

時間-周波数解析を用いたボルト緩み検出方法の検討

東京工業大学
JFE 技研(株)正会員 盛川 仁
正会員 村上 琢哉

1. はじめに 現存する膨大な社会基盤施設に対して、将来にわたって効率的な維持管理を継続していくために、簡便な健全度評価手法、損傷同定手法が望まれている。その中で、損傷によって構造物の振動特性が変化することを利用した損傷判定法は、例えば、熟練者がハンマリングによる打音の変化に基づいて判定する方法が様々な分野で用いられていることからわかるように、比較的簡便な損傷同定法の一つと言える。著者の一人は、柱状構造物を対象に、基部のボルト軸力を適宜緩めた場合のフーリエ振幅スペクトル形状の変化を検討している¹⁾。その結果、ボルト軸力が50%以下であればスペクトルの形状に違いが現れることを示しているが、より初期段階の軽微な損傷の検出には自ずと限界があると考えられる。ここでは、初期段階の損傷検出を目標として、周波数方向に高解像度な時間一周波数解析手法として注目されている Hilbert-Huang Transform (HHT)²⁾を損傷同定手法として適用できるかどうかを検討した。

2. 解析概要 解析対象の供試体を図-1に、解析対象ケースを表-1に示す。すなわち、高さ4mの柱状供試体をハンマで打撃し、その後の自由減衰振動を高さ2m位置に設置された変位計で計測された時刻歴波形を解析対象とした。解析ケースは、同図のボルトD位置の軸力を計測員が通常に締付けた23kNを基準（軸力100%）として、それを順次低下させた4種類の構造系であり、各構造系で3回以上計測した。なお、ボルト軸力管理は埋込みひずみゲージにより行なっている。解析波形は、最大振幅が計測毎に異なることから、最大振幅が1となるように波形を正規化した。さらに、HHTによる解析を実施するにあたっては、記録のはじめから25秒だけを切り出した。最大振幅0.5mmとなる時刻から40秒間の時刻歴波形を、包絡線の形状が見やすいように、左右をつめて表示して、図-2に示す。これより、Case A-4の場合では明確なうなりを生じていることがわかるが、それ以外のケースでは、違いを認識することが難しいことがわかる。

3. 解析結果 HHTにより算定されるスペクトル（以下、ヒルベルトスペクトル）の代表例を図-3に示す。これより、これらを見ただけでは、損傷の有無を認識することは難しい

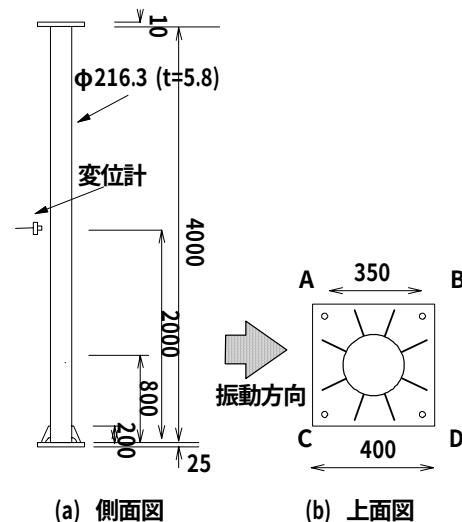


図-1 解析対象とした供試体

表-1 解析対象ケース

Case	ボルト軸力程度(%)				計測回数
	A	B	C	D	
A-1	100	100	100	100	5
A-2	100	100	100	75	3
A-3	100	100	100	50	3
A-4	100	100	100	25	3

(備考)

軸力0%は、ボルトを取り外して実施したボルト軸力程度は100%が23kNを示す。

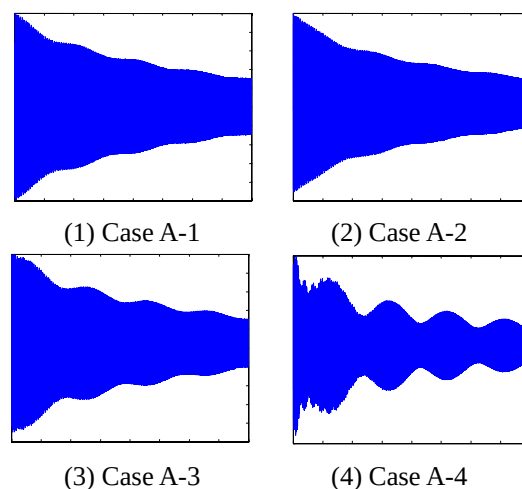


図-2 時系列波形

キーワード 時間-周波数解析, HHT, 損傷同定, ボルト緩み

連絡先 〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259 東京工業大学大学院総合理工学研究科 TEL 045-924-5607

ことが伺える．なお，同図(4)は初動の部分で，振動数が大きく乱れているが，これは，ハンマで叩いたときに，意図せずに2度叩いてしまったことが原因ではないかと考えられる．

柱状構造物の基部のボルトが緩むという現象は，物理的には固定端としての機能を失う，ということに相当する．したがって，ボルトが緩むことにより，高次モードの減衰が早くなるのではないかと，ということが予想される．ここで，

「2次モードが消えるまでの時間」の定義を，第一近似として，「初動から1次モードの振動数が大きく乱れはじめる瞬間まで」を目測による判断で決定した．この程度の定義でも，1次モードの振動数が大きく乱れはじめる部分は，同図からもわかるとおり，非常にはっきりしているため，計測する人によるばらつきはそれほど大きくはないであろう．整理された2次モードの継続時間を表-2に示す．Case A-4の1回目の記録で，継続時間が14.0秒となっていてCase A-1の5回目とあまり違いがないことが目立つものの，それ以外の場合については，少なくとも0.5秒以上継続時間が短いことがわかる．サンプル数が非常に少ないため平均値にはほとんど統計的な意味はないが，おおまかにいって，ボルトが少しでも緩むと2次モードの継続時間は有意に短くなるようであり，75%のボルト軸力でも損傷として検出できる可能性があることがわかる．したがって，2次モードの継続時間をヒルベルトスペクトルから読み取ることで，ボルトがごくわずかに緩んだだけでもそのことを非常に高い精度で判別できるものと期待される．

4. まとめ

柱状構造物を対象として，振動波形から基部のボルトの緩みを検出する手法について検討した．基部のボルト軸力を適宜弛緩して擬似損傷を定量的に与え，ハンマリングにより得られた自由減衰波形に対して，時間一周波数解析手法の一つであるHHTを適用した．その結果，HHTによって得られたヒルベルトスペクトルから，2次モードが消える時間を計測することにより，ボルト軸力が75%の場合でも損傷として検出できる可能性があることが明らかとなった．なお，ボルトの緩みの程度により2次モードの継続時間が系統的に短くなるかどうか，については本研究で行った実験の範囲では判断することはできない．そのため，損傷の有無を判断できることはわかったが，損傷の程度も推定できるかどうかは，今後，より多くの実験を繰り返すことで明らかにできると考えている．

参考文献

- 1) 村上，武田：“ボルトの緩みの定量的評価に関する基礎的検討”，第57回土木学会年次学術講演会，I-573, pp.1145-1146，平成14年9月．
- 2) Huang, N., et al., “The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis”, Proc. of the Royal Society of London, 454, pp.903-995, 1998.

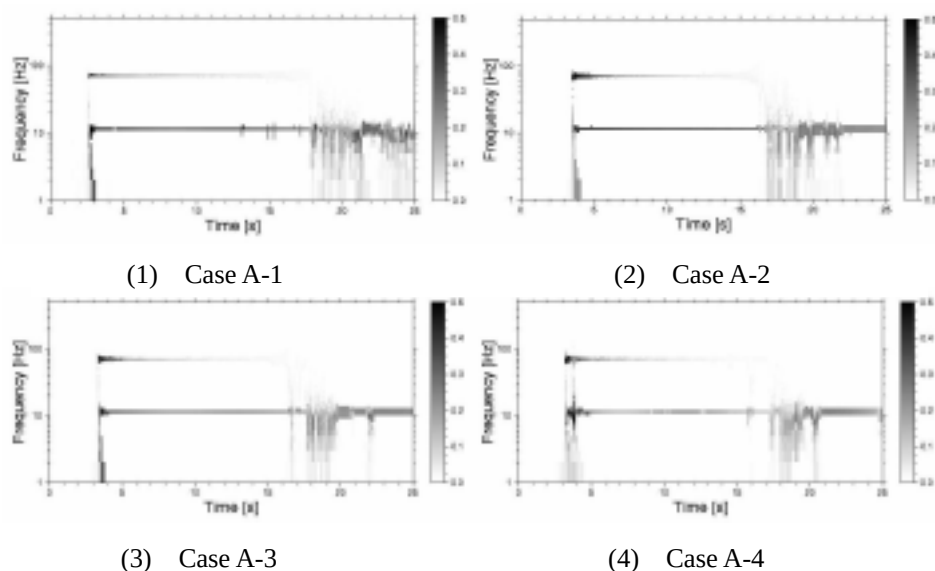


図-3 HHTによる時間一周波数分布（ヒルベルトスペクトル）

表-2 ヒルベルトスペクトルから算定した2次モードの継続時間

Case	2次モードの継続時間(秒)					
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
A-1	15.25	14.63	14.63	14.44	14.38	14.67
A-2	13.19	13.38	14.13	—	—	13.57
A-3	13.25	13.25	14.63	—	—	13.71
A-4	14.00	11.25	13.88	—	—	13.04