

静的締固めによるサンドコンパクションパイルの中詰材としての鉄鋼スラグ「スマートコンパクションTM」の適用性検討

Examination of the Application of the Steel Slag to a Sand Compaction Pile Method

恩田 邦彦 ONDA Kunihiko JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)
本田 秀樹 HONDA Hideki JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)
吉武 英樹 YOSHITAKE Hideki JFE スチール スラグ事業推進部 主任部員 (課長)

要旨

液状化対策向けの静的締固めによるサンドコンパクションパイル中詰材としての鉄鋼スラグ「スマートコンパクションTM」の適用性を明らかにするため、鉄鋼スラグを用いた現場施工試験を実施した。その結果、杭の出来形径、施工時間について従来用いられている天然砂と比べて、いずれも遜色はなく、目標管理値を上回っていることが確認できた。また、杭本数、杭間隔が同一であれば、いずれの中詰材でも同等の地盤改良効果を得ることができた。さらに、施工中における騒音・振動レベルについても、各中詰材で大きな差異はなく、特定建設作業に係る規制基準値 (敷地境界規制値) を大きく下回っており、低騒音、低振動で施工可能であることが確認できた。

Abstract:

JFE Steel carried out an on-site construction examination using five kinds of steel slag in order to find out whether steel slag can be used as a material in Sand Compaction Pile method with static load compaction. It showed equivalent performance in the result diameter of a pile and construction time compared with the conventional natural sand. Moreover, when the pile number and interval are the same, equivalent foundation improvement results were obtained even using any examined slag. Furthermore, the level of noise and vibration during construction did not show a significant difference among construction materials, and is much less than that of the standard regulation values. It has been confirmed that the construction under low noise and low vibration is feasible.

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災では、関東地方の沿岸部でも液状化現象が発生し、建物の傾斜などの被害が多発したことから、液状化対策のニーズが高まりつつある。液状化に対して安全性を高める工法として、サンドコンパクションパイル (SCP) がある。これは、軟弱地盤中に砂や碎石を入れ、振動、衝撃荷重あるいは静的荷重を用いて直径の大きい圧縮された砂柱を造成することにより、周辺地盤を締固めて密度増大 (強度増加) させることで、液状化の発生を抑制する工法である。

サンドコンパクションパイル工法の中詰材としては、天然砂や碎石の他、高炉スラグや転炉スラグをはじめとする鉄鋼スラグ、コンクリート廃材を利用した再生碎石など、さまざまなものが用いられている。また、サンドコンパクションパイル工法における締固め方法について、最も多いのが振

動を利用した方法であり、港湾における軟弱地盤改良工事など、海域におけるサンドコンパクションパイルの施工では、ほぼすべてのケースで採用されている。一方、たとえばタンク基礎や建屋基礎の液状化対策など、陸上における地盤改良施工の場合、振動締固めでは大きな騒音、振動の発生が問題になることから、油圧による静的荷重により、地盤締固めを行なう低騒音、低振動型のサンドコンパクションパイル工法 (静的締固めによる SCP) が開発されている。

鉄鋼スラグについては、振動締固め方式によるサンドコンパクションパイル工法での材料利用実績 (主に港湾を対象とする海域施工) は豊富であり、改良効果を検証した事例¹⁾もあるものの、陸上構造物の液状化対策を主目的とする静的締固めによるサンドコンパクション施工にはほとんど用いられていなかった。

そこで、液状化対策向けの静的締固めによるサンドコンパクションパイル工法の中詰材として、粒度管理を行なった鉄鋼スラグ「スマートコンパクションTM」の適用性を明らかにするため、これを用いた現場施工試験を行ない、施工性、

地盤の改良効果，周辺環境への影響などを確認した。

2. 静的締固めによる地盤改良工法

静的締固めによるサンドコンパクションパイル工法について，(株)ジオダイナミックによる Geo-KONG 工法²⁾の他，SAVE コンポーザー工法³⁾，SDP-N 工法⁴⁾，KS-EGG 工法⁵⁾，STEP 工法⁶⁾などが開発されており，2008 年度までに 400 ヶ所以上の施工実績⁷⁾を有している。今回の現場施工試験では，そのうちのひとつである Geo-KONG 工法を採用している。Geo-KONG 工法は，動力原としてケーシングパイプ貫入時の回転運動に電動モーターを，締固めのためのケーシングパイプ上下運動には油圧モーターを使用することで，低騒音，低振動での施工が可能である。

また，Geo-KONG 工法の締固めメカニズムは，外管および内管からなる二重管ケーシングを用いて中詰材を所定の深度まで地中に貫入した後，**図 1**に示すように引抜き時に内管のみを上下させることで，中詰材を突き固めながら地中に圧入し，地盤を締め固めるものである。

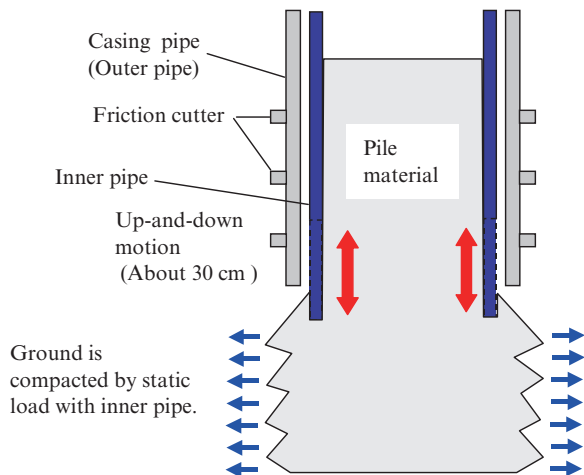


図 1 二重管ケーシング構造

Fig. 1 Casing with a double pipe (Geo-KONG method)

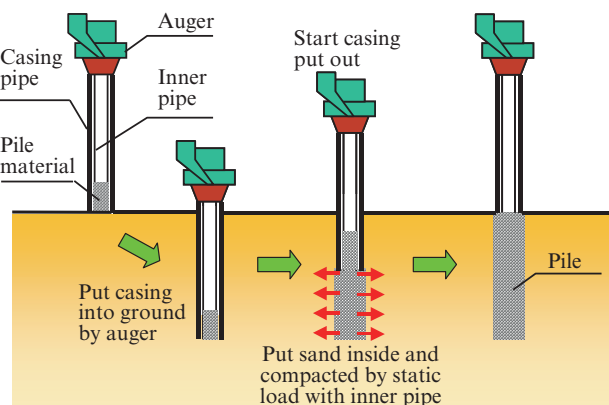


図 2 Geo-KONG 工法の施工手順

Fig. 2 Construction procedure of Geo-KONG method

Geo-KONG 工法の施工手順は以下のとおりである (**図 2**)。

- (1) ケーシングを打設位置にセットし，ケーシング内管内にあらかじめ中詰材を投入する。
- (2) ケーシングを回転させ中詰材を投入しながら所定の深度まで貫入する。
- (3) 貫入終了後，ケーシングの回転を止める。
- (4) 二重ケーシングを同時に引上げつつ，中詰材を地中に供給し杭を造成する。その際，内管のみを上下に 30 cm 程度，8～12 回/m の頻度で作動させ，中詰材を突き固めていく。
- (5) ケーシングを地上まで引き抜き，杭体の造成が完了する。

なお，本工法は試験工事などによる検証²⁾の結果，振動締固め工法と同等の地盤改良効果を得ることが可能であることから，従来の振動締固め工法設計式⁸⁾を適用して，設計評価できることが確認されている。

本工法の中詰材として，後述の各種鉄鋼スラグを適用する場合，その粒度分布や比重（最大乾燥密度）などの差異が，施工性や騒音・振動レベル，地盤改良効果に影響を及ぼすか否かを確かめる必要があった。

3. 現場施工試験

3.1 試験場所および地盤性状

現場施工試験は，JFE スチール東日本製鉄所（千葉）の生浜地区にて実施した。施工状況を**写真 1**に示す。また，施工地盤の代表的な土質性状および N 値分布を**図 3**に示す。地盤は N 値が 5～10 程度の緩い砂質地盤であり，G. L. - 8 m 付近に薄いシルト層が存在する。また，時折，貝殻が混じる砂質層があり，そこでは N 値が 10 を超えている。地表面から G. L. - 1.2～1.6 m にかけては，硬い鉄鋼スラグ路盤材層が存在しており，サンドコンパクションパイルの施工の際は，あらかじめこれを除去して砂と置換した。また，地下水

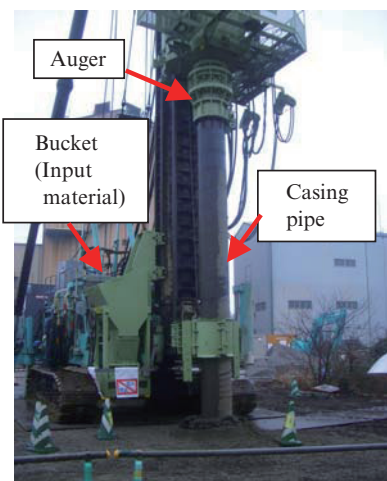


写真 1 施工試験状況

Photo 1 A view of construction examination

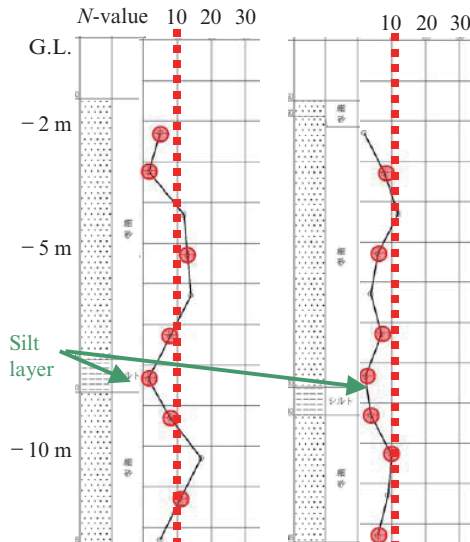


図3 代表的な施工地盤の土質性状

Fig. 3 Typical cross section of construction site

表1 使用中詰材

Table 1 Materials for construction examination

No.	Material	Number of piles	Density (g/cm ³)	Maximum particle diameter (mm)
1	Converter slag (Steamy aging processing)	4	2.48	40
2	Natural sand	16	1.52	5
3	Air-cooled blast furnace slag		2.01	25
4	Converter slag		2.67	40
5	Artificial stone made by steel slag hydrated matrix		2.01	40
6	Granulated blast furnace slag		1.46	5

位は G. L. -1.4 m 付近である。

3.2 試験ケースと中詰材特性

本施工試験で使用した中詰材は表1に示すとおり6種類である。高炉スラグ系の材料としては、高炉水砕スラグ、高炉徐冷スラグの2種類を使用した。また、製鋼スラグ系の材料としては、転炉スラグ（蒸気エージング処理あり）、転炉スラグ（蒸気エージング処理なし）の2種類を使用した。また、鉄鋼スラグ水和固化体製人工石（以後、人工石）も適用している。さらに、上記の鉄鋼スラグ中詰材の施工性を比較評価するため、一般的に用いられている天然砂（木更津産）も使用した。なお、表1には、最大乾燥密度、最大粒径（管理値）も示している。各材料の粒度曲線を図4に、外観を写真2（1）～（6）に示す。

図5に施工箇所のレイアウトを示す。各ケース同士の施工による影響を抑止するため、各中詰材ごとに、離散的に

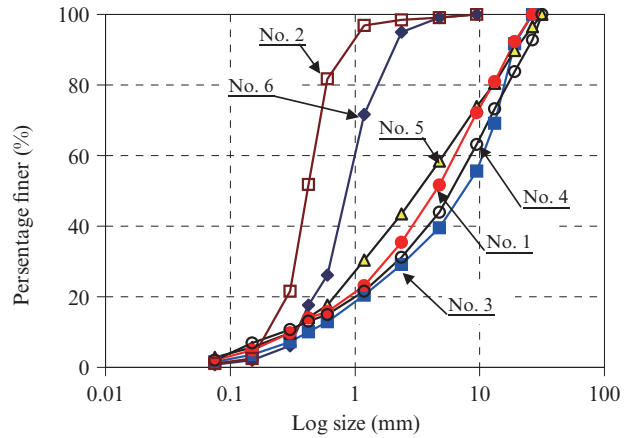


図4 中詰材の粒度曲線

Fig. 4 Grading curve



写真2 中詰材の外観

Photo 2 Appearance of materials in Sand Compaction Pile

施工を行なっている。1種類の中詰材あたりの杭施工本数は、 $4 \times 4 = 16$ 本とした。ただし、No. 1の転炉スラグ（蒸気エージング処理有り）のみは場所の制約もあり、 $2 \times 2 = 4$ 本の杭を施工とした。各杭の長さは10 mとし、杭間隔（中心間の間隔）は、後述の改良率計算をもとに1.8 mとした（図6）。また、杭径の目標管理値は70 cmである。

3.3 地盤改良率の設定

地盤改良率の設定のため、改良前および改良後（予測）

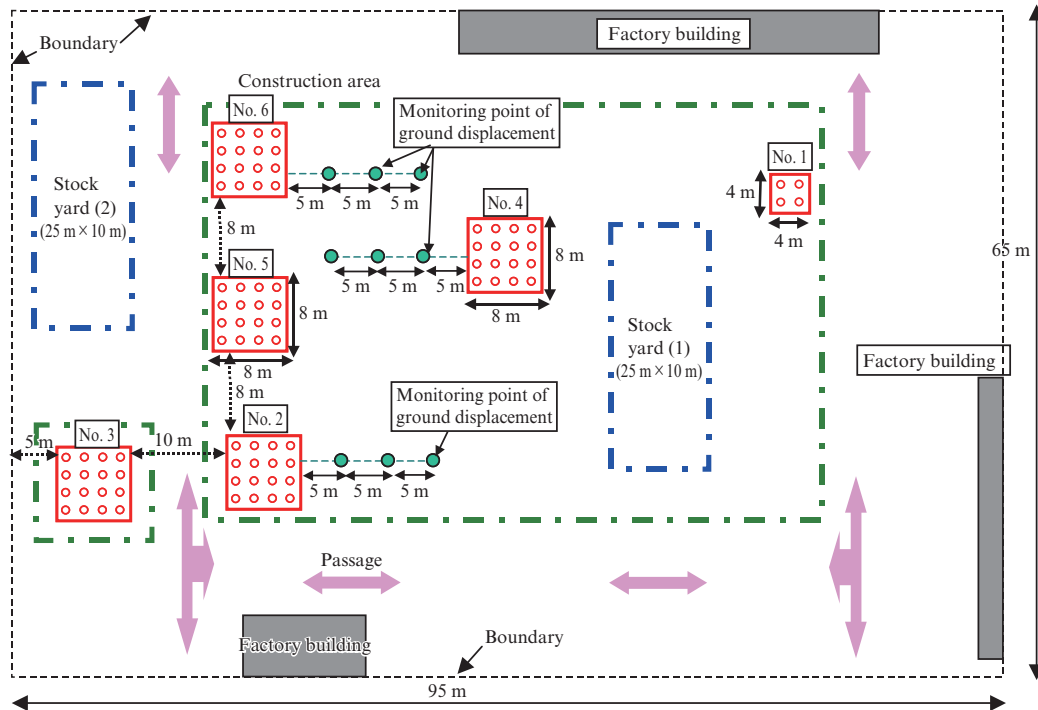


図5 施工箇所のレイアウト

Fig. 5 Layout of a construction site

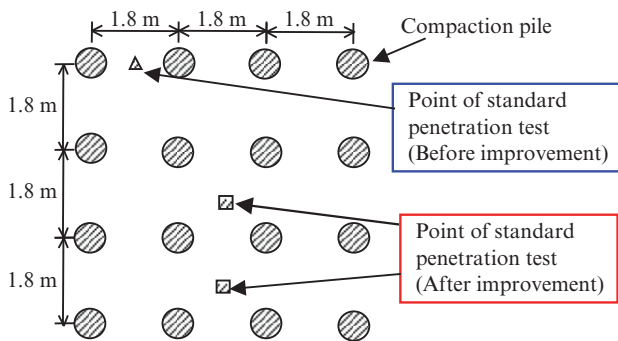


図6 杭の配置

Fig. 6 Arrangement of sand compaction pile

における地盤の PL 値（液状化指数）を建築基礎構造設計指針で示されている方法⁹⁾により算定した。設定地震動はマグニチュード (M) 7.5, 最大加速度 300 gal と設定した。計算結果を表 2 に示す。改良前の PL 値は各ケースで事前に実測した N 値および粒径 $75 \mu\text{m}$ 以下細粒分混合率 FC を用いて算定した。また、改良後の予測値については、改良率 11.9%（杭径 70 cm, 杭中心間隔 1.8 m）と設定し、従来の締固め工法設計式⁸⁾を適用して N 値増分を計算し、それをもとに PL 値を計算した。

改良前の PL 値は 6.77~16.62 であり、液状化の危険性が高い地盤 ($15 < \text{PL}$), または液状化の危険性がある地盤 ($5 < \text{PL} \leq 15$) となっている。それに対し、改良後（予測値）の PL 値は 0~2.82 となり、液状化発生の可能性が低い判定 ($0 < \text{PL} \leq 5$) が得られたことから、上記の改良率（杭中心間隔 1.8 m）で施工を実施することとした。

表 2 改良前および改良後（予測）の液状化指数, PL 値

Table 2 Calculation of liquefaction index, PL-value

No.	Material	PL-Value (Before improvement)	PL-Value (Predicted after improvement)
1	Converter slag (Steamy aging)	6.77	0.0
2	Natural sand	16.16	1.27
3	Air-cooled blast furnace slag	8.75	1.79
4	Converter slag (Unaged)	13.68	1.98
5	Artificial stone made by steel slag	14.77	2.23
6	Granulated blast furnace slag	15.74	2.82

3.4 試験結果

3.4.1 地盤改良効果

図 7 (1)~(6) に、各ケースの施工前および施工約 2 週間後における、杭間位置での標準貫入試験による N 値の変化を示す。標準貫入試験箇所は、図 6 を参照されたい。また、図 7 中には締固め工法設計式⁸⁾による予測値（実線表記）を併記している。なお、計測値のバラツキ程度を確認するため、No. 2 の天然砂および、No. 6 の高炉水砕スラグでは、施工後の標準貫入試験を 2ヶ所で行ったが、いずれのケースでも値のバラツキは小さかった。

施工前後における N 値の変化は、深度ごとで異なるが、

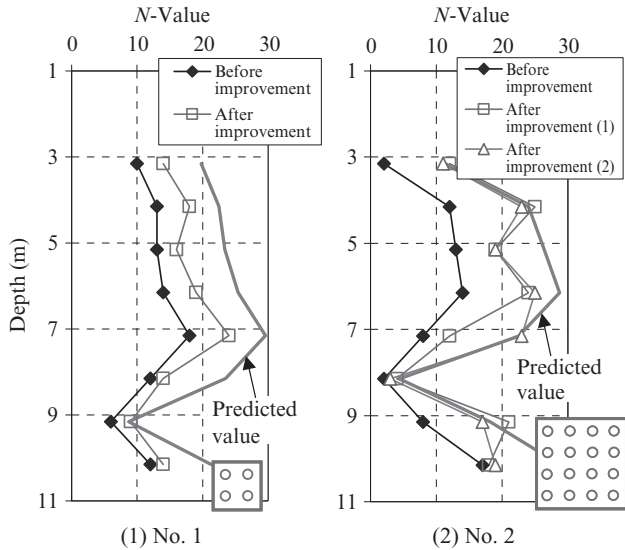


図7 N値分布

Fig. 7 Increased penetration resistances in ground improved by the Sand Compaction Pile method

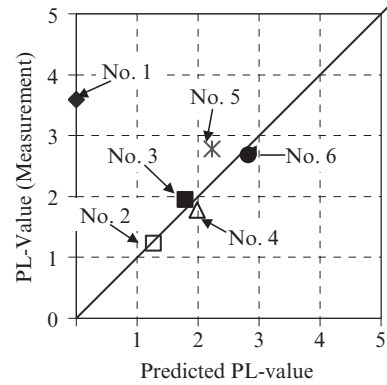
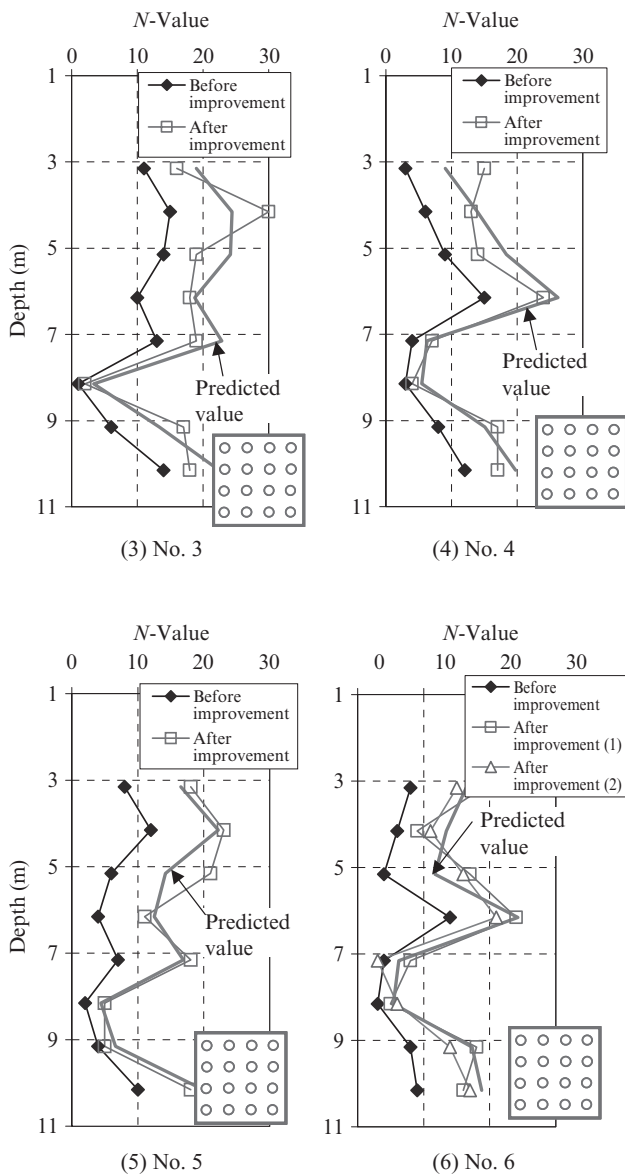


図8 改良後の実測に基づく液状化指数 (PL) 値と予測 PL 値との比較

Fig. 8 Comparison of predicted liquefaction index (PL)-value and measured PL-value

深度およそ7~8 m 付近に存在するシルト層を除いては、 N 値が増大することが確認できた。杭施工本数の少ない(4本) No. 1の転炉スラグ(蒸気エージング処理あり)を除く他のケース(16本施工)では、 N 値の増大はおよそ5~15程度、平均で10程度であり、中詰材による地盤改良効果の差異はなかった。また、予測値とも概ね一致している。No. 1のケースでは、 N 値の増大は平均で5程度あり、予測値を下回った。

図8に、施工後に実測した N 値を用いて算定した地盤のPL 値、および3.3で示した改良後の予測 PL 値とを対比して示す。杭施工本数の少ない No. 1を除く他のケースでは、実測に基づく PL 値と予測 PL 値とは、よく対応しており、期待のおおりの改良効果が得られたことが確認できた。また、鉄鋼スラグを中詰材として用いた場合の改良効果は、天然砂の場合と同等であることが確認できた。

なお、既往の検討¹⁾によると転炉スラグを用いた改良では、施工後時間が経つにつれて、転炉スラグの硬化性の影響により、 N 値が増加し地盤の改良効果が高まることが報告されている。今回の施工試験においても、今後、経時変化を計測していく予定である。また、鉄鋼スラグ材料の硬化性度合いについても継続的に計測し、これに起因する地盤改良効果や透水性の経時変化を確認する予定である。

3.4.2 周辺地盤への影響

(1) 施工中に生じた水平変位

図5の施工箇所レイアウト図に示すように、No. 2(天然砂)、No. 4(転炉スラグ(蒸気エージング処理なし))、No. 6(天然砂)のケースにおいて、前面杭列の端部から5 m、10 m、15 m 離れた位置において、地中の水平変位を計測した。施工中に生じた最大水平変位を表3に示す。いずれのケースでも10 m および15 m 位置においては、水平変位は0.3 mm 以下程度と微小なレベルであった。最も近接した5 m 位置においては3~5 mm 程度の水平変位が生じているが、たとえば近接する建築物に対して設定されている許容水平変位16 mm¹⁰⁾ に

表3 施工中の最大水平変位

Table 3 Maximum horizontal displacement under construction

No.	Material	Distance to a measuring point		
		5 m	10 m	15 m
2	Natural sand	3.6 mm	0.2 mm	0.1 mm
4	Converter slag (Unaged)	4.2 mm	0.3 mm	0.2 mm
6	Granulated blast furnace slag	4.5 mm	0.3 mm	0.1 mm

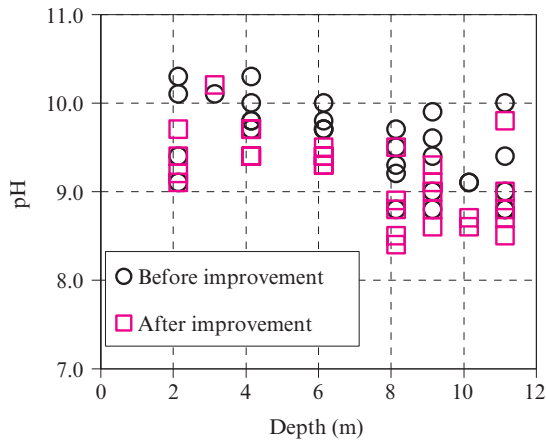


図9 各深度で計測された地盤のpH
Fig. 9 pH Measured in each depth

対しては十分小さい値であった。

(2) 施工前後における地盤pH

図9に施工前および施工約2週間後の杭打設近傍における地盤のpH値を計測深度ごとに示す。同図より施工後において特にアルカリ性が高まった様子はないことが確認できた。なお地表面からG. L. -1.2~-1.6 mにかけて、鉄鋼スラグ路盤材層が存在しているため、元々、pH9~10程度のややアルカリ性を示す地盤である。

今後、引き続き長期計測により、周辺地盤pHの経時変化を測定し、アルカリ影響有無や影響範囲などの評価を行なう予定である。

3.4.3 施工性の評価

(1) 出来形および施工時間

施工完了後の杭の一例(No. 4 転炉スラグ(未エージング))を写真3に示す。

各ケースの施工性に関する評価項目として、表4に造成した杭の平均出来形径、平均施工時間(No. 2における平均施工時間で基準化して表示)を示す。なお、出来形径の測定は直交する2ヶ所の径について行ない、平均している。

杭の平均出来形径については、いずれのケースも目標管理値の70 cmを上回っており、鉄鋼スラグを用いたケースでは、天然砂と同等もしくはそれ以上の結果となっている。

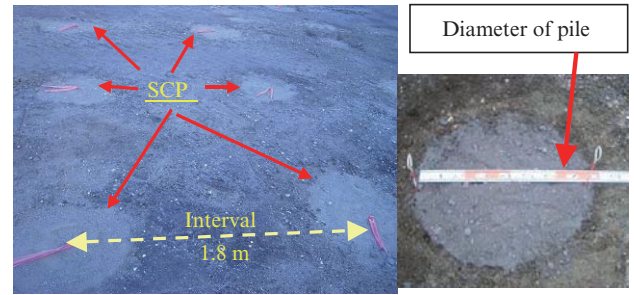


写真3 施工完了後の杭

Photo 3 View of compaction pile (No. 4 Converter slag)

表4 各ケースの施工性に関する評価

Table 4 Construction result for every material

No.	Material	Diameter of SCP (Average) (cm)	Construction time ratio, (Average)/(No. 2)
1	Converter slag (Steamy aging)	75.2	1.10
2	Natural sand	72.1	1.00
3	Air-cooled blast furnace slag	74.1	1.03
4	Converter slag (Unaged)	75.2	0.95
5	Artificial stone made by steel slag	76.3	1.03
6	Granulated blast furnace slag	72.4	1.02

杭一本あたりの平均施工時間については、No. 1の転炉スラグ(蒸気エージング処理あり)のケースで、他よりやや長くなっているが、これは本施工試験において最初に行なったため、中詰材投入量や締固め頻度などの条件設定を慎重に行なったためである。その他のケースでは、天候や材料置場までの距離の違いによる影響など多少あるものの、±5%以内であり、各鉄鋼スラグおよび天然砂とも同レベルであった。

(2) 施工中の騒音・振動レベル

図10に本施工において施工機械からの距離が5 mおよび20 m位置で計測した騒音レベル(dB)を中詰材ごとに示す。鉄鋼スラグを用いた場合の発生騒音レベルはNo. 2の天然砂を用いた場合に比べて大きな差異はなく、いずれのケースにおいても、特定建設作業に係る規制基準値¹¹⁾(敷地境界規制値)85 dBを大きく下回っており、低騒音で施工可能であることが確認できた。

図11に本施工において施工機械からの距離が5 mおよび20 m位置で計測した振動レベル(dB)を中詰材ごとに示す。鉄鋼スラグを用いた場合の発生振動レベルはNo. 2の天然砂を用いた場合に比べて大きな差異はなく、いずれのケースにおいても、特定建設作業に係る規制基準値(敷地境界規制値)75 dBを大きく下回っており、低振動で施工可能であることが確認できた。

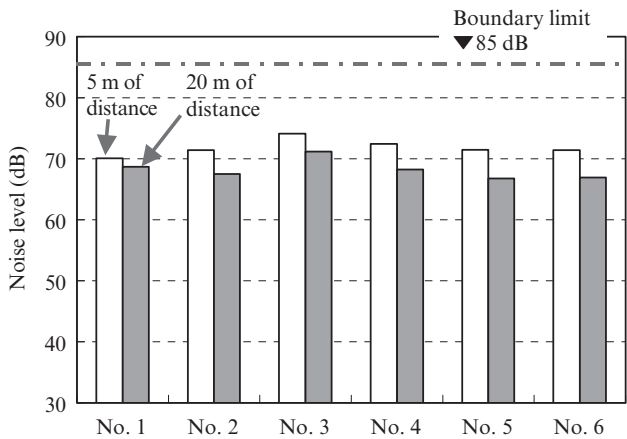


図 10 各中詰材ごとの騒音レベル

Fig. 10 Noise level

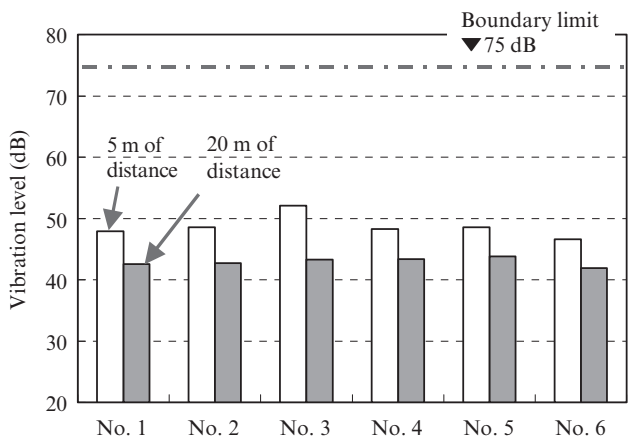


図 11 各中詰材ごとの振動レベル

Fig. 11 Vibration level

4. おわりに

高炉水砕スラグ、高炉徐冷スラグ、転炉スラグ（エージング有・無）、人工石（鉄鋼スラグ水和固化体製）の5種類の鉄鋼スラグを用いて、静的締固めによるサンドコンパクションパイル工法（Geo-KONG 工法）の現場施工試験を行った結果、期待のとおり、地盤改良効果が得られることを確認できた。また、従来用いられている天然砂と比べて、その改良効果や施工性（杭の出来形径、施工時間）は、いずれの鉄鋼スラグでも遜色はなく、同等であった。

施工中における騒音・振動レベルについても、鉄鋼スラグと従来の天然砂では大きな差異はなく、特定建設作業に係る規制基準値（敷地境界規制値）を大きく下回っており、低騒音、低振動型の施工に適用できることを確認した。加

えて、今回の施工試験後の周辺地盤において、アルカリ性が高まることもなく、締め固めに起因する地盤変動の影響も小さいものであった。

以上の検証から、鉄鋼スラグは、液状化対策向けの静的締固めによるサンドコンパクションパイル工法に対し、好適であることが確認できた。なお、鉄鋼スラグは種類によって、比重や粒度分布、水和固化性などさまざまな特徴を有しており、要求される機能に応じて、最適な材料および施工法の選定を行なうことで、今後さらに使いやすい中詰材にできると考えている。

今回の実験で適用性を確認した上記の鉄鋼スラグについては、液状化対策向けの静的締固めによるサンドコンパクションパイル工法の中詰材「スマートコンパクション」として、当社より商標登録申請中である（2012年6月現在）。

「スマートコンパクション™」は、東日本大震災の復旧・復興事業、並びに今後、発生が懸念される大地震への対策・強化など社会の安心・安全の構築に資する製品であり、同時に鉄鋼スラグを有効利用することで、環境負荷の低減に寄与するものである。本製品を広く普及させることが、社会への貢献に繋がるものと確信している。

参考文献

- 1) 木村保ほか. 転炉スラグを用いたコンパクションパイルによる地盤改良. 川崎製鉄技報. 1988, vol. 20, no. 1, p. 69-75.
- 2) 国土開発技術センター. 一般土木工法・技術審査証明報告書「Geo-KONG 工法」(株) 鴻池組. 2000.
- 3) 国土開発技術センター. 一般土木工法・技術審査証明報告書「SAVE コンポーザー (静的締固め砂杭工法)」不動建設 (株). 1997.
- 4) 国土開発技術センター. 一般土木工法・技術審査証明報告書「SDP-N 工法」東洋建設 (株) ほか. 2011.
- 5) 国土開発技術センター. 一般土木工法・技術審査証明報告書「KS-EGG 工法」国土総合建設 (株). 2008.
- 6) 国土開発技術センター. 一般土木工法・技術審査証明報告書「STEP 工法」(株) 熊谷組, 日本海工 (株). 2008.
- 7) 地盤工学会. 打戻し施工によるサンドコンパクションパイル工法一設計・施工マニュアル. 2009.
- 8) 日本建築学会. 建築基礎のための地盤改良設計指針案. 2006.
- 9) 日本建築学会. 建築基礎構造設計指針. 2001.
- 10) 日本トンネル技術協会. 地中構造物の建設に伴う近接施工指針. 1999.
- 11) 環境庁告示 16 号. 2000.



恩田 邦彦



本田 秀樹



吉武 英樹