曲がり管と旋回流の組み合わせによるオリフィス背後の配管減肉に関する研究

Study on Pipe-Wall Thinning behind an Orifice by the Combined Influence of Curved Pipe and Swirling Flow

○ 菅野 翔 (新潟大院)

正 山縣 貴幸 (新潟大)

正 藤澤 延行 (新潟大)

高野 剛 (新潟大)

Sho KANNO, Graduate School of Science and Technology, Niigata University

Takayuki YAMAGATA, Visualization Research Center, Niigata University

Nobuyuki FUJISAWA, Visualization Research Center, Niigata University

Tsuyoshi TAKANO, Visualization Research Center, Niigata University

Key Words: Pipe wall thinning, Flow accelerated corrosion, Orifice flow, Swirling flow, PIV

1. 緒 言

原子力発電プラントの危機管理や安全運転には、プラントの各種配管における減肉の発生メカニズムの解明とそれに基づく減肉の高精度予測技術が重要な研究課題である。配管減肉の発生原因の一つに流動加速腐食があり、これは配管材料の鉄イオンが内部の流動によって作動流体中に溶解するために生じる物質輸送現象である。代表的な例として、2004年に起きた美浜原子力発電所における配管破損事故があり、オリフィス下流側配管に非軸対称な減肉が発生したことで予想より大きな減肉が発生したことが事故の原因と考えられている¹⁾。著者らはこのような非軸対称な減肉現象のメカニズムを理解するために、オリフィス背後の流動現象について可視化計測を行い、わずかなオリフィスの偏心 ($\pm 0.8\%$) と旋回流の組み合わせ効果により、オリフィス背後に偏流が発生し、物質輸送現象が増強されることを示した²⁻⁴⁾。一方、実機配管系では、オリフィス上流側にエルボなどの曲がり部が設置されている場合も多く、曲がり管と旋回流の組み合わせ効果についても考察する必要がある。

本研究では、曲がり管と旋回流の組み合わせによって形成される流れがオリフィスに流入した場合、オリフィス背後の流れ場に偏流が発生するかどうかについて実験的に検討する。また、曲がり管のない場合と比較することで、曲がり管の影響について考察する。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

実験装置は、ポンプ、整流部、測定部から構成される回流水槽であり、作動流体は水である。Fig. 1は整流部および測定部の模式図である。整流部の背後に旋回流を発生するためのスワラを設置し、曲率半径が管内径の1.5倍であるロングエルボを含む助走区間を介して、計測部のオリフィスが接続されている。ここで、管内径は $D = 56 \text{ mm}$ 、オリフィス絞り比は0.6 (内径 33.6 mm) であり、スワラ-エルボ間は 200 mm 、エルボ-オリフィス間は 600 mm より助走区間は計 800 mm である。スワ

ラは、主流方向に対して一定角度傾けたステンレス製の直線羽根を周方向に6枚固定した構造であり、計測部での旋回流強度が同程度になるように、軸対称旋回流では 30° 、非軸対称旋回流では 45° のものを使用した。ただし、軸対称旋回流の実験ではエルボを排除した直管により計測を行った。

2.2 PIV 計測

速度場計測に用いた PIV システムは、Nd:YAG パルスレーザ ($\lambda = 523 \text{ nm}$)、モノクロ CCD カメラ ($1008 \times 1018 \text{ pixels}$, 8 bits)、パルスジェネレータで構成される。流れの可視化のためにレーザをシート光として照射し、トレーサとして直径約 $40 \mu\text{m}$ のナイロン製粒子 (比重 1.02) を作動流体に加えた。PIV 計測は、Fig. 1 に示すように流れの偏りを観測するため、管軸を含む垂直断面 (x - y 断面) と二次流れを観察するための管軸に垂直な断面 (x - z 断面) に対して行った。なお、本実験のレイノルズ数は $Re (= U_0 D / \nu) = 1.9 \times 10^4$ とした。ただし、 U_0 : 断面平均流速、 ν : 動粘度である。粒子の移動量は軸方向計測で5ピクセル、周方向計測で2ピクセル程度に設定したため、速度計測誤差は、それぞれ2%及び5%程度である。

Fig. 1 Layout of test section.

3. 実験結果および考察

スワラによって生成される旋回流強度は、次式で定義されるスワール数 Sw で表される。

$$Sw = \int_0^R u V_{th} r^2 dr / (R \int_0^R u^2 r dr) \quad (1)$$

Fig.2 Velocity distributions with swirling flow without curved pipe

Fig. 3 Velocity distributions with swirling flow and curved pipe

ただし、 R ：管半径、 r ：管中心からの距離、 u ：管軸方向速度、 V_{th} ：周方向速度である。オリフィスなしの本実験のスワール数は、エルボを介した非軸対称旋回流では0.30、直管での軸対称旋回流では0.33であり、実機配管の再現実験¹⁾と同程度に設定した。

Fig. 2は、曲がり管なし、旋回流ありの条件下におけるオリフィス背後の速度場の計測結果である。ただし、 x - y 断面の平均速度場(a)と y - z 断面($x/D=1.0$)における周方向の平均速度場(b)を示す。また、配管減肉に直接関わりを持つ物質輸送量として、壁面からの無次元距離を Y 、周方向の無次元速度を V_{th} として、管壁面における周方向の無次元速度勾配 dV_{th}/dY を評価した。ただし、これらの速度および速度勾配は、断面平均速度 U_0 と管直径 D で無次元化した。実験結果によると、オリフィス背後の流れ場は中心軸に対して対称となっており、上下壁面での再付着点位置もほぼ一致している。また、周方向速度分布や速度勾配においても軸対称性が認められる。

Fig. 3は、曲がり管と旋回流が共にある場合のオリフィス背後の速度場の計測結果である。ただし、 x - y 断面の平均速度場(a)、 y - z 断面の周方向速度場として $x/D=1.0$ (b)、1.5(c)、2.0(d)、2.5(e)について示した。これらの実験結果によると、オリフィス背後の流れ場には、非軸対称の旋回流が発生し、オリフィス背後上方に向かう強い偏流の発生が見られる。また、周方向速度および速度勾配の結果($x/D=1.0$)によると、左側の管壁に速度の大

き領域が見られ、壁面速度勾配も強い非軸対称性を示す。さらに下流側の領域($x/D=1.5, 2.0, 2.5$)では、増速は徐々に弱まり、それに伴って周方向速度勾配の大きさも小さくなる。図より、下流に進むにつれて周方向速度と速度勾配が共に大きい領域が、左側から下側に移動しており、速度勾配の大きさは徐々に減衰する。このことは、非軸対称旋回流が下流側で徐々に減衰することに対応する。一方、本実験結果によると、周方向速度の増速領域は、オリフィスの下流側へ進むにつれて、後方から見て反時計周りに回転することが注目される。

4. 結 言

オリフィス背後における配管減肉現象の理解を目的とし、曲がり管と旋回流の複合した流れがオリフィスに流入した場合の流れ場を実験的に検討した。実験結果によると、このような複合流れを伴う流れ場では、オリフィス背後に強い偏流が発生し、速度分布、周方向速度勾配に非軸対称性が顕著に見られることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 経済産業省, <http://www.meti.go.jp/committee/materials/g41213aj.html>, 資料 7-1-1, (2004)
- 2) Ohkubo, M. et al., J. Vis., Vol. 14 (2011), pp. 15-17.
- 3) 大久保雅一, 他 3 名, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 77 (2011), pp. 386-394
- 4) 高野剛, 他 3 名, 保全学, Vol. 10 (2011), pp. 30-35.