

2 本ボルトによる締結体の吸振性について

——締結部材間に介在する流体膜による減衰効果——

野 口 勉*・松 尾 征 夫**

On Vibration Absorptiveness of Bolted Joint Fastened with Two Bolts

——Damping Effect of Fluid Film exist between Clamped Members——

Tsutomu NOGUCHI and Yukio MATSUO

要 旨

2本のボルトによる締結体の部材間に存在する流体膜による吸振性を実験により調べ、その有効性を示した。実験は、ボルトの締付けによる結合面の圧力発生領域に $10\mu\text{m}$ のスペーサーを介して部材間に隙間をつくり、そこに介在する流体の粘度とボルトの締付け力を変化させ行なった。吸振性の評価は締結体を自由振動させ、その減衰波形から求めた対数減衰率により行なった。得られた結論は次の通りである。1) 部材間の流体膜が締結体の吸振性に与える影響は大きい。2) 流体膜の振動追従性を考慮し、最適粘度を選び得れば吸振性を高めることができる。3) スペーサーを介することにより静的ばね定数の低下がないため、静剛性を変化させない状態で減衰能の向上が図られる可能性を示し得た。

Synopsis

Vibration absorptiveness, or damping effect which is caused by existence of thin fluid film in gaps of contact surfaces have been experimentally investigated, and an indication of the validity of the fluid film was given. The member used in this experiment is fastened with two bolts, and put a spacer ($10\mu\text{m}$ thickness) between surfaces produced contact pressure. Experiment performed by changing viscosity of fluid in the gaps and tightening force of bolts. Damping effect evaluate the Logarithmic Decrement obtained from damped vibration wave of clamped member. The results obtained are as follows. (1) The damping effect on fluid film exist between members appeared significantly. (2) When the optimum viscosity actualize to consider the vibration followability, improvement of the damping effect can be expected. (3) It is proved that high damping effect is possible without deterioration of static stiffness on account of the use of spacer.

1. 緒 言

機械構造物の小型・軽量・大規模・ち密・高速などの極端化が進んでいる現在、工作機械などではナノ・オーダの「加工精度」,「位置決め精度」の要求が高まっている。しかし、構造物に多用されているボルトやボルト締結部に対する設計基準

は主に強度と静剛性についてのものであり、加工・位置決めの高精度化には締結体の吸振性向上が避けられない課題となっている。

締結体の吸振性は主に(1)部材間接合面におけるすべり摩擦、(2)部材の内部摩擦、および(3)部材間隙間における流体のスクイズ作用やせん断作用の3種により高められていると考えられている¹⁾。しかし、実機に近い形の複数ボルト締結体において、流体膜が吸振性に与える影響を調べた例はいくつかある²⁾が、それを積極的に利用し吸振性を高めよ

* 助 手 機械工学科

** 助教授 機械工学科

うとする研究は見られない。

本研究においては、締結部材間の人為的な隙間に流体膜を形成した突出し部を有する2本ボルト締結体の自由減衰振動波形から対数減衰率を求める簡便な実験により、流体膜の存在が吸振性へ与える影響を調べ、静剛性を低下させないで吸振性を向上させ得る可能性を示すことを目的とした。

また締結体は無限自由度系であるが、1自由度振動系とのアナログの基に考察した。

2. 実験について

2.1 締結体

実験に供した締結体は、図1に示すように矩形断面をもつものであり、コラム型締結体の基本的な締結形態である直列2本ボルト締結とした。

またボルトは六角穴付きボルト M12 であり、締結体にざぐりをおこなったため締付け長さは 10 mm である。

用いた材料は、内部摩擦の小さい SS41 である。

2.2 実験方法

実験装置及び測定系の概略を図2に示す。締付け力の大小に関わらず部材間に隙間が形成するようにボルト①の締付けによる結合面の圧力発生領域に厚さ $10\mu\text{m}$ のスペーサー②(ポリエチレン製)を介し、その隙間に流体を満たした。図3にスペー

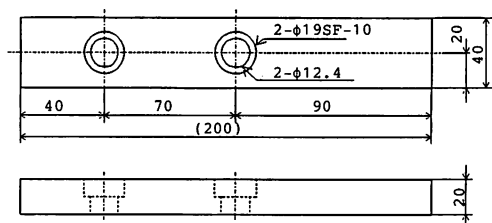


図1 締結部材

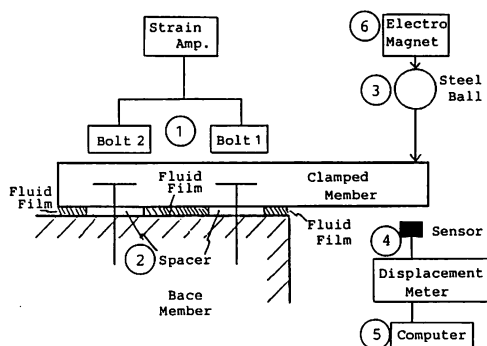


図2 測定系の概略

polyethylene

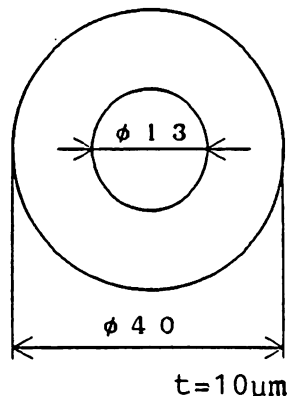


図3 スペーサーの形状

ーサーの寸法を示した。またこの隙間により、部材どうしのすべり摩擦による影響を避け、締結体とベース端との干渉を防ぐことができる。

所定の締付け力で締つけられた締結体突出し部先端に対し鋼球③(重量 $5.345 \times 10^{-2}\text{N}$)により衝撃を与えて締結体を自由振動させた。その振動波形を非接触変位計④により検出し、パソコン⑤に取り込み、ディスクに記録した。ここで得られる振動波形の最大振幅は $3\mu\text{m}$ 程度になるように電磁石⑥を用いて鋼球を自由落下させる方法とした。

このように記録された振動波形から、最大振幅と5周期後(減衰の大きい場合は測定できる範囲で)の振幅および振動数を測定する。

締結体を締つけるボルトの締付け力は、ボルト内部に埋め込めた歪ゲージにより設定した。

実験条件は表1に示すとおりである。

また、スペーサーを介することによる静剛性の変化を調べるために、締結体突出し部先端に静荷重を加え、そのときのたわみ量を測定することに

表1 実験条件

		部材間の介在物			
		空気	軽油	マシン油	グリス
表面	研削面	○	○	○	○
	きざげ面	○	×	○	×

各条件についてボルト締付け力 F_v は以下の5種類

1.96, 3.62, 5.88, 7.84, 9.80 kN

より、締結体のばね定数を求めた。この場合振動振幅と同程度のたわみ量での測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 スペーサの有無が静剛性に与える影響

図4に締結体突出し部先端に静荷重(9.8 N)を加えたときの荷重点たわみ量から求めた締結体のばね定数を各ボルト締付け力について示した。

この図から、ほとんどの締付け力に対して、圧力発生領域にスペーサーを介した方の締結体のばね定数が高く現れている。現在のところ、これに対する説明を行い得ないが、10 μm 程度の薄いスペーサーでは締結体のばね定数つまり静剛性を著しく低下させるような影響は無いと判断することができる。またスペーサーの有無に関わらず締付け力を増すことにより締結体のばね定数が高くなっている。この説明のためボルト結合部のばねモデルを図5に示した。部材のばね定数 k_p 、ボルトのばね定数 k_s は一定値であり、接触剛性 K_c は締付け力 F_v の関数として次式のように表され、締付け力が増すと接触剛性が大きくなる。

$$K_c = K_c(F_v^{3/5}) \quad (1)$$

したがって、ばねモデルの合成ばね定数 K は次式のようにになる。

$$K = \frac{2k_p \cdot k_s (K_c + 2k_p) + 2k_p \cdot k_c (k_s + 2k_p)}{(k_s + 2k_p)(k_c + 2k_p)} \quad (2)$$

このことから締付け力が増すことにより式(2)にしたがってボルト結合部の合成ばね定数 K が大きくなり、結果として締結体のばね定数が高くなる事が分かる。

3.2 部材間隙間に流体を満たした場合の対数減衰率の変化

実験から得られた振動波形の一例を図6に示した。この波形から式(3)により対数減衰率 δ を求めた。

$$\delta = \frac{1}{5} \ln \left(\frac{X_n}{X_{n+5}} \right) \quad (3)$$

図7には部材間隙間に空気、軽油、マシン油、およびグリスを満たした場合の対数減衰率を各締付け力に対して示した。この図から空気膜の場合より、マシン油を満たした状態の方が高い吸振性を示す事が分かる。また比較のために行った軽油の場合も空気膜の場合より吸振性が高く、粘性のより高いマシン油に比して対数減衰率が低くな

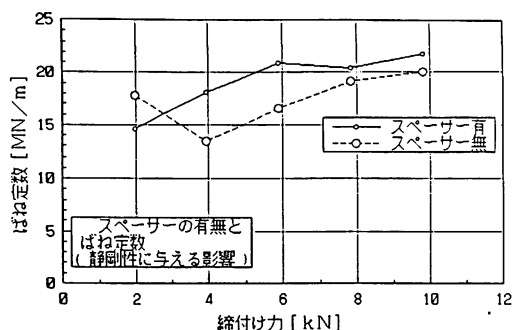


図4 締結体のばね定数

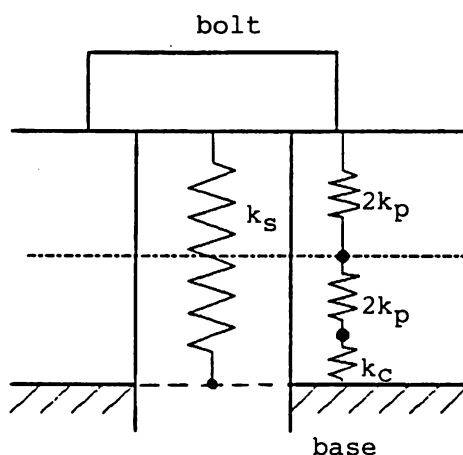


図5 ボルト結合部のばねモデル

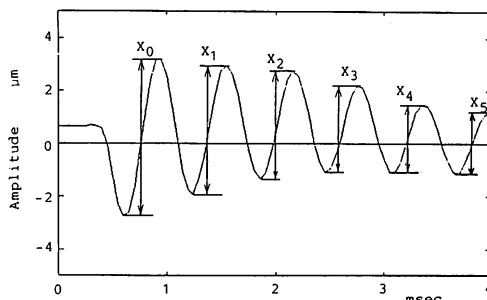


図6 減衰波形 ($F_v=3.92\text{ kN}$, 空気膜)

っている。しかし、粘性が他の3種よりはるかに大きいグリスの場合には空気膜に対する対数減衰率よりも低くなった。

一般に粘性の差異による吸振性の違いは、流体が締結体の振動により隙間から外に押し出されるとき、逆に負圧を受け隙間に吸い込まれるときに粘度 μ に比例したせん断作用を受けることや粘度 μ の流体が満たされた初期隙間量 c の平行平板が面

に垂直な方向に $e(t) = e_0 \cdot \cos \omega t$ の運動をする場合の減衰エネルギー E が次式¹⁾によって表されることができると説明することができる。

$$E = \alpha \frac{\mu \cdot e_0^2 \cdot \omega}{c^3} \quad (4)$$

ここで、 α ：係数(圧縮性・非圧縮性では異なる)である。

しかし、グリスのように粘性の大きい場合には振動追従性が低下することにより薄膜が流れづらくなり減衰効果がなくなるものと考えられる。これらのことから、ある一定の振動数に対して減衰効果をもつ最適な粘度の存在がうかがえる。

また、高い締付け力に対して対数減衰率が低下している。これは、対数減衰率 δ が式(5)のように表されることから、前述した締付け力を増すことによりばね定数が高くなる関係、締付け力の増加により初期隙間量の低下が生じ流体自体のばね効果が高まることなどが一因と考えられる。

$$\delta = \frac{2\pi c}{\sqrt{4mk - c^2}} \quad (5)$$

ここで、 m ：質量、 k ：ばね定数、および c ：粘性減衰係数である。

加えてここで重要な点は、伊東らの報告²⁾では、ボルトの締付け力を高くすることにより部材間の油膜が排除され、油膜の影響は無くなるとしているが、本実験においてはスペーサーの存在により常に油膜が形成されるため、締付け力を高くしても吸振性の向上が図れることが示されたことである。

3.3 流体膜の保持能力を高めるためのきさげの影響について

潤滑油膜を保持するために機械構造物の摺動面によく用いられているきさげを締結体接合面に施した。このきさげは50/坪で深さは $7 \mu\text{m}$ 程度である。

きさげを施し流体膜の保持能力を高めた場合の結果を図8に示した。きさげを施すことにより、空気膜の場合では約1.3倍、マシン油の場合には1.8倍程度の吸振性の改善を行うことができた。

3.4 締結体の振動数について

図9には図8の条件に対応する締結体の振動数を示した。流体膜は減衰効果と同時に復元効果ももつが、復元効果が高まると一般的に振動数が高くなる。

しかし、この図から平滑面間の空気・マシン油

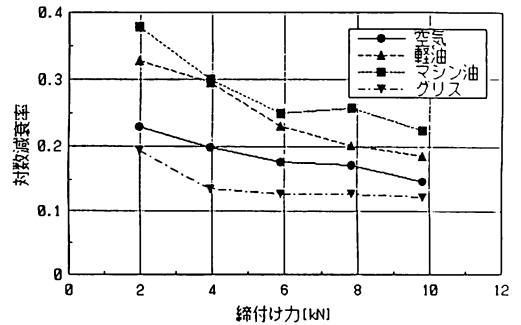


図7 対数減衰率(1)

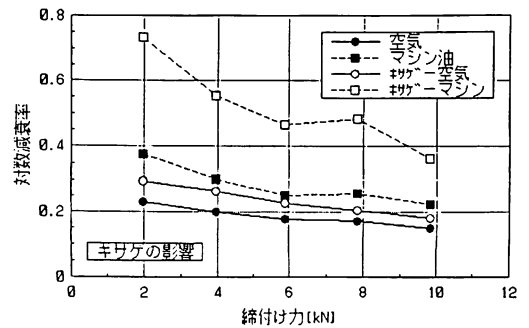


図8 対数減衰率(2)

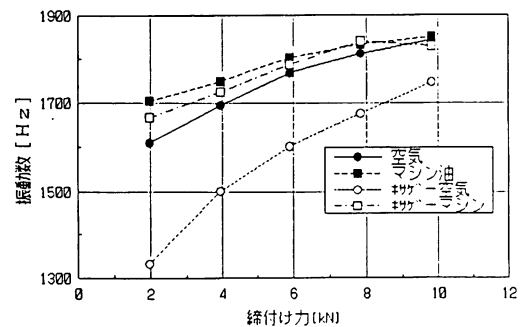


図9 締結体の振動数

膜、またきさげ面のマシン油膜の結果においては大きな変化は現れなかった。一方きさげ面に空気膜の場合には極端に振動数が低下している。この現象は空気はその圧縮性によりきさげにより生じたくぼみ内に閉じ込められ、空気ばねの特性に従い動的ばね定数が小さくなるためである。

また、いずれの結果もボルトの締付け力が大きくなると振動数が高くなるが、前述したとおり接合面の圧力発生領域での接触剛性が高くなることなどが影響し、その結果締結体の振動数が高くなるものとする。

以上、実験結果に対する考察を行い、流体膜の存在が吸振性に与える効果の大きいことが明らかになった。しかし、振動数に対する最適粘度の存在が示唆されるなど現象は複雑であり、今後、締結体の振動数、振幅、面の形状、表面粗さや流体の粘度などによる影響を総合的に評価する必要があると考える。

4. 結 言

本研究により以下の結論が得られた。

1) 部材間の流体膜が締結体の吸振性に与える影響は大きい。

2) 流体膜の振動追従性を考慮し、最適粘度を選び得れば吸振性を高めることができる。

3) スペーサーを介することにより静的ばね定数の低下がないため、静剛性を変化させない状態で減衰能の向上が図られる可能性を示し得た。

参 考 文 献

- 1) 野口, 外崎, 星野: ボルト結合による振動減衰能向上に関する研究 (第1報 消散エネルギー源の検討), 日本機械学会講論集No872-2.
- 2) 例えば伊東, 益子: ボルト結合部の減衰能に関する研究 (第2報, 結合面状態の影響), 日本機械学会論文集 (第3部), 40巻335号, p2058-P2065.

(昭和63年11月30日受理)

