

3次元解析を用いた砂圧入式静的締固めの周辺構造物に及ぼす影響検討

3-D analysis on influences of ground compaction with injection of liquefied sand on circumferential structure

河村精一¹，竹内秀克²，野田利弘³，浅岡 顕⁴

- 1 中部電力(株)・土木建築部火力土建グループ・Koumura.Seiichi@chuden.co.jp
- 2 (株)不動テトラ・中部支店研究室
- 3 名古屋大学・大学院工学研究科・社会基盤工学専攻
- 4 (財)地震予知総合研究振興会

概 要

「砂圧入式静的締固め工法」は、地盤中に流動化砂を圧入・押し広げることにより、周辺地盤に強制的にせん断を与え、締固め効果を期待する工法である。工法の性格上、地盤に変位や応力を与えることに伴い、近接の既設構造物に影響を及ぼすことが想定される。この影響の程度を予測するためには、土要素の圧縮だけでなくダイレイタンスに起因するせん断挙動もより精度よく評価する必要がある。そこで本研究では、自然粘土～中間土～砂を一貫して説明することが可能な弾塑性構成式 (SYS カムクレイモデル) を搭載した水～土連成有限変形地盤解析コード **GEOASIA** を用い、3次元条件で砂杭の造成過程のモデル化し解析を実施した。結果、砂圧入式静的締固め施工時の、周辺砂地盤の地表面および地中発生変位の距離に伴う減衰 (距離減衰) や、近接構造物に与える地盤反力 (側圧) 分布の圧入 (砂杭打設) 位置からの距離に応じた特性等を把握できることがわかった。

キーワード：3次元解析，締固め砂杭，変形，側圧

1. はじめに

「砂圧入式静的締固め工法」は、地盤中に流動化砂を圧入・押し広げにより周辺地盤に強制的にせん断を与え、周辺地盤の締固め効果を期待する工法である¹⁾。工法の性格上、地盤に変位や応力を与えることに伴い、近接の既設構造物に影響を及ぼすことが予測される。この影響の程度を把握するためには、つまり砂圧入による締固め効果と圧入部からの距離に伴う変位の減衰現象を評価するためには、土要素を弾性体として仮定するのではなく、土要素の圧縮だけでなくダイレイタンスに起因するせん断挙動も、より精度よく表現できる弾塑性体として評価するのが再現性は高い。また、本工法による地盤変位は土質材料や土質状態、すなわち土質特性 (粒度組成や N 値など) の影響を強く受けることが予想されるため、この数値解析による評価・検討にあたっては、広範な土質に対応可能な解析コードを使用することが望ましい。また、砂杭の造成過程から構造物に対する変位・応力の影響を考慮するためには、3次元条件で検討することが必要となってくる。

そこで本検討では、砂圧入式静的締固めによる周辺地盤

への影響を調べるために、自然粘土～中間土～砂を一貫して説明することが可能な弾塑性構成式 (SYS カムクレイモデル²⁾³⁾ を搭載した水～土連成有限変形地盤解析コード **GEOASIA**⁴⁾⁵⁾ を用い、3次元条件で解析を実施した。

具体的には、典型的な砂地盤として既往の研究を参考にしつつ、典型的な砂の材料定数を用いて、3次元解析により、砂圧入式静的締固め施工時の周辺地盤に与える変位の影響を調べた。続いて近接構造物に与える影響を調べるため、圧入 (砂杭打設) 位置からの距離に応じた地盤反力 (側圧) 分布を調べた。

2. 地盤条件

2.1 地盤の材料定数・初期状態

本検討では、典型的なゆるい砂地盤として、現場で採取された砂の各室内試験から得られた材料定数を用いた⁶⁾⁷⁾。表 1 は材料定数および地盤の初期状態について一覧を示す。初期状態は間隙比 e が全深度で 0.7 となる地盤を基本ケースとした。また、地盤内の初期土性分布として、比体積、構造の程度 $1/R^*$ および側圧係数 (すなわち応力比) が

表 1 地盤の材料定数

砂質土層		
＜弾塑性パラメータ＞		
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.045	
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.012	
限界状態定数 M	1.30	
正規圧密線の切片 N	1.685	
($p^*=98\text{kPa}$ での練返し土の正規圧密線上の比体積)		
ポアソン比 ν	0.3	
透水係数 k (cm/sec)	3.0×10^{-2}	
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65	
＜発展則パラメータ＞		
構造低位化指数 a, b, c	0.73, 1.0, 1.0	
塑性せん断 c_s	1.0	
正規圧密土化指数 m	0.6	
回転硬化指数 b_r	0.5	
回転硬化限界定数 m_b	0.50	
＜初期値＞		
	(中密)	(ゆるい)
間隙比 e	0.70	0.80
構造の程度 $1/R^*$	7.0	25.0
過圧密比 $1/R_0$	5.6~423	1.1~100
異方性の程度 K_β	0.80	0.80
応力比 K_0	0.80	0.80

深さ方向に一様と仮定し、重力を考慮して土被り圧に応じた過圧密比 OCR (=1/R) を分布させた⁸⁾。なお、「構造が発達した状態」とは「鋭敏な状態」を指し、SYS カムクレイモデルでは、その程度は正規圧密状態における正規圧密線の外側への「嵩張りの程度」として定量化され、構造が高位なほど 1/R* が大きい値で与えられる。

2.2 SYS カムクレイモデルによる再現結果

図 1 は非排水単調せん断試験に対する SYS カムクレイモデルの再現結果で、表 1 の砂層の材料定数(初期間隙比 $e=0.7$)を用いて計算している。初期状態は等方状態とし、平均有効応力 p' を 80kPa とした場合の計算結果を示している。なお、ここではせん断開始前の構造の程度 R^* および間隙比 e を表 1 の値として同一に設定し、過圧密比を p' に応じて与えることでその他の初期値を決定している。左上図は軸差応力(せん断応力) q ~ 平均有効応力 p' 関係(有効応力パス)、中上図は q ~ 軸ひずみ ϵ_s 関係、左下図は比体積 v (=1+間隙比 e) ~ p' 関係、中下図は過剰間隙水圧 $u \sim \epsilon_s$ 、右上図は $\epsilon_s \sim$ 構造の程度 R^* 関係および右下図は $\epsilon_s \sim$ 過圧密比の逆数 R 関係を示す。なお、平均有効応力 p' とせん断応力 q は、Cauchy 有効応力テンソル(引張を正) T' 、偏差応力テンソル S 、等方テンソル I を用いて $p' = -\text{tr}T'/3$ 、 $q = \sqrt{3/2} S \cdot S$ で定義される。

有効応力パスを見ると、間隙比 $e=0.7$ は、せん断開始から限界状態線 ($q=Mp'$) に達した後、若干軟化しその後硬化する挙動を示す。これより、若干密(中密)な状態であると言える。

併せて、比較のために間隙比 $e=0.8$ の初期状態も表 1 に示す。SYS カムクレイモデルの再現結果に関する図は省略するが、単調せん断により有効応力がほぼゼロに到達する静的液状化を呈するようなゆるい状態である。

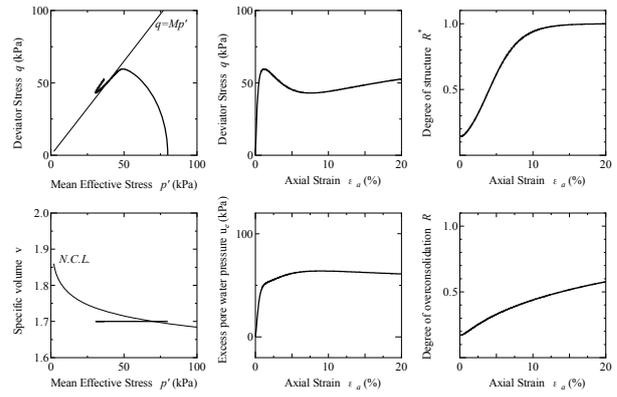


図 1 構成式による非排水単調せん断試験の再現結果

3. 3次元解析による周辺変位

3.1 計算条件

はじめに、砂圧入式静的締固め砂杭の施工(拡張)過程をシミュレートするためのモデル化(理想化/仮定)について説明する。

野田ら⁶⁾や Nakano et al.⁹⁾は、サンドコンパクションバイル工法や静的締固め砂杭工法の締固め効果の確認を目的に、2次元軸対称モデルを用いて解析を実施している。2次元軸対称モデルでは、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、円筒形状地盤(土槽)の中央部に砂杭を1本打設した場合をモデル化している。本研究では、締固め効果の確認も行うが、併せて周囲に与える影響についての評価を主目的とする。そのため、3次元によるモデル化が必要となる。

図 2 は本研究で用いた解析対象とする領域の模式図を示す。ここでは砂杭を1列同時施工した場合を想定し、その1本の1/4断面を3次元にてモデル化した。図 3 は解析に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を示す。なお、以後図 3 中の x 方向のメッシュ長さを壁幅、y 方向の長さを壁厚と記す。壁厚は、本ケースでは砂杭口 2.0m ピッチ(改良率 $as=9.6\%$)相当の 1m とした。水理境界は砂杭拡張部を排水条件、地表面は大気圧とし、その他は非排水境界としている。

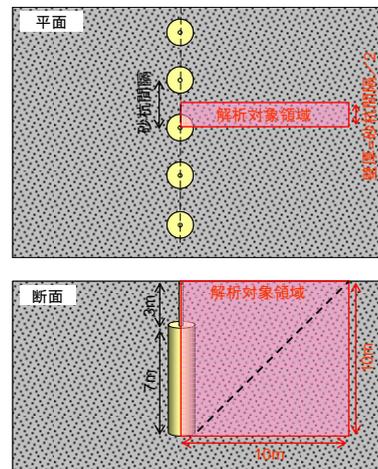


図2 解析対象領域模式図

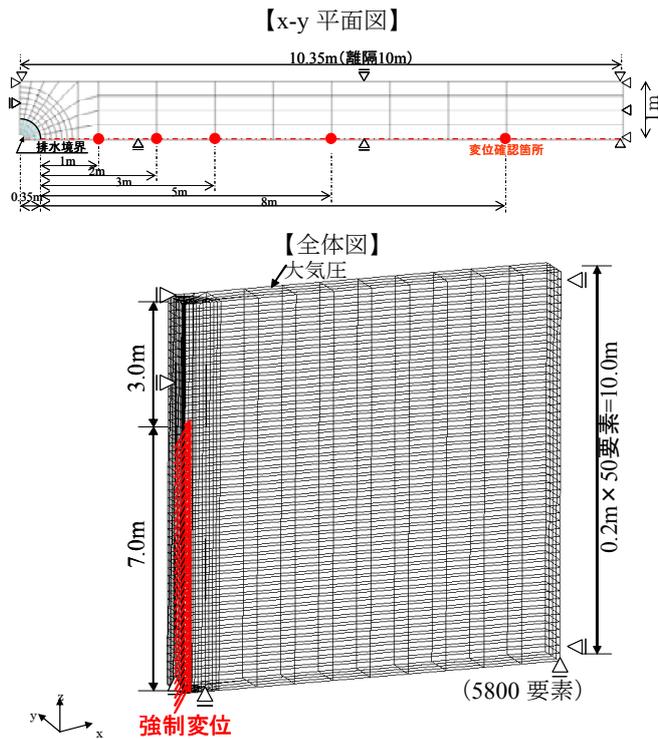


図3 有限要素メッシュおよび境界条件

砂杭拡径のモデル化に関しては、野田ら⁶⁾に倣う。つまり、砂杭部を排水境界として考慮し、拡径を地盤深部から順次与える強制水平変位で表現する(図4)。ただし、通常の静的締め固め砂杭工法はケーシング径がφ40cmであることに對し、砂圧入式静的締め固め工法はロッド径がφ15cmである。ここではφ15cm(半径7.5cm)から砂杭φ70cm(半径35cm)を造成する過程をシミュレーションした。実施工のスピードを参考に変位速度5.5cm/minで半径7.5cmから35cmまでの27.5cm拡径する。GL-10mからGL-3mまでの長さ7mの拡径シミュレーションを実施した。砂杭1本を造成するのに必要な時間は40分になる。

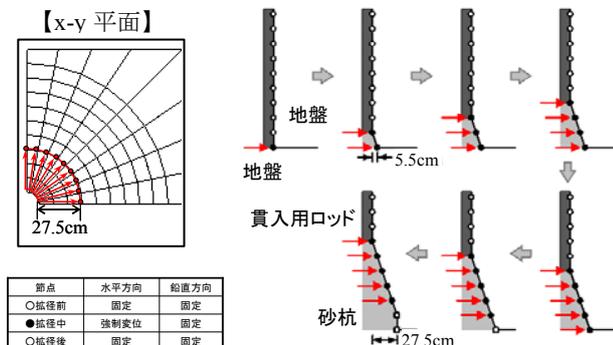
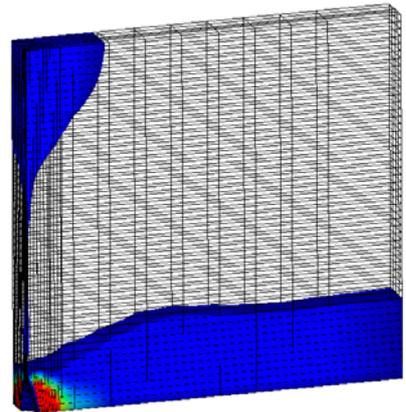


図4 強制変位による砂杭拡径のモデル化手法

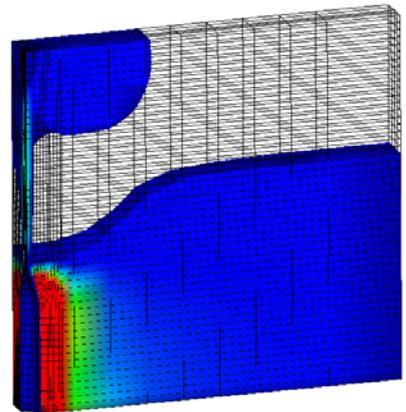
なお、本解析に先立ち、2次元軸対称モデルと3次元解析による等価な境界条件(1/4円筒モデル)で両解析を実施した。結果はよい一致を示し、3次元解析の妥当性を確認した。

3.2 解析結果

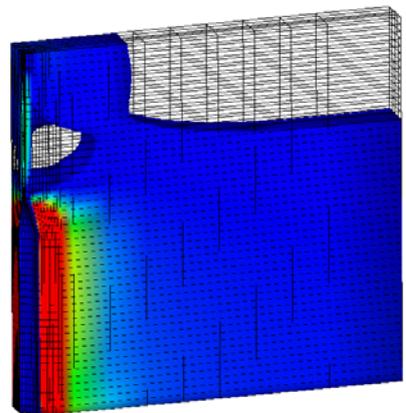
(a) 拡径初期
GL-10mの節点に27.5cm強制変位を与えた時点



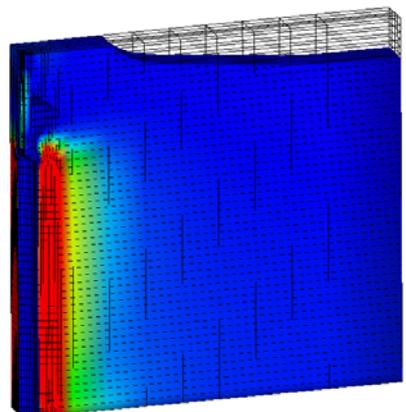
(b) 拡径中
GL-7mの節点に27.5cm強制変位を与えた時点



(c) 拡径中
GL-5mの節点に27.5cm強制変位を与えた時点



(d) 拡径終了時



-0.01 -0.07 (圧縮)
図5 間隙比変化分布(初期間隙比e=0.7)

図5は間隙比変化分布の推移を示す。間隙比が0.01以上圧縮した場合に色示している。拡張部周辺が大きく圧縮して締め固まっていることがわかる。また10m離隔部も若干ながら圧縮しておりせん断による影響が現れている。このように砂杭施工により周辺地盤が締め固め効果により体積圧縮する様子を表現できる。これは、周辺砂要素をSYSカムクレイモデルによる2相系弾塑性体で表現しているためである。弾性解析では表現できない。

図6は図3に赤破線で示した部分の砂杭施工終了時における地盤地表面の鉛直変位～砂杭からの離隔距離の関係を示す。地表面の鉛直変位量は、砂杭近傍は若干地表面が下がり、離隔1m程度までは変位が上方に発生する。離隔1m以上は砂杭からの離隔距離が大きくなるにつれて変位が減衰している。一方、図7は地中(GL-3m)の同様な図を示す。ここでは砂杭近傍ほど大きな値を示している。砂杭位置近傍では鉛直変位量7cmが発生し、距離に応じて減衰する。GL-3mの鉛直変位に対し、地表面鉛直変位は減少していることがわかる。今回、地表面まで間隙比一様な地盤を想定しており、土被り部(GL-0m～3m)も弾塑性体の飽和土としていることから、変位を体積圧縮により吸収していることによる。これも周辺砂要素をSYSカムクレイモデルによる2相系弾塑性体としたために表現できる事象である。土被り部の状態によって地表面変位も影響されることが推測される。

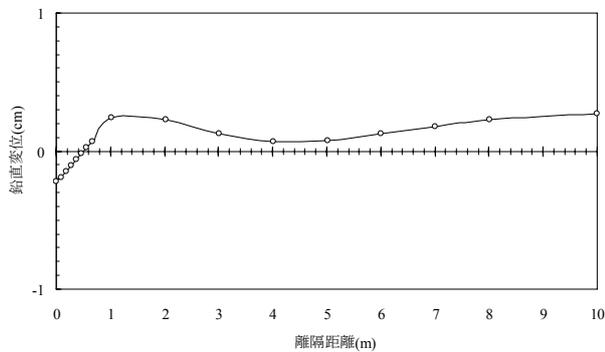


図6 地表面鉛直変位分布 (初期間隙比 $e=0.7$)

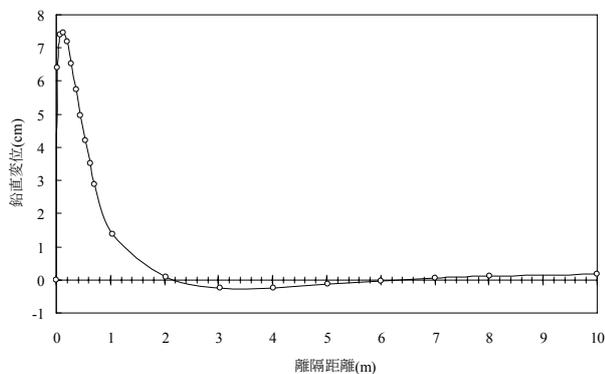


図7 地中(GL-3m)鉛直変位分布 (初期間隙比 $e=0.7$)

さらに比較のため、間隙比 $e=0.8$ とゆるく設定した地盤

に対し、同様のシミュレーションをした場合の結果を示す。図8は地表面の鉛直変位～砂杭からの離隔距離の関係、図9は地中(GL-3m)の鉛直変位～砂杭からの離隔距離の関係を示す。これより、地中の発生変位も間隙比 $e=0.7$ の結果に対し小さくなっており、さらに地表面は沈下していることがみてとれる。このように、周辺地盤の変位は地盤の状態に大きく影響されることがわかる。

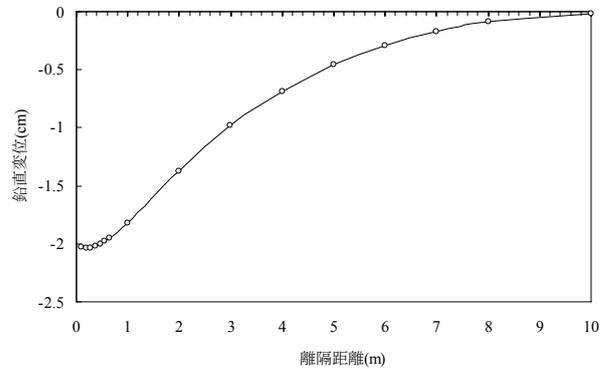


図8 地表面鉛直変位分布 (初期間隙比 $e=0.8$)

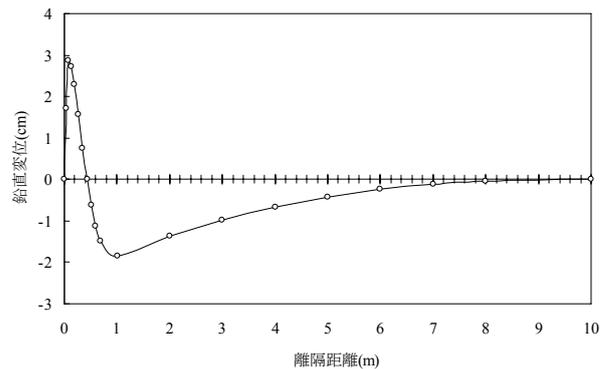


図9 地中(GL-3m)鉛直変位分布 (初期間隙比 $e=0.8$)

次に、図10は図3に示す地点の砂杭施工終了時点における側方変位の地中分布を示す(初期間隙比 $e=0.7$)。砂杭直近では拡張量(27.5cm)発生するが、砂杭からの離隔距離が大きくなるにつれて側方変位の値は減衰することがわかる。なお、この側方変位に関しても鉛直変位同様、地盤の条件や改良仕様(改良率、杭長)、施工過程により影響される。

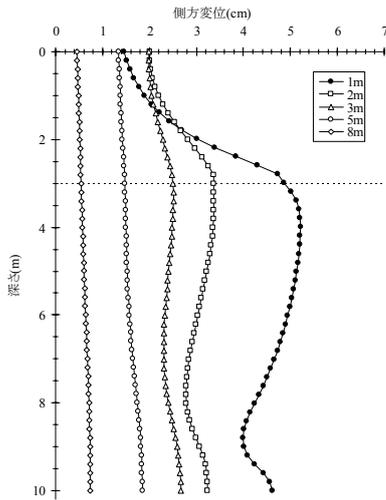


図 10 地中(GL-3m)側方変位分布 (初期間隙比 $e=0.7$)

4. 砂圧入式静的締固めに伴う近接構造物に発生する側圧

本章では、砂圧入式静的締固め工が周辺構造物に与える影響として作用する側圧を調べる。この際、本来であれば、ターゲットとなる構造物を含めてのモデル化が必要となるが、本検討では節点の境界条件を固定にすることで構造物を模擬する。また、変位と同様、砂圧入式静的締固め工施工位置からの離隔距離との関係を調べる。

4.1 解析条件

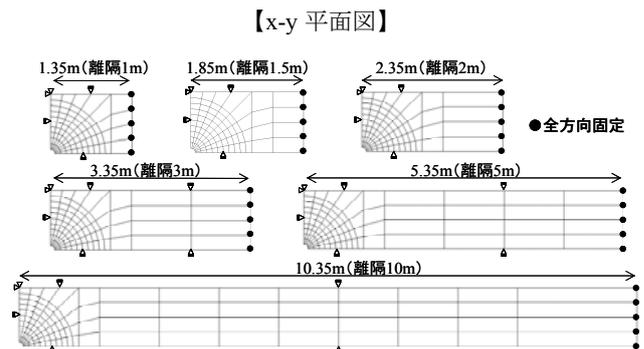
施工位置（圧入／拡径位置）からの距離減衰を把握するために、地盤反力計測位置（離隔距離）をパラメータとした解析を実施した。図 11 は解析に用いた有限要素メッシュ図を示す。砂杭位置より 1m, 1.5m, 2m, 3m, 5m, 10m の離隔距離を有する 6 ケースの有限要素メッシュを用意し、砂杭部から x 方向に離れた節点（図 11 中全体図の赤色部の面に存在する節点）について全方向固定境界（変位を拘束）とした。その他の解析条件は 3 章と同様である。砂杭拡径の深度も同じく GL-10m より GL-3m までの $L=7m$ の施工過程をシミュレートして地盤反力（側圧）を求めた。

4.2 解析結果

図 12 には、各ケースの構造物を想定した離隔部（全方向固定境界部分）における側圧分布を示す。なお、節点の反力は同時点同深度においても平面的な位置の違いにより値は異なる。したがって、ここでは同深度にある節点の x 方向の等価節点力を合計し、それを、当該節点を含む有限要素全面積で除すことで平均化し側圧を求めた。また同図は、施工深度 1m 毎に、その施工深度における離隔部の側圧をプロットしたものである。図 13 は、拡径部の拡径反力を示す。これは、所定の強制変位を与える際に必要となる力である。これも、拡径部にある節点の水平方向の等価節点力の合力を、側圧同様、面積で平均化して求めた。

また同図も施工深度 1m 毎にその施工部分での拡径反力をプロットしたものである。図 12、図 13 とも砂杭位置から構造物想定位置までの離隔距離ごとに整理している。図 12 から、変位と同様、離隔距離が大きくなるにつれ側圧は減少し、特に離隔位置 1m から 1.5m との間の低減量が大きいことがわかる。ただし、図 11 のように、有限要素メッシュが解析ケース毎に異なるため、拡径反力自体に差異があることに注意する。本地盤（初期間隙比 $e=0.7$ ）の場合、離隔部の地盤反力（側圧）は、拡径反力の概ね 10% 程度となっていることがわかる。

また実務で想定して、この解析結果を見た場合、特に離隔距離 1m の拡径反力は施工時に必要な油圧ポンプの能力値（6～7MPa 程度）に近い値を示している。これは、近接構造物離隔部の境界条件を固定にしているために大きな反力を必要としたことも一因に挙げられる。つまり、近接構造物を考慮した解析や設計を行う際は、構造物と地盤の境界のモデル化が重要なことがわかる。併せて、砂圧入式静的締固め施工により、構造物に及ぼす側圧の影響も地盤の種類・状態や改良仕様（改良率・杭長）および砂杭の施工順序など、周囲や施工の状況に大きく作用されることが想定される。



【全体図（離隔 1m の場合）】

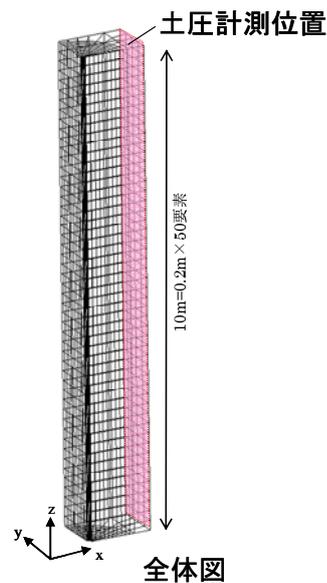


図 11 有限要素メッシュ

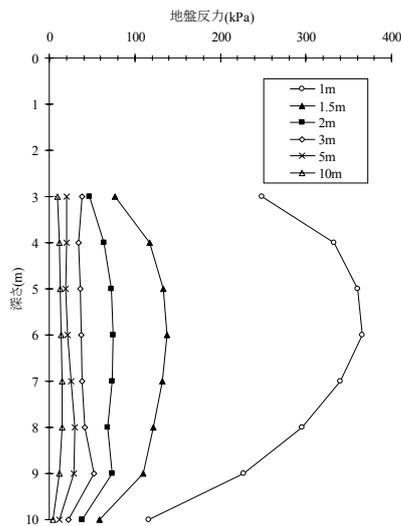


図 12 構造物想定位置の地盤反力（側圧）分布

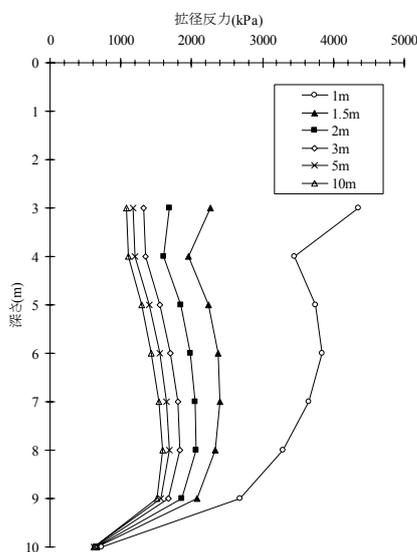


図 13 砂杭拡張位置の拡張反力分布

5. 全体のまとめ

砂圧入式静的締固めによる周辺地盤および近接構造物に及ぼす影響を、水～土連成有限変形地盤解析コード **GEOASIA** を用いて、3次元条件で検討した。なお、解析で想定した地盤の土質材料は典型的な砂で、初期状態は中密程度を想定した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 地盤解析コード **GEOASIA** を用いた3次元解析による砂圧入式静的締固め施工の周辺影響予測の手法を開発した。
- 2) 周辺地盤の変位に及ぼす影響については、本手法により地表面および地中発生変位の距離に伴う減

衰（距離減衰）特性を把握した。中密な地盤では、地表面および地中を押し広げるモードで変位が発生し、距離減衰特性を有する。

- 3) 近接構造物が地盤から受ける側圧に及ぼす影響については、離隔距離が増えると側圧は低減され、中密な地盤では、概ね拡張反力の10%程度の側圧まで低減する。
- 4) 近接構造物を考慮した解析（および設計）を実施する際には、構造物と地盤の境界のモデル化が重要であると考えられる。

「締固め」を原理とした地盤改良工法の周辺地盤・構造物に及ぼす影響については、事前に定量的に予測することが非常に困難であり、これまでは実績や逆解析な手法に頼る場合がほとんどである。その意味で本手法による検討は、施工過程を忠実に再現し、周辺影響を把握でき有用であると考えられる。ただし、砂圧入式静的締固めによる周辺地盤および近接構造物への影響の程度は、地盤の初期状態だけでなく、対象とする土質材料や周辺状況、さらに改良仕様や施工順序にも大きく左右されることが予想される。実績との対比検証や、影響因子との定量的な関連付けにより、本手法のさらなる高度化を図りたい。

参考文献

- 1) 今井優輝, 大林 淳, 福島信吾, 伊藤竹史: 砂圧入式静的締固め工法(SAVE-SP 工法)の改良効果と適用事例, 第54回地盤工学シンポジウム論文集, pp. 579-584, 2009.
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, 40(2), pp.99-110, 2000.
- 3) 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*, 42(5), pp.47-57, 2002.
- 4) 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.
- 5) 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
- 6) 野田利弘, 中野正樹, 水野和憲, 竹内秀克: 砂杭造成によるゆるい砂質地盤の締固め効果に関する水～土連成解析, 地盤工学論文報告集(*Soils and Foundations*) 41(4), pp.113-123, 2001.
- 7) 山田英司, 浅岡顕, 野田利弘, 森川修行: 砂杭造成による砂質地盤の締固めの水～土連成解析, 第37回地盤工学研究発表会, pp. 513-514, 2002.
- 8) 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*, 49(5), pp.739-756, 2009.
- 9) 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.