

大深度シールド発進リスク対策としての薬液注入工法の実績 The record of chemical grouting method as the risk countermeasure for deep shield launching

大江 郁夫*

Ikuo Oe

坂野 陽一*

Youichi Sakano

竹林 大介*

Daisuke Takebayashi

要 約

深さ約 GL-80 m の深度で、直径約 14 m のシールドが地中連続壁を直接切削する工事において、「安全・安心」を確保すべく、確実な止水を行うことが課題となった。対応策として、地中連続壁の外側に薬液注入工により止水壁を設けることとした。大深度で確実な薬液注入を行うために、削孔した注入孔の孔曲がり量の計測を行ったうえで、土量配分システムにより各注入ステップにおける注入量等を設定し施工を行った。その結果、目標とする止水性能（透水係数）を得ることができた。また、薬液注入実施時には、地中連続壁の変状の監視を行い、注入速度の調整等を行うことにより、変状を許容変位量内に収め、「安全・安心」を確保した施工を行うことができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要および施工条件
- § 3. 薬液注入工の計画
- § 4. 施工実績
- § 5. 実工事で得られた知見

§ 1. はじめに

近年、大深度地下シールドトンネルの安全・安心な施工方法について大きく議論されている。本工事は、深さ約 GL-80 m の深度で、直径約 14 m のシールドが地中連続壁（壁厚 1.4 m の NOMST 壁）を直接切削する工事である。工事の周辺地域は閑静な住宅街であり、『安全・安心』な施工は、まさに最重要課題である。本工事で想定されるリスクは、シールドや周辺地山に対する止水対策の不十分により、高圧の出水や地中連続壁の大規模変状が発生し、作業従事者の安全が損なわれたり、工事周辺地域の地表面に沈下等の影響が生じ、安心が損なわれたりすることである。

リスクへの対応として、シールド機への高水圧対応の二重のエントランスパッキンの装備に加え、薬液注入工による防護工を計画した。大深度で薬液注入工を行う場合、精度が決して高いとは言えない注入管設置に対して未改良ゾーンが発生して、確実な止水を行うことができ

なくなる懸念が大いにある。今回、薬液注入工法に土量配分システム¹⁾を採用し、合理的な止水を行ったので、その工法概要と実績を報告する。

§ 2. 工事概要および施工条件

2-1 工事概要

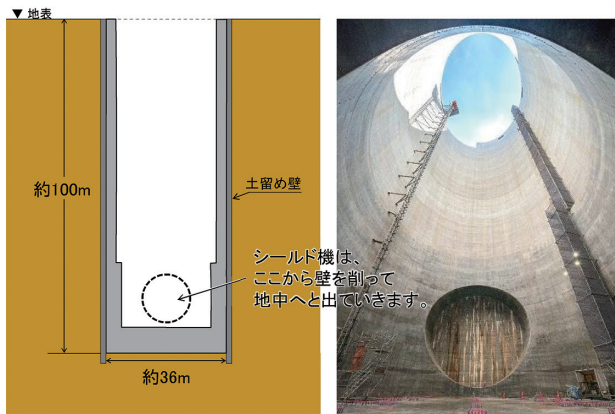
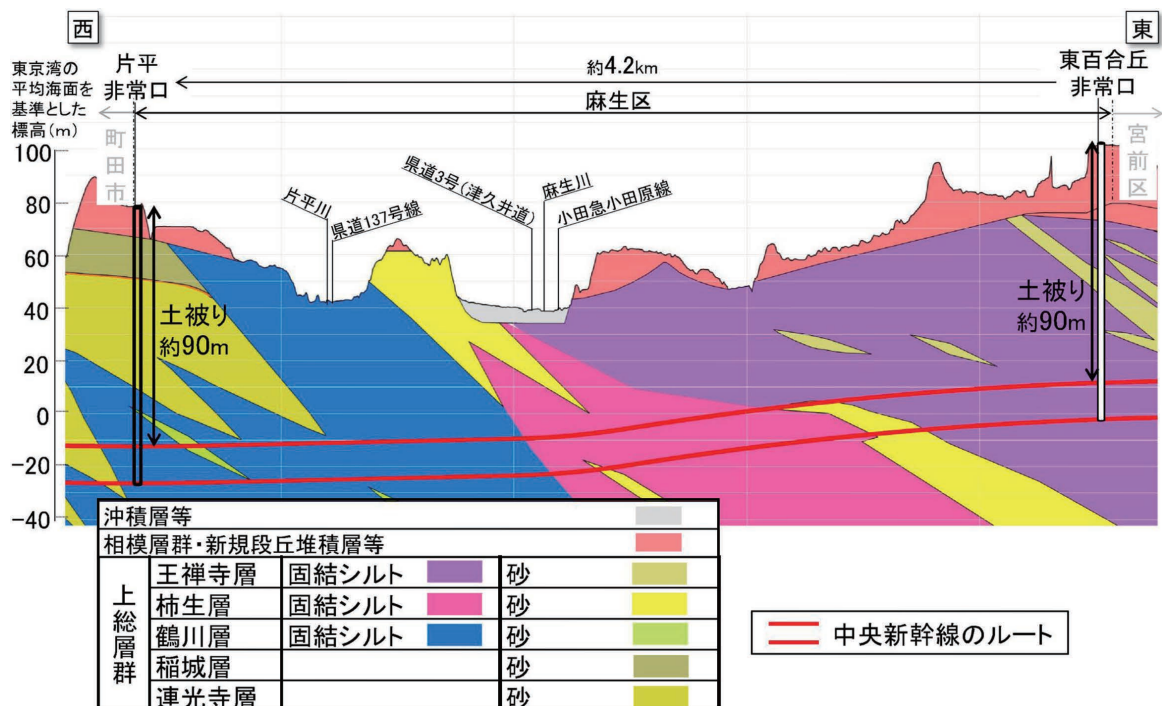
東海旅客鉄道(株)が進めるリニア中央新幹線工事のうち、東百合丘工区は、東百合丘非常口（他社 JV により施工済み）から片平非常口（西松・五洋 JV 施工中）までの約 4.2 km を直径約 14 m の泥土圧シールドで施工する大深度・大断面のトンネル工事と、地中連続壁工法で山留めを行い、躯体を構築する片平非常口躯体工事ほかで構成される工事である（図-1、図-2）。

東百合丘非常口は、躯体の深さが約 100 m で、地中連



図-1 当工区の概要（平面図）²⁾

* 関東土木（支）東百合丘（工）

図ー2 東百合丘非常口の概要³⁾写真ー1 シールド組立中の状況³⁾図ー3 地質縦断面図³⁾

続壁を施工した後に、躯体が順巻きで構築された。図ー2右に示す開口からは地中連続壁がむき出しとなっており、ここにエントランス金物を設置して、地中連続壁を直接切削して、シールドを発進させる（写真ー1）。

2-2 施工条件

(1) 地質

当該工事の地質縦断面図を図ー3に示す。発進位置の地盤は上総層群王禅寺層（Oz-c層）である。この地層は、砂岩・泥岩の互層であるが、当該箇所は硬質な粘性土が支配的であり、介在砂層が散在している。また、当該非常口は鶴川撓曲の東側に位置することから、硬質粘性土にありがちな亀裂があることが想定された。

表ー1に地中連続壁設計時のOz-c層の土質定数を抜粋した。コラムジェット程度の変形係数を有する硬質な地盤であることがわかる。

表ー1 掘削深度におけるOz-c層の土質定数

N値		115
単位体積重量	γ (kN/m ³)	19
設計粘着力	C (kN/m ²)	487
内部摩擦角	ϕ (deg)	17
変形係数	E ₅₀ (MN/m ²)	500

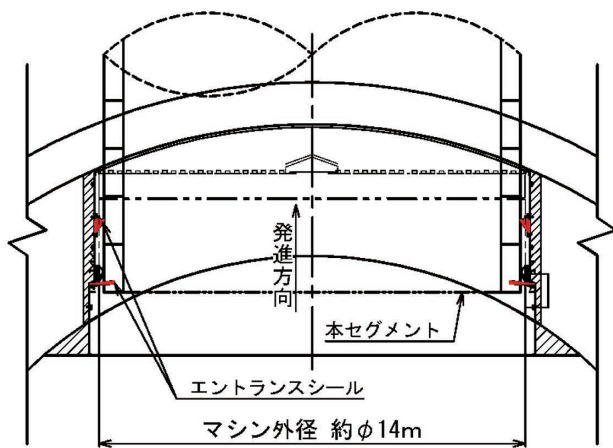
(2) 地下水位

Oz-c層の地下水位は介在砂層毎に大きく異なるが、各種調査結果から掘削断面の介在砂層の地下水位はTP+50～60m（シールドセンターで0.45～0.55 MPa）と推定した。

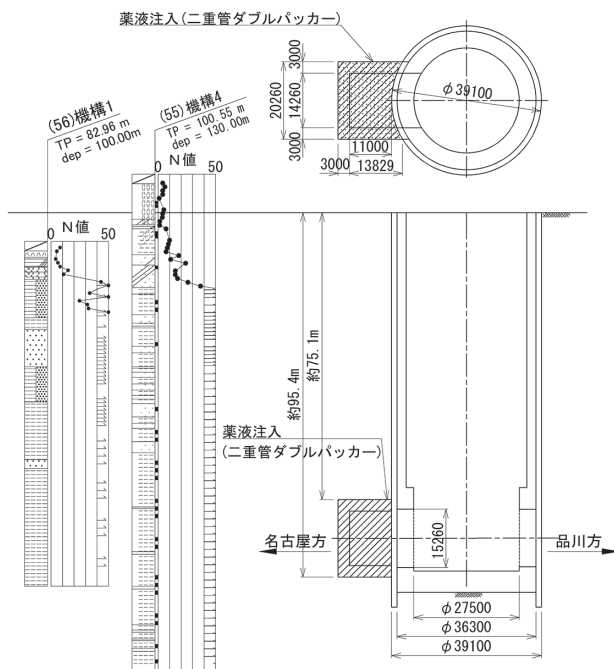
(3) 地中連続壁

地中連続壁は前施工による設計である。壁厚は1.4m、筋材はNOMST、粗骨材は石灰石骨材が使われた。

コンクリート呼び強度は40 N/mm²であるが、当該深



図ー4 エントランス概略図



図ー5 発進防護工概要および地質図

度における強度は呼び強度に比べ大幅に大きくなっていることが想定された。

筋材は最小鉄筋量に相当する断面積を確保しており、許容応力度に対し余裕のある設計を行っていた。

(4) エントランス構造

本工事のシールド機は中折を有していないが、2段シールドで、2段とも加圧チューブを設け、高水圧における止水性を確保することとした(図ー4)。

§3. 薬液注入工の計画

3-1 薬液注入工の施工範囲

地質状況から掘削対象地盤は強度が高く、また、変形係数も大きいことからNOMST壁が大割れする懸念は小さい。しかし、介在砂層や亀裂があると想定され、高水圧であることから、止水性に万全を期すため、薬液注

入工法によって止水壁を設けることとした。

シールド正面から見て『ロ』の字形で地盤改良をし、『シールド機長+3.0mの範囲』に3.0mの壁・側壁・棲壁に相当する改良体で囲うこととした(図ー5)。なお、注入列は1.0m間隔の3列とした。

3-2 薬液注入工の課題

薬液注入工は実績の多い工法であるが、本工事では特に以下の点に注意が必要であると考えた。

(1) 削孔精度

100m程度の深度に削孔して注入管を設置するが、薬液注入工の削孔精度は一般的に1/100程度と言われており、深度が約100m、間隔が1.0mと考えれば、決して良い精度とは言えない。さらに、仮に削孔範囲に礫があれば、精度が1/100より低下する。

例えば、管が離れたにもかかわらず、定量で注入をすると改良できない未改良部分が生じ、大深度工事における止水性の弱点になる。また、隣接する注入管が近づきすぎると、隣接管がぶつかり、削孔できなくなる。これまで深い施工では孔ピッチを縮めて配置する方法が採られたこともあったが、本工事は本数が多く、削孔間隔を小さくすることは避けたい。

(2) 適切な注入率・注入圧の設定

改良対象地盤内には介在砂層や亀裂があると想定された。削孔の際に、トルクなどで、介在砂層の位置を把握することは、ある程度は可能であるものの、薄層における薬液注入工は難しく⁴⁾、慎重に行う必要がある。

(3) 既設構造物への影響

注入圧により、既設構造物、特に地中連続壁への影響が懸念された。

3-3 確実な注入を行うための計画

(1) 削孔の工夫

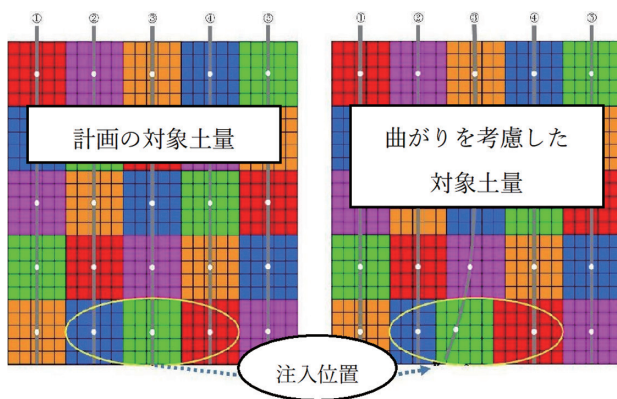
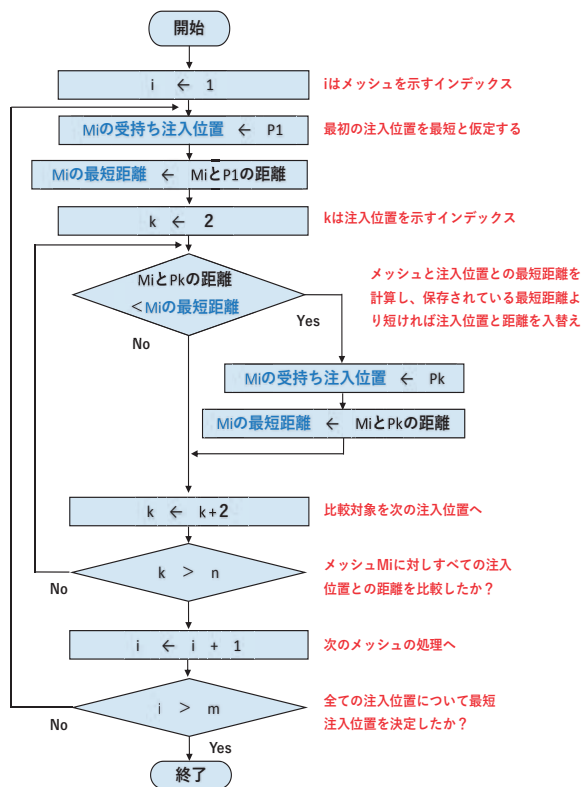
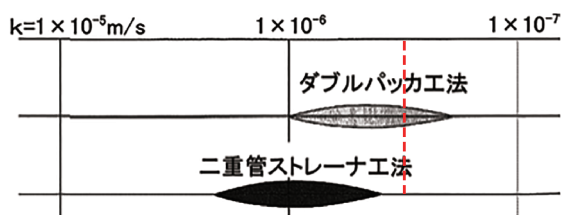
まず、少しでも削孔精度を高めるために、一般的なケーシング(直径約φ100mm)より太い直径φ165mmのケーシングでGL-70mまで削孔し、続いて、それをガイドに直径φ118mmのケーシングを最終深さまで削孔することとした。そして、このケーシングをガイドに注入外管を設置する3段階施工とした。

(2) 土量配分システム¹⁾の採用

本システムは、設置した注入管の位置を計測した上で、改良範囲を任意の3次元メッシュ(当該施工では1辺10cmの六面体)に分割し、それぞれのメッシュ中心からの最短距離にある注入位置を探索し、各注入位置が受け持つ改良土量を算出するものである。改良土量が決まれば、これに適切な注入率を設定し注入量を決定する(図ー6、図ー7)。この方法であれば、少々、注入管位置がずれても、適切な注入ができると考えた。

(3) 注入率

注入工法はダブルパッカー工法とし、対象地盤は概ね

図-6 土量配分イメージ (断面)¹⁾図-7 注入位置とメッシュの従属関係決定フロー¹⁾図-8 目標透水係数⁵⁾

粘性土であるが、介在砂層や亀裂などの影響を読みきれなかったため、計画注入量は砂質地盤相当の31.5%とし、さらに重要度率1.2を乗じた。

注入機は、ヤードの制約から6台とし、性能としては、吐出量6～12 L/minのものを用了。

(4) 目標透水係数

介在砂層への薬材の浸透は難しいものであるが、目標透水係数を文献5)から 5×10^{-7} m/sとした(図-8)。

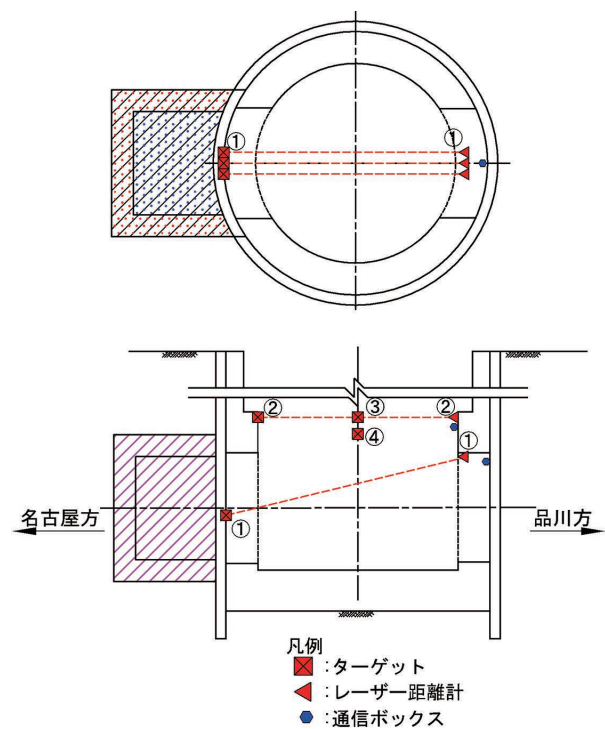


図-9 レーザー変位計計測位置

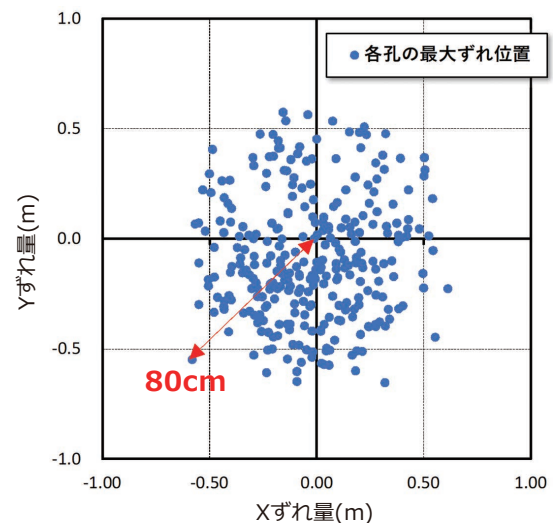


図-10 各孔の最大偏心量 (n=302 本)

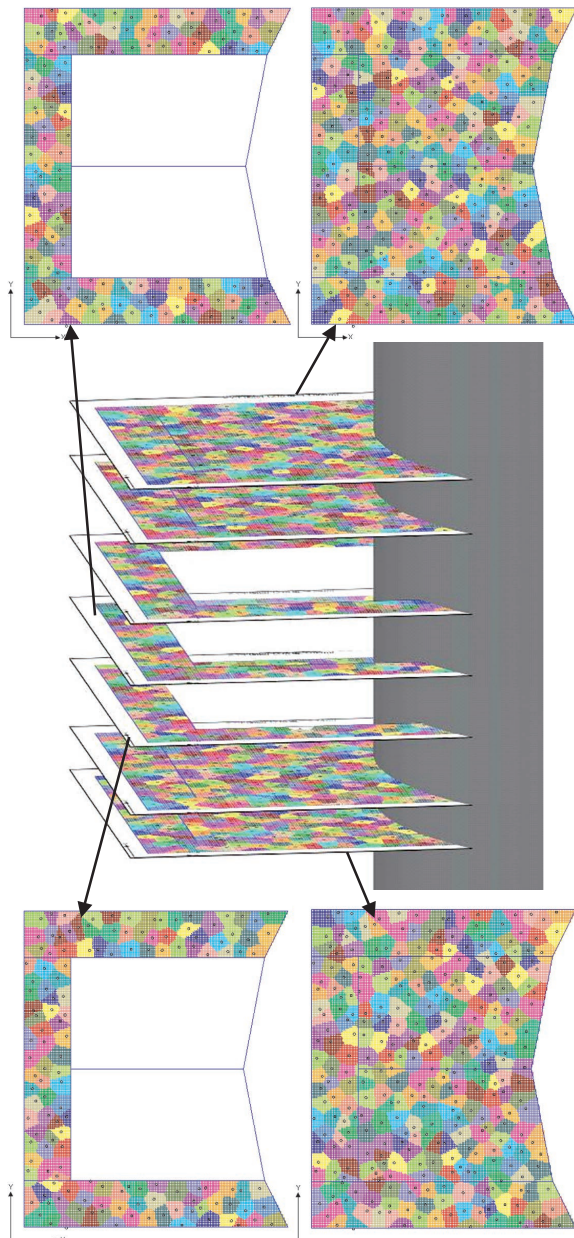
(5) 地中連続壁の許容変位量

筋材に応力度の余裕があったことから、薬液注入工施工前の変位量と許容応力度に達する変位量を弾塑性法から算出し、それらの差分から、地中連続壁の許容変位量を18.5 mmと設定した。変位計を、地中連続壁の他、本体コンクリートにも設置し、薬液注入工による影響を監視することとした(図-9)。

§ 4. 施工実績

4-1 削孔精度と注入量の計算

全孔で管路計測装置(ジャイロ)により孔曲がり量を確認した。全302本のうち、孔の最大偏心量は80 cm、最



図一11 計画注入量配分（各孔の負担面積の算出結果）

大偏芯量の平均は 37 cm であった。各孔の最大偏芯量を図一10に示す。これらを基に各ステップの注入量を計画した（図一11）。

4-2 上限および下限注入圧の設定

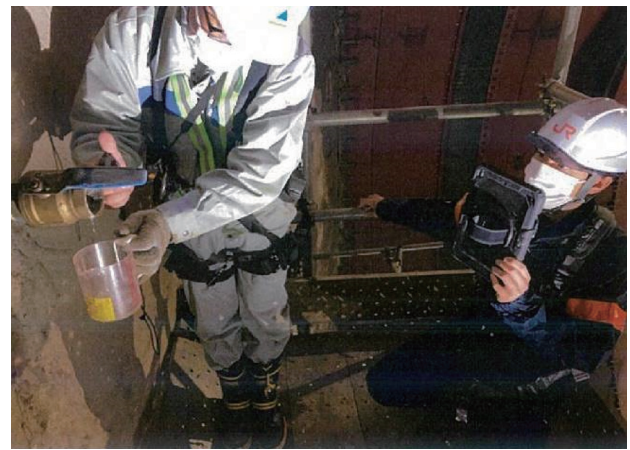
上限圧力を実績から注入機口元で 4.1 MPa で管理することとした。

また、試験注入を 2 箇所行い、注入効果確認結果より、2 MPa を下限注入圧とした。なお、所定量を注入しても下限注入圧に達しない場合は、再度計画注入量の 50% を追加で注入することとした。

4-3 施工結果

(1) 注入量

砂層相当で設定した計画注入量が $1,455 \text{ m}^3$ に対して、



写真一2 水平ボーリング孔からの漏水

表一2 薬液注入工の効果確認

No.1	$3.6 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
No.2	$2.0 \times 10^{-9} \text{ m/s}$
No.3	$2.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
No.4	$4.3 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
No.5	$1.5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

注) 水平ボーリング長さは $L=9.5 \text{ m}$ で、1 m 毎に計測した。表の数値は、その中での最大値を示す。

実施工注入量は $1,477 \text{ m}^3$ と、粘性土卓越地盤にもかかわらず計画値に対して実際の注入量が多い結果となった。これは、鶴川撓曲の影響により固結した粘性土地盤に亀裂があったことによるものと推察している。

(2) 止水性（透水試験）

東百合丘非常口の施工の際にまとめられた記録を基に、砂層と認められた深度で NOMST 壁面から水平ボーリングを $L=9.5 \text{ m} \times 5$ 本行い、漏水量が非常に少ないことを確認した（写真一2）。

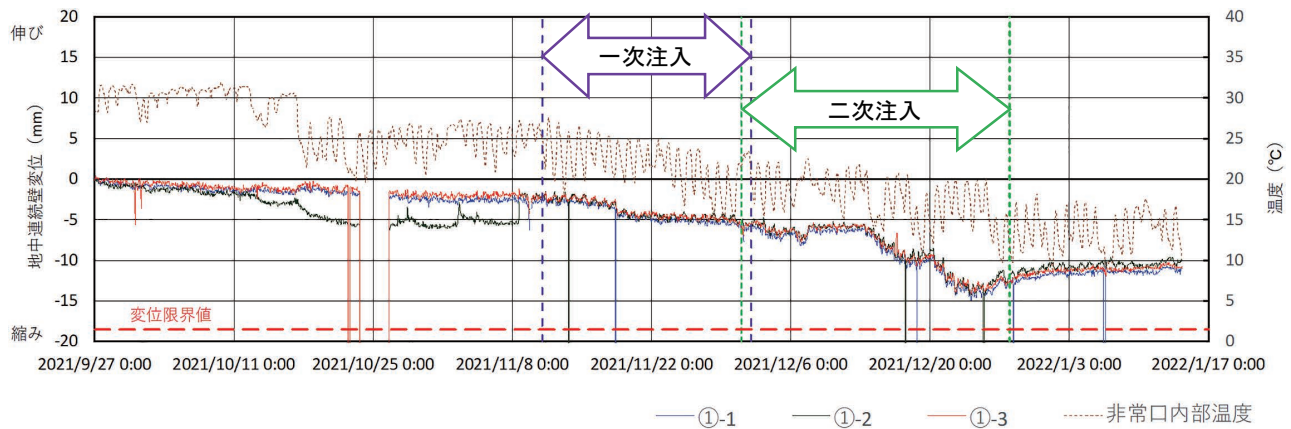
この漏水量を基に透水係数を計算したところ、表一2通りであり、目標値 ($5.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$) より小さいことを確認した。なお、発進直前にも漏水量の確認を行い、表一2に示す透水係数と同程度であることを確認した。

(3) 地中連続壁変状

図一12に地中連続壁中央部の変位を示す。当初、注入機は 6 台で 10 L/min の注入を行っていたが、二次注入の後半から地中連続壁変位の増加する速度が大きくなったことから、文献 4) などの考え方を参考に注入速度を減じて介在砂層や亀裂への浸透圧力を小さくすることで地盤内の圧力上昇が緩やかになることを狙い、注入機 4 台、吐出量 6 L/min で施工することとした。

その結果、地中連続壁中央変位量の限界値 18.5 mm に対して、最大計測結果は 15.2 mm に抑制できた。また、随時、地中連続壁を目視で確認したが、有害なクラックなどは発生しなかった。

なお、地中連続壁の変位を抑制するために、注入順序は地中連続壁側から名古屋側に向かって進めた。



図一12 地中連続壁中央部変位の計測結果

§5. 実工事で得られた知見

本工事で実施した「大深度における全注入孔の孔曲がり量計測と土量配分システムを活用した薬液注入工」の施工結果から得られた知見を以下に示す。

- ① 本薬液注入工により、各注入ステップの合理的な注入量を決定することができた。また、これにより、精度が高いとは言えない大深度削孔でも、注入管を1m間隔で設置する計画とすることができた。
- ② 本薬液注入工により、日々の管理の中で、注入速度の変更を一元的に行うことができた。その結果、介在砂層や亀裂などが存在する、従来、薬液注入工では難しい地盤において、確実な薬液注入工を行うことができた。

今回の薬液注入工では、止水性という『安全』を担保すべく、施工の各段階でモニタリングを徹底的に行ったが、一連のモニタリングにより『安心』を確保することもできたと考えている。

さらに事例が増えれば、今後、深度100mを超える薬液注入工法であっても同じ注入孔間隔(1.0m)で止水目的の薬液注入工は成立すると考えている。

なお、2024年4月現在、当工区はシールドの調査掘進が終了し、本掘進への段取替えの最中である。調査掘進における薬液注入工法改良体の評価については、改めて報告したい。

謝辞。 本施工結果は、発注者である東海旅客鉄道株式会社の多くの方から、計画から施工終了まで御指導を頂いた成果である。また、計測とその解釈では、株式会社地

域地盤環境研究所から実践的な御協力と御指導を頂いた。また、管理値の設定他で、当社の土木設計部および関東土木支社土木部から支援を得た。

さらに、ライト工業株式会社の吉田航統括工事長とは議論を重ね、皆が納得する施工方法の方向性を醸成していただいた。もちろん、情熱的に工事に携わって頂いたことは言うまでもない。

ここに、すべての皆様に深く感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 吉田航ほか：大深度シールド発進に於けるリスク対策その1，土木学会第79回年次学術講演会，2024（投稿中）。
- 2) 東海旅客鉄道(株)ほか：中央新幹線第一首都圏トンネル新設（東百合丘工区）調査掘進での確認結果に関する説明会，
https://company.jr-central.co.jp/chuoshinkansen/urban_shield-tunnel/description/_pdf/higashiyurigaoka-progress-2.pdf，
（参照 2024-05-14）
- 3) 東海旅客鉄道(株)ほか：中央新幹線第一首都圏トンネル新設（東百合丘工区）シールド掘進工事説明会（調査掘進等），
https://company.jr-central.co.jp/chuoshinkansen/urban_shield-tunnel/description/_pdf/higashiyurigaoka-progress.pdf，
（参照 2024-05-14）
- 4) 平岡博明ほか：大深度都市 NATM における合理的止水注入方法（RISS 工法），西松建設技報 VOL. 30 pp. 13-18, 2007.
- 5) (一社) 日本グラウト協会：薬液注入工設計資料（令和3年度版），p. 40.