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

本間裕介[1]，冨永晃司[2]，永井及[3]

1　ジャパンパイル・技術開発部
2　広島大学・大学院国際協力研究科・開発科学専攻
3　広鉱技建・技術部

概　　要

鉄鋼スラグの新たな用途開発の一つとして、鉄鋼スラグで杭頭周辺の極浅層範囲の地盤を改良することにより杭の水平抵抗の増大を図る工法の開発が考えられ、筆者らはその研究・開発を手掛けている。本論文は、この研究の一環として実施した、杭頭周辺地盤を鉄鋼スラグで浅層改良した地盤中杭の正負交番繰り返し水平加力実験結果について報告する。具体的には、繰り返し荷重を受ける杭の水平挙動を紹介し、さらに浅層改良に用いた鉄鋼スラグの特性の違いが杭の水平抵抗に与える影響について検討を加えた結果について報告する。

キーワード：鉄鋼スラグ，杭の水平抵抗，水平加力実験，繰り返し荷重

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。この現況の下、製鋼の過程で発生する鉄鋼スラグにおいてもセメント原料や路盤材等で再資源化が行われている。この鉄鋼スラグには、銑鉄を製造する高炉で溶融された銑鉄以外の鉄分として回収させ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り、前者の中でも、加圧水で急激に冷却されてできたものを水砕スラグと呼び、このスラグは水と反応して水和物を生成し固結する性質がある。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、水砕スラグほど固結性は無いが、含有する遊離石灰 f-CaO（表 1-1 に示す化学組成を参照）が水と反応することによって膨張する性質を有している。このような特性を有しているため、鉄鋼スラグは、これらの特性を抑制するように特殊な処理を施して利用されるのが一般的である。しかし、さらに有効利用材として活用するために、特殊な処理を施さずに、鉄鋼スラグのもつこれらの特長をそのまま生かした用途開発が望まれる。

最近の杭基礎の設計では、杭の高支持力化に伴い、鉛直支持力より杭の水平抵抗によって杭本数や杭径等が決定される事例が多い。また、兵庫県南部地震を契機に、杭基礎の耐震性の重要性が再認識され、大地震に対しても十分な耐力や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、地震に強い杭基礎の工法開発が活発となり、その一環として単に曲げ性能の高い杭材(鋼管杭、SC 杭等)を用いる方法以外にも、杭周辺地盤を地盤改良することで杭の水平抵抗を増大させる工法[1)~3)]、あるいは杭の水平抵抗増大を図るために水平抵抗増大機構を付加させる方法[4)]の開発などの研究が見られる。

このような背景から，筆者らは、杭頭周辺の極浅層範囲の地盤を鉄鋼スラグによって改良し、杭の水平抵抗を増大させる工法（以降、スラグ浅層改良杭と呼称）に関する一連の研究を行っている[5)~8)]。今までに実大杭の一方向水平加力実験を実施し、その結果から杭の水平抵抗増大効果があること[5)]、およびスラグ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[6),8)]等を確認した。また、用いる鉄鋼スラグの種類によって、さらに改良効果が期待できる可能性があることも指摘した[7)]。

引き続き本論文では、浅層改良に用いた鉄鋼スラグの特性の違いが繰り返し荷重を受ける杭の水平挙動に与える影響について検討するために、杭頭周辺地盤の部分的浅層部を異なる 2 種類の鉄鋼スラグで改良した大型模型杭の正負交番繰り返し水平加力実験を行ったので報告する。

表 1-1 化学組成

種類	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	T-Fe	S	MnO	TiO_2	その他
転炉スラグ	11.3	37.3	3.9	15.7	20.4	0.0	6.1	1.5	3.8(f-CaO)
水砕スラグ	33.8	42.0	14.4	6.7	0.3	0.8	0.3	1.0	0.7

原稿受理日：2006年4月3日，採用決定日：2006年7月10日

2. 大型土槽を用いた現場実験概要

2.1 実験土槽

本実験に用いた土槽は、コンクリート製大型土槽であり、図 2-1 に示すように幅 6m×奥行き 4m×深さ 5m の寸法を有している。

2.2 実験に用いたスラグの種類

路盤材等に再利用されている転炉スラグは、膨張を抑えるためにエージング処理を施したものが殆どであり、エージング処理を施さずに転炉スラグを利用できる用途開発が望まれている。そこで、本実験では、エージング処理を施し膨張性を抑えた転炉スラグ（以降、転炉スラグと呼称）以外に、エージング処理を施さない大きな膨張性を有する転炉スラグと水硬性がある水砕スラグを重量比 8:2 で混合した混合スラグ（以降、混合スラグ）も用いた。ここに混合スラグは、未エージング転炉スラグの膨張を起因する遊離石灰(f-CaO)が水砕スラグの固結に消費されるため膨張量が抑えられ、かつ固結する性質を有している。なお、各スラグともに最大粒径 5.0 mm のものを使用した。

用いたスラグについて三軸圧縮試験(CD)および膨張試験を実施した結果を表 2-1 および図 2-1 にそれぞれ示す。表 2-1 は養生 30 日、90 日目に実施した三軸圧縮試験から得られた各スラグの粘着力 C、内部摩擦角 ϕ の経時変化を示している。また、図 2-1 は、膨張を促進させるため 80℃温水養生で行った膨張量試験の結果である。なお、これらのスラグの力学的特性の詳細については、文献 9)－11)で報告しているので、これらの文献を参照されたい。これらの図および表から、用いたスラグの力学的特性として以下のことがいえる。

① 両スラグとも、内部摩擦角 ϕ は 45 度～48 度の範囲でほぼ一定である。

② 粘着力 C は転炉スラグより混合スラグの方が大きく、養生期間の増加に伴って、その傾向が顕著である。

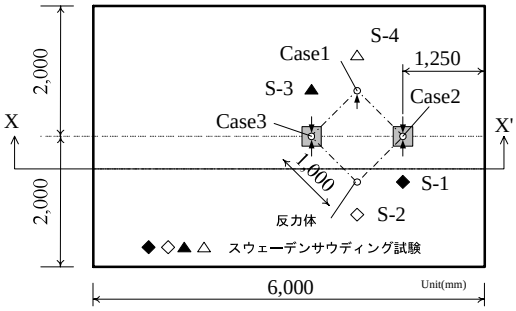
③ 転炉スラグの膨張は混合スラグの 1 / 3 程度である。

2.3 実験杭と実験ケース

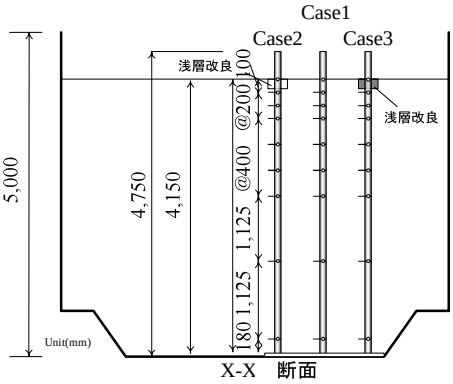
本実験は実大規模を想定しており、表2-2に示すように、用いた実験杭は、長さ L=4.75m、杭径 D=114.3mm、肉厚 t=4.5mm の鋼管である。この杭の仕様は、作製地盤（目標 N 値 1～2 相当）において十分長い杭となるように決定（推定無次元長さ βL（β=[$k_h D$ / 4EI]$^{0.25}$）が 4.61）した。なお、図 2-1 の(b)に示すように、実験杭体表面には 9 断面の対面

表 2-1 粘着力、内部摩擦角

種類	養生期間 (day)	粘着力 C (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ （度）
転炉スラグ	30	44.0	46.5
	90	49.1	45.6
混合スラグ	30	127.6	47.4
	90	136.0	47.4



(a) 平面図



(b) 杭配置図

図 2-2 土槽平面図および杭配置図

表 2-2 実験杭の仕様

	材質 機械構造用 炭素鋼管	杭径 (mm)	杭長 (m)	肉厚 (mm)	曲げ剛性 (kN・m^2)	終局 曲げモーメント 公称値 (kN・m)
実験杭	STK13M A	114.3	4.75	4.5	544	13.8

表 2-3 実験ケース

Case	杭径 D(mm)	載荷方法	表層改良部 材料	表層改良部 改良幅	表層改良部 改良深さ	養生期間 Month
Case1	114.3	一方向	無	-	-	-
Case2	114.3	正負交番	転炉スラグ	3D	1D	3M
Case3	114.3	正負交番	混合スラグ	3D	1D	3M

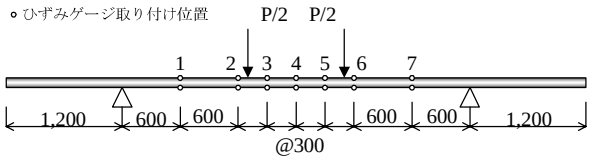


図 2-3 曲げ試験概要図

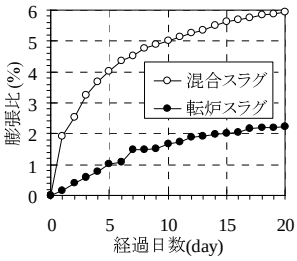


図 2-1 膨張試験結果

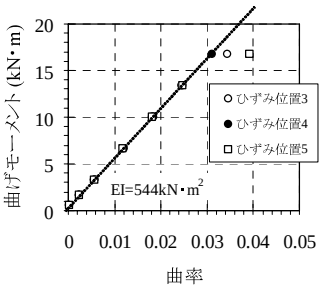


図 2-4 曲げ試験結果

にストレインゲージを貼付している。また、図 2-3 に示す一方向単純曲げ試験を実施し、図 2-4 に示す曲げモーメントと曲率関係から、杭体曲げ剛性 EI=544kN・m^2 を得ている。

実施した実験ケースを表 2-3 に示す。なお、スラグによる地盤改良無を基本（Case1）とし、杭頭周辺部地表面を転炉スラグおよび混合スラグで改良したスラグ浅層改良杭の実験を、それぞれ Case2 および Case3 と呼称することとした。スラグ浅層改良杭のように地盤改良として全置換による締固め工法を適用した場合、置換される地盤の排土が懸念され、実際の杭基礎へ適用するためには、排土量を極力抑える必要がある。そこで、杭基礎構造において一般的に杭頭部に設けられるパイルキャップの施工と比べて大きな負荷とならない範囲を改良の対象とした。現行の設計では、単杭のパイルキャップの寸法（幅）として杭径の 2.0～2.5 倍 [12]を用いることが多いため、これらを考慮して実験の改良は、パイルキャップより一回り大きい 1 辺 3.0D（D は杭径）および改良深さ 1D の極浅層範囲とした。また、養生期間は、実際の杭基礎への適用を考え、3 ヶ月間とした。

以上の各ケースの実験は、杭と杭が相互に影響を及ぼさないように、杭中心間距離を杭径の 10 倍離した杭配置で実施した（図 2-2(a)参照）。

2.4　地盤作製方法およびスラグによる地盤改良方法

本実験地盤の作製は、杭建て込み後に大型多重ふるいによる自由落下方式 [13]を採用した。すなわち、杭の施工法としては、非排土杭に分類される埋込み杭を想定しており、具体的な実験地盤作製手順は、以下の通りである。

各実験ケースに供する全杭のゲージ位置を確認して、所定の杭間隔(10D)を保持できるように杭頭部および先端部を治具で固定し、杭頭側の固定治具をクレーンで吊り上げ、土槽内の所定位置に建て込んだ。ついで、図 2-5 中の数字で示す落下手順（落下位置(1) 投入位置 1,2,3,4,5→(2) 1,2,3,4,5→…→(5) 1,2,3,4,5→(1) 1,2,3,4,5→）に従って、湿

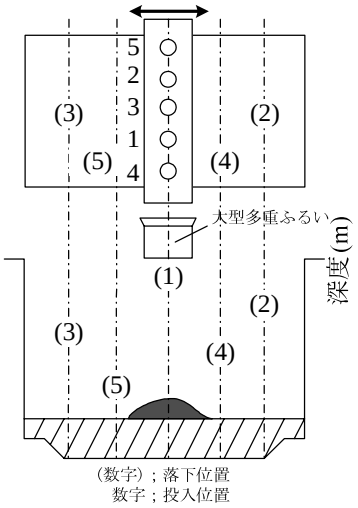


図 2-5　落下手順

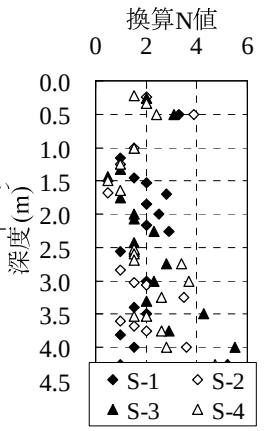


図 2-6 換算 N 値（N_{sw}）

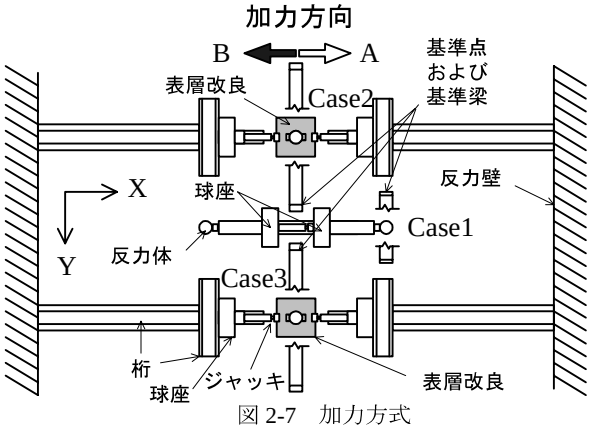
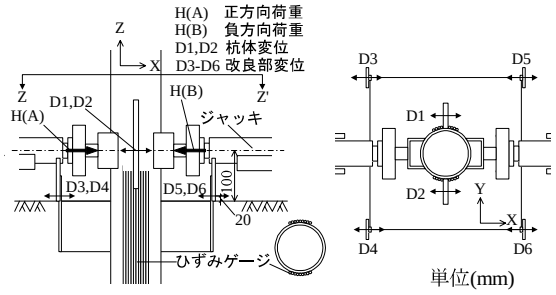
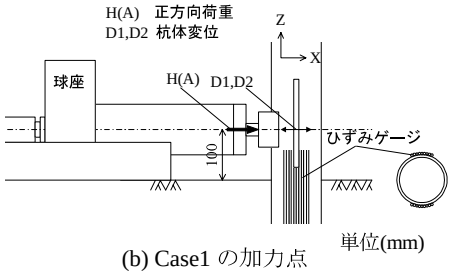


図 2-7　加力方式



(a) Case2 および Case3 の加力点



(b) Case1 の加力点

図 2-8　加力付近の拡大図

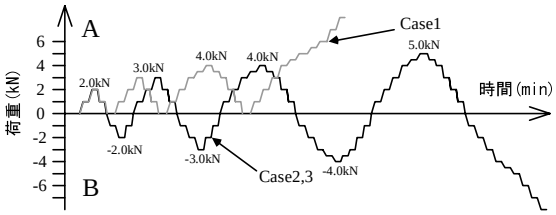


図 2-9　加力計画

潤 5 号硅砂（物性値；G_s=2.66、D_{50}=0.36mm、e_{max}=1.02、e_{min}=0.63）をバックホーバケットで多重ふるい内に投入・自由落下させ、杭の根入れ長が 4.15m になるまで堆積させ、表層のみトンボで平坦にならした。地盤作製時に測定した含水比の結果から、地盤の含水比は深さによらず 3.5%～8.4%であった。なお、Case2 および Case 3 の実験杭では、砂を堆積させた後に、杭頭周辺部を所定の寸法の木製型枠が挿入できるように掘削し、杭頭部周りをその型枠で囲い、その内側に所定のスラグを投入し、外側を掘削した砂で埋め戻しながら型枠を取り除いた。その後、地表面全面が一

定の締固め度になるように、バイブロプレートで満遍なく締め固めた。

地盤作製後に、図 2-2(a)に示す S-1～S-4 の 4 箇所でスウェーデン式サウディング試験を実施した。これらの試験で得られた測定結果から換算 N値(N_{sw})の深さ方向分布を求め、図 2-6 に示した。この図から、地表面付近の換算 N 値には締め固めの効果が確認でき、かつ全体的に多少のばらつきはあるものの、実験地盤の規模を考えればほぼ均一な地盤になっていると判断できた。

なお地盤作製後に、杭頭部の固定治具は取りはずしたが、杭先端部は取り付けたままである。したがって、杭頭は自由で、先端は固定に近い条件であることを付記しておく。

前述したように、鉄鋼スラグは水と反応することで固まる性質があるが、実際の杭基礎への適用を考えた場合、地盤改良への施工負担を大きくするような品質管理上の水分供給等は極力行わない方が理想である。このことから、本研究は、地盤に含まれる水分との水和反応のみを期待し行っている。ここに、文献 5)で報告した杭頭部周辺をスラグで改良した地盤における実大杭の水平加力実験では、一年間の自然養生を行って実験を実施したが、この養生では地盤中の水分の他に直接改良部に雨水等の水分が供給される条件であった。しかし、実際の杭基礎ではこのような水分供給は余り期待できないため、土槽上面を大きなビニールシートで覆って湿潤状態下でスラグの養生を行うようにした。

2.5　水平加力実験方法

各ケースとも水平加力実験は、図 2-7 に示す加力方式により、スラグの養生を 3 ヵ月間行った後に実施した。なお、Case1 の加力方式は反力体（研究の一環として行った水平抵抗増大機構を付加させた杭 [14]）と押し合う一方向多サイクル方式とし、Case2 および Case 3 では、土槽の両側壁を反力壁として、正負交番多サイクル方式とした。図 2-8 にそれぞれの加力点付近を拡大した図を示す。各実験ケースともに、加力点高さは G.L.+100mm である。

実験時の測定項目は、水平荷重、加力点の杭体変位 2 点（D1,D2）および杭体のひずみ量である。なお、Case2 および Case 3 では、改良部四隅における変位（D3～D6）も測定した。

各実験ケースにおける加力計画を、それぞれ図 2-9 に示した。これらは、基本的には土質工学会基準「水平載荷試験方法・同解説」に準拠しており、荷重載荷時（0 分時）および所定荷重で 3 分荷重を保持した時点で測定を行った。ただし、第 3 サイクル終了後は、加力装置の安全が確保できるまで加力することとし、最終的には Case1～Case3 で、それぞれ杭径の約 43%、15%、および 17%に至る大変位加力が実施できた。なお、実験終了後に Case2 および Case 3 の周辺地盤を掘削し、改良部の形状調査を行った。

3.　鉄鋼スラグによる改良効果

3.1　水平荷重～変位関係および杭頭周辺地盤の性状

各ケースにおける実験結果のうち、新規荷重のみを対象として杭頭水平荷重 H と加力点の変位 y との関係を比較して、図 3-1 に示した。なお、A 方向および B 方向加力（図 2-6 参照）ともに H～y 関係は、同じ象限に表示している。

同図より、地盤改良無の Case1 は、低荷重段階から非線形性が顕著な挙動を示し、かつ H～y 関係に基づく割線剛性（以降、抵抗剛性と呼称）は低い値を示すことが読み取れる。これに対して、Case2 および Case3 では、荷重 3.0kN まで高い抵抗剛性を示しており、それ以上の荷重階においては非線形的挙動を示している。また、Case2 の H～y 関係では、荷重 3.0kN 以降に加力方向による若干の違いが見

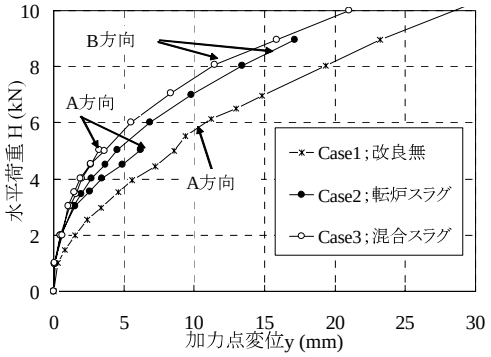


図 3-1　水平荷重と加力点変位の関係

写真 3-1 Case1 地盤状況

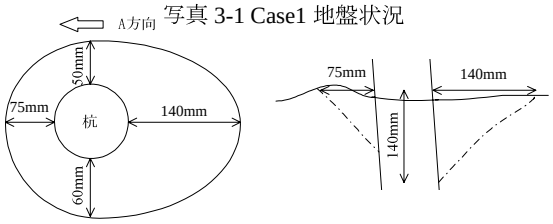
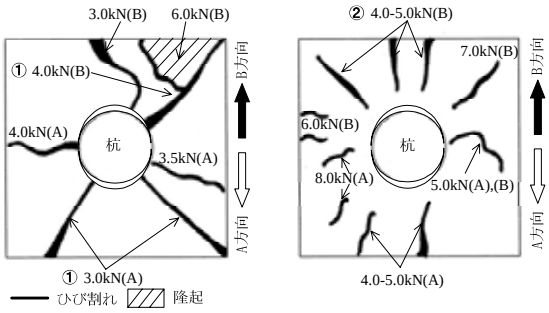


図 3-2　Case1 スケッチ図



(a) Case2　　(b) Case3

図 3-3　ひび割れスケッチ

られるが、Case3 では加力方向による違いは無く、ほぼ同じ H～y 関係を示すことが分かった。ここに、各ケースにおける A 方向加力の H～y 関係を比較すると、荷重 5.0kN 時の変位は、Case1（8.57mm）>Case2（6.18mm）>Case3（3.26mm）の順に小さく、養生 3 ヶ月において十分にスラグによる改良効果が発揮されていると判断できる。

つぎに、Case1 における加力終了後の杭頭周辺地盤状況を写真 3-1 に、そのスケッチを図 3-2 に示す。ただし、このケースでは、最終的に加力点変位が杭径の 43%に至るまで大変位させており、残留変位が 37.0mm の状況である。また、Case2 および Case3 においては、加力中に目視で確認できた地盤改良部のひび割れ状況のスケッチを、ひび割れが発生した荷重値とともに、図 3-3 に示してある。

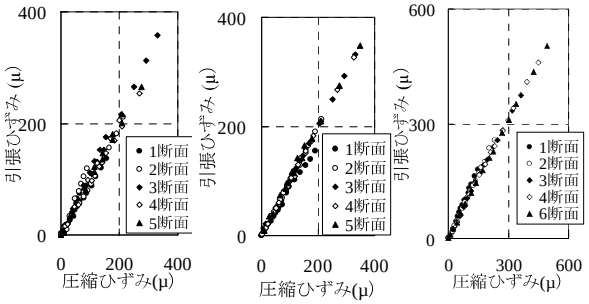
Case1 の場合、写真 3-1 および図 3-2 で見られるように、加力方向の前方地盤では少し盛り上がり、後方地盤においては、杭の移動に伴ってできた隙間に砂が崩れながら落下しており、最終的には加力点変位 49.1mm より大きなすり鉢状の穴が形成されている。これに対して、図 3-3 に示されたスラグで地盤改良したケースでは、加力点変位が杭径の 15%,17%程度と Case1 に比べて小さかったが、粘着力の影響から背面のスラグは崩れることなく自立しており、改良部と杭との間に小さな隙間が生じる程度であった。これらの観察結果から、それ以上に大きな加力点変位を与えても、Case1 のようなすり鉢状にまで発展する可能性は少ないと推測された。

つぎに、改良部に発生したひび割れの進展に着目すると、Case2 の場合は、荷重 3.0kN 時に加力方向に対して 45°の方向に杭から改良部端まで伸びる大きなひび割れが発生し（図 3-3(a)参照）、荷重の増加に伴ってこのひび割れ幅が進展していく傾向が示された。これに対して Case3 では、混合した水砕スラグの固結性が発揮され、荷重 5.0kN 時においても所々表面にひび割れが発生する程度であった。ただし、それ以上に荷重が増加すれば、2 本のひび割れ線が加力方向の前方で大きく発達する様子（図 3-3(b)参照）が観察された。このように、スラグの種類によって地盤改良部のひび割れ発生荷重が異なっており、前述した Case2 の加力方向による H～y 関係の違いは、荷重 3.0kN 時に改良部で発生したひび割れが、その原因であると推測できる。

3.2　杭体に発生する物理量

各ケースにおいて、実験時に測定された最大ひずみの発生深度（5 断面=約 1.0m 付近）までを対象として、圧縮ひずみと引張ひずみの関係を図 3-4 に示した。ただし、Case3 では 5 断面の圧縮側ひずみゲージが破損したため、6 断面までを示した。この図より、各ケースともに 45°（圧縮ひずみ＝引張ひずみ）の線に沿って変動しており、線形関係を保っていることから、実験終了まで杭材は弾性的に挙動したものと判断できた。

これらの曲げひずみの測定値に基づいて、杭体に生じた各物理量を換算し、検討を加えることとした。ここに、各物理量の深さ方向分布は、文献 15)で提案された方法により算出することとし、まず測定されたひずみ値から曲率を式(1)で算定する。なお、Case1 における破損した 5 断面の圧縮ひずみは、いずれの断面においても圧縮と引張ひずみが 45°線上にあることから、対面の引張ひずみ値と同じ値を与えて算定した。

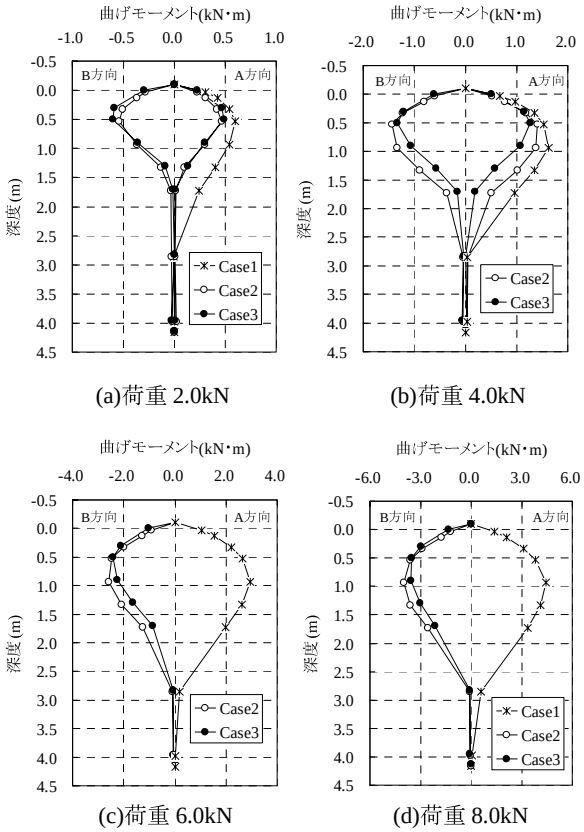


(a) Case1　(b)Case2　(c)Case3

図 3-4　圧縮ひずみと引張ひずみの関係

表 3-1　最大曲げモーメント

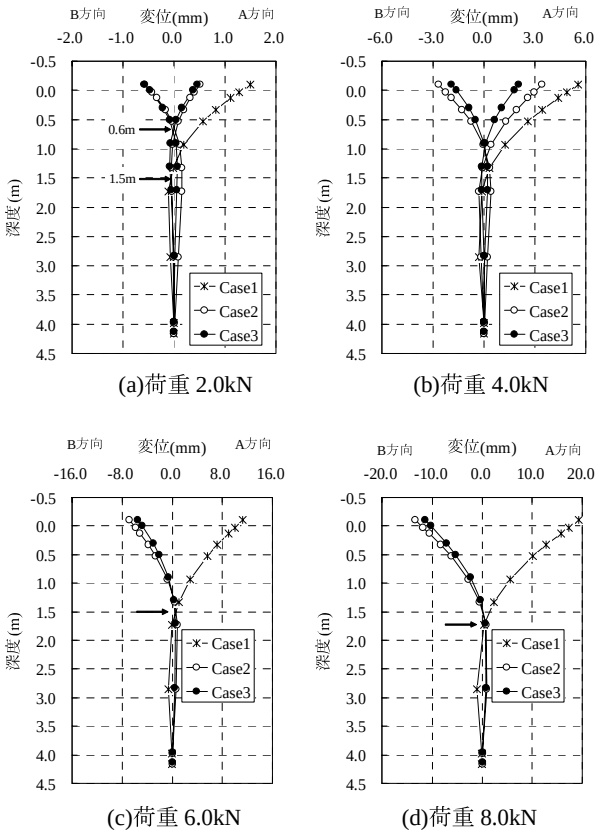
ケース	最大曲げモーメント(kN・m)							
	2.0kN		4.0kN		6.0kN		8.0kN	
Case1	0.59	(1.00)	1.63	(1.00)	2.94	(1.00)	4.43	(1.00)
Case2	0.60	(1.02)	1.44	(0.88)	2.58	(0.88)	3.99	(0.90)
Case3	0.54	(0.92)	1.33	(0.82)	2.41	(0.82)	3.56	(0.80)



(a)荷重 2.0kN　(b)荷重 4.0kN

(c)荷重 6.0kN　(d)荷重 8.0kN

図 3-5　杭体曲げモーメント深さ方向分布



(a)荷重 2.0kN　(b)荷重 4.0kN

(c)荷重 6.0kN　(d)荷重 8.0kN

図 3-6　杭体変位深さ方向分布

$$\phi_i = (\varepsilon_{ti} + |\varepsilon_{ci}|)/D \qquad (1)$$

ここに、　ϕ_i　：i 断面における曲率

$\varepsilon_{ti}, \varepsilon_{ci}$　：i 断面における引張、圧縮ひずみ

D　：杭径（D=114.3mm）

これらの曲率に、曲げ剛性 EI(=544kN/m^2)を乗じて曲げモーメント M 分布を求めた。さらに、曲げモーメント M を微積分することで、せん断力 Q、水平地盤反力 p および変位 y を求めた。このようにして求めた、新規荷重を対象にした荷重 2.0kN、4.0kN、6.0kN および 8.0kN 時における曲げモーメント M 分布および変位 y 分布をそれぞれ比較して、図 3-5 および図 3-6 に示した。そして、各ケースの最大曲げモーメントの値を表 3-1 に示した。なお、同表の括弧内の数値は、Case1 に対する割合を表している。これらの図表から、以下のことが読み取れる。

① 図 3-5 に示した曲げモーメント分布から、改良部にひび割れが発生しない荷重 2.0kN までは、Case2 および Case3 ともに深さ 1.5m 以深では発生していないのに対して、地盤改良無の Case1 では、それ以深まで曲げモーメントが発生している。そして、改良部にひび割れが生じる荷重（Case2＝3.0kN および Case3＝4.0kN）以降では、Case2 および Case3 の分布形状も Case1 に近づいていく傾向が伺える。しかし、ひび割れ発生後においても、最大曲げモーメントは地盤改良無の Case1 より減少しており、スラグで改良を施した効果が現れている。また、表 3-1 より、Case2 の最大曲げモーメントは Case1 に対して約 10%程度の減少に留まっているが、Case3 においては約 20%減少しており、固結性のある水砕スラグを混合したスラグを用いることで、さらに杭の曲げモーメントを低減させる効果があることが確認できた。

② 変位の深さ方向分布を示した図 3-6 より、改良部にひび割れが生じるまでは、Case2 および Case3 の変位零点の深さは Case1 の約半分の深さに現れている。しかし、その後の荷重増加に伴ってその位置は深くなり、荷重 8.0kN では Case1 とほぼ同じ深さになることが判明した。ただし、地表面位置での変位は Case1 より小さな値を示しており、スラグによる改良効果が表れている。また、混合スラグを用いた Case3 の地表面変位は、転炉スラグ(Case2)のそれより小さい。このことは、固結性のある水砕スラグを混合したスラグを用いることで、さらに杭の水平変位抑止効果が発揮されることを示唆している。

3.3　水平地盤反力係数の比較

前述した各物理量の換算結果のうち、深度 0.1m（改良部下端付近）および 0.3m における水平地盤反力 p と杭体の水平変位 y 関係から求められる水平地盤反力係数 k_h～y 関係を、図 3-7 および図 3-8 に示す。ここに、水平地盤反

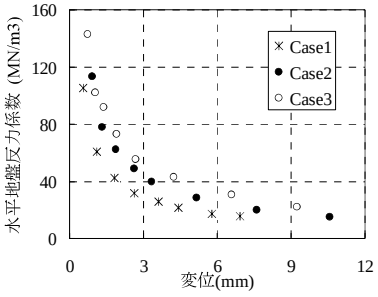


図 3-7　深度 0.1m における水平地盤反力係数

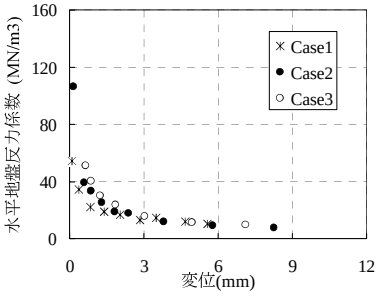


図 3-8　深度 0.3m における水平地盤反力係数

表 3-2　各水平地盤反力係数

深度(m)	Case	水平地盤反力係数k_h					
		杭径1%変位		杭径3%変位		杭径6%変位	
		k_{h1} (MN/m^3)	比率	k_{h3} (MN/m^3)	比率	k_{h6} (MN/m^3)	比率
0.1	Case1	61.8	1.00	26.3	1.00	15.3	1.00
	Case2	90.8	1.47	38.4	1.46	22.3	1.46
	Case3	100.0	1.62	47.2	1.79	29.4	1.92
	Case3/Case2	-	1.10	-	1.23	-	1.32
0.3	Case1	20.4	1.00	13.0	1.00	9.8	1.00
	Case2	27.4	1.34	13.0	1.00	8.2	0.84
	Case3	33.0	1.62	9.3	0.72	9.3	0.95

力係数 k_h は、p を杭径 D と y で除して求めた。なお、Case2 および Case3 では B 方向加力時の水平地盤反力係数である。さらに、水平地盤反力係数 k_h～変位 y 関係を累乗関数で近似し、その関数を用いて杭径の 1%(1.14mm)、3%および 6%時の水平地盤反力係数 k_h を求めた結果を、それぞれ表 3-2 に示した。これらの図表から、以下のことが指摘できる。

① 砂地盤においては、深くなるほど上載圧の影響で水平地盤反力係数は増大するのが一般であるが、本実験地盤では、バイブロプレートの締固め効果により水平地盤反力係数は浅い方が大きい傾向を示している（図 3-7 参照）。

② 改良部下端付近の深度 0.1m に着目すると、Case2 および Case3 は Case1 より約 1.5 倍および 1.8 倍大きな値を示しており、スラグによる改良効果が確認できる。そして、この改良効果は水平変位が約 10mm に至っても発揮していることがわかる（図 3-7 参照）。また、用いたスラグによっても改良効果は異なっており、固結性のある水砕スラグを混合した Case3 の方が Case2 より 1.10 倍～1.32 倍大きな値となっている(表 3-2 参照)。

③ 深度 0.3m においては、微小変位の段階でスラグ改良効果が若干認められるが、変位が大きくなるに従って改良効果が薄れ、最終的には改良無しの Case1 とほとんど変わらない水平地盤反力係数値となることがわかった（図 3-8 参照）。

上述したように、スラグにより杭周辺の極浅層地盤を改良した結果、水平地盤反力係数 k_h は改良無しに比べて増大していることが確認できた。

3.4 繰り返し荷重を受けた際の杭の水平挙動

Case2 および Case3 における 0 分時の水平荷重 H～加力点変位 y 関係を、それぞれ図 3-9 および図 3-10 に示す。これらの図から、以下のことが読み取れる。

① 転炉スラグの Case2（図 3-9）では、第 3 サイクル以降、A および B 方向加力ともに立ち上がりの形状は S 字型を呈し始める傾向のあることがわかる。そして、第 4 サイクルでその傾向が顕著となり、最終的に中央がくびれたスリップ型の履歴ループの形状に近づいている。

② 混合スラグを用いた Case3（図 3-10）では、改良部に大きなひび割れが発生しなかったため、第 3 および第 4 サイクルにおいても、Case2 で見られた S 字型の形状が発生せず高い剛性を維持している。また、除荷時においても Case2 とは異なり高い剛性を有していることが確認でき、最終的な履歴ループは紡錘型に近い形状を示している。

以上のように、用いるスラグによって繰り返し荷重を受けた際の履歴ループが異なり、Case2 は水平変位が増大しやすいスリップ型の履歴特性を有することがわかった。このような現象の違いを検討するために、試験終了後に、改良部の掘り起し調査を行い、それらの状況写真 3-2 および写真 3-3 にそれぞれ示した。これらの掘り起し調査結果から、以下のことが判明した。

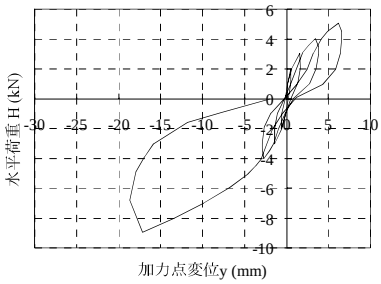


図 3-9 水平荷重と加力点変位の関係（Case2）

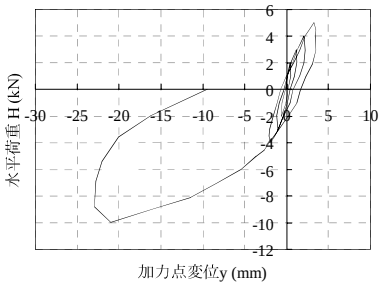


図 3-10 水平荷重と加力点変位の関係（Case3）

③ Case2 の場合、B 方向加力時の際に杭前面側に相当したスラグが、掘り起し中の衝撃により崩れている（写真 3-2 参照）が、Case3 では、そのような崩壊は起きなかった。また、両ケースともに、改良部外周面には締め固まった薄い層の砂が付着しており、その傾向は Case2 より Case3 で顕著であった。さらに、実験中に改良部表面で確認できたひび割れ（図 3-3 参照）は、地中部の側面にまで達していた。

④ 崩壊した Case2 における改良部観察から、改良部の外周のみ厚さ 10mm 程度が固結しており、その内部は固結状態にはなっていなかった。これは、弱いながら水硬性を有する転炉スラグを用いたため、周面地盤に含まれる水分と反応して改良部周面のスラグが固結し、内部への水の供給が遮断され、水硬性の弱いスラグの固結が進行しなかったものと思われる。この現象は、同様な転炉スラグを用いて行った実大杭の水平加力実験においても確認されている [8)]。このことから、浅層改良部に転炉スラグを用いた場合、地盤に含まれる水分のみでは、改良部の外周の固結が生じる程度で、内部のスラグの水和反応は、あまり進行しないことが確認できる。

⑤ 以上の観察結果から、Case2 の履歴ループがスリップ型を呈した理由として、外周面だけ固結し、改良部内部の固結が進行していなかったため、除荷時における締め固められた未固結スラグの緩みを再圧縮する形となったためであると推測される。

⑥ 混合スラグを用いた Case3 においては、改良外周の固

結が促進され、内部においても外周の固結に比べて劣るものの固結が進んでいたことがわかった。この内部の固結は、強い水硬性を有する水砕スラグを混合したため、水砕スラグと転炉スラグが反応して進行したと考えられる。このことから、除荷時におけるスラグの緩みが発生せず、杭とスラグが Case2 より一体化して挙動したため、最終的な履歴ループが紡錘型の形状を示したものと思われる。

以上の結果から、地盤中の水分のみでは内部までスラグの水和反応が進行しなかった転炉スラグに対して、混合スラグは、水砕スラグの影響から内部まで固結が生じており、改良部の安定した品質の確保に有効であると言える。このような改良部内部のスラグの固結状態の違いによって履歴ループの形状は異なり、転炉スラグではスリップ型の形状、そして水砕スラグを混合したスラグでは紡錘型の形状を示した。

3.5　浅層改良部の挙動（Case2 と Case3）

実験時に測定した浅層改良部変位と杭地表面変位との関係について、以下に検討を加えてみる。

Case2 および Case3 の実験における、荷重～改良部変位関係曲線と荷重～加力点変位関係の骨格曲線とを併せて、それぞれ図 3-11 および図 3-12 に示した。なお、A 方向加力時の改良部変位は図 2-7(a)に示す D5 と D6 の平均値、B 方向加力時の改良部変位は同じく D3 と D4 の平均値で表している。一方、杭地表面の変位は、変位分布の地表面位置での値（図 3-6 参照）を採用している。これらの図から、

写真 3-2　掘り起こし状況（Case2）

写真 3-3　掘り起こし状況（Case3）

以下のことがわかる。

地盤改良方法として深層混合処理に代表される固化処理工法を用いた杭工法においては、文献 1)で報告されているように、改良体と原地盤の弾性係数比として数百倍得られ、改良体と杭とが改良幅の 1%変位まで一体化した挙動を示すことが確認されている。これに対して本実験では、両ケースとも加力初期の段階から杭の変位に比べて改良部の変位が小さく、特に A 方向加力時の荷重 5.0kN に着目すると、Case2 の改良部変位は杭の変位に対して約 41%、Case3 の改良部変位は約 27%しか発生していない。同様な傾向は B 方向加力時においても確認できる。このように

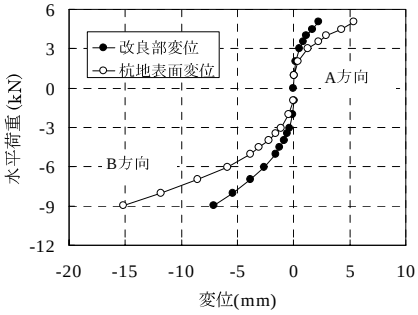


図 3-11　浅層改良部と杭の挙動（Case2）

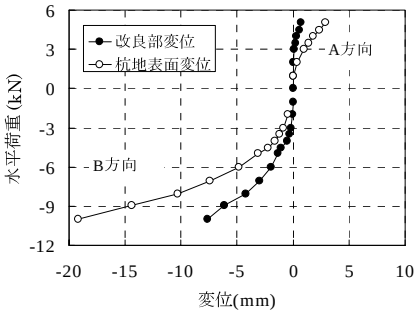


図 3-12　浅層改良部と杭の挙動（Case3）

表 3-3　弾性係数の比較

	周辺地盤 E_0=700N (N値=2)	Case2 転炉スラグ	Case3 混合スラグ
		三軸圧縮試験結果[11]から推定	
弾性係数×10^4(kN/m^2)	0.14	0.63	6.89
周辺地盤との弾性係数比	1	5	49

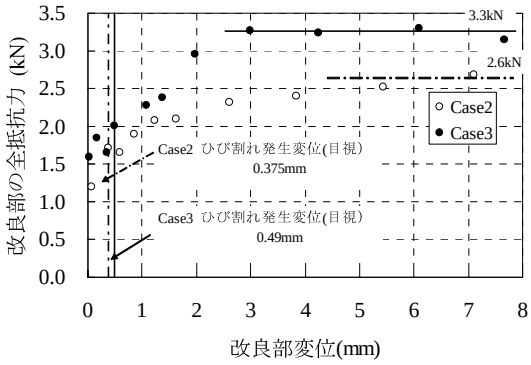


図 3-13　改良部の全抵抗力と変位の関係

改良部と杭とが一体的挙動を示さなかった原因としては、表 3-3 に示すように、スラグの剛性（弾性係数）が周辺地盤の剛性に対して 5 倍および 50 倍であり、一体挙動を示した地盤改良複合杭の弾性係数比 [1]と比べて相対的に小さかったためと考えられる。

以上の結果から、杭頭周辺をスラグで浅層改良した杭においては、周辺地盤に対するスラグの相対剛性が小さいので、杭と改良部とが一体化して挙動するのではなく、杭体が改良部内で相対的に変位しており、さらにその改良部は周辺地盤に対して相対的に変位する複雑な挙動をしていることが明らかとなった。したがって、このような杭の水平抵抗を評価する場合、改良部が地盤から受ける抵抗と杭が改良部から受ける抵抗とを並列的に考慮した解析モデルの構築が必要となる。この点について、改良部の全抵抗力を実験結果から求め、考察を加えてみることにする。

本実験における改良部の全抵抗力は、地表面位置と改良部下端深度 0.1m の 2 点のせん断力 Q の差と等価とみなし、Case2 および Case3 の全抵抗力～改良部変位関係を、それぞれ比較して図 3-13 に示した。なお、図中に各ケースにおける改良部のひび割れ発生変位を記入しておいた。

この図から、改良部の全抵抗力は改良部のひび割れ発生後も急激に低下することなく増加し、改良部変位が約 3mm 変位を越えるとほぼ一定値に収束していく傾向が示されている。ちなみに、その収束値は、混合スラグを用いた Case3 の方が転炉スラグの Case2 より約 1.26 倍大きな値となっている。この原因としては、前述したようにエージング処理した転炉スラグの Case2 に対して、Case3 では混合スラグにより改良部が固結している効果が発現しているためと考えられる。

4. まとめ

本論文では、鉄鋼スラグによる杭頭周辺地盤の部分的浅層改良が、杭基礎の水平抵抗に与える増大効果を把握するために実施した、3 種類の大型模型杭による水平加力実験結果を示した。また、改良材として用いた鉄鋼スラグの特性の違いが杭の水平抵抗の増大効果に与える影響について検討を加えた内容を示した。本論文で示した主な知見は、以下の通りである。

1) 鉄鋼スラグによる杭周辺地盤浅層改良は、3 ヶ月間の養生でも変位および曲げモーメントを効果的に低減でき、杭の水平抵抗を増大させる改良効果が確認できた。
2) 使用スラグが異なると、杭の荷重～変位履歴特性は異なり、転炉スラグではスリップ型の形状、そして水砕スラグを混合したスラグでは紡錘型の形状を示した。
3) 浅層改良に水硬性のある水砕スラグを混合したスラグを用いることにより、さらに杭の水平抵抗増大効果が期待できる。
4) 本実験では、杭頭周辺改良部と杭との一体挙動は観察されなく、杭体が改良部に対して相対的に変位し、改良部は周辺地盤に対して相対的に変位している。したがって、この種の杭の水平抵抗を評価する場合、改良部が地盤から受ける抵抗と杭が改良部から受ける抵抗とを直列的に考慮した解析モデルの構築が必要となることが判明した。

杭の水平抵抗を増大させるための浅層改良材として転炉スラグと水砕スラグを混合した混合スラグの有用性が確認できたが、この混合スラグは膨張性を有しており、その膨張が基礎スラブ等へ与える影響は十分に検討して用いる必要があると考える。

今後、上記の知見 4)で示した杭－スラグ－地盤系の挙動性状を考慮し、提案する水平抵抗増加杭を実杭基礎として適用する設計法を確立するため、杭－改良部および改良部－地盤の連成問題を直列的に解析できる水平抵抗解析モデルを構築する計画である。

5. 謝辞

本実験を行うにあたりご協力を頂いた、広島大学大学院国際協力研究科修士学生の玉井智子、および工学部第四類 4 年生の小池雄三の両氏に深甚の謝意を表します。

参　考　文　献

1) 前田良刀,緒方辰男,徐光黎,平井卓：地盤改良複合杭基礎の開発とその支持力特性,土木学会論文集 No.686/Ⅵ-52,pp.91-107,2001.
2) 宮島正悟,北詰昌樹,飯田清：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,No1048
3) 冨澤幸一,西川純一：深層混合処理工法により形成した複合地盤における杭設計手法,土木学会論文集,No799/Ⅲ-72,pp.183-193,2005.
4) 小林一樹,林篤,中山栄樹：杭頭に付加した水平力抵抗機構についての模型実験比較, 第 58 回土木学会,pp.567-568,2003.
5) 本間裕介,冨永晃司,小椋仁志,永井及：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.
6) 本間裕介,冨永晃司,永井及：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.
7) 本間裕介,冨永晃司：鉄鋼スラグによる表層改良中杭の水平抵抗,日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿),pp.459-460,2005.
8) Y.Homma,K.Tominaga and O.Nagai,：Lateral Resistance of piles in Ground Improved by Compaction Method Using Iron and Steel Slag –An Experimental Study - ,Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conference pp.228-235,Osaka,Japan, 2005.
9) 玉井智子,本間裕介,勘愛軍,冨永晃司：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）,日本建築学会中国支部研究報告集 第 28 巻,pp145-148,2005.
10) 玉井智子,本間裕介,勘愛軍,冨永晃司：製鋼スラグの力学的性質に関する基礎的実験（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 28 巻,pp149-152,2005.
11) 玉井智子,本間裕介,冨永晃司：養生期間が鉄鋼スラグの力学的性質に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿),pp.795-796,2005.

12) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, p.320,1988.
13) 木村亮,柴田徹：大型土槽を用いた群杭の水平抵抗に関する模型実験,土と基礎, Vol.40, No.5, Ser. No. 412, pp.41-46, 1992.
14) 本間裕介,冨永晃司,田中佑二郎：杭頭に板状の水平抵抗増大機構を有する「傘付き杭」の水平抵抗確認実験（その１ 実験概要）, 第41回地盤工学研究発表会, pp.1473-1474, 2006.
15) 冨永晃司,山本春行：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,pp1-10,1991.

Cyclic lateral behavior of piles embedded in partially improved soil by iron and steelmaking slag

Yusuke HOMMA[1], Koji TOMINAGA[2], Oyobu NAGAI[3]

1 Engineering Development Division, JAPAN PILE CORPORATION
2 Graduate school for IDEC, Hiroshima University
3 HIROKOU-GIKEN Co.,Ltd.

Abstract

In order to open up a new avenue of use for iron and steelmaking slag, the authors are developing the method for increasing the lateral resistance of pile foundations by using slag. It has been done by partially improving the subsurface ground around piles with various kinds of slag. As a part of the research, lateral cyclic load tests were carried out on steel pipe piles embedded in ground improved by iron and steelmaking slag. This paper presents the results of the tests, and the influence that the difference of physical and mechanical characteristics of slag have on the increase of lateral resistance of the pile.

Key words: iron and steelmaking slag, lateral resistance of pile, lateral load test, cyclic load