

鉄鋼スラグによる表層地盤改良中杭の水平抵抗

正会員 本間裕介*
正会員 富永晃司**

杭の水平抵抗 地盤改良 鉄鋼スラグ
地盤反力係数 加力実験

1. はじめに

近年、生産 流通 廃棄に至るまで、物の効率的な利用やリサイクルが推進されている。ここに、セメント原料や路盤材等で再資源化されている鉄鋼スラグにおいても、その優れた特長（水硬性、膨張性）を生かす用途開発に期待が寄せられている。この気運の基に、筆者らは、鉄鋼スラグで杭周辺地盤を改良し、杭基礎の水平抵抗を増大させる工法に関する一連の実験的研究を行っている。これらの成果として、鉄鋼スラグにより地盤改良を施した実大杭の水平加力実験から、杭の水平抵抗増強効果があること¹⁾、および経時的に変化するスラグ特性の影響で、杭の水平抵抗が増大すること、などを報告した²⁾。

引き続き、本報では、杭の水平抵抗における鉄鋼スラグの地盤改良効果に関して、一連の実験結果に基づき検討を加えた結果について報告する。

2. 実験に供した鉄鋼スラグの概要

地盤改良に用いた鉄鋼スラグは、最大粒径 25mm であり、膨張性が大きい転炉スラグと水硬性を有する水砕スラグとの混合スラグ（重量比 8:2、以下 MS と呼称）および膨張性の小さいエージング処理を施した転炉スラグ（以下、SS と呼称）の 2 種類である。これらの力学的特性を調べるために、三軸圧縮試験および膨張試験などの基礎的試験を実施している^{3), 4)}。なお、本現場実験で用いた鉄鋼スラグと同じ条件である供試体（寸法：100×200mm）の養生は、密閉ビニール袋中で常温放置する方法で行っている。各試験における測定は、養生期間 1、3、6、12 ヶ月で行う計画であり、現在までに 6 ヶ月養生における結果が得られている。

各試験でこれまでの測定結果から、粘着力は SS より MS の方が大きく、養生期間の増加に伴ってその傾向が顕著になること、内部摩擦角においては、両者で有意な差がないこと、弾性係数に関して、MS は拘束圧に関わらず一定であるのに対して、SS は拘束圧の影響を受けて増加するが、その値は MS が SS の 2 倍以上の値を示すこと、膨張変化量に関しては、両者とも非常に小さいが、SS より MS の方が大きくなる傾向があることなど、鉄鋼スラグの力学的特性としては経時的に変化する特性のあることが確認できている。

3. 鉄鋼スラグによる改良地盤中杭の水平加力実験概要

実験概要および実験方法などの詳細は、文献 1) と同様であるので、以下にその概要を示す。詳細については、文献 1) を参照されたい。

実験地盤の土質柱状図を図 1 に示す。なお、杭の水平抵抗に支配的である表層部の地盤条件として、表層付近 (G.L.-1.5m) に鉄鋼スラグや鉄クズが堆積していたため、試験杭施工後に砂地盤(N 値 4)に置換した。試験杭は、節部径 500mm、軸部径 400mm、長さ 13m の PHC 節杭であり、12 断面において対面にひずみ計を取り付けている。

一連の水平加力実験は、表 1 に示す 6 ケースを実施しているが、本報では、杭全長を地盤改良(節部径の 1.5 倍の改良径：図 1 参照)したものに加えて、杭周地表面付近の幅 2.0m×奥行き 2.0m×深さ 0.75m（以下、表層改良と呼称）を地盤改良した Case4 の結果について述べる。なお、地表面付近に膨張性の大きな鉄鋼スラグを用いると、基礎スラブ等に影響を与えることが懸念されたため、実際の基礎構造物への適用を考慮して、表層改良には MS より膨張量の少ない SS を用い、それ以深は MS を用いることとした。

水平加力は、土質工学会基準に準じて一方向段階荷方式で行った。各養生期間 1, 3, 6 ヶ月目に表層改良部に損傷が生じない程度までの荷重で数回実施し、養生 12 ヶ月目において終局状態に至るまで加力した。なお、本報では終局状態まで加力した養生 12 ヶ月目の結果について示す。

4. 実験結果

Case4 の荷荷点における荷重変位関係を図 2 に示す。この図から、荷重 150kN まで、高い水平剛性を有し弾性的な挙動を示すこと、第 4 サイ

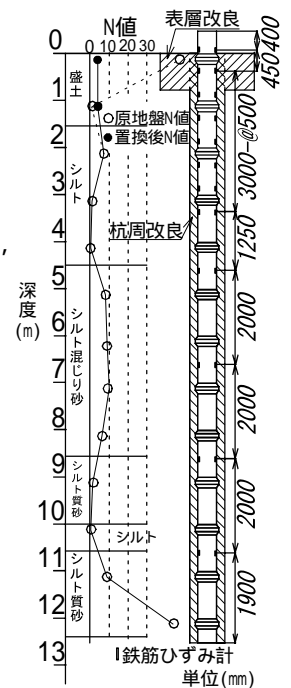


図 1 柱状図および杭姿図

表 1 実験ケース

ケース名	杭	養生(月)	杭周改良		表層改良			
			改良材	径 m	改良材	幅 m	奥行き m	深さ m
Case1	単杭	1	碎石	0.75	-	-	-	-
Case2		1	-	-	-	-	-	-
Case3		1,3,6,12	MS	0.75	-	-	-	-
Case4		1,3,6,12	-	-	SS	2	2	0.75
Case5	2本直列杭	1,3,6,12	MS	0.75	SS	2	3	0.75
Case6		1,3,6,12	-	-	SS	-	-	1.5

クルの荷重 150kN 以降、非線形性を呈して変位が増加し始めること、等が分かる。

一方、図3にはCase4の荷重 変位関係の骨格曲線を変位 10mm まで示した。なお、杭に対する表層改良部の挙動確認用に測定した表層改良部四隅の地表面水平変位（後述する図4中に示す位置G1～G4）も併せて示した。ただし、杭の変位は、載荷点の荷重 変位関係を用いて弾性支承梁法により求めた地表面位置での変位である。図3より、加力初期の段階から、杭の変位に比べて表層改良部の変位は小さく、かつ表層改良部自体の変位も前方より後方で小さくなっていること、荷重 125kN 時に着目すると、杭の変位に対して、表層改良部の前方では約 0.24 倍、後方では約 0.06 倍と小さく、各位置での変位が大きく異なっていることから、周辺地盤に対して表層改良部と杭とが一体化した剛体としての挙動を示していないこと、などが読み取れる。つまり、杭の挙動は水平方向に対して鉄鋼スラグによる改良地盤と周辺地盤とで構成された 2 層地盤中での挙動に近いと考えられ、表層改良に用いた鉄鋼スラグ（SS）が、周辺地盤（砂で N4）より大きな剛性を有していないことが推測できた。

目視で確認した表層改良スラグのひび割れ進行状況を図4に示す。同図には、ひび割れが発生した際の荷重値も示している。この図より、加力初期の段階から、杭後方において杭と鉄鋼スラグが離間し、荷重 125kN に到達すると離間部からひび割れが進展し、荷重 150kN 時には、杭側面の両側から加力方向に対して約 90° 方向に、続いて約 30° 方向に合計 4 本発生している。これらのひび割れ状況から、第 4 サイクルでの荷重 150kN 以降において、表層改良部の塑性化が進行したため、杭の水平変位が非線形的に増大したものと考えられる。

以上から、鉄鋼スラグによって表層改良を施した杭は、表層改良部が弾性範囲では、鉄鋼スラグの剛性により大きな水平抵抗を期待できることが確認された。実構造物への適用を考え、表層改良には膨張量を抑えた SS を用いたが、膨張量は有しているが SS より剛性の高い MS を

用いた場合、さらに杭基礎の水平抵抗の増大が見込めると考えられる。そのためには、スラグの膨張圧を定量的に把握し、基礎スラグ等へのスラグの影響を適切に評価する必要があり、このことは今後の課題となる。

最後に、Case4 の水平地盤反力係数 地表面変位の関係を図5に示す。ただし、水平地盤反力係数は、載荷点の荷重-変位関係から弾性支承梁法により逆算して求めた。なお比較のために、図5中に表層改良を施していないCase3の結果も併記している。この図より、設計に用いられる地表面変位 10mm 時の基準水平地盤反力係数 k_{h0} は、Case3 で 34.5MN/m^3 、Case4 では Case3 に対して約 1.4 倍の 48.6MN/m^3 が得られ、表層改良を施した効果が現れている。

5. まとめ

杭周地表面付近を鉄鋼スラグにより地盤改良した杭は、表層改良部の弾性範囲まで大きな水平抵抗を有することを確認した。また、鉄鋼スラグと周辺地盤との相対剛性によって異なるが、今回の実験ケースでは、表層改良部の弾性範囲においても、周辺地盤に対して表層改良部と杭とが一体化した剛体として挙動するのではなく、杭の挙動は水平方向に鉄鋼スラグによる改良地盤と周辺地盤とで構成された 2 層地盤中での挙動に近いことを確認した。今後、このような杭の挙動を踏まえて、水平抵抗に効果的な表層改良の範囲等を検討し、実務への設計法を確立したいと考えている。

<謝辞>試験場所の提供など多大なご協力を頂きました新日本製鐵(株)広畑製鉄所 設備部 道下共博氏、他関係者各位に感謝いたします。また、実験に際して貴重なご意見を頂きました(社)建築研究振興協会「鉄鋼スラグの杭基礎への活用委員会」(委員長:岸田英明 東京工大名誉教授)の委員各位に謝意を表します。

参考文献；1) 本間裕介他：「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,2004.11,pp.165-172 2)本間裕介他：「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,2005 年,[投稿中] 3) 玉井智子他：「製鋼スラグの力学的性質に関する基礎的実験(その 1 実験概要 - その 2 実験結果とその考察)」日本建築学会中国支部研究報告集,第 8 巻,平成 17 年 3 月,pp.149-152 4)玉井智子,本間裕介,富永晃司：「養生期間が鉄鋼スラグの力学的性質に与える影響」日本建築学会大会,2005 年[投稿中]

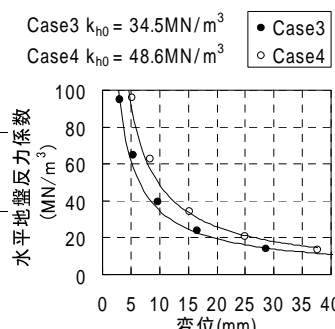
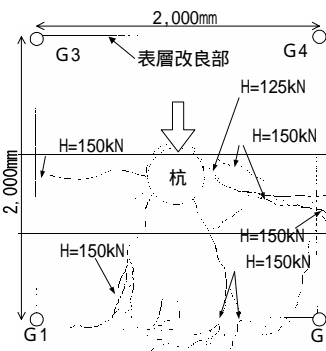
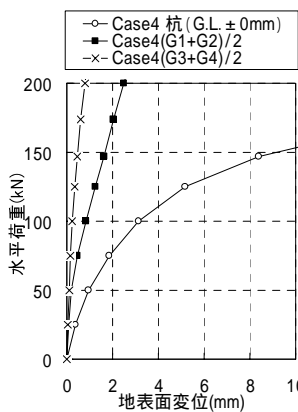
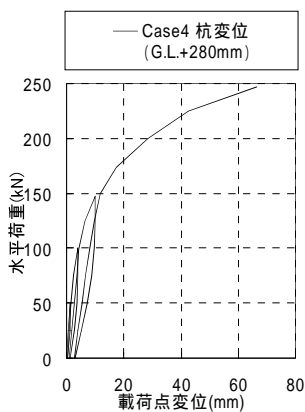


図2 荷重 変位関係(載荷点) 図3 荷重 変位関係(地表面) 図4 ひび割れ状況 図5 水平地盤反力係数 変位関係

*ジャパンパイル 技術開発部
**広島大学大学院国際協力研究科

*JAPAN PILE CORPORATION
**Graduate school for IDEC, Hiroshima University