ぜい性材料からなる円筒の動的ガス内圧による破壊*

橋 本 純**, 佐 藤 和 郎**

The Fracture of Hollow Cylinders of Brittle Materials
under Dynamic Internal Gas Pressure

by Atushi HASHIMOTO and Yasuo SATO

A cylinder loaded with equal internal and external pressure bears without failure. While unloading only the external pressure rapidly, the cylinder fractures dynamically under the internal pressure which is greater than that of the atmosphere. In our experiment, the mediums giving rise to internal and external pressure were nitrogen gas and turbine oil respectively. A hollow cylinder of graphite was used as the specimen, and the relation between internal gas pressure at the fracture of the cylinder and the number of fragments fractured at the longitudinal section were obtained. It was shown that the analytical explanation coincides with the experiment.

Key Words: Fracture, Strength, Brittle Materials, Graphite Cylinder, Internal Pressure, Gas Pressure

1. 緒 言

ぜい性材料の圧縮破壊についての報告は古くから土木、建築のみならず地質などの研究者によって数多くなされている^{(1)~(4)}。しかし最近では耐熱性、耐摩耗性、耐腐食性など金属材料より優れた特性を有するぜい性材料、いわゆるセラミックスが機械材料として注目され研究開発が活発に行われているため、ぜい性材料の圧縮以外の荷重下における破壊についての報告は、今後ますます重要になるものと思われる。

一方、機械には内圧をうける部品がよく使用されるため、この荷重下における材料の破損、破壊に関する研究が行われている^{(5)~(8)}。しかしそれらは主として圧力媒体に液体を用いたものが多く、ガスを用いたものはあまり見られない。これは圧力媒体にガスを用いたときの材料の破壊は、危険であることが経験的に知られているためであって、例えばガス容器やガスタンクの耐圧試験において圧力媒体にガスを用いず、水を用いるのもこのためである。

本報では、ぜい性材料からなる円筒の動的ガス内圧

による破壊の実験結果とその説明について述べる。円筒にこのようなガス内圧を発生させるには、火薬の爆発によるガス圧を利用すれば可能となるが、爆発による円筒の破壊圧力を正確に測定することは困難であり危険を伴う。このためここではぜい性材料は3軸の均等圧縮応力下では破壊が起こらないことを利用した、以下述べるような円筒の動的ガス内圧による破壊試験装置を考案した。

2. 実 験

2.1 実験方法 図1に試験装置の概要を示す。(S)は試験円筒(外径 d_o 、内径 d_i 、軸長 h_o)で、以下円筒という。(E)は円筒(S)に外圧を負荷するための外筒(外径 D_o 、内径 D_i 、軸長 H_o)で、(A)、(B)は取付け金具である。また p_g はガス圧、 p_l は液圧を示す。円筒(S)と取付け金具(A)からのガスのもれは2個の

図1 試験装置

* 昭和61年4月3日 第63期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年10月26日。

** 正員、日本大学工学部(〒963 郡山市田村町徳定字中河原1)。

O リング(O)により防止し、外筒(E)と取付け金具(A), (B)からの液の漏れは2個の O リング(O')により防止する。このようにすれば外筒(E)は両端開放の状態では液内圧 p_l をうけるが、円筒(S)はガス内圧 p_g をうけるとともに液外圧 p_l もうけるので、 $p_g = p_l$ のとき円筒(S)の応力状態は3軸の均等圧縮となり、円筒(S)は破壊しない。

実験は最初円筒(S)にガス圧 p_g を少し負荷する。次に外筒(E)に液圧 p_l をガス圧 p_g と同じ圧だけ負荷する。次に p_g を少し増し、それと同じになるように p_l も増す。このような操作を外筒(E)が破壊するまで順次繰返す。外筒(E)が液圧 $p_l = p_A$ で破壊すれば、液圧は急激に低下するので、円筒(S)は液圧の低下にしたがってガス内圧を動的にうけ破壊する。ここで外筒(E)の破壊圧力を p_A とすれば、 p_A は外筒(E)の肉厚に依存するため円筒(S)に誘起するガス内圧 p_g は外筒(E)の肉厚により変えることができる。

なお実験に使用した圧力媒体は、ポンペに入れて市販されている窒素ガス(圧力 13.7 MPa)とタービン油(#32)である。また実験において液圧は手動ポンプにより外筒(E)に液内圧を静的に負荷し、ガス圧はポンペと取付け金具との間に減圧弁を置き円筒(S)にガス内圧を静的に負荷した。したがって外筒(E)を用いないときには、円筒(S)の静的ガス内圧による破壊試験となる。

2・2 円筒(S)と外筒(E) 実験に用いた円筒(S)と外筒(E)の材料はそれぞれ電極用黒鉛棒(直径 200 mm, 長さ 1550 mm)とアクリル棒(直径 100 mm, 長さ 1000 mm)であり、円筒(S)と外筒(E)はいずれも1本の棒からそれらの軸が棒軸と一致するように切り出し、それを旋盤により所定の寸法に加工した。

準備した円筒(S)は外径 $d_o = 22$ mm, 軸長 $h_o = 25$ mm をそれぞれ一定とし、内径 d_i を 16 mm と 18 mm

 図 2 p - ϵ 曲線

の2種類に変えた外内径比 $\kappa_o (= d_o/d_i)$ が 1.38 と 1.22 の比較的薄肉の円筒である。また外筒(E)は破壊圧力を変えるため、内径 $D_i = 24$ mm, 軸長 $H_o = 45$ mm を一定とし、外径 D_o のみを 26~32 mm の範囲で種々変化させた円筒である。実験では円筒(S)に用いた黒鉛は多孔質材料であるので、円筒(S)の全表面をニトロセルロース系の接着剤により薄く被覆(厚さ約 0.1 mm)して、圧力媒体が材料中に浸透するのを防止した。

ぜい性材料の引張強さは圧縮強さに比べて小さいのが特徴であり、岩石などのように破壊までの伸びの少ないぜい性材料の引張強さは、両端開放した中空円筒の内圧試験により容易に求められる⁽⁸⁾。図 2(a), (b)は実験に用いた黒鉛とアクリルからなる円筒の内圧試験における内圧 p と円筒外周における円周ひずみ ϵ の関係を示したものである。円筒の寸法は図 2中に示すとおりであり、×印が破壊点である。円筒の p - ϵ 曲線はどちらも破壊までほぼ弾性的である。このときの円筒の肉厚は比較的薄いので、材料の引張強さ σ_b は次式から求まる。

$$\sigma_b = \frac{1}{\kappa_o - 1} p_o \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 κ_o は円筒の外内径比で $\kappa_o = d_o/d_i$

p_o は破壊圧力

上式から求めた結果を示せば、黒鉛では $\sigma_b = 7.92$ MPa, アクリルでは $\sigma_b = 29.5$ MPa である。

また中実円筒($d_o = 12$ mm, $h_o = 20$ mm)の単純圧縮試験から求めた黒鉛の圧縮強さ σ_c を示せば、 $\sigma_c = 31.4$ MPa である。

 (a) $p_o = 2.94$ MPa, $n = 4$

 (b) $p_A = 7.85$ MPa, $n = 6$

 (c) $p_A = 10.30$ MPa, $n = 8$

 図 3 $\kappa_o = 1.38$ の円筒の破壊例

2・3 実験結果 ここでは外筒を用いない円筒の静的ガス内圧による破壊を参考資料として示し、外筒を用いた円筒の動的ガス内圧による破壊の実験結果について述べる。以下、円筒の静的ガス内圧による破壊と円筒の動的ガス内圧による破壊を単に静的破壊と動的破壊ということにする。

図3(a)～(c)に $x_0=1.38$ の円筒の破壊例を示す。図3(a)に示した破片は静的破壊におけるものであり、このときの円筒の破壊圧力を p_0 で図中に示す。円筒の破壊は4つの縦断面でほぼ等間隔に起こっている。また図3(b), (c)に示した破片は動的破壊におけるものであり、このときの外筒の破壊圧力を p_A で示す。円筒の破壊はいずれも横断面と縦断面で起こっていて複雑である。縦断面で破壊した破片の数を、以下破片の数といい図中に n で示す。破片の数 n は破壊圧力 p_A を増すにしたがって増加している。

表1に $x_0=1.38$ の円筒の実験結果を示す。表1中の

表1 $x_0=1.38$ の円筒の実験結果

No.	d_0 (mm)	d_1 (mm)	p_A (MPa)	p_A/p_0	n
1	21.95	16.09	3.04	1.00	4.0
2	21.95	15.92	3.04		
3	21.95	16.14	2.16		
4	21.98	15.97	2.94		
5	21.99	16.10	1.96		
6	22.01	15.93	2.75	1.16	4.0
7	22.01	16.02	3.33		
8	22.01	16.02	3.33		
9	21.99	15.99	3.33		
10	22.01	15.96	4.41	1.70	4.0
11	22.00	16.16	4.51		
12	21.99	15.94	5.00	2.00	5.0
13	21.98	16.08	5.39		
14	22.02	16.01	5.39		
15	22.01	16.07	5.88	2.41	4.7
16	22.01	16.06	6.28		
17	21.98	16.10	6.96		
18	21.91	15.93	6.86	2.70	5.7
19	22.01	16.03	7.09		
20	22.02	16.02	7.35	3.11	5.5
21	22.01	15.82	7.85		
22	21.99	16.01	7.85		
23	21.97	15.94	8.34		
24	22.01	15.99	8.63		
25	21.99	16.02	8.83	3.49	6.3
26	21.98	16.09	9.12		
27	21.98	16.12	9.61		
28	21.97	15.95	9.81	3.84	7.3
29	22.01	16.03	10.20		
30	22.01	16.01	10.30		
31	22.02	15.94	10.79	4.29	6.3
32	21.98	16.00	11.11		
33	21.96	16.14	11.87

図4 $n-p_A/p_0$ の関係

d_0 と d_1 は円筒の外径と内径、 p_A は外筒の破壊圧力、 n は破片の数である。No. 1～5の結果は静的破壊におけるものであり、No. 6以降の結果が動的破壊におけるものである。表1には外筒の破壊圧力 p_A を静的破壊における円筒の破壊圧力 p_0 の比 p_A/p_0 で示してあるが、この p_0 はNo. 1～5に示した円筒の破壊圧力の平均値である。

図4は表1に記した $x_0=1.38$ の円筒における n と p_A/p_0 の関係を図中に○印で示すとともに、 $x_0=1.22$ の円筒についても●印で区別して示したものであって、この実験結果を説明するのが本報での目的である。実験値は少しばらついてはいるが、曲線(I)と直線(II)の中間の曲線(III)にほぼのっている。なお図中の曲線(I)、直線(II)、曲線(III)については後で述べる。

3. 実験結果の説明

2章で示した動的破壊の実験結果を説明するために、前報⁽⁹⁾で述べた静的破壊、すなわちぜい性材料からなる円筒の静的ガス内圧による破壊の説明が参考になると思われる。詳しくは原論文をみて頂くとして、ここではまずその説明の概要を述べる。

3・1 静的破壊 いま図5に示すような内半径 r_1 、肉厚 t である比較的薄肉の円筒(S)が、静的ガス内圧 p_0 のもとで縦断面(以下断面という)Aで最初の破壊を起こしたとする。この円筒の破壊条件は円周応力の平均値を $\bar{\sigma}$ とすれば、次のようになる。

$$\bar{\sigma} = \sigma_b \quad \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 σ_b は円筒材料の引張強さ

また σ_b と p_0 との間には式(1)の関係があり、これはまた次のように表される。

$$\sigma_b = \frac{p_0 r_1}{t} \quad \dots \dots \dots (1)'$$

一方、円筒が断面Aで破壊すれば破面Aは自由端となるため、除荷波が縦波の速度で円周方向に伝ばするとともにガスが外部にもれる。しかしガスの体積弾

図5 円筒の破壊

性率はきわめて小さいので、除荷波が伝ばしているとき、円筒がうける内圧はほとんど変化せず、 p_0 を保つ。いま除荷波が断面 B, B' に達したときを考えてみる。このとき $\widehat{BCB'}$ ではまだ除荷波が達していないので、破壊前と同じ状態を保つ。しかし $\widehat{AB}$ と $\widehat{AB'}$ では内圧 p_0 をうけているので、断面 B, B' には次のような円周応力 $\bar{\sigma}$ を誘起する。

$$\bar{\sigma} = \frac{p_0 r_1}{t} (1 - \cos \theta) \cdots \cdots \cdots (3)$$

ただし、 θ は断面 A と断面 B, B' とのなす中心角。いま式(3)において $\theta = \pi/2$ とおけば、 $\bar{\sigma}$ は式(1)'の右辺と一致し、式(2)を満足する。したがって円筒が断面 A で破壊すれば、除荷波が $\theta = \pi/2$ だけ伝ばした断面 B, B' で円筒は破壊する。断面 B, B' で破壊すれば、その初期条件は破面 A におけるものと同じになるため、除荷波が断面 B, B' よりさらに $\theta = \pi/2$ だけ伝ばした断面 C で円筒は破壊する。これが静的破壊において円筒が4つの縦断面で等間隔に破壊することの説明であり、また断面 B, B', C における破壊は、縦波の速度で伝ばするため衝撃破壊となる。

3・2 動的破壊 2章で述べた実験結果は、上述した静的破壊の説明を少し拡張すれば説明できるものと思われる。ここでは実験結果の定量的な説明を述べる前に、定性的な説明を述べる。

3・2・1 定性的な説明 円筒(S)と外筒(E)との間で占める容積を V とし、容積 V を次のように仮定する。

$$(1) \quad V \approx 0$$

$$(2) \quad V \approx \infty$$

仮定(1)では容積 V はきわめて小さいので、外筒(E)が液圧 $p_l = p_A$ で破壊すれば、液圧は直ちに零まで低下するとともに、円筒(S)は瞬時にガス内圧 $p_g = p_A$ をうけて破壊する。したがって式(3)に相当する $\bar{\sigma}$ は次式のようになる。

$$\bar{\sigma} = \frac{p_0 r_1}{t} \cdot \frac{p_A}{p_0} (1 - \cos \theta) \cdots \cdots \cdots (3)'$$

ただし p_0 は静的破壊での円筒の破壊圧力。本実験では $p_A > p_0$ であるので式(2)を満足する中心角 θ は $\theta < \pi/2$ となり、また p_A が増すにしたがって θ は小さくなるので、破片の数 n は p_A を増すにしたがって増加する。図4中の曲線(I)は式(3)'と(2)より p_A/p_0 をパラメータにして θ を求め、それを次式に代入して求めた n と p_A/p_0 の関係である。

$$n = \frac{2\pi}{\theta} \cdots \cdots \cdots (4)$$

仮定(2)では容積 V はかなり大きいので、外筒

(E)が破壊すれば液圧はかなりゆっくり低下し、その低下にしたがって円筒(S)はガス内圧をうける。したがってこのときの円筒(S)の破壊は静的破壊におけるものと同様、4つの縦断面で等間隔に起こることとなる。この関係を示したものが図4中の直線(II)である。

一方、本実験では前述のように円筒(S)と外筒(E)とのクリアランスは1mmとし、容積 V をかなり小さくしているが、容積 V は仮定(1)と(2)で示したものの中間にある。このため外筒(E)が破壊すれば液圧は急に低下するが、液圧が零まで低下するに要する時間は有限となる。したがって実験結果は図4中の曲線(I)と直線(II)の中間の曲線(III)で示したようになる。これが実験結果の定性的な説明であって、この説明から図中の曲線(I)と直線(II)は円筒(S)の破片の数 n に関して上限と下限を与えるものとなる。

3・2・2 定量的な説明 本実験における円筒(S)の破壊は外筒(E)の破壊による液圧の低下に依存し、また円筒(S)がうける外圧 p_A は約 $p_A < 1.5\sigma_0$ であるので、円筒(S)の破壊条件は式(2)となる⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。いま外筒(E)が液圧 $p_l = p_A$ で破壊して液圧が Δp だけ低下したとき、円筒(S)に最初の破壊が起こったとする。このときの円筒(S)は液外圧 $(p_A - \Delta p)$ とガス内圧 p_A をうけているので、円筒(S)に誘起する円周応力 $\bar{\sigma}$ は次のようになる。

$$\bar{\sigma} = \frac{r_1}{t} p_A - \frac{r_0}{t} (p_A - \Delta p)$$

ただし r_0 は円筒の外半径

上式に条件式(2)を適用し、円筒(S)が最初に破壊するときの Δp と σ_0 との関係を求めれば、次のようになる。

$$\frac{r_1}{t} \Delta p - (p_A - \Delta p) = \sigma_0 \cdots \cdots \cdots (5)$$

次に円筒(S)が最初に破壊した後に誘起される衝撃破壊について述べる。円筒(S)の衝撃破壊は液圧の低下に伴って進行するので、現象は複雑である。このため問題を次のように簡素化して考える。すなわち液圧が零 ($\Delta p = p_A$) になったとき、円筒(S)の衝撃破壊が終了するものとし、また衝撃破壊の進行時に円筒(S)がうける液外圧とガス内圧は、破壊が始まって終了するまで一定値とし、その値はその間の平均値で与えられると仮定する。この仮定により衝撃破壊時に円筒(S)がうける液外圧は $(p_A - \Delta p)/2$ 、またガス内圧は p_A となるので、前述の式(3)、(3)'に相当する $\bar{\sigma}$ は次のようになる。

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{r_1}{t} (p_A + \Delta p) - (p_A - \Delta p) \right\} (1 - \cos \theta)$$

上式と式(5)より Δp を消去して、整理すれば、

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2} \frac{p_0 r_1}{t} \left(1 + \frac{p_A}{p_0} \right) (1 - \cos \theta) \dots\dots\dots (3)''$$

上式において $p_A = p_0$ とおけば、前述の式(3)に一致し、ここで述べた衝撃破壊は、3.1節の静的ガス内圧下における衝撃破壊と矛盾しないことを示す。図4中の曲線(III)は式(3)''に(2)を代入し、 p_A/p_0 をパラメータにして中心角 θ を求め、それを式(4)に代入して求めた n と p_A/p_0 の関係である。この曲線(III)が2種類の円筒についての実験結果とほぼ一致することについてはすでに述べた。

一方、この曲線(III)は前述のように液圧が零になったとき、円筒(S)の衝撃破壊が終了するものとして求めたものであり、これが実際の円筒の破壊においても同様に起こるとは考えられない。しかし曲線(III)と実験値とがほぼ一致していることからみて、実際の円筒の破壊はそれに近い状態になっているものと思われる。したがって円筒(S)と外筒(E)との間で占める容積 V が、本試験装置のものよりも小さいときの円筒の破壊では、実験値は曲線(III)から曲線(I)のほうに移行し、また逆の円筒では、実験値は曲線(III)から直線(II)のほうに移行することとなる。

4. 結 論

本報では図1に示すような試験装置を考案して、ぜい性材料からなる円筒の動的ガス内圧による破壊試験を試み、縦断面で破壊した破片の数に着目した実験結

果とその説明について述べた。その結果明らかとなった主なことは次のとおりである。

(1) 円筒の破片の数は外筒の破壊圧力を増すにしたがって増加し、4以上となる。

(2) 破片の数には図4中の曲線(I)と直線(II)で示す上、下の限界がある。

上述の実験結果の説明は、円筒と外筒との間で占める容積を考慮して、前報の円筒の静的ガス内圧による破壊の説明を拡張して行い、実験とよい一致をみた。

またここで述べた円筒の破壊は、当然火薬の爆発による円筒の内圧破壊においても同様に起こることであるが、これについては前報⁽¹²⁾に示してあるので、ここでは割愛する。

文 献

- (1) 後藤・三浦, 土木学会論文報告集, 285 (昭54), 121.
- (2) 岩井・ほか3名, 日本建築学会論文報告集, 314 (昭57), 102.
- (3) Holzhausen, G. R. and Johnson, A. M., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 16-3 (1979), 163.
- (4) Brady, B. T., ほか2名, *Rock Mech.*, 5-2 (1973), 107.
- (5) Steele, M. C. and Eichberger, L. C., *Trans. ASME*, 79-7 (1957), 1608.
- (6) Sato, Y. and Shiguma, S., *Bull. JSME*, 14-72 (1971), 517.
- (7) 渡辺・ほか2名, 機論, 43-370 (昭52), 2071.
- (8) 佐藤・柳, 機論, 41-346 (昭50), 1658.
- (9) 佐藤・橋本, 材料科学, 20-1 (昭58), 59.
- (10) 佐藤, 材料の強度と塑性, (昭55), 86, 森北出版.
- (11) 佐藤, 機論, 39-320, (昭48), 1096.
- (12) 佐藤・永井, 機誌, 69-575 (昭41), 1617.