

線材の捻回試験について

鈴木 弘

捻回試験は線材の変形能を知るための実用試験として広く採用されている。しかしその本質については不明の点が多く、加工率や材質のちがう線において異常な結果が現われ理解に苦しんできた。この論文では、正しい捻回試験方法の確立と、異常捻回値の現われる機構の解明に対する筆者の考えを述べる。

1. ま え が き

線材の機械的性質を表わす試験方法としては、引張試験とともに捻回試験が最も広く用いられている。一定長の線材の試片の両端をつかみ、弱い軸方向の引張応力を加えた状態で、一端を軸線のまわりにねじり続けて、破断するまでのねじり回数をもって“捻回値”と定義し、線材の塑性変形能を表わすものとして、広く実用試験機として採用されていることは周知のとおりである。

引張試験が線材の強さを表わす試験法であり、捻回試験が変形能を表わす試験法であると考えられているのが、両試験法が線材の確信試験の両代表として取り扱われている理由であろう。もしそのとおりであれば、事からはまことに明快であり、線の製造者側としても、また使用者側としても確実な“ものさし”をもって線の機械的性質を表現しうるので都合である。しかし実状は決してそのように単純明快ではない。引張試験の側には残された問題点はほとんどないかに見えるが、捻回試験については、この試験の過程中に、固態物理学的あるいはまた塑性学的にどのような現象が起こっているのかが根本的に明らかにされていないので、捻回試験の方法にもまた捻回試験結果の解釈にも多くの問題点が残されているのである。

筆者の手元においてこの問題に関して多少の研究を行ったので、これを報告して参考に供するとともに、残されている問題点にも触れて一般の関心を高め、捻回試験が合理的な基盤の上で使用されるようになることを願って本稿を草した。

2. 捻回試験についての諸問題

A. 捻回試験がどのような理由から線の変形能の一般的な試験法として採用されるに至ったのか、その歴史は明らかではないが、線材を使用する際には、その固定のためには線をねじるのが普通であり、使用中にその部分からの破断を防止するために、使用前にあらかじめ類似のねじり変形を加えて安全を確認するという考え方から発したものであると考えられる。

この種の、実用条件を再現する形態で生まれた試験法の多くは、単一の物理現象を実験する場合とは異なり、

多数の独立変数を含む複雑な現象となるのが普通であって、試験条件を一定にして試験しなければ信用しうる結果が得られない。したがって試験方法を明確に規定することが肝要であって、現状はまだ満足しうる段階には達していないと見るべきであろう。

B. ねじり試験においては試験片内部における応力・ひずみともに均一な分布とならない。図1に示すとおり、

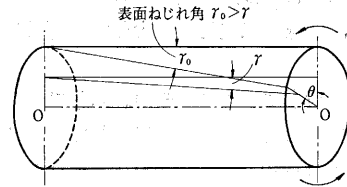
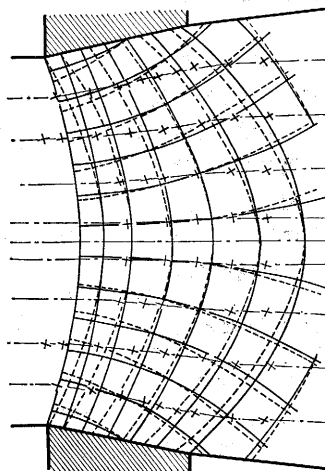


図 1

り、円柱形の試片においても中心軸上のひずみがゼロであって表面のひずみが最大値となり、その間ひずみは半径に比例して変化し均一な分布にはならない。断面形状が円形以外の場合は不均一分布の度はさらにはなはだしく、したがって材料の特性の外に応力およびひずみの不均一分布の条件が試験結果に現われるから、材料の特性のみを求めるのには問題がある。

このことは理論的な結果を求める試験法としては欠点

であるが、その反面線材の外層部の性質の差を検出するためにはむしろ感度を高める効果も期待できる。しかも引抜き加工においては、図2のように、ダイスの影響を受けて外層部が中心部よりもひずみがはなはだしく、したがって加工条件の良否により外層部のひずみに差が生じるので、捻回試験は線



試験片電気銅、断面積減少率 39.63%

図 2 引抜き変形中の主ひずみおよび主応力線

の性質の差を検出する方法としては適している面もあるといえる。

C. 素線から多数のダイスをとおして順次線引して線径を細くして行く過程のすべての段階の線の捻回試験を行なうと、低炭素鋼線材では、素線からの全断面減少率がある特定の値に達すると捻回値が急激に減少する場合がある。また特定の全断面減少率において捻回値が極小値を示すこともある。一般に、全断面減少率の増大にしたがい捻回値は単調には変化しないで、複雑な変化が現われることが多い。

線引工程が進行するにつれて、線径は次第に細くなり、加工硬化が進み、繊維組織が進行する、など、単調に変化して行く要素が多く、捻回値のみに異状変化が現われるので、その理由の解明が非常に困難である。この現象は経験的には知られているが、この理由は現在まだ明らかにされていない。このような異状変化の生じる機構が明らかにされれば、捻回試験の性格が解明されるばかりでなく、伸線加工技術上の大きな成果が期待される。

D. 捻回試験中に進行する線のねじりひずみは、全長にわたって均一に進行する場合ばかりではなく、一局部に集中して起こる場合や、さらに一部からひずみが生じてそれが全長に伝わって行く場合がある。このように種々のひずみの進行型があるが、各型の生じる原因はまだ明らかでない。どのような条件でどの型のひずみが進行するかが判明すれば、これもまた捻回試験の機構を明らかにするに役立つであろう。

ねじりひずみの進行形態に差異があるばかりでなく、ねじりが進行して最後に破断する際の様相にも差異があることは経験的に知られていて、破断の形によって線の品質を分類している工場もある。要するに、各種の破断形式とそれが生じる原因との関係を明らかにすることが必要である。

以上、捻回試験に関する主要な問題点を略記したが、これらは、要するに捻回試験の本質的な機構の解明ができれば解決するものであって、今後の研究はその方向に進めるべきである。本稿においては、現在までに行なわれている研究の結果を紹介するが、この種の研究は当所鈴木研究室において行なわれたものが大半を占めるので、その研究結果を中心に解説する。

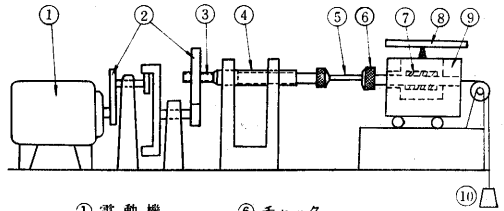
3. 捻回試験条件の検討

一般に捻回試験の結果はばらつきが大きいと考えられている。前述のように捻回試験の機構が明らかにされていない現状では、線材の側にもばらつきの原因があるかも知れないが、少なくとも実用試験としての捻回試験機は、線にねじりを加える方法に関する不備のために捻回値がばらつくものであってはならない。

したがって捻回試験条件の各要素が捻回値に及ぼす影響を検討しておくことは、欠くことのできない前提条件である。このような見地から鈴木研究室で行なった研究結果の要点を述べよう。

(1) 実験方法および試験材料

実験装置は図3に示すようなもので、実験条件としては、捻回速度・軸方向荷重・標点距離を任意に選ぶことができ、線材の伸び・捻回数・ねじりトルクを測定記録できる。



- ① 電動機
- ② 減速歯車
- ③ クラッチ
- ④ 回転数測定接点
- ⑤ 試片
- ⑥ チャック
- ⑦ トルク測定ゲージ
- ⑧ 伸び測定ゲージ
- ⑨ 移動台
- ⑩ おもり

図3 捻回試験実験装置

供試線材は直径2mmのピアノ線で、成分は表1に示すものであって線径5mmから11回の引抜きを行ない(総断面減少率84%)、引張強さ193kg/mm²・ビッカー

表1 供試ピアノ線材の組成%

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
0.80	0.36	0.01	0.008	0.005	0.02	tr	0.04

ス硬さ $H_v=329$ である。加工率の大きい高炭素鋼線材は捻回破断面が軸に直角な正常破断になり、捻回値のばらつきが小さいことが経験的に知られているので、これを試験材として、捻回試験条件の影響のみが明瞭になるよう配慮したものである。

(2) 供試線材の長さの影響

試験線材の長さが捻回値に及ぼす影響を検討するために、線長を30d~200d(dは線径)の範囲で6種、ねじり速度を3.8・9.3・12.9rpmの3種、引張荷重を引張強さの1%として得られた結果を図4に示す。実線は

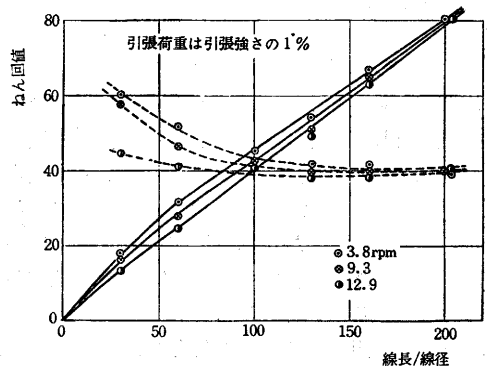


図4 供試線長が捻回値に及ぼす影響

破断捻回数, 点線は長さを 100 d に換算した値である。

任意の長さの線で試験して, 100 d の長さに換算する方法が一般に広く行なわれているが, その取り扱いには注意を要することがわかる。図 5 は供試線材の表面にサーモペイントを塗って捻回試験を行ない, 試験中の線の表面温度分布を求めたものである。線径は 2 mm で比較的細く, 捻回速度も遅いが, それでも温度上昇は明瞭に現われている。実用試験では, これよりも線径・捻回速度ともに大きい場合が多いので, 温度上昇はこれ以上になると考えるべきであろう。

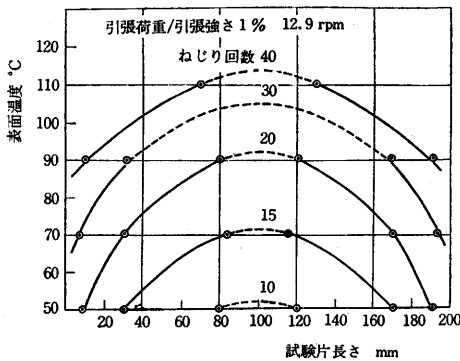


図 5 供試線材表面温度

線の全長に沿いねじり変形熱が発生し一様に温度上昇が起こるはずであるが, 両端からはチャックへ熱が逃げるのでその影響が現われて山形の温度分布が生じ, また線長が短いものほど平均温度も低くなっている。線長が捻回値に及ぼした影響がすべてこの温度分布によるものか否かは不明であるが, 100 d 以下の短い線による試験値から 100 d 長に換算する方法には検討の余地が多いと考えるべきであろう。

(3) 軸方向引張荷重の影響

軸方向の引張荷重が小さいときには, ねじりが進行するにしたがって線が不規則に曲がり直線からはずれる部分が生じ, 部分的に曲げ応力が加わるため, 正しい捻回試験ができなくなり, 結果のばらつきも大きい。したがって軸方向の引張荷重を加えることは必要条件であるが, 引張強さの 3% 以上の引張荷重を加えると捻回値の低下が生じた。(図 6)

軸方向引張応力がねじり応力との組合応力として作用するためあって, 過大な軸応力を加えることはこの点から問題である。しかしながら軸応力を増すにしたがい捻回値のばらつきは減少する。すなわち引張荷重率 1% の場合はばらつきは $\pm 10\%$ であったが, 引張荷重率 10% の場合はばらつきは $\pm 1.5\%$ であった。

DIN の規格では引張荷重率 1% としているのは十分意味のあるところである。わが国では捻回中に軸方向張力が変化する構造の試験機さえ使用されている現状であるから, 1~3% 程度の軸張力を加えるよう早急に規定す

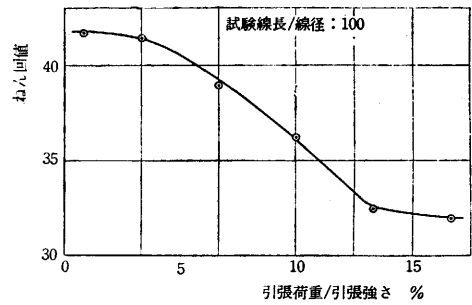


図 6 軸方向引張荷重が捻回値に及ぼす影響

べきである。

(4) ねじり速度の影響

チャックの回転速度を 3.8~12.9 rpm に変えて, 試験長の異なる場合の捻回値を求めたものが図 7 である。

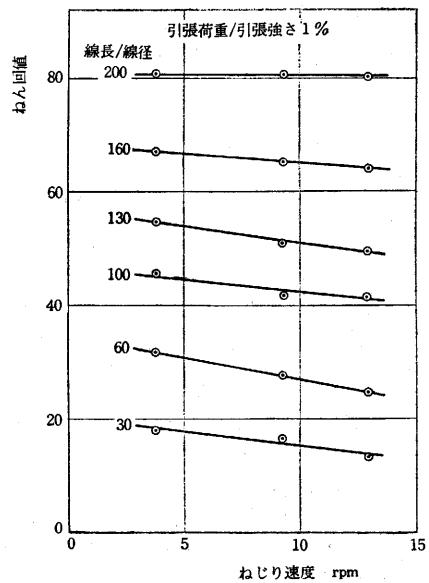


図 7 ねじり速度が捻回値に及ぼす影響

引張荷重率は 1% である。図中の実線は実測値そのまま, 点線は線の単位長さ当たりのねじり数を等しくして比較するために, 長さ 100 d の場合に換算したものである。

ねじり速度が速いほど線の温度が高くなるから, 当然影響が出るはずであるが, 速度範囲が狭いためか影響は比較的少ない。しかし実用機においても高速を採用することは危険である。

(5) 線材温度が捻回値に及ぼす影響

線材の温度が捻回値に及ぼす影響を検討するために, 一定温度に保った炉内で捻回試験を行なった結果を図 8 に示す。この材料の場合 270°C 付近で捻回値が最低となる傾向を示しているが, この曲線の形はもちろん材質ごとにまた線の加工履歴を異にするものごとに異なる。

さきに図 4 において, 供試材の短い場合捻回値が高

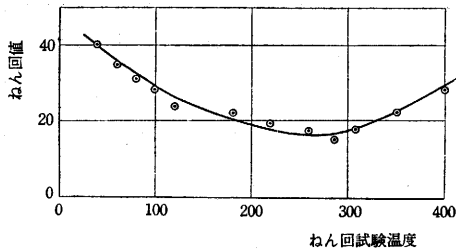


図 8 線材の温度が捻回数に及ぼす影響

く、その理由は供試材の温度が低いためと解釈したが、図 8 の結果はその推測の方向が正しかったことを立証している。

(6) 捻回試験方法に関する考察

捻回試験条件の相異から捻回数の変化を招来しないよう、一般性のある結果を求めるためには、試験方法に関して少なくとも下記の条件を採用する必要があることが以上の結果から明らかである。

- A. 試験のゲージ長さは少なくとも 100 d 以上であること。
- B. 線材に加える軸方向引張荷重は、ねじり開始から破断まで、終始線材の引張強さの 1~3% の一定値に保つことができること。
- C. 捻回中の線の伸縮に応じてチャックは自由に移動しうること。
- D. ねじり速度は、線材の不均一温度上昇の影響を避けるためなるべく遅い方が望ましい。

4. 線の伸線加工度が捻回数に及ぼす影響

前節の実験に使用したのと同種のピアノ線を、線径 2.95 mm から 1.075 mm まで 16 回の線引を繰り返して(総断面減少率 87%)、各段階ごとに捻回数を求めた結果を図 9 に示す。捻回試験条件は引張荷重率 1%、ねじり速度 12.9 rpm、試験長 100 d である。

また図 10 は低炭素リムド鋼線(表 2)を順次線引した場合の総断面減少率と捻回数との関係を示す一実験例である。²⁾

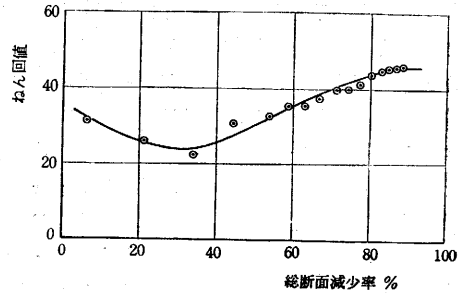


図 9 総断面減少率と捻回数との関係 (ピアノ線の一例)

ピアノ線については総断面減少率 30% の付近で捻回数が最小値を示し、低炭素リムド鋼線は対数ひずみ 160% すなわち総断面減少率 80% の付近で最小値を示している。

これらはそれぞれ高炭素鋼線と低炭素鋼線との一例にすぎないが、引抜加工を継続的に加えて総断面減少率を順次増大して行くと、各段階の線の捻回数は単調には変化しないで、途中で増減する事実は一部の人には以前から知られていた。この原因はまだ解明されていないが、捻回試験に際して生じる線材のねじり変形の進行の形態と関係があることは明らかである。

線材に生じるねじり変形の進行が、きわめて特異なものであることは、高炭素鋼線については筆者らが、また低炭素リムド鋼線については福田²⁾が発見して指摘しているので、以下にこれを紹介する。

表 2 供試低炭素リムド鋼線の組成%

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.06	0.01	0.30	0.012	0.028	0.18

5. 高炭素鋼線の異常捻回

筆者らの行なった高炭素鋼線の捻回試験において、ねじりひずみの進行にきわめて特異なしかも系統的な現象が現われた。前述のように素線からの総断面減少率によ

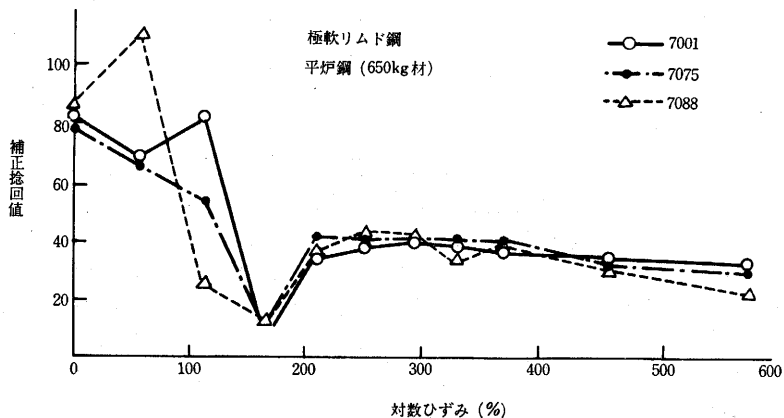


図 10 総断面減少率と捻回数との関係 (低炭素リムド鋼線の一例)

り捻回値が複雑な変化を示す。この理由については従来まったく説明ができないままに現在に至っていたが、ねじりひずみの進行形式によってこの捻回値の異常変化の理由が説明できるのは非常に興味深いことである。

しかしねじりひずみの進行形式に数種類の形式がなぜ現われるか、その理由については現段階では筆者も明らかにするには至っていない。わずかにいくつかの仮説を想像しているに過ぎない状態である。いわば、捻回試験の機構の解明に向けて一步を進めて、捻回値の異常変化とねじりひずみの進行形式とが関係ある事実を明らかにしたに過ぎないが、この事実を多くの研究者にしらせて、さらに掘り下げるために役立てたいと願っている。

(1) 供試高炭素鋼線

供試線材は、引抜いたままのものと、引抜き後直線(矯正)加工を施したものと両者であって、引抜いたまま(As Drawn)の線材の組成と引張り強さとは、それぞれ表3および表4に示すとおりであり、また引抜き工程は、熱処理→塩酸酸洗い→Bonderite+Lime Soap 被膜処理をした後に、表4に示す工程で9回の線引を行なったものである。

表3 引抜き高炭素線材の組成(直線加工なし)

品 種	含有成分 [%]					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
SWRH-4A	0.63	0.26	0.49	0.014	0.019	—
SWRH-4B	0.64	0.25	0.75	0.019	0.015	0.09
SWRH-6A	0.84	0.23	0.50	0.014	0.016	0.11
SWRS-1B	0.72	0.26	0.67	0.014	0.019	0.09

表4 引抜き高炭素線材の引張強さ(直線加工なし) [kg/mm²]

線 径 [mmφ]	断 面 減 少 率 [%]	SWRH -4A	SWRH -4B	SWRH -6A	SWRS -1B
3.50	18.98	131.8	140.4	143.5	128.9
2.80	36.02	138.8	145.5	148.9	135.0
2.50	49.00	143.1	152.0	156.9	141.1
2.25	58.82	150.0	158.7	164.4	147.4
2.03	67.00	155.9	166.4	172.0	154.5
1.80	73.75	164.3	174.0	179.9	162.4
1.62	78.80	170.0	181.0	185.6	167.1
1.48	82.30	177.5	185.2	190.3	172.5
1.35	85.34	187.3	193.6	200.6	179.9
1.20	88.50	195.1	216.6	226.0	189.7

表5 直線加工済みの高炭素鋼線材の組成(直線加工あり)

品 種	含有成分 [%]					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
SWRH-4A	0.61	0.24	0.46	0.013	0.024	0.12
SWRH-4B	0.65	0.24	0.81	0.013	0.019	0.10
SWRH-6A	0.80	0.24	0.50	0.014	0.013	0.09

表6 直線加工済みの高炭素鋼線材の引張強さ(直線加工あり) [kg/mm²]

	線 径 [mmφ]	断面減少率 [%]	SWRH -4A	SWRH -4B	SWRH -6A
伸線上がり	1.25	90.2	206.0	215.3	260.5
	2.35	65.5	145.0	151.0	183.4
直線加工上あり	1.25	90.2	198.4	209.5	246.5
	2.35	65.5	139.4	148.2	172.0

直線加工済み(As Straightened)の線材は、熱処理→塩酸酸洗い→被膜処理の後に、4.00 mm→3.60→2.90→2.60→2.35→2.10→1.88→1.70→1.54→1.38→1.25 mmの10パスの引抜きを行ない、この中2.35 mmφ および1.25 mmφ を抽出して直線加工を行なったものである。またその組成と引張り強さとは表5および表6に示す。

このように引抜いたままの線材と直線加工を施した線材との両者を用意した理由は、実用の線材がこの両種あることにもよるが、両者の残留応力の分布の形と強さに大きな差があるのが一理由である。線材の捻回値の異常変化は残留応力の影響であると考えの人があり、現段階ではその当否を断定し得ないので、この問題に対する資料を求める意味を含めたものである。

(2) ねじりひずみの進行形式

供試線材の表面に軸方向の直線を描いておいて捻回試験を行ない、捻回にしたがってこの線の描くらせん曲線の変化によって、ねじりひずみの進行形式を観察した。

“標準形の捻回形式”高炭素鋼線材について筆者らが行なった一連の実験に際して、材質・断面積減少率・直線加工の有無・捻回試験条件のいかに関係なく広範囲に現われた捻回形式であって、下記のような経過をとる。

最初は供試線の全長にわたって一様のピッチでねじれが進行し、ピッチが次第に細くなる形、すなわち“均一漸増形”で始まるが、線材の性質と試験条件により決まる特定のピッチに達すると、全長にわたる一様のねじれは止まり、次の段階では試験線材の一部に局部的な

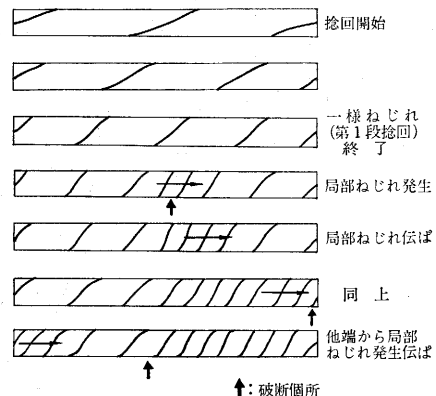


図11 高炭素鋼線の標準形捻回形成

ねじれが発生して、これが一方へ伝ばして行く。すなわち“伝ば形”の進行を示す。

局部ねじれの発生位置は不確定であるが、発生して以後は一定のピッチを保ちながら一方のみに伝ばし、試片の末端に達すると反対端に同一ピッチの局部ねじれが発生して同方向の伝ばを始める。供試線の破断は (a) 局部ねじれが発生する瞬間、(b) 局部ねじれが線の末端に達した瞬間、(c) 他端で発生した局部ねじれが最初の発生位置に達した瞬間、の3者のうちのいずれかの場合に起こるが、どれが起こるかは不定である。

破断位置は局部ねじれの伝ばして行く波頭に当たる部分であって、断面は軸に垂直なせん断破壊面となり、高炭素鋼線材では直交せん断面で正常破断するケースが多いといわれている従来の説に一致した。

特殊形の捻回形式、上記の標準形式とは異なる経過をたどって破断に至るものがあった。この実験で観察されたものには下記の2種類があった。

A. C や Mn の含有率が高く、総断面減少率の大きい線材 (SWRH-4B および 6A の 1.35 mmφ および 1.20 mmφ、直線加工を施した 1.25 mmφ) に顕著に現われたもので、特に直線加工を施したものにおいて発生割合が高かった。これでは初期の“均一漸増形”がわずかで終了し、局部ねじれが発生して“伝ば形”に変わり、その過程では破断することなく全長に伝ばを完了し、再度“均一漸増形”となり、一様ねじれのピッチが細くなり、ある値に達して破断する。

場合によると2度目の伝ば形に変わることもあるが、ごくわずかで発生後ただちに破断する。

B. 前者同様 C・Mn の含有量の多い細線 (1.25 mmφ) で直線加工を施したものに現われた特殊な形式であって、最初から破断に至るまで始終“均一漸増形”を維持して、“伝ば形”がまったく現われないものがあった。

この実験で見られた捻回形式は以上のとおりである。線材がいずれの捻回形式に従うかは、その材質と加工履歴とにより支配されるところが多いが、捻回の過程は試験条件によっても大きな影響を受ける。たとえば初期の均一漸増形の終了する捻回値 N_1 は軸荷重が増すにしたがい減少する。また軸荷重を増すと、伝ば形への移行あるいは局部ねじれの伝ばが不安定となる。

(3) 捻回トルクと伸びの変化

標準形の捻回形式に対応するトルクと伸びの変化の状

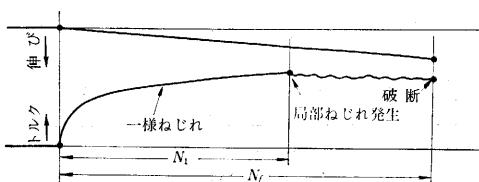


図 12 トルクと伸びの変化 (標準形 1)

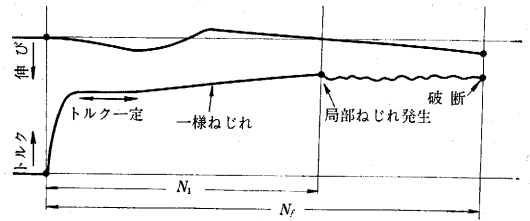


図 13 トルクと伸びの変化 (標準形 2)

況の代表例は図 12 および図 13 の2種がある。両者で多少の相異はあるが、均一漸増形のねじれの進行する第1段階ではトルクが安定していて、その値が漸増し加工硬化を示す点では一致している。また局部ねじれが発生して伝ば形の過程に入ってから以後はトルクが変動して捻回は不安定になるが、局部ねじれが伝ばして行くためのトルクはほぼ一定水準を維持して加工硬化現象は見られず、軟鋼の引張試験において見られる下降伏点現象を連想させるものがある。

長さの変化については、図 12 では捻回の全行程を通じて単調に伸びていて、図 13 では均一漸増形の進行過程に生じる一様ねじれの期間に伸び→縮み→伸びと複雑な経過を示している。しかし長さの変化には、加えてある軸方向荷重の大きさの影響があるので、一般性のある結論を導くことはできない。

図 14 は特殊形の捻回形式の生じた場合のトルクと伸びとの変化過程の一例を示す。均一漸増形→伝ば形→均

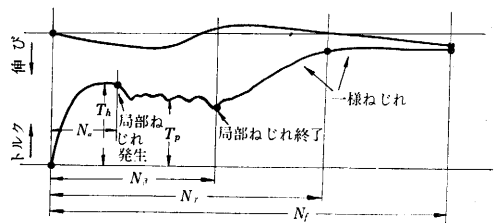


図 14 トルクと伸びの変化 (特殊形)

一漸増形の過程をたどった場合であるが、一様ねじれの進行中はトルクが安定していて加工硬化現象を示し、局部ねじれの伝ば中は加工硬化は起こらないがトルクが不安定な変動を見せる。以上の両特性については標準形の場合と定性的には同様である。

局部ねじれが伝ば中のトルクは、その前の段階の一様ねじれのトルクよりも小さく、特に特殊形の図 14 の場合にはこれが顕著に現われている。初期に T_h のトルクに耐えた線材がそれ以後により小さいトルク T_p により塑性変形する現象は非常に特異なものであり印象的である。今後捻回試験の機構を解明する際の手がかりの一つとなるべき点であろう。

(4) 破断状況

本実験の場合は線径 1.48 mm 以上 (総断面減少率

82.3% 以下) では、線の端または局部ねじれの発生した位置で破断し、破面は軸に垂直でせん断破面を示している。

線径 1.35 mmφ 以下 (総断面減少率 85.3% 以上) のもの、特に C, Mn の含有率の高い線材では、破断は 1 箇所所で起こる場合の外に数箇所同時に破断が起こることがある。破面も光沢のないらせん状のへき開破面と軸に直交するせん断破面とが混ざっている。

特に伝ば形の捻回が進行している過程で破断する場合には、局部ねじれが発生した箇所と、伝ばして行くねじれの波頭の部分とが破断面に含まれていて、前者はへき開破面、後者はせん断破面となっている。常にこのような結果になるとは断定できないが、局部ひずみと均一ひずみとでは応力の分布にも差異があることを示唆しているものとすれば重要な事実である。

(5) 軸方向引張応力が一樣ねじれの捻回数 N_1 および破断捻回数 N_f に及ぼす影響

供試線は材質のいかんにかかわらずほぼ類似の傾向を示したので、図 15 にその一例を示す。一樣ねじれ捻回

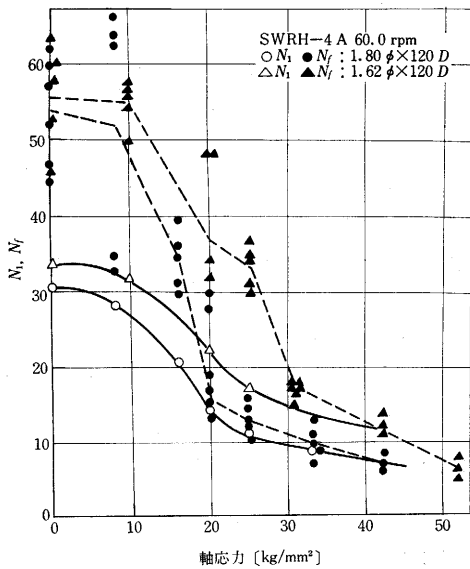


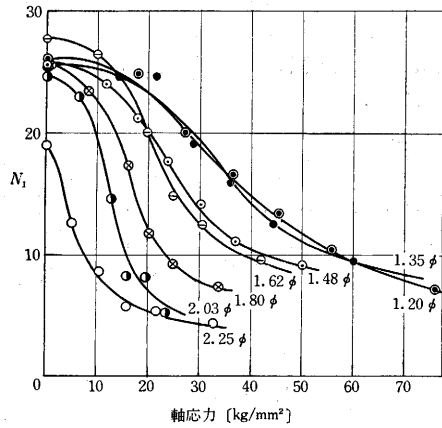
図 15 軸方向引張応力が捻回数に及ぼす影響

値 N_1 は試験片相互の間のばらつきがほとんどないが、破断捻回数 N_f は個々の試験片で差異が大きくてばらついている。

しかし軸応力を増すと N_f のばらつきは減り N_1 に近づく、すなわち軸応力が大きい場合には局部ねじれ発生

直後に破断することを示している。一樣ねじれ捻回数 N_1 に及ぼす軸応力の影響は、材質・線径に無関係に類似の傾向を示す。図 16 はその一例であるが軸応力を増すにつれて N_1 は減少の割合を増すが、ある程度を越すと減少の割合は減る。

図16に例示した材料の引張強さは 131.8~195 kg/mm²



捻回数-軸応力
SWRH-4 A, 60.0 rpm (約), 100 D

図 16

(表 4) であって、その 3% の軸方向引張応力は 4~6 kg/mm² であるから、前に提案したように捻回試験時に 1~3% の軸引張応力を加えるとすれば、 N_1 については軸引張応力の影響がほとんどない値が求められることがわかる。しかし破断捻回数 N_f については軸引張応力の影響がないためにかえってばらつきが存在する。

6. 低炭素リムド鋼線の捻回値の異常現象

上記のように高炭素鋼線の捻回試験に際して特異な現象が現われることが確認されたが、低炭素リムド鋼線についても種類の捻回形式があり、そのいずれが起こるかが捻回数に大きな関係のあることが指摘されているので²⁾、これを述べる。

(1) 供試線材

供試線材は低炭素リムド鋼であってその組成は表 7 に示すとおりであり、直径 5.5 mm の素線から表 8 に示す工程を経て 0.89 mm まで線引し、各線径ごとに試験材

表 7 低炭素リムド鋼線の組成 %

C	Mn	P	S	Cu	Cr
0.07	0.34	0.024	0.019	0.09	0.03

表 8 低炭素リムド鋼線の引抜工程および捻回数

線引回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
線径 mm	5.5	4.19	3.76	3.40	3.05	2.77	2.41	2.11	1.83	1.65	1.47	1.25	0.89
ゲージ	—	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
捻回数	—	75	88	77	77	9	6.5	30	35	37	36	35	16

を採取して引張試験と捻回試験とを行なった。引張試験の結果は図 17 に示す。

(2) 捻回試験結果

捻回試験条件は、標点距離 100 d ・軸方向引張荷重は捻回中引張強さの 2% に維持・捻回速度 51 rpm であって、各線径に対する捻回値は表 8 および図 18 に示すとおりである。すなわち総断面減少率 74.6% および 80.8% (対数ひずみ 137% および 165%) に相当する線の捻回値が著しく低く、谷をなして、それ以後再度上昇している。

(3) 捻回形式

素線は均一漸増形の捻回のみでねじれが進行して、伝ば形はまったく現われないで破断する。しかし線引加工を受けた線材では、捻回形式が異なり、捻回値の谷の出る前の太線では伝ば形のねじれが起こっている。捻回値

の谷を越えた後の細線では、ふたたび一樣ねじれに戻る。捻回値の谷の生じているのは、伝ば形から均一漸増形に形式が変わる転換期に当たっている。

すなわち、捻回値の谷に相当する線の捻回形式は独特のものであって、均一漸増形と伝ば形とが同時に進行するが、図 19 のように伝ば形のねじれの領域が局限され

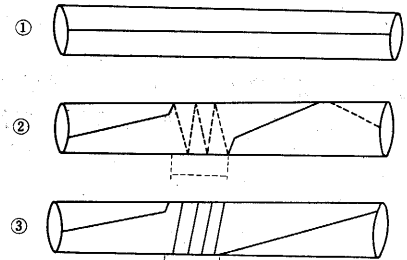


図 19 集中形のねじれ

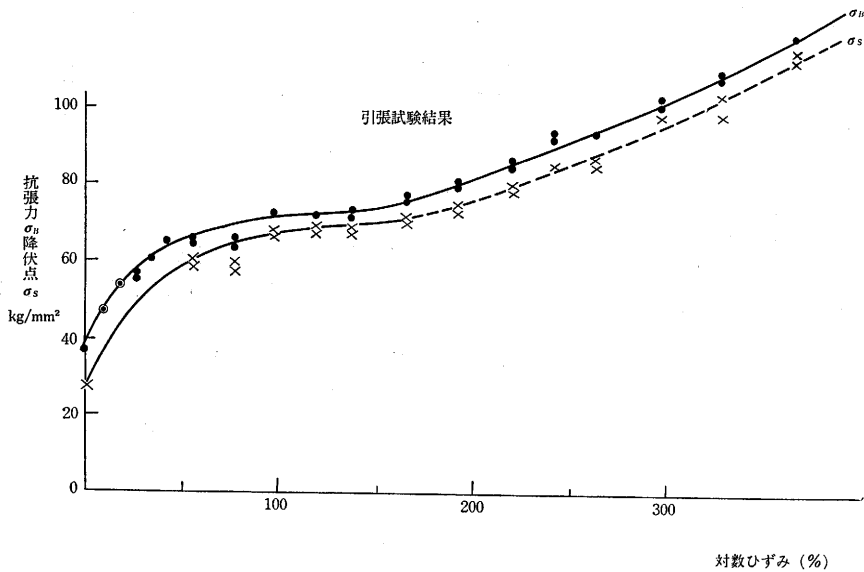


図 17 低炭素リムド鋼線の引張強さ

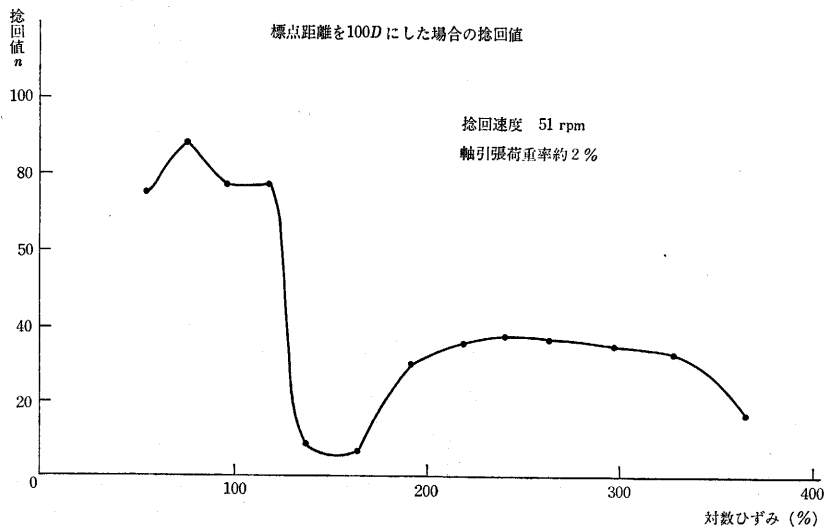


図 18 低炭素リムド鋼線の捻回値

て、その局部に高いひずみが集中するので、全体としてはきわめて低い捻回値で破断が起こる結果となる。いわば集中形ともいべき特異の捻回形式が生じて、捻回値の谷を作っているのである。

したがって、均一漸増形と伝ば形の両形式があることは高炭素鋼線と同様であって、両者の新しい組み合わせである集中形が見られるのが、高炭素鋼と異なっている。しかし、捻回値に大きな変化が見られる際には、捻回形式の変化があることは同様である。

(4) 低温熱処理の影響

表7および表8に示した線を、各線径についてそれぞれ 100°C・200°C・300°C・400°C の4種類の温度で1時間熱処理後空冷したものを捻回試験した結果が図20である。捻回値が平均して多少高くなり、特に総加工率80%付近での捻回値の谷が不明瞭になる傾向が見られる。引抜材にはかならず残留応力が存在するから、低温熱処理を行なって後には残留応力が除去されている点が異なり、したがって図20に現われた変化の一因は残留応力の除去と判断してさしつかえないであろう。

しかし、捻回現象のような微妙な問題については、低温焼鈍の影響をそのまま残留応力の影響に置き換えて考えることが許されるか否かにも疑問が残っている。しかも捻回の形式そのものには変化はない。すなわち捻回値の谷が現われるまでの線径では伝ば形が現われ、それ以後の線径についてはやはり均一漸増形の一様ねじれのみが現われている。したがって残留応力の除去も捻回形式を変える効果はない。

もっとも前記の高炭素鋼線については、450°C 3時間の熱処理を行なった後の捻回試験においては捻回形式の変化が生じて、ねじれが一部に集中して破断したので、低温熱処理が大きく影響していることとなり、低炭素リムド鋼線の場合と対立している。

7. ま と め

上述のように捻回試験については現段階では不明の事態がきわめて多い。しかも実用試験として広く採用されているので、その取り扱いには十分な注意が必要である。

まず試験条件としては再現性があり、しかも個々の試験装置の特性の影響を受けない方法に従わねばならない。したがって捻回試験に際しては“3-(6) 捻回試験方法に関する考察”に述べた諸条件を採り入れるようにすべきはもちろんである。

なお高炭素鋼に関する筆者らの研究結果によれば、一様ねじれの進行は安定していてしかも捻回値もばらつきが少なく、その後が続いて起こる伝ば形のねじれは進行が不安定であるばかりでなく、捻回値のばらつきも大きい。元来捻回試験は線を実用に供する際の用途に適した変形能を保証する意味の試験方法であるから、用途によっては“一様ねじれ”のみの捻回値を対象として試験するのが適切な場合もありうるはずである。このような用途には不確実な要素のはいり込むおそれのある破断捻回値を使用しないで、一様ねじれの捻回値のみを分離して採用することも検討すべきであろう。

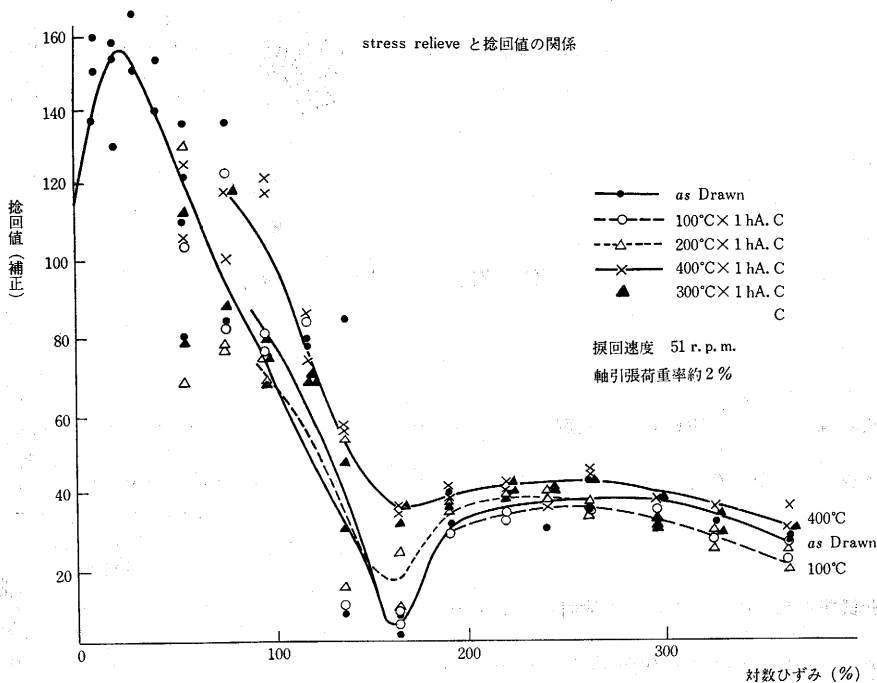


図 20. 低温熱処理の影響

捻回試験の本質的な機構が明らかになれば、試験の具体的な方法と試験結果の利用方法に関する諸問題はおのずから氷解すべき性質のものであって、捻回試験の機構解明が重要問題であることはたびたび指摘したとおりである。この課題については、現段階では捻回試験値のばらつきや、加工率の増すにしたがいあらわれる捻回値の異常現象を捻回形式により説明することに成功した。捻回値の異常変化と捻回形式に現われる変化との対応は、低炭素リムド鋼・高炭素鋼の両者においてきわめて明瞭であって、従来捻回値の異常変化としてその原因がまったく不明とされていた問題を、すくなくとも捻回ひずみ形式の変化で説明することは可能となった。

しかし、“捻回形式の変化”に問題が置きかえられ、一步の前進をとげたにすぎず、捻回値の本質は依然として不明のままといわざるを得ない。従来捻回形式の変化が現われる事実が知られていなかった時期において、捻回値の異常現象の原因として、“線の残留応力説”、“線の繊維構造説”、それに伴う“線材の結晶方位説”、“Aging 説”、あるいは“線材の剛性値の変化説”などを提案した研究者があったが、いずれも説得力のある理論の形で一説を唱えたものではなく、極言すれば“思いつき”あるいは“連想”的な発言程度のものにすぎない。

捻回試験線材の破断面は、①軸線に直交する面 ②軸線を含む縦断面 ③ねじれたらせん面の3種がある。①は単独に現われるが、②と③は同時に組み合わせられて現われることが多い。この中で、捻回中のねじり加工に伴うせん断面は①と②とであり、均一等方性の線をねじる際の材料力学的考察からすれば①②のみしか現われなはずである。

ねじる前の線は繊維を束ばねたような組織であると仮定し、繊維相互のすべりは容易に起こると考えれば、ね

じるにしたがって③のらせん面ですべることが考えられる。線引した線材の結晶方向が揃うことはよく知られているところであって、繊維構造説が出てくる理由はここにある。

繊維が相互に離れてすべるとは実際問題として考えにくいから、線材では結晶方向がよく揃っているから、ねじる前の線の軸線に平行な結晶学的なすべり面があってすべるとすれば、らせん面の生じることが説明できる。また結晶にはすべり面は方向を異にするものが2面以上存在しうるから、ねじりが進行するにしたがい一つのすべり面から他のすべり面にすべりが移行して、このために捻回形式が変化することも想像できる。これが結晶方位説的な考え方である。

上記のように外力により加えられるせん断応力の最大になる面と、材料としてすべりやすい面との組み合わせ面として、ねじりの進行を考えると、応力場に影響をあたえて応力分布を変えるものとして残留応力が登場してくる。また線材の側で応力とひずみとの結びつきの数値的变化をあたえる原因として Aging などが考えられるのも当然である。

現在までに、捻回値の異常に影響しうる因子として挙げられた上記の諸説は、上記のように関係がある可能性の十分あるものではあるが、そのいずれも機構を説明し得る段階には達していない。今後の研究に期待しなければならぬのが現状である。(1967年1月11日受理)

参考資料

- 1) 鈴木弘・橋爪伸・伊藤保男、線材の捻回試験について、昭和34年10月、日本機械学会誌、Vol. 62, No. 489.
- 2) 岡本豊彦・福田実・吉本友吉・大野鉄、低炭素リムド鋼材の捻回試験、昭和38年6月、中研報 No. 327.
- 3) 鈴木弘・木内学、高炭素鋼材の捻回試験について、昭和41年9月、塑性と加工、Vol. 7, No. 68.

次号予告 (4月号)

研究解説

材料の表面と疲れ(3)	北川 英夫
高真空、超高真空における物理吸着の測定	辻 泰
液状パッキンとその作用機構	野崎 弘 古川 勉 佐々木 裕

研究速報

オゾン分析試薬としての塩化クロムの検討	菊池 真一 鈴木 伸 小柳 宏一
ボイラ・アキュムレータ制御系の動的解析	内田 恒夫