

## 充水角形鋼管の繰返し凍結試験 (第1報)\*

— 正方形管の凍結破壊について —

道 端 久 紀\*\*

金 山 公 夫\*\*

馬 場 弘\*\*

三 浦 節 男\*\*

(昭和54年4月28日受理)

### Repeated Freezing Test on Square Sectional Steel Pipes Filled with Water (Part 1)

—Breakage by Freezing of a Regular Square Pipe—

by Hisanori DOHBA, Kimio KANAYAMA, Hiromu BABA  
and Setsuo MIURA

A circular steel pipe filled with water may be cracked immediately when the water becomes frozen. However, it is worth to note that a square pipe will not be cracked at the first time of repeated freezings due to the large bending deformation from square to circular in the cross section. The volumetric change, deformation, stress-strain, inside temperature and inside pressure of the regular square steel pipe were measured during the repeated freezing tests, and the data was numerically analyzed.

The obtained results are as follows.

1) The regular square steel pipes can be durable for the second time of the repeated freezing tests with large plastic deformation as well as elastic. All the test pieces are cracked by the corner edges of the cross section and failed at the third test.

2) While repeating the freezing tests for the same pipe, the inside pressure is increased, but the hoop strain is decreased reversely.

3) The assumption that deformed curves for the lateral cross section and for the longitudinal section are circular and quadratic respectively is almost appropriate for the real deformation of test pipes. The difference in the volumetric increment between the calculated and the measured equals 0.4% for the first time and 2.3% for the second time of the freezing tests.

\* 日本機械学会中国四国支部講演会にて発表 (1979-3)

\*\* 北見工業大学機械工学科

## 1. 緒 言

寒冷地において、水のみをパイプ輸送する場合、あるいは鉱石や石炭等を流体輸送する場合問題となるのは、水が凍結して輸送を妨げたり、輸送管を破壊したりすることであり、その最も卑近な例として水道管の凍結や破壊をあげることができる。また近年省エネルギーの面から注目され、すでに一部実用化されている太陽熱の利用においても、とくに冬期低温時の集熱システム各部配管内での凍結は大きな問題であり、解決策が色々と考案、試行されている。北国にあってこうした問題はしばしば直面する事柄であり、日常生活においても、また産業的にも種々の障害となっており、水の凍結については様々の方面からの実験、研究がなされている。この点本学においても、過去何編<sup>1)~3)</sup>かの円管の凍結に関する研究、報告が行われており、とくに薄肉軟鋼円管については、定性的に流体内圧が作用する場合と同様に扱ひ得ること<sup>1)</sup>や、中西氏の降伏条件とよく適合すること<sup>2)</sup>なども究明されている。さらにそれらによれば、薄肉程低内圧、大変形となることも明らかにされているが、充水円形鋼管の場合、一度の凍結によって破裂をとまらう破壊を起こすことが多い。

この面で筆者らは、水道管として円管を用いる一般的慣習に囚れることなく、凍結破壊の解決策を求める第一段階として、一度の凍結によっては破壊しないという要求にそうべく角形鋼管に注目し、氷結時の体積増約9%をその形状変形によって無理なく吸収できることを予想し、まず初めに正方形管を選定し、変形・内圧に関する解析を行うとともに、凍結を繰返し、破壊する実験を試みた結果、大要所期の目的を達しえたのでここに報告する次第である。

## 2. 基礎解析

### 2.1 円への変形

(1) 凍結繰返し数 正方形の断面積  $A(\text{mm}^2)$  とその外周が等しい円の面積  $A'(\text{mm}^2)$  との比は、正方形辺長  $a(\text{mm})$  と円半径  $r_m(\text{mm})$  との  $4a=2\pi r_m$  なる関係を用いて、下記のようになる。

$$\frac{A'}{A} = \frac{\pi r_m^2}{a^2} = \frac{4}{\pi} = 1.273$$

これより凍結繰返し数  $n$  は、氷の比重  $\gamma_i$  ( $0.917 \text{ grf/cm}^3$ ) を用いて、次のような値となる。

$$1.273 = \left(\frac{1}{\gamma_i}\right)^n = 1.091^n$$

$$\therefore n = \log 1.273 / \log 1.091 = 2.77$$

(2) 横断面積 外周の伸びは円への変形量に

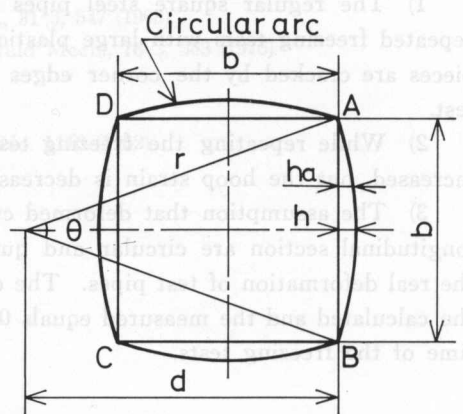


図-1 横断面図

Fig. 1. Lateral cross section.

比べて微少なので、引張変形を無視し、4辺の曲率半径  $r$  (mm) の減少による面積増を求める。まず図-1において次の3式が成り立ちそれを用いて、面積  $A_c$  を導き、原断面積  $A$  で割れば、式(2)のように表わされる。

$$a = \widehat{AB} = r\theta \quad (\text{mm})$$

$$b = 2r \sin(\theta/2) \quad (\text{mm})$$

$$d = r \cos(\theta/2) \quad (\text{mm})$$

$$A_c = b^2 + 4 \left( \frac{ar}{2} - \frac{bd}{2} \right) = 4r^2 \sin \frac{a}{2r} + 2ar - 2r^2 \sin \frac{a}{r} \quad (\text{mm}^2) \quad (1)$$

$$\therefore \frac{A_c}{A} = \frac{4r^2}{a^2} \sin \frac{a}{2r} + \frac{2r}{a} - \frac{2r^2}{a^2} \sin \frac{a}{r} \quad (2)$$

(3) 弾性変形 一度凍結した後溶解したときの体積減少量を求めるために、板厚  $t$  (1.6, 2.3 mm) とひずみ  $\varepsilon$  より、弾性範囲内  $\varepsilon$  (0.002) で最小の曲率半径  $\rho$  を求めると下記のようになる。

一般式  $\rho = \frac{t}{2\varepsilon}$  より

$$\rho_{1.6} = \frac{1.6}{2 \times 0.002} = 400 \quad (\text{mm})$$

$$\rho_{2.3} = \frac{2.3}{2 \times 0.002} = 639 \quad (\text{mm})$$

前節において、横断面の4辺が円弧になると仮定したが、ここで求めた各曲率を式(2)に代入すれば、面積の増加率が求まる。次節で述べる仮定すなわち縦方向稜線を二次曲線とすれば、各板厚にたいし、弾性変形分の体積として、それぞれ4.0, 2.9%なる値が求められる。これに内圧による体積の弾性変形約0.1%、溶存空気による体積変化約0.1%、さらにCu管(熱電対用)の縮みその他をまとめて0.1%と見込み、前記に加えて各板厚にたいしそれぞれ合計4.3, 3.2%となる。

(4) 体積変化 図-2のような1/4面について、横すなわち周  $W$  方向の曲面を円弧、縦すなわち軸  $l$  方向の中心稜線を二次曲線と仮定し、体積増加率を計算し、最大広がり高さ

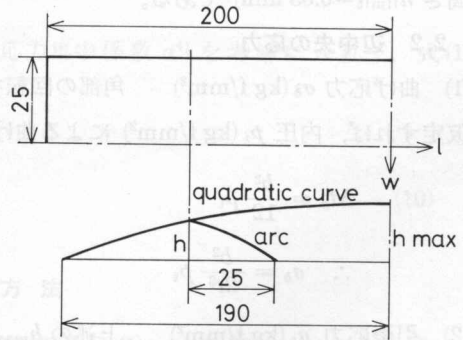


図-2 縦断面図

Fig. 2. Axial cross section.

$h_{\max}$  (mm) との関係を図示したのが図-3である。これより第一回目の凍結・溶解後の体積増加率は前節での数値をもとに下記の値となり、 $h_{\max}$  が求められる。

$$t \ 1.6 \quad 1.091 - 1.043 = 0.048 \quad h_{\max} = 3.25$$

$$t \ 2.3 \quad 1.091 - 1.032 = 0.059 \quad h_{\max} = 3.68$$

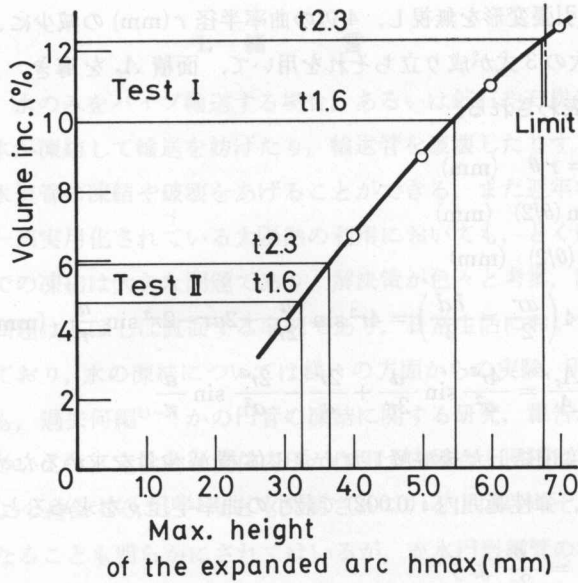


図-3 体積増加率と最大広がり高さ  
 Fig. 3. Rate of volume increase & max. height.

同様にして第二回目の値は下記の通りである。

$$\begin{aligned}
 t_{1.6} \quad & 1.091 \times 1.048 - 1.043 = 0.100 \quad h_{max} = 5.50 \\
 t_{2.3} \quad & 1.091 \times 1.059 - 1.032 = 0.123 \quad h_{max} = 6.70
 \end{aligned}$$

なお、最小曲率半径  $r_m$  は 31.8 mm であり、最大体積増加率 0.124 (この時の極限広がり高さ  $h_{limit} = 6.83$  mm) である。

2.2 辺中央の応力

(1) 曲げ応力  $\sigma_b$  (kg f/mm<sup>2</sup>) 角部の回転を考慮し、その支持条件を自由と固定の中間支持と仮定すれば、内圧  $p_i$  (kg f/mm<sup>2</sup>) による曲げモーメント  $M_b$  (kg f-mm) は、

$$\begin{aligned}
 M_b &= \frac{b^2}{12} p_i \\
 \therefore \sigma_b &= \frac{b^2}{2t^2} p_i \tag{3}
 \end{aligned}$$

(2) 引張応力  $\sigma_t$  (kg f/mm<sup>2</sup>) 上述の  $h_{max} = h_m$  と書換えて、

$$\sigma_t = \frac{b + 2h_m}{2t} p_i \tag{4}$$

(3) 引張による曲げ応力  $\sigma_{tb}$  (kg f/mm<sup>2</sup>)

$$\begin{aligned}
 M_{tb} &= -\frac{b \cdot h_m}{2} p_i \\
 \therefore \sigma_{tb} &= -\frac{3bh_m}{t^2} p_i \tag{5}
 \end{aligned}$$

(4) 全応力  $\sigma$  (kg f/mm<sup>2</sup>) 式 (3), (4), (5) より,

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_b + \sigma_t + \sigma_{tb} \\ &= \frac{b^2 + (b + 2h_m)t - 6bh_m}{2t^2} p_i \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.3 内圧とひずみ

ひずみゲージにより実測された周ひずみ  $\varepsilon_h$  より内圧を求めるには, 式 (6) を変形して式 (7) となる。

$$\begin{aligned} p_i &= \frac{2t^2\sigma}{b^2 + (b + 2h_m)t - 6bh_m} \\ &= \frac{2t^2E}{b^2 + (b + 2h_m)t - 6bh_m} \varepsilon_h \end{aligned} \quad (7)$$

ここで  $E$  は縦弾性係数である。

### 2.4 角部の応力

(1) 曲げ応力  $\sigma_{Rb}$  (kg f/mm<sup>2</sup>) 前述 2.2, (1) の仮定に従い, 内圧と角部の曲げモーメント  $M_{Rb}$  (kg f-mm) との関係は, 次のようになる。

$$\begin{aligned} M_{Rb} &= \frac{b^2}{24} p_i \\ \therefore \sigma_{Rb} &= \frac{b^2}{4t^2} p_i \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 引張応力  $\sigma_{Rt}$  (kg f/mm<sup>2</sup>)

$$\sigma_{Rt} = \frac{\sqrt{2} b}{2t} p_i \quad (9)$$

(3) 全応力  $\sigma_R$  (kg f/mm<sup>2</sup>) 式 (8), (9) を加え, 応力集中係数  $\alpha^4$  を考慮に入れて, 式 (10) を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_R &= (\sigma_{Rb} + \sigma_{Rt}) \alpha \\ &= \frac{b(b + 2\sqrt{2}t) \alpha}{4t^2} p_i \end{aligned} \quad (10)$$

## 3. 実験方法

本実験に使用した材料は, 一般構造用角形鋼管 (STKR 41), 一辺 50 mm の正方形管であり, その肉厚は 1.6, 2.3 mm の 2 種であるが, 表-1 にその機械的性質を, また試験片形状寸法を図-4 に示す。この図からわかるとおり, 全長 400 mm の両端にメネジ付鋼板を溶接し, そのメネジを用いて, 一端に圧力変換器を, 他端に温度測定のための熱電対を取付け, さらに辺の中央 2 方向にひずみゲージを貼付して実験に供した。なお, 低温実験室の温度 (約  $-15^\circ\text{C}$ ) も自記させるとともに, ゲージの温度補償は, 試験片と同形の一端開放鋼管に 90% 程水を入れ, これにも 2 方向にゲージを貼って, ダミーゲージとして結線した。

表-1 試験片の機械的性質

Table 1 Mechanical properties of the test pieces

Mechanical properties		Yield point (kg f/mm <sup>2</sup> )	Ulti. strength (kg f/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
Thickness (mm)	1.6	39.9	46.8	43.1
	2.3	41.8	47.8	31.2

(JIS Z 2201, No. 5 Test piece)

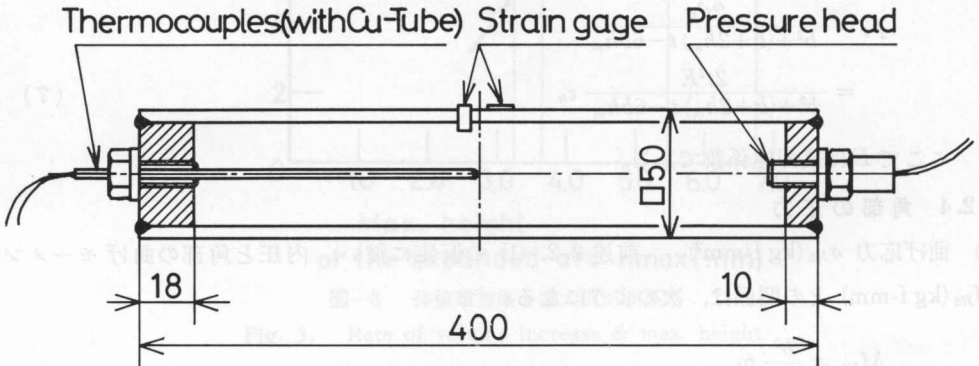


図-4 試験片形状寸法

Fig. 4. Configuration of the test pipe.

さて、凍結実験は2種の各板厚について3本ずつ破壊するまで繰返し凍結実験を行ったのであるが、その方法を要約すれば、総て結線調整後、試験片とダミー付管の両方を低温室内に入れ、管内温度急昇時を凍結開始、同急降時をもって凍結終了として第一回目の実験を終える。なお、過冷却後の温度急昇時は、内圧急増時と一致している。その後、低温室外にて自然溶解し、ゲージを貼りかえ、塑性変形による体積増加分の水を補充し、諸結線を行い、平衡をとり、再び低温室内に入れて第二回目を、同様にして第三回目の凍結実験を繰返した。以上の試験一回に要した時間は約7時間であった。

## 4. 結果と考察

### 4.1 総 論

両板厚の試験片についての凍結実験結果を図-5、図-6(a), (b)に示す。両図とも第一回目凍結実験においては、円形への曲げ変形という正方形管としての明白な特徴を示している。すなわち円管凍結例図-7<sup>1)</sup>と比較するとより一層明らかなように、正方形管の場合両板厚とも極めて低内圧にておよそ一定値を保つ間、周ひずみは着実に増大し、約2%もの大ひずみに達している。なお内圧は生材の円管に比べ約1/23、焼鈍材の円管に比べても約1/10という低さである。

第二回目の曲線より、その前半で曲げ変形はすでにその大部分が終っており、後半では円

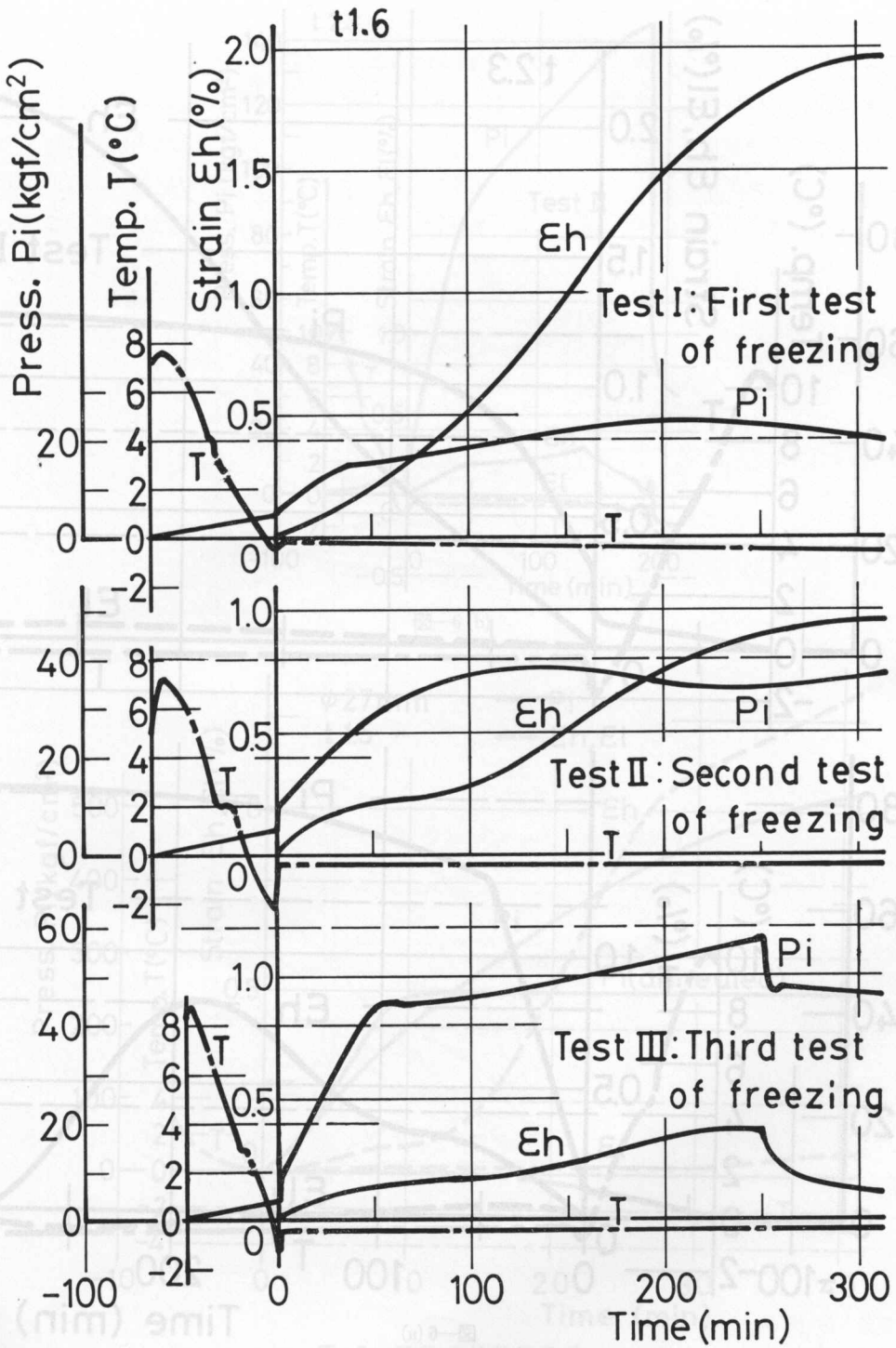


図-5 繰返し凍結試験曲線 ( $t1.6$ )

Fig. 5. Curves of the repeated freezing tests ( $t1.6$ ).

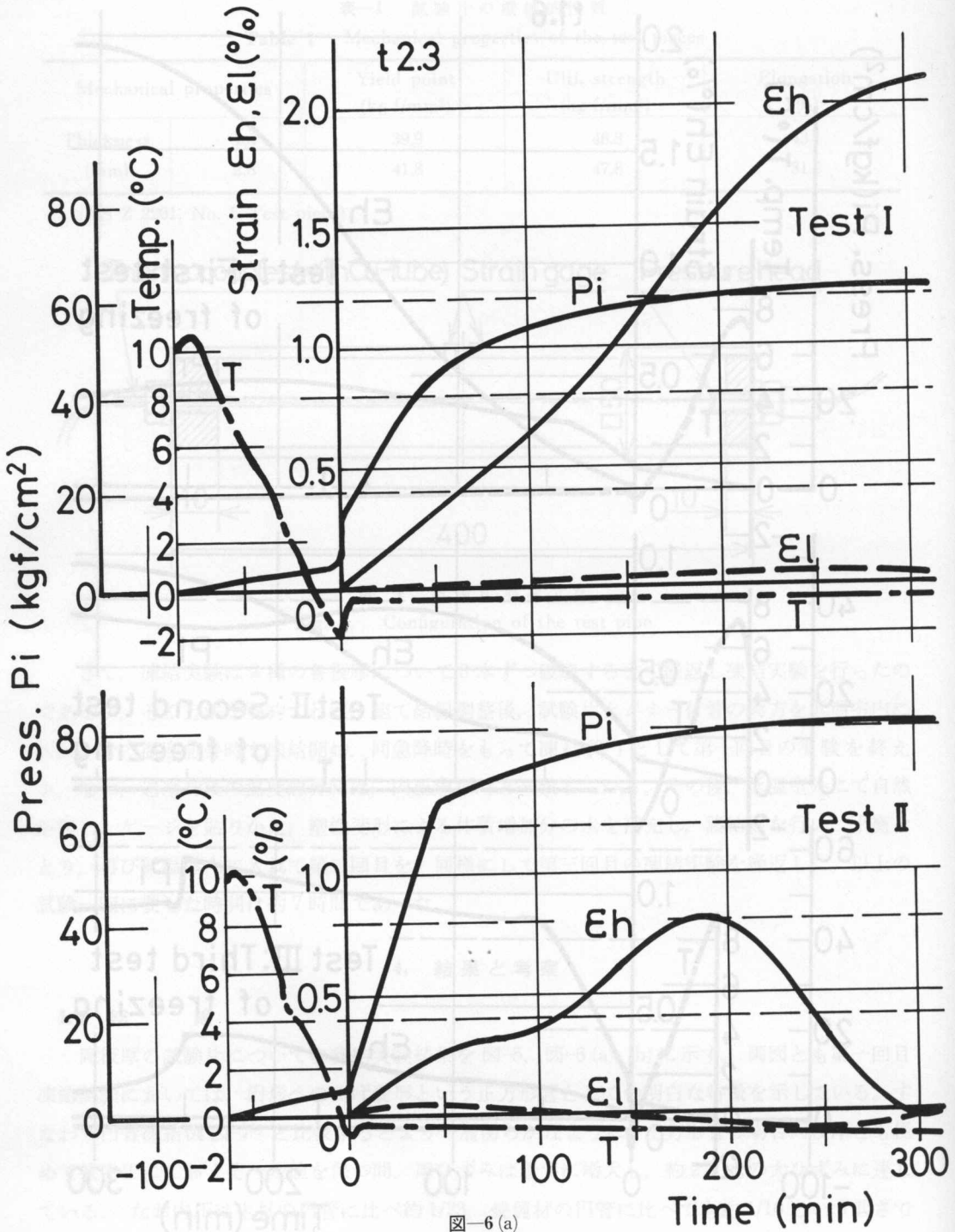


図-6(a)

図-6 繰返し凍結試験曲線 ( $t2.3$ )

Fig. 6. Curves of the repeated freezing tests ( $t2.3$ ).



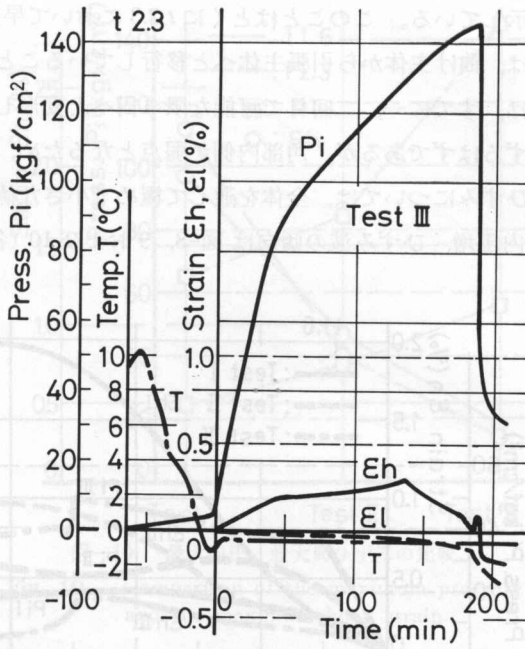


図-6 (b)

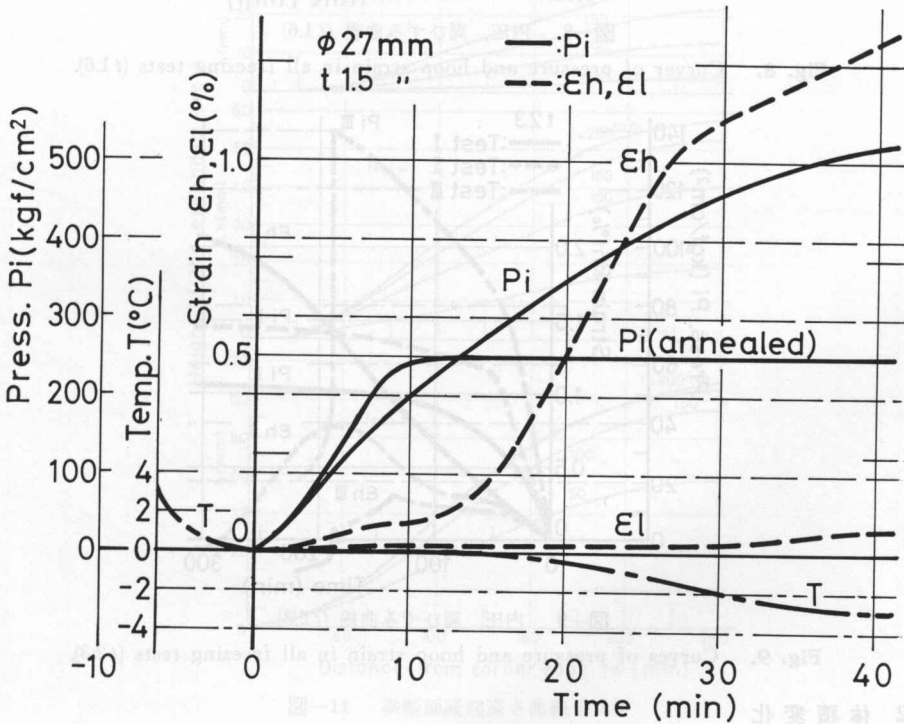


図-7 円管凍結試験曲線

Fig. 7. Curves of freezing test on the circular pipe.

管の場合と似た傾向を示している。このことはとくに  $t2.3$  において早期に生じている。すなわちこの間に周ひずみは、曲げ主体から引張主体へと移行していることがわかる。

第三回目については、すでに、二回目で可能な限り円へと変形しているため、円管と同様の変形と内圧増を生ずるはずであるが、角部内側が弱点となるため、完全凍結に致らずして破壊した。また軸方向ひずみについては、全体を通じて極めて小さな値を示している。以上の特徴的变化、すなわち内圧増、ひずみ減の傾向は 図-8, 9 および 10 (各回最大値) により一層明白に理解できる。

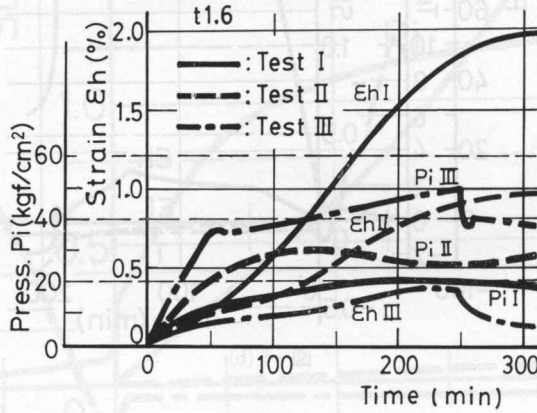


図-8 内圧, 周ひずみ曲線 ( $t1.6$ )

Fig. 8. Curver of pressure and hoop strain in all freezing tests ( $t1.6$ ).

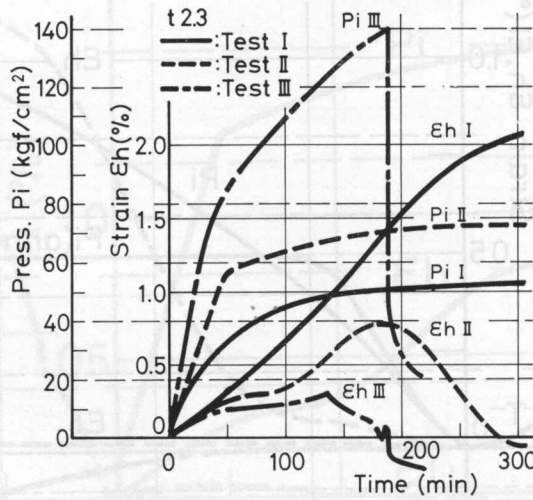


図-9 内圧, 周ひずみ曲線 ( $t2.3$ )

Fig. 9. Curves of pressure and hoop strain in all freezing tests ( $t2.3$ ).

#### 4.2 体積変化

横断面の形状 (図-1 の  $h_a$  値) 実測例を 図-11 に、また縦方向稜線 (図-2 の  $h$  値) の実測値を 図-12 に示す。いずれも角部と端部を除いて、前述の仮定と比較的よく一致している。ただ

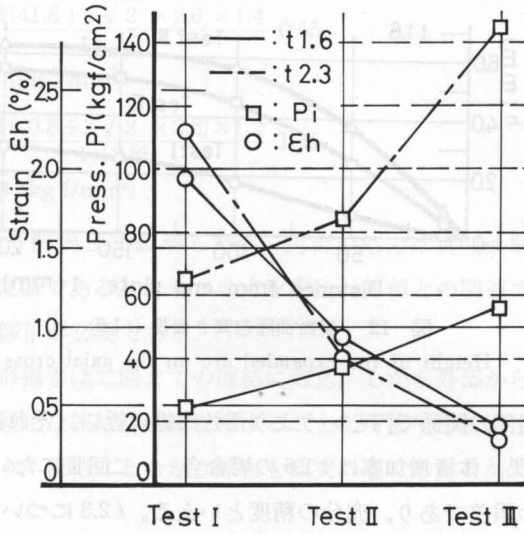


図-10 最大内圧, 最大周ひずみの比較

Fig. 10. Comparison of the maximum pressure and the maximum hoop strain.

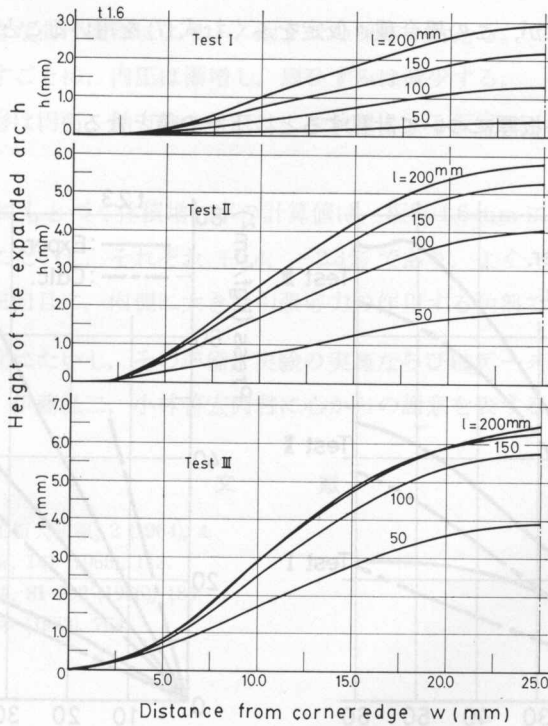


図-11 横断面隆起高さ曲線 (t=1.6)

Fig. 11. Height of the expanded arc on the lateral cross section.

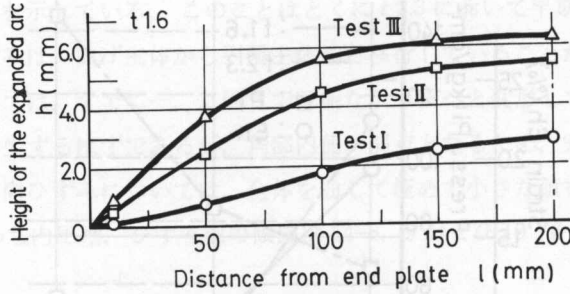


図-12 縦断面隆起高さ曲線 (t1.6)

Fig. 12. Height of the expanded arc on the axial cross section.

し、横断面については角部の関係で円というより正弦曲線に近い。それはさておき、上述の仮定にもとづき計算した結果、体積増加率は t1.6 の場合各一、二回目について、それぞれ +0.4、-2.3% というわずかの誤差であり、充分の精度といえる。t2.3 についても同程度であった。

4.3 内圧計算

前述の式(7)を用いて計算した値と実測値とを 図-13, 14 に示す。大部分大差なく計算値が低い値となっている。なお t2.3 の第三回目については、円への変形が限界に近いため、実測値を超える値となったが、この場合種々仮定をふくむ式(7)を用いることは不適當である。

4.4 角部の応力

式(10)を用いて各板厚について計算すると、下記の値となる。

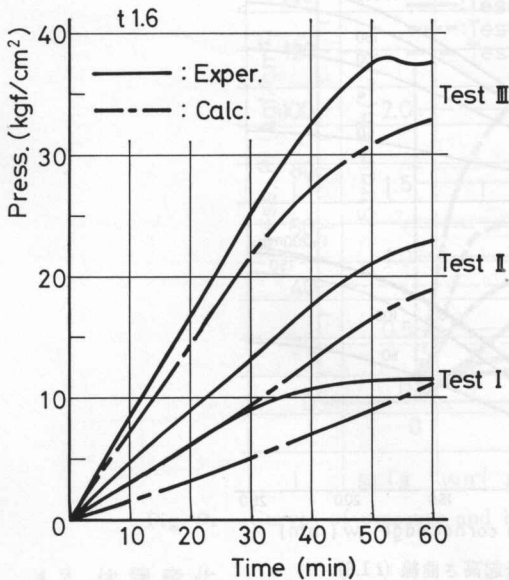


図-13 内圧計算値と実測値の比較 (t1.6)

Fig. 13. Comparison of pressure between the calculated & measured (t1.6).

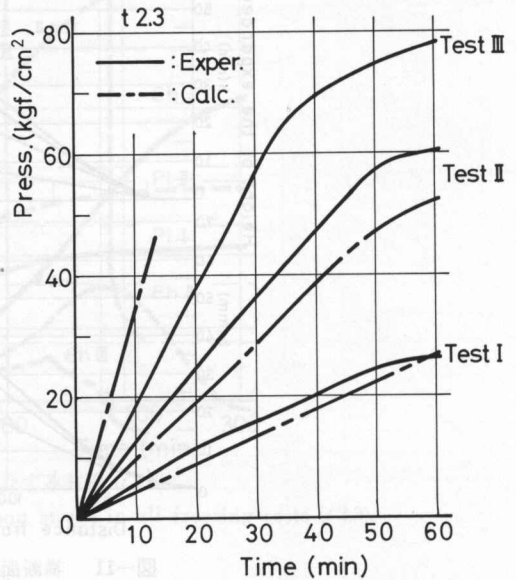


図-14 内圧計算値と実測値の比較 (t2.3)

Fig. 14. Comparison of pressure between the calculated & measured (t2.3).

$$\begin{aligned}\sigma_{R1.6} &= \frac{4.18(41.8+2\sqrt{2}\times 2.0)\times 1.4}{4\times 2.0^2} 0.55 \\ &= 95.5 \text{ (kg f/mm}^2\text{)} \\ \sigma_{R2.3} &= \frac{40.4(40.8+2\sqrt{2}\times 2.8)\times 1.2}{4\times 2.8^2} 1.45 \\ &= 110.3 \text{ (kg f/mm}^2\text{)}\end{aligned}$$

円管に比べ予想より低内圧で破壊したが、角部の応力は真の破断強さ(各板厚 107, 116 kg f/mm<sup>2</sup>)に近い大きな値である。なおこの点を内圧計算値との関連で考慮すると、角部支持条件の仮定は幾分かの修正が必要である。

以上のごとく正方形鋼管は二回までの凍結に耐え、しかも外部から容易にその箇所を確認できるゆえ、この間に適正な凍結防止策を講ずることが可能である。すなわち円管では不可能な破壊の事前防止により、凍結にともなう障害を確実に避けることができる。

## 5. 結 言

一般構造用正方形鋼管(口 50×*t* 1.6, 2.3)を用いて、繰返し凍結実験を行った結果は、下記のように要約される。

- 1) 円形への大きな曲げ変形により、二回までの凍結に耐える。
- 2) 凍結を繰返すごとに、内圧は漸増し、周ひずみは減少する。
- 3) 周方向の変形は円弧、軸方向のそれは二次曲線とする仮定は、角部と両端を除いて、適当である。
- 4) 二つの仮定にもとづく体積増加率の計算値は、板厚 1.6 mm について、一、二回凍結の際の実測値にたいし、それぞれ +0.4, -2.3% であり、よく一致する。
- 5) 破壊は全て三回目に、内側に大きな引張応力の作用する角部で生ずる。

終りに、上記研究にたいし、その準備、実験の実施ならびにデータ整理に協力を惜しまなかった当時本学学生、伊藤弘二、小林善宏両君に心からの謝意を表する。

## 文 献

- 1) 追分, 金山: 北見工短大研報, 2 (1964), 4.
- 2) 松田, 金山: 機講論, 141 (1965), 113.
- 3) 阿部, 金山: 日鉱誌, 81-992 (1965), 186.
- 4) 西田正孝: 応力集中 (1978), 764.