331 自動車トリムドボディのための SEA モデル化に関する研究

Development of SEA Model for Trimmed Body using FEM

○ 内海 智志 (東大院) 桑原 隆弘 (神奈川大工) 正 山崎 徹 (神奈川大工)
正 見坐地 一人 (本田技研) 正 鎌田 実 (東大工)

Satoshi UTSUMI, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

Takahiro KUWABARA, Kanagawa University

Toru YAMAZAKI, Kanagawa University

Kazuhito MISAJI, HONDA R&D CO.,LTD. TOCHIGI R&D CENTER

Minoru KAMATA, The University of Tokyo

We have proposed a technique for SEA model construction using FEM, which is called FEM-SEA. Using this method, we can build the SEA model without actual experiment. The purpose of the research was building the FEM-SEA model for an automobile trimmed body, which is white body with floor carpet. As a basic study, we examined the vibration character of steel plate with floor carpet. The result showed that a FEM model consisting damped oscillator could describe the vibration of steel plate with floor carpet. Application of this FEM model to actual parts of automobile clarified effectiveness of this model comparing with actual value.

Key Words : Statistical Energy Analysis, Finite Element Analysis, Trimmed body, Floor Carpet

A1. はじめに

中高周波数帯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) が注目されている。著者らは, SEA モデルを構築する際に必要な SEA パラメータを, FEM を用いて算出する方法 (以下, FEM-SEA) を提案し, 同手法を箱型構造物や自動車のホワイトボディへの適用し成果をあげてきた。本研究では, より実車に近い対象である, トリムドボディの FEM-SEA モデルを構築することを目的とする。このトリムドボディとは, ホワイトボディのフロア部に, 内装材の一種であるフロアカーペットをのせたものを指す。フロアカーペットをモデル化するために, まず単純な鋼板にフロアカーペットの振動系のメカニズムを実験から把握し, FEM-SEA モデル化をした。このモデルを実車パーツの一部に応用し, 算出された SEA パラメータを実測値と比較することで, 有効性を検討する。

A2. フロアカーペットの振動特性把握

フロアカーペットがのった鋼板の振動系のメカニズムを把握するために以下のような項目で実験を行い, SEA パラメータである内部損失率で評価した。

- (1) 鋼板とフロアカーペット間の摩擦係数による影響の有無
- (2) 振動減衰の種類同定
- (3) 入力加振力による影響の有無

1 では, 摩擦係数による影響を, トレーシングペーパーを用い, その有無による比較を行うことで調べた。その結果, 内部損失率に変化は見られず, 摩擦係数による影響がないことがわかった。よって, この振動系は厚さ方向の運動のみ考慮すればよいとわかった。2 では, フロアカーペットの有無による影響を周波数ごとに見た。フロアカーペットの減衰効果が周波数依存を持つことから, 粘性減衰で近似できるとわかった。よって, バネマスダンパ系で表現することとした。さらに 3 から, 実験の設定範囲では, 加振力に

よる内部損失率に変化は見られなかった。よって, この振動系が考えている振幅範囲に対して線形モデルで記述可能であることがわかった。以上より, この振動系は鋼板の厚さ方向への運動を考慮した, 線形なバネマスダンパ系でモデル化できると考えた。

A3. フロアカーペットのモデル化

実験で得られた知見をもちに, 二枚の plate 要素の間をバネとダンパにあたる spring 要素でつなぐことで, 鋼板とフロアカーペットを FE モデル化した。このモデルによって算出された内部損失率を, 実測値と比較することで整合性を確認した。

A4. 実車パーツへの応用

鋼板とフロアカーペットをモデル化した際と同様の手法で, 実車の一部のパーツを FE モデル化した。ここでいう実車のパーツとはダッシュボードとフロア部の右前部分の要素を示しており, フロア部側にはフロアカーペットが置かれる。

このモデルによるシミュレーション値は, フロアカーペットがある場合とない場合では, ダッシュボードの内部損失率は違いがないが, フロア部の場合はフロアカーペットによって内部損失率が増加するという点で, 実測値と一致していた。ただし, ここで求めた粘性摩擦係数は理論的に求めたものではない。今後は, 鋼板と実機パーツの内部損失率の違いを考慮した算出方法を理論的に明らかにする必要がある。

A5. おわりに

本研究では, 単純な形状である鋼板に対する実験から, 鋼板とフロアカーペットの振動系をバネマスダンパ系で表せることがわかった。構築した FEM モデルによって, トリムドボディの実機パーツの SEA パラメータを, 予測することができた。同様の手法を用いて他の要素をモデル化することで, トリムドボディ全体の FEM-SEA モデルを構築することができると考えられる。

1. はじめに

複雑な構造物の中高周波数帯の振動解析手法として、統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis; 以下 SEA)⁽¹⁾が注目されている。自動車を対象とした低周波数帯での振動解析は FEM が実用化されているが、FEM を用いた高周波数帯での振動解析は非常に細かいメッシュが必要となり、計算時間が膨大となるため、現実的ではない。⁽²⁾そこで、本来ロケット等宇宙機器を対象として開発され、船舶や建築等大型構造物の分野で研究が行われてきた SEA だが、近年では自動車への適用が検討されている。⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

著者らもこれまでに SEA の自動車への適用を目指し研究に取り組んでいる。一般に、SEA モデルを構築する際に必要となる内部損失率 (Internal Loss Factor) と結合損失率 (Coupling Loss Factor) という二つの SEA パラメータは、比較的単純な構造物の場合、理論式から算出することができる。しかし、自動車のような複雑な構造物が対象の場合、実験的にこれらのパラメータを評価する必要がある。そこで筆者らは FEM 解析から SEA パラメータを算出することで、完全に机上で振動予測をする手法 (FEM-SEA) を提案してきた。同手法を用いて、要素形状と結合形状が単純な箱型構造物⁽⁶⁾をはじめとして、要素形状が複雑で結合形態を単純とした実車パーツ⁽⁷⁾、要素形状が単純で結合形態が複雑である平板構造物⁽⁸⁾と対象を広げ、図 1(a)に示すような実車のホワイトボディでも成果を挙げている。⁽⁹⁾

本研究では、より実車に近い対象としてトリムドボディの FEM-SEA モデルの構築を目的とする。ここでいうトリムドボディとは、図 1(b)に示すように、自動車の骨格部分であるホワイトボディのフロア部に、内装材の一種であるフロアカーペットを載せたものを指す。トリムドボディの FEM-SEA モデルを構築するために、まずフロアカーペットが構造部の振動に与える影響を実験的に検討した。このと

(a) Front view of whitebody

(b) Floor panel with floor carpet

Fig.1 Tested automobile

き、複雑な構造である自動車を対象とするのではなく、より単純な対象として、車体と同じ材料、同じ板厚の平板にフロアカーペットをのせたものを対象として選択した。実験的によって得た知見から、フロアカーペットがのった平板のモデルを構築し、シミュレーション値と実測値を比較して、整合性を確認した。このモデルを実車の一部の要素に応用し、モデルの有効性を評価した。

2. フロアカーペットの振動特性

車面にのったフロアカーペットが構造部の SEA パラメータへ与える影響を予測できる FEM-SEA モデルを構築するために、フロアカーペットの振動メカニズムを把握する必要がある。しかし、車体レベルでの検討は難しいので、図 2 に示すような車体と同じ材質で、同じ板厚の鋼板の上にフロアカーペットをのせた振動系のメカニズムを把握する。

2.1 振動メカニズムについての仮説

一般的な樹脂やアスファルト等の粘弾性材料でできた制振材は鋼板に拘束されていて、基板の加振応力による変形から生じる粘弾性層の伸び縮みを利用することで基板の振動エネルギーを吸収する。しかし、今回考えるフロアカーペットは鋼板に拘束されていないので、このメカニズムとは異なる原理で鋼板の振動を減衰させていると考えられる。そこで鋼板にフロアカーペットを載せた振動系に関して以下のような仮説を立てた。

- ・フロアカーペットの柔らかい層がバネとダンパーの役割をしていて、鋼板の振動を減衰させている
- ・フロアカーペットと鋼板の表面が擦れ合うことで摩擦力が発生し、鋼板の振動が減衰している
- ・フロアカーペットによる減衰効果は、加振力に対して非線形性をもつ

Fig.2 steelplate with floor carpet

Fig.3 Excitation point

Fig. 4 Influence of friction

Fig. 5 Comparison with different type of damping

2.2 検証実験

フロアカーペットがのった鋼板を対象に、以下のような項目について加振実験を行い、得られた内部損失率を比較することで、上記の仮説を検証した。加振実験は、図3に示すような位置を動電型加振器によって加振し、その応答を加速度計を用いて36点で計測することで行った。得られた加速度応答を平均化し、以下の式(1)に代入して内部損失率を算出した。

$$\eta = \frac{P}{\omega E} \quad (1)$$

ただし η ; 内部損失率, P ; 入力パワー, ω ; 角振動数, E ; 振動エネルギーである。

(a) 摩擦力による影響を検討する実験

鋼板とフロアカーペットの間の摩擦力による減衰効果を調べるために、トレーシングペーパーを用いて加振実験を行った。図4に示すようにトレーシングペーパーによる違いはないことから、摩擦力による減衰はなく、鋼板とフロアカーペットの振動は厚さ方向のみ考慮すればよいことがわかった。

(b) 減衰の種類を同定する実験

制振材付きの鋼板に対して、同様の加振実験を行い内部損失率を算出し、図5にその結果をまとめた。制振材付きの鋼板は内部損失率に周波数依存性がなく、一般に知られる構造減衰による減衰であることが確認できる。フロアカーペットによる減衰はそれとは異なり、周波数依存性をもつ。したがって、この減衰を粘性摩擦によるものと考えた。

Fig. 6 Influence of input force

Fig. 7 Image of FEmodel of steel plate with carpet

(c) 加振力による影響を検討する実験

フロアカーペットがのった鋼板への加振実験を、加振力を変えることで行い、内部損失率を算出した。図6から、加振力による内部損失率の変化はないことがわかる。したがって、フロアカーペットによる減衰力は、実験で設定された範囲では、加振力に対し線形であることがわかる。

以上の検討により、鋼板とフロアカーペットの振動系を厚さ方向の運動を考慮した線形なバネマスダンパ系でモデル化できると考えられる。

3. フロアカーペットのモデル化

3.1 モデル概要

前章で得た知見をもとに、鋼板とフロアカーペットの振動系を線形なバネマスダンパ系でモデル化する。鋼板とフロアカーペットを、図7に示すように、二枚のplate要素とそれらをつなぐバネダンパの役割となるspring要素でモデル化した。また、下側のplate要素を、前章での加振実験のときと同等の拘束条件になるように、四隅の変位を拘束した。物性値に関しては、下側のplate要素には鋼板の物性値を入力し、上側のplate要素はフロアカーペットの材料試験から得られた物性値を使用している。spring要素のバネ定数に関しては、フロアカーペットの材料試験によるヤング率、ポアソン比を入力したsolid要素に等分布荷重をかけ、その変位から算出した。また、フロアカーペットの減衰効果が低周波帯域で大きく、高周波帯域で小さいことから、最も影響が大きいと考えられる、一次の固有振動数での減衰係数を用いて、粘性摩擦係数を以下のように算出した。

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

(a) steelplate

(b) steelplate with floor carpet

Fig.8 Calculated Internal Loss Factor and actual value

$$\omega = \left[\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \right] \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (3)$$

$$C_0 = 2m\omega \quad (4)$$

$$nC = C_0 \zeta \quad (5)$$

ただし E ; ヤング率, h ; 板厚, ν ; ポアソン比, D ; 曲げこわさ, ρ ; 密度, m ; 質量, C_0 ; 臨界粘性摩擦係数, n ; 節点数, C ; 一節点あたりの粘性摩擦係数, ζ ; 減衰係数, である.

まずフロアカーペットのヤング率とポアソン比, 板厚を式(2)に代入し曲げこわさを求める. 次に式(3)を用いて, 一次の固有振動数を求める. 式(4)から固有振動数から臨界粘性摩擦係数を算出し. 最後に式(5)を用いて, 材料試験で測定した減衰係数から一要素あたりの粘性摩擦係数を求める.

3.2 シミュレーション結果と実測値

FE モデルで実験と同様の場所を加振し, 振動解析を行い, 内部損失率を算出した. 実験では36点で応答をとったが, FEM 解析では全節点での応答から内部損失率を算出した. また, 比較として, フロアカーペットをのせていない鋼板のみのFEモデルについても内部損失率を算出した.

鋼板のみの内部損失率を図8(a), 鋼板とフロアカーペットの内部損失率を図8(b)に示す. 図8(a), 図8(b)からシミュレーションの結果が, フロアカーペットによって内部損失率が上昇することを実測値の結果と同様に示している. また, フロアカーペットによる内部損失率への影響は, 周波数があがるにつれて少なくなるという傾向も, 実測値と同様に示している. したがって, このモデルの整合

Fig.9 Dashboard-Right front floor without floor carpet

Fig.10 Dashboard-Right front floor with floor carpet

性が示されたといえる.

4. 実車パーツへの応用

前章で提案したモデルを, トリムドボディの一部の要素に応用し, シミュレーション結果と実測値を比較することでモデルの有効性を示す.

4.1 モデル概要

ボディ全体のFEM-SEAモデルを構築する際には, 隣接した2要素のモデルに対する解析を行うことで, その要素間の結合損失率と内部損失率を算出する. この解析をすべての組み合わせで行うことで, 全要素についてのSEAパラメータを取得し, FEM-SEAモデルを構築する.⁽⁹⁾

本研究では, 対象車両を38要素に分割した. いくつかある隣接した2要素のなかでも, 一方の要素にフロアカーペットがあり, もう一方の要素にフロアカーペットがのらない組み合わせとして, フロアパネルの右前部とダッシュボードを対象として選んだ. 図9にホワイトボディのダッシュボードとフロアパネル右前部のFEモデルを, 図10にトリムドボディのFEモデルを示す.

4.2 シミュレーション値と実測値の比較

FEM解析によって算出したSEAパラメータを評価するために, 図1(a)図1(b)に示す車両から実験的にSEAパラメータを取得した. SEAパラメータを実験的に求めるには, パワー注入法の理論に基づいて打撃実験を行う. 打撃実験はある要素をインパクトハンマで加振した際の, その要素および隣接する要素について計測を行う. なお加振点は一要素につき3点とし, 応答点は6点とした. 得られたデータから, 入力パワーと各要素の振動エネルギーを算出し, 以下の式に代入して内部損失率と結合損失率を算出した.

(a) Actual value

(b) Calculated value

Fig.11 Internal Loss Factor of right front floor panel

$$\eta_i = \frac{P_i}{\omega E_{ii}} \quad (6)$$

$$\eta_{ij} = \frac{E_{ij} P_j}{\omega E_{ii} E_{jj}} \quad (7)$$

ただし、 η_i ：要素 i の内部損失率、 η_{ij} ：要素 i から j の結合損失率、 P_i ：要素 i への入力パワー、 E_{ij} ：要素 i 加振時の要素 j の振動エネルギーである。

FEM による SEA パラメータは、一方の要素を加振したときの各要素の節点の応答から振動エネルギーと入力パワーを算出し、式(6)、(7)から内部損失率と結合損失率を求めた。なお今回は、トリムドボディの SEA パラメータだけではなくホワイトボディの SEA パラメータも算出した。

求めた SEA パラメータのうち、特にフロアカーペットの影響が大きい内部損失率について、図 11(a)、図 11(b)、図 12(a)、図 12(b)に示した。フロア右前部の内部損失率について、シミュレーション値を図 11(a)に実測値を図 11(b)に示した。ダッシュボードの内部損失率については、図 12(a)にシミュレーション値を、図 12(b)に実測値を示す。まず、図 11(a)、図 11(b)からシミュレーション値が、フロアカーペットによって、フロア部の内部損失率の増加を予測できたことがわかる。また増加の周波数特性も、実測値に近い傾向をしめしているといえる。図 12(a)、図 12(b)から、フロアカーペットが直接置かれていないダッシュボードには、隣接した要素のフロアカーペットによる影響がないことを実測値、シミュレーション値、共に示している。したがって、このモデルの有効性が示されたといえる。

ただし、このモデルの粘性摩擦係数の値は、前章の式(2)(3)(4)(5)から算出したものではない。実機パーツのような複雑な構造の場合、単純な鋼板に比べて二桁ほど高い内部損失率を示す。したがって、鋼板の場合と同じ粘性摩

(a) Actual value

(b) Calculated value

Fig.12 Internal Loss Factor of dashboard

擦係数では、実機パーツの上ののったフロアカーペットによる減衰効果を予測することができない。したがって、対象の内部損失率に応じた粘性摩擦係数の算出方法が求められるが、今回は理論的な算出方法にまでは至らなかった。今後は理論的な粘性摩擦係数の算出方法の確立がもとめられる。

5. 結論

本研究では、自動車トリムドボディの FEM-SEA モデルの構築を目的として、鋼板や実車トリムドボディを対象にモデル化に関する検討を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 単純な構造物である鋼板を対象に、フロアカーペットが振動系に与える影響を実験的に検討することで、フロアカーペットがのった鋼板を線形なバネマスダンパ系で表せることがわかった。
- (2) FE モデル上でフロアカーペットをバネダンパを使うことで、モデル化し、鋼板だけではなく、実車パーツでの、フロアカーペットによる内部損失率の上昇を表すことができた。ただしモデルのパラメータの設定には検討の余地がある。

今後同様の手法を用いて、他の隣接要素について FE モデル化を行い、これらを用いてトリムドボディの FEM-SEA モデル構築できると考えられる。

参考文献

- (1) R.H.Lyon Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems, Theory and Applications, MIT Press (1975)

- (2)三浦 登, 福田 水穂 自動車設計と解析シュミレーション 培風館 (1990)
- (3)入江 良彦, 本田 巖, SEA 法による固体伝搬解析, 日本船用機関学会誌, Vol.19, No.3, (1984), pp.257-266.
- (4)J.L.Guyader, C.Boisson, C.Lesueur Sound Transmission by Couple Structure:Applocation to Franking Transmission in Building Journal of Sound and Vibration (1986)
- (5)James A.Moore, Development of Condensed SEA Midels of Passenger Vehicles, SEA paper, 1999-01-1699, (1999)
- (6)鎌田, 山崎, 竹原 統計的エネルギー解析法の自動車振動予測への適用に関する基礎的検討 - 簡易構造物での検討 - 自動車技術開論文集, Vol.28, No4 pp.49-54 (1997)
- (7)大河原, 山崎, 鎌田 FEM による自動車パーツのSEAモデルの構築, 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2000 CD-ROM 論文集, No, 00-6, 332 (2000)
- (8)山崎, 鎌田, 須藤 FEM による結合損失率の評価 - 結合形態による変化 - 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2001 CD-ROM 論文集, No, 01-5, 118 (2001)
- (9)田邊, 山崎, 見坐地, 西川, 鎌田 自動車NV用バーチャルプロトに向けたSEAモデルの開発 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2003 CD-ROM 論文集, 102(2002-9)