

地盤改良工における CIM の適用事例

若築建設(株) 正会員 ○原 稔
若築建設(株) 正会員 水野 健太

1. はじめに

地盤改良工は施工箇所が地中の不可視部分であり、施工中や施工後の出来形を直接視認することができない。既設構造物と近接することも多く、改良仕様が地盤状況に応じて変化するケースや、土質によって同一断面で薬液注入工法、高圧噴射工法、機械撈拌工法、締固め工法など複数種の地盤改良を施工するケースがあり、平面図、断面図等だけでは完成後の形状、施工手順をイメージすることが困難である。弊社では、地盤改良工の管理手法として 2016 年に陸上 SCP 工において実現場での C I M 適用を開始し、これまで 10 件の地盤改良工事に適用してきた。本稿では、港湾工事に於いて地盤改良工に C I M を適用した事例と課題、空港の現場で新たに導入したツールの詳細と効果を報告する。

2. 適用事例の紹介

2.1 港湾での地盤改良工事（SCP 工）

(1) 工事概要

本工事では、改良径φ700、改良長最大約 11m のサンドコンパクションパイル（以下 SCP）を 1,224 本造成した。平面図、標準断面図を図-1、2 に示す。改良率は 13.3% である。隣接する民地には風力発電用の風車が稼働しており、施工中は自動追尾式トータルステーション（以下、自動追尾式 TS）による動態観測を行った。

(2) 地中不可視部の可視化

施工に先立ち、設計図書に基づき地盤改良体（砂杭）の 3 次元モデル（円柱モデル）を作成した。このモデルを基本として、造成時に天端高や下端高さに変更が生じた場合は、その都度、3 次元モデルの座標を修正する。使用するソフトウェア群とハードウェア環境例を表-1 に示す。砂杭モデルは単純な円柱であり、詳細度は地盤改良工について示された例はないが、C I M 導入ガイドライン¹⁾に示される詳細度で表すと 200 である。

完成した 3 次元モデルは、ソフトウェア上で 360° 回転可能であり、あらゆる方向から俯瞰することができるため、完成形状や不可視部における構造物の取合いを視覚的に認識することができる。本工事の場合は、砂杭の 3 次元モデルを俯瞰することによって、砂杭造成天端高さ、下端高さ、平面的な改良範囲の変化を一目で把握できた他、護岸（コンクリート構造）との取合いを確認し、必要範囲が確実に改良されていることを受発注者間で確認できた。最

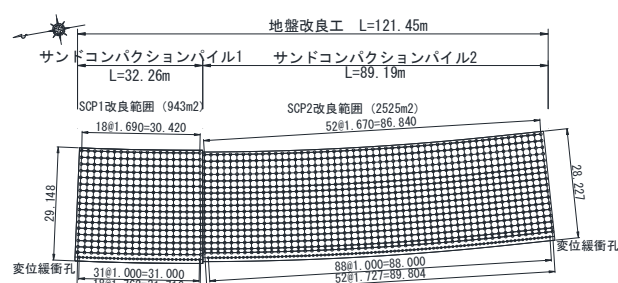


図-1 平面図

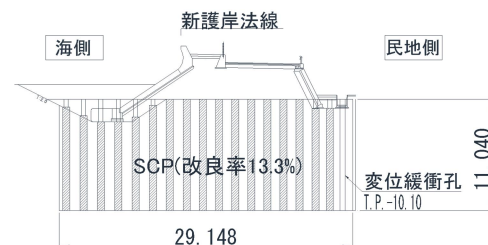


図-2 標準断面図

表-1 ソフトウェアとハードウェア環境

項目	内容
適用工種	地盤改良工全般
Software の構成	3次元CAD : Civil-3D (Autodesk)
	レビューソフト : NavisworksManage (Autodesk)
	属性入力ソフト : Navis+ (CTC)
	Excel (Microsoft)
Hardware 動作環境 (例)	OS : Windows® 7 professional 64ビット
	CPU : Intel® CORE(TM) i7-4790K
	CPU@4.00GB
	メモリ : 32GB
	HD容量 : 500GB
	インターネット環境

キーワード 地盤改良工, C I M, 可視化, 効率化

連絡先 〒153-0064 東京都目黒区下目黒 2-23-18 若築建設株式会社 技術部 TEL 03-3492-0285

終的な 3 次元モデルのキャプチャ画面を図-3 に示す。

(3)属性情報の入力

SCP 工の専門業者から受領する施工日報やオシログラフを基に、全ての砂杭に対して施工情報（一般情報，出来形，品質）を SCP3 次元モデルに読み込み，完成した 3 次元モデルに属性情報を付与した．読み込みを行った項目を表-2 に，属性表示のキャプチャ画面を図-4 に示す。

(4)進捗と動態観測結果の可視化

本件では，3 次元モデルに属性情報として読み込んだ施工日を利用して 4D シミュレーションを行い，砂杭造成の進捗と合わせて動態観測システムによる変位測定結果の移り変わりを表示し，周辺地盤の変位を抑制するよう計画した砂杭造成順序の妥当性を C I Mモデル上で確認した．動態観測システムは自動追尾式 TS を利用しており，1 時間毎の計測結果（観測点：民地境界 14 箇所）をインターネット経由で事務所パソコンへ送信する。

砂杭造成の進捗と合わせて，動態観測結果を表示したキャプチャ画面を図-5 に示す．動態観測結果の表示は，14 箇所の観測点と同位置に，変位量表示用の格子を本システム上で配置し，砂杭造成の進捗表示間隔と合わせてその時点の x 方向，y 方向の変位量をカラーコンターで表示する手法とした．変位量の大きさが矩形の大きさで表現されると同時に，変位量の大小で矩形の色を変化させた．色は変位量 0mm 付近では青色，変位量が管理値 50mm の 80%である 40mm 付近では赤色とした．

進捗と合わせて動態観測結果をアニメーション表示すると，現在の施工の状態および変位の状況，傾向が直感的に把握でき，結果を共有することも容易である．

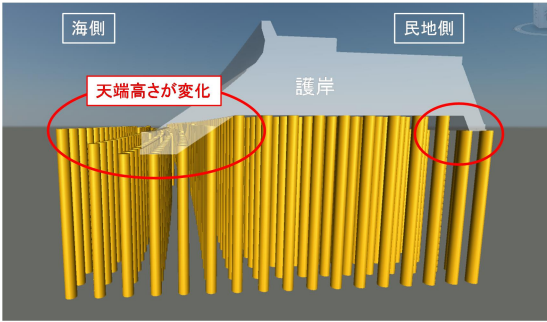


図-3 SCP 3 次元モデル

表-2 属性情報

属性	項目
一般情報	杭番，地盤高，造成日（年月日，曜日），改良機（1号機・2号機）
出来形	貫入長（設計・施工），下端深度（設計・施工），SCP長（設計・施工），SD長（設計・施工），SCP砂量（設計・管理・使用・使用-設計），SD砂量（管理・使用），合計砂量（管理・使用），偏芯量（x，y）
品質	事後調査結果（調査日，SCP造成後経過日数，土質条件，調査深度，N値，Fc）

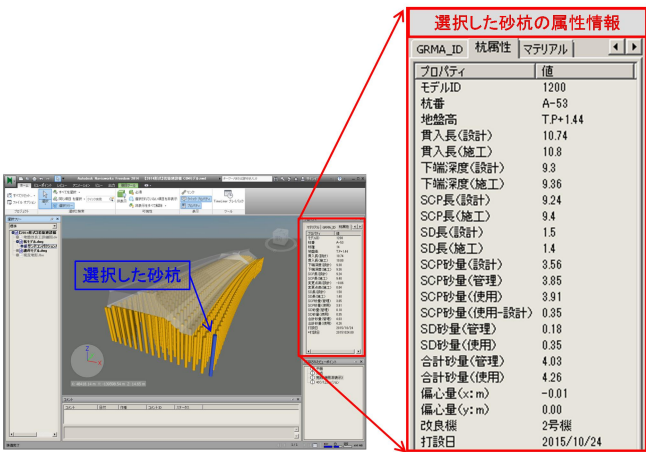


図-4 SCP 3 次元モデルの属性情報

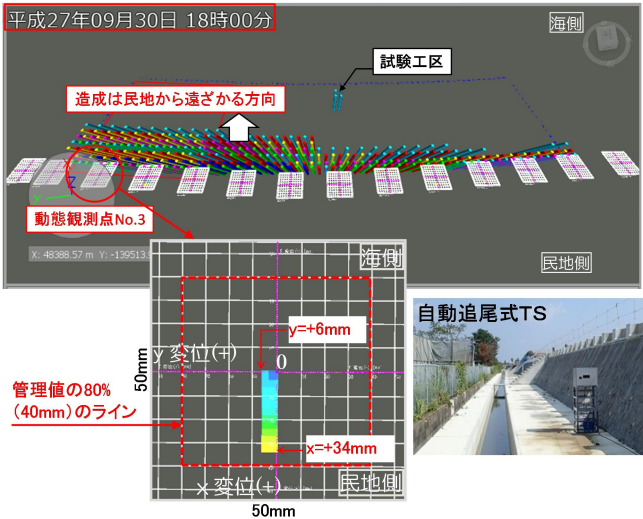


図-5 進捗と動態観測結果の可視化

2.2 空港での液状化対策工事（CPG 工）

(1) 工事概要

本工事では、コンパクショングラウチング工法（以下CPG工法）により換算改良径 ϕ =590mmの改良体を658本造成した。改良長は約4.7m（15ステップ）、改良率は8%である。図-6、7に平面図、標準断面図を示す。施工中は、5mメッシュ地点で自動追尾式TSによる動態観測を行った。

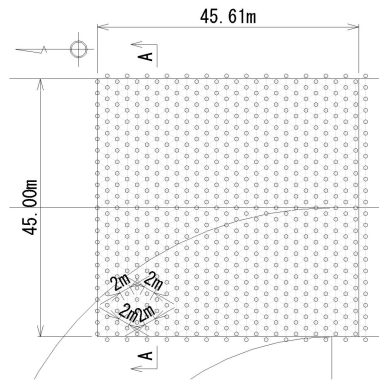


図-6 平面図

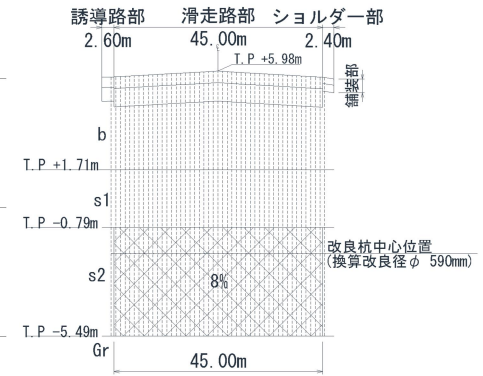


図-7 標準断面図

(2) モデル化について

3次元モデルについて、SCP工の事例ではSCP砂杭造成1か所につき円柱3次元モデルを1本、合計1,224本作製した。属性情報については、SCP工の管理項目は、改良砂杭の平面位置、天端高さ、下端高さ、使用材料砂量であり、施工日報で報告される使用砂量は砂杭1か所分の使用量合計であったため、深さ方向に3次元モデルを分割し、分割したそれぞれの3次元モデルに当該深度での使用砂量を読み込むことは行わず、砂杭1か所分の使用量合計を円柱モデルに読み込んでいる（図-4）。

また、深さ方向にモデルを分割する際に挙げられる課題として、3次元CADファイルの扱いやすさがある。3次元CADで作成した3次元モデルをレビューソフトで閲覧する際は、読み込み時にCADファイルがレビューソフト独自のフォーマットに変換され、1万超のモデルを含むCIMモデルであっても快適に閲覧可能となる。しかし、パソコンのスペックや表示設定にもよるが、3次元モデル数が1,000を超え数千となると、3次元CADソフト内においてモデルが円滑に動かせなくなり、パソコンのフリーズが頻繁に発生するため3次元モデル作成作業が非効率となる。図-8にCIMモデル作業フローを示す。

本工事で採用のCPG工法は、流動性の小さいモルタル等の注入材をCPGポンプで地盤に圧入し、地盤を圧縮強化する締固め工法である。図-9の概要図に示すように、CPG工法では深度方向33cmを標準ステップとして造成を行う。CPG改良体写真を写真-1に示す。

CPG工法の注入管理表には、各ステップの改良体各々についてステップ数、深度（GL-m）、平均吐出量（L/min）、注入圧力（最大・最小）（Mpa）、注入量（計画・実施・累積）（L）、実施率（%）が記録される。注入圧力は現地盤によって変化し、注入量は周辺地盤の変状等を考慮し、計画量と異なる場合も想定される。

改良体・動態観測結果の可視化

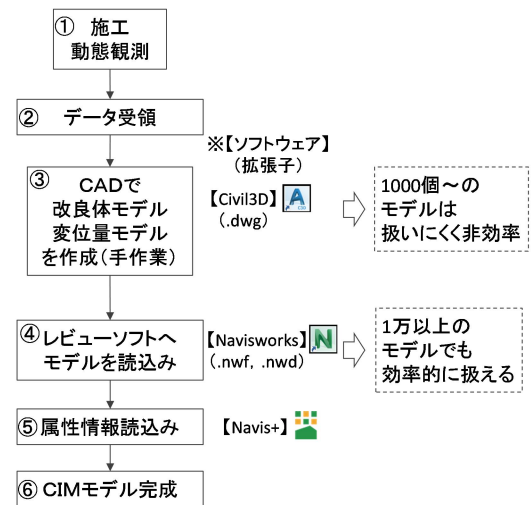


図-8 従来の作業フロー

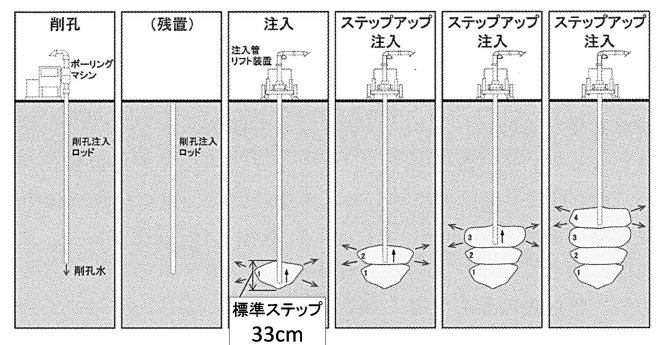


図-9 CPG工法の標準打設方式²⁾



写真-1 CPG改良体²⁾

以上より、CPG工法においてはステップ毎に3次元モデルを作成し、それぞれのモデルに属性値を読み込むこととした。CPG工法の注入管理表（例）を図-10に示す。本工事の改良体造成本数は658本であるが、1本が15ステップで造成され、3次元モデル数は $15 \times 658 = 9,870$ となり、3次元CADを使用し手作業でモデルを作成後レビューソフトに読み込む方法では作業が非効率となることが想定された。また、空港の滑走路下の施工であるため、動態観測結果を頻度良く可視化して状況を把握することが重要であると考え、表-1に示したソフトウェアに加えて作業効率化のため新たなツールを導入することとした。

ステップ	深 度 (GL-m)	平均吐出量 (L/min)	注入圧力(Mpa)		注入量(L)					
			最大	最小	計 画	N実施	R実施	実 施	累 積	実施率(%)
1	13.50	20.2	6.6	0.1	142	0	142	142	142	100.0%
2	13.17	24.9	6.8	0.1	142	0	142	142	284	100.0%
3	12.84	23.3	5.3	0.1	142	0	142	142	426	100.0%
4	12.50	28.8	5.7	0.1	142	0	142	142	568	100.0%
5	12.17	25.2	3.3	0.1	142	0	142	142	710	100.0%
6	11.84	26.2	6.4	0.1	142	0	142	142	852	100.0%
7	11.50	21.5	3.8	0.1	142	0	142	142	994	100.0%
8	11.17	24.5	3.6	0.1	142	0	142	142	1,136	100.0%
9	10.84	23.7	3.4	0.1	142	0	142	142	1,278	100.0%
10	10.50	23.7	3.1	0.9	142	0	142	142	1,420	100.0%
30										
総括	平均	最大	最小	計	計	計	計	計	全体	全体
	24.7	6.8	0.1	1,704	0	1,704	1,704	1,704	100.0%	100.0%

図-10 CPG工法注入管理表（例）

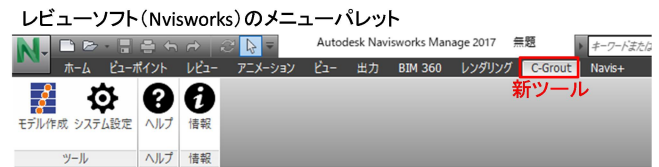


図-11 新ツールモニタ表示

改良体・動態観測結果の可視化

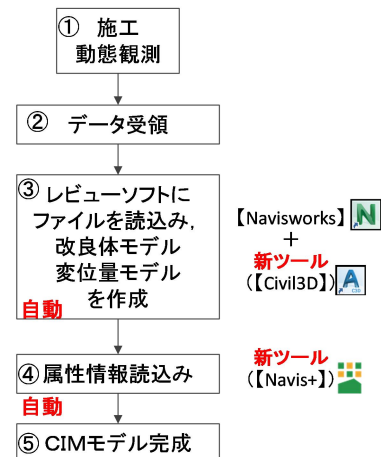


図-12 新ツールを用いた作業フロー

(4) 新しいツールを使用した運用方法

新たに導入したツールを使用した場合のCIMモデル作成方法を説明する。作成フローを図-12に示す。完成したCIMモデルを図-13に示す。

- ①施工、動態観測を行う。
- ②注入日報(csvファイル)を専門業者より受領する。
動態観測記録データ(csvファイル)を自動追尾式TSより受信する。
- ③-1【新ツール】注入日報、動態観測記録(csvファイル)、設定ファイル(csvファイル)をレビューソフトに読み込む。
→所定のフォルダに各csvファイルを保存し、所定の設定後、「モデル作成」ボタンをクリックする。
- ③-2【新ツール】レビューソフト内で新ツールが作動し、バックグラウンドで3次元CADを動かして改良体3次元モデルと動態観測モデルを作成し、続いてレビューソフトに読込んで操作性の良いファイル形式に変換、保存する。
- ④【新ツール】属性情報読み込み用のソフトウェアを自動でコントロールし、ステップ毎の改良体3次元モ

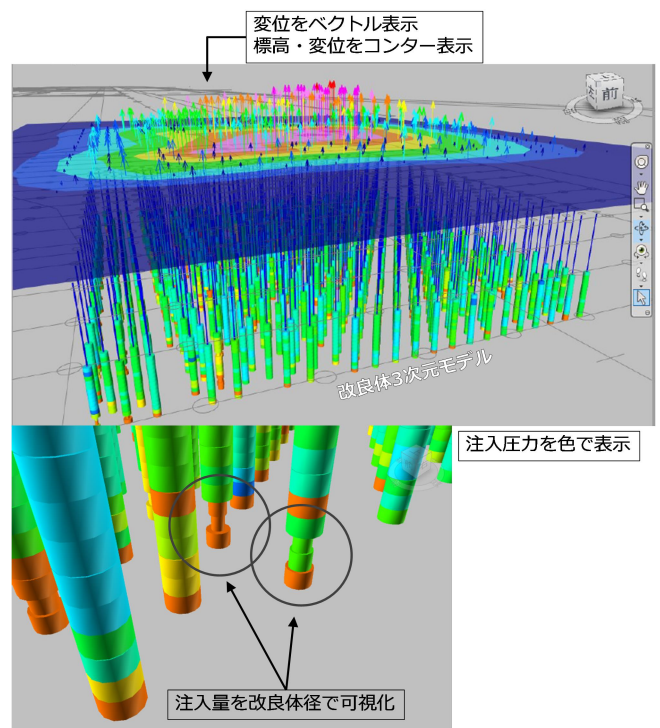


図-13 CPG工法改良体モデルおよび動態観測モデル

デルと観測毎の動態観測モデルに属性情報を読み込む。

→改良体3次元モデルの改良径は、モルタル注入量（実施）より高さ33cm（改良1ステップ分）の円柱として換算し、3次元モデル径に自動で反映する。

→動態観測モデルは、コンターモデルとベクトルモデルで作成され、それぞれ現在の標高、ある時点からの変位量を反映できる。

⑤CIMモデル完成。

フロー③-2での3次元モデル作成時は、3次元CADがバックグラウンドで作業し、3次元CADのフォーマット（dwg）で一旦保存することなくレビューソフトへ読み込み、レビューソフトのフォーマット（nwd）で保存するため3次元CAD上でCADファイルを扱う必要がなく、操作するのはハンドリングの良いレビューソフト用のファイルのみとなるため、3次元モデルが1万以上となるケースでも快適に操作可能である。また、3次元モデル作成のための数項目の設定を行えば、「モデル作成」ボタンをクリックするだけで作業が進行し、専門的なソフトウェアの操作スキルはほとんど必要ないことから、日々の現場での運用も可能となった。

(4)新ツールの効果

本業務において確認した新ツールによる効果として、3次元モデル作成時の操作性向上の他、作業時間の短縮がある。表-3に新ツール導入前後の作業時間比較表を示す。

表-3 作業時間比較表

改良体3次元モデル	作業時間	
	導入前	導入後
作業項目		
モデル作成	5時間	30分
属性情報読み込み	1時間	10分

3. まとめ

陸上地盤改良工（SCP工）と空港の液状化対策工の施工時にCIMを適用した。

陸上地盤改良工（SCP工）では、施工の進捗と動態観測結果の可視化および4Dシミュレーションを行うことで、現場の状況把握が容易になることが確認できた。

空港の液状化対策工（CPG工）では、改良体および動態観測結果のモデル作成と属性情報読み込みのために新ツールを導入し、作業を効率化できた。

動態観測モデル	作業時間	
	導入前	導入後
作業項目		
モデル作成	2～3日	30分
属性情報読み込み	1時間	10分

※いずれも1名で作業する場合。

※導入前の作業時間は別件工事での実績。

4. 今後の展望

2012年に国土交通省よりCIMの概念が提唱され、様々な検討を経て2017年にはCIM導入ガイドライン（案）が示された。その後陸上工事、港湾工事において導入効果の高い工種より順次本格的にCIM導入が進んでいる。しかし、CIM適用にあたっては専門ソフトウェア導入時のコストや、オペレータ不足が課題として残っている。

課題解決のための一つの方法として、3次元モデル等作成作業の効率化が必須であり、本件では地盤改良工のCPG工において新たな技術を導入し、効果を確認した。今後は薬液注入工等他の地盤改良においてもモデル作成作業の効率化を進めたい。

参考文献

- 1) 国土交通省CIM導入推進委員会、CIM導入ガイドライン（案）第1編 共通編、p.26、2018年3月
- 2) 一般財団法人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ーコンパクショングラウチング工法ー（2013年版）、p.47、2013年4月