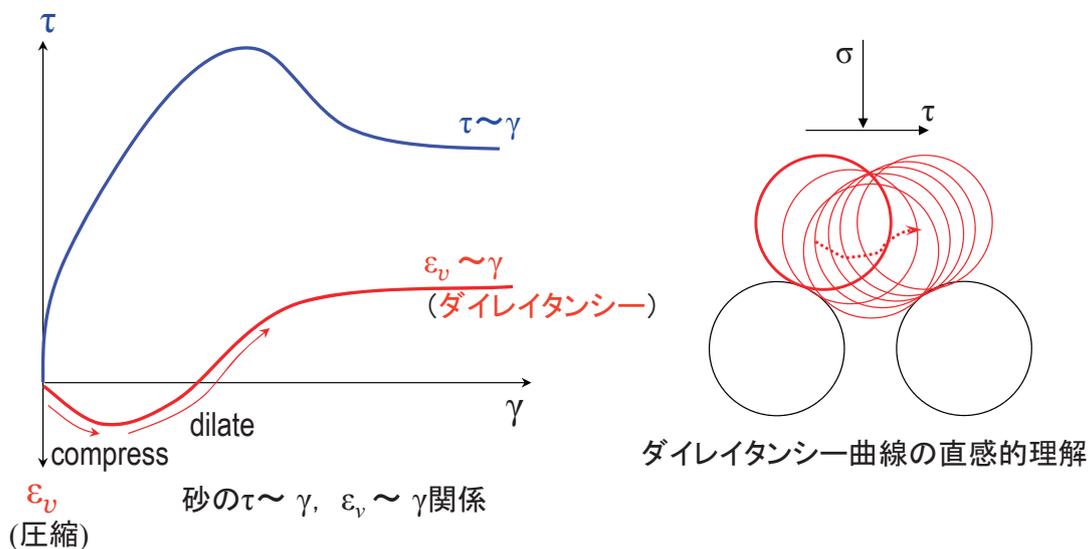
(b) ダイレイタンスー特性をもつ材料



[龍岡,1981]

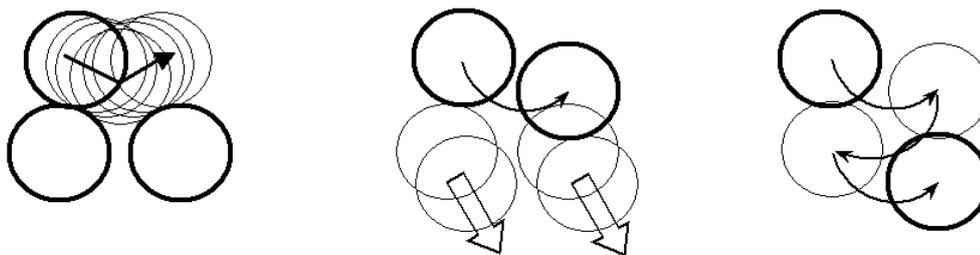
38

## 応力-ひずみ-ダイレイタンスー関係

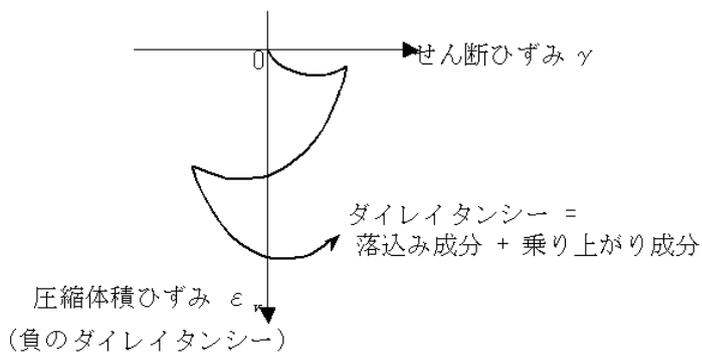


39

### 一つの粒子に着目した繰返しせん断における土粒子の動き

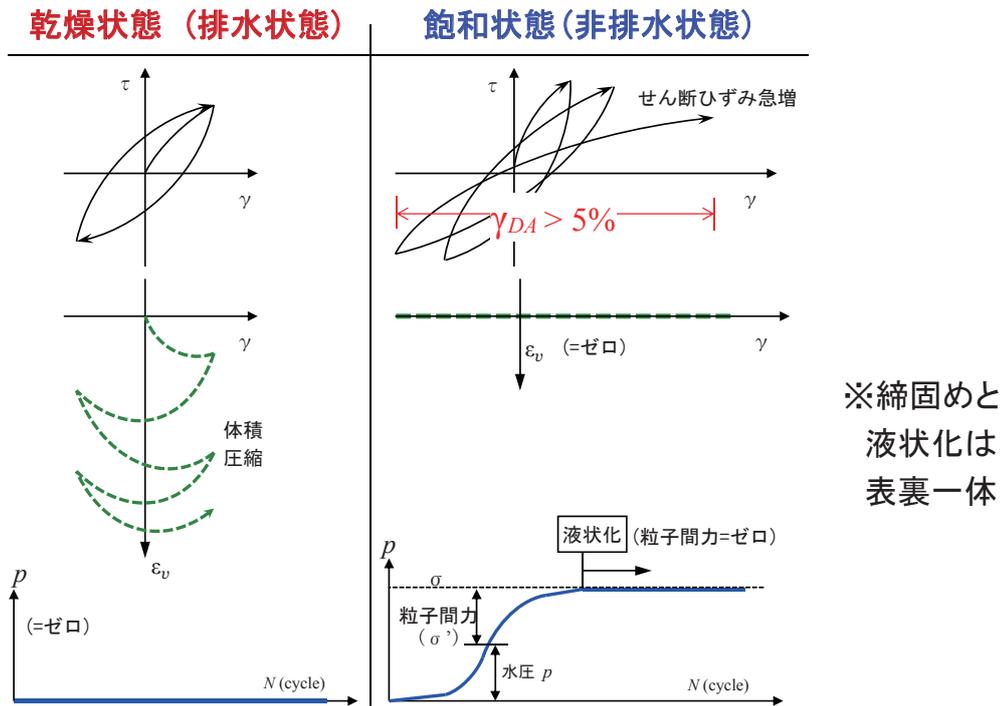


(a) 単調載荷(下二つの粒子は固定) (b) 単調載荷(下二つの粒子も変形) (c) 繰返し載荷



(d) せん断ひずみ～体積ひずみ関係で見たときの繰返しせん断におけるダイレイタンスー 40

## 繰返しせん断時における砂の挙動



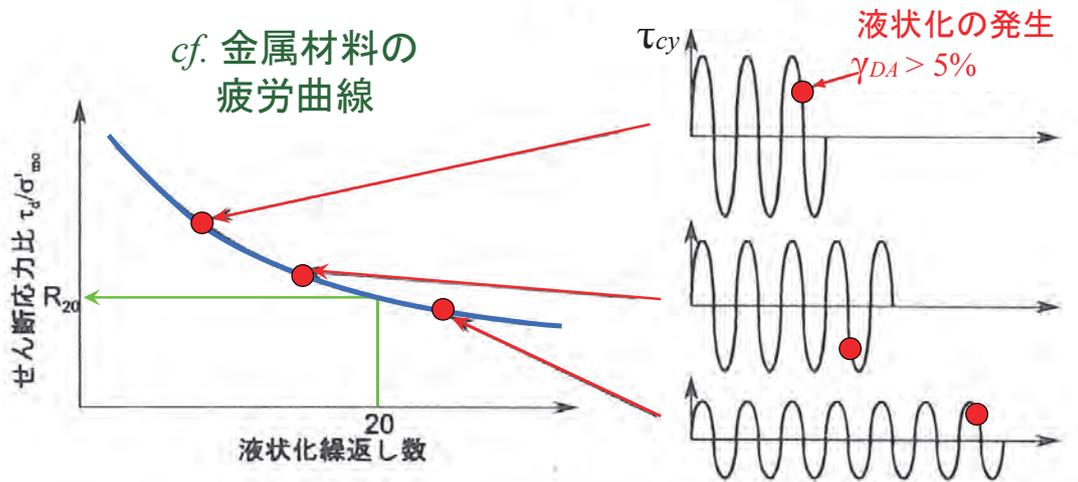
41

## 液状化試験と液状化強度

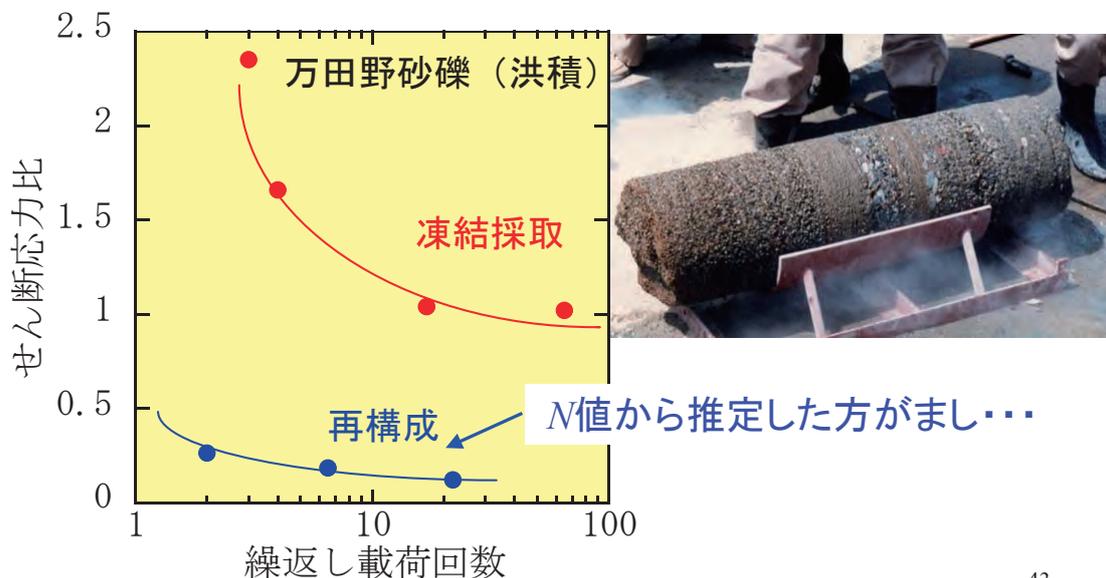
### 【液状化強度曲線】

せん断応力振幅 $\tau_{cy}$ を変えて次々に試験を行い、振幅と液状化に至ったときの繰返し回数をプロットした曲線

→液状化に対する地盤の抵抗力を評価



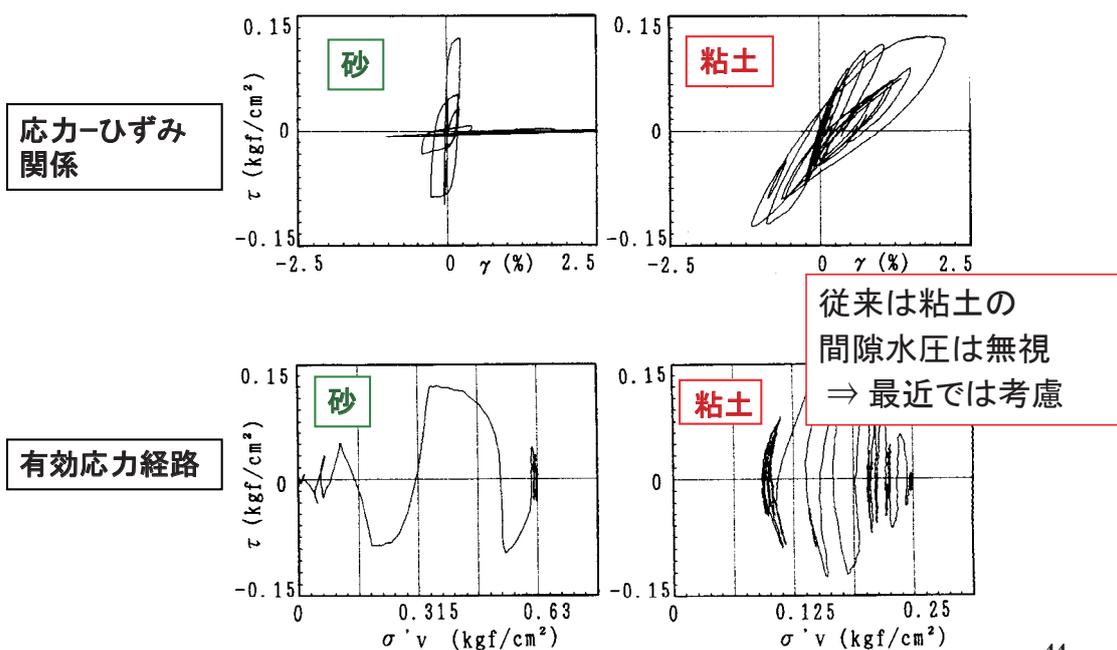
## 砂礫の液状化強度： 不攪乱試料と再構成試料



43

## 砂と粘土の比較 非排水繰返しせん断

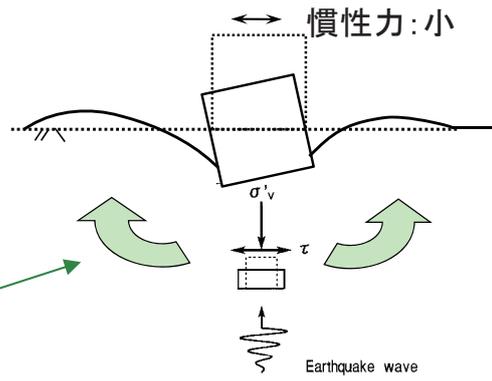
[日下部ほか,1995]



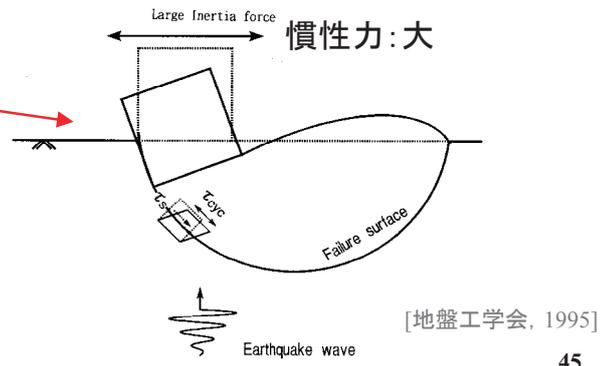
44

## 砂地盤と 粘土地盤の 破壊パターン

- 砂地盤
  - ・即時変形

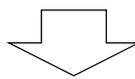


- 粘土地盤
  - ・滑り破壊
  - ・長期圧密沈下

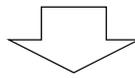


45

以上述べた土の動的性質をモデル化



運動方程式に組み込む

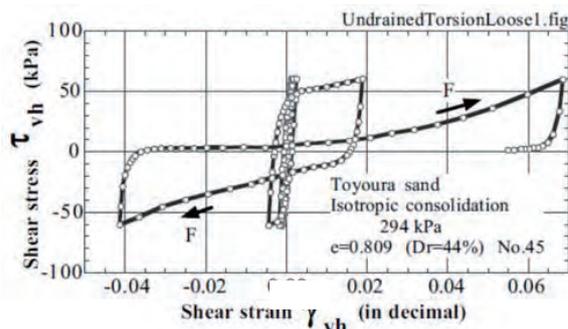


逐次非線形解析

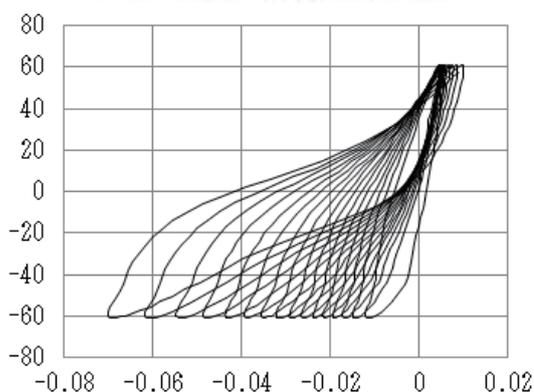
46

## 応力～ひずみ関係

緩い砂



粘土



数学的に  
モデル化  
(構成式)

47

## 土の動的非線形特性のモデル化

(土の構成式)

①等価な剛性と減衰定数を持つ線形モデルに置換	等価線形モデル
②基本的な性状を持つ要素の組合せによる物理的モデル	力学モデル
③応力ひずみ関係にある既知の関数とMasing則を用いて表現	履歴曲線タイプのモデル
④実験・経験式に基づき、土に特有なダイレタンシーを表現	ダイレタンシーモデル
⑤降伏関数や塑性ポテンシャルなどを用いて定式化	弾塑性理論モデル
⑥内部に蓄積される物理量に着目して定式化	Endochronic理論モデル
⑦土粒子の微視的メカニズムに着目して定式化	粒状体理論モデル

運動方程式に組込む  
(復元力特性)

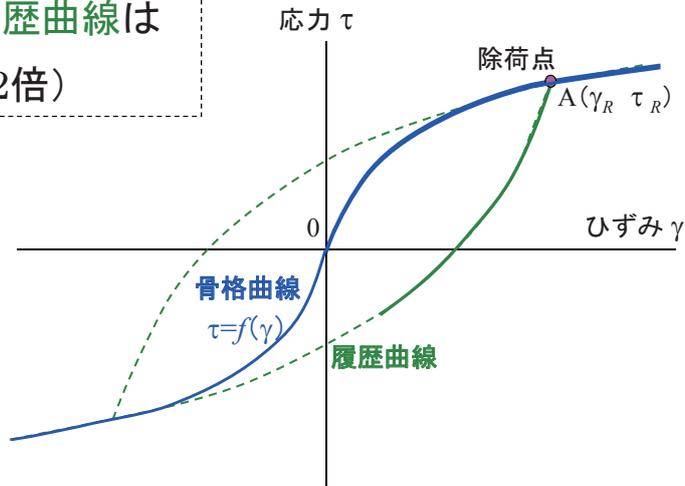
$$M\ddot{u} + C\dot{u} + f(u) = F(t)$$

解析結果は  
構成式とそのパラメータに大きく依存！

48

## τ~γのモデル化:メージング則

■骨格曲線と履歴曲線は相似形(通常2倍)

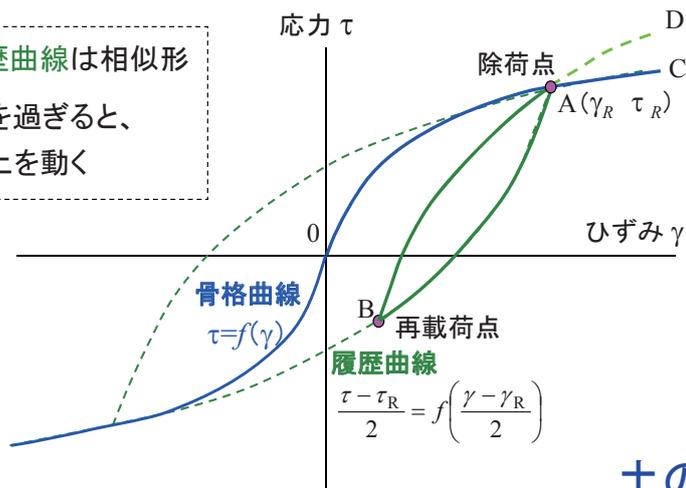


※履歴法則:メージング則(Masing rule)のデモンストレーション

49

## τ~γのモデル化:メージング則

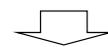
■骨格曲線と履歴曲線は相似形  
■以前の除荷点を過ぎると、以前の曲線状上を動く



※骨格曲線が

- ①双曲線 (修正H-Dモデル) ・ ・ ・  $G_0, \tau_f$
  - ②指数関数 R-0モデル ・ ・ ・  $G_0, \gamma_{0.5}, h_{max}$
- 有効応力の関数

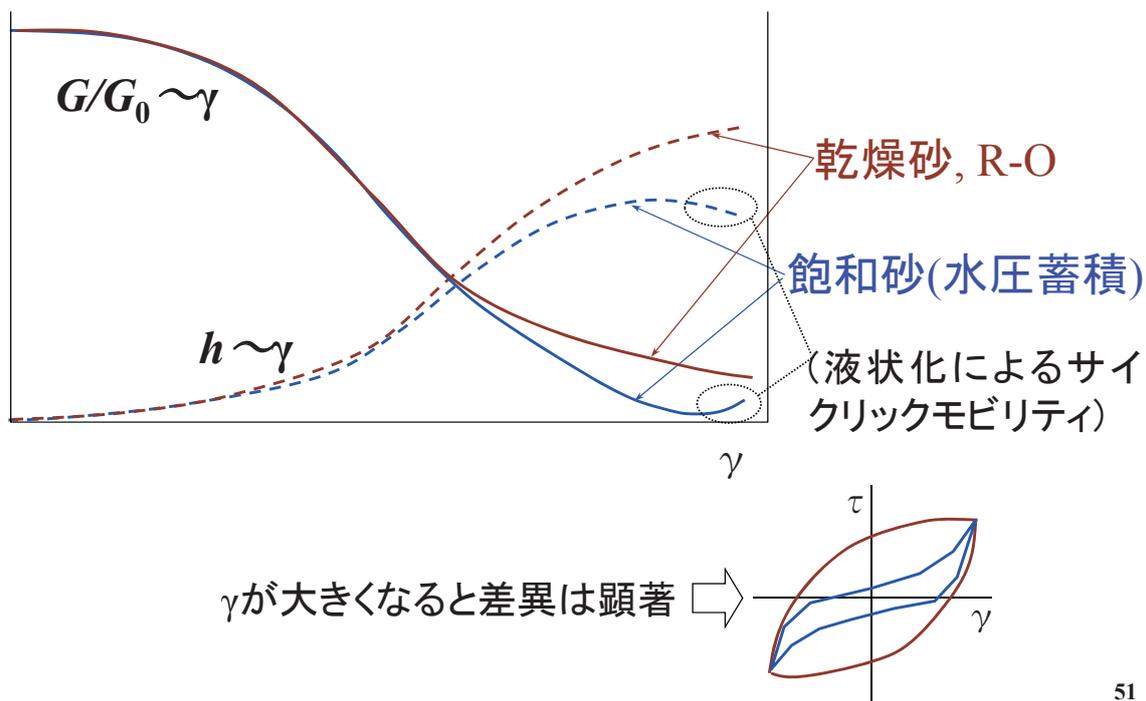
土の構成式



運動方程式に組込む  
(復元力特性)

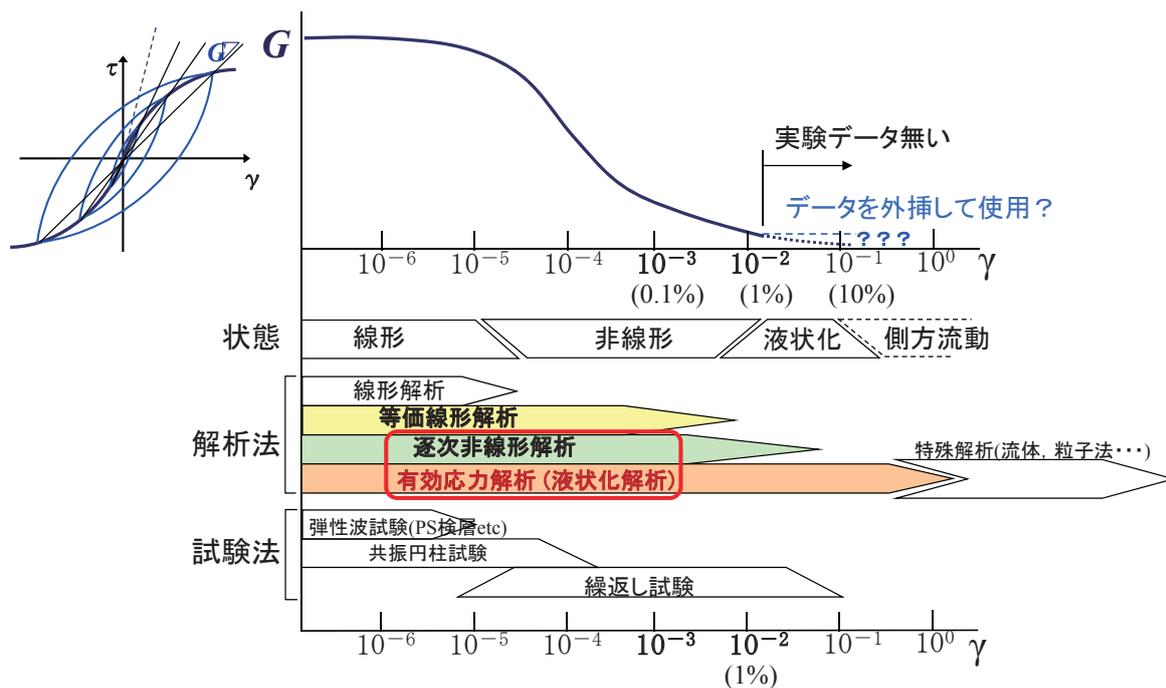
50

## 飽和砂と乾燥砂 (R-O) の差異



51

## 地盤の非線形レベル ( $G \sim \gamma$ 関係) と解析法の適用範囲



52

# 逐次非線形解析法

## ■運動方程式

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + f(u) = F(t) = -m\ddot{u}_g \quad u \rightarrow \Delta u$$

増分形

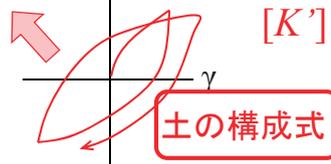
非線形複元力  $\tau$

$$[K']\{\Delta u\} + f_{i-1}$$

## ■空間

◎有限要素法

○差分法



## ■時間(差分)・・・時間領域でStep by Step

◎Newmark- $\beta$ , ○Wilson- $\theta$ , ○Runge-Kutta法

○中央差分

## ■増分法、反復法 → ヒステリシスを忠実にトレース

53

## 土の構成式の例

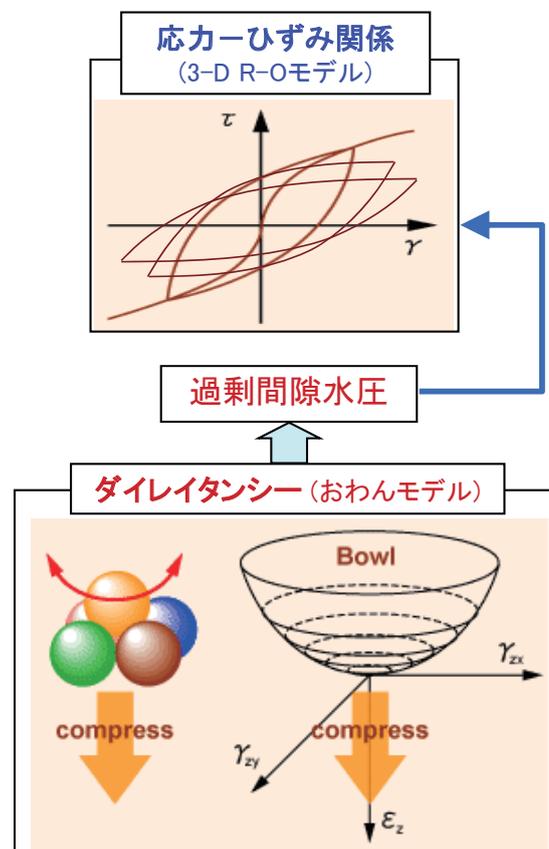
「非線形」と「過剰間隙水圧」が考慮できる



「液状化」を考慮できる解析へ・・・

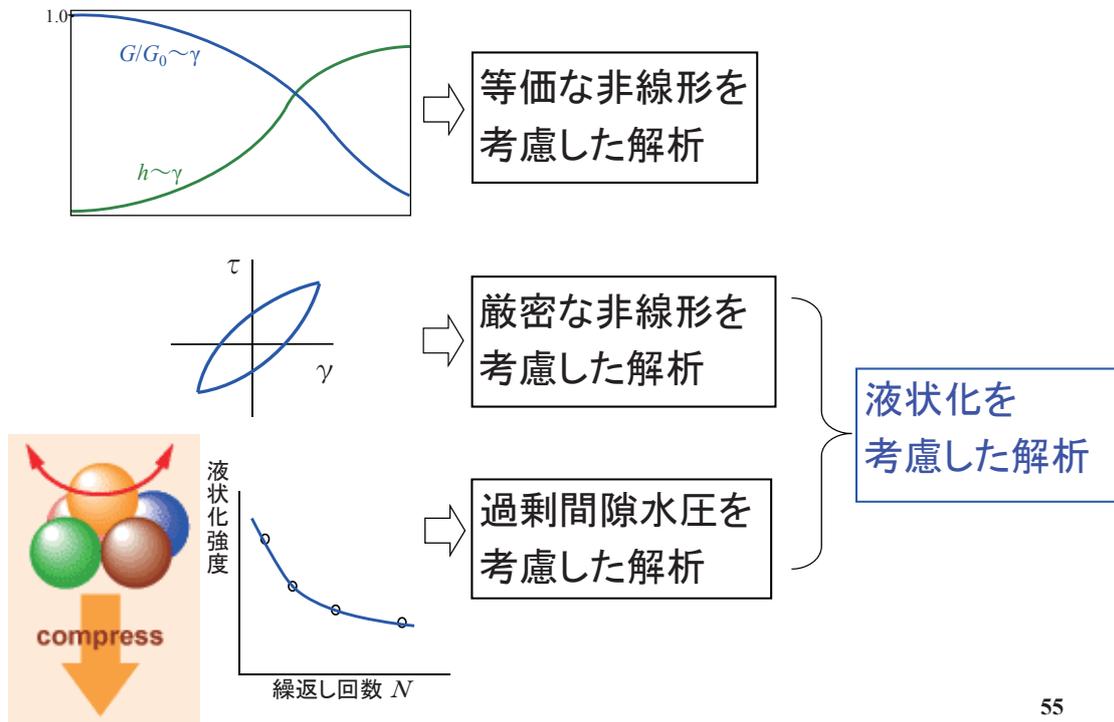


有効応力解析



54

## いろんな非線形解析ができる材料は揃った

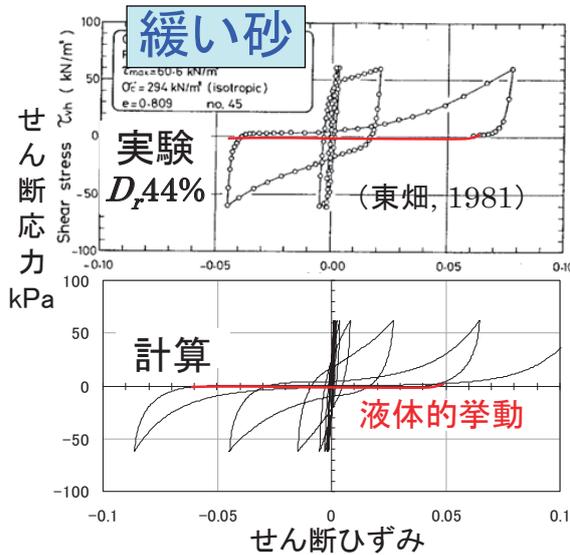


55

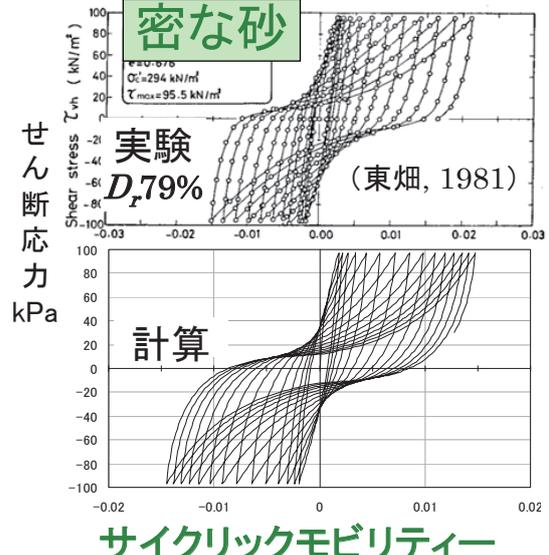
## 種々の土の応力～ひずみ関係の 特徴とシミュレーション

56

# 繰返し試験結果と 構成式によるシミュレーション

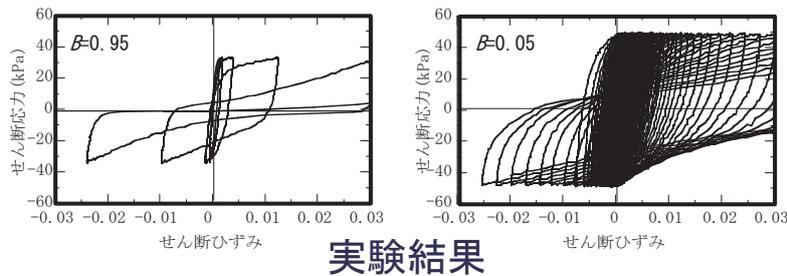
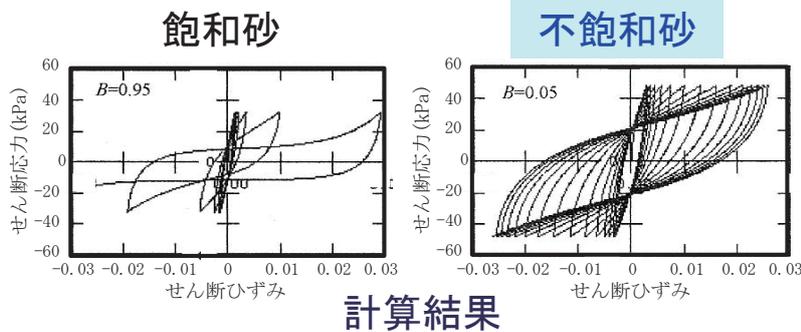


緩い砂は一気に液状化  
に至る



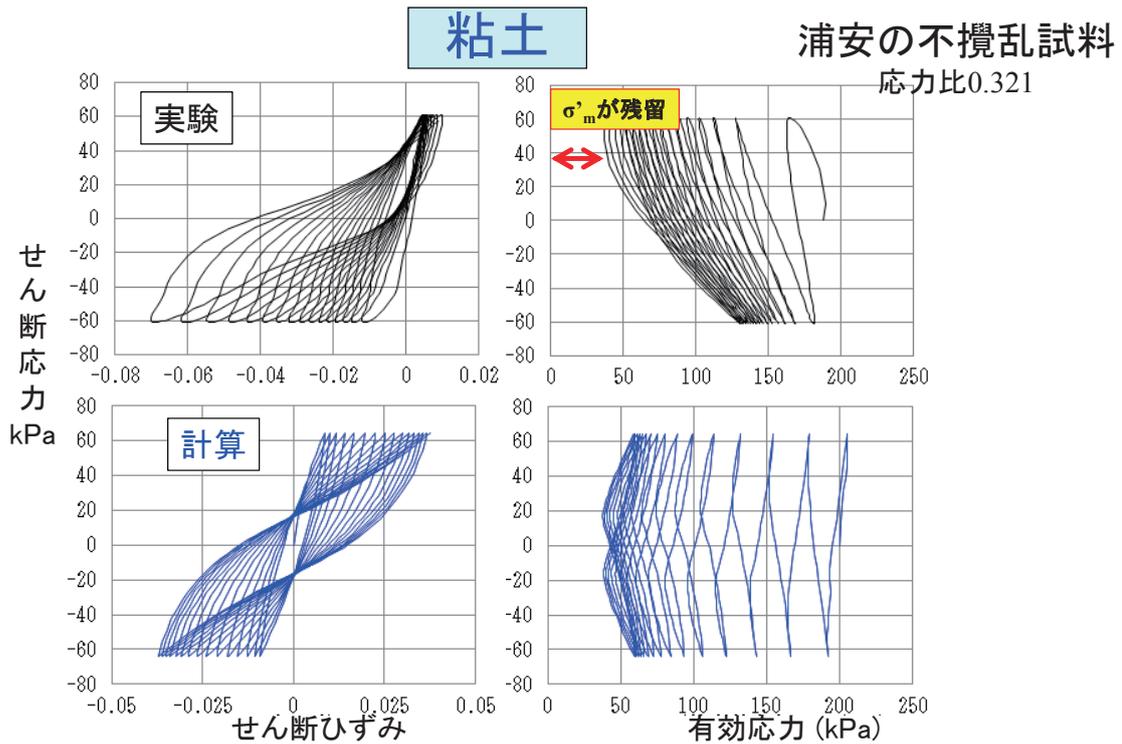
密な砂は”ねばり強さ”があり  
液状化しにくい

57



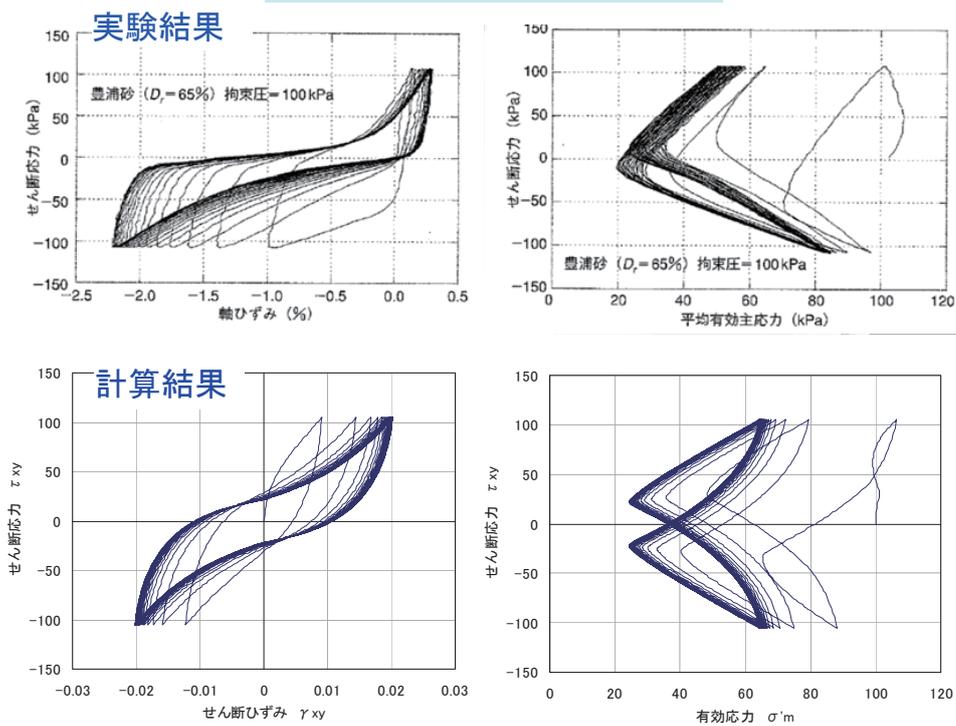
不飽和砂は液状化しにくい

58



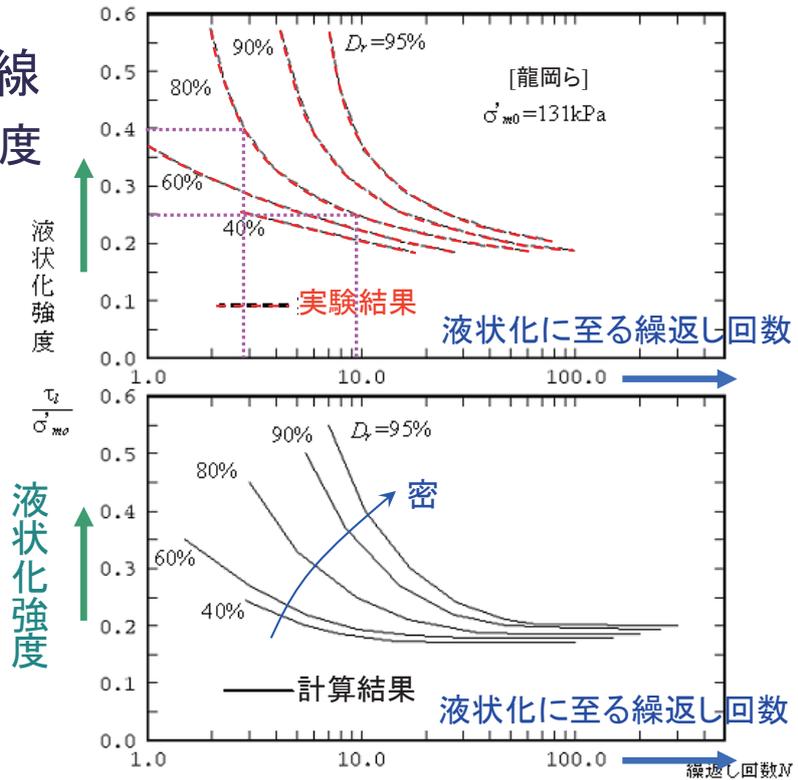
- ・ひずみは徐々に増加(軟化はする)
- ・有効応力はゼロにならない(液状化はしない)

**薬液注入改良体**

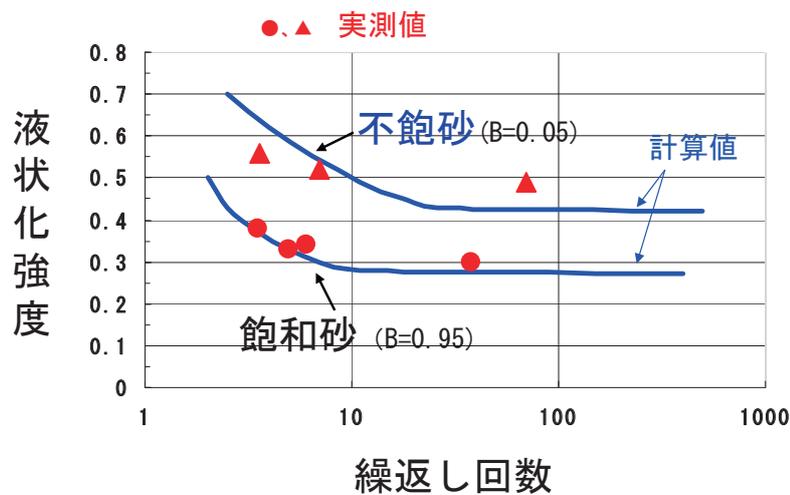


## 砂の 液状化強度曲線 (非排水繰返し強度 ～繰返し回数)

cf. 金属材料の  
疲労曲線

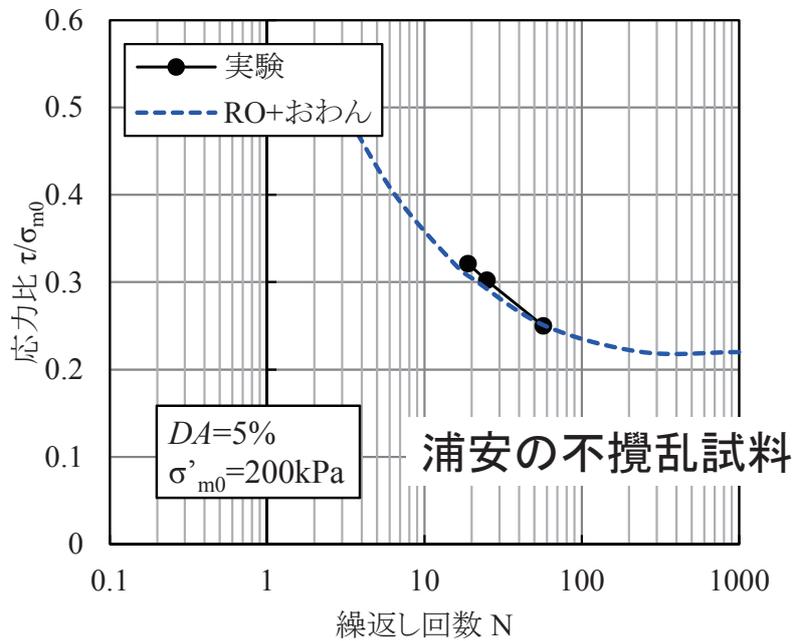


## 飽和砂と不飽和砂の液状化強度曲線 (豊浦砂、 $D_r=70\%$ )



### 粘土の(液状化)強度曲線

→ 軟化曲線と言うべき



63

## ③ 動的解析手法

(特に有効応力解析)

64

# 地盤の地震応答解析

## ■線形解析

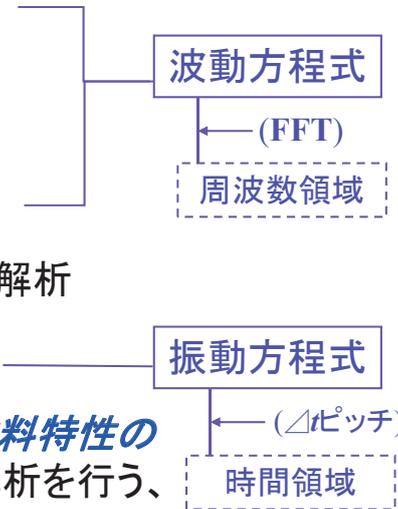
- ひずみの小さい場合には使えるが、実用的にはほとんど使われない

## ■等価線形解析

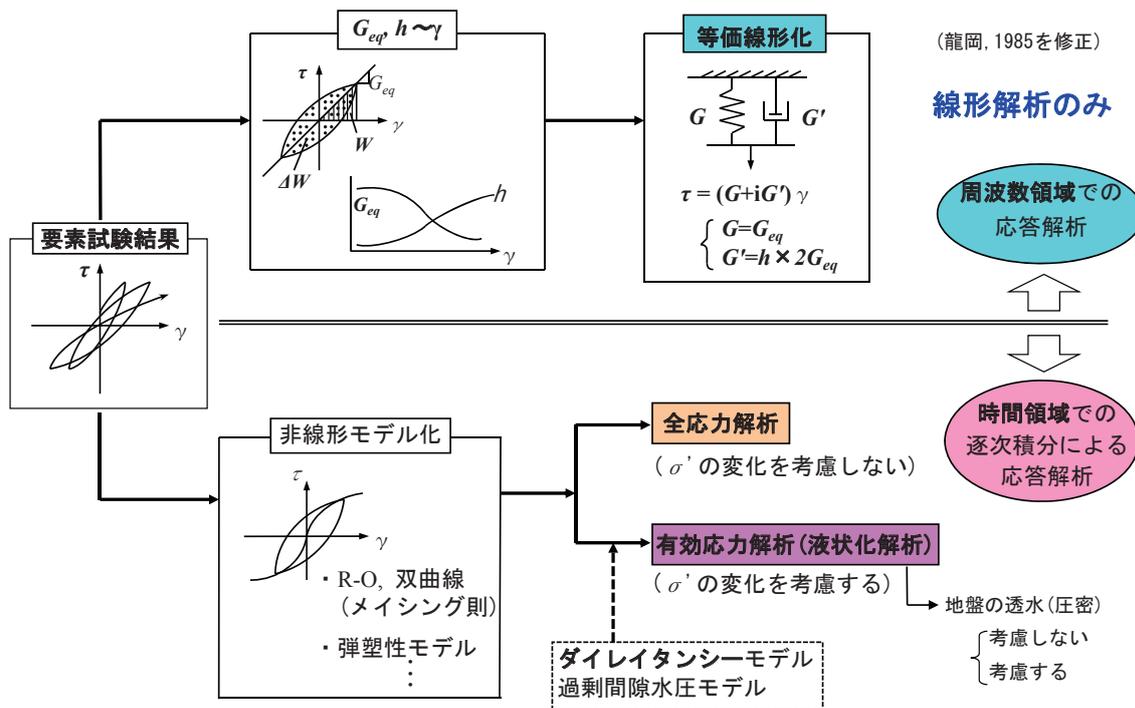
- 材料の非線形性を近似した線形解析

## ■逐次非線形解析

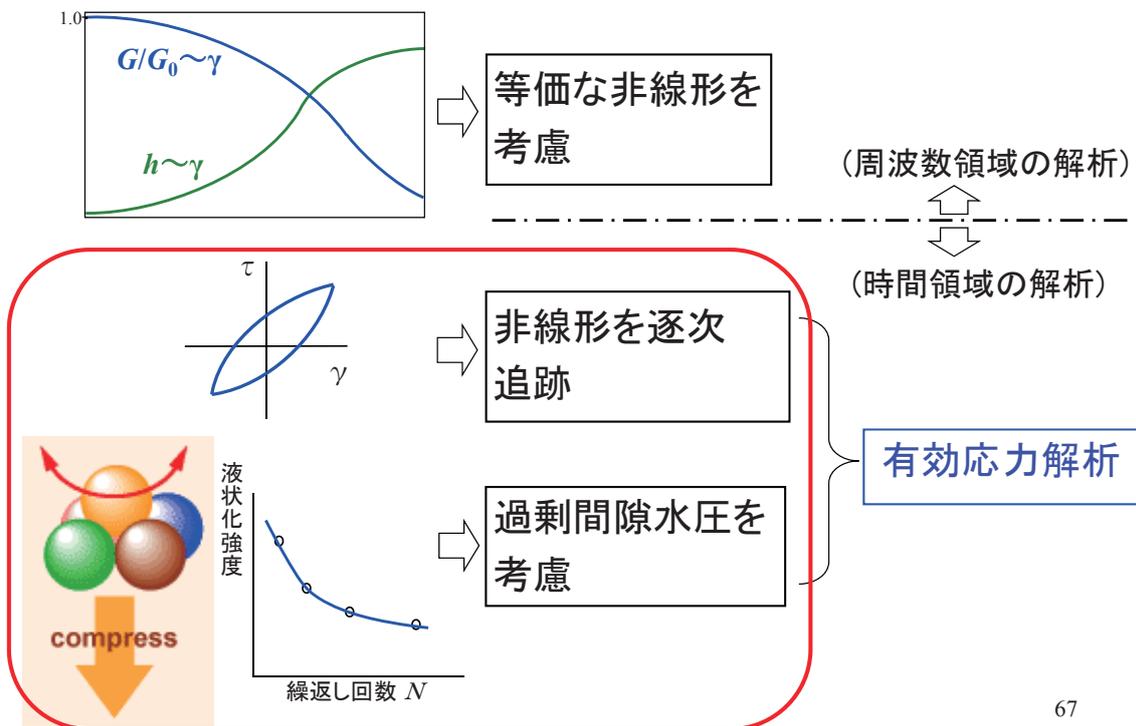
- ひずみや有効応力に依存した材料特性の変化を時々刻々追跡しながら解析を行う、理論的に最も厳密な方法



## 土の応力-ひずみ関係のモデル化と地震応答解析手法

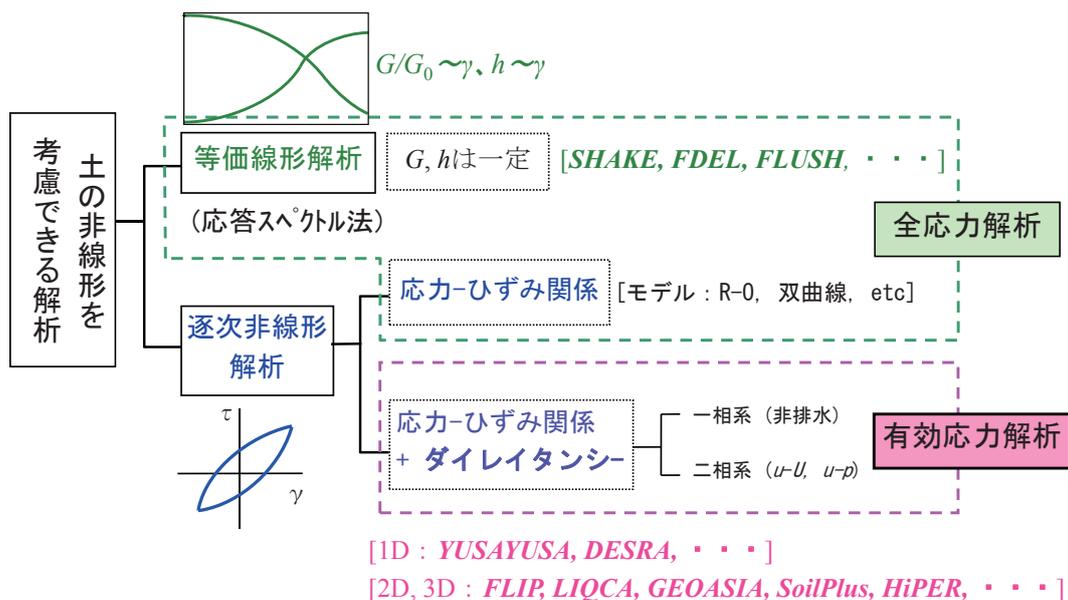


## 種々の非線形解析



67

## 非線形解析の分類 (解析手法の観点から)



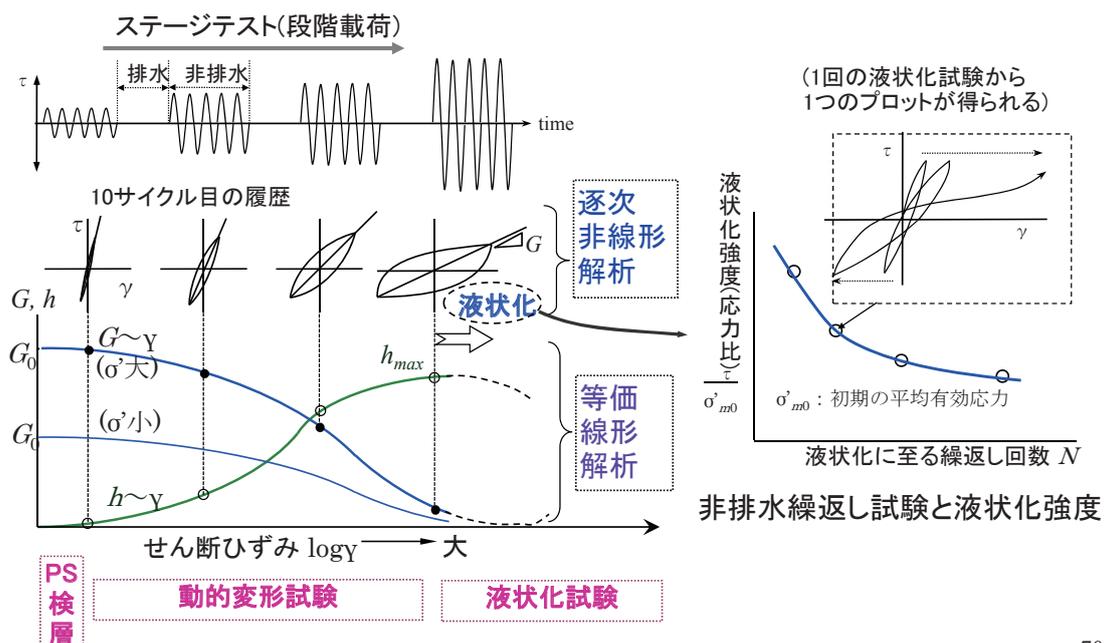
68

# 地盤の計算法と土質調査

解析手法		ひずみ	主な地盤データ	試験, 調査
線形		~10 <sup>-5</sup>	土質 工学的基盤 せん断波速度 密度	ボーリング 標準貫入試験 PS検層 物理試験、粒度他
等価線形		~1%	$G$ と $h$ の $\gamma$ 依存  $(G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma)$	動的変形試験
逐次 非線形	全応力解析	~10%		
	有効応力解析	~100%	液状化強度	液状化試験

69

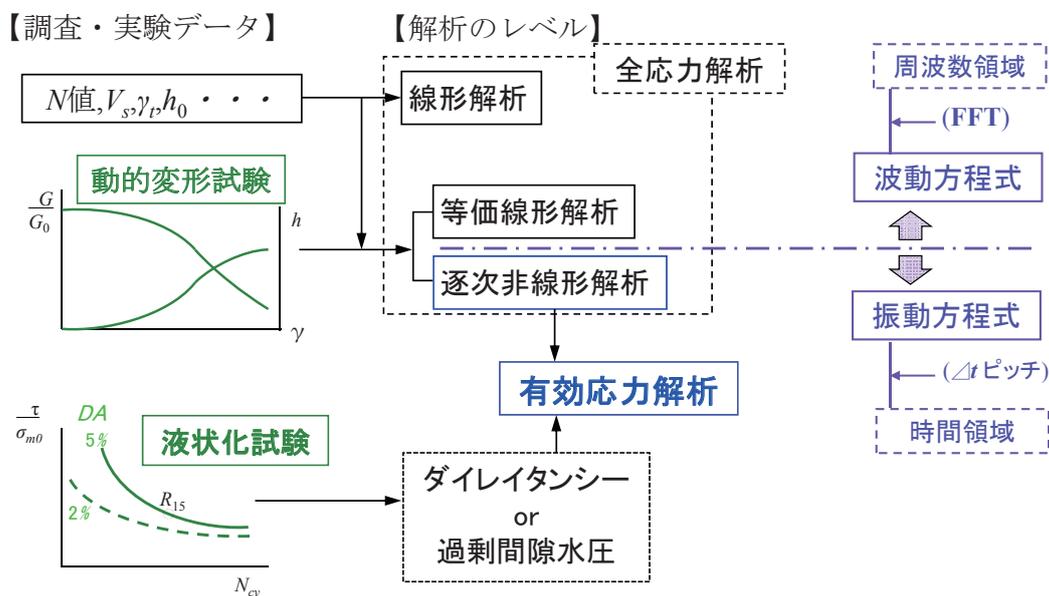
## 動的変形試験から液状化試験まで (非線形特性と液状化特性)



70

## 土質試験と解析手法のまとめ

通常の要素試験結果から設定



71

## 有効応力解析

- 「土全体」と「間隙水(液相)」について運動方程式を解く
- 土粒子骨格の非線形性 (構成式)
- **ダイレイタンスー**(過剰間隙水圧)を評価  
→液状化現象:

間隙水圧上昇やそれに伴う土骨格の  
応力・ひずみ履歴関係の軟化現象

72

## 有効応力解析 (基礎式)

- ① 有効応力の定義式:  $\{\sigma'\} = \{\sigma\} - \rho_w \{m\}$   
( $\{m\} = \{1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T$ : クロネッカーの $\delta$ に対応)
- ② 土骨格の構成方程式:  $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$
- ③ ひずみ・変位式:  $\{\varepsilon\} = [L]\{u\}$  ( $[L]$ : 微分オペレータ)
- ④ 2相系全体の釣合い式:
- ⑤ 水の釣合い式: (Darcy則 + 土と水の相互作用の式 + 慣性力)
- ⑥ 連続の式:  
(土要素の体積ひずみ = 水の出入りによるひずみ  
+ 水圧変化によるひずみ)

→ 基礎式(二相系の式)の種々の近似化

73

## 液状化解析に必要な基礎式

- (1) 有効応力の定義式  
 $\{\sigma'\} = \{\sigma\} - \{m\}p$
- (2) 土骨格の構成式  
 $\{d\sigma'\} = [D]\{d\varepsilon\}$
- (3) ひずみ—変位関係式  
 $\{\varepsilon\} = -[L]\{u\}$
- (4) 全体の釣合式  
 $[L]^T \{\sigma\} - \rho\{b\} + \rho\{\ddot{u}\} + \rho_f \{\ddot{w}\} = \{0\}$
- (5) 水の釣合式  
 $\{\nabla\}p + \rho_f g[k]^{-1} \{\dot{w}\} + \rho_f \{\ddot{u}\} + \frac{\rho_f}{n} \{\ddot{w}\} - \rho_f \{b\} = \{0\}$
- (6) 連続の式  
 $\{m\}^T \{\dot{\varepsilon}\} = \{\nabla\}^T \{\dot{w}\} + \frac{n}{k_w} \dot{p}$

74

$$\{d\sigma\} = \begin{Bmatrix} d\sigma_x \\ d\sigma_y \\ d\sigma_z \\ d\tau_{xy} \\ d\tau_{yz} \\ d\tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad \{d\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} d\varepsilon_x \\ d\varepsilon_y \\ d\varepsilon_z \\ d\gamma_{xy} \\ d\gamma_{yz} \\ d\gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad \delta_{ij} \sim \{m\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\{\nabla\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}; \text{ナブラ} \quad [L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

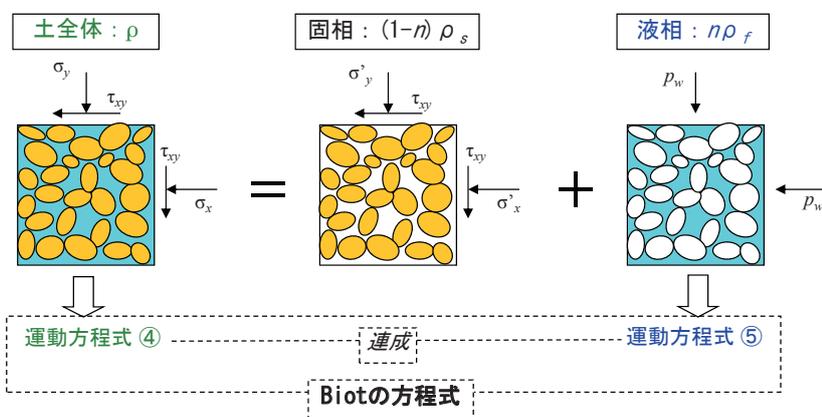
$\{\nabla\}^T \cdot \{\nabla\} = \Delta$ ; ラプラシアン  
 $[L]^T \{m\} = \{\nabla\}$

## 有効応力解析

飽和した土の全応力と有効応力の関係および

土全体の釣合い式④と 液相の釣合い式⑤

$\rho$ : 土全体の質量  
 $\rho_s$ : 土粒子の質量  
 $\rho_f$ : 水の質量  
 $n$ : 間隙率=空隙の体積/全体の体積



# 運動方程式

- 全応力解析 (一相系)

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -\ddot{u}_0 [M]\{1\}$$

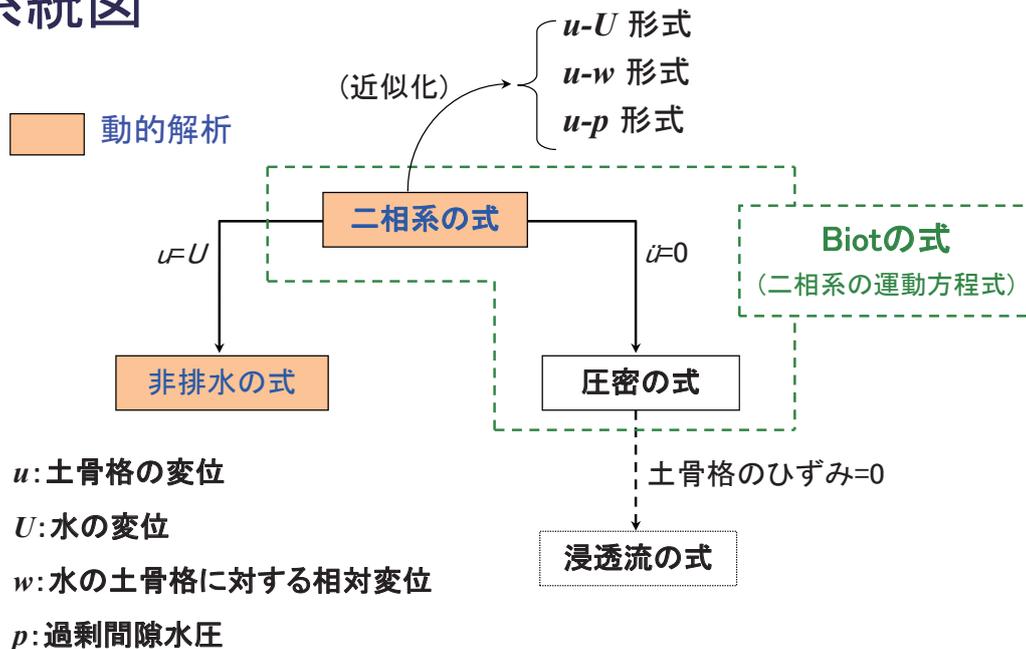
- 有効応力解析 (二相系)  $u$ : 土骨格の変位  
 $U$ : 水の変位

$$\begin{bmatrix} [M^u] & [0] \\ [0] & [M^U] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{U}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C^{uu}] & -[C^{uU}] \\ -[C^{uU}]^T & [C^{UU}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{U}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K + K^{uu}] & -[K^{uU}] \\ [K^{uU}]^T & -[K^{UU}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{U\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F^u\} \\ \{F^U\} \end{Bmatrix}$$

固相  
 液相  
 連成

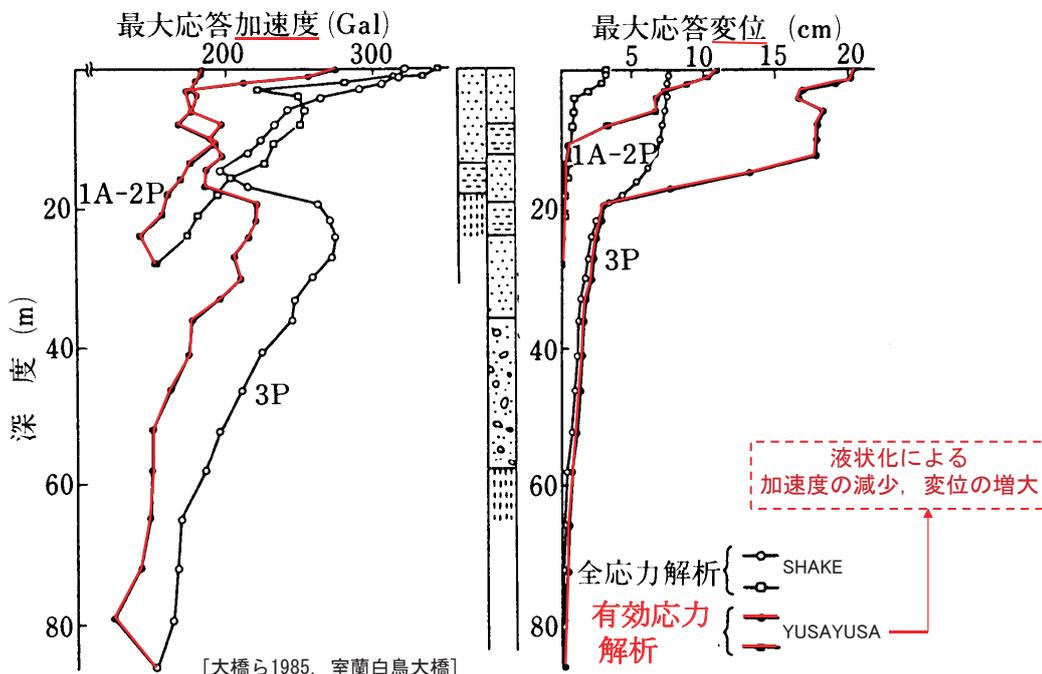
77

## 有効応力法における支配方程式の系統図

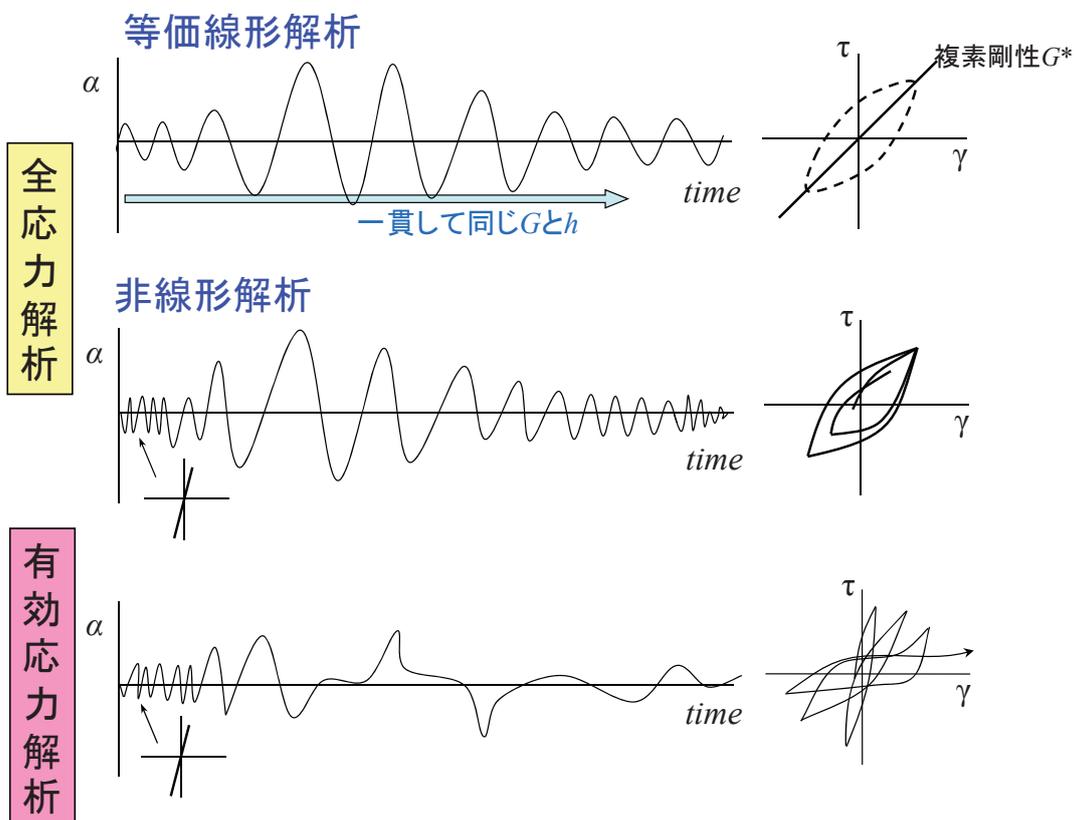


78

### 全応力解析(等価線形解析) & 有効応力解析(YUSAYUSA)による 最大応答値の比較



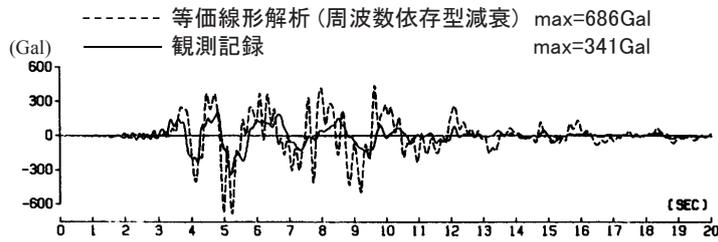
79



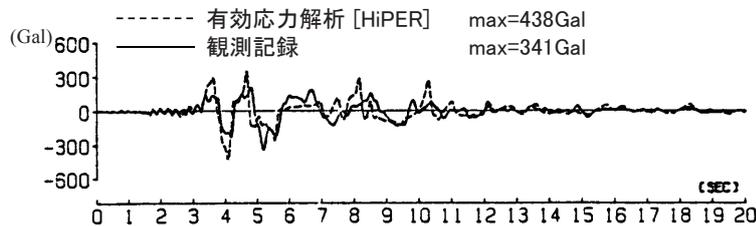
80

## 兵庫県南部地震における神戸ポートアイランドの地表 加速度時刻歴(NS成分)の比較

[川瀬ら, 1995]



(a) 等価線形解析(周波数依存型減衰)と観測記録の比較

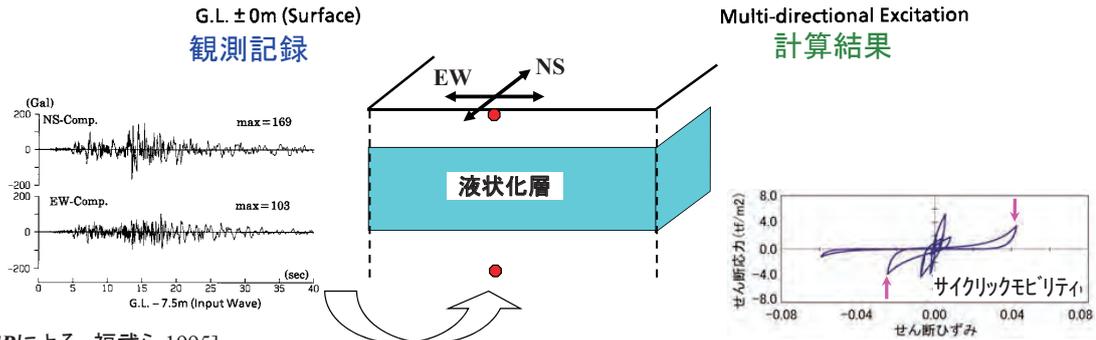
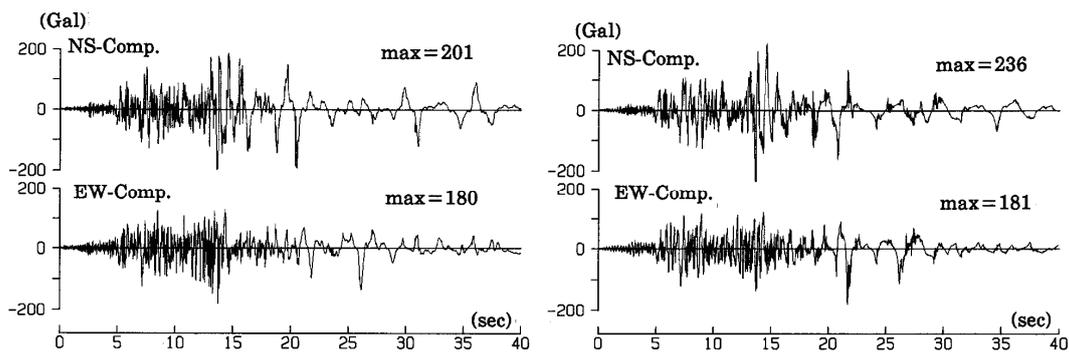


(b) 有効応力解析(R-O+おわんモデル)と観測記録の比較

81

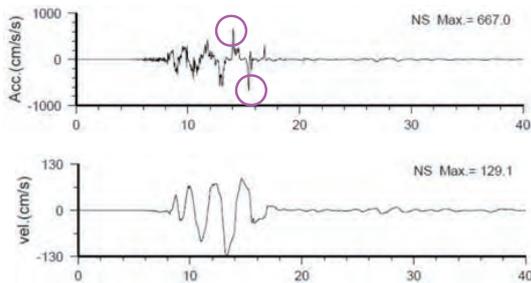
## 地震のアレー観測記録との比較

- ・ 液状化地盤の加速度記録 (2方向同時入力)

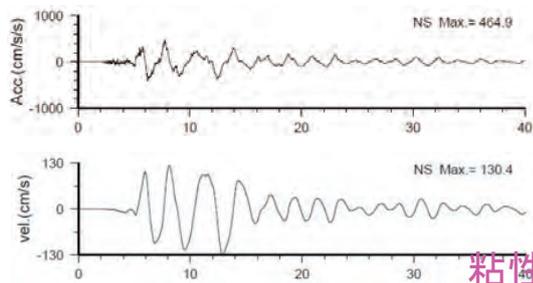


[HiPERによる. 福武ら,1995]

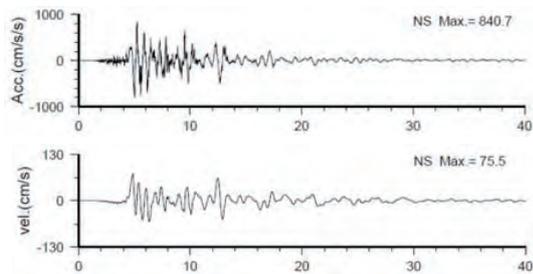
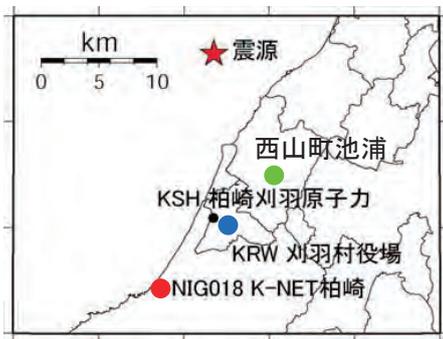
## 震源近傍の観測波形



● K-NET柏崎(NIG018) 砂質土



● 刈羽村役場(KRW) 粘性土 軟弱



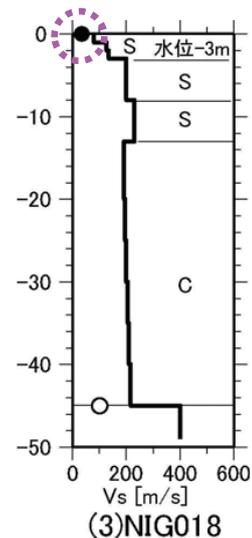
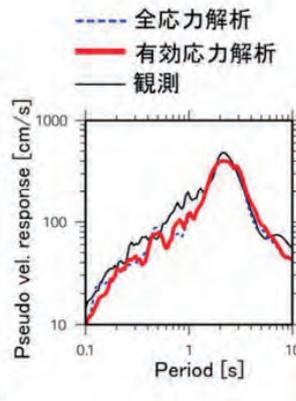
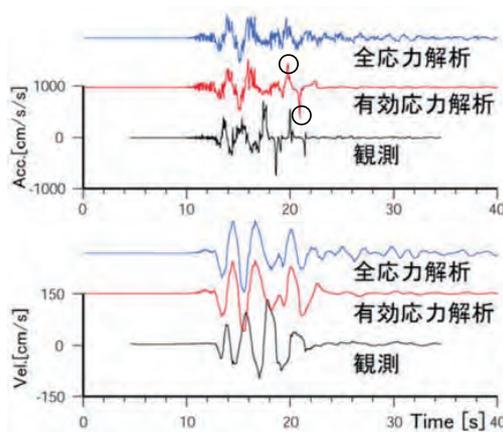
● 西山町池浦 硬い

#83

## NIG018の応答解析

NIG018

- ・有効応力解析 (+ 逐次非線形解析)
- ・基盤波の振幅0.8倍(震源距離を考慮)

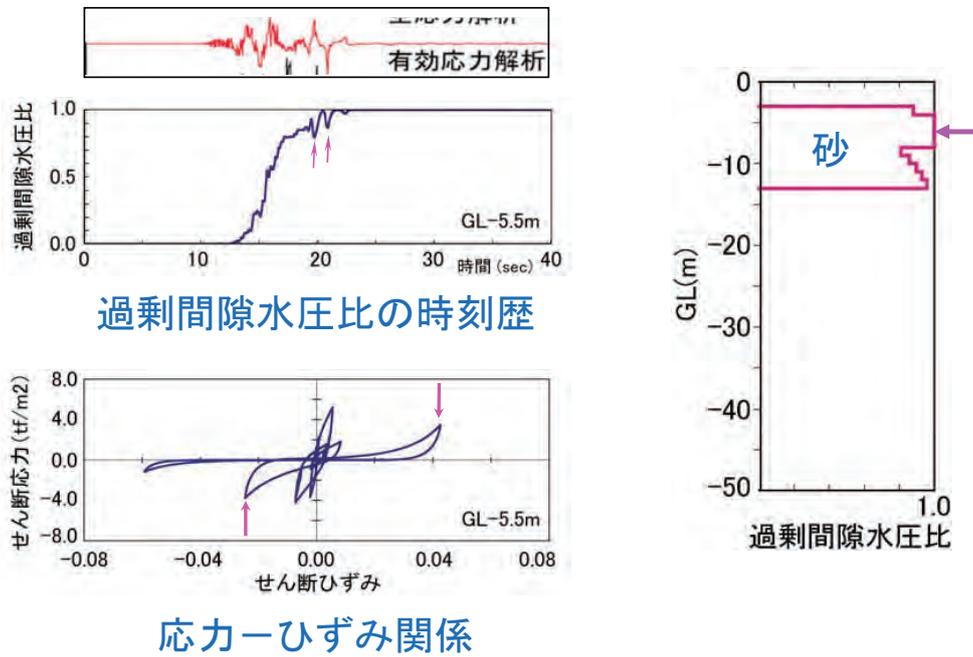


(3)NIG018

## 地表波形と応答スペクトル

#84

## 過剰間隙水圧, 応力-ひずみ関係 NIG018



#85

### 参考文献

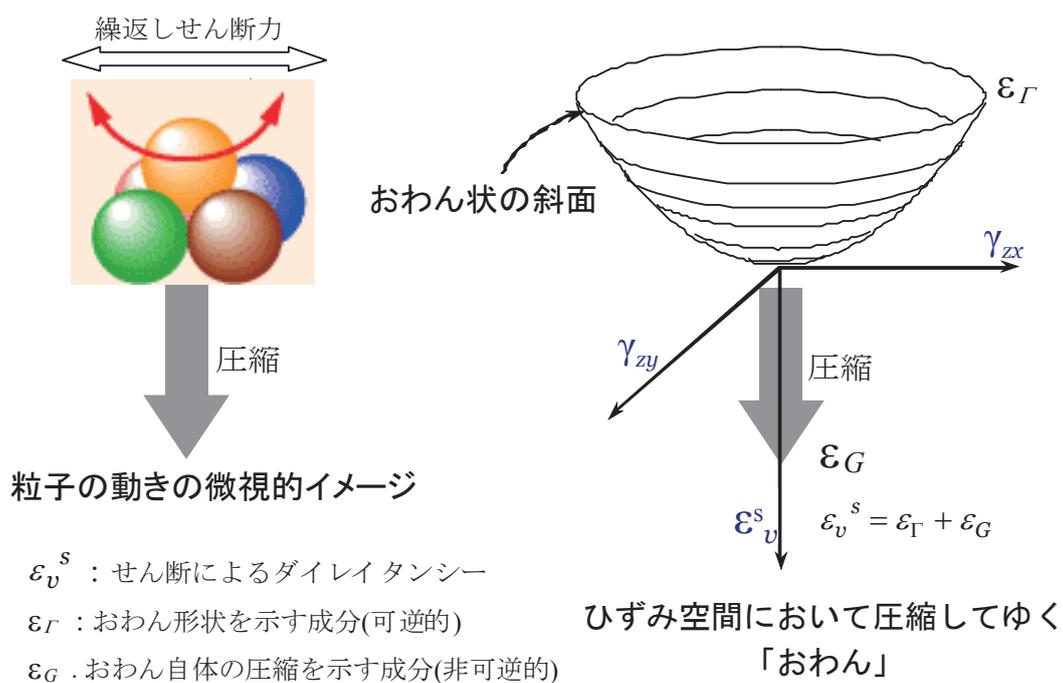
- 1) 吉見吉昭・福武毅芳:「地盤液状化の物理と評価・対策技術」,  
技報堂出版 (2005年11月)
- 2) 建築・土木 基礎の耐震設計と解析例, 総合土木研  
究所 (2008年10月)
- 3) 東畑郁生: Geotechnical Earthquake Engineering, Springer,  
2008

## 補足: おわんモデル

- Soil Plus, HiPERに実装
- FLIPのカクテルグラスモデルも基本は同じ

87

### 粒子の動きとダイレイタンスの直感的理解



$\epsilon_v^s$  : せん断によるダイレイタンス

$\epsilon_\Gamma$  : おわん形状を示す成分(可逆的)

$\epsilon_G$  : おわん自体の圧縮を示す成分(非可逆的)

(福武ら, 1984)

88

## ダイレイタンスー $\varepsilon_v^s$ の 膨張成分 $\varepsilon_\Gamma$ と圧縮成分 $\varepsilon_G$ への分離

$$\varepsilon_v^s = \varepsilon_\Gamma + \varepsilon_G$$

89

### Dilatancy $\varepsilon_v^s$ based on *Bowl model*

Dilatancy  $\varepsilon_v^s$

= Dilatation component (cyclic positive dilatancy)

+ Compression component (monotonic negative dilatancy)

$$\begin{aligned}\varepsilon_v^s &= \varepsilon_\Gamma + \varepsilon_G \\ &= A \cdot \Gamma^B + \frac{G^*}{C + D \cdot G^*}\end{aligned}$$

合せん断ひずみ ……粒子の乗り上がり

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

累加合せん断ひずみ ……粒子構造の圧縮

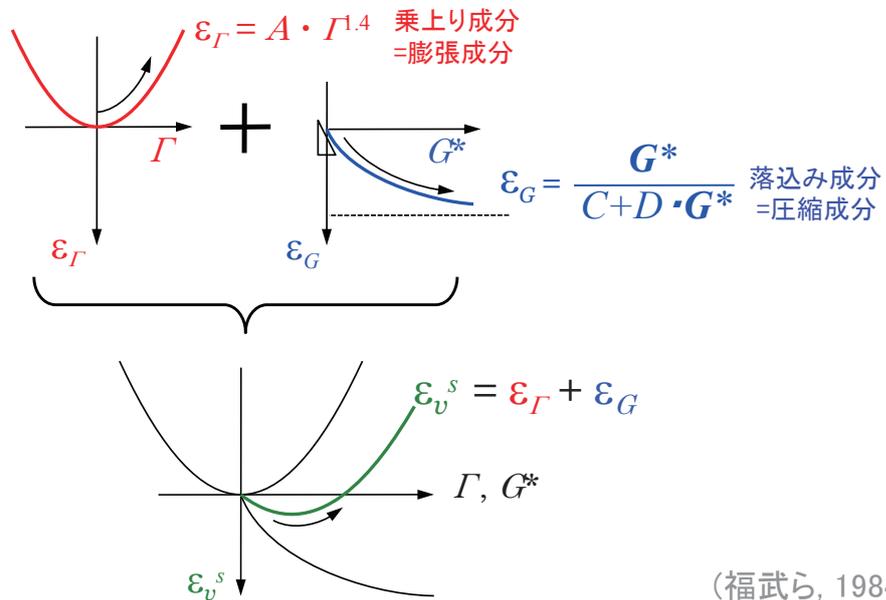
$$G^* = \sum \sqrt{\Delta\gamma_{zx}^2 + \Delta\gamma_{zy}^2 + \Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \Delta(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \Delta(\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

(福武ら, 1984;  
1989)

90

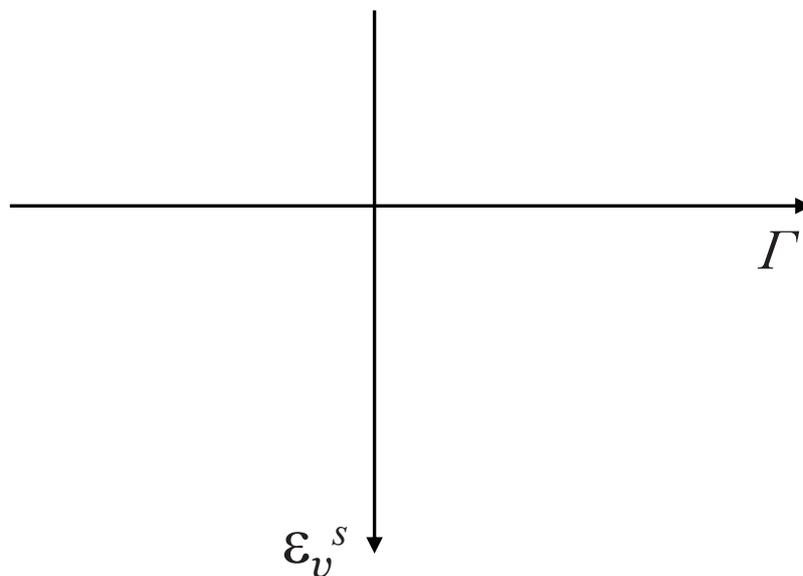
## 単調載荷の場合の重ね合わせ法則:

$$\varepsilon_v^s = \varepsilon_\Gamma + \varepsilon_G$$



(福武ら, 1984;  
1989)

## デモンストレーション

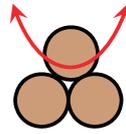


# 密度や粒子構造の違いによる ダイレイタンスの差異

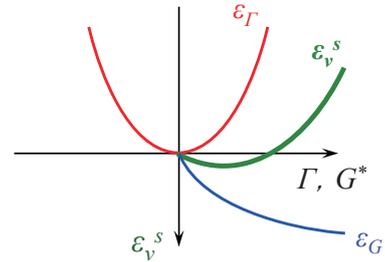
dense sand and gravel



膨張成分:  $\varepsilon_r$  大  
圧縮成分:  $\varepsilon_G$  小



Particle fabric

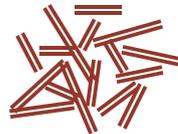


(a) dense soil

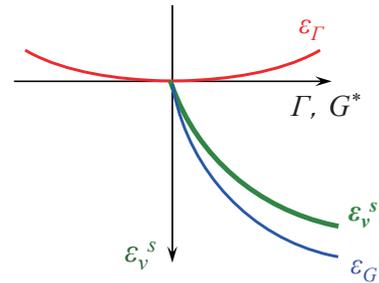
loose sand and clay



膨張成分:  $\varepsilon_r$  小  
圧縮成分:  $\varepsilon_G$  大



Card house fabric

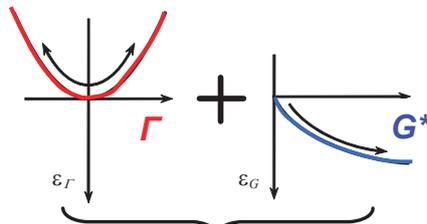


(b) loose soil

(福武, 1997)

93

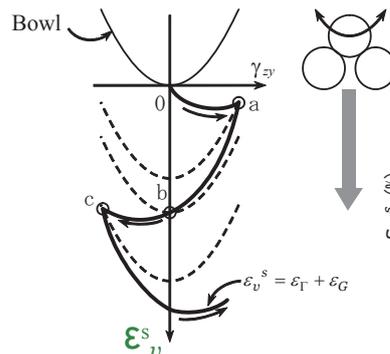
## 繰返しせん断 のダイレイタンスの考え方



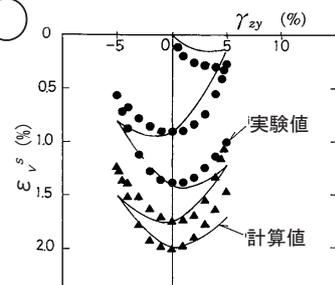
※FLIPのカクテルグラス  
モデルも同じ



(福武, 1989)

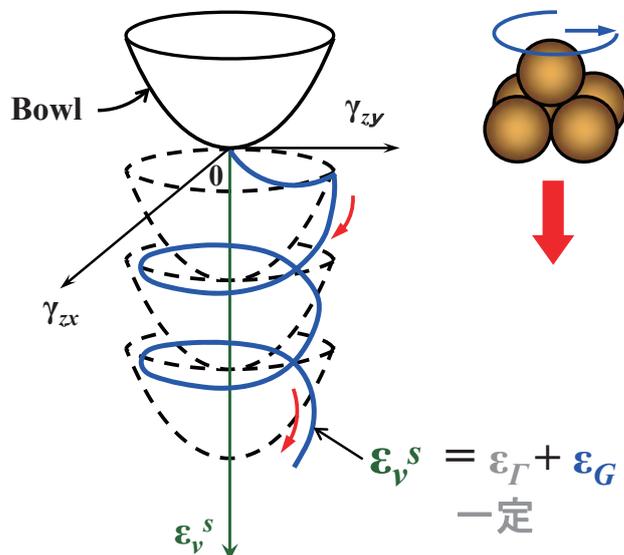


[ 実験結果と計算結果 ]



94

## Dilatancy in the case of repeated circular simple shearing.

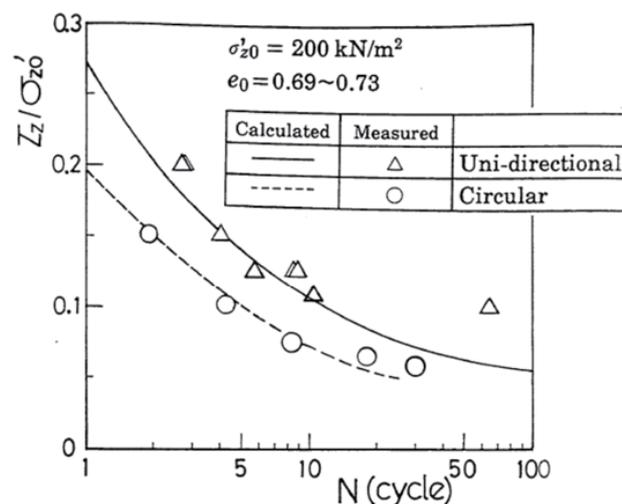
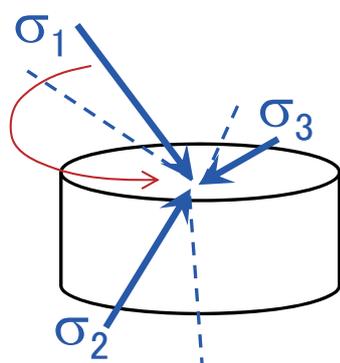


(福武, 1989)

95

## 円経路繰返しせん断

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  の値は不変で向きが回転  
 → 通常の弾塑性論では評価が困難



$\Gamma=5\%$ に至る繰返し回数 $N$ と繰返し応力比 $(\tau_z/\sigma'_{z0})$ の関係

96

## 非排水条件下の有効応力

体積ひずみ  $d\varepsilon_v = 0$  より算定

ダイレイタンスー成分  $d\varepsilon_v^s$  + 圧密成分  $d\varepsilon_v^c = 0$

$$\underbrace{d\varepsilon_v^s}_{\substack{\uparrow \\ \text{おわん}}} + d\varepsilon_v^c = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d\varepsilon_v^c = \frac{0.434 \cdot C_s}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} \quad (\text{for } d\sigma'_m < 0) \\ d\varepsilon_v^c = \frac{0.434 \cdot C_c}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} \quad (\text{for } d\sigma'_m > 0) \end{array} \right.$$

有効応力  $\sigma'_m = \sigma'_{m0} \cdot 10^\alpha$ ,  $\alpha \equiv \frac{-\varepsilon_v^s}{C_s \text{ or } C_c / (1+e_0)}$

有効応力  
減少比  $\left( \frac{\sigma'_{m0} - \sigma'_m}{\sigma'_{m0}} \right) = 1 - 10^\alpha$

(福武, 1997)

97

## 履歴関数モデルとの併用と パラメータ

土の構成式の構築へ

(砂、粘土、改良土)

# 計算方法

累加せん断ひずみ

…粒子構造の  
圧縮

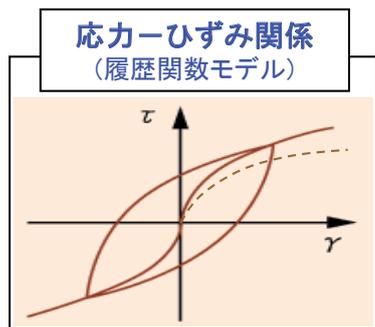
$$G^* = \sum \sqrt{\Delta\gamma_{zx}^2 + \Delta\gamma_{zy}^2 + \Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \Delta(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \Delta(\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

合せん断ひずみ

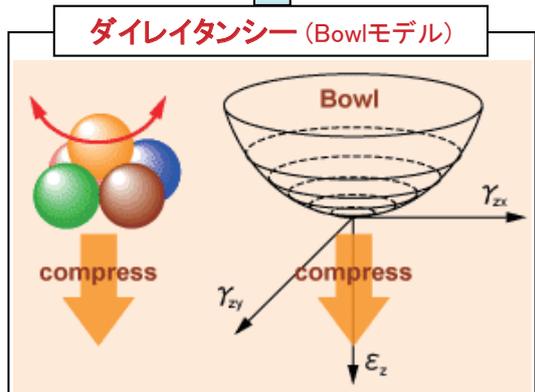
…粒子の  
乗り上がり

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

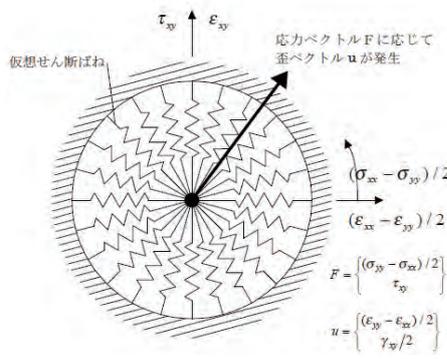
⇒ 有効応力解析HiPER



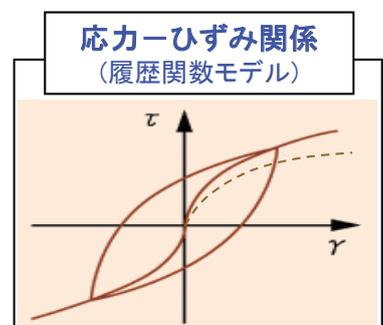
過剰間隙水圧



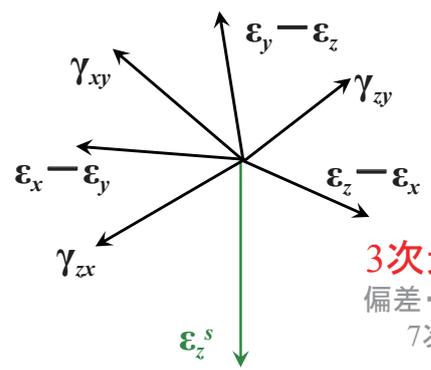
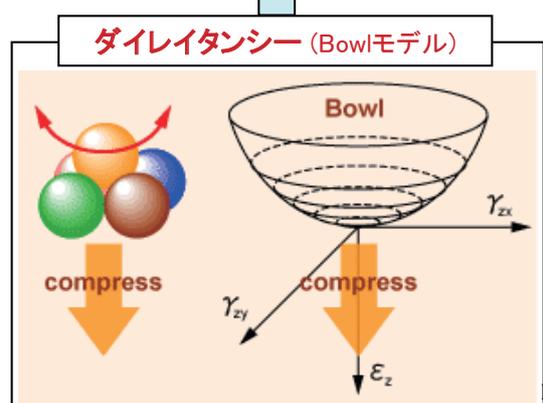
# 3次元構成式へ



3次元に拡張  
多重せん断  
バネモデル

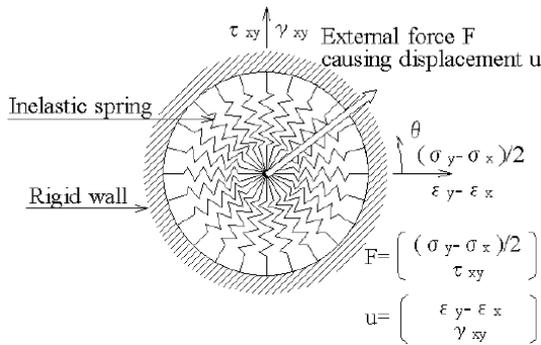


過剰間隙水圧

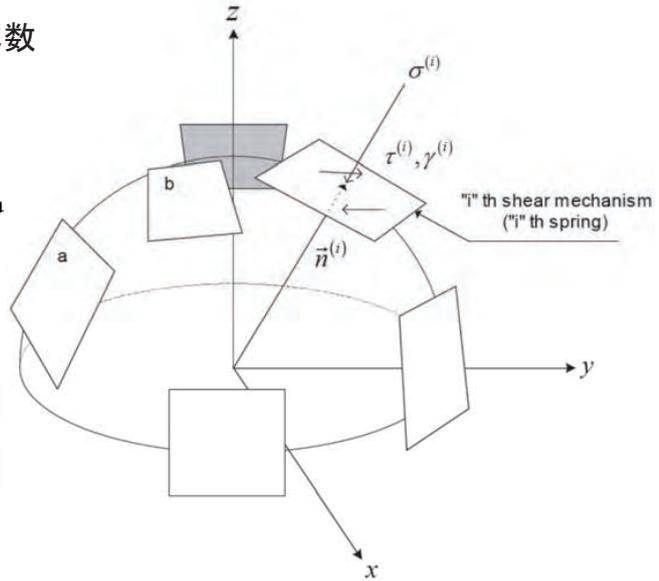


## 多重せん断機構による せん断応力～せん断ひずみ関係の2次元化, 3次元化

- ・客観性の原理とバネ本数
- ・主応力の回転

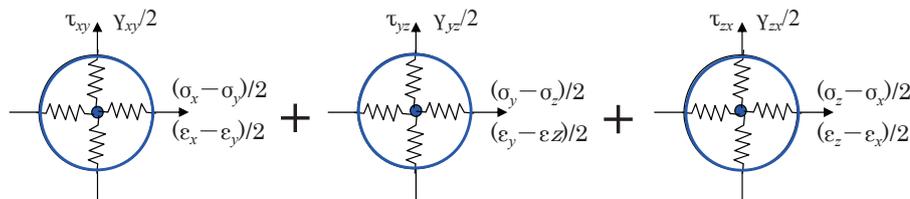


2D Multi-spring model  
(東畑, 1981)



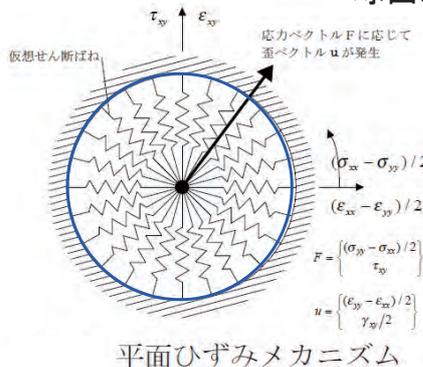
3D Multi-spring model  
(Nishimura, S. and Towhata, 2004)

## 構成式の拡張(西村・東畑法の簡略法)

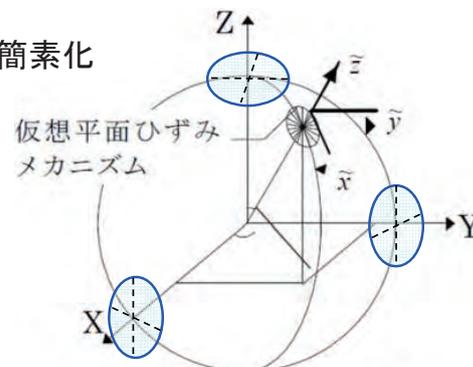


### 偏差応力～偏差ひずみ関係

- ・バネ本数削減
- ・球面メカニズムの簡素化



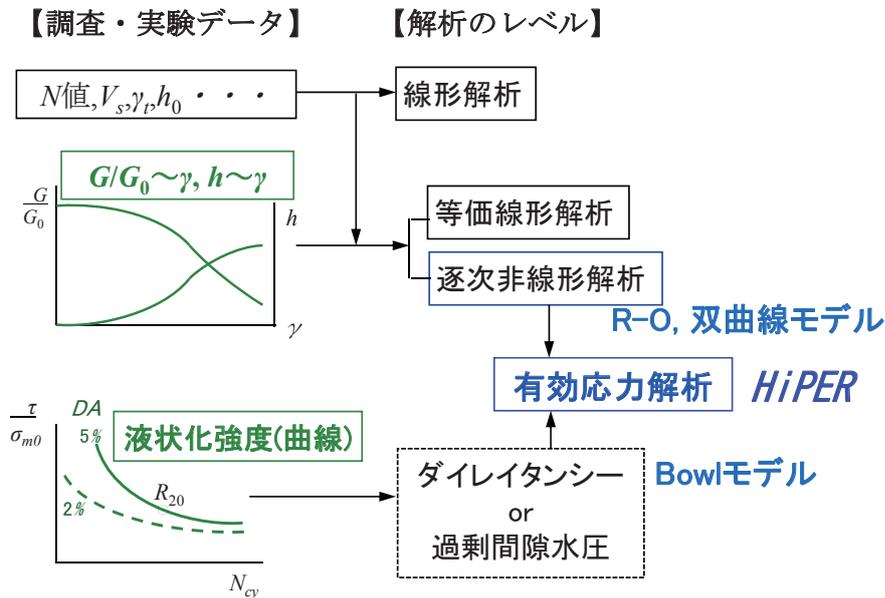
平面ひずみメカニズム



3次元モデルの概念

※バネ本数、 $\oplus$ が少ない時→客観性の原理は満足しない 102

## 解析手法と土質パラメータ 通常の要素試験結果から容易に設定

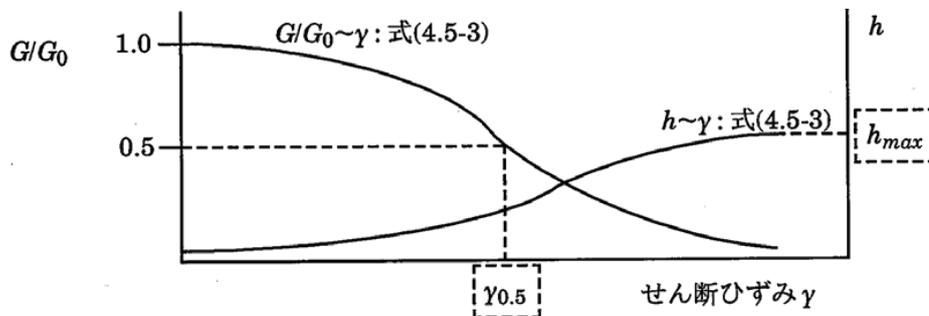


103

## 土質パラメータ

### ① 修正R-0モデルのパラメータ

パラメータ	パラメータの物理的意味
$G_0$	初期せん断弾性係数。 $G_0 = \rho V_s^2$
$h_{max}$	最大減衰定数。
$\gamma_{0.5}$	$G/G_0 = 0.5$ におけるせん断ひずみ(基準せん断ひずみ)。

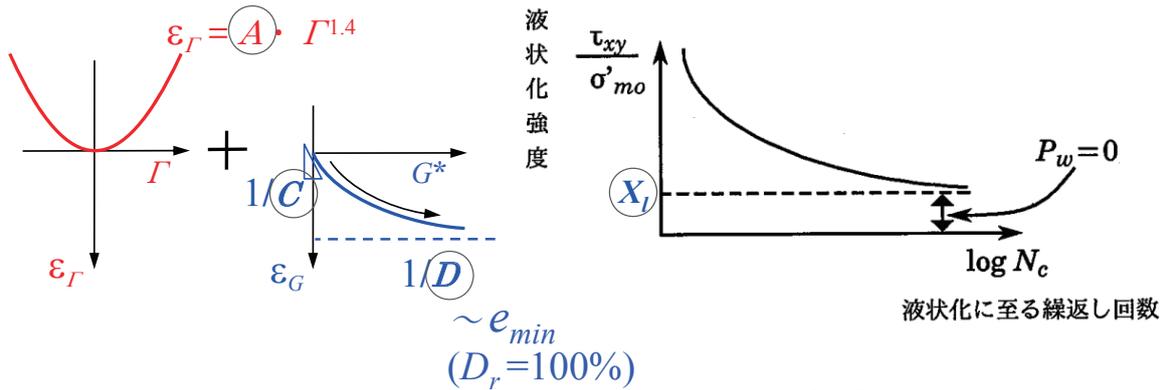


動的変形試験:  $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$  関係

104

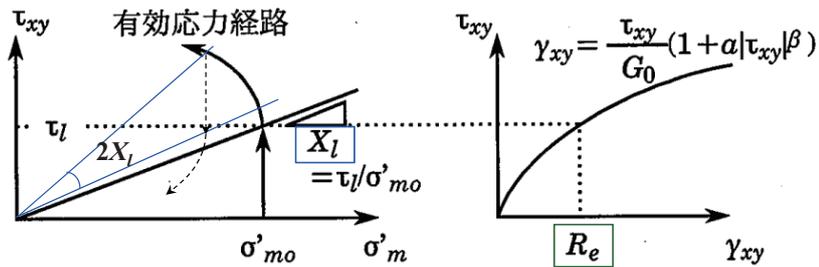
② おわんモデルのパラメータ

	パラメータの意味
$A$	ダイレイタンスーの内、膨張成分を表す。 $ A $ が大きいと膨張側となりサイクリックモビリティが顕著。
$C, D$	ダイレイタンスーの内、圧縮成分 $\varepsilon_c$ を表す。 $\varepsilon_c$ は $G^*$ に対して双曲線。 $1/C$ はせん断初期におけるダイレイタンスーの勾配。 $1/D$ は双曲線の漸近線。
$C_s/(1+e_0)$	$C_s$ は膨潤指数、 $e_0$ は初期間隙比。
$X_l$	液状化強度 $R_l$ の下限値。 $\tau/\sigma' > X_l$ のとき水圧が発生。



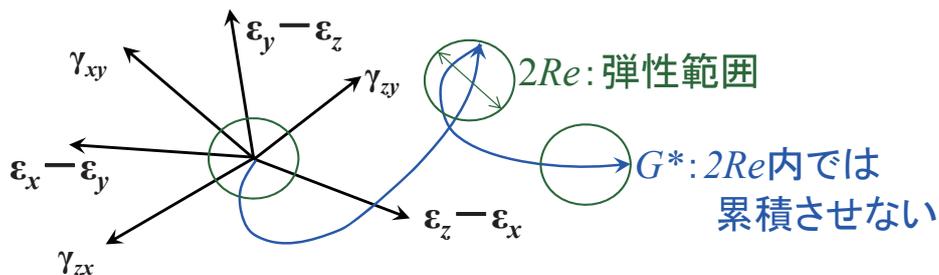
(福武, 1997)

液状化強度の下限値 $X_l$ と有効累積ひずみ



(b) 有効応力経路と $X_l$

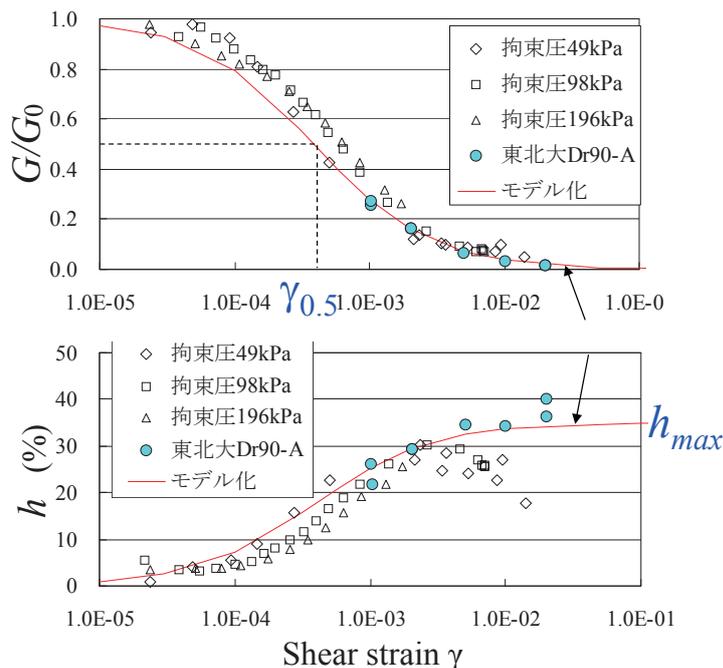
(c) 修正R-Oモデルの骨格曲線と $R_e$



(福武, 1997)

動的変形試験  
( $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ )

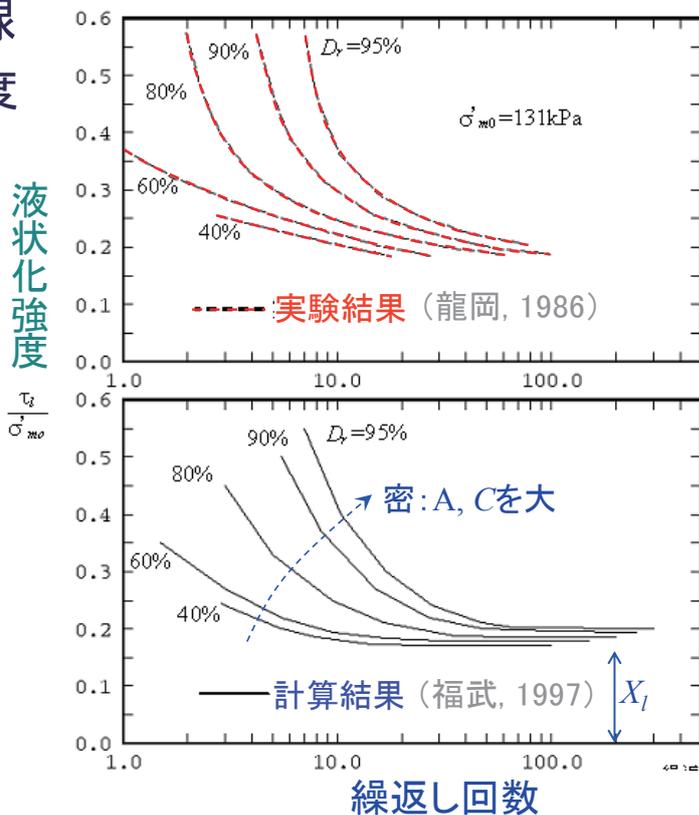
↓  
R-Oモデルの  
パラメータ設定



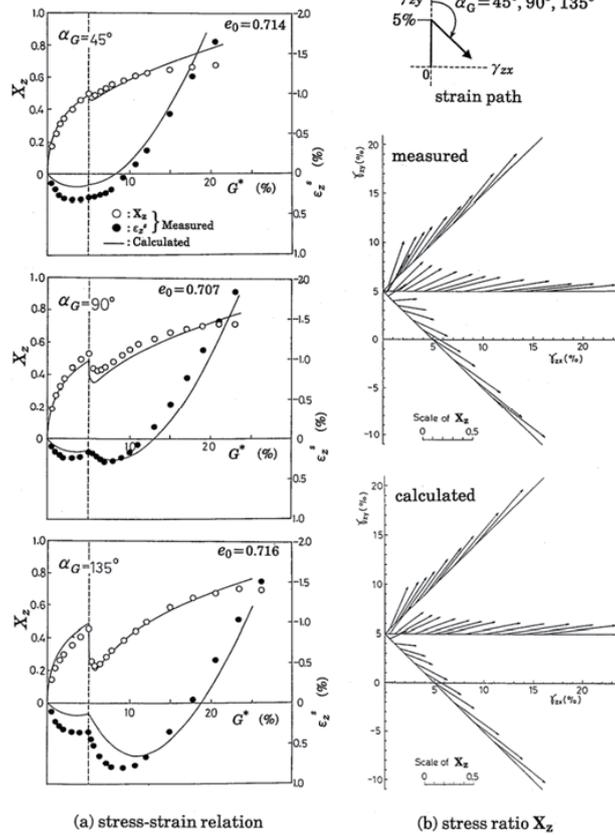
(E-defence報告書)

液状化強度曲線  
(非排水繰返し強度  
～繰返し回数)

↓  
おわんモデルの  
パラメータ設定

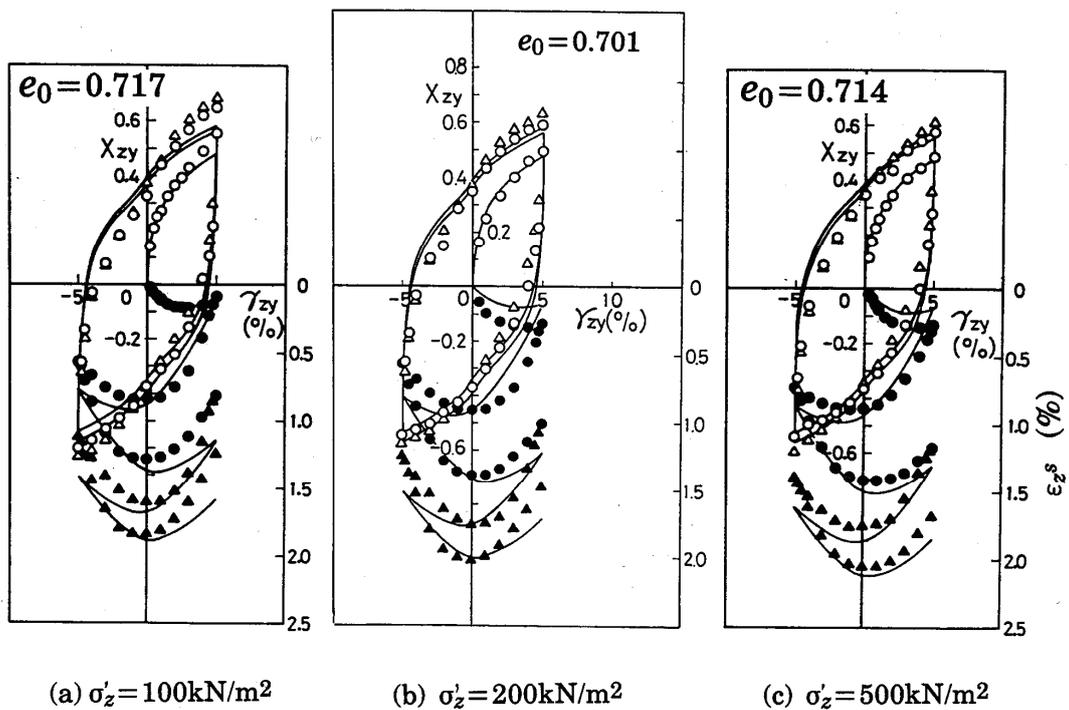


応力・ひずみ・ダイレイ  
タンシー関係のシミュ  
レーション  
・折れ線経路



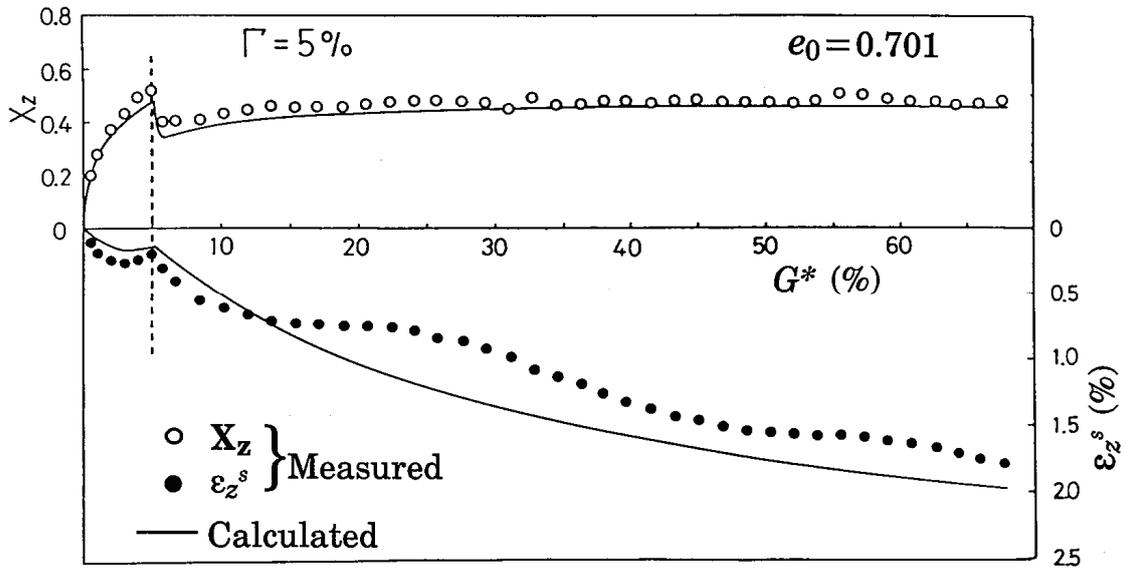
109

・ひずみ直線経路



110

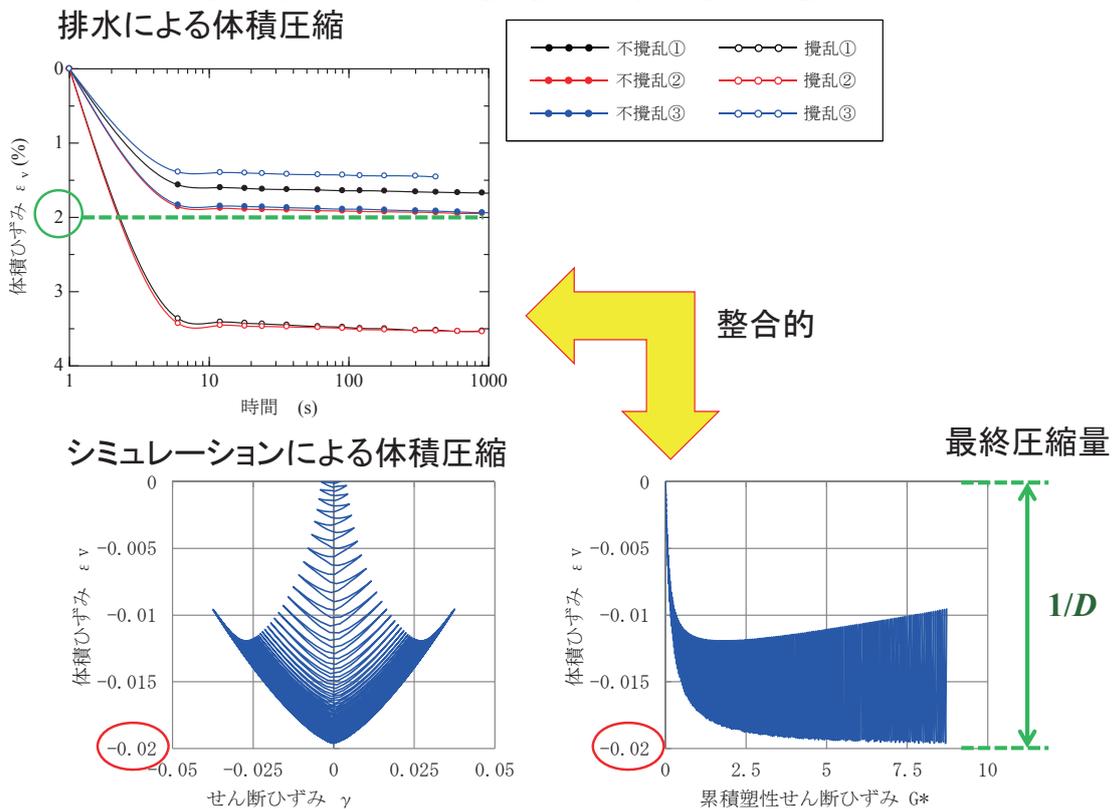
・ひずみ円経路



111

繰返し非排水三軸試験後の排水試験

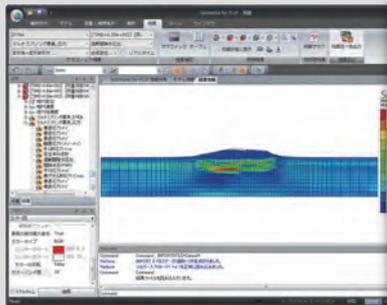
砂(不攪乱)



112

# MIDAS Total Solution

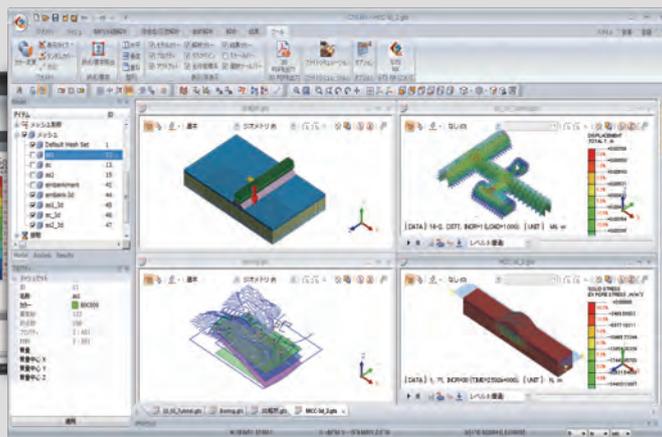
## 建設分野プログラム



### SoilWorks for FLIP

FLIP専用のプリ・ポスト

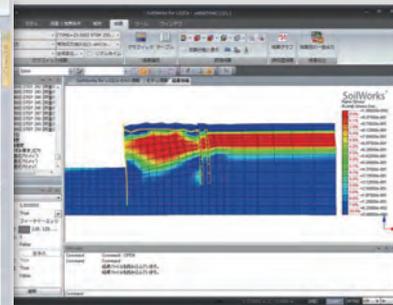
SoilWorks for FLIPはFLIP「地震時の液状化による構造物被害予測プログラム」専用のプリ・ポストです。SoilWorksの操作性をそのまま継承しており、AutoCAD感覚でデータを作成することができます。データ作成後は、FLIPを起動させ計算を実行することもでき、FLIP解析のための統合された作業環境を提供します。



### GTS NX

GTS NX - 地盤分野汎用解析システム

GTS NXは最先端PRE-Postと解析機能を搭載した新しい概念の地盤汎用解析プログラムです。GTS NXは最新のOS環境変化に合わせて64ビット、並列処理を適用した統合ソルバを搭載しており、初心者も使いやすいように直観的なリボンメニュー形式を用意しております。また、様々な解析機能、圧倒的に速い解析速度、優れているグラフィック表現および結果整理機能などを提供します。



### SoilWorks for LIQCA

LIQCA専用のプリ・ポスト

SoilWorks for LIQCAはLIQCA専用のプリ・ポストです。SoilWorksの操作性をそのまま継承しており、AutoCAD感覚でデータを作成することができます。データ作成後は、LIQCAを起動させ計算を実行することもでき、LIQCA解析のための統合された作業環境を提供します。  
※ LIQCAは1987年京都大学の岡 二三生教授をはじめとするLIQCA開発グループにより開発された有効応力に基づく液状化解析プログラムです。

## MIDAS Family Programs

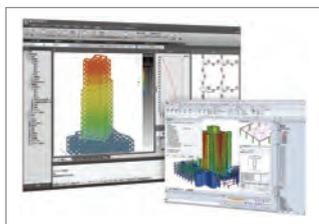
MIDAS 製品紹介

MIDAS Family Program は

最先端CAE(Computer Aided Engineering) ソリューションです。

### 建築

Building Engineering



#### midas iGen

建築分野の  
汎用構造解析および  
許容応力度計算

#### midas eGen

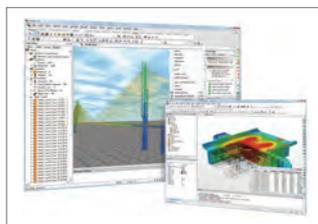
保有耐力自動計算+構造計画/  
設計最適化システム  
CAD 基盤モデリング

#### midas Drawing

世界初 2次元情報CADプログラム  
構造図自動生成

### 土木

Bridge Engineering



#### midas Civil

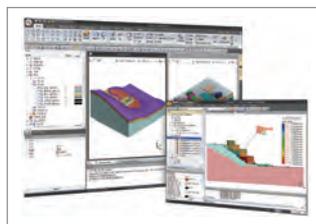
土木分野の  
汎用構造解析および  
最適設計システム

#### midas FEA

建設分野の  
非線形解析および  
詳細解析システム

### 地盤

Geotechnical Engineering



#### SoilWorks

2次元地盤汎用解析/設計  
プログラム

#### SoilWorks for FLIP

液状化解析プログラム  
FLIP用のプリ・ポスト

#### SoilWorks for LIQCA

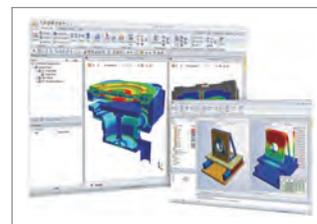
液状化解析プログラム  
LIQCA用のプリ・ポスト

#### GTS NX

2次・3次元地盤汎用解析  
プログラム

### 機械

Mechanical Engineering



#### midas NFX

機械分野の  
汎用構造解析システム

#### midas FX+

有限要素解析汎用の  
プリ・ポスト処理プログラム

# MIDAS

## 液状化 分野

Change is Chance



株式会社マイダスイティジャパン

〒101-0021 東京都千代田区外神田5-3-1 秋葉原OSビル7F

TEL 03-5817-0787 | FAX 03-5817-0784 | e-mail [g.support@midasit.com](mailto:g.support@midasit.com)

Copyright© Since 1989 MIDAS Information Technology Co., Ltd. All rights reserved.

<http://jp.midasuser.com/geotech>