

砂杭拡径による中間土地盤の締固め改良の水～土連成計算

名古屋大学 国際会員 山田英司

名古屋大学 国際会員 野田利弘

名古屋大学 国際会員 浅岡 顕

1 はじめに

従来、地盤力学・工学の問題では、便宜的に土を粘土と砂に分けて取り扱い、それぞれ異なる構成式を用いて解析を行ってきた。人工島などの埋立地盤は、粘土でも粒度がそろったきれいな砂でもない両者が混ざったいわゆる「中間土」が多くを占めているが、その力学挙動を記述する構成式研究は少ない。本論文では、土の骨格構造¹⁾(構造、過圧密、異方性)の働きを表現できる上・下負荷面修正カムクレイモデル(SYSカムクレイモデル)²⁾を土の構成式に適用して、(1)土の骨格構造の働き方の違いによって粘土～中間土～砂の力学挙動を説明できることを示し、(2)初期値・境界値問題として、砂杭拡径による中間土地盤の締固め改良の水～土連成計算^{3),4)}を行い、中間土地盤の特性(土の骨格構造の働き方、透水係数)の違いによる締めまり方の違いを調べた。

2 土の骨格構造の発展則と想定した土の種類

本論文では簡単のため、異方性とその発達は考慮しない。SYSカムクレイモデルの詳細は文献2)に示すが、構造の程度、過圧密状態はそれぞれ R^* , R ($0 < R^*, R \leq 1$, $1/R$ は過圧密比)で表し、塑性変形に応じて $R^* \rightarrow 1$ (構造劣化)で繰り返し状態に近づき、 $R \rightarrow 1$ (過圧密解消)で正規圧密状態に近づく。この変化はそれぞれ R^* , R の発展則で記述される。単位の塑性変形が与えられたとき、構造劣化、過圧密解消の生じやすさは、それぞれ R^* , R の発展則のパラメータ(構造劣化指数 a, b, c , 正規圧密土化指数 m)によって決まる。構造劣化、過圧密解消の生じやすさの相違は、土の骨格構造の働き方の違いを表している。

表-1 弾塑性パラメータと初期値

<弾塑性パラメータ>		<初期値>	
圧縮指数 λ	0.13	過圧密比 $1/R_0$	5.0
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.01	構造の程度 $1/R_0^*$	10.0
限界状態定数 M	1.2	比体積 $v_0 (= 1 + e_0)$	2.58
NCLの切片 N	2.5	平均有効応力 p'_0 (kPa)	98.1
		(at $p' = 98.1$ kPa)	
		応力比 $\eta_0 = q_0/p'_0$	0.0
ポアソン比 ν	0.3	異方性 $\zeta_0 = \sqrt{3/2} \ \beta_{0\parallel}\ $	0.0

表-2 発展則パラメータ

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
構造劣化指数 a ($b = c = 1.0$)	0.3	1.2	0.3	1.5
正規圧密土化指数 m	5.0	1.5	0.05	0.05

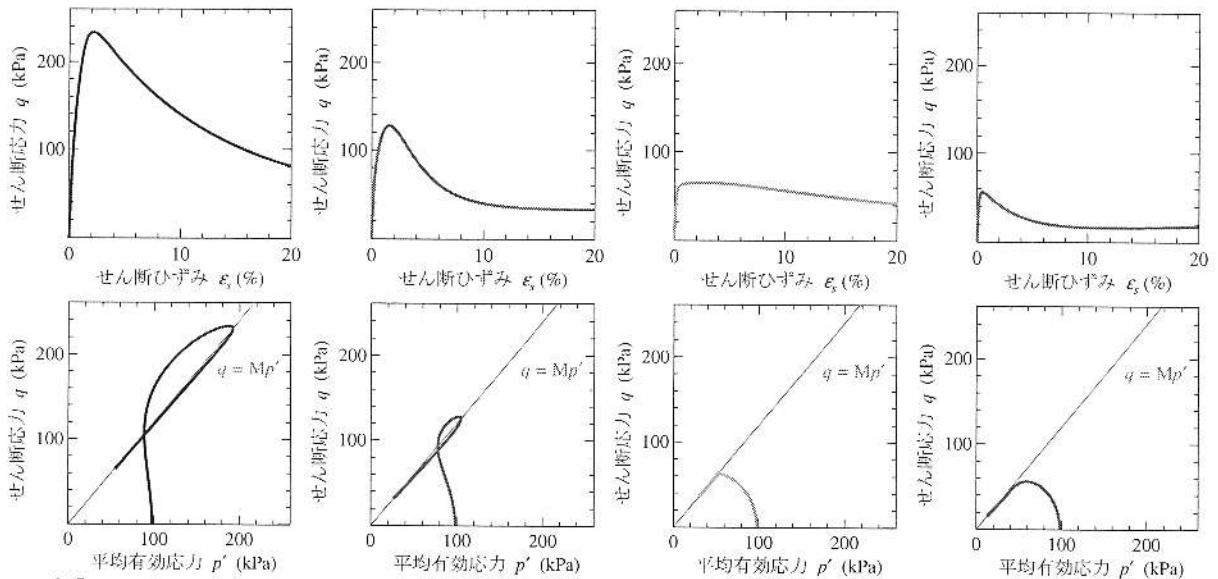
想定した4種類の土は、弾塑性パラメータと構造高位で過圧密状態にある初期値(表-1)は同一で、構造劣化と過圧密解消の生じやすさが異なる(表-2)。Type 1は過圧密解消が構造劣化より速い「粘土」を表し、Type 4は構造劣化が過圧密解消より速い「砂」を表す。Type 2, Type 3は粘土でも砂でもない「中間土」に相当する。

3 構成式応答による粘土～中間土～砂の力学挙動(非排水せん断, 排水せん断, 一次元圧縮, 締固め)

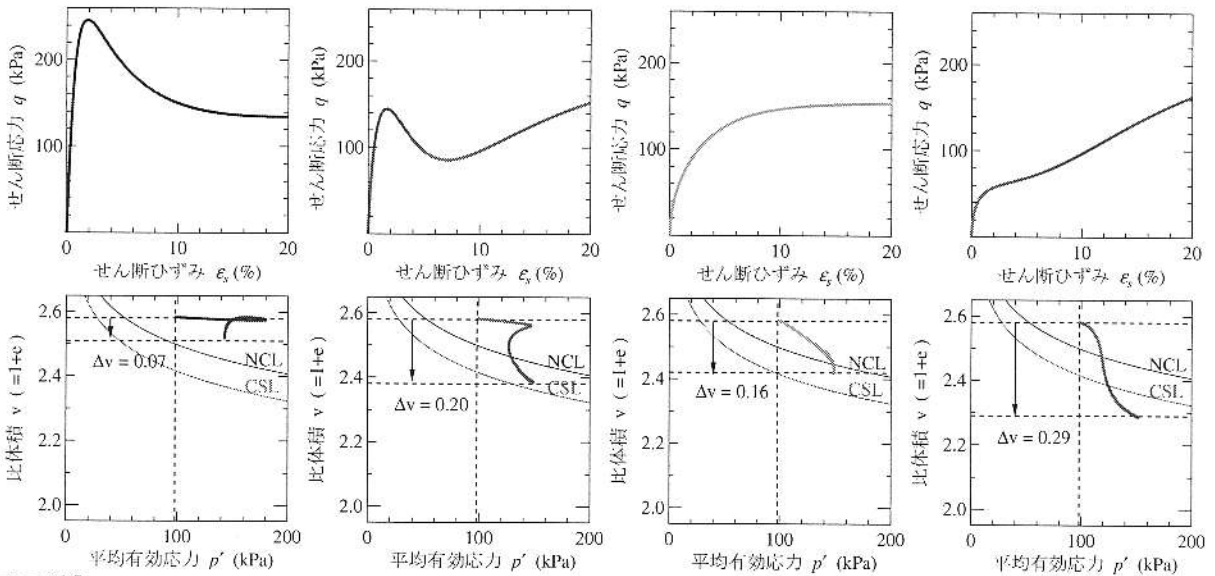
図-1は、非排水せん断挙動(せん断ひずみ $\epsilon_s = 20\%$ までせん断)、排水せん断挙動(せん断ひずみ $\epsilon_s = 20\%$ までせん断)、単調載荷による一次元圧縮挙動、側圧一定の排水繰返しせん断(繰返し振幅30kPa, 20回繰返し)による締固め挙動、についての構成式の応答を示している。同じ弾塑性パラメータ、初期値を有する土でも構造劣化と過圧密解消の生じやすさの相違によって各挙動が大きく変化していることが分かる。

Type 1とType 4はそれぞれ構造、過圧密を有する典型的な粘土と典型的な砂の挙動を示している。構造劣化、過圧密解消がともに生じやすい中間土(Type 2)では、非排水せん断の応力パスは粘土に、応力～ひずみ関係は砂に似た挙動を示す。単調載荷では粘土に比べて大きく圧縮するが、繰返し載荷では粘土と同様に圧縮しない(締めりにくい、比体積変化 $\Delta v = 0.09$)。構造劣化、過圧密解消がともに生じにくい中間土(Type 3)では、非排水せん断の応力パスは砂に、応力～ひずみ関係は粘土に似た挙動を示し、単調載荷では砂に比べて圧縮しないが、繰返し載荷では砂と同様に大きく圧縮する(締まる、 $\Delta v = 0.33$)。

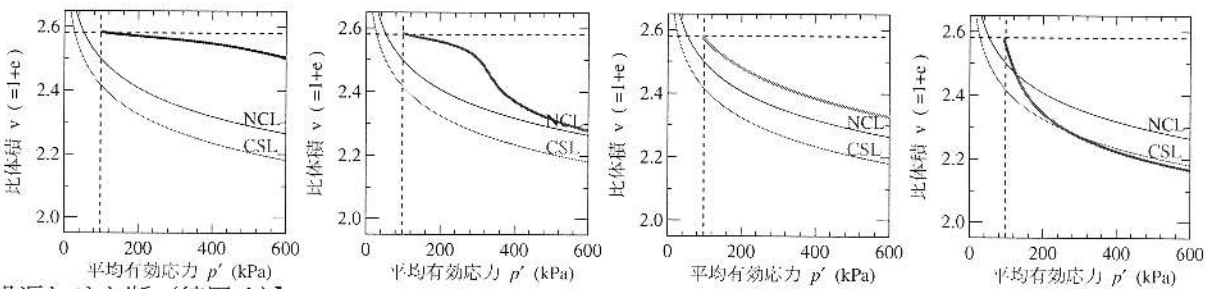
【非排水せん断】



【排水せん断】



【一次元圧縮】



【排水繰返しせん断 (締固め)】

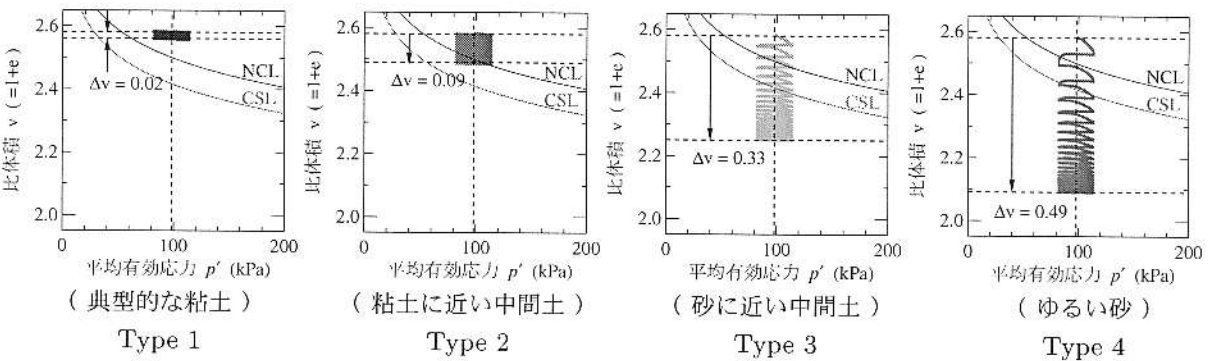


図-1 構成式応答による粘土～中間土～砂の力学挙動

4 砂杭拡径による締固め改良時における杭周中間土地盤の挙動

(1) 計算条件と地盤の初期状態

図-2 に示す層厚 12m の 2 種類の中間土地盤 (Type 2, Type 3) を想定し, $GL-12m \sim GL-2m$ を改良部分とする。ケーシングパイプの押込み, 引抜きを繰り返し, 長さ 10m, 半径 20cm の砂杭を地盤深部より半径 35cm に順次拡径しながら約 14 分で打設する過程を軸対称条件で計算する (計算方法の詳細は文献 4) を参照)。図-2 は計算に用いた有限要素メッシュと境界条件, 図-3 は地盤の初期状態分布である。中間土地盤 Type 2, Type 3 の改良部分の初期状態は, 表-1 の弾塑性パラメータ, 表-2 の発展則パラメータを用い, 構造高位 ($1/R_0^* = 10.0$) で過圧密状態 ($1/R_0 = 5.0$) にある (構造, 過圧密は深さ方向に均一に分布) と仮定し, 土被り圧に応じて比体積 (v_0) の分布を決定した (ただし, 土粒子の密度 $\rho_s = 2.7g/cm^3$, $K_0 = 1.0$)。

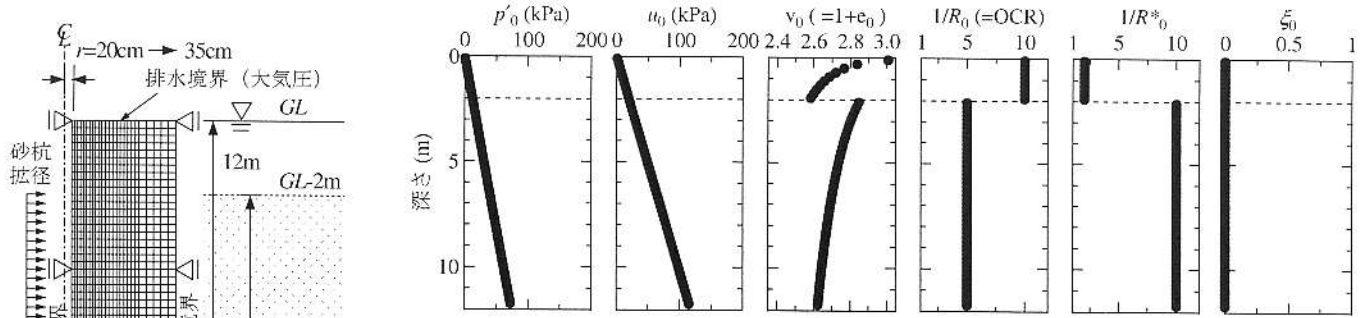


図-3 地盤の初期状態分布

(2) 計算結果

a) 杭周地盤の平均比体積変化

図-4 は, 地盤の透水係数 k を 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} cm/sec と変化させたときの砂杭拡径による杭周地盤の平均比体積変化を示す。 $\Delta v(1m)$, $\Delta v(3m)$ は, それぞれ砂杭中心から 1m 以内, 3m 以内の改良部分における平均比体積変化を表している。図-5, 図-6 は杭周地盤内の過剰間隙水圧が消散した時の比体積変化分布を示す。構造劣化と過圧密解消の生じやすさの違いだけでなく地盤の透水性の違いによって, 地盤の締まり具合 (図-4) や締まる領域 (図-5, 図-6) が大きく変化していることが分かる。三軸試験の境界条件に相当する微小振幅による排水繰返し载荷の構成式応答では, Type 2 は Type 3 に比べて締まりにくかった (図-1 参照) が, 境界条件が異なる砂杭拡径による締固め改良では, 透水係数が大きい場合には Type 2 は Type 3 と同程度締まっている。透水係数が小さい場合には Type 2 は締まりにくいのに対し, Type 3 は締まるように見える。しかし, 過剰間隙水圧の消散が長期間に亘る ($k = 10^{-7}$ の場合で約 30 年) ので, 締固め改良に適しているとは言えない。

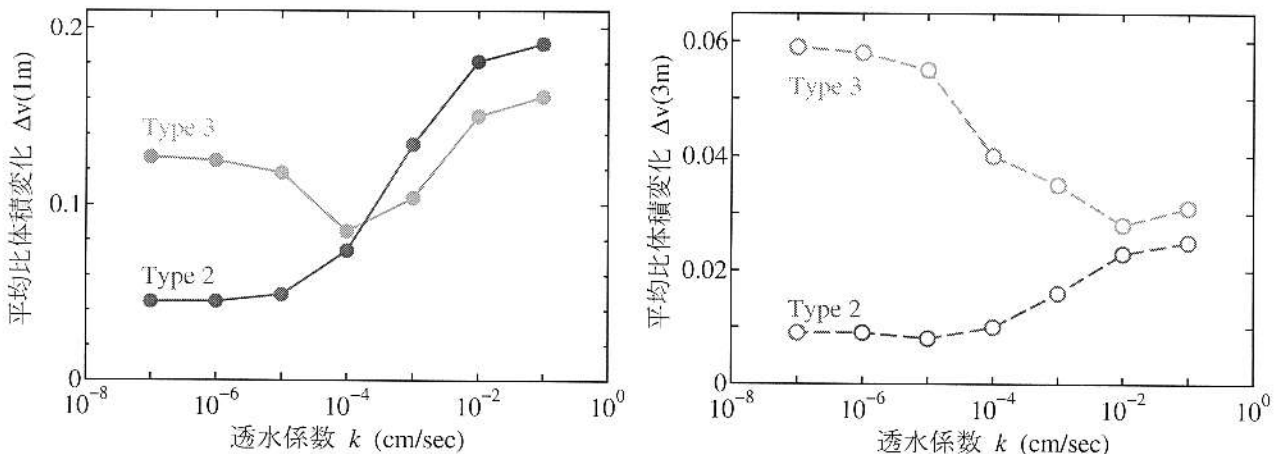


図-4 杭周地盤の透水係数が平均比体積変化に及ぼす影響

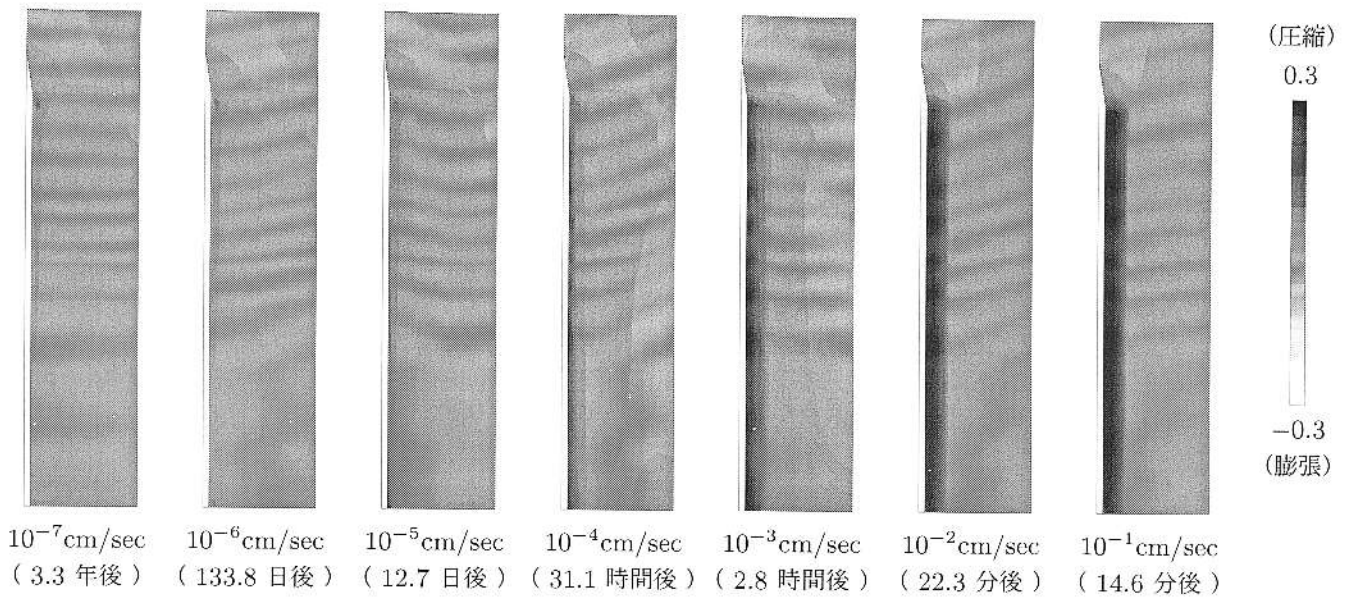


図-5 比体積変化分布 (Type 2: 粘土に近い中間土)

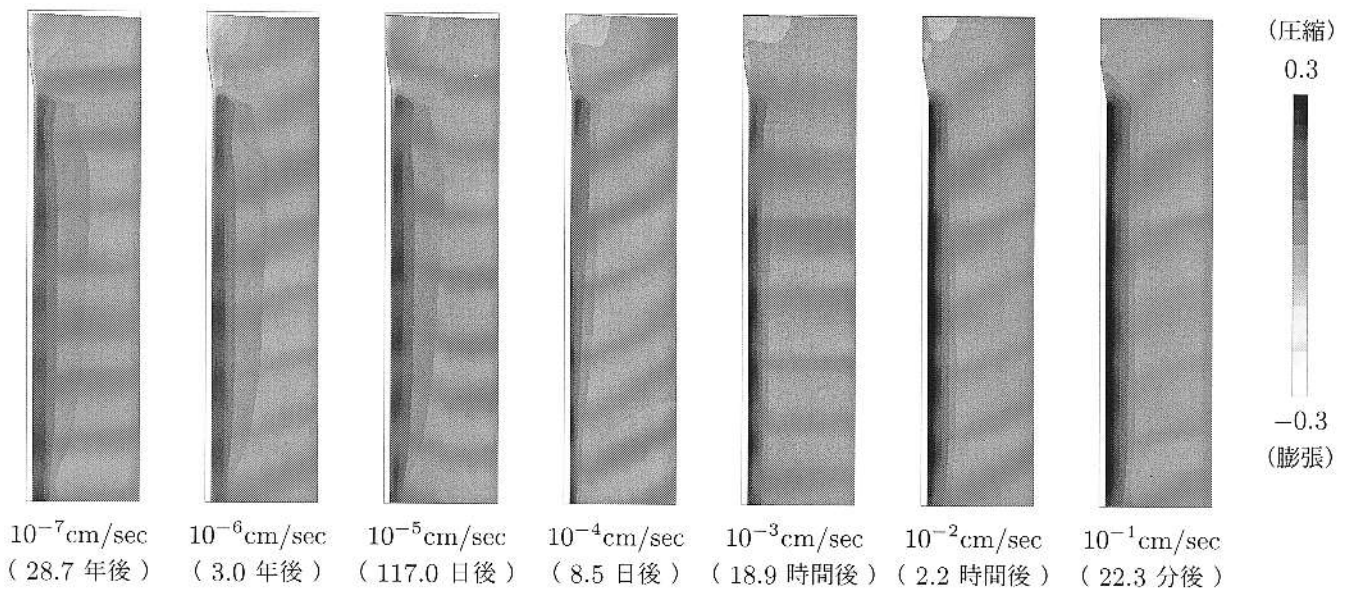


図-6 比体積変化分布 (Type 3: 砂に近い中間土)

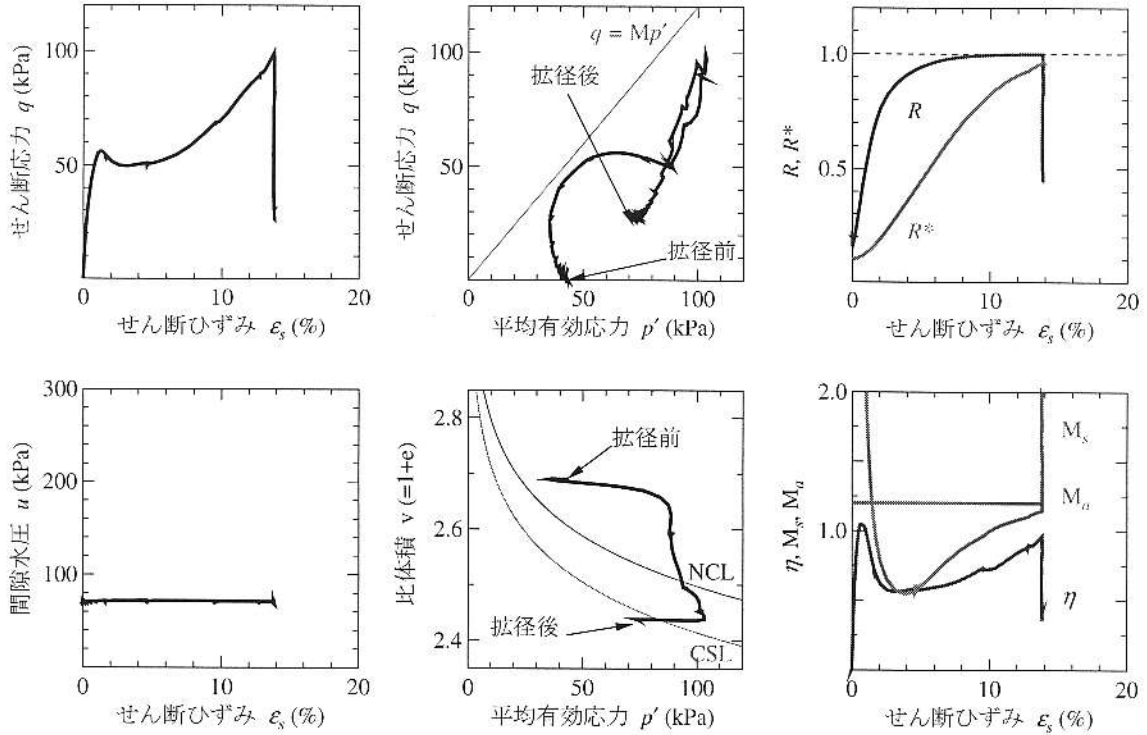
b) 杭周地盤内の代表的な要素の挙動

図-7, 図-8 に杭周地盤内の代表的な要素 (図-2 中の要素 A) の挙動を示す。図-1 に示す構成式の応答と比較すると、杭周地盤の透水係数が大きい場合 ($k = 10^{-1}$ cm/sec, 図-7), ケーシングパイプの押込みに伴う砂杭拡径によって杭周地盤は「排水」せん断されていることが分かる。Type 2 と Type 3 で経路は異なるが、排水せん断による圧縮量がともに大きいので、透水係数が大きい場合は構造劣化、過圧密解消の生じやすさの相違によらず砂杭拡径によって締まる地盤であることが分かる。

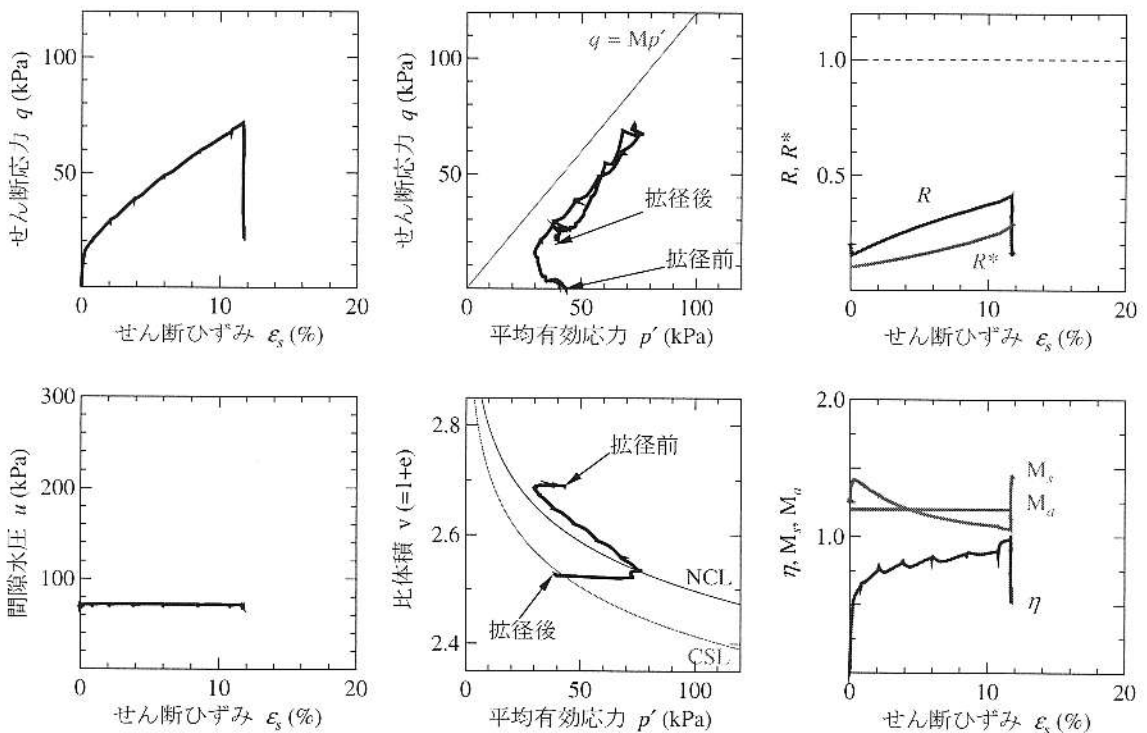
透水係数が小さい場合 ($k = 10^{-7}$ cm/sec, 図-8), 杭周地盤は砂杭拡径時に「非排水」せん断されて平均有効応力が減少し、過剰間隙水圧が蓄積している。その後、過剰間隙水圧は消散して平均有効応力が増加し、圧密が進行している。構造劣化、過圧密解消がともに生じやすい中間土 (Type 2) では、砂杭拡径時において構造、過圧密はともに解消し、圧密過程においてケーシングパイプの引抜きに伴う除荷によって蓄積した過圧密が解消している。過圧密の解消は土が膨張する方向に働いたために圧縮量はより小さくなるので、地盤は締まりにくくなる。構造劣化、過圧密解消がともに生じにくい中間土 (Type 3) では砂杭拡径時においても構造、過圧密は残っている。その後の圧密過程では構造劣化、過圧密解消が生じにくいために練返し土の正規圧密曲線とほぼ平行な曲線に沿って比体積が減少するので、圧縮量は大きくなっている。

5 おわりに

本論文では、構成式の応答と砂杭拡径による中間土地盤の締固め改良の水～土連成計算によって以下のことを示した。(1) SYS カムクレイモデルは、同一の弾塑性パラメータと初期値の組合せであっても土の骨格構造の働き方の相違により力学挙動が大きく変化し、粘土と砂の間のどのような中間土の力学特性にも対応できる。(2) 中間土地盤の特性（土の骨格構造の働き方、透水係数）と境界条件によって締まり方が異なることを示した。どのような中間土地盤が砂杭拡径によって締固めることができるかを判断するためには、弾塑性パラメータ、初期値、土骨格構造の働き方の発展則のみならず、対象とする問題の境界条件、透水係数の影響も含めて議論する必要がある。

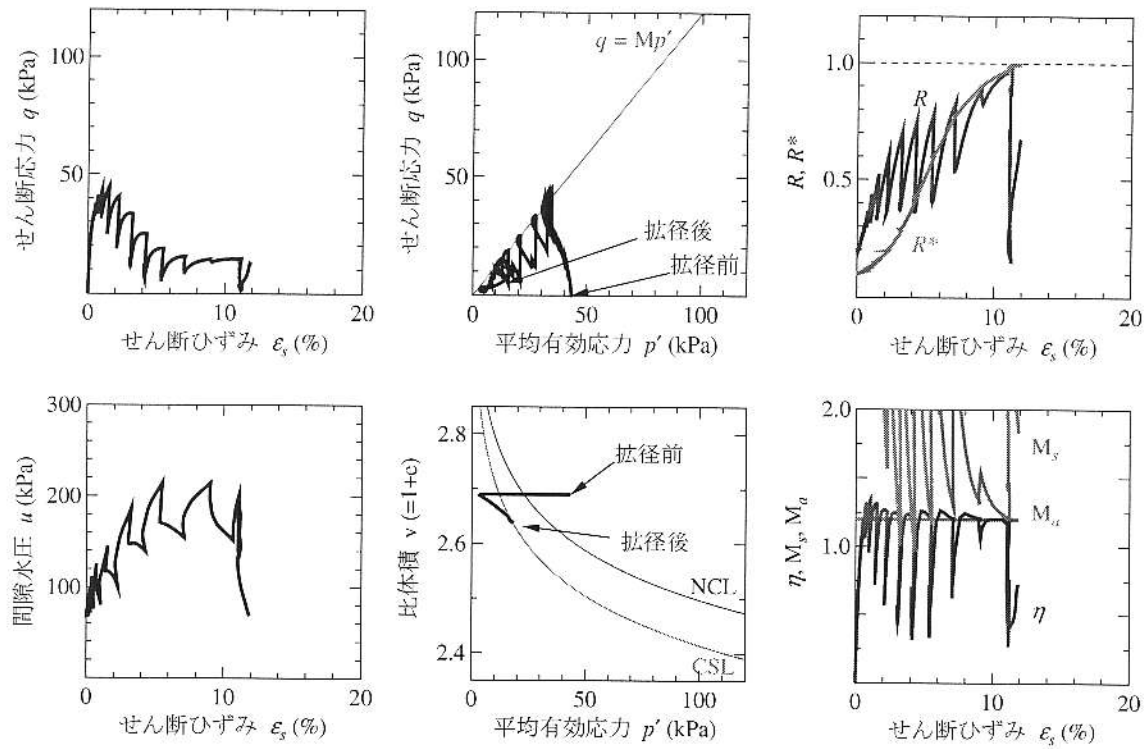


【 Type 2 : 粘土に近い中間土 】

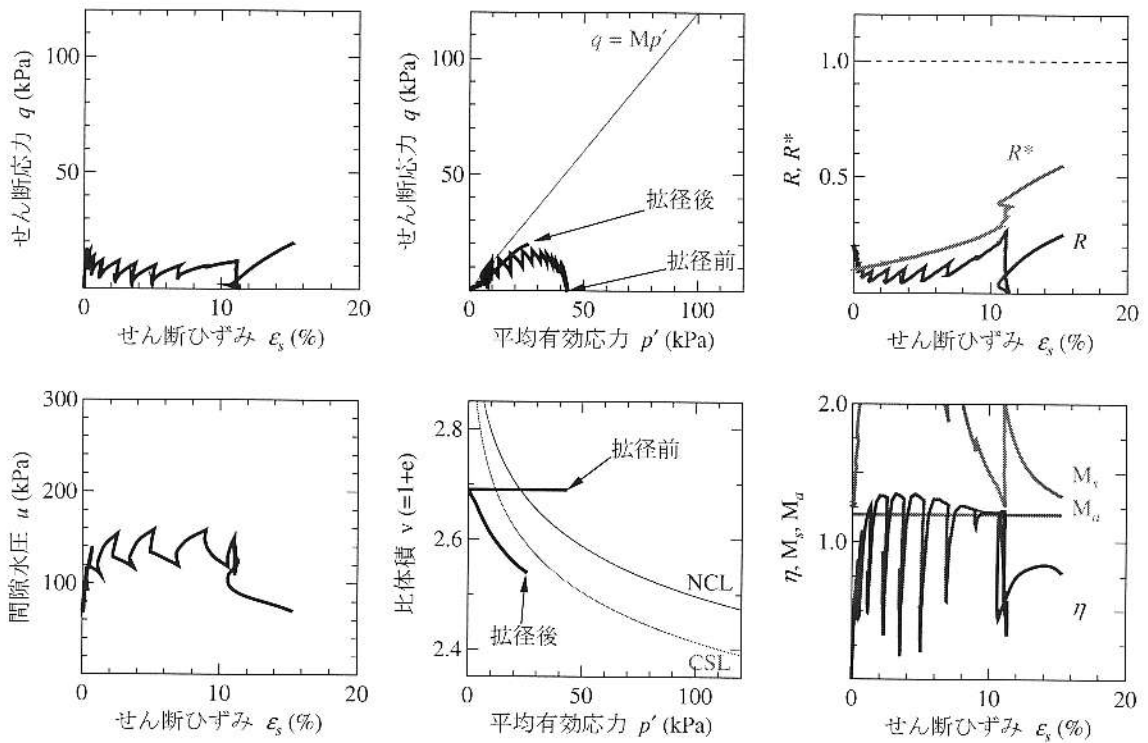


【 Type 3 : 砂に近い中間土 】

図-7 透水係数が大きい場合 ($k = 10^{-1} \text{cm/sec}$) の杭周地盤内の代表的な要素の挙動



【 Type 2 : 粘土に近い中間土 】



【 Type 3 : 砂に近い中間土 】

図-8 透水係数が小さい場合 ($k = 10^{-7}$ cm/sec) の杭周地盤内の代表的な要素の挙動

参考文献

- 1) 三笠 (1964): 土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, **12**(4), pp.17-24.
- 2) Asaoka et al.(2002): An elastoplastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S & F, **42**(5), pp.47-57.
- 3) Asaoka et al.(1994): Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, S & F, **34**(1), pp.91-106.
- 4) 野田ら (2001): 砂杭造成によるゆるい砂質地盤の締固め効果に関する水～土連成解析, S & F, **41**(4), pp.113-123.