ハーモニックドライブ装置のねじり剛性*

矢 鍋 重 夫^{*1}, 石 塚 真 一^{*2}
山 口 利 明^{*3}, 池 田 正 樹^{*3}

Torsional Stiffness of Harmonic Drive Reducers

Shigeo YANABE, Shinichi ISHIZUKA,
Toshiaki YAMAGUCHI, and Masaki IKEDA

A harmonic drive reducer is composed of a flexible cup gear, a rigid ring gear, and an oval cambearing. Concerning the torsional stiffness of the reducer, torsional and radial bending deformations of the flexible cup gear were measured under torque-loaded conditions. The effect of balls in the oval cam bearing on the torsional stiffness was also investigated experimentally. It is found that the radial deformation of cylindrical part of the cup gear goes inside in the 90 deg. angular region measured from the major axis of oval cam toward the torque-loaded direction, and that the ball bearing in this region are subjected to radial forces and have a large influence on the torsional stiffness of the reducer. The above deformation is ascertained by FEM calculations taking account of some constraints of gear meshing and the radial stiffness of the balls.

Key Words: Machine Element, Harmonic Drive Reducer, Torsional Stiffness, Cup Gear, Oval Cam Bearing, Gear Meshing Condition

1. 結 論

ハーモニックドライブ装置(以下 HD 装置と呼ぶ)は、入力軸と出力軸が同軸であり、小形、軽量、高精度を特長とする高減速装置で、産業用ロボットの関節部分、特に手首に相当する部分に広く用いられている。しかしながら、HD 装置のねじり剛性が低いため、位置決め精度が低下したり、ねじり固有振動数が低下して、運転領域内で共振が生じたりするなどの問題が生じており、ねじり剛性の向上が強く望まれている。

HD 装置のねじり剛性については、これまで経験的に次のようなことが知られていた。

(1) ねじり剛性は、ヒステリシスおよび区分線形的な非線形性をもつ。

(2) 低剛性の区分線形域をロストモーション領域と呼び、この部分のねじり剛性は主として、だ円カム等各部のガタに依存する。

(3) 高剛性の区分線形域では、そのねじり剛性は

基本的に、カップギヤのねじり剛性に依存している。

(2)に関しては、多くの技術的検討が加えられロストモーションの小さい製品が開発されているが、(3)を含めて、HD 装置のねじり剛性に関する系統だった検討はほとんど行われていないようである。

本研究では、(3)の領域のねじり剛性に着目して、これに影響を及ぼす因子を明らかにするため、ねじり試験機を用いて、トルク負荷状態にあるカップギヤの弾性変形(ねじれ角、半径方向変位)およびだ円カム転動体の、ねじり剛性に及ぼす影響などを測定した。これらの実験結果より、カップギヤはねじり変形だけでなく半径方向変位も生じ、だ円カム転動体の半径方向ばねがねじり剛性に密接に関係していることが明らかになった。

そこで、拘束条件の組合せが異なるねじり剛性解析モデル数種について、有限要素法を用いて、カップギヤのねじり変形および半径方向変形の計算を行い、実験結果との比較を行った。その結果、二、三の拘束条件の定量化に問題はあるものの、適切なねじり剛性解析モデルが見い出せたので以下に報告する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置 本研究で使用した HD 装置の写

* 昭和 63 年 10 月 18 日 第 66 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 4 月 5 日。

*¹ 正員、長岡技術科学大学 (〒940-21 長岡市上富岡町 1603-1)。

*² 長岡技術科学大学大学院。

*³ 日本精工(株) (〒371 前橋市鳥羽町 78)。

真および各部の名称を図1に、カップギヤの概略寸法を図2に示す。HD装置は外周にベアリングを持つだ円カム、薄肉弾性カップに外歯を切ったカップギヤ、内歯を持つ剛体のリングギヤから成っており、カップギヤはだ円カムの挿入によって押し広げられ、その長径部でリングギヤ(固定)とかみあう。図3はねじり剛性試験機の概略図で、ステッピングモータの出力は2段のHD減速機により増幅され、カップリングを介して供試HD装置のカップギヤ底部に伝えられる。リングギヤおよび出力軸となるだ円カム軸は、それぞれ治具によって固定されているため、カップギヤはねじり変形および半径方向変形を同時に受ける。

2・2 測定方法 供試HD装置に作用するトルクの大きさは、カップギヤ入力軸に貼付けたひずみゲージによって測定した。カップギヤのねじれ角は図4(a)に示すように、長径および短径方向のカップ外周にブロックを貼り付け、その周方向変位を電気マイクロで測定することによって求めた。また、カップギヤの半径方向変位は図(b)に示すように、円周12個所で測定した。両測定とも軸方向位置を変えて行い、その位置は図4(c)に示すように、カップギヤ開口部からの形状に沿った距離 L で表すこととする。

実験項目および測定項目の一覧を表1に示す。

3. 実験結果

3・1 カップギヤねじり変形 トルクを受けたカップギヤのねじり変形測定結果を図5(a)に示した。横軸は L で測定点の軸方向位置を表し、 $L \geq 67$ mm

は入力軸上の点を意味する。縦軸は、ねじれ角を入力トルクで割った、単位トルク当たりのねじれ角である。図中の—●—が長径方向、---○---が短径方向の実測値である。このときの変形を、模式的に表したのが図5(b)である。これらの図より、ギヤかみあい部の変形は小さく長径方向では開口部でねじれ角はほぼ零、底部に向かうに従い増加するのに対して、短径方向では開口部でねじれ角が最大となっていることがわかる。

また、歯を切っていないカップギヤの、歯に相当する部分を特注治具より、全周にわたってクランプした場合のねじれ角の変化を図6に—●—で示す。図中の破線は、通常のHD装置におけるカップギヤの長径方向のねじれ角変化を示している。図より通常のHD装置のねじり剛性は、カップ単体のその約40%に低下していることがわかる。

3・2 カップギヤの半径方向変形 トルクを受けたカップギヤの半径方向変形測定結果を図7に—○—で示した。各図中の▲はカップギヤの長径方向、← T はトルク作用方向、 L は測定点の軸方向位置をそれぞれ表している。また、円グラフの1目盛は20 μ mで、中央の実線の円がカップギヤ変形前の状態を示している。図より、長径からトルク作用方向へ約90°の角度範囲では、カップギヤは内側へ変形し、さらに約90°の範囲では外側へ変形することがわかる。前者の角度範囲をへこみ領域と呼び、後者の範囲をふくらみ領域と呼ぶことにする。

へこみ領域では、カップギヤとだ円カムの間に、力が作用していると考えられ、これがねじり剛性に影響を及ぼすと考えられる。

3・3 だ円カム転動体の荷重分担状況 供試HD装置にトルクを加え、負荷状態におけるだ円カムベアリングの各転動体の動きやすさを調べた。得られた結果を図8に示す。転動体の動きやすさの程度は、荷重分担の程度と一致していると考えられ、図より、入力トルクの増加に従い、荷重を受けている転動体が、長

図1 ハーモニックドライブ装置外観

図2 カップギヤの寸法

図3 実験装置概略

表 1 実験項目および測定項目

Characteristics of tested HD	Measuring items		
	Cup gear		Load sharing of rolling element
	Torsional angle	Radial displacement	
Normal HD	○ 3.1	○ 3.2	○ 3.3
Non toothed cup gear	○ 3.1		
Lacked rolling element	○ 3.4

図 4 カップギヤの変形測定法

図 5 カップギヤのねじれ角の測定例

図 6 歯を切っていないカップギヤのねじれ角

径よりトルク作用方向へ広がっていくのがわかる。また図 7 の結果と比較すると、転動体が荷重を受ける領域は、カップギヤのへこみ領域と良く一致していることがわかる。

3.4 ねじり剛性に及ぼす転動体の影響 だ円カムベアリングの内輪外側に溝を加工し、転動体を自由に出入れできるようにした。図 9 (a) に示すように抜く 4 個の転動体の位置を 8 通りに変えて、順次ねじり剛性試験機に組込み、一定トルクを加えたときのねじれ角の変化を調べた。得られた結果を図 9 (b) に示す。図の横軸の数字は図 9 (a) の八つの場合に対応し、破線は、転動体を抜かない場合ねじれ角を表している。図より転動体の数を減らすとねじれ角が増加し、ねじり剛性が低下することがわかる。また、転動体を抜く

位置が長径方向に近いほど、ねじり剛性に大きな影響を及ぼす。

4. 有限要素法によるねじり剛性解析

4.1 ねじり剛性解析モデル HD装置のねじり剛性を解析するためには基本的にカップギヤの弾性を考慮する必要があるが、前章の実験結果からわかるとおり、(1)カップギヤはリングギヤとの噛み合いによる拘束および(2)だ円カム転動体の弾性に起因する半径方向ばねの影響を受けると考えられる。本来HD装置のトルク負荷時の挙動は、だ円カム転動体の非線形な弾性を含む。したがって、ギヤのかみあい領域がトルクとともに変化する複雑な過程を考慮する必要があると思われるがここではHD装置のねじり剛性に大きな影響を及ぼす因子を抽出するという立場で検討を行った。そこで、有限要素法を用いてねじり剛性の解

析を行うこととし、三角形平板要素を用いて、カップギヤを図10のように分割した。各要素の寸法は図2より得られるが、ギヤ部の肉厚はピッチ円直径とカップ内径の差の1/2(1.08 mm)とした。

上記(1)、(2)の拘束条件を模式的に示したのが図11で、これらを順次考慮した三つの解析モデルを以下に示す。

モデル1：リングギヤとかみあうカップギヤ長径方向の節点の周方向ならびに半径方向変位を拘束し、ギヤがかみあう角度範囲 θ_E (通常 15°)および軸方向範囲(列数)を検討する。

モデル2：モデル1の拘束条件のうち半径方向の拘束を解除し、だ円カム転動体の弾性による半径方向ばね K_R (4700 N/mm)をカップギヤへこみ領域(90°)に位置する節点に付加する。

モデル3：モデル2にリングギヤとのかみあいによる反力 R の分力 $R_{RG} [(T/6r) * \tan 30]$, r はリングギヤピッチ円半径]を付加する。

4.2 計算結果と実験結果の比較

4.2.1 モデル1の場合 モデル1について、かみあいの拘束範囲をいろいろ変えてカップギヤの変形

図7 カップギヤの半径方向変位測定例

(a) 転動体を抜いた位置および実験番号

図8 転動体の荷重分担状況

(b) ねじれ角の変化

図9 転動体のねじり剛性に及ぼす影響

を計算した。得られた結果の代表例をねじれ角の軸方向変化について示したのが図12である。図中の実線は実験値をなだらかに結んだ線である。図より、モデル1ではかみあう節点の列数(1列, 2列)およびかみあう節点の角度範囲 θ_E (通常は 15°) をいろいろ変えても、実験値の最終ねじれ角と、途中の傾きを同時に満足する計算結果が得られないことがわかる。以後の計算では1列拘束, $\theta_E = 15^\circ$ とし、新たな拘束の効果を検討する。

4・2・2 モデル2の場合 モデル2について、 K の値を種々変えて計算を行い、カップギヤのねじれ角および半径方向変位について、実験値と比較的良好一致した場合の結果を図13(a), (b)にそれぞれ示す。図中、○印が実験値、△印が計算値である。図13(a)より、ねじれ角についてはモデル1の場合と異なり、計算値と実験値はほぼ一致しているといえる。このことは、だ円カム転動体による半径方向ばねがHD装置のねじり剛性評価において、重要な因子であることを

示している。なお、 $K_R = 4700 \text{ N/mm}$ という値は、だ円カムベリングの内外輪転動角半径を考慮して、転動体に 0.5 N 程度の力を加えたときに得られるばね定数にほぼ等しい。図(b)の半径方向変位については、計算と実験とはあまり良く一致しておらず、モデル2では、カップギヤの変形全体をとらえるにはまだ不十分である。

4・2・3 モデル3の場合 モデル3を用いて計算したカップギヤのねじれ角および半径方向変位の結

図10 分割図

図11 拘束条件模式図

図12 歯のかみあいによる拘束条件を変えた場合のねじれ角の変化 (実験値との比較)

(a) ねじれ角

(b) 半径方向変位

図13 半径方向ばねを付加した場合カップギヤの変化

果, および実験結果を図 14(a), (b)にそれぞれ示す。図中の記号は 4・2・2 項の場合と同じである。これらの図より, ねじれ角, 半径方向変位とも, 計算値と実験値は良い一致を示すことがわかる。以上より, モデル 3 が HD 装置におけるカップギヤのねじれ角および半径方向変位を解析するうえで適切であるといえる。ただし, ギヤかみあいにおける軸方向の範囲, へこみ領域の範囲, 半径方向ばねのこわさ等については, より詳細な検討が必要である。

5. 結 言

ハーモニックドライブ(HD)装置における, カップギヤのねじり変形および半径方向変形について, 実験および数値解析を行い, 以下の結論を得た。

(1) トルクを受けたカップギヤは, 長径方向がリングギヤとかみあうため, 特徴的なねじりおよび半径方向変形を示す。特にカップギヤ開口部では, 長径よりトルク作用方向に約 90° の範囲(へこみ領域)で内側に半径方向変形を生ずる。

(2) (1)のへこみ領域にある, だ円カム転動体は荷重を受ける。このため, 転動体の弾性による半径方向ばねが, HD 装置のねじり剛性に大きな影響を及ぼす。

(3) 歯を切っていないカップギヤの歯部を全周拘束した場合のねじり剛性は, 同一寸法カップギヤを持つ HD 装置のねじり剛性の約 2.5 倍であった。

(4) HD 装置のねじり剛性解析モデルとしては, カップギヤを薄肉カップとして要素分割を行い, リングギヤとかみあう節点では, その周方向を拘束すると

(a) ねじれ角

(b) 半径方向変位

図 14 リングギヤ反力を加えた場合のカップギヤの変形

ともに, かみあい反力として, 半径方向内向きに力を加え, へこみ領域に半径方向ばねを付加した系が適当である。