

文章编号:1673-5005(2009)02-0099-05

地面占压荷载作用下的管道应力分析

帅 健¹, 王晓霖², 叶远锡², 左尚志³

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 石油天然气工程学院, 北京 102249;

3. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

摘要:占压导致地基下沉和管道变形。建立了地基-管道的三维有限元模型, 分析占压荷载作用下管道的应力与变形。模型考虑了管-土间的相互作用和管底夯实地基, 符合占压管道的实际载荷情况。结果表明:管道在上覆土体和夯实地基的不均匀作用下发生局部弯曲和椭圆化变形; 上覆土体越软, 管道变形越大, 管底夯实地基起到阻止管道下沉的作用, 二者弹性模量相差越大, 管道在夯实地基边缘处的环向弯曲应力越高; 内压起到抵抗管道变形的作用, 但其影响程度较小; 薄壁大口径管道的应力水平和变形程度相对较高, 上覆土体对大口径管道横截面变形有较大的约束作用; 占压荷载与管道横截面的椭圆化变形率近似呈线性关系, 依据极限椭圆化变形率可以确定管道所能承受的安全占压荷载。

关键词:管道; 占压; 应力; 有限元法; 管-土作用

中图分类号: TU 81

文献标识码: A

Stress analysis of pipeline subject to surface load

SHUAI Jian¹, WANG Xiao-lin², YE Yuan-xi², ZUO Shang-zhi³

(1. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Surface load results in foundation settlement and pipeline deformation. A numerical analysis of the stress and deformation of buried pipeline subject to surface load was performed using a 3D finite element model of pipeline-foundation system considering pipe-soil interaction and tamping foundation. The results show that surface load induces local bending and ovalization of pipeline due to non-uniform effects of overlying soil and tamping foundation. Softer overlying soil has greater influence on pipeline deformation; the main effect of tamping foundation is to resist pipeline settlement, and the greater the differential value of elastic modulus between overlying soil and tamping foundation, the greater the bending stress of pipeline at the edge of tamping foundation. Internal pressure has a little effect to resist pipeline deformation. High stress and deformation occur in a pipeline of thinner wall or larger diameter, and overlying soil has much effect to restrict ovalization of such a pipeline. Pipeline ovalization increases approximately linearly with surface load. Allowable surface load may be determined according to ovalization of pipeline.

Key words: pipeline; surface load; stress; finite element method; pipe-soil interaction

埋地管道不可避免地会被道路、建筑、堆积物等地面设施占压。占压造成地基的不均匀沉降, 导致管道产生弯曲变形甚至破裂, 并可能引发油气泄漏、火灾和爆炸等事故。对于占压管道, 采用 Boussinesq 方程可以求解地面集中荷载作用下地基任意

处的应力和位移^[1], 积分得到分布荷载作用下地基的应力和位移分布, 进而分析管道受到的竖直与水平作用力^[2], 再应用弹性地基梁理论即可求解管道的弯矩、剪力和挠度^[3]。也可以通过测量管道的变形量, 求解沉降管道的应力状态^[4]。上述方法以一

收稿日期: 2008-10-08

基金项目: 国家科技支撑技术项目(2006BAK02B01-12)

作者简介: 帅健(1963-), 男(汉族), 湖北黄梅人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事油气储运安全工程方面的教学与研究工作。

系列假设为前提,而且忽略管土的相互作用,难以反映管道的局部变形或屈曲,近年来,采用有限元、边界元、离散元等数值方法研究管土相互作用问题^[5-8],可以较好地模拟和分析管道在地基中的力学状况。笔者通过三维有限元模型,分析占压管道的变形、应力,以及土体弹性模量、内压、管道参数和占压载荷等因素对管道的影响作用,为占压管道的安全评价提供参考和依据。

1 占压管道的有限元模型

1.1 建模方法

埋地管道和周围土壤组成土体-结构相互作用的复合体系^[9]。分析埋地管道力学行为,需要考虑地面荷载、地基模型、管道模型以及管土相互作用模型等影响因素。

(1)地面荷载。建筑物、长期堆积物等作为地面均布静载荷。

(2)地基土体模型。地面荷载通过地基土体传到管道,管道受到的载荷与土体性质关系密切。鉴于土体复杂的本构关系(非线性、弹塑性、粘塑性、剪胀性、各向异性、多态性等),工程界从应用的角度出发,经简化提出了多种理想化的土体本构模型。本文中采用扩展的 Drucker-Prager 模型^[10],该模型考虑屈服与围压关系、材料的剪胀性等因素,适于模拟土体材料。

(3)管道模型。管道为钢制圆管,管材采用 Ramberg-Osgood 本构模型,其参数根据材料拉伸试验测得的应力-应变曲线拟合确定。

(4)管土相互作用模型。管道与地基相互作用是典型的接触非线性问题。地基与管道之间通常不承受拉力;在受压状态下,如果土体与管道间的剪切应力超过极限摩阻力时,地基与管道发生错动,剪切与法向应力符合库仑摩擦定律。因此,将管-土间的相互作用简化为切向接触和法向接触,切向接触考虑土体对管道的摩擦作用,采用罚函数定义,法向定义为硬接触,管土接触后允许分离。

1.2 算例模型

管道直径 630 mm,管材为 X65,拉伸试验测得材料弹性模量为 207 GPa,屈服强度为 423 MPa;根据应力-应变曲线确定 Ramberg-Osgood 模型参数,硬化指数为 10.309,屈服偏差系数为 2.66。占压区域为矩形,宽、长分别为 1.6,3 m,分布载荷为 0.7 MPa。地基土体是一个无限空间体,可截取一定范围作为研究对象。经计算确定地基长×宽×高=24

m×10 m×3.2 m,考虑到几何与荷载的对称性,取结构的 1/4 作为研究对象。土体弹性模量 60 MPa,泊松比 0.32;管土间切向摩擦系数 0.6。按照工程惯例,管沟底部需要夯实,因此管底夯实土体取较高的弹性模量。占压管道模型如图 1 所示。

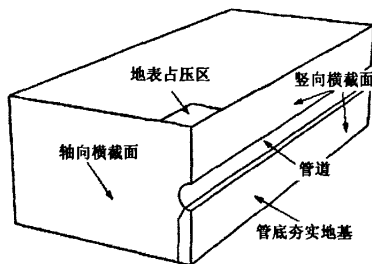


图1 占压管道模型示意图

Fig.1 Model of pipeline subject to surface load

2 计算结果与分析

2.1 管道变形与应力分布

图2是土体与管道位移云图。由图2可知,土体在占压载荷作用下发生沉陷,致使管道整体产生弯曲变形,载荷下方管道产生椭圆化变形。占压载荷对管道的影响作用主要集中在占压面下方局部区域内,远离占压区域管道主要受内压作用,占压影响逐步减弱。

在夯实地基的支撑作用下,管道受到周围土体的不均匀作用。由图3管道内、外壁的环向应力云图可知,占压面下方管道的环向应力分布极不均匀,在夯实土体边缘处,内外管壁分别出现环向应力的最大值和最小值,二者相差 170 MPa。据此可以断定管壁在夯实边缘处产生较大环向弯曲,这种弯曲可导致管道局部凹陷。

2.2 管道变形和应力的影响参数

占压导致管道在不均匀土体的作用下产生弯曲和椭圆化变形,局部处于高应力状态,不仅降低了管道的安全性,而且可能使内检测器无法顺利通过,难以检测占压区域的管道状态。为了分析占压管道的主要影响因素及其作用,分别对上覆土体弹性模量、夯实地基弹性模量、内压、管道几何参数以及占压载荷等进行讨论。

2.2.1 上覆土体

弹性模量反映土壤的松软程度,在 60 ~ 500 MPa 间取 6 组不同弹性模量的上覆土体进行对比分析(管底夯实地基的弹性模量均为 600 MPa)。由图 4 管顶竖向位移可知:随着土体弹性模量的增大,管

顶下沉位移逐渐减小;占压荷载对管道的作用限于局部范围,该范围内管顶下沉位移随着距对称截面

距离的增大而逐渐减小;远离占压区域,由于内压作用管顶上升,且其位移逐渐趋于恒定。

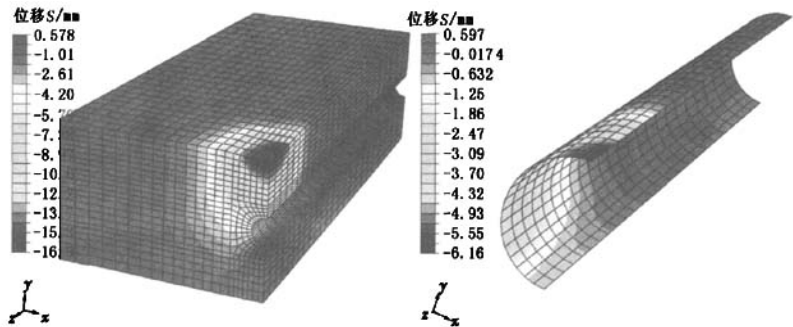


图2 土体与管道的竖向位移云图

Fig.2 Vertical displacement distribution of soil and pipeline

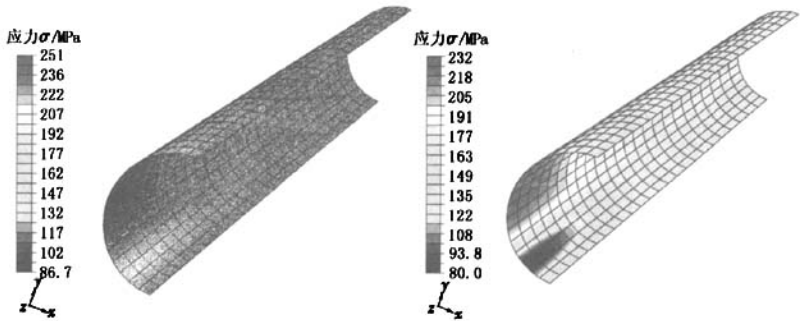


图3 管道内、外壁环向应力云图

Fig.3 Hoop stress distribution of inner and outer pipe wall

内外壁环向应力可以反映管道沿环向的变形情况。图5是管道内、外壁环向应力的差值分布。由图5可知:不同土体弹性模量下管道内外壁最大环向应力差值都出现在管道底部夯实地基边缘(管底

管道横截面表现出椭圆化趋势;管壁各处的变形程度都随土体弹性模量的增大而逐渐减小。

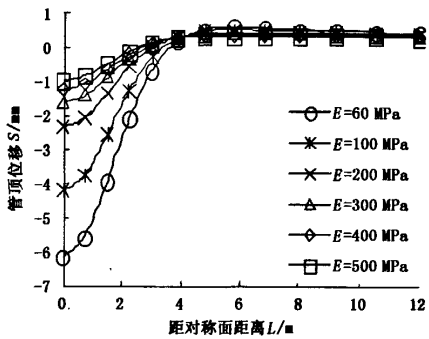


图4 上覆土体对管顶竖向位移的影响

Fig.4 Influence of overlying soil on vertical displacement of pipeline

30°)附近,管壁在此处发生局部弯曲;管顶部分内壁环向应力也大于外壁,在160°附近差值最大,管壁具有弯曲倾向;45°~135°内壁环向应力小于外壁,

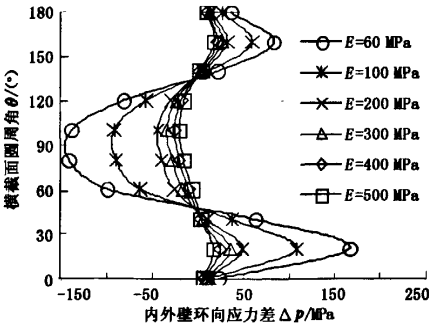


图5 上覆土体对内、外管壁环向应力的影响

Fig.5 Influence of overlying soil on hoop stress of inner and outer pipe wall

分析表明,土质越软(弹性模量小),管道变形越明显。因此,对于具有占压倾向管段,敷设时宜采用硬质上覆土体或进行夯实。

2.2.2 管道底部夯实地基

管底夯实地基起到阻止管道下沉的作用,在

0.6~6 GPa 间选取 6 组夯实地基弹性模量进行对比分析(上覆层弹性模量均为 500 MPa)。由图 6 管顶竖向位移可知,夯实地基的弹性模量对管顶下沉影响较小。管道内外壁环向应力随夯实地基弹性模量增加而略有减小;夯实地基弹性模量与上覆土体相差越大,管道在夯实地基边缘处的环向弯曲应力越高。由图 7 内外管壁环向应力差值分布可知:夯实地基弹性模量对管道上半部应力影响极小,管壁内外环向应力最大差值出现在夯实地基边缘附近,且随地基弹性模量增大而增大。

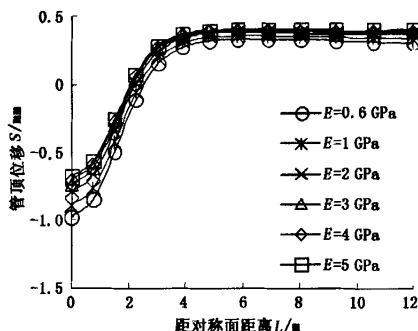


图 6 夯实地基对管顶竖向位移的影响
Fig. 6 Influence of tamping foundation on vertical displacement of pipeline

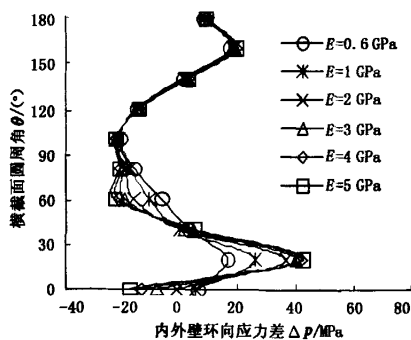


图 7 夯实地基对内、外管壁环向应力的影响
Fig. 7 Influence of tamping foundation on hoop stress of inner and outer pipe wall

2.2.3 内压

在 0.5~6 MPa 间取 5 组内压,分析内压对占压管道的影响作用。由图 8,9 可知:随着内压的增加,管道顶部的垂直位移逐渐减小,管道应力水平明显增高。虽然内压可以起到抵抗管道变形的作用,但其影响并不明显,管壁内外环向应力差值变化也不明显。

2.2.4 管道几何参数

为了分析占压对不同尺寸管道的影响,按几何

参数(管径×壁厚)分别取 6 组管道:426 mm×8 mm,508 mm×8 mm,630 mm×8 mm,762 mm×10 mm,864 mm×12 mm,1012 mm×14 mm。由图 10 管顶竖直位移可知:各管道在占压面下方的管顶下沉位移基本一致;远离占压区域,管顶竖直位移随管径的增大而略有增大。由于管道尺寸不同,管壁应力水平变化明显,630 mm×8 mm 管道应力水平最高,762,864 和 1012 mm 管径的管道由于壁厚的增加,应力水平略有下降。但是根据图 11 管壁内外环向应力差值可以看到:随着管径的增加,管道截面上各处环向应力的差值略有减小,即截面上管道不均匀变形趋势有所降低,可见上覆土体对大口径管道横截面变形的约束作用相对较大。

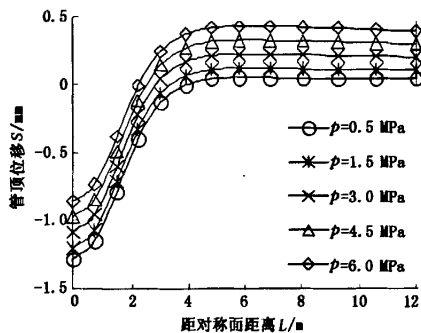


图 8 内压对管顶竖向位移的影响
Fig. 8 Influence of internal pressure on vertical displacement of pipeline

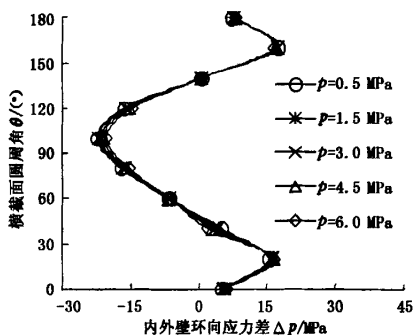


图 9 内压对内、外管壁环向应力的影响
Fig. 9 Influence of internal pressure on hoop stress of inner and outer pipe wall

2.2.5 占压载荷

占压作用下,管道的破坏程度与载荷的大小密切相关。加拿大 CSA-Z662-03^[11]推荐采用椭圆化变形衡量弯曲导致的管道截面破坏程度。管道椭圆化变形率定义为

$$\Delta_{\theta} = 2(D_{\max} - D_{\min}) / (D_{\max} + D_{\min}).$$

式中, $D_{\max}$, $D_{\min}$ 分别为管道最大、最小外径。

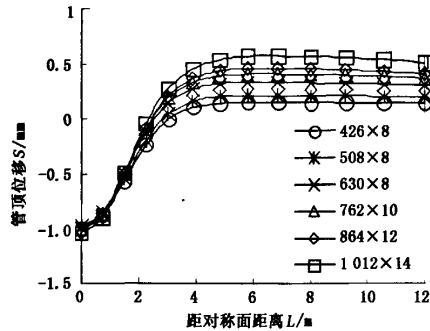


图 10 管道几何参数对管顶竖向位移的影响
Fig. 10 Influence of pipe geometric parameters on vertical displacement of pipeline

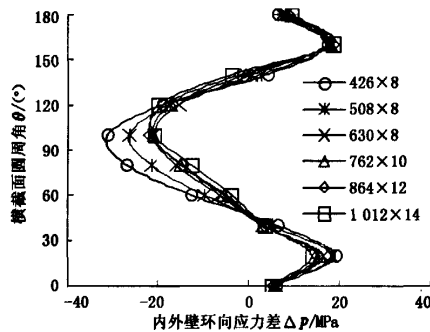


图 11 管道几何参数对内、外管壁环向应力的影响
Fig. 11 Influence of pipe geometric parameters on hoop stress of inner and outer pipe wall

为了防止截面过早破坏, 一般情况下管道极限椭圆化变形率取 0.03, 特殊情况时可取 0.06。图 12 是不同占压荷载作用下, 管道在不同弹性模量的上

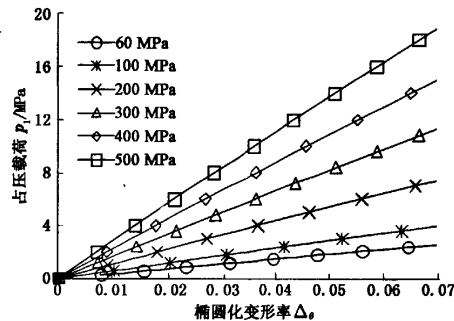


图 12 占压荷载与管道椭圆化变形率的关系
Fig. 12 Relation between surface load and pipeline ovalization

覆土体中的横截面椭圆化变形率曲线。由图 12 可知, 占压荷载与管道椭圆化变形率基本呈线性增长关系, 管道椭圆化变形程度随土体弹性模量增加而

减小。依据极限椭圆化变形率, 从图中可以确定管道在不同上覆土体中所能承受的安全占压荷载。

3 结 论

(1) 建立的占压荷载作用下管道的有限元模型考虑了管-土间的相互作用和管底夯实地基, 比较符合占压管道的实际情况, 可以方便地分析管道的应力与变形情况。

(2) 占压导致局部土体沉陷, 管道在上覆土体和夯实地基的不均匀作用下发生局部弯曲和椭圆化变形。

(3) 上覆土体的弹性模量对管道的应力与变形影响明显, 土质越软(弹性模量小), 管道变形越明显。管底地基起到阻止管道下沉的作用, 但加剧了管道的椭圆化。

(4) 占压作用下, 管道应力水平受管径和壁厚影响显著, 薄壁大口径管道应力水平与变形程度相对较大。上覆土体对大口径管道的截面变形有较大的约束作用。

(5) 占压荷载与管道截面的椭圆化变形率近似呈线性增长关系, 依据管道的极限椭圆化变形率, 可以确定管道所能承受的安全占压荷载。

参考文献:

[1] 吴家龙. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
[2] 龙驭球. 弹性地基梁的计算[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
[3] 李镜培, 丁士君. 邻近建筑荷载对地下管线的影响分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1154-1157.
LI Jing-pei, DING Shi-jun. Influence of additional load caused by adjacent buildings on underground pipeline [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(12): 1154-1157.
[4] LIMURA S. Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 469-479.
[5] NOOR Munaz A, DHAR Ashutosh S. Three-dimensional response of buried pipe under vehicle loads: proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction: New Pipeline Technologies, Security, and Safety, July 13-16 2003 [C]. American Society of Civil Engineers, c2003.

(下转第 108 页)

速度,相应的理论滑移长度达 85 nm。

(2)引入速度滑移边界条件,用 LB 方法模拟的经纳米处理后的毛细管内流动参数与试验值和计算值比较吻合,说明纳米颗粒吸附法能够改变毛细管壁的润湿性,同时验证了滑移模型的有效性。

参考文献:

- [1] MAKIHARA M, SASAKURA K, NAGAYAMA A. The flow of liquids in micro-capillary tube: consideration to application of the Navier—Stokes equations[J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering/Seimitsu Kagaku Kaishi, 1993,59(3):399-404.
- [2] 李勇,江小宁,周兆英,等.微管道流体的流动特性[J].中国机械工程,1994,5(3):24-25.
LI Yong, JIANG Xiao-ning, ZHOU Zhao-ying, et al. Characteristics of the fluid flow in microchannel[J]. Chinese Mechanical Engineers, 1994,5(3):24-25.
- [3] TRETHEWAY D C, MEINHART C D. Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls[J]. Physics of Fluids, 2002,14(3):9-12.
- [4] Cécile cottin-bizonne, Jean-louis barrat, LYDÉRIC Bocquet. Low friction flows of liquid at nanopatterned interfaces[J]. Nature Material Letters, 2003,2:237-240.
- [5] 顾春元,狄勤丰,施利毅,等.纳米粒子构建表面的超疏水性能试验研究[J].物理学报,2008,57(5):3071-3076.
GU Chun-yuan, DI Qin-feng, SHI Li-yi, et al. Experimental investigation of superhydrophobic properties of the surface constructed by nanoparticles[J]. Acta Physica Sinica, 2008,57(5):3071-3076.
- [6] 狄勤丰,顾春元,施利毅,等.疏水性纳米 SiO₂ 增注剂的降压作用机理[J].钻采工艺,2007,30(4):91-94.
DI Qin-feng, GU Chun-yuan, SHI Li-yi, et al. Pressure drop mechanism of enhancing water injection technology with hydrophobicity nanometer SiO₂[J]. Drilling & Production Technology, 2007,30(4):91-94.
- [7] GU Chun-yuan, DI Qin-feng, FANG Hai-ping. Slip velocity model of porous walls absorbed by hydrophobic nanomaterial SiO₂[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007,19(3):365-371.
- [8] SHARP KV, ADRIAN RJ. Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes[J]. Exp Fluids, 2004,36(5):741-747.
- [9] QIAN Y H, d' Humières D, LALLEMAND P. Lattice BGK models for Navier-Stokes equation[J]. Europhys Lett, 1992,17:479-484.
- [10] ZOU Qi-su, HE Xiao-yi. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model[J]. Phys Fluids, 1997,9(6):1591-1598.
- [11] HE X, ZOU Q, LUO L S, et al. Analytic solutions of simply flows and analysis of nonslip boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model[J]. J Stat Phys, 1997,87:115-136.
- [12] SAURO Succi. Mesoscopic modeling of slip motion at fluid-solid interfaces with heterogeneous catalysis[J]. Physical Review Letters, 2002,89(6):1-4.

(编辑 沈玉英)

(上接第 103 页)

- [6] TRICKEY S A, MOORE I D. Three-dimensional response of buried pipes under circular surface loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007,133(2):219-223.
- [7] LIOLIOSAO K, PITIAKIS B, YEROYIANNI. A BEM-FEM convolutional approach to the unilateral contact problem of seismic soil-pipeline interaction[J]. Engineering Analysis With Boundary Elements, 1998,22(1):77-81.
- [8] KAWABATA T, UCHIDA K, ARIYOSHI, et al. DEM analysis on behavior of shallowly buried pipe subject to traffic loads: proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction: New Pipeline Technologies, Security, and Safety, July 13-16 2003 [C]. American Society of Civil Engineers, c2003.
- [9] WATKINS, REYNOLD K, MOSER Alma P. Soil and surface loads on buried pipes including minimum cover requirements[S]//American Society of Mechanical Engineers. Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP: 360. Pressure Vessel and Piping Codes and Standards,1998:483-495.
- [10] ABAQUS Inc. Abaqus analysis user's manual[S]. ABAQUS Inc, 2004.
- [11] Canadian Standards Association. CSA Z662-03, Oil and Gas Pipeline Systems[S]//Rexdale, Ontario, Canada; Canadian Standards Association, 2003:326-327.

(编辑 沈玉英)