

密度増大工法における砂杭造成時の周辺地盤に対する変形解析

大成建設(株) 土木技術研究所 正会員 ○宇野 浩樹
 京都大学大学院 フェロー 岡 二三生

1. はじめに 密度増大工法の一つである、砂杭圧入による締固め工法は、ケーシングパイプを鉛直方向に押し込み、残置した砂柱を上方から押しながら水平に拡張させて砂杭を造成し、周辺地盤を締め固める。本研究では、当該工法に対し、ケーシングパイプの鉛直押し込みと砂柱の水平押し広げの効果によって締固めがなされると仮定して、砂の弾塑性構成式を用いた水～土連成解析¹⁾により検討している。本論文では、1本の砂杭が造成される際の解析領域の影響について検討した。ここでは、実施工の荷重条件を単純化し、前述の押し込みによる鉛直荷重と拡張による水平荷重を独立に作用させて、各荷重による塑性体積ひずみの挙動の違いに着目している。

2. 解析条件 図1に、解析領域として砂杭円周方向には9度、砂杭半径方向の解析領域 L がケーシングパイプ中心から1mとした場合の3次元FEMモデルを示す。高さは2m (GL-7.5m～-5.5m)である。地盤の構成式はOkamoto et al.(1999)による砂の弾塑性構成式²⁾を用い、モデルパラメータは、豊浦砂 $D_r=60\%$ の中空ねじり単調載荷試験が概ね再現されるように設定した。変位境界条件は、底面で鉛直固定、水平自由とする。側面B～Dの鉛直は自由とし、水平については側面Bでx方向、y方向ともに固定とする。側面Cと側面Dにおいては、3次元モデルにおいて軸対称条件を表すように多点拘束する。排水境界条件はモデル上面を排水とし、他は非排水とする。

ケーシングパイプに相当する側面Aの境界条件としては、図2に示すように、ケーシングパイプの押し込みによる鉛直荷重と拡張による水平荷重の2通りとする。前者は、ケーシングパイプの打戻しと引抜きを鉛直方向の節点荷重による荷重と除荷で近似して、荷重範囲をモデル底部から上部に移動させることで表現し、後者は、モデル底面から順次与える砂杭半径方向への強制変位で表現する($dr/dt=0.3\text{cm/sec}$ で15cm拡張)³⁾。

初期応力は、GL-5.5m以浅の土層も考慮した自重分で σ_{z0} を与え、 σ_{x0} と σ_{y0} は $\sigma_{x0}=\sigma_{y0}=K_0\sigma_{z0}$ ($K_0=0.5$)とする。

3. 解析ケース 解析ケースは、砂杭半径方向の解析領域 L と前述の荷重方法を変化させた8ケースとする。表1に解析ケースを示す。荷重方法のうち、ケーシングパイプの押し込みによる鉛直荷重については、実施工での推定値(200～450kN)に基づき、円周方向の解析領域を考慮して荷重範囲の節点荷重の合計が $200\text{kN} \times 9/360=5\text{kN}$ となるように荷重範囲内の節点数で等分割して与える。

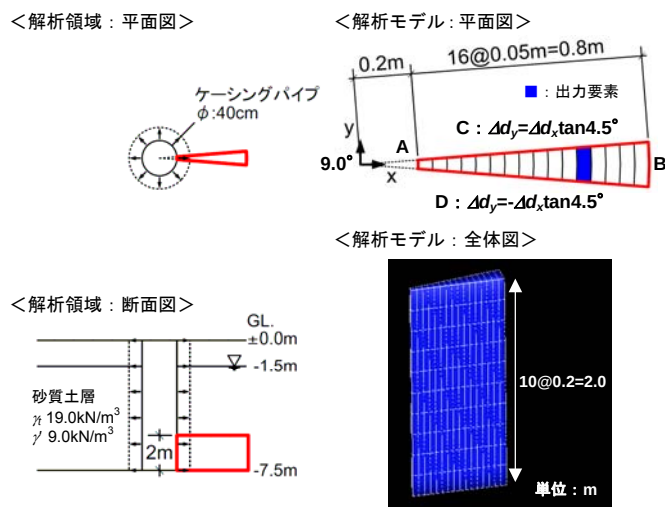


図1 3次元FEMモデル (L=1mの場合)

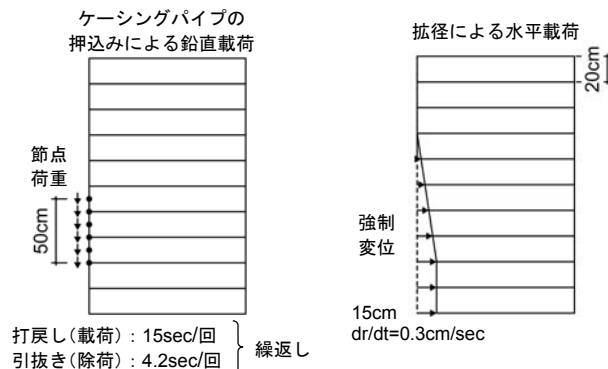


図2 ケーシングパイプ側面からの荷重方法

表1 解析ケース

ケース名	解析領域 L	荷重方法
L01-V	1m	鉛直押し込み 5kN
L01-H		水平拡張 15cm
L02-V	2m	鉛直押し込み 5kN
L02-H		水平拡張 15cm
L05-V	5m	鉛直押し込み 5kN
L05-H		水平拡張 15cm
L10-V	10m	鉛直押し込み 5kN
L10-H		水平拡張 15cm

キーワード 砂、締固め、有限要素法、弾塑性、構成式、軸対称

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室 TEL 045-814-7236

4. 解析結果 解析領域 L が $L=1\text{m}$ と 10m のケースで得られた有効応力経路, 塑性せん断ひずみの累積値 γ^P ($=\int (de_{ij}^P de_{ij}^P)^{1/2}$) および塑性体積ひずみ ε_v^P の経時変化を整理し, 図3に示す。出力要素は, 初期の中心座標が底面からの高さ 0.9m , ケーシングパイプ中心からの距離 $r=0.775\text{m}$ の要素である。鉛直载荷のケースでは, 打戻しと引抜きに応じて载荷と除荷が繰り返され, 偏差応力が複数回振動する。解析領域に着目すると, 境界 B までの距離が遠くなるほど変形の拘束が緩和されてせん断変形しやすくなるため, γ^P が大きくなるとともに, 繰返しせん断に伴って蓄積する ε_v^P も圧縮側で大きくなっている。水平载荷のケースでは, 拡張範囲が当該要素の下部から上部へと移動する際に, それまで変相線を超える程度まで単調増加していた偏差応力が除荷され, ダイレイタンスが正から負に転じる。解析領域については, L が大きいほど境界 B の影響が小さくなり, 単調増加で生じる偏差応力が小さくなるため, 载荷終了時の ε_v^P は膨張側であるものの, 絶対量は小さくなる。

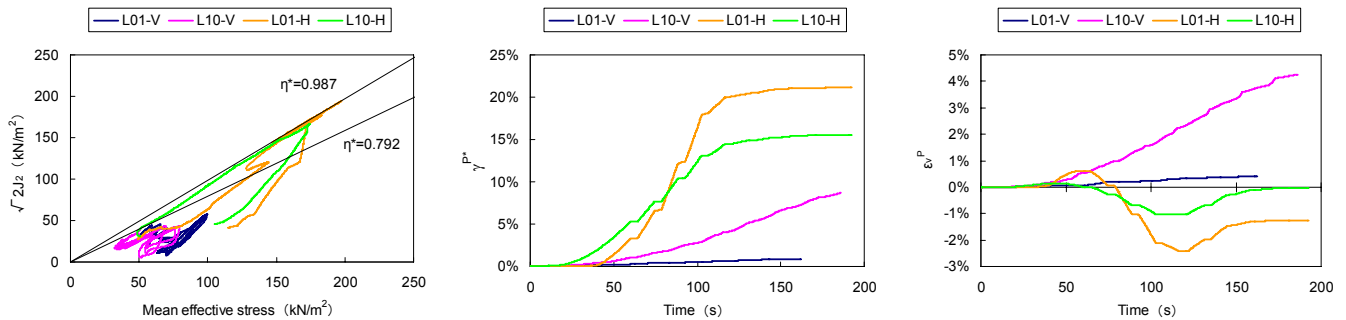


図3 有効応力経路, 塑性せん断ひずみの累積値 γ^P および塑性体積ひずみ ε_v^P の経時変化

図4に, 底面からの高さ 0.9m で得られた ε_v^P の同時刻分布をケーシングパイプ中心からの距離 r で示す。同図には, 杭間隔 2m で隣り合う砂杭が同時に造成されると仮定したケース³⁾ (凡例: Case0) についても示している。このケースは, 砂杭が平面的に順次造成されていく施工条件を簡略化したものである。まず, 砂杭1本造成について考察すると, 鉛直载荷のケースでは, どのケースも $r=0.4\text{m}$ 程度で圧縮側のピークとなり, r の増加に伴って ε_v^P が減少する。ただし, L が大きいケースほど ε_v^P の減少は緩やかであり, $L=5\text{m}$ および 10m のケースでは $r=1\text{m}$ 程度まで圧縮される範囲が拡大している。一方, 水平载荷のケースでは, $L=2\text{m}$ 以上のケースではほぼ同じ傾向を示しており, $r=0.8\text{m}$ 付近で膨張側から圧縮側に変化しているが, $L=1\text{m}$ のケースでは膨張側に留まるのみである。また, ここでは示していないが, 他の深度でも同様の結果となっていることから, 今回の解析モデルの高さや荷重レベル等の解析条件においては, 鉛直载荷, 水平载荷ともに解析領域としては, $L=5\sim 10\text{m}$ によって砂杭1本造成の場合の半無限領域が概ね表現されていると推察される。次に, 隣り合う砂杭の同時造成のケースについては, 砂杭1本造成における $L=1\text{m}$ あるいは 2m のケースと定量的に近い結果となっている。これより, 隣り合う砂杭の同時造成と砂杭1本造成とは, ほぼ同様の応力状態とひずみ量が得られることが確認された。

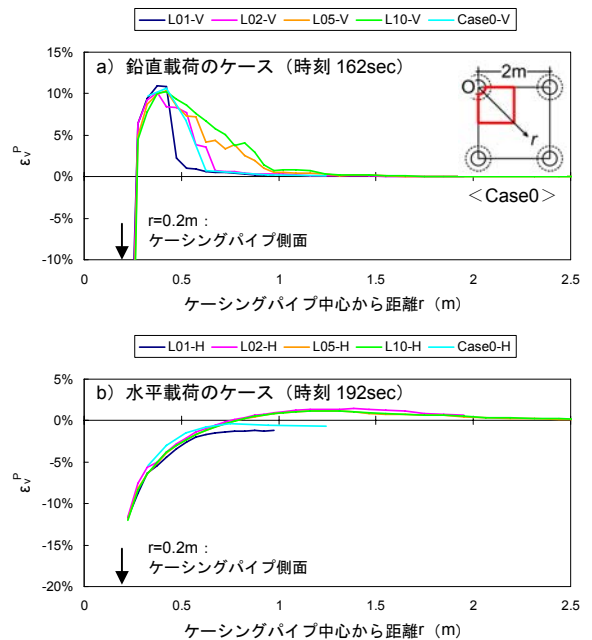


図4 底面から 0.9m で得られた ε_v^P の同時刻分布

5. まとめ 擬似的な軸対称条件の下, 砂杭1本造成の締固め挙動に及ぼす解析領域の影響について検討した。今後は, 鉛直方向に対する解析領域の影響を調べるとともに, 水平拡張においても打戻しと引抜きによる繰返しを考慮して, 鉛直および水平両方向の荷重条件の再現を行い, より実施工に近い条件で締固め効果を明らかにする。

参考文献 1) Oka, F.: Proceedings of 16th ICSMGE, Vol.1, pp.95-122, 2005. 2) Oka, F. et al.: Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999. 3) 宇野ら: 砂杭圧入による砂質地盤の締固めに関する3次元FEM解析, 第44回地盤工学研究発表会, 2009. (投稿中)