

均質化応答解析による締固め液状化対策地盤の動的変形特性と地盤内の応力分担特性

名古屋工業大学大学院 学生員 佐藤 友美
 名古屋工業大学 学生員 橋本 正輝
 名古屋工業大学 正会員 前田 健一

1. はじめに

地盤の液状化対策に効果的な工法として、サンドコンパクションパイル（Sand Compaction Pile；以下 SCP と略す）工法が広く用いられている。現行の SCP 工法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、想定する地震と対象地盤の価値を考え、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震動特性を評価し、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）に形成されると考える。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、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非線形応答解析した（詳細は文献¹⁾参照）。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、本解析では、砂の物性値として $e_{max}=0.991, e_{min}=0.625, \nu_s=2.65$ を用いた。

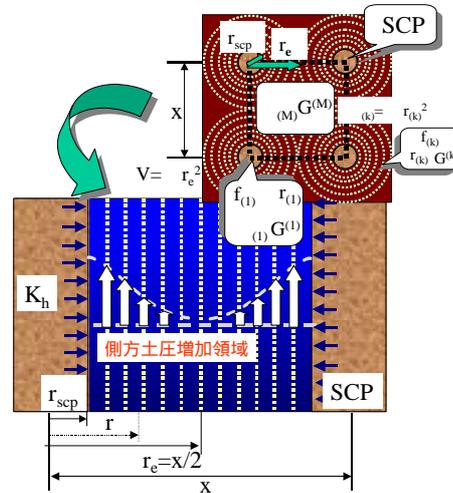


図-1 SCP と周辺地盤の改良効果

3. 解析結果と考察

図-2 は $a_s=10\%$ の改良地盤の改良効果を密度増加のみとした場合と側方土圧増加を考慮した場合について、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と改良地盤全体を評価する均質化解析で比較したものである。均質化解析はいずれの改良効果の条件においても一次元解析に比べ、液状化に対して効果がある。つまり、地盤を一次的に評価した場合では地盤を過小評価している可能性がある。図-3 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について均質化解析した場合で比較したものである。均質化解析の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-4 の左図に示すように大きく三層（上層; $0 < z < 15m$, 下層; $15 < z < 50m$, 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-4 参照）。図-4 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 < 1.5 では α とともに最大せん断応力は大きくなるが、 > 1.5 程度になると最大せん断応力は減少する。さらに、 $z=12m$ （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の影響を図-5 に示

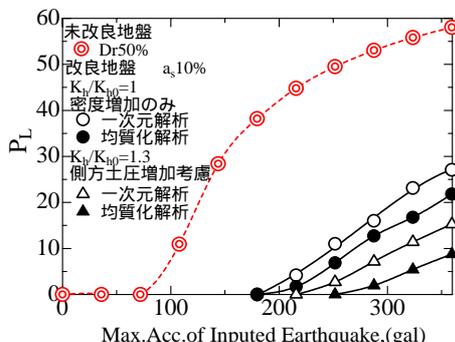


図-2 改良地盤の液状化指数 P_L と入力最大加速度 a_{max} の関係に及ぼす巨視的解析と部分的解析の影響

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-6は、同様の条件で重複反射理論より求めた地盤の線形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、共振特性（固有振動数、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と考えられる。

4. 均質化法によるせん断応力とせん断ひずみの分担割合

均質化法による周辺地盤（Matrix）領域と SCP（Inclusion）領域のせん断応力とせん断ひずみの分担割合について調べた。SCP 領域の剛性は N 値=16、周辺地盤の領域は Dr50%に相当するよう設定した。図-7 は $a_s=15,60\%$ の場合の SCP 領域と周辺地盤の領域におけるせん断応力とせん断ひずみの関係を示したものである。置換率 $a_s=15\%$ の場合に比べて 60% の場合の方が地盤全体の剛性は高いことがわかる。図-8 は同様の条件で、均質化法によるせん断応力とせん断ひずみの分担割合を示している。剛性の違いによってせん断応力とせん断ひずみの分担割合はともに非線形に変化している。

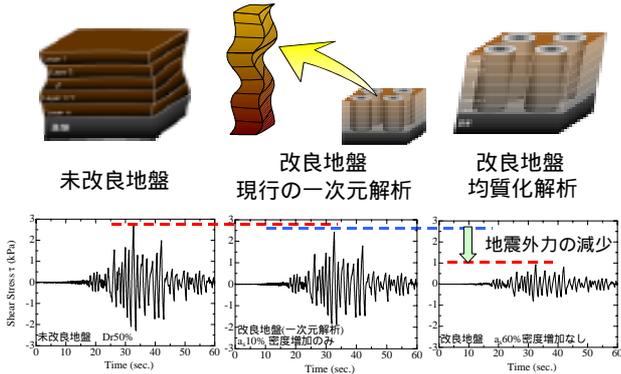


図-3 未改良地盤と改良地盤のせん断応力時刻歴

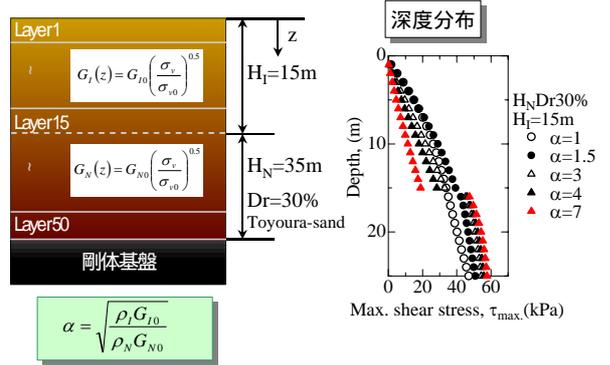


図-4 三層地盤モデルとインピーダンス比が最大せん断応力に及ぼす影響

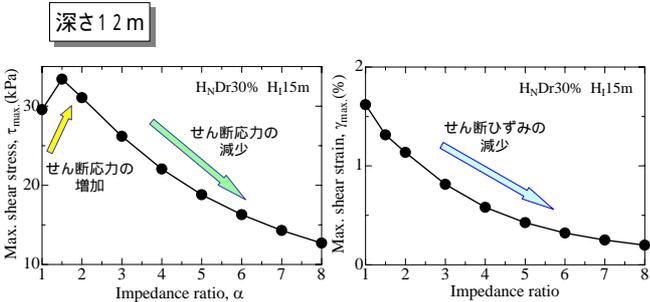


図-5 深さ 12m における地盤剛性比がせん断応力とせん断ひずみに与える影響

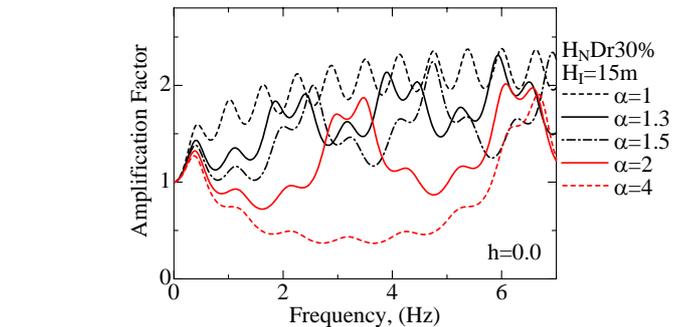


図-6 重複反射理論による固有振動数とインピーダンス比の関係

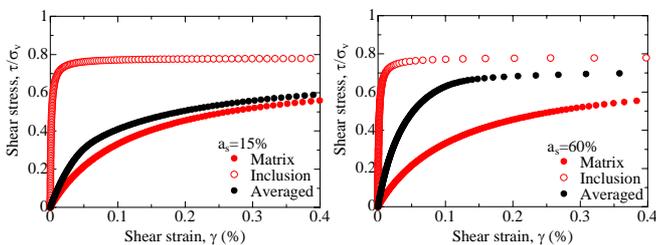


図-7 SCP 領域と周辺地盤領域におけるせん断応力とせん断ひずみの関係

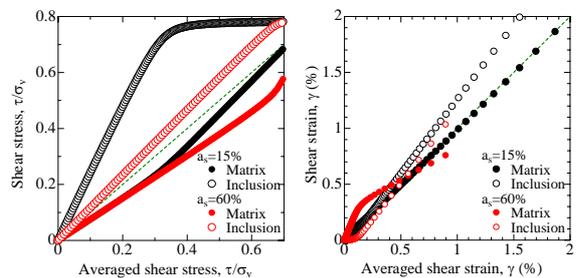


図-8 均質化法によるせん断応力とせん断ひずみの分担割合

5. 結論

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、地盤全体の剛性増加による動的振幅の低減もあることが明らかになった。さらに、均質化法により、置換率と剛性の違いによるせん断応力とせん断ひずみの分担割合の非線形性を表現することができた。

参考文献: 1) 佐藤, 桑原, 前田; 第 47 回地盤工学シンポジウム, pp173-178, 2002.