

# <ガイド波を用いた鋼構造物の亀裂診断手法>

## <Non-destructive Diagnosis of Steel Structure Using Guided Waves>

<榊原淳一・JFE シビル(株)>

<Junichi Sakakibara, JFE Civil Engineering & Construction Corp.>

Key Words: <非破壊検査, 表面欠陥, 連続波法, 表面波法, 鋼構造>

Nondestructive testing method for steel structure inspection by ultrasonic guided wave has been newly developed. Frequency controlled pseudo random wave is applied as a transmitted wave. Results of proof experiment which was conducted with crane runway girder show that this method can be used to detect a small crack in the girder without stopping crane operation.

### 1. はじめに

大型鋼構造物において定期的な点検を行うことは、構造物の疲労破壊などに起因する事故を未然に防ぐためには重要なことである。現状では超音波探傷、磁粉探傷や目視点検が主な手法である。しかし、これらの手法は構造物に接近して試験を行う必要があり定期的な点検を行うことが難しい場合が多い。例えば、製鉄所などで用いられるクレーンランウェイガーダー(以降、CRG と記す)を点検する場合には、①クレーンの操作を停止する必要がある、②高所にあるため仮設足場などを設置する必要がある、③他の設備との干渉や CRG の向きにより目視できない場合がある、といった問題がある。筆者は疑似ランダム波を用いた地盤調査技術を開発し、さらにこの計測手法を鋼構造物に応用するための研究を行ってきた<sup>1)</sup>。本報告では表面波の一種であるガイド波を用いることで、①クレーンの操作を止めず、②仮設足場を必要とせず、③診断は対象物に接近せず(地上で行う)、④その場で結果判定が可能、という新しい鋼構造物非破壊診断手法の開発とその実験結果について述べる。

### 2. 診断手法の概要

**2-1 計測原理** ガイド波は「実体波である縦波と横波が境界条件を満たすように材料を伝播した結果、見かけ上得られる波」であり、伝搬現象が複雑であるため取扱いが難しい面もあるが、エネルギーの散逸が少なく遠方まで伝搬するという大きなメリットを有している<sup>2)</sup>。図 1 および図 2 に本手法の計測原理と計測概念を示す。フランジ側面から発生した亀裂がガイド波の伝播に影響を与えることを利用し、到達時間や受信音圧の変化から亀裂の有無を判定する。こ

亀裂があるとガイド波の伝播に影響を与える

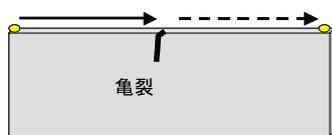


図 1 計測原理

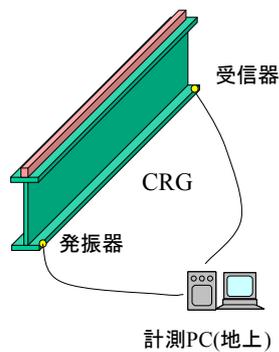


図 2 計測方法概念図

のために CRG(H 鋼)の両端のフランジ側面(コバ)にセンサーを設置し、「フランジ面内に適切な周波数の縦波と横波を伝播させることでフランジ側面に励起されたガイド波」を計測する。

**2-2 疑似ランダム波** 適切な周波数の波を伝播させるためにはパルス波ではなく連続波を用いる必要があるが、連続波を用いると到達波を得ることができない。一方、従来手法として用いられているパルス波は周波数を制御できないため必要とするガイド波を励起することが難しい。疑似ランダム波を用いるとこれらの問題を解決すると共に、遠距離計測、ノイズの影響を受けにくい、音波の減衰の利用という利点がある。

疑似ランダム波はパルス圧縮<sup>3)</sup>と呼ばれる信号増幅方法の一つである。連続波を用いることにより送信するエネルギーを時間軸上に分散させているため、パルス波に比べて送信信号全体のエネルギーを大きくすることができる<sup>4)</sup>。図 3 に疑似ランダム波の例として、発振波(a)、受信波(b)、発振波と受信波の相関計算後の波形(c)を示した。図 3(b)の受信波には発振波の 3 倍の大きさのホワイトノイズ付加と、発振波に対

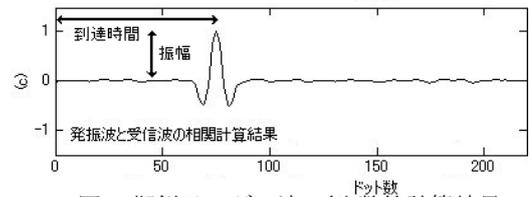
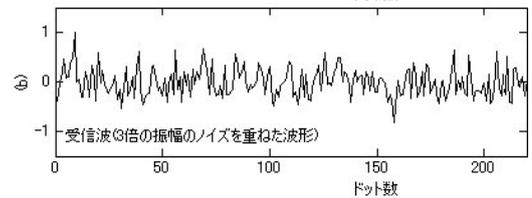
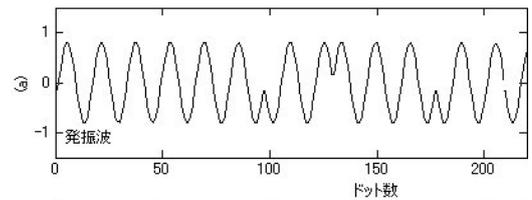


図 3 疑似ランダム波の例(数値計算結果)

して 75 ドットの時間遅延を行ってある。相関関数のピーク値となる時間(図 3(c)では 75 ドット付近の極大値)は擬似ランダム波の到達時間であり、ピーク値の大きさは到達波の持つ受信エネルギーと考えてよいので、これにより媒体を伝播してきた波の到達時間とエネルギー量を得ることができる。図 3 から受信波(図 3(b))ではホワイトノイズに隠れて信号が判別できないが、相関計算後の波形(図 3(c))ではパルス圧縮の効果により明瞭な信号を得られていることが分る。この効果により、「クレーンの操業を止めずに計測する」ことが可能となる。

擬似ランダム波のもう一つの特長は、単一周波数の正弦波をベースとした場合、自己相関関数がこの周波数に依存した波長のパルス波となることである<sup>5)</sup>。図 4 は発振波の周波数を 6kHz, 11kHz, 20kHz, 39kHz とし計測した際の相関関数計算後の波形を示しているが、発振周波数に対応した波長を得られていることが分る。これにより「フランジ面内に適切な周波数の縦波と横波を伝播させる」ことが可能となる。

### 3. 基礎実験

**3-1 実験概要** 計測装置は圧電セラミックス製の発振器と受信器、信号作成器兼データロガー、発振信号および受信信号増幅器で構成されている。実験は 3 段階に分けて行った。まず、亀裂に対する感度とガセットプレートなどの影響を把握する目的で、長さ 2m、幅と厚みが 400mm、10mm の鉄板に、長さ 10mm から 100mm の模擬亀裂(亀裂幅は 5mm)を作成して亀裂長感度試験を実施した(図 5)。また、同じ寸法の鉄板に付属物を想定した長さ 50mm から 200mm のプレートを設置して付属物の影響試験を実施した(図 6)。次に実物大実験として長さ 15m の CRG(フランジ巾と厚みは 440mm と 20mm)を用いて、亀裂長 200mm の模擬亀裂を作成し亀裂のないフランジ面との比較を行った。最後に操業の影響を把握するために現場実証実験を実施した。別途実施した超音波探傷により亀裂の有無と長さが分っている 4 台の CRG を用いクレーン走行中に計測を行った。

**3-2 実験結果** 最初に亀裂長感度試験の結果を図 7 に示す。上から亀裂長 0mm, 10mm, 15mm, 50mm, 100mm の受信波形を示している。図中、理論計算から求めたガイド波の到達時間を矢印で示してある。横軸は時間(ミリ秒)、発振周波数は 30kHz であった。同図から亀裂長が 15mm を越えるとガイド波の振幅が小さくなっていることが判る。次に、付属物の影響試験結果を図 8 に示す。上からプレート長 0mm, 50mm, 100mm, 200mm の受信波形を示している。図内の矢印、横軸、発振周波数は亀裂長感度試験と同じである。同図からプレートの有無はガイド波の伝播にはあまり影響を与えていないことが判る。

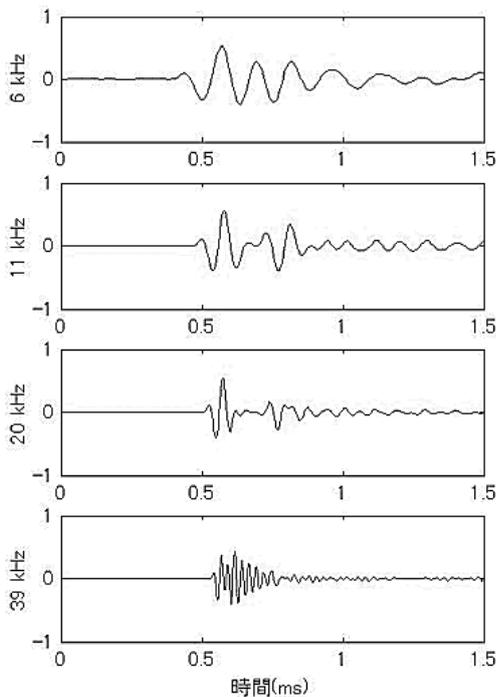


図 4 発振周波数の異なる相関計算後の波形

次に実物大試験の結果として“亀裂なし”, “亀裂 200mm”の 2 ケースについて発振周波数 30kHz と 10kHz の場合の結果を図 9 に示す。この結果から、発振周波数 30kHz で亀裂のない場合にはガイド波が明瞭に確認できるが亀裂のある場合には明瞭ではないことがわかる。また、発振周波数 10kHz の時には亀裂の有

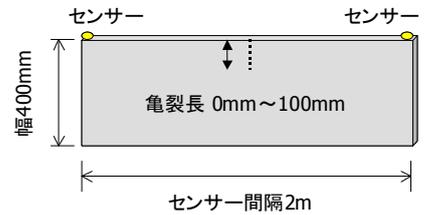


図 5 亀裂長感度試験

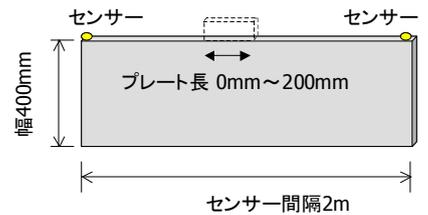


図 6 付属物の影響試験

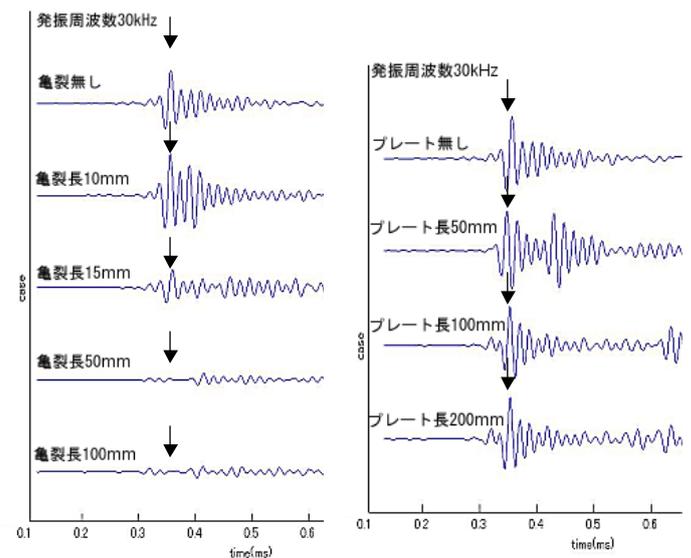


図 7 亀裂長感度試験結果

図 8 付属物の影響試験結果

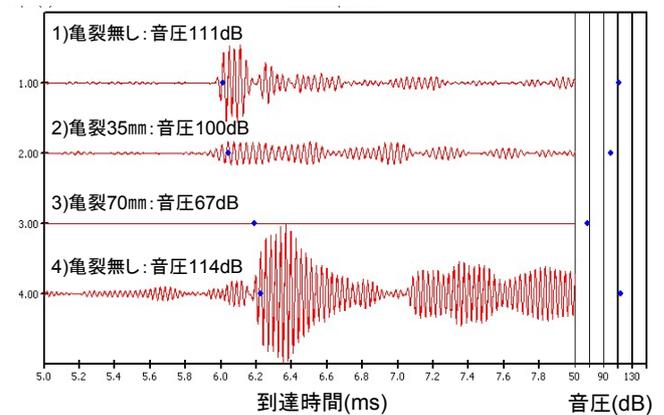


図 9 現場実証実験結果

無に関わらずガイド波は明瞭ではなく、この場合では発振周波数 10kHz が適切な周波数ではないことがわかる。

**3-3 亀裂長と音圧の関係** 亀裂長と音圧の関係を調べるために図 5 に示した実験の結果を縦軸に音圧の減少量，横軸に亀裂長をとって比較した。これを図 10 に示す。同図から亀裂長が 15mm を越えると音圧の減少量が大きくなり始め，40mm で 12dB，すなわち 4 分の 1 まで減少し，60mm を越えると 20dB，すなわち 10 分の 1 になっていることが分かる。この結果から，音圧の初期値が分かっている場合には減少量から亀裂長を推定できることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- ・疑似ランダム波を用いたガイド波を用いた鋼構造物の診断手法の開発に成功した。
- ・基礎実験の結果から，亀裂長と音圧の減少量の間には相関があることがわかった。
- ・現場実証実験の結果から計測結果はクレーン走行の影響を受けないことがわかった。

開発した診断手法を現場に投入するために図 11 に示すフロアレベルからの診断が可能な装置を製作した。伸縮する棒の先端にセンサーを設置した治具を取り付け，伸縮棒を用いてセンサーを診断箇所接近させる。治具を用いてセンサーを CRG の下フランジのコバ面に設置し，発振と受信を行う。図 12 は診断装置の写真(データロガー，伸縮棒とセンサー治具)を示す。この装置を用いると高さ 8m 程度までは足場を設置することなくフロアレベルからの診断が可能となる。この手法では，計測位置(A)-(B)の結果から亀裂ありと判断された場合，計測位置を(A)-(C)，(B)-(C)と変えることで亀裂の位置も把握できる。今後は実験データの蓄積を行い，早急に現場への投入を行っていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 榎原淳一 他，音響トモグラフィを用いた構造物設備診断技術，JFE 技報，No.11(2006)，pp.50-pp.55
- 2) 西野秀郎，非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望，非破壊検査 第 52 巻 12 号(2003)，pp.654-pp.661
- 3) Skolnik, M. : Radar/ Handbooks 2nd Edition, McGraw-Hill Inc., Chapter 10, 1970
- 4) 問山清和，林高弘，神谷庄司，改良型パルス圧縮方法によるガイド信号の高分解能化，超音波テクノ，No.9-10，pp.12-16，2006
- 5) Cunningham, A.B. : Some alternate vibrator signals, Geophysics, 44, pp.1901-1921, 1979

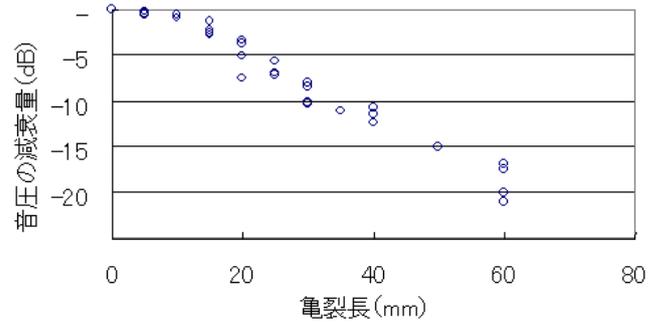


図 10 亀裂長と音圧の減少量

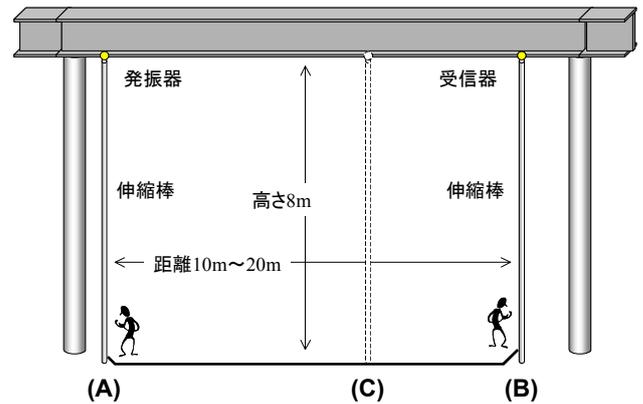


図 11 フロアレベルからの診断

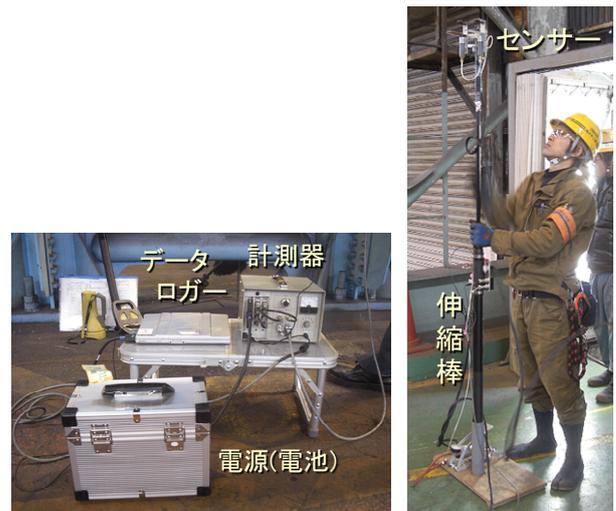


図 12 診断装置(左 データロガー，右 センサー)