

名古屋工業大学 学生員 桑原直範
 名古屋工業大学 正会員 前田健一
 名古屋工業大学 学生員 佐藤友美

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砂などの締固め杭工法（以下 SCP 工法¹⁾）があげられる。SCP 工法の現行の設計では、改良効果として SCP の打設に伴う原地盤の密度増加のみが考慮されている。しかし、最近の事例解析や計測結果などから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 打設部分とからなる複合地盤である。しかし、改良前・後の N 値による検討が主体であり、改良後の複合地盤全体としての動的挙動が評価されていない²⁾。
- 2) SCP 打設による周辺地盤では側方土圧の増加、または、応力緩和後の過圧密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、設計上はその効果が考慮されていない³⁾⁻⁵⁾ (図-1 参照)。

本研究では、個別要素法解析による SCP 周辺地盤の地盤内土圧の変化や変形、均質化法を用いて打設に伴う土圧変化を考慮した SCP 改良地盤全体の巨視的地震応答特性の線形弾性応答解析を試みた。解析結果に基づいて改良地盤全体の動的特性に及ぼす置換率、SCP 周辺地盤の応力変化特性の影響について調べる。

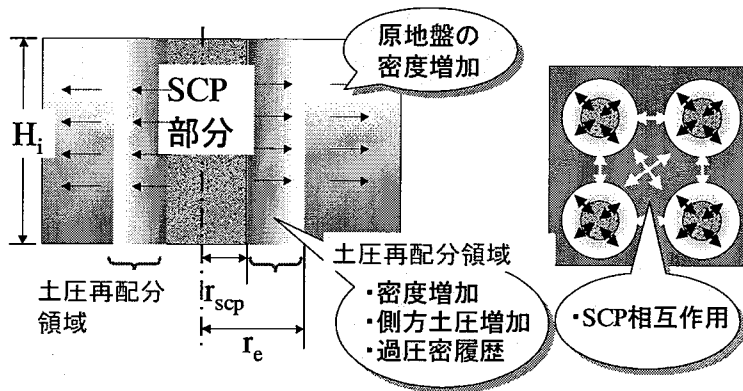


図-1 SCP と周辺地盤の改良効果

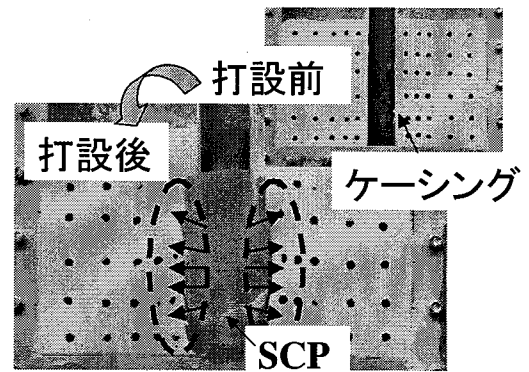


図-2 SCP 打設による周辺地盤の押し広げ変化 (模型地盤)

2. SCP 打設時の周辺地盤の変形に関する簡単な模型実験

図-2 は SCP 打設時の周辺地盤の地盤内変位を簡単な模型実験で再現を試みた様子を示している。原地盤は豊浦砂で $D_r=50\%$ に作成し、あらかじめ埋めておいた鉄製半円筒ケーシング部分に色砂を投入した。その後、ケーシングを一部引き抜き、十分な打撃を与えて締め固めて SCP を作成した。拡径は 1.3 倍程度であった。図中の矢印は模型地盤中に埋め込まれた標点の動きを概略的に示している。打設により SCP 半径の 3 倍程度周辺の地盤が影響を受け、押し広げられるような変形をしていることが確かめられた。

3. 個別要素法による押し広げによる地盤内の応力・変形

SCP 打設に伴う押し広げ効果を単純化し再現するために、2次元個別要素解析^{6,7)}を試みた。解析に用いた粒子間接点メカニズムを図-3、解析パラメータを表-1 に示す。ここではまず簡単のために、剛で十分大きな

表-1 DEM 解析に用いたパラメータ

Parameters	Particle - Particle
Density (kg/m^3)	2700
Diameters (mm)	0.5-1.0
Normal Spring Coefficient k_n (kN/m/m)	$5 \cdot 10^8$
Tangential Spring Coefficient k_s (kN/m/m)	$5 \cdot 10^7$
Damping	Critical Damping
Resistant Friction Angle ϕ_μ (deg.)	$\tan \phi_\mu = 0.25$

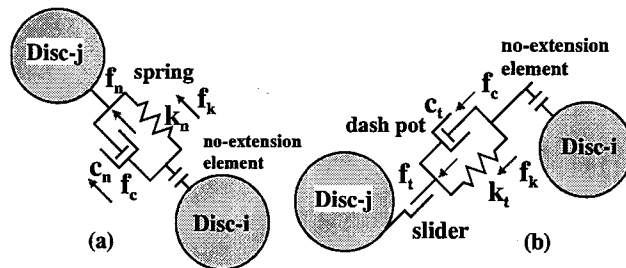
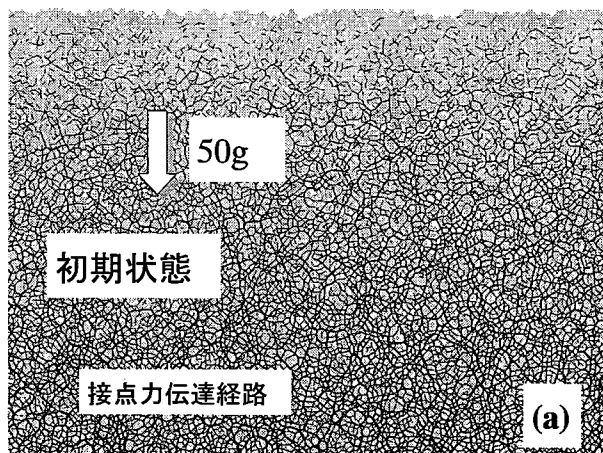


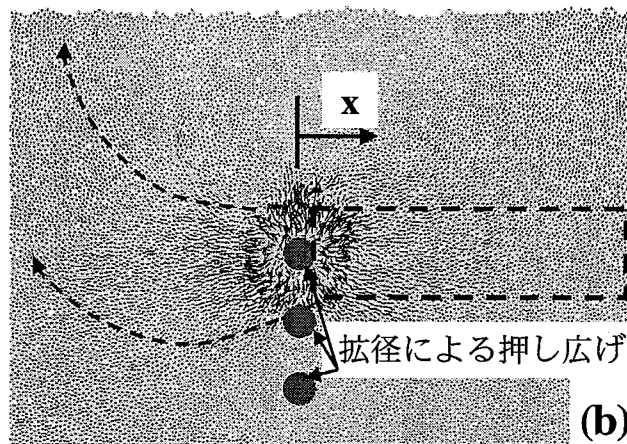
図-3 DEM 解析に用いた接点メカニズム

領域内に粒子を発生させ、仮想地盤内の鉛直応力勾配を再現するために 50 倍の重力加速度(50g)をかけて初期パッキングを実施した(図-4(a))。図中の線分は粒子接点力網を表している。その後、地盤内の数個の粒子について下方の粒子から半径を 15 倍に拡張した場合の地盤内速度ベクトルを図-4(b)に示す。図 2 の模型実験と同様に側方からゆるやかな曲線で上方に変形領域が広がっていることがわかる。

図-5, 6 はそれぞれ押し広げ部分から距離 x 離れた箇所 (図-4(b)) での応力履歴と平均主応力 σ_m の分布を



(a)初期状態



(b)粒子の拡張に伴う地盤内速度ベクトル

図-4 粒子の拡張に伴う地盤内の押し広げ (DEM 解析)

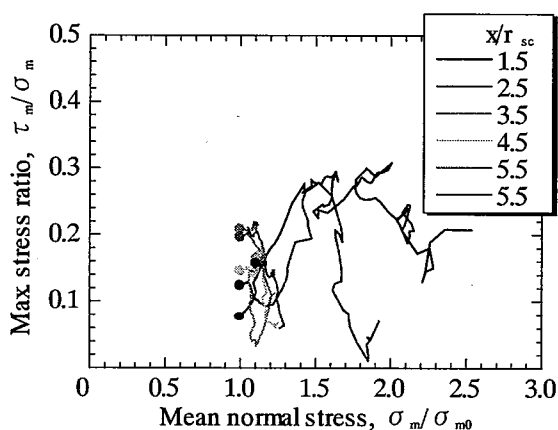


図-5 粒子の拡張に伴う周辺地盤内の応力履歴 (DEM 解析)

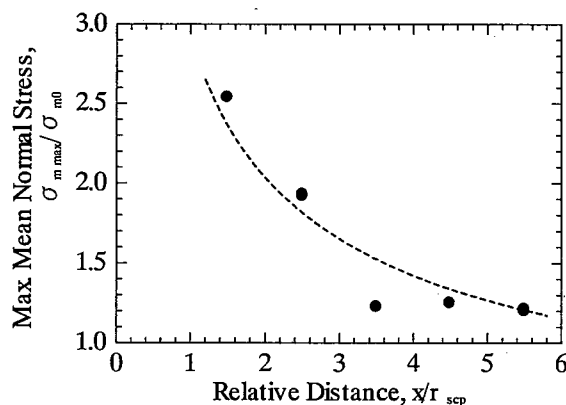


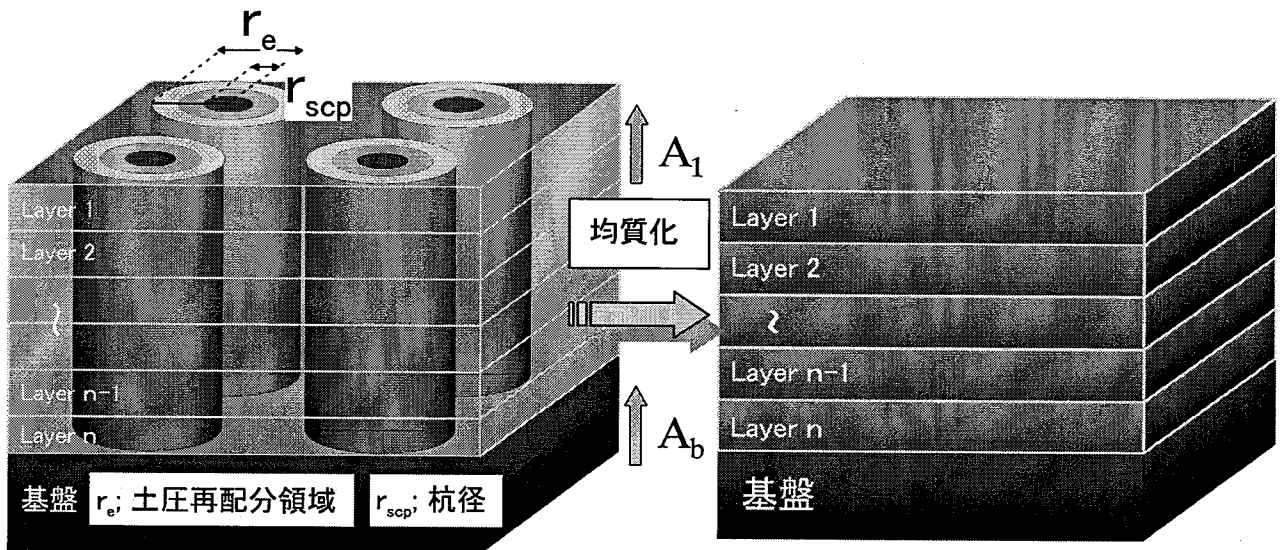
図-6 粒子の拡張後の周辺平均主応力 σ_m 分布 (DEM 解析)

示している。地盤内応力の変化割合は距離 x とともに減衰している。杭半径 r_{scp} との相対距離 $r/r_{scp} \leq 2.0$ では高い応力比が発現するとともに平均主応力も2倍程度増加し、土圧が再配分されていることが分かる。

4. 均質化法を用いた改良後地盤全体の巨視的応答解析方法

図-5, 6が示すようにSCP部分の周辺には密度増加だけでなく土圧が再配分した領域が同心円状に広がっており、SCP改良地盤中には複合杭状に不均質性が介在すると考えられる(図-7)。本研究では、不均質な複合地盤である改良地盤を多数の水平成層に分割し、各層において複合杭と密度増加した原地盤部分に関して均質化法^{8,9)}を用いることで、改良地盤を各層が均質な多層成層地盤とみなすところが特徴である¹⁰⁾。均質化された多層水平成層地盤について重複反射応答解析を行う。

簡単のためにSCP部分、周辺の水平土圧増加領域、原地盤部分それぞれを線形弾性体とし、減衰定数 h は一様とした。また、打設に伴う土圧増加率を K_b/K_{b0} (K_{b0} : 改良前の水平土圧係数、 K_b : 改良後の水平土圧係数) とし、土圧増加領域半径 r_e の内部では一様とした。本論文では改良率と水平土圧増加特性が改良地盤の巨視的応答特性に及ぼす影響について調べることを主とする。SCP置換率 a_s (図-7参照) 場合について、



(a)改良後の不均質な複合地盤: SCP部分と周辺の土圧再配分領域, (b)均質化された多層水平成層地盤
図-7 SCP改良地盤の均質化された多層成層分割部分と重複反射

表-2 改良地盤の分割各層における剛性の均質化法(単純せん断成分のみ表示)

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: $p_0 = (1 + 2K_{h0})\sigma_v/3$	密度増加: $\Delta e = -(1 + e_0) \cdot a_s$ 空隙比: $e = e_0 - (1 + e_0) \cdot a_s$ 平均主応力: $p = p_0 = (1 + 2K_{h0})\sigma_v/3$	$G^M = 330 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{p_a}\right)^{0.5}$ $h = 0.03$	-	$\bar{G} = \frac{G^M}{1 - \frac{f(G^e - G^M)}{G^M + 2S(G^e - G^M)}}$
土圧再配分領域 半径 $r = r_e$	密度増加: $\Delta e = -(1 + e_0) \cdot a_s$ 空隙比: $e = e_0 - (1 + e_0) \cdot a_s$ 平均主応力: $p = p_0 = (1 + 2K_h)\sigma_v/3$	$G^b = 330 \frac{(2.973 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{p_a}\right)^{0.5}$ $h = 0.03$	複合杭部分剛性 $G^c = \frac{G^a(1+c) + G^b(1-c)}{G^a(1-c) + G^b(1+c)}$ $c = (r_{scp}/r_e)^2$	$f = a_s(1/c)^2$ $= a_s(r_e/r_{scp})^2$ $S = \frac{1}{4}$ Eshelby 方法
SCP部分 半径 $r = r_{scp}$	SCP部分空隙: $e = e_{scp}$ 平均主応力: $p = p_0$	$G^a = 1400 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \left(\frac{p}{p_a}\right)^{0.5}$ $e = e_{scp}, h = 0.03$	$h = 0.03$	$h = 0.03$

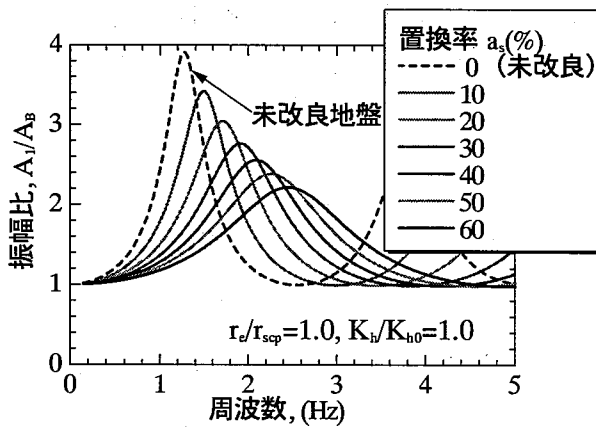


図-8 改良地盤の地震応答特性に及ぼす改良率 a_s の影響（水平土圧増加考慮無し: $r_e/r_{SCP}=1, K_b/K_{h0}=1.0$ ）

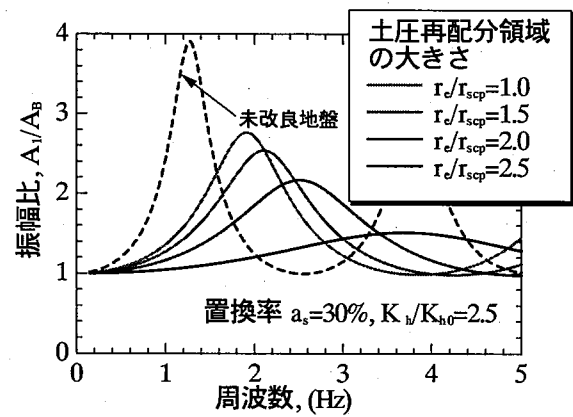


図-9 改良地盤の地震応答特性に及ぼす水平土圧増加領域の大きさ r_e/r_{SCP} の影響（置換率 $a_s=30\%$, $K_b/K_{h0}=2.5$ ）

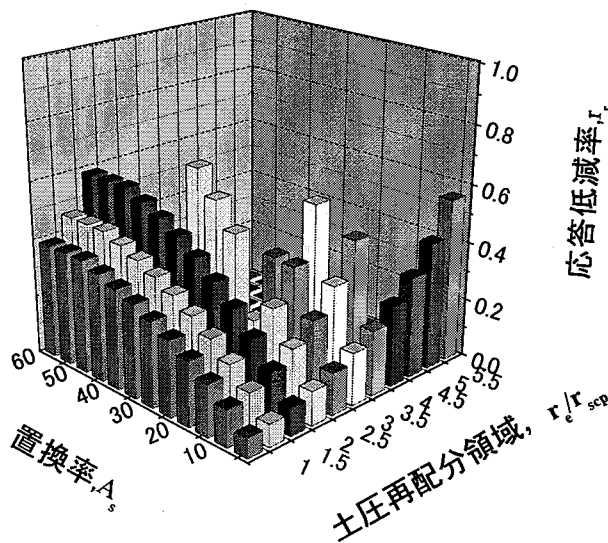


図-10 改良地盤の応答低減率 r_r に及ぼす置換率 a_s と水平土圧増加領域の大きさ r_e/r_{SCP} の影響（ $K_b/K_{h0}=2.5$ ）

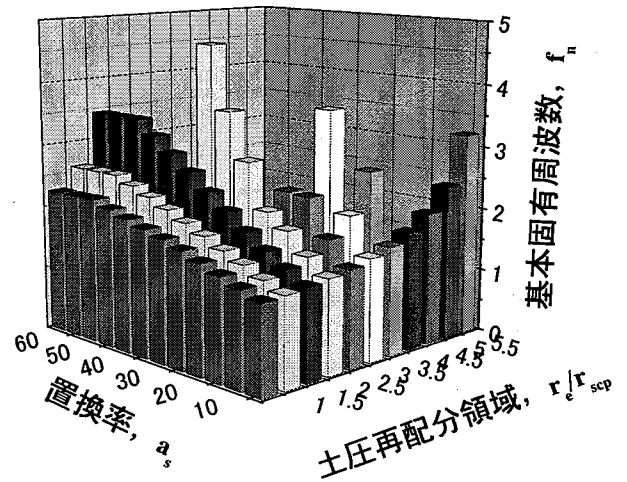


図-11 改良地盤の基本固有周期 f_n に及ぼす置換率 a_s と水平土圧増加領域の大きさ r_e/r_{SCP} の影響（ $K_b/K_{h0}=2.5$ ）

各層の平均剛性の算出方法を表-2 に示す。ここで、 $K_b/K_{h0}=1$ もしくは $r_e/r_{SCP}=1.0$ (r_{SCP} : SCP 半径) では SCP 周辺の地盤では密度増加は生じるが、土圧増加の効果がないことを意味する。

5. 改良後地盤の応答解析結果

本論文では仮想の地盤を改良前間隙 $e_0=0.77$ 、層厚 20m、基盤波速度を 365m/sec. (N 値=50 相当) として設定し、10 層に分割し解析する。また、 $e_{SCP}=0.58$ と十分密とした。水平土圧増加率 K_b/K_{h0} については、計測値として 2.0~3.0 程度が計測されている事例⁴⁾もあることから幅広い値について検討をおこなう。

図-8 は改良地盤の応答特性に及ぼす改良率 a_s のみの影響を示す。改良率の増加に伴い、基盤入力 A_B に対する地表面応答 A_1 の増幅率 A_1/A_B は低下し $a_s=60\%$ では未改良の増幅率の約 0.5 倍、 $a_s=30\%$ でも約 0.6 倍と応答低減がみられる。また、固有周波数も高くなり、十分な改良効果がみられる。

図-9 は $a_s=30\%$ の場合について、打設に伴う土圧増加率 $K_b/K_{h0}=2.5$ と固定し、土圧再配分領域 r_e/r_{scp} の変化に伴う改良地盤の応答特性を示している。土圧増加を考慮する領域 r_e/r_{scp} が大きくなるとともに改良効果が増加することがわかる。さらに、図-10、11 はそれぞれ、改良による地盤の応答低減率 r_r (= (未改良地盤の最大応答 - 改良地盤の最大応答) / 未改良地盤の最大応答) と改良地盤の基本固有周波数 f_b について土圧再配分領域 r_e/r_{scp} と改良率 a_s との関係でまとめている。例えば、改良率 $a_s=60\%$ の場合、土圧再配分を考慮しない場合 ($r_e/r_{scp}=1.0$) の低減率 $r_r=0.4$ であるが、土圧増加を考慮した場合 ($r_e/r_{scp}>1.0$)、 $a_s \leq 15 \sim 30\%$ の低置換率であっても同程度の効果が期待できることになる。これは、土圧再配分領域を確保することで、効果的な液状化対策が可能になることを示している。

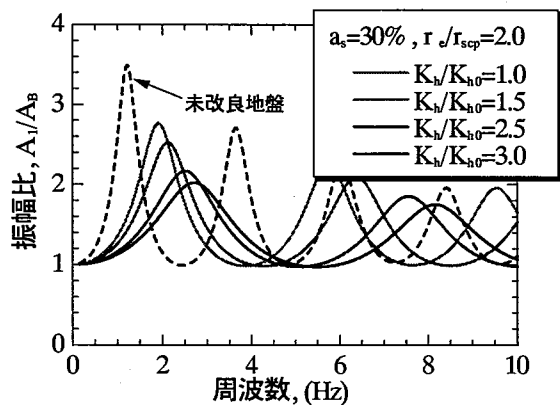


図-12 改良地盤の地震応答特性に及ぼす水平土圧増加率 K_b/K_{h0} の影響 (置換率 $a_s=30\%$, $r_e/r_{scp}=2.0$)

同様に、図-12 は $a_s=30\%$ において打設に伴う水平土圧増加を考慮した場合について示している。土圧増加 K_b/K_{h0} に伴い応答 A_1/A_0 の低減、固有周波数の増加から改良地盤全体の耐震性が向上している。図-13, 14 はさらに詳細に検討した結果を示している。改良率 $a_s=60\%$ においては、水平土圧増加を考慮しない場合 ($K_b/K_{h0}=1.0$)、低減率 $r_r=0.4$ である。しかし、土圧増加を考慮した $K_b/K_{h0}=2.0$ の場合には、 $a_s \leq 15 \sim 30\%$ の低置換率であっても同程度の効果が期待できる。したがって、水平土圧増加や圧密など周辺地盤の剛性の増加によって効果的な液状化対策が可能になる。

6. おわりに

本研究では、二次元個別要素法解析(DEM)による SCP 周辺地盤の地盤内土圧の変化や変形を試みた。また、均質化法を援用することで、改良後の不均質な複合地盤全体の巨視的応答特性を線形弾性の範囲内で解析し、置換率、SCP 周辺地盤の応力変化特性の影響について調べた。主な結果は以下のようである。

- (1) 個別要素法解析(DEM)によって、地盤内の押し広げによる周辺地盤の変形と応力変化を検討した。複雑な応力履歴が周辺地盤に生じ、せん断応力比の増加もみられるが平均主応力の大きな増加もみられ、その効果は打設箇所からの距離とともに減衰することが確認された。今後、ケーシングの考慮や打設時の振動や圧密効果を再現することで、密度増加以外の改良効果を定量的に評価することが課題である。
- (2) 改良地盤全体の巨視的応答特性は、改良率の増加に伴って応答低減率と固有周波数の増加がみられ耐震性の改善がみられた。また、同改良率であっても SCP 周辺の土圧増加を考慮することで著しく改良効果が得られることがあきらかになった。
- (3) したがって、巨視的応答特性と土圧増加を考慮すると現行の設計方法の場合にくらべて半分程度の改良率で同等の耐震性を確保することが可能であると考えられる。実際に、未改良地盤に比べて液状化に対して設計で期待していたよりも、非常に効果的であったとの事例解析結果の報告もある¹¹⁾。以上のことから、液状化対策として、「液状化するか、しないか」ではなくどの程度の地盤の耐震性を期待するかによって改良率を定めるという設計が合理的であるといえる。
- (4) また、均質化を非線形挙動に適用することによって、液状化予測・判定に展開することが今後の課題である。グラベルドレーン工法など他の工法についても同様なことがいえる。
- (5) SCP 間の密度や土圧変化を改良前後でコーン貫入試験・PS 検層などによって調査するとともに、地盤の常時微動などの計測を行い複合地盤全体としての振動特性把握のための実測が必要であると考えられる。

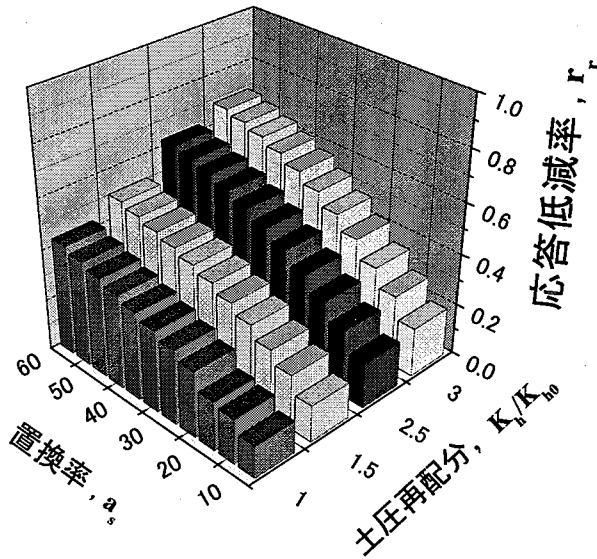


図-13 改良地盤の応答低減率 r_r に及ぼす置換率 a_s と水平土圧増加率 K_b/K_{h0} の影響 ($r_c/r_{SCP}=2.0$)

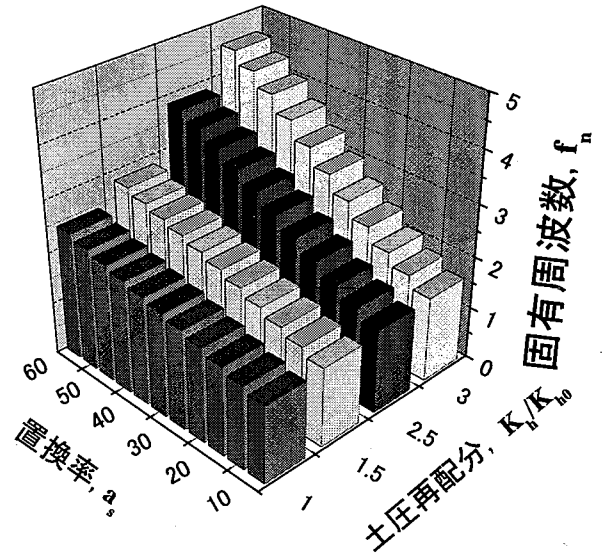


図-14 改良地盤の基本固有周期 f_n に及ぼす置換率 a_s と水平土圧増加率 K_b/K_{h0} の影響 ($r_c/r_{SCP}=2.0$)

参考文献:

- 1)地盤工学会: 液状化対策の調査・設計から施工まで, pp.175-200, 1998.
- 2)例えば、荒井他: コンパクションパイルの複合地盤特性が液状化に与える影響, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集ⅢB-206, 2000.
- 3)山本・原田・野津: 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, 土と基礎, No.11, pp.17-20, 2000.
- 4)例えば木村・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.1863-1864, 1986.
- 5)大石・福井・小澤・遠藤・吉本・前川: 砂礫の液状化特性における側方拘束圧依存性, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.993-994, 2000.
- 6) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L. : "A discrete numerical model for granular assemblies," Geotechnique, Vol.29, pp.47-65, 1979.
- 7) 桑原、前田、川戸: 過圧密履歴を受けた粒状材料の降伏と微細構造の発達・消滅過程に関する個別要素解析, 地盤工学会, 過圧密土および過圧密地盤の力学に関するシンポジウム発表論文集, pp.31-36, 2000.
- 8)Mura, T.: Micromechanics of defects in solids, 1993.
- 9) Nemat-Nasser, S. and Hori, M.: Micromechanics - Overall Properties of Heterogeneous Solids, Elsevier, 1993.
- 10)山内・前田・桑原・川戸: SCP 打設による土圧変化を考慮した改良地盤の巨視的応答特性, 第 35 回地盤工学研究発表会, 2001, pp.2399-2400.
- 11)Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N.: Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, Soils and Foundations, Special Issue, pp.99-107, 1996.