

原位置挿入型針貫入試験装置 T-GeoPenester[®]の開発と適用

小林 真貴子^{*1}・居上 靖弘^{*1}・藤原 斉郁^{*1}

Keywords : improved soil, needle penetration test, unconfined compression test, quality assessment

改良土, 針貫入試験, 一軸圧縮試験, 品質管理

1. はじめに

我が国は都市部など建設需要の高い地域に軟弱地盤が堆積しており, 社会基盤施設等の建設工事において構造物の健全性確保のために地盤改良が多用されている。多種多様な地盤改良工法がある中, セメント等の固化材を地中に供給し, 原位置地盤と混合攪拌して土粒子の骨格を安定させる固結工法がある。本工法は早期に強度が得られること, 軟弱な粘性土地盤と液状化が懸念される砂質土地盤の双方に適用できること, 低騒音・低振動であることなどの特徴を有しており, 盛土のすべりや沈下防止, 護岸の基礎, 液状化防止等に広く適用されている。

固結工法による改良地盤(以下, 固化改良地盤)において, 設計時に求められる強度や変形特性等の性能は一軸圧縮強さ q_u を指標とすることが多く, 品質管理においては一軸圧縮試験が広く普及している。一方, 一軸圧縮試験の実施は採取したボーリングコアの運搬・切出し・整形等に手間を要するうえ, 採取したコアの亀裂や欠損などによっては試験可能な供試体の数や位置が限定される実態がある。すなわち, 施工条件や対象地盤の性状, 固化材の混合性等の影響から固化改良地盤の強度に空間的なばらつきが生じうるとされる中¹⁾, 限られた数や位置での強度確認ではそのばらつきを精度良く把握することに限界が生じることになる。その結果, 過去には実態把握が困難であった未固結部が素因となり盛土が変状した事例もある²⁾。

こうした品質管理の現状を踏まえると, 安全性・信頼性の高い施工の実現や品質不良のリスク低減に向けては, 固化改良地盤の強度の空間的なばらつきを可能な限り詳細に把握することが肝要と考えられる。そこ

で, 本研究では原位置で多数の強度データを取得することで, 固化改良地盤の強度のばらつきを網羅的に把握する技術の開発にあたっている。これまでの取り組みでは, 一軸圧縮強さ q_u と相関があり簡易に強度を把握できる「針貫入試験」を応用し, 原位置地盤内で測定可能な装置を開発し適用を進めてきた³⁾。一方で, 従来装置では一部で手作業での操作が必要であったことから, 作業員の現場常駐による測定を余儀なくされていた。そこで今回は更なる効率化・省人化に向け, 原位置多点測定の全自動化をはじめとする取組みを行った。

本稿ではまず, 開発概要と従来装置の測定機構を 2 章にまとめる。続く 3 章では, 測定の効率化・省人化に向けて新たに開発した装置の詳細を提示する。4 章では開発した装置を 2 つの現場に適用した事例について紹介する。

2. 開発概要³⁾

2.1 開発方針

著者らは, 空間的なばらつきを有する固化改良地盤の強度分布を効率的な測定にて詳細に取得し, 品質評価指標としての強度を網羅的に把握することを目指している。こうした目的での手法として, 一軸圧縮強さ q_u を推定する方法として実績があり, 簡易かつ迅速に測定することが可能な「針貫入試験」⁴⁾に着目した。針貫入試験は測定対象に針を 10mm 貫入し, 貫入荷重と貫入長さの比である針貫入勾配 N_p を測定するものである。また, N_p は実測データに基づく相関式により q_u に換算できる。著者らは針貫入試験を活用した新たな強度評価手法として, 針貫入試験を原位置で行う「原位置

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

置挿入型針貫入試験装置 T-GeoPenester」を開発した。

2.2 原位置挿入型針貫入試験装置の開発

図-1 に原位置挿入型針貫入試験装置を示す。本装置は、原位置の固化改良地盤に設けた測定孔（直径 110～120mm 程度）内に円柱形の貫入装置（直径 108mm×高さ 443mm）を挿入し、反力アームにて測定孔壁面に装置を押し付けて固定し、CCD カメラで貫入状況を確認しながら、針を孔壁に対して垂直に 10mm 貫入する。貫入速度は基準⁴⁾に準拠して 20mm/min とし、ロードセルで貫入過程の荷重推移を測定する。また、孔内での装置の円周方向の向き（針の貫入方向）を変えることにより、同一孔同一深度で何度も測定を行うことが出来るため、例えば材齢毎に測定することで材齢による強度発現傾向をより正確に把握することができる。

しかし、当初開発の上記試験装置では写真-1 のように孔内での装置の昇降や測定制御を手作業で行っていたため、担当者が現場に常駐して 1 測点ずつ位置を調整しながら測定する必要があった。そこで今回、測定の更なる効率化・省人化を目指し新たな開発に取り組むこととした。

3. 測定の効率化・省人化に向けた開発⁵⁾

今回の取組みでは、人が現場に常駐することなく全自動での多点測定を実現するとともに、装置の搬入搬出時や現場内での移動など、あらゆる場面において担当者一人での対応を可能とすることを念頭に以下の開発を行った。

3.1 吊下げ・制御装置の開発

写真-2 に測定時および移動時の装置全景を示す。吊下げ装置の特徴は以下の通りである。

- ・ 貫入装置を吊下げるワイヤーや通信ケーブルの巻き取りドラムと、貫入装置の昇降・針貫入試験等のシーケンス制御やロードセルデータ・貫入量等の測定データを管理する制御盤を組立て・収納式とすることでパッケージ化し、宅急便等による輸送にも対応可能とした。
- ・ 装置全体と台車を一体化することで、現場内において測定箇所へ一人で移動できる形とした。
- ・ 従来は AC 電源が必須で数十 m ケーブルを這わせるなどの対応が必要であったが、汎用バッテリー駆動での終日測定を可能とした。

3.2 制御プログラムの開発

測定開始前に深度方向の測定間隔や同一深度での回転条件等を設定することで、その後は全て自動で測定

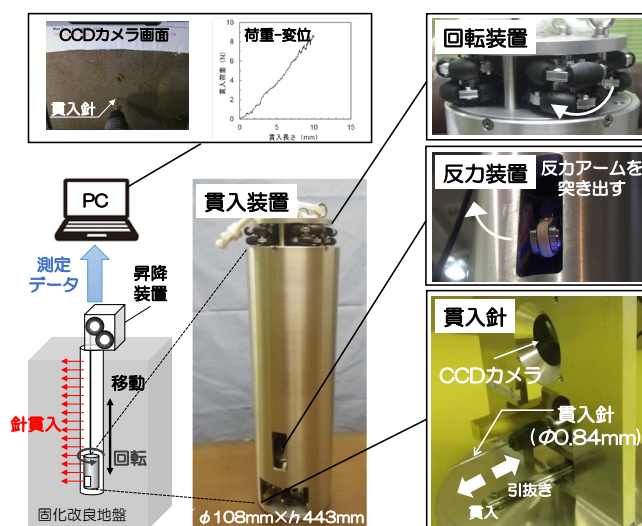


図-1 原位置挿入型針貫入試験装置 T-GeoPenester

Fig.1 Proposed in-situ needle penetration test apparatus

T-GeoPenester

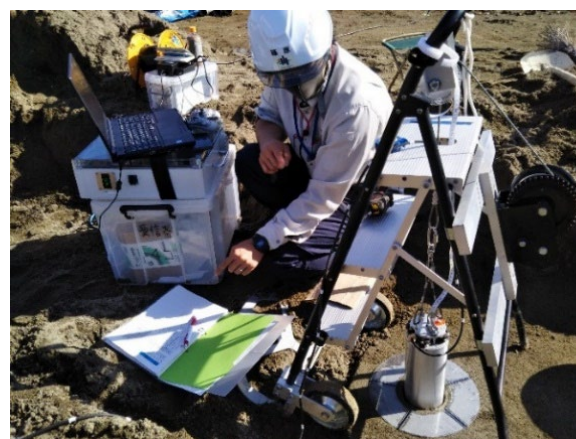


写真-1 現地測定の様子

Photo.1 In-situ measurement



写真-2 測定時および移動時の装置全景

Photo.2 The main unit and cart during measurement and movement

を行うプログラムを構築した。図-2 に示すように、以下の流れにて自動測定を行う。

- 1) 測定孔内にて所定深度まで貫入装置を降下させる。
- 2) 反力アームを出し貫入装置を孔内に固定する。
- 3) 貫入速度 20mm/min にて孔壁に針を 10mm 貫入する。
- 4) 貫入完了後、針を引き抜き反力アームを格納して固定を解除する。
- 5) 同一深度で複数回測定する場合は、最初に設定した回転間隔に則して貫入装置を回転させ、2)～4) を繰り返す。
- 6) 同一深度における所定数の測定完了後、最初に設定した深度方向の測定間隔に則して貫入装置を降下させ、2)～5) を繰り返す。

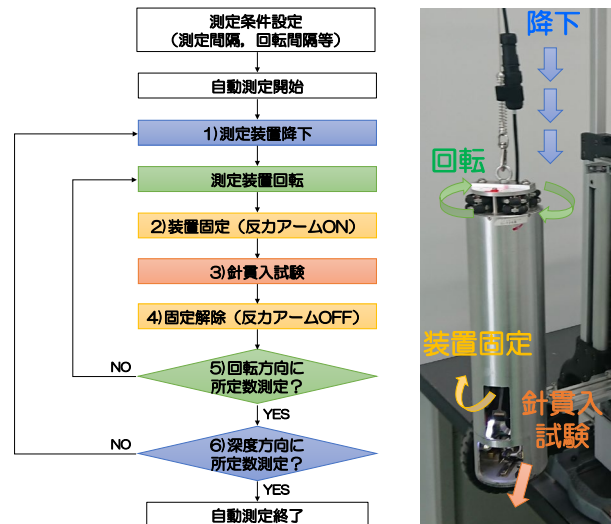


図-2 自動測定フロー

Fig.2 Automated measurement flow

4. 現場適用

本章では、①3章にて開発した測定装置の使用性・有用性を確認するために高圧噴射攪拌改良工法の現場に適用した事例、②本技術の特徴である詳細な強度分布の把握および繰返し測定を機械攪拌改良工法の現場に活用した事例の二つについて紹介する。

4.1 高圧噴射攪拌改良工法への適用⁶⁾

4.1.1 現場概要

測定対象は、耐震補強を目的とした跨線橋更新工事において地耐力向上のために高圧噴射攪拌工法を実施した固化改良体である。改良対象地盤は表層から埋土層（層厚 1.8m）、シルト層（以下 Ac 層、層厚 0.9m、 $N=1$ ）、シルト混じり砂層（以下 As 層、層厚 2.2m、 $4 \leq N \leq 10$ ）、砂質シルト層（以下 Ac-s 層、層厚 1.5m、 $7 \leq N \leq 13$ ）であり、本工事では埋土層下の Ac 層から Ac-s 層までの 4.6m とその下の支持層 0.2m を併せた 4.8m の区間に直径 2.0m の改良体を改良率 78.5% で合計 64 体造成した。

4.1.2 実施手順

実施手順は以下の通りである。

- 1) 改良体中心から半径方向 500mm 離れの位置にて直径 110mm のコアボーリングを行い、コア試料の採取と原位置測定用の孔を造成する。
- 2) 材齢 28 日で孔内水位以浅の地盤改良区間（G.L.-2.0m～4.3m）において、深度方向に 20mm 間隔、1 深度 1 測点で原位置針貫入試験を行う（写真-3）。
- 3) 1)にて採取したコア試料から、深度方向に約 500mm の間隔で直径 110mm×高さ 100mm の供試



写真-3 原位置測定の様子

Photo.3 In-situ needle penetration tests

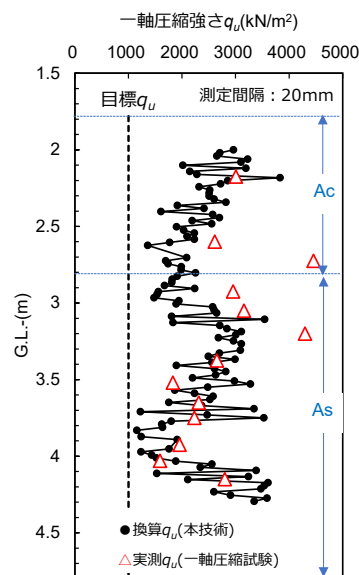


図-3 強度の深度分布

Fig.3 Vertical distributions of UCS

体を 5 体抽出する。材齢 64 日に外周部で等間隔に 25 点の針貫入試験を行った後、外周部をトリミングして直径 50mm の供試体として一軸圧縮試験を行い、取得した一軸圧縮強さ q_u と針貫入勾配 N_p に基づき相関式を求める。

- 4) 上記以外の箇所から高さ 100mm の供試体を 8 体抽出し、直径 50mm に整形して一軸圧縮試験を行い、2) で取得した原位置針貫入試験結果と比較する。

4.1.3 測定結果

図-3 に針貫入勾配 N_p から一軸圧縮強さ q_u に換算した深度分布および一軸圧縮試験の結果を示す。換算については 4.1.2 3) にて算出した以下の相関式(1)を採用した。

$$\log(q_u) = 0.602 \cdot \log(N_p) + 2.785 \quad (1)$$

その結果、いずれの深度においても換算 q_u は目標強度 $1,000\text{kN/m}^2$ を上回っており、局所的な弱部は確認されなかった。Ac 層部と As 層部の分布を比較すると、As 層部の方がばらつきが大きい傾向にある。写真-4 に示す CCD カメラの撮影映像より、As 層部において 10～30mm 大の黒土が点在する様子が確認され、この黒土部分に針を貫入したと想定されるデータが混在することにより As 層部の測定値のばらつきに影響を及ぼしたと考えられる。図-3 より原位置針貫入試験に基づく換算 q_u と一軸圧縮試験による実測 q_u を比較すると、材齢の違いはあるものの深度方向の分布傾向はほぼ整合していた。また、全自動測定にて全 115 点の強度データを約 2 時間で取得できた。本現場での測定を通して、新たに開発した装置の使用性に問題はなく、多点測定により効率的に固化改良地盤の詳細な強度分布や性状が把握出来ることを確認した。

4.2 機械攪拌改良工法への適用⁷⁾

4.2.1 現場概要

測定対象は、調整池工事において写真-5 のように機械攪拌改良工法を実施した固化改良体である。本工事では、近接施工による既設構造物の変状発生が懸念されたことから、改良体の若材齢強度の確保が重要とされた。そこで、試験施工にて改良体造成直後での繰返し測定を行うことにより、若材齢時における深度方向の強度分布を把握した。地盤は表層からローム層（層厚 2.0m, $3 \leq N \leq 8$ ）、粘性土層（層厚 11.5m, $1 \leq N \leq 3$ ）であり、本工事ではローム層を先行掘削した後、粘性土層に対して直径 1.0m の改良体を造成した。

4.2.2 実施手順

実施手順は以下の通りである。

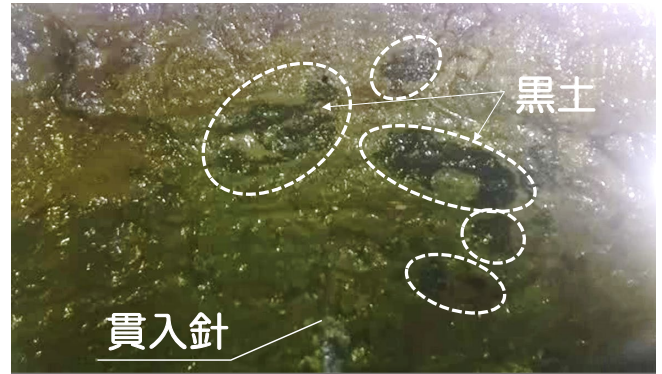


写真-4 CCD カメラの映像 (As 層)

Photo.4 Image monitored by CCD camera in the As layer



写真-5 施工の様子

Photo.5 Construction of improved soil columns

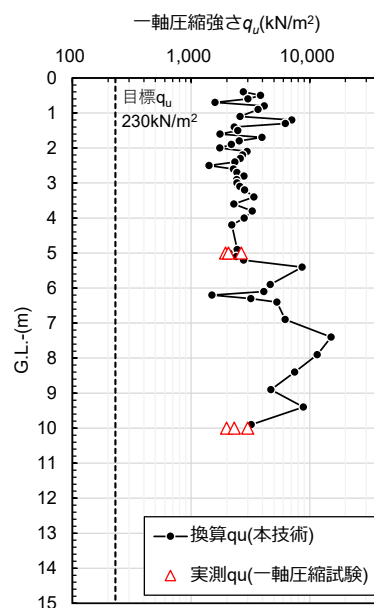


図-4 強度の深度分布

Fig.4 Vertical distributions of UCS

- 1) 改良体造成翌日（材齢 1 日）、改良体中心から 250mm の位置において、ロータリーパーカッションを用いて直径 116mm の測定孔を造成する。
- 2) 材齢 1～4 日において、G.L.-0.4m～G.L.-5.0m までは深度方向に 100mm 間隔、G.L.-5.0m～G.L.-10.0m までは 500mm 間隔、いずれも 1 深度 1 測点の条件にて原位置針貫入試験を行う。
- 3) 当該改良体の造成時に別途採取したウェットサンプリング試料を用い材齢 3 日に一軸圧縮試験を行い、2) で取得した同材齢の原位置針貫入試験結果と比較する。

4.2.3 測定結果

図-4 に、原位置で材齢 3 日に測定した針貫入勾配 N_p から一軸圧縮強さ q_u に換算した深度分布、およびウェットサンプリング試料を対象に同一材齢で一軸圧縮試験を行った結果を示す。なお、換算については以下の汎用相関式(2)⁸⁾を用いた。

$$\log(q_u) = 0.978 \cdot \log(N_p) + 2.621 \quad (2)$$

ウェットサンプリング試料から求めた実測 q_u と同深度の換算 q_u を比較すると両者は概ね整合する傾向を示しており、当現場においても原位置針貫入測定による強度評価の妥当性を示す結果を得た。また図-4 より、材齢 3 日の原位置針貫入試験に基づく換算 q_u は、いずれの深度においても目標強度 $q_u=230\text{kN/m}^2$ を上回る結果となり、材齢 1 日においても同様の結果を確認した。これらの結果から、若材齢時において深度方向に目標強度を満足する見通しを得ることができ、本技術を用いた原位置での繰返し測定による詳細な強度把握の実用性を確認した。

5. まとめ

本報では、固化改良地盤を対象とした原位置針貫入測定の効率化・省人化を目的に新たな測定装置を開発し、2つの現場に適用した。その結果、全自動測定にて最大 115 点の強度データを約 2 時間で取得し、また取得データから換算した q_u は別途実施した一軸圧縮試験

結果と整合し、測定効率の向上と強度評価の実用性を確認した。

建設生産システム全体の生産性向上を目的として ICT の全面活用が推進される中、地盤改良工においても 3 次元設計データ作成、施工の自動化、施工情報のリアルタイム可視化、改良体の位置情報・出来形・固化材量・トルク値等の施工データの一元管理等の取り組みが進められている。将来的には、こうした設計および施工に関する情報と本技術による詳細な強度情報を連携させることで、性能評価の高度化ならびに固化材量や施工方法の適正化を可能とする新たな品質管理法の確立を目指したい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 防災地盤工学研究室 笠間清伸教授にご指導いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 細谷芳巳, 牧原依夫, 木幡行宏, 奈須徹夫, 日比義彦, 荻野拓哉: セメント系改良材による現場改良土の品質評価, セメント系安定処理土に関するシンポジウム, 委員会報告 3, pp.42-56, 1996.
- 2) 三浦哲彦, 村井満: 針貫入試験による地盤改良におけるリスク管理, 地盤工学会誌, Vol.71, No.2, pp.37-40, 2023.
- 3) 小林真貴子, 石井裕泰, 藤原斉郁, 青木智幸: セメント改良地盤を対象とした次世代型品質評価法の開発-原位置挿入型針貫入試験装置での測定実験および強度換算式の検証-, 大成建設技術センター報, Vol.53, 2020.
- 4) 公益社団法人地盤工学会: 地盤工学会基準「針貫入試験方法」, 地盤調査の方法と解説, pp.426-432, 2013.
- 5) 小林真貴子, 藤原斉郁: 原位置固化改良地盤を対象とした多点針貫入抵抗測定の効率化に関する検討, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-988, 2022.
- 6) 小林真貴子, 藤原斉郁, 近藤達也, 竹谷純一, 堀口慧人: 高圧噴射攪拌改良地盤を対象とした多点針貫入抵抗測定, 土木学会第 78 回年次学術講演会, VI-648, 2023.
- 7) 居上靖弘, 小林真貴子, 大杉輔, 松本隆仁: セメント改良地盤の若材齢強度評価に着目した多点針貫入抵抗測定, 第 59 回地盤工学研究発表会, 24-6-1-04, 2024.
- 8) 丸東製作所: 軟岩ペネトロ計 SH-70 カタログ (2024.07.01 確認)。