

地面不均匀沉降下埋地管道响应数值分析

刘 威, 黄淳捷

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 地面不均匀沉降会使埋地管道的受力状态发生变化, 也是埋地管道遭受破坏而引发各类事故的重要原因。针对 4 种不同管材的管道建立了管道-土体一体化模型, 采用有限元分析软件 ABAQUS 进行分析。对于钢管和 PE 管所代表的整体式管道主要分析其管道应力和应变响应, 而对于球墨铸铁管和灰口铸铁管所代表的承插式管道主要分析其接口变形情况。探究了不同类型管道的抗沉降能力, 得出了每种管道达到极限状态下的地面沉降位移, 并研究了管径和土体沉降区域长度与地面极限沉降位移的关系。

关键词: 不均匀沉降; 钢管; PE 管; 球墨铸铁管; 灰口铸铁管; 极限沉降位移

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

Numerical Analysis of Response of Buried Pipelines in Soil Differential-Settlement

LIU Wei, HUANG Chunjie

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Soil differential-settlement, which will change the stress state of buried pipelines, is one of the important causes for the damage of the buried pipelines. In this paper, pipeline-soil integrated models are established for four kinds of pipelines by utilizing the ABAQUS software. For continuous pipelines, such as steel pipelines and PE pipelines, the stress response of the pipelines are mainly analyzed. But for socket pipelines, represented by ductile iron pipelines and grey cast iron pipelines, the joint deformation is the mainly research object. Thus, the soil settlement displacement that causes the limit state of pipelines are obtained, which reflects the anti-settlement ability of different types of pipelines. Moreover, the effects of pipe diameter and length of the soil settlement area are discussed.

Key words: soil differential-settlement; steel pipeline; PE pipeline; ductile iron pipeline; grey cast iron pipeline; ultimate soil settlement displacement

地面沉降是指地面高程的降低, 又称地面下沉或地陷, 均指地壳表面某一局部范围内的总体下降运动。地面沉降产生的原因可分为自然地质因素和人为活动因素^[1-2]。当地面发生不均匀沉降时, 管道就有可能发生变形甚至破坏, 如 2009 年 9 月, 由于土地的不均匀沉降, 苍南县钱库镇境内, 一段直径 1.4 m 的自来水供水主管道爆裂, 造成苍南县江南片 10 多个乡镇停水, 近 60 万人生活受到影响。2011 年 8 月, 北京市北三环和平西桥东北角由于管道周边土壤发生不均匀沉降, 造成水管接头爆裂, 2 500 住户断水, 人们正常生活受到了很大影响。研究埋地管道遭受地面不均匀沉降时的响应十分重要。

目前对于地面不均匀沉降下管道的响应分析主要有理论解析法、试验方法和数值有限元法。理论解析法多采用弹性地基梁模型来模拟管道, Wang 等^[3]考虑了埋地管道在地面断层作用下的响应, 断层附近的管道采用悬索来模拟管道的大变形, 而远端采用弹性地基梁来进行模拟。Karamitros 等^[4-5]提出了永久地面变形下管道响应的非线性应力应变解析法, 利用平衡方程和位移相容性方程推导出施加在管道上的轴向力, 并采用弹性地基梁理论和弹性理论相结合的方法计算弯矩, 并考虑了整个管线的弯曲刚度, 结果更为合理。申文明等^[6]针对 Winkler 地基模型的缺陷, 采用 Pasternak 双参数地基模型建立了较为合理的考虑地基差异沉降的埋地管涵纵向力学模型, 得到了沉降区埋地管涵的挠曲线表达式。张坤勇等^[7]给出

收稿日期: 2021-04-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0802400)

第一作者: 刘 威(1976—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为生命线工程抗震。

E-mail: liuw@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

了一种适用于描述任意位移荷载条件下管线的解析解,适用于多种形式的开挖引起的不同形式的地面位移对埋地管线应力变形影响的模拟,有更广泛的适用性。与理论解析法不同,试验方法比较直观,而且可以较好地考虑管土相互作用、管道破坏过程及破坏模式。Yoshizaki 等^[8]通过大型试验研究了永久地面变形对带弯口的埋地钢管的影响,并与有限元模型进行了对比。Kim 等^[9]在康奈尔大学的生命线实验室对分段水泥管在断层工况下进行了原型试验,结果表明管道接头存在两种明显的失效模式:旋转压缩联合失效和拉压失效。随着计算机的普遍使用和有限元软件的日益成熟,近年来越来越多的学者采用有限元方法来计算地面运动下埋地管道的响应。Luo 等^[10]采用有限元软件研究了基础沉降作用下 PE 管道强度失效与沉降位移的关系,并讨论了过渡段长度对管道屈服的影响。马小明等^[11]用 Ansys 建立了管土非线性接触模型,得到了沉降差量与管道最大 Von-Mises 应力之间的关系,并探讨了管径、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。Zheng 等^[12]研究埋地钢管在不均匀滑坡过程中的失效机理,并考虑了周边土体、内部压力和管道几何尺寸对管道的影响,提出基于最大主应变的强度破坏准则,以确定埋地管道在这种特殊失效问题下的安全性能。

对于管道性能的研究大部分是针对其遭受地震灾害后的,对于日常运维中的管道性能研究较少,但从过往案例可以看出,日常运维过程中管道事故也频频发生,特别是地面不均匀沉降时管道易损且后果严重。所以在管道的日常运维中,需要给出管道的不均匀沉降限值来保证管道的运行安全。

管道的连接方式总体来说分为两类,第一类是采用焊接或是热熔等连接的连续类管道,如钢管、PE 管等;第二类是采用接头连接的承插式管道,如球墨铸铁管、灰口铸铁管等。本文采用 ABAQUS 软件,模拟分析 4 种管道(钢管,PE 管,球墨铸铁管和灰口铸铁管)遭受地面不均匀沉降时的性能,得到了每种管道在达到极限状态时的地面沉降量。

1 模型建立

1.1 连续类管道

钢管和 PE 管都属于连续类管道,建模方法类似,仅参数不同,下面以钢管为例,介绍相应的模型。由于试验采用拟静力加载,加载速度缓慢,忽略土体与土箱的动力效应,采用 ABAQUS 中的静力模块进行模拟。

选取的钢管屈服强度 $f_y = 345 \text{ MPa}$,弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,泊松比 $\gamma = 0.3$,由于只考虑管道在弹性阶段内的响应,故钢管本构采用弹性模型。土壤建模采用 Mohr-Coulomb 本构关系,具体的参数如表 1 所示。建立的有限元模型如图 1 所示,场地长 50 m、宽 5 m、高 3 m;整个模型中钢管是连续建模,全长 50 m;土体分为 3 块,两侧的土体为 $20 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的矩形块,中部沉降区域的土体为 $10 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的矩形块,矩形土体的中部挖空形成一个钢管直径大小的圆柱体,以便管土能够完美贴合。管道长度远大于管道直径,故可以忽略管道的边界影响,管道两端采用固定连接。钢管采用适用于大应变分析的四节点壳单元(S4R)进行模拟。因为模型中不存在应力集中现象,故土体采用计算效率较高的六面体缩减积分单元(C3D8R)进行建模,C3D8R 单元计算效率高,位移响应精度可以保证。钢管与土体分别采用 4 648 个 S4R 和 6 800 个 C3D8R 单元模拟,经过网格质量检查,网格质量完全符合计算要求。

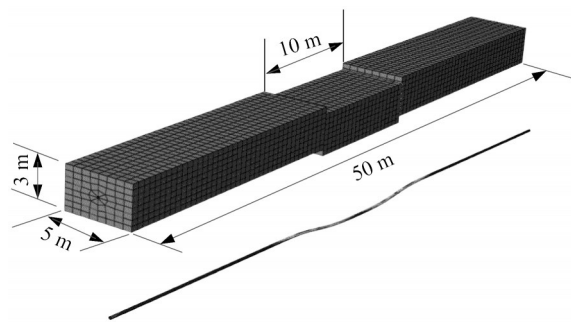


图 1 有限元模型

Fig. 1 Schematic diagram of finite element model

表 1 土壤参数

Tab. 1 Parameters of soil

弹性模量 /MPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦角 /($^{\circ}$)	膨胀角 /($^{\circ}$)	黏聚力 /kPa
6	0.3	1 800	28 $^{\circ}$	0 $^{\circ}$	15

管道与土体接触面产生相对位移,管土相互作用力学特性与有限元软件 ABAQUS 中的罚摩擦模

型力学特性相互吻合。钢管弹性模量大,网格划分较土体更加精细,选取钢管外表面为主面,土体单元

内表面为从面。另外,在管土相互作用中,管道切向的剪切力起主导作用,而法向接触特性仅提供法向压力,故模型中法向采用“硬接触”,即只考虑接触面的接触与脱开状态并传递法向压力。切向方向采用“罚摩擦模型”对管土相互作用进行模拟,摩擦系数取0.3。模型的三块土体之间同样需要设置接触,中部沉降土体的左右两个面与左右两侧土体之间法向相互作用设置为硬接触,切向方向不设置相互作用。模型的初始边界设置如下:①地面施加竖向位移约束;②土体的左右两侧施加左右水平位移约束,前后两侧施加前后水平位移约束;③土壤顶面自由,不施加任何约束。荷载施加分为两步:①将重力荷载施加到整个有限元模型上;②在中部10 m长的沉降区域前、后和底面均匀施加竖向位移,直至竖向加载位移达到0.5 m。

为了考虑管径对于埋地钢管遭受地面不均匀沉降的影响,用同样的建模方法建立了另外两种管径的钢管模型,其参数如表2所示,土体尺寸和中部沉降区域的长度保持不变。

表2 不同管径钢管的参数

Tab. 2 Parameters of steel pipelines with different diameters

直径/mm	219	426	630
埋深/m	1.5	2.0	2.5
壁厚/mm	4	6	8

为考虑沉降区长度对于埋地钢管响应的影响,选取管径为630 mm的钢管进行分析,中部沉降区域长度选择10、15和20 m 3种工况,对应模型长度分别为50、55和60 m。管道参数、土壤本构关系参数、边界条件及荷载施加情况均与上述建模完全相同。

PE管与钢管均属于连续类埋地管道,无接口,故PE管的建模过程与钢管类似,同样考虑了3种管径的PE管在遭受地面沉降时的管道响应,模型总长度为50 m,中部沉降区域的土体长10 m。建模过程中所选取的PE管公称压力为1 MPa,20°静液压强度为12.4 MPa,弹性模量为1 000 MPa,3种管道的参数如表3所示。

表3 不同管径PE管的参数

Tab. 3 Parameters of PE pipelines with different diameters

直径/mm	90	200	400
埋深/m	1.5	1.5	2.0
壁厚/mm	5.4	11.9	23.7

1.2 承插式类管道

在目前管道的连接方式中,除了采用焊接或是热熔等能够使各节管道融为一体的连接方式外,其余连接方式基本都会使管线的力学性能在接口处产生突变,这种突变常常使得接口处成为管道的薄弱部位。目前最常见的承插式管道有球墨铸铁管和灰口铸铁管。本节以球墨铸铁管的建模为例介绍承插式管道的建模方法。承插式管道的建模同样采用ABAQUS中的静力模块进行模拟。

球墨铸铁管在遭受地面沉降时一般会发生接口变形破坏,管身并不会有过大的应力应变,故本节的主要研究对象为管道的接口变形。建模过程中每一段球墨铸铁管长度为6 m,每一段管的边界设置参考点与管道截面耦合,相邻的参考点之间设置线性的轴向弹簧和弯曲弹簧,从而模拟管段之间的连接。所有管道接头的长度均取0.1 m,管道总长度为48.7 m,管道两端采用固定连接,中部沉降区域的土体长6.1 m,如图2所示。球墨铸铁管采用四节点壳单元(S4R)进行模拟,土体采用六面体缩减积分单元(C3D8R)实体单元进行建模。管道与土体分别采用8 256个S4R和16 660个C3D8R单元模拟,经过网格质量检查,网格质量完全符合计算要求。土壤的本构模型及参数、管土相互作用关系、边界条件以及荷载施加方式均与连续类管道的建模相同。同样考虑了3种管径的球墨铸铁管,其弹性模量为135 GPa,其他管道参数和接口弹簧系数如表4所示。

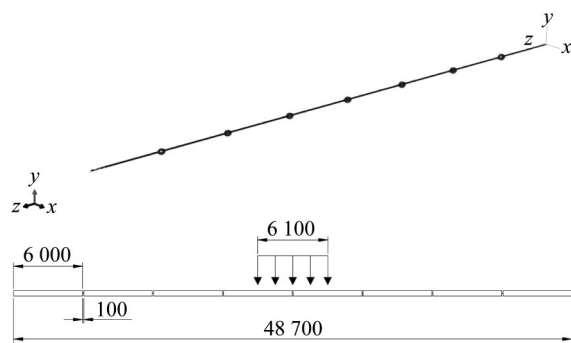


图2 球墨铸铁管尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Layout of ductile iron pipelines (unit: mm)

灰口铸铁管的建模过程与球墨铸铁管相同,仅管道参数有差别,同样考虑了3种管径的灰口铸铁管在遭受地面沉降时的管道接口响应,3种管道的参数和接口弹簧系数^[13]如表5所示。

表 4 不同管径球墨铸铁管的参数及接口弹簧参数
Tab. 4 Parameters of ductile iron pipelines with different diameters and joint spring parameters

直径/mm	118	220	429
壁厚/mm	6.1	6.4	8.1
埋深/m	3	3	3
轴向接口弹簧刚度系数/ (N·m ⁻¹)	348 000	648 814	1 265 186
弯曲接口弹簧刚度系数/ (N·m·(°) ⁻¹)	19 016	35 454	69 134
接口极限变形限值/m	0.046 ^[13]		

表 5 不同管径灰口铸铁管的参数及接口弹簧参数
Tab. 5 Parameters of gray cast iron pipelines with different diameters and joint spring parameters

直径/mm	118.8	220.0	425.6
壁厚/mm	10	12	16
轴向接口弹簧刚度系数/ (N·m ⁻¹)	2.14×10^8	3.99×10^8	7.72×10^8
弯曲接口弹簧刚度系数/ (N·m·(°) ⁻¹)	1.13×10^6	2.11×10^6	4.08×10^6
接口极限变形限值/m	0.002 65 ^[13]		

2 结果分析

2.1 钢管

2.1.1 管道应力响应分析

以外径 219 mm 的钢管为例分析埋地钢管在受到不均匀沉降时的响应。连续类管道的响应主要表现为管身应力的变化。图 3 为管道在沉降位移为 100 mm 时管道的 Mises 应力云图,图 4 为管道沿轴向方向的应力分布图,其中所有应力取管道截面顶部的节点 Mises 应力值,横坐标为距离土体沉降段中心点的轴向距离。

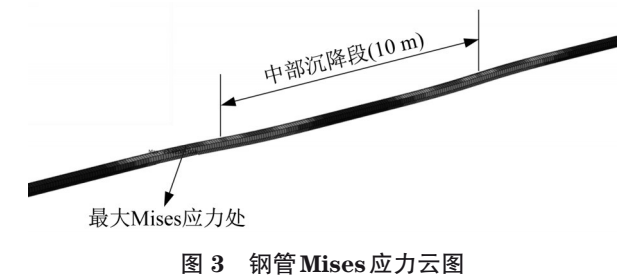


图 3 钢管 Mises 应力云图
Fig. 3 Mises stress distribution diagram of steel pipeline

从图 3 和图 4 可以看出,管道的最大 Mises 应力集中在土体不均匀沉降界面的左右两侧,在不均匀

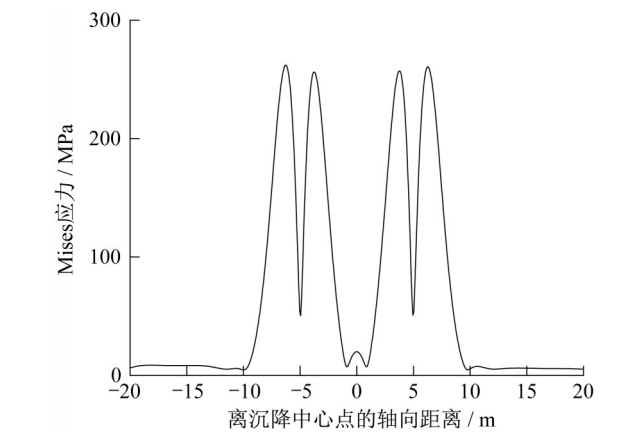


图 4 钢管 Mises 应力轴向分布
Fig. 4 Axial distribution curve of Mises stress of steel pipeline

沉降界面处反而不大;且管道的应力从最大处向两侧下滑很快,具有较大应力的管段长度在中部沉降段的左右两侧均不超过 10 m。故在实际工程中,当沉降段长度较长时,左右两侧的管道应力应变响应类似且互相不会干扰。

图 5 给出了管道的最大 Mises 应力随土体沉降量的变化关系曲线。由图 5 可知,管道的最大 Mises 应力会随土体沉降量的增大而增大,且增大趋势逐渐缓慢。由于本文采用的钢管本构模型为弹性模型,所以管道的 Mises 应力在达到屈服强度后依然会不断增大。本文的研究重点为管道达到屈服前的应力变化规律,故忽略管道达到屈服后的应力变化规律。定义管道应力达到钢材屈服强度时的土壤沉降量为极限土壤沉降位移,则由图 5 可知,对于 219 mm 管径的钢管,其极限土壤沉降位移为 135 mm。

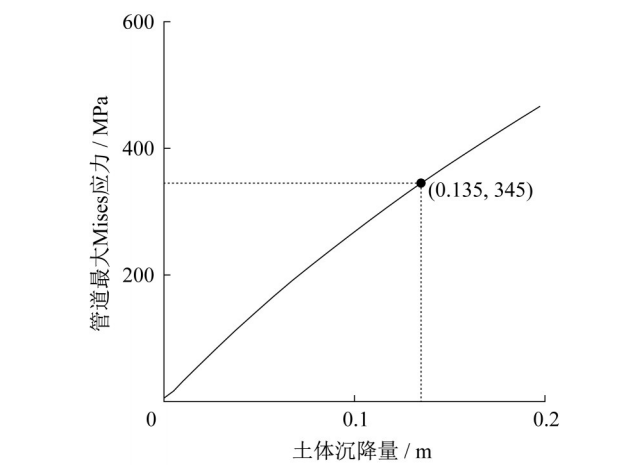


图 5 钢管最大 Mises 应力与土体沉降量关系曲线
Fig. 5 Maximum Mises stress of the steel pipeline versus soil settlement displacement

2.1.2 管径的影响

同时对 3 种管径的钢管进行同样的分析,不同钢管的参数及求出的极限土壤沉降位移如表 6 所示。

表 6 不同管径钢管的极限土壤沉降位移

Tab. 6 Ultimate soil settlement displacements of steel pipelines with different diameters

直径/mm	219	426	630
极限土壤沉降位移/mm	135	185	151

由表 6 可知,管径从 219 mm 增加至 426 mm 后,极限土壤沉降位移明显变大,而当管道直径继续增加至 630 mm 后,极限土壤沉降位移虽然比 219 mm 直径的钢管大,但对比 426 mm 直径的钢管却有减小。这表明对于钢管而言,若不同直径的管道所遭受的沉降区域长度相同,管径越大并不意味着更强的抗沉降能力。

2.1.3 沉降区长度的影响

当管径大小并不再远小于沉降区长度时,沉降区左右两侧的管道之间会互相影响,图 6 给出了沉降量为 100 mm 时,沉降区长度为 10、15 和 20 m 的钢管 Mises 应力云图。图 7 给出了 3 种工况下管道沿轴向方向的应力分布图,其中所有应力取管道截面顶部的节点 Mises 应力值,横坐标为距离土体沉降段中心点的轴向距离。

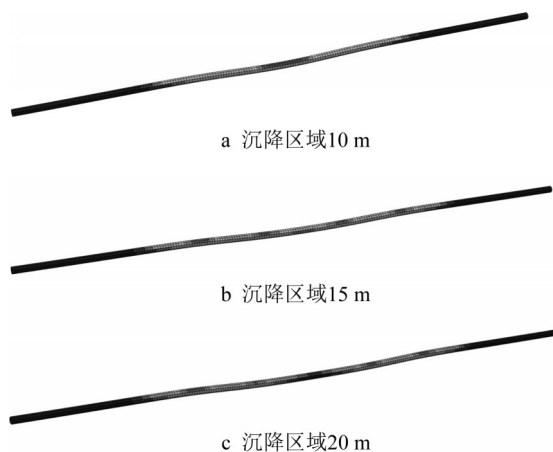


图 6 不同沉降区长度下钢管 Mises 应力云图

Fig. 6 Mises stress distribution diagram of steel pipelines at different settlement zone lengths

由图 6 和图 7 可知,当沉降区域长度较短时(10 m),土体沉降两侧界面之间互相影响,使沉降土体中心部位管道的应力最大,而不再是沉降两侧界面的外侧管段处应力最大;随着沉降区域长度的增大,

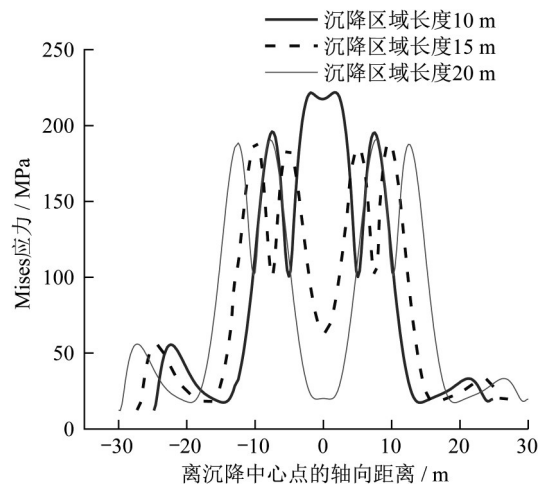


图 7 不同沉降区长度下钢管 Mises 应力轴向分布

Fig. 7 Axial distribution curves of Mises stress of steel pipelines at different settlement zone lengths

沉降区域两侧的相互影响逐渐减弱,当土体中部沉降长度足够长(如在本例中达到 20 m 后),则管道最不利位置在土体沉降界面的外侧附近,而沉降区域内部中心部位管道的应力基本为 0,即该部分管道保持共同沉降,不会发生失效。表 7 中给出了 3 种沉降区域长度下的极限土壤沉降位移。由表 7 可知,当沉降区域较短时,由于沉降两侧的互相影响,沉降区域内部的管道产生最大应力响应,此时能承受的土壤沉降量较小,而当沉降区域长度较长时,管道最不利位置不再是在沉降区域内部,此时管道能承受的土壤沉降量变大,且基本保持稳定。结合表 6 和表 7 可知,只要土体中部沉降长度足够长,则管道最不利位置在土体沉降界面的外侧附近,且满足管径越大,极限土壤沉降位移越大的规律。

表 7 不同沉降区域长度下的极限土壤沉降位移

Tab. 7 Ultimate soil settlement displacements of pipelines at different settlement zone lengths

沉降区域长度/m	10	15	20
极限土壤沉降位移/mm	151	196	197

2.1.4 不均匀沉降施加方式的影响

实际工程中,埋地管道受到的不均匀沉降可能与上述的建模有一定差别。例如当地面受到较大的均布荷载时(如桥墩下的地面),该地面区域会有一定的沉降,地面顶部沉降作用最大,沿着深度的增大土体沉降量会相应变小,且地表面的沉降可能并不像图 1 所示完全均匀,而是从中间向两侧沉降量逐渐减小。为了研究沉降施加方式对管道应变响应的

影响,本节建立了图8所示的模型。与图1所示的模型唯一不同之处在于位移荷载的施加方式,在该模型中,中部沉降区域的底面施加竖向约束,前后两个面施加前后的水平约束,在顶部均匀施加0.5 m的竖直向下的位移荷载。这种施加方式使得沉降区域土体的沉降量从顶部向下逐渐变小,而不是中部沉降土体共同均匀下沉。

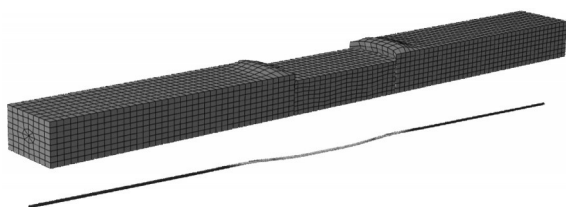


图8 改变位移荷载施加方式后的有限元模型

Fig. 8 Finite element model after changing the displacement load application method

从图8中管道的变形可以看出,该种位移施加方式下管道的变形和图1施加方式下的基本一致。当顶部的施加位移为0.257 m时,管道最大Mises应力达到345 MPa,而此时中部管道的顶部土壤发生了0.137 m的竖向沉降。而从上文可知,在图1施加方式下,当中部土体发生了0.135 m的整体沉降后,管道最大Mises应力达到345 MPa,这说明只要当管道两侧的土体产生了0.135 m左右的相对竖向位移,管道就会达到屈服,而与加载的方式并无太大关系。两种加载方式下管道刚好达到屈服强度时的Mises应力轴向分布如图9所示。由图9可知,两种位移施加方式下管道的Mises应力轴向分布曲线有较大幅度的重合,而且Mises应力最大值发生的部位也相同,这也说明按照图1方式进行建模得到的管道极限土壤沉降位移是准确的,而且该值就等于管道达到屈服时中部土体块的整体沉降位移。所以为了分析方便,本文后续所有的建模均采用和图1相同的位移加载方式。

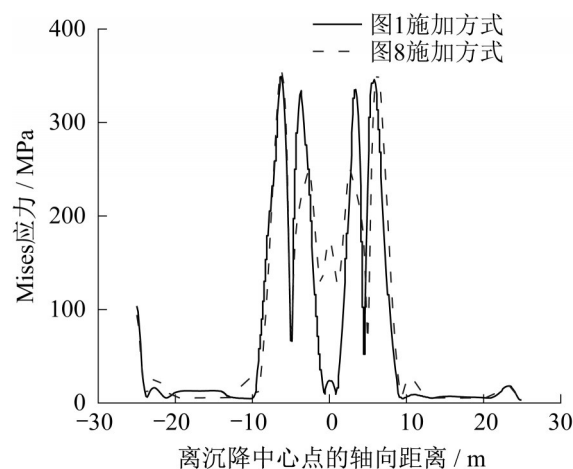


图9 不同位移施加方式下钢管Mises应力轴向分布

Fig. 9 Axial distribution curves of Mises stress of steel pipelines with different displacement load application methods

2.2 PE管

PE管和钢管同属连续类管道,其应力应变响应随土体沉降的变化规律与钢管类似,在此不做赘述,表8给出了不同管径的PE管的极限土壤沉降位移。

表8 不同管径PE管的极限土壤沉降位移

Tab. 8 Ultimate soil settlement displacements of PE pipelines with different diameters

直径/mm	90	200	400
极限土壤沉降位移/mm	65	136	234

2.3 球墨铸铁管

以外径118 mm的球墨铸铁管为例分析承插式管道在受到不均匀沉降时的响应。承插式管道的响应主要为管道的接口变形,故在分析过程中忽略管身的应力应变。图10为管道在沉降位移为100 mm时管道和接口的变形,图11为管道7个接口的变形,其中接口1和7是离沉降区域最远的接口,接口4是中部沉降土体中心处的接口。



图10 球墨铸铁管变形图($D=118$ mm)

Fig. 10 Deformation diagram of ductile iron pipelines ($D=118$ mm)

由图11可知,管道接口变形最大值出现在土体沉降区域外侧最近的接口处,土体沉降区内部的接口变形相对较小,而远离沉降区域处的管道接口基本没有接口变形,即承插式管道在遭受土体不均匀

沉降时最不利的管道处与连续类管道是相似的。

图12给出了管道的最大接口变形(接口3)随土体沉降量的变化关系曲线。由图12可知,管道的最大接口变形会随土体沉降量的增大而增大。在覆土

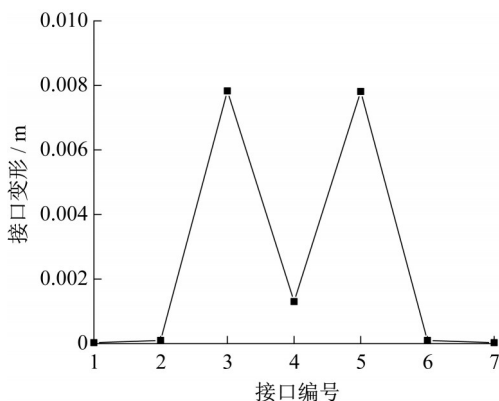


图 11 球墨铸铁管接口变形分布曲线 ($D=118\text{ mm}$)

Fig. 11 Joint deformation distribution curve of ductile iron pipelines ($D=118\text{ mm}$)

压力作用下,管道的接口变形最大值为 $0.000\ 002\text{ m}$,而在 0.453 m 沉降位移作用下,管道的最大接口变形达到了 0.046 m ,即接口的极限变形限值。认定外径为 118 mm 的球墨铸铁管的极限土壤沉降位移为 0.453 m 。同时对3种管径的球墨铸铁管进行同样的建模分析,其极限土壤沉降位移如表9所示。

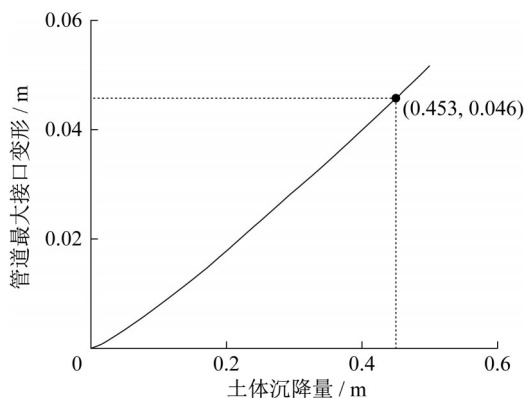


图 12 球墨铸铁管最大接口变形与土体沉降量关系曲线

Fig. 12 Maximum joint deformation of ductile iron pipeline versus soil settlement displacement

表 9 不同管径球墨铸铁管的极限土壤沉降位移

Tab. 9 Ultimate soil settlement displacements of ductile iron pipelines with different diameters

直径/mm	118	220	429
壁厚/mm	6.1	6.4	8.1
极限土壤沉降位移/mm	453	290	235

很明显,与连续类管道完全相反,承插式管道的极限土壤沉降位移随着管径的增大而减小,即大管径的管道在遭受地面不均匀沉降时更容易破坏。这是因为管径越大的球墨铸铁管有着更大的截面刚

度,在受到地面位移后会产生更大的管道内力,从而使管道的接口变形更大,但不同管径球墨铸铁管的接口极限变形限值是相同的,所以管径越大的管道其接口变形更容易达到接口极限变形限值,从而更容易发生破坏。

2.4 灰口铸铁管

灰口铸铁管作为承插式管道,在分析过程中的研究对象也是管道的接口变形。同样考虑了3种管径的灰口铸铁管在遭受地面沉降时的管道接口响应,3种管道的参数及相应的极限土壤沉降位移如表10所示。

表 10 不同管径灰口铸铁管的极限土壤沉降位移

Tab. 10 Ultimate soil settlement displacements of gray cast iron pipelines with different diameters

直径/mm	118	220	425.6
壁厚/mm	10	12	16
极限土壤沉降位移/mm	51.5	18	15

3 结论

本文考虑不同类型的管道以及管径的影响,对埋地管道遭受地面不均匀沉降进行ABAQUS有限元建模模拟,得到了以下结论:

(1)地面的不均匀沉降会给埋地管道造成较大的应变或管道接口变形,从而使管道失效。若不均匀沉降量较小,则管道的响应相对较小,此时对管道虽然未直接造成破坏,但其抵抗其他荷载的能力会降低,管道的可靠性也随之降低。

(2)管道在遭受地面沉降时一般会在不均匀沉降界面附近拥有最大的应变或接口变形,且离该界面较远处管道响应会迅速变小。所以当地面沉降区域较大时,在沉降区域内部的管道并不会发生破坏,而沉降区域边界的管道遭受破坏的可能性较大;当地面沉降区域较小时,管道的最大响应可能会发生在沉降区域内部,此时该区域内的管道最可能发生损坏。

(3)一般来说,对于钢管和PE管这类连续性管道,较大管径的管道能承受较大的地面不均匀沉降;但是对于球墨铸铁管和灰口铸铁管这类承插式管道,较大管径的管道反而只能承受较小的地面沉降。

(4)针对本文讨论的4类管道而言,灰口铸铁管能承受的地面沉降位移量最小,所以在实际工程中需要重点考虑这类管道所遭受的外荷载情况。

作者贡献声明:

刘威:研究目标及内容制定,论文修订。

黄淳捷:数值模拟,数据分析,论文撰写及修订。

参考文献:

- [1] 薛禹群, 张云, 叶淑君, 等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究, 2003(6): 585.
XUE Yuqun, ZHANG Yun, YE Shujun, *et al.* Land subsidence in China and its problems[J]. Quaternary Sciences, 2003(6): 585.
- [2] 王联伟. 几种在役管道典型地质灾害评价方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
WANG Lianwei. Study on several typical geological disaster damage assessment method for in service pipelines [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [3] WANG L R L, YEH Y H. A refined seismic analysis and design of buried pipeline for fault movement [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1985, 13(1): 75. DOI: 10.1002/eqe.4290130109.
- [4] KARAMITROS D K, BOUCKOVALAS G D, KOURETZIS G P, *et al.* An analytical method for strength verification of buried steel pipelines at normal fault crossings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(11): 1452. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.05.012.
- [5] KARAMITROS D K, BOUCKOVALAS G D, KOURETZIS G P. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(3): 200. DOI: 10.1016/j.soildyn.2006.08.001.
- [6] 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.
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.
- [7] 张坤勇, 王宇, 艾英钵. 任意荷载下管土相互作用解答[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1189.
ZHANG Kunyong, WANG Yu, AI Yingbo. Analytical solution to interaction between pipelines and soils under arbitrary loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1189.
- [8] YOSHIKAZI K, O'ROURKE T D, HAMAKA M. Large scale experiments of buried steel pipelines with elbows subjected to permanent ground deformation [J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 2003, 20(1): 1. DOI: 10.2208/jscesee.20.1s.
- [9] KIM J, NADUKURU S, POUR-GHAZ M, *et al.* Assessment of the behavior of buried concrete pipelines subjected to ground rupture: experimental study [J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2012, 3(1): 8. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000088.
- [10] LUO X, LU S, SHI J, *et al.* Numerical simulation of strength failure of buried polyethylene pipe under foundation settlement [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 48: 144. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.11.014.
- [11] 马小明, 康逊. 埋地管道不均匀沉降的应力及影响因素分析[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(8): 45. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582x.2017.08.006.
MA Xiaoming, KANG Xun. Analysis on stress and influence factors of buried pipelines under uneven settlement [J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(8): 45. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582x.2017.08.006.
- [12] ZHENG J Y, ZHANG B J, LIU P F, *et al.* Failure analysis and safety evaluation of buried pipeline due to deflection of landslide process [J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 25: 156. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2012.05.011.
- [13] 韩阳. 城市地下管网系统的地震可靠性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
HAN Yang. Study on seismic reliability of urban buried pipeline network systems [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.