

締固め砂杭による液状化対策地盤の均質化応答解析と液状化特性

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

地震時の地盤の液状化対策における有益な工法の一つとして、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する SCP 工法がある。最近の事例解析や計測結果の報告から、現行の液状化対策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としての動的特性が評価されていない^{1),2)}。また、想定する地震と対象地盤の価値を考え、どの程度の被害を許容するかといった「耐震性能設計」¹⁾が必要であり、液状化特性の把握が重要である。

2) 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見込まれるが^{2),3)}、設計上はその効果が考慮されていない。したがって、現行では対策効果がかなり過小評価されている。

以上を本研究のポイントとし、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、地盤の液状化特性と定量的に結びつける。

2. 均質化法を用いた改良地盤の地震応答解析方法

本研究では、図-1 に示すように SCP の打設に伴って、SCP 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状（複合杭状）に生じていると考える。したがって、改良地盤を複合杭が原地盤に介在した成層不均質地盤として取り扱う。改良地盤を適当な成層に分割し、各層において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を用い⁴⁾、平均剛性を求める(表-1 参照)。これにより改良地盤を各々が均質な多層成層地盤とみなし、剛性のひずみ依存を考慮した非線形応答解析を行った。想定する地盤は、層厚 1 m,30 層の砂質地盤とした。SCP 部分は十分密とし、基盤については N 値=50 に相当するよう設定した。また、現行法通り置

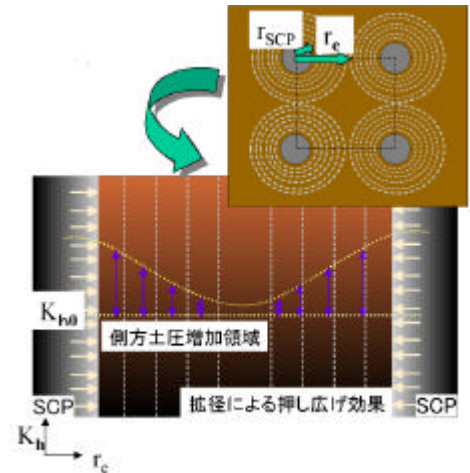


図-1 締固め杭と周辺地盤の改良効果

表-1 SCP 改良地盤分割各層の単純せん断剛性の均質化法（一重の同心円状土圧増加の場合のみ表示）

領域	打設後の密度及び応力	各部分のせん断剛性	各部分平均剛性	層の平均剛性
原地盤： 初期間隙比 e_0 平均主応力： $p_0 = (1 + 2K_{h0}) s_v / 3$	密度増加： $\Delta e = -(1 + e_0) \cdot a_s$ 間隙比： $e = e_0 - (1 + e_0) \cdot a_s$ 平均主応力： $p = p_0 = (1 + 2K_{h0}) s_v / 3$	$G^M = 330 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5}$ $h = 0.03$	-	$\bar{G} = \frac{G^M}{1 - \frac{f(G^e - G^M)}{G^M + 2S(G^e - G^M)}}$
側方土圧増加領域： 半径 $r = r_e$	密度増加： $\Delta e = -(1 + e_0) \cdot a_s$ 間隙比： $e = e_0 - (1 + e_0) \cdot a_s$ 平均主応力： $p = p_0 = \left(1 + 2 \frac{K_h}{K_{h0}} \right) K_{h0} s_v / 3$	$G^b = 330 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5}$ $h = 0.03$	複合杭部分剛性 $G^e = \frac{G^a(1+c) + G^b(1-c)}{G^a(1-c) + G^b(1+c)}$	$f = a_s(1/c)^2$ $= a_s(r_e/r_{sc})^2$ $S = \frac{1}{4}$ Eshelby 方法 $h = 0.03$
SCP 部分： 半径 $r = r_{sc}$	SCP 部分間隙： $e = e_{scp}$ 平均主応力： $p = p_0$	N 値=16 相当	$c = (r_{sc}/r_e)^2$ $h = 0.03$	

液状化対策、締固め砂杭、地震応答、均質化、耐震性能

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 TEL.052-735-5497 FAX.052-735-5497

換率 a_s 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た²⁾。SCP 打設(SCP 半径 r_{scp})に伴い水平土圧に顕著な変化が生じる側方土圧増加領域を r_e とし(図-1)、側方土圧増加率を K_h/K_{h0} (K_{h0}, K_h はそれぞれ、改良前・後の静止土圧係数。 $K_{h0}=0.5$) とする。ここで $K_h/K_{h0}=1$ または $r_e/r_{scp}=1$ 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。本解析では、豊浦砂の物性値を用いた ($e_{max}=0.991, e_{min}=0.625$)。

3. 解析結果および考察

解析によって得られた地盤全体の液状化の激しさの程度を表す液状化指数 P_L と最大地震加速度の大きさの関係を図-2 に示す。これは、未改良地盤と $a_s=10\%$ の改良地盤で密度増加のみと側方土圧の増加、過圧密履歴を考慮した場合および密度増加なしの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、例え密度増加を考慮しない場合でも P_L 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効果が得られるといえる。図-3 は未改良地盤と改良地盤の固有周期と入力波 290gal 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。

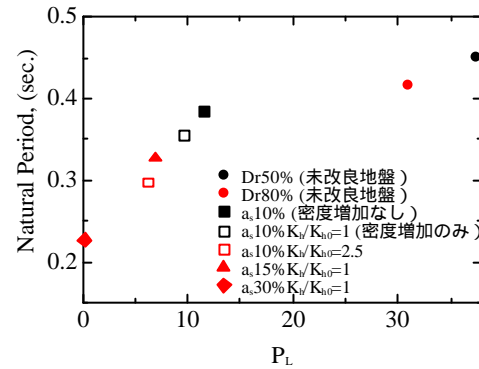
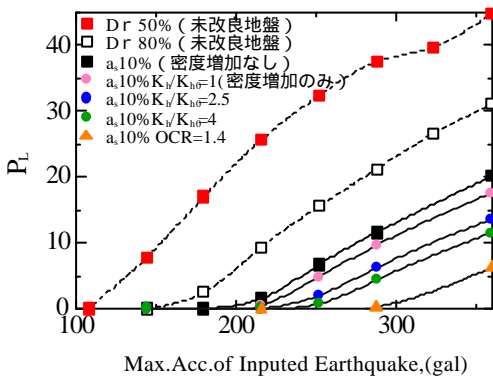


図-2 未改良地盤と改良地盤の最大地震加速度と P_L 値の比較

図-3 未改良地盤と改良地盤の固有周期と P_L 値の比較

4. おわりに

以上から、改良地盤全体の動的特性と SCP 打設による側方土圧の増加や応力緩和後の過圧密履歴による影響を考慮することで、現行に比べ液状化に対する効果があることがわかった。図-4 に示すように、改良効果を適切に評価すると、 P_L 値 ~ 想定最大地震加速度の曲線は下方に移動し、なだらかになる ($P_L(U)/a_{max} > P_L(T)/a_{max}$)。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、改良地盤の動的特性と液状化特性を地震動の大きさと定量的に結びつけることにより、「想定する地震動

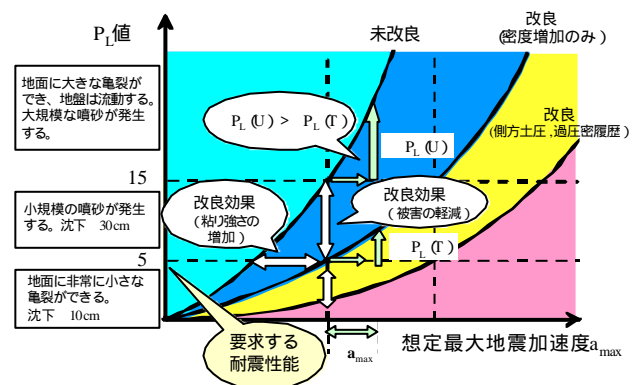


図-4 SCP 液状化対策地盤も耐震性能設計の概念図

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-4)。今後、改良前後の改良地盤において貫入試験、PS 検層、常時微動観測など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である。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)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, 3)木村・奥村・三沢・川鍋：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.186 3-1864, 1986, 4)佐藤・桑原・前田：平成 13 年度土木学会中部支部研究発表会, pp.279-280, 2002