

地盤改良 (サンドコンパクションパイル) による 周辺地盤の水平変位の検討

STUDY OF LATERAL DISPLACEMENT IN ADJACENT GROUND BY SAND-COMPACTION PILE

池上盛容*・林 博一**・木村孝一***・小宮 隆****
By Morikata IKEGAMI, Hiroshi HAYASHI, Kouichi KIMURA
and Takashi KOMIYA

When sand-compaction piles are driven in the ground, the lateral displacement will be induced on the adjacent soil. Therefore it is necessary prior to the driving work to estimate the amount of the effect on the neighboring structures. Especially it has a significant consequence on in-ground structures. In this present study, measurements were taken in a weak silty-sand ground and analyzed in order to establish a prediction method of the soil displacement. Descriptions are given to the developments of two types of prediction methods: one utilizes a finite element method and the other by multiple regression analysis.

まえがき

サンドコンパクションパイルによる地盤改良の目的は、“地中に強制的に砂杭を造り、軟弱砂層を締固めるもの”であり、この結果、地中応力は増加し、周辺地盤は、一般に図-1のように変位する。

特に、水平変位は、周辺構造物に対し土圧の増加、また変位の増加等の悪影響を与える。

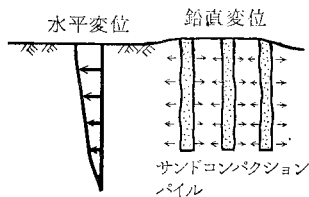


図-1 周辺地盤の変位

したがって、サンドコンパクションパイルを計画する場合には、周辺地盤に発生する水平変位量を事前に予測し、その影響を検討する必要がある。

本報告は、地盤改良による周辺地盤の水平変位データを収集し、その結果から予測式を求め、実際の工事に適

* 正会員 清水建設(株) 土木本部開発部主任
(〒118/東京都港区三田3丁目13-16 三田43森ビル)

** 正会員 清水建設(株) 土木本部開発部課長
(同上)

*** 清水建設(株) 土木本部第2部工事主任
(〒104/東京都中央区京橋2丁目16-1)

**** 清水建設(株) 土木本部第2部主任
(同上)

用した事例を報告する。なお今回は、その予測式の求め方に重点を置く。

1. 予測式の算定に用いた実測データ

(1) データ(その1)

砂杭仕様: サンドコンパクションパイル

長さ 18 m, ϕ 700 (ケーシング ϕ 400)

砂投入量: $0.5 \text{ m}^3/\text{m}$

ピッチ 1.5 m 格子配置

砂杭本数: 4 639 本 (図-2 参照)

測定方法: 可動式傾斜計 (No. 1~No. 3)

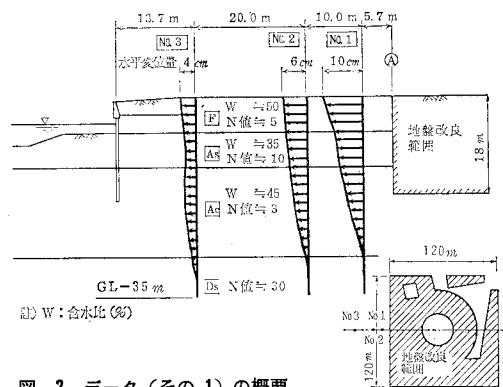


図-2 データ(その1)の概要

(2) データ (その 2)

砂様仕様：上部サンドパイプ (φ400)
 下部サンドコンパクションパイプ (φ700)
 砂杭全長 15 m (サンドコンパクションパイプ長 5.5~9.7 m), ピッチ 2.0 m 格子配置, 砂投入量 0.5 m³/m, 全砂杭本数：238 本
 測定方法：光波距離計 (不動点からの距離の変化量として地表面変位を測定した。また測点④の傍に可動式傾斜計を設けた。)

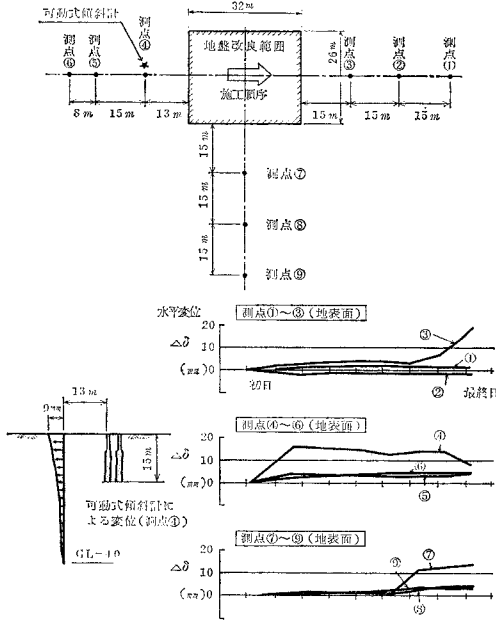


図-3 データ (その 2) の概要

(3) データ (その 3)

砂様仕様：上部サンドパイプ (φ400)
 下部サンドコンパクションパイプ (φ700)
 砂杭全長 15 m (サンドコンパクションパイプ長 10~12 m), ピッチ 2.0 m 格子配置, 砂投入量 0.5 m³/m, 全砂杭本数：128 本
 測定方法：(その 2) と同じ。

【備考】

- ① データ (その 2), (その 3) の地盤条件は, (その 1) と, 同じである。
- ② データ (その 2), (その 3) の地盤は, 遠方まで水平な地盤である。周辺に護岸等の構造物はない。
- ③ データの符号は, 地盤改良範囲から離れる方向をプラスする。

(4) データ分析

- ① データ (その 1) は, (その 2) および (その

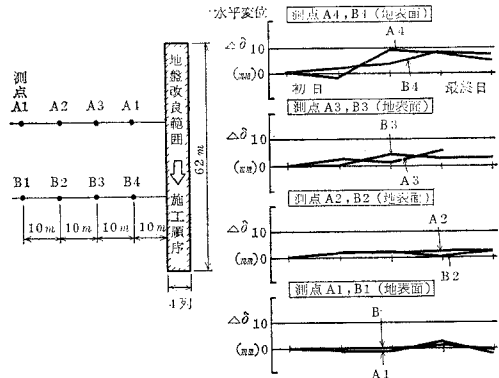


図-4 データ (その 3) の概要

3) に比べ, 水平変位量が 1 ケタ大きい。これは次の理由によるものと考えられる。

- i) サンドコンパクションパイプ長が長く, かつピッチが密である。
- ii) 砂杭打設本数が多い。
- iii) 改良範囲より約 50 m 離れた地点が護岸になっており, 無限地盤に比べ変形しやすい。

② 施工順序については, 変位測点に向って施工していく場合の方が, そうでない場合に比べ, より大きな変位を生じる。

③ 水平変位の深さ方向分布は, (その 1) および (その 2) における可動式傾斜計による測定結果より, 逆三角形分布であると考えられる。

④ データ (その 2) および (その 3) の経時変化は, 単調増加とならず, 凸凹している。これは, 測定誤差および工事用車両等による外力によるものと考えられる。

【備考】

実際の光波距離計による測定と同じ条件を再現し, 変位測定の誤差把握実験を行った。

○実験要領

- I：光波距離計, 反射板据付
- II：測定 (5 回の平均値)
- III：光波距離計, 反射板撤去

I ~ III を 20 回繰返した。その結果を図-5 に示すが, これより測定誤差は ±2 mm であることがわかった。誤差のほとんどは, 据付に起因するものと考えられる。

2. 変位の予測

変位の予測は, 以下に示す 2 つのものを実施した。

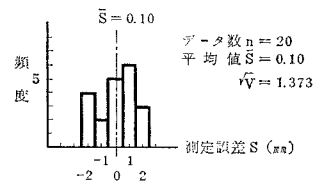


図-5 光波距離計の変位測定誤差のヒストグラム

(1) FEM モデルによる方法

近くに護岸が存在するデータ（その1）については、護岸部までモデル化し、地中変位のシミュレーションを行った。

図-2 に示すデータ（その1）の図中㊸の右側から、地盤改良による応力を荷重として作用させて、No. 1~No. 3 地点の水平変位分布を計算した。地盤の弾性係数 E およびポアソン比 ν は、次のとおりとした。

粘性土層： $E=4E_{50}$, $\nu=0.45$

砂層： $E=28N$, $\nu=0.30$

荷重分布は、矩形分布、三角形分布および逆三角形分布の3種類行ったが、図-6 に示す逆三角形分布が最も実測変位分布に近いことがわかった。図-7 は、No. 2 の地表面水平変位の計算値を実測値に合わせたときの分布図を示す。この場合の荷重は地表で 13.3 tf/m^2 であった。この結果を用い、地盤改良範囲を護岸側に広げた場合の変位予測を行い、施工計画に反映させた。

しかし、この荷重は、データ（その1）と同程度の規模の地盤改良にしか応用できない。

この点については、今後、地盤改良規模と荷重強度の関係データを蓄積し、両者の関係を定式化する必要があると考えている。

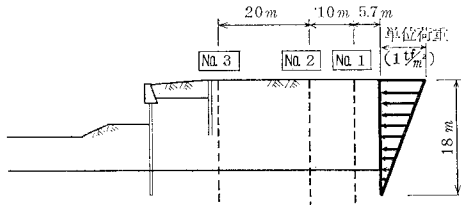


図-6 側圧の荷重パターン

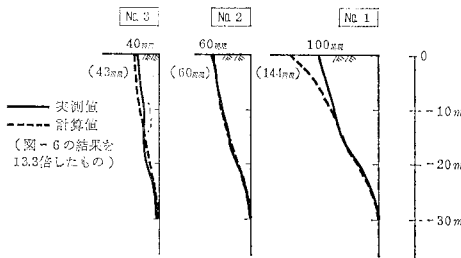


図-7 実測値と計算値の比較

(2) 統計的手法による方法

遠方まで水平な地盤において測定されたデータ（その2）、（その3）については、データを統計的に処理し、変位測定式を算出した。

算出方法のフローを 図-8 に示す。

(a) パラメータの選定

図-9 に水平変位の特性要因図を示すが、これより、推定式を考慮するパラメータを以下のものでした。

水平変位量： $\Delta\delta$ (mm)

測点までの距離： l (m)

測点との角度： θ (度)

サンドコンパクションパイル長： L (m)

改良範囲の奥行き： a (m)

改良範囲の幅： b (m)

改良範囲の前面にある既改良範囲の奥行き： h_1 (m)

改良範囲の後面にある既改良範囲の奥行き： h_2 (m)

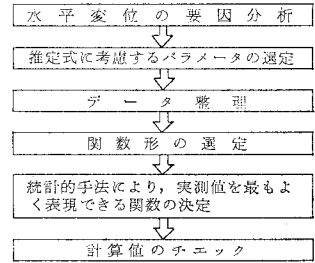


図-8 推定式算出フロー

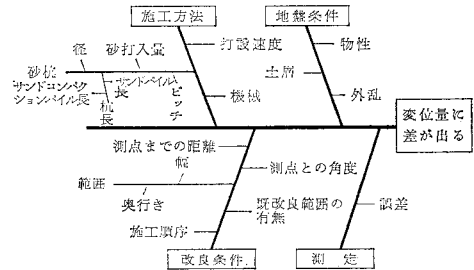


図-9 水平変位位置の特性要因図

これらのパラメータ以外、たとえば、地盤条件、砂杭長 (15m)、ピッチ (2m 格子配置)、砂杭径 (サンドコンパクションパイル $\phi 700$) などは、一定とした。

次に、実測データを整理し、各パラメータ値の一覧表を作成した。各データは、日々の施工ブロックに対する水平変位量 (1日分) $\Delta\delta$ とした。各 $\Delta\delta$ に対する各パラメータの範囲は、以下のとおりであった。

(b) 関数形の選定

① $\Delta\delta \sim (l/\cos\theta)$ の関係は、弾性論によると $\Delta\delta \propto$

- $\Delta\delta$ i : データ数 $N=110$
- l i : $10 \sim 71$ (m)
- θ i : $0 \sim 75$ (度)
- L i : $6 \sim 12$ (m)
- a i : $6 \sim 26$ (m)
- b i : $6 \sim 26$ (m)
- h_1 i : $0 \sim 34$ (m)
- h_2 i : $0 \sim 26$ (m)

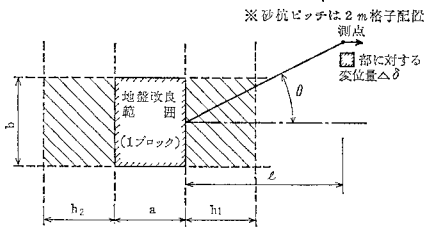
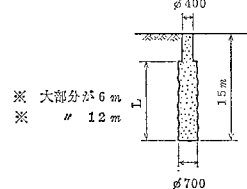


図-10 パラメータの概念図

$(l/\cos \theta)^{-1}$ であるが、砂杭近傍地盤は塑性状態にあると考えられるので、距離減衰の大きい、 $\Delta\delta \propto (l/\cos \theta)^{x_4}$ (ただし、 $x_4 \leq -1$) と設定した。

② $\Delta\delta \sim a$ および $\Delta\delta \sim b$ は、 $\Delta\delta \propto a^{x_2} \cdot b^{x_3}$ (ただし、 $x_2, x_3 \geq 0$) と設定した。

③ $\Delta\delta \sim L$ は、データの傾向より $\Delta\delta \propto L$ と設定した。

④ $\Delta\delta \sim h_1$ および $\Delta\delta \sim h_2$ については、データを次の3つに層別した。

- i) $h_1 = h_2 = 0$ のもの
- ii) $h_1 \neq 0$, かつ $h_2 = 0$ のもの
- iii) $h_1 = 0$, かつ $h_2 \neq 0$ のもの

以上より、変位推定式の関数形は次式となる。

$$\Delta\delta = x_1 \cdot L \cdot a^{x_2} \cdot b^{x_3} \cdot (l/\cos \theta)^{x_4} \dots \dots \dots (1)$$

統計的手法により、式(1)の未定係数 $x_1 \sim x_4$ を求めると表-1の値が得られた。

$x_1 \sim x_4$ は、 表-1 変位推定式の未定係数の計算結果

実測値 $\Delta\delta_{oi}$ と計算値 $\Delta\delta_{ci}$ の差 S_i の自乗和が最小になるものとして算出したものである。表-1における $x_1 \sim x_4$ に対す

x_1	3.5
x_2	1.0
x_3	1.5
x_4	-3.0 ($h_1 = h_2 = 0$ のとき) $Z = 2.3 \text{ mm}$
	-3.1 ($h_1 \neq 0, h_2 = 0$ のとき) $Z = 2.1 \text{ mm}$
	-2.75 ($h_1 = 0, h_2 \neq 0$ のとき) $Z = 1.4 \text{ mm}$

る S_i の自乗和平均の平方根 $Z = \sqrt{\frac{1}{N} \sum S_i^2}$ は、 $1.4 \sim 2.3 \text{ mm}$ であった。

(c) 変位測定式のチェック (1)

推定式から得られる各ブロックの水平変位 $\Delta\delta_i$ (1日分) を合計して、全ブロック打設後の全変位量 $\sum \Delta\delta_i$ を求め、実測データとの比較を行った。その結果を 図-11 に示すが、データ (その3) の測点 A4 を除き、両者の傾向は大差のないものになっているのを確認した。

(d) チェック (2)

実際に、この式を用いて、周辺構造物に与える変位予測を行い、工事の管理に用いた。その結果、変位は予測値以内におさまり、工事は完了した。

あとがき

以上の検討より明らかになった主な事項を次に示す。

- ① 地盤改良による地中応力分布 (水平成分) は、逆三角形分布と考えられる。
- ② 水平変位量の距離減衰は、 $\propto l^{-3}$ (l : 距離) と得られた。これは、弾性解 l^{-1} と大きく異なる。
- ③ 水平変位量は、施工順序により異なる。変位量

は、測点に向って施工して行く方が、そうでない場合に比べ大きい (表-1の x_4 における -3.1 と -2.75 の比較による)。

④ 統計的手法による予測は、FEM に比べ手法も簡単であり、かつ有効である。

しかし、これらはひとつの地盤条件における結果であり、しかも砂杭仕様に限られたものであるため、これらの条件が変わると、地中応力および変位の傾向がどのように変わるか把握されていない。

したがって、今後は、測定方法を改善し、より質の良い実測データを蓄積し、汎用性のある変位推定方法を提案したいと考えている。

また、周辺への影響が懸念される場合の変位軽減対策も合わせて検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 井畔・中沢・林・池上：最適化手法 (山登り法) を用いた3因子実験プログラム，土木学会第9回電算機利用に関するシンポジウム，pp. 89, 1984年。

(1984.11.26・受付)

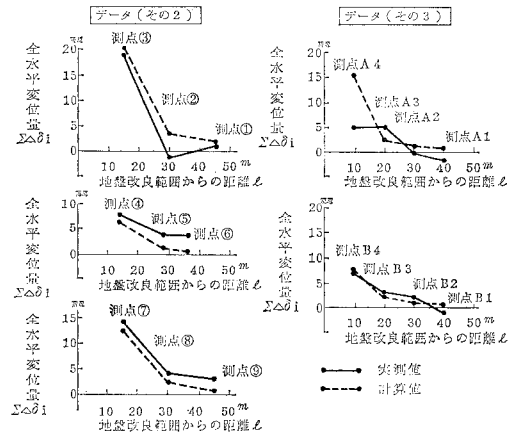


図-11 全ブロック打設後の全水平変位量の 実測値と計算の比較

表-2 式(1)の適用条件

	適用条件
地盤条件	図-2に示した地盤条件とほぼ同じ。 (ただし、周辺地盤は、遠方まで水平) 地盤であること。
砂杭仕様	砂杭長 15 m ケーシング $\phi 400$ サンドコンパクションパイル $\phi 700$ ピッチ 2 m 格子配層
計算方法	(1) 地盤改良範囲を 6 m × 12 m 程度の ブロックに分ける。 (2) 各ブロックについて、式(1)より $\Delta\delta_i$ を計算する。 (3) 全変位量 $\sum \Delta\delta_i$ を求める。
その他	$l \geq 10 \text{ m}$