

SCP工法の地盤改良評価システム開発とシミュレーション

兵頭武志¹・秋吉 卓²・松本英敏³・淵田邦彦⁴

¹正会員 工博 若築建設(株) 技術本部技術部 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒 2-23-18)

²正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-0862 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

³正会員 熊本大学技官 工学部環境システム工学科 (同 上)

⁴正会員 工博 八代工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627)

サンドコンパクションパイル (SCP) 工法における砂杭の圧入効果と振動締固め効果について、著者らは地盤改良評価システム (3次元プログラム: WAP3) としてこれまでに開発を進めてきた。今回の報告では、圧入効果の評価法を一部改良して施工事例をシミュレーションして比較検討し、さらに SCP 改良後の体積ひずみの変化に着目した地表面沈下・隆起量の算定法を提案し、モデルを設定してシミュレーションした。その結果、圧入による砂杭の拡張を考慮することで静的圧入効果の変化をパラメトリックに評価することが可能となり、また地表面沈下・隆起については、まだ開発途上ではあるが、変形予測に有効な手法が得られた。

Key Words : Sand compaction pile method, Simulation, Volumetric strain, Void ratio, Displacement

1. はじめに

液状化対策として SCP を施工すると、砂杭の拡張に伴う圧入効果と打設時の繰返し振動締固め効果により周辺地盤が密実化する。SCP 工法の設計法は圧入効果のみに基づく経験的手法によっているが、砂質地盤を対象とする場合には厳密には振動締固めによる効果も含めた手法が必要と思われる。

著者らは砂質地盤における SCP 工法の改良効果に関する地盤改良評価システム (3次元プログラム: WAP3) の構築を目指し、これまでに模型実験や事例解析を行って検証してきた^{1),2),3)}。WAP3 では SCP 工法の改良効果を砂杭の圧入効果と振動締固め効果の2つに区分しており、いずれも改良効果は間隙比の縮小によるせん断剛性の増加として評価している。圧入効果は軸対称問題として応力-ひずみ関係を求め、静的圧入条件を考慮して間隙比の減少を求めるという手順であり、一方の振動締固め効果については、振動に伴う間隙比の減少を波動理論に基づいて定式化し、円筒砂槽を用いた振動台実験より得られた間隙比と繰返し加振回数の関係からせん断剛性を算定するものである。

SCP を打設すると砂の圧入と振動によって地表面が隆起・沈下することは知られており、打設後の

隆起量の予測法はこれまでにいくつか提案されている⁴⁾。これらの予測法は主に隆起形状の予測と隆起量を改良体積に対する比で表した隆起率の予測から行われているが、粘性土地盤を対象とした比較的高置換な条件で用いられているため、そのまま砂質地盤に適用することは適正とは言えない。一方、砂質地盤に施工した場合の隆起量の予測法には、砂杭打設後の体積変化を考慮し、有効締固め係数なる細粒分に依存するパラメータを用いた山本らの提案法⁵⁾がある。そこで、本報告では山本らの提案法を一部適用し、WAP3 より算出される間隙比から沈下・隆起量の予測する手法を提案する。

2. 砂杭の圧入効果

(1) 圧入効果の評価法

圧入効果の評価法の詳細は文献 3) に示されているのでここでは割愛するが、WAP3 では砂杭の圧入効果は、軸対称の円筒座標系における扇形要素の応力の釣合いを考え、次の2つの仮定を設けて平面ひずみ条件 ($\varepsilon_z=0$) で評価することにしていた。

[仮定①] 貫入されたケーシングの体積と同体積の土が、地盤の拘束圧に関係なく側方に一様に移動して間隙比が縮小される (図-1 参照)。

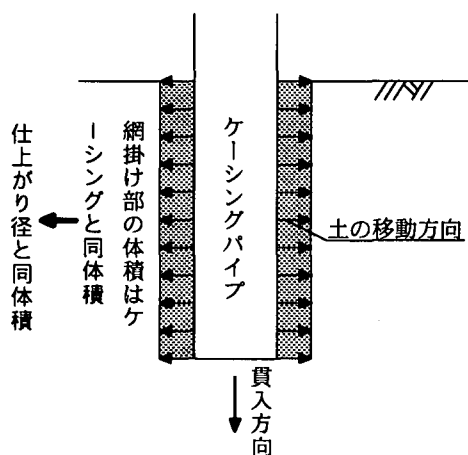


図-1 圧入効果の概念

〔仮定②〕ケーシング圧入前後で地盤全体の体積は変化しない。

この2つの仮定は実状に必ずしも適合しているとは言えないため、今回の報告では①の仮定を修正して評価することを試みた。なお、②については沈下・隆起に関する問題であるので、次章で述べることにする。

本報告では、上述①の仮定に関して、ケーシングと同体積ではなく出来上りの砂杭と同体積の土が側方に移動するという仮定（図-1）に修正し、拡張率 r_e なる定数を導入して静的圧入効果を評価することにした。拡張率はケーシングの外径に対する砂杭径の比として次のように表される。

$$r_e = \phi_s / \phi_c \quad (1)$$

ここに、 ϕ_c ：ケーシングの外径、 ϕ_s ：砂杭の仕上がり径、である。

（2）モデル地盤の計算結果

まず、単純なモデル地盤に対して WAP3 で計算し、拡張率を考慮した場合の静的圧入による N 値の増加状況と考慮しない場合のそれとを比較してみることにする。

図-2 の点線に示す初期 N 値分布（拘束圧依存性を考慮した換算 N 値は全層で 10 に相当）で、全層で細粒分含有率 $F_c=20\%$ のモデル地盤を設定する。打設条件は表-1 のモデル 1 に示すとおりとし、杭間の N 値を WAP3 で計算した結果が図-2 である。図中の●が拡張率を考慮しないケース（ $r_e=1.0$ 、置換率 $A_s=0.09$ ）で、白抜きのマーカーが拡張率を考慮したケース（ $r_e=1.1\sim 1.5$ 、 $A_s=0.11\sim 0.20$ ）である。同図より、拡張率を大きく設定するにしたがって改良効果は増大していることが見て取れるが、 $r_e=1.3$ を超えると最小間隙比に相当する N 値に達し、頭打ちの状態を示していることが分かる。このことを逆に考えると、このモデル地盤に対しては拡張率を

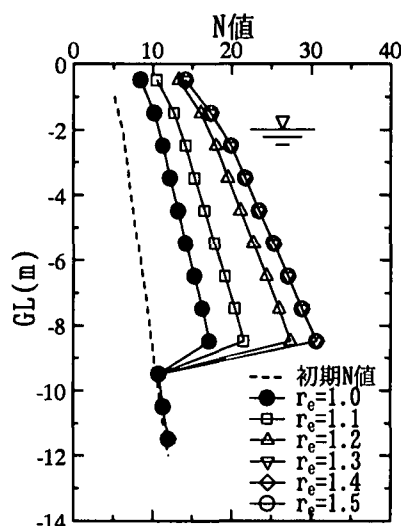


図-2 圧入計算結果（杭間中央）

表-1 打設条件

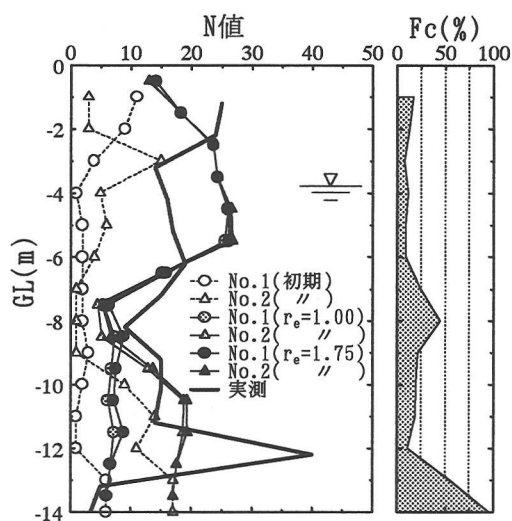
	モデル 1	モデル 2 (地点No.1,2)	モデル 3 (地点No.3)
加 振 力	443kN		429kN
加 振 振 動 数	9.7Hz		9.3Hz
ケーシング径	0.4m		
杭 配 置	正方形		
杭 間 隔	1.2m	1.5m	2.0m
打 設 深 度	10.0m	13.0m	12.0m
拡 径 率	1.0~1.5	1.0, 1.75	1.0, 1.75

1.3 以上に設定すれば、静的圧入による締固めだけで効果は十分に発揮されるということになる。

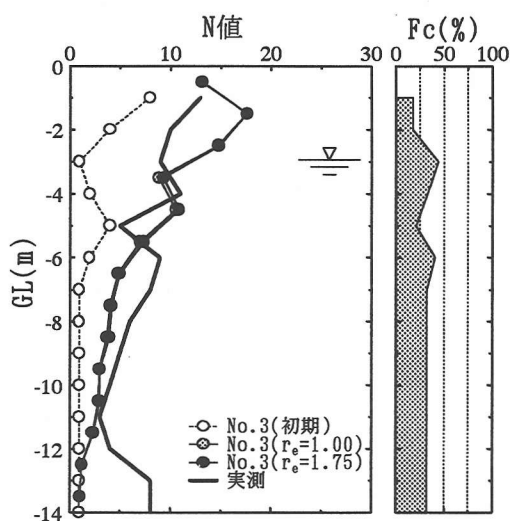
一方、深層部では上述したように仮定①の側方移動のみを想定しているの、特に打設深さで深は拡張率を大きくしても改良効果は上がらない。逆に拘束圧の小さい地表面付近の改良効果は一般に小さいことが経験上指摘されていることから、計算結果は実状よりも高い状況を示していると考えられる。

次に、液状化対策として SCP を施工した 3 地点の施工事例を用いて検証する。図-3(a)の点線（地点 No.1,2）および図-3(b)の点線（地点 No.3）で示す初期 N 値分布および細粒分分布の地盤に、表-1 のモデル 2,3 の打設条件で施工した場合の杭間の N 値を図-3 の実線に示す。なお、杭間中央の N 値増加はその周りの 4 本の砂杭打設に支配されられるので、計算結果は 4 本打設時のものを示している。図-3 の薄墨のマーカーが拡張率 $r_e=1.0$ の場合で、黒塗りのものが $r_e=1.75$ の場合であるが、計算値はいずれの場合も浅層部での N 値の増加が著しく、実測値とは異なっている。

一方、深層部ではばらつきはあるが実測値とほぼ

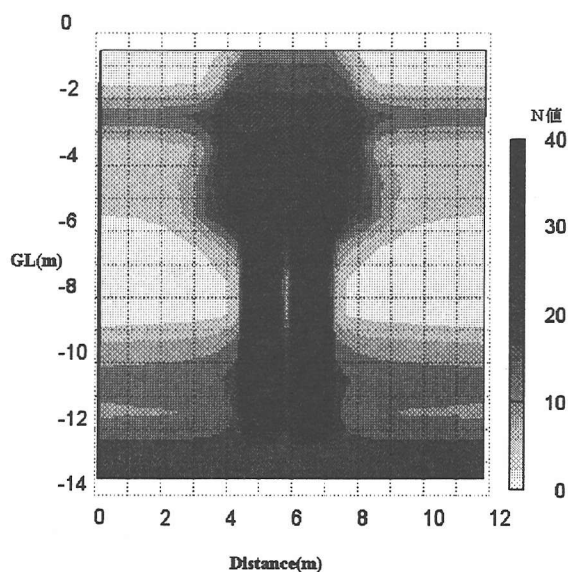


(a)地点 No.1,2

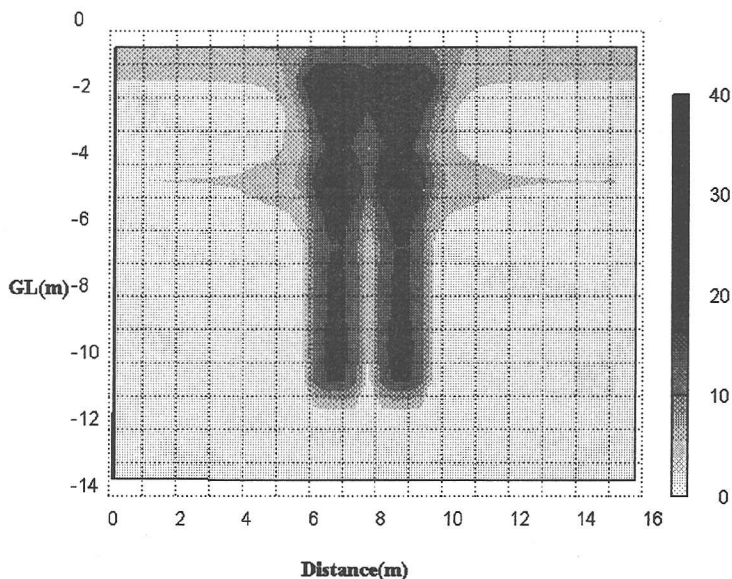


(b)地点 No.3

図-3 SCP 打設前後の杭間 N 値および細粒分分布



(a)地点 No.2



(b)地点 No.3

図-4 SCP 打設後の N 値の分布

対応した結果が得られている。拡張率の違いによる実測値との対応については判別しにくい、深層部に関しては実測値に対して拡張率を考慮した方がばらつきは小さいようである。

図-4 は地点 No.2, 3 における杭間鉛直断面の N 値の深度分布を示しているが、周辺地盤の改良影響範囲という点から眺めると、深層部よりも浅層部の方が側方への影響範囲が広がっていることがわかる。これは圧入締固めではなく、振動による締固めの影響が浅層部で顕著に現れたことによる。

3. SCP 打設後の沈下・隆起量

(1) 沈下・隆起量の算定方法

ここでは、WAP3 より算定される打設ごとの間隙比の変化を用いた簡易な沈下・隆起量の算定法を示し、モデル地盤の計算結果について考察する。

地盤要素の体積ひずみ Δ は次式で求められる。

$$\Delta = \frac{e_1 - e_0}{1 + e_0} \quad (2)$$

ここに、打設前および打設後の間隙比： e_0 , e_1 , である。この体積ひずみを深さ方向に足し合わせ、次式により水平面上の任意の地点の沈下量 ΔH を求める。

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n (dH_i \cdot \Delta_i) \quad (3)$$

ここに、 dH_i ：地盤要素の深さ、である。

以上を水平平面全地点についてそれぞれ計算し、

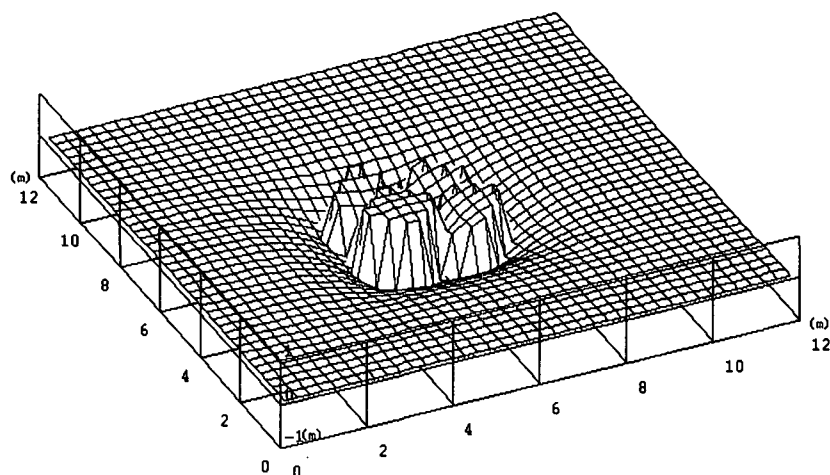


図-5 地表面の沈下・隆起状況

砂杭打設後の地表面沈下量を算定する。WAP3 では、1 本の砂杭打設について(i)静的圧入→(ii)動的ステップ加振という過程で間隙比の減少を追いつながら地盤剛性を算出する仕組みであるので、間隙比を用いて式-2 から体積ひずみを求めることは容易である。しかし、前出の仮定②を設定した場合、間隙比の減少のみで地表面変化を求めると隆起を考慮できないため、沈下量が過大評価されることになる。そこで、山本らが提案する有効締固め係数 R_c を採用して、沈下・隆起計算に限り細粒分の影響による体積変化の補正を行うことにした。有効締固め係数は細粒分含有率 F_c を用いて次式で算出される⁹⁾。

$$R_c = 1.05 - 0.461 \log F_c \quad (4)$$

なお、一連の締固め計算については、間隙比と締固め加振回数との関係式に細粒分含有率の影響がすでに考慮されているので、 R_c を導入していない。

(2) 沈下・隆起計算結果

以上の手順を踏まえ、前出の表-1 に示したモデル2の打設条件と地点 No.2 の N 値分布を用いて沈下・隆起計算を行った結果を図-4 に示す。

同図は、図の中心部に4本打設した場合の地表面の沈下・隆起状況を示しており、算定された沈下・隆起量は最大で0.86mの隆起、0.97mの沈下である。現地では砂杭が多数打設されているので単純な比較はできないが、最大値(隆起量)に関してはおおむね良好な結果と考えられる。ただし、中央の突出部の隆起形状については、一般的な土の安息角などを考えると実際の形状に即しているとはいえない。この原因の一つに、圧入時に砂杭周辺土が拘束圧に関係なく側方に一樣に移動するとしていることがあげられる。今後、拘束圧の影響を考慮した側方移動量の算定法を考える必要がある。

4. おわりに

SCP 工法の圧入効果の評価法を修正改良し、沈下・隆起量を算定する簡易な方法を提案し、モデル地盤を設定して計算した。その結果をまとめると次のとおりである。

- ①ケーシング径と砂杭の仕上がり径の比を表す拡張率 r_e を圧入計算に導入することで、より実状に近い状況を表現できた。
- ②間隙比により体積ひずみを計算して沈下・隆起量を求める手法を提案し、モデル計算を実施した結果、隆起量についてはおおむね良好な結果が得られたが、沈下・隆起形状に関しては実状に対応していなかった。

また、今回の研究で浅層部の拘束圧の影響や沈下・隆起形状など、本手法で検討すべき課題も見つかったため、今後、実績データとの比較・検討結果を蓄積し、改良を加える予定である。

参考文献

- 1)秋吉卓・淵田邦彦・松本英敏・兵頭武志・方火浪：サンドコンパクションパイル工法による地盤剛性改良の動的評価について、土木構造材料論文集，第8号，pp.51-60，1992。
- 2)兵頭武志・秋吉卓・淵田邦彦・松本英敏・方火浪：SCP による地盤改良評価システムの開発，第29回土質工学研究発表会講演集，Vol.3，pp.2131-2134，1994。
- 3)兵頭武志：液状化に対するサンドコンパクションパイル工法に関する研究，熊本大学博士論文，1997.12。
- 4)地盤工学会：地盤工学実務シリーズ11 地盤改良効果の予測と実際，pp.183-194，2000。
- 5)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法，土と基礎，Vol.48，No.11，pp.17-20，2000。