

地基对预制综合管廊接头剪切变形及破坏特征的影响

张 朝^{1,2}, 赵峥嵘^{1,2}, 许有俊^{1,2}, 聂绪致^{1,2}

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 内蒙古自治区高等学校城市地下工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:为获得不同地基条件下预制综合管廊接头的剪切变形规律及破坏特征, 本文综合考虑管廊接头构造特征与地基的影响, 通过模型试验, 揭示地基条件对管廊接头抗剪性能的影响规律。研究表明: 在砾砂、粉质黏土、黏土地基下, 管廊承受剪切荷载时, 带连接件预制综合管廊的承插式接头均具有较好的延性, 能够满足使用要求; 当管廊承受相同荷载时, 随着地基刚度的增大, 管节的错台量会减小, 但接头的破坏范围扩大, 破坏更严重, 最终接头损伤区域约占管廊整体的 15%; 接头的承口端比插口端破坏严重, 倒角位置、螺栓孔附近及顶板与底板处的裂缝最为集中, 建议对这些位置进行局部加强; 随着错台量的增大, 纵向连接件逐渐成为接头抵抗剪切变形的主要受力构件, 在提高接头抗剪能力及接头整体性方面发挥了重要作用。

关键词:桥梁与隧道工程; 预制综合管廊; 接头; 模型试验; 抗剪性能

中图分类号:U451; U459.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)10-3262-12

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231438

Shear deformation and failure characteristics of precast utility tunnel joints by foundation

ZHANG Chao^{1,2}, ZHAO Zheng-rong^{1,2}, XU You-jun^{1,2}, NIE Xu-zhi^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
2. Research Center of Urban Underground Engineering at Universities of Inner Mongolia, Baotou 014010, China)

Abstract: In order to obtain the shear deformation law and failure characteristics of precast utility tunnel joints under different foundations, this paper comprehensively considers the influence of the structural characteristics of utility tunnel joints and the foundation, and reveals the influence of foundation conditions on the shear performance of utility tunnel joints through model tests. The results show that the socket joints of the precast utility tunnel with connectors have good ductility and can meet the requirements of use when the utility tunnel is subjected to shear load under gravelly sand, silty clay and clay foundations. When the utility tunnel bears the same load, with the increase of the foundation stiffness, the dislocation of the utility tunnel will decrease, but the damage range of the joint will expand and the damage will be more serious, the final joint damage area accounts for about 15 % of the whole utility tunnel. The bearing end of the joint

收稿日期: 2023-12-25.

基金项目: 内蒙古自然科学基金项目(2021BS05013); 内蒙古自治区科技成果转化下划资金项目(NM2019BT067).

作者简介: 张朝(1991-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 隧道、地下工程. E-mail: z_dynasty@126.com

is more seriously damaged than the socket end, and the cracks in the chamfer position, near the bolt hole and at the top and the bottom are the most concentrated. It is recommended to strengthen the above positions locally. With the increase of dislocation, the longitudinal connector has gradually become the main force component of the joint to resist shear deformation, which plays an important role in improving the shear capacity of the joint and the integrity of the joint.

Key words: bridge and tunnel engineering; precast utility tunnel; joint; model test; shear performance

0 引 言

目前,我国地下综合管廊建设的总体长度已在 20 万 km 以上。地下综合管廊将城市各类管线整合集中,能够有效解决“空中蜘蛛网”、“拉链马路”等问题^[1]。常见的综合管廊施工方法主要有现浇法与预制法两种^[2]。随着我国新型城镇化战略的稳步推进,预制综合管廊以其特有的优势被广泛应用^[3,4]。然而,预制管廊接头是管廊的薄弱部位,其刚度比主体结构低,邻近工程扰动或地基不均匀沉降极易使接头产生张开或错台变形^[5,6],严重威胁综合管廊自身结构安全和正常使用。

迄今,国内外学者针对预制综合管廊接头的力学性能开展了一些研究。胡翔等^[7]对预制预应力综合管廊接头进行抗弯试验,揭示了弯曲荷载作用下管廊接头的受力过程及破坏形态;闫鑫雨等^[8]通过分片预制装配式管廊接头的抗弯和抗剪试验,研究了管廊接头刚度的变化规律;王雪亮等^[9]根据预制预应力综合管廊接头抗弯试验结果,建立力学模型,推导出接头抗弯刚度的解析式;付伟庆等^[10]对预应力钢棒连接的足尺管廊进行接头抗弯试验,并结合数值模拟分析接头受力性能的影响因素;Wang 等^[11]建立了高强螺栓连接的预制综合管廊接头有限元模型,结合理论推导对影响接头抗弯刚度的因素进行分析;凌同华等^[12,13]通过建立预制拼装综合管廊-土三维纵向数值模型,研究预制拼装综合管廊节段在剪切荷载下承插式接头的力学性能;陈小赞等^[14]考虑地层对管廊的影响,建立了企口型、平口型及剪力键型的管廊接头模型,研究这 3 种接头的力学特性;王鹏宇等^[15]建立了接头的力学模型,并将其与数值模拟结果进行对比,提出了管廊横向接头抗弯刚度的取值方法。

现有文献主要集中在研究管廊接头的抗弯特性方面,对于预制综合管廊承插接头抗剪性能方面的研究仍不系统,且缺乏剪切试验验证。因此,综合考虑管廊接头构造特征与地基的影响,通过

模型试验研究不同地基条件下预制综合管廊接头的力学响应显得尤为迫切,且具有重要的工程实用价值。

因此,本文以包头市经十二路综合管廊工程为背景,以预制双舱综合管廊接头为研究对象,通过几何缩尺比为 1:4 的模型试验,对不同地基条件下预制管廊承插接头的剪切变形规律及破坏特征开展研究,揭示地基对管廊接头抗剪性能的影响规律,该研究成果可为预制综合管廊接头的参数设计提供参考。

1 试验概况

1.1 模型设计

经十二路地下综合管廊项目位于包头市新都市区,管廊标准段结构形式为预制装配式钢筋混凝土结构,由大、小两个舱室组成,断面尺寸为 $3.5\text{ m} \times 7.22\text{ m}$,管廊长度为 6.42 m 。管廊纵向接头采用承插接头,并使用预应力高强螺杆连接,综合管廊接头构造如图 1 所示。

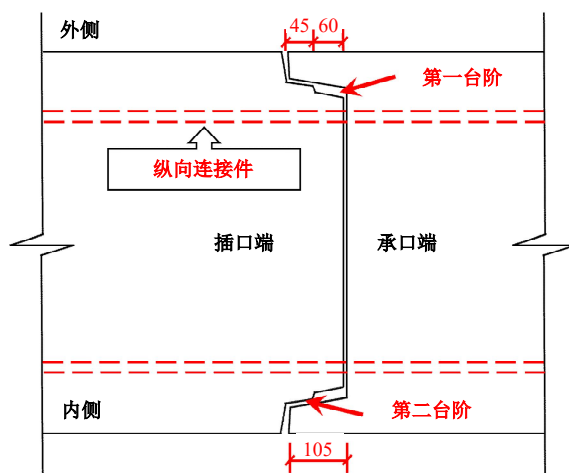
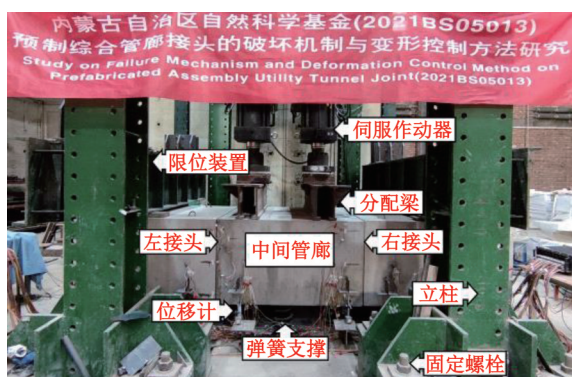


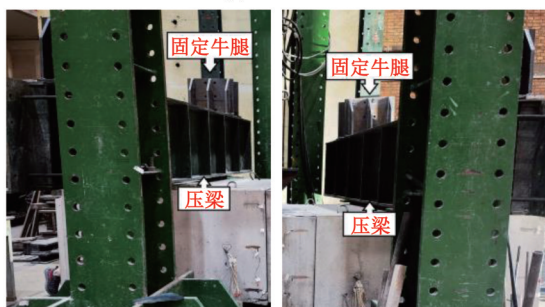
图 1 综合管廊接头构造(单位:mm)

Fig. 1 Structure of utility tunnel joints(unit: mm)

根据实验室加载条件及研究目的,并参考文献[16,17]中的试验方法,在保证综合管廊基本特征及其接头构造不变的基础上,将预制综合管廊模型按 1:4 比例进行缩尺。最终确定双舱矩形综



(a) 整体装置



(b) 左侧管廊约束

(c) 右侧管廊约束

图 4 试验装置

Fig. 4 Test device

栓孔附近的应变较大,因此在应变较大位置的附近布置测点,测点布置形式及纵向连接件位置如图 5 所示。图 5(a)中 $D_1 \sim D_8$ 为位移计位置,位移计量程为 100 mm,精度为 0.01 mm;应变片电阻为 120 Ω ,灵敏系数为 2.0 ± 0.01 ,应变极限为

20 000 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

1.3 试验工况

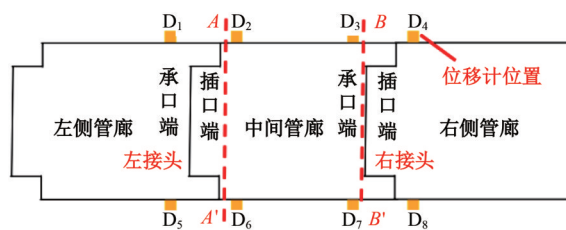
拟建场地地基以粉土、粉质黏土及密实状态的砾砂为主。为揭示上述地基对接头抗剪性能的影响,根据文献[19,20]可知,试验通过在中间管廊下方布置不同数量的弹簧模拟不同地基条件,弹簧布置形式如图 6 所示。由于试验中所用管廊的大、小舱室不对称,为防止加载过程中管廊发生较大的扭转影响试验结果,将中间一排弹簧布置在管廊的中隔墙处。本次试验共分为 3 组工况,如表 2 所示。根据地基发生单位位移所产生的地基反力相等的原则^[16],按照式(1)可计算得到单根弹簧刚度。

$$n \cdot k = K_v \cdot S \quad (1)$$

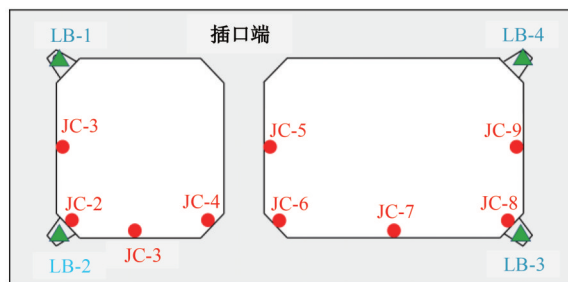
式中: n 为等效地基弹簧数目; k 为所用弹簧刚度, $k=1.734 \text{ kN}/\text{mm}$; K_v 为等效地基刚度系数; S 为管廊底板面积。

1.4 加载制度

本次接头剪切试验采用位移控制加载。3 种工况下伺服作动器中心距离接头 25 cm,为防止中间管廊两侧竖向位移产生较大差异而导致接头发生弯曲、扭转变形,采用同时控制两个伺服作动器同步增长的方式进行竖向加载。加载开始前,对 8 根纵向连接件各施加 30 kN 的预紧力。控制伺服作动器每级加载 2 mm,加载速率为 1 mm/min,加载至接头产生较大破坏时停止试验。

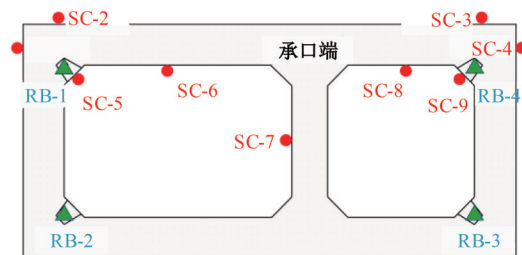


(a) 应变片布置截面及位移计测点



▲ 连接件位置 LB ● 混凝土测点 JC

(b) A-A' 截面测点



▲ 连接件位置 RB ● 混凝土测点 SC

(c) B-B' 截面测点

图 5 测点布置

Fig. 5 Layout of measuring points

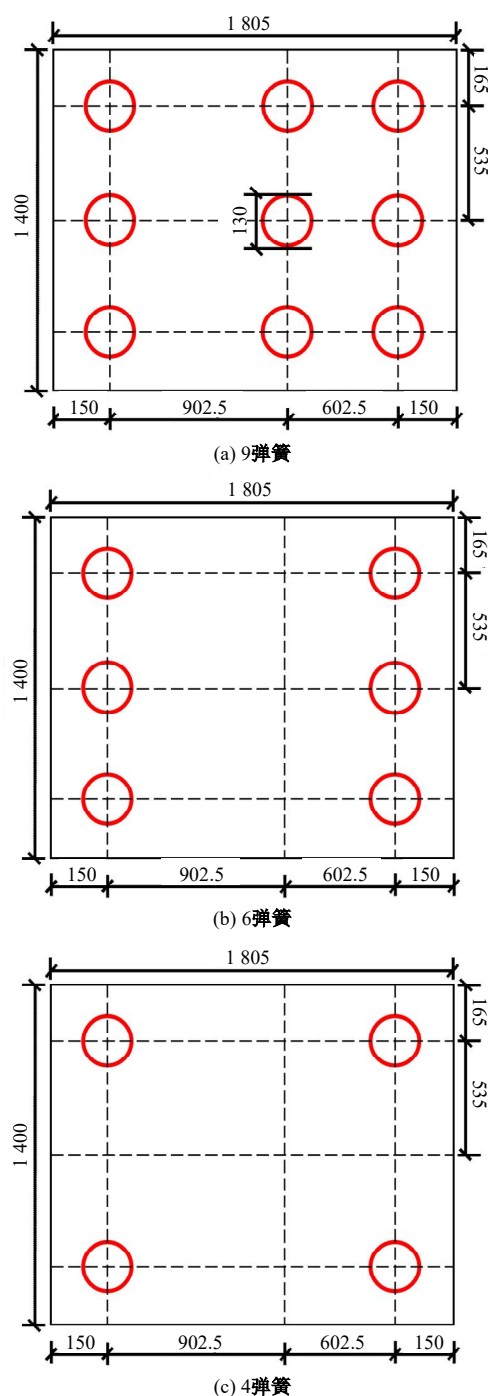


图 6 弹簧布置形式(单位:mm)

Fig. 6 Layout form of springs(unit: mm)

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	等效地基	等效地基刚度系数/ $10^3(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	底板面 积/ m^2	弹簧数 量/个
CD-1	砾砂地基	5.4	2.89	9
CD-2	粉质黏土地基	3.6	2.89	6
CD-3	黏土地基	2.4	2.89	4

2 接头剪切变形破坏特征分析

2.1 接头混凝土破坏

3种地基条件下,管廊接头的变形程度及破坏范围有所差异,但宏观上变形破坏特征与趋势较为相似,因此以工况CD-2为例进行分析。图7为剪切荷载下预制综合管廊承插接头混凝土破坏特征。

加载初期,左接头承口端下部和右接头承口端上部的倒角处出现水平裂缝,如图7(a)(b)所示。这主要因为承口端混凝土厚度较小,接头刚度发生突变,倒角处应力集中现象更显著,该位置也更容易开裂。

随着加载位移的增大,水平裂缝转为 45° 方向继续发展,向顶、底板处延伸,如图7(a)(b)所示。这是由管廊插口端构造特征造成的,插口端的第二台阶与承口端混凝土最先相互挤压,随着接头的变形,插口端的第一台阶也与承口端接触,作用力方向变为斜向。

随着加载的持续进行,左接头侧壁裂缝沿着管廊底板逐渐发展贯通,而右接头侧壁裂缝沿着管廊顶板贯通,左、右接头的裂缝发展趋势和发展状况呈旋转对称分布;两接头顶板与底板处的裂缝均由大舱室向小舱室方向发展,最小、最大破坏区宽度分别出现在大舱室和小舱室的顶板处,分别为164、256 mm,如图7(c)(d)所示,破坏区宽度占管廊顶板长度的20%。受中隔墙位置的影响,小舱室刚度大于大舱室,大舱室方向的破坏则早于小舱室方向。

随着中间管廊错台量的增加,纵向连接件与螺栓孔发生挤压,插口端螺栓孔附近的混凝土被拉裂,上部螺栓孔附近裂缝向管廊外侧延伸,而下部螺栓孔附近裂缝向管廊内侧延伸,如图7(e)所示。

总体上看,管廊主体裂缝出现较少,裂缝主要集中在接头处,承口端比插口端破坏严重,倒角位置、螺栓孔附近及顶板与底板处的裂缝最为集中,建议对这些位置进行局部加强,同时增加构造钢筋。3种地基条件下,管廊接头的破坏趋势和规律基本一致,但当接头产生相同错台量时,砾砂地基下倒角处的裂缝及破坏区裂缝最多,并且最小破坏区宽度与最大破坏区宽度差距更小,这说明

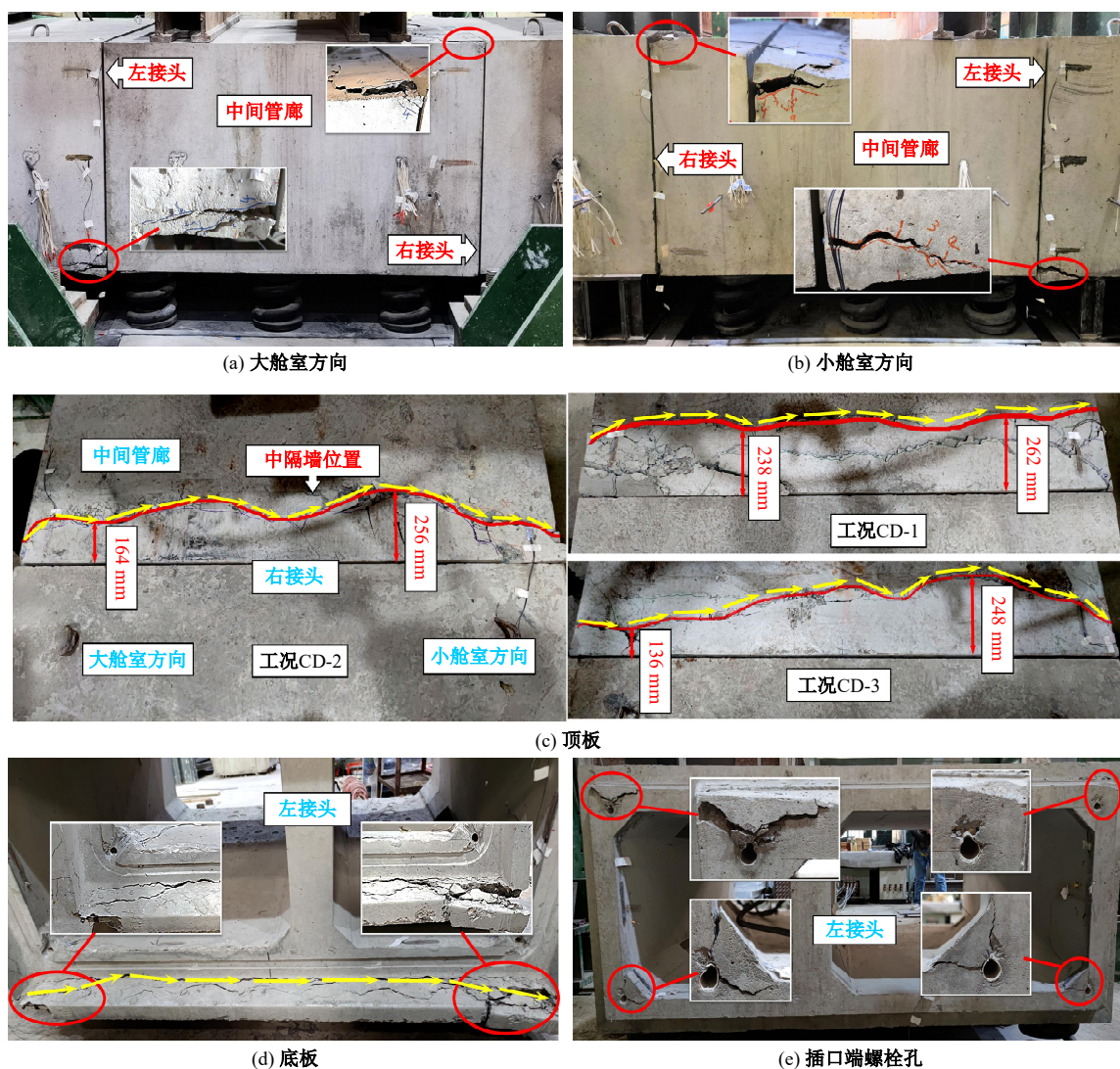


图 7 综合管廊接头混凝土破坏

Fig. 7 Concrete damage of utility tunnel joints

地基越坚硬,管廊接头破坏越严重。

2.2 纵向连接件变形

图 8 为剪切荷载下预制综合管廊纵向连接件的变形情况。由图 8 可以看出,试验结束后,纵向连接件中间出现明显的剪切变形,存在两个明显的塑性铰区,但连接件仍处于弹塑性阶段。连接件塑性铰区对应于螺栓孔端部,说明纵向连接件与混凝土接触部位的应力最为集中。

小舱室方向的纵向连接件变形比大舱室方向明显, LB-1 变形最大,而 RB-1 变形最小,表明小舱室一侧受力比大舱室一侧更大,与接头混凝土的破坏现象相吻合。当承口端顶板或底板混凝土失效时,纵向连接件将承担更多剪力,使得管廊接头仍能承担外部荷载。其在提高接头抗剪能力及接头整体性方面发挥了重要作用。

3 种地基条件下,纵向连接件的变形并非发生在螺杆最中间的位置,而是有一定的变形区域,最终变形区域长度约为连接件长度的 16%。这是因为螺栓孔与纵向连接件之间存在一定的空隙,纵向连接件不仅受到剪力的作用,还受到拉力、弯矩与剪力的共同作用。砾砂地基条件下的纵向连接件的变形最大,其原因为相同错台量下接头混凝土破坏最严重,而混凝土破坏后,接头剪力转由纵向连接件承担。

2.3 管廊错台变形

图 9 为接头剪切试验过程中所观察到的管廊错台变形。由图 9 可以看出,当受到剪切荷载及地基反力的作用时,中间管廊的错台变形较为明显。

随着基床系数的减弱,地基对管廊的支撑作



图 8 纵向连接件变形

Fig. 8 Deformation of longitudinal connectors

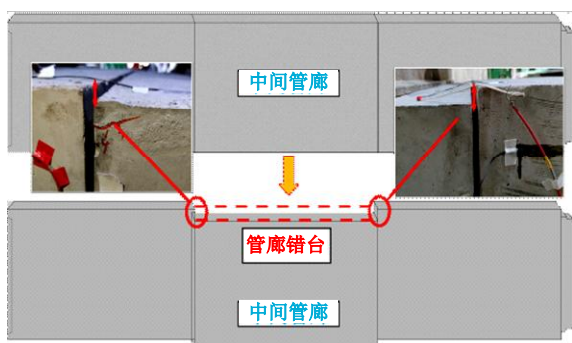


图 9 管廊错台变形

Fig. 9 Dislocation deformation of utility tunnel

用减弱,相同错台量下接头承担的剪力变小,混凝土裂缝数量及破坏范围也会减小。纵向连接件发挥作用对接头处能够起到一定的支撑作用,其通过自身的变形抵抗接头处的剪力,减缓错台变形。

3 试验结果分析

3.1 接头混凝土应变

图 10 为不同地基条件下接头混凝土表面应变变化规律。相对于其他测点处的混凝土应变,JC-4、SC-4 和 SC-7 这 3 处测点的应变较小,为了更好地展现其他测点的应变规律,故省略这 3 处测点。由图 10 可以看出,在 3 种地基下,当加载位移 < 8 mm 时,插口端各测点混凝土应变较小;随着加载位移的增加,测点 JC-2、JC-8 附近的混凝土应变速率加快。这是因为测点附近混凝土被纵向连接件拉裂。因此,螺栓孔附近混凝土为插口

端的薄弱处,需要增加配筋。

加载开始时,测点 SC-2 处混凝土应变速率最先加快;当加载至 7.5 mm 时,测点 SC-3 处混凝土应变速率开始加快,其原因为承口端顶板的混凝土裂缝贯穿至测点处。当管廊承受剪切荷载时,承口端最先发生破坏,承口端顶板与底板在靠近倒角处的应变值最大,与试验中的接头破坏现象相吻合。

总体来说,当不同地基下预制双舱综合管廊接头发生剪切破坏时,接头处各舱室的顶板和底板向管内变形,管廊侧壁向管外变形,中隔墙向小舱室方向发生弯曲变形。插口端螺栓孔附近的混凝土应变要远大于承口端,这是因为插口端螺栓孔附近混凝土的厚度小于承口端,并且插口端螺栓孔附近混凝土受拉,而混凝土的抗拉能力较弱。随着基床系数的降低,插口端螺栓孔附近的混凝土会更早被破坏,而承口端顶板的混凝土裂缝会更晚贯穿。

3.2 纵向连接件应变

图 11 为不同地基条件下纵向连接件应变变化规律。由图 11 可以看出,在 3 种地基下,当加载至 6 mm 时,插口端 LB-2 与 LB-3 处的纵向连接件拉应变出现短暂下降,LB-1 与 LB-4 处的纵向连接件压应变达到最大;随后 LB-1 与 LB-4 处的纵向连接件由受压转为受拉。这是因为随着中间管廊错台量的增加,纵向连接件与螺栓孔壁开始

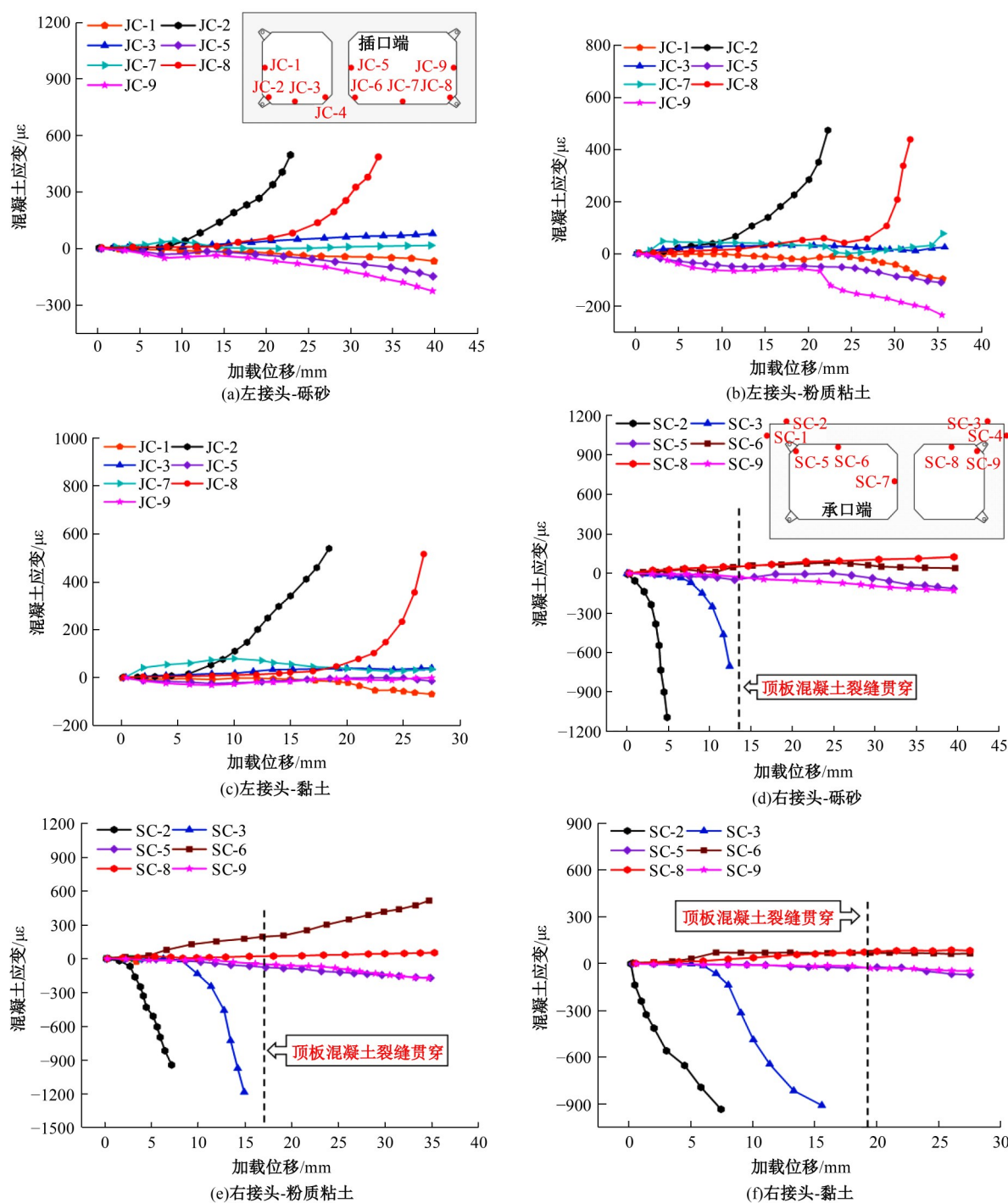


图 10 不同地基条件下接头混凝土应变变化规律

Fig. 10 Variation law of joint concrete strain under different stratum conditions

接触,此时接头混凝土承担了大部分剪力,纵向连接件起到的作用相对较小。

随着剪切荷载的增大,插口端纵向连接件的应变速率会出现短暂的降低,其原因为插口端螺栓孔附近混凝土逐渐开裂,导致螺栓孔对此处纵向连接件的作用力减小;而承口端RB-1与RB-4处纵向连接件的应变曲线会出现拐点,此时承口

端顶板的混凝土裂缝开裂至螺栓孔附近。随着接头混凝土的开裂,纵向连接件逐渐成为接头抵抗剪切变形的主要受力构件。

不同地基下,最终所有纵向连接件均未发生屈服,插口端的纵向连接件应变大于承口端,同一接头小舱室一侧的纵向连接件应变大于大舱室。这说明插口端受力大于承口端,小舱室一侧受力

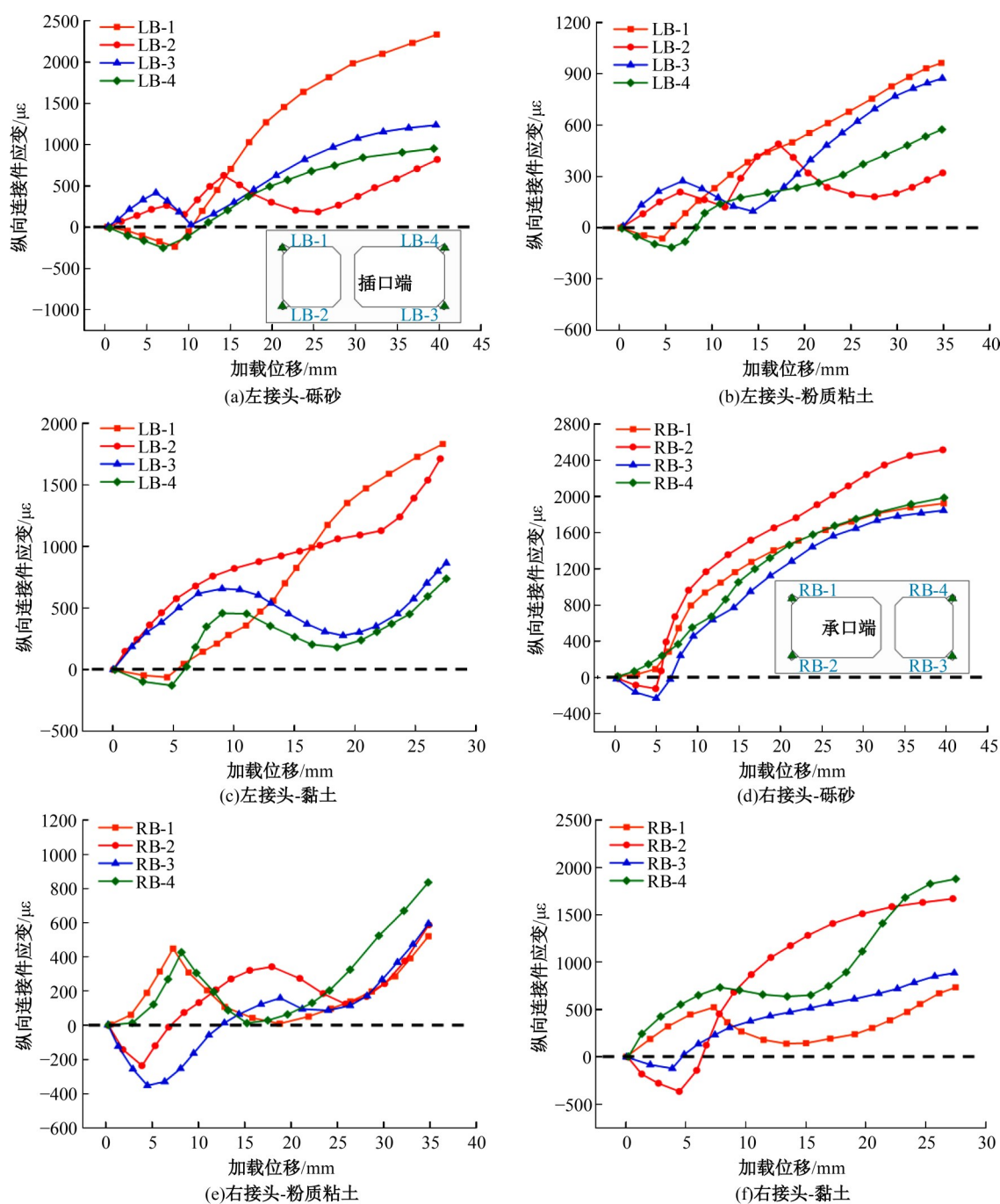


图 11 不同地基条件下纵向连接件应变变化规律

Fig. 11 Strain variation law of longitudinal connectors under different stratum conditions

大于大舱室一侧,与纵向连接件变形情况相符。

3.3 接头延性及变形能力

管廊的接头截面从屈服开始至发生最大承载能力产生的变形称为接头的延性^[19],常用延性系数表示结构的变形能力,其计算公式为:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

式中: μ 为接头延性系数; Δ_u 为接头极限位移; Δ_y 为接头屈服位移。

图 12 为 3 种地基下管廊接头剪力-错台量曲线。由图 12 可以看出,根据剪力-错台量曲线斜率的变化,每种地基下接头的剪力-错台量曲线可近似分为 3 个阶段。其中,第二阶段为接头的屈服阶段,接头进入屈服阶段时的错台量为接头屈服位移,屈服阶段结束时的错台量为接头极限位移。图 12 中, A、B、C 为屈服位移点, A'、B'、C' 为屈服位移点。

经计算得出 3 种地基下的接头延性系数见表 3。

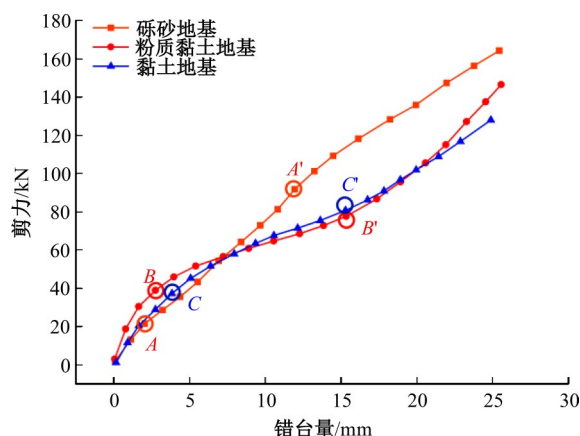


图 12 接头剪力-错台量曲线

Fig. 12 Shear-dislocation curve of joint

由表 3 可知,当基床系数减小时,管廊接头的延性系数减小,这主要是因为地基的减弱增大了管廊接头的相对刚度,导致管廊接头的变形能力降低。但 3 种地基下管廊接头的延性系数均在 3.0 以上,表明带连接件预制综合管廊的承插式接头具有良好的变形能力,可以很好地满足使用要求。

表 3 接头延性系数

Table 3 Joint ductility coefficient

地基	Δ_y/mm	Δ_u/mm	μ
砾砂	2.3	12.1	5.3
粉质黏土	2.9	15.1	5.2
黏土	3.8	15.7	4.1

4 接头受剪过程分析

分析试验结果可知,预制综合管廊接头的抗剪性能总体呈现以下 4 个阶段的变化:

第一阶段,当上部荷载较小时,接头各部位开始接触,间隙逐渐闭合,接头剪力小于装配压力产生的静摩擦力。此时剪力完全由接头处的静摩擦力承担,接头基本不发生错台变形。

第二阶段,剪力逐渐增大,大于接头的静摩擦力,接头出现剪切错台,此时接头错台量较小,错台变形速率较慢,承口端与插口端的混凝土开始挤压。此阶段接头抗剪能力主要由接头混凝土提供。

第三阶段,剪力继续增大,接头混凝土的裂缝逐渐发展,接头错台量逐渐增大,纵向连接件与螺栓孔壁开始接触。此阶段接头混凝土的抗剪能力逐渐下降,纵向连接件通过发生弯曲变形提供额外的抗剪能力。

第四阶段,接头混凝土不再出现新的裂缝,已

经出现的裂缝逐渐变宽,且混凝土开始脱落。此阶段接头混凝土逐渐失效,接头剪力主要由纵向连接件承担。

在上述接头受剪过程中,承口端、插口端混凝土挤压发挥抗剪作用与纵向连接件发生弯曲变形发挥抗剪作用的先后顺序并不固定,这取决于承口端与插口端混凝土间隙和纵向连接件与螺栓孔间隙的大小关系^[21]。若纵向连接件与螺栓孔间隙大于承口端与插口端混凝土间隙,则接头混凝土首先发挥抗剪作用;反之,纵向连接件首先发挥抗剪作用。因此,在选择纵向连接件时,纵向连接件与螺栓孔的间隙应小于接头混凝土的间隙,这样纵向连接件才能更早参与接头抗剪中,减少接头混凝土的损伤。

5 结 论

(1)当预制综合管廊在砾砂、粉质黏土、黏土地基下发生剪切变形时,带纵向连接件的承插式接头具有较好的延性,可以很好地满足使用要求。

(2)3 种地基条件下,当管廊接头承受剪切荷载时,砾砂地基的管廊接头抵抗作用最强,但随着荷载增大,其破坏范围最大,产生的裂缝最多,最终接头损伤区域约占管廊整体的 15%。

(3)当剪切荷载较小时,接头混凝土承担了大部分剪力,而纵向连接件起到的作用相对较小;随着接头混凝土的开裂,纵向连接件逐渐成为接头抵抗剪切变形的主要受力构件,在提高接头抗剪能力及接头整体性方面发挥了重要作用。

(4)不同地基条件下,当管廊受到剪切破坏时,主体裂缝出现较少,裂缝主要集中在接头处,承口端比插口端破坏严重,倒角位置、螺栓孔附近及顶板与底板处的裂缝最为集中,需要对这些位置进行局部加强和保护。

参考文献:

- [1] Hunt D V L, Nash D, Rogers C D F. Sustainable utility placement via multi-utility tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2014, 39: 15-26.
- [2] Lin Z Z, Guo C C, Ni P P, et al. Experimental and numerical investigations into leakage behaviour of a novel prefabricated utility tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating

- Trenchless Technology Research, 2020, 104: No. 103529.
- [3] Bai Y P, Zhou R, Wu J S. Hazard identification and analysis of urban utility tunnels in China[J]. Tunneling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 106: No. 103584.
- [4] Wang T Y, Tan L X, Xie S Y, et al. Development and applications of common utility tunnels in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 76: 92-106.
- [5] 梁荣柱, 林存刚, 夏唐代, 等. 考虑隧道剪切效应的基坑开挖对邻近隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 223-233.
- Liang Rong-zhu, Lin Cun-gang, Xia Tang-dai, et al. Analysis on the longitudinal deformation of tunnels due to pit excavation considering the tunnel shearing effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 223-233.
- [6] 梁荣柱, 曹世安, 向黎明, 等. 地表堆载作用下盾构隧道纵向受力机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 736-747.
- Liang Rong-zhu, Cao Shi-an, Xiang Li-ming, et al. Experimental investigation on longitudinal mechanical mechanism of shield tunnels subjected to ground surface surcharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 736-747.
- [7] 胡翔, 薛伟辰. 预制预应力综合管廊受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(5): 29-37.
- Hu Xiang, Xue Wei-chen. Experimental study of mechanical properties of PPMT[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(5): 29-37.
- [8] 闫鑫雨, 余村, 翟世鸿. 分片预制装配式管廊管片接头力学性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(6): 28-31.
- Yan Xin-yu, Yu Cun, Zhai Shi-hong. Experimental study on segment joint's mechanical properties of split type prefabricated municipal tunnel[J]. Sichuan Building Science, 2017, 43(6): 28-31.
- [9] 王雪亮, 王鹏宇, 王述红, 等. 预制预应力管廊接头抗弯力学研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 134-140, 167.
- Wang Xue-liang, Wang Peng-yu, Wang Shu-hong, et al. Study on the bending mechanics of precast prestressed utility tunnel joints[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(1): 134-140, 167.
- [10] 付伟庆, 聂长强, 李茂, 等. 预制沟道缆线管廊接头受力性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(6): 2028-2038.
- Fu Wei-qing, Nie Chang-qiang, Li Mao, et al. Study on mechanical performance of prefabricated trench cable tunnel joint[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(6): 2028-2038.
- [11] Wang P Y, Wang S H, Israr M K, et al. Bending mechanics model and value of transverse joints in precast prestressed utility tunnel[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2020, 19(3): 203-219.
- [12] 凌同华, 余彬, 肖南, 等. 预制拼装综合管廊承插式接头抗剪性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 741-751.
- Ling Tong-hua, Yu Bin, Xiao Nan, et al. Shear performance of bell and spigot joint of precast utility tunnel[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 741-751.
- [13] 凌同华, 余彬, 黄阜, 等. 预制拼装综合管廊承插式接头剪切力学性能研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 541-549.
- Ling Tong-hua, Yu Bin, Huang Fu, et al. Shear mechanical properties of bell and spigot joint of precast utility tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 541-549.
- [14] 陈小赞, 杨灵, 张宸浩, 等. 预制双舱综合管廊拼装接头力学特性数值研究[J]. 工程建设, 2018, 50(11): 8-14.
- Chen Xiao-zan, Yang Ling, Zhang Chen-hao, et al. Numerical study on mechanical characteristics of joint of precast two-compartment utility tunnel[J]. Engineering Construction, 2018, 50(11): 8-14.
- [15] 王鹏宇, 朱承金, 王述红, 等. 预制管廊横向接头抗弯力学模型及取值方法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2020, 41(5): 629-634.
- Wang Peng-yu, Zhu Cheng-jin, Wang Shu-hong, et al. Bending mechanical model of transverse joints in precast prestressed municipal tunnel and its value method[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2020, 41(5): 629-634.
- [16] 程新俊, 景立平, 崔杰, 等. 沉管隧道管节接头剪切破坏试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 99-105.
- Cheng Xin-jun, Jing Li-ping, Cui Jie, et al. Experi-

- mental failure analysis on immersed tunnel joint subjected to shear loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(4): 99-105.
- [17] 许有俊, 庞跃魁, 张朝, 等. 矩形顶管隧道 F 型承插接头剪切性能研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2023, 57(5): 957-966.
- Xu You-jun, Pang Yue-kui, Zhang Chao, et al. Shear performance of F-type socket joint in rectangular pipe jacking tunnel[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(5): 957-966.
- [18] 袁勇, 禹海涛, 萧文浩, 等. 沉管隧道管节接头混凝土剪力键压剪破坏试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 149-154, 181.
- Yuan Yong, Yu Hai-tao, Xiao Wen-hao, et al. Experimental failure analysis on concrete shear keys in immersion joint subjected to compression-shear loading[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 149-154, 181.
- [19] 赵远清, 赵怡薇, 伍云天, 等. 综合管廊变形缝抗剪锚筋往复加载试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(9): 14-21.
- Zhao Yuan-qing, Zhao Yi-wei, Wu Yun-tian, et al. Experimental study on shear anchor bars of deformation joint in utility tunnel under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(9): 14-21.
- [20] 许成顺, 韩润波, 杜修力, 等. 考虑土-结构相互作用的弹簧-地下结构体系静力推覆试验技术及其试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(1): 248-258.
- Xu Cheng-shun, Han Run-bo, Du Xiu-li, et al. Static pushover test technology and experimental study of spring-underground structure system considering soil-structure interaction[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(1): 248-258.
- [21] 张迪, 徐幼建, 廖少明, 等. 盾构隧道凹凸榫-斜螺栓形式环缝径向顺剪抗剪刚度研究[J]. 隧道建设, 2023, 43(2): 228-239.
- Zhang Di, Xu You-Jian, Liao Shao-ming, et al. Radial shear stiffness of circumferential joint along shear direction with concave-convex tenon and diagonal bolt in shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(2): 228-239.