

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	定常熱伝導解析による複層粘弾性ダンパーの動的特性の検討
Title(English)	Examination of dynamic characteristics of multi-layer viscoelastic damper by steady-state heat conduction analysis
著者(和文)	奥田翔平, 佐藤大樹
Authors(English)	Shohei Okuda, Daiki Sato
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 369-372
Citation(English)	, , , pp. 369-372
発行日 / Pub. date	2021, 3

定常熱伝導解析による複層粘弾性ダンパーの動的特性の検討

構造—振動

正会員 ○ 奥田翔平^{*1}正会員 佐藤大樹^{*2}

制振構造 熱伝導・伝達 複層
粘弾性ダンパー 定常状態 温度・振動数依存性

1 はじめに

粘弾性ダンパーは大幅で高振動数の外乱だけでなく、小さな振幅で低振動数の外乱まで効果的に振動エネルギーを吸収することから、地震および風に有効な制振部材である。その一方で、粘弾性ダンパーは、粘弾性体の温度依存性から熱伝導・伝達の影響大きく受け、振動時に性能が複雑に変化することが特徴として挙げられる¹⁾。そのため粘弾性ダンパーを有する建物では、熱伝導・伝達の影響による性能変化を考慮して設計する必要があり、考慮するための解析手法・評価手法に関する研究が進められている^{2)~4)}。しかしそれらの研究は、実験的・解析的扱いが簡単な2層せん断型粘弾性ダンパーを対象としたものが多く、実設計でよく用いられる複層せん断型粘弾性ダンパー（以後、複層ダンパー）を対象とした研究は極めて少ないのが現状である。

そこで、本研究の目的は、複層ダンパーの性能変化の評価手法を確立し、熱伝導・伝達の影響を考慮した複層ダンパーを有する制振構建造物の設計手法を構築することである。本報では、複層ダンパーにおいて、内部温度の変化に伴う性能の変化の影響を把握するために解析的検討を行う。特に、複層ダンパーでは層数が増加するに伴い、粘弾性体における熱伝達による放熱量が減少し、より性能が低下することが考えられる。そのため本報では、層数をパラメータとして様々なダンパーの解析モデルを作成し、文献2)の長時間加振時の温度・動的特性（＝性能）を簡易的に求める解析手法（以後、定常応答解析法と呼ぶ）を行うことで、そのときの内部温度と動的特性の関係を把握する。

2 3次元解析モデル

本章では、本報で解析を行う4つの粘弾性ダンパーのモデルについて説明する。なお、本報では解析モデルを作成する際に想定するダンパーの1/4のモデル（縦横それぞれ1/2にしたモデル）を解析モデルとして使用し、粘弾性体の層数がモデルの見掛け上半分であるため、以後、2層解析モデルをModel-1、4層解析モデルをModel-2、8層解析モデルをModel-4、16層解析モデルをModel-8と呼ぶこととする。

Model-1は文献3)で使用した解析モデルである。なお本解析は、文献3)で行われた粘弾性ダンパーの長時間正弦波加振実験のうち、A-3Lケースを対象とした解析である。実験の詳細については文献3)を参照されたい。Fig. 1に文献4)の実験で使用されたダンパーの詳細図を示す。このダンパーは2層のアクリル系粘弾性体材料(3M Japan製ISD111)を厚さ12 mm 鋼材の中板・外板の間に挟んだ両面せん断型である。粘弾性体の幅と長さはそれぞれ $B=80$ mm, $L=160$ mm (せん断面積 $A_s=25,600$ mm²)、厚さ $d_v=16$ mmである。

Fig. 2にFig. 1で示した粘弾性ダンパーを基にABAQUS ver. 2017⁵⁾上で作成した解析モデルを示す。この解析モデルにおいて粘弾性体部分 (VE material) はX方向に32分割、Y方向に16分割、Z方向に8分割している。なお、前述したとおり、実際の解析では、XY平面およびXZ平面においてモデルが対称であることに注目し、計算時間の短縮を図るため、Fig3のModel-1で示すように、Fig. 1で示したモデルの1/4の解析モデルを使用する。

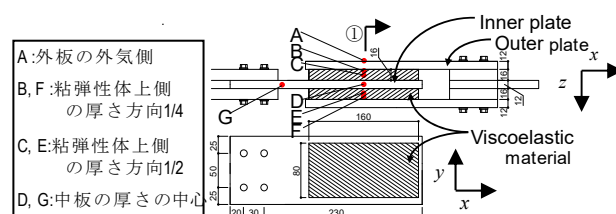


Fig. 1 Viscoelastic damper specimen with the temperature measurement locations

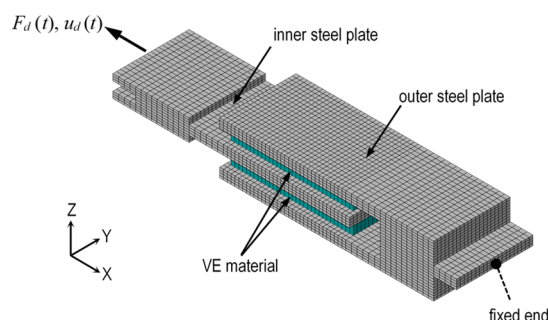


Fig. 2 3D - FEM model - Full VE damper

そしてこの Model-1 を基に、粘弾性体の層数を増加させ、層数に合わせて鋼材の板（Middle plate）および接続部（Connection）を付け加えることで、Model-2、Model-4、Model-8 を作成する。Fig. 3 に作成した解析モデルをまとめて示す。解析モデルは Model-1 に則り、全ての粘弾性体の幅と長さがそれぞれ 80 mm、160 mm、厚さ 16 mm とする。粘弾性体の分割数についても同様に、X 方向に 32 分割、Y 方向に 16 分割、Z 方向に 8 分割とする。また、粘弾性体を挟む鋼板（Outer plate、Middle plate）は全て厚さ 12 mm とする。ただし中版（Inner plate）については、対称面であるため厚さ 6mm であることに注意する。接続部（Connection）については、幅と長さがそれぞれ 50 mm、70 mm、厚さ 44 mm の鋼材を解析上使用した。

本解析では、A-3L ケースが対象なので、中板に X 方向強制変位 $u_{d,max} = 7.07$ mm を一定の振動数 $f_r = 0.288$ Hz で与え、その反力を F_d とした。中板は Y 方向、Z 方向には変位しない。それぞれの鋼板には粘弾性体が接着されており、粘弾性体での発生熱がそれらへ熱伝導される。また、鋼板の接着面、および対称面以外に熱伝達を設定した。対称面では温度の出入りが無いため、その境界条件は断熱とする。ダンパー周辺温度は実験に従い 24℃ と設定した。

本解析で用いる各材料パラメータは、粘弾性体および鉄の熱伝導率がそれぞれ $\kappa_{VE} = 0.188$ N/s/°C、 $\kappa_{steel} = 43.128$ N/s/°C、粘弾性体および鉄の比熱が $s_{VE} = 19.40 \times 10^4$ N-cm/kg/°C、 $s_{steel} = 46.63 \times 10^3$ N-cm/kg/°C、粘弾性体および鉄の密度が $\rho_{VE} = 1.0 \times 10^{-3}$ kg/cm³、 $\rho_{steel} = 7.8 \times 10^{-3}$ kg/cm³、粘弾性体のポアソン比が $\nu = 0.47$ とした。熱伝達係数 α_c は文献 1) に従い $\alpha_c = 0.055$ N/s/cm/°C を使用した。なお、この値は文献 2) によると、自然滞留中の概略値（0.05 ~ 0.25 N/s/cm/°C）の範囲にあり、実験における中板の振動数が $f_r = 0.288$ Hz と低いことから対流が起こらなかったと考えられ、値は妥当と考えられる。

3 定常応答解析手法

本章では、本報で使用した定常応答解析手法について概説する。詳しくは文献 2) を参照されたい。

定常応答解析手法は、3 次元有限要素法プログラムによる静的弾性解析と定常熱伝導解析を繰り返し行うことで、定常状態における正弦波変形を受けるダンパーの温度分布、各要素の歪、ダンパー全体の貯蔵・損失剛性を求めるものである。なお定常状態とは、粘弾性ダンパーにおいて長時間振動時に熱伝導・伝達による放熱量の影響が大きくなり、振動エネルギー吸収による発熱量と放熱量が釣り合い、温度および動的特性値が一定になる状態のことを指す。

解析手法を以下で説明する。3 次元の弾性要素 j で粘弾性体を表すとき、各要素の剪断剛性 G'_j と損失係数 η_j は、笠井らによって提案された以下の式で表される²⁾。

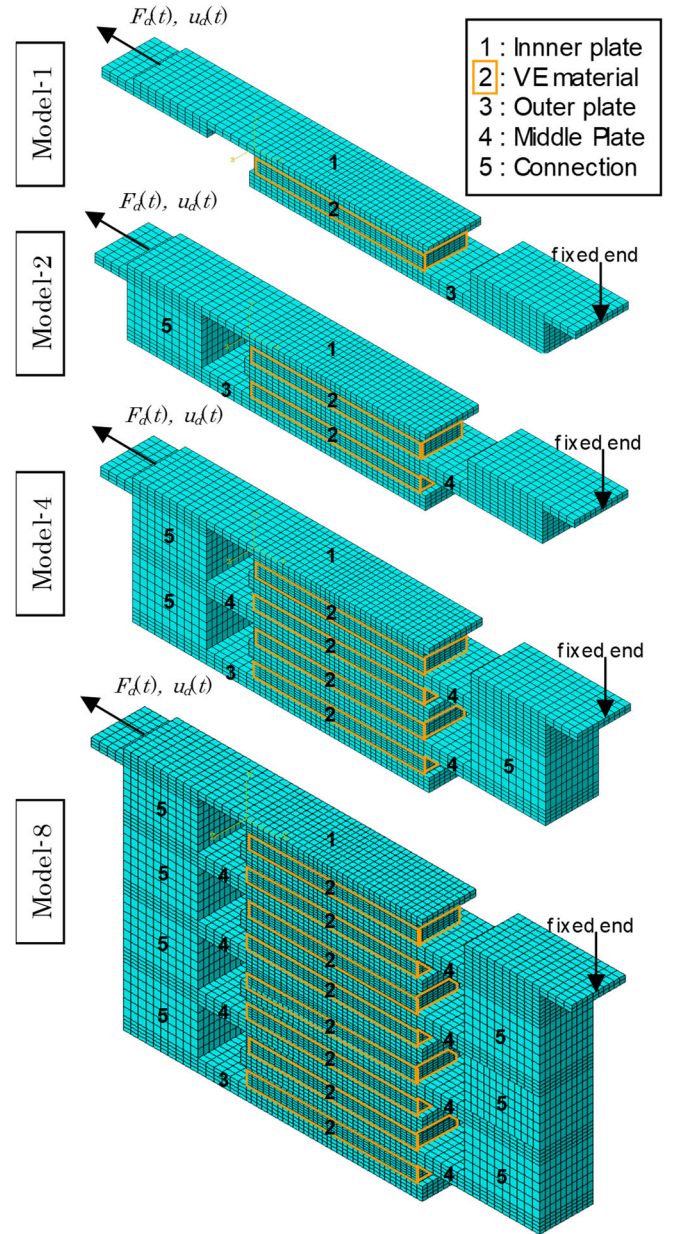


Fig. 3 3D - FEM model -Quarter VE damper

$$G'_j = G \frac{1 + a_j b_j \omega^{2\alpha} + (a_j + b_j) \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)}{1 + a_j^2 \omega^{2\alpha} + 2a_j \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (1)$$

$$\eta_j = \frac{(-a_j + b_j) \omega^\alpha \sin(\alpha\pi/2)}{1 + a_j b_j \omega^{2\alpha} + (a_j + b_j) \omega^\alpha \cos(\alpha\pi/2)} \quad (2)$$

ここで分数微分の次数 α 、また G 、 a 、 b は構成則のパラメータであり、特に a 、 b は温度に依存し次式で求まる。

$$a_j = a_{ref} \lambda_j^\alpha \quad (3) \quad b_j = b_{ref} \lambda_j^\alpha \quad (4)$$

なお a_{ref} 、 b_{ref} は基準温度（20℃）における a 、 b の材料値であり、要素に依らず一定である。また λ は温度を考慮するシフトファクターで以下の式から求める。

$$\lambda_j = \exp[-p_1(\theta_j - \theta_{ref})/p_2 + \theta_j - \theta_{ref}] \quad (5)$$

ここで θ_{ref} は基準温度、 θ_j は粘弾性ダンパーの要素 j の温度を表す。本解析において使用した材料のパラメータは $\alpha = 0.558$, $G = 0.0392 \text{ N/mm}^2$, $a_{ref} = 5.6 \times 10^{-3}$, $b_{ref} = 2.10$, $p_1 = 14.06$, $p_2 = 97.32$, $\theta_{ref} = 20^\circ\text{C}$, である。また軸方向の貯蔵剛性 E' はポアソン比 ν を使い、以下の式で表される。

$$E' = 2G'(1+\nu) \quad (6)$$

Fig.4 に解析手法のフローチャートを示す。ただし n は収斂回数である。載荷振動数 $\omega (= 2\pi f_r)$ 変位振幅 $u_{d,max}$, 各要素の初期温度 θ_j が与えられているとする。これらと式(1)~(6)から各要素の G' , η , E' を求める。次に、各要素を G' , E' を持つ弾性要素と設定し、3次元モデルに最大変形 $u_{d,max}$ を与えて静的弾性解析を行う。この結果により反力 F_d と各要素の中心における歪 ϵ , γ を得る。このとき変形した要素 j の歪エネルギーは以下の式によって求まる。ただし V_j は要素 j の体積である。

$$W'_{d,j} = \frac{V_j}{2} \left\{ \sum_{k=1}^3 E'_j \epsilon_{kk,j}^2 + G'_j (\gamma_{12,j}^2 + \gamma_{23,j}^2 + \gamma_{31,j}^2) \right\} \quad (7)$$

よって要素 j が吸収する 1 サイクル当たりの吸収エネルギー量は以下の式で表され、また要素 j における単位体積、単位時間当たりの発熱量 $\dot{Q}_j$ は加振実験の周期を $T (= 1/f_r)$ とすると以下で表される。

$$W_{d,j} = 2\pi\eta_j W'_{d,j} \quad (8) \quad \dot{Q}_j = W_{d,j} / V_j T \quad (9)$$

またダンパー全体の動的特性値（貯蔵剛性 K'_d , 損失剛性 K''_d , 剪断剛性 G' , 損失係数 η ）はそれぞれ次式より求まる。

$$K'_d = F_d / u_{d,max} \quad (10) \quad K''_d = \left(\sum_j W_{d,j} \right) / (\pi u_{d,max}^2) \quad (11)$$

$$G' = K'_d d_v / A_s \quad (12) \quad \eta = K''_d / K'_d \quad (13)$$

そしてダンパー変形をゼロに戻した後、定常熱伝導解析を行い、粘弾性体の各要素の温度を得る。そしてこの温度をもとに式(1)~(6)より各要素の G' , η , E' を求めなおし、次サイクルとして最大変形 $u_{d,max}$ を与えて静的弾性解析を行う。以上のサイクルを n 回繰り返すことで、温度・貯蔵剛

性・損失剛性は定常状態における値に収束し、温度・貯蔵剛性・損失剛性を簡易的に求めることができる。

4 解析結果の比較

本章では、文献 3) の A-3L ケースの正弦波加振実験を対象に、2 章で説明した 4 つの解析モデルを用い定常応答解析を行う。そして 4 つの解析モデルにおける温度および動的特性を比較し、層数の増加による性能低下の影響を確認する。なお、定常応答解析における収斂回数 n は、すべてのモデルにおいて十分な収斂回数として $n = 10$ としている。

Fig.5 に定常状態における各モデルの温度状態図を示す。すべてのモデルにおいて、粘弾性体の温度が上昇していることが確認できる。加えて、粘弾性体はその中心部が高い温度を示しており、特に、熱伝達による放熱で熱が逃げにくいダンパーの中心側 (Inner) の粘弾性体の中心部が各モデルの中で最も高い温度であることがわかる。一方で、すべてのモデルにおいてダンパーの外側 (Outer) にある粘弾性体は各モデルの粘弾性体の中で最も低い温度状態にあり、最も低い温度は外側の鋼板で示されることも確認される。また、粘弾性ダンパーにおいて厚み方向における温度変化は大きいものの、それに直交する方向では温度が比較的一定であることが確認できる。これは、文献 4) において示されるような、粘弾性ダンパーの動的特性値の簡易予測手法における厚み方向 1 次元体へのモデル化の妥当性を示すものと考えられる。

Fig.6 に、Fig.5 で示した z 軸部分における、定常状態での各モデルの内部温度分布図を示す。各モデルの内部温度分布図を比較すると、層数が増加するに伴い、内部温度分布も平均的に上昇していることが確認できる。これは層数が増加することで、粘弾性体における熱伝達による放熱量が減少し、ダンパー全体として温度が上昇したためと考えられる。また、Fig.5 と同様に、すべてのモデルにおいてダンパーの外側にある粘弾性体が各モデルの粘弾性体の中で最も低い温度状態にあり、最も低い温度は外側の鋼板で示されることが確認される。ここで層数を N とし層数 N のモデルにおける最大内部温度を θ_{max}^N とする。このとき、Fig.5 と同様に、最大内部温度 θ_{max}^N はすべてのモデルにおいてダンパーの中心側の粘弾性体の中心部で確認される。加えて、 $N=4$ と $N=8$ のときにおいては、最も外側にある粘弾性体を除くすべての粘弾性体の中心部の温度が、最大内部温度 θ_{max}^N とほぼ等しい値を示すことが確認される。このことから、放熱量が大きい片面のみに粘弾性体が接着されている鋼板と、それに比べ放熱量が小さい両面に粘弾性体が接着されている鋼板、この 2 種類の鋼板と粘弾性体の接着の組み合わせに粘弾性体の中心部の温度は大きく依存し、 $N=4$ と $N=8$ のときにおいて外側以外の粘弾性体は両面に粘弾性体が接着された鋼板であったため等しい温度になったものと考えられる。

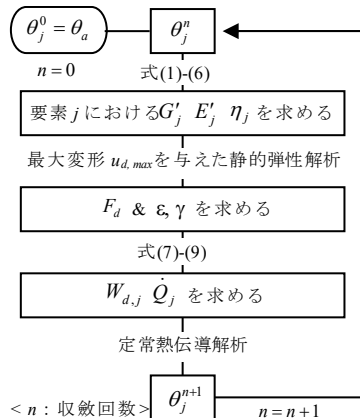


Fig. 4 Flowchart of analysis

Fig.7(a)に $n = 0$ (静的弾性解析のみの結果) のときの層数 N のモデルにおける剪断剛性 G'_N と Model-1 の剪断剛性 G'_1 の比, Fig.7(b)に損失係数 η_N と Model-1 の損失係数 η_1 の比を示す。なお, いずれの値も式(12), (13)より導出している。Fig.7 より, 静的弾性解析が正しく行えていることが確認できる。つまり解析モデルの妥当性が確認される。

Fig.8(a) $n = 0$ および $n = 10$ (定常応答解析の結果) のときの層数 N と剪断剛性 G' の関係を合わせて示す。また, Fig.8 (b)に $n = 0$ および $n = 10$ のときの層数 N と損失係数 η の関係を合わせて示す。 $n = 0$ および $n = 10$ の値を比較すると, Fig.8(a), (b)ともにすべてのモデルにおいて $n = 10$ の値が $n = 0$ の値より, 小さくなっていることが確認できる。これは, 静的弾性解析時では温度上昇が考慮されないためダンパーの動的特性値の低下を捉えていないが, 定常応答解析では長時間振動時の温度上昇による動的特性値の低下を考慮できるためである。また, 層数が増加するに伴い, 動的特性値の低下率が大きくなっていることが確認できる。これは, 前述したとおり, 層数の増加により放熱量が減少し, ダンパー全体として温度が上昇するため, より特性値が低下するからと考えられる。しかし, その低下率は, 例えば剪断剛性 G' において, $N = 1$ のときで 16%であるのに対し,

$N = 8$ のとき 20%でその差は 4%であり, 低下率は層数が増加するにつれて大きくなるものの, 層数が動的特性値に与える影響はそこまで大きくないことがわかる。

5 まとめ

本報では, 複層ダンパーにおいて, 内部温度の変化に伴う性能の変化の影響を把握するために解析的検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1 層数が増加するに伴い, 内部温度分布が平均的に上昇していることが確認した。また最大内部温度は最も中心側に近い粘弾性体の中心で示すことを確認した。
- 2 層数の増加に伴い, 粘弾性体の動的特性値がより低下することが確認された。ただし, その程度は小さくなく, 層数が動的特性値に与える影響は大きくないことが分かった。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル, 明文社 2003.10.1
- 2) 笠井和彦 他: 継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法, 日本建築学会構造論文集, 第 599 号, pp.61-69, 2006.1
- 3) 佐藤大樹 他: 風応答振動時における粘弾性ダンパーの特性及び正弦波による簡易評価手法, 日本建築学会構造論文集, 第 80 巻, 第 710 号, p571-581, 2015 年 4 月
- 4) 奥田翔平ら: 定常熱伝導式による長時間加振時の粘弾性ダンパーの動的特性変化簡易予測 日本建築学会関東支部, 2020. 3
- 5) ABAQUS Manual, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc;1997.

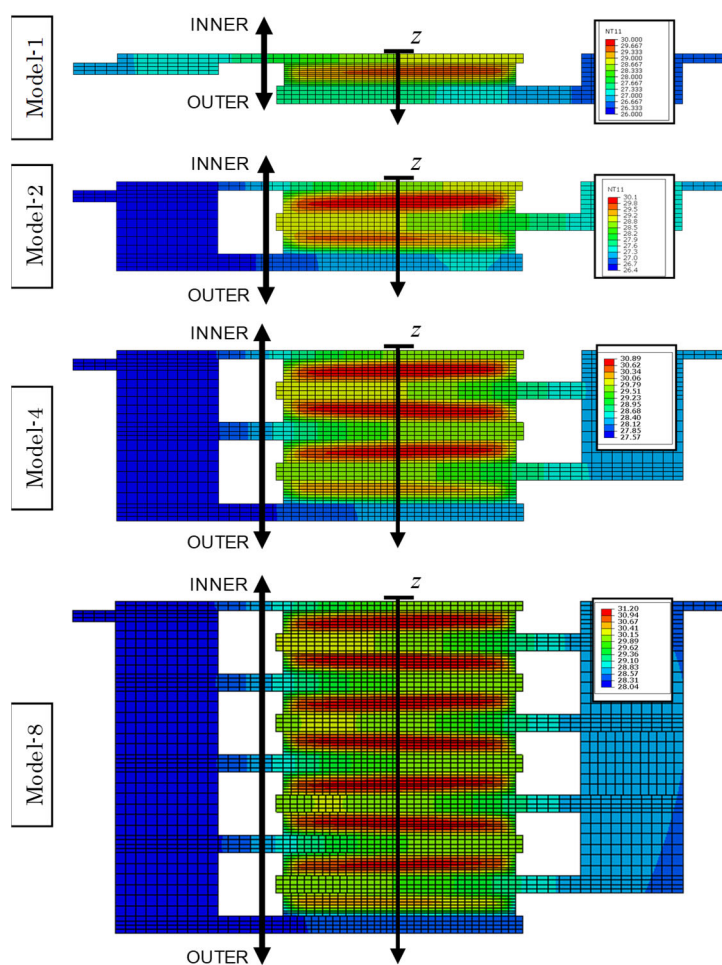


Fig. 5 Temperature State of 3D analysis

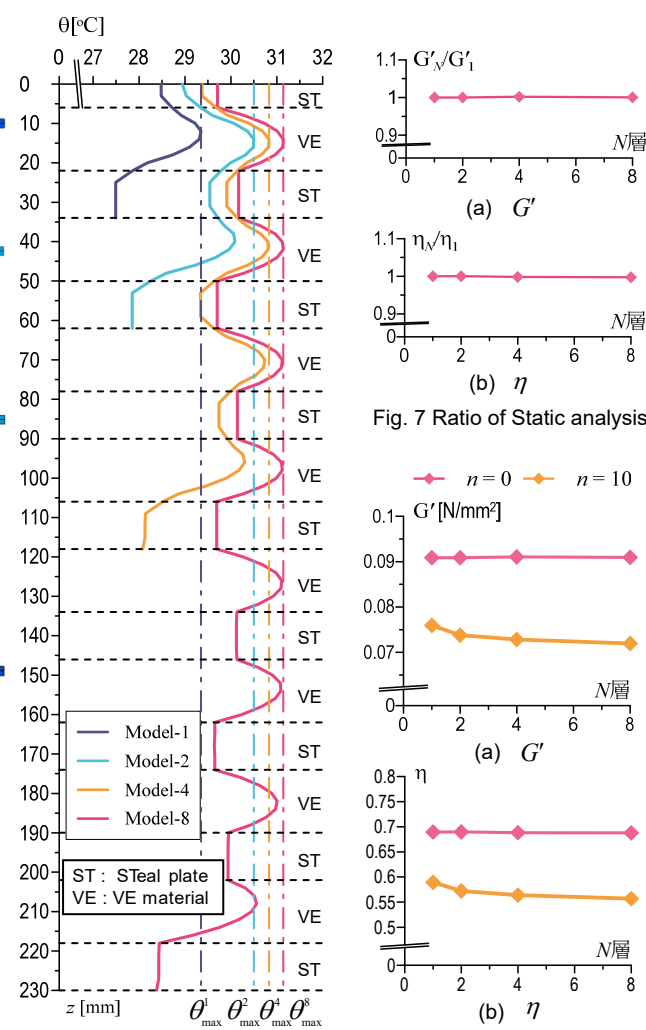


Fig. 6 Distribution of temperature

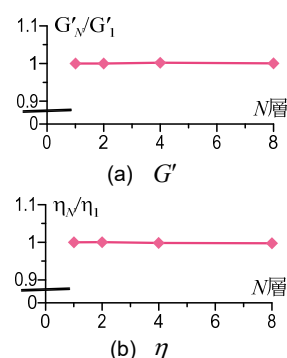


Fig. 7 Ratio of Static analysis

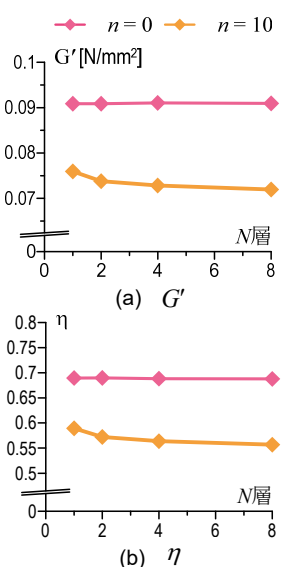


Fig. 8 Character due to N

*1 学生会員 東京工業大学 修士生

*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 准教授・博士