

(17) SCP工法による地盤改良のシミュレーション

若築建設(株)

熊本大学工学部

八代工業高等専門学校

熊本大学工学部

熊本大学大学院自然科学研究科

正員 ○兵頭武志

正員 秋吉 卓

正員 洲田邦彦

正員 松本英敏

学生員 方 火浪

1. はじめに

液状化防止を目的とした軟弱地盤の改良工法としてサンドコンパクションパイル(SCP)を用いた工法の実績が多いが、従来のSCPの設計は静的圧入効果のみからなされている。そこで、筆者らは動的な締固めという観点からその実用的な締固め理論を提案し、室内実験等による検証を行ってきた。特に実験では、現場と類似なSCP打設用ケーシングを用い、ほぼ同様な手順により地盤改良を実現して良好な結果を得ており、その効果を波動累積プログラム(WAP3)で概略説明しうること示した。

2. 振動締固めシミュレーション¹⁾

一様な砂地盤を想定した3次元波動解析を行うにあたり、次のような仮定をする(図1参照)。まず、振動荷重 P が動径方向に一様にかつ同時に作用するものとし、伝播する波動は放射波のみであり、反射波は生じないものとする。円周方向に隣合う各放射状要素は互いに独立で、かつ、各要素境界で半径方向(r 方向)の変位が連続であるとする。このとき、各要素の中心点の直ひずみをその要素の代表ひずみとする。さらに、 e (間隙比) - N_r (加振回数)関係としては、実験結果¹⁾を参考にして近似的に次式のように表せるものと仮定する。

$$e = (e_0 - e_{\min}) e^{-a\gamma N_r} + e_{\min} \quad (1)$$

ここに、 e_0 ；初期間隙比、 $e_{\min}$ ；最小間隙比、 a ；係数、 γ ；ひずみ。式(1)において、間隙比 e の変化は加振回数 N_r とひずみ γ に依存するものと考え、 γ は振動締固め施工時に生じる地盤要素の直ひずみ ε_r (r 方向ひずみ)で代表させた。

解析手順としては、①解析地盤を直方体要素に区切り、SCP打設箇所を設定し、加振点深度を設定する。次に、その加振点と任意の地盤要素とを結ぶ線にかかる要素を検出する。② $e - N_r$ 曲線を利用し、式(1)より得られた間隙比 e 及び拘束圧 σ'_v をHardin-Richtartの実験式²⁾に適用し土のせん断弾性係数 G を算出する。さらに N_r に依存した G を用いて各要素の変位及びひずみの増分を求める。③ひとつの加振点から全ての方向に伝播するとき、その経路にかかる全ての要素の変位及びひずみの増分を求め、これらのことを1本のSCPにおける全ての加振点について行い、 $G + \Delta G$ として新しい G を求める。④以上の手順を全てのSCPについて行い地盤剛性(G)の3次元分布を決定する。

[a の決定のための実験]： $e - N_r$ 曲線を確定するため、すなわち係数 a を決定するため振動台実験を行った。

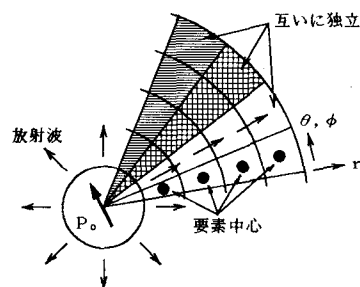


図1 波動伝播概念図

表1 試料砂の物理定数

	試料砂 (I)	試料砂 (II)
比重	2.74	2.84
最大粒径	2 mm	2 mm
最大間隙比	1.026	0.988
最小間隙比	0.671	0.668
均等係数	2.31	4.59
平均粒径	0.34 mm	0.32 mm
細粒分含有率	0.0 %	8.7 %

振動台上に、内径80mm、高さ800mm のアクリル製円筒形砂槽を固定し、これに水中落下法による層厚300mm の緩詰め地盤を作製し、排水状態の载荷を行った。加振は振動台の性能の制約から、振動数は20, 25, 30Hzの3種類で、最大加速度 0.15g~0.35gの上下動加振とした。今回用いた試料砂は、表1のような細粒分含有率が極端に異なる2種類の砂(試料砂Ⅰ:川砂, 試料砂Ⅱ:海砂)で、粒径分布は図2のようにになっている。

以上のような実験より、係数 a を上載圧 σ_v の関数として回帰させると次式のように得られた。

$$a = \begin{cases} 45.3\sigma_v + 0.36 & ; \text{試料砂Ⅰ} \\ 0.75\sigma_v + 0.03 & ; \text{試料砂Ⅱ} \end{cases} \dots (2)$$

この a を式(1)に用いて、サンドコンパクションパイル(SCP)によって地盤の剛性が改良されていくプロセスをシミュレートし、さらに地盤内任意点の剛性を動的に評価する、波動累積プログラムWAP3 (Wave Accumulation Process in 3 dimensions)を開発した。

このWAP3によるSCP改良地盤の推定剛性を現地盤での例と比較検討するため、図3のような粒土組成を持った地盤に対する実施例を参考にした。この地盤は深度15m付近までは細粒分含有率(F_c)は平均8%前後で、15m以深では20%程度であり、試料砂(Ⅱ)の方により近いものである。

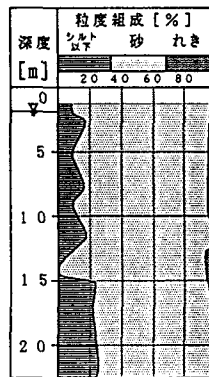


図3 モデル地盤の粒度組成

本実例では、119本のSCPが打設されているが、SCP改良地盤の中間のせん断剛性(図4のQ点)は、周りの4本(正方形配置)のSCPによる影響が支配的として、表2のような打設条件でWAP3により解析した。その結果が図5であるが、 $F_c=8.7\%$ の試料砂(Ⅱ)に対する解析結果は、実測値を平均的に表現しているといえ、また従来法による設計とも近い。

3. SCPの室内実験概要^{3), 4)}

〔実験概要〕: 本実験に用いた鋼製の小型実験砂槽(長さ1.5m, 奥行き1.0m, 深さ1.0m)を図6に示す。飽和砂部分(層厚800mm)は、表3に示す比較的均一な試料砂(川砂)を用い、水中落下法により緩詰め状態(相対密度 $D_r \approx 20\%$)とした。図7のように、ケーシングは内径70mm、長さ900mm、肉厚3mmの鋼管パイプで、その天端に小型起振機(最大加振力9.8kgf)を取り付け、圧縮空気の圧入口及び中詰め砂投入口を天端下約100mmの位置に取り付けたもので、加振方向は鉛直方向のみである。本実験でのSCPの打設は、表4の5ケースの施工条件について、一般の現場と同様に図7の手順で

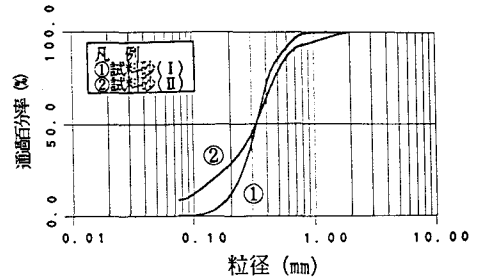


図2 試料砂の粒径加積曲線

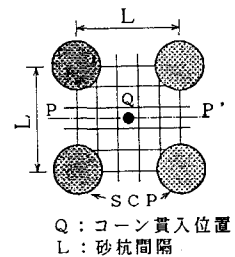


図4 SCP配置図

表2 SCP打設条件

加振力 [ton]	59.9
加振振動数 [Hz]	9.3
SCP長 [m]	21.0
SCP径 [m]	0.7
SCP本数 [本]	4
SCP間隔 [m]	2.0

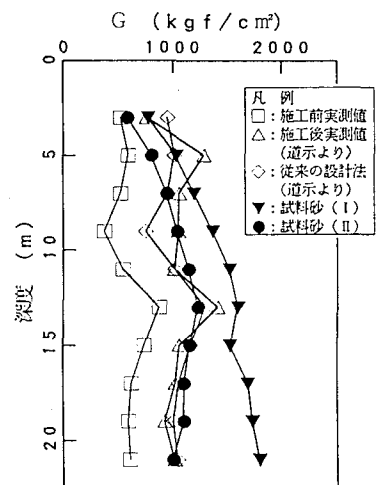


図5 Q点直下のせん断弾性係数Gの分布の比較(Q点:図4参照)

表3 試料砂の物理定数

土粒子密度	2.866 ton/m ³
最大粒径	2.0 mm
最大間隙比	0.985
最小間隙比	0.688
均等係数	2.33
平均粒径	0.32
透水係数	1.38×10^{-4} m/sec

表4 施工条件

	砂杭間隔 (mm)	締固め 加振力 (kgf)	記 号
CASE-1	200	6.2	△
CASE-2	200	8.0	○
CASE-3	200	9.8	□
CASE-4	250	8.0	●
CASE-5	250	9.8	■

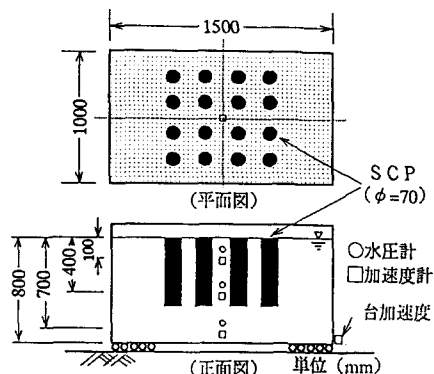


図6 砂槽及びSCP打設地盤

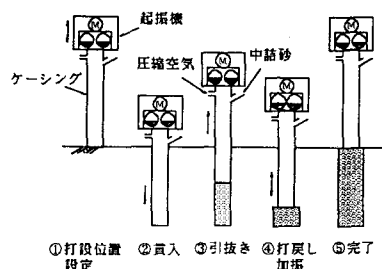


図7 SCPケーシング装置と打設施工手順 (室内実験)

行った。まず、打設深度500mm から1ステップにつき 100mm ずつ加振点深度を引き上げて行き、各深度において振動数25 Hzで10秒間加振し締固めを行った。なお、ケーシング引き抜き時に小型エアーコンプレッサー (最大空気圧0.1kgf/cm²) を用いてケーシング内に圧縮空気を送り込むことにより中詰砂を強制的に排出できるようにした。打設配置は正方形配置で、打設本数は長さ方向に4列、奥行き方向に4列の計16本とした。なお、地盤剛性は、コーン貫入試験機の抵抗値から換算したが、貫入方法は人力による連続圧入方式で、測定箇所は深度100mm の位置から 100mm間隔で深度700mm の位置までとした。

〔実験結果と考察〕： 図8はコーン貫入抵抗値 q_c について、初期状態から砂杭4本打設後までの増分 Δq_c を深度方向にプロットしたものである。この図より、全深度にわたり q_c が増加しており、どのケースも打設深度500mm 付近で最大の増分を示している。砂杭間隔200mm の場合、地表面から打設深度 500mmまでは締固め加振力の違いによる差は見られず、打設深度 500mm 以深で締固め加振力が小さい程改良効果が低いことが分かる。一方、砂杭間隔250mm の場合は、全深度にわたって締固め加振力の違いによる影響が Δq_c の差となって現れており、砂杭間隔200mm の場合と同じ改良効果の実現には大きな加振力が必要である。次に砂杭間隔別に見ると、締固め加振力9.8kgfでは、全深度にわたり砂杭間隔250mm の Δq_c が砂杭間隔 200mmの値の約70%となっている。締固め加振力8.0kgfでは、全深度にわたり約50%となっている。これらのことより、本実験では改良効果に対して砂杭間隔が締固め加振力に比べて大きく影響することが認められた。

〔実験値と解析値の対応〕： 図9は本実験の初期飽和緩詰め砂層に対して砂杭を4本打設した後、図4における P-P' 断面について、WAP3を用いて解析したせん断弾性係数 G (以下、解析値)をコンターにより図示したものである。砂杭間隔は、(a)が250mm、(b)が200mm、締固め加振力は(a)、(b)ともに8.0kgfである。(a)について見ると深層部分の砂杭付近で高い改良効果がみられる。(b)では砂杭より離れた部分では(a)と変わらないが、砂杭付近で(a)に比べ G が約15(kgf/cm²)程度大きく現れている。図10は、締固

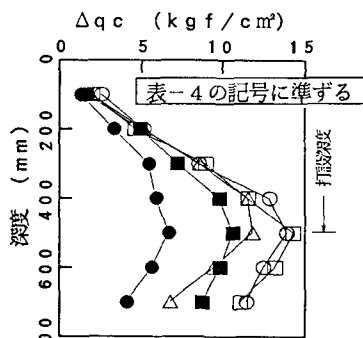


図8 コーン貫入抵抗値の増分 Δq_c の深度分布

め加振力8.0kgf、砂杭間隔250mm の場合のコーン貫入抵抗値から換算したせん断弾性係数 G_1 (以下、実験値) 及び解析値 G から初期値 G_0 を差し引いたそれぞれの増分 ΔG を深度方向にプロットしたものである。全体的にみて実験値に比べ若干解析値が小さいものの、実験値と解析値は同じ傾向を示している。図11は砂杭間隔をパラメータにし、締固め加振力に対する ΔG についてプロットしたものである。まず、(a)の深度400mmの場合は解析値が実験値より若干大きく出ているがよく対応しているのが分かる。(b)は深度500mmの場合で(a)とは逆に解析値が実験値より小さく出ているが、締固め加振力に伴う ΔG の増加傾向はほぼ一致している。また、(a)、(b)両図から砂杭間隔が狭くなる程、締固め加振力に伴う ΔG の増加率は高くなるのが分かる。以上のことから、この解析手法は実験値に対し地盤の全深度において適合性が認められた。

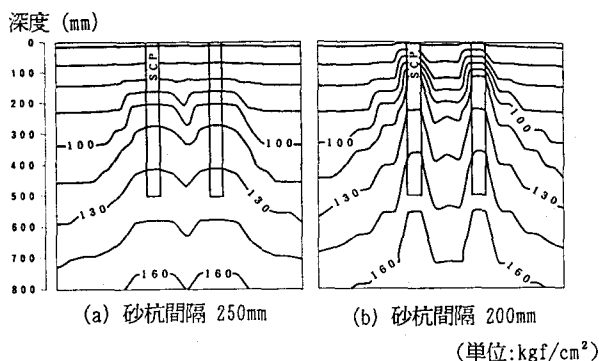


図9 改良地盤のせん断弾性係数 G の分布(P-P')
(締固め加振力 8.0kgf)

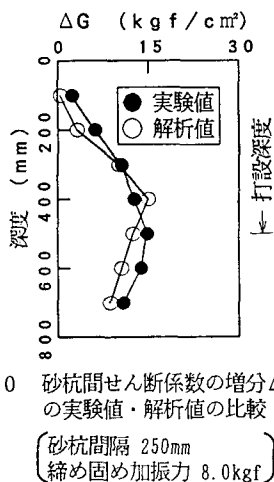


図10 砂杭間せん断係数の増分 ΔG の実験値・解析値の比較
(砂杭間隔 250mm
締め固め加振力 8.0kgf)

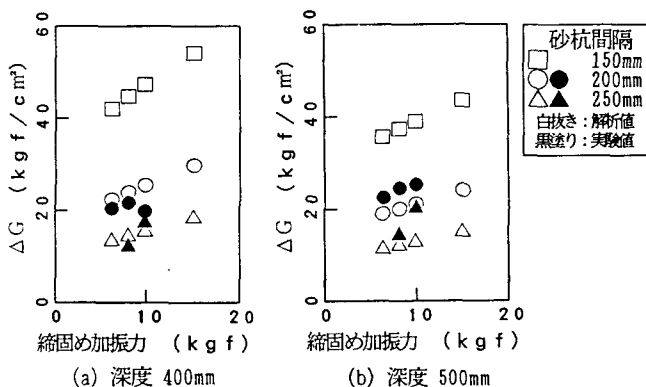


図11 締固め加振力とせん断弾性係数の増分 ΔG との関係

4. おわりに

SCPによる地盤改良プロセスを、振動による締固めとして評価する手法を提案し、このプログラムとしてWAP3を開発したが、実験値ともかなり対応した結果を出すことが示された。従来の手法と異なり、本法は不均質な地盤にも適用し得るので施工管理や設計上でも有用ではないかと思われる。

<参考文献>

- 1) 秋吉・淵田・兵頭・方：サンドコンパクション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，1992.11，pp.51-60.
- 2) 石原研而：土質力学の基礎，鹿島出版会，1976.
- 3) 秋吉・松本・兵頭：振動締固め工法の動的評価について，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第3部，1992.9，pp.1112-1113.
- 4) 秋吉・兵頭・方・阿武：SCP工法による地盤締固め効果について，平成4年度土木学会西部支部研究発表会 講演概要集，1993.3，pp.494-495.