

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ト 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ト 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 (〒982-8577 仙台市太白区香澄町 35-1)

⁴正会員 不動建設株式会社 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、地震時に発生する過剰間隙水圧を速やかに排水させ、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、透水性の良さがおよぼ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、大地震時にも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砂杭工法は、ケーシングパイプの貫入～杭の造成時に、バ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¹⁾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(碎石など)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 号の単粒度碎石(以降、粒度調整碎石もしくは単に碎石と呼ぶ)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、コンクリート塊を砂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(碎石)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の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の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. 粒度調整碎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・体積変化特性の評価

a) 実験方法

碎石杭用の粒度調整碎石と、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。使用した粒度調整碎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、適用範囲が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

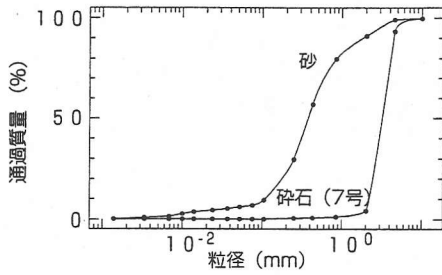


図-1 実験材料の粒度分布

表-1 材料の物理試験結果

	土粒子の密度 (g/cm ³)	最大間隙比	最小間隙比
碎石	2.741	1.236	0.963
砂	2.699	0.860	0.664



写真-1 中型三軸試験の状況

しやすい“静的締固め法”を採用した。これはモールドに所定の量の試料を入れ、飽和化を促進するためにCO₂を5分程度通気させた後、載荷板を介して所定の供試体の高さまで圧縮するものである。なお粒度調整碎石に関しては、供試体を凍結させてからゴムスリーブを装着している。

材料の相対密度は、Dr=30, 60%の2種類とし、初期等方圧 $p_0=29.4, 49.0, 68.6 \text{ kN/m}^2$ で、内部摩擦角 ϕ_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(JGS0524)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、JGS0530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。今回実施する粒度調整碎石7号も最大粒径5~10mmと大きいため、別途中型の三軸試験(供試体サイズは直径150mm, 高さ300mm, 相対密度

表-2 実験ケースと結果

	供試体直径: 5cm					
	砂		碎石		15cm (中型)	
	c_d (kN/m ²)	ϕ_d (度)	c_d (kN/m ²)	ϕ_d (度)	c_d (kN/m ²)	ϕ_d (度)
Dr=30%	0.0	33.7	9.8	40.6	22.5	38.1
Dr=60%	0.0	35.1	6.9	45.4	-	-

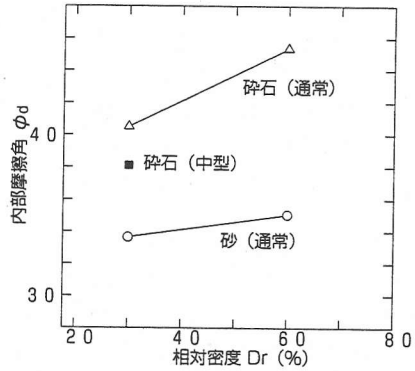


図-2 相対密度~内部摩擦角関係

Dr=30, 60%, 初期等方圧 $p_0=49, 98, 196 \text{ kN/m}^2$ 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~内部摩擦角関係である。相対密度30~60%の範囲で、砂で $\phi_d=33\sim35^\circ$ であるのに対し、粒度調整碎石では $\phi_d=40\sim45^\circ$ 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 $\phi_d=38^\circ$ とやや小さくなる⁴⁾。以上より、同様の施工方法でも碎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%の粒度調整碎石の軸差応力~軸ひずみ~体積ひずみ関係である($\sigma_3=29.4 \text{ kN/m}^2$)。粒度調整碎石は、せん断当初は体積圧縮を起こすものの、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、メンブレンペネトレーションの影響⁵⁾はここでは考慮していない。粒度調整碎石は、大きなせん断ひずみを受けた際に、砂と比較して相対的に体積変化(圧縮)が小さい(これを以後“碎石杭のダイレイタンス特性”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べて体積膨張の傾向もみられる。またこ

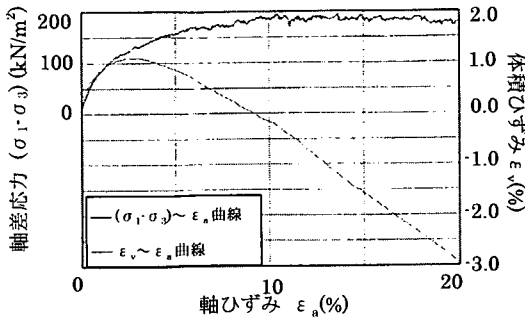


図-3 軸差応力～軸ひずみ～体積ひずみ関係
(Dr=60%の粒度調整砕石の場合)

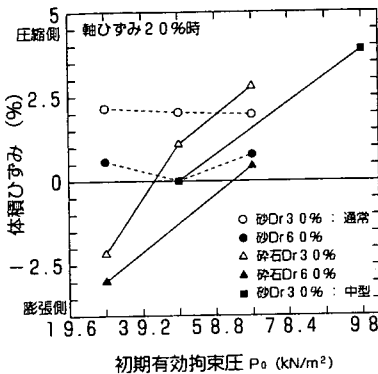
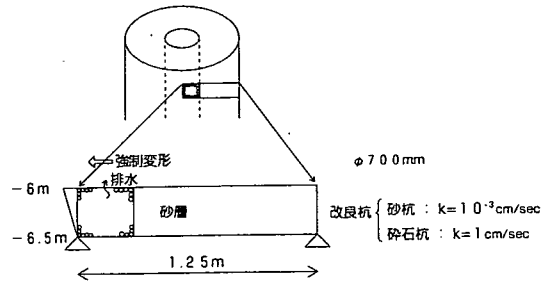


図-4 初期有効拘束圧と軸ひずみ20%時の体積ひずみの関係

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、排水性の向上とダイレイタンスー特性の違いによって、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。以後では、これを数値解析を用いて定量的に示すこととする。

(2) 弾塑性圧密変形解析

ここでは、地震時せん断ひずみ2%程度が1秒間にかかることを仮定し、図-5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。解析では、1秒間にSTEP 2～11まで、0.1cmずつ計1cm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。緩い原地盤砂層および砂杭、砕石杭はすべてCam-clay modelでモデル化し、土質パラメータは表-3のように定めた。ただし(1)で述べたダイレイタンスー特性は杭の“かたさ”としてOCRの大小によって表現している。検討は以下の4ケースについて行なっている。



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

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

	物性および初期応力状態	λ	κ	M	透水係数 (cm/s)
緩い砂層	密度	0.101	0.0064	1.4	0.001
砂杭	1.0g/cm ³ OCR=1, 20	0.101	0.0064	1.4	0.01
砕石杭	初期間隙比 $e_0=1.0$ OCR=1, 20 $K_0=1.0$	0.101	0.0064	1.4	1.0

- Case1: 砕石杭 かたさ大(OCR=20)
- Case2: 砕石杭 かたさ小(OCR=1)
- Case3: 砂杭 かたさ大(OCR=20)
- Case4: 砂杭 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、“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“かたさ”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-9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(原地盤と同等の透水係数)のために、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、杭のダイレイタンスー特性がもたらす前述の吸排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、杭自体のダイレイタンスー特性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。

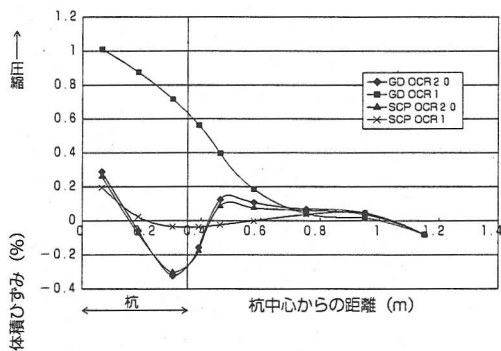


図-6 せん断変形1cm負荷時の体積ひずみ分布

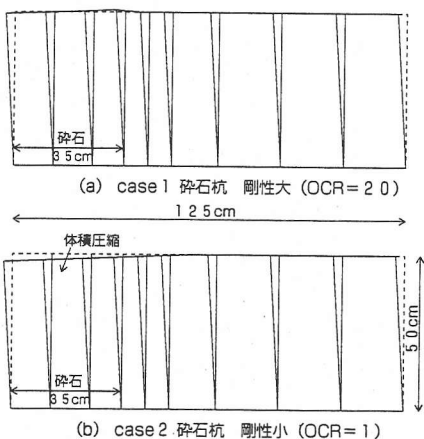


図-7 せん断変形1cm負荷時の変形図(砕石杭, 変位は3倍)

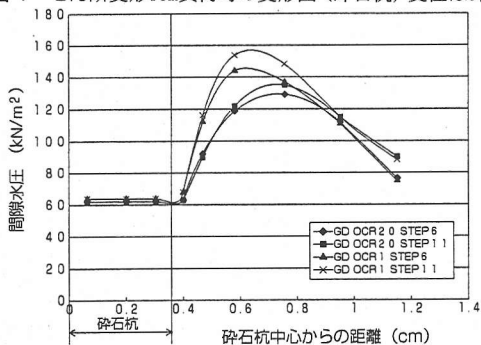


図-8 せん断変形1cm負荷時の間隙水圧分布(砕石杭)

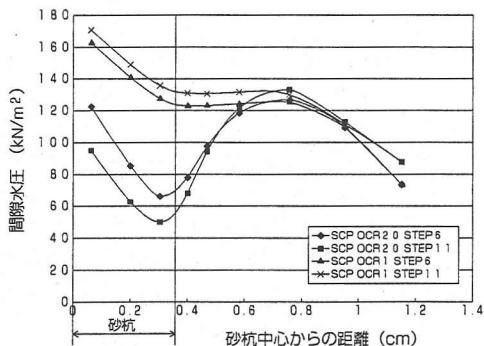


図-9 せん断変形1cm負荷時の間隙水圧分布(砂杭)

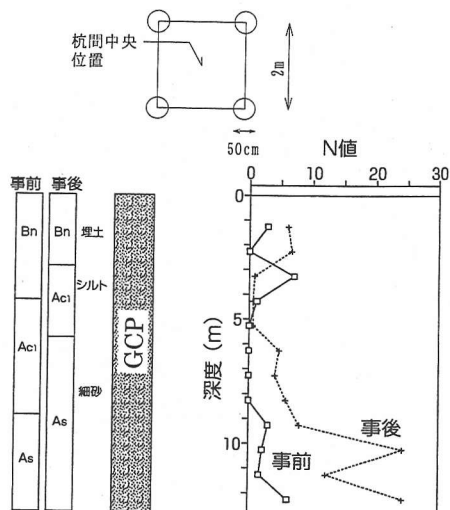


図-10 土質概要および改良前後の杭間中央でのN値比較

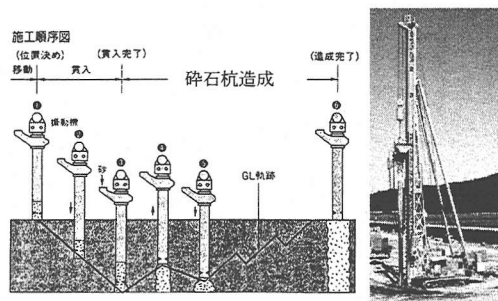


図-11 施工手順と施工機械

3. 粒度調整砕石を用いた締固め式砕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。

(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。地盤は細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、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2.0m、杭径50cm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、高周波バイプロハンマーを用い、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。

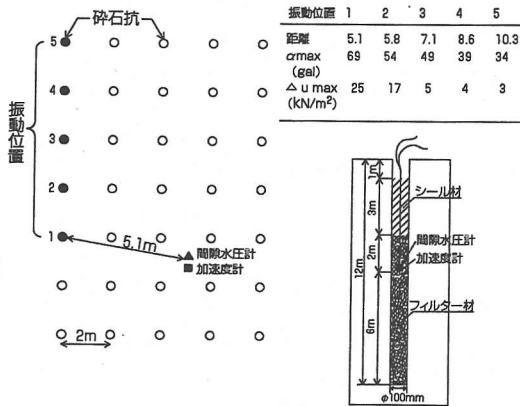


図-12 振動試験概要

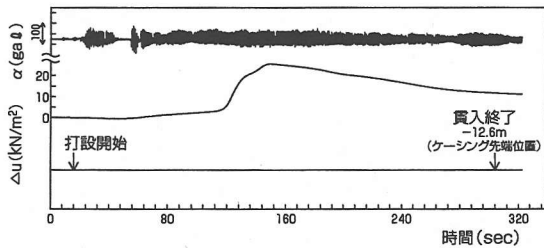


図-13 振動位置1で測定された加速度aおよび過剰間隙水圧 Δu

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。

(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(写真-2)。これは後で示すように、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、

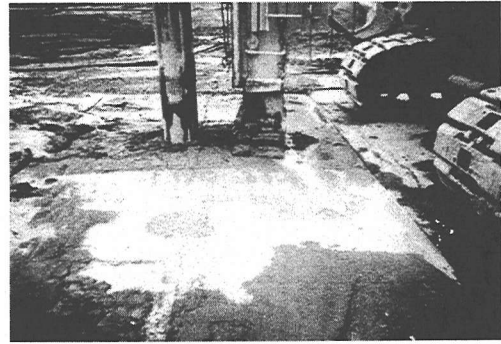


写真-2 砕石杭からの真水湧き出し状況

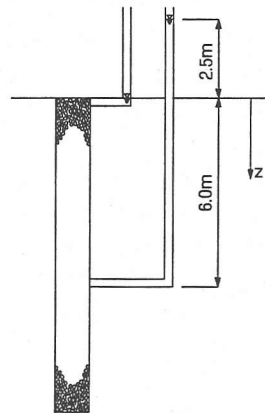


図-14 砕石杭の圧力水頭

その後の体積圧縮（締固め）は期待できない⁶⁾。

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、砂層内に細粒分を多く含んでいたり、そ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”の場合に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の杭間位置で最大約2.5m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。

$$Q=A k i = 200 \text{ l/min}$$

ここに、A:砕石杭の断面積 1960 cm^2 , 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。一方、通常の砂杭の場合は、 $k=10^{-2} \sim 10^{-3}\text{ cm/sec}$ であるので、湧出水量は $0.5 \sim 0.05 \text{ l/min}$ とわずかで、実際の現場の状況（打設後は杭表面に水が滲み出す程度）ともやはり整合している。

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) 碎石杭に用いられる粒度調整碎石では ϕ_0 として $40\sim 45^\circ$ ($Dr=30\sim 60\%$)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碎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) 室内三軸試験結果によると、粒度調整碎石は初期有効拘束圧の小さい場合では、大きなせん断ひずみレベルで同一密度の砂と比べて体積変化(圧縮)が小さい傾向にある(碎石杭のダイレイタンス特性)。このことから、大地震時において、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、地下水位が高く砂層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などでは、碎石杭が有効に機能するといえる。
- (4) 釧路港⁷⁾や神戸港ポートアイランド⁸⁾での適用事例では、大きな加速度にみまわれたにもかかわらず被害は少なかった。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 deposit using gravel drains, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp.757-768, Vol.103, No.GT7, 1977.
- 3) 新川直利, 福島信吾, 林 正美, 香川明人, 遠近潮見: 静的締固め砂杭工法における現地生産再生碎石の使用について, 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.
- 5) 土岐祥介, 三浦清一, 山下聡: 三軸試験におけるメンブレン貫入とその評価, 地盤工学会士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, 高稲俊浩, 野津光夫: 各種構造物の実例にみる地盤改良工法の選定と設計—地盤改良と土質力学(その2)—, 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: 釧路港液状化対策工法現地調査報告書, 1995
- 8) 不動建設(株): 平成7年(1995年)兵庫県南部地震調査報告集, 1995.

(2001. 3. 1 受付)

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.