

流体参数对埋地管道破坏的影响分析^{*}

王素莉¹, 朱庆杰¹, 周云章², 丛德茂²

(1 河北理工大学地震工程研究中心, 河北 唐山 063009; 2 中国石油天然气勘探开发公司, 北京 100034)

摘要: 在考虑流固耦合和断层活动作用的情况下, 应用ADINA中流固耦合分析求解器ADINA-FSI, 建立了埋地管道破坏分析的有限元模型, 介绍了固体模型和流体模型的建模过程以及流固耦合计算过程、断层位移荷载加载和约束的实现以及模型参数选择等。依据计算结果, 分析了管内介质及流速等参数对管道破坏的影响。管道内输送的介质密度和流速越大, 管道越易破坏, 故在埋地管道设计中应充分考虑管内介质的密度与流速。针对计算结果, 提出了几点认识和建议。

关键词: 埋地管道; 数值模拟; 自动动态增量非线性分析软件(ADINA); 流固耦合模型

中图分类号: O353.1, TU81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2008)02-0152-04

0 引言

埋地输液管道在地震作用下很容易遭到破坏, 例如1976年唐山地震, 整个城市供水管网完全遭到破坏, 输油管线流失原油1万余吨^[1]。在中国近年发生的地震中, 埋地管网破坏屡见不鲜, 云南省1998年宁蒗6.2级地震使震区供水管道破裂, 经济损失约1500万元; 云南省1998年宣威5.1级地震造成震区自来水水管破裂, 经济损失约960万元。另外, 2003年云南大姚地震、2004年内蒙东乌地震、2006年云南盐津地震以及2007年云南普洱地震等均造成供水管道大量破坏^[2]。

传统的地下管网破坏分析不考虑流体与管道之间的耦合作用, 20世纪70年代开始考虑固液耦合作用进行计算^[3]。我国的流固耦合研究起自20世纪80年代, 并在90年代取得较大进展。王世忠等^[4,5]讨论了流体的流速、压强变化以及固-液耦合对管道固有频率的影响; 冯振宇等^[6]根据Hamilton原理, 推导了Timoshenko管道的固-液耦合振动微分方程; 张智勇等^[7,8]对充液直管管系中固-液耦合对管系轴向振动响应的影响进行了研究, 推导了低频情况下的充液直管轴向、横向振动传递矩阵和弯管单元的传递矩阵; 王世忠等^[9]用有限元法推导流体输送管道固-液耦合振动方程, 讨论了流体流速、压强变化, 以

及固-液耦合阻尼和刚度对管道固有频率的影响。近几年, 研究者们注重应用有限元法进行数值模拟分析, 如黄宏伟等^[10]研究了顶管施工力学效应的数值模拟方法; 李大勇等^[11]分析了内撑式基坑工程周围地下管线性状; 魏纲等^[12,13]采用有限元方法, 分析了顶管施工引起的管道周围土体移动造成的危害和失稳现象。

在管道破坏的分析中, 有限元法的应用越来越广泛。立足于此, 本文应用ADINA中流固耦合分析求解器来建立地下管道破坏分析的有限元模型, 并实现了地震荷载加载和断层活动约束, 进而依据有限元模拟结果, 分析管内介质及流速等参数对管道破坏的影响。

1 FSI有限元分析方法

FSI(Fluid Structure Interaction, 流固耦合相互作用)分析主要用于处理液体和固体之间的非线性动态耦合问题, 其基本原理是通过分别满足液体和固体之间耦合边界上的运动学平衡方程和动力学平衡方程, 将液体和固体耦合起来, 其运动学条件为

$$d_t = d_s \quad (1)$$

动力学条件为:

$$nT_t = nT_s \quad (2)$$

式中 d_s 、 d_t 分别为液体、固体的边界位移;

^{*} 收稿日期: 2007-08-10; 修回日期: 2007-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678059)、河北省教育厅科研计划项目(2004435)资助

作者简介: 王素莉(1981-), 女, 硕士研究生。主要从事城市地下生命线工程防灾方面的研究。

Email: wangsulili_1021@sina.com

τ_k 、 τ_s 分别为液体、固体的应力。

耦合边界上液体速度可以从运动学条件导出:

$$n v_k = n d_s \quad (3)$$

基于有限元的FSI分析方法需解决三个方面的问题。首先是耦合面上作用力的准确传递。在ADINA中, 固体模型和液体模型是分开建立的, 两个模型之间的耦合是通过分别在其实际的作用面定义液-固耦合表面来实现的, 两者的网格可以不一致, 但要满足一定的容差要求, 耦合面上液体节点的位移通过附近固体节点的位移插值得到, 而固体节点受到的液体作用力可以通过对附近液体应力的积分得到:

$$F(t) = \int_{h^d} \tau dS \quad (4)$$

式中 h^d 为固体虚位移。

然后是描述由于固体变形或位移引起的液体网格的移动。目前常用的方法是将欧拉坐标系统下的N-S方程映射到ALE(arbitrary lagrangian euleria)坐标系统中,ALE坐标的位移及速度即为液体节点的位移和速度。在ADINA中, 耦合面上液体节点的位移和速度由固体变形得到, 由此引起体积改变的液体区域内的可任意移动液体节点的位移增量, 通过求解laplace方程得到; 此外, 可以通过定义Leader-Follower点对模型中非物理移动边界上液体网格的移动进行人为控制。

最后是对耦合系统的求解。ADINA提供了两种方法: 迭代解法和直接解法。这两种方法都要保证动态分析时固体和液体模型之间时间积分点的一致性。由于耦合模型的非线性, 这两种方法都要通过迭代才能得到有限元方程的解。迭代解法中液体和固体求解变量是完全耦合的, 但是需对液体方程和固体方程分别求解, 其中利用耦合系统另一部分的最新信息。直接解法是将液体模型和固体模型装配在同一矩阵中进行求解, 其有限元方程如下:

$$\begin{bmatrix} A_{ff} & A_{fs} \\ A_{sf} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_f^k \\ \Delta X_s^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_f \\ B_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k \quad (6)$$

$$A_{ff} = \frac{\partial F_f^k}{\partial X_f} \quad A_{fs} = \lambda_t \frac{\partial F_f^k}{\partial X_s} \quad (7)$$

$$A_{sf} = \lambda_r \frac{\partial F_s^k}{\partial X_f} \quad A_{ss} = \frac{\partial F_s^k}{\partial X_s} \quad (8)$$

式中 λ_t ($0 < \lambda_t \leq 1$) 为位移松弛因子;

λ_r ($0 < \lambda_r \leq 1$) 为应力松弛因子。

2 流固耦合模型建立

流固耦合考虑的是管道和流体之间的耦合。管

道和流体的耦合作用, 是通过ADINA分别建立固体模型和流体模型, 然后将它们进行耦合计算来实现的。固体模型在结构分析求解器下建立, 与不考虑流固耦合模型的情况相比, 需要增加流固耦合分析设定, 即要选定流固耦合相互作用(Fluid Structure Interaction)选项; 流体模型的建立在计算流体动力学求解器ADINA-F中完成, 并设定流固耦合分析。模型分别建立后, 打开流固耦合求解器进行流固耦合运算求解。

2.1 固体模型的建立

要分析管道与流体的耦合作用, 在ADINA建立固体模型时, 必须首先打开流固耦合分析器。固体模型采用ADINA-native建模方式, 首先定义点, 由点绕Y轴旋转180°生成管道口上半圆弧线, 由线沿Y轴延伸生成管道面, 管道采用双线性塑性材料; 在边界条件定义中, 必须设定流固耦合界面, 即与流体发生耦合作用的管道面; 根据断层活动特点确定约束情况, 断层为正断层情况下, 约束加在管道一侧的下端线上, 断层活动产生的位移荷载加在管道不受约束的另一侧的底面; 管道单元采用9节点壳单元。荷载、约束及网格划分情况如图1。最后选择保存固体模型, 但不选定Run ADINA项。

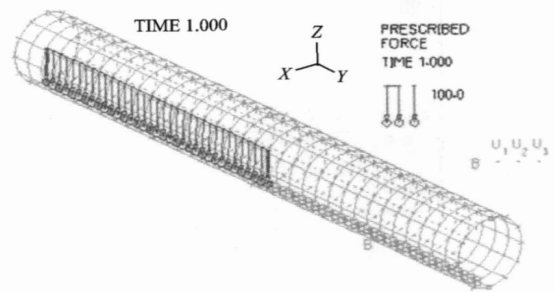


图1 管道模型荷载、约束及网格示意

Fig 1 Loading, fixity and meshing in pipe model

2.2 流体模型建立

流体模型在ADINA-F模块中建立, 并选定FSI选项, 然后进行特殊流体假定。流体采用三维流体, 不考虑热传递, 用有限元分析方法选定流固耦合设定。建立流体模型首先定义点, 由点延伸生成流体柱底面半径, 由线绕Y轴旋转360°生成流体柱底面, 由面沿Y轴延伸生成流体柱。与固体模型一样, 需要设定流固耦合边界, 边界加在流体外表面与管道接触面上, 并考虑滑移条件; 流体采用恒定不可压缩流体, 流体单位采用三维流体单元(3D fluid element); 采用不同方向上设定网格数量来划分网格

密度,采用四节点规则三维流体单元来划分单元。考虑流体以一定流速流动,故施加流速荷载。图2所示为荷载、约束及网格划分。保存模型,并不选定Run ADINA-F。

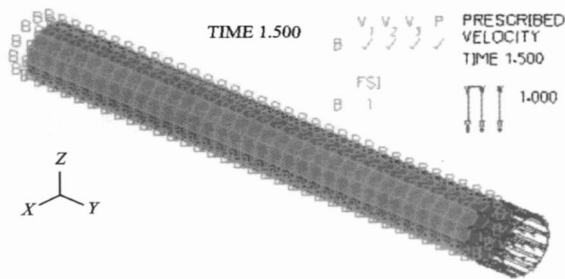


图2 流体模型荷载、约束及网格示意

Fig 2 Load, fixity and meshing plot in fluid model

2.3 耦合求解

在固体模型和流体模型都进行求解后,打开流固耦合求解器,此时必须同时打开固体模型和流体模型,进行模型耦合求解,如图3所示,即可得出流固耦合作用下的计算结果。

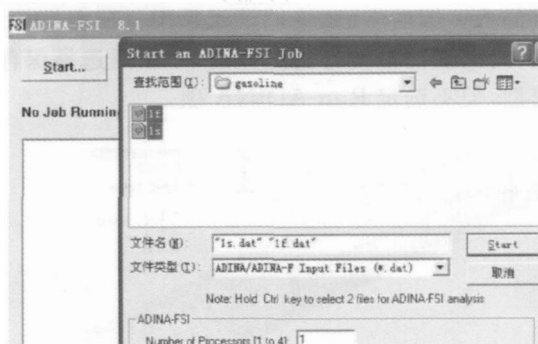


图3 流固耦合求解

Fig 3 FSI solution

3 模型参数选择

管壁厚度为0.01 m,管径为0.6 m,管长为10 m。管道材料为双线性塑性钢管;流体分别考虑水、汽油、煤油三种材料,材料参数见表1。

表1 流体材料参数

Table 1 Parameters of liquid material

材料类型	粘滞系数/($\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$)	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
4℃水	0.01	1
80℃水	0.357	0.97
汽油	0.29	0.71
煤油	1.92	0.78

荷载,流体模型荷载为重力荷载和流体流速,流体流速分别考虑为10、30、50、100 m/m in。

4 结果分析

4.1 流体流速的影响

当4℃的水流速分别为10、30、50、100 m/m in时,流速对管道轴向应变的影响曲线见图4。由图中可以看出,随着流体流速的增大,管道的应变呈增长趋势,故流速越大,管道越容易产生变形破坏。同时可以发现,当流速低于30 m/m in时,流速的影响不明显,因此,限制过高的流速是工程中应该重点关注的问题。

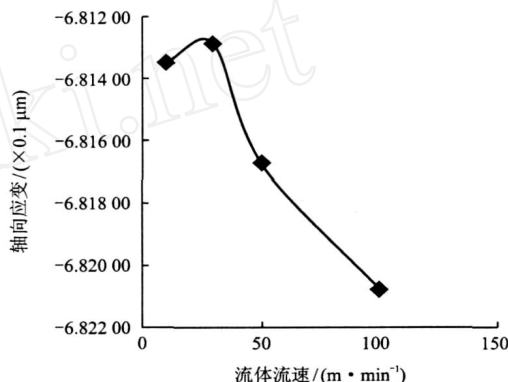


图4 流体流速对轴向应变的影响

Fig 4 Influence of fluid velocity on axial strain

4.2 不同流体材料的影响

流体采用表1中材料,水的材料参数分别考虑为4℃时密度为1 g/cm³和80℃时密度为0.97 g/cm³。图5显示了在管道流固耦合情况下,流体材料对管道轴向应变的影响。图中,水/1表示水温为4℃时密度为1 g/cm³的情况,水/0.97表示80℃水密度为0.97 g/cm³的情况。由图中可以看出,管道

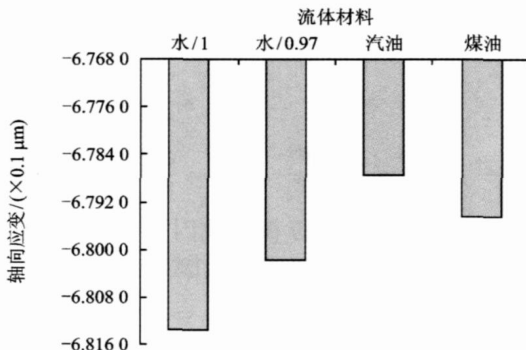


图5 流体材料对轴向应变的影响

Fig 5 Influence of fluid materials on axial strain

固体模型荷载为重力荷载、位移荷载和地震力

变形破坏次序为水/1> 水/0.97> 煤油> 汽油, 流体材料的密度是按照这样的顺序逐渐递减的。由此可见, 流体密度越大, 管道破坏越严重, 故在输送流体介质时要充分考虑流体材料的密度, 对于密度较大的流体, 管道应采取相应的防护措施。

5 结论

通过分析流固耦合情况下的地下管道破坏情况, 得出如下结论:

(1) 将断层位移施加于埋地管道的固体有限元模型, 并建立流体模型, 可通过流固耦合计算分析跨断层埋地管道的应力应变分布, 分析流体性质对管道变形破坏的影响。

(2) 管道内流体的流速越快, 管道受压力越大, 破坏越严重, 故应尽量将管内流体流速控制在一定范围内, 减小流固耦合引起的管道应力及变形。对于高流速流体应特别关注。

(3) 管道在输送不同流体介质时, 管内介质密度越大, 对管道影响越大, 故在管道设计中应考虑管内流体密度。对密度较高的流体, 管道应采取相应的防护措施。

参考文献

- [1] 朱庆杰, 刘英利, 蒋录珍, 等. 管土摩擦和管径对埋地管道破坏的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 197-199
Zhu Q J, Liu Y L, Jiang L Z, et al. Analysis of buried pipeline damage affected by pipe-soil friction and pipe radius[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 197-199
- [2] 郭恩栋, 余世舟, 吴伟. 地下管道工程震害分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 180-183
Guo E D, Yu S Z, Wu W. Seismic damage analysis of buried pipeline engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 180-183
- [3] Bathe K J, Hahn, W. On transient analysis of fluid-structure systems[J]. Journal of Computers and Structures, 1978, 10(2): 383-391
- [4] 王世忠, 王茹. 三维管道固液耦合振动分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1992, 24(4): 43-49
Wang S Z, Wang R. Solid-liquid coupled vibration analysis of 3D piping system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1992, 24(4): 43-49
- [5] 王世忠, 刘玉兰, 黄文虎. 输送流体管道的固-液耦合动力学研究[J]. 应用数学和力学, 1998, 19(11): 987-993
Wang S Z, Liu Y L, Huang W H. Dynamics research on solid-liquid coupling characteristics of fluid-conveying pipes[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1998, 19(11): 987-993
- [6] 冯振宇, 赵凤群. 固-液耦合 Timoshenko 管道的稳定性分析[J]. 应用力学学报, 1999, 16(3): 47-52
Feng Z Y, Zhao F Q. Stability analysis of solid liquid coupling Timoshenko pipes[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1999, 16(3): 47-52
- [7] 张智勇, 沈荣瀛. 充液直管管系中的固-液耦合振动响应分析[J]. 振动工程学报, 2000, 13(3): 455-461
Zhang Z Y, Shen R Y. Fluid-structure interaction of the straight liquid-filled piping system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(3): 455-461
- [8] 张智勇, 沈荣瀛, 王强. 充液管道系统的模态分析[J]. 固体力学学报, 2001, 22(2): 143-149
Zhang Z Y, Shen R Y, Wang Q. The modal analysis of the liquid-filled pipe system[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2001, 22(2): 143-149
- [9] 王世忠, 于石声, 赵阳. 流体输送管道的固-液耦合特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(2): 141-144
Wang S Z, Yu S S, Zhao Y. Solid-liquid coupling characteristics of fluid-conveying pipes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(2): 141-144
- [10] 黄宏伟, 胡昕. 顶管施工力学效应的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 400-406
Huang H W, Hu X. 3D numerical analysis on construction mechanics effect of pipe-jacking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 400-406
- [11] 李大勇, 吕爱钟, 曾庆军. 内撑式基坑工程周围地下管线的性状分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 682-687
Li D Y, Lü A Z, Zeng Q J. Behavior analysis of buried pipeline response to nearby excavation pit with braced retaining structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 682-687
- [12] 余振翼, 魏纲. 顶管施工对相邻平行地下管线位移影响因素分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 441-445
Yu Z Y, Wei G. Influencing factor analysis of sewage pipe project on the migration of parallel buried pipeline[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 441-445
- [13] 魏纲, 徐日庆, 黄斌. 长距离顶管管道的失稳分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1427-1432
Wei G, Xu R Q, Huang B. Analysis of stability failure for pipeline during long distance pipe jacking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1427-1432

(下转第170页)

- [2] 汤怡新, 刘汉龙, 朱 伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554
Tang Y X, Liu H L, Zhu W. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22 (5): 549-554
- [3] JTJ057-94, 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]

Undrained Strength Behavior of Treated Dredged Clays with Quick Lime

DENG Dong-sheng^{1, 2}, ZHANG Tie-jun³, HONG Zhen-shun³

(1 Transportation School, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2 Jiangsu Water Resources Co Ltd, Nanjing 210029, China;

3 Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A series of laboratory tests were performed on the dredged clays treated with quick lime to investigate the main factors of effect on their unconfined compressive strength. The relationships between unconfined compressive strength of treated dredged clays with quick lime and original water content of dredged clays, quick lime content, and water content of treated soils were discussed. Analysis of test data gave a linear relationship between the unconfined compressive strength of treated dredged clays with quick lime and the decreasing percent of water content proposed by authors. A quantitative formula was also proposed in this study for predicting the unconfined compressive strength of treated dredged clays with original water content of dredged clays and water content of treated soils. The testing results are valuable for utilization of waste dredged clays as filling materials.

Key words: dredged clays; treated soils; unconfined compressive strength; prediction method of water content

(上接第155页)

Influence of Liquid Parameters on the Damage of Buried Pipeline

WANG Su-li¹, ZHU Qing-jie¹, ZHOU Yun-zhang², CONG Demao²

(1 Research Center of Earthquake Engineering, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China;

2 China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100034, China)

Abstract: Finite element model is constructed for the analysis of buried pipeline damage under fluid structure interaction (FSI) and fault movement by the application of ADINA-FSI. Modeling of solid and fluid model is analyzed, and model solution under fluid-structure interaction is introduced, displacement loads of faults movement are applied, and parameters of the model are defined through model preferences. Pipe is treated as bilinear elastic-plastic material and liquid is incompressible material with constant properties, such as viscosity and density. Furthermore, velocity load is applied to surface by definition of load type of velocity. According to the calculating results, the influence of density and velocity of fluid on the damage of buried pipeline is analyzed. The larger the density and velocity of the fluid in pipe, the worse the pipeline damage, therefore, density and velocity of the fluid in pipe should be generally considered when buried pipe is designed. Finally, some suggestions for the design and protection of buried pipeline is made.

Key words: buried pipeline; numerical simulation; automatic dynamic incremental nonlinear analysis (ADINA); fluid structure interaction mode