

鋼管杭の打設による液状化対策

清 広 歳 石 井 雄 輔
鳥井原 誠 宮 崎 祐 助

Remedial Measure against Soil Liquefaction by Pile Driving

Hirotohi Sei Yusuke Ishii
Makoto Toriihara Yusuke Miyazaki

Abstract

This paper describes the development of a new remedial method to prevent soil liquefaction by densification of sand deposit due to pile driving. The newly developed closed-end apparatus prevents soil from entering the pile in a loose layer, and the apparatus is pulled out in a dense layer in order to increase the pile driving efficiency. The authors conducted an in-situ prototype test of the proposed method. First, we outline the proposed method and the in-situ test. Next, we discuss the execution efficiency and the compaction effect of the method based on execution records, test results, and measurements of the in-situ test. Finally, we present the design method for the proposed method.

概 要

この研究は、杭の打設による地盤の締固め効果を利用した液状化対策工法に関するものである。締固めの必要な液状化対象層では杭内部に先端閉塞治具を挿入し、先端閉塞の状態では杭を打設して効果的に地盤を締固めるとともに、締固めの必要のない地層では治具を引抜いて先端を開放し、通常の杭と同様に打設することによって、施工能率を高めた杭の打撃工法を提案した。本報では、提案工法の概要、およびこの工法の施工性・締固め効果の確認等を目的として実際の埋立て地盤において実施した実大規模の現場実験結果について報告するとともに、提案工法による地盤の締固め効果の評価手法を提示する。

1. まえがき

打撃工法で杭を打設すると、周辺の地盤が締固められる。この効果を定量的に評価して、設計に反映できれば、より合理的な液状化対策の計画が可能となる。この研究は、開端杭の施工面での利点を生かしつつ、かつ地盤を有効に締固めることを目的として開発した先端閉塞治具を用いる杭の打撃工法に関するものである。本報では、提案工法の施工性の確認、地盤の締固め効果の確認、およびこの効果の評価法の検討等を目的として行った実大規模の現場実験について報告する。

なお、本研究は東京電力株式会社および東電設計株式会社との共同研究である。

2. 既往の研究

杭の打設による周辺地盤の密度変化、地盤変位に関しては、理論的な解析に基づく研究^{1), 2)}、および室内模型実験に基づく研究^{3)~5)}などがあり、1960年代から進められている。何れの研究も杭体積に等しい土が押しつけられる先端閉塞杭の打設を対象にしたもので、杭の打設による影響範囲は杭径の3~5倍程度との研究成果が得られ

ている。また模型実験^{4), 5)}の結果から杭近傍の浅い部分は土が上方に変位し、密度が増加しないことが指摘されている。しかしながら、実際の工事では、模型実験に比較して土被り圧が大きく、また重機等による上載圧も作用するため、現象は異なるものと考えられる。

また、液状化対策として杭の打設による地盤の締固め効果を積極的に活用しようとする研究に、新潟における現場実験^{6), 7)}がある。この実験では、先端閉塞の既製コンクリート杭（直径400mm、長さ13m）を4本×4本の正方形配置で16本打設し、所定の深度まで杭を打設するのに要した累積打撃回数を調査し、最後に打設した杭は最初の杭の2.2倍であったこと、杭打設後のN値について打設前の2倍程度に増加したことを確認している。また、杭の打設による締固め効果は、打設区域中央でやや高いものの全体的に大差ないこと、および打設区域外では杭間隔の1/2（杭径の1.5倍）程度の範囲まで締固め効果が波及することを示している。

3. 提案工法の概要

一般に用いられている先端開放型の鋼管杭では、打設時に杭内部に土砂が侵入し、地盤の締固め効果が有効に

発揮されない。また、侵入土砂の量を予測することができないため、締固め効果の定量的な評価も困難である。そこで、本研究では、締固めによる液状化対策の効果を併せ持つ、開端鋼管杭の打設工法を開発した。Fig. 1に提案工法の概要を示す。この工法では、締固めの必要な液状化対象層では杭内部に先端閉塞治具を挿入し、先端閉塞の状態では杭を打設して地盤を効果的に締固める。締固めを目的としない地層、および支持層では治具を引抜いて先端を開放し、開端杭として打設する。したがって、液状化対象層以外での施工能率は、通常の開端杭と同等である。

4. 現場実験の概要

実験ではTable 1に示すフローに従って事前・事後の地盤物性を調査した。また杭打設中は、杭打ちに関する記録を残すとともに、地中の間隙水圧・加速度および振動・騒音等を計測した。

4.1 地盤概要

現場実験は、横浜市鶴見区大黒町にある、昭和42~46年に埋立てられた比較的新しい埋立て地の一面で行った。地盤概要を、Fig. 2に示す。地盤は不均一であり、礫・細粒土分の多い地層がある。提案工法による締固めの対象層はGL-6~15m付近に堆積する礫混じりシルト質砂層、シルト質微細砂層としたが、部分的にコンクリートガラ等も混入しており、実験結果の評価に際しては、

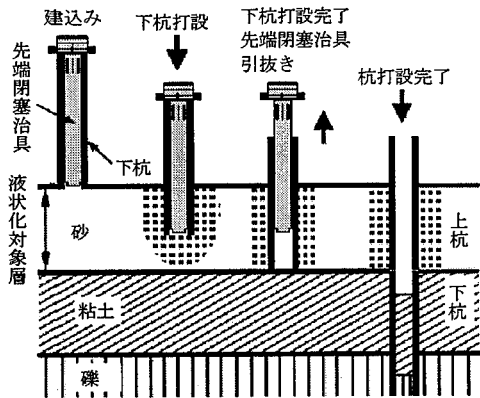


Fig. 1 工法の概要
Outline of Method

Table 1 実験の概要フローと調査・計測項目
Outline of Procedure for Experiment and Items of Test and Measurement

| 実験フロー | 調査・計測項目 |
|-------|---|
| 事前調査 | <ul style="list-style-type: none"> 標準貫入試験 (3孔) P S 検層 室内土質試験 |
| 杭打設中 | <ul style="list-style-type: none"> 地表面変位 間隙水圧 加速度 杭打ち記録 (打撃回数、所要時間等) 振動、騒音 |
| 事後調査 | <ul style="list-style-type: none"> 標準貫入試験 (8孔) P S 検層 室内土質試験 |

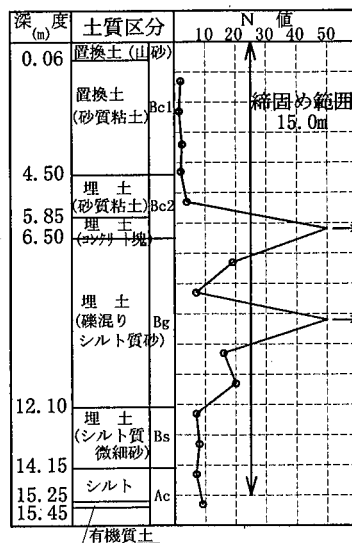


Fig. 2 地盤概要
Soil Boring Log

これらの影響に、十分注意する必要があった。なお、表層付近に多量の障害物が存在していたため、事前にGL-4.5mまで掘削して障害物を撤去し、現地発生土および山砂を埋戻した。

4.2 施工方法

実験で用いた杭は、通常の開端鋼管杭 (直径600mm, 長さ15m, 肉厚9mm) である。実験では、Fig. 3に示す手順に従い、この杭に先端閉塞治具を挿入し、先端閉塞の状態では杭を打設した。

先端閉塞治具は、挿入・引抜きが容易かつ杭内への侵入土砂が極力少なくなるように、Fig. 4(a)に示す形状とした。また、土砂の侵入を防ぐため杭先端内部にはリングを溶接した。本実験では、杭と先端閉塞治具の間への土砂侵入はほとんどなく、杭先端内部に溶接したリングの破損・脱落の有無に拘わらず土砂侵入量に有意な差はなかった。

Fig. 4(b)に示す先端閉塞治具は、上記の実験で発生したリングの破損・脱落を防止するため開発したものであり、杭先端内部にリングを取付けず先端閉塞治具の先端のバンドを改良し土砂の侵入を防ぐ方法を取っている。

杭の配置はFig. 5に示す6本×6本の正方形とし、コーナー部を除く32本の杭を打設した。杭間隔は、実際の火力発電所タービン室の杭工事を参考にして1.9m (約3.2D) ピッチとした。この場合の置換率は約7.8%となる。杭の打設順序は、杭の打設による地盤の密度増加が最も期待できるよう、Fig. 5中に示す外周から内側に向かう渦巻き状とした。

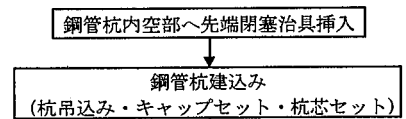


Fig. 3 施工フロー
Procedure for Execution

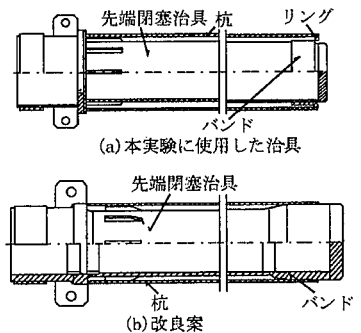


Fig. 4 先端閉塞治具
Closed-end Apparatus

4.3 調査・計測項目

調査・計測の一覧をTable 1に示す。杭打設前（事前調査）および杭打設完了後（事後調査）の調査・計測項目は、地盤の標準貫入試験、PS検層、および室内土質試験であり、杭打設中については、地表面変位、地中の加速度・間隙水圧、振動・騒音、および杭打ちに関する施工性である。Fig. 5に調査・計測位置の平面配置を、またFig. 6に事前・事後調査におけるサンプリング深度、加速度計・水圧計の設置深度を示す。なお、既述のように、締固め対象層には礫分・粘性土分が不規則に混入していたため、実際にはGL-6m以深は連続サンプリングとした。

5. 実験結果と考察

5.1 施工性

5.1.1 打撃エネルギー Fig. 7は、緩い砂層が分布する深さ11~15m間の累計の打撃エネルギーおよび地表面~15m間の累計打撃エネルギーを(1)式で求め杭の打設順（=杭番号）に示したものである。

累計打撃エネルギー：

$$E(z) = \sum (n \cdot W \cdot H) \quad (tf \cdot m \cdot \text{回}) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、n：打撃回数（回） W：ラム重量（tf）

H：ラム落下高さ（m）

Fig. 7から、深さ11~15m間の累計打撃エネルギーは、杭の打設順序が進むにつれて増加しており、地盤が締固められて行ったことがわかる。地表面~15m間の累計打撃エネルギーについては、杭番号9~13の範囲で累計打撃エネルギーが大きく増加しているが、これは深さ10m付近に存在する地中障害物がこの範囲で特に多いためである。このことを考慮すれば、地表面~15m間の累計打撃エネルギーでも、杭の打設にともない累計打撃エネルギーが増加し、地盤が締固められて行ったことがわかる。

5.1.2 施工時間 実験での各施工工程における所要時間および全工程に占める割合をFig. 8に示す。火力発電所建設工事（本実験場の隣地を含む 2カ所）における施工実績では、開端杭（下杭）15mの打撃施工に要する時間は、約9分であった。一方、本実験での打撃施工時間は平均17.5分であり、8.5分余計に時間がかかっている。提案工法を採用した場合、これに加えて先端閉塞治具の挿入・引抜きに平均8.9分を要する。したがって、通常の開端杭の施工に比較して17.5分程度施工時間が長くなる。

5.1.3 振動・騒音 実験での先端閉塞杭打撃中の振動レベルと、本実験場隣地における火力発電所建設工事での開端杭打撃中の振動レベルの比較をFig. 9に示す。また、騒音レベルに関する同様の比較をFig. 10に示す。これらの図には、建設作業所の敷地境界における規制値（振動規制法・騒音規制法の施工規則）も示す。

Fig. 9, 10から、先端閉塞状態で杭を打撃した本実験の

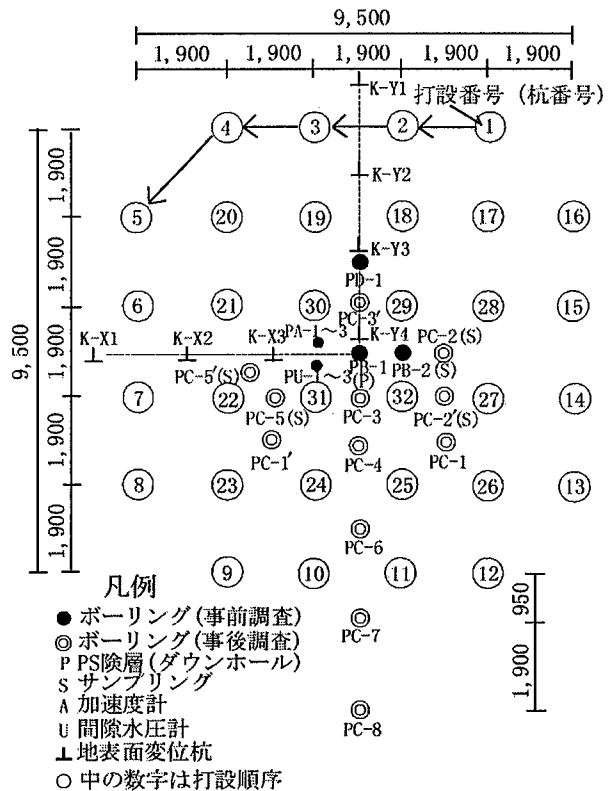


Fig. 5 杭の配置・打設順序および調査・計測位置
Arrangement of Pile, Pile Driving Order, and Positions of Test and Measurement

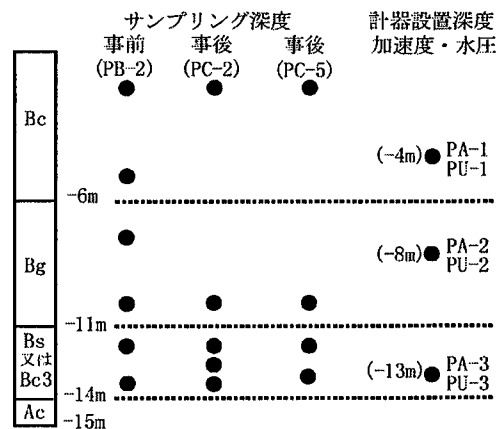


Fig. 6 サンプリング深度および計器設置深度
Soil Sampling Depth and Installation Depth for Transducer

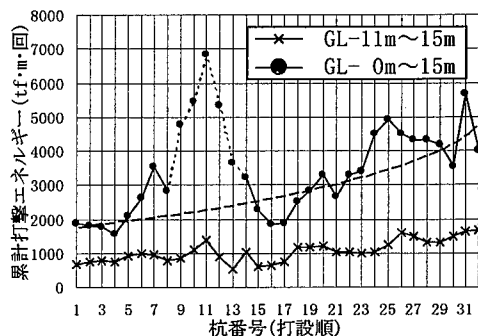


Fig. 7 累計打撃エネルギーと杭打設順序の関係
Relationship between Integrated Driving Energy and Pile Driving Order

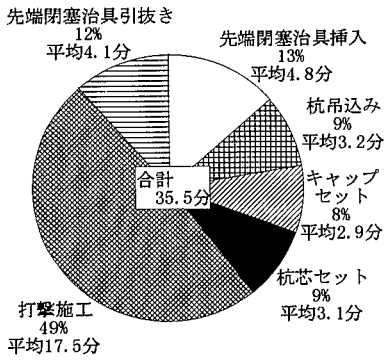


Fig. 8 各施工工程の所要時間と全工程に占める割合
Time Required and Percentage of Each Execution Work Stage

測定値は開端杭の測定値と大差がないことがわかる。これは、提案工法によって先端閉塞状態で杭を比較的緩い地層に打設した場合、振動・騒音の大きさは、開端杭を支持層まで打設した場合と同程度であることを示している。また、実験の振動レベルは振源から15m程度で規制値を下回っているが、騒音レベルは音源から100m離れなければ規制値を下回っていないことがわかる。この原因としては、実験場に隣接した建物の反響が影響していたものと考えられる。

以上から、提案工法の最大振動・騒音レベルは、通常の開端杭の場合と同程度であり、本工法の採用に際して、振動・騒音の問題は、開端鋼管杭の打撃施工が可能な敷地条件であれば、大きな障害とはならないと考えられる。

5.1.4 施工管理手法 最初に打設した杭（杭番号1）および最後に打設した杭（杭番号32）に関して、打撃に要したエネルギーと地盤のN値との相関を、それぞれ事前（杭打設前：PB-1, PU-3, PA-3, Fig.5参照）および事後（全杭打設完了後：PC-1, 3, 4）の地盤調査結果に基づき検討した。累計打撃エネルギー（(1)式）と(2)式により算定した「積分N値」との関係を図11に示す。

$$\text{積分N値} : N(z) = \sum (N \cdot \Delta Z) \quad (\text{回} \cdot \text{m}) \quad \dots (2)$$

ここで、N : N値 (回) ΔZ : N値測定間隔 (m)

Fig. 11から、累計打撃エネルギーと積分N値の間には明らかに相関が認められ、杭の打設によって地盤が締固まっても、累計打撃エネルギーと積分N値の関係は一義的に定まることがわかる。したがって、提案工法を適用する場合、累計打撃エネルギーを用いて、杭打設によるN値の増加を積分N値の形で評価すれば、施工管理の指標となりえると考えられる。

5.2 地盤の締固め効果

5.2.1 間隙水圧・加速度 提案工法によって杭を打設した影響が地盤中でどのように伝達されるかを調べるため、地中に間隙水圧計と加速度計を埋設した。埋設位置は実験工事ヤードのほぼ中央で、埋設深度はGL-4m (PU, PA-1), -8m (PU, PA-2), -13m (PU, PA-3)の3深度である。PU, PA-1は置換土 (Bc1層), PU, PA-2は礫混りシル

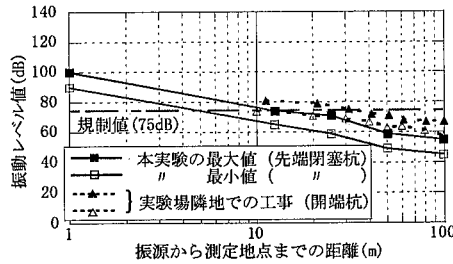


Fig. 9 振動測定結果
Measurement Results of Vibration

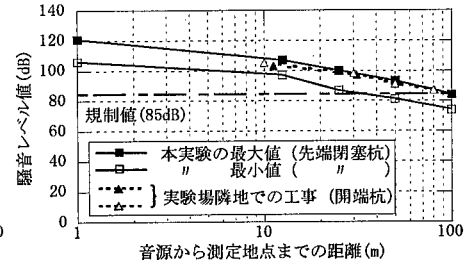


Fig. 10 騒音測定結果
Measurement Results of Noise

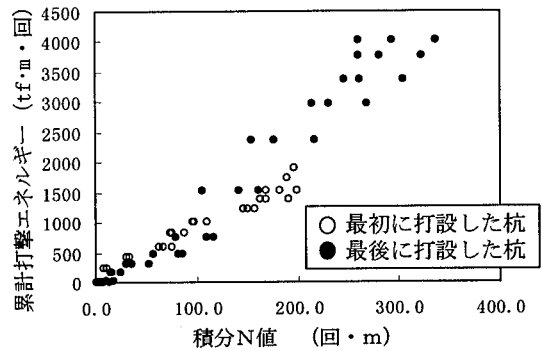


Fig. 11 累計打撃エネルギーと積分N値との関係
Relationship between Integrated Driving Energy and Integrated SPT N-value

ト質砂からなる埋土 (Bg層), PU, PA-3はシルト質微細砂からなる埋土 (Bs層)の各層に設置されている (Fig. 5, 6参照)。

杭 (杭番号22) を打設した際に計測した間隙水圧と杭打設深度との関係をFig. 12に示す。同図は、杭打設前からの増加間隙水圧を計器設置深度の有効土被り圧で除した「増加間隙水圧比」で整理している。増加間隙水圧比は杭先端が計器設置個所の近傍になった時にその値が最も大きくなる傾向にある。間隙水圧の上昇は、地盤が緩い状態から密な状態に変化していくことを現し、この値が大きい領域ほど地盤が締固められていると考えることができる。したがって、杭の打設による地盤締固め効果は、杭先端付近で最も大きくなっていると考察される。

杭 (杭番号30) を打設した際に計測した加速度と杭打設深度との関係をFig. 13に示す。同図には杭の打撃エネルギーも合わせて示す。杭先端深度がGL-10m付近では打撃エネルギー (貫入抵抗) が極端に大きくなっているため加速度も大きくなっているが、全体的にみると、杭先端が各計器の設置深度より深くなるに従って加速度が低下する傾向にある。

それぞれの杭の打設中に発生した最大間隙水圧から求めた増加間隙水圧比と、杭からの水平距離との関係をFig. 14に示す。ばらつきはあるものの、杭からの水平距離が大きくなるに従い間隙水圧の値が急速に低下する傾向がわかる。特に4~5m以上離れると増加間隙水圧比はほとんどゼロに近くになっており、この範囲が提案工法による地盤の締固め効果の影響範囲といえることができる。

杭 (杭番号9, 16, 20, 26, 30) を打設した際に計測した加速度の最大値と、杭との水平距離の関係をFig. 15に示す。間隙水圧と同様、水平距離が大きくなるに従って加

速度は低下し、4~5m以上離れるとその値はほとんどゼロに近づいている。

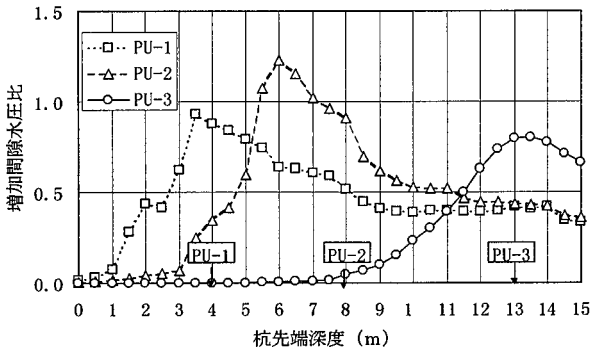


Fig. 12 杭打設時の増加間隙水圧比
Ratio of Increase in Pore Water Pressure during Pile Driving

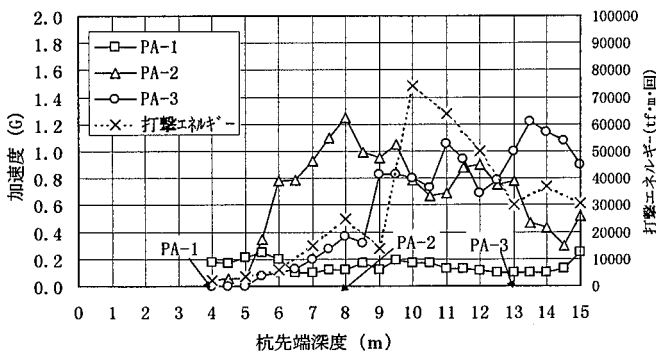


Fig. 13 杭打設時の地中加速度
Acceleration in the Ground during Pile Driving

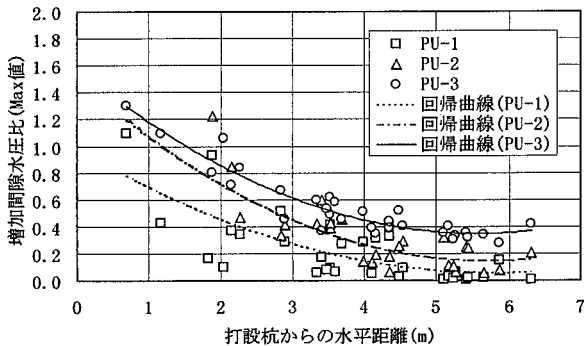


Fig. 14 増加間隙水圧比~打設杭からの水平距離
Relationship between Ratio of Increase in Pore Water Pressure and Horizontal Distance from Pile

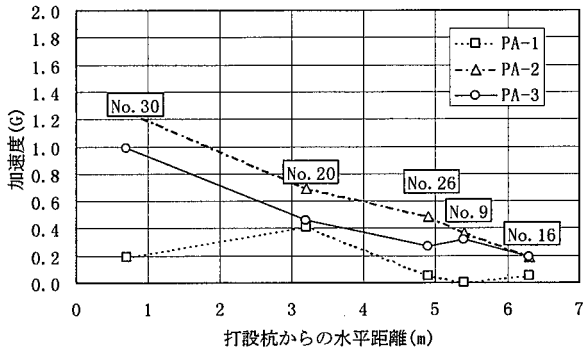


Fig. 15 加速度~打設杭からの水平距離
Relationship between Acceleration and Horizontal Distance from Pile

5.2.2 標準貫入試験 複数のボーリング孔で得られた杭打設前後のN値の深度分布とそのN値の各地層ごとの平均値をFig. 16に示す。図中の破線が杭打設前(事前)の平均N値, 実線が杭打設後(事後)の平均N値である。地層が複雑なためばらつきはあるものの、ほとんどの層で事後のN値は大きくなっている。特に砂質土層(Bs層)と砂礫層(Bg層)のN値は大きく上昇しており、地盤の締固め効果を明確にみることができる。それに対して、粘性土層(Bc, Ac層)のN値はあまり変動がなく、杭打設による地盤の締固め効果は粘性土に対しては、期待できないことがわかる。

提案工法によるN値の増加を、サンドコンパクションパイル工法(SCP工法)における実績と比較したのがFig. 17⁸⁾である。実験での杭打設による置換率は7.8%(直径0.6m, 1.9mピッチ)となるが、砂質土層(Bs層), 砂礫層(Bg層)の事後N値はSCP工法の実績よりかなり大きな値になっている。これは、杭の打設順序が一般的なSCP工事の場合と異なり、外周から中心部に向かって渦巻き状であったため、中心部の締固め効果が高くなったことが影響したものと思われる。この点については今後検討が必要であるが、総合的判断としては、提案工法は砂地盤の液状化対策としてSCP工法と同等以上の地盤締固め効果を有しているといえよう。

5.2.3 PS検層 杭の打設によって、N値と同様にS波速度(Vs)も大きく上昇している。この様子を従来のデータ⁹⁾と比較したのがFig. 18である。一般に、N値とVsの間には両対数グラフ上で直線関係があるといわれている。実験結果も同様な傾向となっている。また、杭打設後のVsは明らかに大きくなっており、この結果からも提案工法による締固め効果が確認できる。

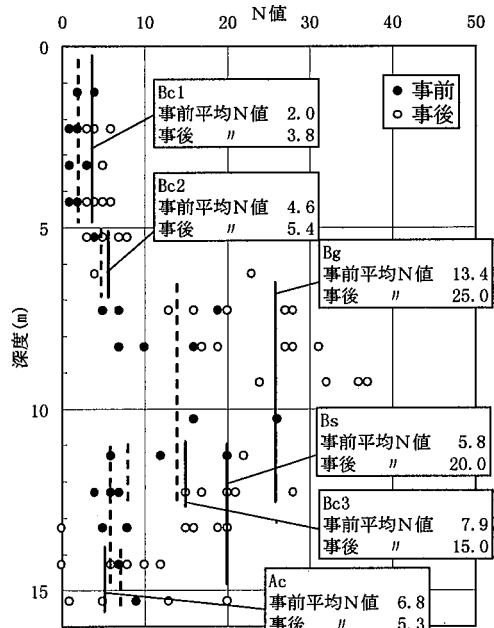


Fig. 16 杭打設前後のN値の深度分布
Depth Distribution of SPT N-value Before and After Pile Driving

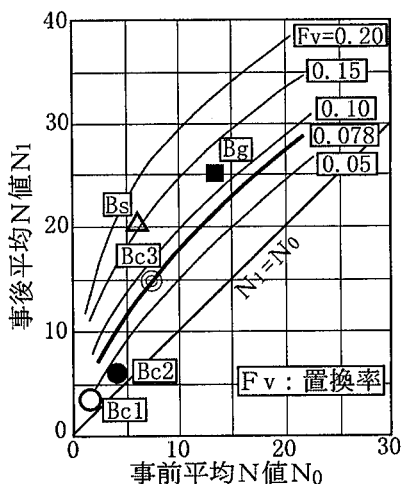


Fig. 17 事前N値と事後N値
Relationship of SPT N-value between
Before and After Pile Driving

6. 設計手法の提案

提案工法の設計は、液状化対策としてSCP工法の設計を行う際に、杭の締固め効果を加味して、その施工数量を低減するといった手法で行う。場合によっては、杭の打設のみでSCP工法が不要になるケースも考えられる。具体的には、SCP工法の設計手順を準用し、SCP本数nを求める際に、(3)式によって、杭による地盤の締固め効果を加味する。杭による変形抑制効果も液状化対策としての設計に取込むべきではあるが、現状では未解明な点が多く、実用設計法に導入するにはさらに検討が必要である。なお、本実験では、杭の打設順序が地盤の締固めが最も期待できる渦巻き状としたこともあつてか、(3)式中のSCPと基礎杭の施工法の違いによる低減係数 α の値として、1以上が得られている。

$$n = \frac{(A \times a_s - \alpha \times n_p \times A_p)}{A_s} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

- n : SCP本数 (本)
- A : 改良域の面積 (m²)
- A_p : 基礎杭の断面積 (m²)
- A_s : SCPの断面積 (m²)
- n_p : 基礎杭本数 (本)
- α : SCPと基礎杭の施工方法の違いによる低減係数
- a_s : 基礎杭を無視した場合のSCP必要置換率

7. まとめ

実験では、先端閉塞治具の挿入不能および引抜き不能といった重大なトラブルは発生せず、また、実験終了後に引抜いた杭も健全な状態にあり、先端閉塞治具による影響は見られず、提案工法の施工については概ね問題のないことが確認できた。

提案工法の地盤の締固め効果についても、従来のSCP工法と比べて遜色がなく、液状化対策に大きく寄与することが明らかとなった。本実験により、提案工法は実用化に向けて大きく前進できたものと考えている。

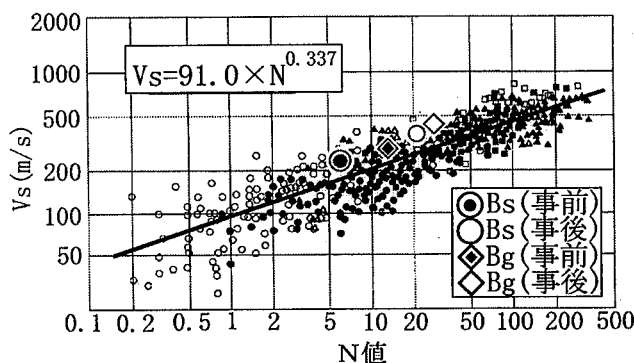


Fig. 18 VsとN値の関係
Relationship between Vs and SPT N-value

謝 辞

本研究に関しご指導を頂きました東京工業大学 時松孝次教授に謝意を表します。共同で研究させて頂いた東京電力株式会社、東電設計株式会社の関係各位、および、実験工事に協力して頂いた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 西田：砂地盤に及ぼすクイの締固め範囲の計算，土と基礎，Vol.13-8，p.33～37，(1965)
- 2) 山口：無限土中における空洞押拡げの弾塑性解析と応用，土木工学科研究，報告No12，東工大，p.1～11，(1973)
- 3) 藤田，他：模型杭の設置による周辺砂地盤の変化，第26回土質工学研究発表会，p.1377～1378，(1991)
- 4) 藤田，他：模型杭の打込みに伴う地盤の密度変化(第1報)，第24回土質工学研究発表会，p.1373～1374，(1989)
- 5) 前嶋，他：模型杭の打込みに伴う地盤の密度変化について，土木学会第44回年次学術講演会，p.842～843，(1989)
- 6) 森重，他：打込み杭による砂層の液状化防止効果，基礎工，Vol.12，No.7，p.74～79，(1984)
- 7) 高橋，他：液状化地盤における打込み杭による地盤改良，構造物設計資料，第44号，日本鉄道施設協会，p.23～26，(1975)
- 8) 軟弱地盤ハンドブック編集委員会：軟弱地盤ハンドブック，建設産業調査会，p.373～386，(1981)
- 9) Imai, T. : P-and S-Wave Velocities of the Ground in Japan, Proc. 9-th ICSMFE, Vol. 1, p. 257～260, (1977)
- 10) 成川，他：先端閉塞治具を用いた鋼管杭の打設による地盤の液状化対策(その1～3)，第33回地盤工学研究発表会，p.915～920，(1998)
- 11) 石川，他：先端閉塞治具を用いた鋼管杭の打設による液状化対策工法(その1～3)，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，p.599～604，(1998)