

SCP 改良された砂地盤と粘土地盤の地震中・地震後挙動の比較

(株)不動テトラ 国際会員 竹内秀克

名古屋大学大学院 国際会員 野田利弘・浅岡顕

1. はじめに

サンドコンパクションパイル(SCP)工法¹⁾は砂地盤の液状化対策として広く用いられている。SCP 砂杭の造成に伴う繰返しせん断により原地盤は締め固まり耐液状化性能も向上する。一方、粘土地盤に対しては、静的荷重に対する安定・支持力対策に用いられることが常であるが、砂地盤と同様に、耐震性向上も期待される。しかし SCP 改良地盤上の構造物の地震時被害が比較的小さいことが多く報告されているものの、地震時応答特性には未解明な点が意外と多い。それ故設計では、例えば、旧来の円弧すべり計算により、外力に地震力を静的荷重に置き換えた設計水平震度を付加するなどして安全率を求める程度で、地震波特性や継続時間などを適切に評価する手法がないのが現状である。

中野ら²⁾は中間土埋立て地盤による SCP 改良の効果の検討で、SYS カムクレイモデル³⁾を搭載した水～土連成有限変形計算⁴⁾ (**GEOASIA**)を実施している。室内試験と構成式応答の対比から、初期地盤の特性を同定し、その後、SCP 改良地盤の杭間の状態を軸対象条件による円筒拡張計算を実施して検討する。そこで得られた状態量を基に砂杭を含む SCP 複合地盤としてモデル化し支持力特性を検討し効果を確認している。SYS カムクレイモデルは粘土・中間土・砂まであらゆる土の挙動を表現することが可能であり、砂杭自身も適切な弾塑性体をして考慮できる。また、地盤解析コード **GEOASIA** は運動方程式が up-dated Lagrangian による有限変形理論に基づいて速度型で定式化され、慣性力にも対応でき、静的荷重/動的荷重を問わず用いることが可能であるため、初めから問題を特定して解析コードを選択する必要なく、地盤に関する全ての問題を同一コードで解決することが出来る。

今回、地盤解析コード **GEOASIA** を用い、中野らと同様な手法にて、典型的なゆるい砂地盤および軟弱粘土地盤の砂杭拡張による杭間土の応力履歴を再現したシミュレーションを実施して SCP 施工後の状態を決定し、その後 SCP 改良を施した地盤をモデル化し、直下型 L2 地震動を用いて SCP 改良地盤の地震中・地震後挙動を調べ耐震性能の評価を行った。さらに、大きさと周波数特性が異なる 2 種類の地震動の下での SCP 改良地盤の地震時特性 (地震中・地震後挙動) を調べた。

2. 砂杭拡張による砂/粘土地盤の締め固め改良の水～土連成計算

2.1 解析条件

図 1 は砂杭配置の模式図を示す。SCP 工法による施工では半径 $r_0=20\text{cm}$ のケーシングパイプを所定の深さまで貫入した後、ケーシングパイプの「引上げ」と「打戻し」を地盤深部から繰り返すことによって半径 $r=35\text{cm}$ の砂杭が地盤深部から造成される。今回は最も簡単な条件として隣り合う砂杭の同時施工を仮定し、砂杭 1 本の造成過程を軸対称条件下で計算した。計算領域は改良対象の杭周地盤

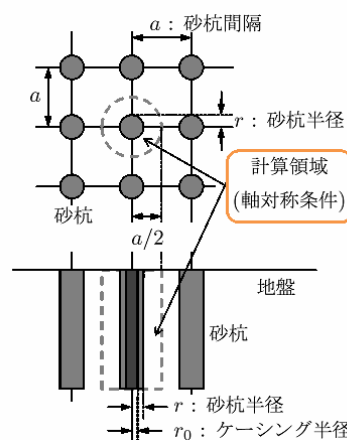


図 1 砂杭配置の模式図

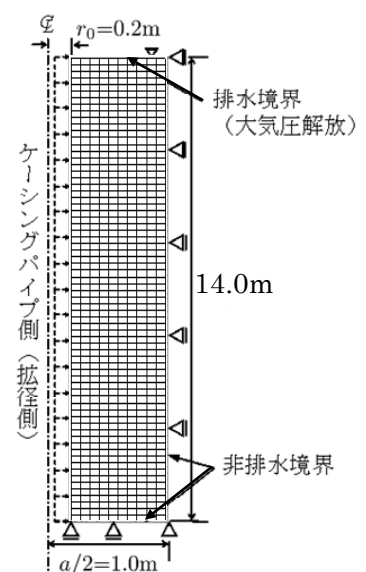


図 2 杭間地盤 FE メッシュ

である。図2に、砂杭間隔 $a=2.0\text{m}$ (計算領域 $a/2=1.0\text{m}$) の場合の有限要素メッシュと境界条件、水理条件を示す。以下では、有限要素メッシュ左側を「拡径側」、有限要素メッシュ右側を「杭間中央部」とする。砂杭造成は、1) ケーシングパイプの打戻しに伴う「拡径」過程と 2) ケーシングパイプの引上げに伴う「除荷」過程の繰り返し、とその後の 3) 「圧密放置」過程、によって再現する。砂杭拡径は、地盤深部から順次与える強制水平変位で表現し、変位速度 0.3cm/sec で 15cm 拡径する。長さ 14m の砂杭1本を造成するのに必要な時間は約18分になる。

2.2 地盤条件

地盤は、砂地盤に4.2と同様の珪砂6号³⁾の材料定数、粘土地盤に三重県四日市市内の軟弱粘土⁵⁾の材料定数を使用する。材料定数初期状態を表4.3.1に示す。砂地盤

に関しては、実際の現場の状態を再現したわけではなく、既往の研究よりゆるい状態を仮定して決定している。粘土地盤は実際の現場より得られた状態を再現している。両地盤とも、比体積 $v_0(=1+e_0)$ 、構造の程度 $1/R^*_0=5.0$ 、異方性の程度 ζ_0 が埋立地盤の深度方向に一様に分布すると仮定し、土被り圧(土粒子の密度 ρ 、側圧係数 K_0) に応じて過圧密比 $1/R_0$ の分布を決定した。

2.3 解析結果

結果、図3に地盤内の比体積変化の推移を示す。比体積は、砂地盤の場合、拡径中より減少し締め固まっている状況が伺える。構造の程度も拡径と同時に喪失し、拡径後には全域で失っている。対して、粘土地盤では、拡径中に比体積は減少しない。同時に構造の程度は喪失して、砂杭拡径により乱される。しかし拡径後の放置中に比体積は減少し、過剰間隙水圧消散に伴う圧密がみられる。このように砂地盤と粘土地盤では過程は異なるけれども、砂杭拡径によりとも杭間地盤は改良される。

表2および表3には、拡径後の各状態量の深度毎の平均値を示す。軸対称条件であるため要素ごとに担当する体積が異なるため、その重みも考慮して平均値を算出している。応力比 K_0 に関しては、要素の Cauchy 有効応力テンソル(引張を正) \mathbf{T}' の T_1 成分と T_2 成分との比で算出している。

表2 砂地盤の SCP 杭間部 状態量

GL	-0~-2m	-2~-4m	-4~-6m	-6~-8m	-8~-10m	10~-12m	12~-14m
構造の程度 $1/R^*_0$	1.90	1.81	1.75	1.73	1.71	1.70	1.66
比体積 v	1.927	1.914	1.893	1.876	1.862	1.849	1.836
異方性の程度 ζ	0.53	0.68	0.72	0.72	0.73	0.69	0.67
応力比 K_0	1.72	0.89	0.79	0.74	0.70	0.68	0.65

表3 粘土地盤の SCP 杭間部 状態量

GL	-0~-2m	-2~-4m	-4~-6m	-6~-8m	-8~-10m	10~-12m	12~-14m
構造の程度 $1/R^*_0$	21.5	16.4	14.5	13.2	11.9	10.7	9.3
比体積 v	2.423	2.419	2.408	2.392	2.371	2.347	2.320
異方性の程度 ζ	0.70	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
応力比 K_0	2.50	0.85	0.56	0.50	0.51	0.53	0.55

表1 地盤の材料定数と初期値

	砂地盤	粘土地盤
<弾塑性パラメータ>		
圧縮指数 λ	0.05	0.15
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.012	0.03
限界状態定数 M	1.0	1.5
正規圧密線の切片 N	1.98	2.08
$(p^* = 98\text{kPa}$ での繰り返し土の正規圧密線上の比体積)		
ポアソン比 ν	0.3	0.1
透水係数 k (cm/sec)	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-7}
土の密度 ρ_s (t/m^3)	2.80	2.65
<発展則パラメータ>		
構造低位化指数 a, b, c	2.2, 1.0, 1.0	0.45, 1.0, 1.0
正規圧密土化指数 m	0.06	2.5
回転硬化指数 b_r	3.5	0.05
回転硬化限界定数 m_b	0.7	1.0
<初期値>		
構造の程度 $1/R^*_0$	5.0	25.7
比体積 v_0	1.94	2.416
異方性の程度 ζ	1.0	0.6
応力比 K_0	0.6	0.6

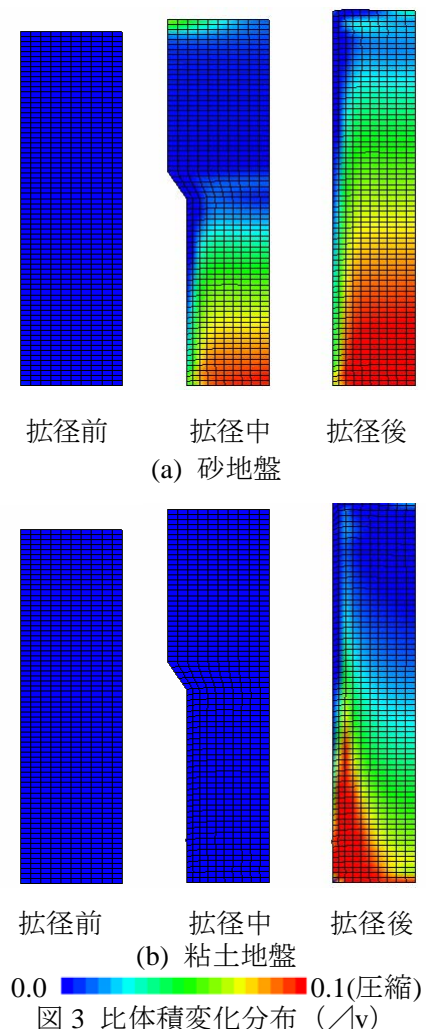


図3 比体積変化分布 (Δv)

3. SCP 複合地盤としての耐震性能

3.1 SCP 改良地盤の平面ひずみ条件におけるモデル化

次に、SCP 改良地盤の耐震性能について FEM 解析を用い評価する。本来、陸上施工などの低置換率での SCP 杭配置を考慮する際、3次元なモデル化が必要となるが、本研究では簡単のため2次元平面ひずみで取り扱うこととする。SCP 改良地盤のモデル化手法は1.でも述べた中野らの手法を用いる。

図5に解析に用いた有限要素メッシュ図と境界条件を示す。解析は平面ひずみ条件とし、原地盤は典型的な砂および粘土からなる層厚14mの地盤を想定した。表4に砂杭と盛土の材料定数・初期値を示す。解析は原地盤を砂および粘土の2種類とし、(a)無処理地盤と(b)SCP改良地盤の計4ケース実施した。

SCP改良域のモデル化では、解析領域中央の幅20m区間(図1太枠部分)にSCP改良による効果を考慮した。SCP改良域は、SCP施工によって造成される「砂杭部」と、砂杭造成によりせん断変形を受けて締め固まる「杭間部」からなる複合地盤であり、その状態を再現する必要がある。置換する砂杭は図5に示すように、幅25cm設置間隔2.0mの「砂壁」(改良率12%相当)としてモデル化し、密な砂で与えた(図5斜線部分が該当)。また杭間の中間土は砂杭拡径による締め固め効果(密度増加)を考慮するために、2.で実施した軸対称条件下の砂杭拡径による締め固め過程のシミュレーション結果を参考にし、鉛直方向に2mごとに分割した7層に対する各層の比体積・構造などの平均化(表2~表3)により状態を決定した。

その後、有限要素メッシュを追加する方法で地盤改良部に相当する位置に盛土を載荷する。圧密変形が収束した状態から、基盤層に底面粘性境界($V_s=300\text{m/sec}$)を設定し、2004年中越地震での観測波(図6)を入力し変形が収束するまで一連の解析を行った。

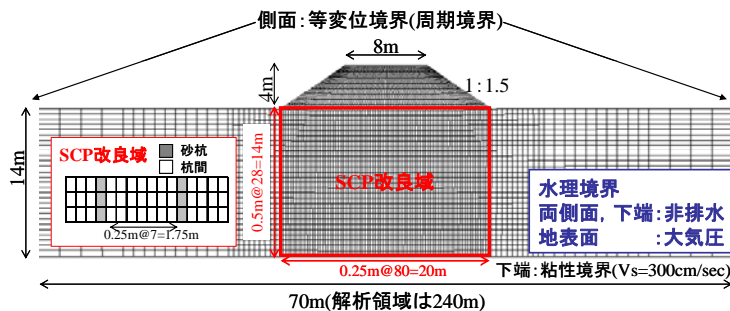


図4 有限要素メッシュ

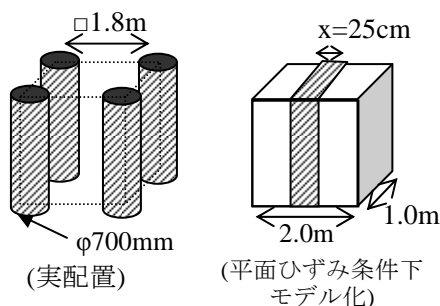


図5 SCP改良地盤の平面ひずみ条件化でのモデル化

表4 地盤の材料定数と初期値

	砂杭	盛土
<弾塑性パラメータ>		
圧縮指数 λ	0.05	0.04
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.012	0.004
限界状態定数 M	1.0	1.45
正規圧密線の切片 N	1.98	2.40
($p' = 98\text{kPa}$ での繰り返し土の正規圧密線上の比体積)		
ポアソン比 ν	0.3	0.4
透水係数 k (cm/sec)	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-5}
土の密度 ρ_s (t/m^3)	2.80	2.65
<発展則パラメータ>		
構造低位化指数 a, b, c	2.2, 1.0, 1.0	10, 1.0, 1.0
正規圧密土化指数 m	0.06	0.03
回転硬化指数 b_r	3.5	0.10
回転硬化限界定数 m_b	0.7	0.65
<初期値>		
構造の程度 $1/R^*_0$	1.26	1.18
比体積 ν	1.79	2.25
異方性の程度 ζ	杭間部に準拠	0.824
応力比 K_0	杭間部に準拠	0.824

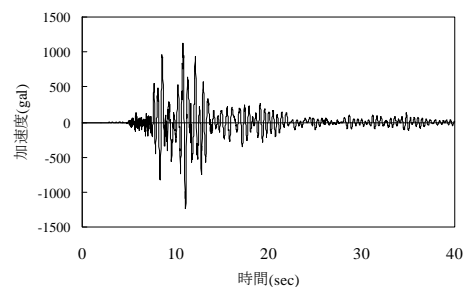
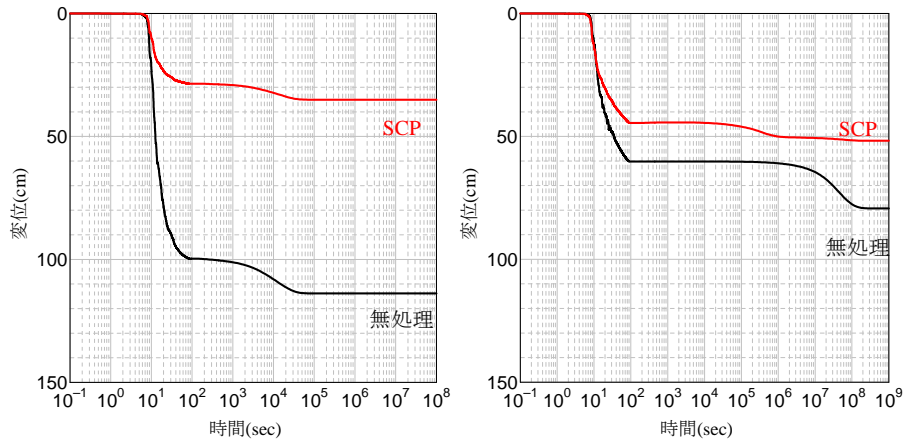


図6 開放基盤面での地震波形 (2004年中越地震)

3.2 解析結果

まずは砂地盤の計算結果をみる。図7に地震発生直後からの盛土中央直下の沈下～時間関係を示す。無処理で最終沈下量が114cmに対し、SCP改良地盤では35cmと70%もの低減効果が見られる。図8に変形収束後のせん断変形分布を示す。やはり、SCPによる歴然とした変形抑制効果が見て取れる。次に、粘土地盤の解析結果をみる。こちら

も、砂地盤ほどではないものの無処理で最終沈下量が79cmに対し、SCP改良地盤では52cmと35%の低減効果が見られる。通常、SCP改良地盤の圧密沈下量を算定する際、原地盤と砂杭の複合地盤とみなし、未改良地盤の沈下量に低減率 $\beta=1/[1+(n-1)*as]$ (n :応力分担比、 as :改良率)を乗じて求める¹⁾。応力分担比は砂杭の場合、 $n=3$ を用いる。その場合、 $\beta=0.8$ となるが、今回の計算結果はそれよりも大きく低減されている。応力分担比 n を逆算すると、 $n=5$ 程度となり、動的荷重では静的荷重より大きく砂杭が応力を分担している場合もあることがわかった。また、地震後の水圧消散に伴う長期にわたる沈下もSCP改良地盤ではほとんど発生していない。図8と図9粘土地盤の結果を示す。この場合も、SCP改良域で変形が抑制されている。深部で、ひずみが大きく現れている部分もあるが、剛性の異なるものを挿入したことで粘土の乱れが生じている。



(a) 砂地盤 (b) 粘土地盤

図7 時間～沈下量関係

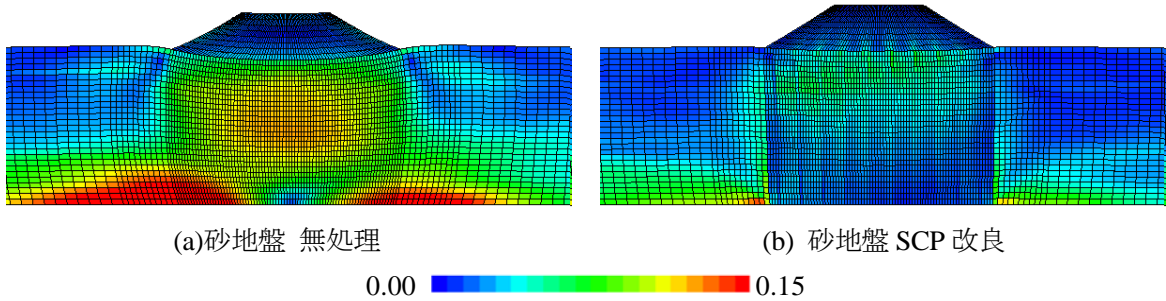


図8 せん断ひずみ分布 (圧密終了後)

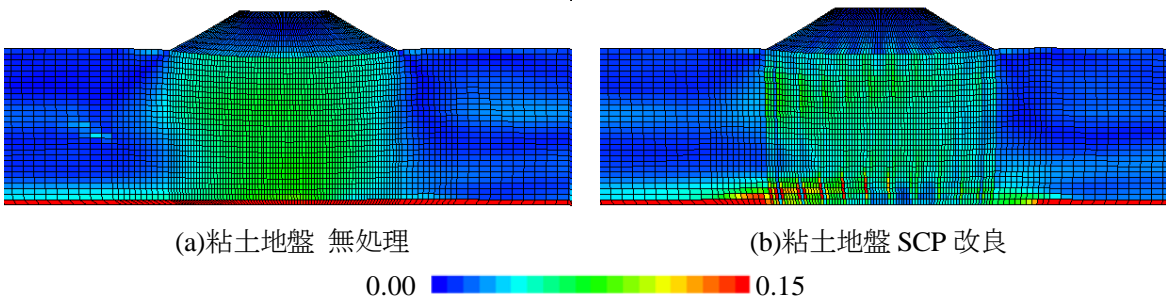
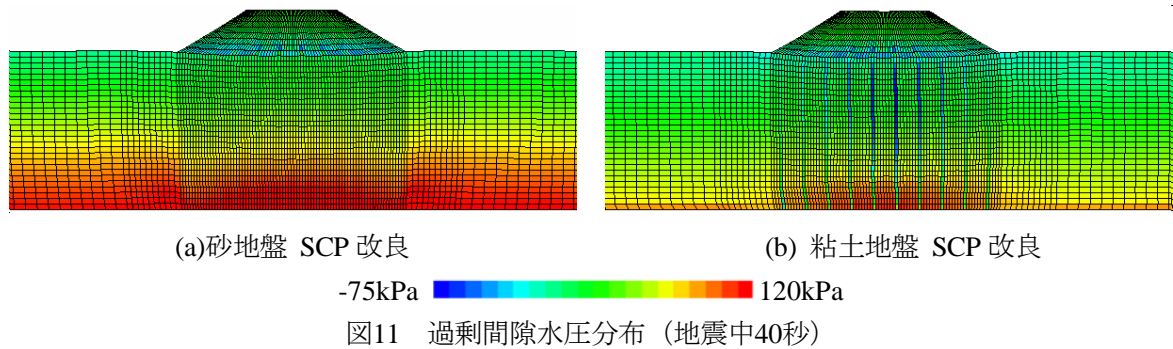
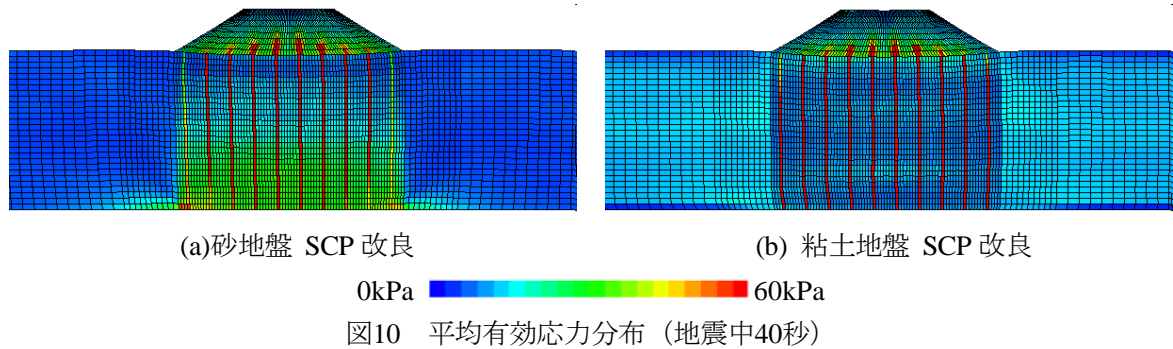


図9 せん断ひずみ分布 (圧密終了後)

次に、砂地盤と粘土地盤の地震時のSCP改良による効果のメカニズムの違いを考察する。図10に地震中(地震発生より40秒後)の平均有効応力分布を示す。両者とも、砂杭に大きな応力集中している。杭間部は粘土地盤では砂杭への応力集中に伴う除荷により(周辺地盤以上に)低減しているが、砂地盤では砂杭拡径による締め固め効果により、ある程度保持している(液状化抑止)。そのため砂地盤はより地震時に変形抑制される。

図 11 に同時刻の過剰間隙水圧分布を示す。粘土地盤では砂杭部分に負圧が発生している様子が伺える(非排水条件下での塑性膨張による⁶⁾)。粘土地盤では今回与えたような大地震の場合、砂杭が杭間よりも大きな負担をすることで、耐震性能も向上することがわかった。



4. 地震動の違いによる挙動の比較

前章では、2004 年中越地震での観測波を用いて、無処理と SCP 改良地盤の挙動を比較したが、地震波が最大加速度 1233gal と極端に大きいため、L1 相当の八戸波(最大加速度 214gal)の解析を同様に実施しその応答を比較する。図 12 に 2 種類の地震波(八戸波・中越波)を示す。図 13 に各々のフーリエスペクトルを示すが、中越地震波は周期 0.5~0.8 秒の波が大きく卓越している。

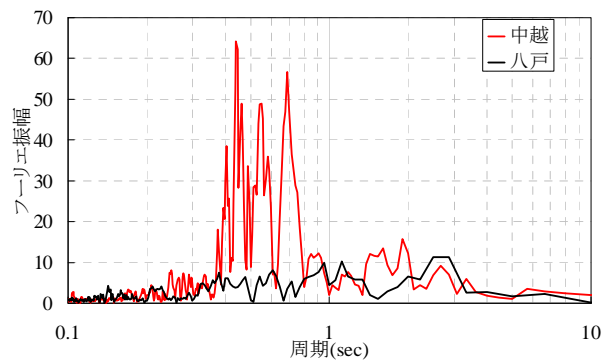
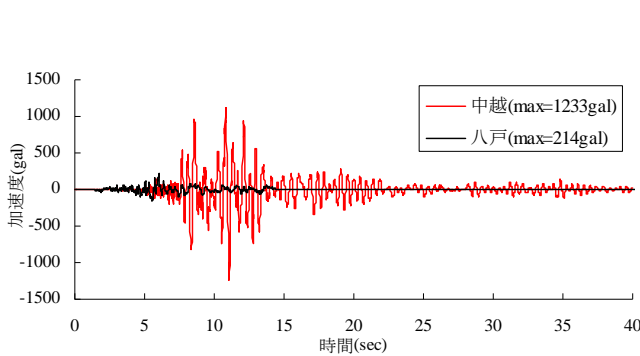
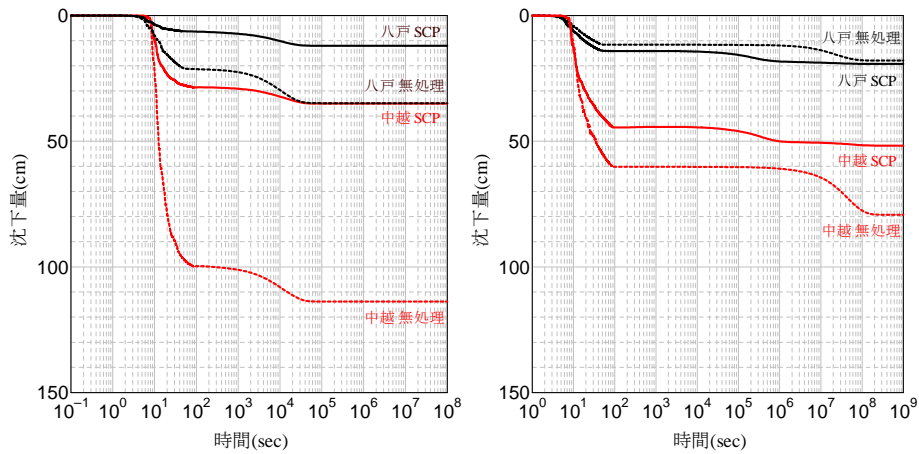


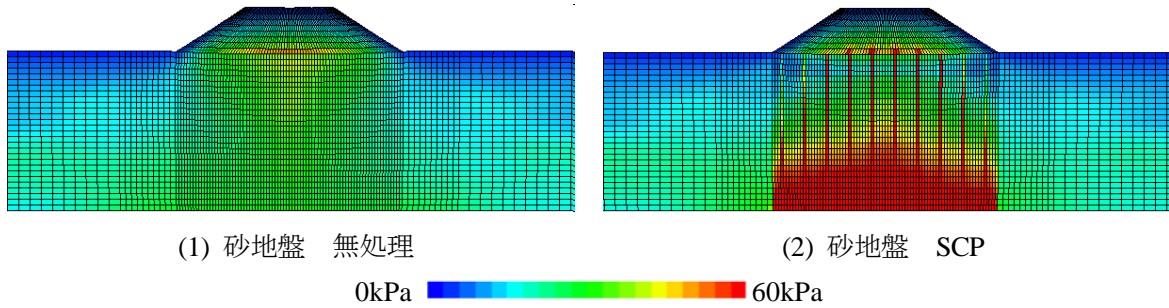
図 14 は地震発生からの盛土中央直下の時間～沈下関係を示す。砂地盤では無処理地盤に比べ SCP 改良地盤は沈下量が圧倒的に小さい。砂地盤の場合、無処理は八戸波でも全域で液状化し変形が生じるが、SCP 改良地盤では砂杭への応力集中と併せ杭間も砂杭拡径に伴う締め固め効果により平均有効応力は保持し液状化しない(図 15)。一方、粘土地盤の場合、八戸波では SCP の有無によらずほぼ同じ沈下量が生じるが、中越地震では差が大きい。これは、図 16 の地震中の過剰間隙水圧分布に示すように、(4)粘土地盤中越波では、砂杭内に負の過剰水圧が発生しているためである。つまり砂杭が正のダイレイタンスを伴う拘束圧増加によ

り、他のケース以上に大きな負担をしている。



(1)砂地盤(2)粘土地盤

図14 地震発生時からの時間～沈下量関係

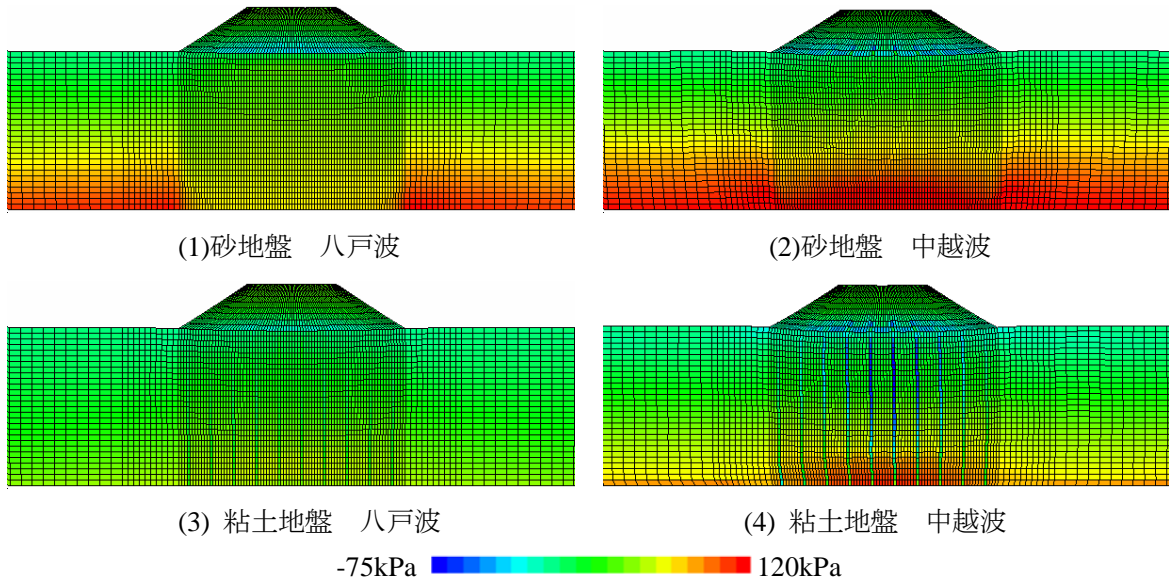


(1) 砂地盤 無処理

(2) 砂地盤 SCP

0kPa 60kPa

図15 平均有効応力分布 (八戸波 地震発生より20秒)



(1)砂地盤 八戸波

(2)砂地盤 中越波

(3) 粘土地盤 八戸波

(4) 粘土地盤 中越波

-75kPa 120kPa

図16 SCP改良地盤の過剰間隙水圧分布 (地震発生より40秒)

図 17 は各ケースの盛土天端中央の加速度応答を示す。盛土がない状態で地震動を受けた場合、砂地盤は液状化による減衰、粘土地盤は増幅する様子を別途確認しているが、盛土がある場合その天端では、全ての結果で増幅している。とりわけ砂地盤では無処理より SCP 改良地盤の方がより大きな加速度を示した。また

図 18 に地震波毎の加速度応答スペクトルを示す。中越波では周期 0.5 秒以下の短周期成分でより増幅されているのに対し、八戸波では 1.5 秒程度の長周期成分でも大きく応答している。

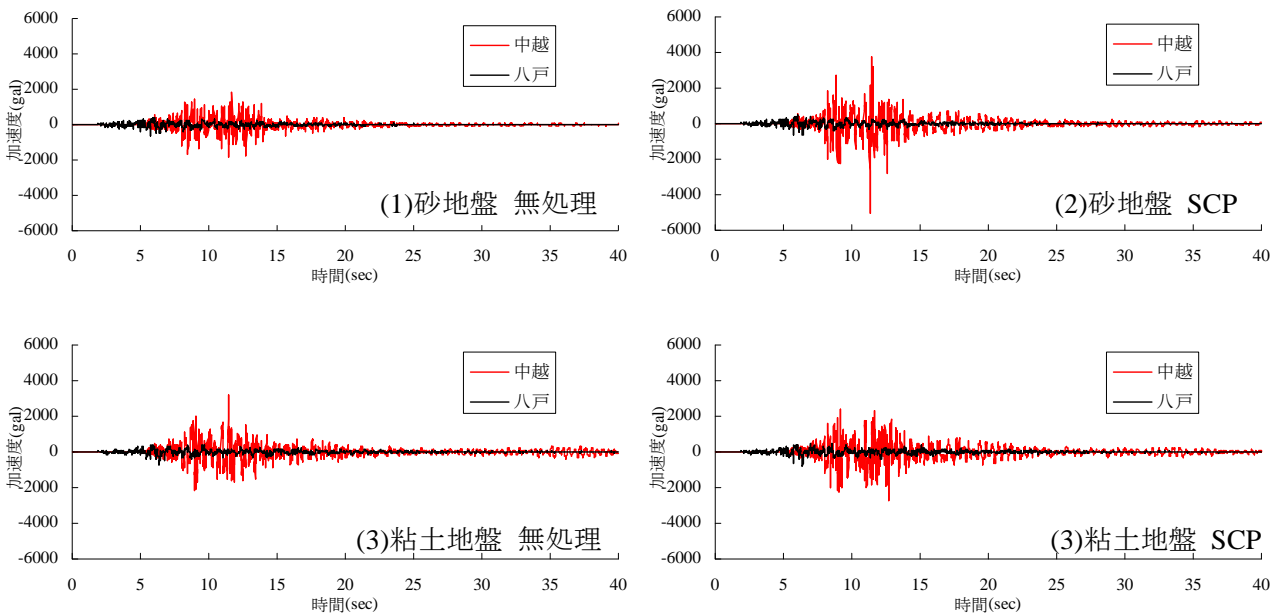


図 17 加速度応答(盛土天端中央)

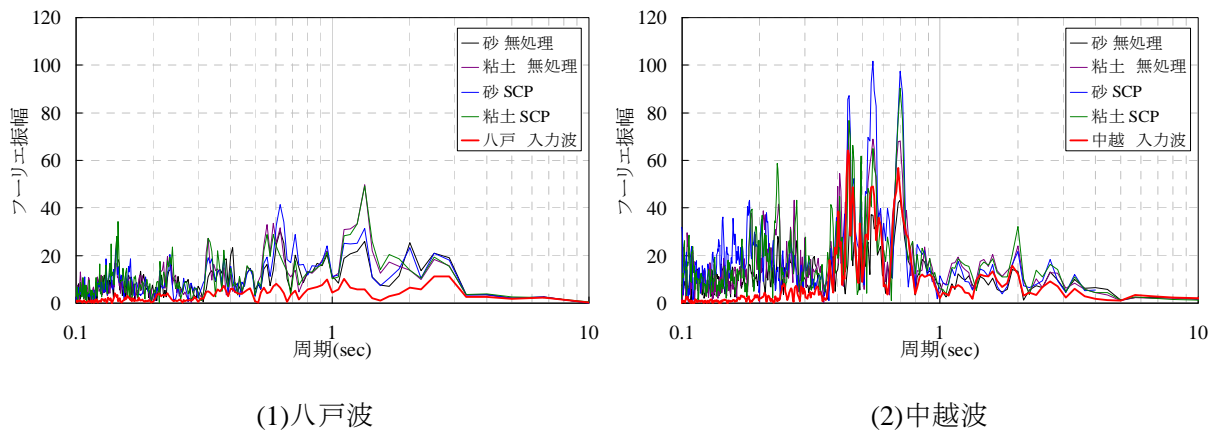


図 18 加速度スペクトル

5. おわりに

本研究では、地盤解析コード **GEOASIA** を用い、典型的なゆるい砂／軟弱粘土地盤に SCP 改良地盤を「砂杭部」と「杭間部」とで構成される複合地盤として 2 次元平面ひずみ条件下でモデル化し、地震中／地震後挙動を調べ定量的に評価することができた。以下に本研究により得られた主要な結論を列挙する。

- (1) SCP 改良地盤は、無処理地盤に比べ、砂地盤および粘土地盤とも地震時変形量を小さく抑えられる。
- (2) 砂地盤も粘土地盤も砂杭へは歴然とした応力集中が発生する。杭間部は粘土地盤では砂杭への応力集中に伴う除荷により (周辺地盤以上に) 低減するが、砂地盤では砂杭拡径による締固め効果により、ある程度保持する(液状化抑止)。
- (3) 入力地震動を変更した計算では、盛土天端では全ての結果で増幅した。とりわけ砂地盤では無処理より

SCP 改良地盤の方がより大きな加速度を示した。

なお今回の計算では、盛土は比較的剛性が大きい(硬い)状態にあることを想定した。この場合は SCP による地盤補強により砂地盤でも粘土地盤でも変形抑制効果が見られる。一方、脆弱な盛土では、特に液状化で加速度が減衰するような地盤である場合、地盤改良により上部構造物には改良前に比べて大きな加速度(≒力)を伝達してしまい、かえって破壊を招く可能性も十分に考えられる。地震時の定量的な評価が可能な数値解析は性能照査型設計には必須である。

また、今回の解析は 2 次元平面ひずみ条件で実施した。しかし、実際は柱状の改良体であるのに対し、解析では壁体として扱うことになるため、実際の 3 次元的な挙動とのギャップは依然存在するものと思われる。地盤解析コード **GEOASIA** による 3 次元解析を実施して確かめておく必要がある。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法設計・施工マニュアル,2009.
- 2) Nakano, M., Yamada, E. and Noda, T.: Ground Improvement Reclaimed Land by Compaction through Cavity Expansion of Sand Piles, *Soils and Foundations*, 48(5), pp.653-672, 2008.
- 3) Asaoka A.: 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.1157-1195,2003.
- 4) 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, *Soils and Foundations*, 48(6),pp.771-790,2008.
- 5) Noda, T., Takeuchi, H., Nakai, K. and Asaoka, A.: Co-seismic and post-seismic behavior of an alternately layered sand-clay ground and embankment system accompanied by soil disturbance, *Soils and Foundations*, JGS, to be submitted.
- 6) Takeuchi, H., Noda, T. and Asaoka, A.: Coseismic and postseismic behavior of intermediate soils ground improved by sand compaction pile method, International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering -from case history to practice-(IS-Tokyo), Tsukuba, Japan, CD-ROM,2009.