

7. 三次元的／静的水～土連成解析による砂質地盤に 設置された筒状改良壁の耐震性能評価

A Seismic Evaluation of Soil-Embankment Systems Including Cylindrical Soil-improvement Elements, Using a Soil-water Coupled 3D Analysis

高稲 敏浩* 山下 勝司*

要 旨

深層混合処理工法を用いた改良壁で筒状に囲った改良体を離散的に配置した場合の砂質地盤～盛土系の地震中および地震後挙動について、SYS カムクレイモデルを搭載した 3 次元動的／静的水～土連成有限変形計算を用いて調べた。その結果、改良体を配置した地盤部では、地盤内の乱れが小さく地震後の沈下、側方変位を抑制できることが分かった。

キーワード：有限要素法／液状化／有効応力解析／深層混合処理

1. はじめに

液状化対策工法の一つである深層混合処理工法を用いた改良形式は、全面改良または格子状が一般的である。格子状は、全面改良に比べて改良率が小さいので経済的な施工が可能であり、格子状に改良された改良地盤で囲まれた地盤のせん断変形を抑止することで過剰間隙水圧の発生を抑えることができる。その結果として、地震による液状化の発生を抑止し、地盤の大変形を抑止することが可能となる。本報では、より経済的な施工を目的として深層混合処理工法を用いた壁で筒状に囲った改良体（以降、「改良ブロック体」と呼ぶ）を、接することなく

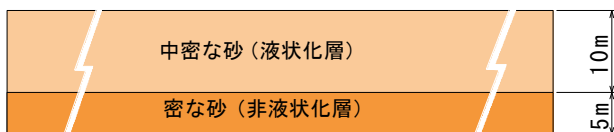
離散的に配置した砂質地盤に、盛土を載荷した場合の耐震性について、3 次元水～土連成有限変形計算を用いて調べた。

一般に液状化対策の効果の判断は、過剰間隙水圧比によることが多い。しかし、仕様規定型設計から性能規定型設計へ移行しつつあるなかで、本研究では液状化するしないではなく、地震中～地震後までの変形抑止に焦点をおいて検討する。そこで、静的あるいは動的を区別なく扱え、地震時前～地震中～地震後の一連の挙動を解析できるプログラム GEOASIA^{1),2)}を用いた。

表－1 計算に用いた土の材料定数と初期値

	弾塑性パラメーター					発展則パラメーター							初期値				土の密度 ρ_s (t/m ³)	透水係数 k (cm/sec)
	圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	限界状態 定数 M	NCL の切片 N	ポアソン 比 ν	構造低位化指数				正規圧密 土化指数 m	回転硬化 指数 b_r	回転硬化 限界定数 m_b	応力比 K_θ	構造の 程度 $1/R^*_\theta$	異方性 の程度 K_β	比体積 ν_θ		
						a	b	c	C_s									
上層(中密な砂)	0.05	0.012	1.00	1.98	0.3	2.2	1.0	1.0	1.0	0.1	3.5	0.7	0.6	4.0	0.6	1.98	2.65	1.0×10^{-3}
下層(密な砂)	0.05	0.012	1.00	1.98	0.3	2.2	1.0	1.0	1.0	0.1	3.5	0.4	0.6	1.3	0.6	1.78	2.65	1.0×10^{-3}
盛土	0.10	0.030	1.40	2.09	0.3	0.3	1.0	1.0	1.0	1.7	0.3	0.5	0.6	7.5	0.5	2.14	2.65	1.0×10^{-7}

($N_p=98\text{kN/m}^2$ における繰り返し土の等方正規圧密線上の比体積)



図－1 地層構成

表－2 改良体の材料定数

弾性係数E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	透水係数k (cm/sec)
2.45×10^5	0.3	1.71	1.0×10^{-9}

*技術研究所構造研究グループ

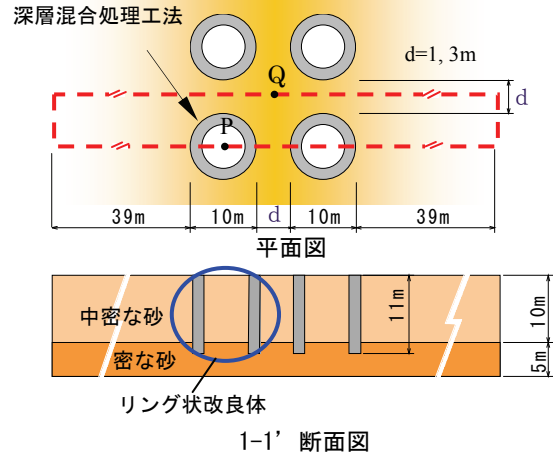
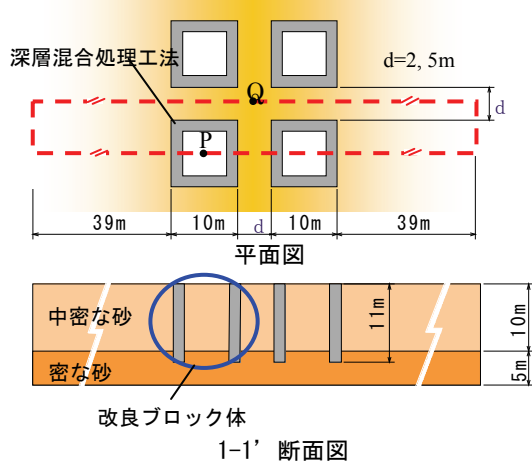


図-2 改良ブロック体配置図（四角）

図-3 改良ブロック体配置図（円形）

表-3 検討ケース

	改良ブロック体筒形状、最小離隔(d)	参考改良率
case1	四角形、2m	24%
case2	四角形、5m	16%
case3	円形、1m	23%
case4	円形、3m	16%
case5	円形（千鳥配置）、「図2参照」	23%
case6	円形（地表面50cm密な砂で置換え）、1m	23%

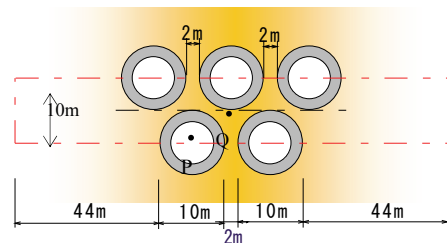


図-4 改良体配置図（case5）

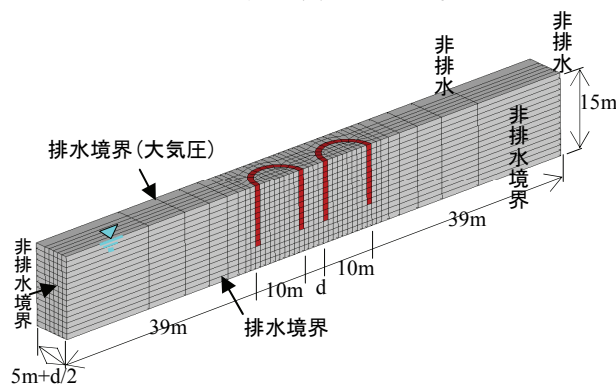
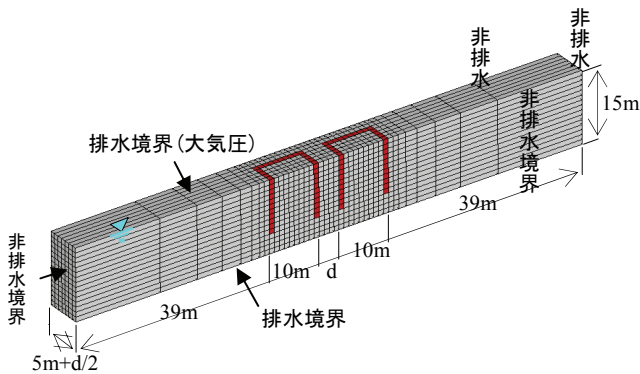
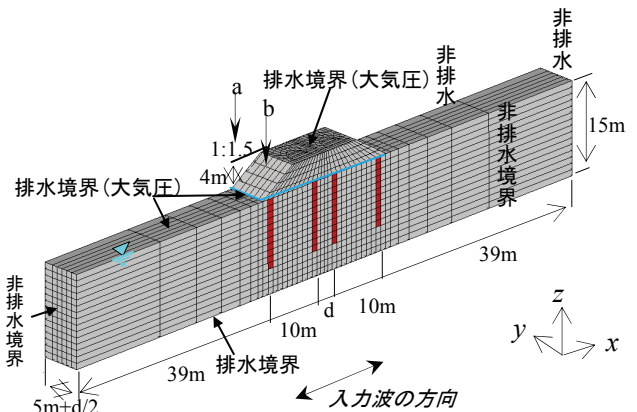


図-5 地盤の有限要素メッシュおよび境界条件



2. 計算条件および計算方法

地盤は、図-1 に示すように下層 5m を密な砂、上層 10m を中密な砂とし、表-1 に示す材料定数を用いた。表-1 に地盤材料の初期値を示した。構造の程度、比体積は各層で均一として、土被り圧に応じて過圧密比を鉛直方向に分布させた。

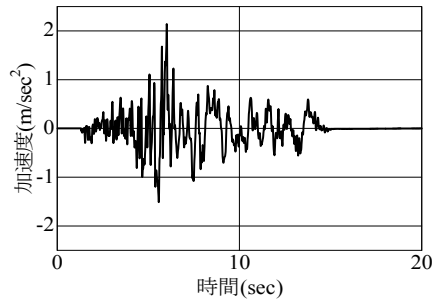


図-7 入力波（八戸波）

改良ブロック体は、改良壁を改良深さ 11m、壁厚 1m とし、図-2 あるいは図-3 に示すように四角および円形状に囲ったものを想定した。図-2 に示す四角に囲った改良ブロック体の場合は、改良壁間 8m で囲まれた改良ブロックを 2 あるいは 5m 毎に配置する 2 ケース（表-3 case1、case2）について検討した。また、図-3 に示すリング状に囲った改良体の場合は、直径 10m の改良ブロック体を最小離隔 1 あるいは 3m で配置する 2 ケース（表-3 case3、case4）について検討した。さらに、図-4 に示すような千鳥配置となっている case5 および case3 と同様の配置で地表から 50cm を密な砂で置換えた case6 についても検討した。

計算に用いた有限要素メッシュは対称性を仮定して図-2、3 の破線部をモデル化し、図-5 あるいは、図-6

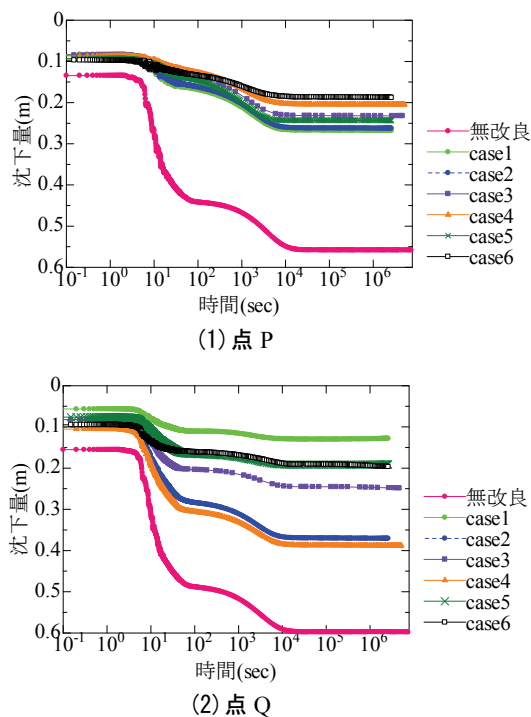


図-8 沈下～時間関係

に示すようなメッシュおよび境界条件を用いた。また、工学的基盤面にあたる地盤下端には、底面粘性境界 ($V_s=300\text{m/sec}$) を設定し、地盤両側の同じ高さにある全節点に等変位条件を課した（「周期境界」）。地震動は、地盤底面の全節点の x 軸方向に八戸波（図-7 参照）を入力した。

深層混合処理工法による改良部分の土要素の除去と同時に、水～土 2 相系線形弾性体（表-2 参照）で「瞬時」に置換することにより再現した。盛土は飽和土を仮定し、水～土 2 相系弾塑性体（表-2 参照）の有限要素を 30cm/8 時間の速度で 4m まで段階的に载荷（要素追加）⁴⁾した。その水理境界は、盛土表面は水圧を常にゼロ（大気圧条件）、下面はサンドマットなどの排水層を想定し同様に水圧を常にゼロに設定した。盛土载荷による圧密が終了した後、地震動を与え、地震後圧密が終了するまで計算を実施した。GEOASIA は、土の構成式に土の骨格構造（構造、過圧密、異方性）の働きを記述できる SYS カムクレイモデル³⁾を搭載し、動的、静的を問わない水～土連成解析プログラムであり、上記の一連の計算を一つのプログラムのみで実施している。

3. 計算結果

3.1 変形挙動

地盤面点 P、Q（図-2、3 参照）における沈下の経時変化を図-8 に示す。地震開始時刻を $t=0$ としている。改良ブロック体の離隔に応じて盛土天端幅が異なるので同一条件での比較ではないが、改良ブロック体内部点 P において無改良地盤に比べて沈下量は、1/2 以下に抑えられ

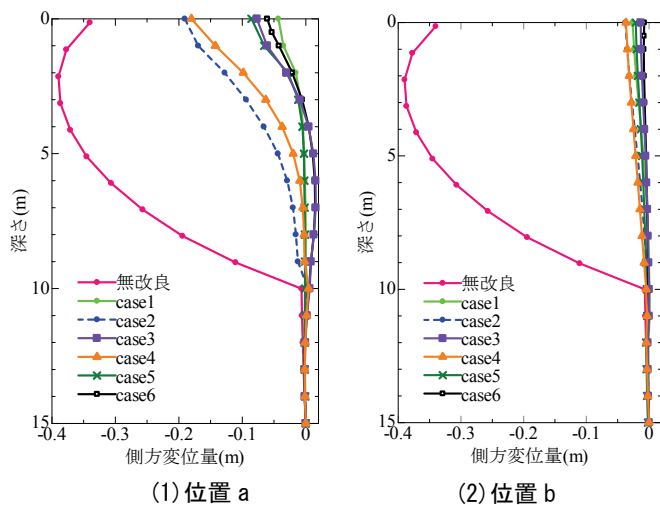


図-9 側方変位量

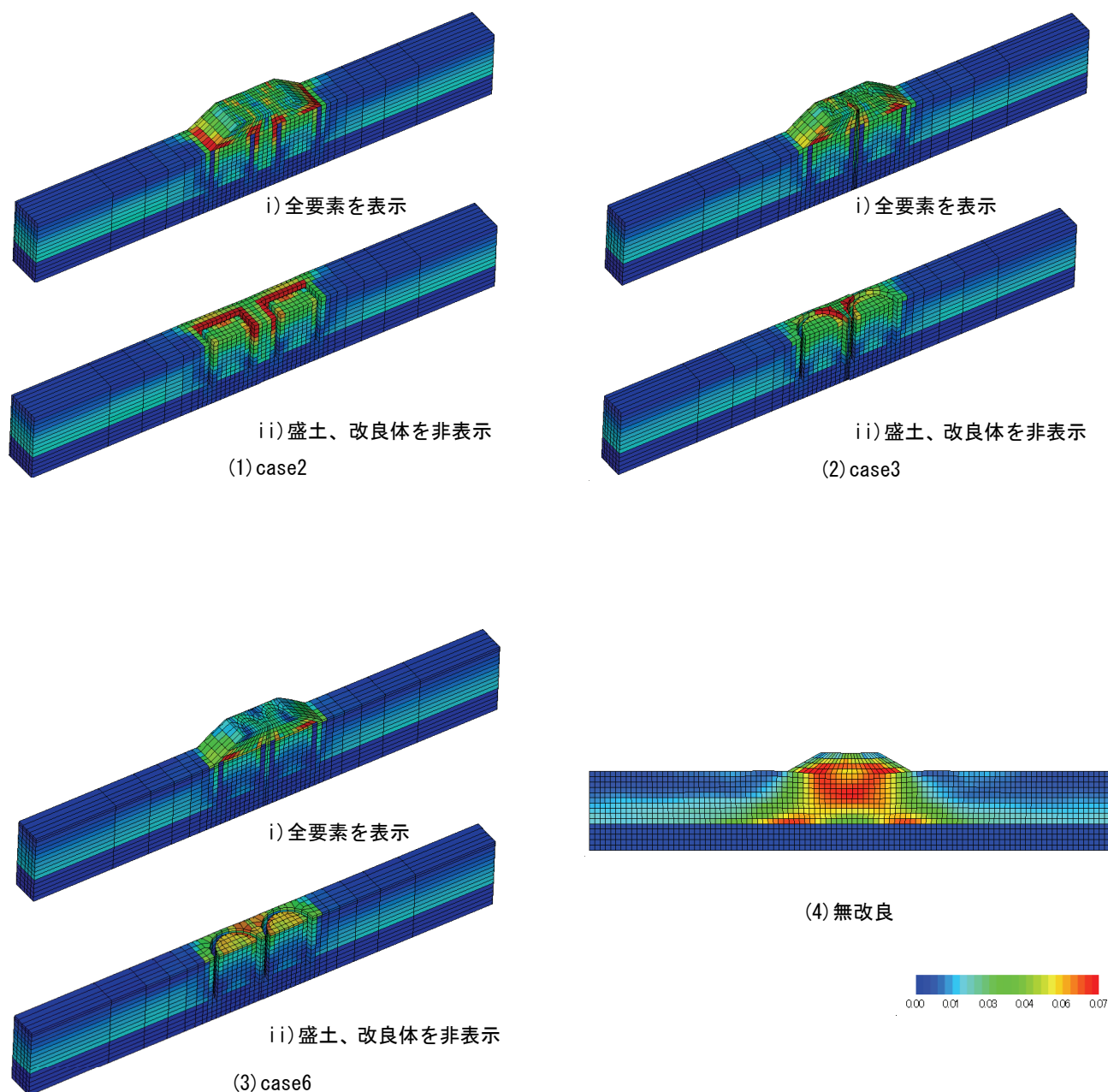


図-10 せん断ひずみ分布（地震後圧密終了時）

ている。内部点 Q においては、改良率の低い case2、case4 を除くと 1/2 以下に抑えられていることが分かる。また、図-9 に圧密終了時における法尻部（図-6 位置 a、b）の側方変位を示す。この場合も無改良地盤に比べ case2、case4 を除くと 1/4 程度に抑えられている。ただし、沈下、側方変位において、改良形状や改良率による有意な傾向は見られない。

図-10 に case2、case3、case6 および無改良地盤の地震後圧密終了時のせん断ひずみ分布を示す。なお、改良

地盤 case2、case3、case6 については、有限要素をすべて表示したものと盛土および改良体を非表示にしたものを掲載している。無改良地盤に比べ改良地盤ではせん断ひずみが小さく、case2 と case3 を比べると、case2 では、法尻付近と改良壁外側で大きくせん断ひずみが発生している。また、case6 では上層の密な砂により、改良ブロック間の局所的なひずみが抑えられ、地表面部で一様なせん断ひずみが生じている。これらは図-8 の点 P と点 Q の沈下に差が無い様子からも読み取れる。

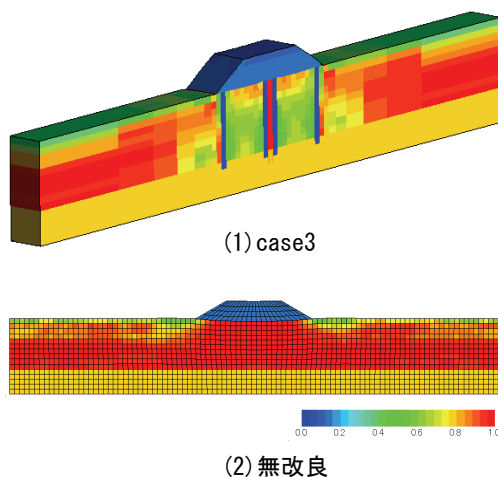


図-11 構造の程度 R^* 分布

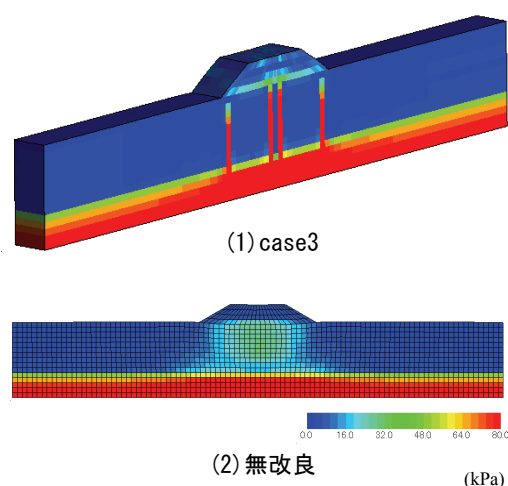


図-13 平均有効応力 p' 分布

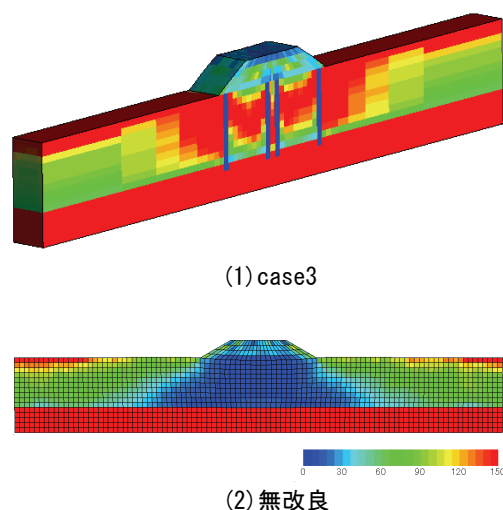


図-12 過圧密比 $1/R$ 分布

3.2 地盤内の挙動

改良地盤 case3 と無改良地盤の地震発生後 40 秒後における構造の程度 R^* 、過圧密の状態 R 、平均有効応力 p' の分布を図-11、12、13 に示す。構造の程度 R^* は、無改良地盤では、すでに低位化してほぼ 1.0 になっているが、改良地盤では改良ブロック体内部では、低位化しておらず乱されていないことが分かる。また、過圧密比 R は無改良地盤ではほぼ解消された ($R \cong 1$) のに対し、改良地盤の改良ブロック内では大きくなっている。平均有効応力 p' については、無改良地盤では盛土载荷により拘束圧が大きくなり、盛土直下で周辺地盤に比べ平均有効応力が大きくなっている。一方、改良地盤における平均有効応力 p' は、改良ブロック体内部も周辺地盤同様小さくな

っているが、改良体部分が大きくなっていて応力分担が増加したことが分かる。

これらの挙動を明確にするために、図-14、15 に改良地盤 (case3) および無改良地盤における点 P、Q の位置の深さ 5m の土要素の挙動を示す。改良地盤 (case3) では、無改良地盤に比べて盛土によるせん断応力の増加は小さく、地震によるせん断ひずみの発生も小さくなっている。また、盛土载荷により増加した平均有効応力は、地震と共に減少し地震後回復に向かう。無改良地盤では、地震開始前の平均有効応力の状態にほぼ戻るが、改良地盤 (case3) では改良体が地震後も応力を分担するため、その回復量は小さいことがわかる。さらに、無改良地盤では地震と共に構造 R^* が低位化し、塑性膨張²⁾ ($Ma < \eta$) / 圧縮 ($Ma > \eta$) を伴う硬化と除荷を繰り返し、構造がやがて消失 ($R^*=1$) する。これに対し、改良地盤では、構造の低位化は小さく、概ね塑性膨張 ($Ma < \eta$) が生じることなく、塑性圧縮を伴う硬化と除荷を繰り返し、過圧密化が進んでいる。すなわち、改良ブロック体の効果により改良壁の荷重分担が増え、改良ブロック体内部では土要素に (弾性) 除荷が生じ平均有効応力が減少し、過圧密が大きくなった。

4. おわりに

改良ブロック体を配置した地盤部では、離散的に設置した場合についても有意な沈下ならびに側方変位の抑制効果があり、改良ブロック体内外の土要素の挙動からもその効果を確認した。今後は、改良体を弾性体ではなく (水～土 2 相系) 弾塑性体としたより詳細な検討も行う予定である。

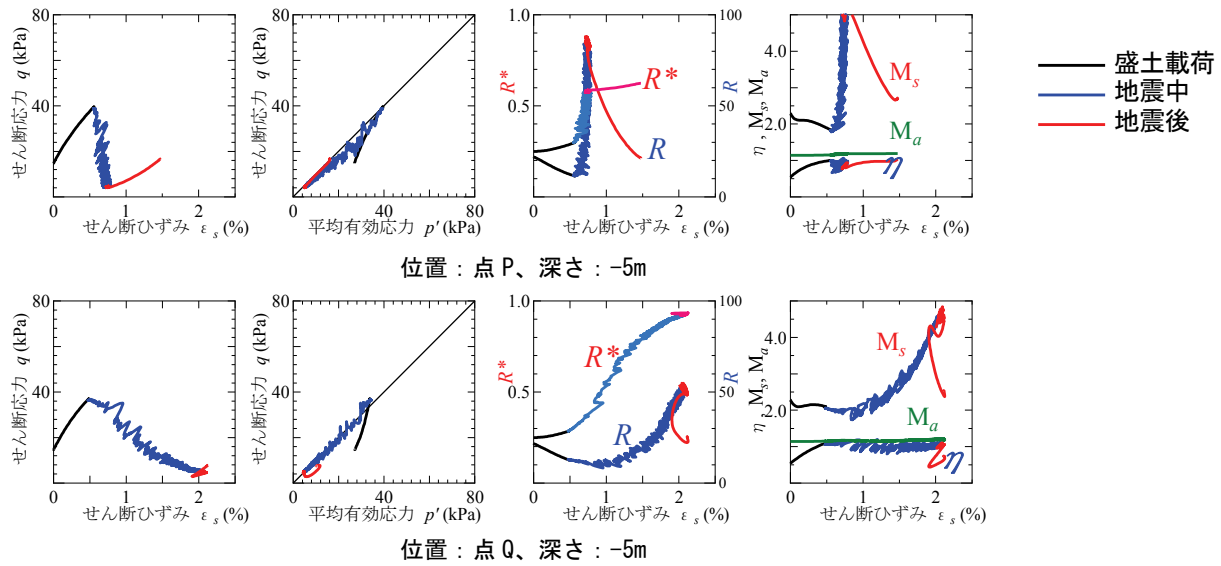


図-14 土要素の挙動 (case3)

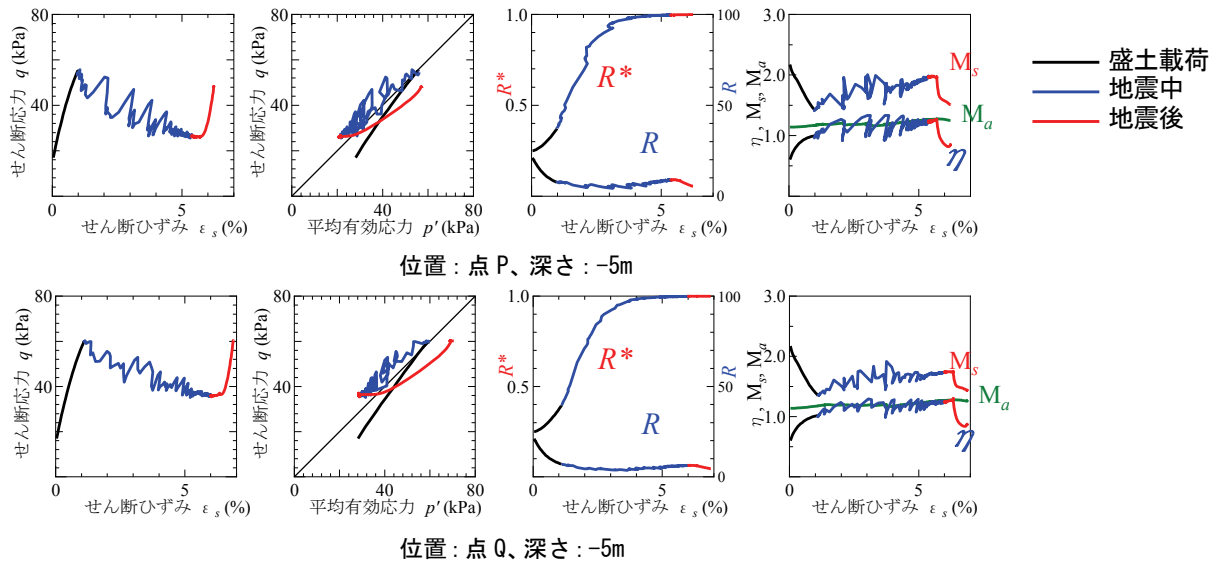


図-15 土要素の挙動 (無改良地盤)

[謝辞]

計算にあたっては名古屋大学大学院浅岡顕教授、野田利弘教授に指導いただいた。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) Asaoka, A. and Noda, T.: All soils all states all round geo-analysis integration, International Workshop on Constitutive Modelling - Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, China, pp.11-27, 2007.

- 2) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, S&F, 48(6), 771-790, 2008.
- 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K., Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol 42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 4) 竹内秀克、高稲敏浩、野田利弘：飽和粘土地盤の圧密変形に及ぼす幾何学的非線形性の効果、応用力学論文 文集 Vol.9, pp.539-550, 2006.