

名古屋工業大学 学生員 佐藤 友美
名古屋工業大学 正会員 前田 健一

1. はじめに

現行の締固め砂杭 (SCP) による液状化対策では、目標 N 値により置換率が決定されるが、目標 N 値は過度に高いと指摘されている。実際には液状化しやすい緩い地盤に固い SCP 部分が介在しているので地盤全体としては高い剛性を有し、土の要素としての液状化強度のみならず、地盤の振動振幅と動的ひずみも抑制されていると考えられる。

一方、防災の点から地盤の液状化を完全に回避するのではなく、ある程度の液状化を許容する性能設計の概念も今後の耐震設計においては重要である。それには改良の程度と液状化危険度との定量的関連付けが不可欠である。本研究では、改良地盤を SCP 部分、周辺の密度・側方土圧増加や過圧密履歴を有する部分からなる不均質地盤として捉え、それに対して均質化法を用いて改良地盤全体の応答特性と液状化危険度を評価する、耐震性能評価方法の提案を目標とする。

2. 均質化法を用いた改良地盤の地震応答解析方法

図-1 に示すように SCP の打設に伴って、SCP 杭体周辺では密度増加だけでなく側方土圧も増加した領域が同心円状 (複合杭状) に形成され则认为。したがって、改良地盤は複合杭が原地盤に周期的に介在した不均質地盤である。そこで、改良地盤全体の動的特性を評価するために次のような手法で非線形応答解析した¹⁾。

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、平均剛性を求め (表-1 参照)、改良地盤を多層水平成層地盤に置き換える。そして、各計算ステップで各層の平均剛性を各部分の接線剛性を用いて算出する。それぞれの部分で剛性のひずみ依存を考慮した応力ひずみ関係を用いれば、平均剛性を用いた非線形応答解析が可能となる。想定する地盤は、層厚 1 m、50 層の砂質地盤とした。SCP 部分は N 値=16、基盤は N 値=50 に相当するよう設定した。また、現行法通り置換率 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や過圧密など顕著な応力履歴の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 ($e_{max}=0.991, e_{min}=0.625$)。

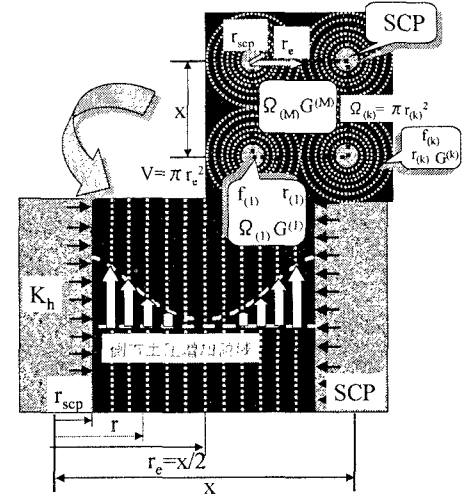


図-1 SCP と周辺地盤の改良効果

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: $p = p_0 = (1 + 2K_{h0})\sigma_v/3$	$G^{(M)} = 330 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5}$	$\bar{G} = G^{(M)} \cdot \left\{ 1 + \sum_{k=1}^n f_{(k)} (S - 1) A'^{(k)-1} \right\}$
側方土圧増加領域: $(k=2 \sim n)$ $\Omega_{(k)}$ ($r_{SCP} \leq r \leq r_e, r \leq r_{(k)}$)	$e = e_0 - (1 + e_0) \cdot a_s$ $p_k = (1 + 2K_h)\sigma_v/3$	$G^{(k)} = 330 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.5}$	$\left\{ 1 + \sum_{k=1}^n f_{(k)} S A'^{(k)-1} \right\}^{-1}$ $A'^{(k)} = (A^{(k)} - S)$ $A^{(k)} = G^{(M)} \cdot (G^{(M)} - G^{(k)})^{-1}$
SCP 部分: $(k=1)$ $\Omega_{(1)} (r \leq r_{SCP})$	打設後の K_h $p_k = (1 + 2K_{h0})\sigma_v/3$	$G^{(1)} = 800 \text{ MPa}$ (一定)	$S = 1/4$

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

3. 解析結果および考察

図-2 はせん断応力の時刻歴について、未改良地盤と置換率 $a_s=10\%$ で密度増加のみの改良地盤について現行の N 値による点的な施工確認を主体とする一次元解析をした場合と $a_s=60\%$ で密度増加なしの改良地盤全体を評価する

均質化解析の場合で比較したものである。均質化解析結果は未改良地盤や現行の一次元解析の改良地盤における結果の約 1/3 程度までせん断応力が低減している。したがって、対象地盤を硬いものに置き換えるだけで地盤全体としては動的特性が改善される場合があると考えられる。そこで、地盤剛性構造の違いが地盤の動的特性に及ぼす影響について詳細に調べるために、図-3 の左図に示すように大きく三層（上層; $0 \leq z < 15\text{m}$, 下層; $15 \leq z < 50\text{m}$, 剛体基盤）に分割した地盤を用いて解析を行った。上層と下層のインピーダンス比を α とする（図-3 参照）。図-3 の右図は最大せん断応力の深度分布をインピーダンス比で比較したものである。上層の剛性を高くすることは、上層が地盤改良されることに相当する。インピーダンス比が高くなると最大せん断応力は大きくなるが、 $\alpha > 1.5$ 程度になると最大せん断応力は減少する。さらに、 $z = 12\text{m}$ （上層部）での最大せん断応力と最大せん断ひずみに及ぼす地盤剛性構造の影響を図-4 に示す。上層地盤の剛性が高くなるとせん断ひずみは減少する。したがって、上層が十分高い剛性を有すると、動的ひずみと振動振幅が抑制されることがわかった。図-5 は、同様の条件で重複反射理論より求めた地盤の応答特性に及ぼす地盤剛性の影響を示している。インピーダンス比の増加に伴い、振動モードが変化し、応答値は全体的に低減している。このことから、上層の剛性がある程度高くなると動的ひずみが抑制され、動的特性の改善されることが考えられる。

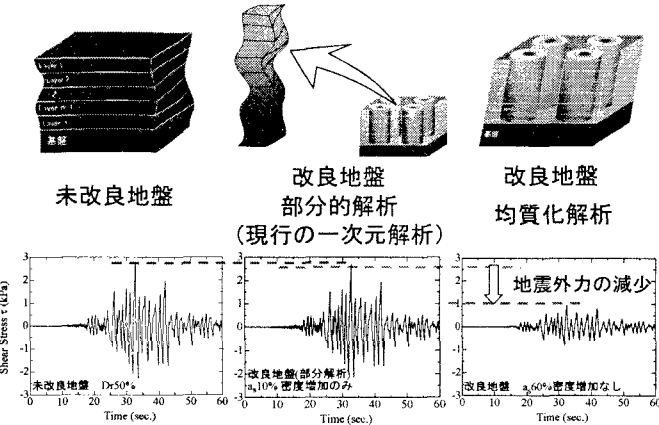


図-2 未改良地盤と改良地盤のせん断応力時刻歴

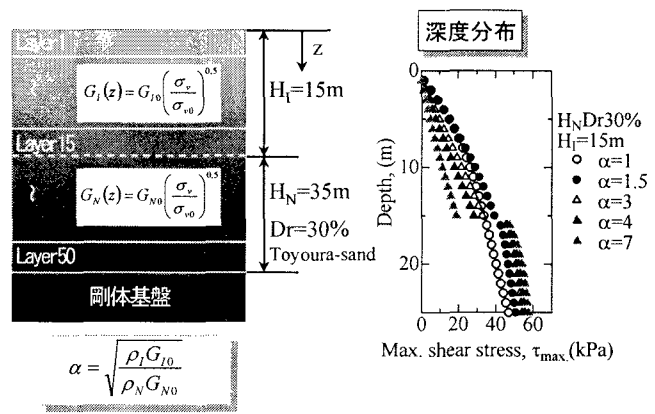


図-3 三層地盤モデルとインピーダンス比が最大せん断応力に及ぼす影響

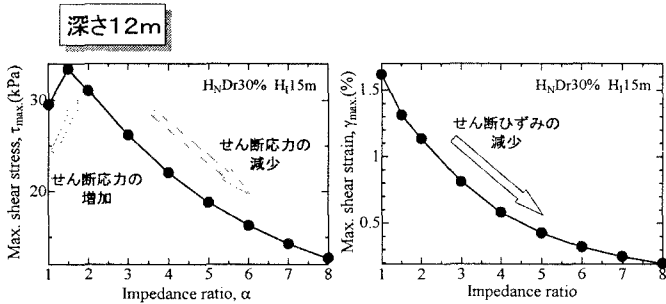


図-4 深さ 12m における地盤剛性比がせん断応力せん断ひずみに与える影響

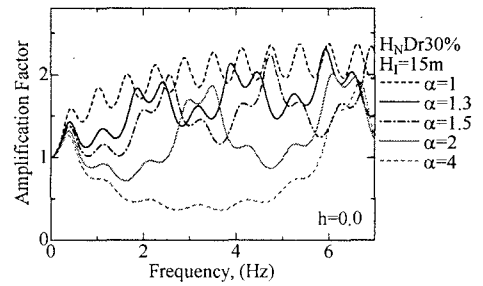


図-5 重複反射理論による固有振動数とインピーダンス比の関係

次に、改良地盤の液状化特性について調べた結果を図-6 に示す。図から、過圧密履歴や側方土圧の増加を考慮した場合は顕著な液状化に対する効果を発揮し、密度増加のみに比べ P_L 値が 1/3 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。

4. おわりに

提案する均質化応答解析によって SCP による液状化対策の効果は、SCP 打設による側方土圧の増加や過圧密履歴による地盤要素の強度増加だけでなく、動的振幅の低減もあることが明らかになった。また、それらの影響を考慮することで、現行の耐震設計の考え方に比べ改良地盤全体の動的特性と液状化に対する効果があることがわかった。今後、これらをより正確に把握するために、改良地盤の不均質性の調査、固有振動数などの動的特性の把握が必要である。

参考文献: 佐藤, 桑原, 前田; 第 47 回地盤工学シンポジウム, pp173-178, 2002

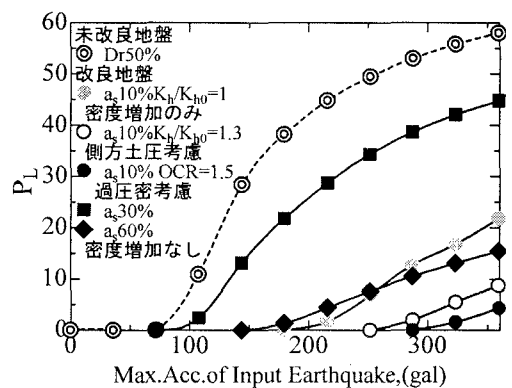


図-6 改良地盤の液状化指数 P_L と入力最大加速度 a_{max} の関係に及ぼす改良効果の影響