# セメント系改良地盤の効率的な 品質評価手法に関する研究

大成建設株式会社技術センター 主席研究員 石井裕泰

#### 概要:

セメント改良土の品質管理においては、ボーリングコアを用いた一軸圧縮試験による強度評価が一般的 であるが、この作業には多大な労力と時間を要する.本研究では、強度評価の代替法として、一軸圧縮強 さとの相関により強度を把握する針貫入抵抗を原位置で効率的に測定するシステムを構築し、品質管理の 合理化を目指す.

本研究は、A. 原位置針貫入抵抗測定装置の検討,B. 強度評価法の検討,の2構成で開発を進め、本報に て初年度の取組み成果をまとめる。A. については、「原位置挿入型」として試作機を製作し、室内検証実験 にて装置が正常に稼働すること、従来法である机上型試験機と同等の強度を把握できることを確認した。 また、現場測定実験を通して実適用に向けた装置の改良点を見出した。B. については、針貫入抵抗による 一軸圧縮強さ推定法に関する仮説を立案し、室内実験データによる検証によって推定精度向上を確認した。 また、簡易破壊モデルに基づく数値シミュレーションにて推定法の適用範囲を提示した。

キーワード: 改良土, 貫入試験, 一軸圧縮強さ, 品質管理

# 1. はじめに

建設業における働き手不足が深刻化する中,省力化・省 人化,生産性向上を実現するi-Constructionの取組みが 広く実践され、ドローンを活用した測量・出来型検査・点 検やGPSを用いた無人化施工など多くの成果をあげている. また、昨今重要視されている働き方改革も踏まえると,建 設工事の細部まで省力化・生産性向上に資する技術開発の 可能性を追求し、技術革新につなげることが重要といえる.

そうした背景の下,地盤改良分野に着目すると,セメン ト改良土の品質管理においては,一般に,1)改良地盤が固 結した後ボーリングを行って試料を採取し,2)それを室内 に持ち帰って供試体を成形の上,3)一軸圧縮試験装置を用 いて強さを確認する,という流れで評価・判定にあたるた め,多大な労力と時間を要する.そこで,本研究では一軸 圧縮試験による強度評価の代替法として,一軸圧縮強さと の相関により対象地盤の強度を簡易かつ迅速に推定する 針貫入抵抗に着眼し,原位置で効率的に測定するシステム を開発する.

本研究では、A. 原位置針貫入抵抗測定装置の検討、B. 強度評価法の検討、の2構成にて開発を進める.本報にて 研究助成初年度の取組みとして以下の実施内容を取りま とめる.

- A. 原位置針貫入抵抗測定装置の検討
- ・ 原位置で効率的に針貫入抵抗を測定するための装置の 試作機製作.
- ・ 装置の測定機能・効率および精度を確認するための室 内検証実験.
- ・ 装置の使用性を確認するための現場測定実験.
- B. 強度評価法の検討
- ・ 針貫入抵抗測定による一軸圧縮強さの推定方法に関す る仮説の立案.
- ・ 室内実験データをもとにした推定法の妥当性検証.
- 数値シミュレーションによる推定法の適用範囲検討.

## 2. 原位置針貫入抵抗測定装置の検討

#### (1) 針貫入抵抗試験の採用

本研究で着眼した針貫入試験とは、軟岩やセメント改良 土に針を貫入し、その貫入荷重を貫入長さで除した貫入抵 抗を求めるもので、「JGS3431-2012 針貫入試験方法」にて 基準化されている。測定形態としてはi)現地盤やコア箱 に置かれた試料を対象に手作業で測定し、ばね式荷重計で 抵抗値を特定する「携行型」、ii)既定の貫入速度で機械的 に貫入しロードセルで抵抗値を特定する「机上型」に大別

# 発表1



図-1 原位置測定方法の概念図および測定装置

される.前者については迅速に測定が行える点,後者については信頼度の高いデータが得られる点が長所となる.本研究では、上記2形態をそのまま転用するだけでは一軸圧縮試験による強度評価の代替法にはならないと考え,第三形態の考案・試作機の製作にあたり、装置の測定機能・効率および精度を確認するための室内検証実験,装置の使用性を確認するための現場測定実験を実施することとした.

## (2) 試作機の製作

上記背景を受けて、図-1 左図に示すような手順にて、孔 壁に対して「机上型」に見合う制御で測定にあたる「原位 置挿入型」に着想を得て、図-1 右に示すような円柱形の試 作機(直径 108mm,高さ 443mm)を製作した.ここで、孔壁 での測定のための対処として、1)貫入状況を監視するため の CCD カメラを搭載し、2)針貫入時にはアームを出して孔 壁から反力を取り、装置を固定する機構を付与し、3)多方 向に貫入を行うための方向制御用の回転ホイールを装備 している.こうした「原位置挿入型」が実現できれば、測 定作業の迅速性と測定値の信頼度を両立できると考えた.

### (3) 室内検証実験

測定機能・効率および測定精度を確認するため、室内検 証実験として以下2つの測定にあたった.

イ)ボイド管(φ=300mm, *l*=1000mm)内にセメント改良土と 模擬調査孔(φ=114mm)を用意して,25(深度)×4(測点/深 度)=100 測点での測定(図-2)

ロ)上記と同一試料で作製した2供試体( Ø100mm×h120mm) を対象に机上型にて各々の供試体で25 測点の測定(図-3)

測定機能・効率については、上記イ)を通してPC 画面上 での貫入状況確認(図-4)、反力アームによる装置の固定、 ホイールによる任意方向への回転が正常に稼働し、今回準 備した模擬調査孔に対しては良好な動作性を確認した.ま た、1測点あたり1.2分の作業時間で測定でき、後述の強 度評価法の検討に準じて1評価試料の一軸圧縮強さを推定 するのに25点の測定を行う場合、30分で結果を得られる ことを確認した.

測定精度については、上記イ)、ロ)を通して得たデータ



図-2 室内検証実験の様子



図-3 机上型による針貫入試験 図-4 映像確認(PC 画面)





で以下のように考察した.まず,貫入荷重~貫入長さ関係の例は、a)原位置挿入型および b)机上型試験機で図-5のようになった.前者では、貫入抵抗の上下変動が目立つこと、測定初期で非線形的な傾向が見られる点で、固定・貫入機構に改善の余地を見る.そうした前提ながら、次に各々の測定値から貫入長さ 10mm 時点で特定する針貫入抵

図-7 現場測定実験の様子



図-9 №と quの相関図<sup>1)</sup>



図-10 推定方法仮説の概念図

抗(=貫入荷重/貫入量)を算定し、図-6のように頻度分布 にまとめた.ここで、原位置挿入型の一部データは模擬地 盤製作時に混入した気泡による空隙やくぼみを貫入して いたことを CCD 映像にて確認したため、本図では除外し、 縦軸は頻度を全測点数で除した密度分布で表記している. 図-6より以下のことが言える.i)原位置挿入型は針貫入 抵抗が小さい測点の割合が多く、机上型に比べて変動係数 が大きい傾向を示す、ii)原位置挿入型の一部過小な点を 除いては、両者の分布幅と平均値は同程度と認められる. 原位置挿入型の一部過小な点については、CCD 映像では 確認できない孔壁内面の空隙やくぼみを貫入したことが 一因として考えられる.その上で、測定装置や対象供試体 の違いを前提とした原位置挿入型測定により、机上型の結 果と大きな乖離ない強度把握が可能になったと考えられ る.

## (4)現場測定実験

実適用に近い状況での装置の使用性確認を目的に,現場 測定実験を行った.対象地盤は現地発生土とセメントをバ ックホウにより撹拌し,ブルドーザー転圧した安定化処理 土である.本測定では,測定孔をコアボーリング(Ø116mm, /6,000mm)で設け,孔壁を対象に 66(深度)×5(測点/深 度)=330測点で測定する流れとした.

測定孔掘削の際, 孔壁が一部損壊し孔径が拡大したため, 地中装置と測定孔のクリアランスが当初予定の 8mm から 20mm まで拡がった. そのままでは孔内に装置を固定できな い状況となったため,本測定では反力アームの拡張および スペーサー装着にて対処した.(図-7)

図-8に貫入長さと貫入荷重の測定結果として、2例を抜粋して示す.図-8左の例では、上記室内検証実験の測定結果(図-5)同様、針を貫入するにつれて貫入荷重が増大する結果が得られた.その一方で右の例では、図-8右のように針が高強度部(礫またはセメント固結部)に当たった測点もあり、貫入針を移動させるモーターのギア軸が貫入荷重に負けて歯飛びによる空回りを起こしている様子を確認した.

現場測定実験で抽出した本課題については、下記のよう な測定機構の改良の必要性を見出すに至った.

- ・ 地中装置と測定孔径のクリアランスの違いに可変的に
  対応するスペーサー機能の付加
- 高強度部検知時の警告・計測停止機能の追加

# 3. 強度評価法の検討

## (1)現行推定法とその課題

針貫入試験における一般的な推定には,図-9に示すよう な log(q,)=a・log(N)+b(a: 傾き,b: 切片)で表現された 両対数軸上の線形相関式が用いられる<sup>1)</sup>が,その設定根拠 の測定点の分布幅には最大で5倍程度のひらきがあり,そ のまま強度試験の代替法の位置づけで活用するには推定 精度に課題がある.そこで本研究では,推定精度向上に向 けて,推定方法に関する仮説を立て,実験データをもとに 妥当性を検証した.合わせて,簡易な数値シミュレーショ ンでの考察にあたりその適用範囲を検討した.

## (2) 推定方法に関する仮説と考察

まず,推定方法の検討にあたり,局所的な弱部・強部を 拾い得る貫入長さ 10mm の $N_p \ge d50$ mm×h100mm 供試体の $q_u$ 

ロ)q<sub>u0\_COV</sub>≒0 となる基準線(暫定) ⇒N<sub>p</sub>とq<sub>u0</sub>の相関式に相当 10000 q<sub>u</sub>(kPa) 1000 q<sub>u0\_COV</sub> 0.1 0.2 0.3 0.4 100 寸法影響を反映 いに応じて基 準線がシフト 10 10 100 1000 0 1  $N_{\rm o}(\rm N/mm)$ 図-11 qu\_covに応じた Noと quの関係  $q_u$ N, 25点 1.針貫入試験 2. トリミング 3.一軸圧縮試験 図-12 実験手順 5 4 up)(du) v 既往の結果 æ  $0.0 \le N_{p_{-}COV} < 0.1$ 0.1≦N<sub>p\_COV</sub><0.2 2 0.2≦N<sub>p</sub> <sub>COV</sub><0.3 0.3≦N<sub>p\_COV</sub><0.4 1  $1.9 \le N_{p_{-COV}} < 2.0$ 0 -1 log(Np) 図-13 N<sub>p.ave</sub>と q<sub>u</sub>の関係 10 10 N=25 $\mu=12.40$  $N_{p_{-COV}}=0.052$ N = 25u= 4.48 8 8 =1 926 6 6 5 4 4 2 2 0 0 13.5-14 13-13.5 12.5-13 12-12.5 112-12.5 111.5-12 11-11.5 10-10.5 10.5-11 14-14.5 14.5-15 0-0.5 0.5-4.5-3.5-4 3-3.5 2.5-3 2.5-3 2.5-3 針貫入勾配 (N/mm) 針貫入勾配 (N/mm) b) *N<sub>p\_00</sub>*=1.926 a) Np\_00v=0.052 図-14 各供試体の ル分布

100000

頻度

を直接関連付けていることに着目した. 貫入深さと対象供 試体とのスケールの相違が推定精度向上を阻害する要因 と考え,図-10に示すように,i) $N_{\rho}$ に対する $q_{u}$ の関連付け は $d_{\delta}$ mm× $h_{0}$ 10mm 基準供試体を対象とし,ii)基準供試体と  $d_{\delta}$ omm×h100mm 評価供試体の関連付けは寸法影響にて展開 する,2段階で説明できるとの仮説を立てた.

推定精度の向上に向けた検討に際して、まず上記ii)の 寸法影響の検討においては、数ある既往の知見のうち後述 する Omine<sup>20</sup>らの手法を参照した.Omine らは、基準供試体 強度のばらつきをワイブルの累積密度関数をもとに与え、 供試体強度に対する寸法の影響を理論的に定量化する手 法を提案した.これをもとに、基準供試体と評価供試体の 関連付けを試みたところ、図-11 中のイ)のように、基準供 試体の変動係数  $q_{u_{Q}}$ に応じて  $q_{u_{Q}}$ に応じて  $q_{u_{Q}}$ 、 方にシフトする結果を得た.

また、寸法影響に関する本理論によれば、 $q_{u0,cm} \Rightarrow 0$ となる均一性の高い評価供試体では、寸法に応じた強度の低下が生じないとされる. すなわち、図-11 中のロ)に示す $q_{u0,cm} \Rightarrow 0$ となる基準線は、 $N_p \ge q_{u0}$ の相関式に相当し、上記 i)の関連付けに適合した式となる.

#### (3)検証および換算式の特定

上記換算式の妥当性を検証するうえでは、i)基準線を 求めるための均一性の高い評価供試体と、ii)基準線のシ フト幅を求めるためのばらつきが異なる評価供試体を準 備し、複数点で測定する N<sub>b</sub>と各評価供試体強度 q<sub>a</sub>が必要 となる.そこで、過去に N<sub>b</sub>のばらつきを把握するために実 施した室内強度試験<sup>30</sup>の結果と、新たに加えた測定結果を もとに検証を試みる.過去の試験<sup>30</sup>では、機械撹拌改良に よる原位置セメント改良土から 10 本の評価供試体を準備 し、各評価供試体の N<sub>b</sub> 25 点を机上型針貫入試験機にて測 定後、トリミングを行い一軸王縮試験に供した(図-12).今 回、新たに 19 本の室内配合供試体を、材料(セメント、カ オリンまたはトチクレー、珪砂 5 号)、配合、撹拌時間を 変えて、均一性の高い供試体とばらつきが異なる供試体を 意図的に作製し、同様に図-12 の手順で測定データを収集 した.

上記検証データを図-13の平均値  $N_p(N_{p,are}) \ge q_u$ の関係に まとめる. 図中の白丸は文献 4)にまとめられたセメント改 良土の  $N_p-q_u$ 関係であり、それ以外は本実験結果で  $N_p$ の変 動係数  $N_{p,arv}$ を 0.1 の範囲ごとに色分けしている. 図-13 よ り、本実験結果の 9 割の供試体が 0.0  $\le N_{p,arv}$  (0.4 の範囲と なり、既往の結果と同程度の幅に分布したが、1.9  $\le N_{p,arv}$ (2.0 の 2 供試体のみ大きく外れる結果となった. 各供試体 の  $N_p$ 分布を確認すると、図-14a)に示すように 0.0  $\le$  $N_{p,arv}$  (0.4 に該当するものは概ね正規分布に準じているが、 図-14b)に示す 1.9  $\le N_{p,arv}$  (2.0 では分布が低強度部と高強 度部に分かれている. 当該の 2 供試体は撹拌時間を短縮し た条件で作製しており、未固結部とセメント部が残存した ため特異な結果になったと言える.

これらのデータを活用し、まず i)の基準線特定に向けて、均一性の高い評価供試体として 0.0  $\leq N_{p,col}$  (0.1 のデータを抽出した. $q_{r}$ =270~10,200 (kN/m<sup>2</sup>)の測定域を横断する範囲で13 供試体が該当し、基準線として式(1)を特定した.

 $\log(q_u) = 0.896\log(N_{p_ave}) + 2.557 \qquad \cdots \neq (1)$ 

次に, ii)のシフト幅の定量化に向けて, $N_{p,cov}$ が 0.1 以上のデータを抽出した. $N_{p,ave}$  =40 (N/mm)付近にデータは限定されるが, $N_{p,cov}$ に伴い $q_u$ が減少傾向を示しており,基準線がシフトする幅の特定に活用できると判断した.そこで,式(1)の切片に対し, $N_{p,cov}$ を考慮した補正項を式(2)にて表



b) N<sub>p.ave</sub>, N<sub>p.av</sub>を説明変数に取り入れた換算式(2)
 図-16 推定 q<sub>u</sub>と実測 q<sub>u</sub>の関係

現した.

$$\log(q_u) = 0.896\log(N_{p\_ave}) + 2.557 - c \cdot (N_{p\_COV})^d$$
$$\cdots \neq (2)$$

べき乗での表現は、実測値に対するフィッティングの自由 度を確保する意図による. 29 供試体について実測値と上記 換算値の残差 2 乗和を最小にする係数を特定したところ、 c=2.230, c=1.934となり、換算式(2)は図-15に示すよう な結果となった. 図-16に本検討で測定した 29 供試体にお ける実測  $q_u$ と換算  $q_u$ の関係を示す. 図-16a)に示す一般的 な推定に用いられる  $N_p$ のみを説明変数とする換算式を用 いた場合に対して、図-16b)に示す  $N_{p,ave}$ ,  $N_{p,ave}$ を説明変数 に取り入れた換算式(2)を用いることで、実測  $q_u$ と換算  $q_u$ の誤差が小さくなり、推定精度向上に寄与することを明示



できた.

## (4) 適用範囲の検討

上記推定法の適用範囲について、文献5)に提示した簡易 破壊モデルに基づくシミュレーションにて検討した.

# a) 解析手法の概要

図-17 に解析モデルの概念を示す. 本解析では, 評価対 象の円柱供試体(直径 d, 高さ h, 以下では評価供試体と 称す)は基準供試体(直径 d, 高さ h)の集合体と考える. 基準供試体には強度(qu)と変形係数(E)のみで表現し た簡易な破壊モデルを適用した上で、評価供試体にひずみ を与える過程を解析対象とする、この時、鉛直縦列に連な る基準供試体の集合体(スティック)を、ひずみ、応力、 破壊判定を行う計算単位とし、ある段階で評価供試体に課 したひずみとスティック毎の等価変形係数から発生応力 を特定し、基準供試体ごとに設定強度を超過していれば破 壊とみなし変形係数を1/100に低減する. これがひずみの 増加に応じて累積すれば評価供試体が発揮する反力とし ての応力が全体として低減することになるためピーク値 が現れ、その評価強度として特定されることになる. さら に一連の計算で取得するピーク値は, 基準供試体特性の空 間分布に依存することから、 複数の試行計算を行い平均で 代表値を抽出する.

#### b)解析条件

上記解析法の適用に際して、基準供試体の寸法について は高さを針貫入測定の貫入長 10mm, 直径をその 1/2 の 5mm とし、基準供試体の特性を針貫入抵抗測定値に基づき設定 した.表-1 に設定条件をまとめる.基準供試体の特性は、 Casel、2 として標準的な測定結果の位置付けで  $N_{\mu}$ が正規 分布に準じた変動係数 0.2、0.4 を設定した. Case3 は図-14b)で示した  $N_{\mu}$ の変動係数が過大なもの、Case4、5 はCase1 ~3 の中間的なバラツキ分布を設定した.以上により  $N_{\mu}$ を 定めた上、式(2)により特定した  $q_{ub}$ を各解析の入力条件と した.

#### c)結果と考察

各解析ケースの 25 回の試行計算で得た評価供試体のピーク強度の頻度分布を図-18 に示す. Case1, 2 では,解析 条件として想定する N<sub>0</sub>の変動係数の増加に伴いピーク強 度が明確に低下し,上記推定法の検討で想定した傾向と調 和する.一方, Case3~5 は, N<sub>0</sub>の変動係数が 0.72~1.99 に わたるものの,ピーク強度に大きな相違は生じなかった. このことは, Case3 の測定事実に基づき過大な N<sub>0</sub>に対応し た q<sub>40</sub>を基準強度の設定に反映したものの,評価強度に対 しては大きな影響要因とはならなかったことを意味する. 本解析結果を図-15 で提示した N<sub>0</sub>-q<sub>4</sub>関係にまとめ,図-19 に示す.本結果より以下のことが言える.

- Case1, 2の解析結果は、N<sub>p</sub>と q<sub>u</sub>の相関式を基準線から 変動係数に応じて補正をする換算式(2)に対して低め の値を示すものの、全体的には調和した傾向を示す。
- ・ 本関係図において、Case3 は対応する実測結果(図中の
  ▲)に対して整合した結果となっている。
- Case4, 5は、解析条件として想定する N<sub>p</sub>の変動係数が
  0.91, 0.72 であるのに対して、換算式(2)に対して変動
  係数 0.6 に相当する.

N<sub>0</sub>の変動係数に応じて基準線をシフトさせる換算式(2) について、本結果からは、i)変動係数が0.4程度以下では 本解析検討でも妥当性を裏付け現段階では変動係数0.4が 上限目安となる、ii)過大なN<sub>0</sub>が混在する場合は換算式(2) の適用性は確保されず適用範囲外となる.

# 4. まとめ

研究初年度の取組み結果を以下にまとめる.

- A. 原位置針貫入抵抗測定装置の検討
- ・ 原位置改良地盤に設けた測定孔を対象に針貫入抵抗を 測定する「原位置挿入型」の試作機を製作した.
- ・ 室内強度試験にて、机上型試験機と同等の強度を効率 的に把握できる見通しを得た。
- 現場測定実験にて、測定孔径拡大により上記試作機の ままでは装置が固定できないこと、高強度部で貫入針 のモーターギア軸が空回りすることを確認した。
- B. 強度評価法の検討
- ・ 針貫入抵抗のばらつきを考慮した推定法を導入することで換算 quと実測 quの誤差が小さくなり,推定精度向上に寄与することを確認した.
- ・ 上記推定法に基づく換算式の適用範囲は、N,の変動係数0.4 が上限で、過大なN,が混在する場合は適用外となることを数値シミュレーションにて確認した. また、取組みを通して、以下の課題を新たに抽出した.
- 測定装置に関して、測定孔径とのクリアランスに可変 的に対応する機能、高強度部を検知した場合の警告・
   停止機能付加。
- ・ 強度評価法に関して、礫などの高強度部を検知した場 合の推定法への反映方法.

表-1 基準供試体に対する設定条件

	基準供試体の設定		
Case	N <sub>p_ave</sub> (N/mm)	Np_COV	備考
1	1.0	0.2	一般的な測定結果としてとして
2	1.0	0.4	設定
3	2.93	1.99	特異な実測値を反映
4	0.84	0.91	No.3測定の上位3点棄却
5	0.60	0.72	同 さらに3 点棄却



図-18 解析で得たピーク強度の頻度分布



図-19 Np-qu関係での比較

次年度の取組みでは、上記課題を踏まえて測定装置の改 良、実験・解析的検討にあたる所存である.

謝辞:本研究を遂行するにあたり、東京工業大学笠間清伸 准教授にご指導を戴いた.記して謝意を表する. 参考文献

- 1) 丸東製作所 HP: https://www.rex-rental.jp/jbn/sh-70.html (2019.04.08 アクセス).
- Omine, K. et. al : "Evaluation of scale effect on strength of cementtreated soils based on a probabilistic failure model", *Soils and Foundations*, Vol.45, No.3, pp.125-134, 2005.
- 小林ら:針貫入試験を活用したセメント改良土の品質評価に関する基礎検討,第13回地盤改良シンポジウム,pp.169-172,2018.
- 岡田ら:針貫入試験による軟弱な地山強度の推定,土と基礎, Vol.33, No.2, pp.35-38, 1985.
- 5) 石井ら:セメント改良土を対象とした簡易破壊モデルとモンテ カルト法に基づく一軸圧縮強さの寸法影響評価,第52回地盤 工学研究発表会, pp.513-514, 2017.