

部分的に固化改良した液状化地盤の地震時 / 地震後応答解析

(株)不動テトラ 国際会員 竹内秀克・深田久・東祥二
 名古屋大学大学院 国際会員 野田利弘・浅岡顕

1. はじめに

液状化対策の必要性が叫ばれるようになってから久しい。既設構造物に関しては、現在のところ薬液注入による対策がもっとも一般的である。特徴としてはセメント固化型の注入材を用いたものや浸透性を向上させた溶液型の工法などがある¹⁾。設計に関しては、液状化の懸念がある層に関して全面的に注入して改良を図ることが専らである。これは、ある程度変形を許容できるような土構造物や、大規模地震に対する(レベル 2)対応においても同様である。改良率をある程度抑えて部分的に固化改良したものは、効果の確認の観点からいまままで採用されていない。この要因として、従来より用いられている FL 法による液状化判定や線形動的応答解析が、液状化の可能性や加速度に関しては把握できるものの、変形量や支持力に関して定量的な評価が困難であることが挙げられる。

そこで、土の弾塑性構成式に SYS カムクレイモデル²⁾を用いた水～土連成動的 / 静的有限変形計算 (GEOASIA)³⁾により、薬液注入・高圧噴射等のセメント固化改良を施した砂質地盤の地震中および地震後の挙動を調べた。

2. 解析条件

2.1 解析条件

解析に用いた有限要素メッシュと境界条件を図1に示す。平面ひずみ条件を仮定し、水理境界は底面排水、側面非排水とした。液状化層は深さ 10m の砂質地盤を想定し、解析領域中央の幅 20m 区間(図1 太枠部分)に、図2に示す6パターンの固化改良体の置換率・配置形状を設定して計算を行った。固化改良体は透水性を有する2相系弾性体としてモデル化し、 $q_u=10\text{Mpa}$ を想定した弾性定数を用いた(表-1)。なお、固化改良時に応力状態は変化しないことを仮定した。粘性境界を設定した基盤層底面より八戸波(図-3)を入力し変形が収束するまで一連の解析を行った。

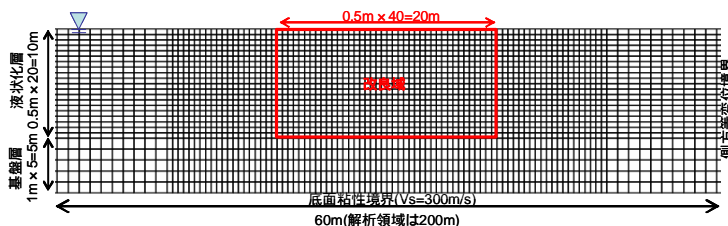


図-1 有限要素メッシュ

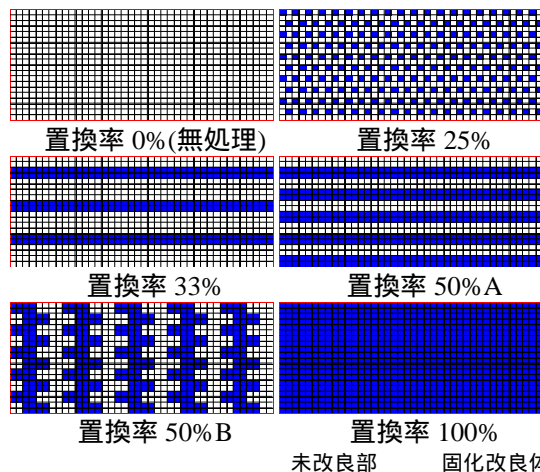


図-2 固化改良体配置パターン

表-1 改良体の材料定数

弾性係数 (kPa)	250,000
ポアソン比	0.3
透水係数 k (cm/sec)	1.0×10^{-6}
土の密度 ρ_s (t/m^3)	2.65

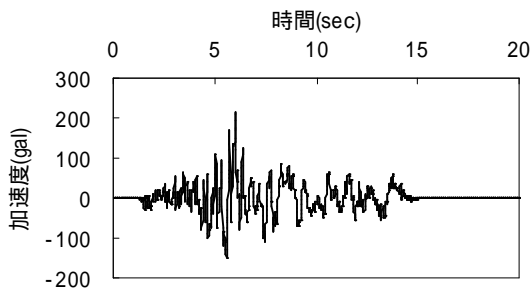


図-3 入力波形(八戸波)

2.2 地盤条件

図-4 に今回用いた四日市市内の典型的な砂の粒径加積曲線⁴⁾を示す。細粒分含有率は20%程度である。図-5 に不攪乱試料を用いた3軸非排水試験結果(点線)とSYS カムクレイモデルを用いた再現結果(実線)を示す。これらから決定された地盤の材料定数と初期値を表-2 に示す。比較的構造が劣化しやすく、過圧密の解消が遅い砂的な挙動を示す土であることがわかる。

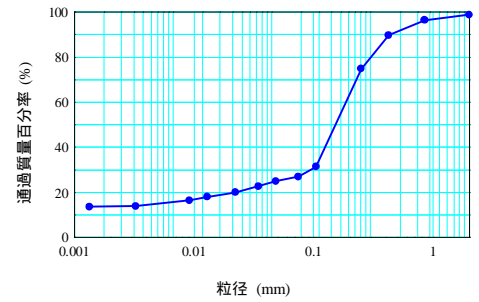


図-4 粒径加積曲線

表-2 地盤の材料定数と初期値

	液状化層	基盤層
<弾塑性パラメータ>		
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.040	0.050
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.004	0.012
限界状態定数 M	1.45	1.00
正規圧密線の切片 N	1.71	1.99
($p' = 98\text{kPa}$ での繰り返し土の正規圧密線上の比体積)		
ポアソン比 ν	0.4	0.3
<発展則パラメータ>		
構造低位化指数 a, b, c	10.0, 1.0, 1.0	2.63, 1.0, 1.0
正規圧密土化指数 m	0.01	0.08
回転硬化指数 b_r	0.10	0.514
回転硬化限界定数 m_b	0.65	0.50
<初期値>		
構造の程度 $1/R_0^*$	1.30	1.26
比体積 ν	1.586	1.790
異方性の程度 K	0.60	0.60
応力比 K_0	0.60	0.60
透水係数 k (cm/sec)	1.0×10^{-4}	4.0×10^{-2}
土の密度 ρ_s (t/m^3)	2.65	2.65

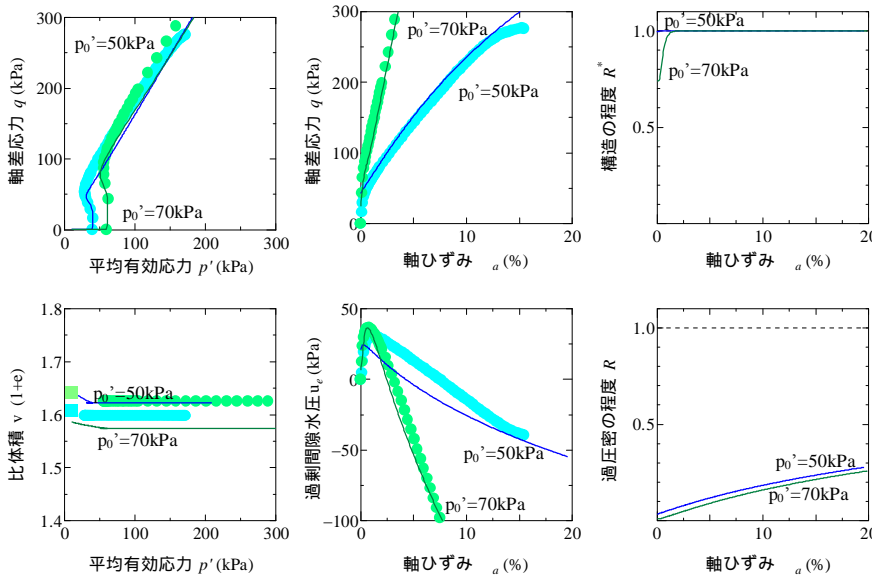


図-5 不攪乱試料の非排水試験結果

3. 解析結果

3.1 上載荷重がない場合 (水平地盤)の解析結果

図-6 に各パターンの地表面地盤中央の地震発生時からの時間～沈下量関係を示す。地震中は沈下がほとんど発生しないが、その後過剰水圧消散に伴い発生し、5時間程度で収束する。図-7 に地震発生より15秒後、図-8 に圧密終了時の地表面沈下形状を示す。地震中はほぼどのパターンでも大きな違いは見られないが、改良範囲に関して置換率0%(無処理)と比べほぼ置換率に応じて低減される。ただし、改良範囲外では無処理のものに比べ、改良体が存在するものの方が沈下量は大きくなっている。図-9 に地震発生15

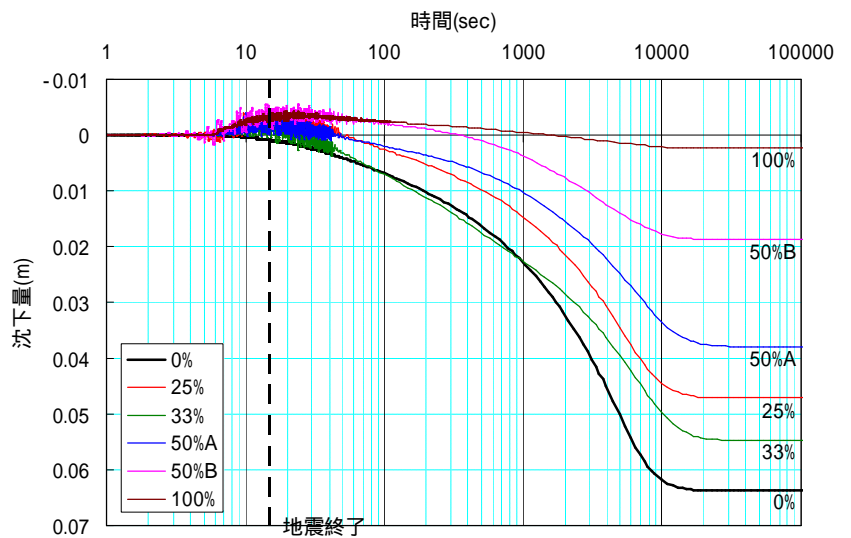


図-6 時間～沈下量関係(地表面)

秒後の過剰間隙水圧分布を示す。過剰水圧は固化改良体にはほとんど発生しないが、未改良部の要素にはいずれの解析パターンでもほぼ同様に発生している。しかしながら、図-10の地震中の液状化層要素(GL-5m)の過剰間隙水圧経時変化から、改良されているもののほうが水圧の発生が若干抑えられていることがわかる。

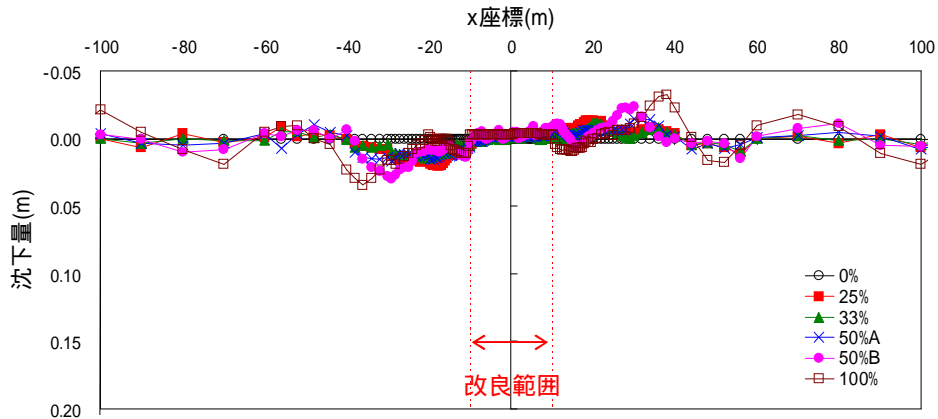


图-7 地表面沈下形状(地震発生 15 秒後)

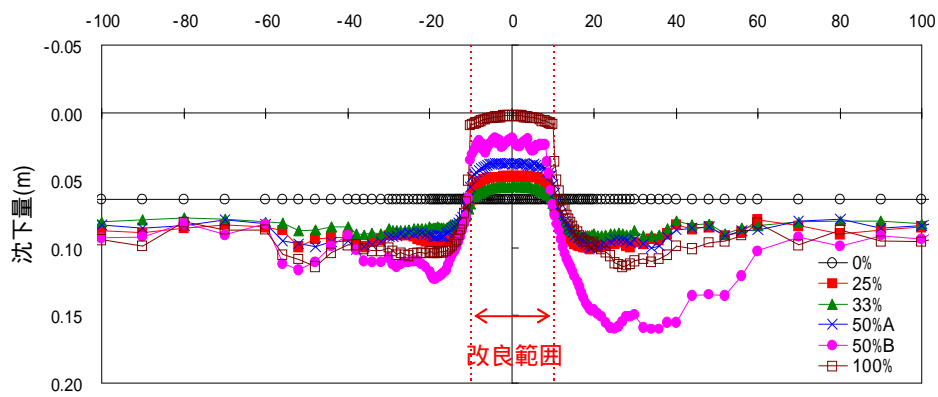


图-8 地表面沈下形状(压密終了後)

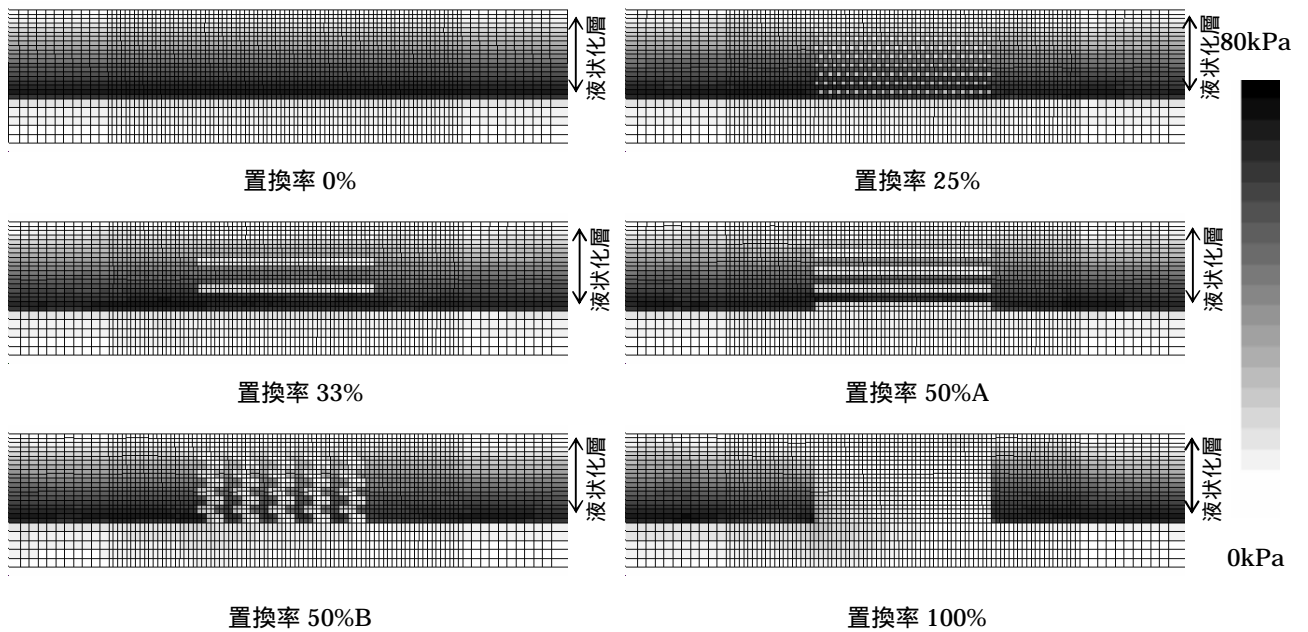


图-9 过剩間隙水圧分布(地震発生 15 秒後)

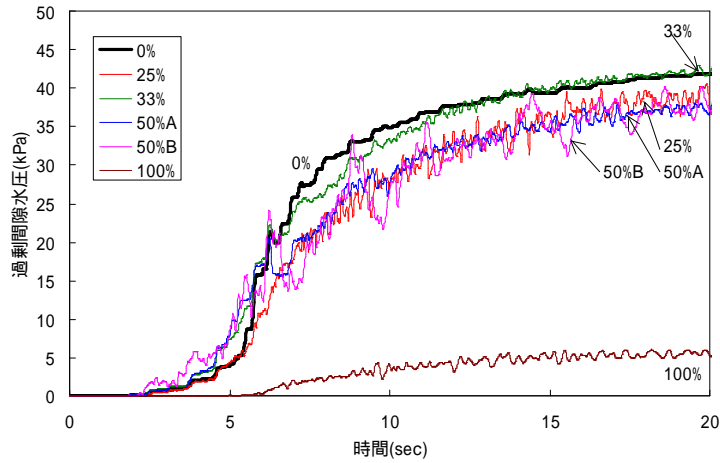


図-10 過剰間隙水圧経時変化(GL-5m)

3.2 上載荷重がある場合 (盛土)の解析結果

図-11 に示す改良域上に高さ 5m,天端幅 5m,勾配 1:1.5 の盛土が存在する場合について 3.1 と同様な 6 パターンの解析を行った。無処理地盤に有限要素メッシュを用いて盛土造成後⁵⁾、固化改良体に置き換えて(図-11 太枠部分)、その後地震波を入力した。図-12 に地震発生 15 秒後、図-13 に圧密終了時の地表面沈下形状を示す。盛土がある場合は地震直後から無処理地盤と改良地盤で顕著な違いが見られる。

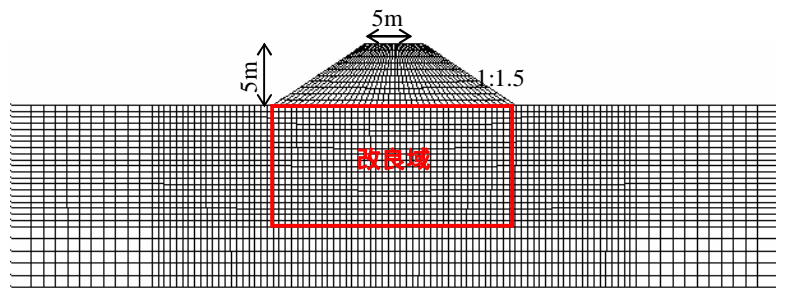


図-11 有限要素メッシュ(盛土造成時)

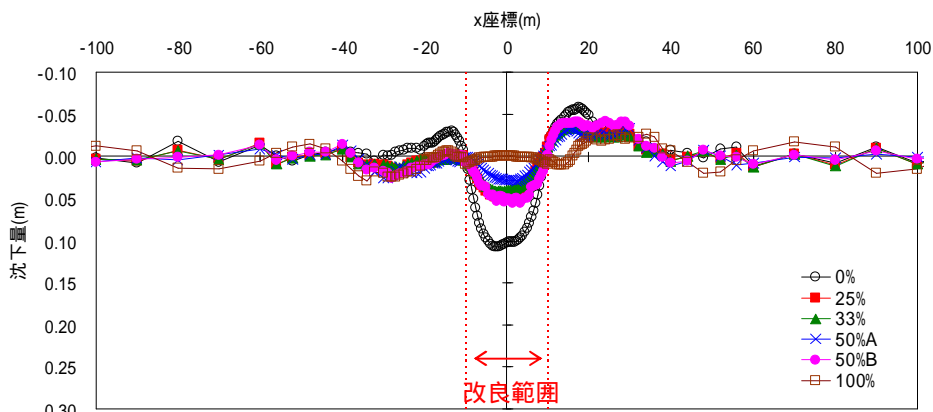


図-12 地表面沈下形状(地震発生 15 秒後)

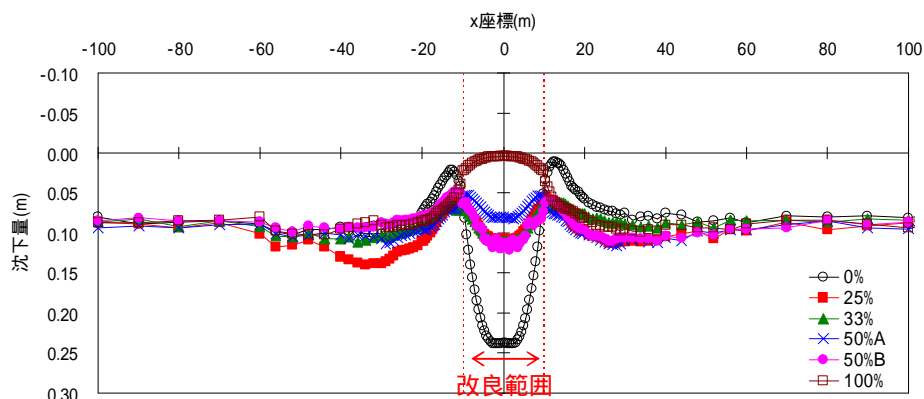


図-13 地表面沈下形状(圧密終了後)

圧密終了時には盛土直下の沈下量の低減はもとより、周辺への盛り上がり量の低減も同時にみられ変形抑止に寄与していることがみてとれる。また、置換率 25%の改良は無処理に比べ盛土直下の沈下量が約半減しており、改良による効果が現れているものと考察できる。

図-14 に法尻部の地中水平変位分布を示す。これを見ると、固化改良体がある場合は盛土直下の沈下は当然ながら、周辺の盛り上がりおよび水平変位などの変形抑止に有効である。中でも水平方向に連続的な固化盤を設けたような改良地盤（33%,50%A）でより水平変位が低減されている効果が見られる。図-15 に地震発生 15 秒後の過剰水圧分布を示す。これも水平地盤のときと同様に固化改良体がある場合でも未処理部では無処理地盤と同様に間隙水圧が発生している。このことより、沈下量や盛り上がり量、水平変位量が低減される理由として、未処理部の液状化を抑止するというよりも、剛性の高い改良体が存在することによるものと推察できる。

図-16 に地震発生 15 秒後のせん断ひずみ分布を示す。水平変位が比較的大きい無処理(0%)や 50%B のタイプは盛土直下のせん断ひずみが大きくのり尻方向へ押し出すように変位が発生している。それに対し、比較的水平変位が少ない水平固化盤のタイプ(33%, 50%A)は、盛土直下のせん断ひずみが低減されておりそれに伴い法尻部の水平変位も低減している。これは連続的な固化盤があるため、あたかも地中に補強土があるかのように振舞い、改良域がより一体となって挙動するからであると考えられる。

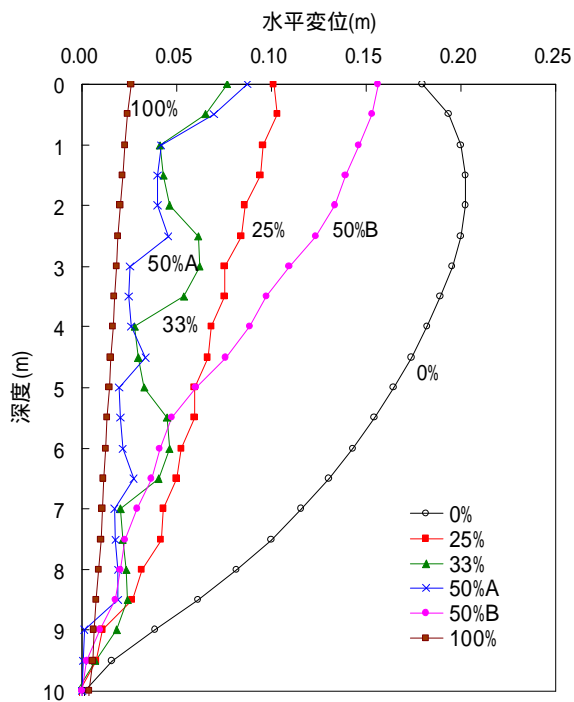


図-14 地中水平変位分布(法尻部)

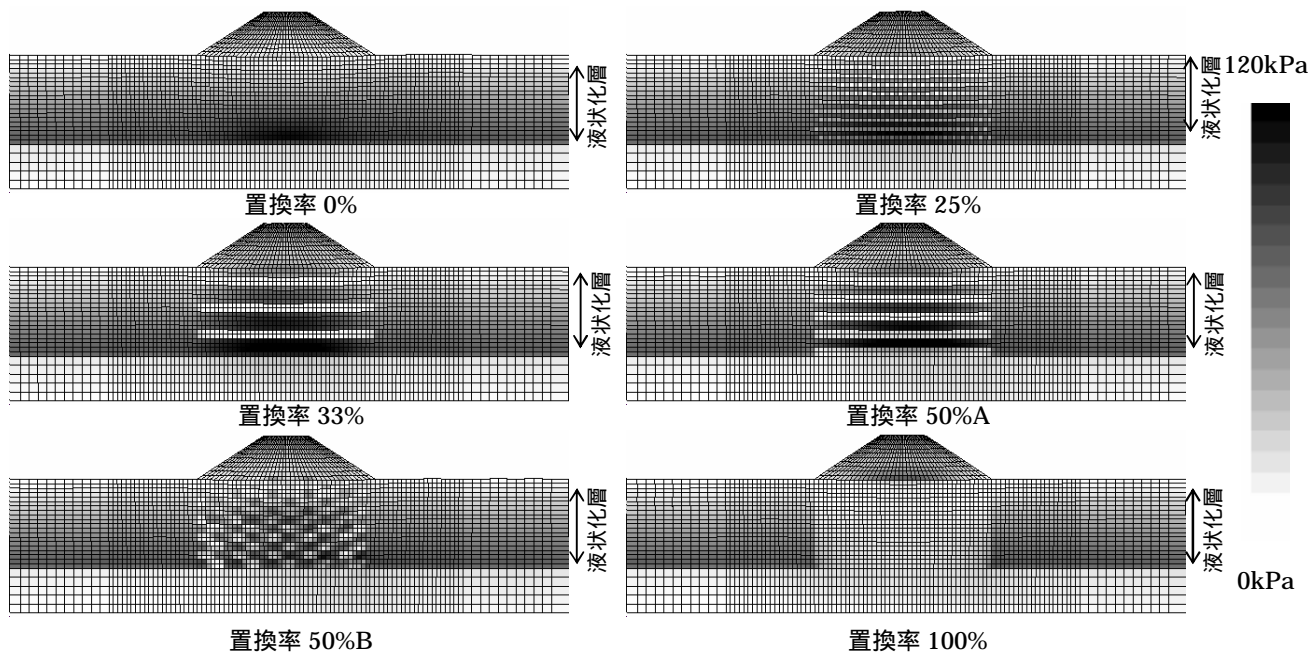


図-15 過剰間隙水圧分布(地震発生 15 秒後)

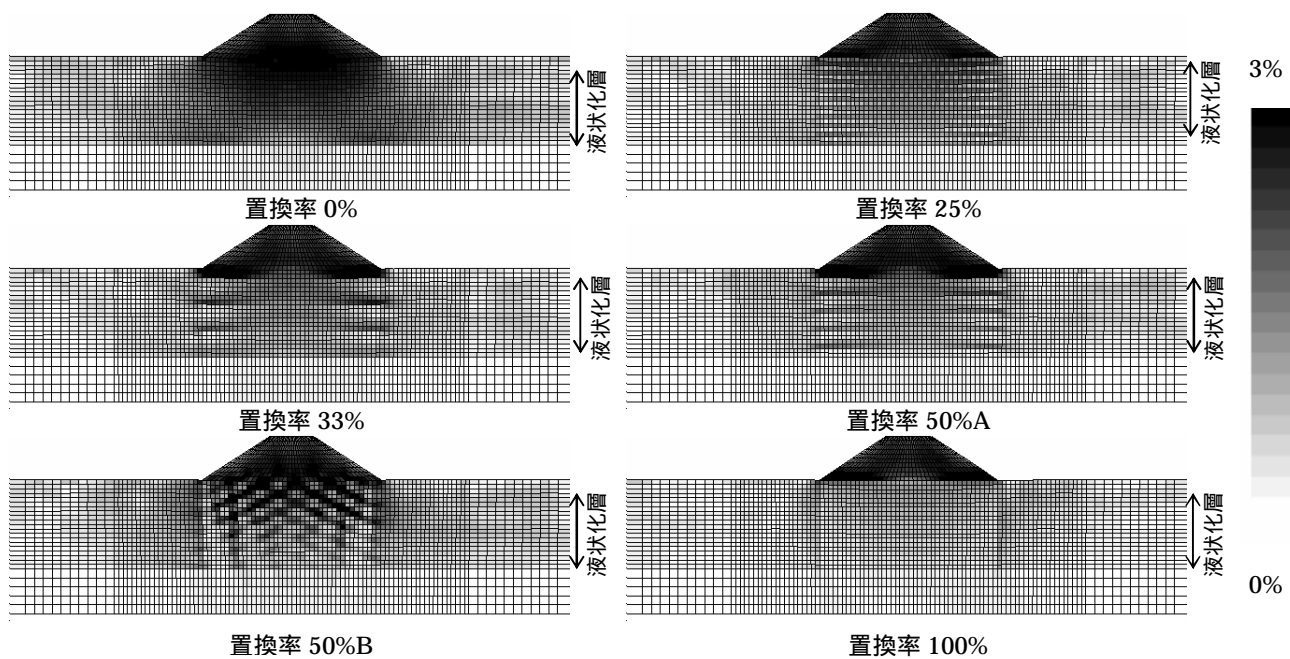


図-16 せん断ひずみ分布(地震発生 15 秒後)

4. おわりに

以上の解析より得られた知見を以下の通りまとめる。

- 1) 土の弾塑性構成式に SYS カムクレイモデルを用いた水～土連成動的 / 静的有限変形計算 (GEOASIA) により、薬液注入・高圧噴射等のセメント固化改良を施した砂質地盤の地震中および地震後の挙動 (特に変形量) を定量的に評価できることがわかった。
- 2) 液状化地盤に部分的に改良体がある場合、ほぼ置換率に応じて圧密終了時の沈下量が低減する。過剰間隙水圧の発生は若干ながら抑制できる。
- 3) 盛土のような上載荷重がある場合には、地震中の変形抑止効果が見られる。沈下量はもとより、周辺に対する盛り上がり量や水平変位に関しては置換率以上に効果が現れるケースも見られた。

今後の展望として、実施工とリンクしたモデル化による解析を実施し、液状化による変形に対し有効な配置等の検討をしたい。また今回は 2 次元平面ひずみ状態を仮定したが、実際の薬液注入による改良などは柱状や脈状など 3 次元による評価が必要になる。3 次元解析も試みて改良メカニズムの検証を行いたい。

参考文献

- 1) 社団法人 地盤工学会 (2004) : 地盤工学・実務シリーズ 18 液状化対策工法, pp.326-335.
- 2) Asaoka A., Noda T., Yamada E., Kaneda K. and Nakano M. (2002) : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils, *Soils and Foundations*, No.42, Vol.5, pp.45-57.
- 3) Asaoka A., Noda T. (2007): 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.
- 4) 竹内秀克, 浅岡顕, 澤田義博, 野田利弘, 中井健太郎, 中野正樹(2007) : 砂・粘土互層地盤～盛土系の地震中 / 地震後挙動に及ぼす盛土等の硬さの影響, 第 42 回地盤工学研究発表会.
- 5) 竹内秀克, 高稲敏浩, 野田利弘(2006) : 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, 応用力学論文集 vol.9, pp.539-550.