ねづみ鑄鉄の機械的性質に及ぼす黒鉛形状の影響*

谷 村 潤** 谷 口 希 一**

Hiromu Tanimura and Kiichi Taniguchi: Effect of the Form of Graphite on the Mechanical Properties. The mechanical properties of gray cast irons were examined, where the structure of matrix is kept constant and the form of graphite is variable. Three groups of cast-iron specimens were prepared, having (1) uniformly distributed flaky graphite (2) eutectic form of graphite in cellular distribution (3) and the mixed type of the two mentioned above. Tensile tests with precise elongation measurement and Charpy impact test were carried out. The influence of the form of graphite on the mechanical properties of cast iron was discussed considering two main factors: decrease of the effective area of matrix and stress concentration on the notch of graphite structure. As the result, the following facts were made clear: (1) Gray cast iron, having uniformly distributed flaky graphite, has higher elongation. When the carbon content is proper, iron of this group is tough. (2) Gray cast iron, having the eutectic form of graphite in cellular distribution, shows low elongation. The tensile strength of the iron of this group is comparatively high. Eventually, iron of this group is very brittle. (3) Gray cast iron, having the mixed form of graphite, has low elongation and low tensile strength. Iron of this group is weak and brittle.

(Received October 31, 1960)

I. 結 言

ねづみ鑄鉄の機械的性質は基地と黒鉛の組織によつて支配される。鑄鉄は鋼に比べてこの黒鉛の存在のために弱くて脆い材料となっている。黒鉛が材料を弱める原因としては有効断面の減少と切欠作用による応力集中の二つが考えられる。鑄鉄の機械的性質に及ぼす黒鉛形状の影響に関しては古くから多数の研究^{(1)~(6)}があるが、系統的な解答を与えたものは少い。よつて本研究では同一の原料鉄から黒鉛組織の異つたねづみ鑄鉄を作り、精密引張試験および衝

撃試験を行つて機械的性質に及ぼす黒鉛形状の影響、とくに粘り強さとの関係を求めた。

II. 試 料 お よ び 実 験 方 法

実験に用いた黒鉛形状としては均一片状型(A型)、共晶型(D型)および両者の混合型(A+D型)の3種を撰んだ。試料の熔製は4.06% C, 1.07% Siを含む不純物の少ない大暮木炭鉄を母材として軟鋼, Fe-SiおよびFe-Mnを用いて炭素量を2.5%から3.8%に変化させ, Si≒2.0%, Mn≒0.6%に一定となるようにクリプトル電気炉にて黒鉛坩堝中で熔解した。均一片状型の黒鉛を得るためにはFe-Si 0.4%で接種を行い、共晶型の黒鉛はTiO₂を含む鉍滓(CaO 47%, SiO₂ 31%, TiO₂ 12%, Al₂O₃ 10%)を作用させ、混合型の黒鉛は塩基性鉍滓(CaO 48%, SiO₂ 40%, Al₂O₃ 10%)を作用させて作った。試験片は直径20 mm, 長さ180 mmの丸棒を生型に4本同時に鑄込んだ。引張試験はマルテンスのエキステンソメーターにより伸びを精密に測定し3本の平均を求めた。衝撃試験は切欠無しの丸

** 九州大学工学部冶金学教室

* 1954年10月本会大阪大会に発表

(1) R.R.Adams: AFS, **50**(1942), 1063.

(2) 飯高, 中村: 鑄物, **30**(1958), 260.

(3) A.Thum: Vereines Deutsche Ingenieure, **74**(1930), 257.

(4) G.Meyersberg: Giesserei, **12**(1936), 285.

(5) J.T.Mackenzie: Metals Technology, **11**(1944), June, T.P.1741.

(6) 沢村, 堀田, 岡: 鉄と鋼, **39**(1953), 520.

棒にて小型シャルピー試験機 (1 m-kg) にて行い、4 本の平均を求めた。各試験片の寸法を Fig.1 に示す。なお共

Fig.1 Test specimens.

晶黒鉛の出る場合には一般にフェライトを伴い、基地の組織が一定せぬため試料はすべて 720° で 10

~20 hrs 焼鈍後、空

冷することにより完

全にフェライト化し

た。試料の化学成分を Table 1 に、黒鉛形状の一例を

Photo.1 に示す。片状型黒鉛の試料は炭素量と共に黒鉛の

Table 1 Chemical composition of specimens tested.

No. of specimens		C	Si	Mn	P	S	Mixed ratio of graphite (F1: Eut) %
Uniform flake type of graphite	F 1	2.53	2.00	0.66	0.038	0.020	—
	F 2	2.91	1.99				
	F 3	3.01	2.17				
	F 4	3.30	2.00				
	F 5	3.38	2.04				
	F 6	3.54	1.99				
Eutectic type of graphite	F 1	2.85	1.94	0.65	0.033	0.013	—
	F 2	3.13	2.12				
	F 3	3.26	2.21				
	F 4	3.60	2.12				
	F 5	3.70	1.97				
Mixed type of graphite	FE1	2.68	2.18	0.74	0.038	0.015	50: 50
	FE2	3.12	2.10				//
	FE3	3.38	2.13				//
	FE4	3.82	2.16				//
	FE5	3.02	2.11				7: 93
	FE6	3.00	2.13				25: 75
	FE7	3.12	2.10				60: 40
	FE8	2.98	2.16				90: 10

Photo.1 Forms of graphite for three types. ($\times 100$)

長さや厚さが増し、共晶型黒鉛の試料は微細黒鉛が Network 状に分布し、黒鉛の大きさの変化はなく、試料 E5

は黒鉛の量がとくに多かつた。

III. 実験結果および考察

1. 抗張力および伸びの関係

鑄鉄の粘り強さを示すために精密引張試験にて伸びを正確に測定した。各型試料の応力-歪曲線を Fig.2 に抗張力または伸びと炭素量との関係をそれぞれ Fig.3, Fig.4 に

Fig.2 Stress-strain curves for three types of graphite.

示す。なおこの場合混合型試料の混合比は 50% の場合の結果である。片状型黒鉛鑄鉄の抗張力および伸びは炭素量と共に減少するが、伸びは他の型のものに比して一般に大である。共晶型黒鉛鑄鉄の抗張力は炭素量と無関係で強い。

Fig.3 Relation between tensile strength and carbon content for three types of graphite.

Fig.4 Relation between elongation and carbon content for three types of graphite.

が、伸びは非常に小さい。混合型黒鉛鑄鉄は抗張力、伸び共にそれぞれ混在する悪い方の黒鉛因子に支配されている。すなわち抗張力は片状型黒鉛に支配されて炭素量と共に減少し、伸びは共晶型黒鉛に支配されて非常に低値を示す。

次に片状型黒鉛に共晶型黒鉛が混った材料の抗張力および伸びの変化に及ぼす混合比の影響を求めた。工場でねぶみ鑄鉄を製造する時に屢々破面が粗い部分と細かい部分の混った材料を生ずることがある。かかる材質は熔解作業の拙劣な場合に生じ、機械部品として使用した場合に屢々事故の原因となつている。この実験には炭素量約3%の場合について鋤卒処理により両黒鉛型の混合比を変えた試料を作つて用いた。その結果を Fig. 5 に示す。片状型黒鉛に共晶型黒鉛が混ると抗張力は初め少し減少し、その量が非常に増すと上昇する。伸びの方は共晶型黒鉛の増加と共に急激に減少する。このように片状型黒鉛に共晶型黒鉛が混じると抗張力の差は大きくないが、伸びが急激に減少するために非常に脆い材料となる。

Fig. 5 Tensile strength and elongation of cast irons, having mixed structure of flake and eutectic graphite in various ratios.

Fig. 5 Tensile strength and elongation of cast irons, having mixed structure of flake and eutectic graphite in various ratios.

鑄鉄の抗張力および伸びの値はこのように鋼に比べて低く、しかも黒鉛組織により著しい影響を受けている。以下黒鉛の形状が如何なる理由で抗張力および伸びの低下をきたすかについて考察する。

(1) 抗張力におよぼす黒鉛形状の影響

鑄鉄中の黒鉛が材料を弱める原因としては黒鉛による有効断面の減少と、切欠による応力集中の二つが考えられる。

まず有効断面の減少について考察するに、静的引張応力下における破断は最大応力面、すなわち最小断面において起るので、抗張力是有効断面積と関連を持つと考えられる。いま一定の試験片中に全体積 V の黒鉛が n 個に分散して均一に分布した場合、黒鉛の形状は板状といわれているのでこれを薄い円板と考え、その直径を d 、厚さを w とすれば $n = 4V/\pi d^2 w$ となり、個数は直径の自乗に反比例する。鑄鉄の場合、 d の変化に比べて V 、 w の変化は一般に少いから、個数が増す程有効断面積は減少すると考えられるので有効断面積は個数によつて左右される。従つて有効断面積は黒鉛の長さの影響を最も受けることになる。これらの関係を定量的に求めることは⁽⁵⁾黒鉛の実際の形状、 w 、 V の変化などのために複雑である。いま黒鉛長さを

試料の断面 20 箇所よりその平均長さを求め、各型の黒鉛長さと抗張力の関係を求めると Fig. 6 に示す如くなる。

Fig. 6 Effect of graphite length on tensile strength.

この場合、混合型の抗張力は片状黒鉛によつて支配されるので片状部の長さを測つた。黒鉛長さと抗張力は略々直線的関係を示し、長さが増すと共に抗張力は減少する。混合型が片状型に比べて相対的に低値を示す理由は、混合型中の片状黒鉛は均一片状型の分布に比べて不均一で樹枝状に析出したためと考えられる。共晶型で共晶黒鉛がほぼ均一な試料 E5 は均一片状型の延長線上に近く、他の network に分布した試料はその影響のためか相当の低値を示している。

Fig. 7 Stress concentration at the notch of elliptical hole.

板に静的引張応力が作用すれば切欠端に応力が集中する。鑄鉄の黒鉛は立体の空洞であるけれども定性的な推論は平面的な切欠からも得られる。さて応力の集中を表わす形状係数の値は常に 1 より大きい。いま楕円切欠が 1 個の場合の形状係数 α_k (Fig. 7) は弾性計算より次の如くなる。 $\alpha_k = \sigma_{max}/p = 1 + 2\sqrt{t/\rho}$ 、鑄鉄の場合には多重切欠を形成するために互に干渉して軽減作用を及ぼす。多重切欠においては軽減係数を乗じて次の如く示される。 $\alpha'_k = F(1 + 2\sqrt{t/\rho})$ 、この式を鑄鉄に適用するには議論の余地もあるが、参考のため上式において曲率半径 ρ を各試料について顕微鏡 (400 倍、40 視野の平均) で測定した黒鉛厚さ [8~66 $\times 10^{-4}$ mm] の 1/2 にとり、 F の値に平野⁽⁷⁾の計算図表より求めた $F=0.5$ を用いて α'_k の値を求め、各黒鉛形状型の抗張力-炭素量- α'_k の関係を Fig. 8 に示すが各黒鉛型とも抗張力と形状係数は対応し、形状係数の値が増すと抗張力は減少しているので形状係数の立場から抗張力の関係を説明し得る。一方、黒鉛切欠による応力集中に関しては Coffin⁽⁸⁾ の研究があり、応力の集中係数は初め高いが塑性流動により減少して約 3 になると述べられているが、黒鉛の形状により引張強度に差異がある事を考えれば応力の集中係数は黒鉛形状により多少相異があると推

(7) 平野：機械学会論文集，16(1950)，No. 55，52；17(1951)，No. 61，12。

(8) L. F. Coffin：J. A. S. M. E.，17(1950)，No. 3，Sept. 233。

論される。

(2) 伸びにおよぼす黒鉛形状の影響

Fig.8 Relation between tensile strength and stress concentration factor and carbon content.

ねづみ鋳鉄の伸びは鋼に比べて非常に少い。この伸びの少い原因としては鋼の変形が地鉄の全面に生ずる迂りによつて起るに反し、鋳鉄においては黒鉛による有効断面の減少と、切欠による応力の集中により変形の大部分が応力方向に直角に近い黒鉛の間にはさまれた地鉄部

Fig.9 Effect of notch on the elongation in silicon steel plates.

れて実験した結果によつて説明出来る。次に鋳鉄試料について観察するため試料 (F3) を予め研磨し、軽く腐食した

Photo.2 Slip lines in ferritic gray cast iron. The specimen was strained after polishing and etching. (×1000)

のみ多数認められ、その他には殆んど認められなかつた。

黒鉛は引張応力に対しては殆んど伝達力を有しないから

Photo.3に示す如き黒鉛の開きが認められる。この黒鉛の開きも伸びの一因をなすことを示している。同様の研究を

Clough, Shank⁽⁹⁾ も発表している。片状型黒鉛組織の鋳鉄の伸びが共晶型黒鉛組織のそれより大である原因は片状

Photo.3 Opening of graphite in ferritic gray cast iron. The specimen was strained after polishing and etching. (×1000)

素のもの程伸びが大であるのは、かかる成分の黒鉛組織は黒鉛間の間隔が最大となり、有効断面の増加と共に応力の集中が少いために破断強度が増し、従つて迂り、Openingが増すためと考えられる。

以上の結果から抗張力、伸び共に大きい鋳鉄の黒鉛組織としては長さが適当に短かく、厚さも厚い組織のものがよいことになる。比較的高炭素の鋳鉄でもかかる黒鉛組織のものを作ることが出来れば強力で伸びの大なる優秀な鋳物を得ることが出来る。なお試料のフェライト粒度は片状黒鉛型、混合黒鉛型で6~7、共晶黒鉛型で7~8であつた。

2. 黒鉛形状と粘り強さとの関係

Fig.10 Relation between resilience and carbon content for three types of graphite.

Fig.11 Relation between Charpy impact value and carbon content for three types of graphite.

ねづみ鋳鉄の粘り強さを表わすには、精密引張試験を行つて破断までに吸収したエネルギー、すなわちレジリエンスを求めた。Fig.10に各黒鉛型の炭素量とレジリエンスとの関係を示したが、片状黒鉛型は一般に粘り強く、炭素量と共に減少し、共晶黒鉛型および混合黒鉛型は伸びが非常に少ないために炭素量と無関係に低く、非常に脆い材料であることを示している。一方ねづみ鋳鉄の衝撃試験はその値が低く、かつ再現性が少ない

(9) W.R.Clough, M.E.Shank: A.S.M., 49(1957), 241.

(10) 谷村: 日本金属学会分科会報告, 17(1954), 34.

示した。試片は引張試験後の頭部を使用するため歪取りの目的で $700^{\circ}\times 7$ hr 焼鈍後空冷した。Fig.11 にシャルピー衝撃値と炭素量との関係を示す。その結果は Fig.10 に示すレジリエンスと略々同様、片状黒鉛型のは低炭素においては粘り強く、炭素量が増すと共に衝撃抗力は小となる。これに対して共晶黒鉛型および混合黒鉛型は炭素量に関係なく非常に脆い。Fig.10, Fig.11 の両図が同一傾向を示すことから鑄鉄の静的引張応力に対する粘り強さと動的衝撃力に対するそれは略々比例的関係を有することがわかった。

IV. 総 括

以上の実験で鑄鉄において基地の組織が一定である場合の機械的性質におよぼす黒鉛形状の影響、とくに粘り強さとの関係を求めたが、その結果を要約すれば次の如くである。

る。

(1) 鑄鉄の機械的性質は黒鉛の組織によつて支配せられる。黒鉛が材料を弱める原因としては黒鉛の長さが最も大きな関係を持ち、黒鉛による有効断面の減少と切欠作用による応力集中とにより説明される。

(2) 均一片状の黒鉛を有する鑄鉄の抗張力は炭素量と共に減少し、伸びは他の黒鉛型のに比べて大きく、一般に粘り強い鑄鉄である。

(3) 共晶黒鉛を有する鑄鉄の抗張力は炭素量とほぼ無関係に一般に強いが、伸びが極端に少いので非常に脆い鑄鉄である。

(4) 片状黒鉛に共晶黒鉛の混った鑄鉄は抗張力、伸び共にそれぞれその性質を悪くする。黒鉛因子により支配される。すなわち抗張力は炭素量と共に減少し、伸びの方は常に少く、脆い鑄鉄である。