深層混合処理工法による改良体の品質評価法

A SYSTEM TO EVALUATE THE QUALITY OF SOIL-CEMENT COLUMN
BY DEEP MIXING METHOD田村 昌仁*¹, 井上 芳生*², 小堀 隆治*³, 渡辺 一弘*⁴, 藤井 衛*⁵日比野 信一*⁶, 小川 能克*⁷, 牧原 依夫*⁸, 阿部 秋男*⁹Masahito TAMURA, Yoshio INOUE, Ryuji KOBORI, Kazuhiro WATANABE, Mamoru FUJII,
Shinichi HIBINO, Yoshikatsu OGAWA, Yorio MAKIHARA and Akio ABE

This paper deals with the system to evaluate the quality of soil-cement column made by deep mixing method. Through the field tests on the several kinds of evaluation methods, main conclusions were summarized as follows. 1) Fundamental index to evaluate the quality is the uniaxial compressive strength of the column by random sampling. 2) The electric resistivity tests to evaluate the mixing degree in the unsolidified condition immediately after the construction, the test method to determine the ratio of unmixed soil parts to the total cross section area in the horizontal cutting surface, and also the integrity tests to evaluate the structural soundness of column are useful to make the standard quality based on the strength of core specimens randomly sampled.

Keywords: ground improvement, soil cement, deep mixing method, quality evaluation, foundation, field tests

地盤改良、ソイルセメント、深層混合処理工法、品質評価、基礎、現場実験

1. 目的

深層混合処理工法は、土と固化材を現位置で攪拌混合する工法であり、改良体の品質は地盤条件や施工条件によって大きく異なる。このため、設計で想定する品質の設定方法や改良効果の確認方法が重要で、信頼できる改良体の品質評価技術が必要不可欠である。

改良体の品質評価に関しては、攪拌性能の評価が最も重要であり、工法毎に独自性を有する攪拌翼などの攪拌条件を考慮し施工機械毎・施工方法毎に評価することが必要である¹⁾。設計者は、採用する工法の施工品質を要求性能との関係に照らして的確に評価しなければならない。しかし、調査法、評価法、地盤の違いによっても、評価結果が異なる可能性があるため、同一条件下で様々な調査等を実施し、評価法の信頼性や適用範囲を明確にすることが重要である。

今回は、同一条件下で施工された改良体に対して、従来のボーリングコアによる一軸圧縮強さだけでなく、電気抵抗による未硬化段階の攪拌混合状況の評価、改良体に含まれる土塊混入状況の評価、インテグリティ試験による評価など、様々な手法を用いて改良体の品質を調査し、各種試験・評価方法の適用性や相互の関連性などを検討したのでその結果を述べる²⁾。また、併せて改良体に必要とされる品質などに関して考察する。

2. 改良体に対する要求性能

改良体に必要とされる基本性能は鉛直支持性能であり、コラム（柱状の改良体1本）の耐力を考えた場合、コラムの設計基準強度 F_c

はコラム1本の鉛直耐力（度）と同程度以上に設定することが必要である。同一現場における実大コラム強度 Q に対して、平均圧縮強度 Q_{ave} 、標準偏差 σ_{col} とすると、 F_c は(1)式で与えられる。実大コラム強度はコア強度の平均値とコア強度の標準偏差などから(2)式で与えられ、 $Q=Q_{ave}$ として F_c とコア強度の関係を求めると(3)式になる。文献1)では、多数の実験結果の平均値として(2)式の $m=1.3$ が示されている。なお、コラムやコアの強度は、同一地層の改良部分を対象としている。

$$F_c = Q_{ave} - k \cdot \sigma_{col} \quad (1)$$

$$Q = quf - m \cdot \sigma_{cor} \quad (2)$$

F_c : コラムの設計基準強度 Q_{ave} : コラム強度の平均値
 σ_{col} : コラム強度の標準偏差 Q : コラム強度（実大強度）
 quf : コア強度の平均値 σ_{cor} : コア強度の標準偏差
 k, m : 係数

$$F_c = quf - \beta \cdot \sigma_{cor} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{kV_{col} + mV_{cor}(1 - kV_{col})}{V_{cor}} \quad (4)$$

β : 係数 V_{cor} : コア強度の変動係数 V_{col} : コラム強度の変動係数
(3)式の β 値は、(4)式で与えられ、コア強度やコラム強度の変動係数との関係でみると表1となる。コラムは構造体でなく地盤であり、 k の値として0.5~1でも支障ないと考え、コア強度やコラム強度の変動係数が20~30%程度の範囲における β 値は概ね1.5~2.4となる。

*1 建築研究所国際地震工学センター 上席研究員・工博

*2 都市基盤整備公団東京支社建築課 課長

*3 都市基盤整備公団阪奈工事事務所 所長

*4 都市基盤整備公団埼玉地域支社 構造専門役

*5 東海大学建築学科 教授・工博

*6 (株)テクノックス技術本部

*7 基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤工学センター

*8 アルファ・ジオ(株) 代表取締役

*9 (株)東京ソイルリサーチ特殊試験室 室長

Building Research Institute, Dr. Eng.

Urban Development Corp.

Urban Development Corp.

Urban Development Corp.

Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Tokai University, Dr. Eng.

Tenox Corp.

Kiso-Jiban Consultants Co., Ltd. Geo-Technical Engineering Center

$\alpha \cdot$ Geo

Tokyo Soil Research Co., Ltd.

$\beta=2$ の場合、 F_c に対するコア強度の不良率は 2.3% となり、 $\beta=2$ が実現されているコラムからコアを数多く採取した場合、想定した品質が実現されているかどうかの条件は(5)式で表される。このため、コア強度による合否判定基準は、その変動係数を 20~30% とすると、 $q_{ub} > (1.7 \sim 2.5) F_c$ となる。

表 1 係数 k と β の関係

変数 k	コラム強度に対する不良率 (%)	変数 β
0	50	1.3
0.5	31	1.5~1.8
1	16	1.7~2.4
1.3	10	1.8~2.7
1.65	5	2.0~3.1

注) $V_{cor}=20 \sim 30\%$ $V_{cor}=20 \sim 30\%$ の場合

$$q_{ub} \geq F_c + 2\sigma_{corb} \quad (5)$$

q_{ub} : 採取したコアの平均強度、

σ_{corb} : 採取したコア強度の標準偏差

コア強度の変動係数が 40% を超えても、コラムが一体として固化し、ばらつきに応じた設計がなされていれば特に支障ないと考えられるが、 V_{cor} が 40% を越えると正規分布を仮定した統計上の取り扱いが難しくなるだけでなく、 q_{ub} の値が(5)式より $5F_c$ 以上となり、コア強度のばらつきの幅も大きくなるので、コアの採取数が少ないと信頼できる品質検査方法を設定することが難しい。このため品質検査に関して、今回目標とする改良体の品質としては、 V_{cor} が概ね 30% 以下でかつコアを採取する際に無作為な採取が可能となるような固結状況と考えた。ボーリングコアの直径が 5~10cm と小さいことを考えれば、固結範囲に含まれる未硬化な土塊の割合が大きくなると無作為なコア採取が困難となる。このため、ボーリングコアに含まれる未硬化部分の割合に制限を設けることが多く、文献 1) では未硬化部分の割合がコア 1m 毎に 10% 以下であることをコア強度検査が実施できる要件としている。このようなことから、コア強度を指標としてコラムの品質を詳細に評価するためには、土塊混入状況の評価が必要不可欠で、詳細に検討するためには従来のボーリングコアによる深度方向の土塊混入状況だけでなく、コラムの水平断面に対する土塊混入状況の評価が有用である。攪拌翼の形状や攪拌方法によっては、コラム水平断面の外周部や中央部の攪拌が不十分な場合もありうる。

3. 評価項目及び実験概要

改良体の基本性能評価指標は、コラム強度やコア強度による抜き取り検査が一般的である。その強度とばらつきが正しく評価されていることを判断するためには、土塊の混入状況がコアの抜き取り状況に影響することを考慮すると、コラムの平面的な混ざり具合及び深度方向へのコラムの混ざり具合を現すコラムの連続性に関しても定量的に把握しておくことが必要である。そこで、今回は、表 2 に示す種々の評価方法を用いて、適用範囲や各種試験の相互の関連性などを検討することにした。実験は、埋土・粘土質シルトを対象とした実工事を利用した実験 A と、関東ローム層を対象にした試験工事として実験 B を行った。特に実験 B は、標準品質（施工時間 14 分）、低品質（施工時間 7.7 分の急速施工）、極低品質（施工時間 7.7 分の急速施工かつ共回り防止機能のない施工）のコラムを人為的に築造して品質の比較実験を実施した。図 1、表 3 には、コラムの標準施工仕様と施工管理基準、柱状図等を示す。なお、品質評価の対象となったすべてのコラムに関しては計画した施工仕様が確保されていることを深度計・流量計・電流計などの自動計測データにより確認しており、この確認はコラムの品質評価を行う前提条件となる。

4. 調査方法の概要

4.1 コア強度試験

コア強度は、改良体の基本性能評価指標であるため、コラム頭部だけでなく、ボーリングコアや深部の水平切断面から多数コアを採取して一軸圧縮強さのばらつきなどを把握することが必要である。この結果は、他の手法の信頼性を判断するための指標となる。

表 2 改良体の品質評価に用いた試験方法

試験の種類	試験方法	説明
ボーリングコアによる調査	一軸圧縮試験	ボーリングコアの端面を成形・キャッピングし、圧縮試験を行う。
土塊混入状況の評価試験	コア採取率調査	ボーリングコア全長に混入する未固結の土塊部分の割合を求める。
	ポケット型コーン貫入試験	コラム水平断面の未固結部分の土塊の割合を求める。
	ピン貫入試験	
ボーリングコアを利用した試験	孔内水平コーン貫入試験	孔壁にコーンを水平に貫入し、貫入抵抗を求める。
	ボアホール映像調査	テレビカメラを孔内に挿入し、孔壁の観察を行い、固結状況を確認する。
	電気抵抗調査	孔内周部の電気抵抗と自然電位を測定する。
非破壊試験	IT 試験	コラムの頭部を軽打し、生じた反射波の状態でコラムの連続性を判定する。
未硬化状態での調査	電気抵抗調査	電気抵抗コーン貫入試験を用いて、深度方向の土塊混入状況を電気抵抗で捉える。
	未硬化段階のソイルセメントの採取方法	採取器を鉛直に挿入し、未固結材料を採取し、攪拌混合状況を確認する。

表 3 各実験における施工仕様と施工管理基準

実験	コラム No.	改良径 (mm)	改良長 (m)	添加量 (kg/m^3)	W/C (%)	練戻長 (m)	速度 (r/min)			共回り防止機能
							掘削時	引上時	練戻時	
A	1	1300	11	250	60	1.0	0.5	1.0	1.0	有り
	2			250		1.0	0.5	1.0	1.0	有り
	3			300(上)* 420(下)*		4.0	0.4	1.0	1.0	有り
B	1	1200	4	360	60	1	0.4	1.0	1.0	有り
	2					無し	0.7	2.0	無し	有り
	3					無し	0.7	2.0	無し	無し

* コラム上部まで添加量 300 kg/m^3 、下部 7~11m まで添加量 420 kg/m^3

図 1 実験 A、B における地盤状況

4. 2 電気比抵抗調査

電気比抵抗測定は、地下水調査法などとして広く用いられているが、コラムに対する適用実績^{2)~4)}から、

①セメント量が 1m^3 あたり 100kg 以上の割合でほぼ均一に攪拌されていると比抵抗が $(0.1\sim 8)\Omega\cdot\text{m}$ を示す。

②比抵抗のばらつき・変化が大きいと攪拌が十分でない。

などを見出した。この測定による改良体の品質評価の対象は改良体の連続性の評価であり、今回は、比抵抗値のばらつき・変化を指標とする定量的な品質評価法を検討することにした。測定は、4 個の電極が取り付けられている比抵抗コーン（図 2）を未硬化段階の改良体に圧入しながら、連続的に比抵抗値を測定するものである。コーン貫入速度は毎秒 1cm とし、測定間隔は $5\sim 10\text{cm}$ 間隔とした。

図 2 電気比抵抗調査概要

4. 3 電気検層試験

電気比抵抗測定は未硬化段階の評価を目的としているが、電気的性質を指標とする硬化後の評価の可能性を調査するため、ボーリング孔を用いて電気検層試験を行った。電気検層試験は、図 3 に示すように、ボーリング孔を用いて地層の比抵抗や自然電位を測定する試験で、電極間隔が 0.25m 、 0.50m 及び 1.0m を標準とするノルマル検層と 2.5cm 、 5.0cm を標準とするマイクロ検層がある。測定はボーリング孔内にゾンデを挿入し、各検層を連続的に行った。

図 3 電気検層調査概要

4. 4 孔内水平コーン貫入試験

改良体からサンプリングした試料に亀裂・ひび割れ、断面欠損があると、強度確認用の試料が確保できないことがある。この場合は、

一軸圧縮試験によるコア強度の評価が困難なので別途の方法で品質を評価しなければならない。ここでは、ボーリング孔の壁面を利用した孔内水平コーン貫入試験を実施して改良効果を確かめることにした。試験は、図 4 に示すように、外形 $\phi 64\text{mm}$ 、長さ 460mm のゾンデを孔内に挿入し、所定深度で孔壁に垂直にコーンを圧入して、その時の押す圧力と貫入量から貫入抵抗 q_{c0} を求める試験¹¹⁾である。室内実験で一軸試験と同じ装置を用いて囲りを拘束し、上方からコーン円錐を貫入させて、ソイルセメントに対する適用性を調べたところ、コーン貫入抵抗 q_{c0} と一軸圧縮強度 q_u には $6\sim 8$ 倍の相関関係（図 4 右参照）があり、 q_{c0} を改良体の強度指標として用いることにした。

図 4 孔内水平コーン調査概要

4. 5 ボアホール映像調査

孔壁の出来映えを目視確認することができれば、局所的に介在するガラなどが原因でコア強度の確認が困難な場合や強度が予想外に不足している場合の原因・対策を考える上で有益である。今回は、ボアホール映像調査法⁵⁾を用いて、ボーリング孔の壁面の映像を確認することにした。図 5 は、装置概要である。

図 5 ボアホール映像調査概要

4. 6 土塊混入状況の評価試験⁶⁾

改良体に土塊が多く含まれると、無作為なコア採取が困難となり、コア強度による品質評価の信頼性が低下する。このため、コラムに含まれる土塊量の情報に基づいた強度や連続性の評価が重要である。

土塊混入状況に関しては、フェノールフタレイン溶液をボーリングコアやコラムの水平切断面に塗布する方法があるが、土塊部分でも赤色反応が見られることがあり、信頼性は必ずしも十分でない。写真 1 は、コラムの切断面にフェノールフタレイン液を塗布したものであるが、指圧により明らかに土塊と判断される部分であっても赤色反応が認められた。土塊の大きさや土塊中の土粒子の大きさにもよるが、

硬化するまで土塊は泥状の混合部分と接触するため、間隙水の pH が高くなることなどが原因と考えられる。

注) 目視・指圧等で確認した土塊部分も赤色反応を示す。

写真1 フェノールフタレイン溶液による
コラム水平断面の土塊混入状況

(1) コア採取率調査

コラムの連続性の評価として、コア採取率を指標として用いて検討した。コア採取率とは、ボーリングにより採取したコアから土塊部分を除いたコア長を採取長で除して得られるものであり、コア断面に対して土塊及び未硬化状態である固化断面欠損の割合が概ね 50% 以上の場合を土塊部分¹⁾と判定した。また、(100-コア採取率)を土塊混入率として評価する場合もある。図6にコア採取率による評価法を示す。

図6 コア採取率による評価法

(2) ポケット型コーン貫入試験

ポケット型コーン貫入試験は、コラム水平断面の土塊混入率の評価を目的としている。施工後1週間程度経過したコラムをバックホウ等で切断して平面に成形し、断面の5cm メッシュ交点にポケット型コーン貫入試験機(最大押込み抵抗値 100N、図-7a 参照)を用いて貫入抵抗を測定した。この方法では、貫入抵抗値「100N 未満」を土塊部分、「100N 以上」を固結部分、さらに不整形で測定困難な測点を測定不能部分に区分した。土塊混入率は、全測点数から「測定不能」の測点数を差し引いた測点数と「100N 未満」の測点数の割合とした。貫入抵抗値が 100N のコーン貫入抵抗 q_c は 500kN/m^2 であり、粘性土の

図7 ピン貫入試験用測定器

q_c と一軸圧縮強度 q_u との一般的な関係($q_c=5q_u$ 前後)から判断すると、100N で貫入できるソイルセメントの強度は概ね 100kN/m^2 以下であると考えられる。

(3) ピン貫入試験

この試験は、コラム断面にピン(爪楊枝、図-7b 参照)をポケット型コーン貫入試験と同様に5cm メッシュの交点に手で貫入させ、ピンが1cm 以上貫入した場合を土塊、1cm まで貫入しなかった場合を改良体と判断し、コラム断面に突き立ったピン本数の割合を土塊混入率とした。ピンが1cm 以上貫入するソイルセメントの強度は、室内試験で調査したところ、概ね 100kN/m^2 以下であった。

4.7 IT 試験

IT 試験は、硬化したコラムの頭部に加速度計を設置した後、ハンマーで頭部を軽打して弾性波を発生させ、弾性波の反射性状を解析してコラム長や弾性波速度から評価する手法である。この手法は、基礎杭の健全性調査として実績が多いが、今回はコラムを対象とした深度方向の連続性の評価を目的として実施した。図8に測定方法を示す。IT 試験でコラムの品質評価¹⁾を行うには、コラム長や弾性波速度のいずれかを初期値として与える必要があり、ここでは、改良長は施工記録通りであると仮定した。これまでの実績から判断すると、この手法の適用範囲は、コラム強度が 1MN/m^2 以上、改良長が4m 程度以上と考えられる。

図8 IT 試験概要

4.8 未硬化段階のソイルセメントの採取手法

未硬化段階のソイルセメントの採取は、

- ① 攪拌混合状況を施工直後に確認すること
- ② 強度を簡便に早期に確認すること

を目的として行われる。①の場合には、コラム施工直後にサンプラーを地中に押し込み、深度方向の試料を数m にわたり採取する。採取装置は試料土を乱すことなく採取できるように工夫されており、試料を目視確認することにより、土塊の混入状況、コラムの深度方向の連続性などを施工直後に評価できる。

図9 未硬化段階のソイルセメント採取装置

②の場合には、直径 10cm、高さ 20cm 程度の採取器を用いて試料を採取する方法が実用的である。採取した試料をモールドに充填して供試体を作製し、早期強度を確認することが可能である。今回は、攪拌混合状況の確認を目的として、図 9 に示す採取装置を用いて採取した。

5. 実験結果

5.1 コア強度試験

各実験におけるボーリングコア及び水平切断面から採取したコアの強度試験結果を表 4 に示す。実験 A では、概ねコア採取率が 100% に近く、同一層に対する変動係数も 30% 以下と少ないが、実験 B では No.1 を除くと攪拌が不十分であることが伺える。

表 4 各実験におけるコア強度およびコア採取率

実験	コラム No.	採取位置	コア数 (個)	平均強度 (Npa)	変動係数 (%)	コア採取率 (%)	評価区間
A	1	頭部	25	3.13	18.8	97.7	GL-6.5m
		ボーリング	18	2.48	37.9		
	2	頭部	25	2.55	15.5	99.1	GL-11.0m
		ボーリング	28	3.14	59.8		
	3	ボーリング	31	9.34	33.8	100.0	
B	1	頭部	25	2.70	10.0	96.6	GL±0m
		中間	23	2.40	31.0		
		ボーリング	10	1.40	21.0		
	2	頭部	25	2.00	17.0	72.4	
		中間	27	0.30	59.0		
		ボーリング	12	0.80	98.0		
	3	頭部	25	1.90	28.0	37.3	GL-3.0m
		中間	9	0.40	174.0		
		ボーリング	11	0.07	28.0		

注1) 実験BはGL-3.0mまでのコア採取率

注2) コア採取率は土塊部分を除いたコア長から求めた、⇒土塊混入率は、(100-コア採取率) %

5.2 電気比抵抗と電気検層調査

実験 A では No.1 において電気比抵抗測定と電気検層試験を実施し、電気比抵抗測定は各コラムにつき 1 回の測定を行い、電気検層試験は各コラムにマイクロ検層とノルマル検層を実施した。測定結果を図 10 に示す。電気比抵抗測定ではコラム施工前の原地盤の比抵抗とセメントミルク原液の比抵抗測定が必要である。電気検層は、硬化後にボーリング孔を利用して測定を行ったが、孔壁の崩壊により全長にわたって測定できなかった。No.1 におけるコラムの電気比抵抗は、原地盤の比抵抗とセメントミルク原液の比抵抗の中間に位置し、コラム改良長 (GL-11m) を過ぎると原地盤の比抵抗に収束している。GL-6.0m までは、ガラ等を多く含んでいたためか、比抵抗がやや大きくばらつきもあるが、それ以後の改良区間では概ね一定の値を示している。

電気検層試験は、GL-8.0m までの測定であったが、ノルマル検層とマイクロ検層ではいずれも電気比抵抗調査による測定値よりもかなり高い比抵抗を示した。これはセメントが硬化したため含水比が減少して比抵抗が上昇したためと考えられる。ノルマル検層は、マイクロ検層と比較して測定間隔が大きくコラムと地盤の境界などの影響も受けやすく、品質評価法としては信頼性が低い。マイクロ検層は、測定間隔が小さく、ノルマル検層と比較するとやや信頼性があるが、作業効率や精度などを考えると現段階では実用的とは言えない。

現場 B ではコラム 3 本に対する比抵抗測定を行い、測定結果を図 11 に示す。測定長は 3m で、No.1 (標準品質) コラムでは、3 回の測定結果はほぼ同等で一定値を示し、概ね均質に施工されていると推定できる。No.2 (低品質) コラムでは、GL-2.0m 付近から比抵抗値が若干波立つ傾向にあり、原地盤の比抵抗値に近い値を示す箇所も見られる。No.3 (極低品質) コラムでは、上部の 1.0m を除くと深度方向のばらつきが非常に大きい。掘出し試験を実施し、GL-2.0m 地点での切断面を確認したところ、図 12 に示すように No.1 コラムでは土塊の混入は認められず、No.2 では若干の土塊が認められた。No.3 コラムでは、ほとんどが土塊であった。

図 10 実験 A (No. 1) における比抵抗調査結果

図 11 実験 B における比抵抗調査結果

注) 水平切断面 (深度 2m) において、目視及び色彩に基づきパソコン上で画像処理を行ったもの

図 12 実験 B における水平切断面の土塊混入状況

5. 3 孔内水平コーン貫入試験

孔内水平コーン貫入試験は、孔壁が滑らかでなく礫・ガラなどを含むと信頼性が乏しいため、実験 A-No.3 の孔壁が比較的滑らかな深度 GL-5.0~11.0m の範囲で実施した。試験結果を図 13 に示す。測定は深度 10cm 毎、コーン貫入速度は 5.0mm/分程度である。図中にはボーリングコアの一軸圧縮強さ (実測 q_u) も併せて示す。途中 GL-10m 付近で孔壁に凹凸があり測定できない個所があったが、コーン貫入抵抗値 q_{co} から求めた換算 q_u と実測 q_u の傾向は図 4 と同様、類似しており、 q_u との相関は概ね $q_{co}=7q_u$ 程度であった。

図 13 孔内コーン貫入試験結果

5. 4 ポアホール映像

ポアホール映像調査は、実験 A、B とは別地点で実施した。ボーリング孔内には掘削時の泥水あるいは懸濁液が充満しているので、映像の鮮明度を高めるため孔内の洗浄を行った。洗浄作業を迅速に進めるため、沈降促進剤を投入し、30 分程度放置してから撮影した。図 14 は、映像結果とボーリングコアのスケッチ (ボーリング孔壁の展開図) である。ポアホール映像による図面はボーリング孔壁を展開している。

ボーリングコアで土塊が

図 14 ポアホール映像結果

混入している位置の映像は、他の部分と色相が明らかに異なっており、土塊の色を反映していると考えられる。均質に施工されたコラムであれば、土質によっても異なるが、ある程度は同様の色相と考えられ、土塊との区別が可能であろう。

5. 5 土塊混入状況の評価

(1) コア採取率調査

ボーリングコアのコア採取率は表 4 に示しており、実験 B の No.2、No.3 を除くと、いずれも 95% を上回っており一体に固結していた。

(2) コラムの水平切断面の土塊混入状況

実験 B の 3 本のコラムについて掘出し試験を実施し、深さ約 2.0m 地点の水平切断面でポケット型コーン貫入試験とピン貫入試験を行った。土塊混入率を求めるためパソコン上で画像処理した断面観察結果を図 12 に示す。写真 2 は、ピン貫入による土塊混入率の試験状況である。表 5 に両試験による土塊混入率を示すが、ピン貫入試験による土塊混入率は、断面観察結果による土塊混入率とほぼ同等と評価される。ポケット型貫入試験は、土塊が多いと試験結果の数値が表せない欠点

表 5 水平切断面の土塊混入率結果

コラムNo.		1	2	3
ポケット型 コーン貫入	貫入抵抗10kg以下の測定本数 (本)	7	86	—
	測点総数 (本)	405	433	—
	土塊混入率 (%)	1.7	19.9	—
ピン貫入	土塊と判断したピン本数 (本)	6	82	255
	測点総数 (本)	377	377	377
	土塊混入率 (%)	1.6	21.8	67.6
断面の観察により求めた土塊混入率 (%)		4.6	23.7	66

写真 2 ピン貫入試験による土塊混入率試験状況

があるが少ない範囲では同等の評価を与えている。以上の結果から、径 1200mm のコラムの場合、5～6cm 間隔の格子点上の測点での調査、即ちコラム断面 30cm²程度に一カ所の調査で土塊混入率が概ね把握できると思われる。ピン貫入試験は、特別な試験器具を用いずに、現場で容易に土塊混入率が測定できる特徴があり、水平切断面の攪拌混合度を詳細に把握するために有用であると考えられる。なお、今回の実験では、コラム頭部は深部の攪拌状況に係わらず攪拌が良好になっており、水平切断面の攪拌状況を把握するためには深度に対する配慮も必要であろう。攪拌中は十分に攪拌された泥状の混合土が地表に排土される場合が多いことから、空打ちする場合を除くと、一般に地表付近は繰り返し効果が高いと考えられる。

5. 6 IT 試験

IT 試験は実験 A、B で実施し、実験 A では No.1、2 の他に改良長および施工条件が同じ実施工コラム 25 本の測定を行った。捨コンが打設される前のコラム頭部に対して試験を実施するものとし、1 本のコラムに対して 4 回の記録を行い、波形の再現性を確認した。また、今回実施したコラムに対する評価は、①先端反射の有無、②先端反射以外の反射波の有無、に着目し、判定は表 6 に基づいて行った。

表 6 IT 試験による品質評価法

判 定	条 件
優	先端反射が明瞭でこれ以外の反射波を含まない
良	先端反射が確認できるがこれ以外の反射を含む
不可	先端反射が確認できない

図 15 IT 試験結果

上記の評価を適用すると、実験 A では、No.1、2 を含む 21 本が“優”、それ以外はすべて“良”となった。また、実験 B では、低品質コラムでは先端反射が確認できず判定は“不可”となり、それ以外の標準品質及び低品質コラムでは“優”の判定となった。測定結果を図 15 に示す。実験 B の No.3 (極低品質コラム) を掘出して確認したところ、コラムの最外周はセメントミルクの薄い膜で覆われているが、写真 3 に示すように内部はほとんど未硬化であった。このため、IT 試験で“不可”と判定されたコラムに関しては、施工状況や地盤状況を考慮した詳細検討が必要と考えられる。コラムの最外周部に“薄皮饅頭状”のセメントミルクの外殻が生じる原因としては、

- ①攪拌翼の水平方向のぶれなどが生じると攪拌不良な層が生じやすい。
- ②最外周部は中央部と比較して土の動きが半径方向に拘束され攪拌しにくい。
- ③外周部は攪拌翼による地盤の切削速度が速いので攪拌時に土塊を繰り返えずに速く動かし、行き場のないセメントミルクが集まりやすい。

などが考えられる。写真 3 の状況は、地盤や施工によっては生じる可能性があり、内部を確実に攪拌するための攪拌条件の検討が重要で

ある。また、掘出し試験で攪拌状況を調べる場合、外観の目視確認だけでは不十分であり、切断等によるコラム内部の調査が必要不可欠と考えられる。また、No.2 の低品質コラムは、IT 試験では『優』となったものの未改良土塊がかなり含まれていたため、この試験で優となっても、必ずしも均質な攪拌を意味しないが、No.3 コラムのように反射が確認できない場合は極端に攪拌が劣る可能性があると考えられる。

写真 3 極低品質コラム（実験 B—No. 3）の掘出試験状況

5. 7 未硬化段階のソイルセメントの採取

未硬化段階のソイルセメントの採取試験は、実験 A の現場において、No.1～3 以外の改良長 4m のコラムで実施した。写真 4 に図 9 の採取装置によるソイルセメントの採取状況を示す。試料は全長にわたって採取され、目視や指圧で確認したところ、一部で土塊の混入が認められた。このため、図 9 の装置を施工機械に取り付ければ、施工直後の攪拌混合状況の目視確認が容易となる。

写真 4 未硬化段階のソイルセメント採取装置によるコラム全長の試料採取状況

6. コラムの品質基準と各種試験の評価

コラムの品質基準は、設計法により異なると考えられるが、施工範囲の改良体が一体に固結し、改良効果が確認できる程度のばらつきに収まっていることが必要である。この観点から、コア強度調査、電気比抵抗調査、水平断面の土塊混入調査などの意義について考える。

2章で述べたコア強度と変動係数に基づく品質基準を考えた場合、まず、コアの無作為採取を考える上で重要なコア採取率とコア強度の変動係数 V の関係を知ることが重要である。図 16 は、コア採取率と変動係数 V の関係を示した図である。各々の点は、土質区分に基づいて同一土質と判断される層内にあるデータから求めた変動係数をプロットしたものである。コア採取率が小さいと変動係数のばらつきが大きくなり、コア採取率が 90% 以上の場合は V が比較的安定し概ね 30% 以下を示す。そこで、2章では、信頼できる品質検査基準を設定するためには、 V を概ね 30% 以下とみなすことが前提であることを示した。 V が 30% よりかなり大きくなるような混合状態の悪い改良体の場合は、コア採取率が小さくなると予想されるが、コア試験体採取できていない範囲が多いということであり、悪い部分をはずした形で変動係数を評価するという、無作為採取の信頼性を満足できていない点を考慮する必要がある。

図 16 コア採取率と変動係数の関係

電気比抵抗調査は、ボーリングコアでは評価しにくい攪拌混合度の評価精度を高めることが可能で、先端支持力に期待する設計をする場合の先端部の攪拌状況やコラム頭部の境界部（パイルキャップ深度付近、施工中の改良部の盛上がりがあるので不明瞭となる）の攪拌状況を詳細に把握できる特徴がある。定量的な電気比抵抗調査の適用方法に関しては、 m 毎の比抵抗の変動係数とコア採取率との関係を考えた。図 17 は、文献 8)9)10)などのデータをまとめたものであり、土塊混入率は、(100%-コア採取率)と同等であることを考慮すると、コア採取率が 90% 以上期待できるケースでは比抵抗値の変動係数が概ね 30~40% 以下であり、これも目安になりうる。なお、比抵抗の変動係数とは、測定距離を 5cm として 1m 毎の 20 個のデータに対するものである。

図 17 コアの土塊混入率と比抵抗の変動係数の関係

ピン貫入試験などは、攪拌翼の形状や固化材液の吐出位置などの違いによる水平方向の攪拌状況の変化を詳細に把握することができる特徴がある。定量的なピン貫入試験による土塊混入率の評価に関しては、実験 B の低品質及び極低品質コラムを除くと、コア強度、コア採取率、電気比抵抗など他の評価法で特に支障ないコラムでは、土塊混入率がいずれも数%であった。深度方向のコア採取率としては 90%、即ち土塊混入率としては概ね 10% 以下としていることを考え併せると、水平切断面でもボーリングコアと同様、土塊混入率としては 10% 程度とすることが望ましい。

IT 試験はコラム群としての施工の確実性を簡便に把握できる特徴がある。この方法は、個々の試験を定量的に評価するより、多数のコラムの相対的な品質評価や極端に品質が劣る可能性のあるコラムの推定が可能であろう。成層状況などが複雑な地盤や経験の乏しい特殊な地盤に対する適用性を知るために、特に有用と考える。

7. まとめ

本研究は、コラムの品質評価法に関するものであり、①電気比抵抗測定、②水平切断面の土塊混入状況の評価、③IT 試験などによる評価技術の有用性や意義を明確にすることができた。

今回の実験では、様々の調査法の特徴や適用範囲の把握を目的としたが、改良体の品質は地盤や施工のわずかな違いで大きく異なることがある。現状では、経験・実績などにより砂質土～粘性土～ロームの順に攪拌しにくいと考えられているが、自然含水比、液塑性限界、セメントミルク量などによって異なる可能性がある。今後は攪拌のしやすさと地盤条件の関係を定量的に把握し、品質評価試験における地盤条件の合理的な設定方法を検討する予定である。

なお、上記は『基礎工法（機械式深層混合処理工法）の性能評価に関する研究委員会：（社）建築研究振興協会』の研究成果の一部を含むものである。ご協力いただいた方々に深く感謝する次第である。

＜参考文献＞

- 1) 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針，編集協力建築研究所 日本建築センター 1997
- 2) 小堀・渡辺他：機械式深層攪拌混合工法に関する性能評価技術の開発（その 1）～（その 6），第 35 回地盤工学研究発表会 pp.443~454, 2000.6
- 3) 田村・藤井他：電気比抵抗を用いた改良体の品質評価に関する現場実験，日本建築学会論文報告集 No.5 pp95~100, 2000
- 4) 田村・渡辺他：深層混合処理工法を対象とした性能評価の考え方，土と基礎 Vol.48 No.5 pp.9~12, 2000.5
- 5) 孔壁展開画像観察記録および地質構造解析システム—BIP System—，BIPS 技術研究会 URL: <http://www.bips.gr.jp/>
- 6) 太田・渡辺他：機械式深層攪拌工法におけるソイルセメントコラムの土塊混入試験—ピン貫入による土塊混入率試験の適用性—，日本建築学会大会学術講演概要集，pp499~500, 2000
- 7) 吉田・溝口他：建築基礎地盤としてのセメント系改良地盤に関する研究（その 29）改良土の試料採取方法と一軸圧縮強度，日本建築学会大会学術講演概要集，pp871~872, 1995
- 8) 野村・溝口他：電気比抵抗法を用いた現位置造成杭の品質評価に関する研究（その 7）ソイルセメントコラムの品質に関する現場実験，第 3 回地盤工学研究発表（熊本），pp1677~1678, 1997
- 9) 溝口・田村他：電気比抵抗法によるソイルセメントコラムの品質評価事例，日本建築学会大会学術講演概要集（九州），pp619~620, 1998
- 10) 小川・酒井他：電気比抵抗と CT スキャンによる改良コラムの品質評価，建築基礎の設計施工に関する研究資料 5 シンポジウム論文集 実務に見る地盤改良工法の技術的諸問題，日本建築学会基礎構造運営委員会，pp47~52, 1999
- 11) 山本：孔壁垂直コーン貫入試験の室内試験に関する一考察，第 23 回地盤工学研究発表会，pp.165~166, 1988.6

（2001 年 1 月 31 日原稿受理，2001 年 7 月 30 日採用決定）