

**MIDAS
CONSTRUCTION
TECHNICAL
DOCUMENT
COLLECTION**

動解析・液状化分野 11



MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION

動解析・液状化分野

11.

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 動的な非線形のモデル化
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

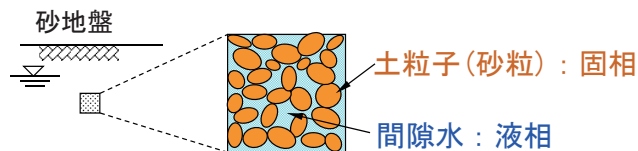


- **コンクリート**:
クラック→破壊→瓦礫
連続体となっていて初めて機能。
- **地盤**は初めから木っ端微塵に壊れている。
しかしちゃんと構造物を支持している。Why?

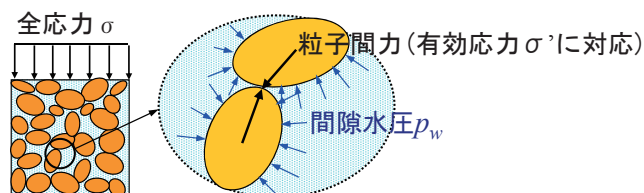


3

2相混合体に理想化した飽和土要素



全応力 σ 、有効応力 σ' 、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)

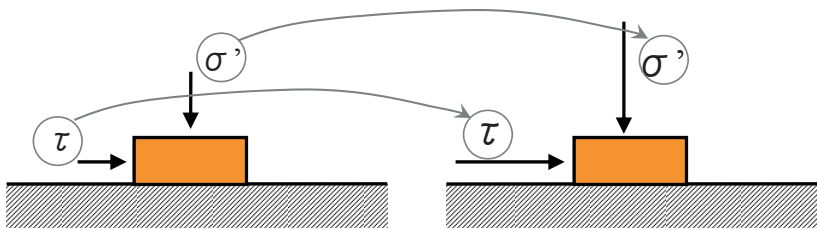
4

有効応力 σ' 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 σ' 大:

→ 滑動させる(変形させる)ための τ も大



5

① 土の性質: 線形と非線形

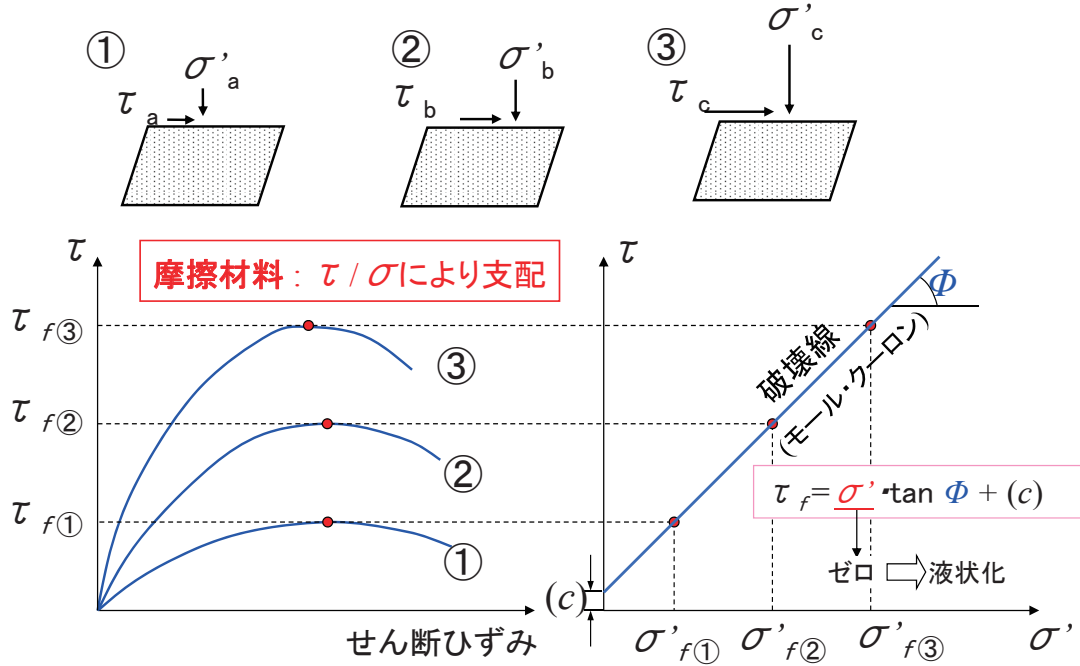
- ・せん断ひずみ依存非線形
- ・応力依存非線形

★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)

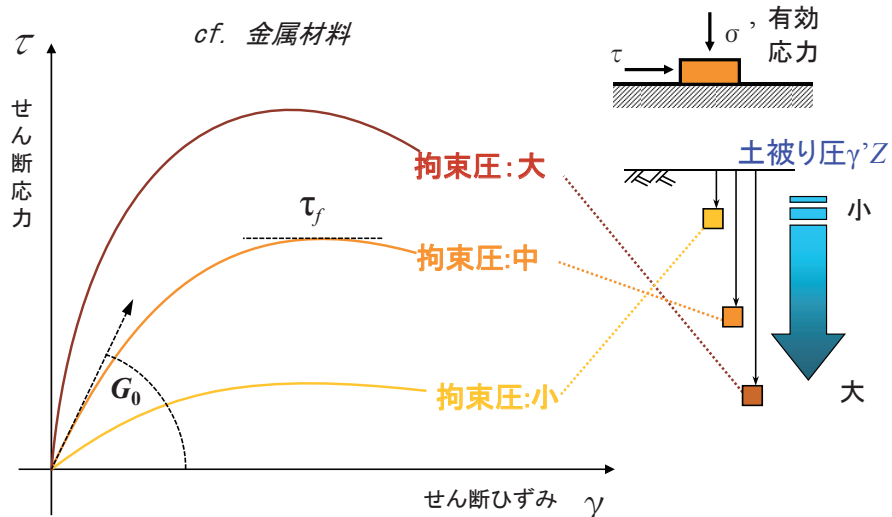
6

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

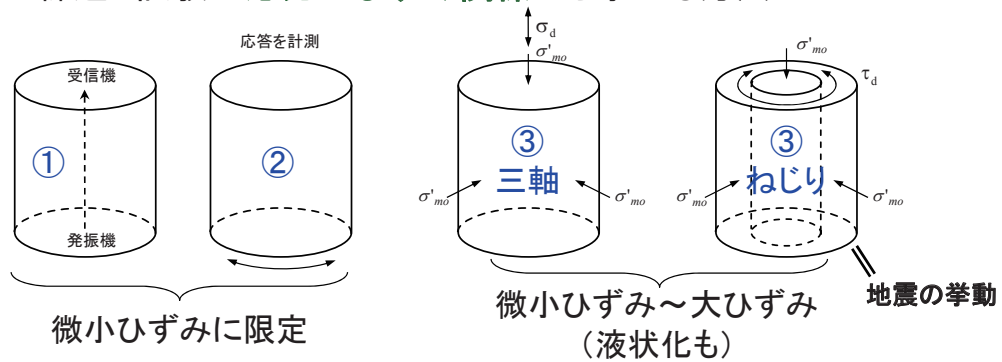
土試料を伝わる波の伝播速度と距離減衰などから波動論に基づいて求める方法

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

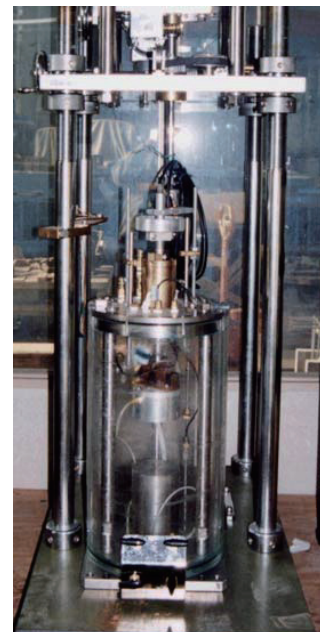


9

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

10

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 σ' 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

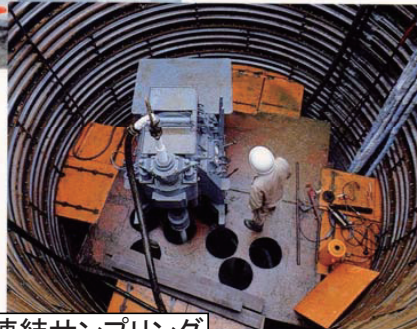
原位置地盤の評価と試料採取

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

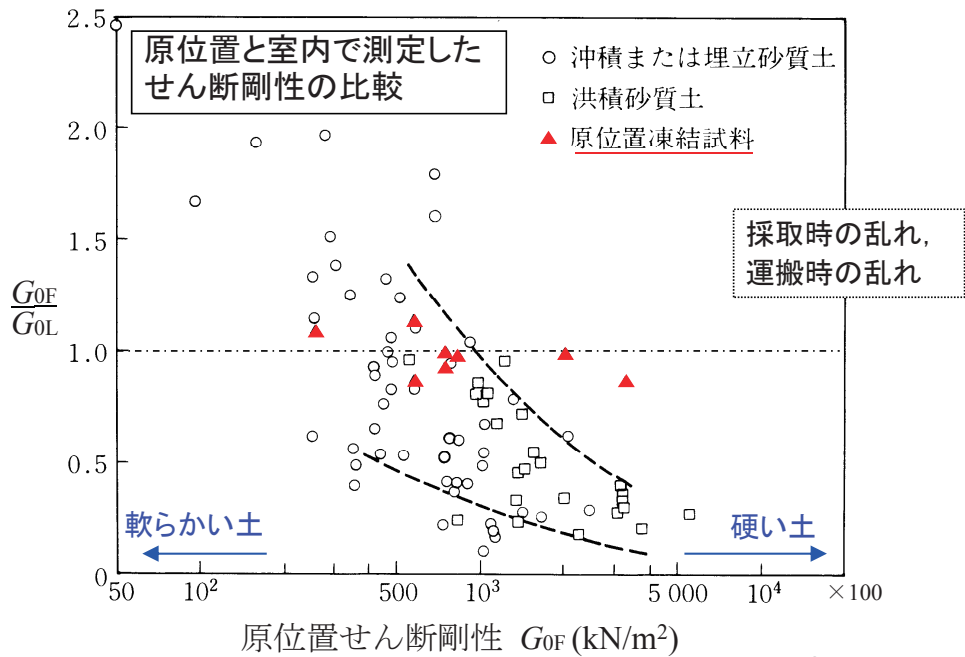


砂礫の凍結サンプリング

[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

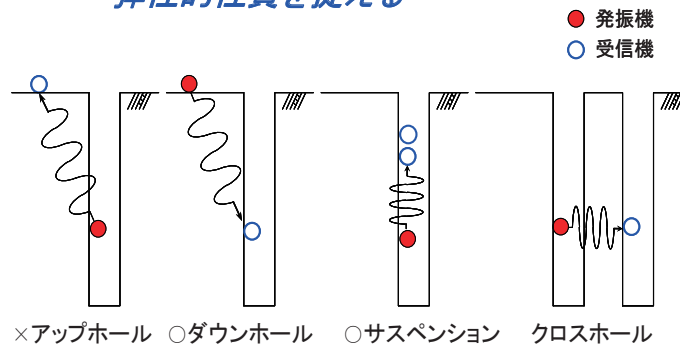


[時松, 1989]

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



$$G_0 = \rho V_s^2$$

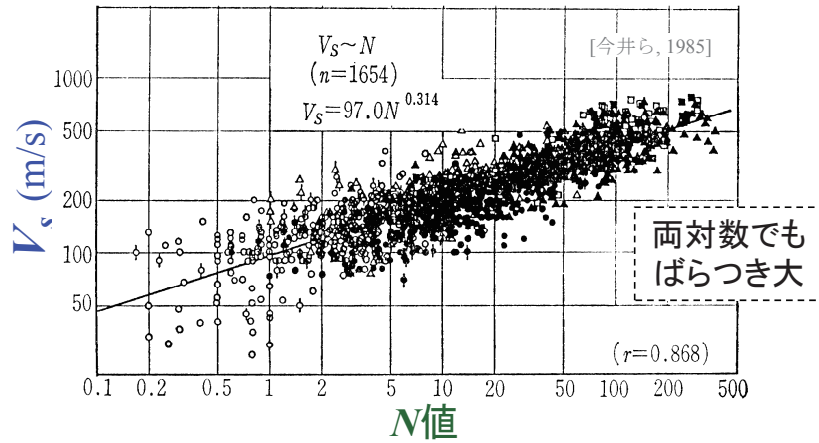
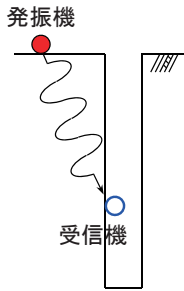
$$E = 2(1 + \nu) G_0$$

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

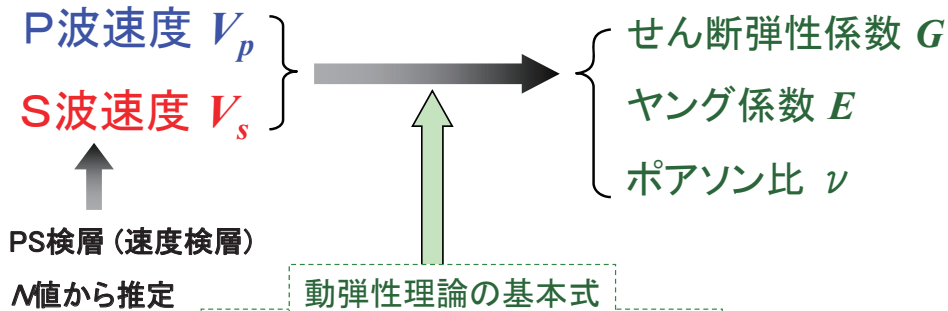
14

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 → V_s → G_0



15



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

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

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

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

> 1.6

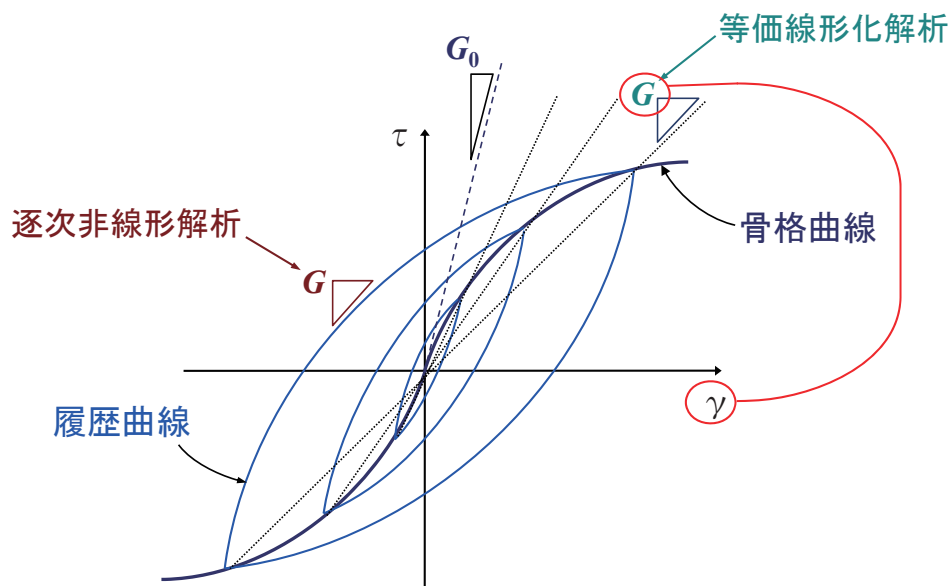
16

② 動的非線形のモデル化

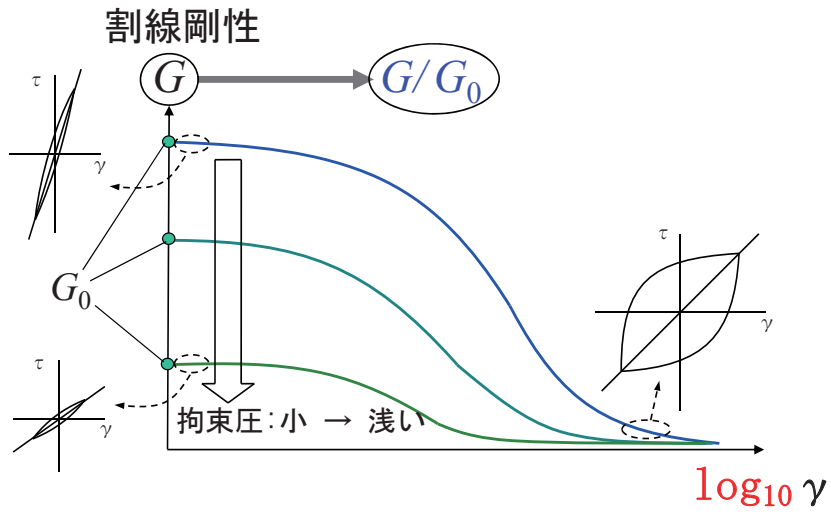
いよいよ
「繰返し」、「非線形」
のお話し

17

応力・ひずみ関係



18

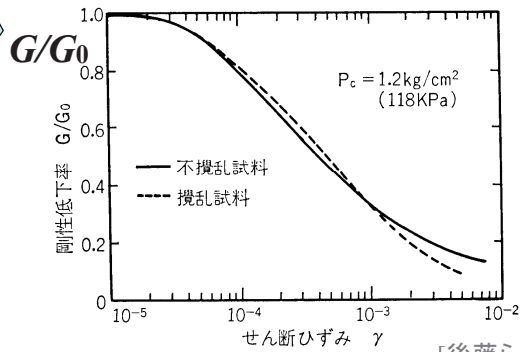
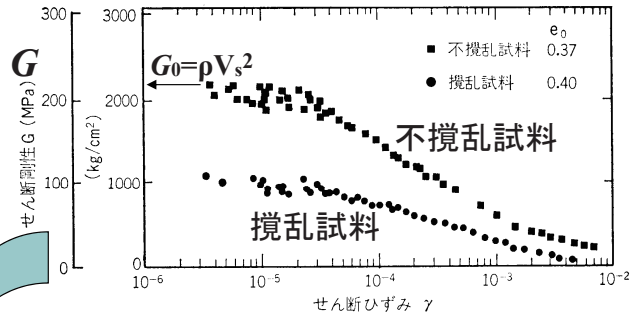


19

試料の乱れと
非線形特性

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

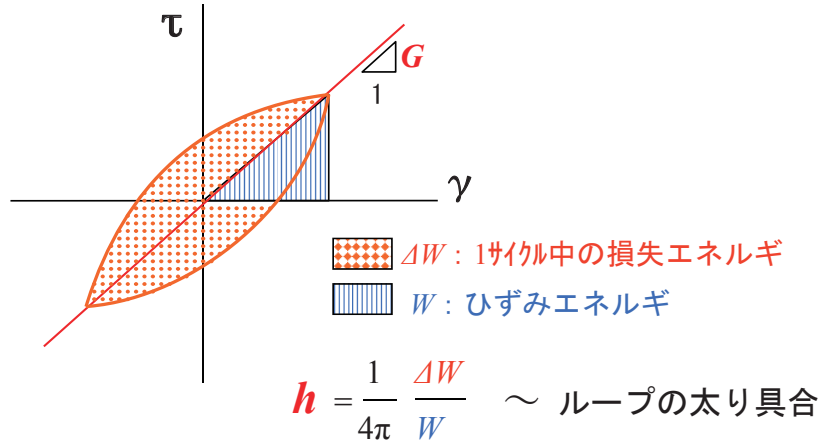
G_0 で基準化



[後藤ら, 1986]

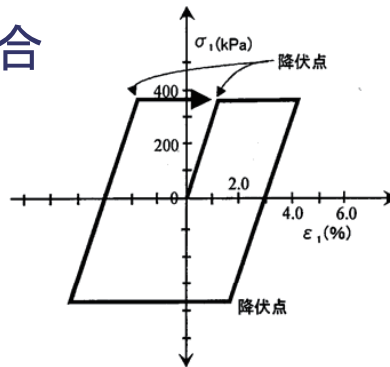
20

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

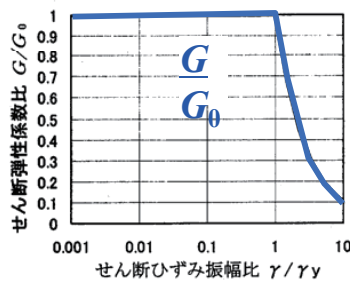


21

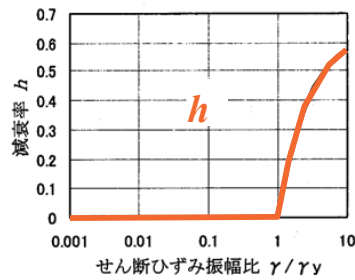
弾完全塑性体の場合



弾完全塑性体の応力ひずみ曲線の例 (繰返し載荷).



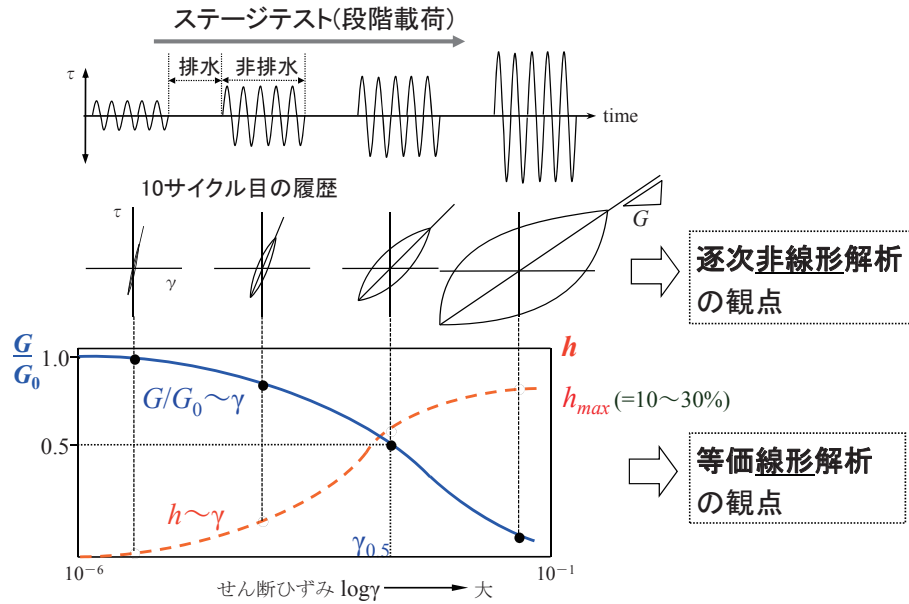
(a) $G/G_0 - \gamma$ 関係



(b) $h - \gamma$ 関係

22

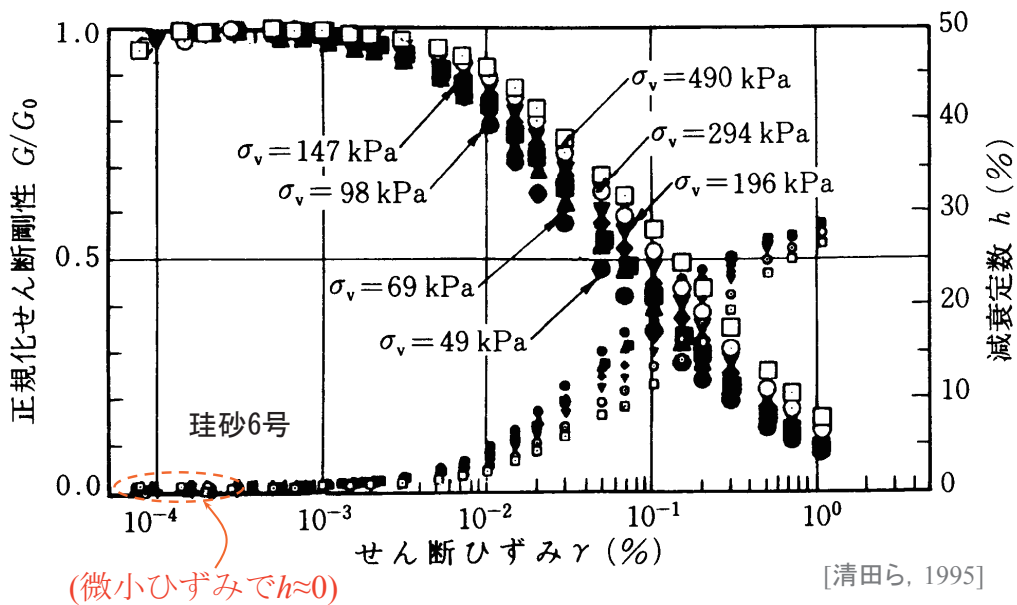
動的変形試験結果と材料定数のひずみ依存性 (非線形特性の表現方法: $G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$)



23

砂質土の動的変形試験結果

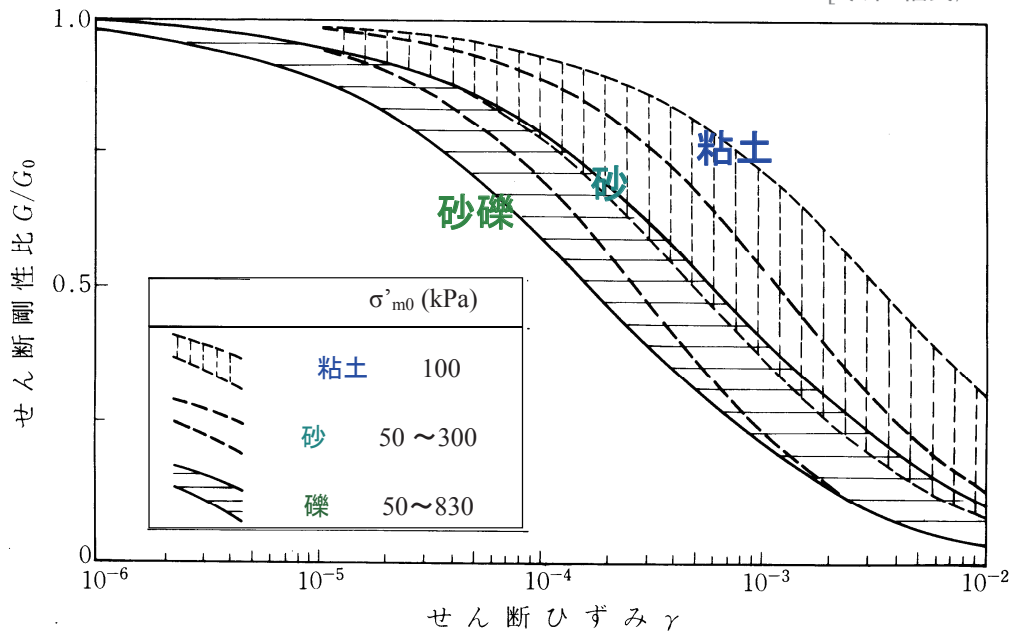
$G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$ 関係の拘束圧依存性



24

土の種類と $G/G_0 \sim \gamma$

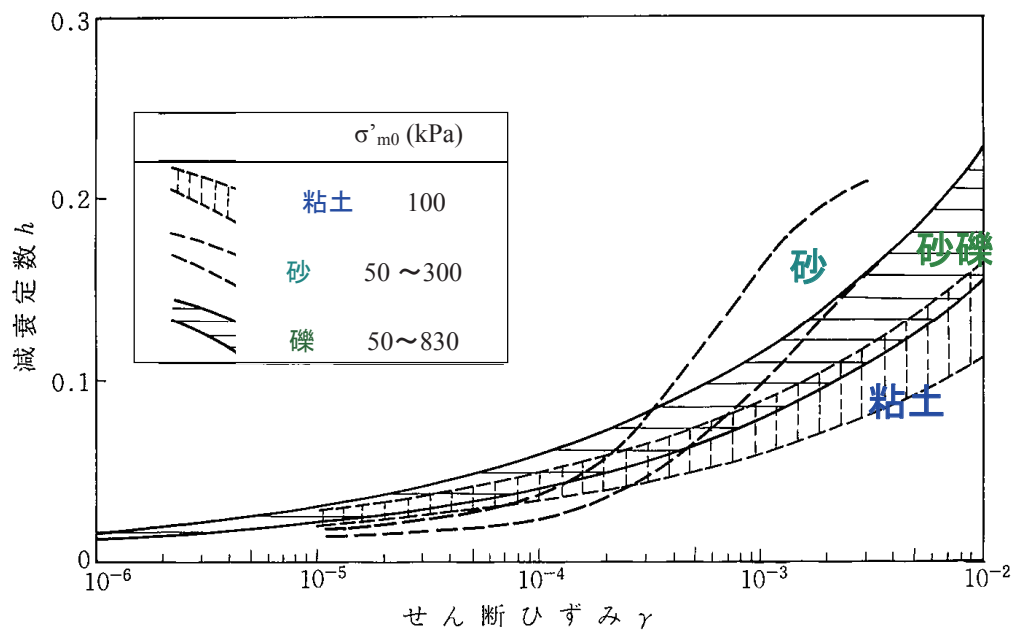
[今津・福武, 1986]



25

土の種類と $h \sim \gamma$

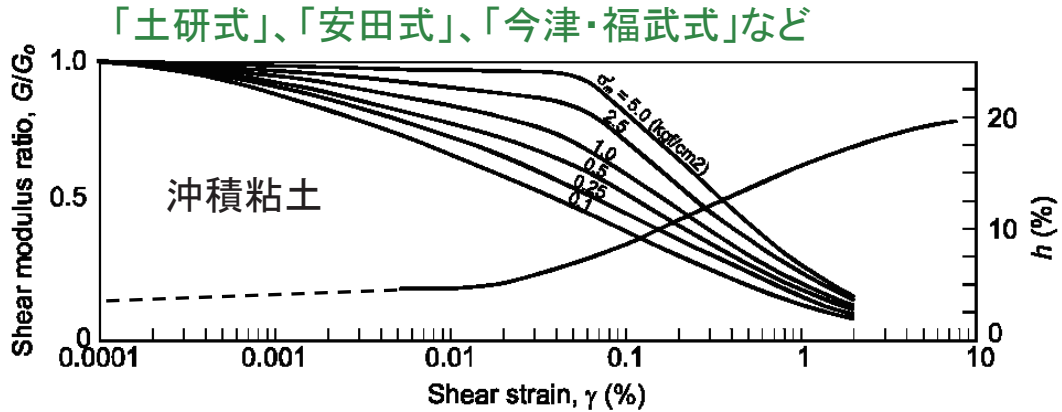
[今津・福武, 1986]



26

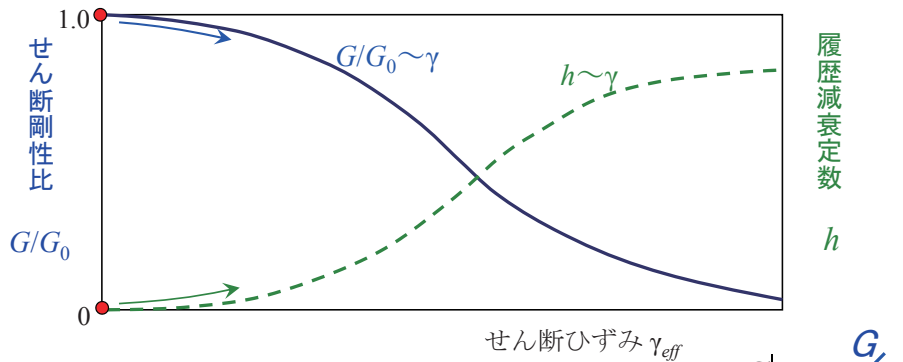
$G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ の式

- ・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。



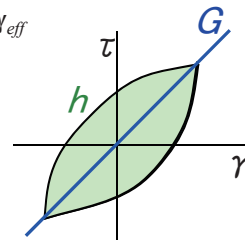
27

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



非線形性を大胆に設定

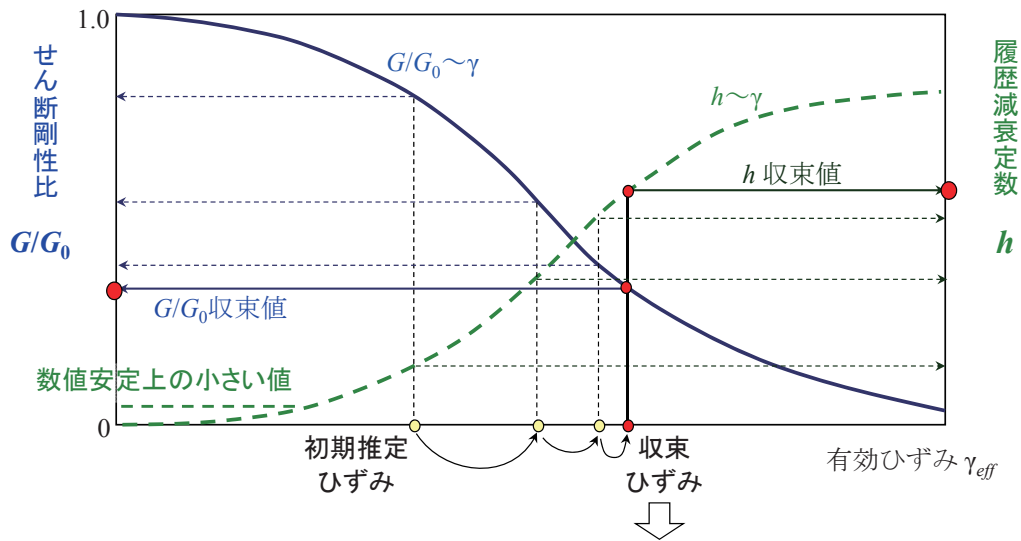
剛性を低減させた弾性定数
⇒波動方程式を解く



「等価線形解析」

28

「等価線形解析」の解き方(イタレーション)



かなり大胆な簡略化！

29

等価線形解析

■ 有効ひずみ γ_{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

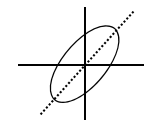
G, h のイタレーション → 結局は、 G, h 一定の線形計算

■ 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 $G^* = G(1+2ih)$ → τ と γ 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

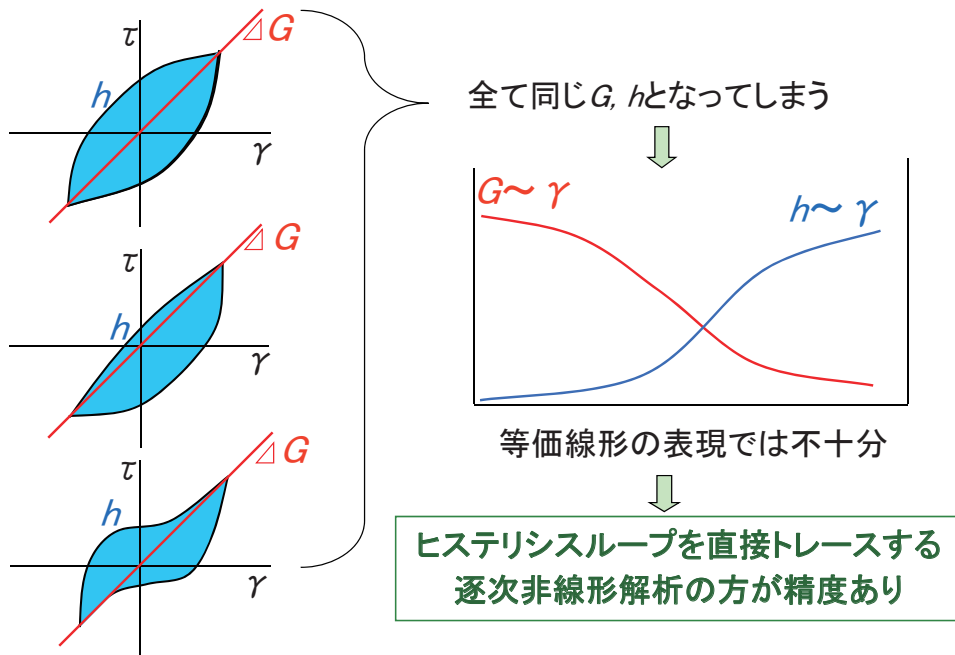
- 空間と時間との分離 → 理論的な扱いが易しい（理論解）
入射波 E と反射波 F の分離が可能
- デコンボリューション: 地表の観測波から基盤入射波
- 増幅関数の補間

■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

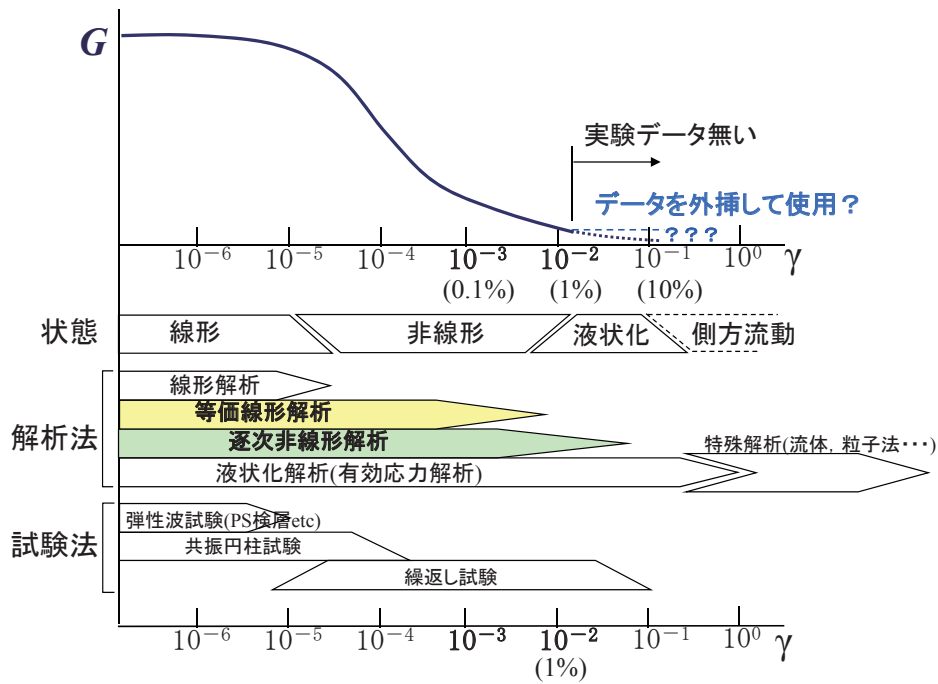
31

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



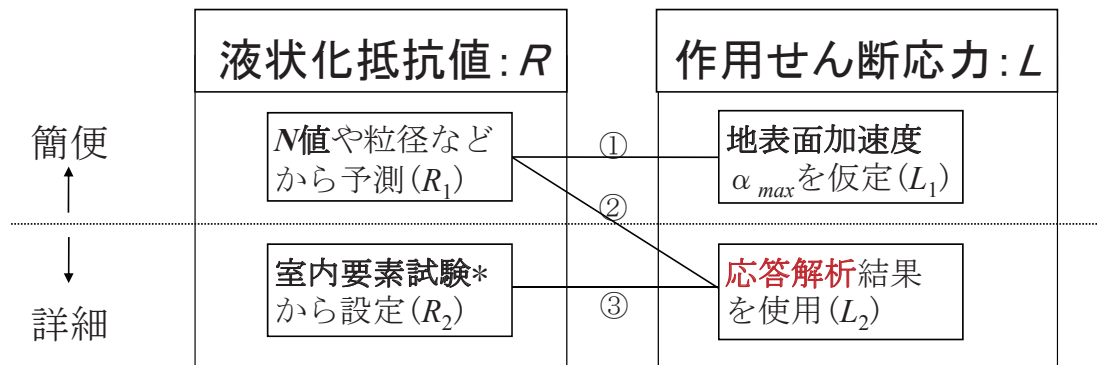
32

G~ γ 関係と各解析法の適用範囲



33

F_L 値 (=R/L) の組合せ



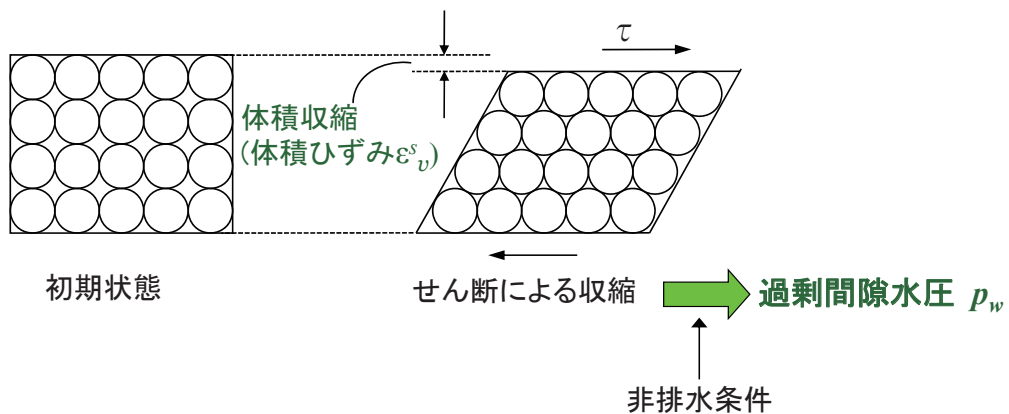
*不攪乱試料でないと
正確な R_2 は求められない

34

土に特有の もう一つの特徴 ダイレイタンスー (dilatancy)

35

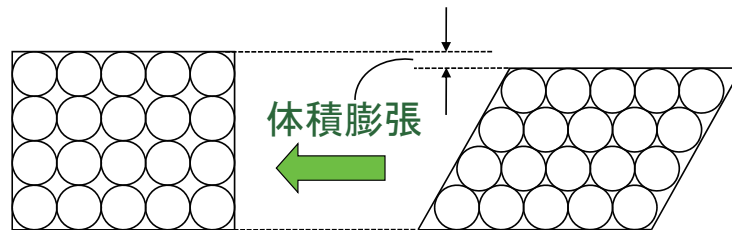
せん断に伴う砂の体積変化 (負の)ダイレイタンスー



※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

ダイレイタンシー のビデオ



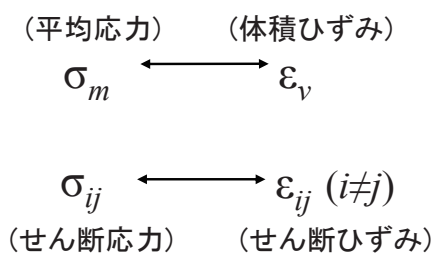
※豆知識

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！

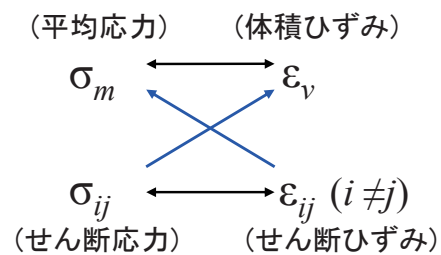
37

理想弾性体と粒状体の比較

(a) 理想弾性体



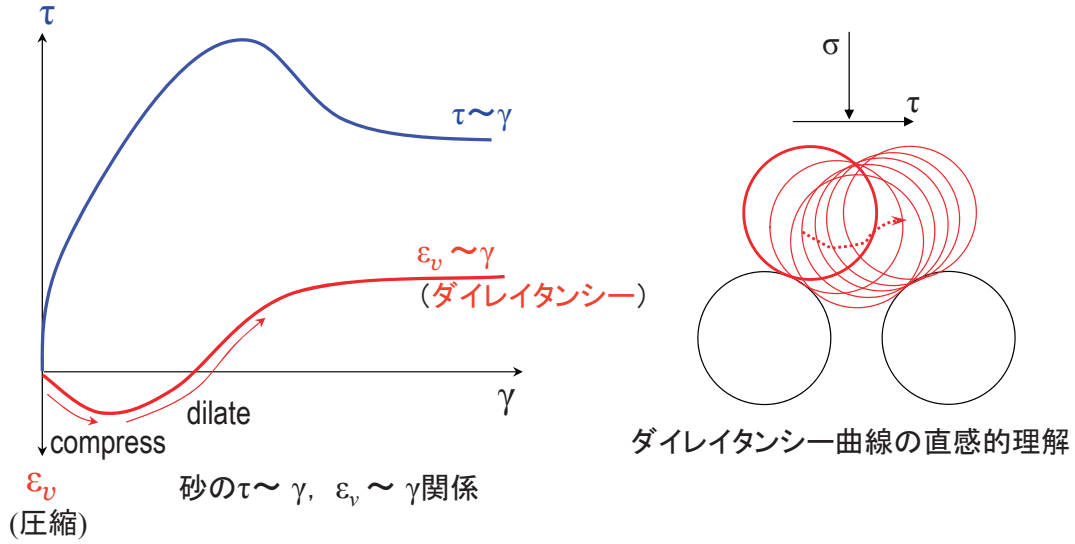
(b) ダイレイタンシー特性をもつ材料



[龍岡,1981]

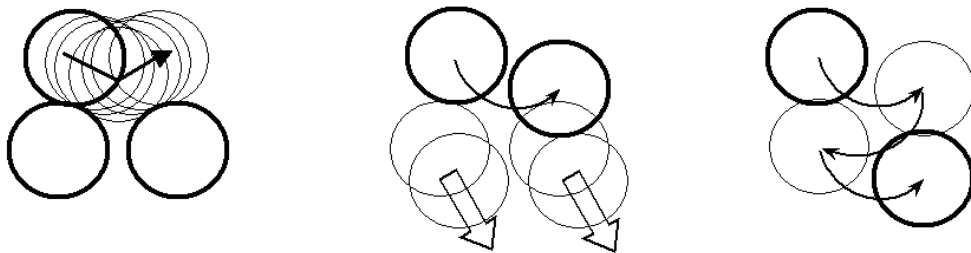
38

応力-ひずみ-ダイレイタンスー関係

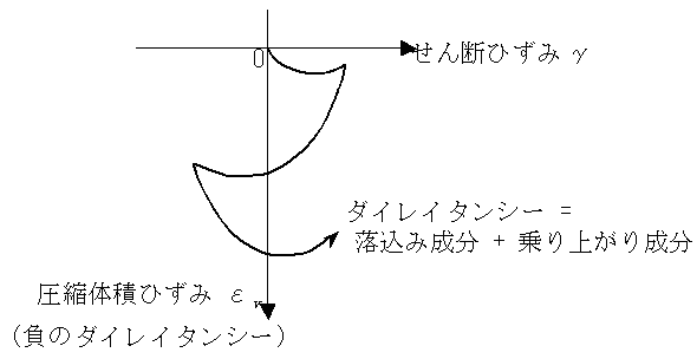


39

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

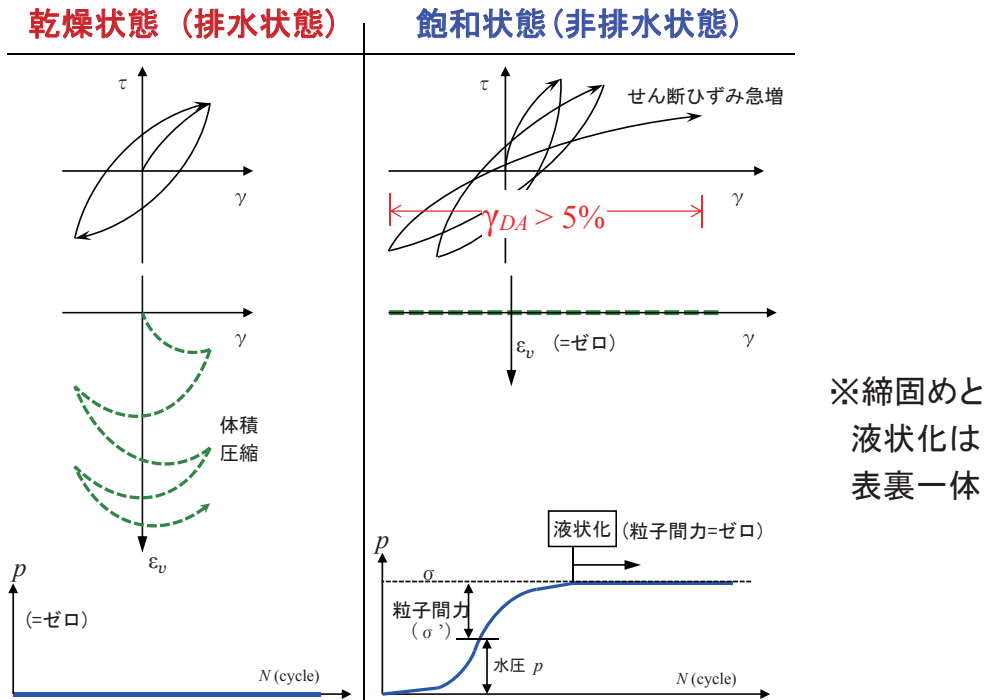


(a) 単調載荷(下二つの粒子は固定) (b) 単調載荷(下二つの粒子も変形) (c) 繰返し載荷



(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



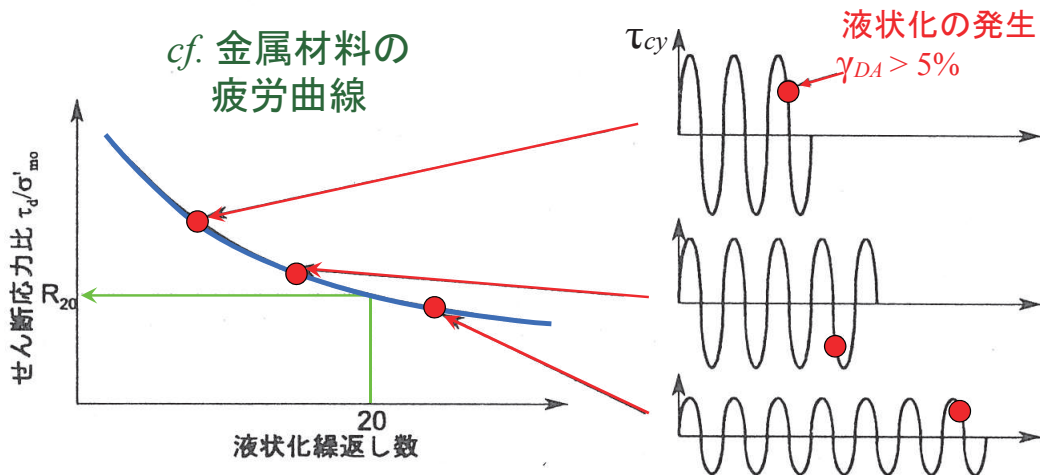
41

液状化試験と液状化強度

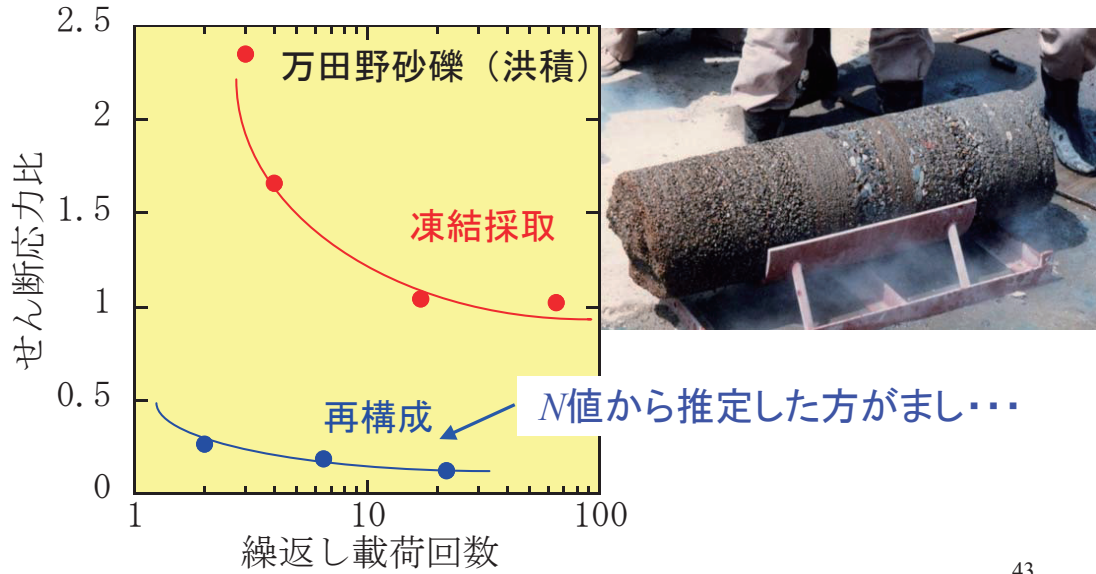
【液状化強度曲線】

せん断応力振幅 τ_{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

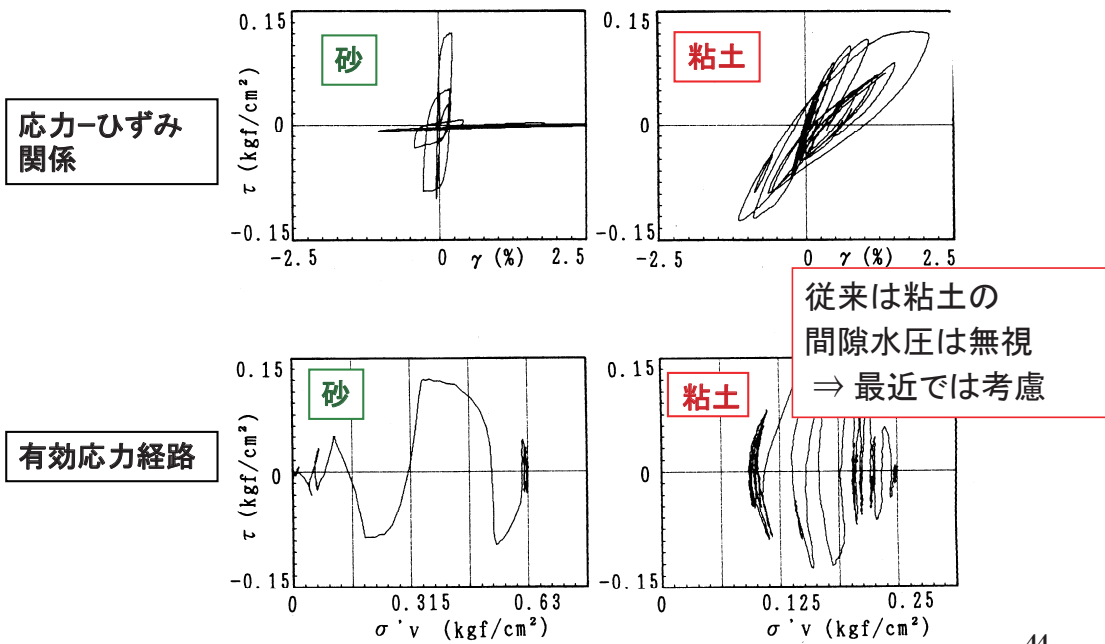


砂礫の液状化強度: 不攪乱試料と再構成試料



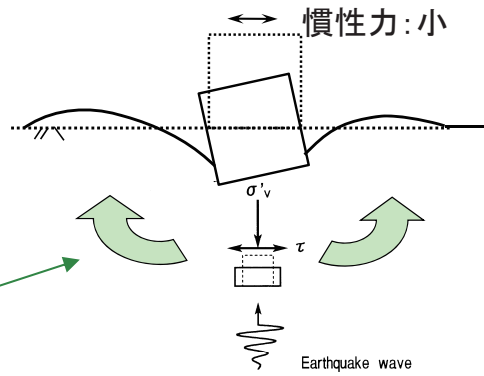
砂と粘土の比較 非排水繰返しせん断

[日下部ほか,1995]

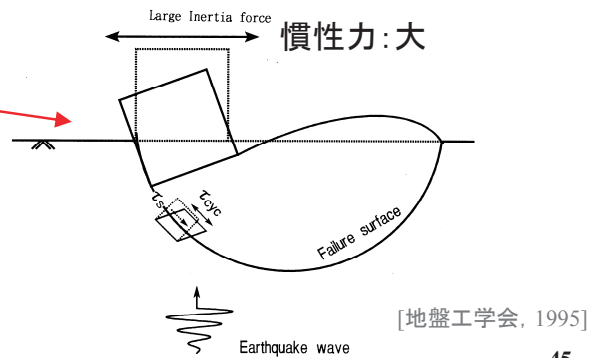


砂地盤と 粘土地盤の 破壊パターン

- 砂地盤
- ・ 即時変形



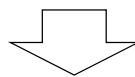
- 粘土地盤
- ・ 滑り破壊
- ・ 長期圧密沈下



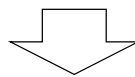
[地盤工学会, 1995]

45

以上述べた土の動的性質をモデル化



運動方程式に組込む

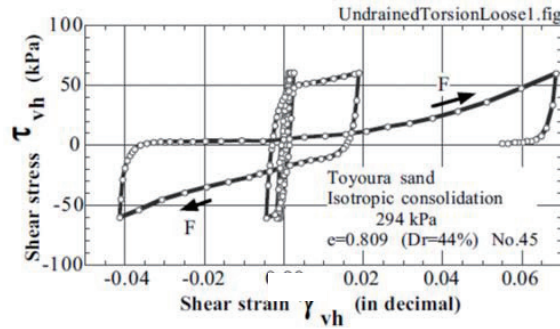


逐次非線形解析

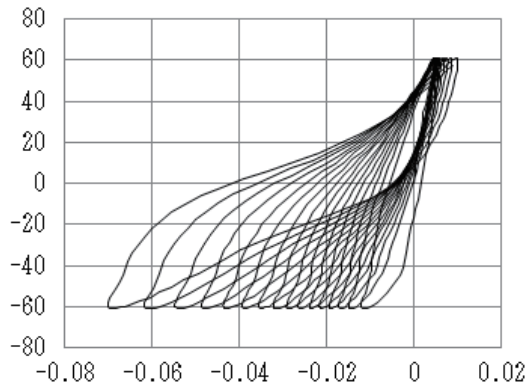
46

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応力ひずみ関係のある既知の関数と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)

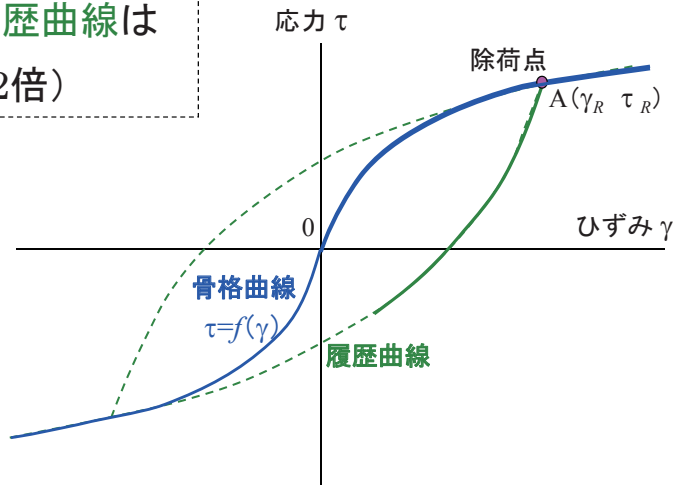
$$M\ddot{u} + C\dot{u} + f(u) = F(t)$$

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)

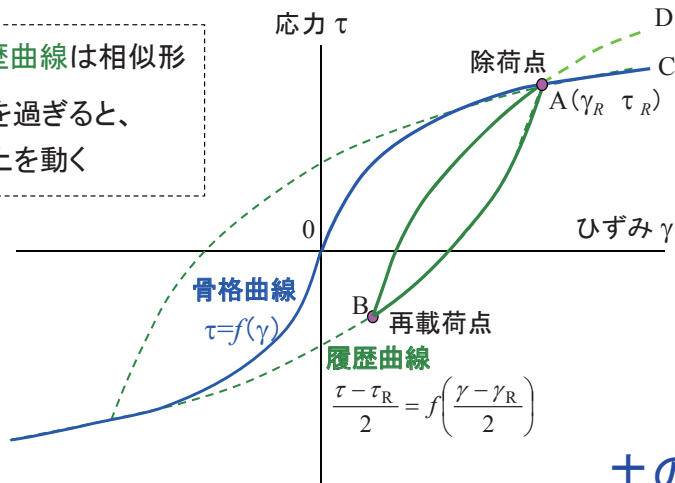


※履歴法則:メージング則(Masing rule)のデモンストレーション

49

τ~γのモデル化:メージング則

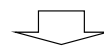
■骨格曲線と履歴曲線は相似形
■以前の除荷点を過ぎると、以前の曲線状上を動く



※骨格曲線が

- ①双曲線 (修正H-Dモデル) . . . G_0, τ_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

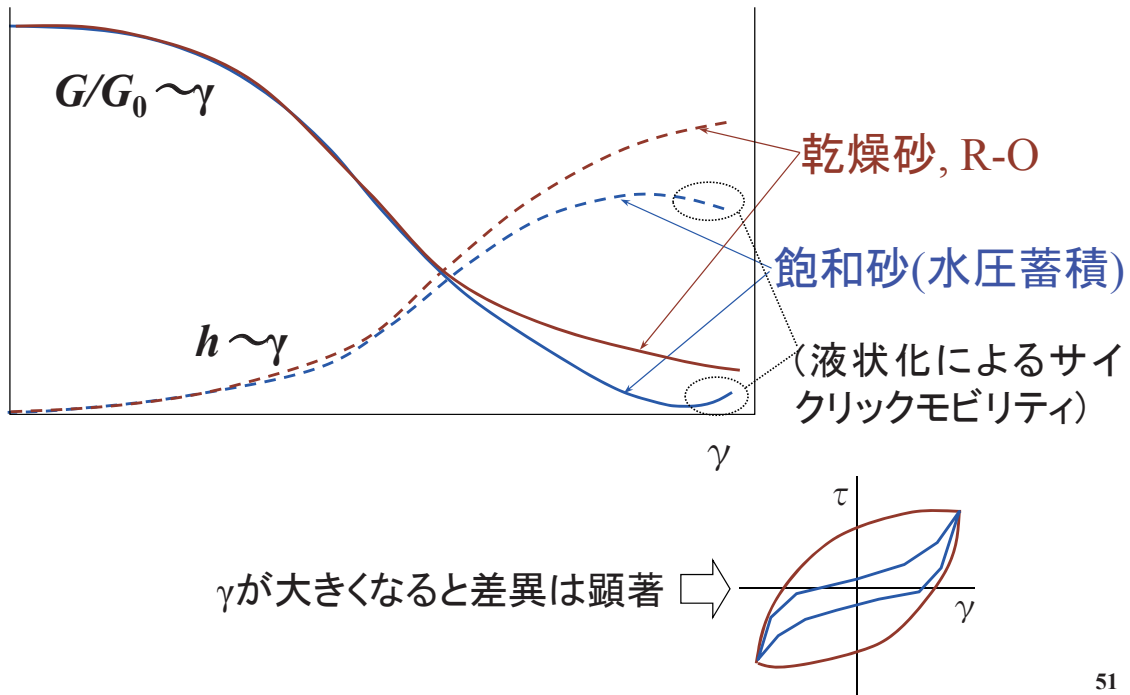
土の構成式



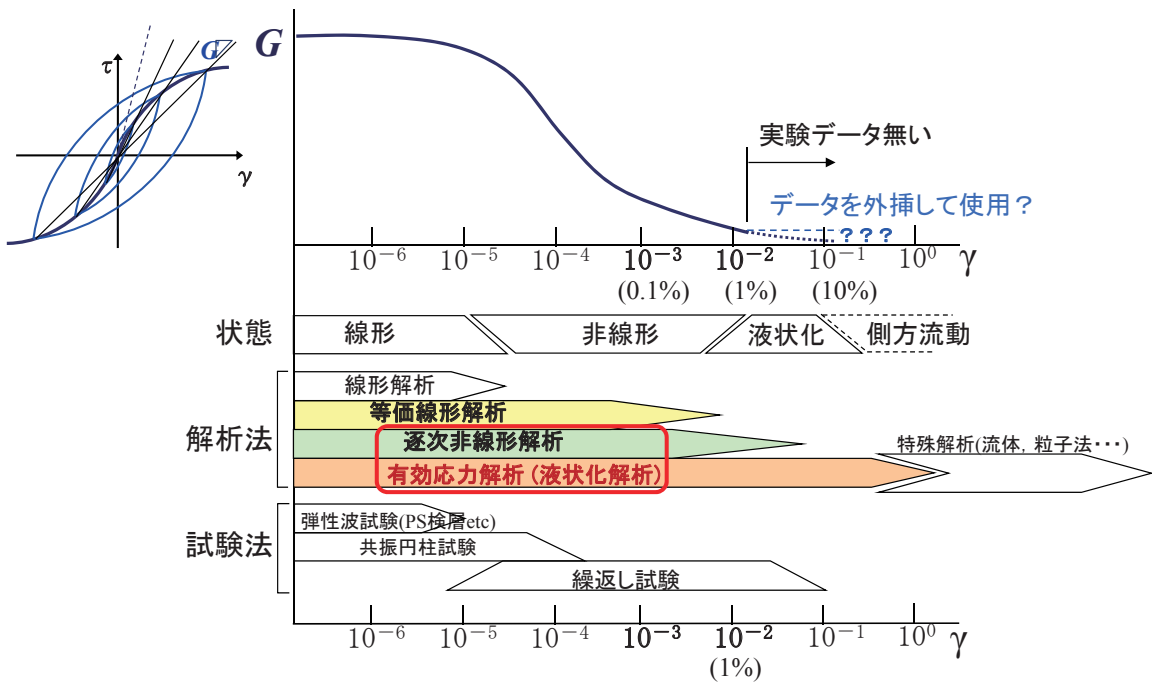
運動方程式に組込む
(復元力特性)

50

飽和砂と乾燥砂 (R=0) の差異



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



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

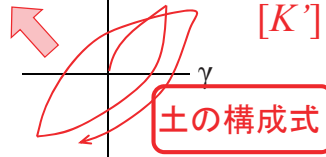
非線形復元力 τ

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

■ 空間

◎有限要素法

○差分法



■ 時間(差分)・・・時間領域でStep by Step

◎Newmark- β , ○Wilson- θ , ○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

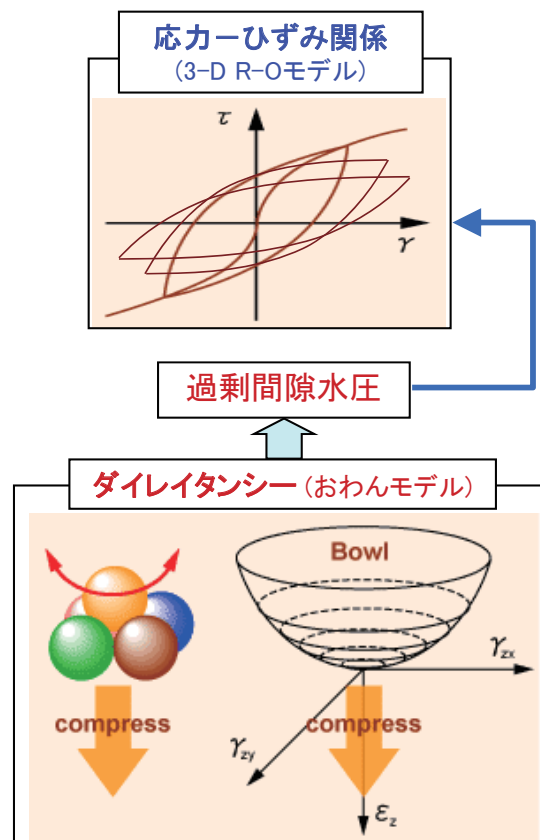
「非線形」と
「過剰間隙水圧」
が考慮できる



「液状化」を
考慮できる
解析へ・・・

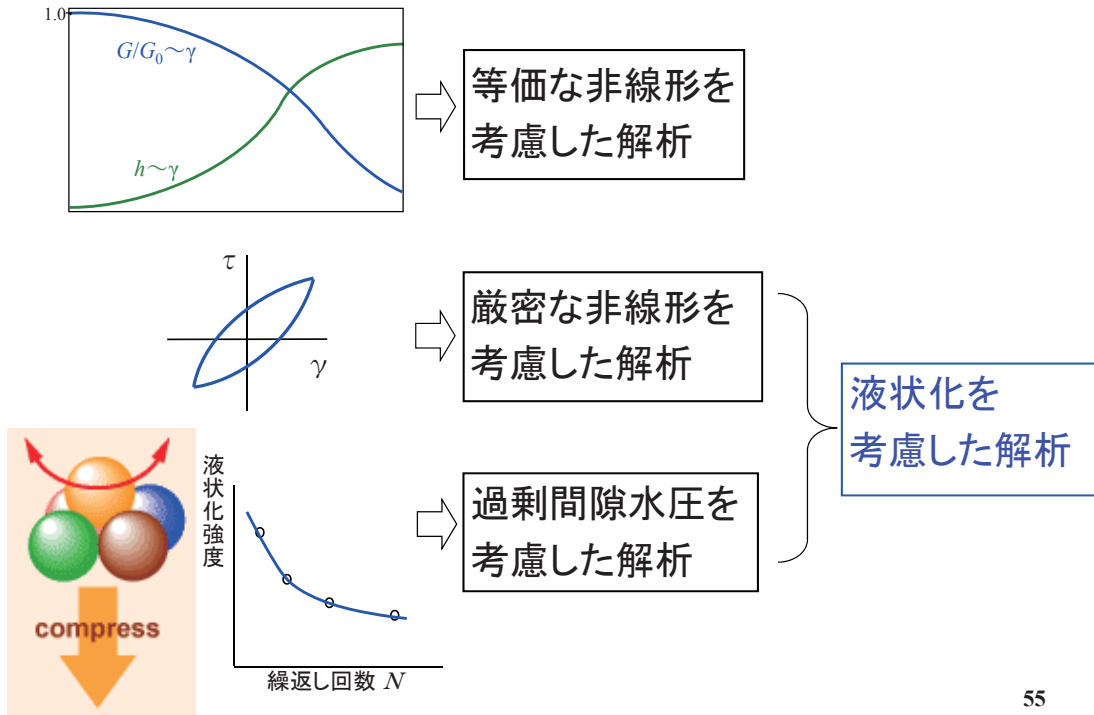


有効応力解析



54

いろんな非線形解析ができる材料は揃った

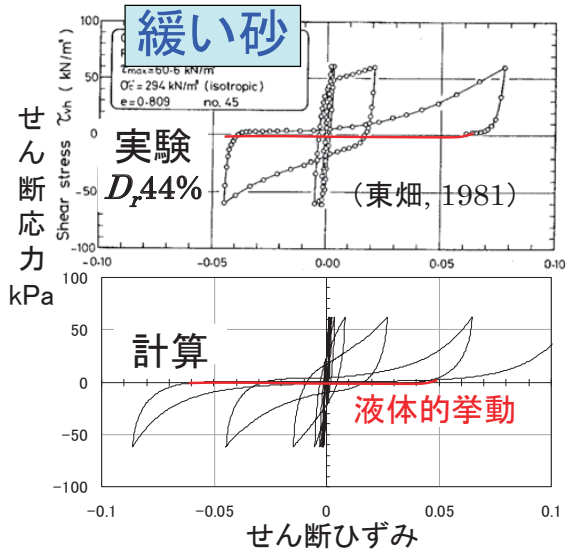


55

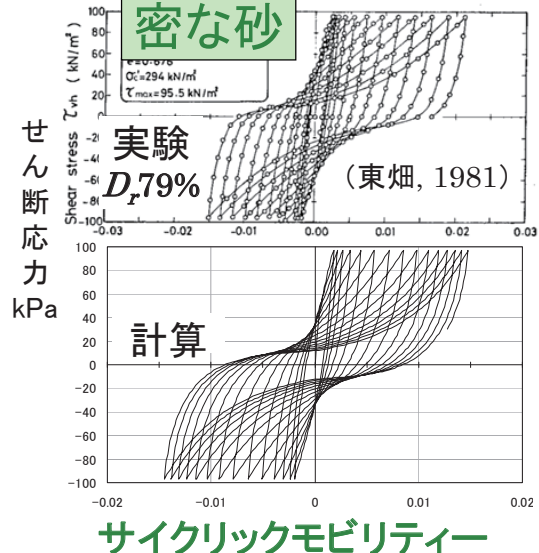
種々の土の応力～ひずみ関係の特徴とシミュレーション

56

繰返し試験結果と 構成式によるシミュレーション

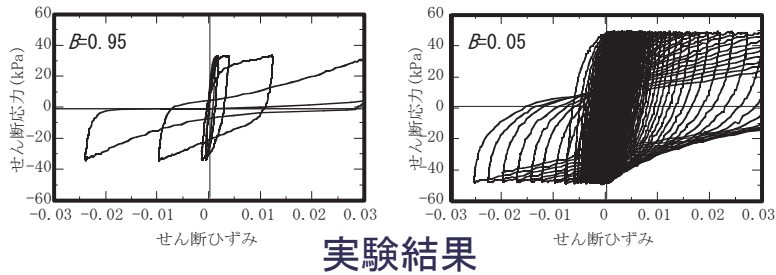
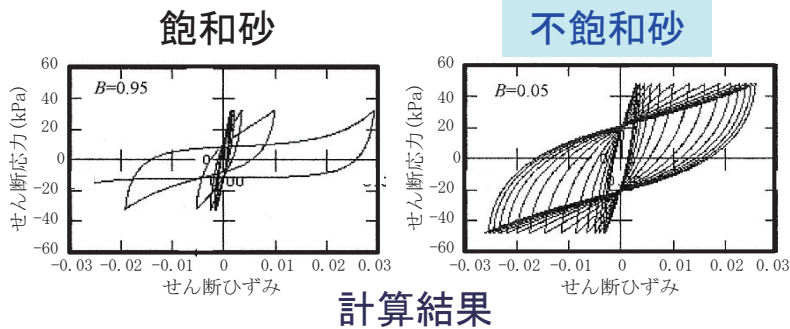


緩い砂は一気に液状化
に至る



密な砂は”ねばり強さ”があり
液状化しにくい

57

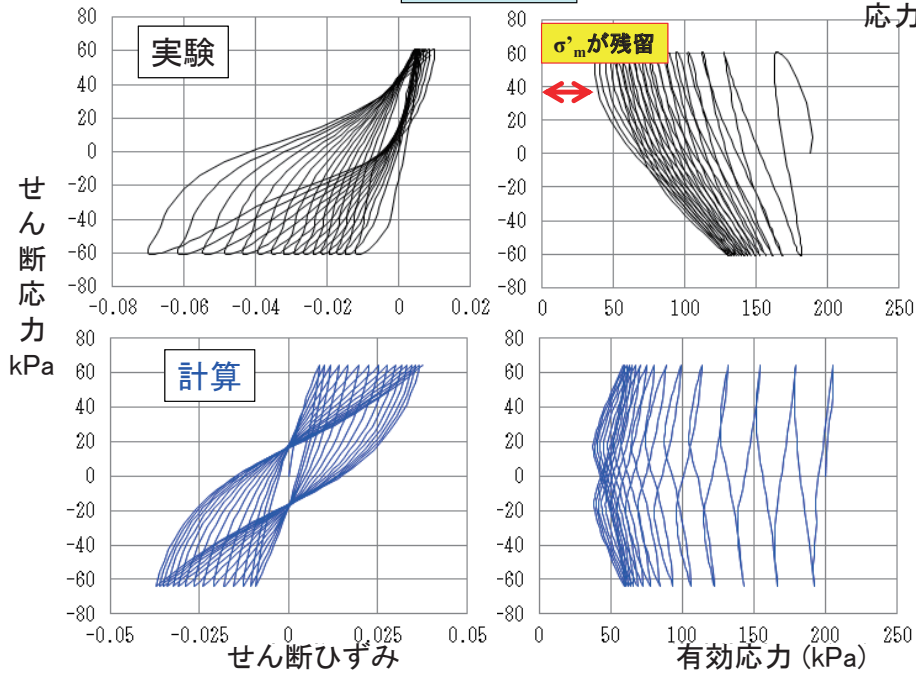


不飽和砂は液状化しにくい

58

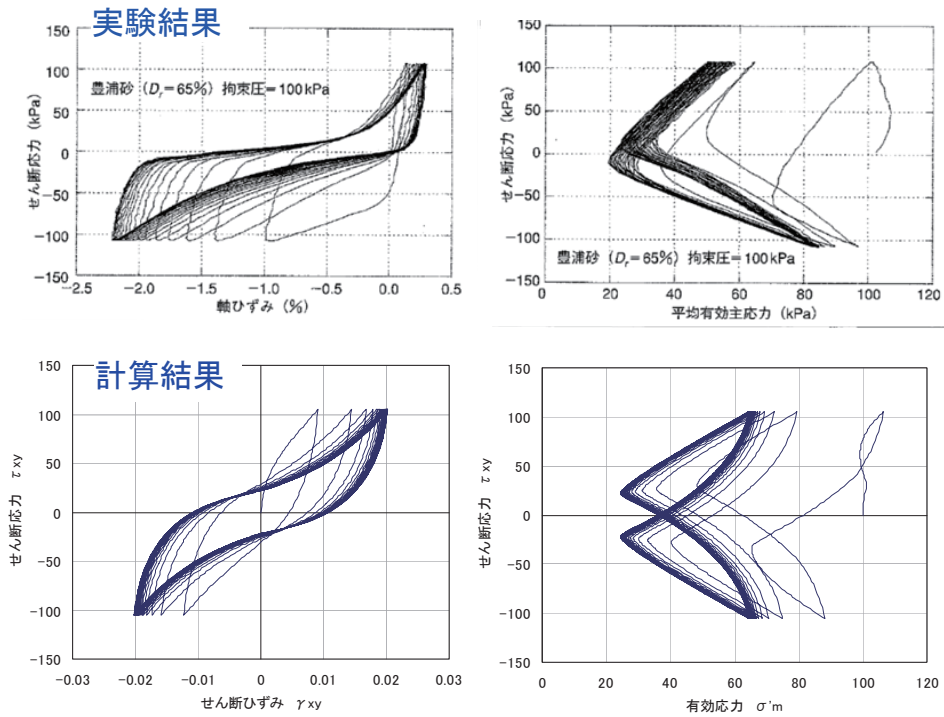
粘土

浦安の不攪乱試料
応力比0.321



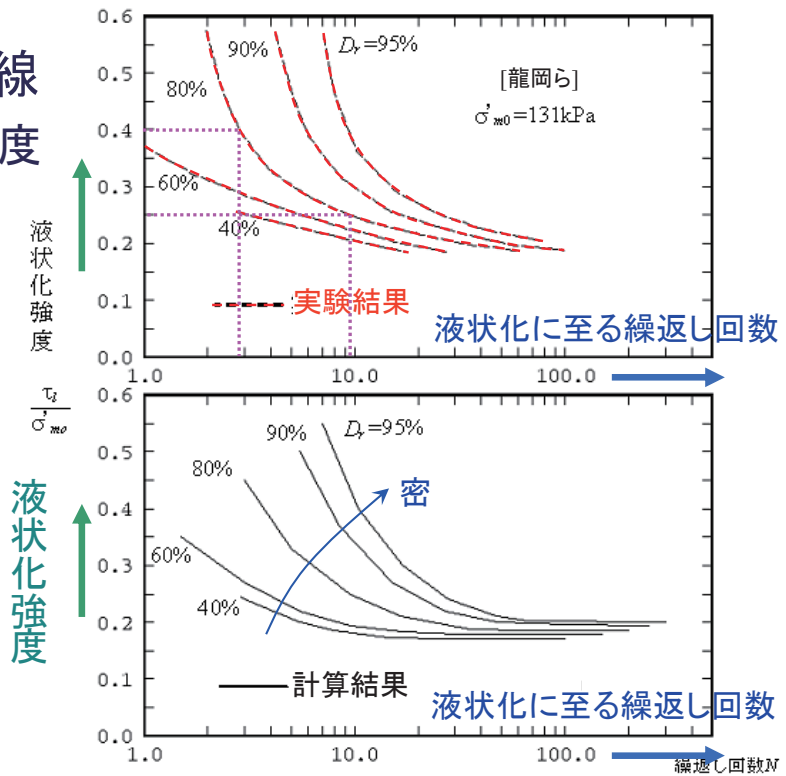
- ・ひずみは徐々に増加(軟化はする)
- ・有効応力はゼロにならない(液状化はしない)

薬液注入改良体

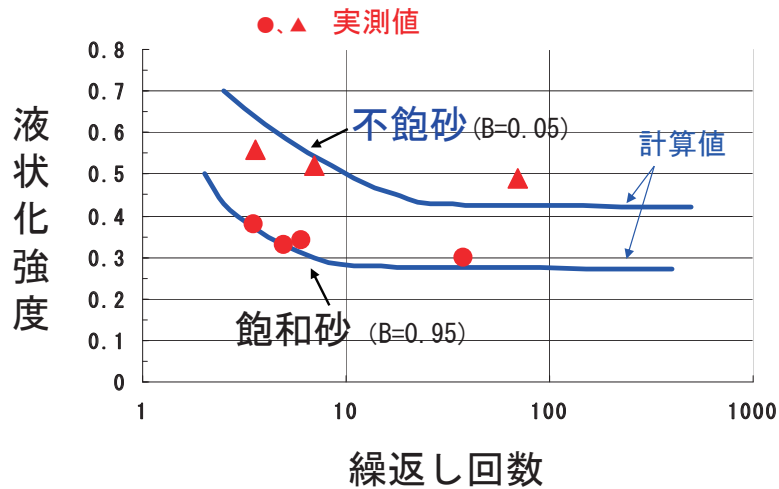


砂の 液状化強度曲線 (非排水繰返し強度 ～繰返し回数)

cf. 金属材料の
疲労曲線

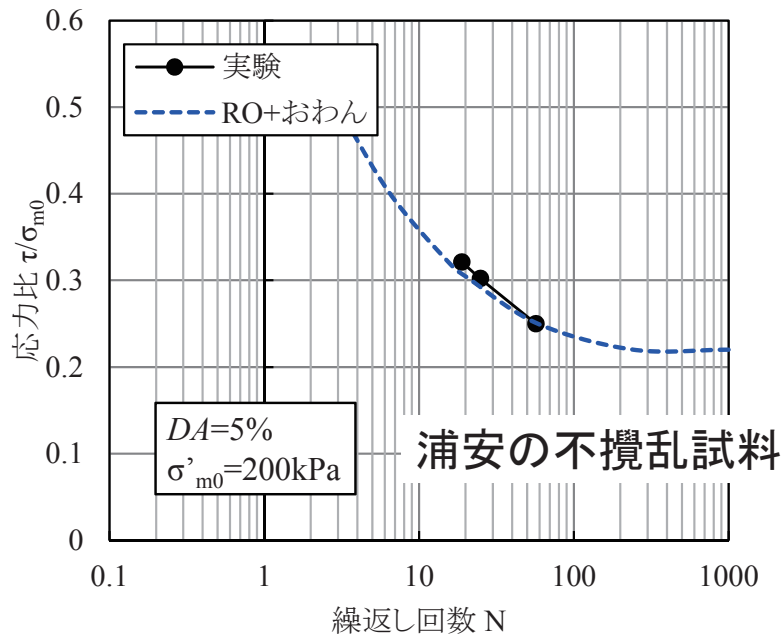


飽和砂と不飽和砂の液状化強度曲線 (豊浦砂、 $D_r = 70\%$)



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

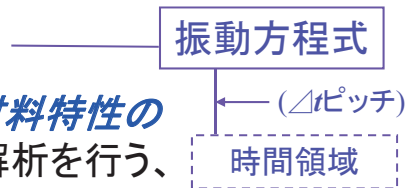
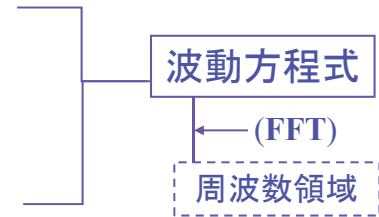
- ひずみの小さい場合には使えるが、実用的にはほとんど使われない

■等価線形解析

- 材料の非線形性を近似した線形解析

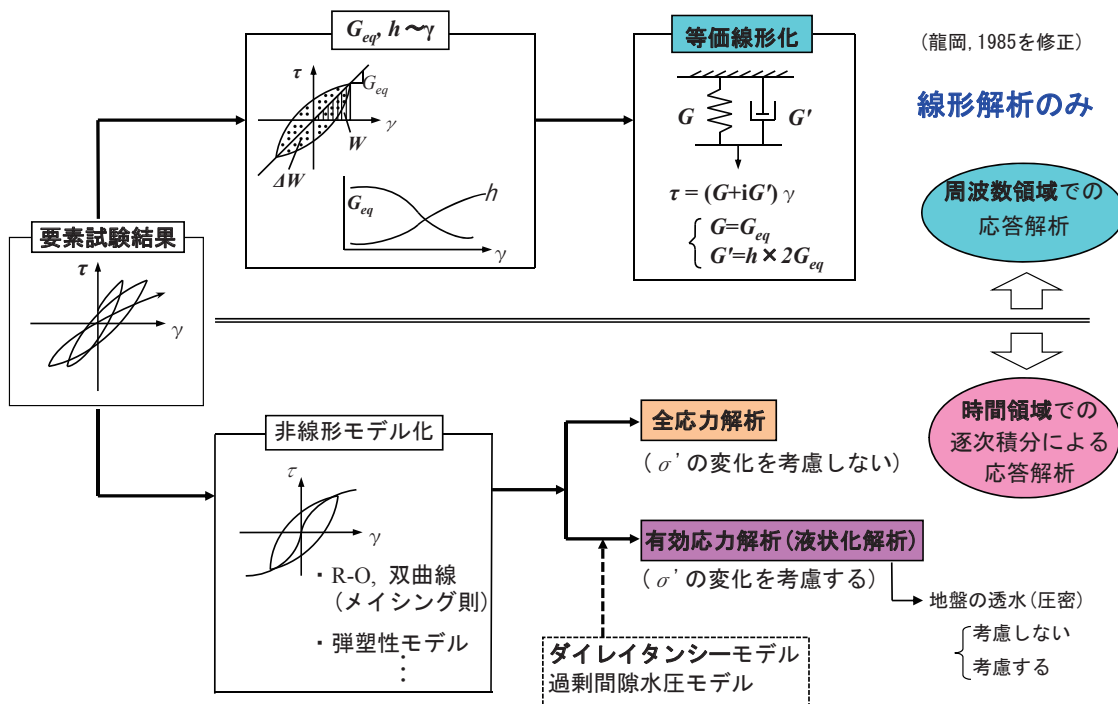
■逐次非線形解析

- 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



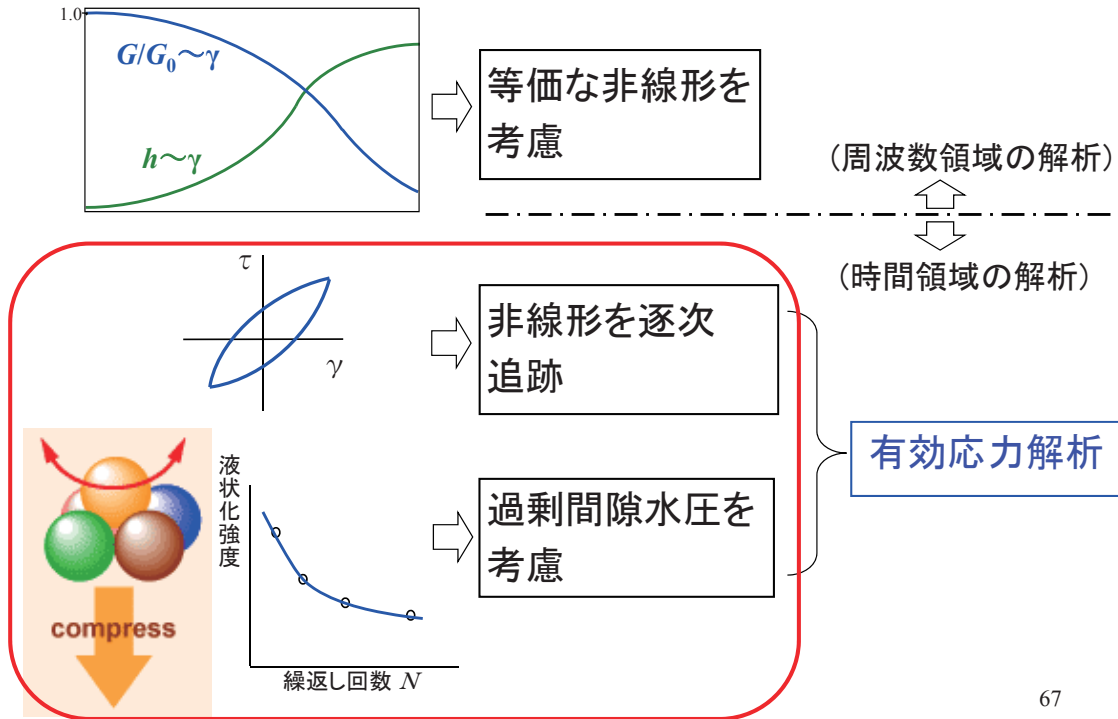
65

土の応力-ひずみ関係のモデル化と地震応答解析手法



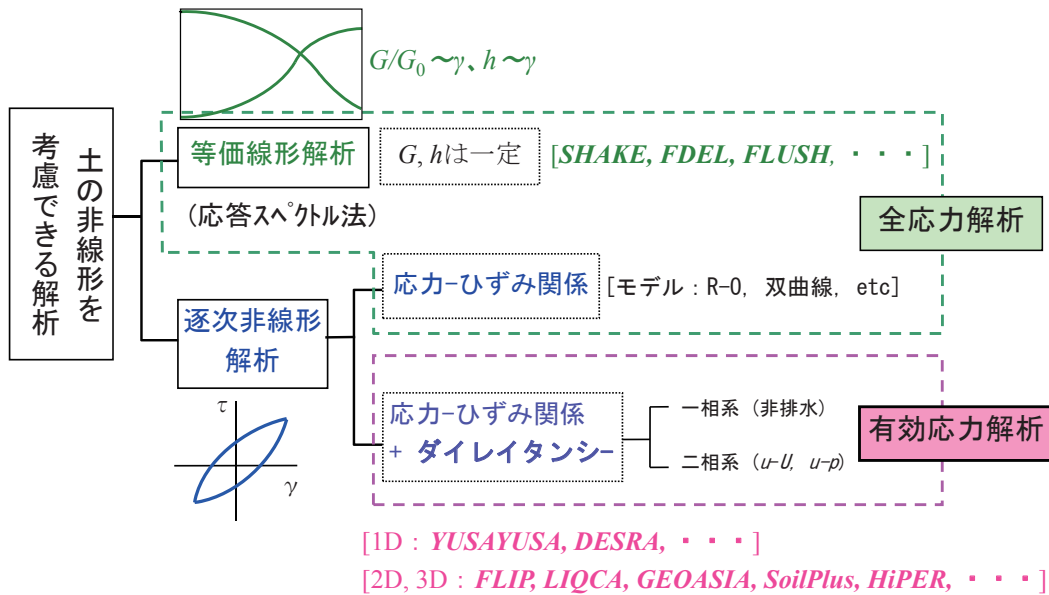
66

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

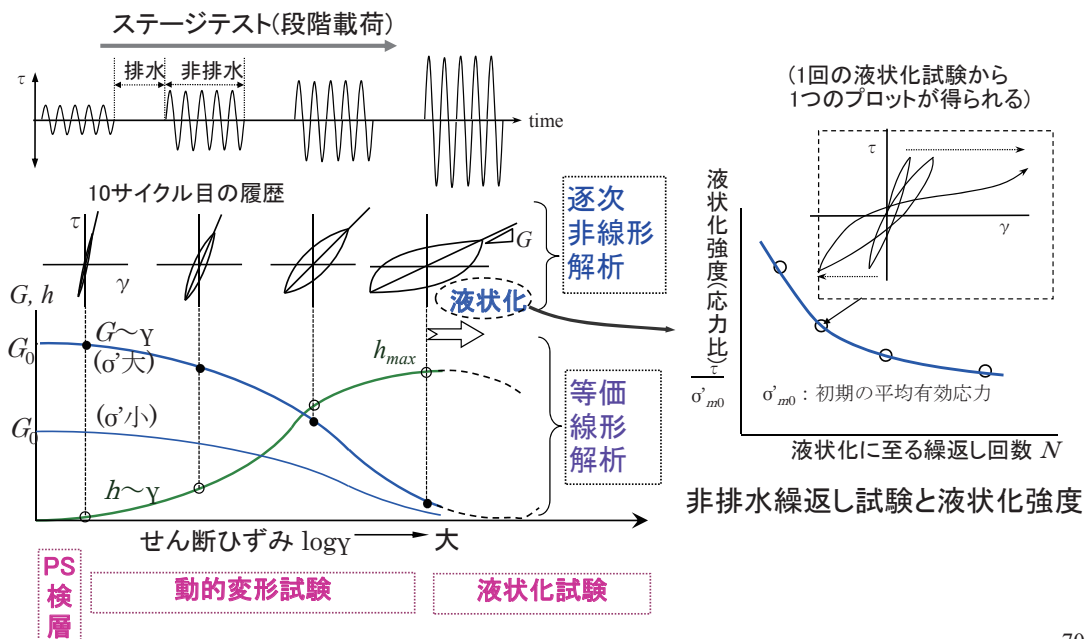
地盤の計算法と土質調査

解析手法		ひずみ	主な地盤データ	試験, 調査
線形		~10 ⁻⁵	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 γ依存 (G/G ₀ ~γ, h~γ)	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

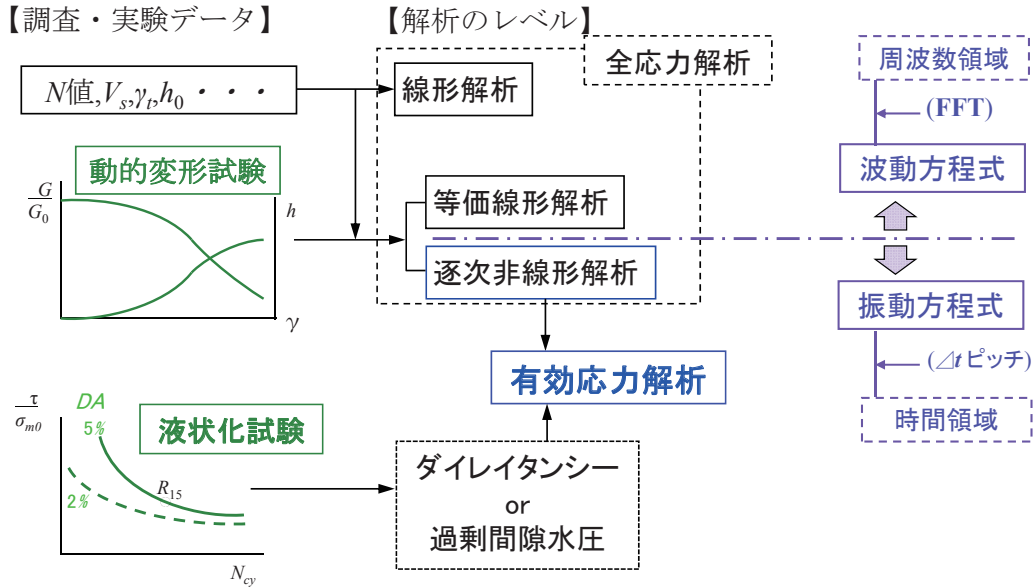
(非線形特性と液状化特性)



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 δ 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

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

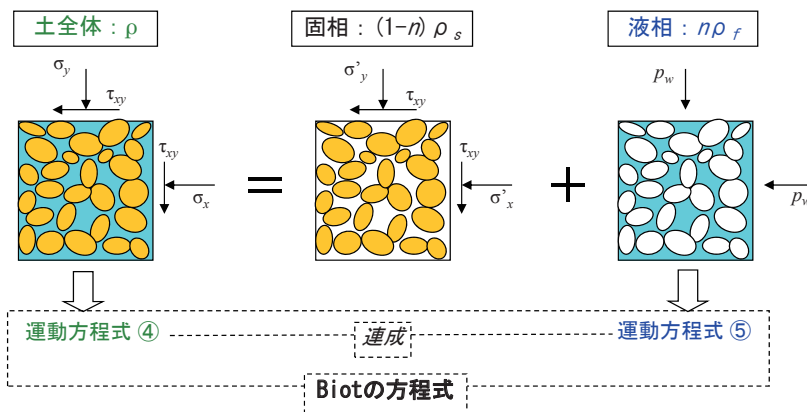
$$\{\nabla\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{Bmatrix}; \text{ナブラ} \quad [L] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \{\nabla\}^T \cdot \{\nabla\} &= \Delta; \text{ラプラシアン} \\ [L]^T \{m\} &= \{\nabla\} \end{aligned}$$

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

ρ : 土全体の質量
 ρ_s : 土粒子の質量 n : 間隙率=空隙の体積/全体の体積
 ρ_f : 水の質量



運動方程式

- 全応力解析 (一相系)

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

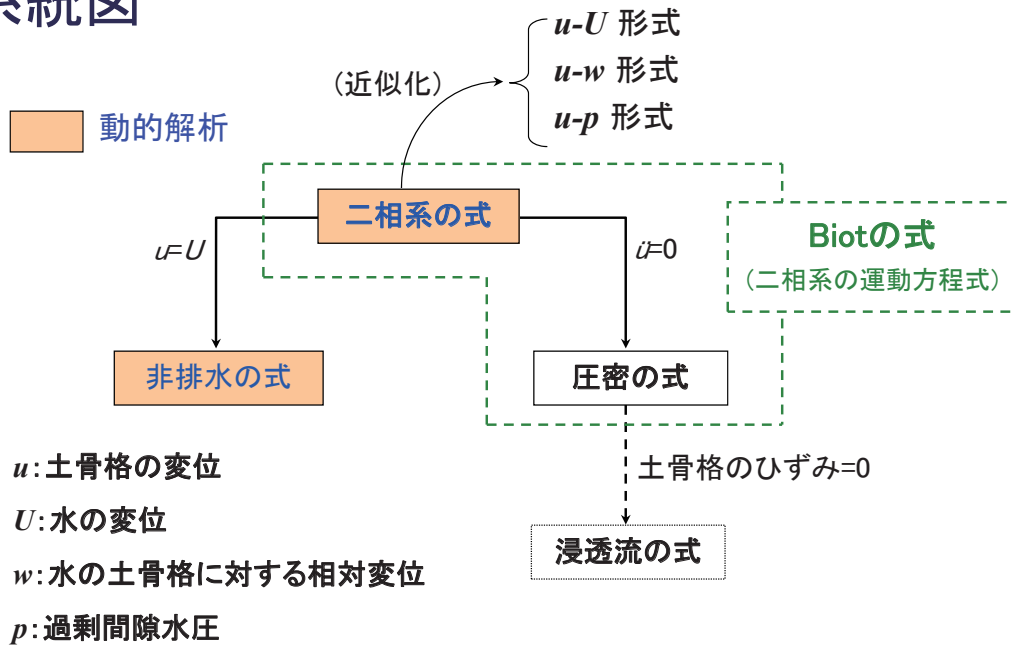
- 有効応力解析 (二相系) u : 土骨格の変位
 U : 水の変位

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

 固相
 液相
 連成

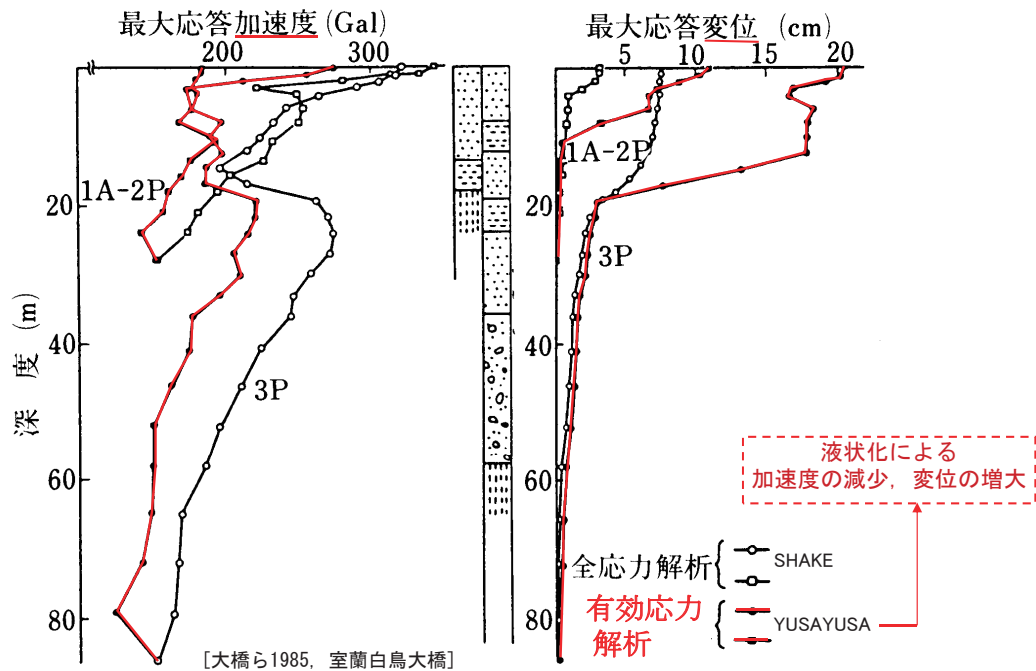
77

有効応力法における支配方程式の系統図



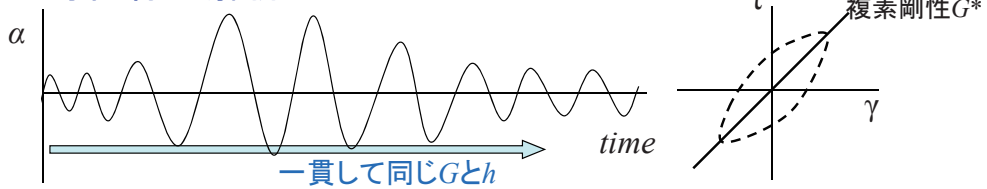
78

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



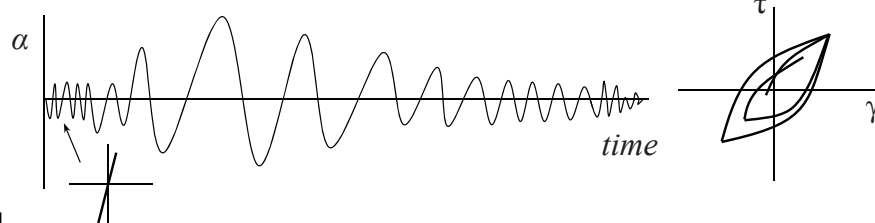
79

等価線形解析

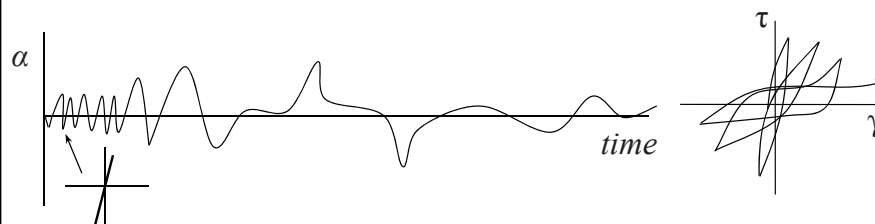


全
応
力
解
析

非線形解析



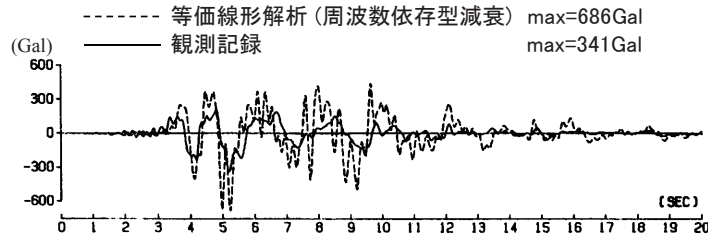
有
効
応
力
解
析



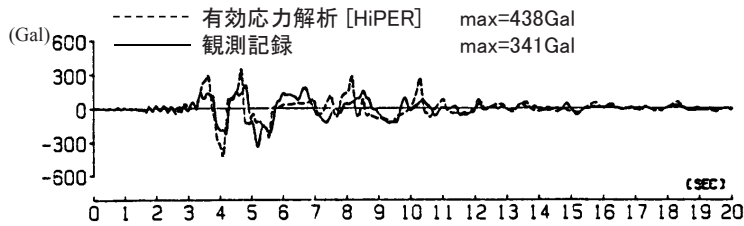
80

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

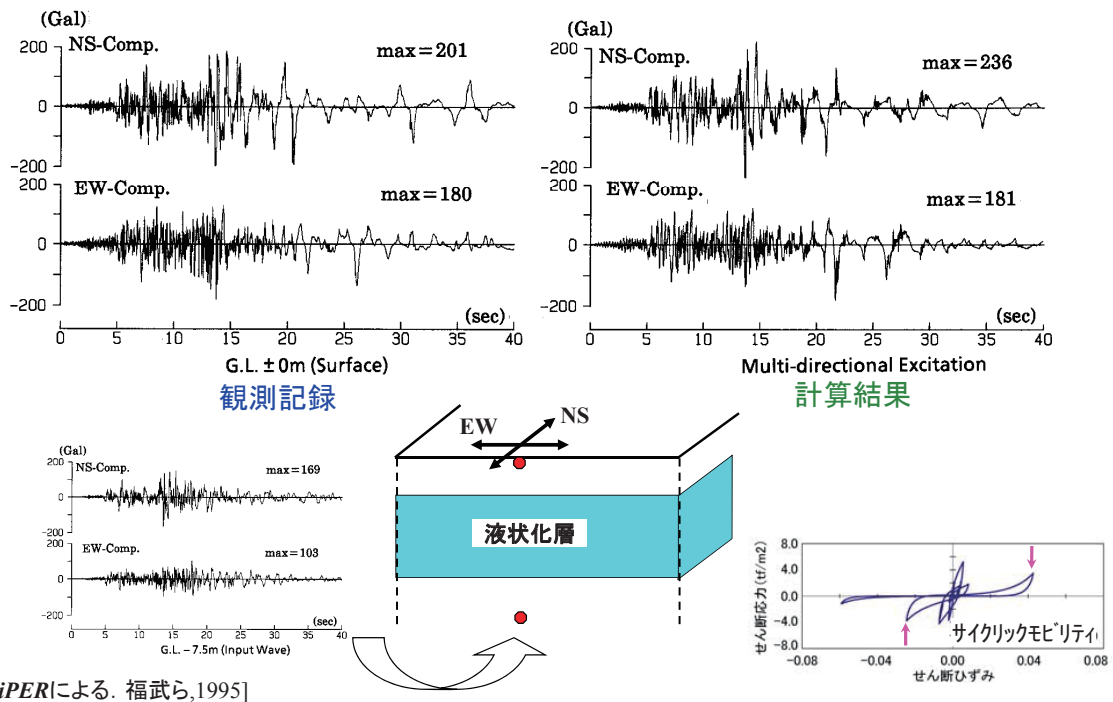


(b) 有効応力解析(R-O+おわんモデル)と観測記録の比較

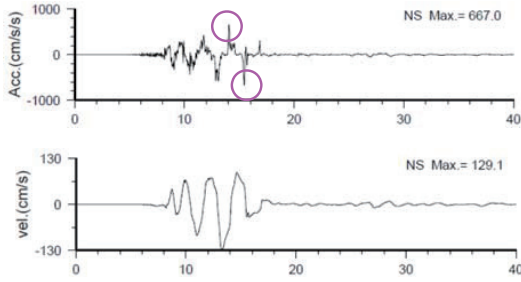
81

地震のアレー観測記録との比較

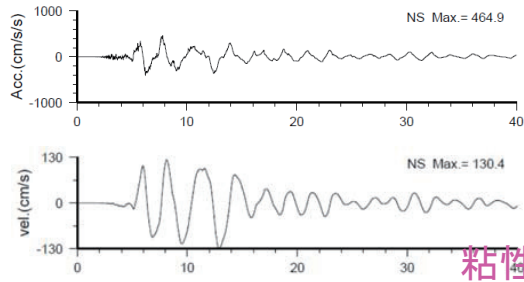
・ 液状化地盤の加速度記録 (2方向同時入力)



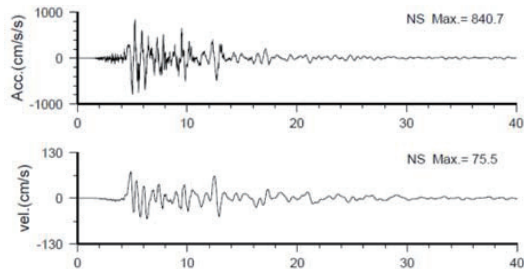
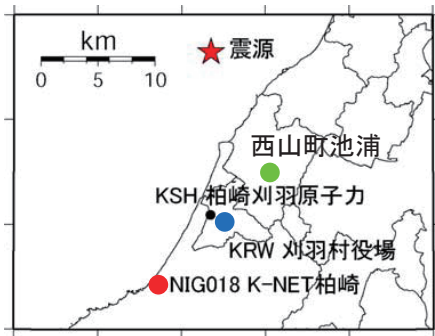
震源近傍の観測波形



● K-NET柏崎(NIG018) 砂質土



● 刈羽村役場(KRW) 粘性土 軟弱



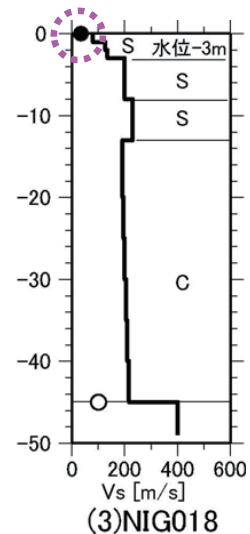
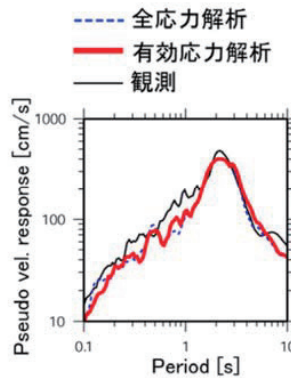
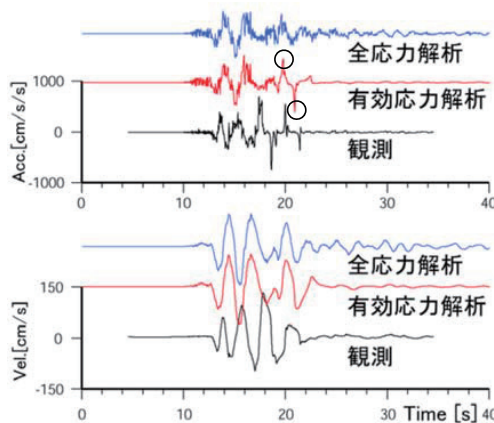
● 西山町池浦 硬い

#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)

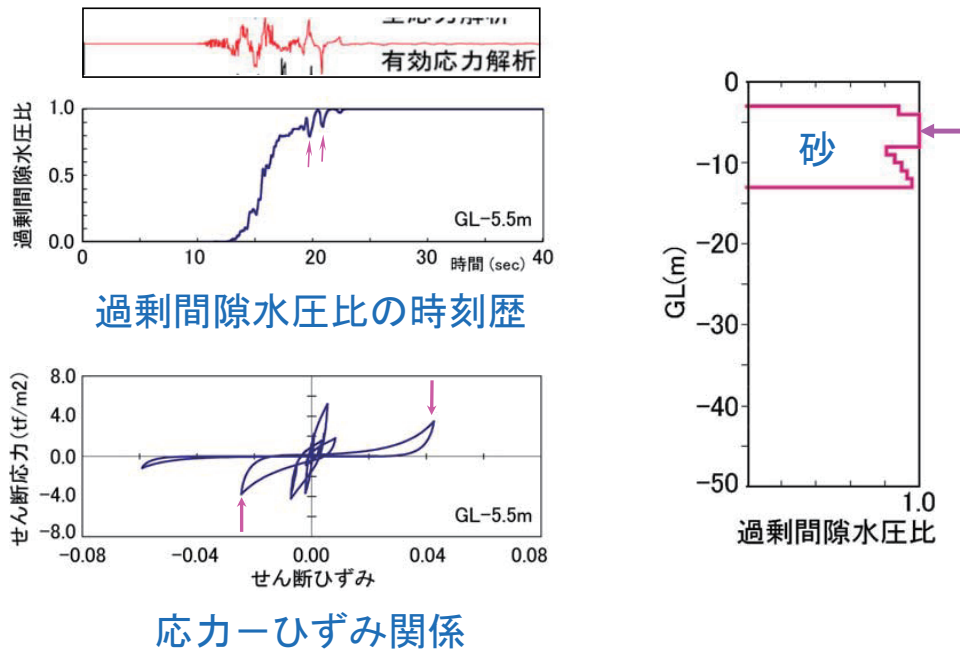


(3)NIG018

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

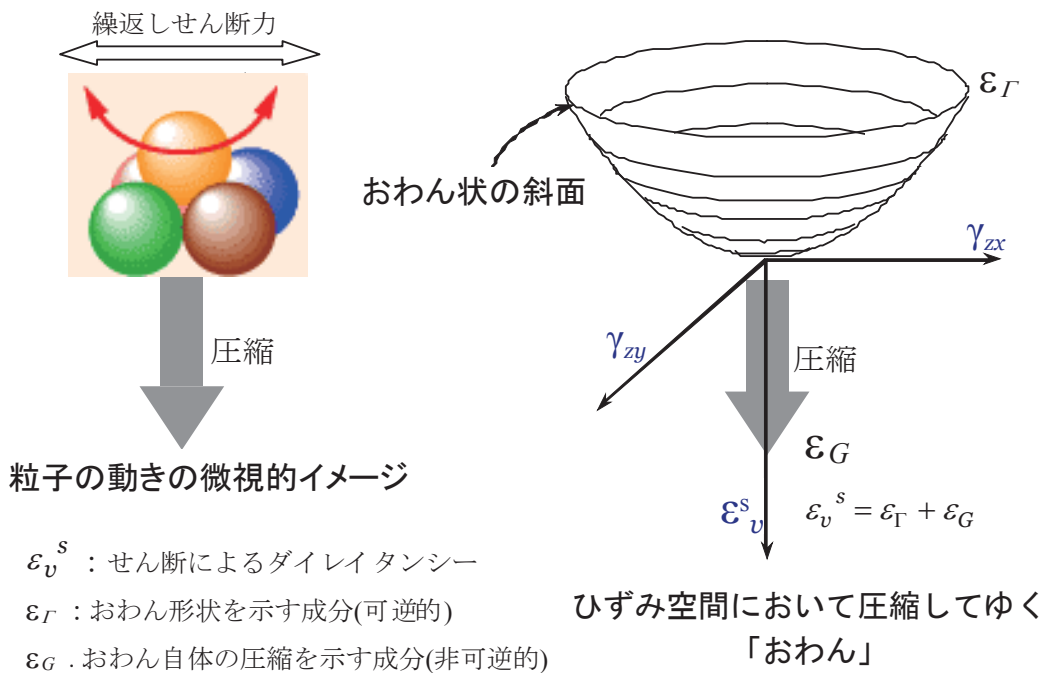
- 1) 吉見吉昭・福武毅芳:「地盤液状化の物理と評価・対策技術」, 技報堂出版 (2005年11月)
- 2) 建築・土木 基礎の耐震設計と解析例, 総合土木研究所 (2008年10月)
- 3) 東畑郁生: Geotechnical Earthquake Engineering, Springer, 2008

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



(福武ら, 1984)

88

ダイレイタンスー ε_v^s の 膨張成分 ε_Γ と圧縮成分 ε_G への分離

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

89

Dilatancy ε_v^s based on *Bowl model*

Dilatancy ε_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

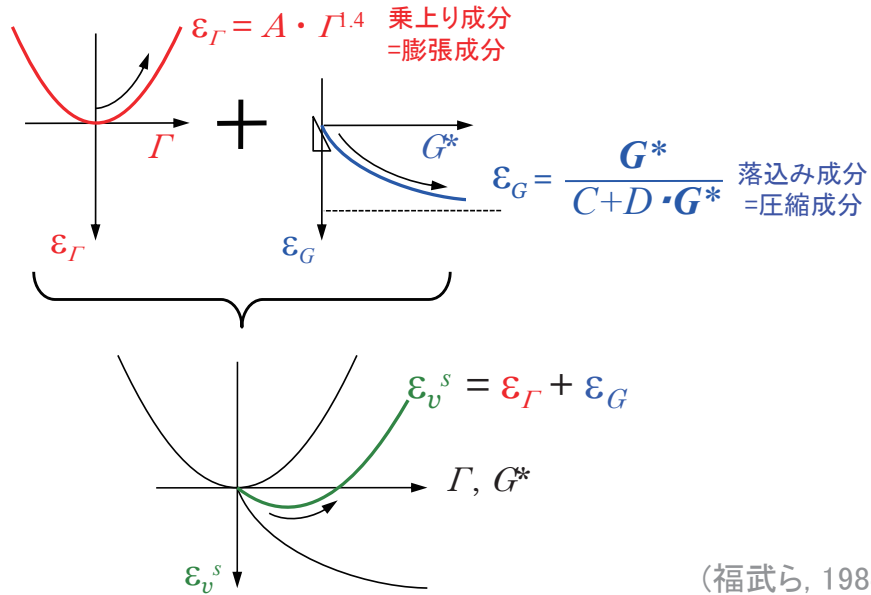
$$G^* = \sum \sqrt{\Delta\gamma_{zx}^2 + \Delta\gamma_{zy}^2 + \Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \Delta(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \Delta(\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

(福武ら, 1984;
1989)

90

単調载荷の場合の重ね合わせ法則:

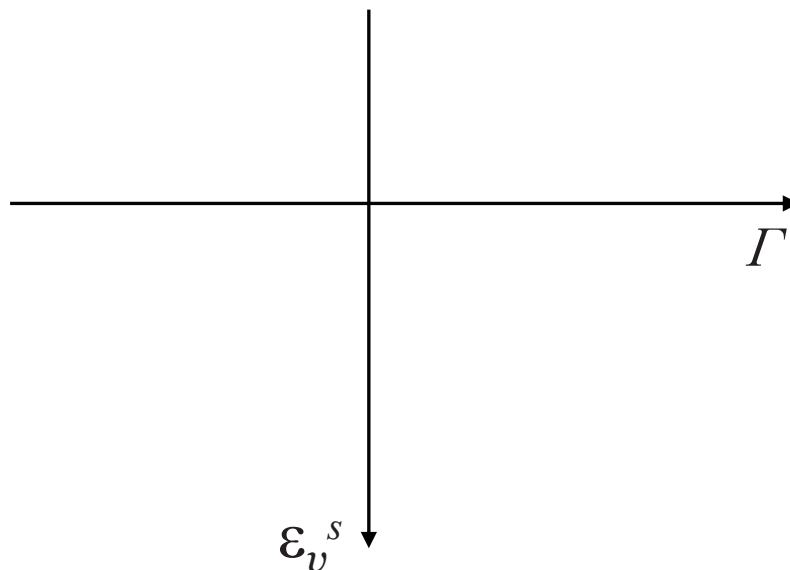
$$\varepsilon_v^s = \varepsilon_\Gamma + \varepsilon_G$$



(福武ら, 1984;
1989)

91

デモンストレーション



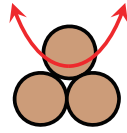
92

密度や粒子構造の違いによる ダイレイタンスの差異

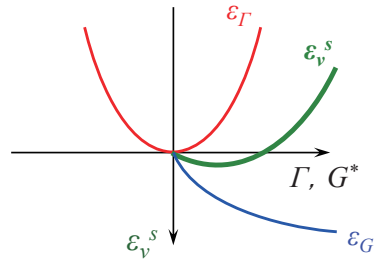
dense sand and gravel



膨張成分: ε_Γ 大
圧縮成分: ε_G 小



Particle fabric

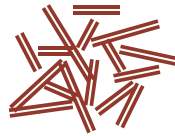


(a) dense soil

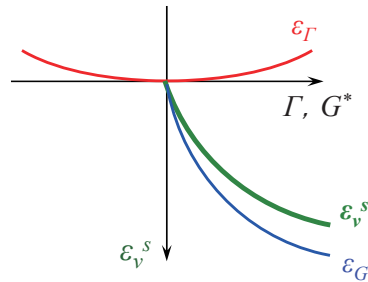
loose sand and clay



膨張成分: ε_Γ 小
圧縮成分: ε_G 大



Card house fabric



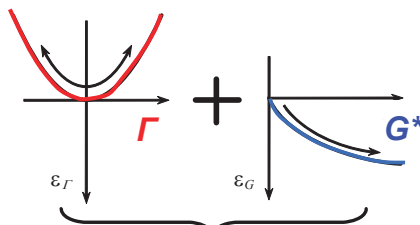
(b) loose soil

(福武, 1997)

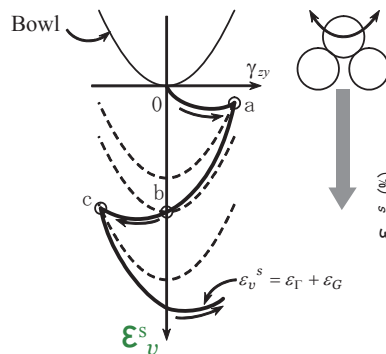
93

繰返しせん断 のダイレイタンスの考え方

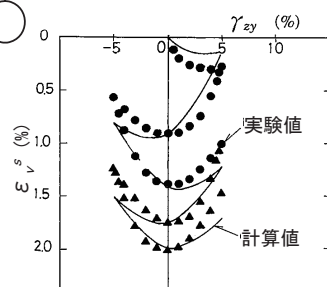
※FLIPのカクテルグラス
モデルも同じ



(福武, 1989)

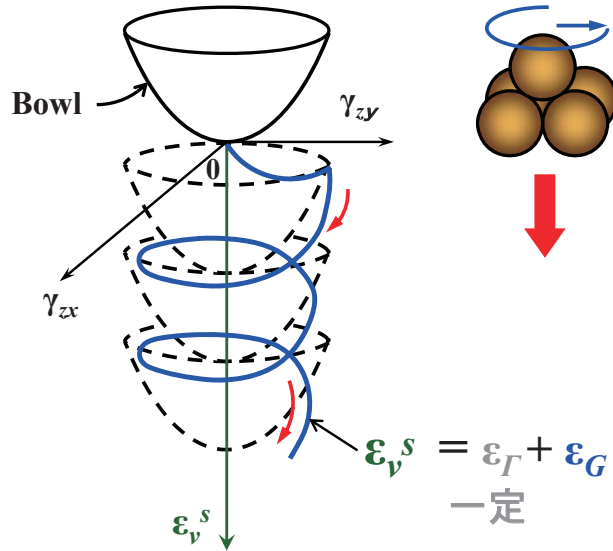


[実験結果と計算結果]



94

Dilatancy in the case of repeated circular simple shearing.

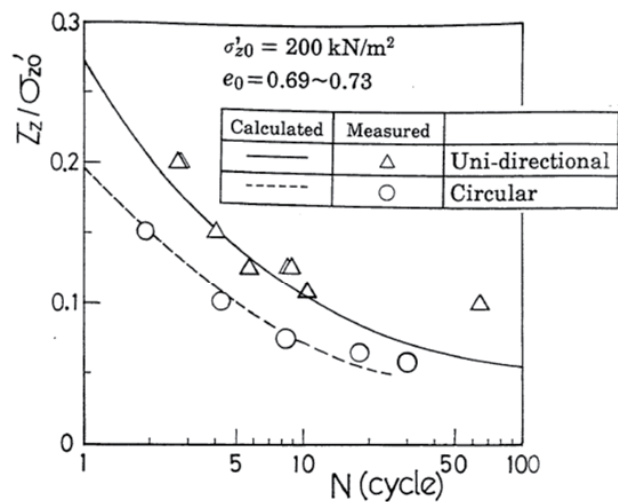
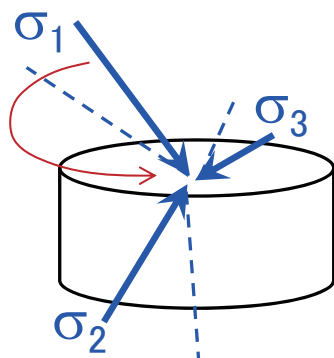


(福武, 1989)

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 (τ_z/σ_{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

ダイヤランシー成分 $d\varepsilon_v^s$ + 圧密成分 $d\varepsilon_v^c = 0$

$$\underline{d\varepsilon_v^s} + \underline{d\varepsilon_v^c} = 0$$

↑
おわん

$$d\varepsilon_v^c = \frac{0.434 \cdot C_s}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} \quad (\text{for } d\sigma'_m < 0)$$

$$d\varepsilon_v^c = \frac{0.434 \cdot C_c}{1+e_0} \cdot \frac{d\sigma'_m}{\sigma'_m} \quad (\text{for } d\sigma'_m > 0)$$

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)

98

計算方法

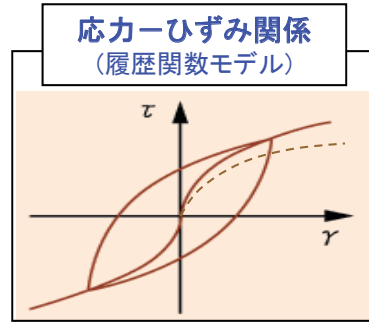
累加せん断ひずみ ……粒子構造の圧縮

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

合せん断ひずみ ……粒子の乗り上がり

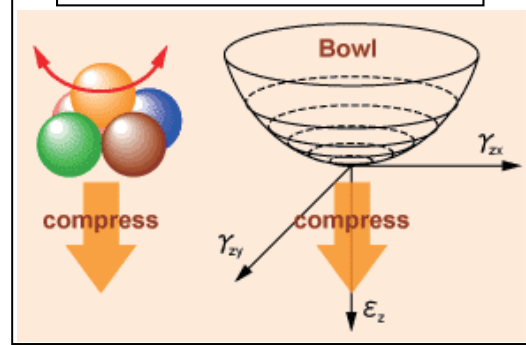
$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{zx}^2 + \gamma_{zy}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2}$$

⇒ 有効応力解析HiPER

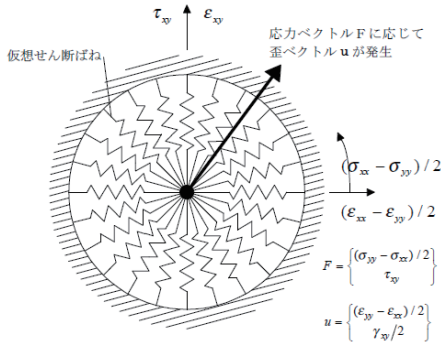


過剰間隙水圧

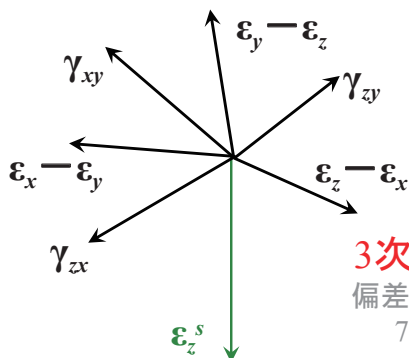
ダイレイタンス (Bowlモデル)



3次元構成式へ

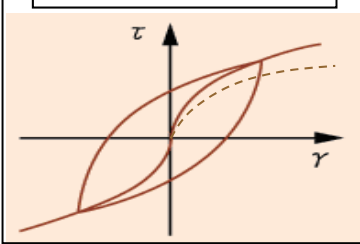


3次元に拡張
多重せん断
バネモデル



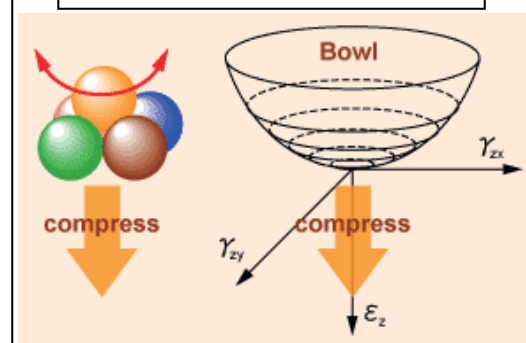
3次元に拡張
偏差・体積ひずみ
7次元空間

応力-ひずみ関係 (履歴関数モデル)



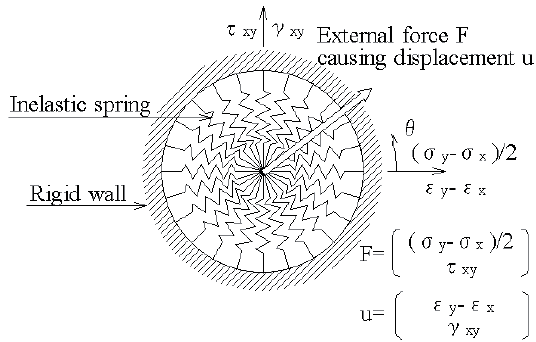
過剰間隙水圧

ダイレイタンス (Bowlモデル)

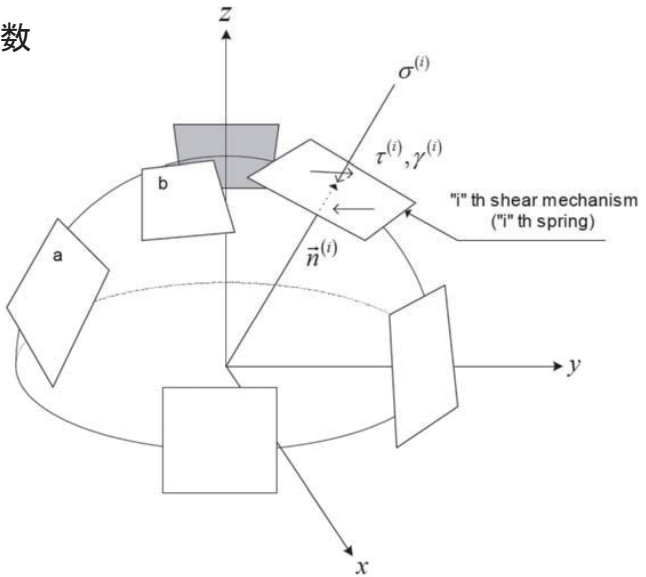


多重せん断機構による せん断応力～せん断ひずみ関係の2次元化, 3次元化

- ・客観性の原理とバネ本数
- ・主応力の回転

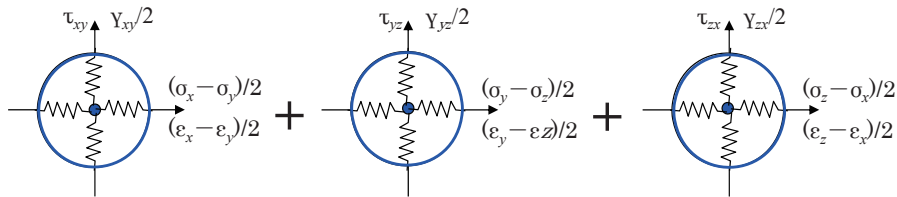


2D Multi-spring model
(東畑, 1981)



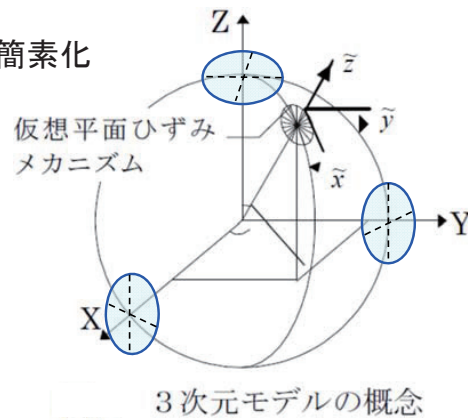
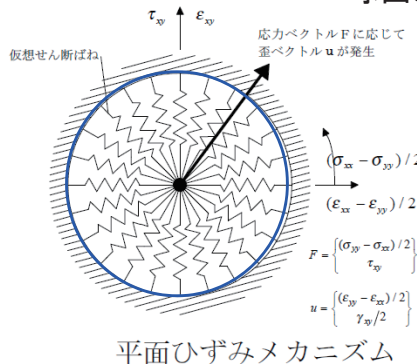
3D Multi-spring model
(Nishimura, S. and Towhata, 2004)

構成式の拡張(西村・東畑法の簡略法)



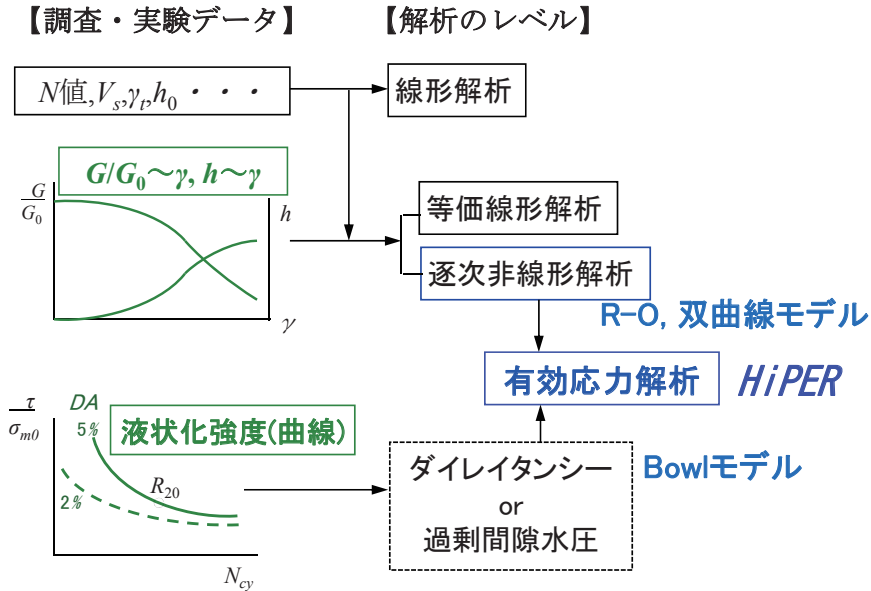
偏差応力～偏差ひずみ関係

- ・バネ本数削減
- ・球面メカニズムの簡素化



※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

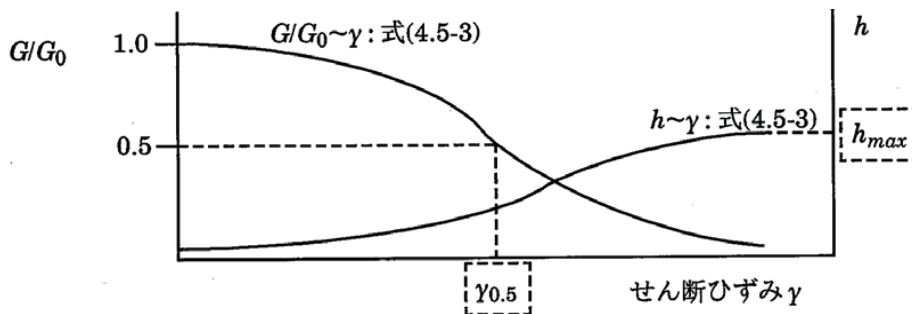


103

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)。

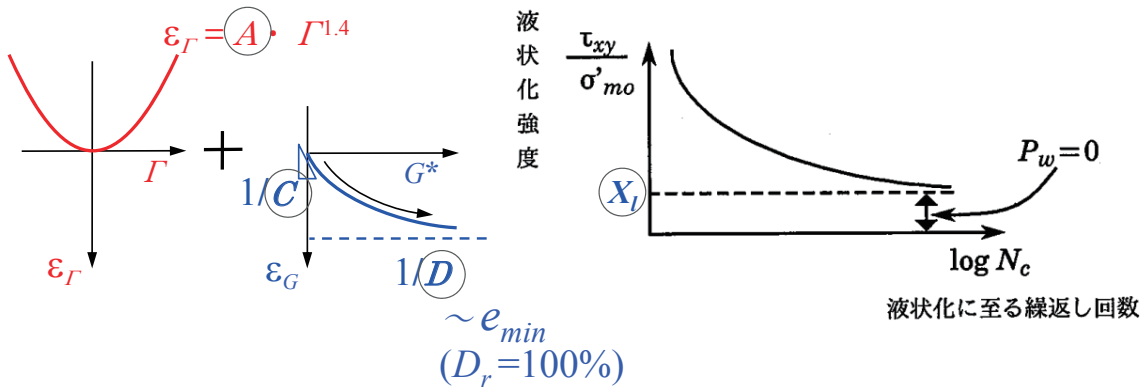


動的変形試験: $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係

104

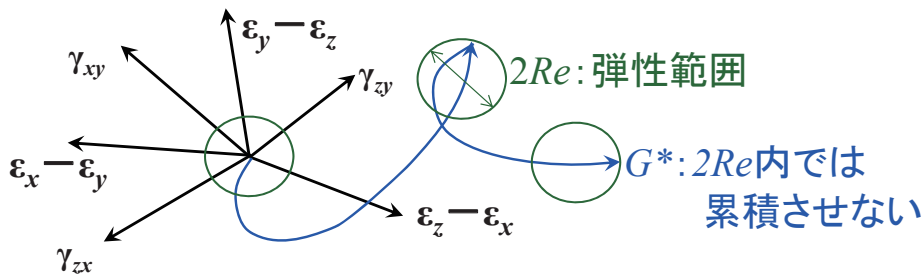
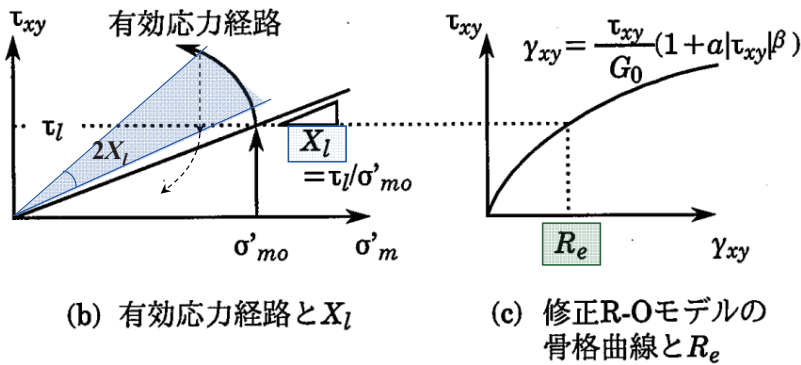
② おわんモデルのパラメータ

	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 ε_c を表す。 ε_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



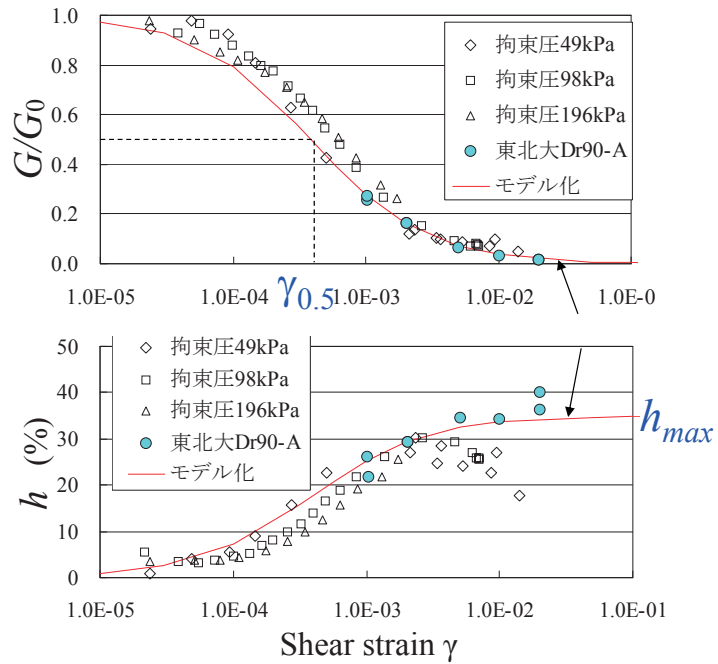
(福武, 1997)

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



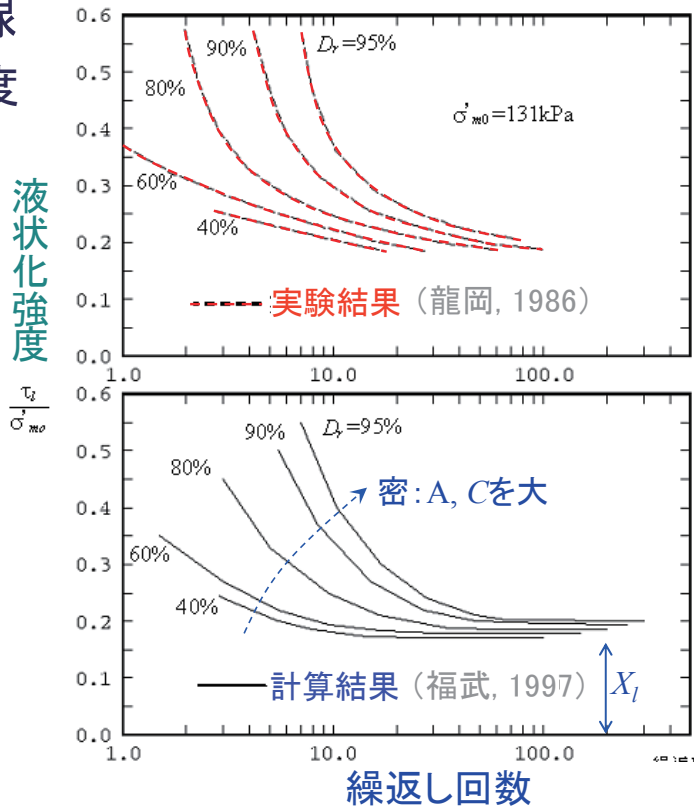
(E-defence報告書)

液状化強度曲線

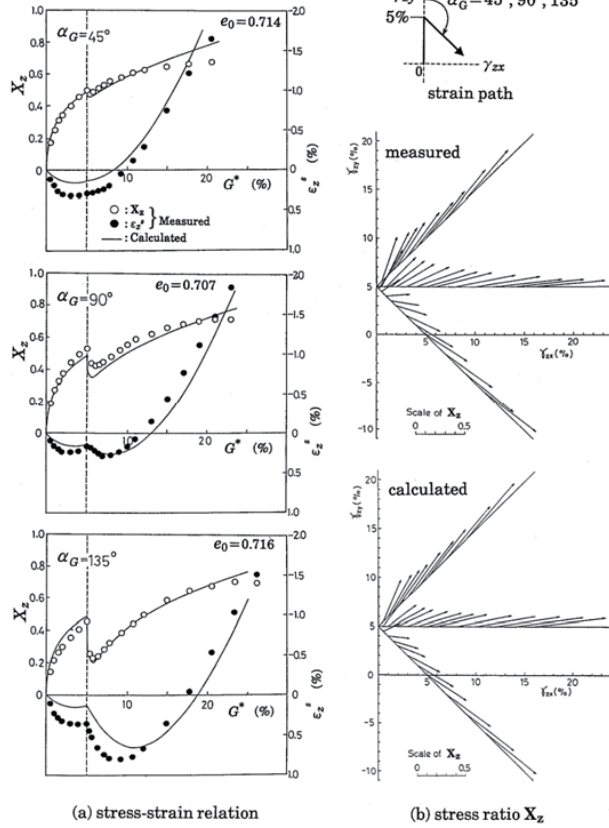
(非排水繰返し強度
～繰返し回数)



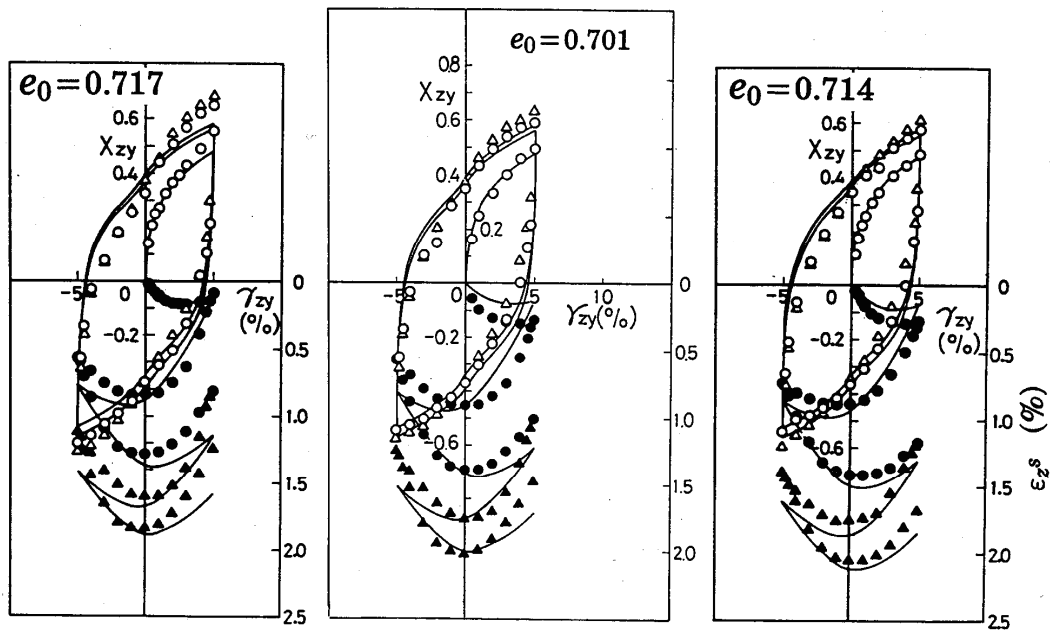
おわんモデルの
パラメータ設定



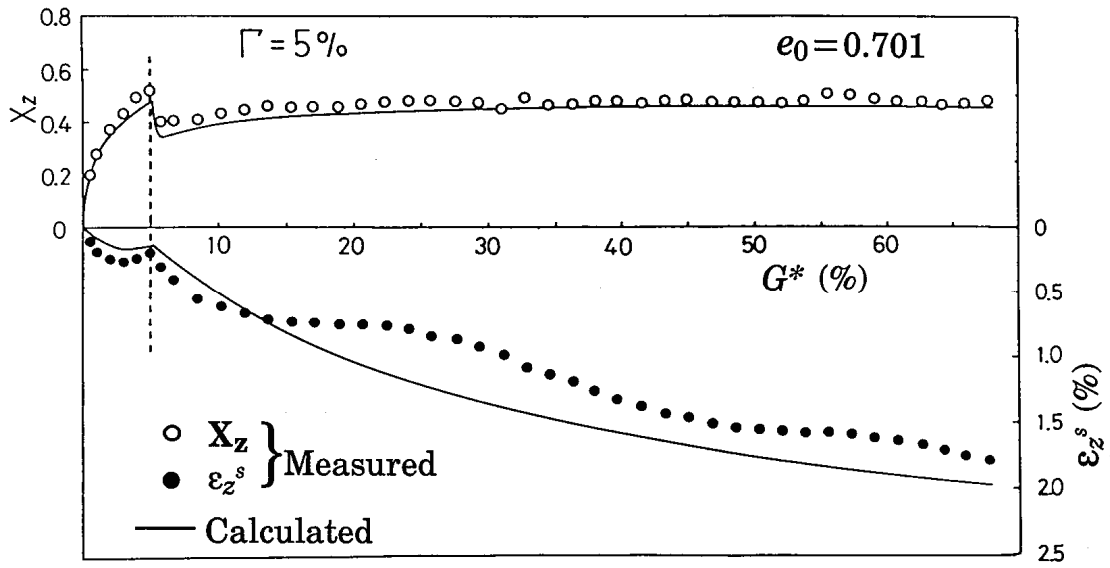
応力・ひずみ・ダイレイ
タンシー関係のシミュ
レーション
・折れ線経路



・ひずみ直線経路



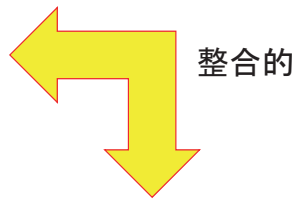
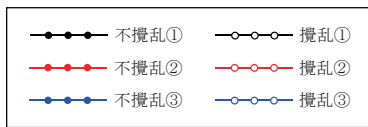
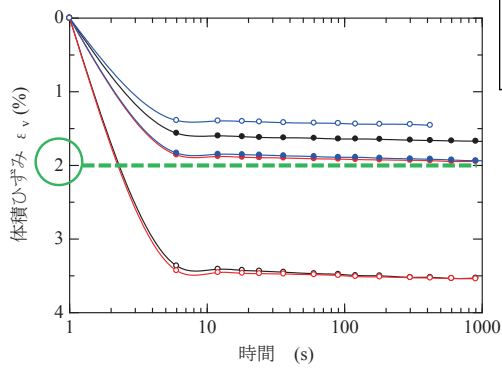
・ひずみ円経路



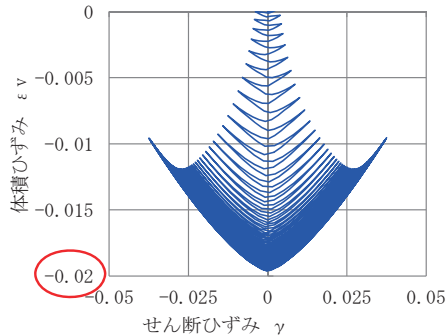
繰返し非排水三軸試験後の排水試験

砂(不攪乱)

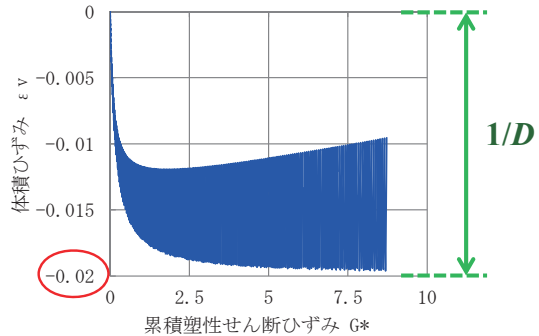
排水による体積圧縮



シミュレーションによる体積圧縮



最終圧縮量



動解析・液状化分野

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL DOCUMENT COLLECTION



株式会社マイダスイテジヤパン

〒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 | URL <http://jp.midasuser.com/geotech>

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