

杭打設による埋立地盤の地盤改良効果

田 地 陽 一
(技術研究所)
社 本 康 広
(技術研究所)
後 藤 茂
(技術研究所)

§ 1. はじめに

杭打設により砂地盤が締固められることは、実施工の経験から定性的に知られている。Meyerhof¹⁾、西田²⁾³⁾は、杭打設による締固めの範囲に関する研究を行い、藤田⁴⁾、近江⁵⁾、Z.V.Solyman et al⁶⁾は、杭を打設した地盤のN値やコーン貫入抵抗値の変化を測定している。高橋⁷⁾、森重⁸⁾は、杭打設による砂地盤の締固めが液状化に対して有効であることを明らかにしている。

しかしながら、これらの研究は、杭打設による地盤の変化をN値やコーン貫入抵抗値を用いて調べたものであり、地盤の液状化抵抗の変化を直接比較したのではない。

上記のような背景から本研究では、東京湾臨海部の埋立地盤において杭を打設し、杭周辺の地盤の変化を検討した。特に、液状化抵抗については杭打設前後の地盤から凍結サンプリングによって不攪乱試料を採取し、その試料の液状化試験から直接的に比較した。

§ 2. 原位置杭打設実験

2.1 実験位置および地盤の概要

図-1に示す千葉県木更津市南部の埋立地盤において原位置杭打設実験を実施した。図-2は、当該地盤のボーリング柱状図を示したものである。この地盤は、G.L.-4mまでがN値10以下の緩い埋立層で、中間部にN値10~20の中密な沖積砂層がある。その下部は、シルト層が続く地層である。砂層は、暗灰から暗青灰色の典型的な東京湾岸に堆積する砂であり、埋立層の一部に貝殻を含むこと以外は、埋立層と沖積層の間に顕著な差異は見られない。地下水位は、G.L.-1.3mである。図-3および4は、

G.L.~-4mの埋立層およびG.L.-4~-7mの沖積砂層の粒度分布を示したものである。どの地層も平



図-1 実験位置

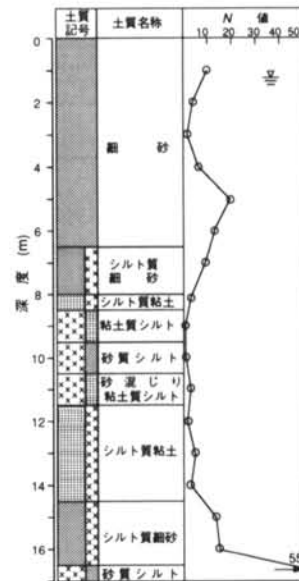


図-2 ボーリング柱状図

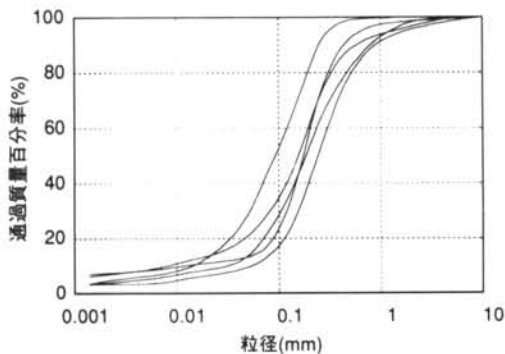


図-3 埋立層の粒度分布

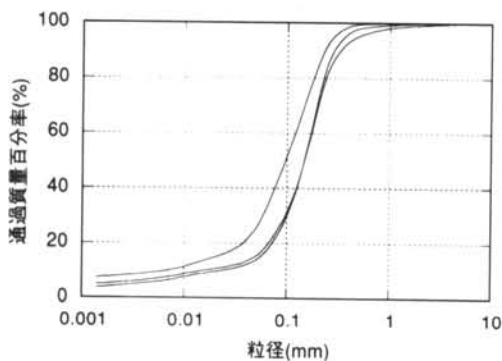


図-4 沖積砂層の粒度分布

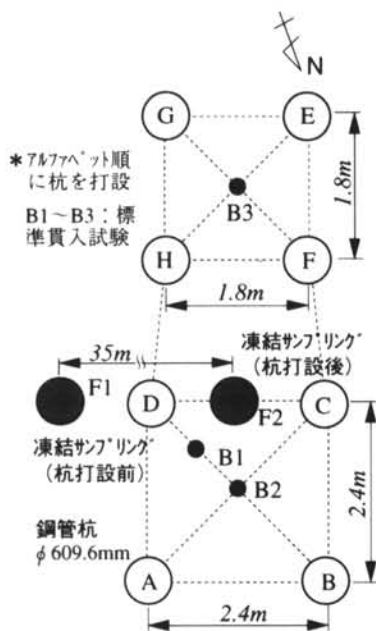


図-5 杭の打設位置および地盤調査位置

均粒径 D_{50} が0.1～0.3mmで細砂に分類される。細粒分含有率は、10～45%程度含むが均等係数は小さく粒径のそろった砂である。

2.2 試験方法および地盤調査

打設した杭は、外径609.6mm、肉厚9.5mm、長さ12.0mの鋼管杭であり、材質は、STK400である。杭の先端は開端であるが、杭の閉塞性を高めるために、長さ600mm、厚さ12mmの鋼製の十字リブを取り付けた⁹⁾。打設ピッチは、図-5の実験位置の詳細図に示すように杭径の3倍および4倍とした。杭の打設は、20tの油圧ハンマーを用い、アルファベット順にA杭から行った。

地盤調査は、以下の項目を行った。

- ①杭打設前 (B1孔)および打設後 (B2, B3孔)における標準貫入試験
- ②杭打設前 (F1)および打設後 (F2)における凍結サンプリング試料の採取

§ 3. 杭打設実験結果

3.1 開端杭の閉塞効果

図-6および7は、杭の打撃回数と深度の関係を示したものであり、合わせて地盤の N 値も記してある。どちらの杭打設ピッチにおいても打撃回数の分布と N 値の分布は、必ずしも対応せず、 N 値の最大値に対して2m程度深くなった位置で打撃回数が最大になっている。また、下部のシルト層に入ると打撃回数が減少する傾向が見られる。

図-8は、D杭内部のボーリング調査を行い、原地盤と比較した図である。D杭内部の地盤は約4.7m表面が沈下しており、貝殻を含む細砂層 (G.L.-4m)およびシルト層は、杭内部と原地盤とで対応しているが、貝殻を含む細砂層とシルト層の間に位置する層 (G.L.-4m～6.6m)は、杭内部のボーリング調査結果から欠落している。このことは、細砂層が閉塞効果のために杭内部に入り込めずに周辺へ押し出され、地盤の密度増加に寄与していることを示している。

以上から、十字リブ付きの開端杭を打設する場合には、地盤がある程度以上固くなると、閉塞効果が生じ杭端部にコアが形成されるが、コア形成のために固い地層に達してからある程度の長さが必要になることがわかる。今回の試験結果では、この長さは、

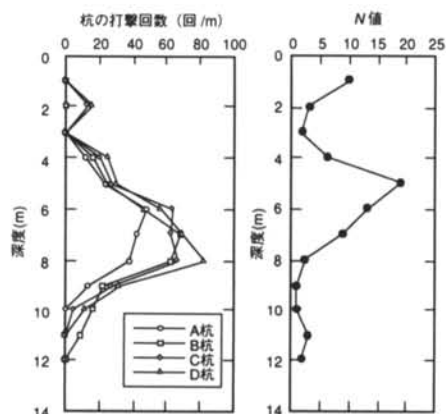


図-6 杭の打撃回数と深度の関係 (2.4mピッチ)

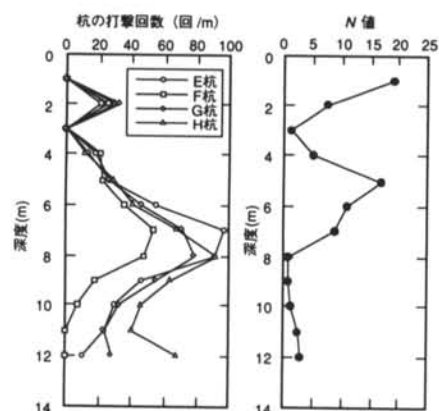


図-7 杭の打撃回数と深度の関係 (1.8mピッチ)

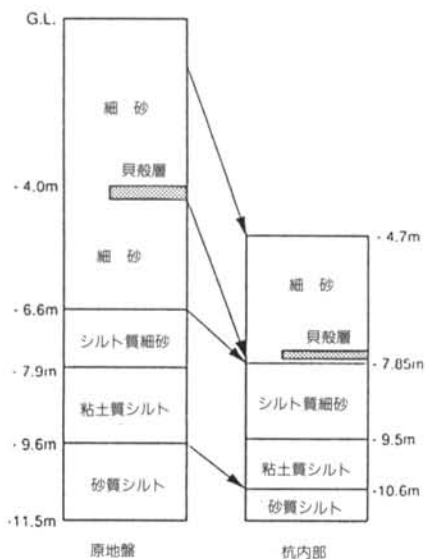


図-8 開端杭 (φ609.6mm) における土の排除

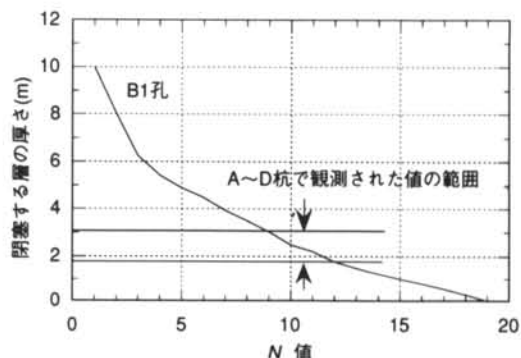


図-9 N値と閉塞する層の厚さの関係

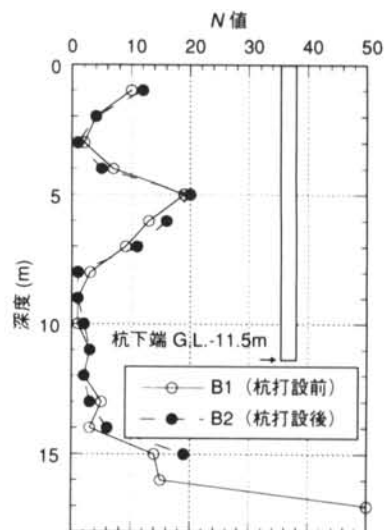


図-10 杭打設前後のN値 (2.4mピッチ)

杭径の3倍程度であった。

図-9は、ある一定以上のN値を有した地層において杭が完全に閉塞すると仮定して求めた、N値と閉塞する層の厚さとの関係である。図中にA~D杭を打設した際に計測された閉塞が生じた層の厚さの範囲を示してある。この図から、十字リブ付の609.6mmφの鋼管杭を打設した場合、N値が9~12の範囲で閉塞が生じていることがわかる。

3.2 地盤改良効果

図-10は、2.4mピッチで杭を打設した領域での中心位置における杭打設前後のN値の変化を示したものである。この図から、G.L.-5m以深の細砂層のN値はやや増加しており、その下層のシルト層ではN値は増加していない。杭打設後のG.L.-5m以浅の地盤のN値が減少しているが、これはこ

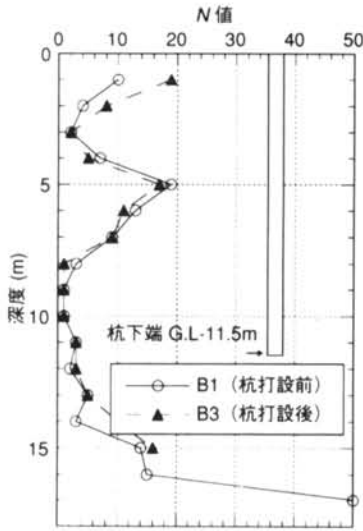


図-11 杭打設前後のN値 (1.8mピッチ)
の深度の砂層の細粒分含有率がB1, B2孔で異なる
ことが理由の一つである。

図-11は、1.8mピッチで杭を打設した領域での中心位置における杭打設前後のN値の変化を示したものである。この図から、改良効果が期待できるG.L.-5~-7mの深度を含め砂地盤全体に改良後のN値が減少している。これは、必ずしも改良効果が見られなかったことを示しているのではなく、B1孔とB3孔で地盤の水平方向の一様性が確保できなかったことが理由として考えられる。B1孔とB3孔は約3mしか離れていないが、杭の打設後に行ったG.L.-4m以浅の埋立層部分の掘削調査において1.8mピッチで杭を打設した位置の砂層に多くのレンズ状のシルトブロックを確認したことから地盤が不均一であったことが裏付けられる。以上のことから、改良効果の評価は、2.4mピッチで杭を打設した領域について行う。

§ 4. 杭打設による地盤改良効果の評価

4.1 地盤改良効果の評価方法

社本ら^{10), 11)}は、サンドコンパクションパイルの締め固め効果を換算N値とパイル間中央部の改良効果に関する補正係数を用いた評価手法を提案している。地盤に柱状のものを打設するという観点では、杭打設はサンドコンパクションパイルと同様であり、その評価手法が適用できる可能性がある。そこで、

原位置試験結果に基づきその評価手法の適用性について検討を行った。

評価手法は、具体的には地盤調査結果から得られたN値から補正N値 Na を求め、(1)式にしたがって改良後の補正N値 Na' を予測する手法である。

$$\begin{aligned}
 Dr_0 &= 0.16 \times \sqrt{Na} \\
 e_0 &= e_{\max} - (e_{\max} - e_{\min}) \times Dr_0 \\
 e_0' &= e_0 - (1 - \alpha) \times a_s \times \beta' \times (1 + e_0) \\
 Dr_0' &= \frac{e_{\max} - e_0'}{e_{\max} - e_{\min}} \quad \dots\dots(1) \\
 Na' &= \left(\frac{Dr_0'}{0.16} \right)^2
 \end{aligned}$$

ここで、 Na は細粒分の影響を考慮した補正N値で、 $Na = N_i + \Delta N_i$ ¹²⁾、 e_0 、 e_0' は改良前後の間隙比、 Dr_0 、 Dr_0' は改良前後の相対密度、 a_s は改良率、 e_{\max} 、 e_{\min} は最大間隙比および最小間隙比である。調査結果がない場合は、細粒分含有率 FC をパラメータとして平間の提案するの近似式 ($e_{\max} = 0.02 \times FC + 1.0$ 、 $e_{\min} = 0.008 \times FC + 0.6$)を用いる¹³⁾。 β' はパイル間の中心部における改良効果の補正值で $\beta' = 2.93 \times a_s^{0.695}$ である。 α は、地盤改良の際の地盤の盛り上がりによって生じた体積増加率で細粒分含有率 FC と相関があり、 $\alpha = 0.00158 \times FC^{1.389}$ である。なお、今回の杭打設による改良率は、2.4mピッチの領域では4.9%、1.8mピッチの領域では8.7%であり、通常のスンドコンパクションパイルの改良率に比べ小さな値である。

4.2 地盤改良効果の評価

図-12は、(1)式に基づいて、埋立砂層と沖積砂

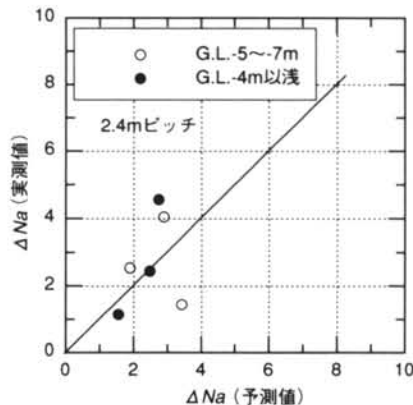


図-12 杭打設後の補正N値の増加量の比較

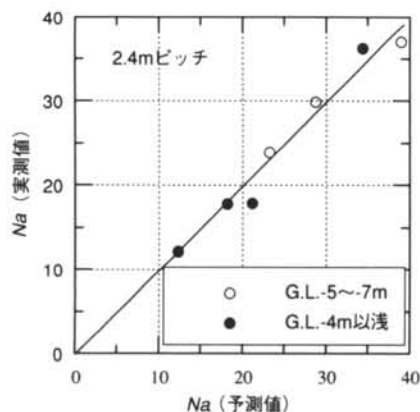


図-13 杭打設後の補正N値の比較

層において杭打設後の補正N値の増分 ΔNa について予測値を算出し、実測値との比較を行ったものである。2.4mピッチの領域では、改良効果は ΔNa で2~4と小さいが、杭打設の際に閉塞が生じた沖積層のNaの増加は予測値とほぼ対応している。一方、G.L.-4m以浅の埋立層は、杭打設時に閉塞が生じておらず改良効果は期待できないにもかかわらず、G.L.-4m~-7mの細砂層とほぼ同程度のNaの増加が生じている。

図-13は、補正N値について実測値と予測値との比較を行ったものである。両者の値は、良く一致していることがわかる。

以上のことから、杭端部が閉塞されている部分では(1)式に示したサンドコンパクションパイルの評価手法で予測できることが明らかとなった。また、杭の閉塞が生じた地層より上部の層では、杭によって周辺へ押し出されていないにもかかわらず補正N値の増加が見られた。

§ 5. 杭打設前後の地盤の液状化抵抗

5.1 凍結サンプリングによる試料の採取

杭打設による地盤の液状化抵抗の変化を明らかにするために、杭打設の前後において凍結サンプリングにより試料の採取を行った。

今回凍結サンプリングを行った地盤は、10~45%の細粒分を含んでいるが、後藤の仮定に基づく試算¹⁴⁾によれば、膨張ひずみは0.5%程度であり、試料の力学的な乱れの影響は少ない。以下に、今回行った凍結サンプリングの概略を示す。

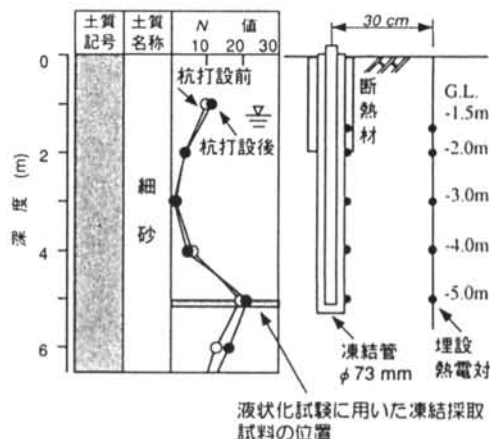


図-14 凍結管および埋設熱電対の概要

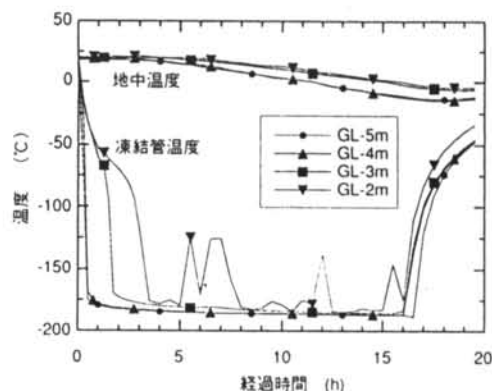


図-15 凍結時の地盤温度の経時変化(杭打設後)

図-14に凍結管と地盤の対応を示す。凍結管は外径が73mmの2重管で、長さ5.3mである。上部2mに断熱処理を施してあり、ボーリングで切孔して立て込んだ。地盤の凍結状態の管理のために、凍結管表面に熱電対を設置するとともに凍結管中心から30cmの地点にも熱電対を埋設した。

地盤の凍結は、約1昼夜にわたって凍結管に液体窒素を流入させて行った。図-15は、杭打設後の地盤凍結中の熱電対による温度の実測値を示したものである。所定の凍結温度を確認した後に、バックホーで掘削後、トラッククレーンで凍結土柱を地盤から引き上げた¹⁵⁾(写真-1)。

この方法は、凍結サンプリングで通常行われているコアリングに比較して凍結した試料に外力を作用させないため、乱れの発生する要因が少なくなることが利点である。また、試料採取に要する費用も少

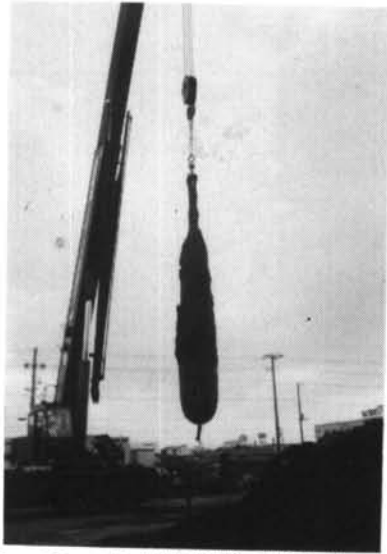


写真-1 クレーンによる凍結土柱の抜き上げ

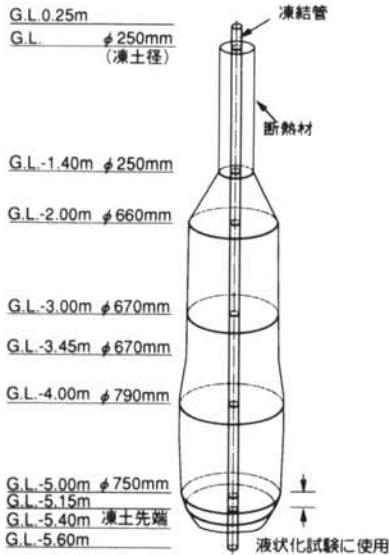


図-16 採取した凍結土柱の形状

ない。ただし、凍結土柱を地中から抜き上げるために周辺の地盤を掘削する必要があり、地盤が乱される領域は広くなる。

図-16は、得られた凍結土柱（杭打設後）の概略である。凍結土柱の寸法は、高さ4m、最大径は79cmであった。凍結土柱の観察より、ボーリング調査結果のとおりG.L.-4mの深さに貝殻層の存在を確認した。採取した試料は、カッターでハンドリングが容易な大きさに切り分けて実験室へ運搬した。

	杭打設前	杭打設後
G_s	2.75	2.74
$\rho_{d \max} (\text{g/cm}^3)$	1.50	1.47
$\rho_{d \min} (\text{g/cm}^3)$	1.16	1.15
$D_{50} (\text{mm})$	0.078	0.081
$FC (\%)$	39.4	34.6
$\rho_d (\text{g/cm}^3)$	1.39	1.38
$Dr (\%)$	72	76

表-1 試料の物理特性

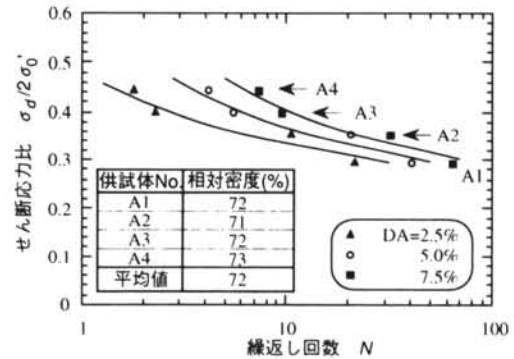


図-17 液状化試験結果（杭打設前）

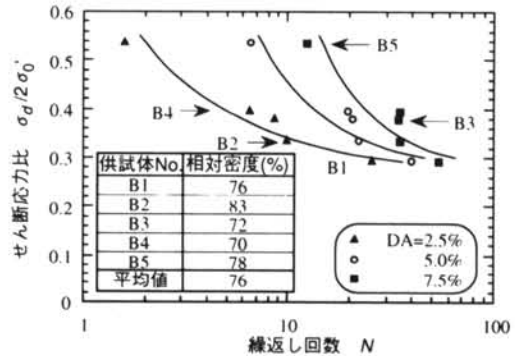


図-18 液状化試験結果（杭打設後）

5.2 凍結サンプリング試料による液状化試験

(1) 試料採取と試験方法

前述した凍結土柱より、杭打設前後ともG.L.-5mの部分を液状化試験に用いた。なお、試料は、鋼管杭からほぼ等しい距離となり、かつ、凍結外管から10cm以上離れた部分を用いた。表-1は、得られた試料の物理特性である。試料の細粒分含有率は、34.6~39.4%である。

液状化試験は、空圧式の繰返し三軸試験装置を用いて行った。直径50mm、高さ10cmに成形した試料を三軸装置にセットし、有効拘束圧50kPaで3~4時

間放置して解凍させた。その後、CO₂と脱気水の順で循環させ、100kPaのバックプレッシャーを加えて供試体を飽和させた。B値が0.95以上であることを確認した後、2時間以上等方圧密した。試験時の有効拘束圧は、解凍時の拘束圧と同じ50kPaとした。載荷は、0.1Hzの正弦波で行った。

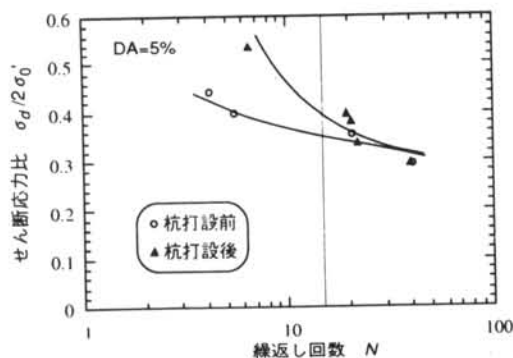


図-19 液状化試験結果の比較 (DA=5%)

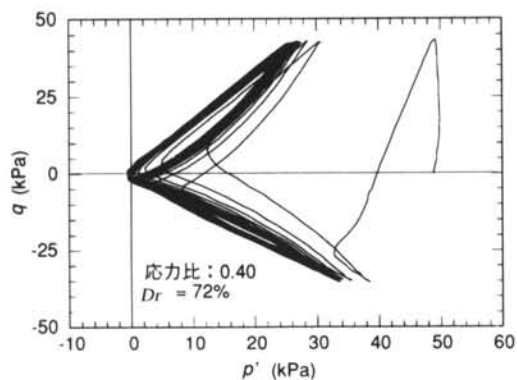


図-20(a) 有効応力経路 (杭打設前A3供試体)

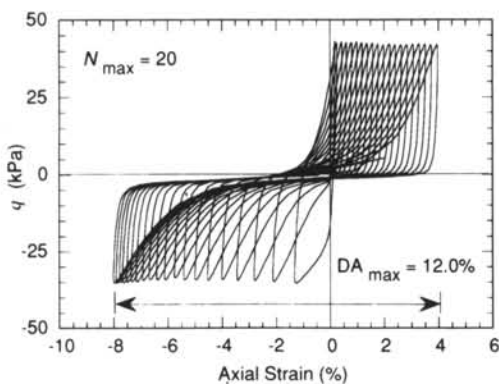


図-20(b) 応力-ひずみ関係 (杭打設前A3供試体)

(2)試験結果

図-17および18は、杭打設前と杭打設後の供試体に対する両振幅軸ひずみDA=2.5%, 5%, 7.5%を生じるまでの繰返し回数と応力比の関係 (液状化強度曲線)を示したものである。液状化強度曲線は、杭打設後の方が、打設前に比べ、左に急角度で上昇している。

図-19は、杭打設前と後の供試体におけるDA=5%が生じるまでの繰返し回数と応力比の関係を示したものである。繰返し回数15回でDA=5%に至る応力比は、杭打設前で0.35、杭打設後で0.40である。また、この図から明らかなように応力比の高い部分で両者の液状化抵抗の差は大きく、応力比の小さいところで差は小さくなっている。これは、入力の大い地震に対して抵抗力が高いことを示しており、いわゆる液状化に対してねばり強い地盤に変化したことを示唆している。

図-20および21は、杭打設前、杭打設後の供試体 (A3供試体、B4供試体)に対する繰返し回数20回ま

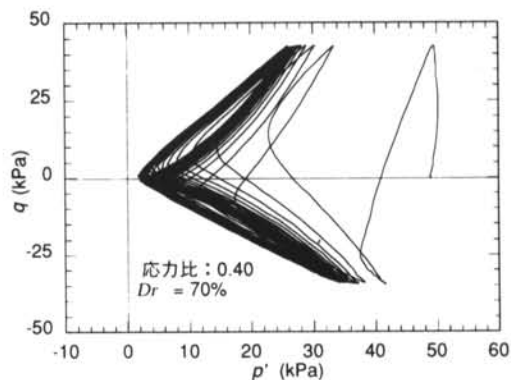


図-21(a) 有効応力経路 (杭打設前B4供試体)

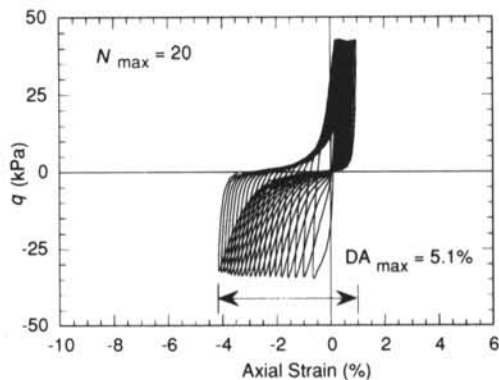


図-21(b) 応力-ひずみ関係 (杭打設前B4供試体)

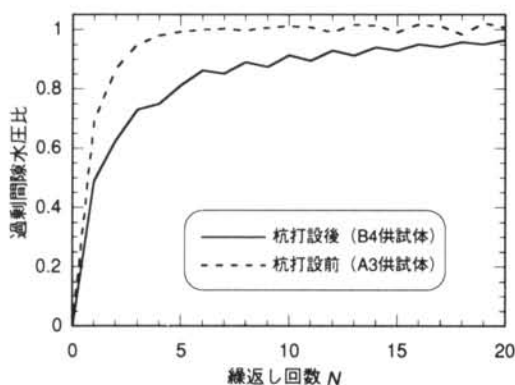


図-22 繰返し回数～過剰間隙水圧比関係

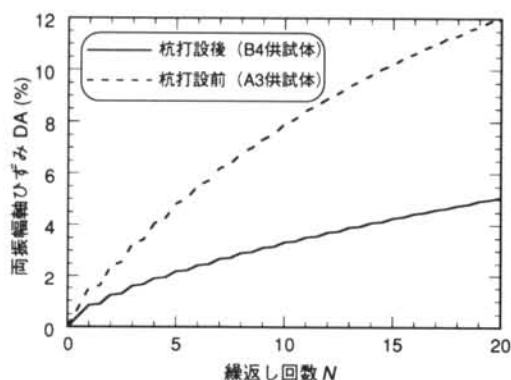


図-23 繰返し回数～両振幅軸ひずみ関係

での有効応力径路、応力～ひずみ関係である。両者の試験時の応力比は0.40で等しく、ともに限界応力状態線 (CSL) と平行な応力状態線 (モービライズされた摩擦抵抗線)¹⁶⁾が存在し、繰返しせん断の進行に伴ってCSLに漸近している様子がうかがえる。しかし、杭打設後のB4供試体の方がモービライズされた摩擦抵抗線がCSLに漸近するまで多くの繰返し回数を必要とし、負のダイレイタンスに伴う過剰間隙水圧の上昇が抑えられている。

応力～ひずみ曲線より、繰返し回数20回での両振幅軸ひずみは、A3供試体で12%、B4供試体で5.1%となっており、B4供試体の方がひずみは小さい。図-22および23は、A3、B4供試体の繰返し回数～過剰間隙水圧比、繰返し回数～両振幅軸ひずみの

関係を示した図である。これらからも、明らかに杭打設後のB4供試体の方が過剰間隙水圧が上昇にくく、ひずみも生じにくい傾向がある。

杭打設前後の地盤の相対密度は、杭打設によって平均4%増加しているが、この程度の変化は液状化に対して有為な差とは考えにくい。3.1の検討結果からも考えて、この深度は、杭の閉塞が生じている部分ではあるが、初期の段階 (コア形成に至っていない段階) であるため密度増加という立場から明確な改良効果は期待しにくい部分である。このように密度はほとんど変化しないが液状化抵抗が増加するという現象は、Seedら¹⁷⁾が示した繰返しせん断履歴による液状化抵抗の上昇と同様であり、杭打設によって砂の微視骨格構造が安定化したため生じたと言える。

§ 6. 結論

東京湾沿岸の木更津市南部に位置する埋立地盤において鋼管杭の打設実験を行い、打設前後の地盤調査と凍結結料を用いた液状化試験を実施することにより、以下に示すことが明らかとなった。

[1] 十字リブ付きの開端杭の場合、 N 値が9～12以上の砂層において閉塞が生じ、その結果、地盤改良効果が期待できる。また、閉塞効果が生じていない埋立層でも、杭打設により地盤改良効果が期待できる。

[2] 杭打設に伴う地盤改良効果は、社本らの提案するコンパクションパイルの評価手法で評価することができる。

[3] 杭を打設した地盤は、密度増加では表せない液状化抵抗の増加が生じた。また、入力の大い地震動に対して抵抗力が高い、いわゆる液状化に対してねばり強い地盤へと変化した。

謝辞 原位置杭打設実験に際しまして、技術研究所桂豊氏、土木本部勝沢勝栄氏、鈴木康夫氏、土木東京支店中村龍一氏、佐田氏のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) Meyerhof, G.G. : "Compaction of Sands and Bearing Capacity of Piles", Proc. of. ASCE. 82-SM1, 1959.

- 2) 西田 義親, 保田 市兵衛: "締固め杭に関する基本的研究" 土木学会論文集第69号, pp.38~44, 1960.
- 3) 西田 義親: "砂地盤に及ぼすクイの締固め範囲の計算" 土と基礎, Vol.18, No.8, pp.33~37, 1965.
- 4) 藤田 圭一: "くい基礎の施工" 間組研究年報, pp.65~80, 1973.
- 5) 近江 雅夫: "杭打ち込みによる砂層地盤の N 値の変化について" 日本建築学会大会学術講演会梗概集(関東), pp.1343~1344, 1975.
- 6) Zoltan V.Solymar., Samsudin., John Osellame., and Basuki Joko Purnomo. : "Ground Improvement by Compaction Piling" Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol.112, No.12, pp.1069~1083, 1986.
- 7) 高橋 利行, 伊藤 賢司: "液状化地盤における打込みくいによる地盤改良" 構造物設計資料, No.44, pp.23~26, 1975.
- 8) 森重 龍馬, 高橋 利行: "打込み杭による砂層の液状化防止対策" 基礎工, Vol.12, No.7, pp.74~79, 1984.
- 9) 山原 浩: 鋼管グイの閉ソク効果と支持力機構(その2), 日本建築学会論文報告集, No.97, pp.34~41, 1964.
- 10) 社本 康広, 持田 泰秀, 玉置 克之: "細粒分を含む砂地盤の地盤改良効果の評価" 地盤の液状化対策に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.211~214, 1991.
- 11) Shamoto, Y., Katsura, Y., Tamaoki, K. and Zhang, J.-M. : "A Simplified Method for Evaluating the Effectiveness of Compaction Piles in Sands Containing Fines" Soils and Foundations. (96年掲載予定)
- 12) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : "Empirical Correlation of Soil Liquefaction based on SPT N -Value and Fine Content" Soils and Foundations, Vol.23, No.4, pp.56~74, 1983.
- 13) 平間 邦典: "相対密度の適用に関する2, 3の私見" 相対密度と工学的性質に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.53~54, 1981.
- 14) 後藤, 社本, 田地, 桂, 勝沢, 鈴木, 中村: "杭打設に伴う埋立地盤の液状化対策効果に関する研究(その3)" 第31回地盤工学研究発表会, pp.1245~1246, 1996.
- 15) 大本 家正, 柏木 順, 青木 美樹, 向後 和広: "凍結サンプリング法による粗粒材料の盛立て密度測定" 第23回土質工学研究発表会講演集, pp.79~80, 1988.
- 16) Zhang, J.-M., Shamoto, Y., and Tokimatsu, K. : "Moving Critical and Phase-Transformation Stress Lines of Saturated Sand during Undrained Cyclic Shear" Soils and Foundations. (96年掲載予定)
- 17) Seed, H.B. Mori, K., and Chan, C.K. : "Influence of Seismic History on Liquefaction of Sands", Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE, Vol.103, No. GT4, pp.257~270, 1977.

