

名古屋工業大学 学生員 佐藤友美
 中央復建コンサルタンツ(株) 正会員 桑原直範
 名古屋工業大学 正会員 前田健一

1. はじめに

地震時に甚大な被害をもたらす地盤の液状化の対策が重要視されている。液状化対策の有益な工法に、サンドコンパクションパイル (Sand Compaction Pile; 以下 SCP と略す) 工法がある。これは液状化の可能性のある緩い地盤に締め固めた砂杭を打設し、地盤の密度を大きくすることで液状化強度を上げるものである。最近の事例解析や計測結果の報告から、現行の SCP 改良地盤の耐震性評価や設計法について以下のような問題が提起されている。

1) 改良後の地盤は原地盤部分と SCP 打設部分からなる不均質な複合地盤である(図-1 参照)。しかし、改良地盤の評価は改良前後の N 値による点的な施工状態の確認が主体であり、改良後の複合地盤全体の動的特性が評価されていない^{1), 2)}。また、地盤全体の液状化特性の把握による「耐震性能設計」³⁾の導入が必要である。

2) 現在、対策効果として密度増加が考慮されているが、SCP 打設に伴う周辺地盤の側方土圧の増加や応力緩和後の過圧密履歴など応力履歴による地震応答特性の改善および液状化強度の増加が対策効果に見込まれる^{2), 4)}。しかし、設計上はそれらの効果が考慮されておらず、現行では対策効果がかなり過小評価されている。

そこで、本論文では、側方土圧増加や過圧密履歴の影響を考慮した改良地盤全体の動的特性について、均質化を用いて把握し、地盤の液状化危険度を評価した。

2. 解析方法

図-1に示すように、改良地盤は SCP の打設に伴って、SCP 部分の周辺に密度増加だけでなく側方土圧の増加した領域が同心円に複合杭状に生じていると考えられる(図-1,2,3)。したがって、改良地盤は複合杭が原地盤に周期的に介入した三次元構造をもつ不均質地盤である。そこで、本研究では、改良地盤全体の動的特性と SCP 間の中心の部分的な動的特性を評価するために次のような手法によって応答解析した。

まず、改良地盤を適当な水平層に分割し、各層において SCP を中心とした複合杭と密度増加した原地盤部分の相互作用を取り入れた均質化法⁵⁾ (Multi-Inclusion Method)を用いて各層の平均剛性を求める。これにより

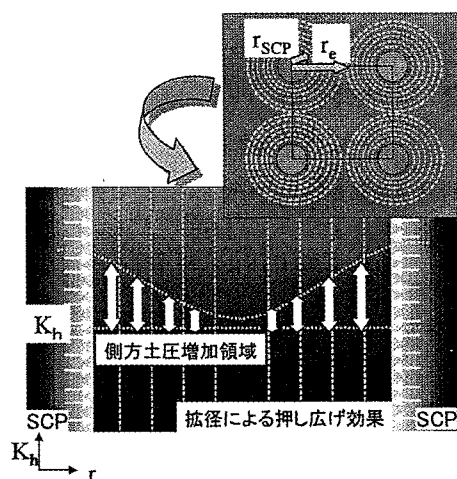


図-1 締固め杭と周辺地盤の改良効果

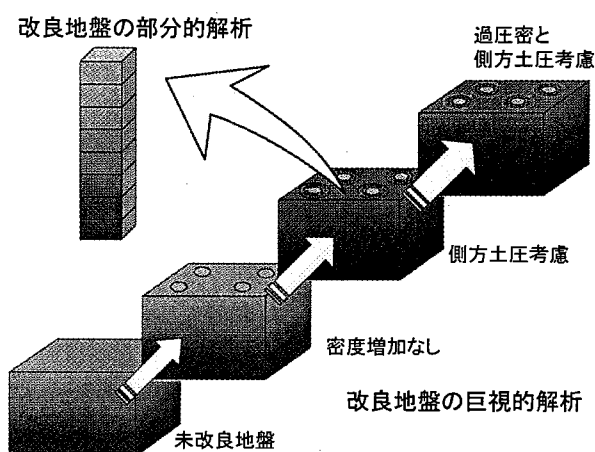


図-2 SCP 改良効果の発揮度と解析手法

Estimation of liquefaction damage of ground counter-measured with sand compaction pile by homogenization seismic response analysis: Yumi SATO(Nagoya Institute of Technology), Naonori KUWABARA(Chuo Fukken Consultants Co., Ltd.), and Kenichi Maeda(Nagoya Institute of Technology)

改良地盤を均質な水平層の多層地盤に置き換える。この水平多層地盤を離散化した集中質量系とし、剛性のひずみ依存性を考慮した非線形応答解析を行う。通常、SCP は四角形や三角形の空間的周期配置で打設されるため、改良地盤全体の平均剛性は SCP 配置形状や整列方向に依存し異方性を有する⁶⁾。また、地震力の方向もランダムである。しかし、本論文では、改良地盤全体の動的特性の把握と SCP 周辺の応力履歴が改良地盤の液化特性に及ぼす影響を調べることを主目的としているので、単純化のために、SCP 配置はランダム配置とし水平一次元振動のみについて検討した。

各層の均質化された平均単純せん断剛性 \bar{G} の算出方法を表-1 に示す。図-1 から図-3 に示すように SCP の中心からの距離を r とすると改良地盤は、SCP 部分 $\Omega_{(1)}$ ($r \leq r_{SCP}$; r_{SCP} : SCP 半径)、密度増加だけでなく SCP 周辺の側方土圧増加や過圧密など顕著な応力履歴の影響を考慮する領域 $\Omega_{(k)}$ ($k=2, 3, \dots, n$; $r_{SCP} \leq r \leq r_e$) と密度増加のみが考えられる領域 $\Omega_{(M)}$ ($r_e \leq r$) で構成されている。また、 $r_{SCP} \leq r \leq r_e$ では図-1 に示すように側方土圧が連続的に分布すると考えられるが図-3 のように離散化し考える。本論文では応力履歴を考慮する範囲 r_e は隣接する SCP との杭間中央部までとした ($r_e = x/2$, x : SCP 間距離)。改良前の原地盤全体と打設後の SCP 杭間中央部 ($r = r_e = x/2$) の側方土圧係数をそれぞれ K_{h0} , K_h とし、打設による側方土圧増加率を K_h/K_{h0} とする。また、打設後の $r = r_{(k)}$ ($k=1, 2, 3, \dots, n$) での側方土圧係数 $K_{h(k)}$ は、空洞拡張理論を参考に分布関数で設定した^{7), 8)}。

ここで、 ϕ は原地盤の破壊時内部摩擦角である。また、 $K_h/K_{h0}=1$ の場合には打設に伴う側方土圧の増加がないことを意味する。本論文で想定する地盤は、層厚 1 m, 30 層の砂質地盤とした。この仮想想定地盤では、豊浦砂の物性値(土粒子比重 $G_s=2.65$, 最大・最小間隙比 $e_{max}=0.991$, $e_{min}=0.625$)を用いた。SCP 部分は十分密とし N 値=15、基盤については N 値=50 に相当するように設定した。また、現行法通り置換率 a_s (表-1 参照) 分だけ周辺地盤の密度を増加させるが、その際、地表面の盛り上がりを考慮し密度増加率を低減させた⁹⁾。改良前の原地盤では、側方土圧係数 $K_{h0}=0.5$ とし、応力ひずみ関係は修正 R-O モデルを用いた全応力解析を行った(砂についてのパラメータの設定は参考文献^{8), 10)} に詳しい)。入力地震動として、釧路沖地震(1993) で得られた波形の最大地震加速度 a_{max} を変化させて用いている。

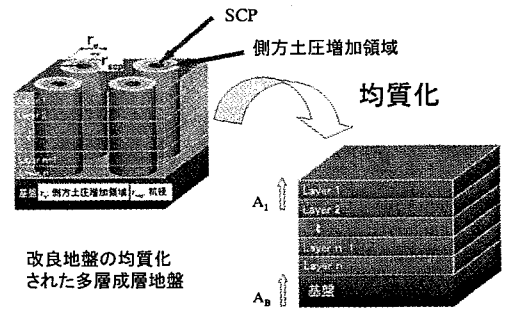


図-3 不均質な改良地盤と均質化による多層成層地盤

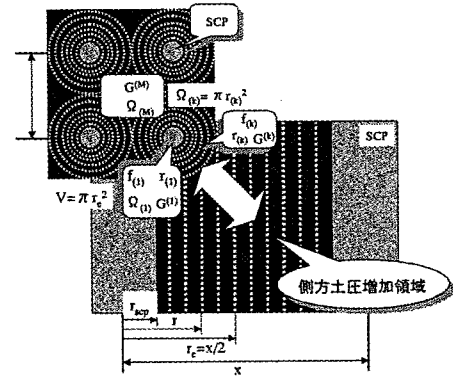


図-4 均質化手法に用いる SCP 周辺に同心円にひろがる側方土圧増加領域のパラメータの定義

表-1 SCP 改良地盤の分割各層の均質化剛性 (単純せん断成分のみ)

領域	打設後の密度及び応力	各部分の初期せん断剛性	各層の平均剛性
原地盤および側方土圧非増加領域: $\Omega_{(M)}$ ($r_e \leq r$) 初期間隙比: e_0 初期平均主応力: P_0 $P_0 = (1 + 2K_{h0})\sigma_v/3$	SCP 打設後の間隙比: $e = e_0 - (1 + e_0) \cdot a_s$ 平均主応力: $p = p_0 = (1 + 2K_h)\sigma_v/3$	$G^{(M)} = 330 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{P_s}\right)^{0.5}$	$\bar{G} = G^M \cdot \left\{ 1 + \sum_{k=1}^n f_{(k)} (S - 1) A^{(k-1)} \right\}$
側方土圧増加領域: ($k=2 \sim n$) $\Omega_{(k)}$ ($r_{SCP} \leq r \leq r_e$, $r = r_{(k)}$)	$e = e_0 - (1 + e_0) \cdot a_s$ $p_k = (1 + 2K_k)\sigma_v/3$	$G^{(k)} = 330 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{P_s}\right)^{0.5}$	$\left\{ 1 + \sum_{k=1}^n f_{(k)} S A^{(k-1)} \right\}^{-1}$ $A^{(k)} = (A^{(k)} - S)$
SCP 部分: ($k=1$) $\Omega_{(1)}$ ($r \leq r_{SCP}$)	打設後の K_h $p_k = (1 + 2K_{h0})\sigma_v/3$	$V_s = 90N^{1/3}$, $G^1 = \rho V_s^2$	$A^{(1)} = G^M \cdot (G^M - G^k)^{-1}$ Eshelby's tensor: $S = 1/4$

SCP の置換率 $a_s = \Omega_{(1)} / x^2 = \pi \cdot r_{SCP}^2 / x^2$ (Fig. 3 の四角形配置の場合); r_e : 応力履歴の影響半径

ここで、同心円領域 $\Omega_{(k)}$ (断面積 $\pi \cdot r_{(k)}^2$) のセル x^2 に対する体積存在割合 $f_{(k)} = \Gamma_{(k)} / \Omega_{(n)} \cdot a_s = \Gamma_{(k)} / (\pi \cdot r_e^2) \cdot a_s$.

ただし、 $\Gamma_{(1)} = \Omega_{(1)}$, $\Gamma_{(2)} = \Omega_{(2)} - \Omega_{(1)}$, \dots , $\Gamma_{(n)} = \Omega_{(n)} - \Omega_{(n-1)}$; 本論文では、分割数 $n=10$ とした。

3. 解析結果および考察

改良地盤の微小振幅振動時（弾性域）の応答特性について図-5,6 に示す。図-5 は置換率 a_s と微小振幅振動時（弾性域）の応答特性について比較したものである。置換率 $a_s=10\%$ の改良地盤に比べ、 $a_s=30\%$ の改良地盤は最大振幅比での固有周期が短くなり、剛性が増すことがわかった。すなわち、置換率をあげることで剛性が増加し、応答値が低減して耐震性に効果があることが確認できた。図-6 では、改良効果（側方土圧の増加）の影響を示している。未改良地盤に比べ、改良地盤では剛性が増し、応答値は低減している。また、側方土圧の増加 ($K_b/K_{b0}=4$) を考慮すれば、応答値には差はないが密度増加のみの場合より固有周期が短くなり、地盤が堅くなったといえる。

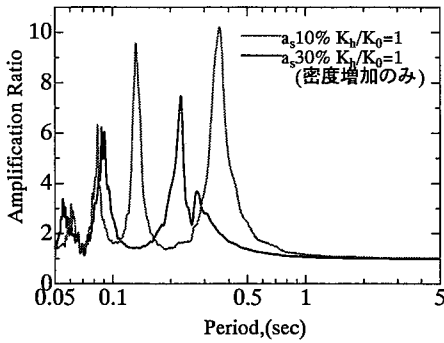


図-5 改良地盤の微小振幅振動時（弾性域）の応答特性に及ぼす置換率 a_s の影響

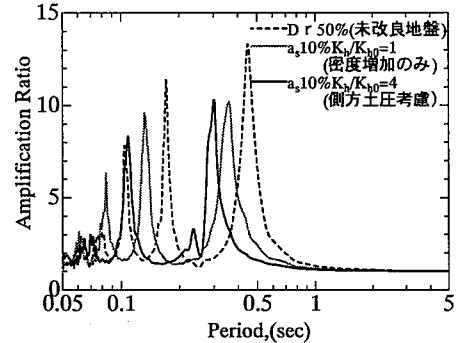


図-6 改良地盤の微小振幅振動時（弾性域）の応答特性に及ぼす改良効果（密度増加、側方土圧増加率： r_s/r_{SCP} K_b/K_{b0}) の影響：置換率 $a_s=10\%$

次に地盤の液状化特性と最大地震加速度 a_{max} の関係を図-7, 8 に示す。ここでは、地盤全体の液状化特性を示す指標として液状化指数 P_L を用いた。図-7 は未改良地盤と $a_s=10\%$ の改良地盤で土圧・密度の両方の増加なしと密度増加のみ、側方土圧の増加および過圧密履歴を考慮した場合を比較したものである。いずれの改良地盤においても未改良地盤に比べ液状化特性は改善されているが、過圧密履歴を考慮した場合は顕著な液状化に対する効果を発揮し、側方土圧の増加を考慮した場合についても密度増加のみに比べ P_L 値が 1/2 程度となり、液状化特性は改善されていることが確認できた。また、密度増加を考慮しない場合でも $P_L \leq 15$ で、十分な効果が期待できる。つまり、液状化強度の増加以外にも、対象地盤を硬いものにある程度置き換えるだけで地盤全体のインピーダンスの増加による応答値の低減によって対策効果が得られるといえる。また、未改良地盤だけみると、 $Dr=80\%$ の密な地盤の方が $Dr=50\%$ の緩い地盤よりも曲線が下方に位置し、なだらかで地震に対して粘り強いといえる。図-8 は改良地盤の部分的解析と巨視的解析の比較である。ここでの部分的解析は隣り合う SCP 間の中心部分の解析である。巨視的解析の場合はいずれの部分的解析に比べ、液状化の効果がある。つまり、改良前後の N 値での点的な施工確認という現行の改良地盤評価は、改良地盤の性能を過小評価していると考えられる。

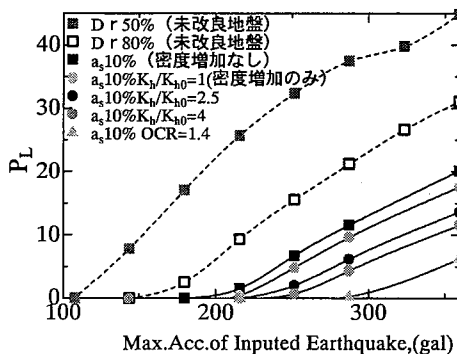


図-7 改良地盤の液状化指数 P_L と入力最大加速度 a_{max} の関係に及ぼす改良効果の影響

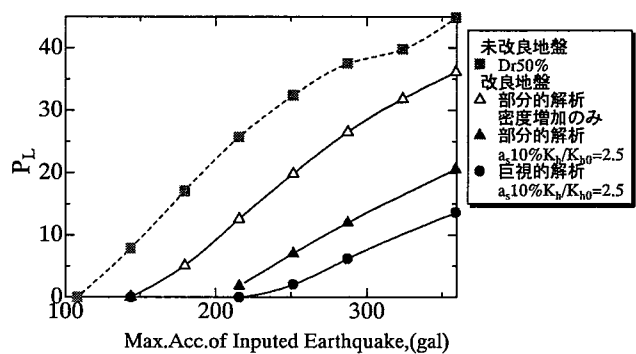


図-8 改良地盤の液状化指数 P_L と入力最大加速度 a_{max} の関係に及ぼす巨視的解析と部分的解析の影響

図-9 は図-5-8 で得られた未改良地盤と改良地盤の基本固有周期と入力波 360gal での P_L 値を示している。未改良地盤に比べ改良地盤の固有周期は短く、地盤全体は硬くなるとともに P_L 値も小さくなり、液状化に対して効果があることが確認できた。また、密度増加のみに比べ、側方土圧の増加を考慮した場合の方が低置換で動的特性と液状化特性の改善に効果があることがわかった。

4. おわりに

SCP 打設による側方土圧の増加や過圧密履歴による影響を考慮して改良地盤全体の均質化解析をすることにより、現行に比べ動的特性と液状化液状化特性は改善されていることがわかった。改良効果を適切に評価すると、 P_L 値～想定最大加速度の曲線は下方に移動し、なだらかになる ($\Delta P_L(U)/\Delta a_{max} > \Delta P_L(T)/\Delta a_{max}$ (図-10))。つまり、地震への粘り強さも増加することがわかった。

また、部分的解析と巨視的解析（地盤全体の解析）の比較から、巨視的解析の方が液状化の対策効果があることがわかった。このことから、改良前後の N 値での点的な施工確認という現行の改良地盤評価は、改良地盤の性能を過小評価していると考えられる。

以上のことから、地盤を適切に評価し、改良地盤の動的特性と液状化特性を地振動の大きさと定量的に結びつけることで、「想定する地震動に対してどの程度の液状化を許容し、それに見合った改良と改良効果を的確に提案し設計する」といった経済的な性能設計を現在の耐震設計に導入可能になると考えられる（図-10）。

今後は改良前後の地盤において貫入試験、PS 検層、常時微動の計測による動的特性の把握や改良施工過程を考慮した周辺地盤内の解析が必要と考えられる。

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)，1997.
- 2) 地盤工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで，1997.
- 3) 大林淳，原田健二，山本実，佐々木康：締固め地盤の液状化抵抗に関する評価，第 10 回日本地震工学シンポジウム，pp.1411-1416.
- 4) 木村保・奥村一郎・三沢久詩・川鍋修：コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について，第 21 回地盤工学研究発表会，pp.1863-1864，1986.
- 5) S. Nemat-Nasser and M. HORI: Micromechanics: Overall properties of heterogeneous materials, North-Holland, pp. 353-355, 1993.
- 6) R. M. Christensen: Mechanics of Composite Materials, Krieger, 1991.
- 7) 地盤工学会：支持力入門，pp.68-73，1997.
- 8) 佐藤友美：液状化対策地盤の均質化応答解析による耐震性能評価，名古屋工業大学システムマネジメント工学科卒業論文，2001.
- 9) 山本実，原田健二，野津光夫：締固め砂杭工法を用いた緩い砂質地盤の液状化対策の新しい設計方法，地盤工学会，土と基礎，Vol.48, No.11, pp.17-20.
- 10) 例えば，田中勉，有沢裕，吉田望，石原研而：地盤の非線形地震応答解析に与える応力-ひずみモデルの影響，第 18 回土質工学研究発表会，pp.631-634，1983.
- 11) 安田進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，pp.228-234，1988.

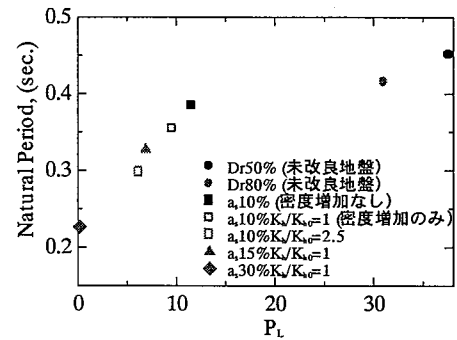


図-9 地盤の基本固有周期 T_1 と液状化指数 P_L の関係に及ぼす改良効果の影響： $a_{max}=359Gal$.

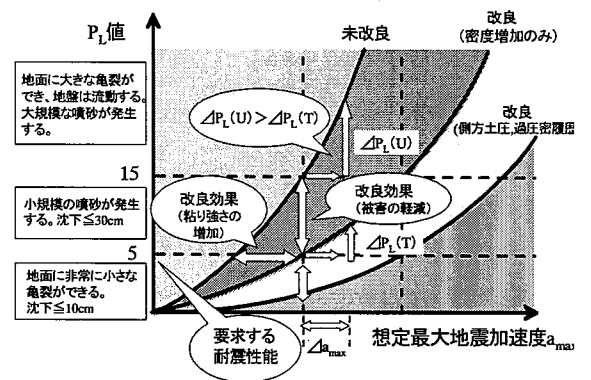


図-10 SCP 液状化対策地盤の耐震性能設計