

未固結砂層における鏡補強注入の施工

内藤將史¹・佐藤哲夫²

¹正会員 戸田建設㈱北陸支店土木部工事課(〒920-0981 石川県金沢市片町 2-2-15 北国ビル)

²正会員 戸田建設㈱北陸支店土木部工事課(〒920-0981 石川県金沢市片町 2-2-15 北国ビル)

地山の流動化判定指標を下回る未固結砂層を対象とした大断面トンネル(掘削断面積 147m²)の施工において、掘削当初は注入式フォアポーリング・注入式鏡ボルト・鏡吹付け・リングカットの補助工法を適用すると共に分割施工を併用して掘削していた。しかし、鏡面の自立性が悪く、剥落・崩落が多発するなど、十分な切羽安定効果が得られない状況にあった。

この課題に対し、筆者らは鏡面の地山補強を目的として、二重管ダブルバッカー工法による鏡補強注入を行った結果、切羽の安定性が向上し施工の安全性確保および掘削効率の向上において大きな効果が得られた。

キーワード：未固結砂層，地山の流動化指標，補助工法，鏡補強注入

1. はじめに

金沢東部環状道路は、「金沢外環状道路」山側幹線の一部で、金沢市今町～鈴見台までの延長 9.4km 区間の道路である。卯辰トンネルは、金沢東部環状道路のうち、金沢市内の卯辰山に掘削される延長 1,220m のトンネルで、本工事はその 4 工事として、御所側および鈴見側より約 392m を掘削するものである(図-1 参照)。

本工事の掘削区間は、卯辰トンネルのほぼ中央から終点側の鈴見坑口に向かったところに位置し、土被り 37～83m の区間となっている。地質は主に未固結の砂岩層(砂層)からなり、部分的に厚さ 1～10m の泥岩を挟在している。

既存調査結果および前工事までの掘削実績から、トンネル天端付近に厚さ 1～3m の泥岩層が存在し、その上部の砂層は被圧された滞水層となっていると想定されていた。そのため、掘削による緩みの発生が遮水層としての泥岩層に悪影響を与え、湧水を伴う天端崩落、流砂現象の発生が懸念された。また、その 2、その 3 工事における砂層の土質試験結果は、一般的な地山の流動化指標¹⁾(細粒分含有率、均等係数、含水比など)を下回る結果となっており、3 度の崩落が生じている(図-2 参照)。

掘削当初、トンネル切羽は自立性が悪く、注入式フォアポーリング、注入式鏡ボルト、鏡吹付けで切羽を補強するとともに、リングカットと分割施工を



図-1 卯辰トンネル位置図

併用して掘削していたが、鏡面の自立性が非常に悪く、剥落・崩落が生じ、十分な切羽安定効果が得られない状況にあった。そのため、切羽の安定性確保および掘削効率の向上を目的として、鏡面の補強注入を適用し、切羽自立性の悪い未固結砂層地山を克服することができた。

本論では、主に補助工法の施工概要を述べるとともに、切羽安定対策としての鏡補強注入の効果と適用性について述べる。

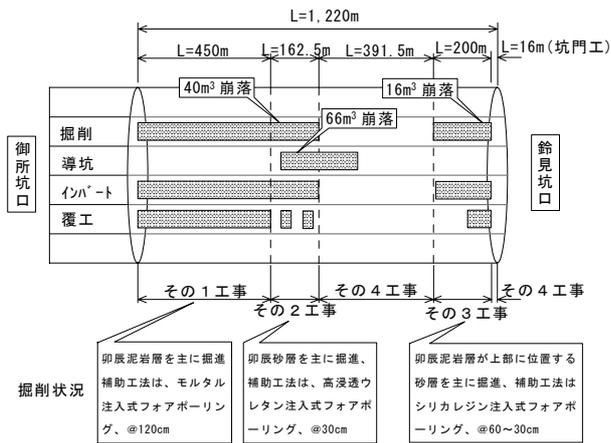


図-2 卯辰トンネル施工状況

2. 工事概要

卯辰トンネルその4工事は、平成13年5月から御所側および鈴見側より掘削開始し、同年10月に貫通している。以下に工事概要を示す。

- ・工事名：卯辰トンネルその4工事
- ・工事場所：石川県金沢市東長江町～鈴見台地先
- ・発注者：国土交通省北陸地方整備局
金沢工事事務所
- ・工事内容：掘削延長 L=391.3m(上半)
覆工延長 L=594.6m
坑門工 L=16m
- ・掘削工法：NATM(ショートベンチ工法)
- ・掘削方式：機械掘削(ツインヘッダー)

3. 地形・地質概要

卯辰トンネルは浅野川と金腐川とに挟まれた地域にあり、北西～南東に延びる丘陵～段丘に代表される地形形状を呈する。同地形の標高は小起伏があるものの、一般に120～130m程度の平坦な形状を有する。

図-3に卯辰トンネルの地質縦断面図を示す。地質構成は、新生代第四紀更新世前期「大桑層」、更

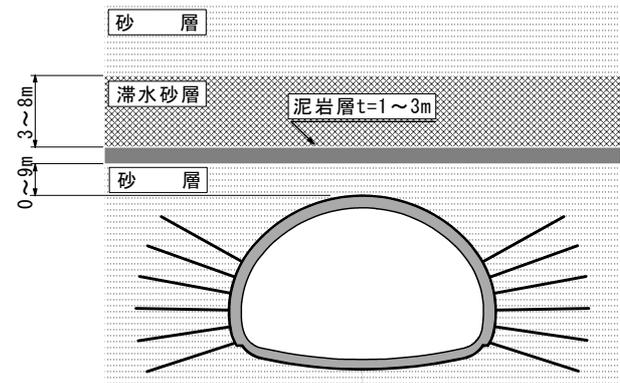


図-4 地質構造模式図

新世中期「卯辰山層」および更新世中期「高位段丘層」より成る。

卯辰トンネルその4工事の掘削対象となる卯辰山層は泥岩層(Um)と砂岩層(Us)の互層となっており、泥岩はやや固結度が高く軟岩状を呈するが、砂岩は固結度の非常に低い中粒砂層となっている。

図-4に代表的な地質構造を示す。既存調査結果および前工事までの掘削実績から、トンネル天端付近に厚さ1～3mの泥岩層が存在し、その上部の砂層は滞水層になっている。泥岩層上部の水頭は、その2工事の水抜きボーリングおよびその4工事で設置した水位観測孔の結果より、約3～8m程度で被圧されていないことを確認している。また、水位観測データの推移によると、降雨による影響および季節的変動もみられず、ほぼ一定に推移している。

その2工事およびその3工事における卯辰山砂層の土質試験結果を表-1に示す。表中に一般的な地山の流動化指標¹⁾(細粒分含有率、均等係数など)を併記するが、すべて指標に対して試験結果が下回るデータとなっており、極めて切羽自立性が悪い状況を示している。

表-2に、調査ボーリングデータを示す。ボーリング位置は、7B-3、7B-4の各々が、その4工事掘削区間の御所側および鈴見側掘削開始付近となる。なお、泥岩層の地山強度比は、0.5～3.3程度となる。

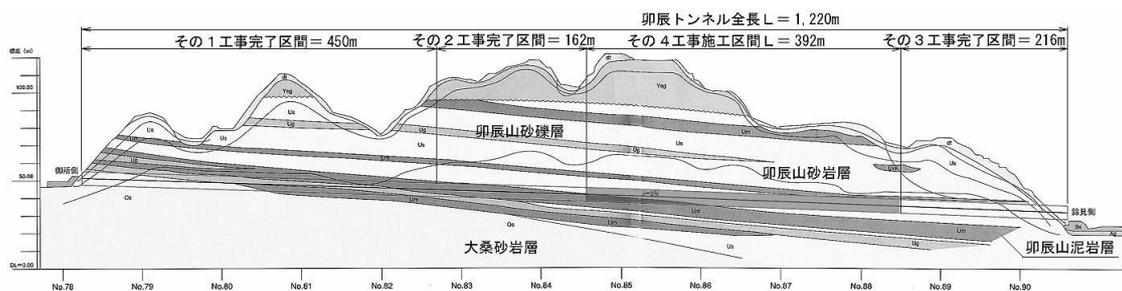


図-3 地質縦断面図

表-1 卯辰山砂層の土質試験結果

	その2工事	その3工事	流動化指標
細粒分含有率(%)	2.0	3.1	<10
均等係数	—	1.9	<5
含水比(%)	12.2	11.9	<15, 30<

注) 試験データは平均値を示す。流動化指標は文献1)より抜粋。

表-2 調査ボーリングにおける地山物性値

ボーリングNo.	7B-3		7B-4
測点	No. 84+38		No. 88+60
地質	中粒砂	泥岩	中粒砂
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.962	1.804	—
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.565	1.293	—
間隙比 e	0.717	1.040	—
粘着力 Cd (kN/m ²)	304	—	—
内部摩擦角 Φ_d (度)	30.8	—	—
一軸圧縮強度 q_u (MPa)	0.4~1.1	0.7~3.4	—
変形係数 D (MPa)	600	880	260

4. 施工経緯

前述した地山条件であることから、当初、切羽安定対策として、図-5に示す注入式フォアボーリング、注入式鏡ボルト、鏡吹付けの補助工法を採用するとともに、リングカットおよび分割施工を併用して掘削していた。しかし、鏡面の自立性が予想以上に悪く、剥落・崩落の発生により一掘進長が大きくなることから、フォアボーリングへの負荷増大に伴う先受工の機能低下、大規模崩壊の発生が懸念された。また、さらに地山状況が悪化した場合には、ボルト本数および注入量が増加して、掘削効率が低下するとともに、工事費が増大するものと予想された。

このような施工状況から、切羽の安定性を確実に確保しつつ、掘削効率の向上を図るため、より合理的な補助工法の選択が必要となった。

5. 鏡面安定対策の選定

一般に固結度の低い土砂地山においては、当初採用の切羽安定対策を目的とした補助工法のほか、AGFなどの長尺先受工が考えられる。しかし、先に示したように本トンネルの地質構造は、トンネル天端に位置する泥岩層の上部が滞水層となっているため、打設角4~10°程度必要とする長尺先受工の施工により泥岩層を貫き、大量湧水に伴う大規模の崩落発生が予想された。そのため、先受工の注入式フォアボーリングについては、そのまま採用し、主に鏡面の自立性向上を

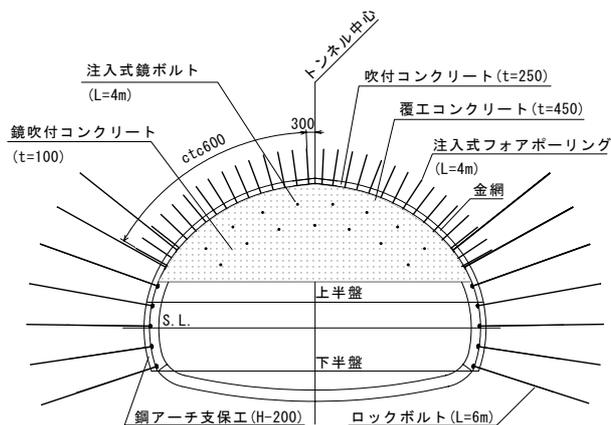


図-5 補助工法および支保パターン

目的とした補助工法の適用を図ることとした。

薬液注入工法は、注入作業に時間がかかること、また、専門の作業員が必要となること、などの短所を有するが、自立性の悪い砂層地山において、確実性の高い補強効果を得ることができ、当初採用したウレタン系注入材を用いた鏡ボルトに比較して経済的に優位になると考え、鏡補強注入の適用を図ることとした。

6. 鏡補強注入の施工

(1) 鏡補強注入の概要

薬液注入工法のうち、確実な浸透固化を実現できる二重管ダブルパッカー工法²⁾を採用した。

同工法は注入管周囲の空隙などを一次注入材で充填処理した後、ダブルパッカーを用いて約33cm間隔のステップ注入を繰り返し、確実な浸透注入、改良体造成を行うものである。

図-6に専用の注入管を、図-7にダブルパッカーの模式図を示す。専用注入管は、鏡面に打設することから、切削可能な樹脂製の注入管を用いた。標準管の単位長さは、3本連結で1mとなる長さになっており各注入孔からのステップ注入が可能となる。

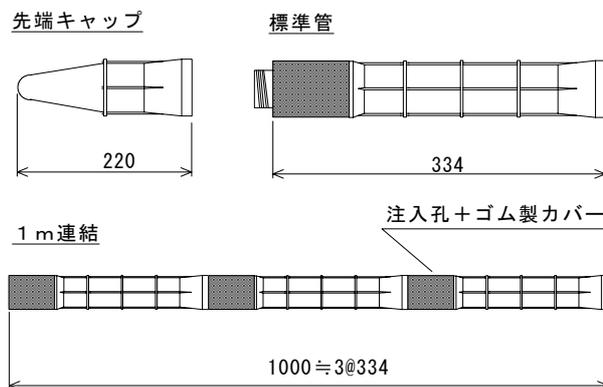
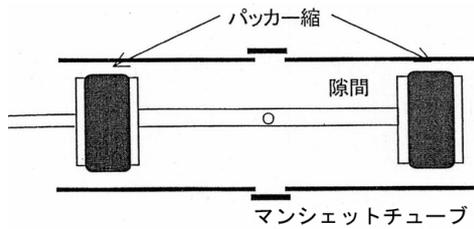
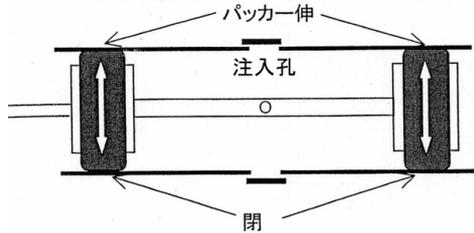


図-6 専用注入管(マンシエットチューブ)

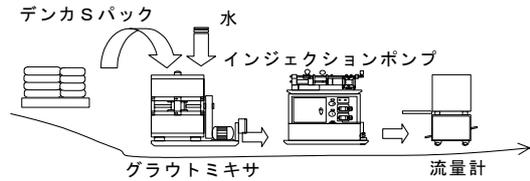


(a) 通常時



(b) 注入時

図-7 ダブルパッカー模式図



機械名称	型式・規格	数量(台)
グラウトミキサ	MVM-5B	1
インジェクションポンプ	RSP-100×2N	3
電磁流量計	GPF-005, 印字式	5
水洗いタンク	MG-10 クラス	1

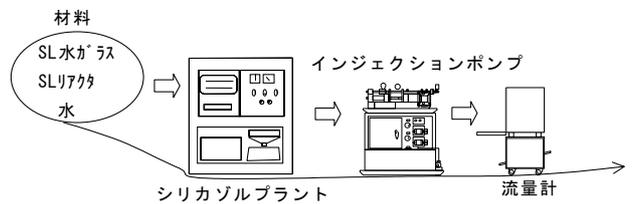
図-8 スリーブ注入工の使用機械と配置

使用するスリーブグラウト材(一次注入材)と浸透注入材(二次注入材)の特徴および標準配合を表-3に示す。スリーブグラウト材は、注入管と孔壁間の荒詰めを目的とするため、短時間で硬化し、且つ固結強度の小さいものが必要とされる。浸透注入材は、砂層地山における浸透性が良好な溶液型注入材を選定した。

スリーブ注入工およびシリカライザー注入工の使用機械とその配置図を、図-8、図-9に示す。注入時間がかかることを想定して、注入ポンプを5セット分用意した。

図-10に鏡補強注入の施工フローを示す。削孔は、径75mmのビットを用いて、2ブームドリルジャンボにより行った。砂層においては、孔壁自立が困難であることから、泡削孔を用いた。これは、フォアポーリング、ロックボルトなど、全ての施工に適用した。

注入材のリーク発生により、確実な浸透注入の実現が困難になることから、口元コーキングは重要な作業となる。コーキング材としては、ウレタン製のコーキ



機械名称	型式・規格	数量(台)
シリカゾルプラント	SLMP-3000	1
インジェクションポンプ	RSP-100×2N	3
電磁流量計	GPF-005, 印字式	5
水洗いタンク	MG-10 クラス	1

図-9 シリカライザー注入工の使用機械と配置

表-3 注入材の特徴と標準配合

項目	一次注入材	二次注入材
名称	懸濁型速硬性注入材 デンカSパック	溶液型注入材 シリカライザー
特徴	約60分で固化し、固結強度は0.2MPa程度。注入管と孔壁間の荒詰めを行う。	粘性が低く、間隙への良好な浸透注入が可能となる。土中のゲルタイムは60分程度。
標準配合 (1m ³ 当り)	Sパック : 150 kg 水 : 945 L 合計 : 1,000 L	SL水ガラス : 250 L SLリアクタ : 45 L 水 : 705 L 合計 : 1,000 L

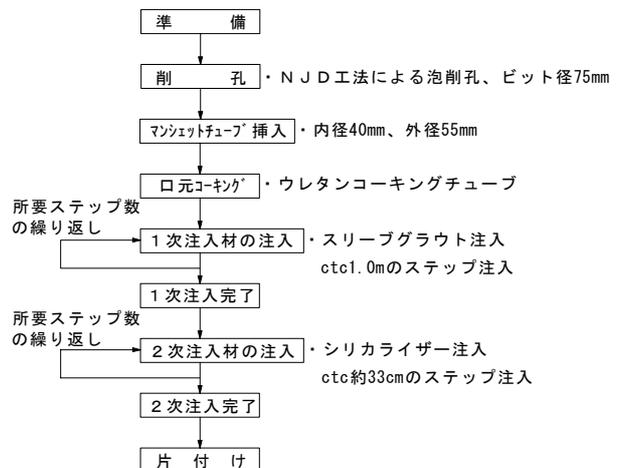


図-10 鏡補強注入の施工フロー

ングチューブを用いた。

ステップ注入は、最深部にダブルパッカーを挿入セットして所定量注入した後、注入ホースをスリーブ注入1.0m間隔、シリカライザー注入約33cm間隔で引き抜き、次ステップの注入、といった施工を口元まで順次繰り返す注入方式である。

(2) 試験施工による基本施工パターンの設定

本施工に先立ち、鏡補強対策としての当工法の適用性確認と、合理的な基本施工パターンの決定を目的として、試験施工を行った。同試験施工においては、以下の事項について評価・分析を行った。

- ①単位注入量(100～300L/m)当りの造成改良体寸法
- ②単位注入量、打設本数・配置による切羽の安定性
- ③基本施工パターンの検討
単位注入量、打設本数・配置、1打設長、施工サイクル
- ④現設計との比較検討

単位注入量と平均改良径の結果を図-11に示す。単位注入量に比例して平均改良径が大きく、改良径の最小～最大のばらつき範囲が小さくなる傾向にある。すなわち、単位注入量が大きいくほど安定した改良体を造成できる結果となっている。これは、深度方向の改良径についても同様な傾向にある。図中の結果によると単位注入量300L/mの平均改良径は700mm程度となる。なお、平均改良径は上下方向の改良径と左右方向の改良径の平均値とした。

切羽の安定性については、切羽観察を行って剥落・崩落の発生箇所およびその範囲を記録し、単位注入量および打設間隔との関連性を検討した。図-12に切羽スケッチの変化を示す。施工した切羽が異なるものの、単位注入量が大きいくほど、切羽の安定性が良好な結果

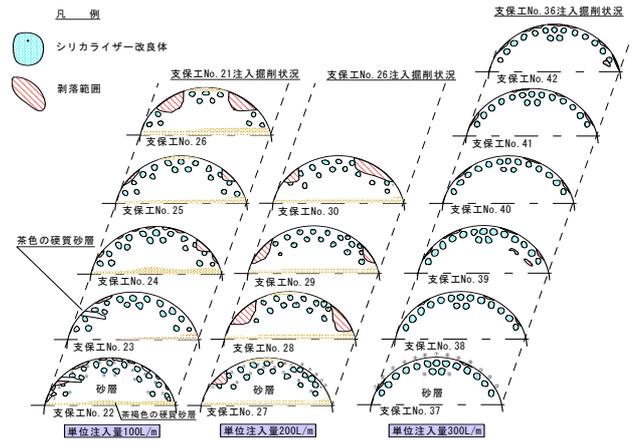


図-12 単位注入量毎の切羽スケッチ

となっている。

これらの改良効果と施工性および経済性を勘案し、表-4、図-13に示すように、単位注入量を300L/mとして、1打設長12m×15本を基本施工パターンに設定した。注入時の切羽の安定性と注入後の硬化養生時間を確保するため、ラップ長を2mとした。

表-4 基本施工パターンの仕様

項目	数量	備考
1打設長(注入管長)	12m	
1シフト長(注入長)	10m	
ラップ長	2.0m	
打設間隔	1.0～1.4m	
打設本数	15本	
スリーブ単位注入量	20 L/m	
スリーブ総注入量	3,600 L	20×12×15
シリカライザー単位注入量	300 L/m	
シリカライザー総注入量	45,000 L	300×10×15

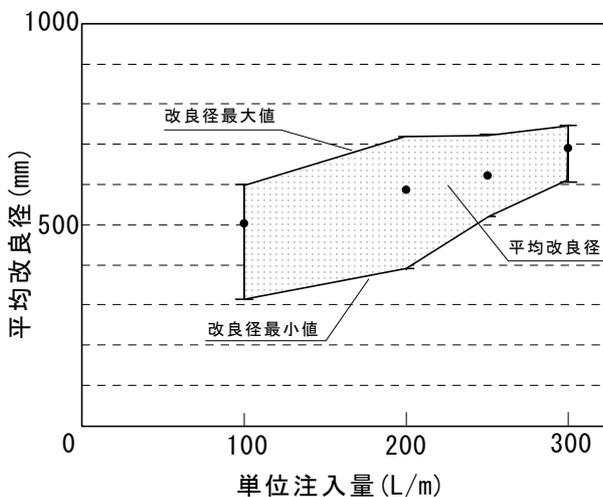


図-11 単位注入量と平均改良径の関係

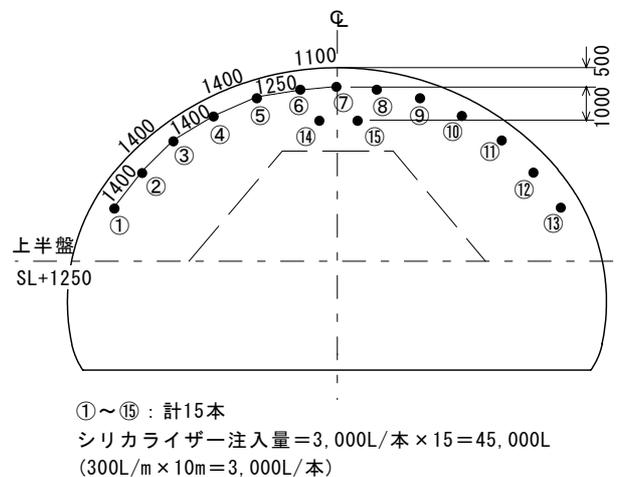


図-13 基本施工パターン

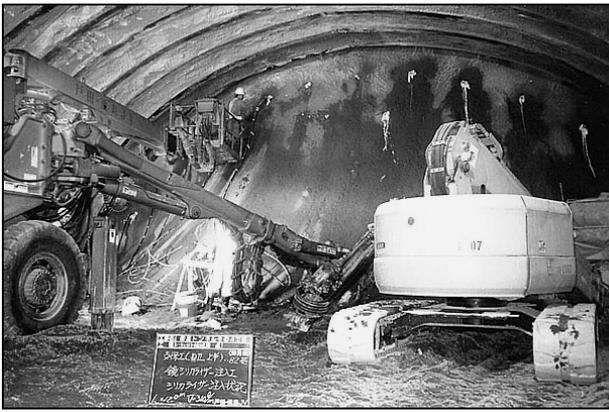


写真-1 シリカライザー注入状況

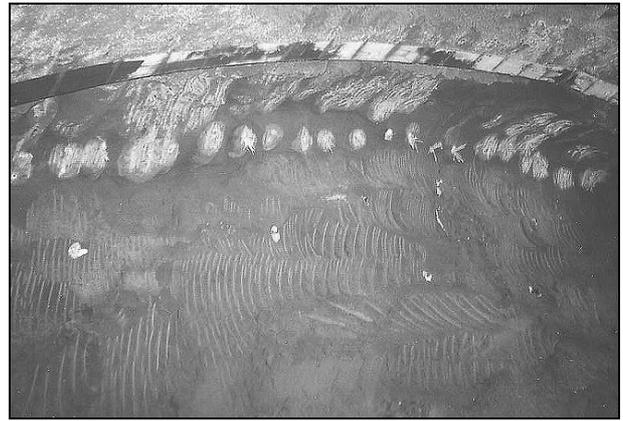


写真-2 シリカライザー注入による切羽状況

(3) 注入管理

鏡補強注入の管理は、使用する配管類の耐圧能力から最大注入圧力を5MPaとし、定量注入を基本とした。したがって、口元リークが発生した場合には、再度、コーキングを実施して再注入を行った。また、確実な口元コーキングを行うため、鏡補強注入を施工する切羽では、設計厚さ以上の鏡吹付けを行った。

注入速度は毎分10リットルとし、注入ポンプ5台用いて施工した。鏡補強注入の施工状況を写真-1に示す。

7. 鏡補強注入の効果

(1) トンネル掘削状況

鏡補強注入の改良体強度は、およそ0.4MPa以下の地山強度(その4工事実績)が、1.0MPa程度に改良されて、鏡面の安定性に寄与するほか、砂層における吹付けコンクリートの付着性向上によりリバウンドが低減するなど、施工性も改善された。写真-2は改良された切羽の状況であり、ツインヘッダー切削の爪跡が残る様子を示している。

このような鏡面の補強効果により、分割施工数が当初の5分割から2分割程度で掘削可能となったため、最大月進41mを達成し、当初に比較して約15%の進捗率を向上することができた。また、経済性については切羽毎に打設する注入式鏡ボルトの当初本数の施工費と比較して同程度以下になった。

(2) トンネル計測結果

掘削当初に採用した注入式鏡ボルト施工区間および鏡補強注入施工区間の計測結果を表-5に示す。上半水平の内空変位は同程度であるが、鏡補強注入施工区間の天端沈下量は、注入式鏡ボルト施工区間の結果と比較して、約36%小さい結果となっている。これは、

表-5 計測結果一覧

	注入式鏡ボルト	鏡補強注入
天端沈下(mm)	49.0	31.3
内空変位(mm)	39.2	40.8
注) 値は区間平均値、内空変位は上半水平の結果を示す。		

鏡補強注入による切羽安定効果により、トンネル上部地山の緩み範囲が低減されたものと考えられる。

8. おわりに

その2工事およびその3工事においては、度重なる小崩落や66m³にも及ぶ崩落が発生したが、その4工事においては、数度の小さい崩落が生じたものの、大規模な崩落はなく、鏡補強注入の採用により困難が予想された砂層地山における掘削を、迅速かつ無事に完了することができた。また、経済的には当初設計に比較して同等以下でありながら、掘削効率の向上を図ることができた。

通常、薬液注入は作業時間がかかるため、切羽での掘削サイクルに組み込む例は少ないが、切羽自立性が非常に悪い砂層地山において、地山粘着力の向上を目的とした1打設長12mの鏡補強注入を実施することにより、掘削効率の向上と確実な施工の安全性を確保できる。

最後に、当工事の設計・施工に際して、多大なるご指導を頂いた関係各位に、心から感謝する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕同解説，1996
- 2) 日本薬液注入協会：薬液注入工設計資料，2001