水ガラス系先受け注入材の現場注入試験結果

鹿島建設　正会員　○山本拓治　伊達健介　北本幸義　日比谷啓介

１．はじめに

トンネル先受け工に用いられる注入材は、透水性が高いが比較的地山が良好な場合はセメント系が、固結度の低い地山にはウレタン系注入材が適用されることが多い。しかし、ウレタン系はコストが高く、安全面、環境面の影響が懸念される。そこで、筆者らは水ガラス系薬液の安全性、環境に対する低負荷、高浸透性に着目し、早期強度の発現と、長期耐久性を有する溶液型材料を開発してきた。これまでに、密な砂質土を対象とした現場注入試験を実施し、均質な棒状改良体の造成，1.0N/mm² 以上の強度発現を確認し、実際の先受け工を模擬した試験でも問題なく施工できることを確認している。今回はシルト混じり地盤でウレタン系と、礫まじり粘性土地盤でセメント系との比較注入試験を実施したのでその結果について報告する。

表－１　注入対象地盤物性

分類	細粒分まじり砂(S-F)：粘土まじり砂
粒度	礫分：0%,砂分：37%, シルト分：34%，粘土分，29%
最大粒径	4.75mm
湿潤密度 ρ_t	1.58g/cm^3
乾燥密度 ρ_d	0.99g/cm^3
土粒子の密度 G_s	2.71
自然含水比 w_n	59.3%
間隙比e	1.7

表－２　削孔及び注入工法

注入箇所	トンネル坑口法面：吹付け施工済み （法高約7.5mの土被り5～6m付近）
注入工法	エアパッカー付注入管によるバルブ方式 エアパッカーは口元から2.5m位置に設置 口元は急結セメントによるコーキング実施
削孔方法	鋼管にインナーロッドをつけた二重管削孔
削孔径	φ114.3mm（長尺フォアパイリングを模擬）
削孔長	6m
注入有効長	3.5m

表－３　注入結果

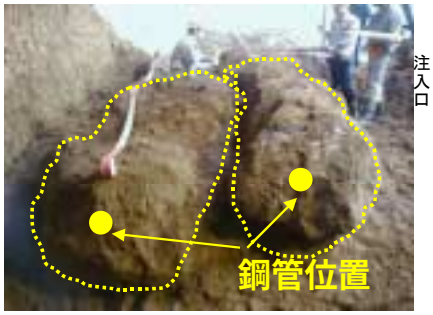
	注入速度	設計注入量／孔	目標改良径	注入量	注入圧力
水ガラス系No.1孔	12～16l／分	760l	1000mm	760l	0.4～0.55MPa
水ガラス系No.2孔	16l／分			760l	0.4～0.5MPa
ウレタン系No.1孔	3～4kg／分	55kg	450mm	200kg	0.5～1.2MPa

２．現場注入試験（その１）

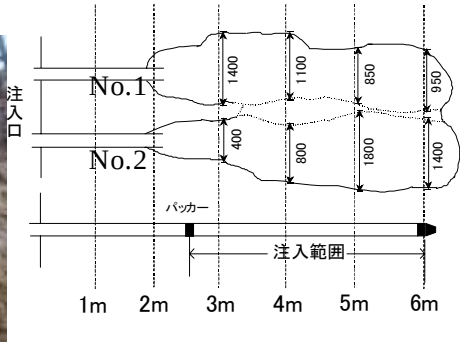
シルト混じり地盤における改良体の施工品質の確認及びウレタン系注入材との比較を目的に、現場注入試験を実施した。注入対象地盤の物性を**表－１**に、削孔仕様及び注入工法について**表－２**に示す。これらに示すとおり、試験は法高約 7.5mの吹付け施工済みのトンネル坑口法面で、対象地盤はシルト・粘土混じりの砂質地盤である。注入試験は土被り 5～6m の箇所で実施した。鋼管は長尺鋼管先受け工を模擬したφ114.3mm で、長さは掘出し確認の必要性から 6m とし、削孔及び設置については削孔と同時にセットする二重管削孔方式を採用した。注入工法についてはエアパッカー付き注入管によるバルブ方式にて行った。なおエアパッカーは口元から 2.5m の位置にセットし注入有効長を 3.5m とした。

注入結果を**表－３**に示す。同表にはウレタン系注入材の結果についても記している。水ガラス系注入材は 1m 離隔をもった２孔に注入されたが、いずれの孔ともに初期圧から 0.1～0.15MPa という低圧レベルに抑えることができ、通常の薬液注入で採用される注入速度（10l/min 前後）よりも若干大きい値で注入させることができ、設計注入量まで注入材を浸透注入させることができたと考えられる。一方、ウレタンについては、砂質地山が予想よりルーズであったためか、所定量を超過しても圧力による完了基準である初期圧+2.5MPa には達しなかったため、所定量の約 3.5 倍の 200kg 注入した。なお、最高圧力はウレタン系としては低いが、水ガラス系注入材の２倍程度である。

写真－１，**図－１**に水ガラス系注入材による改良体の掘出し写真とその模式図を、**写真－２**にウレタン系注入



写真－１　改良体掘出し状況(水ガラス系)



図－１　掘出し状況模式図(水ガラス系)

写真－２　改良体掘出し状況(ウレタン系)

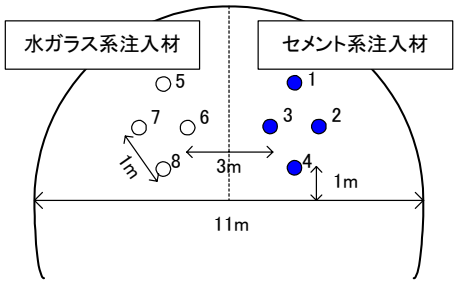
キーワード：先受け工法、地盤改良、薬液注入工
連絡先：〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　TEL　0424-89-7081　FAX　0424-89-7083

材による改良体の掘出し写真を示す。水ガラス系では棒状の改良体が平均的にφ800～1400mm（目標改良径 1000mm）で施工されているのに対し、ウレタン系では脈状に薬液が注入され均質な改良体となっていないことがわかる。これは前者が低圧で浸透注入されたのに対し、後者が割裂注入になっていたものと考えられる。

表－４に掘り出した改良体からサンプリングした供試体について実施した一軸圧縮試験結果について記す。室内配合試験による改良目標強度が約 1.0N/mm² 以上であったことを考えると、５～７割程度のやや低い一軸圧縮強さを示している。この原因としては、湿潤密度の値などからも予想されるとおり、対象土層が地盤調査結果のとおり砂質土層主体ではあるが粘土層が介在しており、間隙率が大きくなり、結果として改良強度が低くなったことが考えられる。さらに供試体中における局所的な粘性土層へは注入されにくく、圧縮載荷の際に弱面として作用した可能性も考えられる。

表－４　一軸圧縮試験結果

供試体No.		1	2
湿潤密度 ρ_t	g/cm³	1.740	1.763
含水比 w_n	%	14.1	17.2
一軸圧縮強度 q_u	N/mm²	0.56	0.751
破壊ひずみ ε_f	%	0.5	0.8
変形係数 E_{50}	N/mm²	129	85



図－２　切羽注入実施状況

表－５　切羽注入結果

注入材	孔数	注入速度	総注入時間	総注入量	最大注入圧力
		l／分	分	*l*	MPa
セメント系	4	約10	18	232	0.75
水ガラス系	4	約9	44	693	0.62

表－６　孔内載荷試験結果

	深度	c	φ	q_u	弾性係数
	(m)	N/mm²	(°)	N/mm²	N/mm²
セメント系	2.5	0.13	40.5	0.54	74.8
水ガラス系	2.0	0.32	26.7	1.05	85.0
	3.0	0.78	21.1	2.28	90.4

３．現場注入試験（その２）

次に、先受け鋼管以外での適用性確認とともに、セメント系注入材との比較を目的に、トンネル切羽において現場注入試験を行った。本トンネル最小土被りが約 10m の小土被りトンネルである。注入試験実施地点ではトレヴィチューブ工法を採用しており、注入対象地盤は火山角礫岩の土石流堆積層（強風化層）である。

切羽への注入に際しては、鏡補強を想定して 6m の自穿孔ボルトを採用した。孔配置は**図－２**に示すとおり、左側が水ガラス系，右側がセメント系になっており、それぞれ４孔に注入した。**表－５**に注入結果を示す。同表から水ガラス系がセメント系に比べて約３倍の量が入っていることがわかる。次に注入翌日に実施した孔内載荷試験結果について**表－６**示す。試験位置は、**図－２**に示した注入孔の中央位置とした。なお、切羽付近は地盤のゆるみが大きくバラツキがあり注入材が浸透していない可能性もあるので、口元から 2.0～3.0m 奥の地点でのデータで比較を行っている。弾性係数に関しては両者ともにほぼ同等の値であるが、試験結果から算定した一軸圧縮強さについては、セメント系は水ガラス系に比べて 1/2～1/4 の低い値を示しており、急硬性セメントであることを考えれば、水ガラス系は試験位置まで浸透したが、セメント系は浸透していなかったと考えられる。

４．まとめ

密な砂質土におけるトンネル先受けを対象とした高浸透性及び早期強度発現性の水ガラス系注入材を開発し、現場注入試験を行った。トンネル坑口部法面で粘土まじり砂質土を対象に実施した鋼管先受け注入試験結果によると、ウレタン系では脈状改良体となったのに対し、水ガラス系では約 1/2 の低圧で浸透注入でき、その結果棒状の固化体を造成することができた。トンネル切羽の強風化層を対象に実施した鏡補強注入試験では、セメント系の約３倍の量を注入することができ、孔内載荷試験からも高浸透性に関する優位性が示された。また、鋼管だけでなく鏡部ボルトでの施工性も問題ないことが確認できた。

このように、今回開発した注入材は、砂質土を主体とした地山では他材料に比較して浸透性において優位であり、その結果均質な改良体が施工でき、設計どおりの確実な地山補強を提供できることがわかった。今後も、様々な地質における適用性を検討し、現場条件に適した注入材としてさらなる改良を実施していきたいと考えている。

参考文献　岩野,山本,伊達,日比谷,関：新しいトンネルの先受け注入材の原位置試験結果について,土木学会年次学術講演会講演概要集,第 56 回,(2001).