各種高級鑄鉄管の疲労強度について*

小 西 一 郎** 薄 田 正 一***

勝 田 良 雄*** 島 田 喜 十 郎**

On the Fatigue Strength of Various High Grade Cast Iron Pipes

by

Ichirō KONISHI, Masakazu USUDA, Yoshio KATSUTA

(Kyoto University) (Hanshin Water Supply Association)

and Kijūrō SHIMADA

(Kyoto University)

Recently, not a few rupture accidents of distribution pipes of water works have occurred at some cities in our country. The pipes ruptured were of high grade cast iron and had been considered to be safe from rupture, because their construction was not very old as we might expect such accidents.

To clarify the cause of the accidents from the view point of the strength of pipe, some static and fatigue tests were made, to which were put rectangular test pieces taken out from bodies of various pipes, that is, the pieces from ruptured pipes and unused pipes manufactured in different years.

Along with those tests, determination of chemical compositions and comparison of microstructures of cast iron were made.

Some of the test results obtained are as follows:

(1) The microstructure of cast iron manufactured in 1940, 1952 and 1954 were gray cast iron. According to the classification of ASTM, all the pipes belong to the type A of graphite flake type chart, and the pipes manufactured in 1940 and 1952 belong to the size 4 of graphite flake size chart, and the pipes made in 1954 belongs to the size 5.

(2) Comparing the fatigue strength of test pieces of the pipes of the same year with each other, the damaged pipes showed a very low strength in comparison to that of the series 2 taken out from unused pipes. The same tendency was shown about the static strength of test pieces.

(3) The test pieces, series 6, were taken from the ductile pipe, and their static and fatigue strengths were higher than the others.

(4) In forming the test pieces, each of which has a rectangular section, the cast skin of the pipes was removed. These treatments must have produced conditions considerably different from the actual state of the pipes, so that the strengths obtained from the tests showed somewhat lower values.

(Received Nov. 5, 1957)

1. 緒 言

上水道施設の普及、および人口の増加にともない、送、配水管のほとんどに大口径管が用いられるようになった。しかし、ここ数年の間に各地において大口径管の破裂事故が頻発し、しかもこの破裂した大部分の大口径管が、現在諸都市で盛んに使用されている高級鑄鉄管であることは非常に大きな問題となっている。

一般に破裂事故を起した高級鑄鉄管は、施設後十数

年を経過しているが、まだ老朽化するには相当寿命を有しているものと思われる。

上水道送、配水用高級鑄鉄管の破裂原因として、管材の強度、流水の水理学的な問題、埋設箇所土質および土圧、交通荷重、電食、施工法などの各要素が考えられる。しかし、以上の各要素の中でも、管材の強度は破裂に対し基本的なものであり、まず第1に検討する必要がある。

本研究は、上水道送、配水用高級鑄鉄管の破裂原因究明の第1段階として、破裂管、および製造年度、管

* 原稿受付 昭和32年11月5日

** 正員 京都大学工学部

*** 阪神上水道市町村組合

径、管厚の異なる未使用管、特に昭和15年、27年、29年製に重点をおき、主として静的試験、および疲労試験を行い破裂事故原因究明の一資料を得ようとしたものである。

また、静的試験、および疲労試験に付随して化学成分分析試験、顕微鏡による金属組織の比較検討などを行った。

2. 試 験 片

試験片は10シリーズよりなり、破裂管、未使用管、製造年度、管径、管厚の異なる10種類の高級鋳鉄管より採取し、各管とも6本の試験片を作製した。

Fig. 1 Form and dimensions of fatigue test specimens

り採取し、各管とも6本の試験片を作製した。

試験片の採取は、管の長手方向にソケット側より45～85 cm の間で行った。この場合、試験片は1カ所において集中的に採取せず、管周6等分点のところより採取した。

試験片は Fig. 1 に示すような2種類の矩形断面を用いた。これは管体より採取した弧状小割片の内側、および外側の鋸はだを削除して所定の形状に仕上げるため、試験片の厚さを最小削除量より決定したものであって、管径が1200 mm 以上のものについては18 mm、600 mm のものについては15 mm 厚とした。

試験片を採取した各管の製造年度、管径、管厚は Table 1 に示したとおりである。この中でシリーズ1以外はすべて未使用管である。

なお、Table 1 には各管の化学成分分析試験結果を併記した。

3. 供試管材の化学成分および組織

昭和15年、27年および29年製の高級鋳鉄管のソケット部と管体部について化学成分ならびに顕微鏡組織を調べた結果、Table 2 と Photo. 1 を得た。

Table 1 Description of specimens for test series

Series No.	Manufactured year	Diameter of pipe (mm)	Thickness of pipe (mm)	Thickness of specimen (mm)	Chemical composition (%)						Note
					T.C.	G.C.	Si	Mn	P	S	
1	1940	1200	32	18	3.18	2.40	1.79	0.85	0.229	0.068	Fractured by accident
2	1940	1200	32	18	3.50	2.88	1.58	1.18	0.259	0.063	
3	1952	1350	25	18	3.27	2.63	1.03	0.68	0.164	0.110	
4	1954	1350	25	18	3.47	2.75	1.34	1.15	0.224	0.166	
5	1954	1350	25	18	3.34	2.32	1.31	0.39	0.207	0.099	
6	1955	1200	23	18	3.51	—	1.64	0.27	0.049	0.006	Ductile pipe
7	1952	600	15.4	15	3.44	—	1.84	0.31	0.284	0.105	
8	1952	1200	23	18	3.54	—	1.05	0.97	0.213	0.078	
9	1952	1200	23	18	3.14	—	1.53	0.67	0.201	0.097	
10	1952	1200	23	18	3.11	—	1.76	0.62	0.175	0.095	

Table 2 Chemical composition and hardness of the pipes manufactured in 1940, 1952 and 1954.

Manufactured year	Sampling part	Chemical composition (%)						H _B
		T.C.	G.C.	Si	Mn	P	S	
1940	Socket	3.27	2.06	2.05	0.56	0.162	0.087	—
	Pipe body	3.21	—	2.15	0.70	0.182	0.105	140
1952	Socket	2.99	2.02	1.52	0.42	0.214	0.108	—
	Pipe body	3.02	2.11	1.47	0.57	0.220	0.112	209
1954	Socket	3.16	2.21	1.48	0.36	0.263	0.112	—
	Pipe body	3.11	—	2.01	0.37	0.265	0.114	189

Table 2 に示した化学成分分析値中 G.C. については昭和15年、29年製の管の管体部の値が測定できなかった。しかし、ソケット部の値から、昭和15年、27年製の両管はだいたい同じような値を示しているが、昭和29年製の管は前二者よりやや大きい値を示していることがわかる。この3者間の品質の相異は Photo. 1 から同じような傾向がうかがえる。すなわち、昭和15年、27年、29年製の各管とも、組織は普通一般の鋳鉄に見られる灰鉄鋳鉄組織であって、特に変わったところは見うけられないが、片状黒鉛の形状は昭和29年製の管が他の管に比較し、その長さが約1/2になっている。

ASTMの分類方法によると、Graphite flake type

Manufactured in 1940
($\times 100 \times 1/2$)

Manufactured in
1940 ($\times 100 \times 2/5$)

Manufactured in 1952
($\times 100 \times 1/2$)

Manufactured in
1952 ($\times 100 \times 2/5$)

Manufactured in 1954
($\times 100 \times 1/2$)

Manufactured in
1954 ($\times 100 \times 2/5$)

Pipe body part

Socket part

Photo. 1 Micrographs of high
pressure cast iron pipes

chart からでは3者とも Type A であるが, Graphite flake size chart からでは昭和15年, 27年製の両管は Size 4, 昭和29年製の管は Size 5 であることがわかる。

つぎに, 黒鉛の分布については, 昭和15年製のものは比較的良好な分布状態を示しているが, その量が過大である点と, 黒鉛の周辺に Ferite が少し表われている点, この材質の強度の小さな原因であると考えられる。これは戦時中の原料鉄が不足した時代に製造されたため, 組織が悪く製品が High silicon になったことによるものである。しかし Steadite や硫化物の不純物は少ないようである。昭和27年製の組織は All pearlite であるが, 黒鉛の分布が不均一であり形状も揃っていない。この中には多角形の大きな Steadite が介在しているため,

昭和33年 3月

衝撃などについて弱い欠点があるものと思われる。つぎに昭和29年製は細くわん曲した黒鉛が均一に分布しており, 他の All pearlite が完全な高級鉤鉄の組織を示している。この種のもは強度が高くじん性に富んでいる。以上の実験から昭和29年製の管は他の2管に比べ良品質であることがわかった。なお, 参考のためシリーズ6の Ductile pipe の顕微鏡組織写真を Photo. 2 に示した。

Manufactured in 1955
($\times 100 \times 2/5$)

Photo. 2 Micrographs of
ductile cast iron pipe

Table 2 には管体部から採取した試験片の硬度を同時に記した。

4. 疲労試験およびその結果

本実験に使用した疲労試験機はローゼンハウゼン疲労試験機 UHP 型 (容量: 静荷重 20ton, 動荷重 10ton) で, 試験機の運転速度は 800 cycle/min を用いた。疲労試験は各シリーズとも $+1 \text{ kg/mm}^2 \sim +\sigma_{\max}$ の部分片振引張応力について行った。この場合の実験室温度は平均約 12°C であった。

疲労試験により得られた結果は, 実験結果の判定を明確にするため, 縦軸を3倍に拡大した特殊両対数グラフを作製し, この縦軸上に最大応力 $\sigma_{\max}$, 横軸上に破断に至る回数 N をとり, 各シリーズの試験片に対する実験結果を同一図上にプロットした。この結果は Fig. 2 に示すとおりである。

Fig. 2 S-N Diagram for all series

5. 実験結果の考察

疲労試験の結果は、 $S-N$ 線図として Fig. 2 に示したように、各シリーズに対しそれぞれの直線を得た。この直線の傾斜 K を用いて $n=2 \times 10^6$ の時間強度 $\sigma_{2,000,000}$ を求めると Table 3 に示す値を得る。Table 3 には、このほかに疲労試験用試験片により静的引張試験を行った結果も併せて記した。

Table 3 Results of static tests and fatigue tests

Series No.	K	Fatigue strength (kg/mm ²)	Static strength (kg/mm ²)
		$\sigma_{2,000,000}$	
1	0.094	4.0	11.6
2	0.103	5.0	15.8
3	0.086	6.5	16.5
4	0.062	6.4	14.2
5	0.091	8.0	22.0
6	0.135	14.0	44.9
7	0.117	5.0	10.2
8	0.121	6.4	19.1
9	0.067	6.3	18.6
10	0.104	6.0	17.0

$$\sigma_{2,000,000} = \sigma_{\max} (N/2,000,000)^K \quad K: \text{Experimental constant}$$

上水道送、配水管は一般に道路下に埋設されるものであり、管は交通物の通過によりたえず繰返し荷重をうけることになる。交通物としては主として自動車および路面電車が考えられ、配水管強度判定のための指定繰返し数としては $n=2 \times 10^6$ が妥当な値であると考えられる。

いま、時間強度 $n=2 \times 10^6$ について各シリーズの実験結果を比較すると、Fig. 2 および Table 3 から、シリーズ 1 の疲労強度が特に低い値を示していることがわかる。これは昭和 15 年に製造され、送水中破裂事故を起したものである。そこで同年に製造された未使用管のシリーズ 2 の結果と比較すると、静的強度および疲労強度はともにいちじるしい低下をみせている。

他のシリーズは昭和 27 年から 30 年の間に製造されたもので、未使用管ではあるが、だいたいの傾向として製造年代が新しいものほど、静的強度および疲労強度は比較的良好な値を示している。

シリーズ 6 は Ductile cast iron pipe で、静的強度および疲労強度は、他のシリーズに比較して飛躍的に高い値を示している。この管は戦後わが国において新しく用いられるようになったもので、管体圧壊試験においても相当弾性を示し、極限状態では高級鋳鉄管のように破断することなく鋼管のような性質を示している。

Fig. 2 および Table 3 の結果から昭和 29 年以降に製造された管は比較的良好な結果を示しているが、これは Photo. 1 から明らかなように、片状黒鉛の形状が昭和 15 年、27 年に比較して微細で均等に分布しているため、これが疲労強度に好影響を与えているものと思われる。すなわち、昭和 15 年、27 年製にみられるように片状黒鉛が大きく粗雑に分布している場合、これがある程度切欠効果を与え疲労強度が低下するものと考えられる。

試験片を作製する場合、弧状小割片から鋳はだを削除して矩形断面に仕上げたのであるが、鋳鉄の鋳はだ部の強度は中央部のものより数%高い値を有し、試験片の採取位置によって強度がかなり相異なることは周知のとおりである。このため著者らが得た実験結果は実際の値よりやや低いものと思われる。

6. 総 括

各種高級鋳鉄管より採取した試験片について静的試験、疲労試験およびこれに付随して 2, 3 の実験を行ったが、得られたおもなる結果を総括すれば、つぎのとおりである。

(1) 昭和 15 年、27 年および 29 年製に対する鋳鉄の組織は灰銑鋳鉄組織であり、ASTM の分類方法によると Graphite flake type chart からでは 3 者とも Type A であるが、Graphite flake size chart からでは昭和 15 年、27 年製は Size 4、昭和 29 年製は Size 5 である。

(2) 疲労試験の結果、各シリーズの $S-N$ 線は特殊両対数目盛上において直線として得られた (Fig. 2 では縦軸は実験結果を明瞭にするため横軸の 3 倍にとった)。各シリーズの傾斜 K は Table 3 に示す値を得た。

(3) $S-N$ 線図の傾斜 K を用いて $n=2 \times 10^6$ に対する時間強度を求め、Table 3 に示す値を得た。

(4) 破裂事故管より採取したシリーズ 1 試験片の疲労強度は、Fig. 2 からわかるように、いちじるしい低下をみせており、同年度に製造された未使用管から採取したシリーズ 2 試験片と比較すると、前者は特に低い値を示している。また、静的強度についても同様の傾向を示している。

(5) シリーズ 6 は Ductile pipe より採取したものであるが、静的強度および疲労強度は他の管に比較して飛躍的に高い値を示している。

今後、重交通下に埋設される送、配水管には、このような管の使用されることが望ましい。

(6) 顕微鏡組織から、昭和 15 年、27 年製のものは同じような片状黒鉛組織を示しており、昭和 29 年製のものは前 2 者より微細な組織を示している。このことは実験結果から疲労強度上に影響しているものと思われる。

れる。すなわち、片状黒鉛の形状が大であれば、これがある程度切欠効果を高め、疲労強度が低下するものと考えられる。

(7) 試験片を作製する場合、鋳はだを削除して矩形状断面に仕上げたが、このため著者らが得た実験結果は実際の強度よりやや低い値を示しているものと思われる。

以上、各種高級鋳鉄管材の静的試験、疲労試験およびこれに付随して 2, 3 の実験を行って得た結果であるが、本研究に引き続き送、配水管の破裂事故原因を

強度の面から多角的に調査研究するため、著者らの一部は 1500 mm 高級鋳鉄管の未使用の旧管および新管の圧壊試験²⁾、破裂管、未使用旧管、新管の時間強度線ならびに(7)に述べた事項については、高級鋳鉄管管体より採取した試験片により曲げ試験を行い、その影響を目下研究中である。

参 考 文 献

- 1) Amer. Found. Soc. Preprint, 20 (1954)
- 2) 小西, 島田, 京都市工研彙報, 第10輯, 48 (1956)

漸増応力疲労試験結果への累積破損理論の適用*

榎 本 信 助**

An Application of the Idea of Cumulative Damage To the Results of Fatigue Tests Under Progressive Load

by

Nobusuke ENOMOTO

(Railway Technical Research Inst., Japanese National Railways)

The Port method regarding the fatigue test of metals has recently been appraised by many investigators. According to these results, n in Eq. 1 in this paper takes different values for different materials and no systematic arrangement has been established yet for each kind of material. Even if the numerical values of n are selected so that the experimental points may be located on a straight line, the extension of such line in most cases, deviates from a point equivalent to the Wöhler endurance limit on the abscissa. The author tried to obtain the equation of the $S-N$ curve and the $S-\alpha$ curve for progressive load fatigue making use of the general idea of cumulative damage, and got the results which would explain the above experimental data and clarify the relations between the $S-N$ curve and the $S-\alpha$ curve. From the above results, it might be said that caution must be exercised in determining the Wöhler fatigue limit by using the $S-\alpha$ diagram, because the curve plotted in this diagram does not form a straight line for what value of n , but is expected to form a complex curve as expressed by Eq. 4 in this paper.

1. ま え が き

漸増応力疲労試験によって、耐久限度を推定する方法は Prot¹⁾ によって提唱された。この方法は直線的に増加する繰返し荷重による疲労破断のさいの応力と、応力増加率の平方根とが直線関係を有すると仮定し、この関係から、応力増加率 0 における応力を外挿によって求めると、これが $S-N$ 曲線における疲労限と一致するというのである。Port の理論によると、漸増応力による破断時の応力 S_R と、応力増加率 α との間に

は、

$$S_R = K\alpha^n, \quad n=0.5 \quad (1)$$

の関係がある。 K は定数である。

Prot 法についての評価は最近各所で行われている。これらを総括すると、(1)式における n の値は材料によってまちまちの値をとり、各材種によって整理できる段階に至っていない。また、 $S_R-\alpha^n$ 線図において、実験点が直線に並ぶように n の値をとっても、その直線の延長は S 軸上の Wöhler 疲労限に相当する点から、かなりはずれる場合が多い。また、Wöhler 法における耐久限の値と、漸増応力法における $\alpha=0$ のときの破断応力とが等価であると断定してよいかどうか

* 原稿受付 昭和32年11月22日, 昭和30年11月26日関西支部秋季講演会および昭和32年10月29日第1回材料試験連合講演会で講演

** 正員 鉄道技術研究所