

水平力を受ける鉄鋼スラグ浅層改良杭に関する一解析法 - 現場実験結果との比較 -

正会員 本間裕介*
正会員 富永晃司**

解析 直列ばね 鉄鋼スラグ
地盤改良 水平地盤反力

1.はじめに

筆者らは、鉄鋼スラグの新たな用途開発の一環として鉄鋼スラグで杭頭周辺地盤を改良し、杭基礎の水平抵抗増大を図る工法（以降、スラグ浅層改良杭と呼称）の開発を手掛けている。今までに実施した水平加力実験結果から、杭の水平抵抗増大効果があること¹⁾、およびスラグの力学的特性の経時的変化による杭の水平抵抗増大効果のあること²⁾等を確認した。また、スラグ浅層改良杭は改良部と杭とが一体化した挙動を示すのではなく、杭体が改良部に対して相対的に変位し、かつ改良部は周辺地盤に対して相対的に変位する挙動を示す知見を得ている³⁾。

以上の実験結果を踏まえ、さらにスラグ浅層改良杭に関する水平抵抗の評価法を確立するため、杭 - スラグ - 地盤系の挙動性状を考慮した解析モデルの構築を行ってきた。本報告は、この解析法を提示するとともに、大型土槽を用いたスラグ浅層改良杭の現場水平加力実験結果³⁾（実験ケースは表 1 参照）についてシミュレーション解析を行い、構築したモデルの適用性についても検討を行った内容を報告する。なお、本報告では転炉スラグ（Case2）を対象に行ったシミュレーション解析結果についてのみ報告していることをお断りしておく。また、現場水平加力実験については、文献 3)を参照されたい。

表 1 現場水平加力実験ケース

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

2.シミュレーション解析手法

本解析法の基本モデルは、図 1 に示す曲げ剛性 EI を有する杭全長に非線形性を考慮した Winkler 型の地盤ばねを取り付けた梁 - ばねモデルである。実際の解析手法は、地盤ばねの非線形性を考慮して、多層に分割した各分割要素に式(1)を適用して各物理量の一般解を求め、各要素境界における連続条件、杭頭および先端の境界条件から多元連立方程式を解く方法である。

$$d^2/dz^2 \left[EI \cdot d^2y/dz^2 \right] + k_h(z) \cdot y \cdot B = 0 \tag{1}$$

ここに、 EI ；杭体の曲げ剛性（= 544 kN・m²）、 y ；水平変位 (m)、 B ；杭径 (m)、 $k_h(z)$ ；深さ z における水平地盤反

力係数 (kN/m³)である。まず、浅層改良部を除く範囲の $k_h(z)$ は、建築基礎指針⁴⁾で提示されている推奨式を用いた。

ついで、浅層改良部における水平地盤反力係数 k_h は、図 2 に示すように、杭 - スラグ - 地盤系において、杭と改良部間の抵抗ばね（以降、改良内部抵抗ばね K_{hi} と呼称）と改良部と地盤間の抵抗ばね（以降、改良部周面抵抗ばね K_{hs} と呼称）とに分離した非線形集中ばねを直列に連結したモデルを用いることにした。しかし、改良部周面抵抗力は、改良部側面、改良部底面の摩擦抵抗力および改良部前面の受働抵抗力などの合力として生じるが、これらの抵抗力成分を分離して評価することは難しい。したがって、本解析における各抵抗ばねは、各抵抗力と相対変位量との関係から評価することとした。

改良部周面抵抗ばね K_{hs} は、図 5 に示すように、Konder 型双曲線⁵⁾に基づき、浅層改良部周面の全抵抗力 R_s と改良部変位 y_s/B の関係を近似して得られた近似曲線の割線剛性として与えた。ここで、浅層改良部の全抵抗力 R_s は、図 3 に示すように、地表面位置と改良部下端深度 0.1m の 2 点間の曲げモーメント差を区間長で除したせん断力として評価した。また、改良部変位 y_s は、B 方向加力時に測定した改良部変位 D3 と D4 の平均値を用いた（図 4 参照）。

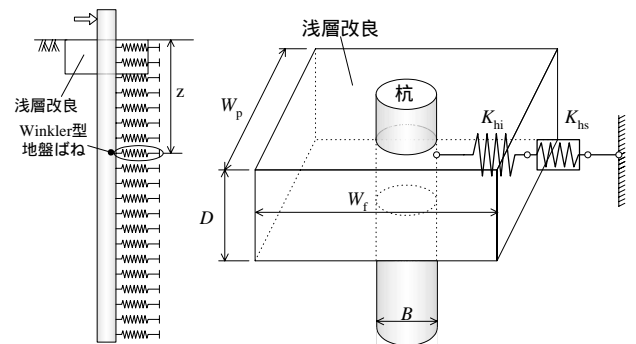


図 1 解析モデル 図 2 直列抵抗ばねモデル

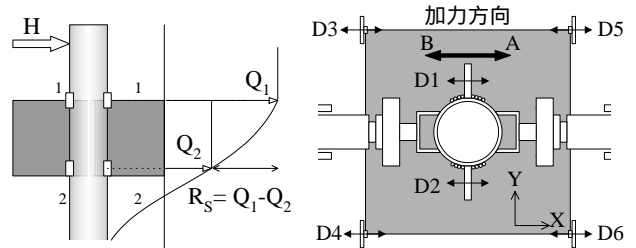


図 3 抵抗力の評価方法 図 4 改良部変位の測点

改良内部抵抗ばね K_{hi} についても、杭が改良部から受けた抵抗力 R_i と改良部内で杭が変位した量 y_i/B の関係から、同様な方法で算出した。なお、抵抗力 R_i は R_s と同じ値を用いることにし、変位 y_i は地表面位置での杭体変位 y_G から改良部変位 y_s を差し引くことで求めた。以上の仮定の下で、浅層改良範囲における水平抵抗ばね K_h (kN/m) は上記の K_{hi} と K_{hs} とを直列的に連結 (以降、直列抵抗ばねモデルと呼称) した式(2)で与えた。なお、上記のばね K_h は、力 (kN) と変位(m) の関係に基づく集中ばね(kN/m)で表している。したがって、式(1)に適用する浅層改良部ばねとして、杭の見付面積 ($B \cdot D$) で除した式(3)で示される水平地盤反力係数 k_h を用いている。

$$K_h = K_{hs} \cdot K_{hi} / (K_{hs} + K_{hi}) \quad (2)$$

$$k_h = K_h / (B \cdot D) \quad (3)$$

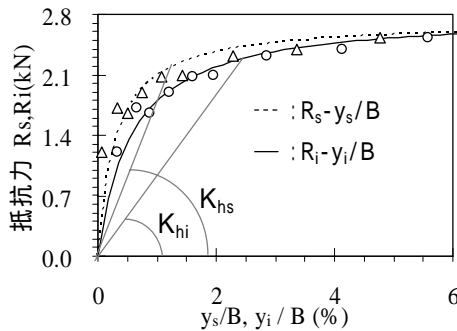


図5 K_{hi} と K_{hs} の比較

3.現場水平加力実験結果³⁾との比較

加力点の水平荷重～変位関係の実験値と解析値を比較して、図6に示す。なお、この図の左側の図は、小変位時 ($y/B = 4.0\%$) を拡大した図である。ここに、提案解析法の有用性を検討するために、改良部と杭とが一体化し剛体と仮定した解析結果 (改良部周面抵抗ばね K_{hs} のみで評価) も付記している。ただし、浅層改良部範囲の杭体の曲げ剛性に浅層改良部の剛性は、考慮に入れていない。これらの図から、以下のことがわかる。

全体的に実験結果に即して各抵抗ばねを決めたことから、実験結果の傾向を良く表現できている。微小変位 ($y/B = 1.0\%$ 以内) では、 K_{hs} のみを考慮したケースの方が提案解析法に比べて実験値に近い傾向を示す場合があるが、それ以降は、提案手法の方が実験値と良く一致する結果が得られている。大変位までの挙動は、各手法による違いがあまり見られない。直列抵抗ばねモデルは、構成する抵抗ばね (K_{hs} および K_{hi}) のうち、ばね剛性の小さい抵抗ばねの影響を大きく受ける。図5からもわかるように、変位の増加に伴って改良部周面抵抗ばね K_{hs} の剛性が改良内部抵抗ばね K_{hi} より小さくなる傾向があり、大変位時においては、改良部周面抵抗ばね K_{hp} の影響が大き

く反映されたものと考えられる。そのため、各手法による違いがあまり現れなかったものと判断される。

つづいて、曲げモーメントの深さ方向分布について、図7に示す。また、各荷重時の最大曲げモーメントの比較を、表2に示した。これらの図表から、各手法ともに最大曲げモーメントが発生する深度など、形状分布は実験値を良く表現できていることがわかる。しかし小変位時では、 K_{hs} のみ考慮したケースの最大曲げモーメントは、実験値に対して過小評価している。これに対して、提案解析法の方が実験値に近い傾向を示している (表2の網掛け部を参照)。

4.まとめ

提案した直列抵抗ばねモデルは、スラグ浅層改良杭の杭体応力および杭体変位等を大変位時まで精度良く評価できることを示した。今回、浅層改良部の抵抗ばねを実験結果に基づいて決定したが、今後は、実験データの蓄積から、実設計に適用できる改良部の抵抗ばねに関する評価法の確立を計りたい。

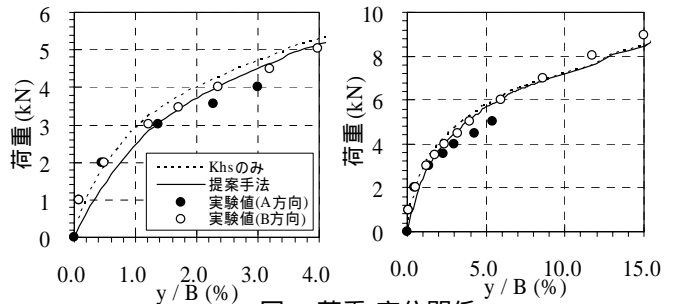


図6 荷重-変位関係

表2 最大曲げモーメントの比較

ケース	荷重 (kN)	最大曲げモーメント				
		実験値 (kN・m)	K_{hs} のみ (kN・m)	比率 (/)	提案手法 (kN・m)	比率 (/)
Case2	1.0	0.19	0.25	(1.32)	0.27	(1.43)
	2.0	0.54	0.45	(0.82)	0.58	(1.08)
	3.0	0.97	0.79	(0.82)	0.91	(0.94)
	4.0	1.44	1.24	(0.86)	1.36	(0.95)
	6.0	2.58	2.51	(0.97)	2.57	(1.00)
	8.0	3.99	4.19	(1.05)	4.11	(1.03)

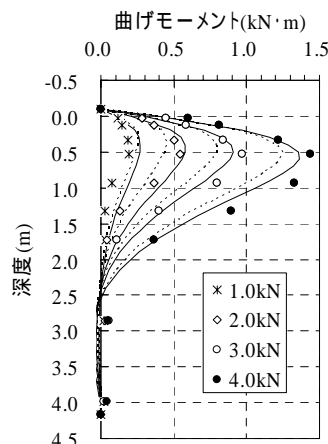


図7 曲げモーメント分布

参考文献

- 1)本間ら：鉄鋼スラグによる改良地盤中杭の水平抵抗増大効果確認実験,第49回地盤工学シンポジウム,pp.165-172,2004
- 2)本間ら：鉄鋼スラグによる地盤改良中杭の水平抵抗-スラグの経時変化による影響-,第40回地盤工学発表会,pp.459-460,2005
- 3)本間ら：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.45-55,2006
- 4)建築基礎構造設計指針(2001),p276(式6.6.3),p277(式6.6.4),p279(式6.6.5)
- 5)二見ら：埋込み節杭のデータによる摩擦杭の荷重～沈下量関係推定法の提案,第44回地盤工学シンポジウム,pp.127-132,1999

*ジャパンパイル株式会社

**広島大学大学院国際協力研究科

*JAPAN PILE CORPORATION

**Graduate school for IDEC,Hiroshima University