U.D.C. 620. 171. 5: 621. 642. 3-186. 4

圧力容器ノズル部の光弾性実験

Three-Dimentional Photoelastic Study of Stress Around Nozzles in Pressure Vessels

岩 崎 勤* 大 内 田 久** Tsutomu Iwasaki Hisashi Ôuchida

内 容 梗 概

圧力容器の構造上の不連続部分のうち,球殻および円筒殻に付けられたフラッシュ形およびスルー形ノズル 部につき,内圧によって生ずる局部応力を3次元光弾性実験を用いて解析し,薄膜応力に対する応力集中係数 を求めてノズル形式を検討し,また理論計算値と比較検討した結果について述べる。

1. 緒 言

原子力,火力発電および石油化学工業設備などの基本要素となる 圧力容器の設計において,構造上の不連続部の応力集中を十分は握 しておくことはきわめて重要なことである。

原子炉圧力容器の設計基準として ASME Voiler and Pressure Vessel Code Section III (1963)が制定された結果,従来の規格に比べてさらに詳細な応力解析および疲労を考慮した設計が必要となり,これらによって圧力容器の安全性が評価されて,強度的ならびに



経済的にもつり合のとれた限界設計が行なわれる段階にきている。

圧力容器のノズル部に生ずる局部的な応力集中に関する理論的解 析は,複雑な形状のために困難で,主として実験的応力解析によら ねばならない場合が多い⁽¹⁾。最近のように応力測定技術が進歩して くると,かなりよい精度でこれらの局部応力を求めることができる ようになってきた。

本文は実験的応力解析の有力な手段となっている3次元光弾性実験によって,球殻および円筒殻に付けられた各種ノズルの内圧により生ずる局部応力を明らかにしたものである。

2. 実 験 方 法

2.1 供試モデル

モデル材料はエポキシ樹脂でアラルダイトBと硬化剤 901 を重量 比 100:20 で混合し,130℃にて注型したのち130℃ 24 h 焼なまし

第1表 円筒殻ノズルの各部寸法

1	ズル	内径	肉 厚 t (mm)	外 側 隅半径 r ₀ (mm)	内 側 阳 ri(馬半径 mm)	突出量	
No.	形式	(mm)			円周方向断面	長手方 向断面	$\begin{pmatrix} \delta \\ (mm) \end{pmatrix}$	備考
1	フラッシュ	36	5.0	4.6	2.0	4.4		
2	フラッシュ	36	3.2	4.4	1.2	4.4		
3	スルー	36	3.2	2.8	2.8	4.5	6	
4	フラッシュ	18	3.4	2.8	1.7	2.7		
5	スルー	18	3.0	3.3	2.6	3.6	5	
6	フラッシュ	18	3.0	1.8	1.5	3.0		ノズル
7	フラッシュ	18	3.0	2.6	1.5	2.3		胴板側補強



第2図 円筒殻ノズルの光弾性モデル



圧力 容 器 ノ ズ ル 部 の 光 弾 性 実 験



100

(a) 円周方向スライス
 (b) 長手方向スライス
 第5図 フラッシュ形ノズルのスライス採取方法

を行ない,次いで5~8℃/h で除冷してつくった。

供試モデルは第1,2回に示すような球殻および円筒殻に各種のノ ズルを付けたものである。 円筒殻ノズルの各部寸法を第1表に示 す。表の下の図に示すようにノズルは付根形状によって,従来から 多く採用されているフラッシュ形ノズルと最近用いられるようにな ったスルー形ノズル⁽²⁾に大別される。また,ノズルの取り付けられ る圧力容器が球殻と円筒殻の場合があり,さらにノズル中心線の方 向によって垂直および斜角ノズルに分類される。

第1図(a)と第2図は球殻と円筒殻について,フラッシュ形とス ルー形ノズルの比較を行なうためのモデルを示したものである。第 1図(b)は日本原子力研究所へ納入された動力試験炉(JPDR)圧力 容器の上部鏡板に相当するもので,斜角ノズルが4本付けられてあ る。第3図に各種ノズルをつけた円筒殻モデルの外観を示す。

2.2 応力凍結方法

各モデルの応力凍結方法を第4図に示す。同図(a)の加圧凍結装 置にモデルを取り付けて内圧負荷を与え、一定に保ちながら同図 (b)のように熱処理を施すことによって、内圧によって生じた各部 の応力は凍結される。なお凍結温度130℃における保持時間はモデ ルの大きさによって1~3hにかえて行なわれた。 凍結温度におけ る各モデル部材の光弾性感度および縦弾性係数は第2表のとおりで ある。

2.3 応力解析方法

加圧凍結された各モデルは軸対称の応力状態となるため, 主応力 方向は球, 円筒殻のそれぞれ軸, 円周方向となる。以下応力の方向





第7図 円筒殻ノズルの表面スライス

したノズル穴を含む円筒の表面スライスを採取した。

このようにして採取したスライスを偏光装置に入れて,応力しま 写真を求めた。このとき応力の符号は引張形コンペンセータで,ま た1次以下のしま次数はバビネコンペンセータおよび Tardy 法を 併用して測定した。

応力算出にさいし、今問題となるのは内圧 $p(kg/mm^2)$ によって 生ずるモデルの内、外側における応力 $\sigma_i, \sigma_0(kg/mm^2)$ で、これら を無次元量の応力比 σ/p ので整理すれば、

内側
$$\frac{\sigma_i}{p} = \frac{n_i}{\alpha \cdot t \cdot p} - 1$$

外側 $\frac{\sigma_0}{p} = \frac{n_0}{\alpha \cdot t \cdot p}$

はノズルではなく、すべて球、円筒殻の軸、円周方向を基準とする。 したがってこれらの方向、すなわち球殻の場合はノズル中心を含み 軸方向に、円筒殻の場合は同じくノズル中心を通り円周方向と長手 (軸)方向に1次スライスを採取し、さらにこれに直角に2次スライ スの小片を求めることにした。フラッシュ形およびスルー形ノズル 部のそれぞれのスライス採取方法を第5,6図に示す。なお円筒殻ノ ズルについては第7図のように、円筒外側面に平行にノズルを切離

ここに、 n_1, n_0 : 内, 外側のしま次数,

α: 凍結温度における光弾性感度 (mm/kg)
 t: スライス片の厚さ (mm)

-となる。以下,この応力比 σ/p をもって応力分布をあらわし、また 応力集中係数は薄膜応力比 $\sigma_{m1}/p = (D+T)/2T$ (D:球,円筒殻の 内径,T:肉厚)に対する値を主として用いることとする。 日立製作所日立研究所創立三十周年記念論文集













円周方向 (a) ノズル穴周縁

円筒フラッシュ形②ノズルの応力しま写真 第10 図





第9図 球殻斜角ノズル の応力しま写真

(a) 円周方向断面 (b) 長手方向断面 第11図 円筒かくスルー形③ノズルの 応力しま写真

(a) 円周方向断面 (b) 長手方向断面 第12図 円筒殻フラッシュ形⑥ノズルの 応力しま写真





(a) 円周方向断面 (b) 長手方向断面 第13図 円筒殻フラッシュ形⑦ノズルの 応力しま写真

3. 結果および検討

球殻垂直/ズル,球殻斜角/ズルおよび円筒殻/ ズルについて求めた1次スライスの代表的応力しま 写真を第8~13 図に示す。なお2次スライスは省略 した。 これらから応力比 o/p であらわしたノズル 部の応力分布は第14~19図のように求まり、次のことが明らかに なった。

3.1 球殻ノズル

第14図において,垂直ノズルのフラッシュ形とスルー形を比較し てみる。最大局部応力はいずれも内側のノズル付根部に生じ、フラ



第14図 球殻垂直ノズルの応力分布 第15図 球殻斜角ノズルの応力分布

> ッシュ形ではそのかどに、スルー形ではノズルの球殻内側へ突き出 した端部よりノズル側へはいった点に生ずる。

> これらの最大局部応力はいずれも円周方向応力で,フラッシュ形, スルー形ではそれぞれ応力比 $\sigma/p=9.2, 7.8$ となり、応力集中係数は 1.58, 1.34 となって、ノズルが球殻内側へ突き出たスルー形では約 15%局部応力が減少することがわかった。またノズル付根部外側に はこれらと同程度の軸方向応力が生じ, フラッシュ形, スルー形で はそれぞれ の/p=8.7,7.8となる。したがって、ノズル形状すなわち ノズル内径、ノズル肉厚、付根隅半径などが同一であるならば、ス ルー形ノズルのほうがフラッシュ形ノズルよりも有利である。 次に、フラッシュ形斜角ノズルについては第15図に示すように、 垂直ノズルの場合と同様にやはり内側の応力の方が外側よりも大き い。最大局部応力は斜角ノズルの球殻中心軸に近い鋭角断面かどに 生ずる円周方向応力で、 $\sigma/p=14.0$ となり、また鈍角断面かどでは

第2表 各ノズル材の凍結温度における光弾性常数

モ	デ	N)	ズ	n	光 弾 性 感 度 (mm/kg)	縦 弾 性 係 数 (kg/mm ²)
球		殻	垂		直	39.78	0.93
球		殻	斜		角	40.26	0.89
			(1)	2	3	42.12	1.04
円	筒	殻	4	(5)	6	41.09	1.04
			(7)			42.20	0.87



第3表 球殻ノズル部の最大応力比と応力集中係数

ノズル			応力	力	実験値	計 算 值		応力集中係数		
名	称	形	式	方	向	(応力比) <i>σ</i> /p	薄膜応力比 σm1/p	局部応力比 $\sigma m_2/p$	$rac{\sigma/p}{\sigma m_1/p}$	$\frac{\sigma/p}{\sigma m_2/p}$
	ズル			軸		0	5.00	-2.65	1 50	
垂直ノ		////2	円	周	9.2	5.83	8.29	1.58	1.11	
		スルー	車	由	2.8	5.00	-2.65	1.34	0.94	
			円	周	7.8	5.83	8.29			
斜角ノ	ズル	フラッシュ	車	ili ili	0.6	0.75	-2.07	2.08	1.63	
			円	周	14.0	0.75	8.59			

第4表 円筒殻ノズル部の最大応力比と応力集中係数

1	ズル	内径比	肉厚比 <i>t/T</i>	隅半径比 r_i/T	突出比 <i>δ/T</i>	実 験 値		応力集 中係数	111-12
No.	形式	d/D				方向	σ/p	$\frac{\sigma/p}{\sigma_{m1}/p}$	備考
1	フラッシュ	0.2	1.00	0.88		軸円周	$-1.5 \\ 45.7$	2.45	
2	フラッシュ	0.2	0.64	0.88	·	軸 円周	$-1.5 \\ 50.1$	2.68	
3	スルー	0.2	0.64	0.90	1.20	ー 軸 円周	$-12.6 \\ 31.1$	1.66	
4	フラッシュ	0.1	0.68	0.54		軸 円周	-1.0 43.9	2.35	
5	スルー	0.1	0.60	0.72	1.00	軸 円周	-10.8 29.8	1.60	
6	フラッシュ	0.1	0.60	0.60		軸 円周	$1.0 \\ 41.4$	2.21	ノズル側補強

第16図 円筒殻フラッシュ形 ② ノズルの応力分布



(a) ノズル穴周縁の円周方向応力分布



第17図 円筒殻スルー形③ノズルの応力分布

σ/p=10.5 と小さくなる。応力集中係数はそれぞれ 2.08 および 1.56



注: 応力集中係数は薄膜応力比 $\sigma_{m1}/p = D + T/2 T = 18.7$ に対する円周方 向応力にのみ求めた。



え合せて合成応力を理論的に求める方法がある⁽³⁾。この計算方法に よって求められるノズル部の局部応力を便宜上 σm2 の記号で表わ し,応力比 σm2/pにて前述の実験結果と比較すると**第3表**のように なる。

フラッシュ形垂直ノズルにおいて,計算値は球殻とリングの結合 部内側の値で,実験値はノズル付根部内測かどの値であるため,計 算値が実験値よりも少し小さく求まったが,両者は10%程度の範囲 で一致することがわかった。

なお参考までに、スルー形ノズルは突出量を考慮せず、また斜角 ノズルは同径、同肉厚の垂直ノズルとして上記の計算方法によって 求めた計算値と実験値を比較すると、スルー形ノズルでは実験値の ほうがわずか小さくなり、斜角ノズルでは約60%実験値のほうが大 きくなった。特に斜角ノズルの場合に大きな差異を生じたのは注目 すべきことで、これらに関しては今後さらに斜角の影響を考慮した 計算方法を開発し、実験的に検討して明らかにすべき問題である。 3.2 円筒殻ノズル

となって、これらには各ノズルの干渉効果も含まれている。 いま、球殻ノズル部を球殻、リング結合部および円筒殻(ノズル) に分割して考える。おのおのの部材が結合されてないと仮定して、 内圧による各部材の薄膜応力および変形を計算し、次いで実際のノ ズルは3個の部材が結合されていることから、各結合部には食い違 いがなくなるように各端部に曲げモーメントとせん断力が働き、こ れらの不連続力による応力を計算し、これらと前述の薄膜応力を加

3.2.1 ノズル部の応力分布

フラッシュ形各ノズル付根部の内,外側の応力分布は第16図か ら明らかなように,付根部の応力集中は円周方向断面よりも長手 方向断面のほうが著しく,また円周方向応力の方が軸方向応力よ りも大きくなっている。したがってノズル付根部で問題となる最 大局部応力は長手方向断面内側かどの円周方向応力である。 スルー形各ノズル付根部の内,外側の応力分布は第17図のよう



第18図 円筒殻フラッシュ形⑥ノズルの応力分布



(1) ノズル内径の影響

フラッシュ形 ② ノズルとスルー形 ③ ノズルはノズルと胴の内 径比 d/D およびノズルと胴の肉厚比 t/T ともに同一で,ただスル ー形は円筒内面へノズルが突き出した形状である点が異なるだけ であるが,応力集中係数が 2.68 から 1.66 となって約 38% 減少す ることがわかる。またノズル内径の小さい ④ ノズルと ⑤ ノズル を比べると,応力集中係数は 2.35 が 1.60 と約 32% 低減している。 したがってスルー形ノズルは,最大局部応力を著しく軽減するこ とができてきわめて有効なノズル形式といえる。

(2) ノズル肉厚の影響

t/T=1.00の①ノズルとt/T=0.64の②ノズルの応力集中係数 はそれぞれ 2.45 と 2.68 となって、ノズル肉厚が薄くなると応力 集中を増す傾向がある。

(3) 円環補強効果

⑥ノズルおよび⑦ノズルのように円環にてノズル側および円 筒側を補強した場合の内側の応力分布は第18,19 図のように補強 なしの場合とほぼ同様で、応力集中係数はそれぞれ 2.21 および 2.25 となって、いずれの側を補強しても補強なしの④ノズルの 2.35 に比べて多少減少する程度であってあまり期待することはで きないようである。

なお,各ノズルから十分離れた円筒部分から軸,円周方向スライスを採取して応力比を求めると,内,外側ではほとんど差がなく,軸方向応力比 $\sigma/p=10.6$,円周方向応力比 $\sigma/p=19.5$ となって,薄膜応力比 $\sigma_{m1}/p=18.7$ とほぼ一致した値が得られ,本実験の精度は5~10%のちがいであることがわかる。

第19図 円筒殻フラッシュ形 ⑦ノズルの応力分布

に外側はフラッシュ形/ズルとまったく同様な分布を呈するが, 内側は/ズル内面の円筒との接合部および円筒の/ズル付根隅半 径部の2個所に応力集中部が分散される。そして最大局部応力は やはり長手方向断面の/ズル内面に生ずる円周方向応力である。

次に,以上のことを確かめるためにノズル穴内縁の応力分布を 求めた。フラッシュ形②ノズルおよびスルー形③ノズルの表面ス ライスから求めたノズル内縁の応力分布は第16(a),17(a)図の ようになって,明らかに長手方向断面内側に高い応力を生じ,そ れぞれ σ/p=43.8,および 28.1 となった。これらは円筒厚さの平 均値であるため,後述の最大局部応力よりもそれぞれ約13%およ び10%小さい値である。

しかしこの応力分布は円周方向と軸方向に2:1の割合で2軸引張 をうける穴あき平板の場合と非常によく似ている。したがって, 近似的には穴のあいた平板の理論にノズル部の形状を考慮して計 算式を求めることも可能と考えられる。

3.2.2 ノズル付根形状と応力集中係数

各ノズル付根部の最大局部応力比を求め、薄膜応力の計算によって求めた円周方向応力比に対する応力集中係数をノズル形状(内径比 d/D, 肉厚比 t/T など)をかえた場合につき求めたものを まとめて第4表に示す。これらから次のことがわかる。

4. 結 言

圧力容器の不連続部の代表的なものとして球殻および円筒殻に付けられたノズル付根部につき、3次元光弾性実験によって局部応力を明らかにし、応力集中係数を求めて、フラッシュ形とスルー形ノズルを比較検討した結果を要約すると次のようになる。

- (1) 球殻に付けられたフラッシュ形垂直ノズルの局部応力は理 論計算とかなりよく一致した。しかし球殻斜角ノズルでは 最大応力の値は約60% 垂直ノズルよりも大きくなる。
- (2) スルー形ノズルはフラッシュ形ノズルに比べて局部応力が 小さく,球殻に付けた場合は約15%,円筒殻に付けた場合 は約35%と著しく応力を軽減することができ,きわめて有 効なノズル形式といえる。
- (3) 円筒殻に付けたフラッシュ形ノズルを円環にて補強しても その効果はあまり期待できない。

本研究を行なうに当たり,有益なご助言を賜わった日立ボイラ株 式会社林課長,桑山主任,日立製作所日立工場浜田主任,日立研究 所山崎部長に厚くお礼申しあげる。また実験に協力された日立製作 所日立研究所清水翼,樋口重雄両君に感謝する。

参 考 文 献

- (1) J.L. Mershon: Welding Research Council Bulletin, 77 (March, 1962)
- (2) I. Berman, D. H. Pai: Welding J. 41, 307-S (July, 1962)
- (3) 浜田: 日立評論 45,91 (昭 38-12)

