

複合タイプインシュレータの開発*

関根 智*¹, 清水 信行*², 山崎 秀夫*³
座古 勝*⁴, 松本 金矢*⁵Development of Silicone Gel Insulator Composed
of Coil Spring and Silicone GelSatoshi SEKINE, Nobuyuki SHIMIZU, Hideo YAMAZAKI,
Masaru ZAKO and Kinya MATSUMOTO

Silicone gel is a very promising new material for reducing shock and vibration in mechanical systems. An insulator composed of a coil spring and silicone gel is used for reducing small-amplitude vibration of mechanical and electrical parts. In the design stage, before insulator production, the vibration characteristics of the insulator, i. e. natural frequency and damping ratio, must be known. To achieve this, the vibration experiment and the finite element (FE) analysis have been conducted. The results of FE analysis are compared with the experimental ones. The two sets of results are shown to be in good agreement. From this study, it has been found that the composite type insulator is very effective in reducing the vibration of mechanical systems.

Key Words: Material, Silicone Gel, Composite-Type Insulator, FEM, Damping Characteristics

1. 緒 言

シリコンゲルは、機械システムの振動や、衝撃を緩和するのに有望な材料である。今回、コイルばねとシリコンゲルを複合したインシュレータを新たに開発した。これは、IC回路の基盤のような機械、電子部品の小さな振幅の振動を緩和するのに有効である。

インシュレータを製作するにあたって設計の段階であらかじめ振動特性、すなわち固有振動数、減衰比などを見積もっておく必要がある。そこで複合タイプインシュレータに対して振動台による加振実験と有限要素法(FEM)による数値解析を行った。本論文では実験結果とFEM解析の結果を比較し、シリコンゲルを用いた複合タイプインシュレータの防振特性を検討する。

2. インシュレータについて

シリコンゲルの素材を単独で使用した振動絶縁用インシュレータは、被防振体を載せたときの初期ひずみにより防振装置としての機能を十分に発揮できない恐れがあった⁽¹⁾⁽²⁾。そこでコイルばねとシリコンゲルを複合させたインシュレータを製作し、コイルばねにより被防振体の自重を支え、コイルばねのばね定数を上載質量に応じて変えることにより被防振体の質量による初期ひずみを少なくすることができるようにし

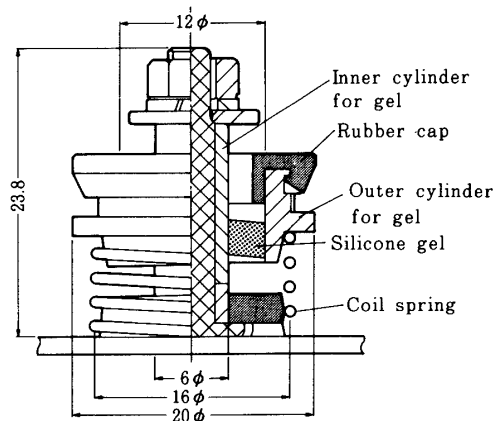


図1 コイルばね-シリコンゲル複合インシュレータ

* 原稿受付 平成5年5月10日。

*¹ 学生員, いわき明星大学大学院 (☎970 いわき市中央台飯野5-5-1)。*² 正員, いわき明星大学理工学部。*³ (株)シーゲル (☎424 清水市宮加三789)。*⁴ 正員, 大阪大学工学部 (☎565 大阪市吹田市山田丘2-1)。*⁵ 正員, 三重大学教育学部 (☎574 津市土浜町1515)。

た。

図1は今回開発したばね-シリコンゲル複合インシュレータである。寸法は図1に示すように直径：20φ、高さ：23.8mmの軸対象の基本形状にコイルばねを複合化したものである。

構成する材質は図1に示されているようにシリコンゲル、SUS 303, 304, ゴムなどである。これらの物理定数を表1に示す。またシリコンゲルの正弦波掃引試験による粘弾性特性(G' , G'' , $\tan \delta$)⁽¹⁾⁽²⁾を図2に示す。なお試験条件は文献(1)に示されている。

3. 複合インシュレータの防振特性の実験

複合インシュレータについての防振特性を明らかにするために振動台による動的実験を行った。

3.1 インシュレータについて 今回は表2に示すS-Type(soft), M-Type(medium), H-Type(hard)の3種類のコイルばねと1種類のシリコンゲル(θ ゲル)でそれぞれ構成される複合インシュレー

表1 インシュレータ材の比重, ポアソン比, せん断剛性

Item	Spec.Weight	Poisson's ratio	Shear Modulus
Material	[-]	ν [-]	G [N/m]*
Silicone Gel	1.001	0.46	Refer Fig.2
Cylinder (SUS303)	7.93	0.29	8.232×10^{10}
Cylinder (SUS304)			

* G is calculated from $G=E/2(1+\nu)$.

表2 設計質量とコイルばねのばね定数

Item	Design Mass [kg]	Spring Constant [N/m]
Coil Spring		
S-Type	0.125	349.9
M-Type	0.185	518.4
H-Type	0.300	839.9

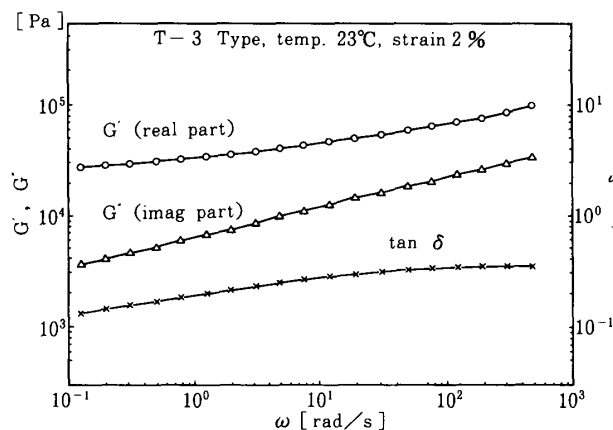


図2 シリコンゲル(θ ゲル)の正弦波掃引試験に対する粘弾性特性

タに対して行った実験について述べる。なお表2の設計質量とはインシュレータに上載する想定機器質量で、この質量とコイルばねの系の固有振動数が、いずれの場合にも、ほぼ8Hzになるように調節してある。

3.2 動的特性の実験 インシュレータの動的な振動特性を把握する目的で振動台上にインシュレータを4個同心円上に等間隔に設置し、この中心点上におもりの重心が一致するようにおもりを載せ、いわゆる共振法による実験を行い、周波数応答曲線を求め、これを基にインシュレータの動的な復元力特性を推定する。

3.2.1 実験方法と実験装置 図3に実験の流れ線図を示す。上載質量は3段階とした。なお上載質量に関しては、表2に示した設計質量(Design Mass)と実験で用いた上載質量は多少異なっている。

3.2.2 実験結果 図4における実験結果はM-Typeコイルばねと θ ゲルを複合化したインシュレータに対する加速度周波数応答関数 $G(j\omega)$ (=上載質量の加速度/振動台の入力加速度)である(なお、FEMの

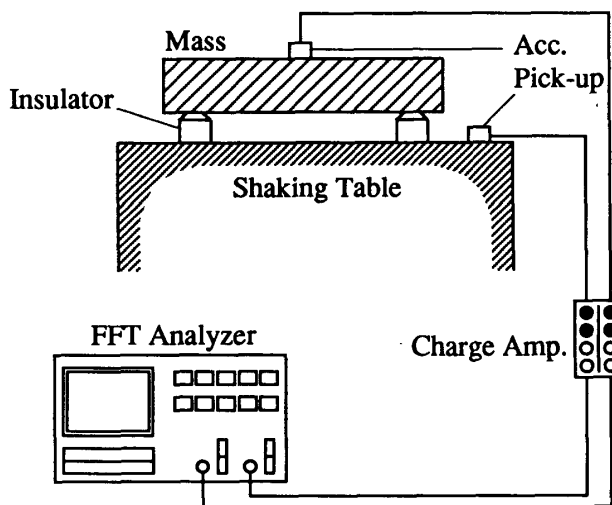


図3 動的共振法試験の流れ図

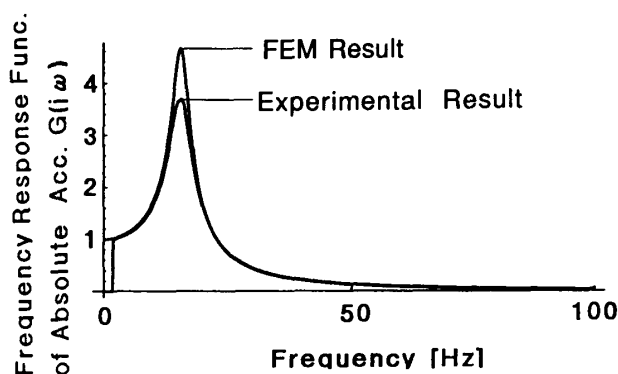


図4 上載質量-複合タイプインシュレータ系の加速度周波数応答関数

結果は5・3・2項で説明する)。この場合の実験条件は振動台の入力レベル0.98 m/s²(=0.1 g), 上載質量0.201 kg/個(上載質量は4個のインシュレータで支えられている)である。なお振動台の性能から約5 Hz以下の振動数では加力されない。またこの付近の振動数での振動台は不安定でありデータの信頼性は極めて低い。したがってグラフが急に立ち上ったり、データに不自然な急変化がみられる(これはほかの図6, 図11などでも同様である)。横軸は加振振動数 f (Hz), 縦軸は加速度周波数応答関数 $G(j\omega)$ (無次元)の絶対値である。複合タイプインシュレータのコイルばねの硬さがS-Type, H-Type に対してはほぼ同様の結果を得た。それらの結果を表3に示す。なお表3中の減衰比は図4の曲線のピーク幅より推定した。

4. 質点系の理論による実験結果の解釈

振動台での実験を理論的に解釈するために図5を考える。上載する質量を m とし, この質量の振動時の振動台からの相対変位を u , 振動台の変位を u_B とする。インシュレータのコイルばねのばね定数を k_s , シリコンゲル単独の複素ばね定数を k^* とすると, 実験における質量の運動方程式は

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_B) = (k_s + k^*)(u_0 - u) - mg \quad (1)$$

と書ける。ただし, u_0 はインシュレータの自然長(インシュレータ基部から上端までの長さ), g は重力の加速度である。ここで u_s をインシュレータに質量を載せたときの静的平衡位置の変位とし, 静的平衡位置からの複合インシュレータの相対変位を $x \equiv u - u_s$

表3 共振周波数, ピーク値減衰比

Item Type	Mass [kg]	Resonant Frequency [Hz]	Peak Resp. of FRF* [-]	Damping Ratio [-]
S-Type	0.134	18.00	3.24	0.169
M-Type	0.201	15.75	3.69	0.159
H-Type	0.323	12.75	4.12	0.108

* Frequency Response Function of Absolute Acceleration

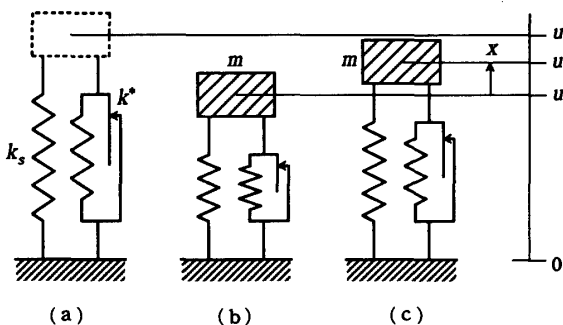


図5 自由度質量-複合インシュレータ系

とすると, 式(1)は $mg = (k_s + k^*)(u_0 - u_s)$ の関係を用いて

$$m\ddot{x} + k_e x = -m\ddot{u}_B \quad (2)$$

となる。ここで k_e, k^* , を

$$k_e \equiv k_s + k^* \quad (3)$$

$$k^* \equiv k\nu(\omega)\{1 + j\eta(\omega)\} \quad (4)$$

とし, k^* を周波数依存のばね定数 $k\nu(\omega)$ と損失係数 $\eta(\omega)$ により表す。ここで共振時 $[\nu(\omega)=1]$, 式(7)の下の文章参照)のシリコンゲル単独のばね定数 k に対するコイルばねのばね定数 k_s の比を

$$s = \frac{k_s}{k} \quad (5)$$

とおくと, k_e は

$$k_e = k[s + \nu(\omega) + j\nu(\omega)\eta(\omega)] \quad (6)$$

となる。ここで共振点法の実験で得られる無減衰時の共振角振動数 ω_n が

$$\omega_n^2 = \frac{k\{s + \nu(\omega_n)\}}{m} = \frac{k(s+1)}{m} \quad (7)$$

で与えられるとする。したがってこの $\omega = \omega_n$ に対しては $\nu(\omega) = \nu(\omega_n) = 1$ となる。

式(2)に式(3)~(7)を代入し, さらに u_B および x を

$$u_B = U_B e^{j\omega t}, \quad x = X e^{j\omega t} \quad (8)$$

とすると, (絶対)加速度周波数応答関数

$$G(j\omega) \equiv \frac{(j\omega)^2 X + (j\omega)^2 U_B}{(j\omega)^2 U_B} = \frac{X + U_B}{U_B} \quad (9)$$

は

$$G(j\omega) = \frac{s + \nu(\omega) + j\nu(\omega)\eta(\omega)}{\{s + \nu(\omega) - (s+1)\lambda^2 + j\nu(\omega)\eta(\omega)\}} \quad (10)$$

となる。ただし $\lambda = \omega/\omega_n$ とおいた。ここで

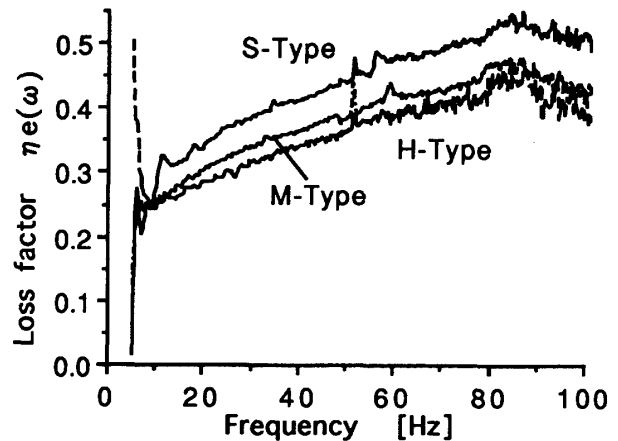


図6 振動台実験による複合タイプインシュレータの有効損失係数

$$G(j\omega) = G_R + jG_I \dots\dots\dots(11)$$

とおくと G_R, G_I は $\nu(\omega)$ と $\eta(\omega)$ の関数として表される。この関数を G_R と G_I を既知とし、 $\nu(\omega)$ と $\eta(\omega)$ を未知数として書き直す

$$\nu(\omega) = p - s \dots\dots\dots(12)$$

$$\eta(\omega) = \sqrt{\frac{-G_R(p - (s+1)\lambda^2)^2 - (s+1)p\lambda^2 + p^2}{\nu(\omega)^2(G_R - 1)}} \dots\dots\dots(13)$$

を得る。なお p は次式で表される 2 次方程式の根である (2 根のうち適切なほうを採用する)。

$$ap^2 + bp + c = 0 \dots\dots\dots(14)$$

$$a = G_I^2 + (G_R + 1)^2$$

$$b = -\{2G_I^2 + (G_R - 1)(2G_R - 1)\}(s+1)\lambda^2 \dots\dots\dots(15)$$

$$c = \{G_I^2 + G_R(G_R - 1)\}(s+1)^2\lambda^4$$

式(14)より p を求めこれを式(12)に代入して $\nu(\omega)$ を求める。さらにこれを式(13)に代入して $\eta(\omega)$ を求める。

設計の際に必要な複合系のばね定数 $k_e(\omega)$ は式(6)より

$$k_e = k(s + \nu(\omega)) \left\{ 1 + j \frac{\nu(\omega)\eta(\omega)}{s + \nu(\omega)} \right\} \dots\dots\dots(16)$$

と書ける。ここで $\nu_e(\omega)$ を、式(16)の実数部と $\omega = \omega_n$ のときの複合系のばね定数の実数部 $k(s+1)$ を用いて、 $k(s + \nu(\omega)) = k(s+1)\nu_e(\omega)$ とおく。すなわち

$$\nu_e(\omega) = \frac{s + \nu(\omega)}{s + 1} \dots\dots\dots(17)$$

と定義する。また $\eta_e(\omega)$ を式(16)の { } の虚数部に等しくおく。すなわち

$$\eta_e(\omega) = \frac{\nu(\omega)}{s + \nu(\omega)} \eta(\omega) \dots\dots\dots(18)$$

この $\nu_e(\omega), \eta_e(\omega)$ が複合タイプインシュレータの総合性能を示すものであり、シリコンゲル固有の値 $\nu(\omega), \eta(\omega)$ と区別すべきものである。

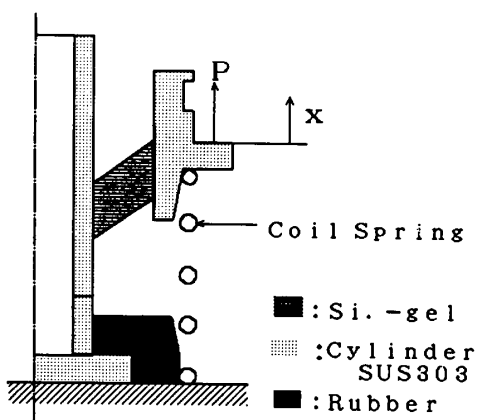


図7 上部加振の複合インシュレータモデル

これらの式を基に、実験で得られた加速度周波数応答関数より求めた有効損失係数 $\eta_e(\omega)$ を図6に示す。

5. 有限要素法による複合タイプインシュレータの数値解析

第2章で述べた複合タイプインシュレータの動特性を把握するために有限要素法による数値解析を行う。この解析の特徴は、振動数依存形の複素せん断剛性 $G(\omega) = G'(\omega) + jG''(\omega)$ を扱うことである。

5.1 インシュレータの振動理論

(a) 上部加振

図7に示すインシュレータの上部加振に対する運動方程式は

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K^*]\{x\} = \{f\} \dots\dots\dots(19)$$

と書ける。ここで $[M]$ および $[K^*]$ は有限要素法で定式化した場合の質量マトリックスおよび複素剛性マトリックスである⁽¹⁾。 $\{x\}$ および $\{f\}$ は節点変位ベクトルおよび節点外力ベクトルである。ここで正弦波励振 $\{f\}$ に対する正弦波定常変位応答 $\{x\}$ を考えると

$$\{x\} = \{X\}e^{j\omega t}, \{f\} = \{P\}e^{j\omega t} \dots\dots\dots(20)$$

と書ける。これらを式(19)に代入すると

$$([K^*] - \omega^2[M])\{X\} = \{P\} \dots\dots\dots(21)$$

となる。有限要素法の定式化は文献(1)で述べた。

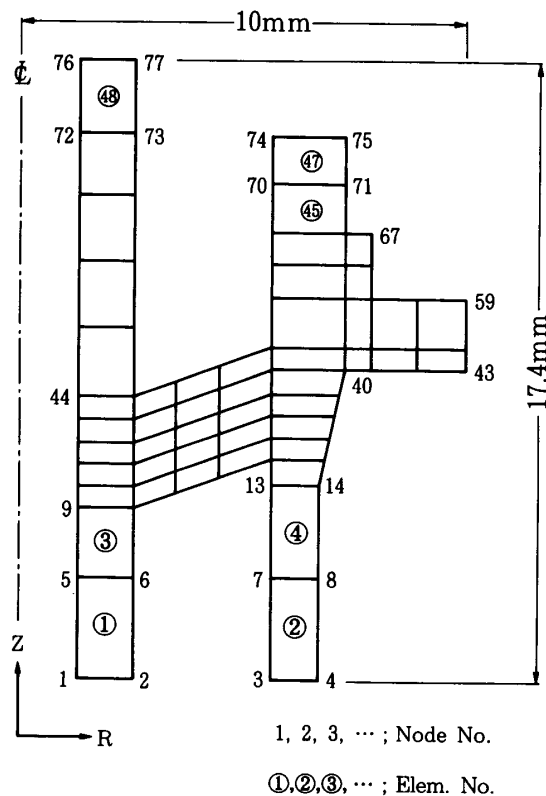


図8 複合インシュレータのFEM解析モデルのメッシュ割り

(b) 台加振

台加振についても上部加振と同様に定式化し、式(21)に対応する式として

$$([K^*] - \omega^2[M])\{X\} = \omega^2[M]\{U_B\} \dots\dots\dots (22)$$

を得る。ただし台の変位ベクトルを

$$\{u_B\} = \{U_B\}e^{j\omega t} \dots\dots\dots (23)$$

とおいた。

5.2 有限要素法のプログラムによる数値計算

インシュレータ解析用の有限要素法の理論⁽¹⁾に基づき有限要素法のプログラムを改良し、これにより数値計算を行った。

5.2.1 計算条件

(a) 計算モデル

図7の軸対称形状複合インシュレータとFEMの解析モデルとして図8のようにメッシュ割りをを行った。

図8は軸対称ソリッド要素モデルのメッシュ割りであり、節点番号、要素番号、主要寸法を示している。

(b) 材料データ

インシュレータの構成材料の物性値はすでに表1に示した。また周波数依存せん断剛性については図2のデータを用いた。その詳細については文献(1)、(2)に述べた。またコイルばねは、図8において要素番号②、④の部分であり、そのせん断弾性係数 G は円筒形要素の上下圧縮方向の変形に対するモデルのヤング率 E およびポアソン比 ν ($\nu=0.29$) の円筒部材に等価置換した。これによって得られた値を表4に示す。

表4 コイルばねの等価置換のせん断剛性 G

Spring Type	G [N/m ²]
S-Type	13280
M-Type	19680
H-Type	31880

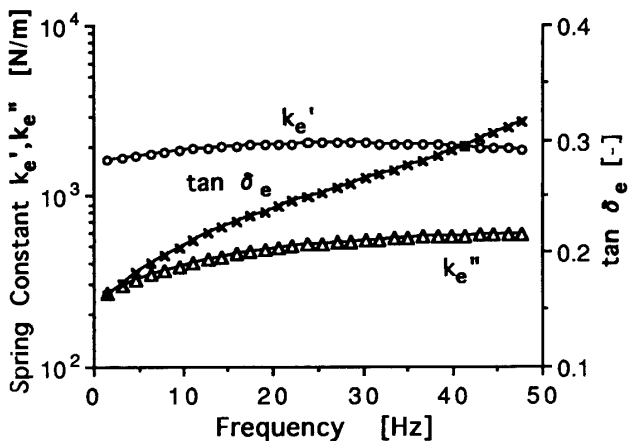


図9 上部加振条件のFEM解析による有効複素ばね定数 k_e' , k_e'' と $\tan \delta_e$

(c) 境界条件

図8において境界条件は節点番号 No. 1, ~ 4 の R (半径), Z (鉛直) 方向, 内筒内面上の節点 No. 5 から No. 76 までと, 外筒内面上の節点 No. 7 から No. 74 まで, すべての R 方向を拘束した。

5.2.2 荷重条件

(a) 上部加振

ここでは使用するコイルばねが M-Type の場合について述べる。図8の節点番号 No. 75 に振動荷重 $P e^{j\omega t}$ を加えた。 P の値は振動台上での実験においてインシュレータ1個当たりが負担する質量が 0.201 [kg] であるので解析でも対応する荷重値

$$P = 0.201 \times 9.81 = 1.972 \text{ [N]}$$

を用いた (入力は 1 rad 当たりとして $P \div 2\pi = 0.314$ [N/rad] を用いている)。

(b) 台加振

図8の下面を振動台に固定し振動台を一定の加速度振幅 $0.98 \text{ m/s}^2 (=0.1 \text{ g})$ で正弦波加振した場合の FEM 解析を行った。

5.3 数値解析の結果および実験結果との比較

5.3.1 上部加振

(a) 有効複素ばね定数および有効損失係数

荷重振幅 P (実数) を加えたときの解析モデルの節点 75 での変位 X を, 振動数 ω を変化させて出力した。この X と P より有効複素ばね定数 k_e および有効損失角 δ_e を次のように計算した。すなわち変位 X は複素数であるから

$$X = X_R + jX_I \dots\dots\dots (24)$$

とおくと, 有効複素ばね定数 k_e は

$$k_e = P/X = k_e' + jk_e'' = k_e'(1 + j\eta_e) \dots\dots\dots (25)$$

と書ける。ここで k_e' , k_e'' は k_e の実数部と虚数部であり, η_e は有効損失係数である。有効損失角 δ_e と η_e には

$$\tan \delta_e = \eta_e \dots\dots\dots (26)$$

の関係がある。

(b) 結果

インシュレータの複素ばね定数の実数部 k_e' , 複素ばね定数の虚数部 k_e'' , および $\tan \delta_e$ を求めた。その結果

表5 上部加振条件における k_e' , k_e'' , $\tan \delta_e$

Method \ Factor	FEM	Experiment	Note * Experimental value
k_e' [N/m]	1992	1968	$\omega_n = 2\pi \times 15.75$ [rad/s] $m=0.201$ [kg], $s=0.325$ [-]
k_e'' [N/m]	453	554	
$\tan \delta_e$ [-]	0.228	0.281	$\nu=1.0$ [-], $\eta=0.38$ [-]

* Experimental values are obtained from base excitation.

を図9に示す。上部加振 FEM 解析では直接ばね定数, $\tan \delta_e$ が求められる利点がある。

これらの値は ω の大きなところでともにほぼ一定値をとる。また比較のため振動台実験により得られた共振周波数 $\omega_n = 15.75 \times 2\pi$ (rad/s)での上部加振における $k'_e, k''_e, \tan \delta_e$ と台加振の実験におけるこれらの値を表5に示した。表5において FEM 解析の結果は、図9より $\omega_n = 2\pi \times 15.75$ rad/sにおける $k'_e, k''_e, \tan \delta_e$ を直接読みとったものである。一方実験結果として示した値は ω_n と m より $k'_e = m\omega_n^2 = 0.201 \times (2\pi \times 15.75)^2 = 1968$ N/mを得た。一方 η_e は式(18)に $\nu(\omega) = 1.0, s = 0.352$ (実験から既知), $\eta(\omega) = 0.38$ [式(13)より]を代入して $\eta_e = 0.281$ と得た。また $k''_e = k'_e \eta_e = 1968 \times 0.281 = 554$ N/mと得た。FEM 解析と実験結果はかなりよく合うことが確認されたが、有効損失係数の値にわずかの差がでた。

5.3.2 台加振

(a) 共振点と損失係数

台加振条件の FEM 解析による共振曲線はすでに図4に示した。共振曲線の値を式(18)に用いて各周波数に対する有効損失係数を図10に示した。図4から共振振動数と、図10からこの振動数における有効損失係数を求め表6の左欄に示した。一方台加振実験の共振曲線より同様に共振振動数、この振動数に対応する有効損失係数が求められる。この結果を表6の右欄に示した。

表6 台加振条件の共振周波数, 有効損失係数, 共振点変位

Item \ Method	FEM	Experiment
Resonant Frequency [Hz]	15.75	15.75
Loss factor η_e [-]	0.220	0.281
Displacement at $\lambda=1$ [mm]	0.455	0.356

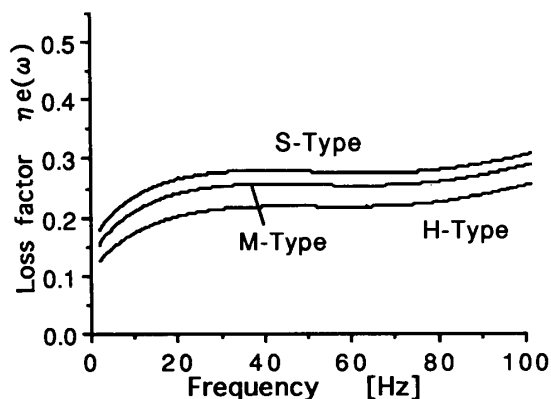


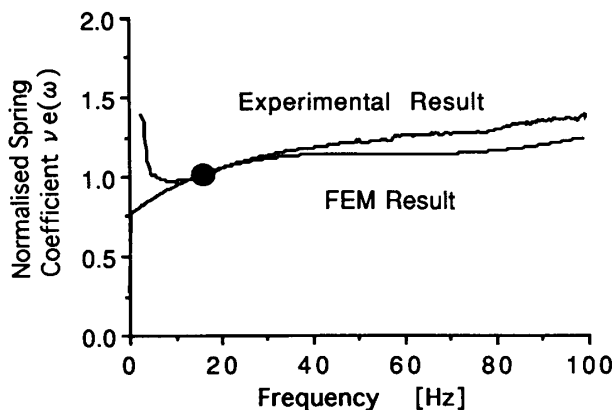
図10 台加振条件の FEM 解析による有効損失係数 η_e

(b) 共振点変位

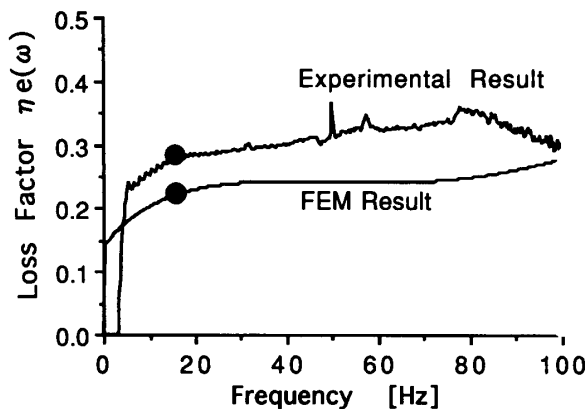
図4から $\lambda = \omega/\omega_n = 1$ のとき加速度応答倍率は約4.60である。台の入力加速度を 0.98 m/s² としているから、応答加速度は $A = 4.60 \times 0.98 = 4.508$ m/s² となる。したがって FEM 解析の共振点変位は $X = A/\omega_n^2 = 4.508 / (15.75 \times 2\pi)^2 = 4.60 \times 10^{-4}$ m (=0.460 mm) となる。一方台加振実験での共振点変位は、加速度倍率が図4より3.56となるから、 $X = 0.356$ mmとなる。これらの値を表6の最下段に示した。

(c) 損失係数に対する実験と FEM 解析の結果

式(12), (13)を用いて $\nu(\omega)$ と $\eta(\omega)$ を計算し、さらに式(17), (18)により $\nu_e(\omega), \eta_e(\omega)$ を計算した。まず4章の実験結果より M-Type のデータ(実験条件: 上載質量; 0.201 kg/個, 入力加速度レベル; 0.98 m/s² (=0.1 g) に対して処理した結果を図11(a), (b)に示す。図中の●印は共振振動数に対応する点である。 ω_n は加速度周波数応答関数の共振曲線ピークを示す角振動数で代用した。図11中約5 Hz以下の曲線の大きな変動は振動台の不安定性によるものである。



(a) 無次元ばね定数



(b) 損失係数

図11 損失係数および無次元ばね定数計算結果
質量 0.201 kg/個, $\omega_n = 15.75 \times 2\pi$ rad/s

次に5・3・2項(a)のFEMの解析結果よりM-Typeのデータを実験データと同じように処理した結果を図11(a), (b)に示す。

図11(a)において複合インシュレータ系の無次元ばね定数 $\nu_e(\omega)$ は周波数に対して右上がりの特性を示すことがわかる。図11(b)より $\eta_e(\omega)$ は5~100 Hzの間で0.2~0.35の値を示し、有限要素法による結果は実験結果と比べ5%程度小さくでていることがわかる。

6. 結 言

新素材であるシリコーンゲルの物性試験およびこれを素材とした振動絶縁用の複合インシュレータの振動特性を実験および理論の両面から検討し、以下の結論を得た。

(1) ばね-シリコーンゲル複合インシュレータの複合系の損失係数 $\eta_e(\omega)$ は0.25~0.30と比較的高い減衰効果を示すことがわかった。

(2) インシュレータの複素ばね定数 $k_e(\omega)$ を有限

要素プログラムを用いて計算した結果と実験結果を比べた。両者は比較的良好一致することがわかった。

(3) インシュレータの変位応答を推定する有限要素法プログラムにより共振点の振動数および減衰定数を予測した。その結果、解析値と実験値はかなり近い値を示すことがわかった。

以上によりシリコーンゲルを用いた複合インシュレータの振動特性および防振特性が明らかとなり、インシュレータの複素ばね定数を推定する理論およびこれに基づく有限要素法のプログラムが完成した。これにより製品開発においてあらかじめ振動特性を予測することが可能となった。

文 献

- (1) 清水・山崎, 新素材シリコーンゲルを用いたインシュレータの開発, 機論, 59-568, C(1993), 1-8.
- (2) 山崎・ほか4名, シリコーンゲルのエラストメリックな挙動と振動・衝撃特性(第1報, 構造・粘弾性及び振動応答), 機講論, No. 920-17, C(1992-4), 240-242.