過渡 SEA による一様平板構造物の衝撃応答解析の実験検証法*

山崎 徹^{*1}, Maksyutov STANISLAV^{*2}

An Experimental Method to Verify Impulsive Responses on Flat Plate Structure Predicted by Transient Statistical Energy Analysis (TSEA)

Toru YAMAZAKI^{*1} and Maksyutov STANISLAV^{*1} Kanagawa University, Dept. of Mechanical Engineering
Rokkakubashi 3-27-1, Kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686 Japan

Transient Statistical Energy Analysis (TSEA) is a suitable tool to predict transient sound and vibration responses especially in huge structures like ship-buildings under the shock excitation. This paper discusses an experimental verification method for TSEA prediction results. TSEA prediction has no information on the distributions inside of subsystems. The issue for discussion is how to evaluate the representative responses on a subsystem in measurement. Then we firstly carry out the measurement of the transient vibration energy responses on a structure, which has two flat steel panel subsystems. The accelerations at 70 points on the subsystem are measured under the impulsive excitation. As a result, we propose the verification method, in which the transient responses are averaged and the spatial average of measurement point coordination should be at the gravity center of the subsystem. It is also shown that the method is useful to verify the TSEA predictions for two systems, one is composed of two flat rectangular panels and the other is of two flat triangular acryl panels.

Key Words : SEA, Method of Vibration Analysis, Vibration of Continuous System, Modeling

1. はじめに

モード数の多い高周波数領域の振動騒音解析手法として統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis ; 以下 SEA) ⁽¹⁾がある。SEA は定常問題に対する解析法である。著者らはこれまでに、SEA モデルを実験データから構築する実験 SEA を用いた固体音低減プロセスを提案し、実機械製品の低騒音化を実現してきた⁽²⁾。一方、衝撃問題に対する解析法には過渡 SEA (Transient SEA ; 以下 TSEA) がある。著者らは、SEA と同様、TSEA を用いた衝撃固体音低減プロセスの開発を目指した研究に取り組んでいる。前報⁽³⁾では、厳密なパワー平衡式の導出が可能な 2 自由度系を対象に、TSEA 基礎式が厳密でないこと、早めで大きめの解析結果となることを示し、これらの特性を考慮した上での TSEA の利用が望ましいことを論じた。また、TSEA を自動車ドアしまり音の解析に適用した報告⁽⁴⁾はあるものの、TSEA 結果と実験結果との比較は議論されておらず、その他の事象への TSEA の適用、実験検証の方法について議論されている論文は見当たらないようである。

そこで本報では、一様平板である構造要素を対象に、TSEA による解析結果 (以下、TSEA 結果と称す) を実験により検証する方法を提案する。

TSEA は要素毎の応答予測を行う手法であるため、要素内の応答分布の情報を有さない。一方、実構造物は空間的な大きさをもつため応答分布をもつ。そのため、TSEA 結果の実験検証法を議論する本報では、空間的な大きさのある要素の応答をどのように捉えれば、TSEA 結果と対応するものとなるかを議論することが根幹となる。そこで本報では、要素内の複数点の応答を平均し、その複数の計測点の位置 (座標) の平均を要素の重心に一致

* 原稿受付 2010 年 10 月 14 日

^{*1} 正員, 神奈川大学 (〒221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)^{*2} (株)小松製作所

E-mail: toru@kanagawa-u.ac.jp

させる, という方法を提案する. なお, 本報では要素形状が一様である平板要素を対象に検討し, 一様でない要素については別報で取り上げる.

本報の構成は, はじめに, 瞬時入力パワー (三角波入力を想定) が TSEA 結果に及ぼす影響について明らかにする. 次に, 一つの応答要素内の 70 点での時刻歴応答計測結果を用いて, TSEA 結果の実験検証法について考察し提案する. その後, 矩形平板および三角形平板をそれぞれ要素とする対象系を例に, 本提案法による TSEA 結果の検証結果を報告する.

2. SEA と TSEA

本章では, 定常問題を対象とする SEA と時刻歴問題を対象とする TSEA の基礎式を示す.

2・1 SEA モデル

定常問題を対象とする SEA では, 系外からの入力パワー $\mathbf{P}(f)$ と要素エネルギー $\mathbf{E}(f)$ に着目し, r 要素からなる系の基礎式を以下とする.

$$\mathbf{P}(f) = \omega \mathbf{L} \mathbf{E}(f) \quad (1)$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} \eta_1 + \sum_{i \neq 1}^r \eta_{1i} & -\eta_{21} & \cdots & -\eta_{r1} \\ -\eta_{12} & \eta_2 + \sum_{i \neq 2}^r \eta_{2i} & \cdots & -\eta_{r2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\eta_{1r} & -\eta_{2r} & \cdots & \eta_r + \sum_{i \neq r}^r \eta_{ri} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで, f は解析周波数バンドの中心周波数, ω はその角周波数, $\mathbf{L}$ は損失率マトリクス, η_i は要素 i の内部損失率 (Internal Loss Factor; 以下 ILF) であり要素内部の減衰を表す. また η_{ij} は要素 i から j への結合損失率 (Coupling Loss Factor; 以下 CLF) であり要素間のエネルギーの伝わりやすさを表す SEA 固有のパラメータである.

ILF と CLF は周波数バンド毎の値であり, ILF と CLF を評価し $\mathbf{L}$ を生成することを “SEA モデルの構築” と称す. SEA モデルは, 解析式, 実験データや FEM 解析データなどに基づいて構築することができる.

2・2 TSEA モデル

時刻歴問題を扱う TSEA の基礎式は以下である.

$$\mathbf{P}(t) = \frac{d\mathbf{E}(t)}{dt} + \omega \mathbf{L}_{\text{TSEA}} \mathbf{E}(t) \quad (3)$$

TSEA における入力パワー $\mathbf{P}(t)$ と要素エネルギー $\mathbf{E}(t)$ はそれぞれ瞬時値 (ただし, t は時間) である. 損失率マトリクス $\mathbf{L}_{\text{TSEA}}$ については, 大きく二つの考えがある. ひとつは, 式(1)の SEA の $\mathbf{L}$ をそのまま用いる, すなわち ILF と CLF に時不変値を用いる方法⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾であり, もうひとつは時変値を用いる方法⁽⁵⁾である.

本報では, 時不変値を用いる方法を採用する. これは, 前報(3)の知見と SEA モデルを構築すれば TSEA 解析を実行できる利便性を有するためである. また, ILF と CLF の時変値を算出することが困難なためでもある. すなわち, 前報(3)では同一の二つの振動子からなる 2 自由度系に対し, 時不変の CLF を時変にするための時間関数 β が導出でき, $\beta=1$ のときにのみ $\mathbf{L}_{\text{TSEA}} = \mathbf{L}$ となることが示せたが, 同一でない振動子からなる 2 自由度系や多モ

ード系では、厳密なパワー平衡式および β のような時間関数を解析的に導出することが困難であると考えられるためである。

3. TSEA の応答結果と入力パワーの影響

本章では、TSEA 結果がどのようなものであるかを例示すると共に、瞬時入力パワーが TSEA 結果に及ぼす影響を明らかにする。

3・1 TSEA 結果例

TSEA による応答算出結果の一例を示す。図 1 に示す 2 要素系を対象に、要素 1 に瞬時入力パワー（図 2、入力開始までの時間は 0.001s）が入力したときの各要素の時刻歴応答エネルギーを算出すると図 3 となる。

Fig.1 SEA model for a system with two subsystems

Fig.2 Definition of instantaneous input power in TSEA calculation

Fig.3 Typical results of subsystem energies calculated by TSEA

対象系の SEA モデル $\mathbf{L}_{TSEA}$ は、 $\eta_1=0.1, \eta_2=0.2, \eta_{12}=0.075, \eta_{21}=0.05$ とした。図 2 の瞬時入力パワーは、衝撃入力の一つである三角波（最大値を $P_{\max}$ 、継続時間を τ とする）を想定し、要素 1 にのみ入力し、要素 2 への入力はないとした。解析中心角周波数 ω を 200π rad/s とし、式(3)をルンゲクッタ法により解いた。

図 3 は $P_{\max}=0.1\text{W}$ 、 $\tau=4.0\times 10^{-4}\text{s}$ としたときの TSEA 結果であり、入力要素 1 の応答は図 3(a)より瞬時に最大値 ($1.97\times 10^{-5}\text{J}$) となり減衰している。また、受振要素 2 の応答は図 3(b)より 0.0121s（すなわち入力開始から 0.0111s 遅れ）で最大値 ($2.50\times 10^{-6}\text{J}$) となり減衰している。

以上のように、TSEA 解析により、各要素の応答エネルギーの最大値およびその到達時間、その後の減衰具合などを知ることができる。

3・2 入力パワーの影響

瞬時入力パワーが TSEA 結果に与える影響を検討するために、図 2 の三角波の最大値 $P_{\max}$ と継続時間 τ を変化させる。

検討に用いた $P_{\max}$ と τ の 5 つの組み合わせ (Case 1 から 5) を表 1 に示す。Case 1 は前節で示した条件であり、Case 2 と 3 は $P_{\max}$ だけを、Case 4 と 5 は τ だけを、Case 1 のそれをそれぞれ 2 倍、3 倍とした場合である。TSEA 結果としては、各要素の最大応答エネルギー値 ($E_{1,\max}$ と $E_{2,\max}$)、受振要素 2 の最大応答到達時間 $T_{\max}$ （入力開始までの時間 0.001s を含む）および各要素の応答エネルギーの時間積分値 (W_1 と W_2) を示している。なお、表 1 中の値は、Case 1 に関しては計算に用いた値およびその結果そのままを示しているが、Case 2 から 5 に関しては Case 1 の各値を 1 とした比率で示している。ただし、最大応答到達時間 $T_{\max}$ の倍率は、入力開始までの時間 0.001s を除いた遅れ時間から算出している。

表 1 より、各要素の応答エネルギーの最大値 ($E_{1,\max}$ と $E_{2,\max}$) および時間積分値 (W_1 と W_2) は、 $P_{\max}$ と τ の積と比例していることがわかる。すなわち、入力パワーの時間積分値（単純には $P_{\max}$ と τ の積）が 2 倍になれば、各要素の最大値および時間積分値も 2 倍になる。このことは、入力パワーおよび TSEA 結果の時間積分値は定常問題（時間平均）の SEA 結果と一致する⁽³⁾ことと一致している。一方、到達時間 $T_{\max}$ は入力パワーの $P_{\max}$ や τ に依存せず、 $\mathbf{L}_{TSEA}$ (ILF と CLF) に依存している⁽³⁾ことがわかる。つまり、瞬時入力パワーでは、応答エネルギーの最大値および時間積分値は入力パワーの時間積分値、つまり入力エネルギーに比例するということである。そのため、瞬時入力パワーを与える代わりに入力要素 1 の初期エネルギーとして入力した場合の TSEA 解析結果も同様となる。

以上より、図 2 の三角波で表される瞬時パワーを入力とする TSEA において、応答エネルギーの最大値および時間積分値は、入力パワーの時間積分値に比例し、到達時間は入力パワーの最大値および継続時間に依存しないことがわかる。

Table 1 Differences of TSEA predictions due to input power

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Input condition	$P_{\max}$	0.10 W	2.00	3.00	1.00	1.00
	τ	$4.00\times 10^{-4}\text{s}$	1.00	1.00	2.00	3.00
Output	$E_{1,\max}$	$1.97\times 10^{-5}\text{J}$	2.00	3.01	2.00	2.90
	$E_{2,\max}$	$2.50\times 10^{-6}\text{J}$	2.00	3.00	2.00	3.00
	$T_{\max}$	0.0121s	1.00 *	1.00 *	1.00 *	1.00 *
	W_1	$1.98\times 10^{-7}\text{Js}$	2.00	3.00	2.00	3.00
	W_2	$5.95\times 10^{-8}\text{Js}$	2.00	3.00	2.00	3.00

* These ratios are evaluated from excluding the leading time (0.001s).

4. 衝撃応答エネルギー挙動

TSEA による応答エネルギーの予測結果は図 3 に示す通りで、要素内の応答分布の情報は有さず、要素毎の結果である。一方、実構造物では要素には空間的大きさがあり、要素内の位置により応答は異なる。この両者を対応付けることが、本報で検討する TSEA 結果の実験検証法の根幹である。またこの検討は、TSEA 結果が意味する実構造物の応答を明らかにすることにもなる。

そこで本報では、TSEA 結果と実構造物の応答結果との違いが空間的大きさの有無の違いであることから、実構造物の衝撃応答計測を多数点で行い、要素応答として代表しうる平均処理化について考察する。

Fig.4 The system composed of two steel rectangular flat plates of 2mm in thickness (×: excitation point)

Fig.5 Examples of measured instantaneous input force, driving velocity at the excitation point and input power

4・1 計測概要

図 4 に示す構造物を計測対象とする。本対象は板厚 2.0mm の鋼製矩形平板を直角に折り曲げて 2 要素系（平板 1 : 0.35m×0.50m, 平板 2 : 0.35m×0.40m）としたものである。本対象は結合辺に平行な二辺の隅の計 4 点をゴムひもでつるした状態で計測を行った。平板 1 の中央点をインパクトハンマーで微小振動となるように打撃加振し、

打撃点裏側に設置した加速度計により打撃点応答を計測した。また、平板 2 の衝撃応答も加速度計により計測した。平板 2 の応答計測点は、図 4 中に示した格子点 10 行 7 列の計 70 点である。加振力でトリガー（プレトリガー時間 0.01s）をかけ、列毎に 7 点の同時計測を行った。なお、使用した加速度計の質量は 0.5g、サンプリング周波数は 12.8kHz、データライン数は 16386 で、計測した応答は加振力の最大値で正規化し、同時性を確保した。

Fig.6 Examples of direct measured transient energy responses at a single point on the receiver plate of the steel structure under impulsive excitation

Fig.7 Examples of 1/3 octave band filtered energy responses in 2.5 kHz band at a single point on the receiver plate of the steel structure under impulsive excitation

4・2 応答エネルギー

4・2・1 周波数バンド処理なしの場合

加振力と加振点速度（加速度データを時間積分）およびこれらより求めた入力パワーの瞬時値の一例を図 5 にそれぞれ示す。図 5(a)の入力力には、二度たたきではないものの入力直後に負の値となっており、負の入力パワー（図 5(c)）が現れている。本報ではこのような衝撃入力パワーを図 2 に示すような三角波としてみなすことを考える。また図 6 には、図 4 中の点 A ($x=0.175\text{m}$, $y=0.025\text{m}$)と点 B (0.175m , 0.475m)での応答エネルギーの瞬時値を示す。これは計測した応答加速度を時間積分した応答速度の二乗に平板 2 の質量を乗じて求めたものである。これより得られる情報は、入力平板 1 に近い点 B の応答エネルギーは点 A より大きいこと程度であり、応答エネルギーが最大となる時間の違いは確認しにくい。

4・2・2 周波数バンドでの整理

次に、周波数バンド処理を行った結果について検討する。バンド処理の手順は以下の通りである。

- 計測した加振力と加速度の時刻歴データをそれぞれ FFT 処理する
- 加速度スペクトルから速度スペクトルに変換する
- 加振力と速度のスペクトルを周波数バンド毎にそれぞれ分割する

- (d) 加振力と速度スペクトルを周波数バンド毎にそれぞれ IFFT 処理し, 加振力の時刻歴データの最大値で速度の時刻歴データを除し, これを速度の時刻歴データとする
- (e) 二乗速度を求め, 平板質量を乗じ, 衝撃応答エネルギーの時刻歴データを算出する

図 7 に, 点 A と点 B の周波数バンド毎の応答エネルギーの算出結果 (1/3 オクターブバンド 2.5kHz) の一例を, 図 6 に対応して示す. 点 B の応答エネルギーの最大値は点 A より大きく, 到達時間の違いは判別しにくい. なお, 一つの要素内においても位置により衝撃応答エネルギーは異なる.

4・3 要素内の応答エネルギー分布

次に, 計測点による違いを調査するために, 70 点の計測データを $4 \cdot 2 \cdot 2$ 項で述べた処理を施し得られた衝撃応答エネルギー波形 (図 7 参考) から応答エネルギーの最大値 $E_{2,max}$ とその到達時間 T_{max} (プレトリガー時間 0.01s を含む) を読み取った. 70 点の最大値 $E_{2,max}$ を図 8(a) に, 到達時間 T_{max} を図 9(a) にそれぞれ○印で示す. これらの図は, 各横軸が受振平板 2 に相当し, 左図は図 4 の y 座標を, 右図は x 座標を横軸にしたもの, すなわち左図は平板 2 の長手方向, 右図は幅方向のそれぞれの値の分布を表している. ○印は, 各計測点の座標 (x,y) より, 左図では横軸の相当する y 座標上に, 右図では x 座標上に, $E_{2,max}$ と T_{max} をそれぞれプロットしたものである. また図中の■印は, 全 70 点の応答エネルギーの時刻歴波形 (周波数バンド毎の) を加算平均した応答エネルギー波形から求めた最大値 ($1.26 \times 10^{-8} \text{J}$) と到達時間 (0.0245s, プレトリガー時間 0.01s を含む) であり, 全計測点の平均座標すなわち受振平板 2 の中央点すなわち重心 (0.175m, 0.250m) の $y=0.250$ および $x=0.175$ 上に示している.

Fig.8 Distributions of maximum values, $E_{2,max}$, of receiver plate 2 (■ presents maximum value, $1.26 \times 10^{-8} \text{J}$, of all responses averaged) at 2.5kHz in 1/3 octave band

図 8(a), 図 9(a)共に計測位置による違いがあることがわかる。なお, 図 8(a)の左図からは入力平板 1 から遠ざかる点 (y 座標が小さくなる) ほどに応答エネルギーの最大値が小さくなる傾向が伺える。2.5kHz の曲げ波伝播速度は 220m/s であり, たとえば 0.02s の間に平板 2 (長手方向 0.5m) を波は 4 往復以上も進む。そのため, 波が進行するほどに減衰されエネルギーの振幅も小さくなることから納得できる。

4・4 応答エネルギーの空間平均処理

次に, 全 70 点の結果の空間平均について考える。70 点からランダムに 6 点および 10 点を 300 セットそれぞれ選択し, 前節の全平均値の算出と同様に, 周波数バンド毎の応答エネルギーの時刻歴波形を加算平均し, その波形から最大値と到達時間を算出した。これらの結果を図 8 および図 9 の(b)と(c)にそれぞれ示す。またこれらの図においても, 6 点ないし 10 点の平均結果は, 計測点の平均座標(x, y)の y 座標および x 座標上に○印で示している。

図 8(b)と(c)の応答エネルギー最大値の結果より, 計測点の平均座標が重心に近い空間平均結果ほど 70 点平均の結果 (■印) に近い値となることがわかる。また, 入力平板から遠くなるほど (すなわち y 座標が小さくなるほど), 応答エネルギー最大値は小さくなることが明らかである。また, 平均点数も 6 点より 10 点と多くとるほどに平均結果が 70 点平均の結果に近くなる割合が増すことも確認できる。一方, 図 9(b)と(c)の到達時間はいずれの平均結果も 70 点平均の結果 (■印) と概ね一致していると言える。このように到達時間の違いが少ないことは, 2.5kHz の曲げ波伝播速度は 220m/s であり, たとえば 0.02s の間に平板 2 (長手方向 0.5m) を波は 4 往復以上も進むということから納得できよう。

以上の結果から, 複数の計測点の平均座標が要素の重心と一致するように選択すれば, 要素の衝撃応答を代表しうるものと考えられる。

Fig.9 Distributions of rise times, $T_{\max}$, of receiver plate 2 (■ presents rise time, 0.0245s, of all responses averaged) at 2.5kHz in 1/3 octave band

5. 実験検証法の適用

本章では、前章で示した知見から TSEA 結果の実験検証法を提案し、矩形平板と三角形平板をそれぞれ要素とする構造物二種の TSEA 結果の検証を実施し、本提案法の有効性を検討する。

5・1 提案する実験検証法

SEA も TSEA も要素間のエネルギー収支に着目し対象全系の振動騒音解析を行う手法であり、その解析結果は要素単位となる。一方、実構造物では、要素が空間的な大きさを有するため、SEA や TSEA 結果と比較する場合には、複数点での応答平均として考えることが一般的であろう。定常問題を扱い周波数領域の解析を行う SEA 結果の検証には、要素内の平均的な応答となるような複数点を選択する⁽²⁾。このとき定常状態の振動分布は固有モードから想像することができ、計測点を比較的容易に選択することができる。一方、衝撃応答は、図 7 および図 8(a)と図 9(a)に示したような結果となり、入力要素に近いほど応答エネルギーは大きくなる傾向は伺えるものの、要素代表としての計測点の選択は困難と言える。

したがって、TSEA 結果の検証においては、図 8 および図 9 の(b)と(c)にそれぞれ示したように、複数の計測点での応答波形の平均をとり、計測点の平均座標が要素の重心（例えば要素が矩形平板である場合には平板要素の中央点）となるように計測点を選択すればよいと考え、これを TSEA 結果の実験検証法として提案する。

5・2 矩形平板構造物での検討

第 4 章で用いた対象物（図 4）と計測データを用いて、本提案法の有効性を検討する。

5・2・1 実験 SEA モデルの構築

はじめに、実験 SEA モデル $\mathbf{L}$ を構築する。構築方法⁽²⁾およびモデルの結果の詳細は省略するが、1/3 オクターブ 315Hz バンド以上で良好な定常応答予測が可能なモデルであることを確認した。

Fig.10 An example of evaluation of power input in TSEA calculation for the steel L-shaped structure of 2.5kHz in 1/3 octave band

5・2・2 TSEA 解析

時不変の損失率で表される $\mathbf{L}$ を式(3)の $\mathbf{L}_{\text{TSEA}}$ として TSEA 解析をルンゲクッタ法により実施する。このとき、入力として入力パワーの時間履歴が必要である。本報では三角波入力（図 2）を用いるが、最大値 $P_{\max}$ と継続時

間 τ を計測結果に対応させる必要がある。そこで本報では、第 3 章の知見である、 $P_{\max}$ と τ により応答エネルギーの最大値は比例し、到達時間は不変であることに基づき、以下のように $P_{\max}$ と τ を設定した。

- 瞬時入力パワーを周波数バンド毎に求める
- 瞬時入力パワーの最大値 $P_{\max}$ と時間積分値 S (ただし積分時間の間隔は十分に入力パワーが小さくなる 5.0×10^{-2} s とする) をそれぞれ求める
- 時間積分値 S の 2 倍を $P_{\max}$ で除し、継続時間 τ を決定する

上記の手順について図 10 で例示する。手順(a)では、計測した加振力および加振点加速度の時刻歴波形から FFT 処理し、加速度は速度に変換した後に周波数バンド分けを行い、IFFT 処理により時刻歴波形を求める (図 10(a) と (b))。次いで、これらの積として入力パワーの時刻歴波形を求める (図 10(c))。求めた周波数バンド毎の入力パワーの時刻歴波形 (図 10(c)) から最大値 $P_{\max}$ を読み取り、ピークを十分に含む 5.0×10^{-2} s 間のデータを時間積分して時間積分値 S を求める。これらから図 2 のような三角波入力 (二等辺三角形) の高さを $P_{\max}$ とし、三角形の面積が時間積分値 S となるように、底辺に相当する継続時間 τ を求める。これより TSEA 解析用の入力パワーの時刻歴波形を図 10(d) の Evaluated に示すように作成する。

5・2・3 TSEA 結果の検証

図 11 に、受振平板 2 の応答エネルギー波形の比較例 (2.5kHz バンド) を示す。ここでの計測結果は、提案する検証法 (計測点の座標平均が要素の重心に一致するように選択した 6 点) での平均結果である。TSEA 基礎式は厳密ではない⁽³⁾こともあるが、計測結果との対応は概ねこのようであった。

図 12 には、最大応答エネルギー $E_{2,\max}$ と到達時間 $T_{\max}$ (プレトリガー時間 0.01s を含む) を周波数バンド毎に比較した結果を示す。なお図には実験 SEA モデルの精度が悪い低い周波数バンドの結果 (網掛け部) も参考を示している。低い周波数バンドでは到達時間に違いが見られるものの、最大応答エネルギー、到達時間ともに、TSEA 結果と実測結果は良い対応が確認できる。

Fig.11 Comparisons of transient subsystem energy response on the receiver plate in 2.5kHz band between measured and predicted by TSEA in case of the steel L-shaped structure as shown in Fig.4

Fig.12 Comparisons of the maximum transient energy response and its rise time between measured and predicted by TSEA in case of the steel structure as shown in Fig.4

5・3 三角形平板構造物での検討

次に、図 13 に示すアクリル製の三角形平板を要素とする対象系を用いて検討する。各三角形平板（板厚 5.0mm）の大きさは、入力平板 1 は底辺 0.295m で高さ 0.385m、受振平板 2 は底辺 0.295m で高さ 0.450m である。支持条件は二つの頂点をゴムひもで吊るした自由状態である。

Fig.13 The system with two triangular flat acryl plates

本対象の実験 SEA モデルの構築および TSEA 解析の入力パワーの扱いについては、5・2・1 項および 5・2・2 項と同様である。ただし、アクリルは鋼に比べ減衰が大きいので、構築した実験 SEA モデルの有効下限周波数バンドは前節の鋼製構造物より低い 125Hz バンドであった。

はじめに、6 点の計測点の平均座標が要素の重心に一致する場合（図 13 中の点 A：平板 1 からの垂直距離 0.150m）と、平均座標が重心より入力平板 1 に近い場合（点 B：0.075m）、遠い場合（点 C：0.225m）の三つの計測点の平均座標による違いについて示す。図 14 に、計測結果と TSEA 結果の比較を示す。図 8 と同様に、計測点の平均座標が入力平板 1 に近いほど、応答エネルギーの最大値は大きくなっており、平板 2 の重心である点 A での計測結果と TSEA 結果は良い対応を確認することができる。また、到達時間は平均座標による違いは小さくなっているが重心である点 A と TSEA 結果は良く対応している。

Fig.14 Comparisons of the maximum transient energy response and its rise time between predicted by TSEA and measured at 2.5kHz band in 1/3 octave band in case of the acryl structure as shown in Fig.13

次に、計測点の平均座標が要素重心（点 A）と一致するような計測点 6 点を上記の他に 2 セット用意し、計測データを処理した。図 15 に、周波数バンド毎の最大応答エネルギー $E_{2,max}$ と到達時間 T_{max} の計測結果と TSEA 結果との比較を示す。図 12 の矩形平板要素の場合と同様、両者の結果はおおむね一致している。しかしながら、計測点の平均座標が重心に一致していても、低い周波数バンドではセットによる違いが確認できる。図 15(a)の最大

応答エネルギー $E_{2,max}$ ではセット 1 は他の結果とずれているが、図 15(b)の到達時間 T_{max} ではセット 3 がずれており、セットによるずれの関係は見られない。このような低い周波数域における計測による違いは定常問題の SEA 解析の際にもしばしば経験されることであり、モード数が少ないために不安定な応答特性を示しているためと思われる。

以上より、計測点の平均座標が要素の重心に一致する複数の点での応答計測を実施し、その平均をとるという 5・1 節で提案する実験検証法は、TSEA 結果と対応した結果となり、TSEA 結果の検証に有効であることが確認された。

Fig.15 Comparisons of the maximum energies and the rise times between measured and predicted by TSEA in case of the acrylic L-shaped structure as shown in Fig.12

6. お わ り に

本報では、TSEA 結果を検証するための実験方法の確立を目指し、一様平板で構成される構造物を対象に検討を行った。以下に成果をまとめる。

- (1) TSEA 結果に及ぼす瞬時入力パワーの影響について三角波入力を想定し考察を行い、応答エネルギーの最大値および時間積分値は入力パワー（最大値，継続時間）の時間積分値に比例し，到達時間はこれらの影響は受けないことを明らかにした。
- (2) 矩形平板要素で構成される対象系において，時刻歴応答計測を多数点で実施し，過渡振動エネルギーの応答挙動を調査した。その結果，入力要素に近い応答点ほど応答最大値は大きく，最大到達時間は周波数による曲げ波の伝播速度が速いために場所による違いは小さいことを確認した。
- (3) 計測点の平均座標が要素の重心と一致するように選択した複数の点の応答平均が，TSEA 結果と対応することを明らかにした。また，これに基づく方法を TSEA 結果の実験検証法として提案した。
- (4) 矩形平板および三角形平板からなる対象系に本提案法を適用し，TSEA 結果を検証することができることを示した。

文 献

- (1) R.H.Lyon, "Statistical Energy Analysis of Dynamical System, Theory and Application", MIT Press, 1975.
- (2) 山崎徹，黒田勝彦，森厚夫，"SEA による機械製品の固体音低減プロセス"，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 73, No. 726 (2007), pp. 446-452.
- (3) 山崎徹，石川慧介，マクシュトフ・スタニスラフ，黒田勝彦，"過渡 SEA の二自由度系による基礎的検討"，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 74, No. 740 (2008), pp. 773-779.
- (4) C.T.Musser, S.Young, "Application of Transient SEA for Vehicle Door Closure Sound Quality", *Proceedings of 2005 SAE Noise and Vibration Conference*, (2005), 2005-01-433.
- (5) M.L.Lai, A.Soom, "Prediction of Transient Vibration Envelopes Using Statistical Energy Analysis Techniques", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.112 (1990), pp.127-137.