

筒状改良壁を有する砂質地盤の地震中液状化・地震後沈下挙動の 3次元水～土連成解析

A Soil-water Coupled 3D Analysis of Sandy Ground with Improved Soil Blocks under/after Earthquake

高稲 敏浩* 山下 勝司*²

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、過剰間隙水圧の上昇が抑えられその消散が早く、地震後の沈下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、その工法原理は、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である。その結果として、地震による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場合の砂質地盤の地震中および地震後の挙動について、土の構成式にはSYSカムクレイモデル¹⁾を搭載した3次元水～土連成有限変形計算²⁾を用いて調べた。なお、筒形状については、四角形および円形（リング）状について検討した。

2. 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には地盤材料の初期値も示しているが、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。

改良壁は、図-2あるいは図-3に示すように改良深さ11m、幅1mとした。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表-3に示すように2～5m毎に配置する5ケース（caseA～E）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の改良ブロックを表-4に示すように最小離隔1～4mで配置する5ケー

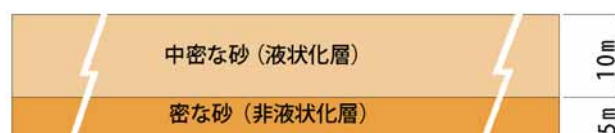


図-1 地層構成

表-2 改良体の材料定数

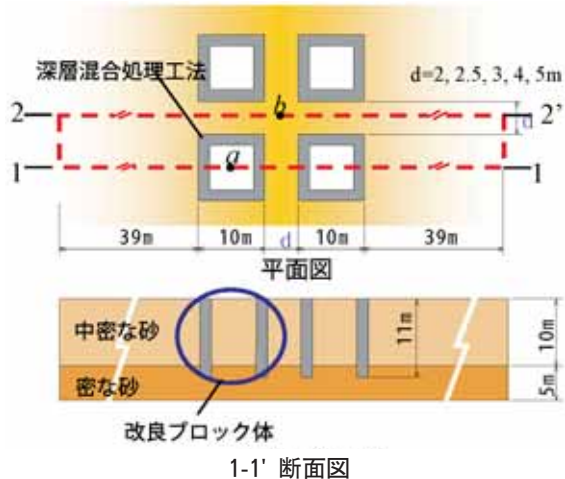
弾性係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	湿潤密度 ρ_t (t/m ³)	透水係数 k (cm/sec)	応力比 K ₀
2.45×10 ⁶	0.3	1.71	1.0×10 ⁻⁹	0.6

表-1 計算に用いた土の材料定数と初期値

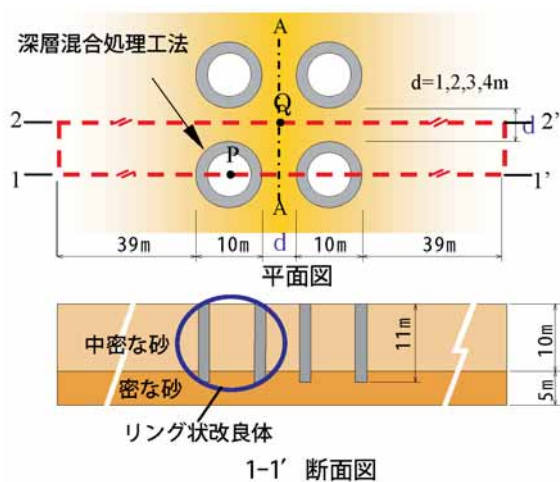
	弾塑性パラメーター					発展則パラメーター						初 期 値				土の密度 ρ_s (t/m ³)	透水係数 k (cm/sec)	
	圧縮指数	膨潤指数	限界状態 定数	NCLの 切片	ポアソン 比	構造低位化指数				正規圧密 土化指数	回転硬化 指数	回転硬化 限界定数	応力比	構造の 程度	異方性の 程度			比体積
	$\sim \lambda$	$\sim \kappa$	M	N	ν	a	b	c	C _s	m	b _r	m _b	K ₀	1/R [*] ₀	K _{β}			v ₀
上層 (中密な砂)	0.05	0.012	1.00	1.98	0.3	2.2	1.0	1.0	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

(N:p=98kN/m²における繰り返し土の等方正規圧密線上の比体積)

*技術研究所土木研究グループ *²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）

ス（case1～5）について検討した。case5については、図－４に示すような千鳥配置となっている。なお、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相系弾性体（表－２参照）で「瞬時」に置換することにより再現した。

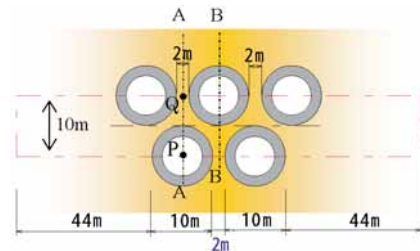
計算に用いた有限要素メッシュは対称性を仮定して図－２、３の破線部をモデル化し、図－５あるいは、図－６に示すようなメッシュおよび境界条件を用いた。また、工学的基盤面にあたる地盤下端には、底面粘性境界（ $V_s=300\text{m/sec}$ ）を設定し、地盤両側の同じ高さにある全節点に等変位条件を課した（「周期境界」）。地震動は、地盤底面の全節点の x 軸方向に八戸波（図－７参照）を入力した。計算は地震動を与えた後、圧密が終了するまで実施した。

表－３ 計算ケース（四角）

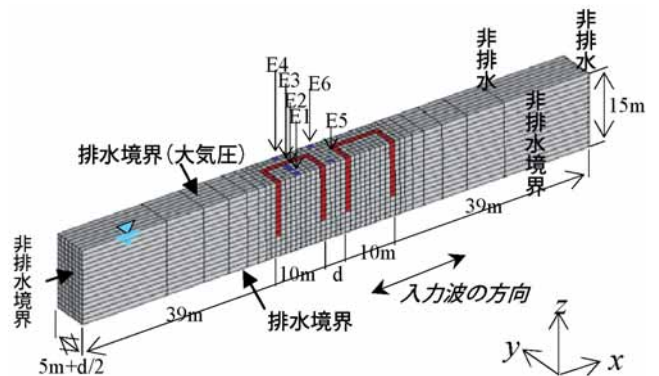
	最小離隔(d)	参考改良率
caseA	2m	24%
caseB	2.5m	23%
caseC	3m	21%
caseD	4m	18%
caseE	5m	16%

表－４ 計算ケース（円形）

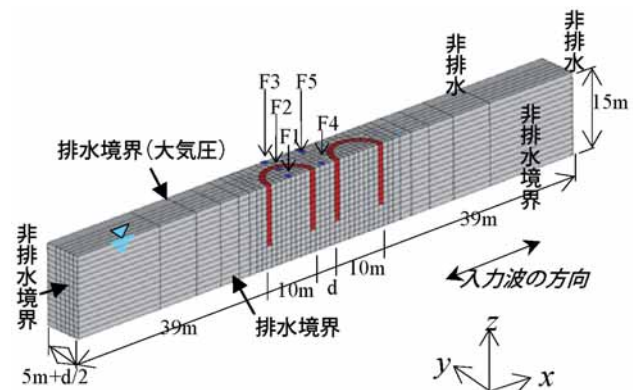
	最小離隔(d)	参考改良率
case1	1m	23%
case2	2m	19%
case3	3m	16%
case4	4m	14%
case5	(図４参照)	23%



図－４ 改良体配置図（case5）



図－５ 有限要素メッシュ（四角形改良ブロック体）



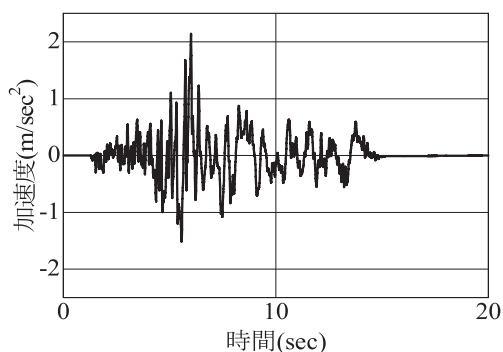
図－６ 有限要素メッシュ（リング状改良ブロック体）

3. 計算結果

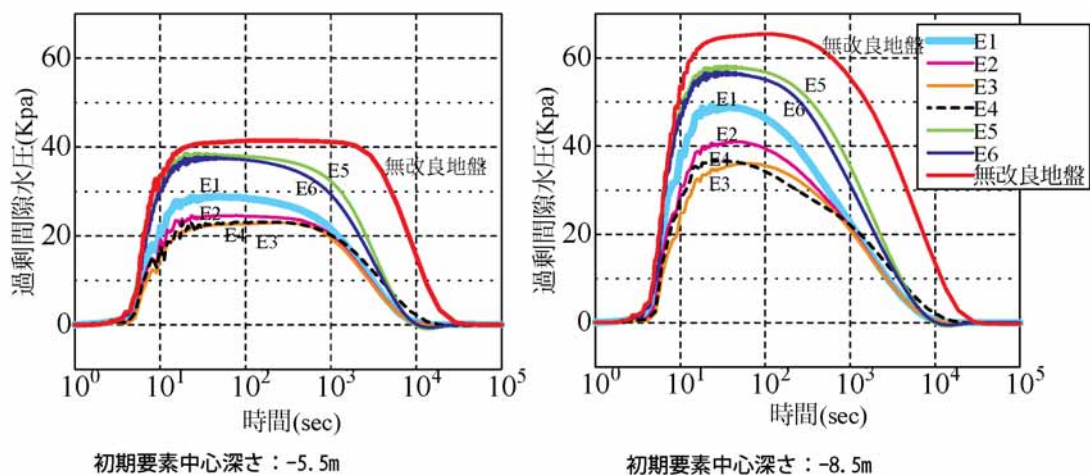
3.1 計算結果（四角形改良ブロック体の場合）

E1～E6（図－5 参照）の深さ5.5mおよび8.5mにある要素の過剰間隙水圧の経時変化を図－8（caseC）および図－9（caseE）に示す。E4の位置を除くと両ケースともおおむね同様な過剰間隙水圧の上昇の様子を示し、改良体設置部では、無改良地盤に比べると、地震中の発生過剰間隙水圧はE1の位置で75%、E2,E3の位置で60%程度に、E5,E6で85～90%程度に抑えられている。E4では、caseCでは60%、caseEでは80%程度となっている。また、過剰間隙水圧の消散が無改良地盤より早いことも分かる。図－10にcaseCにおける地震開始20秒後および16分後の過剰間隙水圧分布（40kPa以上の領域のみを表

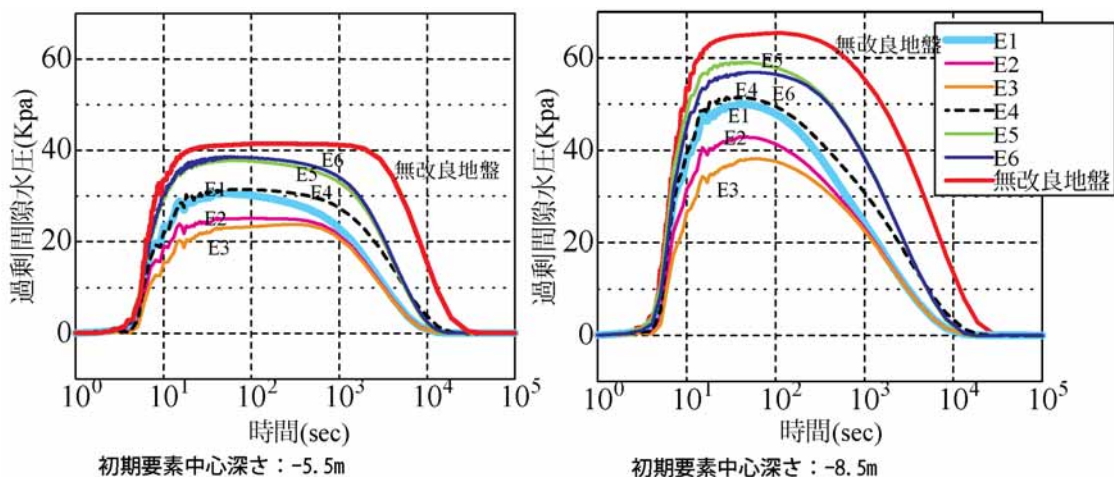
示）を示す。図－11に点a, b（図－2 参照）における沈下の経時変化を、図－12に各ケースの1-1' 断面および2-2' 断面における圧密終了時の地表面沈下量を示す。



図－7 入力波（八戸波）



図－8 過剰間隙水圧～時間関係（caseC）



図－9 過剰間隙水圧～時間関係（caseE）

無改良地盤に比べると、いずれの場合も沈下量は抑えられていて、約1/2以下となっている。各点の沈下量は、概ねcaseA<caseB<caseC<caseD<caseEとなっていて、改

良ブロック体の間隔に応じた結果となっている。今回の場合は、改良ブロック体間隔が3m以下の場合、沈下の低減効果は大きいといえる。

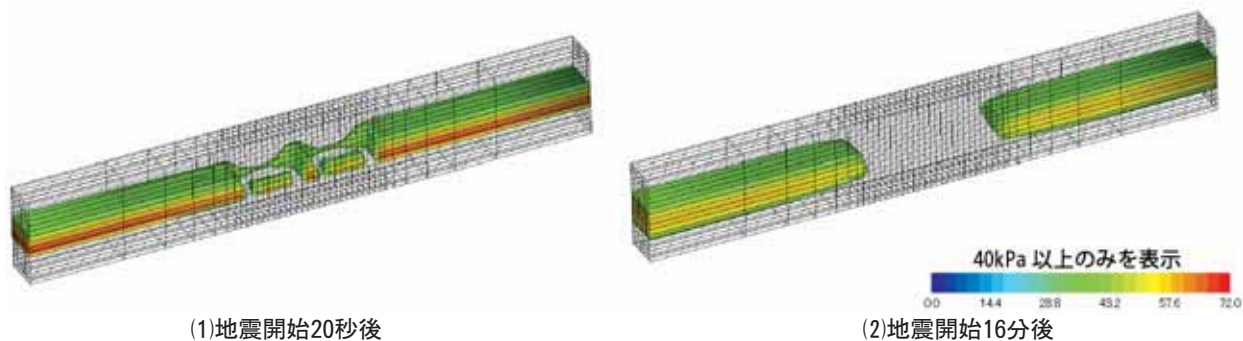


図-10 過剰間隙水圧分布

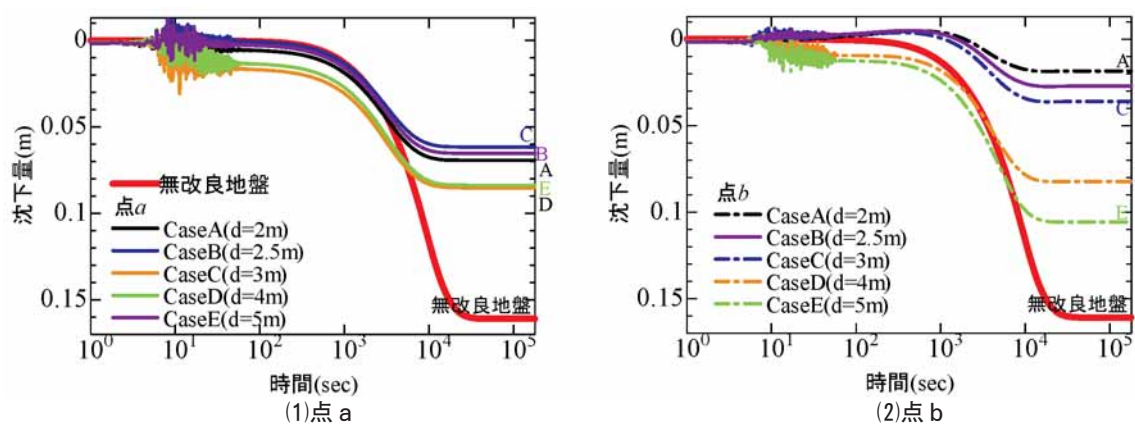


図-11 沈下～時間関係

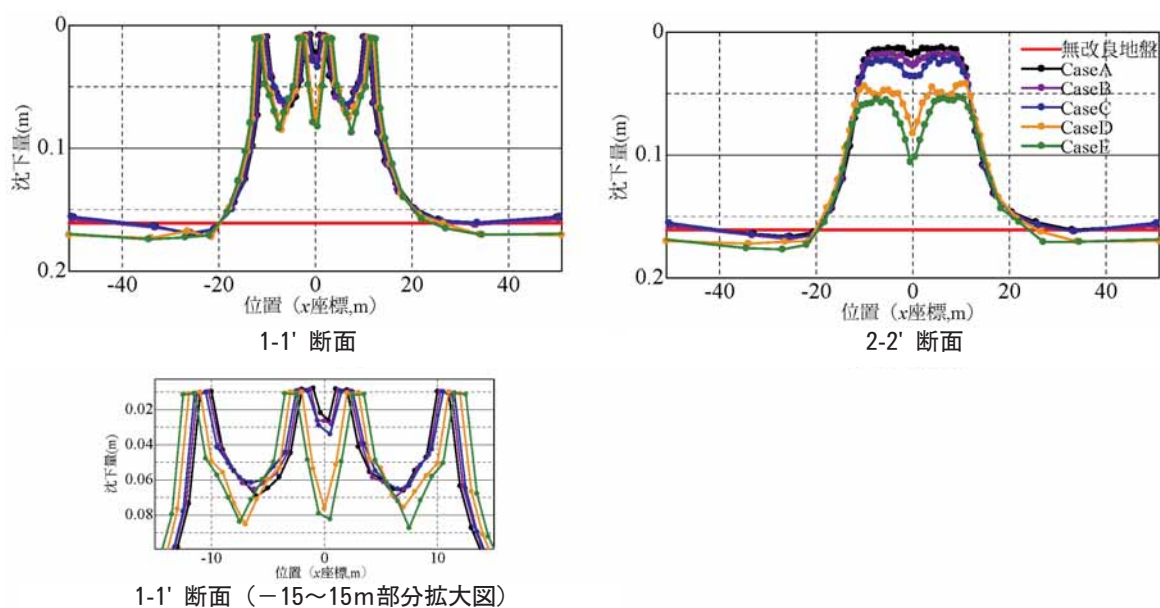


図-12 地表面沈下量（圧密終了時）

また、図-11からも改良ブロック体を有する地盤は無改良地盤に比べ圧密終了までの時間が早いことも見てとれる。図-13、14に圧密終了時のせん断ひずみ分布図を示す。せん断ひずみは、無改良地盤では液状化層下部で大きく、沈下が下部で生じているが、改良された地盤の改良ブロック体内部及びそれらの間においては、上部で大きくなっていることが分かる。

3.2 計算結果（リング状改良ブロック体）

F1～F5（図-6 参照）の深さ5.5mおよび8.5mにある要素の過剰間隙水圧の経時変化をcase1, case3の場合をそれぞれ図-15、16に示す。改良体設置部では、無改良地盤にくらべると、地震中の発生過剰間隙水圧はF1～F3の位置で50～75%程度に、F5で90%程度に抑えられてい

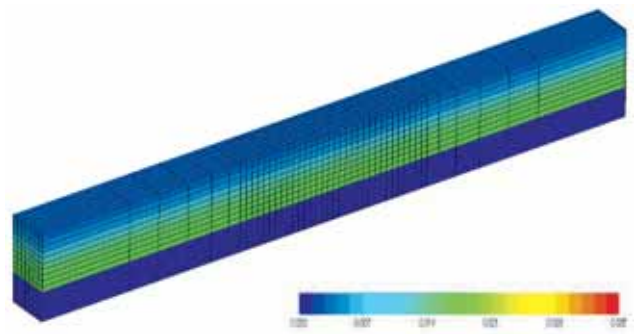


図-13 せん断ひずみ分布（無改良地盤、圧密終了時）

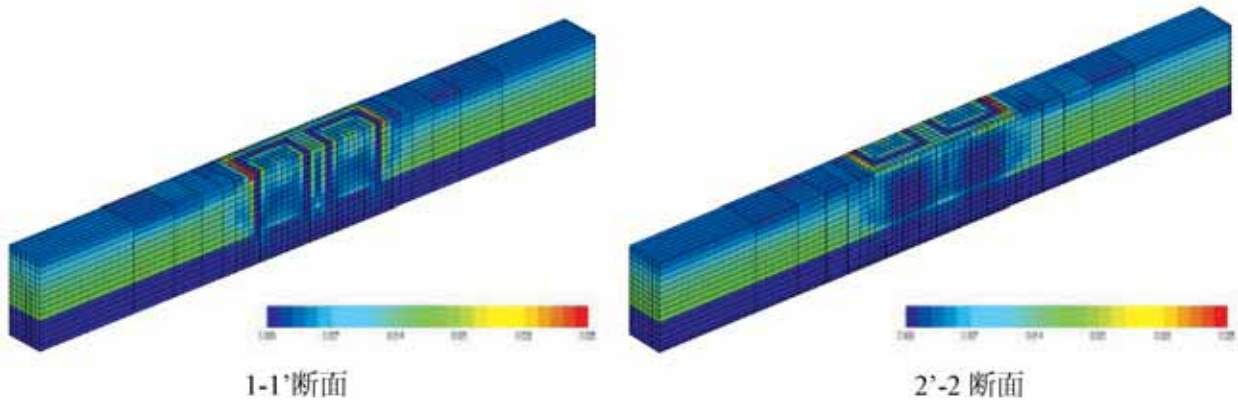


図-14 せん断ひずみ分布（caseC、圧密終了時）

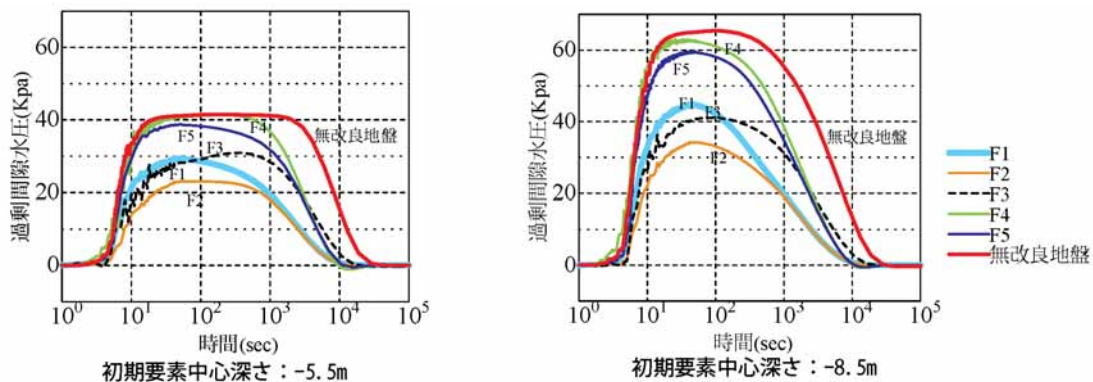


図-15 過剰間隙水圧～時間関係（case1）

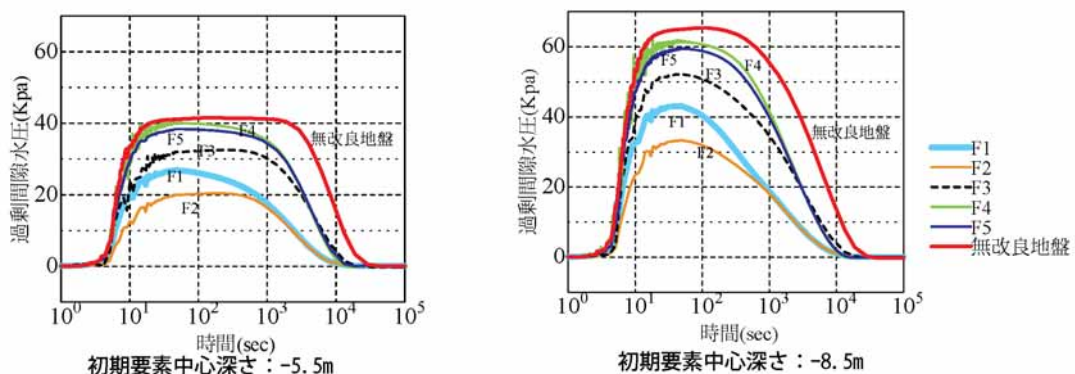
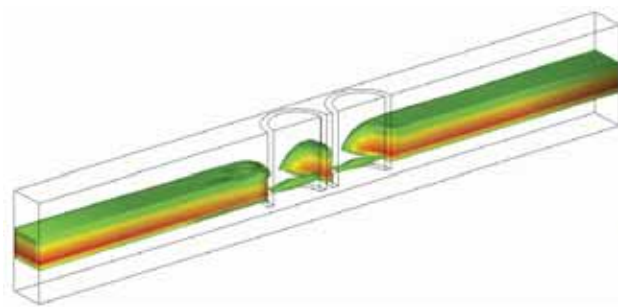
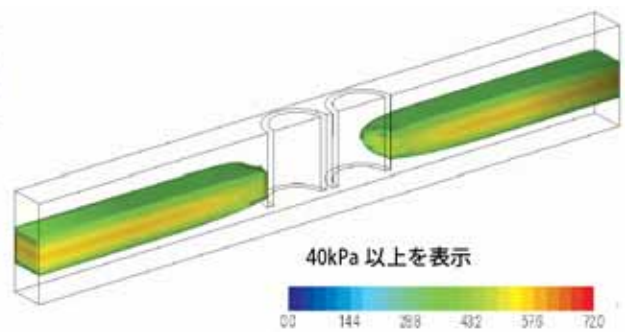


図-16 過剰間隙水圧～時間関係（case3）



(1)地震開始20秒後



(2)地震開始16分後

図-17 過剰間隙水圧分布

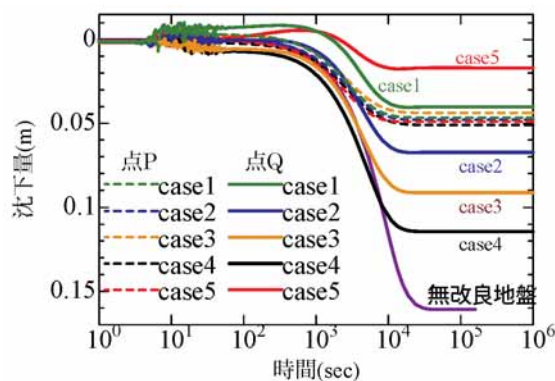


図-18 沈下～時間関係

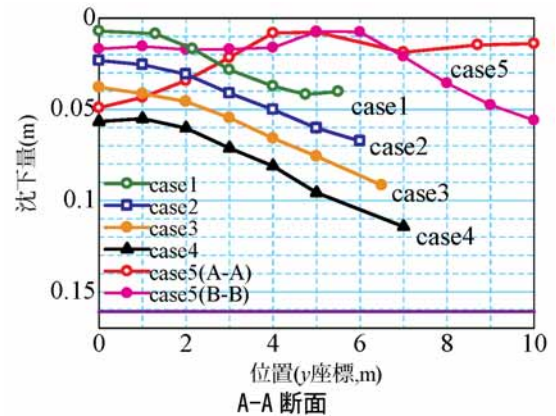


図-19 地表面沈下量（圧密終了時）

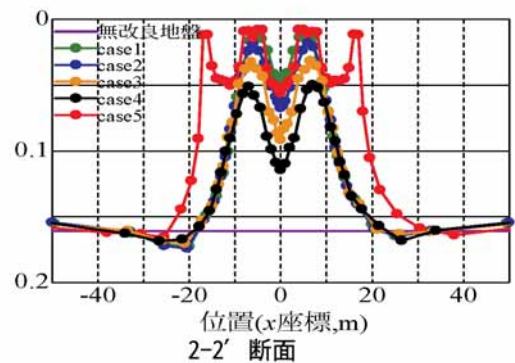
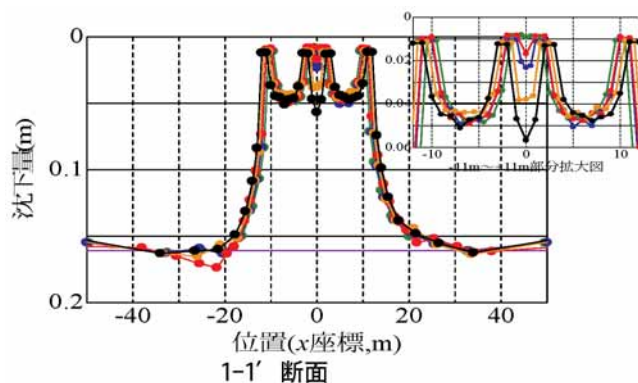


図-20 地表面沈下量（圧密終了時）

る。F4においては、無処理地盤にくらべ若干小さい過剰間隙水圧が発生しているが、無処理地盤にくらべ消散が早い。また、case1とcase3を比較するとF3における過剰間隙水圧の発生の様子が異なっていることが分かる。図-17にcase1の地震開始20秒後および16分後の過剰間隙水圧分布（40kPa以上の領域のみを表示）を示す。

図-18に点P、Q（図-3参照）における沈下の経時変化を、図-19、20に各ケースのA-A断面（図-3参照、case5はB-B断面も掲載）および1-1'断面、2-2'断面に

おける圧密終了時の地表面沈下量を示す。無改良地盤に比べると、いずれの場合も沈下量は抑えられていて、改良ブロック壁内部では、いずれのケースも同様な沈下を示し約1/3となっている。また、改良ブロック体間の点Qでは、各点の最大沈下量は、case5(2cm)<case1(5cm)<case2(6.5cm)<case3(9cm)<case4(11cm)となっていて、改良率に応じた結果となっている。また、前節と同様に改良ブロック壁を有する地盤は無改良地盤に比べ圧密終了までの時間が早い。

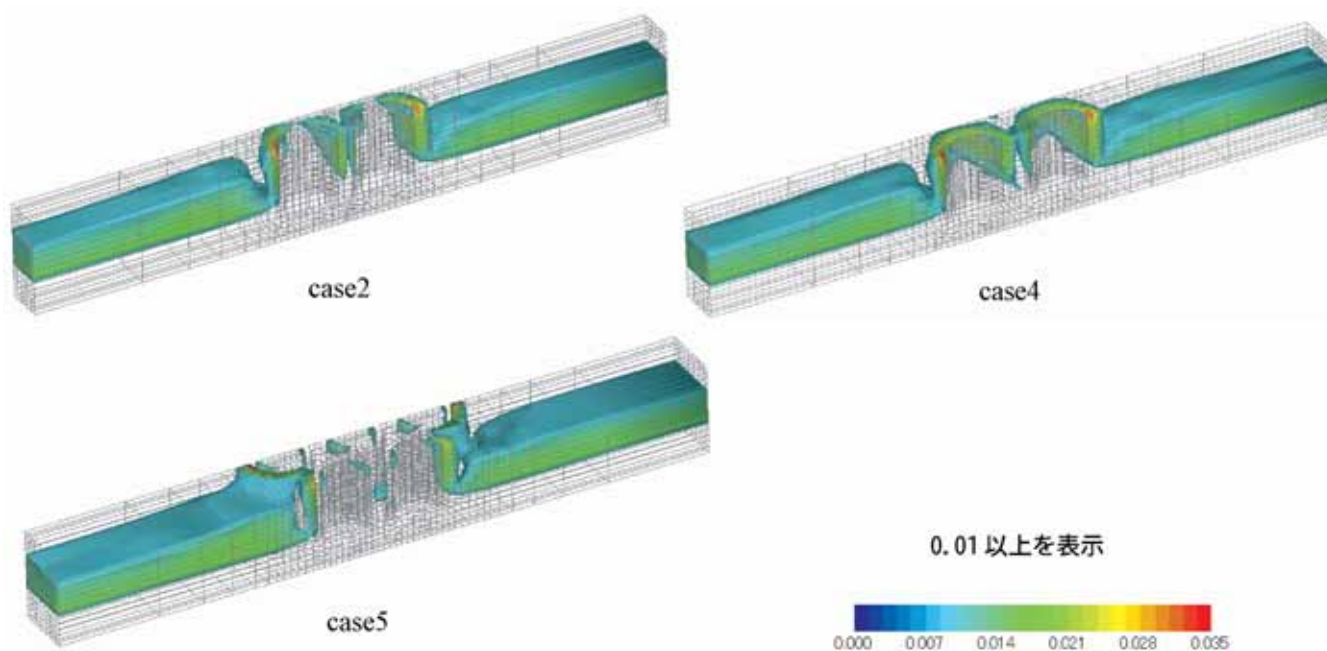


図-21 せん断ひずみ分布

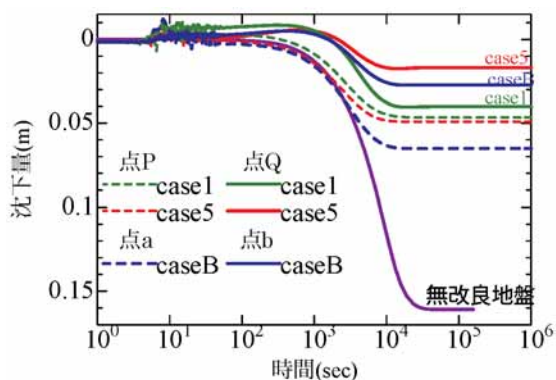


図-22 時間～沈下関係

図-21にcase2,case4,case5の圧密終了時のせん断ひずみ分布図(0.01以上を表示)を示す。せん断ひずみ分布の様子から、上記沈下の様子を理解することができる。また、せん断ひずみは無改良部分では液状化層下部で大きく、改良ブロック壁設置部においては、上部で大きくなっていることも分かる。

3.3 四角形とリング状改良ブロック体の比較

四角の改良ブロック体とリング状改良ブロック体について、改良率がほぼ等しいcaseB、case1、case5について、沈下量について比較する。図-22に改良ブロック体内部の点a、Pおよび改良ブロック体間の点b、Qの時間～沈下関係を示す。また、図-23には各ケースの1-1'断面、

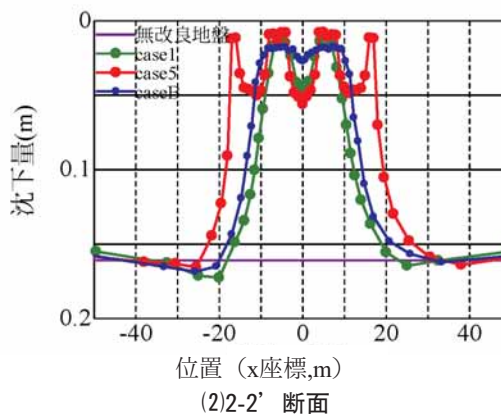
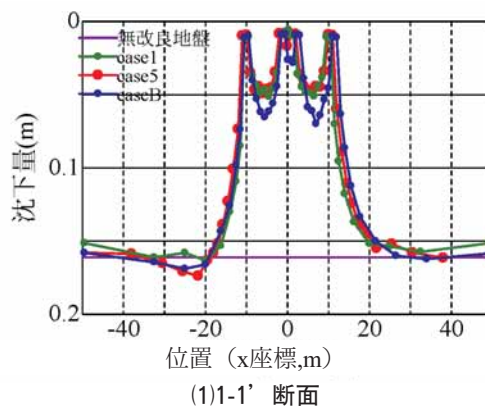


図-23 地表面沈下量(圧密終了時)

2-2' 断面における圧密終了時の地表面沈下量を示す。

図-22に示した各点を比較すると、地震後の沈下量の点ではcase5が有利であるといえる。ただし、図-23では2-2' 断面ではcaseBの沈下量が小さく、必ずしもcase5が有利とはいえない。リング状の場合は、四角形のような角がないため部材応力においては有利と考えられるので、今後検証を実施していく予定である。

4. まとめ

四角に囲った改良体及びリング状に囲った改良体を配置した地盤部では、地震中の過剰間隙水圧の上昇が抑えられるとともに、その消散が早く、離散的に設置した場合についても沈下抑制効果があることが分かった。また、無改良地盤では液状化層下部でせん断ひずみが大きく発生するのに対し、改良地盤では改良地点の上部で大きくなった。このことから、表層を改良すれば、沈下抑制効果はさらに増すものと考えられる。今後、地盤、入力地震動、改良体配置などの各種条件に対する系統的検討を行っていく予定である。

なお、本報は、(株) 不動テトラとの共同研究による計算結果^{3), 4)}である。

[謝辞]

上述の計算は、All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration (GEOASIA)²⁾を用いて行った。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., 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.
- 2) 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.
- 3) 高稲敏浩、野田利弘、浅岡顕、竹内秀克：改良ブロック体を有する砂質地盤の地震中液状化・地震後沈下挙動の3次元水～土連成解析，第43回地盤工学研究発表会，pp.1583-1584, 2008.
- 4) 高稲敏浩、野田利弘、浅岡顕、竹内秀克：リング状改良壁を有する砂質地盤の地震中・地震後沈下挙動

の3次元水～土連成解析，第63回土木学会年次学術講演会概要集Ⅲ，pp.5-6, 2008.