# 液状化対策工法としての締固め式砕石杭工法の改良効果

Soil Improvement Effect of Gravel Compaction Pile Method as a Countermeasure Against Liquefaction

佐藤友彦(さとうともひこ) ㈱東北開発コンサルタント土木設計部課長

伊藤孝男(いとう たかお) 東北工業大学教授 工学部土木工学科

大 高学(おおたか まなぶ)㈱東北開発コンサルタント土木設計部課長補佐

野 津 光 夫 (のづ みつお) 不動建設㈱ジオ・エンジニアリング事業本部 技術統轄部 主任研究員

### 1. はじめに

液状化対策としての締固め砂杭工法は、ケーシングパ イプの貫入~杭の造成時に、バイブ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<sup>1)</sup>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 めや砂杭自体の剛性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 の被害を防ぐ効果を期待できる<sup>2)</sup>。本文で以降述べる "砕石杭工法"は、主としてこの "締固め式砕石杭工法" を指す(**表**-1)。

上記砕石杭工法の材料としては,JIS でその粒度が定 められた 5~7 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。

ここで,もし粒状材(砕石)自体の強度,体積変化特 性および排水特性をさらに積極的に考慮することにより, 砂質地盤全体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。そこで本 文では,粒度調整砕石について,基礎的実験,数値解析 および現場試験を実施し,その結果について考察を加え たので報告したい。

表一1 施工方法と中詰め材料で整理した液状化対策工法

		施工方法				
		排 :	L 式	非排土式		
		工法名	適用	工法名	適用	
	粒度調整砕石	グラベルド	過剰間隙水	締固め式砕	過剰間隙水	
	$k = 10^2 \sim$	レーンエ	圧の速やか	石杭工法	圧消散,お	
	10º cm/sec	法 <sup>3)</sup>	な消散	(バイブロ	よび杭間砂	
中				ハンマーま	質地盤の締	
詰				・たは強制昇	固め	
め材				降装置使		
料				用)		
	砂	-		SCP 工法	杭間砂質地	
	$k{=}10^{-2}{\sim}$				盤の締固め	
1	$10^{-3}\mathrm{cm/sec}$				1	

## 粒度調整砕石の基礎的特性と地震時地盤内 過剰水圧抑制効果

- 2.1 室内大型三軸試験による強度・体積変化特性の 評価
- (1) 実験方法

砕石杭用の粒度調整砕石と、砂杭用の砂を用いた排水 (CD) 三軸試験(供試体サイズは直径50 mm,高さ100 mm)を実施した。通常のドレーン杭の相対密度を考慮 し、 $D_r$ =30,60%、初期等方圧 $p_0$ =29.4,49.0,68.6 kN/ m<sup>2</sup> で、内部摩擦角 $\phi_d$ とせん断中の体積変化を求めた。 排水(CD) 三軸試験は、地盤工学会基準(JGS 0524) に準じて行う。ただし、軸ひずみ20%に達するまでせ ん断を続行した。

なお、JGS 0530には、「均等係数が10程度より小さ い場合は、最大粒径を供試体直径の1/10程度以下とす る」と記されている。これ以上になると、ゴムスリーブ の供試体への貫入(メンブレンペネトレーション)、破 損などのおそれがあるためである<sup>5)</sup>。今回実施する粒度 調整砕石7号も最大粒径5~10 mm と大きいため、別 途中型の三軸試験(供試体サイズは直径150 mm、高さ 300 mm、相対密度 $D_r$ =30,60%、初期等方圧 $p_0$ =49, 98,196 kN/m<sup>2</sup>)も実施し、強度特性の確認を行った。

使用した粒度調整砕石と砂の粒度分布を図―1に示す。 砂の細粒分含有率は約7%である。

(2) 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



13 NII-Electronic Library Service 報文--2631

表-2 実験ケースと結果

	供試体直径:5 cm				15 cm(中型)	
	砂		砕 石		砕 石	
	$c(kN/m^2)$	<b>¢</b> d(度)	$c(kN/m^2)$	<b>\$</b>	$c(kN/m^2)$	<b>¢</b> d(度)
$D_{\rm r} = 30\%$	0.0	33.7	9.8	40.6	22.5	38.1
$D_{\rm r} = 60\%$	0.0	35.1	6.9	45.4		



図-3 初期有効拘束圧と軸ひずみ20%における体積ひ ずみの関係

図-2は、粒度調整砕石および砂の相対密度~内部摩擦角関係である。これによると、相対密度30~60%の範囲で、砂で $\phi_d$ =33~35°であるのに対し、粒度調整砕石では $\phi_d$ =40~45°と大きく評価できることがわかる。なお、中型三軸試験では $\phi_d$ =38°とやや小さくなるが、この傾向は文献4)と同様である。また、砂の $\phi_d$ が豊浦砂と比較してやや小さいが、これは細粒分が若干含まれているためと考えられる。

ii) せん断時の体積変化特性

図-3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、メンブレンペネトレ ーションの影響<sup>5)</sup>はここでは考慮していない。図-3に よれば、粒度調整砕石は、せん断時に砂と比較して全体 的に体積変化(圧縮)が小さい。また、初期有効拘束圧 の小さいケースでは砂と比べて体積膨張(正のダイレイ タンシー)の傾向もみられる。また、この傾向は同じ拘 束圧では、材料を問わず密な方がより大きい。したがっ て、密な杭を造成する締固め式砕石杭工法では、砂杭工 法と比較して、排水性の向上と剛性の大きさ(体積圧縮 の抑制)によって、地震時の過剰間隙水圧をより速やか に排水(吸水)することが可能と考えられる。そこで, 以下では数値解析を実施して上記特性の確認を試みた。

### 2.2 数値解析による砕石の地震時地盤内過剰水圧抑 制効果の評価

地震時せん断ひずみとして,ここでは2%程度が1 秒間にかかることを想定し,図-4に示す簡単な平面ひ ずみモデルを用いて弾塑性変形解析を行ってみた。一般 に地震時に発生するせん断ひずみは深さ方向に異なるが, 本検討では簡単のためある深度(-6~-6.5 m)の間 の杭と周辺地盤を取り出してモデル化している。解析で は,STEP 2~11まで,0.1 cm ずつ計1 cmの"強制せ ん断変形"をモデル上端の節点それぞれに与えている。 排水面は,ここでは改良杭の上部A~B間のみとする。 緩い原地盤砂層および砂杭,砕石杭はすべて Cam-clay model(カムクレイ)でモデル化し,土質パラメーター は表-3のように定めた。ただし,杭の剛性は OCR に よって表現している<sup>6</sup>。

検討は以下の4ケースについて行っている。

 Case 1: 砕石杭
 剛性大 (OCR=20)

 Case 2: 砕石杭
 剛性小 (OCR=1)

 Case 3: 砂杭
 剛性大 (OCR=20)

Case 4:砂杭 剛性小 (OCR=1)

図一5,6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図を示す。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,剛性が小さ く透水性の高い砕石杭のみ,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。

図一7は砕石杭部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。また杭の剛性が大きい場合は、杭自体の 体積圧縮抑制効果によって、結果的にプラスアルファー



STEP 2~11 まで,0.1 cm ずつ計 1 cm の強制せん断変形をモデル上面に与える。

図-4 弾塑性変形解析モデル

表-3 解析に用いた土質パラメーター

	密度 p' (g/cm <sup>3</sup> )	間隙 比 <i>e</i> 0	K <sub>0</sub>	透水 係数 (cm/s)	λ	к	М
緩い砂層	1.0	0.88	1.0	10-3	0.101	0.0064	1.404
砂杭 OCR=1, 20	1.0	0.88	1.0	10-3	0.101	0.0064	1.404
砕石杭 OCR=1,20	1.0	0.88	1.0	1.0	0.101	0.0064	1.404



図-5 強制せん断変形1cm 負荷時の体積ひずみ分布



図-6 強制せん断変形1cm 負荷時の変形図
 (砕石杭の場合,ただし変位は3倍である)



(砕石杭の場合)

の排水(吸水)効果が生じ、杭間地盤の水圧上昇が抑え られていることがわかる。

一方,図-8の砂杭においては少し様相が異なる。す なわち,砕石と比較して相対的に透水性が小さいために, 砂杭の剛性が小さい場合は,砂杭内部でも水圧が上昇し ている。また,砕石杭と異なり,杭の剛性がもたらすプ ラスアルファーの排水(吸水)効果はみられない。

以上より,定性的ではあるが,砕石杭の場合,剛性の 大きさと良好な透水性があいまって,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-8 強制せん断変形1 cm 負荷時の間隙水圧分布 (砂杭の場合)

### 3. 粒度調整砕石を用いた振動式砕石杭工法の 施工時の締固め効果

ここでは、中詰め材に直径5mm程度の粒度調整砕石(7号)を用いた振動式砕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。

#### 3.1 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, 地盤は砂とシルトの互層状態であった。砕石杭の過剰間 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2.0 m,杭 径50 cm で,改良率 as=4.9%である。なお、当地区は 閑静な住宅地であり,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,小口径ケーシング, 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。当現場における改良前後の杭間の標準貫 大試験結果を図ー9に示す。これによると上部のシルト 層以外では確実に 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。

#### 3.2 水圧測定内容と結果の考察

図―10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―11に示す。図によるとケーシング先端がちょうど 水圧計が埋設された深度に達した時、水圧は最も上昇 ( $\Delta u_{max} = 25.0 \text{ kN/m}^2$ ) 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がみられた。この理由について、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—11)によると、深度 6 m の杭間位置で最大約2.5 m の圧力水頭が得られている(図—12)。そこで杭内でも同等の水頭差が出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 \cdot k \cdot i = 200 \ l/min
```

報文--2631



時間(sec) 図-11 振動位置1で測定された加速度 a, 過剰間隙水圧 Δu

160

80

240

320

ここに、A:砕石杭の断面積1960 cm<sup>2</sup>, k:砕石の透水 係数4 cm/sec である。実際の湧出量もこの程度であっ たと思われる。これに対し、通常の砂杭の場合は、k= 10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup> cm/sec であるので, 湧出水量は0.5~0.05 l/min とわずかであり、実際の現場の状況(打設後は砂 杭表面に水がしみ出す程度)ともやはり整合している。

以上より、砕石杭の場合に水が多量に湧出してくるの は、その高い透水性に起因する。特に細粒分を多く含む 砂質土の場合、過剰間隙水圧消散に伴う圧密による地盤 の強度増加が期待される。当地盤は、細粒分20~30% と多く、打設中の過剰間隙水圧の排水に伴う体積圧縮 (密度増加)によって、地盤深部でのN値が大幅に増加 したものと推定できる。このように、砕石杭工法では、 細粒分を多く含む地盤において、施工中の排水促進に伴 5 m

図-12 砕石杭の圧力水頭

う締固め効果が期待できる可能性がある。ただし、改良 効果の定量化は今後の課題である。

#### 4. まとめ

以上の検討の結果得られた事項を以下に示す。

- (1) 砕石杭に用いられる粒度調整砕石では, **φ**a 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、同様の施工方法でも砕石杭の方が砂杭 よりも地盤全体の常時の支持力向上を期待できる (複合地盤効果がある)といえる。
- (2) 室内試験によると、粒度調整砕石は初期有効拘束 圧の小さい場合では、せん断時に同一密度の砂と比 べて体積変化(圧縮)が小さい傾向にある。
- (3) 数値解析による検討の結果, 粒度調整砕石は剛性 の大きさと良好な透水性の相乗効果によって、杭間 地盤の地震時過剰間隙水圧抑制効果が期待できる。
- (4) 現場における振動時の杭間の地中過剰間隙水圧の 測定によって、砕石杭の排水性能が確認された。施 工中の砕石杭からの水の湧出は、杭間地盤の密度増 加を促進し、液状化に対する抑止効果をより高める ことが期待できる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 山田 隆・野津光夫: 非振動式締固め砂杭工法による砂 地盤の締固め効果,第21回地盤工学研究発表会,pp. 49~50, 1996.
- 2) Seed, H. B. and Booker, J. R.: Stabilization of potentially liquefiable sand deposite using gravel drains, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp. 757~768, Vol. 103, No. GT7, 1977.
- 3) グラベルドレーン工法研究会:グラベルドレーン工法技 術資料, p. 66, 1996.
- 4) 松本徳久・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2006号, 1983.
- 土岐祥介・三浦清一・山下 聡:三軸試験におけるメン 5) ブレン貫入とその評価, 地盤工学会 土の非排水繰返し試 験に関するシンポジウム発表論文集, pp. 89~96, 1985.
- 6) 浅岡 顕・松尾 稔・小高猛司:複合地盤の非排水支持 力に関する研究,土木学会論文集,No. 448/III-19, pp. 63~71, 1992.

(原稿受理 1999.5.19)