焼入応力におよぼす鋼種および硬化程度の影響*

磯 村 良 蔵** 佐 藤 初 吉**

Ryôzô Isomura and Hatsukichi Satô : Influence of Steel Grade and Degree of Hardening on Quenching Stresses. The quenching stresses of 18 mm ϕ commercial steel cylinders were measured by the Sachs' method utilizing electric spark machining. The influences of carbon content of steel and of the bulk of unhardened core upon these stresses were investigated. The results area summarized as follows: (1) The stress distribution of water-quenched, through-hardened steels were of thermal stress-transformational stress superposition type. The center compression declined continuously with decrease of the carbon content and the surface compression exhibited its maximum at medium carbon content. The tension peak in the intermediate zone, was located near the surface in high-carbon steel and shifted deep inward with decrease of the carbon content, which constitutes one of the reasons why a low-carbon steel is less susceptible to quenching crack than a high-carbon steel. (2) The stress distribution of oil-quenched, through-hardened high-carbon steel was of transformational stress type. But, when the steel has a small unhardened core, the longitudinal stress in this area was converted into an exceedingly great tension and that in the hardened area into a small compression; as the core increased in the bulk, the tension in the core again dropped abruptly, while the compression in the hardened area increased. Owing to these stress distribution, a through-hardened steel is more liable to suffer a quenching crack (longitudinal) than a core-hardened, but an inner-crack (transverse) would occur even in the latter, if the core is small. Meanwhile, between these two dangerous cases, there exists a remarkable hardened state, in which the quenching stresses are small as a whole and no cracking is caused.

(Received June 21, 1962)

I. 緒 言

焼入応力は鋼の熱処理にともなう各種の割れや変形、熱処理品の疲れ強さなどに関連を有し、したがって、この応力におよぼす鋼種や硬化程度の影響は基礎的なにも、実務的にも重要な問題であると考えられる。しかし、焼入硬化したものは残留応力の測定が困難なため、これまでに、実用鋼を対象としたこの種の研究⁽¹⁾⁽²⁾は極めて少ない。しかも、それら少数の研究も応力測定を簡略法で行なっているため、応力状態を詳細に把握しているとはいえない。

そこで、著者らはさきに報告した要領を用い、焼入した実用鋼円柱の3主応力をSachs法によつて実測し、焼入応力におよぼす鋼種(鋼の炭素量)、硬化程度(芯部の有無・大小)の影響を検討したので、以下にその結果を述べ、考察を行なうことにする。

II. 実 験 方 法

1. 鋼 種 の 影 響

中心まで完全に焼入硬化させるため、1%前後のクロムを含む低クロム鋼について実験を行なうことにし、炭素量を異にするJIS鋼種の中からSUJ 2(軸受鋼)、SKT 2(鍛造型鋼)、SCr 2(強靱鋼)、SCr 22(肌焼鋼)を選んで18 mm ϕ

×100 mmの円柱試験片を旋削により採取した。そして、試験片には焼入を施し、応力測定を行なつて鋼の炭素量の影響を検討した。焼入には水焼入を用い、真空炉で850°C×1/2 hr加熱後、常温水中に垂直に投入し、はげしく攪拌して全体が水温になるまで冷却した。Table 1は各試験片の化学組成を示す。

Table 1 Chemical composition of specimens.

Specimen	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)
SUJ 2	0.98	0.30	0.36	0.012	0.006	1.39
SKT 2	0.51	0.20	0.93	0.023	0.011	1.04
SCr 2	0.33	0.17	0.63	0.019	0.009	0.94
SCr 22	0.20	0.31	0.68	0.013	0.006	1.02

2. 硬 化 程 度 の 影 響

マルテンサイトとパーライトの比容積の差が大きく、したがって、硬化程度が焼入応力に大きく影響する高炭素鋼について実験を行なうことにし、炭素工具鋼・スエーデン鋼の中から炭素量が0.7%前後で硬化能を異にする(C, Mn, Siなどのわずかな差によるものと考えられる)3種類の鋼を選んで18 mm ϕ ×100 mmの円柱試験片を旋削により採取した。そして、試験片には焼入を施して種々の大きさの非硬化芯部を有するものを得、応力測定を行なつて芯部の影響を検討した。焼入には熱応力が小さく⁽⁴⁾、この影響が明瞭に現われると考えられる油焼入を採用することにし、真空炉で900°C×1/2 hr加熱後、50°Cの油中に垂直に投入し、はげしく攪拌して全体が油温になるまで冷却した。

Table 2は各試験片の化学組成を示すもので、D, M, Sの

** 鉄道技術研究所 (The Railway Technical Research Institute, Tokyo)

* 1961年10月 本会秋田大会に発表; 鋼の焼入応力に関する研究(第5報)

(1) J. E. Campbell, H. O. McIntire: Iron Age, **172** (1953), 20, 185.

(2) O. V. Greene: Trans. ASST, **18**(1930), 369.

(3) 磯村, 佐藤(初): 本誌, **25**(1961), 357.

(4) 磯村, 佐藤(初): 本誌, **25**(1961), 360.

順に硬化能が小さくなっている。なお、炭素鋼では油焼入で中心まで完全に硬化させることができないから、この状態

Table 2 Chemical composition of specimens.

Specimen	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
D	0.73	0.31	0.34	0.013	0.015
M	0.65	0.20	0.33	0.016	0.009
S	0.69	0.21	0.22	0.026	0.010

の応力を知るためには $850^{\circ}\text{C} \times 1/2 \text{ hr}$ 加熱後、同様に油焼入した SUJ 2 円柱についての測定結果⁽⁴⁾を参照した。

さて、上述した各実験における応力測定は放電加工を利用した Sachs 法⁽⁵⁾により行なつた。その要領はさきに⁽³⁾詳述したとおりであるが、ここでも、簡単にその概要に触れておこう。まず、焼入した試験片は表面を軽くペーパー研磨後、応力に変化を与えない範囲で両端部を等分に切断除去し、長さ 36 mm (直径の 2 倍) の応力測定片を採取した。この測定片には中心軸と同心的に順次直径の大きな穿孔を施し、そのつど、表面に生ずる長さ歪・切線歪を抵抗線歪計 (アラルダイト・ゲージを使用) で読取つて Sachs の式により長さ応力・切線応力・半径応力の分布を算出した。穿孔は主として放電加工によつたが、内壁の変質層にもとづく読取歪の誤差と割れの発生を避けるため、10~13 mm ϕ 以上では 10% 硝酸による腐食でこれを行ない、合計 17 回前後の繰返しで原断面積の約 93% を除去した。ここで計算に用いた焼入状態のヤング率・ポアソン比は Table 3 のとおりである。なお、応力測定片を採取するとき生じた端部切断片は、その切断面についてヴィッカース硬さ (20 kg) 分布の測定、硝酸によるマクロ腐食試験を行ない、硬化状態を調べるのに使用した。

III. 実験結果および考察

1. 鋼種の影響

Fig. 1 は各試験片における応力分布と硬さ分布の測定結果であつて、図中の Ms 点は組成よりの計算値⁽⁶⁾ (高炭素の SUJ 2 に対しては単なる目安を与える) である。この硬さ分布およびマクロ腐食の結果から、試験片はいずれも中心まで完全に硬化していることがわかる。

いま、長さ、切線両応力を見るに、その分布はいずれの

Table 3 Young's modulus and Poisson's ratio used in the calculation.

Specimen	E (kg/mm ²)	μ
SUJ 2	19400	0.22
SKT 2	20000	0.24
SCr 2	20200	0.25
SCr 22	20300	0.26
D	19800	0.24
M	〃	〃
S	〃	〃

Fig. 1 Residual stress and hardness distribution in 18 mm ϕ , water-quenched cylinders, made of chromium steel containing various carbon contents.

鋼も内部が変態応力⁽⁷⁾、表面部が熱応力⁽⁷⁾で支配された⁽⁸⁾

(7) 磯村：鉄と鋼，47(1961)，936.

(8) H. Bühler, E. Scheil: Arch. Eisenhütt., 7(1933/34), 359.

(5) G. Sachs: Z. Metallk., 19(1927), 9, 352.

(6) Metals Handbook: ASM, (1948), 611.

いわゆる熱応力・変態応力重畳型であり、表面は圧縮、中心もおおむね圧縮で中間には引張の極大が存在する。

Bühler ら⁽⁹⁾、菅野ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾は水焼入した Fe-Ni 合金円柱について 焼入応力を測定し、Ni % が減少して Ms 点が上昇すると変態応力が現われがたくなることを示しているが、実用鋼でもこの傾向は同様であつて、Fig. 1 において、炭素量が低下し、Ms 点が上昇すると変態応力は縮小し、熱応力が優勢となるのがわかる。ただ、実用鋼では Fe-Ni 合金と異なり、Ms 点の低い高炭素鋼でも単純な変態応力型の分布とならないことは留意すべきである。

さて、鋼の炭素量によつて焼入応力の形がこのように変化すれば、試験片各部の応力の大きさも当然これに沿つた変化を示すことになる。すなわち、Fig. 1 の中心応力は炭素量の低下とともにその圧縮を減じて小さな引張となり、高炭素鋼では長さ応力が切線応力より大きかつたのが、低炭素鋼では両者同程度の大きさとなる。また、表面応力はその圧縮を増加し、長さ応力の方が若干大きかつたのが、反転して切線応力の方が大きくなる。ただ、低炭素鋼は表面付近で降伏を起こし、応力を減ずるから、表面の圧縮が最大を示すのは実際には中炭素鋼である。一方、中間にある引張の極大は、変化が小さく明瞭ではないが、高炭素鋼から中炭素鋼になると若干高くなり、高炭素鋼では切線応力が長さ応力より高かつたのが、低炭素鋼では両者が同程度になるようである。しかし、このときも、低炭素鋼では表面応力との釣合上再び低くなるから、引張の極大が最高となるのはこれまた中炭素鋼のようである。

しかし、鋼種の影響が大きく、実際上注目を要するのはやはり引張の極大の位置であつて、これは Fig. 1 に見られるように、鋼の炭素量の低下により、表面の近傍から内部へ向つてかなり大きく移動する。そして、このため高炭素鋼では表面付近に引張が現われるが、低炭素鋼ではこの付近がたんに圧縮となる。焼割は一般に表面付近⁽⁴⁾⁽¹²⁾の引張に基因すると考えられるから、高炭素鋼に焼割が起こりやすく、低炭素鋼に起こりがたい理由の一つは、ここにあると思われる。

2. 硬化程度の影響

Fig. 2 は各試験片における応力分布と硬さ分布の測定結

果であつて、縦線を施した部分はマクロ腐食による非硬化芯部の範囲を示す。ただし、T は参考として掲げた SUJ 2 についての測定結果⁽⁴⁾である。T は全断面にわたつて Hv 860 前後の硬さを示し、マクロ腐食でも芯部が認められなかつたが、D, M, S では表面付近の Hv 880, 780, 630 の硬さが中心付近ではいずれも Hv 350 前後に減少し、また、それぞれ 7.6 mmφ, 12.6 mmφ, 1.54 mmφ の大きさの芯部を示した。

さて、T は長さ・切線両応力とも大きさは比較的小さいが、分布の形は変態応力型となり、中心の圧縮は長さ応力

Fig. 2 Residual stress and hardness distribution in 18 mm φ, high carbon steel cylinders, oil-quenched to various degrees of hardening.

が大きく、表面の引張は切線応力が大きい。試験片に用いた炭素鋼が中心まで硬化し得たとすれば、そのときにも、熱応力が若干強化されるほかはこれと同様な分布をとるものと考えられる。これに対し、芯部を有する D, M, S では応力の大きさも概して大きく、分布の形も芯部は引張、硬化部は圧縮となり、しかも、引張・圧縮とも長さ応力が切線応力より大きくなつてゐる。

中心まで硬化した場合に対比して、芯部のある場合を概括して述べるとこのようになるが、芯部・硬化部の応力はまた硬化程度によつて大きく変化する。まず、芯部の小さい D ではその長さ応力において、芯部は極めて大きな引張と

(9) H. Bühler, E. Scheil: Arch. Eisenhütt., **6** (1932/33), 7, 283.

(10) 菅野, 阪本: 鉄と鋼, **36** (1950), 61.

(11) 菅野, 阪本: 鉄と鋼, **36** (1950), 548.

(12) H. Scott: Sci. Pap. Bur. Stand., **20** (1925), 399.

なり、硬化部は圧縮側に浅く沈んだ形となつている。切線応力でも分布の形は同様であるが、ただ、大きさが著しく小さくなつている。これより芯部の大きいMになると、切線応力では芯部の引張、硬化部の圧縮ともに増大するが、長さ応力では硬化部の圧縮の増大に対して芯部の引張は再び大きく減少し、長さ・切線両応力の大きさの差は小さくなる。さらに、芯部の一層大きいSになると、長さ・切線両応力とも、硬化部の圧縮は若干増加し、芯部の引張は減少し、長さ・切線両応力の大きさも同程度になる。

さきに⁽³⁾⁽⁴⁾、中心部に少量のパーライトが散在するときは、周囲との比容差のため、その付近の圧縮が局部的に減少することを指摘したが、以上に述べた結果から、このような中心部の応力はパーライト量の増加につれて急速に引張に転じ、小さな芯部が現われて比容差が最大になると芯部の引張もまた最大となり、以後、芯部の増大にともなつて、引張・圧縮の釣合関係の変化と硬化部にパーライトを混ざるための比容差の減少から、この引張は再び減少するものと考えられる。そして、硬化部の応力はこれとの釣合上、まず、引張から圧縮に転じ、さらにその圧縮を増加するものと思われる。

芯部の応力と硬化部の応力の平均的な大きさは硬化程度によつてこのように変化するが、芯部の大きいときは各部の応力も決して均一ではない。まず、芯部ではSにパーライト変態によると思われる変態応力型の分布が現われて周辺で高い引張を示し、またM、Sの境界近傍には応力急減の反動と見られる小さな隆起が認められる。そして、Sの切線応力では両者が合一して相当な高さの引張の極大を形成している。一方、硬化部では、M、Sの切線応力に変態応力型の分布が認められるが、これは薄肉の中空円柱にこの分布が現われやすい⁽¹³⁾のと同種の現象であるように思われる。

つぎに、以上の結果にもとづいて、高炭素鋼の焼割と硬化状態の関係を考察してみよう。さて、焼割は中心まで完全に硬化するとき起こりやすく、芯部が出るときは起こりがたいといわれている⁽¹⁴⁾。これは、焼割が一般に表面付近⁽⁴⁾⁽¹²⁾の引張に基因するもので、中心まで硬化したときはこの付近に引張が現われるが(Fig. 1-A, Fig. 2-T)、芯部のあるときはこの付近が圧縮になるからであると考えられる。そして、中心まで硬化したときの表面付近の引張は切線応力の方が長さ応力より大きいから、このときの焼割は縦割となる。しかし、芯部が出るときにも危険な場合があり、芯部が小さいときは、そこに作用する大きな引張の長さ応力(Fig. 2-D)で内部から横割を起こすことが考えられる。そして実際に、Bühlerら⁽¹⁵⁾は、炭素工具鋼円柱(22.6 mmφ, 水焼入)について、この応力によると思われる内部の横割を観察している。

しかし、焼割との関連において注目すべきは、むしろ、中心まで完全に硬化した場合と芯部のある場合との間の過

渡的な硬化状態である。前にも述べたように、このときの応力分布は完全に硬化したときの中心部の圧縮を、比容の小さいパーライトを分布させて、引張側に引上げ、それによつて、表面部の引張を逆に押下げたものであるから、中心部のパーライト量が適当で両引張が調和したときには、焼入応力は全体的に小さくなり、焼割の危険もなくなる筈である。Malinkina⁽¹⁶⁾は炭素工具鋼角柱(20 mm□, 一端に孔あり)について焼割試験(水焼入)を行ない、焼入温度が低くて中心部の硬化が不十分なときと、焼入温度が高くて中心まで完全に硬化したときに、それぞれ弓形割(横割と同種のものと思われる)と縦割を生じ、焼入温度が中間の820°~860°Cで中心部の硬度がH_{RC} 45~55のときに焼割を生じなかつたことを報告しているが、この割れない状態がすなわち上述の状態であつたと解される。しかし、この状態は、焼入温度に限らず、焼入液や鋼種などの選択によつても達成できることは勿論であつて、このような、実用上十分に硬化し、しかも、焼割のない、焼入応力の小さい状態が、マルクエンチなどの特別な焼入法を用いずに得られることは妙味のあることと思われる。

IV. 総 括

各種実用鋼の18 mmφ円柱につき、その焼入応力を放電加工法を利用したSachs法で測定して、焼入応力におよぼす鋼の炭素量、非硬化芯部の有無・大小の影響を検討した。

結果を要約すると、つぎのとおりである。

(1) 水焼入により中心まで完全に硬化したときの焼入応力は熱応力・変態応力重畳型である。そして、鋼の炭素量の低下とともに、変態応力は縮小し、熱応力は優勢となり、したがつて、中心の圧縮は減少し、表面の圧縮は増加する。ただ、低炭素鋼は表面部で降伏を起こすから、表面の圧縮は実際には中炭素鋼で最大となる。しかし、炭素量の影響の著しいのはやはり中間にある引張の極大の位置であつて、高炭素鋼では表面近傍にあり、炭素量の低下と共に大きく内部へ移動する。焼割が高炭素鋼で起こりやすく、低炭素鋼で起こりがたい理由の一つはここにあると考えられる。

(2) 油焼入により高炭素鋼を中心まで完全に硬化させたときの焼入応力は変態応力型であるが、小さな芯部が現われると、その部分の長さ応力は反転して著しく大きな引張となり、また、硬化部も転じて圧縮となる。そして、芯部が大きくなると、その部分の引張は再び急減するが、硬化部の圧縮はそのまま増加する。切線応力もややおくて同様な変化を示すが、その大きさは概して小さい。高炭素鋼が中心まで完全に硬化したときは、表面付近に引張が現われるから焼割(縦割)を生じやすいが、芯部のある場合でも、それが小さいときは、その部分の大きな引張のため内部から焼割(横割)を起こすことがある。しかし、一方、この両者の間には、実用上十分に硬化していながら、焼入応力が総じて小さく、焼割の危険のない注目すべき硬化状態が存在する。

(13) H. Bühler, E. Scheil: Arch. Eisenhütt., **8**(1934/35), 219.

(14) Metals Handbook: ASM, (1961), 316.

(15) H. Bühler, E. Herrmann: VDI, **103**(1961), 10, 436.

(16) E. I. Malinkina: Metal Treat., **12**(1961), 2, 12.