

Fe-Mn-Si系形状記憶合金の高速・高能率ミーリング — クレーンレール継目板のボルト穴加工 —

関東職業能力開発大学校 大 澤 剛

High Speed-High Efficiency Milling of Fe-Mn-Si Shape Memory Alloys
— Processing for Bolt Holes in the Crane Rail Joint Bar —

Tsuyoshi OHSAWA

要約 配管継手メーカーより、Fe-Mn-Si系形状記憶合金を利用したクレーンレール継目板の取付け用ボルト穴の加工方法の改善について依頼を受けた。従来の加工方法では、複数の工作機械と切削工具そして加工工程を要するために加工コストが非常に高くなる問題があった。そこで、できるだけ加工コストを少なくする加工方法について加工実験を通して検討を行った結果、マシニングセンタを利用したミーリングによる穴あけ加工が最適であることがわかった。メーカー側に新しい加工方法の提案を行った結果、従来の加工方法に比べて加工時間を5分の1以下に短縮することができた。本稿では、その加工方法について今回実施した加工実験とあわせて紹介する。

I はじめに

形状記憶合金 (Shape Memory Alloys) について、多くの人が「変形しても元の形状に戻る」という不思議な性質を知っている。しかし、実用材料として、生活用品、医療器材、建造物・土木関連、機械部品、電気電子機器等に広く利用されていることはあまり知られていない。

配管継手メーカーの淡路マテリア株式会社では、形状記憶合金を利用したクレーンレール継目板 (以下 SMA継目板) を製造・販売している。しかし、量産化には加工方法を再検討する必要があり、中でも特に問題となっていたボルト穴の加工方法の改善について相談を受けた。

加工方法の検討を行った結果、従来のドリル加工に代えて、ミーリングによる穴加工を行うことで、加工能率を飛躍的に向上させることができたので報告する。

II Fe-Mn-Si系形状記憶合金

形状記憶合金は、Ni-Ti系、Cu系、Fe系そしてそれ以外の合金に分類されている。SMA継目板はFe系の形状記憶合金で、成分からFe-Mn-Si系に属する。Fe系の形状記憶合金の特徴および用途を以下に記す⁽¹⁾。

○特徴

- ① 主成分がFe(60%以上)で、鉄鋼用の大量生産設備で生産できる (コスト安。大型部材の大量生産向き)
- ② 形状回復ひずみは約3.5%
- ③ 動作温度が高い (90~350°Cの範囲でじわじわ回復)
- ④ 純国産の素材

○用途

- ① 各種締結部材 (大径の鋼管やステンレス管の接続)
- ② センサやアクチュエータ

Ⅲ クレーンレール継目板への応用

クレーンレールはレールとレールを溶接や継目板を使用して締結されている。しかし、溶接は設置コストやメンテナンス性に問題があり、継目板を使用した場合もボルト穴とボルトの遊びが原因で、クレーンの走行による振動で隙間が生じてしまう。このような問題の改善を目的として、継目板に形状記憶合金の利用が考えられた。SMA継目板によるレールの締結工程を図1に示す。

レールは隙間を開けた状態でSMA継目板とボルトで仮締結された後に、継目板をバーナーなどで加熱して形状を回復(収縮)させる。収縮によりレールが引き寄せられることでレールが密着し、ボルト穴のガタが吸収されて隙間のない締結が実現できる。また容易に分解できるため、溶接に比べてメンテナンス性が良い。

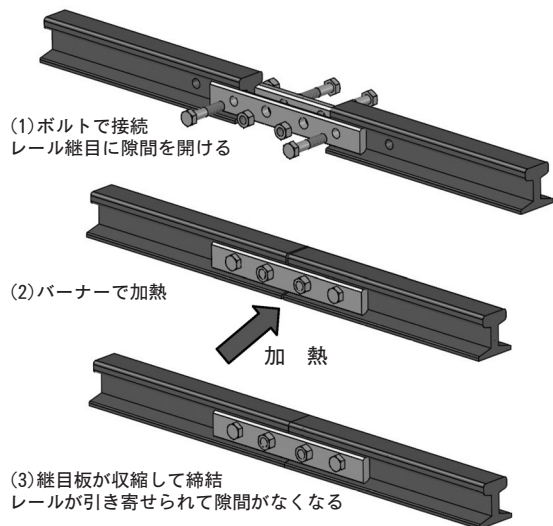


図1 SMA継目板によるレールの締結

Ⅳ 加工方法の検討

今回相談を受けたSMA継目板の加工は、図2に示す円形と長円形の深さ28mmの4個のボルト穴である。切削性についてはステンレス鋼並の難削材ということ意外はわかっておらず、企業側が製作を依頼した加工メーカーが加工を断念したケースもあった。

1 従来の加工方法

現在製作を行っている加工メーカーは、ドリルによる下穴加工とエンドミルによる仕上げ加工をラジアルボール盤とマシニングセンタを使用した4工程で行っていた。

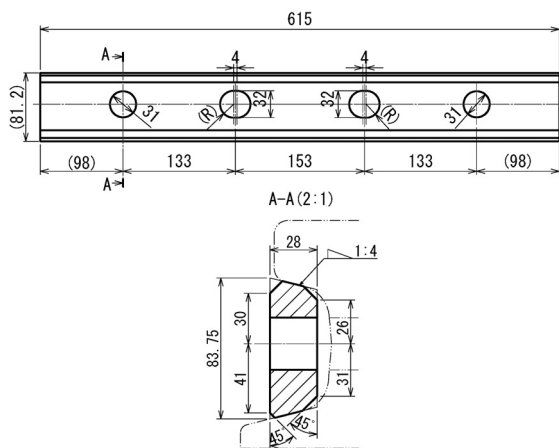


図2 継目板寸法

た。しかし、4個の穴加工に1時間程(1個あたり約15分)かかるうえ、定期的にドリルの再研削が必要になるなどの問題があり、加工コスト削減のためには加工方法を改善する必要があった。表1に従来の加工工程と切削条件を示す。

表1 従来の加工工程と切削条件

工程	使用工具	切削条件	使用工作機械
1	φ12ドリル HSS+TiALN	N=220min ⁻¹ f=0.1mm/rev	マシニングセンタ (88穴磨耗なし)
2	φ18ドリル HSS+TiN	N=135min ⁻¹ f=0.1mm/rev	ラジアルボール盤 (40穴毎に再研削)
3	φ28ドリル HSS+TiN	N=60min ⁻¹ f=0.11mm/rev	ラジアルボール盤 (20穴毎に再研削)
4	φ17エンドミル WC+TiALN	N=360min ⁻¹ F=450mm/min	マシニングセンタ

2 加工の高能率化

加工コストを削減するためには、加工の高能率化が必要であり、「加工時間の短縮」、「工具コストの削減」がポイントになる。そこで以下の改善項目を設定して検討を行った。

○加工時間の短縮

- ① 加工速度を上げる
- ② 工程数を減らす
- ③ 段取り換えをしない(1台の機械で加工する)

○工具コストの削減

- ① 使用工具を減らす
- ② 工具寿命を延ばす
- ③ 再研削を行わない(スローアウェイ工具の使用)

検討の結果、マシニングセンタを使用したミーリングによる穴あけ加工で高能率化が図れると考え、加工実験による検証を行った。

V 加工実験および結果

企業から提供を受けたSMA素材に、以下の加工を行いそれぞれについて検証を行った。

- ① フェイスミルによる平面切削
- ② ボールエンドミルによる穴あけ加工
- ③ ラジアスマイルによる穴あけ加工
- ④ ワイヤカット放電加工による穴あけ加工

①については、切削性を確認する目的と、実験用のプレートを製作するために予備的に行った加工である。また、④については、企業側からの要望で可能性について検証するために行った加工である。

1 フェイスミルによる平面切削

フェイスミルによる平面切削を表2の切削条件で行い、切削性および仕上げ面の状態を確認した。工作機械は、マキノ製操作フライス盤 (KE55) を使用した。

表2 平面切削の切削条件

工具	メーカー名	住友電工ハードメタル		
	型番	ウェーブミル WGC4032EW (φ40, 3枚刃)		
	チップ型番	SEMT13T 3 AGSN-G (TiALNコーティング)		
切削条件		主軸回転数	送り速度	切込み量
	1	960min ⁻¹ (120m/min)	195mm/min (0.07mm/tooth)	1 mm
	2	1210min ⁻¹ (150m/min)	315mm/min (0.09mm/tooth)	1 mm
	3	1210min ⁻¹ (150m/min)	520mm/min (0.13mm/tooth)	1 mm
	クーラント	エアブロー		

上記の切削条件において、チップの欠けや切削面のむしれもなく良好な仕上げ面を得ることができた。実験より、メーカー推奨のステンレス鋼の切削条件 (切削速度160~250m/min、送り速度0.15~0.3mm/tooth、最大切込み量3mm) に近い切削条件での加工が可能だと考える。

2 ボールエンドミルによる穴あけ加工

ボールエンドミルによる、ヘリカル切削で切込んだ後にポケット加工により所定の穴径に仕上げる方法で穴あけ加工を行った (図3)。工作機械は森精機製マシニングセンタ (SV-503) を使用した。

この加工方法は、従来のセンタドリル、ドリル、リーマを使用した精密穴あけ加工のように加工径に応じて工具を揃える必要がなく、ボールエンドミル1本で、

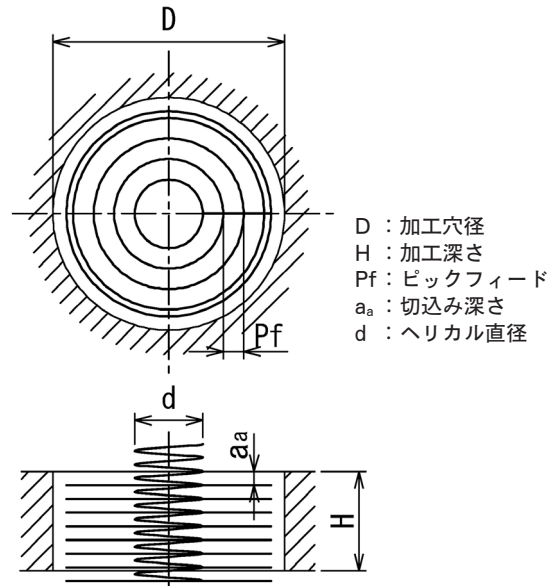


図3 ポケット加工(ヘリカル切り込み)

高精度な穴あけ加工が可能である。これにより、準備時間の短縮および使用工具の本数を減らすことができる。

ステンレス鋼並の切削性を考慮して、切削熱や加工硬化を抑制するために、「浅切り込み」、「高送り」の高速加工で実験を行うことにした。表3、4に切削条件を示す。

2回の加工後に工具を観察したが、欠損や磨耗は見られず良好な加工ができた。また、大径のボールエンドミルを使用することで加工時間をさらに短縮することが可能である。しかし、大径のソリッドタイプのボールエンドミルは高価なため、工具コストの面からスローアウェイタイプのボールエンドミルを使用することが望ましい。図4に加工写真を示す。

表3 ポケット加工の切削条件1

工具	メーカー名	三菱マテリアル神戸ツールズ (HKOBELCO)		
	型番	ミラクルボールエンドミルVC-2MB (TiALNコーティング)		
	工具径	φ6 (R3) 2枚刃		
	D=26mm、H=10mm、d=3mm、Pf=3mm、aa=0.3mm			
切削条件		主軸回転数	送り速度	加工時間
	1	5000 min ⁻¹ (94m/min)	500mm/min (0.1mm/rev)	13m53s
	2	7000min ⁻¹ (132m/min)	315mm/min (0.1mm/rev)	10m00s
	3	7000min ⁻¹ (132m/min)	520mm/min (0.1mm/rev)	7m07s
	クーラント	水溶性切削油(スピンドルスルー)		

表4 ポケット加工の切削条件2

工具	メーカー名	三菱マテリアル神戸ツールズ (旧KOBELCO)		
	型番	ミラクルボールエンドミルVC-2MB (TiALNコーティング)		
	工具径	φ10 (R5) 2枚刃		
切削条件	D=32mm、H=28mm、d=5mm、Pf =5mm、 $a_a = 0.6\text{mm}$ ※穴テーパー角2° (刃長不足による干渉防止のため)			
		主軸回転数	送り速度	加工時間
	1	5700min ⁻¹ (180m/min)	600mm/min (0.11mm/rev)	13m53s
	2	5700min ⁻¹ (180m/min)	840mm/min (0.15mm/rev)	10m11s
	クーラント	水溶性切削油 (スピンドルスルー)		



図4 ポケット加工による穴あけ

3 ラジヤスミルによる穴あけ加工

加工時間を短縮するには、ポケット加工で所定の穴径に加工する方法では限界があるため、図5に示すヘリカル切削だけで加工する実験を行った。使用工具も、ボールエンドミルではなく、加工穴径が大きい場合に有利で、高送りが可能なラジヤスミルを使用した。表5に切削条件を示す。

2回の加工後に工具を観察したが、欠損や摩耗は見られず良好な加工ができた。また、実験結果より、ポケット加工による穴あけ加工と比較して飛躍的に加工時間を短縮することができた。加工プログラムもヘリカル補間機能を使用することで簡単に作成することができる(図6)。

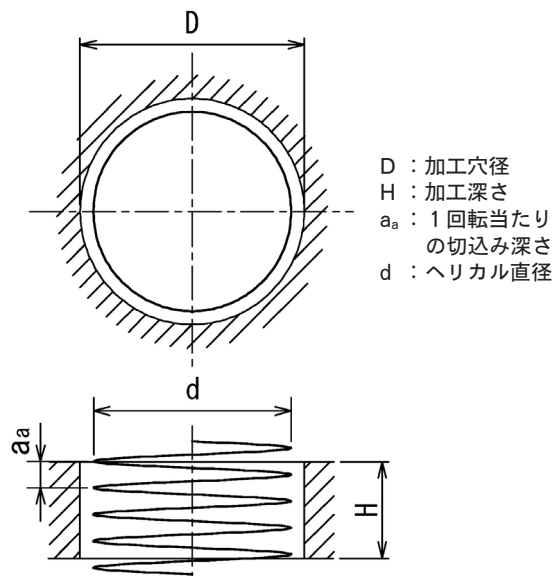


図5 ヘリカル切削

表5 ヘリカル切削の切削条件

工具	メーカー名	SECO TOOLS		
	型番	R217.29-1608.3-04.2.040 (φ16、2枚刃)		
	チップ型番	RDHW0803M0T-MD05 (φ8丸駒チップ) (TiCN+TiALN+TiNコーティング)		
切削条件	D=30mm、H=20mm、d=14mm、 $a_a = 1\text{mm}$			
		主軸回転数	送り速度	加工時間
	1	2400min ⁻¹ (120m/min)	500mm/min (0.21mm/rev)	2m14s
		クーラント	水溶性切削油 (サイドスルー)	

O0200(HELICAL);	M98P210L25;
#100=7(Helical Radius);	G90G01X0;
#101=1(Milling Depth);	M05;
G90G92X0Y0Z5.;	M30;
S2400M3;	
F500;	O0210(SUB)G91G03I-#100Z-#101;
G00X#100;	M99;

図6 ヘリカル切削用NCプログラム

4 ワイヤカット放電加工による穴あけ加工

企業側からの要望で、放電加工による穴あけ加工を行い実用化の可能性について検証した。加工実験は、加工時間を考慮して、形彫り放電加工機ではなくワイヤカット放電加工機にて行った。

加工は、板厚20mmのSMAプレートに直径1.5mmのイニシャルホールを細穴放電加工機(日本放電技術製JEM-25A)で加工し、その後ワイヤカット放電加工機(ソディック製AQ550L)で円形状(直径32mm)にダイ加工を行った。

実験の結果、加工に約1時間（加工速度2.3mm/min）を要し、加工条件等を変更したとしても加工時間の大幅な短縮は期待できないため、実用化の可能性は低いことがわかった。図7に加工後の写真を示す。

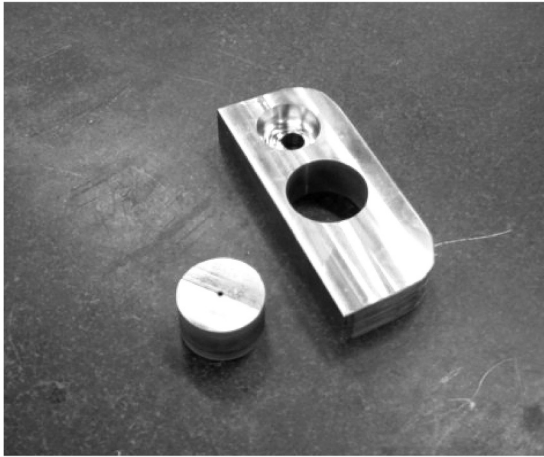


図7 ワイヤカット放電加工による加工

VI 企業側への提案

加工実験より、Fe-Mn-Si系形状記憶合金の加工について次の3点について確認することができた。

- ① 「浅切り込み」、「高送り」の高速加工を行う
- ② 「切れ味」と「強度」を兼ね備えたコーティング工具（超硬）の使用が望ましい
- ③ 穴あけ加工については、スローアウェイタイプのラジアスマイルによるヘリカル切削が最も効率が高く経済的である

企業側からの依頼であるボルト穴の加工方法の改善として、従来のドリル加工に代えて、ヘリカル切削による穴あけ加工を提案した。また、使用工具については、今回実験で使用したラジアスマイルではなく、加工深さが深くなっても切れ刃負担が変化しない、タンガロイ製のTACフラッシュミルEXP 05020RS（工具径φ20）を、使用チップの材質についてはステンレス鋼用（AH140）を推奨した。図8に推奨したTACフラッシュミルの外観を示す。

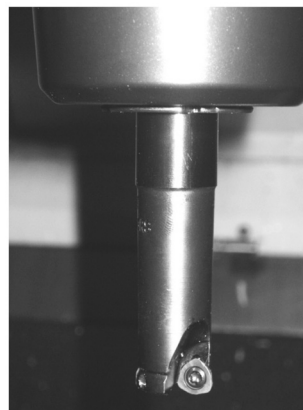


図8 TACフラッシュミル

VII 改善後の穴加工

実験結果を参考に企業側が切削条件を検討した結果、主軸回転数 $N=2400\text{min}^{-1}$ 、送り速度 $F=2400\text{mm/min}$ 、1回転当たりの切込み深さ $a_a=0.4\text{mm}$ のヘリカル切削で、1個の穴加工を約2分で行うことができ、チップ交換なしで160個（継目板40枚分）の穴加工を行うことができたとの報告を受けている。図9に製作したSMA継目板の写真を示す。



図9 製作したSMA継目板

VIII おわりに

今回、SMA継目板の穴加工を従来のドリル加工からミーリング（ヘリカル切削）に代えることを企業側に提案することで、加工時間を5分の1以下に短縮することができた。また、Fe-Mn-Si系形状記憶合金の加工に高速・高能率ミーリングが有効であることがわかった。最後に本稿の発表にあたり、資料提供および助言をいただいた淡路マテリア株式会社の丸山忠克氏ならびに栗田孝氏に謝意を表す。

[参考文献]

- (1) <http://www.awaji-materia.co.jp>
鉄系形状記憶合金とその応用