

DOI: 10.11779/CJGE20220996

走滑断层错动下采用抗拉拔承插式接口埋地管线力学性能及破坏机理

钟紫蓝, 赵鑫, 张亚波, 缪惠全, 张卜*

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 断层位错下供水管线的破坏形式主要集中在管道接口等管线结构力学性能薄弱环节。在传统供水管线承插式接口的基础上引入橡胶垫圈和金属限位环进行优化改进, 提出一种新型抗拉拔承插式接口, 在达到正常使用极限状态前可发生一定拉压和转动变形; 当接口轴向变形达到一定变形后, 发生自锁现象阻止接口发生进一步拉脱破坏; 自锁后的接口带动相邻管段与土体发生相对运动, 形成锁链效应, 从而有效吸收断层错动引起的管线过渡变形。为了研究采用新型承插式接口供水管线抵抗断层错动的能力, 针对管道埋深、管道-断层夹角等关键因素, 通过建立三维非线性管-土相互作用有限元模型进行深入分析, 结果表明: 采用新型承插式接口的管线其抵抗断层大变形错动的能力提高了近4倍, 其失效模式由普通承插式接口的拉拔破坏转为接口的弯曲破坏; 对于采用新型承插式接口的管道, 其在管线-断层夹角为 120° 左右并且浅埋的情况下, 其抵抗断层错动的能力提高最明显; 有效的提高管道接口的轴向拉伸承载能力是提高承插式管道抵抗场地大变形能力的关键。

关键词: 承插式管道; 抗拉拔接口; 跨断层; 力学性能; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)11-2336-10

作者简介: 钟紫蓝(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事城市基础设施结构抗震性能分析及灾害韧性评价的理论与方法研究。E-mail: zilanzhong@bjut.edu.cn。

Mechanical behavior and failure mechanism of buried pipelines with anti-pullout bell-socket joints under strike-slip fault dislocation

ZHONG Zilan, ZHAO Xin, ZHANG Yabo, MIAO Huiquan, ZHANG Bu

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The damage of water-supply pipelines under fault rupture primarily concentrates at the pipe joints, which are the weakest structural links of the pipelines. Based on the traditional bell-socket joint of water supply pipelines, the rubber gasket and metal limit ring are introduced in the joint configuration, and a new type of anti-pullout bell-spigot is proposed. The new joint allows certain tensile-compressive and rotational deformations before the service limit state under daily operation. When the axial deformation of the joint reaches a certain level, a self-locking mechanism is triggered to prevent the joint from the pullout damage. The self-locked joint in turn leads to the relative movement between the adjacent pipe segments and the surrounding soil, and forms a chain effect, which effectively overcomes the excessive pipeline deformation caused by the fault dislocation. To assess the performance of water-supply pipelines incorporated with the proposed anti-pullout bell-spigot joint under strike-slip fault, the influences of the critical factors such as pipeline burial depth and pipeline-fault angle are investigated based on the numerical analyses of a three-dimensional nonlinear pipe-soil interaction finite element model. The results show that the pipelines incorporated with the anti-pullout bell-spigot joint can accommodate a strike-slip fault displacement 4 times of that for a traditional joint, and its failure mode of the joint changes from the pull-out failure to the excessive bending one. Moreover, for a shallowly buried pipeline with a fault crossing angle of 120° , the proposed joint can most effectively improve the resistance of the segmented pipelines against strike-slip fault movement. Overall, improvement of the axial tensile bearing capacity of the pipe joint is the key to improve the performance of segmented pipelines subjected to large ground deformation.

Key words: socket pipe; anti-pullout joint; strike-slip fault; mechanical behavior; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978020); 国家自然科学基金联合基金项目(U1839201); 中国博士后科学基金项目(2021M700311)

收稿日期: 2022-08-15

*通信作者(E-mail: zhangbu@bjut.edu.cn)

0 引言

承插式管道日益成为了城市给排水管网的重要组成部分, 而永久地面变形 (PGD) 如断层运动、滑坡和土壤液化等, 是引起管线破坏的主要原因之一。例如 1995 年的日本阪神地震和 1999 年的台湾集集地震震害^[1-2]表明大量的管道由于断层运动造成了管道接口的开脱、管段破损和接口裂缝等现象的出现。并且已有的震害研究^[3]表明, 在相同烈度条件下, 连续管道管段相对于承插式管道损伤较少。因此研究承插式管道在受到地震时断层相对运动影响下的力学性能和破坏机制并提出相应的抗断措施是至关重要的。

目前, 大量学者进行了管道接口的研究。Singhal^[4]对不同管径 (DN100~DN250) 的球墨铸铁管线承插式接口开展了系列单调轴向拉伸和横向弯曲力学试验, 并给出了管线接口刚度和承载力的简化计算公式, 建立了弹性基础上管线的刚度矩阵。周静海等^[5]对 DN200 球墨铸铁和 UPVC 管线承插式接口进行了不注水和注水的静载轴向拉拔试验和数值模拟, 研究两种典型接口在不同轴向变形下的破坏模式, 量化其失效判定准则。Valsamis 等^[6]介绍了一种柔性接头用在跨断层连续管道上以达到管道可以抵抗大变形运动的目的, 并通过一定数量的参数分析, 确定了管道-断层夹角、断层位移大小、接头允许转角、深径比和径厚比对接头抗断效果的影响。钟紫蓝等^[7]介绍了经垫衬法修复后管道接口并对进行了拟静力拉拔与弯曲试验, 定义了管道接口的失效准则, 并根据失效准则分析了垫衬法修复后管道接口的拉拉弯承载能力及相应的破坏模式。Argyrou 等^[8]介绍了一种采用垫衬法加固技术 (CIPLS) 技术的新型接口, 对其抵抗断层变形运动的性能进行了试验研究, 并与采用承插式接口的管道进行了对比, 试验结果与数值模型结果吻合良好, 提供了一种可靠准确的数值模型。

基于目前情况来看, 现有的研究主要聚焦在连续管道受到断层位错时的性能分析, 而很少关注承插式管线的研究。Kim 等^[9]通过模型箱试验研究进行了跨断层混凝土分段管线的力学性能分析, 针对管道接口轴向位移、接口转角和管体应变的提取, 得到了跨断层分段管线的破坏机制。Kaneko 等^[10]通过试验研究和数值分析研究分析了跨断层分段管道的失效模式, 以为建立跨断层球墨铸铁管道的设计方法提供依据。贾晓辉等^[11]通过建立跨断层分段 PVC 管线三维数值分析模型研究了分段管线在断层作用下的破坏模式, 并根据断层交角进行了参数分析, 为管道设计规范提供了参考。Qin 等^[12]基于跨断层承插式球墨铸铁管道

提出了新的解析解公式, 其中考虑了不同断层管道之间的距离和管土相互作用的影响。以上文献表明, 采用常规承插式接口的管道在断层位错下容易发生破坏, 因此需要研发新型的抗断接口, 并研究其在断层错动下力学性能和变形机理。

因此本文提出了一种新型抗断接口, 并针对采用新型接口的管道在受到走滑断层位错下的力学性能展开分析, 其中, 采用的新型接口是在普通承插式接口上改进而来, 其接口可以发生一定拉压和转动变形, 并且达到一定变形后, 可以带动相邻管线一起运动, 形成锁链效应。因此本研究首先对新型接口的构造设计和抗震机理进行详细介绍, 然后利用 ABAQUS 有限元软件针对跨走滑断层采用新型抗拉拔接口的承插式管道进行了一系列的数值分析, 通过对某特定工况下两种接口的效果分析验证了新型接口抵抗断层运动的性能, 并根据断层夹角和管道埋深作为关键参数分析了采用两种接口的承插式管道在受到断层运动时的力学性能和破坏模式。

1 新型抗拉拔承插式接口

普通承插式接口的承载能力主要由橡胶圈与管道插口间的摩擦提供, 与管段相比, 其抗拉能力较差。而随着使用年限增加橡胶圈的老化和松动, 管道的抗拔能力大幅下降, 管道接口很容易拉坏^[13]。承插式管道受到断层错动时管道接口的破坏是最典型、最主要的失效模式。为提高承插式管道在受到断层错动时的力学性能, 设计了一种新型抗拉拔承插式接口。该新型接口能够提高普通承插式接口的抗拉拔能力并具有一定的变形位移能力。当接口位移达到限值后锁死, 并带动相邻管段一起滑动变形, 以此类推依次传递, 将断层的位移量传递到多个管道接口, 从而减小断层附近管道接口的集中变形和破坏, 提高承插式管道抵抗大变形的能力。

1.1 新型接口构造设计

新型抗拉拔接口的构造示意图如图 1 所示。考虑到接口应具有易施工性, 本文所采用抗拉拔接口是在原有普通承插式接口上做了改进, 从而达到可以广泛在市场推广的目的。本研究在原有承插式接口的插口部分添加凸起, 并在承口处开一凹槽并添加金属限位环, 保证管道接口受拉时而维持接口有相应的承载能力, 且承口和插口之间有一定的距离以保证承插式接口在外力作用下可以产生一定的位移。本新型接口加入金属限位环, 可以有效地提高其抗拉承载能力, 延长管道接口寿命, 降低管道灾后修复和维护成本。

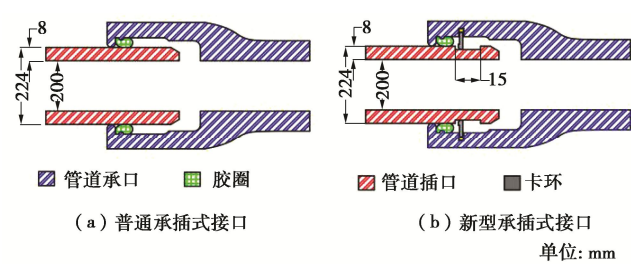


图 1 普通承插式接口与新型接口示意图

Fig. 1 Comparison between conventional and proposed bell-socket joints

以新型承插式管道接口为例,如图 2 所示,其施工顺序如下:①先将橡胶垫圈和组成金属限位环的两个半圆环安装在管道承口的凹槽内,3 个圆弧拼装成一个完整的圆环后,其可以牢固的卡在管道承口的凹槽内;②之后将止水橡胶圈安装在管道承口的凸起位置,将管道插口插入管道承口,插入前先在止水橡胶圈和金属限位环上涂一层润滑剂;③安装管道插口过程中,管道插口端部凸起通过预设的斜坡面,挤压金属限位环,压力通过金属限位环传递到橡胶垫圈。橡胶垫圈压缩变形,导致金属限位环被撑开,管道插口安装就位。

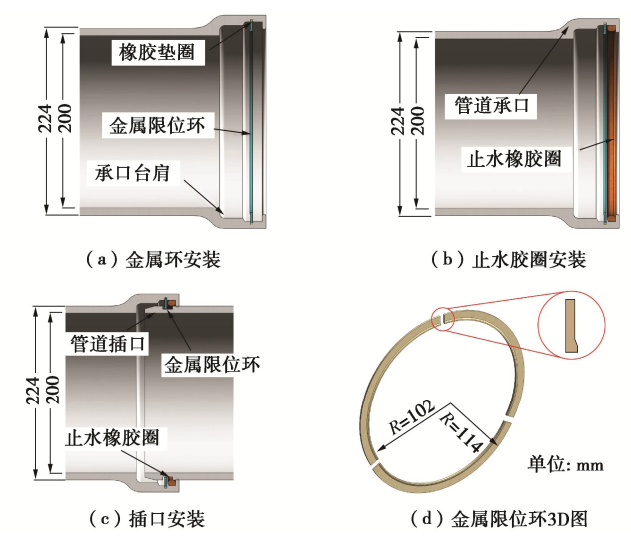


图 2 新型接口施工顺序图

Fig. 2 Construction sequence of new joint

1.2 新型接口抗断层位错机理

本文所述新型管道接口在受到轴向拉力较小时,接口的抗拉力主要由管道插口与止水橡胶圈的摩擦力提供,在接口所受拉力大于管道与止水橡胶圈的摩擦力时,管道接口被拉动,止水橡胶圈和管道插口产生滑动。当管道插口的凸起被拉动到金属限位环位置时,被限位环卡住。此时的轴向承载力主要由金属限位环的端承力提供,在此金属限位环的端承力远大于管道与止水橡胶圈的摩擦力,可以有效的防止管道插口被

继续拉动。在接口达到极限变形之后,所设计的金属限位环可提供的管道接口抗拉承载力大于每节管道所受的周围土体约束力,从而保证单个管道接口受拉变形达到极限后,每根管道能带动相邻管道一起滑动,并将管道变形传递到临近管道接口,最终实现抵抗管道周围土体大变形的能力,图 3 所示为新型接口抗断层层位错机理示意图。

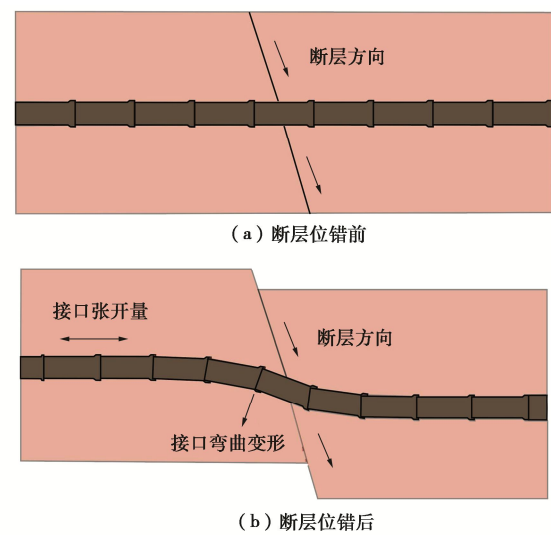


图 3 新型接口抗断层层位错机理示意图

Fig 3 Schematic diagram of anti-fault dislocation mechanism

2 承插式管道失效评判准则

承插式管道的破坏主要集中在管道接口部分,并且插式管道接口破坏也是承插式管道最常见的破坏形式。根据以往的震害表明,管道接口的失效模式主要分为以下 3 种情况:①管道的拉拔破坏,即受到因断层相对运动而产生的土体轴向拉应力引起的;②承口开裂,即管道接口受到的轴向压应力超过了极限压应力而产生的破坏;③接口弯曲破坏,即接口因受到剪切力作用发生弯曲而破坏。但是在实际工程中,管道接口的抗压能力大于接口的抗拉能力,并且接口受到轴向压应力往往不会产生漏水现象,而轴向拉应力的产生往往是造成液体泄漏的主要原因。因此,本文将接口极限张开量和接口极限转角作为承插式管道的失效准则,并列举了系列接口轴向拉伸试验结果^[5, 14-16],如表 1 所示,管道接口极限拉伸位移均值为 52 mm,标准差为 4.8 mm。考虑到实际接口的安全系数,本文将接口允许张开量取为 40 mm,且将 O'Rourke 等^[3]的研究成果作为接口极限转角的参考,如表 2 所示。

表 1 已有系列试验接口极限张开量

Table 1 Ultimate joint openings of existing tests						
已有研究	周静海等 ^[5]	钟紫蓝等 ^[14]	傅俊 ^[15]	韩阳等 ^[16]	均值	标准差
接口张开量/mm	58	47	48	56	52	4.8

表 2 管道失效准则

Table 2 Failure criteria for pipeline

接口类型	接口失效判断指标	
	接口允许张开量/mm	接口允许转角/(°)
承插式	40	10

3 三维数值分析模型介绍

本文采用通用有限元分析软件 ABAQUS 建立了跨走滑断层承插式管道力学分析模型。由于本文模型属于大变形运动，因此本文模型考虑了材料非线性和几何非线性，如图 4 所示为本文模型。之前研究者的成果^[17]表明：管道跨断层大变形段主要集中在沿管轴方向的 30 倍管径以内，所以本文沿管轴方向所采用的土体和管道模型尺寸为 30 m，图 4 (a) 展示了土体模型，其尺寸为 5 m×5 m×30 m。土体模型单元采用八结点减缩积分六面体单元 (C3D8R)，管道模型单元采用四结点减缩积分壳单元 (S4R)。同时为了保证计算精度和计算效率，将靠近管道和断层处的土体单元网格进行了精细划分^[18-19]。图 5 为走滑断层错动下承插式管道模型示意图，本文管道采用 DN200 型球墨铸铁管道，单根管道长度为 6 m，分别用 4 个承插式球墨铸铁管道接口连接，图 5 中 β 为断层方向与管道轴线方向的夹角，且为本文关键参数分析中的一组。另外，本文采用的分析步将分为两步进行：①开展管-土相互作用体系的初始应力场计算，对模型底部进行法向约束，在动力隐式分析步中，施加重力载荷，得到重力载荷下的应力场，其次，将得到的应力场定义为初始应力场，施加于本文的有限元模型，进行地应力平衡。②施加位移。在此步骤中，将土体上表面设定为自由面，并对各个表面施加其对应的法向约束，对固定盘表面施加位移为 0，反之对移动盘沿断层运动方向表面(x 方向)施加非零荷载，本文依据 Vazouras 等^[17, 20]建议取断层宽度 $W=0.33$ m。

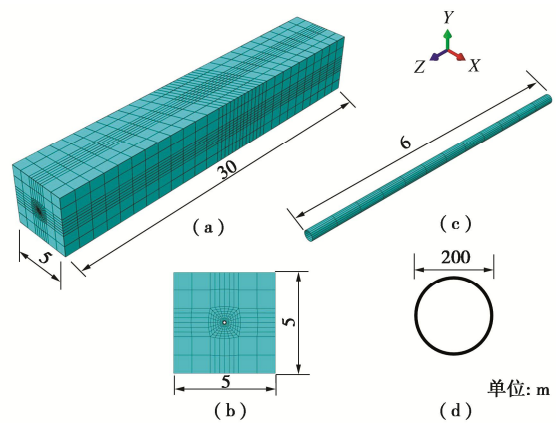


图 4 管土相互作用三维有限元模型

Fig. 4 3D finite element model for pipeline-soil interaction

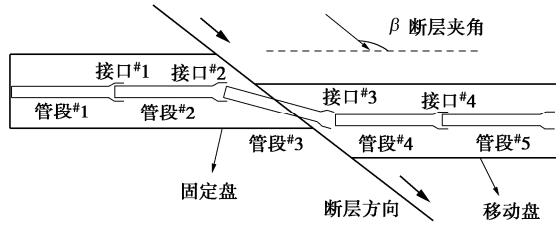


图 5 走滑断层错动下承插式管道模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bell-socket pipeline model under Strike-slip fault

3.1 管-土相互作用

考虑到在断层错动作用下，管道外表面和土体会产生相对滑移和相互作用力，本文采用接触算法来模拟管道外表面和周围土体之间的界面，其中法向行为定义为“硬”接触，切向行为则通过定义适当的摩擦系数来模拟真实的管土相互作用。根据 Yimsiri 等^[21]的研究成果表明：对于管道-土体之间的界面摩擦系数 $\mu=\tan(2/3\psi_p)$ ，因此摩擦系数取值为 0.3。

3.2 材料模型

之前的研究成果^[6]表明，管道的建模方式主要有：①采用实体单元模型，即用实体单元进行网格化，其可以模拟轴向、剪切和弯曲变形但是使用实体单元不能够直接观察管体局部屈曲和截面过度变形；②采用壳单元模型，即将管道设为壳单元，将管道周围的土体设为实体单元，这种方法可以很好的考虑管道与土体之间的复杂性和非线性。因此本文管道将采用壳单元模型，材料选用球墨铸铁，弹性模量=160 GPa，泊松比=0.3，密度=7300 kg/m³，屈服强度=420 MPa，屈服点对应应变=5%。

砂土材料模型采用莫尔-库仑模型，弹性模量=33 GPa，泊松比=0.32，密度=1790 kg/m³，摩擦角=33.5°，剪胀角=0.01°。

3.3 管道接口模型

图 6 展示了本文管道接口模型示意图。本文在 ABAQUS 中采用 3 组非线性弹簧单元拟合柔性承插式接口的非线性力与位移、弯矩与转角的力学关系，即采用轴向弹簧、剪切弹簧和弯曲弹簧。其中本文普通承插式接口的轴向弹簧刚度和弯曲弹簧刚度取值采用钟紫蓝等^[22]的推荐值，剪切弹簧刚度设置与管段的剪切刚度一致，以此模拟管道承口与插口之间的挤压。

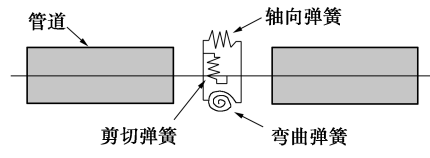
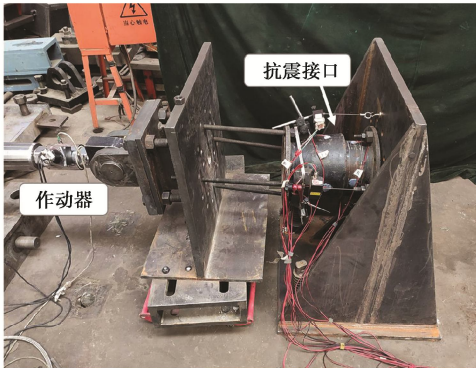


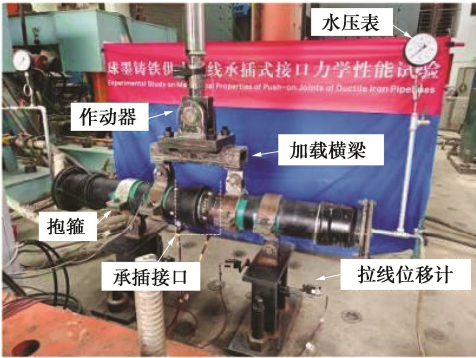
图 6 管道接口模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram for pipeline joint model

新型接口力学性能数据参考张亚波^[23]已开展试验得到的数据并进行了拟合,图 7 为参考试验现场图片,图 8 为本文所采用的新型接口的力学性能曲线,在试验初期,接口的承载力主要由胶圈和管道插口之间的摩擦力提供;当接口变形量达到 20 mm 时,卡环初次与插口槽壁接触,随着加载位移的增加,接口轴向承载力持续上升;当接口变形量达到 32 mm 时,轴向承载力达到峰值,其后承载力并未发生骤降现象,而是出现短暂的稳定波动段;随着加载继续,直至接口变形量达到 50 mm 卡环彻底拔出。因此可得,管道接口主要发生轴向拉伸和转角变形。新型抗拉拔接口相比于普通承插式接口,其轴向抗拉承载力明显提升,但是对于承插式接口的抗弯承载力基本没有改变。



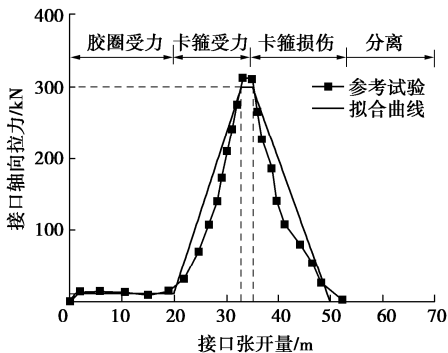
(a) 新型接口拉拔试验^[19]



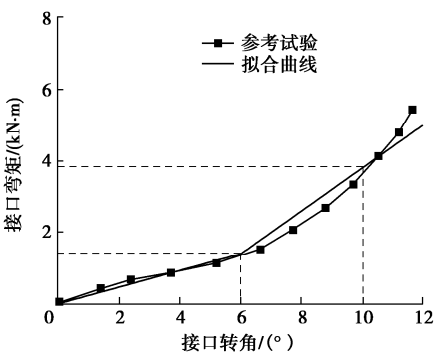
(b) 管道接口弯曲试验^[24]

图 7 管道接口力学性能试验^[19, 24]

Fig. 7 Mechanical performance tests on pipeline joint^[19, 24]



(a) 接口轴力-位移关系图



(b) 接口弯矩-转角关系图

图 8 新型抗拉拔承插式接口的力学性能曲线

Fig. 8 Mechanical properties of new anti-pullout bell-socket joint

4 三维模型数值分析结果

4.1 管道接口抗断机理验证

为了验证本文接口的有效性,本文展示了某特定工况下采用了两种管道接口承插式管道的接口张开和弯曲图(图 9)。假设此特定工况如下:①断层与管道夹角为 120°;②管道埋深为 2.5 m;③土体和管道的材料本构模型采用前文所述;④断层位移 δ 为 1 m。图 9 展示了特定工况下采用两种接口承插式管道效果分析图。从图 9 中可以看出,采用普通接口的管道,其靠近断层断裂带的接口会产生较大轴向拉伸,而采用新型接口的管道由于其构造设计,其抗拉承载力明显提升,所以其不容易出现拉拔破坏,相比于采用普通接口管道失效模式,采用新型接口的承插式管道更容易出现接口的弯曲破坏,而且可以看出两种管道接口的转角受到断层运动时其结果相差不大,这是因为新型承插式接口的构造设计对于接口的弯曲承载能力没有明显提升,由图 9 中还可以看出,对于采用两种接口的承插式管道,其管段上的应力分布基本是一致的。

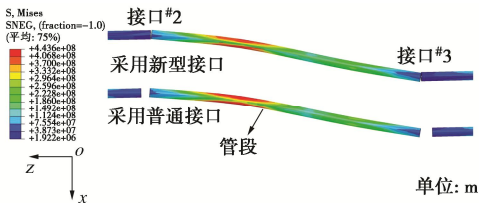


图 9 特定工况下采用两种承插式接口的管道效果分析

Fig. 9 Effect analysis of pipeline with two kinds of socket joints

图 10 展示了特定工况下采用两种接口承插式管道的接口张开量和接口转角随断层位移变化的对比。由图 10 中可以看出,对于接口张开量,采用新型承插式接口的管道明显要小于采用普通承插式接口的管道,这是由于新型承插式接口的轴向刚度远大于普通承插式接口的轴向刚度。而对于接口转角,金属限位

环的加入并未增加普通承插式接口的弯曲刚度, 所以采用两种接口的承插式管道其接口转角曲线是相一致的。

由图 10 (a) 可以看出, 当断层位移在 $0 \sim 0.15$ m 时, 两种接口的曲线增长规律大致相似, 这是因为在断层位移较小时, 其引起的接口张开量还未达到使金属限位环受力的阶段, 当断层位移达到 0.15 m 之后, 新型接口的张开量增长斜率开始减缓, 此时管道接口开始带动相邻管道进行运动, 并且由图 10 (b) 可知, 新型接口的张开量在达到失效准则前, 接口转角已经达到失效准则, 而普通接口张开量在达到失效时, 其接口转角还远远未达到失效准则。由此可得采用新型接口的管道相比于采用普通接口的管道, 其失效模式由接口的拉拔破坏转为接口的弯曲破坏。

图 11 展示了上述特定工况下采用新型接口管道随断层位移变形图, 从图 11 中可以看出, 随着断层位移的逐渐增大, 新型接口开始带动相邻管道开始运动,

这是由于采用的新型承插式接口的抗拉承载力大于管-土间的切向摩擦力, 当遭遇大变形时相邻管道接口会带动管道向断层断裂带, 因此断层变形大部分由管道接口带动管道轴向运动来承担, 可以有效地提高管道抵抗大变形的能力。

4.2 断层夹角对承插式管道力学响应分析

为了研究新型承插式接口抗断层位错性能具有普遍性, 本文将断层夹角和管道埋深作为关键参数。其中断层夹角随着场地位置的变化而存在差别, 管道穿越断层夹角主要分布在 $90^\circ \sim 135^\circ$ 。选取断层夹角 β 为 90° , 105° , 120° , 135° 分析对承插式管道的力学响应, 且市政管网埋深大多在 3m 以内。选取管道埋深为 0.6, 1.0, 1.6, 2.0, 2.5 m 分析对承插式管道的力学响应。根据不同断层夹角和管道埋深分别建立了数值分析模型, 研究了在不同工况下采用两种接口的承插式管道受到走滑断层错动时的力学响应规律。

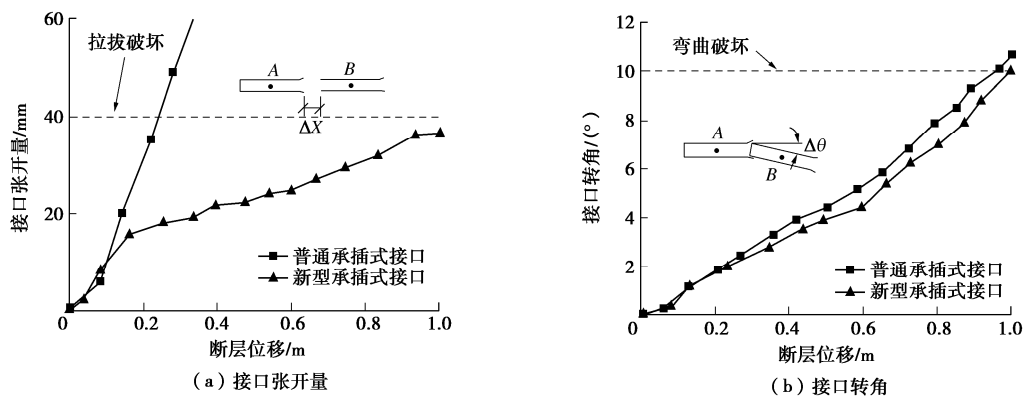


图 10 特定工况下采用两种接口承插式管道力学响应

Fig. 10 Responses of two joints under specific conditions

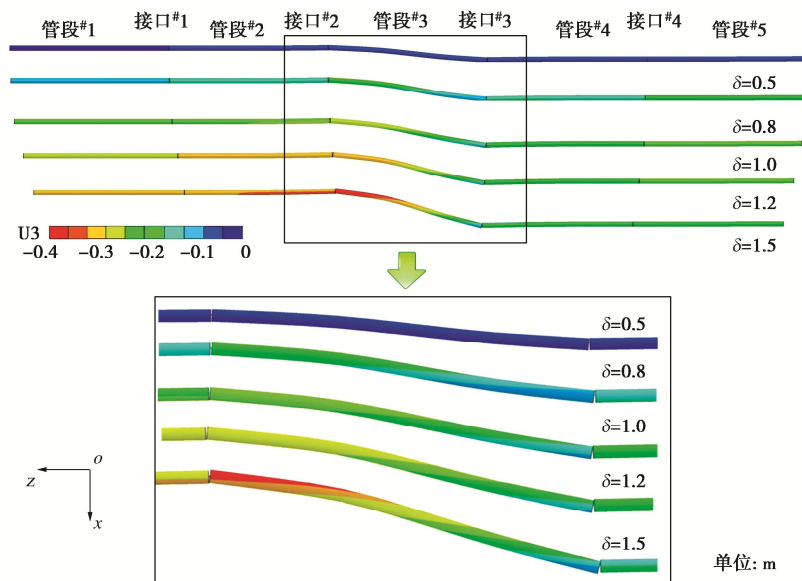


图 11 特定工况下采用新型接口管道随断层位移变形图

Fig. 11 Deformations of pipeline with fault displacement using new joint under specific conditions

图 12 展示了不同断层夹角下采用两种接口的管道最大接口张开量和最大转角与断层位移的关系图。从图 12 中可以看出,在所有工况下,对于采用两种接口的管道受到断层位错时的接口张开量变化趋势是不相同的。随着断层夹角增加到 120° 时,管道接口的张开量和转角的增长斜率都有所减小,当断层夹角大于 120° 后,其管道接口转角的斜率明显增大,这是由于在相同的断层位移下,过小的断层夹角使得断层位移引起的接口张开量较大,而过大的断层夹角使得相邻管线的轴向位移增大,从而造成相邻管线带动接口发生弯曲破坏。其中在所有工况下采用新型承插式接口的管道因其具有较大的轴向刚度,接口的弯曲破坏要先于接口的拉拔破坏,而对于采用普通承插式接口的管道,其接口张开量的增长斜率随着断层夹角的增加而增加,且不同于采用新型承插式接口的管道,其接口张开量随断层位移的增长而显著增长,所得出的结论与贾晓辉等^[11]相似。

由图 12 (a) 可以看出,对于在不同断层夹角工况下采用普通接口的管道,其接口张开量达到规定的失效标准时,其接口转角还远未达到失效标准,这表明采用普通接口的管道失效模式为接口的拉拔破坏,而对于采用新型接口管道,当其管道张开量还未达到失效时,其接口转角已经达到了失效标准,采用新型

接口的管道失效模式为接口的弯曲破坏。

对于采用新型接口的管道在不同断层夹角工况下其失效模式为接口的弯曲破坏,其中当断层夹角为 120° 时,其达到失效准则时的转角最大,建议当采用新型接口时的管道与断层夹角为 120° 左右。

4.3 管道埋深对承插式管道力学响应分析

图 13 展示了在不同管道埋深下采用两种接口的管道最大接口张开量和最大转角与断层位移的关系图。从图 13 (a) 中可以看出,随着埋深的增大,采用新型抗拉拔接口的管道其转角达到失效时的断层位移量也在减小,而对管道埋深在 2 m 以下的情况,其接口张开量和转角随管道埋深的变化不明显,不同于采用新型承插式接口的管道响应规律,在采用普通承插式接口的管道中,其接口张开量的增长斜率随着管道埋深的增大而减小,而不同的管道埋深对接口转角的影响较小。因此建立采用两种接口的承插式管道都尽量浅埋,对于采用新型承插式接口的管道,其埋深在未达到一定极限时,其失效时的临界位移相差不大,当超过一定埋深时,其失效时的临界位移会出现下降。

对于在不同管道埋深工况下采用普通接口的管道,其接口张开量达到失效时的断层位移要小于其接口转角达到失效时的位移,这表明采用普通接口的管

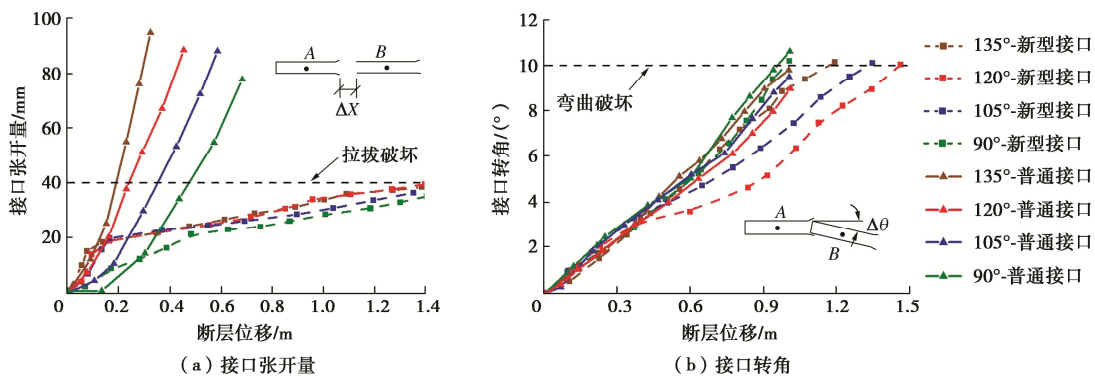


图 12 不同断层夹角下采用两种接口的管道的力学响应

Fig. 12 Mechanical responses of pipelines with two joints under different fault angles

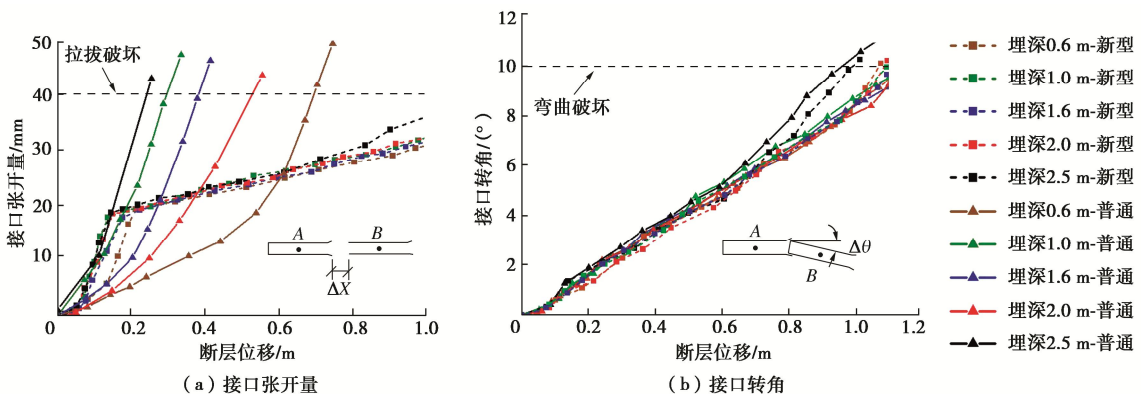


图 13 不同管道埋深下采用两种接口的管道的力学响应

Fig. 13 Mechanical responses of pipelines with two joints under different burial depths

道失效模式为接口的拉拔破坏, 而对于采用新型接口管道, 当其管道张开量还未达到失效时, 其接口转角已经达到了失效标准, 所以采用新型接口的管道失效模式为接口的弯曲破坏。

4.4 两种接口承插式管道失效临界位移对比

图 14 展示了以上所有工况下采用新型抗拉拔接口和普通式承插式接口管道失效时断层的位移量。由图 14 可知, 采用新型抗拉拔接口的情况下, 各工况下管道失效时断层位移 δ 最大值为 1.41 m, 相对于未采用新型抗拉拔接口管道提高了 4 倍左右。因此新型抗拉拔接口有效地提高了承插式管道抵抗大变形错动的能力。

由图 14 中还看出, 在其他条件都相同的情况下, 对于断层夹角为 120° 的承插式管道, 其采用新型接口在受到断层位错时其抗断性能提升最大, 同样在其他条件等同下, 管道埋深在 0.6 m 的承插式管道其采用新型接口时的抗断性能相比于普通承插式接口的管道提升最大。

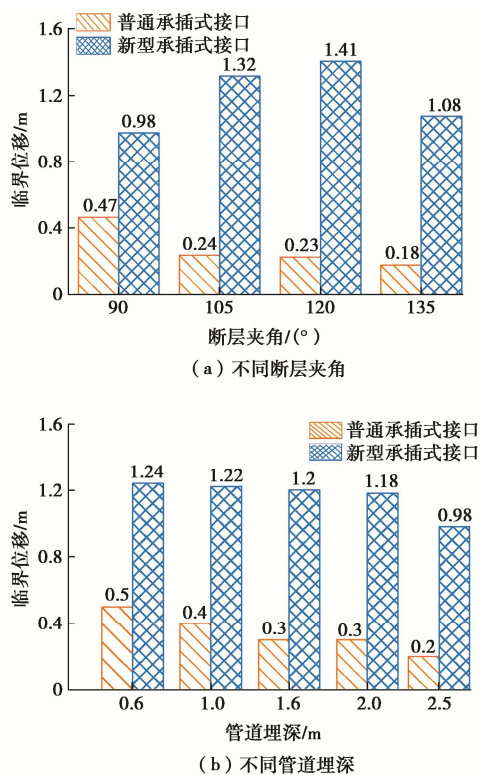


图 14 不同承插式接口临界位移的对比

Fig. 14 Critical displacements of different bell-socket joints

4.5 管段应变响应分析

本文提出了一种新型抗拉拔接口以提高承插式管道抵抗大变形错动的能力, 为了防止管道接口轴向刚度过大而造成的受断层错动管段表面应力过大, 本文提取了不同工况下管段#3 的弯曲峰值应变, 来判断采用新型抗拉拔接口的管道在受到断层时的失效模式。

对于管段的失效判断准则, 本文采用国际管道规范^[25]定义的极限拉伸应变和极限压缩应变, 可以得到本文管段的极限拉伸应变为 2%, 极限压缩应变为 2%。图 15 展示了不同工况下#3 管段峰值应变与断层位移的关系图, 其中 T 表示管道拉伸应变, C 表示管道压缩应变。从图 15 中可以看出, 随着断层夹角的增加, 管段峰值拉应变和压应变随之减小, 这是由于断层夹角增大, 断层位移分解后的竖向位移相应减小, 所以管段上的拉应变和压应变也随之减小, 并且随着土体埋深的增加, 管段的峰值拉应变和压应变也在增加, 这是由于随着土体埋深的增大, 管周土体对埋地管线的约束也跟着增大。由图 15 可知, 所有工况下的管段都未达到管段失效准则, 因此可以看出本文所采用的新型接口承插式管道在走滑断层错动下, 管道接口的破坏先于管段出现破坏。

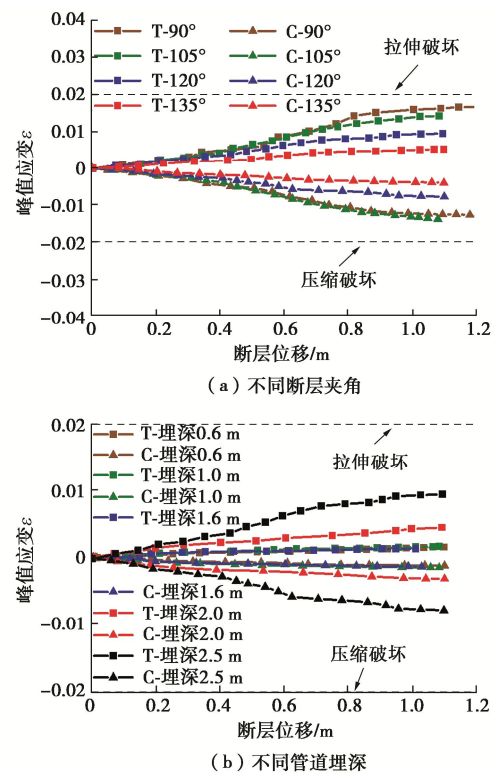


图 15 不同工况下#3 管段峰值应变

Fig. 15 Peak strains of pipe section No. 3 under different conditions

5 结 论

介绍了一种新型承插式抗震接口, 并详细阐述了其构造设计及抗断机理, 根据其接口特性建立了跨断层承插式管道力学分析模型, 研究了采用新型承插式接口的管道在受到断层运动时的破坏机制, 并将此新型抗拉拔接口和普通承插式管道接口在不同断层夹角和管道埋深情况下受到断层错动的破坏模式进行了对

比,得到5点结论。

(1)本文所介绍的新型抗拉拔接口的抗拉承载力大于单根管道与土体间的切向摩擦力,从而可以带动相邻管道运动,而且可以看出采用新型抗拉拔接口的承插式管道相比于采用普通承插式管道,其抵抗断层大变形错动的能力提高了4倍左右。

(2)相比于采用普通承插式接口的管道,本文所采用的新型承插式接口的管道在受到断层错动的情况下,其失效模式由接口的拉拔破坏转为接口的弯曲破坏。

(3)对于采用新型承插式接口的管线,当断层夹角在 120° 左右时,其能够承受较大的地面变形位移,对于采用常规接口的管线,当断层夹角在 $90^\circ \sim 105^\circ$ 时能够抵抗较大的地面变形。

(4)采用新型抗拉拔接口和常规承插式接口的埋地管线,都需在浅埋的情况下,其抵抗断层错动的能力提高最明显。

(5)本文根据各种工况下的数值分析结果可以看出,承插式管道在受到断层错动时,管道接口的破坏先于管段出现破坏。

参考文献:

- [1] CHEN W W, SHIH B J, CHEN Y C, et al. Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji earthquake[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, **22**(9/10/11/12): 1209-1214.
- [2] HAYS W W. Case histories of damaging earthquakes[C]// *Proceedings of the Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, MO, 1998: 957-962.
- [3] O'ROURKE M J, JIU X. Seismic Design of Buried and Offshore Pipelines: MCEER-12-MN04[R]. Buffalo: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering, State University of New York, 2012.
- [4] SINGHAL A C. Nonlinear behavior of pipeline joints [C]// *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, 1984.
- [5] 周静海, 赵海艳, 魏立群. 球墨铸铁供水管线在地震作用下功能性实验分析[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2008, **24**(2): 196-199. (ZHOU Jinghai, ZHAO Haiyan, WEI Liqun. Experimental research on functionality of ductile cast iron pipelines under the earthquake[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2008, **24**(2): 196-199. (in Chinese))
- [6] VALSAMIS A I, BOUCKOVALAS G D, GANTES C J. Alternative design of buried pipelines at active fault crossings using flexible joints[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, **180**: 104038.
- [7] 钟紫蓝, 王书锐, 甄立斌, 等. 经垫衬法修复后铸铁管道接口力学性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, **51**(6): 141-147. (ZHONG Zilan, WANG Shurui, ZHEN Libin, et al. Experimental study on mechanical properties of ductile iron pipeline rehabilitated by corrosion protection lining[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, **51**(6): 141-147. (in Chinese))
- [8] ARGYROU C, O'ROURKE T D, STEWART H E, et al. Large-scale fault rupture tests on pipelines reinforced with cured-in-place linings[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, **145**(3): 04019004.
- [9] KIM J, O'CONNOR S, NADUKURU S E T al. Behavior of full-scale concrete segmented pipelines under permanent ground displacements[C]// *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2010*. SPIE, 2010, 7650: 257-267.
- [10] KANEKO S, MIYAJIMA M, ERAMI M H. Study on behavior of ductile iron pipelines with earthquake-resistant joints buried across a fault[C]// *International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering*. Chengdu, 2013.
- [11] 贾晓辉, 王 龙, 范晓庆, 等. 埋地分段管线在地震断层作用下的破坏模式研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, **28**(1): 81-88. (JIA Xiaohui, WANG Long, FAN Xiaoqing, et al. Failure mechanism of buried segmented pipelines subjected to earthquake fault[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, **28**(1): 81-88. (in Chinese))
- [12] QIN X G, WANG Y. Different failure modes assessment of bell-spigot jointed ductile iron pipes under abrupt transverse ground movements[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, **163**: 107558.
- [13] MOHITROUR M, GOLSHAN H, MURRAY A. Pipeline design and construction: a practical approach[M]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2006.
- [14] 钟紫蓝, 王书锐, 杜修力, 等. 管道承插式接口轴向力学性能试验研究与数值模拟[J]. *工程力学*, 2019, **36**(3): 224-230, 239. (ZHONG Zilan, WANG Shurui, DU Xiuli, et al. Experimental and numerical study on axial mechanical properties of pipeline under pseudo-static loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2019, **36**(3): 224-230, 239. (in Chinese))
- [15] 傅 俊. 供水管线接口变形试验与抗震可靠度研究[D].

- 上海: 同济大学, 2013 (FU Jun. Displacement Experiment and Seismic Reliability Study of Water Supply Pipeline Joint[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.(in Chinese))
- [16] 韩 阳, 李冠潮, 李东桥, 等. 管道承插式柔性接口轴向力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, **40**(5): 44-51. (HAN Yang, LI Guanchao, LI Dongqiao, et al. Experimental study on axial mechanical properties of pipeline under pseudo-static loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, **40**(5): 44-51. (in Chinese))
- [17] VAZOURAS P, KARAMANOS S A, DAKOULAS P. Mechanical behavior of buried steel pipelines crossing strike-slip seismic faults[C]//Proceedings of ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rotterdam, 2011.
- [18] ANASTASOPOULOS I, GAZETAS G, BRANSBY M F, et al. Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(8): 943-958.
- [19] LIU A W, HU Y X, ZHAO F X, et al. An equivalent-boundary method for the shell analysis of buried pipelines under fault movement[J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, **17**(1): 150-156.
- [20] VAZOURAS P, KARAMANOS S A, DAKOULAS P. Finite element analysis of buried steel pipelines under strike-slip fault displacements[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, **30**(11): 1361-1376.
- [21] YIMSIRI S, SOGA K, YOSHIZAKI K, et al. Lateral and upward soil-pipeline interactions in sand for deep embedment conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(8): 830-842.
- [22] 钟紫蓝, 张亚波, 侯本伟, 等. 考虑交叉管线影响的城市供水管网地震响应分析及震害评估[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(5): 953-96. (ZHONG Zilan, ZHANG Yabo, HOU Benwei, et al. Seismic response analysis and damage assessment of urban water supply network with crossing pipelines impact[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(5): 953-96. (in Chinese))
- [23] 张亚波. 供水管道承插式接口力学性能试验研究及管网抗震性能评价[D]. 北京: 北京工业大学, 2022. (ZHANG Yabo. Experimental Study on Mechanical Properties of Socket and Spigot Joint of Pipeline and Evaluation of Seismic Performance of Pipeline Network[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [24] 钟紫蓝, 张亚波, 李锦强, 等. 球墨铸铁管道接口弯曲性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, **55**(9): 143-150. (ZHONG Zilan, ZHANG Yabo, LI Jinqiang, et al. Bending performance test of push-on joints of ductile iron pipelines[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, **55**(9): 143-150. (in Chinese))
- [25] Association Canadian. Oil and Gas Pipeline Systems CSA-Z662[S]. 2007.