

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 CONSIDERATION OF THE RELATIVE BEHAVIOR BETWEEN CABLE BOLTS AND ROCK MASSES INSTALLED INTO THE TUNNEL FACE

岡野成敏*, 松尾勝弥**, 野村貢*, 小原勝巳**, 山地宏志***

Shigetoshi OKANO, Katsuya MATSUO, Mitsugu NOMURA, Katsumi OBARA and Hiroshi YAMACHI

As the result of the increased importance of underground openings in traffic systems and/or energy systems, there is an increasing need for a rapid and safety tunneling method. The cable bolt is one of the capable and powerful supporting measure for its purpose. But the functional mechanism of cable bolts is very complicated. The mechanical behavior of rock masses is extremely complex. The strength and deformability of them entirely depends on the system of discontinuities, such as cracks, fissures, faults, and bedding characteristics along these discontinuities. It may be thought that installing the cable bolts makes the mechanical behavior of rock masses drastically changed. This is named 'Supporting Effect' in engineering sense. Hence, the supporting effect of cable bolt depends on the behavior of rock masses around the installed cable bolt. In this paper we discussed the relative behavior between rock masses and cable bolts on the basis of the result of field measurement. The effect of cable bolting also discussed.

Keywords: cable bolt, field measurement, relative behavior,

1. はじめに

鉱山の分野において用いられてきた、ケーブルボルトを土木のトンネルにおいても導入しようとする試みが、近年、行われている。例えば、トンネル掘削前の事前補強や、トンネル鏡ボルトの長尺化等は顕著な効果を、力学的にも、また施工サイクルの面からも期待し得るであろう。ところが、その設計の基とすべきケーブルボルトの作用機構や支保効果は詳らかでなく、準拠すべき事例も至って少ない現状にある。

筆者らは、小島信濃-木崎(停)線木崎湖トンネル貫通点において比較的長尺(20m)のケーブルボルトを鏡ボルトとして採用し、比較的長期にわたる挙動観測を実施し、いくつかの興味ある知見を得た。本論文は、この計測結果より得られたケーブルボルト挙動を地山との相互作用、特に地山不連続面挙動との相関において論じたも

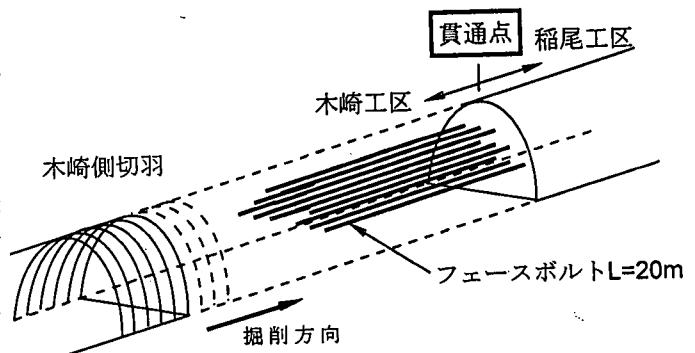


図1 ケーブルボルト打設概要

*正会員 三井建設(株)土木本部土木技術部

**正会員 飛島建設(株)土木本部技術部

***正会員 三井建設(株)技術本部技術研究所

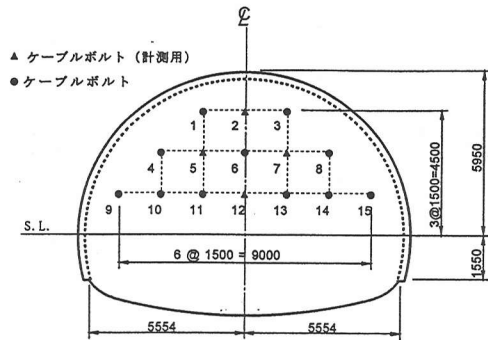


図2 ケーブルボルト打設パターン図

表1 ケーブルボルトと定着材の緒元

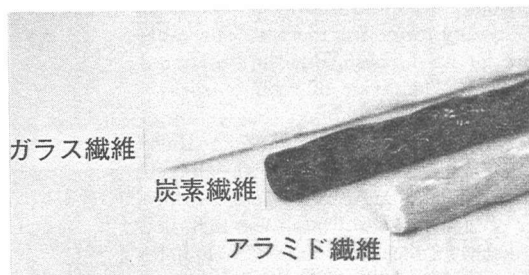


写真1 打設したFRP ケーブルボルトの外観

ケーブルボルト			定着材	
母材	材質	ガラス	削孔機械	ジャンボHD-90
	形状	組紐状	ロッド径	28mm
	呼び径	φ15mm	削孔ビット径	65mm, 75mm(計測孔)
定着材	W/C	60±3%	注入ポンプ	連続線リキサーポンプ
	Pポート値	10sec	足場	テーブルリフター

のである。

2. 鏡留めケーブルボルト施工の概要

鏡留めケーブルボルトの実施箇所は、土被りが14～18m(1.5D相当)と浅い沢地地形であり、地質は未固結であるが比較的締まった火山灰(シルト混じり砂)が連続して分布し、顕著な亀裂は確認されないが、鏡の滑落等が時折発生するため、潜在的な不連続面が存在するものと考えられた。このため、地表面沈下抑制、並びに鏡面保持のため注入式鋼管先受け工法と鏡留めケーブルボルト工法の併用が適切と判断された。

図1にケーブルボルトの打設概要図を示す。図に示すように、ケーブルボルト打設位置はトンネル到達店と一致したため、先達した稲生工区側の鏡面より打設することとし、木崎工区側は打設期間中も掘削を継続することとした。ケーブルボルトの打設パターンは図2(a)に示すように、トンネル軸を中心に1.5m間隔で対称とし、上半盤に三段、計15本の打設を実施する。打設長は20mとし、トンネル勾配、及び定着材の充填性を考慮し木崎工区側に向け4°の向上勾配で削孔するものとした。尚、削孔径は65mmとする。

また、使用したケーブルボルトはφ15mmのガラス繊維製組紐ケーブルボルトとし、定着材にはカルシウムアルミネート鉱物を成分とする速硬性セメントを使用した。ケーブルボルトと定着材の緒元を表1に、またケーブルボルトの外観を写真1に示す。

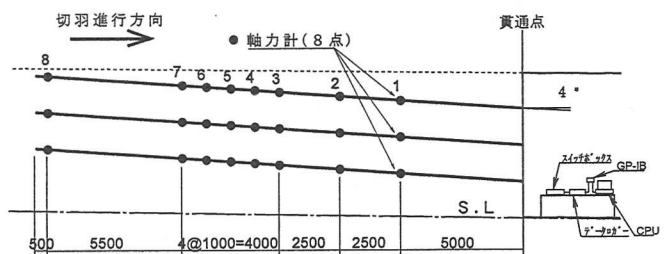


図3 トンネル軸方向の軸力計測位置

表2 実施計測項目の一覧

3. 計測の概要及びその結果

3.1 計測項目並びに計測概要

計測の実施に際しては、その目的によって地山挙動観察と、ボルト挙動観察とに峻別し、その各々について表2に示す項目を各々実施した。計測頻度は、木崎側工区の掘削進行に応じ適宜としたが、1掘進長(1m)毎に最低一回の計測を実施することとした。尚、図3にトンネル軸方向のケーブルボルト軸力測定位置を示す。

地山挙動観測			
計測項目	計測方向	計測器	計測点数
地表面沈下	縦断方向	光波測量器	25
地中傾斜	横断方向	傾斜計	45
地中変位	横断方向	エクステンソメータ	24
地中変位	縦断方向	エクステンソメータ	6
切り羽表面変位	—	変位計	5
内空変位	横断方向	光波測量器	78
ボルト挙動計測			
計測項目	計測方向	計測器	計測点数
ボルト軸力	縦断方向	起歪計	32

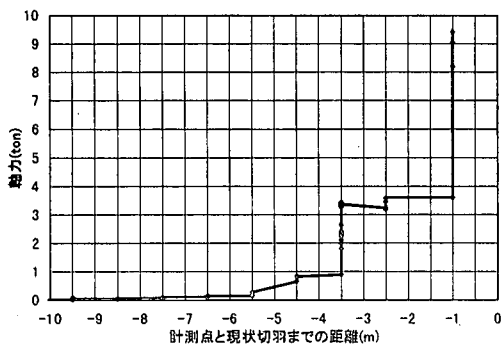


図4 ボルト軸力の発生と切羽距離との関係

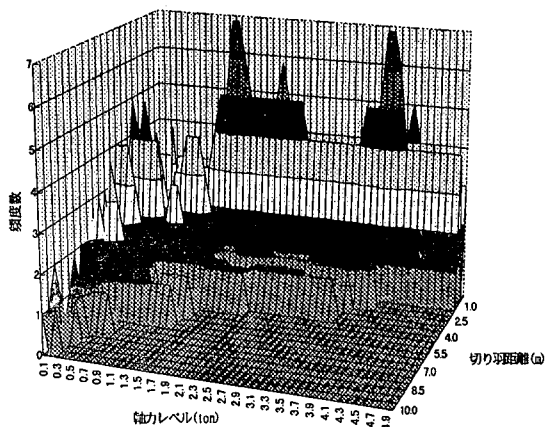


図5 切羽距離による軸力レベルの発生頻度

3.2 計測結果とその考察

ここでは、ケーブルボルト挙動と地山挙動の相関を論ずる上で最も重要なケーブルボルト軸力測定結果に焦点を当て、その特徴と問題点に考察を加える。

図4に典型的なボルト軸力の発生パターンを示す。図4はケーブルボルト上の一つの計測点に着目し、その計測点と計測時の切羽距離を横軸に、発生軸力を縦軸に取り、切羽の接近に伴う任意点の軸力発生状況を示したものである。図4に示すように当該計測点では切羽が5.5m付近に接近した付近から軸力が発生し始め、その後切羽の接近に応じ、軸力が増大してゆく。また、切羽距離3.5mと1.0mで切羽を停止したが、この停止期間中にも、軸力は増大している。これは地山変位が時間依存的に増大するに伴い、軸力が発生するものと考えてよいであろう。

このような切羽距離と軸力発生との関係を今回計測した全計測点についてまとめ、各切羽距離における軸力レベルの頻度を図5に示す。今、軸力発生初期を0.1ton以上とすれば、敏感な計測点では10m付近で軸力が発生し始めるが、全体としては7m以内に接近した時点から軸力が発生し始め、1tonを超える軸力は4~5mに接近してから発生し始め、2m以内からは級数的に軸力が増加してゆく。このように、切羽の接近に伴いケーブルボルト軸力は徐々に増大し、切羽掘削の影響は7m程度から発現し始め、2m程度に接近した時点で顕著な影響を及ぼすことが明らかとなった。

次に、掘削に伴うケーブルボルトの切断によってケーブルボルトがどのような挙動を呈するかを考

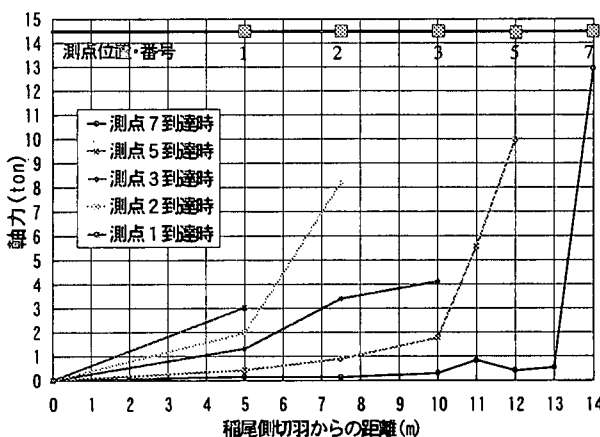


図6 切断に伴う軸力分布の遷移 (Mode_A)

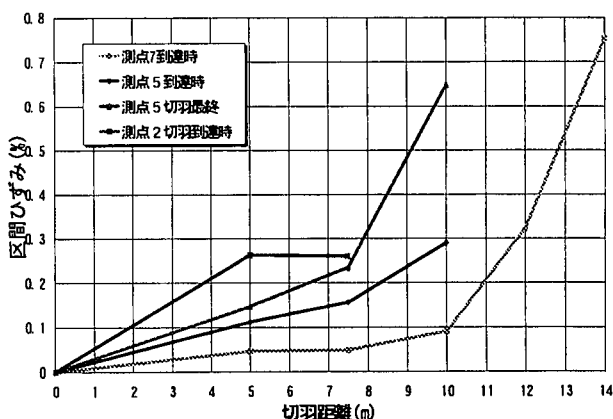


図7 切断に伴う地山区間ひずみの遷移

察する。図6は切断に伴う発生軸力分布の変化を示すため、横軸に稲尾側切羽からの距離をとり、それに対応する位置の軸力値をプロットした図である。ここで示した軸力分布の遷移は最も典型的な遷移パターンであり、以下では

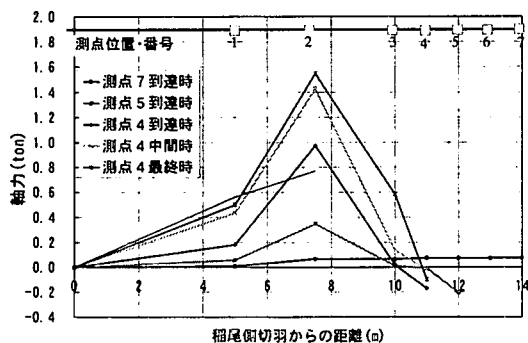


図8 切断に伴う軸力分布の遷移 (Mode_B)

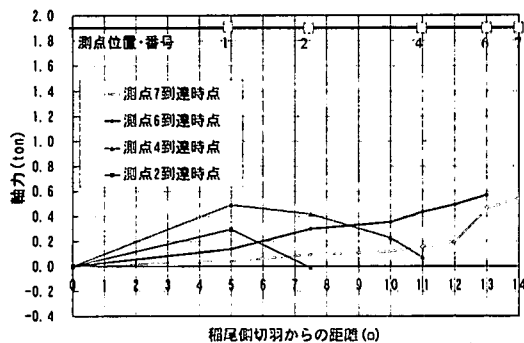


図9 切断に伴う軸力分布の遷移 (Mode_C)

Mode_A と呼ぶ。図に示すようにこのモードの特徴は、指数級数的な軸力の分布形状が、ケーブルボルトの切断に伴って、順次、後方に遷移してゆく点にある。すなわち、切り羽掘削による切断とともに、切り羽の影響圏が後方へ移動し、これに対応するケーブルボルト部分が、順次、切り羽掘削に影響された挙動を呈するものと考えてよからう。この軸力分布形状の遷移を、図7に示すボルト切断に伴う地山区間ひずみの分布形状の遷移と比較すれば、地山のひずみ分布の遷移と良好な相関を保つことが窺え、ケーブルボルトと地山がその共同に相互に影響を及ぼすことが知れる。

このように、Mode_A が地山挙動と良好な相関を示すのに対し、図8に示す Mode_B は地山挙動との相関が明確でない。この挙動モードの特徴は、図に示すように最大軸力が切羽面ではなく、ケーブルボルト中央部付近に発生し、しかも切羽掘削に関わらず同一点にあることにある。さらには、図9に示すような Mode_A と Mode_B が混合された軸力分布の遷移形態も計測された。すなわち、当初、切羽面に最大軸力が発生していた分布形態 (Mode_A) が、切羽の進行に伴って、最大軸力がケーブルボルト中央部付近に発生する分布形態 (Mode_B) に転移する。このようなケーブルボルト挙動を以下では Mode_C と呼ぶ。

この二つのケーブルボルト挙動、すなわち Mode_B と Mode_C に関してはトンネル軸方向の地山変形挙動との相関が明らかでない。しかし、ケーブルボルトは、それが打設された地山挙動との相互作用によって初めて何らかの挙動を呈すものであり、単独で何らかの挙動を呈すものとは考えられない。次章ではここで計測された三つのケーブルボルト挙動を統一的に論ずべく、考察を行う。

4. ケーブルボルトと地山の相互作用に関する考察

前章に示した計測結果をもとに、ケーブルボルト挙動、周辺地山挙動、及びその相互作用に関する考察を行う。考察のために次のような評価式を導入しよう。すなわち、図10に示すケーブルボルト微小部分の力の釣り合いは以下のように示される。

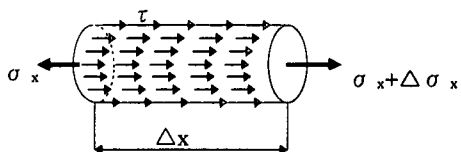


図10 ケーブルボルト微小部分の釣り合い

$$-\sigma_x \pi a^2 + (\sigma_x + \Delta\sigma_x) \pi a^2 + \tau \cdot 2\pi a \cdot \Delta x = 0 \quad (1)$$

ここに、 σ_x : ケーブルボルト軸方向に作用する応力
 τ : ケーブルボルト周辺に作用する付着応力
 a : ケーブルボルトの等価半径

式1より次の簡単な微分方程式を得る。

$$\frac{\Delta\sigma_x}{\Delta x} = -\frac{2}{a} \tau \quad (2)$$

ケーブルボルトに作用する軸力は、式2にボルト断面積を掛け、定着長さで積分することで求められる。すなわち、

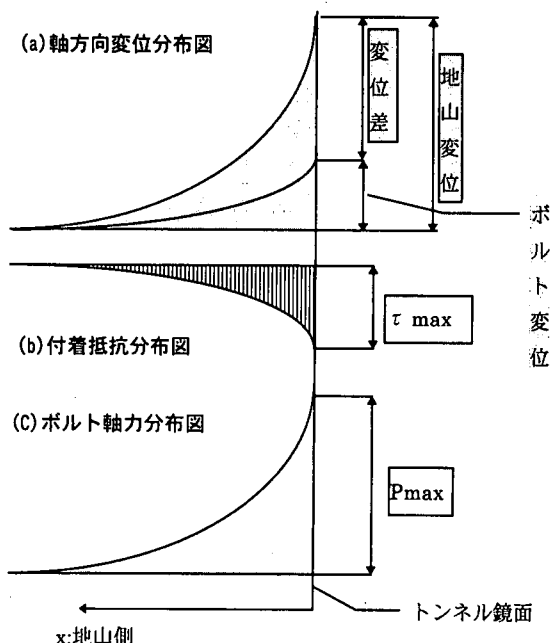


図 11 連続体地山における変位、付着抵抗、及び軸力分布の模式図

$$p = \pi a^2 \int_0^l d\sigma = -2\pi a \int_0^l \tau dx \quad (3)$$

(3)

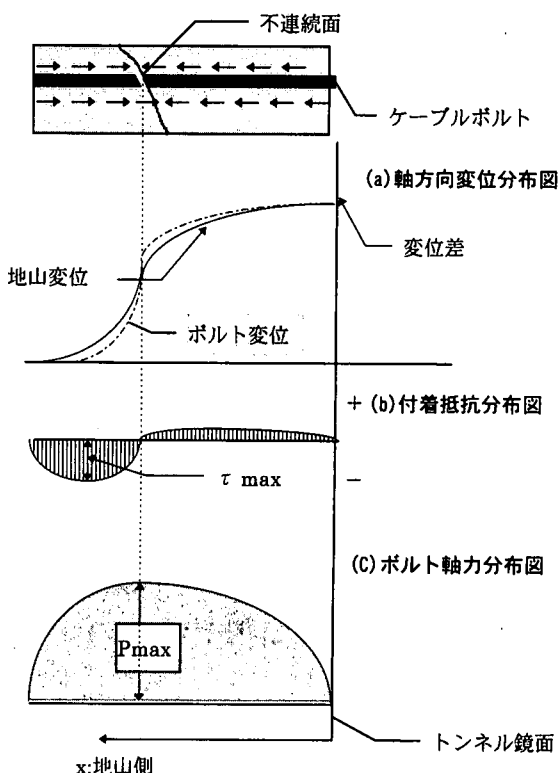


図 12 亀裂部における変位、付着抵抗、及び軸力分布の模式図

すなわち、ボルトに発生する軸力の大きさはボルト周辺に作用する付着抵抗力の和と等しく、その方向は逆向きとなる事が分かる。この関係をもとにケーブルボルトの挙動を考えてみよう。いま、地山が連続体的な挙動を呈する場合、トンネル軸方向の地山変位は図 11(a)に示すように、トンネル鏡の内側に変位する。これに伴ってケーブルボルトも変位するが、ケーブルボルトのトンネル軸方向の剛性は地山よりも大きいために、ケーブルボルトは地山変位を抑制するよう働き、地山とケーブルボルトの境界面には摩擦抵抗力が発生する。この摩擦抵抗の大きさは地山とケーブルボルトの変位差、すなわち地山とケーブルボルトの剛性差に比例し、その向きはトンネル鏡面を地山側に引き寄せるよう働く。その分布は図 11(b)のように模式的に表せる。この摩擦抵抗力の分布から、計測されるボルト軸力分布を式 3 に従って求めれば、図 11(c)の様にトンネル鏡面において引張の最大軸力を示し、地山深度方向に漸減してゆく分布が得られるであろう。これは、前章において示した Mode_A の軸力分布に他ならない。

これに対し、ケーブルボルトが不連続面を貫いて打設されている場合を考えよう。この場合、不連続面より鏡側の岩盤は剛体的に挙動するが、ケーブルボルトが打設されているために、この岩盤は不連続面より地山側にある岩盤に縫い付けられる。従って、地山変位とボルト変位は不連続面位置で一致し、それより鏡側ではボルト変位が若干卓越し、地山側では地山変位が卓越する(図 12(a)参照)。このため、図 12(b)に示すように付着抵抗分布は不連続面を境にその方向が逆となる。この摩擦抵抗力の分布から、計測されるボルト軸力分布を式 3 に従って求めれば、図 12(c)の様に不連続面位置で引張の最大軸力を示す双曲線型の軸力分布が得られる。これは、前章において示した Mode_B の軸力分布に対応するものと考えられよう。

この知見をもとにすれば、図 9 に示した Mode_B の軸力分布遷移は次のようにまとめることができよう。すなわち、トンネル切羽が測点 7 (切羽距離 14m) 付近にある時点では、測点 2 付近にあると推定される不連続面が顕著な挙動を呈せず、測点 5 (切羽距離 12m) に切羽が近づいた時点で何らかの不連続挙動(滑動や開口等)を呈し始め、この不連続挙動を抑制するようケーブルボルトは挙動を開始し始める。その後、掘削の進展に伴って不連続面より鏡側の定着長が、順次、短くなってゆくために軸力値は小さくなってゆく(これは式 3 において積分長 l が小さくなることに対応する)。さらに、想定される不連続面が存在するであろう位置(切羽距離 8m)を過ぎると、その軸力分布は掘削による影響を受けた Mode_A へと再び転移する。

さらに図 10 の混合挙動 Mode_C についても、上述の議論を敷衍し次のようにまとめられる。すなわち、測点 6 (切

羽距離 13) 付近までは、切羽掘削による影響が卓越する Mode_A の挙動を呈するが、切羽が測点 4 (切羽距離 11m) 付近に達した頃より、測点 1 付近に存在するであろう潜在的な不連続面がその挙動を呈し始めたがために、ケーブルボルトの挙動は Mode_B に転移した。

このように、全く異なるメカニズムで挙動すると考えられた二つのケーブルボルト軸力計測結果は、ケーブルボルト微小部分の釣り合い条件から与えられる簡便な式で統一的に論じることが明らかとなった。ここで用いた釣り合い条件はケーブルボルト線材と定着材の区別を明確とせず、一体として挙動する仮想のケーブルボルト支保を想定している。実際のケーブルボルトは二つの境界面、すなわちケーブルボルト線材－定着材境界及び定着材－地山境界を有し、微視的にはより複雑な挙動を呈するであろう。しかし、ここで論じたように計測結果を適切に評価し得るという事実から、工学的な一次近似としては十分なものと考えられよう。

5. おわりに

トンネル到達点で実施した鏡留め長尺ケーブルボルトの計測結果をもとに、その挙動を釣り合い条件によって評価した。その結果、簡便な式で十分にその挙動を評価しうること、及びケーブルボルトの有効性を検証することができた。今後この成果をもとに、鏡留めケーブルボルトの設計手法や施工管理手法を提案してゆく方針である。

謝辞：当該の鏡留め長尺ケーブルボルトの施工、及び計測の実施にあたっては三井建設(株)角屋裕志様、飛島建設(株)水越裕一様、(株)東亜測器藤田清一様をはじめとする皆様にご協力、並びにご尽力いただきました。心からの謝意を述べ、この小論の結びとさせていただきます。