

超音波による高力ボルトの遅れ破壊調査事例

(株)コンクリート診断 非会員 青柳圭祐

開発技建(株) 正会員 ○ 近藤 治

1. はじめに

1980 年以前に建設された鋼橋では、部材の連結に F11T の高力ボルトが使用されている場合があり、ボルトの遅れ破壊による破断等が見つかることがある。鋼材に生じた亀裂の検出には、非破壊試験の超音波探傷試験がよく用いられ、施工時の品質管理用途では溶接部の超音波探傷検査や、あと施工アンカーボルトの長さ測定などが広く普及している。しかし、維持管理用途での活用はあまり進んでおらず、橋梁の高力ボルトに対する超音波探傷は一般的にそれほど普及しているとは言えない。これは、超音波で何を調査可能かが十分認知されていないことが一要因と考えられる。著者らは、ある道路橋において、打音点検済みの高力ボルト F11T を対象に、超音波法による遅れ破壊調査を行った。この調査事例の概略を紹介し、超音波法の優れた検出性能、得られる情報の多さ、調査の迅速さ、簡便さなど、従来の打音点検に対する優位性について記述する。

2. 調査対象

2.1 調査対象の橋梁と高力ボルト

調査対象とした橋梁の諸元を表-1 に示す。そして調査対象とした高力ボルトの寸法形状を表-2 に示す。高力ボルトの種類は F11T M22 首下長さ $L=80\text{mm}$ である。

2.2 調査箇所

箱桁上フランジの添接板 1 箇所、ボルト数 200 本を調査箇所に選定した。この添接板は、2012 年 6 月実施の橋梁点検で、ハンマーによる打音調査の結果、200 本中 7 本の高力ボルトに破断やゆるみが見つかった部位である。この 200 本に対して超音波による非破壊試験を行い、潜在的な損傷ボルトの検出を試みた。

3. 調査方法

3.1 調査方法の概要

調査対象のボルトは、箱桁上フランジ添接板の高力六角ボルトである。上フランジ上面には床版が接しているため、箱桁の内部ではボルトの頭部だけが見え、ボルト軸及びナット側（先端側）を見ることはできない。そこで、図-1 に示す様に、高力六角ボルトの頭部に超音波の垂直探触子を当て、超音波パルス反射法により探傷する方法とした。

3.2 超音波パルス反射法

垂直探触子から発信された超音波は、鋼材（高力ボルト）の内部をビーム状に直進するとともに、材質が変化する境界面では反射する性質を持つ。高力ボルトの反対面（ねじ部先端）は鋼材／空気（又はコンクリート）の境界面であるため、超音波は反射して探触子に戻ってくる。これを、横軸を伝播時間、縦軸を信号の振幅として表示すると、高力ボルトの長さに相当する伝播時間にピークが観察される。これを「底面エコー」（記号 B1）と呼ぶ。条件によっては、「底面エコー」が複数回観察されることもある（記号は B2, B3...）。これを多重反射といい、超音波が往復してボルトの両端面で何度も反射を繰り返すことによって生じる。

表-1 橋梁諸元（橋梁点検調書より）

路線	一般国道 現道
供用開始	1980年
橋長	148m
活荷重・等級	TL-20 1等橋
適用示方書	昭和47年 道路橋示方書
上部構造形式	3径間連続箱桁橋
全幅員、有効幅員	12.25m、11.25m
車道幅・車線	7.00m 2車線
交通量	16020台/日

表-2 高力ボルトの寸法形状

項目	基準寸法	許容差
D1	22	+0.8/-0.4
H	14	±0.9
B	36	+0/-1
C	約41.6	
S	40	+6/-0
L	80	±1.4

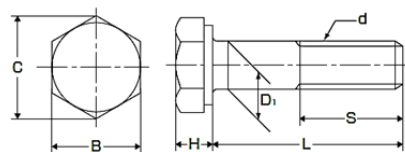


図-1 超音波探傷試験のイメージ図

キーワード 高力ボルト, 遅れ破壊, 非破壊検査, 超音波, きず

連絡先 〒950-0914 新潟市中央区紫竹山 7 丁目 13 番 16 号 開発技建(株) TEL. 025-245-7131 E-mail : kondo@khgk.co.jp

高力ボルトの軸に亀裂などの傷がある場合、亀裂も鋼材／空気等の境界面と見なせるため、超音波は反射する。このとき超音波波形には、探触子から亀裂までの距離に相当する伝播時間にピークが現れる。これを「きずエコー」（記号 F1,F2…）と呼ぶ。

高力ボルトが健全で亀裂などが無い場合、超音波の波形には「底面エコー」だけが表示されるが、高力ボルトに亀裂などが存在する場合、「きずエコー」と「底面エコー」の両方が表示される（図-2）。亀裂が大きい場合や破断している場合は、「きずエコー」だけが表示される。

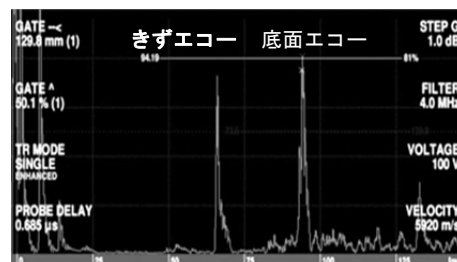


図-2 実際の超音波探傷波形



図-3 当現場で発見した破断ボルト

3.3 試験装置

使用した超音波装置と探触子を下記に示す。これらは非破壊試験に用いられる一般的なものである。

- ・デジタル超音波測定装置：日本ソナテスト DIO-1000
- ・垂直超音波探触子：日本ソナテスト SLP 5-10

4. 試験片の人工きずによる実験

4.1 試験片による実験の目的

現場の超音波探傷に先立ち、どの程度の大きさのきずが発見できるかを把握しておくことが重要である。そこで、現場の高力ボルトを人工的に模した試験片を作製して、検出能力などの実験を試みた。

4.2 遅れ破壊発生位置の傾向と人工きずの位置

図-3に当現場の箱桁内で発見した3本の破断ボルトの写真を示す。破断位置は写真左より「首下」、「不完全ねじ部」、「ねじ部」である。高力ボルトの遅れ破壊発生傾向については、複数の文献でデータが示されており、高力ボルトの遅れ破壊が生じる位置は、「不完全ねじ部」が最も多く、次いで「ねじ部」、「首下」と続く。この3部位を合わせると全体の約90%を占める¹⁾。従って、遅れ破壊が多発する位置を①「首下」、②「不完全ねじ部」、③「ねじ部」の3部位と予想し、人工きず試験片はこの3部位の亀裂を想定して作製することにした。

4.3 実験方法

図-4に示すように、新品の高力ボルトについて、①「首下」、②「不完全ねじ部」、③「ねじ部」の3箇所人工のスリットきずを入れて、超音波の探傷波形を観察、記録した。人工のスリットきずは鋸盤で加工し、スリットきずの深さを少しずつ変化させて、きずエコーや底面エコーの変化を見た。

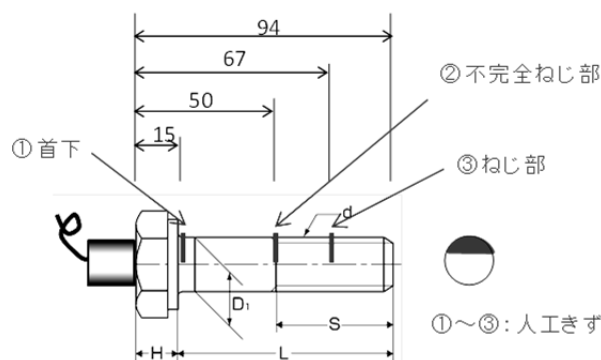


図-4 人工きずの位置

なお、使用した高力ボルトはF10T M22 L=80mm（全長94mm）である。このボルトは現場の高力ボルトF11T M22 L=80mmと同じ形状寸法で、材質だけが異なるボルトである。F11Tは入手困難なため、F10Tを代用した。

4.4 きずの寸法と検出可否

人工スリットきずの深さを少しずつ深くしながら超音波探傷試験を行い、検出可能な人工スリットきずの最小寸法を調べた。人工スリットきずの位置は前述のように

表-3 検出可能な人工きずの寸法

きずの位置	ほぼ確実に検出可能なきずの最小寸法
①首下	走査併用で5mm(面積率17%)
②不完全ねじ部	4mm (面積率12%)
③ねじ部	4mm (面積率12%)

①首下、②不完全ねじ部、③ねじ部の3タイプである。なお、この実験では、現場で試験技術者が行うのと同じ要領で探触子をボルト頭面で走査してきずを探った。実験結果を表-3に示す。使用した超音波試験機器と高力ボルトの組み合わせでは、②不完全ねじ部と③ねじ部は深さ4mm（面積率12%）程度なら容易に検出可能、①首下の検出はやや難しく、深さ10mm（面積率44%）程度なら探触子固定で容易に検出可能、深さ5mm

(面積率 17%) 程度までは探傷走査することで検出可能なことがわかった。なお、きずの面積率は、人工スリットきずの面積を円弧と直線からなる弓形と仮定して算出し、これをボルト軸全断面積で割った値である。

4.5 きずの大きさとエコー高さの関係

超音波のエコー高さは反射源の大きさによって変化し、きずの面積が大きいほどエコーは高くなる。つまり、人工スリットきずの面積とエコー高さの関係式を求めることによって、超音波波形をもとに現場のボルトに生じた亀裂の大きさを推定できる可能性がある。

そこで、3 タイプの人工きずそれぞれについて、特定のエコーの高さに着目してデータを整理した。接触状態による感度変化の影響を取り除くため、エコー高さの絶対値ではなく、きずエコーと底面エコーの比 (F1/B1 又は F2/B1) を指標とした。なお、①首下は、送信パルス (ノイズ) のため F1 が見つからないため、代わりに F2 に着目した。

実験結果を図-5 に示す。きずの面積率(%)と F1/B1(dB)又は F2/B1(dB)は、ほぼ直線で近似される対応関係が見られた。よって、実験データの直線近似式を求め、超音波測定値(dB)から面積率 (%) を求める換算式として使用することにした。なお、換算式は当現場専用の換算式であり、ボルトの種類や超音波装置、探傷方法が変わればその都度実験により求める必要がある。

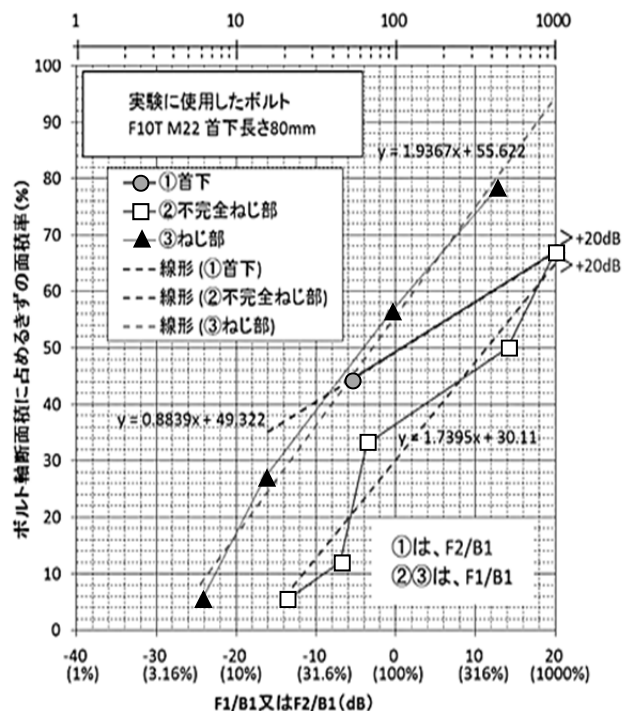


図-5 エコー高さと人工きず面積率の関係

5. 現場調査

5.1 現場における高力ボルト超音波探傷試験方法

超音波探傷の前にグラインダーでボルト頭部の塗装を除去し、グリセリンを塗布したボルト頭部で探触子を走査し、波形を観察した。きずエコーが現れた場合は、探触子をボルト頭部に固定してエコー高さを読み取った。なお、現場探傷の後、ボルト頭部を塗装し復旧した。



図-6 現場の高力ボルト試験状況

5.2 高力ボルトの評価方法

下記 3 項目の評価項目で○△×の区分に分類し、3 個のうち最悪の区分を総合評価とした。総合評価は表-5 に示す○「良」、△「注意」、×「不良」の 3 段階である。

i) ボルトの長さ

ボルト長の許容範囲 (94±2.3mm) 内…○, 外…×

ii) きずの面積率 (断面欠損率) 推定値

きずエコー無し…○, 断面欠損率<10% (亀裂の疑いがあるが、雑音との判別が困難) …△, 断面欠損率≥10% (亀裂ありと判断) …×

iii) 目視, 打音点検 (2012 年 6 月橋梁点検)

異常なし…○, ゆるみ (異音) …△, 抜け落ち…×

6. 調査結果

6.1 異常ボルト検出結果及び評価結果

図-7 に異常ボルト検出結果図を、表-6 に調査結果集計表を示す。異常ボルト検出数は、目視打音点検 (橋梁点検) が 7 本(3.5%), 超音波試験が 16 本(8.0%)であった。両者の重複が 2 本含まれるため、計 21 本 (10.5%)

表-4 評価項目と評価区分

評価項目	○	△	×
i) ボルト長さ	許容内	—	腐食/過大
ii) 断面欠損率	エコー無し	10%未満	10%以上
iii) 目視/打音	異常なし	ゆるみ	抜け落ち

表-5 総合評価方法

○良	○が3個…「良」
△注意	△が1つ以上あり, ×無し…「注意」
×不良	×が1つ以上あり…「不良」

のボルトが異状ありと判定された。異状 21 本中、×「不良」は 15 本、△「注意」は 6 本であった。

ゆるみ以外の△「注意」は、亀裂有無の判断が困難なものである。雑音等の可能性と、超音波の反射率が低い形状、方向の亀裂（過小評価される）が存在する可能性の両方がある。従って△「注意」のボルトであっても性能を期待すべきでない。

6.2 超音波によるきず検出位置の傾向

きずの位置に関しては、集計結果を表-7 に示す。きず検出位置の多い順に②不完全ねじ部、③ねじ部、①首下となり、当現場は既往のデータと類似の傾向であった。

6.3 きずの面積率測定結果

きずの面積率（断面欠損率）は、亀裂を人工スリットの形状と見なしてエコー高さから類推した値である。自然欠陥と人工スリットきずでは超音波の反射特性が異なるため、実際の面積とは誤差があると考えられるが、破断に近い亀裂と初期段階の亀裂は判別可能と考える。検出された 16 本のボルトの断面欠損率は 1%～>94%で、この内、欠損率 50%以上の破断に近いといえるボルトは 8 本であった。

6.4 超音波による高力ボルト調査の有効性

打音点検に対する超音波法の優位性は、第一に破断前のボルトの亀裂を検出できる点が挙げられる。事例では断面欠損率 10%程度の亀裂が発見できた。第二に、きずの位置やボルトの長さが判る点が挙げられる。きずの位置とボルトの長さに関しては非常に精度・確度が高い。そして第三に、きずの大きさ、つまり強度低下の度合いを定量的に評価できる点が挙げられる。上記以外の内容も含め、超音波法と打音点検の特徴について整理し、表-8 に示す。

7. おわりに

超音波法は打音点検に比べ、亀裂の検出性能が明らかに優れ、定量的、迅速な方法である。事例では、1 日の現場作業で 200 本の高力ボルトを調査し、この内、打音では検出できない危険なボルトを 16 本発見した。これは超音波法の優れた成果と言える反面、高力ボルトの遅れ破壊が極めて身近なことを浮き彫りにしたものである。

超音波法は、装置の汎用性が広い。当然、六角ボルトと同じ手法でトルシアボルトも調査可能である。また、軸力測定等にも応用可能である。超音波法は、高力ボルトの維持管理における必須項目と言え、積極的な活用と普及が望まれる。

参考文献

1)「六角穴付きボルト類の選び方 使い方」日本ソケットスクリュー工業協同組合 他

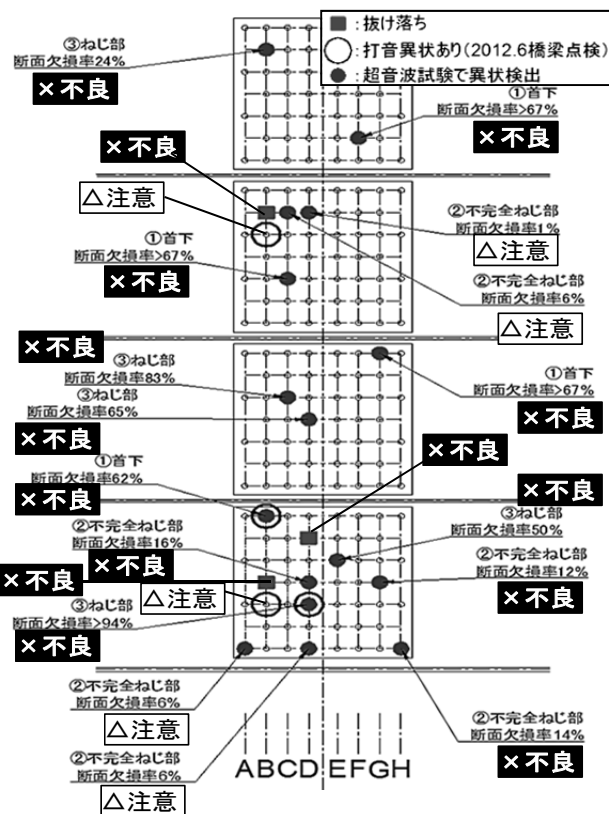


図-7 異状ボルト検出結果図

表-6 調査結果集計表

項目	分類	ボルト本数	割合
目視 打音点検	△ ゆるみ	4	2.00%
	× 抜け落ち	3	1.50%
	損傷検出数 合計	7	3.50%
超音波試験	△ 断面欠損率<10%	4	2.00%
	× 断面欠損率≥10%	12	6.00%
	損傷検出数 合計	16	8.00%
総合評価	○ 良	179	89.50%
	△ 注意	6	3.00%
	× 不良	15	7.50%
ボルト総数		200	

表-7 きず検出位置集計表

位置	①首下	②不完全ねじ部	③ねじ部	その他	計
本数	4本	7本	5本	0本	16本
割合	25%	44%	31%	0%	100%

表-8 超音波法と打音点検の比較

項目	超音波	打音
非破壊性	◎ (場合により前処理)	◎
検査速度	◎100～300本/日	◎1000本以上/日
きずの検知	◎ (初期の亀裂は△)	△不確実
きずの位置	◎精度良く判る	×
きずの大きさ	○試験片と比較推定可能	×
ボルト長さ	◎精度良く判る	×
ゆるみ	○軸力測定方法あり	△明らかな緩みのみ
試験技術者	○資格制度あり	△熟練が必要
定量的評価	◎数値的评价	△個人差多い