539.384.6:624.074.4:621.825.8

円環かくの強度に関する研究*

(第4報, 伸縮継手の強度の一計算例)

太田友弥**, 浜田 実**, 古川 守***, 宇野真佐雄****

On the Strength of Toroidal Shells

(4th Report, An Example for Calculation of the Strength of the Expansion Joint)

by Tomoya ŌTA, Minoru HAMADA, Mamoru FURUKAWA, and Masao UNO

As an example of application of the method for solving the toroidal shell problem which was proposed in the first report, the expansion joint consisting of two kinds of toroidal shells and one kind of cylindrical shell which is subjected to an axial force is treated in the present paper. Since the values of two parameters μ and λ used in this example are small enough, the equations (40)~(45) in the first report are useful. The stress distributions and the elongation are calculated and compared with those obtained from experiments.

1. 序

本報においては第1図のような形式の伸縮継手の応力分布および伸びの計算方法について述べる。伸縮継手には種々の形式のものがあり、第2報で取扱ったベローズおよびΩ継手もその一つであるが、第1図の形式のものも広く用いられており、特に大口径の配管用に多い。しかし筆者らの知る範囲ではこの継手の厳密な解析方法を考察した研究はまだないようである。したがってここにこの形式の継手の一解析例を示すことは意義があると考ええる。

この問題ははじめ川崎重工技術研究所において実験が行なわれ、そのデータが提供されたので筆者らはこれの理論解析に協力した。はじめは中村⁽¹⁾の方法により円環かくの部分の解を求めて計算した。その結果を筆者らの1人が発表した⁽²⁾。しかしそれには筆者らの数値計算に誤りがあった。その後第1報に述べたような解法を案出したので、これを用いて再び計算を行なった。ここに上記の報告の誤りを訂正するために、また同時に第2, 3報と同様第1報に提案した解の適用例を示す目的をもって、第1図の伸縮継手の強度計算の経過を報告する。

2. 応力分布の計算

ここでは第1図の伸縮継手に軸力のみが作用し内圧

はかからない場合を考えた。この継手は2種類の円環かくと1種類の円筒かくの組合せである。これら個々のかくに対する関係式は第1報と第3報に述べたが、それらのうちここに必要なものを以下に列挙し、次いで接続条件について述べる(諸記号の意味は前報と同じである。第2~4図参照)。

第1図

第2図

* 昭和36年8月30日 第11回 応用力学連合講演会において講演, 原稿受付 昭和37年7月12日。

** 正員, 大阪大学工学部(大阪市都島区東野田町9)。

*** 正員, 神戸商船大学。

**** 准員, 住友化学会社。

(a) 円環かく

$$\left. \begin{aligned} \mu &= mr_1^2/ah, \quad \lambda = r_1/a, \quad m = \sqrt{12(1-\nu^2)} \\ \chi &= \chi_\varphi = mrH/Eh^2, \quad \Omega = A = (ma/Eh^2)A \dots (1) \\ A &= (1 + \lambda \sin \varphi_0) V_0 \end{aligned} \right\}$$

ただし V_0 はある特定の点 $\varphi = \varphi_0$ における V の値である。いま軸引張力を P とすれば

$$V_0 = \frac{P}{2\pi a(1 + \lambda \sin \varphi_0)} \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \vartheta &= C_1 \eta_{1R} + C_2 \eta_{1I} + C_3 \eta_{2R} + C_4 \eta_{2I} + A \eta_{\varphi I} \\ \chi_\varphi &= C_1 \eta_{1I} - C_2 \eta_{1R} + C_3 \eta_{2I} - C_4 \eta_{2R} - A \eta_{\varphi R} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

$$Q = \frac{Eh^2}{ma} \left(\frac{-\sin \varphi \cdot \chi_\varphi + \cos \varphi \cdot A}{1 + \lambda \sin \varphi} \right) \dots (4)$$

$$N_\varphi = \frac{Eh^2}{ma} \left(\frac{\cos \varphi \cdot \chi_\varphi + \sin \varphi \cdot A}{1 + \lambda \sin \varphi} \right) \dots (5)$$

$$N_\theta = \frac{Eh^2}{mr_1} \frac{d\chi_\varphi}{d\varphi} \dots (6)$$

$$M_\varphi = -\frac{D}{r_1} \left(\frac{d\vartheta}{d\varphi} + \frac{\nu \lambda \cos \varphi}{1 + \lambda \sin \varphi} \vartheta \right) \dots (7)$$

$$M_\theta = -\frac{D}{r_1} \left(\nu \frac{d\vartheta}{d\varphi} + \frac{\lambda \cos \varphi}{1 + \lambda \sin \varphi} \vartheta \right) \dots (8)$$

$$u = \frac{h}{m} \left\{ -\nu \cos \varphi \cdot \chi_\varphi + \left(\frac{1}{\lambda} + \sin \varphi \right) \frac{d\chi_\varphi}{d\varphi} - \nu \sin \varphi \cdot A \right\} \dots (9)$$

第 3 図

第 4 図

(b) 円筒かく

実験には第 1 図のように有限長さの円筒かくの継手が用いられたが、普通実用的には半無限長と考えられる場合が多いから、これに対する式をあげる。

$$\gamma^2 = m/2bh \dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \vartheta &= e^{-\gamma z} (K_1 \cos \gamma z + K_2 \sin \gamma z) \\ \chi &= e^{-\gamma z} (K_1 \sin \gamma z - K_2 \cos \gamma z) \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

$$Q = \frac{Eh^2}{mb} e^{-\gamma z} (K_2 \cos \gamma z - K_1 \sin \gamma z) \dots (12)$$

$$N_\varphi = N_z = P/2\pi b \dots (13)$$

$$N_\theta = \frac{Eh}{2b\gamma} e^{-\gamma z} \{ (K_1 + K_2) \cos \gamma z - (K_1 - K_2) \sin \gamma z \} \dots (14)$$

$$M_\varphi = M_z = D\gamma e^{-\gamma z} \{ (K_1 - K_2) \cos \gamma z + (K_1 + K_2) \sin \gamma z \} \dots (15)$$

$$M_\theta = \nu M_z = D\nu\gamma e^{-\gamma z} \{ (K_1 - K_2) \cos \gamma z + (K_1 + K_2) \sin \gamma z \} \dots (16)$$

$$u = \frac{e^{-\gamma z}}{2\gamma} \{ (K_1 + K_2) \cos \gamma z - (K_1 - K_2) \sin \gamma z \} \dots (17)$$

(c) 接続条件 (第 3~5 図参照)

第 2 図において外側にとつての円環部分をかく (I), 外側におうの円環部分をかく (II), 円筒部分をかく (III) と名付け, それぞれのかくの諸量に添数 I, II, III を付して区別する。かく (I) のように外側にとつてである円環かくにおいては $a^{(I)} > 0$, かく (II) のように外側におうである円環かくにおいては $a^{(II)} < 0$ にとればよいことが中村⁽¹⁾により示されている。この場合 $a^{(II)} > 0$ に対しては $Q, N_\varphi, M_\varphi, u$ および ϑ の正の方向を第 3 図のようにとり, $a^{(II)} < 0$ に対しては第 4 図のようにとればよい。また円筒かくの部分は γ の定義により $b > 0$ でなければならないから, Q, N_φ, M_φ および u, ϑ の正の方向はかく (I) と同じ方向 (第 3 図) に指定しなければならない。したがって 3

第 5 図

種類のかくの接続条件は次のようになる。

(i) 円環かく(I)と円環かく(II)の接続部($\varphi = \varphi_0$)における条件

$$\left. \begin{aligned} M_\varphi^{(I)} &= -M_\varphi^{(II)} \\ Q^{(I)} &= Q^{(II)} \\ u^{(I)} &= -u^{(II)} \\ g^{(I)} &= g^{(II)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

これから

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{r_1} \frac{d\vartheta}{d\varphi} \right)^{(I)} &= - \left(\frac{1}{r_1} \frac{d\vartheta}{d\varphi} \right)^{(II)} \\ \chi_\varphi^{(I)} &= -\chi_\varphi^{(II)} \\ \left(\frac{1}{r_1} \frac{d\chi_\varphi}{d\varphi} \right)^{(I)} &= \left(\frac{1}{r_1} \frac{d\chi_\varphi}{d\varphi} \right)^{(II)} \\ g^{(I)} &= g^{(II)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

(ii) 円環かく(II)と円筒かく(III)の接続部($\varphi = \pi/2, z=0$)における条件

$$\left. \begin{aligned} M_\varphi^{(II)} &= -M_z^{(III)} \\ Q^{(II)} &= -Q^{(III)} \\ u^{(II)} &= -u^{(III)} \\ g^{(II)} &= -g^{(III)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

これから

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{r_1} \frac{d\vartheta}{d\varphi} \right)^{(II)} &= - \left(\frac{d\vartheta}{dz} \right)^{(III)} \\ \chi_\varphi^{(II)} &= \chi^{(III)} \\ \left(\frac{1}{r_1} \frac{d\chi_\varphi}{d\varphi} \right)^{(II)} &= \left(\frac{d\chi}{dz} \right)^{(III)} \\ g^{(II)} &= -g^{(III)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

かく(I)は対称性により η_{1R}, η_{1I} を考慮しなくてよい。これは $\varphi = \pi/2$ に対し $Q^{(I)}=0, g^{(I)}=0$ であるからである。したがって未定の係数は $C_3^{(I)}, C_4^{(I)}, C_1^{(II)}, C_2^{(II)}, C_3^{(II)}, C_4^{(II)}, K_1^{(III)}, K_2^{(III)}$ の合計8個となる。これらを条件(20), (21)式により定めれば問題が解ける。

次に第1図の継手に対する諸数値を以下にあげる。ただしここでは引張荷重が 3 000 kg の場合の計算を行なった。かく(I), (II), (III)を通じて

$$E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2, \nu = 0.3, h = 6 \text{ mm},$$

$$D = 4.1538 \times 10^5 \text{ kg mm}, P = 3 \text{ 000 kg}$$

かく(I)に対し

$$a^{(I)} = 225 \text{ mm}, r_1^{(I)} = 28 \text{ mm},$$

$$\lambda^{(I)} = 0.12444, \mu^{(I)} = 1.9191$$

かく(II)に対し

$$a^{(II)} = -201 \text{ mm}, r_1^{(II)} = 23 \text{ mm},$$

$$\lambda^{(II)} = -0.11443, \mu^{(II)} = -1.4495$$

かく(I)とかく(II)の接続部に対し

$$\sin \varphi_0^{(I)} = \sin \varphi_0^{(II)} = -0.47059$$

この箇所における V_0 は(2)式から

$$V_0^{(I)} = V_0^{(II)} = 2.2541 \text{ kg/mm}$$

$$\text{したがって } A^{(I)} = -A^{(II)} = 0.0020870$$

かく(III)に対し

$$b = 178 \text{ mm}, \gamma = 0.039333/\text{mm}$$

第1報の各 F 関数の数値表は $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ に対するものである。いまはかく(I), かく(II)において

$\varphi_0 = -28.072^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ に対する関数値が必要となる。もっともかく(I), (II)をさらに二つの部分に分けて $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ の問題に帰することも可能であるが、接続条件の数が増加して計算がめんどうとなるから、この方法は採用すべきでない。一方かく(I), (II)とも μ と λ の値は非常に小さい。したがって第1報における I (29) 式の $l=0$, および $l=1; m=0$, および $m=1$ に対する項だけで、十分の精度が保持できると考えられる。これは I (40)~I (45) 式を用いることと同意義である。本報においては I (40)~I (45) 式を用いることとし、後述の伸びの計算においてもこれによった。

そこでまずかく(I)およびかく(II)の λ と μ を用いて, $\varphi = \varphi_0, -20^\circ, -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 90^\circ$ に対する各 η 関数およびその導関数の数表を作製する。一方(3)および(11)式から

$$g^{(I)} = C_3^{(I)} \eta_{2R} + C_4^{(I)} \eta_{2I} + 0.0020870 \eta_{\varphi I}$$

$$\chi_\varphi^{(I)} = C_3^{(I)} \eta_{2I} - C_4^{(I)} \eta_{2R} - 0.0020870 \eta_{\varphi R}$$

$$g^{(II)} = C_1^{(II)} \eta_{1R} + C_2^{(II)} \eta_{1I} + C_3^{(II)} \eta_{2R}$$

$$+ C_4^{(II)} \eta_{2I} - 0.0020870 \eta_{\varphi I}$$

$$\chi_\varphi^{(II)} = C_1^{(II)} \eta_{1I} - C_2^{(II)} \eta_{1R} + C_3^{(II)} \eta_{2I}$$

$$- C_4^{(II)} \eta_{2R} + 0.0020870 \eta_{\varphi R}$$

$$g^{(III)} = e^{-\gamma z} (K_1 \cos \gamma z + K_2 \sin \gamma z)$$

$$\chi^{(III)} = e^{-\gamma z} (K_1 \sin \gamma z - K_2 \cos \gamma z)$$

$$dg^{(III)}/dz = \gamma e^{-\gamma z} \{ (-K_1 - K_2) \sin \gamma z \\ + (-K_1 + K_2) \cos \gamma z \}$$

$$d\chi^{(III)}/dz = \gamma e^{-\gamma z} \{ (-K_1 + K_2) \sin \gamma z \\ + (K_1 + K_2) \cos \gamma z \}$$

これらを(19), (21)の条件式に代入して未定係数に対する八元一次連立方程式を作り、これを解けば $g^{(I)}, \chi_\varphi^{(I)}, g^{(II)}, \chi_\varphi^{(II)}, g^{(III)}, \chi^{(III)}$ が求められる。したがって(5)~(8)式および(13)~(16)式を用いて応力分布を求めることができる。計算結果を第6図と第7図に示した。ただし膜応力 $\sigma_\varphi, \sigma_\theta$ および曲げ応力 $\sigma_{b\varphi}, \sigma_{b\theta}$ は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\varphi} &= N_{\varphi}/h, & \sigma_{\theta} &= N_{\theta}/h, \\ \sigma_{b\varphi} &= 6M_{\varphi}/h^2, & \sigma_{b\theta} &= 6M_{\theta}/h^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

であり、曲げ応力は外表面における値をとる。図にプロットされた点は川崎重工技術研究所にてなされた実験結果である。実験は第 1 図のように円筒部分の長さがそれほど大きくない継手に対して実施された。一方上記の計算では円筒部分を半無限長としている。そこでこれと比較するため、円筒かく (III) がなく、かく (II) の端部 ($\varphi = \pi/2$) において自由支持である場合の計算を行なった。すなわち

$\varphi = \pi/2$ において

$$Q^{(II)} = 0, \quad M_{\varphi}^{(II)} = 0$$

これから

$$\chi_{\varphi}^{(II)} = 0, \quad \left(\frac{d\vartheta}{d\varphi} \right)^{(II)} = 0 \dots\dots\dots (23)$$

この条件とかく (I), (II) の接続条件 (19) 式を用いて、 $C_3(I)$, $C_4(I)$, $C_1(II)$, $C_2(II)$, $C_3(II)$, $C_4(II)$ の六元一次連立方程式を解いて応力分布を求めた。その結果は第 8 図および第 9 図のごとくである。

3. 伸びの計算

一般の軸対称かくの軸方向変位 w に関する第 1 報の I (9) 式を円環かくの場合に対して変形すると、次式のようになることが証明できる。

第 6 図

第 7 図

$$\begin{aligned} \frac{dw}{d\varphi} &= r_1 \cos \varphi \cdot \vartheta \\ &+ \frac{h}{m} \left\{ \frac{\lambda \sin \varphi (\cos \varphi \cdot \chi + \sin \varphi \cdot \Omega)}{1 + \lambda \sin \varphi} \right. \\ &\left. - \nu \frac{d\chi}{d\varphi} \sin \varphi - 2\nu \sin^2 \varphi (1 + \lambda \sin \varphi) P \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots (24)$$

いまは内圧が零であるから上式は

$$\begin{aligned} \frac{dw}{d\varphi} &= r_1 \cos \varphi \cdot \vartheta \\ &+ \frac{h}{m} \left\{ \frac{\lambda \sin \varphi (\cos \varphi \cdot \chi_{\varphi} + \sin \varphi \cdot A)}{1 + \lambda \sin \varphi} \right. \\ &\left. - \nu \sin \varphi \frac{d\chi_{\varphi}}{d\varphi} \right\} \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

となる。さらに λ の二次の項を省略すると

$$\begin{aligned} \frac{dw}{d\varphi} &= r_1 \cos \varphi \cdot \vartheta \\ &+ \frac{h}{m} \left\{ \frac{\lambda}{2} \sin 2\varphi \cdot \chi_{\varphi} - \nu \sin \varphi \frac{d\chi_{\varphi}}{d\varphi} \right. \\ &\left. + \lambda \sin^2 \varphi \cdot A \right\} \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

第 8 図

第 9 図

これを積分した結果, 上式の各項に対応して次式のようにする.

$$w = w_1 + w_2 + w_3 + w_4 \dots\dots\dots (27)$$

数値計算の結果は後述のように w_1 の影響が最も大きく, 他の項は無視してよいことを示している. w_1 は角変位 φ が軸方向の伸びに寄与する量を示し, $w_2 \sim w_4$ はかく中央面における φ 方向のひずみ $\varepsilon_{\varphi m}$ の影響を示すが, 前者のみを考えればよいというのは, 本報の数値例のみならず一般に成立する事項のようである. したがって以下には w_1 の計算式のみをあげ, $w_2 \sim w_4$ に対しては数値計算結果を述べるにとどめる.

$$\begin{aligned} w_1 = r_1 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi \cdot \varphi d\varphi = r_1 \left(C_1 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{1R} \cos \varphi d\varphi + C_2 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{1I} \cos \varphi d\varphi \right. \\ \left. + C_3 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{2R} \cos \varphi d\varphi + C_4 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{2I} \cos \varphi d\varphi + A \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{\varphi I} \cos \varphi d\varphi \right) \dots\dots\dots (28) \end{aligned}$$

第1報におけるように $\varphi = \pi/2 - \psi$ とする.

$$\begin{aligned} \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{1R} \cos \varphi d\varphi &= \int_0^{\psi} \eta_{1R} \sin \psi d\psi \\ &= -\cos \psi + \mu^2 \left(\frac{21}{16} \cos \psi - \frac{1}{4} \cos \psi + \frac{1}{48} \cos 3\psi + \frac{1}{2} \psi \sin \psi - \frac{1}{4} \psi^2 \cos \psi \right) \\ &\quad + \mu^3 \lambda \left(-\frac{59}{72} \cos \psi + \frac{29}{144} \cos 2\psi + \frac{1}{24} \cos 3\psi - \frac{1}{144} \cos 4\psi - \frac{1}{8} \psi^2 + \frac{1}{8} \psi \sin 2\psi \right) \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{1I} \cos \varphi d\varphi &= \int_0^{\psi} \eta_{1I} \sin \psi d\psi \\ &= \mu \left(\cos \psi - \frac{1}{4} \cos 2\psi \right) + \mu \lambda \left(-\frac{3}{8} \cos \psi + \frac{1}{24} \cos 3\psi \right) \\ &\quad + \mu^3 \left(-\frac{397}{144} \cos \psi + \frac{55}{72} \cos 2\psi - \frac{1}{48} \cos 3\psi + \frac{1}{1152} \cos 4\psi \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \psi \sin \psi + \frac{5}{16} \psi \sin 2\psi - \frac{1}{4} \psi^2 + \frac{1}{4} \psi^2 \cos \psi - \frac{1}{16} \psi^2 \cos 2\psi \right) \\ &\quad + \mu^3 \lambda \left(\frac{779}{384} \cos \psi - \frac{5}{16} \cos 2\psi - \frac{451}{6912} \cos 3\psi + \frac{1}{144} \cos 4\psi - \frac{1}{2304} \cos 5\psi + \frac{5}{8} \psi \sin \psi \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{8} \psi \sin 2\psi - \frac{1}{36} \psi \sin 3\psi + \frac{1}{8} \psi^2 - \frac{9}{32} \psi^2 \cos \psi + \frac{1}{96} \psi^2 \cos 3\psi \right) \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{2R} \cos \varphi d\varphi &= \int_0^{\psi} \eta_{2R} \sin \psi d\psi \\ &= \sin \psi - \psi \cos \psi + \lambda \left(-\frac{1}{2} \psi + \frac{1}{4} \sin 2\psi \right) \\ &\quad + \mu^2 \left(-\frac{15}{8} \sin \psi - \frac{5}{8} \sin 2\psi - \frac{5}{72} \sin 3\psi + \psi + \frac{33}{16} \psi \cos \psi \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} \psi \cos 2\psi + \frac{1}{48} \psi \cos 3\psi + \frac{1}{4} \psi^2 \sin \psi - \frac{1}{12} \psi^3 \cos \psi \right) \\ &\quad + \mu^2 \lambda \left(-\frac{13}{9} \sin \psi - \frac{779}{864} \sin 2\psi + \frac{1}{18} \sin 3\psi + \frac{67}{3456} \sin 4\psi + \frac{45}{32} \psi + \frac{95}{72} \psi \cos \psi \right. \\ &\quad \left. + \frac{47}{144} \psi \cos 2\psi - \frac{1}{24} \psi \cos 3\psi - \frac{1}{144} \psi \cos 4\psi - \frac{1}{24} \psi^3 + \frac{1}{16} \psi^2 \sin 2\psi \right) \dots\dots\dots (31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{2I} \cos \varphi d\varphi &= \int_0^{\psi} \eta_{2I} \sin \psi d\psi \\ &= \mu \left(\sin \psi + \frac{5}{8} \sin 2\psi - \psi - \psi \cos \psi - \frac{1}{4} \psi \cos 2\psi \right) \\ &\quad + \mu \lambda \left(\sin \psi + \frac{1}{4} \sin 2\psi - \frac{1}{18} \sin 3\psi - \frac{1}{2} \psi - \frac{7}{8} \psi \cos \psi + \frac{1}{24} \psi \cos 3\psi \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +\mu^3\left(-\frac{239}{72}\sin\psi-\frac{1607}{864}\sin 2\psi-\frac{5}{72}\sin 3\psi-\frac{47}{13824}\sin 4\psi+\frac{89}{32}\psi+\frac{505}{144}\psi\cos\psi\right. \\
& \quad +\frac{137}{144}\psi\cos 2\psi+\frac{1}{48}\psi\cos 3\psi+\frac{1}{1152}\psi\cos 4\psi+\frac{1}{4}\psi^2\sin\psi+\frac{5}{32}\psi^2\sin 2\psi \\
& \quad \left.-\frac{1}{12}\psi^3-\frac{1}{12}\psi^3\cos\psi-\frac{1}{48}\psi^3\cos 2\psi\right) \\
& +\mu^3\lambda\left(-\frac{14513}{3456}\sin\psi-\frac{1331}{864}\sin 2\psi+\frac{4097}{41472}\sin 3\psi+\frac{67}{3456}\sin 4\psi+\frac{107}{69120}\sin 5\psi\right. \\
& \quad +\frac{247}{96}\psi+\frac{1529}{384}\psi\cos\psi+\frac{63}{144}\psi\cos 2\psi-\frac{595}{6912}\psi\cos 3\psi-\frac{1}{144}\psi\cos 4\psi \\
& \quad -\frac{1}{2304}\psi\cos 5\psi+\frac{7}{16}\psi^2\sin\psi+\frac{1}{16}\psi^2\sin 2\psi-\frac{1}{72}\psi^2\sin 3\psi-\frac{1}{24}\psi^3-\frac{13}{96}\psi^3\cos\psi \\
& \quad \left.+\frac{1}{288}\psi^3\cos 3\psi\right) \dots\dots\dots (32)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} \eta_{\varphi I} \cos \varphi d\varphi &= \int_0^{\psi} \eta_{\varphi I} \sin \psi d\psi \\
&= \mu\left(-\sin\psi-\frac{1}{4}\sin 2\psi+\frac{1}{2}\psi+\psi\cos\psi\right) \\
& +\mu\lambda\left(-\frac{5}{8}\sin\psi-\frac{1}{4}\sin 2\psi+\frac{1}{24}\sin 3\psi+\frac{1}{2}\psi+\frac{1}{2}\psi\cos\psi\right) \\
& +\mu^3\left(\frac{53}{24}\sin\psi+\frac{229}{288}\sin 2\psi+\frac{5}{72}\sin 3\psi+\frac{1}{1152}\sin 4\psi-\frac{41}{32}\psi-\frac{115}{48}\psi\cos\psi\right. \\
& \quad \left.-\frac{5}{16}\psi\cos 2\psi-\frac{1}{48}\psi\cos 3\psi-\frac{1}{4}\psi^2\sin\psi+\frac{1}{12}\psi^3\cos\psi\right) \\
& +\mu^3\lambda\left(\frac{469}{192}\sin\psi+\frac{1031}{864}\sin 2\psi-\frac{101}{2304}\sin 3\psi-\frac{67}{3456}\sin 4\psi-\frac{1}{2304}\sin 5\psi\right. \\
& \quad -\frac{61}{32}\psi-\frac{677}{288}\psi\cos\psi-\frac{59}{144}\psi\cos 2\psi+\frac{1}{24}\psi\cos 3\psi+\frac{1}{144}\psi\cos 4\psi \\
& \quad \left.-\frac{1}{8}\psi^2\sin\psi-\frac{1}{16}\psi^2\sin 2\psi+\frac{1}{24}\psi^3+\frac{1}{24}\psi^3\cos\psi\right) \dots\dots\dots (33)
\end{aligned}$$

(28)~(33) 式によりかく (I) およびかく (II) の w_1 を求めることができる。同様の方法により $w_2 \sim w_4$ も計算した。結果を第 1 表に示す。これからわかるように w_1 は w_2, w_3, w_4 に比較して大きく、 w_1 のみを考慮すれば十分である。かく (III) の軸方向の伸びは

$$\frac{dw}{dz} = \frac{1}{Eh} (N_z - \nu N_\theta) \dots\dots\dots (34)$$

に (13), (14) 式を代入し積分すればよい。しかしこれは本質的にかく (I), (II) における w_2, w_3, w_4 に対応するもので、その全長が長くないかぎり値は小さい。ここではかく (III) の伸びは省略した。

結局第 1 図の伸縮継手の軸荷重 3 000 kg に対する

第 1 表 伸 び の 量 (mm)

	か く (I)	か く (II)
w_1	1.59×10^{-1}	1.25×10^{-1}
w_2	1.26×10^{-4}	2.41×10^{-4}
w_3	-8.72×10^{-4}	3.45×10^{-4}
w_4	3.50×10^{-4}	3.57×10^{-4}

伸びの量は

$$\delta = (0.159 + 0.125) \times 2 = 0.568 \text{ mm}$$

したがって 1 t 当りのばね定数は

$$\delta/P = 0.568/3 = 0.189 \text{ mm/t}$$

これに対して実験結果は 0.226 mm/t であった。

4. 考 察

以上に示したように、応力および伸びの計算値は実験値とはほぼ一致した。実験の諸条件を考慮するとこの程度の一致は好結果であると考えらる。

第 1 報に提案した η 関数を用いることにより計算は簡単になったとはいえ、なおかなりめんどうであることは否定できない。そこでおよその見積りを得るため、第 1 図の伸縮継手をかく (I) と一つの円筒かく (内径 388 mm) からなる Ω 継手でおきかえて考える。すると第 2 報の結果から φ 方向の最大曲げ応力 $\sigma_{\varphi m}$ と θ 方向の最大膜応力 $\sigma_{\theta m}$ および伸びの量 δ が容易に計算できる。その結果は

$$\sigma_{\varphi m} = 7.49 \text{ kg/mm}^2, \sigma_{\theta m} = 2.11 \text{ kg/mm}^2$$

$$\delta = 0.287 \text{ mm}$$

となり、応力値は第6図および第7図のかく(I)に対する値に近い。一方伸びの量は 0.287 mm と 0.568 mm でかなり相違する。これは形状の相違からみてやむを得ない。第1図の継手のほうがよく伸びるという結果が出たのは妥当であろう。なおかく(II)の部分においてかく(I)より大きい応力が発生しているが、これは曲率が小さいためであると考え。第1図の形式の伸縮継手に対する設計公式または図表を作るかわりに、かく(I)とかく(II)の連続からなるベローズの解析を行えば、かなり近い結果が得られるのではないかと考えている。

科学技術庁・LPG 球形タンクに特別研究調整費

科学技術庁では、このほど昭和 37 年度特別研究調整費から 1578 万 5000 円を液化ガス (LPG) 貯蔵用タンク保安対策特別研究として支出、研究の促進を図ることになった。

特別研究調整促進費というのは、各省庁の所管に関係する重要な研究テーマを促進し、調整をはかる目的で昭和 35 年度から科学技術庁の予算に一括して計上されたもので、37 年度としては標記の他に、大気汚染防止研究、合成洗剤特別研究に支出された。

さて、LPG の貯蔵に使われる球形タンクは、高圧の LPG 用としては円筒形タンクにくらべて強度の点で非常に有利なことはいうまでもなく、また所要鋼材や建設敷地面積などいろいろな面で多くの長所をもっている。

この球形タンクは昭和 32 年ごろから各地で建設され始めたが、LPG が燃料や化学原料として急速に需要がふえたのにつれて、これを貯蔵する球形タンクもしだいにその数をまし、また形も大きくなってきた。こうして現在では高張力鋼を溶接してつくった LPG 用球形タンクが全国で 120 ないし 130 基も使われるようになっている。

ところが、このタンクに溶接部に割れを生じた事故が発生し始め、これはアメリカやカナダでも発生している。そこで調査した結果、タンク内面の溶接部分に特別な割れが数多く発生しており、さらに調べるとタンクの材料として使われている高張力鋼に特有な硫化物割れとよばれる現象でもあることが判明した。それにしてもこの特殊の割れの真の原因がよくわかっていないので、将来の保安対策上にも緊急今回の措置となつたものである。

5. 結 語

第1図の伸縮継手が軸荷重を受ける場合の、応力分布と伸縮量の計算を、第1報に提案した方法を用いて実施し実験結果と比較した。この種類の計算をされる方の参考に資するため計算経過を詳述した。

終りにこの問題を提起され、また実験データを提供された川崎重工技術研究所 宮崎 光氏、三木三省氏ほかの諸氏に厚く感謝の意を表する。

文 献

- (1) 中村, 機械学会論文集, 19-83 (昭 28), 48.
- (2) 古川, 神戸商船大学紀要, 第2類第7号 (昭 35), 23.

さて、この研究は大別して三つの方針にそって進められる。すなわち、第一は LPG 貯蔵用球形タンク溶接部のき裂の実態調査で、現在あるタンクについて溶接部の割れの状況を調べ、同時に非破壊検査法を使って現場テストをする。第二は LPG 貯蔵用球形タンク溶接部のき裂の原因の究明で、溶接部に割れが発生してからしだいに成長していくメカニズムを金属学的な立場と化学的な立場より明らかにしようとするものである。

第三は LPG 貯蔵用球形タンクにかんする各種技術基準設定のための試験研究で、材料基準、設計基準、工作基準、検査基準に必要な研究を行なって将来の安全にそなえようというわけである。

実際の研究はつぎのように分担して行なわれる。

(1) LPG 貯蔵タンク溶接部の硫化物割れの実態調査=212万6000円で通産省軽工業局が日本 LPG プラント協会に実施委託する。

(2) タンク用材料の硫化物割れの研究=金学的研究=科学技術庁金属材料技術研究所で実施する。金額は505万円。

(3) 同じく硫化物割れの化学的研究=通産省の東京工業試験所で、211万3000円で行なう。

(4) 貯蔵タンク用材料の強度に関する研究=343万4000円で、通産省軽工業局が担当し、じっさいの研究は阪大の渡辺教授(耐用限界応力試験)および東大の金沢教授(破壊強度低下試験)に委託される。

(5) タンク用材料の非破壊検査法およびき裂防止の研究=運輸省運輸技術研究所が306万2000円で行なう。

(服部 敏夫)