均等外圧を受くる薄板球形罐の弾性的安定 に関する実験と其の壓壊壓力の近似計算法

正員 工学博士 徳 川 武 定

梗 概

外圧を受ける薄板球形罐が、弾性的不安定の爲に壓壊すると云ふ場合の實驗は、未だ發表されたものがない様である。本論文では、此の問題の研究資料を得んとして行はれたる大規模實驗の成績を紹介し、併せて既に發表されて居る R. Zoelly の理論に依る計算壓力は、本實驗成績と甚だ離隔して居る事を知り、新に著者が思ひついた近似計算法を掲げることとした。

Abstract.

Experiments on the Elastic Stability of Thin Spherical Shell under Uniform External Pressure and Some Idea of Rough Approximation to the Calculation of its Collapsing Pressure.

By Takesada Tokugawa, *Kogakuhakushi, Member.*

Experimental results on the collapse of thin spherical shell under external pressure due to the elastic instability has not yet been published, so far as the author is aware.

In this paper, he intends to describe the result of an extended experiment with steel models of various sizes carried out at the Naval Technical Research Department, Tokyo, with a view to obtaining the data for investigation of this line. Since the measured values of the collapsing pressure in our experiment all fall short of those calculated with Dr. R. Zoelly's formula, a new idea of dealing with this problem is developed in the later part of this paper.

著者は昭和 4 年 11 月東京で開催された萬國工業會議で、薄板圓筒の弾性的安定の問題⁽¹⁾を論述し、又昭和 6 年 11 月同じく東京で開かれた應用力學聯合大會で、薄板圓錐の弾性的安定に関する實驗成績⁽²⁾を發表したので、此の度は最後に残された薄板球形罐の弾性的安定に関する實驗の成績を掲げて、學者の参考に供し度いと思ふ。

(1) 實驗裝置及模型

海軍技術研究所造船研究部に設置してある内徑 880 耗、長さ約 2 米、壁厚 51 耗の砲身材で造つた使用壓力每平方糎 100 耗の壓力水槽を使用して此の實驗を行つた。本實驗に使用した模型は軟鋼

(1) "Model Experiments on the Elastic Stability of Closed and Cross-stiffened Circular Cylinders under Uniform External Pressure." Paper No. 651. World Engineering Congress, 1929

(2) 「四周より均等法線外圧を受くる薄板圓錐の弾性的安定に関する實驗と其の壓壊壓力の近似計算法」(應用力學聯合大會——造船協會雜纂第 125 號附錄——昭和 7 年 8 月刊行)

であつて、 $E=2,000,000\text{kg./cm}^2$ の材質を持つて居り、其の直径を夫々 800 耗、600 耗、400 耗、200 耗に選び、壁厚の種類を下の様に、筒数は各 2 箇所つ造つたから、模型数は合計 34 箇所である。

直径(耗)	壁 厚 (耗)				
800	6	5	4	3	2
600	6	5	4	3	2
400	3	2.5	2	1.5	1
200	1.5		1		

(註) 直径 800, 400, 200 のものは相似な譯である。

製法は各直径毎に特殊の内外圧延型を造り、半球一つを作成し、後で中央を熔接したものである。熔接する前に掛員を製造所へ派遣して、凡ての球壁の厚さを測定させ、又球罐としての仕上りを厳密に調査した。

(2) 實驗成績及概括

實驗成績は TABLE I に示す通りて、其の成績を $\left(\frac{\text{板厚}}{\text{直径}}\right)$ 即ち s/D の比を横軸に取り、壓壊壓力 p_k を縦軸に取つて作つた曲線を、FIG 1 (普通方眼紙) 及 FIG 2 (對數方眼紙) に記入して置いた。

球壁である板の厚さは、到底設計通り出來上るものではないから、 s/D の群として之を分割整理するのは不可能である。由つて表記の様に一貫した s/D 順に依ることにした。實驗成績から得た概括結論を記述して見ると次の様なことになる。

- (i) s/D 相等しいものは、直径の大小に関係なく概して等しい壓壊強度を有する。
- (ii) 壓壊の状況は最初球形罐の下面の部分に、FIG 3 A の様な周縁圓形な凹入が出來、尙壓力の上昇を續けると、順次 B, C, D, E の様に變形が進行して行くのを認め得た。此の現象は軟鋼製球罐の壓壊後の状況より見ても、亦特に別に設けた小型壓力槽に厚い硝子蓋を附けて、中にゴム鞠を入れて之に壓力を掛けて、其の凹入する模様を見ても、丁度上に述べた様な過程を経ることを認め得たのである。

猶参考として次の様な寫眞を挿入して置いた。

FIG 4 壓壊過程の一段階として五角形を生じた所を示す寫眞。

FIG. 5 壓壊球罐全部の寫眞。

FIG 6 壓壊過程を示すに好適なる壓壊球罐を集めた寫眞。

FIG 7 直径 600 耗にして厚さ夫々 6, 3, 2 耗 (球罐番號 12-B, 9-A, 8-B) なる球罐の壓壊様式を示したもの。

(3) 本回の實驗範圍で得られた實驗式

- (1) 外壓に因つて球形罐壁の材料中に惹起する周壁應力 (hoop stress) は周知の如く下の式で計算

出来る。

$$f = \frac{p}{2s} \quad \dots \dots \dots (1)$$

茲に f = Stress intensity, kg./cm².

p = External pressure, kg./cm².

r = External radius of sphere, cm.

s = Thickness of spherical shell, cm.

(ii) 球形罐壓壊壓力實驗式

(A) 外壓に因つて球形罐壁材料中に生起する周壁應力が材料の比例限度（軟鋼にて約 1,900～2,000kg./cm²）以内の場合は、本研究の結果次の實驗式を用ひて壓壊壓力を算定し得る。

$$p_k = 14.82 E \left(\frac{s}{D} \right)^{2.5} \quad \dots \dots \dots (2)$$

茲に p_k = 球形罐の壓壊壓力, kg./cm².

E = 材料の Young's modulus, kg./cm².

此の場合 $E = 2,000,000$ kg./cm².

s = 罐壁の厚さ, cm.

D = 罐の外徑, cm.

本實驗式利用範圍を周壁應力 1,900～2,000kg./cm² 以内と考へる代りに

$$\left(\frac{s}{D} \right) = 0.0045 \quad \text{以下として考へても宜しい。}$$

(B) 周壁應力が比例限度を超えるとき、換言すれば $\left(\frac{s}{D} \right)$ 比が 0.0045 以上となるときは、次の實驗式を用ひねばならない。

$$p_k = 0.0122 E \left(\frac{s}{D} \right)^{1.19} \quad \dots \dots \dots (3)$$

上式中の符號の意味は前式(2)の通り、又式(2),(3)に依らずとも FIG. 1, FIG. 2 から、直接 $\left(\frac{s}{D} \right)$ が分れば壓壊壓力を推定することが出来る。

(4) 球形罐の壓壊壓力近似計算法

(i) R. Zoelly に據る外壓に作用される球形罐の壓壊壓力の理論的計算法⁽¹⁾（新たに工夫した近似計算法を述べる前に Zoelly の理論を略説して置く）。

R. Zoelly の假定は球罐は外壓を受けるとき axially symmetrical bulging を起すものと考

⁽¹⁾ R. Zoelly—Über ein Knickungsproblem an der Kugelschale Dissertation Zurich, Techn Hochschule 1915

へて、理論を誘導したのである。

Dr. Zoelly の此の critical pressure を與へる理論式は

$$p_k = \frac{4E}{N} \frac{s}{D} + \frac{4E}{3(1-\sigma^2)} N \left(\frac{s}{D} \right)^3 \cdots \cdots \quad (4)$$

茲に D = Diameter of the spherical shell.

s = Thickness of the shell.

σ = Poisson's ratio.

n = No. of lobes で

$N = 4n^2 + 2n - 1$ の形で關係付けられたもの。

(4) 式は plate 又は shell の elastic stability の他の諸問題のときと同様、stress-member と bending-member とから成立して居り、前項は n の増加と共に減少し後項は増加する。(4)式を觀察すると stress-member は比較的效果大であつて大なる値を與へるから、内力が材料の比例限度以内に納まる程度では、球形罐は凹入は相當大きな wave numbers n でのみ起ることが解る。 n の種々な値を與へ p_k の smallest possible value を見出すには $\frac{\partial p_k}{\partial N} = 0$ と置けばよい。

$$\text{之より} \quad N = \sqrt{3(1-\sigma^2)} \cdot \frac{D}{s} \cdots \cdots \quad (5)$$

を得られ、從つて p_k の對應値を見出せば

$$p_{kmin} = \frac{8E}{\sqrt{3(1-\sigma^2)}} \left(\frac{s}{D} \right)^2 \cdots \cdots \quad (6)$$

となる。(5)式を見れば球形罐壁の厚さが薄き程 N 從つて wave-numbers n は大となる。(6)式を用ひて本研究の場合に當嵌めて見ると實驗値より遙かに大きな値が出て實用にならない。(FIG. 1 及 FIG. 2 参照)。蓋し球形罐の middle surface の buckling の一般形式を求めることは解析的に非常に困難なもので、Zoelly の場合も假定が實際に則しないのであると思はれる。茲で著者は今回の實驗の結果を具に觀察して、實際に則した近似計算法を誘導して、Zoelly の場合よりは、遙かに實驗値に近似せしむることが出来た。

(II) 球形罐の壓壊壓力近似計算法の工夫

球は其の形が中心に對して完全に對稱であるから、壓壊する瞬時の形も亦中心に對して對稱に起るべきである。(但し此の意味は壓壊後の形が中心に對して對稱になり居ると言ふ意味ではない)。凡ての方向に對稱なる球形罐の壓壊壓力を理論上算定することは極めて困難であつて、現在ある理論に關しては上に説述したが、茲には著者の思ひ付いた一種の近似算定法を掲げ、其の比較的に實驗値に近似し得ることを示さうと思ふ。

先づ球形罐の壓壊する瞬時の形が、中心に對し對稱に起るべきことは上に述べたが、其の中心に對し對稱形であるとは、正多面體を想像するのが當然の順序である。詳言すれば球が壓壊するときの凹

入が、正多面體の面に相當する位置に發生すると言ふ考へ方である。而して球罐の凹入せる形を考へて見ると、頂角の大なる扁平な薄板圓錐 (thin conical shell) の壓壊時、其の底面縁に沿ひ凹入する形と良く類似することを想起したのである。(昭和 6 年 11 月開催の應用力學聯合大會に「四周より均等法線外壓を受ける薄板圓錐の弾性的安定に関する実験と其の壓壊壓力の近似的計算法」として發表してある。……造船協會雜纂第百二十五號附録、昭和 7 年 8 月)。各稜が其の球に接する正多面體を考へる。(是は内接及外接の中間で球に更に近い形と考へられる)。此の多面體の 1 つの頂點に集まる稜を母線として含む圓錐により、球の凹入部に近似せんとするものである。(FIG. 8)。

却つて正多面體中最も球に近い形は正二十面體⁽⁴⁾である。

圓錐の計算法に従ひ、 l の頂點から $0.6l$ の處に於ける錐面の法線が、圓錐體の主軸と交る點迄の長さが、其の母線に於ける錐面の曲率半径であるから、此の長さの 2 倍即ち $d=0.6D$ (D =球形罐の直徑) を直徑とし、 l を長さとする圓筒の壓壊壓力算定式を用ひれば宜しい。

l の長さは FIG. 9 に示す様に

$$l=0.31D$$

であるから、 $d=0.6D$ をも併せ考へれば

$$\frac{d}{l} = \frac{0.6D}{0.31D} = 1.94$$

即ち圓筒 (cylinder) の壓壊壓力の式に

$$\frac{d}{l} = 1.94 \quad \frac{s}{D} \text{ の代りに } \frac{s}{0.6D} \text{ と置けば}$$

球形罐の壓壊壓力を求め得らるゝ譯である。

圓筒の壓壊壓力を求むる近似式(附録参照)

$$p_k = \frac{4\pi}{3\sqrt{3}} \frac{E}{(1-\sigma)^{\frac{3}{4}}} \frac{d}{l} \left(\frac{s}{D} \right)^{2.5} \dots \dots \dots (7)$$

の式中に $\frac{d}{l} = 1.94$, $\frac{s}{D}$ の代りに $\frac{s}{0.6D}$ と置き、軟鋼球形罐として $E=2,000,000 \text{ kg./cm}^2$. と取れば

$$\begin{aligned} p_k &= 5.2 \times \frac{d}{l} \left(\frac{s}{0.6D} \right)^{2.5} \times 10^6 \\ &= 1.008 \times \left(\frac{s}{0.6D} \right)^{2.5} \times 10^7 \\ &= 3.59 \times \left(\frac{s}{D} \right)^{2.5} \times 10^7 \\ p_k &= 3.59 \times \left(\frac{s}{D} \right)^{2.5} \times 10^7 \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

(4) 正多面體と言ふは立體幾何學上、正四面體、正六面體、正八面體、正十二面體、正二十面體の五つより他にないことは周知の事實である。

又 E を其の儘として置けば

$$p_k = 17.95 E \left(\frac{s}{D} \right)^{2.5} \dots \dots \dots (9)$$

(7)式従つて(8)、(9)式は元來 α^2 (茲に $\alpha = \frac{\pi d}{2l}$) が n^2 に比して小なりと言ふ條件の下に求められた式である。

FIG. 1 及 FIG. 2 中 calculated collapsing pressure と記した曲線は上式を trace したものである。

最後に本研究で模型製作に就ては海軍技師池上作太郎君、實驗及解析に就ては有吉金太君、和泉誠一君、野中重彌君等に俟つ所が大であつたこと、又海軍當局が本研究成果發表の許可を與へられたことに對し何れも深謝の意を表する次第である。

附 録 I

圓筒が外壓に作用されるとき、其の壓壊壓力を與へる式は、著者が潜水艦の耐壓船殻強度計算の爲に作成したものをひればよい。〔昭和 4 年 11 月—造船協會雜纂第 92 號—萬國工業會議提出論文 No. 651—“Model Experiments on the Elastic Stability of Closed and Cross-stiffened Circular Cylinders under Uniform External Pressure.”〕

即ち原式は

$$p_k = \frac{E \left(\frac{s}{D} \right)}{n^2 - 1 + \frac{\alpha^2}{2}} \left[\frac{2\alpha^4}{(n^2 + \alpha^2)^2} + \frac{2}{3} \frac{1}{(1 - \sigma^2)} \left(\frac{s}{D} \right)^2 \left\{ (n^2 + \alpha^2)^2 - \frac{n^4(2n^2 - 1)}{(n^2 + \alpha^2)^2} \right\} \right]$$

p_k = The collapsing pressure,

s = The thickness of shell,

D = The mean diameter,

l = The unsupported axial length of the cylinder,

E = Young's modulus,

σ = Poisson's ratio,

n = Number of lobes,

$$\alpha = \frac{\pi D}{2l},$$

今 l が相當に大きくて α^2 が 1 に對して省略し得るならば ($n \geq 2$ であるから n^2 に對しても亦省略し得ることは明かである)。

$$p_k = E \frac{s}{D} \left[\frac{2\alpha^4}{n^4(n^2 - 1)} + \frac{2}{3} \frac{1}{(1 - \sigma^2)} \left(\frac{s}{D} \right)^2 (n^2 - 1) \right],$$

内力 $f = \frac{p_k r}{s}$ であるから

$$f = \frac{E}{2} \left[\frac{2\alpha^4}{n^4(n^2-1)} + \frac{2}{3} \frac{1}{(1-\sigma^2)} \left(\frac{s}{D} \right)^2 (n^2-1) \right],$$

$$\frac{1}{n^4(n^2-1)} = \frac{1}{n^6} \frac{1}{1-\frac{1}{n^2}} = \frac{1}{n^6} \left(1 + \frac{1}{n^2} + \frac{1}{n^4} + \dots \right) \cdot \frac{1}{n^6} \left(1 + \frac{1}{n^2} \right)$$

であるから、 $\frac{2}{3} \frac{1}{1-\sigma^2}$ を括り出して $\left(\frac{1}{n^4} \right)$ の項が 1 に對して省略し得るならば

$$f = \frac{E}{3(1-\sigma^2)} \left[\frac{3\alpha^4(1-\sigma^2)}{n^6} \left(1 + \frac{1}{n^2} \right) + \left(\frac{s}{D} \right)^2 (n^2-1) \right],$$

n で微分して

$$\frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{1}{n^6} \left(1 + \frac{1}{n^2} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{n^6} + \frac{1}{n^8} \right) = - \left(\frac{6}{n^7} + \frac{8}{n^9} \right) = - \frac{2}{n^7} \left(3 + \frac{4}{n^2} \right),$$

であるから

$$\frac{\partial f}{\partial n} = \frac{E}{3(1-\sigma^2)} \left[- \frac{6\alpha^4(1-\sigma^2)}{n^7} \left(3 + \frac{4}{n^2} \right) + 2n \left(\frac{s}{D} \right)^2 \right],$$

$\frac{\partial f}{\partial n} = 0$ を n に就て解き f の式に入れて f の式の envelope を求める爲に $\frac{\partial f}{\partial n} = 0$ から其の括弧内を

0 と置けば

$$\left(\frac{s}{D} \right)^2 = \frac{9\alpha^4(1-\sigma^2)}{n^8} \left(1 + \frac{4}{3n^2} \right),$$

$\frac{1}{n^2}$ が 1 に對して省略し得るならば

$$n^8 = \frac{9\alpha^4(1-\sigma^2)}{\left(\frac{s}{D} \right)^2}$$

即ち
$$n^2 = \alpha \sqrt[4]{\frac{9(1-\sigma^2)}{\left(\frac{s}{D} \right)^2}} = \alpha \sqrt[4]{\frac{3}{\left(\frac{s}{D} \right)}} \sqrt[4]{1-\sigma^2}$$

故に
$$f = \frac{E}{3(1-\sigma^2)} \left(\frac{s}{D} \right)^{1.5} \left[\frac{4}{\sqrt[4]{3}} \alpha \sqrt[4]{1-\sigma^2} - \frac{2}{3} \left(\frac{s}{D} \right)^{0.5} \right]$$

$\frac{s}{D}$ は極めて小さいから括弧内の第 2 項を省略すれば

$$f = \frac{4E}{3\sqrt[4]{3}} \frac{1}{\sqrt[4]{(1-\sigma^2)^3}} \left(\frac{D}{s} \right)^{1.5} \left(\frac{2l}{\pi D} \right) = \frac{2\pi}{3\sqrt[4]{3}} \frac{E}{\sqrt[4]{(1-\sigma^2)^3}} \frac{1}{\left(\frac{D}{s} \right)^{0.5} \left(\frac{s}{l} \right)},$$

$$E = 2 \times 10^6 \text{ kg./cm}^2.$$

$\sigma = 0.3$ と置けば

$$f = \frac{2 \cdot 60}{\left(\frac{D}{s} \right)^{0.5} \left(\frac{l}{s} \right)} \times 10^6 \dots\dots\dots (10)$$

故に f は對數方眼紙に $\left(\frac{D}{s}\right)^{0.5} \left(\frac{l}{s}\right)$ を base として trace すれば凡ての厚さに就いて 1 つの直線として現れる。而して此の直線は傾斜右下りに 45° である。

(10) 式を $f = \frac{p_k D}{2s}$ 式と結び付けければ、前掲(9)式を直ちに誘導することが出来る。

附 録 II

R. Zoelly の論文の外、本問題に多少なりとも關係ある文獻を下に掲げて置く。

E. Schwerin :—

Zur Stabilität der dünn-wandigen Hohlkugel unter gleichmäßigen Außendruck.

(Z. für Ang. M. u. Mechanik, Bd. II, Heft 2, April 19.2)

Dr. Föppl :—Drang und Zwang. Bd. II, 1920. A. Van der Neut, Diss. Delft. 1932.

Dr. Ing. W. Flügge :—

Statik und Dynamik der Schale. 1934.

(IX-Die Stabilität der Schalen. §5-Kugelschale unter radialem Druck.)

S. Timoshenko :—Theory of Elastic Stability, 1936.

§91. Buckling of Uniformly Compressed Spherical Shell, (p. 491).

ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE EXPERIMENT. TABLE I.

	MODEL NO.	DESIGNED $D \& s$ mm.	WEIGHT W kg.	$s = \frac{W}{9.36r^2}$	s/D	$\frac{s}{d} = \frac{s}{.6D}$	n	P cal.	P obs.	RATIO.	DATE OF EX- PERIMENT.
1	12-B	600×6.0	50.450	5.990	.00998	.01665	6	359.8	99.0	.275	8-9-7
2	12-A	600×6.0	48.750	5.790	.00965	.01608	6	329.5	88.0	.267	8-8-27
3	11-A	600×5.0	40.450	4.800	.0080	.01332	6	206.3	72.5	.351	8-8-27
4	11-B	600×5.0	39.370	4.670	.00778	.01299	6	193.8	72.6	.375	8-9-14
5	17-A	800×6.0	90.700	6.060	.00757	.01261	6	179.9	87.6	.487	8-9-1
6	17-B	800×6.0	90.250	6.030	.00754	.01258	6	178.9	95.0	.531	8-9-16
7	7-A	400×3.0	11.200	2.990	.00748	.01248	6	175.4	66.8	.380	8-9-5
8	7-B	400×3.0	10.400	2.780	.00695	.01159	6	145.8	66.6	.457	8-9-15
9	16-A	800×5.0	75.650	5.050	.00631	.01052	7	114.4	52.1	.415	8-9-6
10	2-A	200×1.5	1.160	1.240	.00620	.01032	7	109.1	79.0	.724	8-8-23
11	16-B	800×5.0	74.100	4.950	.00619	.01032	7	109.1	59.2	.543	8-9-7
12	10-B	600×4.0	31.050	3.690	.00615	.01025	7	107.3	56.1	.523	8-9-8
13	10-A	600×4.0	29.250	3.475	.00579	.00965	7	92.2	52.7	.572	8-8-29
14	2-B	200×1.5	1.000	1.069	.00534	.00890	7	75.3	35.6	.473	8-9-9
15	15-B	800×4.0	61.350	4.090	.00512	.00853	7	67.8	49.2	.726	8-9-11
16	15-A	800×4.0	60.700	4.060	.00507	.00844	7	65.9	46.3	.702	8-9-1
17	6-A	400×2.5	7.500	2.005	.00501	.00835	7	64.2	42.5	.662	8-9-6
18	6-B	400×2.5	7.270	1.945	.00486	.00810	7	59.5	43.4	.729	8-9-8
19	9-B	600×3.0	22.850	2.710	.00452	.00753	7	49.6	41.8	.843	8-9-9
20	1-A	200×1.0	.840	.898	.00449	.00748	7	48.8	36.0	.737	8-8-23
21	9-A	600×3.0	22.050	2.620	.00436	.00726	7	45.3	37.8	.839	8-8-31
22	5-A	400×2.0	6.460	1.725	.00431	.00717	7	43.9	35.2	.802	8-9-2
23	5-B	400×2.0	6.210	1.658	.00415	.00692	7	40.1	33.1	.825	8-9-11
24	14-B	800×3.0	44.700	2.990	.00374	.00623	8	30.88	24.2	.784	8-9-12
25	4-B	400×1.5	5.270	1.410	.00352	.00587	8	26.61	18.4	.691	8-9-12
26	14-A	800×3.0	40.650	2.715	.00339	.00565	8	24.18	19.7	.815	8-8-31
27	4-A	400×1.5	4.970	1.325	.00332	.00553	8	22.92	21.8	.952	8-9-2
28	8-B	600×2.0	15.550	1.845	.00308	.00513	8	19.00	21.5	1.131	9-2-15
29	1-B	200×1.0	.570	.610	.00305	.00508	8	18.55	16.8	.905	8-9-9
30	8-A	600×2.0	15.050	1.785	.00298	.00492	8	17.12	14.1	.824	8-9-1
31	13-B	800×2.0	33.750	2.252	.00282	.00469	8	15.19	14.1	.929	8-9-13
32	3-A	400×1.0	4.140	1.105	.00276	.00460	8	14.46	11.2	.775	8-9-4
33	13-A	800×2.0	32.700	2.185	.00273	.00455	8	14.07	14.2	1.010	8-9-4
34	3-B	400×1.0	3.810	1.018	.00254	.00423	8-9	11.72	13.6	1.160	8-9-13

FIG. 1.

FIG. 2.

FIG. 3. TYPICAL COLLAPSING MODES.

FIG. 4. PHOTOGRAPH SHOWING TYPICAL EXAMPLES OF COLLAPSING MODE.

FIG. 8. ILLUSTRATION SHOWING AN IDEA OF
APPROXIMATION TO THE CALCULATION OF
COLLAPSING PRESSURE OF THIN SPHERICAL SHELL.

FIG. 9.

討 論

○座長(山本武藏君) 唯今の御講演に對して御質問又は御討論のおありの方はどうぞ最初にお名前をおつしやつて其後にお話をお願い致します。

○佐藤兌君 pressure を増して行く rate はどの位ですか。

○徳川武定君 何秒にいくらといふことは、はつきり覚えて居りませんが、指針の動く有様を記憶の儘に申上げますと、——この位です。

○佐藤兌君 單位は kilogram ですか。

○徳川武定君 さうです。最初は 10 kg 毎位に途中で止めましたが、止めると反つて悪いので其の後は徐々ではありますが連続してやる事にしました。

○佐藤兌君 rate によつて collapsing form が變ると思ひますが、

○徳川武定君 cylinder や cone に就てやつて見ましたが、今の程度位では餘り差がない様です。爆發の場合は違ひます。波の数が多くなつて壓力が上ります。

○佐藤兌君 其の場合には deformation の side が一方でなしに、他方からも凹みが出てくるのではないでせうか。

○徳川武定君 爆發の時は cylinder の場合は爆發心に向つた方が の如く凹みまして、次に少

し遅れると考へられますが、全周に亘つて一様に の如く細かい波が出ます。之れは explosion

の centre の distance と爆藥量とで違ひますから、やはり昇壓の time rate によつて違ふ譯であらうと思ひます。

○佐藤兌君 有難うございました。

○妹澤克惟君 complete sphere と semi-sphere とでは問題がすつかり違ふやうに思ひます。stability の場合は私は知りませんが、vibration の時には small damping を入れると出易くなる振動が確かに違ひます。semi-sphere は zonal harmonics 型で宜いでしょうが、complete sphere の方は tesseral harmonics を適當に取つた tetrahedron 型のものになつたと記憶致します。

○徳川武定君 實驗をやつて見ますと凹みの diameter が boundary を cover せぬ時は實際の成績上同様でありましたから宜いと思ひます。差し當り差支へないと思ひますが、恐らく嚴密に言へば違ふかと思ひます。

○妹澤克惟君 夫れから茲では二十面體を使つてお出でになりまして tesseral harmonics を適當に

取ると云ふ考と能く一致して居りますけれども、慾を云ふと正多面體の色々なやつをやつて見て、其の minimum の壓力の出たものが complete sphere に當嵌まるとする方が良いと思ひます。勿論 Zoelly や Schwerin のは良くないと思ひます。

○徳川武定君 あれは displacement の assumption が axial symmetry ですからいけないのだと思ひます。

○妹澤克惟君 私の考へでは、さう云ふ多面體をいくつもやつて見て一番低くなるものをお取りになると數字的にはともかくとして理論的には良いと思ひます。

○徳川武定君 私もさう思ひますから、やつて見たいと思ひます。

○座長(山本武藏君) 他にどなたか御座いませんか。他に御座いせんければ、私より一言申し上げます。徳川博士は前には cylinder と cone で同じ様に實驗をされ會員の爲めに發表して居られます。一體實驗と云ふものが難しいと云ふのは設備のみならず、計測上色々厄介な事が起ると云ふ點にあるので此事は皆様の御承知の通りであります。にも拘らず徳川博士は何時も巧まい實驗裝置、計測裝置をお考へになつて着々實驗を進め成績を擧げて居られます。時々親しくお話を伺つて私共非常に爲になつて居るのであります。今回の sphere の問題の如きは之を造るのが非常に厄介で計測が又厄介であるにも拘らず着々實驗を進められ、壓壞の問題では、面白いと言つては失禮であります、着想が非常に變つてゐて面白いと思ひました。非常に面白く拜見致しました。お話の通り、未だ御自身でも充分お考へになつて居られない部分もあると云ふ事がありますが、更に尙進んで御研究をおやりになるらしく拜聴致しましたので、今後も此の問題に關し御發表あることゝ思つて喜んで居る次第であります。非常に有益な御研究を御發表になりまして會員一同の裨益する所大であると信じます。拍手を以て感謝の意を表し度いと思ひます。(一同拍手)