

型を用いない爆発成形球殻技術の数値解析

張 丙*, 井山裕文*, 藤田昌大**, 伊東 繁**

張 鉄生***, 李 振声****

球面に内接するように円錐殻を多重に重ね、上下面を円形平板で蓋をした構造体を予め溶接によって組み立てる。この構造体の中に水を充填し、その中央に適量の爆薬を配置する。起爆によって水中衝撃波が発生し、やがて構造体の内面壁に達する。構造体は衝撃水圧の作用によって変形し、球殻に成形される。この加工法を提案し、成形過程における構造体の変形機構を有限差分法を用いた数値解析法によって明らかにする。解析結果によって次の変形機構が明らかにされた。衝撃圧を内面に受けた構造体では、溶接部において内方に凸の曲げを生じ、その両側に外方に凸の曲げを生じる。この2つの曲げ波がそれぞれの円錐殻要素の中央に向かって移動し、その曲げ波の移動と共に円錐殻の要素は次第に球面状の形状に成形される。

1. はじめに

球殻成形を作成する方法としては、様々な方法^{1,2)}が考えられているが、ここで、対象とする方法は、型を用いない方法であり、簡便かつ安上がりである。方法の概要は、次の通りである。Fig. 1に示すように、多重に重ねた円錐殻にその上下面を円形平板で、蓋をしたような構造体を溶接によって予め組み立てる。この構造体の内部に水を充填し、その中央に適量の爆薬を配置する。爆薬を起爆すると水中衝撃波が発生し、やがて衝撃波は構造体の内面壁に到達し、衝撃圧の作用によって構造体は膨らみ、球形に成形される。この加工法は、著者らの2人が既に提案したもので³⁾、その方法を利用して大小様々な球体を製作し、それを実用に供しているが、構造体の各部分がどのような変形過程を辿るか、その間にどのような応力を生じるかという問題は、球体の製作上の技術的な問題としてばかりでなく、高速変形力学の観点から或いは、構造体の衝撃変形の具体的な様相を知る上で、大きな興味と意義を持っていると考えられる。本研究では有限

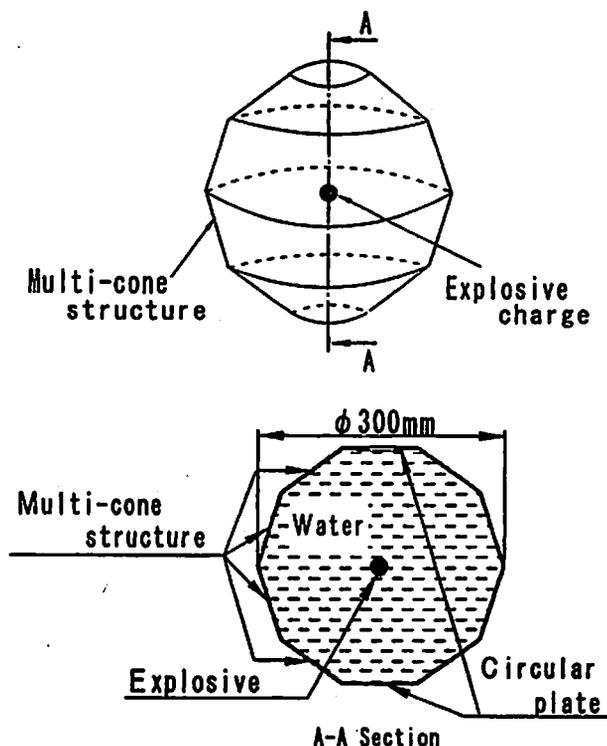


Fig. 1 Set-up for non-die explosive technology to make spherical shell

差分法によって数値解析を行い対象とする構造体の変形機構を明らかにする。

2. 解析モデルと基礎的な仮定

構造体は軸対称であり、そして赤道に対して面对称であるので、Fig. 2に示すように1/4象限の要素を計算の対象にする。使用した言語はFortran、パソコン

1996年8月14日受理

*熊本大学大学院

**熊本大学工学部

〒860 熊本市黒髪2丁目39-1

TEL 096-342-3739

FAX 096-342-3729

***P. O. BOX

142-80 北京 100854 中国

****内蒙古工业大学材料工学科

呼和浩特 010062 中国

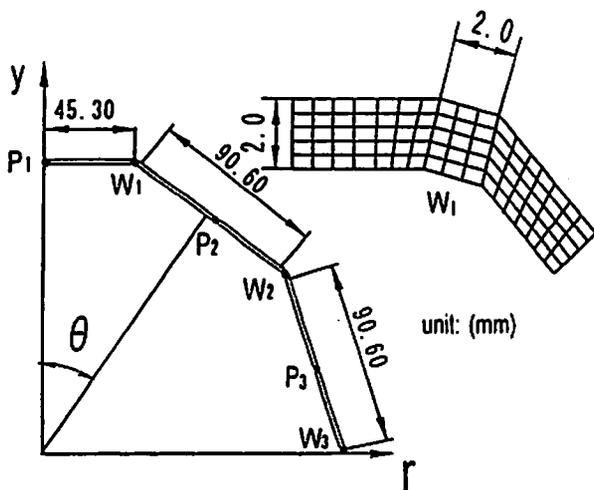


Fig. 2 Illustration of analytical object and elements divided for numerical analysis

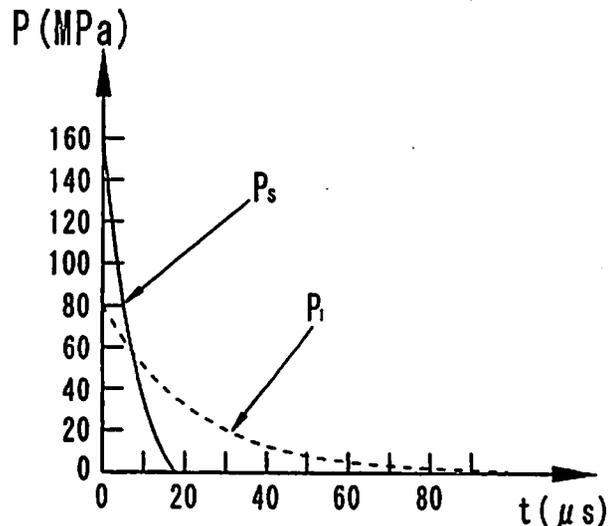


Fig. 3 Shock pressure P_s received by the plate under water

Table 1 SUS 304 ステンレスの材料性質

E (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	A (MPa)	n
210	0.26	7890	280	640	580	0.57

はEpsonのAT-6000型機であり、CPU時間約3時間である。構造体の材質は、SUS 304ステンレス鋼板であり、板厚は2mmである。また、構造体の外側輪郭は直径300mmの球に内接しているとする。有限差分法で計算を行うため、板厚を5層に分割し、子午線方向には290要素に分割した。計算要素の寸法は約0.8mm×0.4mmである。同材の溶接部は板厚と同じ幅(2mm)を有しているとし、この部分も3つの要素に分割した。Fig. 2において、 P_1 、 P_2 、 P_3 は円板の中心や各円錐殻の中央点を示しており、 W_1 、 W_2 、 W_3 は各溶接部の中央点を示している。解析の基礎式となる要素の運動方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{ry}}{\partial y} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{ry}}{\partial r} + \frac{\tau_{ry}}{r} \right)$$

になる。数値解析はSALE法によって実行した⁴⁾。(1)式の中で、 σ_r 、 σ_y 、 σ_θ 、 τ_{ry} は半径r方向、板面に垂直な方向、円周方向及びr-y面内のせん断応力成分と考える。 u 、 v は要素のr方向及びy方向の速度成分である。 ρ は板の密度である。材料の構成式は、

$$\sigma_y = \sigma_s + A(\epsilon_p)^n \quad (2)$$

によって示される、ひずみ硬化材であるとした。材料

の力学的性質を表す特性値は、Table 1に示している。ここでE、 ν 、 ρ はSUS 304ステンレス材料の弾性係数、ポアソン比及び密度を示している。 σ_s 、 σ_b は材料の初期降服応力と破断応力である。A、nは材料常数と硬化係数となっている。爆薬はTNT(成分： $-C_7H_5N_3O_6$ 、密度：1560kg/m³、爆轟速度 $V_D = 6700$ m/s、薬量：10g)である。爆源から150mm離れた位置での衝撃圧波形の時間変化 P_1 はFig. 3中に破線で示しているように、指数減衰曲線で与えられるとする。 P_1 (kg/m²)の計算式は

$$P_1 = P_0 e^{-\frac{\theta_m}{t}}$$

$$P_0 = k \left(\frac{W^{1/3}}{R_0} \right)^\alpha \quad (3)$$

$$I = l W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R_0} \right)^\beta$$

$$\theta_m = \frac{I}{P_m}$$

になる。その中で、W(kg)は薬量、 R_0 (m)は爆薬中心から板面にかけて離れた距離である。k、l、 α 、 β は爆薬係数である。TNTの場合は、 $k = 0.0533 \times 10^4$ 、 $l = 0.0588$ 、 $\alpha = 1.13$ 、 $\beta = 0.89$ 。板面に受けた衝撃波圧力 P_s は同図の中に実線で示す。 P_1 は板面に到着する時 $t = 0$ 定義する。この P_1 、 P_s の詳しい計算はCole⁵⁾とZheng⁶⁾の方法に従っている。

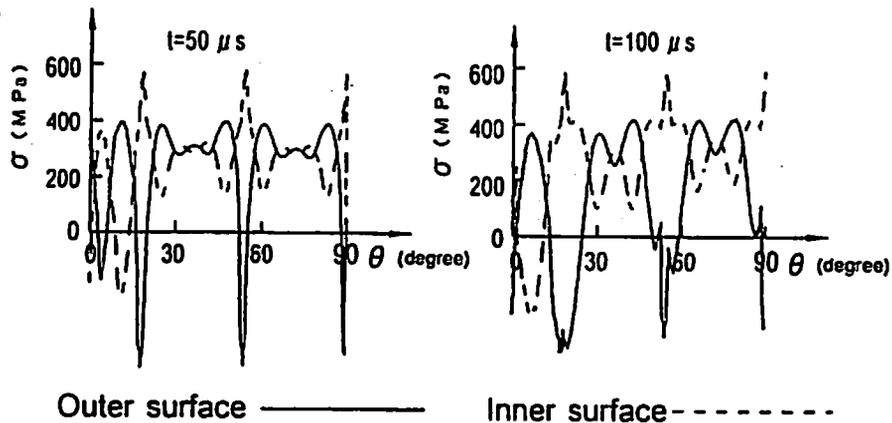


Fig. 4 Meridian stress distributions at different times

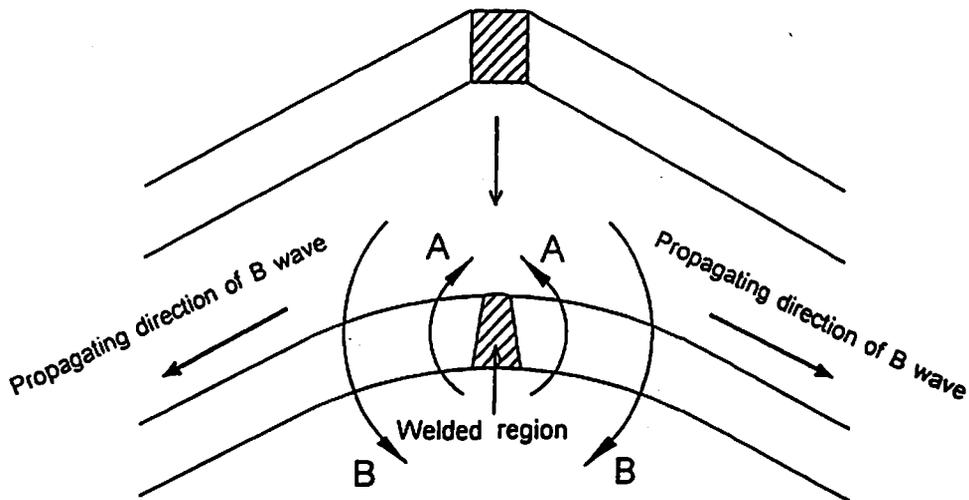


Fig. 5 Two different kinds of bending waves (A and B) were generated near by the welded region

3. 解析結果

3.1 応力分布

Fig. 4 は $t = 50 \mu s$ と $100 \mu s$ での構造体の内表面と外表面における子午線方向の応力分布を示している。溶接点を含む狭い領域では、内表面層の応力が正(引張り)で、外表面層の応力が負(圧縮)となっており、これと隣接する部分では逆に外表面層の応力が正の大きな値となり、内表面層の応力が正の小さな値(又は負の値)となっている。このことは2つの方向の異なる曲げ変形が相次いで生じていることを表している。Fig. 5 はこの2つの曲げ変形を模式的に説明した図である。溶接によって組立てられた屈曲部は衝撃圧によって押し展げられようとするために(A)の曲げ、つまり内に向かって凸の曲げを生じ、その両側では溶接部と溶接部の中間の未変形部(平坦部)と溶接部の曲げ変形部を滑らかに接続するために外に向かって凸の曲げ変形が生じている。 $t = 50 \mu s$ と $t = 100 \mu s$ の分布図を比べると判るように時間の経過と共に溶接部近傍の(A)方向の曲げ変形は、領域が広がると共に(B)の方

向の曲げ波は、両溶接部に挟まれた板の中央部の方向に移動し、 $t = 100 \mu s$ では両側の溶接部から進行した曲げ波が、間もなく中央部で合体しそうな状況となっている。このように曲げ波の移動によって構造体の変形は進行する。この時溶接部の外表面層では大きな圧縮応力を生じているが、これはこの部分に塑性座屈を生じさせる。実際成形後溶接部は外側に膨らんでおり、この効果が実際に生じたことを示している。さて、板部 P_2 及び P_3 では外側へ膨らむと円周方向に引張り作用を生じ、この面内応力によって塑性状態となっている。そのためにこの部分では面内応力(引張り)が大きく生じ、曲げによって生じたひずみにより、外表層では若干応力を増大させ、内表面層では応力を減少させたものと考えられる。これに対して P_1 部では、後に述べるように溶接部は、殆ど変位しないために変形によって膨らむ時、円周ひずみは殆ど増大しない。従って、子午線方向の僅かな面内引張りを伴うに過ぎず、外表面層では塑性状態となっても、内表面層は弾性域内である。従って同じ曲率の曲げであっても、曲げに

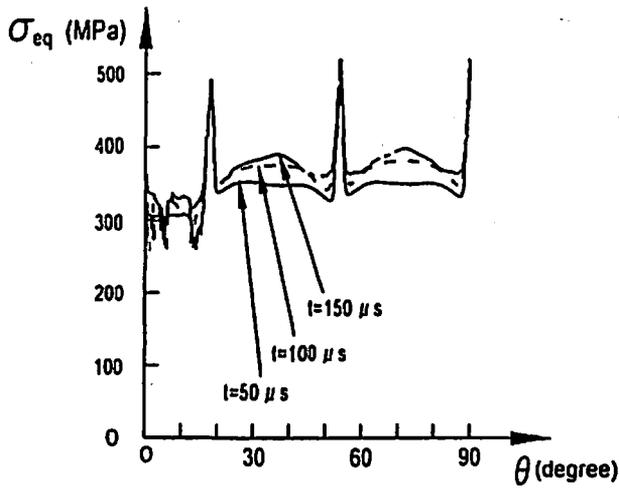


Fig. 6(a) Equivalent stress distributions at different forming stages (inner surface)

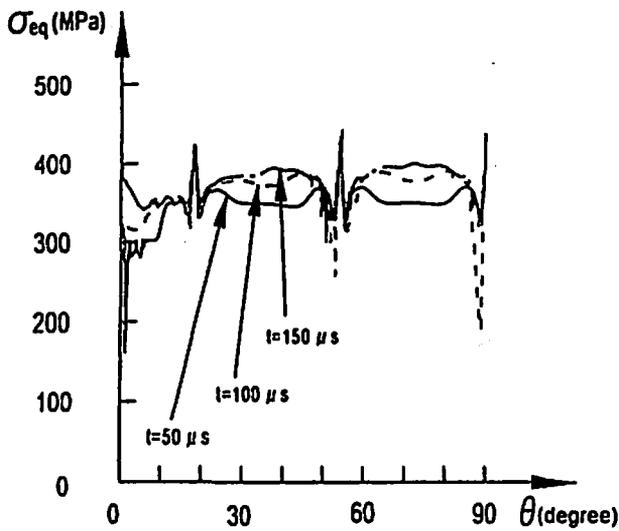


Fig. 6(b) Equivalent stress distributions at different forming stages (outer surface)

よる応力差は大きく生じたと考えられる。Fig. 6 (a), (b)は溶接部の内面層と板部の外面層における相当応力の分布を示している。言うまでもなく、相当応力が破断応力(sus 304の破断応力は $\sigma_b = 640$ MPa)を越える時、破断することが予想される。溶接部では $t = 50 \mu s$ において既に行程中での最大値に達しており、その後の行程では殆ど変化しない。板部では曲げ波の移動と共要素内部の相当応力 σ_{eq} は増大していく。しかし、溶接部板部共に σ_b を越えてはならず破断することなく工程が進行することを示している。実際溶接部、板部共に破断は生じなかった。図から判るように溶接部では屈曲部を押し広げようとする作用のために内面層でより大きな相当応力を生じているが、溶接部ではこのように内面において大きな相当応力を生じ、外面において塑性座屈を生じるような圧縮応力を生じるこ

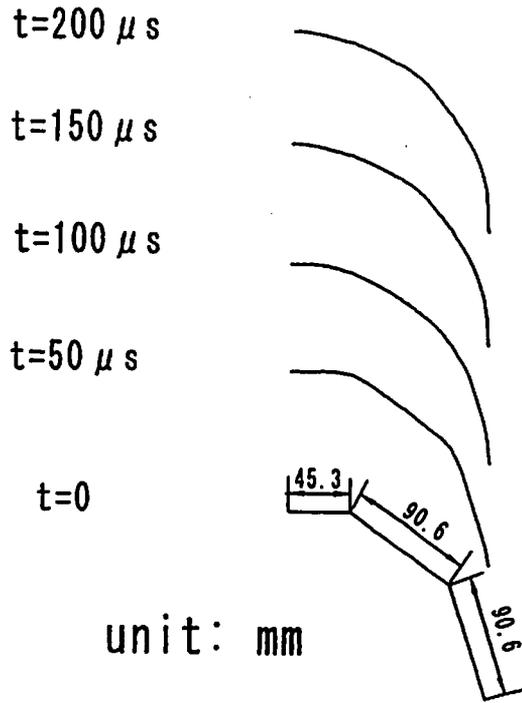


Fig. 7 Deformation processes at different times

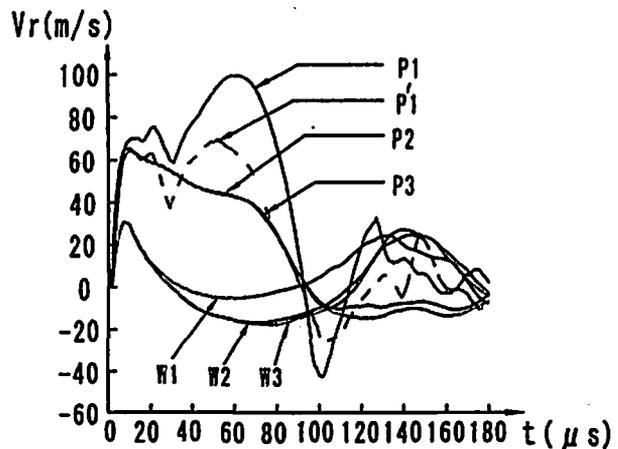


Fig. 8 Radial velocity distributions of different points

とを念頭に置かなければならない。

3.2 変形の特徴

Fig. 7は $50 \mu s$ おきの変形形状の変化を示す図である。時間の経過をと共に溶接部から曲げ波が誘起され板の中央方向に移動して、次第に丸味が形成されていく様子を知ることができる。

Fig. 8は P_1, P_2, P_3 (それぞれの板の中央点)と W_1, W_2, W_3 (3つの溶接部)の外方への変位速度の時間的変化を表している。溶接部においても衝撃波を受けた当初には、外方への変位速度を与えられるが、溶接部両側の内に凸の曲げ波の働きによって溶接部は減速し、やがて負の速度となっている。一方板部のうち P_2, P_3 の点では、初期に高い変位速度を得るが、円

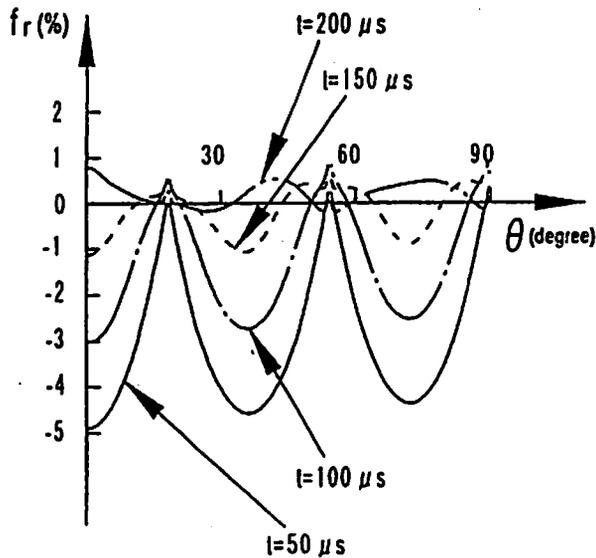


Fig. 9 Forming accuracy distributions vary with time

周方向応力の働きがあるために、やがて減速し始め、約 $100\mu\text{s}$ において速度0に降下している。これに対して P_1 点では、初期に到達した高速度から一旦減速した後加速されて、更に高い速度に達しその後で減速に転じ、速度も0に降下する。Fig. 9は $r=150\text{mm}$ を基準として各部の球体からの誤差をパーセントで示したものである。言うまでもなく、初期 $t=0$ においては溶接部では0%、板部中央(P_1, P_2, P_3 点)では-5%の距たりを有しており、変形の進行と共に球体からの距たりが小さくなっていく。 $t=200\mu\text{s}$ では概して塑性変形は終了し構造体全体が弾性振動している時間帯であるが、この運動波は、極めて小さいので、この時刻のダイアグラムが最終変形形状のものと見なして良い。この図から中央部 P_1 点において、かなりの突

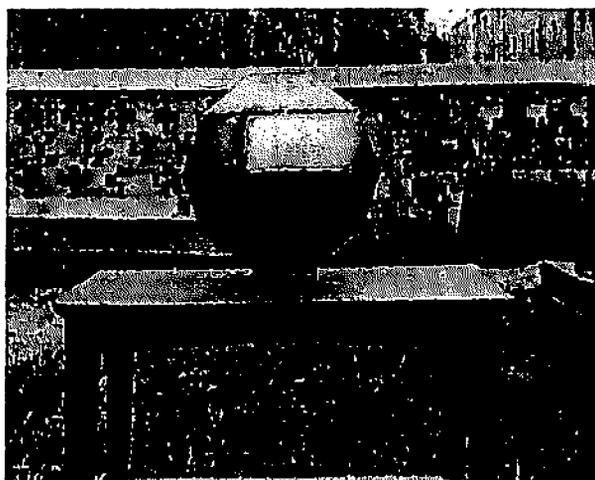
出が見られるが、($\theta \leq 17^\circ$)では球体からの距たりは1%以内に収まっている。 P_1 点で突出するのは、前図(Fig. 8)の速度線図から判るようにこの点では、変形の後半における速度の第2の増大によってもたらされるものである。

3.3 砂の変形抑制効果

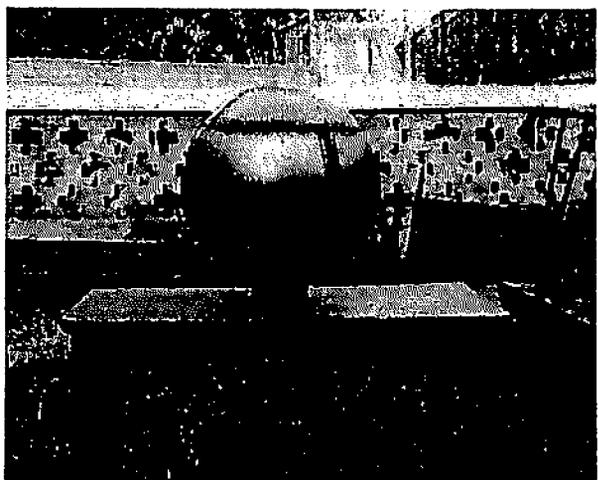
P_1 点を含む円形平板部は実際には、砂の上に乘せられている。この砂は、軟らかくほぐした砂であり、変位速度が高い時に、それを抑制しようとする働きをもつと推察される。今、この砂の密度を $\rho=1000\text{kg/m}^3$ とし板の変位速度(板面に垂直な方向の速度成分)を V_p とする時 ρV_p^2 が板面に垂直な方向に作用するとして計算を行った。その結果は、Fig. 8中に破線 P_1 で示している。Fig. 8から判るように、 P_1 点の変化速度は第2の速度増大がかなり抑制され、その結果最終変形形状での P_1 点の球体からの距たりは+1%以下に押さえられている。このように砂の上に置くことによって砂の変形抑制効果によって P_1 点の突出が抑制され、全体的な球体の成形が1%以内で可能になっている。なお、反対側の平板は構造体内水を注入したり、爆薬を構造体の中心に配置し、雷管脚線を取り出すために、板の中央に孔を穿けているが、構造的に弱体化するのを防止するために板を2枚重ねて溶接している。この補強によって板の変形は抑制され、この部分でも外形的には、ほぼ球体と見なせる形状に変形した。

4. 実験結果と応用例

Fig. 10は上記計算例の条件で爆発成形実験を行って得られた成形例である。球形容器の直径は 300mm 、使用した薬量はTNT 10gであった。図から判るように、全体にほぼ球体と見なせる結果が得られている。Fig. 11はこの方法を利用して製作した直径4mの球



Before forming



After forming

Fig. 10 Experiment result of $D=300\text{mm}$ spherical shell (SUS 304 stainless)

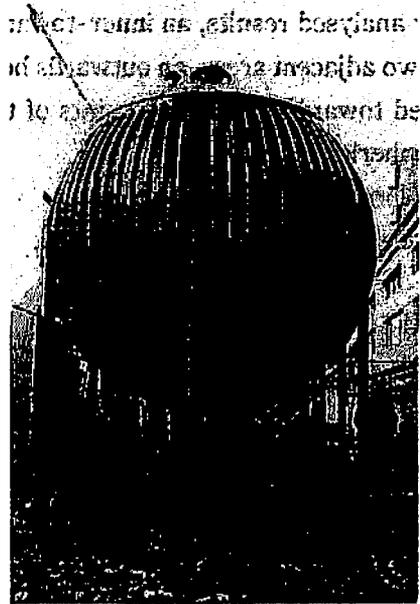
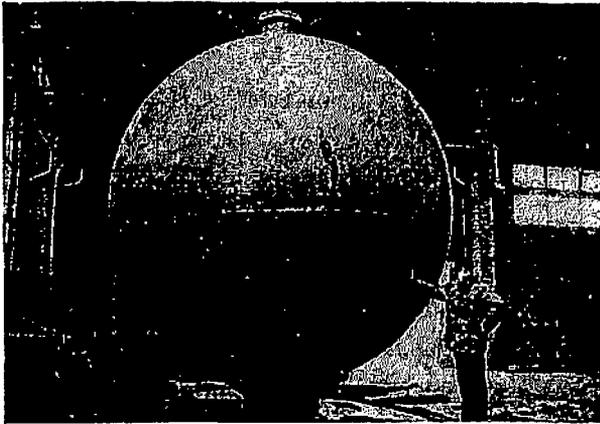


Fig. 11 High pressure vessel (D=4000mm) with 20mm thickness made by non-die explosive forming method

形タンク(爆薬量: TNT 500g, 板厚20mm, 軟鋼製)の例である。この場合には3回の爆発を繰り返したが、図から判るようにはほぼ完全な球体を製作することができた。

5. 結 論

本論文では予め溶接によって組立てた多重円錐殻構造体に水を充填し、その中心で爆薬を起爆しその際発生する水中衝撃波の圧力作用によって構造体を膨らまして球殻を製作しようとする方法について実際の構造体の変形機構を求めた。結果をまとめると次の通りである。

- (1) 衝撃圧を受けた構造体は、溶接部で外に向かって凸の曲げ変形が誘起され、これらの曲げ波は時間

経過と共に溶接部と溶接部の間に挟まれた板面内をその板の中央部に向かって進行する。曲げ波が進行するに従って、構造体は次第に球形に造られる。

- (2) 衝撃圧を受けた直後には構造体は全体に外方向の変位速度を得るが、溶接部では内に凸の曲げ波の働きで、すぐに減速して速度0近くで振動するために全過程を通じて殆ど変位しない。円錐各部では、円周方向応力が変位速度を抑制するために、変形はほぼ球形輪郭までの進行に止まるが、円形平板部では、円周方向応力が変位の抑制効果をもたらさないため、球形ではなく円錐形への変形が進行して、そのために球形輪郭より中心部が突出する。
- (3) 実際には円形平板部は砂の上に置かれ、変形によって砂の運動を誘起し、その反作用として砂は円形平板部の変位速度を抑制する。この働きを考慮に入れるとこの部分でも球形への変形がなされることが、シミュレーション計算によって確認された。
- (4) 実際の変形形状は全体にはほぼ球形となることが実験によって確認された。

文 献

- 1) Anderzewski, H and Krurpa, Z., Explosive Forming of Elements of Spherical Vessels, Research Report of Institute of Precision Mechanics, Warsaw, Poland (1972)
- 2) Z. R. Wang et al, The Integrally Hydrobulging Technology for Spherical Pressure Vessels, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, 1007-1012, (1990)
- 3) R. Zhang and T. S. Zhang, Non-Die Explosive Forming of Spherical Pressure Shells, Material Processing Technology, 41, 341-347 (1994)
- 4) A. A. Amesden, H. M. Ruppel and C. W. Hirt; "Sale: A Simplified ALE Computer Program for Fluid flow at All Speed", LA-8095, UC-32, (1980)
- 5) R. H. Cole, Under Water Explosions, 228-269 (1948)
- 6) Zhe-Min Zhang, Primary Discussion on Mechanism of Explosive Forming of Spherical shell, Research Report of Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China (1964)

Numerical analysis of non-die explosive forming of spherical shell technology

by Rui ZHANG*, Hirofumi IYAMA*, Masahiro FUJITA**, Shigeru ITOH**
Tie-Sheng Zhang*** and Zhen-Shen LI****

A spherical-inscribed multi-cone structure with two circular plates at its two ends was pre-welded together. Then water was filled in and a certain amount of explosive charge was put in the center of the structure. When the explosive was fired, a shock pressure was generated in the water and the pre-welded structure was loaded. By using this working method, a spherical shell was manufactured. The deformation process of the structure was analysed by finite difference method. According to our analysed results, an inner-towards bending was generated at the welded region and at its two adjacent areas, an outwards bendings were generated. These outwards bendings moved towards the middle points of the plate, then the whole structure was deformed into a spherical shape.

(*Graduate Student of Kumamoto University, Kumamoto 860, Japan

**Faculty of Mechanical Engineering, Kumamoto University, Kumamoto 860, Japan

***P. O. Box 142 - 80, BeiJing 100854, China

****Department of Material Sciences, Inner Mongolia Polytechnic University, 010062, China)