

鉄鋼スラグ浅層改良杭の水平抵抗 - 改良仕様と改良効果との関係 -

杭の水平抵抗 地盤改良 有限要素法

ジャパンパイル(株) 正会員 本間 裕介
広島大学 国際会員 富永 晃司

1. はじめに

筆者らは、杭頭周辺の極浅層範囲の地盤を鉄鋼スラグによって改良し、杭の水平抵抗を増大させる工法（以降、この杭を鉄鋼スラグ浅層改良杭と呼称）に関する一連の研究を行っている^{1),2)}。今までに行った現場水平加力実験 2 例から、杭頭周辺のごく限られた範囲の地盤を鉄鋼スラグによって改良することで、杭の水平抵抗を増大させる効果があること、およびスラグの力学的特性の経時変化による水平抵抗増大効果のあること等を確認した。しかし、現場実験は、限定された改良仕様におけるものであり、改良幅や改良深さの仕様が改良効果に与える影響について明らかではない。そこで、三次元有限要素法（以降、FEM 解析と記す）を用い、鉄鋼スラグによる浅層改良仕様が改良効果に与える影響について検討を行ったので報告する。

2. 解析モデル

解析モデルは、大型土槽を用いた現場実験²⁾（実験ケースは表 1 参照）を対象にして、図 1 に示すモデルを設定した。境界条件として、側面は法線方向の変位拘束、底面は X,Y,Z 方向の変位拘束を与えている。地盤要素は非線形 8 節点要素とし、Mohr-Coulomb の弾塑性モデルを用いた。また、浅層改良部も一連の現場実験からひび割れ破壊を伴って塑性化する現象を示したが、このような現象をモデル化することは非常に煩雑となるため、地盤と同じモデルを用いた。なお、現場実験は 2 種類のスラグを対象に行ったが、本論文の解析は、転炉スラグ（表 1 中の Case2）のみを対象にした。

一方、杭体の要素は杭中央に弾性梁要素を配置し、杭の節点と周辺の地盤節点を杭半径長の剛な梁で放射状に連結することによって、杭体積を表現できるモデル³⁾とした。さらに、杭の周面には約 1.0mm の厚さの薄層要素を設けて、加力背面側の杭と地盤の剥離を表現できるようにした。地盤要素および浅層改良部に用いた解析定数を表 2 に示す。なお、地盤要素の解析定数は、基本的には日本建築基礎指針⁴⁾で示されている N 値に基づく評価方法（式（1）～式（5））を用いて定めた。ただし、不飽和砂地盤であるため見かけの粘着力が存在すると考え、既往の研究⁵⁾を参考にして粘着力 c を与えた。また、浅層改良部にあたる転炉スラグのポアソン比、弾性係数 E 、内部摩擦角 および粘着力 c は、養生 3 ヶ月目の三軸圧縮実験結果⁶⁾から求めた値を採用し、それ以外の定数は地盤要素と同じように評価を行った。FEM 解析は、汎用プログラム CTC（伊藤忠テクノソリューションズ）製 Soil Plus を用いた。

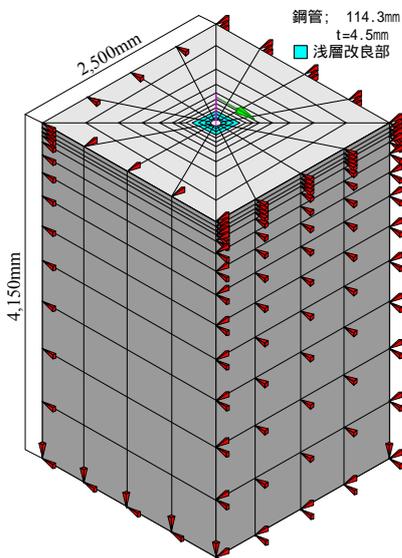


図 1 解析モデル

表 1 実験ケース²⁾

Case	杭径 B(mm)	載荷方法	表層改良部			養生期間 Month
			材料	改良幅	改良深さ	
Case1	114.3	一方向	無	-	-	-
Case2	114.3	正負交番	転炉スラグ	3B	1B	3M
Case3	114.3	正負交番	混合スラグ	3B	1B	3M

表 2 各地盤定数

各解析定数	深度0m-1m	深度1m-3.5m	深度3.5m-4.15m	転炉スラグ
ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33	0.25
評価地盤N値	2	1	4	-
弾性係数 E (kN/m ²)	5600	1400	5600	6325
内部摩擦角 (°)	26	24	29	50
粘着力 c (kN/m ²)	1.0	1.0	1.0	50
せん断弾性係数 G (kN/m ²)	2105	526	2105	2530
静止土圧係数 K_0	0.56	0.59	0.52	0.23

- 弾性係数 : 深度 0m-1m $E=2.8N$ (MN/m²) (1)
- 上記以外の深度 $E=1.4N$ (MN/m²) (2)
- 内部摩擦角 : $= (20N)+20$ (3)
- せん断弾性係数 : $G=E/2(1+)$ (4)
- 静止土圧係数 : $K_0=1-\sin$ (5)
- ここに、N : N 値、 : ポアソン比

3. FEM 解析の精度検証

まず、はじめに解析モデルの有用性を検証するため、現場実験で観察された杭体が浅層改良部に対して相対的に変位し、かつ浅層改良部も周辺地盤に対して相対的に変位する挙動²⁾を、FEM 解析によりどの程度シミュレートできるかの検討を行うこととした。検討結果として、各荷重階における浅層改良部変位 D_i と杭地表面変位 D_p の関係、および D_p に対する D_i の比に関して、実験値と FEM 解析との比較をそれぞれ図 2 および図 3 に示す。なお、浅層改良部変位は加力方

向前方の二隅の平均値を採用している。これらの図から、Mohr-Coulomb に基づく弾塑性モデルでは弾性領域での非線形性が表現できないため、初期荷重階で多少の違いが生じることが読み取れる（図 2 参照）。ただし、最終的な D_p に対する D_i の比は、両者とも 0.4 程度（図 3 参照）となり、全体的には良い対応を示している。また、曲げモーメント分布および変位分布においても、両者間で良い対応が得られていることを付記しておく。これらの結果より、本解析モデルは実測値をかなりの精度でシミュレートできると判断している。

4. 改良仕様の違いが改良効果に与える影響

大型土槽を用いた実験に基づく解析モデルにより、改良仕様（改良幅および改良深さ）が改良効果に与える影響について検討を加えてみる。改良無の 0B（数字は倍率、B は杭径を表し、以下同じ）を基本として、改良仕様としての改良幅を 2B から 6B まで変化させた場合、改良深さを 1B から 6B までと杭の特性長 $1/l$ とした場合について解析を行った。なお、対象杭の $1/l$ は約 1.0m（杭径 B の約 8.8 倍）である。ただし、杭頭の境界条件は自由と固定の両方で解析した。

解析結果のうち、杭頭変位および最大曲げモーメントに関する改良仕様と改良効果との関係を図 4 および図 5 に示す。ただし、改良無の杭頭変位が杭径の約 2.0%に達した時の杭頭せん断力を基準にまとめた結果である。また、縦軸の各改良効果は改良無で正規化した値を用いている。これらの図より以下のことがわかる。

改良幅の増加に伴って、杭頭変位および最大曲げモーメントも減少する。

杭頭変位は、改良深さの増加に伴って減少しながら一定値に収束していく傾向があり、収束し始める改良深さは杭頭自由で 4B であるが、杭頭固定では 5B ~ 6B であり、杭頭接合条件によって多少異なる。

最大曲げモーメントは杭頭接合条件によって異なり、杭頭自由では最大値の低減に最適な改良深さが 2B から 3B の範囲に存在するのに対して、杭頭固定では深さ 4B 以上で一定値に収束する傾向がある。

以上の考察より、改良深さ 3B 以上あれば、杭の水平抵抗に寄与するとされる範囲（杭の特性長 $1/l$ ）まで改良を施したケースとほぼ同等の改良効果が得られると判断できる。

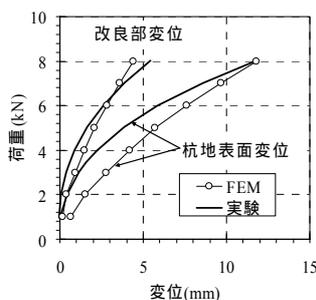


図 2 D_p と D_i の関係

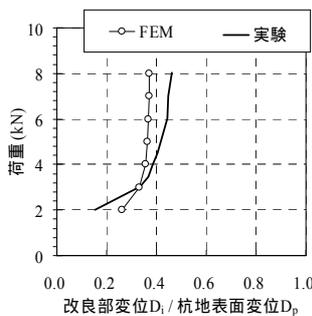


図 3 D_i/D_p の比較

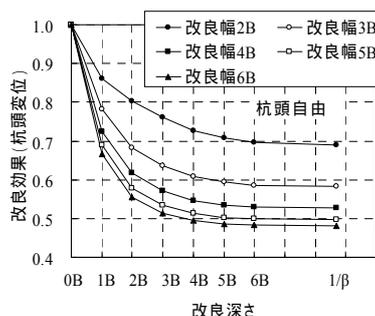


図 4 改良仕様と改良効果の関係（杭頭変位）

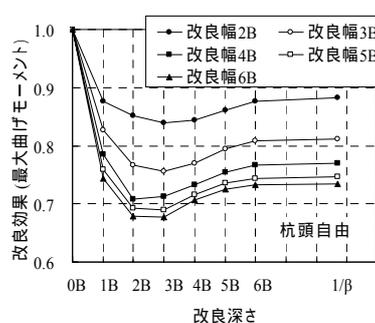
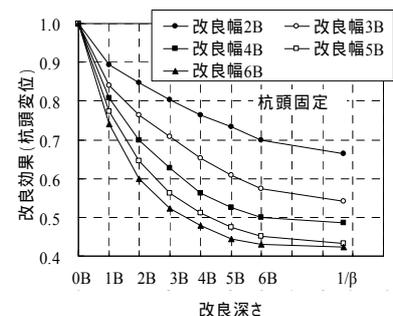
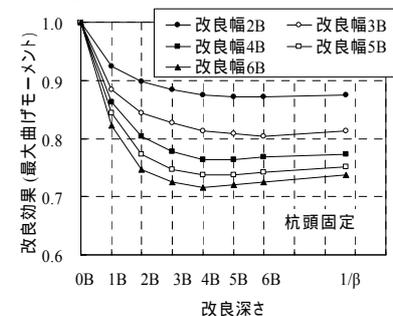


図 5 改良仕様と改良効果の関係（最大曲げモーメント）



5. まとめ

本工法のように地盤改良方法として、鉄鋼スラグで全置換して締固める工法を適用する場合、改良深さよりも改良幅をある程度大きくすることで改良効果を期待する方が効率的で適切であると思われる。解析による検討結果ではあるが、改良仕様と改良効果との関係の解析結果から、鉄鋼スラグ浅層改良杭に適した改良範囲としては、現行設計における単杭のパイルキャップの寸法が一般的に杭径の 2.0~2.5 倍⁷⁾が採用されている現状を考慮すれば、改良幅はこれより大きい 3B 以上、そして改良深さは 3B 以浅に設定することが合理的になると結論できる。

【参考文献】

- 1) 本間・富永・永井 (2005): 鉄鋼スラグによる改良地盤中杭の水平抵抗-スラグの経時変化による影響-, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.1565-1566
- 2) 本間・富永・永井 (2006): 鉄鋼スラグによる浅層改良地盤中杭の繰り返し水平挙動に関する現場実験, 地盤工学ジャーナル, pp.45-55
- 3) 前田ら (2001): 地盤改良複合杭基礎の開発とその支持力特性, 土木学会論文集, No686/ -52, pp.91-107
- 4) 日本建築学会 (2001): 基礎構造設計指針, p.28, p.114, pp.145-146
- 5) 富永 (1983): 一様な定数をもつ弾塑性地盤に設置された群杭の水平抵抗に関する研究, 博士論文, p.122, P.127, P.159
- 6) 本間ら (2006): 杭周地盤改良材として適用するための鉄鋼スラグの力学的特性に関する基礎的実験, 地盤工学ジャーナル, pp.123-130
- 7) 日本建築学会 (1988): 基礎構造設計指針, P.320