

液状化に伴う残留変形評価法による締固め改良効果の評価事例

株式会社不動テトラ	正会員	○ 原田 健二
東京電機大学	正会員	石川 敬祐
東京電機大学	フェロー会員	安田 進
東京電機大学大学院	学生会員	永井 慎太郎

1. 目的

兵庫県南部地震以降、耐震設計に2段階の設計外力を考慮する考えが導入された。これを反映して、液状化対策の設計にあたり、多くの技術指針類でレベル2地震動を考慮するよう改められ、構造物の許容変形量を精度よく算定することが求められている。サンドコンパクション(SCP)工法は、我が国の代表的な液状化対策工法であり、過去の地震被害調査よりその有効性が数多く実証されている¹⁾。SCP工法の最近の話題として、締固め改良地盤の液状化強度の再評価がある。これは、レベル2地震動を想定した設計を考える場合に静止土圧係数 K_0 の増加や杭間より剛性の大きい砂杭の効果を定量的に考慮するものである。本研究では、これらの効果を考慮したSCP改良地盤に対して、液状化に伴う残留変形評価法を用いて変形量照査を行い、 K_0 増加やSCP杭を考慮した複合地盤の剛性効果の有効性を1978年の宮城県沖地震の石油タンク事例をもとに検証した。

2. 検証に用いた事例

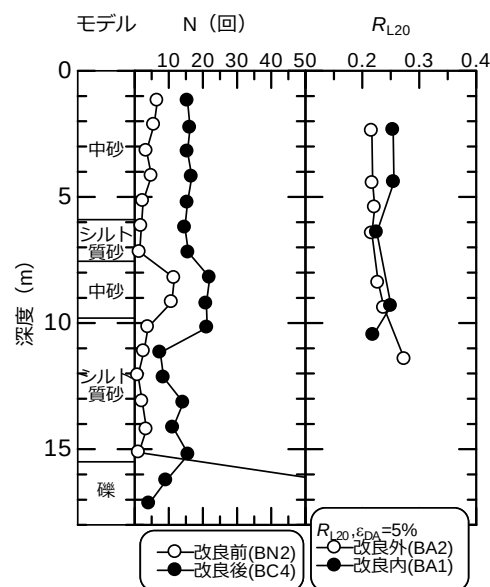
検証事例は、1978年宮城県沖地震の際の石巻港の石油タンクである。石油タンクの液状化対策としてSCP工法が施されていた²⁾。タンクヤードの周辺では液状化に伴う噴砂や地表にクラック等の地盤変状が確認されている。地震前後の石油タンク(6,000kl.)の沈下量として、地震前年の年間沈下量は2~10mm(平均6mm)であり、地震を挟んだ1977年から1978年(地震の12日後)の沈下量は5~9mm(平均7mm)と石油タンクの本体の損傷に繋がるような変状は生じていないことが確認されている。

3. 残留変形評価法による事例検証

3. 1 解析条件

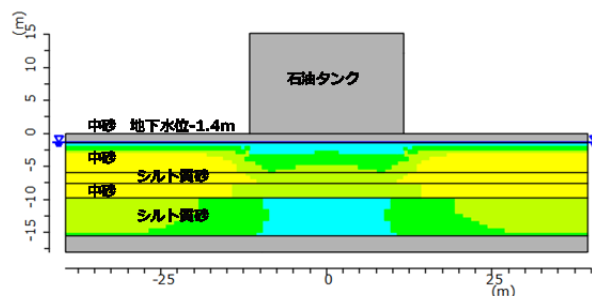
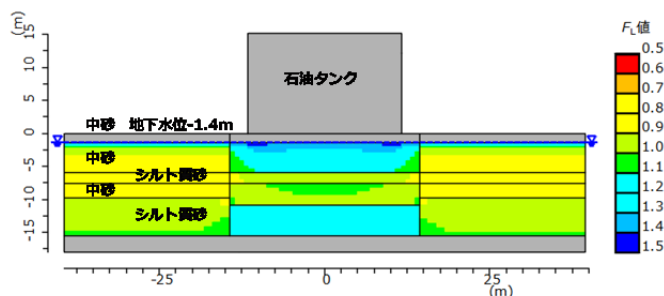
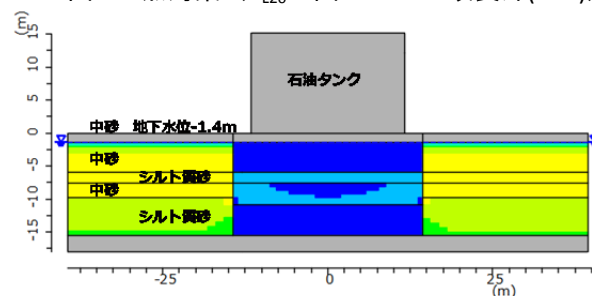
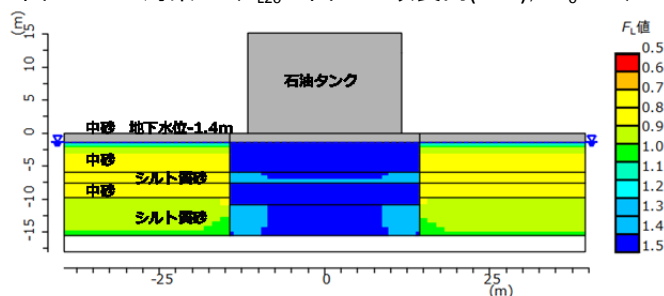
地盤モデルは、石原らによるSCP改良前および改良後の N 値や液状化試験結果等の詳細な地盤調査結果²⁾をもとに設定した。地層区分は、SCP工法による改良前の N 値(BN2)や土質名を参考にして、深度15.5mの礫層までの砂質土層を図1のように4層に分割した。地下水位は、対策後の調査で確認された深度1.4mとした。単位体積重量は、一般的な値としている。各層のせん断剛性は、各層ごとに N 値の平均値を求めヤング係数 E を $2,800N(\text{kN/m}^2)$ により求め、ポアソン比を $1/3$ として求めている。せん断抵抗角 ϕ は道路橋示方書の推定式に準じ、粘着力は見込んでいない。

解析方法は、液状化に伴う残留変形評価法のALID³⁾である。液状化に対する安全率 F_L は、道路橋示方書に準じた簡易法で求めている。この際の地震外力は、石原らの検討条件と同様に地表面最大加速度を $181.5(\text{cm/s}^2)$ とした。また、各層の液状化強度比は、図1の液状化試験結果または道路橋示方書の推定式に準じて各層の平均 N 値より推定した全4種類の液状化強度の考えで検討している。石油タンクは、幅23.24mで高さ15.22mとし、タンク荷重(死荷重と積載荷重の和)は $63(\text{kN/m}^2)$ とした。なお、タンクの変形はないものと仮定し、解析領域はタンク敷き幅の5倍とした。

図1 N 値および R_{L20} の深度分布

キーワード 締固め, 残留変形, 再現解析

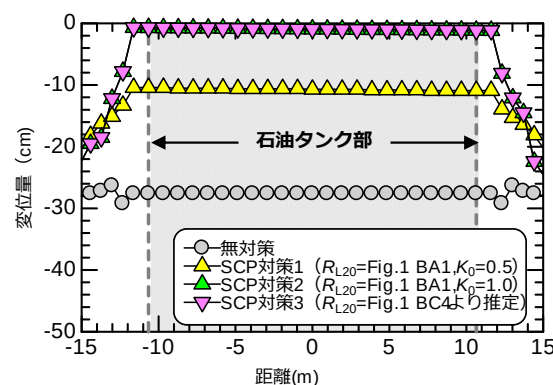
連絡先 〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2 (株) 不動テトラ 地盤事業本部 TEL 03-5644-8534

図2 無対策 (R_{L20} : 図1のSCP改良外(BA2))図3 SCP対策1 (R_{L20} : 図1の改良内(BA1), $K_0=0.5$)図4 SCP対策2 (R_{L20} : 図1の改良内(BA1), $K_0=1.0$)図5 SCP対策3 (R_{L20} : 図1の改良後N値(BC4)から推定)

3. 2 解析結果

図2～図5に各条件時の F_L コンターを示す。また、図6は、地表面の変位分布の集積図である。無対策時の F_L 分布は、タンク直下で0.9～1.2、周辺地盤で0.7～1.0と液状化が生じる結果となり、その際のタンクの沈下量は28cmとなり、地盤改良が行われていない場合には石油タンクの本体の損傷に繋がっていた可能性が考えられる。図3のSCP対策1は、タンク直下をSCP工法で対策した際の F_L 値の分布である。この際の R_{L20} は図1のBA1の試験値を用い、地盤剛性はBC4の改良後のN値より求めている。無対策に比べて液状化強度が増加したことによりタンク直下の F_L 分布は1.0以上の領域が増えているが、深度6～10mの区間で F_L が1.0を下回り液状化が生じる結果となり、タンクの沈下量は10cmとなっている。図4のSCP対策2は、SCP対策1の条件に対してSCP工法の締固め効果によって K_0 が0.5から1.0に増加したことを考慮した結果である。道路橋示方書に準じた液状化判定の場合に K_0 が1.0に増加すると動的せん断強度 R は、拘束条件の補正によって1.5倍大きくなる。その結果、タンク直下の F_L 分布は1.0を上回り、タンクの沈下量は0.9cmとなった。図5のSCP対策3は、詳細な液状化試験結果がない場合を想定し、BC4の改良後のN値を用いて道路橋仕様書の R の推定式に準じて設定し、SCP杭と杭間地盤を複合地盤と考えた場合⁴⁾の結果である。その結果、タンク直下の F_L 分布はSCP対策2の条件と同様に1.0を上回り、タンク沈下量は0.9cmとほぼ同じ値となった。以上の再現解析結果より、SCP対策2やSCP対策3での検討結果が実現象と整合し、これらの手法の有効性が確認された。

図6 地表の変位分布(タンク部拡大)



4. まとめ

SCP改良地盤に対して、液状化に伴う残留変形評価法を用いて変形量照査を行う際は、SCP工法の締固め特性である K_0 の増加効果やSCP杭も含めた複合地盤の考えを考慮することで締固め改良効果を適切に評価することができ、本手法の有効性が確認された。

参考文献 1) Harada et al.: Verification of effectiveness of liquefaction countermeasures during past large scale earthquakes in Japan, *Proc. of the New Zealand-Japan Workshop on Soil Liquefaction during Recent Large-Scale earthquakes*, pp.181-192, 2013. 2) Ishihara et al.: Liquefaction characteristics of sand deposits at an oil tank site during the 1978 Miyagiken-Oki earthquake, *S & F*, Vol.20, No.2, 1980. 3) 安田ら: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.71-89, 1999. 4) Harada et al.: Evaluation of improved ground by compaction method considering performance-based design, *2nd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, No.6.06, pp.731-740, 2012.