

無水削孔ボーリング技術を用いた 下向きロックボルトの技術開発

戸田 皓¹・山岸 稔²・東芝 崇³

¹正会員 安藤ハザマ (〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20)

E-mail: toda.akira@ad-hzm.co.jp

²安藤ハザマ (〒107-8658 東京都港区赤坂 6-1-20)

E-mail: yamagishi.minoru @ad-hzm.co.jp

³日本基礎技術株式会社 (〒151-0072 東京都渋谷区幡ヶ谷 1- 1-12)

E-mail: takashi_toushiba@jafec.co.jp

供用中のトンネルの盤ぶくれ対策の一つとして、下向きロックボルトが適用されることがある。従来、ロックボルトの施工は削孔水を用いた削孔が一般的であるが、盤ぶくれが発生するトンネルにおいては、削孔水を用いない施工方法が望ましい。そこで、筆者らは脆弱地山を想定した無水削孔ボーリング技術を開発し、試験施工によりその効果を確認した。また、削孔後のロックボルト打設や品質確認方法についてはほとんど議論されていないため、削孔技術だけでなく、下向きロックボルトの一連の施工を実施した。本論文では、下向きロックボルトの施工上の課題への対策およびその効果について報告する。

Key Words: tunnel, heaving, downward rock bolt, drilling without water

1. はじめに

供用中の山岳トンネルで盤ぶくれが発生することがある。盤ぶくれの発生メカニズムはスクイーピング（塑性化にともなう押し出し）とスウェリング（吸水膨張）の二つに大きく分けられている¹⁾。スクイーピングによる盤ぶくれでは地山強度比が小さい場合に見られ、スウェリングによる盤ぶくれは、膨潤性粘土鉱物が吸水膨張することが原因である¹⁾。このように盤ぶくれのメカニズムの一つとして、水が起因していることが知られている。

盤ぶくれが発生した場合の対策としては、下向きロックボルトやインバートコンクリートの打設などが用いられる。下向きロックボルトは、盤ぶくれを完全に止めることはできないが、インバートコンクリートよりも簡易に施工が可能で、変位量を抑制することができる²⁾。下向きロックボルトを施工する場合、従来の削孔に水を使った施工方法では、泥岩や凝灰岩など膨張性を示す地山を対象とすることが多いため、盤ぶくれを助長する可能性がある。そのため、従来の施工方法とは異なる、地山に水を供給しない無水削孔が望ましい。また、地山強度が小さい脆弱な地山では削孔後に孔壁が崩れることが懸

念される。そのため、削孔後にボルトを確実に施工できる施工方法が必要である。

一方、ロックボルト孔削孔後においては、ロックボルト鋼棒挿入、モルタル注入、引抜き試験による定着確認等の一連の施工になる。ただし、下向きロックボルトの施工事例も少ないことから、削孔後のロックボルト打設方法や品質確認方法についてこれまで論じられていない。

本論文では、下向きロックボルトの一連の施工で考えられる課題を抽出し、無水削孔技術を用いた下向きロックボルトの試験施工を試みた。

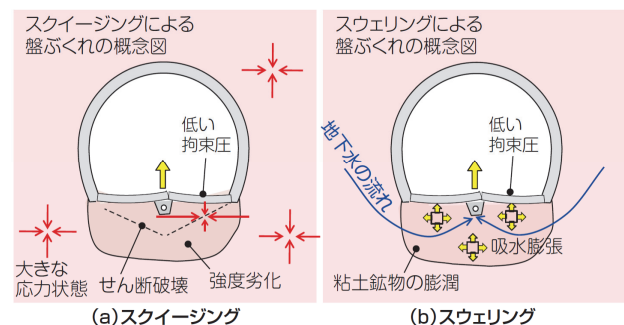


図-1 盤ぶくれメカニズムのイメージ¹⁾

2. 施工上の課題

下向きロックボルトの施工は、削孔→ロックボルト打設→品質確認の3ステップである。脆弱な膨張性地山を対象とした場合には、施工上の課題として各ステップで以下の課題が考えられる。

(1) 削孔時の課題

前述に示したように盤ぶくれのメカニズムは塑性化にともなう押出しと粘土鉱物の吸水膨張の二つに分けられる。これらは地山に水が供給されることで盤ぶくれを助長する可能性があり、水を使用しない削孔が望ましい。さらに、脆弱な地山では孔壁の保持が困難な可能性も考えられる。

以上、現状では、下向きロックボルトの削孔においては、削孔水を用いたボーリングが多く、今後、削孔水を用いず、孔壁保護に配慮した削孔方法の開発が望まれる。また、盤ぶくれは供用後のトンネルにおいて発生することが多く、下向きロックボルトの施工も供用中のトンネルで施工することが多い。この場合、車線規制して施工するなど制限されたスペースで作業となるため、粉じん対策やコンパクトな施工機械が必要である。

(2) ロックボルト打設時の課題

ロックボルトの長さや材質は、地質や路盤の隆起量など現場の状況に合わせて決める必要がある。ボルトの長さは、地盤調査で推定した緩み領域に定着長を加えた長さが必要とされており、既往事例では、長さ4～6m、径約25mmのボルトが用いられることが多い³⁾。ボルト材質は、通常、異形棒鋼が使用される場合が多い。しかし、脆弱地山では、PC鋼棒をロックボルトとして使用している事例もあり、高耐力ボルトよりも変位抑制効果が高いと期待されており、解析的に検証されている⁴⁾⁵⁾。また、八木ら⁶⁾は、大断面トンネルにおいては、応力の集中しやすい上半側壁部に耐力の高いPC鋼棒を打設することで、変位量を抑制することが可能であると確認している。

以上を考慮すると、脆弱な膨張性地山では安全側を考慮して、長さ10m程度のPC鋼棒を下向きに施工することが想定される。この場合、ボルトの長さが長い場合、分割してボルトを挿入することや確実にモルタルを充填する施工方法が必要となる。

(3) 品質確認時の課題

ロックボルトの品質確認は、引抜き試験を行うことが一般的である。山岳トンネルで実施されている引抜き試験は、ロックボルトの降伏耐力の80%以上を最大荷重としている。例えば、通常使用されているロックボルト

は設計耐力170kNであり最大荷重は150kN、高耐力ボルトでも290kNであるため、最大荷重は250kNである⁷⁾。しかし、今回想定している脆弱地山では設計耐力748kNのPC鋼棒を用いるため、最大荷重は600kNとなる。そのため、600kNまで載荷できる引抜き試験機が必要となる。また、引抜き荷重が大きい場合ロックボルトプレートの変形や路盤コンクリートのせん断破壊などが懸念される。

3. 各課題の対策

施工上の課題(1)～(3)の対策を以下に示す。

(1) 削孔方法および削孔機械

削孔水を用いず、孔壁保持に対応した削孔方法として、ケーシングを用いた二重管方式による無水エア削孔技術を開発した。さらに、ロッドについては、削孔土砂の効率的な排土を目指してスクリューを取り付けたロッド（以下、スクリューロッドと称す）を使用する（写真-1）。図-2にスクリューロッドの詳細図を示す。スクリューロッドにより削孔土砂を強制的に排出することができるため、スクリューが付いていないロッド（以下、通常ロッド）と比較して排土量の増加および削孔時間の短縮といった効果が期待される。

図-3に開発した削孔機械の概要図を示す。削孔機械のガイドセルの長さが4.27m、機械の幅は1.70mである。例として、図-4の監視員通路ありトンネル標準断面図（1級A・B）¹⁰⁾に記載されているトンネルの建築限界高ささと片側道路幅と比較する。建築限界高さは4.80m、片側道路幅は3.50mであるため、使用する削孔機械は建築限界高さおよび片側車線内で施工できる機械である。ま



写真-1 スクリューロッド

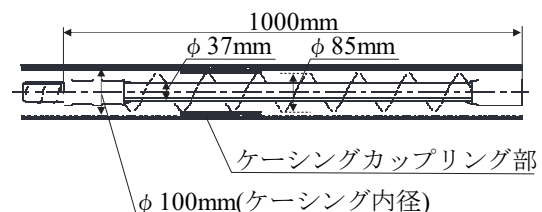


図-2 スクリューロッド詳細

た、削孔機械は水平方向に $\pm 90^\circ$ 、鉛直方向に $\pm 180^\circ$ 旋回することができ、汎用機械よりも可動域が広い特徴がある。そのため様々な姿勢で削孔作業が可能である。

次に図-5に発生した粉じんに対する設備概要を示す。削孔時の粉じんを抑制するため、削孔箇所には口元集じん設備を取り付けて削孔する。削孔により発生した粉じんおよび土砂は、口元集じん設備とガイドセル中間部に接続されているホースを通して土砂収集設備に移動する。土砂収集設備内の粉じんは、集じん機に吸引される仕組みとなっている。

(2) ロックボルト打設方法

ロックボルト打設を確実に実施するため、二重管削孔完了後、図-6および以下に示す①～⑥の手順で打設する。

- ①ロッド撤去
- ②ロックボルト挿入
- ③モルタル充てん
- ④充てん完了
- ⑤ケーシング撤去
- ⑥補足充てん

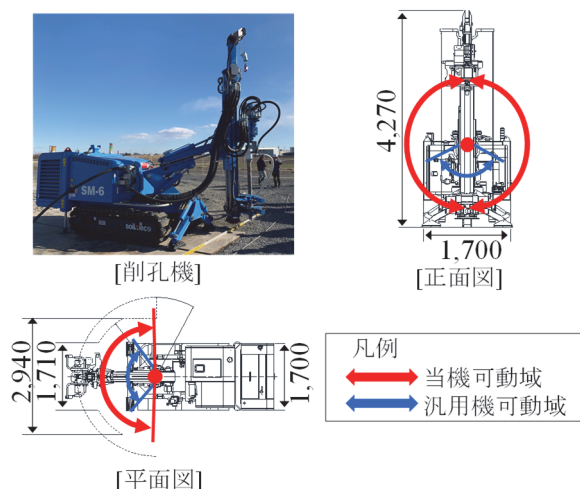


図-3 削孔機械の概要

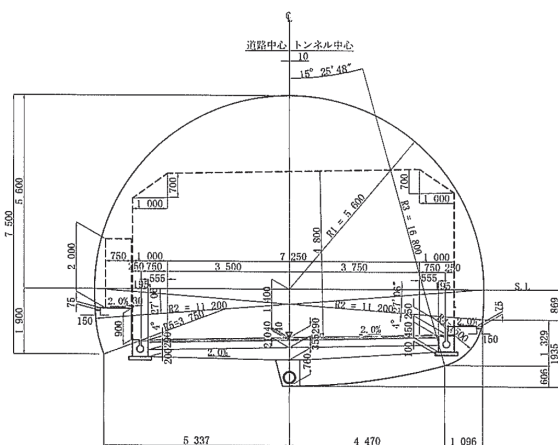


図-4 監視員通路ありトンネル標準断面図(1級A・B)¹⁰⁾

9mのPC鋼棒を人力で扱うことを考慮して3m、2m、2m、2mに分割する。モルタルを最深部まで密実に充てんするため、PC鋼棒挿入時に充てん用ホースをあわせて挿入し、最深部から直接充てんしていく。これにより、確実なモルタル充てんが可能であり、地下水があった場合にも対応できる。なお、ケーシング撤去により、モルタルが沈降した場合には、補足充てんを行う。

(3) 引抜き試験

今回、引抜き荷重としては最大600kNを想定しているため、通常の山岳トンネルのロックボルト工で用いられる引抜き試験機では対応できない。そこで今回、最大荷重600kNまで対応可能なPCアンカー専用の引抜き試験機を適用することとした。

最大荷重600kNかけた場合にロックボルトプレート下の路盤コンクリートがせん断破壊しないよう、コンクリ

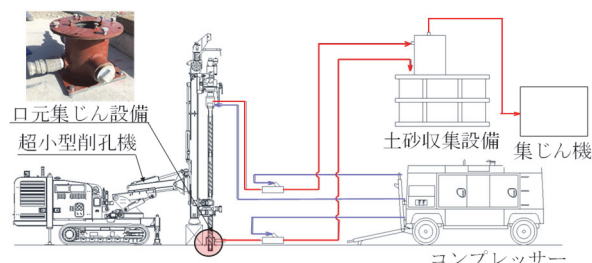
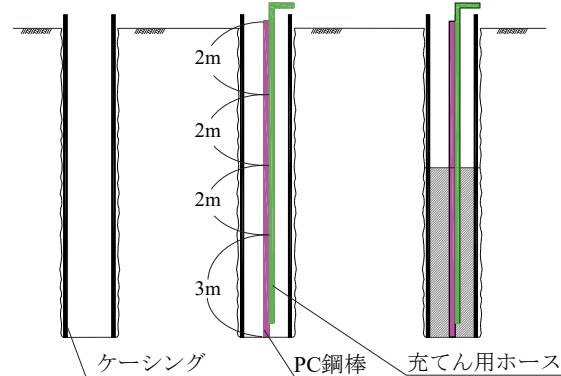


図-5 粉じん設備概要

- ①ロッド撤去 ②ロックボルト挿入 ③モルタル充てん



- ④充てん完了 ⑤ケーシング撤去 ⑥補足充てん

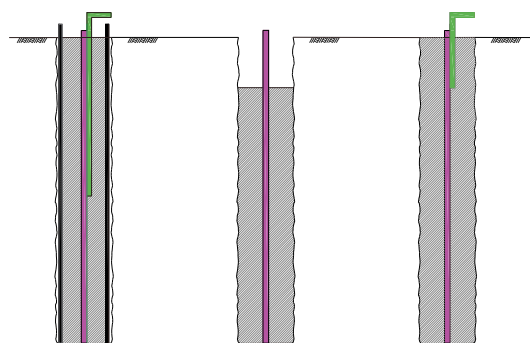


図-6 詳細施工手順

ートの押抜きせん断力から簡易的にコンクリートの仕様を決定した。式(1)⁹が成り立つコンクリート厚を算出する。

$$\tau_p = \frac{P}{b_p \cdot d} < \tau_a \quad (1)$$

ここに

τ_p : 押抜きせん断応力[N/mm²]

P : 荷重[N] (=600000N)

b_p : 断面の分布形状を、部材の有効高の 1/2 の距離だけ離れた面への外周の長さ[mm] (=180mm)

d : 有効高さ[mm]

τ_a : コンクリートの許容押抜きせん断応力度[N/mm²]
(=0.85N/mm²)

※設計基準強度 21N/mm²の許容押抜きせん断応力

以上より、有効高さは以下になる。

$$d > 323 \quad (2)$$

よって、設計基準強度 21N/mm²のコンクリートを 324mm 以上の厚さで打設すれば問題ないと判断し、コンクリート厚を 400mm とした。

写真-2 に引抜き試験の状況を示す。写真に示すように変位量を上部と下部で測定することとし、上部ではボルトの変位量、下部では地盤の変位量を測定する。なお、一般的には上部のみの変位量を測定するが、今回は地盤の破壊があった場合に備えて下部の変位量も測定する。変位量は、荷重を 20kN ずつ増加させたときの変位量を読み取る。

4. 試験施工結果

各対策の効果を確認するため坑外ヤードで試験施工を実施した。削孔は鉛直下向きに全長 9.0m とし、削孔径を外径 125mm とした。表-1 に試験施工のケースを示す。ロッドには、スクリーロッド（ロッド径φ38mm、φ85mm のスクリーウの取付けあり）、通常ロッド（ロッド径φ57mm、スクリーウの取付けなし）を用いた。また、地質の違いによる削孔の効率化を論じるにあたって、以下の2地点で試験施工を行った。

ケース 1-1, 1-2 : 坑外ヤード、地質は深層混合処理工法で改良されたセメント改良土、地下水位は低い。

ケース 2-1, 2-2 : トンネル現場、地質は凝灰角礫岩、安山岩溶岩、火山角礫岩が主体、地下水位は高い。

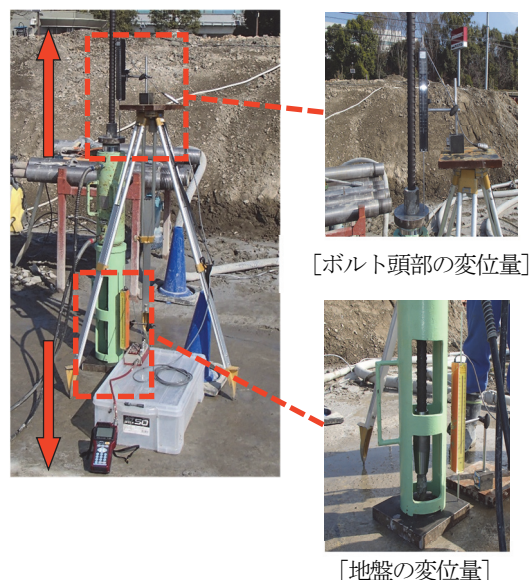


写真-2 引抜き試験機設置

表-1 試験施工概要

ケース	ロッド仕様	地点	地質
1-1	①スクリーロッド (ロッド径 38mm, スクリー径 85mm)	坑外ヤード	セメント改良土 地下水位：低い
1-2	②通常ロッド (ロッド径 57mm, スクリー取付けなし)		
2-1	①スクリーロッド (ロッド径 38mm, スクリー径 85mm)	トンネル現場	凝灰角礫岩, 安山岩溶岩, 火山角礫岩 地下水位：高い
2-2	②通常ロッド (ロッド径 57mm, スクリー取付けなし)		

表-2 各ケースの排土量と削孔時間

ケース	排土量 [ℓ/m]	削孔時間 [min/m]	ケーシング内の土砂の付着	サンプル数	備考
1-1	17	1.85	少ない	10	排土量 20%増加 削孔時間 5%短縮
1-2	14	1.97	多い	4	
2-1	13	1.98		3	差異なし
2-2	14	1.96		3	

(1) 削孔

試験施工時に排土量および削孔時間を測定し、各ケースの 1m あたりの排土量および削孔時間を算出した。また、削孔完了後にボアホールカメラをケーシング内に挿入し、ケーシング内の状況を確認した。表-2に各ケースの 1m あたりの排土量および削孔時間を示す。坑外ヤードで実施したケース 1-1, 1-2 を比較すると、スクリーロッドを用いた削孔の方が、通常ロッドよりも排土量が 20%増加し、削孔時間が 5%短縮した。また、ボアホールカメラでケーシング内を確認したところ、スクリーロッドで削孔した方がケーシング内に付着している土砂が少なかった。これは、坑外ヤードの地質が、セメント改良土のため粘性が高く、地下水位が低かったことから、スクリーに削孔土砂が載ったため円滑に排土できたと考えられる。

一方、トンネル現場で実施したケース 2-1, 2-2 では、スクリーの有無による排土量および削孔時間の違いはなかった。これは、実施したトンネルの地下水位が高かったため、削孔箇所へ湧水が集中し、土砂が泥ねい化したためと考えられる。泥ねい化した削孔土砂は流動性が非常に高く、スクリーによる強制的な排土が困難で、エア圧のみで排土されたため、スクリーの効果を得られなかった。なお、湧水が多いためケーシング内の土砂の付着状況の差異を確認できなかった。

また、粉じんの発生はほとんどなく、用いた設備で十分に粉じんを抑制できるといえる。また、トンネル坑内



写真3 トンネル内での試験施工状況



写真4 ロックボルト打設状況

での試験施工では、壁面への衝突などなくトンネル半断面のみで施工できることを確認した（写真-3）。

(2) ロックボルトの打設

写真-4にロックボルト打設状況を示す。ロックボルトの打設は、ケース 1-1 の坑外ヤードで 3 本実施した。写真-4のようにPC鋼棒を削孔機械で吊りながら3m, 2m, 2m の順に接続して挿入した。モルタルは、先端のPC鋼棒に沿わせた充てん用ホースを用いて最深部から充てんした。充てん完了後、ケーシングを撤去したが、撤去時にモルタルが沈降したため、ロックボルトプレート位置下まで補足充てんを行った。

表-3にモルタルの使用量を示す。この時、比較するモルタルの設計量は削孔体積から PC 鋼棒の体積を控除したものである。モルタルの使用量は1300であり、設計量の 1.3 倍程度であった。このことから密実にモルタルを打設できたといえる。また、深度の浅いところではケーシングの継足しにより繰り返しケーシングと地盤との摩擦が発生するし、孔壁が広がったため、モルタル使用量が増えたと考えられる。

(3) 引抜き試験

引抜き試験は、打設した 3 本の PC 鋼棒で実施した。

表-3 モルタルの使用量

設計量※ [ℓ]	平均の使用量 [ℓ]	充てん率 [%]
100.9	130	129

※PC鋼棒の体積控除

表-4 引抜き試験結果

	最大変位量[mm]		備考
	ボルト頭部	地盤	
No.1	20.44	0.08	
No.2	16.48	0.98	
No.3	15.96	2.84	

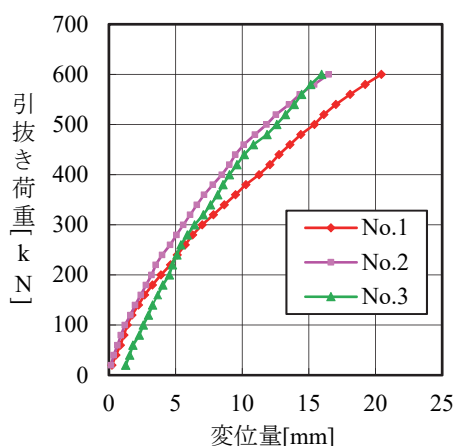


図-7 引抜き荷重と変位量の関係

表-4および図-7に引抜試験の結果を示す。表-4に示すように各ケースの最大変位量は異なる。ボルト頭部の変位量は最大で 20.44mm、地盤の変位量は最大で 2.84mm であった。荷重を 600kN かけた場合、PC 鋼棒の破断や変位量の急激な増加等はなく、路盤コンクリートのひび割れも確認されなかった。また、図-7のように3本すべて変位量がほぼ弾性領域内の挙動を示しており、変位量の急激な増減はないことから、PC 鋼棒の降伏やモルタルの付着切れはなかったといえる。そのため、今回示した方法であれば 600kN まで載荷可能といえる。

5. まとめ

本論文では、下向きロックボルトの施工上の課題に対して、試験施工を行い検証した。以下に本論文の成果を示す。

- 1)粘性が高く地下水位が低い地質では、スクリーロッドで削孔することにより、排土量が約 20%増加し、削孔時間を約 5%短縮できることがわかった。また、本機械および粉じん対策設備で粉じん抑制が可能であることを確認した。
- 2)ロックボルトの打設は、ロックボルトを分割して挿入し、最深部に直接モルタルを充てんすることで、確実にロックボルトを打設できる。
- 3)最大荷重 600kN 載荷したときに、PC 鋼棒の破断や変位量の急激な増加はなく、路盤コンクリートのひび割れなどもなかった。本試験方法で、引抜き試験は可能であることがわかった。通常、山岳トンネルで用いられるロックボルトの引抜き試験より大きい引抜き荷重においても、今回示した、試験方法等により引抜き試験に関する品質確認を行うことができる。

参考文献

- 1) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 朝倉俊弘: 地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起とその対策工に関する研究, 土木学会論文集F1 (トンネル工学), Vol.68, No.3, pp.65-79, 2012.
- 2) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 建設時の影響を考慮した山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集F1 (トンネル工学), Vol.69, No.2, pp.105-120, 2013.
- 3) 土木学会: 山岳トンネルのインバートー設計・施工から維持管理まで一, pp.213-224, 2013.
- 4) 北村義宣, 畠田篤志, 上南隆, 小野塚大輔: 頁岩地山に対する PC 鋼棒ロックボルトのトンネル変形抑制効果についてーさがみ縦貫城山八王子トンネル (その 1-2) 工事ー, 第 66 回年次学術講演会, pp.199-200, 2010.
- 5) 秋山崇裕, 北村義宣, 畠田篤志, 小野塚大輔: PC 鋼棒ロックボルトの変形抑制効果に関する解析的検証, 第 67 回年次学術講演会, pp.195-196, 2011.
- 6) 八木弘, 玉村公児, 畠田篤志, 土門剛, 西村和夫: 脆弱地山の断面トンネルにおける PC 鋼棒の支保部材としての適用性の検証, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.67, No.1, pp.1-15, 2011.
- 7) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: トンネル施工管理要領, p.9, 2020.
- 8) 小林寛明, 井浦智実, 上野光, 渡辺和之, 嶋本敬介, 伊藤直樹: 山岳トンネルの盤ぶくれ対策工の効果を予測する基礎的研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.3 (特集号), pp.80-93, 2015.
- 9) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編, pp.139-140, 2017.
- 10) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 設計要領第三集トンネル【建設編 令和 2 年 7 月】, p.2-15, 2020.

(2021. 8. 6 受付)

THE TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF DOWNWARD ROCK BOLT BY DRILLING WITHOUT USING WATER

Akira TODA, Minoru YAMAGISHI and Takashi TOUSHIBA

Downward rock bolts may be applied as one of the measures against the heaving of tunnels in service. Rock bolts are generally constructed using drilling water, but in tunnels where heaving occur, a construction method that does not use drilling water is desirable. Therefore, the authors have developed a technology that drilling without using water for soft ground. The effect was confirmed by test construction. In addition, since there was almost no discussion about how to place rock bolts after drilling and how to check the quality, not only drilling technology but also a series of downward rock bolts were constructed. In this paper, we report the measures for the construction problems of downward rock bolts and their effects.