

非凍結破損管に関する研究

その1：管の応力評価と破損防止策

Study on Water Pipe Free from Fracture by Water Freezing
Part1 : Stress Evaluation for Pipe and Way of Fracture Prevention

藤井 石根 *¹
Iwane FUJII

阿部 裕亮 *²
Hiroaki ABE

石沢 賢二 *³
Kenji ISHIZAWA

Abstract

We are frequently confronted with water pipe fracture by its freezing in winter especially in cold districts. To cope with the problem several preventive measures such as electric heating and/or thermal insulation have been commonly applied to pipe systems heretofore. Unfortunately, however, such procedures cannot always assure complete avoidance of the problem. In addition, the pipe heating requires abundant electric power consumption due to continuous and long term loading.

Under such a situation a modified pipe free from the fracture by its freezing is introduced in this paper. Besides description on the technique to achieve this purpose the related testing results are also indicated to show performance of this method. Generally speaking, the testing results satisfy our essential request for pipe fracture at least, which causes us to expect strongly its coming practical application.

キーワード：水管系、凍結破損、体積変化、歪調整、発泡材、応力弛緩

Key Words : Water Plumbing, Fracture by Freezing, Volume Change, Strain Adjustment, Foamed Material, Stress Relaxation

1. はじめに

地球温暖化など環境問題はわれわれに課せられた大きな課題である。当然、こうした状況は太陽エネルギーなど自然エネルギーのより積極的な活用をうながす結果となっている。

ところで、太陽熱はより一般的かつ身近なエネルギー源の一つとして太陽熱温水器やソーラーシステムと言ったかたちで以前より広く使われてきた。しかし、エネルギー資源環境や時流に即した経済性の思わくから、その利用拡大にはいま一つの伸びが見られない。しかも、より多くの利用が期待されるこうした機器類の普及がとりわけ寒冷地で少ないという現象も呈している。こうした現象が生れる背景の一つに、使用上手間がかかる技術的な未解決部分があることは否めない。その具体的な一つ

の事例に配管系の凍結破損の問題があろう。とりわけ寒冷地ではこの問題に遭遇する可能性が高いだけに、この問題への対応の容易さや金銭的な負担の大きさが、当該機器の利用の有無を決定づけることになる。現在の対応策の一つに管系を寒冷期間中、電気ヒータで加熱することが多く行われている。この策はその期間中、停電という事態が無ければ簡便な方法と言えようが、これで全ての課題が解決されたというものでもない。加えて、ここで消費される電力量も加熱期間の長さとも相俟って、かなりの量に達する場合もあり、その量次第では機器設置の意義やメリットも失いかねない。他方、系の断熱を十分に施すという策も多く取り入れられているが、その程にも限界があり、冷気に晒される時間の長さ次第では管系の破損事故も当然、起こり得よう。

こうした諸々の状況を勘案しつつ、有効な手立てを検討してきた結果がここに提案している、管内の水がたとえ凍結しても管が破損しないような策を施した水管を開発することであった。すなわち、ここでは「凍結防止」や「凍結遅延」という要求から「凍結破損防止」へと観点を変えている。言う迄もなくこの策は決して管内水の凍結を防止したり遅延させたりするものではないが、凍結による管系の破損だけは少なくとも回避させることが

*¹ 明治大学理工学部 教授
(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

*² 明治大学理工学研究科博士前期過程2年
(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

*³ 国立極地研究所 所員
(〒173-8515 東京都板橋区加賀1-9-10)
(原稿受付：2003年10月21日)

できる。このことは寒冷地帯で一般に行われている冬季の配管系の電気加熱による加温を省くことができ、結果的には省エネルギー上、大きな効果をもたらすことは明らかである。しかも当該管を用いた配管系にも、これまでのように電気加温対策ならびに保温対策を施せば、たとえ管内水の凍結で水が通らない状況が生じたとしても、一時的な系の電気加熱で暫時のうちに回復させることが可能となろう。しかも、かかる管が耐久性のほか、衛生上の問題、それに管摩擦抵抗の問題などをクリアした暁には上水の管系にも応用できる可能性があり、その有効性には極めて大きなものが期待される。

記号

a : 水管の内半径	(mm)
b : 水管の外半径	(mm)
E : 縦弾性係数	(MPa)
L : 管長	(mm)
P : 圧力	(MPa)
R : 管の代表平均半径	(mm)
r : 半径方向座標	
r_1 : 非凍結時のライニング層の内半径	(mm)
t_1 : 非凍結時のライニング層の厚さ	(mm)
t_2 : 凍結時のライニング層の厚さ	(mm)
u : 半径方向変位	(mm)
V : 体積	(m^3)
W : 質量	(kg)
Y : a/t_1	(-)
δ : $=t_2/t_1$	(-)
ε : ひずみ	(-)
ν : ポアソン比	(-)
ρ : 密度	(kg/m^3)
σ : 応力	(MPa)

添字

i : 管の内側または水	z : 管軸方向
o : 管の外側	θ : 円周方向
p : ライニング層	1: 水の凍結前
r : 半径方向	2: 水の凍結後
w : 水	

2. 管に生ずる応力値の推察

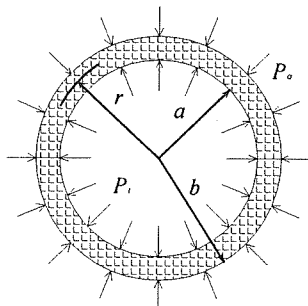


Fig.1 Cross section of pipe

かつて太陽熱温水器やソーラーシステムなどの配管系に金属管や塩ビ管などが使われることもあったが、最近

ではポリエチレン管が多く用いられるようになっていいる。こうした中、鋼管は機械的な強度が他に優っているが、腐食という弱点を有しているため、表面を樹脂で被覆された鋼管も見ることができる。他方、塩ビ管は腐食の点では優れているが、機械的な強度では金属管に及ばず、しかも紫外線による劣化も無視できない。これらの点ではポリエチレン管は材料自体にある程度の弾力性を具備しており、腐食や紫外線劣化にも強いので塩ビ管の代替品として広く用いられるようになっていいる。しかもその弾力性は、たとえば管内水の凍結で同管内の圧力が上がったとしても、管そのものがそれなりに膨張することで、その圧力が弛緩、軽減される効果も期待できる。こうした優れた特性が利用拡大の背景になっているが、弾性域以上の膨張は一部、永久歪として残留し、こうした現象が繰返されれば、いずれは破損する可能性はある。そこでここでは、こうした管の内部に存在する水がもし凍結したときに管材にどれ程の応力が誘起されるものかを見極める為、機械的な強度がこれらの中で最も強いと見られる鋼管を対象に、まず検討することにする。

ところで、水が凝固すると約 10%程度の体積膨張がある。もし、この体積膨張の影響を弛緩する何らかのものが無い場合、密封された容器内の水は相変化することで容器にそれ相応の応力を誘起させることになる。

さて図 1 にあるような長い円管に内圧 P_i 、外圧 P_o が作用している系を考えれば、円周方向に作用する応力 σ_θ と半径方向応力 σ_r は各々次式によって与えられている。⁽¹⁾

$$\sigma_\theta = -\frac{a^2 b^2 (P_o - P_i)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{P_i a^2 - P_o b^2}{b^2 - a^2} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{a^2 b^2 (P_o - P_i)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{P_i a^2 - P_o b^2}{b^2 - a^2}$$

そこで、これらの式中の圧力 P_o はこの場合には管の外表面に作用する圧力、すなわち大気圧に当たることが判っており、かつ管の内圧 P_i は P_o を圧力の基準にしたときの圧力と解釈、また、管の内外両表面に一樣に大気圧 P_o が加わっている状況での管の応力状態を基準に考えるものとすれば、 P_o を零とおけるので

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 P_i}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_i}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$

となる。これより σ_r は ($a \leq r \leq b$) なる関係より常に圧縮応力で $r=a$ で最大値 P_i を、他方 σ_θ は $r=a$ で最大値

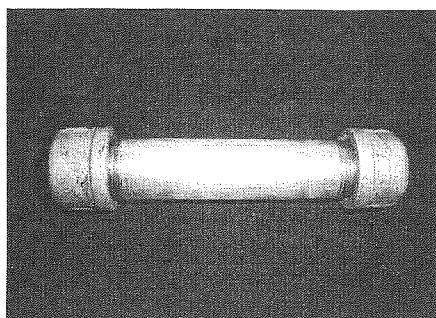
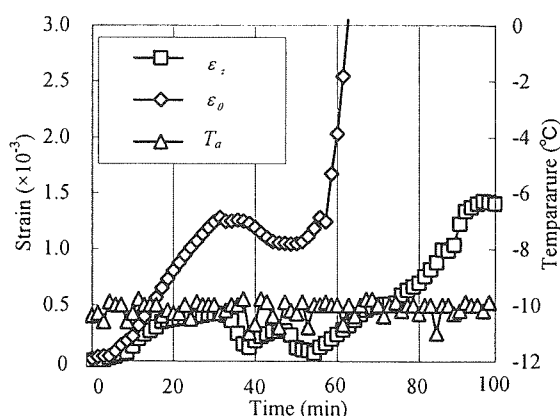
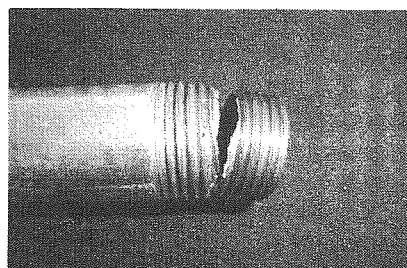
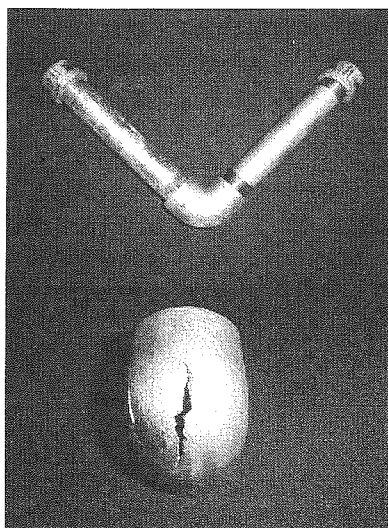
$$(\sigma_\theta)_{\max} = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} P_i \quad (3)$$

を持つことになり、この値は P_i より大きくなる。しかし、通常、水管の肉厚は管径に対してそれ程大きくないのでこれらの応力に対し平均した応力、すなわち $\bar{\sigma}_\theta$ 、 $\bar{\sigma}_r$ で代表させて、以降の議論を進めることにすれば

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{1}{b-a} \int_a^b \sigma_\theta dr$$

$$= \frac{a^2 P_i}{(b^2 - a^2)(b-a)} \int_a^b \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) dr$$

$$= \frac{a P_i}{b-a} \quad (4)$$


 Fig.2 Appearance of a testing pipe whose inside is filled with water⁽²⁾

 Fig.3 History of temperature and strain transition of the conventional steel pipe⁽²⁾

 Fig.4 Fracture state of thread part of the pipe⁽²⁾

 Fig.5 Another pipe system with elbow and fracture state of the elbow⁽²⁾

3. 提案する管破損防止策とその有効性

3.1 その防止策の概要と特徴

図3に示す実験の結果から明らかなように管系のどこかに管内水の凍結による体積の増加部分を吸収し得るのが用意されていればこうした破損は容易に回避できることが分る。そこで本研究ではその吸収機能を備えた層を管の内壁にライニングすることを提案している。この策の提案理由には次のような事柄がある。

- a) たとえ配管系の何処から管内水の凍結が始まっても、その対応が十分に果たせる機能がある。
- b) 配管系にティ、エルボそれに弁などを多く用いられていても、管に十分な容積吸収機能が備わっていれば、図3の歪挙動結果からも明らかなように系の破損には至らない。
- c) 管内壁に希望する層や膜をライニングする方法は既に技術的には確立している。

他方、当該目的を達成するためにはライニング層には次の事項すなわち

- a) ライニング層は外力に対する膨張・吸収の追従性が十分に備わっている、例えば独立気泡の集合体からなる発泡体であること。
- b) 層の素材は管の使用目的を勘案して水に対する腐食性に優れ、かつ、日常生活で使用する給水・給湯の温度レベルに対しても充分な耐久・耐熱性、弾力性、それに相応の機械的強度を持ち合わせているほか、水質に対しても悪影響を与えないこと

等が要求されよう。

それでは次にライニング層の必要な厚みはどれ程になるかを検討する。図6は発泡層をライニングした水管(以後ライニング管と略記)の断面を表したもので、ここに与えられている記号を用いれば管長 L の管内部に包含される水の質量 W は

$$W = \pi r_1^2 L \rho_w$$

よって、この体積 $V_1 = W / \rho_w = \pi r_1^2 L$ (13)

となる。他方、この水が氷になった時の体積を V_2 とすれば $V_2 = W / \rho_i$ より、この場合の体積の増加分 ΔV は

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_2 - V_1 = \frac{W}{\rho_i} - \frac{W}{\rho_w} = W \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right) \\ &= \pi r_1^2 L \left(\frac{\rho_w}{\rho_i} - 1 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

となる。

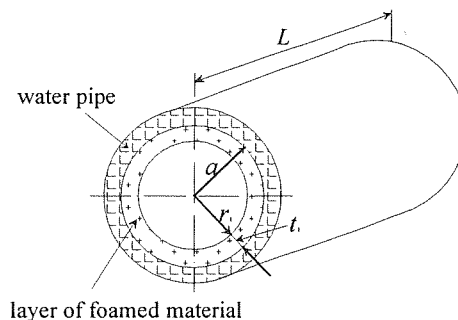


Fig.6 Cross section of the lining pipe

次にライニング層が初期厚さ t_1 にあるときの同層がしめている容積 V_{p1} は

$$V_{p1} = \pi a^2 L - \pi r_1^2 L = \pi L(a^2 - r_1^2) \\ = \pi L\{a^2 - (a - t_1)^2\} = \pi L t_1(2a - t_1) \quad (15)$$

また、水が凍って層の厚さが t_2 になったときの容積 V_{p2} は同様に

$$V_{p2} = \pi L t_2(2a - t_2) \quad (16)$$

となるので、これらの間の容積の変化量 ΔV_p は

$$\Delta V_p = V_{p1} - V_{p2} \\ = \pi L\{t_1(2a - t_1) - t_2(2a - t_2)\} \quad (17)$$

となる。ここで(14)式の ΔV と(17)式の ΔV_p は当然、等しい筈であるから、次式が成立する。

$$\pi r_1^2 L \left(\frac{\rho_w}{\rho_i} - 1 \right) = \pi L\{t_1(2a - t_1) - t_2(2a - t_2)\} \\ \therefore (a - t_1)^2 \left(\frac{\rho_w}{\rho_i} - 1 \right) = t_1(2a - t_1) - t_2(2a - t_2) \quad (18)$$

ここで辺々を t_1^2 で割り、 $t_2/t_1 = \delta$ 、 $a/t_1 = Y$ とおいて上式を整理すれば、

$$(Y - 1)^2 \left(\frac{\rho_w}{\rho_i} - 1 \right) = (\delta - Y)^2 - (Y - 1)^2 \quad (19)$$

となり、適合する δ の値を求めれば

$$\delta = Y - (Y - 1) \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_i}} \quad (20)$$

が得られる。そこでもし、 $\rho_w/\rho_i = 1$ とすれば $\delta = 1$ 、すなわち $t_1 = t_2$ となり理に合っている。ここで試みに $a=10.3$ (mm)、 $t_1=3$ (mm) とおけば $Y=3.6$

したがって(20)式より

$$\delta = 0.885 \quad \therefore t_2 = \delta t_1 = 2.66$$

となり、 $t_1 - t_2 = 0.34$ (mm) だけライニング層の厚さが縮むことでこの場合の水の凍結による膨張分を吸収できることになる。その縮みはライニング層にしてみれば大した量でないことがわかる。

最後にこのような層を管内径に比して、その層の厚さは小さいとは言え、その分、水の流路面積は減少し、それが短所として映るが、そのことはあらかじめ考慮して若干太めの管を選んでおくことで総じて対処できる話である。

その一方でこの層が存在することで

- 水管本体の管内表面の水質による腐食が軽減される。
 - この層が断熱材の働きを呈する。
 - 衝撃的な圧力変化の弛緩にも役立つ
- 等の付加的な利益も考えられる。なお2番目の断熱効果については、管外から加熱して管内の氷を融かす場合に層が収縮した状態にある分、断熱効果は小さくなっていることも確認されている。

3.2 ライニング管の有効性

ライニング管の効果の程を実験によって確認するため管の内半径 $a=10.7$ (mm)、長さ $L=125$ (mm) の水道管を用意、この管の内壁には厚さ $t_1=3$ (mm) のポリエチレン発泡シートをライニングした。使用したシートの物理的な特性は

筆者らが実験等で調べた限りでは表2のようになっている。

Table2 Physical properties of the foamed material used here

Item	Quantity
Density under normal state	182 kg/m ³
Thermal diffusivity	3.42×10^{-4} m ² /s
Porosity rate	80 %
Compressive stress under 20% compression in volume	145 kPa
Specific heat	5.03 kJ/(kg·K)
Thermal conductivity	0.088 W/(m·K)

なお表中の気泡率の値はポリエチレン材そのものの密度の値をベースに算出されたものである。さて、実験に用いた素子の概観は図2や図5で示したものとほぼ同じであり、実験の方法も先と同じである。他方、実際の配管系を想定するとき、そこには概してティやエルボ、それに弁のような要素が組み込まれるのが普通であり、こうした要素にまで、かかる発泡シートをライニングすることは實際上、考えにくいし、容易にできるものでもない。それでもなお、もしライニング管を使用していればこうした要素が系に組み入れられていても当該問題に対

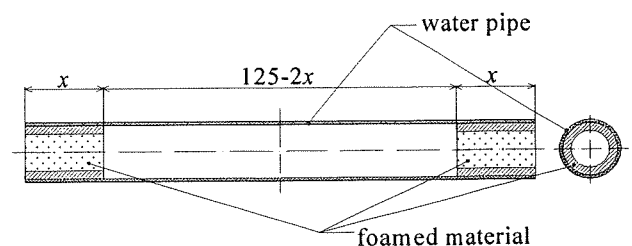


Fig.7 A cross-sectional view of local lining pipe (2)

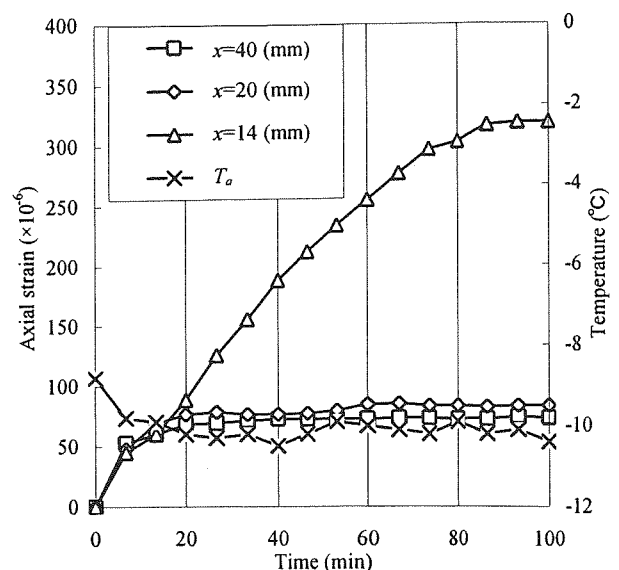


Fig.8 History of transitions of partial lining pipes

処できるか否かを確認するため図 7 で示す局所的にライニング層を設けた管も用意して同様な実験も試みられた。選ばれたライニング層の長さ x は 14(mm)、20(mm)、40(mm)の 3 通りでここでの $x=14(\text{mm})$ なる寸法はライニング層が占めているオリジナルな容積と管内水の凝固による体積増加分とを一致させた時に得られる寸法である。

さて、実験の結果はライニング管の場合は無論のこと局所ライニング管のうち $x=20$ と 40(mm)の場合には歪の変化が全く計測されなかった。図 8 より、実際に計測された歪はそれぞれ約 80×10^{-6} であるが、これはゲージが温度の影響を受けたためで、この実験のように -10°C の環境下では最大で 120×10^{-6} の「見かけ歪」なるものが生じると言われている。従って $x=20$ と 40(mm)の場合、実際には管に応力が発生していないものと考えられる。それに対して、 $x=14(\text{mm})$ の場合には見かけ歪の値を差し引いても、長手方向に最大 198×10^{-6} という歪みが計測された。この $x=14(\text{mm})$ の場合で計測された ε_z の値を参考に

$$\bar{\sigma}_z = \frac{E}{1-2\nu} \varepsilon_z \text{ なる式によって得られる } \bar{\sigma}_z \text{ の応力値は}$$

125(MPa)、 $\bar{\sigma}_\theta$ に関しては管材は降伏点を越えていると見られる。

これらの実験素子のほか、さきの図 5 で見るようにエルボを伴った系についても実験、管にライニング管を用いた場合は何ら問題は生じなかったが、非ライニング管を用いた場合には、エルボ部に破損が確認され、その状況は既に図 5 で見た通りである。

4. おわりに

太陽熱温水器に限らず、太陽熱を利用する各種の機器、それに上水や下水管など水を通す配管系の利用は我々の日常生活上でも数多く見ることができる。そうした中、配管系の漏水事故も少なくないがとりわけ冬季での事故が多い。その原因は今更、言う迄も無く管系の凍結によるものが大半を占めており、この場合に管に誘起される応力は本報での試算結果からも明らかになったように概して極めて大きなものであり破損の必然性も確認された。こうした状況を踏まえ、かかる事故を回避する為の「ライニング管」なるものを提案、この管の概要や特徴、それに同管の有効性についての実験による確認も行われ、それらについては本報で明らかにされた。当該管の実用化は更なる検討の上ということになるだろうが、水管系にポリエチレン管が用いられているケースも今では多くのところで目につくようになっており、ライニング素材に同様の素材を活用すればさほど問題も生じないと推測される。

現在ポリエチレン独立気泡発泡材の耐久性、水に対する流動摩擦係数等も実験を中心とした調査、検討も試みられており、近い将来の実用化が待たれるところである。

参考文献

- (1) Timoshenko and Goodier, Theory of Elasticity, 2nd.Ed (1933), 59, Kōgakusha, McGraw-Hill.
- (2) 阿部裕亮・藤井石根・石沢健二, 水管の凍結破損防止に関する一提案, 太陽/風力エネルギー講演論文集(2002), 443, 宮城.
- (3) 藤井石根, 特願 2002-053633 (2002)