

切羽ボルトの最適打設本数の決定手法に関する数値解析的検討

徐 景源^{1*}・土門 剛²・西村 和夫³

¹ 韓国建設技術研究院 国土地盤研究部（韓国，〒411-712 Daewha-dong Ilsan-gu Gyeonggi-do）

² 首都大学東京 都市環境学部 研究員（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）

³ 首都大学東京 都市環境学部 教授（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）

*E-mail : kwseo@kict.re.kr

近年、切羽ボルトは施工件数が急激に増えており、数多くの研究もなされている。しかし、トンネルは現場ごとに地盤条件およびボルトの種類などが異なり、設計の段階で画一的に最適の打設本数を決めておくのは極めて難しい。本論文は三次元数値解析を用いて多様なボルトモデルについて検討し、打設本数を決定する一つの手法を提案したものである。結果として、打設密度で決定する場合はボルト径による差が大きく、最大19%の変位差が生じているが、提案する L_{fric} として設計するとわずかな差しか生じない。したがって、切羽ボルトの本数の決定は打設密度ではなく、 L_{fric} として設計した方がより効果的であることが分った。

Key words : face bolt, installation number, frictional length, axial displacement

1. はじめに

長尺切羽ボルト（以下、切羽ボルトとする）はトンネル掘削時にもっとも不安定になる切羽補強に使用されており、主に鏡面の崩落、肌落ち、切羽周辺地盤の緩み防止に効果があるとされている。近年は材料および工法の発達によって使用実績が急増しており、打設長も長くなり 40m まで打設する場合¹⁾もある。使用されるボルトの直径は 20mm から 100mm まで多様であり、材質も GFRP、鉄筋、ケーブルボルト、鋼管膨張式ボルトなどの様々なものが用いられている。

現在、切羽ボルトの打設本数を設定する手法としては①シールド工法において切羽の安定性を検討する際に用いられる「村山の式」²⁾によって切羽にかかる最大水平力および最大土圧を求め、それにボルトの耐力を考慮した設定手法、②ランキンの主働土圧により切羽に作用する土圧を推定し、これを満足する圧力をボルトに付加する考えなどが適用されている。また施工実績から本数を決定する手法などが用いられている。ところが、現場ごとに地盤条件やボルトの種類などが異なり、設計の段階で画一的に最適の打設本数を決めておくのは極めて難しい。また、切羽ボルトの補強効果は軸力に大きく依存しているため対象としたボルトの諸元によっても結果は大

きく異なる。

そこで本研究ではまず、切羽ボルトの打設本数に関する既往研究について概観し、残された点について整理する。次に現場を対象とした数値解析を行い、切羽ボルトの最適打設本数を決定する一つのファクターを提案する。

2. 切羽ボルトの打設本数に関する既往の研究

切羽ボルトの打設効果について分析した事例は数多くなされているが、最適打設本数について取り扱った例は少ない。D.Pelia ら³⁾は数値解析および現場計測から切羽ボルトの本数と押し出し変位との関係を報告した。彼らは図-1 に示したように数値解析の結果では約 100 本、現場計測では約 80 本を境界として本数の効果はそれほど増加しないと報告した。Yoo ら⁴⁾は室内実験および数値解析を通じて打設本数に関する効果を報告し、打設密度が 1.1 本/m² 以上であれば、補強効果はそれほど増加しないと報告した。

大塚ら⁵⁾は日本の 33 箇所の施工実績を基に打設密度の決定手法は、実績による経験的手法多く、その他の方法として「村山の式」²⁾による簡易計算的な方法が用いられており、打設密度は 0.3 本/m² の場合が多いと報告した。

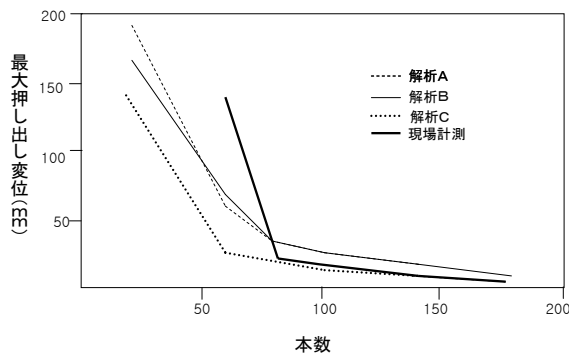


図-1 切羽ボルトの打設本数と切羽最大押し出し変位の関係
(一部加筆修正)

彼らは切羽ボルトが使用される地盤条件として粘着力は 0.04MPa 以下の地盤、変形係数は 200MPa 以下の地盤が多く、ボルトの長さは $12\text{m}\sim 18\text{m}$ 、ラップ長は $3\text{m}\sim 6\text{m}$ のケースが多いと示した。また、御手洗⁶⁾は異なる地盤条件下で打設密度は押し出し変位と緩慢な L 型の比例関係にあることを報告した。

図-2 および図-3 に筆者らが調査した 11 箇所の現場（主に道路トンネルおよび鉄道トンネルである）の切羽ボルトの打設本数を示す。図-2 の打設本数と地盤の変形係数の比較に着目すると切羽ボルトは最少 11 本/断面～最大 46 本/断面打設しており、変形係数との相関関係は見られない。この理由として切羽ボルトは単独で使われる場合は少なく、先受け工と併用して適用するケースが多いため⁷⁾現場ごとの許容変位量を他の補助工法と合わせて算定し、打設本数を決定すること、また、ボルト径や切羽での打設位置が現場ごとに異なることなどが考えられる。

図-3 に打設本数と土被りを比較して示す。切羽ボルトは土被りが約 40m 以下の現場で多く適用されており、それ以外は相関関係は見られない。特に都市部トンネルは切羽の押し出し変位の抑制に加えて地表面沈下に対する対策工法も併用されるケースが多いため土被りとの直接的な関係はないと考えられる。

図-4 に既往の資料⁷⁾に基づいて分析した切羽ボルトの直径（図-4(a)）および打設密度（図-4(b)）を示す。ボルトの直径は $20\sim 60\text{mm}$ が多く、平均打設密度は $0.51\text{本}/\text{m}^2$ であることが分る。ここで、大塚ら⁵⁾が調査した平均打設密度と違うのは彼らは主に GFRP 製のボルトを対象としたものであり、筆者らの調査はボルトの種類を区別しなかったためと思われる。

図-5 に収集した資料のボルト直径と打設密度の関係を示す。同一の直径においても打設密度の差が大きく、ボルトの直径との関係は見られない。

以上の既往の文献から切羽ボルトの打設本数について整理すると以下になる。

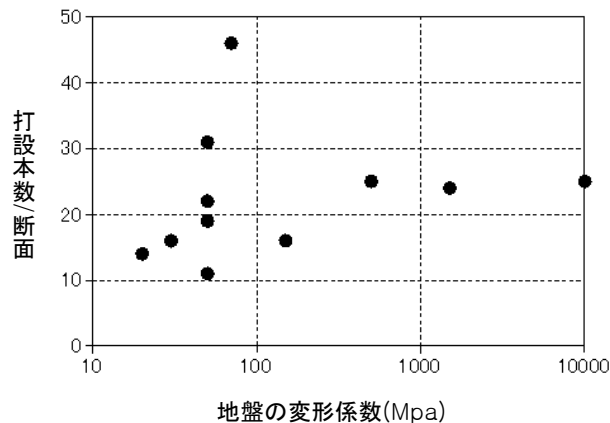


図-2 地盤の変形係数と打設本数の関係

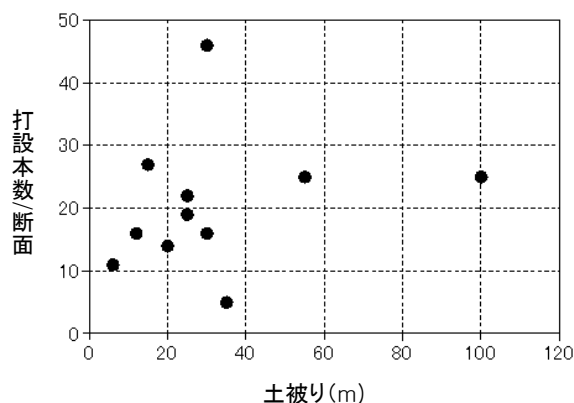
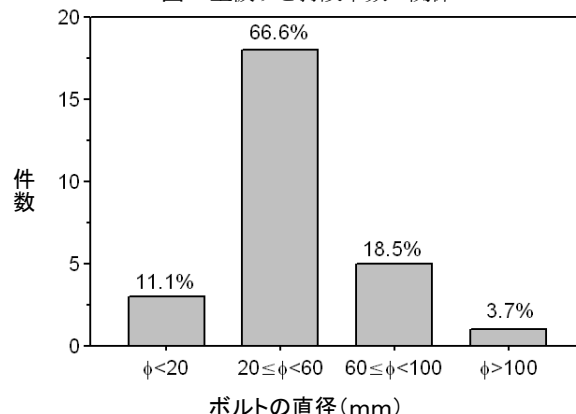
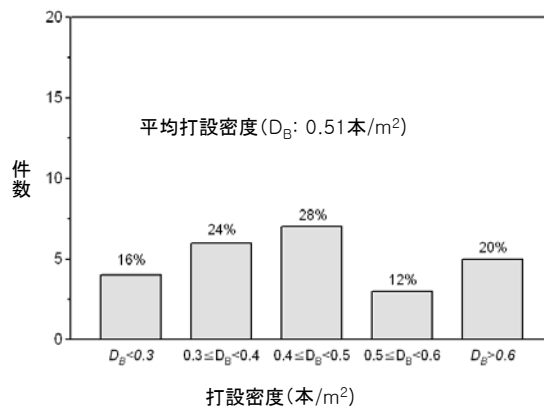


図-3 土被りと打設本数の関係



(a) ボルトの直径と現場数の関係



(b) ボルトの直径と現場数の関係

図-4 切羽ボルトの打設数に関する文献調査

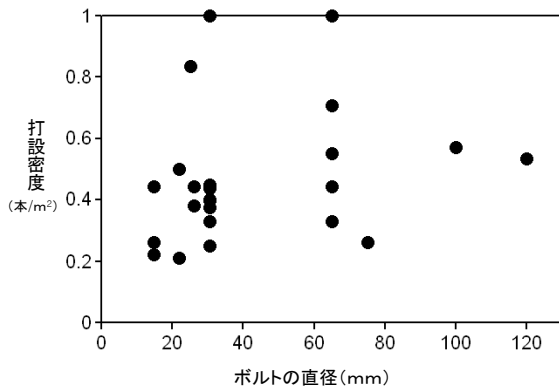


図-5 ボルトの直径と打設密度の関係

- 切羽ボルトが使用される地盤は変形係数が 200MPa 以下および土被りが 40m以下の地盤でよく用いられている。
- 地盤条件と打設本数の関係は見られない。
- ボルトの平均打設密度は 0.51 本/m²であるが、地盤条件およびボルト材質との関係は見られない。
- ボルトの直径と打設本数の関係は見られない。
- 打設本数に関する基準は確立されてない状況である。

そこで本研究では切羽ボルトの直径と打設本数をパラメーターとした数値解析を行い、打設本数を決定する一つの手法について提案する。

3. 解析手法の概要

(1) 地盤モデル

解析メッシュを図-6 に示す。土被りは都市部の低土被りを想定して 16mとする。トンネルは半径 6mの半円形断面を想定し、解析領域は対称性を考慮して縦半分とし、横断方向は 42m、縦断方向は 100mとする。境界条件は地表面を自由面、他の面はローラー境界とした。使用プログラムは FLAC3D である。

表-1 に地盤と合成部材の物性値を示す。地盤は NATM 設計施工指針⁸⁾ の S_Iの地盤を想定した。鋼製支保工と吹付けコンクリートは合成部材としてシェル要素でモデル化を行い、ロックボルトは省略し、1 ステップ遅れて打設すると考えた。

(2) 切羽ボルト

まず、本論文の用語を次のように定義する。切羽ボルトの効果は主に周辺地盤との摩擦に依存していることからボルトの単位長さの摩擦長を無次元化するため式(1)のように L_{fric} を定義する。

表-1 地盤と合成部材の物性値

	地盤	合成部材
粘着力 (MPa)	0.02	
内部摩擦角(°)	30	
単位体積重量(kN/m ³)	16	23.8
弾性係数 E(MPa)	20	8.65E3
ポアソン比	0.35	0.25

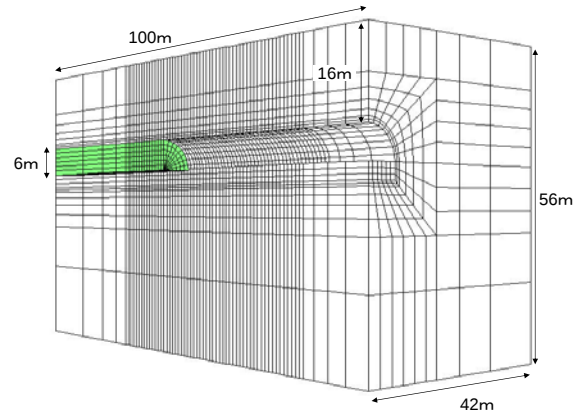


図-6 解析メッシュ

$$L_{fric} = \frac{L_B}{L_T} \quad (1)$$

$$L_B : \sum_{i=1}^{N_p} \text{ボルトの周辺長 (単位長さ)} \quad (2)$$

$$N_p : \text{ボルトの打設本数} \quad (3)$$

$$D_p : N_p / \text{Tunnel area} \quad (4)$$

$$L_T : \text{トンネルの周辺長 (単位長さ)} \quad (5)$$

ここで、切羽ボルトの軸力は次のように定義できる。

$$T = -E_b A_b (\varepsilon_b - \varepsilon_g) \quad (6)$$

ここで、 E_b : ボルトの変形係数、 A_b : ボルトの断面積、

ε_b : ボルト変形率、 ε_g : 地盤変形率

表-2 に切羽ボルトの物性値および配置条件を示す。ボルトの物性は近年使用実績の多い GFRP 製のボルトである。ボルトはケーブル要素であり、付着特性は御手洗⁹⁾の実験値を用いる。ボルトの効果に大きく影響する付着特性は同一材質でもボルトの直径により異なるが、ここでは等価として扱うことにする。

解析ではボルトの直径のみ異なるボルトを 1 断面あたりなし～60 本まで打設し、ボルトの直径による補強効果を検討した。ここで、ボルト直径が D30mm、D76mm は現場でよく用いられている^{1) 7)} ボルトであり、

表-2 切羽ボルトの打設諸元

解析ケース	直径 (Φ, mm)	打設本数/断面 (N _p)	L _{fric}	打設密度 D _B
I			ボルトなし	
II	D30	10, 20, 30, 40, 60	0.06(N _p =10)~0.36(N _p =60)	0.17(N _p =10)~1.06(N _p =60)
III	D56	10, 20, 30, 40, 60	0.11(N _p =10)~0.68(N _p =60)	0.17(N _p =10)~1.06(N _p =60)
VI	D76	10, 20, 30, 40, 60	0.15(N _p =10)~0.92(N _p =60)	0.17(N _p =10)~1.06(N _p =60)

● 変形係数: 21Gpa, 長さ: 1D(12m)

● ラップ長: 0.5D(6m)

(注: N_p=打設本数, L_{fric}=式(1), D_B:打設密度(=N_p/tunnel area))

D56mm は直径による検討を行うため設定したボルトである。この時、ボルトの打設密度はボルト径によらず打設本数が同一であれば同じになるが、ボルトの摩擦長を無次元化した L_{fric} はボルトが太いほど大きくなる。

4. 解析結果および考察

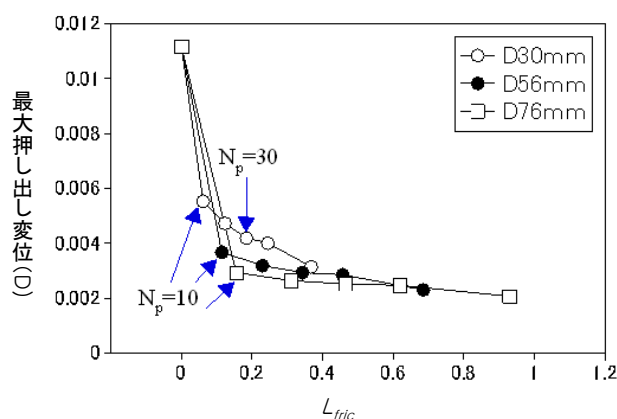
(1) 切羽の押し出し変位

図-7(a)には L_{fric} と切羽の最大押し出し変位を示す。ボルト直径が異なっても共に L 型の分布で収束しているが、D76mm のボルトが急に収束しており、直径が小さいほど緩慢な L 型の傾向がある。図-7(b)に着目すると、解析ケース共に D_B =0.18 を規準として L 型の曲線を見せている。ところが、D76mm ボルトは急な L 型であり、ボルトの直径が小さいほど緩慢な L 型の沈下曲線になる。また、大塚ら⁹⁾が調査した現場の打設密度 (0.3 本/m²) に着目すると D_B=0.3 の地点においては D76mm と D56mm ボルトは 0.00055D(7mm)の変位差があり、D76mm と D30mm ボルトは 0.00021D(27mm)の変位差があることから切羽ボルトとしては直径 50 mm 以上のボルトが必要と思われる。

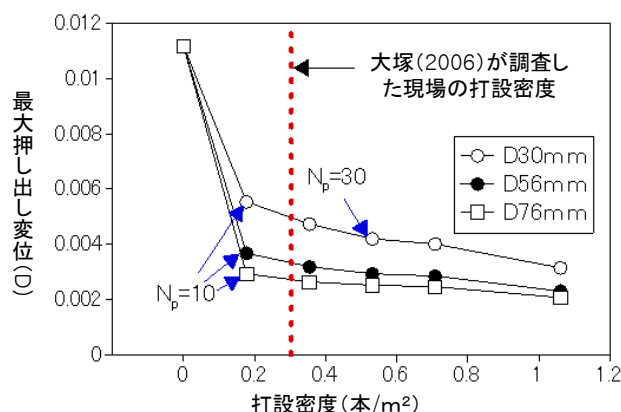
今までの多くの研究および設計での打設本数の決定は主にボルトの密度として取り扱っているが、これらの結果によると摩擦長として評価した方がより効率的だと思われる。

図-8 に掘削断面における天端沈下を D_B (打設密度) および L_{fric} (摩擦長を規準化したパラメーター) と比較して示す。まず、切羽ボルトは図-7 のように押し出し変位に対しては効果が大きい、天端沈下に対しては打設本数と比べるとそれほど大きくないことが分る。図-8(a)に打設密度と天端沈下を示す。大塚ら⁹⁾が調査した平均打設密度である 0.3 本/m²に着目すると図-8(a)場合

は、ボルト直径により 0.0044D(53mm)~0.0037D(44mm)の差が生じている。一方、図-8(b)は摩擦長を無次元化した L_{fric} と天端沈下を示す。図-8(a)は同一の打設密度においてもボルト直径ごとに差が大きい、図-8(b)の L_{fric} はボルト直径ごとの差が小さいことが分る。もし打設本数を L_{fric} として管理するとしたら L_{fric}=0.3 の地点 (図中の点線) では 1~2mm しか差がなく、より効率的に本数の決定ができると思われる。



(a) ボルトの摩擦長と押し出し変位の関係



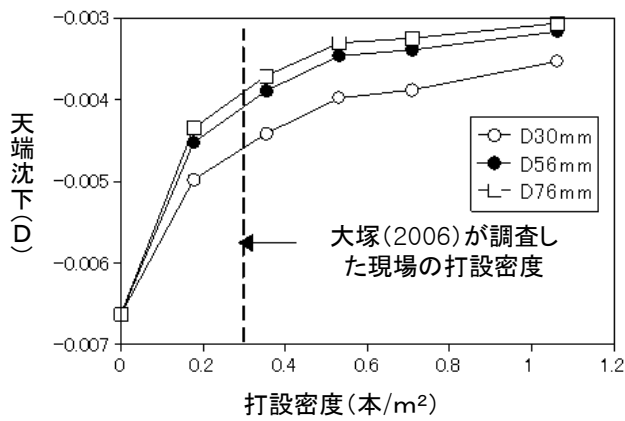
(b) ボルトの打設密度と押し出し変位の関係

図-7 切羽の最大押し出し変位 (切羽の最大押し出し変位は中央部の変位を分析する。図中の点線は大塚ら⁹⁾が調査した現場の打設密度)

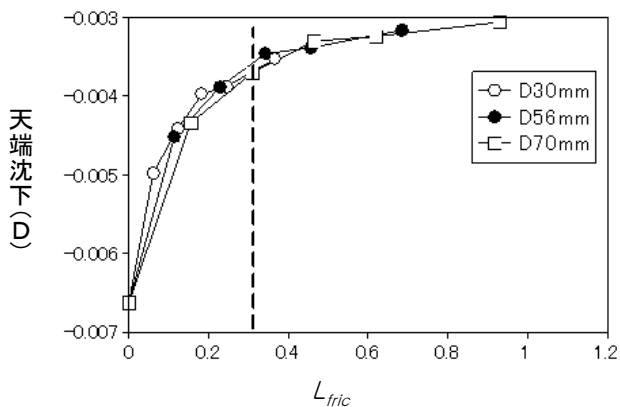
(2) 切羽ボルトの軸力

図-9 に D56mm ボルトの場合の打設本数と軸力分布を示す。ボルトの軸力は式(6)のように地盤変位とボルト変位の相対変位と深い関係があり、ボルトの軸力は主に地盤の変位に大きく依存しているため地盤の変位が小さくなるほど (図-7 参照) 軸力は小さくなる。

図-10 に切羽ボルト直径と軸力を示す。打設本数は共に N_p=10 である。共に切羽前方 1m 地点で最大の軸力に



(a) 打設密度と天端沈下の関係



(b) 摩擦長と天端沈下の関係

図-8 ボルトの直径および摩擦長による天端沈下

なり以下には減少する傾向である。この時、軸力の大きさはボルトの直径が大きいほど、軸力も大きくなっている。最大軸力を基準として D76mm ボルトは D30mm ボルトより 38%大きく、図-7 の押し出し変位は ($N_p=10$ の場合) 88%の差が生じている。

5. 結論

切羽ボルトを適用するトンネルは脆弱な地盤であり、地盤条件、使用するボルトの種類、定着材の種類など多くの部分において異なり、設計の段階で設計本数を決定するのは極めて困難で難しい。本研究ではボルトの打設本数に着目し、打設本数の決定において一つの手法を提案した。以上の結果を基に、次のような結論に至った。

- (1) 同一の打設密度においてもボルトの L_{fic} によって押し出し変位に対して大きな差を見せており、 $N_p=10$ に着目すると D30mmボルトは D76mmボルトより約 88%以上大きい。
- (2) ボルトの軸力は L_{fic} が大きいほど大きくなり、D76

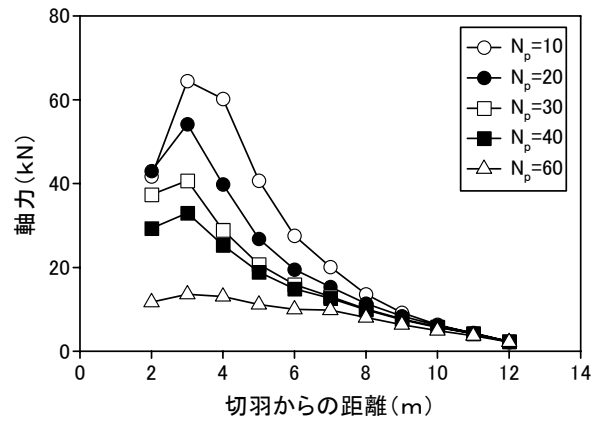


図-9 D56mm ボルトの打設本数による軸力の分布

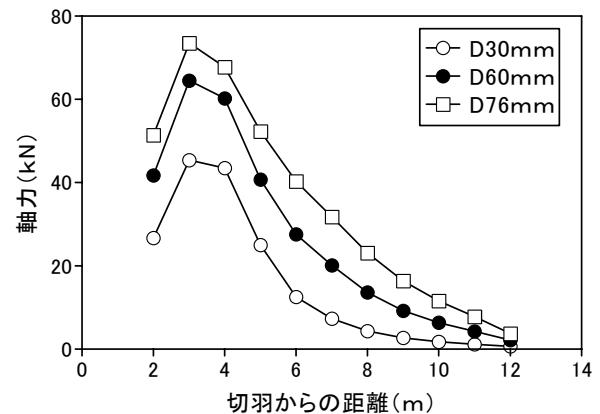


図-10 ボルト径と軸力の関係 (軸力は打設後 1m掘削したときの値であり、 $N_p=10$ の場合である)

mmは D36mmより 38%大きい。

- (3) 切羽の押し出し変位に対しては本数が多いほど L 型の特徴を持っているが、D36mmボルトは緩慢な L 形態、D76mmは急な L 型の形態になる。したがって、経済性および施工性を考慮した上では、直径 50mm以上のボルトを打設した方が効果的であると思われる。
- (4) 本研究の検討結果、打設本数について、今まで多くの現場施工においては密度として計算してきたが、切羽ボルトの効果はボルト径によって大きく異なるため打設密度ではなく、 L_{fic} として評価することでより合理的な施工が出来ると思われる。

本稿は主に切羽ボルトの打設本数に着目して数値解析による検討を行った。今後は既報告の計測事例を詳細に分析して、実設計への適用を図りたい。

参考文献

- 1) 西崎晶士, 羽馬 徹, 岡部 正: 長尺切羽ボルトの施工傾向と挙動特性の解析的研究, トンネル工学論文 報告

- 集, Vol.12, pp.131-136, 2002.11
- 2) 村山 朔郎, 遠藤 正明, 橋場友則: 機械化シールドの掘削製に関する土質力学的考察, 第 1 回土質工学研究発表会, pp.75-78, 1966
 - 3) D.Peila, P.P.Oreste & S.Pelizza : Study of the influence of sub-horizontal fiber glass pipes on the stability of a tunnel, *North American Tunnelling*96, pp.425-432, 1996
 - 4) Chungsik Yoo, Hyun-kang Shin : Deformation behaviour of tunnel face reinforced with longitudinal pipes-laboratory and numerical investigation, *Tunnelling and Underground Space Technology* , 18(2003), pp.303-319
 - 5) 大塚 勇, 青木 智幸, 岡部 正, 森本 真吾 : 長尺鏡止めボルトの施工実績と適用範囲に関する検討, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 pp. 41-46, 2006
 - 6) 御手洗 良夫: 山岳トンネルにおけるグラスファイバーチューブによる長尺切羽補強工の作用効果と適用性に関する研究, 大阪大学 博士論文, 2003.12
 - 7) ジェオフロンテ研究会: 長尺鏡ボルトの施工実態調査とその分析, 2000.
 - 8) 日本鉄道建設公団 (旧) : NATM 設計施工指針, p.321, 平成 8 年 2 月
 - 9) 御手洗 良夫, 松尾 勉, 手塚 仁, 岡本 哲也, 西村 誠一, 松井 保: 山岳トンネルにおける長尺鏡補強工の作用効果の評価, 土木学会論文集, No.743/III-64, pp.213-222, 2003.9

NUMERICAL ANALYSIS FOR THE OPTIMUM INSTALL NUMBERS OF FACE BOLTS

Kyoungwon SEO, Tsuyoshi DOMON, Kazuo NISHIMURA

Most of tunnels in which longitudinal pipes are employed has very weak ground, and their ground condition, the type of pipes to be used, the type of adhesive, etc. are different each other. So, the determining the installation number at the stage of design is quite difficult. This study dealt with the analysis of behavior of ground and bolts in a tunnel supported by face bolts by means of numerical analysis and it mainly focused on the installation numbers. The results are the following. It is found that the design of installation numbers with L_{fic} (normalized factor of bolt's frictional length) was more effective than with installation density. And the face bolt is cut and installed simultaneously with excavation and it is effective on the horizontal displacement. Therefore, the additional reinforce method is required.