

振動締固め工法の波動論的考察

熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
 熊本大学工学部 正員 松本 英敏
 八代工業高等専門学校 正員 湊田 邦彦
 若築建設(株) ○正員 兵頭 武志

1. はじめに 地盤の密度の増大により地震時の液状化を防止する工法として広く施工されているものに、振動締固め工法がある。その中のサンドコンパクションパイル工法(以下SCP工法と呼ぶ)を取り上げると、その締固め効果は、砂杭の施工間隔、地盤条件、施工機械等により様々に変化して複雑であるため、従来は砂杭配置による静的取扱い方法のみで処理していて、動的な締固めプロセスを定量的に把握するには至っていないのが実状である。

そこで本研究では、簡易な模型実験により間隙比と加振回数との関係を求め、その結果を用いて波動理論に基づいた3次元解析を行うことにより、SCP工法による振動締固め施工後の周辺地盤剛性(G)の改良度の分布を図化することにした。なお、本報告ではその概要について示すことにする。

2. 解析方法

[1] 実験方法 実験装置は図-1に示すように、振動台の上に内径80mm、高さ800mmの円筒形砂槽を用い、水中落下によりゆる詰め飽和砂地盤を30cm作成する。その上に上載板を載せ、さらにその上に上載圧としておもりを載せている。振動台を鉛直加振し、砂面の沈下量を変位計により計測し、加振回数に対する間隙比の変化をプロットすると概略図-2のようになる(以下これを $e-N$ 曲線と呼ぶ)。様々なパラメーター(上載圧、振動数等)について同様のことを繰り返し、間隙比と加振回数との関係を求める。なお、入力波は正弦波とする。

[2] 解析手順

波動理論に基づいた3次元解析を行うにあたり、次のような仮定をする。

(図-3参照)

- ①反射波(後退波)は生じず、放射波(進行波)のみとする。
- ②各放射状要素は互いに独立で各要素境界で変位(r 方向)が連続とする。
- ③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。
- ④振動荷重 P_0 が動径方向に一様にかつ同時に作用するものとする。

以上の仮定により解析手順を示すと、

1) 解析地盤を直方体要素に区切り、砂杭(SCP)打設箇所を設定し、加振点深度を設定する。

2) 加振点と地盤内の任意の要素とを結ぶ線上にかかる要素を検出する。

3) 実験によって得られた $e-N$ 曲線を利用してHardin-Richartの実験式¹⁾(2)により間隙比の増分(減少分) Δe に対する土のせん断弾性係数 G の増分 ΔG を算出する。

〔 $e-N$ 曲線利用法〕 間隙比の変化は加振回数とせん断ひずみに依存するものと考え、この際、SCP打設時に生じる要素の直ひずみ ε_r (r 方向ひずみ)はせん断ひずみ γ と大差ないものとし、次のような簡易式を仮定する。

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

ここに、 e : 間隙比、 e_0 : 初期間隙比、 e_{min} : 初期間隙比、

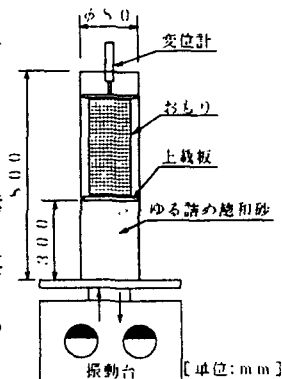


図-1 実験装置

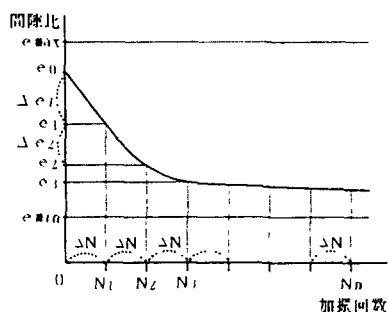


図-2 $e-N$ 曲線

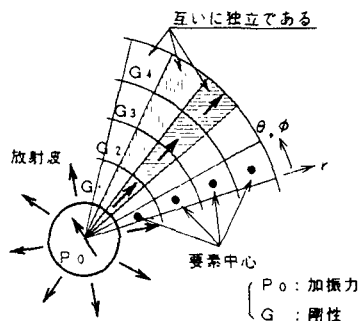


図-3 波動伝播概念図

a ; 定数, r ; せん断ひずみ, N ; 加振回数

$$\text{この } e \text{ に対して、Hardin-Richtart の式を適用し } G \text{ を求める。: } G = 330 \frac{2.97 - e}{1 + e} \sigma_v'^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 σ_v' ; 拘束圧 (有効応力)

4) 式 (2) により求められた G を用いて理論式を当てはめ、任意の要素の変位、ひずみの増分を求める。

3次元極座標 (球) における波動方程式は、半径方向の変位振幅を u_0 とすると、次式となる。

$$\frac{\partial^2 u_0}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_0}{\partial r} + [k_L^2 - \frac{2}{r^2}] u_0 = 0 \quad (3) \quad \text{ここに、} k_L = \omega / v_L \text{ ; (波数)、} v_L \text{ ; P波速度}$$

この解は : $u_0 = A h_1^{(2)}(k_L r)$ (4) ここに、 $h_1^{(2)}(k_L r)$ は複素表示の球Bessel関数

この波動 (式 (4)) を図-3の要素境界で変位を連続させて解く。ただし、反射波はないものとする。

このとき、直ひずみ ε_r は次のようになる。

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} = A \frac{\partial}{\partial r} h_1^{(2)}(k_L r) = A \left[k_L h_0^{(2)}(k_L r) - \frac{2}{r} h_1^{(2)}(k_L r) \right] \quad (5)$$

$$\text{したがって、直応力 } \sigma_r \text{ は : } \sigma_r = A \cdot 2G \left[\alpha k_L h_0^{(2)}(k_L r) - \frac{2}{r} h_1^{(2)}(k_L r) \right] \quad (6)$$

ここに、 $\alpha = \frac{1-\nu}{1-2\nu}$ 、 ν ; ポアソン比

5) 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、ひずみの増分を算出する。

6) 1本の砂杭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。

7) 全ての砂杭について 1) ~ 6) を行い、剛性 (G) の分布を図化する。

3. モデルパラメーターを用いた解析結果

一様なゆる詰め飽和砂地盤を想定し、表-1に示すモデルパラメーターを用いて解析した結果を図-4に示すただし、式 (1) の定数 $a = 10.0$ とする。

このとき、-10mの深度から地表面に向かって加振点を上昇させることにより、間隙比が減少しそれに伴って剛性 (G) が蓄積されて増加しているのが判る。

また、理論式中には剛性の増分及び伝播距離に減衰項が (履歴減衰20%) 含まれているため、深いほど、また加振点より遠いほど締固めの効果は小さくなっており、実地盤の分布にはほぼ類似した形ではないかと考えられる。この点については、今後実測資料と対応させていくつもりである。

4. おわりに 現在、実験については進行中であり式

(1) の検証については講演時に発表する予定である。また、今回の解析により、一様な緩い飽和砂地盤でのSCP工法による振動締固め施工後の周辺地盤剛性の分布が概略掴めてきたので、実地盤に即したものにすることも、今後、複合地盤について実測資料と照らし合わせながら研究を進めて行きたい。

[参考文献]

1) 石原 研而: 土質動力学の基礎、鹿島出版会、pp. 142-144.

表-1 モデルパラメーター

P_0 : 加振力[ton]	50.0
f : 加振振動数[Hz]	10.0
H_s : 砂杭長[m]	10.0
r : 砂杭径[m]	0.7
N_s : 砂杭本数	2
S : 砂杭間隔[m]	2.0
G_{sd} : 砂杭剛性[kg/cm ²]	1500.0
e_0 : 初期間隙比	1.0
e_{min} : 最小間隙比	0.6
ΔN : 加振回数増分	1000
H : 層厚[m]	20.0
γ_{sat} : 砂の単位体積重量[kg/m ³]	1800.0

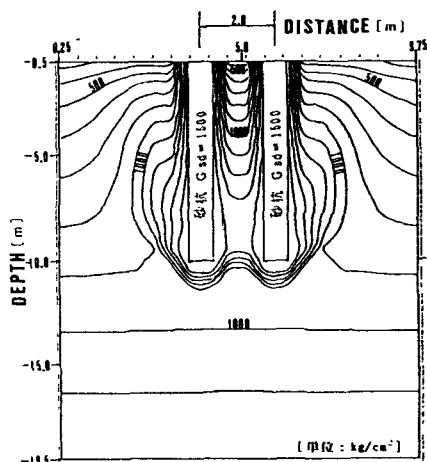


図-4 周辺地盤の剛性 (G) の分布