技 術 論 文

白 鑄 鉄 の 圧 縮 試 験**

福 元 一 郎*

Ichiro Fukumoto: Compression Tests for Various White Irons (Studies on Alloy White Cast Iron (7th Report)). Compression tests were performed on as-cast and heat-treated specimens of the alloys Nos. 1~12 in report No.6. The summarized results were as follows: (1) As the hardness of primary crystal increased, the yielding stress increased from 30 to 140 kg/mm², but was not affected so much by C % of alloys. (2) At about constant strain of 1 %, the compressive stress increased almost in proportion to the hardness of the specimens, but at 0.3% strain the compressive stress varied markedly for the specimens having the same hardness. The factors causing this variation seemed to be the S, C contents, the melting and the casting conditions and the heat-treatment of the alloys. (3) The specimens having hardness of above 60 H_{RC} fractured vertically or were crushed to pieces, at about 1 % strain and the stress of about 320 kg/mm². On the other hand, the specimens below about 55 H_{RC} fractured on the plane about 45° to the compressed axes, at the stress of 160~280 kg/mm² and about 3~30% strain.

(Received November 14, 1958)

I. 緒 言

前報⁽¹⁾に白鑄鉄の抗折試験結果などについて報告したが、白鑄鉄は主としてロールなど圧縮力の作用する部品に使用されるので、本報では共晶セメント量を変化し、また熱処理により初晶の組織を変化したパーライト白鑄鉄および NiCr 合金白鑄鉄について、圧縮試験を行い歪-歪力曲線、抗圧力などを求めた結果について報告する。

II. 試料および実験方法

前報⁽¹⁾において抗折試験を行った合金 No.1~12 の径 10 mm, 長さ 150 mm 油砂型鑄造試料より径 8 mm, 長さ 10 mm の試片を切削し、両端面間を 10 mm ± 1.5/1000 mm の公差内に研磨仕上した。圧縮はアムスラー万能試験機により、歪-歪力曲線は一定応力で荷重を除去し、1/100 ダイヤルゲージおよびマイクロメーターで高さの永久歪量を測定し、さらに高い応力を与えてこれを繰返した。また別に実物ロールのチル部より採取した一辺 10 mm の立方体試片をも用いた

試料の熱処理は前報⁽¹⁾の抗折試験の際と全く同様に行った。

III. 実験結果

1. 歪-歪力曲線

Fig.1~3 に各々合金 Nos.1~5, 合金 Nos.7~10 および合金 No.12 の低圧縮応力の際の永久歪-歪力曲線を示す。破断せしめるにはさらに大きな荷重を必要とする。

* 日立製作所中央研究所

** 1958 年 10 月本会名古屋大会に一部発表；合金白鑄鉄の研究 (第 7 報)

(1) 福元：本誌，23(1959), 259.

Fig.1 よりパーライト白鑄鉄合金 Nos.1~5 の降伏点は約 50~70 kg/mm², これを 900° に焼鈍して粗粒状パーライトとすると降伏点は 30~40 kg/mm² に低下する。ともに合金の C % による差は認められないが、ただ C 2% の合金 No.1 のみは 20 kg/mm² で降伏点が低い。かくの如く初晶の組織が変化すると降伏点が変わるのであるが、Fig.1 に併記した C 3% の Ni-Cr 合金 No.8

Fig.1 Stress-strain curves for alloys Nos.1~5.

H_{RC} 60 以上)の降伏点は初晶が高硬度のため高く 80~100 kg/mm² となっている。また降伏以後の塑性変形については、合金の C % が増すと変形し難くなっている。

Fig.2, 3 より C 3% の Ni-Cr 合金白鑄鉄の各種熱処理試料は、高硬度ほど変形し難いという当然の結果に見えるが、詳細に見ると例えば Fig.3 の鑄造のままで H_{RC} 57 の試料(図中実線で示す)と、900° より空気焼後 600° で焼戻して H_{RC} 50 の試料(図中点線で示す)とでは前者

の方が高硬度に拘らず、永久歪 0.9 % までは同一応力でむしろ変形し易い結果となつている。また Fig.2 の合金

% 歪の際の方が熱処理別による変形量の差が著しく、1 % 歪では前述した如く変動が小となり、硬度-応力の測定点

Fig.2 Stress-strain curves for alloys Nos.7~10 (Figures beside the curves mean HRC values).

Fig.3 Stress-strain curves for alloy No.12.

が大きい1%歪では小さい。変動の要因として第一に合金群別により変動が大きく、Ni-Cr 合金白鑄鉄 Nos.7~10 と No.12(図中鑄造のまま、熱処理試料を一括して×印で示してある)では合金 No.12 が変形し易い。第二に同一合金群 Nos.7~10 においても、鑄造のままの試料は変形し易く、熱処理試料は変形し難く、とくに 900° 焼鈍後空気焼入して 200~600° に焼戻した試料(図中□にて示す)は低硬度のわりに変形し難く、かつ 1% 歪に比して 0.3

Fig.4 Relation between hardness & compressive stress for alloys Nos.1~12.

Nos.7~10 と Fig.3 の合金 No.12 を比較すると後者の方が変形し易い。これらについては後述する。

Fig.4 に Fig.1~3 の曲線および曲線に併記した硬度値より、一定歪の際の圧縮応力とその試料の硬度値との関係求めて示した。これより次のことが明らかである。

0.3% 歪では測定点の変動

は比較的良好に一曲線上に乗るようになる。しかし、合金 Nos.7~10 の鑄造試料(図中●にて示す)および合金 No.12 (図中×にて示す)は 1% 歪においても他の測定点に未だ一致しない。なお熱処理による変形量の差は Fig.2, 3

Fig.5 Stress-strain curves from yielding to fracture. (Each sign ●, ○, □, ⊙, △ & × on the curves means a few hair cracks in eutectic cementite, slip in primary crystal, slip at boundary, slip in several colonies, cracks || el to compressive force in the eutectic cementite & fracture).

2. 圧縮破断に到るまでの変形過程

Fig.5 に破断に到るまでの歪-歪力曲線の例として、C 3% の白鑄鉄および合金白鑄鉄 (No.8) の各種熱処理試料の曲線を示す。破断に到る途次の変形については詳細

12 の 900° に 7~21hr 保持後空気焼入し 250~600° に焼戻した試片は図中点線で示す如く、他の熱処理試料に比して硬度が低いわりに変形し難く、とくに応力の小なる間は変形し難いが、一定応力になると急激に変形し始める傾向を示す。以上により、応力-硬度の測定点の変動の要因に、合金群の別および熱処理の差があげられる。

は後報するが、0.2~0.5% 永久歪で試片側面の初晶と共晶セメンタイトの間で迂りを生じ(図中に○で示す、初晶が境界に沿って彎曲する)、次にこれが一共晶コロニー全体に波及し、板面が圧縮方向に45°に近い板状共晶セメンタイト晶を有する共晶コロニーから順次迂りを生じ、続いて共晶コロニー単位の大きなしわを生じ(図中●で示す)、さらに2~3% 永久歪で板状共晶セメンタイト中に圧縮方向に略々平行な“たてわれ”(板状晶を横断するわれで、正確には平行といえないが)を生じ(図中△で示す)、さらに荷重を増すとこの“たてわれ”の数および巾が大となり後破断に到る。しかして迂り変形を行う過程においても、白鑄鉄の共晶セメンタイトはその基地をなすので、共晶セメンタイトの迂り変形以外に、共晶セメンタイト晶内および共晶セメンタイト晶々間の境界において迂りによる小亀裂を僅少なから生じている(図中●にて示す)。

H_{RC} 約 60 以上の高硬度 Ni-Cr 白鑄鉄は約 1% の永久歪で、Photo.1 左の如く縦割れしまたは粉碎する。H_{RC} 約 55 以下の Ni-Cr 白鑄鉄およびパーライト白鑄鉄は相当変形した後、Photo.1 右の如く圧縮方向に約 45°の面で破断する。なお両種の破断面の混合した形もある。破断面の状況は Photo.2 に示す如く、縦割面は粗く(左)、45°破断面は絹布状でなめらかである(右)。45°破断面近傍では前報⁽²⁾ Photos.5~8 に示した如き著しい flow 組織が見られる。

Photo.1 Fractured specimens (left: H_{RC} 60, right: H_{RC} 50, ×1.5).

Photo.2 Fractured surfaces. (left: fractured || el to compressive direction, right: slipped 45° to compressive direction, ×1.5).

3. 抗 圧 力 お よ び 全 歪 量

Fig.6 にパーライト白鑄鉄 Nos.1~5 の C% と抗圧力、全永久歪量と C% の関係を示し、また Ni-Cr 合金白鑄鉄のそれらの一例を併記した。C 2% 合金 No.1 を

除いて、C% が増すと僅かではあるが抗圧力が高くなり、歪% は減少している。鑄造のまま 900° と焼鈍試料を比

Fig.6 Compressive strength & reduction of height for alloys Nos.1~5.

金白鑄鉄は H_{RC} 60 以上では抗圧力約 320 kg/mm²、永久歪約 1% で極めて変形難いが、鑄造のままで残留オーステナイトの多いものや、焼戻軟化した低硬度試片は略々硬度に比例して抗圧力が低下し、一方永久歪が増加する。また合金 Nos.7~10 に比較して合金 Nos.11,12 は抗圧力 230~280 kg/mm² と低く歪量も少く、抗折試験と同様な傾向を示した。これは合金の S%, 溶解鑄造条件などによる。なお高硬度試片の圧壊試験は支持台を損傷するので数多くは試験出来なかつた。

4. チル試片の歪-歪力曲線

前報⁽³⁾に述べた如くチラー近傍のチル組織においては、共晶セメンタイトが板状(切断面では棒状)に略々チラー面に直角に成長しており、また白鑄鉄は海綿状の骨格をなす共晶セメンタイトより成つているので、セメンタイト晶の結晶方向により変形状況が異ると推定される。

実物合金チルドロールよりチラー面を一面とする一辺 10 mm の立方体を採用、上仕上げして

圧縮の際の歪-歪力曲線を求めた。Fig.7 より圧縮方向による変形量の差が明らかである。圧縮力を増加して行く

Fig.7 Stress-strain curves for chilled specimens.

(2) 福元：本誌，23(1959)，255。

(3) 福元：本誌，22(1958)，292。

過程の試料側面の変形状況を観察すると、約 0.05% 永久歪で共晶セメンタイト中にチラー面に略々平行に（棒状セメンタイトを横断して）hair crack が現われ始め、0.2% 歪ではこれが著しく増加している。チラー面に加圧する場合の方が変形し難いことから、棒状セメンタイトを縦に圧縮した場合の方がセメンタイトは変形し難いものと考えられる。

IV. 考 察

第一に降伏点について：白鑄鉄の弾性延伸量は 0.1~0.2% である⁽⁵⁾ので、本実験の歪力-永久歪曲線の歪 0% の応力を降伏応力として実用的にはよい。降伏が初晶または共晶セメンタイトに始まるか、または境界の迂りに始まるかは、白鑄鉄の弾性限内のミクロ的な応力分布、セメンタイト晶の降伏点などが不明のため推定し難いが、同一 C% の白鑄鉄にて初晶が粗粒状パーライト、層状パーライト、マルテンサイトと高硬度になると概して降伏点が上昇し、一方鋼の縦弾性係数は焼鈍鋼と焼入鋼で大差なく⁽⁶⁾の、白鑄鉄の初晶の組織が変化しても弾性限内のミクロ的な応力分布は大差ないと考えられるので、白鑄鉄の降伏点を変化せしめる要因は主として初晶の降伏応力の差と推定される（C 約 2% の粗粒状パーライト、層状パーライトの降伏点は Fig.1 より各々約 20 および 70 kg/mm²）。しかし降伏点は必ずしも硬度に比例しない。すなわち 1% 歪では圧縮応力は略々硬度に比例して高いが、0.3% 歪では変動が大きく、高硬度試片の圧縮応力が必ずしも高くはなく、従つて降伏点も硬度に比例しない。例えば Ni-Cr 白鑄鉄の as cast 試片で、初晶に残留オーステナイトの多いものは高硬度に拘らず降伏点が低い。これはセメンタイトの熱膨脹係数（ α -鉄のそれは $12 \sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ で、鋼で C% が増加するとこれより低下することから、セメンタイトの熱膨脹係数は α -鉄のそれより低い）はオーステナイトの熱膨脹係数より著しく低いので、鑄造時の冷却過程で共晶セメンタイトおよび初晶中に大きな残留応力を生じたためである。一方 Ni-Cr 白鑄鉄を 900° 焼鈍焼入後焼戻すると低硬度となるが、硬度のわりに降伏点が高い。これは上述の残留応力が消失したことと、900° 焼鈍中共晶セメンタイトが丸味を帯びて切欠効果が減少したことによる。

第二に降伏後の変形状況は前述の如く、初晶の迂りが主体をなすが、この迂りに伴つて主として共晶セメンタイト中に「亀裂」を生じる（永久歪 0.05~0.5% で hair crack 2~3% で圧縮方向に略々平行な亀裂—たてわれ—を生ず）のであるが、H_{RC} 約 55 以下の場合は抗折の際と異なつてこの亀裂が直ちに破断に進行せず初晶の塑性変形により著しく変形し（歪約 20% に達す）、圧縮方向に約 45° の面で迂り破断し、かつ圧縮破断応力は引張破断応力の約 8 倍

である⁽⁸⁾（抗圧力は前述の如く 220~320 kg/mm²、また白鑄鉄、Ni-Cr 白鑄鉄の抗張力は 20~46 kg/mm² である⁽⁵⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾）。

一方 H_{RC} 約 60 以上の白鑄鉄（初晶がマルテンサイトなどで硬い場合）では、前述した共晶セメンタイト中の“たてわれ”が進展して約 1~2% 歪で縦割れ破断に到るか、または粉碎する。従つて縦割れか 45° 破断かは主として初晶の塑性変形能に依存する（パーライト白鑄鉄でも高 C% のものは時に縦割れする場合もある）。

しかし抗折の際と異なつて、初晶が前述の如く著しく塑性変形すると同時に共晶セメンタイトも塑性変形し、硬度圧痕近傍に見られた迂り線（前報⁽²⁾参照）が圧縮試片側面の共晶セメンタイト中にも認められる。さらに 45° 迂り破断面近傍においては、共晶セメンタイトが粉碎され初晶が flow してこれを包んだ特異な組織を認める⁽²⁾。

第三に硬度について：1% 永久歪における硬度-圧縮応力の関係が 0.3% 歪におけるそれに比して比較的良く一直線上にのることから考えて、硬度をもつて白鑄鉄の塑性変形能の目安とすることは一応妥当と考えられ、前報⁽¹⁾の抗折試験の結果と併せて、硬度が上昇すると抗折力、撓みが減少し、一方一定歪における圧縮応力が（従つてまた圧縮破壊応力も略々）増加する。しかしながら抗折力が熱処理、合金群別により変動したと同様に圧縮応力も変動し、例えば合金 Nos.11, 12 は Nos.7~10 に比較して硬度が等しくとも抗圧力および全歪 % が低いことから考えて硬度のみでは靱性は判定出来ない。なお圧延時ロールに作用する圧縮応力は、冷間、熱間、圧下率などにより異なるが 100 kg/mm² を超える場合もあるので、上述の白鑄鉄の降伏点から考えて severe な使用条件といえる。

V. 総 括

C 2~4% の白鑄鉄および C 3% の Ni-Cr 合金白鑄鉄の油砂型鑄造および熱処理試料（10φ）についての圧縮試験結果を括めると、

(1) 初晶が高硬度ほど概して降伏点が高く、30~140 kg/mm² と変化するが、Ni-Cr 合金白鑄鉄を 900° で焼鈍、空気焼入後焼戻した試片は硬度の低い割に降伏点が高く、合金白鑄鉄鑄造試料で残留オーステナイトが多いものは高硬度の割に降伏点が低い。また C% と降伏点の間には明らかな関係はない。

(2) 1% の圧縮永久歪では硬度が高くなる（C% がますます、初晶の硬度がますます）と略々圧縮応力が高くなるが、0.3% 永久歪では硬度が同一でも圧縮応力の変動が大きくこれは(1)に述べた熱処理の差、および合金群の別による。

(3) 試片側面の圧縮変形過程は、まず共晶セメンタイトと初晶の間の迂りに始まり、一共晶コロニー全体に波及し

(5) R.A.Flinn & H.J.Chapin: Trans. AFA, **54** (1946), 141.

(6) V.W.Köster: Arch. Eisenhütt., **14**(1941~2), 211.

(7) 機械工学便覧

(8) E.Orowan: Reports on Progress in Physics, **12**(1948~9), 185.

(9) 谷口：製鉄研究所報告, **10**(1930), 22.

(10) W.J.Williams: Metallurgia, **52**(1955), 129.

漸時他のコロニーにも迂りを生じ、次に共晶セメンタイト中に圧縮方向に略々平行の亀裂を生じ、後破断に到る。なお前半の迂り過程においても共晶セメンタイト中に hair crack を認める。

(4) H_{RC} 約 60 以上の試料は約 1 % の永久歪で縦割れ破断し、または粉碎し、抗圧力は約 320kg/mm^2 であり、 H_{RC} 約 55 以下の試料は大略硬度に逆比例して 3~25 % 歪で、圧縮力に約 45° の面で破断し、抗圧力は約 $160\sim 280$

kg/mm^2 である。チルドロールより採取した Ni-Cr 白鑄鉄の立方体試片についての結果は、チル試片は共晶セメンタイト晶に方向性があるため、チラー面を加圧した場合がこれに直角の面を加圧した場合より変形し難く、鑄造のままの試片の降伏点は約 100kg/mm^2 である。

終りに臨み、御指導を賜った村上武次郎先生、本研究所長菊田博士に厚く感謝申し上げる。