

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.20.002

PCCP管承插口力学性能与失效模式仿真分析

翟科杰¹, 方宏远^{2,3,4}, 张冲博^{2,3,4}, 李斌^{2,3,4}, 薛冰寒^{2,3,4}, 吴汉英^{2,3,4}

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275; 2. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 重大基础设施检测修复技术国家地方联合工程实验室, 河南 郑州 450001; 4. 水利与交通基础设施安全防护河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 预应力钢筒混凝土管(PCCP)承插口接头是易发生破坏的位置。为了研究承插口在发生相对转角时的受力特性与失效模式,基于非线性有限元建立了PCCP承插口精细化三维模型,结合承插口处各材料应力分布与橡胶圈的滑出失效分析,研究了相对转角、接头间隙和配合间隙对承插口的影响。结果表明,当相对转角达到 1.434° 时,承插口会因橡胶圈的完全滑出而失效,且承插口处混凝土最易发生拉裂破坏;配合间隙的增加会使橡胶圈滑出量增大,但有助于减小各材料的应力;接头间隙的增加不利于承插口接头保护。研究结果可为PCCP管道设计、施工与维护提供依据。

关键词: 预应力钢筒混凝土管; 承插口; 相对转角; 力学性能; 失效分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)20-0010-09

Mechanical Properties and Failure Mode Simulation Analysis of Joints in PCCP

ZHAI Ke-jie¹, FANG Hong-yuan^{2,3,4}, ZHANG Chong-bo^{2,3,4}, LI Bin^{2,3,4},
XUE Bing-han^{2,3,4}, WU Han-ying^{2,3,4}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. National Local Joint Engineering Laboratory of Major Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Zhengzhou 450001, China; 4. The Collaborative Innovation Center of Water Conservancy & Transportation Infrastructure Safety, Henan Province, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The joint of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) is the most vulnerable location. In order to study the mechanical response and failure mode of the joint when the relative angle occurs, a refined three-dimensional model of the PCCP joint was established based on nonlinear finite element method. Combining the stress distribution of each material at the joint and the slip-out failure analysis of the rubber, the effects of the relative angle, joint gap, and the fit clearance on the joint were studied. The results showed that when the relative angle reached 1.434° , the joint would fail due to the rubber slipping out completely, and the concrete at the joint was the most vulnerable to tensile cracking. The slip out of the rubber would increase with the development of fit clearance, but it would help reduce the stress of each material. The increase of the joint gap was not conducive to the protection of the joint. The

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0802400); 河南省重大科技专项(171100310100); 河南省高校科技创新人才计划项目(19HASTIT043); 郑州大学优秀青年教师发展基金项目(1621323001)
通信作者: 方宏远 E-mail: 1833719244@163.com

research results can provide basis for the design, construction and maintenance of PCCP.

Key words: prestressed concrete cylinder pipe (PCCP); joint; relative angle; mechanical response; failure analysis

1 研究背景

预应力钢筒混凝土管(PCCP)是由法国工程师邦纳(Aimee Bonna)于1893年发明的,其生产使用至今已有100多年历史。根据管道的结构形式分为内衬式预应力钢筒混凝土管(LCP)和埋置式预应力钢筒混凝土管(ECP)两类^[1-2];根据施工特点,又包含预应力钢筒混凝土顶管(JPCCP)^[3];根据预应力钢筋的类型,又衍生出钢筋缠绕钢筒混凝土压力管(BCCP)^[4]。PCCP具有承压能力高、抗渗性能好、适应地基能力强、抗震性能优良、工程造价和运行维护费用低、使用寿命长等诸多优点,被广泛应用于各类供水输水工程中。

由于不均匀沉降导致的承插口破坏是PCCP运行的安全隐患之一,如不能及时发现,可能引起爆管等安全事故,造成巨大的经济损失和社会影响。因此,阐明PCCP承插口结构的破坏机理,并将其应用到PCCP的生产设计、施工安装和运行维护的全生命周期中,对保障工程安全可靠运行、延长服役年限具有重要意义。

试验研究和有限元模拟是管道承插口研究的重要方法。孙立强等^[5]基于现场试验和数值计算分析了在软土地基上影响PCCP管线相对转角的关键因素,指出管道底部碎石垫层厚度、腰部以下砂垫层的厚度和压实度对管道承插口接头相对转角影响较大,并结合工程实际提出了在软土地基上控制PCCP承插口接头相对转角的措施。胡少伟等^[6]对BCCP开展了承插口力学性能试验研究,分析了地基沉降值与相对转角间的关系及承插口应变分布和变化规律,指出地基沉降对管道承插口的力学响应影响较大而对管身影响不明显。王成华等^[7]基于有限元建立了3节PCCP管道的局部超载模型,研究了超载大小、土体弹性模量、管道刚度、接口连接刚度和碎石垫层厚度对管道绝对沉降和差异沉降的影响,提出了降低管道绝对沉降和差异沉降的措施。Hajali等^[8-10]通过三维非线性有限元模型,在考虑承插口间相互作用情况下,研究了不同断丝位置(承口、插口和管身)和不同断丝数目(5、35、70和100根)对管道极限内压的影响。Balkaya等^[11]基

于ABAQUS有限元软件,考虑了承插口接头和脱空位置的影响,对埋地PVC管道接头及管身进行了应力和变性评估。

承插口理论研究对工程实际 also 具有重要的指导意义。宁靖华等^[12]结合工程实践介绍了PCCP承插口接头允许相对转角的两种计算方法,并建议应取两种方法计算结果的较小值作为工程应用的允许转角值。刘卿春等^[13]认为埋置式预应力钢筒混凝土管的插口环裂是由插口异型钢板与端部管芯混凝土之间产生滑移和脱离造成的,并提出可以通过在插口钢板内外焊接环向钢筋和在插口内侧混凝土中埋置纵筋的方法解决。姚宣德等^[14]以南水北调PCCP管道工程为背景,对管道漏水的原因进行了分析,提出以管线承插口接头最大相对转角和最大脱开值作为PCCP管道漏水的控制标准。Wang等^[15]针对刚性管节,利用解析解分析了其剪切与转角情况,并与有限元结果进行了对比。Karamitros等^[16-17]基于现有方法,运用有限元理论分析,对断层处理地管线应力进行了预测和研究。

上述成果在管道承插口研究方面都作出了很大贡献,但由于PCCP自重较大,很难对其开展多角度的试验研究,且目前对PCCP承插口研究不够精细,未能考虑橡胶圈、接头间隙和配合间隙等对承插口受力性能的影响。因此,笔者基于精细化PCCP承插口模型,研究接头间隙与配合间隙对承插口力学性能和相对转角特性的影响,并对橡胶圈的完全滑出失效进行分析。研究结果可为进一步了解PCCP承插口受力特性与失效模式提供依据。

2 有限元模型的建立

2.1 几何尺寸及单元类型

选取内径为2 600 mm的埋置式单胶圈PCCP建模。有效长度5 000 mm,砂浆保护层厚度32 mm,预应力钢丝直径7 mm,缠丝螺距23 mm,混凝土芯壁厚190 mm,钢筒厚2 mm,管身各层的几何参数如图1所示。承插口尺寸:承口深度 C 和插口长度 E 均为110 mm,接头间隙 J 为25 mm,承插口钢环的配合间隙 K 为1 mm,密封胶圈的截面为直径20 mm的圆,承插口的几何尺寸见图2。

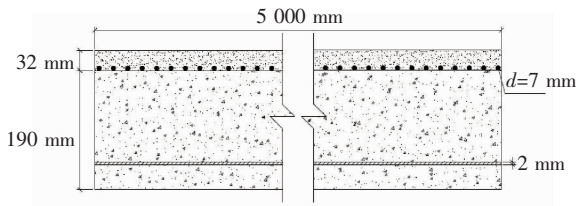


图1 管身结构尺寸

Fig. 1 Tube size of PCCP

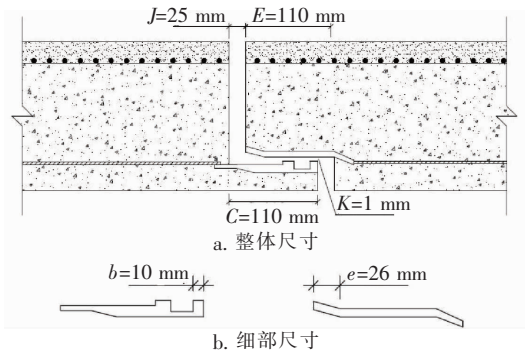


图2 承插口接头几何尺寸

Fig. 2 Joint size of PCCP

有限元计算模型包括砂浆保护层、混凝土芯、钢管、预应力钢丝、承口钢环、插口钢环和密封橡胶圈，模型如图3所示。其中，钢管属于薄壁结构，采用S4R壳单元进行模拟；钢丝采用T3D2三维杆单元进行模拟；砂浆层、混凝土芯、承插口钢环和橡胶圈均采用C3D8R三维实体单元进行模拟^[18]。砂浆保护层与混凝土芯间的约束设为“Tie”；通过“Embedded”将钢管嵌入混凝土芯中，将预应力钢丝嵌入砂浆保护层中^[19]。在结构复杂的承插口位置，承插口钢环与承插口混凝土间的约束设为“Tie”；假定橡胶圈在承插口钢环间不发生滚动，将橡胶圈的内侧面与插口钢环的胶槽面进行绑定约束；将橡胶圈的外侧面与承口钢环之间在法向设置硬接触，切向设置摩擦。

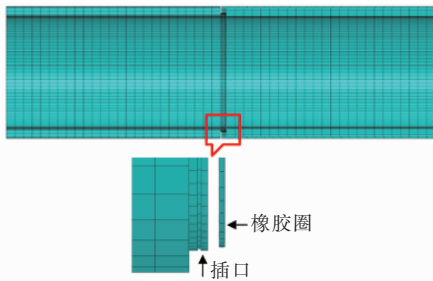


图3 承插口有限元模型

Fig. 3 Finite element model of PCCP joint

2.2 材料本构

管芯混凝土和砂浆保护层均采用混凝土塑性损伤模型(CDP)^[20-21]，其应力应变关系如图4所示。图4中， ε_c 、 ε_t 、 σ_c 和 σ_t 分别为材料的压应变、拉应变、压应力和拉应力； σ_{c0} 和 σ_{t0} 分别为最大弹性压缩和拉伸强度； σ_{cu} 为最大抗压强度； d_c 和 d_t 分别为材料压缩和拉伸损伤因子； ω_c 和 ω_t 分别为压缩和拉伸恢复因子； E_0 为初始弹性模量。

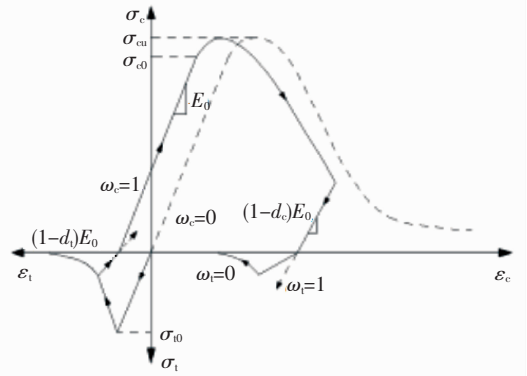


图4 CDP模型

Fig. 4 CDP model

钢管和钢环均采用钢板进行剪切然后焊接成型，属于低碳钢。在模型中对其材料本构进行简化，假定钢管和承插口钢环的应力应变关系为理想弹塑性^[22]。根据美国《预应力钢管混凝土压力管设计标准》(AWWA C 304—14)^[23]，预应力钢丝的弹塑性本构关系式表达如下：

$$\begin{cases} f_s = \varepsilon_s E_s & \varepsilon_s \leq f_{sg}/E_s \\ f_s = f_{su} [1 - (1 - 0.6133 \varepsilon_s E_s / f_{su})^{2.25}] & \varepsilon_s > f_{sg}/E_s \end{cases} \quad (1)$$

式中 f_s ——钢丝应力
 ε_s ——钢丝应变
 E_s ——钢丝的弹性模量
 f_{su} ——钢丝的抗拉强度
 f_{sg} ——钢丝的张拉控制应力

橡胶是一种超弹性材料，具有特殊的物理化学特性，其应力应变关系十分复杂。国内外学者提出了众多橡胶的本构模型，包括两大类：基于应变能函数的唯象模型和基于分子链网络的统计模型。ABAQUS中提供的超弹性材料本构模型有 Arruda - Boyce 模型、Marlow 模型、Mooney - Rivlin 模型、Neo - Hooke 模型、Ogden 模型和 Yeoh 模型等。

Mooney - Rivlin模型比其他模型具有更稳定的计算能力,在较小应变下具有较高的计算精度和迭代收敛性^[24-25]。相关标准^[26-27]规定:管道接头用橡胶密封圈可采用聚异戊二烯橡胶或其他合成橡胶,胶圈的尺寸和体积应与承插口钢环的胶槽尺寸和配合间隙相匹配。有限元模型中橡胶圈的材料本构选定为 Mooney - Rivlin 模型,其应变能密度函数模型:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{i,j} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (I_3^2 - 1)^{2k} \quad (2)$$

橡胶圈模型参数如表1所示。

表1 橡胶圈 Mooney - Rivlin 应变能函数参数

Tab.1 Parameters of rubber ring Mooney - Rivlin strain energy function

项目	C01/MPa	C10/MPa	D1/MPa ⁻¹
数值	0.43	0.07	29.4

有限元模型中其他材料参数如表2所示。

表2 材料参数

Tab.2 Material parameters

项 目	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性 模量/ MPa	泊松 比	抗压 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa
混凝土芯	2 500	34 500	0.2	42	2.64
砂浆保护层	2 350	24 165	0.2	36	3.49
钢丝	7 850	205 000	0.3	1 570	1 570
钢筒、钢环	7 850	206 000	0.3	215	215

2.3 荷载及边界条件的施加

PCCP数值模型计算中常用的钢丝预应力施加方式有等效荷载法和降温法^[28]。在此采用降温法对钢丝施加预应力,钢丝应力值与降温值关系如下:

$$\Delta t = \frac{F}{\alpha EA} \quad (3)$$

式中 Δt ——降温值

α ——预应力钢丝的线膨胀系数

E ——预应力钢丝的弹性模量

A ——预应力钢丝的截面面积

根据 PCCP 产生转角过程中的受力情况,分4步对模型进行荷载施加。在第1步中采用降温法给管道施加预应力,承口管和插口管两端为全固定约束;第2步和第3步模拟承插口安装,在第2步中向安装在插口钢环内的橡胶圈施加径向位移,对橡胶圈进行压缩,在第3步中激活橡胶圈与承口钢环的接触,并取消上一步中施加的径向位移,至此承插口安装模拟完成;在第4步中取消插口管管端的固定

约束并施加竖向位移使承插口接头产生相对转角。

3 结果分析

橡胶密封圈是柔性材料,主要用于密封,不能传递过大的压力,相对转角不会导致承插口接头过大的变形^[6]。因此,本研究主要针对承插口接头产生相对转角过程中,橡胶圈发生的滑移和承插口处材料应力分布及变化进行分析。

3.1 相对转角对承插口力学性能及失效的影响

只对插口管管端施加方向向下的竖向位移荷载,使管节处产生相对转角。通过改变竖向位移 h 的大小来控制接头相对转角的大小。承口管管端由于边界条件设置为全固定,其竖向位移为0。用插口管的转角值来表征管道接头的相对转角,具体工况设计如表3所示。

表3 不同工况下管道接头相对转角

Tab.3 Relative angles of joints under different cases

工况	管端位移 h /mm	接头相对转角值 θ /(°)
1	-10	0.105
2	-20	0.216
3	-40	0.439
4	-60	0.662
5	-80	0.883
6	-100	1.104
7	-130	1.434
8	-150	1.653

为便于描述与理解,定义环向路径的管顶为0°,并沿顺时针方向角度依次增大,即0°(360°)和180°分别为竖直方向管顶和管底位置;90°和270°则为水平方向管道两侧位置。模拟结果发现,承插口混凝土整体受拉,插口混凝土最大主应力较承口处混凝土大,且最大主应力的最大值位于插口混凝土根部。插口处混凝土最大主应力环向分布见图5。

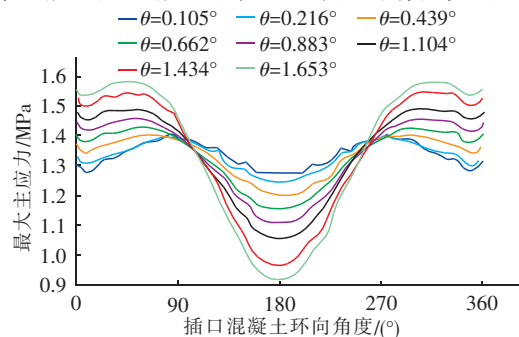


图5 插口混凝土环向最大主应力分布

Fig.5 Circumferential maximum principal stress of concrete

随着承插口接头相对转角的增大,插口混凝土最大主应力的最大值逐渐增大,当相对转角达到 1.653° 时,最大主应力的最大值为 1.59 MPa ,管芯混凝土的抗拉强度为 2.64 MPa ,尚未达到极限抗拉强度。

各相对转角下钢丝的应力分布如图6所示。由图6可见,预应力钢丝的应力最大值位于管侧(90° 和 270°)位置,随着接头相对转角的增加预应力钢丝的环向应力在管顶(0°)和管底(180°)位置减小,在管两侧位置(90° 和 270°)增大,但应力变化量很小。在管道接头相对转角值从 0.105° 增大至 1.635° 的过程中,预应力钢丝应力最大值从 1102.49 MPa 增加至 1104.74 MPa ,其绝对增加值为 2.25 MPa ,相对增量则仅为 0.20% 。这说明在接头相对转角增大过程中预应力钢丝的应力变化不大,接头发生转角对承插口处的预应力钢丝影响很小;在各工况下钢丝的应力最大值为 1104.74 MPa ,而其极限抗拉强度为 1570 MPa ,钢丝应力仍有很大的安全储备。

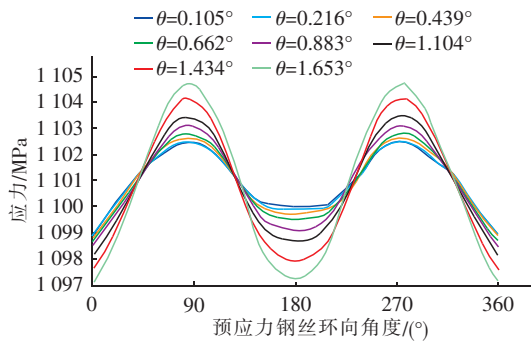


图6 预应力钢丝环向应力分布

Fig. 6 Circumferential stress of prestressed steel wires

不同接头相对转角下,插口管和承口管中的钢筒在接头位置处的应力均比管身位置处的应力大。插口管钢筒在不同相对转角下的环向应力分布如图7所示。可见,在相对转角较小时,钢筒的应力分布相对比较均匀;随着相对转角的增大,钢筒管底处的应力迅速增加且明显大于其他位置。在转角增大过程中钢筒的最大应力值为 57.48 MPa ,远小于其屈服强度 215 MPa ,可知钢筒在管道发生转角时不易发生屈服破坏。

不同相对转角下,插口钢环应力在管道两侧附近最大,其应力分布如图8所示。可见,应力随相对转角的变化趋势与钢丝相似。在相对转角增大过程

中,钢环在两侧(90° 和 270°)位置的应力逐渐增大,而在管顶(0°)和管底(180°)位置附近的应力逐渐减小。在各转角工况下钢环的最大应力值为 38.04 MPa ,远小于其屈服强度 215 MPa 。

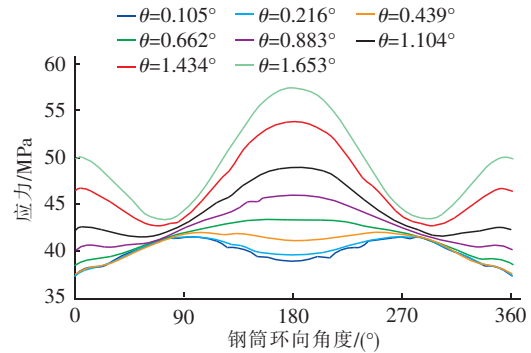


图7 钢筒环向应力分布

Fig. 7 Circumferential stress of steel cylinder

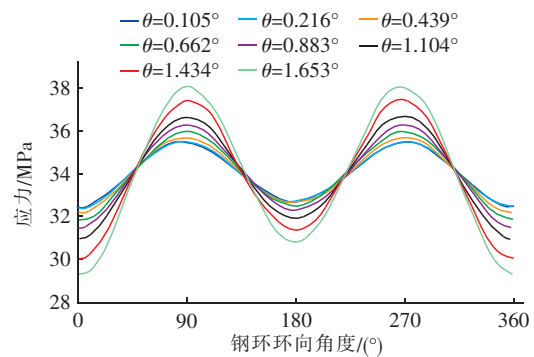


图8 钢环应力分布

Fig. 8 Stress of steel ring

管道承插口接头发生相对转角时,承口管和插口管之间的接头间隙增大,密封橡胶圈会随着插口钢环向外移动滑出,当橡胶圈被移出承口钢环的工作面时,会彻底失去对接头的密封作用,承插口接头完全失效^[12],如图9所示。因此,定义胶圈极限滑出量以便对失效进行评价分析。由几何关系可得:

$$L_w = C - J - e - b \quad (4)$$

式中 L_w ——橡胶圈极限滑出量

e ——承口钢环外瓣边缘长度

b ——插口钢环边缘宽

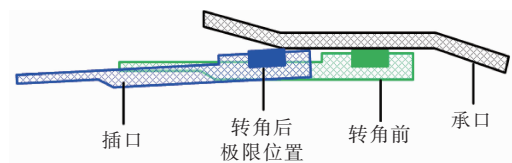


图9 承插口转角失效示意

Fig. 9 Schematic diagram of joint failure

密封橡胶圈的滑出量可以由橡胶圈和承口钢环的相对轴向位移进行计算,各相对转角下橡胶圈轴向位移如图10所示。可见,相对转角较小时橡胶圈的轴向位移很小,随着转角增大,在环向顶部位置(0°)橡胶圈向承口外移动,在底部位置(180°)向承口内移动;顶部位置(0°)的轴向外移量最大,随着承插口相对转角的增大,橡胶圈会先在顶部位置滑出承口钢环,而承口钢环几乎不发生位移,结合图8得出胶圈最大滑出量如表4所示。可见,当承插口相对转角达到 1.434° 时,密封胶圈在顶部位置的滑出量为49.02 mm,超出了该型管胶圈的极限滑出量,胶圈在局部位置被完全移出承口钢环,承插口接头发生失效破坏。

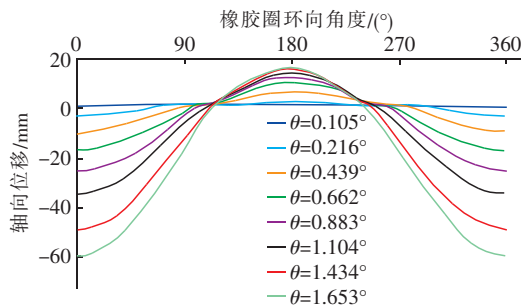


图10 橡胶圈轴向位移

Fig. 10 Axial displacement of rubber ring

表4 不同相对转角下橡胶圈最大滑出量

Tab. 4 Maximum displacement of rubber ring under different relative angle

相对转角值/(°)	橡胶圈滑出量/mm
0.105	0.17
0.216	2.33
0.439	9.18
0.662	16.68
0.883	24.98
1.104	34.17
1.434	49.02
1.653	59.44

3.2 配合间隙对承插口力学性能及失效的影响

以配合间隙为变量研究其对承插口力学性能的影响。当相对转角为 1.104° ,接头间隙为25 mm,配合间隙 K 分别为1、2和3 mm时承插口各材料应力变化情况如图11所示。可见,随着配合间隙的增大,各材料应力逐渐减小,这是由于随着配合间隙的增加,橡胶圈受挤压程度减小,进而导致承插口处应力减小所致。此外,钢丝和钢筒减小幅度不大,而混

凝土和钢环应力减小较为明显。

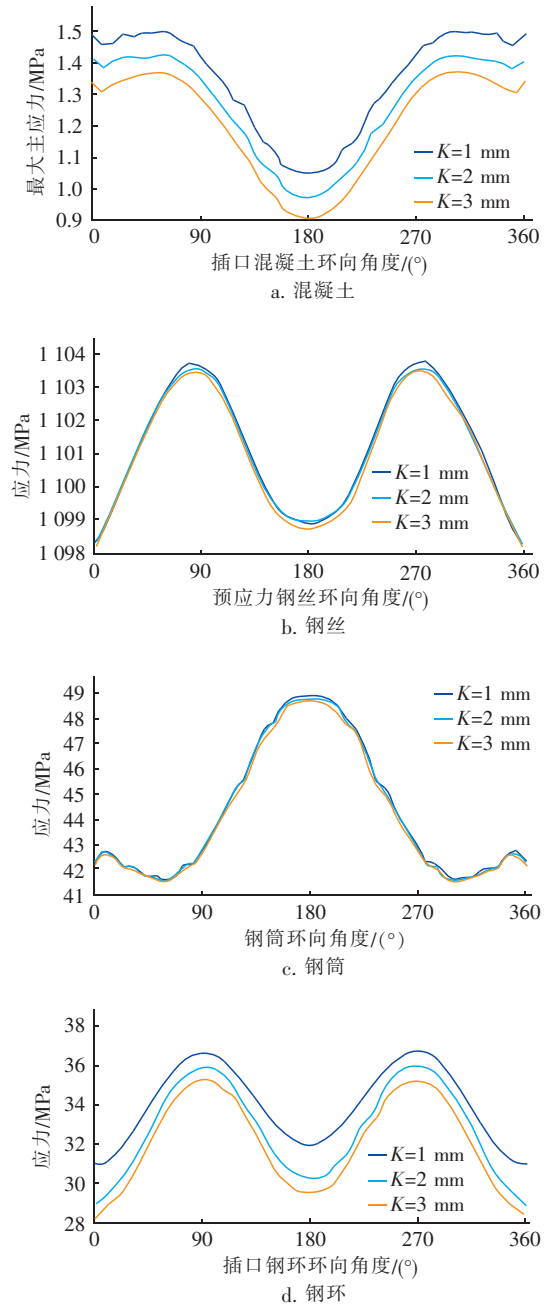


图11 不同配合间隙下插口各材料应力分布

Fig. 11 Stress of each material under different fit clearance

图12是不同配合间隙下橡胶圈轴向位移。可见,随配合间隙的增大,橡胶圈轴向位移逐渐增加,且橡胶圈最大位移发生在管顶位置。当承插口钢环配合间隙为1、2和3 mm时,橡胶圈的最大滑出量分别为34.16、38.32和43.10 mm。这说明配合间隙的增大会使橡胶圈的滑出量增大,不利于承插口接头的保护。

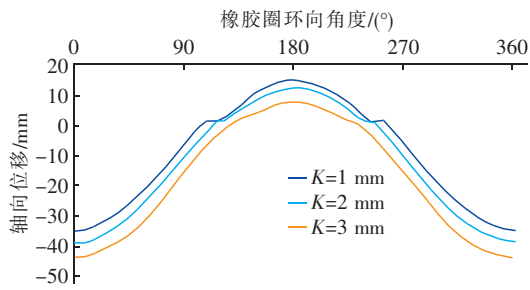
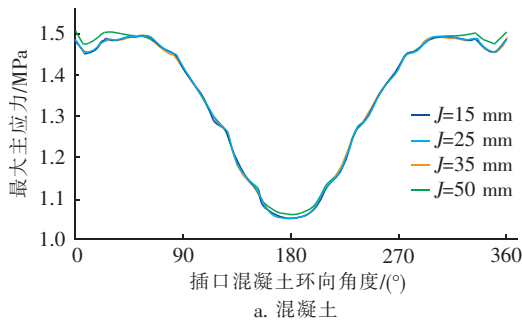


图12 不同配合间隙下橡胶圈轴向位移

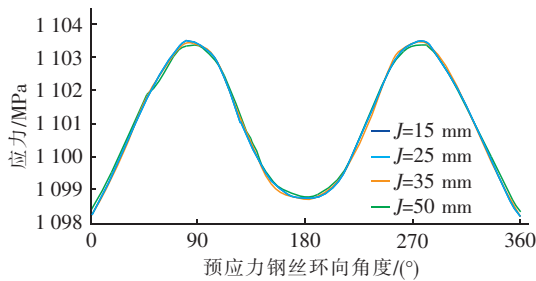
Fig. 12 Axial displacement of rubber ring under different fit clearance

3.3 接头间隙对承插口力学性能的影响

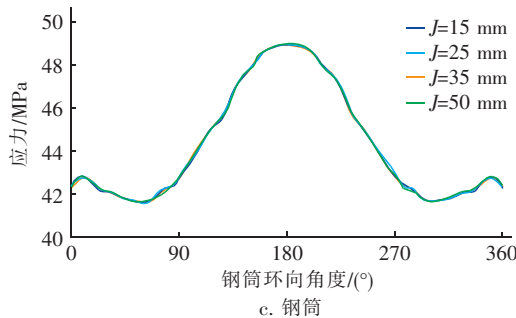
为了研究接头间隙对承插口转角性能的影响,对相对转角为 1.104° ,配合间隙为1 mm,接头间隙分别为15、25、35和50 mm的模型进行计算研究。不同接头间隙下承插口各材料应力分布见图13。可见,承插口处各材料应力基本不随接头间隙的变化而变化,即接头间隙对承插口力学性能影响很小。



a. 混凝土



b. 钢丝



c. 钢筒

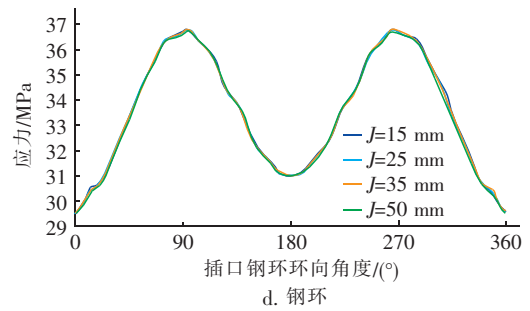


图13 不同接头间隙下承插口处各材料应力

Fig. 13 Stress of each material under different joining clearance

图14为不同接头间隙下的橡胶圈轴向位移。可见,接头间隙的变化对橡胶圈轴向位移影响很小,但当接头间隙增大至50 mm时橡胶圈的轴向位移增大略有显著。在接头间隙为15、25、35和50 mm时,对应的橡胶圈最大滑出量分别为34.16、34.47、34.49和36.26 mm,变化不大。而此时橡胶圈的极限滑出量分别为57、47、37和22 mm(见图15),呈现明显下降趋势。如图15所示,随着接头间隙的增加,橡胶圈的计算滑出量略有增加,但橡胶圈的极限滑出量明显变小。在相对转角为 1.104° 时,接头间隙为50 mm的承插口,密封胶圈的计算滑出量已经远远超过其极限滑出量,说明橡胶圈局部位置已经完全从承口钢环中移出,承插口接头完全失效。由此可见,接头间隙的增大不利于承插口的保护。

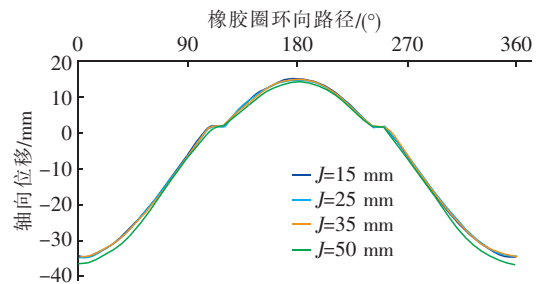


图14 橡胶圈轴向位移

Fig. 14 Axial displacement of rubber ring

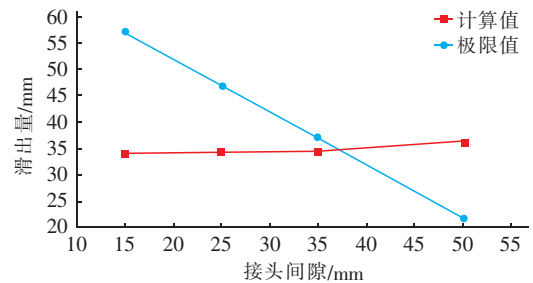


图15 橡胶圈滑出量计算值与极限值

Fig. 15 Calculation and limit values of rubber ring displacement

4 结论

基于非线性有限元软件建立了PCCP承插口相对转角的精细化三维模型,根据数值计算结果分析了承插口在发生相对转角时的力学响应,研究了相对转角、接头间隙和配合间隙对承插口处材料应力的影响,对橡胶圈滑出失效进行了分析。主要得出如下结论:

① 相对转角对钢筒和钢环应力影响较大,对钢丝应力影响较小,且此三者皆有较大安全冗余,不易发生破坏。混凝土最大拉应力出现在插口混凝土根部管顶附近,易发生拉裂破坏。

② 接头间隙25 mm、配合间隙1 mm情况下,当相对转角达到 1.434° 时,承插口接头完全失效。

③ 适当增加配合间隙有助于减小承插口转角过程中所受的约束,承插口处各材料的应力会有不同程度的降低,但橡胶圈滑出量会有所增大。

④ 接头间隙的增加对承插口处各材料应力影响不大,但会降低橡胶圈的极限滑出值,不利于承插口接头保护。

参考文献:

- [1] GB/T 19685—2017, 预应力钢筒混凝土管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
GB/T 19685—2017, Prestressed Concrete Cylinder Pipe [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018 (in Chinese).
- [2] AWWA C 301—07, Prestressed Concrete Pressure Pipe, Steel—Cylinder Type[S]. USA: AWWA, 2007.
- [3] Zhang Y, Yan Z, Zhu H, *et al.* Experimental study on the structural behaviors of jacking prestressed concrete cylinder pipe[J]. Tunn Undergr Space Technol, 2018, 73: 60—70.
- [4] Hu S, Sun Y, Xue X, *et al.* Calculation model for bar-wrapping during prestressing of an embedded bar-wrapped cylinder concrete pressure pipe[J]. Thin Wall Struct, 2019, 139: 39—45.
- [5] 孙立强, 张京京, 李恒, 等. 软土地基上影响预应力钢筒混凝土管相对转角关键因素研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊): 293—298.
Sun Liqiang, Zhang Jingjing, Li Heng, *et al.* Research on key factors influencing relative angle of prestressed concrete cylinder pipe in soft soil foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S): 293—298 (in Chinese).
- [6] 胡少伟, 薛翔, 孙岳阳, 等. 地基沉降对BCCP接口力学性能影响的试验研究[J]. 人民长江, 2018, 49(11): 91—96.
Hu Shaowei, Xue Xiang, Sun Yueyang, *et al.* Experimental study on mechanical properties of BCCP joint under foundation settlement[J]. Yangtze River, 2018, 49(11): 91—96 (in Chinese).
- [7] 王成华, 尹书辉. 超载作用下PCCP管沉降性状三维有限元参数分析[J]. 建筑科学, 2012, 28(增刊): 29—32.
Wang Chenghua, Yin Shuhui. Three-dimensional finite-element analysis of PCCP under overloading[J]. Building Science, 2012, 28(S): 29—32 (in Chinese).
- [8] Hajali M, Alavinasab A, Shdid C A. Structural performance of buried prestressed concrete cylinder pipes with harnessed joints interaction using numerical modeling[J]. Tunn Undergr Space Technol, 2016, 51: 11—19.
- [9] Hajali M, Alavinasab A, Shdid C A. Effect of the location of broken wire wraps on the failure pressure of prestressed concrete cylinder pipes[J]. Struct Concr, 2015, 16(2): 297—303.
- [10] Hajali M, Alavinasab A, Shdid C A. Effect of the number of broken wire wraps on the structural performance of PCCP with full interaction at the gasket joint[J]. J Pipeline Syst Eng, 2016, 7(2): 1—8.
- [11] Balkaya M, Moore I D, Saglam A. Study of non-uniform bedding due to voids under jointed PVC water distribution pipes[J]. Geotext Geomembr, 2012, 34: 39—50.
- [12] 宁靖华, 崔卫祥, 王乃锋. 预应力钢筒混凝土管接头允许相对转角的计算[J]. 混凝土与水泥制品, 2005(4): 23—25.
Ning Jinghua, Cui Weixiang, Wang Naifeng. Calculation of allowable relative angle of prestressed cylinder concrete pipe joints[J]. China Concrete and Cement Products, 2005(4): 23—25 (in Chinese).
- [13] 刘卿春, 张建, 潘卫国. 埋置式预应力钢筒混凝土管插口环裂的预防[J]. 混凝土与水泥制品, 2006(1): 22—23.
Liu Qingchun, Zhang Jian, Pan Weiguo. Prevention of ring cracks in joints of embedded prestressed cylinder concrete pipe[J]. China Concrete and Cement Products, 2006(1): 22—23 (in Chinese).
- [14] 姚宣德, 石维新, 王东黎. 南水北调大口径PCCP管道漏水风险分析[J]. 水利水电技术, 2009, 40(7):

- 66 – 69.
- Yao Xuande, Shi Weixin, Wang Dongli. Analysis on leakage risk of large diameter PCCP pipeline for South-to-North Water Transfer Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40 (7) : 66 – 69 (in Chinese).
- [15] Wang Y, Moore I D. Simplified design model for rigid pipe joints based on the two-pipe approximation [J]. Can Geotech J, 2015, 52 (5) : 626 – 637.
- [16] Karamitros D K, Bouckovalas G D, Kouretzis G P. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings [J]. Soil Dyn Earthq Eng, 2007, 27 (3) : 200 – 211.
- [17] 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 Dyn Earthq Eng, 2011, 31 (11) : 1452 – 1464.
- [18] 王复明, 方宏远, 李斌, 等. 交通荷载作用下埋地承插口排水管道动力响应分析 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (12) : 2274 – 2280.
- Wang Fuming, Fang Hongyuan, Li Bin, *et al.* Dynamic response analysis of drainage pipes with gasketed bell and spigot joints subjected to traffic loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (12) : 2274 – 2280 (in Chinese).
- [19] Zhai K, Fang H, Fu B, *et al.* Mechanical response of externally bonded CFRP on repair of PCCPs with broken wires under internal water pressure [J]. Constr Build Mater, 2020, 239 : 117878.
- [20] Lee J, Fenves G. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. J Eng Mech, 1998, 124 (8) : 892 – 900.
- [21] Li B, Fang H, He H, *et al.* Numerical simulation and full-scale test on dynamic response of corroded concrete pipelines under multi-field coupling [J]. Constr Build Mater, 2019, 200 : 368 – 386.
- [22] Hu B, Fang H, Wang F, *et al.* Full-scale test and numerical simulation study on load-carrying capacity of prestressed concrete cylinder pipe (PCCP) with broken wires under internal water pressure [J]. Eng Fail Anal, 2019, 104 : 513 – 530.
- [23] AWWA C 304 – 14, Design of Prestressed Concrete Cylinder Pipe [S]. USA: AWWA, 2014.
- [24] 高海东, 赵涛, 马胜利, 等. 高压条件下钢顶管管节密封性试验及数值模拟研究 [J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (2) : 148 – 154.
- Gao Haidong, Zhao Tao, Ma Shengli, *et al.* Sealing test and numerical simulation for steel jacking pipe joint under high water pressure [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52 (2) : 148 – 154 (in Chinese).
- [25] 陈侃, 沈景凤, 余关仁, 等. 轨道用橡胶扣件 Mooney – Rivlin 模型参数确定及压缩变形的有限元模拟 [J]. 机械工程材料, 2016, 40 (4) : 89 – 92.
- Chen Kan, Shen Jingfeng, Yu Guanren, *et al.* Parameter determination of Mooney-Rivlin model and finite element simulation of the compression deformation of rubber rail fastener [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2016, 40 (4) : 89 – 92 (in Chinese).
- [26] JC/T 749—2010, 预应力与自应力混凝土管用橡胶密封圈试验方法 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2011.
- JC/T 749 – 2010, Standard Methods of Testing Rubber Gasket Ring of Prestressed and Self-Stressing Concrete Pipe [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2011 (in Chinese).
- [27] JC/T 748—2010, 预应力与自应力混凝土管用橡胶密封圈 [S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2011.
- JC/T 748 – 2010, Rubber Gasket Ring of Prestressed and Self-Stressing Concrete Pipe [S]. Beijing: China Building Materials Press, 2011 (in Chinese).
- [28] Xiong H, Li P, Li Q. FE model for simulating wire-wrapping during prestressing of an embedded prestressed concrete cylinder pipe [J]. Simul Model Pract Theory, 2010, 18 (5) : 624 – 636.



作者简介: 翟科杰 (1991 –), 男, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事管道受力机理方面研究。

E – mail: zhaikj@mail2.sysu.edu.cn

收稿日期: 2020 – 06 – 10