

セメント改良地盤を対象とした原位置針貫入試験による品質評価法「T-GeoPenester」の開発

大成建設(株)	正会員	○小林	真貴子
大成建設(株)	正会員	石井	裕泰
大成建設(株)	正会員	藤原	斉郁
九州大学	正会員	笠間	清伸

1. はじめに

軟弱な沖積地盤が多くを占める我が国での建設工事においては、構造物の健全性確保のために各種地盤改良工法が多用されている。本研究が対象とするセメント固化による地盤改良工法では、原位置で固化材と地盤材料を攪拌混合する方法や、固化材と採取した土を専用機械で混合して撒き出し・転圧する方法、土砂に水または泥水と固化材を加えて混練し狭隘部や締固めが困難な場所等を埋め戻す方法などがある。これら改良地盤の品質は施工条件や対象地盤の性状、固化材の混合性等の影響を大きく受けるため、適切な品質管理を行う必要がある。

設計時に求められる固化改良地盤の強度や変形特性は一軸圧縮強さ q_u を指標とすることが多く、固化改良地盤の品質管理においては一軸圧縮試験が広く普及している。例えば、深層混合処理工法による柱状改良の場合、改良体 500 本ごとにコアボーリングを 3 本行い、1 本のコアについて上・中・下の 3 箇所から 3 体ずつ供試体を採取して合計 27 供試体の q_u を測定し、設計基準強度に対する適否を判断する手法が規定されている¹⁾。一方、一軸圧縮試験で使用する供試体は一般的に高さ 10cm 程度を要するため、採取したコアの亀裂や欠損によっては試験できる供試体の数や位置が限定されてしまうこともある。また、対象地盤の不均質性や固化材の混合の不均一性などにより改良地盤の強度に空間的なばらつきが生じるが²⁾、前述したような限られた数や位置での一軸圧縮試験ではそのばらつきを精度良く把握できるとは言い切れない。

そこで、本研究では一軸圧縮試験では把握できない弱部の有無や連続的な強度分布を簡便に確認できる針貫入試験³⁾に着目し、 q_u と相関のある針貫入抵抗 N_p データを多点計測して改良地盤の強度やばらつきを詳細に把握する品質評価法「T-GeoPenester」の開発にあたっている。将来的には本技術を活用して、変形量や地耐力などに対する改良地盤の性能を適切に評価し、固化材量および施工方法の適正化や品質不良リスクの低減を実現することを目指している。T-GeoPenester の開発内容としては、原位置で効率的に多点の N_p を取得するための測定装置の検討と、 N_p に基づく強度推定法の検討に大別される。

本論文ではまず、開発概要を説明し、「測定装置」と「強度推定法」に分けて検討内容を説明した。次に、「測定装置」について、その仕様および測定精度を確認するための室内試験について詳述し、測定装置の有用性を確認した。さらに、「強度推定法」で新たな推定法を提案し、推定法の検証のために測定試験を行い、その結果を用いて具体的な推定式を提示して提案推定法の推定精度を検証した。

2. 開発概要

(1) 開発方針

著者らが目指す品質評価法は、強度測定法を機械化・自動化することで効率化し、地層構成や地盤特性の分布に対応した細かな強度分布を精度よく測定し、品質指標としての強度を地盤内で網羅的に収集するものである。本研究では、現行の品質管理指標である一軸圧縮強さ q_u の換算値を得る手法として実績があり、測定作業の機械化・自動化が可能な「針貫入試験³⁾」を活用することとした。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抵抗 N_p を測定するものである。

キーワード 地盤改良, セメント改良土, 針貫入試験, 一軸圧縮強さ, 品質管理

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株)技術センター TEL 045-814-7221

針貫入試験には図-1に示す、「携行型」と「机上型」の二種類がある。携行型は、原地盤やコア箱に置かれた試料を対象に、手作業で針貫入を行いバネの最大収縮量から貫入抵抗を測定する。「机上型」は室内に持ち運んだ試料を対象に、貫入速度を機械的に制御し、貫入長さとの貫入荷重の関係を取得する。前者は原位置で簡易かつ迅速に測定が行える点、後者は機械制御により人為的な要素に基づく実験誤差を排除したデータが得られる点が長所である。

換算 q_u 取得においては、検討対象の改良土ごとに相関式を設定するか、図-2に示すような推定式(1)式が用いられている⁴⁾。

$$\log(q_u) = a \cdot \log(N_p) + b \quad (1)$$

$a=0.978, b=2.621$

式(1)は、約 100~40,000kN/m² と広範囲にわたる強度を網羅したセメント改良土および天然岩石の試験結果に基づき定めているため、汎用性が高く強度評価に多用されている。一方、本式の設定根拠である試験結果は、セメント改良土のデータのみでも同程度の実測 N_p において実測 q_u に最大で3倍程度の差異がある。

(2) 開発検討内容

上記既往の試験法の利点・欠点を加味した上で、針貫入試験を活用した新たな品質評価法の開発検討内容を具体化した。取組みの内容は以下の2点である。

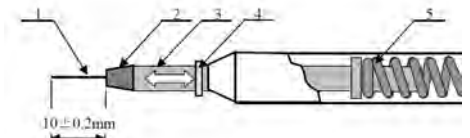
a) 測定装置の検討

対象地盤の多数 N_p データを「携行型」のような迅速さ、「机上型」のような精確さをもって取得することが望ましい。そこで、本検討では両者の利点を備えた形式として、原位置の測定孔内で機械制御して針貫入試験を行う「原位置挿入型」装置を開発する。測定孔内で貫入装置を上下に移動させてデータを収集することにより、効率的な多点測定を実現し、将来的には自動化を目指す。本検討では、装置を製作の上、模型地盤にて測定を行い、動作性や測定精度を検証する。

b) 強度推定法の検討

本研究では品質指標として活用できる N_p を用いた強度推定を目指しており、現行の推定式のままでは q_u 強度換算の精度は十分とは言えない。よって、本検討では新たな推定方法を提示し、その精度を試験データに基づ

携行型



針貫入勾配 N_p (N/mm)
= 貫入量 10mm 時点のバネ反力から換算

机上型

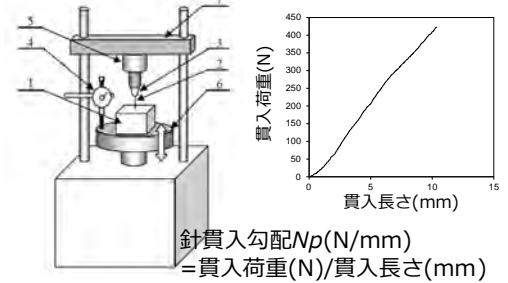


図-1 針貫入試験装置³⁾に加筆

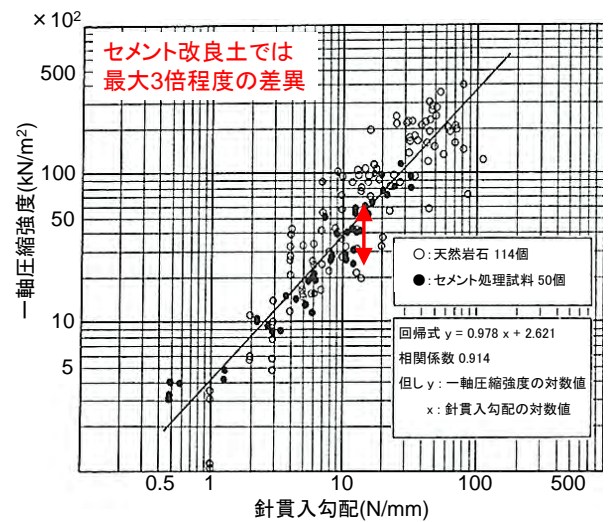


図-2 N_p と q_u の推定式⁴⁾に加筆

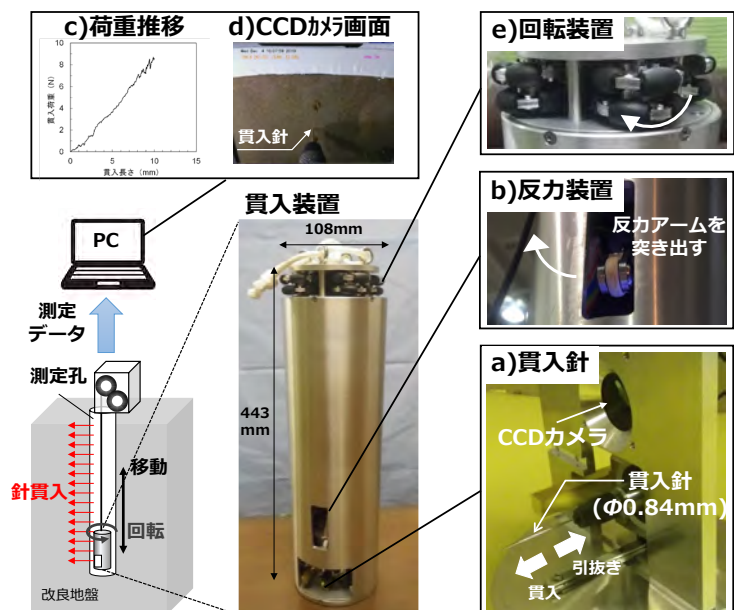


図-3 装置の構造および測定方法

き検証する。

3. 測定装置の検討

(1) 装置の仕様

測定形態は、図- 3 に示すように固化改良地盤に設けた測定孔（直径 110～120mm 程度）内に、図- 3a) のような貫入針を搭載した貫入装置（直径 108mm，高さ 443mm の円筒形）を挿入して針貫入試験を行う「原位置挿入型」とした。測定の流れは、①固化改良地盤孔内に貫入装置を挿入し、所定の深度まで移動させ、②図- 3b) のような反力アームにて測定孔壁面に貫入装置を押し付けて固定し、③孔壁に向けて針貫入を実施して、貫入長ささと貫入荷重を測定し、④所定の長さまで貫入後、針を引き抜いて反力アームを解除し、次の測定点に移動する。貫入速度は試験基準に準拠して 20mm/min で変位制御し、ロードセルで図- 3c) のような貫入過程の荷重推移を測定する。貫入針の上部には CCD カメラを搭載しており、図- 3d) のように貫入状況を PC 上でリアルタイムに確認できる。また、図- 3e) のような貫入装置を孔内で回転させる装置を搭載し、同一深度で円周方向に複数点で測定を行える。上記一連の貫入試験およびデータ取得は全て自動で行う。

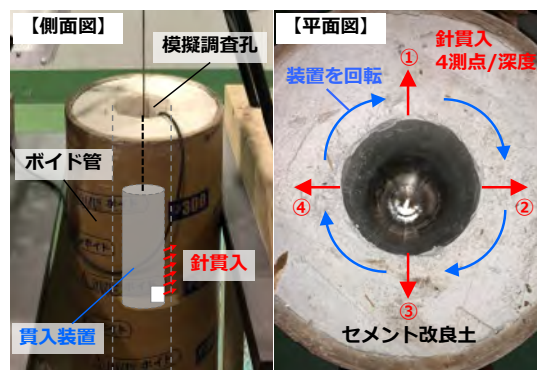


図- 4 原位置挿入型での測定

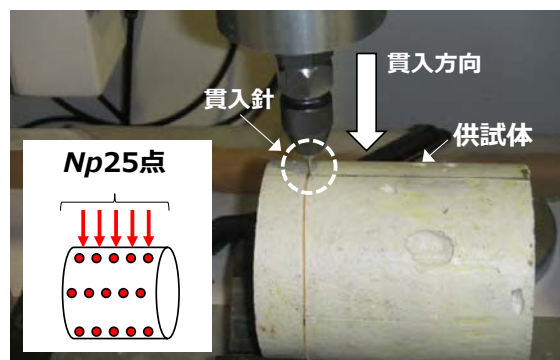


図- 5 机上型での測定

(2) 測定実験

a) 測定内容

測定装置の測定機能・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。

- 原位置挿入型での測定：ポイド管（ $d300\text{mm}\times h1,000\text{mm}$ ）中央部に塩ビ管（ $d114\text{mm}\times h1,200\text{mm}$ ）を設置してその周辺にセメント改良土を打設し、セメント改良土が固結後に塩ビ管を引き抜いて模擬調査孔を用意する。本模擬測定孔の孔壁を対象に 25（深度） \times 4（測点/深度）=100 測点の針貫入試験を行う（図- 4）。

- 机上型での測定：上記セメント改良土をモールドに詰めて作製した 2 供試体（ $d100\text{mm}\times h120\text{mm}$ ）を対象に 1 供試体周面で 5（側線） \times 5（測点/側線）=25 測点の針貫入試験を行う（図- 5）。

表- 1 に測定対象とするセメント改良土の配合条件を示す。本配合は、過去の実績に基づき一軸圧縮強度

表- 1 配合条件

材料名		密度(t/m^3)	添加量(kg)	体積(m^3)
泥水	カオリン粘土	2.75	571	0.21
	珪砂5号	2.67	245	0.09
	水	1.00	571	0.57
セメントスラリー	高炉セメントB種	3.04	139	0.05
	水	1.00	83	0.08
合計			1,609	1.00



写真- 1 原位置挿入型装置での針貫入時の映像

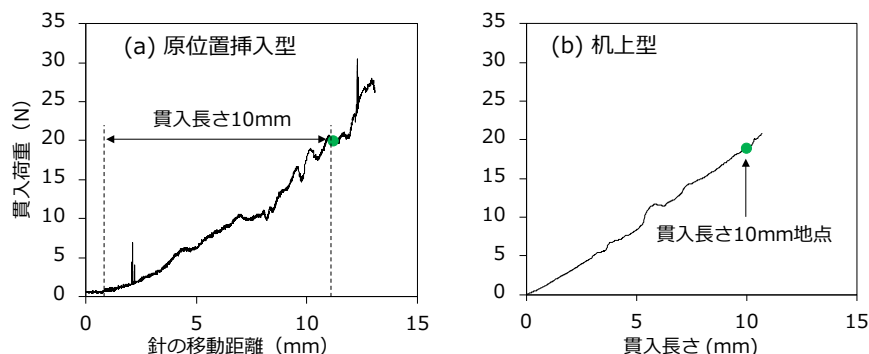


図- 6 貫入長ささと貫入荷重の関係

500kN/m²程度を確保する意図で設定した。

b) 実験結果

写真-1に原位置挿入型装置による測定時に CCD カメラで撮影した針貫入時の映像の一例を示す。これらの映像より原位置挿入型による針貫入は正常に稼働し、今回の模擬調査孔に対しては問題なく動作することを確認した。

図-6に(a)原位置挿入型および(b)机上型で測定した貫入長さ N_p と貫入荷重の係数 N_p の関係を示す。ここで、机上型については、貫入針の先端を供試体表面上にセットしてから貫入を開始するため、図-6(b)に示すように貫入開始から10mmまでが貫入長さとなる。一方、原位置挿入型では、貫入針を装置内にセットバックさせた状態から孔壁に向けて前進させる。そのため、図-6(a)に示すように貫入抵抗を感知しない1mm程度の区間を含み、貫入抵抗を特定する10mmの貫入深さは同図のように設定している。図-6より、原位置挿入型は、貫入抵抗の上下変動が目立つことから固定・貫入機構に改善の余地がある。一方、今回の検証実験を通して1測点あたり2分弱の作業時間で測定できたことから、原位置改良地盤を対象に迅速な多点測定が可能であることを確認した。

図-7に各装置で測定したデータの頻度分布を示す。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、縦軸は頻度を全測定数で除した密度の分布で表記している。原位置挿入型、机上型でデータの分布幅は整合し、原位置挿入型で得た40

点の変動係数は0.139、机上型2供試体で得た各25点の変動係数は0.115、0.082で比較的近い水準となった。以上から、原位置挿入型は机上型と大きな乖離なく N_p を測定できるといえる。また、機械攪拌改良体や締固め安定処理土を対象とした測定実験⁵⁾においても、詳細な強度分布データを取得し、机上型との比較測定でも強度の分布傾向が概ね整合する結果を得たことから、本測定装置の有用性を確認した。

4. 強度推定法の検討

(1) 新たな強度推定法の考え方

推定精度向上に向けた強度推定法の検討に際して、標準寸法($d50\text{mm} \times h100\text{mm}$)の供試体(以降、評価供試体と呼ぶ)内には健全部と潜在的弱部が混在し、供試体内で強度がばらつくことに着目した。一軸圧縮試験下では弱部から破壊が進展するため、供試体内の強度のばらつきが大きいほど一軸圧縮強さは低減する傾向にある⁹⁾。そこで、著者らは、局所的な健全部や弱部の把握に適した N_p の多点測定値は、上記評価供試体内のばらつきを定量的に判断できる指標と考え、図-8のように N_p と q_u の関連付けを以下の2段階構成で解釈することとした。

- i) 貫入長さ10mmの N_p は、供試体の高さが等価となる $d_05\text{mm} \times h_010\text{mm}$ の供試体(以降、基準供試体と呼ぶ)の q_{u0} と関連付ける。(図-8中のi))
- ii) 評価供試体($d50\text{mm} \times h100\text{mm}$)は基準供試体($d_05\text{mm} \times h_010\text{mm}$)の集合体と捉える。(図-8中のii))

本解釈のうち、ii)の妥当性を考察するため、数ある既往の知見のうち Omine⁹⁾らの手法を参照した。本手法

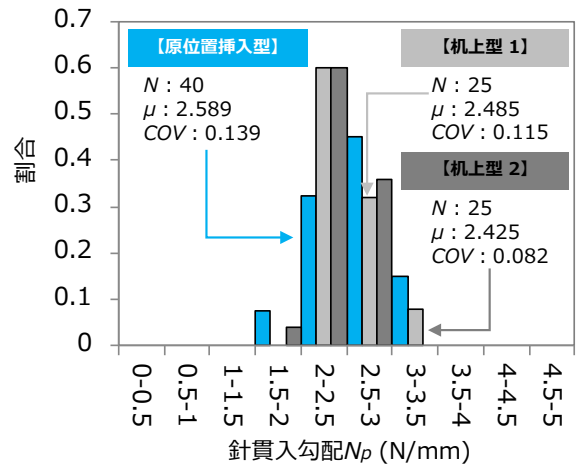


図-7 各 N_p 測定結果の頻度分布

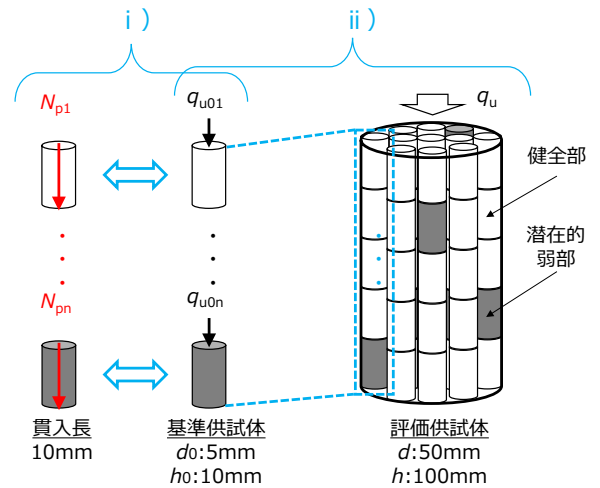


図-8 N_p と q_u の関連付けの2段階構成概念図

では基準供試体の強度のばらつきをワイブルの累積分布関数で定義づけた上で、寸法比とばらつき分布特性に基づき寸法増加に伴う q_u の低減を理論式により表現している。

本理論式を活用して、基準供試体 ($d_0=5\text{mm}$) と評価供試体 ($d=50\text{mm}$) の関連付けを試みたところ、**図-9** 中で暫定的に引いたイ)基準相関式に対して、ロ)のように基準供試体の変動係数 q_{u0_cov} の増加に応じて下方にシフトする結果を得た。さらに基準供試体の q_{u0_cov} が40%の場合の評価供試体の強度を算出すると縦軸の q_u の低下が1/3程度となる。これは、**図-2** に示す現行の推定式の設定根拠となる実測データのばらつき幅で言及した3倍程度の差に整合する。あわせて、基準供試体にばらつきがなく一様であれば寸法の増大に伴う強度低下は生じないとの解釈から、上記イ)の強度基準線は均一性の高い供試体に限定した N_p と q_u の相関により特定できることになる。

(2) 強度換算のための提案式

上記を踏まえ、本研究では強度やそのばらつきが異なる複数の供試体を準備して、机上型装置を用いて多点 N_p データおよび q_u を取得し、下記の手順にて推定式を設定することとした。

i) 均一性の高い評価供試体 (本検討では $0.0 \leq N_{p_cov} < 0.1$) の測定データを基に、式(2)の関係式の係数 A , B を最小二乗法により特定して基準線を定めた。

$$\log(q_u) = A \cdot \log(N_{p_ave}) + B \quad (2)$$

ii) その上で、 N_{p_cov} が0.1を超過する測定データをもとに、ばらつき補正項を加えた式(3)にて、実測値と換算値の残差二乗和を最小にする係数 C , D を定めた。

$$\log(q_u) = A \cdot \log(N_{p_ave}) + B - C \cdot (N_{p_cov})^D \quad (3)$$

式(2)の補正項をべき乗形態にしたのは、実測データに対するフィッティングの自由度を念頭に置いたためである。

(3) 検証データ取得のための測定試験

a) 測定試験の概要

提案推定式を設定および検証するための測定試験を行った。試験では、実測値としての評価供試体 q_u に対して、推定値算出で考慮する基準供試体強度のばらつきを25点の N_p 測定で把握した。

図-10 に測定試験の流れを示す。まず、標準寸法 ($d50\text{mm} \times h100\text{mm}$) に比べて径が20mm以上大きな直径 (70~100mm) で評価供試体を作製した。評価供試体の外周部を対象に机上型装置を用いて25点の N_p を測定した (**図-10** 中の1.参照)。その後、針貫入の痕跡が強度低下を引き起こさないように、針貫入試験後の評価供試体の周面を直径50mmになるまでトリミングして、標準寸法の評価供試体を作製した (**図-10** 中の2.参照)。その供試体を対象に一軸圧縮試験を行い (**図-10** 中の3.参照)、評価供試体ごとの q_u と25点 N_p の平均値 N_{p_ave} と変動係数 N_{p_cov} を一組のデータ (1個の q_u と25個の N_p) として取得した。今回、流動化処理土、機械攪拌改良土、締固め安定処理土を対象に、評価供試体の作製方法、母材、セメント配合量や材齢が異なる合計51

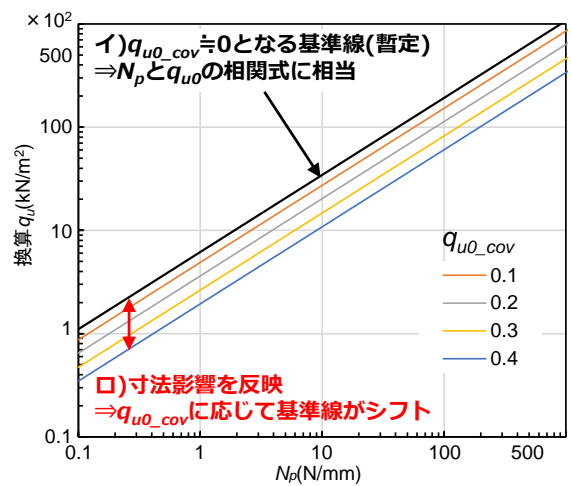


図-9 q_{u0_cov} に応じた N_p と q_u の関係

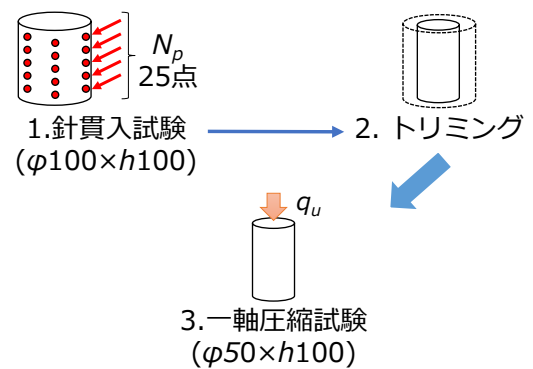


図-10 測定試験の流れ

供試体を準備し、51組の測定データを収集した。各供試体の作製方法の詳細は、文献7)~9)の通りである。

b) 測定結果

各供試体における測定結果を表-2に示す。a) 流動化処理土は q_u が 270~4,500 (kN/m²) の強度水準において網羅的にデータを取得でき、 N_{p_cov} は 0.04~0.39 となった。b) 機械攪拌改良体では、 $q_u < 200$ (kN/m²) と $q_u > 4,000$ (kN/m²) の大きく2つに強度が分かれ、それぞれ N_{p_cov} は 0.10~0.40 の範囲に分布した。c) 締固め安定処理土では、 q_u が 200~1,400 (kN/m²)、 N_{p_cov} が 0.28~0.59 となり、計 51 供試体から広範囲の強度水準でばらつきの異なるデータを確保できた。

図-11に、測定した N_p の平均値 N_{p_ave} と q_u との関係を示し、変動係数 N_{p_cov} の水準で色分けした結果を示す。赤色でプロットした $0.0 \leq N_{p_cov} < 0.1$ と比較的ばらつきが小さい測定データについては、 N_{p_ave} の増加に伴い q_u も増加し、両対数軸上で線形性が高い傾向となった。 N_{p_ave} が同程度の場合、 N_{p_cov} が大きいほど q_u は減少する傾向を示し、最大で7割程度低減する結果もあった。

(4) 測定試験結果による提案式の検証

a) 係数の特定

上記 51 供試体の測定データに基づき、本章(2)で提案した手法にて推定式の係数を特定する。

まず基準線である式(2)を特定するにあたり、相対的に均一性の高い評価供試体として $0.0 \leq N_{p_cov} < 0.1$ のデータを抽出した。 $q_u=250\sim 10,000$ (kN/m²)の測定域を横断する範囲で 16 供試体が該当し、最小二乗法により式(4)を特定した。

$$\log(q_u) = 0.896 \cdot \log(N_{p_ave}) + 2.560 \quad (4)$$

次にばらつき補正項を加えた式(3)の特定において、 N_{p_cov} が 0.1 を超過する 35 供試体について、実測値と換算値の残差二乗和を最小にする係数 C 、 D を特定して、図-12に示すような推定式(5)を特定した。

$$\log(q_u) = 0.896 \cdot \log(N_{p_ave}) + 2.560 - 2.071 \cdot (N_{p_cov})^{1.863} \quad (5)$$

b) 換算値の精度

換算精度を確認するために、本論文で取得した 51 供試体の測定データに基づき、2章(1)のように N_{p_ave} のみを説明変数として算出した式(6)と、提案推定式(5)を比較する。

表-2 各測定結果

測定対象	No.	N_{p_ave} (N/mm)	N_{p_cov}	q_u (kN/m ²)	
a) 流動化 処理土	1	0.91	0.086	271	
	2	1.47	0.165	504	
	3	1.58	0.074	525	
	4	1.67	0.199	524	
	5	1.67	0.157	536	
	6	1.71	0.067	659	
	7	1.82	0.148	653	
	8	1.92	0.079	628	
	9	2.43	0.082	1058	
	10	2.49	0.115	1031	
	11	3.97	0.100	1067	
	12	4.21	0.088	984	
	13	4.99	0.085	1428	
	14	5.33	0.064	1703	
	15	5.51	0.053	1725	
	16	5.92	0.051	1793	
	17	6.99	0.295	1868	
a) 流動化 処理土	18	7.03	0.093	2236	
	19	7.20	0.251	1622	
	20	7.22	0.058	2094	
	21	7.55	0.244	1459	
	22	7.80	0.043	2436	
	23	8.66	0.390	1332	
	24	9.08	0.288	1430	
	25	9.18	0.340	1463	
	26	12.40	0.052	4437	
	b) 機械 攪拌 改良体	27	0.43	0.182	135
		28	0.43	0.380	127
		29	0.56	0.310	131
		30	0.93	0.243	171
		31	0.94	0.260	147
		32	0.98	0.104	196
		33	38.60	0.265	5722
		34	39.76	0.137	8362
b) 機械 攪拌 改良体		35	42.12	0.234	4031
		36	43.11	0.399	5249
	37	43.25	0.100	9367	
	38	44.30	0.117	11277	
	39	45.21	0.091	10179	
	40	48.15	0.178	10395	
	41	48.57	0.199	11497	
	42	50.11	0.175	10260	
	c) 締固め 安定 処理土	43	1.40	0.594	202
		44	1.58	0.409	180
		45	2.56	0.481	467
		46	2.89	0.283	473
		47	4.49	0.307	742
		48	5.83	0.440	880
		49	5.94	0.439	1107
		50	8.64	0.404	1205
		51	15.38	0.339	1393

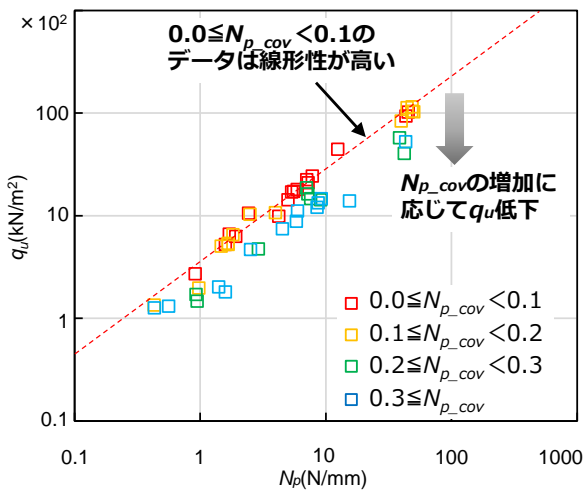


図- 11 N_{p_ave} と q_u の関係

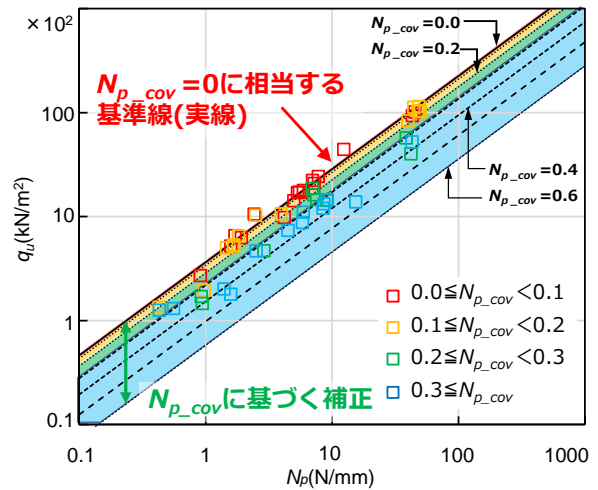
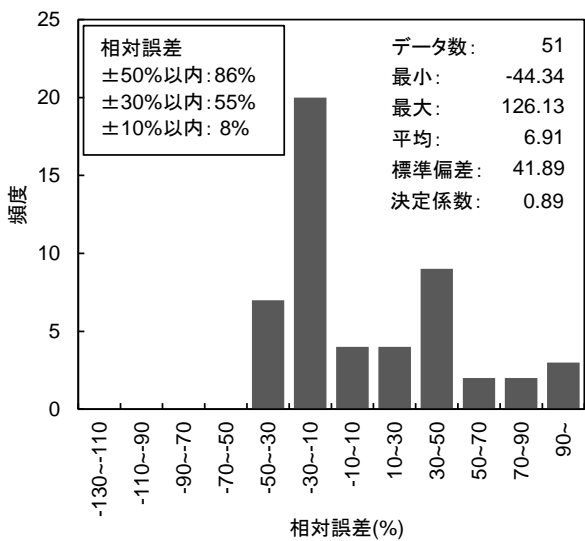
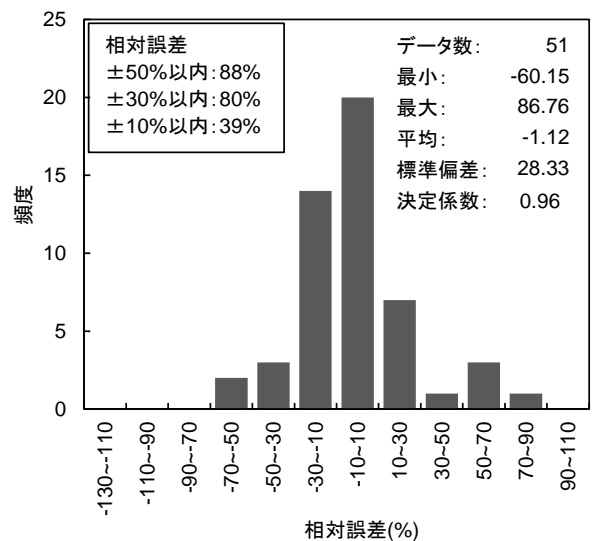


図- 12 提案推定式(5)と N_{p_ave} - q_u の関係



(a) N_{p_ave} のみを説明変数とする推定式(6)



(b) N_{p_ave} と N_{p_cov} を説明変数とする推定式(5)

図- 13 実測 q_u と換算 q_u の相対誤差の頻度分布

$$\log(q_u) = 0.908 \cdot \log(N_{p_ave}) + 2.421 \quad (6)$$

図- 13 に実測 q_u と両式による換算 q_u の相対誤差の頻度分布を示す。 N_p のみを説明変数とする式(6)では、例えば相対誤差 $\pm 30\%$ 以内に収まるデータは55%だが、提案推定式(5)では80%まで向上した。また、両者の決定係数 R^2 を下記式(7)にて算出した。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

y_i : 実測値, f_i : 推定式に基づく換算値,

\bar{y} : 実測値の平均値

R^2 が1に近いほど推定式の精度は高いが、両者を比較すると N_p のみを説明変数とする式(6)では0.89に対し、提案推定式(5)では0.96とより高い結果となった。以上から、 N_p 多点測定によるばらつき補正を考慮した提案推定式の活用により、強度推定精度が向上したといえる。

5. まとめ

本研究では「針貫入試験」に着目したセメント改良地盤の原位置品質評価法の実現を目指し、詳細な強度分

布データを迅速に取得する装置を製作し、針貫入抵抗値に基づく強度推定法の精度を向上させた。以下に取組の内容と結果をまとめる。

(1) 測定装置

- ・ 原位置に設けた測定孔にて多点の N_p を効率的に測定する「原位置挿入型」装置を考案し製作した。
- ・ 検証実験にて 1 測点あたり 2 分弱の作業時間で測定できたことから、迅速な多点測定が可能であることを確認した。
- ・ 原位置挿入型と机上型による測定データを比較した結果、両者のデータは整合し原位置挿入型の有用性を確認できた。

(2) 強度推定法

- ・ 針貫入抵抗 N_p の多点測定データは評価供試体内のばらつきを定量的に評価する指標と考え、多点データに基づく「基準換算」と「ばらつき補正」による強度推定法を提案した。
- ・ 上記提案推定法を検証するために、作製方法やセメント配合量等が異なる 51 供試体を準備し、各供試体にて 25 点の N_p とそれに対応する q_u データを取得した。
- ・ 上記測定試験の結果、 N_p の変動係数 N_{p_cov} が 0.1 以下の場合には両対数軸上で高い線形性を示し、 N_p の平均値 N_{p_ave} が同程度では N_{p_cov} の増加に応じて q_u が減少し、最大で 7 割程度低減することを確認した。
- ・ 測定試験データに基づき係数を特定した提案推定式により、実測 q_u と換算 q_u の相対誤差が ±30% 以内に収まるデータが 25% 増加し、推定精度が向上した。

以上により、新たな品質評価法の基本技術を確立できたと考える。今後、実現場で測定実績を積み上げて、本技術にて取得した多点強度データからセメント改良地盤全域の強度やそのばらつき傾向を把握し、固化材量の低減や施工方法の適正化につながる性能評価への展開を図る所存である。

参考文献

- 1) 土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改定版，2008。
- 2) 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。
- 3) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.426-432，2013。
- 4) 丸東製作所：軟岩ペネトロ計 SH-70，<https://www.rex-rental.jp/jbn/sh-70.html>（2022.07.28 アクセス）。
- 5) 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第 53 号，2020。
- 6) Omine, K., Ochiai, H. and Yasufuku, N.: “Evaluation of scale effect on strength of cement-treated soils based on a probabilistic failure model”, Soils and Foundations, Vol.45, No.3, pp.125-134, 2005.
- 7) 小林真貴子，石井裕泰，藤原斉郁，青木智幸，笠間清伸：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。
- 8) 小林真貴子，石井裕泰，藤原斉郁，青木智幸，笠間清伸：針貫入抵抗測定による一軸圧縮強さの推定法に関する考察（その 1：多点測定による精度向上の可能性），第 13 回地盤改良シンポジウム，pp.169-172，2019。
- 9) 小林真貴子，石井裕泰，藤原斉郁，青木智幸，笠間清伸：机上型装置を用いた針貫入抵抗の多点測定による一軸圧縮強さの換算推定とその検証，第 14 回地盤改良シンポジウム，pp.201-204，2020。