

縞付き鋼管による切羽補強工法の開発

横田 泰宏¹・伊達 健介¹・山本 拓治¹・辻 孝志²・岡部 正²

¹正会員 鹿島建設(株) 技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)
E-mail:yokotaya@kajima.com

²正会員 (株) ケー・エフ・シー 技術部(〒135-8073 東京都江東区青海二丁目45)

近年、トンネル補助工法技術は高度化し、適用範囲や適用方法も変化してきた。例えば、地山強度比が小さく膨張性を示す特殊地山等においては、掘削断面を小さくし、切羽や天端を安定させながら掘削する工法が主流であった。しかし、過剰変位を抑制できず、縫返しを余儀なくされるケースが見られた。近年では、このような不良地山こそ、全断面で掘削し、早期閉合することにより最終変位を抑制している事例が多くなってきた。全断面掘削を行うためには、長尺先受け工に加え、長尺切羽補強工を用いて、切羽を安定させることが重要となる。本論文では、従来用いられてきた切羽補強工の問題点を検証した結果を示すとともに、より高い引抜き抵抗力が得られる新しい鋼管切羽補強工を開発し、引抜試験と数値解析によりその優位性を確認した結果を報告する。

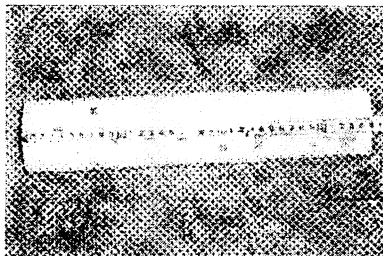
Key Words : Facebolts, Face stability, Bonding strength, Pull-out test, 3D numerical analysis

1. はじめに

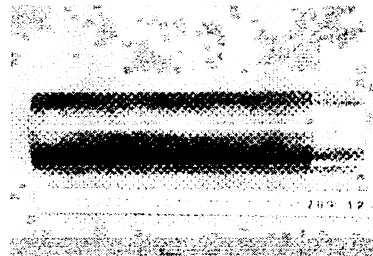
10年程度前までは、日本のような複雑な地質状況の地山では、全断面掘削は無理であり、地質の悪い場合は、切羽をできるだけ小さくして施工することが望ましいとの認識が一般的であった。しかしながら、切羽の自立が困難な押し出し性地山などを上部半断面掘削工法により掘削した場合、過大な変位が発生し、縫返しなどの対策を余儀なくされ、結果として、工費・工期の損失に繋がったという事例が報告されていた。近年では、トンネル補助工法技術の高度化に伴って、地質の悪い膨張性地山といった特殊地山においても、大型機械と補助工法を駆使し、できるだけ大断面で合理的かつ安全に施工しようと

いう考え方が定着しつつある。また、そのような地山を掘削する場合、補助ベンチ付き全断面掘削を行い、下半にインバートストラットを用いて早期閉合することにより、過剰変位を抑制することが可能と考えられているが、全断面掘削を行うため、長尺フォアパイリングなどの先受け工に加えて、長尺切羽補強工(長尺鏡ボルト)を用い、切羽の安定性を向上させることが重要となる^{1) 2)}。

長尺切羽補強工は、掘削性を考慮して補強材としてGFRP(グラスファイバ)ボルトが広く普及しているが、近年では、小口径の鋼管ボルトを採用するケースが増加している(写真-1(a)(b))。しかしながら、筆者らは、現在使われている鋼管ボルトは表面が滑らかであるため、鋼管周囲の付着耐力が確保できず、GFRPボルトと同程



(a) GFRP (グラスファイバ)



(b) 通常鋼管

写真-1 従来用いられてきた補強材



写真-2 縞付き鋼管の表面形状

度の効果は得られないと考えた。既往の研究では、切羽補強工の補強効果を定量的に評価した事例は少なく、補強材や定着材をパラメータとした室内・現場引抜試験より、付着耐力などを算出した結果も数少ない。さらに、それらの結果を入力データに用い、数値解析手法により現場設計を実施した事例もほとんど見られない。

上述した問題点を解決するため、筆者らは、地山に確実に定着して切羽を安定化させ、さらに補強材と定着材の分別回収も可能な切羽補強工法を開発した。本報告では、新しい縞付き鋼管の優位性と補強効果を定量的に把握することを目的に実施した現場引抜試験結果、新しい鋼管を実際のトンネル坑口の地山不良部に実適用した結果、および数値解析手法によって本工法の優位性を確認した結果について報告する。

2. 開発工法の概要

切羽補強工に使用する補強材は、地山の挙動に伴って発生する解放応力にバランスよく抵抗することが必要で、地山と定着材との付着力と、定着材と鋼管との付着力、および鋼管の継ぎ手部の引張り耐力のバランスが重要な要素となる。新しく開発した工法は、従来の鋼管切羽補強工の弱点とされてきた鋼管と定着材の付着耐力の問題を、写真-2に示すようにボルトの表面形状を縞鋼板とすることにより解決したものである。また、継ぎ手部の引張り耐力も、接続部の加工を工夫することにより、従来の補強鋼管（5.2mm）に比べて薄肉（4.5mm）であるにも関わらず、従来より引張剛性が高くなっているのが特徴であり、軽量となったため施工性・経済性の向上にも寄与できる材料である。さらに、鋼管にはスリットを設けてあるため、鋼管切羽補強工法の利点である分別回収を従来よりもさらに容易に行える工法である。

表-1 現場引抜試験ケース一覧

ケース	鋼管の種類	鋼管径 (mm)	定着長 (mm)	付着面積 (mm ²)	定着材	対象地質
1	通常	76.3	1,000	287,500	①早期強度発現型モルタル	頁岩
2					②超早期強度発現型モルタル	
3					③シリカレジン	
4	縞付き	76.3	500	287,500	①早期強度発現型モルタル	頁岩
5					②超早期強度発現型モルタル	
6					③シリカレジン	



写真-3 現場引抜試験状況



写真-4 試験後の供試体

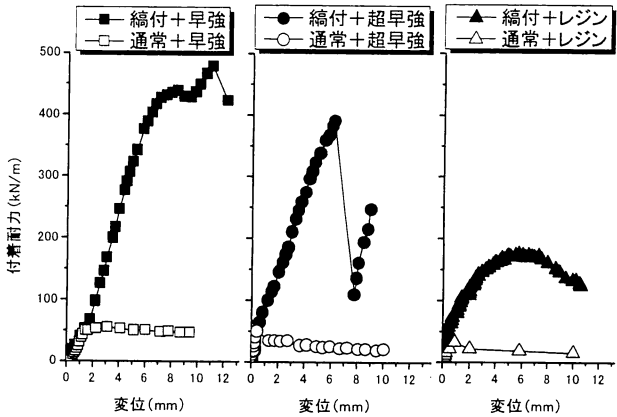


図-1 引抜試験結果

表-2 定着材にモルタルを用いた場合（頁岩地山）

	原位置試験 (kN/m)		室内試験 (kN/m)
	早期強度発現型モルタル	超早期強度発現型モルタル	
(参考)GFRP管※	-	-	150
通常鋼管	48.5	46.5	50
縞付き鋼管	482.2	407.8	500以上
定着材			
圧縮強度 (N/mm ²)	19.6 (24時間)	12.4 (3時間)	12 (24時間)

表-3 定着材にシリカレジンを用いた場合（強風化凝灰角礫岩）

	原位置試験 (kN/m)		室内試験 (kN/m)
(参考)GFRP管※	-	-	75
通常鋼管	36		25
縞付き鋼管	175		130
定着材			4
圧縮強度 (N/mm ²)	-	-	(発泡倍率 3倍)

3. 現場引抜試験

(1) 試験概要

現場引抜試験は、鋼管表面の付着性能を確認することにより、鏡ボルトの補強効果を定量的に評価することを目的とし、鏡ボルトの付着耐力（摩擦力）と付着剛性を求める試験である。表-1は、実施した引抜試験ケースの一覧である。本試験では開発した縞付き鋼管の通常鋼管に対する優位性を確認するため、同条件で両者の引抜試験を実施した。定着材には早期強度発現型モルタル（材齢24時間：圧縮強度=12N/mm²）、超早期強度発現型モルタル（材齢3時間：圧縮強度=8N/mm²）およびシリカレジン（3倍発泡時：圧縮強度=4N/mm²）を用いた。引抜試験は頁岩地山と強風化凝灰岩を対象に2現場で行った。試験手順を以下に述べる。まず始めに坑内側壁に長さ0.5～2.0mの削孔を行い、定着長さ500～1,300mmの供試体（補強材）を挿入した。次に、地山と供試体の間隙に定着材を注入し、所定の養生時間後に油圧ジャッキやラムチェア等の専用ジグを用いて供試体を引張り、最低限ピーク強度が確認できるまで引抜きを行った（写真-3）。

(2) 試験結果

写真-4 は引抜試験後の供試体状況である。なお、本試験で実施した全てのケースでは、地山と定着材の間ではなく、補強材と注入材間で付着切れが発生したことを確認している。図-1 はボルト頭部の変位量と引抜荷重の関係を示したグラフである。表-2 および表-3 は図-1 の

結果をもとに付着耐力を算出した表である。

これらの結果を見ると、定着材にモルタルを用いた場合、縞付き鋼管の付着耐力は、482.2kN/m（早期強度発現型モルタル：材齢 24 時間）および 407.8kN/m（超早期強度発現型モルタル：材齢 3 時間）であった。一方、通常鋼管の付着耐力は 48.5kN/m（早期強度発現型モルタル：材齢 24 時間）および 42.4kN/m（超早期強度発現型モルタル：材齢 3 時間）であった。これより、縞付き鋼管の付着耐力は、定着材に早期強度発現型モルタルと超早期強度発現型モルタルのどちらを用いた場合においても、通常鋼管に比べて約 9～10 倍の付着耐力が得られることが分かる。また、参考値で示すように従来用いられてきた GFRP 管の室内試験から得られた付着耐力は 150kN/m であることも考慮すると、縞付き鋼管から得られた付着耐力は他の補強材を用いた場合と比べて顕著に大きく、従来と同等以上の補強効果が期待できると言える。さらに、縞付き鋼管は超早期強度発現型モルタルと組み合わせることで、注入後約 3 時間で補強に十分な付着抵抗が得られることも分かった。

次に、定着材にシリカレジンを用いた場合、縞付き鋼管の付着耐力は 175kN/m 程度であった。この値は 3 倍発泡のシリカレジンを周囲に充填させた GFRP 管の室内試験結果 (75kN/m) の約 2.3 倍の値を示しており、縞付き鋼管の付着耐力の大きさが実証されたと言える。さらに、この値は、早期強度発現型モルタルを用いた GFRP 管の室内試験結果 (150kN/m) とほぼ同等な値を示しており、

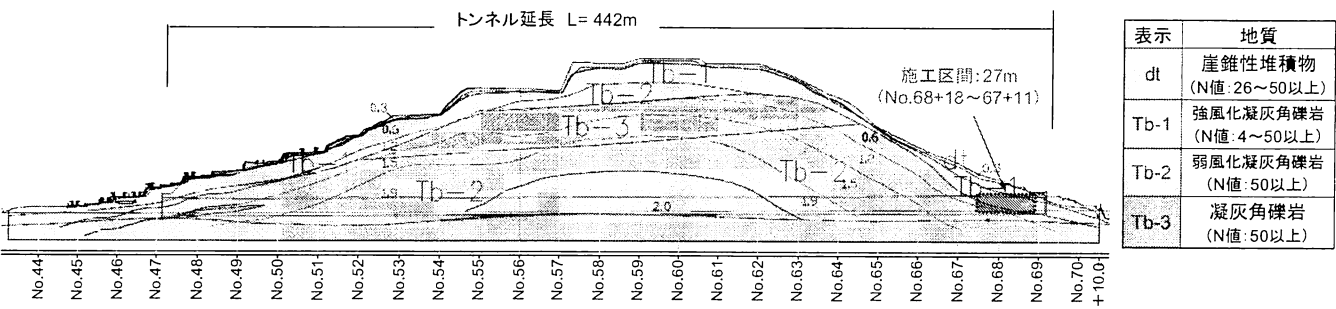


図-2 地質縦断面図



写真-4 坑口状況

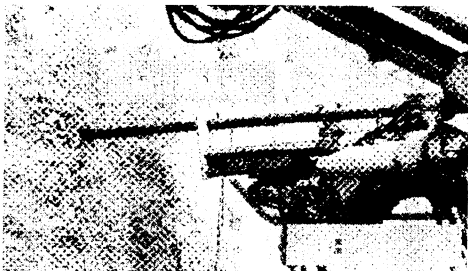


写真-5 ジャンプによる施工状況

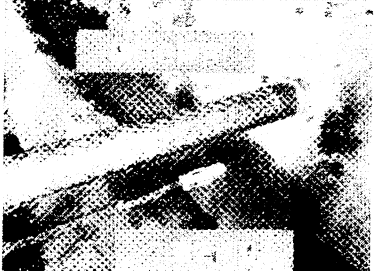


写真-6 削孔ツールズ

シリカレジンによる付着耐力低下の問題を解決することにも貢献している。一方、通常鋼管の付着耐力は36kN/m程度である。これは3倍発泡のシリカレジンを中心に充填した室内試験結果(25kN/m)よりもやや大きな値を示すが、他の部材の組み合わせと比べて、非常に小さい値となっている。つまり、通常鋼管とシリカレジンとを組み合わせると、小さな付着耐力しか得られなく、適用においては十分注意する必要があると言える。しかし、定着材にシリカレジンを用いた場合でも、縞付き鋼管の付着耐力は通常鋼管の約5倍となり、GFRP管と同等以上の効果を得ることができることが分かる。

4. 現場適用事例

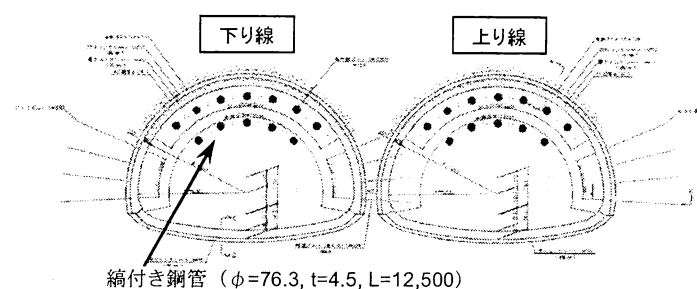
前述の通り、筆者らは、従来の鋼管切羽補強工の弱点とされてきた付着耐力の問題を解決すべく、高摩擦型の縞付き鋼管切羽補強工を開発し、その補強効果の大きさを引抜試験によって実証してきた。本章では、第四期更新世の凝灰角礫岩を主体とするトンネル掘削工において、坑口部の崖錐および強風化凝灰角礫岩区間に本工法を適用した結果、先進トンネルである下り線は、切羽および天端崩落もなく、顕著な変形量も発生せず無事施工を完了することができたので、その施工実績について報告する。

(1) 工事および地質概要

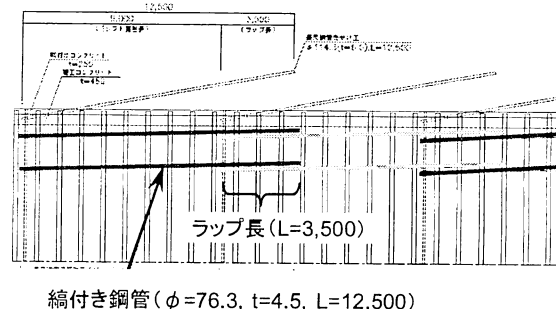
対象としたトンネルは、標高130m程度の山地を貫く、延長L=442m×2本の超近接トンネルである。図-2は本トンネルの地質縦断面図である。地質は、弱風化凝灰角礫岩(Tb-2層)を主体とするが、坑口付近には、基質部が風化により粘土化した強風化凝灰角礫岩(Tb-1層)や崖錐性堆積物(d層)が堆積しており、切羽や天端の崩落が懸念されていた。さらに、本トンネルは、上下線トンネルが写真-4のように非常に近接しており、先行する下り線掘削による緩みを最小限に抑える慎重な施工が必要であった。また、本トンネルでは、孔の自立性が低く、注入材の浸透性も小さい地山だったため、定着材にシリカレジンを用いる必要があった。そのため、通常鋼管では十分な補強効果が得られないことも懸念されたため、地山に補強材を確実に定着することができ、前方地山の補強効果に優れた縞付き鋼管切羽補強工法を採用した。本工法は、特殊な機械・設備に変更する必要がなく、従来どおり油圧ジャンボによる施工が可能であり(写真-5)、削孔は二重管方式で行われるため、本トンネル坑口部のように孔壁が不安定な地質状態でも打設が可能である(写真-6)。

(2) 施工実績

図-3(a)(b)は、補助工法の配置パターン図である。図-3(a)に示すように、補強材に用いた縞付き鋼管(鋼管径 $\phi=76.3\text{mm}$ 、肉厚 $t=4.5\text{mm}$ 、ボルト長 $L=12.5\text{m}$)は1



(a) トンネル横断面図



(b) トンネル縦断面図

図-3 切羽補強工配置パターン図



(a) 鏡ボルト施工前

(b) 鏡ボルト施工後

写真-7 切羽写真

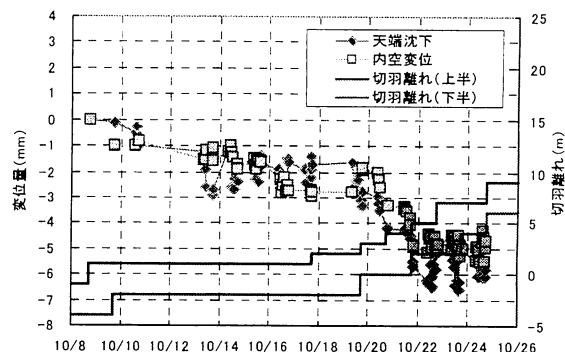


図-4 A計測結果 (No.68+10)

断面あたり 12 本打設した。また、図-3 (b) に示すように、ラップ長を 3.5m (1 シフト 9.0m) と設定し、合計 3 シフト間 (No.68+18~No.67+11 : 27.0m 区間) に適用した。縞付き鋼管は、表面形状を凹凸とすることでボルト周囲の付着耐力を高めたため、ボルト打設時の削孔性の悪化が懸念された。しかしながら、本施工に要したサイクルタイムは通常鋼管を補強材に用いた場合とほぼ同等であることを確認した。写真-7 (a) (b) は、縞付き鋼管ボルト打設前後の切羽写真である。

図-4は、No.68+10のA計測結果 (天端沈下量と内空変位量) である。同図から、天端沈下量、内空変位量共に切羽が5m (0.5D) 程度進行すると収束傾向を示し、発生した変位量も10mm以下と非常に小さく抑制できていることが分かる。また、B計測として実施した地中変位計測や地表面沈下計測においても、掘削期間中に大きな変化は見られなかった。これらの計測結果を考察すると、縞付き鋼管切羽補強工法の補強効果により、強風化凝灰角礫岩や崖錐性堆積物が堆積する坑口部を安全に掘削できただけでなく、切羽周辺の緩みを最小限に抑制することができたと考えられる。

5. 縞付き鋼管の補強効果検証

前術の通り、現場適用事例では、縞付き鋼管切羽補強工を採用することで、強風化凝灰角礫岩や崖錐性堆積物が堆積する坑口部を安全に掘削できただけでなく、切羽

周辺の緩みを最小限に抑制することができたと考えられる。本章では、同現場の解析モデルを作成し、数値解析によって、縞付き鋼管と通常鋼管の補強効果の差異を検証した。

(1) 解析モデル

数値解析には、汎用数値解析コードである三次元有限差分法 (FLAC3D) を用いた。同数値解析手法については、これまでに遠心模型実験のシミュレーションを実施することで、砂質地山におけるトンネル掘削時の地山挙動およびボルトの補強効果を表現可能であることを確認している。図-5は解析に用いたメッシュ図である。土被りは、切羽補強工が適用された区間を参考に1.0Dとした。解析領域は、端面の境界条件が全体の解析結果に大きな影響を与えないよう、トンネル中心から最低限3.0D以上の領域を確保するように設定した。また、境界条件に関しては、地表面を自由面、側面および底面はローラ境界とした。なお、解析領域については、トンネルセンターからの対称性を考慮して、領域全体を半分に縮小した。

(2) 解析物性値および解析ケース

表-4および表-5は、解析に用いた物性値である。解析に用いた物性値は、文献^{3) 4)} や地質調査報告書を参考に決定した。切羽補強工は、付着特性を表現できるケーブル要素を採用した。曲げ効果は考慮していない。切羽補強鋼管と地盤の境界面の物性については、現場で実施した原位置引抜き試験結果から付着強度および付着剛性を決定した。解析ケースは、縞付き鋼管の補強効果を比較

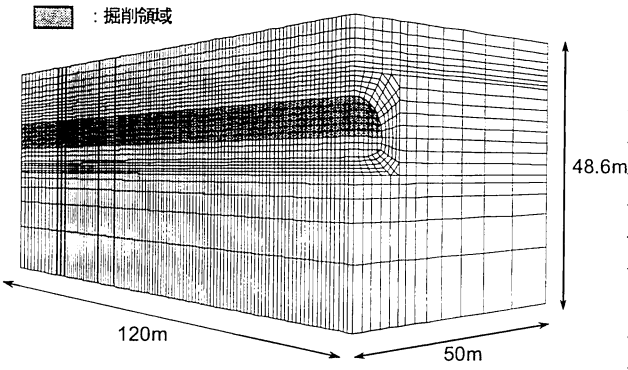


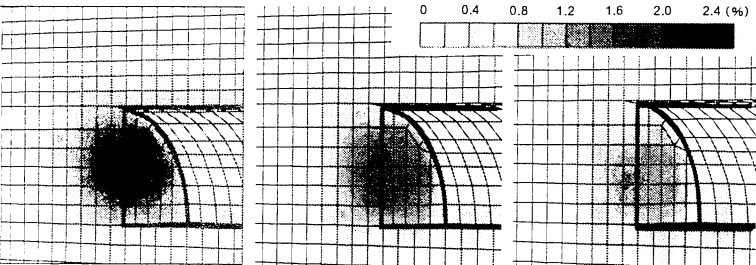
図-5 解析メッシュ

表-4 解析物性値一覧

地盤		支保工 (吹付けコン+鋼製支保工)	
構成則	Mohr-Coulomb	構成モデル	Shell
弾性係数 (MPa)	50	弾性係数 (MPa)	8000
密度 (g/cm ³)	1.9	密度 (g/cm ³)	2.5
ポアソン比	0.35	ポアソン比	0.25
内部摩擦角 (°)	35	厚さ (m)	0.3
粘着力 (kPa)	8		

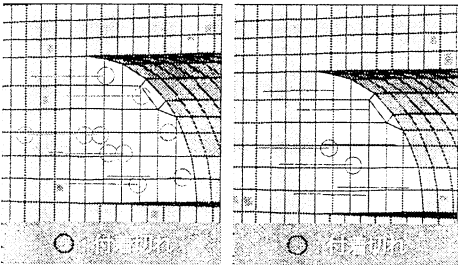
表-5 補強鋼管物性値

切羽補強工 (構成モデル: Cable)			
付着強度 (kN/m)	(通常) 35	付着剛性 (MN/m ²)	(通常) 7
	(縞付) 175		(縞付) 35



(a) 切羽補強なし (b) 通常鋼管 (c) 縞付き鋼管

図-6 解析結果 (せん断ひずみ分布)



(a) 通常鋼管 (b) 縞付き鋼管

図-7 解析結果 (鋼管付着状況)



(a) 横スリット

(b) 縦スリットとシール材

写真-8 回収性能を高めたスリット



写真-9 鋼管の分別状況

検証するために、無補強で掘削したケース、従来の通常鋼管を切羽補強工に用いたケースと併せて合計3ケース行った。

(3) 解析結果

図-6 (a) (b) (c) は、坑口から15mまで支保を設置した段階における、切羽付近に発生したせん断ひずみ分布図である。これらの結果を見ると、無補強の場合は、切羽全面にひずみ量2.0%以上を示す領域が卓越し、通常鋼管を用いた場合は、1.6~1.8%程度を示す領域が主に分布することが確認できる。今回、解析に用いた弾性係数から限界ひずみ⁵⁾ 中間値を算定すると、限界ひずみ量は約1.7%となり、両ケースで発生したひずみ量は限界ひずみと同等か超過することから、切羽が不安定になることが懸念される。

一方、縞付き鋼管を切羽補強工に用いた場合、切羽全面に発生するひずみ量は抑制され、1.2%程度となる。図-7 (a) (b) は、鏡ボルトの付着状況を比較した結果である。これらより得られた結果を考察すると、通常鋼管を用いたケースは、付着力不足による付着切れが顕著に発生しているのに対し、縞付き鋼管を用いたケースでは、付着が切れた箇所は少なく、本トンネルのように定着材にシリカレジンを用いた場合においても、十分な補強効果を発揮することが確認できた。

6. 鋼管回収性の向上

長尺切羽補強工は、掘削時に補強材と定着材が一体となって回収されるため、混合産業廃棄物が多量に発生する。そこで、今回開発した縞付き鋼管は、鋼管表面に一定間隔のスリットを設け、切徐部とすることで、掘削時に鋼管と定着材が分別して回収できる構造とした。

写真-8 (a) (b) に示すように、スリットは横スリットと縦スリットを設け、縦スリットは削孔時のスライム排出性を高めるため、シール材で密閉した。写真-9は、鋼管と定着材の分別状況である。このように鋼管にスリットを設け、シール材でスリットを密閉することによって、掘削時の削孔性を低下させずに鋼管と定着材の分別回収を可能にした。

7. まとめ

本研究では、従来の切羽補強工の問題点を解決すべく、高い摩擦抵抗力を有する縞付き鋼管切羽補強工を開発し、その補強効果の大きさを現場引抜試験、現場適用事例および数値解析結果から示した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 従来の鋼管切羽補強工の弱点であった鋼管と定着材の付着抵抗の小ささの問題を解決できた。通常鋼管に比べ、補強効果はモルタルで約10倍、シリカレジンで約5倍となった。
- ・ 定着材にシリカレジンを用いた場合においても、十分な付着抵抗が得られることが分かった。
- ・ 超早期強度発現型モルタルと組み合わせることで、注入後約3時間で補強に十分な付着抵抗が得られることが確認できた。
- ・ トンネル坑口部に適用した結果、先進トンネル掘削によって発生する変位や緩みを最小限に抑制できた。
- ・ 実適用した現場をモデル化した数値解析結果から、通常鋼管に対する優位性を示すことができた。
- ・ スリットを設けることで、鋼管と定着部材の分別回収が可能となった。

このように、従来の切羽補強工に対して新しい高摩擦型の縞付き鋼管切羽補強工の優位性を示すことができた。本工法を用いることで、切羽安定性の向上や周辺地山の緩み低減に貢献できるだけでなく、これまでに実施してきた数値解析結果などから通常鋼管に比べて打設本数を減らすことができ、コストダウンにも繋がる可能性があると考えている。

今後は、さらにそのような検討を進めて行くとともに、現場適用実績を増やすことで、施工の合理化に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 堂場直樹, 青柳隆浩, 畝田篤志, 岡部正: 切羽安定における注入式長尺鏡ボルトの効果とその評価, トンネル工学報告集第17巻, pp.7-14, 2007.
- 2) 渋谷優, 山口亮太, 伊達健介, 染谷麻優子, 澤谷和仁: 崖錐堆積物直下の低土被り区間におけるトンネル補助工法の設計施工実績, トンネル工学報告集第17巻, pp.127-134, 2007.
- 3) 日本道路公団試験研究所: トンネルの標準設計に関する研究報告書, 1986.
- 4) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: NATM 設計施工指針, 1996.
- 5) 桜井春輔, 足立紀尚: 都市トンネルにおける NATM, 1988.

A STUDY ON DESIGN AND CONSTRUCTION OF NEW LONG FACEBOLTS USING STEEL CHECKER PIPE

Yasuhiro TOKOTA, Kensuke DATE, Takuji YAMAMOTO,
Takashi TSUJI and Tadashi OKABE

Recently, owing to the development of tunnel reinforcement, mountain tunneling method has been increasingly used even for shallow tunnels in urban areas and unusual tunnels like squeezing ground. In such a case, full face cutting and immediate ring closure method is adopted as a countermeasure against large displacement. However, tunnel face stability is very important for using full face cutting. The authors have been developed the new long facebolts which have high friction resistance. This paper presents the result of pull-out test, application to tunnel construction and 3D numerical analysis to reveal reinforcing effects of new facebolts.