大深度都市 NATM における合理的止水注入方法(RISS 工法) A Rational Injection Method Applied in Urban NATM at Deep Under Ground

平岡 博明^{*} Hiroaki Hiraoka 萩原 敏行^{*} Toshiyuki Hagiwara 宮崎 啓一^{**} Keiichi Miyazaki 蔵本 哲夫^{*} Tetsuo Kuramoto 今村 眞一郎^{*} Shinichirou Imamura

要 約

大都市圏では、道路や鉄道などの公共インフラストラクチャーが大深度地下に構築される場合も増加してきている.大深度の都市 NATM 工法では、その補助工法として地中における確実な止水技術が重要となる.当社は、首都圏の基盤層として広く分布する固結シルト層を対象に、その固結シルト層に介在する薄い砂層に対する合理的な止水注入技術(RISS 工法)を開発した.本技術の施工管理方法および止水効果を検証するために、砂層厚、注入条件を変えて止水注入を行う土槽注入実験を実施した.実験を通して介在砂層に対する適切な注入方法、注入管理方法および改良後の止水性・出来形を確認し、効率的で確実に行える止水注入技術を確立した.

目 次

- § 1. はじめに
- §2. 土丹層に介在する砂層への合理的な止水注入技術
- § 3. 土槽注入実験
- § 4. 実験結果および考察
- § 5. まとめ
- § 6. おわりに

§1. はじめに

都市部では,道路や鉄道等で大深度地下使用法に基づ く事業構想があり,現在では,一部のプロジェクトが実 施段階にある.

大深度地下での施工において都市 NATM 工法は有力 な工法の一つであるが、本工法における施工では、周辺 地盤の強度や止水が求められる.大深度を想定したとき 対象となる 40 m 以深の固結シルト層(通称,土丹層)に は、薄い砂層が層状に介在しており、このような砂層に 対して止水を確実に実施する必要がある.

従来から行われている止水注入の手法を土丹層に適用 した状態を模式的に図ー1(a) に示す.土丹層への止水



注入は,介在する砂層を含めた一体の地層として計画さ れ,その結果,介在する砂層への割裂が発生したり,砂 層への注入が不十分になるなど,砂層に対する止水の品 質確保が困難であった.

均一な比較的厚い層の砂地盤に対する止水注入に関し ては,既に多くの研究がなされ^{1),2)},注入圧力の算定に は,球状浸透のメカニズムを仮定した Magg の式が用い られる.一方,介在砂層への止水注入は,板状に浸透す る二次元的なメカニズムが想定される(図一1(b)参照). このような土丹層に止水注入を行う場合には,固結シル トは透水性が低いため止水注入の必要性が低い点に着目 し,介在する砂層(以下,介在砂層と称する)を主とし た止水注入を行うことにより,高品質な止水が得られる ものと考えた.

^{*} 技術研究所技術研究部土木技術研究課

^{**}技術研究所技術研究部



図-2 介在砂層における合理的な止水注入技術

§2. 土丹層に介在する砂層への合理的な止水注入技術

土丹層への止水注入は、土丹層に介在する砂層を把握 し、砂層の層厚に応じた適切な注入速度で管理する必要 がある.そこで、介在砂層の詳細把握、適切な注入速度 の把握、多数孔同時注入制御システム、品質確認技術を 組み合わせた図-2に示すシステムによって、高品質で 合理的に止水注入を行うことが可能になる.以下に、そ れらの技術を示す.

(1) 詳細サウンディング技術

詳細サウンディング技術は,注入外管設置時の削孔速 度やトルクなどのボーリングデータを基に,コンピュー タ解析により介在砂層の位置,層厚,範囲などを正確に 把握する.

(2) 限界注入速度試験の実施

位置等が把握された介在砂層に対して,注入外管を利 用した限界注入速度試験を実施し,土丹層に介在する砂 層の最適な注入速度のマップを作成する.

(3) 多数孔同時注入制御システムによる止水注入

注入孔ごとにコントローラを配置し,各介在砂層に対 して最適な注入速度で管理しながら,一台の注入ポンプ による多数の注入孔の高品質な同時注入を可能としたも ので,効率よく止水注入を行うことができる.

(4) 品質確認

止水注入施工後は,注入外管を利用して加圧透水試験 等を行い止水品質を確認する.

そこで,介在砂層に関する注入特性の把握と止水効果 を検証するために,実験土槽を用いて高水圧下における 介在砂層への止水注入実験を行い,介在砂層への合理的 な止水注入技術を確立した. §3. 土槽注入実験

3-1 実験概要

大深度で想定される介在砂層に対して注入条件,止水 注入特性および改良砂層の止水性,改良範囲などについ て把握するために,介在砂層の模擬地盤を作製し砂層厚, 注入速度の条件を変えて土槽注入実験^{3),4)}を行った.地 盤条件は次の条件を想定した.

想定地層:上総層,深度 50 m, 介在砂層の層厚 50~200 mm

3-2 実験装置

実験土槽を図-3 および写真-1 に示す.実験土槽は, 直径 1,800 mm,高さ 350 mm の円筒型とし,砂層の周囲 に排水層を設け,砂層の間隙水圧は,外部に設けた排水 槽を介して調整を行い,砂層の間隙水圧を一定に保てる 構造とした.砂層の上部には注入圧力によって部分的な 膨らみが生じないように鋼製の載荷板を設置し,その上 からエアーバックにより圧力を加えて,介在砂層に対し て土被り圧をかけられる構造とした.

薬液を注入する注入管は、ダブルパッカー方式を模擬 し、土槽の中心に注入管(φ50 mm)を建て込み、砂層の 中央部に注入孔(φ10 mm)を配置した.

3-3 模擬地盤

(1) 砂層

実験に用いた砂層の粒度分布を図-4に示す.この粒 度は、上総層の土丹層に介在する砂層の調査結果を参考 に、粒度分布がほぼ一致する珪砂6号Aおよび珪石粉を 質量比8:2で混合して作成した.実験に用いた砂層の土 質性状を表-1に示す.介在砂層の透水係数kは10⁻⁴ cm/s~10⁻³ cm/sの範囲と想定され,作成した混合砂に おける締固め密度と透水係数の関係を調べ,砂層の締固







め密度および透水係数を決定した.砂層は,乾燥砂を用いて所定の密度に締め固め,後に土圧を作用させる段階において脱気水を砂層に通して飽和状態にした.砂層に作用させる土圧および間隙水圧は,想定する地層の深度を50m,地下水位GL-1m,上部地盤の平均単位体積重量18.62 kN/m³(密度1.9 t/m³)として設定した.

(2) 石膏層

介在砂層を挟んだ固結シルト層を模擬して,石膏層を 作製した.砂層の下側に水に溶いた石膏を流し込み,ま だ固まらないうちに砂を撒き出し,締め固めた砂層の上 側表面も同様に石膏を流し込む方法で砂層を挟み,砂層 の境界面を密着させた.

(3) 介在砂層のモデル

実験で想定した介在砂層のモデルを図-5 に示す.止 水注入の方法として,一層の砂層に対して注入する方法 と複数の砂層に対して同時注入する方法の二種類とした. 一層注入のモデルでは,砂層厚を50 mm および200 mm の2ケースとし,複数層同時注入のモデルでは,砂層厚 を50 mm と100 mm の二層構造の1ケースとした.

3--4 注入材

実験に用いた注入材は,水ガラス系の溶液タイプで,ゲ ル化時間が数時間と長く,浸透性の高い非アルカリ系の シリカゾルを用いた.

3-5 注入計画

模擬砂層の直径 1,800 mm に対して,注入固化の範囲 を直径 1,500 mm で計画し,薬液の注入量は,計画範囲 の間隙部分に 100%充填される量として計画した.



写真一1 実験土槽

表一1 模擬砂層の土質性状

土粒子の密度	2.628 g/cm^3	締固め密度	1.624 g/cm^{3}		
細粒分含有量	16.4%	相対密度	80%		
砂の最大密度	1.771 g/cm^{3}	透水係数	$2.2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$		
砂の最小密度	1.220 g/cm^3	飽和度	100 %		
全土圧 (上載圧)		932 kPa			
間隙水圧		481 kPa			



3-6 実験方法

(1) 実験ケース

止水注入実験の実験ケースを表-2に示す.実験は,前 記介在砂層のモデルに対して,注入速度を変えて行った. 従来(3次元)の止水注入の形態は,一般的に図-6で 示され,浸透注入領域,割裂注入領域および割裂浸透注 入領域の3つの領域がある.本実験での注入速度は,こ の図で示される浸透注入領域および割裂浸透注入領域 (qcr)の2ケースと比較的厚い砂層に対する qcr で一般 的に行われている注入速度10 L/min とした.なお,表-2に示した qcr および浸透注入速度は,後述の水注入試 験で得られた結果を示したものである.

宙験チデル	一層注入						複数層同時注入
	砂層 50 mm			砂層 200 mm			砂層 100 mm + 50 mm
実験 No.	実験I	実験Ⅱ	実験Ⅲ	実験Ⅳ	実験V	実験VI	実験Ⅶ
注入形態	浸透	qcr	従来速度	浸透	qcr	従来速度	qcr
注入速度	2 L/min	5 L/min	10 L/min	2 L/min	7 L/min	10 L/min	7 L/min

表一2 止水注入実験の実験ケース

(2) 実験土槽の準備

土槽に予め注入管を建て込み,石膏層および砂層を前 記の方法で作製し,実験システムを組み立て,エアーバ ックにより100 kN/m²程度の上載圧をかけた状態で,土 槽内の排水層および砂層に脱気水を通して飽和状態にし, その後,上載圧および間隙水圧を段階的に増加させて,所 定の模擬地盤を作製した.

(3) 水注入試験

止水注入実験の前に各模擬地盤の注入特性を把握する するために水注入試験を行った.水注入試験は、注入管 内の水圧を土槽内の間隙水圧に合わせた後、注入圧を段 階的に増加させて、水を土層内に注入した.注入圧 p と 注入量(注入速度) q の関係をグラフ化し、限界注入速 度 qcr を求め、また、浸透注入が行える速度をグラフの 初期勾配より決定した.

(4) 止水注入実験

止水注入実験における土槽内を模式的に図-7に示す. 各介在砂層のモデルに対して,直径1,500 mmの砂層の 間隙水が置換される量として算出した薬液量を所定の注 入速度で薬液を注入した.薬液を注入後,土槽内の圧力 を維持した状態で3日間の養生を行い,その後,土槽を 解体し,薬液が浸透し,固結した砂層の出来形および止 水性を調べ,各実験ケースに対する評価を行った.止水 性は,固結した砂層をサンプリングし,土槽と同じ圧力 下にて透水試験を行い,透水係数から評価した.

§4. 実験結果および考察

4-1 水注入試験

水注入試験の結果を図-8 に示す.各実験ケースにお ける最大注入速度はその実験ケースで予定している止水 注入実験の注入速度以下とした.

(1) 最大注入圧力

層厚 50 mm の砂層(実験 I ~実験 II)では,注入圧力 の最大値が上載圧とほぼ同じでそれ以上の注入圧の増加 は見られなかった.一方,層厚 200 mm の砂層(実験 Ⅳ~ 実験 Ⅵ)では,注入圧は上載圧を遙かに超える結果を示 した.

二層同時注入を行った実験モデル(実験Ⅲ)では,最 大注入圧は,層厚 50 mm の実験モデル(実験 I ~実験 Ⅲ)より低い圧力であった.

最大注入圧には,砂層の厚さ,砂層境界層の強度,上





図一8 水注入試験における p - q 曲線

被り圧,砂層内の圧力分布,注入孔の配置などが要因が 関係していると考えられる.

(2) 限界注入速度 qcr

限界注入速度 qcr は, 層厚 50 mm の砂層(実験 I ~実 験Ⅲ)では, 5 L/min, 層厚 200 mm の砂層(実験 IV~実 験 IV)では, 7 L/min となり, 前記の最大注入圧に関係 し, 層厚が薄くなるほど qcr は小さくなる傾向を示した.

二層同時注入を行った実験モデル(実験WI)は,層厚 200 mm の砂層のケースと同じ値であった.

(3) 浸透注入速度

通常の球状注入では、浸透注入となる注入速度は p-q

曲線の初期勾配(直線部分)の範囲である¹⁾. 板状領域 に注入する本止水注入実験でも浸透注入の条件は同じと 考えられ,水注入試験結果から浸透注入速度を2L/min と設定した.

4-2 止水注入実験

薬液の注入後に固結砂の形状を観察すると,層厚 50 mm シリーズおよび層厚 200 mm シリーズとも,注入 管付近の砂層は上から下まで密に薬液が浸透し,固結し



写真-2 注入固化した固結砂の断面形状

ていたが、固結砂の終端部は、その断面を**写真-2**に示 すように、上部の方が固化範囲が広い傾向が見られた.こ のことから、薬液は、図-9に示すような境界面に沿っ て流れていることが想定できる.

各実験ケースにおける注入固化した固結砂の出来形を 図-10に示す. 図中の改良率は,注入計画面積に対する 浸透固化した面積の割合で表した.止水注入の良否の判 定は,出来形の形状と改良率より総合的に判断した.



図一9 薬液の浸透状態



※図中の破線は注入計画線,実線は浸透固化した範囲を示す.

図-10 注入固化した固結砂の出来形

(1) 注入速度 10 L/min による固結砂の出来形

砂層厚 50 mm (実験Ⅲ)の場合は,注入が一方向に偏 り,割裂による注入形態を示し,砂層厚 200 mm (実験 Ⅵ)の場合は,若干の偏りが見られ砂層の下部断面では 楕円形状であった.10 L/min による止水注入は,砂層の 厚さが薄くなるほど出来形が不十分となることが確認さ れた.

(2) 限界注入速度 qcr および浸透注入速度における固 結砂の出来形

ー層注入を行った実験モデルにおいて,限界注入速度 および浸透注入速度で実施した砂層厚 50 mm および 200 mm (実験 I, II, IV, V)は,全てのケースで固結 砂の出来形は良好であった.従って,限界注入速度 qcr による注入は,良好な止水改良体を形成できると考えら れる注入速度としては最も効率的なものであることが確 認された.

(3) 二層同時注入による限界注入速度 qcr で実施した 固結砂の出来形

二層同時注入を行った砂層厚 100 mm および 50 mm を組み合わせたもの(実験 W) は,薬液の流れが層厚 100 mm の上部砂層の方に偏り,層厚 50 mm の下部砂層 での止水注入は不十分であった.

(4) 固結砂の止水性

固結砂の透水係数を図—11 に示す. 横軸に示した注入 位置からの距離 (a/r) は,計画した注入半径を1とし, それに対する実際に改良された領域の半径の比で表した. 砂層厚 50 mm の止水注入では,中心から計画領域の 0.8 程度の範囲において透水係数は 10^{-7} cm/s 程度で十分な 止水性があることが示された.計画領域の終端部におい ては,薬液による固結度が低いためサンプリングするこ とが難しく,透水係数を測定することができなかったが, 注入前の砂層の透水係数が 10^{-4} cm/s であるので,約5 × 10^{-5} cm/s 程度の止水性はあるものと思われる.砂層 厚 200 mm の止水注入では,全ての実験ケースにおいて 透水係数は 10^{-7} cm/s 程度で十分な止水性があることが 確認された.

§5. まとめ

本土槽実験の結果から以下のことがわかった.介在砂 層に対して止水注入を行う場合には,砂層厚に応じた適 切な注入速度がある.また,複数層に対して同時に注入 する方法は,薬液が流れやすい砂層に偏る傾向にあり,確 実に止水注入を行うには,一層ごとに注入する必要があ る.



図-11 注入固化した固結砂の透水係数

§6. おわりに

本止水注入技術は,非開削需要が高い都市部での道路 トンネル分岐合流部の合理的施工法「カップルバード工 法」⁵⁾をはじめ,大深度地下開発に有効な技術と考えられ る.今回は,室内実験での模擬地盤による介在砂層に対 する止水注入の注入管理方法を検証できた.今後は,自 然地盤の介在砂層を対象とした現場実証実験を行い,止 水注入システムをより確実なものにしたい.

謝辞:本実験の実施に当たっては、土木設計部、ライト 工業㈱にご協力頂きました.関係者各位に深く感謝いた します.

参考文献

- 森 麟,田村昌仁,小峰秀雄:薬液注入において 浸透固結形を考慮した限界注入速度の決定方法,土 質工学会,Vol. 33, No. 3 pp. 159–169, 1993.
- 2)森 麟,田村昌仁,平野 学:ゲル化時間の長い 薬液の砂地盤における注入形態とその支配条件,土 木学会論文集,No.388, pp.131-140, 1987.
- 蔵本哲夫,他:高圧下での介在砂層への板状止水注 入模型実験,第60回年次学術講演会概要集,2006.
- 4) 蔵本哲夫,他:高圧下での介在砂層への板状止水注 入模型実験,第12回地下空間シンポジウム,2007.
- 5)小林正典,磯 陽夫:カップルバード工法の開発, 西松建設技報, Vol. 30, 2007.