

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.08.006

埋地管道不均匀沉降的应力及影响因素分析

马小明, 康 逊

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘要:为保障天然气埋地管道的安全运行,需要对其在不均匀沉降状态下的应力水平及其影响因素进行研究。选取该管道系统易发生应力集中的3个关键部位进行现场应力测试,得到系统运行时管道的应力值。应用ANSYS软件建立了管土非线性接触模型,通过对其进行分析,得到管道应力水平并建立了沉降差量与最大Von-Mises应力之间的映射关系。在该模型的基础上,探讨了管径、壁厚、埋深、埋土弹性模量、埋土泊松比对管道应力状态的影响。增大壁厚和埋土弹性模量以及减小埋深和管径均可降低不均匀沉降时管道的最大Von-Mises应力。研究结果为目前大量在建及在役天然气埋地管道的安全运行提供了理论支持,并提出了针对性的改进措施。

关键词:埋地管道;不均匀沉降;有限元分析;应力水平

中图分类号:TE88

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)08-045-08

Analysis on stress and influence factors of buried pipelines under uneven settlement

MA Xiaoming, KANG Xun

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P.R.China)

Abstract: It is necessary to study the stress and its influence factors of buried pipelines which are under uneven settlement in order to ensure the safe operation. Stress measurement was taken on 3 representative testing points on pipelines and the pipelines' stress in operation was obtained. The nonlinear contact model of pipe and soil was built by using ANSYS. By analyzing the model, pipelines stress was obtained and the mapping relationship of the settlement with the maximum Von-Mises stress was set up. Based on this model, the influence of diameter, wall thickness, burial depth, soil's elasticity modulus and Poisson's ratio on the stress status of pipelines were also studied. Increasing wall thickness and soil's elasticity modulus and decreasing burial depth and diameter can reduce the maximum Von-Mises stress of pipelines under uneven settlement. The research methods and achievements may offer basis and measures for further researches on mechanical characteristics of natural gas pipelines under uneven settlement.

Keywords: buried pipeline; uneven settlement; finite element analysis; stress status

收稿日期:2017-03-05

基金项目:中澳天然气技术伙伴关系基金资助项目。

Supported by China-Australia Natural Gas Technology Partnership Fund.

作者简介:马小明(1962-),华南理工大学副教授,主要从事压力容器设备、失效分析与管道应力测试的研究工作,
(E-mail)mars_suct@163.com。

近年来,随着石油天然气工业的迅猛发展,埋地管道的应用越来越广泛。由于承载着高压、易燃、易爆或剧毒等介质,工作环境十分恶劣,其安全问题显得更加重要。诱发埋地管道安全事故的因素有很多,例如腐蚀、地基不均匀沉降、地震及疲劳断裂等。现珠海某天然气分输站内埋地管道由于敷设在软基回填土中,其地基发生不均匀沉降,严重威胁着埋地管道的安全运行。为了防止管道泄漏或破裂等恶性事故的发生,在运行过程中对管线进行在线监测,并分析其应力水平是必要的^[1-6]。

在埋地管道的应力分析研究中,Imura^[7]基于沉降监测数据和弹性地基梁模型,推导了沉陷区埋地管道的应力计算公式,并在此基础上对沉陷区埋地管道的应力水平进行了评估。张一楠等^[8]利用有限元法对埋地管道进行数值计算,分析了土体沉降对埋地管道跨越结构的应力影响。张土乔等^[9]、申文明等^[10]分别采用 Winkler 弹性地基梁模型和 Pasternak 双参数地基模型建立地基差异沉降作用下的埋地管涵纵向力学模型,对地基差异沉降下埋地管道的纵向力学性状进行了研究。

以上学者虽然对不均匀沉降下的管道应力做了大量研究,但其所建模型适用性均不强,只针对某一特定区域内管道的沉降应力进行了分析,而影响管道沉降应力的因素并未得到充分研究。且目前的管道应力研究多是理论推导或有限元分析,缺乏针对管道应力现场测试的试验研究。针对这些问题,选取该管道系统易发生应力集中的三个关键部位进行现场应力测试,得到系统运行时管道的应力值;应用 ANSYS 软件建立了管土非线性接触模型,通过对其进行分析,得到管道应力水平并建立了沉降量与最大 Von-Mises 应力和椭圆度之间的映射关系;在该模型的基础上,探讨了管径、壁厚、埋深、埋土弹性模量、埋土泊松比对管道应力状态的影响。

1 埋地管道应力测试

1.1 管道的基本参数

本文研究对象为站场内管道。分为地上部分和地下部分。地上部分由于支座支承的作用,沉降量小于地下管道,由于这种变形不均匀,使得管道发生不均匀沉降。

管道采用专用材料 X80,规格为 $\phi 660 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}$,埋深为 3 300 mm。首先根据现场的情况,选择具有代表性并且危险的点作为观测点^[13-15],如图 1 所示。

1.2 应力测试数据

基于现场条件,计划停车期间布点布线,以 0 MPa 时的测量数据作为平衡值。当系统升压到工作压力 6 MPa,进行第一次测量。结果见表 1。

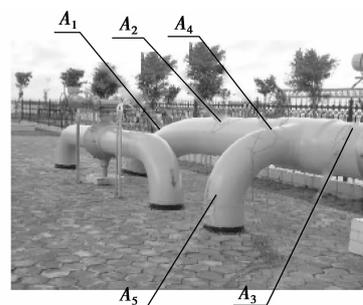


图 1 应变片布置图

Fig.1 The distribution of the strain gauges

表 1 各测点应力水平

Table 1 The stress of each testing point

测点	应力/MPa	测点	应力/MPa
A_{1-1}	134.0	A_{1-2}	34.4
A_{2-1}	196.0	A_{2-2}	54.9
A_{3-1}	180.5	A_{3-2}	35.6
A_{4-1}	108.4	A_{4-2}	21.1
A_{5-1}	-158.2	A_{5-2}	90.3

表 1 中, $A_{1-1} \sim A_{5-1}$ 的应力为环向应力值, $A_{1-2} \sim A_{5-2}$ 的应力为轴向应力值。从表中可以看出,环向水平在 $-200 \sim 200 \text{ MPa}$ 之间,轴向应力水平在 $50 \sim 100 \text{ MPa}$ 之间,最大环向应力为 A_2 点(出口 45° 弯头直管处),大小为 196 MPa。最大轴向应力在 A_5 点(三通阀),大小为 101.25 MPa。

2 管道有限元分析

2.1 有限元模型的建立

埋地管道材料为 X80,弹性模量 $E = 2 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$,密度 $\rho = 7\ 850$ kg/m³,工作压力 6 MPa。埋土为 D-P 材料,弹性模量 $E_G = 4$ MPa,泊松比 $\mu_G = 0.32$,密度 $\rho = 1\ 876$ kg/m³,粘聚力 $C = 19$,摩擦角为 32°,膨胀角为 30°。对于边界条件,埋地管道的直管部分都为轴向约束,阀座支承部位给一定的初始约束;土体模型底部施加固定约束,四周为对称约束,而顶部为自由表面。将管道模型划分为 22 706 个单元与 11 949 节点,将土体模型划分为 4 325 个单元与 2 694 节点,模型及网格划分如图 2 所示^[16-17]。

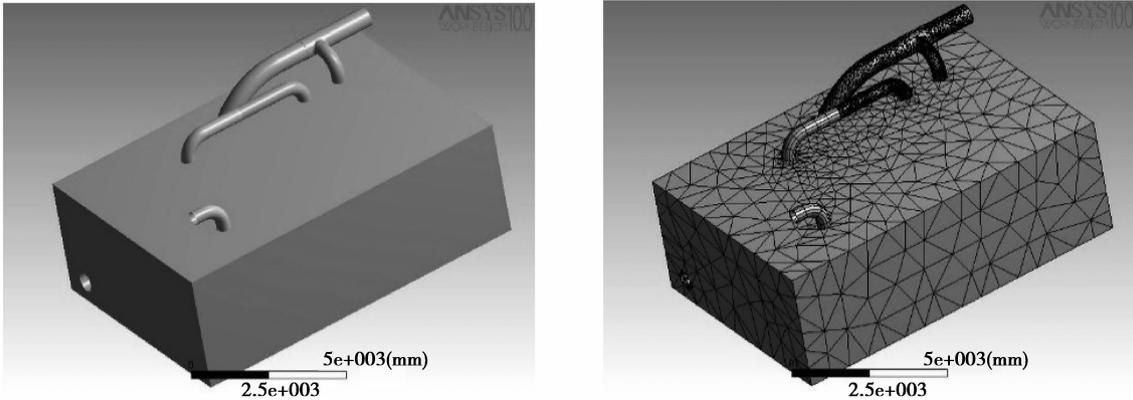


图 2 模型及网格划分图

Fig.2 Model and mesh

2.2 管道应力有限元分析

通过有限元分析软件对模型进行加载,计算出各点应力值,得出以下结论:

- 1)管道的最大 Von-Mises 应力位于管的三通内壁(见图 3),为 327.748 MPa;
- 2)管道的最大径向应力位于埋地最深处管道的内壁,为 192.606 MPa,管道的最大环向应力位于管的三通的内壁,为 318.928 MPa,管道的最大轴向应力位于管道埋地最深处内壁,为 129.689 MPa;
- 3)管道的最大位移在埋地最深的管道的弯头处,为 53.627 mm,沉降差量为 48.275 mm(见图 4)。

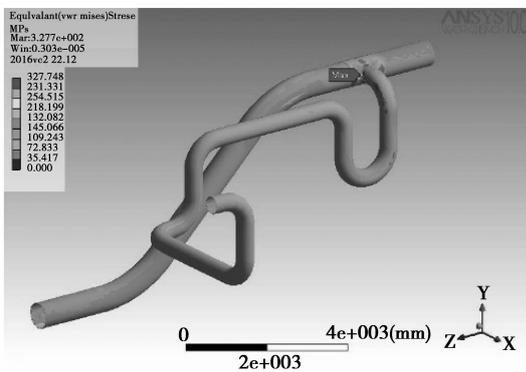


图 3 埋地管道 Von-Mises 应力分布云图

Fig.3 Von-Mises stress of the buried pipe

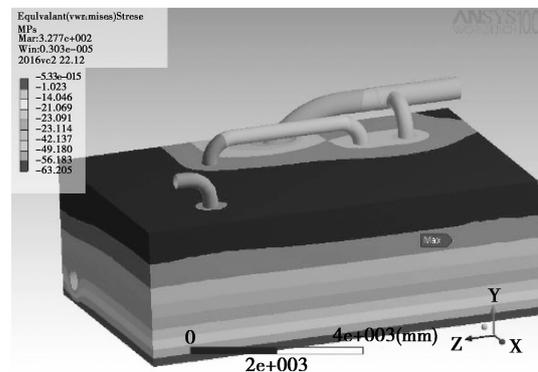


图 4 埋地管道和土的 Y 方向位移分布云图

Fig.4 The displacement of Y direction

并将结果与上节实测应力值进行对比,结果见表 2。有限元值的相对误差能控制在 10% 以内,因此该有限元模型可以准确地模拟现场埋地管道的应力和位移情况。

表 2 测量点的实验值与有限元模拟值比较

Table 2 Results comparison of the testing and the FEA

测点	实测值/ MPa	有限元值/ MPa	相对误差/ %	测点	实测值/ MPa	有限元值/ MPa	相对误差/ %
A ₁₋₁	134.00	133.03	-0.72	A ₁₋₂	34.4	36.261	5.41
A ₂₋₁	196.00	161.10	-17.80	A ₂₋₂	54.9	55.393	0.89
A ₃₋₁	185.50	165.61	-10.70	A ₃₋₂	35.6	37.480	5.28
A ₄₋₁	108.40	108.25	-0.14	A ₄₋₂	21.1	22.484	6.56
A ₅₋₁	158.20	138.31	-12.57	A ₅₋₂	90.3	79.104	-12.30

2.2 管道沉降差量有限元分析

随着地基不均匀沉降程度的不断加重,在外载作用下管道的最终沉降差量也逐渐增大,管道应力也随之变化。为确定管道的沉降差量与管道最大 Von-Mises 应力的关系,分别模拟了沉降差量为 20, 40, 60, 80, 100 mm 共 5 种情况下管道的最大 Von-Mises 应力。

从图 5 可以看出,沉降差量对管道应力的影响很明显,随着沉降差量的增加,管道的最大 Von-Mises 应力也呈近似线性增加。管道材料为 L360MB,其许用应力 $[\sigma]$ 为 396 MPa,故根据第四强度理论,最大沉降差量为 58.328 mm。

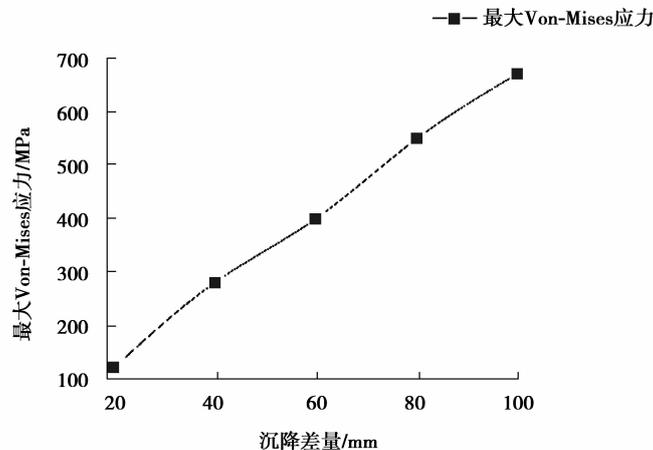


图 5 不同沉降差量下的最大 Von-Mises 应力

Fig.5 The maximum Von-Mises stress at different settlements of pipeline

2.3 影响因素分析

为了进一步了解埋地管道的沉降理论,用 2.1 节中已经验证过的模型对管道沉降应力的影响因素进行分析。选择管径 d 、管道壁厚 δ 、埋深 h 、埋土的弹性模量 E_G 与泊松比 μ_G 五个方面进行研究。在 ANSYS 中选择不同的取值进行模拟,计算出管道的最大 Von-Mises 应力。

2.3.1 管径 d

目前,管道工程建设向大口径、高压、巨输量的趋势发展。为探究管径对沉降管道应力的影响,分别对 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 m 共 5 种管径下的应力进行计算。从图 6 中可以看出:管道的最大 Von-Mises 应力随着管径的增大而增大。当管径从 0.6 m 增加到 1.0 m 时,最大 Von-Mises 应力从 320 MPa 增加至 391 MPa。故在不均匀沉降作用下,大口径管道更容易发生强度失效破坏。

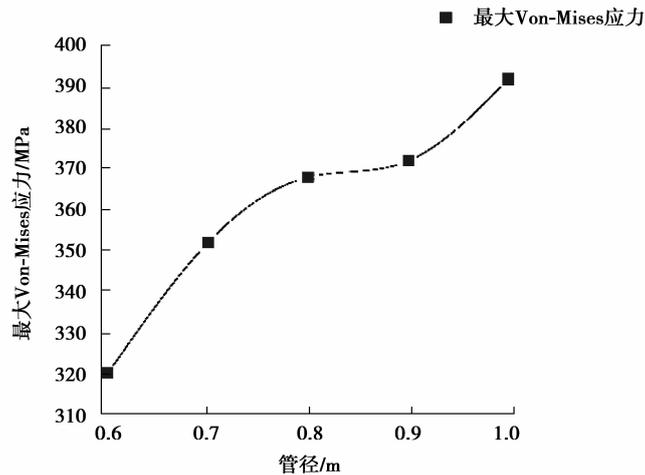


图 6 不同管径下的最大 Von-Mises 应力

Fig.6 The maximum Von-Mises stress at different diameters of pipeline

2.3.2 壁厚 δ

壁厚是影响管道刚度和强度的主要因素,为探究其对沉降管道应力的影响,分别对 8,10,12,14,16 mm 共 5 种壁厚下的应力进行计算。从图 7 中可以看出:随着壁厚的增加,管道的最大 Von-Mises 应力近似线性降低,当壁厚从 8 mm 增加到 16 mm 时,最大 Von-Mises 应力从 356 MPa 降至 304 MPa,壁厚的变化会对管道的应力状态产生较大影响。

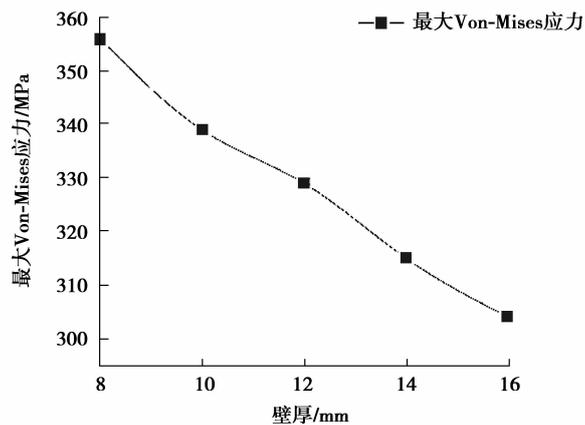


图 7 不同壁厚下的最大 Von-Mises 应力

Fig.7 The maximum Von-Mises stress at different thickness of pipeline

2.3.3 埋深 h

埋深不同,作用在管道上的土体荷载不同,浅埋敷设可降低土体对管道的作用力。为更好的研究埋深对沉降管道应力的影响,分别计算了中心埋深 3.0,3.2,3.4,3.6,3.8 m 共 5 中情况下管道的最大 Von-Mises 应力。从图 8 中也可以看出:当埋深从 3.0 m 增加到 3.8 m 时,最大 Von-Mises 应力从 368 MPa 增加至 346 MPa,因此敷设施工时应优先选取浅埋式敷设方式。

2.3.4 埋土弹性模量 E_G

在 ANSYS 中设置埋土弹性模量 E_G 依次为 4,6,10,15,30 MPa。其余参数均与 2.1 节中保持一致,进行模拟。从图 9 中可以看出,随着埋土弹性模量的增大,管道最大 Von-Mises 应力随之减小,因此管道敷设时应选择较硬质的埋土。

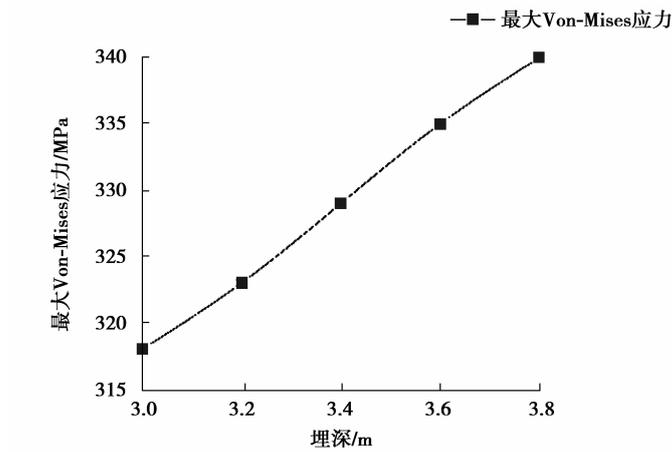


图 8 不同埋深下的最大 Von-Mises 应力

Fig.8 The maximum Von-Mises stress at different depths of pipeline

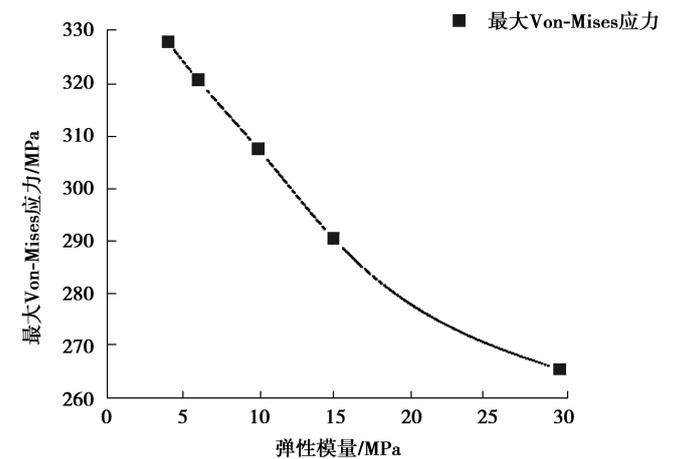


图 9 不同埋土弹性模量下的最大 Von-Mises 应力

Fig.9 The maximum Von-Mises stress at different elasticity modulus of soil

2.3.5 埋土泊松比 μ_G

在 ANSYS 中设置埋土泊松比 μ_G 依次为 0.2, 0.3, 0.4, 0.49。其余参数均与 2.1 节中保持一致, 进行模拟。从图 10 中可以看出, 埋土泊松比对管道最大 Von-Mises 应力影响不大。

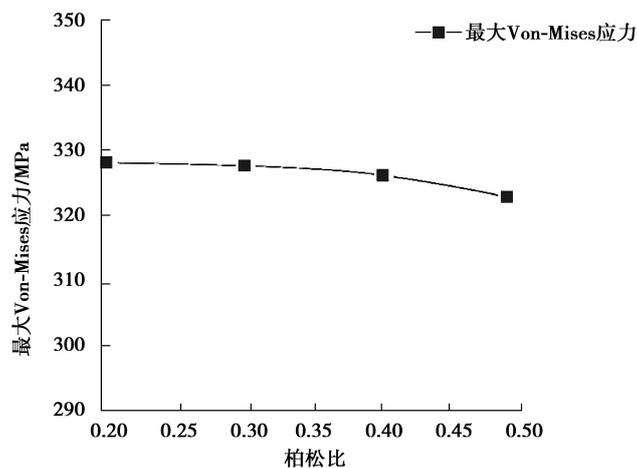


图 10 不同埋土泊松比下的最大 Von-Mises 应力

Fig.10 The maximum Von-Mises stress at different Poisson's ratios of soil

4 结 论

综合上述分析,可得出以下结论:

1)通过现场应力测试,测得管道环向应力水平在 $-200\sim 200$ MPa之间,轴向应力水平在 $100\sim 50$ MPa之间,最大的环向应力位于出口 45° 弯头直管处,为196 MPa。最大轴向应力位于三通阀高出地面处,为101.25 MPa。

2)有限元计算结果的误差率在10%以内,因此该有限元模型可以准确地模拟现场埋地管道的应力和位移情况。

3)增大壁厚和埋土弹性模量以及减小埋深和管径均可降低不均匀沉降时管道的最大 Von-Mises 应力,但其中管径、壁厚和埋土弹性模量的变化对管道最大 Von-Mises 应力的影响更为显著。

在前人工作的基础上,完成了管道应力实际测量与有限元计算的对照分析,并利用有限元软件分析了土壤性质对管道沉降的影响。为确保现场埋地管道的安全运行,并为在建和拟建的埋地管道提供可行的理论支持,提出了以下建议:在铺设管道时,应根据现场情况合理选择埋土;支承部位应选择弹性支墩,这样在埋地管道的一端由于随着时间的推移而出现不均匀沉降时,固定端可以通过自我调节以及人为的调节来平衡这种不均匀沉降;通过增大弯头的曲率来缓和地上和地下管道的过渡,这样可以降低管道的应力集中现象。

参考文献:

- [1] 贾承造,张永峰,赵霞.中国天然气工业发展前景与挑战[J].天然气工业,2014,34(2):1-11.
JIA Chengzao, ZHANG Yongfeng, ZHAO Xia. Prospects of and challenges to natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 1(1): 1-13. (in Chinese)
- [2] Melchers R E. Oil and gas pipelines: integrity and safety handbook[M].[S.l.]: Wiley & Sons, 2015.
- [3] 吴策宇,耿晓梅,赵焕省.欧洲天然气管道发展特点及事故原因[J].油气储运,2014,33(2):148-152.
WU Ceyu, GENG Xiaomei, ZHAO Huansheng. Development characteristics and accident causes of European natural gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage & Transportation, 2014, 33(2): 148-152. (in Chinese)
- [4] Sun J, Xiao Q, Wen J, et al. Natural gas pipeline small leakage feature extraction and recognition based on LMD envelope spectrum entropy and SVM[J]. Measurement, 2014, 55(9): 434-443.
- [5] Wang Z, Wang L, Li L, et al. Failure mechanism of tunnel lining joints and bolts with uneven longitudinal ground settlement[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2014, 40(1): 300-308.
- [6] 韦凯,翟婉明,肖军华.软土地基不均匀沉降对地铁盾构隧道随机振动的影响分析[J].中国铁道科学,2014,35(2):38-45.
WEI Kai, ZHAI Wuanming, XIAO Junhua. Influence of uneven settlement of soft soil foundation on random vibration of subway shield tunnel[J]. China Railway Science, 2014, 35(2): 38-45. (in Chinese)
- [7] Iimura S. Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement[J]. Construction & Building Materials, 2004, 18(6): 469-479.
- [8] 张一楠,马贵阳,周玮,等.沉降土体对管道跨越结构应力影响的分析[J].国安全生产科学技术,2015(8):106-111.
ZHANG Yinan, MA Guiyang, ZHOU Wei, et al. Analysis on influence to stress of pipeline with crossover structure by soil mass settlement[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(8): 106-111. (in Chinese)
- [9] 张土乔,李洵,吴小刚.地基差异沉降时管道的纵向力学性状分析[J].中国农村水利水电,2003(7):46-48.
ZHANG Tuqiao, LI Xun, WU Xiaogang. Analysis of longitudinal mechanical properties for pipeline during foundation uneven settlement[J]. China Rural Water & Hydropower, 2003(7): 46-48. (in Chinese)
- [10] 申文明,唐晓武,边学成,等.地基不均匀沉降时埋地管涵纵向力学模型探讨[J].工业建筑,2010,40(10):82-85.
SHEN Wenming, TANG Xiaowu, BIAN Xuecheng, et al. Study on the longitudinal mechanical model of buried culvert

- during foundation differential settlement [J]. *Industrial Construction*, 2010, 40(10): 82-85. (in Chinese)
- [11] 狄宏规, 周顺华, 宫全美, 等. 软土地区地铁隧道不均匀沉降特征及分区控制[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(Suppl2): 74-79.
DI Honggui, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei, et al. Differential settlement of metro tunnels and its zonal control in soft deposits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Suppl2): 74-79. (in Chinese)
- [12] 曹文贵, 邓湘君, 张超. 基于 Duncan-Chang 模型的地基沉降分层总和和分析方法探讨[J]. *岩土工程学报*, 2013, 47(4): 643-649.
CAO Wengui, DENG Xiangjun, ZHANG Chao. Layerwise summation method for ground foundation settlement based on Duncan-Chang constitutive model[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(4): 643-649. (in Chinese)
- [13] Ossai C I. Advances in asset management techniques: An overview of corrosion mechanisms and mitigation strategies for oil and gas pipelines[J]. *ISRN Corrosion*, 2015, 2012(7): 1-10.
- [14] 沙晓东, 陈晓辉, 黄坤, 等. 输气管道应力影响因素分析[J]. *天然气与石油*, 2013, 31(1): 1-4.
SHA Xiaodong, CHEN Xiaohui, HUANG Kun, et al. Analysis on factors affecting stress in gas pipeline[J]. *Natural Gas & Oil*, 2013, 31(1): 1-4. (in Chinese)
- [15] Mosleh F. A condition assessment model for oil and gas pipelines using integrated simulation and analytic network process[J]. *Structure & Infrastructure Engineering*, 2015, 11(11): 263-281.
- [16] Shi J C, Meng X, Zheng Y H, et al. Uneven settlement effect of LNG facilities integrally installed at marine construction site[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 775(6): 252-258.
- [17] Kim J, Varadan V V, Varadan V K. Finite element modeling of structures including piezoelectric active devices[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2015, 40(5): 817-832.

(编辑 郑洁)