

ベルトコンベア支持構造物損傷評価のための有限要素モデルの音響解析

東京大学大学院 学生会員 ○加藤宗 正会員 長山智則 蘇迪

新日鐵住金株式会社 正会員 久積和正 富永知徳

1. はじめに

数十年という長期にわたるプラント稼働の中で、その鋼製設備の一つであるベルトコンベア支持構造物に腐食が生じている。支持構造物中の部材には粉塵が付着・堆積している箇所が存在し、目視での損傷判定は困難である。また、支持構造物の中には数m程の高さに位置するものがあり、近接しての点検は難しい。このような背景から、非接触での損傷検知手法へのニーズは高い。下弦主部材を対象とした損傷同定手法として、図1の局部断面振動モード(Cross-Sectional vibration Mode, CSM)を利用した方法がRanaら(2016)¹⁾によって提案されている。CSMの固有振動数を算出することで部材の損傷同定が可能であるが、支持構造物の振動を励起するためにハンマーによる打撃を要した。そこで非接触の加振方法として、構造物の損傷検知への適用事例のある音響加振を利用することが考えられる。本研究では、モードの断面形状に基づいたCSMの判別指標を提案すること、有限要素モデルにより音響加振を再現し、ベルトコンベア支持構造物の音響加振時の振動特性を明らかにした上で、判別指標によりCSMが抽出できることを確認することを目的とする。

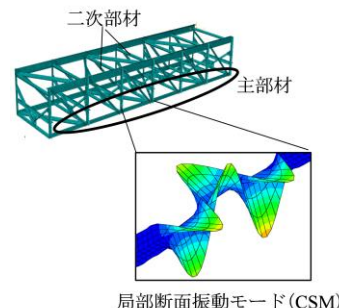


図1 局部断面振動モード

No.	主部材のモード形状 (代表的な断面を赤線で示している。)	代表的な断面の特徴
1		端部A 端部C 隅角部B ・端部一回転 ・隅角部の振幅一小さい
2		・端部一開閉 ・隅角部の振幅一小さい
3		・端部一開閉 ・隅角部の振幅一大きい

補正関数1: $G_1(f) = 1 - \frac{\min(|V_A - V_C|, S)}{S}$
端部が開閉するモードを取り除く

補正関数2: $G_2(f) = 1 - \frac{\min(|V_B|, S)}{S}$
隅角部振幅が大きいモードを取り除く

(回転成分のスペクトル $S(f) = |V_A + V_C|$)

図2 モード形状と補正関数

2. 局部断面振動モード判別指標の提案

固有値解析によって算出された下弦主部材の代表的なモード形状を図2に示した。CSMの断面形状の特徴は、L型断面の端部2点が隅角部を中心として同方向に回転すること、隅角部の振幅が微小であること、の二つが挙げられる。そこで、断面上の端部2点、隅角部の速度を用いて、端部2点が開閉運動するモードの影響を取り除く補正関数1、隅角部の振幅が大きいモードを取り除く補正関数2を提案した²⁾。CSM判別指標は回転成分のスペクトルに対し二つの補正関数を掛け合わせたものとする。

3. 解析概要

有限要素解析ソフトAbaqusを用いて、点音源から生成された音が音響媒体を介して構造物を加振する、図3に示した音響解析モデルを構築した。構造物は1パネル分のベルトコンベア支持構造物の一部分のみを構築した。主部材は隣接する二次部材によって固定されており、二次部材、主部材の境界条件をピン接合とすることで、実構造物中の主部材の境界条件を模擬している。音響媒体と構造物の境界面には拘束条件を与え、また、音響媒体の外側の境界面には吸収境界条件を与えた。音源波形は300-700Hzに帯域制限したホワイトノイズとした。解析ステップは、固有値解析を行った後、モーダル法による時刻歴応答解析によって音響解析を行うものとし、対象とする部材断面上の3点の速度からパワースペクトルを算出する。比較のため音響解析に加え、打撃加振した場合についても同一のモデルで解析を行った。また、打撃加振、音響加振いずれもサンプリング周波数は1600Hz、時刻歴応答の時間長は1sとした。

キーワード 非接触損傷検知, 音響加振, 局部振動モード, 有限要素解析

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学橋梁研究室 TEL 03-5841-6097

4. 解析結果

一点の速度データによるパワースペクトル $S_{VA}(f)$ と CSM 判別指標 $S_c(f)$ を比較したものを、図 4 に打撃加振条件、図 5 に音響加振条件について示す。ただし、 $S_{VA}(f)$ に関しては縦軸を対数スケールとしている。図 4 から打撃加振条件では、一点の速度データからは 320, 471, 678Hz に卓越したピークが見られるが、CSM 判別指標では 320Hz は完全に打ち消され、471, 678Hz のみが判別でき、それぞれ 3 次 CSM, 4 次 CSM と判断することができる。3 次 CSM の卓越周波数は Rana らが行った実験結果との整合がとれていることが確認できた。320Hz のモードは固有値解析の結果から、図 6 に示すモード形であることがわかった。このモードの断面形状は端部が開閉するように振動し、かつ隅角部の振幅が大きい、という特徴を有するため、補正関数値が 0 となり判別指標で打ち消されたと考えられる。一方で図 5 から音響加振条件では、CSM 判別指標を見ると 456, 471Hz が卓越しており、さらに 654, 678Hz にわずかにピークが見られる。いずれも打撃加振条件で判別された CSM の卓越振動数に近い。ここで 456Hz と 471Hz のモード形状を図 7 に示す。471Hz のモード形状は主部材のみが局所的に振動する CSM であることが分かる。一方で 456Hz のモードは二次部材と連動して主部材も振動する形状になっている。主部材のみを点加振する打撃加振とは異なり、音響加振では二次部材まで含め構造物の広い範囲にまで加振が及ぶため、456Hz のようなモード形まで強く励起されると考えられる。また、図 3 に示す箇所を 10%減肉させた損傷部材 での指標適用結果を図 6 に示す。判別された 3 次 4 次 CSM の振動数は損傷により 30Hz 程度減少していることが確認できる。

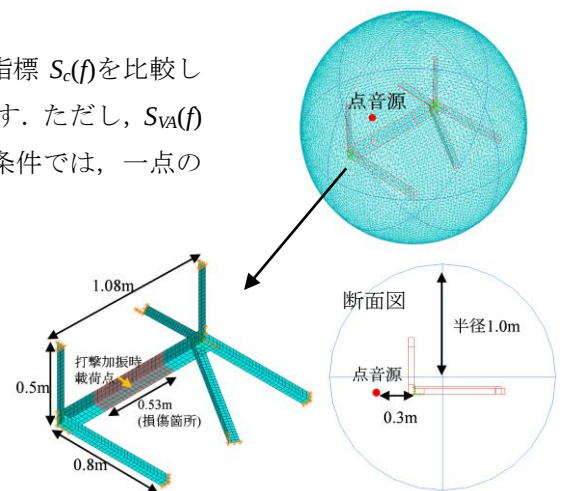


図 3 音響解析モデル概要

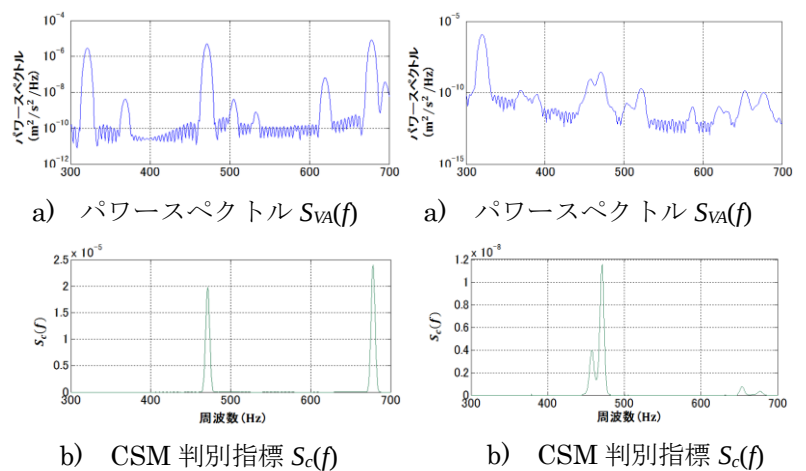


図 4 打撃加振条件

図 5 音響加振条件

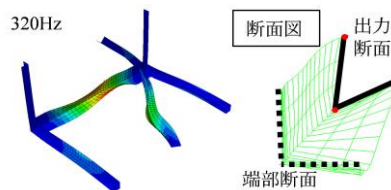


図 7 開閉モードとその断面

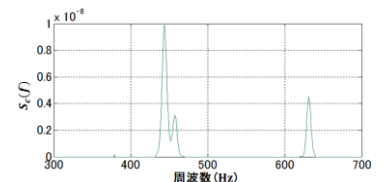


図 6 CSM 判別指標 $S_c(f)$ (損傷部材, 音響加振条件)

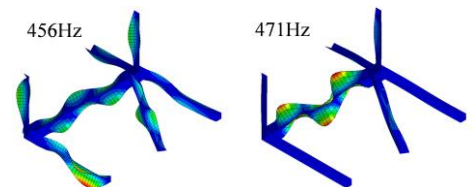


図 8 異なる周波数での 3 次 CSM

5. まとめ

モードの断面形状に着目し、CSM を判別する指標を提案した。音響加振を再現した有限要素モデルにより、指標適用後に打ち消されたモード、判別されたモードの形状、振動数が確認された。また、損傷部材との比較により CSM の振動数変化が 30Hz 程度見られ、このことは損傷検知の可能性を示唆している。

参考文献

- 1) S. Rana, T. Nagayama, K. Hisazumi, T. Tominaga: Clarification of cross-sectional vibration characteristics for damage identification of belt conveyor support structure, Proc. the International Conference on Smart Infrastructure and Construction, Cambridge, UK. 27–29 June 2016.
- 2) 加藤宗, 長山智則, 蘇迪, 久積和正, 富永知徳: 音響加振を用いたベルトコンベア支持構造物の局部断面振動モードの同定, 第 72 回土木学会年次学術講演会概要集, I-116, 2017.9