

砂・粘土互層地盤の地震中 / 地震後挙動 に及ぼす盛土変形特性の影響

竹内 秀克¹・中井 健太郎²・野田 利弘³

¹(株)不動テトラ 地盤技術部設計課 (〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2)

E-mail:hidekatsu.takeuchi@fudotetra.co.jp

²名古屋大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail:nakai@soil.civil.nagoya-u.ac.jp

³名古屋大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

E-mail:noda@soil.civil.nagoya-u.ac.jp

土の構成式にSYSカムクレイモデルを用いた水～土連成有限変形静的 / 動的解析を実施し、砂・粘土互層地盤（上部：砂層、下部：粘土層）と盛土系の地震中・地震後の変形挙動に及ぼす盛土等の硬さの影響を調べた。この結果、盛土等の硬さに応じて地震中・地震後の上部砂層と下部粘土層で異なる大変形挙動を示すことがわかった。すなわち、盛土等が軟らかい土の場合は、盛土は地震中に液状化を示す上部砂層とともに大変形を示すものの、下部粘土層は地震後もほとんど影響を受けない。これに対し、盛土が硬い場合、地震中に砂層は液状化を示すものの、下部粘土層へ盛土荷重が伝播し、これが原因となって地震後に地盤（粘土層）は大沈下を示す。

Key Words : liquefaction, soil-water coupled analysis, embankment

1. はじめに

これまで地盤のみ、あるいは、盛土のような土構造物と地盤からなる連成系に対する耐震性照査において、地震後の挙動までを検討対象にした解析はほとんどないと言ってよいだろう。動的解析では、例えば液状化解析のように、もっぱら砂地盤の「地震中のみ液状化挙動」に注意が払われ、そしてまた、耐震性上問題がある砂地盤や盛土だけを対象にして改良すればそれでよいとされてきたからであると考えられる。そこで、著者らは土の構成式には粘土から砂、中間土までを同じ理論的枠組みで記述できる（例えば、文献1）～3））SYSカムクレイモデル^{4), 5)}を搭載し、動的・静的を問わず、刻々の変形を追従することができる水～土連成有限変形解析⁶⁾を実施し、これにより、砂・粘土互層地盤（上部：砂層、下部：粘土層）と盛土の連成系の地震中・地震後の変形挙動を調べた。本報では特に、盛土等の硬さがこれらの挙動に及ぼす影響について述べる。

2. 計算条件

図-1は計算に用いた土構造物（盛土）載荷後の有限要素メッシュ図を、表-1は計算に用いた材料定数（弾塑性パラメータ・発展則パラメータ）と地盤の初期値を示す。地盤の地層構成は四日市市内の典型的な砂と粘土の互層地盤を参照にして決めた。上から上部シルト混じり砂層（As層：5m）・砂層（As'層：5m）・下部粘土層（Ac層：10m）の水平堆積地盤であり、その下にはN値が30以上の工学的基盤である。盛土は飽和状態を仮定して地盤と盛土の上面は水圧を常にゼロとし、地盤側面は非排

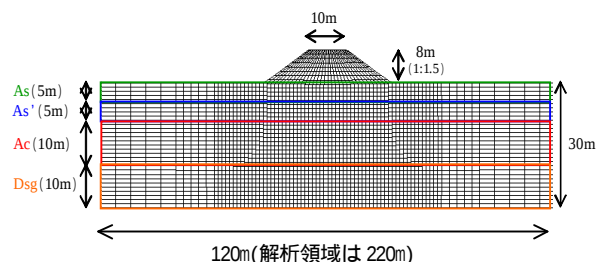


図-1 有限要素メッシュ

水、下面排水境界とした．また、地盤両側面の同じ高さにある全有限要素節点の各成分に等変位条件を課した（周期境界）．材料定数は、この地点での採取試料

表-1 地盤の材料定数と初期値

<弾塑性パラメータ>				
	As	As'	Ac	Dsg
圧縮指数 λ	0.120	0.040	0.150	0.050
膨張指数 κ	0.012	0.004	0.03	0.012
限界状態定数 M	1.45	1.45	1.50	1.99
正規圧密線の切片 N	1.59	1.71	2.08	1.00
ポアソン比 ν	0.20	0.40	0.10	0.30
<発展則パラメータ>				
	As	As'	Ac	Dsg
構造低位化指数 a ($b=c=1.0$)	200	10.0	0.45	2.63
$-D_p$ の割合 cs	1.0	1.0	0.3	1.0
正規圧密土化指数 m	0.30	0.01	2.50	0.08
回転硬化指数 b_r	0.05	0.10	0.05	0.514
回転硬化限界定数 m_b	0.65	0.65	1.0	0.50
<初期値>				
	As	As'	Ac	Dsg
比体積 v	1.668	1.586	2.416	1.790
応力比 K_0	0.668	0.600	0.600	0.600
構造の程度 $1/R_0$	1.18	1.30	25.7	1.26
過圧密比 $1/R$	5.6-20	70-88	12-130	
異方性の程度 K_0	0.668	0.600	0.600	0.600
透水係数 k (cm/sec)	5×10^{-6}	1×10^{-4}	5×10^{-7}	4×10^{-2}
土の密度 ρ_s (t/m ³)	2.65	2.65	2.65	2.65

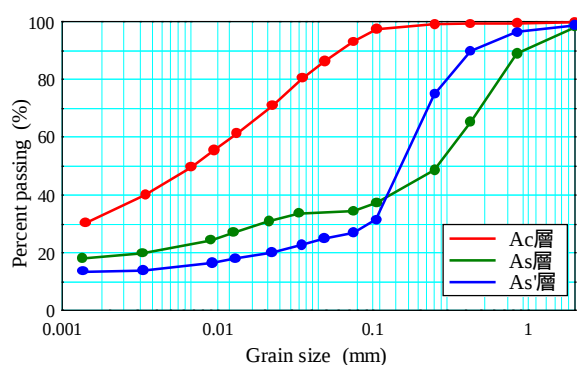


図-2 粒径加積曲線

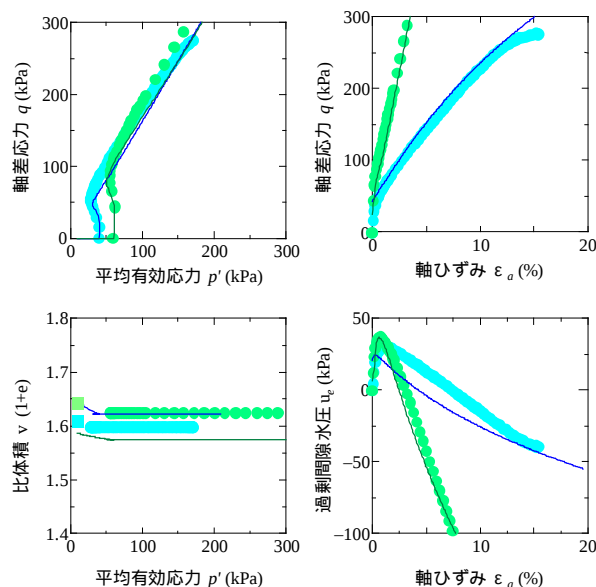


図-4 As'を用いた非排水三軸圧縮試験の再現結果

（図-2の粒径分布参照）を用いて等方圧密試験・非排水三軸圧縮試験を実施し、（理想的な）サンプリング過程⁷も考慮して各種力学挙動をよく再現するように決めた．その際、弾塑性パラメータは繰返し試料、発展則パラメータは不攪乱試料の実験結果を用いている．図-3～5に不攪乱試料の非排水三軸圧縮実験結果(点線)と構成式による再現結果(実線)を示す．土別に各種材料定数を考察すると、まず弾塑性パラメータについては、圧縮指数 λ および膨張指数 κ は粘土的（細粒分が多い）な土ほど大きく、砂的（細粒分が少ない）土ほど小さい．すなわち、砂に比べて粘土の方が圧縮性は高い．砂層については、As層は砂に分類されるものの圧縮指数 λ が非常に大きく、圧縮性の高い土であるといえる．

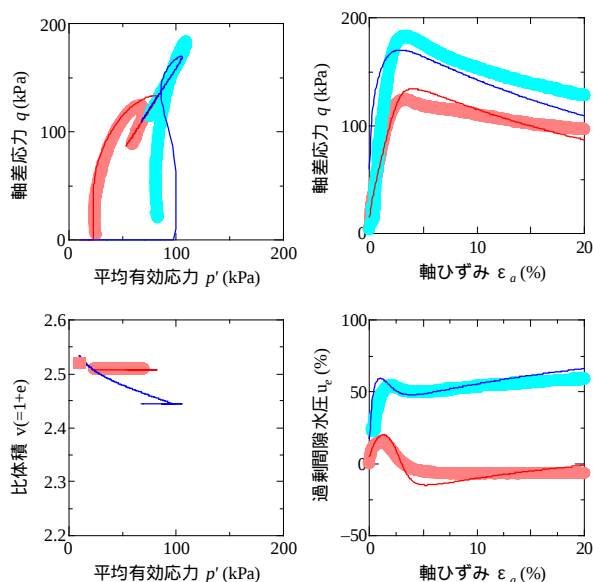


図-3 Acを用いた非排水三軸圧縮試験の再現結果

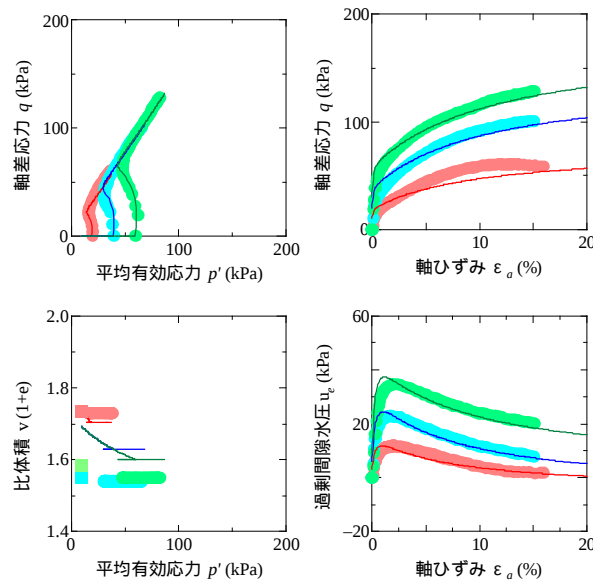


図-5 Asを用いた非排水三軸圧縮試験の再現結果

次に、発展則パラメータについては、Ac層は「構造劣化が遅く、過圧密解消が速い、異方性の発展/消滅が遅い」典型的な粘土である。一方のAsとAs'層はAc層とは逆に、「構造劣化が速く、過圧密解消が遅い、異方性の発展/消滅が速い」砂であるといえる。なお、粒径分布のなだらかなAsの方がより構造劣化は速い。この際、各試料の採取地点における骨格構造（構造・過圧密・異方性）の初期状態も同時に推定できるので、構造・異方性の初期分布は、比体積がほぼ等しい各同一地層内で同一と仮定し、過圧密比は土被り圧に応じて鉛直方向に分布させた。

計算は、盛土を有限要素追加の手法⁹⁾により8m高まで段階的の荷重して圧密終了後、地震動を地盤底面全節点の水平方向に図-6に示す加速度の1/2を入力し、沈下が収束するまで実施した。なお、工学的基盤面にあたる地盤下端節点は底面粘性境界($V_s=300\text{m/sec}$ 相当)とした。

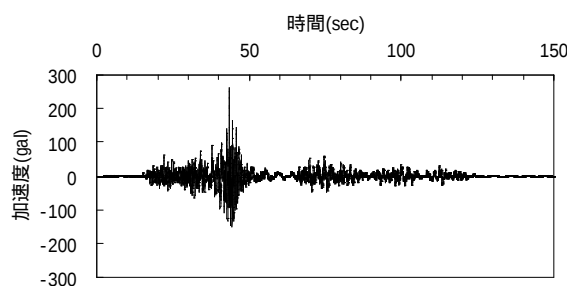


図-6 解放基盤面での想定地震波形
(東海・東南海連動型)

以上の条件のもとで、盛土を軟らかくした場合(TypeA)と硬くした場合(TypeB)の2ケース解析を実施し(表-2)、その挙動を比較する。想定した二つの盛土の材料定数の違いは次の通り。TypeAには定数に粒径分布がなだらかでかつ細粒分も35%と比較的大きいAs層の値を用いた。この土は砂に分類されるが、力学試験からは圧縮係数が0.12と圧縮性が比較的大きくやや粘土に近い中間土(シルト混じり砂)といえる。一方、TypeBには粒径分布も比較立っており細粒分も若干小さい(28%)As'層の値を用いた。この土は圧縮係数が0.04と圧縮性が小さくより砂に近い。また計算結果の比較のため、盛土荷重の大きさを同一($\gamma=21\text{kN/m}^3$)にするために、盛土比体積は両者とも1.5とし、相対的にTypeAはTypeBよりも軟らかい盛土とした。

表-2 解析ケース(盛土の材料定数)と特性

	盛土定数	比体積	盛土剛性
TypeA	As	1.50	軟らかい
TypeB	As'	1.50	硬い

3. 計算結果

図-7～8は地震発生時点からの盛土中央部における時間～層別沈下量関係を示す。地震発生時点より盛土および上部砂層が沈下を始め、全体で1.5m以上の大沈下を示す。その後の圧密に伴う沈下量は比較的少ない。一方、TypeBではTypeAに比べ下部粘土(Ac)層が30cm以上大きく圧縮する。また、図-9～10は地震中および変形収束後のせん断ひずみ分布、図-11～12は平均有効応力分布、図-13～14は構造の程度($1/R^*$)の比較を示す。TypeAでは盛土自身が大きく変形し上部砂層も大きく側方へ変位するため、下部粘性土に関しては大きなひずみも発生せず応力も伝えていない(液状化層が「クッション」のように働いている)。一方、TypeBでは盛土自身はほとんど変形していないが、上部砂層と下部粘性土層との層境に大きな応力集中が発生し、その後の粘性土の長期沈下を誘発している。ただし、下部粘土層の構造の劣化の程度にはあまり違いが見られなかった。つまり、盛土が軟らかい土の場合は、盛土が地震中に液状化を示す上部砂層と一緒に大変形を示すものの、下部粘土層は地震後もほとんど影響を受けない。これに対し、盛土が硬い場合は、地震中に砂層は液状化を示すものの、下部に伝わる鉛直応力は低減せず、これが原因となって地震後に地盤(粘土層)は大沈下を示す。このように盛土等の硬さあるいは変形特性の違いに応じて地震中・地震後の上部砂層と下部粘土層で異なる変形挙動を示すことがわかった。

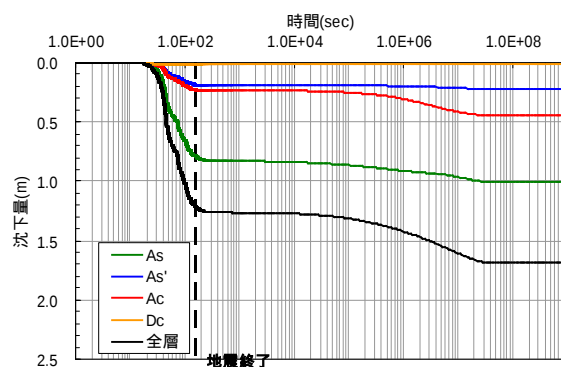


図-7 時間～層別沈下量関係 (TypeA)

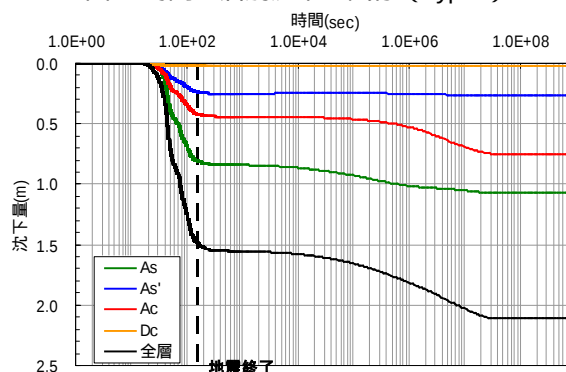
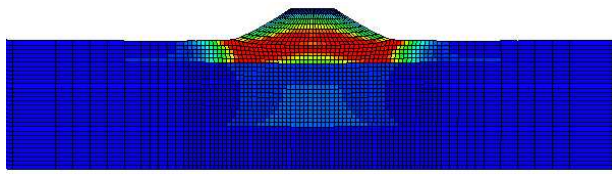
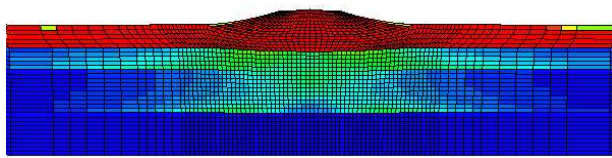


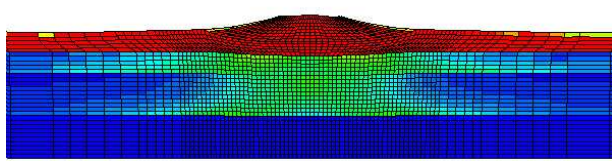
図-8 時間～層別沈下量関係 (TypeB)



(a) 地震発生前



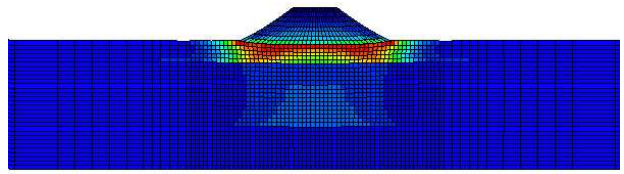
(b) 地震発生 150 秒後



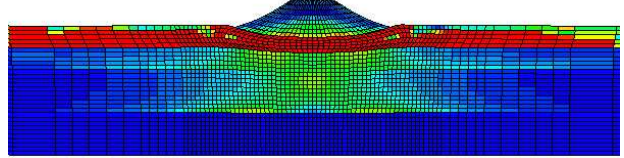
(c) 圧密終了後

0% 15%

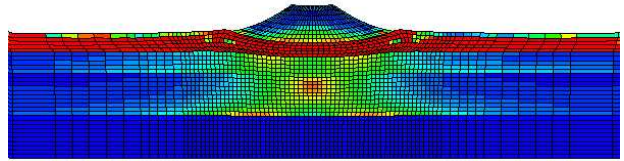
図-9 せん断ひずみ分布(TypeA)



(a) 地震発生前



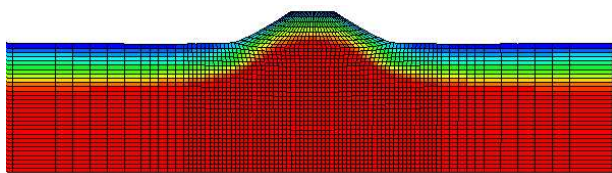
(b) 地震発生 150 秒後



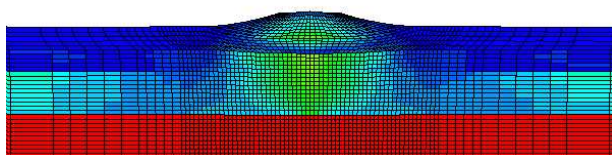
(c) 圧密終了後

(15%以上はすべて15%としている)

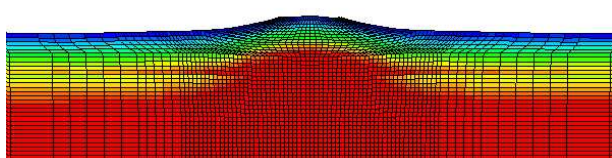
図-10 せん断ひずみ分布(TypeB)



(a) 地震発生前



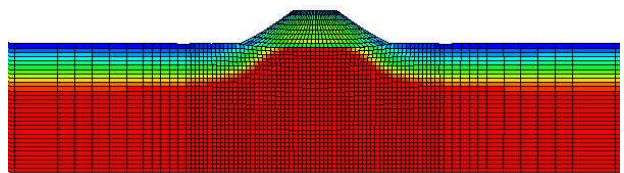
(a) 地震発生 150 秒後



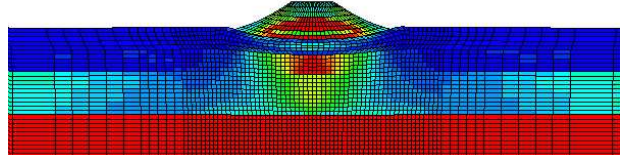
(b) 圧密終了後

0kPa 80kPa

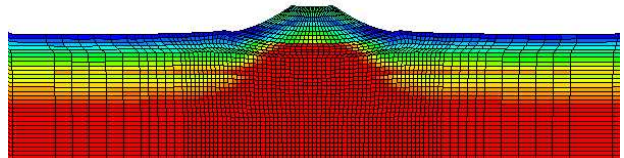
図-11 平均有効応力分布(TypeA)



(a) 地震発生前



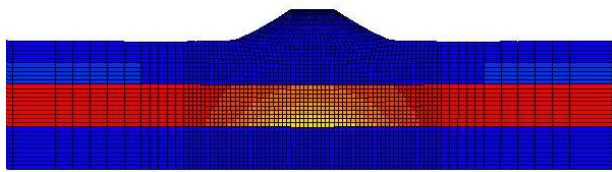
(a) 地震発生 150 秒後



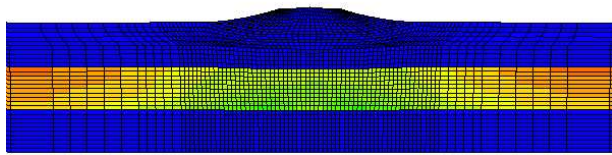
(b) 圧密終了後

(80kPa 以上はすべて 80kPa としている)

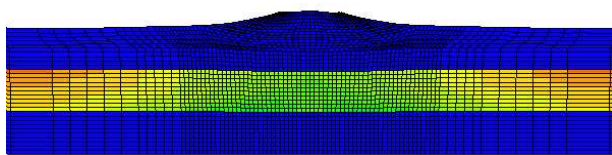
図-12 平均有効応力分布(TypeB)



(a) 地震発生前

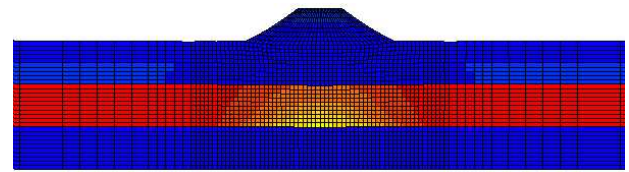


(b) 地震発生 150 秒後

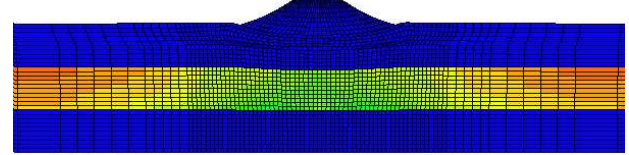


(c) 圧密終了後

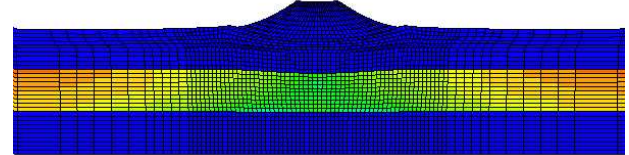
図-13 構造の程度($1/R^*$)分布(TypeA)



(a) 地震発生前



(b) 地震発生 150 秒後



(c) 圧密終了後

図-14 構造の程度($1/R^*$)分布(TypeB)

次に、図-15～16に砂層（As，盛土法尻，GL-2m），図-17～18に粘土層（Ac，盛土直下，GL-12m）の要素の挙動を示す．なお、各図中の青線は盛土造成時、黒線は地震中、および赤線は地震後より変形収束時までの挙動を表す．まず法尻部の砂は、盛土造成時に構造を若干喪失している($R^*=1$)．ただし、盛土荷重がない要素では当然構造は保持したままである．地震中には有効応力パスをみると平均有効応力がせん断応力とともに原点($p'=0$)のほうに近づき液状化している様子が伺える．またそれに伴

いせん断ひずみも大きく発生している．TypeA(盛土:軟)とTypeB(盛土:硬)で有効応力パスはほぼ同様であるが、特に地震時のせん断ひずみの量はTypeAの方が大きく発生している．これは先に述べたように盛土が比較的軟らかいため液状化の影響で側方へより大きく流動していることを示している．このとき比体積 v はほぼ一定であり地震時は非排水的に挙動する．地震後は過剰間隙水圧の消散により、ふたたび平均有効応力は上昇し比体積が減少する(砂の圧密)．

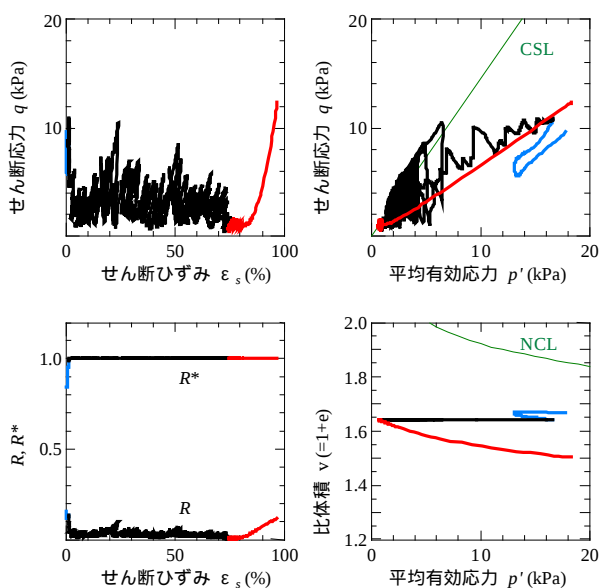


図-15 砂層の要素の挙動(TypeA)

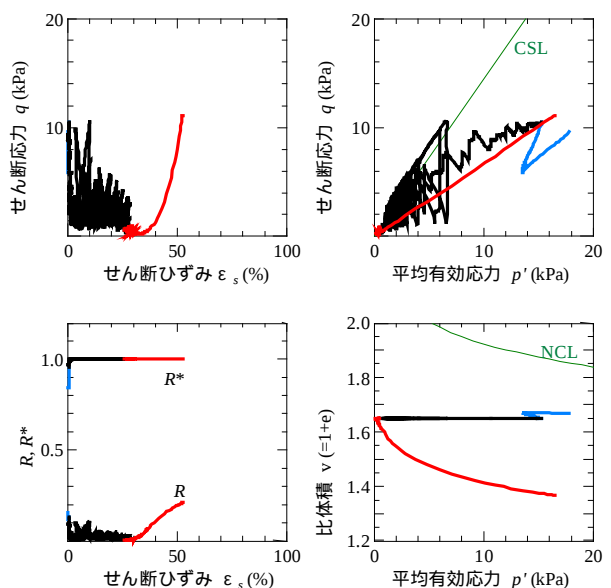


図-16 砂層の要素の挙動(TypeB)

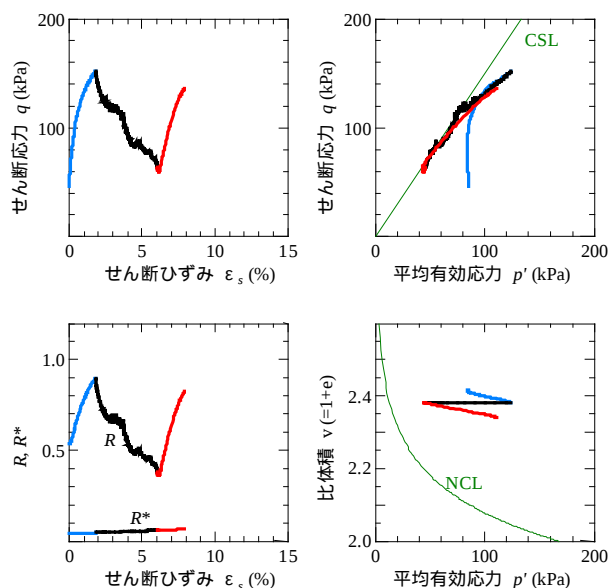


図-17 粘土層の要素の挙動(TypeA)

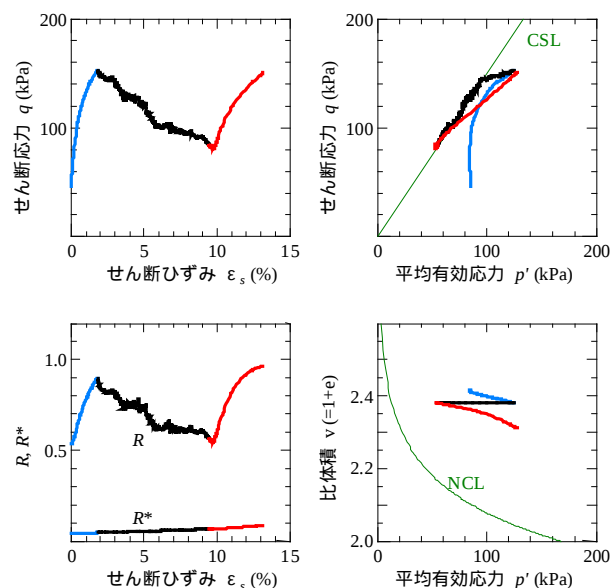


図-18 粘土層の要素の挙動(TypeB)

これに対し、盛土直下の粘土では地震中のせん断ひずみの発生量はTypeBの方が大きい。この理由として、地震中のせん断応力の値がTypeAでは最小で約60kPaであるのに対し、TypeBでは80kPaであるため、より大きなせん断応力で繰り返し荷重を受けていることが挙げられる。

4. おわりに

地震は局所的ではなく影響範囲が広域であるため、盛土が弱い場合は盛土、地盤が弱い場合は地盤と弱部を探すかのようにして攻めてくる。つまり、地震時の盛土安定性向上のために盛土を固くすると、粘土層の沈下・ひずみが反って大きくしてしまう場合があることがわかった。鋼構造物では、耐震性向上のために特定の部材を補強すると、かえって他の部材が地震時に被害を受けることはよく知られているが、今回の計算はそれに対応する。このことから、液状化層が介在する地盤を補強/改良する場合、液状化層だけでなく土構造物や他の層の状態も十分配慮して設計する必要性についても示唆していると考えられる。上述の計算は、All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration (GEOASIA) (文献4), 5), 6)を含む) による。

謝辞：本報告を作成するにあたり、名古屋大学大学院浅岡顕教授に御助言をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Nakano, M., Nakai, K., Noda, T. and Asaoka, A. : Simulation of shear and one-dimensional compression behavior of naturally deposited clays by Super/subloading Yield Surface Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.1, pp.141-151, 2005.
- 2) Nakano M., Noda T., Asaoka A. and Nakai K. : Compaction behavior of sand with degradation of structure and overconsolidation, *Proc. of Sino-Japanese Symposium on Geotechnical Engineering*, Beijing, China, pp.455-462, 2003.
- 3) Yamada E., and Nakano M.: Improvement of manmade island filled with intermediate soils by SCP method, *Proc. 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, to appear, 2007.
- 4) Asaoka A., Nakano M., and Noda T. : Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior. *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110, 2000.
- 5) Asaoka A., Noda T., Yamada E., Kaneda K. and Nakano M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanics of soils, *Soils and Foundations*, No.42, Vol.5, pp.45-57, 2002.
- 6) 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.
- 7) Noda T., Yamada S. and Asaoka, A.: Elasto-plastic behavior of naturally deposited clay during/after sampling, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.1, pp.51-64, 2005.
- 8) 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, *応用力学論文集*, vol.9, pp.39-550, 2006.

(2007.06.29 受付)