

超音波反射法によるロックボルトの充填性診断法 に関する基礎的検討

森 孝之^{1*}・中畠 誠門¹・筒井 透²

¹鹿島建設株式会社（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²有限会社ツツイ電子（〒187-0004 東京都小平市天神町1-32-1）

*E-mail: moritakayuki@kajima.com

NATM工法における支保部材の一つであるロックボルトの定着方式として全面接着型が広く採用されており、地山に定着するための充填材として主にモルタルが使用される。地山岩盤は硬岩から軟岩までその性状が様々であり、充填材が岩盤亀裂に逸散するなどの不完全充填は長期安定性を阻害する要因となる。

ボルト打設完了後、充填材の充填状況を簡易に把握出来れば、支保部材の品質向上に貢献することができる。著者らは超音波計測を行う際に検出される微小反射信号を明確に表示する装置を試作し、ロックボルトを石膏拘束したモデル実験を行ったところ充填後の硬化に伴い微小反射信号の変化を明確にとらえることができたので報告する。

Key Words : NATM, rock bolt, filling performance, quantitative assessments, ultrasonic wave

1. はじめに

NATM工法における支保部材の1つであるロックボルトには全面接着方式が広く採用されている。しかし、孔荒れや逸散などで充填が不十分であると、支保の強度不足やボルトの腐食を誘発し長期安定性を阻害する。そこで、ボルトの充填状況を現場で簡易に診断できれば、支保部材の品質向上に大きく貢献できると考えられる。これまで、探傷システムでボルトの長さを測定する技術¹⁾に加え、超音波計測においてボルトと充填材の付着界面で発生する微小反射信号に注目して充填状況を把握する試みがなされている。本論文では、まず数値計算を行ってボルト内部の超音波伝播に関する基礎的な性状を把握した後、微小反射信号をより明確に検出できる装置を試作し、充填状況を模擬したモデル実験と現場計測実験を行って、充填状況診断方法の基本的な考え方を示した。

2. 音波伝播に関する理論検証

(1) 音波放射原理

微小反射信号の伝播に関する理論的検証を行う上で、鋼棒中の超音波が発信源から周辺部にどのように拡散し減衰するかを理解することは、装置の仕様設計や実験結

果の考察を行う上で有用である。そこで、ここでは音波放射原理について簡単に述べる。

図-1に示す微小部分 dS を点音源と考え、これが正弦波でピストン運動して半無限空間に対して音を放射するとき、音源からの距離 r の位置（点P）における速度ポテンシャル $d\Phi$ は以下のように表される。

$$d\Phi = \frac{\dot{V}e^{-jkr}}{2\pi r} dS \quad (1)$$

ただし、 k は波長常数、 $\dot{V}$ は dS の粒子速度ベクトルである。これより、平面振動子 S が振動するとき、放射波の速度ポテンシャル Φ は次式で表される²⁾。

$$\Phi = \frac{\dot{V}}{2\pi} \iint_S \frac{e^{-jkr}}{r} dS \quad (2)$$

上式は非線形であり厳密解を求めることはできないが、円形の振動子の中心軸に沿った音場については厳密解を得ることが可能である。一般には、後述の式(3)で近距離音場限界 L を求め、音場が複雑な近距離音場領域を避けて、その外側に広がる音場を近似的に扱うことが多い。

$$L = \frac{D^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{16} \quad (3)$$

ここで、 D はボルト径、 λ は波長である。近距離音場限界外側の中心軸上の音圧は距離に反比例して減少することが知られている。

(2) 音波放射の数値計算

ここでは、発信源近傍の領域を含む詳細な音場を得るため、振動子を $20 \times 20 \text{ mm}$ の角形とし、各軸方向について20点の格子点に分割して、シンプソン法による数値積分を行った³⁾。周波数変化に伴う音場の変化を調べるために3.66MHz、4.5MHz、5.0MHzの3周波数について計算を行った。これらの周波数は、本計測装置として試作した振動子が効率良く送受信できる動作周波数である。

図-1に示すように、鋼棒中心からの距離を x 軸、中心音圧を y 軸、振動子からの距離を z 軸にとり、計算結果を周波数ごとに表示したグラフを図-2に示す。(ただし、計算結果は中心軸との音圧差を縦軸にしたもの。また、各距離ごとの中心軸上の音圧で正規化しており、実際の音圧の分布は距離に反比例して減衰することになる。)

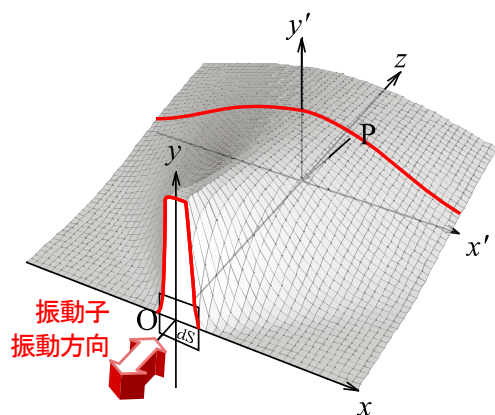


図-1 音場放射の模式図

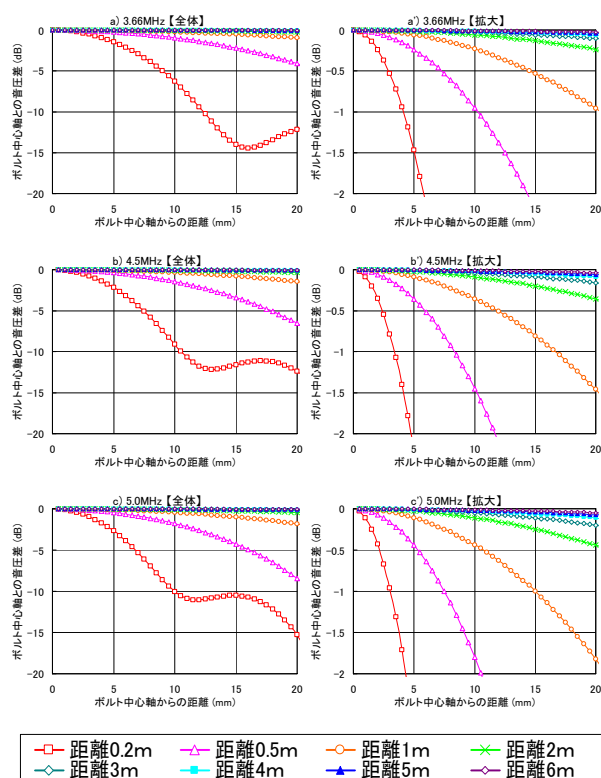


図-2 音場放射の数値計算結果

計算結果から次のことが読み取れる。

- 音圧は周波数が高くなるほど中心部に集中し、周波数が低くなるほど周辺部へ拡散する。
- 振動子から離れるにしたがって鋼棒内の音場分布は均一化し、振動子からの距離 2m の位置における鋼棒周辺と中心軸上の音圧の差は最大のケース (5.0MHz) でも 0.4dB 程度である。

これより、超音波の周波数が高いほど指向性が高く、振動子から離れるにしたがって鋼棒内の音場分布が均一になることが示された。すなわち、超音波の周波数がある程度低く設定した方が鋼棒周辺の影響を受けやすく、ボルトの充填状況を見分けやすいデータが得られると推測される。一方、振動子から離れるにしたがって全体的な音圧は減衰するため、ボルトの長さに応じて指向性を考慮した周波数帯域を選定する必要があると言える。

3. 充填状況に関する室内検証実験

(1) 概要

ここでは、全面接着方式で打設されたロックボルトを模擬した試験体と微小反射信号を明確に表示できる計測装置を使用して室内実験を行い、充填の有無による微小反射信号の違いを検証した。

実験装置の外観を写真-1に、装置の構成ブロック図を図-3に示す。送信パルスにバースト波を用いることにより、基本周波数の純度が高く、出力の大きい音波を発生させることができる。また、弱い受信信号レベルを細かく表示出来るLOGアンプを用いることにより微小な反射信号を検出可能な仕様とした。



写真-1 装置外観

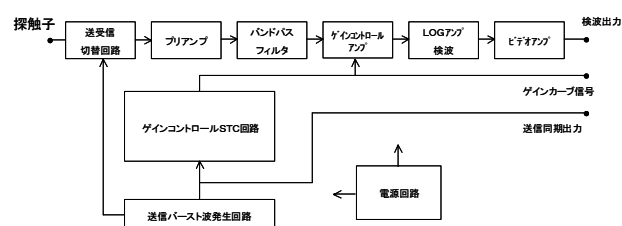


図-3 装置の構成ブロック図

(2) 手順

まず、完全未充填モデルとしてボルト長2m（実質2.1m）の先端剣先型TD24ボルト（写真-2a）で計測を行い、その後同一ボルトの周囲を石膏で固めたもの（写真-2b）を完全充填モデルとして計測した。石膏打設の際、半割にした塩ビ管とスペーサーを使用して未充填部が発生しないよう注意しながら充填した。なお、計測は3.66MHz、4.5MHz、5.0MHzの3周波数について行った。

また、ボルトの拘束状態を定性的に評価するために、石膏を打設した後の硬化過程において、反射波の計測を繰り返し実施して経時的な変化を観察した。

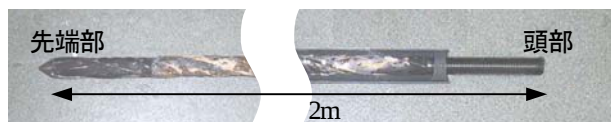


写真-2a 無拘束ボルト（充填なし）

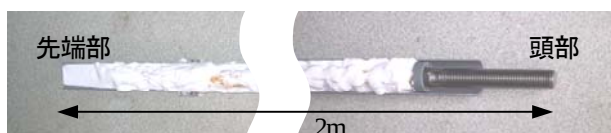


写真-2b 拘束ボルト（充填あり）

(3) 結果

a) 周波数による比較

図-4に各周波数における無拘束ボルト・拘束ボルトの反射波の計測結果を示す。横軸は振動子からの距離（音波伝播速度×反射時間2として計算）、縦軸は受信信号をLOGアンプを介して出力される相対振幅レベルである。無拘束ボルトでは表面反射と思われる信号は周波数によらず一定であるのに対し、拘束されたボルトでは、周波数が低いほど表面反射と思われる信号は大きい。これは、超音波の周波数を低く設定した方が、指向性が低く音場が拡散しやすいため、入力信号がボルト先端部に到達する前に鋼棒表面で反射して戻ってきやすいためと考えられる。この結果は、低周波数帯域ほど鋼棒周辺の影響を受けやすいとした数値計算結果とも一致する。

b) 拘束ボルトと無拘束ボルトの比較

周波数5.0MHzの計測結果について拘束ボルトと無拘束ボルトを比較した結果を図-5に示す。これより、無拘束ボルトでは微小反射信号が大きくなる結果が得られた。これは、無拘束状態ではボルトと充填材の付着界面で音波が比較的反射しやすいのに対し、拘束ボルトでは音波が透過しやすいためと考えられる。

c) 石膏硬化時間による比較

石膏の硬化過程における反射波の経時変化を図-6に示す（発振周波数3.66MHz）。時間経過に伴い微小反射信号は減少傾向にあり、硬化過程初期において鋼棒境界面で反射していた音波が、時間経過とともに鋼棒と充填材が一体化して透過し始めることを示すデータが得られた。

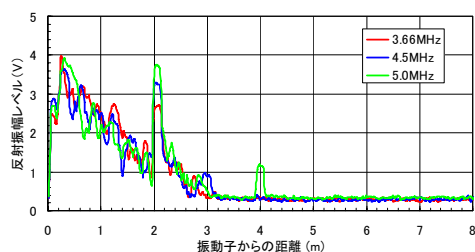


図-4a 無拘束ボルトの周波数による反射波の比較

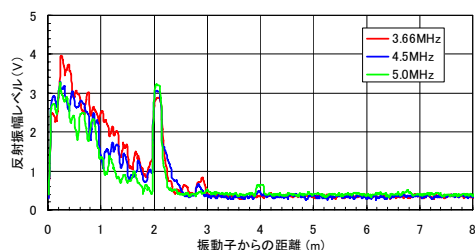


図-4b 拘束ボルトの周波数による反射波の比較

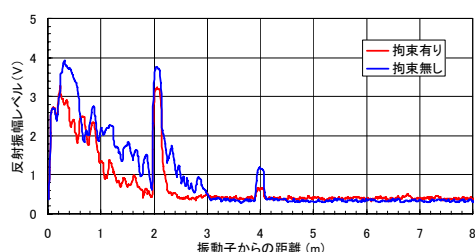


図-5 ボルト拘束有無による反射波の比較

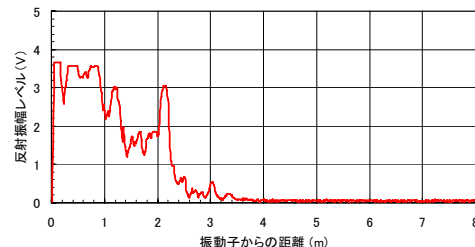


図-6a 打設後の経過時間による反射波の比較（4時間経過後）

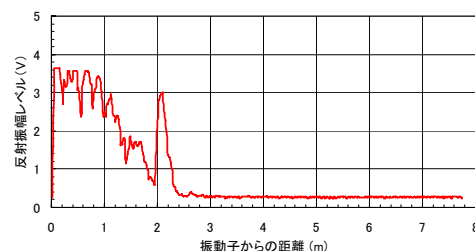


図-6b 打設後の経過時間による反射波の比較（30時間経過後）

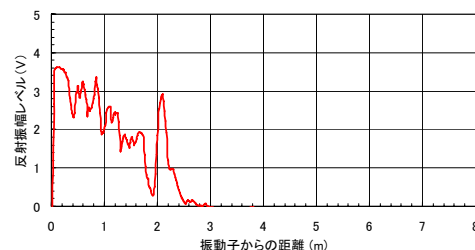


図-6c 打設後の経過時間による反射波の比較（6日経過後）

4. 充填状況に関する現場測定例と健全性評価方法

(1) 現場測定例

ここでは、全面接着方式でロックボルトを打設したトンネル現場において測定を行い、充填性の良・不良による微小反射信号の違いを調べた。その結果、充填が良好と判断される図-7aと不良と判断される図-7bの計測事例を得た。実際に充填性を確認していないため、判断の正誤は容易でないが、両者の微小反射信号には明らかな違いが見られ、充填部に何らかの差異があると推測される。

(2) 健全性評価方法

健全性評価方法の考え方として、微小反射信号の包絡線角度を求め比較する判定概念を図-8に示す。充填が良好なほど入射波は地山に透過伝播し、ボルト周面での反射は小さくなるため、同図に示すように反射波の分布は下側に描かれる。これに対し、充填が不良で空隙があるほど入射波はボルト周面で反射が顕著になり、同図に示すように反射波分布は上側に描かれる。このように、充填状況について完全充填と未充填の2つの標準曲線を作成しておくことで、実現場においてボルトの健全性の判定に利用できる可能性がある。ただし、健全性判定のための標準曲線はボルトの種類・地山・充填材によって異なることが考えられ、今後検討すべき課題である。

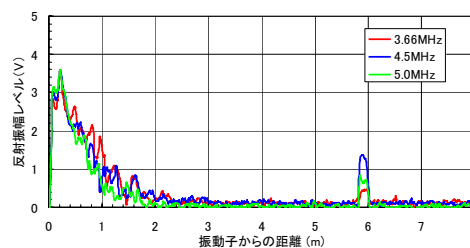


図-7a 現場測定例（充填良好と考えられる事例）

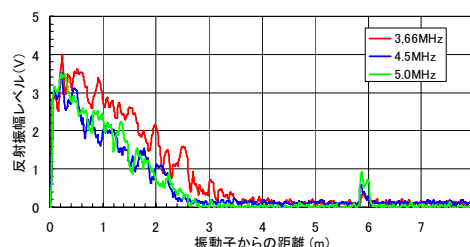


図-7b 現場測定例（充填不良と考えられる事例）

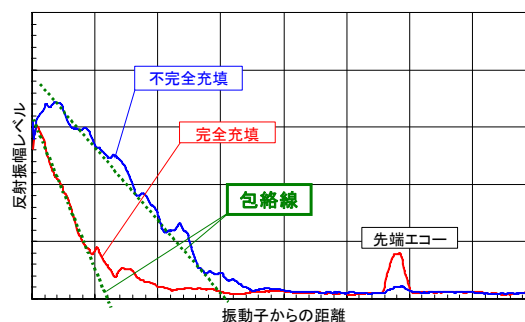


図-8 ロックボルトの充填状況判定概念図

5. 終わりに

ロックボルトの充填健全性評価を目的として、超音波反射に関する基礎実験を行った。この結果、微小反射信号強度は充填状況に対応しており、包絡線を定めることでボルトの健全性を判定可能と考えられる。今後は、実証試験等を実施してより詳細な分析を行い、メカニズムの解明および精度向上に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 藤原鉄朗, 松山公年, 金本康宏: ロックボルトおよびグラウンドアンカー長さ計測技術の開発, こうえいフォーラム第12号, 2004.
- 2) 実吉純一他監修: 超音波技術便覧新訂版, pp.23-27, 日刊工業新聞社, 1991.
- 3) 赤坂隆: 数値計算, 応用数学講座第7巻, pp.176-185, コロナ社, 1973.

FUNDAMENTAL STUDY ABOUT THE DIAGNOSTIC TECHNIQUE OF INSTALLATION CONDITION OF ROCK BOLT.

Takayuki MORI, Makoto NAKAJIMA and Tohru TSUTSUI

The rock bolt, which is one of the support member in NATM, the full-bond type being adopted usually and mortar is mainly used as a filler for installation to rock ground. If the filling condition of bolt can be simply estimate, it can contribute to the improvement in quality of support. Authors made the prototype measuring equipment which displays clearly the minute reflective signal detected in ultrasonic measurement, and tried the model experiment using the rock bolt which hardened around with gypsum. Consequently, authors could catch the change of minute reflective signal clearly. This paper reports the result of a fundamental experiment and the proposal of future inspection technique.