特別講演

主 催 東北工業教育協会第35回年次大会
と き 昭和62年10月26日
ところ 岩手大学工学部

薄肉強靱鑄鉄の開発研究と地場産業への応用

The Development of High Strength Cast Iron with Thin Section and its Application to Local Industries in Iwate

堀 江 皓^{*}
Hiroshi HORIE

1. はじめに

固体金属を液体状態にし、鑄型に注入することによって金属に所要の形状を与える鑄造技術は、B・C 3500年頃から歴史に登場してきており、鍛造に次いで古い加工法である。鑄造法によって造られた金属は“鑄物”と呼ばれ、鑄鉄鑄物、銅合金鑄物、軽合金（アルミニウム、マグネシウム）鑄物に大別されている。日本の鑄物の生産量（昭和57年）は652万t/年であるが、この中の約80%を鑄鉄鑄物が占めている。

したがって、鑄物という名称はこの鑄鉄鑄物で代表される場合が多く、“重くて脆い”金属材料の代名詞として用いられてきた。今回、軽くて強い鑄鉄、いわゆる薄肉強靱鑄鉄が開発され、鑄物もやっと軽量化時代を迎えたといえよう。

ここでは最初に鑄鉄の一般的な特徴について述べ、次に今回開発された薄肉強靱鑄鉄の開発過程と地場産業への応用経過について記述する。

2. 鑄鉄の種類、特徴及び動向

2.1 鑄鉄とは

鑄鉄は鋼と同様に鉄（Fe）と炭素（C）の合金であり、C含有量が2%以下を鋼、2%以上を鑄鉄として分類されている。

C含有量が2%を超える鑄鉄では、一般にCは凝固に際して黒鉛としてFe中に現れてくる。しかし、鑄鉄を速く凝固させると、Cは黒鉛としてではなく、Feとセメント（Fe₃C）と呼ばれる化合物を形成してFe中に現れるようになる。このセメントはきわめて硬く、脆いので、わずかなセメントが鑄鉄に現れても、その鑄鉄は著しく脆弱となる。このセメントが鑄鉄中に現れることをチル化、あるいはセメント化と呼ばれており、鑄物の冷却速度を増加するほど、すなわち薄肉になるほど鑄物はチル化しやすいという特性を有している。

次に完全にチル化した鑄鉄に荷重をかけて破断させると、破壊はこのセメントを通して進み、その断面は白色となるので、このように完全にチル化した鑄鉄は白鑄鉄と呼ばれる。これに対して、Cが黒鉛として現れた鑄鉄では、破壊は黒鉛を通して進み、その断面はねずみ色となるので、このような鑄鉄はねずみ鑄鉄と呼ばれている。

白鑄鉄は非常に硬いため、耐摩耗性を必要とする圧延用ロール等に使用されているが、その用途はきわめて少なく、大部分の鑄鉄鑄物は黒鉛の現れたねずみ鑄鉄として使用されている。そして、特別の場合を除き、鑄鉄とはこのねずみ鑄鉄を意味している。

2.2 鑄鉄の種類と特徴

さて、鑄鉄中の黒鉛は正六方形の炭素原子環からなる蜂巢状の網平面を平行に積み重ねた層格子であり、¹⁾ その引張強さは約1 kgf/mm²程度であって、Feに比べて破壊に対する抵抗がきわめて小さい。

^{*} 岩手大学工学部金属工学科助教授
Iwate University

そこで、鑄鉄中の黒鉛は、それ自体内部切欠き（亀裂、空洞）と見なされ、鑄鉄は種々の形状の内部切欠きを有した材料であり、内部切欠きの形、すなわち黒鉛の形状が鑄鉄の強度を支配している。したがって、鑄鉄は黒鉛の形状によって片状黒鉛鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄に分類されている。

片状黒鉛鑄鉄はわが国では318万t/年（昭和57年）生産され、自動車部品、産業機械に用途をもっている。そして、この鑄鉄は安価で、非常に振動吸収能に優れているが、黒鉛が片状であるため引張強さ（10～35 kgf/mm²）が小さく、3mm程度の薄肉にすると機械鑄物として使用できない。

これに対して、球状黒鉛鑄鉄は166万t/年（昭和57年）生産され、鑄鉄管、自動車部品等に用途をもっている。この鑄鉄は片状黒鉛鑄鉄に比べて引張強さ（37～80 kgf/mm²）が大きく、靱性にも優れ、現在では引張強さ140 kgf/mm²、伸び10%程度の機械的性質を有する鑄鉄も生産されている。しかし、この鑄鉄は強度が高い反面、きわめてチル化しやすいという大きな欠点を有しており、このチル化のために従来3mm程度の肉厚を有する球状黒鉛鑄鉄の製造は困難とされていた。

また、球状黒鉛鑄鉄を製造する場合には、鑄鉄溶湯（溶融鑄鉄）に対して黒鉛を球状化させるため、マグネシウム（Mg）を添加する必要がある。しかし、わが国の鑄鉄溶解炉の約90%を占めるキューポラで球状黒鉛鑄鉄を造る場合には、燃料として用いるコークスから硫黄（S）が鑄鉄溶湯中に混入し、このSが球状化剤のMgと反応してMgの効果が失われるため、黒鉛の球状化が妨害されるという現象が起こる。

このため、キューポラで球状黒鉛鑄鉄を製造する場合には、あらかじめ鑄鉄溶湯中よりSを除去する脱硫処理が必要であり、このことがキューポラで球状黒鉛鑄鉄を製造する場合の困難の一因となっている。

2.3 鑄鉄の生産量、用途及び動向

鑄鉄の昭和57年の生産量は片状黒鉛鑄鉄318万t、球状黒鉛鑄鉄75万t（鑄鉄管91万tは別統計のため除外）で、合計393万t（鑄鉄管を加えると484万t）生産されているが、全生産量の47%が自動車用に、次いで19%が産業機械器具用として使用されている。これ以外にも鋳型定盤用、金属加工機械用、土木建設機械用、電気通信機器用、産業車両鉄道用など非常に多くの用途をもっている。

特に、自動車では、シリンダーブロック、クランクシャフトなどエンジン、足回り部品として、小型車では車体重量の約15%、大型車では約17%が鑄鉄で占められている。

したがって、オイルショック以後強力に推進されている軽量化対策に伴って、鑄鉄材料の軽量化も非常に重要な課題となってきた。

3. 薄肉強靱鑄鉄の開発研究

3.1 開発の経緯

オイルショックに端を発した省資源、省エネルギーの思想は自動車をはじめ、各種の構造体の重量を軽くすることで具体化されつつあり、鑄鉄材料の分野でも薄肉で強い鑄鉄の開発が望まれていた。特に自動車工業では燃費の向上が大きな課題となっており、そのためにはサイズ・ダウン、FF化（フロントエンジン・フロントドライブ）及び部品の軽量化が強力に推進され、車体重量の約15%を占める鑄鉄材料部品の軽量化も重要な課題の1つであった²⁾。

しかし、鑄鉄は前述したように、軽量化（薄肉化）するほどチル化して脆くなりやすく、このことが鑄鉄を軽量化する上での最大の障害となっていた。

このような観点から、昭和56年から軽量でさらに靱性の大きい鑄鉄の開発研究に取組み、従来10mm程度までが限界であった鑄鉄材料を3mm以下の肉厚とし、40 kgf/mm²以上の引張強さを有し、かつ絶対にチルによる脆弱化が起こらないことを開発目標においた。

3.2 薄肉球状黒鉛鑄鉄におけるチル臨界粒数

C及びチル防止に効果のあるケイ素（Si）含有量の異なる非常に多くの球状黒鉛鑄鉄を研究用の小型高周波電気炉（12kW）で溶製し、3、6、9mm肉厚の階段状の試験片を多数作成した。

各肉厚の試験片の顕微鏡組織を観察して黒鉛粒数を測定し、チル化と黒鉛粒数との関係を詳細に調べてみると、図1に示すように非常に興味ある結果が得られた。すなわち、各肉厚の試験片にはチル化しないための臨界の黒鉛粒数（チル臨界粒数）が存在し、そして、このチル臨界粒数は図1に示すように試験片の冷却速度の二次式で表されることが判明した。

このことは、試験片の肉厚が9mmの場合（冷却速度9℃/S）には、黒鉛粒数を約200個/mm²以上に、また6mmの場合（冷却速度14℃/S）には、約400

図1 各肉厚の試料の冷却速度とチル臨界粒数との関係

個/mm²以上に、さらに薄肉3mmの場合(冷却速度21℃/S)には約650個/mm²以上に増加させると、もはやチルによる脆弱化は起こらないことを示している。

3.3 黒鉛粒数に及ぼす希土類元素の効果

薄肉球状黒鉛鑄鉄のチル化を防止するには、チル臨界粒数以上に黒鉛粒子を増加することがきわめて有効であることが判明したので、次の研究段階では

図2 RE, Ca 添加量による黒鉛粒数の変化

RE, Ca 無添加

RE 0.05%, Ca 0.05% 添加

写真1 薄肉球状黒鉛鑄鉄の顕微鏡組織(3mm肉厚)

黒鉛粒数の増加、すなわち黒鉛の核生成に効果があると思われる多数の希土類元素、アルカリ土類元素について、試行錯誤の実験を行った。その結果、図2に示すように極微量の希土類元素RE(La, Ce, Nd, Pr, Sm)の添加が著しく黒鉛粒数を増加し、さらにカルシウム(Ca)の併用添加でその効果が助長されることが確認された(写真1)。

また、RE, Caの添加によって黒鉛粒数が著しく増加した試料をX線マイクロアナライザで分析した結果、黒鉛の中心部より希土類元素の硫化物(RES)及びカルシウムの硫化物(CaS)が検出された。

これらの結果、RE, Caを添加した鑄鉄では黒鉛粒数が増加するのは鑄鉄溶湯中に微量に存在するSとRE, Caが反応して、溶湯中にこれら元素の硫化物の微粒子(1μm以下)が多数形成され、これらを下地(Substrate)として、鑄鉄が凝固する時にこの微粒子上に黒鉛が晶出³⁾するので、黒鉛粒数が著しく増加することが判明した。

3.4 黒鉛粒数に及ぼす硫黄の影響

RESの生成が黒鉛粒数の増加に有効に作用する

図3 S及びRE添加による黒鉛組織の変化

ことから、従来球状黒鉛鑄鉄の黒鉛球状化妨害元素であったSは、薄肉球状黒鉛鑄鉄を製造する場合にはむしろ有効元素として作用することが予想される。

そこで、ベースとなる鑄鉄溶湯のS含有量を変えて実験を行った結果(図3)、極低S含有量の溶湯から薄肉球状黒鉛鑄鉄を製造することは困難で、ある程度のS含有量が必要であることが判明した。また、RE, Caの最適添加量を経済性を考慮して検討した結果、ベースとなる鑄鉄溶湯のS含有量0.05%で、RE, Ca添加量がそれぞれ0.05%の場合に黒鉛粒数が最も増加した。

4. 産学官による薄肉強靱鑄鉄の開発体制

4.1 地域フロンティア技術開発事業

この事業は、拡大しつつある大企業との技術格差を克服し、中小企業の技術開発力の強化を図るため、先端技術を導入して、地域の中小企業が大学、国・

公立試験研究機関、民間研究所と密接に連携し、集中的な研究開発を行うことを目的とした中小企業庁の補助制度である⁴⁾。

岩手県では昭和59年にこの制度の指定を受け、鑄造業界を対象とした「複合加工による鑄鉄の新機能付加技術の開発」のテーマで3年間にわたり、産学官が一体となってこの研究開発事業に取り組んだ。

また、この事業の研究テーマは図4に示すように、岩手県工業試験場が担当する中核技術開発の3テーマ及び中小企業が担当する応用技術研究開発の4テーマから成っており、岩手大学で開発した薄肉強靱鑄鉄の製造理論と基礎技術は応用技術研究の中「高精度薄肉強靱鑄鉄製造技術の開発」及び「インテリア・エクステリア鑄鉄の薄肉化と鑄肌の多様化技

図5 薄肉強靱鑄鉄の開発体制

図4 岩手県フロンティア事業

術の開発」の2テーマに導入され、さらに産，学，官それぞれの開発体制の分担は図5に示すように決められた。

5. 薄肉強靱鑄鉄の製造試験

5.1 企業規模での製造試験

岩手大学で行った薄肉強靱鑄鉄の実験を基に民間研究所で製造された薄肉強靱鑄鉄用添加合金の添加条件を調査し、さらにこの合金を用いて企業規模で薄肉強靱鑄鉄ができるかどうかを確認するため、企業の2 t キュボラを用いて製造試験を行い、次のような試験結果を得た。

- ① C 3.8 %，Si 2.2 %，S 0.082 % のキュボラ溶湯にこの合金を添加することにより、企業規模で脱硫処理なしで薄肉球状黒鉛鑄鉄を製造できることを確認した。
- ② RE，Ca の添加は製造工程の複雑化を招くが、これらの元素を球状化剤と一緒に合金化することにより工程の複雑化を回避し、合金添加という単純な工程で薄肉強靱鑄鉄の製造が可能となった。
- ③ 200 × 200 × 3 mm の薄肉強靱鑄鉄試験鑄物より200 × 40 × 3 mm の試験片を切り出し、曲げ試験を行ったところ、180 度曲げても破壊や亀裂の発生が認められず、この鑄鉄のきわめて高い強靱性が確認された。

5.2 製品化試験

企業規模での試験結果に基づいて、フロンティア

事業参加企業では、次のような製品を試作した。

○ A 社

大型インテリア用レリーフ

○ B 社，C 社，D 社，E 社

インペラー，L 字形継手，厨房品

なお，インテリア用レリーフの肉厚は3 ～ 5 mm，厨房品の肉厚は3 mm であり，インペラーは従来の6 mm 厚を3 mm へ，またL 字形継手は10 mm 厚を5 mm へと薄肉軽量化と同時に強靱も図ることができた。

6. おわりに

岩手大学で開発された薄肉強靱鑄鉄は、その製造基礎研究が岩手県の地域フロンティア技術開発事業に導入され、3 年間にわたるこの事業を通して製品の実用化に向かいつつあり、今後、地場産業のインテリア・エクステリア製品を始め、日本の鑄鉄生産量の約47%を占める自動車部品や産業機械器具への応用が期待されている。

参考文献

- 1) 都竹，山本，奥本：球状黒鉛鑄鉄の理論と実際，（丸善），83
- 2) 総合鑄物センター研究調査報告No.277（1980）
- 3) R.J. Warrick：AFS Cast Metals Research Journal（1966），September，97
- 4) 岩手県地域技術活性化事業概要（昭和59年），岩手県