

地震直後対応としての鋼構造物における亀裂の 簡易な存否判定のための基礎的検討

A Study to Find Cracks on Steel Structure using Time-Frequency Analysis

盛川 仁*・村上琢哉**

Hitoshi MORIKAWA and Takuya MURAKAMI

*正会員 博(工) 東京工業大学准教授 大学院総合理工学研究科(〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

**正会員 工修 JFE 技研株式会社主任研究員 土木・建築研究部(〒210-0855 川崎市川崎区南渡田町 1-1)

It is very important to find small damages such as cracks on steel structure with less works. Because, for example, we have to detect quickly the health level of structures after a big earthquake. For this purpose, we propose a method using the Hilbert spectrum which is a time-frequency distribution obtained from the Hilbert-Huang transform. To discuss the applicability of the proposed method we carried out some experiments and found that the waves with higher frequencies show more quick damping than waves with lower frequencies for damaged steel plates. Consequently, this suggests that we can possibly detect the damages from the damping of waves in high frequency range.

Key Words : damage detection, elastic wave, time-frequency analysis, Hilbert-Huang transform

1. はじめに

社会基盤施設や建築物がある程度以上のレベルの地震動をうけた場合、その健全度を短期間のうちに確認したうえで、健全性が確認された構造物から逐次供用を再開するという一連の作業を行うことが必要となる。健全性は、主として目視で判断されているが、目視できない箇所も多いため、その健全性を簡易に判断できる手法が望まれている。しかも、膨大な数の構造物の健全度を短期間で判定するためには、損傷の有無を簡易に判定し得ることは極めて重要である。もちろん、平時における構造物に対しても、簡便な手法に基づく健全度評価法や損傷同定法はその維持管理の効率化に大きく貢献することが期待される。

損傷によって、構造物の振動性状が変化することは広く知られているところであり、古くから行われている損傷の検出方法の一つに、打音検査がある。これは、ハンマーによって構造物を打撃し、その打音を熟練者が聞き取って異常の有無を判断するものである。これを応用して、熟練者に頼ることなく、計測によって打音の変化を捕らえようとする音響モニタリングの手法¹⁾や構造物の振動特性そのものの変化を捕らえようとする手法(たとえば、土木学会²⁾、大西ら³⁾、小幡ら⁴⁾など)も数多く提案されている。しかし、多くの場合、構造系そのものが変化するような、たとえばボルトが緩むことによって構造物の境界条件が変化する場合や、地震によって構造物の一部が塑性化するというような損傷については有効であるが、ごく小さな亀裂などの

発見には、用いる振動の波長が損傷のスケールに対して大きすぎてあまり有効ではないことが多い。

構造物のスケールに対して非常に小さな亀裂のような損傷は、超音波探傷法のような非常に波長の短い波動を用いた手法を利用することで発見可能である。しかし、波長の短い波動を使うと、1回の操作によって探傷可能な範囲が非常に狭いため密な計測が必要となり、構造物全体といった広い範囲で探傷を行うためには非常に時間がかかる。このことは、地震直後のような緊急性が求められる健全度診断の際には大きな問題となり得る。

超音波よりは長い波長の波動で、かつ構造系の自由振動や音波よりは短い波長の波動によって、損傷の存否を概略判定し、損傷の存在可能性の高い部分に限定して超音波などを用いた詳細な探傷を実施することは作業の効率を高める上で非常に有効であると考えられる。このような問題意識のもとで、本研究では、超音波と音波の境界領域である 20 kHz 前後の波動を利用して亀裂の存否を判定可能か、という問題を鋼板上の模擬損傷について実験的、定性的に議論しようとするものである。

2. 解析方法

実験を行うにあたって、直接目に触れにくい場所で亀裂が進展し、ある程度の長さになった、という状態を想定した。このような亀裂は、構造物のスケールに対して十分に小さいため、系全体の振動特性には影響

をおよぼさない。そこで、板材の一部を打撃し、それによって生成する弾性波を加速度センサーで直接計測し、その波形から損傷の存否判定が可能であるかどうか、定性的に検討する。

一般に板材を伝播する弾性波はさまざまな周波数の波で構成されており、必ずしも顕著に卓越する振動モードなどが観測されるわけではないため、振動を用いた損傷同定法でしばしば行われているような、フーリエ振幅スペクトルの変化を調べる、という方法を利用することは難しい。そこで、本研究では、時間-周波数解析を適用し、周波数特性の時間的な変化を追跡することで損傷による影響が時間-周波数特性の変化として現れるかどうかを調べる。

打撃によって生成される弾性波の記録を解析するにあたっては、Hilbert-Huang 変換 (HHT) によって得られる Hilbert スペクトル⁵⁾を用いる。時間-周波数解析手法として、wavelet 解析⁶⁾、spectrogram (短時間 Fourier 変換)⁷⁾、Wigner 分布⁷⁾など様々な手法が知られているが、HHT は時間と周波数の分解能が比較的高い時間-周波数特性を得ることができるため、本研究の目的に適切な手法であるといえる。

HHT は Huang ら⁵⁾によって提案された時間-周波数解析法の一つで、非定常、非線形な時間変動を高い時間・周波数分解能で追跡可能な手法である。HHT を損傷同定に応用した例としては、ボルトを緩めて模擬損傷を与えた建物模型の損傷同定⁸⁾、柱状構造物を固定するボルトの緩みを HHT によって発見する手法⁹⁾などがある。これらの手法では、損傷に起因する周波数特性の時間的な変化を損傷による特徴として抽出したうえで損傷の判定を行っている。

3. Hilbert-Huang 変換

以下では、HHT について、文献に沿ってその基本的な考え方のみを簡単に述べる。適当な複素時系列波形 (以下では単に複素信号とよぶ)、 $s(t)$ を考え、それが、

$$s(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (1)$$

と表されるものとする。ここで、 $j = \sqrt{-1}$ 、 $A(t)$ と $\phi(t)$ は実信号で、それぞれ $s(t)$ の振幅と位相を表している。このとき、ある時刻 t における信号の瞬間的な周波数を代表する量である瞬間周波数は、 $\phi(t)$ の時間微分 $\phi'(t)$ によって表される。

$s(t)$ が実信号であった場合、上記の定義によって求められる瞬間周波数は常に 0 となる。そのため、物理的に意味のある瞬間周波数を得られるようにするためには、何らかの方法で虚部を与えなくてはならない。虚部は自由に与えてよいが、負の周波数に対して 0 となるようなスペクトルを有するように虚部を決定する、という条件を与えると実信号 $s(t)$ の虚部は $s(t)$ の Hilbert 変換として一意的に与えることができる。このように

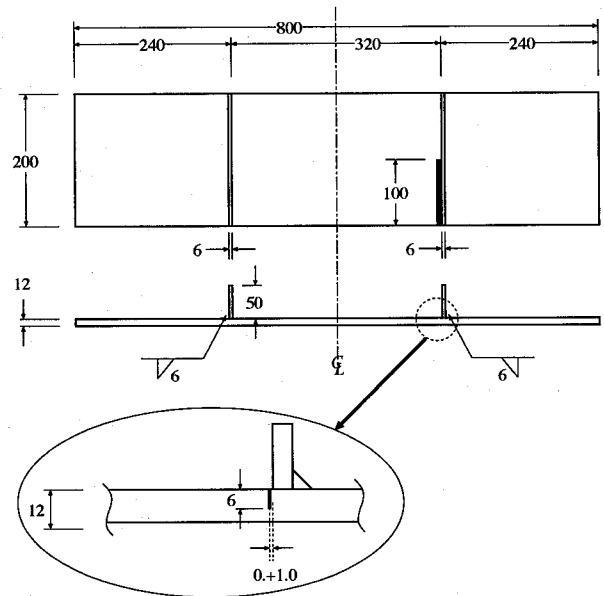


図-1 供試体 3 (疑似損傷深さ 6mm) の寸法図

して得られた複素信号を解析信号と呼ぶが、現実の実験によって得られる波形の記録はほぼ例外なく実信号であるため、以下では解析信号を取り扱うこととなる。

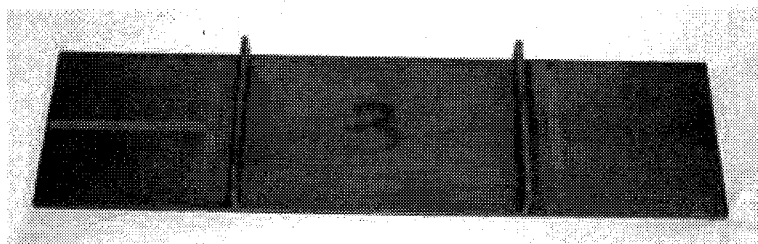
意味のある瞬間周波数を得るためには、信号が 0 を挟んで上下で対称であることが要請されるため、Huang ら⁵⁾は局所平均が 0 であるような信号 (intrinsic mode function; IMF と呼ぶ) でこれを代用するとしている。しかも、同時に 2 つ以上の振動数成分からなる信号の瞬間周波数は物理的に理解しにくい性質を示すため、各時刻でそれらの振動数成分が分離されるように信号を分解しなくてはならない。従って、任意の実信号 $s(t)$ が与えられたとき、その信号を IMF の和に分解したのち、それぞれの IMF の解析関数を構成して、瞬間周波数を求めることになる。信号の分解には empirical mode decomposition (EMD) と呼ばれる Huang ら⁵⁾によって提案されている手続きを用いる。

以上より、 k 番目の IMF に関する時刻 t の振幅を $A_k(t)$ 、瞬間周波数を $\omega_k(t) \equiv \phi'_k(t)$ とすると、 $A_k(t)$ が $\omega_k(t)$ にも依存することに注意して、時間-周波数分布は $A_k(t, \omega_k(t))$ によって与えられることがわかる。これを Hilbert スペクトルと呼ぶ。

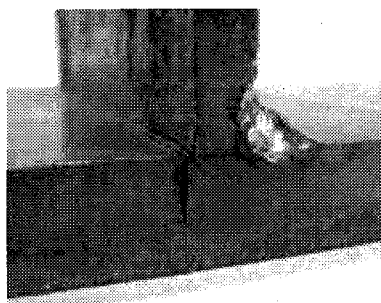
4. 実験概要

4.1 供試体

図-1 に供試体の形状を示す。供試体は SS400 による板材で、本体部分の厚さは 12mm、リブの厚さは 6mm である。また、本体部分とリブとはリブの片側を溶接によって接合している。3 種類の供試体を準備し、それぞれ、損傷がないもの (供試体 1)、深さ 2mm の疑似損傷亀裂があるもの (供試体 2)、深さ 6mm の疑似損傷亀裂があるもの (供試体 3)、とした。なお、疑似損傷亀裂



(a) 供試体 3 の全体



(b) 疑似損傷部分と溶接部分

図-2 供試体 3

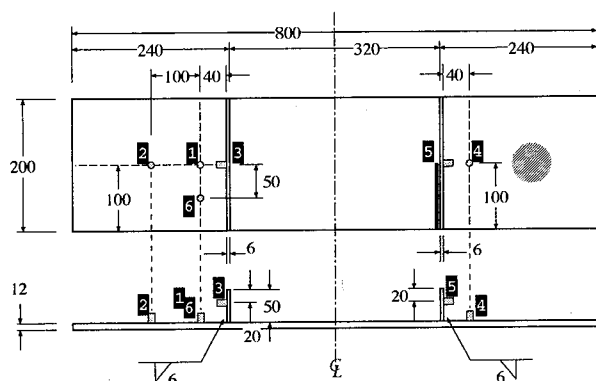


図-3 センサーの設置位置とビー玉による打撃位置 (右側の網掛け部分)

は長さが 100mm で、供試体の一端から中央までリブの溶接されていない側にリブと平行に作成した。図-1 は供試体 3 の寸法図および疑似損傷部分の詳細図である。図-2 に供試体 3 の全体写真および疑似損傷と溶接部分の拡大写真を示す。

4.2 計測装置

20 kHz 付近の弾性波を対象とすること、一般に加速度センサーのなかでは圧電型のものが短周期の特性がよいことを考慮し、Brüel & Kjær 社 (以下、B & K) 製の 4375 型センサーを用いた。このセンサーは固有振動数が 55 kHz で、フラットな周波数特性が保証されている周波数範囲は 0.1~16500 Hz である。しかし、加速度センサーなので、センサーの固有周波数付近までは十分な感度が確保されているものと期待され、実際、センサーの応答特性のカatalog値は 15 kHz までは振幅感度の変動が $\pm 2\%$ 以内でほぼフラットレスポンス、40 kHz でも 5 dB 程度の振幅の増幅で、位相についても 3 度程度のずれなので、40 kHz くらいまでなら十分に使用に耐え得ると判断した。

センサーは、供試体へのコンプライアンス (追従性) を考慮すると、供試体に瞬間接着剤で固定することが望ましいが、センサーの位置を変えて計測をする際に大きな手間がかかるため、比較的強力な両面粘着テー

プを用いて接着した。なお、センサーは 2 個用意して、それらの出力を同時に記録している。

増幅器にはセンサーとのマッチングがとられている B & K の専用品を用いたが、振幅の絶対値そのものは重要ではないので、特に振幅の校正などは行っていない。以下の解析では最大振幅で正規化して解析を行っている。また、アンチエイリアジングフィルタとして、増幅器内蔵のローパスフィルタを用い、そのカットオフ周波数は 30 kHz とした。

波形は、サンプリング周波数 200 kHz、分解能 14bit のデジタル記録としてデータロガーに 2 チャンネル同時に収録した。

4.3 実験方法

(1) 加振方法

直径約 15mm、質量約 3g のビー玉を高さ約 190mm から自由落下させて打撃を与えた。打撃位置は、図-3 の右の網掛け部分のあたりであるが、打撃の位置やビー玉の落下高さについては厳密な意味での管理をしていない。これは、実際の検査などで常に同じ打撃を正確に与えることは事実上不可能であると考えられ、ある程度、入力にばらつきがある方が現実的であると考えたためである。

データロガーには、打撃によって生成された弾性波の初動の立ち上がりでトリガーをかけて、250 μ s のプリトリガー分の記録も含めて全部で 80 ms の長さの信号を記録した。

(2) 供試体の設置

実際の構造物の場合には何らかの形で地盤からの振動の影響を受けるはずであるが、この実験ではそのようなことは全く考えないで、ただ、鋼板を伝播する弾性波だけを対象とするような理想に近い状況を設定することとした。

そこで、供試体の設置にあたっては、木製のフローリングの上に厚さ 3mm 程度の布製マットを敷き、さらにその上にエアキャップを二つ折りにしたもの敷いて、その上に供試体を置いた。鋼とエアキャップの音響インピーダンス比は非常に大きいので、エアキャップ

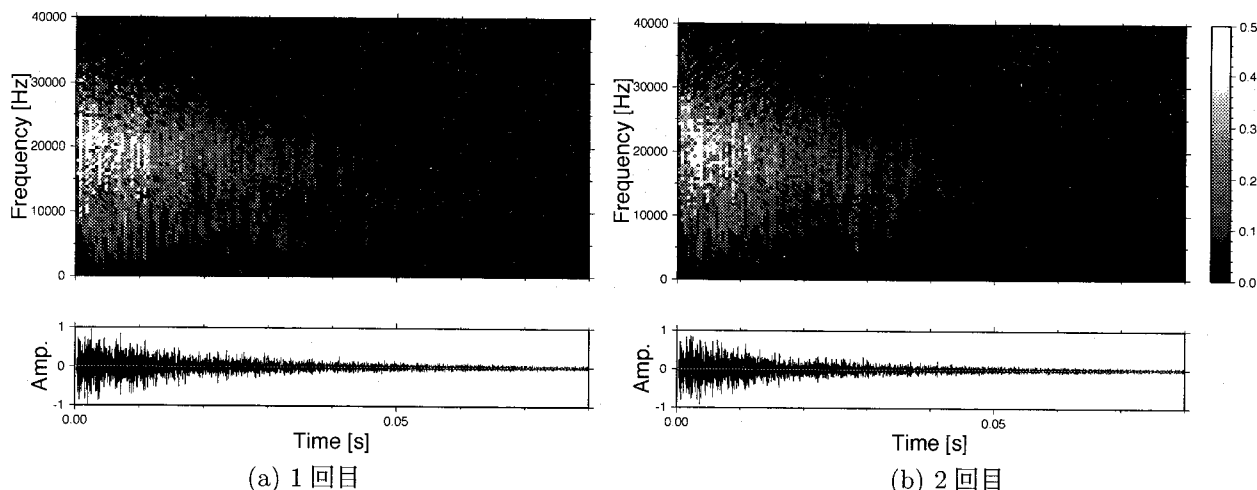


図-4 同じ場所で異なる時刻に計測した記録の Hilbert スペクトル

に接している鋼板の下面での弾性波の境界条件は、空気に接している上面のそれとほぼ同じであると期待される。従って、波動伝播の観点からは、供試体はほとんど空中に浮いているのと同じ状態となっている。

(3) センサーの配置

計測の際には、既に述べた通り、2つのセンサーを使って2ヶ所で同時に振動を計測した。センサーの設置位置は、図-3の白抜き文字で示すように、6ヶ所設定した。このうち、1, 2, 4, 6は厚板に取りつけてあり、上下方向の振動を、3, 5はリブに取りつけてあるため、リブの水平方向の振動を計測している。

リファレンスとして、1の位置には常にch.1のセンサーを設置しておき、もう一つのセンサー(ch.2)を1~6の位置に順次移動させ、各々の位置で10回ずつ打撃を与えて記録をとった。

5. 結果と考察

5.1 予備実験

前節で述べた通り、2つのセンサーを使って2箇所同時に記録をとっているが、本研究では、センサーの設置位置の違いによる供試体の応答特性の違いを見るので、リファレンスとして常に同じ位置に設置したch.1の記録は用いない。しかし、実験を始めるにあたって、両面粘着テープによるセンサーの設置状況の再現性について検討をおこなった。

同じセンサーを同じ場所に設置しても、一度、両面テープからはがして、改めて接着するとセンサーの供試体に対するコンプライアンスが変化していることが考えられる。非常に短周期の波を対象としているため、粘着テープのようなあまり剛でない素材を使うことは、上のような影響は無視できない可能性がある。

そこで、まず、ある場所にセンサーを設置して記録をとり、その後、センサーを両面テープからはがして、時間をおいた後、再びセンサーを同じ場所に取りつけ

て記録をとったものが、最初の記録と同じであるかどうか、を確かめた。

波形の形状を子細にみると、予想通りその波形は異なっている。しかし、2回の計測において打撃位置を全く同じ位置にすることができないため、打撃条件の違いによって Hilbert スペクトルが異なるのか、コンプライアンスの違いによってそれが異なるのか、を定量的に判断することができない。以下の議論では、損傷の有無が時間-周波数分布 (Hilbert スペクトル) に目視で判定可能な変化として現れるか、と云う点に注目するため、波形の細かい違いよりは、むしろ、Hilbert スペクトルの特徴が共通して見えるかどうかが重要である。

図-4は供試体1の1の位置にセンサーをおいた場合のヒルベルトスペクトルを示している。後の議論で述べるように、損傷の有無を高周波成分の減衰によって判定するという観点でみれば、図-4の2つの Hilbert スペクトルは同一視することが可能であると考えられる。むしろ、剛な接着剤を使わずに両面テープを使ったことで供試体の真の減衰を知ることはできないかもしれない。しかし、同じ条件下での Hilbert スペクトルの再現性が確認されたことにより、両面テープが供試体減衰特性におよぼす影響は供試体によらず同じと見做すことができ、供試体の違いによる減衰特性の相対的な違いを抽出することは可能である、ということの意味しているものと判断される。

以上のことより、センサーの供試体へのコンプライアンスのばらつきよりは、損傷の存否による Hilbert スペクトルの変化の方が大きく、センサーの設置状態については以下の議論を進める上では気にとめる必要がないであろう。

5.2 打撃による応答の Hilbert スペクトル

打撃によって生成された弾性波の特徴として、損傷のない供試体1と損傷のある供試体2および3の Hilbert スペクトルに明確な違いが存在するか、について議論

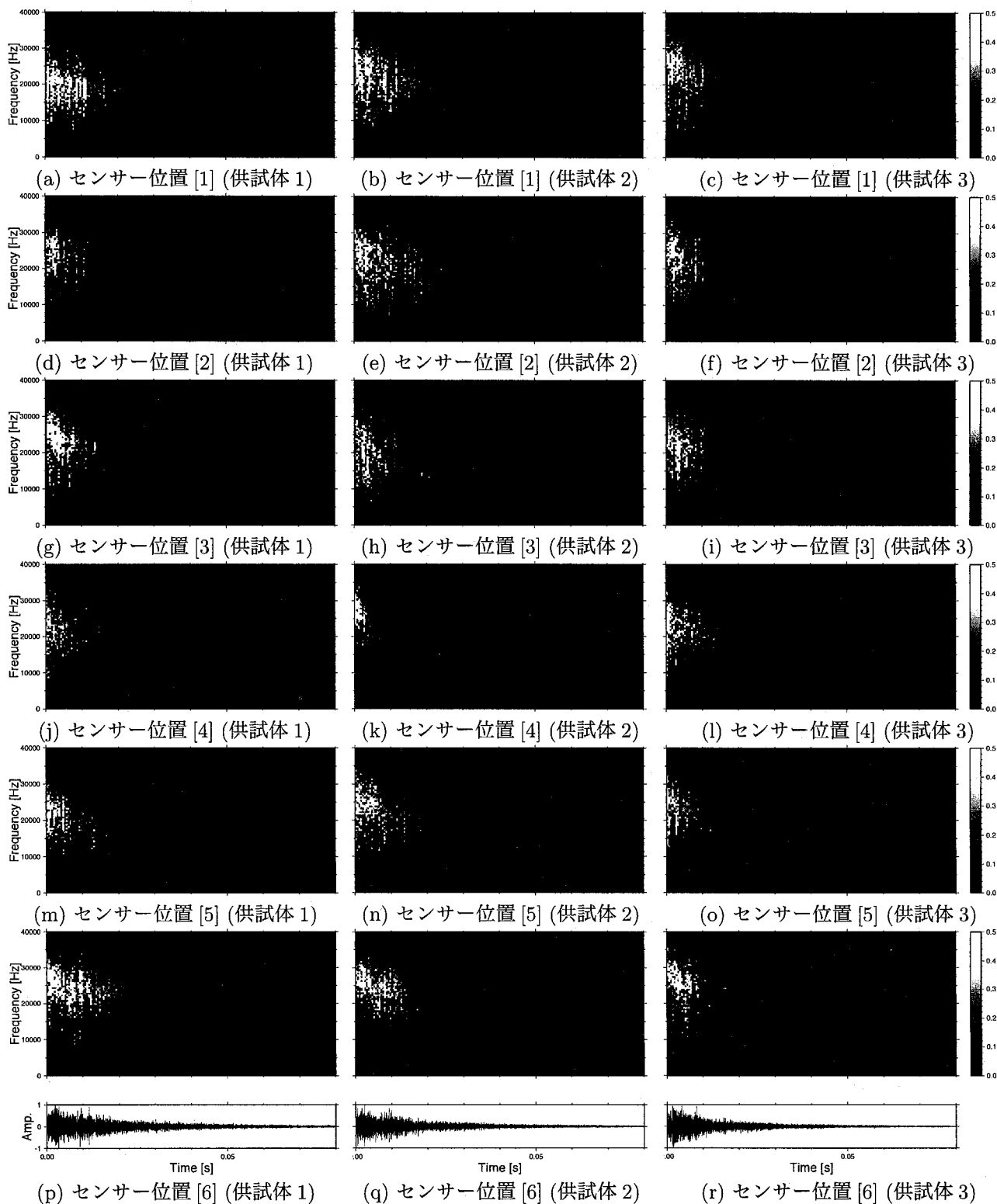


図-5 供試体ごとの Hilbert スペクトルの比較

する。

図-5 にそれぞれの供試体についてセンサーの位置ごとにヒルベルトスペクトルを描いたものを示す。各観測条件で 10 回ずつ計測を行っているが、図は、そのなかの 1 回の記録について描いたものである。図中には、一番下のセンサー位置 [6] の場合のみ時刻歴波形を示しており、それ以外の場合については時刻歴波形は省略

している。一見ただけでは、どれもあまり違いがないように見えるが、詳細に見ると、以下の点に気が付くであろう。

- 損傷がある供試体 3 は損傷のない供試体 1 に比べて振動の継続時間が短い。供試体 2 は供試体 1 との継続時間の違いがあまり明確ではない。
- 供試体 3 は供試体 1 に比べて 20 kHz 以上の高周

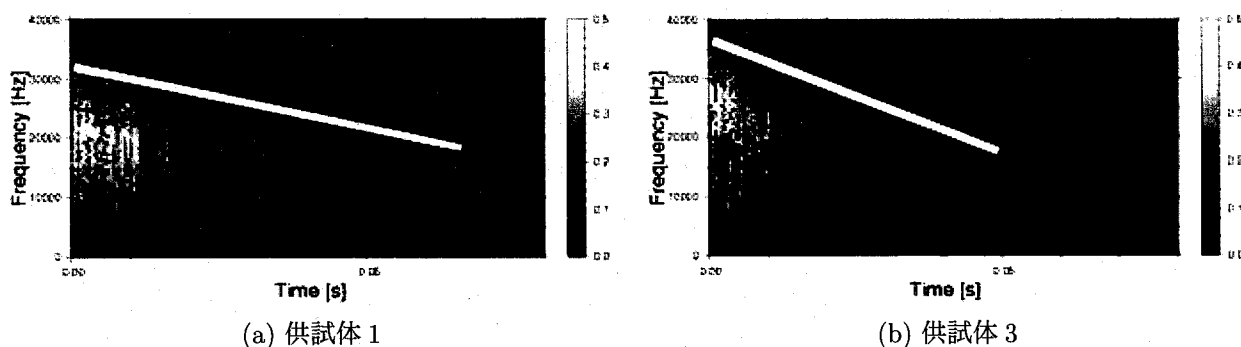


図-6 損傷の有無による見掛けの減衰の違い (センサー位置 [1])

波数成分の減衰がはよい。特に、センサー位置 [1], [3], [5], [6] で顕著であるように見える。供試体 2 はどちらかという供試体 3 と似たような傾向を示しているが、供試体 1 との違いが明確、というほどでもない。

- 記録開始後 10 ms 程度の間の周波数特性を見ると、供試体 1 では 20 kHz あたりがピークとなっているが、疑似損傷が深くなるほどピークが短周期側に移動し、供試体 3 では 30 kHz あたりにピークがあるように見える場合がある。

供試体 1 と供試体 3 を比較すると、高周波数成分の減衰の違いはかなり明確であるといえる。3 番目の特徴については、観測点の位置によっては必ずしも同様の傾向ではなく、たとえば、センサー位置 3 では逆の傾向があるように見える。打撃直後の周波数特性が損傷と関係がある可能性は高いものの、以下では目視で判断がしやすいと考えられる、高周波数成分の減衰特性に絞って議論を進める。

上記の特徴を模式的に示したものを図-6 に挙げておく。この図では、高周波数成分の見掛けの減衰を白線で表示している。損傷のある供試体 3 のほうが白線の傾きが大きく、高周波数成分がはやく減衰していることを示している。また、白線の長さはだいたい振動が収束したように見えるところまで目視で引いているが、供試体 3 のほうが振動そのものが全体的に見てはやく収束している。図-6 の場合、全体の減衰までの時間は供試体 1 で約 70 ms、供試体 3 で約 50 ms なので、その差は供試体 1 の継続時間の 30% 近くあることになって、十分に有意な違いと言えよう。

EMD によって分離された IMF の振幅の変化から周波数毎に減衰に要する時間を調べることができれば、目視による主観的な判断よりも客観的な議論が可能であると期待される。HHT における EMD では、分離された IMF が常に同じモードに現れるわけではなく、信号によってモードの入れ替わりが生じる。そのため、IMF から時間-周波数平面上で Hilbert スペクトルを再構成したうえで、周波数毎に振幅の時刻歴を抽出し、振幅が十分に小さくなったと見做されるまでの時間を計測

することが必要となる。しかし、その時刻歴は時間と共に振幅が小さくなるという大きな傾向を示すものの、変動が非常に大きいため、簡単な規則で機械的に減衰に要する時間を計測することは難しい。このような信号に対して、細かな変動に捕らわれずに大局的な判断を行うにはそれなりのアルゴリズムが必要となり本研究が目的としている検討範囲を大きく超える。主観による判断は個人によって結果が大きく異なるものの、同一人による判断の再現性はそれほど悪いものではないことが多いと考えられ、現象の相対的な違いを判断するには有効であると考えて目視による方法を採用した。なお、周波数毎に振幅が小さくなった部分を選んで減衰に要する時間とするのため、結果として、図-6 では Hilbert スペクトルの振幅の大きい部分ではなく、上部の境界部分に白線が描かれている。

このような現象が見られる原因について、非常におおざっぱな考察を与えておく。鋼のせん断波の伝播速度を 3 km/s とすると、30 kHz の波の波長はちょうど 10 cm ということになる。損傷の溝の深さ (2 mm または 6 mm) や幅 (0.5 mm 以下) は対象としている波の波長にくらべて非常に小さいため、ほとんど弾性波の伝播にはなんの影響も与えないと考えられる。しかし、疑似損傷の長さは板の幅の半分でちょうど 10 cm 与えており、この長さは、せん断波の波長とほぼ対応するスケールである。

波の伝播方向に対して、疑似損傷の配置がどのように影響しているか、を議論することは現時点では難しいが、ビー玉の打撃によって伝播する波は様々な経路を経てセンサーに到達しているということを考慮すると、伝播途中で疑似損傷の溝にトラップされる (閉じ込められる) 波が存在することについては疑問の余地はないであろう。これが、30 kHz 付近の短周期成分の波の見掛けの減衰のはやさが、損傷の有無によって異なる原因であると考えられる。もちろん、それよりも長周期の成分波でも、10 kHz 程度であれば波長は損傷の長さと同オーダー的には同じであるから、損傷の影響を受けているはずである。しかし、30 kHz の波に比べれば当然影響の受け方は少ないため、損傷でトラップさ

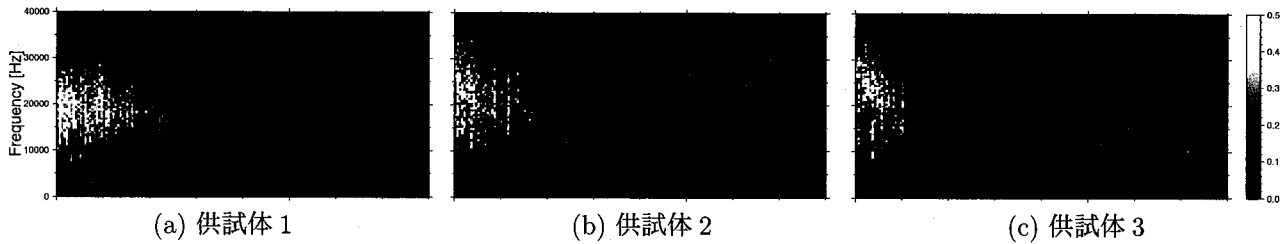


図-7 センサー位置 [1] における 10 回の計測結果をスタックして供試体ごとに求めた Hilbert スペクトルの比較

表-1 高周波成分の見掛けの減衰特性 (傾き, 単位: kHz/s) の比較

センサー位置	供試体 1	供試体 2	供試体 3
1	-188	-375	-543
2	-281	-375	-529
3	-256	-538	-536
4	-363	-500	-617
5	-275	-617	-600
6	-188	-313	-463

れることも少なく 30 kHz の成分波に比べて見掛けの減衰は小さい, ということになるのであろう。ただ, 疑似損傷によって波がトラップされることと, 減衰が大きくなることは直接の関係があるわけではないが, 疑似損傷の部分でトラップされる波はそうでない波に比べて余分な経路を経るうえ, 損傷部分で散乱をすることで, 減衰が大きくなっているものと考えている。

このように考えると, 損傷があることによって, 全体的に見掛けの減衰がはやくて, しかも, 短周期成分の減衰は相対的にはよい, ということが説明できそうである。

図-5 の (a), (b), (c) の 3 枚と (p), (q), (r) の 3 枚を比較すると, それぞれ同じ供試体については, ほとんど同じ Hilbert スペクトルとなっていることがわかる。これは, センサーの位置が [1] であっても [6] であっても計測される振動の周波数特性の時間変化にはほとんど違いがない, と云うことを意味している。

センサー位置 [6] は疑似損傷の正面真ん中に置かれているが, 波にとってはセンサー位置 [1] との違いは認識されていないようである。このことは, 当初, 期待していたように, だいたい損傷の有無をある程度広い範囲で判断できれば良い, という目標に非常に合致していると言える。すなわち, どの位置に損傷がある, ということは正確にはわからなくても, 一回叩くだけである程度の範囲に含まれる損傷の存否を非常に大雑把には判断できるであろう, と期待されるのである。

5.3 複数記録のスタッキング

物理探査などで記録に含まれるノイズを低減するために, スタッキング (重畳) の手法がしばしば用いられ

る。この実験でも, それぞれの計測条件で 10 回ずつビー玉を落として計測しているので, 10 回の記録を時間軸上でスタック (重畳) することで, 時間-周波数特性がより明確に現れるかどうか検討した。

それぞれの計測は, 初動が到達したときにトリガーがかかって 250 μ s のプリトリガーと共に記録されている。従って, 記録の時刻はほぼそろっているので, 時間軸上で 10 回分の記録を単純にスタックをしても問題は生じない。もちろん, ビー玉の落とし方が厳密に同じではないので, 微妙なばらつきはあるものの, そのようなランダム性を有する違いはスタッキングによってある程度打ち消されるものと期待される。

各計測毎の 10 回の記録をスタックして得られた波形から求められた Hilbert スペクトルの例を, 図-7 に示す。図-5 の (a), (b), (c) と比較してもわかる通り, スタックした波形から得られる Hilbert スペクトルは, 1 回だけ記録から得られるそれとほとんど同じである。センサー位置 [1] 以外にセンサーを設置した場合の Hilbert スペクトルの図は示していないが, センサーの位置によらず, スタックの有無によらず, ヒルベルトスペクトルはほぼ同じ傾向であった。

このことは, 10 回の記録が非常に安定していて, ほとんど同じ波形を 10 回記録しているということを意味している。つまり, ビー玉で叩く位置が多少違ったりでは時間-周波数特性が大きく変化する, ということはない, ということである。もちろん, 個々の記録を詳細に比較すればそれなりのばらつきは見られるが, 時間-周波数特性, と云う大雑把な見方をすると, 非常に安定している, ということだと言える。

亀裂の存否の簡単な判断基準となるべき, 高周波成分の減衰の様子を時間-周波数平面上の傾きとして整理しておく。ここで言う傾きとは図-6 の白線の傾き, という意味である。図-6 のように, 時間-周波数分布の絵にラフに線を入れて, その傾きを「振動数の増分 [kHz]」/「時間の増分 [s]」という単純な計算で求めた。単位は [kHz/s] である。ただし, 細かなばらつきの議論を避けるために, 10 回の計測結果をスタッキングして得られた Hilbert スペクトルから傾きを求めた。

その結果を表-1 に示す。目視で傾きを決めているだけなので, いかようにでも値を調整できるということをしり込みして考えても, 損傷のあるものはそれなりに

有意に高周波成分の減衰が速いように見える。しかし、傾きの大きさと損傷深さの相関性についてははっきりしない。ただ、損傷の存否と傾きの関係は有意であると言えよう。

6. 結論

時間-周波数解析のひとつである Hilbert-Huang 変換 (HHT) を用いて、損傷のある鋼板を伝播する波の時間-周波数特性を求め、それによって、損傷の存否を判断可能であるかどうか検討した。構造物のスケールに対して十分に小さい亀裂のような損傷の場合、構造系の振動特性が変化することはないため、材料中を伝播する弾性波を直接計測することで、その弾性波の時間-周波数特性の変化をとらえることができるかどうか、と云う点が重要となる。

このような観点から、疑似損傷を与えた供試体と健全な供試体の時間-周波数特性を比較した結果、高周波成分の見掛けの減衰特性が変化することで損傷を判定できる可能性のあることが明らかになった。また、そのような現象が見られる原因として、損傷の長さや弾性波の波長の関係が影響している可能性を指摘した。ただし、疑似損傷の深さによっては減衰特性の変化が明確ではないため、単純な損傷長さや弾性波の波長の関係だけで論じることができない可能性があることには注意が必要である。

これらの点については、損傷の長さや深さが異なる供試体を用いた実験や、数値解析で波動場を追跡すると云ったことが必要となり、目視による主観的な判断を理論的な観点から裏付けることが必要である。この点については今後の課題としたい。

以下には、ここまでの解析を通してわかったこと、わからなかったことを簡単に整理しておく。

まず、わかったことは以下の通り。

- 溝状の損傷がある鋼板を伝播する弾性波は高周波成分の見掛けの減衰が大きい。これは、損傷の長さと同程度の波長を有する波が損傷部分にトラップされて伝播しにくくなる、ということが原因として考えられる。
- 損傷がある場合、全体的な振動の継続時間も短くなって、見掛けの減衰が大きくなる。
- 減衰の変化はセンサーの設置場所にはあまり依存しないようである。このことは、伝播している波の波長が長く、この実験で扱ったような小さな供試体ではセンサーの位置に対する信号の感度が低いためと考えられる。
- 損傷の位置に対する解像度はほとんどないので、超音波探傷のような解像度は望めない。しかし、加速度センサーで計測できる周期帯域で、手軽に損傷の有無を判定できる可能性は示された。

一方、わからなかったことおよび問題点は次の通り。

- 高周波成分ほど減衰する原因が損傷の長さに関係しているかどうか、は仮説の域を出ていない。物理的にはありそうな話ではあるが、波動の伝播方向と損傷の方向との関係も問題になりそうなので、この原因を検証するためには、異なる条件での実験が必要である。
- 損傷があれば減衰が大きくなる、という因果関係が本当に存在するのか、という理論的背景についての検討が必要である。
- 現象を理論的に説明・理解するためには、数値計算などで再現できること、また波動場を逐次追跡して、ある特定の周波数の波の挙動を知ることが必要である。
- 減衰以外の特徴として、記録開始時の周波数特性の違いについて、これが損傷とどのような関係を持つのか検討が必要である。
- 現実の構造物等への適用性についての検討。特に、損傷がない状態でのリファレンスのデータ (供試体 1 に相当するデータ) がない場合にも損傷判定をスタンドアロンで実現するための手法の発見が重要である。

謝辞

本研究でおこなった実験を遂行するにあたって、町田市立本町田東小学校の盛川奈々氏に多くのご助力をいただいた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小幡卓司・植田康平・宮森保紀・林川俊郎・佐藤浩一：鋼橋の損傷同定における音響モニタリングの適用に関する基礎的研究，応用力学論文集，Vol. 5, pp.827-836, 2002.
 - 2) 土木学会構造工学委員会：橋梁振動モニタリングのガイドライン，丸善，2000.
 - 3) 大西巧基・三上修一・山崎智之・大島俊之・高田直幸：高次振動解析による鋼桁ボルトのゆるみの検出，土木学会第 56 回年次学術講演会，I-A157, pp.314-315, 2001.
 - 4) 小幡卓司・林川俊郎・佐藤浩一・水草浩一：振動モニタリングデータに基づいた鋼橋の損傷同定に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol. 46A, pp.531-538, 2000.
 - 5) Huang, N.E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.C., Shin, H.H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C.C., and Liu., H.H., "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis," *Proc. of the Royal Society of London*, Vol. 454, pp.903-995, 1998.
 - 6) Daubechies, I., *Ten Lectures on Wavelets*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, USA, 1992.
 - 7) コーエン, L. (吉川昭・佐藤俊輔 共訳)：時間-周波数解析，朝倉書店，1998.
 - 8) Pines, D. and Salvino, L., "Health Monitoring of One Dimensional Structures Using Empirical Mode Decomposition and the Hilbert-Huang Transform," *Proc. of SPIE*, Vol. 4701, pp.127-143, 2002.
 - 9) 村上琢哉・盛川仁：時間-周波数解析を用いたボルトの緩み検出方法に関する一考察，応用力学論文集，Vol. 9, pp.1111-1120, 2006.
- (2007 年 4 月 12 日 受付)