

製鋼スラグを用いた地盤改良技術への取り組み

Soil improvement technique by using steelmaking slag

田 辺 和 康 (たなべ かずやす)
福山大学 教授 工学部建築学科

鈴 木 操 (すずき みさお)
JFE スチール㈱ スラグ事業推進部 主幹職

吉 澤 千 秋 (よしざわ ちあき)
JFE ミネラル㈱ 製鉄関連事業部 主任部員

林 正 宏 (はやし まさひろ)
JFE スチール㈱ スラグ事業推進部 主任部員

1. はじめに

鉄鋼スラグは、高炉で鉄鉱石を溶融・還元する際に生成する高炉スラグと、鋼を精錬する製鋼段階で生成する製鋼スラグに大別される。高炉スラグは高炉セメントや高炉スラグ微粉末、細骨材、路盤材として有効活用されている。一方、製鋼スラグは硬質で耐摩耗性に優れており、主に埋め戻し材料等として活用されているが、未反応の CaO を含み、これが水と反応すると体積膨張を起こすため、用途が限られている。筆者らは、製鋼スラグを有効活用するための用途拡大に向けて取り組んでおり、本稿では製鋼スラグを用いた地盤改良技術への取り組みと、その施工事例について報告する。

2. 製鋼スラグを用いた地盤改良への取り組み

地盤改良とは、土の物理化学的な性質を改善して、地盤の使用目的を達成することである。したがって、対象土に物理的あるいは化学的な処理を行い、土のせん断強さや変形に対する抵抗性などを改良することである。表層からの地盤改良深さによって、3 m までが浅層改良、3 m 以上を深層改良に分類しているが、その目的と対象土により地盤改良工法は多種多様である。この章では、製鋼スラグを用いた対象土の異なる浅層地盤改良と深層地盤改良のサンドコンパクションパイル（以下 SCP と称す）の取り組みについて述べる。

2.1 製鋼スラグを用いた浅層地盤改良特性

製鋼スラグを用いた地盤改良メカニズムの特長は、骨材と骨材のかみ合わせによる力学的な改良と、骨材中の CaO の溶出に伴う化学的な地盤改良ができることである。従来までのセメント系や石灰系の処理材のような乾燥質量換算による少量配合ではなく、容積換算による大量配合処理による地盤改良である。

対象土は、災害を受けやすく施工性の悪いシラスと黒ぼく土の特殊土と森林褐色土を対象に検討を行った。その結果、製鋼スラグを60 vol.%配合することにより、かみ合わせ効果による改善が認められた。CaO からの遊離 Ca^{2+} と非晶質な SiO_2 と Al_2O_3 によるポゾラン反応効果で化学的な改善も図られている。また、製鋼スラグを土に配合することで膨張を抑制する効果も認められた。なかでも、シラスは火山灰が起源で、非晶質 SiO_2 を主

成分としていることから、製鋼スラグに含まれる free-CaO とのポゾラン反応により C-S-H が生成される。その結果として、free-CaO が消費されることで $\text{Ca}(\text{OH})_2$ となる量が限られ、膨張抑制効果を示している¹⁾。

2.2 サンドコンパクションパイル (SCP)

軟弱地盤の地盤改良工法の1つに SCP 工法がある。海砂採取禁止などによる天然砂の供給困難な状況に対処するため、海砂の代替として鉄鋼スラグを用いる工法が開発され、瀬戸内を含め多くの港湾構造物に採用された。

製鋼スラグを用いた SCP 工法の設計は、製鋼スラグを天然の材料と同様の粒状材料として扱い、設計に用いる内部摩擦角 ϕ は35°を標準としてきたが、2015年2月発行の製鋼スラグ利用技術マニュアル²⁾では、これまでの実績が評価されて内部摩擦角 ϕ は40°以上が認められている。砂質土地盤の締固めを目的とする場合には、対象地盤の特性及び施工方法の特徴を十分に検討し、既往の施工実績などを考慮して適切に行うことが必要である。高置換では製鋼スラグの固結と透水性の低下に影響しない置換率70%以上の改良に適用することができる。

また、東日本大震災では液状化による構造物被害も多発し、液状化対策としての SCP の需要が増加することが見込まれる。陸域の施工は海域よりも厳しい環境条件が求められるため、これらの要求を満たした静的締固めによる SCP 工法も開発され、震災復旧・復興事業や今後の震災対策に向けて中詰め材としての製鋼スラグの活用が期待されている。

3. 施 工 事 例

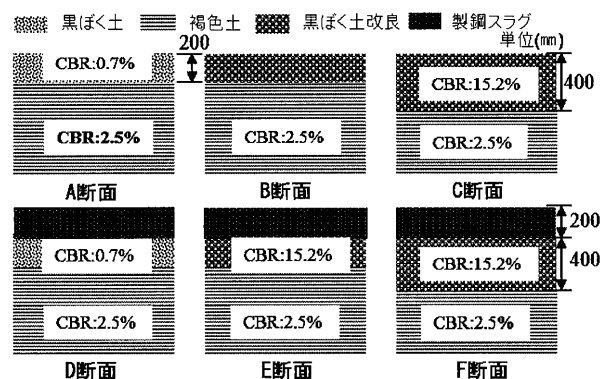
3.1 製鋼スラグを用いた林道の試験舗装

(1) 対象土の基礎特性

対象土は黒ぼく土と褐色土の二層からなり、表層の黒ぼく土は自然含水比 (101.6%) と液性限界 (105.5%) が非常に高いことから鋭敏な土質である。また、有機物を多く含んでいるので強熱減量値 (36.9%) も高く、地盤改良の難しい軟弱土であると推察した。

(2) 林道舗装設計

林道舗装は、図—1に示す各断面構成について検討を行った。A 断面は現地状況の断面構成で、上層の黒ぼく土の CBR は0.7%、下層の褐色土の CBR は2.5%の軟弱路床であるために地盤改良を必要とした。B・C 断面



図一 林道舗装の断面構成

は、黒ぼく土を20 cm と40 cm に改良した断面である。D, E, F の断面は、A と B 及び C 断面に20 cm の製鋼スラグの路盤を設けた構成となっている。

一般的な舗装構成は、骨材と瀝青材を結合した表層部（アスファルト舗装）とこれを支持する路盤材からなっている。ここでは、交通量区分 N_1 で設計 CBR が4% の舗装断面となる表層4 cm, 上層路盤20 cm の舗装構成³⁾を想定した。また、本試験舗装では、これをより簡易化するために表層部を除いた舗装構成とした。これは、製鋼スラグの膨張現象を開放するためでもあり、路床と路盤のみの構造体として検討を行った。したがって、路床の設計 CBR が4%以上を満たすことが必要となる。

対象となる路床は、黒ぼく土と褐色土の二層構成からなり、表層の黒ぼく土の自然含水比は高く、CBR は0.7%であり、極めて軟弱な地盤となっている。ここで、黒ぼく土の層厚を20 cm と40 cm に想定して区間 CBR³⁾を求めると、黒ぼく土の層厚が20 cm, 褐色土の層厚が80 cm の路床では区間 CBR は2.0%, 黒ぼく土の層厚が40 cm, 褐色土の層厚が60 cm の路床では区間 CBR は1.8%となり、設計 CBR の4%を満たしていない。したがって、黒ぼく土の路床改良を選択し検討を行った。

(3) 黒ぼく土の路床改良の検討

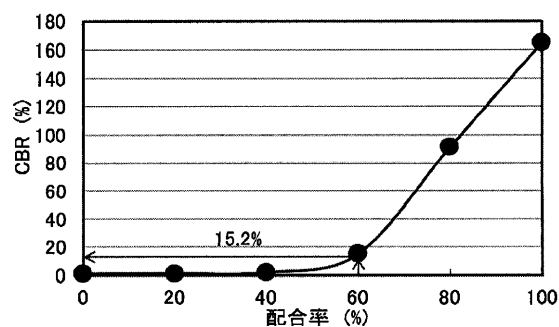
黒ぼく土の地盤改良は製鋼スラグの配合割合を0, 20, 40, 60, 80, 100 vol.%に変えて供試体を作製し、CBR 試験により改良効果の検討を行った。CBR と製鋼スラグ配合率の関係を図一2に示す。その結果、60 vol.%配合で支持力の改良効果が見受けられ、その時の CBR = 15.2%であった。したがって、路床の黒ぼく土部分の改良はこの配合率とした（図一1 B, C, E, F 断面）。

(4) 林道試験施工の実態調査

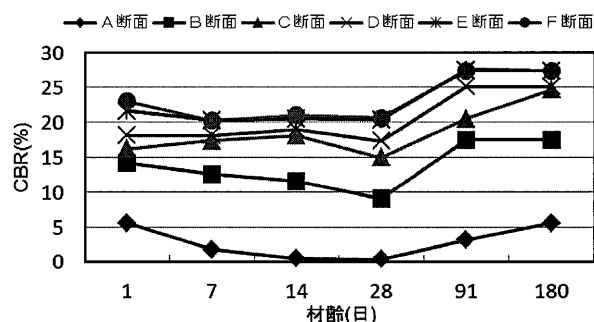
試験ヤードの各工区の幅員は2.5 m, 延長は5.0 m として、路床改良はバックホウで施工後、コンバイン振動ローラーで転圧を行った。地盤強度特性の検証は、衝撃加速度法を基本原理とした簡易支持力測定器「キャスボル」を用いて実態調査を行った。調査日程は施工翌日、7日、14日、28日、3ヶ月、6ヶ月に渡り実施した。

(5) キャスボルによる地盤強度特性

A 断面は未処理、B・C 断面は路床改良厚さについて、D・E・F 断面は路盤材を設けた場合の影響について調査した。CBR と養生日数の関係を図一3に示す。これ



図一2 CBR と製鋼スラグ配合率の関係



図一3 キャスボルによる CBR の経時変化

より、A 断面から F 断面を相対的にみると、 $A < B < C < D < E < F$ の順に効果が認められた。これは路床改良厚さによる影響と、D, E, F 断面では製鋼スラグ100%の路盤材があるため、これが路盤としての役割も果たしている。また、28日養生を境として増進することについては、製鋼スラグの中に含まれる free-CaO の水和反応による硬化と考える。また、A 断面についてはシキソトロピー現象によるものと考えられる。以上のことから、林道の断面構成は C 断面又は D 断面の設計においても十分な効果が認められた。

3.2 振動締固めによるサンドコンパクション工法

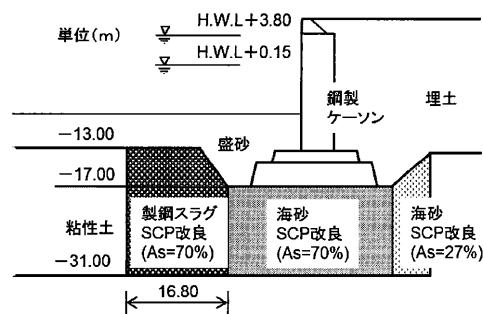
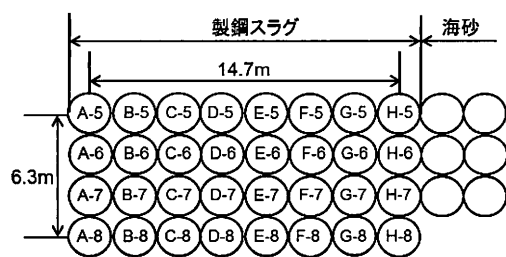
(1) 試験場所及び地盤性状

1997年から1998年にかけて、広島港出島地区の埋立工事で振動締固めによる海上 SCP を施工した際に、海砂と製鋼スラグを用いて比較調査を実施した。試験は図一4と図一5に示すように、ケーソン護岸を設置する工事で $q_u = 10 \sim 40 \text{ kN/m}^2$ の軟弱粘性土地盤を SCP で改良した。SCP の杭径は2.0 m で置換率は70%, -13.0 ~ -17.0 m の海底からの杭長は14.0 ~ 18.0 m で施工した。

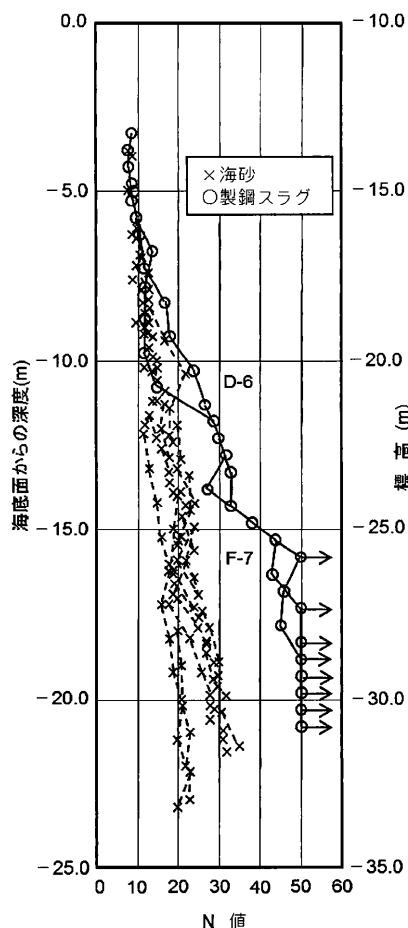
(2) 改良効果

打設直後の海砂と製鋼スラグの杭芯の N 値を図一6に示す。図一6は材料の違いを比較するもので、実測した N 値は50を上限にして示している。海底面から0 m の地点が標高 -10.0 m で、標高 -13.0 ~ -17.0 m までは海砂の改良区域の上に盛砂があり、海砂と製鋼スラグの比較は -17.0 m より深い部分となる。製鋼スラグ、海砂ともに深度方向に一樣に N 値が増加する傾向が見られるが、全体的に海砂より製鋼スラグの方が大きな N 値を示しており、製鋼スラグを用いた SCP の強度については海砂と同等以上であると評価できる。

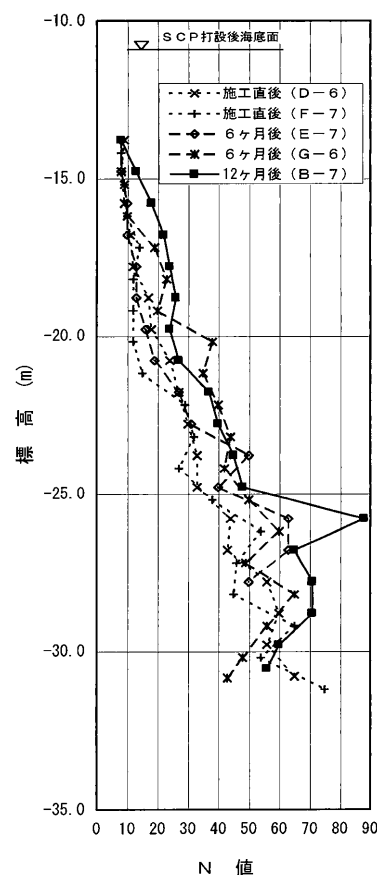
報 告

図—4 サンドコンパクション試験区域⁴⁾

図—5 試験杭の配置図（製鋼スラグ）

図—6 試験杭 N 値比較打設直後²⁾

施工直後、6ヶ月後、12ヶ月後における製鋼スラグの杭芯 N 値を図—7に示す。図—7は N 値の経時変化を示すもので、 N 値は貫入量が30 cm 未満である場合、貫入量を30 cm にした値に換算した。これより、 N 値の経時的な増加が見られる。この現象は、製鋼スラグの水和による硬化が進行していることに起因していると考えら

図—7 製鋼スラグの杭芯 N 値の経時変化²⁾
($N > 50$ は換算 N 値)

れる。また、三軸圧縮試験による杭材のせん断抵抗角は 40° 以上の改良効果が得られ、海砂と同等以上の効果を確認した⁵⁾。工事区域近傍の海水の pH はほとんど変わっていないことも確認した⁵⁾。

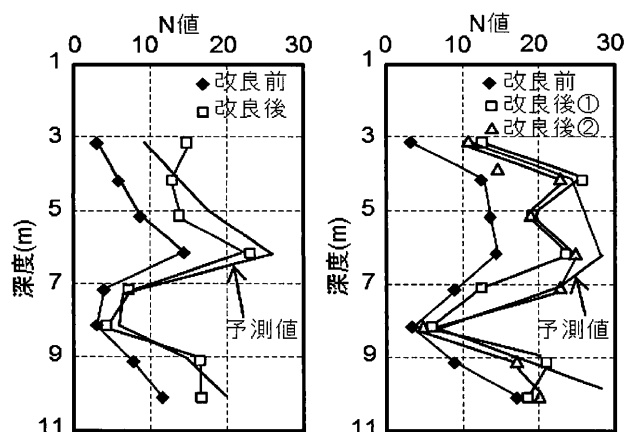
施工性については、海砂よりも密度が高く、物理特性の違いによる影響で試験杭に挿入する1バッチ当たりの製鋼スラグの体積量を少なくする等の改善を必要としたが、無難に仕上げる事ができた。設計性能については、せん断抵抗角が海砂よりも格段に大きく、地盤改良の狭幅化も可能である。

3.3 静的締固めによるサンドコンパクション工法

液状化に対して安全性を高めることのできる SCP 工法がある。鉄鋼スラグについては、振動締固め方式による SCP 工法での材料利用実績（主に港湾を対象とする海域施工）は豊富であるが、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 SCP 施工の事例は少ない。そこで、液状化対策向けの静的締固めによる SCP 工法の中詰材として、粒度管理を行った鉄鋼スラグの適用性を確認した。

(1) 試験場所及び地盤性状

現場施工試験は、JFE スチール東日本製鉄所（千葉）の生浜地区で実施した。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。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。また、地下水位は G.L. - 1.4 m 付近にある。



図—8 改良前後の N 値⁵⁾
(製鋼スラグ)

図—9 改良前後の N 値⁵⁾
(山 砂)

(2) 試験ケース

本施工試験で使用中詰材は、製鋼スラグ（未エージング材、蒸気エージング処理材）、高炉徐冷スラグ、高炉水砕スラグ、鉄鋼スラグ水和固化体製人工石、比較材として山砂（木更津産）の6種類を用いた。

本報告は、製鋼スラグがテーマであり、この中で製鋼スラグ（未エージング材）と、比較材の山砂を取り上げる。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。各杭の長さは10 m、杭径の目標値は70 cmとし、杭間隔（中心間の間隔）は1.8 mとした。

(3) 地盤改良効果

製鋼スラグと山砂の施工前及び施工約2週間後における杭間位置での標準貫入試験による N 値の変化を図—8及び図—9に示す。

施工前後における N 値の変化は、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 値が増加することを確認した。 N 値の増加は5～15程度である。

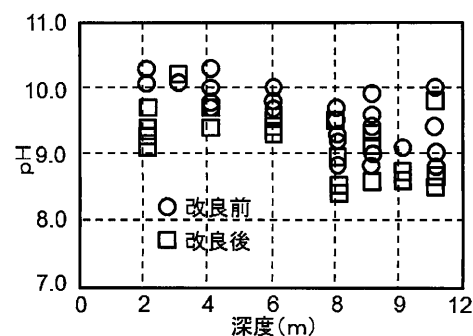
製鋼スラグを中詰めとして用いた場合の改良効果は、施工後の N 値の増加量からみて、天然砂を用いた場合と同等であることを確認した。製鋼スラグは、経時的に硬化する性質から N 値が増加し、地盤の改良効果がさらに高まることが期待される。

(4) 施工中の騒音・振動レベル

SCPの施工機械からの距離が5 m及び20 mの位置で騒音レベル (dB) 及び振動レベル (dB) を測定した。製鋼スラグを用いた場合の発生騒音レベルは山砂に比べ大きな差異はなく、特定建設作業に係る規制基準値85 dBを大きく下回り、低騒音で施工可能であることを確認した。また振動レベルも同様に山砂との差異はなく、特定建設作業に係る規制基準値75 dBを大きく下回り、低振動で施工可能であることを確認した⁵⁾。

(5) 施工前後における地盤の pH

施工前及び施工約2週間後の杭打設近傍における地盤の pH を計測深度ごとに調査した結果を図—10に示す。これより、施工後にアルカリ性の高まりは見られないこ



図—10 各深度で計測された地盤の pH⁵⁾

とを確認した。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たため、pH 9～10程度のアルカリ性を示す地盤であった。しかし、施工後の pH については上昇傾向が見られないことより、周辺環境への影響は少ないものと判断できる。

4. おわりに

本報では、製鋼スラグを用いた浅層と深層の地盤改良技術の取り組みについて紹介した。浅層地盤改良では、骨材と骨材のかみ合わせによる力学的な改良で施工直後から目標強度が得られ、それと同時に化学的には長期的な反応を期待する工法の提案である。深層地盤改良では、振動締固めと静的締固めによる SCP 工法の材料としての評価を検討したものであり、海砂、山砂と同等以上の改良効果が認められることを報告した。製鋼スラグを用いた地盤改良は、対策工のみならず近年とみに重要視されている防災工学の見地から、合理的な地盤改良工法の選択、及び安全で確実な施工が望まれるものであり、製鋼スラグの使用領域は、今後、ますます拡大されるものと予想する。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、(一財)広島県環境保健協会の久保隆氏に貴重な助言をいただきました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田辺和康・吉澤千秋・渡辺哲也・須藤達也・山田幹雄・佐野博昭：製鋼スラグを用いた地盤改良メカニズム，第57回地盤工学シンポジウム論文集，pp. 659～666，2014.
- 2) (一財)沿岸技術センター：港湾・空港・海岸等における製鋼スラグの利用技術マニュアル，pp. 42～44，2015.
- 3) 舗装設計便覧：(財)日本道路協会，2006.
- 4) 高橋邦夫・清水春生・巻洲正治・橋本 健・小林延郎：製鋼スラグの SCP 材料への適用，第3回地盤改良シンポジウム，日本材料学会，pp. 207～210，1998.
- 5) 恩田邦彦・本田秀樹・吉武英樹：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」の適用性検討，JFE 技報 No. 31，pp. 50～56，2013.

(原稿受理 2015.4.28)