

单调荷载下承插式柔性管道接口功能性能试验研究

顿彤彤¹, 聂留洋¹, 任雪振²

(1. 长垣烹饪职业技术学院, 河南 新乡 453499; 2. 中德新亚建筑材料有限公司, 河南 新密 452300)

摘要:为分析加载速率对承插式柔性管道接口功能性能影响规律,文章对管径 DN300 mm 弯曲作用下球墨铸铁管道承插式柔性接口进行3种加载速率单调加载试验,在接口转角位移达到极限转角位移以前,加载速率影响较小,然而在极限转角位移之后接口弯矩值的大小受到加载速率影响显著,并在停止加载未出现漏水现象。基于试验数据,利用 matlab 分析软件进行了管内水压和转角、转角和拔出位移数据分析,建立了管内水压-接口转角-接口轴向位移关系服从一般规律的三维模型。研究结果表明:1)文章定义管径 DN300 mm 极限转角为 5.8°;2)给出了管内水压-接口转角-接口轴向位移三者之间简洁数学表达式,对比管内水压-接口转角拟合曲线拟合结果与试验结果基本一致;3)证明了柔性管道接口在加载过程中具有良好供水功能性能。

关键词:单调加载; 极限转角; 功能性能; 球磨铸铁管

中图分类号: TU992

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)06-0033-06

doi:10.13402/j.gcjs.2025.06.072

Experimental study on functional performance of socket flexible pipeline interface under monotonic load

DUN Tongtong¹, NIE Liuyang¹, REN Xuezheng²

(1. Changyuan Culinary Vocational and Technical College, Xinxiang 453499, Henan, China;

2. Zhongde Xinya Building Materials Co., Ltd., Xinmi 452300, Henan, China)

Abstract: In order to analyze the influence of loading rate on the functional performance of the socket flexible pipeline interface, this article conducted monotonic loading tests on three loading rates of ductile iron pipeline socket flexible interface under bending action with a diameter of DN300 mm. Before the interface angular displacement reached the ultimate angular displacement, the influence of loading rate was relatively small. However, after the ultimate angular displacement, the magnitude of the interface bending moment value was significantly affected by the loading rate, and there was no water leakage phenomenon when the loading was stopped. Based on experimental data, MATLAB analysis software was used to analyze the data of water pressure, angle, angle, and pull-out displacement inside the pipe. A three-dimensional model was established, in which the relationship between water pressure inside the pipe, interface angle, and interface axial displacement follows a general law. The following conclusion can be drawn: 1) The article defines the ultimate turning angle of DN300 mm pipe diameter as 5.8°; 2) A concise mathematical expression was given for the relationship between water pressure inside the pipe, interface angle, and interface axial displacement. The fitting curve of water pressure inside the pipe and interface angle was compared, and the fitting results were basically consistent with the experimental results; 3) It has been proven that the flexible pipeline interface has good water supply performance during the loading process.

Key words: reciprocating loading; extreme turning angle; mechanical properties; ductile iron pipe

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078125&51578217)

作者简介: 顿彤彤(1997—),女,硕士研究生,从事工程建造管理方面的研究。

近年来,承插式柔性接口管道被广泛应用到埋地管线建设当中^[1]。作为城市正常运作基础设施的埋地管道,其特点是分布广泛、布局复杂以及所处环境恶劣。如:1906年美国旧金山地震,2008年汶川地震以及2011年东日本大地震等诸多震害资料表明^[2],埋地管线一旦失效将造成严重的渗漏现象,影响管线的整体功能发挥。因此,针对承插式柔性接口管道在外部荷载下的功能性研究就显得尤为重要。

目前,对于承插式柔性接口管道试验研究,学者们已开展了大量研究。何航^[3]基于 ABAQUS 有限元软件和 Fluent 流体计算软件研究了流速、流量、橡胶圈硬度等因素对承插口环向受力和竖向变形的影响规律,得出承口内侧的管顶、底为受拉区域为最危险的区域,且承口内外侧的环向应变大于插口。刘望^[4]利用 ABAQUS 软件对承插式混凝土管道接头部分进行了精细化建模,分析轴向拉拔作用和弯曲作用条件下管道接头的受力特征及胶圈的变形形态,建立了安装间隙对不同管径管道接头极限转角影响的拟合函数关系。ZHONG^[5]对球墨铸铁管道开展了轴力和管内水压共同作用下的接口轴向拉伸破坏性试验,对比了不同管径的接口拉伸力学性能变化过程及渗漏失效机理。研究表明:0~0.3 MPa 的水压波幅对球墨铸铁管道接口抗拉承载能力未产生显著影响,接口抗拉承载力与相应接口张开量呈正相关分布。任雪振等^[6-8]对承插式球墨铸铁管道进行了系统的轴向拉拔和横向弯曲的试验研究,分析了管道内有无水压、管道直径等其他因素对柔性接口的力学性能影响,得出有水压的接口抗震性能较好于无水压。ARGYROU 等^[9-10]对大型断层展开试验研究并进行了数值模拟,结果表明 CIPP 加固的管道柔性接口在地面发生瞬间变形下的脱粘、轴向伸长和弯曲性能。

以上研究成果表明,柔性接口管道研究主要以轴向的静载拉拔试验为主,而鲜有考虑正常供水压力与拉弯耦合效应以及加载方式等因素的研究。从以往震害明显可以看出,承插式柔性接口管道的破坏并不是单一模式破坏,管道弯曲引起的柔性接口破坏表现为接口的轴向拔出和承口掰坏,并且在内

压与横向加载耦合情况下的接口受力模式更是复杂。因此,对于球墨铸铁管道柔性胶圈接口的试验研究不能局限在轴向拉拔上,接口在有内压耦合以及拉弯耦合作用下的弯曲试验同等重要。

本文对球墨铸铁管道胶圈柔性接口进行有水压下横向弯曲加载耦合试验,观测、分析管道接口的失效模式、极限受力状态以及接口轴向拔出位移。同时,改变加载速率,研究分段管道柔性接口的失效机理,并基于试验数据建立不同加载速率的柔性接口管内水压-拉拔位移-弯曲角度的三者关系,以期可为球墨铸铁管道胶圈柔性接口抗震设计理论和分段式管道的功能性评价提供试验数据依据和技术支持。

1 试验方案

1.1 试件设计

采用的管件参数:直径 DN300 mm、外径 DN326 mm、承口深度 110 mm、壁厚 7.2 mm、中间长管长度为 3 m。水压传感器装置连接数据采集箱实现与加载位移同步记录管道内部水压变化。通过自制卡箍外连作动器对接口处施加横向荷载,实现承插式球墨铸铁管道胶圈柔性接口受弯变形。为使管道端部约束更符合真实工况,本文摒弃传统试验的端部自由约束,利用管道两端分别外接一组短管的方式实现了端部的有限转动约束,接口弯曲产生的转角主要是由长管接口与两组短管的接口共同承担,加载示意图如图 1(a)所示。接口弯矩计算具体简化示意图 1(b)所示。

结合图 1(b)承插式管道接口的弯矩(M)通过式(1)进行计算转化,接口处产生的转角(θ)通过式(2)~(4)进行转化并通过倾角仪进行校核。

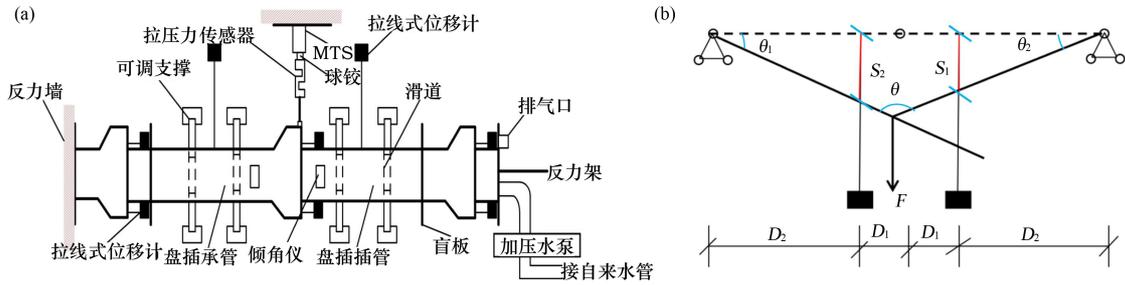
$$M = \frac{F \times (2D_1 + 2D_2)}{4} \quad (1)$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{S_1}{D_2} \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{S_2}{D_2} \quad (3)$$

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 \quad (4)$$

式中: F 为作动器施加的力值,kN; D_1 为设置拉线位移计与中间长管接口水平距离,mm; D_2 为支座与拉线式位移计之间的水平值,mm; S_1 、 S_2 分



(a) 管道试件加载示意图; (b) 弯矩及转角转化图

图 1 试验加载及接口转角计算

别为支座两侧 D_1 和 D_2 对称位置处拉线位移计测量值, mm, θ_1 和 θ_2 分别为两端支座短管接口转角, ($^\circ$); θ 为中间长管道接口的转角, ($^\circ$)。

1.2 试验加载方案

考虑市政供水基本水压以及分析接口在有水压下的功能性能, 加载试验开始前, 采用手动加压装置实现管道压力达到 0.2 MPa, 加载过程中不进行补压^[7]。拟定加载方案为每组试验均采用伺服缸位移控制加载方式, 加载模式为单调加载, 加载速率为 0.5、1.0 mm/s 和 2.5 mm/s, 加载至管道接口的承插管件发生严重碰撞, 即接口发生功能性失效。具体试验加载工况如表 1 所示。

表 1 加载工况

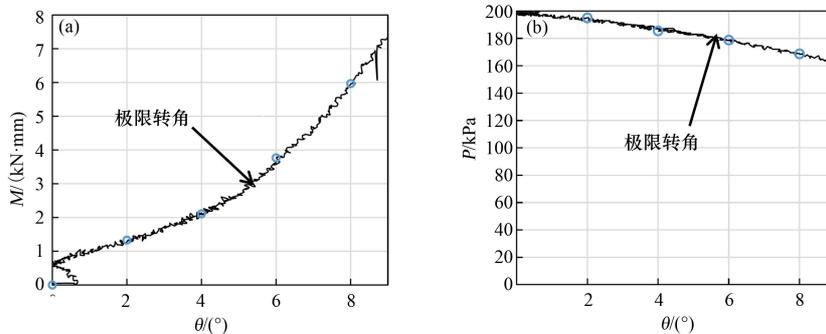
工况编号	加载模式	管径/mm	加载速率/ (mm·s ⁻¹)	水压/MPa
1、2、3	单调	300	0.5、1.0、2.5	0.2

2 试验结果

加载速率为 0.5 mm/s 试验数据结果如图 2 所示。由图 2(a) 可以看出, 在加载初期, 接口弯矩与接口转角位移非线性增长趋势, 接口转角达到 5.8 $^\circ$

左右时, 曲线斜率从 0.52 变化到 1.36, 接口弯矩出现迅速递增现象。故本文根据试验结果变化趋势, 定义 5.8 $^\circ$ 为接口的极限转角位移。图 2(b) 为在加载速率 0.5 mm/s 条件下的管件内部水压与接口转角试验结果。由图 2(b) 可知: 在初期加载时, 管件内部水压下降幅度较小; 随着接口转角的增加, 在接口转角位移达到图中定义的极限转角是出现了管件内部水压相对初始压强出现一定幅度的下降, 但在加载位移峰值时管件内部水压下降至 179.4 kPa 左右, 可以认为对于正常供水管道而言基本没有影响, 试验停止未出现接口渗水现象。

速率 1.0 mm/s 单调弯曲加载试验结果如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 曲线结果可细化分为 3 个阶段, 即弯矩的上升段、弯矩过渡段以及承插管壁碰撞阶段。由图 3(b) 可知: 加载初期接口位移变化较小时, 管件内部水压基本没有较大幅度的下降; 随着接口转角位移增加, 同样在极限转角位移时管件内部水压下降至 180.4 kPa, 相对于初始水压 200 kPa 而言, 其下降幅度不足以影响管道正常供水。



(a) 弯矩与转角 ($M - \theta$); (b) 转角与水压 ($\theta - P$)

图 2 速率 0.5 mm/s 试验结果

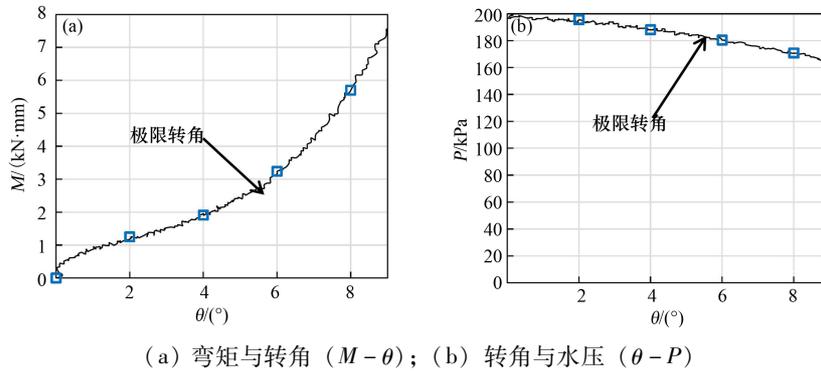


图 3 速率 1.0 mm/s 试验结果

2.5 mm/s 单调弯曲加载试验结果如图 4 所示。由图 4(a)可知, 接口弯矩与转角位移曲线基本上也可划分为加载的 3 个阶段。和前两个加载速率一致, 在初期加载时接口弯矩随接口转角增长而增加, 在接口转角位移达到接口极限转角, 此时接口弯矩为 3.90 kN·m。图 4(b)为在此工况下加载速率为 2.5 mm/s 的接口转角和管件内部水压之间的关系, 可以看到在极限转角时, 管件内部水压下降至 180.70 kPa, 相对于管件初始内部水压 200 kPa 来说, 下降幅度并不显著。

3 分析与讨论

3.1 加载速率的影响

图 5 为不同加载速率下接口轴向拔出位移以及停止加载管道接口实际现场结果。由图 5(a)可知: 3 种不同加载速率下, 接口极限转角位移为 5.8°。此处需要注意一点, 在接口转角位移为 2° 以前, 3 种不同加载速率的接口弯矩基本一致, 接口转角位移之前主要是由于胶圈的挤压变形引起的弯矩, 此时处于胶圈的弹性阶段, 加载速率影响较小。然而, 当接口转角位移为 2°~5.8° 时属

于接口弯矩过度阶段, 在这个阶段中, 由于接口产生了轴向拔出位移, 相对于第一阶段弯矩增长速度, 由于该阶段处于克服胶圈与管壁之间的滑道摩擦引起的接口弯矩, 故增长速度有所减缓。随着加载时间的延长, 在接口转角位移为 5.8° (即极限转角位移) 时, 接口弯矩的大小随着加载速率的不同有所变化, 而且是随着加载速率的增加逐渐增加。这主要是由于在接口转角位移为极限转角时, 承插管壁发生碰撞, 导致接口弯矩突然增加, 此时处于接口管壁碰撞阶段, 属于刚性接触。

由图 5(b)可知: 在加载终止时, 3 种不同加载速率的试验结果中, 接口轴向拔出最大为基本在 30 mm。接口转角位移为 5.8° 时, 接口轴向拔出位移基本达到 20 mm, 需要说明一点在加载初期, 速率为 1.0 mm/s 时, 接口轴向拔出位移略微下降, 主要由于每次试验完毕均进行重新安装胶圈, 装配管件等一些操作的影响以及试验环境导致。整体分析可以得出接口的轴向拔出位移随加载速率增长趋势, 尤其在极限转角之后的加载过程此变化趋势更为突出。

图 5(c) 为试验加载终止接口拔出现场图, 仔

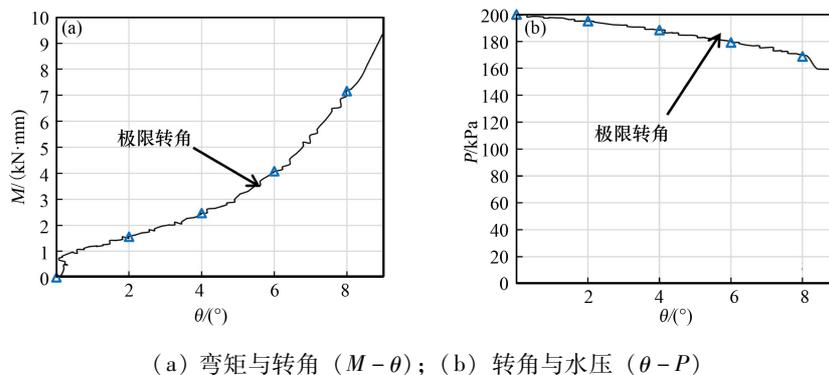
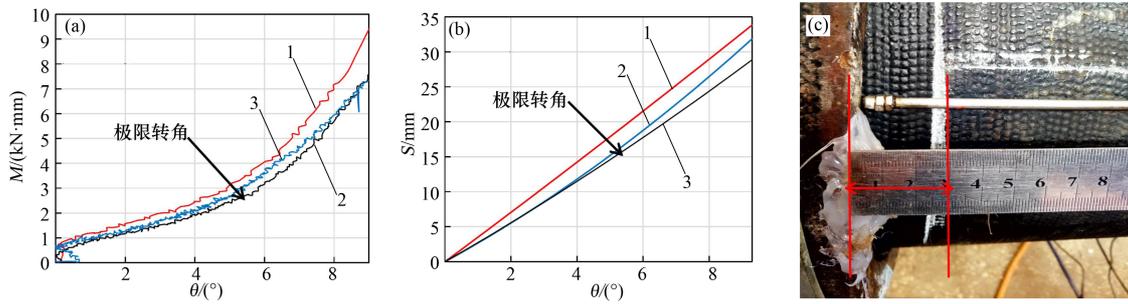


图 4 速率 2.5 mm/s 试验结果



(a) 弯矩 - 转角曲线; (b) 转角 - 接口拔出曲线; (c) 最大拔出位移
速率/(mm·s⁻¹): 1—2.5; 2—1.0; 3—0.5。

图 5 不同速率单调加载分析

细观察接口并未出现渗水现象, 这充分说明了柔性接口较好的抗震性能以及供水性能。通过试验数据分析, 得到 3 种加载速率下, 接口的极限位移时对应极限弯矩、轴向拔出位移和水压, 如表 2 所示。

表 2 极限转角对应的接口试验结果

加载速率/ (mm·s ⁻¹)	极限转 角/(°)	极限弯矩/ (kN·m)	轴向拔出 位移/mm	水压/ kPa
0.5	5.8	3.44	15.5	179.40
1.0	5.8	3.36	16.5	180.40
2.5	5.8	3.90	18.5	180.70

3.2 水压 - 转角 - 轴向位移相互关系

3 种不同加载速率下, 对柔性接口的水压 - 弯曲角度 - 拉拔位移三者数据进行拟合, 发现其水压 - 拉拔位移 - 弯曲角度三者的关系如式(5) ~ (7)所示, 其中 R² 为试验结果拟合度, 分别为 99.3%、99.6% 和 98.8%。水压 - 转角 - 轴向位移三者的关系如图 6 (a) ~ (c) 所示。

$$P = 199.3 - 0.7775 \cdot S + 0.3313 \cdot \theta + 0.05716 \cdot S \cdot \theta - 0.3688 \cdot \theta^2 \quad (5)$$

$$P = 198.3 - 1.544 \cdot S - 2.674 \cdot \theta + 0.06423 \cdot S \cdot \theta - 0.3248 \cdot \theta^2 \quad (6)$$

$$P = 199.5 + 0.1821 \cdot S - 2.144 \cdot \theta + 0.02428 \cdot S \cdot \theta - 0.3994 \cdot \theta^2 \quad (7)$$

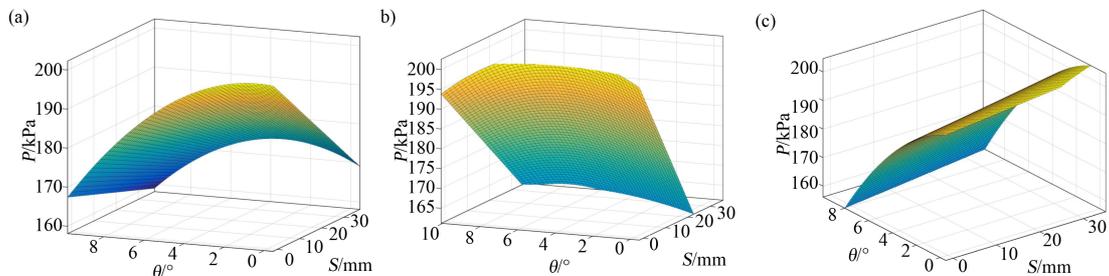
式中: P 为管内水压, kPa; S 为接口轴向拔出位移, mm; θ 为接口转角, (°)。

分别取 P 、 S 、 θ 的试验值代入式(5) ~ (7), 可得不同加载速率下的管件的弯矩 - 转角的拟合曲线, 与试验中实际的 $P - \theta$ 曲线进行对比, 可以发现, 拟合结果与试验结果基本一致, 具体结果如图 7 所示。

4 结 论

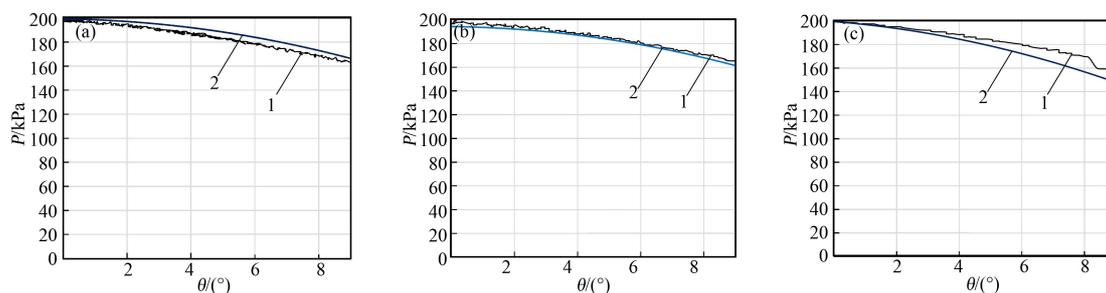
(1) 不同加载速率接口达到接触转角位移时均未出现渗水等现象, 这充分说明柔性接口在抗震方面以及供水性能较好。在单调加载方式下, 接口弯矩可按加载位移划分为 3 个加载阶段, 2° 以前接口弯矩增长较快, 2° ~ 5.8° (接触转角位移) 过度阶段, 接口弯矩增长略缓, 在接触转角位移之后接口弯矩出现骤增趋势, 同时在整个加载过程中, 接口均产生一定轴向位移, 因此本文建议管径 DN300 mm 单节管道接口不宜超出 5.8° 左右。

(2) 采用 Matlab 进行多元非线性回归分析,



速率/(mm·s⁻¹): (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.5

图 6 不同加载速率下 $M - \theta - S$ 拟合结果



速率/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$): (a) 0.5; (b) 1.0; (c) 2.5

1—0.5 mm/s 试验值; 2—0.5 mm/s 拟合值; 3—1.0 mm/s 试验值;

4—1.0 mm/s 拟合值; 5—2.5 mm/s 试验值; 6—2.5 mm/s 拟合值。

图 7 不同速率下拟合与试验值对比结果

得出了在不同加载速率下, 管内水压 - 接口转角 - 接口轴向位移关系所服从的一般规律, 并给出形式简洁的数学表达式。分别取 P 、 θ 、 S 的试验值代入数学表达式, 可得不同加载速率下管内水压 - 接口转角的拟合曲线, 将其与试验中实际的 $P - \theta$ 曲线进行对比, 可以发现拟合结果与试验结果基本一致。

参考文献:

- [1] 蔡志雄. 承插式球墨铸铁管道柔性接口力学性能影响的试验研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2022, 5(2): 22 - 24.
- [2] 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.
- [3] 何航. 承插式混凝土排水管道接头力学性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [4] 刘望. 承插式混凝土管道接头力学特性研究与工程应用[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- [5] ZHONG Z, FILIATRAULT A, AREF A. Numerical simulation and seismic performance evaluation of buried pipelines rehabilitated with cured-in-place-pipe liner under seismic wave propagation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(5): 811 - 829.
- [6] 任雪振, 韩阳, 杨金城. 偏心拉伸作用下球墨铸铁管道柔性接头力学性能试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2019, 28(5): 37 - 40.
- [7] 段君峰, 韩阳, 薛晨曦, 等. 球墨铸铁管道胶圈柔性接口弯曲试验研究[J]. 给水排水, 2016, 52(3): 103 - 106.
- [8] 李冠潮, 韩阳, 任雪振. 往复荷载下管道承插式柔性接口力学性能试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2020, 29(1): 29 - 33.
- [9] ARGYROU C, O'ROURKE TD, PARIYA - EKKASUT C, et al. Ductile iron pipeline response to earthquake-induced ground rupture [J]. Earthquake Spectra, 2020, 36(2): 832.
- [10] ARGYROU C, BOUZIOU D, O'ROURKE T D, et al. Retrofitting pipelines with cured-in-place linings for earthquake-induced ground deformations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 156.