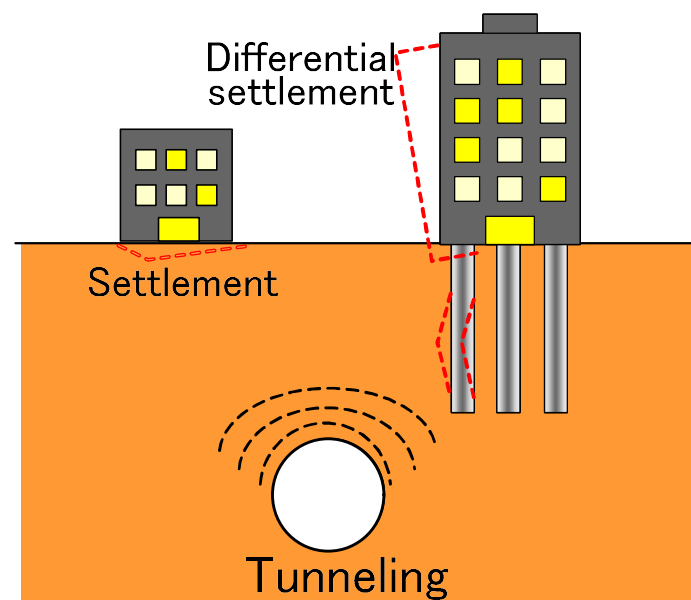
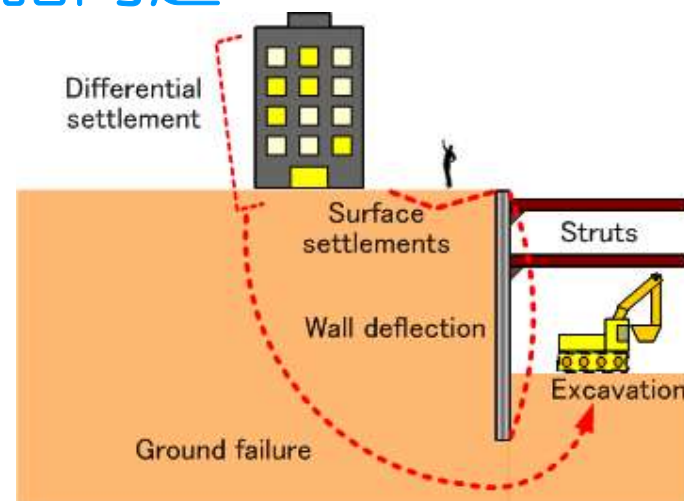
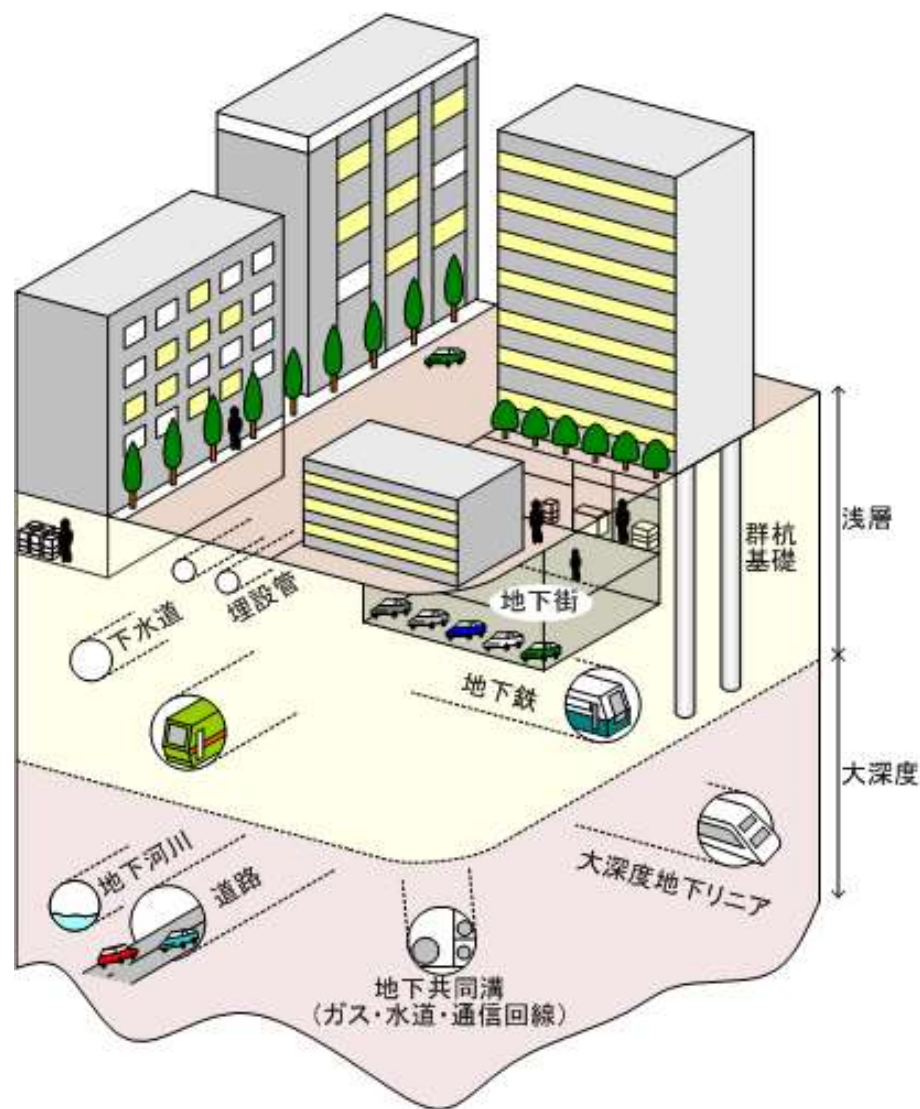


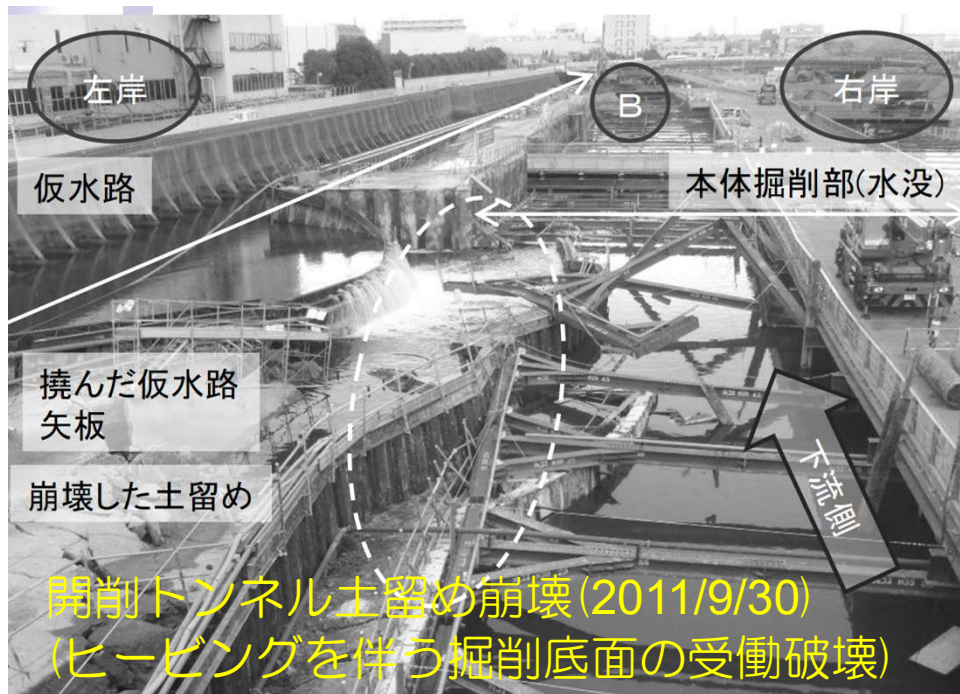
2021年(令和3年)11月15日
第6回「PLAXIS+tijモデル」プログラムセミナー

弾塑性構成モデル (Subloading t_{ij} モデル)の 地盤材料パラメーター設定例

1. はじめに

1.1 都市部における地盤工学的な諸問題



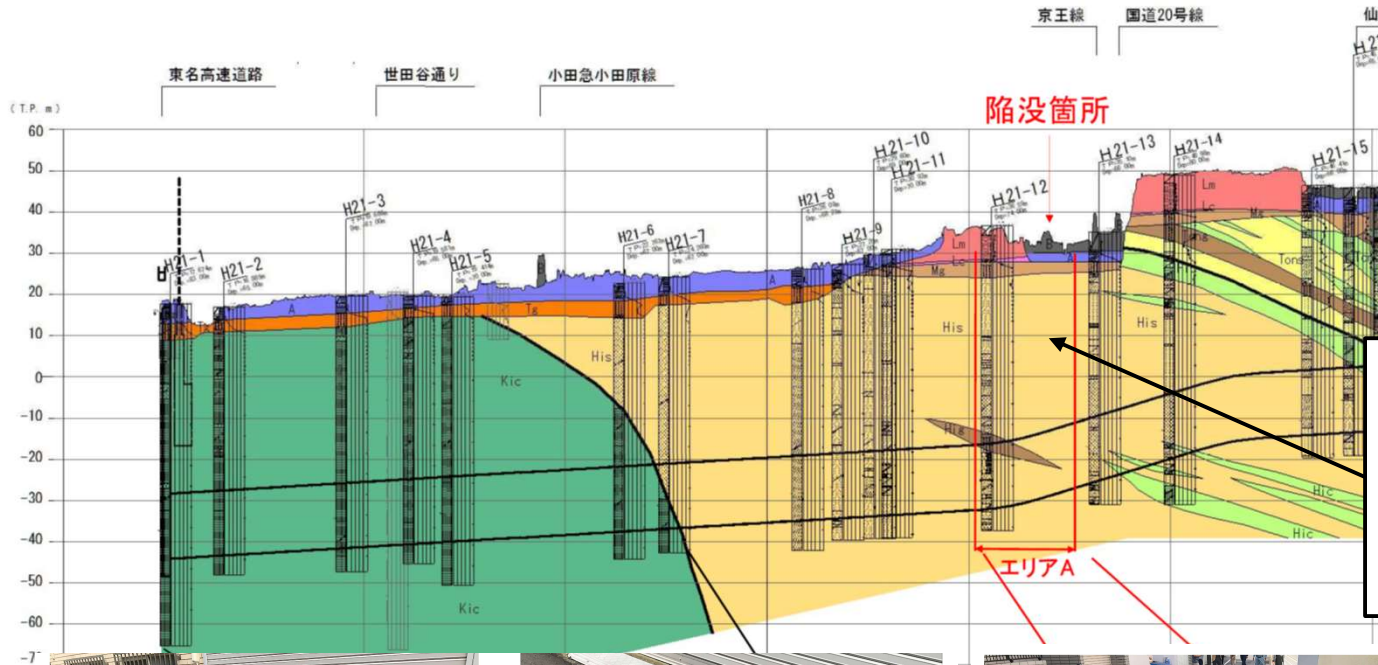


約14時間前
(大陥没の約50分前に天端部から肌落ち)



1. 東京外環の地盤状況

東京外環トンネル
 施工等検討委員会
 有識者委員会
 資料からの抜粋



- 東久留米層による
単一砂層
- 細砂～中砂主体
- 均等係数 $U_c=3$ 程度



写真2 陥没箇所(2020年10月18日_9:30水たまり)



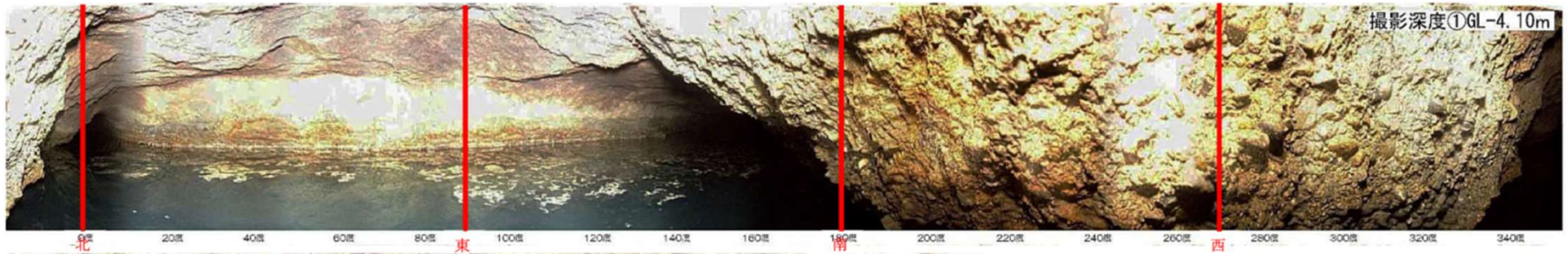
写真3 陥没箇所(2020年10月18日_11:50 舗装亀裂)



写真4 陥没箇所(2020年10月18日_12:30)

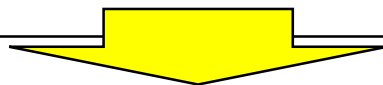


写真6 陥没箇所(2020年10月18日_13:00_西側から撮影)



1.2 素朴な疑問とトラブル発生の背景

- (1) どうしてよく似た事故が繰り返し発生するのだろうか？
- (2) 日本の土木技術は格段に発達したと言われているのになぜ防げなかったのだろうか？
- (3) 日本だけでなく海外でもよく似たトラブルが発生しているのはなぜだろうか？

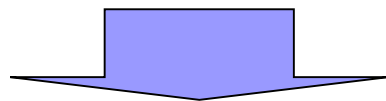


- (a) 日本の大都市では、地下水が高く、軟弱地盤が多いため、地下建設工事においてトラブルが発生しやすい。
- (b) 地下利用の進展にともない、近接工事や大深度のより難易度の高い地下工事が増えていることから、大礫地盤や岩盤、断層や不整合による地質変化に遭遇しやすい。
- (c) 近年建設投資の減少により大規模工事や難工事の計画、設計、施工をする機会が減少し(その後急増しつつあり)、実務経験者が急減し、技術の維持伝承が課題である。

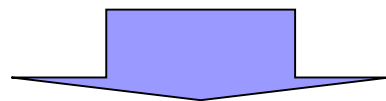
1.3 実務上の地盤挙動予測手法

- 高い地下水位
 - 流動性の高い細砂層, 大礫, クラッキー粘土, 鋭敏粘土 等
 - 既設構造物(許容応力ギリギリの設計)に対する近接施工
-
- 地盤の挙動を可能な限り正確に予測することが重要!
 - しかし, 地盤変形を十分な精度で予測することは困難...
 - 実務では, 経験則に基づいた概略的な予測が主流

- 2次元線形弾性FEM解析が**主流**である。
土留め壁変位量：実績の多い梁ばねモデルから別途算定する。
→ 強制変位として作用させる。
- 地盤の非線形性を考慮した弾性解析や弾塑性解析は**稀**である。
初期応力の設定が困難(特に近接構造物がある場合)である。
解析領域および地盤定数の妥当性？技術者判断？

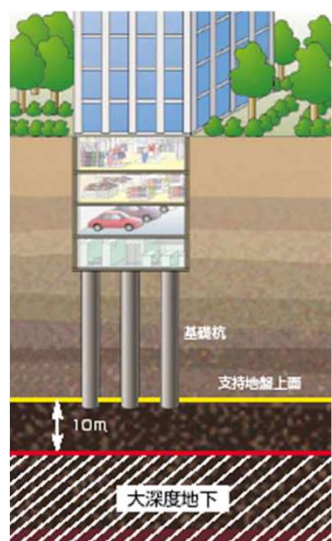


- * 異なった手法で予測解析：**煩雑**，**一貫性なし**
- * 弾性解析：実測値に比べて影響領域を**拡大予測**することが多い。

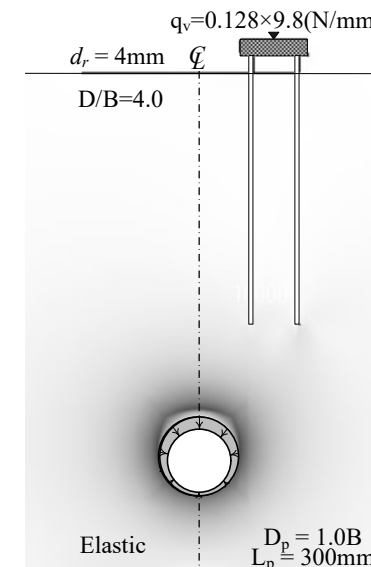
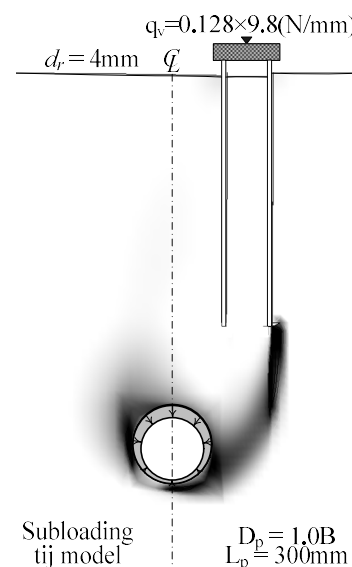
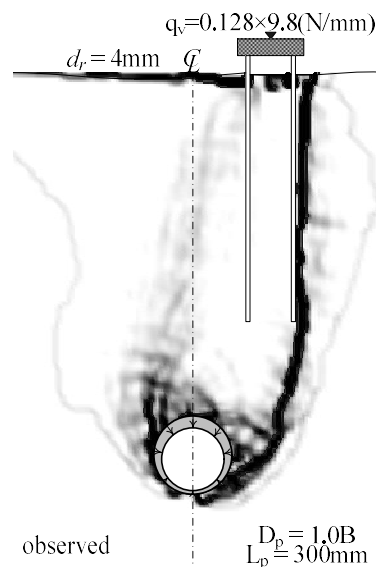


地盤材料の力学特性を適切に表現できる**弾塑性モデル**
実務的に適切な精度で挙動把握できる解析手法が望まれている。

【地盤変形解析事例(シールド工事の場合)】



(モデル実験結果) (弾塑性FEM解析結果) (弾性FEM解析結果)



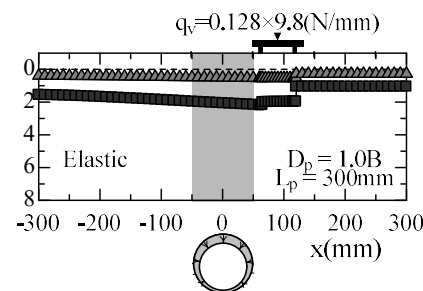
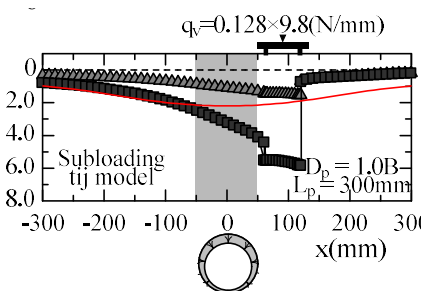
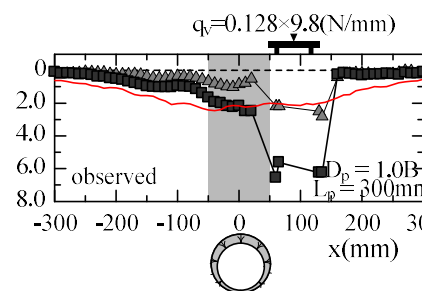
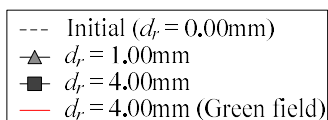
D_r : トンネル内空変位量

D_p : 杭下端~トンネル天端深度差

B : トンネル掘削径

L_p : 杭長

($\Phi 10\text{m}$ のトンネルを杭長30m下端から1D離れで構築した状態を想定)



杭基礎に近接してトンネルを構築する場合，たとえ大深度であっても，せん断ひずみはトンネル下端から杭下端に向かって発達します．その結果，トンネル掘削に伴う緩みにより，トンネル近接構造物に大きな沈下が発生する可能性があります．本現象は，アルミ棒積層体を用いたモデル試験からも実証できています．

目 次

1. はじめに

- 1.1 都市部における地盤工学的な諸問題
- 1.2 素朴な疑問とトラブル発生の背景
- 1.3 実務上の地盤挙動予測手法

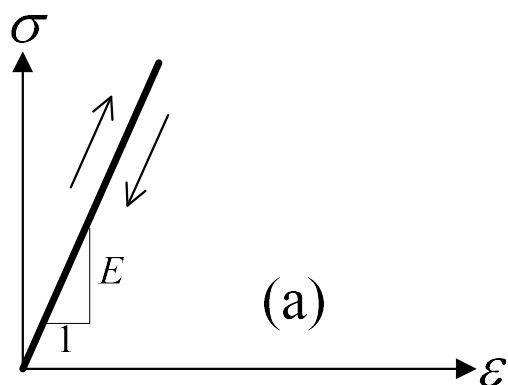
2. 実務で用いられている地盤構成モデル

- 2.1 固体の応力～ひずみ関係モデル
- 2.2 地盤材料の変形・強度を表現する構成モデル
- 2.3 Subloading t_{ij} model 用の地盤材料パラメーター
- 2.4 粘性土地盤の材料パラメーターの設定方法例
- 2.5 砂質土地盤の材料パラメーターの設定方法例
- 2.6 その他パラメーターの設定方法例

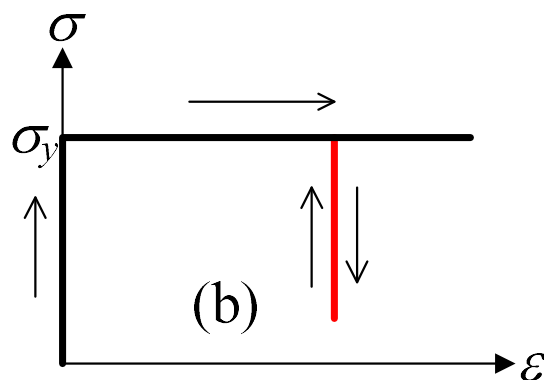
3. おわりに

2. 実務で用いられている地盤構成モデル

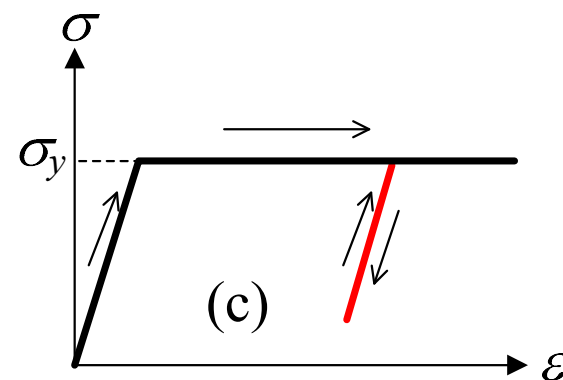
2.1 固体の応力～ひずみ関係モデル



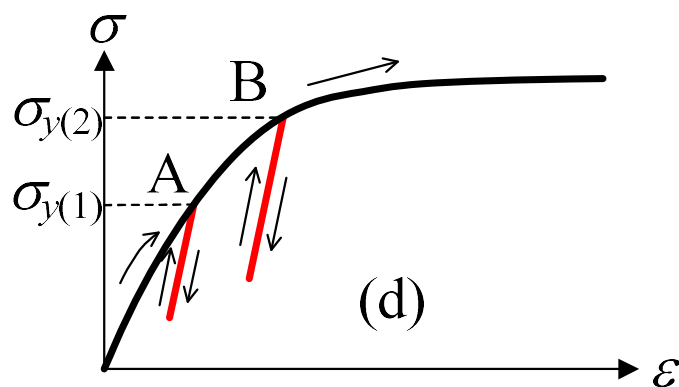
線形弾性体



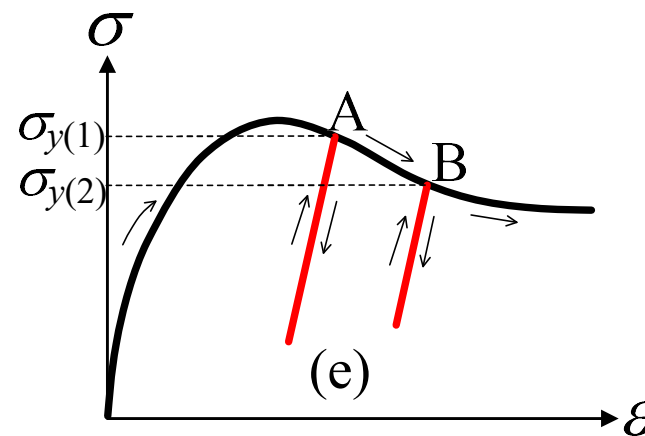
剛塑性体



弾・完全塑性体

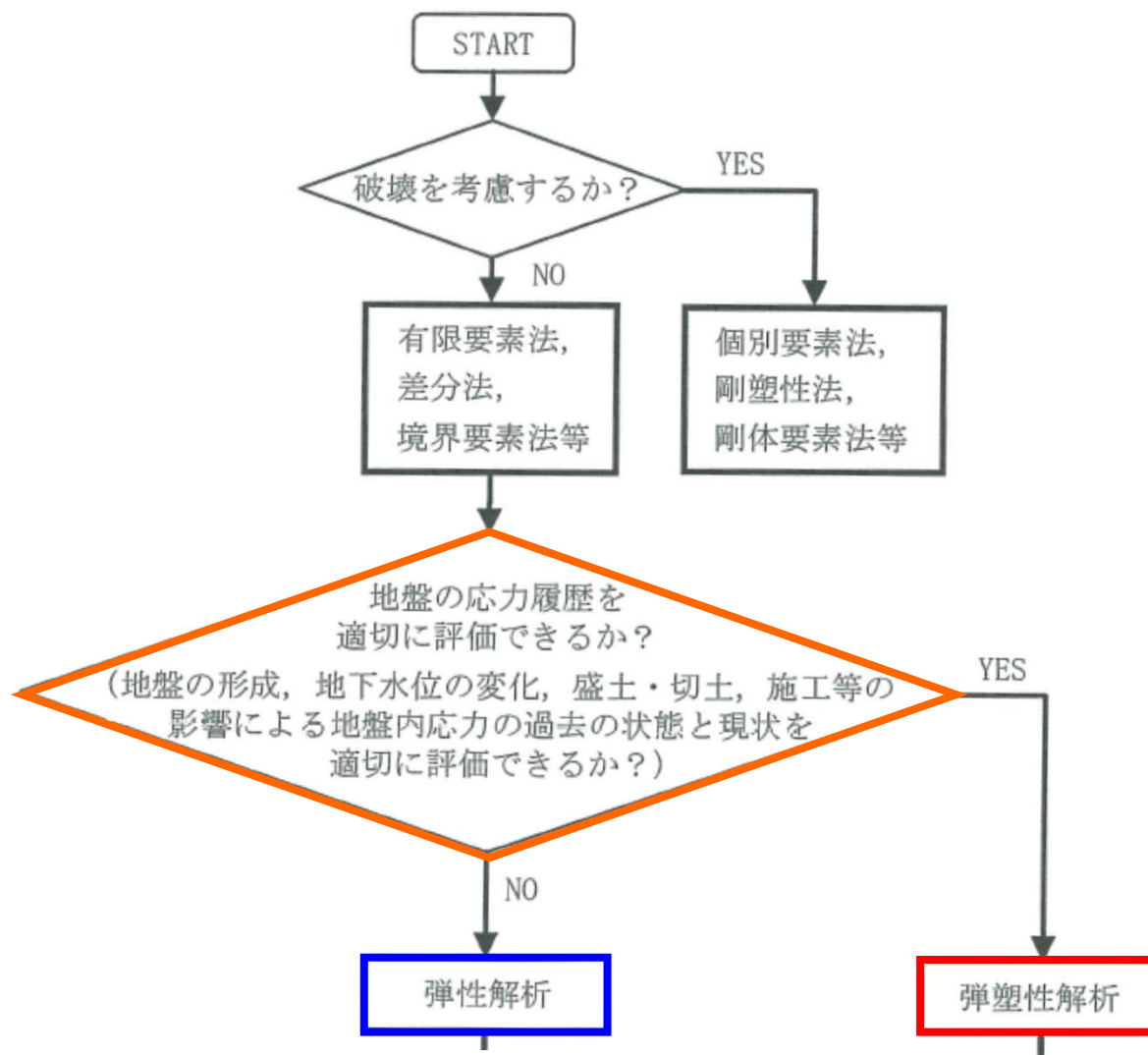


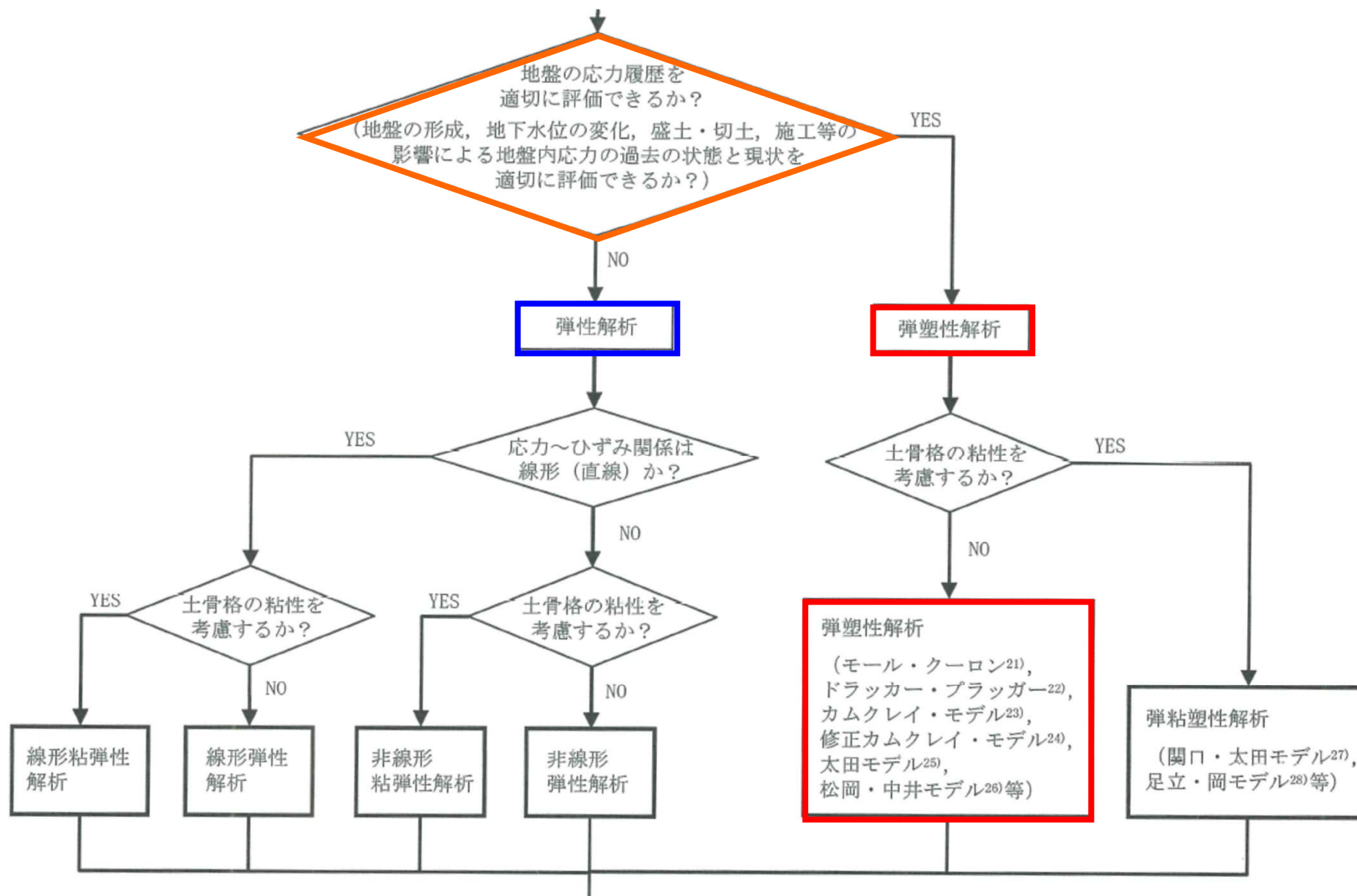
ひずみ硬化弾塑性体

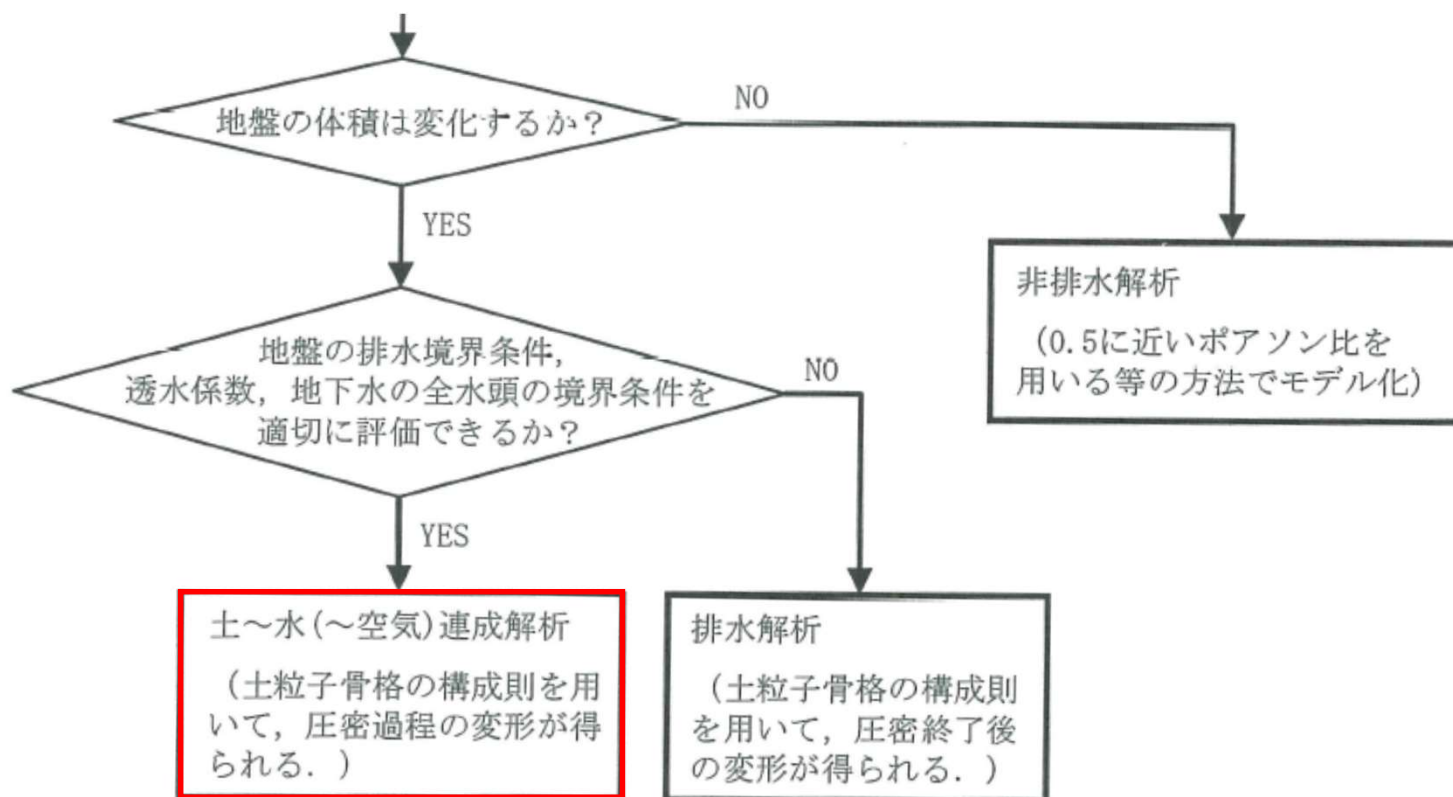


ひずみ軟化弾塑性体

【地盤変形を予測する場合における数値解析法の選択例】







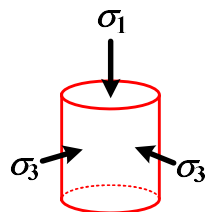
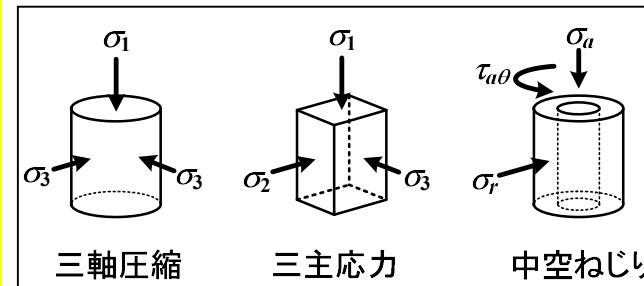
地盤変形を予測する場合における数値解析法の選択
((公社)地盤工学会：近接施工，地盤工学・実務シリーズ28， p.33， 2011)

2.2 地盤材料の変形・強度を表現する構成モデル

Subloading t_{ij} model

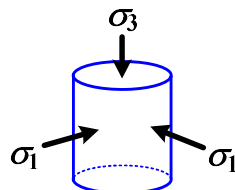
(Nakai & Hinokio, 2004, Nakai et al. 2011, Nakai 2012)

緩い土 から 密な土 まで
 低い拘束応力 から 高い拘束応力 まで
 唯一的に説明できる土の力学モデル



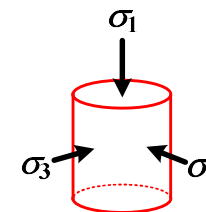
Comp.
三軸圧縮

正規粘土
過圧密粘土

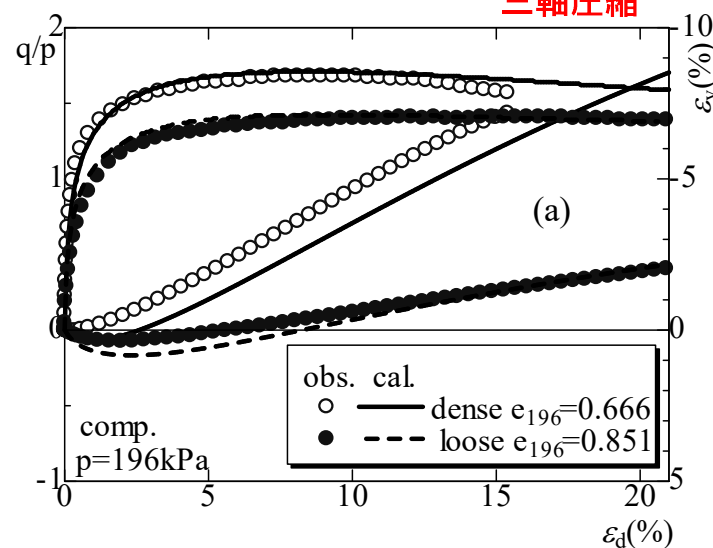
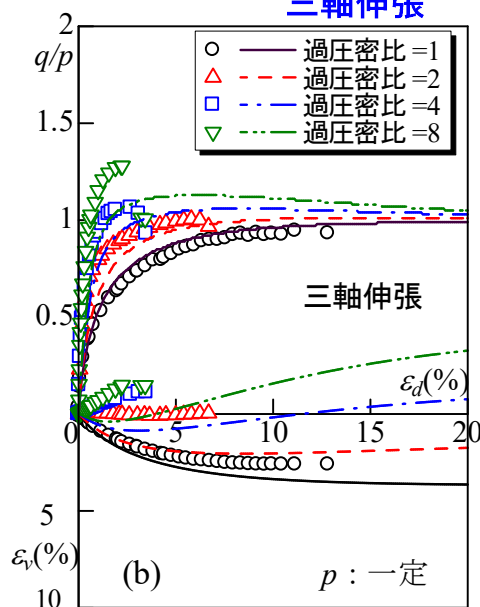
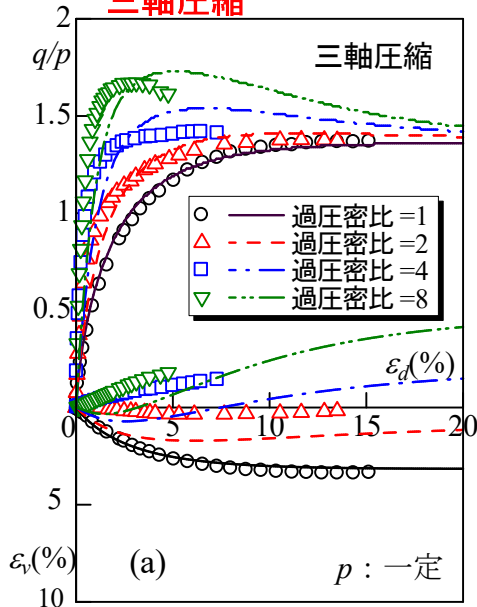


Ext.
三軸伸張

緩い砂
密な砂



Comp.
三軸圧縮



【Subloading t_{ij} modelの特徴】

- ① 中間主応力が変形・強度特性におよぼす影響(3次元)
- ② ひずみ増分方向におよぼす応力増分方向の影響
- ③ 正・負のダイレイタンスー特性
- ④ 変形・強度特性におよぼす密度(間隙比)や拘束応力の影響
- ⑤ 繰返し载荷による影響
- ⑥ 堆積過程で生じる固有異方性
- ⑦ 自然堆積粘土等に見られる構造の発達した土の挙動
- ⑧ 粘土も砂も統一された少ない地盤材料パラメーター群で表現可能

土の材料特性を精度よく表現できる弾塑性構成モデル

2.3 Subloading t_{ij} model 用の地盤材料パラメーター (iVersion=0の場合)

【圧縮特性を表現するパラメーター】

- λ : 正規圧密状態から載荷過程にある時の $e \sim \ln p'$ 関係の直線傾き
- κ : 正規圧密状態から除荷過程にある時の $e \sim \ln p'$ 関係の直線傾き
- N : 正規圧密線 (NCL) を延長して設定する大気圧下
($p' = 98$ [kPa], $q = 0$ [kPa]) での間隙比

【せん断特性を表現するパラメーター】

- R_{cs} : 三軸圧縮条件下の極限状態における主応力比
- β : 降伏曲面の形状を規定するパラメーター

【過圧密特性を表現するパラメーター】

- a : 密度と拘束圧の影響を規定するパラメーター

【自然堆積構造特性を表現するパラメーター】

- b : ボンディングの影響を規定するパラメーター
- ω_0 : ボンディング効果を仮想上の密度増加 ω に置換する際の初期値

【(例) 豊浦砂と藤森粘土の地盤材料パラメーター】

				iVersion=3		iVersion=0		
表現する項目	規定する項目	パラメータ		豊浦砂	新藤森粘土		豊浦砂	新藤森粘土
圧密特性	Cam clay model と同じ	λ	*1)	0.050	0.104		0.070	0.104
		κ		0.004	0.010		0.0045	0.020
		N	(e_N at $p=98$ kPa, $q=0$ kPa)	1.0	0.83		1.1	0.83
せん断特性	せん断特性	R_{cs}	($=\sigma_1/\sigma_3$) $CS_{(comp.)}$	3.2	3.5		3.2	3.5
		ν_e		0.2	0.2		0.2	0.2
	降伏曲面の形状	β		1.6	1.5		2	1.5
過圧密特性	密度と拘束圧 の影響*2)	a	(圧密試験で決定)	60	100	600	17 (AF)	290
		k_a	(せん断試験で決定)	16	8	50	290 (IC)	
自然堆積 構造特性	ボンディング の影響*3)	b	(圧密試験で決定)	—	10		—	23
		k_b	(せん断試験で決定)	—	3		—	—

*1) 旧藤森粘土の場合、 $\lambda=0.090$

*2) 密度 ρ の発展則を表す増加関数 $G(\rho)$ は、iVersion=3で $G(\rho)=a\rho$ 、iVersion=0で $G(\rho)=a\rho^2$ で規定する。

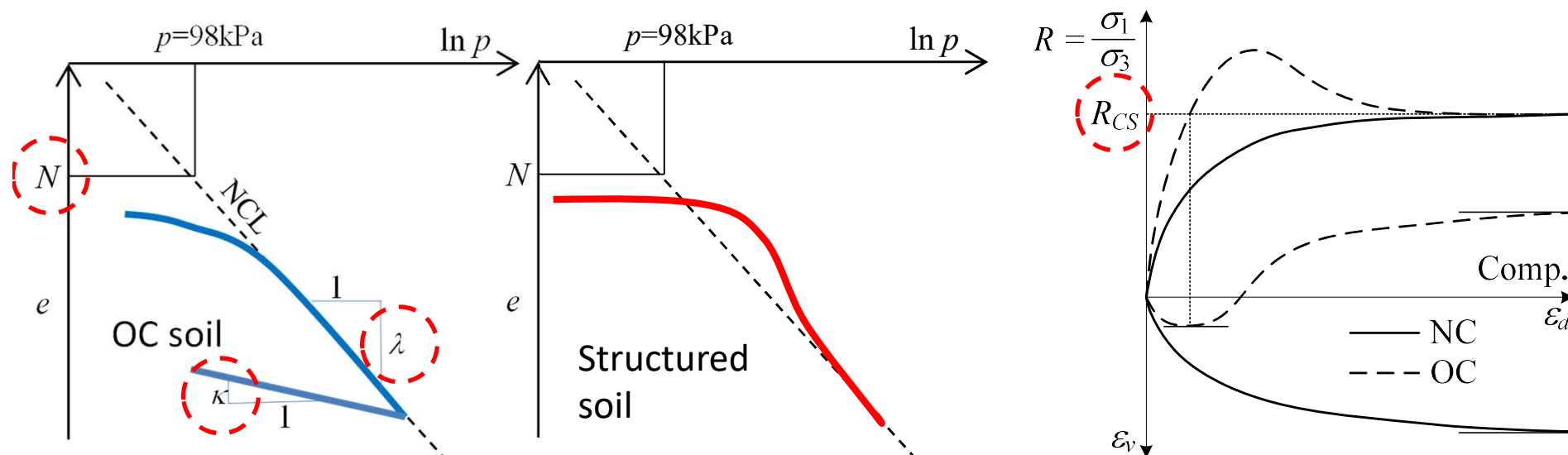
*3) ボンディング ω の発展則を表す増加関数 $Q(\omega)$ は、iVersionによらず $Q(\omega)=b\omega$ で規定する。

また、ボンディング効果を仮想上の密度増加 ω に置き換える際の初期値 ω_0 は、 Q_0 を直接設定することによって規定する。

2.4 粘性土地盤の材料パラメーターの設定方法例

【STEP 1】

各土質試験結果から、以下のパラメーターを仮決めする。



(1) 圧密試験結果から「 λ 」「 κ 」「 N 」を決定する。

(2) 圧密試験は「段階载荷圧密試験」でも「定ひずみ速度载荷圧密試験」でも良い。

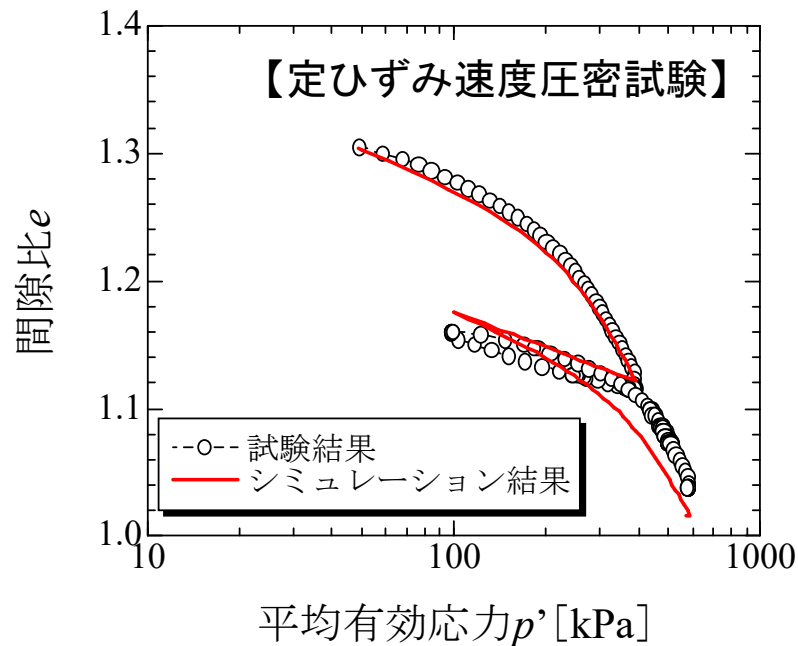
(3) Cam-clay modelと同じパラメーターの決め方。

(4) 横軸は自然対数であることに注意。

(5) 三軸圧縮試験(CD試験またはCU試験)から有効応力下での限界状態時における主応力比「 R_{CS} 」を決定する。

【STEP 2】

圧密試験結果をフィッティングする。



[N について]

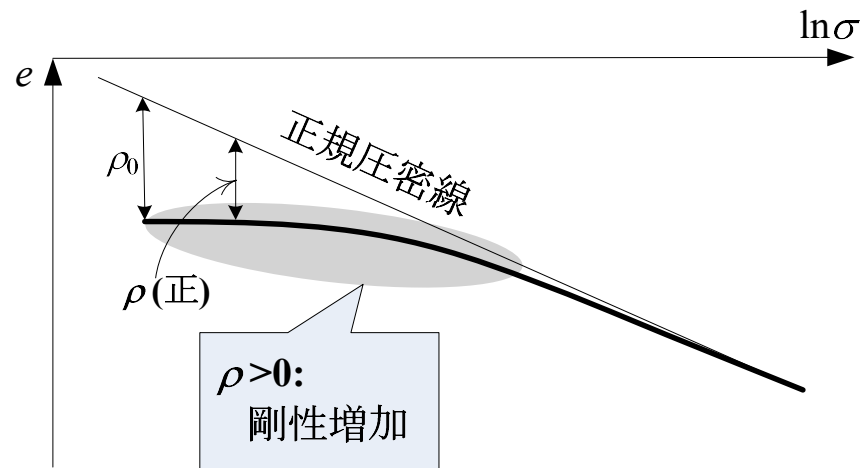
本来 N は「3次元等方圧縮時」における $e \sim \log p$ 関係のNCLより決定する。

→ 圧密試験結果(1次元圧密)における $e \sim \ln \sigma_v$ 関係のNCLから N を設定しても大差はないことから、実用上問題はない。

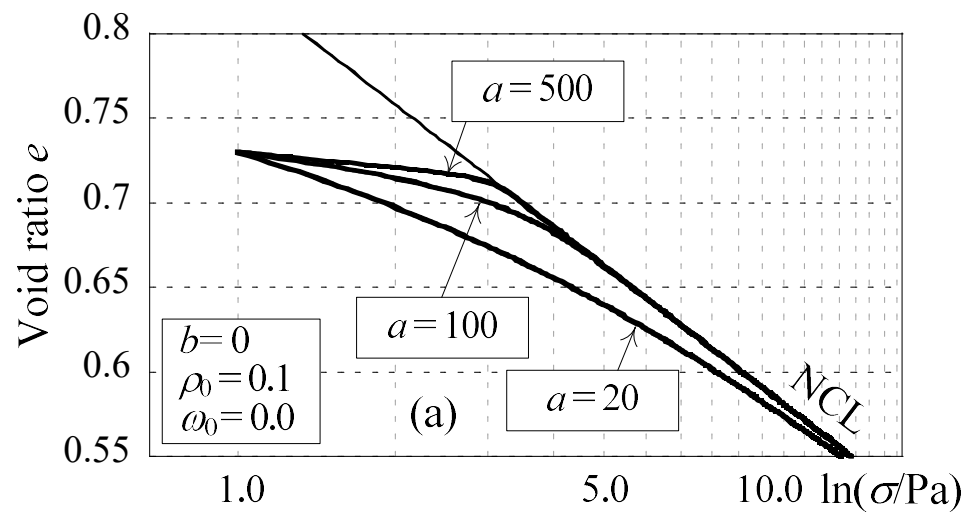
[κ について]

圧密試験(除荷時)の初期勾配には塑性成分が含まれている。

→ 実際の κ よりも大きくなる可能性があるので、「過圧密領域の傾き」「圧密試験における除荷時の傾き」「 λ の1/10倍」の3つを比べて最も小さい値を採用することが多い。



過圧密土の間隙比 $e \sim \ln \sigma$ 関係



パラメータ a の影響

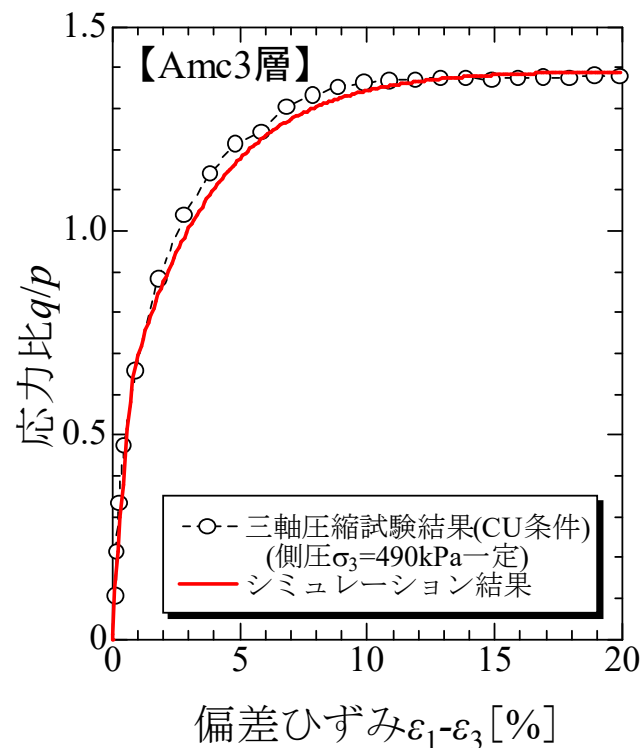
[a について]

a が大きいほど
NCLに近づきやすい。
通常, $a = 100 \sim 900$ (整数) で
調整することが多い。

【STEP 3】

三軸圧縮試験(CU条件)結果をフィッティングする。

【三軸圧縮試験(CU条件)】



[ひずみ軟化傾向がない場合]

ボンディング効果を考慮しない。
 β と a を調整してフィッティングする。

[ひずみ軟化傾向がある場合]

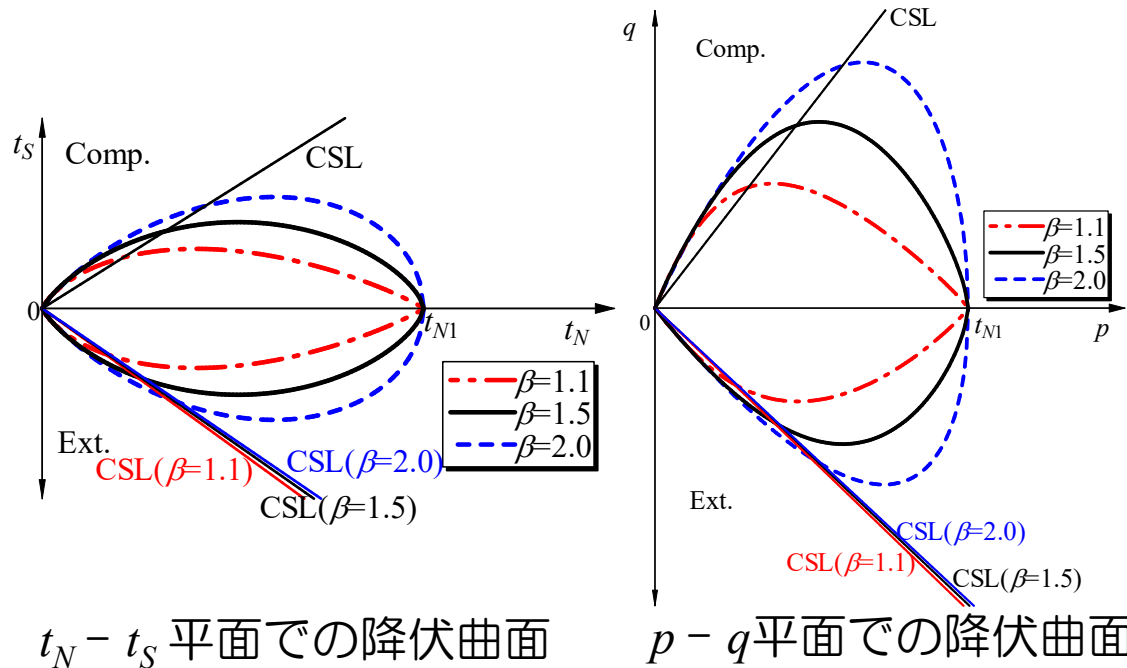
ボンディング効果を考慮する。
 β と a を調整してフィッティングする。
 合わせて b と ω_0 も調整する。

【STEP 4】

STEP 2 ~ STEP 3 を繰り返して各パラメータを微調整する。

【補足1】

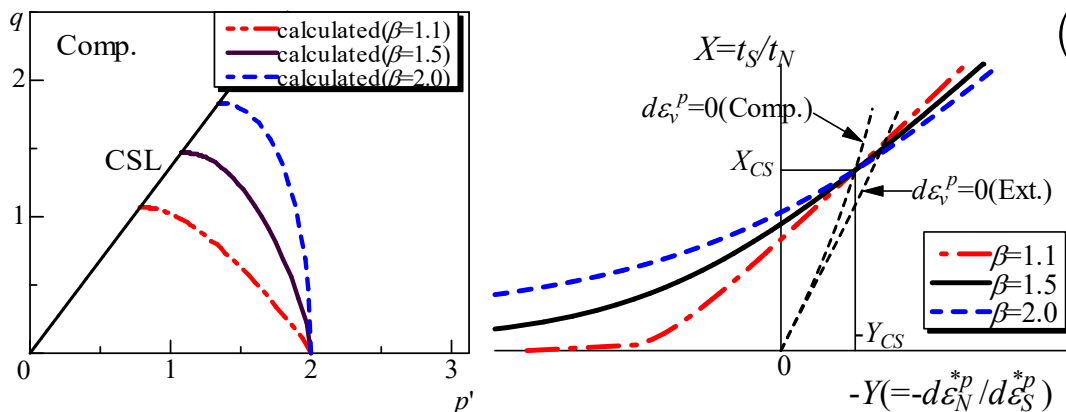
(せん断特性)降伏曲面の形状を規定するパラメーター β



$t_N - t_S$ 平面での降伏曲面

$p - q$ 平面での降伏曲面

- (1) β が小さくなると平べったい, 先端が鋭くなる降伏曲面になる。(左図参照)
- (2) $\beta = 1$ で Cam-clay model (オリジナル) と同じになる。
- (3) 通常, $\beta = 1.1 \sim 2.0$ (小数第1位まで) で調整することが多い。



- (4) 以下に示す関係を利用して β を決定する。

- 応力～ひずみ関係
- 有効応力経路 (非排水強度等)
- 応力比－塑性ひずみ増分比関係

【補足2】

(過圧密特性) 密度と拘束圧に関するパラメーター a

STEP 1 (圧密試験 & 三軸圧縮試験結果より)

: 「 λ 」 「 κ 」 「 N 」 「 R_{cs} 」 を仮決めする。

STEP 2 (圧密試験結果にフィッティング)

: 「 κ 」 「 N 」 を微調整した上で「 a 」を仮決めする。

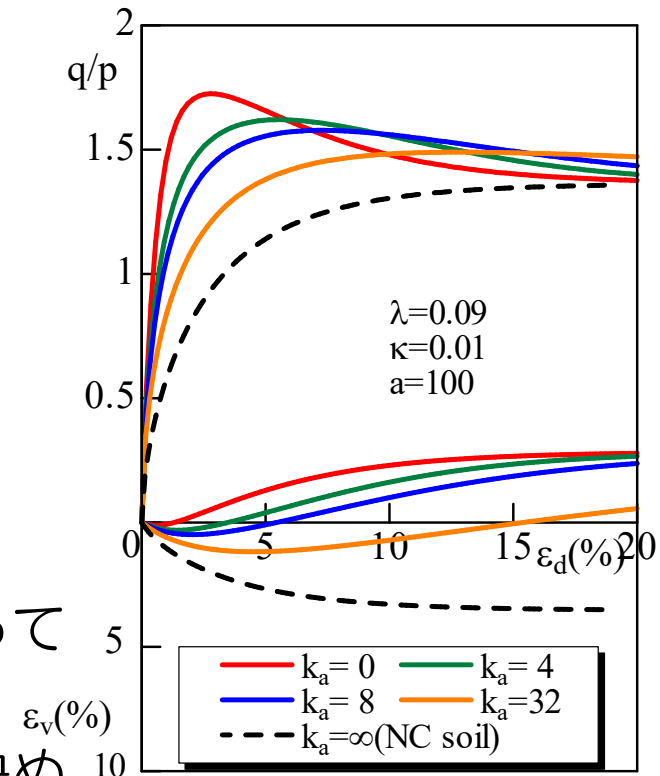
STEP 3 (三軸圧縮試験結果にフィッティング)

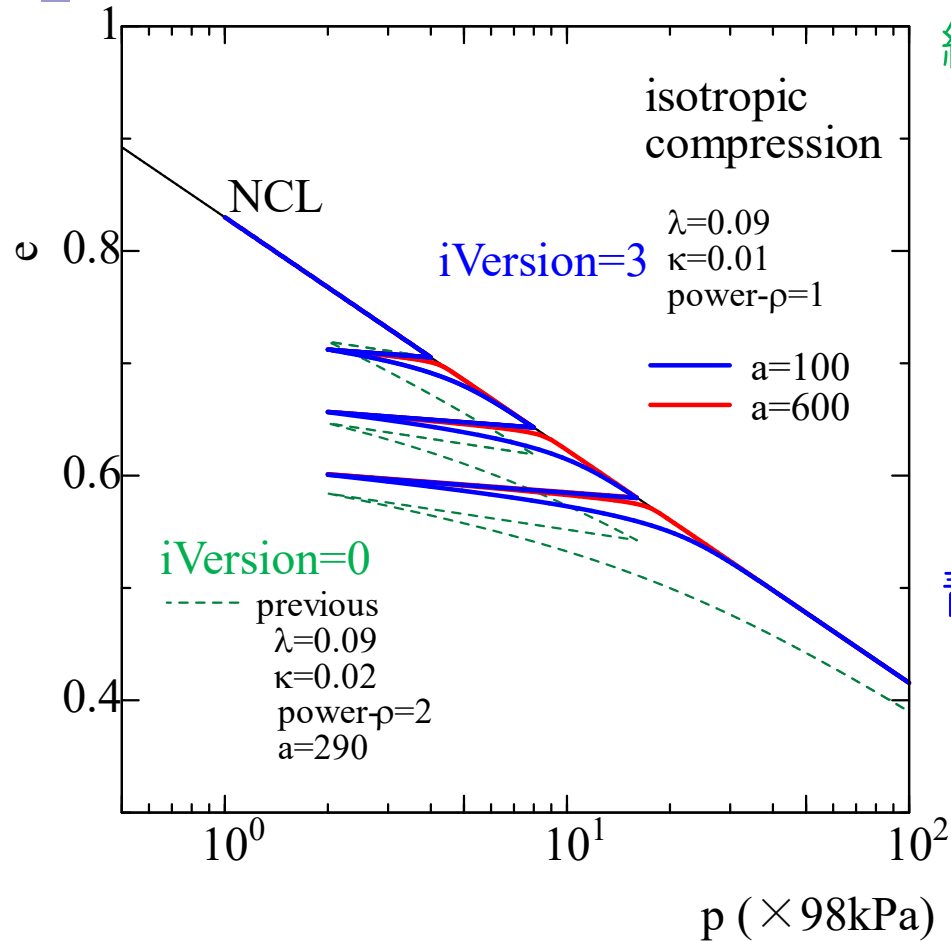
: 「 β 」 「 a 」 を調整してフィッティングする。
ここで「 a 」を調整するとSTEP 2に立ち戻って繰返し再調整が必要となる。 (iVersion=0)

現在では、「 a 」については、STEP 2で仮決めしたままで、STEP 3では「 β 」と「 k_a 」を調整してフィッティングできるように改良している。

(iVersion=3では $G(\rho) = ap$. これにより、圧密試験で決めた a によらずにせん断時の応力～ひずみ関係をシミュレートできる。)

「 k_a 」は0～ ∞ までの整数値で調整する。





緑色破線

：旧藤森粘土の等方圧縮載荷・除荷試験のシミュレーション結果

(iVersion=0の場合)

→ 「大きめの $\kappa=0.02$ 」 と
「 $G(p)=ap^2$ (power- $p=2$)」 の
影響から柔らかい応答を示している。

青色実線 & 赤色実線

：旧藤森粘土の等方圧縮載荷・除荷試験のシミュレーション結果

(iVersion=3の場合)

→ $a=100$ の場合よりも $a=600$ の
方が弾性的な挙動に近づく。
→ $G(p)=ap$ (power- $p=1$, 線形関係)
より, a の値にかかわらず
必ず NCL に戻ってくる。

iVersion=3 を選択し, 圧密試験結果をおおよそ表現できる a でフィッティングしておけば, せん断試験のフィッティングは β と k_a だけで調整することができる。

【補足3】**STEP 1 ~ STEP 4 の手順でフィッティングできない場合**

(1) 原地盤の有効上載圧 σ'_v に近い拘束圧の試験結果に極力合わせる形でフィッティングする。

(2) 自然堆積構造特性(ボンディング)を考慮する。

【補足4】参照

(3) λ (NCLの傾き)を許容範囲内で調整する。

ボンディングを考慮する場合、圧密試験の $e - \ln p$ 関係曲線とNCLとの交点や各拘束圧における離隔(ρ)は、三軸圧縮試験(CU条件)結果における有効応力経路から推定できる。

(4) (詳細は、WG1(解析手法・使用法WG)でご説明)

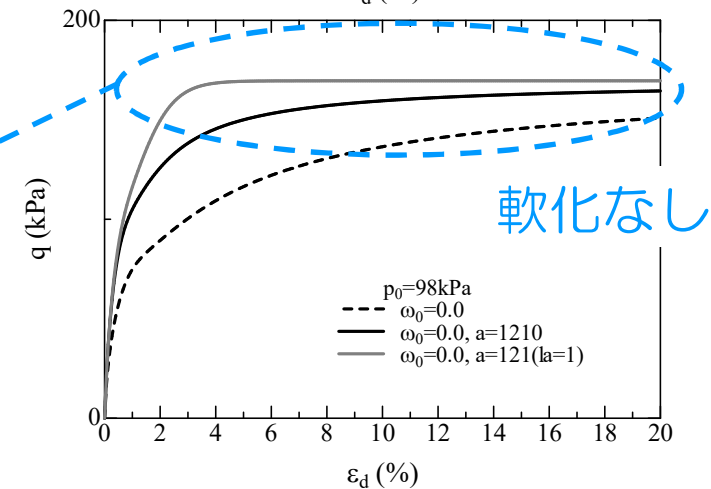
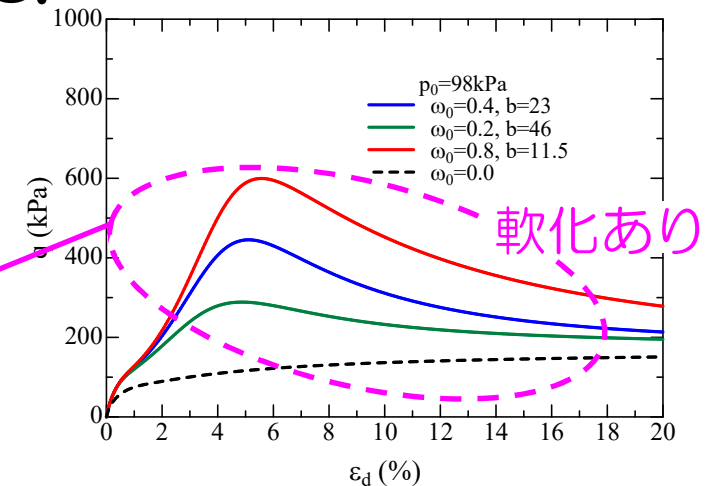
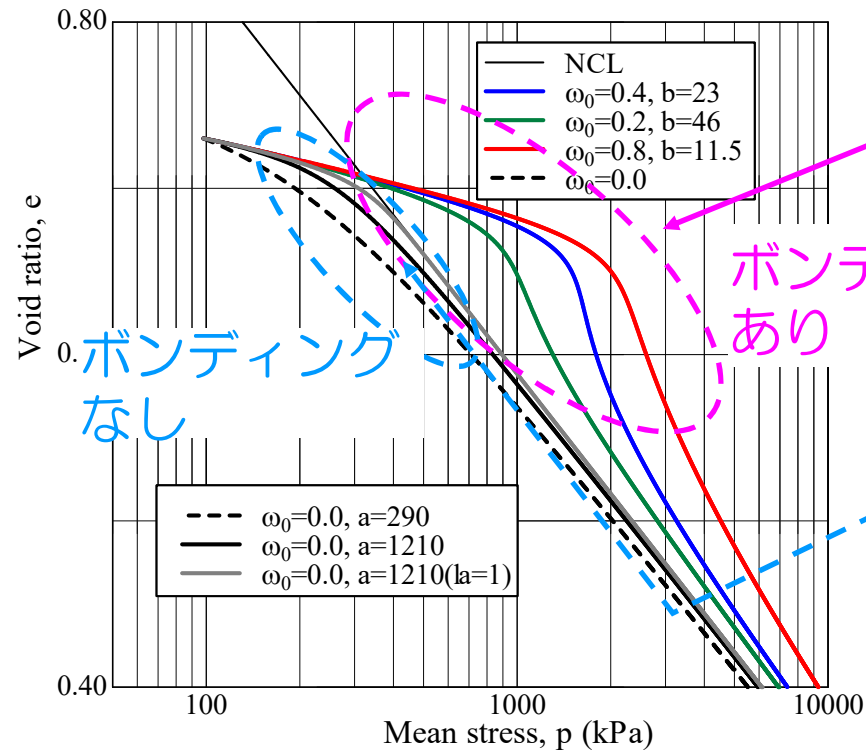
【補足4】

(自然堆積構造特性)

ボンディング効果を表すパラメーター b と ω_0

ボンディング ω の発展則を表す増加関数 $Q(\omega) = b\omega$ は、圧密試験で「 b 」「 ω_0 」を仮決めした後に、せん断試験で「 k_b 」を調整する。

(iVersion=3, これにより、圧密試験で決めた b , ω_0 によらずにせん断時の応力～ひずみ関係をシミュレートできる。



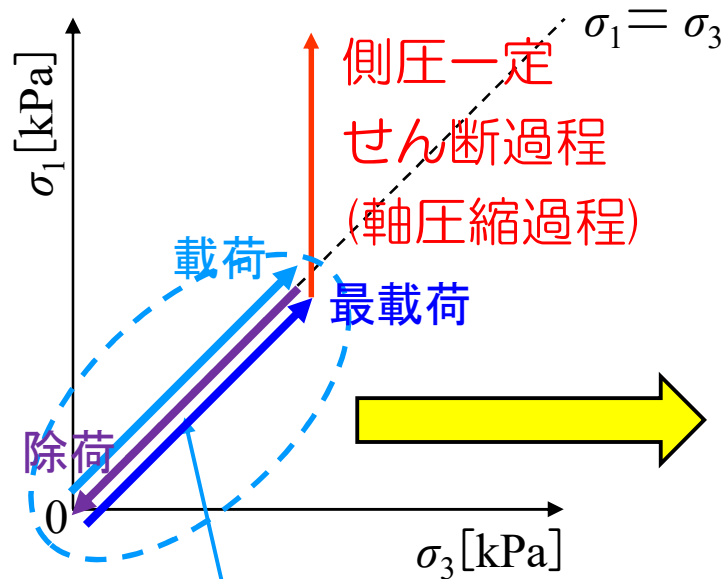
2.5 砂質土地盤の材料パラメーターの設定方法例

【土試料の採取方法と土質試験の内容】

- 粘性土 → 実地盤から乱れの少ない試料を採取した後、
圧密試験と三軸圧縮試験(CU条件)を実施する。
- 砂質土 → 実地盤から乱れの少ない試料を採取することは非常に困難である。
→ コアチューブの無水削孔により乱れた試料を採取する。
→ 例えば、トリプルサンプラーを用いたオールコア
サンプリングを実施する。
- 乱れた試料を用いて再構成供試体(緩詰め供試体と密詰め供試体,
なるべく間隙比の差が大きくなるように調整する)を作製する。
→ 礫分が多い場合には、粒度調整やメンブレン補正が必要。
- 三軸圧縮試験は、採取深度での土被り圧相当まで等方圧縮後に
等方除荷し、再度等方圧縮した後に、側圧一定の三軸圧縮試験
(CD条件)を実施する。

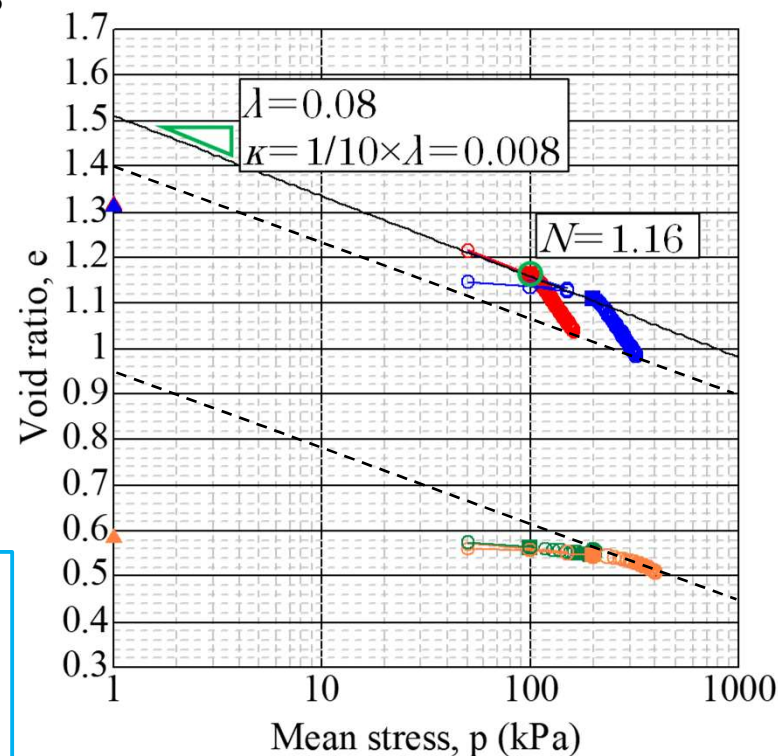
【STEP 1】

三軸圧縮試験(CD条件)の等方圧縮～除荷～再載荷過程より
 $e \sim \ln p$ 関係をフィッティングする。



等方圧縮過程

等方応力載荷時において、
 等方応力値とその際の
 体積変位量や軸変位量から
 間隙比を細かいステップ毎
 に記録する。

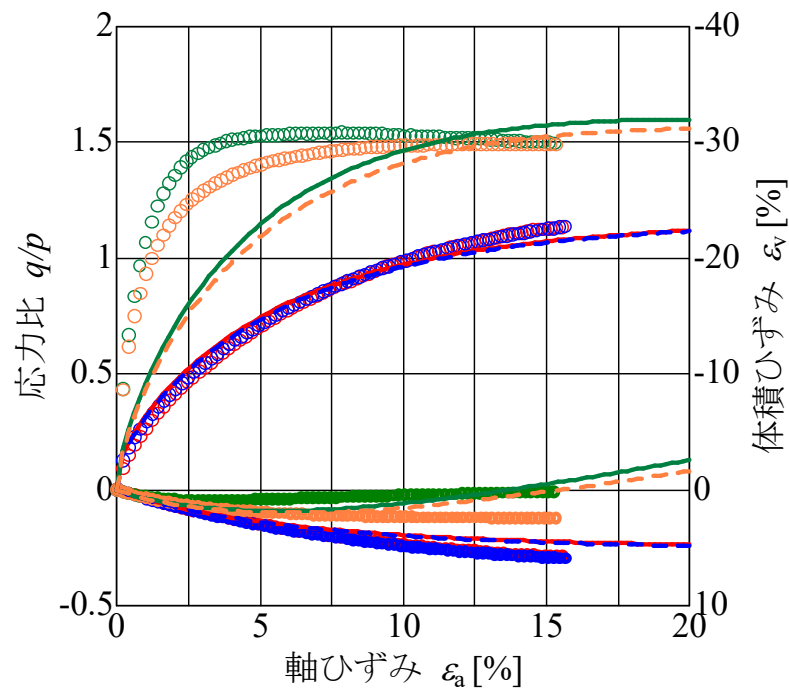


ここでは、
 対象地盤の
 土被り圧に
 近く、緩詰め
 供試体である
 ○○に着目
 して、
 圧縮特性を
 表現する
 パラメーター
 λ , κ , N を
 決めている。

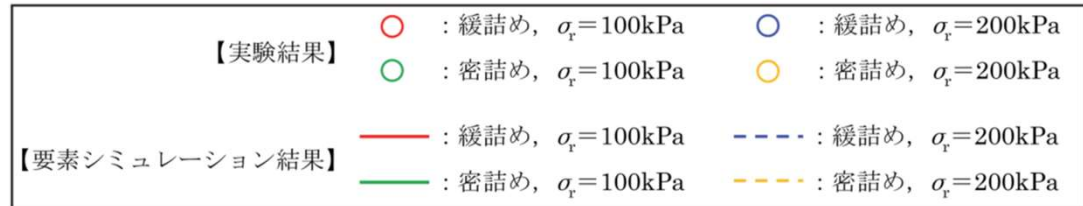
【実験結果】 ○: 緩詰め, $\sigma_r = 100\text{kPa}$ ○: 緩詰め, $\sigma_r = 200\text{kPa}$
 ○: 密詰め, $\sigma_r = 100\text{kPa}$ ○: 密詰め, $\sigma_r = 200\text{kPa}$

【STEP 2】

三軸圧縮試験(CD条件)のせん断過程より応力～ひずみ関係をフィッティングする。

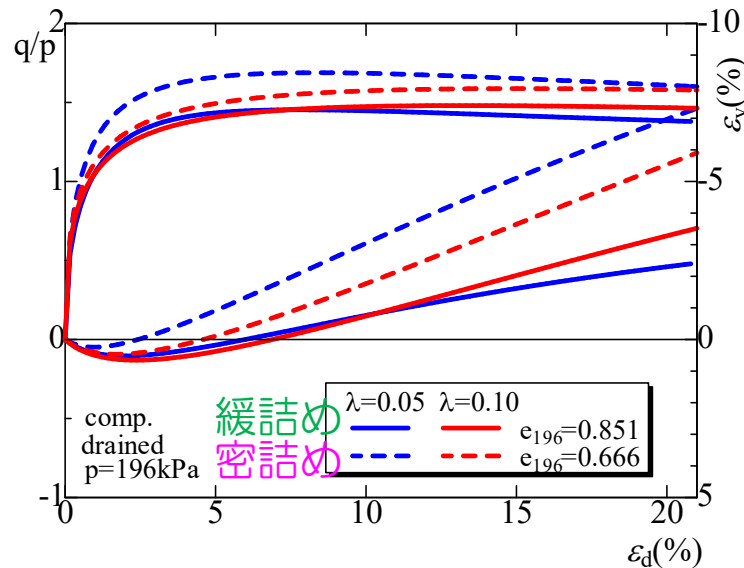
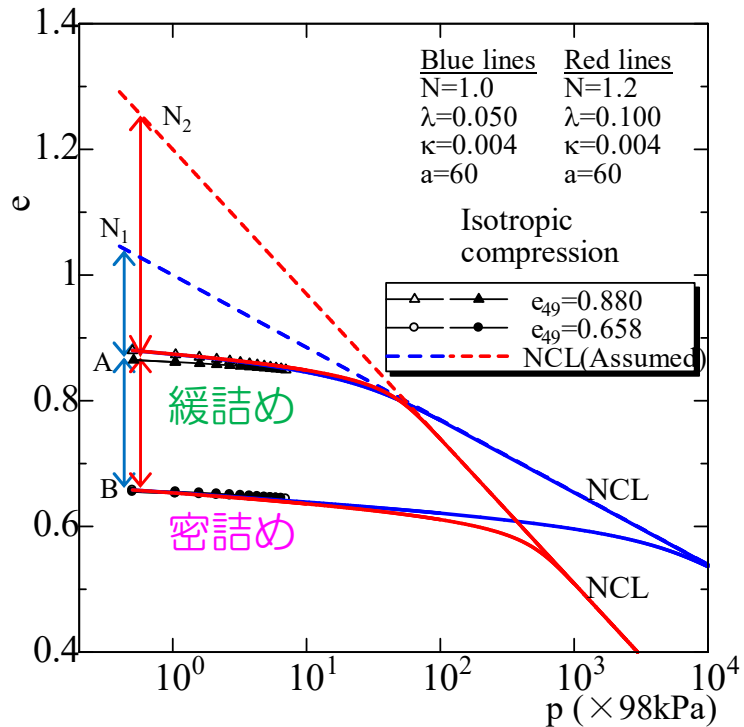


ここでは、対象地盤の土被り圧に近く、緩詰め供試体である○●に着目してせん断特性を表現するパラメーター Rcs , β , a を決めている。



【STEP 3】

STEP 1 ～ STEP 2 を繰り返して各パラメータを微調整する。



【補足1】

砂質土のNCLが決めにくい場合の推定方法

(1) 左上図各プロットは、三軸圧縮試験の等方圧縮 & 等方除荷時の実験結果である。

赤色実線も青色実線もどちらのパラメータも実験結果を適切に表現できている。

ここで、

緩詰め密度の初期値 ρ_0 : N1-A, N2-A

密詰め密度の初期値 ρ_0 : N1-B, N2-B

上記の差 : AB

(2) 左下図は、各材料パラメータを用いた場合のせん断挙動の解析結果である。

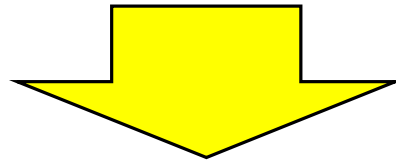
緩詰め試験結果に合わせる場合、赤色実線と青色実線のどちらが実験結果を適切に表現できるかを確認しながら、NCLを推定する。

* 例えば、ABがNAに比べて相対的に小さい場合 (例えば赤色実線)、応力~ひずみ関係は密度の違いによる差異が小さくなる傾向がある。

【補足2】

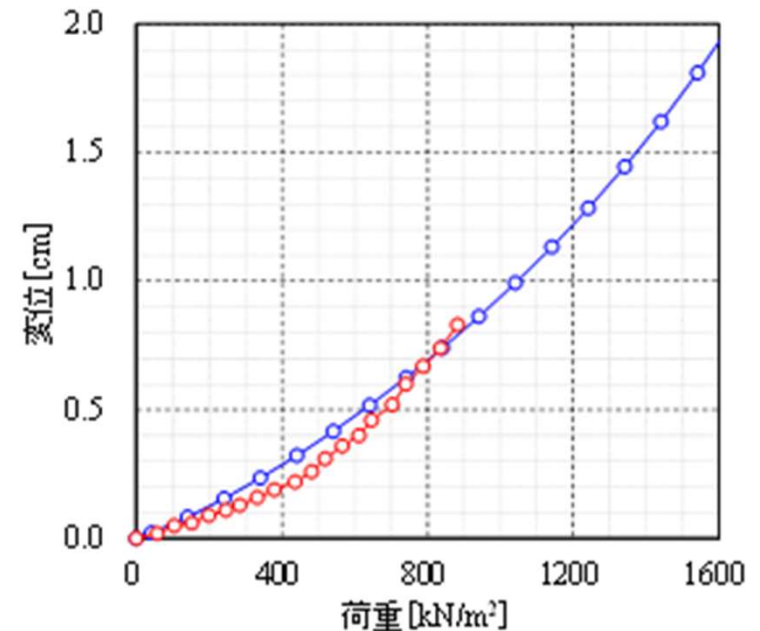
(推奨) 孔内水平載荷試験(LLT)のシミュレーション

砂質土は、実地盤から乱れの少ない試料を採取することが非常に困難であることから、乱れた試料を用いた再構成供試体を作製して、三軸圧縮試験(CD条件)を実施して各パラメータを設定する。



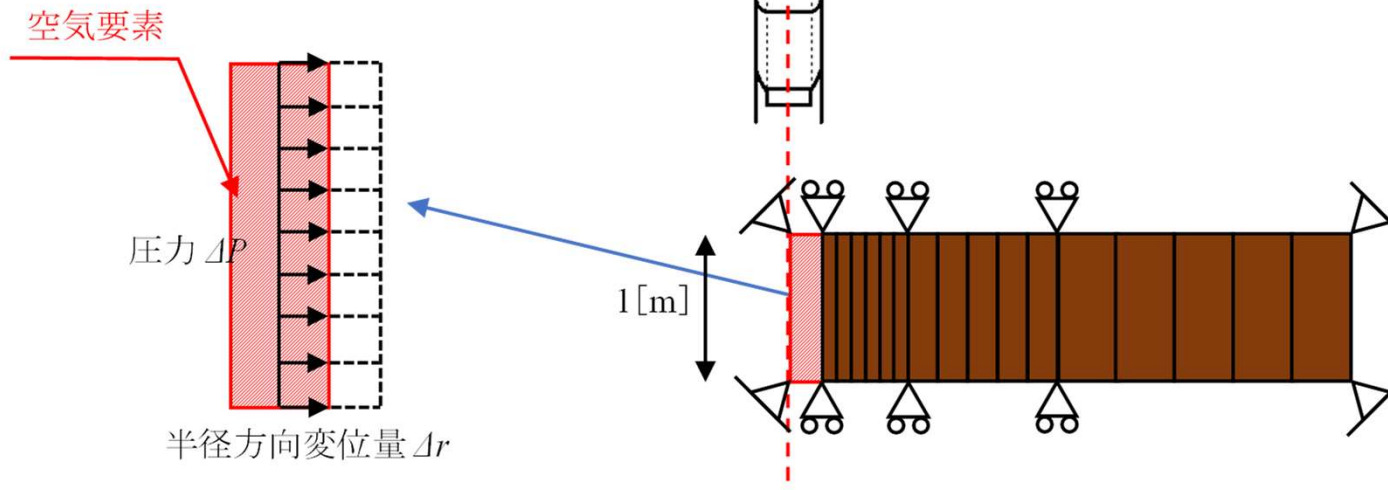
実地盤における強度・変形特性を把握する上で、上記方法の信頼性を補完する事を目的に、LLTの実施を推奨する。

→荷重～変位関係曲線にフィッティングさせることによって、代表深度における過圧密特性を表現するパラメーター a を設定する。



○ : 試験結果 ○ : シミュレーション結果

孔内水平载荷試験で得られた
「圧力 ΔP ~ 半径方向変位量 Δr 関係」
になるよう、 a をフィッティングする。



【LLT結果を「 a 」だけではフィッティングできない場合】

- (1) 実地盤での拘束圧 & 間隙比が、 $e - \ln p$ 関係のNCLよりも「右側」に位置する場合、 N を大きくして調整する。
- (2) 実地盤での拘束圧 & 間隙比が、 $e - \ln p$ 関係のNCLよりも「左側」に位置する場合、 κ を小さくして調整する (λ の1/100まで)。
- (3) 初期間隙比 e_{in} を例えば密度検層結果を参考にしながら取りうる範囲で調整する。

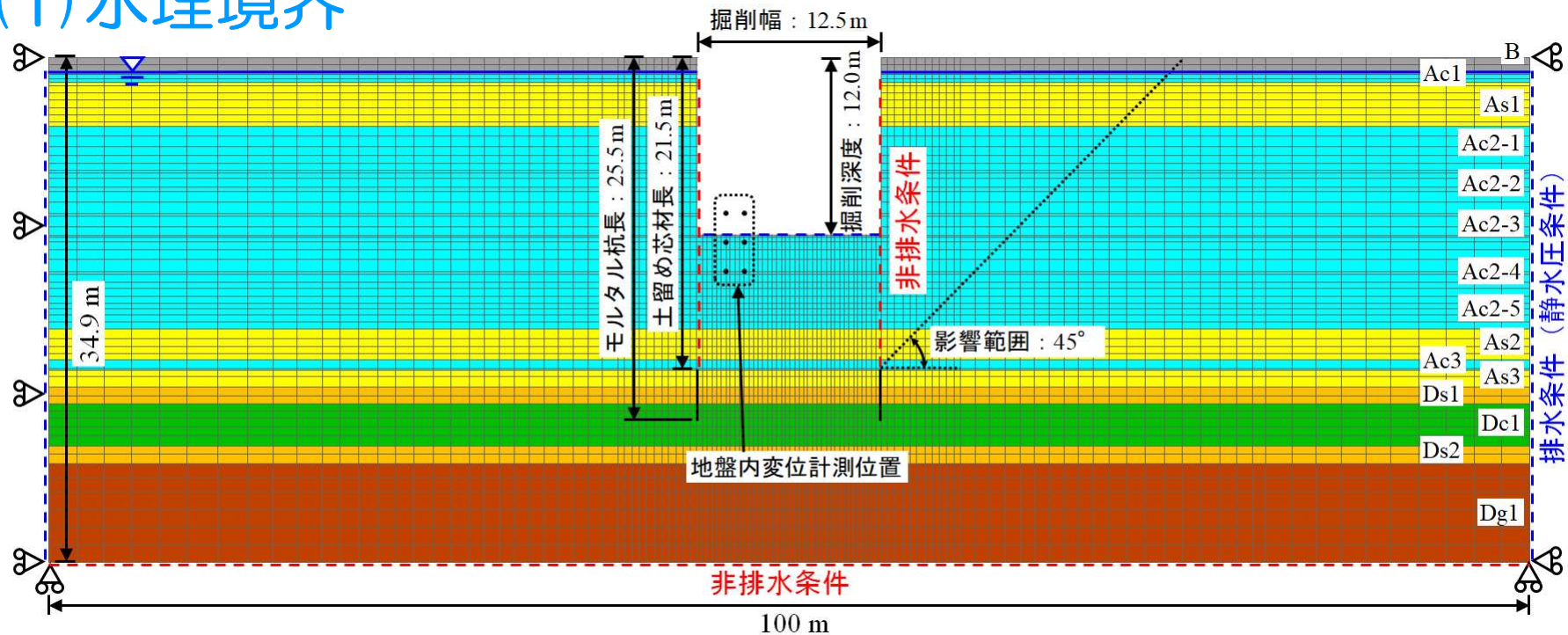
【補足3】

STEP 1 ~ STEP 2 の手順でフィッティングできない場合

- (1) 細粒分を多く含む砂質土の場合，自然堆積構造特性(ボンディング)を考慮する。
- (2) (詳細は，WG1(解析手法・使用法WG)でご説明)

2.6 その他パラメーターの設定方法例

(1) 水理境界



砂質土層：各帯水層で現場透水試験を実施して、透水係数と平衡水位を把握して解析に反映させる。

粘性土層：圧密試験で得られた透水係数を参考にする。地下水位は、上下の帯水層の地下水位を参考にする。

* 1) 孔内水位を利用する場合には注意が必要。

* 2) 「有効応力解析」と「全応力解析」をごちゃまぜにして解析しない。

(2) 初期間隙比

1) PLAXISの入力パラメータ e_0

- 解析開始時点における応力状態に合わせた初期間隙比
- Subloading t_{ij} モデルを用いて自重圧密解析する場合には「無応力状態における間隙比 e_0 」となる。

2) Subloading t_{ij} モデルの構成則において、自重圧密解析後の初期間隙比は「実地盤で想定する間隙比 e_{in} 」でなければならない。

よって、 $e_0 = e_{in}$ に設定して自重圧密解析をSubloading t_{ij} モデルを用いて実施することはできない。

3) 自重圧密解析後の初期間隙比が「実地盤で想定する間隙比 e_{in} 」になるよう、「無応力状態における間隙比 e_0 」を調整するのが1つの方法である。

4) または、自重圧密解析後の応力状態や初期間隙比 e_{in} の分布を別途計算する。

- 応力状態 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)
: (a)弾性解析で設定, (b)単位体積重量と土被り厚と K_0 を用いて設定
- 初期間隙比 e_{in} 分布
: e_{0inc} (初期間隙比分布の勾配) と Z_{ref} (勾配を持った初期間隙比を計算するための基準座標) を入力して設定

【自重圧密解析後の初期間隙比 e_{in} の設定方法例】

(1) RI計器による土の密度試験(原位置試験, 密度検層)

- 実地盤の含水比状態を反映した密度(地盤の湿潤密度 ρ_t)を得る.
- 含水比 w より乾燥密度 ρ_d を算出する.

$$\rho_d = \rho_t / (1 + w/100)$$

+ 土粒子の密度試験(室内土質試験)

- 各土層の代表深度において実施することにより土粒子の密度 ρ_s を得る.
- 初期間隙比 e_{in} は, 土粒子の密度 ρ_s と乾燥密度 ρ_d から算出する.

$$e_{in} = \rho_s / \rho_d - 1$$

(2) 砂の最小密度・最大密度試験(室内土質試験)

+ 土粒子の密度試験(室内土質試験)

- 対象砂地盤の最も緩い状態での密度 ρ_{dmax} と最も密な状態での密度 ρ_{dmin} を得る.
- 砂の締まり具合を表す指標である相対密度 D_r を標準貫入試験結果(N値)から仮定し, 以下の式より初期間隙比を想定します.

$$D_r = (e_{max} - e_{in}) / (e_{max} - e_{min}) \times 100$$

$$e_{max} = \rho_s / \rho_{dmin} - 1$$

$$e_{mix} = \rho_s / \rho_{dmax} - 1$$

3. おわりに

- (1) 今回、弾塑性構成モデル(Subloading t_{ij} モデル)の地盤材料パラメータ設定例(基本ルール?)をお示ししたが、完全に確立した方法ではないので、今後は是非、WG1(解析手法・使用法WG)にてご議論いただいた上で、基本マニュアルができることを希望します。
- (2) 各土質試験結果のフィッティング時に地盤材料パラメータをパラスタする際には、PLAXISの「SoilTest機能」を使うと比較的簡単に決定することができます。
- (3) ご紹介した地盤材料パラメータの設定方法をベースにして、各対象地盤の特性に則した調整をおこなっていただき、できればこれらの事例を研究会にてデータベース化できれば大変有用であると思います。