

液状化被害を受けた火山灰質砂地盤を対象とした高圧噴射攪拌工法の設計・施工事例

○堤彩人¹・片山遥平¹・山本敦¹・鈴木定義¹・佐々木将仁²・後藤雄平²
¹五洋建設・²札幌市建設局

1. はじめに

平成30年9月6日に発生した北海道胆振東部地震により、札幌市清田区里塚地区では、盛土造成された火山灰質砂層が液状化し、傾斜盛土の端部から流出するという特異な形態の地盤災害が発生した(図1¹⁾参照)。市街地の被害は甚大で、局所的な地盤沈下量は最大で2mにも及び、地区内の道路・上下水道・公園など各種インフラ施設が大きな被害を受けた。さらに、宅地においては、半壊以上の判定を受けた家屋が全約140戸のうち80戸以上にものぼった。

札幌市では、この災害からの速やかな復旧を目的に、清田区里塚地区市街地復旧工事として詳細設計付工事が発注され、五洋・伊藤特定共同企業体が設計・施工を担当した。本工事では、液状化による大規模な側方流動と土砂流出の再発を防止するため、高圧噴射攪拌工法による道路部の改良と薬液注入工法による宅地部の改良を組み合わせる対策方針が採用された(図2参照)。

本工事の特徴として、地盤工学的には液状化被害を受けて脆弱化したN値が0~1程度の弱層部を含む火山灰質砂層が改良対象であること、また、設計的には高圧噴射攪拌工と薬液注入工の複合的な地盤構造を対象とした安定照査が必要であることが挙げられる。本論文では、道路部の高圧噴射攪拌工の実施設計のうち、これらの特徴に関連する内容を中心に事例報告を取り纏める。尚、宅地部の薬液注入工については、その設計・施工上の要点を文献2)により報告しているので参照されたい。

2. 里塚地区の対策工の考え方

(1) 地区全体の対策方針

本節では、佐々木ら³⁾の報告を参考に、里塚地区全体の対策方針について整理する。

液状化に伴う流動化を防止するには、宅地部・道路部・公園部を一体的に対策し、地区全体の大規模な滑動を抑止する必要があることが基本設計時の安定計算により確認された。宅地部においては、住民が居住しているなかで施工が可能な薬液注入工法による地盤改良が選定された。一方、道路部においては、道路直上から施工でき薬液注入工法よりも施工が速く経済性に優れ、滑動に対する抑止効果も高い高圧噴射攪拌工法による格子状改良が選定された。公園部については、別工事として発注されたため、本論文での詳細な説明は割愛するが、砕石置換と中層混合処理工法による対策工が選定されている。対策工の設計方針はa)~c)のとおりである。

a) 地区全体におけるマクロ的視点の安定照査

盛土全体の滑動ブロックの安定性を検討するため、地区内の最も滑動しやすい断面について安定照査を行い、地震時の最小安全率が1.0以上となるよう改良を行う。

b) 宅地部における未改良層の残存を許容する設計

対策範囲において液状化指数5以下(液状化による被害発生の可能性は低い)、地表変位量5cm以下(液状化の程度が軽微)を満たす改良を行う。費用対効果も考慮し、宅地部に液状化層が残存しても、道路部と公園部の改良によるトータルの抑止力で滑動を防止する。

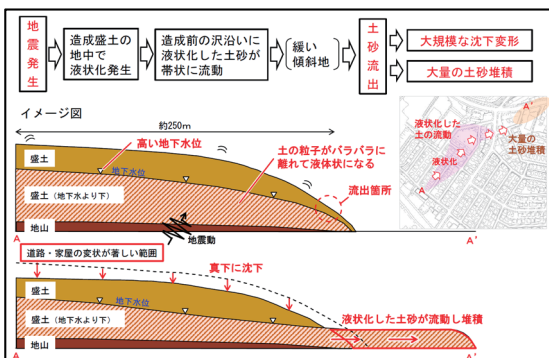


図1 地盤災害の発生メカニズム

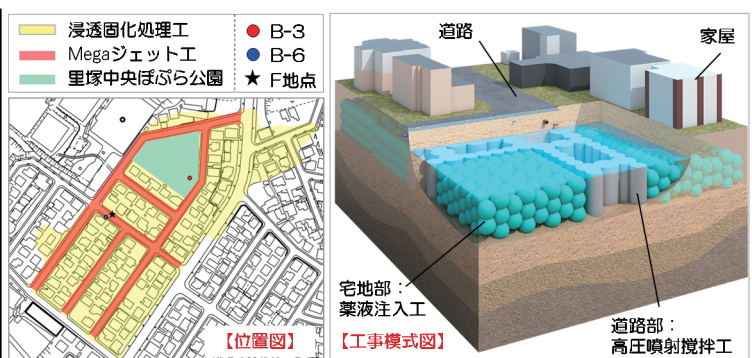


図2 対策工のイメージ

Design and construction of Jet Grouting Method targeted at volcanic ash sand deposit damaged by liquefaction
Ayato Tsutsumi¹, Youhei Katayama¹, Atsushi Yamamoto¹, Sadayoshi Suzuki¹, Masato Sasaki², Yuhei Goto² (¹Penta-Ocean Construction, ²Construction Bureau City of Sapporo)

c) 道路部におけるミクロ的視点の安定照査

高圧噴射攪拌工法による格子状改良の外的安定（滑動・転倒・支持力）と内的安定（端趾圧・水平せん断・拔出せん断・鉛直せん断）について地震時と常時の照査値が要求性能を満足することを確認する。

(2) 清田区里塚地区市街地復旧工事における道路部の高圧噴射攪拌工の実実施設計

2.(1)a)~c)のうち、本工事では、b), c)について実施設計を行った。本論文では、c)道路部の高圧噴射攪拌工法による格子状改良の実実施設計の内容について取り纏める。

本工事では、居住中の住宅もある中、その目にかつ供用中の道路を部分閉鎖しての施工が必要となるため、大型の施工機械の使用は困難であった。一方で、地下埋設物をかかわした改良体配置において確実に隣接する改良体とラップさせるため、比較的口径の大きい改良体の造材が必要となった。以上の条件の下で施工可能な高圧噴射攪拌工法として Mega ジェット工法⁴⁾を採用した。

図3に高圧噴射攪拌工の実実施設計フローを示す。実施設計では、まず、設計条件を整理するとともに、試験施工の結果を踏まえて Mega ジェット工法による格子状改良の仕様を設定した。次に、設定した改良仕様に加えて、宅地部（薬液注入工法）の改良範囲を反映した格子状改良地盤の照査断面を作成し、外的安定と内的安定について照査を行った。以降、3章では Mega ジェット工法の試験施工について、4章では複合的な地盤構造をモデル化した安定照査について詳述する。

3. 試験施工による Mega ジェット工法の改良仕様の検討

(1) 改良対象地盤の特徴

図4に地震発生の直後に里塚中央ぽぶら公園で実施した標準貫入試験(B-3)の結果を示す。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)から構成される。高圧噴射攪拌工は、液状化層であるBk層を改良し、Dv層やDvc層に着底あるいは一部根入れする仕様で設計されたが、改良対象の主となるBk層には、N値が非常に小さい(0~1程度)の弱層が散見されることから、改良地盤の品質(改良強度と改良径)確保が課題になると考えた。このため、試験施工により、当該地盤に適した Mega ジェット工法の施工仕様を検討した。

(2) Mega ジェット工法

図5に Mega ジェット工法の模式図とジェット噴射状況を示す。本工法は、圧縮空気とともに硬化材を超高压で噴射することで1t級の小型機械でありながら大口径の改良体が造材可能な工法であり、一定の吐出圧力の下、引き上げ時間を制御することで改良径を2.0~3.0mに設定することができる。表1に引き上げ時間と標準設計有効径の関係を示す。

硬化材には、別途実施した配合試験により、高炉セメントB種を用いることとした。表2に硬化材の配合表を示す。設計基準強度は、基本設計の外部安定照査と内部安定照査の結果を基に1,000 kN/m²に設定した。

表1 引き上げ時間と標準設計有効径

施工機械	硬化材量 (L/min)	引上時間 (min/m)	改良径(m) (砂質土 N ≤30)
M3 (1t級)	95×2方=190	6	2.0
	95×2方=190	9	2.5
	95×2方=190	15	3.0

表2 硬化材配合表

硬化材	高炉セメントB種 (kg)	混和剤 (kg)	水 (kg)
標準	760	10	750
中強度	650	10	785
低強度	550	10	816

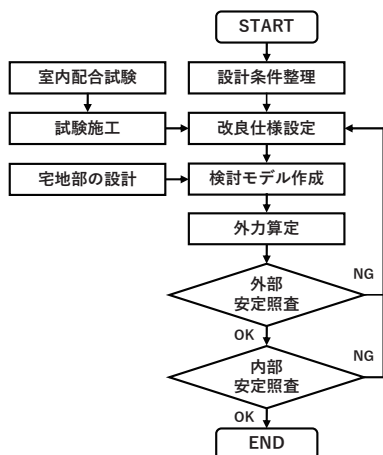


図3 実施設計フロー

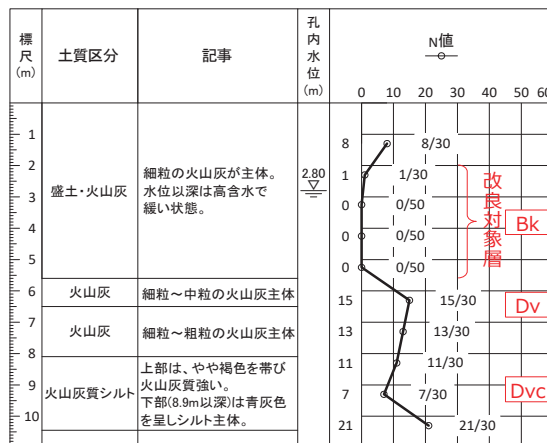


図4 土質柱状図(里塚中央ぽぶら公園B-3)

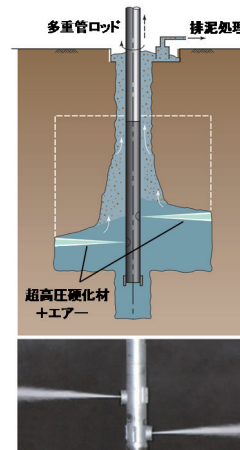


図5 工法模式図

(3) 試験結果

試験施工は、里塚中央ぽら公園内 B-3 地点の近傍で実施した。図 6 に試験施工の概要を示す。試験施工では、目標改良径として 2.0, 2.5, 3.0 m の 3 ケース、配合条件として標準と中強度の 2 ケースを設定し、ラップ部の品質を確認するために 2 改良体ずつ造成した。改良体の出来形と品質は、改良体天端面での改良径、サンプリング試料の連続性、サンプリング試料の一軸圧縮強さで評価した。

表 3 に各試験ケースの改良体天端面の出来形実測値を、図 7 に目標改良径 2.0 m の改良体天端面の写真を示す。表より、目標改良径 2.5 m, 3.0 m のケースではほぼ設計どおりの改良径となったものの、最も小さな目標改良径 2.0 m のケースでは、標準的な引き上げ時間ではやや過大な出来形となる結果となった。

次に、品質確認として各ケース 3 カ所からサンプリングを行った。図 8 にサンプリング位置を示す。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た。一例として目標改良径 3.0 m の改良体端部から採取した不攪乱試料を図 9 に示す。目標改良径 3.0 m のケースでは、天端面の改良径は設計値の 1.01 倍と余裕のある大きさではなかったが(表 3 参照)、図 9 より全深度に渡って改良径の端部まで改良されていることがわかる。

表 4 に改良体の一軸圧縮強さ(材齢 28 日)の平均値を示す。目標改良径とサンプリング位置ごとに結果を整理している。条件によって強度にばらつきが見られるものの、全てのケースにおいて目標改良強度 1,000 kN/m² 以上の値が確認された。配合条件が同一である目標改良径 2.0 m と 3.0 m のケースを比較すると、2.0 m のケースで一軸圧縮強さが小さいことに気づく。これは、目標改良径 2.0 m のケースでは出来形が「設計 < 実績」となったことから、改良土量当たりの硬化材置換率が想定より低くなった結果、改良強度も小さくなったためと考えられる。また、目標改良径 2.0 m のケース(標準配合)は、やや貧配合の中強度配合で造成した目標改良径 2.5 m のケースよりも一軸圧縮強さが小さくなっており、一軸圧縮強さに与える影響は配合条件(標準 or 中強度)よりも硬化材置換率が支配的となることがわかる。

改良体の配置検討では、施工上の制約のため(例えば、埋設物をかわす配置を検討するため)、目標改良径 2.0~3.0 m 全ての改良体を使用する計画であった。本施工では、表 1 の仕様で改良体を造成し、配合条件は全ての目標改良径において一軸圧縮強さが設計基準強度 1,000 kN/m² を満足する値となった標準配合を採用することとした。

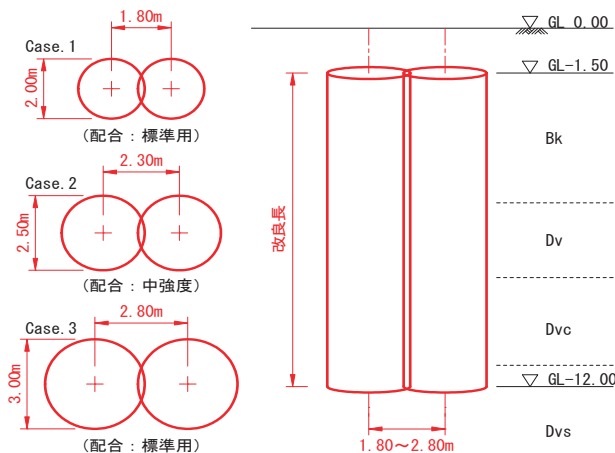


図 6 試験施工概略図

表 3 改良体天端面の出来形実測値

Case	設計値 (m)	実測値 (m)		
		L1	L2	平均
Case.1	2.00	2.58	2.58	2.58
Case.2	2.50	2.60	2.56	2.58
Case.3	3.00	3.03	3.03	3.03

表 4 改良体の一軸圧縮強さ(試験施工)

Case	目標改良径	配合	一軸圧縮強さ q_u (kN/m ²)		
			①D/4	②ラップ部	③端部
Case.1	ϕ 2.0 m	標準	1,091	2,522	1,640
Case.2	ϕ 2.5 m	中強度	1,263	2,869	2,687
Case.3	ϕ 3.0 m	標準	3,361	6,857	4,324



図 7 改良体天端面

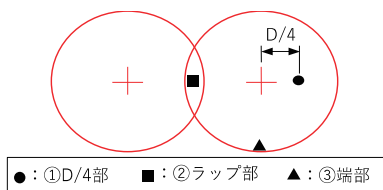


図 8 サンプリング位置

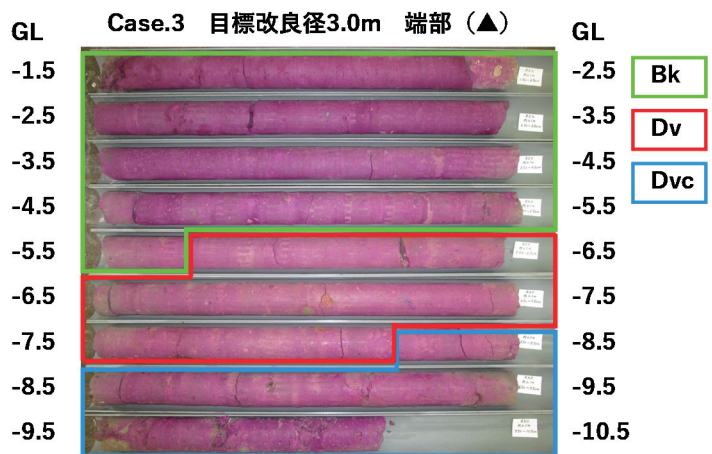


図 9 採取試料 (Case.3③端部)

4. 宅地部の液状化対策を考慮した道路部の格子状改良地盤の安定照査

(1) 安定照査の概要

図10に本工事の地盤改良工の出来形イメージを示す。工事の中で実際に作成した BIM/CIM モデルを地中から見上げたイメージで、円柱は道路部の高圧噴射攪拌工（格子状改良）の出来形モデル、球体は宅地部の薬液注入工の出来形モデルを表している。宅地部では浸透固化処理工法（PGM）を採用し²⁾、実施設計において、工事対象範囲内の全ての宅地でスウェーデン式サウンディング試験（JIS A 1221: 2013）を実施し、この結果を基にした液状化判定により宅地ごとに改良範囲を設定した。このため、格子状改良地盤についても、宅地部の PGM の設計の結果を反映し安定照査を実施した。図11に本工事の安定照査断面の模式図を示す。液状化判定の対象層である Bk 層のうち、地下水位から液状化指数5以下となる範囲までを地盤改良するため（図中 PGM）、照査断面の下部に液状化層を一部残存する土層構成を成すことがわかる。加えて、主働側と受働側で土層構成が異なる複雑な照査断面となることが特徴的である。

(2) 地盤条件

表5に地盤定数の一覧表を示す。Bk, Dv, Dvc 層の地盤定数は基本設計から引き継いだ値を用いた。PGM 改良層の地盤定数は同工法技術マニュアル³⁾を参考に設定した。PGM では、改良地盤は溶液型の薬液を浸透注入する方法で造成されるため、単位体積重量と内部摩擦角には原地盤（Bk 層）と同じ値を用いることが一般的である。さらに、粘着力が付与されるため、その効果を(1)式より計算した。

$$c = \frac{q_{uck}}{2 \tan(45^\circ + \phi/2)} \quad (1)$$

ここに、 c と q_{uck} はそれぞれ PGM 改良層の粘着力と設計基準強度（85 kN/m²）、 ϕ は原地盤の内部摩擦角である。

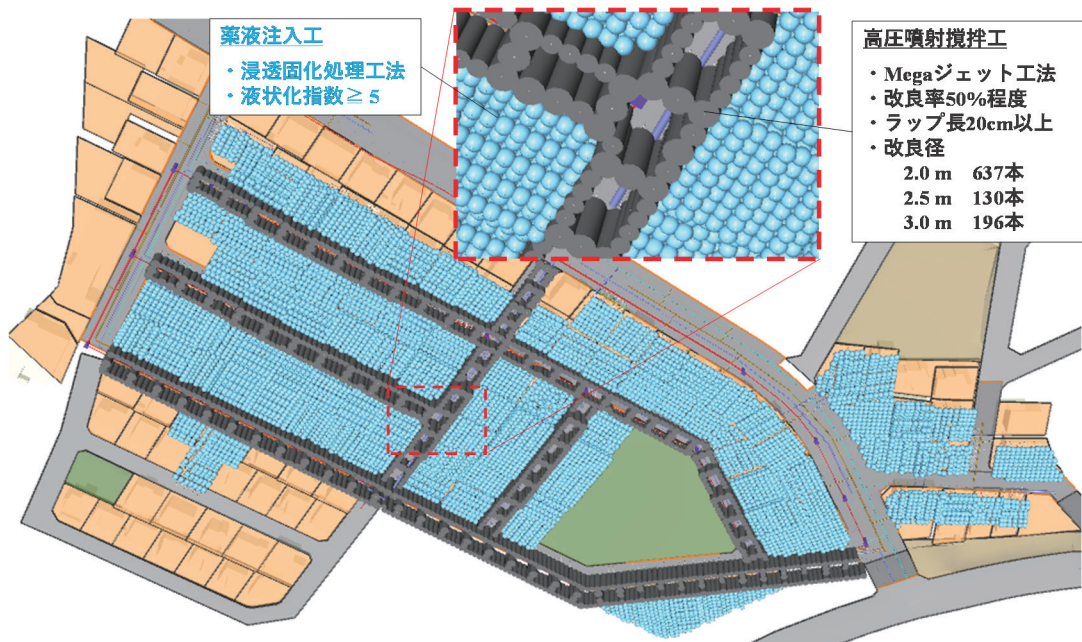


図10 清田区里塚地区市街地復旧工事の出来形イメージ

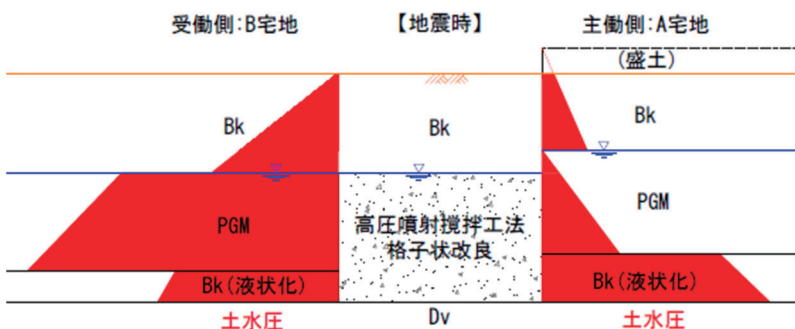


図11 安定照査断面の模式図

表5 地盤定数の一覧表

土層名	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
Bk	15	-	30
Dv	15	-	38
Dvc	18	131	-
PGM	15	24.5	30

(3) 検討ケース

安定照査は、液状化対策工法設計・施工マニュアル⁶⁾に準拠し実施した。表6に検討ケースを示す。検討ケースは地震時および常時（地震後）を対象としたが、本論文では地震時の検討結果を中心に記載する。

上載荷重は、道路部を挟む主働側と受働側の宅地部の地盤高の高低差から設定した。また、設計水平震度は、地震時に当該地で観測された最大加速度より0.29とした。土水圧はマニュアル⁶⁾に記載の方法で算定した。ここでは一例として、本検討における特徴的な土層であるPGM改良層の土水圧の考え方を説明する。PGM改良層は、液状化しないc-φ材と仮定し、(2)式より主働土水圧 p_{AH} 、(3)式より受働土水圧 p_{PH} を算定した。

$$p_{AH} = K_{EA} \left\{ \sum (\gamma z) + w \right\} + p_w - 2c\sqrt{K_{EA}} \quad (2)$$

$$p_{PH} = K_{EP} \sum (\gamma z) + p_w + 2c\sqrt{K_{EP}} \quad (3)$$

ここに、 γ は土の単位体積重量、 z は地表面からの深さ、 w は上載荷重、 p_w は静水圧、 K_{EA} は地震時の主働土圧係数、 K_{EP} は地震時の受働土圧係数である。土水圧の分布イメージは図11に示すとおりである。

安定照査は、外的安定として滑動・転倒・支持力、内的安定として端趾圧・水平せん断・拔出せん断・鉛直せん断の計7項目について計算を行った。断面数は、5ユニットに1断面程度を目安に17断面を選定した。道路部を挟む宅地部のうち地下水位が高い方を主働側とすることを基本設定とし、地震時には地震慣性力が逆方向にも作用することを考慮し、主働側と受働側を入れ替えたケースについても計算を行った。したがって、地震時の検討として計34断面の安定照査を実施したことになる。安定照査結果の一例として、図12に滑動と転倒に対する安全率のヒストグラムを示す。いずれの検討断面においても、滑動・転倒ともに十分な安全率が確保されていることが確認される。

5. Mega ジェット工法で造成した改良体の品質

本工事では、Mega ジェット工法により963本の改良体を造成した。これらのうち、12箇所からロータリー式三重管サンプラーにて不攪乱試料を採取し一軸圧縮試験により品質を評価した。図13に採取試料の写真と一軸圧縮強さを整理する。本試料は、図2に示すB-6ボーリング調査位置から8.8m離れた位置(F地点)で採取した試料である。図13には、比較のため、地盤改良前のN値の深度分布(B-6ボーリング調査)も併記している。図より、改良前のN値が0の弱層部においても、強固な改良体が造成されていることが確認される。高压噴射攪拌工法は硬化材と原地盤を混合攪拌することで改良体を造成する方法であるが、弱層の存在が改良強度に影響しない結果から考察すると、改良強度の支配要因は地盤の状態ではなく硬化材による強制置換の効果といえそうである。

表6 検討ケース一覧表

検討ケース	作用外力	作用方向
地震時	自重, 上載荷重, 地盤反力, 地震時土水圧, 地震時慣性力	地震方向が逆向き のケースも実施
常時	自重, 上載荷重, 地盤反力, 常時土水圧, 流動力	一方向のみ実施

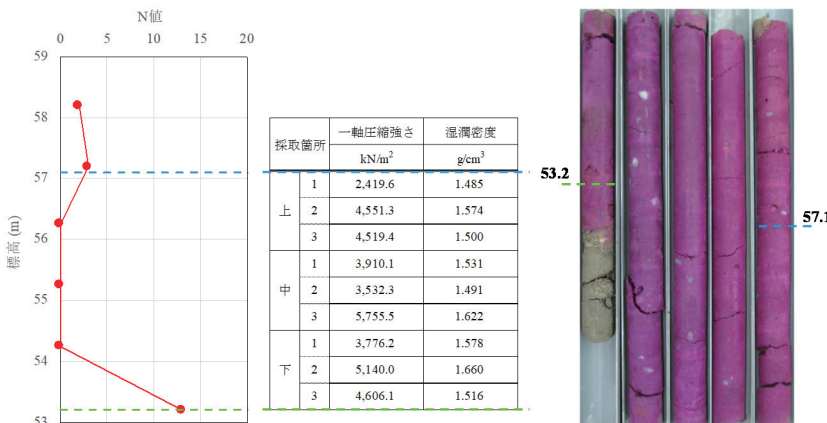


図13 事前ボーリングB-6の結果とF地点の事後調査の結果

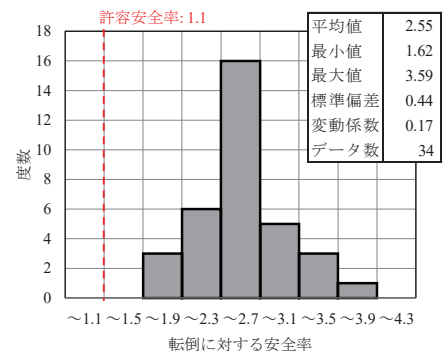
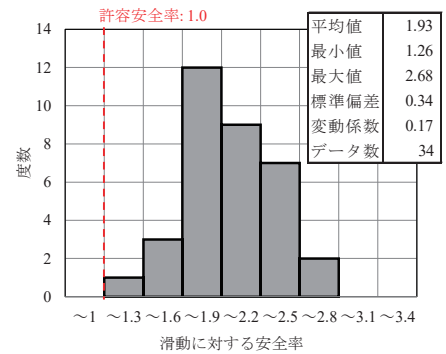


図12 外部安定照査の結果

表 7 事後調査結果の総括表

事後調査結果	一軸圧縮強さ (kN/m ²)	湿潤密度 (g/cm ³)
平均値	3,561.9	1.548
最小値	1,056.1	1.459
最大値	8,840.0	1.717
データ数	102個	

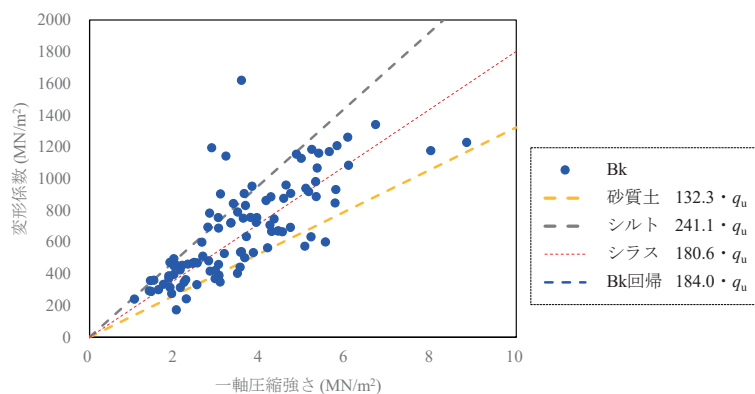


図 14 一軸圧縮強さと変形係数の関係

事後調査の結果は、山本ら⁷⁾の報告に詳しく纏められているため、ここでは結論を簡潔に示す。表 7 に事後調査結果の総括表を示す。設計基準強度 1,000 kN/m² に対して、一軸圧縮強さの平均値は 3,562kN/m²、最小値は 1,056kN/m² となり、全調査箇所において設計基準強度を上回る値となった。この結果から、液状化とそれともなう流動化を経験した火山灰質砂層という過去に例のない地盤条件に対し、試験施工を含む種々の事前検討や対策を行うことで通常と変わらない高い品質の施工が実施できたと考えている。

最後に、地盤の変形解析を実施する場合には、物理・強度定数（例えば、湿潤密度や一軸圧縮強さ）に加えて変形係数も重要なパラメータとなるので、一軸圧縮試験から得られた変形係数 (E_{50}) についても整理しておく。図 14 に、改良体の一軸圧縮強さと変形係数の関係を示す。一般に、セメント改良地盤の変形係数は一軸圧縮強さに依存することが知られている⁸⁾。参考までに、図 14 に、文献 8) に記載の「深層混合処理工法で改良した地盤の一軸圧縮強さと変形係数の関係」をプロットする。両者の関係は原点を通る直線で表され、その勾配は、砂質土で 132.3 程度、シルトで 241.1 程度、シルスで 180.5 程度となることが報告されている。里塚地区の Bk 層の一軸圧縮強さと変形係数の関係についても最小二乗法により回帰直線を求めたところ、その勾配は 184.0 となった。改良体の強度変形特性は母材の種類によって異なり、里塚地区の Bk 層を母材とした改良体はシルスに近い強度変形特性を示すことが確認された。

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災害復旧工事における高圧噴射攪拌工の実施設計上のポイントを整理した。試験施工では、液状化と流動化を経験した火山灰質砂層に対して、Mega ジェット工法により設計基準強度 1,000 kN/m² を満足する改良体を造成できることを確認した。ただし、小口径の目標改良径 2.0 m の改良体を造成する場合には、弱層の影響により、標準的な改良仕様では出来形改良径がやや過大 (2.5 m 程度) になる結果となった。また、宅地部の浸透固化処理工の改良仕様を考慮し、道路部の Mega ジェット工による格子状改良地盤の安定照査断面をモデル化する方法について説明した。本文では、滑動と転倒に対する安定照査の結果を整理し、いずれの断面においても十分な安全率が確保されていることを示した。

参考文献

- 1) 佐々木将仁, 渡部要一, 川尻峻三, 櫻井英文, 須志田健: 北海道胆振東部地震における札幌市清田区里塚地区の市街地の復旧について, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 60 号, pp.139-148, 2020.
- 2) 堤彩人, 増田雄太郎, 陳恩施, 坂元宏司, 山本敦, 鈴木定義, 片山遥平, 堀口晴実, 後藤雄平, 佐々木将仁: 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, 第 14 回地盤改良シンポジウム論文集, pp.523-530, 2020.
- 3) 佐々木将仁, 須志田健, 櫻井英文, 川尻峻三, 渡部要一: 平成 30 年北海道胆振東部地震で被災した札幌市清田区里塚地区の市街地復旧, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), 77 巻 2 号, pp.170-189, 2021.
- 4) 宇梶伸, 長崎康司: 狭隘条件における大口径高圧噴射攪拌工法の適用, 第 53 回地盤工学研究発表会, pp.829-830, 2018.
- 5) 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.
- 6) 建設省土木研究所: 液状化対策工法設計・施工マニュアル (案), 1999.
- 7) 山本敦, 堤彩人, 片山遥平, 後藤雄平, 佐々木将仁: 市街地復旧工事での高圧噴射攪拌工法の施工—札幌市の市街地における Mega ジェット工法の適用事例—, 基礎工, Vol.50, No.3, pp.73-76, 2022.
- 8) 一般財団法人 日本建築センター: 改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—, 第 3 版, 2012.