

## 製鋼スラグを利用した埋込み節杭の周面抵抗機構の検討

製鋼スラグ 杭 周面抵抗力

(株)ジオトップ

国際会員 小椋仁志 同 藪内貞男

同上

正会員 吉川那穂 同 平尾幸太郎

日本工業大学

国際会員 桑原文夫

## 1. はじめに

前報<sup>1)~3)</sup>において、製鋼スラグを利用した埋込み節杭の土槽実験と現場実験の結果について述べた。本報では、これらの実験結果のうち周面抵抗の変化に着目して検討し、合わせて一連の押し込み試験が終了した後に行った試験杭の掘り起こし試験の結果や既往の研究結果等をふまえて、スラグを充填した杭の周面抵抗のメカニズムについて検討を加える。なお、地盤条件等は前報に記載している通りである。

## 2. 周面抵抗特性の検討

図1(a)は 440-300(節部径  $D_o = 440\text{mm}$ 、軸部径  $D = 300\text{mm}$ )、根入れ長さ 3mの節杭を用いた土槽実験<sup>2)</sup>で、図1(b)は 440-300、根入れ長さ 11.3mの節杭を用いた現場実験<sup>3)</sup>で得られた周面抵抗  $R_f$  ~ 杭頭沈下量  $S_o$  曲線である。凡例の記号は試験杭記号を示す。Yは土槽実験、Hは現場実験であり、SSは製鋼スラグ、MSは混合スラグ(容積比で製鋼スラグ70%と水砕スラグ30%を混合したスラグ)を、GRは砕石、GMはソイルセメントをそれぞれ充填した杭を表している。図中の数字は、杭施工後に載荷試験を行うまでの養生した月数を示している。前報<sup>2),3)</sup>で述べた  $R_f$  に関する考察と、図1(a)(b)から分かることをまとめると、以下ようになる。

$R_f$  ~  $S_o$  曲線の初期での沈下剛性に注目すると、土槽実験では混合スラグ充填杭 > 製鋼スラグ充填杭 > 砕石充填杭の順にやや大きい傾向が見られる。一方、現場実験では、三者ともほぼ同じ剛性になっている。

土槽実験の製鋼スラグ充填杭では、養生期間が1ヶ月と3ヶ月との  $R_f$  ~  $S_o$  曲線の連続性からみても  $R_f$  の増加が顕著である。充填した製鋼スラグが膨張したことによるものと推察されるが、現場実験ではその傾向は見られない。

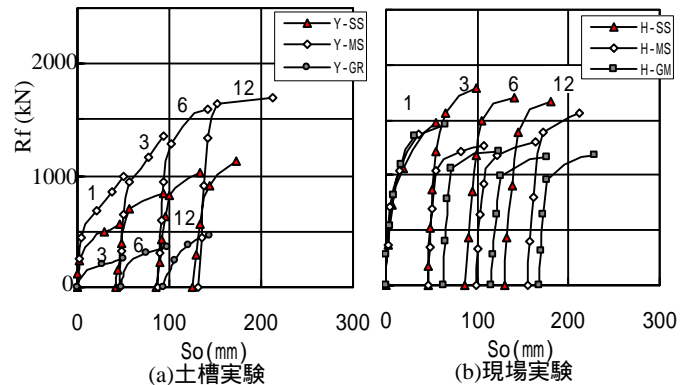
$R_f$  ~  $S_o$  曲線の形状は、土槽実験ではいずれの杭も  $R_f$  は増加し続けており、 $S_o = 0.3D_o (132\text{mm})$  を超えてもピークが生じていない。一方、現場実験ではいずれの杭でも  $R_f$  にピークが生じている。製鋼スラグ充填杭は他の杭よりも遅い  $S_o = 100\text{mm}$  (3ヶ月養生時) でピークになり、その後はほぼ一定値になっている。混合スラグ充填杭はピークが生じた後、増加に転じている。ソイルセメント充填杭は、ピークが生じた後は漸減している。

土槽実験では、同じ  $S_o$  における  $R_f$  の値は混合スラグ充填杭 > 製鋼スラグ充填杭 > 砕石充填杭の順に大きい。一方、現場実験では、 $R_f$  の最大値は製鋼スラグ充填杭 > 混合スラグ充填杭 > ソイルセメント充填杭の順に大きく、スラグを充填した杭は土槽実験と逆の傾向になっている。これは、現場実験では充填した混合スラグの密度が製鋼スラグよりもかなり小さかった<sup>3)</sup>ためと考えられる。

## 3. 掘り起こし後の観察結果

施工後12ヶ月間養生した押し込み試験が全て終了した後、試験杭を掘り起こして杭周の状況を観察した。土槽実験では、製鋼スラグ充填杭のスラグはほとんど固結しておらず、掘ると崩れてしまった。杭体の表面には縦方向には鉛直方向の傷があった。混合スラグ充填杭は、写真1のように、節部の下部と杭周部に固結した部分が残っていた。他の部分は手で削ると簡単に崩れた。節部直下のスラグは非常に固く、押し込み試験時に節部によって圧縮されたものと思われる。また、節部の上面には全周にわたって高さ約100mmの隙間が生じていた。その形状は節部と同じであり、杭が沈下した跡と見られる。

現場実験では上部5mほど掘り起こしたが、製鋼スラグ、混合スラグとも杭周に円柱状に自立していた。固結性が小さい製鋼スラグでも手では削れない程度には固結しており、平均直径は830mmであった。また、固結性の大きい混合スラグは当然固結していたが、表面をスコップの先で削ってみるとソイルセメント充填杭の表面ほどには固くなっていなかった。平均直径は855mmであった。

図1. 周面抵抗  $R_f$  ~ 杭頭沈下量  $S_o$  曲線写真1. 土槽実験の混合スラグ  
充填杭の節部直下

Study on shaft resistance of bored nodular pile packed with steelmaking slag.

H.Ogura, S.Yabuuchi, K.Hirao, N.Yoshikawa (Geotop Corp.), F.Kuwabara (Nippon Institute of Technology)

#### 4. 周面抵抗機構の検討

両実験で得られた  $R_f$  の特性と試験杭を掘り起こした結果をもとに、筆者らの三軸加圧型土槽を用いた模型実験による節杭の支持力機構に関する研究<sup>4),5)</sup>を参考にして、スラグを充填した杭の周面抵抗機構を検討する。筆者らの実験は、乾燥砂地盤に節部径  $D_o=88\text{mm}^4),100\text{mm}^5)$  の模型杭を貫入して、X線<sup>4)</sup>や色砂<sup>5)</sup>を用いた杭周地盤の動きや感圧紙によって杭に働く応力を測定<sup>5)</sup>したものである。その結果、440-300の節杭と相似な模型節杭の周面抵抗機構は、次の( )~( )のように推移するとしている。

( )最初に、杭表面と充填材(地盤)との間に滑りが生じて、図2(a)のような摩擦抵抗が発生する。しかし、この抵抗は沈下量が  $0.1D_o$  程度に至る前に小さくなる。

( )次に、同図に併記するような支圧抵抗が節部下面に生じる。この抵抗は杭先端面の支持機構とほぼ同じ機構を持ち、杭の沈下とともに増大して周面抵抗はピークに至る。支圧抵抗であるため、沈下剛性は( )の摩擦抵抗よりも小さくなる。

( )沈下量が  $0.2D_o \sim 0.4D_o$  (地盤の密度や上載圧により異なる)を超えると、図2(b)のように、節部よりやや大きい径のせん断面が形成され、周面抵抗は急激に低下する。

これらの実験では充填材として地盤と同じ砂<sup>4),5)</sup>や砂利<sup>5)</sup>などの粒状体を用いていることから、この支持機構を「粒状体型」と呼ぶ。土槽実験の砕石充填杭はこの支持機構と思われるが、図1(a)のように  $S_o=0.3D_o$  ではピークは生じていない。

一方、充填材がソイルセメントなど固結体の場合は、支持機構の研究は見あたらない。しかし、筆者らが以前に押込み試験後に掘り起こした杭について観察や曲げ試験を行った結果(ただし固結体径は節部径の1.2倍以下)では、固結体は節杭と一体化している。したがって、節杭の周面抵抗は、図3のように固結体表面と地盤との間の摩擦抵抗で評価されるものと思われる。この場合、周面抵抗は小さな沈下量でピークに達し(したがって沈下剛性は大きい)後減少する。この支持機構を「固結体型」と呼ぶ。現場実験のソイルセメント充填杭も、この型になっているものと判断できる。

今回のスラグ充填杭の  $R_f \sim S_o$  関係や掘り起こし後の観察結果から推測すると、土槽実験の製鋼スラグ充填杭はスラグがほとんど固結していなかったことから粒状体型に近いと思われる。ただし、 $S_o=0.4D_o$  を越えてもピークが現れないことや、 $R_f$  の値が砕石充填杭よりも非常に大きいこと等を考えると、製鋼スラグの膨張性や砕石とは異なる圧縮・せん断特性(未解明)等が影響している可能性がある。

土槽実験の混合スラグ充填杭も、掘り起こし結果(模式図を図4に示す)から見ると粒状体型に近い。まず、節部直上の隙間は、杭体表面とスラグとの間で( )で述べた滑りが生じたことを示している。初期の沈下剛性が他の杭よりも大きくなった(2. )のは、ここでの抵抗(図4の(B))が混合スラグの固結により増大した粘着力等によって大きくなった結果と解釈できる。次に、節部直下のスラグが固く圧縮された層は、図5に示す高野らの実験<sup>6)</sup>で杭先端直下に見られるコア部分に相当している。その周囲のスラグは図5のように外側に押し出されて大きくせん断変形したために、手で削られる状態になったものと考えられる。これらは、節部下面が杭先端面と同様な作用をして、( )で述べた大きな支圧抵抗(図4の(A))が生じたことを示している。( )で述べたせん断面が形成されるのはスラグの表面なのか内部なのかは分からないが、 $R_f$  にピークが見られないことから、せん断抵抗(図4の(C))は極限状態には至らなかったであろう。

現場実験のスラグ充填杭は、掘り起こした時にスラグが自立していたことから、ソイルセメント充填杭と同じ固結体型に近い。したがって、初期の沈下剛性もソイルセメント充填杭とほぼ同程度に増大したものと解釈できる。また、「固結体型」であれば、スラグ充填杭の  $R_f$  がソイルセメント充填杭よりも大きい(2. )のは、固結体部分の径の違いが主因と考えられる。ただし、 $R_f \sim S_o$  関係の形状が異なっている(2. )こと等から、土槽実験の混合スラグ充填杭のようにスラグ内部では「粒状体型」の支持機構になっていた可能性もある。今後の検討に待ちたい。

#### 5. おわりに

本報では製鋼スラグを周囲に充填した節杭について、養生期間を変えて行った押込み試験結果と掘り起こして観察した結果等を基に、その周面抵抗のメカニズムを検討した。製鋼スラグは膨張性を持ち、水砕スラグと混合することによって固結性も発揮する。これらの性質によって、埋込み節杭の周面抵抗や沈下剛性が増大することが分かった。最後に、本検討に際して貴重なご意見をいただきました(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)~3) 藪内・吉川・平尾・西脇他: 製鋼スラグを利用した埋込み節杭の支持力性能(その1)~(その3), 第39回地盤工学研究発表会, 2004.7
- 4) 小椋・山岸・岸田: 模型実験による節付き円筒杭の鉛直支持力特性の検討, 日本建築学会構造系論文報告集 No.374, pp.87-97, 1987.4.
- 5) 藪内: 異形杭の周面抵抗機構の解明および礫・鉄鋼スラグ充填節杭の鉛直支持力特性に関する研究, 大阪大学学位論文, 2004.11
- 6) 高野・岸田・村越: 砂地盤中の埋込み杭周辺部地盤の変形, 第13回土質工学研究発表会, pp.789~792, 1978.6

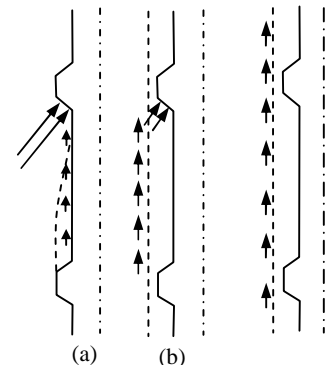


図2. 粒状体型

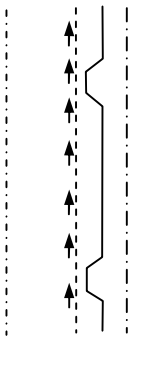


図3. 固結体型

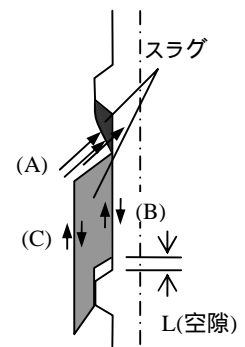


図4. 土槽実験の混合スラグ充填杭の周面抵抗機構の模式図

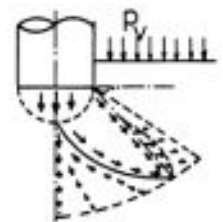


図5. 杭先端地盤の動き<sup>6)</sup>