

盾构隧道内部双层预制结构梁-柱节点连接技术研究

王文东

(上海黄浦江越江设施投资建设发展有限公司, 上海市 200093)

摘要: 以诸光路盾构隧道工程为依托,进行了预制结构梁-柱节点的试验研究。试验结果表明,采用超高性能混凝土 UHPC 作为后浇材料,梁端钢筋可以采用只搭接不焊接的形式,既保证了连接接头强度和刚度,又提高了施工效率和施工质量,为隧道内部结构的预制拼装设计、快速化施工提供了参考。

关键词: 盾构隧道;预制结构;接头试验;UHPC

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)10-0208-04

1 工程背景

随着装配式结构的成熟发展,预制拼装技术开始在隧道内部结构中得到应用^[1-7]。目前上海诸光路隧道预制拼装率高达 90%以上,是国内第一条双层内部结构全预制拼装隧道。该隧道采用“板-梁-柱”结构体系,如图 1 所示。主要预制构件包括:“π”型件、预制立柱、预制车道板。下层车道由“π”型件组成,上层车道由预制立柱和预制车道板组成。

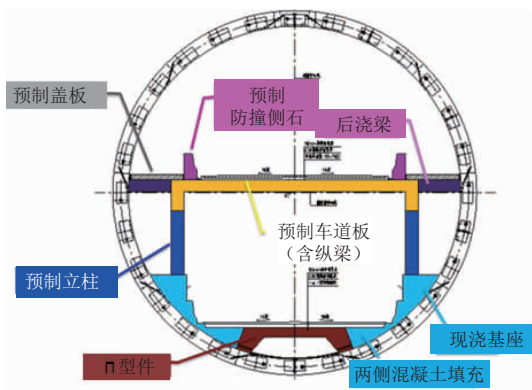


图 1 双层内部预制结构体系

对于装配式结构而言,预制构件之间的连接至关重要。各节点不仅便于施工,满足精度要求,还需要满足受力需求。本体系的重要节点包括立柱-基座连接节点、梁-柱连接节点。本文以上海诸光路隧道工程为依托,从便于施工和提高功效的角度出发,借助试验手段重点对梁-柱节点进

行研究。

2 梁-柱节点试验研究

为了释放基座施工和立柱拼装过程中产生的底部误差,梁-柱节点需采用湿接头形式。如图 2 所示,梁端腰筋搭接、立柱顶部预留接驳器用于立柱插筋安装,箍筋环绕立柱插筋。其节点的空间尺寸为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。如果接头浇筑采用普通混凝土,则搭接的腰筋需要进行焊接处理。但是接头空间狭小,钢筋焊接施工困难,质量难以保证;并且焊接工作量大,严重影响拼装效率,与预制拼装理念不符。因此需要寻求更高性能的材料,以满足钢筋只搭接不焊接的需求,以提高施工质量和效率。



图 2 梁-柱节点

收稿日期: 2020-04-24

作者简介: 王文东(1989—),男,硕士,工程师,从事隧道和桥梁工程建设和技术管理工作。

2.1 试验目的

研究梁-柱节点后浇不同混凝土材料、主筋采用不同连接形式(焊接、搭接)的情况下,整体试件的极限承载力和破坏形态。

2.2 试验设计

由于后浇梁-柱接头周围涉及梁、板、柱等多种结构,且接头本身处于弯、剪、扭的复合作用之下,使得原结构难以直接用于试验,必须对其进行简化。尽管接头在实际中处在复合受力状态下,但钢筋作为一维受力材料,只能承受拉、压两种力。因此,试验的简化有两种思路,一种是钢筋的锚固拉拔破坏试验,用于测试钢筋在特定材料中的握裹承载力;另一种是整体构件的纯弯试验,通过截面弯矩来反映钢筋和材料的协同工作能力(见图3)。然而,钢筋在锚固拉拔试验中的工作状态与钢筋搭接时有所不同。这是由于实际设计中,相邻钢筋的搭接间距较小,尚不足一倍钢筋直径,导致材料对钢筋的握裹力有所削弱,因此采用第二种纯弯试验更为符合实际设计方案。

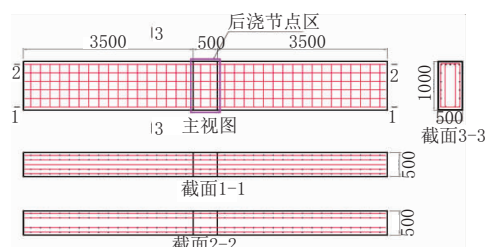


图3 纯弯试验试件配筋

根据目前的施工条件,单梁纯弯试验共设计了3根单梁试件,见表1。其中1号为钢筋焊接、后浇C60混凝土的基本试件;2号、3号为钢筋搭接、接头分别后浇抗压强度达100 MPa的UHPC、常规C80高强混凝土,整个试件的尺寸为7500 mm × 500 mm × 1000 mm。

表1 纯弯试验试件

试件编号	纵筋连接方式	梁纵筋	梁箍筋	接头材料
1	焊接	受拉区 5 Φ 28	4 $\times$	C60
2	搭接	受压区 4 Φ 20	Φ 12@200	UHPC100
3				C80

2.3 加载方案

为了更好地观察节点内部纵筋的受力情况与节点附近的破坏形态,在试件梁的中部构造一个纯弯段,确保接头处于仅有弯矩而无剪力的纯弯区域,分配梁与试件的支座条件均为简支(见图4)。

试件加载采用同济大学静力试验系统。竖向荷载由加载吨位为1500 kN的千斤顶提供。千斤顶

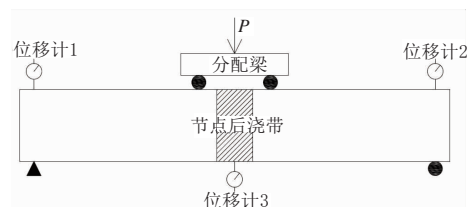


图4 纯弯试验加载简图

的加载中心对准分配梁上部翼缘的形心位置,分配梁的形心又与接头上部的形心对准。其反力系统由竖向反力架和支撑在反力架上的钢横梁构成,如图5所示。

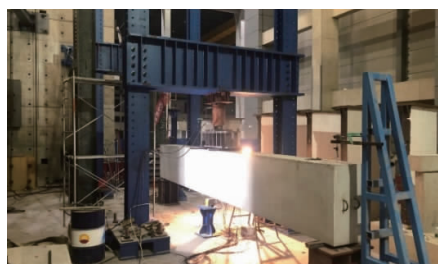


图5 加载装置

试验采用荷载控制的分级加载制度。首先,千斤顶逐渐加力到初裂荷载附近(约150~200 kN),暂停加载。然后以150 kN为一级,继续加力到300 kN、450 kN,暂停加载。继续加力到钢筋接近屈服的荷载700 kN时,暂停加载。之后以100 kN为一级,继续加载至800 kN、900 kN,暂停加载。最后加载直到试件彻底破坏。

3 试验结果分析

3.1 试验现象

(1) 1号试件

荷载等级达到450 kN(跨中弯矩686 kN·m)时,在节点与预制构件的接缝处开始观察到裂缝,最大缝宽达0.19 mm。随着荷载的增加,裂缝沿着接缝逐渐竖直向上蔓延。

荷载等级达到700 kN(跨中弯矩1068 kN·m)时,节点内部的C60混凝土开始出现竖直的裂缝,但数量很少。此时两侧预制构件的底部已经出现较多裂缝,接缝处裂缝的最大宽度已达0.67 mm。

荷载最终加载到1210 kN(跨中弯矩1845 kN·m)时,试件发出巨大声响,内部受拉钢筋断裂;最长的裂缝已延展至离梁顶约20 cm的位置。此时接头内部区域仍相对完好,裂缝数量不多、宽度不大(见图6)。

(2) 2号试件

荷载等级为450 kN(跨中弯矩686 kN·m)时,预制构件上的裂缝数量已经明显增多,并已经蔓延至中性轴附近,最大缝宽约0.19 mm;接头与预制构件的交界面上出现沿着交界面发展的竖向裂

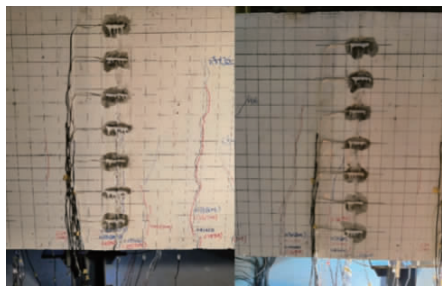


图6 1号试件裂缝图

缝;接头内部仍未出现裂缝。

荷载等级达到 700 kN(跨中弯矩 1 068 kN·m)时,接头内部出现了一条宽度仅 0.02 mm 的裂缝;预制构件已经出现较为密集的裂缝,最大缝宽达 0.29 mm。

荷载最终加载到 1 139 kN(跨中弯矩 1 737 kN·m)时,试件发出巨大声响,内部受拉钢筋断裂;最长的裂缝已延展至离梁顶约 20 cm 的位置。此时接头内部区域仍相对完好,裂缝数量不多、宽度不大。裂缝最明显的位置位于接缝处和预制构件上靠近接头的位置(距交界面约 30 cm,纯弯段边缘)(见图 7)。

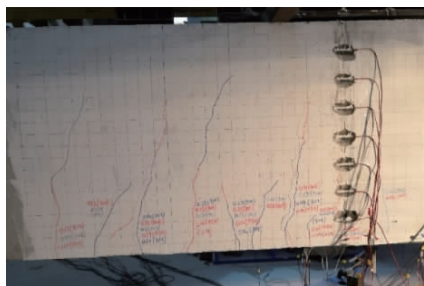


图7 2号试件裂缝图

(3)3号试件

荷载等级为 300 kN(跨中弯矩 458 kN·m)时,预制构件上出现少许细微裂缝;而接头内部区域已经开始出现裂缝;接头与预制构件交界面裂缝的最大缝宽已达 0.23 mm。接头内部仍未出现裂缝。

荷载等级为 450 kN 时,预制构件上陆续出现多条裂缝;交界面的裂缝最宽处已达 0.38 mm;接头内部已经出现两条裂缝,且其中较长的一条已达 40 cm 长,另一条宽度已有 0.15 mm。

荷载最终加载到 591 kN(跨中弯矩 901 kN·m)时,千斤顶无法进一步加力,试件变形明显,接头区域接近破碎,被迫停止加载。此时接头区域底部已经出现多条极为明显的大型裂缝(见图 8),并且该试件的极限承载力尚未达到按规范公式计算得到的预期值。

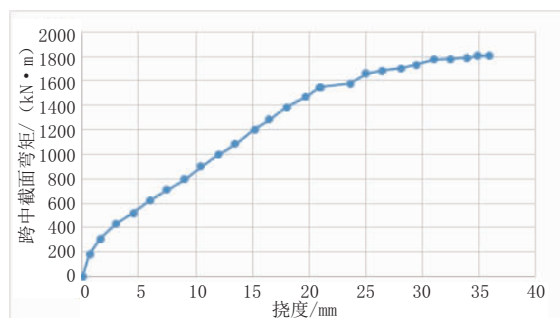
3.2 荷载 - 挠度曲线

对比图 9 所示的 3 个试件的荷载 - 挠度曲线

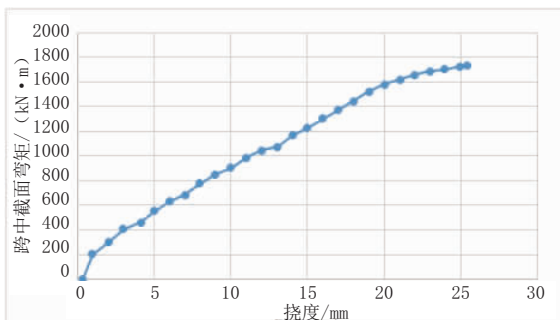


图8 3号试件裂缝图

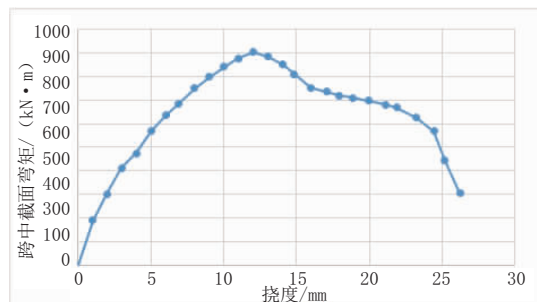
可知,2号试件在承载力上与1号基本试件相差不多,均能满足要求;3号试件承载力明显较小,约为1号试件的一半。1号、2号试件在屈服之前的刚度比较接近,1号试件有比较明显的屈服点,而2号试件的屈服点不明显。



(a) 1号试件荷载 - 挠度曲线



(b) 2号试件荷载 - 挠度曲线

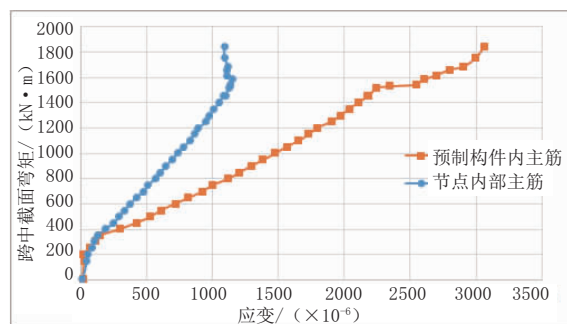


(c) 3号试件荷载 - 挠度曲线

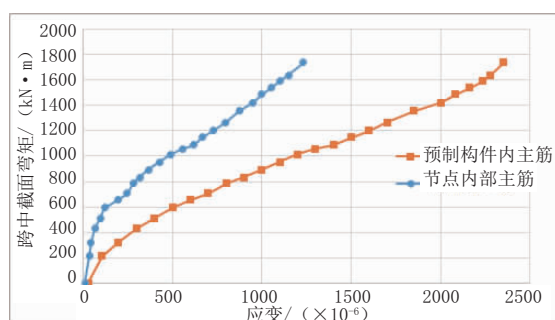
图9 试件荷载 - 挠度曲线

3.3 钢筋应变

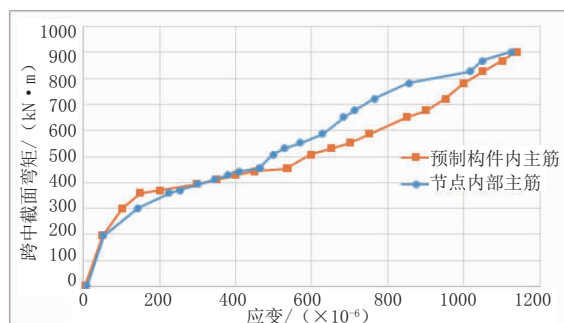
图 10 分别给出了每个试件预制构件内和节点内的主筋应变情况。可以看出,随着外荷载的增加,钢筋应变随之增大。然而 1 号、2 号试件预制



(a) 1号试件主筋应变



(b) 2号试件主筋应变



(c) 3号试件主筋应变

图10 主筋应变

构件内主筋应变的增长较节点区更快,当预制构件内的主筋已经屈服时,节点区的主筋应变仍然较小。只有3号试件预制构件内与节点区的主筋应变比较接近。

3.4 小结

从裂缝开展情况看,1号、2号试件的破坏位置位于接缝处或纯弯段边缘,3号试件的破坏位置位于节点区以内。可以推测3号试件的破坏原因是节点区材料的握裹能力不足,钢筋发生滑移。1号、2号的破坏形态则满足要求。说明2号试件的高性能混凝土对钢筋的握裹力能够达到等同现浇的需求。

从钢筋应变情况来看,1号、2号试件在达到极限承载力时钢筋已经破坏,而3号试件本身先于钢筋发生破坏。

从荷载-挠度曲线来看,与1号基本试件相比,3号试件的挠度发展较快,2号试件符合要求。

3号试件屈服荷载较小,未能达到预估值且极限承载力未达预估值。

由上述结论可知,1号、2号试件符合工程需求,3号试件不符合工程需求。因此腰筋搭接+掺钢纤维的高性能混凝土能够达到腰筋焊接+C60混凝土的效果。腰筋搭接+C80高强混凝土不满足设计要求。

4 梁-柱接头施工

车道板拼装完成后,绑扎梁-柱接头处的钢筋,腰筋只进行搭接不焊接,提高了施工效率。浇筑掺钢纤维的混凝土时采用固定泵的形式,如图11所示,实际施工过程中浇筑流程,钢纤维混合均匀,质量得到很好的保证。从现场施工方面进一步验证了此方案的可行性。



图11 梁-柱接头浇筑

5 结论

研究了梁-柱节点后浇不同混凝土材料、主筋采用不同连接形式的情况下,整体试件的极限承载力和破坏形态。结果表明,UHPC超高性能混凝土可以提高对钢筋的握裹力。采用此种类型的高性能混凝土时,梁端钢筋可以采用只搭接不焊接的形式。既保证了连接接头强度和刚度,也提高了施工效率和施工质量,为隧道内部结构的预制拼装设计、快速化施工提供了参考。

参考文献:

- [1] 周文波,吴惠明.水底公路隧道盾构掘进中的道路同步施工技术[J].现代隧道技术,1998(3):13-17.
- [2] 周松.上海复兴东路越江隧道工程施工技术综述[J].岩石力学与工程学报,2004,23(z2):4761-4769.
- [3] 胡滢之.双层双向盾构法隧道横断面的创新设计[J].中国市政工程,2010(s1):1-3.
- [4] 王善高,史世波,舒恒,等.单管双层特长盾构隧道内部结构预制施工技术——以南京纬三路过江盾构隧道工程为例[J].隧道建设,2016,36(4):451-457.
- [5] 黄俊,马明,李勇,等.盾构隧道内部双层结构快速化施工方法技术研究[J].公路,2013(3):212-219.
- [6] 晏胜荣.单管双层盾构隧道内部结构同步施工台车设计与制造技术[J].铁道建筑技术,2015(2):82-85.
- [7] 拓勇飞,郭小红.南京纬三路过江通道总体设计与关键技术[J].现代隧道技术,2015,52(4):1-6,23.