

ロックボルト工品質の迅速評価技術

伊達 健介¹・山本 拓治¹・小泉 悠¹・横田 泰宏²

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

E-mail:koizumyu@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 北海道支店（〒060-0003 北海道札幌市中央区北3条西3丁目）

E-mail:yokotaya@kajima.com

山岳トンネル工法の主な支保材料であるロックボルトに関する研究開発は，充填材料や注入材料を含めて多方面で行われてきた．近年では，大土被りや膨張性を示す特殊地山，大量湧水の地山，都市部山岳トンネル工法，さらにトンネルの維持補修分野にまで適用範囲が拡大し，各分野におけるロックボルトの効果向上を目的とした研究も増加している．一方で，ロックボルト工の品質を確認する方法や，早期の補強効果を迅速かつ合理的に確認できる方法はいまだ少ないのが現状である．そこで筆者らは，モルタル定着式ロックボルトの有効接触率評価技術，ロックボルトプレートの表面塗装を利用したボルト軸力の可視化技術の開発に取り組んだ．本報告は，室内及び現場で実施した有効性検証試験とその結果について報告するものである．

Key Words : Rock bolt, quality assessment, anchorage quality, axial force

1. はじめに

支保技術や補助工法技術の高度化に伴って，わが国では，都市部の大断面トンネルや未固結の特殊地山であっても，山岳トンネル工法が採用されるようになってきた¹⁾．それと同時に，トンネル支保部材が果たすべき役割はますます重要となり，その施工品質を適切に評価・管理可能な技術の開発が求められている．

支保技術のうち，筆者らは，これまで長期にわたって材料や施工方法に大きな変化の無いロックボルト工を対象に，技術開発を進めてきた．本報告では，近年，筆者らが取り組んできたロックボルト施工管理技術²⁾について報告する．

1件目は，モルタル定着材式ロックボルトの有効接触率推定技術である．超音波をロックボルト端部に与え，検出される反射波形を分析することにより，ロックボルト～モルタル定着材間の有効接触率を推定する．第2章では，室内試験および現場試験の結果を示すとともに，多変量解析により有効接触率を推定する手法を提案する．

2件目は，ロックボルトプレートの表面塗装を利用したボルト軸力の可視化技術である．地山の押し出しによりロックボルト端部の軸力は増加するが，それに伴ってプレートから徐々に剥離し，縞状の模様を示す塗料を開発した．今回，この塗料が塗られたプレートを室内ならびに現場で試験し，併せてロックボルトの軸力計測を行

った．第3章では，その結果について報告する．

2. モルタル定着材式ロックボルトの有効接触率評価技術

(1) 開発の背景と目的

山岳トンネル工事では，定着材にモルタルを用いた全面定着方式のロックボルトが広く採用されている．しかしながら，亀裂や湧水が多い区間では，モルタルの逸散や流出により，ロックボルト～モルタル間の定着が不完全となり得る．このような場合，支保の強度不足や支保機能の長期安定性が阻害される．しかしながら，ロックボルトは地山内部に打設されることから，その施工品質を施工後に広範囲にわたって確認することは非常に困難であった．

そこで筆者らは，超音波をロックボルト端部に与え，検出される反射波形を分析することにより，ロックボルト～モルタル間の有効接触率を非破壊で推定できる技術の開発を進めてきた．

(2) ロックボルト有効接触率推定技術の概要²⁾

使用する装置を写真-1に示す．探触子からは，複数の周波数の超音波を同時に発信できる．また，特殊なLOGアンプを用いることで，微小な反射信号を増幅させ，

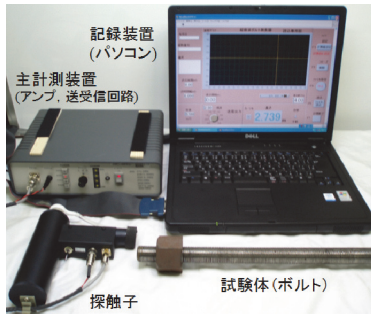


写真-1 使用する装置の外観

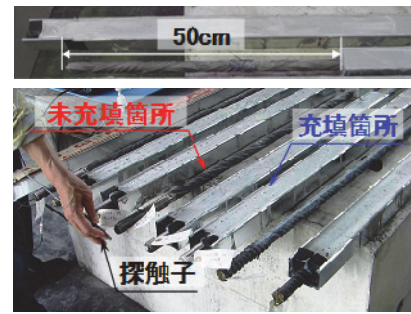


写真-2 室内試験状況

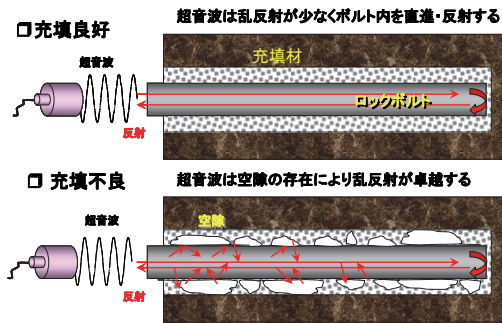
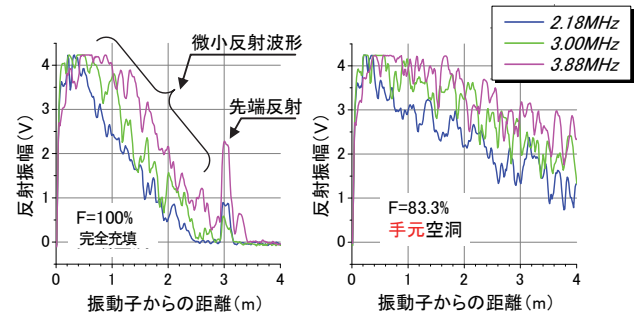


図-1 ロックボルト近傍での超音波伝播イメージ



(a) 完全充填 (b) 手元 50cmが空隙

図-2 室内試験結果

反射波形を記録装置で記録できる。

ロックボルト～モルタル間の接触が良好な場合と不良な場合とで、超音波の伝播イメージの相違を図-1に示す。接触が良好な場合、超音波はロックボルト内を直進し、ボルト先端部で反射して手元に返ってくる。これに対し、接触が不良な場合、ロックボルト周辺の空隙によって乱反射が生じ、反射波形はより乱れたものになると考えられる。そこで、写真-2に示すように、溝形鋼内に長さ3.0mのロックボルトを設置し、ボルト周辺をモルタルで完全に充填した後、超音波反射波形を取得する室内試験を行った。さらに、硬化したモルタルをボルトの手元および先端から50cmずつ削り取っていき、その都度、超音波反射波形を取得した。完全充填時の反射波形と、ボルト手元50cm（全長に対して16.7%）が削り取られた状態での反射波形を図-2に示す。ロックボルトの手元が空くことで乱反射が卓越し、図-2 (b) ではボルト先端部での反射が捉えられていない。さらに、反射波形の負の傾きが小さくなり、反射波形とXY軸によって囲まれる面積が大きくなっていることが分かる。

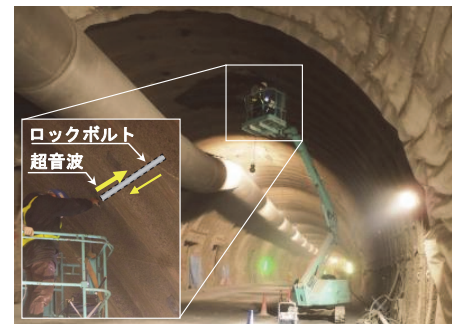
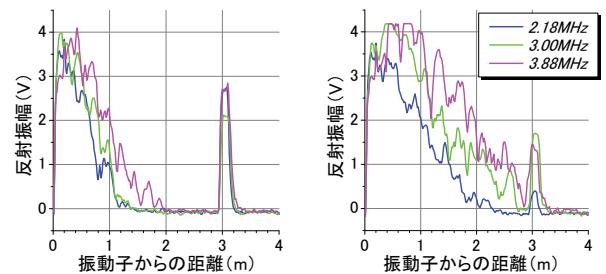


写真-3 現場測定状況



(a) 標準地質区間 (b) 湧水区間

図-3 現場試験結果

(3) 現場試験結果

本技術をAトンネル現場に適用した。同現場では、標準的な地質区間と、湧水が生じた地質区間とがあり、それぞれの区間で測定を行った。測定状況を写真-3に、両区間で取得された代表的な波形を図-3に示す。図-3 (a) は標準区間で取得された波形であるが、微小反射信号が小さく、各発振周波数で波形がおおよそ一致する。

一方、図-3 (b) は湧水区間で取得された波形であるが、微小反射信号が大きいことに加え、図-3 (a) に比較して反射波形の負の傾きが小さく、反射波形とXY軸によって囲まれる面積が大きい。さらに、乱反射の卓越により直進波が減衰することで、ロックボルト先端部での反

射が小さくなったものと考えられる。また、発振周波数ごとに波形の形状が異なった。これは、超音波の指向性が発振周波数ごとに異なり、その傾向の差が湧水区間のロックボルトにより顕著に現れたものと考えられる。前節で示した室内試験結果により得られた知見を踏まえると、図-3 (a) に示すロックボルトに対し、図-3 (b) に示すロックボルトの有効接触率は低いと推定される。その要因として、湧水によるモルタル流出の可能性が考えられる。

(4) 有効接触率推定方法の提案

室内及び現場試験の結果を踏まえ、有効接触率の差異は、主には反射波形の負の傾き、反射波形とXY軸によって囲まれる面積によって定められ、図-4に示すように、有効接触率の高いロックボルトほど反射波形の負の傾きが大きく、反射波形とXY軸で囲まれる面積が小さいと考えられる。このことから、各発振周波数 f で得られる波形の傾き a と面積 S を説明変数とし、有効接触率 F を目的変数とする多変量解析を行うことで、式 (1) を得て、これにより有効接触率を推定できると考えられる。なお、傾き a と面積 S については、0~3m区間において最も相関性の高い線形近似式を算出することとする。

$$F = C_1 \times f + C_2 \times a + C_3 \times S + C_4 \quad (1)$$

ここで、 C_i ：多変量解析から得られた定数である。

図-5は、得られた推定式を用いて、室内試験データを再入力し、算出される予測値と正解値を比較した結果である。この結果より、予測値と正解値には幾分ばらつきが見られるが、標準誤差は3.2%、相関係数は0.94であることから多変量解析により求められた推定式で、有効接触率の傾向を推定できると考えられる。

次に、現場測定データを用いて有効接触率を算出した結果について述べる。ここでは、室内試験結果から得られた推定式が現場でも同様に適用可能か検討を行った。比較的地質状況が良好な場所を選択し、現場で通常通りモルタルを充填させロックボルトを定着させたケース

(100%充填相当)と通常充填量の3/4 (75%充填相当)のモルタルを使用して定着させたケースを作成した。図-6は、推定式を用いて算出した予測値と現場で想定した有効接触率の比較結果である。これらの結果より、室内試験で得られた推定式に現場測定データを入力すると、有効接触率が想定値より高くなる傾向を示すことが分かった。この理由は、室内試験ではモルタルの周囲は拘束されていないのに対し、現場ではモルタルの周囲が岩盤により十分に拘束されており、微小反射波の発生が抑制される傾向にあることが一因と考察できる。そこで、式 (2) に示すように現場の拘束効果を表す補正係数として $\alpha=0.6$ を乗じると、想定した100%と75%の充填率が推

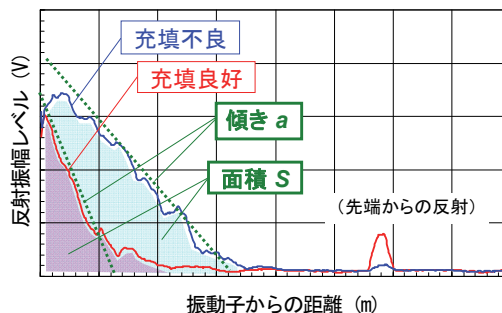


図-4 多変量解析に用いる説明変数

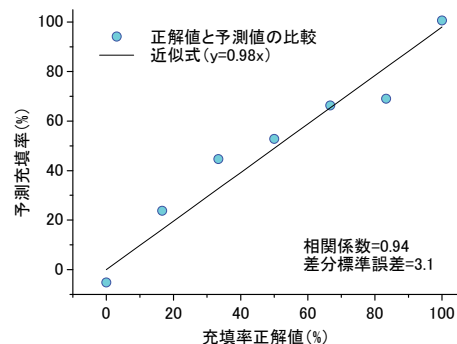


図-5 有効接触率の予測値と正解値の関係 (室内試験)

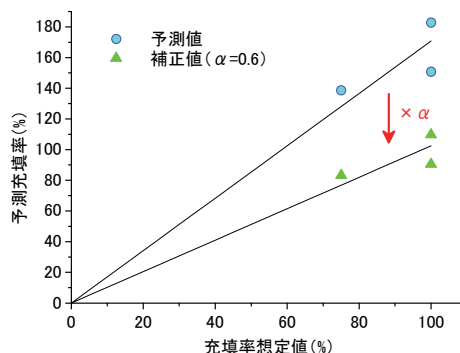


図-6 有効接触率の予測値と正解値の関係 (現場試験)

定できることを確認した (図-6)。

$$F_c = \alpha \times F_p \quad (2)$$

ここで、 α ：補正係数、 F_p ：有効接触率 (推定値)、 F_c ：有効接触率 (補正値) である。

上記のように多変量解析から得られた推定式に拘束効果を表す補正係数を用いることで、現場で施工されたロックボルトの有効接触率を推定できると考えられる。今後、様々な地質条件の現場で適用するためには、各現場において比較的作製が容易である室内試験と同様な完全拘束モデルと非完全拘束モデルからなるキャリブレーションモデルを作成しておくことが有効となる。

3. ロックボルトプレートの表面塗装を利用したボルト軸力の可視化技術

(1) 研究の背景と目的

掘削に伴う地山の押出しに対し、ロックボルト及びプレートは補強効果を発揮し、応力解放に対して抵抗し、地山変形を抑制する。押出し変位が著しい場合、写真-4に示すように、ロックボルト頭部に取り付けられたプレートはたわみ、その程度が大きい場合は目視によっても確認ができる。熟練した技術者は、このたわみによる押出しと補強効果の相関関係を推定し、現場で必要な対策に活用している場合も多い。しかし、押出しが弱い場合や、天端付近のプレートについてまで、そのたわみの程度を観察することは困難である。そこで、ロックボルトの軸力の増加、またプレートのたわみの増大に伴って、除々にプレート表面から剥離し、縞状の模様を示す塗料を開発した。この塗料をロックボルトのプレートに塗布し、室内および現場でその適用性を試験した。

(2) 室内試験結果

室内試験では、押出しの強い地山を想定し、高耐力ボルト用のプレート（材質S45C、150×150×9mm、中心孔径45mm）を使用した。背面には75mmの孔を中央に配置した受台を設置し、受台と反力壁の間にはラムチェアを挟んだ。反力壁の反対側にはセンターホールジャッキを設置し、図-7に示すように、ボルトを引っ張り込むように力を与えることで、周囲の地山が押出している状況を模擬した（JIS M 2506に準拠）。このときのプレートに塗布した塗料の剥離状況の一例を写真-5に示す。塗料は107kNで剥離し始め、191kNでは50～100mm程度の範囲に縞模様が拡大している。239kNでは縞が端部に達し、100～150mm程度の範囲に、さらに294kNでは150mm以上の範囲に拡大した。同試験を繰り返し実施した結果、±20kN程度のバラツキはあるものの、100kN付近で塗装が直径50mm以内の範囲で剥げ落ち、150～200kNでそれが直径50～100mm程度に拡大するとともに縞模様が生じることが分かった。そして、200～250kNで直径100～150mm程度、250kN付近以上で直径

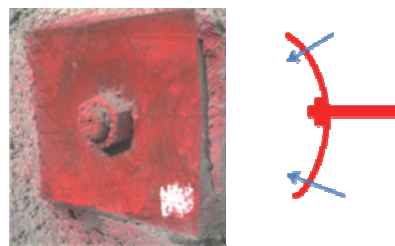


写真-4 ロックボルトプレートたわみ



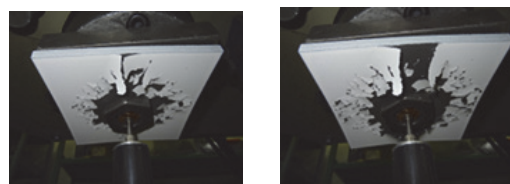
図-7 室内試験状況



(a) P=107kN

(b) P=191kN

→ 剥離範囲：50～100mm



(c) P=239kN

(d) P=294kN

→ 剥離範囲：100～150mm

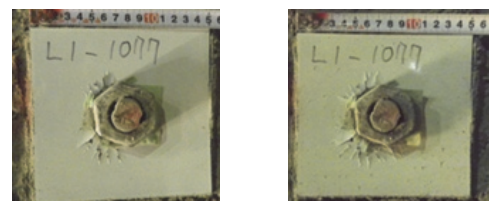
150mm 以上

写真-5 室内試験結果



(a) P=115kN

(b) P=131kN



(c) P=142kN

(d) P=185kN

写真-7 現場試験結果

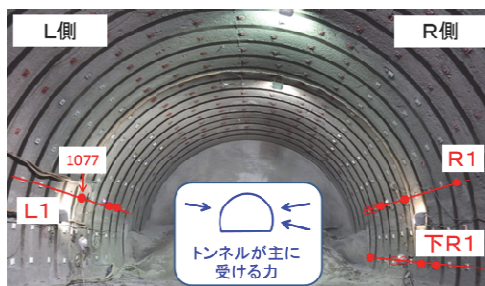


写真-6 プレート設置状況

150mm以上となることが分かった。

(3) 現場試験結果

室内試験により、縞模様の発生と荷重増加に伴う剥離範囲の拡大が確認できた。そこで、押出しの強い泥岩地山を掘削中のBトンネルにて現場試験を実施した。写真-7に示すように、B計測断面を含む区間の高耐力ボルト用プレートに、開発した塗料を塗布したプレートを多数設置した。

プレート設置後の観察結果を写真-8に示す。写真に示すプレートは、ボルト軸力計測位置に隣接する位置（同じ高さ）に設置されたものである。まず、115kNで縞模様の元となるひび割れが生じ、131, 142kNでひび割れ箇所が増えるとともに、ひび割れ発生範囲が直径50mm程度まで広がった。185kNでは直径50mmの範囲が少し拡大し、範囲内のひび割れの数も増大した。これにより、軸力が閾値を超えることで、縞模様の元となるひび割れが発生すること、荷重とともにひび割れ箇所が増し、割れの程度も大きくなることが確認できた。ひび割れ発生開始の軸力は室内試験と同じ100kN程度であり、荷重増大後の傾向も室内試験とよく整合した。ただし、室内試験よりは185kN付近での拡大範囲がやや狭かった。今後、データの蓄積によって、現場条件におけるロックボルト軸力と拡大範囲の関係を把握していく必要がある。

また、写真-7のようなひび割れ（縞模様）を生じた箇所は、写真-6に示すL1, R1, 下R1という3つの高さ位置に集中した。B計測でも、同じ高さ位置で曲げモーメントが卓越しており、写真-6中に矢印で示した向きで、トンネル全体が力を受けていることが確認できた。

以上より、本プレートを多数設置することで、トンネル全体がどのような力を受け、掘削に伴い、どの位置のロックボルトがどのように軸力を負担していくかということを、概略把握できることが示された。

4. まとめ

本報告では、ロックボルト工の施工の品質評価に関連して、筆者らが開発中の技術2件を報告した。

1件目のモルタル定着材式ロックボルトの有効接触率推定技術については、室内及び現場試験結果を示した後、多変量解析によりロックボルト～モルタル間の有効接触率を推定する手法を提案した。本手法を現場で適用するとともに、推定精度の検証・向上が今後の課題である。

2件目のロックボルトプレートの表面塗装を利用したボルト軸力の可視化技術については、プレートのたわみを観察することで、地山の押出しの程度、またそれに伴うロックボルトの軸力の増大がおおよそ把握可能という現場の知見をヒントに、プレートに塗布する塗料の開発を行った。この塗料をプレートに塗布し、その剥離度合いを観察することで、小さなたわみであっても、ロックボルトの軸力を概ね推測できることが分かった。

ロックボルト工は、吹き付けコンクリート、鋼製支保工とともに、山岳トンネルの標準工法で用いられる重要な支保部材であるが、筆者らは、設計・施工・管理の各段階で解決すべき課題が未だ多数残されていると考えている。今回、施工後の管理に関して2件の技術を報告したが、更なるロックボルト工の施工の品質向上を目指し、研究開発や現場検証実験を継続して行っていく所存である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，pp.201-233，丸善出版，2006。
- 2) 横田泰宏，山本拓治，伊達健介，森孝之：ロックボルト施工の品質向上技術に関する研究，土木学会論文集 F1（トンネル工学）特集号 Vol.68，No.3，pp.151-164，2012。

(2014.9.15 受付)

NEW QUALITY ASSESSMENT TECHNIQUES OF ROCK BOLTING

Kensuke DATE, Takuji YAMAMOTO, Yu KOIZUMI and Yasuhiro YOKOTA

Due to the development of tunnel supporting techniques, nowadays the NATM has been widely applied to the various types of ground conditions. This also implies that the quality assessment of tunnel supporting has become more important. In this paper, the authors report the two quality assessment techniques of rock bolting; the one is to investigate the anchorage quality between rock bolts and the surrounding mortar using ultrasonic wave. The estimation method of the anchorage quality is demonstrated based on the result of field tests. The other is to visualize the axial force of rock bolts using newly developed paint, which is coated on the plate of rock bolts. The results of laboratory and field tests show that the paint tends to be exfoliated with the increase of the axial force of rock bolts as expected.