

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.005

含软弱夹层场地中埋地管道的地震反应 特性研究*

杨 乾¹, 杨庆华^{1,2}, 姚锦涛³

(1.西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2.高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;
3.四川省机场集团有限公司, 四川 成都 610202)

摘要: 为了研究含软弱夹层场地中埋地管道的地震反应特性,基于管土接触模型,运用ADINA软件,采用非线性分析,研究埋深、厚度和倾角等因素对含软弱夹层场地中埋地管道地震反应的影响规律。结果表明:软弱夹层各因素对埋地管道地震动力响应产生影响不同,一定厚度和埋深条件下,软弱夹层具有隔震作用,当软弱夹层的存在增大其场地不均匀程度,则会对埋地管道地震动力响应具有非常不利的影响;管道有效应力和位移随着软弱夹层厚度的增大而减小,当厚度达到一定值时,软弱夹层起到一定的缓冲作用;管道有效应力和位移随着软弱夹层埋深的增大而减小,但影响程度小于夹层厚度所产生的;软弱夹层因倾角变大增大了场地不均匀程度,导致管道有效应力和位移变大。

关键词: 软弱夹层; 埋地管道; 地震反应; 数值模拟; 影响因素

中图分类号: TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0520-07

Seismic Response Characteristics of the Buried Pipeline in Soil with Soft Interlayer

YANG Qian¹, YANG Qinghua^{1,2}, YAO Jintao³

(1.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2.Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031, China;

3.Sichuan Province Airport Group Co., Ltd., Chengdu 610202, China)

Abstract: In order to study the seismic response characteristics of the buried pipeline in soil with soft interlayer, the software ADINA and nonlinear constitutive model was adopted in this paper. The interaction model was also utilized to simulate the contact of pipeline and soil. The influence of different factors including the buried depth, the soft interlayer thickness and the dip angle on seismic response of pipeline was obtained. Results show that the influence of the soft interlayer indexes on the seismic dynamic response of buried pipeline is different. The soft interlayer has an effect of isolation with a proper thickness and a suitable buried depth. When enhancing the inhomogeneity of the ground, soft interlayer will have unfavorable impact on the seismic response of the buried pipeline. The effective stress and deformation of the pipeline decrease with the increase of the soft interlayer thickness. The

* 收稿日期:2018-07-01;修回日期:2018-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51478403)资助

作者简介:杨 乾(1990-),男,博士研究生。主要从事生命线工程抗震方面的研究。Email: yangqian-swjtu@foxmail.com

通讯作者:杨庆华(1976-),男,副教授,博士。主要从事工程抗震方面的研究。Email: qhyang@home.swjtu.edu.cn

soft interlayer plays a certain buffering role when its thickness reaches a certain value. The effective stress and deformation of the pipeline decrease with the increase of the buried depth of the soft interlayer, but the influence degree is less than that of the interlayer thickness. The effective stress and deformation of the pipeline increase with the increase of the dip angle of the soft interlayer which increases the inhomogeneity of the ground.

Keywords: weak interlayer; buried pipeline; seismic response; numerical simulation; influence factors

引言

埋地管道,作为城市基础设施的重要组成部分,主要承担着供水、供电、供气、供热等任务,被称为城市地下生命线工程。随着我国城镇化建设的迅速发展,埋地管道发挥着日益重要的作用,管道系统的安全运行成为保障城市生产生活正常运转的基本前提。地震作为一种突发性灾难,是引起埋地管道发生破坏的主要原因,随之引发水灾、火灾、爆炸等次生灾害,造成生命财产的巨大损失,威胁城市安全。2008年5月发生的汶川特大地震灾害,震灾区的管道系统受到严重破坏,管网断裂、水厂受损、管网压力陡降,汶川县因停电导致停水一周,北川县供水系统设施全部损毁^[1]。

历史震害调查表明,场地条件不同,对震害的影响也不同^[2]。当地下结构处于非均匀场地、软土层等复杂地质环境条件时,地下结构更易遭到损坏。在强地震发生时,软弱夹层与周围土层间的相对滑动以及不均匀的场地变形也是巨大的安全隐患^[3]。但是,也有震害资料显示,土层中软弱夹层具有隔震作用。如1976年唐山地震,唐山市区烈度达到Ⅸ~Ⅺ度,但市区北部和东部陡河沿岸地区出现了低破坏区带,河两岸300~400 m范围内多层砖房一般开裂而未倒,调查发现此处地下3~5 m深处有淤泥质黏土层,厚为1~3 m,最厚达5 m。因此,含软弱夹层场地对地震动的放大效应与其减震效应相互矛盾,导致了土层地震反应分析的复杂性。很多学者进行了研究,如薄景山等^[4]得到软弱夹层位于土层底部时,具有隔震的作用;随着软弱夹层埋深的增大,地表加速度减小。许建聪等^[5]通过场地脉动的测试及频谱分析得到软土层对地脉动的卓越周期有一定放大作用,并揭示了深厚软土地层地震破坏的作用机理。陈国兴等^[6]发现软弱夹层厚

度对地表加速度峰值的影响与软弱夹层所处位置有关,并且软弱夹层土对场地加速度反应的放大作用削弱与输入地震动的强度有关,输入地震动的强度越大,削弱作用越明显。李伟华等^[7]研究了软弱夹层对地铁车站地震响应的影响,结果表明软弱夹层对地铁车站结构地震动响应具有非常不利的放大作用,且当软夹层位于地铁车站中部时,放大作用最不利。黄玉龙等^[8]研究发现软弱夹层可减小地表的地震动强度。I. M. Idriss^[9]研究指出,软弱土层在地震动输入幅值较低的时候存在放大效应,随着地震动幅值的增大,软弱土层逐渐表现出减震的效果。李恒等^[10]研究得出场地浅部夹层土对高频地震动有明显的放大作用,深部夹层土则对高频地震动有减震效应。

沿海地区、江河下游或两岸地区多出现较深厚的软弱沉积层,由于其成因和构造年代不同,导致各土层的动力特性也存在差异^[11]。以成都市某一含软弱夹层地区的埋地供水管道为例,通过有无软弱夹层场地对比,改变软弱夹层厚度、埋深和倾角,研究不同因素对含软弱夹层场地中埋地管道地震反应的影响,为特殊场地条件下埋地管道的抗震设计提供参考依据。

1 模型设计

在建立含软弱夹层场地中埋地管道的分析模型时,首先假定:

- (1)在传播过程中,地震波的各参数不变;
- (2)地震波在介质分界面不发生反射和折射;
- (3)土体和埋地管道为均质材料,各部分的力学性能一致;
- (4)管道采用空管,不考虑管内的水对管道的影响;
- (5)模型的运动均为平动,不考虑转动。

模型中土体采用立方体,长、宽、高分别为20、

15、20 m,与有限元建模对应的坐标轴为:Y轴、X轴、Z轴。土体由覆盖层、软弱夹层和其他土层三部分组成,覆盖层与软弱夹层顶面之间摩擦系数取0.95,考虑到软弱夹层顶面的正压力小于底面正压力,因此软弱夹层底面与其他土层之间摩擦系数取0.98。夹层埋深为 H ,按夹层顶面计算,夹层厚度为 D ,倾角为 α 。模型中管道壁厚为0.01 m,管径为1 m,管道水平布置,埋深按管顶外缘计算。设计的分析模型如图1所示。

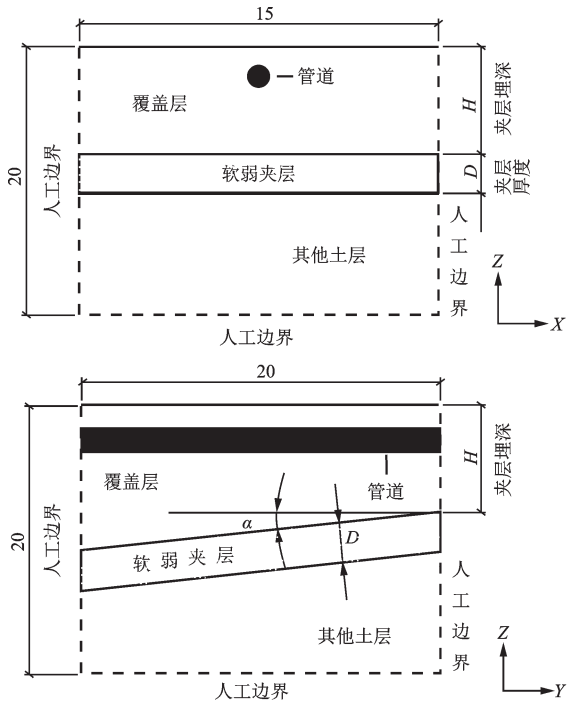


图1 分析模型

Fig.1 The analysis model diagram

2 有限元模型与参数

场地条件是影响埋地管道破坏的主要因素之一,尤其是含软弱夹层的场地,在建模中考虑场地为三层结构。土体性质、管-土摩擦等均是建模中不可忽略的重要参数。运用ADINA有限元软件,通过定义土体、管道几何模型,材料特性等参数,建立含软弱夹层场地中埋地管道的有限元模型,并施加地震荷载对该模型进行计算。

2.1 土体与管道参数

管道材料选取冷轧无缝钢管,具体参数见表1。土体采用摩尔-库仑材料(Mohr-Coulomb),土质参数根据研究对象场地地勘报告确定,覆盖层和其他

土层为粉质黏土,软弱夹层为淤泥质土,具体参数见表2。

表1 管道参数

Table 1 Parameters of pipeline

管材类型	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 $\rho/$ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
冷轧无缝钢管	205	0.3	7.9

表2 土体参数

Table 2 Parameters of soil

土体类型	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	密度 $\rho/$ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 C/kPa	管土摩擦系数
粉质黏土	5.5	0.3	1.94	12	20	0.4
淤泥质土	2.2	0.49	1.78	6	9.2	0.2
粉质黏土	5.5	0.3	1.94	12	20	0.4

2.2 管-土接触

在地震作用下,埋地管道的变形很小,而管周的土体有较大变形,管道受到管-土接触面上的摩擦阻力后,将地震荷载传递给管道,这是埋地管道受力的主要来源,因此模拟埋地管道与土体之间的管-土接触十分必要。

埋地管道与土体之间的摩擦通过定义ADINA中的接触摩擦来实现,接触摩擦的设定步骤是:定义接触摩擦控制→定义接触组→定义接触面→定义接触对,管-土接触设置有1个接触组,4个接触面,2个接触对。定义接触对时,相应的接触面应一一对应。模型中覆盖层和其他土层与埋地管道之间的动摩擦因数设置为0.4,软弱夹层与埋地管道之间的动摩擦因数设置为0.2。

2.3 输入荷载的特性

作用在模型上的荷载有静力荷载和动力荷载,重力荷载恒定不变,其重力加速度大小为 9.8 m/s^2 ,方向竖直向下。动力荷载为地震荷载,地震波选用美国Northridge波,作用在整个物理模型上,采用P波输入,振动方向为竖直方向。地震荷载的加速度时程曲线如图2所示。

先采用静力分析方法计算管-土模型在自重

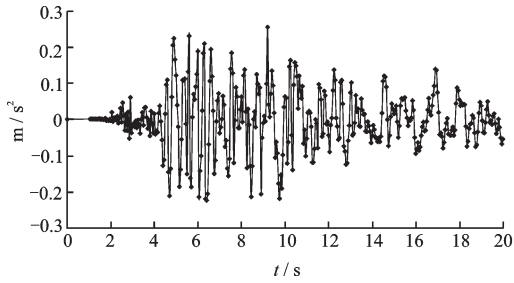


图2 Northridge地震荷载
Fig.2 Northridge earthquake load

作用下的静力反应;在完成自重作用反应计算的基础上,对其进行地震动作用的动力反应计算。模型总共加载时间为20 s。

2.4 约束条件设定

考虑到地震波采用P波输入,土体在竖向方向产生振动,因此研究埋地管道在横向方向的振动反应,管道模型按照 Euler-Bernoulli 弹性地基梁模型进行简化,模拟含软弱夹层场地中埋地管道的地震动力响应。埋地管道两端可上下移动,限制左右移动和转动;土体底面为固定约束,土体四周限制水平方向移动,可在竖向方向振动(图3)。

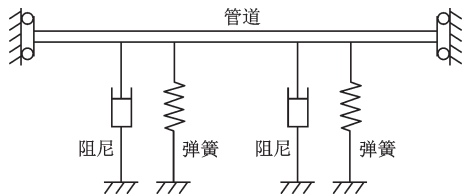


图3 埋地管道横向振动模型
Fig.3 Transverse vibration model of buried pipeline

3 计算结果及分析

采用上述模型,应用 ADINA 有限元软件进行非线性分析,研究埋地管道的时程曲线时,本文选取管道两端和中部截面上分布在管道顶部编号为 L 点、M 点、R 点。由于钢管属于多线性弹塑性材料,依据 Mises 屈服理论,有效应力^[12](effective stress, 即等效应力)能较为准确的反应出管道的受力状态,因此取其作为研究目标,同时研究管道在竖向(Z轴)方向的位移。管道监测点分布如图4所示。

3.1 土体中有无软弱夹层的对比分析

研究土体中有无软弱夹层对埋地管道地震反应特性的影响,选取3种场地类型进行对比分析,场

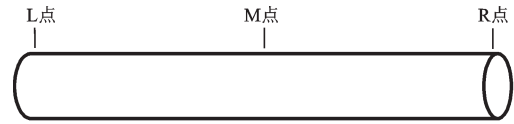


图4 管道监测点分布

Fig.4 The distribution of monitoring points on pipeline

地1中无软弱夹层,场地2中夹层一半为软弱土,场地3中夹层全为软弱土,管道埋深为2 m,夹层埋深为8 m,厚度为2 m,倾角 $\alpha=0^\circ$,对比模型如图5所示。

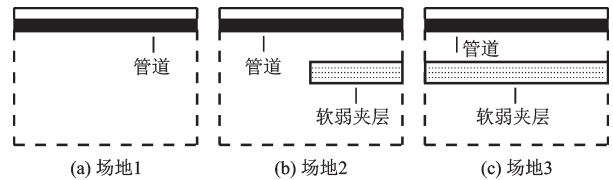


图5 有无软弱夹层对比模型

Fig.5 The contrast model of soil with or without weak inter-layer

图6和图7为不同场地中管道节点M的有效应力和竖向位移时程曲线,可以看出:含软弱夹层场地中埋地管道的有效应力和竖向位移随时间呈现出简谐波的变化趋势,无软弱夹层场地中埋地管道的有效应力和竖向位移随时间逐渐增大,后趋于稳定。

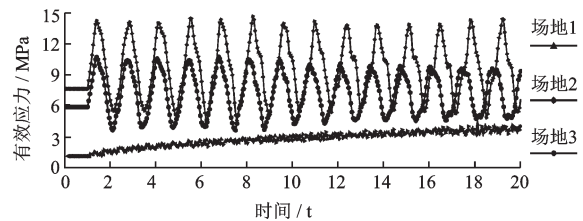


图6 不同场地中节点M有效应力时程曲线

Fig.6 Effective stress time history of pipeline node M in different soil

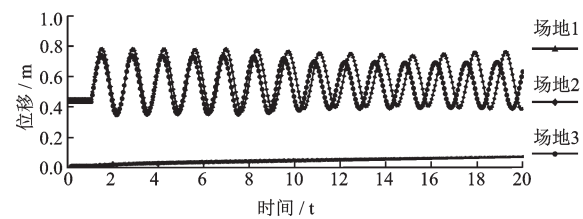


图7 不同场地中节点M竖向位移时程曲线

Fig.7 Z-displacement time history of pipeline node M in different soil

图8和图9为不同场地中管道监测点的最大有效应力和位移,可以看出:①含软弱夹层场地中埋

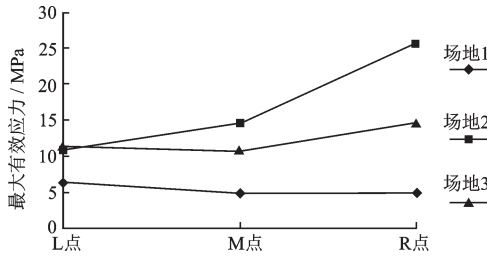


图8 不同场地中管道监测点的最大有效应力

Fig.8 The maximum effective stress of pipeline node in different soil

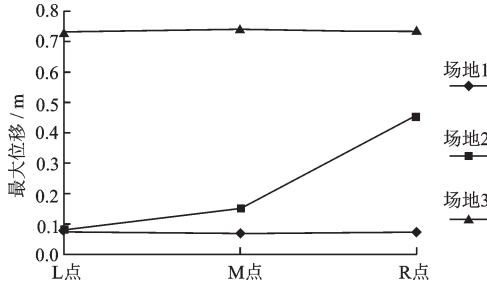


图9 不同场地中管道监测点的最大位移

Fig.9 The maximum displacement of pipeline node in different soil

地管道的最大有效应力和位移大于不含软弱夹层场地的。说明在该工况条件下,软弱夹层对埋地管道地震响应具有放大作用。②场地中一半有软弱夹层的埋地管道具有最大的有效应力,达到25.5 MPa,约为无软弱夹层场地的5倍。说明不均匀场地对埋地管道地震响应具有非常不利的影响。

这是由于软弱土在地震作用下使其出现液化现象而导致丧失承载力,场地3的位移远大于场地1的位移也说明这一现象。场地2中节点R的位移小于场地3中节点R的位移,比较场地2和3发现,场地2中管道下方左半部分下卧层无软弱夹层,具有较好的承载力,因此场地2中管道左端位移较小,并且抑制了管道右端的位移。

3.2 软弱夹层厚度的影响分析

研究土体中软弱夹层厚度对埋地管道地震反应特性的影响,选取7种场地类型进行对比分析,管道埋深为2 m,夹层埋深为6 m,倾角 $\alpha=0^\circ$,场地1至7的软弱夹层厚度依次分别取2、4、6、8、10、12、14 m。图10和图11为不同软弱夹层厚度场地中管道监测点的最大有效应力和最大位移。

从图10和图11可以看出:随着软弱夹层厚度的增大,管道的最大有效应力和最大竖向位移随之

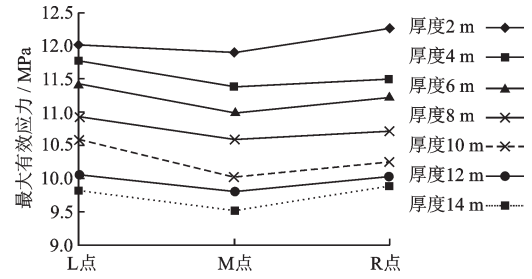


图10 不同软弱夹层厚度场地中管道监测点的最大有效应力

Fig.10 The maximum effective stress of pipeline node in soil with different weak interlayer thickness

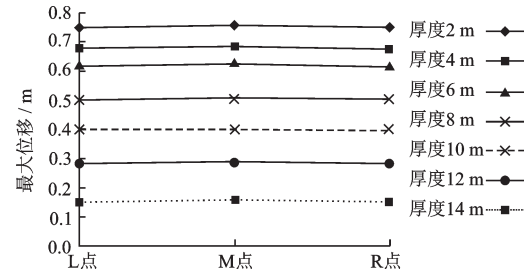


图11 不同软弱夹层厚度场地中管道监测点的最大位移

Fig.11 The maximum displacement of pipeline node in soil with different weak interlayer thickness

减小,有效应力为9.8~12.5 MPa,位移为0.1~0.8 m,该两值均大于无软弱夹层场地中埋地管道的最大有效应力和最大竖向位移。这是由于软弱夹层具有强度低,孔隙率高等特点,会对其上方的土层具有一定类似缓冲的作用,导致软弱夹层对地震动的放大作用逐渐削弱。由于模型尺寸有限,根据这一趋势可以推断,当软弱夹层厚度达到一定值时,则起到减震作用,这与文献[4]、[6]、[11]有关软弱夹层对地震动影响的研究结果基本相同。

3.3 软弱夹层埋深的影响分析

研究土体中软弱夹层埋深对埋地管道地震反应特性的影响,选取6种场地类型进行对比分析,管道埋深为2 m,夹层厚度为2 m,倾角 $\alpha=0^\circ$,场地1至6的软弱夹层埋深依次分别取4、6、8、10、12、14 m。

从图12和图13可以看出:①随着软弱夹层埋深的增大,管道的最大有效应力和最大竖向位移随之减小。②管道最大有效应力为11~12.5 MPa,最大竖向位移为0.7~0.77 m,其变化幅度小于因软弱夹层厚度产生的变化区间。其原因为随着软弱夹层埋深增大,导致软弱夹层对地震动的放大作用由

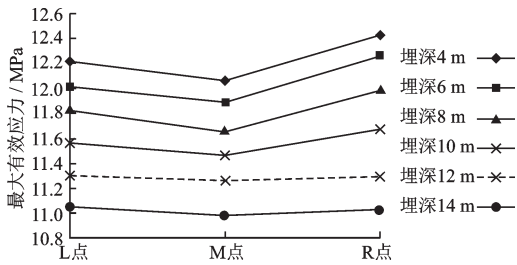


图 12 不同软弱夹层埋深场地中管道监测点的最大有效应力

Fig. 12 The maximum effective stress of pipeline node in soil with different weak interlayer buried depth

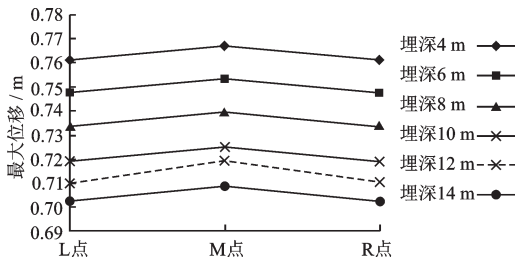


图 13 不同软弱夹层埋深场地中管道监测点的最大位移

Fig. 13 The maximum displacement of pipeline node in soil with different weak interlayer buried depth

于覆盖层正常土的厚度增大而逐渐削弱,因此,土体作用在管道上的有效应力随之减小。

3.4 软弱夹层倾角的影响分析

研究土体中软弱夹层倾角对埋地管道地震反应特性的影响,选取5种场地类型进行对比分析,管道埋深为2 m,夹层埋深为8 m,厚度为2 m,场地1至5的软弱夹层倾角依次分别取 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° ,如图1所示,倾角沿水平方向绕R点逆时针转动。图14和图15为不同软弱夹层倾角场地中管道监测点的最大有效应力和最大位移。

从图14和图15可以看出:①随着软弱夹层倾角 α 增大,管道最大有效应力和最大竖向位移随之增大,这是由于随着软弱夹层倾角 α 增大,场地土不均匀程度也随之增大,导致作用在管道上的有效应力也增大,因此,不均匀场地对埋地管道地震动响应具有非常不利的影响。②有效应力和位移变化幅度为R点>M点>L点,这是因为随着倾角 α 增大,场地土不均匀程度增大,R点的有效应力和位移逐渐增大也可以说明这一点,然而L点和M点的覆盖层正常土厚度变大,软弱夹层对地震动的放大作用逐渐削弱,所以不均匀场地和覆盖层厚度增大两者叠加作用使得L点和M点作用在管道上的有效

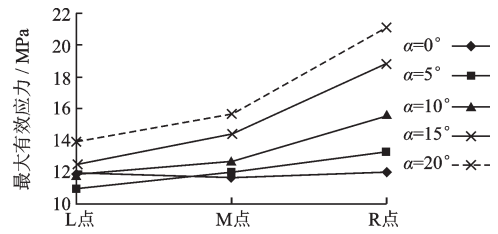


图 14 不同软弱夹层倾角场地中管道监测点的最大有效应力

Fig. 14 The maximum effective stress of pipeline node in soil with different weak interlayer dip

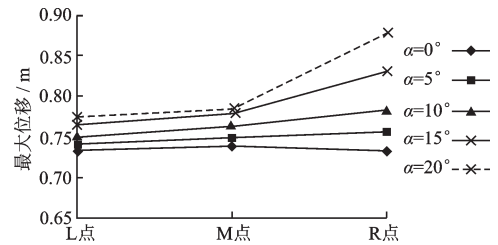


图 15 不同软弱夹层倾角场地中管道监测点的最大位移

Fig. 15 The maximum displacement of pipeline node in soil with different weak interlayer dip

应力变化范围小于R点的,这也说明软弱夹层倾角变化对管道的影响程度大于软弱夹层埋深。

4 结 论

本文以成都市某一含软弱夹层地区的埋地供水管道为研究对象,根据实际场地资料为基础,构造了20个不同的场地剖面,利用ADINA有限元软件对不同的构造剖面进行地震反应计算,分析了软弱夹层厚度、埋深和倾角对埋地管道有效应力和位移的影响,并总结出一些规律:

(1)软弱夹层对埋地管道的地震动力响应影响显著,但并非总是增大其动力响应,还与软弱夹层厚度、埋深、倾角等因素有关。在一定工况条件下,软弱夹层的存在会起到一定的隔震作用,但是不均匀场地对埋地管道地震动响应具有非常不利的影响。

(2)软弱夹层厚度为2~14 m时,随着软弱夹层厚度的增大,管道的最大有效应力和最大竖向位移随之减小,最大有效应力为9.8~12.5 MPa,最大位移为0.1~0.8 m,当软弱夹层厚度达到一定值时,软弱夹层起到一定类似缓冲的作用。

(3)软弱夹层埋深为4~14 m时,随着软弱夹层埋深的增大,管道的最大有效应力和最大竖向位移

随之减小,但其变化幅度小于因软弱夹层厚度产生的变化区间。

(4)软弱夹层倾角为 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时,随着软弱夹层倾角 α 增大,管道最大有效应力和最大竖向位移随之增大,而管道的有效应力变化趋势是由不均匀场地程度和覆盖层厚度两者叠加而产生。

(5)软弱夹层各因素对埋地管道地震动力响应产生影响不同,影响程度也不同,根据各因素导致有效应力的变化区间判断,其影响程度:倾角 $>$ 厚度 $>$ 埋深。

参考文献:

[1] 刘遂庆. 汶川特大地震中城镇供水系统地震灾害与抗震救灾调查报告[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013: 88-97.
Liu S Q. Investigation report on earthquake disaster and earthquake relief work of urban water supply system in Wenchuan earthquake[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013: 88-97. (in Chinese)

[2] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海软土地震反应特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 773-778.
Huang Y, Ye W M, Tang Y Q, et al. Characteristic analysis for seismic ground response of soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(5): 773-778. (in Chinese)

[3] 杜楠馨. 含软弱饱和土夹层场地中地铁车站的地震响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
Du N X. The seismic response analysis of the subway station in soil with saturated weak intercalations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

[4] 薄景山, 李秀领, 刘红帅. 土层结构对地表加速度峰值的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 35-40.
Bo J Sh, Li X L, Liu H Sh. Effects of soil layer construction on peak accelerations of ground motions[J]. Earthquake Engineering & Engineering Vibration, 2003, 23(3): 35-40. (in Chinese)

[5] 许建聪, 简文彬, 尚岳全. 深厚软土地层地震破坏的作用机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 313-320.
Xu J C, Jian W B, Shang Y Q. Study on the seismic failure mechanism of the thick soft soil foundation[J]. Chi-

nese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2005, 24(2): 313-320. (in Chinese)

[6] 陈国兴, 陈继华. 软弱土层的厚度及埋深对深厚软弱场地地震效应的影响[J]. 世界地震工程, 2004, 20(3): 66-73.
Chen G X, Chen J H. The effect of depth and thickness of soft soil layer on earthquake response for deep soft sites[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2004, 20(3): 66-73. (in Chinese)

[7] 李伟华, 赵成刚, 杜楠馨. 软弱饱和土夹层对地铁车站地震响应的影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3 958-3 963, 3 970.
Li W H, Zhao Ch G, Du N X. Analysis of effects of saturated soft interlayer on seismic responses of metro station[J]. Rock & Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3 958-3 963, 3 970. (in Chinese)

[8] 黄玉龙, 周锦添, 郭迅, 等. 软泥夹层对香港软土地震反应的影响[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 109-116.
Huang Y L, Zhou J T, Guo X, et al. Influence of soft sandwich layer on seismic response in Hong Kong[J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(1): 109-116. (in Chinese)

[9] Idriss I M. Response of soft soil sites during earthquakes [C] // Proceedings, Memorial Symposium to Honor Professor Harry Bolton Seed, Berkeley, California: [s.n.], 1990: 273-290.

[10] 李恒, 张静波, 吴建超. 软夹层和硬夹层对地表地震动特性的影响[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 441-445.
Li H, Zhang J B, Wu J Ch. Effects of soft and hard interlayers on ground motion characteristics[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 441-445. (in Chinese)

[11] 陈继华, 贾学民, 王伟. 软弱夹层土对软土地震效应的影响[J]. 燕山大学学报, 2006, 30(5): 451-455.
Chen J H, Jia X M, Wang W. Soft interlayer on effects of earthquake response for soft site[J]. Journal of Yanshan University, 2006, 30(5): 451-455. (in Chinese)

[12] Chen W F, Zhang H. Plasticity for structural engineers [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1988: 256-260.

(本文责编: 周小潭)