

(昭和 35 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

補強材を有する薄肉円筒殻の 圧壊に関する研究

正員 寺田 明*

正員 島本 参之助**

Collapse of Ring-stiffened Thin Cylindrical Shell under External Pressure

By Akira Terada, *Member*Sannosuke Shimamoto, *Member*

Summary

Collapse of ring-stiffened thin cylindrical shell under external pressure can be divided into two kinds, one "Shell Collapse", the other "Bodily Collapse".

The "Bodily Collapse" was named and proposed by Tokugawa as the originator in this study of the world, but subsequently it is called "General Collapse" in the United States. As for "Shell Collapse", researches were made by both Tokugawa and Windenburg, and are sufficiently practical in respect of Mild Steel. But, since High Tension Steel with superior weldability came out in public sales, we carried out experiments to obtain its characteristic qualities.

Regarding "Bodily Collapse" there are two Theories in Elasticity, one by Tokugawa, the other by Kendrick, but they have not been put into actual use yet. Formulae, either by Lévy or by Lame, which are now adopted in actual designs, show considerable discrepancies, as far as their definite length are concerned, when compared with the experimental results. Therefore, we aimed at putting Tokugawa's Theory of Elasticity into actual design, this time.

Now, let us take :

$$\phi = \frac{P_K \cdot D}{2S \left(1 + \frac{\sigma_{YF}}{\sigma_{YS}} \cdot \frac{F}{l'S} \right) \cdot \sigma_{YS}}, \quad B = \frac{\sigma_{YS} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{YE}}{\sigma_{YS}} \cdot \frac{F}{l'S} \right)}{E \cdot \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{S}{D} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{I}{l'S^3/12} \right)^{3/4}}$$

considering, ϕ is "Mean Pressure Factor" and B is "Bodily Factor". The relation of ϕ and B is shown in Fig 9.

When calculating moment of inertia of stiffener, the effective breadth can be adopted with three (3) S in case of inner stiffener, and one (1) S in case of outer stiffener.

If $\pm 10\%$ of tolerance is permitted, Fig 9 may be used in the actual design as they are, regardless whether they are Mild Steel or High Tension Steel.

1. ま え が き

等間隔に補強材を有する薄肉円筒殻が均等外圧を受けて圧壊する形式には殻板圧壊と全体圧壊の2種類がある。全体圧壊の現象は徳川¹⁾が最初に Bodily Collapse と名付けて弾性理論式を発表したが残念ながら実験をもつてその裏付を行っていない。近時米国では²⁾これを General Collapse と称し Kendrick の式が機械加工によつて製作した模型についての実験によく一致したと報じている。一方実用方面では Trilling³⁾が述べているように Lévy と Lame の式を使用しているがこれらの式は有限長さの模型実験結果と相当の違いを示している。

原稿受付 昭和 35 年 6 月 17 日

* 防衛庁神戸事務所

** 川崎重工修繕部

かように全体圧壊の理論的研究は未だ十分とはいえない。然しながら吾々は全体圧壊に関連しているものを計画し製作しているので、たとえ理論的研究が遅れていて不明の点があるにしてもなおかつ物を製作し続けなければならないので模型実験と従来の理論式とを基にして大抵にその結果を取りまとめて実用に供し得るような資料を作った。

つぎに殻板圧壊については近時溶接性の優れた高張力鋼が市販されるに到つたのでこれを応用した若干の実験を行つたので合せてここに発表して各位の御批判を仰ぎ度い。

記号

殻板の板厚 $=S$

殻板の直径 $=D$

補強材心距 $=l'$

径間長さ (unsupported span) $=l$

全 長 $=L$

補強材の慣性モーメント $=I$

補強材自体の断面積 $=F$

弾性係数 $=E$

しわの数 $=n$

材料の降伏点 $=\sigma_Y$

殻板材料の降伏点 $=\sigma_{YS}$

補強材材料の降伏点 $=\sigma_{YF}$

圧壊圧力 $=P_K$

圧壊平均周応力 $=f_K$

周応力 $=f$

ポアソン比 $=\mu$

2. 全 体 圧 壊

2.1 模 型 寸 法

各模型の計画寸法と実測寸法、圧壊圧力、材質並に各系列の実験目的を第1表に示す。

(1) 模型寸法を第1表のように選定した主旨は次の通りである。

(a) 実験には寸法効果が必ずつきものであるといつてよい。今までに公表されている日本と独逸の模型直径は 800, 1200, 1600 mm の3種類であり、その実験結果と比較検討するのに便利であるから今回の模型直径は 1200, 1600 mm の2種類とした。

(b) 模型に薄板を使用すると材料に異方性があるため解析が困難である。Taylor Basin ではこの欠陥を補うため特殊な “Furniture steel”⁴⁾ を使用している。今回 5 mm 以上の殻板としたのは一般構造用鋼材の最小板厚が 5 mm であり、この程度以上であれば実験結果はおおむね実用に供し得るからである。今回使用した材料の機械的性質は第2表のようであつた。材質別には第3表に示す3種類とした。

この内、主として MS+MS の模型で、幾何学的形状と補強材の圧壊圧力におよぼす影響を研究する方針とした。

(2) 同一寸法の模型でも工作法が相違すれば当然真円度、残留応力等に相違があり圧壊圧力もまた相違すると推測されるので模型製作に当つてまず工作法を決定する必要がある。そこで最初に B-2 の同一寸法模型4個をそれぞれ相異なる工作法により製作しその実験結果に基づいて以後の模型工作法を決定した。

模型構造は第1図に示す。

(3) 全模型について寸法、真円度を計測した。

実測寸法は第1表に、真円度は第4表に示す。

模型長さは鋼製巻尺により、補強材寸法は模型取付前に、心距と板厚は模型製作後何れもマイクロメーターによつて計測した。また模型の真円度は電気式真円度測定装置により殻板内側の真円度を計測し、模型内径は真円度測定結果より算出した。なお真円度は板厚の関数で示すこととする。

(4) 実験装置系統図は第2図に示す。模型は実験水槽用蓋の下部にボルト締めされている。水槽蓋中心部は直径 1.2 M の開口となつており圧壊状況を容易に肉眼で観察できるようにした。加圧は高圧空気によりおおむね毎分 0.7 kg/cm² の割合で行ない圧力は4段階の大型圧力計により精密に読みとることができ、かつ圧力の変化状況を自動圧力記録計により記録するようにした。

本実験装置の特長は圧壊圧力を正確に読みとることができるように工夫した点である。

第1表 全体圧壊模型実験結果一覧表

模型 番号	実験 目的	計 画 値										実 測 値										材 質																	
		D (mm)	S (mm)	L			L' (mm)	補強材 寸法(mm)	数	D (mm)	S (mm)	L			補強材 寸法 (mm)	鉄 板	補強材	降伏点 (kg/mm^2)	圧 力 (kg/cm^2)																				
				一般(mm)	上(mm)	F(mm)						一般(mm)	上(mm)	F(mm)																									
B-1	鉄板MS の模型の全 体圧壊の研究 内付溶接補強 材の場合 4a (補強材に鋼を 変化させる)	1200	5	120	50	50	160	130	130	2500	30×10×4 INVA.	21	1194.4	4.91	119.4	57.2	50.9	2496.6	3030×970×12	MS	MS	29.50	31.84	22.55															
2a													1194.4	4.97	160.5	134.9	128.5	2496.4	2990×946×14						30.83	31.00	20.70												
2b													1201.2	5.07	160.8	134.3	128.8	2497.0	3006×999×16						30.83	31.00	20.78												
2c													1200.3	5.03	160.4	139.5	130.1	2500.6	2986×1002×16						32.70	30.95	21.00												
2d													1200.5	5.15	160.8	136.9	124.6	2496.9	2986×946×16						32.70	30.84	22.65												
3													1201.2	4.92	199.6	159.2	151.0	2500.1	2970×973×19						29.47	31.40	18.38												
4a													1202.1	5.11	239.4	174.8	172.2	2502.4	3032×984×25						32.53	31.61	16.78												
4b													1201.5	5.08	239.7	171.5	172.5	2500.0	3037×988×14						32.53	31.15	18.10												
5													280	130	130																								
6													160	130	130																								
B-2	全上 内付 補強材	1200	5	120	170	170	240	130	130	2500	30×10×4 INVA.	15	1202.2	5.06	159.8	132.2	127.6	2500.3	3022×3490×421	MS	MS	29.53	31.71	15.18															
4													1201.2	5.11	239.8	169.3	168.4	2501.4	3029×3482×419						30.33	31.17	20.85												
C-1													130	130	1700																								
2													90	90	2100																								
3													170	170	2500																								
4													160	160	3200																								
5													150	150	3400																								
6													120	120	1200																								
7a													120	120	720																								
7b													120	120	720																								
8	全上	1200	7	160	40	40	1200	40	40	2500	30×10×4 INVA.	7	1199.2	6.76	239.7	135.5	126.5	1700.3	2993×987×382	MS	MS	29.53	31.71	15.18															
9													1199.5	6.61	239.5	45.5	84.4	2098.2	3005×988×386						28.70	35.01	24.12												
10													1200.0	6.72	239.7	177.8	165.2	2499.0	3008×988×382						28.70	35.01	22.38												
11													1319.9.3	6.77	246.0	161.3	158.0	3197.7	3003×990×380						27.40	34.93	19.52												
12													1619.9.7	7.28	239.5	151.5	147.5	3891.8	2981×994×400						29.40	36.20	22.34												
13													519.9.3	6.93	239.5	122.4	117.5	1198.2	3016×994×395						23.10	36.80	28.41												
14													319.9.8	6.69	239.5	123.2	116.7	718.4	3006×989×390						28.50	35.70	27.71												
15													2200.2	6.72	240.0	120.1	118.5	719.6	3026×993×392						28.50	36.10	28.69												
16													5201.2	6.81	159.6	39.6	38.6	716.2	2964×984×407						27.30	29.20	33.43												
17													819.7.9	6.81	159.8	40.3	40.7	1199.1	2955×987×405						27.40	29.10	34.35												
D-4	外付溶接補強材 (補強材に鋼を 変化させる) 隔壁の影響	1200	5	120	50	50	160	130	130	2500	30×10×4 INVA.	21	1197.2	5.21	119.6	48.9	48.0	2496.4	2987×992×420	MS	MS	28.53	27.88	32.18															
5a													1198.0	5.13	159.3	134.9	126.7	2494.8	2986×983×413						32.13	31.31	17.88												
5b													1198.0	5.20	159.4	121.4	132.0	2487.4	3003×988×420						30.43	31.43	17.83												
6													1196.7	5.19	149.2	149.0	153.2	2493.8	2981×988×410						29.20	30.82	14.88												
12													1199.5	5.18	159.6	133.4	132.3	2499.6	2976×1011×386						27.40	34.18	19.42												
13													1200.1	4.99	159.6	136.6	130.0	2499.0	2978×996×384						27.40	33.92	20.57												
F-1													1199.6	5.28	159.4	125.4	124.1	3597.7	3519×991×393						30.93	31.7	21.27												
2													1199.6	5.17	159.5	122.9	125.0	3598.0	3019×983×397						32.63	27.5	16.64												
3													1200.7	5.03	159.5	123.6	124.1	3597.2	2489×984×409						30.83	30.4	14.32												
4													1199.4	5.10	159.4	123.9	125.3	3599.2	1944×984×406						31.40	29.7	8.42												
G-1	5%が変化した 場合の影響 (模型長さを 変化させる)	1600	5	130	130	1700	90	90	2100	3600	30×10×4 INVA.	10	1598.3	5.19	159.4	132.0	131.0	1698.0	2993×1007×397	MS	MS	31.65	30.3	15.74															
2													1600.0	5.27	159.6	95.8	86.1	2097.5	2965×993×394						29.95	29.5	14.80												
3													1599.1	5.18	159.6	132.6	132.1	2497.8	2992×983×394						30.50	28.8	14.28												
4													1598.3	5.23	159.6	83.3	82.5	3196.4	2992×981×397						31.65	29.4	14.17												
5													1600.2	5.16	159.6	42.7	40.4	719.4	2936×997×395						25.00	27.75	15.81												
SH-1													1195.5	5.16	139.2	62.1	70.2	2499.4	3997×988×408						36.20	30.60	26.55												
2													1198.0	5.13	139.3	70.2	56.4	2497.4	5004×315F.B.						36.10	34.20	24.74												
SB-1													1198.6	5.09	149.3	58.9	55.6	2497.5	3983×426F.B.						37.30	32.00	28.95												
3													1197.9	5.16	139.4	62.1	64.1	2497.4	4009×440F.B.						37.10	33.80	27.45												
4													1199.2	5.23	169.5	147.6	147.6	2499.3	4021×415F.B.						36.40	31.30	24.55												
SC-1	全上 (模型長さを 変化させる)	1200	5	140	40	1200	80	80	1700	40×4F.B.	12	1199.3	5.18	139.1	83.8	80.5	1694.8	4008×431F.B.	HT	MS	37.20	32.10	28.56																
2												1198.2	5.07	139.4	66.9	67.4	3201.4	4010×434F.B.						37.30	28.90	26.71													
3												1200.1	5.36	139.2	65.3	69.1	2498.8	5015×438F.B.						35.8	30.3	33.08													
4												1200.6	5.25	139.3	66.7	65.0	2498.9	4683×442F.B.						36.7	30.2	29.05													
5												1200.7	5.22	139.3	69.0	61.3	2498.6	3525×442F.B.						36.6	31.9	26.20													
6												1200.0	5.30	139.2	63.7	68.0	2499.5	3096×433F.B.						36.8	29.5	19.58													
7												1200.8	5.35	139.0	64.1	68.6	2497.1	4765×790×257						36.7	30.4	29.95													
8												1201.1	5.28	139.4	63.5	63.3	2495.4	4010×409F.B.						36.6	37.7	29.60													
9												1200.3	5.39	139.3	65.2	64.8	2497.6	5003×410F.B.						35.2	32.7	31.88													
10												1201.4	5.21	139.5	63.5	64.0	2497.6	4505×416F.B.						35.5	38.3	31.05													
HB-2	鉄板補強材 HFTの模型 (補強材寸法を 変化させる)	1200	5	60	60	60	2500	40×4F.B.	40×4F.B.	2500	40×4F.B.	18	1198.0	5.47	137.4	63.2	57.6	2497.3	3752×336(T)	HT	HT	44.7	37.9	31.78															
2													1201.4	5.21	139.5	63.5	64.0	2497.6	4505×416F.B.						44.7	37.9	31.78												
3													1198.0	5.47	137.4	63.2	57.6	2497.3	3752×336(T)						41.2	40.4	22.18												
4													1197.9	5.37	137.7	60.2	59.0	2498.6	3492×336(T)						41.1	40.4	19.93												
5													1198.4	5.29	137.9	59.8	59.3	2494.4	3492×336(T)						39.2	40.4	30.25												
6													1198.4	5.34	137.6	59.2	59.9	2496.0	3492×336(T)						39.2	40.4	30.25												
7													1198.4	5.34	137.6	59.2	59.9	2496.0	3492×336(T)						39.2	40.4	30.25												
8													1198.4	5.34	137.6	59.2	59.9	2496.0	3492×336(T)						39.2	40.4	30.25												
9													1198.4	5.34	137.6	59.2	59.9	2496.0	3492×336(T)						39.2	40.4	30.25												
10													1198.4	5.34	137.6	59.2	59.9	2496.0	3492×336(T)						39.2	40.4	30.25												

第2表 材料試験結果概要

材 質	板 厚 mm	降伏点 kg/mm^2		引張強さ kg/mm^2		伸 び %	
		ロール方向	直角方向	ロール方向	直角方向	ロール方向	直角方向
MS	5	28.0	28.6	42.8	43.1	28.4	27.2
	7	27.3	28.1	42.8	43.6	27.5	27.4
HT	5	38.8	38.3	51.9	51.7	21.1	24.2

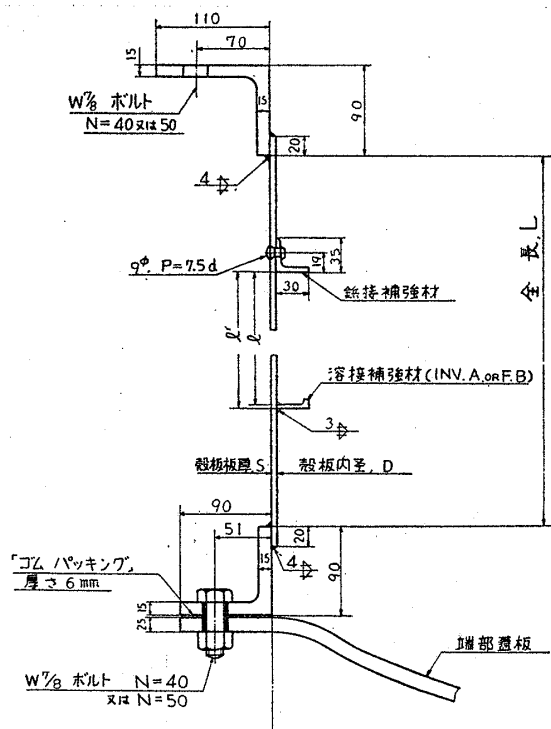
第3表 模型の使用材料

使用場所	使用材料	系列番号
鉄板+補強材	MS + MS	B, B', C, D, F, G.
	MS + HT	SH, SB, SC, SF
	HT + HT	HB, HF, HFT.

2.2 模型実験結果

2.2.1 圧壊圧力および圧壊状況 実験結果は第1表に示す。全体圧壊の現象としては圧壊圧力に達すると弾性内においては音響を伴って圧壊しその途中の状況は肉眼でよく観察することができる。弾性域を越えると一大音響を伴って一挙に圧壊し補強材は横倒れする。このときチョークの粉を塗っておけば粉が飛び散るので最初に圧壊を生じた位置を知るのに便利である。

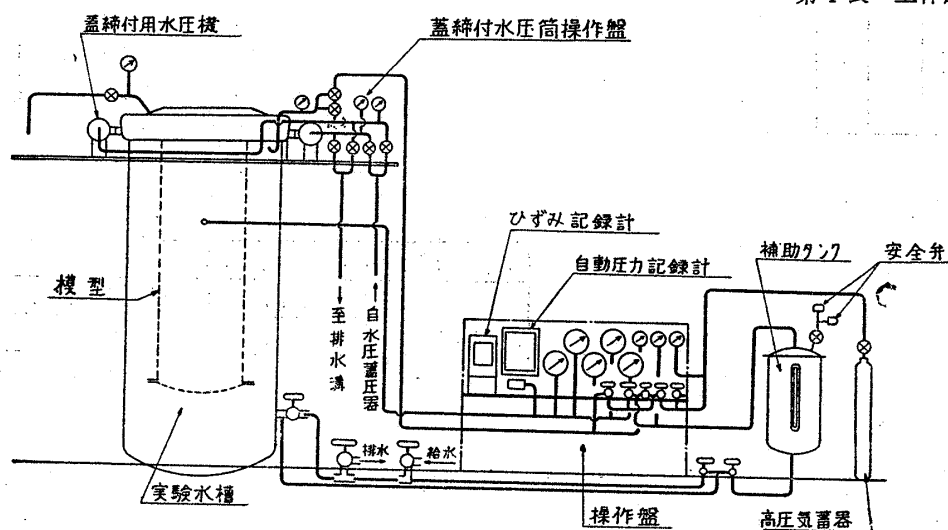
全体圧壊状況の1例を写真1, 2に示す。



第1図 模型構造詳細

模型番号	真円度	模型番号	真円度
B-1	0.427	F-1	0.332
2a	0.498	2	0.573
2b	0.422	3	0.446
2c	0.408	4	0.554
2d	0.283	G-1	0.463
3	0.349	2	0.467
4a	0.386	3	0.378
4b	0.342	4	0.358
5	0.420	5	0.499
B'-2'	0.420	SH-1	0.363
4'	0.230	2	0.555
C-1	0.276	SB-1	0.338
2	0.381	2	0.277
3	0.403	3	0.383
4	0.329	SC-1	0.421
5	0.205	2	0.489
6	0.314	3	0.311
7a	0.203	SF-1	0.302
7b	0.236	2	0.291
8	0.239	3	0.451
9	0.238	4	0.490
10	0.288	5	0.285
11	0.253	HB-2	0.400
12	0.244	HF-1	0.405
D-4	0.547	2	0.350
5a	0.449	HFT-2	0.333
5b	0.545	3	0.351
6	0.678	4	0.265
12	0.550	3'	0.242
13	0.394		

第4表 全体圧壊模型真円度一覧表



第2図 実験装置系統図

2.2.2 加圧時の変位量と応力測定

(1) 加圧時の模型各部の変位量は真円度計測装置を用いて測定した。その1例を第3図に示す。これを見ると圧力が上昇するにつれて初期ひずみの凹凸が次第に顕著になつていく状況がよく判る。

(2) 加圧時における

各部の応力は約 10 個の模型についてひずみ計によつて測定した。応力は円周上かなりの凹凸があるが (±30%

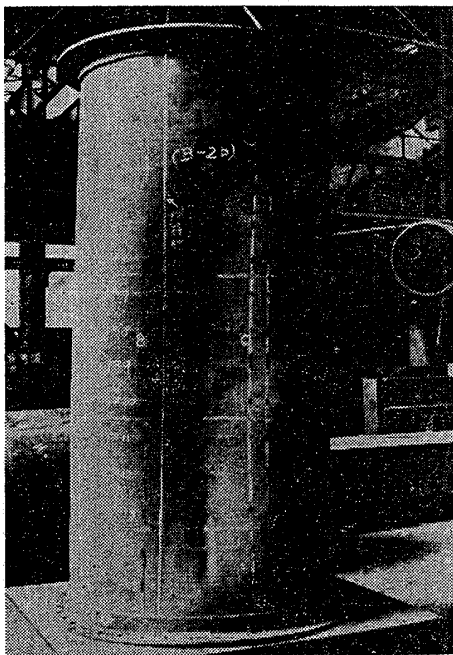


写真1 B-2b 模型圧壊状況

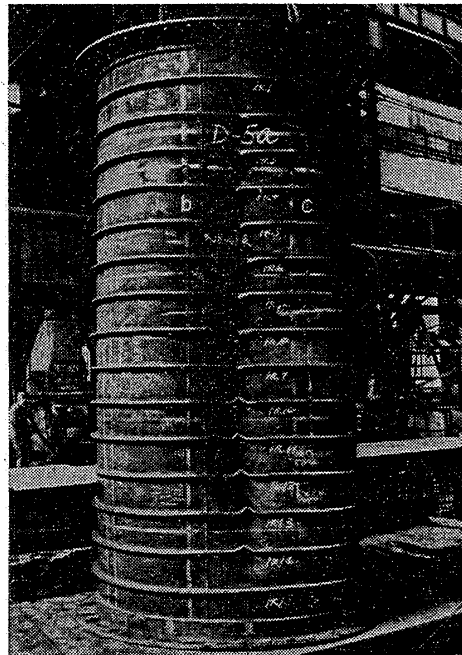
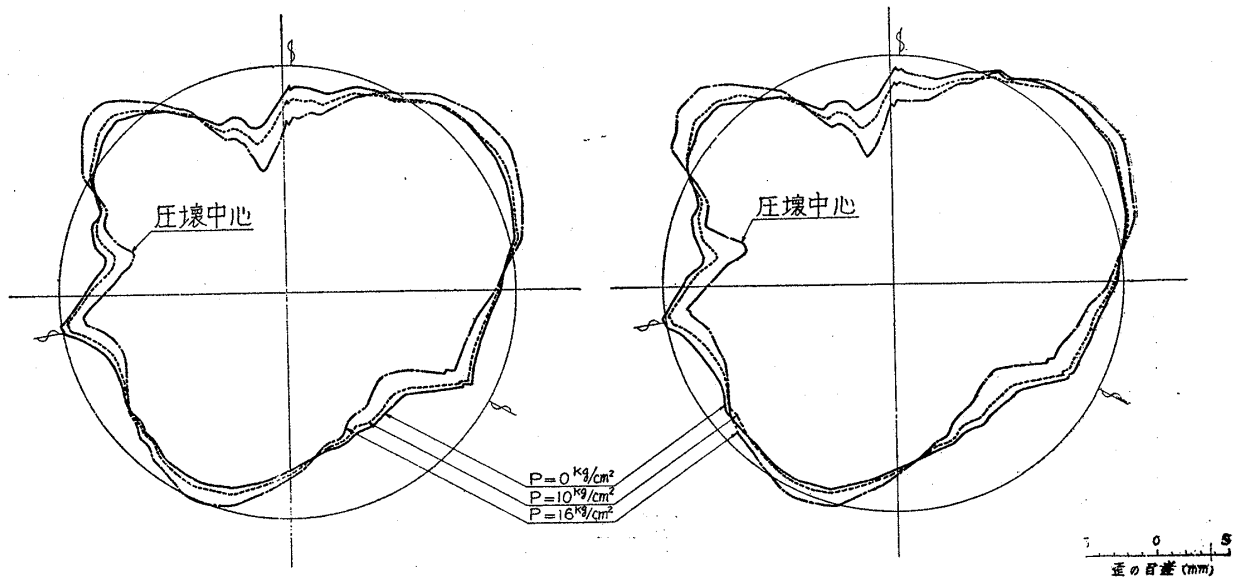


写真2 D-5a 模型圧壊状況



第3 a 図 D-5b 模型加压時の補強材上の変位量 (FR 7)

第3 b 図 D-5b 模型加压時の補強材間の変位量 (FR 7 1/2)

程度) その平均値は Sanden の計算値におおむね一致している。また各部の応力の差異は圧力が高くなればなる程大となつてゐるがこれは模型の初期ひずみに起因する曲げの影響と考えられる。

測定結果の例を第4図に示す。

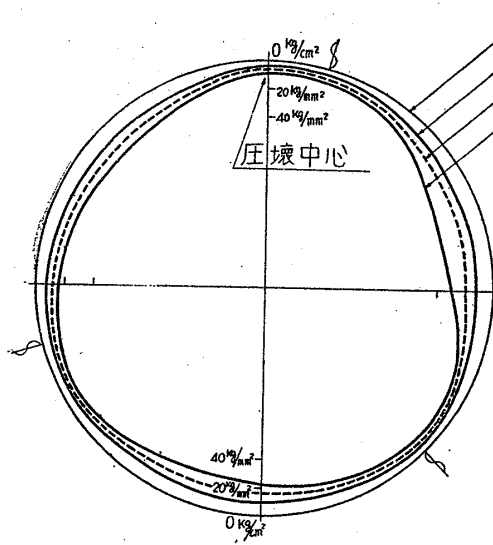
2.2.3 幾何学的形状が圧壊圧力におよぼす影響

(1) 端部強度が圧壊圧力におよぼす影響

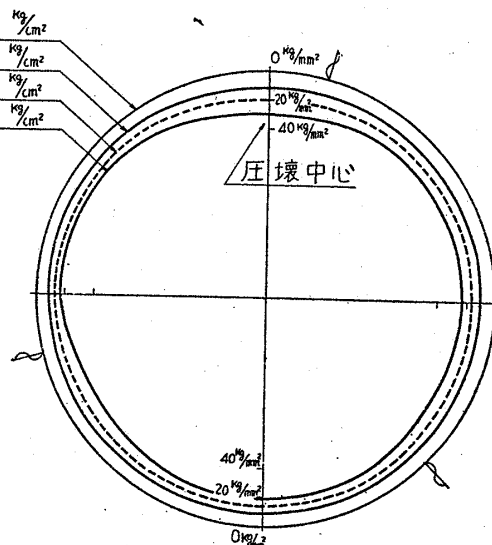
模型実験では模型の両端を強固な蓋に取付けて行なつた。これは長い円筒の途中に数個の隔壁または非常に大きな補強材を有する場合に隔壁間長さのものに相当する。この場合隔壁の強度はどの程度であれば本実験結果に相当するものになるかを調査する目的で D-12, 13 模型の実験を行なつた。隔壁は D-12 では 1.3 kg/cm^2 , D-13 では 2.3 kg/cm^2 を越えると永久ひずみを生ずる程度の強さであつて、その他の諸寸法は B-2 模型と同一である。

実験結果を B-2 と比較すると D-12 は約 1 kg/cm^2 低いが、D-13 ではほとんど差異が認められない。

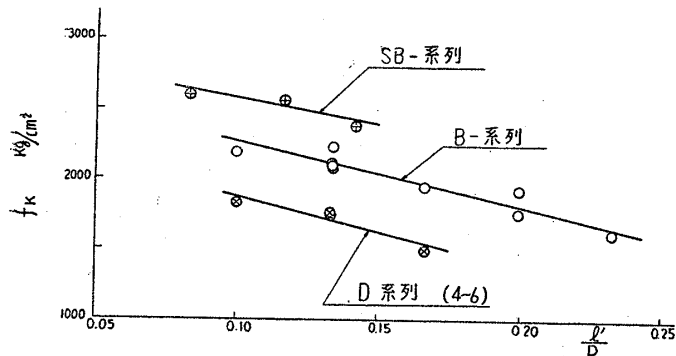
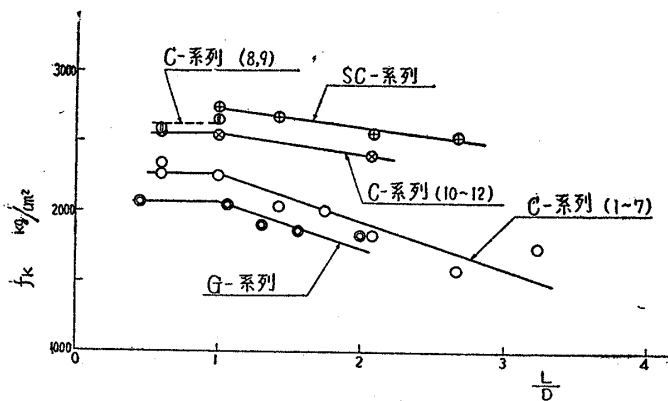
したがつて本実験は耐圧力 2.3 kg/cm^2 以上の隔壁を有する場合に相当すると考えればよい。



第4a図 SB-2 模型応力分布図 (FR-9)



第4b図 SB-2 模型応力分布図 (FR 9 1/2)

第5図 $f_K \sim l'/D$ 図第6図 $f_K \sim L/D$ 図

(2) 第5図は f_K と $\frac{l'}{D}$ との関係を示す。

B系列は内付補強材の場合、D-4~6 は外付補強材の場合を示す。寸法が同一であれば外付補強材が内付補強材より弱いことを示している。

(3) 第6図は f_K と $\frac{L}{D}$ との関係を示す。

$\frac{L}{D}$ が小になる程圧壊圧力は増加するが $\frac{L}{D}$ が1より小になつても1の場合とおおむね相等的。また補強材が大きくなると L/D の圧壊圧力におよぼす影響は次第に小さくなる傾向があるようである。

(4) 第7図は f_K と有効幅3S付の補強材の I との関係を、第8図は f_K と F との関係を示す。

2.2.4 実験結果の考察

圧壊圧力 P_K は徳川, Kendrick の式共

$$P_K = E \left\{ f \left(\frac{L}{D}, \frac{S}{D}, n \right) + f \left(\frac{I}{l' D^3}, n \right) \right\}$$

の形で表わされているが、ここでは徳川の式を基として考察を行なうこととする。すなわち

$$P_K = \frac{E \cdot \frac{S}{D}}{n^2 - 1 + \frac{\alpha^2}{2}} \left[\frac{2\alpha^4}{(n^2 + \alpha^2)} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1 - \mu^2} \left(\frac{S}{D} \right)^2 \beta (n^2 + \alpha^2) - \frac{n^4 (2n^2 - 1)}{(n^2 + \alpha^2)^2} \right] + \frac{8EI'}{D^3 l'} r (n^2 - 1) \quad (1)$$

ただし、 $\alpha = \frac{\pi D}{2L}$

β, r = 殻板, 補強材それぞれの中立軸と殻板および補強材を一体としたものの中立軸の相違による補正係数

I' = 補強材自体の慣性モーメント

(1)式にて $\beta=1$, $rI'=I$ とおき, I は補強材にある有効幅を考えたときの慣性モーメントとすれば

$$P_K = \frac{E \frac{S}{D}}{n^2 - 1 + \frac{\alpha^2}{2}} \left[\frac{2\alpha^4}{(n^2 + \alpha^2)^2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1 - \mu^2} \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^2 \right] \times \left\{ (n^2 + \alpha^2) - \frac{n^4(2n^2 - 1)}{(n^2 + \alpha^2)^2} \right\} + \frac{8EI}{D^3 I'} (n^2 - 1) \quad (2)$$

(2)式で $\mu=0.3$ とし, n を消去した包絡線を求めて大胆に簡略化すると近似的に

$$n^2 = \alpha \left(\frac{I}{I' S^3} \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^2 \right)^{1/4} \quad (3)$$

$$P_K = 2.4 E \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{2.5} \cdot \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{I}{I' S^3} \right)^{3/4} \quad (4)$$

(4)式より殻板と補強材の平均周応力 f_K は

$$\begin{aligned} f_K &= \frac{P_K \cdot D}{2S(1+F/I'S)} \\ &= \frac{1.2 E \left(\frac{D}{L} \right) \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{I}{I' S^3} \right)^{3/4}}{1+F/I'S} \\ &= \frac{1.2 E}{1+F/I'S} \\ &\quad \cdot \left(\frac{D}{L} \right) \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{I}{I' S^3} \right)^{3/4} \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式の両辺を材料の降伏点で割って無次元化すると

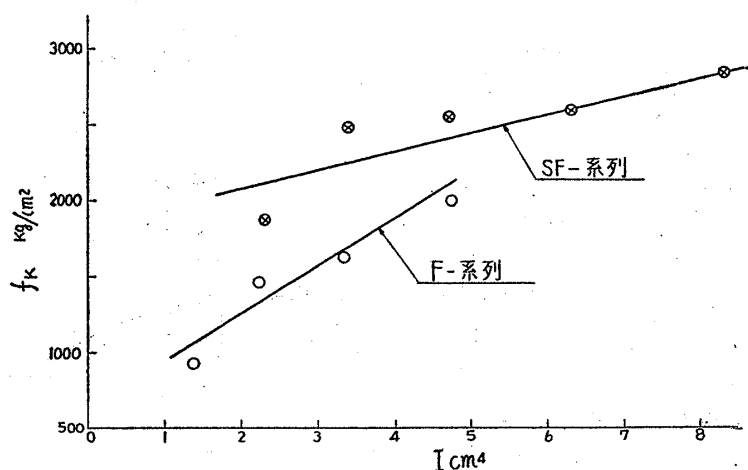
$$\begin{aligned} \frac{f_K}{\sigma_Y} &= \frac{P_K \cdot D}{2S(1+F/I'S)\sigma_Y} = \frac{1.2 E \cdot \left(\frac{D}{L} \right) \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{I}{I' S^3} \right)^{3/4}}{\sigma_Y \cdot (1+F/I'S)} \\ &= \frac{1.2}{\sigma_Y (1+F/I'S)} \\ &\quad \cdot \frac{E \cdot \left(\frac{D}{L} \right) \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{I}{I' S^3} \right)^{3/4}}{12} \end{aligned} \quad (6)$$

さらに殻板と補強材の降伏点異なる場合には(6)式を次式のごとく補正する。

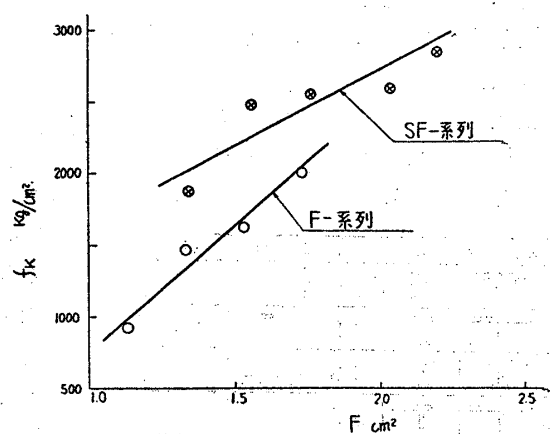
$$\frac{f_K}{\sigma_{YS}} = \frac{P_K \cdot D}{2S \cdot \left(1 + \frac{\sigma_{YF}}{\sigma_{YS}} \cdot \frac{F}{I'S} \right) \cdot \sigma_{YS}} = \frac{1.2}{\sigma_{YS} \left(1 + \frac{\sigma_{YF}}{\sigma_{YS}} \cdot \frac{F}{I'S} \right)} \cdot \frac{E \cdot \left(\frac{D}{L} \right) \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{I}{I' S^3} \right)^{3/4}}{12} \quad (7)$$

Windenburg の方法⁵⁾にならつて

$$\frac{P_K \cdot D}{2S \left(1 + \frac{\sigma_{YF}}{\sigma_{YS}} \cdot \frac{F}{I'S} \right) \sigma_{YS}} = \phi \text{ とおき "Mean Pressure Factor"}$$



第7図 $f_K \sim I$ 図



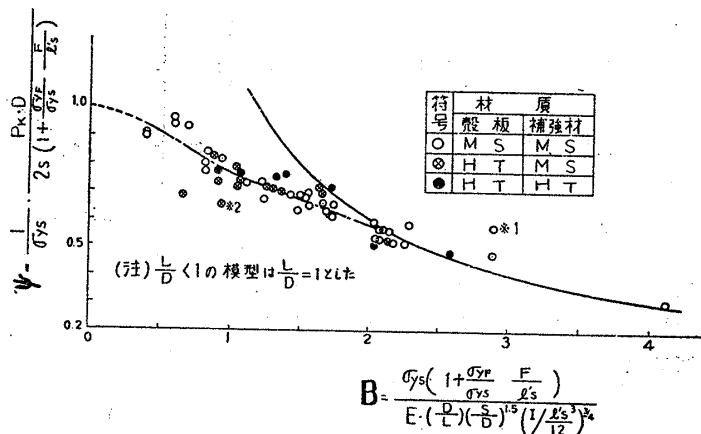
第8図 $f_K \sim F$ 図

$$\frac{\sigma_{YS} \left(1 + \frac{\sigma_{YF}}{\sigma_{YS}} \cdot \frac{F}{l_s} \right)}{E \cdot \left(\frac{D}{L} \right) \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{I}{l_s^3} \right)^{3/4}} = B \text{ とおき "Bodily Factor" と呼ぶこととして, } \phi \sim B \text{ の関係を図示す}$$

ると第9図のようになる。この場合 $L/D < 1$ のときは $L/D = 1$ として計算する。

補強材の慣性モーメントの計算に当つて
 殻板の有効幅は一般に $k\sqrt{DS}$ で表わされ
 るが本実験では $S/D = 0.00313 \sim 0.00584$
 の範囲にあるので簡単に板厚のみの関数と
 して表わすこととし、実験結果より trial
 and error method により補強材の形状別
 に第10図のように想定した。

外付補強材の模型は内付補強材のものと
 比べると各寸法が同一であつても強度はか
 なり低下する。これは中立軸の直径が内付
 補強材の場合より大きいことと凹入個所が
 補強材の横倒れ個所と一致することになつ
 て横倒れによる剛性の低下がはなはだしい
 こと等が原因と考えられる。真円度の強度におよぼす影響については全模型を真円度計測結果に基づいて区分



第9図 全体圧壊実験結果

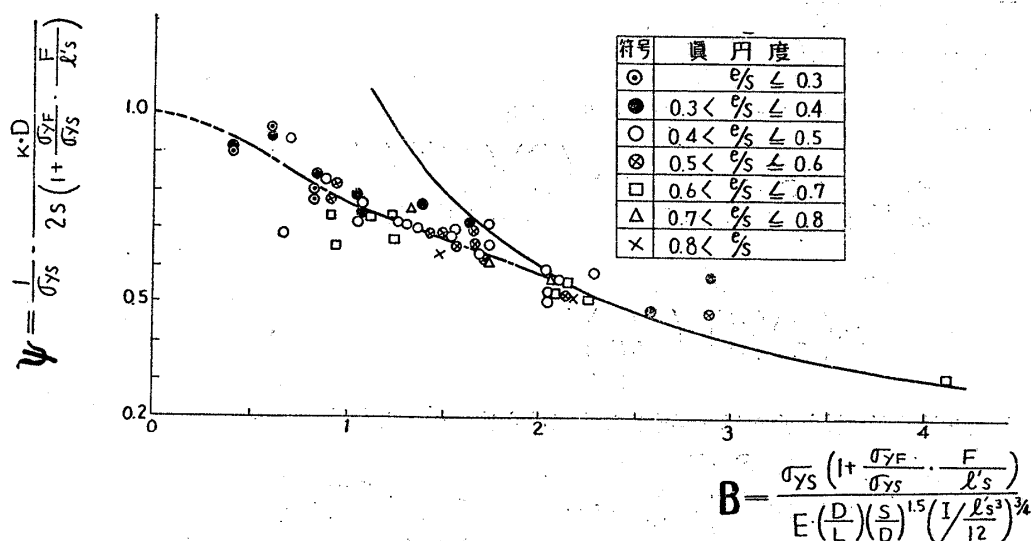
補強材形状	内付	外付
		万々幅
		3 S
		3 S
		3 S

第10図 補強材の有効幅

し第9図の形式で表わすと第11図の通りである。真円度は $|e/S|$ 中の最大値をとった。

本実験結果は平均しておおむね $e/S = 0.5$ の辺とみなされる。真円度が悪くなつた場合には圧壊平均応力が若干低くなる傾向があるようである。

C-5 模型 (第9図における※1) は弾性域にあつて(7)式より相当上回つた値を示しているがこれは(7)式が(2)式から包絡線を取



第11図 真円度の影響

考えられる。したがつて弾性域では n は2~3で比較的小さいから(7)式によらず(2)式から第10図の有効幅を用いて計算を行つて圧壊圧力を求める方がよい。

2.2.5 補強材の横倒れ 本実験では溶接構造の場合の補強材の形状は第12図に示すように。F.B, inverted

angle (Bulb plate 式), T 型の 3 種類であつてウェブの厚さ S' は $S > S' \geq \frac{2}{5} S$ の範囲である。

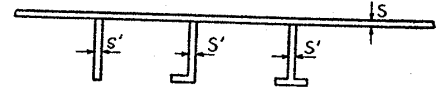
SH-2 (第 9 図における※ 2) は F.B. の深さが $15S'$ であつて先端部が座屈したため圧壊圧力が小さかつた。その他のものについては補強材が横倒れしたものはなかつた。

上記の結果からおおむね次のようにいふことができる。

(1) $S > S' \geq \frac{2}{5} S$ のウェブ厚さで市販形鋼の形状であればまず横

倒れの現象がおきる心配はなからう。

(2) F.B. の深さはウェブ厚さの 10 倍を越えないようにすることが望ましい。



第 12 図 補強材の形状

3. 殻板圧壊

3-1 模型寸法

軟鋼の殻板圧壊については既に理論的に実験的研究が徳川⁶⁾および Windenburg⁵⁾ によつて行なわれてお

第 5 表 殻板圧壊模型実験結果一覧表

模型 番号	実験 目的	寸 法										実 測 値										材 質	圧壊圧力 (MPa)	初期 圧力 (MPa)	補強材 圧力 (MPa)
		計 算					備 考					実 測 値					殻板 圧壊 強度 (MPa)								
		D (mm)	S (mm)	ℓ' (mm)	L (mm)	補強材 寸法 (mm)	D (mm)	S (mm)	ℓ' (mm)	L (mm)	補強材 寸法 (mm)	D (mm)	S (mm)	ℓ' (mm)	L (mm)	補強材 寸法 (mm)									
A-2	HT 材	1200	120	140	70	70	840	6	1199.2	5.02	1392	74.6	69.9	839.8	60.01	5.05	F.B.	47.15	34.16	34.16					
3	殻板圧壊	1200	120	175	87.5	87.5	1050	6	1199.0	5.03	1746	86.3	89.5	1048.6	60.03	5.02	F.B.	39.93	30.80	30.80					
4	の研究	1200	120	210	105	105	840	4	1199.0	5.11	208.9	106.1	106.3	838.4	59.97	5.08	F.B.	42.15	25.89	25.99					
5	溶接肉付補強材	1200	120	240	120	120	960	4	1199.4	5.12	208.5	108.1	107.0	839.8	59.99	4.95	F.B.	42.15	25.77	26.92					
6	溶接肉付補強材	1200	120	265	132.5	132.5	1060	6	1200.2	5.19	263.0	133.6	137.1	1059.4	60.15	4.96	F.B.	40.37	23.86	23.86					
7	(補強材心距を变化させる)	1200	120	295	147.5	147.5	1180	4	1198.9	5.21	240.1	119.7	122.8	962.0	60.01	5.03	F.B.	39.93	20.56	22.26					
8		1200	120	325	162.5	162.5	1300	4	1199.6	5.26	324.1	162.6	164.3	1298.6	60.07	5.02	F.B.	42.03	18.92	21.22					
9		1200	120	385	192.5	192.5	1540	4	1199.3	5.25	385.5	189.9	191.4	1538.1	60.08	5.53	F.B.	44.3	17.50	20.82					
10		1200	120	265	190	190	2500	9	1198.8	5.31	244.3	193.2	194.6	2501.2	60.06	5.08	F.B.	41.1	15.60	16.60					
11		1200	120	700	350	350	1400	2	1199.8	5.12	697.8	350.2	348.1	1396.1	59.99	4.98	F.B.	38.87	22.50	23.00					
A-4	全鋼板肉付補強材	1200	120	210	105	105	840	4	1200.6	5.11	209.5	105.7	105.6	839.5	59.43	4.02	5.18A	36.6	9.67	10.88					
D-1	全上	1200	120	280	70	70	840	3	1197.4	5.28	279.8	71.7	71.7	210.2	841.8	59.92	4.98	F.B.	42.15	27.67	28.72				
2	溶接肉付補強材	1200	120	175	87.5	87.5	1050	6	1197.8	5.40	174.9	89.6	86.0	1050.5	59.94	4.98	F.B.	42.5	20.00	20.85					
3	全上	1200	120	210	105	105	840	4	1198.3	5.28	209.7	107.0	104.2	841.0	59.98	5.03	F.B.	41.0	29.18	29.18					
8	補強材の心距を变化させる	1200	120	265	132.5	132.5	1060	4	1201.2	5.37				841.0	59.98	5.03	F.B.	42.5	26.87	28.27					
9	溶接肉付補強材	1200	120	265	132.5	132.5	1060	4	1200.2	5.19				838.5				41.1	12.47	12.93					
E-1	MS 材	1200	120	210	105	105	840	4	1199.8	5.12	263.4	134.9	133.9	1059.1	60.31	5.54	F.B.	42.8	8.31	8.80					
2	殻板圧壊	1200	120	265	132.5	132.5	1060	4	1199.8	5.34	208.9	105.8	106.2	839.1	60.62	5.02	F.B.	36.0	19.53	21.01					
3	の研究	1200	120	295	147.5	147.5	1180	4	1199.6	5.34	263.8	135.0	132.2	1058.7	60.70	4.94	F.B.	27.5	21.15	21.36					
4	溶接肉付補強材	1200	120	455	227.5	227.5	1820	4	1199.8	5.35	294.4	147.9	148.3	1179.3	60.65	5.08	F.B.	27.83	17.71	18.12					
5		1200	120	265	190	190	2500	9	1198.6	5.27	454.5	226.9	228.7	1818.9	60.48	5.35	F.B.	27.0	14.20	15.55					
		1200	120	265	190	190	2500	9	1199.5	5.30	263.5	191.2	192.8	2500.3	60.44	5.06	F.B.	27.83	12.54	12.54					
		1200	120	265	190	190	2500	9	1199.5	5.30	263.5	191.2	192.8	2500.3	60.44	5.06	F.B.	29.37	17.41	18.00					

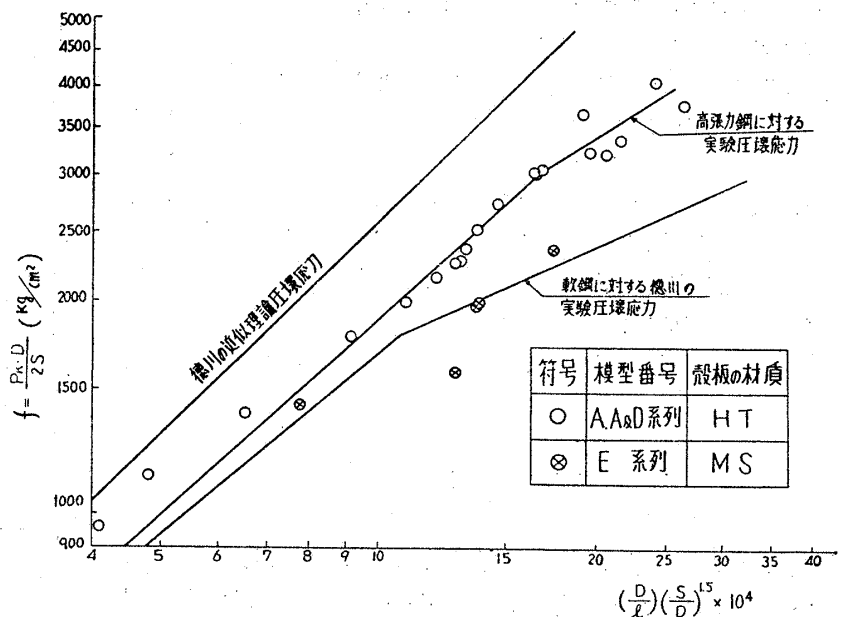
り実用的にはまず十分であるといつて差し支えない。したがつて模型の幾何学的形状の圧壊圧力におよぼす影響は既知であるとして取扱つた。

使用材料として軟鋼 (MS) が高張力鋼 (HT) に代つた場合の圧壊圧力について研究する目的で模型寸法を第 5 表のように立案した。E 系列は本実験装置と実験方法が適正であるか否かを調査するために徳川の実験結果と比較検討することを目的とした。

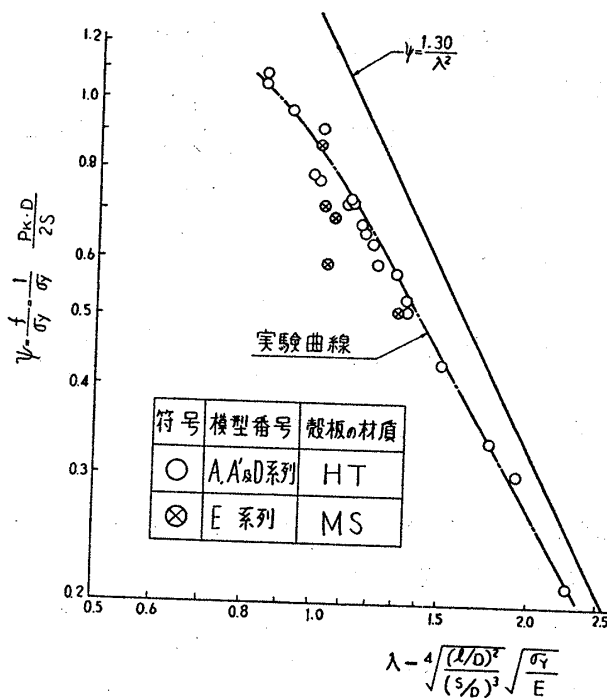
3-2 実験結果とその考察

実験結果は第 5 表に示す。

徳川と Windenburg の様式



第 13 図 殻板圧壊実験結果



第14図 ψ-λ 図

$$\frac{1}{\sigma_Y} \cdot \frac{P_K \cdot D}{2S} = \frac{1.2}{\left\{ \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \cdot 4 \sqrt{\frac{(l/D)^2}{(S/D)^3}} \right\}^2} \quad (8)$$

$$\text{Pressure factor } \psi = \frac{1}{\sigma_Y} \cdot \frac{P_K \cdot D}{2S}$$

$$\text{Thickness factor } \lambda = \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \cdot 4 \sqrt{\frac{(l/D)^2}{(S/D)^3}}$$

とし ψ~λ の関係を図示している。

(8)式の両辺を σ_Y で割って(9)式が成立するためには「材料の応力ひずみ図が相似であれば」という条件を満足しなければならない。そこで MS と HT との応力ひずみ図を比較すると第15図のようである。

Windenburg の表示法は一見非常によくまとまっているように見えるけれども実用上最も大切な $\psi=1 \sim 0.9$ の附近が対数目盛で表示しているため余り明瞭でない。これを普通目盛で表示すると Nash⁸⁾ が指摘しているように相当バラツクのであってこれは厳格には両者の応力ひずみ図が相似でないためと思われる。然し実用上平均曲線に対し $\pm 10\%$ の誤差を許容するならば両者何れによつても差支えなからう。

(6)真円度は第6表に、その影響は第16図に示す。

4. 結 論

(1)実験数は必ずしも多くはないが S/D が $0.00313 \sim 0.00584$ の範囲で使用材料が MS または HT の何れであつても平均曲線に対し $\pm 10\%$ の誤差を許容することにすれば全体圧壊については第9図を、殻板圧壊については第13図、または第14図を使用して実用上差し支えなからう。ただし全体圧壊の弾性域

で図示するとそれぞれ第13図と第14図のようである。

(1)E系列の実験は直径1200mmで板厚は徳川が4.5mmに対し今回は5mmであるが実験結果はよく一致しており本実験装置と実験方法は信頼するに十分であることを示している。

(2)補強材は殻板に溶接で取付けてもリベットで取付けても径間長さ(Unsupported span)が同一であれば圧壊圧力に相違はない。溶接の場合は内付でも外付でもまた圧壊圧力に相違はない。

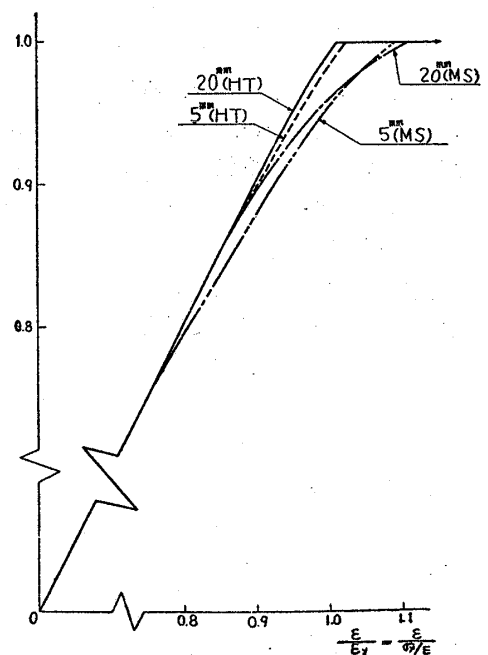
(3)応力は Sanden の計算結果によく一致した。

(4)圧壊圧力には初期圧壊圧力と極限圧壊圧力の2種類があるが第13図、第14図共初期圧壊圧力をとった。Windenburg は極限圧壊圧力を採用しているので原文⁵⁾に比較して若干低い値を示しているのはこのためである。

(5)徳川によれば

$$f = \frac{P_K \cdot D}{2S} = 1.2 E \cdot \left(\frac{D}{l} \right) \cdot \left(\frac{S}{D} \right)^{1.5} \quad (8)$$

Windenburg は(8)式の両辺を σ_Y で割って



第15図 応力ひずみ図

においては第 10 図に示す有効幅を有する補強材の I を用いて (2) 式で計算する方がよい。

(2) 一般構造物においては通常全体圧壊ではなく殻板圧壊をするように計画するのが普通である。

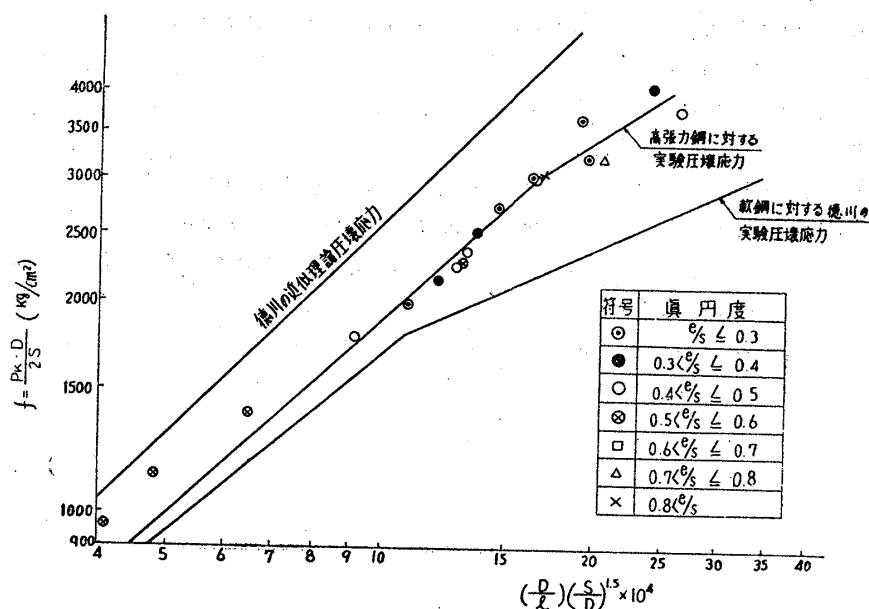
殻板圧壊と全体圧壊の境界を明確に知ることは困難であるが、実験を行なった範囲で全体圧壊をする場合には、第 13 図または第 14 図に示す平均曲線による殻板圧壊圧力の 10% 増の圧力までは必ずといってよい程殻板圧壊をせず全体圧壊をした。

また殻板圧壊圧力は初期圧壊圧力であつて極限圧壊圧力ではないことに注意すれば計画時、15~20% 増の殻板圧壊圧力に耐えるよう補強材の寸法を決めることが望ましい。

(3) 溶接構造であれば初期ひずみは避けられないものであつてひずみはできる限り小さいことが望ましいが、その程度が実用上圧壊圧力に

第 6 表 殻板圧壊模型真円度一覧表

模型番号	真円度	模型番号	真円度
A-2	0.305	D-1	0.364
3	0.205	2	0.580
4a	0.248	3	0.624
4b	0.228	7	0.391
5	0.217	8	0.469
6	0.315	9	0.425
7	0.292	E-1	0.343
8	0.328	2	0.449
9	0.406	3	0.442
10	0.264	4	0.745
11	0.449	5	0.401
A'-4'	0.189		



第 16 図 真円度の影響

およぼす影響については、全体圧壊については若干、殻板圧壊については殆んどないといつてよい。

ブロックの現場溶接接手は補強材間の中央で施行しても溶接余盛が若干の補強となるためかまた圧壊圧力に相違はない。

(4) 全体圧壊は必ずといってよい程殻板の縦接手付近に生じた。殻板圧壊の場合は必ずしもそうではないが縦接手付近に最初の凹入を生じたものが多かったことは注意すべきことであろう。

(5) 全体圧壊において L/D が小になれば圧壊圧力は増加するが、 $L/D < 1$ の場合は $L/D = 1$ の圧壊圧力におおむね相等しい。これは構造上普通スチフナーの外にウェブスチフナーを使用する場合には $L/D = 1$ のスパンになるように計画することが最も得策であることを示している。

(6) 吉識、山本、鈴木⁹⁾ は全体圧壊の圧壊平均応力の上限は材料の降伏点の 90% 程度を越えることはなからうと予言しているが今回の実験では降伏点の 95% 程度であつた。

感 謝

本研究は 4 年間にわたる防衛庁委託研究の実験と、川崎重工自体の実験結果とを取りまとめたもので、ここに発表を許可されたことに深く感謝の意を表したい。

つぎに直接御懇切なる御指導を賜つた故徳川武定博士と本文取りまとめに協力下さつた川崎重工、中野和夫、猪野一郎の両君に合せて御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) T. Tokugawa : "Model experiments on the elastic stability of closed and cross-stiffened circular cylinders under uniform external pressure"
昭和4年11月 造船協会雑誌, 第92号
- 2) Galletly, Slankard and Werk : "General Instability of Ring-stiffened Cylindrical Shells subject to External Hydrostatic pressure- A Comparison of Theory and Experiment"
June, 1958, Journal of Applied Mechanics
- 3) Trilling : "The influence of stiffening rings on the strength of thin cylindrical shells under external pressure"
Feb. 1935, P.B. Report No 396
- 4) R. D. Conrad : "Structural Models. Part I. Theory"
June 18, 1938 p. 38—40
- 5) Windenburg : "Collapse by Instability of Thin Cylindrical Shells under External Pressure"
A. S. M. E. 1934 Vol. 56
- 6) 徳川武定 : "均等外板に働かれる薄肉円筒, 円錐および球の圧壊圧力近似計算法について"
昭和15年12月 造船協会会報 第67号
- 7) William R. Osgood : "Column Curves and Stress-Strain Diagrams"
Bureau of Standards Journal of Research Oct. 1932, Vol. 9 No. 4
- 8) Wenk, Slankard and Nash : "Experimental Analysis of the Buckling of Cylindrical Shells subject to External Hydrostatic Pressure"
Dec. 1953, Experimental Stress Analysis Vol XII, No. 1
- 9) 吉識, 山本, 鈴木 "補強円筒殻の軸対称圧壊"
昭和34年7月 造船協会論文集 第105号