液状化対策工法としての
締固め式碎石杭工法の改良効果

大高 学1・佐藤友彦2・伊藤孝男3・野津光夫4

1正会員 株式会社東北開発コンサルタンツ 土木設計部課長補佐 (〒980-0804 仙台市青葉区大町 2-15-33)
2正会員 株式会社東北開発コンサルタンツ 土木設計部課長 (〒980-0804 仙台市青葉区大町 2-15-33)
3正会員 東北工業大学工学部 土木工学科 教授 (〒882-8577 仙台市太白区香憶町 35-1)
4正会員 不動建築株式会社 ジオ・エンジニアリング本部 (〒110-0016 東京都台東区台東 1-2-1)

液状化対策としての締固め式碎石杭工法は、杭間砂質地盤の締固めや杭自体の強度付与などの改良効果の他に、砂の代わりにせん断剛性が高く透水性の良い粒状材を用いることによって、地震時発生する過剰間隙水圧を速やかに排出させ、完全液状化による構造物の被害を防ぐ効果を期待している。本文では、締固め式碎石杭工法の適用性の拡大を目的として、主として粒度調整碎石について、三軸圧縮試験により内部摩擦角とせん断時の体積圧縮特性を調べた。さらに、施工現場での計測結果の分析をもとに、透水性の良好さがおよそす排水効果について検討した。粒度調整碎石は、それ自体の強度、ダイレイタンシー特性と良好な透水性によって、地震時に一層の杭間地盤の地震時過剰間隙水圧抑制効果が期待できる。

Key Words : soil improvement, grain drain, liquefaction, laboratory test, numerical analysis

1. はじめに

液状化対策としての締固め式碎石杭工法は、ケーシングバイプの貫入〜杭の完成時に、パイプロハンマーによる振動締固めや、強制昇降装置による静的締固めなどの“非排土式”の施工を行うことによって、杭間砂質地盤の締固めや砂杭自体の強度付与などの改良効果を期待している。その一方で、砂の代わりに透水性の良い粒状材を用いると、地震時に緩い砂質地盤内で発生する過剰間隙水圧を、地盤中に造成された粒状材（砕石など）の柱によって速やかに排水させることにより、完全液状化による構造物の被害を防ぐ効果も期待できる（排水効果を取り込んだ設計法はほぼ確立されている2)）。本文で以降述べる“碎石杭工法”は、主としてこの“締固め式碎石杭工法”を指す。

上記碎石杭工法の材料としては、JISでその粒度が定められた5号～7号の単粒度砕石（以降、粒度調整砕石もしくは単に砕石と呼ぶ）が用いられることが多い。最近では、建設廃材の再生利用の観点から、コンクリート塊を砕石の代替材として用いた事例も増加しつつある3)。

本ノートでは、粒状材（砕石）自体の強度、体積変化特性および排水特性を、室内実験や数値解析をもとに見直しを試みる。これにより、改良砂質地盤全体の一層の支持力増加が期待できれば、例えば電力変電所施設等の比較的軽量な構造物について直接基礎の採用によりコスト低減を図れる可能性がある。

2. 粒度調整砕石の基礎的特性と地震時地盤内過剰間隙水圧抑制効果

(1) 室内三軸試験による強度と体積変化特性の評価
a) 実験方法
碎石杭用の粒度調整砕石と、砂杭用の木更津産山砂を用いた排水（CD）三軸試験（供試体サイズは直径50mm、高さ100mm）を実施した。使用した粒度調整砕石と砂の粒度分布および物理試験結果を図-1、表-1に示す。砂の細粒分含有率は約7％である。

今回供試体の作製方法としては、適用範囲を広く供試体の高さ方向の細粒分含有率、密度の均一性が確保
表-1 材料の物理試験結果

<table>
<thead>
<tr>
<th>土粒子の密度 (g/cm³)</th>
<th>最大間隙比</th>
<th>最小間隙比</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>砕石</td>
<td>2.741</td>
<td>1.236</td>
</tr>
<tr>
<td>砂</td>
<td>2.699</td>
<td>0.860</td>
</tr>
</tbody>
</table>

写真-1 中型三軸試験の状況

三軸圧縮試験状況

写真-1 実験材料の粒度分布

図-2 相対密度～内部摩察角関係

Dr=30, 60％、初期等方圧 p₀=49, 98, 196kN/m² も実施し、強度特性の確認を行った（写真-1）。

b) 実験結果と考察

表-2に各実験ケースと結果を示す。

i) 強度特性

図-2は相対密度～内部摩察角関係である。相対密度30～60％の範囲で、砂でφₚ=33～35°であるのに対し、
粒度調整砕石ではφₚ=40～45°として大きい値を示すことがわかる。なお、中型三軸試験ではφₚ=38°とやや
小さくなる。以上より、同様の施工方法でも砕石杭の方が地盤全体の支持力向上を期待できる。

ii) せん断時の体積変化特性

図-3は、Dr=60％の粒度調整砕石の軸差応力～軸ひずみ～体積ひずみ関係である（φₚ=49.4kN/m²）。
粒度調整砕石は、せん断後は体積変化を起こすものの、軸ひずみ3％程度以上の大きなひずみを受けると
体積膨張の傾向を示し、地盤内でも吸水作用を発揮すると思われる。

図-4は初期有効拘束圧と軸ひずみ20％における体積ひずみ量の関係である。ただし、メンプレングベ
トレーションの影響においてここでは考慮していない。粒度調整砕石は、大きさせん断ひずみを受けた際に、
砂よりも相対的に体積変化（圧縮）が少ない（これを以後“砕石杭のダイレイタンシー特性”と呼ぶ
こととする）。また、初期有効拘束圧の小さいケース
では砂と比較して体積膨張の傾向もみられる。またこ
図-3 輪差応力～軸ひずみ～体積ひずみ関係
(Dr=60%の粒度調整砕石の場合)

図-4 初期有効拘束圧と軸ひずみ20%時の体積ひずみの関係

図-5 杭部を含む（平面ひずみ）モデル化

表-3 解析に用いた土質パラメータ

<table>
<thead>
<tr>
<th>物性および初期応力状態</th>
<th>透水係数</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>細い砂壤</td>
<td>0.101</td>
</tr>
<tr>
<td>砂杭</td>
<td>1.0g/cm3</td>
</tr>
<tr>
<td>砕石杭</td>
<td>Ks=1.0</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Case1: 砕石杭 かたさ大(OCR=20)
Case2: 砕石杭 かたさ小(OCR=1)
Case3: 砕杭 かたさ大(OCR=20)
Case4: 砕杭 かたさ小(OCR=1)

図-6,7 にせん断ひずみ 2%を与えたときの体積ひずみ分布および変形を示す。これによると有限要素メッシュの粗さによる誤差は多少あるものの、“かたさ”が小さく透水性の高い砕石杭(Case2)のみ、杭部が大きく体積圧縮しており、他のケースはいずれも体積変化は小さいことがわかる。

図-8 は砕石杭を含む地盤の過剰間隙水圧分布である。砕石杭の透水性が大きいために、杭の中で水圧上昇は起こらない。また杭の“かたさ”が大きい場合は、杭全体の体積圧縮抑制効果によって、結果的にプラスアルファの排水(吸水)効果が生じ、杭間地盤の水圧上昇が抑えられていることがある。

一方、図-9の砂杭においては少し様相が異なる。すなわち、砂杭と比較して相対的に透水性が小さい(原地盤と同等の透水係数)ために、砂杭の“かたさ”が小さい場合は、砂杭内部でも水圧が上昇している。また、砕石杭と異なり、杭のダイレイタンシー特性がもたらす過剰の吸水効果もみられない。

以上より定性的ではあるが、砕石杭の場合、杭全体のダイレイタンシー特性を良好な透水性がありましても、杭間地盤の過剰間隙水圧抑制効果がみられることがわかった。
図6 せん断変形1cm負荷時の体積ひずみ分布

図7 せん断変形1cm負荷時の変形図（碎石杭、変位は3倍）

図8 せん断変形1cm負荷時の間隙水圧分布（碎石杭）

図9 せん断変形1cm負荷時の間隙水圧分布（砂杭）

図10 土質概要および改良前後の杭の杭の中でのN値比較

図11 施工手順と施工機械

3. 粒度調整碎石を用いた締固め式砂石杭工法の施工時の排水～締固め効果

ここでは、中詰め材に直径5mm程度の粒度調整碎石（7号）を用いた振動式砂石杭工法の締固め効果について、現場適用事例を見ながら考察してみたい。

(1) 工事概要

実際に施工された場所は千葉県浦安市の埋立地内で、地盤は図10のように砂とシルトの互層状態であった。地盤は粒分含有率がかなり多く、改良後のN値が上がりにくい状況である。現場では、碎石杭の過剰間隙水圧の排水性能を確認する目的で、施工時の過剰間隙水圧測定を行った。改良仕様は正方形ピッチ2.0m、杭径50cmで、改良率As=4.9%である。なお、当地区は閉塞性に営業であり、振動・騒音などの環境問題に対する制限が厳しい場所であったため、小口型ケーシング、高周波バイブロハンマーを用い、振動・騒音を低減した施工を行った。施工手順を図11に示すが、基本的には通常のSCPと同様である。
当現場における改良前後の杭間の標準貫入試験結果を図-10 に示す。これによると上部のシルト層以外では確認にN値は増加しており、特に地盤の深部でN値の増加（密度増加）が顕著であった。

(2) 過剰間隙水圧測定内容と結果の考察

図-12 のように、5箇所でケーシングパイプを順次振動貫入させ、地中の過剰間隙水圧および加速度の経時変化を測定した。そのうち振動位置 1 のときの測定結果を図-13 に示す。図によるとケーシング先端からに水圧計が埋設された深度に達した時、水圧は最も上昇（Δu_m=25.0kPa）するが、その量は小さく、しかも施工中にもかかわらずその後も水圧は徐々に消散している。

また現場では、砕石杭を打設中に、隣接する複数の砕石杭から相当量（ポンプ排水が必要なほど）の冷たく透明な真水の湧き出し方がみられた（写真-2）。これは試験によるものと、砕石杭の透水性が格段に良好なためである。一般に砂層では、粘土層と異なり、打設している間に過剰間隙水圧が消散しなければ、その後の体積圧縮（締固め）は期待できない。したがって、砕石杭工法は通常の砂杭工法と比較して、“地下水位が高く、砂層中に細粒分を多く含んでいたり、その上部に粘土層などがあり、過剰間隙水圧の消散が困難な地盤”の場合は改良効果が高いと考えられる。

ここで、前述の湧き出し量について、ダルシー則を用いて簡単な検討を行ってみた。間隙水圧計の計測（図-13）によると、深度 6m の杭間位置で最大约 5m の圧力水頭が得られている。そこで図-14 のように杭内でも同等の水頭差が存在していると仮定すると、動水勾配は最大 i=dh/dz=2.5/6.0=0.42 であるので、最大湧出水量 Q が次式によって計算できる。

Q=A k i = 200 l/min

ここに、A: 砕石杭の断面積 1960cm²、k: 砕石の透水係数 4cm/sec である。実際の湧出量もこの程度であったと考えられる。一方、通常の砂杭の場合は、k=10⁻²～10⁻³cm/sec であるので、湧出水量は 0.5～0.05 l/min とわずかで、実際の現場の状況（打設後は杭表面に水が浸み出す程度）ともはや整合している。
4. おわりに

以上の検討の結果、得られた事項を以下に示す。

(1) 砂石杭に用いられる粒度調整砂石は、その粒径分布の特徴として、40～45% (Dr=30～60%) が期待できる。この数値は、ほぼ同一の相対密度の砂と比較して大きい。したがって、個別の施工方法でも砂石杭の方が砂杭よりも地盤全体の持続性向上を期待できる (数値地盤効果がある) といえる。

(2) 室内三軸試験結果によると、粒度調整砂石は初期有効拘束圧の小さい場合では、大きさが解消されず、ひずみレベルで同一密度の砂と比べて体積変化 (圧縮) が小さい傾向にあつて (砂石杭のダイレイタンシー特性)。このことから、大規模試験において、吸水による過剰間隙水圧抑制効果が期待できる可能性がある。

(3) 現場における振動時の杭間地中過剰間隙水圧の測定によって、碎石杭の排水性能が確認された。この結果、地下水位が高く砂留の上下部に粘土層などがあり過剰間隙水圧の消散が困難な地盤において、碎石杭が有効に機能するといえる。

(4) 釧路港や神戸港ポートアイランドでの適用事例では、大きな加速度にみられたにもかかわらず、被災は少なかった。これは、本ノートで述べた上記効果が関連している可能性がある。

参考文献
1) 山田隆、野沢光夫：非圧密式砂杭工法による砂地盤の絶密化効果、第21回地盤工学研究発表会、pp.49-50、1996。
3) 新川直利、福島信吾、林正美、香川明人、遠近應：静的絶密化砂杭工法における現地生産再生砂石の使用について、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集、3-B、pp.528-529、1999。
4) 松本浩久、渡辺和夫、村上清基：ロック材料の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験・その2、建設省土木研究所資料第06号、1983。
5) 土岐祥介、三浦清一、山下聡：三軸試験におけるメンプレン貫入とその評価、地盤工学会士の非排水薄返し試験に関するシンポジウム発表論文集、pp.89-96、1985。
6) 淺岡顕、高橋俊浩、野沢光夫：各種構造物の実例における地盤改良工法の選定と設計—地盤改良と土質力学（第2章）—土と基礎、Vol.48、No.2、Ser. No.492、pp.49-54、1999。
7) 運輸省港湾技術研究所・グラベルドレーン工法研究会：釧路港開港化対策工法現地調査報告書、1995。
8) 不動健三 (株): 平成7年 (1995年) 兵庫県南部地震調査報告、1995。

SOIL IMPROVEMENT EFFECT OF GRAIN MATERIAL IN THE PILE AS A MEASURE AGAINST LIQUEFACTION

Manabu OOTAKA, Tomohiko SATO, Takao ITO and Mitsuo NOZU

Principle of gravel compaction pile method is to increase the density of loose sandy ground and to prevent damage of structure due to liquefaction using the gravel piles, which will immediately dissipate the excess water pressure occurred in the sandy ground at the earthquake.

In this report, soil improvement effect of grain material in the gravel pile as a measure against liquefaction was investigated. Tri-axial compression tests using uniform particle size grain material and in-situ testing were conducted. According to those results, it was clarified that both the dilatancy properties of less volume change and high permeability of the material can be considered in the design stage, and also are effective for the economical design of slab foundation structures.