

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240124001

交通荷载作用下球墨铸铁管承插接口 疲劳试验研究*

刘威^{1,2}, 崔万丽¹

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

摘要: 交通荷载是埋设在路面下的管道所承受的主要活荷载之一。管道在运行年限内要承受多次重复的交通荷载作用, 可能导致管道发生疲劳破坏。然而目前的研究大多集中于管道的静力力学响应或动力响应, 对于接口的疲劳力学性能研究较少。本研究首先基于公路车辆荷载统计数据, 考虑土荷载、管体自重等恒载, 采用有限元软件 ABAQUS 计算给出了交通荷载下球墨铸铁管承插接口的力学响应。随后为了模拟实际交通荷载的循环往复作用, 基于转角等效的原则, 在注水加压条件下开展了球墨铸铁管接口的弯曲疲劳试验, 得到了不同疲劳荷载幅值下管道接口的最大转角与渗漏速率的关系。最后采用累计损伤理论, 对不同车辆荷载组合作用下管道的疲劳寿命进行分析, 并基于试验数据得到了 DN200 的球墨铸铁管承插接口的疲劳荷载幅值与循环次数关系曲线。研究结果表明: (1) 接口处最大转角是衡量接口疲劳破坏程度的重要指标; (2) 接口最大转角与渗漏速率成正相关, 随着接口转角不断增大, 渗漏速率加快; (3) 接口处橡胶圈的疲劳力学性能退化而导致接口密封失效是管道漏水的重要原因。

关键词: 球墨铸铁管; 承插接口; 交通荷载; 疲劳试验

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0838-11

Study on Fatigue Testing of Ductile Iron Pipe Socket Joints under Traffic Loads

LIU Wei^{1,2}, CUI Wanli¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Traffic load is one of the main live loads on pipelines buried under road surfaces. Pipelines are subjected to repeated traffic loads during their service life, which may lead to fatigue failure. However, existing studies mostly focus on the static or dynamic mechanical responses of pipelines, with limited research on the fatigue mechanical performance of pipe joints. This study first analyzed statistical data of highway vehicle loads, considering constant loads such as soil load and pipe self-weight, and used the finite element software ABAQUS to calculate the mechanical responses of the socket joints of ductile iron pipes under traffic loads. Subsequently, to simulate cyclic loading under actual traffic conditions, bending fatigue tests of ductile iron pipe joints were conducted under internal water pressure based on the principle of equivalent rotation angle. The relationship between the maximum ro-

* 收稿日期: 2024-01-24; 修回日期: 2024-04-02

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3801004)、上海市 2022 年度“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1201201)资助

作者简介: 刘威(1976—), 男, 副教授, 博士。主要从事生命线工程抗震研究。E-mail: liuw@tongji.edu.cn

tation angle at pipe joints and leakage rate under different fatigue load amplitudes was obtained. Finally, the fatigue life of pipelines under different combinations of traffic loads was analyzed using the cumulative damage theory, and the relationship between fatigue load amplitude and number of cycles for DN200 ductile iron pipe socket joints was obtained based on the test data. The results showed that: (1) the maximum rotation angle at pipe joints was an important indicator for evaluating fatigue failure severity. (2) The maximum rotation angle at pipe joints was positively correlated with the leakage rate, with leakage accelerating as the rotation angle increased continuously. (3) The degradation of the fatigue mechanical properties of the rubber rings at pipe joints led to seal failure, which was a major cause of leakage.

Keywords: ductile iron pipe; socket joint; traffic load; fatigue test

0 引言

生命线工程系统是维系现代城市与区域经济、社会功能的基础性工程设施与系统,其典型对象包括城市供水、供气、区域电力与交通系统等^[1]。作为生命线工程的重要组成部分,城市供水管网在保障城市各项功能正常运转发挥着不可替代的作用。近年来,随着城镇化的发展,供水管网的规模不断扩大。截止2022年底,我国供水管道总长度达110.3万公里,约为2000年的4.3倍,供水普及率高达99.39%^[2]。

然而,随着城市供水管网的规模不断扩大,管网爆管、漏水等事故也经常发生。据《2021年全国地下管线事故分析报告》数据显示^[3]:2020年至2021年期间,我国共发生地下管线事故1723起,较2020年增长39.06%。其中,供水管道事故719起,占地下管线事故的53.06%。针对管道事故原因调查后发现:我国市政供水管道大多铺设年代较早,管线运行时间较长,由于管材的老化,供水管道在管道自重、土压力等恒载以及交通荷载、管道内压等活载共同作用下,极易发生管道接口的破坏^[4]。

交通荷载是埋地管道上方最主要、最频繁的活荷载之一^[5]。近年来,随着我国经济与交通事业的发展,交通运输呈现出交通量增大,载重增加等特点^[6],导致管道结构在车辆荷载下破坏时有发生^[7]。目前已有不少学者针对交通荷载作用下埋地管道的力学响应展开研究。吴小刚^[8]和王直民^[9]针对交通荷载作用下埋地管道的力学性状开展了一系列研究,建立了管线受力分析模型并提出了埋地管道相对刚度公式。李新亮等^[10]将交通荷载简化为管道附加土应力,通过Winkler弹性地基梁模型和Io-

wa公式求出管道的环向应力,并研究了不同参数对管道力学影响的规律。以上研究为交通荷载作用下管道的力学响应计算提供了解决办法,但是以上研究都针对的是连续式管道,并不适用于供水管网中常用的承插式管道。同时,国内外学者针对承插式管道主要展开了球墨铸铁管承插接口力学性能试验与数值模拟研究。这些研究主要关注供水管道接口的轴向拉拔力学性能^[11-13]和弯曲力学性能^[4,14-17]。管道接口往复荷载试验研究^[18-19]重复加载次数较少,试件并没有出现疲劳破坏现象。从上文可以看出,当前在承插接口的疲劳力学性能方面的研究还十分不足。因此,开展供水管道接口疲劳破坏机理研究,对于保证我国城市供水管网的运行安全具有十分重要的意义。

本文研究了埋设在路面下的管道在交通荷载作用下的力学行为和疲劳破坏机制,为设计和维护管道提供参考依据。首先基于实际车流量统计数据得到的车辆荷载模型,考虑土荷载、管体自重等恒载,通过ABAQUS软件计算给出了车辆荷载作用下DN200球墨铸铁管承插接口处的力学响应,然后开展了DN200的球墨铸铁管弯曲疲劳试验,得到了接口的最大转角与循环次数的关系,最后基于疲劳累积损伤理论,给出了车辆荷载组合作用下管道疲劳寿命计算公式。

1 试验概况

1.1 试件设计及试验装置介绍

本试验主要研究球墨铸铁管承插接口在内部水压和外部竖向荷载作用下的弯曲疲劳力学性能和疲劳破坏方式。试验中所采用的管道为新兴铸管集团有限公司提供的DN200球墨铸铁管,试件由

承管、插管、密封胶圈及密封堵板四部分组成,堵板上设有进出水口以及阀门。试件由两段管段通过承插接口连接而成,球墨铸铁管试件尺寸及测点布置如图1所示。考虑到实际场地与试验装置的限制,因此对试件长度进行了缩短加工,试件总长度为1.4 m,跨度1 m,两端各伸出支座200 mm。本文接口承插深度取10 cm,是因为本试验用到的管道试件是在工厂加工安装后运输到试验室进行试验的,而在安装运输的过程中,由于一些不可控因素

会导致承插接口一定程度上的脱开,因此预留间隙宽度会发生变化。为了消除该不利因素影响,本文采用直接将插口安装至底随后进行加固的做法,确保接口承插深度的准确性。这一做法也参考了钟紫蓝等^[3]在DN200的管道承插接口的力学性能试验中,接口承插深度取10 cm的做法。因此本文没有考虑预留间隙的影响,研究了接口在最大承插深度情况下的疲劳力学行为。承插接口尺寸如图2所示。

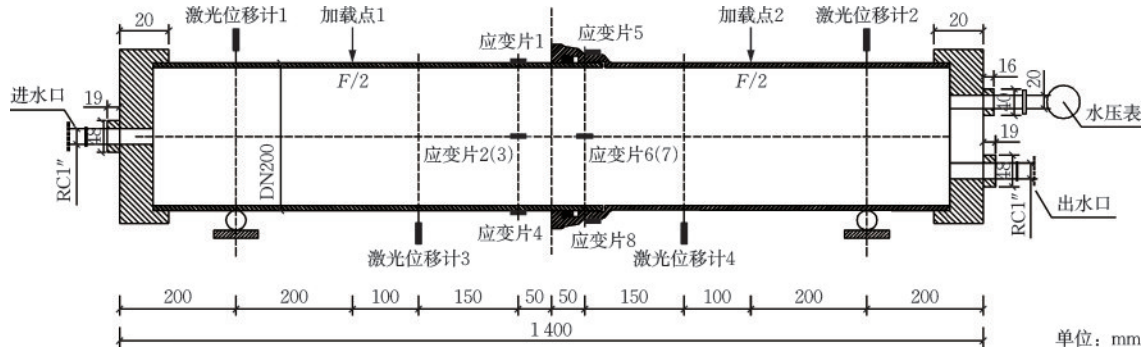


图1 球墨铸铁管试件尺寸及测点布置

Fig.1 Dimensions of ductile iron pipe specimens and sensor arrangement

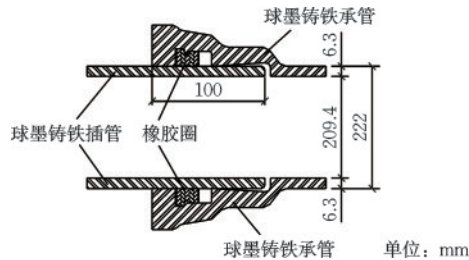


图2 管道承插接口尺寸

Fig.2 Dimensions of pipe socket joints

本试验采用的力学试验装置为同济大学工程结构性能演化试验室的MTS液压疲劳试验机(250 kN),采用单相自吸清水泵(型号为25ZDB-45-0.75)给管道内注水加压,试验中采用的传感器见表1。

试验前,将装配好的球墨铸铁管试件通过吊车

安装在疲劳试验机的两端支座上,之后将分配梁安装在管道上,疲劳试验机的作动器通过分配梁将荷载以两点加载的方式作用在管道上,试件安装的三维示意如图3所示。安装完成之后在管道接口和支座周围对称布置应变片和激光位移计,加载前试件整体安装示意如图4所示。最后,通过进水口往管道内部注水加压到规定内压后进行试验加载。

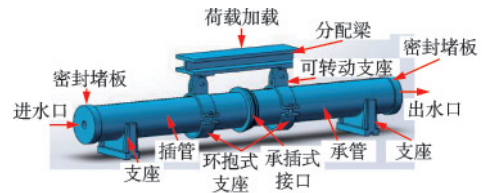


图3 球墨铸铁管试件安装三维示意

Fig.3 Three-dimensional schematic diagram of installation of ductile iron pipe specimens

表1 试验传感器
Table 1 Test sensors

名称	量程	数量	用途
电阻应变计	0~10 000 微应变	24	测量管身应变
激光位移计	-150~150 mm	4	测量管身位移
角位移计	0~360°	2	测量管身角度
水压表	0~1 MPa	2	测量管内水压
烧杯、量杯、量筒	0~5 000 mL	5	测量水量大小
多功能计时器	0~99分59秒	2	计时

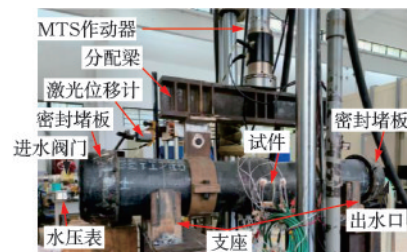


图4 加载前试件整体安装示意

Fig.4 Schematic diagram of installation of ductile iron pipe specimens before loading

1.2 加载制度

在疲劳加载前,首先对一根试件进行单调加载,获得球墨铸铁管承插接口的静力力学性能参数,为后面交通荷载作用下承插接口的力学响应计算提供参考。单调加载时,采用力控制加载,加载速率为0.1 kN/s,加载过程中,管内水压保持在0.2 MPa,管道承受竖向荷载和水压的共同作用,加载至管道接口发生严重漏水后停止加载。然后进行疲劳加载,为了模拟实际车辆荷载对管道接口的循环往复作用,本试验采用接口转角等效的原则进行加速疲劳试验,即试验条件下接口转角大小与实际车辆荷载作用下接口转角大小相等,而加载频率比实际车辆荷载作用频率快。本试验设计了两组疲劳加载工况(表2),表中疲劳荷载幅值计算方法如下:

$$F = 4M / (L - L_0) \quad (1)$$

式中, F 为荷载值,kN; M 为接口弯矩值,kN·m; L 为试件跨度,本文为1 m; L_0 为加载点1和加载点2之间的跨度(图1),本文为0.6 m。

表2 球墨铸铁管试件疲劳加载工况

Table 2 Fatigue loading conditions of ductile iron pipe specimens

试件 编号	疲劳荷载/kN			管内 水压/ MPa	加载终止条件
	上限 F_{max}	下限 F_{min}	幅值 F_a		
DIC-1	30	4	26	0.2	加载至接口漏水严重,管内水压降低到0
DIC-2	48	4	44	(±0.02)	

其中,接口弯矩值的计算方法详见本文第2.3节。在2.3节中利用ABAQUS软件计算给出了不同车辆荷载作用下球墨铸铁管承插接口的弯矩值,见表3。试件DIC-1和试件DIC-2的疲劳荷载上限值根据表3中的荷载Load-1和Load-2下的接口弯矩值计算得到,疲劳荷载下限值根据表3中的荷载Load-3下的接口弯矩值计算得到。疲劳加载采用力控制加载,荷载形式为正弦波,加载频率为10 Hz,疲劳加载制度示意如图5所示。

在渗漏开始后,用烧杯接收渗漏的水,以20秒为间隔,每次接1分钟,再用量筒、量杯读取渗流量,持续这样的操作直到管内水压下降到0。渗漏状态

表3 管道接口转角和弯矩计算值

Table 3 Calculated values of rotation angle and bending moment at pipe joints

荷载 工况	荷载	接口 转角/(°)	接口弯矩值/ (kN·m)
Load-1	内压0.2 MPa+小轿车	4.2	3.0
	轮压0.24 MPa+土荷载+自重		
Load-2	内压0.2 MPa+公交车	6.0	4.8
	轮压0.83 MPa+土荷载+自重		
Load-3	土荷载+自重	2.0	0.4

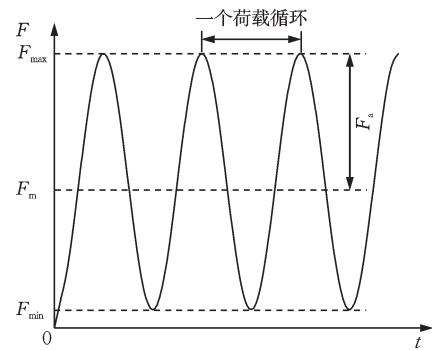


图5 疲劳试验加载制度示意

Fig.5 Schematic diagram of fatigue test loading conditions

用漏水速率来确定,见表4。当接口发生严重漏水,管内水压降低到0后停止加载。

表4 不同渗漏状态下的漏水速率

Table 4 Leakage rates under different leakage states

渗漏状态	漏水速率/(mL·s ⁻¹)
微漏	0~2
小漏	2~10
中漏	10~200
大漏	>200

1.3 接口测量方案

球墨铸铁管接口刚度小于管身刚度,受弯管道的变形主要集中在接口处,因此需要对接口变形进行测量。管道接口变形主要包括竖向位移和转角。因此在管道接口两侧的管段下方布置激光位移计测得管身的竖向位移,通过几何关系即可得到接口的转角大小。

由于变形主要集中在接口处,计算简图如图6所示。接口转角 θ 由两部分组成:插管转角 α 和承

管转角 β ,根据几何关系可以得到,接口的转角 θ 计算公式如下:

$$\sin\alpha = \frac{y_1}{L_1} = \frac{y_3}{L_1 + L_2} = \frac{y_3 - y_1}{L_2} \quad (2)$$

$$\sin\beta = \frac{y_2}{L_5} = \frac{y_4}{L_4 + L_5} = \frac{y_4 - y_2}{L_4} \quad (3)$$

$$\theta = \alpha + \beta \quad (4)$$

式中, y_1 、 y_2 分别为加载点1、加载点2的竖向位移,mm; y_3 、 y_4 分别为激光位移计3、激光位移计4的竖向位移,mm; α 、 β 分别为插管、承管的转角,(°); θ 为承插接口总转角,(°)。

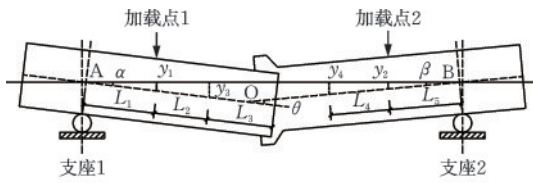


图6 转角计算简图

Fig.6 Schematic diagram of rotation angle calculation

2 交通荷载下管道承插式接口力学响应计算

本节通过承插接口的单调加载试验获得接口的静力力学性能参数,基于此参数建立有限元模型进行计算,其中车辆荷载模型采用实际车流量统计数据确定,最后得到交通荷载作用下承插接口的弯矩—转角关系,为后面的疲劳试验提供参考。

2.1 单调加载下承插接口力学性能

在单调加载初期,承管与插管互不接触,接口抗弯刚度完全由插管与承管内的橡胶圈之间的摩擦力提供,第一阶段抗弯刚度为 K_1 ,而当接口转角大于第一阶段接口转角上限 θ_1 时,插管与承管之间相互接触,管壁之间的摩擦会大大提高接口的抗弯刚度,第二阶段抗弯刚度为 K_2 ,且 K_2 远大于 K_1 。继续加载,直到管道发生严重漏水,此时接口转角为 θ_2 。图7给出了管道接口的弯矩—转角关系,接口的弯矩—转角曲线可以简化为双折线模型^[20],并可以给出 K_1 和 K_2 的值。管道承插接口的静力力学性能参数见表5。

在承插接口的单调加载试验中,空管在自重作用下,接口的初始转角为 2.1° ,注水后,接口的初始

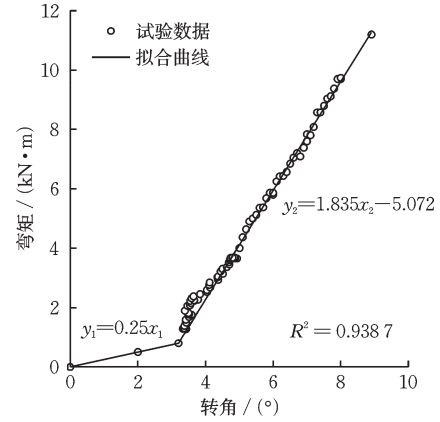


图7 单调加载下管道接口弯矩—转角曲线

Fig.7 Curves of bending moment and rotation angle at pipe joints under monotonic loading

表5 单调加载下管道承插接口力学性能参数

Table 5 Mechanical properties of pipe socket joints under monotonic loading

管径	转角 $\theta_1/(^\circ)$	渗漏转角 $\theta_2/(^\circ)$	最大弯矩/ (kN·m)	$K_1/(\text{N}\cdot\text{m}/(^\circ))$	$K_2/(\text{N}\cdot\text{m}/(^\circ))$
DN200	3.2	8.9	11.2	250.0	1 834.8

转角增大到 3.2° ,因此图7中接口抗弯的第一阶段仅捕捉到 2.1° 和 3.2° 两个点,线性拟合得到第一阶段的抗弯刚度为 $250.0 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$,段君峰^[16]通过试验拟合得到DN200球墨铸铁管柔性接口的第一阶段抗弯刚度为 $247.9 \text{ N}\cdot\text{m}/^\circ$,与本文结果十分接近,因此本文的结果具有一定的代表性。

2.2 交通荷载模型

根据调查^[21],城市道路中载重货车非常少,通行车辆中主要车型有小轿车、公交车和其他车型。其中小轿车为主要车型,所占比例约为70%~80%;公交车所占比例约为10%~20%,其它车型占比不到5%,因此可以忽略。

本文分析的主要车型为小轿车和公交车两种车型,根据相关车辆的技术质量参数和有关规范,主要车型的技术质量参数确定见表6。

表6 车辆模型技术质量参数

Table 6 Technical parameters of vehicle models

车型	总长/ mm	总宽/ mm	空载 质量/kg	满载 质量/kg	标准轮压/ MPa
小轿车	4 800	1 800	1 500	1 800	0.24
公交车	12 000	2 500	17 000	22 600	0.83

车辆荷载模型可以用车辆荷载概率密度函数来表示,大量研究表明,车重 x 服从对数正态分布^[22]:

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5)$$

式中, μ 和 σ 分别为车重对数的平均值和标准差。

基于上海市某城市道路的车流量数据统计整理得到车辆荷载模型的分布参数见表7。

表7 车辆荷载分布参数

Table 7 Distribution parameters of vehicle loads

车辆类型	分布参数	车重取值范围/吨	车辆比例 $p/\%$
小轿车	$\mu_1 = 1.625,$ $\sigma_1 = 0.279$	1.2~2.2	80
公交车	$\mu_2 = 19.71,$ $\sigma_2 = 3.691$	15~22	20

2.3 承插接口力学响应计算

承插接口是供水管网中十分常见的一种接口类型。在计算时,考虑到五点:(1)承插接口内部形状不规则,会导致网格数量多,网格质量差;(2)橡胶圈因为变形大,所以容易产生网格扭曲;(3)承插接口内部涉及大面积的接触关系,会导致模型的收敛性变差;(4)需要对承插接口进行装配预应力模拟;(5)计算时间。本文有限元计算是在疲劳试验前进行的,目的是为了得到合理的疲劳荷载幅值。在没有试验现象与试验结果作为依据的前提下,试验前直接做精细化有限元计算的结果不一定准确,而且受到网格划分,接触设置,预应力设置等因素影响,根据接口实际情况进行建模计算结果难以确保准确性。因此本文在进行计算时,采用弹簧对承插接口进行简化模拟^[23]。由于承插接口在剪切变形方面,变形能力较差,基本无横向错动,在简化模型中,设置接口两侧不产生剪切位移,因此本文采用轴向弹簧和弯曲弹簧对承插接口进行模拟,承插接口简化模型如图8所示。

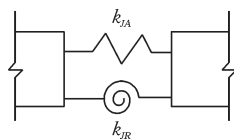


图8 承插接口简化模型

Fig.8 Simplified model of socket joint

采用ABAQUS软件对交通荷载作用下球墨铸铁管接口变形进行模拟。模型基本参数为:球墨铸铁管密度 $7\ 300\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $1.35 \times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 0.3,管外径 220 mm,壁厚 6.3 mm,管段总长度 1 500 mm,两段管段中间接口用两个弹簧模拟,轴向弹簧系数参考孙千伟^[23]通过试验得到的DN200球墨铸铁管接头轴向弹簧系数为 $3.48 \times 10^5\text{ N/m}$,弯曲弹簧的系数采用前面试验所确定的双折线模型;土体为三维固体模型,土体长、宽、高为 $1\ 500\text{ mm} \times 1\ 400\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$,土体的本构采用 Mohr-Coulomb 模型,土体参数依据《水利水电工程地质勘察规范》^[24](GB50487—2008)的附录E中给出的平均值:密度为 $2\ 000\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 10 MPa,泊松比 0.4,管顶埋置于地表下方 500 mm 处;轮胎大小为宽度 200 mm,长度 300 mm 的矩形,轮压均匀分布,车辆荷载的轮压分别取 0.24、0.83 MPa,重力加速度 g 取 9.8 m/s^2 ;管土相互作用主要包括法向和切向两个方向,在法向方向上采用ABAQUS中的“硬摩擦”,切向方向采用摩擦模型,摩擦系数采用刘全林等^[25]给出的经验法取值 $\mu = \tan\theta$,一般取 $\theta = 19^\circ$,则 $\mu = 0.35$,模型如图9所示。

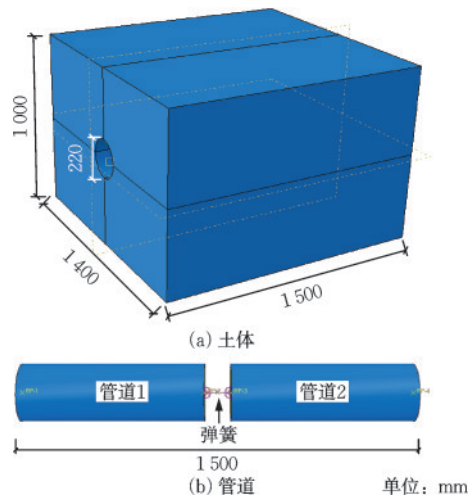


图9 球墨铸铁管和土体建模示意

Fig.9 Schematic diagram of modeling for ductile iron pipe and soil

本文的计算模型中土体的本构采用的是 Mohr-Coulomb 模型,因为 Mohr-Coulomb 模型可以较好地模拟土体塑性阶段的应力应变响应,而且模型中的参数易于测量,具有明确的物理意义。管道材料的本构采用的是弹性模型,因为本文主要研究的是接口处的转角变形,而且在车辆荷载作用下,

管道基本处于弹性阶段,因此管身采用弹性体假设符合实际情况。为了验证模型的合理性,计算了埋深 2.2 m 下管道在车辆荷载作用下接口转角值,计算结果为 3.2°,与王飞等^[26]实测的埋深 2.2 m 下灰口铸铁管接口附近的相对转角最大值 2.9°相比,计算结果误差在 10% 以内。本文采用了简化的模型进行计算,不仅可以节约成本,而且计算模型与实际工程进行了验证,证明了本文的计算模型有一定的合理性,可以为今后埋地球墨铸铁管承插接口的转角计算提供一定的参考。

计算 3 种荷载工况下球墨铸铁管接口处的弯矩以及最大转角,计算结果见表 3。通过有限元计算得到不同车辆荷载作用下接口处的弯矩值,利用式 (1) 可计算得到相应的疲劳荷载幅值。因此试件 DIC-1 和试件 DIC-2 设计的转角范围分别为 2.0°~4.2°和 2.0°~6.0°。而实际加载时,试件 DIC-1 的接口初始转角范围为 2.2°~3.8°,试件 DIC-2 的接口初始转角范围为 2.1°~5.5°。由于试验误差的存在,设计的转角范围与实际加载条件下转角范围有一定的差距,但是误差均小于 10%,在可以接受的范围内。

3 疲劳试验结果分析

3.1 疲劳加载下承插式接口疲劳力学性能

在试件的整个疲劳加载过程中,接口的转角在正弦荷载作用下呈现出正弦变化的规律,且接口的最大转角随着加载次数的增加而明显增大,直达到接口漏水的临界值时,接口开始出现漏水现象。在加载过程中,管内水压始终保持在 0.2 MPa,直到接口开始出现渗漏现象,管内水压逐渐降低,接口漏水过程有三个阶段:(1)首先接口顶部最先开始出现渗水,通过测量发现此时渗漏速率较低(渗漏速率 ≤ 2 mL/s),渗漏量较小,渗漏状态为微漏;(2)继续加载一段时间后,接口顶部和两侧均出现了漏水现象,渗漏速率在快速增加(2 mL/s $<$ 渗漏速率 ≤ 10 mL/s),漏水量也大大增加,渗漏状态达到小漏;(3)最后接口出现全截面漏水,漏水速率较快(渗漏速率 > 10 mL/s),水花呈喷射状,渗漏状态达到中漏,管内水压迅速下降到 0,接口转角也达到极限最大值,此时可以认为试件完全失效,停止加载。接口渗漏图如图 10 所示。

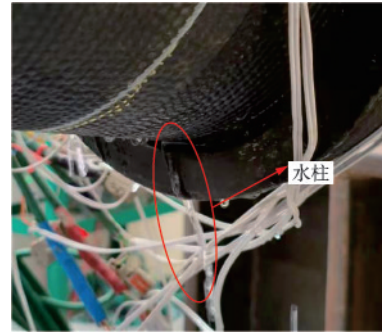


图 10 接口渗漏图

Fig.10 Photo of leakage at pipe joints

在疲劳加载初期,两组工况下的试件接口均有着良好的密封性,随着加载次数的增加,接口的最大转角明显增大。第一组试件 DIP-1 加载前管道接口的初始转角为 2.2°,接口拔出 2 cm,当加载次数达到 3 955 700 次时,接口开始出现漏水现象,此时漏水速率为 0.4 mL/s,渗漏状态为微漏,接口最大转角为 8.4°;继续加载到 4 883 110 次时,接口渗漏速率加快,漏水速率为 2.2 mL/s,渗漏状态为小漏,接口最大转角增加到 8.8°;最终加载到 4 913 220 次时,接口完全失效,此时漏水速率为 15.9 mL/s,渗漏状态为中漏,接口最大转角为 10.9°,接口最大拔出长度为 6.3 cm。第二组试件 DIP-2 加载前管道接口的初始转角为 2.1°,接口拔出 1.5 cm,当加载次数达到 55 200 次时,接口开始出现漏水现象,此时漏水速率为 0.3 mL/s,渗漏状态为微漏,接口最大转角为 8.1°;继续加载到 2 566 866 次时,接口渗漏速率加快,漏水速率为 3.4 mL/s,渗漏状态为小漏,接口最大转角增加到 9.3°;最终加载到 3 574 747 次时,接口完全失效,此时漏水速率为 23.9 mL/s,渗漏状态为中漏,接口最大转角为 11.8°。两组工况下接口的各个渗漏状态及其对应的加载次数和接口转角最大值见表 8。

表 8 承插接口的渗漏状态及加载次数

Table 8 Leakage states at pipe joints and number of cycles

试件编号	渗漏状态	加载次数	接口最大转角/(°)
DIP-1	微漏	3 955 700	8.4
	小漏	4 883 110	8.8
	中漏	4 913 220	10.9
DIP-2	微漏	55 200	8.1
	小漏	2 566 866	9.3
	中漏	3 574 747	11.8

从上文可以看出,接口最大转角是衡量接口是否失效的重要指标之一,两组试件接口的最大转角随循环次数均不断增大,而荷载幅值不变,说明接口的抗弯刚度在不断降低,如图11所示。从图中可以看出,两组试件呈现出相同的规律,接口最大转角随加载次数的变化大致可以分为三个阶段:①前期快速增长期,在疲劳加载的初期,接口的最大转角随着加载次数的增加而逐渐增大,此时接口密封性良好;②中期平稳期,接口的最大转角增大到一定值后趋于平稳,整体趋势还在增长,但是增长幅度较小,此时接口也没有出现漏水;③后期快速增长期,在疲劳加载后期,接口的转角到达临界值后又开始急剧增大,直到接口完全失效,此阶段还会伴随漏水现象出现。由于试件DIP-2的疲劳荷载幅值较大,因此接口最大转角始终大于DIP-1的接口转角,但是最后疲劳失效时,两组试件的接口最大转角值十分接近,分别为 10.9° 和 11.8° ,两者相差8%,可以认为两组试件极限最大转角基本相等,说明接口的极限最大转角与疲劳荷载幅值无关,对两组数据取平均值得到接口极限最大转角为 11.3° 。

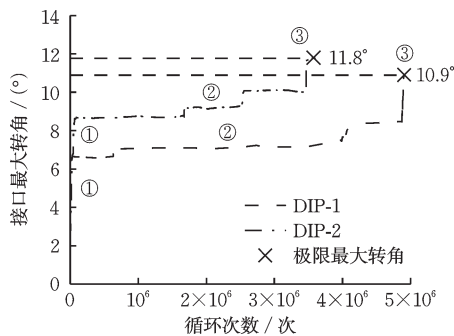


图11 接口最大转角随荷载循环次数变化曲线

Fig.11 Variation curves of maximum rotation angle at pipe joints with number of cycles

当渗漏状态为微漏时,第一组试件DIP-1与第二组试件DIP-2的加载次数差距较大可以从以下三点来解释:(1)第二组试件DIP-2的疲劳荷载幅值比第一组大,因此接口开始出现渗漏时的循环次数要比第一组少;(2)由于制作和安装的误差,两组试件接口的密封性能有一定差异,因此两组试件出现渗漏时的接口转角有一定的差距,但是从结果来看,第一组试件DIP-1出现微漏时,接口最大转角为 8.4° ,第二组试件DIP-2出现微漏时,接口最大转角为 8.1° ,两者十分接近,因此可以看出接口的渗漏状态主要取决于接口最大转角;(3)从图11中可以看

出,接口最大转角随加载次数变化的第一阶段为快速增长期,在这一阶段,接口的最大转角随着加载次数的增加而逐渐增大,而这个增长速度也与疲劳荷载幅值相关,疲劳荷载幅值越大,显然接口最大转角的增长速度也会更大,因此第二组试件DIP-2的接口出现微漏时的循环次数与第一组试件DIP-1有一定差距。

疲劳试验完成后对管道接口部分进行观察发现,承管管口边缘有轻微的磨损缺口,插管基本完好,只有轻微的磨损痕迹,但是承口内橡胶圈挤压破坏严重,胶圈整体发生了不可逆变形,如图12所示。由图12可见,管道接口的疲劳破坏与承口内密封的橡胶圈有密切联系,正是由于橡胶圈在疲劳荷载作用下出现了力学性能的退化,导致接口抗弯刚度的降低,使得接口最大转角不断增大,最后密封圈彻底失去密封性能导致接口发生渗漏,最终导致管道疲劳失效。

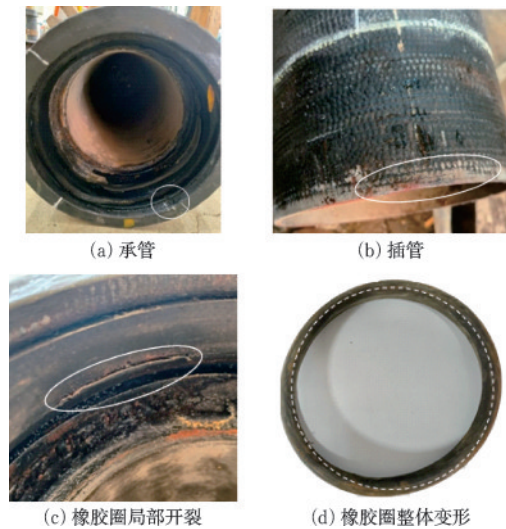


图12 接口破坏示意

Fig.12 Schematic diagram of pipe joint failure

3.2 车辆荷载累积作用下埋地管道疲劳寿命分析

埋地管道在运行期间,长期受到各种车辆荷载的循环往复作用,这些作用会使得管道某一部分发生损伤,随着时间的增长,管道的损伤会不断累积而最终导致管道发生累积损伤破坏。为了考虑不同车辆荷载对管道产生的累积损伤作用,需要用到疲劳累积损伤理论。A. Palmgren^[27]和M. A. Miner^[28]提出了线性累计损伤理论,该理论实用性高,计算简单,在各类工程领域都得到了广泛的应用。

Miner线性累积损伤理论认为,材料在各级应力下的疲劳损伤是独立的,且总损伤可以按线性形式累加起来,因此,在多种车辆荷载组合作用下,管道产生的总损伤为:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

式中, k 为车辆荷载种类; n_i 为第*i*种车辆荷载作用的循环次数; N_i 为第*i*种车辆荷载单独作用时的疲劳寿命。

假定疲劳荷载幅值与管道疲劳寿命服从下式:

$$(\Delta F)^m N = C \quad (7)$$

式中, ΔF 为疲劳荷载幅值,kN; N 为对应荷载幅值下管道发生疲劳破坏时的循环次数; m 、 C 为材料常数,可通过疲劳试验确定。

由前面的疲劳试验可知,小轿车和公交车分别单独作用时,管道疲劳寿命分别为 $N_1 = 4\,913\,220$, $N_2 = 3\,574\,747$,可以得到材料常数 $m = 0.6$ 、 $C = 3.52 \times 10^7$,管道疲劳荷载幅值与循环次数关系曲线如图13所示。

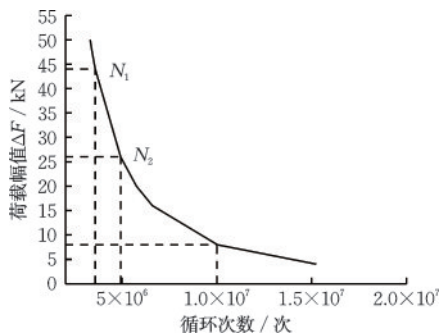


图13 疲劳荷载幅值与循环次数关系曲线

Fig.13 Relationship curve between fatigue load amplitude and number of cycles

根据损伤等效原理,等效车辆荷载幅值作用下产生的损伤为:

$$D_e = \frac{n_e}{N_e} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (8)$$

式中, D_e 为等效车辆荷载幅值作用下产生的损伤; n_e 为等效车辆荷载作用的次数; N_e 为等效车辆荷载单独作用时的疲劳寿命。

由式(7)、(8)可得,等效车辆荷载幅值 ΔF_e 为:

$$\Delta F_e = (C \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{N_i})^{1/m} \quad (9)$$

式中, ΔF_e 为等效车辆荷载幅值,kN; $p_i = n_i/n_e$ 为第*i*种车辆荷载的比例,且 $\sum_{i=1}^k p_i = 1$,其余参数同上。

由上述计算可知,埋地管道在多种车辆荷载组合作用时,采用式(9)计算可以得到等效车辆荷载幅值,然后由 $\Delta F-N$ 曲线可以得到相应幅值下的管道疲劳寿命。

以上海市某城市道路为例,每天车流量大约为4 000辆,管道使用年限50年,每辆车荷载按两次循环荷载计算,则50年内循环荷载次数为 $4\,000 \times 2 \times 365 \times 50 = 1.5 \times 10^8$ 次,车流量数据参考表7中小轿车和公交车的比例,小轿车占比为80%,公交车占比为20%,按式(9)计算得到两种车辆荷载组合作用下管道疲劳寿命为 4.6×10^6 次 $< 1.5 \times 10^8$ 次,所以管道结构很有可能在运行年限内提前发生疲劳失效。

4 结 论

供水管道在日常运行中受到车辆荷载的循环往复作用,接口的疲劳破坏是管道漏水的关键。本文基于实测的车辆荷载数据,计算了车辆荷载作用下球墨铸铁管承插接口的转角大小,在此基础上开展了承插接口的弯曲疲劳试验,研究结果表明:

(1)接口最大转角是衡量接口漏水的重要指标。本文给出了DN200的球墨铸铁管承插接口不同渗漏状态下接口的最大转角值:微漏时,接口最大转角为 $8.1^\circ \sim 8.4^\circ$,小漏时,接口最大转角为 $8.8^\circ \sim 9.3^\circ$,中漏时,接口最大转角为 $10.9^\circ \sim 11.8^\circ$,此阶段管道接口已经彻底丧失密封性能,可以认为管道失效。

(2)接口是管道的薄弱位置,管道接口的疲劳破坏与承口内的橡胶圈有密切联系。在疲劳荷载作用下,接口处的橡胶圈由于力学性能退化而导致接口抗弯刚度降低,使得接口转角不断增大,直到失去密封性,发生漏水现象。

(3)DN200的球墨铸铁管承插接口疲劳失效的极限最大转角为 11.3° ,随着加载次数的增加,管道接口最大转角逐渐增大,到达极限最大转角时,接口发生疲劳失效,且接口的极限最大转角与疲劳荷载幅值无关。

(4)小轿车和公交车单独作用下DN200的球墨铸铁管承插接口的疲劳寿命分别为 4.9×10^6 、 3.6×10^6 ,均在 10^8 以内,说明管道结构在50年运行期间内,很有可能提前发生疲劳失效。

(5)利用疲劳累积损伤理论,给出了多种车辆

荷载组合作用下,球墨铸铁管承插接口的疲劳寿命计算公式,为今后埋地管道承插接口的疲劳寿命计算提供参考。

参考文献:

- [1] 李杰. 生命线工程的研究进展与发展趋势[J]. 土木工程学报, 2006, 39(1):1-6, 37.
Li J. The progress in lifeline engineering researches[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(1):1-6, 37. (in Chinese)
- [2] 国家统计局. 《中国统计年鉴-2022》[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [3] 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 Z L, Wang S R, Du X L, 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)
- [4] 王丽萍, 张宛静, 赵帅, 等. 竖向荷载作用下承插式球墨铸铁供水管道接口破损试验与数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2):232-239.
Wang L P, Zhang W J, Zhao S, et al. Experiment and numerical simulation study on socket and spigot joint damage of ductile iron water supply pipeline under vertical loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2):232-239. (in Chinese)
- [5] 苟文锦. 车行道下方埋地管道的力学性状研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Gou W J. Study on mechanical characteristics of buried pipelines under the roadway[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [6] 邓学钧, 孙璐. 车辆—地面结构系统动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [7] 刘明. 长期循环荷载作用下埋地管道受荷特性及减荷措施研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
Liu M. Study on load characteristics and load reduction measures of buried pipeline under cyclic load[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [8] 吴小刚. 交通荷载作用下软土地基中管道的受力分析模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
Wu X G. Study on mechanical analysis model of pipelines in soft ground under traffic loads[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [9] 王直民. 交通荷载作用下埋地管道的力学性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Wang Z M. Study on mechanical behaviors of buried pipelines under traffic loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [10] 李新亮, 李素贞, 申永刚. 交通荷载作用下埋地管道应力分析与现场测试[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(11):1976-1982.
Li X L, Li S Z, Shen Y G. Stress analysis and field testing of buried pipeline under traffic load [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(11):1976-1982. (in Chinese)
- [11] 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 Y, Li G C, Li D Q, 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)
- [12] 李冠潮. 管道柔性接口轴向力学性能及功能性试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020.
Li G C. Experimental study on the axial mechanical properties and functional properties of flexible joints in pipelines[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] 韩阳, 张珂华, 段君峰, 等. 球墨铸铁给水管道柔性接口轴向拉拔试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(4):80-83.
Han Y, Zhang K H, Duan J F, et al. The pull-out test of ductile cast iron pipe with flexible joint [J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(4):80-83. (in Chinese)
- [14] 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 Z L, Zhang Y B, Li J Q, 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)
- [15] 李晓晓, 钟紫蓝, 侯本伟, 等. 大型球墨铸铁管承插式接口力学性能研究[J]. 特种结构, 2020, 37(4):47-55.
Li X X, Zhong Z L, Hou B W, et al. Study on mechanical behaviors of push-on joints of large-diameter ductile iron pipelines[J]. Special Structures, 2020, 37(4):47-55. (in Chinese)
- [16] 段君峰. 球墨铸铁管道胶圈柔性接口的力学性能试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011.
Duan J F. Experimental study on mechanical behavior of rubber gasketed joint with ductile cast iron pipe [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011. (in Chinese)

- [17] 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.
Duan J F, Han Y, Xue C X, et al. Bending test of rubber gasketed joint with ductile cast iron pipe[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(3): 103-106. (in Chinese)
- [18] 谢延江.循环荷载作用下软土地基中埋地管道动力响应研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
Xie Y J. Research on dynamic response of buried pipeline in soft soil foundation under cyclic loading[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021. (in Chinese)
- [19] 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):5.
Li G C, Han Y, Ren X Z. Experimental study on mechanical properties of socket type flexible joint of pipeline under reciprocating load[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2020, 29(1): 5. (in Chinese)
- [20] Li S, Wei C, Peng X. Safety monitoring of buried pipeline with socket joints subjected to ground deformation using MEMS inclinometers[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2019, 10(2): 04019008.
- [21] 张艳娟.城市道路交叉口车辆荷载特征[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(11):301-304.
Zhang Y J. Characteristics of vehicle load at urban road intersections[J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition), 2018, 14(11): 301-304. (in Chinese)
- [22] 王元清.基于WIM数据的某城市桥梁车辆荷载概率模型[J].公路,2019,64(7):155-159.
Wang Y Q. Probabilistic model of vehicle load on a city bridge based on WIM data[J]. Highway, 2019, 64(7): 155-159. (in Chinese)
- [23] 孙千伟.地下供水管网地震反应分析与抗震可靠度研究[D].上海:同济大学,2011.
Sun Q W. Seismic response analysis model and reliability analysis of buried water supply systems[D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese)
- [24] 水利水电工程地质勘察规范:GB 50487—2008[S].北京:中国计划出版社,2022.
- [25] 刘全林,杨敏.地理管与土相互作用分析模型及其参数确定[J].岩土力学,2004,25(5):728-731.
Lu Q L, Yang M. Analytical model and parameters determination of interaction between buried pipe and soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 728-731. (in Chinese)
- [26] 王飞,胡智翔,胡群芳,等.城市供水管网运行安全监测技术及应用[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(2):197-205,212.
Wang F, Hu Z X, Hu Q F, et al. Operation safety monitoring technology and its application in urban water supply network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(2): 197-205, 212. (in Chinese)
- [27] Palmgren A. Durability of ball bearings [J]. ZVDI, 1924, 68(14): 339-341.
- [28] Miner M A. Cumulative fatigue damage[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): A159-A164.

(本文编辑:池营营)