

既設戸建住宅に適用可能な高圧噴射攪拌工法の開発 ～楕円状コラムの築造を可能とする Miny（ミニー）マルチ工法～

前田建設工業株式会社	正会員	○山内	崇寛
前田建設工業株式会社	正会員	川西	敦士
前田建設工業株式会社	正会員	太田	光貴
前田建設工業株式会社	正会員	手塚	広明
株式会社ミヤマ工業	非会員	宮	朗

1. はじめに

東日本大震災以降、既設戸建住宅の液状化対策として、周辺道路を含めた既設戸建住宅との一体事業である市街地液状化対策事業¹⁾が進められている。市街地液状化対策工法の有効な工法の1つに格子状地中壁工法²⁾がある。格子状地中壁は深層混合処理工法（機械攪拌工法・高圧噴射攪拌工法）を用いて、既設戸建住宅の敷地境界部分と周辺道路を格子状に地中壁を築造し、地震時の地盤のせん断変形を軽減することで格子内地盤の液状化を抑制するものである。

既設戸建住宅の敷地内で格子状地中壁を築造するには、施工機械がコンパクトな高圧噴射攪拌工法が不可欠である。しかし、従来工法では既設戸建住宅の狭隘な敷地内への対応は十分とは言えず、また改良体の品質が土質性状や強度に影響を受けやすいという課題もある。さらに、工事費の一部を所有者が負担する本事業では、事業成立に必要な合意を形成するために、従来工法に対して大幅なコストダウンが求められている。

このような背景を踏まえ、既設戸建住宅の敷地内で施工を可能とし、設計基準強度以上の安定した品質を確保でき、楕円状コラムにより経済的かつ効果的な格子状地中壁工法を築造(図1)することを目的に「Miny（ミニー）マルチ工法」を開発・実用化した。本報では、工法概要および楕円状コラムの開発に関わる基礎実験、品質管理方法の構築および性能確認試験について報告する。

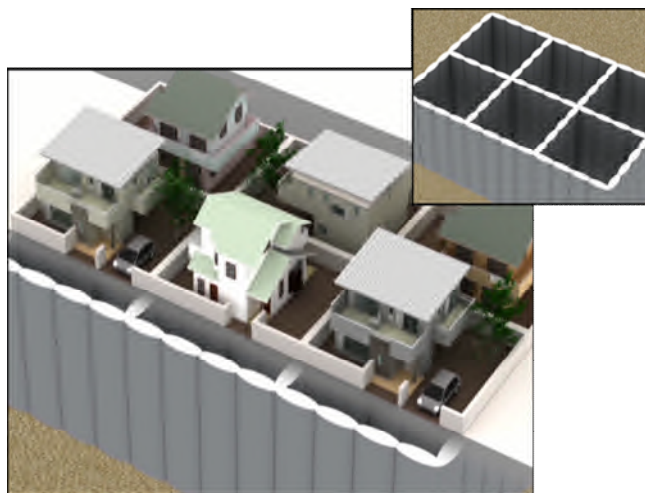


図3 楕円状コラムによる格子状地中壁の構築イメージ

2. 工法概要

本工法は、硬化材スラリーを超高圧（30～40MPa）かつ高速（約300m/s）で噴射し、噴流エネルギーを利用して原地盤を切削し、原地盤と硬化材スラリーを攪拌混合することでコラムを築造する高圧噴射攪拌工法である。既設戸建住宅の敷地境界の狭隘地で施工が可能で、独自開発のロッド回転制御による楕円状コラムにより、格子状地中壁の合理的な築造を可能とした。

平成27年2月27日には、建築分野で初となる高圧噴射攪拌工法の第三者証明「建設技術審査証明（建築技術）（一財）日本建築センター」を取得した。本工法の主な特徴は下記の3点である。以降、各特徴の詳細について述べる。

- ① 既設戸建住宅地の敷地境界の狭隘地に対応
- ② 楕円状コラムで経済的かつ効果的な格子状地中壁の築造が可能
- ③ 設計基準強度以上の安定した品質の供給が可能

キーワード 市街地液状化対策、既設戸建、高圧噴射攪拌工法、楕円状コラム、格子状地中壁工法

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2 前田建設工業株式会社 土木設計部 TEL 03-5276-5166

(1)既設戸建住宅の敷地境界の狭隘地に対応

本工法は、既設戸建住宅の敷地境界の狭隘地に対応するため、超小型専用マシン（W60cm×D75cm×H163cm、重量 400kg）を開発し、施工幅 1m×施工高さ 2m 程度の空間での施工を可能にした（図 2）。従来工法ではマシン移動や施工中のロッド切継ぎにクレーンを必要とするが、本工法はクレーン不要で人力による作業が可能である。また、超小型専用マシンはスライドベースとアウトリガーを備えており自走することが可能である。

(2)楕円状コラムで経済的かつ効果的な格子状地中壁の築造が可能

本工法は、従来の円柱状改良以外に、専用ロッドの回転を独自の制御方式を採用することで、新しい形状の楕円状コラム（図 3）の築造を可能とした。この楕円状コラムは、壁状形式や格子状形式の改良地盤を築造する際、格子状地中壁としての要求性能で有効壁厚 85cm 以上かつ最小壁厚 60cm 以上を満足し、かつ弱部となるラップ部（最小壁厚 60cm）の箇所を大幅に削減できる。

(3)設計基準強度以上の安定した品質の供給が可能

従来、高圧噴射攪拌工法は、硬化材スラリーの超高圧ジェットを水平に噴射することで地盤を切削し、地盤と硬化材スラリーを攪拌混合することでコラムを築造する工法である。そのため、切削距離が土質性状や強度に影響を受けやすいといった課題がある。

本工法では、独自開発のリアルタイム管理装置を用いることで、機械動作を高精度で制御し、かつコラム品質に関わる主要な施工情報をリアルタイムで一元管理している。さらに、4 章で詳述する独自開発の品質確認を施工中に行なうことで、砂質土地盤（細粒分含有率 50%未満）において、設計基準強度 $F_c=2,500\text{kN/m}^2$ 、設計変動係数 $V_c=30\%$ のコラム品質を確保することを可能とした。

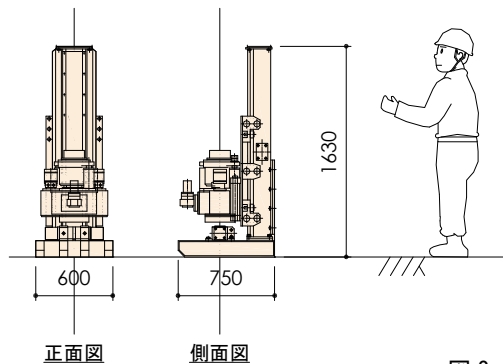


図 2 超小型施工機械

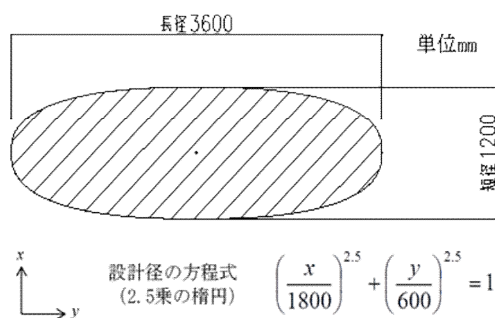
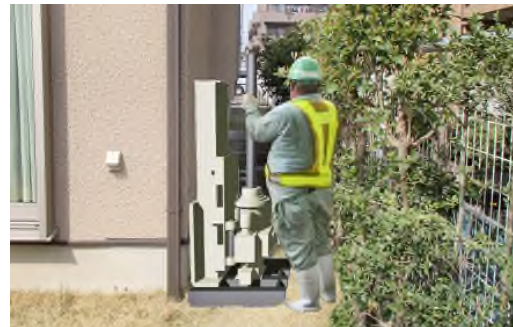


図 3 楕円状コラム



3. 楕円状コラムの施工管理方法の確立

3.1 目的

改良体の改良距離とジェット噴流の水平方向での回転速度は密接な関係がある。そこで、楕円状コラムの築造を行うための施工管理方法を確立することを目的に、噴射回転速度と改良距離の関係を確認するため試験施工を行った。

3.2 試験場所および土質条件

本実験は茨城県つくば市安食で実施した。試験場所の土質柱状図および改良範囲を図4に示す。

3.3 試験ケース

表1に造成仕様を、実験ケースを表2に示す。図5に示すようにジェット噴流を両側に噴射し、ロッドを180度揺動する制御とし、回転速度を可変させ楕円状コラムの築造を行った。

3.4 試験結果およびまとめ

築造したコラムを掘起し、コラム頭部の形状測量を行った。コラムの掘起し状況を写真2、形状測量結果より回転速度を改良距離の整理結果を図6に示す。回転速度と改良距離に高い相関性を確認した。図6の相関式を設計改良形状の式（図3の図中に記載）に代入することで、図7に示す揺動角度と必要回転速度の関係を得ることができ、同図を用いてコラム築造中の施工管理を行なうことで、楕円状コラムの築造を可能とすることができる。

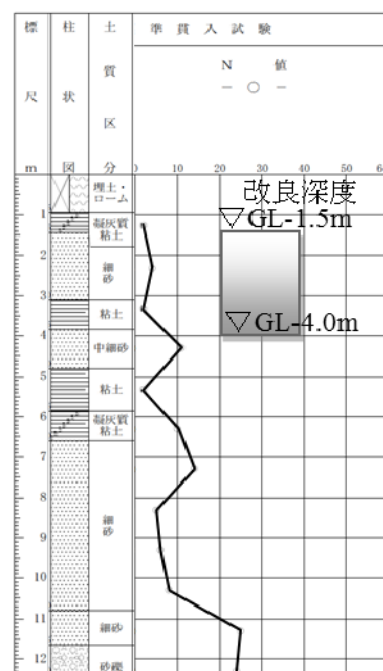


図4 土質柱状図および改良範囲

表1 造成仕様

項目	造成仕様
硬化材配合	配合1 (W/C=137%)
噴射方向	両側
1方向当りの噴射量	95ℓ/min
噴射圧力	40MPa
圧縮空気圧	0.7MPa
圧縮空気量	5.0Nm ³ /min
揺動角度	180度*
切削回数	2回
STEP高	2.5cm
m当たりのSTEP数	40回
回転速度	各ケースで設定(表2)

*両側噴射で180度揺動により360度のコラムを築造

表2 試験ケース

ケース	最小回転速度 v_{min} (rpm)	最大回転速度 v_{max} (rpm)
CASE1	3.0	5.0
CASE2	1.5	2.5
CASE3	2.0	10.0
CASE4	3.0	10.0
CASE5	1.0	5.0
CASE6	1.5	20.0



写真1 コラムの掘起し状況

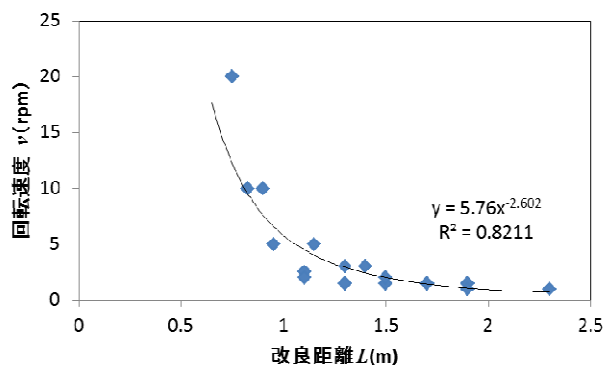


図6 回転速度と改良距離の関係

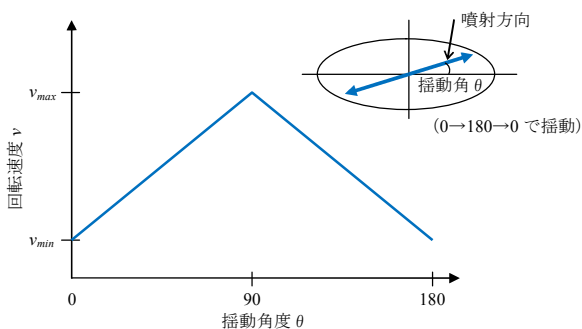


図5 回転速度の概念

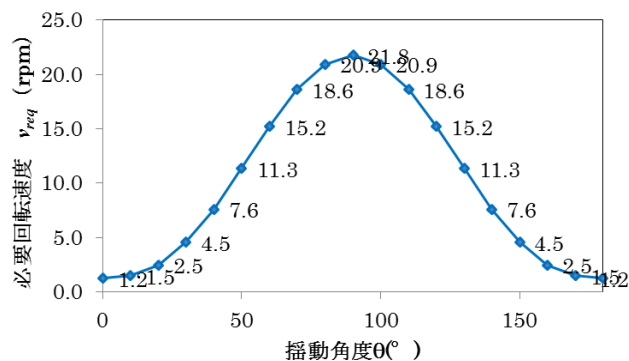


図7 揺動角度と必要回転速度の関係

4. 品質管理方法の確立

4.1 目的

従来、高圧噴射攪拌工法は地中で硬化材スラリーを超高圧で噴射し、地盤を切削・攪拌して改良体を造成する工法である。そのため、改良体の品質（強度・出来形）が土質性状や強度に影響を受けやすく、品質安定化が課題となっている。そこで、本工法では設計基準強度以上の安定した品質の確保を実現するための品質管理方法を確認することを目的に、以下に示す独自開発した品質管理方法についての有効性を検証した。

(1)光ファイバ温度計による出来形確認³⁾

光ファイバ温度計とは、ファイバ全長において連続的な温度検知がリアルタイムで可能な技術である。図4に示すように、施工前に設計改良径の位置にボーリング削孔で光ファイバ温度計を埋設しておき、施工中はジェット噴流の到達の温度変化を計測することで設計改良径の確保を確認する。本手法は、事前の埋設用ボーリング費用がかかるものの、リアルタイムで改良深度全長かつ連続的に確認することができる。

(2)簡易動的コーン貫入試験による出来形確認⁴⁾

簡易動的コーン貫入試験（JGS 1433）は、先端に円錐形（直径 25mm）のコーンと外径 16mm のロッドおよび重量 5kg のハンマーによって構成される。試験機は非常に軽微であり、人力での移動や計測が簡単に行える試験方法である。主に小規模建築物基礎地盤において地盤の貫入抵抗を求め、簡易な支持力判定に用いられることが多い。本手法は確認範囲が改良体頭部に限定されるものの、低コストで短時間（5分程度）に確認することができる。

(3)塩酸溶解熱法による改良体 28 日強度予測³⁾

塩酸溶解熱法は、セメント成分に含まれたカルシウム分と塩酸が反応して発熱する性質を利用して、セメント含有量を測定する手法である。施工中地上面に排出される排泥は、地中の未固結改良体の余剰分であり、改良体と同程度の品質を有している。そのため、排泥のセメント含有量を塩酸溶解熱法による温度上昇量からリアルタイムに管理することで、強度不足を未然に防止することができる。本手法は、コスト（塩酸の材料費のみ）で短時間（1 計測 10 分）に確認できる。ただし、温度上昇量と 28 日強度の関係が地盤に依存するため、事前に室内配合試験で温度上昇量と 28 日強度の関係性についてキャリブレーションが必要となる。

4.2 試験施工による品質管理方法の有効性確認

品質確認方法の有効性を確認するために、現場実験で削孔から造成（GL-1.5m～15.0m）の一連の施工を行い、それぞれの品質確認方法の検証を行った。なお現場実験場所（茨城県安食）は 3 章と同様である。

(1)光ファイバ温度計による出来形確認結果

光ファイバ温度計の埋設位置を図5に示す。光ファイバ温度計埋設深度は GL-0.0～15.0m である。造成中の温度計測結果の代表（GL-2.0m, -5.0m, -10.0m, -15.0m）を図6に示す。いずれの深度でも+4～5℃程度の温度上昇を確認し、改良径が設計値を満足していることを確認した。

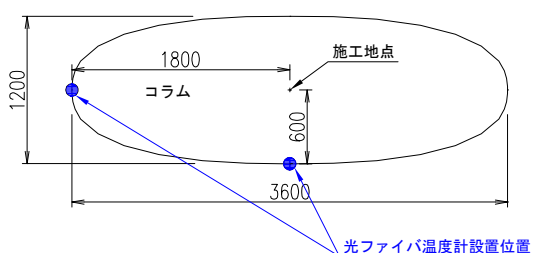


図5 光ファイバ温度計の配置図

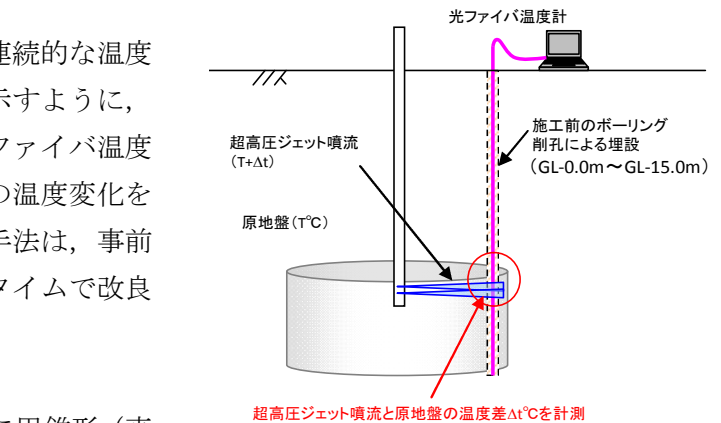


図4 光ファイバ温度計による出来形計測概要

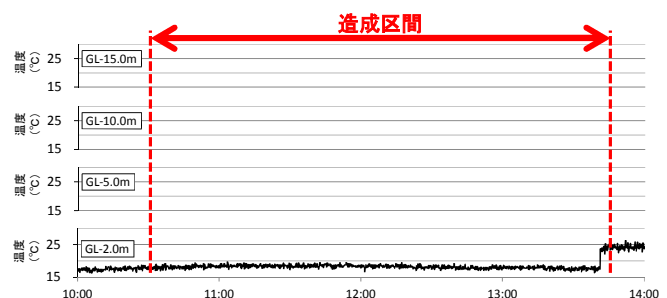


図6 各深度の温度経時変化図（長径方向）

(2)簡易動的コーン貫入試験による出来形確認結果

施工完了後、設計改良径の位置（短径 $R=0.6\text{m}$ と長径 $R=1.8\text{m}$ の各 1 点）で、簡易動的コーン貫入試験のロッドを貫入し、未固結改良体の有無を確認した。その結果、設計改良天端の深度で貫入抵抗の喪失し、未固結改良体が存在を容易に確認できた。

(3)塩酸溶解熱法による改良体 28 日強度予測結果

図 7 に示す事前の室内配合試験結果を示す。設計基準強度 $F_c=2,500\text{kN/m}^2$ に対する温度上昇量の管理基準値は 39.1 度である。造成時の排泥を利用した塩酸溶解熱法による温度上昇量（3 深度計測）から推定した 28 日強度と採取コアによる 28 日強度の対比を図 8 に示す。多少のバラつきはあるものの、この温度上昇量による 28 日強度の推定値は抜取コアの 28 日強度に対して概ね下限値側で整合しており、その品質確認方法として有効であることを確認した。

4.3 品質管理方法の策定

本工法の品質管理は、従来の「建築物のための地盤改良の設計及び品質管理指針（一財）日本建築センター」に示される造成 28 日後のコアボーリングによる品質管理に加え、独自開発のリアルタイム品質確認方法を取り入れた方法を策定した。本工法で採用する品質管理フローを図 9 に示す。本施工前に、主に造成仕様の確認を目的に、本コラム兼用で試験施工を実施する。本施工中は、コラム 100 本に 1 回の頻度で光ファイバ温度計による出来形確認（コラム全長計測）と塩酸溶解熱法による改良体 28 日強度予測を行い、その間を補完する目的で 10 本に 1 回の頻度で簡易動的コーン貫入試験による出来形確認（コラム頭部計測）を標準とした。

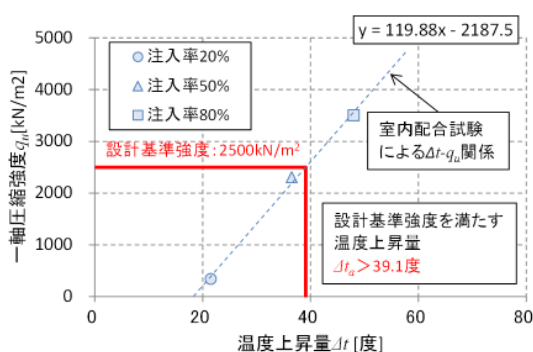


図 7 室内配合試験で設定した $q_u-\Delta t$ 関係

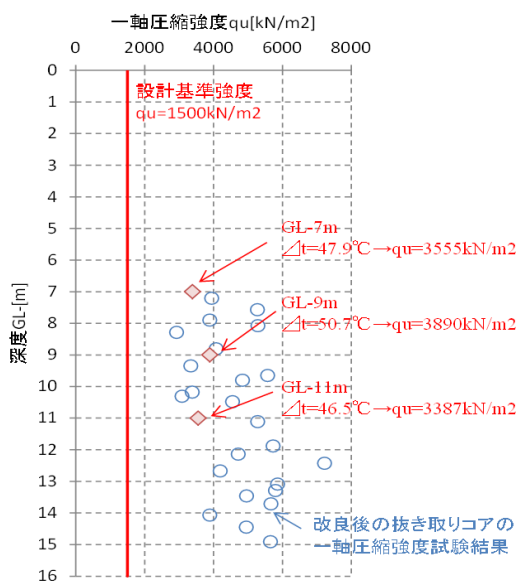


図 8 予測値と抜取りコアの 28 日強度比較

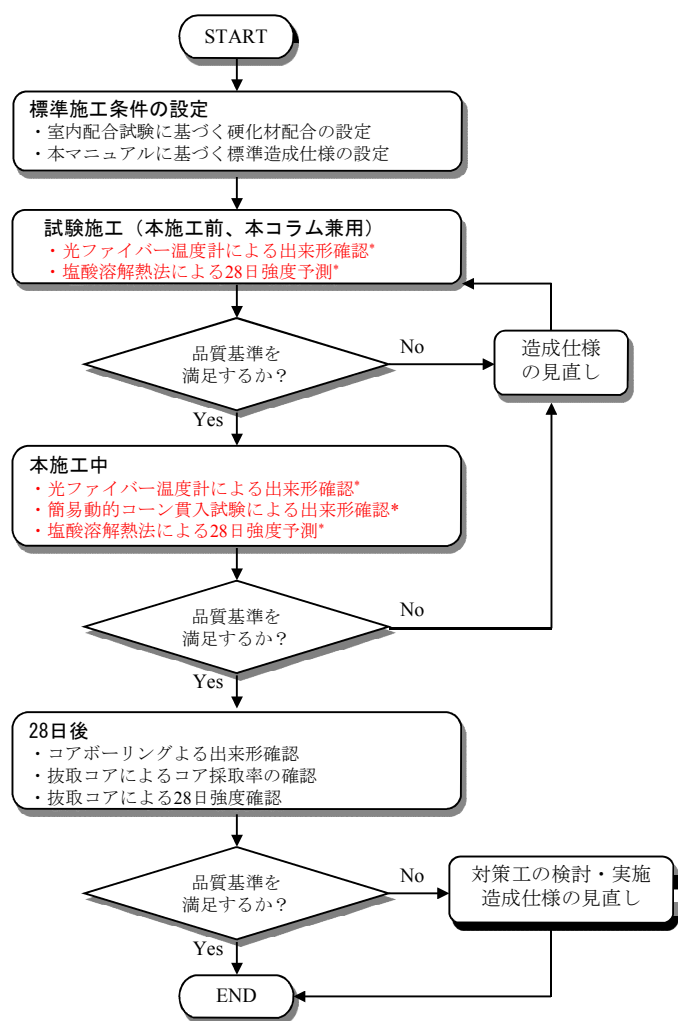


図 9 品質管理フロー

5. 性能確認試験

5.1 試験目的

性能確認試験は、3 章での楕円状コラムの築造に対する施工管理方法、および 4 章での品質管理方法を用いて築造した楕円状コラムの性能を確認することを目的とする。性能確認試験の実施現場の一覧を表 3 に示し、千葉県浦安市（高洲）の土質柱状図を図 10 に示す。

また、性能確認とは別に、既設戸建住宅地内での施工に対して、周辺への影響（振動・騒音・変位）を確認するため、性能確認試験において、振動・騒音・変位の計測を実施する。

5.2 目標性能

砂質土（細粒分含有率<50%）において、2,500kN/m² の設計基準強度を確保することが可能であり、配合計画および品質検査に用いるコラムから採取したコアの一軸圧縮強さの変動係数として 30%が採用できることを目標性能とした。

5.3 試験項目と方法、その確認方法

性能確認試験の試験項目と方法、その確認方法について表 4 に示す。なお、本試験で行う抜取コア試験では、水平方向と深度方向について、変動係数を評価するため各方向 25 供試体の抜取コアを採取した（図 11）

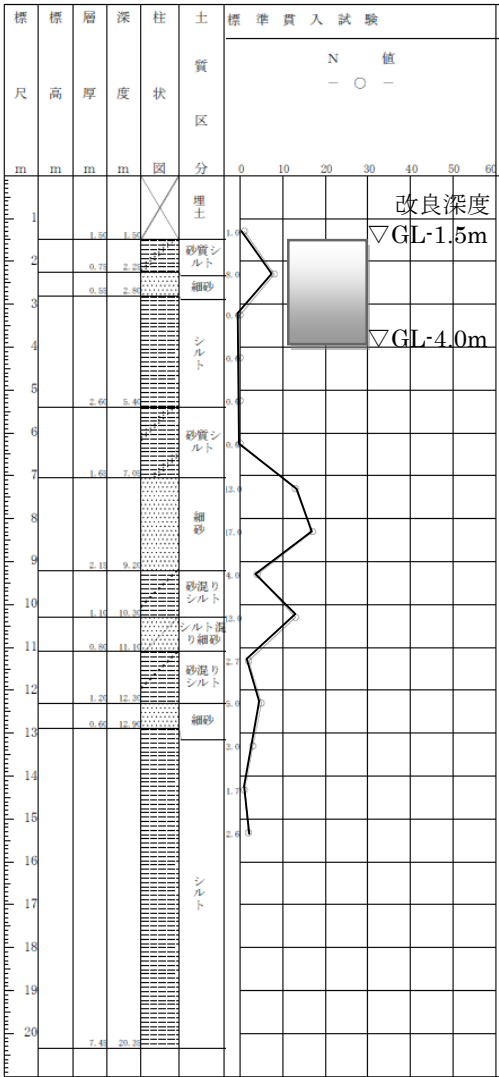


図 10 土質柱状図（千葉県浦安市（高洲））

表 3 性能確認試験の実施現場一覧

所在地	主な土質	N 値	改良深度
茨城県 つくば市	細砂 (32.4%)	5~10	GL-1.5 ~15.0m
新潟県 新潟市	砂 (1.0%)	5~15	GL-1.5 ~4.0m
千葉県 浦安市	シルト (48.0%)	0~3	GL-1.5 ~4.0m
千葉県 千葉市	シルト (3.6%)	0~3	GL-1.5 ~4.0m
茨城県 鹿島市	細砂 (3.0%)	5~10	GL-1.5 ~4.0m

* () 内の数字は細粒分含有率を示す

表 4 試験項目と方法、その確認事項

試験項目	試験方法	確認事項
①抜取コア 試験	コア採取率 一軸圧縮試験	コア採取率の確認（深度方向）、 抜取コアによる変動係数の確認・ 抜取コアによる設計基準強度の 設定（深度方向・水平方向）
②出来形 確認試験	出来形計測	設計径の確認

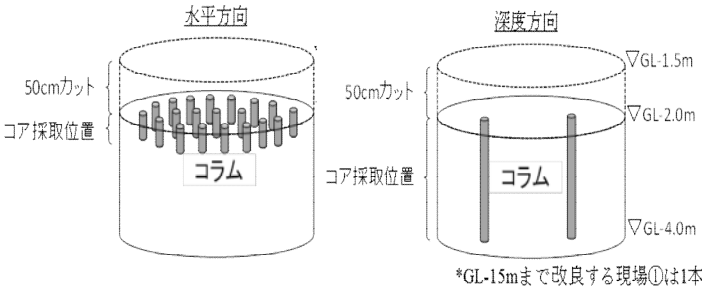


図 11 抜取コアイメージ

5.4 試験結果

(1) 抜取コア試験

千葉県浦安市の抜取りコア採取位置を図 12 に示し、深度方向（No26, 27）のコア状況（GL-2.0～4.0m）を写真 2 に示す。コア採取率は、5 現場の全長コア採取率で 96.7～98.3%，1m 当たりコア採取率の最小値が 95.7～97.1%であった。建築センター指針に示されているコア採取率の必要条件（砂質土：全長コア 95%，1m 当たり 90%）を満足した。

千葉県浦安市の水平・深度方向の現場平均強度と変動係数を図 13 に示す。5 現場の現場平均強度は 3,327～14,584kN/m²と目標性能 2,500kN/m²を満足するものの、広範囲に分布している結果となった。特に細粒分含有率が高いほど強度が小さくなる傾向を示した。各現場での変動係数は 0.18～0.27 と比較的均質であり目標性能を満足する結果となった。なお、水平方向と深度方向で現場平均強度と変動係数に大きな違いは確認されなかった。

(2) 出来形確認

千葉県浦安市の現場で掘起したコラム出来形、および設計径と実測値の比較を図 14 に示す。5 現場において設計改良径に対し 1 割程度の裕度をもった出来形であることを確認した。

(3) 周辺への影響（振動・騒音・変位）

振動・騒音について、千葉県千葉市の試験現場において計測を実施した。その結果、振動は施工地点 5m 以内で 60～70dB、騒音は 70～80dB 程度発生していることが分かる。図中に示す特定建設作業基準値以下ではあるものの、戸建住宅の敷地内で施工を行う場合は、この数値は決して小さい値とは言えないため、防振・防音対策を講じた上で関係住民に理解をいただくための説明が必要であると考えられる。

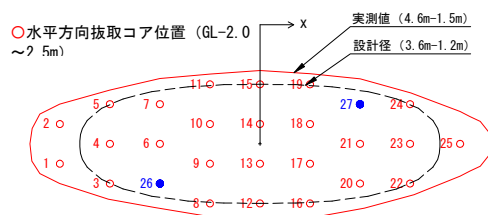
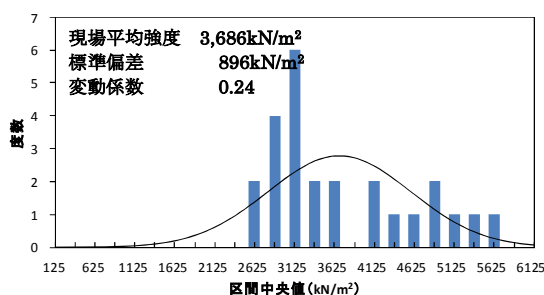


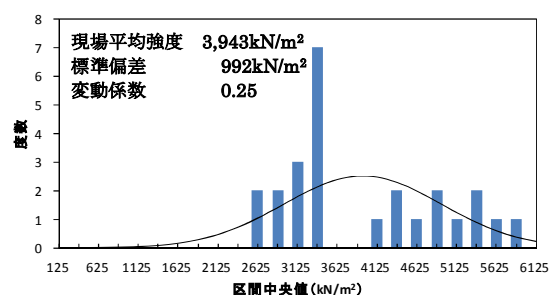
図 12 抜取コア位置（千葉県浦安市）



写真 2 深度方向コア状況（千葉県浦安市）



(a) 水平方向



(b) 深度方向

図 13 現場平均強度と変動係数（千葉県浦安市）

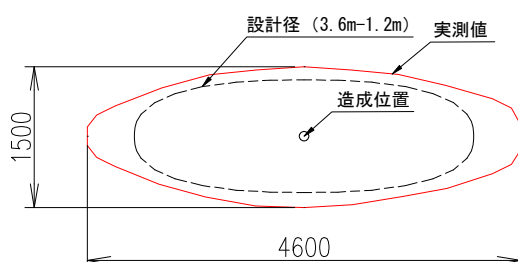


図 14 掘起したコラムの出来形状況（千葉県浦安市）



変位について、性能確認試験の 5 現場で計測を実施した。造成直後と造成翌日で、施工地点からの離れに応じた鉛直変位の関係を図 15 に示す。その結果、造成直後は隆起傾向であり、最大で+5mm 程度発生している。造成翌日は沈下傾向を示し±3mm 程度に収束する傾向を示す。変位について比較的小さい値となっているが、既設戸建住宅近傍の施工であることを考慮すると、施工時の動態観測を重点的に行う必要があると言える。

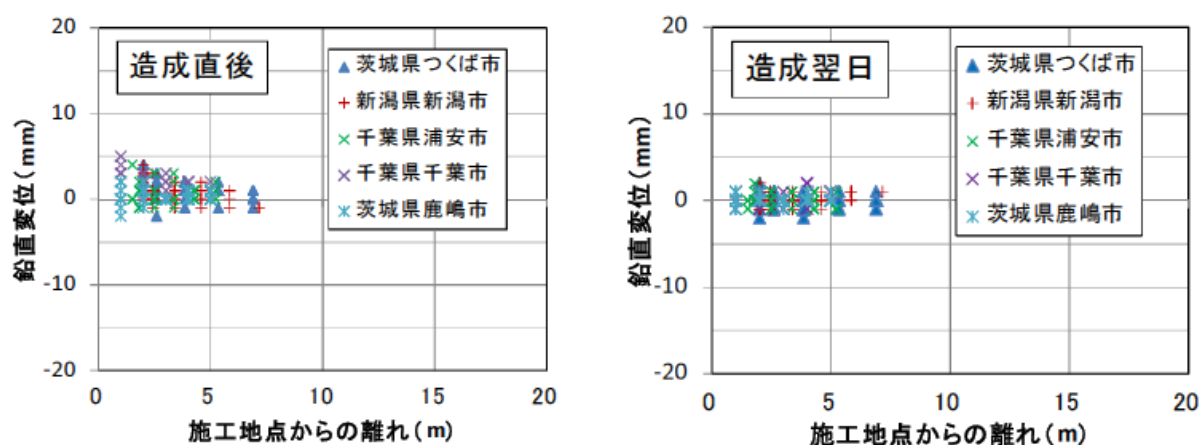


図 15 鉛直変位の計測結果

5.5 まとめ

抜取コア試験における深度方向のコア採取率は建築センター指針の必要条件を満足した。出来形についてはすべての現場において設計改良径を満足する結果であった。

抜取コアの変動係数に対し、建築センター指針に準拠⁶⁾し、有意水準 5%を採用した χ^2 分布による正規分布適合度の検定（必要試料本数 25 以上）を行い、正規分布とみなせることを確認した。現場数は、建築センター指針に定められている変動係数設定のために必要とされる 5 現場以上という条件を満足している。さらに、有意水準 1%の F 検定を行って現場毎のバラつきが安定していることを確認した。これらの結果を踏まえ、設計及び検査に使用する変動係数の値として、砂質土（細粒分含有率 $F_c < 50\%$ ）について 30%を採用できることを確認した。なお、粘性土を含む互層地盤の場合には変動係数が 30%を超える可能性がある。

6. 最後に

今後平成 27 年度より市街地液状化対策事業の着工を予定している浦安市をはじめとした各市町村において、本工法の活用により低コストで安心・安全な国土を提供できるよう貢献していきたいと考える。また、実施工によりデータを蓄積し、さらなる安定的な品質確保に向けて信頼性を高めていく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ，液状化対策推進事業について
www.mlit.go.jp/common/000184390.pdf（参照2015.7.28）
- 2) 浦安市ホームページ，浦安市 宅地の液状化対策に関する説明資料，
www.city.urayasu.chiba.jp/secure/37768/shiryo.pdf（参照2014.6.30）
- 3) 手塚広明・山内崇寛・川西敦士：高圧噴射攪拌工法で改良された地盤の品質管理手法，地盤工学ジャーナル Vol.8 No.2, pp.251~263, 2013
- 4) （公社）地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.317~324, 2013.3
- 5) 建築物のための地盤改良の設計及び品質管理指針，日本建築センター，pp.184~188, 2002.11
- 6) 建築物のための地盤改良の設計及び品質管理指針，日本建築センター，pp.420~427, 2002.11