

11. 軟弱地盤への盛土施工における地盤性状等の不確実性を考慮した 施工管理手法に関する検討

国立研究開発法人土木研究所 ○ 茂木 正晴
国立研究開発法人土木研究所 山口 崇
（株）東設土木コンサルタント 中川 光貴
（株）EARTHRAIN 緒方 正剛

1. はじめに

軟弱地盤の変形対策を伴う道路構造物整備において、調査、設計、施工の各段階において、地盤性状の空間的ばらつき、工法選定の適否、施工条件や施工品質の変動など、複数の要因に起因する不確実性が内在している。これらの不確実性は、対策工の性能や信頼性に影響を及ぼし、施工の合理化や維持管理の観点からも十分な考慮が求められる。

特に、既設道路の拡幅においては、供用中の本線に対する影響を最小限に抑えつつ、軟弱地盤対策を含めた工事全体の合理化が求められている。一方で、軟弱地盤上に盛土を構築する場合には、既設盛土および拡幅盛土の直下やその周辺地盤における変形挙動（沈下・側方流動等）に十分な配慮が必要であり、従来にも増して高度な技術的対応と的確な施工管理が求められている。

本研究では、このような背景を踏まえ、以下の2点に焦点を当てて検討を行う。

第一に、地盤改良体の施工状況を把握する手法として、改良機の稼働データを活用した施工時モニタリングによる広域的・連続的な施工管理手法の可能性を検討する。これにより、従来のコアサンプリングに依存した局所的な確認から脱却し、地盤性状のばらつきや施工条件の変動に対応可能な合理的な品質管理の実現を目指す。

第二に、盛土構築時の地盤変状管理として行われている動態観測の効率化を目的に、設置省力化機器及び ICT 測量技術（ドローン等）の導入可能性を検討し、従来の TS による観測作業の負担軽減と観測精度の確保を両立するための技術的方策を探る。

以上を踏まえ、本研究では、「地盤改良時における改良体の施工状況を把握するための稼働データの活用検討」、「盛土構築時における動態観測の効率化に向けた検討」を通じ、今後の施工プロセスにおいて求められる情報の取得方法に関する課題とその対応策について述べる。

2. 地盤改良時における改良体の施工状況を把握するための稼働データの活用検討

2.1 研究対象

過去 10 年間（2013 年度～2022 年度）の施工実績データ 15,627 件の分析結果によれば、図-1 に示すように浅層混合処理工法が最も多く（全体の 35%）、深層混合処理工法は次いで多い（29%）結果となっている¹⁾。深層混合処理工法は、軟弱地盤の層厚が大きい場合に、地盤深部まで改良を行うことを目的とした工法であり、浅層混合処理工法と比較して、N 値や含水比などの変動、土質性状等の空間的なばらつきといった不確実性の影響をより強く受けると考えられる。こうした特性を踏まえ、本研究では深層混合処理工法に着目し、その施工管理手法の検討を行うこととした。

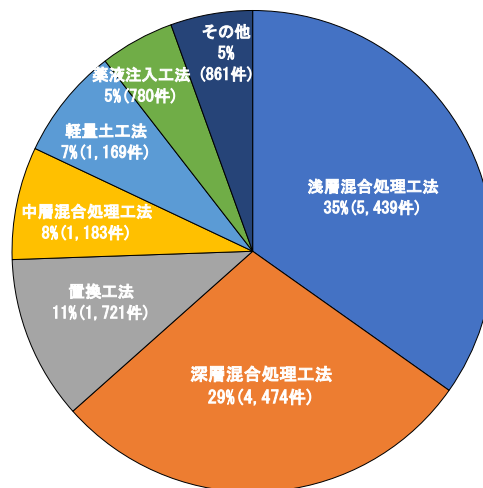


図-1 軟弱地盤対策工の工事件数内訳¹⁾

2.2 実態調査に基づく検討

一般的に地盤改良終了後、改良体 500 本未満は 3 本、500 本以上は 250 本増えるごとに 1 本追加された改良体に対してコア採取（上層・中層・下層の 3 箇所）を行い、施工管理（品質の把握）として一軸圧縮強さの確認を行っている。

地盤改良における変形リスクを適切に管理するためには、部分的なコア採取による地盤改良状況に関する施工管理から広域的な施工管理が求められる。そのため、地盤改良時における施工機械の稼働情報等から攪拌状況を把握することが必要になるものと考えられる。

深層混合処理工法 4,474 件の施工実績の中から、上層・中層・下層の各深度における詳細なコア採取データが得られた 22 件を対象として分析を行った。これらの現場において、施工時の稼働データと強度特性との関係性を把握するために、固化材の添加量と一軸圧縮強さの関係（512 データ）、ロッド回転数と一軸圧縮強さの関係（35 データ）、およびロッド回転トルクと一軸圧縮強さの関係（69 データ）について検討を行った。

2.3 施工機械の稼働情報と攪拌状況に関する検討結果

(1) 固化材の添加量と一軸圧縮強さ

固化材の添加量の比率が 1.0 付近で最も多く分布し、その際の一軸圧縮強さの比（現場施工で得られた一軸圧縮強さと改良地盤設計基準強度との比）は概ね 2～4 の範囲で推移していた。この結果は、添加量を単純に増加させることで必ずしも強度が向上するわけではないこと、また、改良対象とする土質の種類や含水状態、現場条件などにより強度発現にばらつきが生じることを示唆している。一方で、現場において実施工により得られた強度が設計基準に対しておおむね十分な余裕を持っていることから、室内配合試験に基づいて設定された基準添加量は、安全側に構築されるべき現場施工として妥当であったと評価できる。すなわち、本調査結果は、設計と施工の整合性を裏付けるものであり、地盤改良における設計基準の適切性と施工信頼性の両面において工学的に意義深い知見を確認できた（図-2）。

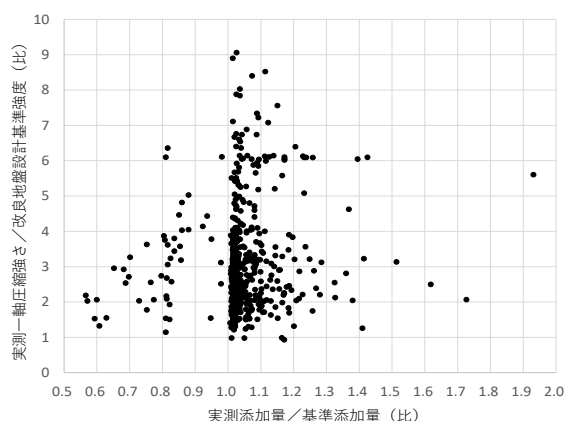


図-2 固化材の添加量比と一軸圧縮強さとの関係

(2) ロッド回転数と一軸圧縮強さ

改良機のロッド回転数と一軸圧縮強さの関係を分析した結果、ロッド回転数を高めることで一軸圧縮強さが上昇する傾向が確認された（図-3）。これは、地盤の性状に応じてロッドの回転数を適切に制御することにより、固化材が地盤内により効果的に攪拌され、均質に混合されることで所定の強度が確保されている可能性を示唆している。一方で、本分析では施工に使用された改良機の詳細な仕様、特にオーガ形状やスパイラルピッチなど、攪拌性能に大きく影響を与える要因について、十分な情報を把握できていない。そのため、ロッド回転数と一軸圧縮強さとの関係には一定のばらつきが認められており、これらの構造的要因がデータの分散に影響している可能性が考えられる。

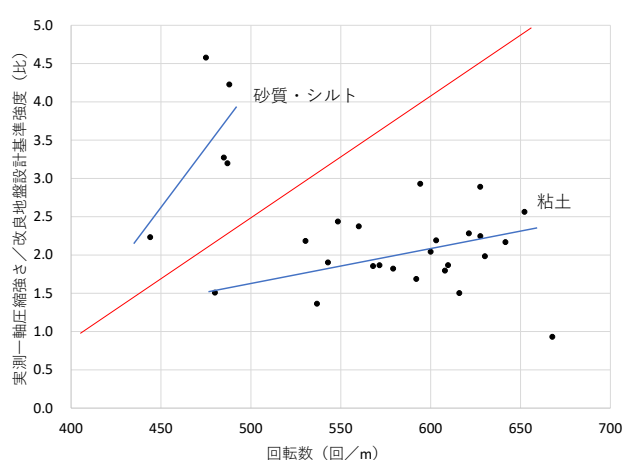


図-3 ロッド回転数と一軸圧縮強さとの関係

(3) ロッド回転トルクと一軸圧縮強さ

ロッド回転トルクについては、10 kN・m に集中する傾向が見られた。一方で、対応する一軸圧縮強さの比にはばらつきが確認された。特に、ロッド回転数と比較して、ロッド回転トルクと一軸圧縮強さとの相関性は明瞭でなく、土質性状の違いがトルク値に及ぼす影響は限定的である可能性が示唆された（図-4）。

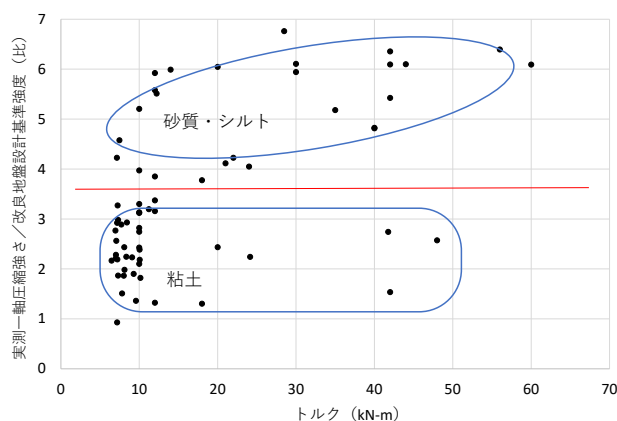


図-4 トルクと一軸圧縮強さとの関係

今後、異なる土質条件下でのデータを蓄積・分析することで、より明確な傾向や影響要因を把握できると考えられる。

3. ICT 測量技術等を用いた軟弱地盤上盛土の安定管理手法の検討

軟弱地盤における盛土の動態観測は、従来、手動による追尾型トータルステーション（以下、TS）を用いて行われており、盛土延長約 40m ごとに設けた横断測点を対象に、1 日 1 回の計測が実施されてきた。こうした手法は、長年にわたり標準的な観測手段とされてきたが、以下のような課題が指摘されている。

盛内ら²⁾の報告によれば、通常 1 つの工事で約 10,000～20,000 回に及ぶ計測が必要となり、変状が確認された場合には、その 3 倍程度の頻度で計測を行う必要が生じることがある。これにより、施工の進行とともに動態観測作業の負担が急増する。また、現行の手法では 2 名の人員が必要であり、測量精度を確保するためには熟練した作業者の確保が不可欠である点も課題となっている。さらに、TS の設置作業自体にも時間と手間がかかる。

こうした背景のもと、これらの課題を解決すべく自動化技術の導入に向けたシステム開発も進められているが、自動化に伴う初期投資や運用コストの増大が新たな懸念事項として挙げられている。

本研究では、動態観測の効率化および負担軽減を目的として、簡易的な動態観測技術の改善に加え、既存の ICT 測量技術などを活用した観測手法について適用の可能性について検討を行った。

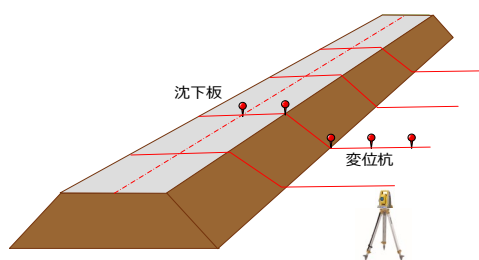


図-5 TSによる動態観測

3.1 簡易的な動態観測技術の改善検討

現場で活用されている TS による動態観測の課題改善のため、取扱い時間の短縮、安定した計測精度の確保、低コスト化を目指し、簡易的な改善によって測定精度を確保しつつ作業効率の向上に向けた検討を進めた。

(1) 従来の計測実態の把握

動態観測の課題に対処するため、「TS の取り扱い時間の短縮」、「安定した計測精度の確保」、「低コスト化」を目的として、実現可能な動態観測手法の検討を進めた。

現場における TS による動態観測作業の実態として、現場では必ずしも測量専門の作業者が動態観測を実施しているとは限らず、動態観測の経験が浅い作業者が対応しているケースも少なくない。

そこで、写真-1 に示すとおり、TS により計測するための環境整備として、土木研究所土工実験施設内に N 値 4 以下の盛土を整備し、測量経験の浅い作業員 1 名が 5 日間にわたり TS の設置及び計測により実態を把握した。



写真-1 従来の TS を用いた観測状況

計測では、設置時間（三脚設置、整準・水準）、測定時間（座標設定、計測）、撤去時間（TS の取り外し、三脚撤去）の 3 つの区分に分け、それぞれの作業時間を計測した（表-1）。

表-1 従来の TS による計測結果
(任意座標設定 X, Y, Z:50m)

	1 日目	2 日目	3 日目	4 日目	5 日目
TS 高さ(m)	1.312	1.347	1.335	1.298	1.34
X (m)	50.588	50.580	50.587	50.587	50.587
Y (m)	45.551	45.556	45.552	45.551	45.552
Z (m)	50.191	50.190	50.191	50.193	50.197
設置時間 (s)	300	360	960	570	570
測定時間 (s)	120	180	180	180	120
撤去時間 (s)	120	120	120	120	120
トータル時間 (s)	540	660	1,260	870	810

その結果、特に設置作業に時間を要している傾向が明らかとなった。加えて、各日での作業時間にバラつきが見られたが、これは三脚の固定、TS 機器の取り付け、整準・水準作業などにおける作業者の技量差に起因していると考えられる。

以上の結果から、複数箇所で動態観測を行うような場合には、設置時間の短縮が作業効率向上に寄与する可能性が高いことが示唆された。

しかしながら、TS の設置においては、機器の安定性を確保し、測定精度を担保することが前提であり、単に設置時間を短縮するだけでは不十分だと考えられる。

(2) 簡易的な工夫によるTSを用いた動体観測技術の検討

従前のTSによる計測実態に基づき、都度の設置作業の短縮を図ることを目的とした検討を進めた。検討では、従来のTSを用いた動態観測手法を大きく変えることなく、TSの使用環境において効率的かつ安定した計測を目指し、動態観測用台座を考案した。

動態観測用台座は、設置の容易さと可搬性、安定した計測を両立するため、本体重量を2kg以内とし、アルミ合金を採用した。また、TSおよび三脚の荷重に対する十分な耐久性を確保するため、強度計算を実施した(図-6)。沈下防止対策としては、TS本体および三脚、さらに台座本体の重量と接地面積を踏まえ、粘性土(N=2)を想定した接地圧に対応可能な形状とした。加えて、設置・計測時の滑りを防止するため、底部にスパイクを設置した。

本台座の有効性を確認するため、従来の計測実態把握のための計測と同様に、土木研究所の土工実験場において、N=4以下の軟弱地盤を対象に土木作業員1名が動態観測を5日間実施した(表-2)。

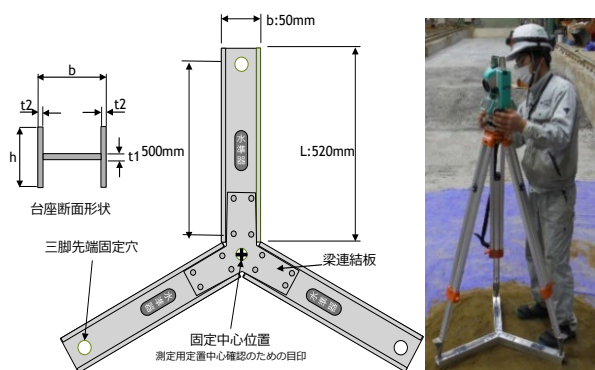


図-6 動態観測用台座及びTSによる計測状況

表-2 動態観測用台座を用いたTSによる計測結果
(任意座標設定 X, Y, Z:50m)

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目
TS 高さ(m)	1.365	1.365	1.365	1.365	1.365
X (m)	50.588	50.588	50.587	50.587	50.587
Y (m)	45.553	45.553	45.553	45.554	45.554
Z (m)	50.185	50.185	50.185	50.184	50.185
設置時間 (s)	360	180	180	180	150
測定時間 (s)	600	180	120	150	90
撤去時間 (s)	240	120	120	120	120
トータル時間 (s)	1,200	480	420	450	360

(3) 簡易的な工夫による効果(従来との比較)

従来の動態観測を想定した計測と比較した結果、動態観測用台座を用いた場合、1日目は設置に時間を要したものの、2日目以降は設置時間が半減し、

作業効率の向上を確認することができた(図-7)。加えて、台座を使用することで測定精度も安定し、現場での実用性の高さを示すことができた。

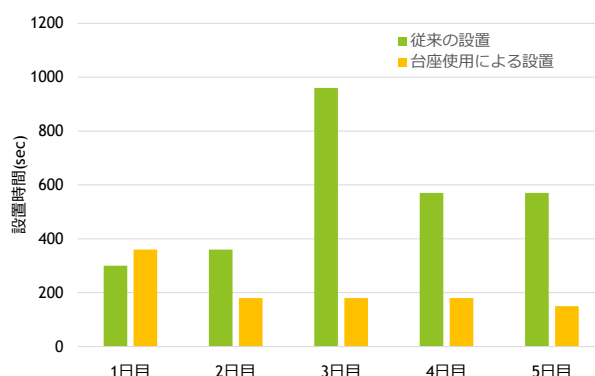


図-7 動態観測用台座の有無による設置時間

3.2 既存のICT測量技術等による動態観測の適用検討

盛土施工段階の地盤の安定性や変動を効率的・的確に把握可能なICTを活用した計測技術の検討を進めた。

(1) 既存のICT測量技術の選定

効率的・的確に動態観測を行うため、取り扱いが比較的容易で流通面において導入可能なICT測量技術について、現場での活用を想定し、NETIS登録されている計測技術より選定を行った。

その結果、土工等での施工管理やインフラ維持管理等で現場導入が進められている計測技術として、UAV「高速ドローン測量システム(NETIS番号:QS-230006-A)」,スマートフォン内蔵カメラ「Smart Construction Quick 3D(NETIS番号:KT-230083-A)」,一眼レフカメラ「遠方自動撮影システム(NETIS番号:KT-190008-VR)」を選定した。

これらの計測技術については、土木研究所建設機械屋外実験施設に構築した盛土に図-8に示す測量杭を対象に計測を行った。以下に結果及び課題を述べる。なお、予めTS(SOKIA:NET05AX)により、各種計測技術を比較検証(目標精度として±5mm以内)するための計測を行った。

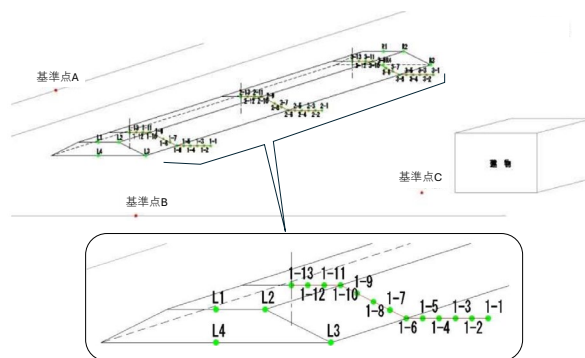


図-8 測量杭の設置場所及び基準点

(2) UAV による計測

計測後の SfM 処理では点群の密度が低く、盛土部分は一定程度の点群化が可能であったが、密度のばらつきにより検証点となる杭の位置特定が困難であった。そのため、現状の UAV 計測による動態観測への適用は困難と判断した。

効率面では、3 側線を 1 回のフライトで計測でき、1 側線あたりの所要時間は準備約 3 分、計測約 2 分の計 5 分であった（写真-2）。一方、SfM 処理に要する時間は、使用ツールの性能や設定により、最短 10 分から最長 6 時間と大きく変動した。計測自体は効率的であるものの、ツールの選定により内業（処理作業）時間が大きく左右される点が課題となる。



写真-2 UAV による計測状況

(3) スマートフォン内蔵カメラによる計測

本計測は、ICT 施工での活用を想定したものであり、「地上写真測量を用いた出来形管理の監督・検査要領（土工編）」等で示される 50mm 精度を基準とする技術である。検証（写真-3）では、平均 5mm ～10mm の精度が確認された。

効率面では、1 側線あたりの平均所要時間は、準備約 5 分、計測約 1 分の計 6 分、SfM 処理時間は 10～20 分であった。

一方、計測時における現場斜度の違い等に起因する計測位置や方法の誤差が、動態観測において求められる 5mm 精度の確保に影響を及ぼす点は、今後の課題といえる。



写真-3 スマートフォン内蔵カメラによる計測状況

(4) 一眼レフカメラによる計測

写真-4 に示す一眼レフカメラを用いた遠方自動撮影システム（以下、一眼レフカメラ）は、主に橋梁などのインフラ点検におけるひび割れ等の記録に活用された実績があり、正対撮影による計測検証において、水平方向で平均 1mm～1.5mm、鉛直方向で平均 7mm～40mm の精度を確認した。

精度に影響を与える要因としては、解像度、撮影角度、レンズの光学的な歪み、撮影枚数の多少が挙げられ、これらの条件を複合的に最適化することで、安定した精度が確保できるものと考えられる。今後、精度に関わる諸条件の詳細な検討が課題となる。なお、本計測手法は一定の精度を得られる一方で、計測にやや時間を要する点も課題として挙げられる。



写真-4 一眼レフカメラによる計測状況

(5) 計測結果のとりまとめ

各種計測技術について、検証結果に基づき課題を解決した際に期待される精度を表-3 に示す。

UAV のデジタル画像による計測精度は一般的には解像度が高いほど優位である。しかし、今回の検証では画角が狭くなる分、隣接画像間でのパターンマッチングで不利になり、飛行高度が低いと、点群処理ができなかったことが確認され、期待される精度の確保が難しい結果となった。実現場において、同様の事象が発生することが考えられ、SfM 処理ソフトの性能にも左右され、効率面においても課題が残る結果となった。今後、画像取得の最適化や SfM アルゴリズムの改良によって、点群密度のばらつきが抑制されれば、杭位置の特定精度の向上も期待され、UAV 計測の適用可能性が高まる可能性がある。また、活用を広域的（マクロ）な観点での動態観測が必要な場合、工区全体の状態監視といった施工管理への利用に期待できるものと考えられる。

スマートフォン内蔵カメラによる計測は、現段階においても比較的高い計測精度が得られており、盛土延長 40m・1 断面の条件下では、人員・計測時間の観点から生産性の高い技術と評価できる。

今後、スマートフォンのカメラ性能がさらに向上すれば、5mm 以下の高精度な計測も期待できる。

表-3 各種計測技術による検証結果

手法		UAV			スマートフォン内蔵カメラ		一眼レフカメラ				
対象		法下面-法面-天端			法下面-法面	法下面-法面-天端	法下面	法下面	法面	法面	法面
計測距離		20m	12m	6m	0.5m-1.0m	0.5m-1.0m	12m	12m	10m	25m	25m
角度条件		正対	正対	正対	—	斜め 45 度	水平 50 度	水平正対	水平正対	水平正対	水平正対
							鉛直 40 度	鉛直 40 度	鉛直 30 度	鉛直正対	鉛直正対
絶対平均値	X	鉄の特定困難			6.1mm	23.9mm	13.4mm	6.4mm	1.2mm	1.6mm	0.8mm
	Y				7.2mm	9.0mm	12.8mm	6.3mm	—	—	—
	Z				10.6mm	11.3mm	—	—	54.5mm	38.4mm	7.1mm
課題解決により期待される精度		—			5mm-10mm	10mm-20mm	10mm-15mm	5mm-10mm	1mm-60mm	1mm-40mm	1mm-10mm

また、実運用においては、斜面作業時の安全性と計測精度の両立が求められることから、一定条件下で安定した計測が可能となる治具等の活用も有効と考えられる。

一眼レフカメラによる計測は、1 断面をほぼ正対で撮影し、レンズ歪みを精度良く補正できた場合には、1mm 前後の高い精度を実現できる可能性がある。ただし、実現場で安定した計測を行うためには、現場規模や周辺環境を踏まえたうえで、使用するレンズの選定や計測位置の事前検討が必要となることから、効率面での課題が残ると考えられる。

4. まとめ

4.1 地盤改良時における改良体の施工状況を把握するための稼働データの活用検討

本研究では、軟弱地盤改良において不可視な地盤内部の改良状況を、改良機の機械稼働データを用いてモニタリングし、適切な施工管理が可能かを検証するため、深層混合改良工法を対象とした施工実態の調査を行った。改良機の稼働データ分析の結果、ロッド回転数を上げることで一軸圧縮強さが上昇する傾向が見られ、また、ロッドトルクについてもばらつきはあるものの、大きいほど強さが増す傾向が確認された。さらに、土質の違いによって強度の上昇傾向に特性が見られることも明らかとなった。

これらの結果から、改良機の稼働データを活用することで、広域的な施工管理を時系列でモニタリングする可能性が示された。しかしながら、本研究では、512 データのうち土質条件や含水比の欠落を含んでおり、それらの影響は考慮されていない。このため、強度のばらつきには土質特性や含水比の違いに加え、改良機の仕様や施工条件の違いも影響している可能性がある。特に、オーガの軸数や羽根形状、スパイラルピッチ、改良径といった改良機の仕様は、固化材と土の混合状態に直結し、攪拌性能に大きく関与する。また、スラリーの供給量や圧送圧力、回転数、貫入・引抜速度といった施工条件の組合せによっても、攪拌の均質性が左右され

る可能性がある。今後、改良体の品質管理技術の実用化を図るには、改良機の仕様および稼働パラメータに関する詳細なデータを収集・整理し、より高精度な施工管理モデルの構築を進める必要がある。特に、現場条件の多様性を踏まえ、攪拌性能と改良品質の関係性を定量的に把握する取り組みが今後の課題である。

4.2 盛土構築時における動態観測の効率化に向けた検討

本研究では、簡易的な動態観測技術の改善を通じて、測定精度を確保しつつ作業効率の向上を図る手法として、動態観測用台座の有効性を確認した。これにより、従来手法を大きく変更することなく、安定した計測が効率的に実施可能であることが示された。今後は、動態観測用台座の実用化に向けて、現場検証を通じた最適形状の検討や、使用環境に応じた改良が求められる。

一方、ICT 測量技術を動態観測へ応用するにあたっては、現在の基準に合わせた TS 計測の代替技術の実用化には個別の課題解決が必要であるが、本研究により、将来的な適用に向けた基礎的な知見を得ることができた。今後、安定的な計測精度を確保するための治具開発に加え、撮影方法や処理手法を含む計測条件の最適化が重要な検討課題となる。

参考文献

- 1) 佐々木亨, 宮下千花, 川村逸太, 茂木正晴, 間瀬利明: 土質の不確実性が深層改良体の施工品質に与える影響に関する一考察, 第 16 回地盤改良シンポジウム, pp.232-237, 2024.
- 2) 盛内政孝, 岡田昌俊, 山中誠也: 泥炭性軟弱地盤への盛土における自動追尾型 TS を用いた安定管理について, 第 62 回 (平成 30 年度) 北海道開発技術研究発表会, 2017.
- 3) 社団法人セメント協会, セメント系固化材による地盤改良マニュアル第 5 版, 技報堂出版株式会社, p.234, 2021.
- 4) 茂木正晴, 山口崇, 橋本聖: TS による軟弱地盤の効率的な動態観測手法に関する研究, 土木学会年次講演会, VI-1165, 2024.