

地震時に乱された粘土の地震後圧密挙動

名古屋大学大学院 国際会員 中井健太郎・野田利弘・中野正樹・浅岡顕
(株)不動テトラ 正会員 竹内秀克

1. はじめに

従来の地震時動的解析においては、液状化解析のように、砂地盤における地震中挙動のみに注意が払われ、耐震性能上問題となった砂地盤だけを対象として改良すればよいとされてきた。ところが、地震による被害は液状化だけでなく、液状化後の大沈下も問題となっている。液状化した砂地盤は地震後に層厚の3~5%もの沈下が生じると報告されており¹⁾、地震中だけでなく、地震後の圧密挙動把握も重要である。また、粘土地盤においても、地震後に数十日に渡って続く長期沈下が観測された報告もあり²⁾、砂地盤だけでなく、粘土地盤をも対象とした解析が望まれる。本報告で示す解析は、骨格構造（構造・過圧密・異方性）とその働きを記述するSYSカムクレイモデルを土の構成式に搭載した水～土連成有限変形解析プログラム**GEOASIA**（All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration）³⁾⁴⁾⁵⁾を用いており、砂から粘土まであらゆる土材料に対し、静的も動的も、変形から破壊まで区別せずに対象とする。

本報告では、土構造物（盛土）と砂・粘土互層地盤との連成系における地震中/地震後の変形挙動の解析事例を示し、最初に盛土硬さが盛土自身および下部地盤の変形挙動に及ぼす影響について調べる。続いて、擁壁/シートパイルおよびタイロッドによって補強された土構造物（盛土）の解析事例を示し、盛土高さおよびシートパイル根入れ深さが、地震後の沈下量に及ぼす影響について、特に軟弱粘土層の構造低位化に着目して考察する。

2. 解析条件

2.1 室内試験結果の再現と土の材料定数・初期値

対象とした地盤の地層構成は、三重県四日市市周辺の典型的な砂と粘土の互層地盤である。地表面からシルト混じり砂 As 層（層厚 5m）、密な細砂 As' 層（層厚 5m）、軟弱な粘土 Ac 層（層厚 10m）および非常に密な砂 Ds 層（層厚 10m）となっており、その下には工学的基盤（N 値 > 30、Vs > 300m/s）が存在する。地盤の材料定数および初期値は、当該地域から採取したサンプリング試料の力学試験とその試験結果をSYSカムクレイモデルで再現することによって決定した。

表-1 に地盤の材料定数（弾塑性パラメータ・発展則パラメータ・物性）を示す。弾塑性パラメータは、採取試料

表-1 解析に用いた材料定数

	As	As'	Ac	Ds
弾塑性パラメータ				
限界状態定数 M	1.45	1.45	1.50	1.00
NCLの切片 N	1.59	1.71	2.08	1.99
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.120	0.040	0.150	0.050
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.012	0.004	0.030	0.012
ポアソン比 ν	0.20	0.40	0.10	0.30
発展則パラメータ				
構造劣化指数 a ($b=c=1.0$) (塑性測度は $-D_v^p$ と $\ D_s^p\ $ の和)	20.0	10.0	0.45	2.2
$-D_v^p$ と $\ D_s^p\ $ の割合 c_s	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 br	0.05	0.10	0.05	3.0
回転硬化限界面 m_b	0.65	0.65	1.0	0.7
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65	2.65	2.65	2.65
透水係数 κ (cm/s)	5.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-7}	1.0×10^{-3}

を十分に捏ねくりかえして作成した練返し試料の力学試験（標準圧密試験・非排水三軸圧縮試験）結果から求めた。発展則パラメータは、不攪乱試料の力学試験（標準圧密試験・非排水三軸圧縮試験）結果をSYSカムクレイモデルで再現することによって試行錯誤的に決定した。Ds層に関しては試験データ不足により、材料定数の特定を行うことができなかったため、名古屋大学でこれまでに用いた砂の定数で密な状態を仮定した。圧縮指数に着目してみると、Ac層 > As層 > As'層となっており、細粒分が多いほど圧縮性が高いことがわかる。As層はシルト分が多く含まれているため、圧縮性がかなり大きい。発展則パラメータを見てみると、Ac層は「過圧密解消が構造劣化より卓越しており、異方性の発達/消滅が遅い」典型的な粘土であると考えられる。As層とAs'層は、逆に「構造劣化が過圧密解消より卓越しており、異方性の発達/消滅が速い」砂的なパラメータを有する⁶⁾。図-1～図-3は、各層における再現結果である。As層およびAs'層は、拘束圧の異なる非排水三軸圧縮試験、Ac層は非排水三軸圧縮試験および標準圧密試験結果を示している。いずれも実験結果をよく再現できている。ここで、図-3の標準圧密試験結果（右下図）を見てみると、Ac層不攪乱試料の試験結果は練返し正規圧密線NCLの外側、いわゆる不可能領域に応力状態を取ることがわかる。ここで「構造」とは、鋭敏な土の状態のことを言い、正規圧密線の外側への「嵩張りの程度」として定義される³⁾⁴⁾。構造を有する土は、試験結果からもわかるように、低応力下では高位な構造を有し「嵩張った」状態にあるが、载荷などの塑性変形を受けると、構造の低位化に伴い正規圧密線へ次第に漸近していく。構造の低位化は圧縮量を増大させるので、高位構造を有する土はその低位化が起因となって大圧縮を生じる。対象としたAc層は、「嵩張った」圧縮挙動を示しており、構造高位な、鋭敏で軟弱な粘土層である。

表-2に地盤の初期値を示す。室内試験結果再現の際は、現地盤での堆積時を初期状態に取り、サンプリングから供試体作製までの(理想的な)

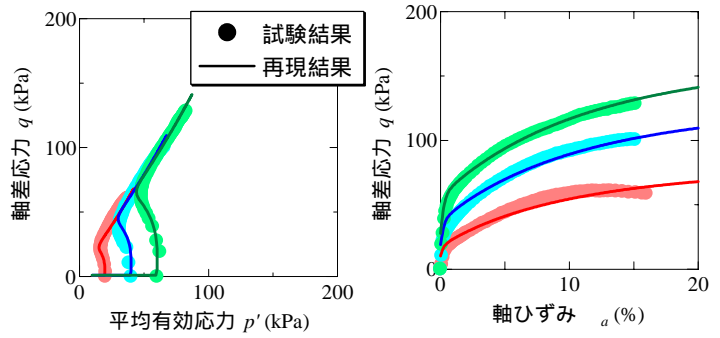


図-1 As層における力学試験結果の再現

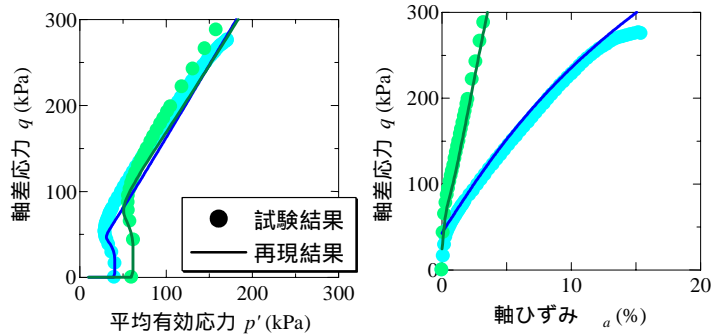


図-2 As'層における力学試験結果の再現

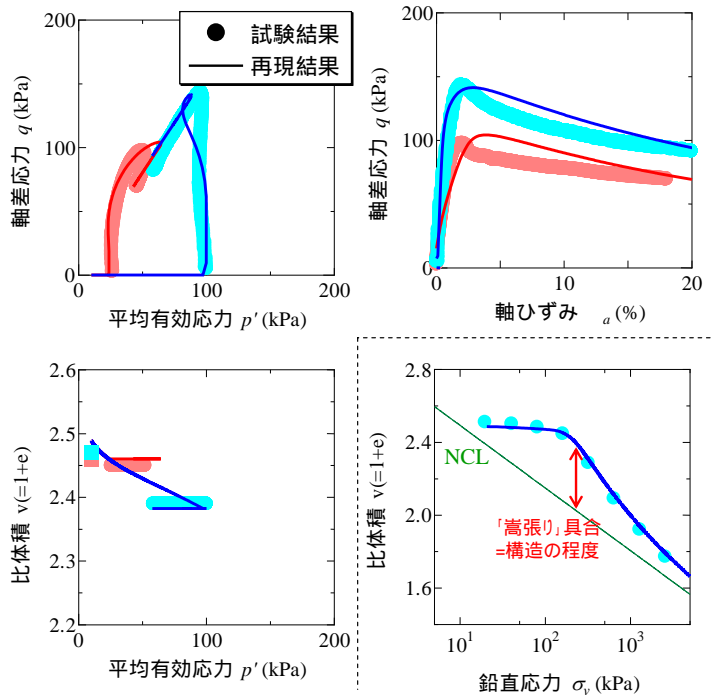


図-3 Ac層における力学試験結果の再現

表-2 解析に用いた地盤の初期値

	As	As'	Ac	Ds
比体積 v	1.67	1.59	2.42	1.79
応力比 K_0	0.60	0.60	0.60	0.60
構造の程度 $1/R^*$	1.18	1.30	25.7	1.26
過圧密比 $1/R$	分布	分布	分布	分布
異方性の程度 K_β	0.67	0.60	0.60	0.60

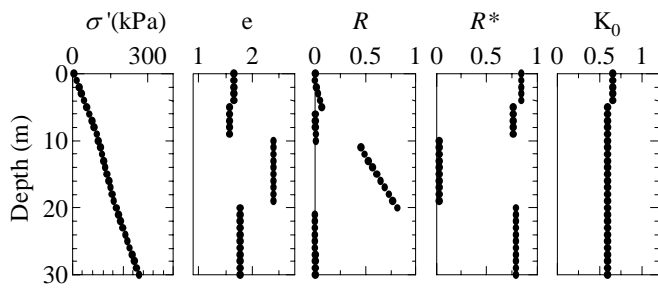


図-4 初期状態分布図

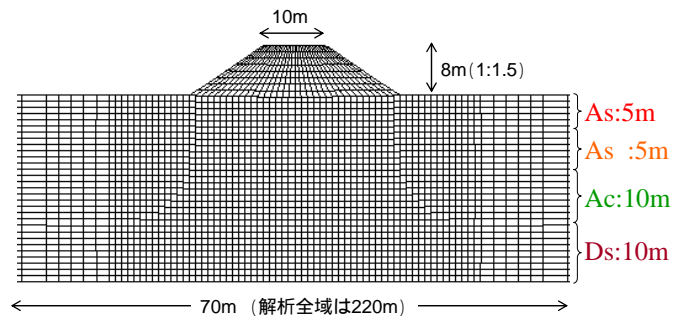


図-5 盛土構築後の有限要素メッシュ図

乱れの影響までも考慮して行うので、力学試験の再現だけでなく、堆積時初期状態の推定も可能である。表からも Ac 層の構造が非常に高位であり、軟弱な粘土地盤であることがわかる。地盤の初期状態分布は図-4 に示すように、構造の程度、比体積は深度方向に均一とし、過圧密比は土被り圧に応じて分布させた。静止土圧係数 K_0 は表層の As 層のみ 0.67、他は 0.6 とした。

2.2 有限要素メッシュと境界条件

図-5 に盛土構築後の有限要素メッシュ図を示す。地盤は縦 30m 横 220m の水平方向に均質な地盤を仮定した。水理境界は、地表面が水位面と一致するよう水圧ゼロとし、下端面は透水性の高い砂礫層の存在を考慮して排水境界、側面を非排水境界とした。また制約条件として、両側面の同一高さの全節点の各成分に等変位条件を設けている（周期境界）。このような地盤上に土構造物を構築後、地震動として図-6 に示す加速度の 1/2 を地盤底面全節点の水平方向に等しく入力し、地震動終了後も地盤の沈下が収束するまで計算した。なお、工学的基盤にあたる地盤下端節点は底面粘性境界（ $V_s=300\text{m/s}$ ）とした。

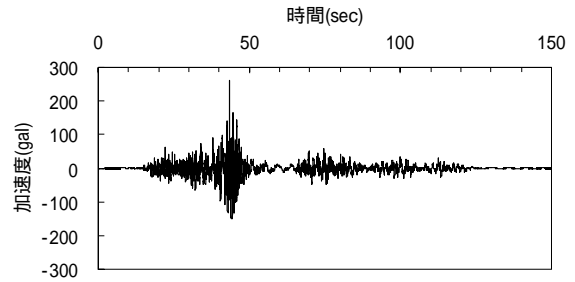


図-6 開放基盤面での地震波形
（東南海・東海連動型地震）

3. 盛土硬さが地震中 / 地震後挙動に及ぼす影響

3.1 解析条件

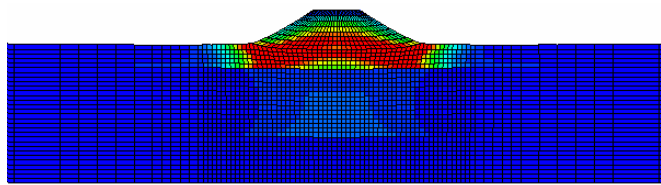
ここでは、盛土の硬さ（圧縮性）が地震中 / 地震後挙動に及ぼす影響について調べる。図-6 で示したように、地盤中央に高さ 8m、天端幅 10m、法尻勾配 1:1.5 の盛土を、飽和した二相系の弾塑性有限要素メッシュとして段階的に載荷した後、地震動を与えた。盛土部の材料は、表-3 に示す 2 通りを想定して解析を行った。Type-A は As 層の材料定数を用い、圧縮指数が 0.12 と大きく、粘土に近い中間土である。一方 Type-B は As' 層の材料定数を用い、圧縮指数が 0.04 と小さく、砂に近い材料である。計算結果比較のため、盛土荷重は両者で同一（ $\gamma_t = 21.0\text{kN/m}^3$ ）としたため、ともに比体積は 1.5 であり、相対的には Type-A は柔らかい盛土、Type-B は硬い盛土となる。

3.2 解析結果

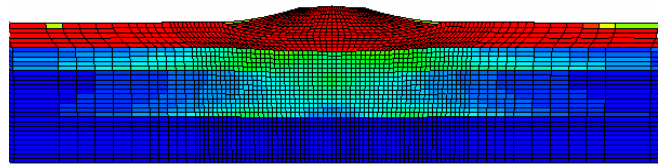
図-7 および図-8 は、地震中および地震後のせん断ひずみ分布の推移を示す。盛土の柔らかい Type-A では、地震中に盛土自身が As 層とともに側方へ大きく変形し、盛土がつぶれてしまっている。一方、盛土の硬い Type-B では、As 層において大きなせん断ひずみが発生しているものの、盛土自身には大きなせん断ひずみは発生せず、安定を保っている。図-9 および図-10 には、地震発生時点からの盛土中央直下における層別沈下量を示す。なお、図中全層合計沈下量とは、地盤部分の合計沈下量を示しており、盛土自身の沈下量は含

表-3 想定盛土の特性

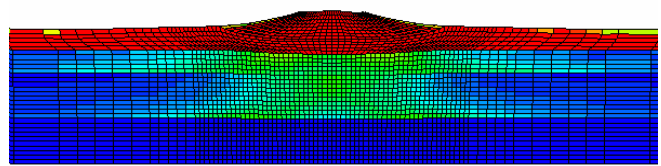
	Type-A	Type-B
材料定数	As	As'
密度	21.0 (kN/m ³)	21.0 (kN/m ³)
比体積	1.50	1.50
盛土剛性	柔らかい	硬い



(a) 地震発生前



(b) 地震発生から150秒後

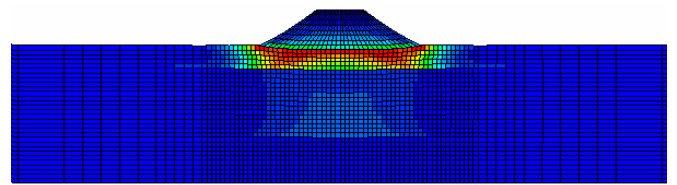


(c) 圧密終了後(地震発生から200日後)

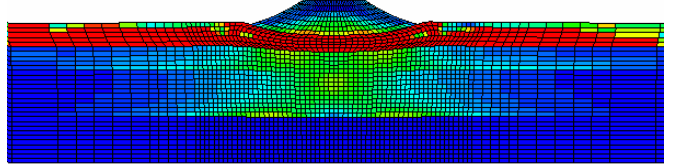
0% 15%

15%以上はすべて15%として表記

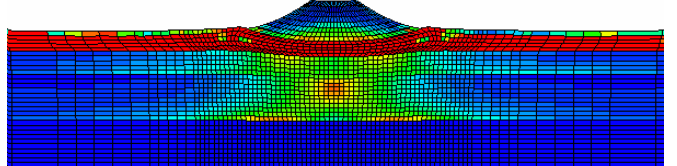
図-7 せん断ひずみ分布(盛土 Type-A)



(a) 地震発生前



(b) 地震発生から150秒後



(c) 圧密終了後(地震発生から200日後)

0% 15%

15%以上はすべて15%として表記

図-8 せん断ひずみ分布(盛土 Type-A)

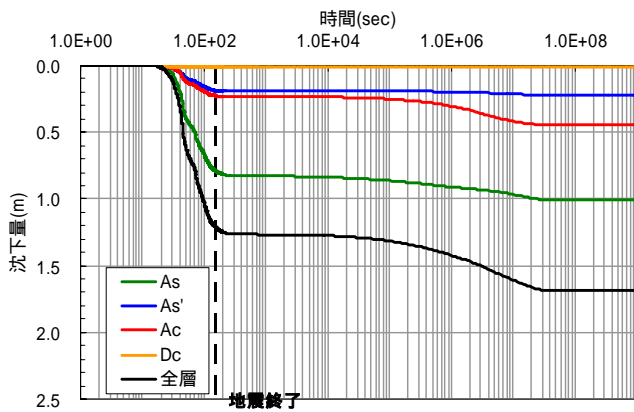


図-9 層別沈下量(盛土 Type-A)

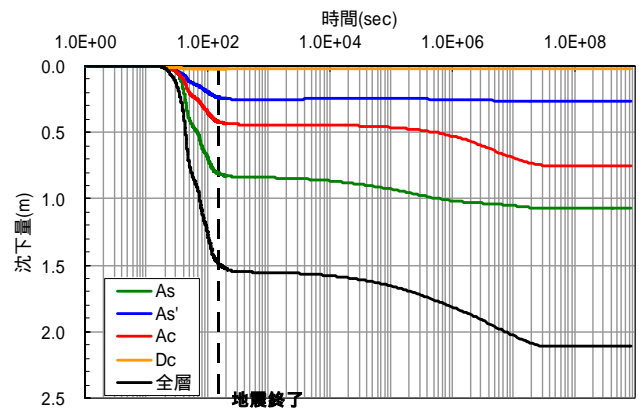
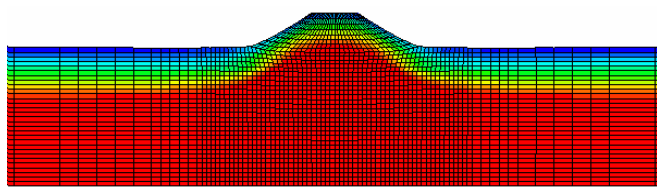
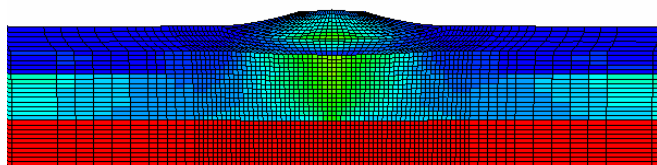


図-10 層別沈下量(盛土 Type-B)

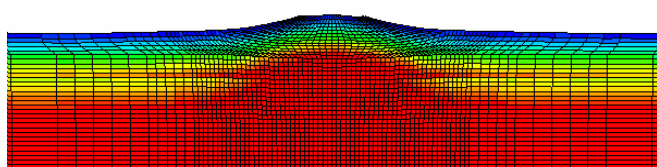
んでいない。地震とともに大きく沈下を生じ、地震中に Type-A で 1.2m、Type-B で 1.5m の沈下を生じる。地震後はさらに、Type-A で 0.5m、Type-B で 0.7m もの沈下が生じる。層ごとに比較してみると、透水性の大きい As' 層では地震終了とほぼ同時に沈下は収束しているのに対し、透水性の低い As 層および Ac 層では地震後約 2 時間してから再び大きく沈下し始め、沈下収束までに約 200 日かかる。盛土硬さで比較してみると、最終沈下量は Type-A で 1.7m、Type-B で 2.2m となっており、盛土が硬い方が大きくなる。この両者の沈下量の差は、特に Ac 層で生じていることが図からわかる。この原因について考察するため、平均有効応力分布の推移を図-11 および図-12 に示す。上部砂層では Type-A も Type-B も地震中に平均有効応力がゼロとなり、



(a) 地震発生前



(b) 地震発生から150秒後

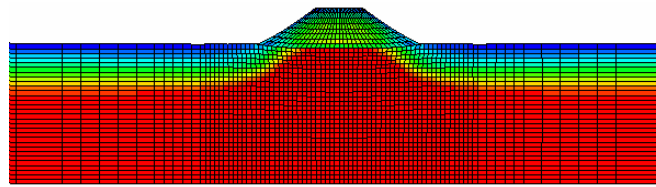


(c) 圧密終了後(地震発生から200日後)

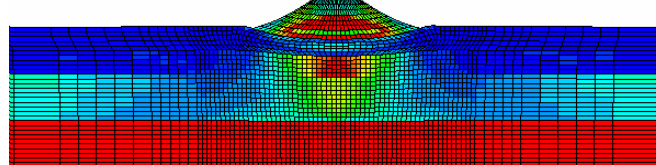
0kPa 80kPa

80kPa以上はすべて80kPaとして表記

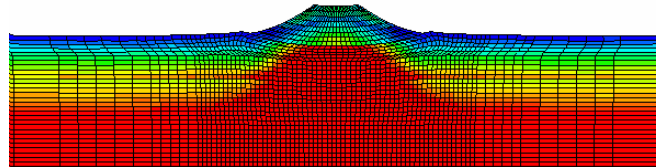
図-11 平均有効応力分布（盛土 Type-A）



(a) 地震発生前



(b) 地震発生から150秒後



(c) 圧密終了後(地震発生から200日後)

0kPa 80kPa

80kPa以上はすべて80kPaとして表記

図-12 平均有効応力分布（盛土 Type-B）

広範囲で液状化していることがわかる。盛土部および Ac 層を見てみると、Type-A では平均有効応力が大きく減少しているのに対し、Type-B では減少していない。盛土が柔らかい場合は、盛土が地震中に上部砂層と一緒に液状化を生じ大変形を示すので、液状化層がクッションのように働いて、下部粘土層に伝わる鉛直応力は低減する。一方、盛土が硬い場合は、地震中に盛土周辺の砂層は液状化を示すものの、盛土が安定を保っているため、下部（Ac 層）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大沈下を生じる。地震終了後のせん断ひずみ分布（図-7 と図-8）を見ても、盛土の硬い Type-B では Ac 層において大きなせん断ひずみが発生していることがわかる。

以上のように、盛土硬さあるいは圧縮特性の違いによる地震中・地震後変形挙動を調べた結果、盛土剛性を硬くすると、盛土自身の安定性は向上するものの盛土下部 Ac 層への荷重伝播が大きくなるため、Ac 層での沈下量が増大してしまうことがわかった。

4. 擁壁・シートパイル・タイロッドで補強された土構造物および地盤の地震中 / 地震後挙動

4.1 解析条件

土構造物の側方変位対策として擁壁による補強、そして土構造物下部での液状化対策としてシートパイル・タイロッドによる補強（シートパイル工法）が挙げられる。ここでは、これら補強対策を行った時のシートパイル根入れ深さの検討を行う。盛土形状は擁壁を用いた鉛直盛

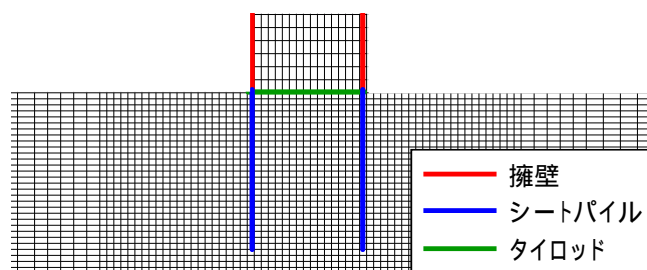


図-13 有限要素メッシュ図と盛土・地盤の補強方法

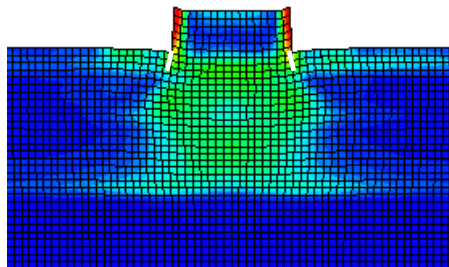
土とし、盛土幅 16m で盛土高さは 3m と 6m の 2 通りとした。シートパイルの根入れ深さを 3m、15m、25m の 3 通りを想定し、シートパイル先端同士(法尻部)をタイロッドで結んだ。3m とは上部砂層の中間に、15m とは Ac 層の中間に、そして 25m とは Ds 層の中間への根入れを想定している。擁壁およびシートパイルは、簡単のため、対象要素節点間に距離不変および角度不変の制約条件を与えることで再現し、タイロッドも同様に距離不変の制約条件でもって再現した(図-13)。また、本章の計算例では、前章と異なり、As 層の層厚は 3m、As' 層の層厚は 7m で、表-4 に示すように As 層の材料定数および初期値が若干異なる。それ以外はすべて前章と同じ条件である。このような土構造物および地盤に、2. と同様に図-6 の地震波を入力し、圧密が収束するまでそのまま圧密計算した。

4.2 解析結果

図-14 ~ 図-16 に盛土高さが 6m の時の地震発生から 200 日後のせん断ひずみ分布図を示す。白線は制約条件で再現したシートパイルを図示したものである。根入れが浅いと、液状化した上部砂層の側方流動に耐えられず、シートパイルが「八」の字型に広がってしまう。また、シートパイル先端にせん断ひずみが集中し、根入れ 15m(図-15)では地盤深部に

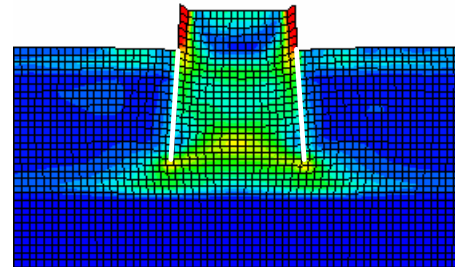
表-4 解析で用いた As 層の材料定数・物性と初期値

弾塑性パラメータ	
限界状態定数 M	1.45
NCL の切片 N	1.51
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.063
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.012
ポアソン比 ν	0.30
発展則パラメータ	
構造劣化指数 a ($b=c=1.0$) (塑性測度は $-D_v^p$ と $\ D_s^p\ $ の和)	10.0
$-D_v^p$ と $\ D_s^p\ $ の割合 c_s	1.0
正規圧密土化指数 m	0.15
回転硬化指数 br	0.30
回転硬化限界面 m_b	0.65
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65
透水係数 κ (cm/s)	1.0×10^{-5}
初期値	
比体積 v	1.57
応力比 K_0	0.60
構造の程度 $1/R^*$	1.37
過圧密比 $1/R$	分布
異方性の程度 K_β	0.60



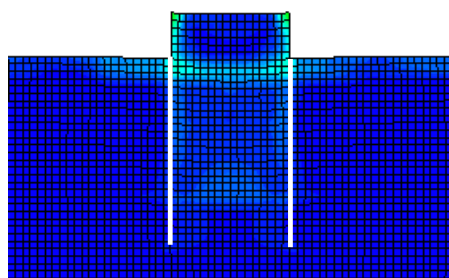
0% 20%

図-14 根入れ 3m の時のせん断ひずみ分布



0% 20%

図-15 根入れ 15m の時のせん断ひずみ分布



0% 20%

図-16 根入れ 25m の時のせん断ひずみ分布

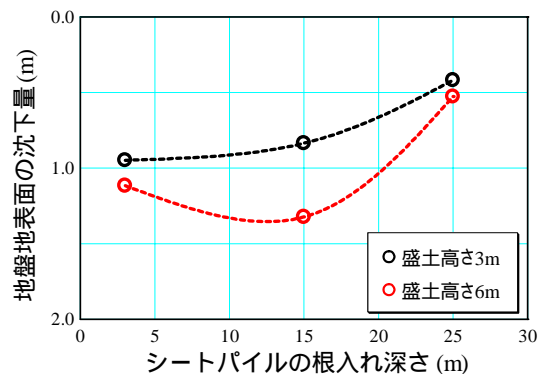
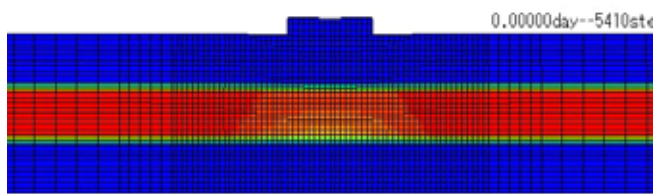
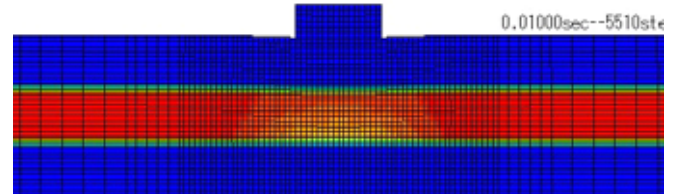


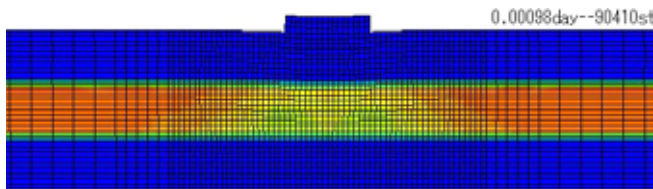
図-17 地表面沈下量まとめ図



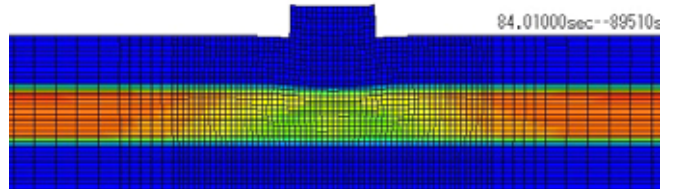
(a) 地震発生前



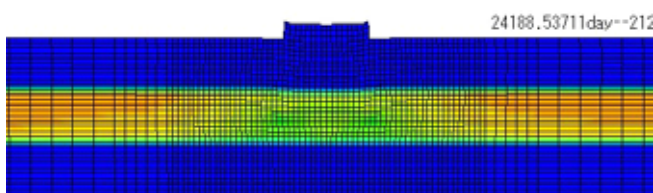
(a) 地震発生前



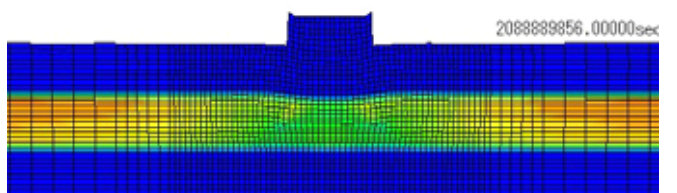
(b) 地震発生から150秒後



(b) 地震発生から150秒後



(c) 圧密終了後(地震発生から200日後)



(c) 圧密終了後(地震発生から200日後)



図-18 構造の程度分布(盛土高さ 3m 根入れ 15m)

図-19 構造の程度分布(盛土高さ 6m 根入れ 15m)

において大きなせん断ひずみが発生している。支持力の大きな D_s 層まで深くすると(図-16) シートパイルはほとんど傾かず、せん断ひずみもほとんど生じない。図-17 に盛土高さと根入れ深さを変えた際の、盛土中央部における地表面沈下量の比較を示す。図から、盛土中央部の沈下量を低減するためには、根入れを非常に密な砂 D_s 層(支持層)まで到達するように十分深くとる必要がある。盛土高さ 3m の場合は、若干ではあるものの、根入れが深くなるにしたがって沈下量は低減するが、盛土高さ 6m では、根入れ 15m の時に、根入れ 3m よりも逆に沈下量が増加してしまうことがわかる。これを考察するため、根入れ深さ 15m において、盛土高さ 3m と 6m の時の構造の程度分布を図-18 と図-19 に示す。両図を比較すると、盛土高さ 3m に比して、6m は A_c 層における構造低位化が顕著で、初期に軟弱だった粘土層が地震によって乱されたことがわかる。すなわち、(上述のようにシートパイル先端ではせん断ひずみが集中するが、) 構造高位な A_c 層にシートパイル先端があると、特に盛土高さが高くして上載荷重が大きい場合、粘土層を乱し、地震後の沈下量が増大してしまうことがわかった。

4. おわりに

本報告では、**GEOASIA** による土構造物(盛土)と砂・粘土互層地盤との連成系における地震中/地震後の変形挙動の解析事例から、

地震中に生じる盛土変形を抑止するために盛土剛性を硬くすると、盛土自身の安定性は向上するものの盛土下部 A_c 層への荷重伝播が大きくなるため、地震後に生じる沈下量が増大してしまうこと、シートパイル工法による地盤補強の際に構造高位な軟弱粘土層にシートパイル先端があると、特に盛土

高さが高くて上載荷重が大きい場合、地震動によって軟弱粘土層を乱してしまい、それによって地震後の沈下量が増大してしまうこと、を示した。地盤に地震のような大きな外力が加わる際には、地震中被害を軽減するための対策をよく検討して実施しないと、地震後被害が甚大となってしまう可能性があることを示した。また、地震時動的解析においては、地震中だけでなく地震後挙動までも含めて把握することが重要である。

なお、本研究は平成 18 年度国土交通省建設技術研究開発費補助制度(基礎研究開発公募)の支援も受けた。

参考文献

- 1) Nagase H. and Ishihara K. (1988): Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, *Soils & Foundations*, Vol.28, No.1, pp.65-76.
- 2) 佐々木康, 加納誠二, 辻誠治. (2003): ジオグリッドによる堤防の地震時変形抑止効果, *地盤工学会誌*, Vol.51, No.3, pp.28-30.
- 3) Asaoka A., Nakano M. and Noda T. (2000): Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils & Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110.
- 4) 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 & Foundations*, Vol.42, No.5, pp.45-57.
- 5) Asaoka A. and Noda T. (2007): All soils all states all round geo-analysis integration, *International Workshop on Constitutive Modeling –Development, Implementation, Evaluation and Application*, Hong Kong, China, pp.11-27.
- 6) Asaoka A. (2003): Consolidation of clay and compaction of sand –An elasto-plastic description-, Keynote lecture, *Proc. of 12th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Leung et al, Singapore, Vol.2, pp.1157-1195.