研究

センタと加工物間の軸方向接触剛性*

加藤秀雄** 中野嘉邦** 鴻巣健治** 鈴木 誠***

Axial Contact Stiffness between Center and Workpiece

Hideo KATO, Yoshikuni NAKANO, Kenji KOUNOSU, Makoto SUZUKI

This paper describes the axial contact stiffness between a center and a workpiece, one of basic properties of a center-workpiece system, under a static condition. The contact stiffness is analyzed theoretically by using the finite element method and investigated experimentally for the system of an actual machine tool. The theoretical results are compared with the experimental results. The obtained main results are as follows: (1) The relationship between the center-workpiece relative displacement and the axial load is hysteretic. (2) The center-workpiece system made of solid metal as one body gives the infinite axial contact stiffness. The maximum value of the axial contact compliance of the actual center-workpiece system is about $0.001\text{--}0.005\ \mu\text{m/kgf}$. It seems, however, that the stiffness decreases owing to the angular discrepancy between the center and the hole, the increase of the out-of-roundness and the surface roughness, the decrease of the coefficient of friction, etc. (3) In the case of lapped holes, the hysteresis and the scatter of the stiffness are smaller than the case of drilled holes. The average values of the axial contact compliance are about $0.02\ \mu\text{m/kgf}$ for lapped holes and $0.02\text{--}0.05\ \mu\text{m/kgf}$ for drilled holes.

1. 緒 論

円筒状部品を加工する場合、センタで加工物を支持する方法は古くから広く用いられている。センタ支持部は、センタとセンタ穴の接触部で加工物自重、切削力、回転駆動トルクなどの荷重を支え、かつ正確な運動を伝える回転案内面と考えられる。したがってセンタによる加工物支持条件、すなわちセンタおよびセンタ穴の幾何学的形状と寸法、心押力などは最終的な仕上精度に影響を及ぼす重要な要因と考えられる。また、センタ支持部の剛性は、工作機械-工具-加工物系の総合的な剛性に深く関与しており、静的な案内精度のみならず、びびり振動や加工能率に少なからぬ影響を及ぼすと考えられる。ところが、このようなセンタ支持部の特性については、いまだに不明な点が多く、具体的な支持条件の設定についても定量的に明確な指針は得られておらず、現実には熟練した技能者の経験と勘に頼ることが多い。

これまでのセンタ支持系に関する研究としては、円筒研削における加工精度とセンタ穴形状の関係を論じた Дудакら^{1)~3)}、Камсюкら^{4)~6)}、久門ら⁷⁾等による報告、センタ-加工物系の動剛性を論じた Salje

ら⁸⁾の報告がある。しかし、センタ支持部のもっとも基本的な特性の一つであるセンタとセンタ穴間の接触剛性を定量的に解明したものは見当たらない。

そこで本報では、センタ支持系の特性を系統的に解明するための第一歩として、支持部の剛性の3成分、すなわち軸方向接触剛性、半径方向接触剛性、角度方向接触剛性のうち、まず軸方向接触剛性について検討する。そのため、有限要素法を用いて接触部の静的変形挙動を理論的に解析し、次いで実際のセンタ支持系について実験を行い、両者の結果を比較検討する。

2. 理論解析

2.1 解析方法

図1に示すように、加工物が両センタで支持され、心押力が軸方向に作用している場合における変形挙動を、有限要素法によって解析する。この場合、センタと加工

図1 解析したセンタ-加工物系

* 原稿受付 昭和53年8月14日。昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和52年10月15日)にて発表。

** 正会員 千葉大学工学部(千葉市弥生町1-33)

*** 学生会員 千葉大学大学院

図2 解析のための要素分割様式

図3
計算の手順を示す
フローチャート

物の軸が一致していれば軸対称となり、二次元問題と同様に扱うことができる。さらに、加工物の長さの中央に関して対称であるとするれば、解析は対称面の片側だけ行えばよい。また、センタ穴接触部における接触変形を考慮するために、薦らによる接触問題解析法⁹⁾を用いる。

要素の分割様式、拘束条件、節点外力等はそれぞれ図2のように定めるが、接触部付近の分割様式はセンタ穴の大きさの相違により若干異なる場合もある。

計算の手順は、図3に示すように、接触状態決定ル

ープと荷重増分ループから成っている。接触状態決定ループは接触変形の非線形性を扱うもので、相対する各接触部節点間に、口開き、一体接触、相対すべりのいずれかの接触状態を仮定し、その結果、変位の連続および節点力のつりあいにも不合理を生じないように、接触状態を定める繰返しループである。接触状態には口開き状態も含んでいるので、センタとセンタ穴の頂角が異なる場合や、変形により接触面間にすきまが生ずる場合も容易に解析することができる。荷重増分ループは繰返し荷重が作用するときの変形を扱うもので、これにより

ヒステリシスがある変形挙動を解析することができる。

解析に用いた諸元は表1に示す。ここで摩擦係数は、デッドセンタで加工物を支持し、接触部に潤滑剤を用いない状態で回転させるときの滑り始めのトルク実測値より算出した値で、0.3~0.7間でばらついた。解析はこれらの最小値と最大値および摩擦がないと仮定した場合について行う。また、参考としてセンタと加工物が一体物で作られた、極限の接触状態をもつ場合の変形挙動も求めている。

2.2 解析結果

以上の方法により求めた接触部の変形状態の例を図4に示す。(a)はセンタおよびセンタ穴頂角が共に 60° の場合の変形状態を示したもので、すべての接触部節点で相対すべりを生じている。(b),(c)はセンタ穴頂角がそれぞれ 59.5° , 60.5° の場合の変形状態を示したもので、頂角の違いは拡大して描いてある。(b),(c)共に接触する節点は負荷によって変わらず、(b)ではセンタ穴入口の節点で、(c)では下穴側の節点でのみ相対すべりが生じ、他の節点は口開きのままである。

このような計算結果から求めた荷重と変位の関係を図5に示す。変位は、図2の節点A,B間の軸方向相対変位で表してある。荷重は0から45kgfまで3段階に分けて、3回負荷・除荷を繰返しているが、図のようにヒステリシス挙動はほとんど現れず、線形関係を示している。また、摩擦係数の減少およびセンタ頂角とセンタ穴頂角の不一致により、コンプライアンスは増加する。頂

(a) センタ穴頂角 $\beta=60^\circ$

(b) $\beta=59.5^\circ$

(c) $\beta=60.5^\circ$

軸方向荷重 $F=10$ kgf, 摩擦係数 $\mu=0.7$, センタ頂角 $\alpha=60^\circ$

図4 解析した変形状態

角の誤差は、センタ頂角がセンタ穴頂角より小さい場合の方が、逆の場合より、コンプライアンスの増加が著しい。

図5から点A,B間の相対コンプライアンスを求め、センタ穴径に対して整理したものが図6(a)である。図の太い実線は、センタと加工物が一体化した場合を示し、他の線は相対すべりを生ずる場合を示している。図からわかるように、センタと加工物が一体化したもののコン

図5 軸方向荷重と点A,B間相対変位の関係(解析結果)

(a) 点A-B間相対コンプライアンス

(b) 接触コンプライアンス

図6 軸方向コンプライアンス(解析結果)

プライアンスは、相対すべりを生ずる場合の極限の値となっている。一体化した場合と相対すべりを生ずる場合の相対コンプライアンスの差は、センタと加工物間の軸方向接触コンプライアンスを示すものと考えられる。図6(b)は、(a)から接触コンプライアンスを求め、センタ穴径に対して示したもので、これより次のことがわかる。接触コンプライアンスは、センタ穴径が小さいほど、摩擦係数が小さいほど、またセンタ頂角とセンタ穴

図7 実験装置

表2 試験片およびセンタの諸元

a) 試験片

センタ穴加工法	センタドリル加工	ラップ仕上
材質	SUJ2	S45C
硬度	HRC45	HRC35
センタ穴頂角 β	$59^{\circ}39' \sim 60^{\circ}20'$	$59^{\circ}30' \sim 59^{\circ}57'$
センタ穴真円度	$9.0 \sim 15.0 \mu\text{m}$	$4.1 \sim 6.0 \mu\text{m}$

センタ穴径 D (mm)	センタ穴 下穴径 d (mm)	センタ穴径 D (mm)	センタ穴 下穴径 d (mm)
2.2~2.6	1.0	3.1~3.3	1.0
3.6~4.3	2.0	3.7~4.0	2.0
4.8~5.7	3.0	5.7~6.4	3.0
7.5~7.8	4.0	7.3~7.4	4.0
9.5~9.8	5.0	9.3~9.6	5.0

b) センタ

形式	MT4
チップ材質	超硬
等級	A級
センタ頂角 α	$60^{\circ}20'$
センタ真円度	$0.5 \mu\text{m}$

頂角の不一致により増大する。また、センタ頂角がセンタ穴頂角より小さい場合の方が、逆の場合より、コンプライアンスの増加は著しい。これは、センタ穴径の減少と頂角の不一致による接触面積の減少、および摩擦係数の減少による相対すり量の増加に起因するものと考えられる。

3. 実験装置および方法

図7に示すように、円筒研削盤の両センタにひずみゲージ式の荷重計を介し、加工物に相当する試験片を初期心押力 25 kgf で取付ける。さらに、最大約 20 kgf までの心押力増加分を繰返し負荷・除荷する。その場合、試験片左端とセンタの軸方向変位をテーブル上に固定した電気マイクロメータで測定した。試験片の軸方向変位は、軸の傾斜による影響を除くため、軸に関して対称に配置した電気マイクロメータ①、②の読みの平均値とし

(a) センタ穴ドリル加工

(b) センタ穴ラップ仕上

図8 センタ穴の真円度記録

て求めた。センタの中心軸はほとんど傾斜しないので、電気マイクロメータ③のみにより、センタの変位を測定した。変位の測定点は図2のA、Bに対応した点である。また、試験片と主軸台センタに曲げモーメントが作用しないように、試験片と荷重計の間に鋼球を入れてある。センタ穴接触部には、潤滑油を用いていない。

試験片とセンタの諸元は表2に示すとおりである。形状、寸法は解析に用いたものとはほぼ同じものである。試験片は、センタ穴ドリル加工しただけのものと、さらにラップ仕上したもの2種類である。ラップ仕上は、A #300~1000 相当の砥粒とマシン油を、ラップ用に研削したセンタとセンタ穴の間に入れて行った。センタ穴の真円度曲線の例を図8に示す。図は任意の3か所の測定結果を同一記録紙に描いたものであるが、曲線の形状や誤差の大きさは測定点によらずほぼ同じである。また、センタ穴頂角は、大きさの異なる数種類の鋼球を挿入したときの出入り量を測定することにより求めた。センタ

センタ穴径 $D=9.5$ mm, センタ穴ドリル加工

図9 軸方向荷重と変位の関係(実験結果)

図10 定常ループに達するまでの負荷回数の度数分布

は市販の超硬センタで、センタ穴と接触する部分の真円度は約 $0.5 \mu\text{m}$ で一定である。

4. 実験結果および考察

図9は、5~10 s 周期で、25~約 45 kgf 間の心押力の負荷・除荷を繰返したときの、荷重と軸方向変位の関係を示すものである。(a)は試験片、(b)はセンタの変位を示す。いずれの試験片を用いた場合でも、荷重と試験片変位の関係には(a)のように明らかなヒステリシス挙動が観察された。また、始めの数回の負荷サイクルでは、荷重を初期荷重 25 kgf にもどしても大きな残留変位が認められた。一方、センタの変位は(b)のようにほぼ線形挙動を示した。このことから、(a)のような試験片の非線形挙動は主にセンタ穴接触部で生じているものと考えられる。理論解析の結果では図5のような線形挙動を示しているが、この相違は、解析では接触面の相対すべり状態を一定の摩擦係数を用いて計算していること、また接触面の塑性変形を無視していることなどに起因するものと思われる。

定常ヒステリシスループに達するまでの負荷回数の相対度数分布を図10に示す。図より、センタ穴をドリル加工しただけのものよりラップ仕上げしたものの方が、定常ループに達するまでの負荷回数は少なく、ばらつきも小さいことがわかる。この原因は、接触面の観察によっては識別できなかったが、前者より後者の方が微視的な接触状態がよかったことによるものと考えられる。この

(a) 点 A-B 間相対コンプライアンス

(b) 接触コンプライアンス

図11 軸方向コンプライアンス(実験結果)

傾向はセンタ穴径の大きさを変えても同じであった。

定常ループにおける試験片およびセンタの変位と荷重の関係より、平均的な点 A-B 間の軸方向相対コンプライアンスを求め、センタ穴径に対して整理したものが図

11(a)である。実験値は全体的に大きくばらついているが、センタ穴が小さい方が、またラップ仕上したものよりドリル加工しただけのものの方が、ばらつきは大きくなっている。図の破線と一点鎖線は、ドリル加工の場合とラップ仕上の場合の最小二乗推定曲線を示す。また実線は、センタと加工物を一体化した場合の解析結果、すなわち図6の太い実線と同じものである。実験結果においても、解析結果と同様にセンタと加工物が一体化した場合が、相対コンプライアンスの極限の値となっている。この実線と実験値との差は接触コンプライアンスを示すものと考えられ、最小二乗推定曲線と実験値の下限から求めた接触コンプライアンスを、センタ穴径に対して示したものが図11(b)である。最小二乗推定曲線による接触コンプライアンスは、ラップ仕上の場合、センタ穴径によらず約 $0.02 \mu\text{m/kgf}$ でほぼ一定、ドリル加工の場合、約 $0.02 \sim 0.05 \mu\text{m/kgf}$ でセンタ穴径が小さくなると増加する傾向がある。センタ穴加工法によるこの相違は、前述のように微視的な接触状態の相違によるものと考えられる。しかし、どちらの加工法においても実験値の下限による接触コンプライアンスは非常に小さく、 $0.001 \sim 0.005 \mu\text{m/kgf}$ 程度の値である。すなわち、センタ穴での接触条件が適当な場合、接触部はセンタと加工物が一体化した場合と同程度の剛性をもつが、円すい角の不一致、真円度や面粗さの悪化、摩擦係数の減少などの原因により剛性は低下するものと思われる。

解析結果の図6と実験結果の図11は、実験値のばらつきが大きいために詳細に対応づけることはできない。この点については、荷重-変位間のヒステリシス挙動を含めて、今後さらに検討を行う必要がある。

5. 結 論

センタ-加工物系が静止した状態において、センタ支持部の軸方向接触剛性を理論解析と実験により検討した結果、次の点を明らかにすることができた。

- (1) 軸方向荷重とセンタ-加工物間相対変位の関係はヒステリシス挙動を示し、特定の荷重に対して相対変位は一義的には決定されない。

- (2) 軸方向接触剛性はセンタと加工物が一体化した場合に無限大となるものであるが、実際のセンタ支持系での最大値は、コンプライアンス値で $0.001 \sim 0.005 \mu\text{m/kgf}$ 程度となる。また円すい角の不一致、真円度や面粗さの悪化、摩擦係数の減少などの原因により剛性はこれより低下する。
- (3) センタ穴をラップ仕上した場合は、ドリル加工しただけの場合に比べて、ヒステリシスは減少し、剛性のばらつきも減少する。平均の軸方向接触コンプライアンスは、ドリル加工の場合、約 $0.02 \sim 0.05 \mu\text{m/kgf}$ でセンタ穴径が大きくなるほど減少する傾向がある。ラップ仕上の場合、センタ穴径によらず約 $0.02 \mu\text{m/kgf}$ でほぼ一定である。

参 考 文 献

- 1) Н. С. Дудак и Н. М. Селиванов: Уменьшение погрешностей формы деталей при шлифовании в центрах, Вестник Машиностроения, 8, (1971) 71.
- 2) А. М. Дальский и Н. С. Дудак: Влияние кромоочных контактов и износа центровых отверстий и центров на точность формы высокоточных деталей, Изв. ВУЗ Машиностр., 12, (1973) 144.
- 3) Н. С. Дудак: Точность формы и взаимного положения поверхностей деталей при шлифовании в центрах на оправках, Изв. ВУЗ Машиностр., 10, (1974) 143.
- 4) М. С. Камсюк и В. Т. Никития: О наследственном характере образования погрешностей формы цилиндрических деталей при шлифовании на центрах, Изв. ВУЗ Машиностр., 9, (1973) 180.
- 5) М. С. Камсюк: Качественный анализ влияния массы заготовки на точность обработки при круглом шлифовании, Изв. ВУЗ Машиностр., 9, (1974) 132.
- 6) М. С. Камсюк: Влияние частоты изменения некруглости центровых отверстий и наружной поверхности заготовки на точность обработки, Изв. ВУЗ Машиностр., 3, (1975) 172.
- 7) 久門輝正, 築添 正, 宮脇敏光: 円筒研削における工作物の真円度に及ぼすセンタ穴の摩耗と潤滑剤の影響, 日本機械学会論文集, 375, 11 (1977) 4315.
- 8) E. Salje u. U. Isensee: Dynamisches Verhalten schlanker Werkstücke bei unterschiedlichen Einspannbedingungen in Spitzen, Z. Wirtsch. Fertigung, 8, (1976) 340.
- 9) 鳶 紀夫, 山地成一: 接触問題の有限要素解析法に関する研究, 日本機械学会誌, 76, 3 (1973) 348.