

# I型部材への統計的エネルギー解析法の適用性に関する研究

建設設計工学研究室 田中 良哉  
 指導教官 鳥居 邦夫  
 宮木 康幸

## 1. はじめに

河川橋梁を電車が走行するときには騒音が発生するように、構造物ではその振動が原因で固体伝播音となりやすい。橋梁が振動によって発生する環境騒音の問題を、解析的に取り扱い予測する方法はいくつかあるが、統計的エネルギー解析法（SEA）については、まだまだ一般的ではない。そこで本研究は主に、SEAの有効性あるいは実橋への適用性の検討を目的とし、I型モデルでの実験・解析を行う。

一般的に橋梁の振動解析は有限要素法（FEM）によって計算されるが、可聴周波数域の特に高周波域になると計算が困難になる。そこで、中・高周波数を得意とするSEAの適用を考えてみるが、SEAはモード数が少ない低周波域では精度が悪い。昨年の研究では、FEM、SEA、実験を行いある境界を決め、それ以上ならSEA、それ以下ならFEMが適しているという結果が得られている。しかしながら、モデルの形状によりSEAパラメータ（損失係数、モード数等）が変わってくるのが予想される。また、要素分割の仕方についても検討する必要がある。そこで本年度は、より実構造物に近いI型モデルを用いてFEM・SEAさらには音響実験を行い、結果の比較・検討を行うとともに、SEAパラメータや要素分割の検討およびSEAの適用性を考慮した。

## 2. SEAについて

SEAは、対象部をマクロな要素（サブシステム）の集合体と考え、振動・音響をエネルギーという統一量で計算する。各要素間のエネルギーネットワークを作り、要素別のパワーバランスに関する連立方程式を周波数バンド毎に解いて、各部の平均的なエネルギー量を求め、その結果から各部の振動・騒音レベルを求める手法である。以下には、その基礎式と計算法を示す。

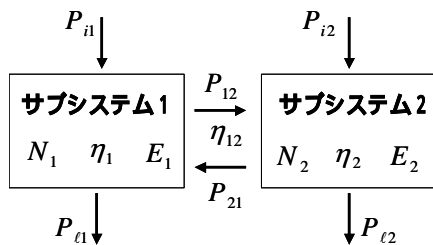


図1. サブシステム間のパワーフロー

$P_{i1}, P_{i2}$  : 入力パワー  
 $P_{12}, P_{21}$  : 伝達パワー  
 $P_{e1}, P_{e2}$  : 内部損失パワー

図1に示すような結合された2つのサブシステムのパワーフローを考える。それぞれのサブシステムのパワーバランスは次のように表せる。

$$\begin{aligned} P_{i1} &= P_{e1} + P_{12} \\ P_{i2} &= P_{e2} + P_{21} \end{aligned} \quad \dots (1)$$

サブシステム内部で消費されるパワーはサブシステムのエネルギー  $E_1$  に比例するものとみなし内部損失率  $\eta_1$  を用いて次のように表せる。

$$P_{e1} = \omega \eta_1 E_1 \quad \dots (2)$$

: 計算周波数帯域の中心角周波数

また、伝達パワーも同様に結合損失率  $\eta_{12}, \eta_{21}$  を用いて次のように表せる。

$$P_{12} = \omega \eta_{12} E_1 - \omega \eta_{21} E_2 \quad \dots (3)$$

ここで SEA において  $\eta_{21}$  ,  $\eta_{12}$  は相反関係より  $\eta_{12}N_1 = \eta_{21}N_2$  が成り立つ . これより ( 3 ) 式を整理すると次のように表せる .

$$P_{i2} = \omega \eta_{12} N_1 \left( \frac{E_1}{N_1} - \frac{E_2}{N_2} \right) \quad \dots ( 4 )$$

よって ( 2 ) , ( 4 ) 式を ( 1 ) 式に代入し ,

$$P_{i1} = \omega \eta_1 E_1 + \omega \eta_{12} N_1 \left( \frac{E_1}{N_1} - \frac{E_2}{N_2} \right)$$

$$P_{i2} = \omega \eta_2 E_2 + \omega \eta_{21} N_2 \left( \frac{E_2}{N_2} - \frac{E_1}{N_1} \right) \quad \dots ( 5 )$$

( 5 ) 式の関係から , サブシステムについてのパワー方程式をマトリックスで表すと以下のようになる .

$$\omega \begin{bmatrix} \left( \eta_1 + \sum_{i \neq 1} \eta_i \right) N_1 & -\eta_{12} N_1 & \dots & -\eta_{1n} N_1 \\ -\eta_{21} N_2 & \left( \eta_2 + \sum_{i \neq 2} \eta_i \right) N_2 & \dots & -\eta_{2n} N_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{n1} N_n & \dots & \dots & \left( \eta_n + \sum_{i \neq n} \eta_i \right) N_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1 / N_1 \\ E_2 / N_2 \\ \vdots \\ E_n / N_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{i1} \\ P_{i2} \\ \vdots \\ P_{in} \end{bmatrix} \quad \dots ( 6 )$$

SEA パラメータが与えられれば , 上記の式は未知数が各サブシステムのエネルギーのみになり , 解くことができる . サブシステムのエネルギーが求まれば , 次式で振動速度および音圧を求めることができる .

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad \dots ( 7 )$$

$$P = \rho c v \quad \dots ( 8 )$$

ここで ,  $m$  はサブシステムの質量 ,  $v$  は振動速度 ,  $\rho c$  は音響インピーダンスである .

### 3 . 解析モデルの作成

本研究で用いた I 型部材は , 製品としての規格のものではなく , 薄板を折り曲げて溶接を行って製造した特殊 I 型部材である . 詳しく述べると , 2 枚の薄板を折り曲げて C 型にし , その背中どうしをスポット溶接したものである . 図 2 はその概略図であり , 表 1 は完成したモデルの物理特性である . 実験はスポット溶接をしてから 1 度行い , その後外周を溶接してからもう 1 度行った .

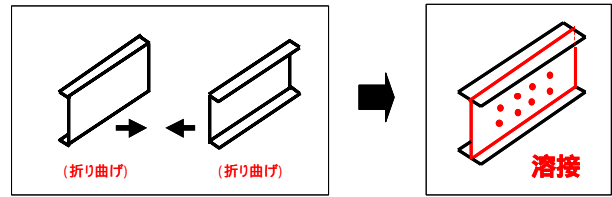


図 2 . モデル作成図

表 1 . モデルの物理特性

長さ	1.0(m)
幅	0.3(m)
高さ	0.4(m)
板厚(フラン)	0.0023(m)
板厚(ウェブ)	0.0046(m)
密度	7800(kg/m <sup>3</sup> )
ヤング率	2.1 × 10 <sup>11</sup> (N/m <sup>2</sup> )
ポアソン比	0.3

### 4 . 実験

モデルには加振器 , 普通騒音計 , 速度・加速度ピックアップを取り付けた . 加振器は上フランジ部に , 普通騒音計 , ピックアップはそれぞれ上フランジ部 , ウェブ部 , 下フランジ部に取り付けている . また加振器には与える速度を計測するため , 上部にピックアップも一緒に取り付けた . 普通騒音計はプレートから 5cm 離れた所に設置した . 支持条件はモデルの下部をローラー 2 つで支える不安定構造である . 実験は加振器で周波数をコントロールしながら , 22Hz ~ 340Hz までの音圧レベルを計測した . 図 3 は実験風景である .

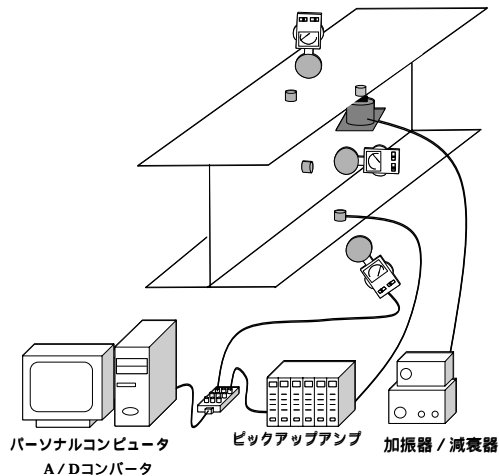


図 3 . 実験概略図

図 4 に実験結果を示す．グラフよりスポット溶接のみの場合，及び，完全溶接の場合の両者とも中心角周波数が大きくなるごとに音圧レベルが上がっている．全体的に完全溶接した場合のほうが加振器からの振動が良く伝わり，音圧レベルが大きくなった．これらの実験結果を解析結果と比較・検討していく．

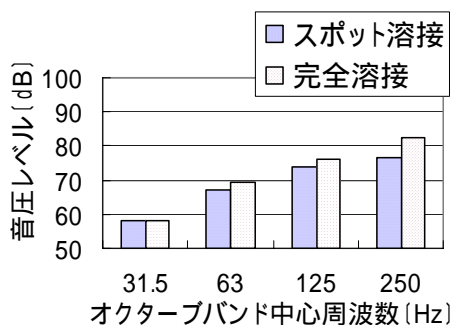


図 4 . 実験結果

## 5 . SEA 解析

このモデルは簡単な I 型構造なので，エネルギーの伝達も容易に推測できる利点がある．また，はっきりした境界がわかるので SEA 法のための要素分割もやりやすい．本研究では図 5 に示すように 3 分割と 5 分割に要素分割を行い解析した．

次に結合損失率 (CLF) は，結合部分のタイプによって異なってくる．解析では，3 分割のとき

は T 字型結合とみなし，そのときのエネルギー透過率を用いた．また 5 分割のときは T 字型結合と L 字型結合が考えられるので，その両方の場合を考えて解析した．また，内部損失率はサブシステムの材料によって決まり，モデルは SS400 材であるので，鋼板の内部損失率の近似式 ( 9 ) を使用した．

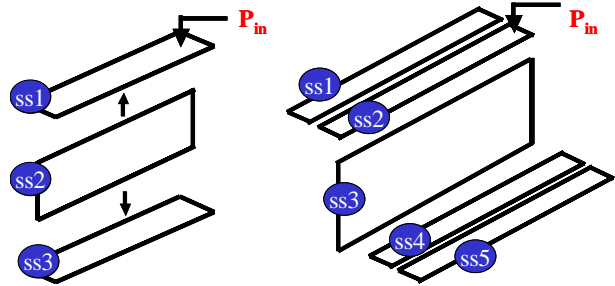


図 5 . 要素分割図

$$\eta = 0.041 \times f^{-0.7} \quad \dots (9)$$

## 6 . FEM 解析

図 6 は FEM の解析モデルである . メッシュを，上フランジ部，ウェブ部，下フランジ部をそれぞれ 100 要素ずつの計 300 要素に切り，周波数は 1 Hz ~ 177Hz まで変えながら解析を行った．それによって得られた節点変位から節点速度 4 節点の平均速度 ( 要素の速度 ) 要素のエネルギー サブシステムのエネルギーという流れで最終的に音圧レベルを算出した．

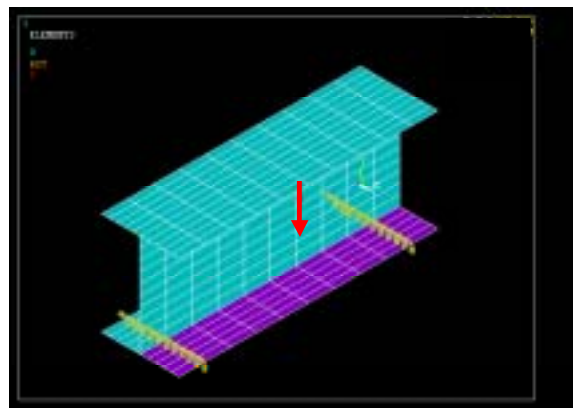


図 6 . FEM 解析モデル

## 7. 結果比較・考察

図7は、完全溶接したときの実験値と、要素分割を5分割と3分割の場合で行ったSEAの結果を比較したグラフである。全体的に3分割より5分割のほうが実験値に近い値をとった。よって、I型部材にSEAを適用する場合、要素分割方法は5分割が良いと思われる。

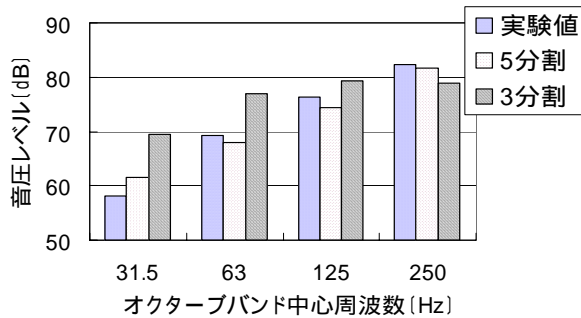


図7. 要素分割比較 (下フランジ)

図8は、スポット溶接のときの実験値とSEA結果の比較図である、SEAはCLFをT字型とL字型で行い、両方とも5分割で解析を行っている。音圧レベルを見比べてみると、全ての中心周波数でCLFをL字型にした場合が実験値に近い値となっている。よって、I型部材にSEAを適用する場合、CLFは、T字型のエネルギー透過率を用いて算出したものを使用するのが良いと考えられる。

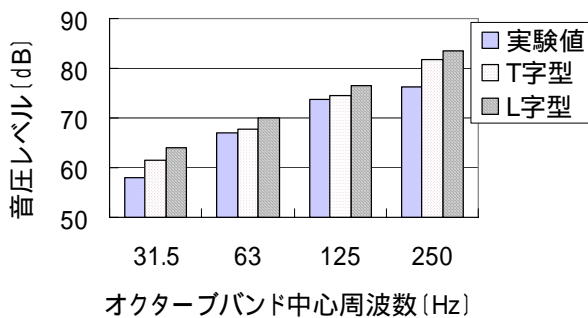


図8. 結合損失率比較 (下フランジ)

図9はSEA, FEMの解析結果と実験値の差分を表したものである。差分をみると、31.5HzではFEMの精度が良く、SEAは誤差が大きい。一方63Hz以上は差分が3dB以内であることから、SEAは十分な精度であると言える。

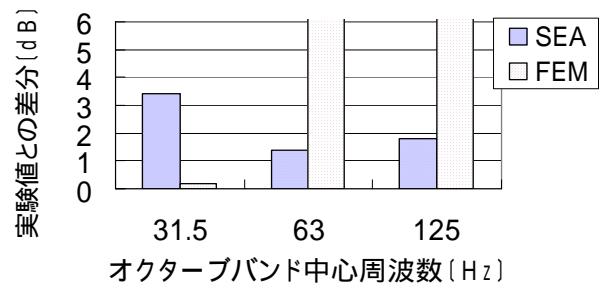


図9. 実験値と解析結果の差分 (下フランジ)

## 8. 結論

結合損失率はT字型のエネルギー透過率を用いて算出すると良いことがわかった。また、要素分割方法は上フランジおよび下フランジを2分割ずつの計5分割にすると良いことがわかった。そして、上記の設定を施し解析をした結果、63Hz以上からは許容誤差 $\pm 3$ dBであり十分な精度が得られた。したがって、I型部材への統計的エネルギー解析法(SEA)の適用は十分可能であるといえる。

## 9. 参考文献

- 1) R.H.Lyon, R.G.DeJong : Theory and application of statistical energy analysis (second,edition.),(Butterworth-Heinemann,Boston,1995)
- 2) 入江 良彦, 中村 任男 : SEA 法による固体伝播音解析法, 日本船用機関学会誌, 第19巻, 第3号, pp257-266 (1984)
- 3) 飯田 一嘉, 大橋 心耳, 岡田 健, 麦倉 喬次 : 現場実務者と設計者のための実用 騒音・振動制御ハンドブック, (株)エヌ・ティー・エス (2000)