

ボルト緩みの遠隔検知

東京都市大学 正会員 小西 拓洋
東急建設株式会社 正会員 ○島田 裕貴

1. 目的

ボルトの脱落は、構造物やボルト自身の落下による第3者被害の原因となることから、確実な防止が求められている。緩みの検知は、目視による発見、テストハンマーによる打音から点検員が判断しているが、点検では対象に近接することが必要であり、例えば、機械足場を用いても全ボルトに触れる距離まで接近するには多くの時間とコストを要する。このような理由から遠隔からボルトの緩みを検知する手法を検討した。

2. ボルト緩みの検知

2.1 検知のしくみ

ボルト頭を打撃したときに発生する約1~5kHz範囲の振動モードの中に、軸力の影響を受け、変化するモードが存在する。図-1にM22ボルト（軸力20%時）の打撃時のボルト軸方向加速度（ m/s^2 ）の周波数応答を示す。通常、この周波数範囲に3~6つ程度のピークが表れ、いくつかのモードでは軸力に応じてモード特徴量（振動数、あるいは振幅）が変化する。これを軸力検知モードとし、この特徴量を利用して軸力を推定し、緩みを判定する。軸力の推定例を図-2に示す。左は1次モードの周波数と軸力の関係、右は4次モードのピーク値と軸力の関係を示す。これらの関係式より、軸力を推定し判定を行う。検知モードを利用した緩み判定の流れを図-3に示す。

軸力推定式の決定は、フロー右側に示すボルトキャリブレーション試験により、検知モードを特定し、軸力とモード特徴量との関係を見出す。M22ボルトでは、8つの特徴量から3つを選定し、推定式を求めている。

2.2 機械学習による軸力検知

以上の軸力推定を、機械学習によって訓練した判別器を用いて行った。機械学習の手順は、設計軸力に対して0,20,50,80%の4種類の軸力でのハンマーによる打撃実験を行った。振動の検出はマイク、ドップラー振動計を利用し、出現する振動ピークの振動数、振幅を収集し、これを訓練データとして判別器を訓練する。判別法としてはKNN法（K最近傍法）、2次判別法を利用した。軸力判定に使用するモード振動の特徴量（振動数、振幅）から3~5個を選択した場合の診断結果の正解率を表-1に示す。但し、本結果は、訓練データを試験データとして診断した結果であるため、本来の学習の正解率とは異なる。

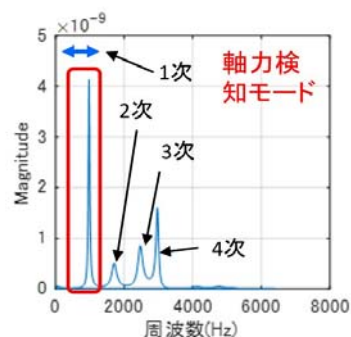


図-1 検知振動モード

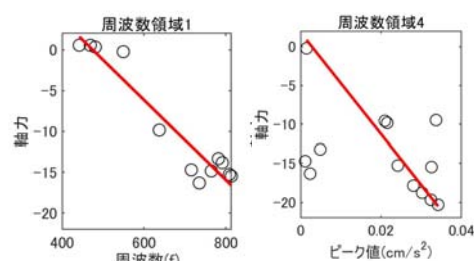


図-2 軸力推定式の決定

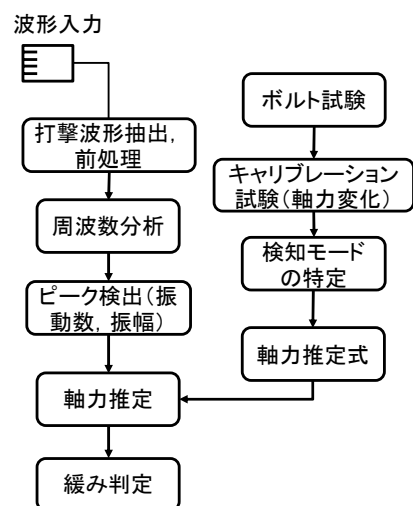


図-3 ボルト緩み判定の流れ

表-1 機械学習による検知結果

入力	判別法	特徴量			
		f1, f4, p2	f1, f2, f3, p1	f1, f2, f3, p2	f1, f2, f3, f4, p2
マイク	KNN法	85%	89%	71%	86%
	2次判別法	85%	89%	71%	86%
ドブラ振動計	KNN法	75%	74%	79%	79%
	2次判別法	84%	100%	100%	100%

現実の点検では、ピーク振幅は軸力以外の要因（打撃法、継手部の振動特性の違い）により変動する可能性があり、これを特徴量とした場合、判定の精度は低下する恐れがある。

2.3 検知精度の改善

機械学習においては、教師データの質が判定精度を決定する。図-4 に、第 4 次モードの振幅ピーク値と軸力の関係を示す。直線関係があり、軸力推定が可能に見えるが、赤の領域においては、推定式では軸力が一意に決定できないことが分かる。このような外れ値を取り除いた場合の推定精度を図-5 に示す。補正により、図中の→で示すように、誤差が改善されたことが確認できた。

3. 遠隔打撃法

遠隔緩み検知システムとしての課題として、接近出来ないボルトの加振法の開発がある。ボルトとの距離が 4 m 程度までは、機械式の遠隔打鍵装置を利用した緩み検知が可能であるが、打鍵装置を利用出来ない、接近困難箇所のボルトに対しては、YAG レーザー（Quantel 社 Q-smart450）による打撃を試みた。レーザー光（緑色、出力 200mJ）をボルト頭に照射した際のアブレーション（表面物質のイオン化）で生じる振動を利用するもので、実験状況を図-6 に示す。1 回の照射で得られた周波数応答を図-7(a)に示す。加振力が弱く、軸力検知モードがノイズに埋もれ検出できていない。そこで、連続レーザーパルス照射を行い、加振によるモード振動の強調処理を行った結果を図-7(b)に示す。更に、ピーク振動を利用した軸力推定式の推定結果を図-8 に示す。(a)は強調処理無し、(b)は処理有りの場合の軸力-周波数関係を示す。この処理によりピーク振動数と軸力の相関を見出すことができた。

4. まとめ

ボルト頭加振時の特定の振動モードを利用する軸力の検知アルゴリズムを開発し、遠隔からのボルト軸力測定を利用した緩み検知手法を開発した。通常の弛み点検では遠隔打鍵装置により微小な緩みの検知が可能であり、現場検査の効率化が図れると考える。また、人の接近が不可能な検査対象に対して、レーザー加振による検査の適用性が確認できた。

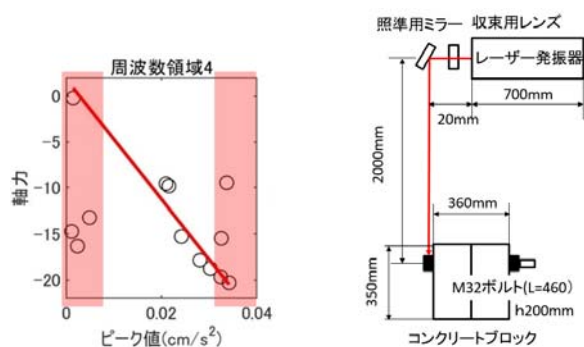


図-4 訓練データの外れ値 図-6 レーザー加振実験

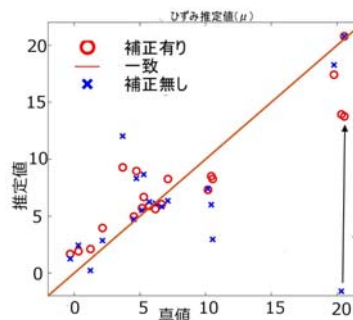
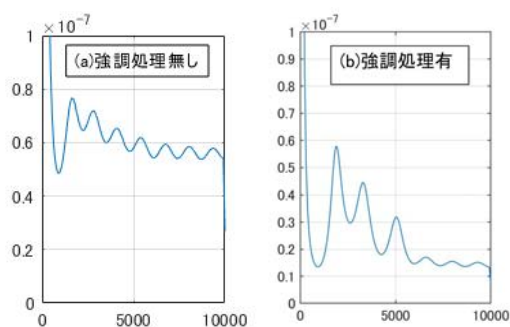
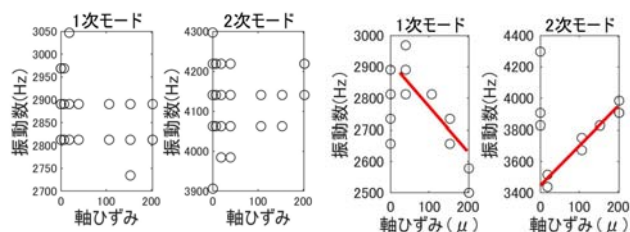


図-5 ボルト緩み判定の精度改善



(a) 強調処理無し (b) 強調処理有り

図-7 検知モードの強調処理（右：処理後）



(a) 強調処理無し (b) 強調処理有り

図-8 強調処理後の軸力推定式

キーワード:ボルト緩み, 軸力, 遠隔検知, レーザー加振

連絡先:〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1, 東京都市大学 都市基盤施設の再生工学研究センター TEL:03-5707-0104