

細粒分の多い火山灰質土に対する液状化対策としての薬液注入工法の適用性

○堤彩人¹・増田雄太郎¹・陳恩旻¹・坂元宏司¹・山本敦¹・鈴木定義²・片山遥平²・堀口晴実²・
後藤雄平³・佐々木将仁³

¹五洋建設・²五洋-伊藤JV・³札幌市建設局

1. はじめに

平成30年北海道胆振東部地震により被災した札幌市清田区里塚地区では、火山灰質砂で構成される傾斜盛土地盤が液状化し、大規模な側方流動が発生した。復旧工事においては、液状化に伴う流動化の再発を防止するため、地盤改良と砕石置換、排水用暗渠管設置等を組合せ、地域の地盤を一体的に対策する方針が策定された¹⁾。宅地部では薬液注入による地盤改良工が選定されたが、工法の適用にあたっては、二つの課題があった。一つは、特殊な地盤条件（細粒分が多く、緩く堆積した火山灰質土）のため、工法の適用性（薬液の浸透性や改良地盤の強度）を施工前に詳細に検討する必要があったことである。もう一つは、住民が生活を続ける市街地において、家屋を損傷させることなく、その直下の地盤を改良する必要があったことである。本論文では、詳細設計付工事として発注された「清田区里塚地区市街地復旧工事」において、難しい地盤条件と施工条件を克服するために実施した、設計・施工上の工夫と、その成果として得られた改良地盤の品質について報告する。

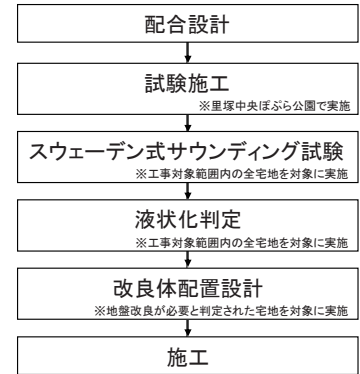


図1 設計フロー

2. 設計上の課題とその対策

薬液注入工法には、浸透固化処理工法²⁾が選定された。同工法は、里塚地区の火山灰質土と同種の土に対する液化対策工事の実績を有することが選定の理由である。図1に本工事における浸透固化処理工法の設計フローを示す。工事では、配合設計と試験施工により工法の適用性を検討した後、工事対象範囲内の全ての宅地においてスウェーデン式サウンディング試験を実施し、この結果を基にした液状化判定により詳細な改良範囲の設定と改良体配置設計を実施した。本論文では、紙面の都合上、試験施工の結果までを詳述するものとする。

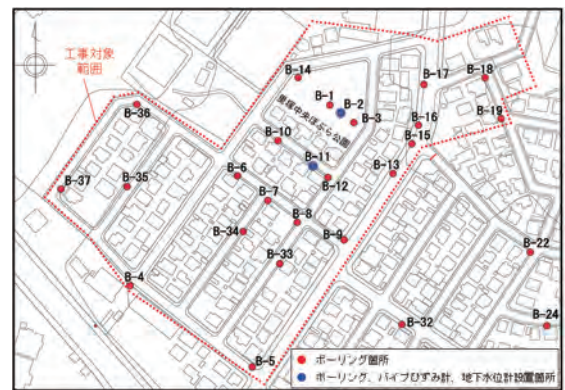


図2 工事の対象範囲

(1) 地盤条件

図2に工事の対象範囲を示す。図には、工事に先立ち実施した調査ボーリングの位置も示している。図3に里塚地区の代表的な地層構成を示す。里塚中央ぽら公園で実施した調査ボーリングB-1, 2, 3, 14を基に構成した土層縦断面図である。当該地盤は、盛土層(Bk)、洪積火山灰層(Dv)、洪積火山灰質粘性土層(Dvc)、洪積火山灰質砂層(Dvs)、砂礫層(Dg)から構成される。地盤改良の対象であるBk層には、地下水位以深においてN値が0~1を示す範囲が散見され、非常に緩い状態で堆積していることがわかる。浸透固化処理工法のこれまでの施工実績において、N値0の地盤を対象とした事例は少なく、地盤の堆積状態の観点から、施工には高い精度が要求されることが予想された。

表1にBk層の物理試験結果の一例を示す。細粒分含有率 F_c が28.8~40.9%と非常に大きな値を示すことが特徴的である。一般に、 F_c が高い土は液状化しにくいといわれるが、Bk層のコンシステンシー特性は非塑性であるため、粒度特性から期待されるほど

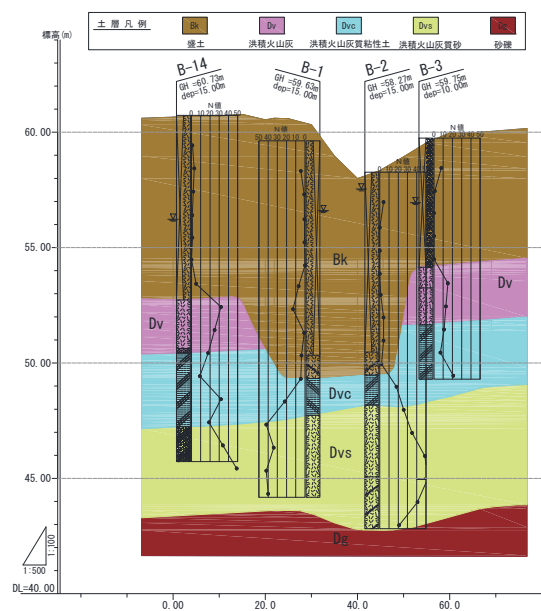


図3 里塚中央ぽら公園の土層縦断面図

Applicability of chemical grouting method as liquefaction countermeasures for volcanic ash soil containing much fine fraction
Ayato Tsutsumi¹, Yuutarou Masuda¹, Onni Chin¹, Kouji Sakamoto¹, Atsushi Yamamoto¹, Sadayoshi Suzuki², Youhei Katayama², Harumi Horiguchi², Yuhei Goto³, Masato Sasaki³ (¹Penta-Ocean Construction, ²Goyo-Ito JV, ³Sapporo City)

の液状化抵抗力は有していなかったと考えられる。また、B-2 で実施した現場透水試験では、透水係数 $k = 2.96 \times 10^{-6}$ m/s の値が得られており、土質区分上は透水性の低い土層と判定される。浸透固化処理工法工法の適用土質は、 $F_c \leq 40\%$ 、 $k \geq 1.0 \times 10^{-6}$ m/s とされている²⁾ので、里塚地区のBk層は、浸透性の観点からも、工法の適用には入念な検討が必要な地盤といえる。

(2) 配合設計

a) 薬液のシリカ濃度

概略検討では、図2の位置で実施した調査ボーリング結果を用いた液状化判定により、工事の対象範囲が決定された¹⁾。3種の地震動に対して実施した液状化判定の結果、当該地区で発生すると考えられるせん断応力比の最大値 L_{max} は0.49であった。

浸透固化処理工法の設計では、改良体の液状化強度比と一軸圧縮強さに相関関係がある^{2),3)}ことから、簡便な方法として、設計基準強度を一軸圧縮強さで評価する方法を採用することが多い。図4に一軸圧縮強さと液状化強度比の関係²⁾を示す。設計基準強度は式(1)の関係を仮定し、図4より液状化安全率 ($F_L = R_{ck}/L_{max}$) が1.0となるように設定するのが通例である。

$$R_{ck} = RL_{20.5\%} = q_{uck} \quad (1)$$

ここに、 R_{ck} は設計基準強度（液状化強度比）、 $RL_{20.5\%}$ は繰返し載荷回数20回でせん断ひずみ両振幅が5%に達する繰返し応力振幅比、 q_{uck} は設計基準強度（一軸圧縮強さ）である。図4より、本工事における q_{uck} は85 kN/m²と設定した。

配合試験では、2倍の安全率を考慮し、改良目標強度を $q_{ul} = 170$ kN/m²と設定した。薬液はエコシリカ III を使用し、シリカ濃度は7%、8%、9%の3水準とした。土試料は、里塚中央ぽふら公園で採取したBk層の攪乱試料（2mmふるい通過分）を使用し、供試体の目標乾燥密度は0.950 g/cm³とした。この値は、今回の試験条件において、制御可能な（再現性を担保できる）乾燥密度の下限値であり、現地で観測されている乾燥密度の最小値付近の値に相当する（表1参照）。一般に、改良土の相対密度が小さい程、一軸圧縮強さは小さくなる⁴⁾ことから、本試験は比較的安全な条件で設計されているといえる。

図5に配合試験の結果を示す。材齢28日時点の供試体4本の一軸圧縮強さの平均値を示しているが、いずれのシリカ濃度においても配合目標強度を満足する値が得られている。本結果より、本工事の標準配合はシリカ濃度7%に決定した。ところで、浸透固化処理工法では、改良土の標準的な一軸圧縮強さは100~200 kN/m²程度といわれている。例えば、文献³⁾によると、5号硅砂を相対密度60%に締め固めてシリカ濃度8%の薬液で改良した供試体の一軸圧縮強さは164 kN/m²である。一方、Bk層の試料を緩詰めし、シリカ濃度8%の薬液で改良した、本試験の供試体では、前者に比べて2倍以上の一軸圧縮強さ（334 kN/m²）が確認されている。一般に、改良土の粒径が小さくなる程、一軸圧縮強さは大きくなる傾向がある⁵⁾ため、細粒分が多いBk層の試料は、強度発現性の観点からは薬液注入工法と相性の良い土といえそうである。

b) 注入率

表2に浸透固化処理工法の標準的な注入率²⁾を示す。注入率 λ は式(2)で定義される指標である。

$$\lambda = \alpha \cdot n / 100 \quad (2)$$

表1 Bk層の物理試験結果

試料番号	B-1-5	B-2-5	B-3-5	B-14-5
深層土質	5.00~5.50	5.00~5.50	5.00~5.50	5.00~5.50
土質	盛土(BK) 火山灰質砂			
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.493	2.328	2.347	2.333
自然含水比 (%)	63.8	67.9	56.1	61.8
礫分 (%)	11	5.2	15.9	6.9
砂分 (%)	48.1	59.7	55.3	58.2
シルト分 (%)	35.2	28.7	23.8	11.6
粘土分 (%)	5.7	6.4	5	23.3
最大粒径 (mm)	19	19	19	19
細粒分含有率 (%)	40.9	35.1	28.8	34.9
均等係数	20.1	16.2	27.2	23.7
塑性指数	NP	NP		
透水係数 (m/sec)	2.96E-06			
乾燥密度 (g/cm ³)	0.919~1.149			

※透水係数はB-2孔で実施した現場透水試験結果の平均値

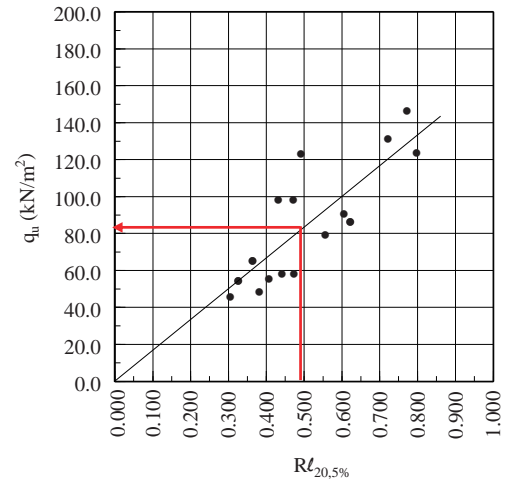


図4 一軸圧縮強さと液状化強度比の関係

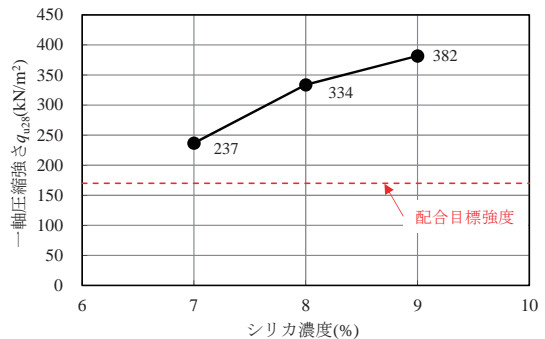


図5 配合試験の結果

表2 浸透固化処理工法の標準的な注入率

土質	間隙率(%)	充填率(%)	注入率(%)	
砂れき	ゆるい~中位	40	90	36.0
	中位~締った	35	90	31.5
砂	ゆるい~中位	45	90	40.5
	中位~締った	35	90	31.5
シルト質砂	20% < F _c ≤ 40%	50~	—	25.0

図5に配合試験の結果を示す。材齢28日時点の供試体4本の一軸圧縮強さの平均値を示しているが、いずれのシリカ濃度においても配合目標強度を満足する値が得られている。本結果より、本工事の標準配合はシリカ濃度7%に決定した。ところで、浸透固化処理工法では、改良土の標準的な一軸圧縮強さは100~200 kN/m²程度といわれている。例えば、文献³⁾によると、5号硅砂を相対密度60%に締め固めてシリカ濃度8%の薬液で改良した供試体の一軸圧縮強さは164 kN/m²である。一方、Bk層の試料を緩詰めし、シリカ濃度8%の薬液で改良した、本試験の供試体では、前者に比べて2倍以上の一軸圧縮強さ（334 kN/m²）が確認されている。一般に、改良土の粒径が小さくなる程、一軸圧縮強さは大きくなる傾向がある⁵⁾ため、細粒分が多いBk層の試料は、強度発現性の観点からは薬液注入工法と相性の良い土といえそうである。

表3 一次元模型注入実験の実験条件と実験結果

ケース	実験条件				実験結果				
	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	間隙率 n (%)	充填率 α (%)	注入率 λ (%)	注入量 $V_{\text{injection}}$ (cm^3)	浸透長/ 目標改良長 (cm/cm)	改良体積 $V_{\text{improved-soil}}$ (cm^3)	実績注入率 $\lambda_{\text{experiment}}$ (%)	充填率 $\alpha_{\text{experiment}}$ (%)
Case A	0.950	59.6	90.0	54.0	848	94/80	1836	46.2	77.5
Case B	1.149	51.1	90.0	46.0	723	94/80	1816	39.8	77.9
参考	1.149	51.1		25.0	393	56/80	1072	36.7	-

ここに、 α は充填率、 n は間隙率である。細粒分含有率 $F_c \leq 20\%$ の砂質土に対しては、 α を90%と仮定し、 λ を設定するのが一般的な方法である。一方、里塚地区のBk層の試料は、 $F_c > 20\%$ であるため、合理的な設計のためには、 α と λ を実験により検討する必要がある。注入率の設定が不適切な場合には、施工において次のようなリスクが懸念される。

- ①注入率過少の場合： 注入率が不足すると、設計上想定している範囲（改良体積）を改良できず、出来形不足となり、改良地盤が所定の品質を満足しない可能性がある。
- ②注入率過大の場合： 過剰な量の薬液を注入すると、薬液のリークや地盤隆起により、家屋に悪影響を及ぼす恐れがある。

本工事における注入諸元を検討するため、一次元模型注入実験を実施した⁶⁾。図6に実験の模式図を示す。円筒容器内に直径5cm、高さ100cmの飽和砂地盤を作製し（模型地盤）、模型地盤底部より一定の圧力20kN/m²で薬液を浸透注入した。配合試験の結果より、薬液のシリカ濃度は7%を用いた。一次元模型注入実験のケース一覧表を表3に示す。土試料は配合試験と同じものを使用し、乾燥密度 ρ_d は配合試験で設定した0.950g/cm³に加え、締まった地盤を想定して1.149g/cm³のケースも実施した。注入量は、目標改良長80cm（改良土量1570.8cm³）に対し、 $\alpha = 90\%$ を仮定し設計した。また、参考までに、マニュアル記載の $F_c > 20\%$ の土の注入率25%（参考値）を採用した場合についても実験を行った。

薬液注入量は重量により管理した。図7に薬液注入量の経時変化を示す。図より、設計量の薬液が注入されていることが確認される。また、模型地盤の密度に依存し薬液の浸透速度が異なり、密度が小さなCaseAで浸透速度が速いことがわかる。模型地盤は、設計量の薬液を注入した後、恒温室内（20℃）で7日間養生した。出来形の体積は、未固結部を洗い流した後（図8参照）、固結部の体積を測定することで評価した。図9に各ケースの固結部の出来形を示す。図より、 $\lambda = 25\%$ では明らかに出来形不足となることがわかる。一方、 $\alpha = 90\%$ としたCase A, Bでは、固結部は目標改良長より長く、薬液注入量がやや過大であったことがわかる。表3に実験結果を定量的に整理する。実績注入率 $\lambda_{\text{experiment}}$ は式(3)より算定した。

$$\lambda_{\text{experiment}} = V_{\text{injection}} / V_{\text{improved-soil}} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 $V_{\text{injection}}$ は薬液注入量、 $V_{\text{improved-soil}}$ は固結部の体積である。表より、実績注入率として、およそ40~46%が適当であることが確認された。また、これらの値を充填率に換算すると、式(2)より、初期間隙率に対する充填率 $\alpha_{\text{experiment}}$ は78%程度であることが明らか

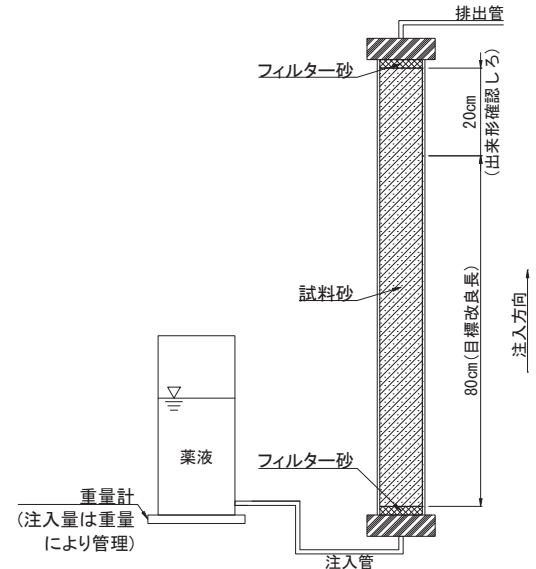


図6 一次元模型注入実験の模式図

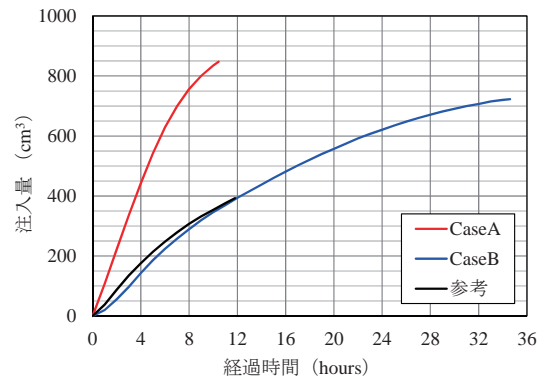


図7 薬液注入量の経時変化



図8 未固結部の洗い流し状況

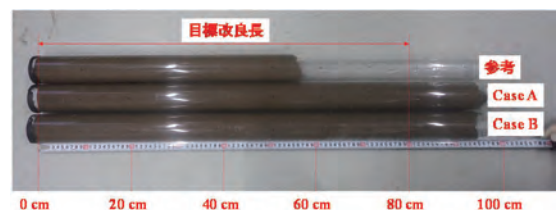


図9 固結部の出来形

かとなった。注入率 40~46%は、結果的に表 2 の「ゆるい砂」の注入率と同程度の値となったが、この値は $\alpha=90\%$ を仮定した従来の配合設計では導出できなかった値であり、特殊な土については、実験で α と λ を検証する必要があることを示唆する結果となった。

(3) 試験施工

配合設計の妥当性と実地盤における薬液の浸透性を評価するため、試験施工を実施した。配合設計の結果より、施工仕様は、薬液のシリカ濃度 7%、注入率 40.5%、注入間隔 1.6 m (改良径 $D=2.0$ m : 低透水性地盤仕様) とした。また、当工事では N 値 0 の低密度部において薬液が流出する懸念があったため、注入材としてセメントベントナイト (CB) を併用する注入方式の適用性も検討した。図 10 に試験施工の実施ケース模式図を示す。Case1 は標準的な注入方式で、所定量の薬液を所定の注入間隔で浸透注入するものである。Case2 は、一次注入として CB を先行注入し、低密度部を粗詰めしてから、薬液を浸透注入する方式で、NEO ソレタンシユ工法⁷⁾から着想したものである。

試験施工は里塚中央ぽぷら公園内の B-1, 2 地点付近で実施した。改良範囲は 3.2 m×3.2 m×3.2 m (改良体 8 球相当 : 4 球×2 段) とし、注入速度は限界注入速度試験により 10 L/min と設定した。各ケースの施工条件を図 10 に併記する。薬液の注入が完了してから 2 週間程度の養生期間を設けた後、平面的な注入中心位置から $D/4$ の位置で、ロータリー式三重管サンプラーにより不攪乱試料を採取し、一軸圧縮試験を実施した。Bk 層は礫混じりの土質であるため、採取試料の外周面は整形せず、端面のみを切断し、直径 80 mm、高さ 160 mm 程度の円柱供試体を作製した。なお、供試体の端面は石膏でキャッピング処理した。表 4 に試験施工の事後調査結果を示す。一軸圧縮強さ q_u にばらつきはあるものの、全てのケース・深度において q_u の平均値は設計基準強度を満足する結果となっていることがわかる。この結果、注入方式に依らず、浸透固化処理工法で里塚地区の Bk 層を改良できることが確認されたが、局所的に存在すると考えられる低密度部分へのリスクヘッジと、薬液の使用量低減による経済性の観点から、本施工では Case2 の注入方式を採用することとした。

4. 施工上の課題とその対策

宅地毎の液状化判定の結果、全 91 宅地、改良土量 51,069 m³ の範囲を浸透固化処理工法で地盤改良することが決定した。宅地毎に施工条件が異なるため、全 91 宅地に対して、1 宅地ずつ周辺状況を考慮した削孔計画と改良体配置設計を実施した。これらの内、家屋がある宅地については、道路部からの斜め削孔により家屋直下の地盤を改良する必要があった。図 11 に設計図面の一例を示す。直行する 2 本の道路に近接する宅地の例である。本章では、家屋を損傷させないために実施した削孔工と注入工における施工管理方法を紹介する。

(1) CIM を用いた削孔シミュレーション

道路部からの斜め削孔では、水道管や下水管等の様々な地中埋設物を交わし、家屋直下の所定の位置まで正確に削孔する必要があった。地中埋設物を損傷させないための工夫として CIM⁸⁾を用い

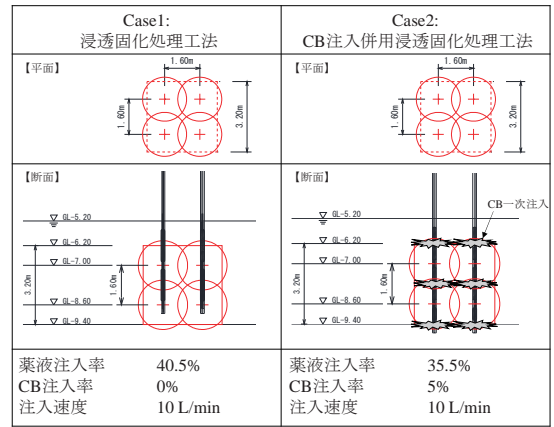


図 10 試験施工の実施ケース模式図

表 4 試験施工の事後調査結果

ケース	注入方法	材齢 (日)	採取深度	一軸圧縮強さ (kN/m ²)			
				供試体1	供試体2	供試体3	平均値
Case1	浸透固化処理工法	20	上段	52.1	144.1	228.7	141.6
			下段	188.6	218.8	131.3	179.6
Case2	CB注入併用浸透固化処理工法	15	上段	89.3	137.3	205.5	144.0
			下段	110.9	185.3	53.2	116.5

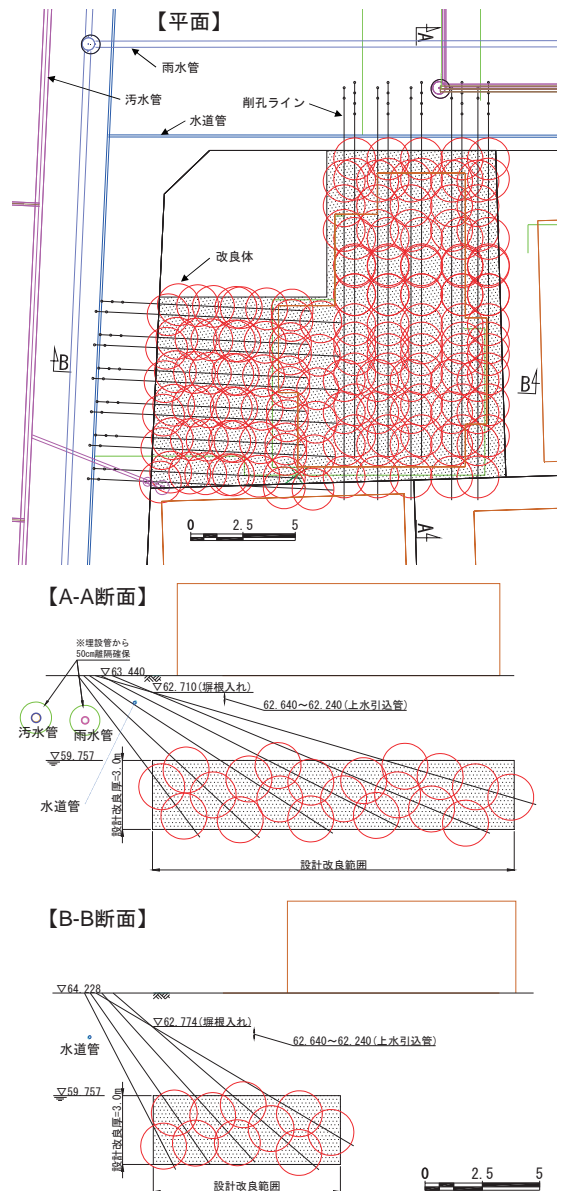


図 11 設計図面の一例

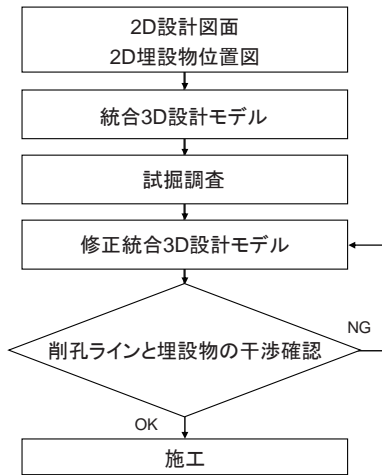


図 12 CIMによる削孔管理フロー

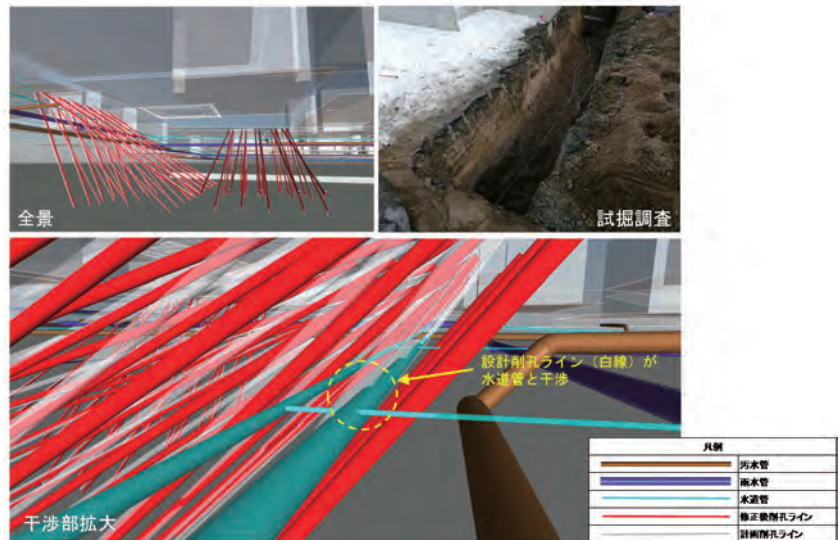


図 13 修正統合 3D 設計モデル (地中のイメージ)



図 14 プリズムの設置状況

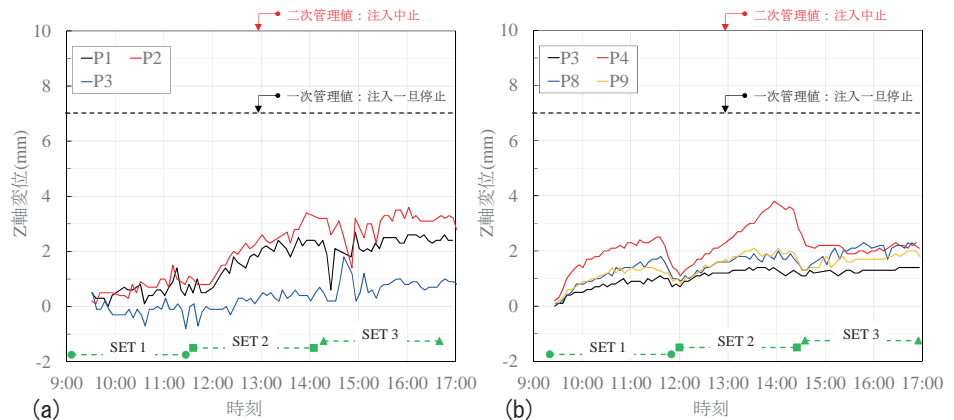


図 15 Z 軸方向の相対変位量の経時変化 : (a) 家屋, (b) 更地地表面

た削孔管理を実施した。図 12 に CIM による削孔管理のフローを示す。まず、2D の設計図面と埋設物位置図を統合し、3D の設計モデルを作成する。次に、削孔工に先駆けて試掘調査を行い、3D 設計モデルの埋設物の位置情報を更新し、削孔ラインが埋設物と干渉しないことを確認する。干渉の可能性がある場合には、3D 設計モデル上で削孔ラインを修正する。削孔時には、修正 3D 設計モデルを iPad で現場に持ち出し、削孔オペレータに危険な削孔ラインを明示・周知することで、地中埋設物の損傷リスク低減に努めた。図 13 に修正統合 3D 設計モデルの一例を示す。図 11 の設計図面に対応する宅地の 3D モデルである。

(2) 家屋の変位観測

薬液注入による家屋への影響を監視するため、二種類の方法で家屋の変位を計測した。一つは、自動追尾式トータルステーション (トプコン社製 SX-105TF) により、注入中の相対変位量を監視する方法である。もう一つは、オートレベル (ニコン・トリンプル社製 AE-7) により注入前と注入完了後の標高値 (絶対変位量) を計測する方法である。前者は注入中の相対変位量を連続的に計測することで、施工時の異常事態を早期に発見するための管理方法で、後者は注入により家屋に残留変形が生じていないことを確認するための管理方法である。いずれの方法も、1 宅地あたり 2~4 箇所程度の観測点にプリズムを設置し、プリズムの変位を計測した。図 14 にプリズムの設置状況を示す。

図 15 に地表面と直行する軸 (Z 軸) の相対変位量の経時変化の一例を示す。(a) は家屋変位を計測した結果で、(b) は更地における地表面変位を計測した結果である。例えば、(b) の結果を見ると、1 日 3 セットの注入を実施しているが、注入を停止すると、変位量は減少傾向に転じており、注入・停止に応じて地盤は弾性的に応答していることがわかる。(a) の家屋変位においても、変位量の減少はやや小さいものの、(b) と同様に変位量が増減する傾向が認められる。

図 16, 図 17 にそれぞれ、相対変位量の最大値 (最大相対変位量) と絶対変位量の最大値 (最大絶対変位量) のヒストグラムを示す。家屋直下に薬液を注入した宅地 (全 47 宅地) の内の 45 宅地分の結果を集計したものである (人為的な操作ミスと思われる計測値が確認されたデータは集計対象外とした)。図より、最大相対変位量の平均値は 4.9 mm であり、

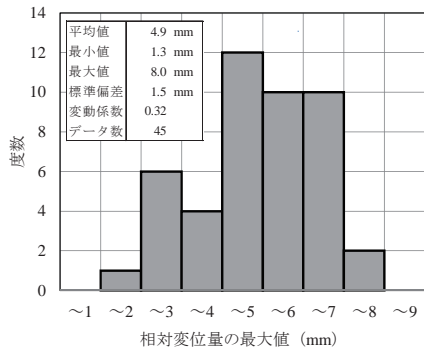


図 16 最大相対変位量のヒストグラム

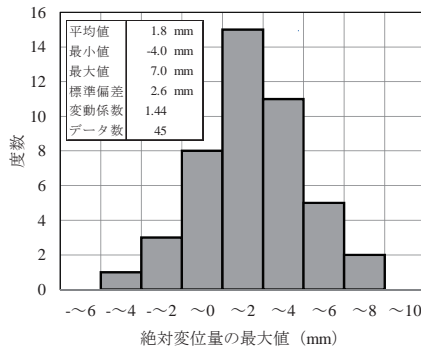


図 17 最大絶対変位量のヒストグラム

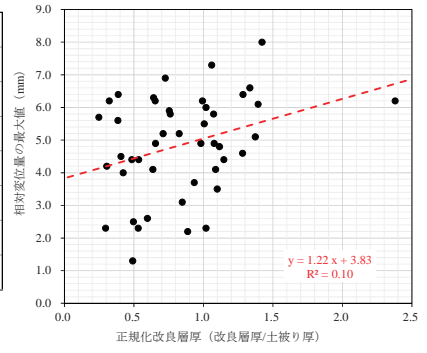


図 18 改良層厚と最大相対変位量

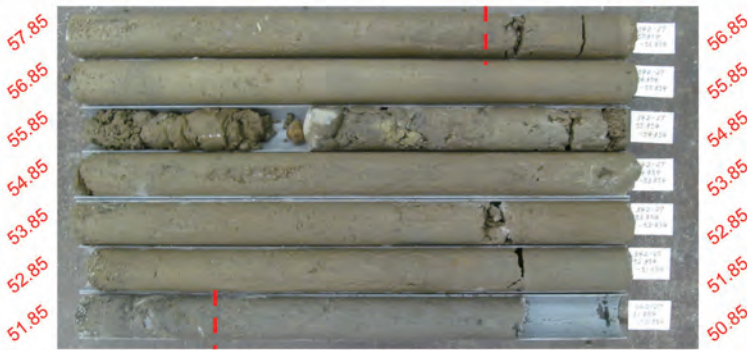


図 19 事後調査時に採取した不攪乱試料

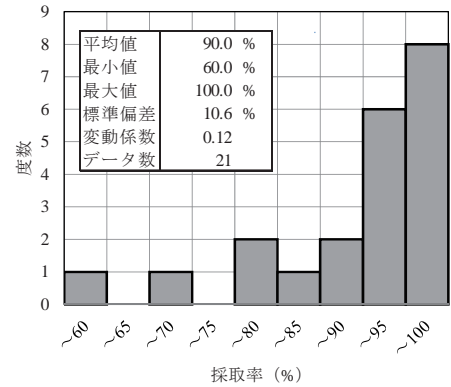


図 20 不攪乱試料採取率のヒストグラム



図 21 事後調査で実施した一軸圧縮試験の供試体の写真

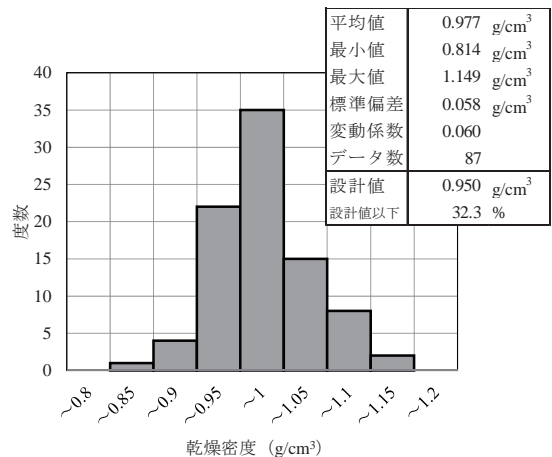


図 22 供試体乾燥密度のヒストグラム

浸透注入とはいうものの、変位量を 0 mm に抑制することは難しいことがわかる。ただし、先述したとおり、この変位は一時的なものと考えられ、図 17 の絶対変位量で評価すると、注入完了後も残留する変位量は平均で 1.8 mm 程度であり、住民の生活に悪影響を及ぼすレベルではないことがわかる。図 17 において興味深いことは、沈下方向の変位も計測されていることである。平均的な注入日数は 5~6 日であり、この間、注入・停止のオペレーションが繰り返行われている。緩く堆積した火山灰質砂地盤においては、このような注入・停止の繰り返しが地盤の密度を増大させる方向に作用する場合があることが示唆されたといえる。

図 18 に土被り厚で正規化した改良層厚（正規化改良層厚）と最大相対変位量の関係を示す。ばらつきは大きいものの、正規化改良層厚が大きくなるほど、最大相対変位量が大きくなる傾向が確認される。これは、注入量が多くなるほど地盤隆起のリスクが高くなることを示すもので、配合設計において注入率を最適化し、過剰注入を抑制したことは家屋の健全性の維持に貢献したものと考えられる。

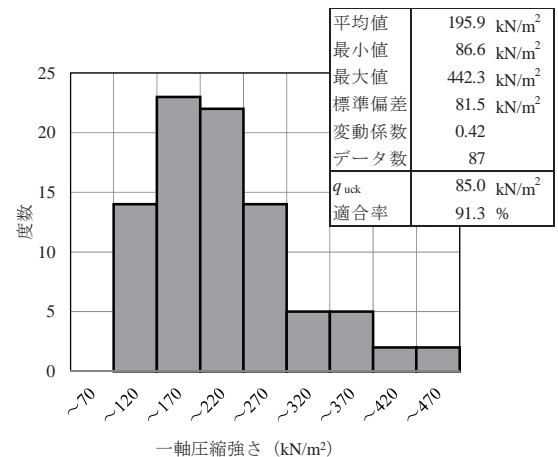


図 23 供試体一軸圧縮強さのヒストグラム

5. 改良地盤の品質

改良地盤の品質を評価するため、施工範囲内の 21 地点で事後調査を実施した。調査数量は、技術マニュアル²⁾を参考に、改良土量 2,500 m³あたり 1 箇所程度の頻度で設定した。また、調査位置は、施工範囲全体において平面的な偏りがないう候補地点を配置し、最終的には、地権者の同意が得られた宅地で事後調査を実施した。調査方法は、試験施工時と同様に、ロータリー式三重管サンプラーで採取した不攪乱試料に対して一軸圧縮試験を実施し、改良地盤の品質を評価した。21 地点の中には斜め施工箇所 4 宅地が含まれるが、これらの宅地では、施工は斜めに実施したが、サンプリングは宅地内（庭の隅）で鉛直に実施した。図 19 に事後調査時に採取した不攪乱試料の一例を示す。図中の左右に赤字で標高を記載し、改良範囲の上端と下端のおおよその位置を赤い破線で示している。ここで、改良地盤の出来形の指標として、不攪乱試料の採取率を定義する。採取率は、改良厚さに対して連続して円柱試料が採取できた長さの百分率で、図 19 の場合、改良厚さ 5.5 m に対して標高 55.85～54.85 m のサンプルの一部に不連続部が認められるため、91%と判定される。図 20 に不攪乱試料採取率のヒストグラムを示す。Bk 層の母材は緩い火山灰質砂なので、改良品質が低く未改良に近い状態では、採取率は低下するものと考えられる。図によると、採取率の平均値は 90%と非常に高いことから、里塚地区の改良地盤の出来形は良好な状態と推察される。

図 21 に事後調査で実施した一軸圧縮試験の供試体の写真を示す。供試体は、1 改良体あたり 3 本程度を目安に、試料の乱れが少ない部分から採取した。試験施工時と同様に、試料の端面のみを切断し、直径 80 mm、高さ 160 mm 程度の円柱状に整形した後、石膏でキャッピング処理し、一軸圧縮試験用の供試体とした。図 22、23 に一軸圧縮試験の結果を示す。全 87 本の供試体に対して実施した一軸圧縮試験の結果をまとめたもので、図 22 には供試体の乾燥密度のヒストグラム、図 23 には一軸圧縮強さのヒストグラムを示している。まず、乾燥密度について見てみると、分布範囲は 0.814～1.149 g/cm³ と非常に広く、Bk 層の性状は不均質であることがわかる。また、乾燥密度の平均値は 0.977 g/cm³ であり、配合試験の設計値 0.950 g/cm³ と同程度の値となっていることがわかる。統計的に設計値の位置づけを考えてみると、図 22 が正規分布に従うと仮定し、図中の平均値 μ と標準偏差 σ より、設計値以下の密度が出現する割合を計算すると約 32%となる。したがって、強度設計では不均質な Bk 層の 68%程度をカバーした条件設定ができていたことになり、当初の想定通り比較的保守的な設計ができていたことが確認された。一方、図 23 では、一軸圧縮強さの平均値は 195.9 kN/m²であった。ここで、乾燥密度と同様に、統計値 μ 、 σ を用いて、改良品質の適合率を考えてみると、設計基準強度 85 kN/m²以上となる改良地盤の割合は 91%以上である。例えば、深層混合処理工の場合、適合率が 84%程度（不良率 15.9%）になるよう配合設計を行う⁹⁾ので、この値と比較しても、浸透固化処理工で改良した里塚地区の Bk 層の品質は高いといえる。また、里塚地区の Bk 層は、未改良時には N 値 0 を示す箇所が散見される不利な地盤条件であったことを考えると、適合率 91%という高い品質は、設計・施工上の工夫が功を奏した結果もたらされたもの、といえるかもしれない。

図 24 に「清田区里塚地区市街地復旧工事」の全景を示す。里塚地区の CIM モデルを地中から見上げたイメージである。同工事では、道路部を深層混合処理工により地盤改良している¹⁰⁾ため、CIM モデル上には深層混合処理工の円柱改良体もモデル化されている。本論文の最後に、工事では 2019 年 7 月 4 日～2020 年 3 月 27 日の間に、浸透固化処理工により合計 12,468 個の改良体を造成したことを報告する。

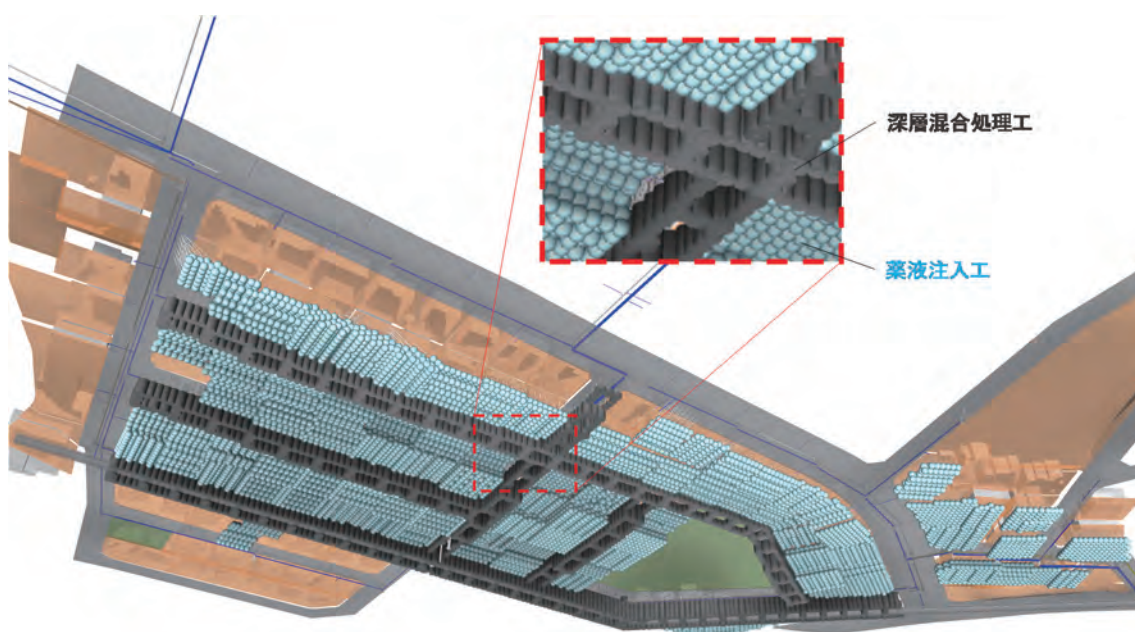


図 24 「清田区里塚地区市街地復旧工事」の全景（CIM モデルを地中から見上げたイメージ）

6. まとめ

平成30年北海道胆振東部地震により被災した札幌市清田区里塚地区の宅地部を薬液注入工法により地盤改良した。設計・施工上の工夫により、困難な地盤条件と施工条件を克服し、極めて品質の高い改良地盤を造成した。工事の中で得られた知見をまとめると次のようである。

- (1) 改良対象地盤(Bk層)は、N値0~1の低密度部が点在する上、40%以上の高い細粒分含有率を示す土質も混在するため、薬液注入工法の適用にあたって高度な技術力が要求された。
- (2) 配合試験の結果、シリカ濃度7%の薬液で改良したBk層の試料(乾燥密度 0.95 g/cm^3)は、 237 kN/m^2 の一軸圧縮強さを有することを確認した。薬液で改良した中密な砂の一軸圧縮強さは $100\sim 200\text{ kN/m}^2$ 程度といわれているので、これと比べると里塚地区のBk層は強度発現性が高く、改良強度の観点からは薬液注入工法と相性の良い土といえる。
- (3) 一次元注入模型実験の結果、乾燥密度 $0.950\sim 1.149\text{ g/cm}^3$ に密度調整したBk層試料の実績注入率は46~40%程度で、充填率に換算すると78%程度であることを確認した。この注入率は、偶然にも、浸透固化処理工法技術マニュアルの「ゆるい砂」の注入率の参考値40.5%と同程度の値となった。しかし、本実験とマニュアルでは、注入率の導出過程で設定している設計値が全く異なるため、対象地盤が特殊な場合には、一次元模型注入実験により注入率を決定することが推奨される。
- (4) 試験施工の結果、点在する低密度部対策として実施したCB注入併用浸透固化処理工法により、適正な改良地盤を造成できることを確認した。また、薬液注入率を40.5%、この内の5%をCBとした配合で造成した改良体の一軸圧縮強さの平均値は $116.5\sim 144.0\text{ kN/m}^2$ であった。目標の品質を満足する結果が得られたことから、本施工においても同様の仕様(CB注入併用浸透固化処理工法：薬液注入率40.5%、内CB5%)を標準とした。
- (5) 斜め削孔の施工においては、CIMによる削孔管理を実施した。2D設計図面、2D埋設管配置図、試掘調査の結果を3次元モデル上で統合し、施工前に削孔シミュレーションを実施することで、埋設物の損傷リスクを低減することができた。
- (6) 薬液注入による家屋への影響を監視するため、薬液注入中の家屋の動態観測を実施した。鉛直方向の最大相対変位量の平均値は4.9 mmであり、浸透注入といえども隆起量を0 mmに抑えることは難しいことが確認された。しかし、この変位は地盤の弾性的な変形に応答するものと考えられ、施工完了後の残留変位量の平均値は1.8 mmであり、家屋に悪影響を及ぼすレベルではないことを確認した。
- (7) 設計基準強度 85 kN/m^2 の目標値に対して、改良地盤の一軸圧縮強さの平均値は 195.9 kN/m^2 、標準偏差は 81.5 kN/m^2 であった。正規分布を仮定して、改良地盤の適合率(設計基準強度以上となる改良地盤の割合)を算出したところ、その値は91%であり、改良地盤が高い品質を有することが確認された。

参考文献

- 1) 佐々木将仁, 須志田健, 後藤雄平, 佐藤真吾, 渡部要一, 山本淳司, 藤永壮毅, 櫻井英文: 札幌市清田区里塚地区における再度災害防止対策, 第55回地盤工学研究発表会, DS-10-05, 2020.
- 2) 財団法人沿岸技術研究センター: 浸透固化処理工法技術マニュアル(2010年版), 2010.
- 3) 仙頭紀明, 有本拓麻, 林健太郎: 強震時における溶液型薬液改良砂の非排水繰返しせん断特性, 第50回地盤工学研究発表会, pp.601-602, 2015.
- 4) 社本康広, 天利実, 風間広志, 桂豊: 特殊シリカ系薬液注入改良土の相対密度と一軸圧縮強度の関係, 第40回地盤工学研究発表会, pp.761-762, 2005.
- 5) 天利実, 社本康広, 風間広志: 特殊シリカ系薬液注入改良土の相対密度と一軸圧縮強度の関係に粒径が及ぼす影響, 第41回地盤工学研究発表会, pp.791-792, 2006.
- 6) 堤彩人, 増田雄太郎, 坂元宏司, 片山遥平, 後藤雄平, 佐々木将仁, 鈴木定義, 林和宏: 清田区里塚地区市街地復旧工事における地盤工学的課題—薬液注入工編一, 第55回地盤工学研究発表会, DS-10-06, 2020.
- 7) 宇梶伸: NEO ソレタンシュ工法の開発について, 土木学会第73回年次学術講演会, pp.1967-1968, 2018.
- 8) 増田雄太郎, 堤彩人, 山本敦, 陳恩旒: 曲がりボーリングを用いた地盤改良工事に対するBIM/CIMの適用事例, 第55回地盤工学研究発表会, DS-8-06, 2020.
- 9) 財団法人沿岸技術研究センター: 港湾・空港における深層混合処理工法技術マニュアル(改定版), 2018.
- 10) 山本敦, 海田翔平, 堤彩人, 高口卓海, 後藤雄平, 宮本将大, 鈴木定義, 馬場秀貴: 清田区里塚地区市街地復旧工事における設計・施工上の課題—深層混合処理工編一, 第55回地盤工学研究発表会, DS-10-07, 2020.