減肉管の外圧による圧壊変形に関する研究*

柴 田 俊 忍** 中 井 宏*** 藤 浪 清***

A Study on Failure of Partially Thinned Pipes by External Pressure

by

Toshinobu SHIBATA, Hiroshi NAKAI and Kiyoshi FUJINAMI

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

It is important to prevent the buckling of thin pipes caused by an external pressure in the heat-exchanger system of a pressurized water reactor. The design code in ASME Sec.III NB considers this point. However, the thickness of pipes is partially thinned down by steam-liquid flow in service, and in design step no consideration is being paid to such a partially thinned down pipe, though much attention should be paid on this point.

In this paper, the pressure at failure of a partially thinned pipe under an external pressure was studied. The experimental results show that the failure occurs at unexpectedly small pressure, if the thinned part has some expansion in area, and that the pressure at failure does not follow with the buckling equation given by elastic theory for thin cylinders.

(Received Dec. 9, 1978)

キー・ワード：減肉管の座屈，蒸気発生細管，原子力発電所

1 は じ め に

通常用いられる配管系においては，内圧による強度が大きな問題となり，特殊な使用状態を除いて外圧による圧壊，座屈を考慮する必要はない．しかし加圧水型原子炉の一次と二次冷却水の熱交換用細管のように，内圧 (150 kg/cm²) と外圧 (75 kg/cm²) が同時に加わっているような場合には，故障や事故を想定して，外圧による圧壊を予め考慮しておく事が要求される．

特に上記の熱交換器の蒸気細管においては，管の外周部が部分的に減肉されていることが報告されている．このような減肉部をもつ細管が外圧に対してどれほどの強度を有しているかについては報告がない．本研究においては，蒸気細管と同一寸法の呼び径20の管に減肉部を作り，外圧を加えて圧壊試験を行い，その結果について考察を行った．

2 実 験 方 法

2・1 供試材料

実験に用いた円管は JIS G 3425 の 高圧配管用管 (SGP; P : 0.05%以下, S : 0.05%以下, C : 0.2%以下) で，呼び径20である．管は入手状態のまま熱処

理を行わずに加工し，実験に供したが，一部比較のため試験片加工後真空焼なましを施した．その条件は，700℃で30分のもとの，900℃で60分の2種類である．JIS Z2201 の11号試験片による引張試験の結果（それぞれ3本ずつの平均）を Table I に示した．

Table I. Mechanical properties of the specimen.

Heat treatment	Upper yield point (kg/mm ²)	Lower yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
As rolled	25.8	—	37.1	40.5
700°C 30 min. Annealing	23.0	21.3	33.0	51.6
900°C 60 min. Annealing	20.1	19.4	31.3	50.0

* JIS Z 2201 Type 11 was tested.
* Values show the mean of three specimens respectively.

2・2 試験片

供試管を内径 22 mm，外径 26 mm に旋削した後，Fig.1 に示す形に減肉部分をフライス加工した．減肉部分は図示のように，減肉角 θ ，減肉長さ l ，および減肉部の肉厚 t を実験のパラメータとなるようにしている．減肉部の加工は，供試管の内側に芯材を入れて割出し台に固定し，エンドミル (径 10 mm) の側面を用いて管の軸方向に l の長さだけ減肉し，次いで割出し台を用いて 5° または 10° 回転させて同様の減肉

* 本報を「パイプ破断に関する研究 (第1報)」(Study on Pipe Rupture, I) とする.
原稿受理 昭和53年12月9日
** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町
*** 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

Fig. 1. Test specimen.

加工を行うという方法を用いた。割り出し台を用いて 10° ずつ回転させるときに生ずる減肉部厚さの誤差は

$$\Delta t = (2 - t) / \cos \frac{10^\circ}{2} - 2 (\text{mm})$$

であり, $t=0.1$ mm のとき, $\Delta t=0.042$ mm である。

割り出し角 5° で $\Delta t=0.1$ mm のとき $\Delta t=0.011$ mm の大きさである。

試験片の両端には厚さ 3 mm のアルミニウム板をアルダイト接着剤で接着し密封した。加圧試験中、アルミニウム板の凹み変形は高圧力域で 2, 3 生じたが、接着部分の破損や、洩れは生じなかった。

2・3 加圧装置

本研究のために、耐圧強度 200 kg/cm^2 、内容積 6 l の圧力容器を作った。この容器中に試験片を入れ、手動ポンプにより加圧した。圧力は共和電業製圧力変換器 PG-200KU (容量 200 kg/cm^2) を用いて検出し、ひずみ計を介してペン書きオシロあるいは X-Y 記録計に記録した。

なお圧壊するときの圧力は、圧壊が座屈現象の一つであることから、不安定変形時に生ずる可聴音によって、あるいは圧壊時に生ずる試験片の内容積の変化に伴って記録紙上に現れてくる圧力低下より読み取った。試験片の一部には減肉部分に電気抵抗線ひずみゲージを貼付し、圧力-ひずみ曲線として X-Y 記録計に記録し、考察の助けとした。

3 実験結果

熱処理をしない状態で、かつ割り出し角 10° で加工した試験片による結果を、減肉部の寸法および後述の (6) 式より計算される圧壊圧力とあわせて Table II に示した。 $l=0$ mm に対しては、 $t=0.1$ mm, $\theta=90^\circ$ でも、外圧 200 kg/cm^2 で圧壊も変形も生じないが、 $l=20$ mm, $\theta=70^\circ$, $t=0.12$ mm では外圧 15 kg/cm^2 で圧壊している。 Fig. 2 は圧壊状況を例示したものである。寸法および圧壊圧力は図示のとおりである。図示のごとく、外圧を加えると、試験片には変形が生じ、次いで破断 (開口) する。 Fig. 2 (a) の場合、外圧 130 kg/cm^2 において図示のような変形と減肉部の肩部の所に小孔が生じ、油が管内に侵入している。 Fig. 2 (b) の場合には、外圧 33 kg/cm^2 で変形が生じ、 $33 \sim 45 \text{ kg/cm}^2$ の圧力間に開口しているが、開口時の圧力を特定することは困難であった。このように、一般に開

Table II. Comparison of experimental results with calculated values.

Dimension of thinned part			Failed pressure (kg/cm^2)	
Length l (mm)	Angle θ (deg.)	Thickness t (mm)	Exptl. P_e	Calculated. P_e
30	90	0 60	184	184.0
		0 35	66	75.7
	70	0 57	178	170.1
		0 41	110	98.8
		0 26	62	47.9
		0.26	52	47.9
	50	0 49	149	134.2
		0 41	116	100.5
		0 33	74	71.1
		0 19	22	30.8
	30	0.48	149	133.7
		0 42	135	108.1
		0 30	86	64.2
		0.21	43	38.0
	10	0.54	163	177.5
		0 38	122	104.7
		0 28	80	68.0
		0 20	40	43.8
	0	0 31	82	116.3
		0 22	55	80.1
		0.11*	54	34.9
20	90	0 65	>200	224.1
		0 55	168	171.0
		0 48	150	137.7
		0.38	107	95.6
		0 35	90	84.2
	70	0 75	>200	284.8
		0 55	167	172.3
		0 45	141	125.4
		0 12	15	19.7
	50	0 65	>200	227.9
		0 51	156	154.9
		0 41	122	110.4
		0 30	84	69.2
		0 19	36	36.6
	30	0.50	154	154.5
		0.37	122	98.1
		0 30	77	72.5
		0 20	67	41.9
	10	0.10	30	18.9
		0 52*	130	180.7
		0 30	79	84.4
		0 14	25	35.6
		0.14	41	35.6
	0	0 39	175	168.6
		0 30	172	126.4
		0.22	108	93.5
10	70	0 50*	155	186.5
		0.50*	168	186.5
		0 30	96	94.1
		0 17	33	48.4
	50	0 50*	110	189.1
		0 31	97	100.3
		0.15	37	44.1
	30	0 37	142	130.7
		0 29	101	96.8
		0 20	54	63.9
	10	0 50	200	215.0
		0 27	65	105.2
		0.15*	55	62.1
	0	0.20	>200	131.0
0	90	0 40	>200	>200
		0 15		
	50	0 10		
	20	0 15		
		0.05		
	10	0 20		
		0.10		
	0	0 10		

* These specimens are the retested specimens which did not failure at $l=0$ mm.

Fig. 2. Examples of pipe failed by external pressure.

口時の圧力を明確にできなかったので、座屈による不安定変形を生じたときの圧力を圧壊圧力とした。Table II に示した圧力はこの値である。

なお、Table II 中、*印の付した試験片は $l=0 \text{ mm}$ で 200 kg/cm^2 の圧力下で圧壊しなかったものについて、その $l=0 \text{ mm}$ の減肉部の裏側に、表記の減肉部を加工したものである。

つぎに割り出し角度を 5° および 10° に変化させたときの影響を示したものが Fig. 3 である。図中実線は後述の(6)式より計算したものである。図より割り出し角度によって圧壊圧力には殆んど差がないので、割り出し角度を 10° として試験片を加工したことによる影響はないものとして考察を進めた。

圧壊圧力に及ぼす熱処理の影響を示したのが Fig. 4 である。熱処理を施した場合、圧壊圧力はかなり減少するがこれは焼なましによって延性が増加するためと考えられる。実際の使用状況は入手状態に近いと考え

Fig. 3. Effect of machining angle by index-head on result.

Fig. 4. Effect of heat treatment on result.

られるので以後の考察では熱処理をしない材料の結果を対象とする。

4 実験結果の考察

4・1 薄肉円管の座屈の式

円管の圧壊(座屈)圧力 P_{cr} は、円管断面内で平面応力的に解いたときに、次式で与えられる。^{1)~3)}

$$P_{cr} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{r_0} \right)^3 \quad (1)$$

E : ヤング率

ν : ポアソン比

t : 薄肉円管の肉厚

r_0 : 薄肉円管の半径

この式では円管の長さの影響が入れられていない。円管の長さ l を加味し、円管の軸方向および半径方向から加圧されたときの座屈圧力は Von Mises によって⁴⁾ 次式のように与えられている。

$$P_{cr} = \frac{Et}{r_0} \times \frac{1}{n^2 + (\pi r_0/l)^2/2} \times \left\{ \frac{1}{[n^2(l/\pi r_0)^2 + 1]^2} + \frac{l^2[n^2 + (\pi r_0/l)^2]^2}{12r_0^2(1-\nu^2)} \right\} \quad (2)$$

式中 n は座屈の次数である。 $l \rightarrow \infty$ となったとき、 P_{cr} の値は $(t/r_0)^3$ の値に比例するが、軸方向の圧力を考えているから(1)式とは一致しないのは当然である。

Fig. 3 および 4 より明らかなように、圧壊圧力は t^3 には比例せず、 t の指数は 3 よりも小さく、ほぼ 1.5 であることが予想できる。(1)、(2)式とも、今回のような減肉管の圧壊圧力を表現できないことは明らかである。

4・2 減肉管の圧壊圧力を示す式

本実験で行ったような減肉管の圧壊圧力を示す式を実験結果に基づいて求めてみる。圧壊圧力を決定する因子には、減肉部分の各寸法、すなわち肉厚 t 、長さ l 、角度 θ 、の他に、管径 $2r_0$ 、材質 E 、 ν および材料の強度 σ_y が考えられるが、同一材料、寸法の管を素材にしているため、 r_0 、 E 、 ν 、 σ_y については考えないことにする。

微小な減肉部を考えたとき、この部分に加わる外圧

を減肉部分の周囲のせん断応力によって受けると仮定すると、圧壊圧力は、 θ に関して

$$P_c \propto A + 1/\theta \quad (3)$$

なる形をもっと予測される。定数 A は、 l および t の関数であるが簡単のために t の一次形であると仮定する。Table II において示したように $\theta = 0^\circ$ でも圧壊することを考えて、(3)式の θ の代りに $\theta + \theta_0$ とおくと、(3)式は

$$P_c \propto At + 1/(\theta + \theta_0) \quad (3')$$

とおける。

つぎに、 l に関しても同様の考え方にに基づき、かつ(2)式からのアナロジーによって、

$$P_c \propto Bt + 1/(l + l_0)^2 \quad (4)$$

なる形を想定する。また、 t に関しては単に $P_c \propto t^\alpha$ と考えると、(3')式および(4)式より、圧壊圧力 P_c は l 、 θ 、 t の関数として

$$P_c = P_0 t^\alpha \{1/(\theta + \theta_0) + At\} \{1/(l + l_0)^2 + Bt\} \quad (5)$$

なる形が得られる。 θ_0 および l_0 の値は、減肉部の端部で、肉厚が $1.1t$ となる部分まで減肉部として拡張することにより

$$\theta_0 = 5^\circ, \quad l_0 = 6 \text{ mm}$$

が得られる。このことは、Fig. 2 に示すように、圧壊変形した管の測定からも妥当な値である。

つぎに(5)式の定数 A および B を、 t 、 l あるいは t 、 θ を一定にしたデータよりそれぞれ独立に最小二乗法によって求め、最後に全データより P_0 と α を最小二乗法によって求めた。その結果、

$$P_c = 3.89 \times 10^4 \times t^{-0.221} \{1/(\theta + 5) + 0.672t\} \times \{1/(l + 6)^2 + 0.0157t\} \quad (6)$$

が得られた。ただし、 t 、 l は mm で、 θ は度、 P_c は kg/cm^2 で表している。なお前述のように(2)式から予測できる α の値は 1 であり、Fig. 3, 4 より予測される値は -0.5 であったが、最小二乗法で得られた値は -0.221 であり、(6)式はかなり実験結果より予測される値に近い。なお Fig. 3, 4 に示した実線および Table II の最右欄の値は(6)式から計算した値を示したものである。

4・3 実験値と圧壊圧力を表す式との比較

上で求めた圧壊圧力 P_c と実験結果を比較したものが Fig. 5~8 である。Fig. 5 は $l = 20 \text{ mm}$ の結果を、減肉角 θ を横軸にとって示したもので、実験結果を点で、(6)式で計算した値を実線にて示した。各実験点に付した数字は減肉部の肉厚 t である。Fig. 6 は減肉角 $\theta = 30^\circ$ に対して減肉部長さ l を横軸にとって結果を示したものである。Fig. 7, 8 は $l = 10$ および 20 mm に対して、実験値 P_c を縦軸に、(6)式による計算値 P_c を横軸にとって示したものである。図中 * 印を付した点は、Table II で * 印を付したデータである。これ

らの点はいずれも実験値が計算値よりも小さくできている。このことは、減肉部が近接して 2 か所にあるため変形抵抗が減少したためと考えられる。このような干渉効果についてはさらに今後研究すべきことであると考えている。

Fig. 5. Effect of angle of thinned part θ on results (Numbers beside point and lines indicate the thickness t (mm)).

Fig. 6. Effect of length of thinned part l on results.

Fig. 7. Comparison of experimental results with calculated ones. ($l = 10 \text{ mm}$)

Fig. 8. Comparison of experimental result with calculated ones. ($l=20$ mm)

Fig. 9. Effect of thickness at thinned part t on result.

Fig. 9 は $l=30$ mm に対して横軸に減肉部肉厚 t をとり、減肉角 θ をパラメータにとって実験結果と、計算値を比較したものである。

実験結果のばらつきを考慮すれば、Fig. 5~9 でみるように、(6)式はかなりよく実験結果を代表しているといえる。

4.4 三木の実験との比較

伊方の原子力発電所建設に関する行政訴訟（いわゆる伊方原発訴訟）において、被告の国側が、減肉管の内外圧に対する強度を保障するものとして提出した三木の実験結果⁵⁾と我々の結果を比較してみる。この実験では、インコネル 600 のウェスティングハウス社タイプの伝熱管に、Fig. 10 に示すような形状の減肉を与えたときの強度を実験的に求めている。三木の実験の内、外圧に対する圧壊強度の結果のみを Fig. 11 に書き直して示した。この実験では圧壊圧力がいずれも 200 kg/cm² を越えており、原子力発電所の一次冷却水が LOCA 時などにたとえ 0 kg/cm² になっても、二次冷却水の圧力 75 kg/cm² の外圧以上であり、減肉率 $(l-t)/l$ が 95% 以上 ($t=0.08$ mm) になっても圧壊し

Fig. 10. Test specimen of Miki's experiment. (Shadowed parts were thinned out)

Fig. 11. Miki's experimental result⁵⁾.

ないと述べている。しかし三木の実験は、著者達の実験における $l=0$ mm, $\theta=0^\circ$ に相当するものであり、我々の実験範囲の極く一部分にしか過ぎない。

Fig. 12 は我々の実験結果の内 $\theta=0^\circ$ に対する結果を l をパラメータにして示したものである。 $l=0$ mm, $\theta=0^\circ$ では明らかに圧壊圧力は 200 kg/cm² を越えているが、 l が 20 mm, 30 mm の実験値は、 200 kg/cm² より低くなり、 $l=30$ mm で $t=0.22$ mm の試験片は 55 kg/cm² の外圧で圧壊している。

Fig. 12. Result at $\theta=0^\circ$.

通常減肉は $\theta=0^\circ$, $l=0$ mm の形に限定できるものではなく、かなりのひろがりをもっているものであり、三木の実験結果のように限定された条件から得られる結論「減肉率が 95% でも圧壊圧力は 200 kg/cm² を越えるから、外圧 75 kg/cm² の蒸気細管は安全である。」ということは間違っているといえよう。

なお三木の結果は(6)式で計算される値よりも小さい

が, これは供給管の肉厚 t' が異なるためと, 減肉部の曲率半径 R が異なるためで, 三木の試験片の方が変形しやすいためである. (5)式の l_0 の値に, $l_0=9\text{ mm}$ の値を代入して計算した結果を Fig. 11 に図示したが, 三木の実験結果をもよく表していることがわかる. なお, 三木の実験結果の内, 減肉率が60%以下の場合全断面の影響が現れてくるので比較の対象から除外した.

5 結 言

減肉管の外圧による圧壊変形抵抗を求めるために, 呼び径20の供試管に, 減肉部の長さ, 肉厚, 減肉角度をパラメータとした一連の実験を行った. その結果, 得られた結論は次のとおりである.

(1) 薄肉管の圧壊(座屈)圧力を示す弾性式は, 減肉管には適用できない.

(2) 減肉管の圧壊圧力を示す式を導いたが, 実験範囲内で, 実験結果と良い一致を示した. 薄肉円管での座屈圧力は, 肉厚 t の3乗に比例するが, 減肉管では t の 1.78 乗に比例する式となった.

(3) 減肉部があるひろがりをもてば, 非常に低い外圧によっても, 減肉部は容易に圧壊変形し, 開口するので, 配管の安全管理には十分な配慮が払われるべきである.

(4) 減肉部が近接して二つ以上存在する場合, 変形抵抗の減少により, (6)式で与えられる圧壊圧力より低い圧力で圧壊する.

(昭和52年5月25日 日本材料学会第26期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 安藤良夫, 岡林邦夫, “原子力プラントの構造設計(原子力工学シリーズ, 3)”, 126 (1977) 東大出版会
- 2) 河本 実, “材料力学”, 161 (1973) 共立出版
- 3) Timoshenko, S. P., and J. M. Gree, “Theory of Elastic Stability”, 289 (1936) McGraw-Hill
- 4) Timoshenko, S. P., and J. M. Gree, “Theory of Elastic Stability” 498 (1936) McGraw-Hill
- 5) 三木孝夫, “蒸気発生器伝熱管の強度試験結果”(1977) 三菱重工業高砂工場技術報告