曲 り 円 管 の 凍 結 破 壊*
(第1報, 180° 曲り円管の凍結挙動)

追 分 重 義**, 稲 葉 英 男**

Pipe Fracture by Freezing in Curved Water Pipes
(1st Report, Freezing Behavior of 180° Curved Pipes)

by Shigeyoshi OIWAKE and Hideo INABA

The formation of the ice growth that occurs in 180° curved pipes containing water flow was investigated. The experiments were carried out under various experimental conditions in a range of pipe with an inside diameter of $d=16.5\text{ mm}\sim 21\text{ mm}$, Reynolds numbers (based on pipe i. d.) $Re=290\sim 6\,653$, and temperature ratios of the freezing parameter, $T^*=(T_f-T_w)/(T_\infty-T_f)$, $T_f=0^\circ\text{C}$, T_f =cooling pipe temperature, T_∞ =temperature of flowing water)=1.52~11. From visual observations of ice formation and measurements of the pressure drop between the inlet and outlet of a curved pipe, it was understood that the flow condition and temperature ratio T^* played an important role in the formation of ice in the curved pipe. The transient behaviors of ice formation, according to time proceeding, were expressed in the relationship between nondimensional friction resistance f and Reynolds number for various temperature ratios T^* . Moreover, the critical condition of perfect ice blockage in the curved pipe was obtained with experimental correlation equations in terms of T^* and Re .

Key Words: Thermal Engineering, Phase Change, Ice Formation, Curved Pipe Flow, Pressure Drop

1. 結 言

円管内の流れを伴う凍結問題は、水道管の破裂および工場給水管内の凍結事故など寒冷地に住む住民の解決しなければならない大きな問題である。そのため従来より、直管に関して、流れ場を層流および乱流状態における理論的そして実験的研究^{(1)~(5)}が、特に圧力損失や熱伝達挙動についてなされてきた。しかしながら、水道管の凍結事故の大多数を占める本管より分岐し曲り部の多い比較的管直径の細い給水管(管直径 $d=15\sim 25\text{ mm}$)に関する研究はほとんど報告されていないように思える。特に、円管の曲り部においては、遠心力による二次流れと流れのはく離による偏流のために、流れ状態が複雑となり、それに伴って局所の熱伝達率も変化し、その凍結挙動は複雑となることが予想される。本研究は、日常使用されている水道給水管の凍結問題を対象とし、特に 180° 曲り円管の流れおよび凍結挙動の可視化実験、凍結による圧力損失の変化、管閉そく限界条件および管閉そくまでの時間に及ぼす諸因子(管内流水の温度、流量および管外部環境温度)の

効果を実験的に解明し、今後の曲り円管凍結破壊に対する研究の基礎資料を得ようとするものである。

記 号

- D : 曲り円管の曲り直径
 d, d_o : 円管内径, 円管外径
 F_o : フーリエ数 $= at/d^2$
 F_o^* : 円管閉そくまでのフーリエ数 $= at_c/d^2$
 f : 損失係数 $= (P_i - P_o) / \{(\rho V^2)/2\}$
 l : 曲り円管の全体長さ
 P_i, P_o : 曲り円管入口および出口圧力
 Re : レイノルズ数 $= Vd/\nu$
 Re^* : ディーン数 $= Re\sqrt{d/D}$
 Q : 水流量
 T_∞, T_w, T_f : 水温, 曲り円管壁温, 水の凍結温度 $= 0^\circ\text{C}$
 T^* : 温度比 $= (T_f - T_w) / (T_\infty - T_f)$
 t : 時間
 t_c : 円管閉そくまでの時間
 V : 円管内平均流速
 a : 水の温度伝導率
 ρ : 水の密度
 ν : 水の動粘性係数
 θ : 曲り角度

* 昭和60年10月1日 第63回全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和60年1月30日.

** 正員, 北見工業大学 (〒090 北見市公園町165).

2. 実験装置および実験方法

実験装置は、大別すると試験水循環系統、冷却ブライン循環系統および試験部より構成され、全体の概略を図1に示す。試験水系統は、試験水を所期の温度 T_w に保つ試験水タンク⑭、試験水を移送する水ポンプ⑨、水ポンプの発熱を吸収し、試験部への水温を微調整する熱交換器②、試験水圧力を調整する定圧弁⑫および試験部にて発達した速度分布を得るために設けた長さ4050 mmの助走区間用配管⑪より成り立っている。冷却ブライン系統は、ブライン(50%透明エチレングリコール水溶液)タンク⑦、ブライン輸送ポンプ⑨より主として構成されている。冷却ブライン温度 T_b は、 $0^{\circ}\text{C} \sim -25^{\circ}\text{C}$ の範囲で任意に設定することが可能である。試験部は、助走区間用配管に続く試験 180° 曲り円管⑤、吸熱部としての流れの整流板を組み込んだ透明アクリル板より作られた恒温ブライン槽④およびブライン槽と外部環境との熱移動を少なくする低温空気槽③より成り立っている。試験に用いられた 180° 曲り円管(U字管)は、一般水道の給水管を想定し、そして管径および曲率の効果を調べるために管内径 $d=21\text{ mm}$ (外径 $d_o=27.2\text{ mm}$, 曲り直径 $D=150\text{ mm}$), $d=21\text{ mm}$ ($d_o=27.2\text{ mm}$, $D=102\text{ mm}$, $l=458\text{ mm}$) および $d=16.5\text{ mm}$ ($d_o=21.8\text{ mm}$, $D=124\text{ mm}$, $l=451\text{ mm}$) の3種類の鋼管を用いた。また、流動および凍結挙動の可視化実験用とし、鋼管とほぼ同じ寸法を有する3種類の耐圧ガラス製 180° 曲り円管を用いた。実験は、まず試験部を所期の冷却温度 T_b に保った後に、定圧弁より所期の温度 T_w および一定圧力 ($P_i=9.8 \times 10^4 \pm 5 \times 10^3\text{ Pa}$) の試験水を試験曲り円管に流入させることにより、管内凍結の進行過程を可視観測および曲り円管入口、出口に設けた微小圧力計 (P_i , P_o) の経時変化より判断することにより行われ

た。試験水の流量 Q (または流速 V) も凍結挙動に重要な影響を及ぼすことより、水ポンプ⑨の回転数を変えることとバイパスバルブを操作することにより、一定圧力のもとで種々の流量が得られるように工夫してある。さらに、 180° 曲り管の冷却が極力均一となるように、極力低速でブラインを流すとともに冷却ブライン槽④内には、整流用仕切板なども設けてある。また、曲り管内の凍結状態が冷却ブラインの流れ方向で変化しないことも、ブラインタンクより冷却ブライン槽への出入口を逆にした予備試験より確認してある。結果的には、冷却ブライン槽出入口のブライン温度差は 1°C 以内であった。実験整理に用いた諸量として試験水の温度 T_w は曲り円管入口温度、冷却管壁温度 T_w は、曲り円管壁に設けた3点の熱電対 (0.1 mm C-C 熱電対) による温度の平均値、水の流量 Q は、凍結がかなり進行するまでほとんど変化しないことより、試験開始直後の流量、および無次元整理に用いる物性値は、 T_w と凍結温度 $T_f=0^{\circ}\text{C}$ の平均値を採用した。3種類の試験 180° 曲り円管の各々測定範囲は、次のとおりである。

$$d=21.0\text{ mm}(D/d=7.14);$$

$$T^*=1.67 \sim 10.2, R_e=290 \sim 2990,$$

$$R_e^*=110 \sim 1150$$

$$d=21.0\text{ mm}(D/b=4.85);$$

$$T^*=1.87 \sim 11.0, R_e=277 \sim 4118,$$

$$R_e^*=125 \sim 1860$$

$$d=16.5\text{ mm}(D/d=7.52);$$

$$T^*=1.52 \sim 11.0, R_e=435 \sim 6653,$$

$$R_e^*=159 \sim 2427$$

ここで、 $T^*=(T_f-T_w)/(T_w-T_f)$ である。なお試験水の温度範囲は、 $T_w=0.98 \sim 6.1^{\circ}\text{C}$ であり、管内の平均流速 $V=0.0231 \sim 0.696\text{ m/s}$ の範囲で実験が行われた。

図1 実験装置の概要

図2 流れ挙動 ($d=21\text{ mm}$, $D/d=4.85$)

図 3 凍結状態
($d=21$ mm, $Re=558$, $T^*=10$, $t=15$ 分)

(a) $t=162$ 分

(b) $t=206$ 分

(c) $t=239$ 分

(d) $t=450$ 分

図 4 凍結状態 ($d=21$ mm, $Re=2081$, $T^*=10.8$)

図 5 凍結状態
($d=21$ mm, $Re=3232$, $T^*=9.8$, $t=300$ 分)

3. 実験結果および考察

図 2 (a)~(c)は、凍結の伴わない場合の $d=21$ mm ($D/d=4.85$) の耐圧ガラス管の曲り部におけるそれぞれ $Re=293, 774$ および 2460 の場合における流動状態を墨をトレーサとして上部より写真撮影したもので、図中右下より水が流入し、左下より流出することになる。これらの流れ状態より、図 2 (a), (b) の層流においては、曲り部で流れの遠心力による二次流れと流れのはく離による偏流の効果がかなり大きく作用していることが理解できよう。また、図 2 (c) の乱流の場合には層流の場合ほど、曲率の効果が少ないこともわかる。これらのことより、管内凍結において特に曲り管の場合には、その凍結挙動が流れ状態により大きく変化することが推定される。

管内の凍結状態は、流れのトレーサとして緑色の着色料で試験水を着色し、赤緑フィルターを付けたカメラにて試験上部より撮影した。以下の図 3~5 は、図 2 と同じ寸法の耐圧ガラスを用いた場合の凍結状態の可視化写真で白い部分が氷層そして黒い部分が水層である。図 3 は、 $T^*=10$ ($T_\infty=1.2^\circ\text{C}$), $Re=558$ の場合の実験開始後 $t=15$ 分の凍結状態で、急激な凍結進行のため水層中に緑色トレーサのかみ込んでいる様子が理解でき、この条件では約 20 分後に完全に管が閉そくされた。図 4 は、 $Re=2081$, $T^*=10.8$ ($T_\infty=0.99^\circ\text{C}$) の場合における一連の凍結状態を示したもので、(a) の実験開始後 $t=162$ 分の場合には、流入側および流出側の右側の直管部の管壁よりの凍結進展が著しく、曲り部での凍結の進展が遅いことがわかる。図 3 (b) の $t=206$ 分の場合には、 $t=162$ 分にみられた傾向がさらに著しくなる。さらに $t=239$ 分の図 3 (c) の場合には、流水の管入口側で凍結界面の移動が観察され、管の流出口付近での凍結はさらに進行するようになる。図 3 (d) の $t=450$ 分の場合には、入口領域での融解が進行する一方で、曲り後の内側の領域での凍結が進行する複雑な凍結挙動となっている。このように管の凍結の進行と共に管内の流動状態が変化し、それに伴って局所的熱伝達率の変化が複雑に凍結界面の移動をもたらすものと考えられる。図 5 は、 $Re=3232$ の $T^*=9.3$ ($T_\infty=0.02^\circ\text{C}$) の場合の $t=300$ 分における凍結状態を示したもので、その大きなレイノルズ数による熱伝達の効果より、管壁近傍に薄い氷層が発達するのみで、氷層の進展はみられない。

図 6 は、温度比 $T^*=10$ における凍結による管の抵抗係数 $f=[(P_i-P_o)/(\rho V^2/2)]$ とフーリエ数 $Fo=[at/d^2]$ の関係をレイノルズ数をパラメータとして示

図 6 管の抵抗係数 f とフーリエ数 F_0 の関係

したもので、 f の変化により間接的に管内の凍結状態が理解できる。図中において、 f の立上りを終えた一定の f の値を示す点が凍結により管が閉そくしたことを示す。図 6 (a) は、 $d=21.0$ mm ($D/d=4.85$) の場合の例で、レイノルズ数の増大とともに f の立上がる割合が急激に減少する様子が理解でき、さらにその管閉そくまでの時間も増大する結果となる。このことは、管内の流動状態が大きく管凍結に影響を及ぼすものといえよう。図 6 (b) は、曲率の異なる $d=21.0$ mm ($D/d=7.14$) の場合における f と F_0 の関係を示したものである。図 6 (c) は、管径の小さい $d=16.5$ mm ($D/d=7.52$) における f と F_0 の関係を示したものである。

図 7 は、 Re 数および温度比 T^* により管の閉そくが起こるか起こらないかの限界条件を示したもので、図中参考のため、 $d=21.0$ mm ($D/d=7.14$) の場合のみ実測データをプロットしてある。図中の黒丸印は管が閉そくする場合、白丸印は完全に管が閉そくしない場合を示している。この図より曲り管の凍結による管閉そく限界条件は、レイノルズ数と T^* の関係にて十分表現することが理解できよう。図中の実線は、 $d=21.0$ mm ($D/d=7.14$)、一点鎖線は $d=21.0$ mm ($D/d=4.86$)、破線は $d=16.5$ mm ($D/d=7.52$) の条件における管閉そく限界線である。それぞれの曲り円管において、最小二乗法により相対誤差 2% 以内で管閉そく限界条件を T^* と Re の関係で表すと次のようになる。

$d=21.0$ mm ($D/d=7.14$):

$$2.2 \times 10^2 \leq Re \leq 3.2 \times 10^3$$

$$T^* = 1.463 + 3.873 \times 10^{-3} Re - 6.907 \times 10^{-7} Re^2 + 9.707 \times 10^{-11} Re^3 \dots (1)$$

$d=21.0$ mm ($D/d=4.85$):

$$2.2 \times 10^2 \leq Re \leq 4 \times 10^3$$

$$T^* = 1.064 + 3.542 \times 10^{-3} Re - 5.265 \times 10^{-7} Re^2 + 6.910 \times 10^{-11} Re^3 \dots (2)$$

$d=16.5$ mm ($D/d=7.52$):

図 7 管閉そくの限界条件 (Re 数と T^* の関係)

$$2.2 \times 10^2 \leq Re \leq 4.7 \times 10^3$$

$$T^* = 1.110 + 1.532 \times 10^{-3} Re \dots (3)$$

$d=21.0$ mm の曲り管で、曲率直径比 $D/d=7.12$ の限界線が $D/d=4.86$ の小さいものに比べて若干大きくなるのは、曲り管においては、 D/d の大きなものほど、曲り部での乱流への遷移レイノルズ数が小さくなり、流れが乱れるという報告⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾にあるように、 D/d の大きなものほど、同じレイノルズ数で曲り部の熱伝達がよくなり、管閉そくにより大きな T^* の値が必要な結果となったものといえよう。さらに、管径の小さい $d=16.5$ mm の場合には、前の $d=21.0$ mm に比較して、当然、管閉そくに対する限界の T^* 値は小さくなっていることが理解できよう。

図 8 は、管が凍結し始めてから閉そくするまでの無次元時間 F_0^* とディーン数 Re^* との関係を温度比 T^* をパラメータに用いて示したものである。これらの図より、 Re^* と T^* の関係より管閉そくまでの時間を導くことが可能である。図 8 (a) は $d=21.0$ mm ($D/d=4.85$) の場合の例で、ディーン数の増加とともに、 F_0^* の値が大きくなり、特に大きなレイノルズ数領域では、 F_0^* の増加割合が増大するのは、前述の図 4 で示した凍結界面の移動により、管閉そくまでより多くの時間を必要とすることによる。また T^* の小さいものほど、管閉そくまで多く時間を必要とすることが定量的に理解できよう。図 8 (b) は、 $d=21.0$ mm ($D/d=7.14$) の場合における F_0^* と Re^* の関係を示したもので、図 8 (c) は、 $d=16.5$ mm ($D/d=7.52$) の場合の

 図 8 管閉そくまでの無次元時間 F_0^* とディーン数 Re^* の関係

例である。

4. 結 論

一般の水道給水管をモデルとした 180° 曲り部の存在する凍結挙動を試験水の温度、流量、冷却面の温度および曲り管の寸法を実験条件として、凍結挙動の可視化、損失抵抗の実測より、曲り管凍結の機構を明らかにすることができた。曲り円管の凍結挙動には、急速に管中心まで凍結が進行する場合、凍結界面が凍結層の形状とその流動状況により移動し、管閉そくに時間を要する場合および管が完全に閉そくしない場合に分類され、これらは温度比 T^* 、レイノルズ数および曲率と管径比の関係にて定量化する可能性を見出すと同時に本研究は、凍結による管閉そくに対する T^* の限界条件をレイノルズ数の関係にて、また管閉そくまでの時間をレイノルズ数と T^* の関係にて定量的に表

すことができた。

本研究の遂行に関して、実験データの採取にご協力願った本学技官福田武幸氏に深く感謝する。本研究の研究費の一部は昭和 58 年度文部省科学研究費、一般研究 C, No. 58550136 の補助を受けたことを記し、ここに感謝する。

文 献

- (1) Özisik, M. N. and Mulligan, J. C., *Trans. ASME, Ser. C*, **91** (1969), 385.
- (2) Zerkle, R. D. and Sunderl, J. E., *Trans. ASME, Ser. C*, **90** (1968), 183.
- (3) Thomason, S. B., ほか 2 名, *Trans. ASME, Ser. C*, **100** (1978), 387.
- (4) Gilpin, R. R., *Trans. ASME, Ser. C*, **103** (1981), 363.
- (5) 智田, 機論, **49**-438, B (昭 58), 433.
- (6) Ito, H., *Trans. ASME, J. Basic Engineering*, (1959), 123.
- (7) 森・中山, 機論, **31**-230 (昭 40), 1521.