

液状化地盤を対象とした小型碎石地盤改良機による支持力 及び透水性改良効果の検討

Evaluation of Stone Column Technique for Improvement of Bearing Capacity
and Permeability in the Liquefaction Ground

酒井 俊 典 (さかい としのり)
三重大学 教授 大学院生物資源学研究所

尾 鍋 哲 也 (おなべ てつや)
㈱尾鍋組 社長

神 村 真 (かみむら まこと)
㈱サムシング 常務

川 又 良 一 (かわまた りょういち)
クラウン工業㈱ 社長

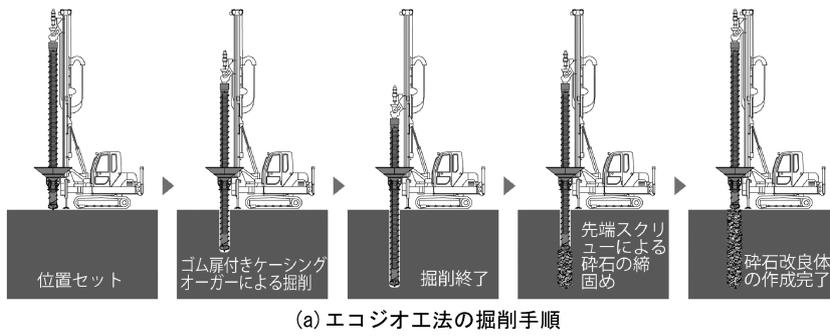
1. はじめに

現在まで液状化対策工法として、サンドコンパクションパイル (以下 SCP) 工法, 深層混合処理工法, ディープウェル工法, グラベルドレーン (以下 GD) 工法など種々の工法が提案され, これら工法の液状化対策に対する適用性が示されている¹⁾。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では住宅地での液状化被害が多数発生したこともあり, 液状化対策が今まで十分施されてこなかった小規模な土地が対象となる住宅地においても, 信頼性の高い液状化対策技術が求められている。ところで, 東北地方太平洋沖地震での千葉県被害調査では, GD 工法あるいは SPC 工法により改良された住宅地盤で液状化被害が見られなかったとの報告がなされている²⁾。このうち, GD 工法は, 地盤内に高い透水性を有する碎石等を柱状あるいは壁状に打設し, 地震時の過剰間隙水圧の発生を抑制するとともに消散を早めて液状化被害を抑制する工法で, グラベルドレーンにより地震時の過剰間隙水圧上昇速度を低下させるとともに, その消散速度を高める効果が確認されている^{3),4)}。しかし, GD 工法の施工にあたっては, 大型の施工機を用いて行われるため広い施工面積が対象となり, 住宅等の小規模建築物が施工された狭小な場所への適用が難しい。これに対し, 著者らは狭小な場所での施工が可能な小型の施工機を使用し, 所定の断面を有する連続した碎石改良体を構築できる機能を有したケーシングオーガーを用いる小型碎石地盤改良機 (エコジオ工法) の開発を行った^{5),6)}。エコジオ工法は, グラベルドレーン工法と同様ケーシングオーガーを用いる碎石地盤改良工法であるため, 地盤支持力増加とあわせ透水性改良効果も期待できると考えられる。本報では, 東北地方太平洋沖地震において実際に液状化被害が見られた地盤を対象に, エコジオ工法を用いて碎石地盤改良体を施工し, 地盤支持力増加及び透水性改良の効果について検証を行った結果について報告する。

2. 試験装置及び試験方法

図-1 にエコジオ工法の掘削手順及び試験装置を示す。エコジオ工法による地盤の掘削は, 掘削中のケーシング内への土砂及び地下水の浸入を防止できる機能を持つゴム扉を有するケーシングオーガー, 並びに先端ヘッドを右回転することにより行う。掘削後の碎石改良体の構築は, ゴム扉を介してホッパーからケーシング内に碎石を連続的に投入しながらケーシングを上昇させ, 投入された碎石を先端スクリーにより排出するとともに, 層厚 10 cm 毎に先端ヘッドにより左回転で締固めることで行う。これにより所定の断面を有する連続した碎石改良体の構築が可能となる。本装置のケーシング外径は 32 cm で, ケーシング外周には幅 4 cm の外部スクリーが取り付けられており, 掘削及び締固めのための先端ヘッドの直径は 42 cm となっている。

試験は, 東北地方太平洋沖地震で実際に液状化被害が見られた千葉県内の地盤を対象に行った。図-2 に各深度の粒度試験結果を, 図-3 に現地のボーリング柱状図, N 値, 細粒分含有率 (F_c), 並びに地表面最大加速度 $\alpha_{max} = 200 \text{ gal}$ とした時の F_L 値の結果を示す。ボーリングの結果, 試験地盤は地表面から 0.8 m までが埋土, 4.4 m までが細砂及びシルト混じり細砂, それ以下が砂質シルト, シルトとなっている。現地は近隣河川で浚渫された砂を利用して沼の埋立てが行われた場所で, GL-4.4 m までがこれに相当すると考えられる。図-2 に示す粒度分布を見ると, GL-4.4 m 以浅の粒度はいずれも均等係数の小さい砂における「特に液状化の可能性あり」の範囲に入っている。また F_c 及び F_L 値を見ると, GL-4.4 m までは F_c が 10% 程度と低く F_L 値も 1 以下となっており, この層での液状化の可能性が考えられる。これに対し, GL-4.4 m 以深においては, N 値は低いものの F_c は 60% 以上と高く, 塑性指数も GL-4.4 m ~ 5 m において 32 程度を示しており, 液状化の可能性は低いと考えられる。碎石改良体の施工は, 上記を考慮して液状化の可能性が考えられる上位の GL-4.4 m までの層を対象に施工深度 4 m とした。グラベルドレーンの配置



(a) エコジオ工法の掘削手順

(b) 試験装置(ゴム扉を有したケーシング)

図-1 エコジオ工法の掘削手順と試験装置

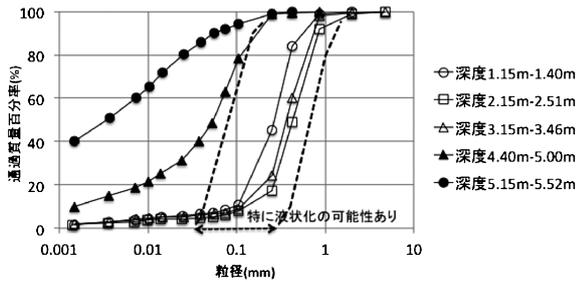


図-2 各深度の粒径加積曲線

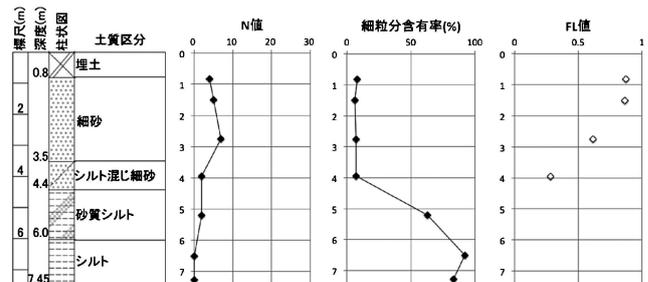


図-3 各層のボーリング柱状図・N値・細粒分含有率・FL値

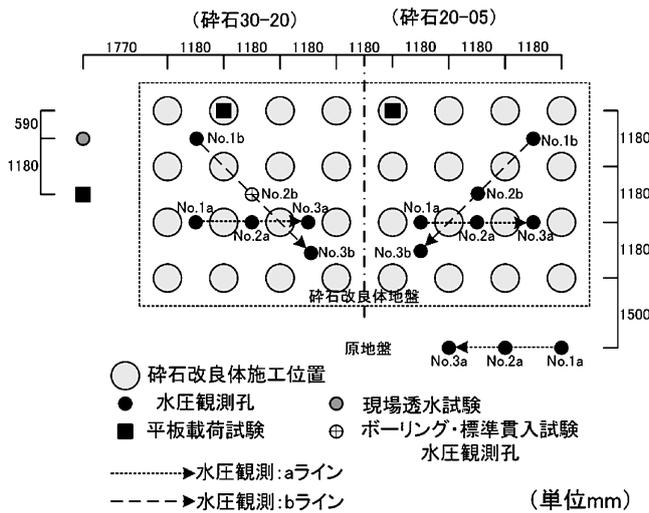


図-4 砕石改良体の施工位置と試験位置

にあつては、地震時に発生する過剰間隙水圧が許容値を満足するよう液状化対策マニュアル⁷⁾に基づき求めた。計算に使用したパラメータのうち、地盤の透水係数は地盤の20%粒径 (D_{20}) を基に求めた $4.75 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ を、砕石の透水係数は5~6号砕石の一般的な値である $1.0 \times 10^{-1} \text{ m/s}$ を採用し、地表面加速度が200 galとして求まる1.18 m間隔を砕石改良体配置間隔とした。なお、現地で事前に実施したGL-3.0 m~3.5 mにおける現場透水試験により求めた透水係数は $1.73 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ であった。グラベルドレーンが目詰まりせず所定の透水係数を保持することが必要であるため、 $D_{G15}/D_{S85} < 9$ (D_{G15} : 砕石の15%粒径, D_{S85} : 周辺地盤の85%粒径) を満足する砕石を採用することが求められる。本試験では、エコジオ工法で使用される粒径30 mm~20 mm (砕石30-20) の砕石に加え、 $D_{G15}/D_{S85} < 9$ を満足する粒径20 mm~5 mm (砕石20-05) の砕石での施工を行



写真-1 エコジオ工法による施工状況

い、砕石粒径の影響について検討を行った。

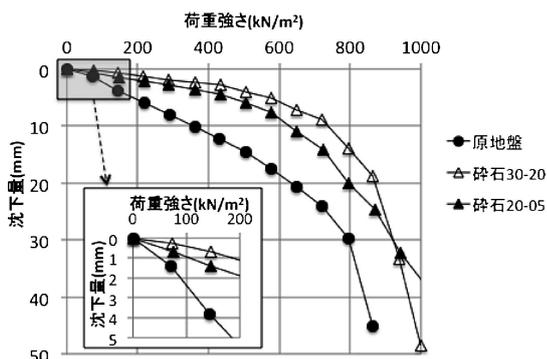
図-4に砕石改良体の施工位置及び各種試験位置を、また写真-1に現地でのエコジオ施工状況を示す。砕石改良体の施工は1.18 m間隔の正方形配置で、砕石粒径の影響を評価するため図中左側16本が砕石30-20、右側16本が砕石20-05となっている。ボーリング調査、標準貫入試験、平板載荷試験、及び水圧観測は図-4に示す各位置において実施した。砕石改良体施工による地盤改良効果の検証のうち地盤の支持力特性については、砕石改良体の直径に相当する直径42 cmの載荷板を用いた平板載荷試験により行った。また、透水性改良効果の検証については、図-4に示す原地盤及び砕石改良体間に1.18 m間隔 (aライン)、及び砕石改良体交点間1.67 m間隔 (bライン) の位置に施工したボーリング孔を利用し、内径が5.1 cmでGL-2.0 m~2.2 mの位置がストレーナーとなっている塩化ビニール製パイプを用いた水圧観測により行った。なお、砕石改良体を挟んで設置されたNo. 1aからNo. 3a及びNo. 1bからNo. 3bの各観測孔の水圧測定は、In-situ社製 Rugged TROLL200を

使用し、No. 1a 及び No. 1b 観測孔への注水による各観測孔の水圧変化を1秒毎に計測した。

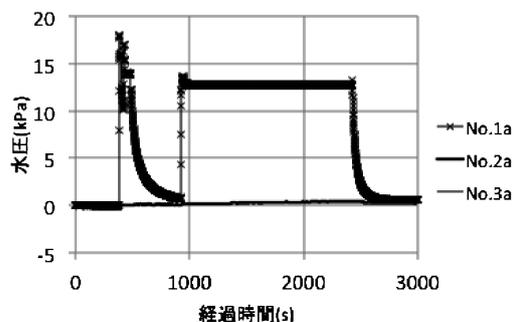
3. 試験結果

図一5に原地盤及び碎石30-20及び碎石20-05における平板載荷試験結果を示す。一般住宅に必要な荷重応力の4倍程度に相当する72 kN/m²の荷重強さにおける沈下量を原地盤と碎石改良体地盤と比較すると、原地盤では1.4 mm であるのに対し、碎石改良体地盤では碎石30-20で0.3 mm、碎石20-05で0.7 mm と小さく、碎石改良体の沈下抑制効果が確認できる。また、沈下量が30 mm 時の荷重強さを比較すると、原地盤では800 kN/m²程度であるのに対し、碎石改良体では900 kN/m²程度となり、碎石改良体による地盤の支持力増加が確認できる。図一6は、原地盤及び碎石30-20、碎石20-05において、水圧観測孔の間隔が1.18 m の a ラインを対象に、No. 1a 観測孔への注水による各観測孔の水圧変化を示したものである。原地盤では No. 1a 観測孔へ注水を行っても No. 2a, No. 3a 観測孔の水圧変化は明瞭に認められない。これに対し、碎石30-20及び碎石20-05が施工された碎石改良体地盤では、No. 1a 観測孔への注水後 No. 2a, No. 3a 観測孔において水圧変化を確認することができる。図一7は原地盤及び碎石30-20、碎石20-05において、注水終了後の水位低下期間を対象に、a ライン、b ラインの No. 1a, No. 1b 観測孔と碎石を隔てて隣接した No. 2a, No. 2b 観測孔それぞれの初期水圧からの水圧差の関係を見たものである。No. 1a 観測孔への注水による水圧変化が No. 2a 及び No. 3a 観測孔において認められない原地盤では一定値で推移するものの、碎石30-20、碎石20-05が施工された碎石改良体地盤では両者に対数相関が認められる。図一8は原地盤及び対数相関が見られる碎石30-20及び碎石20-05において、a ライン、b ラインの No. 1a, No. 1b 観測孔の水圧変化が No. 2a, No. 2b 観測孔に及ぼす影響を見るため、注水終了後の水位低下期間を対象に、No. 2a, No. 2b 観測孔の観測値を1秒ごと遅らせた30秒間の両者の対数相関における R² の変化を求めたものである。碎石改良体地盤では、碎石30-20、碎石20-05とも水位低下直後に R² は0.8以上の高い相関を示し、No. 1a, No. 1b 観測孔の水圧変化は No. 2a, No. 2b 観測孔に即座に反

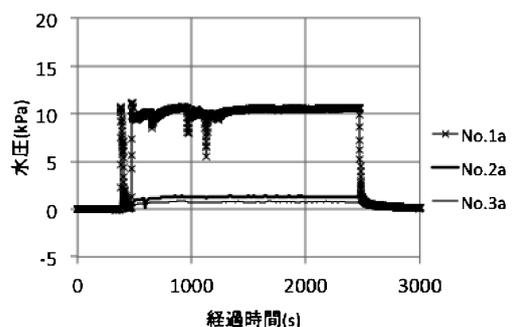
映されるものと考えられる。これに対し、原地盤では水位低下直後の R² は0.36と明瞭な相関は認められない。図一9は、原地盤及び碎石30-20、碎石20-05における a ライン、b ラインの No. 1a, No. 1b 観測孔の注水終了後の水位低下に伴う水圧変化を示したものである。注水終了後に水圧が平衡に達するまでの時間は、原地盤では100秒以上要するのに対し、碎石改良体地盤では両碎石とも20秒程度と短くなる。この水圧低下の結果を基に透水係数を推定した結果を表一1に示す。原地盤では 9.88×10^{-5} m/s であるのに対し、碎石までの距離が0.59 m の a ラインの場合 3.76×10^{-4} m/s 及び 3.72×10^{-4} m/s、距離が0.83 m の b ライン場合 4.25×10^{-4} m/s 及び 4.19×10^{-4} m/s と、両碎石とも碎石改良体地盤では原地盤に比べ透水係数は高く透水性改良効果が認められる。また、碎石30-20及び碎石20-05では、注水終了にともなう水圧低下並びに透水係数に大きな差はなく、碎石粒径の違いが透水性改良効果に及ぼす影響は見られないと考えられる。本試験の碎石改良体地盤において、



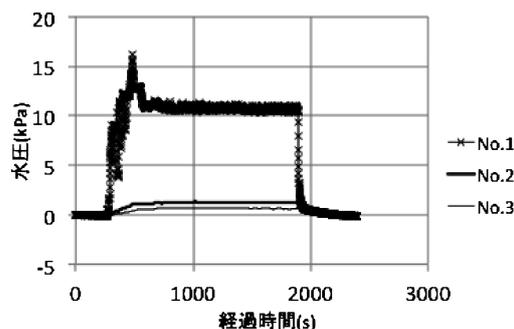
図一5 平板載荷試験結果



(a) 原地盤

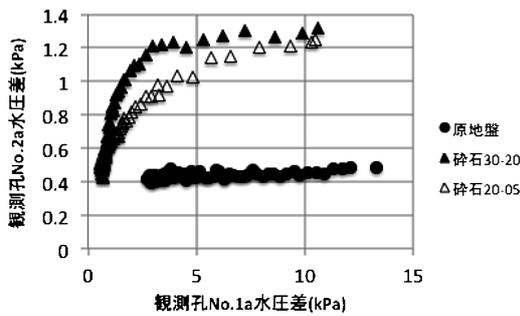


(b) 碎石 30-20

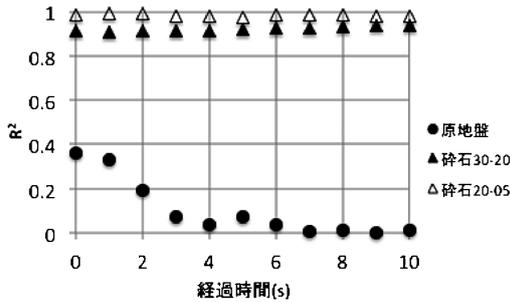


(c) 碎石 20-05

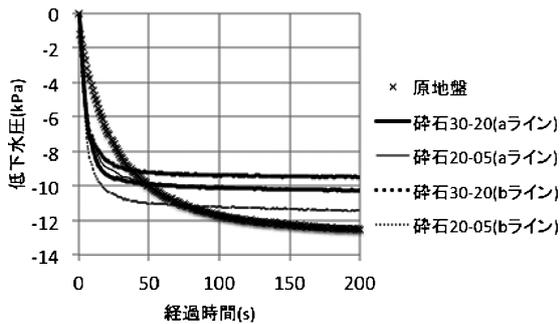
図一6 各観測孔の水圧変化



図一七 No. 1a 観測孔と No. 2a 観測孔の関係



図一八 対数相関での R² の変化



図一九 注水終了後の水位低下状況

水圧変化がどの程度の範囲まで影響するか検討するため、水圧測定間隔の異なる観測孔間隔1.18 m の a ライン及び1.67 m の b ラインにおいて、No. 1a 観測孔と No. 2a, No. 3a 観測孔、及び No. 1b 観測孔と No. 2b, No. 3b 観測孔の注水終了直後から30秒間における対数相関の R^2 を求めた結果を表一 2 に示す。碎石30-20及び碎石20-05とも、2.36 m の範囲までは R^2 が0.8以上と高い相関が認められるものの、3.34 m では R^2 が0.3以下と相関は低下する。この結果、対象とした本試験での碎石改良体地盤による水圧変化は、2.36 m の範囲まで影響することが確認できる。

4. おわりに

東日本大震災において実際に液状化被害が見られた地

表一 観測間隔の違いによる透水係数の変化

| 碎石までの距離(m) | 透水係数(m/s) | | | | |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 碎石30-20 | | 碎石20-05 | | 原地盤 |
| | aライン | bライン | aライン | bライン | |
| 0.59 | 3.76×10^{-4} | | 3.72×10^{-4} | | 9.88×10^{-5} |
| 0.83 | | 4.25×10^{-4} | | 4.19×10^{-4} | |

表一 二 観測間隔の違いによる R² の変化

| 測定間隔(m) | R ² | | | | |
|---------|----------------|------|---------|------|------|
| | 碎石30-20 | | 碎石20-05 | | 原地盤 |
| | aライン | bライン | aライン | bライン | |
| 1.18 | 0.91 | | 0.98 | | 0.36 |
| 1.67 | | 0.94 | | 0.82 | |
| 2.36 | 0.86 | | 0.87 | | 0.4 |
| 3.34 | | 0.28 | | 0.14 | |

盤を対象に、碎石30-20及び碎石20-05を用いてエコジオ工法により碎石地盤改良体を施工し、地盤支持力及び地盤の透水性改良効果について検討を行った。その結果、碎石改良体地盤において支持力増加及び透水性改良効果を確認することができた。また、碎石改良体の目詰まり防止を考慮し、碎石の粒径が改良効果に及ぼす影響について検討を行った結果、碎石30-20及び碎石20-05とも本試験で対象とした地盤においては、水位低下の程度、透水性係数、及び水圧変化の影響範囲に差は見られず、碎石粒径の違いが透水性改良効果に及ぼす影響は見られなかった。このため、GD工法で示された碎石改良体の目詰まり防止を考慮に入れた $D_{G15}/D_{S85} < 9$ を満足する碎石20-05を利用した施工でも、地盤改良効果を発揮できると考えられる。今後は、種々の地盤を対象に地盤改良効果について検討を行う必要があると考える。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：液状化対策工法，2004.
- 2) 安田 進・原田健二・石川敬祐：東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害，地盤工学ジャーナル，Vol. 7, No. 1, pp. 103~115, 2012.
- 3) 田中幸久・国生剛治・江刺靖行・松井家孝：グラベルパイルによる水平地盤の液状化防止について，土木学会論文集，第352号/Ⅲ-2, 1984.
- 4) 井合 進：グラベルドレーンの大型模型振動実験と解析，港湾空港技術研究所報告，Vol. 27, No. 3, pp. 25~160, 1988.
- 5) 酒井俊典・尾鍋哲也：新型碎石地盤改良機・エコジオの開発，三重大学社会連携研究センター研究報告，第17号，pp. 147~151, 2009.
- 6) 神村 真・尾鍋哲也・川又良一・酒井俊典：碎石パイル工法による対策（エコジオ工法），基礎工，Vol. 40, No. 10, pp. 59~61, 2012.
- 7) 土木研究所他：液状化対策工設計・施工マニュアル，2009.

(原稿受理 2014.3.12)