

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 -

杭の水平抵抗 地盤改良 载荷試験

ジオトップ 正会員 本間裕介
広島大学 正会員 富永晃司
広鋳技建 非会員 永井 及

1. はじめに

近年、循環型社会形成推進基本法が制定され、産業廃棄物の有効利用が推進されている。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（潜在水硬性、膨張性）を生かす用途開発が期待されている。そこで、筆者らは、杭周辺地盤を鉄鋼スラグで改良し、杭の水平抵抗に与える改良効果について研究を行っている。すでに、実大杭で行った水平加力実験結果から、鉄鋼スラグで杭周地盤を改良することで、杭の水平抵抗を高める効果があることを報告した¹⁾。引き続き、本報では各養生期間（1,3,6,12ヶ月目）に、同一杭で行った数回の水平加力実験結果から、経時的に変化する鉄鋼スラグの特性が、杭の水平抵抗に与える影響について検討した。

2. 地盤改良に用いたスラグの特性

地盤改良に用いたスラグは、膨張性が大きい転炉スラグと潜在水硬性がある水砕スラグを重量比で8:2に混合した混合スラグ（以下MSと呼称する）と、エージング処理を施し膨張性を小さくした転炉スラグ（以下SSと呼称する）の2種類である。ここに、MSは膨張性ととも潜在水硬性による潜在水硬性も期待するものである。

特性である潜在水硬性および膨張性の経時変化を調べるために、三軸圧縮試験²⁾および膨張試験を行った。三軸圧縮試験は、「土の圧密排水(CD)三軸圧縮試験法」(JGS 0524-2000:土質試験の方法と解説³⁾)に、膨張試験は、JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」に基づいて行っている。用いたスラグの粒度分布を図1に示す。三軸圧縮試験の円柱供試体は、100mm×200mmのモールドにスラグを4層に分けて入れ、2.5kgランマーで最大乾燥密度となるように1層30回突き固めて作製し、その後ビニール袋で密閉し養生した。三軸圧縮試験の測定は、養生期間1ヶ月、3ヶ月、6ヶ月、12ヶ月とした。膨張試験の供試体は、150mm×125mmのモールド内に3層に分けて入れ、4.5kgランマーで最大乾燥密度となるように1層42回突き固めて作製した。膨張を促進させるために、その後80℃温水中に浸して膨張試験を実施し、20日間毎日膨張量を測定した。

三軸圧縮試験および膨張試験の結果を表1および図2に示す。なお、三軸圧縮試験の結果は現段階までに得られている1,3ヶ月目までである。表1より、粘着力は養生期間の増加に伴って増加する傾向があり、その傾向はSSよりMSでより顕著であることがわかる。また、粘着力はSSよりMSの方が大きく、養生1ヶ月目で3.19倍、養生3ヶ月目で4.65倍大きい値である。内部摩擦角においては、養生期間に関わらずほぼ一定の値であり、また両スラグで有意な差は見られない。SSの膨張比はMSの約25%程度であり、エージング処理の効果により膨張量が抑えられていることが分かる。これらの試験結果から、スラグの特性が経時的に変化することが確認できる。

3. 水平加力実験概要および実験方法

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。したがって、本報ではその概要のみ示したので、詳細については文献1)を参照されたい。

姫路市広畑区（広畑製鉄所構内）に位置する実験地盤の土質柱状図を図3に示す。表層部の地盤条件は杭の水平抵抗に支配的であるため、試験杭の施工後、表層付近(G.L.-1.5mまで)に堆積したスラグや鉄クズを砂地盤(N値4)に置換した。これ以深G.L.-10mまでは、N値0~8程度のシルトおよびシルト混じり砂で構成されている。試験杭は、表2に示すような節部径500mm、軸部径400mm、杭長13mのPHC節杭であり、12断面において対面にストレインゲージを貼付した鉄筋ひずみ計を取り付けている。一連の水平加力実験は、表3に示す6ケース実施されており、本報では、杭全長の

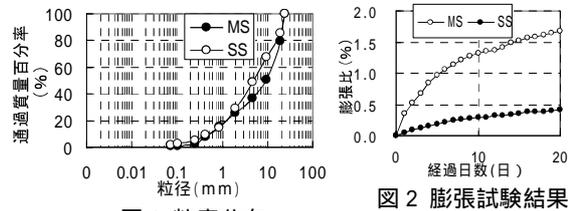


図1 粒度分布 図2 膨張試験結果

表1 三軸圧縮試験結果

試料	粘着力(kN/m ²)			内部摩擦角(度)		
	養生期間			養生期間		
	1ヶ月(1M)	3ヶ月(3M)	3M/1M	1ヶ月(1M)	3ヶ月(3M)	3M/1M
MS	144.9	259.5	1.79	53.7	48.4	0.90
SS	45.4	55.8	1.23	49.6	50.0	1.01
MS/SS	3.19	4.65	-	1.08	0.97	-

表2 杭の諸元

杭	杭種	杭径(mm)		肉厚(mm)	EI(N・mm ²)
		節部径	軸部径		
節杭	B	500	400	65	4.20 × 10 ¹³

表3 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	砕石	0.75	-	-	-	-
Case2		1	-	-	-	-	-	
Case3		1,3,6,12	MS	0.75	-	-	-	
Case4	2本直列杭	1,3,6,12	-	-	SS	2	2	0.75
Case5		1,3,6,12	MS	0.75	SS	2	3	0.75
Case6		1,3,6,12	MS	0.75	SS	-	-	1.5

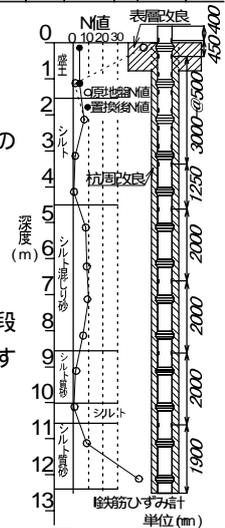


図3 柱状図と試験杭の姿

周面地盤のみ改良（以下、杭周改良と呼称）した Case2 と 3 および杭周改良と杭周地表面付近の地盤改良（以下、表層改良と呼称）を施した Case4 の結果について述べる。Case2 と 3 は同じ仕様であり、杭全長にわたり節部径の 1.5 倍大きな改良径で杭周改良を施している。Case4 は、Case2,3 に幅 2.0m × 奥行 2.0m × 深さ 0.75m の表層改良を施した仕様である。なお、地表面付近に膨張性の大きなスラグを用いると、基礎スラブ等に悪影響を与える懸念があるため、実際の基礎構造物への適用を考慮して地表面から 0.75m（節部径 D0 の 1.5 倍）のみ膨張性の少ない SS を用い、それ以深は MS を用いた。試験杭の施工および杭周改良は、特殊な締め固め用ケーシングを用いたプレボーリング埋込み工法¹⁾により同時に行い、その後、改良範囲をスラグで置換し、パイプロランマーで十分締め固めて表層改良を施した。

加力は土質工学会基準に準じて、一方階段載荷方式で行った。Case2 は、養生 1 ヶ月(1M)目に杭がほぼ終局状態に至る荷重まで実施し、Case3 および 4 は、各養生期間 1 ヶ月(1M)、3 ヶ月(3M)、6 ヶ月(6M)目に表層改良部に損傷が生じない程度の荷重に抑えて数回実施し、養生 12 ヶ月(12M)目において終局状態に至る荷重まで実施した。以降、養生期間は括弧内の記号で呼称する。

4. スラグの経時変化が杭の水平抵抗に及ぼす影響

スラグの経時変化が杭の水平抵抗に及ぼす影響について検討する。各養生時における Case3 と 4 の荷重-変位関係を図 4 と 5 にそれぞれ示す。なお、12M の荷重-変位関係は荷重 50kN までの関係を示している。図 4 より、Case3 の荷重-変位関係は、1M と 3M で同程度の傾向を示すが、3M 目からは養生期間の増加に伴って水平剛性(実験終了時の荷重/変位)が増加することがわかる。また、図 5 より、Case4 の水平剛性は 1M 目から養生期間の増加に伴って増加し、その増加の割合は Case3 より大きいことが確認できる。

Case3 と 4 の初期水平地盤反力係数-変位関係を図 6 と 7 にそれぞれ示す。初期水平地盤反力係数は、実験から得られた荷重-変位関係を用いて弾性支承梁法により逆算して求めた。図 6 と 7 には、初期地盤反力係数と変位の関係を累乗近似して求めた曲線も付記した。付記した累乗近似曲線から求めた変位 4.0mm（杭径の 1%）時の水平地盤反力係数 k_{h4} を表 2 に示す。同表には、1M の値との比を括弧内に示している。表 2 より Case3 と 4 とともに養生期間が増加すると水平地盤反力係数 k_{h4} も増加していることがわかる。1M に対する 12M の割合は、Case3 で 1.70、Case4 で 2.57 である。このことから、スラグの経時変化によって水平地盤反力係数が増加することが確認できる。また、Case3 に対する Case4 の割合は、1M で 1.10、12M で 1.67 であり、1M では杭周改良に比べて表層改良を施した効果があまり見られなかったが、スラグの経時変化により、表層改良を施した効果が明確に現れる結果となった。

杭が終局状態に至るまで加力した Case2(1M)、Case3(12M)および Case4(12M) で得られた荷重-変位関係をそれぞれ比較して図 8 に示す。図 8 から、1M に実施した Case2 の荷重-変位関係は、他の 2 ケースより早い段階から非線形性を呈していることが確認できる。終局状態に至った荷重（以下、最終荷重と呼称）は Case2(169kN) < Case3(223kN) < Case4(247kN) の順で、最終荷重時に発生した変位（以下、最終変位と呼称）は、Case4(67mm) < Case3(73mm) < Case2(78mm) の順で大きくなっている。同じ仕様であり、実験を行った養生期間が異なる Case2 と 3 を比較すると、Case3 は Case2 に対して最終荷重で約 1.3 倍、最終変位で約 0.9 倍の値となっており、スラグの経時変化により杭の終局耐力も向上したことが確認できる。また、12M 目においても、Case4 の最終荷重は Case3 に対して約 1.1 倍の値であることから、杭の終局耐力の向上に与える表層改良の効果は小さいことがわかる。

5. おわりに

鉄鋼スラグにより改良された地盤中の杭の水平抵抗は、スラグの経時変化に伴って増大することを確認した。特に、スラグの経時変化によって、杭周改良に対して表層改良を施した効果が、水平地盤反力係数の増大として明確に現れた。最後に、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 道下恭博氏、他関係者各位に感謝いたします。

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) 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〔現在投稿中〕 3) 地盤工学会編：「土質試験の方法と解説」

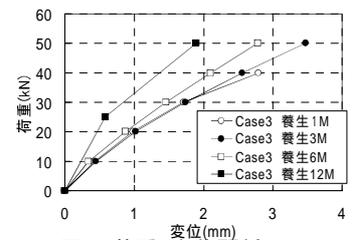


図 4 荷重-変位関係(Case3)

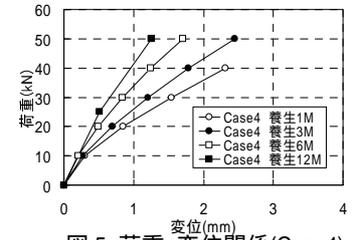


図 5 荷重-変位関係(Case4)

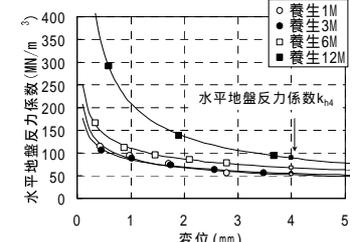


図 6 地盤反力係数-変位関係(Case3)

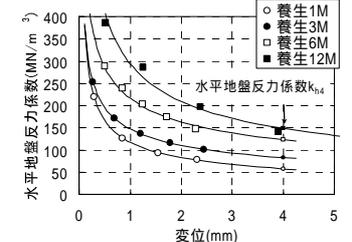


図 7 地盤反力係数-変位関係(Case4)

表 2 水平地盤反力係数 k_{h4}

養生期間	水平地盤反力係数 k_{h4} (MN/m ³)		
	Case3	Case4	Case4/Case3
1M	52.4 (1.00)	57.8 (1.00)	1.10 (1.00)
3M	55.5 (1.06)	82.5 (1.43)	1.49 (1.35)
6M	67.7 (1.29)	123.1 (2.13)	1.82 (1.65)
12M	89.0 (1.70)	148.3 (2.57)	1.67 (1.52)

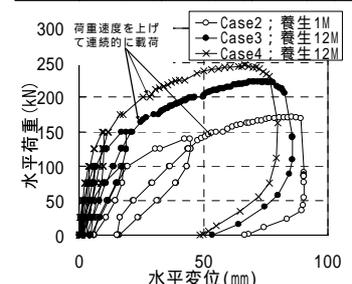


図 8 荷重 変位関係