工作機械構造の剛性解析システム (第3報)*

— 構造設計への応用 —

大久保 信行** 竹 内 芳 美*** 佐田 登志夫†

Computer System for Analysis of Machine Tool Structure (3rd Report)

— Application to Structure Design —

Nobuyuki OKUBO, Yoshimi TAKEUCHI, Toshio SATA

The study presents a method to select the best machine tool structure to satisfy the design requirements from several proposed models in the design stage, by using the computer program for static, thermal and dynamic analysis of machine tool structure. The selection is divided in the following three stages; in the first stage, the first elimination of the proposed models is performed from the stand point of the static rigidity and the steady state thermal behaviours of the structures; in the second stage, the best structure is selected by examining the non-steady state thermal behaviours and dynamic rigidity on the qualified models; and in the third stage, the environment conditions for the selected model is set up to satisfy the design requirements. The procedures for selection is demonstrated for machine tool structures with single column as an example.

1. ま え が き

現在、機械加工における加工精度への要求はますます高まり、工作機械の剛性の向上が望まれている。すなわち数値制御あるいは計算機制御の導入により、工作機械の製造費用も著しく増大し、所要の加工精度を実現できる工作機械をいかに早く、能率よく設計してゆくかが現在この領域の課題となっている。このためにはまず機械加工における加工精度を低下させる原因を考えなければならない。加工精度は工具と工作物の相対位置関係、すなわち工具および工作物を含めた工作機械構造の変形によって決まるものである。その工作機械構造の変形には切削力の静的な成分による静変形、およびその変動成分による動変形、加工によって発生する熱や各運動部分の熱損失による熱変形、環境温度の上昇による熱変形などが含まれる。これらの工作機械構造の変形挙動は常に総合的に考えなければならない。

従来の工作機械構造の設計ではこれらの特性を定量的に把握できず、従来の経験にもとづいて試作を繰返し、剛性の高い構造を求めてきた。一方、すでに本研究の第1報¹⁾、2報²⁾で述べたように有限要素法による構造解析によって工作機械の静、熱および動剛性を精度よく解

析できるようになった。そこで、ここではこれらの剛性解析プログラムを使用して工作機械構造の静、熱および動剛性を総合的に判断しながらいかにその構造設計を効率よく進めるかについて考えた。本報告では、設計者が提案した種々の工作機械構造モデルの中から静、熱および動剛性についての要求仕様を満足し、製造コストなどの評価関数から考えた最適な構造を選択する設計手法およびその手法をシングルコラム型のマシニングセンタのモデルについて適用した結果について述べる。

2. 設計システムの基本的な考え方

本研究で提唱する工作機械構造の設計プロセスの流れを図1に示す。まず設計の第1段階において設計すべき工作機械に求められる加工法の種類とそれぞれの加工能率、加工精度、および加工可能な空間領域など設計仕様が定められる。第2段階では設計者がそのような設計仕様にもとづいて工作機械構造の静剛性、熱剛性および動剛性に対する要求を定量的に表現する。次に設計者は、

図1 設計プロセスの流れ

* 原稿受付 昭和50年7月11日。北陸信越支部新潟地方講演会（昭和49年6月28日）にて発表。

** 正会員 機械技術研究所（東京都杉並区井草4-12-1）

*** 学生会員 東京大学工学部（東京都文京区本郷7-3-1）

† 正会員 東京大学工学部

設計仕様を満足すると考えられる種々の工作機械構造モデル, すなわちコラム, テーブル, ベッドなどの接続関係を提案する. この基本的な構造はさらに剛性を高めるために補強され, 最後に具体的な寸法の入った設計計算モデルとなる. この工作機械構造の幾何データに加え, 設計者はその構造が使用される条件, すなわち加工条件, 発熱条件 (技術データ) および検討すべき加工位置を設計システムに与える.

次に以上の三つの工作機械構造の剛性要求, 設計モデルおよび技術データを入力として計算機内部での最適構造選択プロセスに移る. この最適構造選択プロセスは構造決定プロセスと環境決定プロセスからなる. この構造決定プロセスでは提案した設計モデルの中から剛性要求を満足し, 適当な評価関数を最適化する構造を決定する. ここで選択された構造が実際に工場に設置される状態も加工精度に及ぼす影響は大きい. そこで構造以外の環境に対する剛性は環境決定プロセスに従って環境設計を行う.

この二つのプロセスによる設計システムが終わると後は実際に構造を製造するための詳細設計を行い, 設計図面が描かれる. 以下に計算機内で処理される構造決定および環境決定プロセスの内容について触れる.

2.1 構造決定プロセス

この構造決定プロセスは, I: 自動データ作成, II: 構造選択第1ステップ, III: 構造選択第2ステップ, IV: 最適構造選択の4つの部分からなり, 図2にその流れを示す. すなわち第I部では入力データに従って以下の解析に必要な有限要素データを作成する.

構造選択第1ステップでは, 工作機械構造は加工位置によってその剛性特性が変わるので, 提案された加工位置において静剛性特性および定常状態における熱変形特性を解析する. そしてこの結果にもとづいて剛性要求を満足する構造を選択する.

次の構造選択第2ステップでは, 第1ステップで選択された設計モデルについてさらに動特性, 非定常状態での熱変形特性を解析し, 剛性要求を満足する設計モデルが選択される. 提案された設計モデルの中で剛性要求を満足する構造がない場合には, 補強の方法による剛性の変化を考慮し, さらに新しい構造を提案すればよい.

このように構造選択を二つに分割したのは, 第1ステップでは剛性解析の計算時間が短く, また剛性評価の判断が容易で多数の構造について選択できるからである. 構造選択第1および第2ステップの剛性解析においては本研究の第1, 第2報で述べた計算機プログラムを使用する.

図2 構造決定プロセス

次の最適構造選択では, たとえば, 製造コストを評価関数として以上の二つのステップで選択された設計モデルから最適なものを決定し, それを出力する. このようにして最適構造モデルが選択されると次に環境決定プロセスへ進む.

2.2 環境決定プロセス

環境決定プロセスでは有限要素法を用いた剛性解析によって工作機械構造の剛性要求を満足する環境条件の決定, すなわちすえつけ条件, 環境温度の設定をする.

工作機械はレベリングブロックなどを介して機械工場の床, あるいは工作機械基礎の上に置かれることが多い. この場合には, 特に動剛性として低次の振動モードはこのすえつけ条件の影響をうける. そこで環境決定プロセスの第1ステップでは工作機械のすえつけ条件の影響を解析し, 必要な場合にはすえつけ条件を指定する.

工作機械の熱変形特性は環境温度の変動によって大きな影響をうける. そこで環境決定プロセスの第2ステップではこの変動による工作機械構造の熱変形を計算によって求め, 熱変形を許容値内におさめるような環境温度条件を設定する.

3. 幾何データおよび技術データ

設計者は構造を記述した幾何データと解析の仕様を与える技術データを準備しなければならない。構造の剛性解析のために、構造を有限要素に分割した時の節点の座標、一つの有限要素を構成する節点番号などが必要であるが、これらは前に述べた自動データ作成ルーチンで計算機内で自動処理されるので、設計者は提案する設計モデルについて簡単な構造記述データを用意すればよい。この幾何データの準備では、工作機械構造を6面体の箱型の形状で組合わせて表現できるとしてその6面体を構成する8節点、6面の有無および各稜の分割数を与えればよい。このような自動データ作成ルーチンにより、データを準備する労力はかなり軽減され、誤りも非常に少なくなる。

この幾何データに加え、工作機械構造の剛性解析を行うために設計者は技術データを用意しなければならない。この技術データは静剛性解析の場合の外力、熱剛性解析の場合の熱源の位置と発熱量、動剛性解析の場合の外力と減衰定数などである。これらの技術データの数値は現在解析がまだ十分行われていないため実際に実験を行ってその結果を用いなければならない。

工作機械の内部からの発熱はその位置は容易にわかるが、発熱量を正確に求めることは困難であった。しかし第2報で報告したように熱源まわりの少数の温度測定値により、その発熱量が推定できる解析法が開発され、この方法を用いてデータを収集できる。したがって無負荷運転時の主軸部分からの発熱量、加工時の発熱量などが求められ、設計者は加工条件を与えるだけで、実際に加工を行っている状態での熱剛性を評価できる。

動剛性解析の場合、特に減衰定数に関しては実際的な研究はあまり発表されていず、現在は適当な数値を仮定している。しかしこの数値がびびり発生限界を決定するので重要な課題として残されている。

4. 剛性の評価

このように静、熱および動剛性解析により工作機械構造の特性が定量的に表されると種々の構造の比較を行い、剛性の評価をしなければならない。設計者は従来、過去の経験と勘に頼ってこの評価を行ってきたので、確立した定量的な基準がないのが現状である。しかし基本

図3 剛性の評価

的には以下の項目により判断を行っていると考えられる。

静剛性については、第1には工具点での直接剛性成分、すなわち剛性マトリクスの逆行列の成分を考える。この値は工具点での各方向のばね定数に相当するものである。しかし実際の加工ではその切削力方向と加工精度に影響を与える方向とが異なる場合がある。たとえば、ドリル加工ではスラスト方向の切削力が大であるが、横方向の加工精度が問題である。したがって第2の評価項目として典型的な加工状態における加工精度を重視する方向の変位を基準とする。そこで静剛性解析により図3(a)に示すように各設計モデルについて計算された直接剛性成分、典型的な加工状態における変位を並べ、設計者の要求する剛性値以下のものを剛性不足として除去する。

熱剛性解析では、定常状態および非定常状態の二つの場合について考える。定常時には主軸を無負荷運転した時の変位量で判断する。これは図3(b)のように静剛性

図4 シングルコラム型マシニングセンタモデル

と同様にある許容変位以上変形する構造を除去する。これまでの剛性評価は比較的容易で計算時間も短いので構造選択の第1ステップとして行われる。さて非定常状態では図3(b)に示すようにウォーミングアップの期間と加工開始後に分けて考える。ウォーミングアップ時ではその立上がり時間 T の大小が比較される。加工開始後は工作機械は種々の負荷条件、主軸回転数で運転され、熱的には常に変動し、したがって異なった主軸回転数間での変位差 δ が重要となる。その評価基準としてここでは最小回転数と最大回転数における定常熱変位差をとっている。

動剛性解析では、低次の固有振動数と振動モードを計算する。しかしこれだけでは剛性の評価をするには不十分で減衰定数の値が正確に知られていなければならない。実際の工作機械構造では図3(c)のように外力振動数に対する変位が測定され、固有振動数におけるピーク値が大きいとびりやすい。そこで、ここでは適当に仮定した減衰定数により設計者の与えた構造の中でピーク値が大きいものを除去する。ただしここでは同じ振動モード、たとえば、ねじれ一次モード相互間では同じ減衰定数をもつと仮定する。

以上で述べた構造選択の第2ステップに含まれる非定常状態での熱剛性および動剛性の評価は具体的にどの程度であれば設計者が満足できるかは正確につかめず、今後この設計システムで構造設計を行って経験を積み重ねなければならない。

5. 設計システムによる設計例

以上の設計システムを用い図4に示すシングルコラム型マシニングセンタモデルについて設計を行う。この機種は設定加工範囲と種類から工具径が定められ、それに従って主軸系(スピンドル径と長さ、支持ベアリング)

図5 静剛性のモデル

などが決定されており、図中の寸法をもった主軸頭が必要であると想定した。また主軸の可動範囲は上下500mmのストロークが要求された。そこで基本設計としては図のようなコラムと主軸頭の接続関係が提案され、その補強として上部あるいは下部のしきり板を考え、また鋼板溶接構造で製造するとしてその板厚を2種類に変えることにした。図中にはこれらの組合せとして用意された設計モデルを表にしてある。以後モデル番号はこの表による。

まず構造選択の第1ステップとして主軸頭が最高位置と最低位置での静剛性を計算し図5に示す。ただし構造のすえつけは4点で支持し固定端と考えている。最高位置での直接剛性すなわち荷重方向のフレキシビリティで比較すると主軸の軸方向、X方向の剛性は上部あるいは下部しきり板の有無によって大きな影響を受け、また板厚が大きく影響していることが分かる。しかしY,Z方向については大幅な剛性向上が見られない。加工精度の点から考えるとY,Z方向は主軸の半径方向となり穴径に大きな影響を及ぼすのでこの方向の剛性も重要である。また最低位置でのフレキシビリティを比較するとX方向に関してはモデルにより最高位置の場合と同様に変化が大きい、Y,Z方向はほとんど差異が認められない。

そこで次に典型的な加工例としてドリル加工について工具自体の変形を除いた工具点での変形について計算を行った。この場合の加工精度を重視する方向はY,Z方

図6 ドリル切削力による静変形

向である。図6(a)には技術データによりスラスト方向に1800 kgの荷重が加わった場合の半径方向のずれを示す。この図から補強によって単純に剛性が向上するとはいえないことが分かる。この場合には上部しきり板が有効である。また図6(b)にはモデルVIIIについてそれぞれの位置での全体の変形と工具点での変位量を示す。

次に熱剛性として無負荷運転時の主軸部分での発熱による工具点の定常熱変位を計算し図7(a)に示す。これは主軸回転数560 rpmの場合に実際に工作機械構造の変形に寄与した熱量を技術データとして与えた場合である。この結果によるとZ方向すなわち上方に伸びる方向の変位が著しく大きく、また補強や板厚の違いにより影響を受けるが、他のX, Y方向はあまり変位していない。これは従来の経験によるシングルコラム型の熱変位の傾向とよく一致し、この手法により定量的にこれらの性質を理解できる。図7(b)にはモデルVIIIについての全体の変形の様子を示す。

さて以上のようにして第1ステップが終わった段階では静剛性ではモデルI, II, 加工例ではI, III, 定常熱変形ではI, II, III, IV, Vが所要の剛性が足りない判断された。したがって残るモデルVI, VII, VIIIの3種類についてさらに構造決定を進めて第2ステップに移る。

非定常熱剛性として異なる主軸回転数においての熱

図7 定常状態での熱剛性

図8 主軸回転数の違いによる熱変位の差

変位の差を図8に示す。ここでは低速と高速として560および1670 rpmでの無負荷運転時での発熱量を想定した。この結果によると各モデルの差異は少ない。そこで動剛性解析により4次までの低次の固有振動数と振動モードを計算し図9に示す。モデルVIではまず最低次に主軸頭が大きく変形する振動モードが現れた。これは下部しきり板がないために主軸頭の質量によるモードである。2次にはX方向ローリング, 3次にはY方向のローリング, 4次にはねじりによるモードが得られた。モデルVIIは最低次にY方向, 2次にX方向ローリング, 3次にはねじり, 4次には上部しきり板が無いためにコラム上部で局部的に変形する振動モードが計算された。モデルVIIIでは1次にY方向, 2次にX方向ローリング, 3次にねじり, 4次には主軸頭の局所的な振動モードが現れた。

図9 低次の固有振動数と振動モード

図10 動剛性の比較

動剛性の評価は確立されていないのでこれだけで判断はできないが、このシングルコラム型と同じような実機について行った動剛性の実験による⁸⁾と X 方向のローリ

ングとねじり振動の振幅が他のモードに比べ顕著で、加工に大きく影響することが明らかにされている。これは、このシステムによって計算された静剛性でも X 方向の剛性が他の方向に比べて著しく低いことから説明できる。そこでこの特徴的な振動モードについて、以下のようにして動的リセプタンスと等価減衰比により動剛性を評価した。

共振状態ではその振動モードが顕著であり、その固有振動数をもつ等価な 1 自由度系と考えられ次式のように表現できる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f \quad (1)$$

ここで m は等価モード質量、 c は減衰定数、 k は静的なばね定数、 f は外力で、 x は注目する方向の変位である。したがって固有振動数 $\omega = \sqrt{k/m}$ がすでに求められているので動的リセプタンス R 、および等価減衰比 D は、

$$\left. \begin{aligned} R &= 1/c\omega \\ D &= c\omega/2k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

として求める。ここで同じ振動モードに関しては工作機械構造が類似である場合、減衰定数 c が等しいと仮定すると実験値か

ら求めた値を用いることができる。そこで前述の静剛性解析での k の値と動剛性解析での ω の値と実験値 c を用いることにより、図 10 のように二つの振動モードについて動的リセプタンスおよび等価減衰比が求められる。これらの結果によりびりばり動的リセプタンスが低いほど、等価減衰比が大きいほど発生しないことを考慮してモデル VI が動剛性、特にねじり振動モードに対して高いと考えられる。以上のような構造決定プロセスによりモデル VI、上部しきり板のついた板厚 60 mm の構造が選ばれた。

この決定された構造が実際にどのような状態で使用されるかについて環境決定プロセスへ進む。ここでは最近問題となっている環境温度上昇による熱変形を検討した。図 11 には環境温度が 1°C 上昇し、構造全体の温度

環境温度上昇: 1°C

変位: $\Delta X = 3.6 \mu\text{m}$, $\Delta Y = 5.0 \mu\text{m}$, $\Delta Z = 9.0 \mu\text{m}$

図 11 環境温度上昇による熱変形

も 1°C 上昇した場合の熱変形を示す。工具点での変位もかなり大きく、仕上加工の場合のように精度の高い加工を行う際には環境温度上昇も十分考慮しなければならない。また逆に熱変形をこの数値以下におさえたい場合は機械工場の温度制御を少なくとも変動 1°C 以下にしなければならない。

なおこの設計モデルは 71 節点、長方形板要素 76 個を用いて表現されている。この設計では東京大学大型計算機センタの HITAC 8800/8700 (320 KW) を使用して、第 1 ステップでは 8 種類の構造について約 20 min, 第 2 ステップでは 3 種類の構造について約 15 min の計算時間が必要であった。

6. 結 論

有限要素法を利用して工作機械構造の静、熱および動剛性を考慮して設計を行うシステムを開発した結果、次のことが結論として得られた。

- (1) 剛性解析プログラムにより設計者の与えた構造の特性が定量的に表される。
- (2) その結果により、各構造間の剛性比較が可能となり設計の判断基準となる。
- (3) 構造決定プロセスにおいて構造選択を 2 段階に分けて設計を進めると、多数の構造の中から効率よく所要のものが選択できる。
- (4) 環境決定プロセスでは実際に工場に設置された時の特性が解析でき、加工精度を保証するために必要な環境条件を決定できる。
- (5) 構造を記述するより一般的な自動データ作成、および標準的な技術データが準備されれば本システムの使用により設計者の労力は著しく軽減される。

またこの設計システムで現在十分な解析が行えない部分、接合面の剛性および減衰定数、動剛性の評価などが解決すれば工作機械構造本体だけでなく、主軸系、駆動系などを含めた自動設計の第一歩となるであろう。

文 献

- 1) 佐田登志夫ほか: 工作機械構造の剛性解析システム (第 1 報), 精密機械, **42**, 10 (1976) 955.
- 2) 竹内芳美ほか: 工作機械構造の剛性解析システム (第 2 報), 精密機械, **43**, 1 (1977) 67.
- 3) 工作機械の剛性および切削性能の向上に関する研究分科会研究成果報告書, 日本機械学会 (1974).