

## 空港滑走路下における液状化対策工事の舗装隆起管理事例

株式会社 大林組

土木本部 生産技術本部 技術第二部 三浦 国春  
稲川 雄宣  
重野 桂子

### 1. はじめに

東京国際空港では、地盤改良による空港滑走路及び誘導路等の液状化対策工事を実施しており、弊社では2017年度および2019年度にかけて、東京国際空港において静的圧入締固め工法(以降、CPG工法)による液状化対策工事を実施した<sup>\*1</sup>。本工事は、供用中滑走路及び誘導路上での地盤改良工事であり、供用中滑走路等へ影響を与えないよう舗装の変状に対して厳しい管理が求められるものであった。

東京国際空港における滑走路等の変状管理は、地盤改良体注入毎に管理値が設定されており、さらに、施工エリア全体の許容値が設定されるなど、変状に対して厳しい管理を実施している。この隆起管理は数ミリ単位の厳しい管理値となっており、地盤改良工事で起こりうる注入時の地盤内圧力の上昇等に伴う急激な隆起のリスクに対応するためには、高精度な計測管理が必要となる。また、隆起に対して迅速に対応する管理体制が重要であるが、本工事は1日当たり7~9つの地盤改良エリアに多数の施工機械を導入して施工を行うため、管理の効率化を図ることも課題であった(写真-1)。

本報文は、当該現場において微小な隆起を早期に把握し対処するために、レーザー測量やICTを導入して隆起管理の高度化を図った事例について報告する。

本報文は、当該現場において微小な隆起を早期に把握し対処するために、レーザー測量やICTを導入して隆起管理の高度化を図った事例について報告する。



写真-1 東京国際空港における夜間施工状況

※1 工事名:東京国際空港C滑走路南側他地盤改良工事,発注者:国土交通省関東地方整備局

工事名:東京国際空港C滑走路他地盤改良工事,発注者:国土交通省関東地方整備局

### 2. CPG工法の概要と隆起管理

CPG工法とは、スランプ0~7cmの流動性が極めて小さいモルタルを地盤中へ静的に圧入し、柱状固結体を造成することによる締固め効果で、周辺地盤を圧縮する地盤改良工法である<sup>[1]</sup>。確実な改良効果を得るためには、規定された改良仕様(注入量,注入速度など)に従って施工しなければならないが、改良材の注入に伴って地盤内の圧力が上昇すると、地表面の隆起を引き起こす可能性がある(図-1)。そこで、CPG工法では注入ステップ毎に地表面の隆起やその要因となる注入圧力の上昇に留意した施工管理を実施し、最終

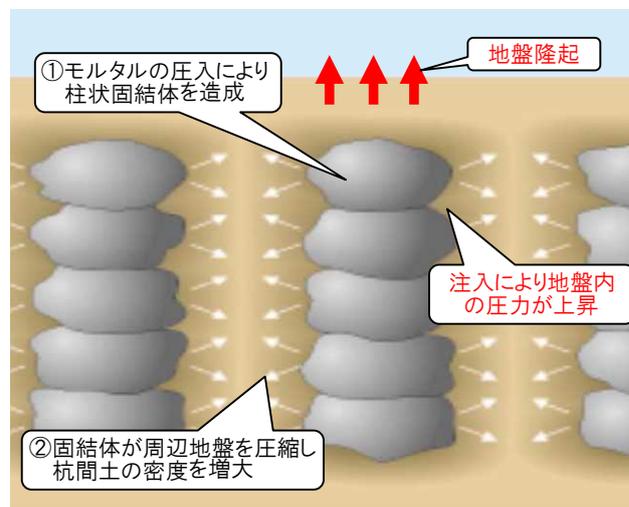


図-1 CPG工法の工法原理及び留意点

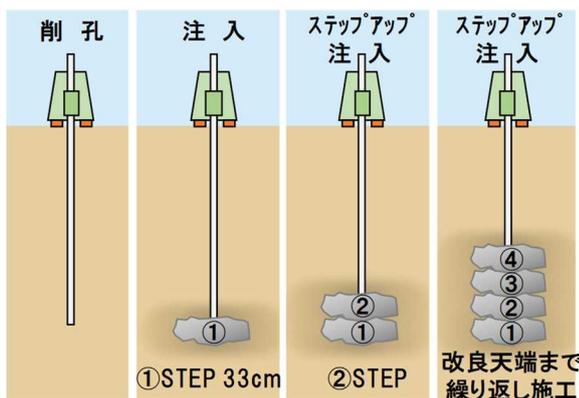


図-2 CPG 工法の施工手順

的な施工エリア全体の隆起量が滑走路等の供用に支障のないように、日々計測管理を実施している。CPG 工法の施工手順を図-2 に、空港施設内における隆起管理項目とその管理値を表-1 に示す。施工において管理値を超過する場合には、隆起制御を優先して当該ステップの注入を中断し次ステップへ移行するなど対処を行うこととなっている。

表-1 東京国際空港における隆起管理項目

施工管理項目		施工管理値
注入孔ごとの管理	注入ステップ別隆起量	2mm以下
	地点別隆起量	14mm以下
施工エリア全体の管理	累計隆起量	GL+150mm以下
	舗装勾配	許容勾配1.5%以内
最大注入圧力		6MPa以下

### 3. 注入孔ごとの隆起管理

#### 3.1 隆起管理の現状と課題

注入孔ごとの隆起管理は、従来それぞれの注入マシンごとに管理担当者を配置してレベル測量による計測管理を行っていた(図-3)。注入毎の隆起管理において、隆起の影響の小さい離れた位置からレベル測量で1ステップあたり2mmという精度の計測管理を行うには、測量を行う管理担当者にも高い技術力が要求される。また、地盤改良で生じる隆起は微小であることから、目視では隆起の傾向は把握できず、計測のタイミングによっては隆起の把握に遅れが生じるリスクもあった。このように、レベル測量では安定的な計測精度の確保や連続的な変状確認において課題があることから、計測方法の改善を図って隆起に対して迅速に対応できる、効率的な管理方法が求められた。

#### 3.2 改善方法と適用結果

##### 3.2.1 自動計測技術の導入

計測管理における各課題の改善を図るために、「ワイヤレス沈下・隆起計測システム」を導入して隆起量の常時監視を実施した。ワイヤレス沈下・隆起計測システムを図-4 に示す。当該システムは、回転式レーザーレベルと複数のワイヤレス受光センサーの使用により、同時に多点計測が可能な測量システムであ



図-3 レベル測量による計測管理



図-4 ワイヤレス沈下・隆起計測システムによる計測管理

る。レーザーと高感度の受光センサーを用いることで、離れた位置からでも 0.1mm 単位の精度で計測が可能であり、常にレーザー照射しているため 0.2 秒ごと(※受光センサー1 台につき)の連続計測を可能としている。計測データは1 台の管理PCに集約・管理し、複数の注入箇所の隆起管理を同時に実施した。

ワイヤレス沈下・隆起計測システムの導入にあたり、従来のレベル測量も導入し計測精度の検証を行った。その結果、レベル計測では 1.0mm 単位でしか隆起が把握できなかったのに対し、ワイヤレス沈下・隆起計測システムでは 0.1mm 単位の微小な隆起を計測でき、徐々に生じる隆起傾向を捉えることができた<sup>[2]</sup>。このため、急激な隆起を生じさせる前に注入停止を行ったり、注入速度を落とすなどの迅速な変状抑制対策が可能となった。また、1 孔あたりの累計隆起量についても精度よく計測することができており、警告灯を取り付けて警戒値に達した際は周囲へ注意喚起を促すなど、隆起量の可視化を図った。

### 3. 2. 2 施工状況連携技術の開発

自動計測技術の導入によって、全体的な隆起傾向の把握や計測精度の向上が可能となったものの、施工進捗状況と連動した計測ができなかったため、注入ステップごとの隆起管理においては計測管理上課題が残った。元々、注入装置と自動計測機はそれぞれ別のシステムである。このため、注入ステップなどの施工進捗状況とは連動しておらず、各施工機の進捗状況は計測管理の担当者が巡回しながら確認にあたっていた。しかしながら、各施工機の進捗は一定間隔ではなく、1 つの施工エリアに複数台同時に作業していることから、限られた人員で正確な進捗状況を把握することに多大の労力を要した。

そこで、この状況の改善を図るため、注入装置から施工情報を取得し自動計測結果との連携を図る「施工状況連携システム」の開発を試みた。施工状況連携技術のシステム概要を図-5 に示す。当該システムは、OCR 技術(光学的文字認識技術)を搭載した携帯端末で注入装置の注入管理モニター画面に表示される施工管理情報を撮影して数値情報を自動読み取りし、取得した施工情報と隆起情報を管理サーバー上で集約・管理するシステムである。OCR 技術を用いることで、自由に取付け可能な外付け装置での情報取得を可能とし、注入装置本体の改良を不要とした。当該システムで各種データを取得してサーバー上で一元管理することで、施工進捗に応じた隆起情報を正確に管理することができ、また、携帯端末に現状の隆起量を表示させることで、施工機のオペレーターも施工しながら現状の隆起を確認可能とすることを目的としている。

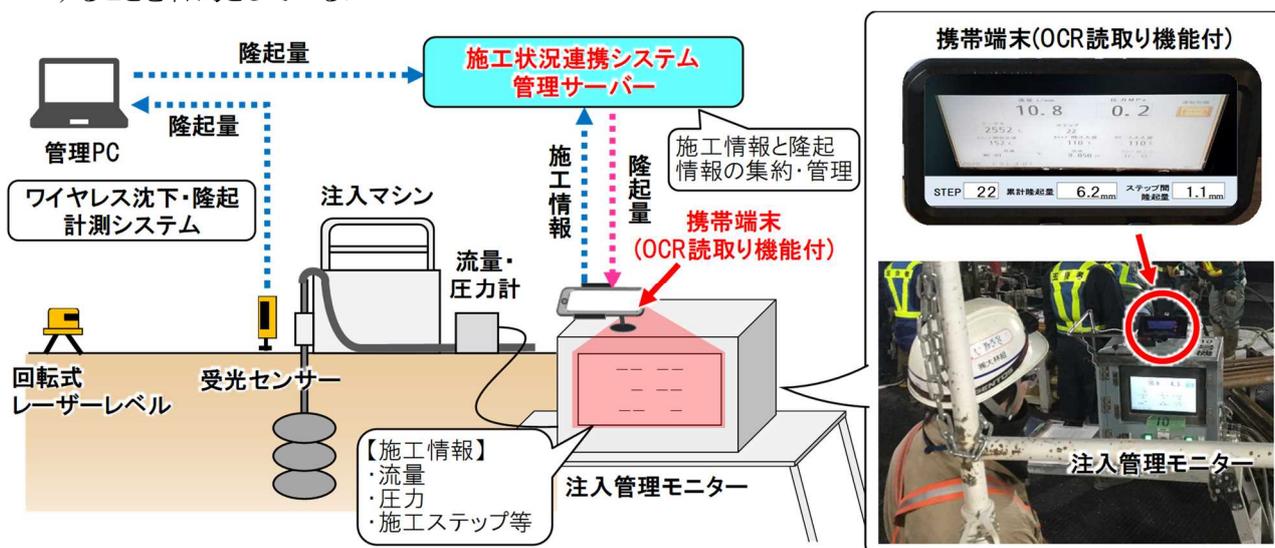


図-5 施工状況連携技術のシステム概要

現場で撮影した注入装置のモニター画面の動画を用いて、当該システムの施工情報読み取り確認及び隆起量の連携確認を行った。図-6は確認試験状況の様子である。注入装置のモニター画面には、現在の「注入ステップ」や注入時の「流量」「圧力」などの施工情報が表示されている。モニター画面が映る様に携帯端末を設置し、数値読み取りを行う施工情報の表示範囲を指定することで、OCR技術によって画像データからデジタルデータとして取得し、端末の通信機能を利用して管理サーバーに取得データを送信している。確認試験では、3秒間隔でデータの取得・送信ができており、約2時間の撮影動画において、約70~80%の精度で施工情報の取得ができた。なお、前述の通り欠損データがあっても、データ取得数にして約4~6秒に1回の頻度のデータ数であり、施工管理上十分なデータ数と考える。確認試験で取得した施工情報データと、実際に現場で計測管理したワイヤレス沈下・隆起計測システムの計測データを集約したものを図-7,8に示す。リアルタイムで取得した施工情報と隆起量情報を集約することで、注入ステップごとの隆起量を正確に求めることができるほか、顕著な隆起傾向がどのタイミングで生じているかも明確に把握できるようになった。なお、「流量」や「圧力」などの施工情報も取得することで、隆起傾向の要因の検証も可能となると考える。このほか、ワイヤレス沈下・隆起計測システムの計測データの管理サーバーへの送信・集約確認を行った。隆起量連携も問題なく集約できており、携帯端末への集約した隆起量の表示もほぼリアルタイムで確認可能となった(図-9)。

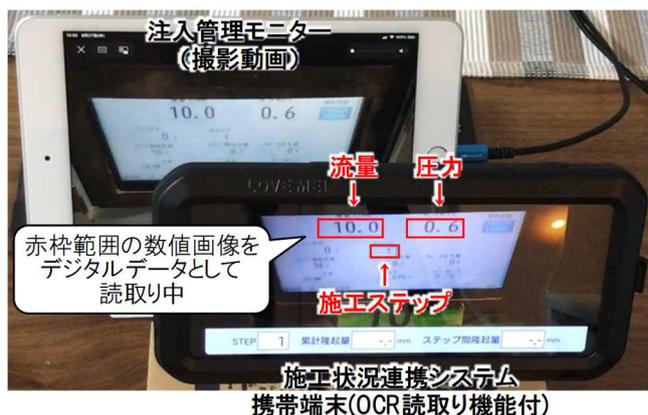


図-6 施工状況連携技術の確認試験状況

今回開発したシステムは、現時点では現場で撮影した動画を用いた検証の段階であるが、前述で示した通り、現場に適用した際にはより正確な注入ステップごとの隆起管理が可能となると考える。

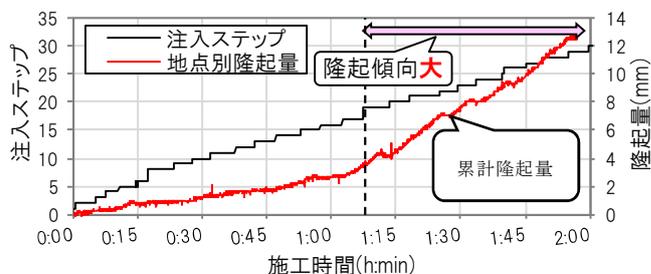


図-7 注入ステップと地点別隆起量の傾向

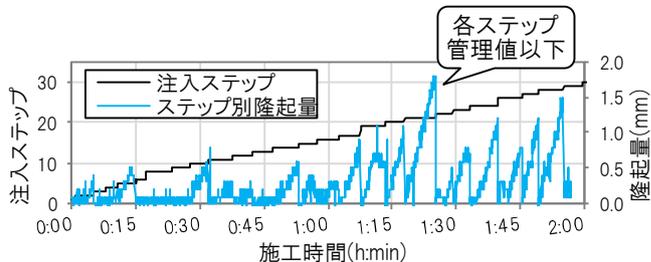


図-8 注入ステップとステップ別隆起量の傾向

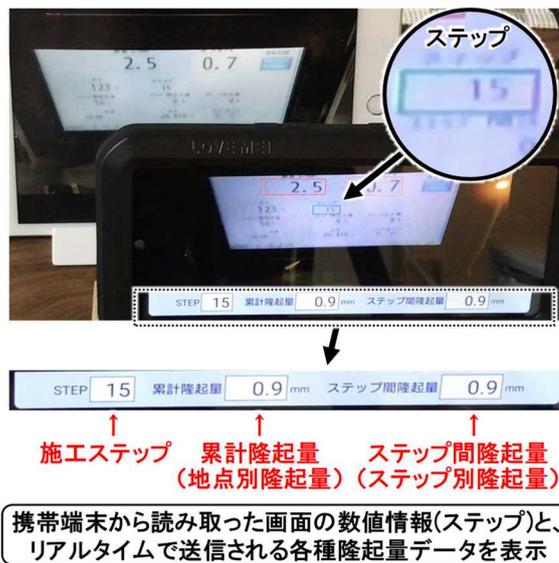


図-9 隆起量連携確認状況

### 3.3 今後の展望

本工事への自動計測技術の導入により高精度の隆起管理が可能であることが確認できた。さらに、新たに開発した施工情報連携技術を導入することで、施工進捗に応じた隆起管理も可能となることから、計測管理の自動化など効率的な管理に適用したい。

#### 4. 施工エリア全体の隆起管理

##### 4.1 隆起管理の現状と課題

施工エリア全体の隆起管理は、当日の注入作業完了後に実施する隆起管理である。滑走路の占用時間が決まっていることから、注入作業完了後速やかに計測を実施し、滑走路の供用に支障がないことを確認したうえで退出しなければならない。このため、計測管理の迅速化・省力化が課題であり、現地での隆起確認方法の工夫が求められた。

##### 4.2 改善方法と適用結果

本工事では、計測管理の迅速化・省力化を図るために、タブレット端末や ICT ツールを積極的に活用した。本工事の計測管理手順を図-10 に示す。

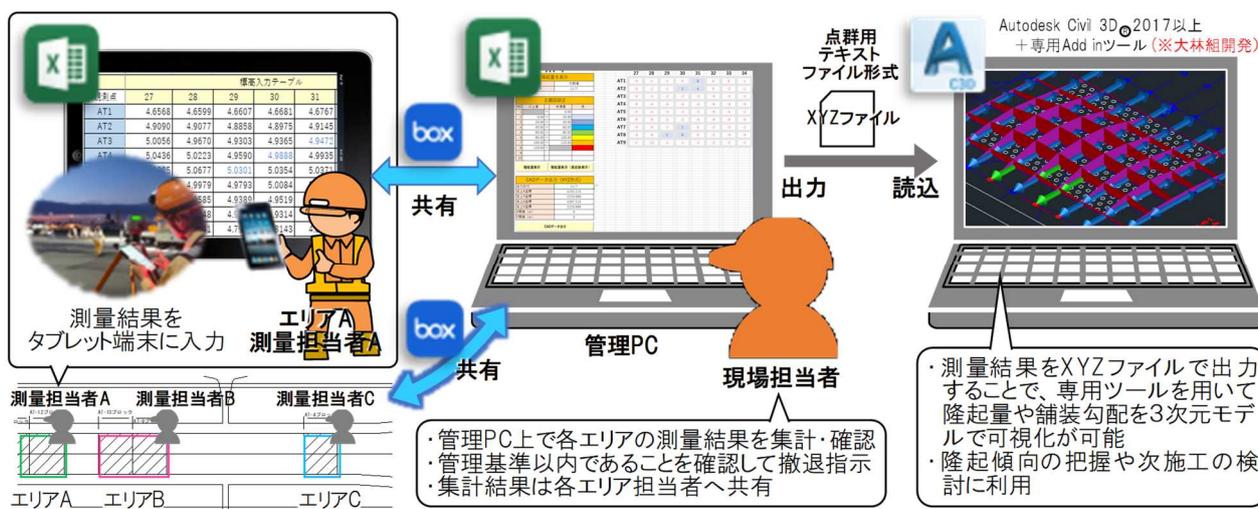


図-10 施工エリア全体の隆起管理における計測管理手順

各施工エリアの舗装高さの計測は電子レベルで計測を行い、計測結果は測量担当者がタブレット端末を使用して測量結果入力用の専用ツールにその場で計測値を入力する。入力したデータは、オンラインストレージ「BOX (Box,Inc.)」を利用して測量担当者及び現場担当者間でファイル共有し、全施工エリアのデータの集約を図った。集約された全施工エリアのデータはPC上で管理されているため、工事着手前の測量結果と比較して瞬時に隆起量の確認が可能となる。また、確認結果はオンラインストレージ「BOX (Box,Inc.)」により全測量担当者にも共有されるため、現場での舗装高さ計測後、直ちに隆起量の確認が行えるようになり、全施工エリアの隆起確認を迅速に行うことができた。

この他、計測結果はCADに取り込み可能な点群用のテキストファイル形式「XYZファイル」での出力が可能となっており、Autodesk® Civil3D®のアドインツール(当社開発)へ当該ファイルを取り込むことで隆起量を3次元モデル化し、隆起の大きさや舗装勾配の向き・大きさの可視化を図った。Autodesk® Civil3D®での可視化事例を図-11に示す。当該ツールを利用した隆起量や舗装勾配の3次元モデル化により、目視では把握しづらい舗装の隆起範囲が視覚的にも把握可能となった。なお、隆起や舗装勾配が大きい箇所では、さらなる注入により管理基準を超える恐れがある。このため、日々の施工管理において、隆起管理表や3次元モデルの凡例表示機能を利用して、隆起警戒箇所を確認しながら次の注入箇所の選定を行い、全体隆起及び舗装勾配への影響を抑制しながら施工を行った。

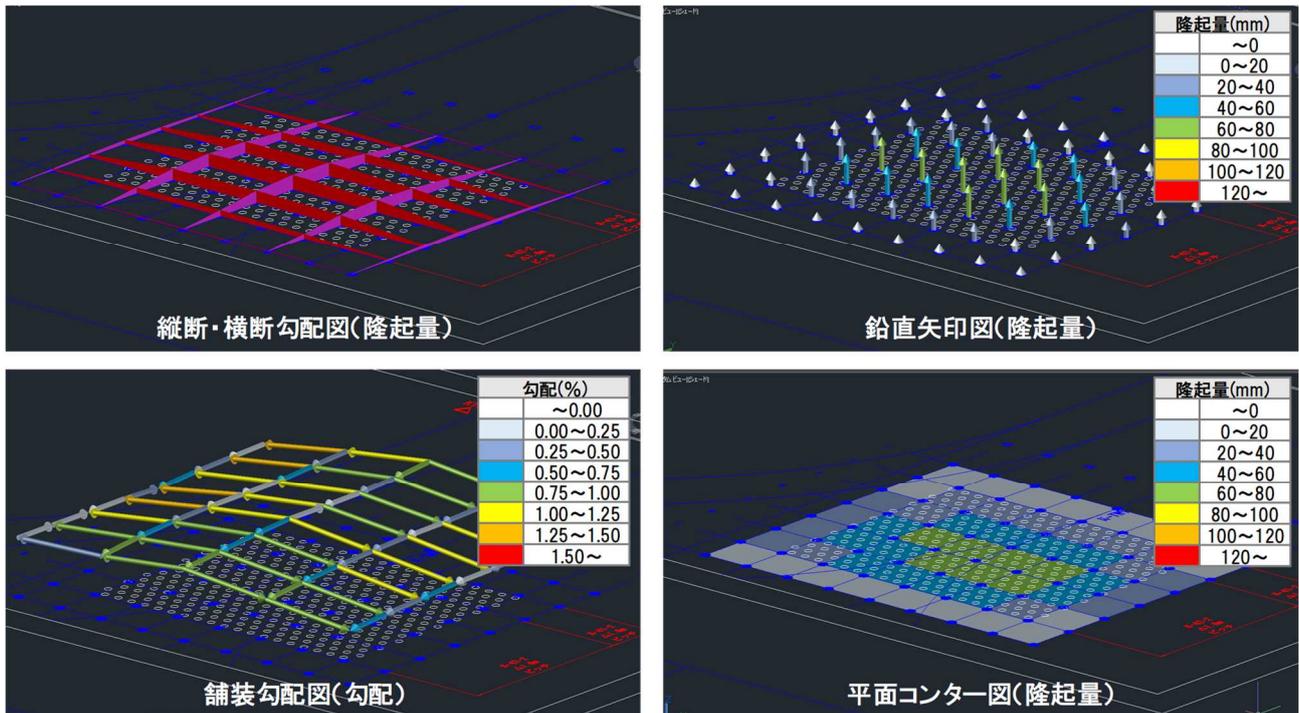


図-11 隆起量及び勾配の可視化事例

本工事では、ICT の導入により計測管理の迅速化・省力化が図れ、限られた作業時間内で全ての管理作業を終えることができた。また、日々蓄積されるデータや3次元モデルの凡例表示機能を活用することで、隆起に対する警戒箇所が瞬時に把握でき、工事期間を通じて空港滑走路に支障を与えることなく施工を完了できた。

#### 4.3 今後の展望

今回利用したツール類は、計測管理の迅速化・省力化を目的として、計測結果の集約や表示に特化したものである。今後は、さらに発展させて、これらの隆起情報に地盤改良施工時の情報(注入圧力・流量・施工日など)を取り込み、一連の地盤改良工事情報の集約を図って隆起発生要因の検証を行いたい。また、将来的には検証結果をもとに AI 技術も取り入れながら、隆起の影響を回避し効率的に施工できる注入箇所を自動選定できるような施工計画支援に利用していきたい。

#### 5. おわりに

本工事では、正確な計測管理が求められる空港滑走路内での工事において、従来の課題解決のために様々な最新技術を取り入れて計測管理の高度化及び省力化を図った。最新技術の導入は、変状計測の高精度化や管理作業の省力化をもたらすだけでなく、大量の情報の収集・集約・蓄積・処理を可能とした。これらの情報を検証することで、今まで把握できなかった変状の傾向や原因の究明につながると考えられる。検証結果を有効に活用することで、地盤改良工事における変状対策も立案でき、変状に対してより安全に施工できるものとする。

#### 参考文献

- [1] (財)沿岸技術研究センター:液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル, 2013
- [2] 三浦他:静的圧入締固め工法における地表面隆起管理事例, 第74回年次学術講演会(土木学会), 2019