

# 输水盾构隧道纵缝压弯力学性能分析研究

赵佶彬<sup>1</sup>, 吴 隽<sup>2</sup>, 唐 丹<sup>3</sup>, 柳 献<sup>1</sup>, 朱建龙<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

2. 中国电力工程顾问集团 华东电力设计院有限公司, 上海 200092;

3. 三门核电有限公司, 浙江 三门 317100)

**摘 要:** 三门核电站二期取排水隧道工程拟采用盾构法修建, 拟建隧道存在标准段和特殊段, 特殊段采用钢与混凝土复合管片, 其与钢筋混凝土管片接头有较大的差别, 为了了解两种接头压弯力学性能, 有助于方案设计和计算参数取值, 开展了接头足尺试验, 得到了接头的刚度、强度等参数, 以及接头刚度随荷载的变化规律。最后, 对比分析了不同接头的力学性能, 主要得出如下结论: 偏心距与接头抗弯刚度呈负相关, 但两种接头的减小速率不同, 复合管片接头明显较小; 正弯矩作用下, 复合管片接头的刚度远大于普通管片接头的; 两者的抗负弯矩刚度相当, 复合管片接头刚度略大。

**关键词:** 输水盾构隧道; 纵缝接头; 抗弯刚度; 接头试验; 复合管片

中图分类号: TU923

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)01—0059—07

## Mechanical Properties Analysis of Longitudinal Joints of Water Conveyance Shield Tunnel under Compression and Bending Moment

ZHAO Jibin<sup>1</sup>, WU Jun<sup>2</sup>, TANG Dan<sup>3</sup>, LIU Xian<sup>1</sup>, ZHU Jianlong<sup>2</sup>

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

2. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200092, China;

3. Sanmen Nuclear Power Company, Sanmen, Zhejiang 317100, China)

**Abstract:** The second phase of the water conveyance tunnel project of Sanmen nuclear power plant will be constructed by shield tunneling method. There are standard sections and special sections of the tunnel to be constructed. The special section uses steel-concrete composite segments, which are quite different from the joints of reinforced concrete segments. In order to figure out the mechanical properties of the two joints, and facilitate the schematic design and the assignment to parameter values, a full-scale test of joint was carried out to obtain the parameters such as the stiffness and strength of the joints, as well as the variation law of the stiffness of the joints with the load. Finally, the mechanical properties of different joints were compared and analyzed, and the conclusions are as follows. The flexural rigidity of the joint is negatively correlated with the eccentricity, but the reduction rate of the two joints is different, and that of the composite pipe segment joint is obviously smaller. Under the action of positive bending moment, the stiffness of composite joint is much higher than that of ordinary joint; the difference of compressive-bending stiffness between the two joints is small, and stiffness of the composite joint is larger than that of the ordinary joint.

**Keywords:** water conveyance shield tunnel; longitudinal joint; flexural stiffness; joint test; composite segment

盾构隧道使用功能逐渐多样化,由传统的地铁区间隧道向给排水隧道、过江隧道、燃气隧道等多种方向拓展。由于使用工况不同,盾构隧道所处的荷载条件也不完全相同,这使得它们的设计不可完全互相照搬经验。而作为一种装配式建筑,盾构隧道设计的关键之处在于接头,这是衬砌受力的薄弱环节,容易发生破坏,控制着整环的承载力<sup>[1-2]</sup>。

目前,研究装配式建筑结构的重点一般在于连接节点,即接头的性能。而分析接头力学性能的手段,以接头足尺试验和数值模拟为主<sup>[3-6]</sup>,也有一些研究人员采用原型足尺结构试验或缩尺模型试验<sup>[7-8]</sup>。

作为输水用的水工隧道,其设计路线所经位置一般包含自然水域,即输水隧道常会越江(河)。而越江盾构隧道一般处于地面以下较深位置,所承受的水、土压力均较大,这对设计提出了较高的要求,尤其是接头的设计。兰学平等<sup>[9]</sup>基于上海长江隧道工程的背景,对其衬砌接缝进行了足尺试验,得到了纵缝接头抗弯刚度在不同轴力和弯矩组合下的变化规律。研究发现,在承受负弯矩的小偏心受压状态下,接头转角与弯矩成线性关系,在承受正弯矩的大偏心受压状态下,接头的转角与所承受的弯矩成非线性关系变化。封坤等<sup>[10]</sup>依托狮子洋隧道工程,对构造复杂的接缝进行了抗弯性能研究,给出了一些结论:斜螺栓对接头正、负弯曲特性影响微小;小弯矩作用下  $M-\theta$  曲线呈近似线性变化,之后明显非线性变化,并且轴力水平越大线性段越长。郭瑞等<sup>[11]</sup>采用有限元分析手段,以狮子洋水下铁路盾构隧道为对象,开展了接头抗弯刚度的研究,并进一步分析了其对管片内力的影响。

此外,输水隧道一般具备高内水压的特性,而内水压将导致衬砌内环向轴力减小,增大了接头内力的偏心距,导致接头的抗弯刚度显著减小,这使得对接缝的要求更高。闫治国等<sup>[12-13]</sup>通过原型荷载试验,对青草沙水源地原水工程隧道的纵缝转角刚度进行了研究。研究表明,正弯矩作用下纵缝接头转角刚度符合双直线模型,负弯矩作用下转角刚度近似成线性。并在此基础上,建立了一个新的接头力学计算模型。彭益成等<sup>[14]</sup>利用足尺试验及三维非线性弹塑性数值模拟,对上海青草沙输水隧道(岛屿陆域段)管片接头,进行了详细研究,包括不同轴力、不同弯矩、不同螺栓预紧力条件下的接头刚度变化规律。

金瑞等<sup>[15]</sup>对采用高刚性口字型接头预埋件的

深埋输水盾构隧道管片接头开展了正弯矩抗压弯性能试验,得到了这种特殊形式接头的其承载能力、变形特性和破坏特征。赵瑞<sup>[16]</sup>针对水下盾构隧道管片纵缝的两种连接螺栓形式,利用数值模拟手段,分析了不同轴力水平下管片接头的承载能力,并对比了不同形式接头的抗弯刚度和承载性能。罗冬冬<sup>[17]</sup>专门针对城市排水盾构隧道的接头力学特性进行了研究,分别建立了单层、双层衬砌接头有限元模型进行模拟加载,得出了接缝变形和接触应力与内力的变化关系,并对比分析了两种接头的力学性能,给出了采用双层衬砌接头的建议。

综合而言,输水盾构隧道接头一般刚度要求较大,为此,人们从不同角度出发设计了许多不同形式构造的高刚度接头,以抵抗复杂的受力状态。然而,目前针对输水盾构隧道接头特性的研究依然较少,且对于常规直径(6 m 级)的厚管片衬砌的接头在大偏心距内力作用下的受力性能尚未完全明晰。因此,本文依托三门核电站取排水盾构隧道工程,对所采用的不同接头形式开展了室内接头足尺试验,旨在对输水盾构隧道接头的受力性能及相关影响因素进行研究,得到接头的刚度、强度等参数,并通过分析研究接头受力全过程,得到接头刚度随荷载的变化规律及不同因素对刚度的作用,以期对设计和研究提供相关参考依据和经验。

## 1 研究背景

浙江三门核电厂拟建取水构筑物(含取水头部、自流引水管)和排水构筑物(含排水头部、排水隧道)中需建的水工隧道,计划采用盾构法进行建造。

取水隧道拟采用内径为  $\Phi 6\ 200\ \text{mm}$  的盾构法隧道两根,平均单根长度约 900 m,管顶覆土约 10 m。基础持力层为:②层淤泥、③2 层淤泥质粉质黏土、③5 层黏土、⑤1 层黏土、⑤2 层粉质黏土、局部为⑥1 层粉质黏土与⑥2 层黏土。而排水隧道地基排水隧道经过的主要地层为:②层淤泥、③a 层粉质黏土夹粉细砂、③1 层淤泥质黏土、⑤2 层粉质黏土、⑧2 层粉质黏土、⑪层含砾粉质黏土、⑬2 中等风化英安流纹质含角砾玻屑熔结凝灰岩、⑬3 微风化英安流纹质含角砾玻屑熔结凝灰岩。

在设计中,存在标准段和特殊段的区别,在特殊段盾构隧道中,采用了钢与混凝土复合管片。由于复合管片在接缝处的构造与钢筋混凝土管片有较大的差别,两者的接缝受力性能存在较大的差异,因

此,本文对两种接头形式均作了研究。

2 试验概述

2.1 试件设计

试验构件为钢筋混凝土管片(以下简称普通管片)和钢-混凝土复合管片(以下简称复合管片)。为了增强试验结果的可信度,同时,又考虑到试验成本和工程时间要求,每种管片分别制作了相同的 6 组试验试件(其中 3 组用于正弯矩试验,3 组用于负弯矩试验),共计 12 组试件,以进行重复性试验。由于相同条件下的试验结果十分相近,本文最终给出的各工况试验结果均为平均值。

普通管片的外直径为 7.1 m,管片厚度为 450 mm,环宽为 1 200 mm,混凝土等级为 C55,受力主筋等级为 HRB400,其余钢筋为 HPB300 级,管片的块与块之间均以 2 根 10.9 级的 M39 直螺栓连接。复合管片外直径为 7.1 m,管片厚度为 450 mm,环宽为 1 225 mm,混凝土等级为 C55,纵缝采用 3 对 8.8 级 M42 短直螺栓连接,且接缝面本身全部为 Q235B 钢板。普通管片纵缝有止水带、嵌缝等构造,而复合管片纵缝无相关构造,为平面。两种接头的具体构造形式如图 1 所示。

2.2 试验工况

两种形式管片试件均进行正弯矩加载试验和负弯矩加载试验(弯矩以内弧面受拉为正)。试验先按照接头内力偏心距的不同进行数个设计工况的加载,根据整环衬砌内力的初期计算结果,正弯矩试验偏心距取值包括 0.03、0.09、0.21、0.57、1.26。负弯矩试验偏心距取值包括 0.04、0.08、0.16、0.32。

设计工况加载完成后,管片卸载至原始状态后进行极限工况加载直至试件破坏。考虑到试件有限,选取了更能反映本文所研究内水压隧道衬砌内力特性的较大偏心距值作为极限工况加载偏心距,对于普通管片接头,其正弯矩极限工况的偏心距固定为 1.26,负弯矩极限工况则固定偏心距为 0.32。

而对于复合管片接头,在普通管片正弯矩极限工况加载路径的基础上,先逐级加载使竖向荷载达到限制值 3 000 kN,此时横向加载为 850 kN,在保持竖向荷载不变的同时逐级减小横向荷载,此过程中,接缝弯矩基本不变,但轴力减小至 0,即偏心距( $M/N$ )从 1.26 不断增大至加载能力限值;在普通管片负弯矩极限工况加载路径的基础上,先逐级加载使横向荷载达到限制值 2 000 kN,在保持其不变的同时逐级增大竖向荷载,直至竖向合力达到 3 000 kN,

此过程中,接缝弯矩逐级增加,但轴力不变,即偏心距( $M/N$ )从 0.32 逐渐增大至 0.47。

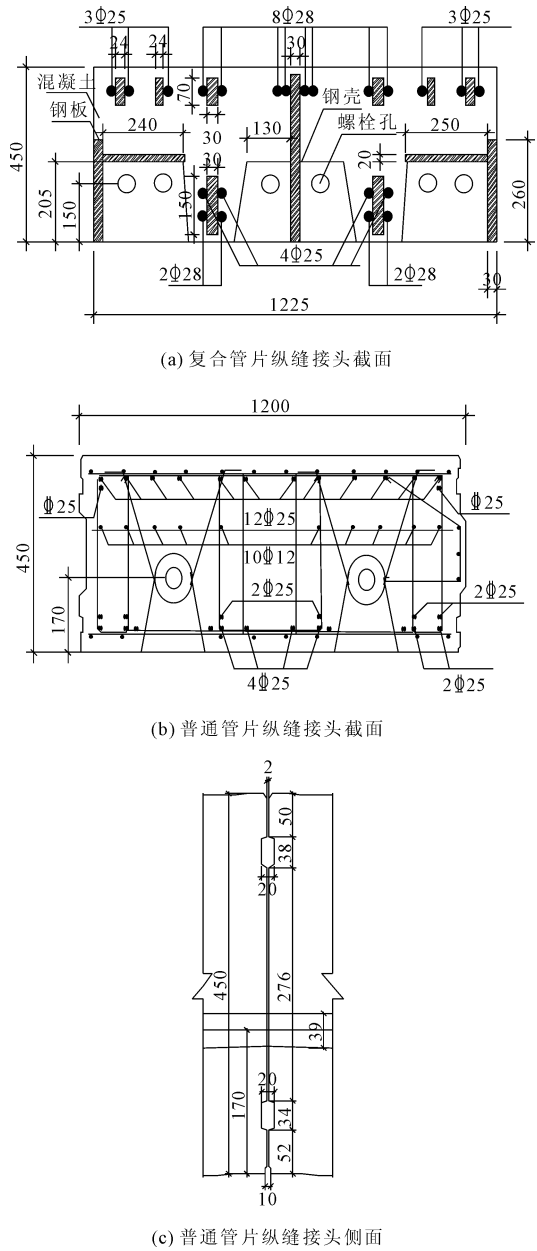


图 1 接头具体构造形式(单位:mm)

2.3 加载系统

试验采用同济大学自主研发的 TJ-GPJ2000 盾构管片接头试验加载系统进行试验加载,加载系统由主加载框架、电液伺服加载作动器、试样座、试样装配与纵向加载装置和 POP-M 工控 PC 电液伺服多通道控制器组成,可实现对隧道管片衬砌结构(包括梁、板等)的三向加载。

本次纵缝压弯试验仅需用到双向加载装置,通过水平加载制动器施加轴力  $N$ ,通过竖向加载制动器和刚性加载梁施加竖向力  $P$ ,并利用二者间的配

合,使得接缝面产生设计弯矩  $M$ 。

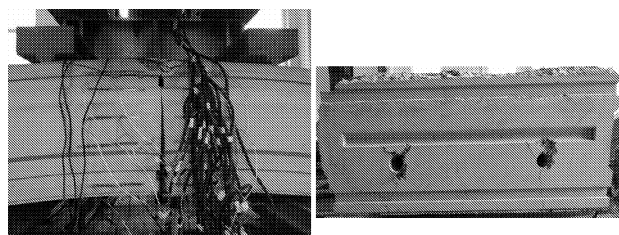
### 3 试验过程及破坏模式

#### 3.1 正弯矩加载工况

##### 3.1.1 破坏模式

(1) 普通管片接头。破坏过程主要为:接头截面全部受压或者绝大部分受压,接缝内缘张开,接缝外缘接触,接缝外缘贴紧,接缝外缘压裂,接缝外缘压碎,试验结束。

破坏现象如图 2 所示,外弧面混凝土被压碎得较为严重,许多部位产生了块状的翘起和脱落。在手孔内螺栓位置附近向外辐射发展了许多裂缝。这是在加载过程中,螺栓逐渐承受较大拉力,挤压混凝土所致。



(a) 接头侧面

(b) 接头截面

图 2 普通接头最终状态

(2) 复合管片接头。复合接头最终状态如图 3 所示。在荷载作用下仅产生接缝内弧面分离,接缝附近混凝土始终无肉眼可见的裂缝。在试验结束时,手孔及其附近均无明显现象。6 根螺栓基本保持原有性状,无明显弯曲,且均未发生螺纹滑丝的情况。

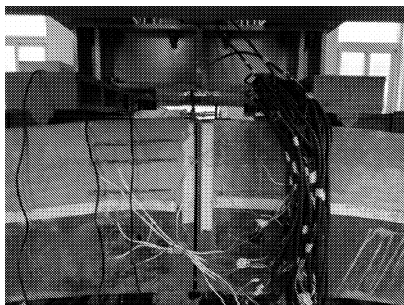


图 3 复合接头最终状态

##### 3.1.2 监测结果

(1) 纵缝张开。在图 4 中,描绘了两种接头外弧面张开量的发展曲线,并标识出了普通接头的 3 个性能点,按顺序依次是:①外弧面混凝土接触;②外弧面混凝土贴紧;③外弧面混凝土压裂。

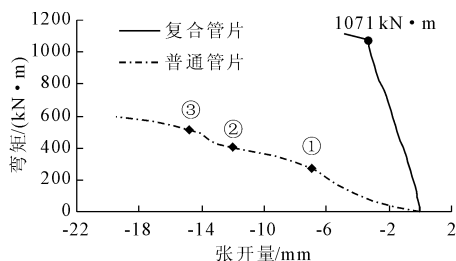


图 4 接缝张开量

在弯矩为  $0 \sim 315 \text{ kN} \cdot \text{m}$  阶段,普通管片接缝外弧面闭合量和内弧面张开量基本呈线性发展。而在  $1071 \text{ kN} \cdot \text{m}$  之前,复合管片接缝处张开或闭合则基本呈线性发展,在同样的荷载下,其值远小于普通管片接缝处的张开值,在  $1071 \text{ kN} \cdot \text{m}$  之后,加载偏心距逐步增加,曲线斜率变化。

随着荷载的增加,两种接缝的张开或闭合量的差值呈逐步增加的趋势。普通管片接缝内弧面张开量最大为  $-19.50 \text{ mm}$ ,相同弯矩下的复合管片接缝内弧面张开量为  $-1.74 \text{ mm}$ ,前者约为后者的  $1120.7\%$ 。而复合管片的接缝内弧面张开量最大为  $-4.88 \text{ mm}$ 。

(2) 螺栓应变。如图 5 所示,在  $M = 425 \text{ kN} \cdot \text{m}$  前,螺栓处于线弹性阶段,始终受拉。在  $M = 425 \text{ kN} \cdot \text{m}$  时,螺栓应变的增加速率明显减慢,这是外缘混凝土贴紧,混凝土分担外荷载的比例增加导致的。之后,受外缘混凝土压裂的影响,螺栓短时间承担较多荷载,应变速率增加。

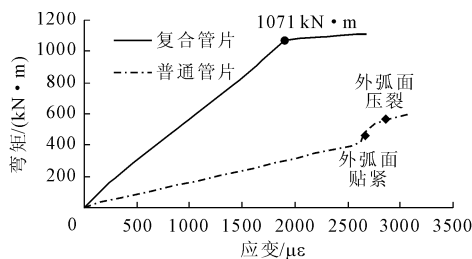


图 5 螺栓应变

在  $M = 1071 \text{ kN} \cdot \text{m}$  前,复合管片接缝处螺栓受拉,且处于线弹性阶段。在  $M = 1071 \text{ kN} \cdot \text{m}$  之后,复合管片接缝处螺栓应变值朝正向的增速明显增大。

在同样的荷载下,普通管片接缝处的螺栓应变远大于复合管片接缝处的螺栓应变,前者与后者的比值百分比范围约为  $290\% \sim 360\%$ 。普通管片接缝处的螺栓应变最大值约为  $3089.8 \mu\epsilon$ ,对应的拉应力约为  $617.96 \text{ MPa}$ ,约为屈服应力的  $68.66\%$ ,而复合管片接缝的螺栓应变最大值为  $2672.0 \mu\epsilon$ ,对

应的拉应力约为 534.4 MPa,约为屈服应力的 83.5%。即普通管片处的螺栓和复合管片接缝处螺栓最终未达到受拉屈服状态。

3.2 负弯矩加载工况

3.2.1 破坏模式

(1) 普通管片接头。破坏过程主要为:全截面受压——接缝外缘张开——接缝内缘混凝土压裂——接缝内缘压碎——试验结束。主裂缝为接缝上侧受压裂缝,裂缝最深位置为止水带上部位置。接缝上表面破碎,混凝土大量压碎翘起,接缝在下表面处张开明显。接缝截面最终状态如图 6 所示。

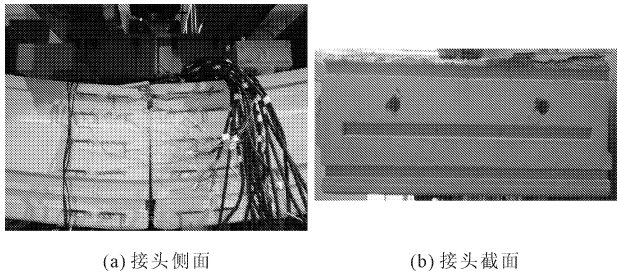


图 6 普通接头最终状态

(2) 复合管片接头。破坏过程主要为:全截面受压——接缝外缘张开——接缝内缘混凝土压裂——接缝内缘压碎——试验结束。由于管片接触面为钢板,在试验荷载作用下不会破坏,也未产生较大变形,因此,其现象不明显。最终,仅在内弧面的手孔钢板间的混凝土中出现压裂破坏,且接缝在下表面处张开明显。复合接头最终状态如图 7 所示。

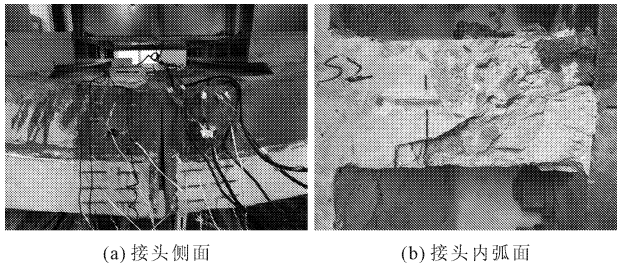


图 7 复合接头最终状态

3.2.2 监测结果

(1) 纵缝张开。如图 8 所示,描绘了两种接头外弧面张开量的发展曲线,并标识出了普通接头的 3 个性能点,按顺序依次是:① 外弧面接缝张开;② 内弧面混凝土压裂;③ 内弧面混凝土压碎。

复合接头张开量在按固定偏心距加载到限值(640 kN·m)之前为一个阶段,其曲线呈线性发展,在 640 kN·m 之后,张开或闭合量呈非线性发展,这是不断改变加载偏心距所致。

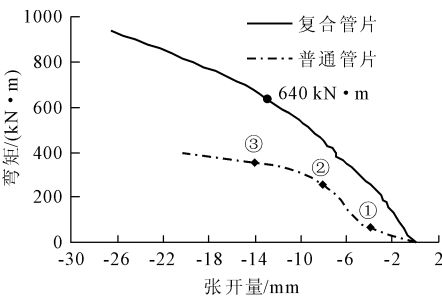


图 8 接缝张开量

普通管片接缝处的张开或闭合量远大于复合管片的。普通管片接缝内弧面闭合量最大为 4.11 mm,相同弯矩下的复合管片接缝缝外弧面闭合量为 1.68 mm,前者约为后者的 244.6%;普通管片接缝外弧面张开量最大为 -20.33 mm,相同弯矩下的复合管片接缝缝内弧面张开量为 -6.95 mm,前者约为后者的 292.5%。复合管片的接缝外弧面闭合量最大为 7.51 mm,复合管片的接缝内弧面张开量最大为 -26.57 mm。

(2) 螺栓应变。如图 9 所示,在弯矩为 79 kN·m 之前,普通接头螺栓处于线弹性阶段,在荷载作用下受拉。在此之后,螺栓应变增长速率明显减慢,原因应是内弧面混凝土有所接触,受压区面积增大,使得混凝土承担的外荷载比重增加。在弯矩为 272 kN·m 时,螺栓应变增长速率再次加快,此时,内缘混凝土压裂,受压区面积减小,需要螺栓承担更多的荷载。与接缝张开反映的规律一致,复合接头螺栓应变发展曲线在按固定偏心距加载到限值(640 kN·m)之前为一个阶段,其增速基本为固定值。

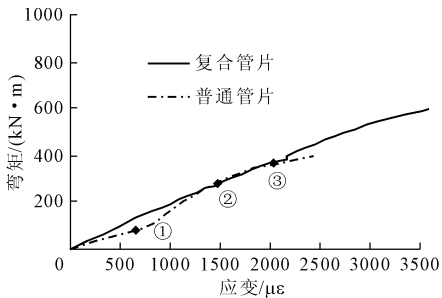


图 9 螺栓应变

在相同荷载条件下,与正弯矩试验时不同的是,两种管片接缝处螺栓应变数值相当接近。普通管片接缝处的螺栓应变最大值约为 2 427.0 με,对应的拉应力约为 485.4 MPa,约为屈服应力的 53.93%,而复合管片接缝的螺栓应变最大值超过 3 500 με。即普通管片处的螺栓最终未达到受拉屈服状态,复

合管片接缝处螺栓已达到受拉屈服状态。

4 力学性能对比分析

4.1 不同偏心距抗弯刚度

4.1.1 正弯矩接头

当偏心距较小时,接缝全截面受压,而当接缝截面有所转动时,管片纵缝接头的转角随着弯矩呈直线增长,且转角刚度数值均较大。对比各设计工况直线段的转角刚度,如表 1 所示。

表 1 设计工况抗弯刚度对比

| 工况                                     | 偏心距<br>$e$ | 普通接头<br>刚度①<br>$/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$ | 复合接头<br>刚度②<br>$/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$ | ②/①-1<br>/% |
|----------------------------------------|------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|
| 设计 1                                   | 0.03       | 全截面受压                                         | 全截面受压                                         | —           |
| 设计 2                                   | 0.09       | 全截面受压                                         | 全截面受压                                         | —           |
| 设计 3                                   | 0.21       | 全截面受压                                         | 全截面受压                                         | —           |
| 设计 4                                   | 0.57       | 22502                                         | 129410                                        | 475.1       |
| 设计 5                                   | 1.26       | 12100                                         | 95460                                         | 688.9       |
| 差别程度/% =<br>(1 - 设计 5/<br>设计 4) × 100% |            | 46.23                                         | 26.23                                         | —           |

可以发现,随着偏心距的增大,两种接头的转角刚度均逐渐减小,即偏心距与转角刚度呈负相关。普通管片接头在工况 4 与工况 5 的转角刚度的比值为 1.86,略小于工况 5 与工况 4 的偏心距比值 2.21,但基本相当,而复合管片接头在工况 4 与工况 5 的转角刚度的比值为 1.36,小于偏心距比值的程度较大,即随偏心距程度的增大,复合管片接头的减小程度是明显小于普通管片接头的;在同一偏心距下,复合管片接头的转角刚度远大于普通管片接头的转角刚度,其程度随着偏心距的增大有增大的趋势。

4.1.2 负弯矩接头

在 4 个设计工况中,当偏心距较小时,接缝全截面受压。对比设计工况的转角刚度,如表 2 所示。

表 2 设计工况抗弯刚度对比

| 工况                                     | 偏心距<br>$e$ | 普通接头<br>刚度①<br>$/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$ | 复合接头<br>刚度②<br>$/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$ | ②/①-1<br>/% |
|----------------------------------------|------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|
| 设计 1                                   | 0.04       | 全截面受压                                         | 全截面受压                                         | —           |
| 设计 2                                   | 0.08       | 全截面受压                                         | 全截面受压                                         | —           |
| 设计 3                                   | 0.16       | 18860                                         | 31454                                         | 66.8        |
| 设计 4                                   | 0.32       | 10455                                         | 23078                                         | 120.7       |
| 差别程度/% =<br>(1 - 设计 4/<br>设计 3) × 100% |            | 44.57                                         | 26.63                                         | —           |

与正弯矩工况反映的规律相同,随着偏心距的增大,两种接头的转角刚度均逐渐减小,即偏心距与转角刚度呈负相关。普通管片接头在工况 3 与工况 4 的转角刚度的比值为 1.80,略小于工况 4 与工况 3 的偏心距比值 2.00,但基本相当,而复合管片接头在工况 3 与工况 4 的转角刚度的比值为 1.36。这也与正弯矩时的差异程度相当。

4.2 不同接头承载能力

4.2.1 正弯矩工况

由图 10 可以看出,复合管片接头的抗弯刚度远远大于普通管片接头,其在整个加载过程中产生的转角都很微小,且曲线始终保持线弹性状态。

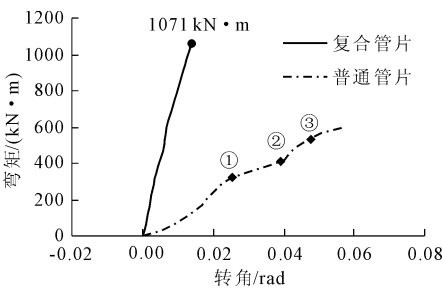


图 10 正弯矩-转角曲线

从普通接头的曲线可得到,在外缘混凝土接触至贴紧的第二阶段的抗弯刚度是相对最小的,其比第一阶段的抗弯刚度减小了 43.4%。而对比于第二阶段的抗弯刚度,第三阶段的抗弯刚度的量值是增加的,且变化幅度较大,为 120.7%。这与外缘混凝土贴紧有关,其参与了截面受压,增大了受压区面积,分担了外荷载的作用,同时,这也与这一阶段的轴力水平有关。两者抗弯刚度的对比如表 3 所示。

表 3 不同接头抗弯刚度对比

| 接头形式      | 抗弯刚度/ $(10^4 kN \cdot m \cdot rad^{-1})$ |        |        |
|-----------|------------------------------------------|--------|--------|
|           | 第 1 阶段                                   | 第 2 阶段 | 第 3 阶段 |
| 复合接头      | 79727                                    | 79727  | 79727  |
| 普通接头      | 12620                                    | 7149   | 15779  |
| 比值(复合/普通) | 6.32                                     | 11.15  | 5.05   |

4.2.2 负弯矩工况

由图 11 可以发现,在外弧面接缝张开至内弧面混凝土压裂的第 1 阶段,接缝抗弯刚度是相对较小的,第 2 阶段的抗弯刚度相对第 1 阶段的抗弯刚度,其量值是增加的,且变化幅度较大,为 206.6%。这说明在外弧面接缝张开较大的同时,靠近内弧面的混凝土接触甚至贴紧,内弧面附近的混凝土分担较大压力和螺栓分担较大拉力,这对刚度增加的贡献

是较大的,使得刚度提升较显著。

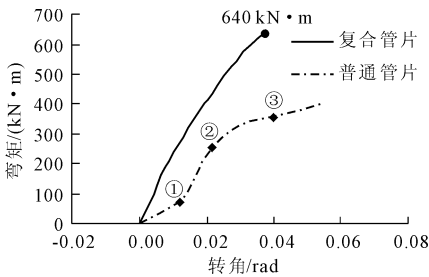


图 11 负弯矩 - 转角曲线

复合管片接缝的转角 - 弯矩发展曲线十分明显地具有两个阶段,在按固定偏心距加载到弯矩限值(受限于试验机加载范围,为 640 kN · m)之前为一个阶段,呈线性发展。之后,接头内力偏心距不断增大,曲线呈非线性发展。

复合接头的抗弯刚度大于普通管片接头在外弧面接缝张开前的刚度值,但差别相对正弯矩工况时较小。两种接头形式抗负弯矩刚度对比如表 4 所示。

表 4 不同接头抗弯刚度对比

| 接头形式      | 抗弯刚度( $10^4 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$ ) |        |
|-----------|----------------------------------------------------------------|--------|
|           | 第 1 阶段                                                         | 第 2 阶段 |
| 复合接头      | 17218                                                          | 17218  |
| 普通接头      | 6168                                                           | 18914  |
| 比值(复合/普通) | 2.79                                                           | 0.91   |

5 结 论

(1) 普通管片接头在承受正弯矩作用时,存在从外弧面混凝土接触到贴紧的阶段,前后变化幅度为 120.7%。而承受负弯矩作用时,存在内弧面的混凝土接触、贴紧的时刻,前后抗弯刚度增加的幅度较大,为 206.6%。

(2) 在相同荷载路径下,复合管片接头强度远远大于普通管片接头;复合管片接头的抗正弯矩刚度远大于普通管片接头,前者与后者的比值最小为 5.05;而两者的抗负弯矩刚度基本相当,复合管片接头的抗负弯矩刚度略大。

(3) 随着偏心距的增大,两种接头的转角刚度均逐渐减小,即偏心距与转角刚度呈负相关。但是,在相同条件下,复合管片接头的减小程度是明显小于普通管片接头的减小程度。

参考文献:

[1] 毕湘利,柳 献,王秀志,等. 通缝拼装盾构隧道结构

极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2014,47(10):117-127.

[2] 柳 献,张晨光,张 衍,等. 复合腔体加固盾构隧道纵缝接头试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2015,12(2):376-383.

[3] 韩俊良,郁有升,王 燕,等. 木结构装配式节点研究现状[J]. 青岛理工大学学报,2019,40(1):28-33.

[4] 程 蓓,苗小燕,徐建伟. 一种新型装配式混凝土框架结构连接节点试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(12):94-98,199.

[5] 李兆平,王 臣,苏会峰,等. 装配式地铁车站结构接头混凝土裂缝及接缝变形规律试验研究[J]. 土木工程学报,2015(S1):418-422.

[6] 王 俊,迟 恒,施良峰,等. 装配整体式半刚性节点在地下工程中的数值分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(1):233-238.

[7] 顾卫兵,冯宇韬,刘江涛,等. 预制装配式管廊受力性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):91-97.

[8] 金峰华. 竖向荷载下装配式交错桁架体系桁架与柱连接节点受力性能试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015:1-72.

[9] 兰学平,鲁 亮,刘利惠,等. 超大隧道衬砌管片接头力学性能试验研究[J]. 结构工程师,2009,25(5):110-114.

[10] 封 坤,何 川,肖明清. 高轴压作用下盾构隧道复杂接缝面管片接头抗弯试验[J]. 土木工程学报,2016,49(8):99-110,132.

[11] 郭 瑞,何 川,封 坤,等. 大断面水下盾构隧道管片接头抗弯刚度及其对管片内力影响研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(5):46-53.

[12] 闫治国,彭益成,丁文其,等. 青草沙水源地原水工程输水隧道单层衬砌管片接缝荷载试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(9):1385-1390.

[13] 闫治国,丁文其,沈碧伟,等. 输水盾构隧道管片接头力学与变形模型研究[J]. 岩土工程学报,2010,33(8):1185-1191.

[14] 彭益成,丁文其,沈碧伟,等. 输水隧道单层衬砌管片接头抗弯力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(5):1065-1069,1108.

[15] 金 瑞,朱合华,周 龙,等. 深埋排水盾构隧道高刚性管片接头力学性能试验研究[J]. 现代隧道技术,2018,55(S2):561-572.

[16] 赵 瑞. 湛江湾跨海盾构隧道衬砌结构静力特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2018:1-87.

[17] 罗冬冬. 城市深隧排水盾构隧道管片接头力学行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2019:1-91.