平歯車の曲げ疲労強度に及ぼす歯元部転造の影響* (ADI, S45C 歯車)

矢野 健太郎*¹, 小田 哲*², 小出 隆夫*²
五 家 政 人*³, 尾 崎 龍 夫*⁴

Effect of Fillet Rolling at the Root of the Tooth on Bending Fatigue Strength of Spur Gears (ADI, S45C Gears)

Kentaro YANO, Satoshi ODA, Takao KOIDE,
Masato GOKA and Tatsuo OZAKI

In order to obtain higher bending fatigue strength of gear teeth required to cope with severe driving conditions of gears, shot peening is widely used. It is a very effective method to improve the bending fatigue strength as is well known, but it also roughens the tooth surface, resulting in lowered tooth surface strength. To overcome this weak point, fillet rolling at the root of the tooth is proposed. The surfaces at the roots of S45C gears and austempered ductile iron (ADI) gears are markedly work hardened by this method. Bending fatigue strength of fillet-rolled gears is investigated compared with that of unrolled gears. Bending fatigue strength of S45C gears is improved by up to 33%, but that of ADI gears is lowered by about 9% due to microcracks connecting neighboring graphite grains just below the surface of the tooth face, produced in fillet rolling. Bending fatigue strength of ADI gears, where a 3-mm-thick layer is removed from both side edges by turning, is improved by about 16%.

Key Words: Gear, Fatigue, Bending Fatigue Strength, Work Hardening, Fillet Rolling, Austempered Ductile Iron, S45C, Spur Gear

1. 緒 言

最近、歯車の作動条件の苛酷化に伴い、歯車強度の向上とともに、歯の曲げ疲労強度の向上も求められている。このため、Hofer の 30° 接線に基づく歯元部付近にショットピーニングすることにより、曲げ疲労強度の向上が図られているが、ショットピーニングすると、歯面が粗くなり面圧強度が低下するおそれがある。その欠点を除く一解決策として著者らは、歯車状工具によるプランジ方式の歯元部転造を行い、歯元部転造した ADI 歯車、S45C 歯車の曲げ疲労試験を行って歯元部転造の効果を調べたので、その結果を報告する。

2. 歯 元 部 転 造

2.1 実験装置および実験方法 図 1 にプランジ方式転造装置の概略図を示す。可動工具台①に歯元部転造用工具を、固定工具台②に歯車形支持工具を、ワ

ークホルダ③に標準ホブで歯切りした素材をそれぞれ取付け、転造荷重を油圧シリンダ⑥により与える。図 2 に素材と転造工具の写真を示す。工具は自製の 5 枚歯

- ① Moving tool holder
- ② Fixed tool holder
- ③ Work holder
- ④ Drive shaft
- ⑤ Load cell
- ⑥ Oil cylinder for loading

図 1 歯元部転造装置概観図

* 原稿受付 平成 4 年 1 月 29 日。

*¹ 正員、九州大学大学院 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*² 正員、鳥取大学工学部 (〒680 鳥取市湖山町南 4-101)。

*³ 日立金属(株)素材研究所 (〒321-43 真岡市鬼怒ヶ丘 11)。

*⁴ 正員、九州大学工学部。

実験では、所定の転造荷重になるように油圧を調整した後、素材に荷重を加えた状態で支持工具を揺動させ、所定の転造回数を与える。

2・2 工具・素材諸元 表1に歯元部転造用工具の諸元を示す。工具の歯先丸み半径は、素材の歯元部付近の転造加工が行えるよう前加工用ホブの歯先丸み半径1.13 mmより小さい0.15 mm, 0.4 mm, 0.6 mmの3種類とし、転位係数は0.0, -0.3, -0.5の3種類を用いた。材質は合金工具鋼SKD11である。素材はモジュール3, 歯数42, 歯幅20 mmの標準平歯車である。潤滑油は工業用ギヤ油(SAE 20 相当)を用いた。

3. 工具形状の歯元部転造に及ぼす影響

3・1 実験条件 歯元部転造工具の諸寸法(歯先丸み, 転位係数)と、転造量, 加工硬化との関係を調べた。素材はADIを用い、表2にその機械的性質を、表3に化学成分をそれぞれ示す。素材のオーステンパ処理のオーステナイト化温度 T_A は875°C(処理時間2 h), 恒温変態温度 T_1 は375°C(2 h)である。転造荷重は12 kN, 20 kNの2段階とし、加工回数は5回とし

表1 歯元部転造工具の諸元

Unit : mm			
Specification	Rolling tool		
Module	3		
Pressure angle	20°		
Number of teeth	5 of 62		
Addendum modification coefficient	0.0	-0.3	-0.5
Diameter of tip circle	193.50	191.70	190.50
Face width	30		
Tip chamfering radius	0.15, 0.4, 0.6

図2 素材と歯元部転造工具

た。

3・2 危険断面付近の転造量 図3に危険断面付近の転造量と工具形状との関係、図4に投影機で測定した転造前後の歯元部形状の変化を示す。転造量は、加工前後の歯面垂直方向の変位量をいう。工具歯先の丸み半径が小さいほど、また負転位量が大きいほど、危険断面付近の転造量は大きくなっている。特に、歯先丸み半径0.15 mmの場合の転造量がほかの歯先丸み半径のものに比べて非常に大きいのは、加工の際、針状の切りくずを生じていることから、塑性変形だけでなく、一部切削が行われたためと考えられる。また、歯先丸み半径0.15, 0.4 mmの場合には、転造後歯底への移行部に小さな盛り上がりが生じているが、0.6 mmの場合にはなだらかな表面形状が得られる。したがって、歯先丸み半径をあまり小さくしすぎるのは好ましくないと思われる。

3・3 歯元部の加工硬化 図5に歯先丸み半径0.4, 0.6 mmの工具による歯元部転造後の表面直下の硬さ分布を示す。図に示すように歯先丸み半径を0.4 mmの工具により転造したものの方が、0.6 mmの工具によるものよりもいくぶん硬くなっているが、転位係数の違いによる硬さの差異はほとんど認

表2 ADIの機械的性質

Material	Proof stress	Tensile strength	Elongation	Hardness
ADI	697MPa	1017MPa	11.0 %	HV 353

表3 ADIの化学成分(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Mg
3.66	2.37	0.37	0.025	0.012	0.05	0.53	0.30	0.039

図3 工具形状と危険断面付近の転造量との関係

められない。

4. 転造荷重の決定

4・1 実験条件 前章の転造実験結果に基づき、歯先丸み半径 0.6 mm、転位係数 -0.5 の転造工具を用いることにした。工具、素材の諸寸法は 2 章のとおりである。素材は、S 45 C、ADI の 2 種類を用いたが、ADI は 3 章で用いたものとは化学成分、熱処理条件がわずかに異なっている。表 4 に、ここで用いた S 45 C、ADI の機械的性質を、表 5 に ADI の化学成分を示す。ADI のオーステンパ処理は、 T_A は 875°C (2 h)、 T_1 は 380°C (2 h) である。

適切な転造条件を決定するため、転造荷重は S 45 C

表 4 素材の機械的性質

Material	Proof stress	Tensile strength	Elongation	Hardness
S45C	366MPa	677MPa	23.9 %	HV 262
ADI	780MPa	1040MPa	11.5 %	HV 550

表 5 ADI の化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Mg
3.63	2.29	0.51	0.025	0.011	0.02	0.51	0.30	0.037

については 3.0 kN から 12.0 kN まで 10 段階、ADI については 9.0 kN から 30.0 kN まで 7 段階に、加工回数は 1 回から 5 回まで変化させた。

4・2 転造後の表面硬さ ここで、実験で用いた転造荷重を無次元量 P_d に換算して整理する。

$$P_d = P / (k \rho B)$$

P : 転造荷重 N

図 5 工具の形状と素材の硬さ分布との関係

図 4 工具形状と転造後の歯元部形状との関係

k : 素材のせん断降伏応力 = 耐力/ $\sqrt{3}$ MPa

B : 歯幅 mm

ρ : 危険断面付近の工具と素材の相対曲率半径
 $= (\rho_T \times \rho_W) / (\rho_T + \rho_W)$ mm

ρ_T : 工具歯先丸み = 0.6 mm

ρ_W : 素材危険断面付近曲率半径 = -1.45 mm

図6に、Hoferの30°接線に基づく危険断面付近の転造後の表面硬さと、転造荷重無次元量 P_d との関係を示す。S45C, ADIともに P_d が小さいときには、荷重の増加に伴い表面硬さが上昇するが、S45Cの場合、 P_d が1.6以上、ADIの場合1.4以上で、表面硬さはほぼ一定となる。過度の転造荷重は歯形精度などに悪影響を及ぼすおそれがあるので、 $P_d=1.6$ 程度が転造荷重として適当であると思われる。

図7に危険断面付近の表面硬さの、歯幅方向分布を示す。S45C($P_d=1.6$)、ADI($P_d=1.4$)ともに、両端面から約2mm以上内側では、ほぼ一定の硬さになっているが、端面付近ではあまり硬さが上昇しておらず、中央付近に対し約20%も小さい。これは、図8に示すように、中央部付近は5回繰返し転造加工されるのに対し、歯幅両端付近は側面方向への塑性流動が生じるので、容易に変形し、1回の転造で加工がほとんど終

ってしまうので、十分加工硬化しないと考えられる。

また、中央付近でS45Cの硬さ上昇率が16%程度であるのに対し、ADIでは36%程度であり、ADIのほうが硬さの上昇が大きいのは、これは、ADIでは残留オーステナイトのマルテンサイト化が生じるためと思われる。

5. 曲げ疲労試験

5.1 実験装置および実験方法 著者らはADI歯車の曲げ疲労試験を行い、ADI歯車が浸炭焼入れ歯車と同程度の疲労強度を有し、ショットピーニングを施した場合には、曲げ疲労強度が30%程度増大することを確認した⁽¹⁾。そこで、歯元部転造歯車の曲げ疲労強

図6 転造荷重と転造後の歯元部歯幅中央付近の表面硬さとの関係

図7 歯元部付近の表面硬さの歯幅方向の分布

図8 転造前後の歯元部付近の歯すじ曲線 (ADI, $P_d=1.4$)

度について調べることにする。図9に油圧式歯車曲げ疲労試験機を示す。試験時の負荷位置は歯先とし、荷重は完全片振りで与え、繰返し速度は毎分760回である。素材の引張り側歯元実応力 σ_t は会田・寺内の式⁽²⁾により求めた。ここで用いた素材歯形寸法を図10に示す。

5・2 実験結果および考察 4・2節で述べたように、歯幅端面部と中央部では転造効果の程度が異なっていると思われるので、その影響を調べるため、歯幅20 mmの歯車を歯元部転造した後、両端を3 mmずつ削り落し歯幅14 mmとしたものと、歯幅14 mmの歯車を歯元部転造し、端面除去は行わなかったものについて曲げ疲労試験を行った。

5・2・1 S45C 歯車 図11にS45C歯車の曲げ疲労試験結果を示す。図のように $P_d=1.6$ で転造することにより疲労強度が約33%向上している。端面除去の影響もほとんどみられず、曲げ疲労試験の際の破断

図9 曲げ疲労試験機

図10 素材歯形寸法

にいたるき裂の発生点は、転造の有無によらず、歯元部歯幅中央付近である。

5・2・2 ADI 歯車 図12にADI歯車の曲げ疲労試験結果を示す。ADIについては、 P_d を1.4としたものと、3.3としたものについて比較をしたが、疲労強度に違いはみられず、転造後端面の除去を行うことにより、転造しないものに比べて疲労強度は約16%上昇する。ところが、端面除去を行わなかった場合は、転造しない場合よりも9%程度曲げ疲労強度が低下している。曲げ疲労試験の際、破断にいたるき裂の発生点

図11 曲げ疲労強度(S45C 歯車)

図12 曲げ疲労強度(ADI 歯車)

図13 歯元部付近の球状黒鉛

は、端面除去を行ったものは S 45 C の場合と同様、歯幅中央付近であるのに対し、端面除去を行わなかったものは端面付近に限られている。転造歯車の歯元部付近、端面から約 2 mm 内側部分の組織写真を観察すると、図 13 のように、隣接する球状黒鉛粒間を結ぶきれつが生じているのが見られ、これが曲げ疲労強度低下の原因になっていると思われる。

本実験とは応力状態が異なるが、村上らは、素材のマイクロビッカース硬さ (HV) と介在物もしくは欠陥の大きさ (area) の回転曲げ疲労強度に及ぼす影響を詳細に調べ、以下のような疲労強度の予測式 (村上の式) を提案している⁽³⁾。

$$\sigma_w = 1.43(HV + 120) / \sqrt{\text{area}}^{1/6} [(1 - R)/2]^a$$

$$a = 0.226 + HV \times 10^{-4}$$

$$R = \text{応力比} (\sigma_{\min} / \sigma_{\max})$$

完全片振りでは $R = 0$

σ_w : 疲労強度 MPa

area: 欠陥または介在物の投影面積 μm^2

遠藤は ADI 中の球状黒鉛を微小欠陥と考え、その大きさ (area) は疲労強度の予測において無視できないとしている⁽⁴⁾。そこで、球状黒鉛が単独で欠陥として存在する場合、および互いに近い位置にある球状黒

鉛がきれつによりつながり、大きな欠陥となっている場合についてそれぞれ area を見積もり、村上の式による計算結果と実際の曲げ疲労試験結果とを比較し、図 14 に示す。村上の式は両振りの回転曲げ疲労に基づいているので、ここでは実験値 σ_t を 2 で除した振幅 σ_a を用いて比較する。

この式において、転造後端面を除去しない場合は、破断が端面から始まっているので、素材端面付近の表面硬さ HV605 を用い、また、転造により黒鉛粒間を結ぶきれつが生じると考え、さらに、図 15 に示すような歯車の曲げ疲労試験時の歯すじ方向の応力分布 [久保・梅沢の式⁽⁵⁾] を考慮すると、疲労強度は約 2% 低下することになる。端面を除去すると、表面硬さは HV750 程度になるので、きれつが生じていると仮定すると、疲労強度は約 14% 向上することになる。この傾向は実際の曲げ疲労試験結果をよく説明できることから、曲げ疲労試験で生じた疲労強度の低下の原因は、黒鉛粒間に生じたきれつによるものと推定される。なお、表面硬さが HV750 程度で、黒鉛粒間のきれつが発生していない場合、曲げ疲労強度は約 28% 向上するという予測結果が得られる。村上の式による予測値と今回の実験値には、いくぶん開きがある。その原因としては、疲労試験で用いた会田・寺内の式は弾性変形を仮定しているが、その式を用いて得られる引張り側の歯元応力計算値は、850~1500 MPa 程度となり、素材の引張降伏応力 (780 MPa) より大きくなるので、実際には歯元部は降伏していると考えられること、村上らの実験と、本実験とでは試料形状、応力状態などが異なっていること、また、村上らがほぼ一様な硬さの試験片で実験を行っているのに対し、転造で加工硬化する領域は、表面近傍のみであることなど考えられる。

これらの結果から、ADI 転造歯車では加工硬化により表面硬さが上昇し、疲労強度の向上が期待されるが、黒鉛粒間にきれつが生じるため、十分に加工硬化していない部分 (本研究では歯幅方向端面部) から破断し、結果的に曲げ疲労強度が低下すると考えられる。端面部分を除去した場合には、曲げ疲労強度は向上することから、歯元部転造そのものは ADI 歯車に対してもある程度有効であると思われるが、今後さらに、側面をジグで拘束して側面方向への塑性流動を減少させることにより、端面付近も十分加工硬化させる、あるいは、素材の端面に対応する部分の工具の歯たけを短くすることにより、転造代を小さくし、黒鉛粒間のきれつの発生を防ぐなどの方法で転造し、その効果を確認したい。

図 14 実験結果と村上の式との比較 (ADI)

図 15 歯元部の応力分布
($P_n = 13.2 \text{ kN}$, $\sigma_t = 1.1 \text{ GPa}$)

6. 結 言

歯元部転造工具の形状と歯元部付近の転造量との関係は、工具の歯先丸み半径が小さいほど、転位係数が、大きいほど転造量が多くなるという結果が得られたが、歯先丸みを極端に小さくすると切削が行われる。また、歯形方向の転造量分布などから、最適な歯先丸み半径として、0.6 mm 程度が適当と思われる。

歯先丸み半径を 0.6 mm, 転位係数を -0.5 とした転造工具による S 45 C の歯元部転造では、表面硬さの上昇が 16%程度あり、曲げ疲労強度は、転造しない歯車に対し約 33%向上し、歯元部転造の効果が確認された。

ADI では、歯幅中央部の表面硬さは約 36%上昇するが、端面部分を除去していない歯車では、転造しない歯車よりも曲げ疲労強度が低下している。端面部分を除去することにより、曲げ疲労強度は約 16%向上す

るが、歯車の歯元部転造後、端面部の除去を行うのは実用的ではない。ADI における曲げ疲労強度の低下は、転造加工により黒鉛粒間にきれつを生じるためと思われるので、曲げ疲労強度の高い歯車を製作するために、端面を十分加工硬化させる、端面付近の黒鉛粒間のきれつの発生を防ぐなどの対策が必要と考えられ、今後の課題としたい。

終りに、本研究を行うに当たり、とくにご協力いただいた日立金属(株) 小松賢一氏、疲労破壊についてご助言いただいた九州大学 村上敬宜教授に深く謝意を表する。

文 献

- (1) 小田・矢野・五家・小出, 機論, 56-532, C(1990), 256.
- (2) 会田・寺内, 機論, 27-178(1961), 853.
- (3) 村上・上村・夏目・宮川, 機論, 56-525, A(1990), 1074.
- (4) 遠藤, 材料, 38-433(1989), 1139.
- (5) 久保・梅沢, 機論, 43-371(1977), 2771.