

# 行政院原子能委員會 委託研究計畫研究報告

核能電廠安全級管路斷管及其影響分析研究(II)

The studies of the safety-related pipe rupture  
of the nuclear power plants(II)

計畫編號：942001INER027 (NL940028)

受委託機構：龍華科技大學

計畫主持人：葛自祥副教授

報告日期：94年11月30日

# 核能電廠安全級管路斷管及其影響分析研究(II)

葛自祥 陳建忠 丁鯤

## 摘要

核能電廠在安全級核能管路設計階段時，MEB 3-1 須對圍阻體內外的高能量與中能量管路，進行發生假想性斷管事件(pipe rupture)及其後續效應的設計基準分析。據此，訂定圍阻體、重要系統、組件與設備完善的防護措施，維護核能安全。此部分的分析結果，必須要在終期安全分析報告 3.6 節中詳細說明。因此，本計畫之目的擬建立完整性的斷管與其效應分析技術，及相關之審查導則，以提供管制單位對核四廠管路設計基準稽查與審查之參考。

然核能電廠管路系統極為龐大。因此，本計畫擬定以美國核能管制委員會所提出的管路 benchmark 問題做為參考對象 (NUREG/CR-1677)，以建立有關斷管之各項技術。因此本計畫擬以兩年期，分別執行下列各項工作：

1. 建立國內安全級管路斷管位置判定導則，以為管制審查參考。
2. 建立 NUREG/CR-1677 中管路系統之動態應力分析基準。
3. 根據斷管位置判定準則，評估上述管路系統之斷管位置。
4. 建立管路斷管後沖放負載之分析技術與程序。

在第一年工作中，已完成根據 NUREG-0800 中 3.6.1 及 3.6.2 節的 ASB 3-1 與 MEB 3-1 斷管位置之判定準則，訂定國內相關準則，作為管制審查參考。

在本(第二)年工作中，將採用計算流體力學 Star CD，建立分析模式，進行管路系統於發生破裂或斷裂時之動態分析。依據系統內流體特性的改變，求出此管路系統的動態反應，即為產生動態的反作用力。此反作用力為時間與空間的函數，決定於斷管前管路內的流體狀態、斷管面積、摩擦效應與系統特性等參數，且此函數的訂定，要符合 ANS 58.2 中 6.2 節與 Appendix A 的要求。因此流體反作用力沖放負載的建立，所得結果與分析技術可提供管制單位在審查核四廠終期安全分析報告 3.6.2 節之參考。

# **The studies of the safety-related pipe rupture of the nuclear power plants (II)**

**T. H. Ko, J. J. Chen and K. Ting**

## **ABSTRACT**

Section 3.6 in Safety Report describes the design bases and protective measures which ensure that the containment, essential systems, components and equipment, and other essential structures are adequately protected from the consequences associated with a postulated rupture of high-energy piping or crack of moderate-energy piping both inside and outside the containment. The purpose of this project will establish the comprehensive procedure to evaluate the pipe rupture and the effects and review guide for the reference the regulatory staff to review safety report.

However, the piping system is very huge and complicated. The project will emphasize the piping benchmark problems of NUREG/CR-1677 for the pilot study. This project will perform the following items in the two-year period.

1. To establish the piping rupture criterion of the safety-related piping in Taiwan.
2. To establish the dynamic analysis of the benchmark problem of the piping system for the demonstration problem.
3. Based on the established piping rupture criteria, to evaluate the existing piping rupture in the safety report.
4. To establish the reactive force due to the piping rupture by the analytical method and CFD methods.

The establishment of piping rupture criteria will base on NUREG-8000 Sections 3.6.1 and 3.6.2 ASB 3-1 and MEB 3-1 criteria. A CFD package, Star CD will be used for the dynamic analysis of NUREG/CR-1677 piping problem. The reactive force function will be provided as a check according to the requirement of ANS 58.2 Section 6.2 and Appendix A.

# 目 錄

	頁碼
摘要.....	ii
ABSTRACT.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
1. 計畫目標	
1.1 背景說明.....	1
1.2 計畫目標.....	4
2. 研究方法.....	6
2.1 物理模式.....	6
2.2 數學模式.....	7
2.3 數值方法.....	9
3. 結果與討論	
3.1 事例分析(一)：90 度彎管圓周向破裂模式.....	13
3.2 事例分析(二)：90 度彎管軸向破裂模式.....	14
3.3 事例分析(三)：120 度彎管圓周向破裂模式.....	16
3.4 事例分析(四)：120 度彎管軸向破裂模式.....	17
3.5 事例分析(五)：180 度彎管圓周向破裂模式.....	19
3.6 事例分析(六)：180 度彎管軸向破裂模式.....	20

4. 結論.....	22
參考文獻.....	23

## 圖目錄

圖 1.1 管路甩動抑制器.....	3
圖 3.1 90 度彎管之尺寸圖.....	24
圖 3.2 90 度彎管圓周向破裂之位置圖.....	25
圖 3.3 $t=0.009\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (90 度彎管圓周向破裂).....	26
圖 3.4 $t=0.013\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (90 度彎管圓周向破裂).....	27
圖 3.5 $t=0.03\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (90 度彎管圓周向破裂).....	28
圖 3.6 $t=0.06\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (90 度彎管圓周向破裂).....	29
圖 3.7 $t=3.0\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (90 度彎管圓周向破裂).....	30
圖 3.8 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (90 度彎管圓周向破裂).....	31
圖 3.9 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (90 度彎管圓周向破裂).....	32
圖 3.10 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (90 度彎管圓周向破裂).....	33
圖 3.11 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (90 度彎管圓周向破裂).....	34
圖 3.12 $t=3.0\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (90 度彎管圓周向破裂).....	35

圖 3.13 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (90度彎管圓周向破裂).....	36
圖 3.14 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (90度彎管圓周向破裂).....	37
圖 3.15 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (90度彎管圓周向破裂).....	38
圖 3.16 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (90度彎管圓周向破裂).....	39
圖 3.17 $t=3.0\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (90度彎管圓周向破裂).....	40
圖3.18 90度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖 .....	41
圖3.19 90度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_y$ )圖 .....	42
圖3.20 90度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖 .....	43
圖 3.21 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (90度彎管軸向斷裂).....	44
圖 3.22 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (90度彎管軸向斷裂).....	45
圖 3.23 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (90度彎管軸向斷裂).....	46
圖 3.24 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (90度彎管軸向斷裂).....	47
圖 3.25 $t=3.0\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (90度彎管軸向斷裂).....	48

圖 3.26 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	49
圖 3.27 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	50
圖 3.28 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	51
圖 3.29 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	52
圖 3.30 $t=3.0\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	53
圖 3.31 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	54
圖 3.32 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	55
圖 3.33 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	56
圖 3.34 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	57
圖 3.35 $t=3.0\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	58
圖3.36 90度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_x$ )圖.....	59
圖3.37 90度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_y$ )圖.....	60
圖3.38 90度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_z$ )圖.....	61
圖 3.39 120 度彎管之尺寸圖 .....	62



圖 3.40 120 度彎管圓周向破裂之位置圖 .....	63
圖 3.41 $t=0.009\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (120 度彎管圓周向破裂).....	64
圖 3.42 $t=0.013\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (90 度彎管圓周向破裂) .....	65
圖 3.43 $t=0.03\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (120 度彎管圓周向破裂).....	66
圖 3.44 $t=0.06\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (120度彎管圓周向破裂).....	67
圖3.45 $t=3.0\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (120 度彎管圓周向破裂).....	68
圖 3.46 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (120度彎管圓周向破裂).....	69
圖 3.47 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (120度彎管圓周向破裂).....	70
圖 3.48 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (120度彎管圓周向破裂).....	71
圖 3.49 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (120度彎管圓周向破裂).....	72
圖 3.50 $t=3.0\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (120度彎管圓周向破裂).....	73
圖 3.51 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (120度彎管圓周向破裂).....	74
圖 3.52 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖	

(120度彎管圓周向破裂).....	75
圖 3.53 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖	
(120度彎管圓周向破裂).....	76
圖 3.54 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖	
(120度彎管圓周向破裂).....	77
圖 3.55 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖	
(120度彎管圓周向破裂).....	78
圖3.56 120度彎管圓周向破裂前後管路受力(Fx)圖 .....	79
圖3.57 120度彎管圓周向破裂前後管路受力(Fy)圖 .....	80
圖3.58 120度彎管圓周向破裂前後管路受力(Fx)圖 .....	81
圖 3.59 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速向量圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	82
圖 3.60 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速向量圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	83
圖 3.61 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速向量圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	84
圖 3.62 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速向量圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	85
圖 3.63 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速向量圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	86
圖 3.64 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	87
圖 3.65 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖	

(120度彎管軸向斷裂).....	88
圖 3.66 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	89
圖 3.67 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	90
圖 3.68 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖	
(120 度彎管軸向斷裂).....	91
圖 3.69 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖	
(120 度彎管軸向斷裂).....	92
圖 3.70 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	93
圖 3.71 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖	
(120度彎管軸向斷裂).....	94
圖 3.72 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖	
(120 度彎管軸向斷裂).....	95
圖 3.73 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖	
(120 度彎管軸向斷裂).....	96
圖3.74 120度彎管軸向斷裂前後管路受力(Fx)圖.....	97
圖3.75 120度彎管軸向斷裂前後管路受力(Fy)圖.....	98
圖3.76 120度彎管軸向斷裂前後管路受力(Fz)圖.....	99
圖 3.77 180 度彎管之尺寸圖 .....	100
圖 3.78 180 度彎管圓周向破裂之位置圖 .....	101
圖 3.79 t=0.009sec 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況	
(180 度彎管圓周向破裂).....	102

圖 3.80 $t=0.013\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (180 度彎管圓周向破裂).....	103
圖 3.81 $t=0.03\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (180 度彎管圓周向破裂).....	104
圖 3.82 $t=0.06\text{sec}$ 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況 (180 度彎管圓周向破裂).....	105
圖 3.83 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (180 度彎管圓周向破裂).....	106
圖 3.84 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (180 度彎管圓周向破裂).....	107
圖 3.85 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (180 度彎管圓周向破裂).....	108
圖 3.86 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速之分佈圖 (180 度彎管圓周向破裂).....	109
圖 3.87 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (180 度彎管圓周向破裂).....	110
圖 3.88 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (180 度彎管圓周向破裂).....	111
圖 3.89 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (180 度彎管圓周向破裂).....	112
圖 3.90 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力之分佈圖 (180 度彎管圓周向破裂).....	113
圖 3.91 180 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖.....	114

圖3.92 180度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_y$ )圖 .....	115
圖3.93 180度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖 .....	116
圖 3.94 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (180度彎管軸向斷裂).....	117
圖 3.95 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (180度彎管軸向斷裂).....	118
圖 3.96 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (180度彎管軸向斷裂).....	119
圖 3.97 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速向量圖 (180度彎管軸向斷裂).....	120
圖 3.98 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (180度彎管軸向斷裂).....	121
圖 3.99 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (90度彎管軸向斷裂).....	122
圖 3.100 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (180度彎管軸向斷裂).....	123
圖 3.101 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上流速分佈圖 (180度彎管軸向斷裂).....	124
圖 3.102 $t=0.009\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (180度彎管軸向斷裂).....	125
圖 3.103 $t=0.013\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (180度彎管軸向斷裂).....	126
圖 3.104 $t=0.03\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (180度彎管軸向斷裂).....	127

圖 3.105 $t=0.06\text{sec}$ 時，管內對稱面( $x=0$ 平面)上壓力分佈圖 (180 度彎管軸向斷裂).....	128
圖3.106 180度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_x$ )圖.....	129
圖3.107 180度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_y$ )圖.....	130
圖3.108 180度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_z$ )圖.....	131

# 1. 計畫目標

## 1.1 背景說明

核能電廠在設計階段，須對安全級管路（Safety-Related Piping）考量假設性斷管（postulated pipe rupture）或破裂（pipe crack）的評估，及其所引發的後果是否會對圍阻體、重要系統、組件與設備以及其他重要結構造成相當的影響。因此，其設計基準與保護措施要能防止此兩類事件的所產生的後果，並必須將此部分結果說明於核能電廠安全分析報告第3.6.1與3.6.2節中[1]。

所謂斷管與破裂係分別針對圍阻體內外的高能量管路（high energy piping system）與中能量管路（moderate energy piping system）來考量。在進行斷管位置判定前須先將管路分類定義出來。

(1) 高能量管路定義（下列兩條件擇一即可）：

- (a). 最高運轉溫度超過93°C；
- (b). 最大運轉壓力超過1902.5 kPag。

(2) 中能量管路定義（下列兩條件擇一即可）：

- (a). 最高運轉溫度不超過93°C；
- (b). 最大運轉壓力不超過1902.5 kPag。

管路系統若僅有很短的運轉時間(運轉時間的2%以內) 分類屬於高能量管路，但其他時間則分類為中能量管路，仍可視為中能量管路。

所謂假設性管路斷管事件，依法規定義為：當核電廠在正常運轉時，發生單一假想管路失效事件者（pipe failure）；其範疇包含任何因此假想性管路失效，所直接造成的後果者；包含因結果所發生的任意管路失效者及設備是否失效者。

其中假想性管路失效，包含高能量系統管路中發生軸向或圓周向破裂或假設性斷裂；中能量系統管路中發生穿壁式洩漏者（through-wall leakage），造成必須使反應器急停，以及要延緩因為此假設性管路失效所產生的後果。

進一步定義假設性管路斷裂，在高能量管路中考慮為為壓力邊界的突然性整體失效（gross failure），可能為嚴重的圓周向完整斷裂（斷頭式斷裂）或者是突

然的軸向式劈裂。至於中能量管路系統管路失效僅限於管路發生裂縫，這些裂縫會影響到週遭的環境條件，但不引起管路的甩動。

高能量管路的假設性斷管所引發的動態效應（dynamic effects）後果，包括有[2]：

- (1) 產生拋射物（missile generation）
- (2) 管路甩動（pipe whipping）
- (3) 管路斷管反應力（pipe break reaction forces）
- (4) 噴流衝擊（jet impingement）
- (5) 隔間、次隔間、空穴壓力（compartment, sub-compartment and cavity pressurizations）
- (6) 斷管內的次壓力波（decompression waves）

針對上述動態效應的防護，管路設計時之考量，要能符合下列目標：

- (1) 確保反應器能安全地達到停機（shutdown）要求，且要維持在安全冷停機的條件；同時因假設性管路失效所產生的後果，要在不需要廠外電源條件下，能減緩到可接受的範圍。
- (2) 確保維持圍阻體的結構完整性。
- (3) 確保假設性管路失效所產生的放射性劑量要低於10CFR100的限度內。

在訂定這些保護性的考量時有下列的假設：

- (1) 管路斷管可能發生在電廠正常運轉中。
- (2) 管路斷管可能與地震事件同時發生，但地震事件不是產生管路斷管的原因。
- (3) 管路斷管事件中假設為單一主動設備失效（Single Active Component Failure, 簡稱SACF），設備可能喪失其機械、水力與電氣功能，但其結構完整性不受到影響。
- (4) 管路斷管失效位置可能發生在備用串上，備用串不採用SACF假設。
- (5) 若斷管事件發生在非耐震一級管路上，管路斷管事件將不會對重要系統、組件以及設備造成失效，而必須停機。
- (6) 若因斷管直接造成廠外電源失效，這是屬於SACF假設。
- (7) 管路甩動僅單獨發生在圓周式或軸向式斷裂。



- (8) 所有可用系統在一除因假設性管路失效事件後均能可用
- (9) 雖然發生在圍阻體外的斷管事件，而必須冷停機，到熱停機至少要8小時，以有充分的時間讓電廠人員評估電廠狀況與修理。
- (10) 管路甩動為斷管後的立即運動，其發生要依據管路幾何形狀、噴流後座力方向所引起的移動。
- (11) 隨者斷管產生的內部流體能量要將管路限制器納入。
- (12) 所有的牆、門、樓板以及穿越氣可視為分區邊界者，皆可設計為抵抗最壞情況的屏障

前述所界定的重要系統、組件與設備則根據電廠的安全分析報告中予以訂定。

因斷管或破裂引起的後果，必須要以機械式的方式來描述失效事件，包括管路尺寸、配管形狀、材料性質（在SRP 3.6.2中訂定）以及設備安排等，均要能考量到下列各種防護的方法

- (1) 因管路斷管造成動態效應的保護措施要能抑制管路甩動，管路上加裝甩動抑制器（圖1.1所示）。
- (2) 管路的安排要考慮到區域性的分隔以及相關屏蔽的安排。
- (3) 要考慮到以後的維修以及管路間不要過於接近。

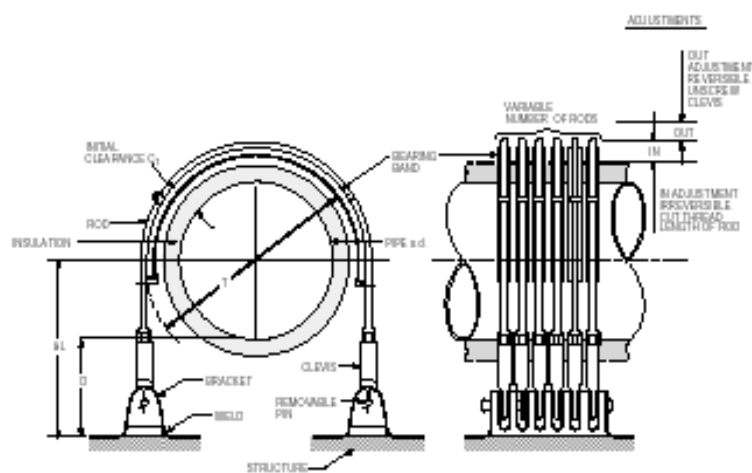


圖1.1 管路甩動抑制器 [ 1 ]

電廠設計時要考慮到各類系統設備間的區域性隔開，以維持各備用串的獨立運作，不會因管路斷管造成安全功能的喪失。每一區域都要能獨自抵擋管路斷管的事件，但往往會造成一些死角，或分區不實際的情形，但都要要符合高能量管

路分隔分析（High-Energy Line Separation Analysis，簡稱HELSEA）評估，使管線有更進一層的保護。

根據上述多方面的考量，在高能量管路系統中有可能發生假設性斷管點的管路必須有下列特性：

- (1) 所有管路為反應器壓力邊界的一部分而且持續承受反應器的壓力；
- (2) 在第二個隔離閥外的管路但持續承受反應器壓力；
- (3) 其他高能量管路。

而假設性斷管位置之考量，需滿足下列之基本要求：

- (1) 配合分區要求，根據HELSEA評估，高能量管路必須要考量到空間的區隔，這些點不能視為斷管點。
- (2) 在圍阻體穿越區的管線，從圍阻體壁到內部隔離閥或外部隔離閥的管路不允許設有斷管點或破裂點，同時要滿足ASME Code Section III, Subarticle NE-1120的要求。
- (3) 焊接區的斷管處要儘量減少。
- (4) 上述三區域外，在ASME Code Section III Class 1 Piping之斷管假設為
  - (i) 管線端點
  - (ii) 根據ASME 規範第三冊 Eq. (10)計算最大應力範圍超過 $2.4 S_m$ 者中間位置
  - (iii) 累積使用因子超過0.1者的中間位置

當選定斷管位置與以補強後，管路要重新作應力分析，斷管位置可能會移動，但最開始考量的位置不能改變。

## 1.2 計畫目標

在上述斷管位置的選定與管路保護措施的補強，整個程序的建立，可由兩方面來進行，此亦即分別為本二年期計畫之目標：

- (1) 第一年計畫目標：協助核四廠斷管安全分析報告的審查

本計畫在第一年之執行中，已建立起斷管位置判定導則之訂定，可作為核四廠斷管安全分析報告的審查參考，一方面可加強此部分的驗證，另一方面可藉由實際的分析結果審查建立此技術的能力。

## (2) 第二年計畫目標：分析模式的建立

由於核電廠管路系統複雜龐大，且學校參與人力非顧問公司所能及，因此將選定管路系統內最易產生斷裂或破洞之90度、120度及180度之彎管部分，作為分析之主要範例，以示範建立整體性管路設計的程序，以完整的進行電廠安全分析報告的審查。

當壓力管路斷裂後所引起流體特性的改變，產生反作用力，導致管路系統的振動，此反作用力為時間與空間的函數，與管路斷裂前流體的狀態、斷管面積、摩擦損失、電廠系統特性、管路系統以及其他因數都有關係。此函數的計算為本計畫的重要項目之一。本計畫(第二年)之主要目標，將使用計算流體力學(CFD)套裝軟體Star CD [3]進行斷管相關沖放反應力量的計算，以建立完整流體力學分析的技术能力。

## 2. 研究方法

### 2.1 物理模式

本計畫中斷管位置判定導則之訂定，在建立防止假設性管路破壞所造成動態效應之保護措施(Protection Against Dynamic Effects Associated with the Postulated Rupture of Piping)。在描述用在評估圍阻體內外管路失效 (piping failure) 後果之相關規定及假設前，必需要先定義管路斷裂事件 (pipe break event) 及假設性管路失效 (postulated piping failure)：

**管路斷裂事件：**在電廠正常運轉期間所發生的任意單一假設性管路失效，因假設性管路失效所產生的直接導致任一管路失效或(以及)設備失效。

**假設性管路失效：**在高能量流體系統管路 (high-energy fluid system piping) 假設發生縱向或圓周向斷裂或破裂，在中能量流體系統管路 (moderate-energy fluid system piping) 假設發生穿壁式洩漏裂縫 (throughwall leakage crack)。

高能量管路發生假設性斷管，所產生的動態效應，包括 (1) 飛射物的產生 (missile generation)；(2) 管路甩動 (pipe whipping)；(3) 斷管反作用力 (pipe break reaction forces)；(4) 噴流撞擊力 (jet impingement forces)；(5) 隔間 (compartment)、次隔間 (sub-compartment) 及空穴壓力 (cavity pressurizations)；(6) 在斷管內之壓降波 (decompression waves)。因高能量管路發生斷管後所產生之危害，遠較中能量管路為嚴重，因此本計畫分析模式之建立，將以高能量管路發生斷管之情況為主。分析之模式將選定管路系統內最易產生斷裂或破洞之 90 度、120 度及 180 度之彎管部分，作為分析之主要事例。破裂之型式則考量圓周向破裂，與軸向斷裂等二種情況。

#### 2.1.1 基本假設

分析模式之建立，係採用下列之假設：

- (1) 管路內流體為單相流，並不考慮相變化。
- (2) 因考量高能量流體系統管路，故所分析之管路內壓力，在發生破裂前之壓力為 2000Kpa。

(3) 分析之問題為三維之暫態紊流流場。

### 2.1.2 物理模式描述

電廠內之管路系統十分複雜，不可能將所有管路系統列入計算分析。由於本研究之重點在於瞭解，管路系統中某部位發生破裂或斷裂後，對管路內流體性質產生之影響，並了解因流體洩出或噴出時，所產生之反作用。因此，本研究以最容易發生破裂或斷裂之局部管路為研究之控制體積，探討管路發生破裂或斷裂之前後，管路內之流場變化，並進一步計算出因流體洩出或噴出時，所產生之反作用。分析之模式包含 90 度、120 度及 180 度之彎管管路系統，每一種彎管皆考慮圓周向破裂，與軸向斷裂等二種情況，故共有六個事例。各事例中之管路直徑皆為 0.5m。在圓周向破裂之事例中，皆假設破裂發生於彎管之彎管段中點處，圓周向之破裂範圍為 300 度。在軸向斷裂之事例中，則假設斷裂位置位於各彎管之出口端。

## 2.2 數學模式

### 2.2.1 統御方程式

由於所考量者為三維、暫態之紊流流場，故所需考量之方程式，包含：

連續方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

Navier-Stokes 方程式：

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_\ell \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (2.2)$$

紊流模式則採用  $k-\varepsilon$  模式：

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho U_j \kappa - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) = \mu_t P_S - \rho \varepsilon \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho U_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_S - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.4)$$

其中

$$P_S = 2 \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (2.5)$$

$$\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t \quad (2.6)$$

$\mu_l$  和  $\mu_t$  分別為流體黏滯係數(laminar viscosity)與紊流黏滯係數。

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (2.7)$$

相關之紊流模式係數為  $C_\mu=0.09$ ， $\sigma_\kappa=1.0$ ， $\sigma_\varepsilon=1.22$ ， $C_{\varepsilon 1}=1.44$ ， $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 。

### 2.2.2 邊界條件與起始條件

由於考量暫態分析，流場之起始條件為無破裂或斷裂之彎管流動。在所有之計算事例中，皆係假設在  $t=0.01\text{sec}$  時，管路系統發生破裂或斷裂。因分析之模式包含 90 度、120 度及 180 度之彎管管路系統，每一種彎管皆考慮圓周向破裂，與軸向斷裂等二種情況。在圓周向破裂之事例中，故於  $t=0.01\text{sec}$  前，所有管壁為固體邊界，設為流體無滑動條件；但在  $t=0.01\text{sec}$  以後，於模擬之破裂處(為一 300 度之環型區)之管壁，轉換為與大氣接觸之大氣壓力之邊界條件。在軸向

斷裂之事例中，則將斷裂處(假設於各事例之出口端)之壓力，由原本之管路未斷裂前之壓力環境，於管路斷裂時(即  $t=0.01\text{sec}$  以後)，改設為大氣壓力條件。

### 2.2.2 管路受力之計算

在利用前述之方程式、邊界條件與起始條件，求得管路斷裂前後之每一瞬間之流場狀況後，便可進一步經由計算管路控制體積中流體之動量變化，求出每一時刻下，管路之受力情況。相關之計算理論如下：

$$\Sigma F_x = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{c.v} u \rho dv + \iint_{c.s} u (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) \quad (2.8)$$

$$\Sigma F_y = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{c.v} v \rho dv + \iint_{c.s} v (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) \quad (2.9)$$

$$\Sigma F_z = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{c.v} w \rho dv + \iint_{c.s} w (\rho \vec{v} \cdot d\vec{A}) \quad (2.10)$$

上式中  $u$ ， $v$ ， $w$  分別為流場速度之三方向之分量；c.v. (control volume) 及 c.s. (control surface) 則分別表示計算區間之控制體積與控制表面； $\Sigma F_x$ ， $\Sigma F_y$  及  $\Sigma F_z$  則分別表示流體在三不同方向所受到之力量。由於作用力與反作用力之關係，管路在三不同方向之受力即為  $-\Sigma F_x$ ， $-\Sigma F_y$  及  $-\Sigma F_z$ 。

### 2.3 數值方法

所有的統御方程式可利用控制體積法，針對不同變數所屬之控制體積作體積分，再配合連續方程式及冪次法則體系 (Power Law Scheme) [4]，可得下列三方向之速度差分方程式：

$$(a_e - s_p^u)u_e = \sum a_{nb}u_{nb} + s_c^u + (p_p - p_E)A_e \quad (2.8)$$

$$(a_n - s_p^v)v_n = \sum a_{nb}v_{nb} + s_c^v + (p_p - p_N)A_n \quad (2.9)$$

$$(a_t - s_p^w)w_t = \sum a_{nb}w_{nb} + s_c^w + (p_p - p_T)A_t \quad (2.10)$$

及其他變數之差分方程式：

$$(a_p - s_p^\phi)\phi_p = \sum a_{nb}\phi_{nb} + s_c^\phi \quad (2.11)$$

差分後動量方程式之物理意義係表示在各格點上之速度，實受到其鄰近各格點之速度場及壓力梯度的影響。式中  $a_e$ ， $a_n$ ， $a_p$ ， $a_{nb}$  各項係數代表對流與擴散的合成效應，皆為速度之函數，因此使上列各式成為非線性。 $s_p^\phi$  及  $s_c^\phi$  即為將源項線性化後所產生。

應用數值方法求解流場過程中，由於並沒有適當的方程式描述壓力，因此壓力項成為最令人頭疼的一項未知數。1980 年代以前的數值方法多利用  $\psi$ - $\omega$  (Stream Function & Vorticity)法，先將動量方程式作處理，消去壓力項，並將未知數轉為  $\psi$  及  $\omega$ ，間接求出速度場等未知數。由於此法在先天上受到無法擴展到三維問題的限制，因此大約在 1980 年以後，大多數數值解法已不再用  $\psi$ - $\omega$  法，而改用直接解  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 、 $p$  等主要變數 (Primitive Variable)。本研究之數值方法採用 SIMPLE (Semi-Implicit Method with Pressure-Linked Equation) [4]演算法則。SIMPLE 為 Partankar 與 Spalding 所發展之一套直接求解主要變數之流場解題流程。茲將 SIMPLE 的主要精神敘述如下：

由 x 方向之動量方程式：

$$a_e u_e = \sum a_{nb} u_{nb} + s_u + A_p (p_p - p_E) \quad (2.12)$$

其中  $A_p$  為  $P_p$  及  $P_E$  雙點壓力差所施力之面積。若猜一壓力值  $P^*$  代入上式：

$$a_e u_e^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + s_u + A_p (p_p^* - p_E^*) \quad (2.13)$$

則可由式 (2.13) 解出速度  $u^*$ ，但由於  $P^*$  值為猜測值，不是真正的流場壓力，



$u^*$  不會滿足連續方程式。因此必須修正  $u^*$  使連續方程式滿足。問題便在於如何求出此一修正量。SIMPLE 法則自壓力方面著手。

假設真正流場之  $P$  值為  $P^* + P'$  ( $P'$  為壓力修正項) 由式 (2.12) – 式 (2.13) 得

$$a_e u'_e = \sum a_{nb} u'_{nb} + s_u + A_p (p'_p - p'_E) \quad (2.14)$$

$$\text{其中 } u' = u - u^* \quad , \quad p' = p - p^*$$

Patankar 為求出簡單之速度修正量  $u'_e$  及  $p'$  間之關係式，故直接忽略

$\sum a_{nb} u'_{nb}$  項：

$$u'_e = \frac{A_p}{a_e} (p'_p - p'_E) \quad (2.15)$$

但 1984 年 Raithby[5] 提出 SIMPLEC (SIMPLE Consistent)，他認為 Partankar 在式 (2.14) 中大膽略去  $\sum a_{nb} u'_{nb}$  項之結果，誇大了  $p'$  對  $u'$  的影響，並不適當，

因此他主張將式 (2.14) 等號兩邊各減  $\sum a_{nb} u'_e$ ：

$$(a_e - \sum a_{nb}) u'_e = \sum a_{nb} (u'_{nb} - u'_e) + A_p (p'_p - p'_E) \quad (2.16)$$

認為  $u'_{nb}$  及  $u'_e$  隻數階應較一致，故將  $\sum a_{nb} (u'_{nb} - u'_e)$  略去較為合理。此即

SIMPLEC 與 SIMPLE 不同處：

$$\text{於是, } u'_e = \frac{A_p}{a_e - \sum a_{nb}} (p'_p - p'_E) = d_e (p'_p - p'_E) \quad (2.17)$$

若對徑向及切向之動量方程式作相同處理，可得

$$V'_n = \frac{A_p}{a_n - \sum a_{nb}} (p'_p - p'_N) = d_n (p'_p - p'_N) \quad (2.18)$$

$$W'_t = \frac{A_p}{a_t - \sum a_{nb}} (p'_p - p'_T) = d_t (p'_p - p'_T) \quad (2.19)$$

將式 (2.17)、(2.18)、(2.19) 代入連續方程式：

$$(\rho u A)_e - (\rho u A)_w + (\rho v A)_n - (\rho v A)_s + (\rho w A)_t - (\rho w A)_b = 0 \quad (2.20)$$

可得壓力修正方程式：

$$a_p p'_p = \sum a_{nb} p'_{nb} + b \quad (2.21)$$

其中  $a_E = \rho_e d_e A_e$

$$a_w = \rho_w d_w A_w$$

$$a_N = \rho_n d_n A_n$$

$$a_s = \rho_s d_s A_s$$

$$a_T = \rho_t d_t A_t$$

$$a_B = \rho_b d_b A_b$$

$$b = -(\rho_e u_e^* A_e) + (\rho_w u_w^* A_w) - (\rho_n v_n^* A_n) + (\rho_s v_s^* A_s) - (\rho_t w_t^* A_t) + (\rho_b w_b^* A_b)$$

$$(2.22)$$

若  $u_e^*$  等速度以為真實之速度，則應可滿足連續方程式， $b$  之值即為零。反之，則  $b$  不為零，故  $b$  稱為殘餘質量源 (residue mass source)， $b$  值之大小可視為程式是否收斂之標準。

SIMPLEC 之流程如下：

- (1) 猜  $P^*$
- (2) 由 (2.17) (2.18) (2.19) 三式求出  $u^*$ ， $v^*$ ， $w^*$
- (3) 用 (2.22) 式，檢查是否已達收斂標準。  
若已達收斂標準，則解得答案，程式停止。  
若未達收斂標準，則繼續執行。
- (4) 由 (2.21) 式解  $P'$
- (5) 修正  $p$ ， $u$ ， $v$ ， $w$ ，再回 (2) 作疊代。

由於本研究之問題屬暫態，故需設定  $\Delta T$ ，在本研究中， $\Delta T$  之值設為 0.001sec。

### 3. 結果與討論

#### 3.1 事例分析(一)：90 度彎管圓周向破裂模式

圖 3.1 所示為事例分析(一)：90 度彎管之尺寸圖。圖 3.2 則為於圓周向破裂之位置圖。起始時(未發生破裂)，流場之壓力約為 2000Kpa。

圖 3.3 所示為  $t=0.009\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況。在此時刻，管壁尚未發生破裂，故流體之流動方向皆平行於管壁，速度大約為 553m/s。圖 3.4 為  $t=0.013\text{sec}$  時之流體流動情況。由於此時已發生管壁破裂(管壁係假設在  $t=0.01\text{sec}$  時破裂)，由圖中可清楚發現，在破裂處流體向外噴出之情況。由於，管內原為 2000Kpa 之高壓，而破裂處之環境僅為 100Kpa 之大氣條件，故流體因壓差而向外噴出之情況，十分明顯。噴出流體之最大速度，於此時可達 1600m/s，約為未發生破裂前之 3 倍。此外，由於在破裂的瞬間，破裂處附近之壓力驟降，除使破裂處上游之流體速度加快外，在破裂處下游之流體亦於此瞬間被低壓牽引，發生瞬間流體逆流之現象。在此一短暫時刻，管內流體於破裂處下游區域之流速甚低。這樣的情況，很快的被上游不斷加速的流體所改變。圖 3.5 顯示在  $t=0.03\text{sec}$  時之流場情況，由圖中可發現，破裂處下游之逆流現象，已不復存在。此時，流體噴出之方向，已不似剛發生破裂時紊亂，而變成較為一致。破裂處上游流體與破裂處流體噴出之速度，於此時皆已加速至約 2200m/s。圖 3.6 及圖 3.7 所示為  $t=0.06\text{sec}$  與  $t=3.0\text{sec}$  時刻下之流動情況，自圖中可見，流體仍不斷自破裂處噴出，且噴出之速度逐漸上升。而管內流體之流速，於此時刻亦仍在上升階段。

為更清晰了解管內流體速度之變化情況，圖 3.8-3.12 顯示在管內對稱面( $x=0$  平面)上，於不同時刻下流速之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.8)，由於破裂尚未發生，故流場之速度分佈，為典型之彎管流動，最大之流速，發生在轉彎處之內側，此係因彎管曲率效應所造成之結果。在  $t=0.013\text{sec}$  時(圖 3.8)，為破裂發生不久，流體之高速區，可見於轉彎處之內側，以及發生破裂之角落。此圖亦再次呈

現出破裂處上游流體加速，而破裂處下游流體於此瞬間減速之結果。在  $t=0.013\text{sec}$  以後(圖 3.9-3.12)之流場，管內之流體速度，逐漸加大，到  $t=3.0\text{sec}$  時，最大流速約可達  $7500\text{m/s}$ 。

圖 3.13-17 顯示管內對稱面上，於不同時刻下壓力之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.13)，由於破裂尚未發生，故管內流體之壓力，呈現沿下游逐步降低之分佈。在  $t=0.013\text{sec}$  時(圖 3.14)，為破裂發生不久後之情況。由於因破裂造成之瞬間低壓，使破裂處上游之流體迅速加速，破裂處下游之流體亦因低壓之牽引，使流場發生逆流；自破裂處上游加速流向下游之流體，與破裂處下游逆流而上之流體，在破裂處附近產生激烈衝擊，遂於該處形成一局部高壓區。在  $t=0.013\text{sec}$  後，逆流因破裂處上游之快速流體帶動，迅速的消失，而使先前局部之高壓區亦逐漸消失。但因流體不斷加速，自破裂處上游加速流向彎道之流體，以高速衝擊彎道，遂於彎道之外緣型成局部高壓區。此外，另可由圖中發現，由於在彎管彎道內側，流體速度較高，遂在該區域形成一相對低壓區。

圖 3.18-20 所示為 90 度彎管管路於破裂前後，管路於  $x, y, z$  三方向之受力情況。由三圖之比較，可知於本事例中  $F_x$  最小， $F_y$  與  $F_z$  則相當。自圖中可看出，當管路破裂後，由於流體自破裂處迅速噴出，使  $F_y$  與  $F_z$  迅速加大，至  $0.1\text{sec}$  時， $F_y$  與  $F_z$  便達到一穩定值，約為  $4.2 \times 10^6 \text{N}$ 。

### 3.2 事例分析(二)：90 度彎管軸向破裂模式

其次探討事例分析(二)：90 度彎管於軸向發生斷裂之情況。起始時(未發生斷裂)，流場之壓力亦約為  $2000\text{Kpa}$ 。斷裂係假設發生於彎管之出口端，於  $t=0.01\text{sec}$  時，該處發生斷裂，邊界條件瞬間變為大氣壓力。

圖 3.21-25 顯示管內對稱面上，於不同時刻下之速度向量圖。圖 3.21 所示為  $t=0.009\text{sec}$  時之流體流動之情況。在此時刻，管壁尚未發生破裂，故流體之流動尚未發生加速之情況。圖 3.22 為  $t=0.013\text{sec}$  時之流體流動情況。由於此時已發

生管路斷裂(管路係假設在  $t=0.01\text{sec}$  時斷裂)，由圖中可清楚發現，流體開始明顯加速。由於管內原為  $2000\text{Kpa}$  之高壓，而斷裂處之環境僅為  $100\text{Kpa}$  之大氣條件，故流體因壓差而向外噴出之情況，十分明顯。 $t=0.013\text{sec}$  以後(圖 3.23-25)，流體仍不斷自斷裂處噴出，且噴出之速度逐漸上升。而管內流體之流速，於此時刻亦仍在上升階段。

圖 3.25-3.30 顯示在管內對稱面( $x=0$  平面)上，於不同時刻下流速之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.25)，由於斷裂尚未發生，故流場之速度分佈，仍為典型之彎管流動，最大之流速，發生在轉彎處之內側，此係因彎管曲率效應所造成之結果。在  $t=0.013\text{sec}$  以後(圖 3.26-3.30)，對稱面上流速之分佈型態十分相似，流體之最大速度發生於轉彎處之內側，管內之流體速度，逐漸加大，到  $t=3.0\text{sec}$  時，最大流速約可達  $8700\text{m/s}$ 。

圖 3.31-3.35 顯示管內對稱面上，於不同時刻下壓力之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.31)，由於斷裂尚未發生，故管內流體之壓力，呈現沿下游逐步降低之分佈。在  $t=0.013\text{sec}$  時(圖 3.14)，為斷裂發生不久後之情況。由於因斷裂造成出口之瞬間低壓，使斷裂處上游之流體迅速加速，亦造成管內整體壓力下降。在  $t=0.013\text{sec}$  後，因流體不斷加速，自上游加速流向彎道之流體，以高速衝擊彎道，遂於彎道之外緣型成局部高壓區，而逐漸使管內壓力又再升高。此外，由於在彎管彎道內側，流體速度較高，可由圖中發現，在該區域仍形成一相對之低壓區。

圖 3.36-3.38 所示為  $90$  度彎管管路於發生軸向斷裂前後，管路於  $x, y, z$  三方向之受力情況。由三圖之比較可知，於本事例中  $F_x$  仍最小， $F_y$  與  $F_z$  則相當。自圖中可看出，當管路斷裂後，由於流體自斷裂處迅速噴出，使  $F_y$  與  $F_z$  迅速加大，至  $0.1\text{sec}$  時， $F_y$  與  $F_z$  便達到一穩定值，約為  $6.0 \times 10^6 \text{N}$ ，此值較前一事例，發生周向破裂之管路受力之值略大。

### 3.3 事例分析(三)：120 度彎管圓周向破裂模式

圖 3.39 所示為事例分析(三)：120 度彎管之尺寸圖。圖 3.40 則為於圓周向破裂之位置圖。起始時(未發生破裂)，流場之壓力約為 2000Kpa。

120 度彎管之流場情況，與 90 度彎管之情況十分類似。僅數值有所差異。圖 3.41 所示為  $t=0.009\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況。在此時刻，管壁尚未發生破裂，故流體之流動方向皆平行於管壁，速度大約為 553m/s，與 90 度彎管之情況相同。圖 3.42 為  $t=0.013\text{sec}$  時之流體流動情況。由於此時已發生管壁破裂(管壁係假設在  $t=0.01\text{sec}$  時破裂)，由圖中可清楚發現，在破裂處流體向外噴出之情況。由於，管內原為 2000Kpa 之高壓，而破裂處之環境僅為 100Kpa 之大氣條件，故流體因壓差而向外噴出之情況，十分明顯。噴出流體之最大速度，於此時亦可達 1600m/s，約為未發生破裂前之 3 倍。此外，由於在破裂的瞬間，破裂處附近之壓力驟降，除使破裂處上游之流體速度加快外，在破裂處下游之流體亦於此瞬間被低壓牽引，發生瞬間流體逆流之現象。在此一短暫時刻，管內流體於破裂處下游區域之流速甚低。這樣的情況，很快的被上游不斷加速的流體所改變。圖 3.43 顯示在  $t=0.03\text{sec}$  時之流場情況，由圖中可發現，破裂處下游之逆流現象，已不復存在。此時，流體噴出之方向，已不似剛發生破裂時紊亂，而變成較為一致。破裂處上游流體與破裂處流體噴出之速度，於此時皆已加速至約 2700m/s。圖 3.44 及圖 3.45 所示為  $t=0.06\text{sec}$  與  $t=3.0\text{sec}$  時刻下之流動情況，自圖中可見，流體仍不斷自破裂處噴出，且噴出之速度逐漸上升。而管內流體之流速，於此時刻亦仍在上升階段。

圖 3.46-3.50 顯示在管內對稱面( $x=0$  平面)上，於不同時刻下流速之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.46)，由於破裂尚未發生，故流場之速度分佈，為典型之彎管流動，最大之流速，發生在轉彎處之內側，此係因彎管曲率效應所造成之結果。在  $t=0.013\text{sec}$  時(圖 3.47)，為破裂發生不久，流體之高速區，可見於轉彎處之內側，以及發生破裂之角落。此圖亦再次呈現出破裂處上游流體加速，而破裂處下

游流體於此瞬間減速之結果。在  $t=0.013\text{sec}$  以後(圖 3.48-3.50)之流場，管內之流體速度，逐漸加大，到  $t=3.0\text{sec}$  時，最大流速約可達  $9500\text{m/s}$ 。

圖 3.51-3.55 顯示管內對稱面上，於不同時刻下壓力之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.51)，由於破裂尚未發生，故管內流體之壓力，呈現沿下游逐步降低之分佈。在  $t=0.013\text{sec}$  時(圖 3.52)，為破裂發生不久後之情況。由於因破裂造成之瞬間低壓，使破裂處上游之流體迅速加速，破裂處下游之流體亦因低壓之牽引，使流場發生逆流；自破裂處上游加速流向下游之流體，與破裂處下游逆流而上之流體，在破裂處附近產生激烈衝擊，遂於該處形成一局部高壓區。在  $t=0.013\text{sec}$  後，逆流因破裂處上游之快速流體帶動，迅速的消失，而使先前局部之高壓區亦逐漸消失。但因流體不斷加速，自破裂處上游加速流向彎道之流體，以高速衝擊彎道，遂於彎道之外緣型成局部高壓區。此外，另可由圖中發現，由於在彎管彎道內側，流體速度較高，遂在該區域形成一相對低壓區。

圖 3.56-3.58 所示為 120 度彎管管路於破裂前後，管路於  $x, y, z$  三方向之受力情況。由三圖之比較，可知於本事例中  $F_x$  最小， $F_y$  與  $F_z$  則相當，但  $F_y$  大於  $F_z$ 。自圖中可看出，當管路破裂後，由於流體自破裂處迅速噴出，使  $F_y$  與  $F_z$  迅速加大，至  $0.1\text{sec}$  時， $F_y$  與  $F_z$  便達到穩定， $F_y$  約為  $4.2 \times 10^6\text{N}$ ， $F_z$  則約為  $2.8 \times 10^6\text{N}$ 。

### 3.4 事例分析(四)：120 度彎管軸向破裂模式

其次探討事例分析(四)：120 度彎管於軸向發生斷裂之情況。起始時(未發生斷裂)，流場之壓力亦約為  $2000\text{Kpa}$ 。斷裂係假設發生於彎管之出口端，於  $t=0.01\text{sec}$  時，該處發生斷裂，邊界條件瞬間變為大氣壓力。

圖 3.59-3.63 顯示管內對稱面上及出口端，於不同時刻下之速度向量圖。圖 3.59 所示為  $t=0.009\text{sec}$  時之流體流動之情況。在此時刻，管壁尚未發生破裂，故流體之流動尚未發生加速之情況。圖 3.60 為  $t=0.013\text{sec}$  時之流體流動情況。由

於此時已發生管路斷裂(管路係假設在  $t=0.01\text{sec}$  時斷裂)，由圖中可清楚發現，流體開始明顯加速。由於管內原為  $2000\text{Kpa}$  之高壓，而斷裂處之環境僅為  $100\text{Kpa}$  之大氣條件，故流體因壓差而向外噴出之情況，十分明顯。 $t=0.013\text{sec}$  以後(圖 3.61-63)，流體仍不斷自斷裂處噴出，且噴出之速度逐漸上升。而管內流體之流速，於此時刻亦仍在上升階段。

圖 3.64-3.68 顯示在管內對稱面( $x=0$  平面)上，於不同時刻下流速之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.64)，由於斷裂尚未發生，故流場之速度分佈，仍為典型之彎管流動，最大之流速，發生在轉彎處之內側，此係因彎管曲率效應所造成之結果。在  $t=0.013\text{sec}$  以後(圖 3.65-3.68)，對稱面上流速之分佈型態十分相似，流體之最大速度發生於轉彎處之內側，管內之流體速度，逐漸加大，到  $t=3.0\text{sec}$  時，最大流速約可達  $12900\text{m/s}$ ，較  $90$  度彎管於相同之斷裂情況下為高。

圖 3.69-3.73 顯示管內對稱面上，於不同時刻下壓力之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.69)，由於斷裂尚未發生，故管內流體之壓力，呈現沿下游逐步降低之分佈。在  $t=0.013\text{sec}$  時(圖 3.14)，為斷裂發生不久後之情況。由於因斷裂造成出口之瞬間低壓，使斷裂處上游之流體迅速加速，亦造成管內整體壓力下降。在  $t=0.013\text{sec}$  後，因流體不斷加速，自上游加速流向彎道之流體，以高速衝擊彎道，遂於彎道之外緣型成局部高壓區，而逐漸使管內壓力又再升高。由於  $120$  度彎管最大流速，較  $90$  度彎管於相同之斷裂情況下為高，因此， $120$  度彎管內之最大壓力，亦較  $90$  度彎管於相同之斷裂情況下為高。此外，由於在彎管彎道內側，流體速度較高，可由圖中發現，在該區域仍形成一相對之低壓區。

圖 3.74-3.76 所示為  $120$  度彎管管路於發生軸向斷裂前後，管路於  $x, y, z$  三方向之受力情況。由三圖之比較可知，於本事例中  $F_x$  仍最小， $F_y$  與  $F_z$  則相當，但  $F_y$  較大。自圖中可看出，當管路斷裂後，由於流體自斷裂處迅速噴出，使  $F_y$  與  $F_z$  迅速加大，至  $0.1\text{sec}$  時， $F_y$  與  $F_z$  便達到一穩定值， $F_y$  約為  $9.9 \times 10^6\text{N}$ ， $F_z$  約為  $5.5 \times 10^6\text{N}$ ，此值較前一事例，發生周向破裂之管路受力之值略大。



### 3.5 事例分析(五)：180 度彎管圓周向破裂模式

圖 3.77 所示為事例分析(五)：120 度彎管之尺寸圖。圖 3.78 則為於圓周向破裂之位置圖。起始時(未發生破裂)，流場之壓力約為 2000Kpa。

圖 3.79 所示為  $t=0.009\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況。在此時刻，管壁尚未發生破裂，故流體之流動方向皆平行於管壁，速度大約為 333m/s，較 90 度及 120 度彎管之速度低。圖 3.80 為  $t=0.013\text{sec}$  時之流體流動情況。由於此時已發生管壁破裂(管壁係假設在  $t=0.01\text{sec}$  時破裂)，由圖中可清楚發現，在破裂處流體向外噴出之情況。由於，管內原為 2000Kpa 之高壓，而破裂處之環境僅為 100Kpa 之大氣條件，故流體因壓差而向外噴出之情況，十分明顯。噴出流體之最大速度，於此時亦可達 2000m/s，約為未發生破裂前之 6 倍。此外，由於在破裂的瞬間，破裂處附近之壓力驟降，除使破裂處上游之流體速度加快外，在破裂處下游之流體亦於此瞬間被低壓牽引，發生瞬間流體逆流之現象。在此一短暫時刻，管內流體於破裂處下游區域之流速甚低。這樣的情況，很快的被上游不斷加速的流體所改變。圖 3.81 顯示在  $t=0.03\text{sec}$  時之流場情況，由圖中可發現，破裂處下游之逆流現象，已不復存在。此時，流體噴出之方向，已不似剛發生破裂時紊亂，而變成較為一致。破裂處上游流體與破裂處流體噴出之速度，於此時皆已加速至約 2600m/s。圖 3.82 為  $t=0.06\text{sec}$  時刻下之流動情況，自圖中可見，流體仍不斷自破裂處噴出，且噴出之速度逐漸上升。而管內流體之流速，於此時刻亦仍在上升階段。

圖 3.83-3.86 顯示在管內對稱面( $x=0$  平面)上，於不同時刻下流速之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.83)，由於破裂尚未發生，故流場之速度分佈，為典型之彎管流動，最大之流速，發生在轉彎處之內側，此係因彎管曲率效應所造成之結果。在  $t=0.013\text{sec}$  時(圖 3.84)，為破裂發生不久，流體之高速區，可見於轉彎處之內側，以及發生破裂之角落。此圖亦再次呈現出破裂處上游流體加速，而破裂處下

游流體於此瞬間減速之結果。在  $t=0.013\text{sec}$  以後(圖 3.85-3.86)之流場，管內之流體速度，逐漸加大。

圖 3.87-3.90 顯示管內對稱面上，於不同時刻下壓力之分佈圖。在  $t=0.009\text{sec}$  時(圖 3.87)，由於破裂尚未發生，故管內流體之壓力，呈現沿下游逐步降低之分佈。在  $t=0.013\text{sec}$  時(圖 3.88)，為破裂發生不久後之情況。由於因破裂造成之瞬間低壓，使破裂處上游之流體迅速加速，破裂處下游之流體亦因低壓之牽引，使流場發生逆流；自破裂處上游加速流向下游之流體，與破裂處下游逆流而上之流體，在破裂處附近產生激烈衝擊，遂於該處形成一局部高壓區。在  $t=0.013\text{sec}$  後，逆流因破裂處上游之快速流體帶動，迅速的消失，而使先前局部之高壓區亦逐漸消失。但因流體不斷加速，自破裂處上游加速流向彎道之流體，以高速衝擊彎道，遂於彎道之外緣型成局部高壓區。此外，另可由圖中發現，由於在彎管彎道內側，流體速度較高，遂在該區域形成一相對低壓區。

圖 3.91-3.93 所示為 180 度彎管管路於破裂前後，管路於  $x, y, z$  三方向之受力情況。由三圖之比較，可知於本事例中  $F_x$  最小， $F_z$  最大。自圖中可看出，當管路破裂後，由於流體自破裂處迅速噴出，使  $F_y$  與  $F_z$  皆迅速加大，至  $0.04\text{sec}$  時， $F_y$  達到到最大值，約為  $190000\text{N}$ ； $F_z$  之值較  $F_x$  與  $F_y$  大很多，當  $t=0.1\text{sec}$  時， $F_z$  之值已達約  $4.8 \times 10^6\text{N}$ 。

### 3.6 事例分析(六)：180 度彎管軸向破裂模式

最後探討事例分析(六)：180 度彎管於軸向發生斷裂之情況。起始時(未發生斷裂)，流場之壓力亦約為  $2000\text{Kpa}$ 。斷裂係假設發生於彎管之出口端，於  $t=0.01\text{sec}$  時，該處發生斷裂，邊界條件瞬間變為大氣壓力。

圖 3.94-3.97 顯示管內對稱面上及出口端，於不同時刻下之速度向量圖。圖 3.94 所示為  $t=0.009\text{sec}$  時之流體流動之情況。在此時刻，管壁尚未發生破裂，故流體之流動尚未發生加速之情況。圖 3.95 為  $t=0.013\text{sec}$  時之流體流動情況。由於此時已發生管路斷裂(管路係假設在  $t=0.01\text{sec}$  時斷裂)，由圖中可清楚發現，流

體開始明顯加速。由於管內原為 2000Kpa 之高壓，而斷裂處之環境僅為 100Kpa 之大氣條件，故流體因壓差而向外噴出之情況，十分明顯。t=0.013sec 以後(圖 3.961-97)，流體仍不斷自斷裂處噴出，且噴出之速度逐漸上升。而管內流體之流速，於此時刻亦仍在上升階段。

圖 3.98-3.101 顯示在管內對稱面(x=0 平面)上，於不同時刻下流速之分佈圖。在 t=0.009sec 時(圖 3.98)，由於斷裂尚未發生，故流場之速度分佈，仍為典型之彎管流動，最大之流速，發生在轉彎處之內側，此係因彎管曲率效應所造成之結果。在 t=0.013sec 以後(圖 3.99-3.101)，對稱面上流速之分佈型態十分相似，流體之最大速度發生於轉彎處之內側，管內之流體速度，逐漸加大。

圖 3.102-3.105 顯示管內對稱面上，於不同時刻下壓力之分佈圖。在 t=0.009sec 時(圖 3.102)，由於斷裂尚未發生，故管內流體之壓力，呈現沿下游逐步降低之分佈。在 t=0.013sec 時(圖 3.103)，為斷裂發生不久後之情況。由於因斷裂造成出口之瞬間低壓，使斷裂處上游之流體迅速加速，亦造成管內整體壓力下降。在 t=0.013sec 後，因流體不斷加速，自上游加速流向彎道之流體，以高速衝擊彎道，遂於彎道之外緣型成局部高壓區，而逐漸使管內壓力又再升高。此外，由於在彎管彎道內側，流體速度較高，可由圖中發現，在該區域仍形成一相對之低壓區。

圖 3.106-3.108 所示為 180 度彎管管路於發生軸向斷裂前後，管路於 x, y, z 三方向之受力情況。由三圖之比較可知，於本事例中  $F_x$  仍最小， $F_z$  最大。自圖中可看出，當管路斷裂後，由於流體自斷裂處迅速噴出，使  $F_z$  迅速加大，至 0.1sec 時， $F_z$  已達到一穩定值，約為  $6.3 \times 10^6 \text{N}$ ，此值較前一事例，發生周向破裂之管路受力之值略大。

## 4. 結論

本研究已成功的針對管線可能斷管處，利用流體力學軟體 Star CD 建立完整之計算分析模式，除可針對管路發生破裂或斷裂前後之流場特性，如速度分佈及壓力變化等，進行動態分析外，亦可經由流體之動量變化，進行沖放力之分析，所得之數據可進一步作為管路甩動的分析依據。由於管路發生破裂或斷裂前後之流場特性，與管線之操作條件有密切相關；針對特定操作條件、管線位置，甚至特定破裂情況之分析需求，皆可經由本計畫完成之分析模式，執行計算，進而獲得相關數據，以進行進一步之分析。

## 參考文獻

1. Modification of General Design Criterion 4 Requirements for Protection Against Dynamic Effects of Postulated Pipe Rupture, Federal Register, Volume 52, No. 207, Rules and Regulations, Pages 41288 to 41295, October 27, 1987.
2. RELAP 3, A Computer Program for Reactor Blowdown Analysis, IN-1321, issued June 1970, Reactor Technology TID-4500.
3. Computational Fluid Dynamics Software, STAR-CD, Version 3.2, CD adapco Group, 2004.
4. Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, New York, 1980.
5. Raithby, G. D., Enhancement of the SIMPLE method for Prediction Incompressible Fluid Flows,” Numerical Heat Transfer, Vol. 7, 1984.

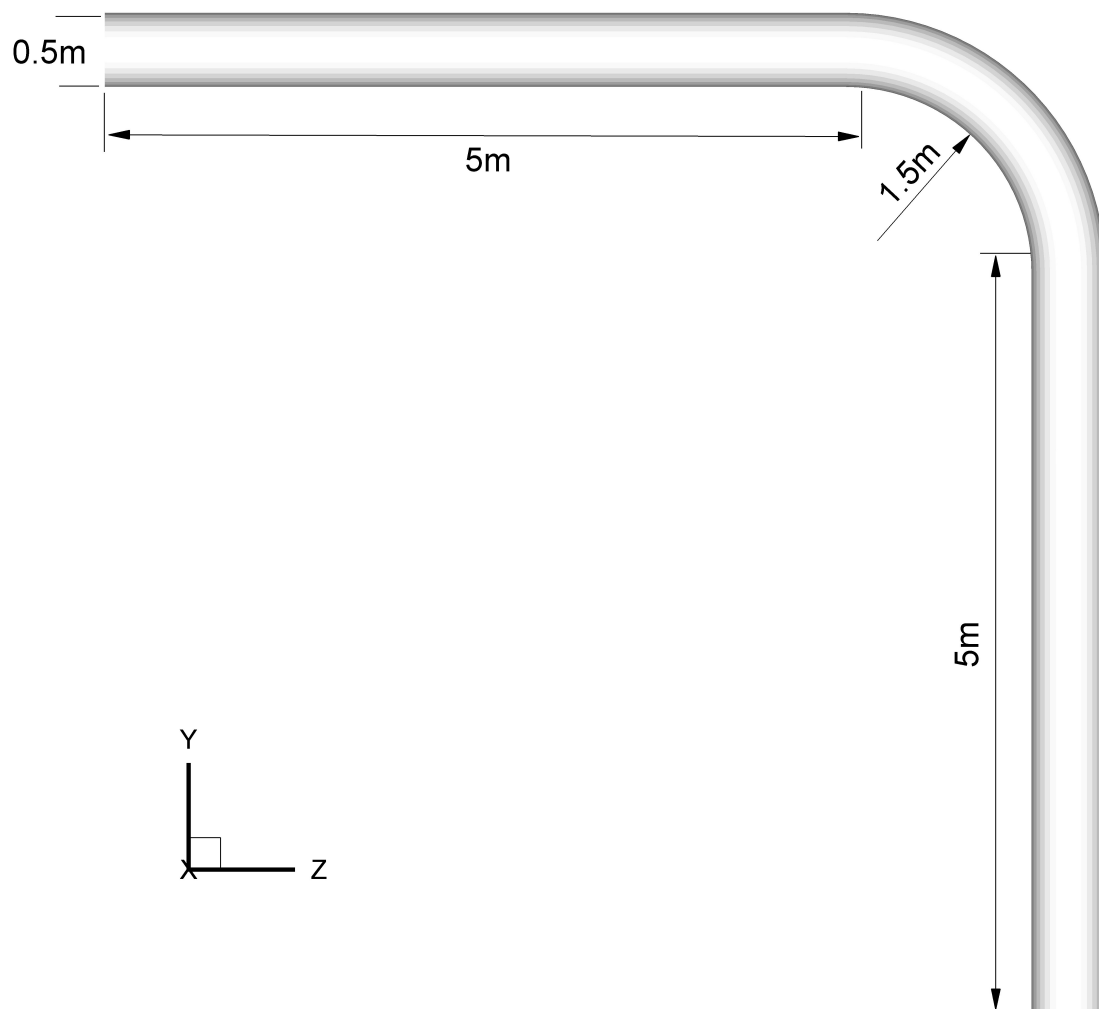


圖 3.1 90 度彎管之尺寸圖

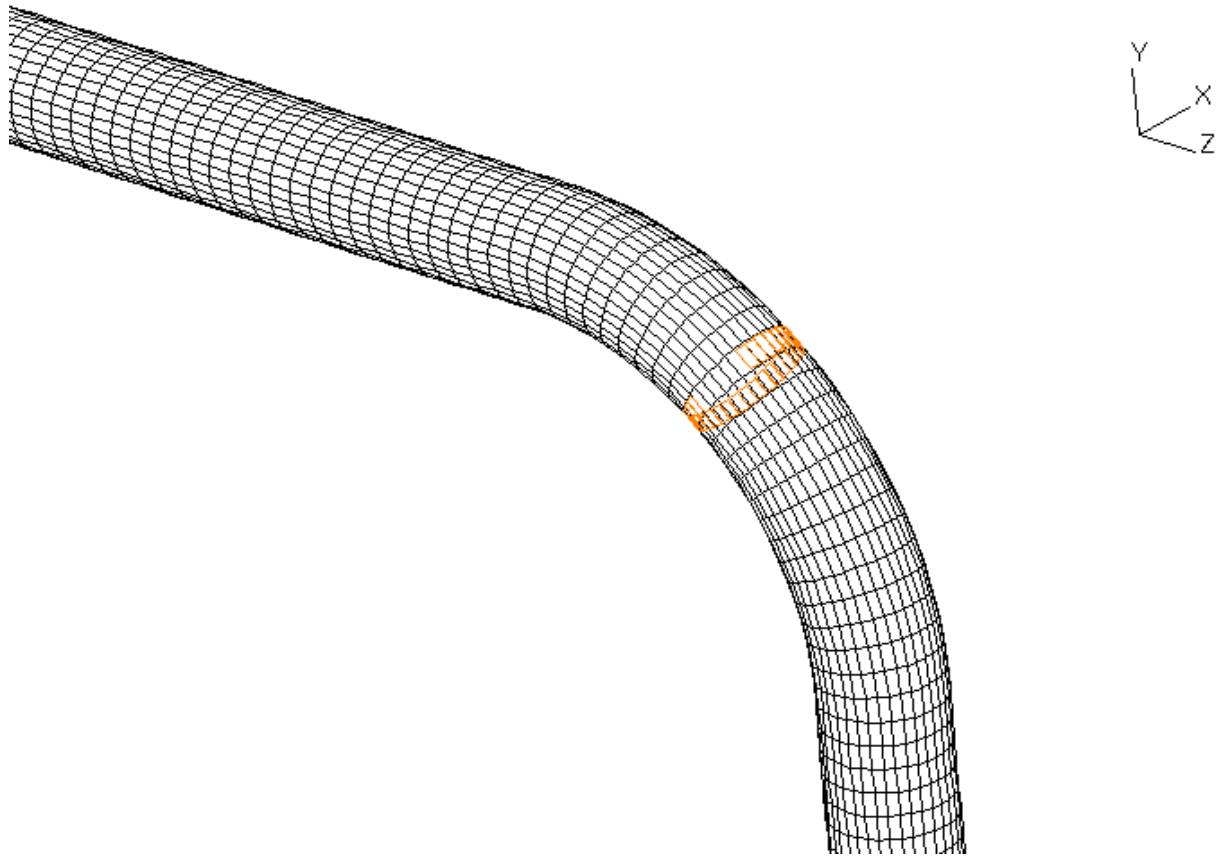
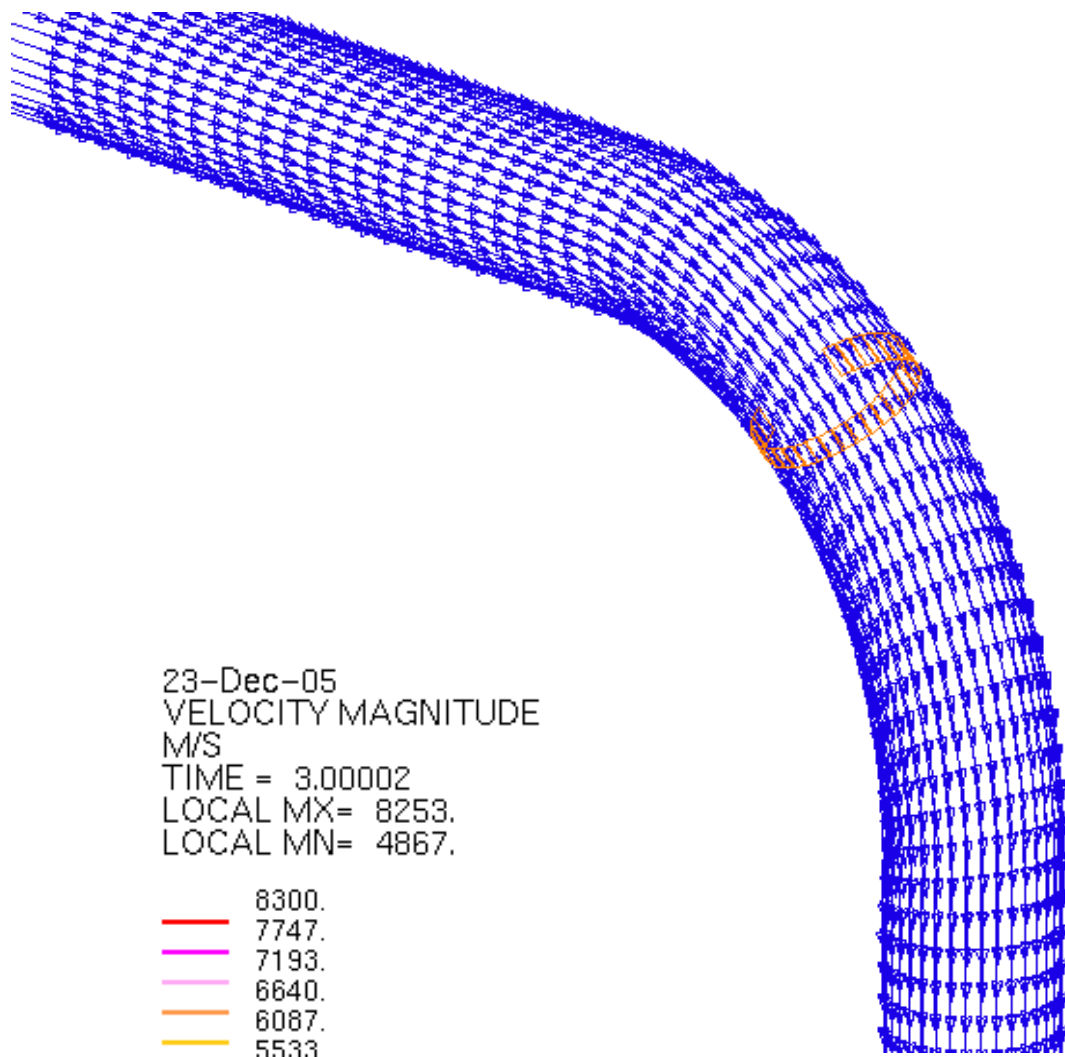


圖 3.2 90 度彎管圓周向破裂之位置圖



23-Dec-05  
 VELOCITY MAGNITUDE  
 M/S  
 TIME = 3.00002  
 LOCAL MX= 8253.  
 LOCAL MN= 4867.

- 8300.
- 7747.
- 7193.
- 6640.
- 6087.
- 5533.
- 4980.
- 4427.
- 3873.
- 3320.
- 2767.
- 2213.
- 1660.
- 1107.
- 553.3
- 0.0000

圖 3.3  $t=0.009\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (90 度彎管圓周向破裂)



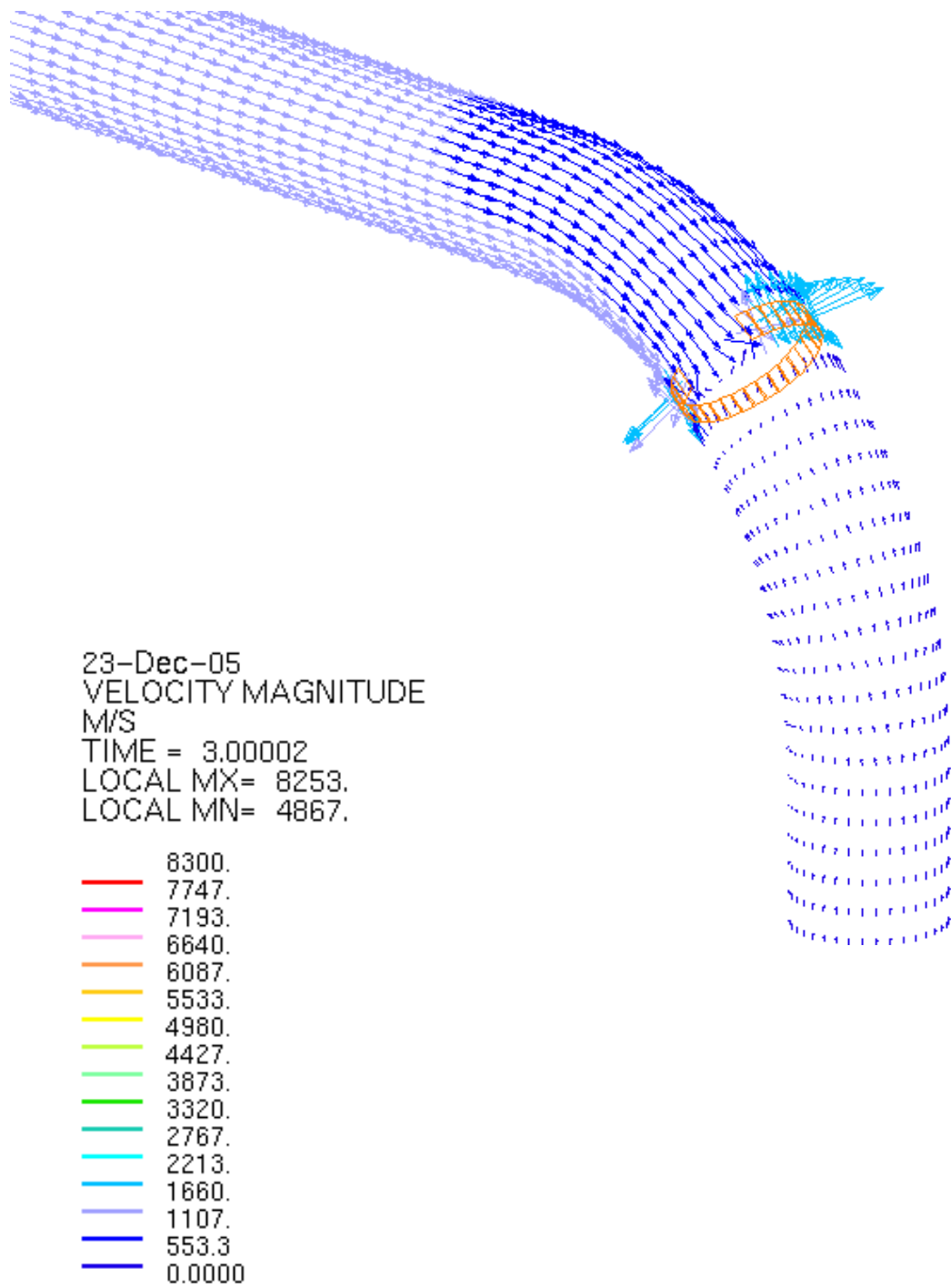


圖 3.4  $t=0.013\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (90 度彎管圓周向破裂)

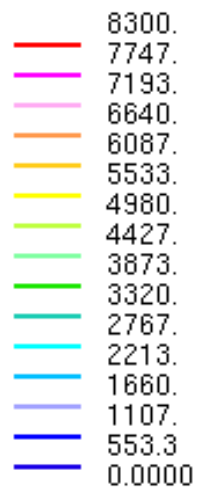
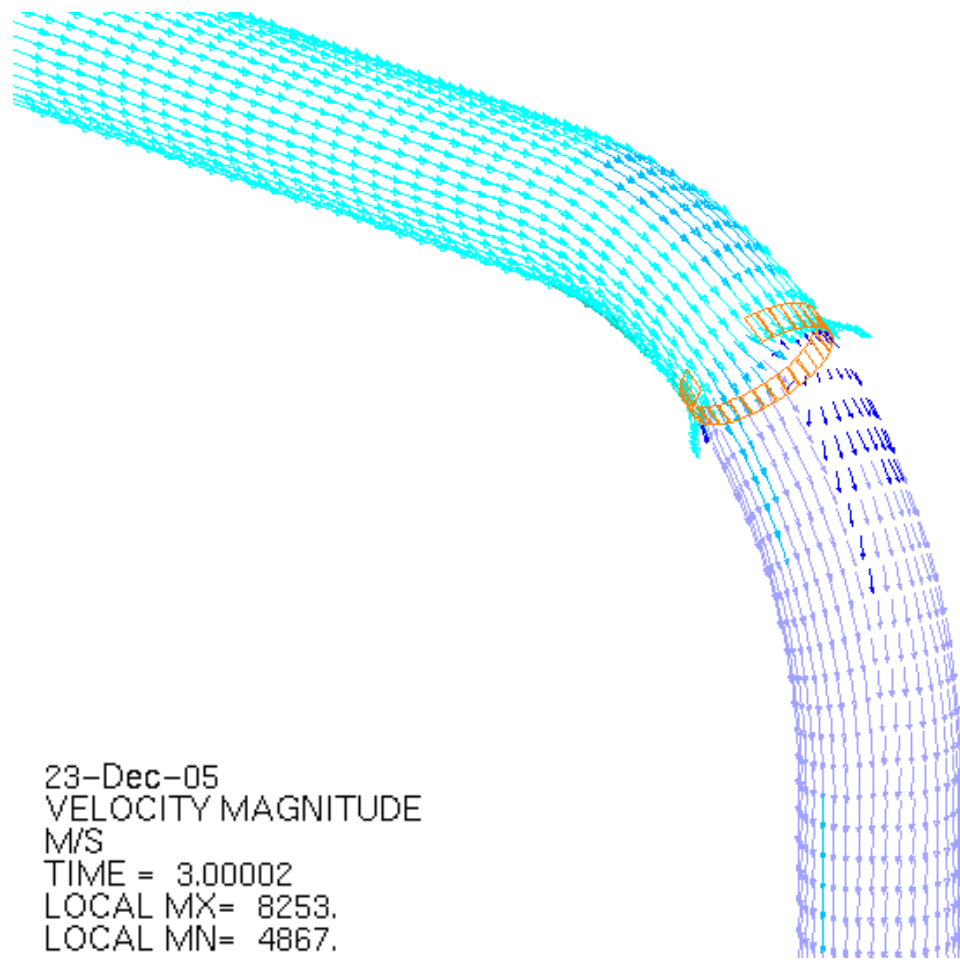
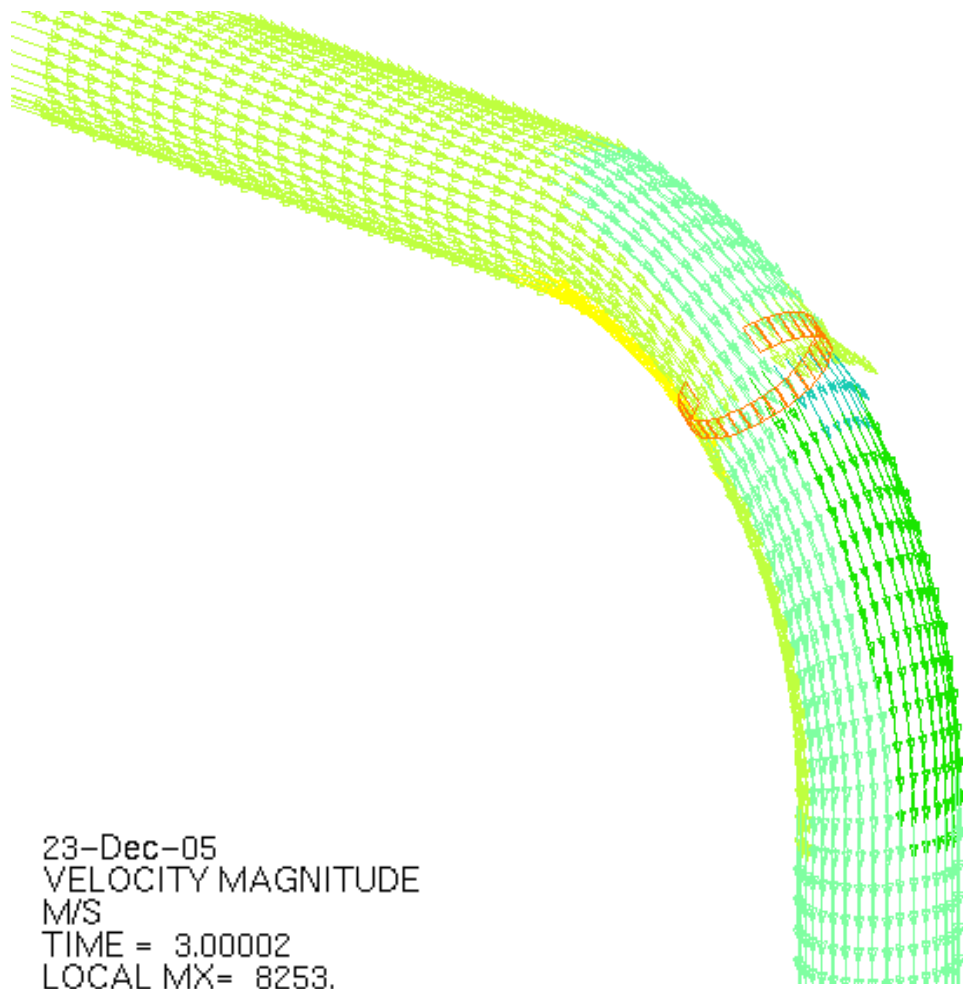


圖 3.5  $t=0.03\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (90 度彎管圓周向破裂)



23-Dec-05  
 VELOCITY MAGNITUDE  
 M/S  
 TIME = 3.00002  
 LOCAL MX= 8253.  
 LOCAL MN= 4867.

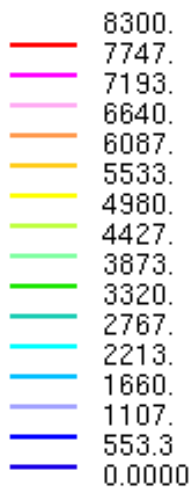
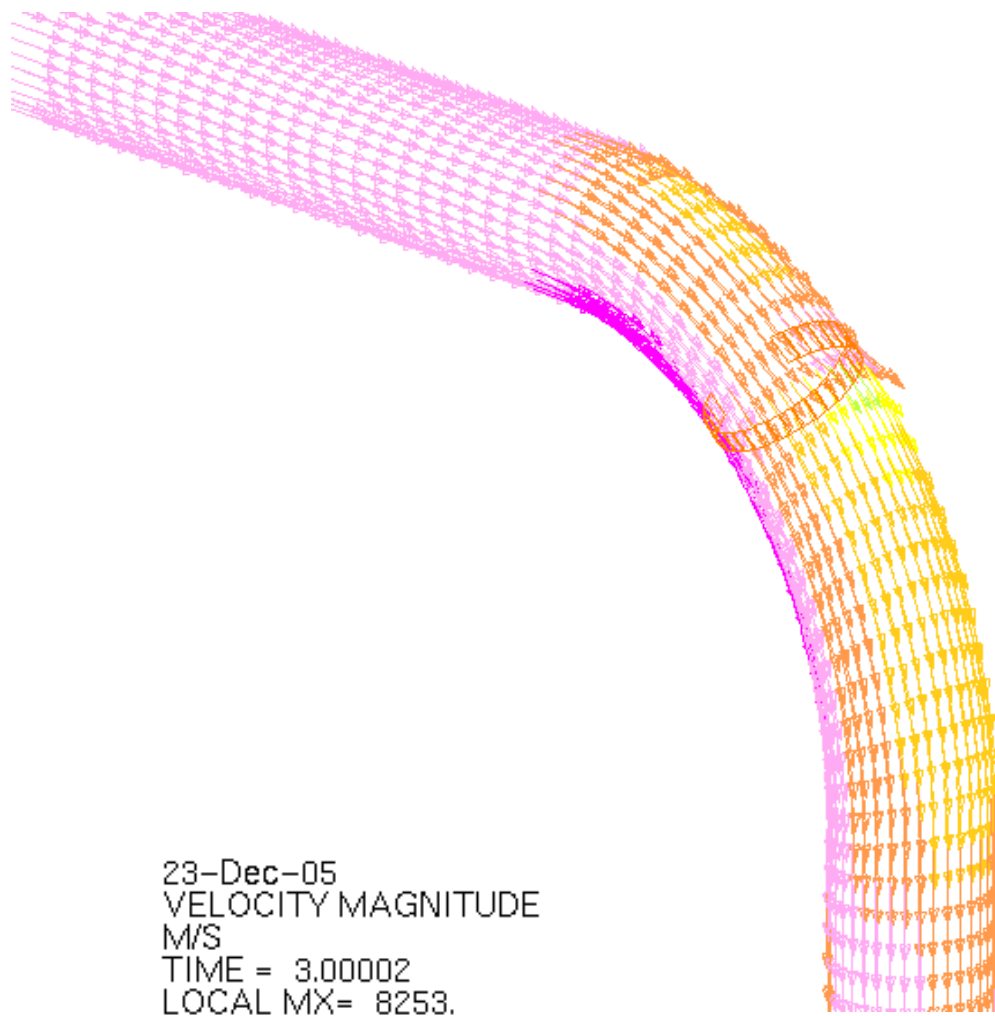


圖 3.6  $t=0.06\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (90 度彎管圓周向破裂)



23-Dec-05  
 VELOCITY MAGNITUDE  
 M/S  
 TIME = 3.00002  
 LOCAL MX= 8253.  
 LOCAL MN= 4867.

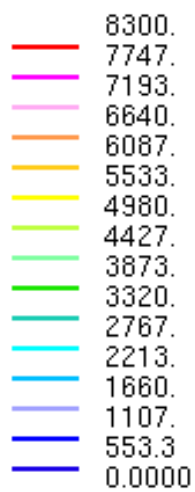


圖 3.7  $t=3.0\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (90 度彎管圓周向破裂)

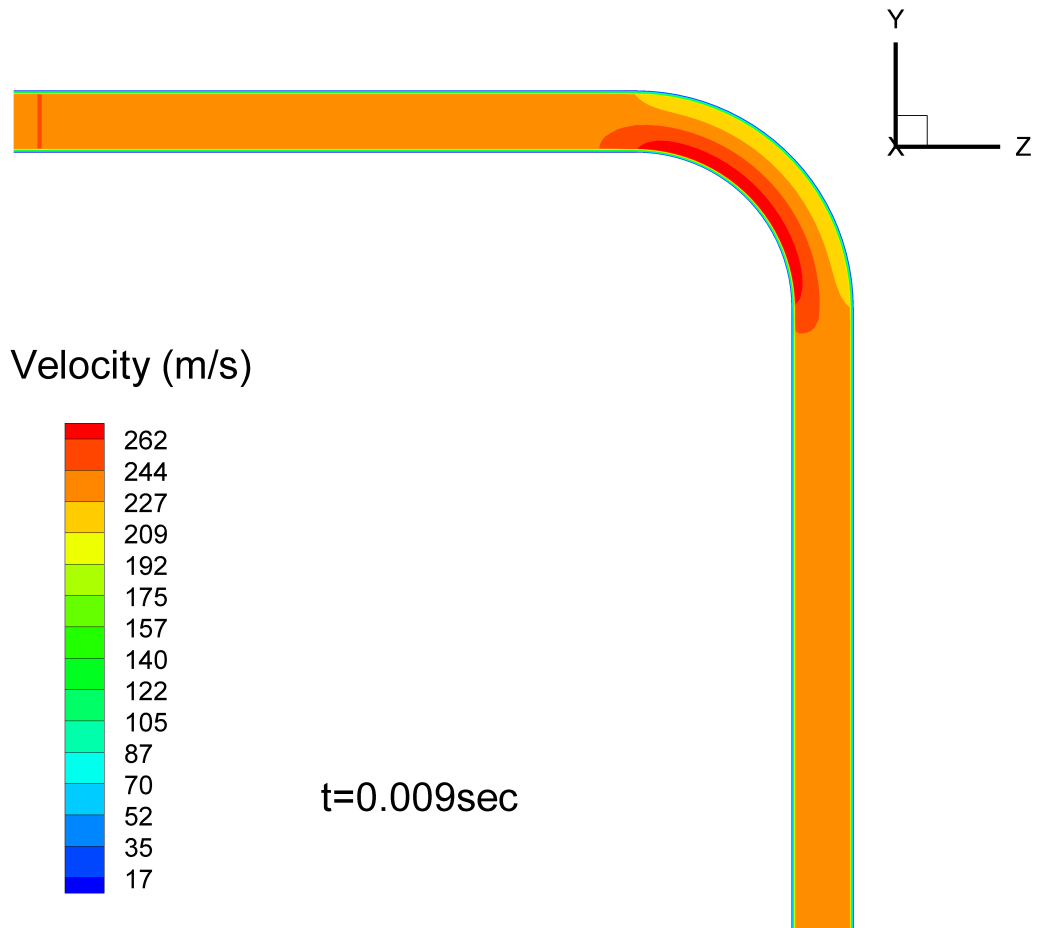


圖 3.8  $t=0.009\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

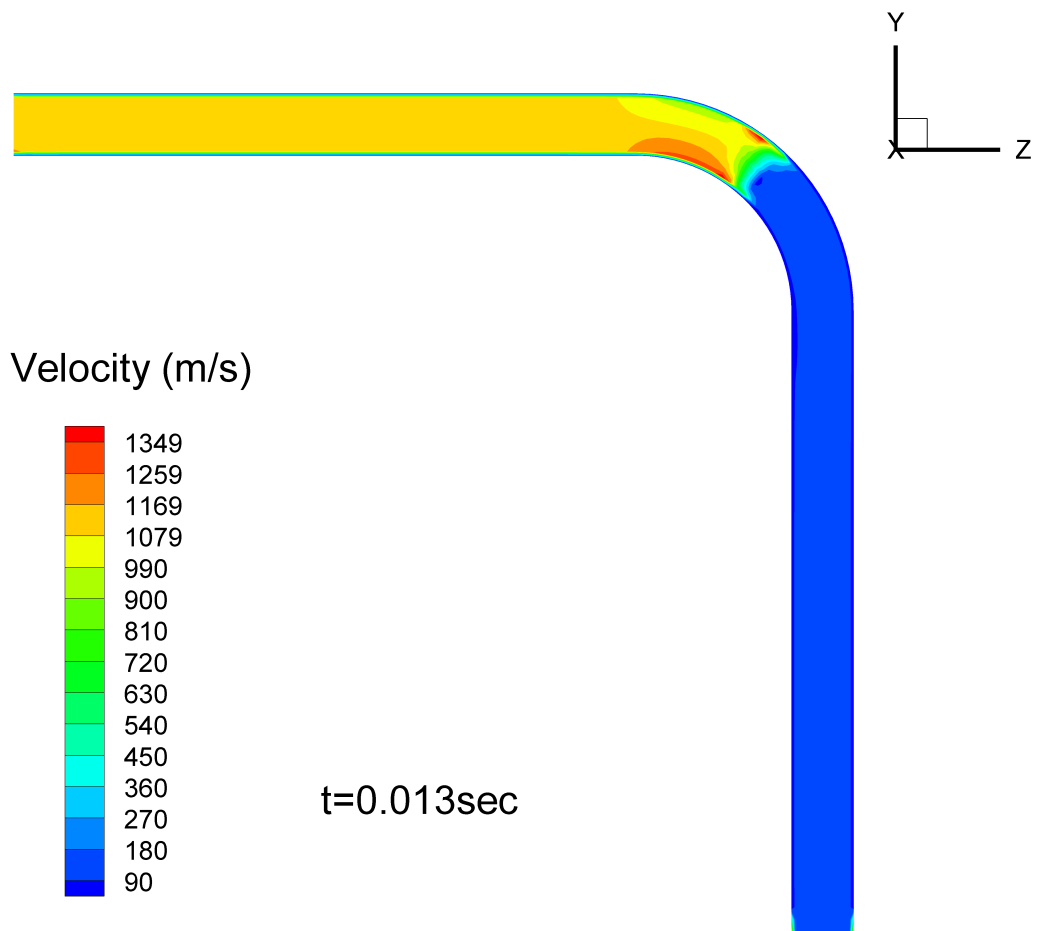


圖 3.9 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

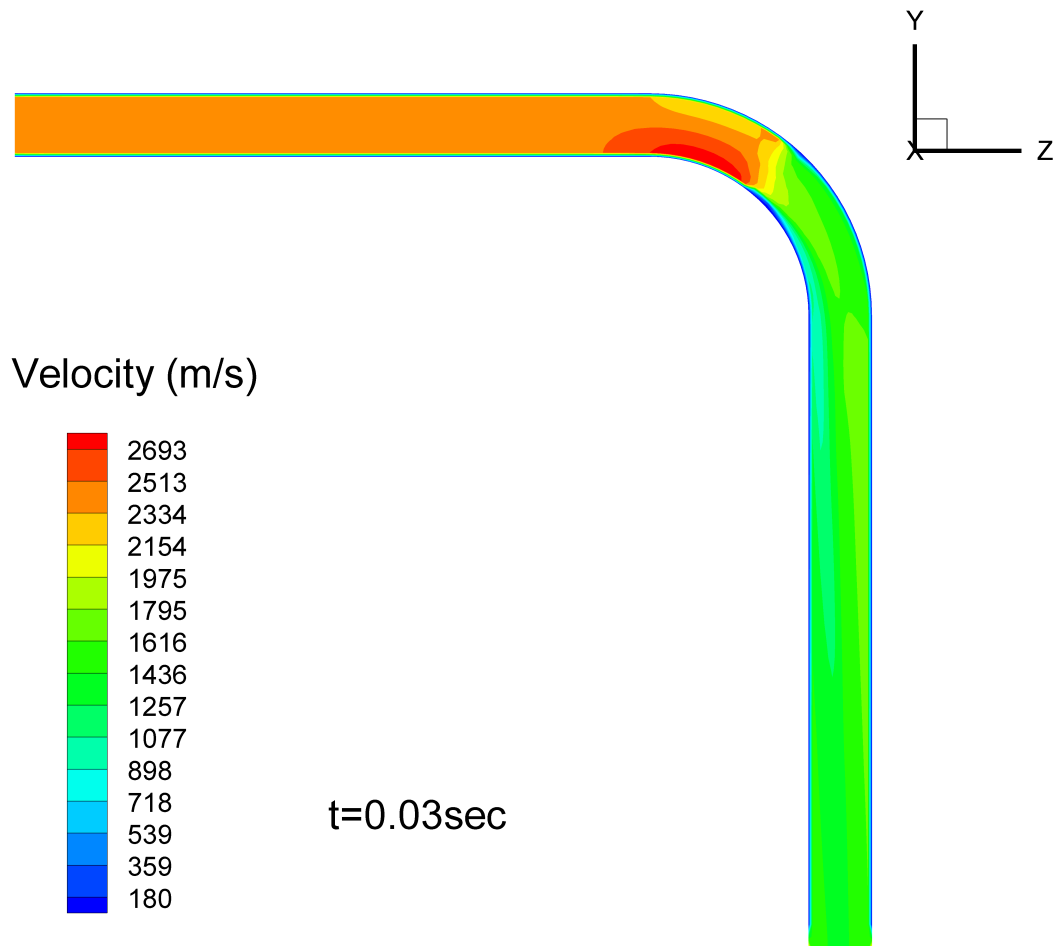


圖 3.10 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

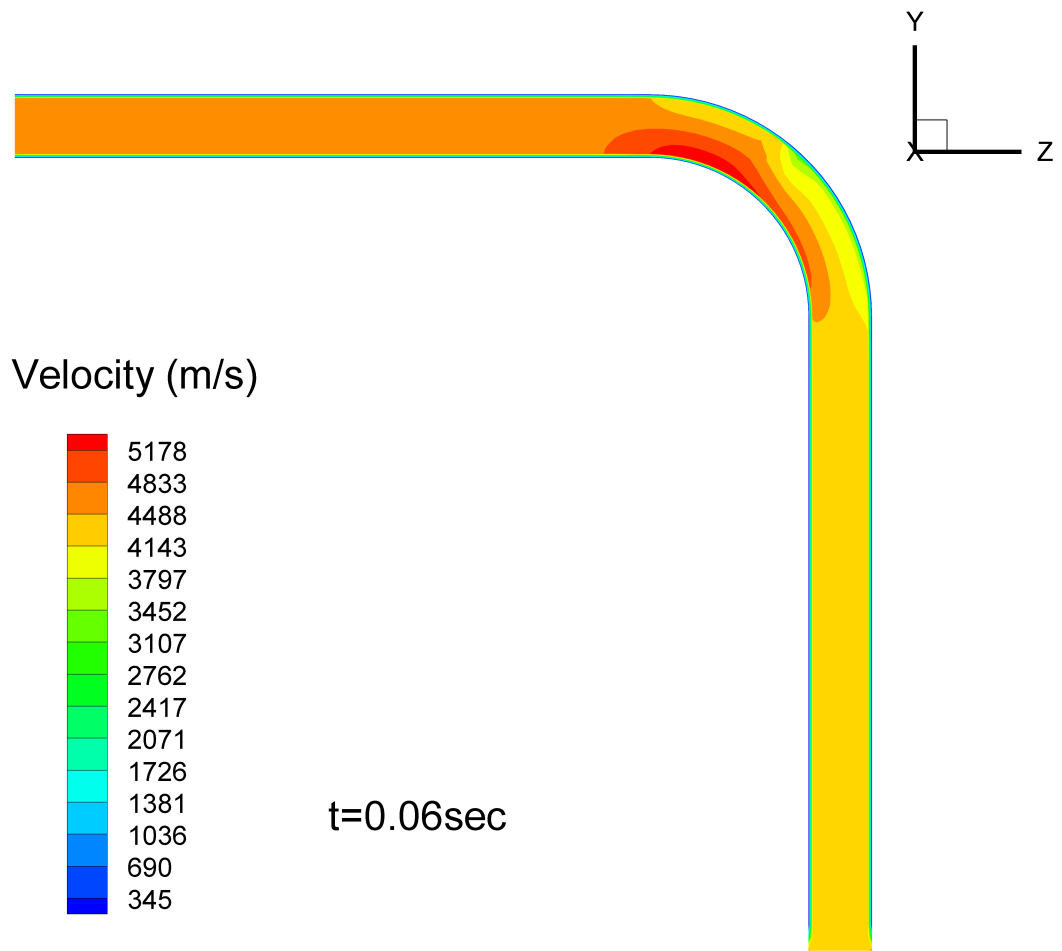


圖 3.11  $t=0.06\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)



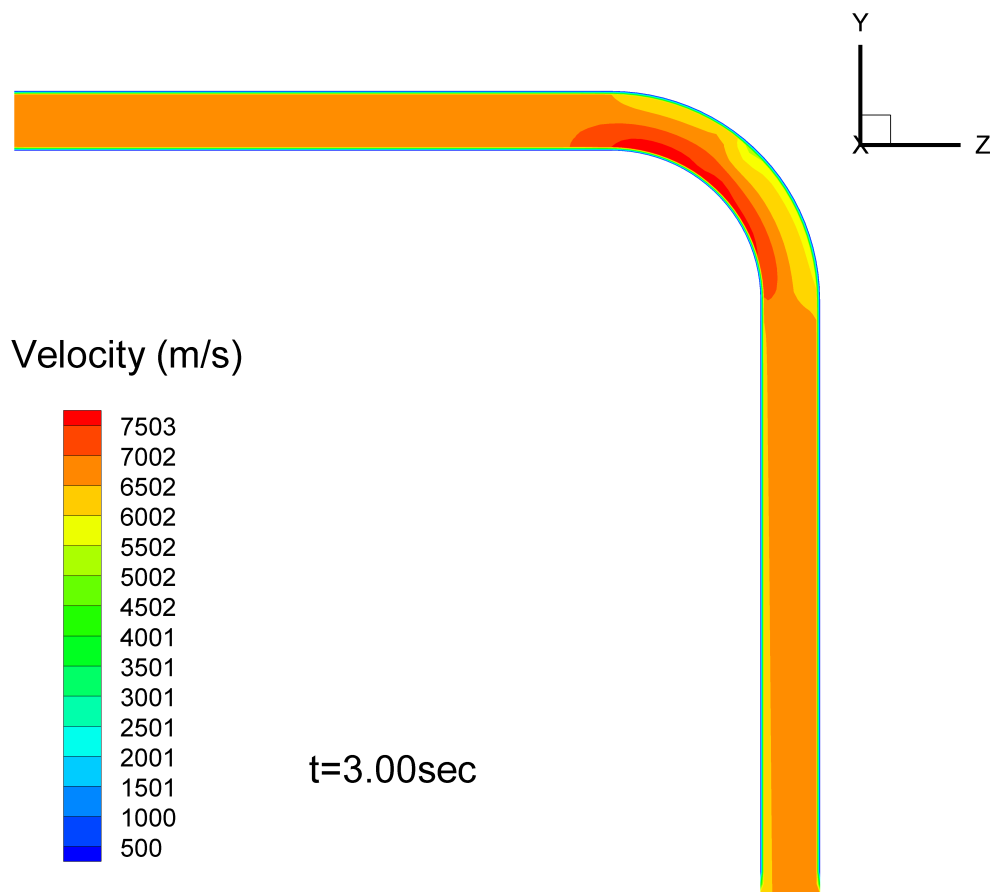


圖 3.12 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

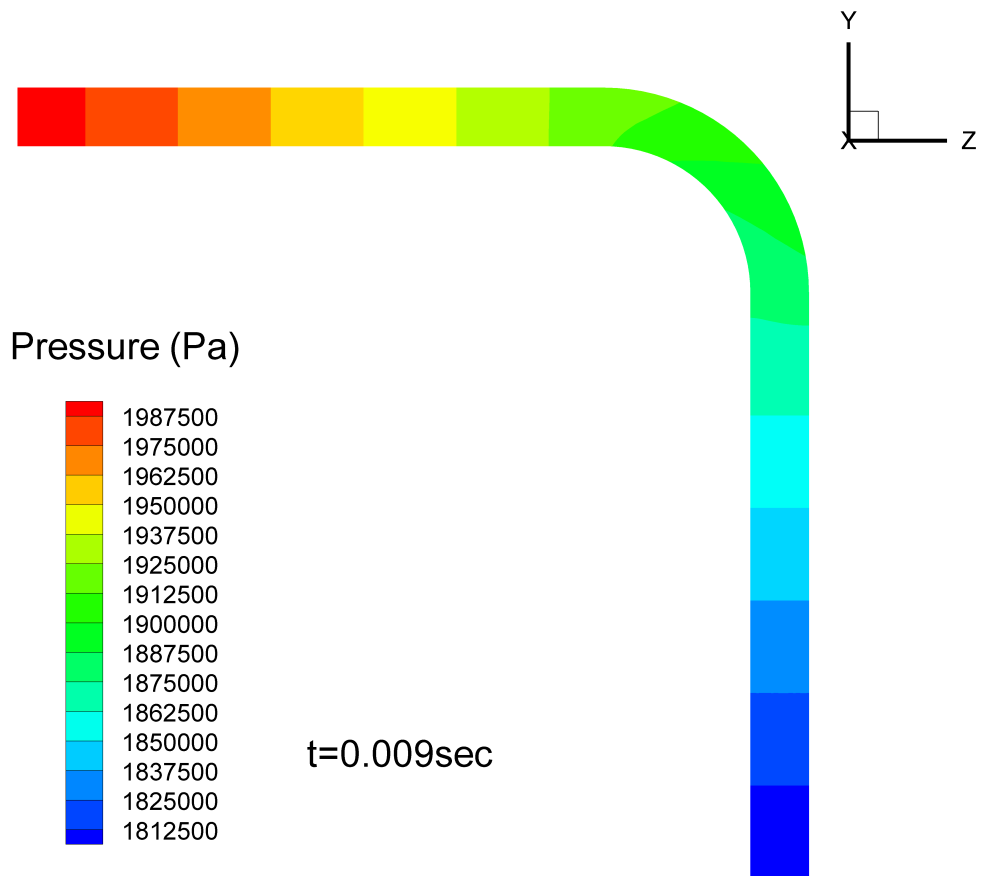


圖 3.13 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

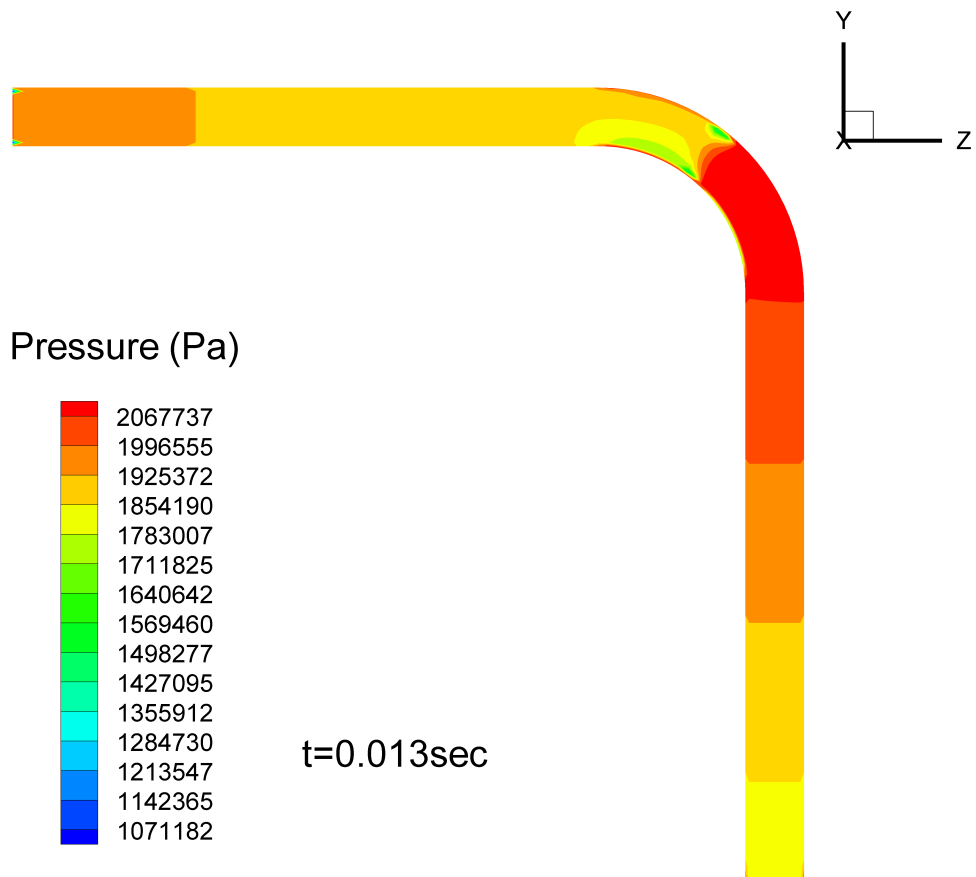


圖 3.14 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

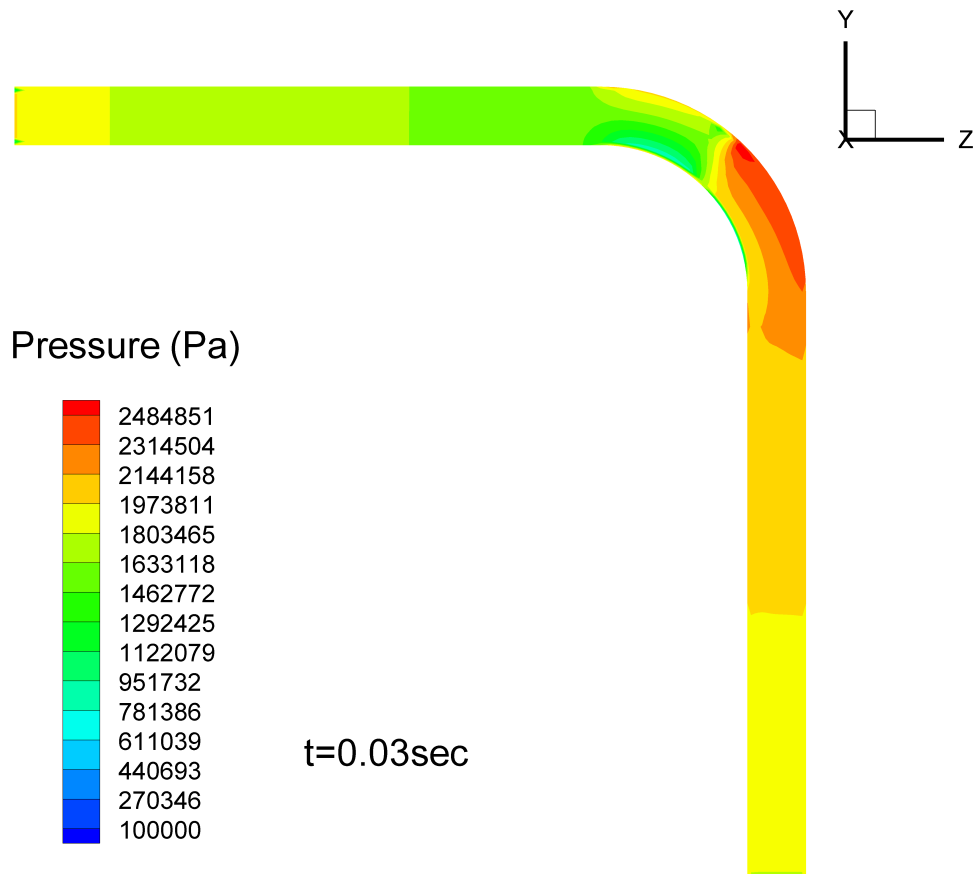


圖 3.15 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

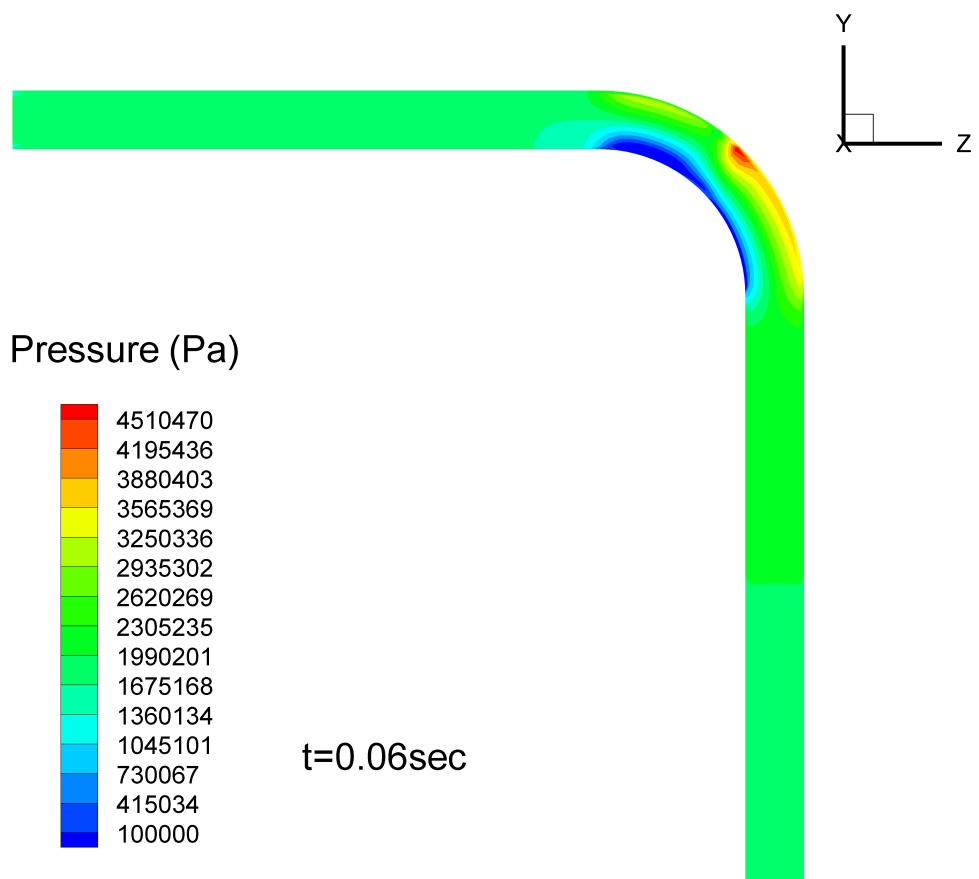


圖 3.16 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

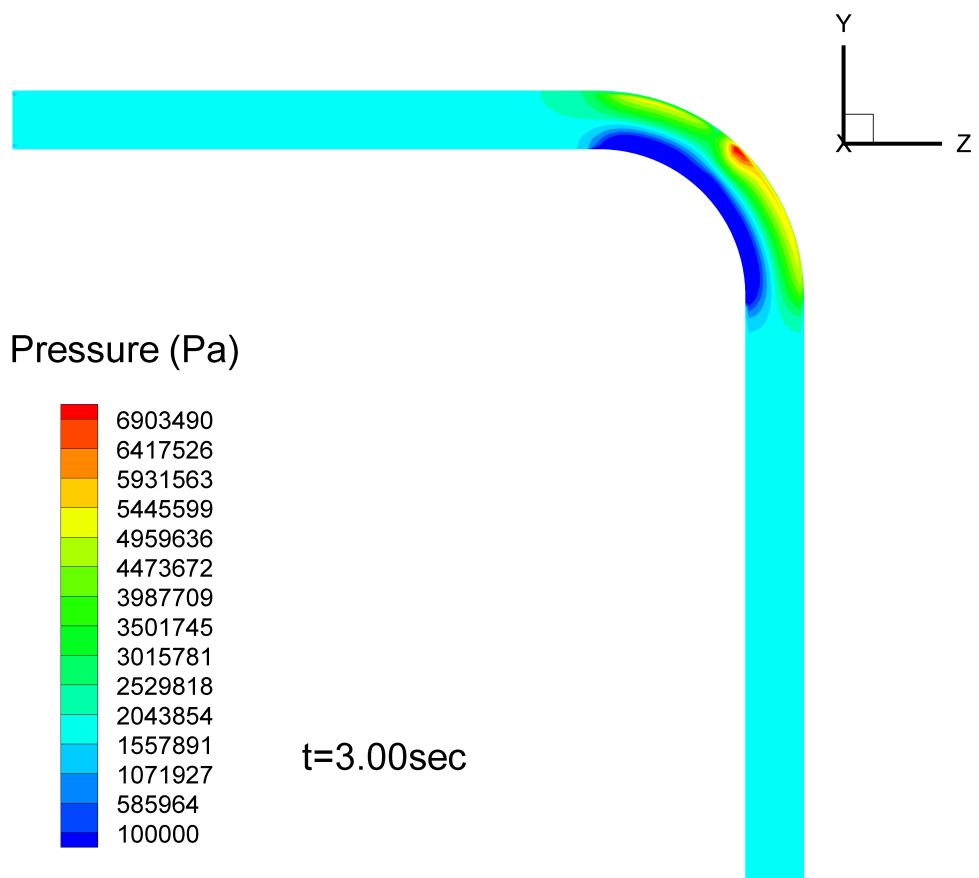


圖 3.17 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(90 度彎管圓周向破裂)

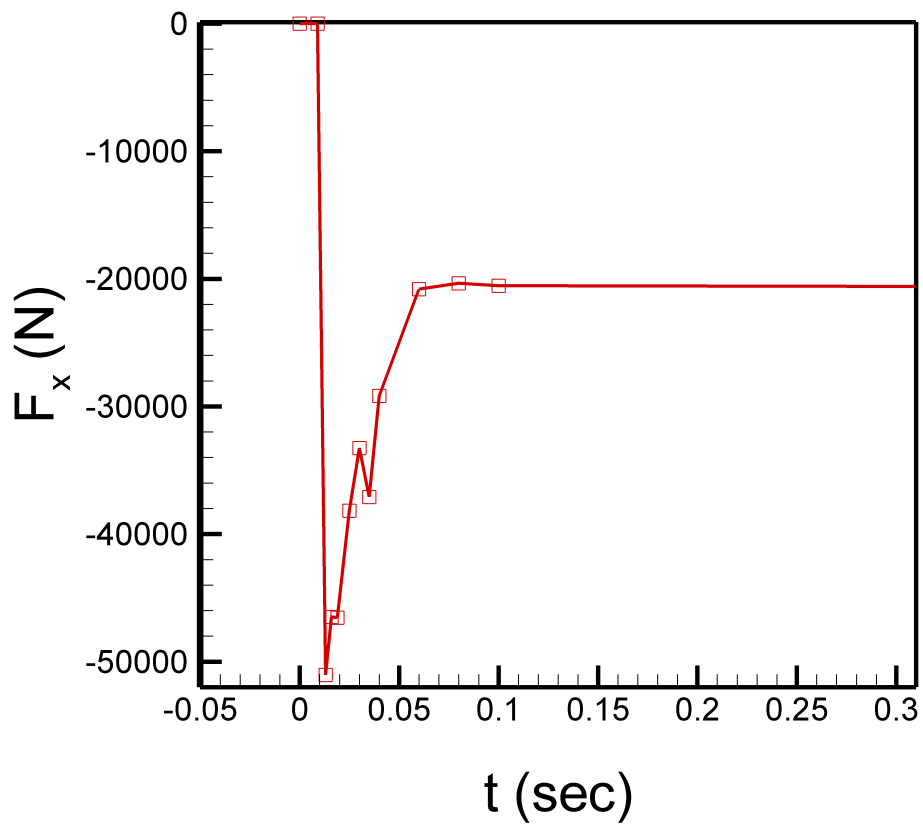


圖 3.18 90 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖

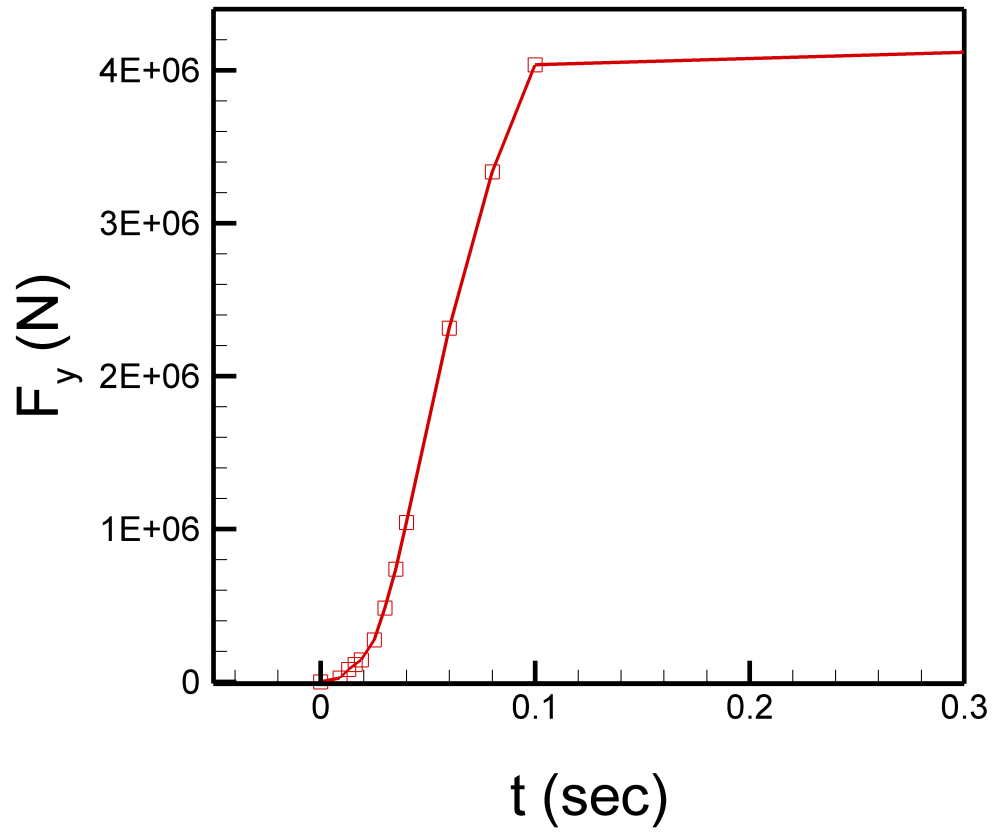


圖 3.19 90 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_y$ )圖



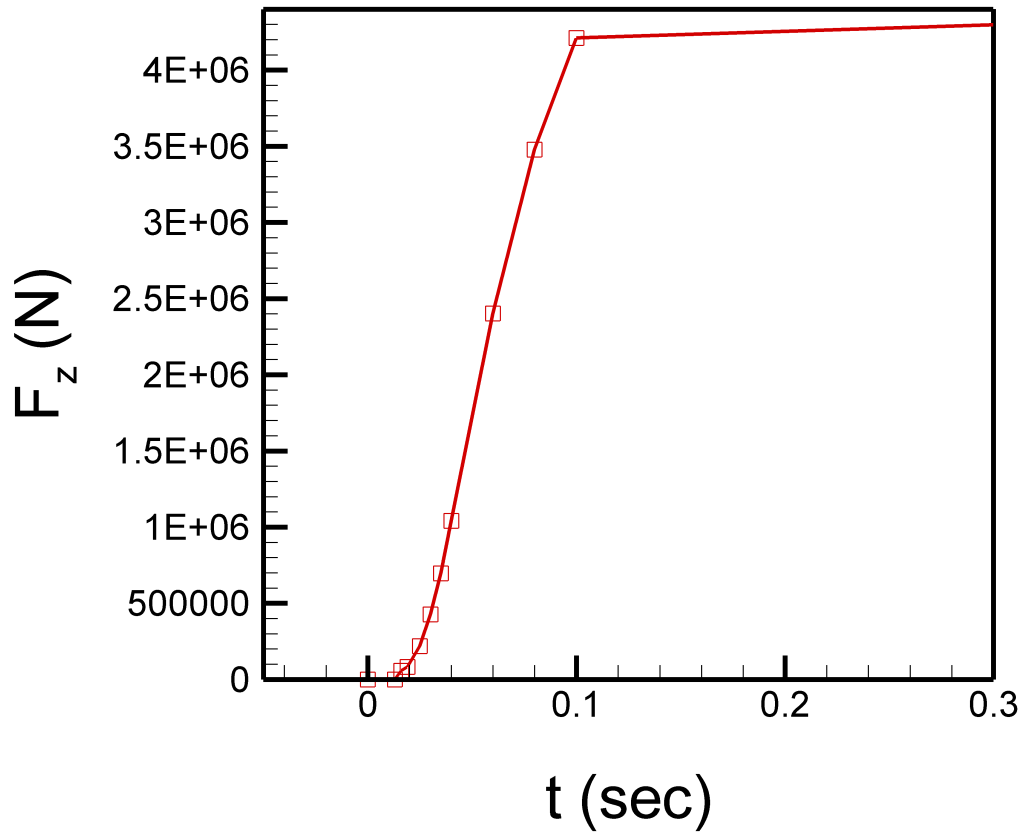


圖 3.20 90 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖

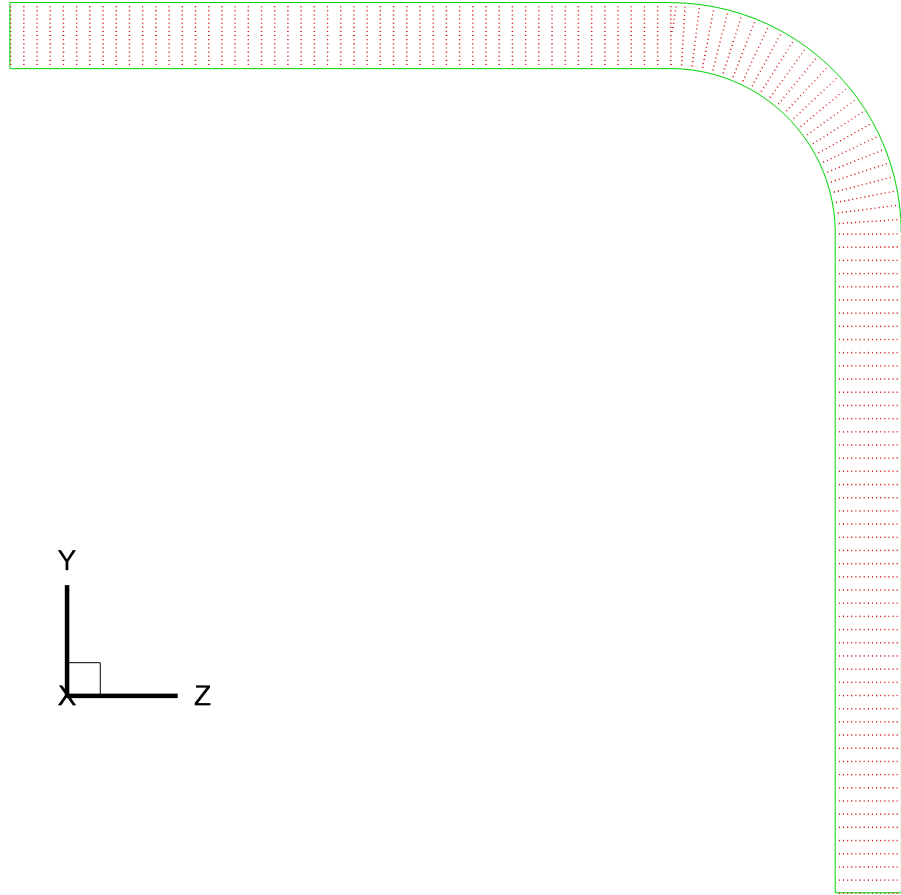


圖 3.21  $t=0.009\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

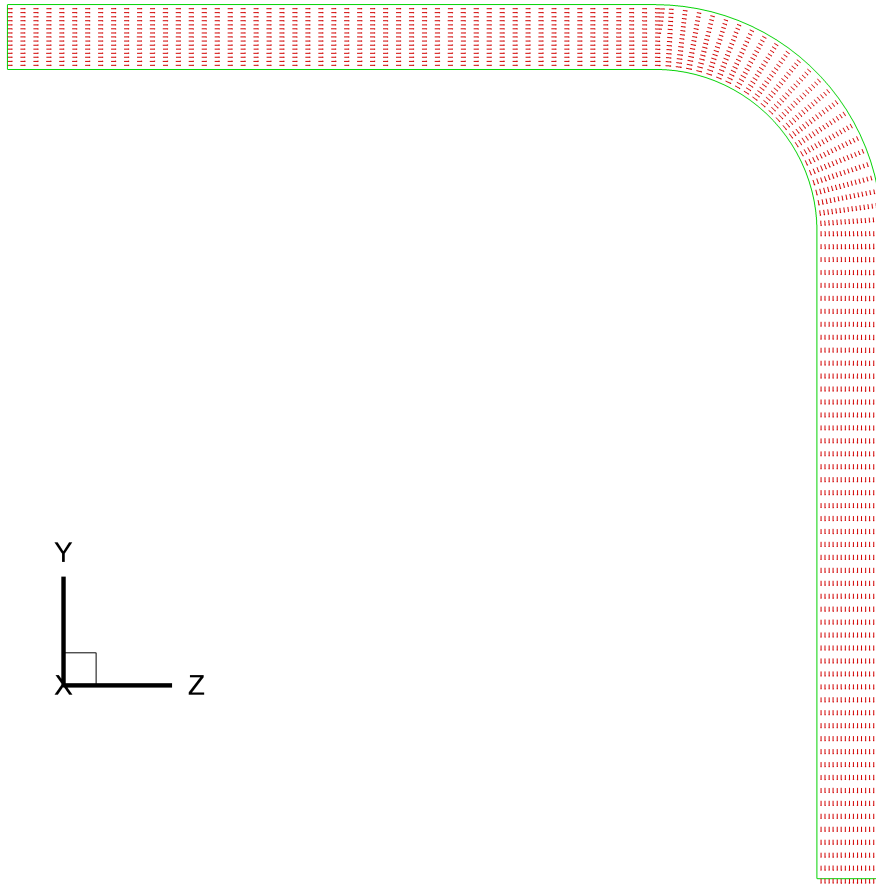


圖 3.22  $t=0.013\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

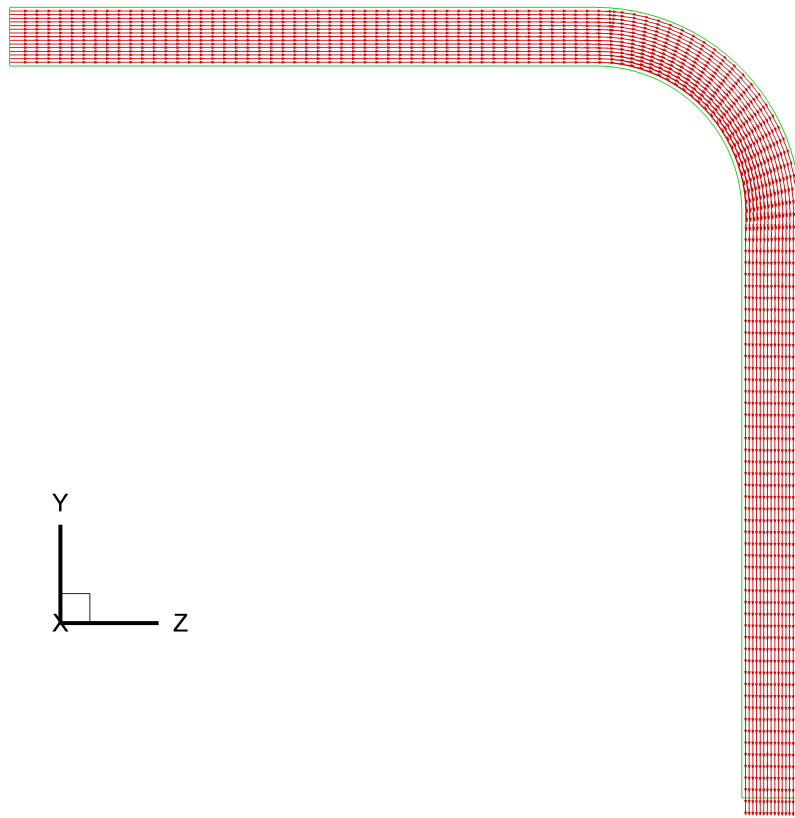


圖 3.23  $t=0.03\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

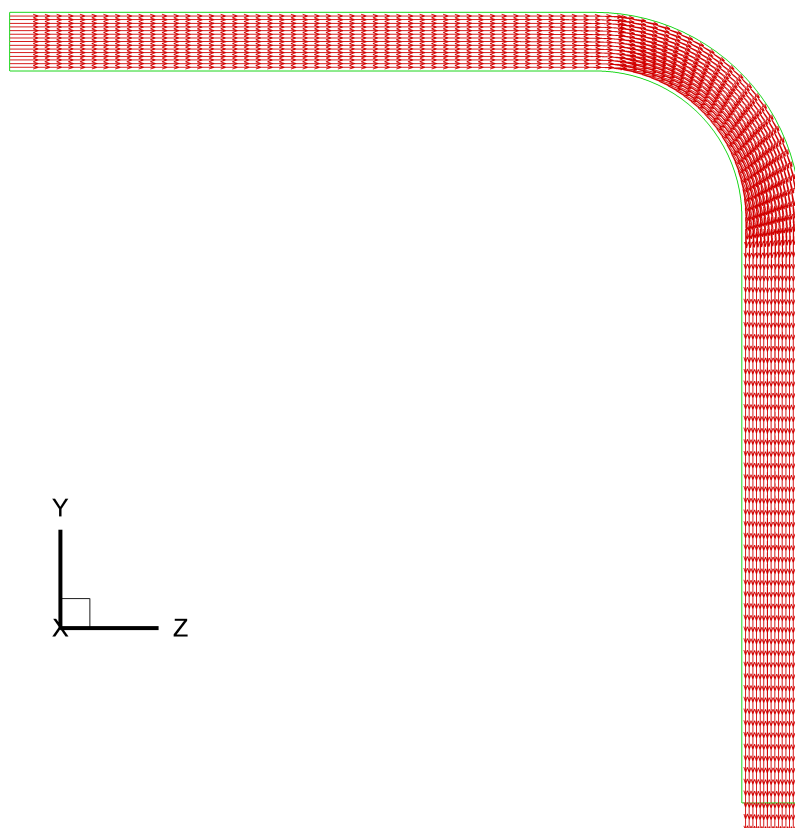


圖 3.24  $t=0.06\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

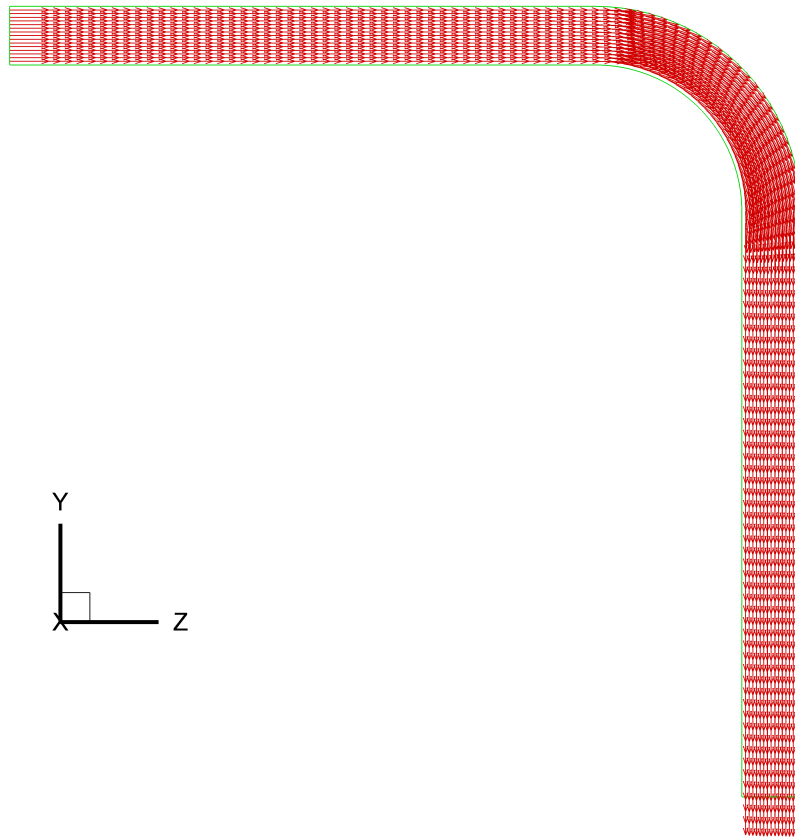


圖 3.25  $t=3.0\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

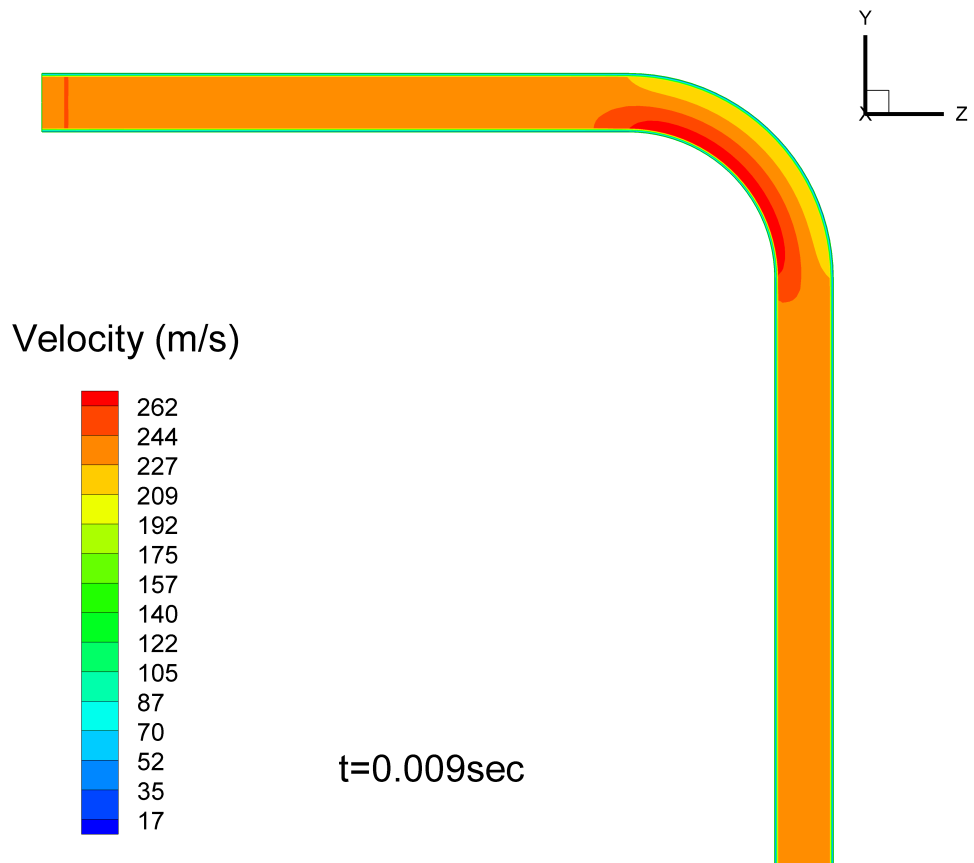


圖 3.26  $t=0.009\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

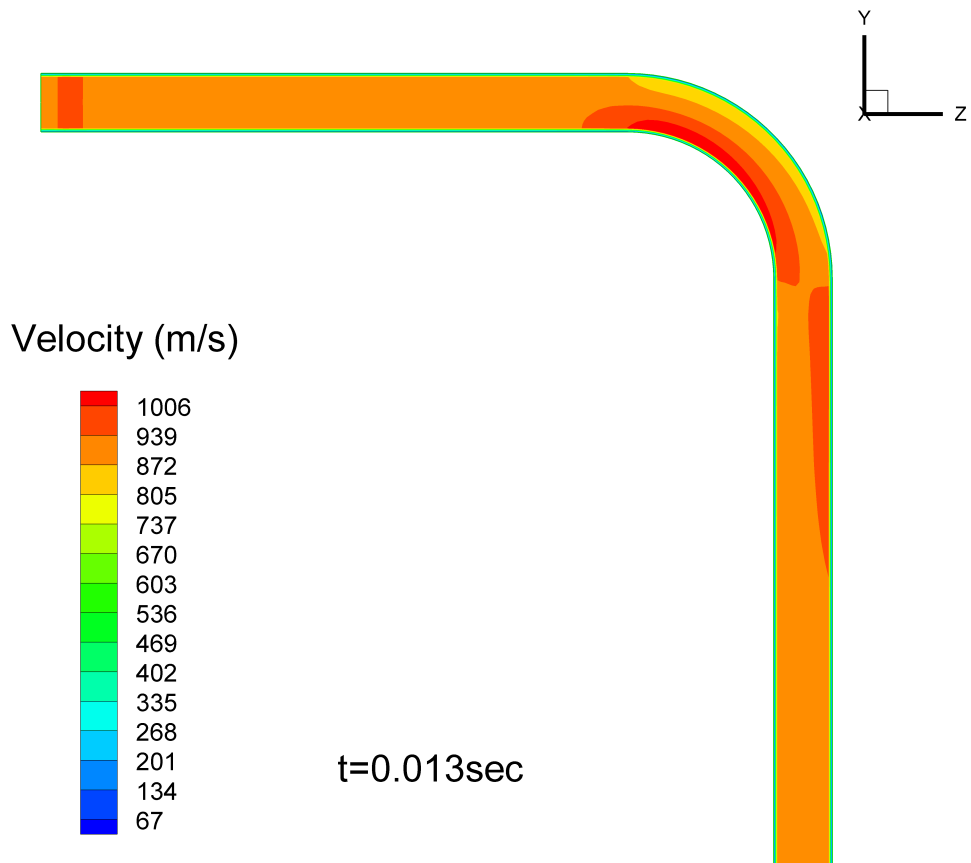


圖 3.27  $t=0.013\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)



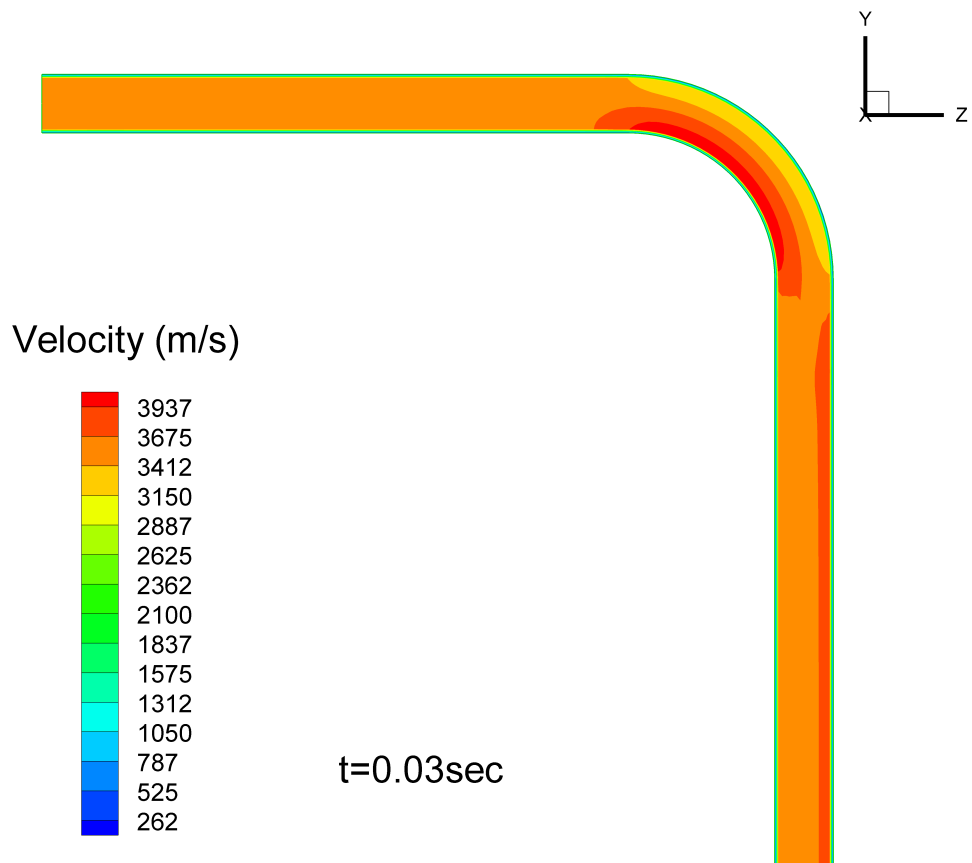


圖 3.28  $t=0.03\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

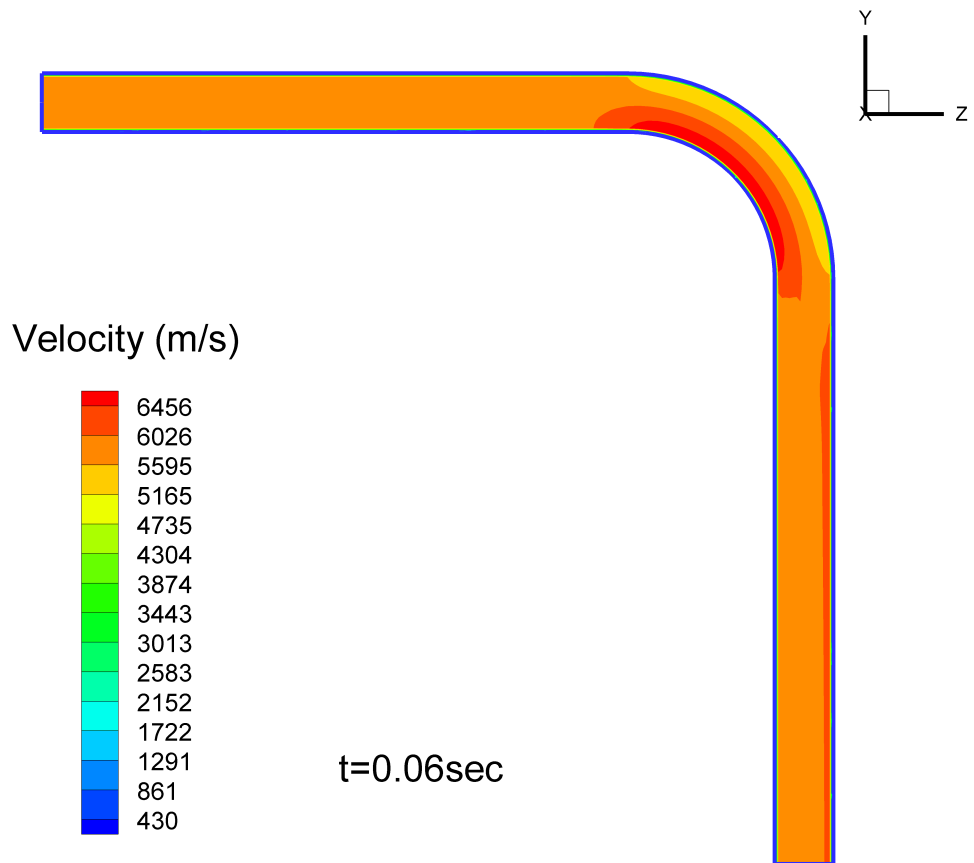


圖 3.29  $t=0.06\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

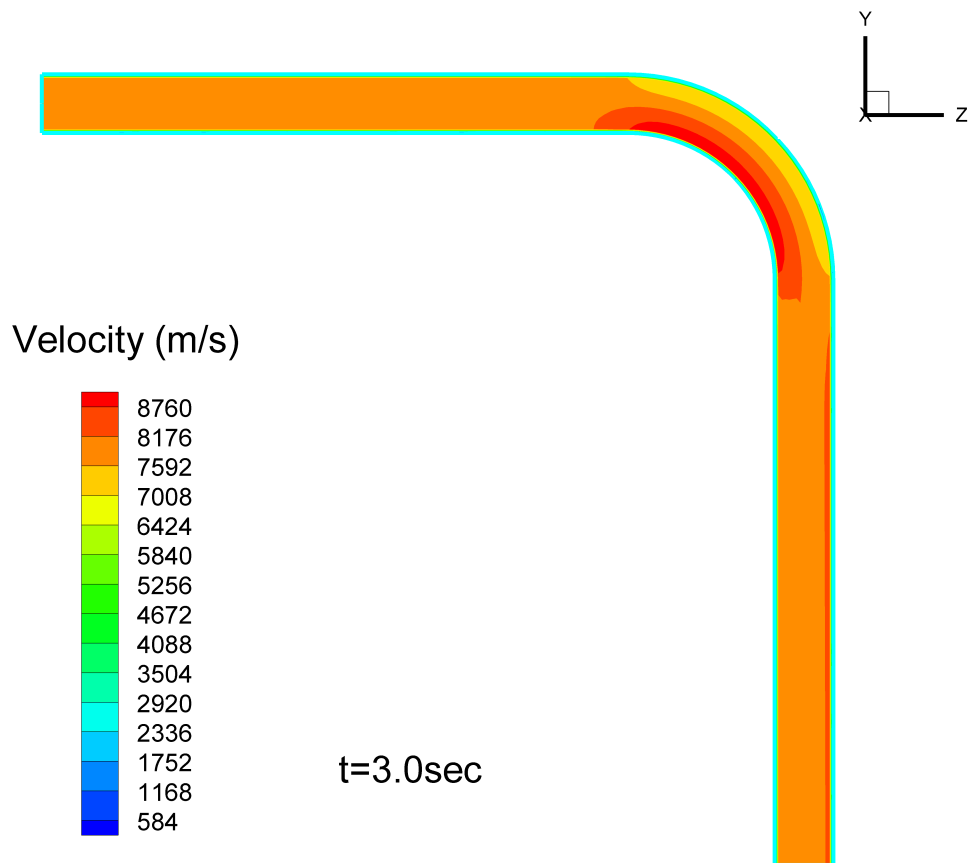


圖 3.30 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

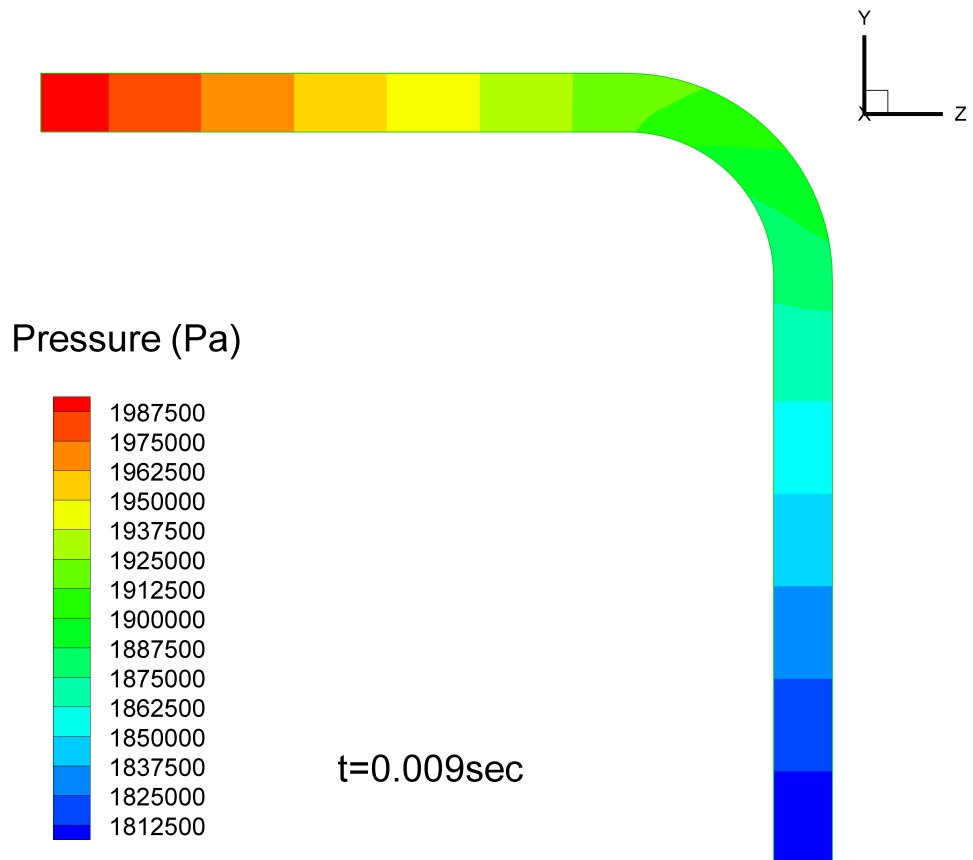


圖 3.31  $t=0.009\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上壓力分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

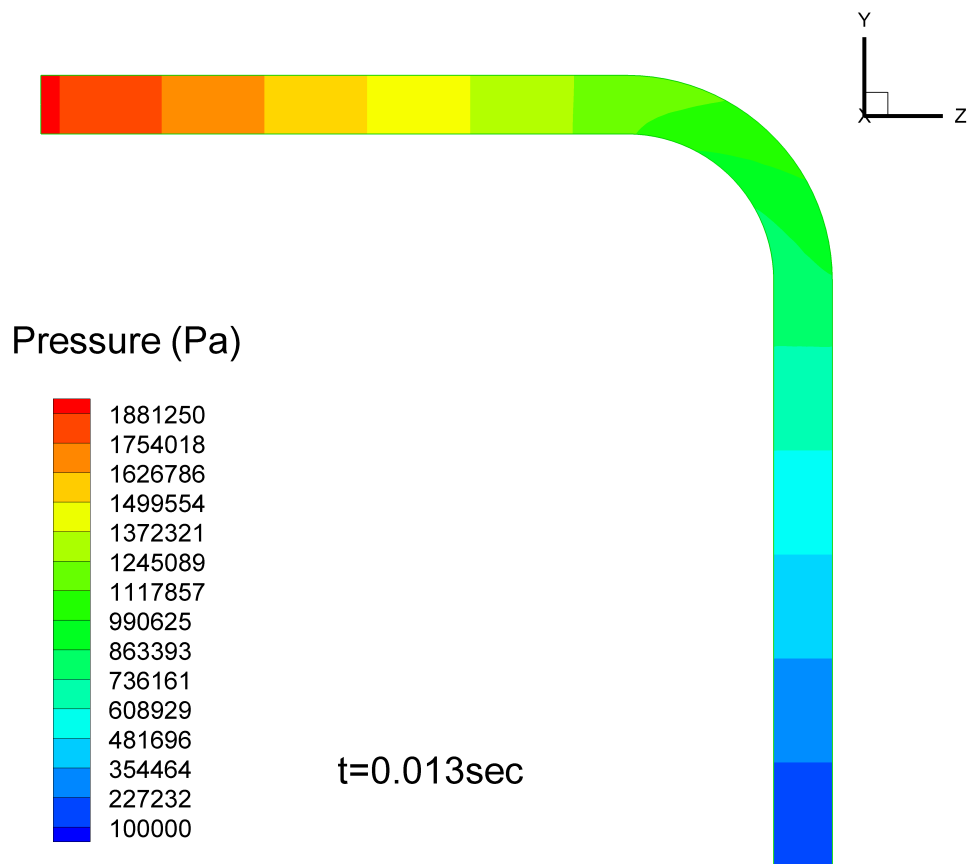


圖 3.32 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

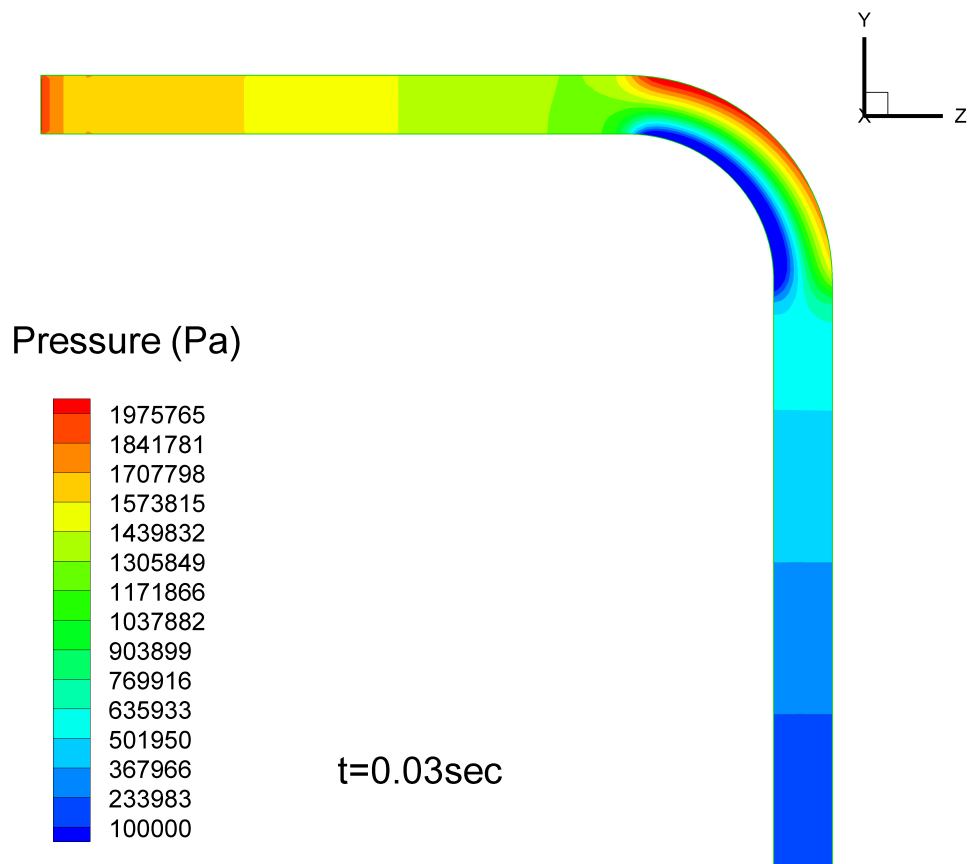


圖 3.33 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

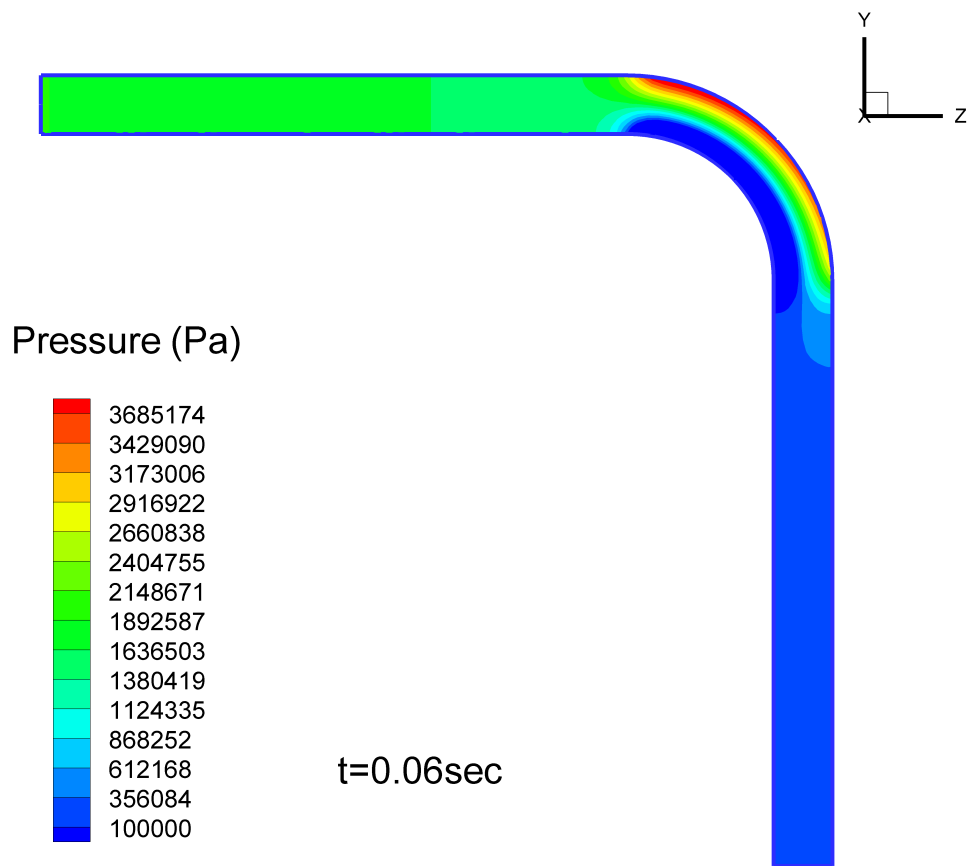


圖 3.34 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)

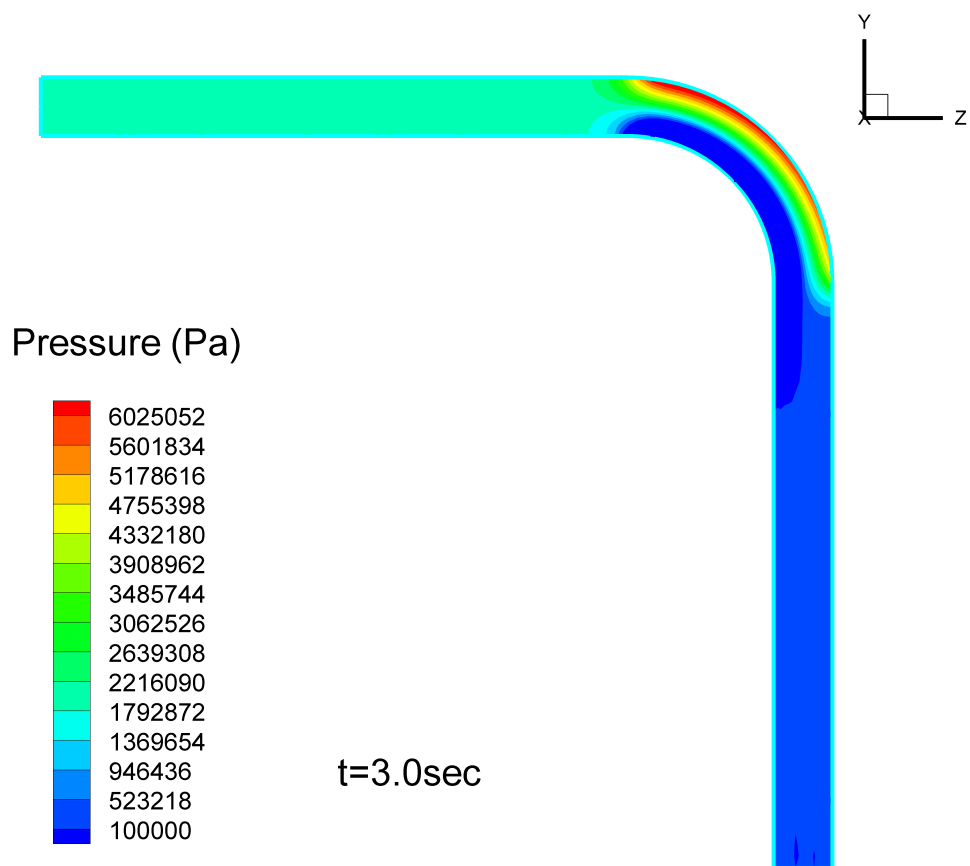


圖 3.35 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)



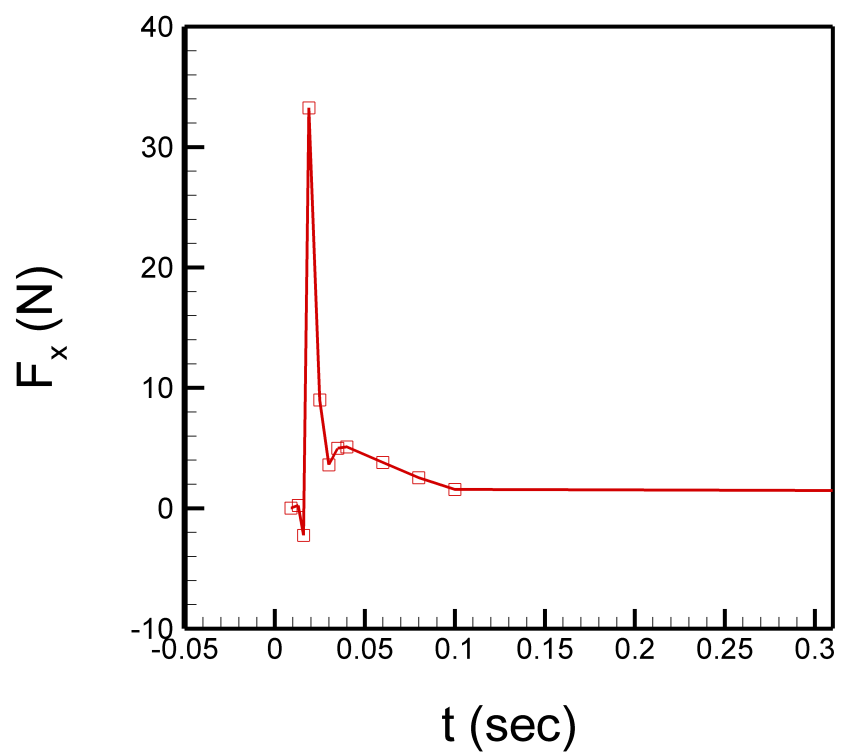


圖 3.36 90 度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_x$ )圖

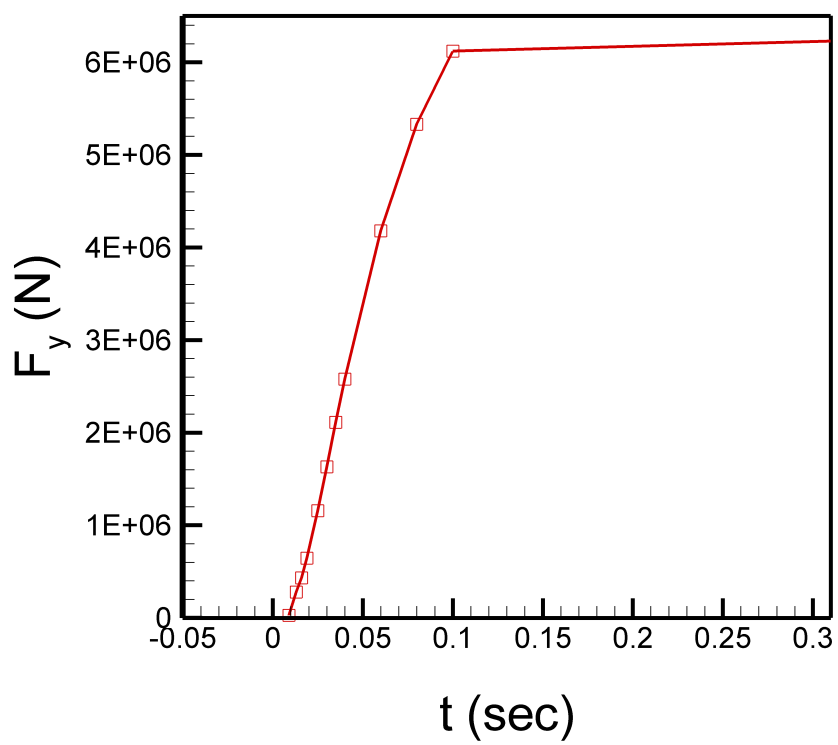


圖 3.37 90 度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_y$ )圖

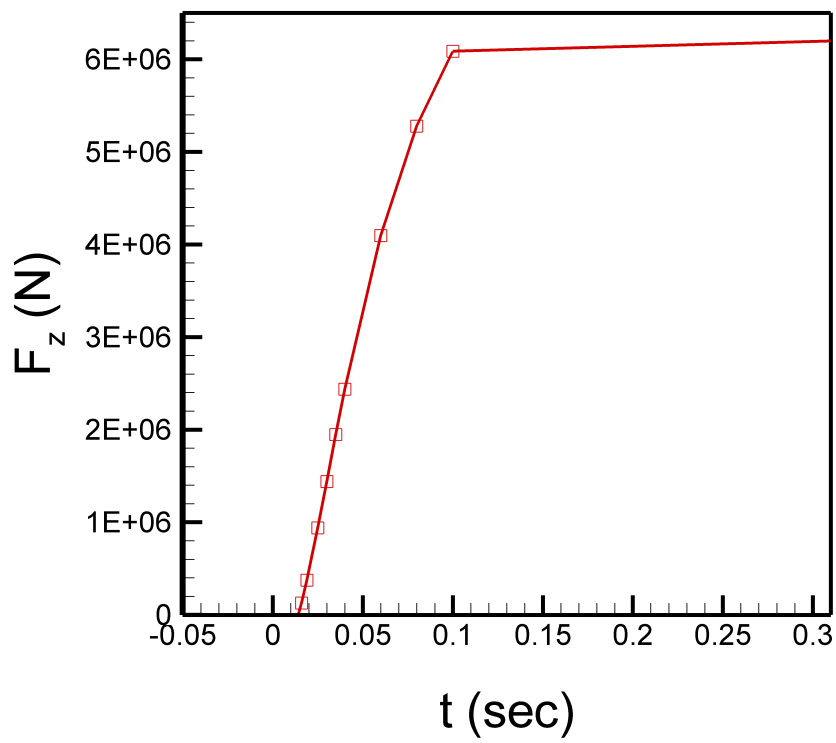


圖 3.38 90 度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_z$ )圖

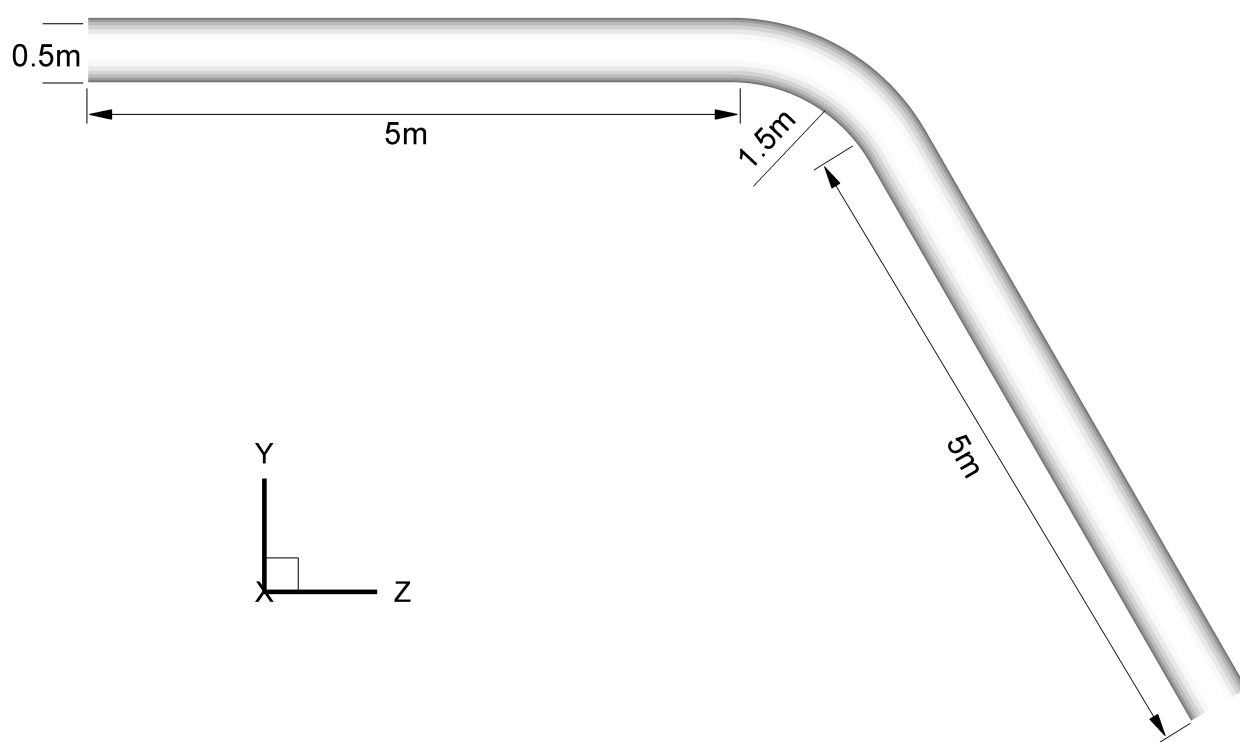


圖 3.39 120 度彎管之尺寸圖

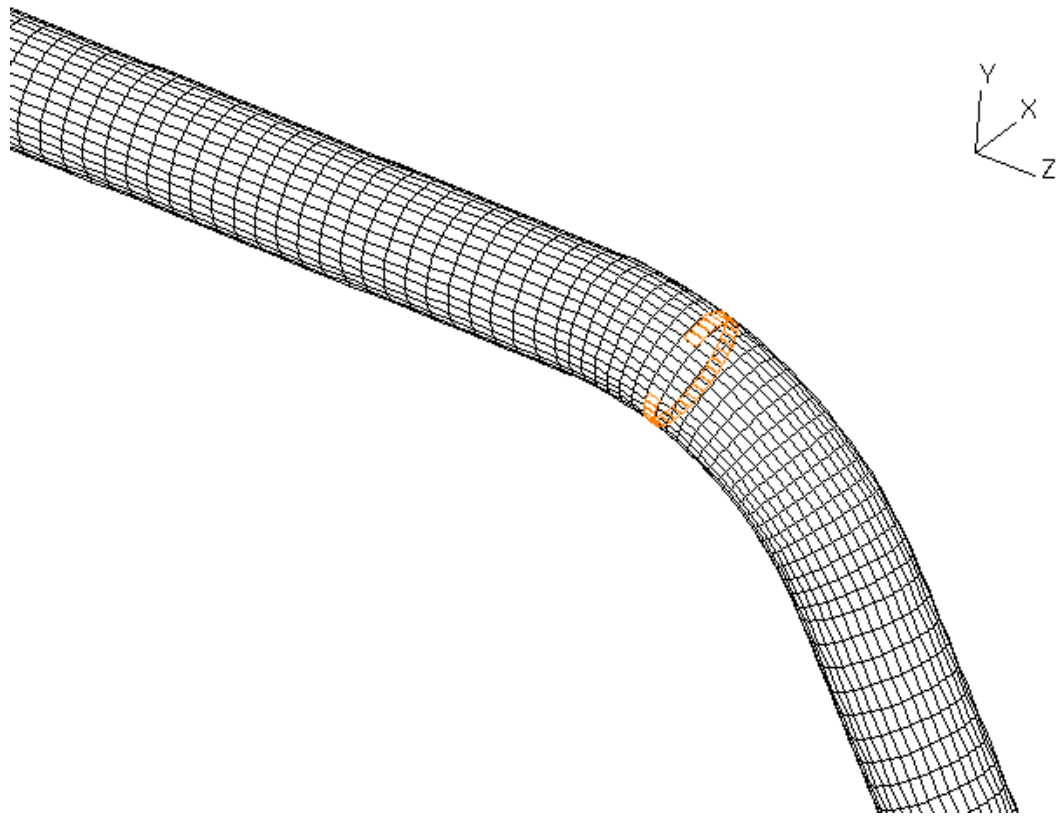


圖 3.40 120 度彎管圓周向破裂之位置圖

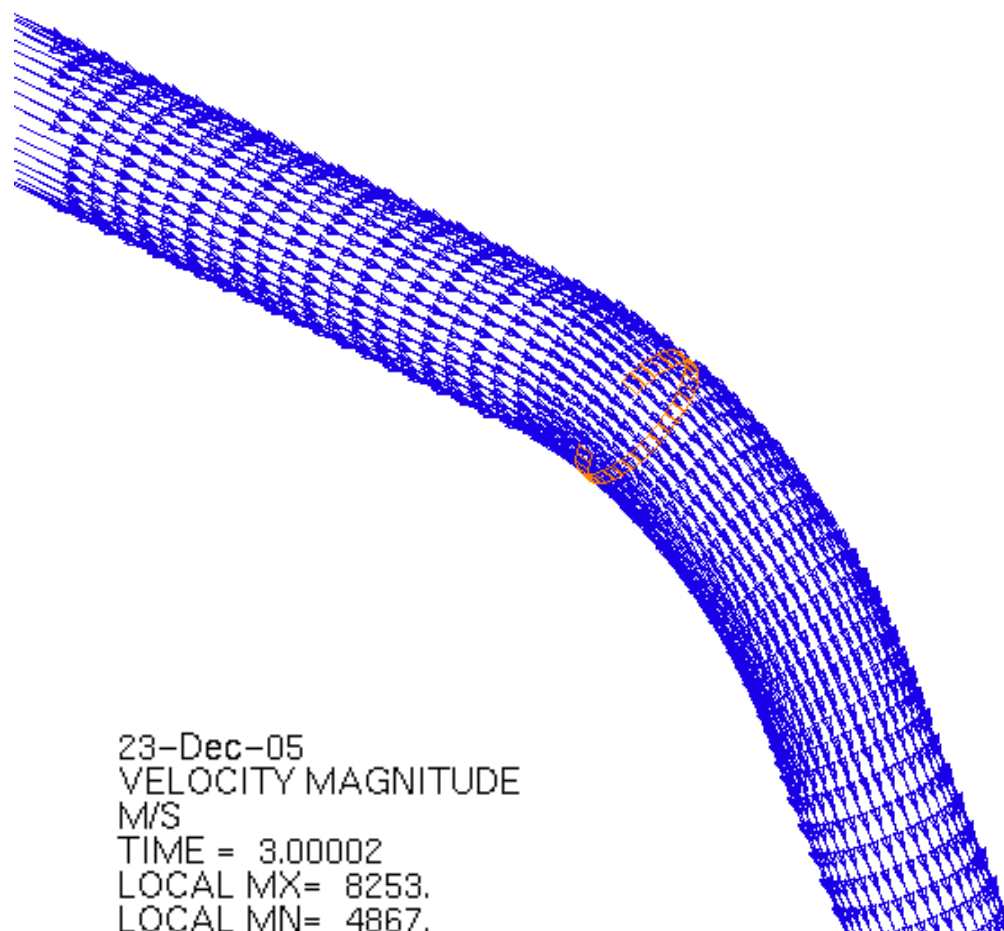
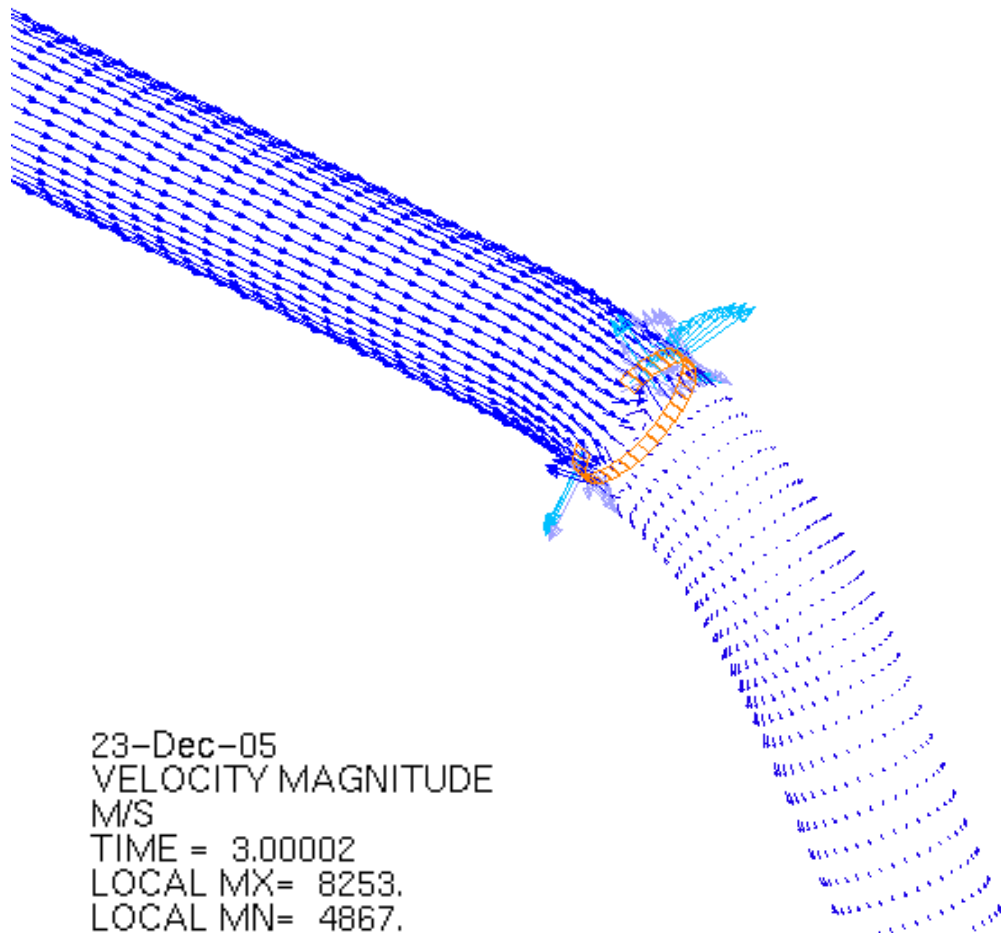


圖 3.41  $t=0.009\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (120 度彎管圓周向破裂)



23-Dec-05  
 VELOCITY MAGNITUDE  
 M/S  
 TIME = 3.00002  
 LOCAL MX= 8253.  
 LOCAL MN= 4867.

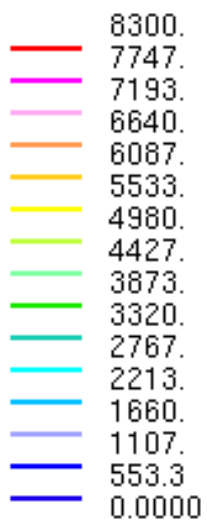
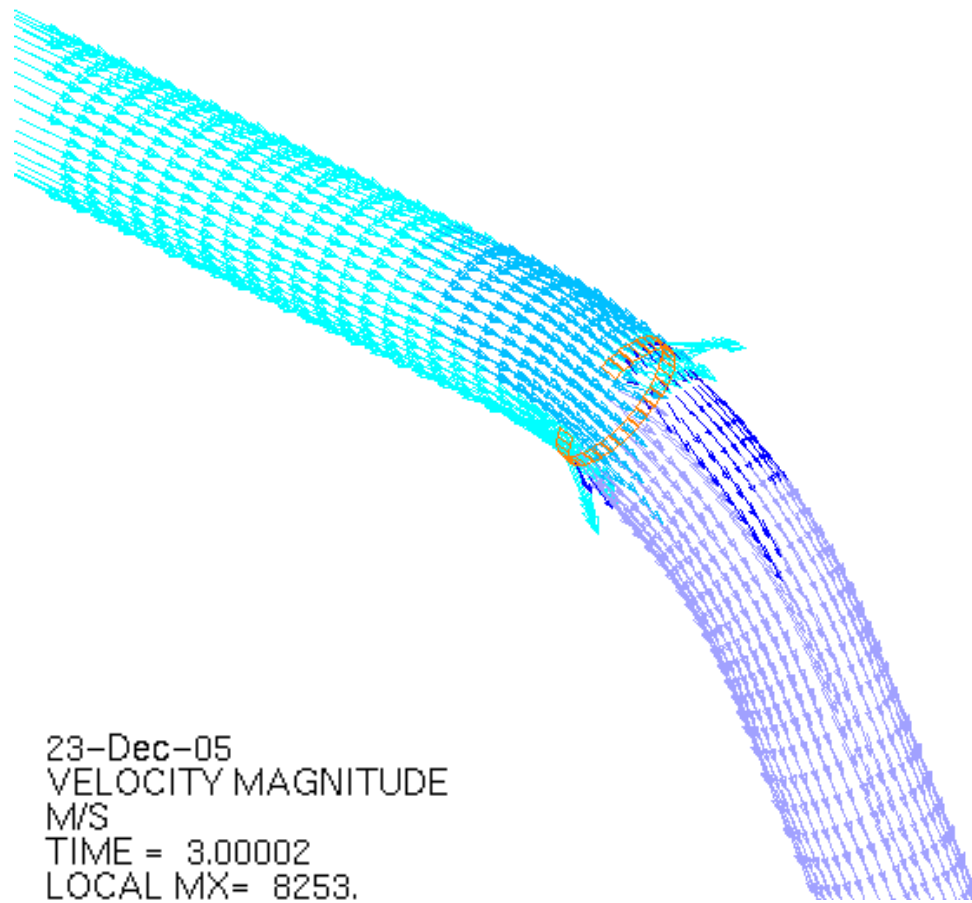


圖 3.42 t=0.013sec 時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (120 度彎管圓周向破裂)



23-Dec-05  
 VELOCITY MAGNITUDE  
 M/S  
 TIME = 3.00002  
 LOCAL MX= 8253.  
 LOCAL MN= 4867.

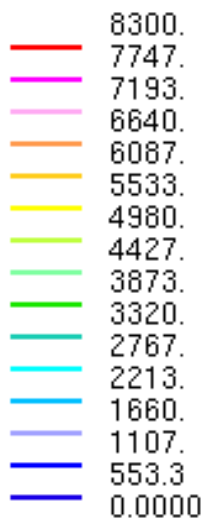
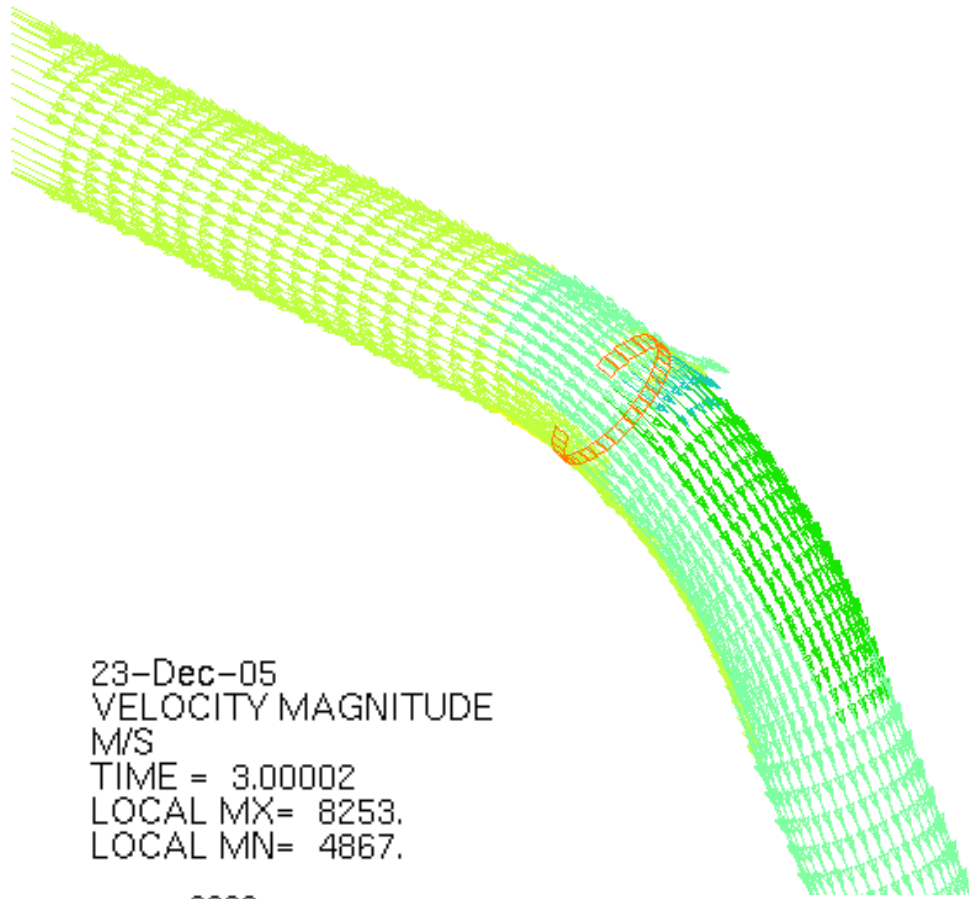


圖 3.43  $t=0.03\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (120 度彎管圓周向破裂)





23-Dec-05  
 VELOCITY MAGNITUDE  
 M/S  
 TIME = 3.00002  
 LOCAL MX= 8253.  
 LOCAL MN= 4867.

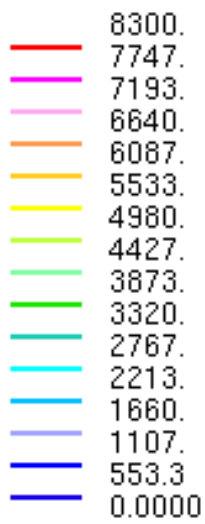
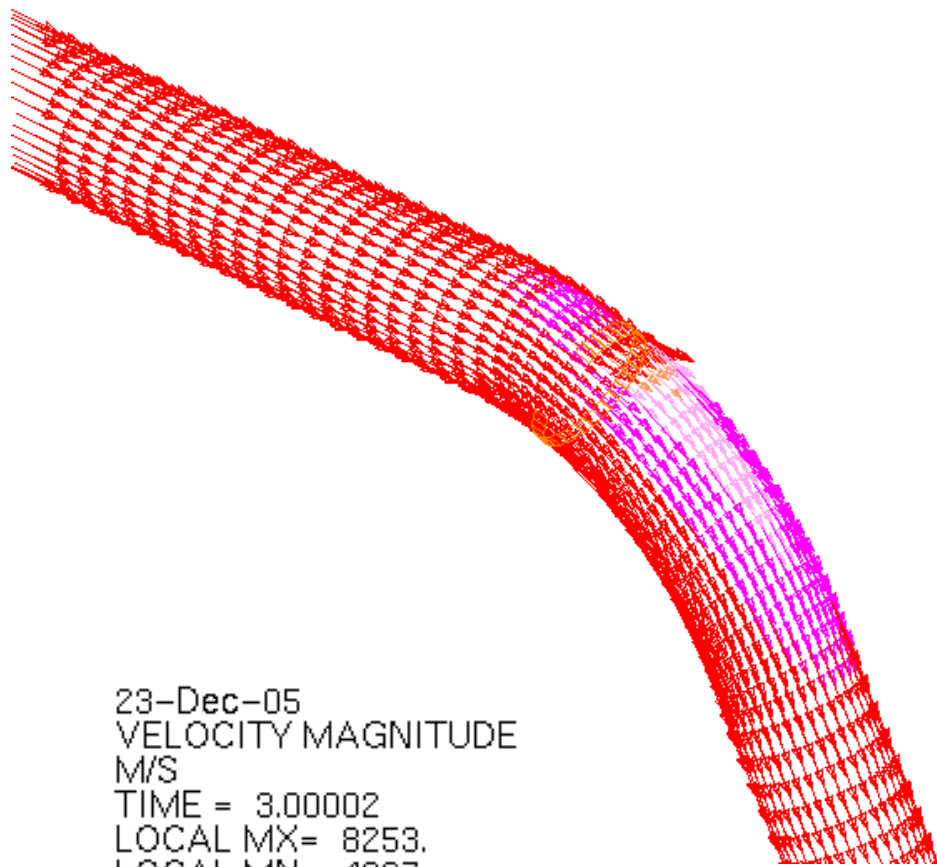


圖 3.44  $t=0.06\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (120 度彎管圓周向破裂)



23-Dec-05  
 VELOCITY MAGNITUDE  
 M/S  
 TIME = 3.00002  
 LOCAL MX= 8253.  
 LOCAL MN= 4867.

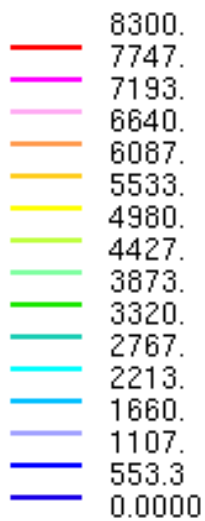


圖 3.45  $t=3.0\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (120 度彎管圓周向破裂)

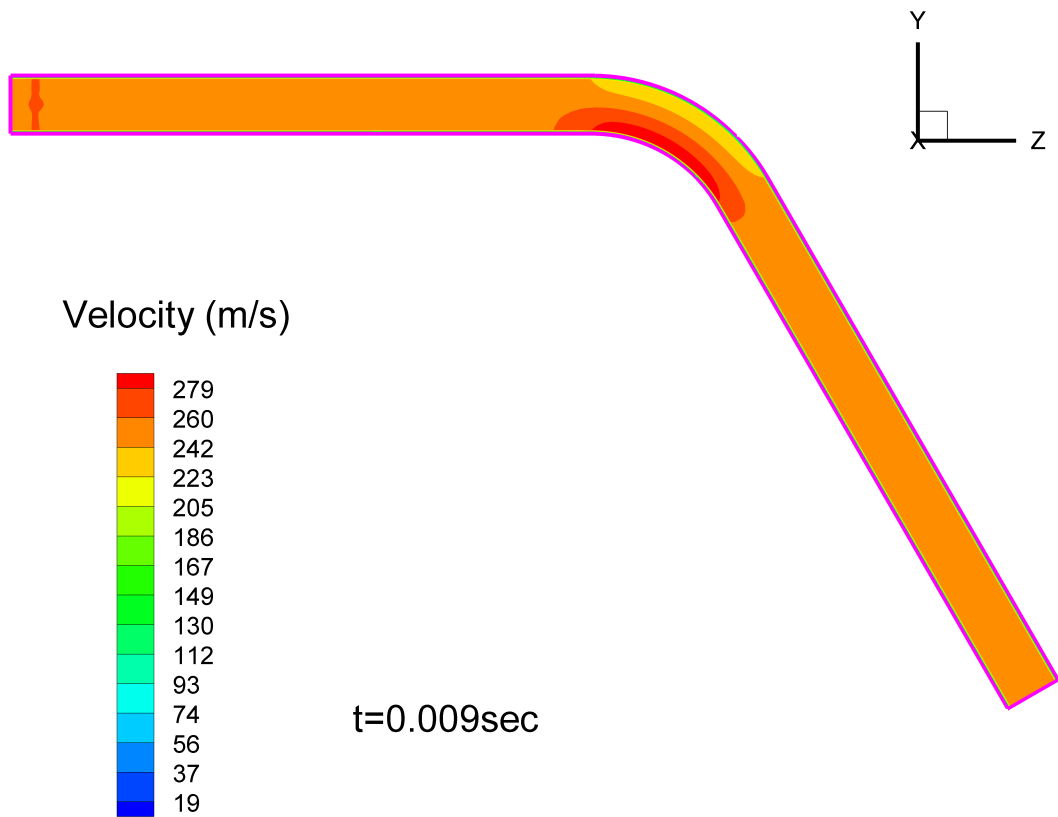


圖 3.46 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

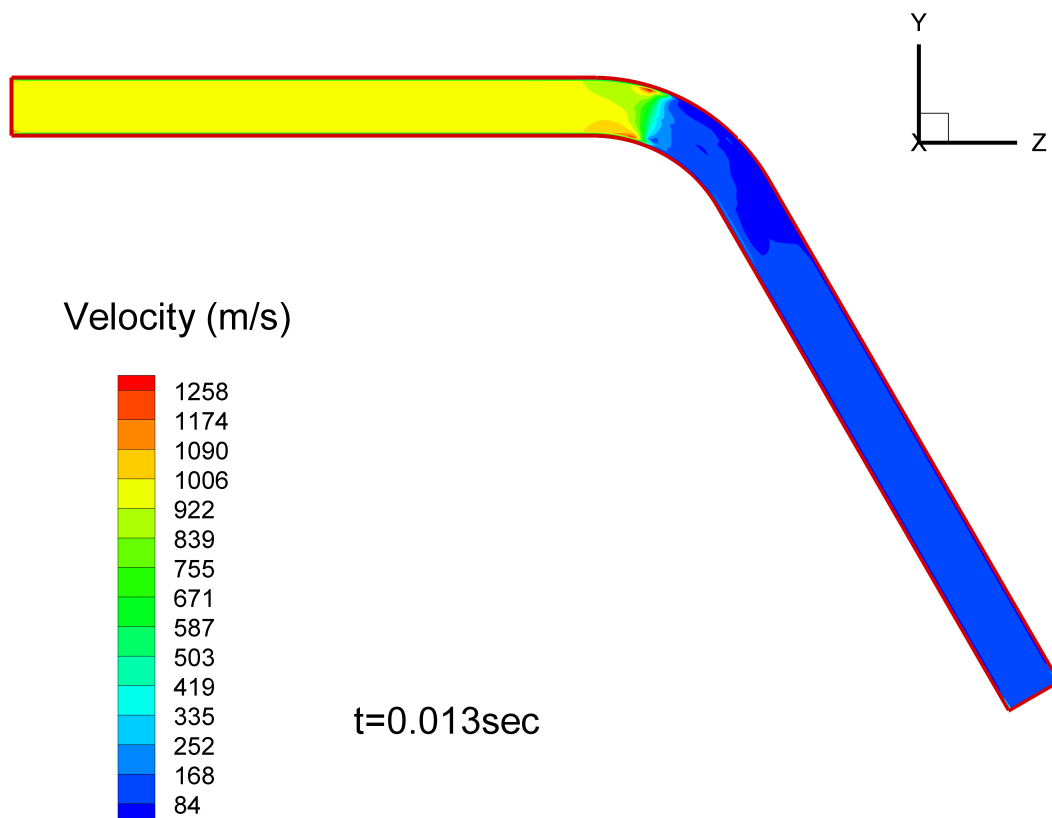


圖 3.47 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

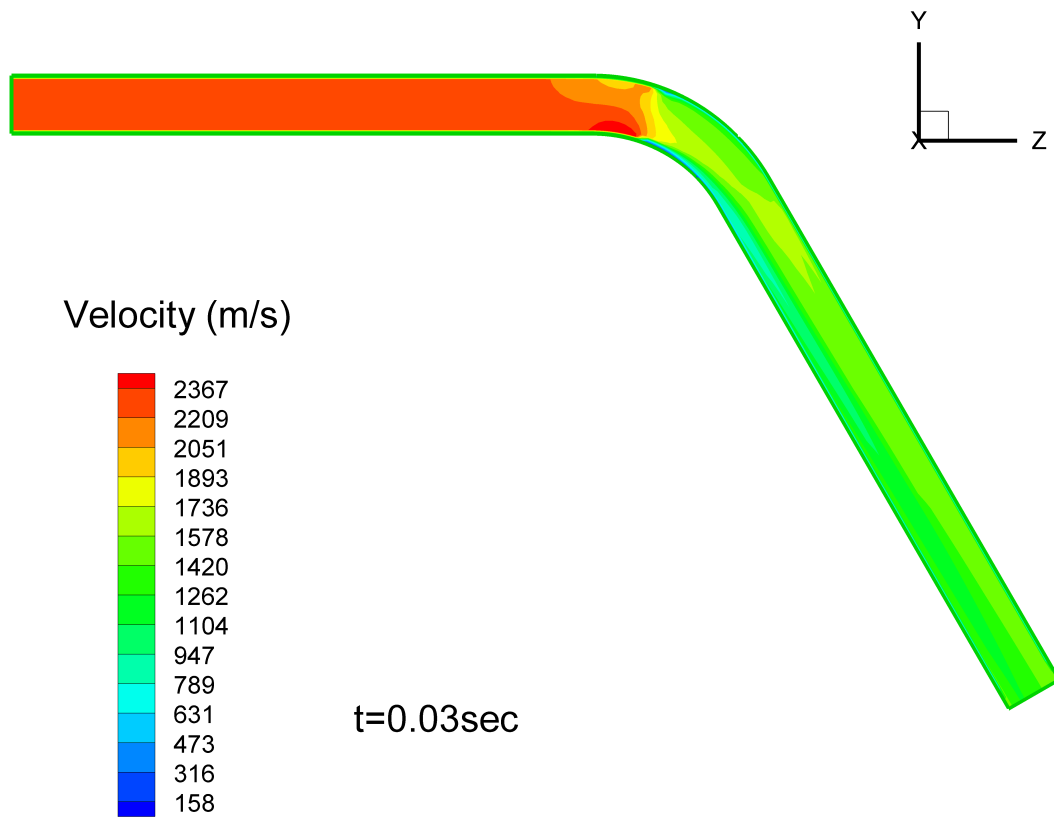


圖 3.48  $t=0.03\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

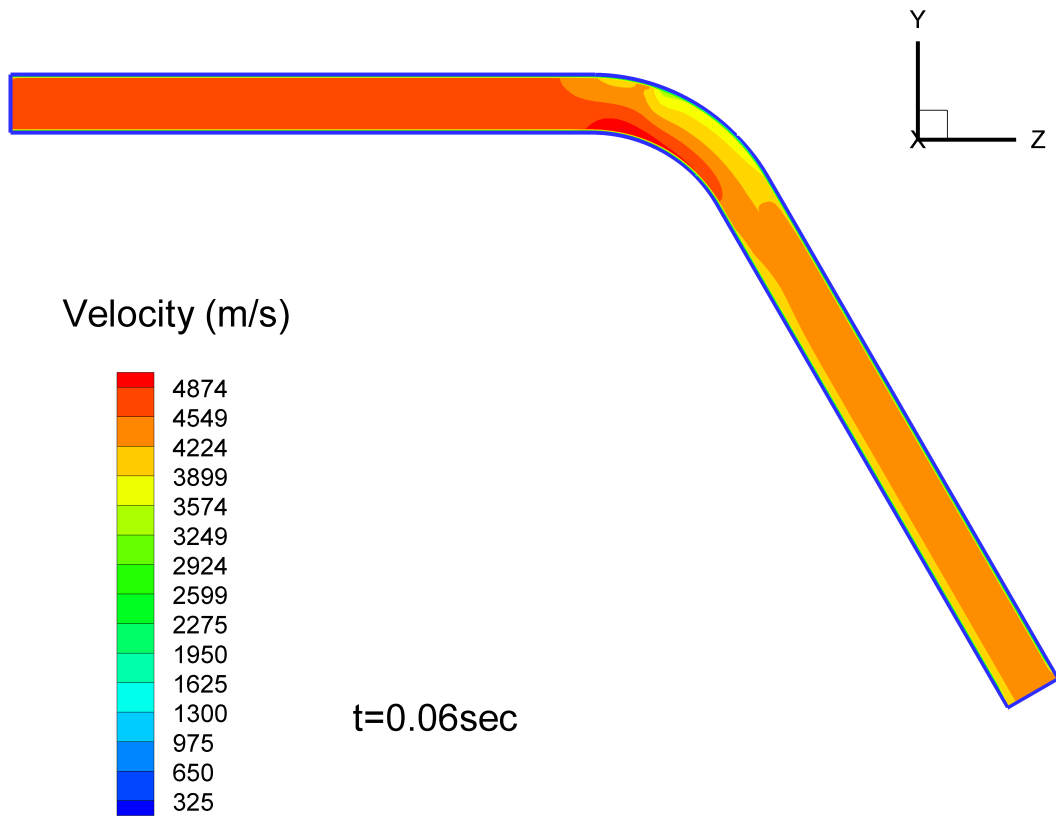


圖 3.49  $t=0.06\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

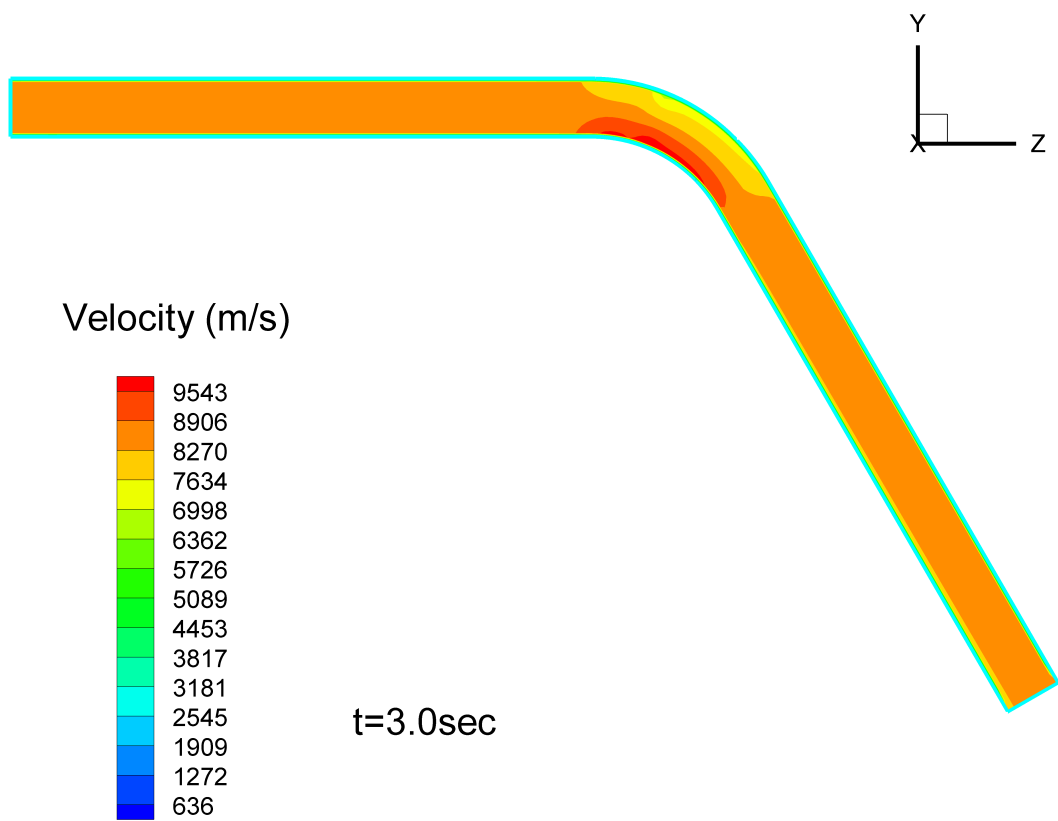


圖 3.50 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

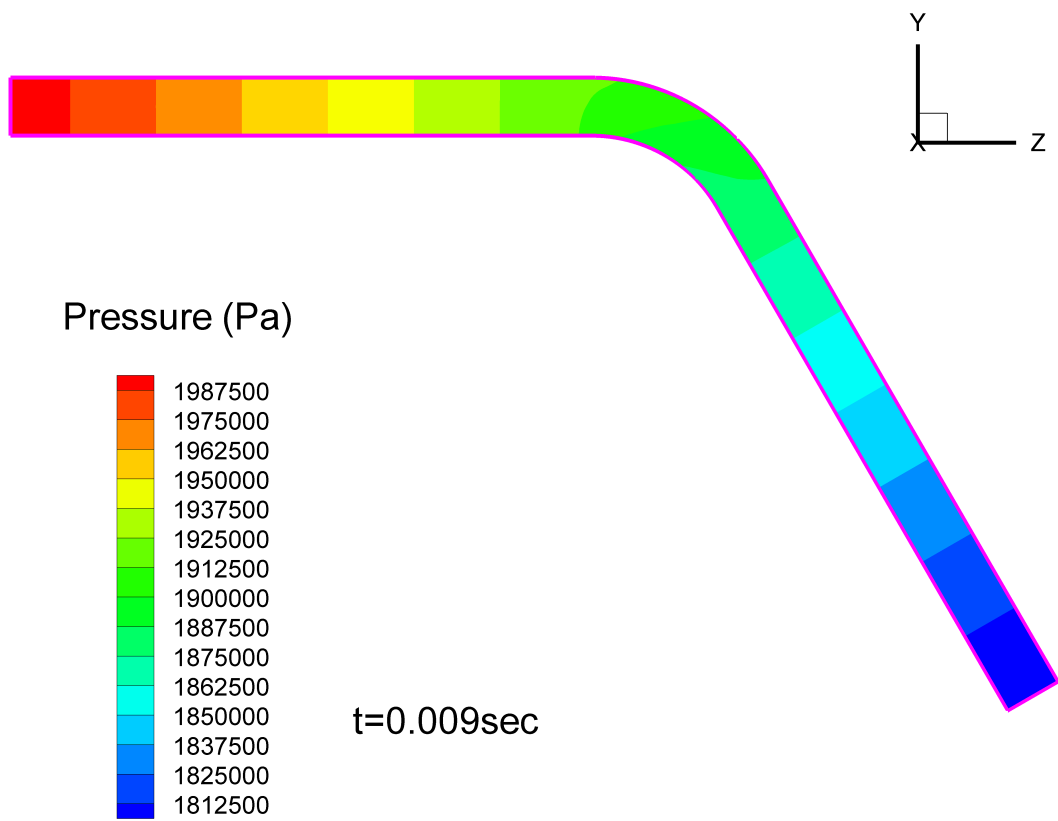


圖 3.51 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)



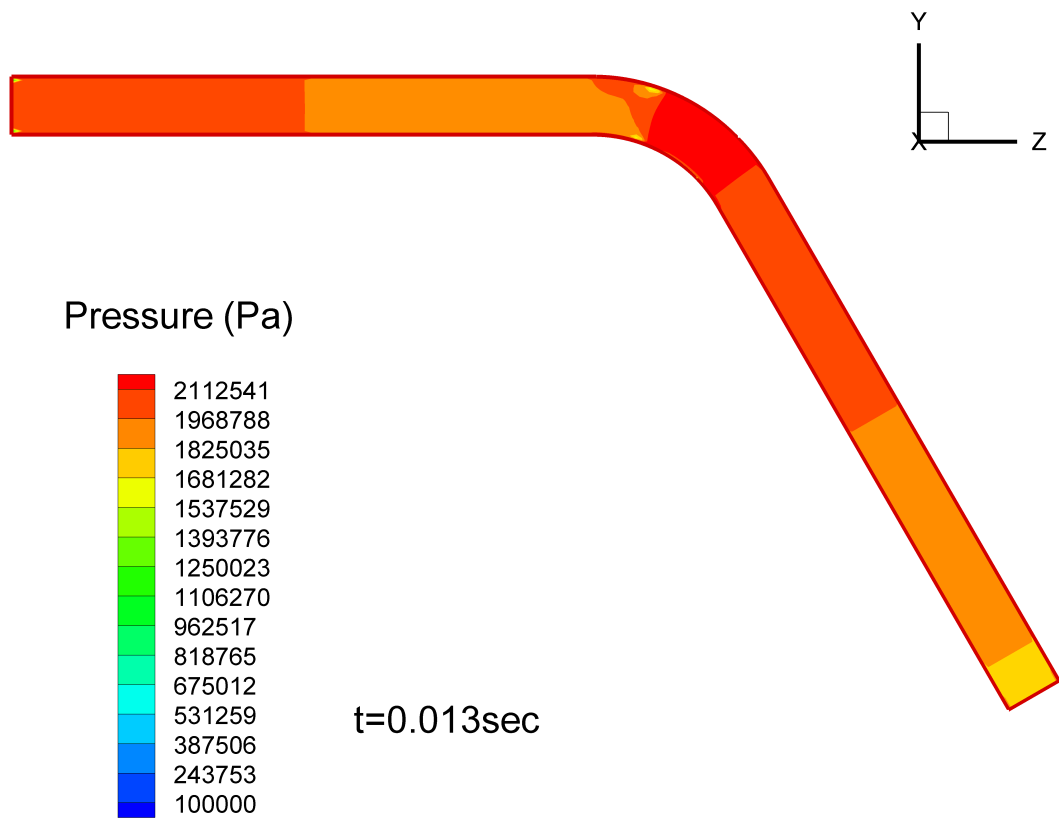


圖 3.52  $t=0.013\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上壓力之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

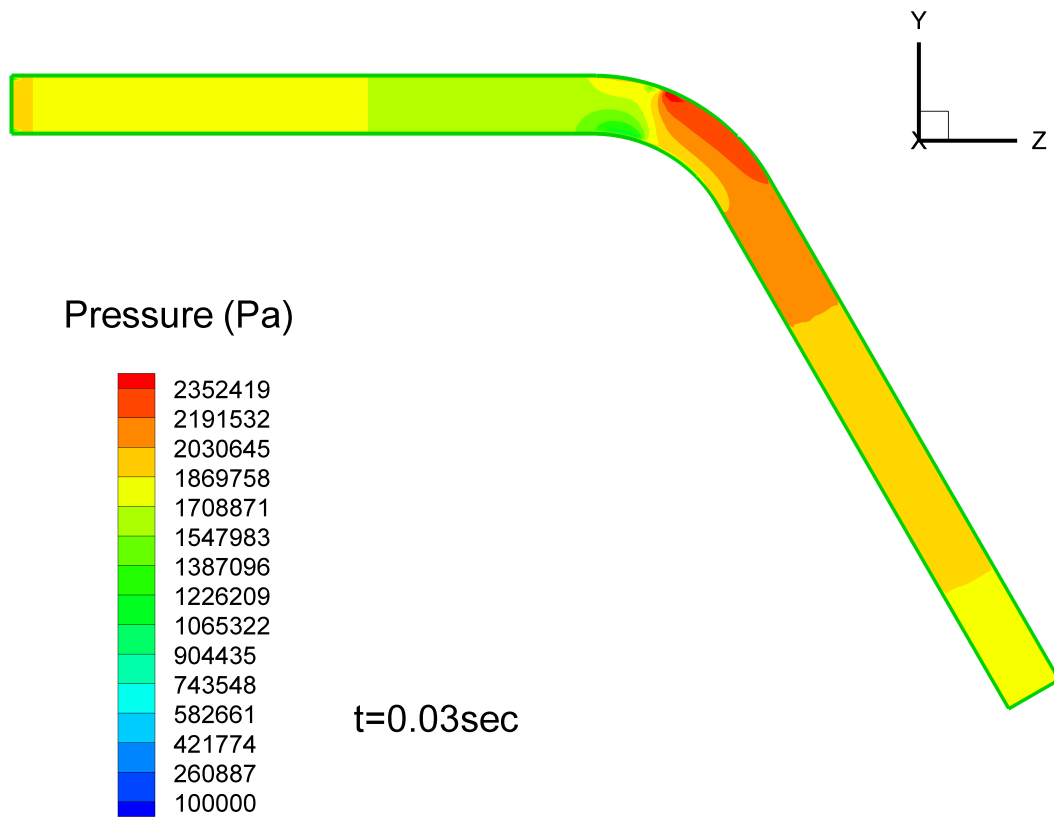


圖 3.53  $t=0.03\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上壓力之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

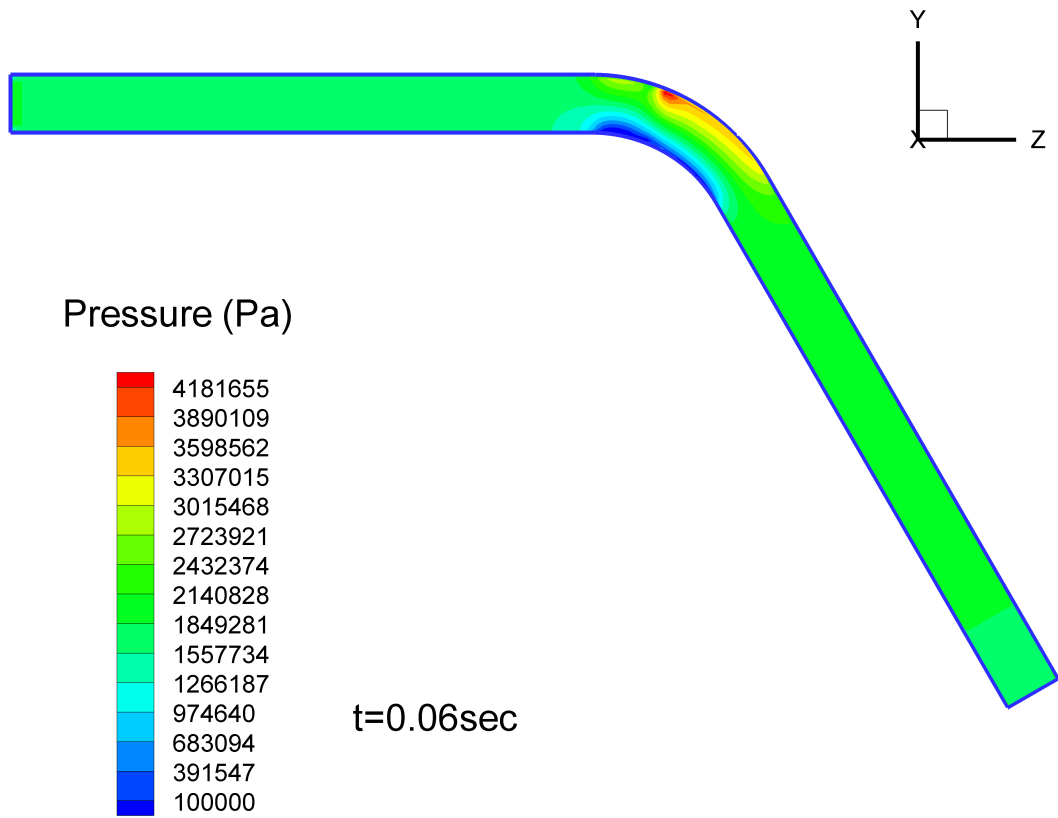


圖 3.54 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

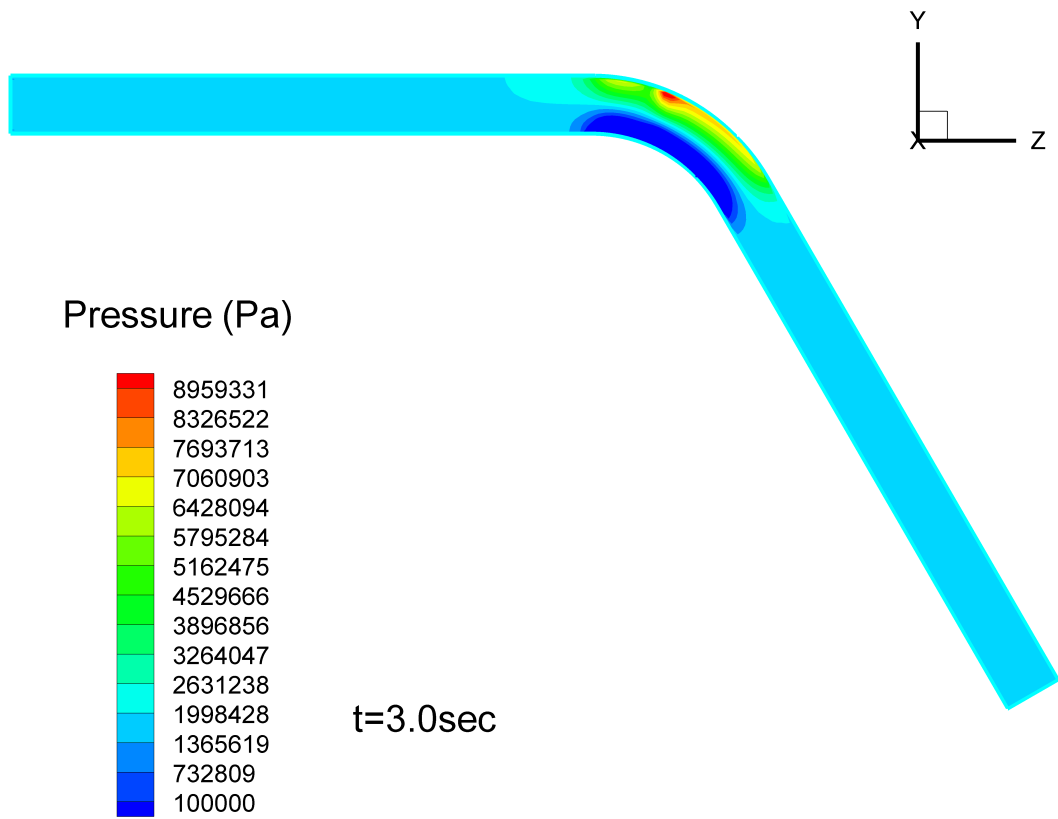


圖 3.55 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(120 度彎管圓周向破裂)

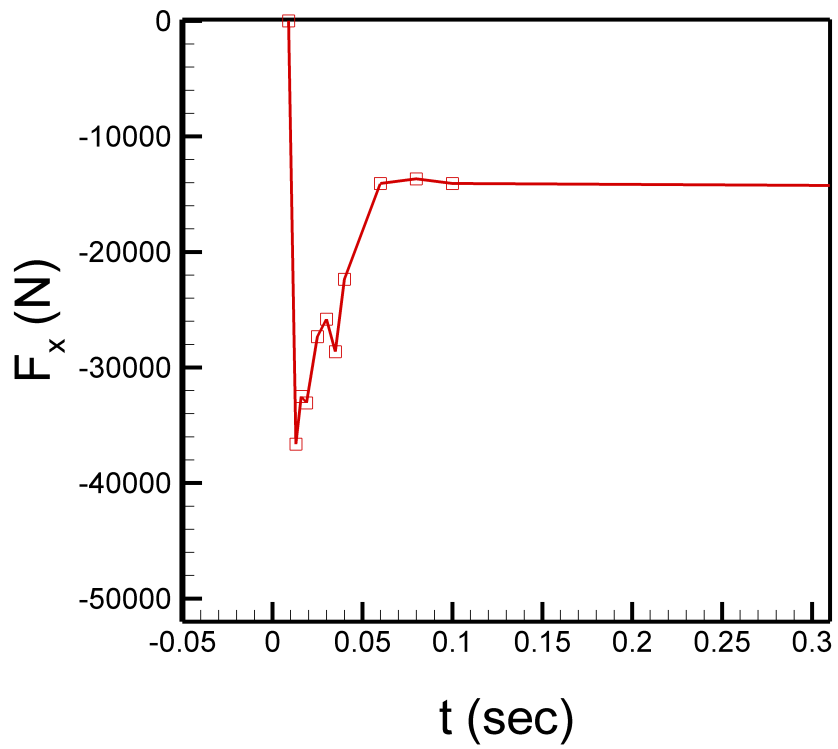


圖 3.56 120 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖

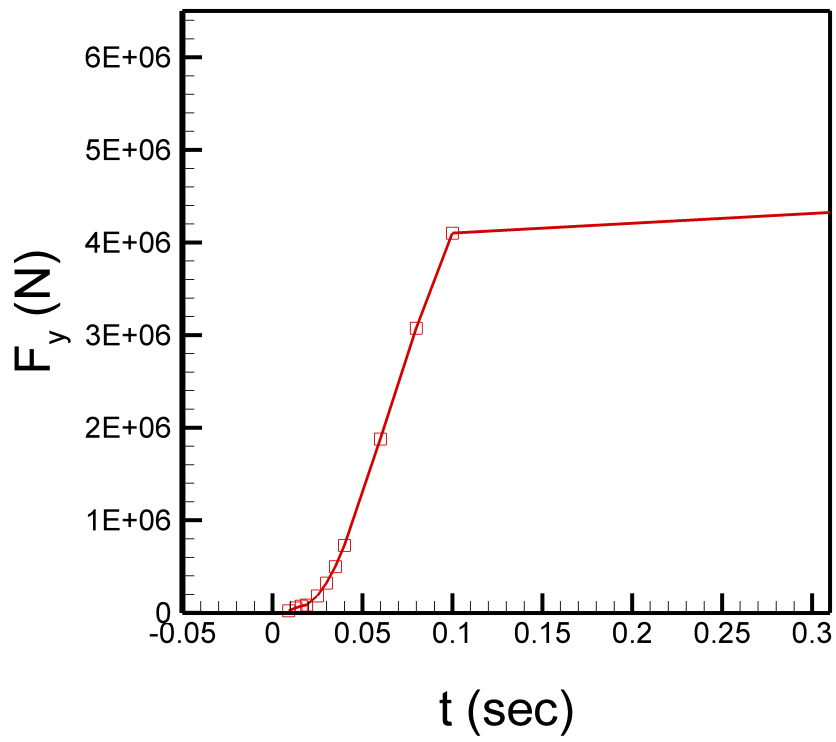


圖 3.57 120 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_y$ )圖

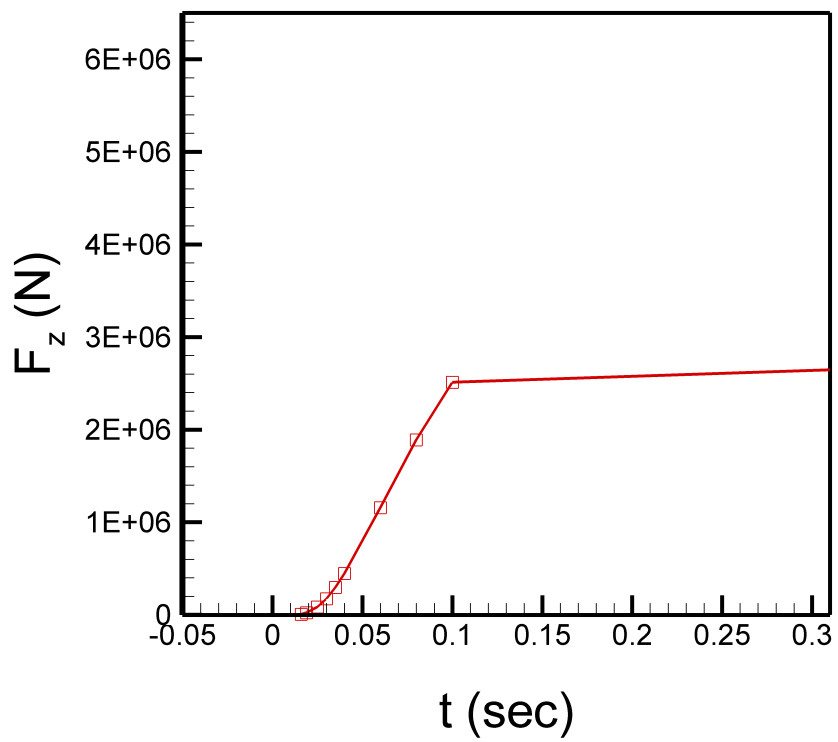


圖 3.58 120 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖

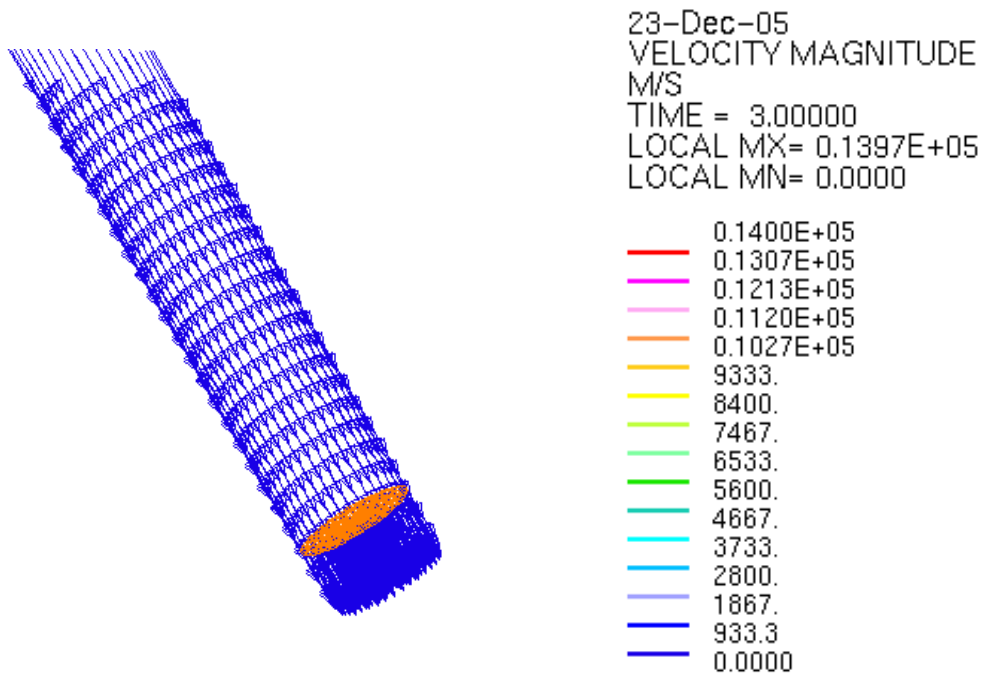
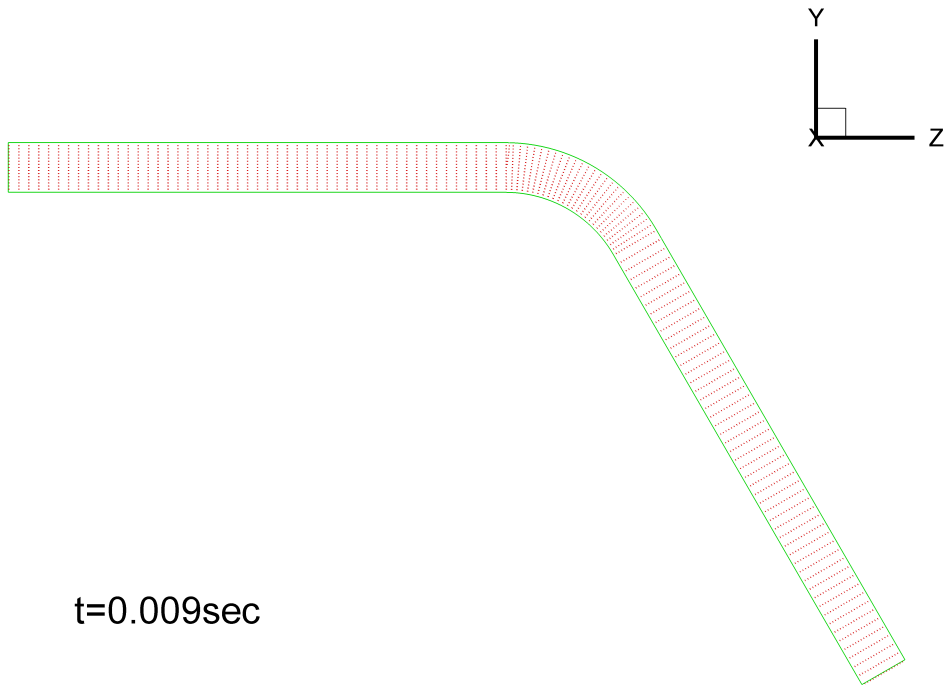


圖 3.59 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速向量圖  
(120 度彎管軸向斷裂)



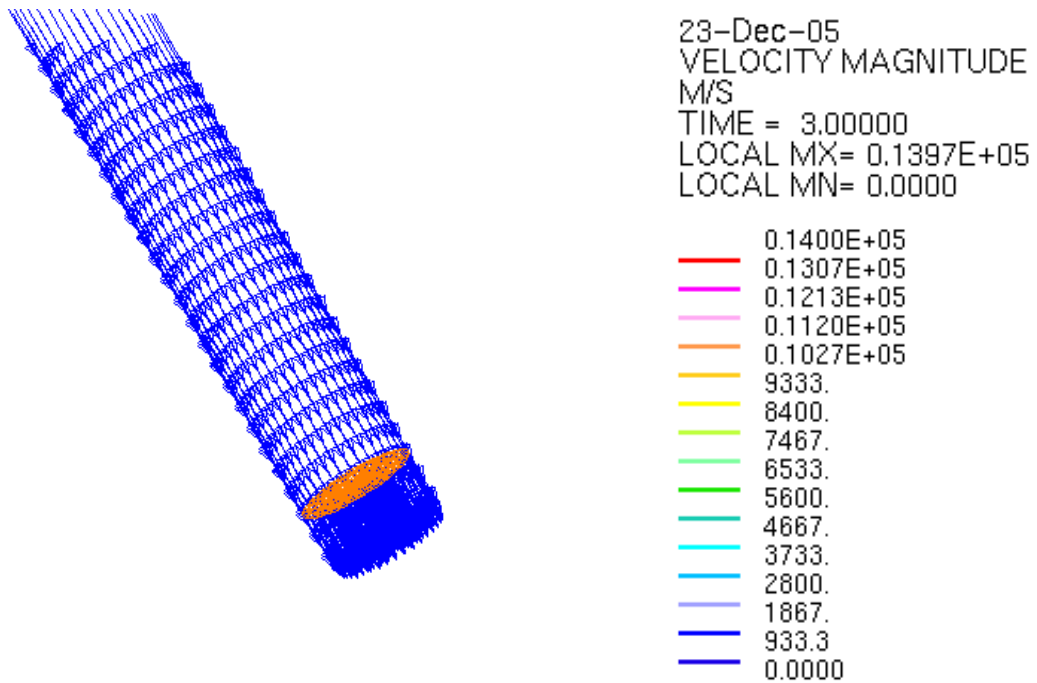
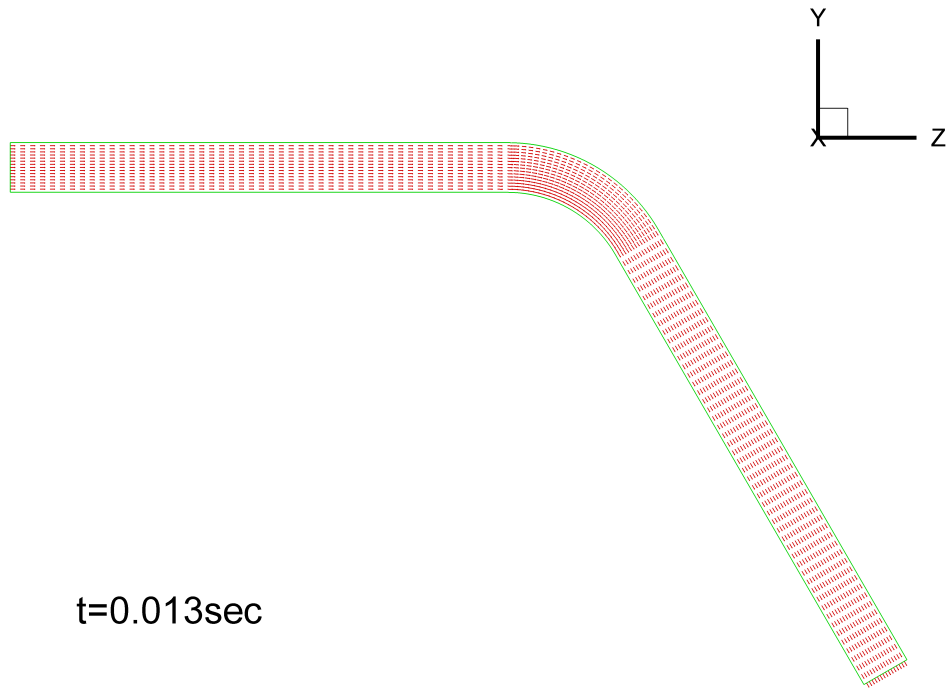


圖 3.60  $t=0.013\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
 (120 度彎管軸向斷裂)

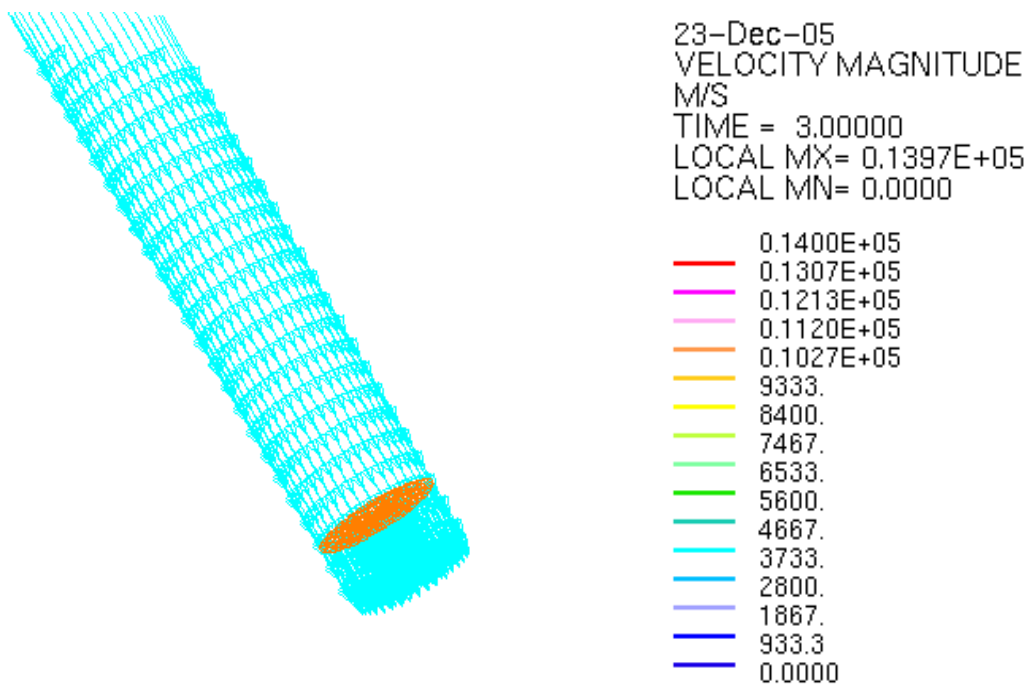
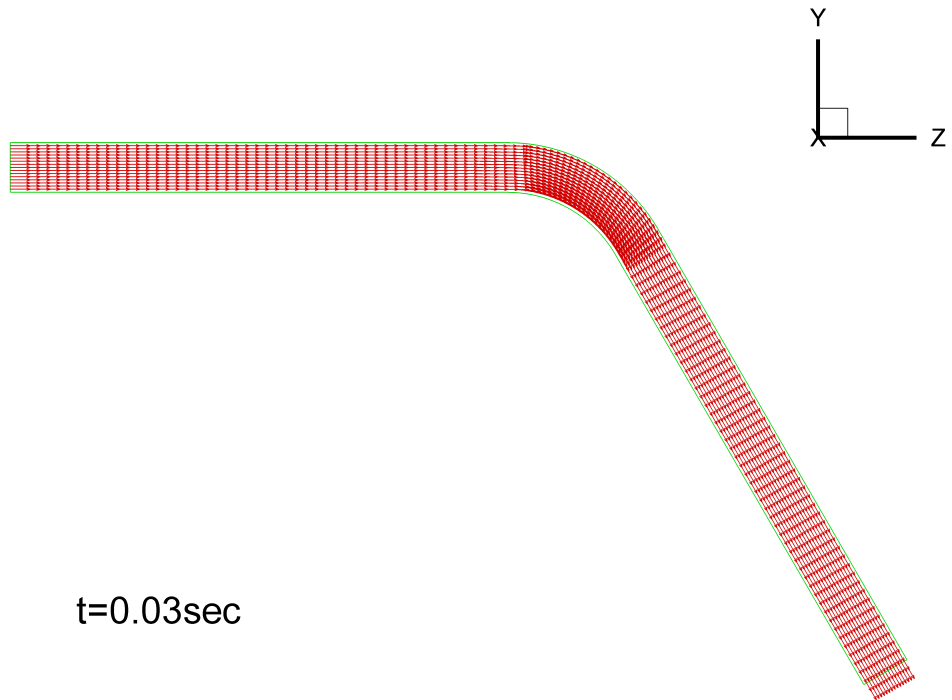


圖 3.61  $t=0.03\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

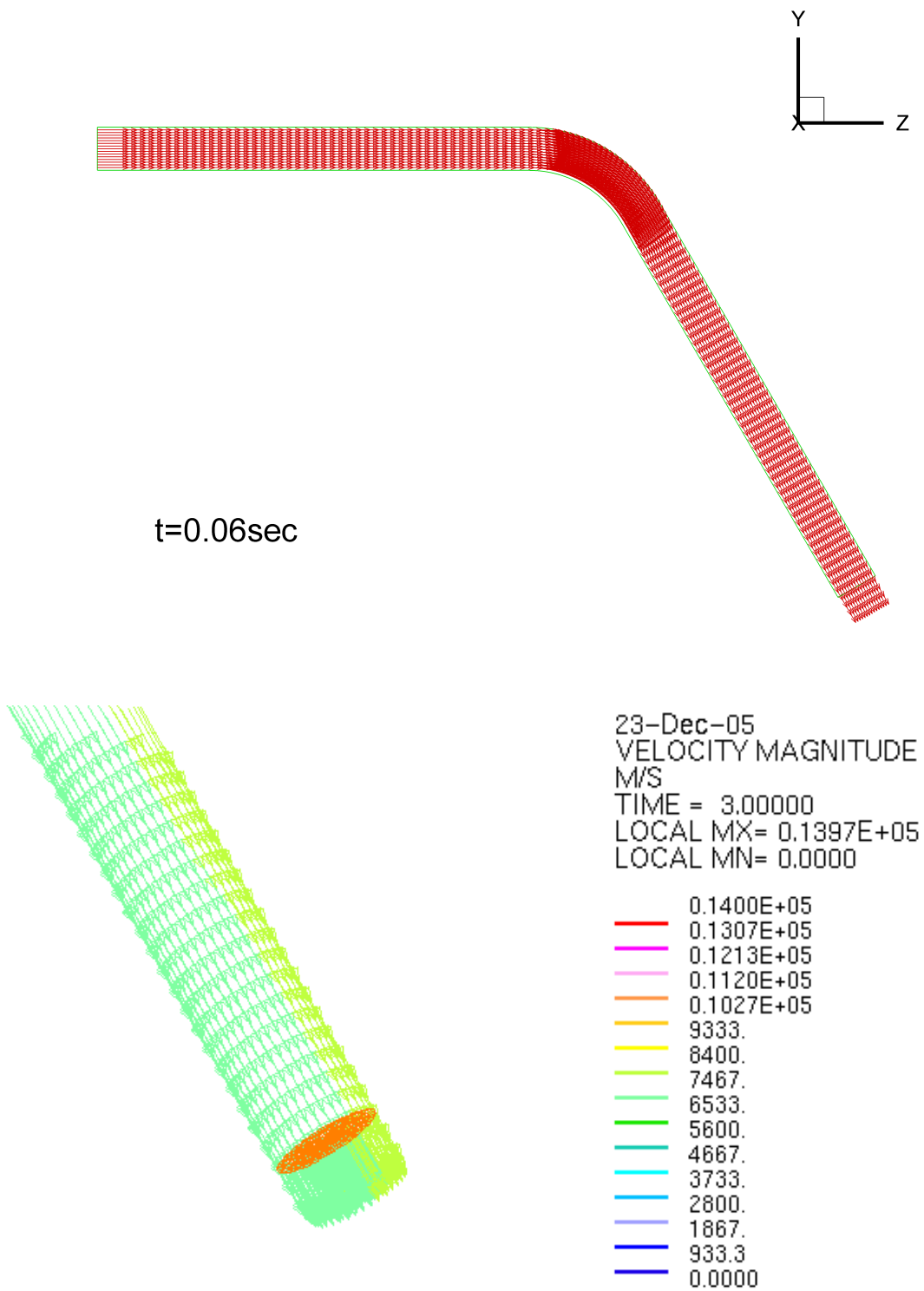


圖 3.62 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速向量圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

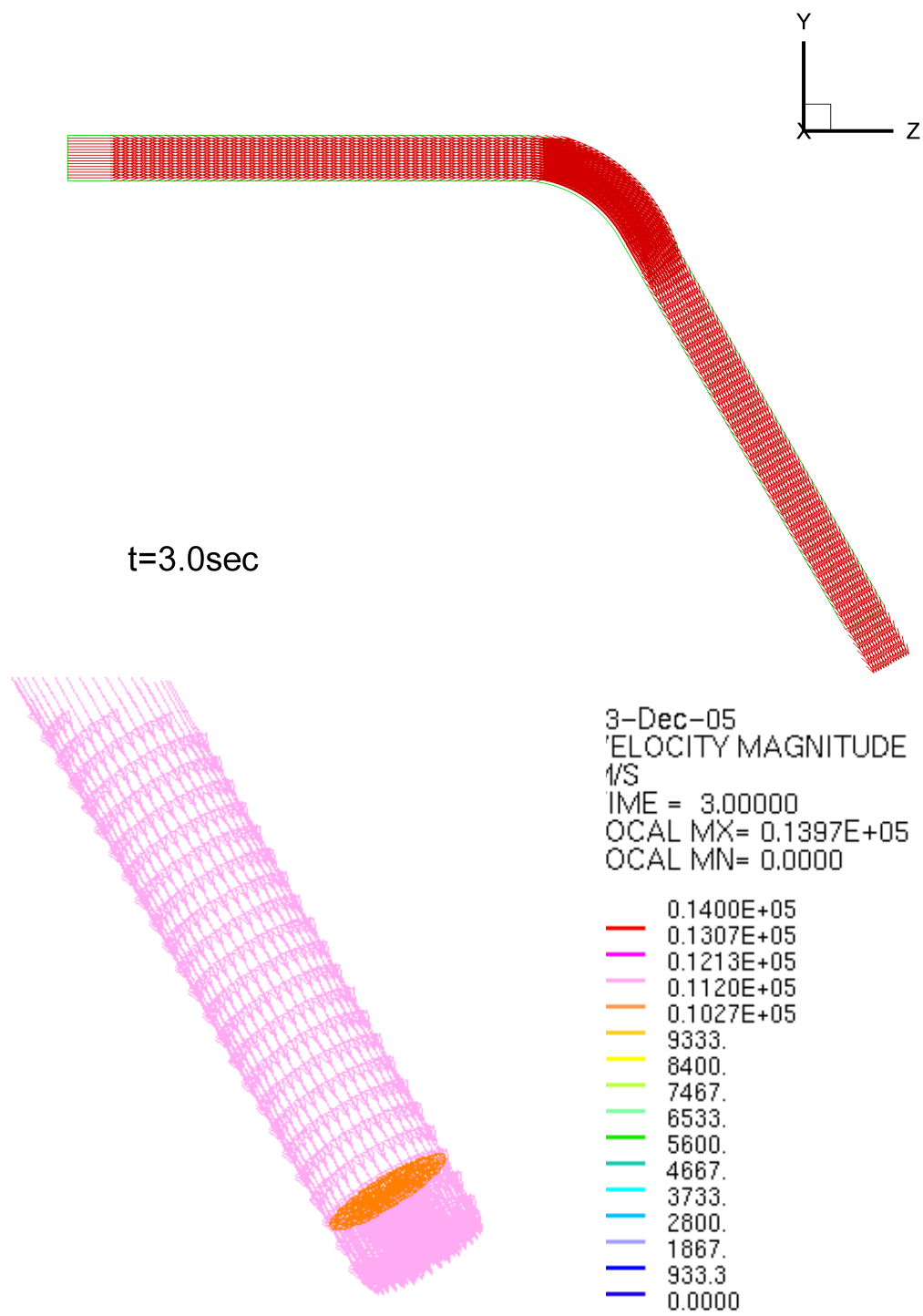


圖 3.63 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速向量圖  
 (120 度彎管軸向斷裂)

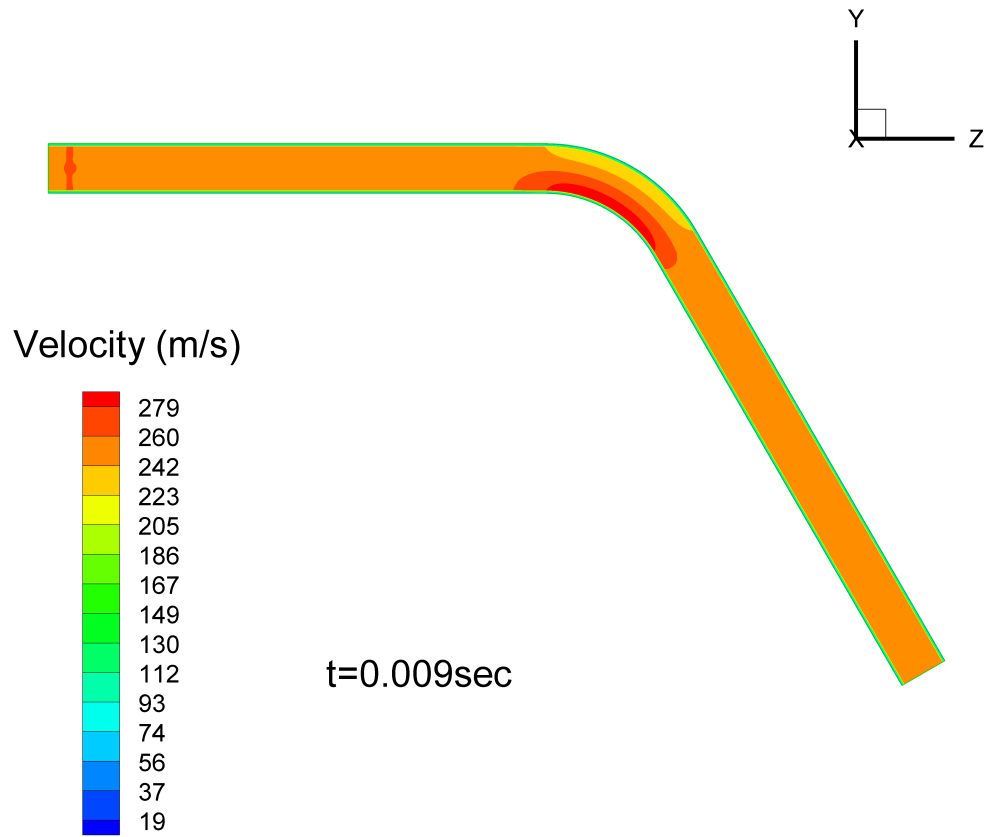


圖 3.64 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

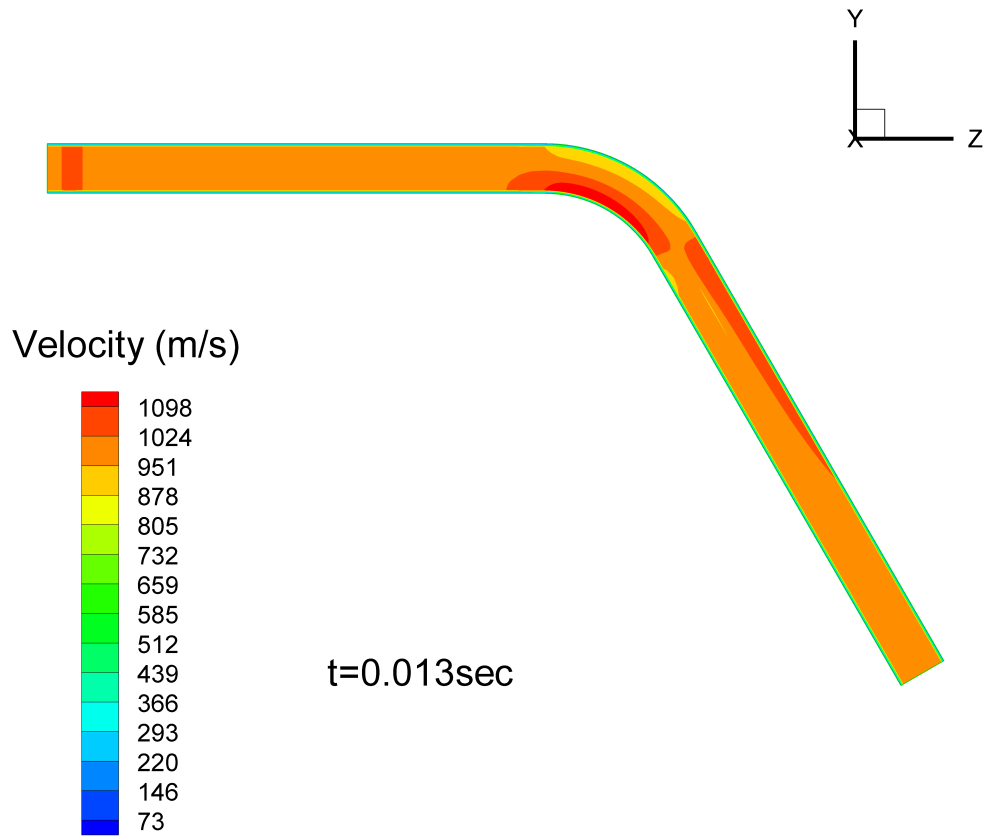


圖 3.65  $t=0.013\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

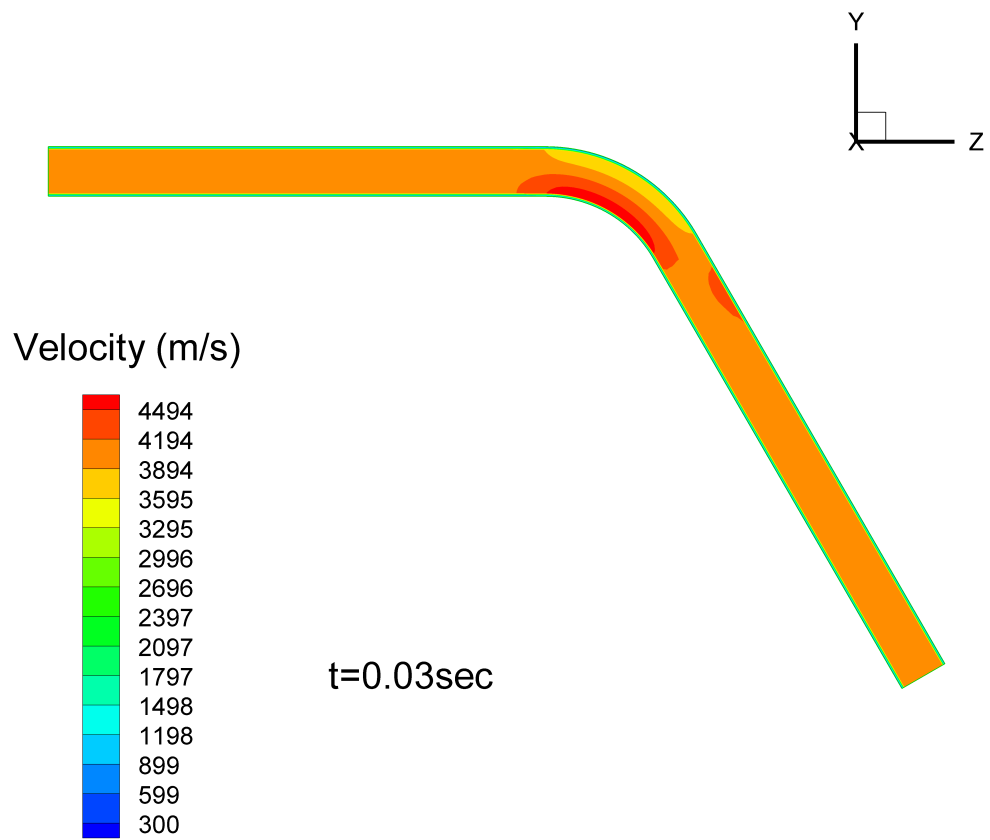


圖 3.66 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

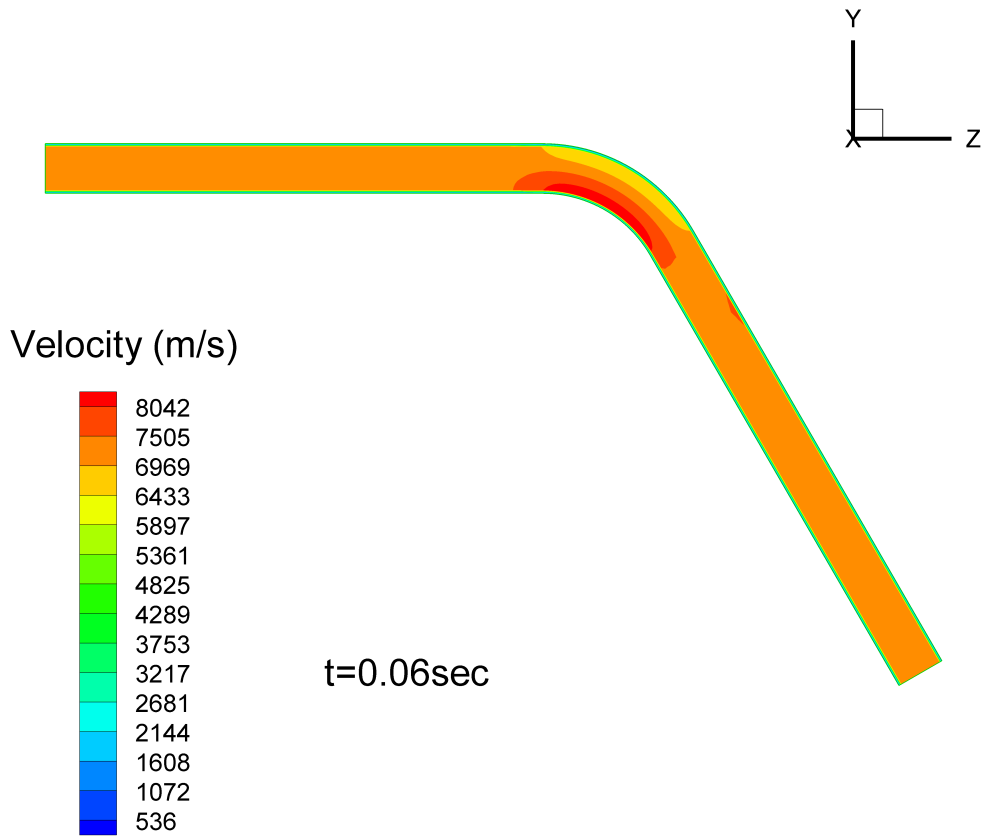


圖 3.67  $t=0.06\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)



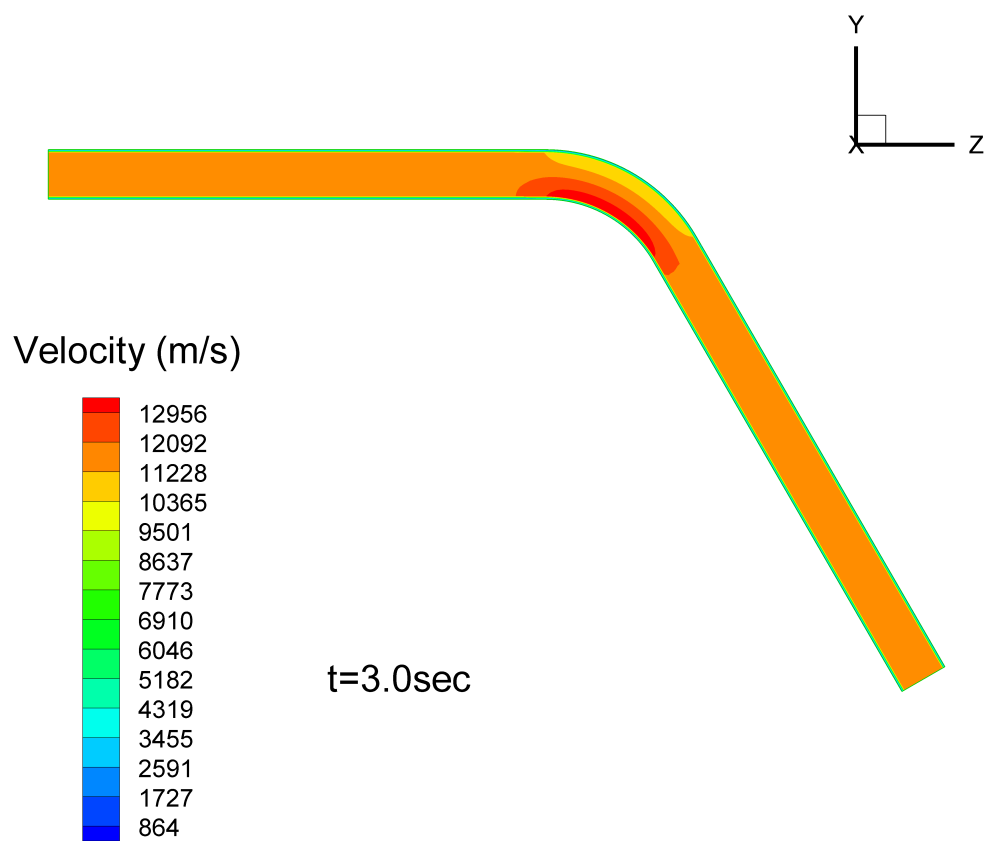


圖 3.68 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

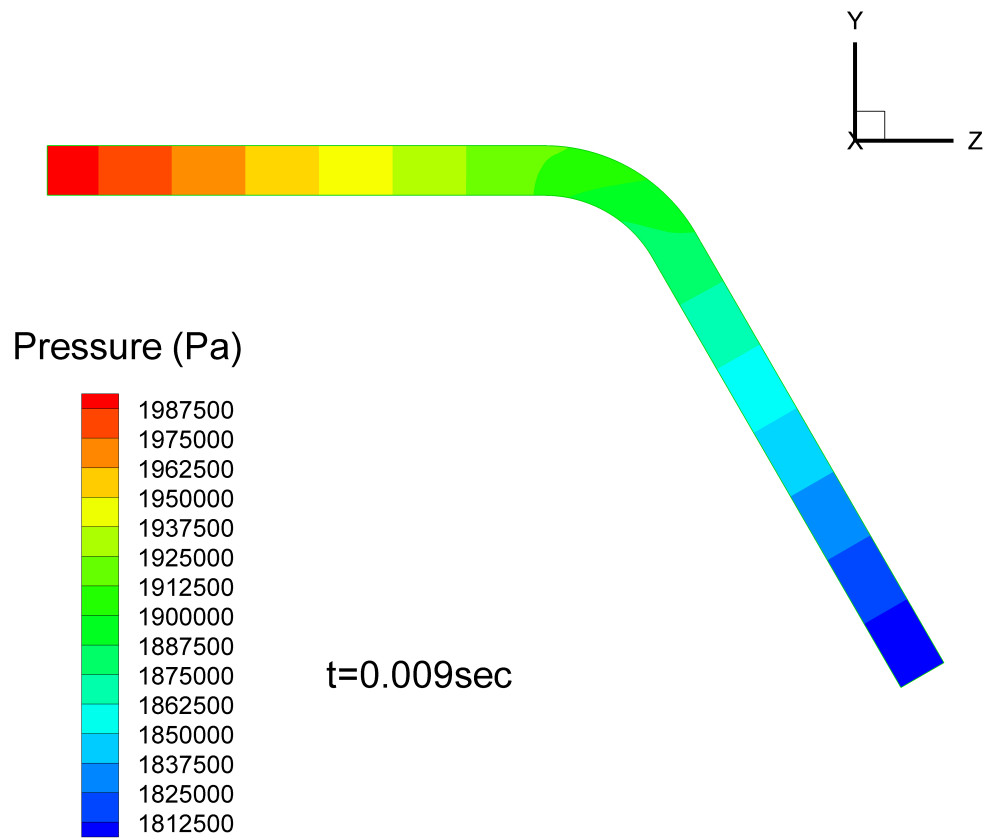


圖 3.69 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

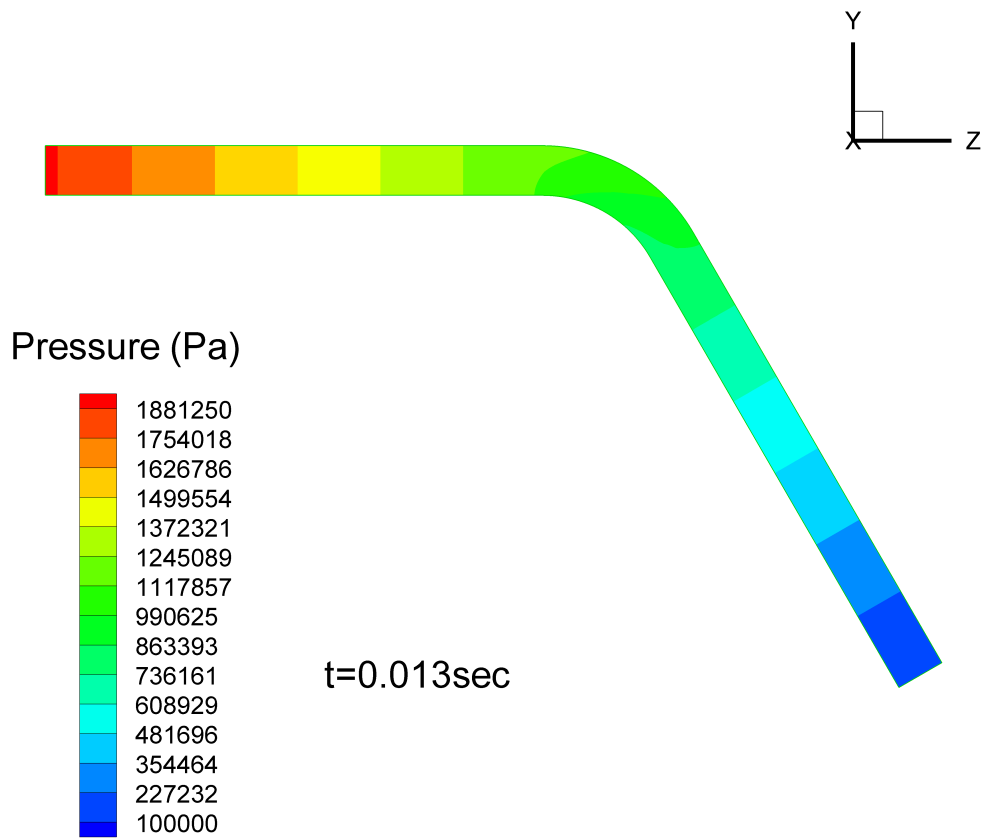


圖 3.70 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

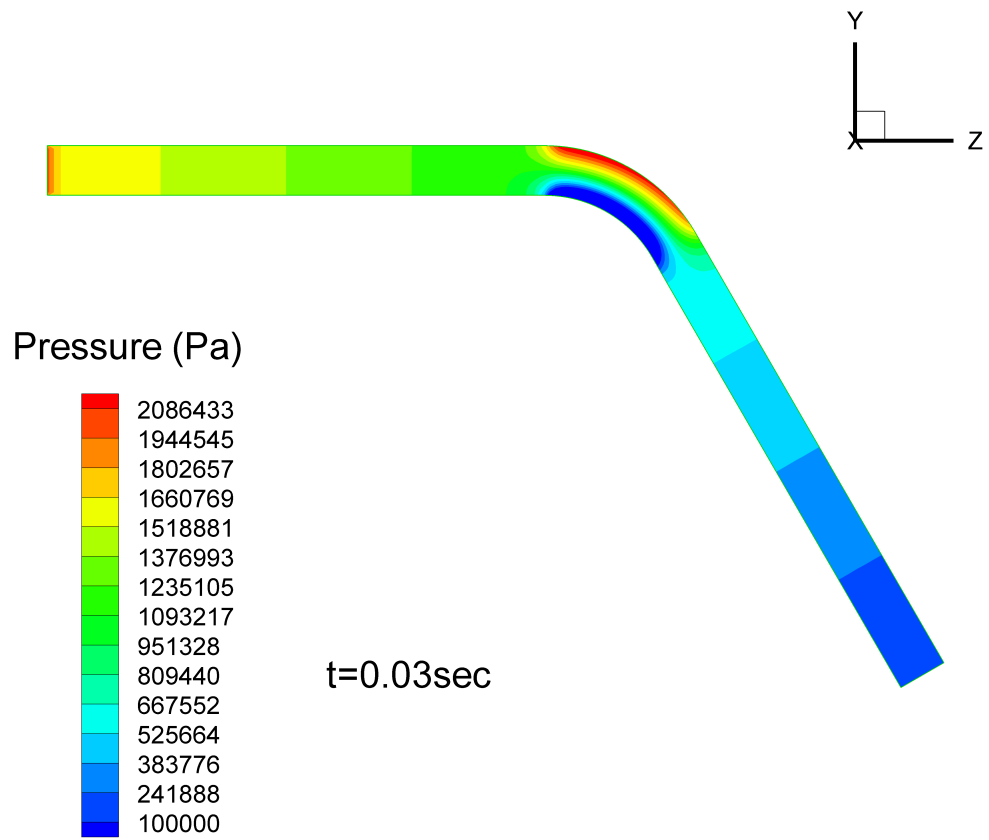


圖 3.71 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

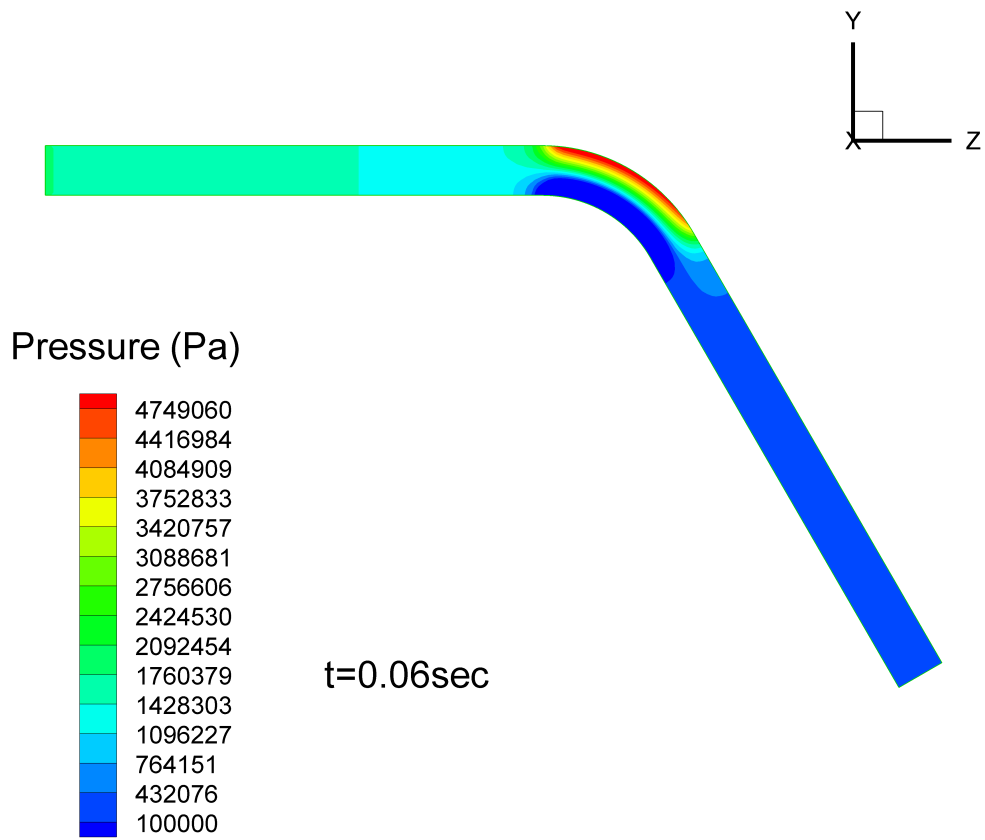


圖 3.72 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

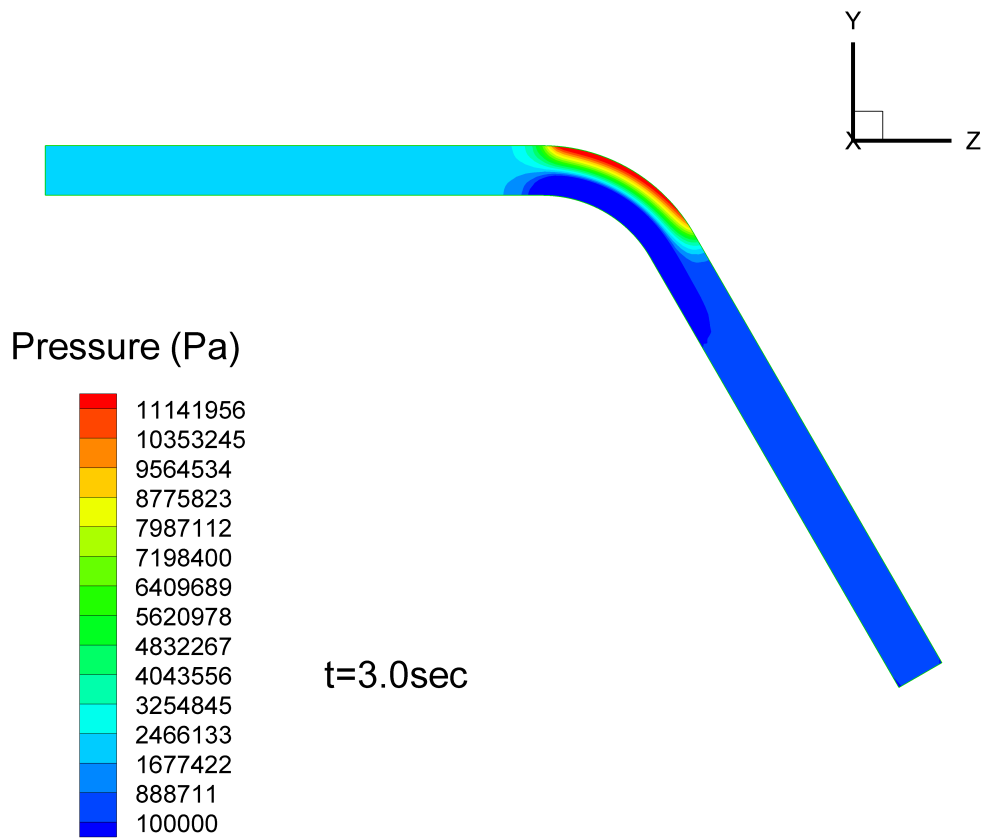


圖 3.73 t=3.0sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(120 度彎管軸向斷裂)

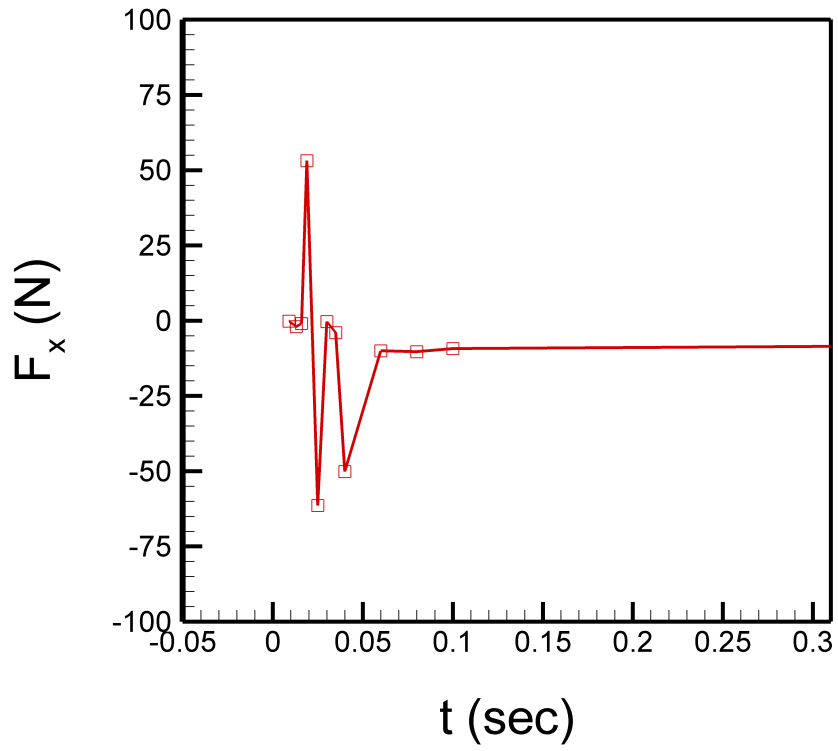


圖 3.74 120 度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_x$ )圖

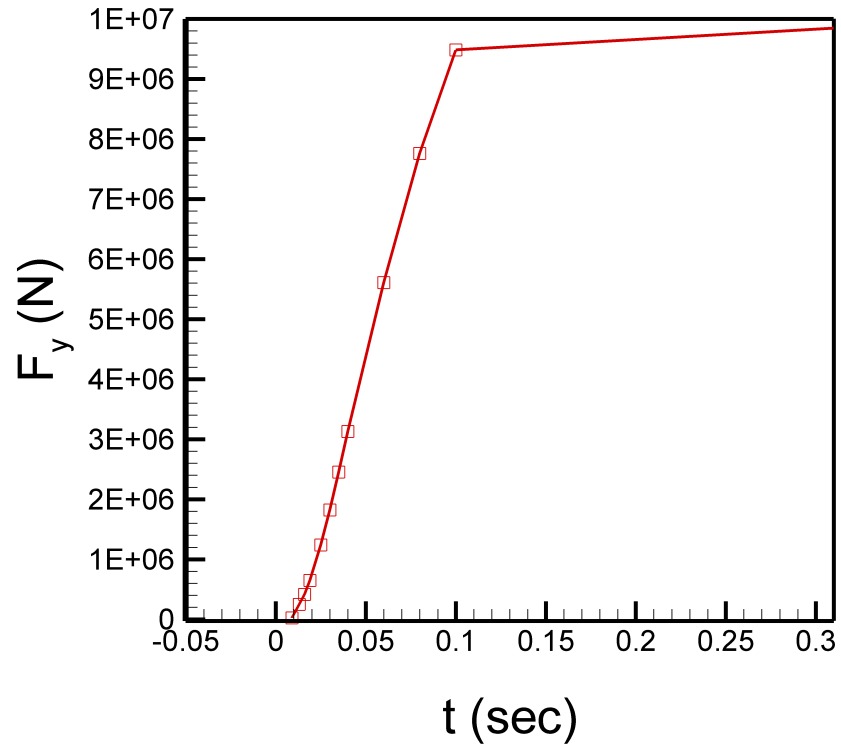


圖 3.75 120 度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_y$ )圖



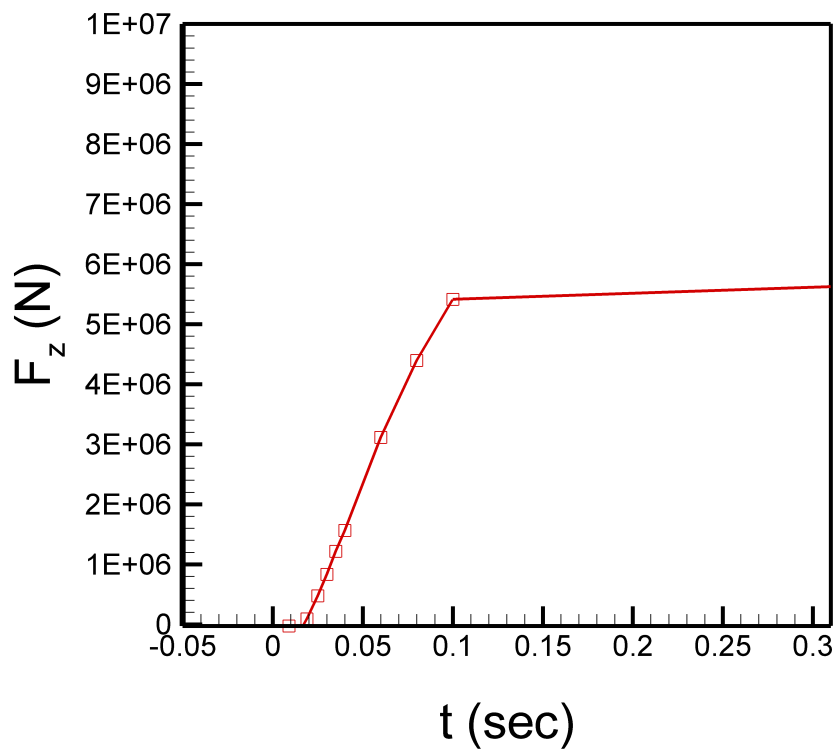


圖 3.76 120 度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_z$ )圖

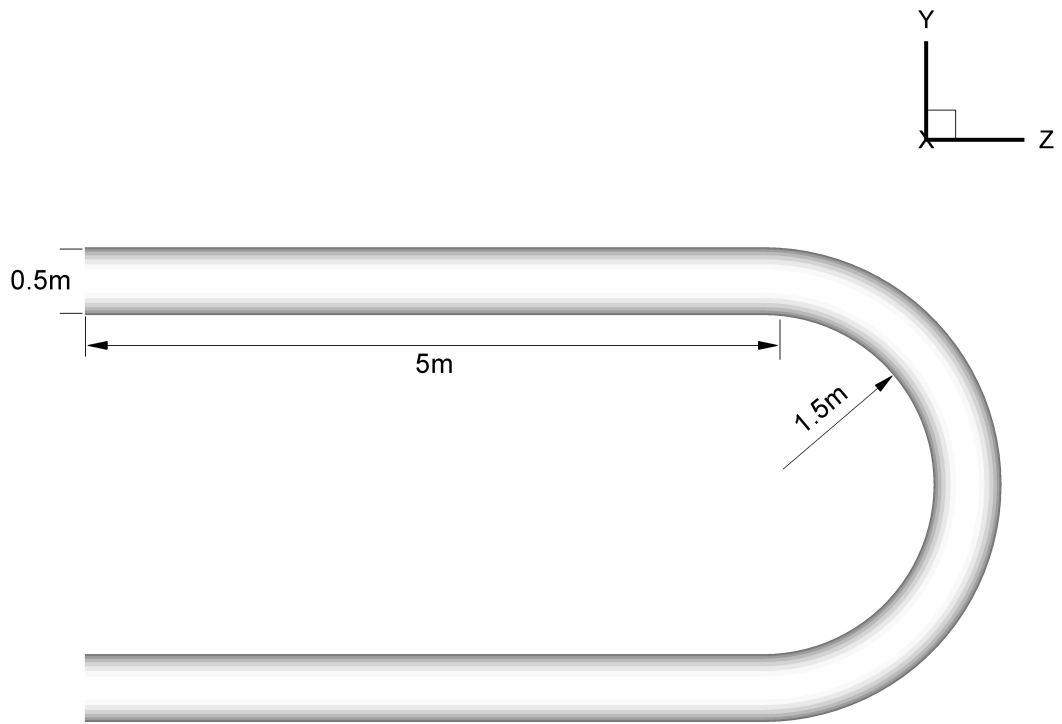


圖 3.77 180 度彎管之尺寸圖

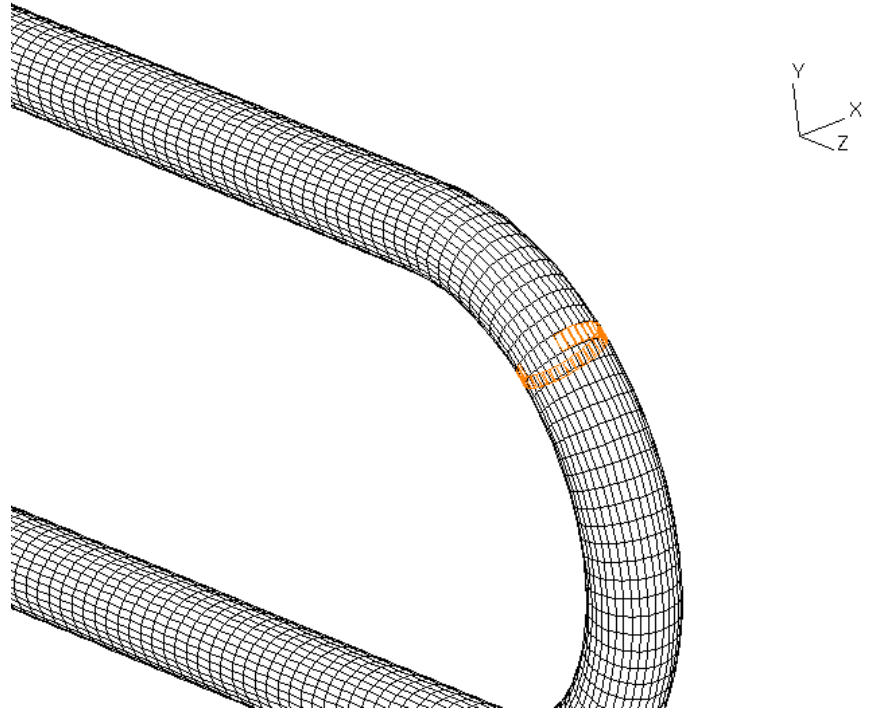


圖 3.78 180 度彎管圓周向破裂之位置圖

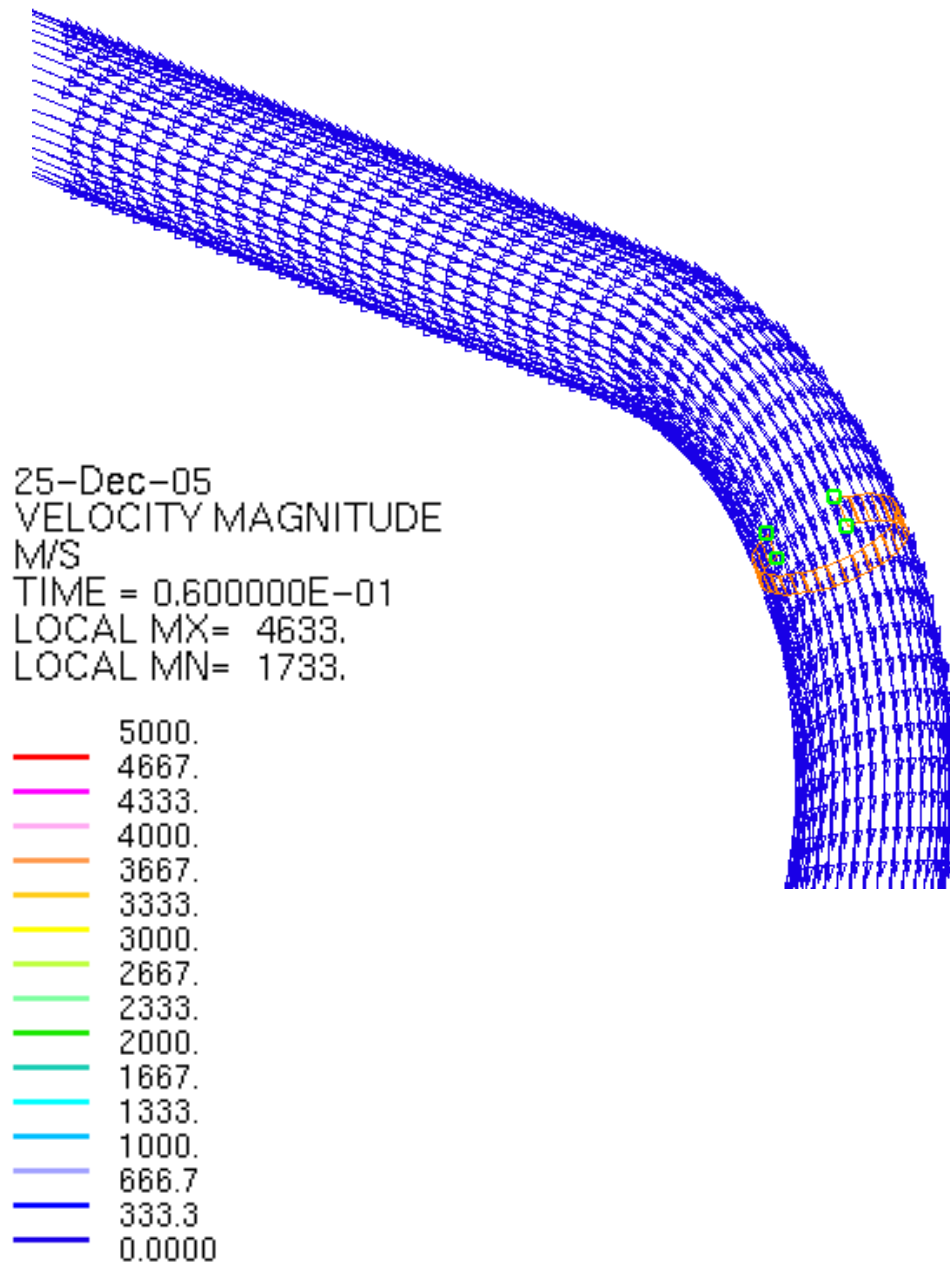


圖 3.79  $t=0.009\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (180 度彎管圓周向破裂)

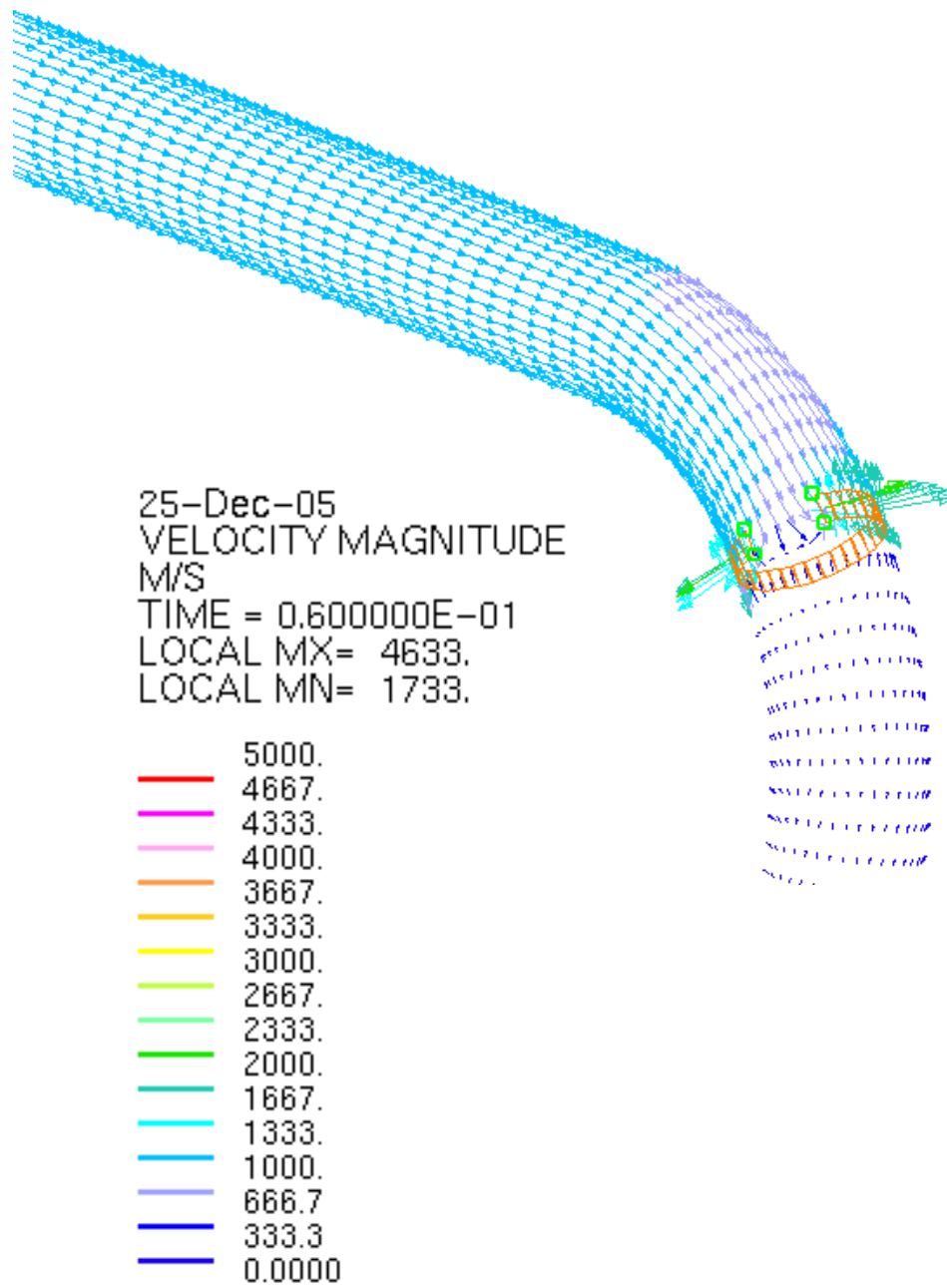


圖 3.80  $t=0.013\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (180 度彎管圓周向破裂)

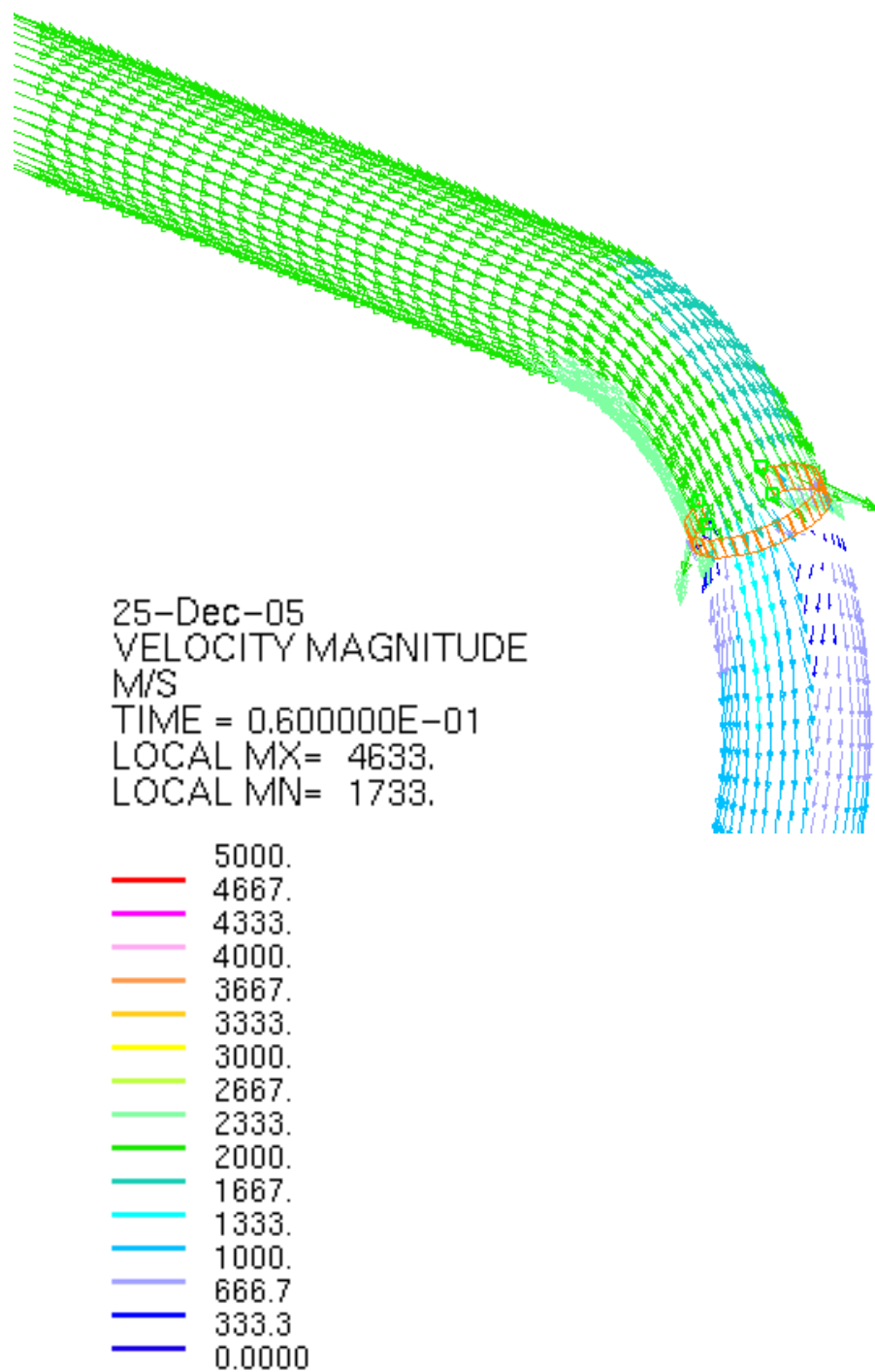


圖 3.81  $t=0.03\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (180 度彎管圓周向破裂)

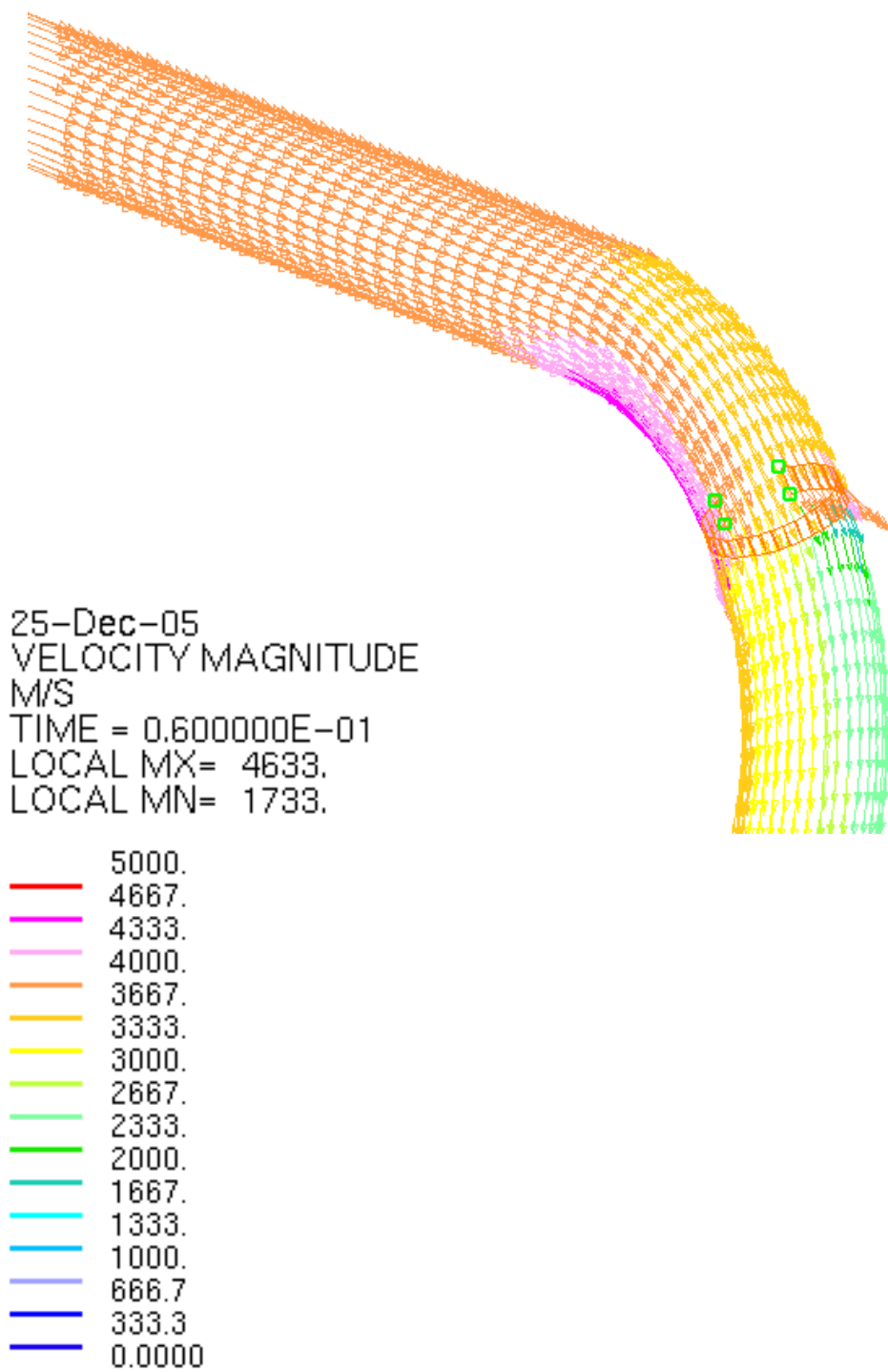


圖 3.82  $t=0.06\text{sec}$  時，在最接近管壁處之內圈上之流體流動之情況  
 (180 度彎管圓周向破裂)

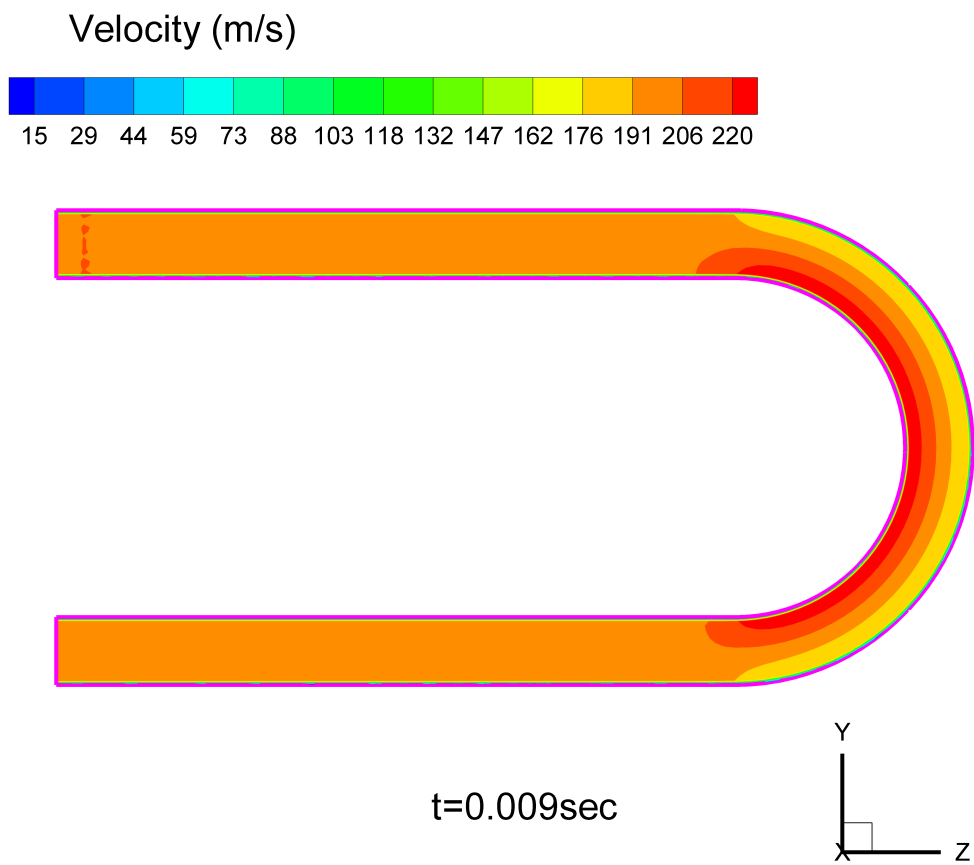


圖 3.83  $t=0.009\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速之分佈圖  
(180 度彎管圓周向破裂)



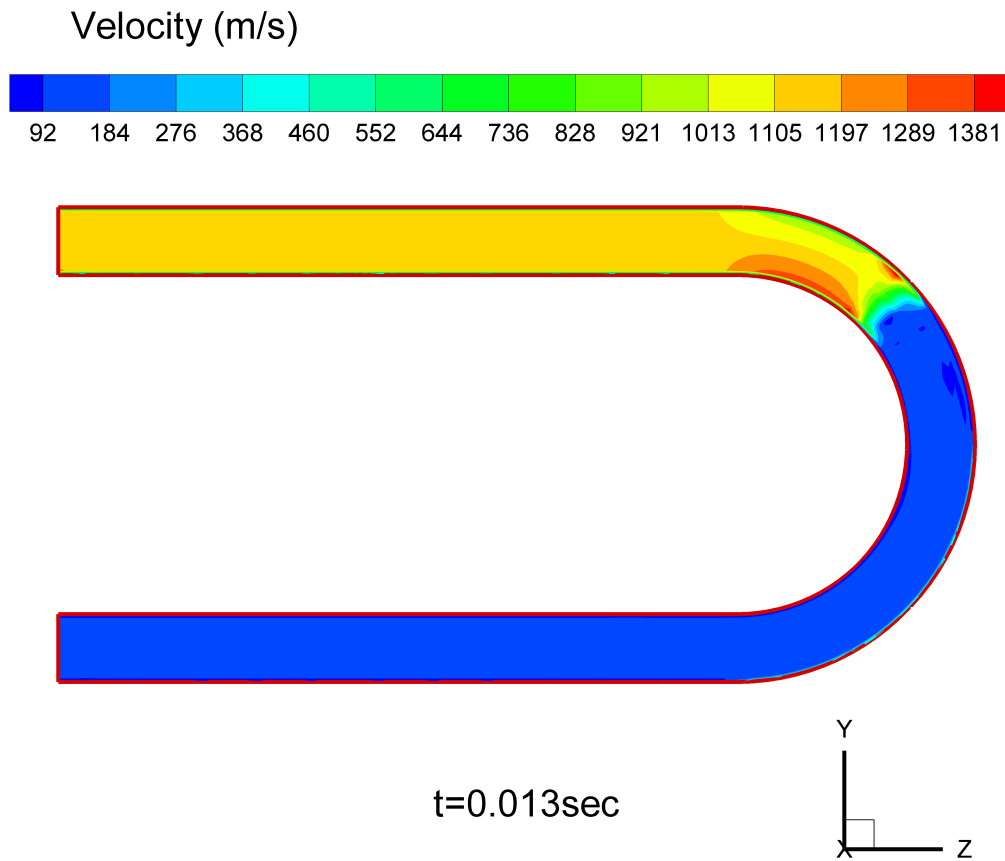


圖 3.84  $t=0.013\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速之分佈圖  
(180 度彎管圓周向破裂)

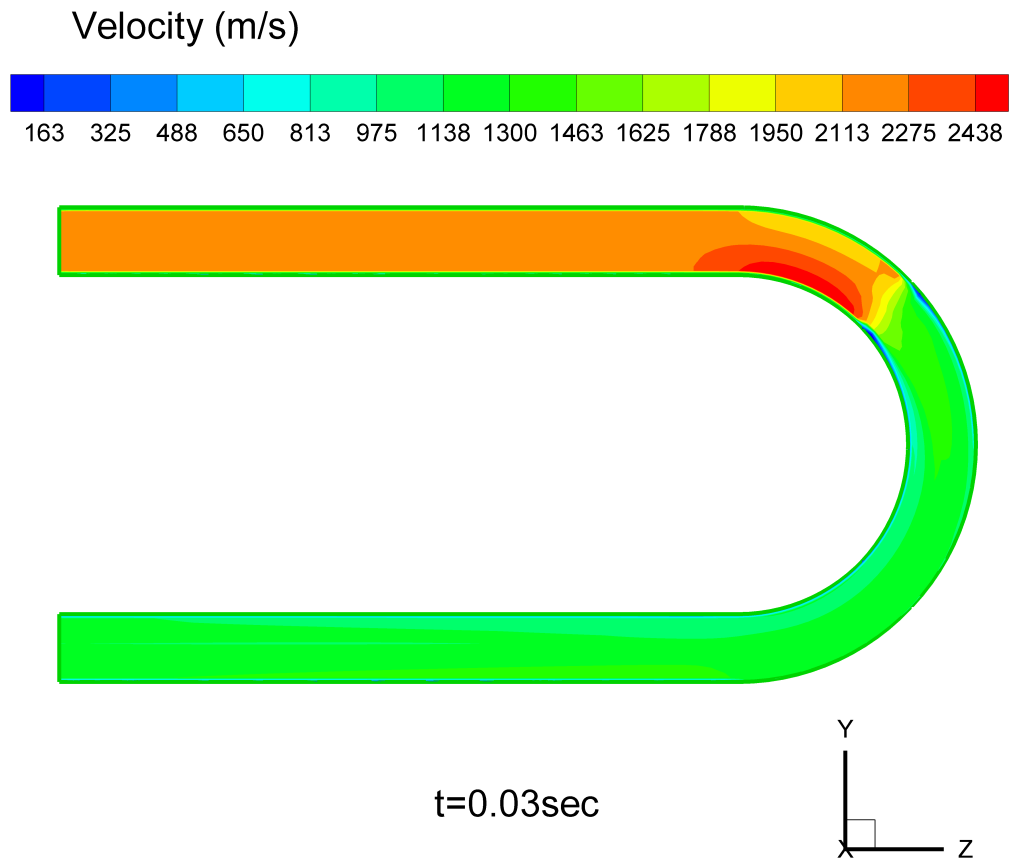


圖 3.85  $t=0.03\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速之分佈圖  
(180 度彎管圓周向破裂)

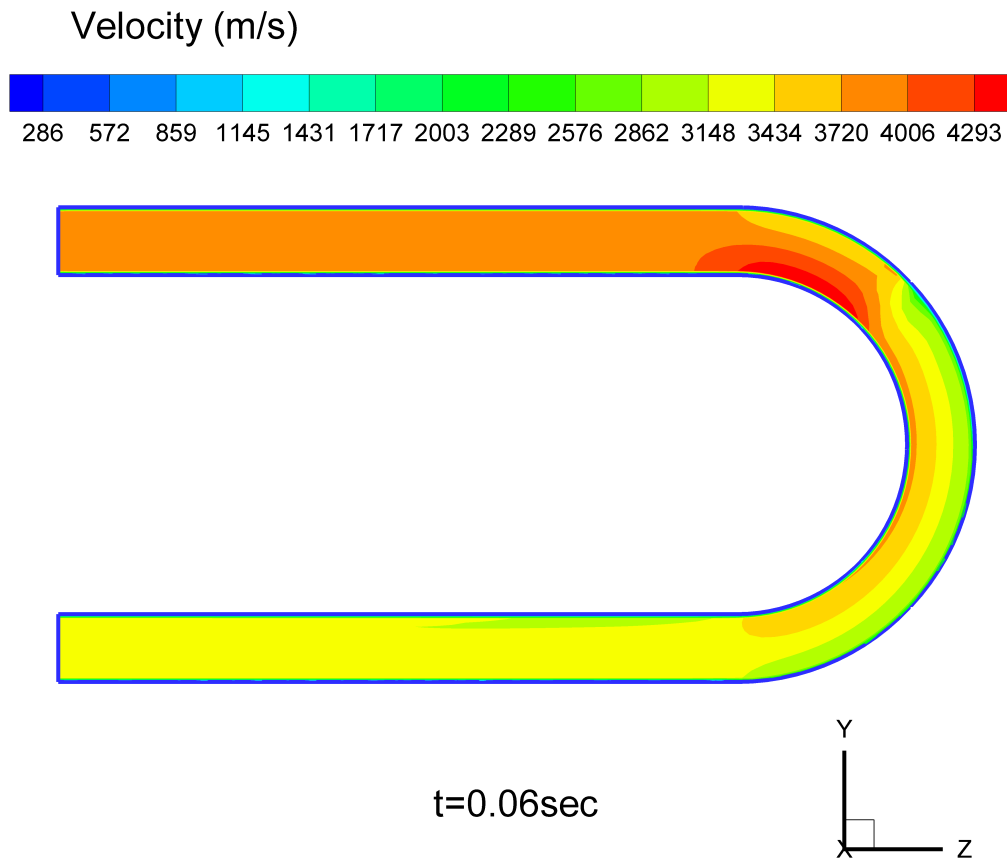
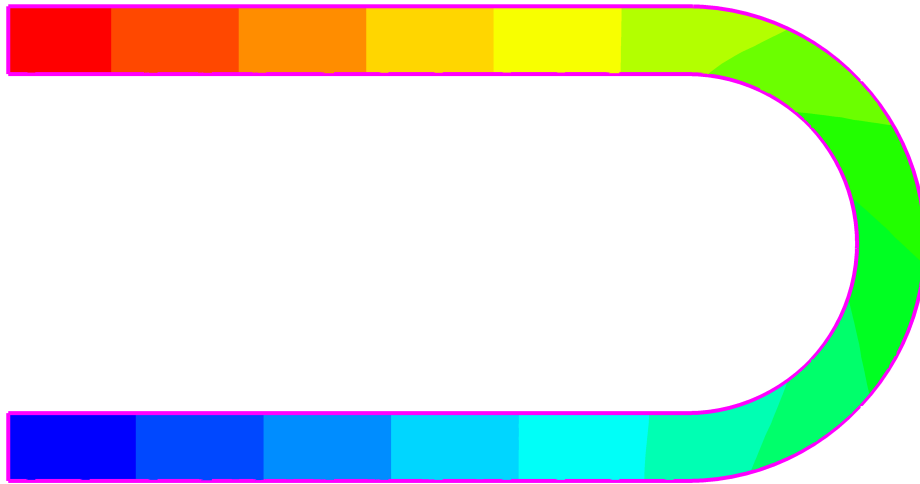
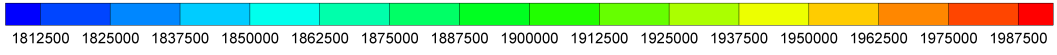


圖 3.86  $t=0.06\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速之分佈圖  
(180 度彎管圓周向破裂)

Pressure (Pa)



t=0.009sec

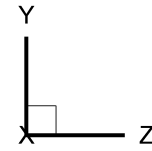


圖 3.87 t=0.009sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(180 度彎管圓周向破裂)

Pressure (Pa)

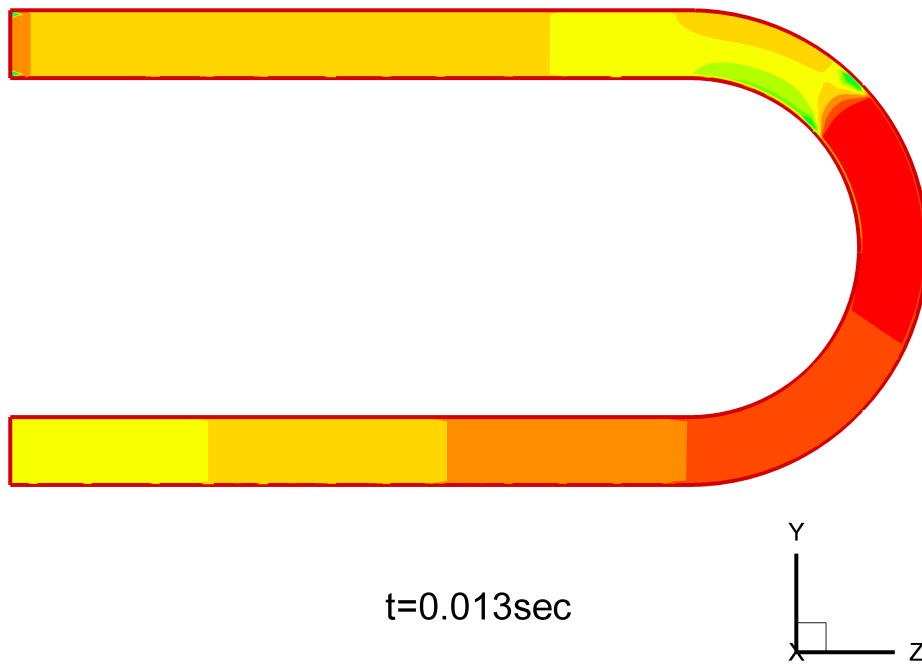
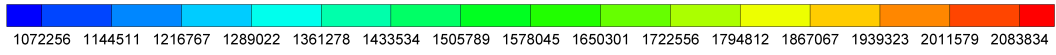


圖 3.88 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(180 度彎管圓周向破裂)

Pressure (Pa)

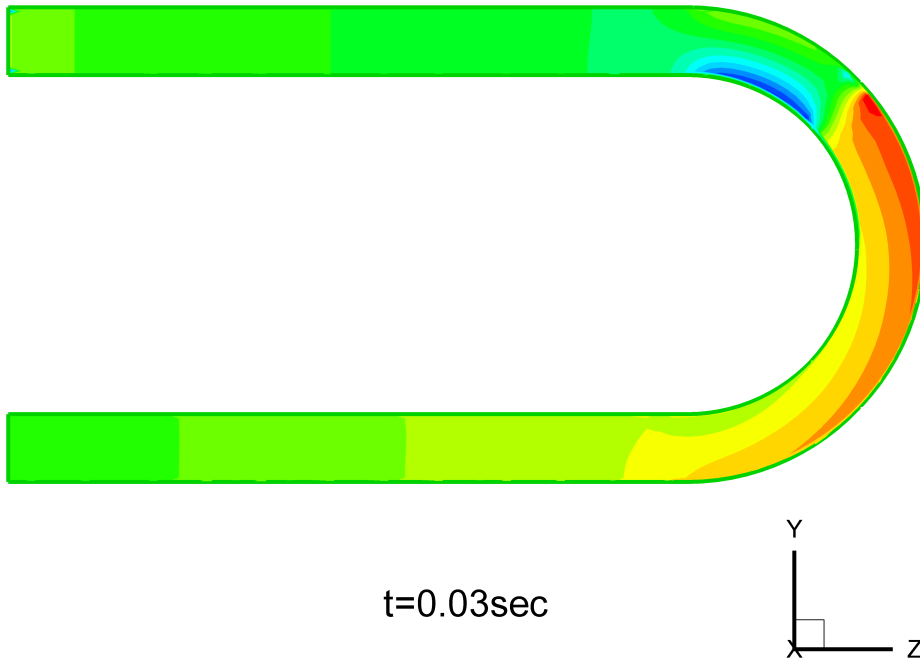
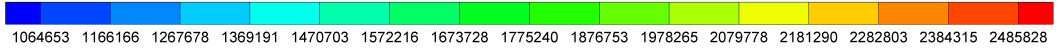
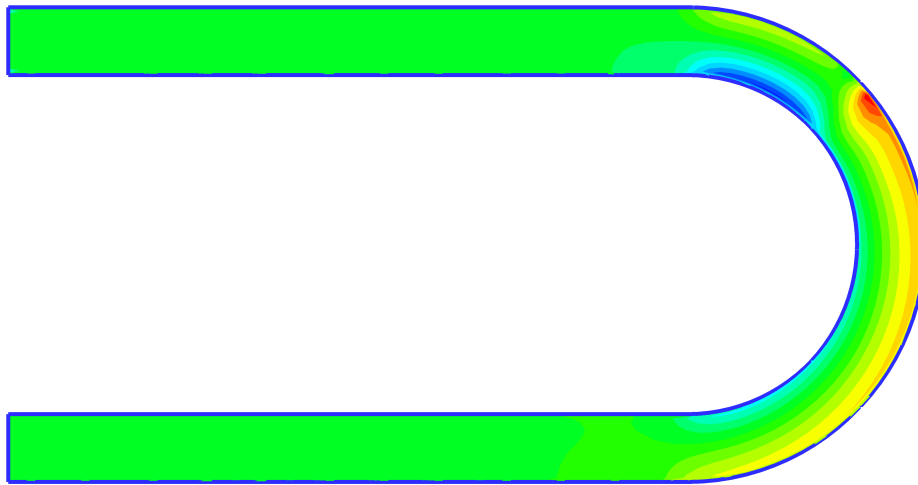
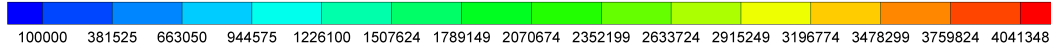


圖 3.89 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(180 度彎管圓周向破裂)

Pressure (Pa)



t=0.06sec

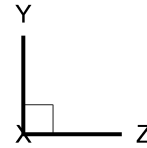


圖 3.90 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力之分佈圖  
(180 度彎管圓周向破裂)

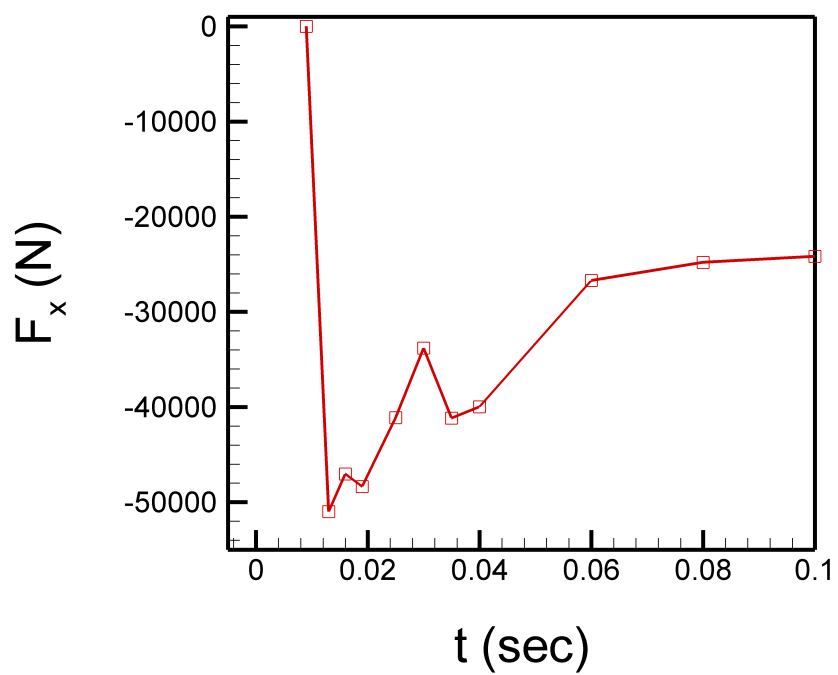


圖 3.91 180 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_x$ )圖



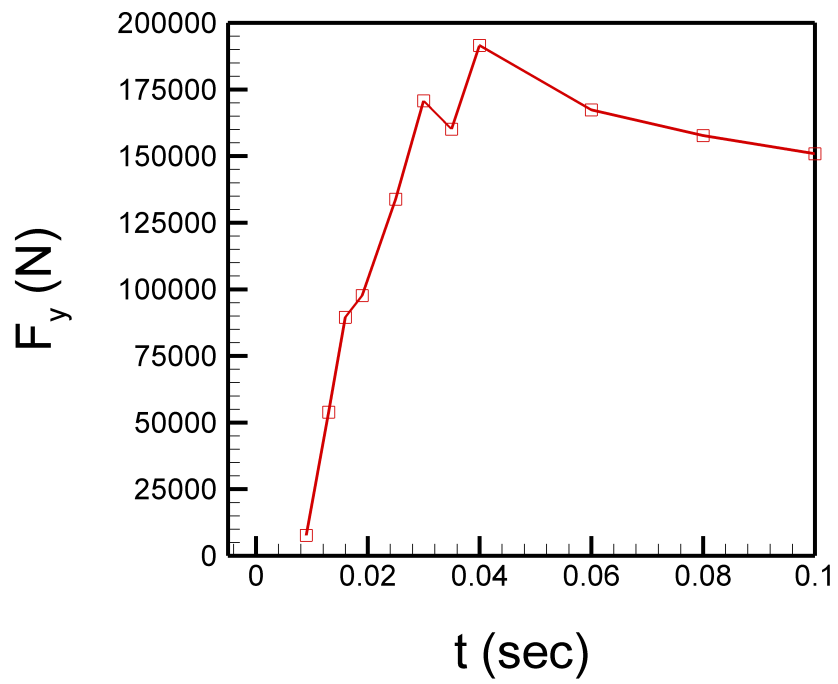


圖 3.92 180 度彎管圓周向破裂前後管路受力( $F_y$ )圖

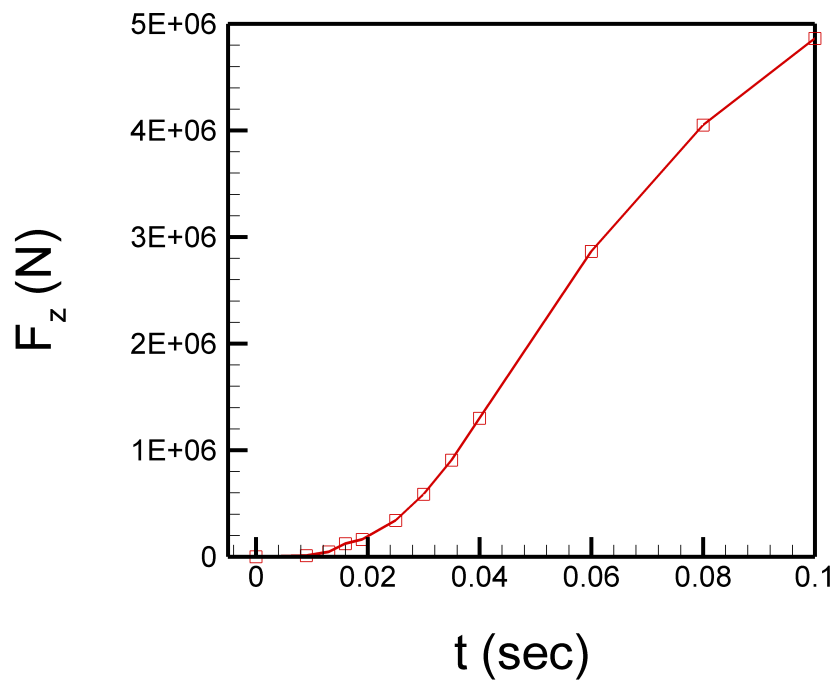


圖 3.93 180 度彎管圓周向破裂前後管路受力(Fx)圖

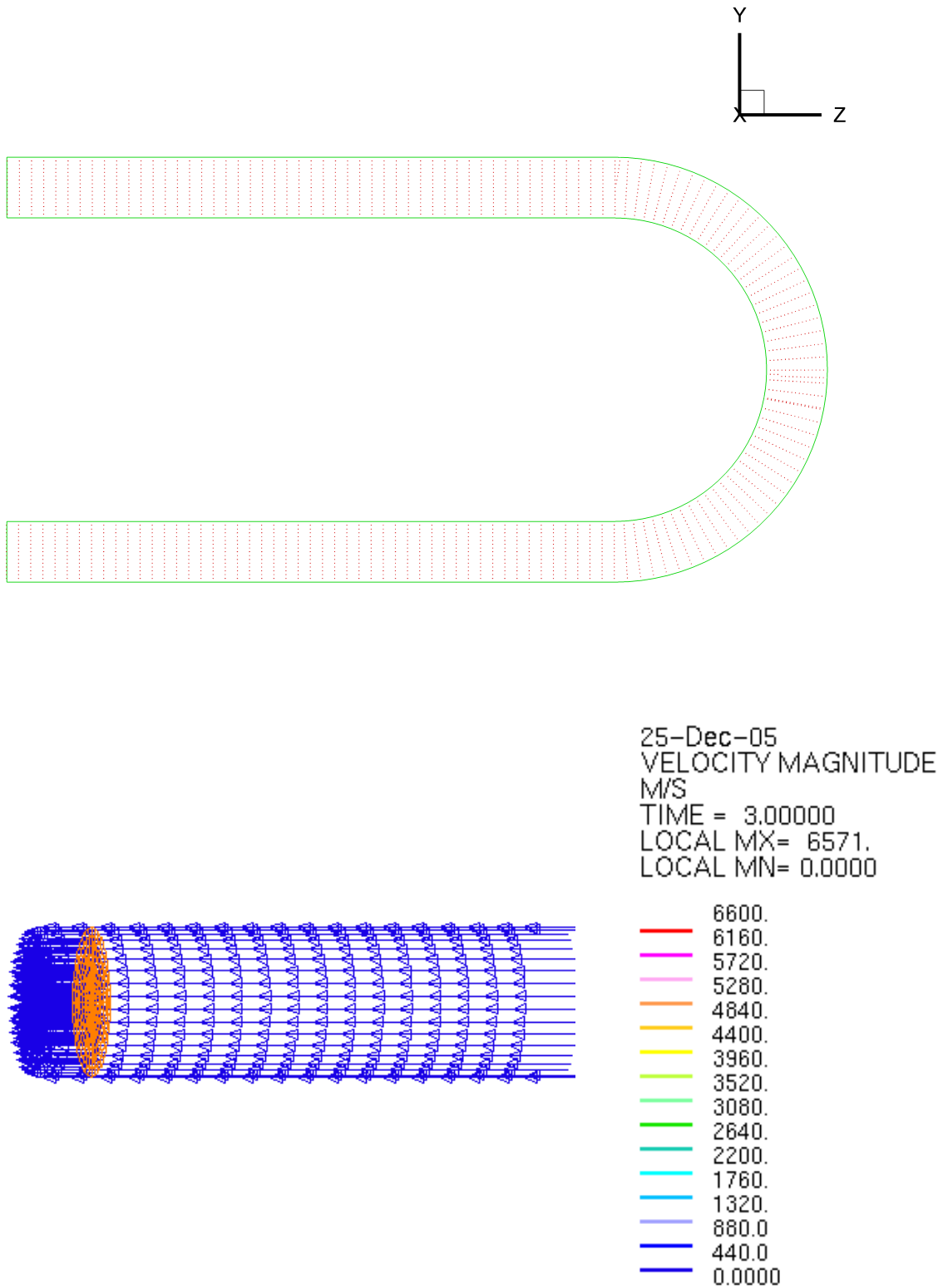


圖 3.94  $t=0.009\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
 (180 度彎管軸向斷裂)

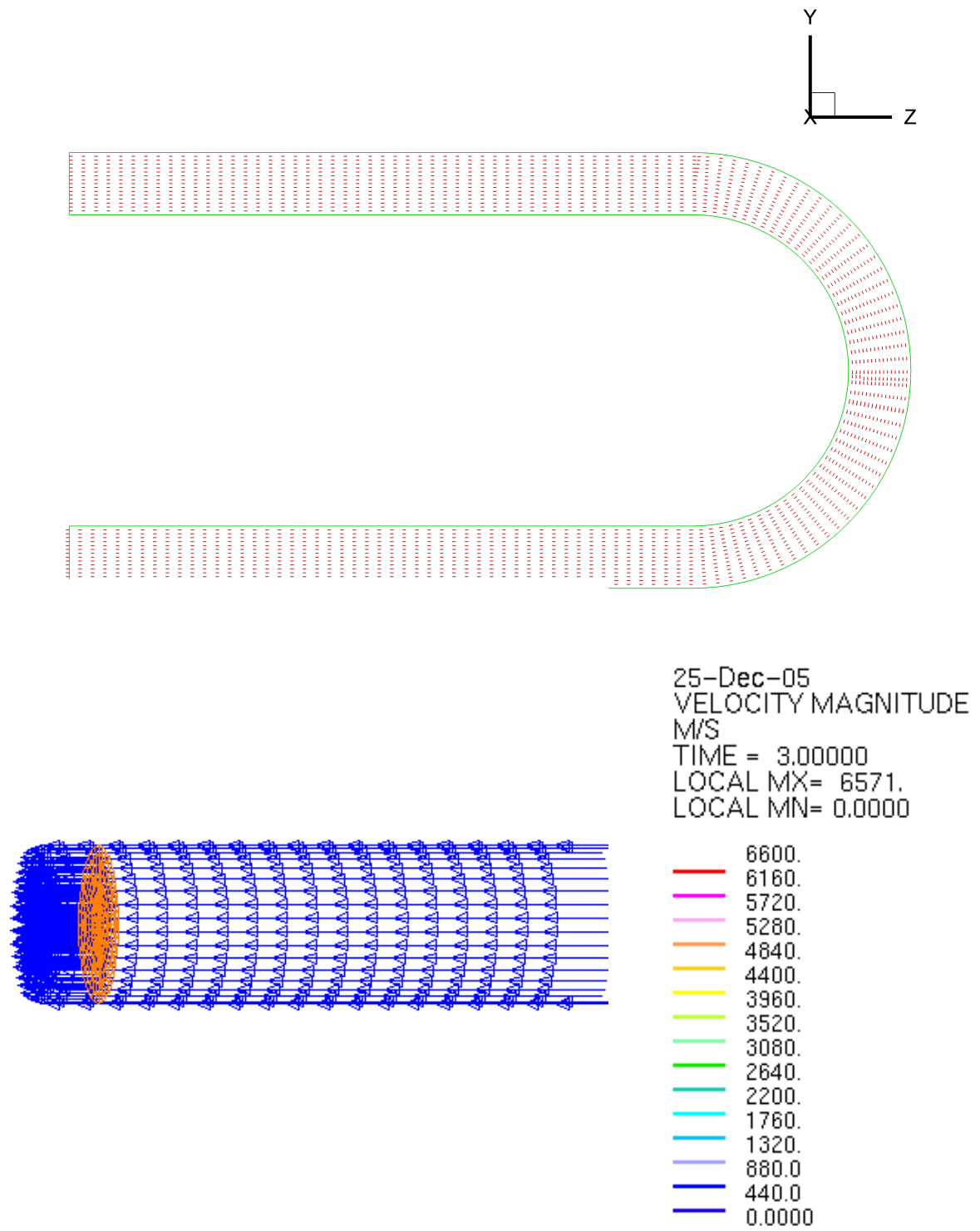


圖 3.95  $t=0.013\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
 (180 度彎管軸向斷裂)

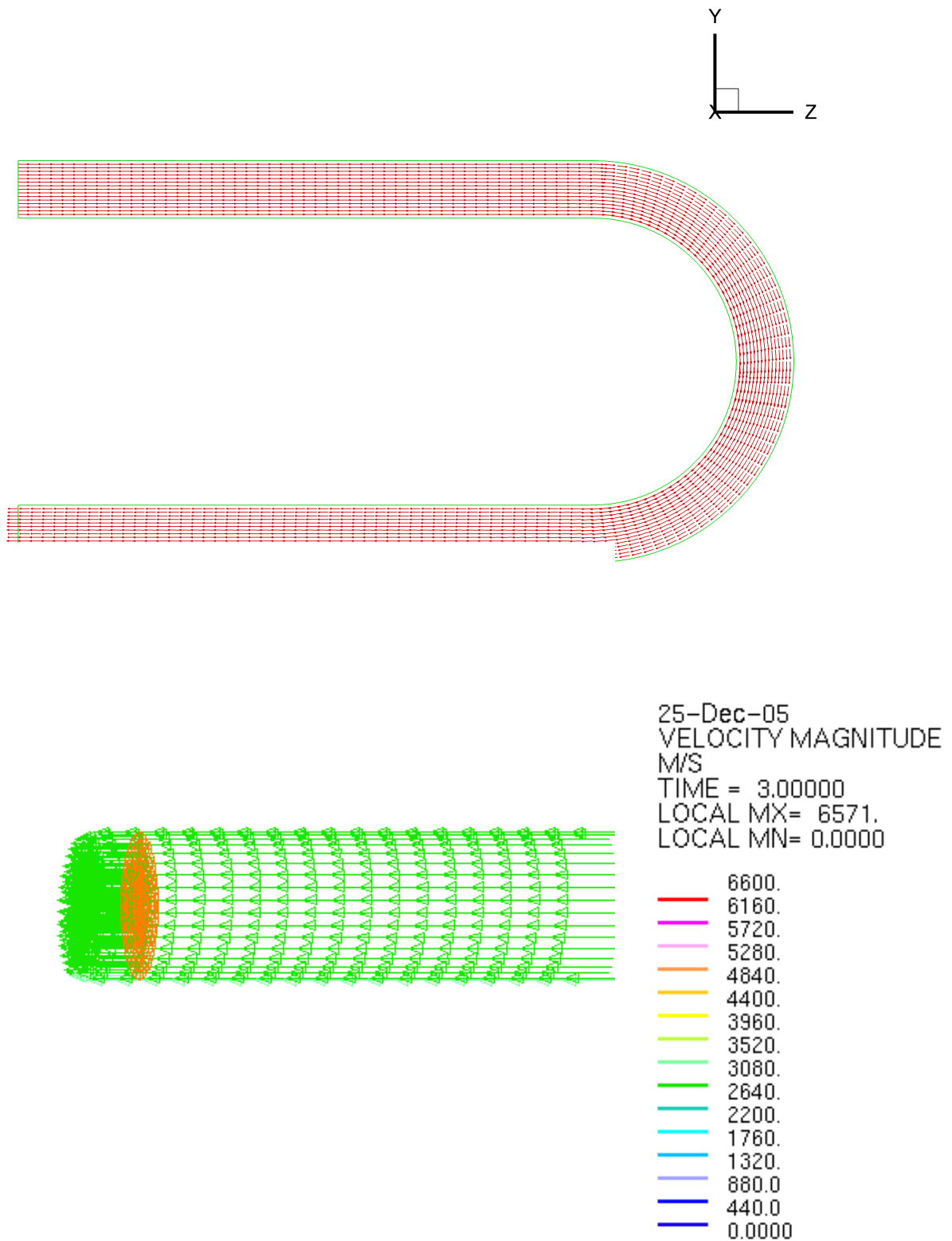


圖 3.96  $t=0.03\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
 (180 度彎管軸向斷裂)

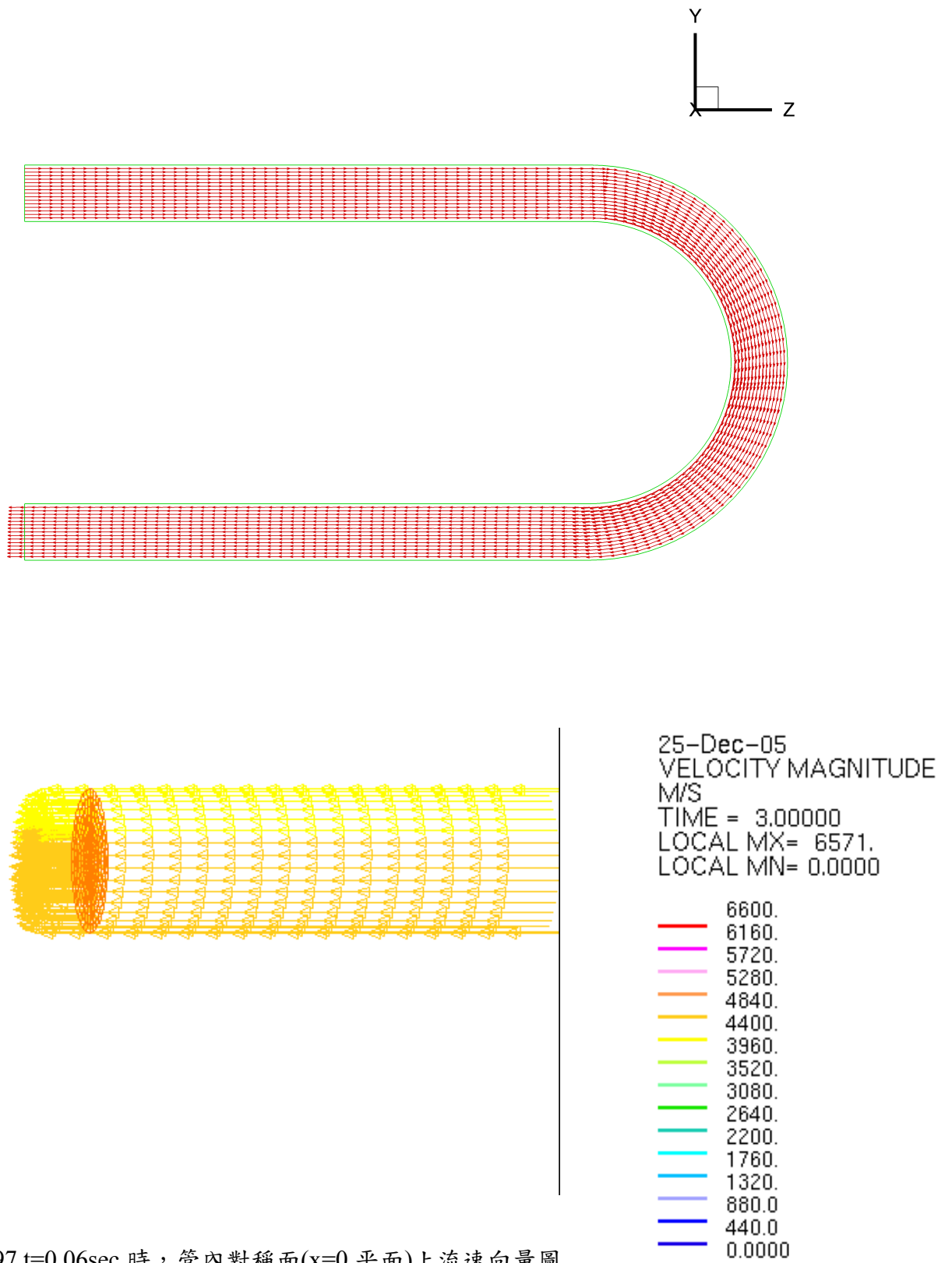


圖 3.97  $t=0.06\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速向量圖  
 (180 度彎管軸向斷裂)

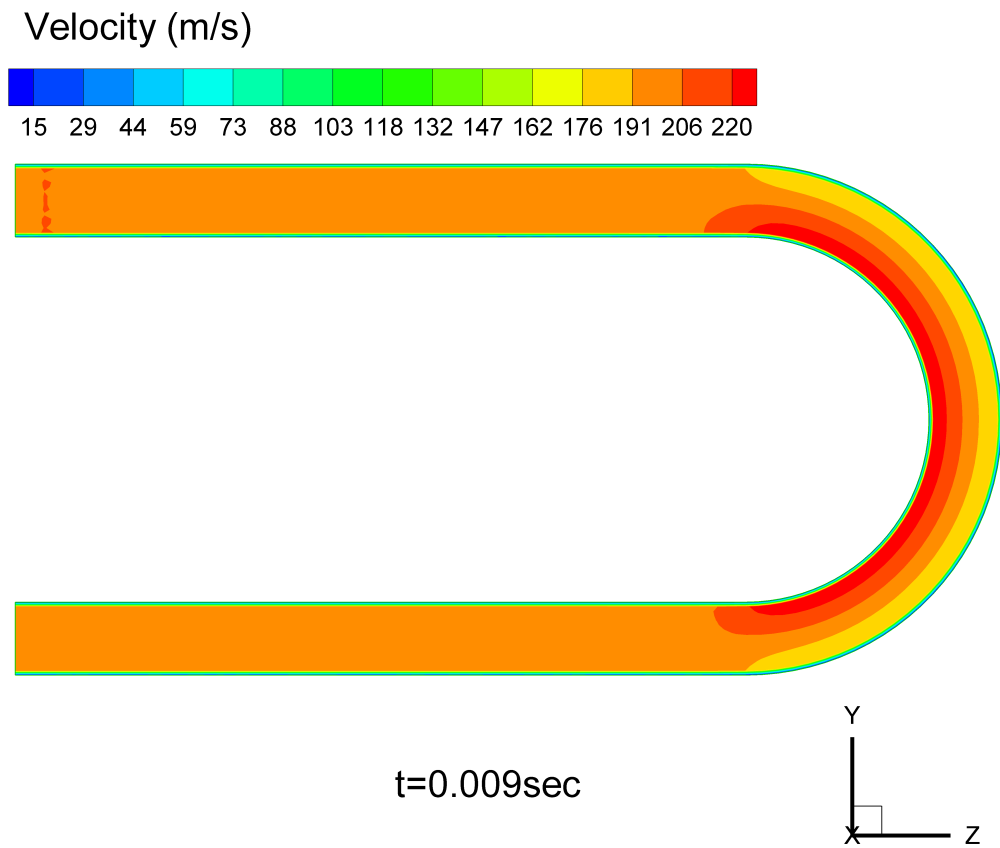


圖 3.98  $t=0.009\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上流速分佈圖  
(180 度彎管軸向斷裂)

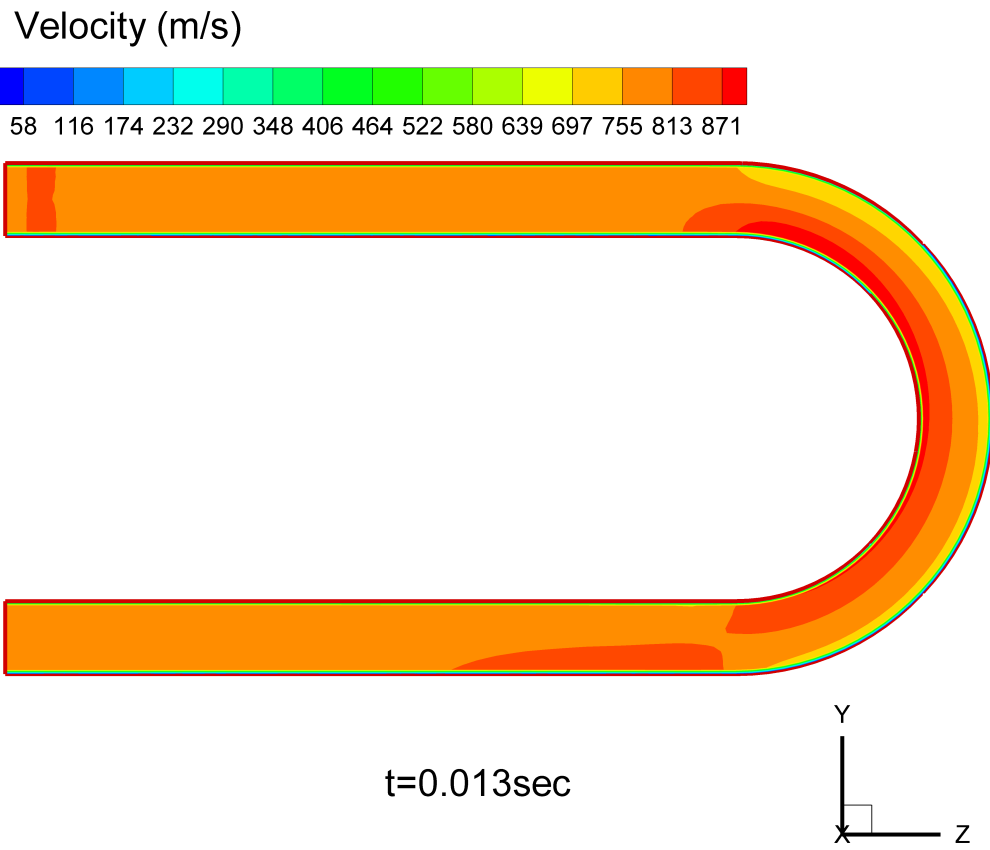


圖 3.99 t=0.013sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖  
(90 度彎管軸向斷裂)



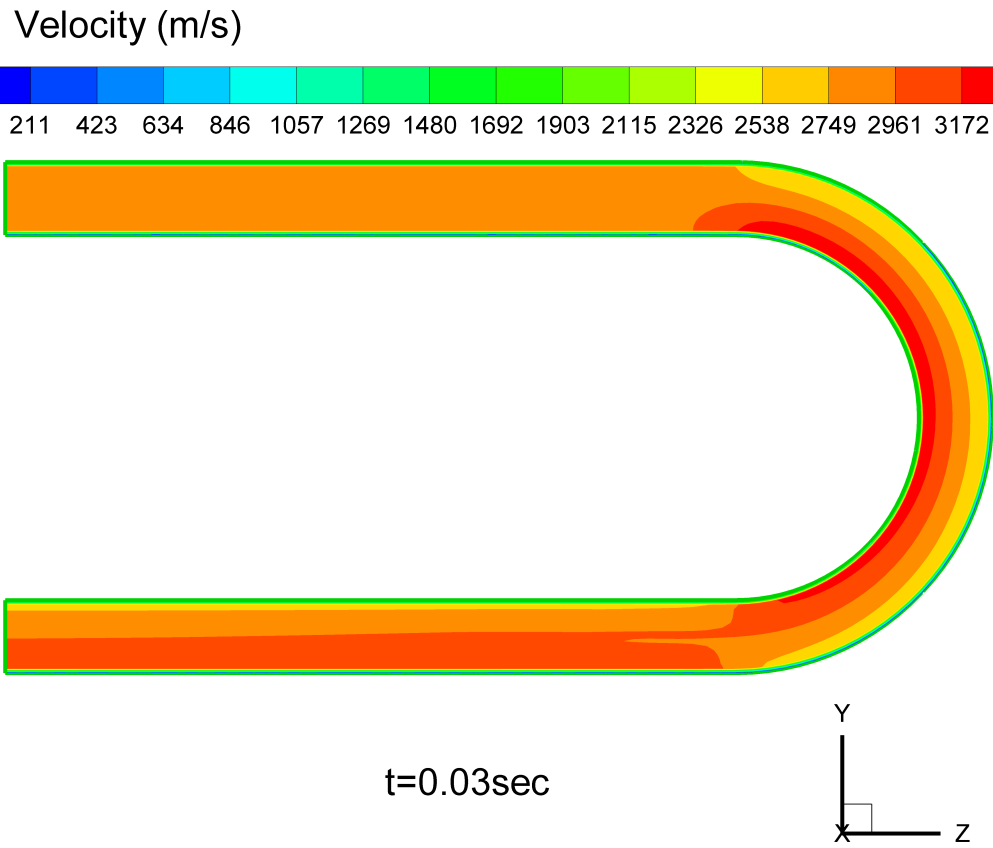


圖 3.100 t=0.03sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖  
(180 度彎管軸向斷裂)

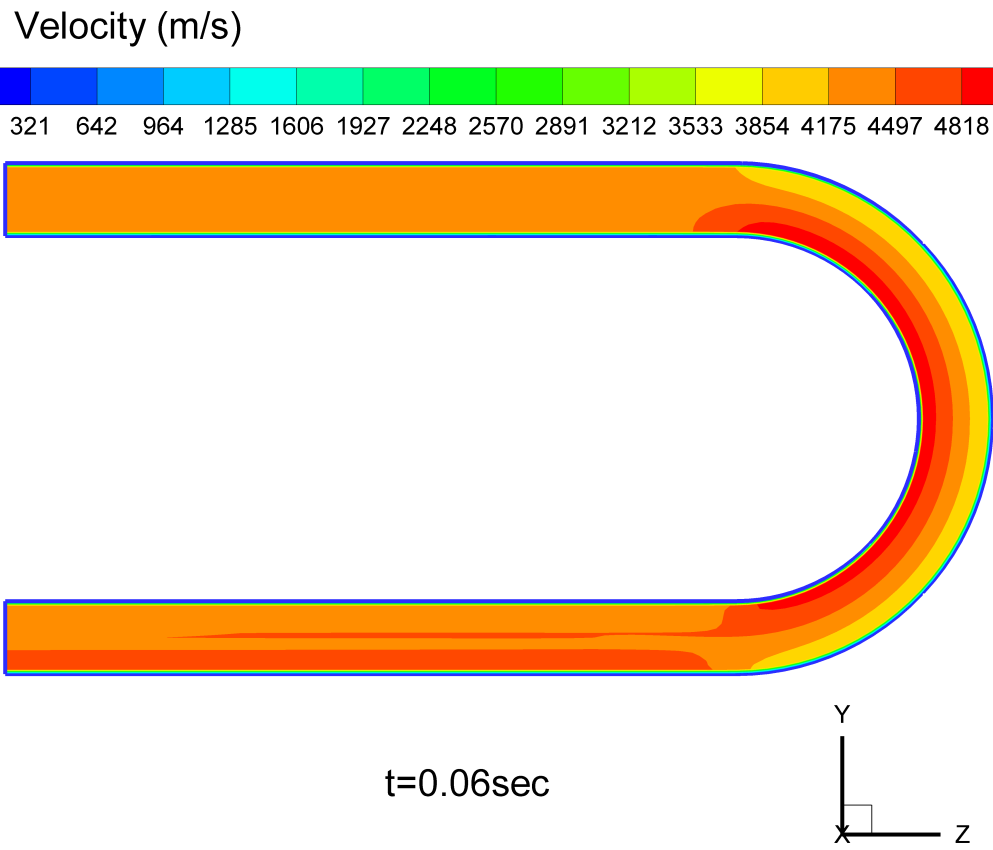


圖 3.101 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上流速分佈圖  
(180 度彎管軸向斷裂)

Pressure (Pa)

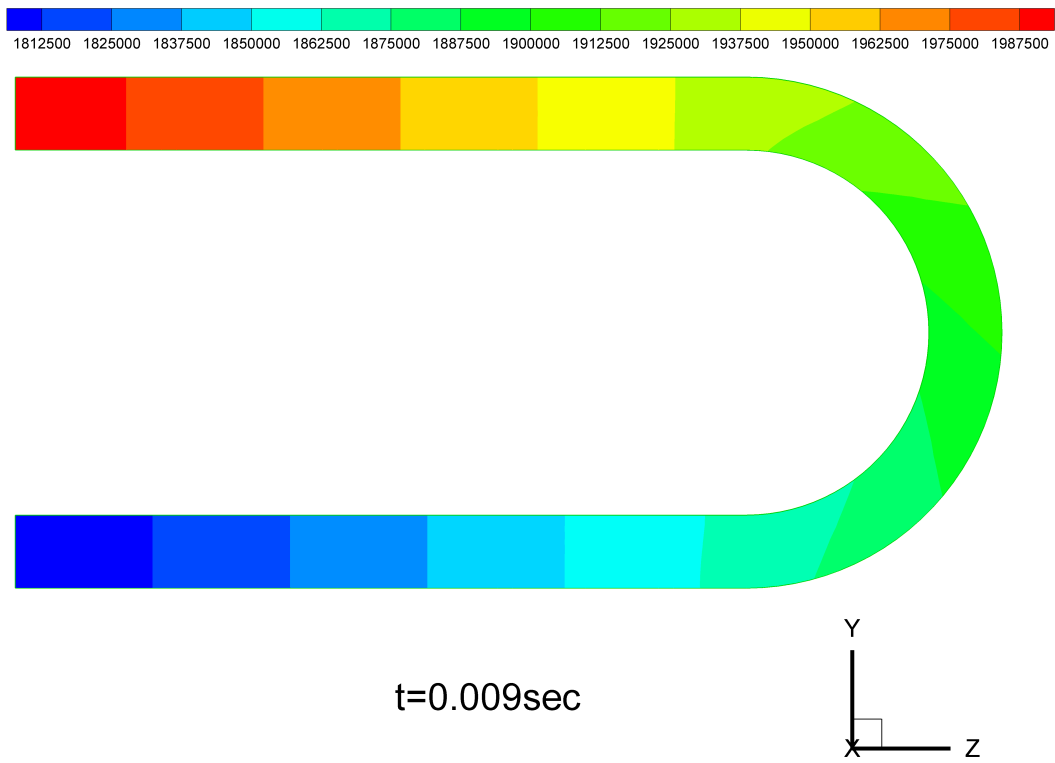


圖 3.102  $t=0.009\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上壓力分佈圖  
(180 度彎管軸向斷裂)

Pressure (Pa)

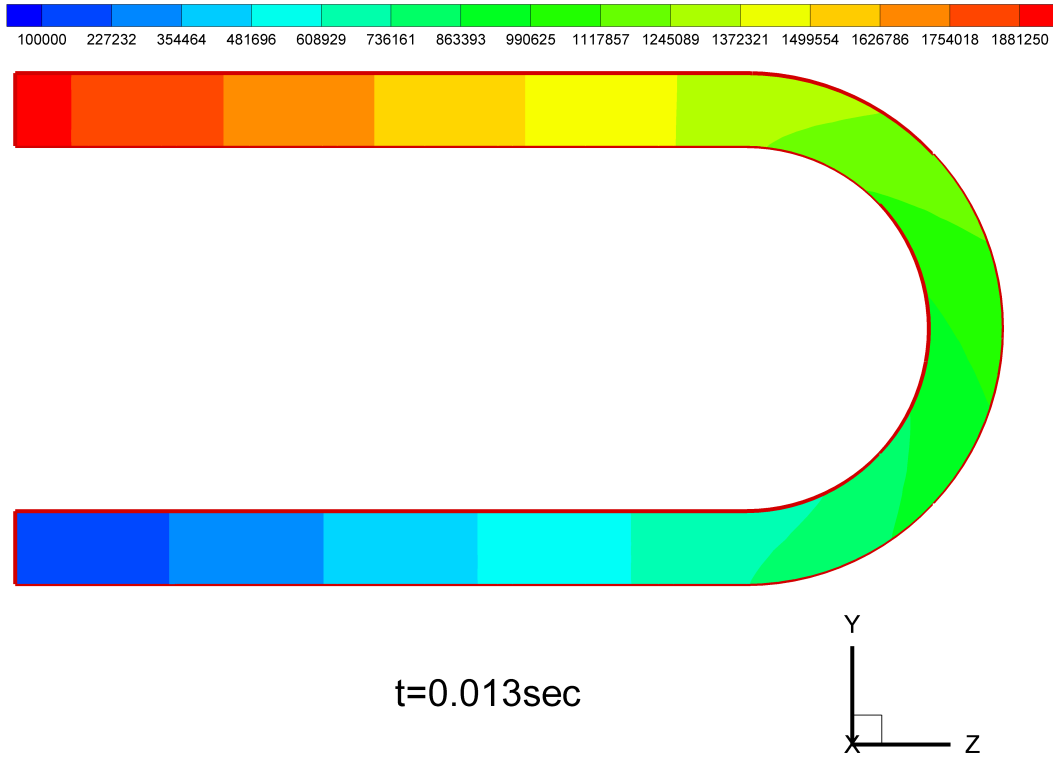


圖 3.103  $t=0.013\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上壓力分佈圖  
(180 度彎管軸向斷裂)

Pressure (Pa)

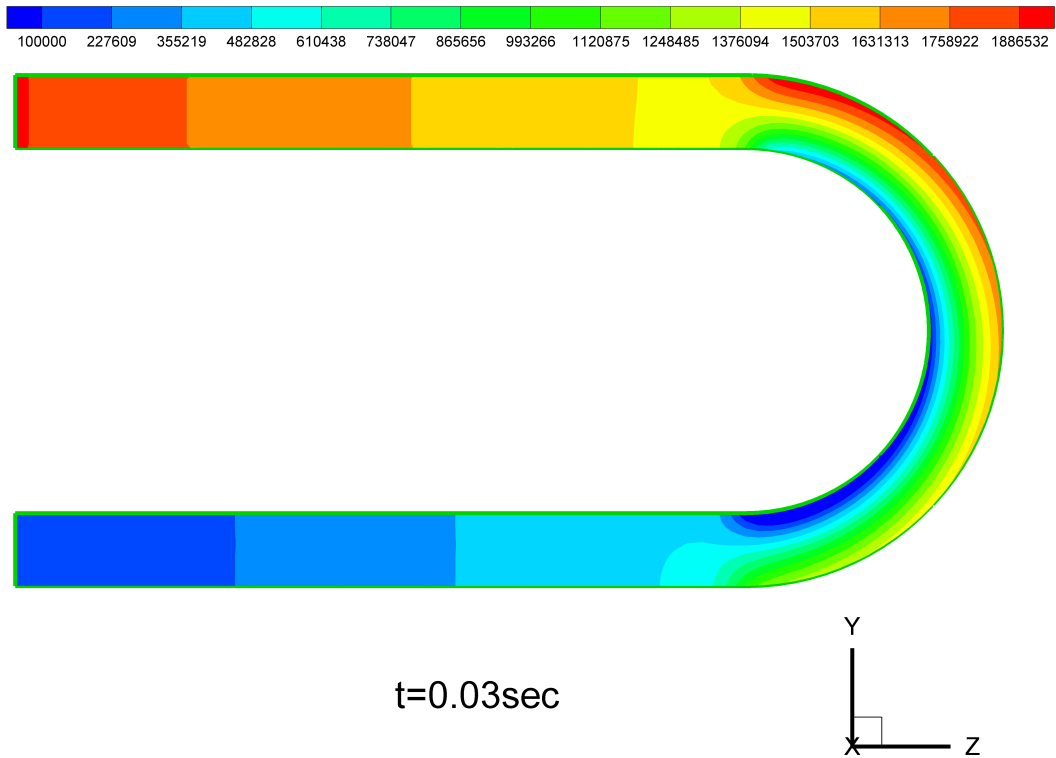


圖 3.104  $t=0.03\text{sec}$  時，管內對稱面( $x=0$  平面)上壓力分佈圖  
(180 度彎管軸向斷裂)

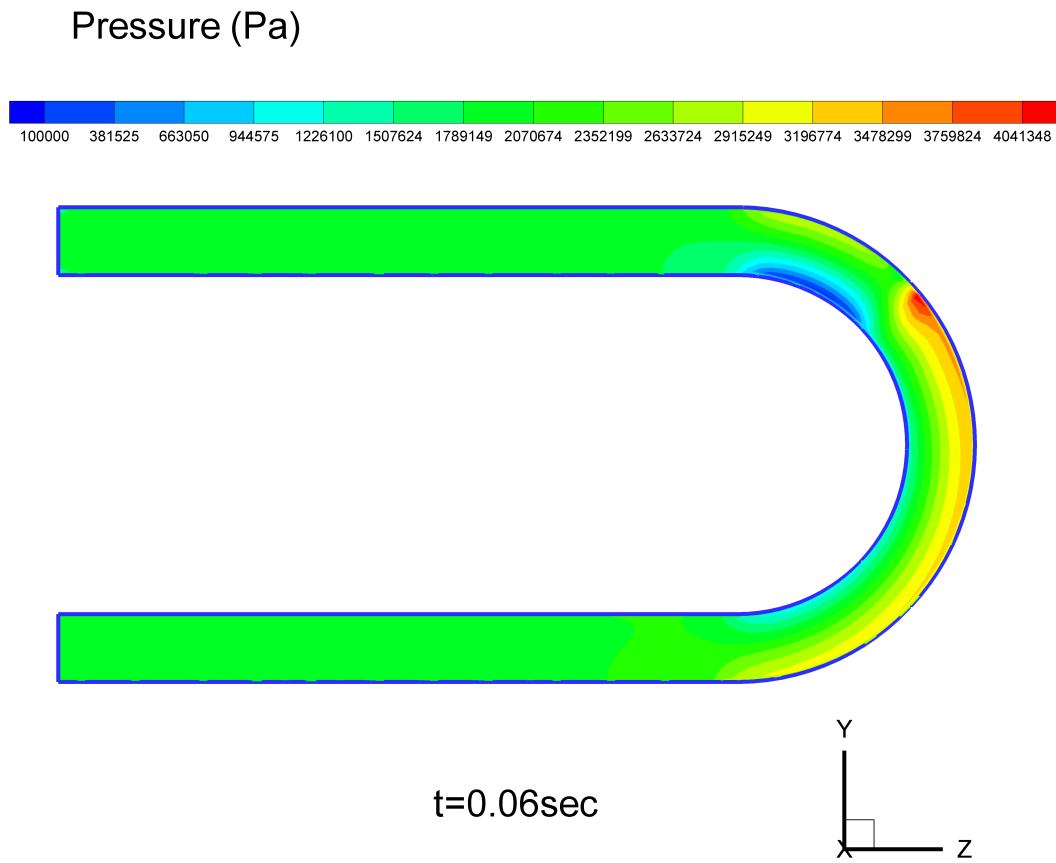


圖 3.105 t=0.06sec 時，管內對稱面(x=0 平面)上壓力分佈圖  
(180 度彎管軸向斷裂)

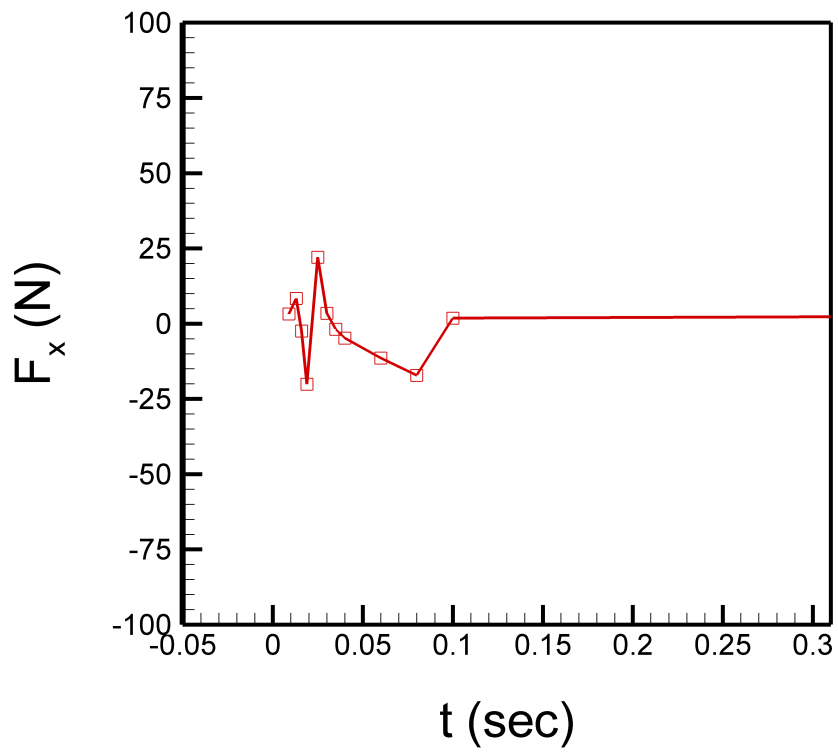


圖3.106 180度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_x$ )圖

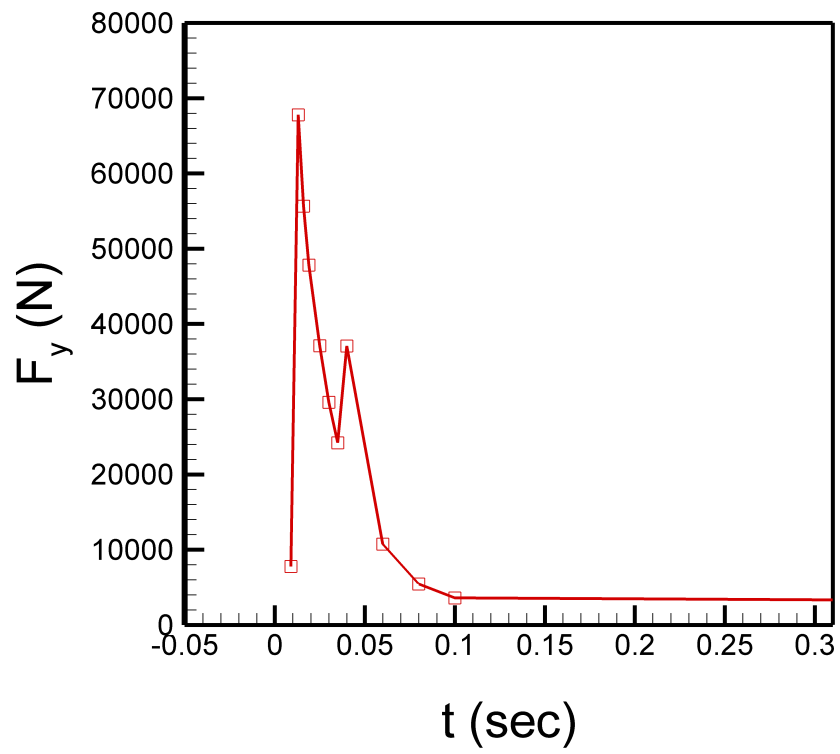


圖3.107 180度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_y$ )圖



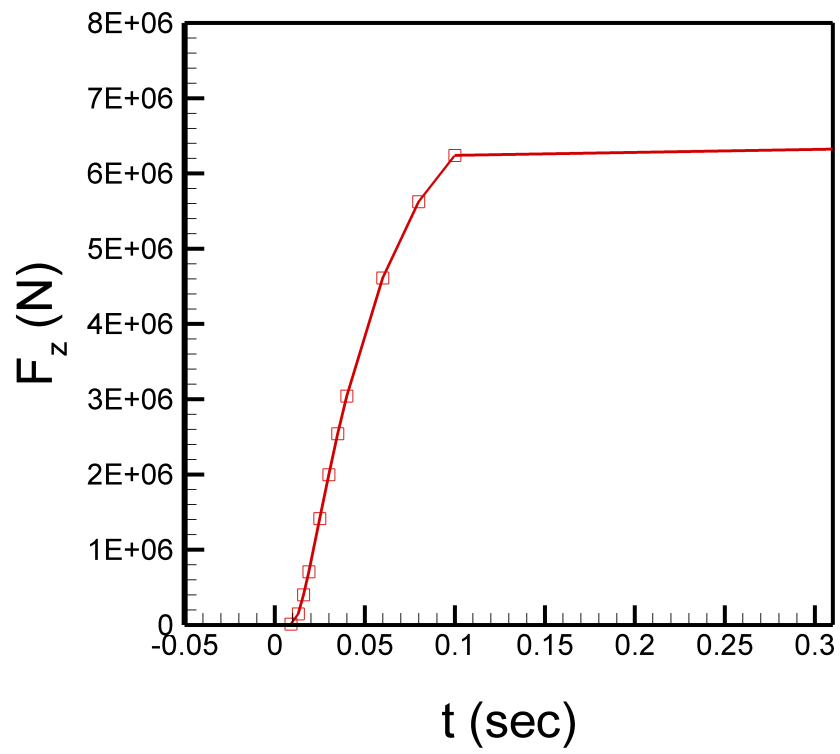


圖3.108 180度彎管軸向斷裂前後管路受力( $F_z$ )圖