

密度増大工法改良地盤における間隙水圧計測を伴う動的コーン貫入試験の適用事例

中澤 博志¹・足立 雅樹²・高木 俊夫¹・入澤 一明³・齋藤 正幸³

¹正会員 復建調査設計 東京支社 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-8-15)

E-mail: nakazawa@fukken.co.jp

²正会員 みらい建設工業 建設本部 (〒160-0004 108-0014 東京都港区芝4-8-2)

E-mail: ma-adachi@mirai-const.co.jp

³正会員 国土交通省 関東地方整備局 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-3-1国際空港第二庁舎4F)

E-mail: irisawa-k8310@pa.ktr.milt.go.jp

密度増大工法の一つに静的圧入締固め工法がある。本工法は、低流動性の注入材を地盤中に静的に圧入することにより周辺地盤を圧縮強化する工法であり、近年の設計の合理化の中、通常の改良率よりも低い改良率における設計・施工が行われてきているが、いずれも、鉛直削孔後、注入・造成を行うことを基本としているものである。しかし、現場の状況により、必ずしも鉛直施工が出来ない場合も多いため、誘導式自在ボーリングによる曲線ボーリングと同工法を組み合わせた方法について試験施工を行い、間隙水圧計測を伴う動的コーン貫入試験による改良効果確認調査を実施した。試験結果にばらつきが認められたものの、ある程度の地盤改良厚があるケースについて、改良効果を確認することができた。

Key Words : liquefaction, densification method, dynamic cone penetration test, horizontal drilling

1. はじめに

一般に、空港における供用中の既設滑走路・誘導路の液状化対策は、航空機の離発着に支障の無い深夜の数時間に施工せざるを得ないのが現状であり、施設を供用しつつ、施設を傷めずかつ短期間に完結し得る工法の出現が望まれる。空港で比較的実績の多い液状化対策として、密度増大工法の一つである静的圧入締固め工法がある。本工法は、低流動性の注入材を地盤中に静的に圧入することにより周辺地盤を圧縮強化する工法であり、近年の設計の合理化の中、通常の改良率よりも低い改良率による設計・施工が行われてきた。しかし、施工方法に関しては、鉛直削孔後、注入・造成を行うことを基本としており、滑走路面からの削孔を伴う方法をとらざるを得なかった。そこで、今回、施工の際、滑走路への削孔を避けて施工することを目的とした誘導式自在ボーリングによる曲線ボーリングと静的圧入締固め工法を組み合わせた方法（以下、曲線CPG工法）を試験施工し、施工時の滑走路への影響把握を行うとともに、所定の改良効果の確保について、サウンディング手法である間隙水圧計測を伴う動的コーン貫入試験による確認調査を実施した。

なお、地盤改良効果確認調査にサウンディングを導入

する意義については、低改良率や施工方法が通常と異なる場合に、地盤改良の品質におけるばらつき対し、一本のボーリング調査で改良域全体の評価を代表させることが困難であることによる¹⁾。本来、ボーリングを複数本実施することが望ましいが現実的でないため、簡便・迅速で安価なサウンディングを多点で実施し、改良体に対する測定値の空間分布をきめ細かく確認することが望ましいと考えられる。

2. 試験施工およびの概要

試験施工は東京国際空港内で実施された。以下に試験施工と調査の概要を示す。

(1) 試験施工

静的圧入締固め工法は²⁾、図-1に示すように、スランプ5cm以下の極めて流動性の低い注入材（モルタル）を振動や衝撃を全く加えず液状化層内に圧入し、固結体を造成することで周辺地盤を圧縮、密実化させる工法である。その特徴として、大規模な施工機械を必要としないこと、振動や騒音があまり生じないため周辺地域への影

響が少ないこと、および他の工法では困難である供用中の施設への施工や狭隘な場所における施工が可能であること等が挙げられる。なお、本試験施工の改良率 a_3 は、6%で設計された³⁾。

先にも述べたとおり、図-2(a)に示す従来の鉛直施工では、改良対象上にアスファルト等を有する場合、孔を開け施工を行うが、(b)に示す曲線CPG工法は、削孔による施設を傷めることを避けるため、少し離れた場所から改良層を狙って曲線削孔により施工する事を目的としている。削孔工は、飛行機の運航の妨げにならないことから24時間の施工が可能である。特長として、最少曲率半径 $r_{min}=30m$ 、削孔長 $L_{max}=150m$ の三次元曲線削孔が可能であること、細粒分含有率 $F_c=50\%$ 程度の地盤まで適用可能であること、および施工後、地中に注入管が残らないことが挙げられる。

対策断面として、図-3に示す様に、水平施工における施工時の地表面変状および改良効果を確認するため、2段(地盤改良層厚2m相当)、3段(地盤改良層厚3m相当)および4段(地盤改良層厚4m相当)の改良を行った。施工時には、スランプ試験で確認した注入材をポンプで圧送し注入および充填を行ったが、その際の注入圧力は6MPa以内とし、所定の注入量を確保した後、33.3cmの引き抜きを繰り返して、固結体を造成した。

(2) 地盤改良効果確認調査

改良効果確認調査は、改良層厚毎に施工前後においてボーリング調査、サウンディングとして間隙水圧計測を伴う動的コーン貫入試験(以下、PDC)、および物理探査は小規模微動アレイ観測と表面波探査を実施した³⁾。本論文では、PDCについて詳述するため、以下に試験方

法を簡単に説明する。

図-4に示す様に、PDC⁴⁾は、打撃貫入時に先端コーン位置で間隙水圧応答を計測するサウンディング装置である。地盤定数として、 N 値、地下水位、細粒分含有率 F_c

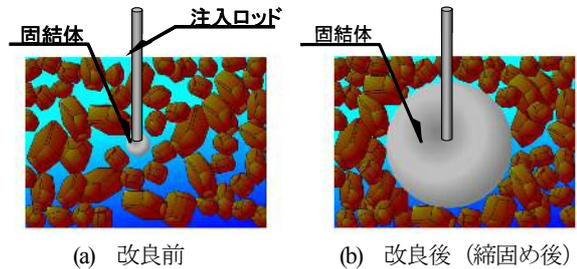
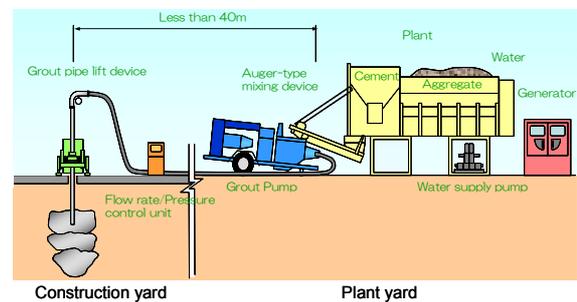
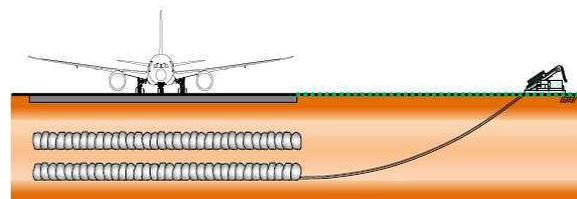


図-1 改良の概念



(a) 鉛直削孔



(b) 曲がり削孔

図-2 施工概要

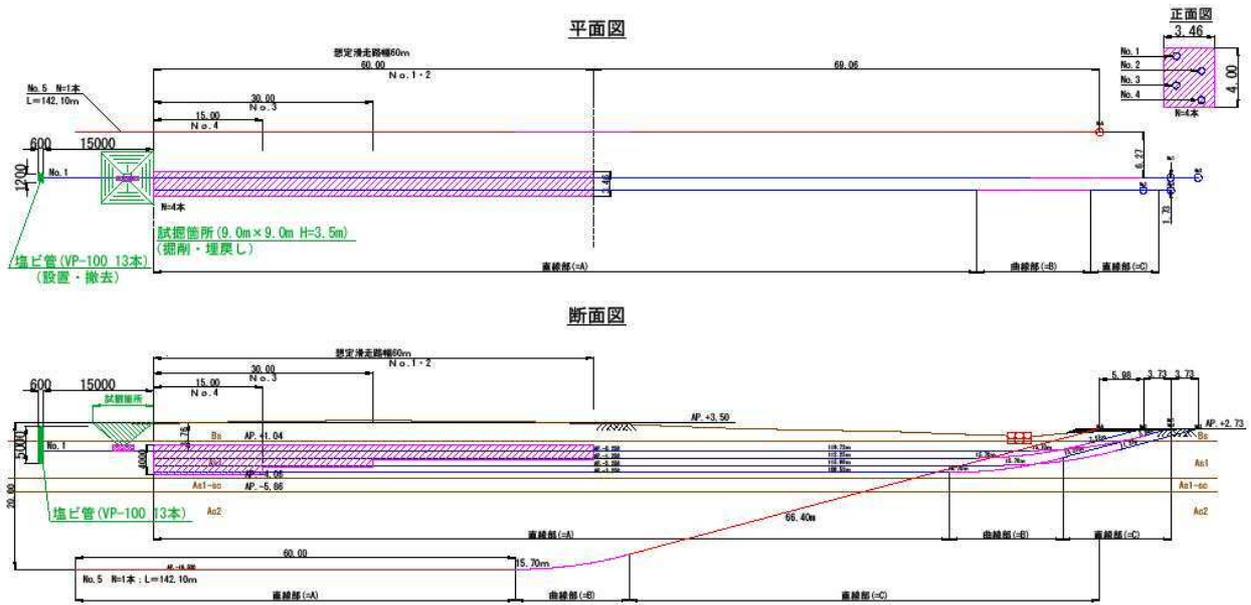


図-3 施工断面

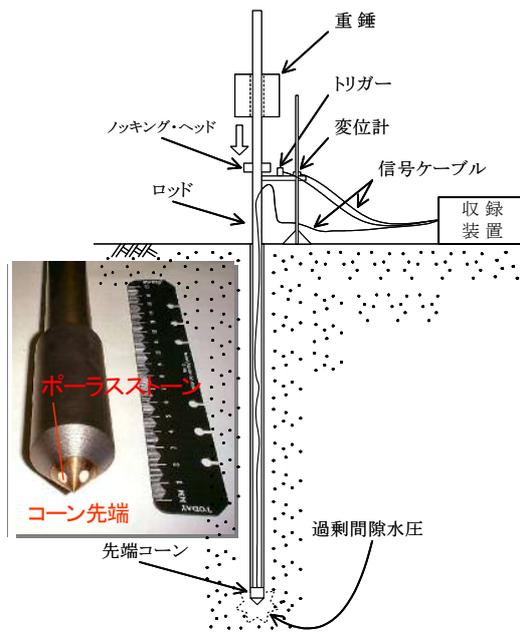


図-4 ピエゾドライブコーン装置の概要

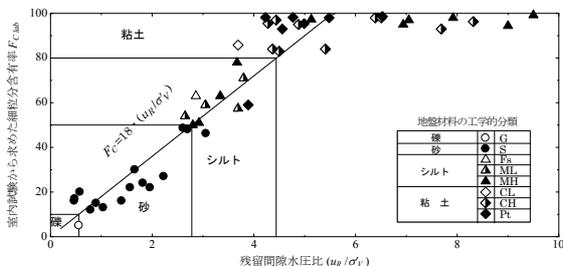


図-5 残留過剰間隙水圧と細粒分含有率の関係⁴⁾

等を簡易かつ短時間で取得が可能であるため、原位置計測により液状化判定が簡易に短時間で評価できる利点がある。本手法を導入した理由として、改良率が低めであること、また、改良層が薄層であることから、通常の1mピッチのN値による改良効果の評価が困難であると判断されたためであり、多数のデータを取得することばらつきの評価も可能となる。

PDCの貫入機構は、動的貫入試験装置の先端コーン部に打撃貫入時に発生する地盤の過剰間隙水圧を測定する調査方法であり、重錘落下による動的貫入試験装置の先端コーン部に間隙水圧計が設置され、打撃貫入時の間隙水圧を計測する。コーン先端での動的な間隙水圧応答値は電気信号として中空のロッドを通した信号ケーブルを伝わり地上の収録装置でA/D変換され記録される。なお、先端コーン寸法は、φ36.6mmである。使用する重錘は、ミニラムサウンディングと同様に、重さ30kgであり、高さ35cmから自由落下させて先端コーンが地盤内に20cm貫入する打撃回数 N_m 値を計測する方式である。1mのロッドの継ぎ足し時に周面摩擦補正のためのトルク M_f を計測し、式(2)により N_m 値は標準貫入試験SPTによるN値相当の N_d 値に換算される。

$$N = N_d = \frac{1}{2} N_m - 0.16 M_f \quad (2)$$

また、PDCでは、動的打撃時には重錘がノッキング・ヘッドに打撃するタイミングでトリガーがかかり、打撃直後の貫入変位量および間隙水圧量を $\Delta t=100\mu\text{sec}$ でデータ収録する。打撃貫入時の過剰間隙水圧消散は地盤の透水係数 k に主に依存するものとして、図-5に示すように打撃から0.2s後の残留値である累積間隙水圧比 u_q/α' と F_c に高い相関があることが示されており、土質区分も判別されていることから、液状化判定も可能となる。

(3) 地盤改良対象層の地盤条件

事前に実施された調査地の地層は、上位よりBs（舗装を含む）、As1、As1-sc、Ac2およびAscの5層に分類される。図-6に今回の地盤改良箇所を含む地層想定断面図を示す。この地層想定断面図によると、液状化層はAs1およびAs1-scであった。今回の地盤改良対象層であるAs1の特徴として、シルトを含んだ砂層で腐植物や貝殻片を混入し、N値は1~12程度であった。次に、図-7に物理試験結果の深度分布図を示す。As1層では F_c が20~40%の範囲で分布しているが、非塑性であることがわかる。また、図-8に液状化対策の対象層であるAs1層の粒経加積曲線を示す。20%未満の細粒分を含むが、全体的に港湾基準⁵⁾の”液状化可能性あり”の範囲に属していることがわかる。

3. 地盤改良効果確認調査結果

試験施工に伴い実施した地盤改良前後のボーリング調査およびPDCの結果を以下に述べる。

図-9に地盤改良試験工事前後におけるボーリングおよびPDC試験結果の深度分布図を示す。同図では、N値、 N_d 値分布の重ね合わせ、また、4.0、3.0および2.0mの3種類の改良範囲を赤線で示している。なお、PDCにより推定された F_c は、どのケースにおいても非常にばらついており、特徴が見出せないことから、ここではN値と N_d 値の比較を中心に述べるものとする。

(a)に示す4.0mの改良層におけるN値と N_d 値の深度分布を見ると、地盤改良前後において、両者ともに、若干の増加傾向を示し、また、施工前後で殆ど同様な分布傾向を示している。N値と N_d 値の相関については、 N_d 値にばらつきが認められるものの、1mピッチのN値の該当深度において、施工前後で高い相関を示している。したがって、N値で改良効果が認識できる状況であれば、N値深度間の補間データとして、より細かい地盤性状の確認が可能であることがわかる。

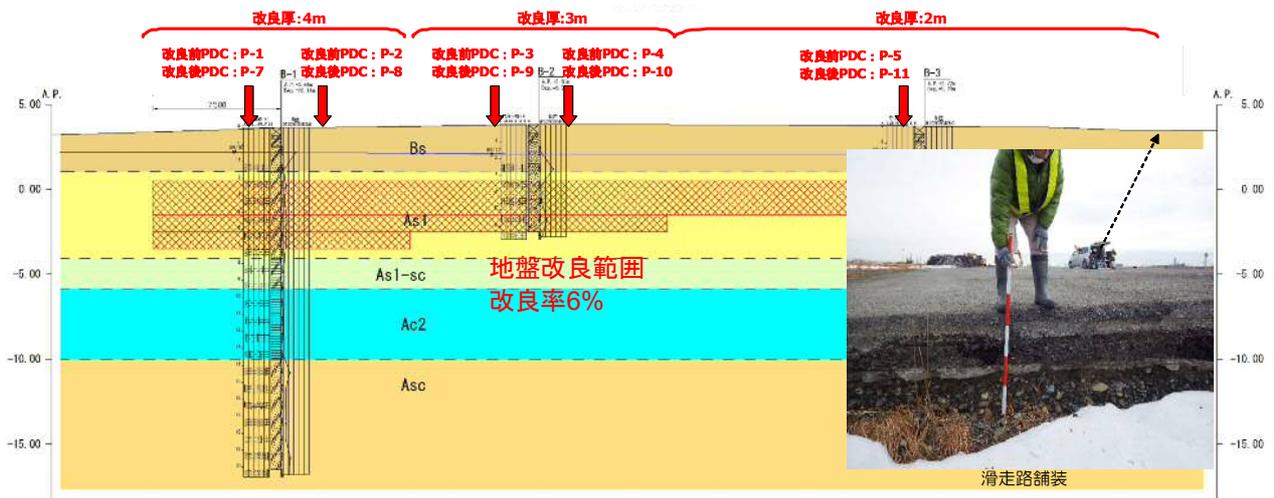


図-6 地層想定断面図

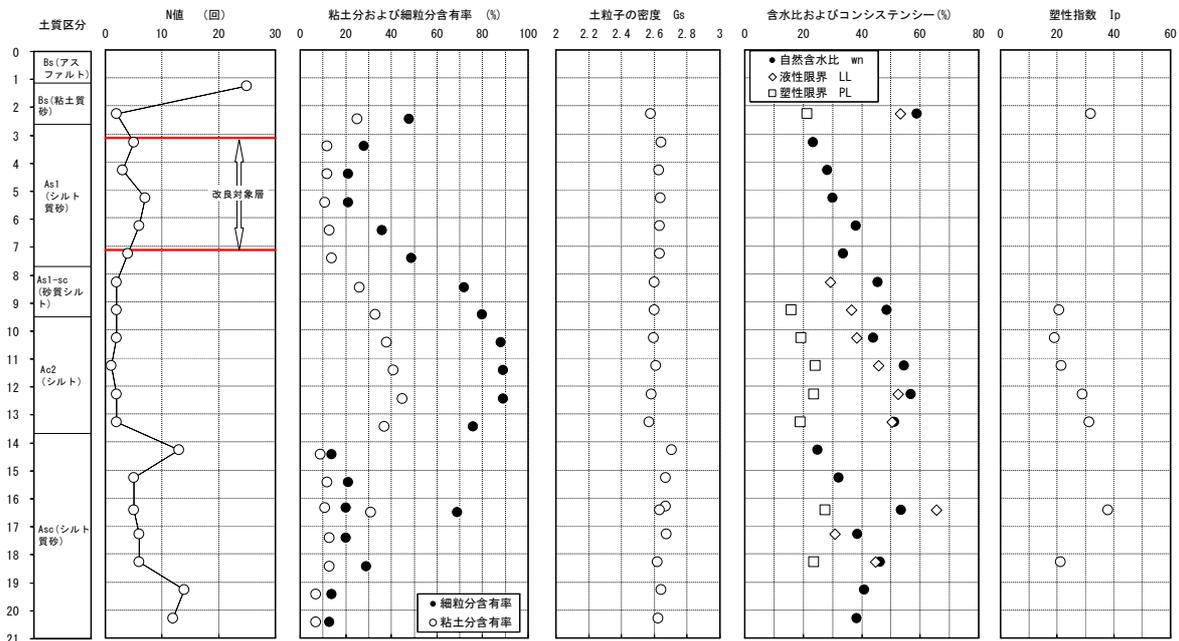


図-7 施工前の調査・試験結果の一例 (P-1地点)

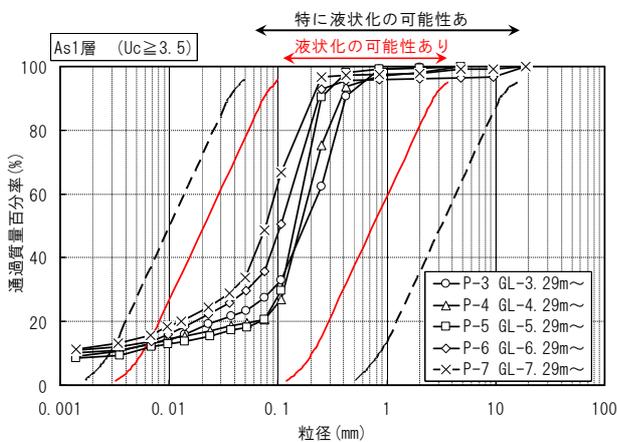


図-8 粒徑加積曲線

(b)における3.0mの改良層における試験結果を見ると、 N 値では地盤改良効果が確認できるものの、 N_d 値では、改良範囲下部において若干の増加傾向が見られるものの、全体的には施工前後での明瞭な変化の確認が出来ない。細粒分含有率の分布を見ると、 F_c が他地点と比べ高い地盤条件であることに起因していると考えられる。

(c)に示す改良層厚2.0mでは、地盤改良範囲の浅い部位で事後の N 値が減少する傾向が見られている。一方、 N_d 値を確認すると、GL-3.6~4.0mおよびGL-5.0m前後において、著しい増加が確認出来る。当該箇所は、 F_c が10%前後と比較的低い傾向にあることから、局部的に地盤が締まったものと判断される。

以上より、 N 値の測定深度間において、連続的かつ局所的な N_d 値の変化が明瞭に見られることから、 N 値だけでは表せない地盤のばらつきの影響や局所的な改良効果が確認可能であることが示された。

4. 地盤改良効果の評価

これまでにまとめた本試験施工における地盤改良前後の調査・探査結果から、それぞれの指標の感度や特徴は異なるものの、改良層が厚ければ、変化を捉えることが可能であることがわかる。以下に各指標の特徴を考慮し、改良効果について確認した。

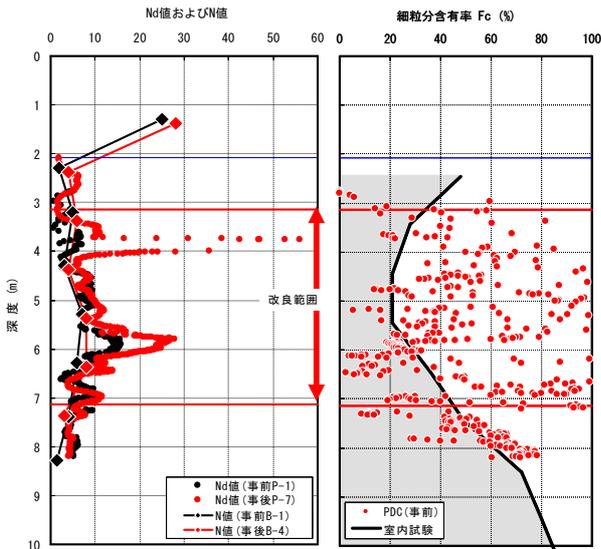
(1) N 値による評価

同一深度における地盤改良前後の N 値の比較を図-10に示す。改良層厚2mにおいて、地盤改良後に著しい N 値の低下が見られるが、全体的には層厚の違いに拘わらず、増加している様子が見られる。しかし、 a_s が6%と低いことから、幾つかの既往の調査結果に比べ、 N 値の増加程度はそれほど大きくないことがわかる。

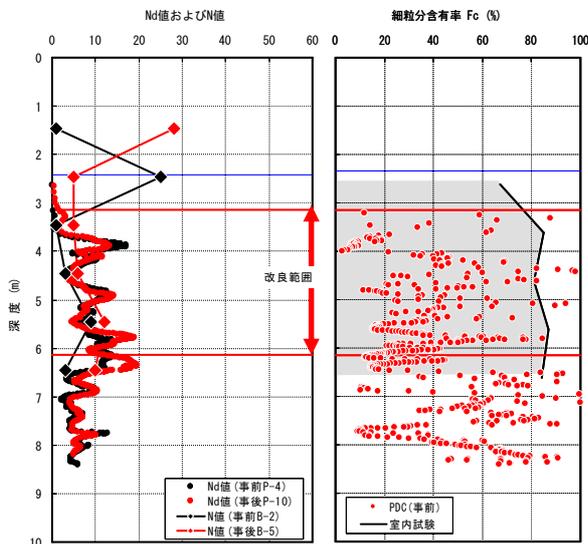
(2) N_d 値による評価

PDCによる N_d 値は、図-9の深度分布図にも示されているように、 N 値の分布に対し対象地盤を連続的に評価でき、局所的な情報も捉えている。局所的に緩い場合には、地盤改良工事に際し、注入圧で施工管理されていることから、緩い部位から先行して地盤が締まるものと推察される。地盤改良後の N_d 値の変化を検討するにあたり、地盤改良前後における同一深度の N_d 値の比較が困難であることから、図-11に N_d 値のヒストグラムを示し、地盤改良層の全体的な効果について検討した。また、(a)~(c)の各グラフ内には基本統計量も併記した。

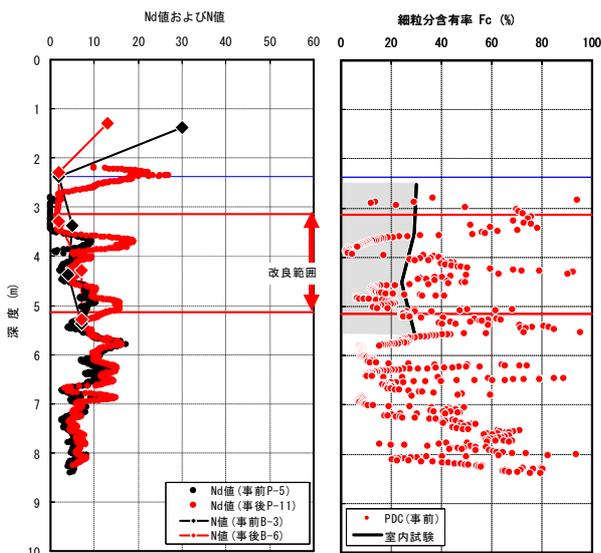
改良前の N_d 値を見ると、地盤改良層厚3ケースのうち、改良層厚3、4mについての平均 N_d 値は8~9程度示しているのに対し、2mでは6.2とやや小さい値を示している。地盤改良前後で比較すると、地盤改良層全体の平均 N_d 値増分は、地盤改良層厚2、3、4mに対し、3.5、1.4および



(a) 地盤改良層厚4m



(b) 地盤改良層厚3m



(c) 地盤改良層厚2m

図-9 地盤改良前後におけるPDC調査結果の比較

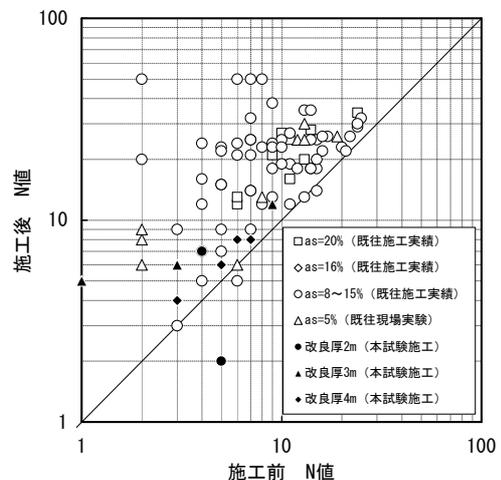
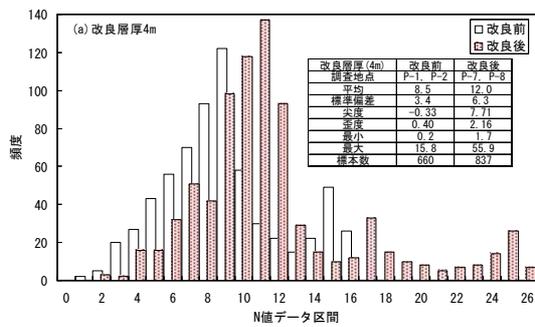
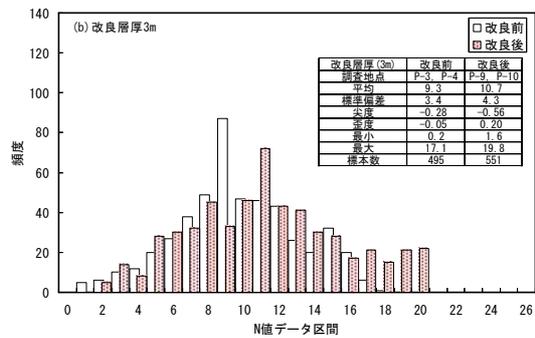


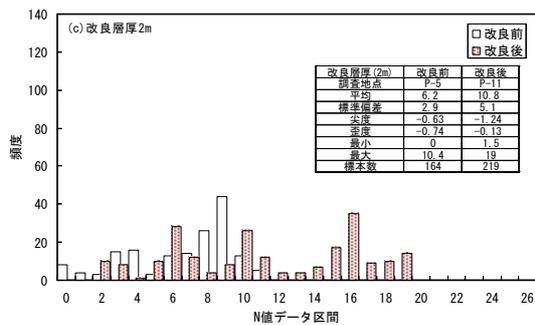
図-10 地盤改良前後の N 値の比較



(a) 地盤改良層厚 4m



(b) 地盤改良層厚 3m



(c) 地盤改良層厚 2m

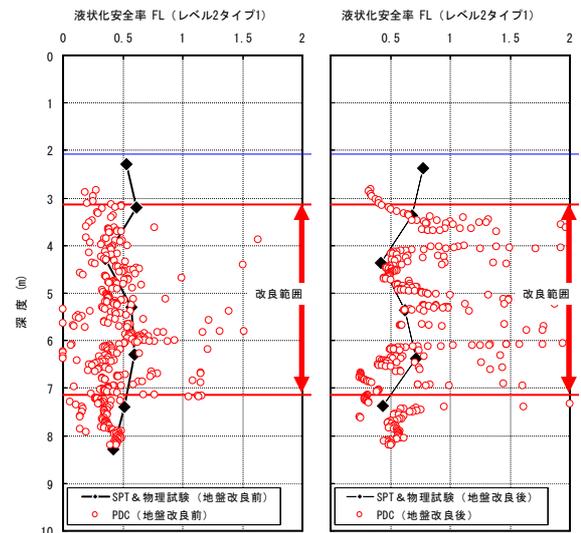
図-11 地盤改良前後における N_v 値の分布傾向

4.6であった。(b)の地盤改良層厚3mでは、地盤改良前後における平均 N_v 値の増加が少なかったが、他の2ケースに比べ、地盤改良層の F_c が大きいことに起因している可能性もある。

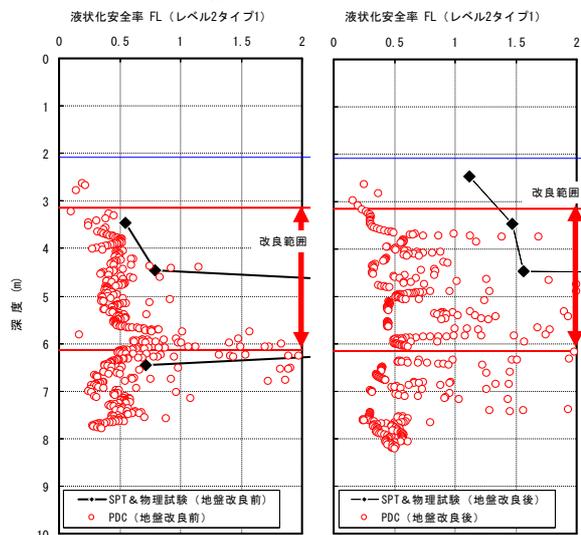
N_v 値の分布傾向全般を見ると、地盤改良層厚3mおよび4mでは、全体の分布傾向が地盤改良後に右寄りかつ尖度が大きい傾向を示し、地盤改良層が全体的に密になった様子がわかる。一方、地盤改良層厚2mにおいては、明瞭な変化は示さず、所期の地盤のばらつきを地盤改良後も引きずっており、地盤改良効果の確認が困難であった。

(3) 液状化判定

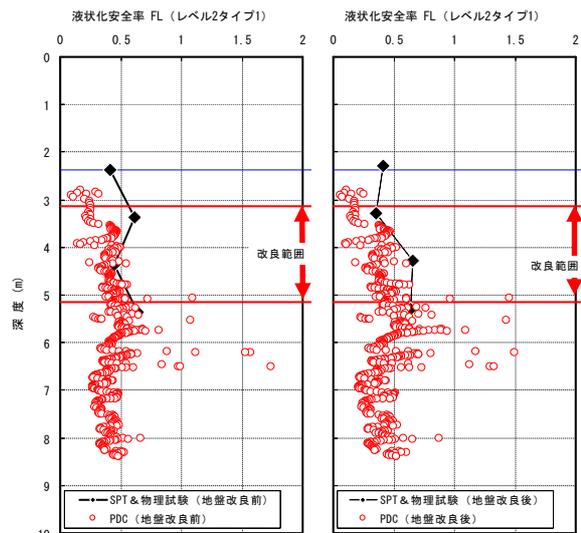
PDCとSPTの大きな違いは、 N 値あるいは N_v 値の空間分解能力である。この空間分解能力の影響を確認するため、両調査手法において、道路橋示方書⁶⁾に基づきレベル2タイプ1地震動による地盤改良前後の液状化判定を実



(a) 地盤改良層厚 4m



(b) 地盤改良層厚 3m



(c) 地盤改良層厚 2m

図-12 地盤改良前後における液状化判定結果の比較

施した。液状化判定では、SPTは N 値および室内試験による F_c を用い、PDCは地盤改良前後の N_v 値と F_c の推定値

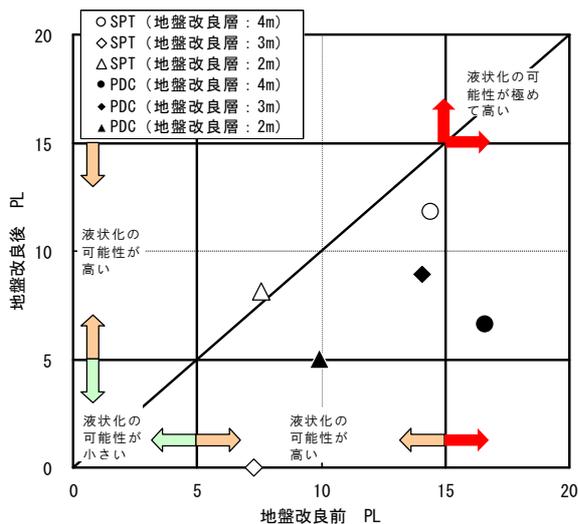


図-13 地盤改良層厚と P_L 値の関係

を用いている。

図-12に地盤改良層厚4m~2mの液状化判定結果を示す。調査手法や地盤改良の有無に拘わらず、全体的にPDCの F_L のばらつきが大きいものとなっている。これは、 F_L の推定値の分布傾向が原因であると考えられる。

各地盤改良層厚毎に地盤改良範囲内の F_L 分布を見ると、地盤改良層厚4mのSPTは地盤改良前後で F_L の分布は0.5前後でありあまり変わらないが、PDCでは地盤改良後に F_L 分布が大きくなっている。SPTの結果と比較すると、地盤改良前ではSPTの F_L 分布はPDCの分布の上限付近に分布し、地盤改良後では下限に相当している様子が見える。地盤改良層厚3mでは、地盤改良前の F_L 分布は、SPT、PDCともに1m毎では良く一致しているが、地盤改良後の F_L 分布には大きな差が確認できる。この両者の相違は、SPTの地盤改良前後の調査孔間の地盤の違いやばらつきが無視できなかったことが主要因として推察される。地盤改良層厚2mでは、1m毎で見ると、地盤改良後におけるPDCの F_L 分布にばらつきが生じているものの、地盤改良前後の F_L 分布はSPT、PDC共に良く一致している様子が見える。以上より、地盤改良層厚3mの事例は例外的ではあるが、SPTの1m毎の位置における F_L は非常に調和的であることがわかる。

一方、地盤改良効果の評価にあたり、地盤改良範囲を連続的に評価できていることが重要である。上述の結果では、地盤改良層厚3mのケースを除き、同一深度におけるSPTとPDCの F_L は調和的であったが、地層全体を評価する際には、連続的な評価が必要である。そこで、図-12に示す液状化判定結果を基に改良範囲内の P_L を算出し、空間分解能について検討した。なお、 P_L の算出方法は道路橋示方書⁶⁾の通りとし、液状化の可能性の判断基準として、 P_L は0~5で「小さい」、5~15で「高い」、また、15以上で「極めて高い」と評価される。

図-13に地盤改良前後の P_L の比較を示す。地盤改良層厚3mの結果を除き4mと2mのプロットを見ると、SPTによる F_L は1:1のライン付近にプロットされ、地盤改良前後で地盤改良層の評価はあまり変わらない。一方、PDCの F_L は、地盤改良前ではSPTと比較的同等な値を示しているが、地盤改良後には P_L は低下し、改良層全体での液状化抵抗が増加している。

したがって、SPTとPDCの1m毎の N 値が調和的であること、および地盤改良後の P_L は、両調査手法間で異なる評価を与えることから、地盤改良前後で地盤性状を深度方向に連続的に評価しておくことが、地盤改良効果を評価する上で非常に有効であることが示唆された。

5. まとめ

今回、滑走路への削孔を避けて施工することを目的とした誘導式自在ボーリングによる曲線ボーリングと静的圧入締固め工法を組み合わせた方法を試験施工した。その地盤改良効果の確認について、通常実施されるボーリング調査の他に、PDCの適用を試みた。今回の試験施工の N 値増加傾向については、既往の施工実績と調和しており、設定改良率、現位置の K 値に合致した改良後 N 値を示し、かつ、曲がり削孔で水平に注入締固めを実施した場合にも、概ね鉛直削孔と同様な地盤改良効果が得られた。PDCに関する成果について、以下に示す。

- N 値による地盤改良効果の評価では、全体的な傾向として、改良層厚が厚いほど N 値増加が確認され、この傾向はPDCでも同様であった。
- PDCによる N_d 値の分布傾向については、地盤改良後、地盤改良層厚に応じた増加傾向を示した。 N_d 値にばらつきが認められるものの、 N 値との相関を見ると、1mピッチの N 値の該当深度において両者は一致した。
- 液状化判定から得られる地盤改良前後の P_L から、 N 値による地盤改良前後での改良効果はあまり変わらないと判断された。しかし、PDCによる P_L は、地盤改良前において、 N 値によるものと比較的同様な値を示すが、地盤改良後には低下し、液状化による被害の可能性が低くなる結果を得た。したがって、地盤全体としての評価を考えると、 N 値による地盤改良効果の評価に対し、PDCの方が深度方向に連続的かつ高い空間分解であるため、より厳密な地盤改良効果確認が可能である。

以上より、 N 値では空間的な分布の評価が困難な場合があるが、PDCでは深度方向により精度の高い地盤改良効果を評価し得る可能性が確認できた。地盤改良効果を把握する上では、確実性からいって実績が豊富で試料観

察も可能な標準貫入試験が基本を考えられる。しかし、今回の調査から、低改良率による地盤改良効果のばらつきを等を含めて議論する場合には、 N 値の空間補間手法としてPDCの適用も十分に可能であると考えられるため、地盤改良工事における調査実績を積むことが重要であると考えられる。

なお、本試験施工では、現場における施工性および調査手法の適用性を確認することを目的としており、地盤改良後にも液状化する結果が示されている。本施工の際には、より本質的な改良効果が得られる地盤改良仕様・設計について議論する必要がある。

謝辞： 今回の試験施工および確認調査の実施にあたり、国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所関係者の多大なるご協力を得た、記して謝意を述べさせていただきます。

参考文献

1) 菅野高弘, 中澤博志: 地盤改良の効果判定のための物理

探査の現状と課題, 特集号「最近の探査手法とその応用」, 基礎工 Vol.41, No.9, 総合土木研究所, pp.22-27, 2013.

- 2) (財)沿岸技術研究センター: 液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル—コンパクショングラウチング工法—, 188p, 2007.
- 3) 足立雅樹, 渡邊英雄, 入澤一明, 齋藤正幸: 曲線ボーリングを併用した静的圧入締固め工法の液状化対策事例, 土木施工, Vol.55, No.9, pp.76-79, 2014.
- 4) (公社)地盤工学会: 地盤調査の方法と解説 第6編 サウンディング 第13章 規格・基準以外の方法, pp.462-464, 2013.
- 5) (社)日本港湾協会: 港湾施設の技術上の基準・同解説 (上巻) 平成19年7月 国土交通省港湾局監修, 第6章 地盤の液状化, pp.383-389, 2007.
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 4章 設計地震動, pp.16-35, 2012.

INVESTIGATION OF EFFECTIVENESS IN IMPROVED GROUND BY DENSIFICATION METHOD USING PIEZO-DRIVE CONE PENETRATION TEST

Hiroshi NAKAZAWA, Masaki ADACHI and Toshio TAKAGI

Generally There is known a compaction grouting method as one of the some kinds of densification methods. The feature of this method is currently designed assuming that improved ground becomes denser due to the void change, and that the amount of the volume change is equal to the volume of grouting material injected to the ground. Usually, its improvement works for pouring to the liquefiable soil layer are carried out in vertical boreholes. However, the cases which can be constructed vertical drillings are rare on a runway. Therefore, after improving using tentative method which combined curvilinear drilling and the compaction grouting experimentally, Piezo-Drive Cone Penetrator Tests instead of Standard Penetration Test were performed to confirm its improvement effectiveness. According to results before and after improvement, it is recognized that improved effectiveness and heterogeneous in improved ground were confirmed and application of Piezo-Drive Cone Penetrator Tests to improved ground was effective.