

組合せ応力下における工具材料の 破壊とじん性に関する一実験

後藤善弘* 古川俊雄* 若杉昇八* 中 比呂志**

An Experimental Study on the Fracture and Toughness
of Tool Materials under the Combined Stresses

Yoshihiro GOTO*, Toshio FURUKAWA*
Shohachi WAKASUGI*, and Hiroshi NAKA**

(Received Aug. 8, 1987)

The fracture strength and toughness of tool materials for metal forming (JIS SK3, SKS3, SKD11 and SKH51) under the condition of combined stresses were evaluated and investigated experimentally. The combined stresses considered in this study were caused by simultaneous action of torsion and tension.

From the relation between the absorbed energy and hardness under the condition of uniaxial tensile stress, three kinds of test pieces with the hardness which correspond to the regions of ductile fracture, brittle fracture and transition were used for the experiment. Those test pieces were prepared by varying heat treatment.

The relations between the ultimate tensile strength (fracture) and the torsional stress and the relations between the absorbed energy (toughness) and the torsional stress were examined for three regions, that is, the regions of ductile fracture, brittle fracture and transition.

The conclusions are as follows:

- (1) In the region of ductile fracture, the ultimate tensile strength and absorbed energy under the combined stresses are smaller than those under uniaxial stress.
- (2) In the regions of transition and brittle fracture, the ultimate tensile strength is nearly constant even if the torsional stress is loaded at the degree of shear yield stress.
- (3) The ultimate tensile strength in the region of transition is larger than that in the other two regions.
- (4) The toughness in the region of ductile fracture is considerably greater than that in the region of brittle fracture.
- (5) In the tool materials used in the experiment, SKH51 possesses the greatest fracture strength and toughness, so it is best tool material.

1. 緒 言

塑性加工の成形技術の進展に伴い、難加工性材料の加工頻度が増大し、製品品質、生産性向上の点から金型材料の強度や寿命に対する要求は厳しくなっている。したがって、金型の設計に際しては使用される目的や加工条件に応じて適切な工具材料が選択されるべきである。

工具材料の強度に関するデータは単軸応力状態下での引張り、圧縮強度あるいは衝撃値、疲労強度に関するものが多い。しかし、実際の使用条件に近い動的負荷が作用する場合や複合(組合せ)応力下における強度やじん性に関するデータは極めて少ない。

本報では、数種の塑性加工用工具材料について一定のねじりトルクを荷重しながら静的引張り試験を行い、組合せ応力下における破壊とじん性を引張り強さと吸収エネルギーにより評価し、検討した結果を報告する。

2. 実験方法および実験条件

2.1 実験装置

図1は本実験に使用した静的引張りとねじりの組合せ応力試験装置を示す。

上部および下部の応力棒(直径22mm)は引張り試験機のチャックに固定されている。トルク荷重用ディスク(直径500mm)にはワイヤを取付け、その端に重錘をつるすことにより試験片にねじりトルクを作用させるようになっている。また、トルク荷重用ディスクを固定しているベアリング固定円筒の内部にはスラストベアリングを介して下部応力棒が取付けられ、上部に装着された試験片はねじりトルクおよび引張りの荷重を同時にうけるようになっている。試験片はねじりトルクが荷重されるようにそのつかみ部で一部平坦部を有し、二つ割りの取付け治具により上部応力棒および治具取付け用ディスクに取付けられるようになっている。

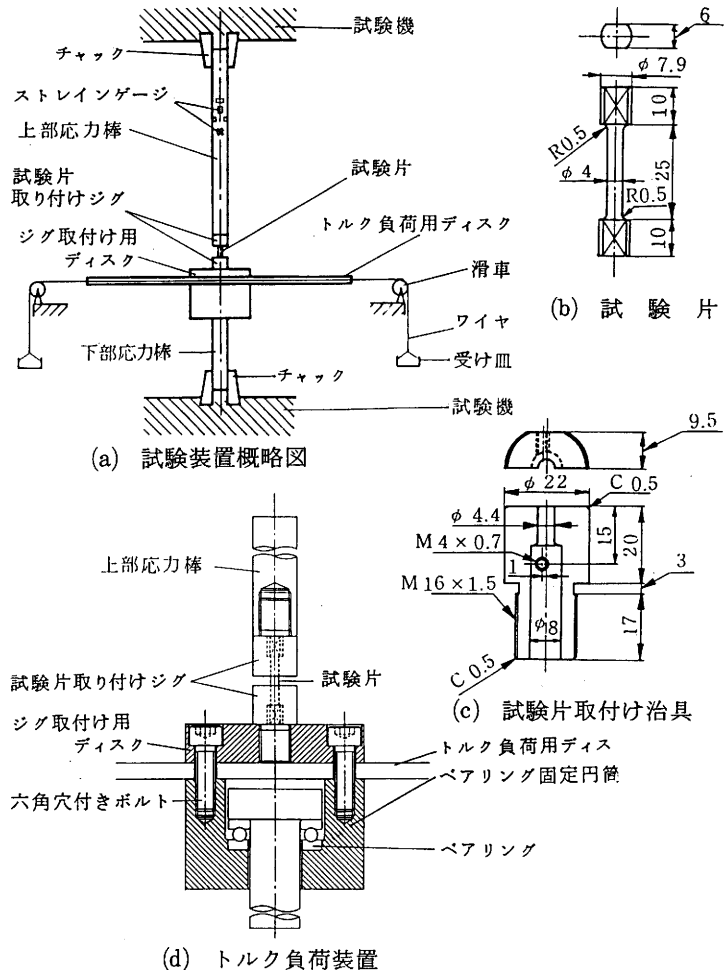


図1 (静的)引張り-ねじり組合せ応力試験装置

2.2 実験方法

本実験では、試験片に一定のトルクを負荷した状態でさらに静的引張り荷重を負荷し、破断させた。試験片に作用する引張り力およびトルクは上部応力棒に貼付したストレインゲージによりブリッジ回路を構成し、その出力電圧を測定して求めた。なお、静的引張り力およびトルクと出力電圧の関係はあらかじめそれぞれ単独に検定を行って求めた。

さらに、トルクに及ぼす引張り力の影響(干渉)を調査するため、引張り荷重を徐々に加えながらトルクの変化を求めた。その結果、本実験の試験片破断荷重15~20KNの範囲ではトルクに及ぼす引張り力の影響がほとんどないことがわかった。

2.3 実験材料

試験片材料には塑性加工用工具材料である炭素工具鋼SK3, 合金工具鋼SKS3, SKD11および高速度工具鋼SKH51の4種を用いた。

それぞれの試験片の実測した縦弾性係数Eは209, 203, 212および214GPaであった。

従来の単軸引張りの実験より得られた吸収エネルギーとかたさの関係は図2に示すような傾向にある¹⁾ことがわかっている。かたさ値が大きくなるととも

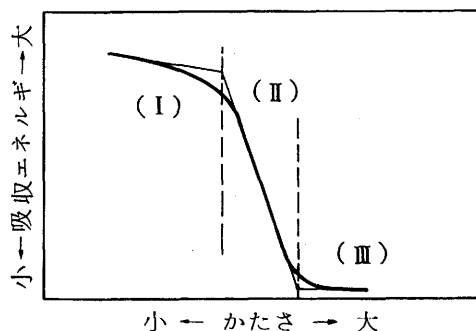


図2 吸収エネルギーとかたさの関係

に吸収エネルギーは小さくなり、とくにかたさがHv500~700において急激に減少する。つまり延性破壊領域(I)からぜい性破壊領域(II)へ移る遷移領域(II)が認められる。

本研究ではこれら3種の領域に対応するかたさ値を有する試験片を、熱処理温度(焼きもどし温度)を変化させることにより準備し実験に供した。表1~表3にそれぞれの試験片の焼入れ条件、焼きもどし条件、かたさを示す。

表1 試験片の焼入れ条件

試験片材料	焼き入れ温度 [°C]	冷却方法
SK3	820×0.5h	水冷
SKS3	830×0.5h	油冷
SKD11	575×2h, 725×1h, 1025×0.5h	空冷
SKH51	850×0.5h, 1000×0.7h, 1180×0.8h	窒素ガス空冷

表2 試験片の焼きもどし条件

試験片材料	焼きもどし温度 [°C]			冷却方法
	I	II	III	
SK3	500	400	300	空冷
SKS3	400	350	280	空冷
SKD11	600	550	400	空冷
SKH51	660	620	600	ガス空冷

表3 試験片のかたさ

試験片材料	ビッカースかたさ [Hv]		
	I	II	III
SK3	450~475	550~570	700~730
SKS3	580~605	605~635	705~745
SKD11	475~505	610~640	710~740
SKH51	510~530	600~630	760~790

2.4 ねじり応力の計算

各試験片材料についてあらかじめねじり試験を行い、ねじりトルク T とねじり角 θ の関係を求め、式(1)により試験片の外縁ねじり応力 τ (以降、単にねじり応力と称す)を計算した。²⁾

$$\tau = \frac{1}{2\pi r^3} \left(3T + \theta \frac{dT}{d\theta} \right) \quad (1)$$

ここで、 r : 試験片の半径である。

図3にねじり応力 τ とせん断ひずみ γ ($\gamma = r\theta$) の関係の一例を示す。

3. じん性の評価

実験で得られた応力とひずみの関係を弾性域と塑性域の2直線で近似し、これより吸収エネルギーを求めてじん性を評価した。組合せ応力下での吸収エネルギーは、引張りの吸収エネルギーとねじりの吸収エネルギーの和として表されるが、本報では引張りの吸収エネルギーのみを便宜的に採用し、次式(2)または(3)に実験値を代入し求めた。

ぜい性破壊のとき

$$U_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_T^2}{E} \quad (2)$$

延性破壊のとき

$$U_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_Y^2}{E} + \frac{1}{2} (\sigma_Y + \sigma_T) \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\sigma_T - \sigma_Y}{E} \right) \quad (3)$$

ただし、 σ_T : 引張り強さ、 σ_Y : 引張り降伏応力、 E : 縦弾性係数、 Δl : 試験片の伸び、 l : 試験片の平行部長さである。なお、試験片の伸び Δl は試験後、破断面を互いに突き合わせて測定した。

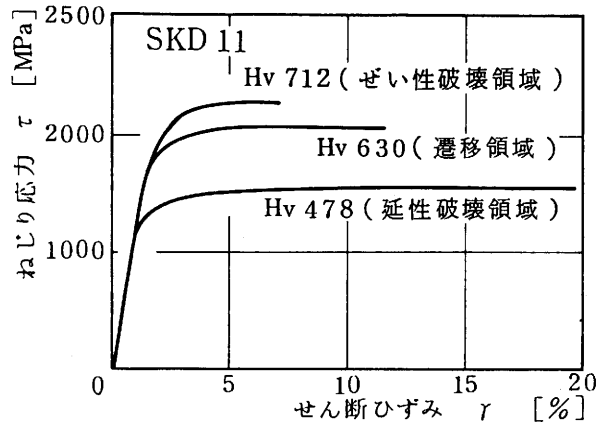


図3 ねじり応力とせん断ひずみの関係

4. 実験結果および考察

4.1 組合せ応力状態での引張り力、トルクの変出力波形

図4は試験片がぜい性および延性破壊したときの引張り力およびトルクの時間的変化の一例を示したものである。ぜい性破壊のときは負荷初期をのぞけばほぼ直線的に引張り荷重が増大し破断している。延性破壊のときは降伏荷重まで荷重が直線的に増大し、以後塑性変形域がみられほぼ最大の引張り荷重で破断している。

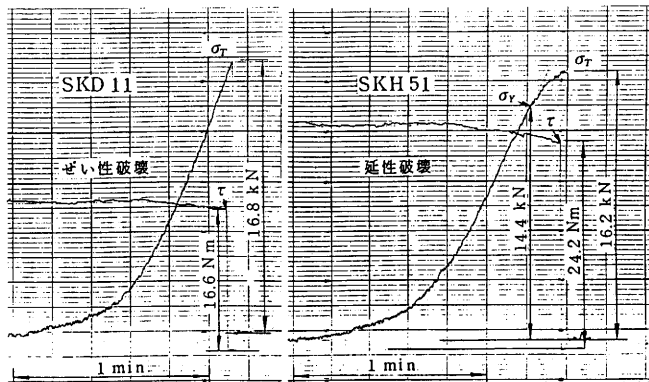


図4 引張り力およびトルクの変出力波形例

4.2 単軸引張りおよび組合せ応力下の引張り強さと吸収エネルギー

図5に単軸引張りおよび組合せ応力下(初期トルク18.1Nm, $\tau = 1440\text{MPa}$)におけるSKD11の引張り強さとかたさの関係を示す。かたさHvが700前後では試験片にねじり応力が作用しても引張り強さは単軸引張りのそれとほぼ同じ値になっている。500~700では明らかにねじり応力が作用したときの引張り強さが小さくなっていることがわかる。また、単軸引張りおよび組合せ応力下のいずれの場合もHvが600前後のとき引張り強さが最も大きくなっている。

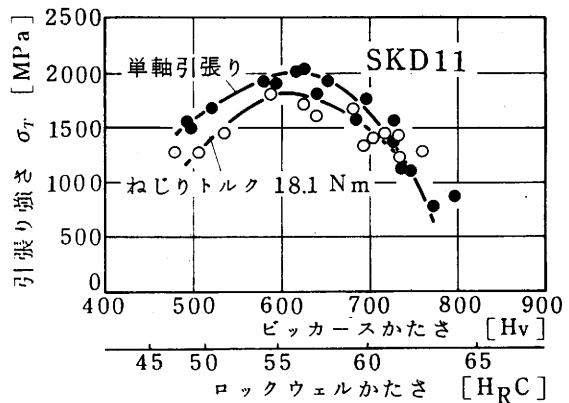


図5 引張り強さとかたさの関係

図6は図5の結果に対応する吸収エネルギー U_1 とかたさの関係を示す。図2でも示したように吸収エネルギーから延性破壊とぜい性破壊の領域が比較的明瞭にあらわれていることがわかる。遷移領域はこの図からHvが580~630と考えられ、この範囲は図5の引張り強さが最大になるかたさとほぼ対応するということができる。図5の結果に対応して吸収エネルギーもまたHvが500~630でねじり応力が作用したときに小さくなっている。

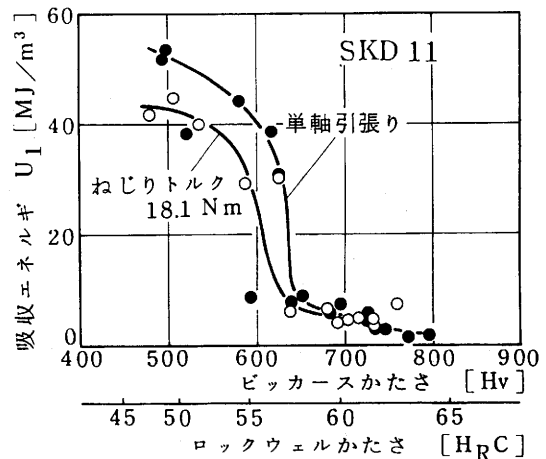


図6 吸収エネルギーとかたさの関係

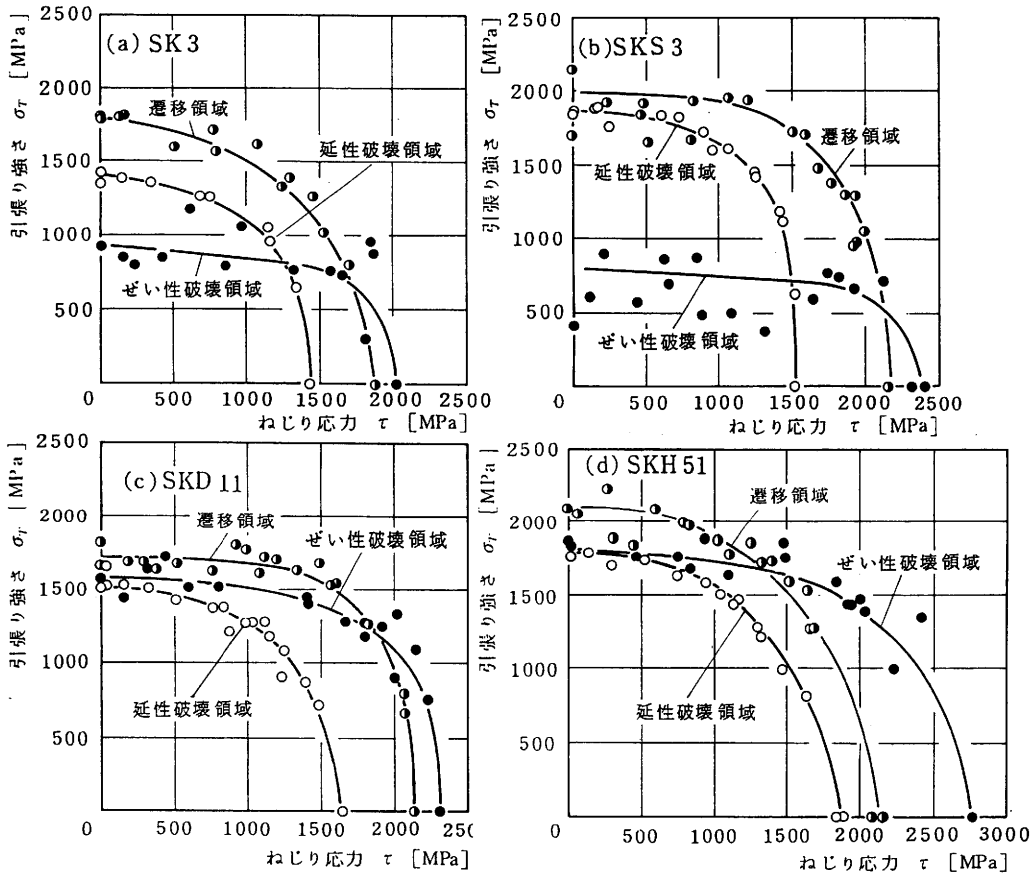


図7 引張り強さとねじり応力の関係

4.3 引張り強さとねじり応力の関係

図7(a)~(d)にそれぞれSK3, SKS3, SKD11, SKH51の引張り強さ σ_T と負荷したねじり応力 τ の関係を示す。

ぜい性破壊領域の試験片はほぼ同じかたさHv700~740(SKH51のみ760~790)の範囲のものが使用されている。試験片の表面傷や微細クラックなど応力集中の影響のため実験値はややばらつきを生じているが、いずれの材料の引張り強さもねじり応力が1000~1500MPaまででは単軸引張り($\tau=0$)の引張り強さとほぼ同じ値を示している。材料別にこれらの範囲で引張り強さを比較するとSKH51, SKD11では $\sigma_T=1600\sim 1800$ MPaで大きく、SKS3, SK3では $\sigma_T=500\sim 800$ MPaとなっておりかなり小さい。

つぎに、延性破壊領域の試験片は必ずしも材料間でかたさ値が統一されてはいないが、いずれの材料もねじり応力の増大とともに引張り強さは減少し、とくにせん断降伏応力($\tau=1200\sim 1250$ MPa)を超えると著しく減少している。SKD11およびSKS3の場合、ぜい性破壊領域、遷移領域ともに引張り強さはせん断降伏応力の範囲内ではねじり応力の影響をほとんど受けない。また、いずれの材料に対してもねじり応力が極端に大きくなければ遷移領域での引張り強さ(単軸引張り)はぜい性および延性破壊領域のそれに比べ大きくなっている。したがって破壊強度の点から考えると遷移領域でのかたさ値を有する工具材料を使用することが望ましいといえる。

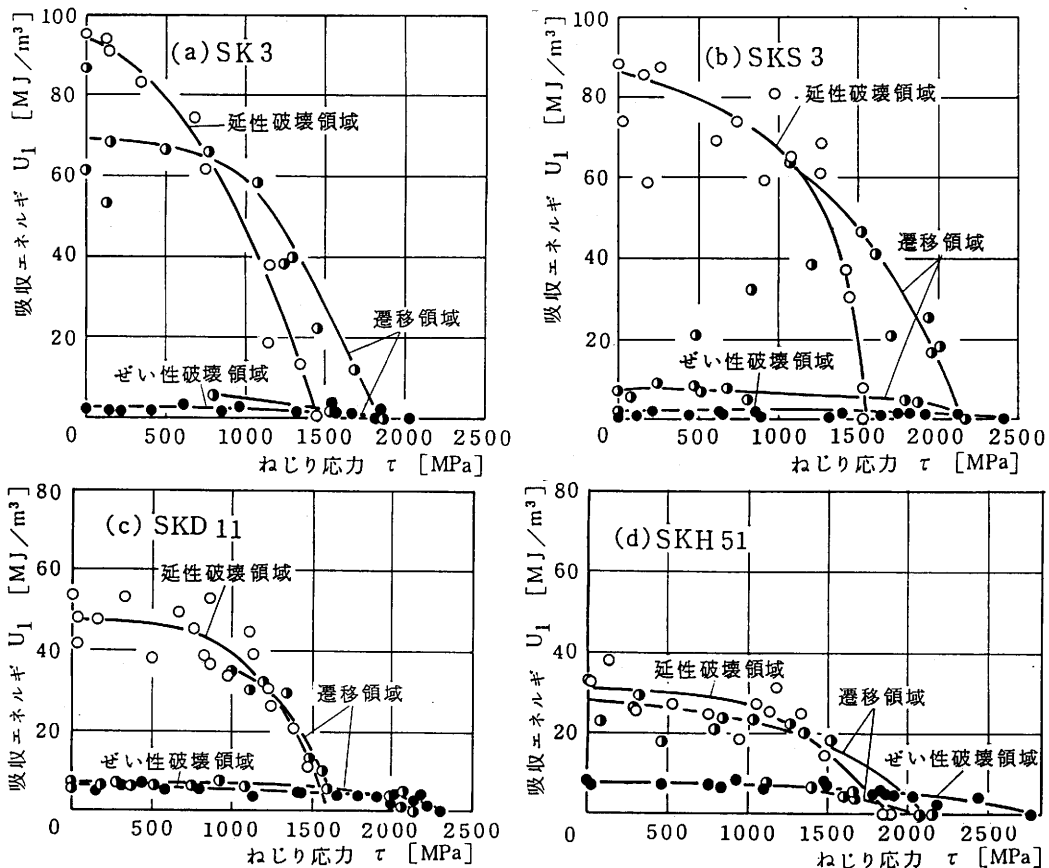


図8 引張り吸収エネルギーとねじり応力の関係

4.4 吸収エネルギーとねじり応力の関係

引張りの吸収エネルギー U_1 とねじり応力 τ の関係を図8(a)~(d)に示す。ぜい性破壊領域における U_1 は延性破壊領域におけるそれに比べ非常に小さい。遷移領域における U_1 の τ ともなう変化はぜい性、延性両領域の変化の傾向が混在し不安定である。このことは図6の結果においてかたさのわずかな変化(Hv580~630)で吸収エネルギーが大きく変動していたことから理解できる。したがって、遷移領域で破壊強度および吸収エネルギーをともに大きくとることは可能であるが、かたさの範囲を十分に考慮し熱処理を施す必要がある。

ぜい性破壊領域での吸収エネルギーは前述のように τ の大小にかかわらず非常に小さく、負荷するねじり応力の大小にはあまり影響されない。この領域の吸収エネルギーを材料間で比較するとSKH51, SKD11がSK3, SKS3に比べてかなり大きくなっている。

4.5 考察および検討

表4および表5はねじり応力 $\tau=1000\text{MPa}$ のときの引張り強さ σ_T および引張りの吸収エネルギー U_1 の値を示したものである。参考までに単軸引張り($\tau=0$)のときの σ_T , U_1 の値も示した。

領域I, II, IIIに対するかたさは各工具材料でやや異なっており、直接材料間の優劣などを比較することはできないが、これらの結果より引張り強さが大きく、また吸収エネルギーも比較的大きい領域は延性領域または遷移領域ということになる。

表4 $\tau = 1000\text{MPa}$ および単軸引張り($\tau = 0\text{MPa}$)のときの引張り強さ σ_T 単位: MPa

試験片材料	I	II	III	I($\tau = 0$)	II($\tau = 0$)	III($\tau = 0$)
SK3	1100	1500	900	1400	1800	930
SKS3	1650	1900	500	1900	1900	600
SKD11	1250	1700	1500	1500	1700	1600
SKH51	1500	1850	1700	1800	2100	1800

表5 $\tau = 1000\text{MPa}$ および単軸引張り($\tau = 0\text{MPa}$)のときの吸収エネルギー U_1 単位: MJ/m²

試験片材料	I	II	III	I($\tau = 0$)	III($\tau = 0$)
SK3	47	60	2	91	3
SKS3	68	≥ 7	2	85	2
SKD11	40	≥ 7	5	48	6
SKH51	27	23	7	30	7

しかし、工具鋼に要求される特性としては強度とじん性の他に耐摩耗性も重視され、かたさ値を大きくすることがそれに対する一つの対策とされている。また、加工の際の工具面の温度上昇による焼きもどし軟化などを考慮し一般的には工具のかたさをHv600~750(SKH51: 660~800)³⁾としている。このことから考えると、引張り強度の大きい遷移領域(SK3, SKS3, SKD11)またはぜい性領域の下限(SKD11, SKH51)のかたさを有する工具を使用するべきである。ぜい性破壊領域であるHv ≥ 700 ではSKH51は引張り強度とじん性の点から最も優れた工具材料といえる。

5. 結 言

従来の塑性加工用工具材料を使用し、一定のトルクを負荷しながら静的引張り試験を行い組合せ応力下の破壊強度とじん性を調査し以下の結論を得た。

- (1) 延性破壊領域では組合せ応力下での引張り強さ、引張りの吸収エネルギーは単軸引張りのそれらより小さくなる。遷移領域、ぜい性破壊領域ではねじり応力がせん断降伏応力程度まで引張り強さはほぼ一定である。
- (2) 遷移領域の引張り強さは他の領域のそれに比べ大きい。また吸収エネルギーは二つの領域つまり延性、ぜい性両領域にわたる変化の傾向がみられる。
- (3) 延性破壊領域におけるじん性はぜい性破壊領域のそれに比べて非常に大である。
- (4) 引張り強さや耐摩耗性を重視して工具材料を使用する場合、遷移領域またはぜい性破壊領域のかたさが得られる熱処理条件を選ぶことが望ましい。

今後、負荷経路やひずみ履歴などを考慮し、変形挙動や降伏条件に関する実験的検討も必要と考えられる。最後に、本実験に協力いただいた福井大学大学院太田真紀君に謝意を表します。

文 献

- 1) 後藤・若杉・白崎・福岡: 日本機械学会 北陸信越支部北陸地方講演会講演概要集('85-7, 福井), 15.
- 2) 例えば, 鶴戸口・川田・倉西: 材料力学(上), (1967), 124, 裳華房.
- 3) 吾郷: 塑性と加工, 19-204(1978), 44.