

文章编号:1004-4574(2013)02-0221-08

“3·10”盈江地震管道节点破坏机理及抗震对策研究

钟旻, 缪昇, 秦云, 明灿

(云南大学 城市建设与管理学院, 云南 昆明 650091)

摘要:“3·10”盈江地震发生后, 架空供水主管节点遭到了破坏, 导致震后供水障碍。运用 SAP2000 软件模拟了地震作用下管道的受力、变形等情况, 并运用有限元软件 ANSYS 对法兰盘进行了局部受力分析, 总结出供水主管节点的破坏机理。针对破坏机理, 提出了带橡胶垫层的槽型管道支架的抗震加固方式, 并利用 ANSYS 软件研究了带橡胶垫层与不带橡胶垫的槽型支座在节点位移、速度、应力以及相邻节点位移差值上的区别。

关键词:架空供水主管; 有限元分析; 破坏机理; 抗震对策

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

Study on damage mechanism of pipe's joints in “3. 10” Yingjiang earthquake and seismic countermeasures

ZHONG Min, MIU Sheng, QIN Yun, MING Can

(Urban Construction and Management College, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: Water supply obstacle occurred when overhead main pipe of water supply was damaged in the “3. 10” Yingjiang earthquake. SAP2000 was used to simulate the stress and deformation of the pipes to summarize the damage mechanism, and ANSYS was used to analyze local stress of flange. According to the summarized damage mechanism, groove pipe support with rubber cushion was suggested to be the seismic strengthening measures. To explore advantages and disadvantages of groove pipe support with rubber cushion, the difference of displacement, velocity and stress between groove pipe supports with and without rubber cushion was analyzed in ANSYS.

Key words: overhead water-supply main pipe; finite element analysis; damage mechanism; earthquake countermeasures

2011年3月10日12时58分, 东经 $97^{\circ}55'$, 北纬 $24^{\circ}43'$ 处发生了5.8级地震, 震中位于盈江县县城西北方向2 km处(仕明一带), 13时03分56秒, 东经 $97^{\circ}9'$, 北纬 $24^{\circ}7'$ 处发生5.8级地震, 震中位于盈江县县城西南方向1 km处。在地震发生后, 水厂至新城东路的架空供水主管由于变形过大导致局部法兰盘破裂, 供水主管渗水严重。供水系统是一个城市最为重要的生命线工程系统。30多a来, 我国发生过几次大的破坏性地震, 一些现代化城市不同程度受到袭击, 其震害报告表明, 我国供水系统抵抗地震的能力是非常脆弱的^[1]。作为维持城市生存功能和国计民生的重大工程, 供水系统的正常运行对城市居民生命和生活极为重要, 对抗震救灾和恢复生产更是起到重要作用。

管道破坏机理研究是生命线工程的重要课题之一。目前人们对地下管线的破坏机理研究较为深入, 而

收稿日期: 2012-07-10; 修回日期: 2012-09-21

基金项目: 云南大学研究生科研资助项目(yunuy201102)

作者简介: 钟旻(1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事工程抗震及加固方面的研究. E-mail: happysophia2010@sina.com

对架空管线的地震破坏机理研究较少,对于架空管道的破坏机理分析,多数来源于震害调查统计分析^[2]与理论模型计算^[3],较少采用软件模拟的方式进行分析。本文首次运用 SAP2000 软件模拟管道在地震作用下的真实响应,总结破坏机理。

在工程实际中往往通过建立带有橡胶垫层的槽型管道支架来提高管道的抗震性能,以往的研究只进行定性分析,未从定量的角度分析此种加固方式。本文运用 ANSYS 有限元分析软件建立橡胶接触模型和混凝土接触模型,对比橡胶接触模型相对于混凝土接触模型的管道抗震特性,为今后的抗震加固提供可靠的依据。

1 计算参数

经现场调研,获取各项基本资料如下表 1 所示。

表 1 现场调研数据表
Table 1 Field survey data

序号	项目	内容
1	结构材料	(1) 梁与柱混凝土强度等级为 C20。 (2) 受力钢筋采用 HRB335 级钢筋,构造钢筋采用 HPB300 级钢筋。
2	结构截面尺寸	柱:半径 250 mm 管道支架柱间距 3 000;柱埋地约 1 m。 梁:200 mm × 400 mm,梁下表面至地面 2 200 mm,管道支架间跨度为 8 500 mm。
3	基本条件	(1) 基本风压 $w = 0.3$ kN/m。 (2) 抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为 0.15 g,地震分组为第三组,II 类场地。
4	管道规格	管道采用 DN400, K9 型螺旋球墨铸铁管;管材屈服强度 300 MPa,抗拉强度 420 MPa,管道设计水压 0.9 MPa。
5	法兰规格	法兰外径 580 mm;法兰厚度 38 mm;法兰盘 Q235 钢,屈服强度 235 MPa;螺栓孔距 525 mm;螺栓直径 30 mm;螺栓孔数 16;螺栓 M6.8 级,屈服强度 480MPa;弹性模量 MPa,泊松比为 0.29。

2 管道破坏机理分析

2.1 SAP2000 管道时程分析

2.1.1 模型建立及处理

管道与管道支架均采用框架线单元绘制,其中管道采用与工艺要求相同的标准型钢 Q235,管道支架的梁与柱通过快速定义材料选择中国地区 GB50010 下的 C20 混凝土。选取包含边支座和斜管在内的 8 跨作为研究对象,管道与管道支架存在相互作用,能否真实模拟是模型处理的关键,SAP2000 中通过各种连接单元能够真实考虑结构体系不同时的相互作用,此模型中管道与管道支架间存在相互摩擦力,因此通过在管道与管道支架间绘制两点间的摩擦摆隔震连接单元进行连接。内衬、保温层、管道附件重量等竖向荷载通过分布荷载进行布置;风荷载采用规范的计算方法计算后布置在梁柱上;温度荷载采用框架均布荷载来实现^[4]。

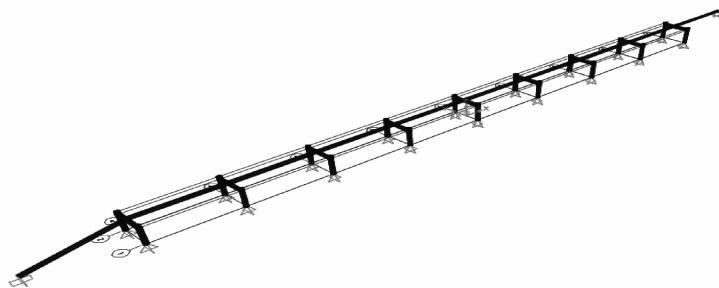


图 1 SAP2000 整体模型图

Fig.1 SAP2000 overall model

本文采用 SAP2000 对整体计算单元建立模型如图 1 所示, X 为管道轴向方向, Y 为管道横向方向, Z 为竖直方向。

2.1.2 管道整体分析

(1)管道受力分析

管道时程分析后弯矩包络图如图 2 所示:

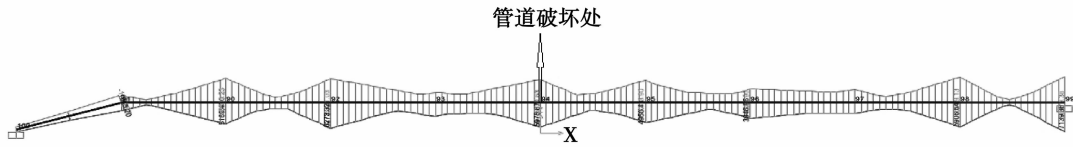


图 2 管道弯矩包络图

Fig. 2 Bending moment envelope of pipe

由图 2 可知,管道与中间管道支架接触处是弯矩值最大的地方,说明此处相对其它地方更容易出现破坏,实际地震中破坏的法兰盘也在此处,为了方便识别,破坏处的节点编号为 94。

(2)从管道变形角度分析

管道在地震波作用下的变形如图 3 所示:

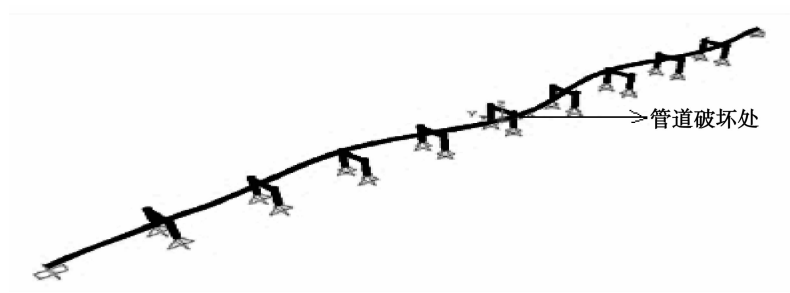
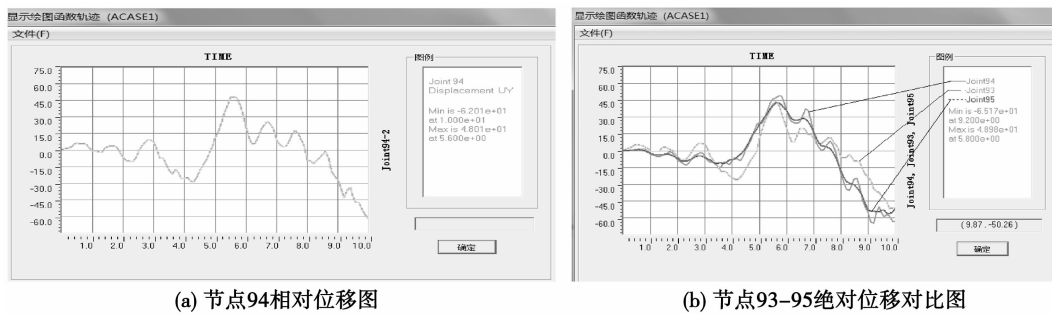


图 3 管道变形图

Fig. 3 Deformation of pipe



(a) 节点94相对位移图

(b) 节点93-95绝对位移对比图

图 4 节点位移图

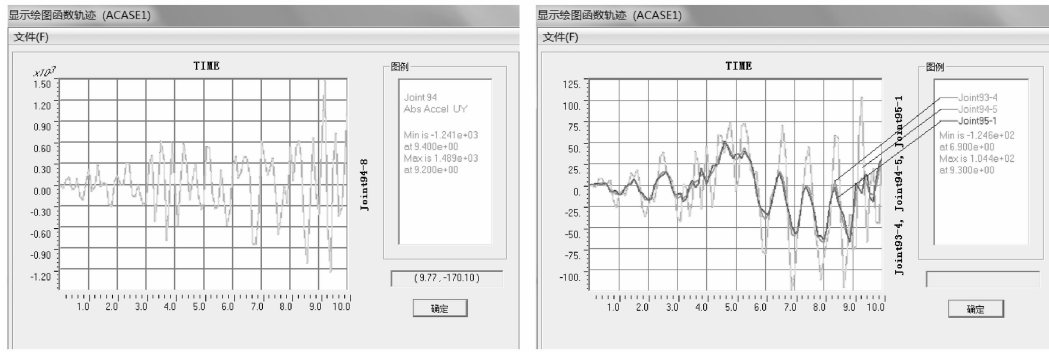
Fig. 4 Displacements of joints

从图 4(a)可以看出,在地震作用下,节点 94 在 UY 方向位移出现正负交替的情况,说明管道在 UY 方向来回摆动,节点 94 相对位移的绝对值最大处为 6.2cm。从图 4(b)可以看出,节点 94 与相邻节点 93,95 的位移在变化趋势上大体一致,而在位移变化曲线的峰值和频率上有差别,有些时间点上出现一个节点处于波峰,另一节点处于波谷的情况,表明管道摆动时节点间的位移相差较大。由以上图像可知,管道振动时,各节点均有不同频率和幅度的位移变化,在破坏节点处的管道变形较为明显。

(3)从速度与加速度角度分析

UY 方向的节点速度与加速度信息如图 5(a),(b)所示:

由图 5(a)可得,节点 94 具有指向管道截面轴心的加速度,且在 92 s 时,管道出现最大加速度为



(a) 节点94绝对加速度图

(b) 节点93-95绝对速度对比图

图 5 节点速度与加速度图

Fig. 5 Acceleration and velocity diagrams of joints

1.489 m/s², 由于管道为铸铁材料, 密度较大, 产生的惯性力大, 加上管道中水具有一定加速度, 水体产生的惯性力也较大, 对管道产生不利的影响。图 5(b) 是节点 94 与节点 93, 95 的速度对比图, 图中节点速度的变化趋势是一致的, 而在变化幅度和频率上有区别, 在 9.3 s 时, 节点 94 的绝对速度有正向最大值 104.4 mm/s, 而此时, 另外两节点具有负向速度, 节点 94 与相邻节点摆动方向不一致, 很多情况下是相反的方向, 容易产生弯矩过大导致破坏。

2.2 法兰盘分析

由于破坏节点位于法兰盘上, 因此有必要对法兰盘的破坏机理进行分析, 根据盈江县供水主管的法兰规格 (见表 2 所示), 建立法兰盘有限元模型如下图 6 所示:

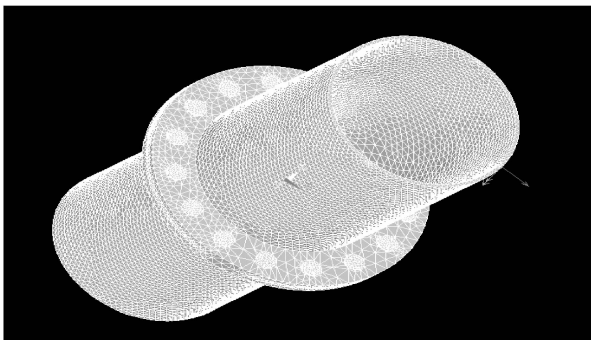


图 6 法兰盘有限元模型

Fig. 6 Finite element model of flange

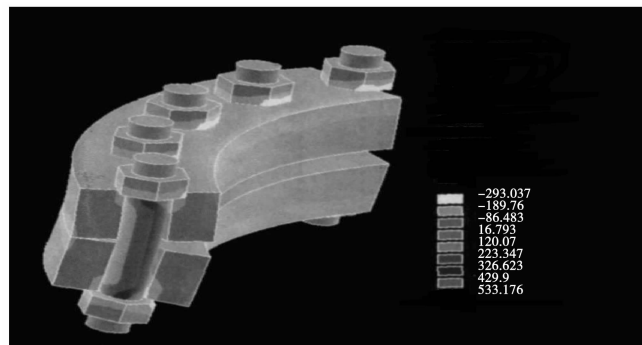


图 7 法兰局部应力云图

Fig. 7 Local stress nephogram of flange

根据材料与工程特性, 钢管、螺栓、法兰盘单元都选取 solid185, 上下法兰盘、法兰盘与螺栓之间由于存在接触特性, 故采用接触单元 contact174 和 target170 进行模拟, 摩擦系数取 0.29。采用 PRETS179 预拉伸单元和 PSMESH 预拉伸网络命令模拟螺栓对法兰盘的预加应力。采用 MASS21 和 CERIG 命令绘制出刚性区域, 并对其施加弯矩^[5], 按最不利荷载组合情况对法兰盘进行荷载的布置。考虑到管道内水体对管道有内压, 在管道内壁施加均布荷载, 取设计水压 0.9 MPa。利用 SAP2000 受力分析得出的节点最大弯矩、剪力与轴力值, 对法兰盘施加荷载后, ANSYS 分析出的法兰局部受力云图如图 7 所示:

《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》^[6] 给出的柔性法兰中螺栓受拉、弯作用下的计算公式如下:

一个螺栓所对应的管壁段中的拉力为:

$$N_b = \frac{1}{N} \left(\frac{M}{0.5r} + N \right). \tag{1}$$

式中: M 为法兰所受的弯矩, 单位为 $N \cdot mm$; N 为法兰所受的轴心作用力, 受压时取用负值, 单位为 N ; r 为钢管外壁半径, 单位为 mm 。由前面分析得知法兰盘所受最大弯矩有 $1\,145.554\, kN \cdot m$, 所受轴力为 $2\,075.44\, kN$ 。

经计算得

$$N_b = \frac{1}{16} \left(\frac{1\ 145.554}{0.5 \times 205} + 2\ 075.44 \right) = 130.41 \text{ kN}. \quad (2)$$

理论上,在管道受到最大弯矩与最大轴力时,螺栓所受的应力均为

$$P = \frac{N_b}{A} = \frac{130.41 \times 10^3}{\pi \times 15^2} = 184.59 \text{ MPa}. \quad (3)$$

理论上,选取屈服强度为 480 MPa 的 6.8 级螺栓在安全允许范围之下,但从图 7 可以看出,螺栓呈现拉弯的状态,螺栓的受力并不均匀,部分地方呈现较大的应力。在钢管受拉一侧,上下法兰盘在边缘处因相互受压顶紧而产生了较大的压应力,法兰盘内边缘张开而外边缘顶紧,这使法兰盘对螺栓有附加偏心力作用且使螺栓产生了附加弯矩^[7]。螺杆全截面受拉,最大拉应力有 429.4 MPa,理论上螺栓的最大屈服强度为 480 MPa,由于管道的建设时间较长,螺栓的屈服强度随时间减弱,同时在地震作用下,螺栓反复受拉弯,出现断裂的情况是可能的。

2.3 破坏机理总结

一般而言,由于管道支架被破坏导致架空管道造成破坏的情况较多;经过现场考察和软件模型分析,框架支撑体系的受力处于结构稳定状态,未出现框架支撑体系遭到破坏而导致管道破坏的情况。对于盈江县供水主管的破坏,总结起来有以下几种原因:

(1)管道与管道支架相对位移过大造成的破坏,由图 4(a)所示的节点 94 相对位移曲线获知:节点破坏处的管道相对位移最大值为 6.2 cm。相对位移的出现将导致管道上的一些薄弱环节(法兰与管道的联接处、弯头、三通、焊缝等)处发生破坏。

(2)由于盈江供水主管网建设时间较长,法兰盘和螺栓强度日久受蚀导致强度减弱,同时,在管道与管道连接处最容易出现弯矩较大且突变的情况,在反复地震作用下容易发生破裂。此次架空管道的震害主要表现在法兰连接处开裂,与法兰强度不足,架空管道工作条件较差,螺栓锈蚀,螺丝连接部位出现松弛或局部开裂等均有一定关系。

(3)管道节点之间速度与加速度的差动较大,致使管道本身与水体的惯性作用力较大,使得管道与水体在相互作用下无规律的晃动,导致管道节点在某一时刻出现较大的应力而损坏。

(4)管道和管道支架的固有频率较低,固有周期大约在 0.1~0.3 s 范围内,而地震最大加速度发生的区段周期是在 0.1~0.7 s 范围内,两者存在着相同或相近的可能性,造成管道在地震时产生共振。管道振幅在共振作用下可被数倍甚至数十倍放大,剧烈的振动必然会导致管道的破坏。

3 供水主管抗震对策研究

3.1 现场抗震加固方式简介

供水主管遭到破坏后,工作人员对法兰盘进行了修复与加固,主要措施如图 8 所示:



图 8 现场加固图

Fig. 8 Photos of in-situ strengthening

从图中看出,供水主管被破坏后,工作人员对供水主管采取的抗震加固方式主要是通过图 8(a)细铁丝

绑扎或者图 8(b) 钢筋拧紧来限制管道的位移,其目的主要是防止供水管道在地震的作用下摆动幅度过大,图 8(b) 加固效果较图 8(a) 更加明显,但是这两种方法并不能很好的起到抗震作用。由于细铁丝只能承受拉力,且其本身的抗拉强度相对于地震作用力来说很小,起不到抗震作用。用铁杆将管道固定使其没有可活动空间,不利于有组织的引导管道温度变形。

3.2 抗震加固改进研究

在加固设计的时候,应尽可能地使加固措施发挥它的综合效应,提高其加固效益;尽可能地保留、利用原有结构构件,以减少不必要的拆除、更换;计算时需考虑结构在加固过程中的应力以及加固部分的应变滞后效应等,并且需要考虑新旧材料的协同工作程度以及应力转换现象等^[8]。在 GB50032 - 2003《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》中规定:管道与构筑物、设备的连接处(含一定距离内),应配置柔性构造措施;并且架空管道应采用钢管,并应设置适量的活动、可挠性连接构造^[9]。同时架空管道需在过河段上方设置一定数量的柔软性接口,以适应岸坡向河中心滑移^[10]。针对以上抗震加固的要求以及盈江县架空供水主管的破坏机理,槽型管道支架可以解决现场加固方式的缺陷,它可使管道与管道支架协同工作,同时不影响温度作用下管道的伸缩。由于橡胶具有一定的弹性,能吸收部分的地震能量,可以在管道与支架间设置橡胶垫来优化抗震性能。目前针对带橡胶垫层的管道支架加固方式并未进行深入研究。可通过 ANSYS 有限元数值模拟,分析带橡胶垫层的槽型管道支架的抗震特性。

3.2.1 模型建立及处理

通过建立两种模型进行抗震对比研究,管道与混凝土接触模型(简称混凝土接触模型)和管道与橡胶接触模型(简称橡胶接触模型),具体区别见下图 9 所示,主要通过改变垫层的材料性能参数来实现。混凝土接触模型中垫层材料与梁一致,由于笔者研究的重点是管道且混凝土内的钢筋较难模拟,通过增大混凝土弹性模量的方法替代管道支架中的钢筋。由于 Mooney Rivlin 模型是一个比较经典的模型,几乎可以模拟所有橡胶材料的力学行为,适合中小变形,一般适用于应变约为 100% (拉伸) 和 30% (压缩) 的情况,形式简单,而且在模拟天然橡胶材料的中、小变形具有足够的准确度并大大的节省了计算时间,因此笔者采用 Mooney-Rivlin 模型模拟橡胶的本构模型。参阅文献[11],经拟合得到,模拟混凝土接触模型的参数为 C01 为 0.080 61, C10 为 0.806 1, d 取 0, 硬度为 40, 垫层厚度 20 mm。

通过建立面面接触来处理管道与垫层的接触问题,其中选择管道所有表面作为接触面,选取垫层上表面作为目标面,三维接触面和目标面分别采用 CONTA173 单元、TARGE169 单元来模拟。建立模型时,选择 SHELL181 单元来模拟管道,该单元无中节点,更容易收敛。用 18X 族中的 SOLID185 单元来模拟超弹性橡胶材料和混凝土接触模型。SOLID185 单元用于构造三维固体结构;单元通过 8 个节点来定义,具有超弹性,应力刚化,蠕变,大变形和大应变等能力。模型整体俯视图模型如图 10 所示。

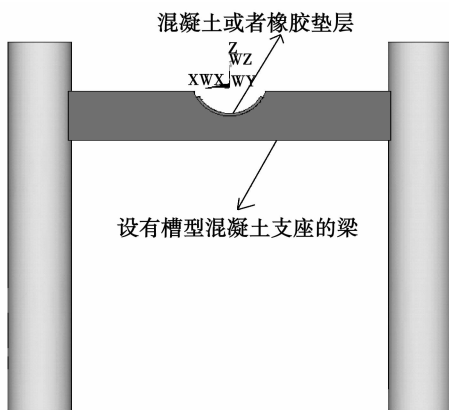


图 9 管道支架截面
Fig. 9 Section pipe support

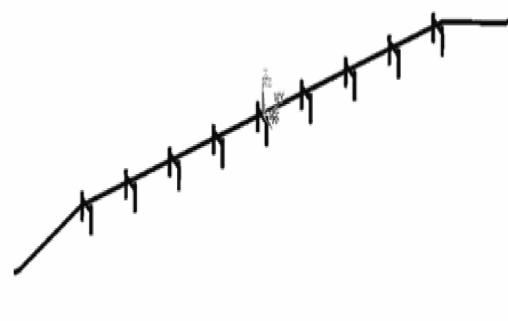


图 10 管道模型
Fig. 10 Pipe model

3.2.2 瞬态动力对比分析

选取兰州波并调幅至 7 度多遇地震下,对两种模型进行瞬态动力对比分析。关键节点信息如下表 2 所示,主要从两种模型下关键节点的位移、速度和应力和相邻节点下的位移差值进行对比分析。

表 2 关键点信息表
Table 2 Information list of key joints

关键点编号	关键点坐标系			在结构中的具体位置
	X	Y	Z	
47023	0	0	201	中间支座处管道截面内壁最上方
47384	0	566.67	201	与 47023 最相邻节点
47383	0	8500	201	第六支座处管道截面内壁最上方
47744	0	9066.7	201	与 47383 最相邻节点
48463	0	34000	201	边支座处管道截面最上方
48477	0	33433	201	与 48463 最相邻节点

(1)关键节点的位移、速度、应力等角度对比研究,取数据中绝对数值最大值进行比较,具体数据见下表 3 所示:

表 3 数据对比表
Table 3 Comparison of data

模型类型	节点编号	兰州地震波作用下							
		UX/mm	UZ/mm	VX/(mm·s)	VZ/(mm·s)	SX/MPa	SY/MPa	SXY/MPa	Von Mises/MPa
混凝土接触模型	47023	0.0872	34.042	3.114	202.581	25.787	19.008	0.00147	23.066
	47383	0.0706	30.812	1.339	127.814	24.665	16.704	0.0139	21.883
	48463	0.0412	8.594	1.910	156.439	23.350	18.456	0.0254	20.524
橡胶接触模型	47023	0.00165	78.946	0.0193	288.005	23.002	23.143	-0.000103	22.843
	47383	0.00152	68.975	0.0168	208.846	23.273	20.722	-0.000104	21.555
	48463	0.00224	10.380	0.0182	206.334	22.690	19.687	-0.00102	20.054

由表 3 可知,橡胶接触模型相对混凝土模型在 UX 方向位移数值降低了一个数量级,位移明显减小。在 UY 方向上,橡胶对管道位移有放大作用,速度与位移有相同的特征。两种模型的应力较为接近,SX 代表管道的环向应力,混凝土接触模型相对橡胶接触模型数值更大,SY 为管道的轴向应力,橡胶接触模型相对混凝土接触模型数值更大,SXY 表示管道在 XY 平面的剪应力,橡胶接触模型的数据较混凝土接触模型数据更小。Von Mises 代表管道的平均应力,总体上看,橡胶接触模型中管道的平均应力相对混凝土接触模型较小。

(2)3 处相邻节点的位移差值分析

由于管道的破坏主要取决于管道相邻节点的相对位移,相对位移值越大,破坏的可能性就越大,因此,有必要对比研究两种模型下相邻节点的位移差值情况。取节点间位移差值中绝对值最大值进行对比,如下表 4 所示:

表 4 相邻节点位移差值
Table 4 Displacement differences of adjacent joints

相邻节点	UX		UZ	
	混凝土接触模型	橡胶接触模型	混凝土接触模型	橡胶接触模型
4702 与 47384	6.7	4.68	0.0430	0.0686
4738 与 47744	3.0	1.03	0.563	1.33
4846 与 48477	3.8	9.65	0.823	1.35

由表 4 可看出,在 UX 方向上,橡胶接触模型的相邻节点位移相差的最大值相对混凝土接触模型有大幅度减小,说明在 UX 方向上,橡胶接触模型相对混凝土接触模型在地震作用下更加安全,在 UZ 方向上,橡胶接触模型的相对位移差值较大,混凝土接触模型更趋于安全。

4 结 语

(1)管道节点之间速度与位移的差动较大,加上管道本身与水体的惯性作用,引起管道不受控制的摆动,是导致管道破坏的主要原因。

(2)按规范计算出的法兰盘的应力为平均应力,不能反映法兰盘真实的内部应力状态,在某些部位应力较大,如法兰与管道连接处,螺栓受拉弯部位等,应引起注意。要定期检查法兰盘与螺栓,若锈蚀严重,应及时更换。

(3)在 GB50032-2003《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》中规定:管道与构筑物、设备的连接处(含一定距离内),应配置柔性构造措施;并且架空管道应采用钢管,并应设置适量的活动、可挠性连接构造,对盈江县供水管道的修复措施,建议采用槽型混凝土支座,条件允许时,在槽型支座上设置橡胶垫。

(4)通过混凝土接触模型和橡胶接触模型的对比研究得知,橡胶接触模型对于改善管道水平的抗震能力相对混凝土接触模型有明显提高,但是对于管道的竖向抗震,橡胶接触模型没有混凝土接触模型理想,但由于竖向地震只对悬臂结构和长跨重载结构影响显著,对供水管道影响不大。因此,橡胶接触模型在实际地震中抗震能力更佳。

参 考 文 献:

- [1] 冯启民. 天津开发区供水系统地震反应分析[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(4): 39-44.
FENG Qimin. Seismic performance analysis of water delivery systems in Tianjin economic developed area [J]. Journal of Nature Disaster, 9(4): 39-44. (in Chinese)
- [2] 邓民宪. 架空管道震害预测实用方法的研究[J]. 地震学报, 1999, 2(2): 51-55.
DENG Minxian. Study on practical method for earthquake damage prediction of high brace pipe [J]. Journal of Seismolog, 1999 (2): 51-55. (in Chinese)
- [3] 柳春光. 架空管道的地震破坏及其分析方法研究[J]. 世界地震工程, 1999, 15(3): 69-73.
LIU Chunguang. The earthquake damage to overhead pipe and its analysis methods [J]. World Information on Earthquake Engineering, 1999, 15(3): 69-73. (in Chinese)
- [4] 张茂盛. 工业系统管道支架的整体分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
ZHANG Maosheng. Overall Analysis of Pipe in Industrial System [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [5] 黄誉. 钢管杆中刚性法兰的有限元分析[J]. 特种结构, 2008, 25(2): 3-5.
HUANG Yu. Finite element analysis of flange joint with stiffening rid in steel transmission poles [J]. Special Structure, 2008, 25(2): 3-5. (in Chinese)
- [6] DL-T5154-2002 架空送电线路杆塔结构设计技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
DL-T5154-2002 Technical Regulation of Design for Towers and Pole Structure of Overhead Transmission Line [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese)
- [7] 余欢. 变电构架中无加劲肋法兰节点有限元分析[J]. 武汉大学学报:工学版, 2007, 40(增刊): 204-208.
YU Huan. Finite element analysis of non-stiffened flange joint in substation frames [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(s): 204-208. (in Chinese)
- [8] 肖新华. 混凝土结构抗震鉴定与加固技术及其应用[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 138-142.
XIAO Xinhua. Seismic appraisalment and strengthening of concrete structure and their application [J]. Journal of Nature Disaster, 2009, 18(5): 138-142. (in Chinese)
- [9] GB50032-2003 室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
GB50032-2003 Code For Seismic Design of OutdoOr Water Supply, Drainage And Gas Heating Engineering [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 严定中. 基于砂土液化分析的穿越管道抗震可靠性[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(5): 113-116.
YAN Dingzhong. Aseismic reliability of traversing pipelines based on soil liquefaction analysis [J]. Journal of Nature Disaster, 2004, 13(5): 113-116. (in Chinese)
- [11] Gladwell G M L. 经典弹性理论中的接触问题[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1991: 142-256.
Gladwell G M L. Contact Problems in Classical Elasticity Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1991: 142-256. (in Chinese)