

長尺フェースボルトの掘削に伴う挙動

BEHAVIOUR OF LONG FACEBOLT DUE TO TUNNEL EXCAVATION

小原勝巳¹⁾・安永礼三²⁾・井上伸一³⁾・市川健作⁴⁾・熊谷幸樹¹⁾

Katsumi OBARA, Reizo YASUNAGA, Shinichi INOUE, Kensaku ICHIKAWA and Koki KUMAGAI

Recently, as a construction method for stabilizing cutting face, long facebolt is used frequently for large section tunnels. Under the situation, to define the effect of facebolt and to compose the theory of design, it is necessary to clarify the behavior of facebolt installed in actual tunnel face. This paper shows a few remarkable results of measured axial force of facebolt which is used at three lanes highway tunnel.

Key Words : tunnel, facebolt, axial force, field measurement

1. はじめに

トンネル切羽の掘削時の安定を確保する「鏡安定対策」として、従来の3～4mの鏡ボルトに替わり、トンネル切羽から前方に10～20m程度の長さのファイバーボルトまたはケーブルを打設する「長尺フェースボルト」の採用例が増えている。特に、道路トンネルを中心としたトンネル断面の大型化に対応し、断面を最小限の分割で効率良く施工するための補助工法として、長尺先受け工とともに本工法の必要性は飛躍的に高まってきている。

このような背景において、本工法の作用効果を明確化し設計方法を確立するためにも、打設されたボルトの挙動を解明することが必要であるが、計測実施例が少なく、現状では不明確な点が多い。本報告は、3車線高速道路トンネルにおいて実施した長尺フェースボルトの軸力計測結果と、これによって判明したいくつかの特徴的な挙動について考察を行ったものである。

2. 施工概要

(1) トンネルの概要

本計測を実施した中央高速道路（改築）新岩殿トンネルの東側坑口付近は、崩積土が厚く堆積した不安定な斜面が斜交しており、坑口から25m程度は偏圧対策としてアーチ部の置き換えを兼ねた押え盛土を施工した。長尺フェースボルトは、これより深部の約75m区間において、不安定斜面や上部の国道などに対するトンネル掘削の影響を低減する目的で、AGF-P工法と組み合わせて施工した。

構成地質は表-1に示すとおりであり、小礫を含有するN値6～11の含水比の高い崩積土が基岩の安山岩の上に厚く堆積している。計測箇所である第6シフト付近の土被りは13m程度であり、崩積土がほぼ上半盤まで分布しており、掘削時の自立性はきわめて悪い状態であった。

図-1に打設区間の地質縦断と計測実施位置を示す。

-
- | | | | |
|----|-----|---------|-----------|
| 1) | 正会員 | 飛島建設(株) | 土木本部土木技術部 |
| 2) | | 飛島建設(株) | 横浜支店 |
| 3) | 正会員 | 飛島建設(株) | 横浜支店 |
| 4) | | 飛島建設(株) | 土木本部土木技術部 |

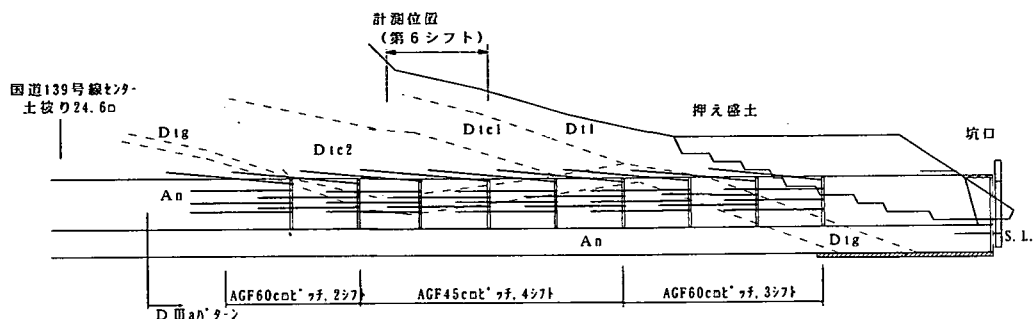


図 - 1 地質縦断面図

表 - 1 構成地質

地 質 名		N値	特 徴
ローム質崩積土	D1l	6～9	ローム質粘性土。少量の礫を含む。
粘性土質崩積土	D1c1	9～11	茶褐色を呈する。D1c2層とほぼ同様な性状を示すが、色調によって区別される。
粘性土質崩積土	D1c2	6～11	安山岩の小礫を含む崩積土。粘土を多く含み（最大67%）、含水比が高い。緑灰色を呈す部分は砂分の含有率が高い。
礫質崩積土	D1g	>30	基盤との境界部に分布し、安山岩礫を含有する崩積土。
安山岩	An		基盤岩。上部は風化している。

表 - 2 長尺フェースボルト仕様

ボルト材質	グラスファイバー
ボルトタイプ	中空型
ボルト径	外径φ30.5mm
削孔径	φ70mm
定着材	速硬性セメント
定着方法	後注入方式

(2) 長尺フェースボルトの概要

長尺フェースボルトは、長さ6m中空型グラスファイバーボルトをカプラにより連結し12mとしたボルトを、1.2mのピッチで1断面当たり16~20本打設した。また、ラップ長は4mとし、1シフト8m掘削するごとにAGFとともに施工し、全体で9シフトの施工を行った。

打設パターンと施工仕様を図-2と表-2に示す。

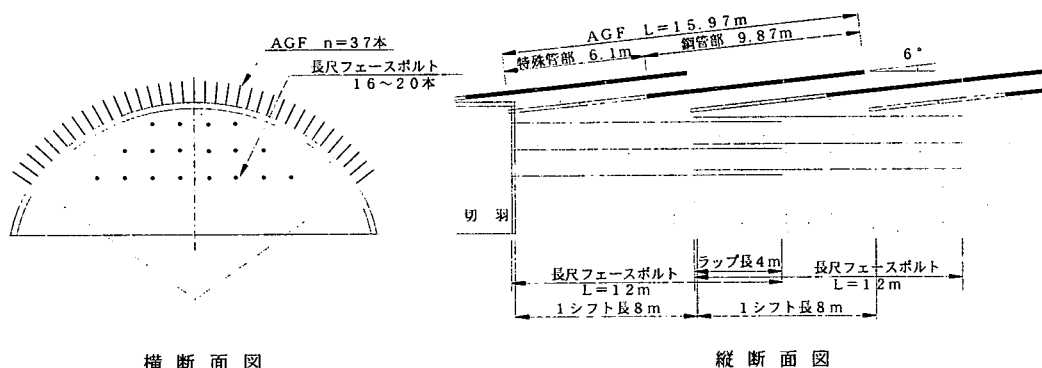


図 - 2 長尺フェースボルトおよびAGF打設パターン

3. ボルト軸力の測定方法

長尺フェースボルトは切羽の掘削と同時に切削されるため、切羽側から計測用ケーブルを取り出してもその保護が困難であり継続的な計測が不可能であった。このため、従来の測定例では、両押しのトンネルの出会い貫通点において先に到達した側から長尺フェースボルトを打設して計測用のケーブルを出しておき、反対側から掘削する方法¹⁾、またはデータレコーダーを長尺フェースボルトの先端部に埋め込んで掘削中の軸力データを自動的に記録しておき、切羽がボルトの先端部に近づいた時点でレコーダーを回収する方法などにより計測が行われている。

(1) 計測システム

本計測で用いたシステムは図-3に示すように、ボルト打設時にボルトの先端部に小型のデータロガーを埋設する方法を用いた。データロガーは、内蔵電源によりボルトに貼付したひずみゲージから読みとった数値を自動的にメモリーに記録しておき、これをデジタル変換してコントローラーに排出するものである。

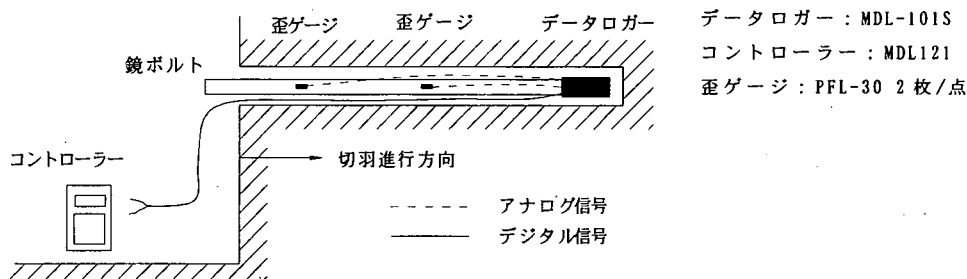


図-3 計測システム概要

データの排出がデジタル信号のため、計測ケーブルが切断されてもデータロガーから随時データの排出が可能である。また、計測ケーブルは切羽において開放端としており、測定時だけ開放端をコントローラーにつなぎデータを排出するため、掘削作業による支障がなく継続したデータを得ることができる。

なお、本計測では測定のインターバルを10分とした。

(2) ボルト軸力計の配置

軸力計測用のボルトはトンネル中心線付近の上下2点に配置した。また、ひずみゲージは図-4に示すように、2本のボルトそれぞれに7点配置した。測点の設定根拠は、端部は地山による拘束が小さくなり、一般に軸力があまり増加しないことを考慮したものであり、ピッチは1掘削進行1mに合わせている。

以降の文中・図における測点番号については、図-4の中の見号(例えば1-1)で示す。

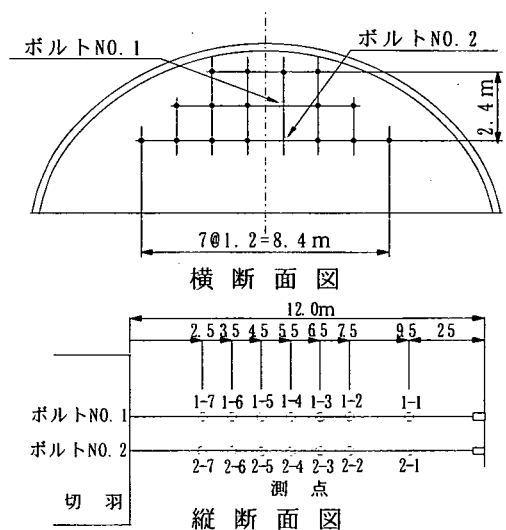


図-4 計測ボルト・計測点の配置

4. 計測結果と長尺フェースボルトの挙動

(1) ボルト軸力の経時変化

長尺フェースボルトの測点ごとの軸力の経時変化を図-5に示す。軸力はすべて引張りを正值としている。掘削に伴うボルト軸力の経時変化には以下のような特徴が見られる。

1) 地山特性による影響

ボルト軸力はトンネル掘削によって一時的に低下するが、その後、次の掘削までの間に徐々に増加する特徴が見られる。これは地山のクリープ的挙動を反映するものと考えられる。最も切羽の放置期間の長い、3 m掘削完了時点から4 m掘削開始までの34.5 時間でさえも軸力は増加し続け収束が見られない。このような経時的な挙動を示す粘性土においては、掘削のインターバルが軸力の増分に影響を及ぼす。

本計測データでは掘削のインターバルは総じて7～10 時間程度となっていることから、3 m掘削後の軸力値として最終値ではなく掘削後8 時間程度経過時の値を採用することも考えられるが、一度地山に許したクリープひずみは以降の掘削時の挙動にも影響を及ぼしていると思われるため、このような仮定は行わず、クリープ的な挙動については無視することとし、以降の検討では各掘削段階における軸力値はすべて次回掘削直前の最終値を用いるものとする。

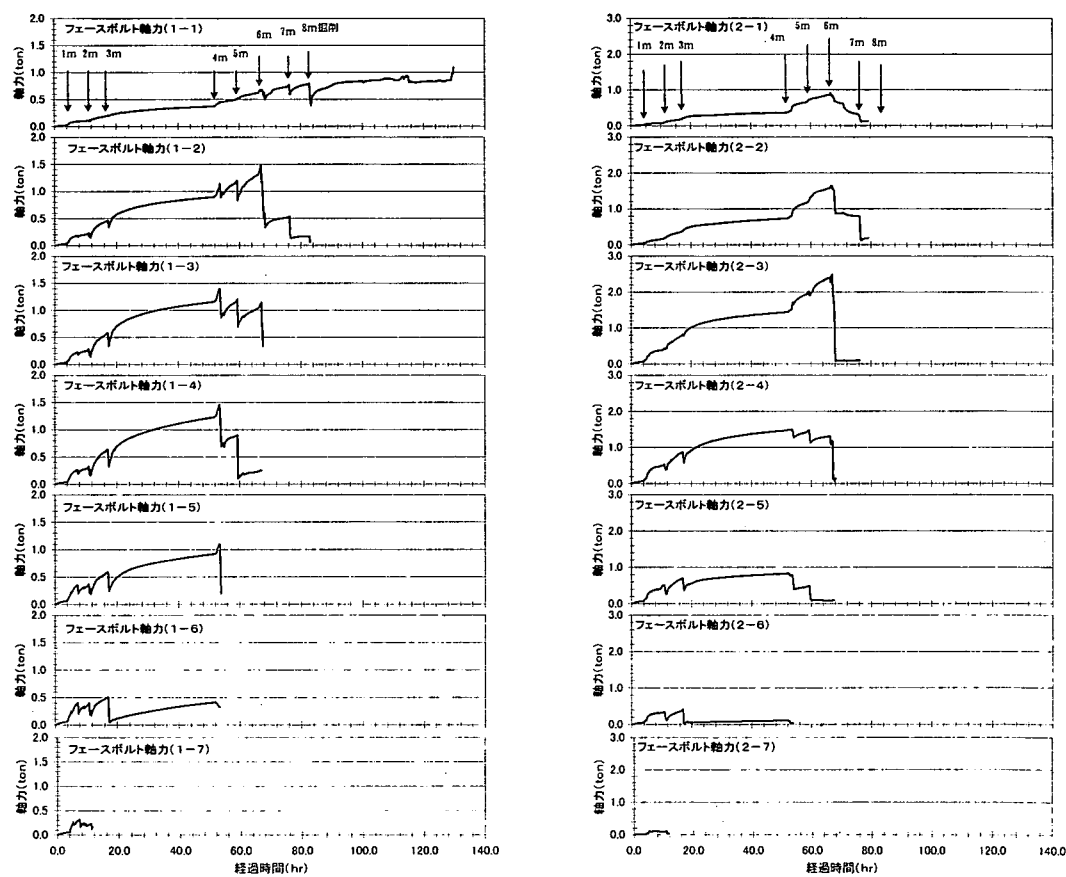


図-5 ボルト軸力の経時変化

2) 掘削による切断後のボルト軸力の経時的な挙動

切羽掘削時には、軸力はボルトのほぼ全長において一時的に急激な低下が生じる。これは、切羽掘削長 1 m 分の地山による拘束がなくなり、ボルト残長が減少するためと考えられる。その後、再度、応力再配分により軸力は上昇するが、ボルトの残長が長い 3 m までの掘削においては、一旦低下した軸力が元の軸力レベルまで比較的急速に回復し、その後は掘削直前までの曲線の延長線上を推移するような曲線を描く。しかし、4 m 掘削以降は、掘削前の軸力レベルまで戻るものと戻らないものがあり、測点によって異なった傾向を示す。

また、掘削開始直後に軸力が一時的に (10~30 分間) 増加する場合もあるが、これは掘削に伴い切羽表面が一旦緩められることが原因であると思われる。

(2) 切羽の進行と軸力分布

掘削進行に伴い短くなるボルトの軸力分布には、次の特徴が見られる (図-6)。

ボルト軸力分布の最大値の発生位置は、掘削開始時点ではボルトの中央付近となっているが、切羽が進むにつれて、ボルトの先端側へと移行する。

しかし、切羽の進行とともにボルトが切羽側から切断されて短くなるので、残っている部分だけに着目した場合、残長が短くなるにつれて最大値の発生位置は切羽側に近くなっている。

また、最大値自体も切羽の進行とともに大きくなるが、最も最大値が大きくなるのはボルト中央付近の 5 m 掘削時点 (残長 7 m) までである。これは、残長が短くなるとボルトに対する地山の拘束力が低下するためと考えられる。

これらのことから、もっと長いボルトを打設した場合にはボルト軸力の最大値はさらに大きな値を示した可能性はあるが、この場合、切羽前方への掘削の影響範囲が重要な要素となるとと思われる。そこで、切羽の進行と軸力分布の関係を、簡単なモデルで検証する。

トンネル掘削によって発生する切羽前方のトンネル軸方向の地山ひずみ分布を図-7に示すように単純な3角形分布と仮定する。ただし、切羽前方にひずみが及ぶ範囲については、図-6に示す1 m掘削時点での軸力分布を参考に7 mと仮定する。このようなひずみ分布において、切羽が1 m進むことで地山に生じるひずみの増分 $\Delta \varepsilon$ に対してボルトに作用する付着応力 (摩擦力) が比例関係にあるとすれば、ボルトの表面に働く付着応力は、ひずみが増加した範囲において一様な増加を示す。切羽がさらに進行すると付着応力が累積されるが、このとき、ボルトに生じる軸力は、累積した付着応力にボルトの表面積を乗じたボルト軸方向の積分値で与えられる。ただし、ボルト端部においては地山の拘束力がないことから両端の軸力を0とし、ボルト母材に発生する軸力を計測値に近似させると、各掘削段階の軸力分布は図-8のようになる。

図-8に示すように、ボルト軸力の分布は計測結果とよく類似した形状を示す。このことか

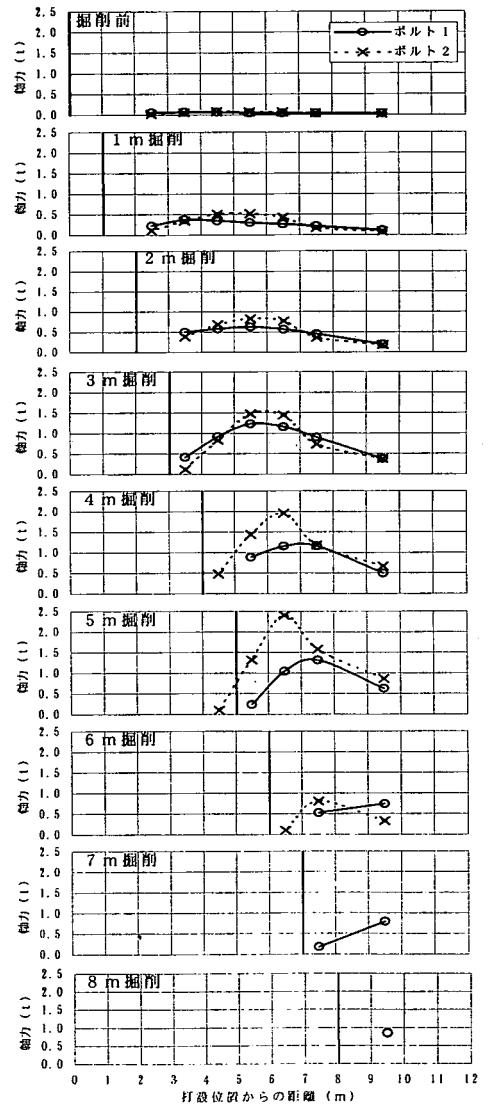
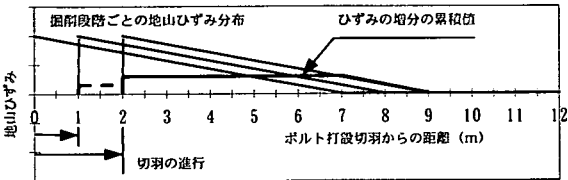


図-6 切羽進行に伴う軸力分布の変化

ら、長尺フェースボルトに発生する軸力は打設段階からの地山のひずみ増分に対応していることが理解できる。

また、定着材による軸力負担を無視し、削孔径7 cm の周面に作用する地山との付着応力を求めると、付着応力は切羽位置で 0.35kgf/cm² (1m掘削ごとの増分値は約 0.05 kgf/cm²) となった。これは、地質条件が、礫を含む粘性土でN値が 6～11 であることを考慮すると妥当な値と言える。

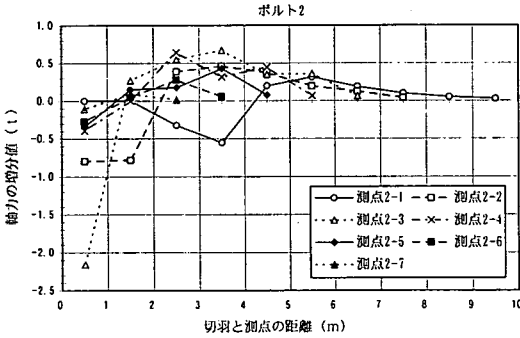
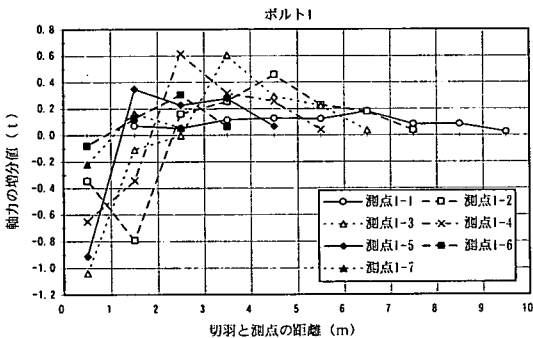


図－7 仮定した切羽前方のひずみ

(3) 測点ごとの軸力の増減

切羽の接近に伴う測点ごとの軸力の増分値について図－10に示す。

ボルトの一部分に着目した場合、切羽接近に伴い掘削ごとの軸力の増分値が大きくなるが、ボルト先端側の測点ほど切羽から離れた位置（4～5 m）で増分が減少に転ずる。また、1.5 m～2 m 以下では増分は負の値となり軸力の低下が生じているが、ボルトはほとんど掘削直前まで付着切れを起こさないで作用していることが分かる。ただし、切羽の押し抑抑制を目的とする場合には、3～4 mのボルト長ではあまり効果が期待できないと考えられる。



図－10 切羽距離と測点ごとの軸力の増分値

5. おわりに

粘性土地山を掘削する3車線トンネルにおいて長尺フェースボルトの軸力計測を行い、その有効性を確認した。また、軸力の増加は、地山のひずみ分布と打設ボルト長の関係、ボルトの残長による影響、掘削による履歴などから説明が可能であることが分かった。今後は、ボルトの挙動とトンネル周辺地山の挙動を関連づけていくことが必要と思われる。

参考文献 1) 岡野成敏, 松尾勝弥, 野村貢, 小原勝巳, 山地宏志; トンネル切り羽に打設された長尺ケーブルボルトと地山挙動の相関に関する考察, トンネル工学研究論文・報告書 VOL.6 1996