

文章编号：0258-0926(2016)S2-0103-00；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0103

管道模型瞬态动力分析间隙刚度取值研究

黄文慧，李朋洲，陈学德，李锡华

中国核动力研究设计院，成都，610213

摘要：建立与模型结构的非线性边界条件（间隙）相符合的数学模型，应用试验中测量得到的冲击台面上管道模型支承处的加速度时程作为输入载荷，采用 ANSYS 大型通用有限元程序，进行一系列的几何非线性瞬态动力时程分析，计算管道模型在冲击载荷作用下的非线性动力响应，将计算结果与试验的测量值进行比较。通过对各种计算方案的几何非线性冲击动力瞬态时程计算分析结果与试验的测量值之间的分析比较，探索支承间隙的合理模拟方法。

关键词：管道模型；瞬态分析；间隙刚度

中图分类号：TB122 文献标志码：A

Gap Stiffness Value Research in Transient Dynamic Analysis for Piping Model

Huang Wenhui, Li Pengzhou, Chen Xuede, Li Xihua

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Set up a geometry nonlinear finite element model consistent with experiment model to calculate shock response of piping under transient load with nonlinear transient dynamic time history method and made comparison between corresponding experiment data and numeric results. By way of this comparison, the exploration study has been done for how to simulate the gap of support and how to confirm the gap stiffness.

Key words: Piping model, Transient analysis, Gap stiffness

0 引言

用有限元模型详细模拟管道-间隙几何结构，会造成解题规模过大，现有的计算机硬件还难以满足这种大型的非线性瞬态分析要求。通常，对间隙的处理有 3 类简化模型，即点对点、点对面和面对面接触等。对于管道与间隙，相对较精确的模拟是将接触处理成点对面接触模型或面对面接触模型，但在计算结构的瞬态响应时，还未见过点对点或面对面接触模型用来计算结构瞬态响应的报道^[1]。目前，国际上通用的作法是将管道与间隙处理成点对点的接触模型^[2]。本文参照该处理方法，采用点对点接触模型建立间隙数学模型，开展了间隙元刚度取值研究。

1 管道模型冲击试验概况

管道模型冲击试验的试验对象为三维空间管道模型。该模型是参照核动力工程中主回路系统的频率特性范围，并考虑中型冲击机的承载能力而设计的。为了模拟核动力工程中主回路系统管道的特性，该管道模型采用与主回路系统管道材料相同的无缝不锈钢管道。某实际核动力工程管系的壁厚与外径比值为 8.62%；本管道模型外径为 57 mm，壁厚为 4.8 mm，其壁厚与外径比值为 8.42%，与实际工程管系的相应值非常接近。试验考虑的主要管道系统部件包含 1 个弹簧吊架、1 个集中质量（用来模拟法兰）和 1 个间隙，其中弹簧吊架位于距中部直管段端部 930 mm 处，间

隙设置在距中部直管段端部 930 mm 处下方，集中质量安装在距中部直管段端部 1960 mm 处。三维空间管道模型及其系统部件示意如图 1，具体试验工况见表 1。

试验过程中详细记录了各试验工况下关键位置处冲击加速度和应变的最大值。左、右侧刚性支承处的加速度时程见图 2 和图 3。

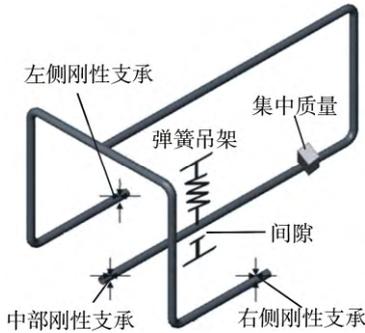


图 1 管道模型示意图

Fig. 1 Sketch of Piping Model

表 1 冲击试验工况

Table 1 Load Case of Shock Test

工况	内压 /MPa	弹性吊架 / $10^5 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$	间隙 /mm	模拟质量块重/kg	冲击方向
1	5	1.0	1.0	10	垂向
2	5	1.0	2.0	10	垂向

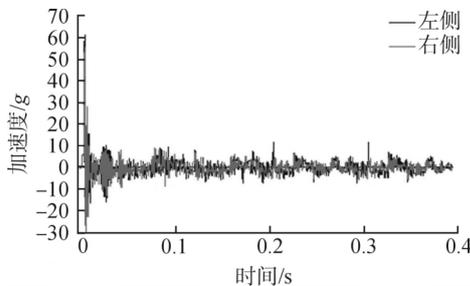


图 2 工况 1 刚性支承处加速度时程

Fig. 2 Acceleration Time-history of Left and Right Support of Load Case One

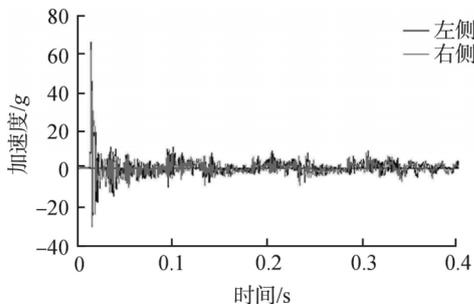


图 3 工况 2 刚性支承处加速度时程

Fig. 3 Acceleration Time-History of Left and Right Support of Load Case Two

2 几何非线性瞬态动力分析数学模型

针对前文中所述载荷工况，建立与试验工况相一致的数学模型，在间隙处加弹簧-间隙单元来描述点对点的接触模型，有限元模型见图 4。利用上述分析模型进行该管道模型的动力特性计算分析，结果表明管道模型的分析计算频率和试验中所测得的频率非常接近，针对本次核动力装置管道系统冲击试验，该有限元计算模型是合理可靠的。图 5 示意了碰撞模型本构关系，当结构未接触时，结构间的作用力为零，当结构的变形超过间隙，即 $d + \delta \leq 0$ 时，间隙与结构间的碰撞力 $F_n = K_n(d + \delta)$ ，间隙刚度 K_n 的选取直接影响碰撞力。

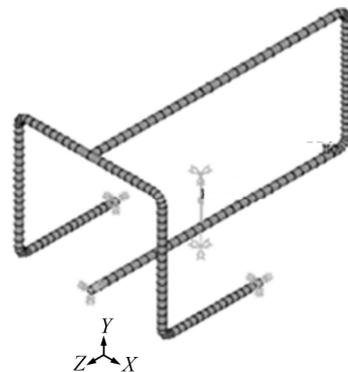


图 4 有限元计算模型

Fig. 4 Finite Element Calculation Model

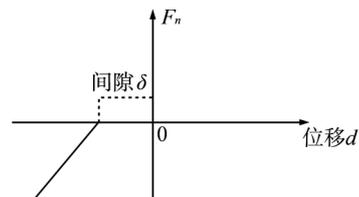


图 5 碰撞模型本构示意图

Fig. 5 Sketch of Constitutive Curve for Collision Model

3 间隙元刚度取值研究

为了研究间隙元刚度的取值对计算结果的影响以及间隙元刚度取何值时计算结果最接近于试验测量值，针对上述试验工况 1、2，采用 0.0% 的阻尼比、0.05 ms 的积分时间步长，逐步改变间隙元的刚度值，开展了一系列的计算研究。

按照 ANSYS 程序的推荐， K_n 可在相邻单元刚度的 10~100 倍之间选取，间隙刚度的选取与程序的迭代收敛性密切相关，通常在上述范围内取值进行试算^[3]。对于本计算模型，间隙元处面临

单元有 2 个，即单元 14、15，且二者均为 PIPE16 管道单元，单元 187 属于 PGAP 间隙单元，如图 6 所示。结合管道模型的几何参数，可分别计算出 2 个相邻单元的刚度分别为 $K_{14}=2.85 \times 10^8 \text{ N/m}$ ， $K_{15}=3.10 \times 10^8 \text{ N/m}$ 。以上述 2 个单元刚度中较小的为基准刚度，具体的计算方案考虑 4 种： $K_n=5K_{14}$ 、 $K_n=50K_{14}$ 、 $K_n=85K_{14}$ 、 $K_n=100K_{14}$ 。

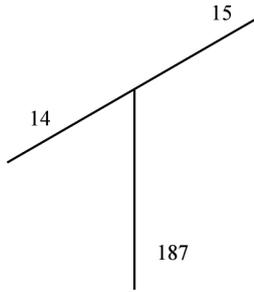


图 6 间隙元、相邻单元示意

Fig. 6 Gap Element and Adjacent Element

3.1 计算结果及对比

应用试验中测量得到的冲击台面上管道模型刚性支承处的加速度时程作为输入载荷（时程曲线如图 2 和图 3 所示），采用 ANSYS 大型通用有限元程序，进行一系列的几何非线性瞬态动力时程分析，计算管道模型在冲击载荷作用下的非线性动力响应，将计算结果与试验的测量值进行比较，具体的比较情况见表 2~表 5。通过上述比较分析，探索支承间隙的合理模拟方法。

3.2 间隙元刚度取值对计算结果影响分析

针对本计算模型，结合上述计算结果对比情况可知，当用弹簧-间隙单元模拟管道间隙时，同种工况条件下，输入相同的冲击载荷，采用瞬态

表 2 间隙刚度取值对管道左侧支承处弯曲应力计算结果的影响

Table 2 Gap Stiffness' Influence upon Calculation Bend Stress of Left Support

计算工况	计算方案	管道左侧支承处最大弯曲应力/MPa		偏差/%
		计算值	试验值	
工况 1	$K_n=5K_{14}$	156.82	143.92	8.96
	$K_n=50K_{14}$	156.82	143.92	8.96
	$K_n=85K_{14}$	155.58	143.92	8.10
	$K_n=100K_{14}$	156.25	143.92	8.57
工况 2	$K_n=5K_{14}$	136.32	132.32	3.02
	$K_n=50K_{14}$	135.45	132.32	2.37
	$K_n=85K_{14}$	135.22	132.32	2.19
	$K_n=100K_{14}$	136.01	132.32	2.79

表 3 间隙刚度取值对管道中部支承处弯曲应力计算结果的影响

Table 3 Gap Stiffness' Influence upon Calculation Bend Stress of Middle Support

计算工况	计算方案	管道中部支承处最大弯曲应力/MPa		偏差/%
		计算值	试验值	
工况 1	$K_n=5K_{14}$	131.41	131.90	-0.37
	$K_n=50K_{14}$	129.47	131.90	-1.84
	$K_n=85K_{14}$	131.83	131.90	-0.05
	$K_n=100K_{14}$	128.77	131.90	-2.37
工况 2	$K_n=5K_{14}$	113.95	115.86	-1.65
	$K_n=50K_{14}$	112.54	115.86	-2.87
	$K_n=85K_{14}$	115.08	115.86	-0.67
	$K_n=100K_{14}$	112.03	115.86	-3.31

表 4 间隙刚度取值对集中质量处加速度计算结果的影响

Table 4 Gap Stiffness' Influence upon Calculation Acceleration of Mass Block

计算工况	计算方案	管道集中质量处最大加速度/g		偏差/%
		计算值	试验值	
工况 1	$K_n=5K_{14}$	38.12	39.37	-3.18
	$K_n=50K_{14}$	41.81	39.37	6.20
	$K_n=85K_{14}$	40.67	39.37	3.30
	$K_n=100K_{14}$	41.23	39.37	4.72
工况 2	$K_n=5K_{14}$	43.97	44.80	-1.85
	$K_n=50K_{14}$	48.81	44.80	8.95
	$K_n=85K_{14}$	45.52	44.80	1.61
	$K_n=100K_{14}$	48.50	44.80	8.26

表 5 间隙刚度取值对间隙支承杆处轴向应力计算结果的影响

Table 5 Gap Stiffness' Influence upon Calculation Direct Stress of Gap Support

计算工况	计算方案	间隙支承杆处轴向应力/MPa		偏差/%
		计算值	试验值	
工况 1	$K_n=5K_{14}$	54.14	92.99	-41.78
	$K_n=50K_{14}$	52.40	92.99	-43.65
	$K_n=85K_{14}$	91.21	92.99	-1.91
	$K_n=100K_{14}$	128.09	92.99	37.75
工况 2	$K_n=5K_{14}$	32.54	86.74	-62.49
	$K_n=50K_{14}$	56.13	86.74	-35.29
	$K_n=85K_{14}$	81.66	86.74	-5.86
	$K_n=100K_{14}$	116.84	86.74	34.70

时程分析方法进行计算，当间隙刚度值分别取相邻单元刚度值的 5 倍、50 倍、85 倍、100 倍时：

(1) 管道支承位置处的最大弯曲应力计算值均与试验值较接近，不同方案下的计算结果相比仅有少许变化，间隙刚度的取值对管道支承处弯

曲应力最大值的影响很小。

(2) 管道集中质量处最大加速度计算值均与试验值较接近, 不同方案下的计算结果相比也仅有少许变化, 间隙刚度的取值对集中质量处加速度值的影响也较小。

(3) 随间隙刚度的增大碰撞力有较明显的增大, 即间隙刚度的取值对碰撞力的影响较大。当间隙刚度值取为相邻单元刚度的 85 倍时计算结果与试验值接近。

4 总 结

针对包含间隙的典型试验工况, 建立合理的有限元分析模型, 采用间隙刚度值分别取为相邻单元刚度的 5 倍、50 倍、85 倍、100 倍等不同的计算方案, 利用瞬态时程分析方法计算管道模型在冲击载荷下的动力响应, 对间隙刚度的取值进行了研究, 通过一系列的分析对比, 得到如下结论以供参考:

(1) 间隙刚度的取值对管道支承处弯曲应力

最大值、集中质量处加速度最大值的影响较小, 间隙单元刚度取为相邻单元刚度的 5~100 倍对于计算管道模型自身在冲击载荷作用下的动力响应是合理的。

(2) 间隙刚度的取值对碰撞力、间隙支承杆轴向应力的影响较大。在本计算中, 若间隙刚度值取为相邻单元刚度的 80~90 倍, 工况 1、工况 2 间隙支承杆处轴向应力计算值与试验测量值相近, 且此时其他关键位置处的应力、加速度计算值也与相应的试验值较接近, 本研究结果可为管道限位支承设计提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] 孟庆国, 杜俭业. 国外舰艇抗冲击技术发展概况及启示[J]. 舰艇及设备冲击响应分析技术, 2006, 3: 3-7.
- [2] Zienkiewicz O C. The Finite Element Method[M]. London: McGraw-Hill Company, 1977: 9-15.
- [3] Bathe K J. Finite Element Procedures[M]. USA: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1996: 31-38.

(责任编辑: 方凯锐)