

# ねじり付加による棒・線材のせん断切断面形状の改善

独立行政法人 産業技術総合研究所  
 研究員 梶野 智史  
 (平成 19 年一般研究開発助成 AF-2007026)

キーワード：ねじり，せん断，だれ，かえり

## 1. 緒言

ボルトなどのフォーマ鍛造用素材を棒・線材から切り出すさいには、せん断による切断が主に用いられている。せん断加工は、切削やレーザ切断に比べ、加工時間が短い上、歩留まりが高い点で優れている<sup>1)~3)</sup>。一方、切断面のだれやかえりなどの形状不良、破断面とせん断面が混在し、特に破断面が劣悪な表面性状になるなど、切断後の形状では、前述の加工法に比べると著しく劣っている<sup>4)~5)</sup>。したがって、せん断加工のみでは、冷間鍛造用の素材として、切断面の要求精度を満足できておらず、追加工程が必要となり生産性の低下を招いている。しかし、大量生産が主流であるフォーマでは、加工時間の短さから、せん断加工が根強く採用されている。過去の研究でも、さまざまな観点から改善方法が検討されているが<sup>6)~10)</sup>、まだ十分ではないため、良好な切断面を得る新たなせん断方法が求められている。

一般的に延性材料にねじりを加えて破断させた場合、**図 1 (a)**に示すように、線軸に垂直な面でだれ・かえりを発生せず、破断することが知られている<sup>11)~12)</sup>。**図 1 (b)**に示す、せん断加工による切断面と比較すると、その差が一目瞭然である。

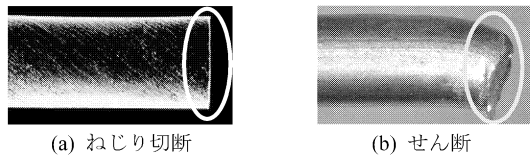


図 1 切断面形状

だが、ねじり切断のデメリットとしては、①ねじり切るまでには通常数回転を要するため、せん断加工と比較すると時間が大幅にかかる点。②チャック間における破断箇所を制御するのが困難であるため、素材長さの寸法が悪い点が挙げられ、実用レベルには達していない。

そこで、良好な切断面形状を維持しつつ、加工時間が短く、かつ長さに関して高寸法精度な切断方法としてねじり切断とせん断加工を組み合わせた加工法を開発することにした。本報では、ねじりがだれやかえりに与える影響に焦点をあて、検討した内容を報告する。

## 2. 実験装置

ねじりを付加させつつせん断加工が可能な装置を自作した。その装置を**図 2**に示す。

自作した試験機は回転側と固定側があり、回転側はタイミングベルトを介してモータと接続し、モータの回転を伝達して線材にねじりを付加する機構となっている。固定側

には、うでの長さの比が 1 : 9 のシーソーが設置してあり、長いうでの方にステップ状の荷重を与え、てこの原理により荷重を増幅させ、短いうで側でチャック固定台を跳ね上げることでせん断荷重を負荷する。

線材の両端をスペーサで挟んだあと、さらに上下からチャックで挟み、それぞれ、回転側と固定側に設置する。スペーサの間がクリアランス  $c$  となる (**Fig. 2** 参照)。せん断速度はおよそ 200 mm/s である。

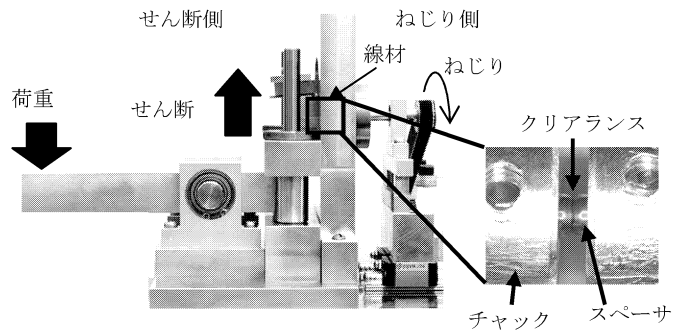


図 2 ねじり付加せん断実験装置

## 3. 実験方法

### 3.1 供試材

パーライト組織の影響を極力抑えるため、低炭素鋼材 S20C を供試材とした。φ1.96 mm 材に 850 °C、2 h の焼鈍を施して使用した。化学成分を表 1 に示す。

表 1 試験片の化学組成

mass %									
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	N
0.21	0.22	0.66	0.017	0.016	0.01	0.03	0.05	0.051	0.004

### 3.2 ねじりなしせん断加工

クリアランスを変化させ、ねじりを付与せず、通常のせん断加工を施した。せん断後の線材の側面をマイクログラフで撮影し、だれ高さ  $\lambda_d$ 、かえり高さ  $\lambda_b$  を**図 3 (a)**のように定義して測定した。また、切断面を正面から撮影し、**Fig. 3 (b)**のようにせん断面に外接と内接する同心円において、内接円直径を  $D_1$ 、外接円直径を  $D_2$  として、真円度を  $D_1/D_2$  で定義した。

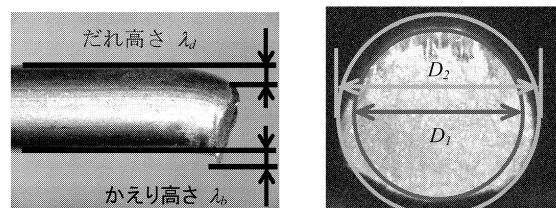


図 3 切断面形状の測定

### 3.3 ねじり付加せん断加工

前節と同様に S20C の  $\phi 1.96$  mm の焼鈍材を供試材として使用した。線材を装置に設置した後、回転速度を 2 rpm としてねじりを付加し、所定の 180, 360, 450, 540 deg のねじり角度になった瞬間にせん断加工を施した。せん断後の線材に対して、だれ高さ、かえり高さ、真円度を測定し、ねじりを付与しない場合の結果と比較した。

### 3.4 静的せん断荷重負荷ねじり切断

前述の実験条件では、せん断速度 200 mm/s に比べ、ねじり速度が 0.2 mm/s と相対的に遅いことでねじりの効果が小さいと考えられた。そこで、せん断速度とねじり速度を同レベルまで近づけ、ねじりの効果をも高める実験として静的せん断荷重負荷ねじり切断を実施した。

前述の自作した試験装置を用い、荷重負荷用シーソーの長いうでに 1.2 kgf の重りを載せるのみで、せん断力を静的に負荷した状態で、ねじり切断を行い、ねじりの速度との同期を試みた。供試材は前述の S20C の  $\phi 1.96$  mm とし、だれ高さ・真円度の定義、測定項目等は前節と同様である。

この場合のせん断速度は 0.3 mm/s、ねじり速度は 0.2 mm/s となり、前述の速度差を大幅に縮めることができた。静的にせん断力を負荷した場合のせん断応力は 95 MPa 程度であり、降伏応力よりも小さい。

### 3.5 けがき線を用いたねじれ範囲の測定

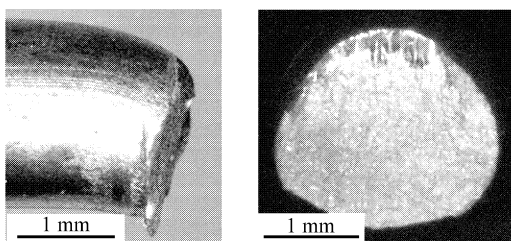
ねじり切断において、クリアランス間のみでねじり変形し、チャック内部の試験片には変形が起きないことが切断面付近の材質を変化させず理想であり、また、付与するねじりひずみ量も、ねじり角度で制御でき有効である。しかし、実際はチャック内部にもねじり変形が起きており、したがって、実際に付与されるねじりひずり量の把握を阻害し、加工硬化にともなう素材の性質変化を引き起している。そこで、実際のねじり範囲を測定し、付与されたひずみ量とだれを低減する切断条件の関係を検討する必要がある。

ねじり変形範囲の測定にはけがき線を描いた試験片を用いた。先の  $\phi 1.96$  mm の試験片にけがき線を描き、180, 360, 540 deg の角度でねじりを加えた。

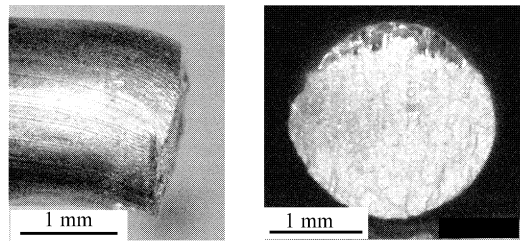
## 4. 実験結果

### 4.1 ねじり付加せん断加工

ねじり付加せん断後の線材の写真をせん断のみの結果とあわせて図 4、図 5 に示す。また、だれ高さ、かえり高さ、真円度とクリアランスの関係を図 6、図 7、図 8 に示す。図から明らかなように、クリアランスが小さくなるほど、だれ高さ、かえり高さともに減少し、真円度が高くなっており、形状が良好になっていることが確認できる。これらは従来の知見<sup>4),5)</sup>と一致する結果となった。



(a) 破断面形状の横方向観察 (b) 破断面形状の正面観察  
図 4 せん断後の端面形状



(a) 破断面形状の横方向観察 (b) 破断面形状の正面観察  
図 5 ねじり付加せん断後の端面形状

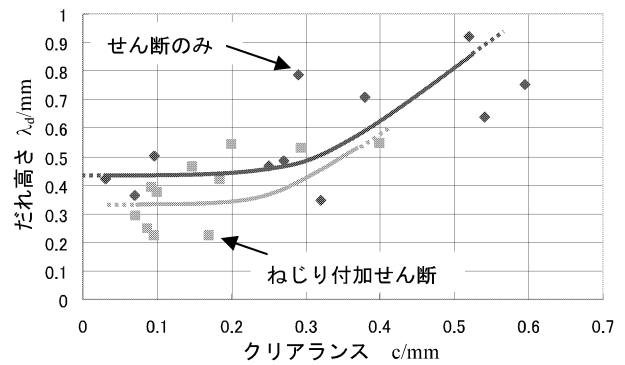


図 6 だれ高さ と クリアランス の関係

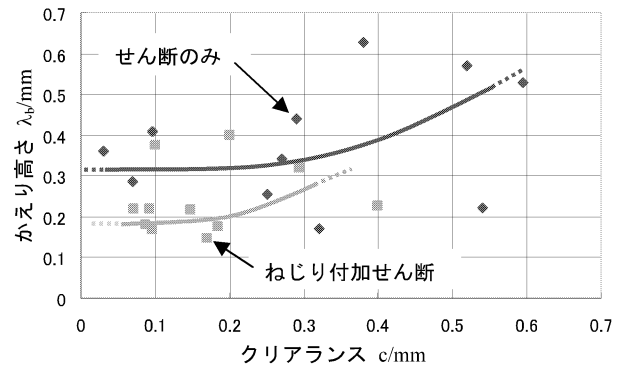


図 7 かえり高さ と クリアランス の関係

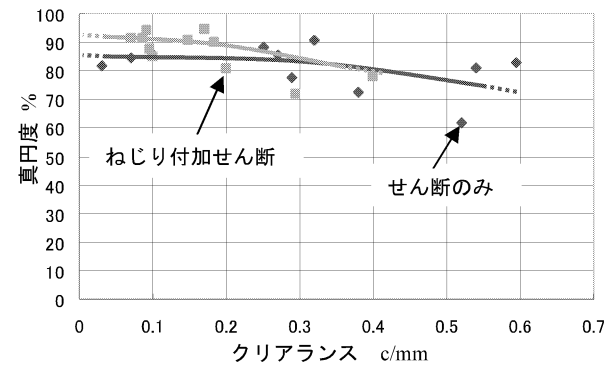


図 8 真円度 と クリアランス の関係

ねじりを付加した場合は、しない場合に比べて、だれ・かえり高さが小さくなり、真円度が大きくなり、せん断形状が改善していることが確認できる。以上の結果より、特に小クリアランス領域と考えられる 0.4 mm 以下の範囲におけるだれ高さ、かえり高さの平均値を図 9 に示す。

どちらの結果も、ねじりを付加することで、だれ高さは 25% の低減、かえり高さは 35% の低減となっており、せん断形状の改善にねじりが有効であると考えられる。

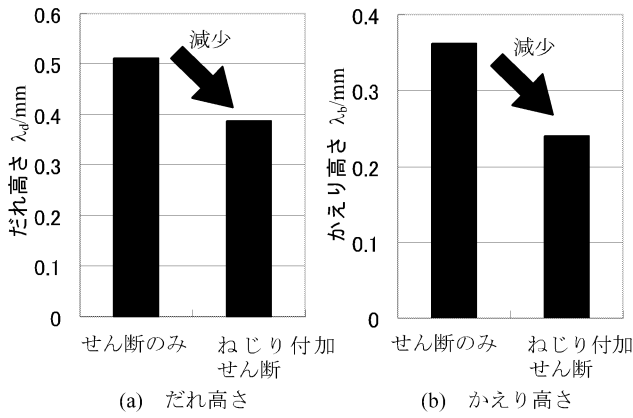


図9 だれ高さとかえり高さの比較

つぎに、付加するねじり角度とだれ高さ、かえり高さの関係を図10に示す。0 deg はせん断のみの結果を示している。結果から明らかなように、付加するねじり角度が大きくなるほど、だれ、かえり高さが減少していることが確認できた<sup>13)</sup>。だが、360 deg 以上のねじり角度では、一定値に収束する傾向を示した。

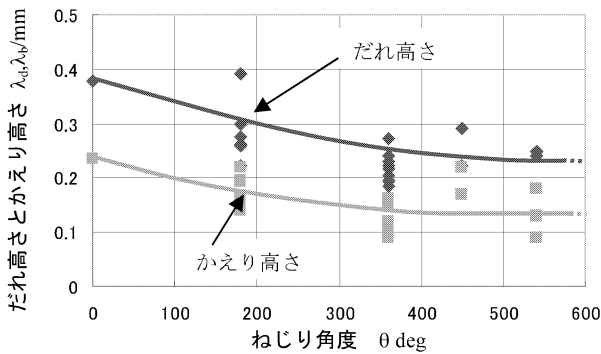


図10 ねじり角度とだれ高さ、かえり高さの関係

#### 4.2 静的せん断荷重ねじり切断

静的せん断荷重ねじり切断後の線材の写真を図11に示す。また、それぞれの切断方法による真円度・だれ高さを表2に示す。図から明らかなように、ねじり付加切断に比べ、静的せん断荷重ねじり切断で得られた結果は、だれ高さが減少し、真円度が高くなっており、また、線軸に対する直角度も良好であることが視覚的に確認できる。低速(2 mm/s)でのせん断のみ切断と静的せん断付加ねじり切断における荷重-経過時間線図を図12に示す。

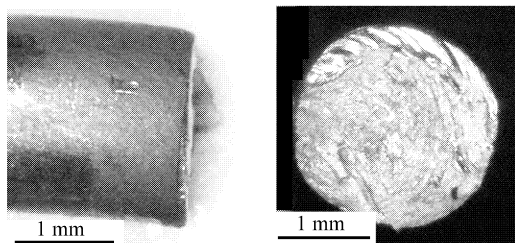


図11 静的せん断過重荷ねじり切断後の端面形状

表2 だれ高さ と 真円度

切断方法	だれ高さ	真円度
せん断のみ	0.239	79.9
ねじり付加せん断	0.112	91.4
静的せん断荷重ねじり切断	0.0732	95.1

図12から、せん断のみ切断では約1.4 kNのせん断力が必要であるが、一方、静的せん断荷重ねじり切断では0.3 kN以下のせん断力で切断が可能であることが確認できる。だれ発生の一因であるせん断荷重が、80%減少することが確認でき、だれの低減に大きな効果あると考えられる。

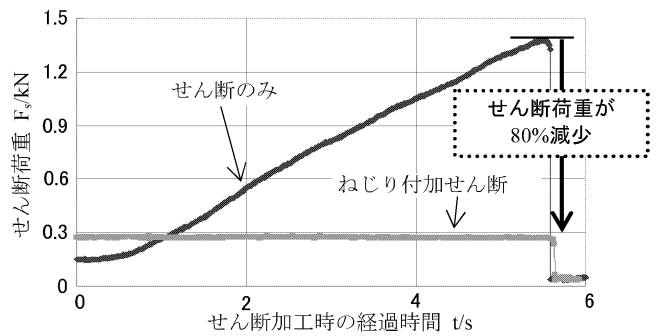


図12 ねじり付加せん断におけるせん断荷重の推移

#### 4.3 ねじれ角とねじれ範囲の関係

けがき線を描いた線材にねじりを付与した後、マイクロスコップを用いて線材を撮影し、試験片のねじれ範囲を実測した。図13に実際にけがき線を描いた試験片を、図14に例として360 degで試験した結果を示す。

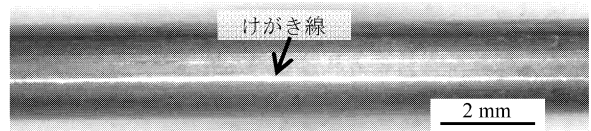


図13 試験片にけがいたけがき線

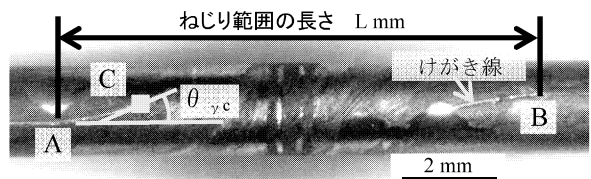


図14 ねじり角度360°の試験片

図14において、けがき線の角度が変化している範囲Lをねじれ範囲と定義した。測定したねじれ範囲Lと付与したねじり角度の関係を図15に示す。チャック間距離は全ての試験片において2 mmである。図15からねじり角度が増えるとチャック内部のねじれ範囲が広がることが確認できるが、500 deg以上では飽和すると考えられる。

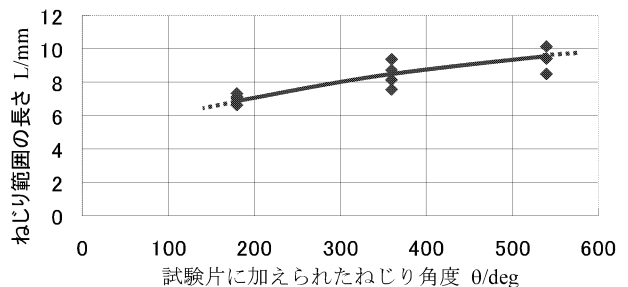


図15 ねじり角度とねじり範囲の関係

#### 4.4 ねじれ範囲内のせん断ひずみ分布

図14のAを基準としてBに向かって0.5 mm 間隔に、けがき線と線軸とのなす角度 $\theta_\gamma$ を測定した。 $\theta_\gamma$ の例として $\theta_{\gamma c}$ を図14のC点に示す。 $\theta_\gamma$ とAからの距離Xの関係を図16に示す。図16より、AからBに向かうにつれて $\theta_\gamma$ が増加

した後、一定のねじれ角度の区間があり、その後、減少するというねじれ角度の変化が確認できた<sup>14)</sup>。また、 $\theta_r$ が一定の区間に着目すると、ねじり角度が増加するにしたがって大きくなり、チャック間隔である2 mmに飽和した。

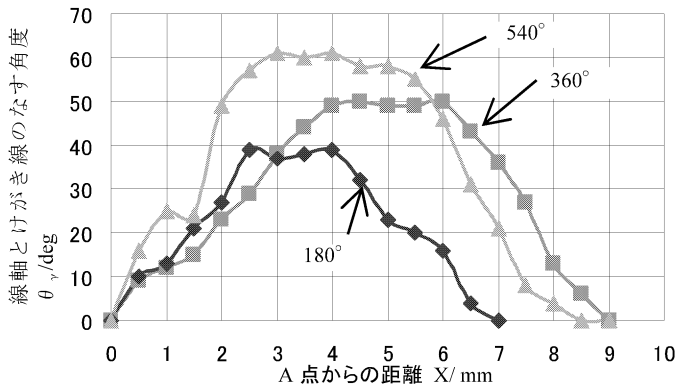


図16 線軸とけがき線のなす角度の推移

図16から求めたけがき線の傾き角度 $\theta_r$ を用いて  $\tan \theta_r$ で算出した最大ねじりひずみ量 $\gamma_r$ とねじれ角の関係を図17に示す。ねじり付加せん断加工の場合は、ねじれ角が増加すると、最大ねじりひずみ量も増加していることが確認できた。一方、静的せん断荷重ねじり切断の場合は、ねじり角度540 degよりも小さいねじりひずみであった。

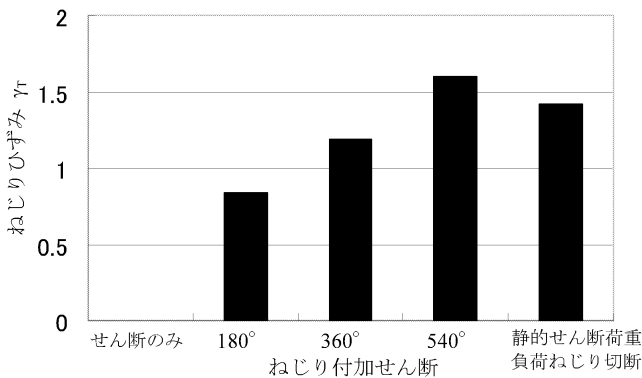


図17 各切断条件におけるねじりひずみ

### 5. 最適な切断条件の検討

最適な切断条件を究明するため、付与したせん断ひずみとねじりひずみの割合を検討することにした。せん断加工は、パンチが移動するにしたがって、始めに大きくだれが発生し、その後に工具が素材に食い込み、工具と擦れてせん断面を形成する。最終的に、亀裂が発生し、連通して破断に至ると考えられている<sup>15)</sup>。このうち、亀裂発生および連通は破壊現象であり、巨視的なひずみ発生はほとんどないと考えられる。また、せん断面を形成する時期は、だれの発生が終わり、工具が材料に食込む過程であり、だれの防止とは直接関係のないひずみと考えた。そこで、このひずみ量は無視することにした。したがって、せん断初期で発生するだれを本検討におけるせん断ひずみとした。だれ発生時のひずみの計算は、実際に測定しただれ高さ $\lambda_d$ 、およびクリアランス $c$ を用いて $\lambda_d/c$ で算出した。また、ねじりひずみについては、前節において測定したけがき線の傾きから最表層部におけるねじりひずみを算出した。その結果は前述のFig. 17に示してある。このせん断ひずみとねじりひずみを用いて、図18に示す箇所の相当塑性ひずみを

算出し、せん断ひずみ、ねじりひずみが相当塑性ひずみに占める割合を計算した結果とそのさいのだれ高さを図19に示す。

図19に示すように、加えたひずみの中で、ねじりひずみの割合が増加するほど、だれ高さが減少し、切断面形状

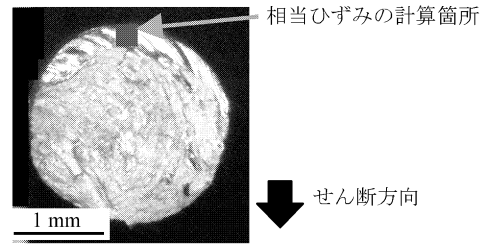


図18 相当ひずみの計算箇所

が良好になっていることが確認できる。特に形状が最も良好であった静的せん断荷重ねじり切断では、せん断ひずみとねじりひずみの比率はおよそ3:7になっていることが確認できた。このように、良好な切断面形状を得るにはねじりひずみを増加させることが重要であると考えられる。

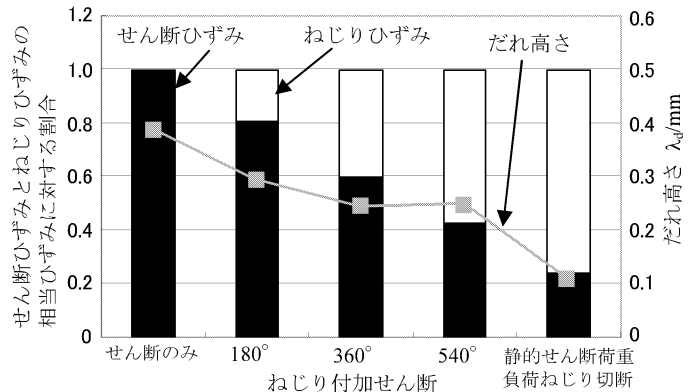


図19 ねじりひずみの相当応力に対する割合とだれ高さの関係

## 6. 考察

### 6.1 ねじりがだれ、かえりに与える影響

実験結果で示されたように、ねじりを付加してせん断加工を施すことで、だれ、かえり高さの減少が確認された。だれの発生要因は、せん断加工初期における軸方向への材料引込みによる材料不足が主要因と考えられている<sup>1)</sup>。ねじりを付加すると、材料の円周方向の材料流れが発生して軸方向への材料の過不足を補い、引込みが緩和され、だれ高さが減少したと考えられる。同様に、かえりに関しても、円周方向材料流れにより、円周方向に分散されたため、1部分でのとがり状が形成されず、かえり高さが減少したと考えられる。

### 6.2 静的せん断荷重ねじり切断のだれの抑制

実験結果より、静的せん断を荷重してねじり切断を施すことで、ねじり付加せん断加工以上のだれ高さの減少が確認された。本加工法では、せん断のみ切断に必要なせん断荷重の約20%のせん断荷重で切断可能であり、軸方向への引込みが緩和されたと考えられる。また、せん断速度とねじり速度を近づけたために、ねじりによる周方向の材料流れがだれ側の材料不足を補い、さらに軸方向への引込みを抑制したと考えられる。

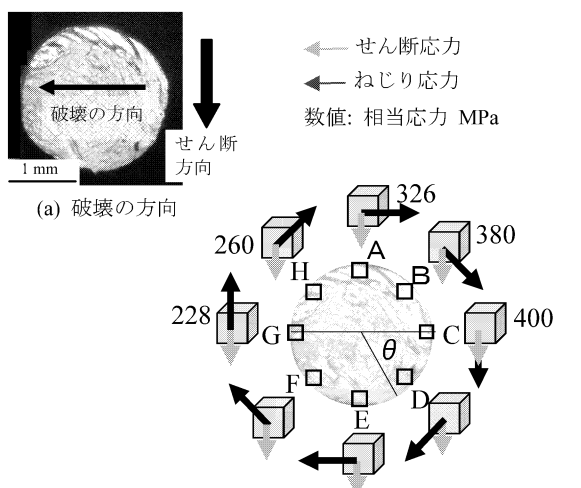
静的せん断荷重ねじり切断に関して、切断に必要な

せん断荷重が、通常のせん断加工における荷重の 20%程度である点について考察する。負荷した静的荷重によって生じるせん断応力は 95 MPa 程度であり、降伏応力より小さく、通常では塑性変形しない応力状態である。そのせん断応力はクリアランス内に生じている。この状態でねじりを負荷した場合、徐々にねじりひずみ、およびトルクが増加する。その結果、クリアランス内の相当応力が高まり、降伏応力を超え、塑性変形が発生する。さらにねじりを負荷し続けると、クリアランス内の変形が進んだ後、破断すると考えられる。

このように 小さくてもせん断荷重を負荷した状態でねじりを加えると、主にねじりのトルクと、小さなせん断荷重でクリアランス内に塑性変形を発生させ、切断することができる。この小さなせん断荷重の働きにより、通常では切断箇所をコントロールするのが困難であるねじり切断において、ねじり範囲内の所定位置で切断することが可能になる。また、切断までに要する時間も短縮できる。

### 6.3 破壊方向の検討

図 11 に示した破断形状の正面図に着目すると、亀裂の進展が、せん断方向と直行する方向であることが観察できる。破断面において、図 20 に示すように、円周に微小体積を考え、その微小体積の破面側の面に働く応力を示す。



(b) せん断応力、ねじり応力と相当応力の分布  
図 20 破壊の方向と相当応力の分布

せん断荷重によるせん断応力は、鉛直下方向の一方向に発生すると考えられる。一方、ねじりによるせん断応力は、円周方向に発生すると考えられる。0.15 kN の静的せん断荷重で、ねじりを加えた場合の相当応力を計算した。図 20 内の数字は計算した相当応力の値である。図中の C 点の相当応力が最も高く、反対側の G 点が最も低いことがわかる。したがって、相当応力の最も高い C 点より塑性変形が始まり、G 点に向かって進展していき、切断に関しても、同様に C 点から G 点へと伝播していくと考えられる。そのため、せん断方向と直行する方向の亀裂進展が観察されたと考えられる。

そこで、この C 点から G 点までの亀裂の伝播を確認するために、静的せん断荷重負荷ねじり切断を途中止めた試験片を用意し、マイクروسコープで観察した。また、途中止めた試験片を、切断箇所から分離し、その切断面も観察した。その結果を図 21 に示す。

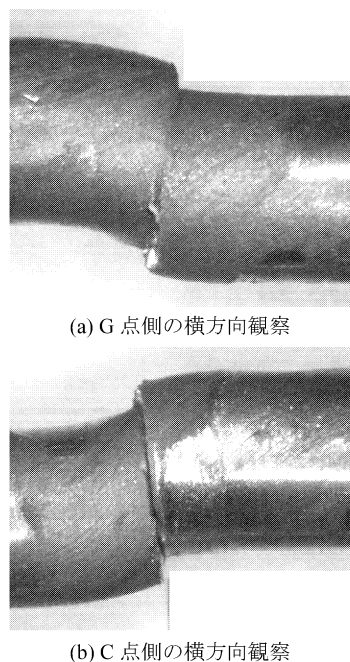


図 21 静的せん断荷重負荷ねじり切断の途中止め試験片の横方向観察

側面を撮影した結果より、C 点側の側面図には、切断箇所へ亀裂が入っていることが確認できる。一方、反対側である G 点を観察すると、まだ試験片がつながったままであり、亀裂の発生は観察できなかった。この結果から、明らかに、切断における亀裂は、相当応力が最も高くなる、C 点より発生して G 点に伝播することが確認された。

つづいて、途中止めた試験片を観察後に分離し、切断面を観察した結果を図 22 に示す。

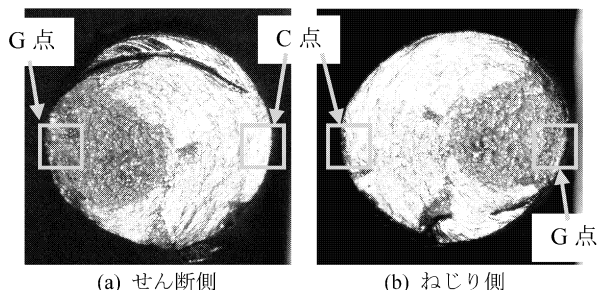


図 22 途中止め試験片を割った断面

C 点付近と、G 点付近で切断面が異なっていることが観察できる。C 点近傍では、円周方向に筋が観察でき、せん断断面となっており、一方 G 点では、凹凸のある破面となっている。この凹凸がある破面は、途中止めた試験片を分離したさいに生じた破面であり、図中の丸で囲んだ、G 点付近は途中止めた段階において、接合していたと考えられる。一方、C 点付近は、切断していた箇所であると判断できる。円周方向の筋は、亀裂が伝播した結果として生じたといえる。また、切断面の上方、A 点では、表面性状が比較的良好な、せん断面が観察できる。これは、従来のせん断加工と同様に、工具と接触して生じた面であると考えられる。以上より、せん断方向と、ねじりの方向が一致する箇所が最も相当応力が大きくなり、180° 回転したせん断とねじりが反対方向になる箇所が最も低い相当応力となると考えられる。したがって、切断の方向は必ずせん断方向

と直行すると考えられる。

## 参 考 文 献

### 7. 結 言

本研究では、S20Cの低炭素鋼のφ1.96 mmの線材を対象として、せん断加工において発生するだれを低減させることを目的として、ねじり付加せん断加工について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) ねじりを付加することにより、だれおよびかえり高さの減少が確認された。ねじりによる円周方向材料流れが、だれの発生要因である材料の引込みを緩和し、また、かえりを分散させたと考えられる。
- (2) 付加するねじり角度が増加すると、だれ高さは減少した。ねじりによるせん断ひずみの増加が、だれ高さ減少の一要因と考えられる。静的せん断荷重負荷ねじり切断では、付与した相当ひずみに対するねじりひずみの割合が70%であり、だれ高さが最も減少していた。
- (3) せん断荷重を静的に負荷し、ねじり切断した場合は、せん断荷重がせん断のみの場合の20%に低下した。加えて、ねじり速度とせん断速度が同期するため、円周方向材料流れの効果が大きくなり、さらに、だれ高さが減少したと考えられる。
- (4) 静的荷重負荷ねじり切断では、せん断方向と破壊の方向が直交する現象が観察された。ねじりとせん断の方向が一致する箇所が最も相当応力が大きくなり、その180°反対では、逆に相当応力が最も小さいために発生する現象であると考えられる。

- 1) 日本塑性加工学会編：せん断加工，コロナ社出版(1992).
- 2) 村川正夫：塑性と加工，35-396 (1994)，3-9.
- 3) 柳原直人：塑性と加工，35-396 (1994)，43-48.
- 4) 工藤英明・中川威雄・田村公男：塑性と加工，22-241 (1981)，150-158.
- 5) 工藤英明・田村公男：塑性と加工，5-43 (1964)，527-535.
- 6) 村川正夫・呂言・古閑伸裕・大川陽康：塑性と加工，33-374 (1992)，296-301.
- 7) 村川正夫・古閑伸裕・大川陽康：塑性と加工，31-356 (1990)，1135-1141.
- 8) 呂言・村川正夫：塑性と加工，31-356 (1990)，1142-1147.
- 9) 村川正夫・呂言・古閑伸裕：塑性と加工，33-380 (1992)，1063-1068.
- 10) 工藤英明・田村公男：塑性と加工，6-50 (1965)，165-171.
- 11) 水野寛之・伊藤直樹・落合征雄・浅川基男：材料とプロセス，Vol.14-5，1072.
- 12) Thiruvarduchelvan, S. : J. Mech. Work. Technol., 19 (1989)，1-10.
- 13) 梶野智史・田中智也・浅川基男：平21 塑加春講論，(2009)，131-132.
- 14) 梶野智史・田中智也・浅川基男：60 回塑加連講論，(2009)，319-320.
- 15) 工藤英明・田村公男：塑性と加工，6-48 (1965)，27-36.