

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：

本研究は、セメント改良土地盤の品質確認や設計評価のためのデータとして、強度特性を効率的に測定・把握するための手法に関するものである。測定方法としては、針貫入試験法を採用し、対象地盤内に設けた調査孔で針貫入抵抗 N_p を収集する原位置挿入型装置の開発と、 N_p から一軸圧縮強さ q_u を推定する換算評価式の検討にあたった。

2018 年度から助成研究として取り組んだ 2 年の成果として、従来の机上型装置による結果との比較を通して測定値の信頼性を確認した。あわせて、種々のセメント改良土を対象とした測定を通して、施工法に応じた強度分布の違いをきめ細かく確認できる有用性を明らかにした。また、25 点 N_p の平均値と q_u を関連付けた「基準換算」、および N_p の変動係数の増加に伴い q_u を低減する「ばらつき補正」を特徴とする新たな換算式を考案した。全 53 試料の検証データにて従来の換算法に比べた精度、信頼度の高さを示すとともに、締固め安定処理土での適用法と注意事項を明示した。

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

本研究は、セメント改良土強度の品質管理・評価を対象とした省力化・省人化、生産性向上に資する取り組みに位置付けられる。一般的な品質管理では、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。こうした従来法に併用・代替できる効率的な評価・判定の開発は、きめ細かな達成品質の把握も容易にし、設計法や施工法の見直しや高度化への貢献性が期待できる。

図 1 に全体研究計画を示す。本研究課題では、「原位置針貫入抵抗測定装置の検討 (図中 A、B、C)」を進めつつ、「強度評価法の検討 (図中 D)」にあたる構成となっている。2018 (平成 30) 年度の助成 1 年目までの取り組みでは、原位置針貫入抵抗測定装置を試作し、主に模型地盤を対象とした測定を繰り返し、装置の使用性や測定結果の信頼性を調査した。評価法に関しては、針貫入抵抗から一軸圧縮強度を得る換算式を新たに考案し、その適用性を測定データに基づき検証した。

本報の対象となる 2019 (平成 31) 年度の取り組みでは、まず、1 年目の現場測定実験で抽出した課題を基に装置を改良した。その上で、表 1 に示すとおり、助成 1 年目の取

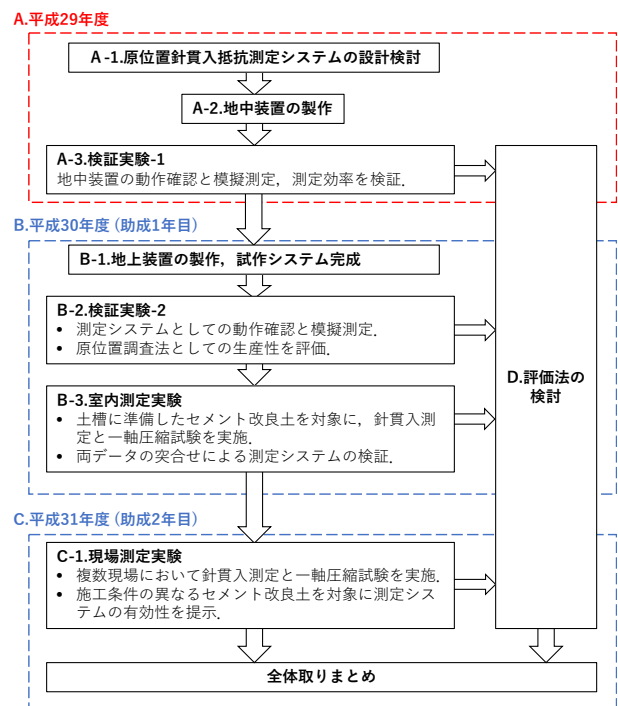


図 1 全体研究計画

組みで網羅できていない強度水準や造成方法が異なる種々なセメント改良土を対象に測定実験にあたり、データ

表 1 測定実験と評価法検討の対象

No.	助成計画 (年度)	測定対象	実施 場所	一軸圧縮強さ(kN/m ²)			
				0 ~ 500	500 ~ 1,000	1,000 ~ 5,000	5,000 ~ 10,000
1	1年目	機械攪拌改良体	現場				⇔
2	(2018)	流動化処理土	室内	⇔	⇔		
3	2年目 (2019)	締固め安定処理土	現場	⇔	⇔		
4		機械攪拌改良体	現場	⇔			
5		流動化処理土	室内		⇔		
6		締固め安定処理土	室内		⇔		
7		締固め安定処理土	現場			⇔	



(a) 装置全景 (b) 背面部スペーサー
写真 1 測定孔の準備状況

の積み上げと評価方法の検討にあたった。

2. 原位置針貫入抵抗測定装置の検討

(1) 測定装置の改良

2018年度の現場測定を通しては、測定孔としてのボーリング孔の径は、現場作業を通して部分的に拡大することがあり、程度によっては測定機本体(写真1(a))を固定する反力アームが機能するストロークを超過することが確認された。これを受けた対処策として、測定孔の大きさに応じて反力アーム背面側本体に、写真1(b)に示すスペーサーを取り付ける機構を付与する改良を施した。

スペーサー厚さは5~35mmまで5mmずつ段階的な選択が可能で、当初の測定孔径の範囲114~116mmについて最大径を151mmに拡大できた。次節以降で示す測定実験でも適宜本機能を活用し、安定した測定を行うことができた。

(2) 測定実験

a) 実験概要

測定実験として表1中のNo.4,6に該当する、「原位置機械攪拌」、「締固め安定処理土」のセメント改良土を準備して測定実験にあたった。

「原位置機械攪拌」については、試験ヤードの地山を掘削した部分に購入山砂を投入した実験用地盤にて、原位置



(a) 原位置機械攪拌 (b) 締固め安定処理
写真 2 測定孔の準備状況

機械攪拌改良工法¹⁾の実機を用いて直径1,200mm、高さ1,000mmの円柱形のセメント改良土を造成した。測定孔3孔の準備のために、造成作業終了直後に攪拌部分上面を露出させ、未固結の状態では塩ビ管(VP100、外径114mm、長さ1,200mm)を3本、バックホウバケットで押し込んで挿入した(写真2(a))。材齢28日で改良体を掘り起こして、20℃管理の室内に移設し、塩ビ管を引き抜いて56日材齢での測定実験にあたった。長さ約1mの各孔に対しては、110mmの測定単位となる9Unitを定め、上部からNo.1,2,3・・・,9と番号付けした。塩ビ管内部に残されていた試料については、等分割して9体/孔×3孔=27体の円柱形供試体を採取した。

「締固め安定処理土」は、20℃の実験室内に設置された地下ピットにて、珪砂5号とトチクレ、普通ポルトランドセメントを混合し、プレートコンパクターを用いて密度管理にて撒き出し・転圧を5回、15cmの仕上がり厚にて繰り返した。測定対象層厚約850mmを確保の上、測定孔はコアリングにて直径116mm、7孔(Bore Hole-1~7)を確保した(写真2(b))。測定単位として各孔深さ方向に4Unitを、7孔分の合計28Unitを定めた。このとき、挿入型に対する比較測定を行うコアリング試料が少なくとも120mm程度の連続する部分を選択し、おおむね各締固め層中央部に位置したが締固め層境界を介在するものも混在した。測定孔、コア採取試料に対しては、下層からNo.a, b, c, dに番号付けした。

b) 実験結果

図2に、双方の測定結果の例を示す。

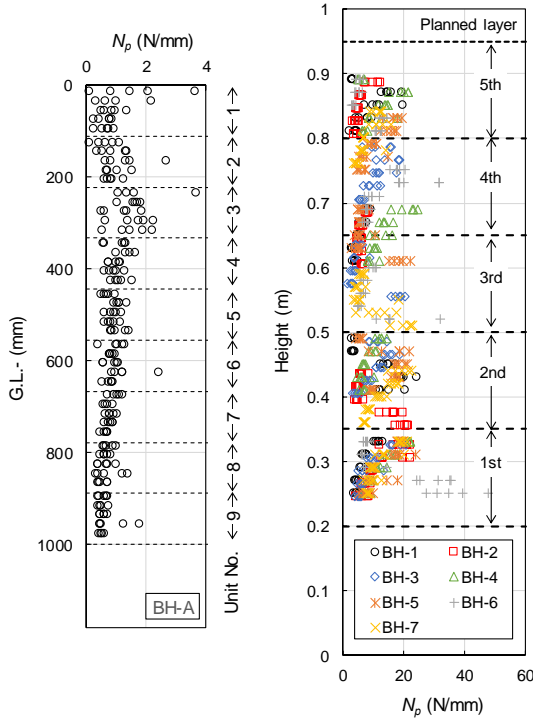
「原位置機械攪拌」については、同図(a)のとおり、1mの測定長さで上層のばらつきが大きくなること、深さ200~400mm付近で相対的に高い強度分布となること、下端・上端付近に突出した測定値が現れることが確認できた。これらは攪拌改良位置での土被りや、改良対象の山砂以外の地山からの土砂混入が影響した結果と推察される。

「締固め安定処理土」については、同図(b)のとおり、個々の調査孔では撒き出し・締固め層に対応して深度方向に強度の増減を繰り返すこと、その分布から層境界を判別することも可能であることが確認できた。

図3には、「原位置機械攪拌」におけるUnit-5を対象にした25点×測定孔3本=75点の測定結果について、測定孔内での原位置挿入型による結果と塩ビ管採取試料を対

象にした机上型による測定結果を頻度分布にて比較した。ばらつき度合いは相対的に机上型で小さくなるものの、度数ピークの出現位置、分布幅は整合した結果が得られることを確認した。

図 4 には、「締固め安定処理土」を対象にした 1Unit 分 25 点の N_p の頻度分布例を示す。左図は、測定結果そのも



(a) 原位置機械攪拌 (b) 締固め安定処理
図 2 針貫入抵抗の測定結果

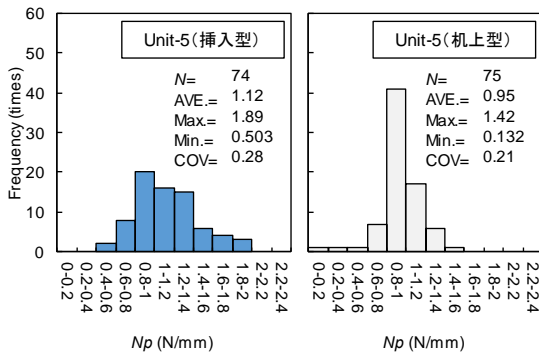


図 3 原位置機械攪拌で得られた測定結果の頻度分布

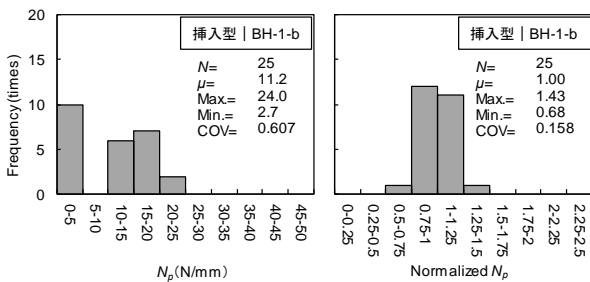


図 4 締固め安定処理土で得られた測定結果の頻度分布

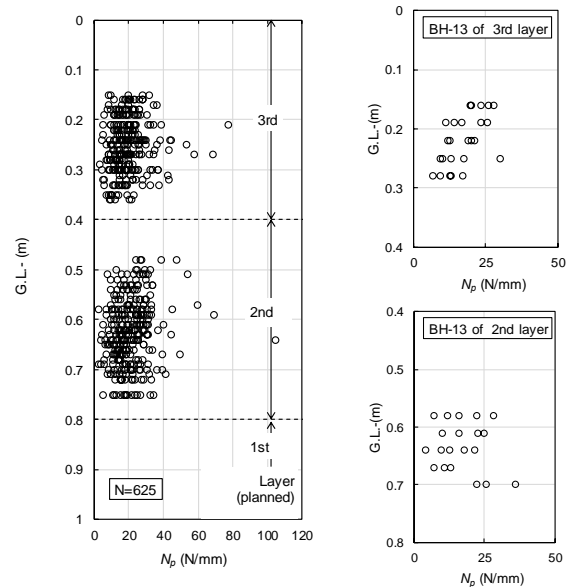
の分布を示したもので、締固め面から下方に離れた低強度分布に相当する $0 \sim 5 \text{ N/mm}$ の度数が卓越する。結果として得られる変動係数が 60% を超えることは施工結果に生じるランダムなばらつき指標としては過大になるものと考えられる。そこで、各深度の N_p 平均値で正規化し深度方向分布の影響を排除した指標として正規化した N_{pV} をとると、同右図の頻度分布は、ランダムに左右対称となり変動係数では 16% 程度との評価に落ち着くことになる。

「原位置機械攪拌」、「締固め安定処理土」を対象とした図 2 の比較を通して、針貫入抵抗の水準は 10 倍の差を確保できた点は、異なる強度水準で測定データを収集する目的に合致した結果となった。また、上記に示した通り、造成方法に応じたきめ細かな強度分布を把握することができたことにより、本研究で採用する手法の有用性を明らかにすることができた。

(3) 現場測定

表 1 中の No. 7 に該当する測定は、某現場での施工実験にて造成された締固め安定処理土を対象に行った。礫質土を破砕機で破砕して粒径調整した母材に、セメントと水を添加して土質改良機で混合したセメント改良土を、仕上がり厚 $0.4\text{m} \times 3$ 層に振動ローラで転圧したものである。養生期間を経て、直径 116mm の測定孔を 13 孔、一般的なコアボーリングで確保した。

測定は、締固め作業の 2 層目 (G. L. $-0.4 \sim -0.8\text{m}$)、3 層目 (G. L. $0.0 \sim 0.40\text{m}$) を測定対象として、各孔で上層、下層の 2Unit を定め、各々の Unit で 25 点の測定を行った。現場での測定作業を極力低減することと Unit 数としては 25 点確保することを念頭に、Bore Hole-1 については下層 Unit のみに絞り、合計 $25 \text{ 点/Unit} \times 25 \text{ Unit} = 625$ 点の挿入型針



(a) 13 孔の全結果 (b) 結果抜粋

図 5 現場測定結果

貫入試験を行った。

挿入型装置で測定を行ったところ、貫入長さに応じて貫入荷重が増加する傾向を示す結果が 54%を占めたのに対して、残りは貫入中で針が破断した。さらに全体の 6%については貫入初期に貫入抵抗が急上昇し測定を中止した。このような結果からは、礫混入の程度を針貫入抵抗で定量的に把握できることを示唆する。

全測定結果の深度分布と上層、下層の結果を抜粋したものを図 5 に示す。貫入抵抗が 50N/mm を超えるものはすべて上記 6%の想定に該当するもので、過大な結果をあたえるものと判断される。これらを除外したものは全プロットで見るとランダムにばらつくように見受けられるが、各 Unit で確認した結果は、上記(2)「締固め安定処理土」と同様に深度方向への分布傾向が確認できる。各測定高でのばらつきが大きめで、下層に行くほど減少する傾向が緩慢と見られる点から、室内とは異なる現場締固めに応じた強度分布特性を把握できたと言える。

3. 強度評価法の検討

(1) 換算式の更新

a) 検討用データの収集

2018 年度の検討で用いたデータに加えて、下記の机上型針貫入測定結果、一軸圧縮試験結果を加えて換算式の妥当性、適用性について検討にあたった

- ① 締固め安定処理土(現場) (表 1 中 No. 3 に該当)

表 2 強度評価法の検討で収集したデータ

種類	No.	N_{p_ave} (N/mm)	N_{p_COV}	q_u (kN/m ²)	備考
①安定処理土	1	4.49	0.31	742	長さ6m のポーリングコア
	2	5.83	0.44	880	
	3	8.51	0.42	1205	
	4	15.38	0.34	1393	
	5	5.94	0.44	1107	
	6	1.40	0.59	202	
	7	2.51	0.50	467	
	8	2.89	0.28	473	
	9	1.58	0.41	180	
②機械攪拌改良体	1	0.94	0.26	147	同一深度で採取
	2	0.93	0.24	171	
	3	0.98	0.10	196	
	4	0.43	0.18	135	同一深度で採取
	5	0.43	0.38	127	
	6	0.56	0.31	131	
③流動化処理土	1	5.92	0.05	1793	体積比 0%
	2	5.33	0.06	1703	体積比 20%
	3	5.51	0.05	1725	
	4	6.99	0.29	1868	
	5	7.20	0.25	1622	体積比 40%
	6	7.55	0.24	1459	
	7	9.18	0.34	1463	
	8	9.08	0.29	1430	
	9	8.66	0.39	1332	

- ② 機械攪拌改良体(現場) (同 No. 4 に該当)

- ③ 流動化処理土(室内) (同 No. 5 に該当)

各々に分類される供試体数と測定結果を

表 2 にまとめる。①では、 q_u が 200~1,400 (kN/m²)、 N_{p_cov} は 0.28~0.59 となり、広範囲にデータを確保できた。②では q_u が 200 (kN/m²) 以下にて、 N_{p_cov} は 0.10~0.38 となりばらつきが小さいものもあった。③については、珪砂 1 号の体積比に応じて N_{p_cov} は増加、 q_u は減少する傾向となった。

b) 段階補正型の換算式

本研究で提案する換算式は、式(1)に示すもので、右辺第 1 項、2 項は従来の換算式と同形式の基本換算に相当し、第 3 項の補正を加えることを特徴とする。

$$\log(q_u) =$$

$$A \cdot \log(N_{p_ave}) + B - C \cdot N_{p_cov}^D \dots \text{式(1)}$$

q_u : 一軸圧縮強度

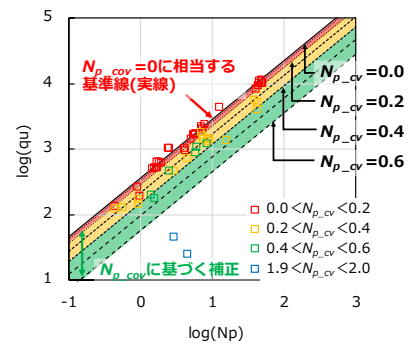


図 6 換算式と測定結果

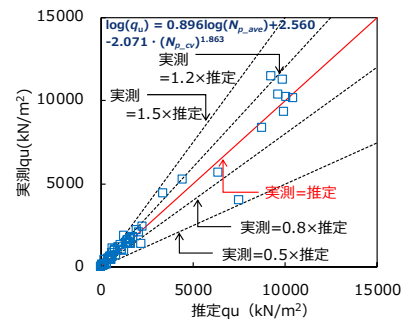


図 7 推定 q_u と実測 q_u の関係

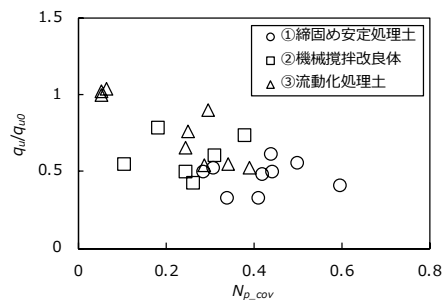


図 8 N_{p_cov} と強度低減の関係

$N_{p,ave}$, $N_{p,cov}$: 25 点 N_p の平均値、変動係数
 2018 年度検討の 29 体の試験結果²⁾に表 2 の 24 体を加えた総計 53 体の測定データを基に、換算式(1)に含まれる係数を、実測値、換算値の残差二乗和が最小になるように特定した。4 つの係数は $A=0.896$ 、 $B=2.560$ 、 $C=2.071$ 、 $D=1.863$ で、測定結果と換算式を図 6 のようになる。今回の検討で係数決定のためのデータ範囲を増大・拡大したものの、これまでの 29 供試体で特定した係数からは大きな変化は見られなかった。

換算式による推定 q_u と実測 q_u 関係をまとめると図 7 のようになり、両者の誤差が概ね $\pm 50\%$ 以内に収まる結果を得た。あわせて、実測 q_u を、式(1)第 1、2 項にて特定した基本換算値 q_{u0} で正規化したところ、 $N_{p,cov}$ との関係は図 8 のようになった。ばらつきは大きいながらも全体的に右下がりとなる傾向は、 $N_{p,cov}$ の増加に応じて q_u を低減させる「ばらつき補正」を取り入れた本換算法の妥当性を示唆すると言える。

(2) 締固め安定処理土に対する評価法

a) 換算方法の考察

前述の「室内締固め安定処理土」で得られた BH-4、Unit-a の N_p 分布と、対応箇所採取した供試体の一軸圧縮試験状況を図 9 に示す。 N_p は締固め度合いの深度影響を受けて減少傾向にあること、その最弱部となる供試体下部に破壊が生じていることが理解できる。「室内締固め安定処理土」の測定では全体的にこうした傾向が見られ、一軸圧縮試験では供試体内の弱部で破壊が生じることが確認された。締固め安定処理土では、原位置機械攪拌混合と大きく異なり供試体内にランダムに弱部が存在するのではなく、周期的に弱部域が表れて一軸圧縮強度の支配要因になることを示唆する。

以上を踏まえて、本研究の提案換算式を締固め安定処理土に適用する場合、「基準換算」と「ばらつき補正」を以下のように設定することに一定の合理性を見る。

- ・ 基準換算： $N_{p,ave}$ に代わる強度の支配要因になる指標値として、側面ごとの 5 点平均で比較した最小値 $N_{p,avemin}$ を選択する。
- ・ ばらつき補正： $N_{p,cov}$ に代わり、深さ方向分布の影響を排除したばらつき指標として、側面ごとの 5 点平均で正規化した N_{pV} を採用し、ばらつき補正はその変動係数 $N_{pV,cov}$ にて行う。

b) $N_{p,avemin}$, $N_{pV,cov}$ 利用の効果

表 3 に、「室内締固め安定処理土」で得られた結果について、 $N_{p,ave}$ と $N_{p,cov}$ 、および $N_{p,avemin}$ と $N_{pV,cov}$ の組み合わせによる方法で算定した換算 q_u 値の一覧を示す。 $N_{p,ave}$ は 5.39 ~ 17.98 (N/mm) の範囲に対し、 $N_{p,avemin}$ は 2.63 ~ 8.99 (N/mm) の範囲に減少し、 $N_{p,cov}$ は 0.183 ~ 0.875 に対し、 $N_{pV,cov}$ は 0.085 ~ 0.407 におさまる結果となった。

$N_{p,ave}$, $N_{p,cov}$ による方法、 $N_{p,avemin}$, $N_{pV,cov}$ による方法それぞれ

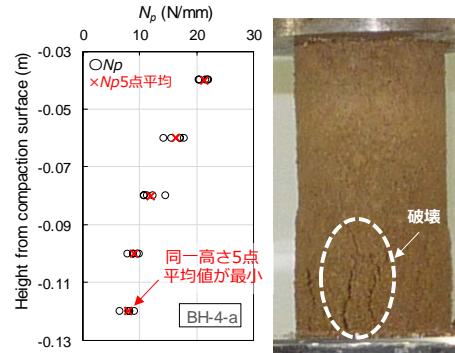
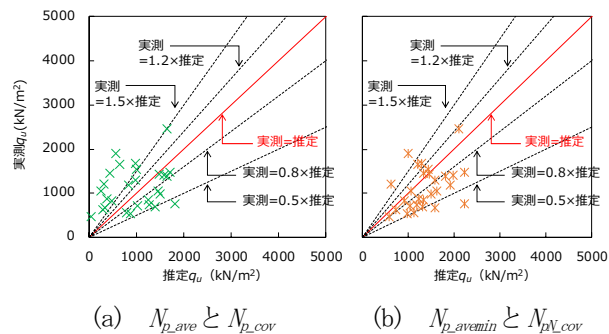


図 9 N_p 分布と一軸圧縮試験結果の一例

表 3 室内安定処理土における測定結果による q_u 換算

No.	BH	Unit	(a)		(b)		
			$N_{p,ave}$	$N_{p,cov}$	$N_{p,avemin}$	$N_{pV,cov}$	
1	1	a	7.15	0.378	4.64	0.135	
2		b	11.24	0.607	3.36	0.158	
3		c	5.39	0.337	3.38	0.122	
4		d	8.25	0.643	3.12	0.238	
5	2	a	11.37	0.474	6.63	0.194	
6		b	10.43	0.616	4.93	0.141	
7		c	6.11	0.183	5.28	0.101	
8	3	d	5.86	0.387	4.36	0.175	
9		a	9.20	0.520	5.11	0.205	
10		b	10.16	0.388	4.51	0.161	
11		c	6.77	0.875	2.63	0.259	
12	4	d	11.04	0.386	5.87	0.224	
13		a	13.36	0.378	8.02	0.085	
14		b	8.48	0.305	6.49	0.170	
15		c	13.24	0.359	8.98	0.155	
16	5	d	11.40	0.469	5.71	0.177	
17		a	13.33	0.385	7.61	0.187	
18		b	13.46	0.416	5.62	0.161	
19		c	8.19	0.663	4.70	0.232	
20	6	d	11.17	0.415	5.93	0.224	
21		a	17.98	0.734	7.32	0.231	
22		b	9.10	0.621	5.14	0.205	
23		c	13.38	0.537	7.52	0.154	
24	7	d	7.66	0.513	3.54	0.134	
25		a	12.17	0.366	8.19	0.144	
26		b	12.64	0.385	7.11	0.094	
27		c	10.01	0.658	5.00	0.407	
28	7	d	8.37	0.400	4.46	0.222	
最大値			17.98	0.875	8.98	0.407	
最小値			5.39	0.183	2.63	0.085	
平均値			10.25	0.479	5.54	0.182	



(a) $N_{p,ave}$ と $N_{p,cov}$ (b) $N_{p,avemin}$ と $N_{pV,cov}$

図 10 推定 q_u と実測 q_u の関係

れについて、換算 q_u と実測 q_u の関係を比較すると図 10 のようになった。後者による方法の採用で換算・実測の整合度が向上したことが認められる。従来変数を利用した場合、実測 q_u に対して過小な値（実測値 = 1.5 × 換算値線より上方に位置する点）が目立つことは、換算計算の「ばらつき補正」による低減が過大であったことを意味し、 $N_{p,cov}$ に代わり $N_{pV,cov}$ を採用したことが結果の違いに寄与したと言える。

c) 現場測定結果への適用

上記 $N_{p,avemin}$ 、 $N_{pV,cov}$ による評価法を、「2. 原位置針貫入抵抗測定装置の検討」の「(3) 現場測定」のデータに適用し整理した。その上で得た実測、換算 q_u の関係は、図 11 のようになり全体的に推定値が過小の評価をあたえる。

本結果については、相当量の礫の混入が強度増加に結び付き、礫以外の部分を測定した針貫入抵抗に基づき推定した強度を実際の強度が上回った可能性が考えられる。

今後、礫分を多く含むセメント改良土については、礫接触率（針の破損率）で礫混入量を判別し、礫および礫以外の改良土強度の程度に応じて割増係数を設定することが対処策として考えられる。仮に今回の結果で割増係数を 2.5 に設定すると図 11 の結果は、図 12 のようになる。実測 $q_u = (0.5 \sim 1.5) \times$ 推定 q_u の範囲に収まる結果は、前出の図 7、図 10(b) で示した既往データのプロットに対して大きくは乖離せず、分布域として整合する。

4. まとめ

まず、原位置針貫入抵抗測定装置の検討に関しては以下の結果と成果を得た。

- ・ 第三の方式として挿入型装置を発明、試作機を製作した。
- ・ 机上型装置との比較で結果の信頼性を確認した。
- ・ 測定 Unit 単位での強度の違いをきめ細かく確認できる有用性を、各測定実験を通して確認した。
- ・ 締固め安定処理土については、締固め面の位置、強度の深度方向分布など、これまでの一軸圧縮強度による手法では確認できなかった施工・品質検証ができることを確認した。

あわせて強度評価法の検討を通しては以下の結果と成果を得た。

- ・ 25 点 N_p の平均値と q_u を関連付けた「基準換算」、および N_p の変動係数の増加に伴い q_u を低減する「ばらつき補正」を特徴とする新たな換算式を考案した。
- ・ 各種測定実験を通して、全 53 試料の検証データを収集、従来の換算法に比べて精度、信頼度を向上した換算値の算定が可能なることを確認した。
- ・ 針貫入抵抗がランダム分布となるスラリー攪拌改良

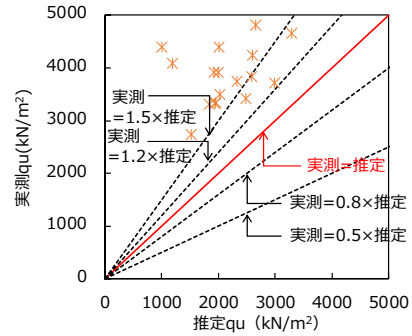


図 11 実測・換算 q_u の関係 (BH-1~7)

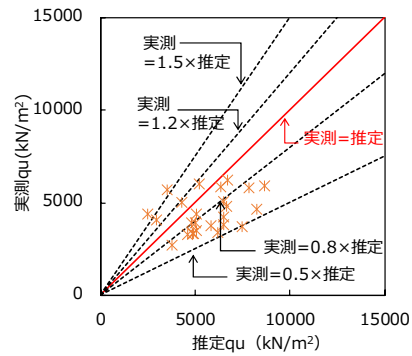


図 12 実測値と礫混入割増し補正 2.5 を考慮した換算 q_u の関係 (BH-1~7)

に対して、締固め面から規則分布が生じる締固め安定処理土について、その施工実態と強度特性を加味した換算パラメータの選定法を提示した。

以上にて、2 年の助成検討で掲げた開発目標は概ね達成したものと考えられる。

併せて今後の課題として、以下が挙げられる。

- ・ 実務利用に耐えうる、装置の機能増強：自動化、針破断の防止
- ・ 強度評価に際しての、データ棄却条件の一般化
- ・ 施工法や設計検討へのフィードバックを含めた活用策の具体化

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。

参考文献

- 1) Fujiwara, T., Ishii, H., Kobayashi, M. and Aoki, T.: “Development and on-site application of new in-situ soil mixing method with ability of obstacle avoidance and inclined operation”, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.2, No.62, pp. 2107-2110, 2016.
- 2) 石井裕泰：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 研究成果報告書, 2017 年度 JICE 研究開発助成, 2018.