

24 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

Lateral resistance of piles in ground improved by compaction method with iron and steel slag

本間裕介*, 富永晃司**, 小椋仁志***, 永井及****
yusuke HOMMA, koji TOMINAGA, hitoshi OGURA and oyobu NAGAI

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、潜在水硬性や膨張性等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検討を加えることにした。本論文は、実大杭の水平加力実験結果に基づく改良効果について報告する。

キーワード：鉄鋼スラグ、地盤改良、現場水平加力実験、杭の水平抵抗
iron and steel slag, soil improvement, lateral load test, lateral resistance

1. はじめに

近年、生産から流通、消費、廃棄に至るまで物の効率的な利用やリサイクルを目指した循環型社会形成推進基本法が2000年に施行され、産業廃棄物の有効利用が推進されるようになってきた。セメント原料、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、膨張性等）を生かしたさらなる用途開発が望まれており、最近では杭基礎工法に適用した事例¹⁾がある。同文献においては、膨張性の大きい製鋼スラグを節杭の周囲に充填し、密度を高めることで沈下剛性を増大させる工法が紹介されている。

杭基礎の設計では、鉛直支持力より水平抵抗が杭本数や杭径等を決定する要因となる事例が多い。兵庫県南部地震以後、杭基礎の耐震性の重要性が認識され始め、大地震に対しても十分な耐力、変形性能を有する杭基礎が要求されるようになってきた。このため、杭の水平抵抗を向上させる方法への関心が高まっている。

上述した背景から、一方法として、杭周辺地盤を改良することで杭の水平抵抗の増大をはかる開発・研究が行われている^{2)~5)}。これらの地盤改良工法は、深層混合処理工法に代表される固化処理工法がほとんどである。

これに対して、地盤改良として鉄鋼スラグを有効利用する締め固め工法が考えられる。筆者らは、杭の水平抵抗を増大させるため、この工法に関する研究を行っている。本論文は、実大杭の水平加力実験結果から、鉄鋼スラグによる地盤改良が水平抵抗の増大へ与える効果について、現段階までに得られた知見について報告するものである。

2. 鉄鋼スラグの種類と用いたスラグの特性

2.1 鉄鋼スラグの種類

製鉄の過程で発生する鉄鋼スラグには、銑鉄を製造する高炉で熔融された鉄鉱石以外の鉄分として回収される高炉スラグと製鋼工程で転炉や電気炉において生成される製鋼スラグがある。高炉スラグの中でも、熔融状態のスラグに加圧水を噴射して急激に冷却して生成したものを水砕スラグと呼ぶ。水砕スラグには潜在水硬性があり、セメントの原料や細骨材などの用途も広い。一方、製鋼スラグの中でも転炉で生成された転炉スラグは、水と反応し膨張する特性があるので、それを小さくするためにエージング処理が施され、路盤材などに用いられている。

水砕スラグと転炉スラグの化学組成を示す表1より、両者の主成分は、石灰(CaO)とシリカ(SiO₂)である。

表1 化学組成

種類	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	T-Fe	S	MnO	TiO ₂	その他
水砕スラグ	11.3	37.3	3.9	15.7	20.4	0.0	6.1	1.5	3.8
転炉スラグ	33.8	42.0	14.4	6.7	0.3	0.8	0.3	1.0	0.7

2.2 用いたスラグの特性

地盤改良は、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に混合したもの（未エージング混合スラグ；MS）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（エージング転炉スラグ；SS）の2種類を用いた。ここに、未エージング混合スラグは膨張性とともに入砕スラグによる潜在水硬性も期待するものである。地表面付近の地盤改良には、膨張性の少ないエージング転炉スラグを用いている。

鉄鋼スラグの特性は経時的に変化する。そこで、地盤

* (株)ジオトップ 技術本部

** 広島大学大学院国際協力研究科 教授

*** (株)ジオトップ 技術本部長

**** 広鉦技建(株)

Engineering Division, GEOTOP Corporation

Prof., Graduate School for IDEC, Hiroshima University

Manager, Engineering Division, GEOTOP Corporation

HIROKOU-GIKEN Co.,Ltd.

改良に用いるスラグの特性の経時変化を調べるために、JIS A 5015「道路用鉄鋼スラグ」に準じ、一軸圧縮試験および膨張試験を行った。試験に用いたスラグの粒度分布を図1に示す。

一軸圧縮試験の円柱供試体は、内径 100mm×高さ 127.4mm のモールドにスラグを3層に分けて入れ、4.5kg ランマーで最適含水比、最大乾燥密度となるように1層42回突き固めて作製し、20℃の恒温槽で養生した。各スラグの最適含水比および最大乾燥密度を表2に示す。測定は、作製後7日、14日、28日、91日の各日に行った。膨張試験の供試体も同様に、最適含水比、最大乾燥密度となるように、内径 150mm×高さ 125mm のモールド内に3層に分けて突き固めて作製した。膨張を促進させるために、この供試体を80℃の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。

表2 最適含水比と最大乾燥密度

試料	最適含水比(%)	最大乾燥密度(g/cm ³)
未エージング混合スラグ	4.4	2.648
エージング転炉スラグ	4.7	2.601

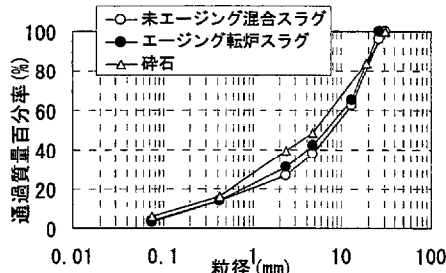


図1 粒度分布

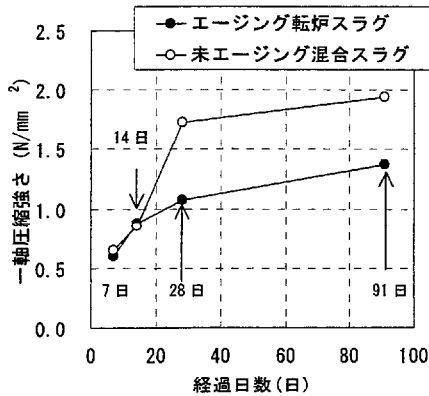


図2 一軸圧縮強さと経過日数の関係

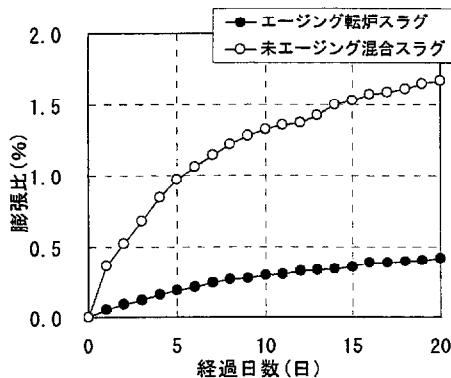


図3 膨張比と経過日数の関係

一軸圧縮試験および膨張試験の結果を図2,3にそれぞれ示す。これらの試験結果から以下のことがわかる。

① 一軸圧縮強さは、各スラグともに経過日数の増加に伴って増大する。スラグの種類による一軸圧縮強さの違いは、経過日数14日まで見られないが、経過日数14日以降、違いが現れた。すなわち、未エージング混合スラグは、経過日数14日から28日の間に急激に増加し、エージング転炉スラグに対して約1.6倍大きくなっている。これは水砕スラグの潜在水硬性による影響と考えられ、特に経過日数14日以降からその効果が現れている。7日時点の強度に対する91日時点の強度増加割合は、未エージング混合スラグが約3.0倍、エージング転炉スラグが約2.2倍である。

② 膨張比は、エージング転炉スラグより未エージング混合スラグの方が約4.0倍大きく、エージング処理を施すことで、膨張量が抑えられていることがわかる。経過日数が20日を超えても各スラグの膨張比は増加する傾向が伺える。

3. 実験概要

3.1 実験地盤

実験地盤は姫路市広畑区(新日本製鐵所構内)に位置する。図4に示す同現場近隣の土質柱状図より、表層部付近はスラグ・鉄クズ等を多く含む砂礫主体であり、それ以深GL.-10mまでは、N値0~7程度のやわらかいシルトおよびN値8程度の緩いシルト混じり砂がつづく地層構成となっている。

なお、表層部の地盤条件は水平抵抗に支配的であるため、試験杭の施工後にGL.-1.5mまでの部分の表層地盤を砂に置換した。地下水位はGL.-1.6m付近にあり、置換した砂は湿潤状態となっている。

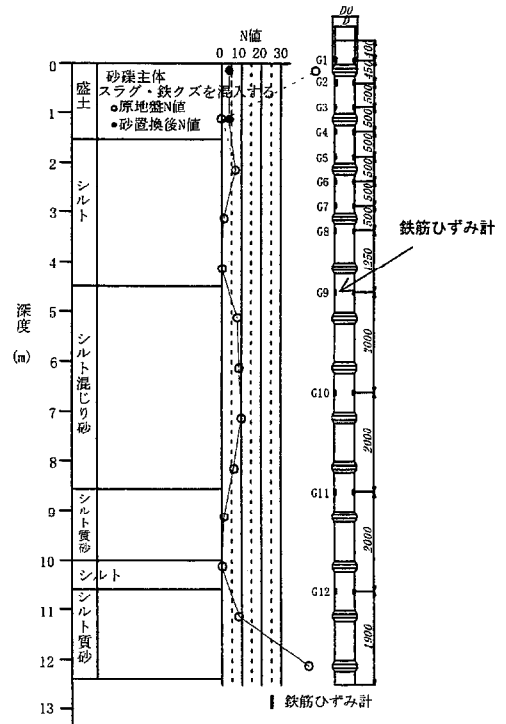


図4 土質柱状図および試験杭の姿

3.2 試験杭概要

試験杭は、節部径 D_0 が 500mm、軸部径 D が 400mm (以下、 $\phi 500-400$ と表示) で杭長 13m の PHC 節杭であり、表 3 に杭の諸元を示す。また、試験杭には曲げひずみを計測するため、図 4 に示すように 12 断面において対面にストレングージを貼付した鉄筋ひずみ計を PC 鋼棒に取り付けている。

表 3 試験杭諸元

節部径 (mm)	軸部径 (mm)	換算断面積 (mm ²)	プレストレス量 (N/mm ²)	PC鋼棒 径 本数	曲げ剛性 (N・mm ²)
500	400	7.03×10^4	8.0	9 12	4.20×10^{13}

3.3 実験ケース

各実験ケースにおける主な諸元を表 4 に、概略図を図 5 に示す。なお、鉄鋼スラグによる地盤改良の効果を確認するために、基本パターンとして杭全長の周面地盤のみ改良(以下、杭周改良と呼称)した杭を設定した。

杭周改良は、改良材としてスラグを用いたもの (Case2) と、比較のために砕石を用いたもの (Case1) の 2 ケースである。砕石は、図 1 中に示したように、スラグとほぼ同粒度分布のものを用いた。それぞれの改良径は、杭全長にわたり節部径の 1.5 倍 ($D_s=750\text{mm}$) である。地表面付近に膨張性の大きなスラグを用いると、スラグの膨張が基礎スラブ等に悪影響を与える懸念がある。そこで、実際の杭基礎構造物への適用を考慮し、スラグによる杭周改良 (Case2) は、地表面から 750mm (節部径 D_0 の 1.5 倍) のみ膨張性の少ないエージング転炉スラグを用い、それ以下は未エージング混合スラグを用いた。

さらに、杭周地表面付近の地盤改良 (以下、表層改良と呼称) の改良幅や改良深さの仕様が杭の水平抵抗に与える効果を検討するために、表層改良無し (Case3) を基本とし、杭周改良部が同じで表層改良パターンを 3 ケース (Case4~Case6) 設定した。ここに、表層改良に用いたスラグは、エージング転炉スラグである。

表層改良無しの Case3 は、Case2 と同じ仕様であり、Case4 は 2.0m (節部径の 4 倍) \times 2.0m \times 深さ 0.75m の表層改良を施している。また、Case5 は、2 本直列杭に幅 (B_1) 2.0m \times 奥行き (B_2) 3.0m \times 深さ (F) 0.75m の表層改良を施し、Case6 は Case5 の表層改良深さを 2.0 倍 (1.5m) にしたものである。なお、2 本杭の杭芯間距離は 1.0m (節部径の 2.0 倍) とし、両者は杭頭固定とするために RC 製の剛なフーチング (1.0m \times 2.0m \times 0.8m) を設けて、杭頭固定の条件としている。ただし、これらの実験では、フーチング底面と地表面と間に 100mm のクリアランスを設けている。

表 4 実験ケース

ケース名: 名称	杭	杭周改良		表層改良		
		改良材	径 D_s mm	改良材	幅 B_1 mm	幅 B_2 mm
Case1: 1S000	単杭	砕石	750	-	-	-
Case2: 1A075		MS	750	-	-	-
Case3: 1A075				-	-	-
Case4: 1B075				SS	2000	2000
Case5: 2B075	SS			2000	3000	750
Case6: 2B150		1500				

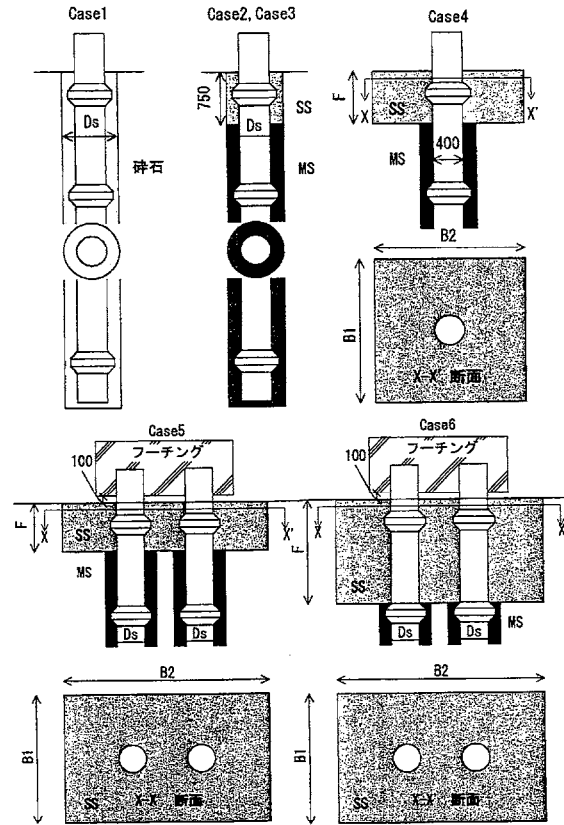


図 5 各実験ケースの概要図

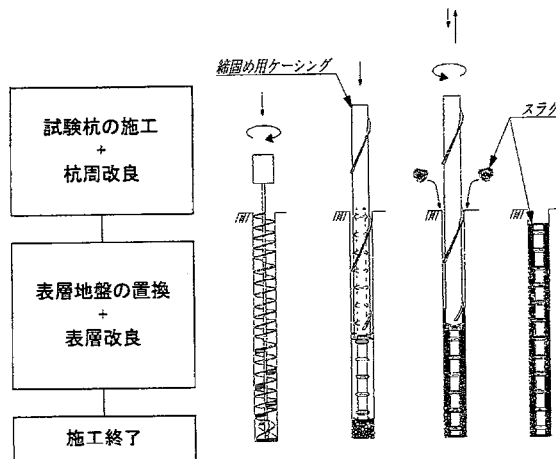


図 6 施工フロー

図 7 試験杭の施工手順

3.4 試験杭および地盤改良方法

試験杭の施工は、特殊な締固め用ケーシング (以下、ケーシング) を用いたプレボーリング埋め込み工法¹⁾が採用され、図 6 に示すフローに従って施工を行った。これらの施工手順は、図 7 および以下のとおりである。

1) 試験杭の施工および杭周改良の手順

- ① 掘削孔崩壊防止板付オーガースクリュー ($\phi 750\text{mm}$) で掘削・排土した後、掘削孔内に試験杭を建て込み、ケーシングを挿入する。
- ② 試験杭を所定の深度になるまで回転圧入する。
- ③ 地表面から掘削孔壁とケーシングの隙間に所定の改

良材を投入する。

④ ケーシングを逆転させ、先端羽根で改良材を詰め固めながら徐々に引き上げ、杭頭部まで改良材を充填する。

2) 表層地盤の置換および表層改良

原地盤の表層部付近はスラグ・鉄クズを多く含んでいるため、試験杭の施工14日後に深さ1.5m部分まで地盤を掘削し、これらを除去した。その際、杭周改良部のスラグもすべて取り除いた。その後、設定した地盤改良の寸法となるように、それぞれ試験杭の周面を木製型枠で囲い、層厚300mmごとに分割して外側に砂、内側に所定の改良材を充填し木製型枠を引き上げながら締め固めた。砂地盤は事前に検討した結果に基づき、N値4程度となるようにパイプロプレートとパイプロランマーを用いて締め固め、改良部はパイプロランマーで十分に締め固めた。

上記の施工では、深度1.5mを境にスラグの養生期間に違いが生じるため、以後養生期間は表層改良終了時からの期間を表示することとした。

4. 実験方法

Case1および2は、養生1ヶ月(1M)目に杭がほぼ終局状態に至る荷重まで水平加力実験を行った。Case3～Case6は、表層改良の仕様が杭の水平抵抗に与える効果を調べる目的に加えて、スラグ特性の経時変化による影響も検討するために、各養生期間1ヶ月(1M)、3ヶ月(3M)、6ヶ月(6M)、12ヶ月(12M)に数回の水平加力実験を行うことにした。養生6ヶ月(6M)目までの水平加力実験は、表層改良部に損傷が生じない程度の荷重で終了し、養生12ヶ月(12M)目の水平加力実験は杭がほぼ終局状態に至

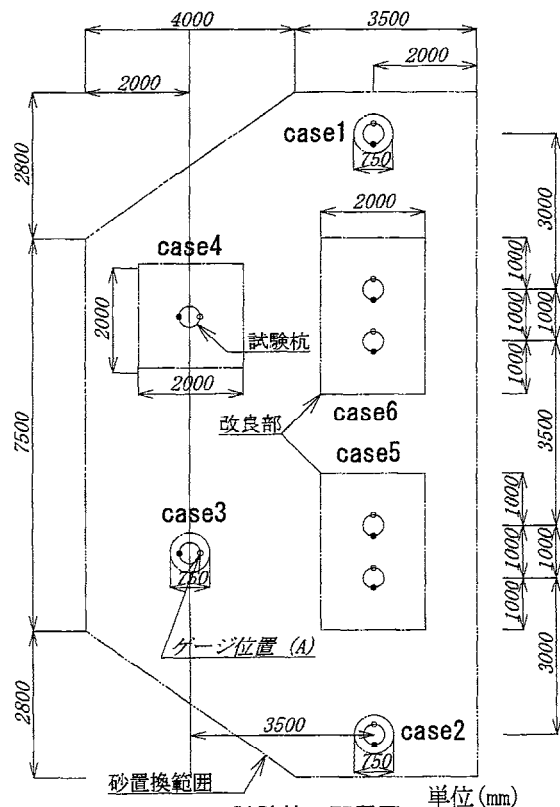


図8 試験杭の配置図

るまで行う予定である。本論文では、Case3～Case6においては養生3ヶ月(3M)目までの実施した内容について報告する。

4.1 加力方法

試験杭の各配置は図8に示す。実験には特別に反力杭を設けず、Case5または6を反力として、その周りに各ケースの試験杭を配置する方式を採用した。

図9にCase1および2の加力方法を示す。反力としてCase5および6を用いた。杭が終局状態に至る荷重まで加力を行うため、試験杭が加力方向に大きく傾斜し、油圧ジャッキ等の加力装置が跳ね出す危険性がある。これを防止するため、図9に示すような試験杭の変形に追従できる装置(クレビス)を用いて試験杭を引き寄せるようにして水平力を作用させた。

Case3および4の加力方法を図10に、Case5および6の加力方法を図11にそれぞれ示す。与える水平力は表層

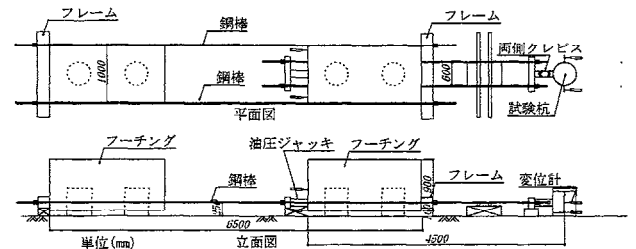


図9 Case1,2の加力方法

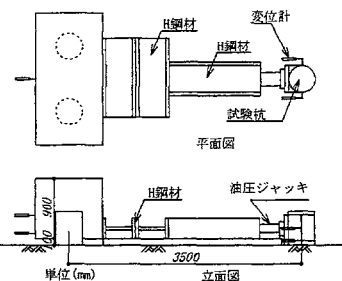


図10 Case3,4の加力方法

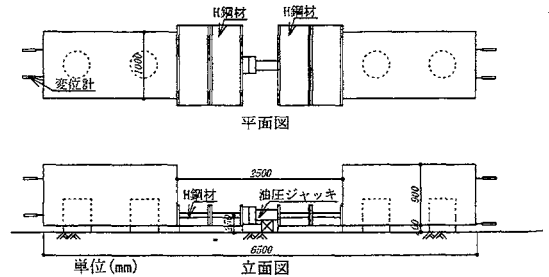


図11 Case5,6の加力方法

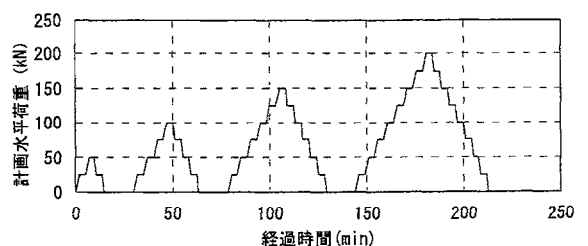


図12 Case1,2の載荷計画

改良部に損傷を生じさせない程度の荷重としたため、加力装置が跳ね出す危険性は少ない。したがって、各図に示すような加力方法とし、Case5 と 6 の実験はお互いを押し合うように計画した。

4.2 加力方式および測定項目

Case1 および 2 の水平加力実験は、図 12 に示すように一方向多サイクル段階載荷方式で行った。文献⁹⁾を参考に、荷重速度を約 0.2kN/s、荷重保持時間を 180s とした。Case3 および 4 の水平加力実験は、表層改良部の損傷を抑えるために一方向一サイクル段階載荷方式で行った。計画最大荷重は、初めに行った Case2 の実験結果に基づき、水平変位量が杭径の 1%(4.0mm)を超えない 40kN とし、荷重段階を 4 段階、荷重速度を約 0.08kN/s、荷重保持時間を 180s とした。同様に、Case5 および 6 の水平加力実験も一方向一サイクル段階方式として、計画最大荷重を 100kN、荷重段階を 10 段階とした。

実験時の計測項目は、水平荷重、杭体変位（載荷点 G.L.+250mm；2 点、G.L.+100mm；2 点）および杭体の曲げひずみである。ただし、Case5 および Case6 に関しては、フーチング上下端の変位（下端 G.L.+250mm；2 点、上端 G.L.+700mm；2 点）を計測した。

5. 鉄鋼スラグによる地盤改良の効果

鉄鋼スラグによる地盤改良の効果を検討するため、基本パターンである杭周改良のみの Case1 と 2 を取り上げ、

実験結果の比較を行う。

5.1 砕石による杭周改良(Case1)

実験で得られた結果のうち、載荷点での水平荷重 H ～水平変位量 y の関係、処女荷重時のひずみ量の深度分布および $\log H \sim \log y$ の関係を図 13～15 に示す。

図 13 より、第 3 サイクル以後、立ち上がりの形状が S 字型を示していることが読み取れる。これは、除荷時における杭体前面の締め固められた砕石の緩みが、再載荷時に再圧縮されるためと考えられる。第 4 サイクルで荷重が 175kN 以上になると変位が急激に増加したため、荷重速度を上げて連続的に荷重を増加させた。最終的に荷重 195kN で PC 鋼棒の破断音とともに杭体は終局状態に至った。図 14 より、引張ひずみが急激に増加する箇所が見られるが、これは杭体にひび割れが発生(塑性化)し、コンクリートの応力負担分が PC 鋼棒に転化したためであると考えられる。この現象は、初めに荷重 125kN 時に深度 2.89m、続いて荷重 175kN 時に深度 0.89m で生じている。初めに生じた時の荷重 125kN は、図 15 中に示す折れ点の荷重とほぼ対応し、表層付近(深度 0.89m)で生じた時の荷重 175kN は、変位が増加し始めた荷重とほぼ一致している。

5.2 スラグによる杭周改良(Case2)

実験で得られた結果のうち、載荷点での水平荷重 H ～水平変位量 y の関係、処女荷重時の曲げひずみの深度分

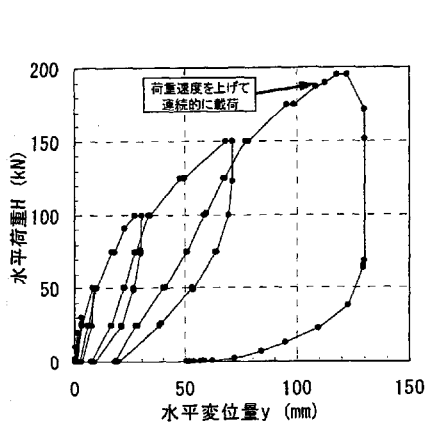


図 13 水平荷重～水平変位量の関係 (Case1)

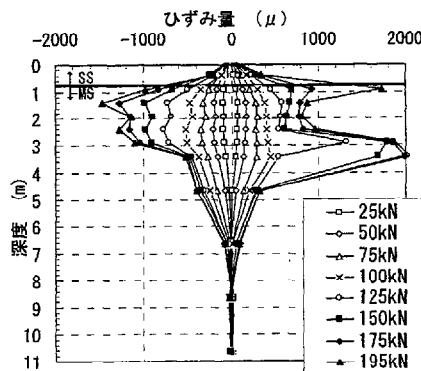


図 14 ひずみ量の深度分布(Case1)

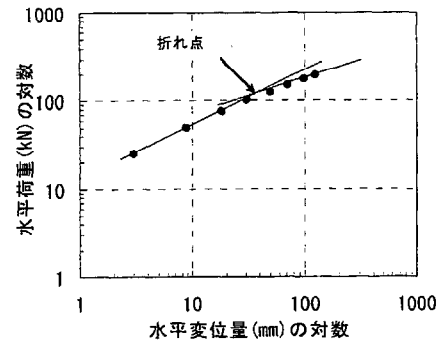


図 15 $\log H \sim \log y$ の関係(Case1)

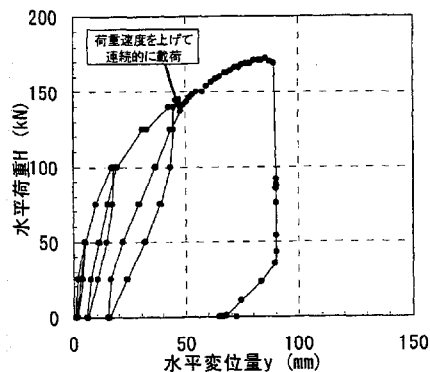


図 16 水平荷重～水平変位量の関係 (Case2)

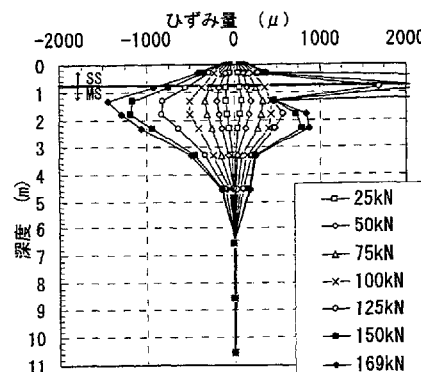


図 17 ひずみ量の深度分布(Case2)

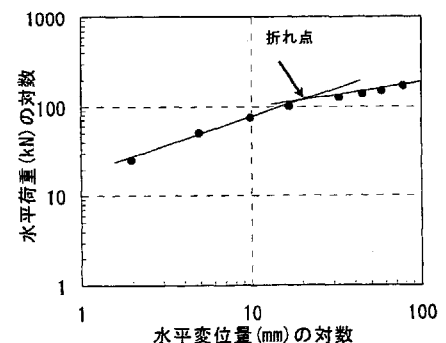


図 18 $\log H \sim \log y$ の関係(Case2)

布および $\log H \sim \log y$ の関係を図 16~18 に示す。

図 16 において、砕石の場合に見られた S 字型の水平荷重 $H \sim$ 水平変位量 y の関係が生じていない。すなわち、スラグが固結し、除荷時に杭体前面の緩みが生じなかったと推測できる。なお、第 4 サイクルで荷重が 130kN に到達すると変位が急激に増加することが予想されたため、連続的に荷重を増加させた。最終的には、荷重 169kN で PC 鋼棒の破断音とともに杭体が終局状態に至っている。図 13 との比較から、杭の水平耐力は、Case1(砕石)と比べて 15%程度小さいことが判明した。

また図 17 より、曲げひずみは深度 5.5m 以深でほとんど生じていないが、杭体のひび割れは、図 18 中に示す折れ点とほぼ対応した荷重 125kN 時に深度 0.80m 付近で初めに生じ、続いて荷重 150kN 時に深度 2.45m 付近で生じている。初めのひび割れは Case1(砕石)と同一荷重であるが、発生深度(0.80m)は Case1(砕石)より約 2.0m 浅く、2 種類のスラグの境界(エージング転炉スラグから未エージング混合スラグへ)付近にあたる。すなわち、この境界位置で応力集中が生じていることを示唆している。この原因として、①養生 1 ヶ月(IM)目で 2 種類のスラグの特性が大きく異なるため、境界位置での杭体に応力が集中しやすい状態であったこと、②地中部で大きなひずみが発生する杭頭自由の条件で実験を行ったこと、などの条件が重なったためであると考えられる。

5.3 Case1 と 2 の比較

杭体に発生した各物理量について比較検討を行う。各物理量は、文献⁷⁾で提案された方法により算出した。まず、計測された各断面のひずみ量を基に、曲げモーメント M の深度分布を次式で算定する。

$$M_i = \phi_i \times EI = (\varepsilon_{ti} + |\varepsilon_{ci}|) / D_p \times EI \quad (1)$$

ここで、 ϕ_i : i 断面における曲率

EI : 曲げ剛性

ε_{ti} 、 ε_{ci} : i 断面における引張、圧縮ひずみ量

D_p : 鉄筋計の取付位置の直径($D_p=335\text{mm}$)

ついで、これらの曲げモーメント M を基に、せん断力 Q の深度分布は、連続する 3 断面における M 値の分布を 2 次式で表し、対象とする断面位置での微分値として順次下方へ求めた。さらに、水平地盤反力 p の深度分布も同じ方法で、せん断力 Q の 2 次式の微分値として求めた。一方、たわみ角 θ の深度分布は、連続する 3 断面における曲率 ϕ の深度分布を 2 次式で表し、対象断面での積分値として順次算定した。また、水平変位 y も同様な方法により、たわみ角 θ の積分値として求めた。

以上の方法で求めた曲げモーメント M 分布、水平変位 y 分布、せん断力 Q 分布および水平地盤反力 p 分布に関する 2 ケースを比較して、図 19 に示した。ただし、図示した各深度分布は、杭体が弾性範囲と考えられる荷重 100kN までである。これらの図から以下のことがわかる。
① 曲げモーメント M 分布; Case2 の曲げモーメントは、Case1 に比べて深度 3.5m 以深での発生が小さい。2

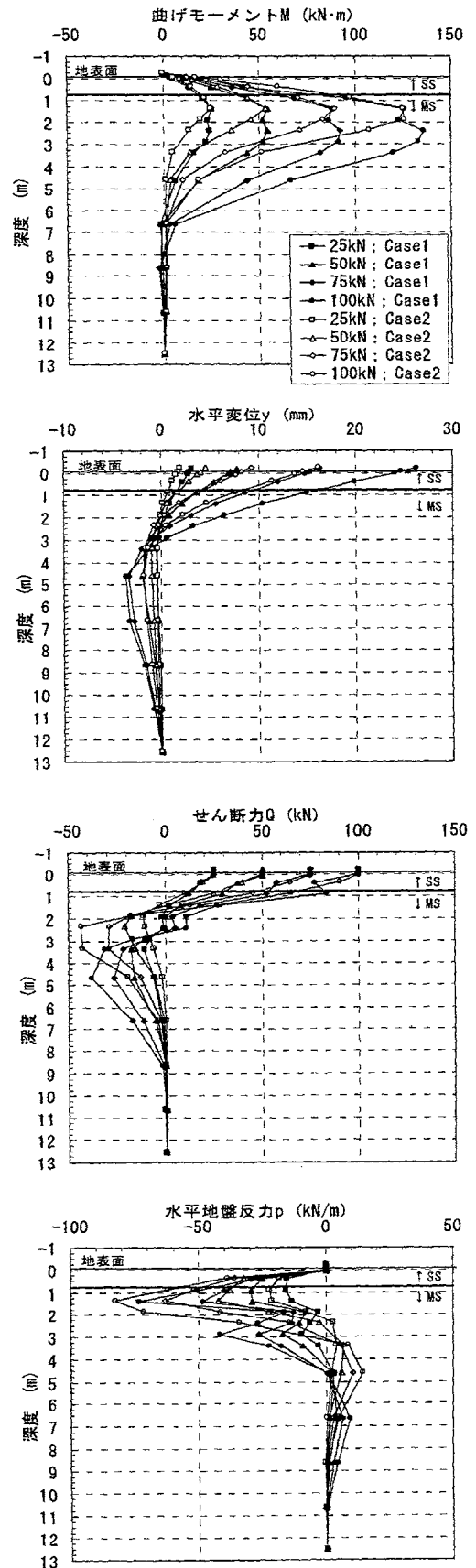


図 19 各物理量の深度分布の比較

つのケースともに荷重の増加に伴い、地中部最大曲げモーメントは増加し、その発生位置は深くなる。また、荷重 100kN 時に発生した Case2(スラグ)の地中部最大曲げモーメントは、Case1(砕石)に比べて約 10%減少している。

② 水平変位 y 分布；荷重の増加に伴って、反曲点位置が深くなり、分布形状は明確なくの字形となる。この傾向は Case2(スラグ)より Case1(碎石)で顕著である。なお、荷重 100kN 時の Case2(スラグ)の杭頭水平変位は、Case1(碎石)と比べて約 40%減少している。

③ せん断力 Q 分布および水平地盤反力 p 分布；地中部の最大せん断力が発生する位置は、荷重の増加に伴い、若干深くなる傾向が見られ、Case1(碎石)では深度 4.6m で、Case2(スラグ)はそれより約 2.0m 浅く、深度 2.3m に現れている。一方、最大水平地盤反力は 2 ケースともに深度 1.5m 付近に発生する。

さらに、深度 1.5m 以浅における各深度の水平地盤反力 p ~ 水平変位 y の関係を図 20 に示した。同図より、地盤の抵抗剛性を表す傾きは、水平変位の増加に伴い徐々に減少していくことがわかる。特に、上載圧の小さい表層に近いほど、この減少度合いが著しくなる。また、すべての深度において、傾きは Case2(碎石)より Case1(スラグ)の方が大きいことがわかった。

ついで、各深度の水平地盤反力 p を杭径 D (軸部径 $D=400\text{mm}$)と水平変位 y で除して求めた、水平地盤反力係数 k_h について、以下に検討を加えてみる。

水平地盤反力係数 k_h ~ 水平変位 y 関係を図 21 に示した。同図中には水平地盤反力係数 k_h を累乗式に基づく最小二乗法近似の曲線も併記してある。また、累乗近似式から求めた杭径 D の 1%の水平変位($y=4.0\text{mm}$)における各深度の水平地盤反力係数 k_{h4} を表 5 に示してある。これらの図表より、各深度において水平地盤反力係数 k_{h4} は Case1(碎石)より Case2(スラグ)の方が大きく、前者に対する後者の割合は、深度 0.3m, 0.8m および 1.3m で、それぞれ 1.5 倍, 1.8 倍および 2.1 倍となっている。ちなみに、 N 値 4 が得られている深度(0.8m, 1.3m)の水平地盤反力係数を基礎指針⁸⁾で提案されている $E_0=700N$ (E_0 =変形係数, N =標準貫入試験による N 値)の関係をを用いて評価すると、変位 4.0mm における水平地盤反力係数 k_{h4} は 22.3 MN/m^3 となる。この値は、Case1(碎石)の深度 (0.89m, 1.39m) における平均値 21.3 MN/m^3 とほぼ等しい値となった。このことから、掘削により緩んだ孔壁と杭との間に砂利を充填し施工した Case1(碎石)においても、掘削による水平地盤反力係数の低減はなく、原地盤に近い値が得られていることがわかる。

スラグで杭周地盤を改良することで、碎石の場合に比べて最大曲げモーメントは約 10%、杭頭水平変位は約 40%低減した。また、水平地盤反力係数は約 2.0 倍大きくなり、杭の水平抵抗を高める傾向のあることが確認された。ただし、杭の水平耐力は、前述したように碎石の場合より約 15%劣る結果が得られている(図 13 および 16 参照)。この原因としては、Case2(スラグ)では杭体にひび割れを生じる位置が Case1(碎石)の場合より浅く(図 14 および 17 参照)、ひび割れ後の荷重増加に対して、それらの位置をヒンジとした崩壊機構が形成されるようになったためと考えられる。なお、この点については、実

際の杭に近い杭頭固定の条件の下で行った実験結果から、鉄鋼スラグによる改良地盤中の杭の水平挙動を検討することが必要である。

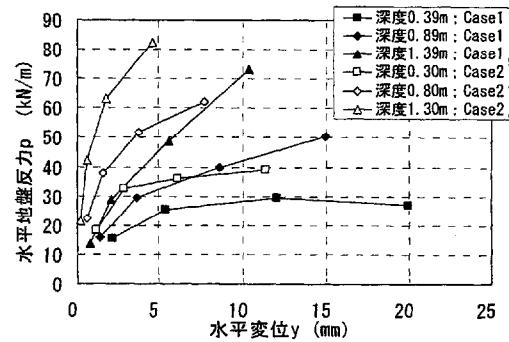


図 20 水平地盤反力~水平変位の関係の比較

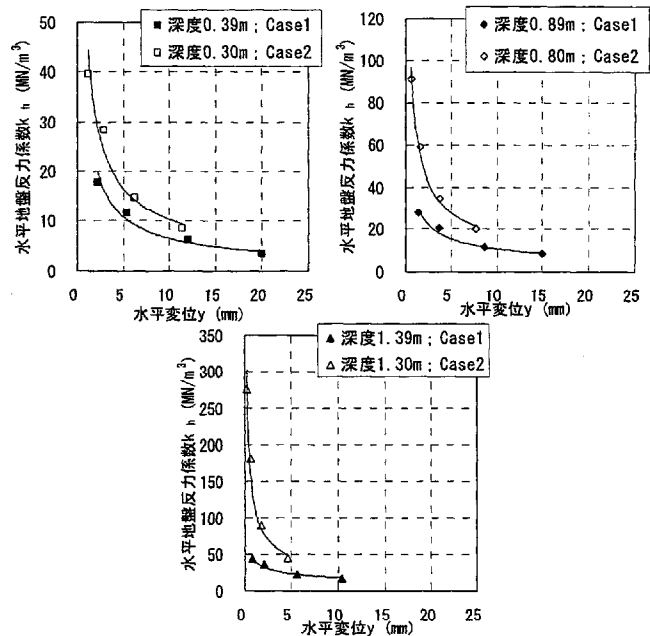


図 21 各深度の水平地盤反力係数~水平変位の関係

表 5 水平変位 4.0mm における水平地盤反力係数

実験ケース	水平地盤反力係数 k_{h4} (MN/m^3)		
	深度 0.3m 付近	深度 0.8m 付近	深度 1.3m 付近
Case1	12.6	17.4	25.3
Case2	19.1	31.8	52.7
Case2/Case1	1.5	1.8	2.1

6. スラグの経時変化および表層改良の仕様が杭の水平剛性に及ぼす影響

スラグの経時変化および表層改良の仕様(改良幅, 改良深さ)が、杭の水平剛性に及ぼす影響について検討を加えてみる。なお、水平剛性は実験終了時の水平荷重を水平変位量で除した値と定義している。Case5,6 の水平荷重は、杭本数で除した値を用いている。各ケース(Case3~Case6)について、養生 1 ヶ月 (1M) 目と養生 3 ヶ月 (3M) 目に実施した実験結果から求めた水平剛性を表 6 に示す。

表 6 から、各ケースもとにスラグの経時変化(1M→3M)により、水平剛性が増加していることがわかる。各ケースの経時変化による水平剛性の増加割合は、Case3(1.08

倍) \lt Case4(1.29倍) \lt Case5(1.48倍) \lt Case6(1.58倍)の順に大きくなっている。

表層改良無しのCase3に対する2.0m \times 2.0m \times 0.75mの表層改良を施したCase4の増加割合は、養生1ヶ月(1M)目が1.21倍、養生3ヶ月(3M)目が1.45倍である。約2.7倍の幅で改良したことにより、水平剛性が約1.5倍増加している。このことから、改良幅を増すことによる水平抵抗を増大させる効果のあることがわかった。ちなみに、水平剛性の比は、養生1ヶ月目から3ヶ月目において1.19倍増加している。

2.0m \times 3.0m \times 0.75mの表層改良を施したCase5に対する2.0倍の深さで表層改良したCase6の水平剛性の比は、養生1ヶ月(1M)目が1.05、養生3ヶ月(3M)目が1.12である。2.0倍の深さで改良したことで、水平剛性が約1.1倍増加し、このことから改良深さを増すことによる水平抵抗の増大への効果が確認できる。また、水平剛性の比は、養生1ヶ月(1M)目から3ヶ月(3M)目において1.06倍に増加している。

表6 経時変化による水平剛性の変化

実験ケース	改良幅による影響			改良深さによる影響			
	Case3	Case4	水平剛性比 Case4/Case3	Case5	Case6	水平剛性比 Case6/Case5	
水平剛性 (kN/mm)	1M	14.30	17.30	1.21	23.00	24.20	1.05
	3M	15.50	22.40	1.45	34.10	38.16	1.12
	3M/1M	1.08	1.29	1.19	1.48	1.58	1.06

7. 結語

杭周辺地盤を鉄鋼スラグによって地盤改良することで、杭の水平抵抗を増大させる工法について検討した。実大杭の水平加力実験結果から、杭の水平抵抗に与える①鉄鋼スラグによる地盤改良の効果、②スラグの経時変化の影響および③改良仕様(改良幅、改良深さ)の影響について、以下のことが確認された。

- ① 鉄鋼スラグで杭周面の地盤を改良することで、碎石の場合に比べて最大曲げモーメントは10%、杭頭水平変位量は40%低減した。また、水平地盤反力係数は2.0倍大きく改善され、杭の水平抵抗を高める傾向がある。
- ② スラグ特性の経時変化(1M \rightarrow 3M)により、水平剛性が増加し、杭の水平抵抗が向上する。
- ③ 杭の水平剛性は、改良幅を約2.7倍大きくすることで、約1.5倍増加し、改良深さを2.0倍大きく改良することで、約1.1倍増加した。

本研究は継続しており、今後の計画として、養生期間6ヶ月(6M)、12ヶ月(12M)目に改良地盤中の単杭および杭頭固定の2本直列群杭の水平加力実験を実施し、これらの実験結果からスラグによる杭周辺地盤の改良効果について、さらに検討を加えていく予定である。

謝辞：本実験遂行にあたり、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)広畑製鐵所 設備部 道下恭博氏、他関係者各位に感謝いたします。また、本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) 藪内貞男・西脇平尾幸太郎・吉川那穂・芝本真吾(2003)：各種地盤における鉄鋼スラグを用いた埋込み杭の支持力特性について、(社)日本鉄鋼協会社会鉄鋼学部会スラグ利用プレハブ構造研究会 第2回報告会, pp.33-42.
- 2) 神山英樹・桑原文夫・田中実・加藤洋一(1999)：埋め込み杭施工時に排出される泥水を用いた杭の補強に関する研究-水平剛性および耐力の向上への適用性-, 第34回地盤工学研究発表会, pp.1443-1444.
- 3) 濱田純次・土屋富男・加倉井正昭・山下清・河合栄作・桑原文夫(2001)：表層地盤改良を施した杭の水平載荷実験, 第36回地盤工学研究発表会, pp.1663-1664.
- 4) 河野真実・和田宣史・鈴木永之・坂手道明(2000)：軟弱地盤での地盤改良複合杭基礎とその載荷試験, 橋梁と基礎, Vol.34, No.1, pp.27-27.
- 5) 宮島正悟・北詰昌樹・飯田清(2003)：固化処理工法による単杭の地震時水平抵抗の増大効果, 港湾空港技術研究所資料, No.1048.
- 6) 土質工学会基準(1983)：杭の水平載荷試験方法・同解説
- 7) 富永晃司・山本春行(1991)：杭頭自由および固定の単杭が終局状態に至るまでの水平挙動性状に関する理論と実験, 構造工学論文集, Vol.37B, pp.1-10.
- 8) 日本建築学会(2001)：建築基礎構造設計指針

The Basic Law for Establishing the Recycling-based Society was enacted in 2000, in which the utilization of industrial waste products plays an important role. From the background, iron and steel slag is recycled as materials of cement, roadbed, and so on. The slag has hydraulic and expansive potentialities, which might be available to develop a method of utilization of slag. The authors are researching about application of slag with the potentialities to a pile foundation, and making a series of load tests on full-scale nodular piles around which ground were improved by compaction with slag. As a part of these tests, this paper presents the experimental results that the slag around the piles could increase the lateral resistance of the piles.