

衝撃法によって励起されたガイド波と加速度センサを用いた遠隔計測

愛媛大学大学院 正会員 ○高本龍直, 学生員 大谷憂馬, 学生員 齊藤 中, 正会員 中畑和之

1. はじめに

土木構造部材の健全性を評価する上で、目視検査では把握できないような内部のきずを検出するためには、高周波領域の弾性波（以下、超音波）を用いた非破壊試験が必要となる。一般的な超音波探傷の範囲は、数十 cm 程度の超音波の往復路程であるから、きずの発生箇所が予想できない場合に、すべての部位について超音波探傷を実施するのは非効率である。また、土木構造部材は橋梁などを例に挙げればわかるように、長尺材料から構成される場合が多い。従って、超音波探傷の前に、長尺材料中のきずの位置を大まかに把握できる手法があれば便利である。この手法によって大まかな位置が検出でき、超音波探傷による局所的な検査によってきずの詳細な大きさや形状を評価できる。2 段階の検査法によって、損傷評価精度は格段に向上する。長尺材料の内部のきずを検出する可能性のある方法としてガイド波¹⁾を用いる方法がある。ガイド波は、ウエーブガイドの存在によって生じる超音波の呼称であり、Lamb 波や板波等も含まれる。土木構造部材へガイド波検査を適用する際に以下の 2 点を克服する必要がある。

- 土木構造部材は任意断面を有し、かつ構成材料も複合的であるため、波動伝搬モードが解析的に求まらない。
- 全国に散在する社会インフラの数の鑑み、ガイド波の発生および測定方法は簡便であるのが望ましい。

そこで、本研究では、ハンマ等による衝撃加振によってガイド波を発生させ、長距離に伝搬する超音波を遠方で受信できるようなワイヤレス計測法を提案する。ハンマ加振において重要なのは、加振周波数の帯域で発生する波動伝搬モードを把握することである。ここでは、半解析的有限要素法 (Semi-Analytical Finite Element 法、以下 SAFE²⁾) の適用を試みる。また、局所的に加振を加えた場合の、部材の過渡的な応答を計算するために動弾性有限積分法 (EFIT³⁾) を用いる。これら 2 つの数値解析を援用することで、土木構造物におけるガイド波検査の精度向上を目指す。ここでは I 型金属試験体を用いて、本計測法の検証を行う。

2. 衝撃加振によるガイド波の発生と計測

(1) 計測装置の構成と計測方法

ガイド波の発生とその計測装置を図-1 に示す。計測で用いた実験装置は、波形記録用ノート PC、無線 LAN ルーター、無線計測ノード（1 軸加速度センサ付属）、加振用ハンマである。無線計測ノードは最低でも 2 つ必要であり、1 つは基準点として用いるため衝撃地点近くに設置し、もう 1 つは任意点における計測用である。波形は以下のように収集する、ハンマで加振し、基準ノードと計測ノードで同時に計測する。計測した波形を基準ノードの到達波形の時刻と最大振幅で正規化する。無線計測ノードが多数あれば、同時に多点で計測できるが、ここでは、計測ノード 1 つで検証を行った。このとき、基準ノードは固定したまま計測ノードを変えて、ハンマ加振および計測を行った。これを繰り返すことによって、多点で波形を収集した。

(2) I 型部材中の波動伝搬モードと分散曲線

I 形部材中を伝搬するガイド波の分散曲線を数値的に求める。対象とする I 形部材を図-2 に示す。材質はアルミニウムであり、縦波音速は 6.3km/s、横波音速は 3.1km/s、密度は 2700kg/m³ である。

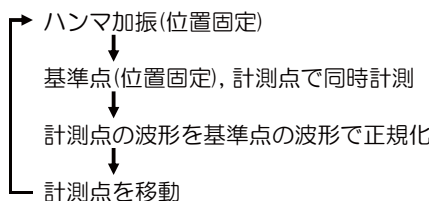
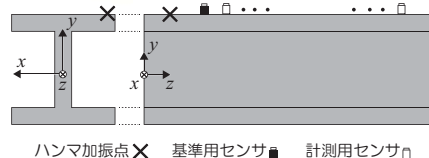
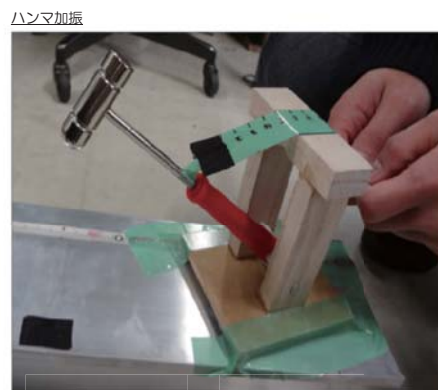


図-1 衝撃加振によるガイド波の発生と計測方法

キーワード：ガイド波、非破壊検査、衝撃法、加速度センサ、波動解析

連絡先 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3, E-mail: takamoto@cee.ehime-u.ac.jp

SAFE を用いて数値的に求めた分散曲線を図-3 に黒点でプロットしている。図の横軸は波数 k ，縦軸は周波数 f を表しており， $f = kc/2\pi$ の関係から図-3 の傾きは位相速度を表している。図-3 から，同一の周波数について多数の伝搬モードが現れており（重畳性），位相速度も周波数によって変化している（分散性）。次に，計測波形から分散曲線を求める。実験ではハンマを用いて，図-2 のように上フランジ端部を打撃した。ハンマと同じ面に，128 点の受信点を設置し， y 方向の加速度波形を記録した。128 点で得られた時刻歴波形に時空間フーリエ変換を施し，それに色づけを行ったものが図-3 のカラーマップである。なお，各周波数の最大値で正規化している。赤い色ほど強い振幅を有する伝搬成分であることを示している。図-3 から，SAFE から求めた分散曲線の一部が計測実験から求めたものと一致していることがわかる。これは，ハンマ加振は局所的かつ単一方向に行われるため，特定の伝搬モードのみが励起されるためであると考えられる。これは，EFIT による過渡応答解析によって裏付けられるが，頁の制限で割愛する。

3. きずの評価への応用

SAFE と EFIT を援用して，きず（減肉部）の評価を行った例を示す。図-4 に示すように下フランジ外側に減肉がある I 形部材について，衝撃加振を行った。減肉幅は 100mm で，減肉部の肉厚は 5mm である。EFIT の知見から，下フランジ部の波動振幅が大きくなるように，実験では上フランジ端部をハンマで打撃した。計測実験で得られた加速度振幅について，横軸を時間，縦軸をセンサの設置位置として表したものを図-5 (a) に示し，EFIT による本実験を模擬した計算結果を図-5 (b) に示す。実験と同様に，減肉部で大きな振幅が得られている。また，図-6 に示すようにセンサ設置点ごとの加速度二乗平均平方根（Root Mean Square, RMS）振幅を全計測点の最大値で正規化し，計測実験と EFIT の結果を比較する。計測実験と EFIT の結果は良好に一致しており，減肉部で計測した波形は，健全断面で得た波形よりも大きな振幅が得られている。これは，健全断面から減肉部にガイド波が伝搬する際，波動エネルギーの伝達が行われるが，入力エネルギーを保ったまま減肉部を伝搬しようとするため，振幅が部分的に大きくなるためである。

4. おわりに

衝撃加振による長尺部材に対するガイド波検査の開発を目的として，超音波を遠方で受信できるワイヤレス計測を提案した。また，ガイド波検査の信頼性を向上させるために数値解析を援用し，波動伝搬モードおよびモード形状を同定した。さらに，欠陥評価への応用例を示した。

参考文献

- 1) J.L. Rose, Ultrasonic Guided Waves in Structural Health Monitoring, Key Engineering Materials, Vols. 270-273, pp. 14-21, 2004.
- 2) T. Hayashi, W.-J., Song, J.L. Rose, Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example, Ultrasonics, Vol.41, pp.175-183, 2003.
- 3) K. Nakahata et al., Three-dimensional numerical modeling of ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation, Construction and Building Materials, Vol.78, pp.217-223, 2015.

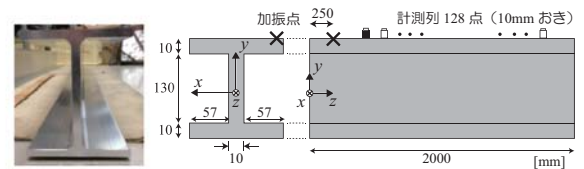


図-2 I 形部材の形状

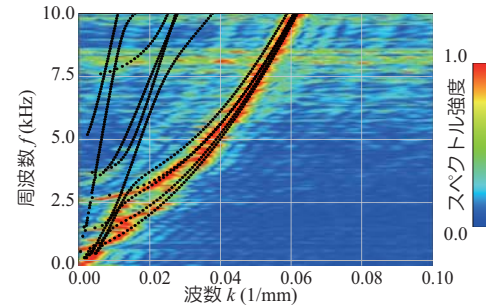


図-3 I 形部材の分散曲線（計測実験：カラー，SAFE：黒点）

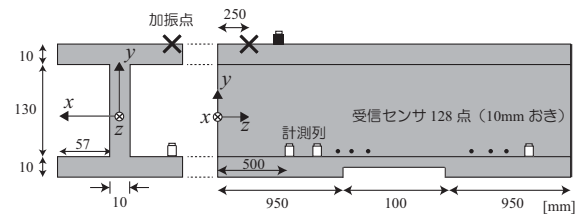


図-4 減肉を有する I 形部材の形状

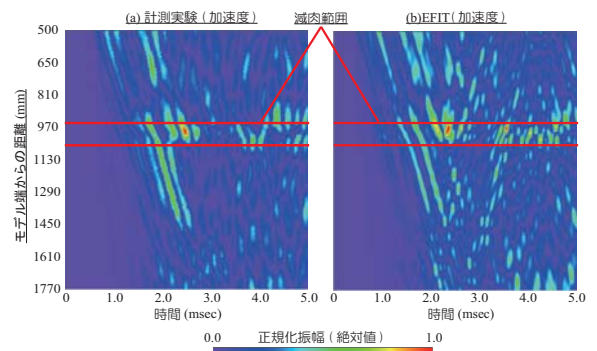


図-5 (a) 計測実験 (b) EFIT から得られた加速度振幅

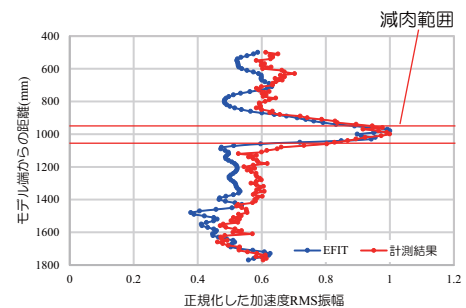


図-6 正規化した加速度 RMS 振幅