

衝撃弾性波法によるロックボルト工長さおよび定着材の非破壊検査方法

住友建設（株）技術研究所 正会員 松元香保里
住友建設（株）技術研究所 正会員 藤田 学
住友建設（株）東京支店 青嶋寿夫
住友建設（株）東京支店 正会員 高橋 浩
住友建設（株）技 術 部 桑原秀樹

1. はじめに

日本道路公団では平成9年の「トンネル施工要領（本体工編）」の改訂に伴い、「ロックボルト工長さ検査試験方法」¹⁾を新たに規定した。これは、超音波探傷器を用い、発信された超音波のロックボルト先端からの反射波を測定し、反射波の位置からロックボルト長（4m 以下）を測定するものである。

これまでに著者らは、衝撃弾性波法を用いたロックボルト工長さの非破壊検査の適用性を確認するため、模型試験および現場試験を実施し、ボルト先端が剣先形状であっても 6m 以下であれば、卓越振動数と弾性波の伝播速度から長さが判定できることを確認している²⁾。トンネルロックボルト工では、ボルト工長さの確保とともに定着材を確実に充填することが、構造物の品質を確保する上で重要であり、そのためには、定着材の充填状況に関しても非破壊的に検査する手法の確立が必要と考えられる。今回、衝撃弾性波法を用い、ロックボルト工の定着材の充填性評価に関する検討を行ったのでここに報告する。

2. 評価方法

本手法では、パワースペクトル図より読み取られる卓越振動数と仮定伝播速度から弾性波の反射位置を特定し、ロックボルト工長さおよび定着材の欠陥位置を検出する。卓越振動数と弾性波の反射位置の関連付けは、以下の考えに基づいて行っている。

図-1 のようにロックボルト頭部から弾性波を入力すると、弾性波は伝播速度 V でボルト中を伝播するが、ボルト先端や欠陥部などの境界面において反射するため、反射位置に起因した卓越振動数 f が現れる。この卓越振動数 f と反射距離 L の関係は式(1)で表すことができる。

$$f = V/2L \quad (1)$$

しかしながら、反射の影響は部材寸法と波長の影響を受けるため、実際に卓越する振動数は式(1)で求められる振動数の整数 n 倍となる。従って、卓越振動数 f と反射位置 L の関係は式(2)で表すことができる。

$$f = n \times V/2L \quad (2)$$

ここで、伝播速度 V には事前の予備計測などで得られる仮定値を用いる。

これまでに実施した模型試験および現場試験より、ボルト中を伝播する弾性波の伝播速度は、その形状には依存せず、定着材の充填状況の影響を受け、定着材が充填された場合で約 4650m/s、定着材が未充填の場合で約 5150m/s と計測されている。また、式(2)より反射距離 L が短いほど卓越振動数 f は高くなることが分かる。即ち、ボルト先端が最も遠い反射距離であるので、観測される卓越振動数の内、最も低い振動数が先端からの反射に起因した卓越振動数となる。従って、最小の卓越振動数とロックボルト工長さを用いて伝播速度を逆算し、他の卓越振動数に関する反射距離を求めれば、評価精度を向上させることができる。

3. 模型試験結果

定着材の充填性評価を目的とした模型試験を、日本道路公団上信越自動車道日暮山トンネル東工事において実施した。試験対象は、先端が剣先形状の異形ロックボルト D25、 $L=3\text{m}$ とした。ボルト全体、または一部を鋼製シー

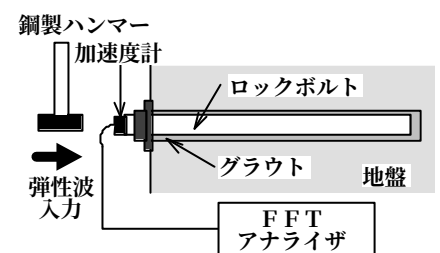


図-1 試験方法

ス（内径 36mm）と止水材で覆い空隙部を確保した試験体を作り、これを通常のボルトと同様に削孔内にセットし、定着材を充填することで人工的な欠陥（空隙）部を有する模型試験体を製作した。模型試験体を図-2

に、試験水準を表-1 に示す。

試験は、図-1 のようにボルト頭部に圧電型加速度計を取り付け、打撃治具を介して銅製ハンマー（784g）により衝撃弾性波を入力し、この時の加速度波形を計測した。加速度データより得られたパワースペクトルを図-3 に示す。

1) ケース：3-0 卓越振動数は、1531Hz および

3063Hz と読み取られる。両固有振動数は、ほぼ整数倍の関係にあることから、同じ反射位置に起因した固有振動数であると推定できる。式(2)において、伝播速度を定着材充填時の $V=4650\text{m/s}$ と仮定し、それぞれ $n=2$ および 4 とすると、ともに $L=3.04\text{m}$ となる。これより、ボルト長は 3m で、欠陥はないと判断できる。

2) ケース：3-1 卓越振動数は、828Hz、1593Hz、2313Hz と読み取られ、ほぼ整数倍の関係にあることから、同じ反射位置に起因した固有振動数であると推定できる。また、振動数は 3-0 に比べやや高いことから、伝播速度を定着材未充填時の $V=5150\text{m/s}$ と仮定し、式(2)において $f=828\text{Hz}$ 、 $n=1$ とすると $L=3.11\text{m}$ となる。これより、ロックボルト工長さは 3m であり、定着材は充填されていないと推定される。ここで、 $L=3\text{m}$ として伝播速度を逆算すると、 $V=4968\text{m/s}$ となる。この値を用いて、 $f=1593\text{Hz}$ および 2313Hz に関して、それぞれ $n=2$ および 3 としてボルト長を評価すると、 $L=3.12\text{m}$ 、 3.22m となる。

3) ケース：3-2 卓越振動数は、906Hz および 2484Hz と読み取られるが、整数倍の関係にないことから、独立した反射位置に起因した固有振動数と推定できる。式(2)において、伝播速度を定着材未充填時の $V=5150\text{m/s}$ と仮定し、 $f=906\text{Hz}$ 、 $n=1$ とすると、 $L=2.84\text{m}$ となる。ボルト工長さは 3m であると推定できる。ここで、 $L=3\text{m}$ として伝播速度を逆算すると、 5436m/s となる。この値を用いて、 $f=2484\text{Hz}$ 、 $n=1$ として反射位置を計算すると $L=1.09\text{m}$ となる。これは、模型試験体における欠陥部の境界位置 $L=1.12\text{m}$ とほぼ一致する。

以上より、卓越振動数と伝播速度から、ボルト長および欠陥位置の定量的な評価が可能であることが分かる。

4. まとめ

ロックボルト工長さおよび定着材の充填性評価に関して、衝撃弾性波法を用いて非破壊的に検査することを試みた。その結果、卓越振動数に着目することで弾性波の反射位置を特定し、ロックボルト工長さおよび欠陥位置を評価可能であることが分かった。本評価方法では、弾性波の伝播速度は推定する必要がある上、評価精度に与える影響が大きい重要な要素である。今後、伝播速度の推定方法に関してさらに検討を加えるとともに、より高い精度でロックボルト工長さと定着材の充填性を評価できるシステムを構築することを考えている。

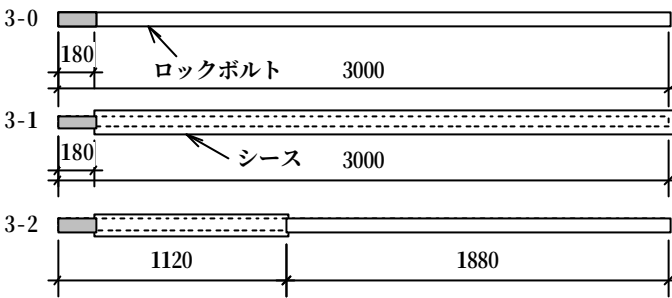


図-2 模型試験体 (単位：mm)

表-1 模型試験水準

ケース	ロックボルト長(mm)	未充填長さ(mm)	未充填位置
3-0	3000	0	なし
3-1	3000	2855	全体
3-2	3000	940	手前

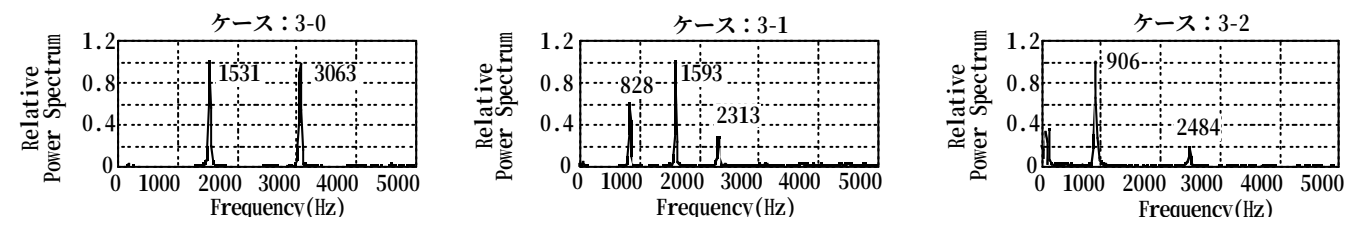


図-3 加速度波形とパワースペクトル図

【参考文献】

1) 日本道路公団：日本道路公団試験方法 第7編トンネル関係試験方法、(1997)

2) 松元他：衝撃弾性波法を適用したロックボルト工長さ検査試験方法、土木学会第54回年次学術講演会、第VI部門、pp415-416 (1999)