複合フライスによる長尺部材の高速・高精度加工の研究*

小野塚 英明** 風間 繁† 大槻 浩之† 小泉 幸久†
上野 恵尉*** 前田 幸男†† 帯川 利之†††

High Speed and High Accuracy Machining of Long Flexible Parts with
Combined Face Milling Cutters

Hideaki ONOZUKA, Shigeru KAZAMA, Hiroyuki OOTSUKI, Yukihiisa KOIZUMI,
Keii UENO, Yukio MAEDA and Toshiyuki OBIKAWA

This paper describes an innovative method to machine the guide rails for elevators in high efficiency and high accuracy. Guide rails are usually machined on a planer. However, the machining time is long because of the useless return motion of the table and low cutting speeds. In order to decrease the machining time, face milling with combined cutters was applied to the machining of guide faces. The trial face milling of guide rails indicated the reduction of the width of guide rails at the tool exit and deterioration of the perpendicularity of guide faces. Thus, in this research, the machining mechanism affecting the accuracy of the machined surfaces was studied. The analytical and experimental results revealed that cutter path deviation from the center of a guide rail affects the width reduction at the exit part of the guide rail, whilst the clamping stiffness of the guide rail has a much greater influence on the perpendicularity of the guide face than the cutter path deviation. It was also found that change in the number of cutting edges engaged in machining simultaneously caused wavy machined surface with a long wave length. Finally, determined based on the above findings were the critical tool path deviation and critical clamping stiffness, which permitted the efficient machining of the guide rails at a high cutting speed of 267m/min and a high feed rate of more than 1000mm/min, decreasing machining time by a factor of six.

Key words: high speed machining, face milling, machining accuracy, guide rail

1. 緒 言

ガイドレールのような長尺部材の加工には、平削りが用いられてきた。例えばエレベータに用いられているガイドレールは図1に示す断面形状を有し、その長さは約5000mmである。エレベータの乗りかごの駆動案内であるガイドレールは、乗り心地や非常時の制動性能等の要求から高い品質が要求されている。素材はSS400 相当品の圧延材料であり、特にその接続部における段差は走行時の振動発生の原因となるため、頭部の二面幅に対し0.05mmの寸法精度が5000mmの全長にわたって要求されている。一般にガイドレールの加工では図2に示すように両側に一对のバイトを取付けてガイドレールを搭載したテーブルを往復させ、さらにバイトを取付けた刃物台を、テーブルの1往復毎に下方向に移動させることによって頭部の側面加工が行われている。通常、プレーナのテーブル送り速度(切削速度)は60m/min程であり、加工能率は低い。例えば図1に示した形状のレール頭部の加工では送りピッチを0.2mmとしても100回以上のテーブル送りが必要であり、頭部側面の加工時間だけでも約30minを要し、切削能率は8250mm³/min程度である。

近年、工具材質やコーティング材質の開発による切削性能の向上は目覚しく、炭素鋼や鋳鋼を200m/minを超える切削速度で加工することは十分に可能である¹⁾。しかし従来の平削りではテーブル移動速度の向上には限界があり、製造コスト低減を目的とした加工諸元の向上はこれ以上期待できない。さらに平削りでは連続した切りくずが大量に生成されるので、その切りくずの処理作業のため無人化が図りにくいという問題がある。したがって切削工具の耐摩耗性能を十分に活用し、ガイドレールの高能率加工を実現するためには平削りに替わる別の加工方式が必要となる。

Fig.1 Typical dimensions of a guide rail for elevator

Fig.2 Conventional planing method of a guide rail.

* 原稿受付 平成21年7月22日

** 正 会 員 (株)日立製作所 生産技術研究所
(神奈川県横浜市戸塚区吉田町292)

*** (株)日立製作所 生産技術研究所
(神奈川県横浜市戸塚区吉田町292)

† (株)日立製作所 都市開発システム社
(茨城県ひたちなか市毛1070)

†† 正 会 員 富山県立大学 工学部知能デザイン工学科
(富山県射水市黒河5180)

††† 正 会 員 東京大学 生産技術研究所(東京都目黒区駒場4-6-1)

そこで本研究では約 20 年以上にわたって適用され続けてきた、平削りにおける加工時間が長いという問題点を改善し、切削工具の性能を十分に引き出した高速切削を実現するために、一対の正面フライスを用いて 1 パスで頭部側面の加工を行う方式を検討した。図 3 に示すフライス加工では 1000mm/min 以上の送り速度を見込めるので、1 パスでの加工が可能であれば全長 5000mm のガイドレールの加工において 5min 程度の加工時間と 49500mm³/min の加工能率が実現可能であり、従来の平削りと比較して 6 倍の高能率化と大幅な加工時間の短縮が期待できる。しかし回転工具である正面フライスでは、同時に切削に作用する切れ刃の数が一定でなく、切削力が変動する。またエレベータ用ガイドレールの頭部両側面を切削する際のレールの弾性変形が、加工精度に影響を及ぼす。本報では、特にレール頭部の二面幅寸法と側面のうねりの形成機構について検討を行い、要求される加工精度を十分に満たすためのレール中心と複合フライス中心の偏差ならびにレールのクランプ剛性の基準を明らかにしたので、結果を報告する。

2. 実験方法

本研究の実験で使用した工作機械は五面加工機である。加工機のテーブル上にレールのフランジ部を一定の間隔で固定した後、テーブルを長手方向に送ってレールを切削加工した。固定方法がレールの加工精度に及ぼす影響を検討するため、図 4 に示すようにフランジの固定間隔を変化させた場合、またマグネットチャックを利用した場合についても検討を行った。図 4 の I は 500mm の間隔でフランジ部を加工機テーブルに固定した場合、II は 250mm の間隔で固定した場合である。また III は 100mm の間隔で電磁石が設置されているマグネットチャックを使用した場合を示している。

工具は直径 250mm、16 枚刃の正面フライスを、スペーサを介して 2 枚組合せたものであり、BT50 のフライスアークに取付けて実験に供した。

Fig.3 Proposed method with combined face milling cutters

Fig.4 Three different fixture methods of a guide rail

加工条件を表 1 に示す。レール素材の頭部は仕上がり寸法に対して片側 1.5mm の切削代が設けられている。1 刃当りの工具送りは 0.23mm/tooth とし、ダウンカットでレールの側面を切削した。加工の状況を図 5 に示す。

本研究では、レールの加工精度として、頭部の二面幅寸法と側面の垂直方向の真直度（以下、単に真直度と呼ぶ）を評価した。図 5 に示した頭部側面加工用の複合フライスは、ツールプリセットを用いて切れ刃の振れ回りを 0.003mm 以内に管理した。また正面フライスは直径が 250mm と大径であるため、回転主軸と送り軸との直角度がレールの二面幅に影響を及ぼすことが懸念される。そのため、実験に当っては回転主軸と送り軸の直角度を 250mm の直径に対して 0.01mm 以内となるように調整した。二面幅の測定は、分解能 0.001mm のマイクロメータを用い、頭部の中央部、すなわち上面から約 17mm の位置で行った。また側面の真直度は図 6 に示すように、加工機に接触式変位計を取付け、加工機の上移動軸を利用して側面上を走査し、その断面形状をペンレコーダに記録することによって測定した。さらに、切削力によるレール頭部の弾性変形について検討するため、頭部の倒れに対する剛性を測定した。図 7 に示すように、ばねばかりを用いてレール頭部の上面および端面から約 5mm の位置に荷重を加え、ダイヤルゲージを用いて変位を測定することにより剛性を求めた。

Table 1 Experimental conditions

Cutting tool	Face milling cutter Diameter ϕ 250mm Approach angle 45° Radial rake angle -2° Axial rake angle 19°
Workpiece	JIS SS400
Cutting conditions	Spindle revolution 341 min ⁻¹ Axial depth of cut (d) 1.5 mm Feed rate (f) 0.23 mm/tooth Down milling
Cutting fluid	Soluble

Fig.5 Face milling with combined cutters

Fig.6 Measurement of straightness of machined surface

3. 実験結果と考察

3.1 頭部二面幅寸法精度

初めに表 1 に示した条件で長さ 5000mm のガイドレールを加工し、頭部二面幅寸法を測定した。その結果の例を図 8 に示す。直径が 250mm の複合フライスで 33mm の幅の頭部を加工すると、図 8 の添え図に示すように、切削開始からフライス全体がガイドレールに接触するまでの領域 A、フライス全体がガイドレールに接触している領域 B、前方の切れ刃は切削を終了しているが後方の切れ刃がガイドレールに接触している領域 C に分類される。図 8 に示した 3 本の加工結果の例から分かるように、領域 A および B においては二面幅に多少のばらつきがあるもののその分布には特徴的な変化は見られない。しかし領域 C においては、常に二面幅の急激な減少が観察されることが分かった。なお、領域 C における二面幅の減少量は、領域 A、B における二面幅の直線的な変化を想定したときの右端の値と右端での測定値の差から算出した。そこで最初に複合フライスが加工を終了する領域 C における二面幅の減少について考察した。

レールの頭部側面は片側当り 1.5mm の切削代が設けられている。レールの中心と複合フライスの中心が一致し、頭部の左右両側の切削代が同一であれば左右の正面フライスに作用する切削力の大きさは同一となる。しかし素材の曲り、加工機への取付け誤差、倒れなどの誤差が生じている場合、左右の正面フライスに作用する切削力の大きさは同一とならない。

Fig.7 Measurement of stiffness of workpiece

Fig.8 Examples of width change over the length of guide rails

例えば図 9 に示すようにレールの曲り等によって、レールに対し複合フライスの中心が右側にずれている場合、右側のカッタの切削代が小さく、左側のカッタの切削代が大きい状態となる。このような状態で領域 C に入り、複合フライスの送り方向前方の切れ刃が切削を終了すると、図 10 に示すように頭部に作用する切削力が急激に減少するため、レール頭部の弾性変形が回復する。その結果、後方の切れ刃に弾性回復分の切込みが作用することになり、後方の切れ刃だけで切削が行われ、領域 C において二面幅が減少するものと考えられる。

図 11 は図 8 における加工面の観察結果の例を示している。図 8 の条件ではダウンカットで加工しているため領域 B では前方の切れ刃の切削痕が、領域 C においては後方の切れ刃による切削痕が加工面に形成されている。本研究では上記のメカニズムによる端部での二面幅減少を解明するため、レールに作用する切削力と弾性変形について検討した。初めに切れ刃に作用する切削力を測定するため、ほぼ同一の切れ刃形状をもつ直径 100mm の正面フライスによってレールの頭部と同じ 33mm の SS400 材を切削したときの回転軸方向の切削分力の最大値 F_x と軸方向切込み量 d の関係を測定した。その結果を図 12 に示す。ただし切削条件は、軸方向切込み量を除き、表 1 と同一である。

Fig.9 Unbalanced axial cutting forces due to the tool path deviation from the center of a guide rail

Fig.10 Effects of the bending on machined width at terminal position of a guide rail

Fig.11 Cutter marks in the cutting regions of B and C

図 12 からわかるように、切込み量 d を 0.25mm から 1.5mm と増加すると軸方向の切削分力は比例的に増加する。しかし比例関係を表す直線は原点から大きく外れ、切込み 0 のとき 81.69 N と大きな値をとる。

図 13 は長さ 1000mm のガイドレールを用いて、ガイドレールと複合フライスの中心のずれ量 δ を変化させて加工し、二面幅を測定した結果を示したものである。図中のデータはそれぞれの条件についてガイドレールを 3 本ずつ加工し、領域 A 及び B、ならびに加工終端の二面幅の平均値とばらつきをプロットしたものである。領域 A 及び B と、加工終端における二面幅平均値の差を ε とすると、 ε は δ の増加に伴って増加している。すなわちガイドレールと複合フライスの中心のずれが大きい程、加工終端における二面幅減少量が大きい。

切削力は、図 12 の結果より、複合フライスの軸方向切込み量 d に対し、次式で表される。

$$F_{a \max} = K_{a \max} \cdot d + K_{ae} \quad (1)$$

ここで $K_{a \max}$ は切込み量に比例する定数、 K_{ae} は切れ刃とレールの接触により定常的に作用する定数である。本実験条件では $K_{a \max} = 149.85 \text{ N/mm}$ 、 $K_{ae} = 81.69 \text{ N}$ である。図 9 に示したようにレールと複合フライスの中心が δ だけずれていると、領域 B の加工中に、左側のカットに作用する切削力 F_{aL} 、右側のカットに作用する切削力 F_{aR} はそれぞれ、

$$\begin{aligned} F_{aL} &= K_{a \max} (d + \delta) + K_{ae} \\ F_{aR} &= K_{a \max} (d - \delta) + K_{ae} \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。したがって、レール頭部に作用する切削力の合力 F_a は次式で表される。

$$F_a = F_{aL} - F_{aR} = 2K_{a \max} \delta \quad (3)$$

レール頭部の剛性を K とすると、領域 B の加工中に生じる弾性変形 e は、

$$e = \frac{F_a}{K} = \frac{2K_{a \max} \delta}{K} \quad (4)$$

である。

切削が領域 C を移行すると、フライス前方の切れ刃が切削しないため、レール頭部は弾性回復により左側に移動する。したがって複合フライスの左側後方の切れ刃には、切込み a が作用し、その結果レールの二面幅は a だけ減少する。ただし右側後方の切れ刃は切削に関与しない。このときの弾性変形を e' とすると、左側のカットに作用する切削力 F_{aL} と切込み a の関係ならびに F_{aL} と弾性変形を e' の関係は次式で与えられる。

$$F_{aL} = K_{a \max} a + K_{ae} \quad (5)$$

Fig.12 Relation between the axial depth of cut and axial cutting force

$$F_{aL} = Ke' \quad (6)$$

また切込み a と弾性変形 e' には

$$a = e - e' \quad (7)$$

の関係があるので、式(5),(6),(7)より

$$a = \frac{Ke - K_{ae}}{K + K_{a \max}} \quad (8)$$

さらに上式に式(4)を代入し、切込み a が非負であることを考慮すると

$$a = \begin{cases} \frac{2K\delta - K_{ae}}{K + K_{a \max}} & (2K\delta > K_{ae}) \\ 0 & (2K\delta \leq K_{ae}) \end{cases} \quad (9)$$

が得られる。

式(9)よりレールの中心と複合フライスの中心のずれ δ に対し、領域 C での二面幅減少量は図 14 の I で表わされる。しかし二面幅減少にはレールの曲りだけでなく、頭部の倒れや表面粗さなどの不確定な要因による定常誤差があると考えられる。本研究では図 8 の切削における誤差の最大値を定常誤差の範囲と考え上記の結果に加算し、図 14 の II を求めた。実測値（平均値と誤差棒）は II の下にあり、この線を誤差の予測に使用できる。以上の結果より、レールとフライスの中心ずれを防止しても、定常的な誤差によってある一定値以上には精度を向上できないが、定常誤差は要求される誤差 0.05 mm より十分に小さいこと、図 14 の I のように二面幅の減少には δ に対する不感帯が存在するため、 δ を領域 C において $K_{ae}/(2K)$ 以下、本研究の場合 0.27 mm 以下に管理すれば、15 μm 以内の極めて良好な加工精度を維持できることが分かった。

3.2 頭部側面の真直度

本実験における頭部側面の真直度の測定結果を図 15 に示す。図中の L, R はそれぞれフライスの送り方向から見て左側および右側の側面を示している。

Fig.13 Relation between the deviation of center and the width of guide rails

Fig.14 Correlation of deviation of center and reduction of width at the exit end of guide rail

この図からガイドレールと複合フライスの中心のずれ量 δ の増大に伴って、側面のうねりも増大していることがわかる。また側面にはほぼ 1 周期のうねりが形成されていることが認められる。本節ではこのうねり量と波形について考察を行った。藤井ら²⁾は、ねじれを有するエンドミルによる側面切削加工において、ねじれによって同時に作用する切れ刃の枚数と切削合力の位置が変化し、その結果、切削力とそれによって生ずる工具の弾性変形量変動して加工面にうねりが形成されることを明らかにしている。本研究で対象としているガイドレール側面の正面フライス加工においては、図 16 に示した様に、複合フライスの切れ刃が回転に伴って移動し、同時に作用する切れ刃枚数の変化により切削力が変化すると考えられるので、複合フライスの中心とレールの中心に偏差 δ がある場合、同様のモデル化が可能である。

図 16 において、1 枚の切れ刃 i に作用する軸方向の切削力は、式(1)と同様に、次式でモデル化できる²⁾。

$$F_{ai} = K_{tc} d f \cos \theta_i + K_{te} \quad (10)$$

ここで K_{tc} と K_{te} は比例定数、 f は一刃当たりの送り、 θ_i は工具軸を原点とした場合の切れ刃 i の水平軸からの回転角である。上式における右辺第一項は切れ刃の軸方向切込み量 d と切削厚さ $f \cos \theta_i$ に比例した項である。第二項は切削厚さには比例せず一定となり、主に工具逃げ面が被削材に接触することによって生じる押しならし力³⁾に相当する。

切れ刃 i の垂直座標 z_i は、工具の半径を R 、レール頭部の幅を W 、正面フライスの切れ刃の数を N とおき、レール頭部の下端を高さ 0 とすると、切削時には、

$$0 \leq z_i = R(1 - \sin \theta_i) \leq W \quad (11)$$

の範囲にあり、二つの切れ刃 i と $i+j$ の垂直座標の違いは

$$\Delta z = R \left\{ \sin \theta_i - \sin \left(\theta_i - \frac{2\pi}{N} j \right) \right\} \quad (12)$$

で与えられる。最大の同時切れ刃数は $\theta_i = \pi/2$ のとき、

Fig.15 Surface profile errors for mechanical clamp in mm

Fig.16 Number of simultaneous cutting teeth

$$\Delta z = R \left\{ 1 - \sin \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{N} j \right) \right\} \leq W \quad (13)$$

を満たす最大の j を求めればよく、 $R = 250 \text{ mm}$, $W = 33 \text{ mm}$, $N = 16$ より $j = 1$ が得られる。すなわち本加工条件における同時作用切れ刃数は、図 17 に示す様に 1 と 2 の場合だけであり、この 2 つの場合が交互に繰返されながら仕上げ面は生成される。なお、ひとつの切れ刃のみが切削するときの回転角は、

$$\frac{3}{8}\pi < \theta_i < \sin^{-1} \frac{R-W}{R} + \frac{\pi}{8} \quad (14)$$

で与えられる僅かな範囲である。切れ刃の回転角が式(14)の右辺に等しいとき、次の切れ刃が切削を開始し、同時に作用する切れ刃数が 1 から 2 に増加する。その際、切削力が不連続に増加し、その結果レールの弾性変形とともに切込みが急激に変化し、うねりが形成されるものと考えられる。そこで、うねりを解析的に求め、切削力の変動によるうねりの形成機構を解明した。

簡単のため、3.1 節と同様にガイドレールの頭部はばね定数 K で弾性支持されており、左右のカッタに作用する切削力の差によって横方向に変位するものと仮定する。同時に作用する切れ刃数が n の場合、軸方向の切削合力は、

$$F_a = \sum_{i=1}^n 2K_{tc} \delta f \cos \theta_i \quad (15)$$

で与えられるので、切削点の垂直座標 z_k と切削点での弾性変位 y_k

$$y_k = \frac{F_a}{K} = \sum_{i=1}^n 2K_{tc} \delta f \cos \theta_i \quad (16)$$

$$z_k = R \sin \theta_k \quad (17)$$

の関係を求めると側面のうねりを解析的に求めることができる。式(16)からわかるようにガイドレール頭部の変位 y_k は剛性 K の影響を受ける。

Fig.17 Changing of the number of simultaneous cutting teeth and bending of the guide rail

Fig.18 Stiffness of guide rail measured at the exit end

Fig.19 Analysis of surface profile error for three clamping methods

Fig.20 Relation between the deviation and profile error

本研究ではガイドレールのフランジ部をクランプしてガイドレールの加工を行っているが、図4に示したように3種類の状態を作り、それぞれについて剛性 K を求め、うねり幅の上記解析結果と実測値との比較を行った。図18のIとIIはガイドレールのフランジ部をそれぞれ500mm間隔、250mm間隔で機械的にクランプした場合のガイドレール端部における曲げ剛性の測定結果、図18のIIIはマグネットチャックを使用し、フランジ部の裏面を吸着させた場合のガイドレールの端部における曲げ剛性の測定結果である。この図から、500mm間隔でクランプを設置したIよりも、250mm間隔としたIIの方が剛性が高く、マグネットチャックを使用すると端部における剛性はさらに向上することが分かる。

図19はIからIIIのクランプ方法において前述の方法によって解析を行った頭部側面の断面形状を示している。ガイドレールとフライスカッタの中心のずれ量 δ はいずれの場合も1mmとしている。ガイドレール頭部は並行に変位するものと仮定しているが、解析においても下部から約10mmの位置において変曲点を持つ1周期のうねりが形成されており、上記の仮説を裏付けられた。

図20にIおよびIIIの方法でレールを固定したときの、レール中心とカットの中心のずれと、端部での真直度の関係を示す。同図では上記の方法で得られた断面形状から求めるうねりに定常誤差の範囲として0.014mmを加え、実験結果と比較した。その結果、いずれの場合も定常誤差を想定したIおよびIIIの直線の下に実測値がほぼ存在するため、これらの直線は実際の誤差の予測に利用できる。また図21はマグネットチャックを用いて加工したときの実際の断面形状を示したものであり、図15の結果と比較すると、明らかにうねりは低減している。

Fig.21 Surface profile errors for magnetic clamp in mm

ここで前節におけるレール中心とカットの中心のずれの基準値 $\delta = K_{ae}/(2K)$ を図20に適用すると、III以上のクランプ剛性、すなわち、図18より50 kN/mm以上のクランプ剛性があれば、真直度に対しても15 μ m以内の極めて良好な加工状態を維持できることが分かった。

4. 結 言

本研究では、プレーナによるエレベータ用ガイドレールの頭部切削加工時間が長いという問題を解決するために、頭部側面にフライス加工を適用することを考え、複合フライスによりガイドレール頭部の左右側面の同時加工を行った。また高精度な加工を実現するため、頭部二面幅と頭部側面のうねりの形成機構について検討した。その結果以下のことがわかった。

- (1) ガイドレールとフライスカッタの中心のずれによって、切削加工中に頭部の左右側面に作用する切削力の大きさが異なり、ガイドレールを弾性変形させる。
- (2) 中心のずれがある場合、ガイドレールの二面幅は、フライスカッタの送り方向の前方の切れ刃が切削を終了した後、後方の切れ刃が再度切削を行うため、二面幅が減少する。
- (3) 切削が終了する領域において、中心のずれ量が大きい程二面幅の減少量は大きくなるが、フライスカッタの軸方向切削力は切込みに依存しない成分があり、一定値以下の中心のずれ量では二面幅減少量は大きくなる。
- (4) 同時に作用する切れ刃数の変化によって、側面にうねりが形成されるモデルを考案し、実測値と比較した結果、中心のずれ量、剛性がうねりに及ぼす影響を解明した。
- (5) 高精度な加工を実現するための中心のずれとクランプ剛性に対する基準値を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 狩野:データでみる次世代の切削加工技術,日刊工業新聞社(2000)104.
- 2) 藤井義也, 岩部洋育, 鈴木雅晴: 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度の関係(第1報), 精密機械, 43,7(1977) 807.
- 3) 仙波卓弥, 田口紘一, 佐久間敏三, 穂積豊: 高剛性精密仕上げエンドミルの開発とその切削性能, 日本機械学会論文集, 57,533(1991)313.