

部分被覆サンドイッチばりの損失係数に関する検討

麻生稔彦¹・會田忠義²・榎田智子³

¹正会員 博(工) 山口大学講師 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

³学生会員 山口大学大学院 工学研究科社会建設工学専攻 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

本研究では粘弾性層をコアとしたサンドイッチばりについて、粘弾性層を部分的に装着した場合の損失係数を支持条件・振動次数を変化させて検討した。その結果、拘束層の弾性係数と粘弾性層のせん断弾性係数との関係により支持条件によらず低次の振動モードでは部分的にサンドイッチ構造とした場合に高い損失係数が現れるものの、高次振動ではこのような部分被覆効果は生じないことが明らかとなった。また、複数の粘弾性層を装着した場合の損失係数についても検討した。

Key Words : sandwich beam, loss factor, vibration, damping

1. はじめに

鉄鋼に代表される構造用材料は強度も高く、成形加工性に優れているが振動エネルギーを吸収する性能は小さい。そこで、制振鋼板のようにゴム等の粘弾性材をコアとして金属層でサンドイッチ状に挟んだ構造部材が振動低減のために有効であると考えられている¹⁾。

部分被覆サンドイッチばりについてはこれまでもいくつかの研究がなされている。これらの研究のうち、Nokesら²⁾やMaruks³⁾によりサンドイッチばりでは対象とするはりを全長に渡りサンドイッチ構造とするよりも、部分的に粘弾性層を装着した場合に大きな損失係数が得られることもあることが報告されている。これらの報告を受けて、立道ら⁴⁾は部分的に5層としたはりの損失係数を遷移行列法により解析し、Nokesらの結果と比較している。また、岡崎ら⁵⁾は部分被覆サンドイッチばりに生じる中立軸の不連続性を解決する解析法を示し、基層と拘束層の境界条件が異なる場合の解析を行っている。しかし、粘弾性層を部分的に装着した場合の研究の多くは、特定の支持条件における比較的低次の振動を対象としており、合理的なサンドイッチ化により振動低減を図るためには支持条件・振動次数が損失係数に与える影響を明らかにする必要があるものと考えられる。

そこで本報は、各種の支持条件を有するはりについて振動次数および粘弾性層の被覆率を種々変化した場合の損失係数を求め、最も大きな損失係数を得るた

めの条件について検討したものである。また、はり全長に渡り設置されている粘弾性層を分割した場合の損失係数の検討も行った。解析ではLallらにより示されている系全体の損失係数をひずみエネルギーから求める方法⁶⁾を、任意の支持条件を有する場合に拡張して使用した。

2. 損失係数の解法

粘弾性層を部分的に装着したサンドイッチばりのモデル図を図-1に示す。図-1において①は高さ H_1 、長さ L の基本ばりであり、任意の支持条件を持つものとする。②、③はそれぞれ高さ H_2 、 H_3 の粘弾性層および拘束層であり、基本ばりの左端から a の位置に置かれ長さはいずれも $b-a$ である。また、各層の幅はいずれも B で同一とし、基本ばりと拘束層の弾性係数を E_1, E_2 、粘弾性層のせん断弾性係数を G 、粘弾性層の材料損失係数を η_0 とする。解析にあたっては次の仮定を設ける。(i) たわみは基本ばりの高さに対して十分小さく、たわみ時に層間の滑りは生じない。(ii) 粘弾性層の弾性係数は基本ばり、拘束層に比べて無視し得るほど小さい。(iii) 各層の z 方向変位は等しい。(iv) 基本ばりと拘束層のせん断変形は無視する。

図-1に示した部分被覆サンドイッチばりの損失係数 η は、参考文献6)に示されているように系の1周期中の最大ひずみエネルギー E に対する1周期中に粘弾性層で消費されたひずみエネルギー ΔE の比として次式

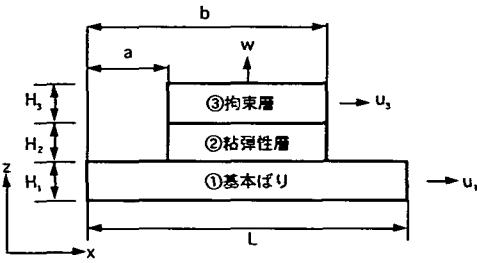


図-1 解析モデル概要

表-1 解析モデル諸元

基本ばりの長さ L	2.0m
基本ばりの幅 B	0.1m
基本ばりの高さ B ₁	0.010m
粘弾性層の高さ B ₂	0.005m
拘束層の高さ B ₃	0.002m
基本ばりの弾性係数 E ₁	2.06 × 10 ⁷ GPa
拘束層の弾性係数 E ₃	2.06 × 10 ⁷ GPa
粘弾性層の材料損失係数 η _c	0.30

で与えられる。

$$\eta = \Delta E / 2\pi E \quad (1)$$

ここで、EおよびΔEは、はりのz方向変位w、基本ばりの軸方向変位u₁、拘束層の軸方向変位u₂、粘弾性層のせん断ひずみγを用いて次式より求められる。

$$\Delta E = 2\pi \left(\frac{1}{2} BGH_2 \eta_c \int_a^b | \gamma |^2 dx \right) \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{2} BE_3 H_3 \int_a^b \left| \frac{\partial u_3}{\partial x} \right|^2 dx + \frac{1}{2} BE_1 H_1 \int_a^b \left| \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|^2 dx + \frac{E_3 B H_3^3}{24} \int_a^b \left| \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|^2 dx + \frac{E_1 B H_1^3}{24} \int_0^L \left| \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|^2 dx + \frac{1}{2} GBH_2 \int_a^b | \gamma |^2 dx \quad (3)$$

いま、任意の支持条件を持つ部分被覆サンドイッチばりのn次の振動モードw_nは基本ばりの振動モードと近似的に等しいものと仮定して式(4)とする。本来、部分被覆サンドイッチばりでは中立軸が不連続となり、変位場を連続関数で表現することはできない。しかし、拘束層が基本ばりに比べて薄ければ中立軸の不連続を無視しても実用的には問題が少ないという結果が報告されている⁷⁾。

$$w_n = A_1 \sin \lambda_n \xi + A_2 \cos \lambda_n \xi + A_3 \sinh \lambda_n \xi + A_4 \cosh \lambda_n \xi \quad (4)$$

$$\xi = x / L \quad (5)$$

ここで、A₁～A₄およびλ_nは支持条件、振動次数によって定まる定数である。一方、基本ばりと拘束層に生じる軸方向力の力の釣り合いより、u₁とu₂の間には式(6)の関係が導かれる。

$$u_1 = -rsu_2 \quad (6)$$

また、サンドイッチ部分の軸方向の力の釣り合いおよびせん断層のせん断応力からwとu₂の間には式(7)の関係が成り立つ。

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial \xi^2} - Qu_2 = QRS \frac{\partial w}{\partial \xi} \quad (7)$$

ここで、式(6),(7)において、

$$Q = \alpha \frac{rs+1}{qr}, \quad R = \frac{1}{1+rs}, \quad S = \frac{H_1}{2L} (1+2q+r) \quad (8)$$

$$\alpha = (G / E_3) (L / H_1)^2 \quad (9)$$

$$q = H_2 / H_1, \quad r = H_3 / H_1, \quad s = E_3 / E_1 \quad (10)$$

式(4)を式(7)に代入して微分方程式を解けば、式(11)が得られる。

$$u_2 = c_1 \cosh \sqrt{Q} \xi + c_2 \sinh \sqrt{Q} \xi + x_1 \sin \lambda_n \xi + x_2 \cos \lambda_n \xi + x_3 \sinh \lambda_n \xi + x_4 \cosh \lambda_n \xi \quad (11)$$

式(11)中のc₁、c₂およびx₁～x₄は支持条件、振動次数および被覆位置から定まる定数であり、付録に示す。また、サンドイッチ部分のたわみ時の幾何学的形状から粘弾性層に生じるせん断ひずみは次式となる。

$$\gamma = \frac{1}{H_2} (u_2 - u_1) + \frac{1}{2q} (1+2q+r) \frac{\partial w}{\partial \xi} \quad (12)$$

式(4)、(6)、(11)、(12)を式(2)、(3)に代入し、さらに式(1)を用いることにより部分被覆サンドイッチばりの損失係数を近似的に求めることができる。

3. 解析結果

今回の解析の対象としたサンドイッチばりの諸元を表-1に示す。基本ばりおよび拘束層は鋼とし、粘弾性層は高減衰ゴムを想定してη_c=0.30としている。この諸元より式(10)のパラメーターはそれぞれq=0.5、r=0.2、s=1.0となる。また、基本ばりの支持条件はピン-ピン、固定-固定、固定-自由、固定-ピンの4通りについて解析した。ここで、本解析では式(9)で定義される無次元量αをパラメーターとすることとする。αの定義式中、G以外は表-1の値を用い、αはGを変化させることにより変化させた。

(1) 被覆率と損失係数の関係

図-2は被覆率ζによる損失係数ηの変化を、各支持条件における1次振動について求めたものである。ここで、被覆率ζは基本ばりの長さに対する粘弾性層の長さの比と定義している。また、左右対称の支持条件を持つ(a)ピン-ピンおよび(b)固定-固定では基本ばりの中央より徐々に被覆するものとし、(c)固定-自由および(d)固定-ピンについては固定端から被覆を進行させた。図-2より1次振動では支持条件によらずαが小

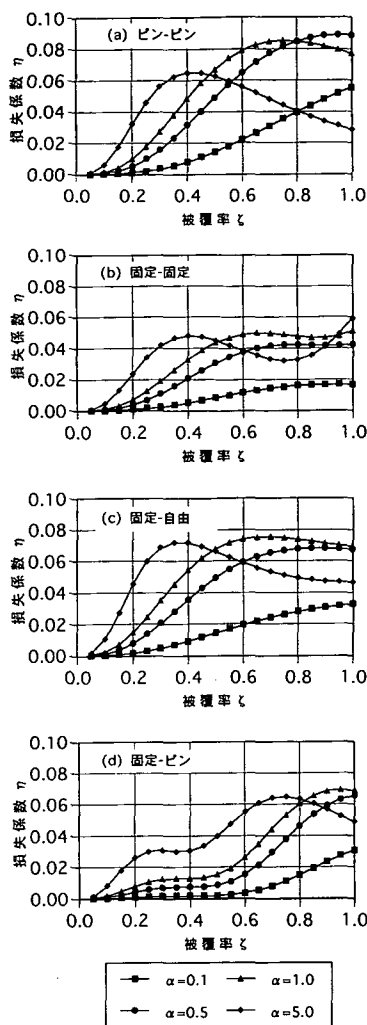


図-2 被覆率と損失係数の関係

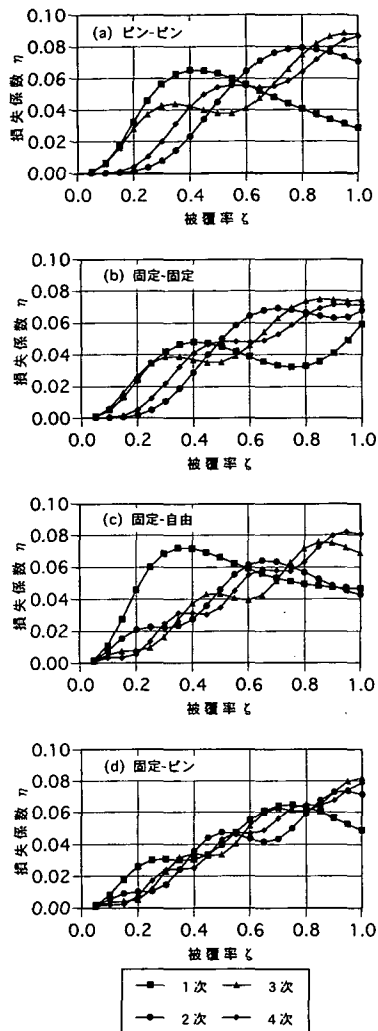


図-4 振動次数と損失係数の関係

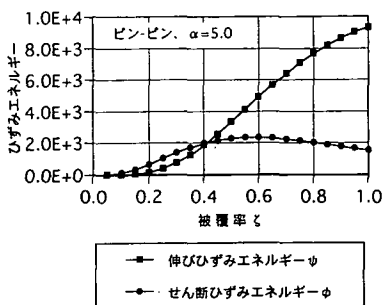


図-3 被覆率によるひずみエネルギーの変化

さいときには基本ばりの全長に渡り粘弾性層で被覆した場合 ($\zeta=1.0$) に η はもっとも大きくなるのがわかる。しかし、 α の増加に伴って基本ばりを部分的に被覆した場合に η が最大となる部分被覆効果が現れている。また、この部分被覆効果は α が大きくなるほど低被覆率で現れる傾向がある。この時の系全体の伸びひずみエネルギー ψ と粘弾性層のせん断ひずみエネルギー ϕ の変化をピン-ピン、1次振動、 $\alpha=5.0$ の場合について図-3に示す。図-3と図-2を比較すると、 ϕ が ψ よりも大きいときには η は増加し、逆に ψ が ϕ よりも大きいときには η は減少しているのがわかる。また、 ψ と ϕ が交わる被覆率において η は最大となっている。ここで、他の振動次数での部分被覆効果を検討するた

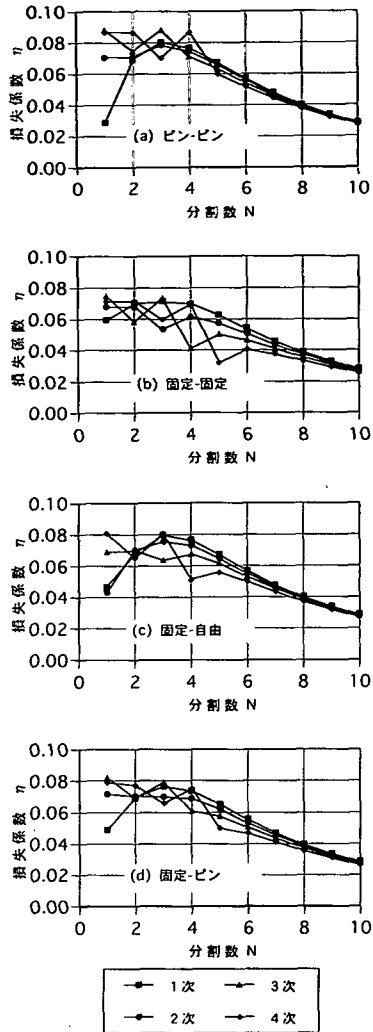


図-5 分割時の損失係数

めに、1次振動で顕著な部分被覆効果を示した $\alpha=5.0$ の場合について1~4次振動における被覆率と損失係数との関係を求めると図-4となる。図-4では全ての支持条件において、振動次数が高くなると最大の η を与える被覆率が大きくなっている。特に、(a)ピン-ピンや(d)固定-ピンの4次振動では部分被覆効果は現れず、 $\zeta=1.0$ で η は最大となる。一般に、振動次数が高くなるにつれいずれの場合にも各振動モードにおける曲げモーメントの変曲点が多数現れるようになる。また、粘弾性層は曲げモーメントの変曲点を覆うように被覆すると損失係数は大きくなる。従って、高次振動では高い損失係数を得るためには基本ばりのほとんどの区間を被覆する必要があり、部分被覆効果が現れな

くとなると考えられる。

(2) 分割数と損失係数の関係

以上の結果より、 α と振動次数により粘弾性層を部分的に装着することにより、損失係数が大きくなる場合もあることが明らかとなった。そこで、基本ばりの全長に渡り粘弾性層で被覆した場合に、この粘弾性層をいくつか分割することにより、より大きな損失係数を得ることができるのではないかと考えられる。図-5は $\alpha=5.0$ として基本ばりの全長に渡り設置した粘弾性層を複数に等分割した場合の、損失係数 η と分割数 N との関係を示している。なお、分割数 N は次式で定義される。

$$N = L / L_1 \quad (13)$$

ここで、 L_1 は分割した粘弾性層1つの長さである。各支持条件とも1次振動では η が最大となる分割数が存在する。しかし、他の振動次数ではこのような傾向はあまり見られない。また、分割数を多くすると η は低下している。ここで、左右対称の支持条件を持ち、分割数 N と振動次数が一致した場合には、 η が全長を被覆した場合と等しくなっている。これは分割数 N と振動次数が一致した場合には基本ばりと拘束層の伸びひずみおよび粘弾性層のせん断ひずみの分布が全長を被覆した場合と等しくなるためと考えられる。

4. まとめ

構造部材の減衰性を向上させるサンドイッチばりについて、損失係数の部分被覆効果を検討した。低次の振動については、粘弾性層をはりの全長に渡り装着するよりも、部分的に装着した方が支持条件によらず高い損失係数を得られる場合がある。しかし、高次振動ではこのような部分被覆効果は発生しないことが明らかとなった。また、はり全長に渡り装着する場合でも、粘弾性層をいくつか分割することにより損失係数を大きくすることが可能である。本研究を行うにあたり、(株)横河ブリッジの今田安男氏に有益なご助言を頂いた。記して感謝します。

付録

式(11)中の $x_1 \sim x_4$ および c_1, c_2 は支持条件、振動次数および被覆位置から次のように求められる。

$$x_1 = \frac{QRSA_2 \lambda_n}{\lambda_n^2 + Q} \quad x_2 = \frac{QRS A_1 \lambda_n}{\lambda_n^2 + Q} \quad (14)$$

$$x_3 = \frac{QRS A_2 \lambda_n}{\lambda_n^2 - Q} \quad x_4 = \frac{QRS A_3 \lambda_n}{\lambda_n^2 - Q} \quad (15)$$

$$c_1 = \frac{(c_{12} + c_{13} + c_{14} + c_{15})}{c_{11}} \quad (16)$$

$$c_2 = \frac{(c_{22} + c_{23} + c_{24} + c_{25})}{c_{21}} \quad (17)$$

$$c_{11} = \sqrt{Q} (\sinh\sqrt{Q} a \cosh\sqrt{Q} b - \cosh\sqrt{Q} a \sinh\sqrt{Q} b) \quad (18)$$

$$c_{12} = -x_1 \lambda_n (\cos\lambda_n a \cosh\sqrt{Q} b - \cosh\sqrt{Q} a \cos\lambda_n b) \quad (19)$$

$$c_{13} = x_2 \lambda_n (\sin\lambda_n a \cosh\sqrt{Q} b - \cosh\sqrt{Q} a \sin\lambda_n b) \quad (20)$$

$$c_{14} = -x_3 \lambda_n (\cosh\lambda_n a \cosh\sqrt{Q} b - \cosh\sqrt{Q} a \cosh\lambda_n b) \quad (21)$$

$$c_{15} = -x_4 \lambda_n (\sinh\lambda_n a \cosh\sqrt{Q} b - \cosh\sqrt{Q} a \sinh\lambda_n b) \quad (22)$$

$$c_{21} = \sqrt{Q} (\cosh\sqrt{Q} a \sinh\sqrt{Q} b - \sinh\sqrt{Q} a \cosh\sqrt{Q} b) \quad (23)$$

$$c_{22} = -x_1 \lambda_n (\cos\lambda_n a \sinh\sqrt{Q} b - \sinh\sqrt{Q} a \cos\lambda_n b) \quad (24)$$

$$c_{23} = x_2 \lambda_n (\sin\lambda_n a \sinh\sqrt{Q} b - \sinh\sqrt{Q} a \sin\lambda_n b) \quad (25)$$

$$c_{24} = -x_3 \lambda_n (\cosh\lambda_n a \sinh\sqrt{Q} b - \sinh\sqrt{Q} a \cosh\lambda_n b) \quad (26)$$

$$c_{25} = -x_4 \lambda_n (\sinh\lambda_n a \sinh\sqrt{Q} b - \sinh\sqrt{Q} a \sinh\lambda_n b) \quad (27)$$

参考文献

- 1) 時田保夫, 森村正直: 防振制御ハンドブック, フジテクノシステム.
- 2) Nokes, D. and Nelson, F. C. : Constrained layered damping with partial coverage, *Shock and Vibration, Bull. Vol.38 PT. 3*, pp.428-435, 1968.
- 3) Markus, S. : Damping mechanism of beams partially covered by constrained viscoelastic layer, *ACTA Technica CSAV, No.2*, pp.179-194, 1974.
- 4) 立道有年, 浦田喜彦, 安田弘: 粘弾性層を持つ部分多層ばりの振動解析, 日本機械学会論文集 (第1部), 40巻335号, pp.1899-1907, 1974.
- 5) 岡崎明彦, 浦田喜彦, 大河内禎一, 立道有年: 粘弾性コアを持つ部分三層ばりの振動解析, 日本機械学会論文集 (C編), 53巻486号, pp.300-307, 1987.
- 6) Lall, A. K., Asnani, N. T. and Nakra, B. C. : Damping analysis of sandwich beams, *Journal of Sound and Vibration, Vol.132 No.2*, pp.247-259, 1988.
- 7) 出羽宏視, 岡田養二, 永井文秀: 粘弾性材を減衰層とする部分被覆ばりの曲げ振動減衰特性, 日本機械学会論文集 (C編), 55巻515号, pp.1575-1581, 1989.

(1996. 5. 10 受付)

LOSS FACTOR OF THE PARTIALLY COVERED SANDWICH BEAM

Toshihiko ASO, Tadayoshi AIDA and Tomoko MASUDA

This paper reported the loss factor of beams covered partially and separately by constrained viscoelastic layer. The loss factor of three layered sandwich beam was calculated by strain energy analysis. Four support conditions, Pin-Pin, Fix-Fix, Fix-Free and Fix-Pin were considered in analysis. At low vibration mode, loss factor of partially covered sandwich beam becomes higher than that of fully covered one, not related with support conditions. However, this phenomena was disappeared at higher vibration mode due to distribution of bending moment. When the viscoelastic layer covered fully is divided into a few sections, loss factor becomes higher depending on the number of separation, material properties and vibration mode.