

装配式地下车站 CHC 型钢-混凝土组合 接头受弯性能分析

叶 亮¹ 丁先立¹ 项 宝¹ 赵维刚² 吴居洋¹ 欧飞奇¹ 咎子卉¹

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510030, 广州;

2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 050043, 石家庄//第一作者, 工程师)

摘 要 新型 CHC(C 型钢+H 型钢+C 型钢)型钢-混凝土组合接头结合了预制混凝土预埋和型钢安装工艺。基于某装配式地下车站,对 CHC 型钢-混凝土组合接头试验梁进行四点弯曲足尺加载试验,测量试验荷载、接头竖向位移、表面混凝土应变以及型钢后锚固钢筋的应力分布,进而研究 CHC 型钢-混凝土组合接头的受弯性能。研究结果表明:CHC 型钢-混凝土组合接头的力学性能符合刚性接头特征;试验梁在极限荷载时的破坏模式符合适筋破坏形态,且破坏之前有明显的预兆;梁体截面刚度随着荷载增加而降低;组合接头的混凝土凸榫-凹槽构造对受压区混凝土产生约束作用,提高了接头附近的受压混凝土高度;接头锚固钢筋间应力分布的均匀程度呈先上升后下降的趋势,并在屈服阶段再次提高;型钢-混凝土组合接头总体协同性较高,呈现良好的整体力学性能。

关键词 装配式地下车站; 预制构件接头; 环缝; CHC 接头; 受弯性能

中图分类号 TU398⁺.9; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.026

Bending Performance of CHC Steel-concrete Combined Joint in Underground Prefabricated Metro Station

YE Liang, DING Xianli, XIANG Bao, ZHAO Weigang, WU Juyang, OU Feiqi, ZAN Zihui

Abstract A new type of CHC steel-concrete (C steel + H steel + C steel) joint combines prefabricated concrete and steel installation process. Based on certain underground prefabricated station, four-point bending full-scale loading test is carried out on the test beam with CHC steel-concrete joint, measuring the test load, the vertical displacement of the joint, the surface concrete strain and the stress distribution of the anchored steel bar, and the bending performance of CHC steel-concrete joint is further studied. Research results show that the mechanical properties of the CHC steel-concrete joint conform with that of rigid joints. The damage pattern under extreme load of test

beam conforms with that of reinforced beams, which is obviously indicated before it taking place. The section stiffness of test beam decreases as the load increases. Concretes in the compressive zone are constrained by the tenon-groove structure of joint, therefore depth of compressive concrete zone of joint increases. The distribution evenness of the anchored steel bars stress shows trend of increasing first then decreasing, and then increasing again in the yielding phase. The general coordination of steel-concrete joint is high, demonstrating good overall mechanical performance.

Key words prefabricated underground station; precast component joint; rings seam; CHC joint; bending performance

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510030, Guangzhou, China

随着建筑业低碳环保及工业化的要求越来越高,预制装配式结构的应用率也越来越高。目前,盾构隧道管片已实现了标准化预制与装配,也有了较成熟的计算理论和设计方法^[1],但地下车站的装配式结构仍有很大的研究空间。现国内仅有长春地铁 2 号线袁家店站^[2]、广州地铁 11 号线上涌公园站等少数车站采用了地下装配式结构方案。

在地下装配式结构中,预制件之间采用的连接方式为设计关键。由于盾构管片工作阶段轴压力大,一般可采用弯螺栓连接,计算时采用考虑接头弯曲刚度小于管片弯曲刚度并将其等效于管片结构整体折减刚度的整环模型^[3];日本伊势湾天然气隧道采用单个 CHC(C 型钢+H 型钢+C 型钢)连接件作为管片的环向连接结构^[4]。相对隧道结构,地铁车站具有埋深浅、跨度大、非圆形等特点,柔性接头不能满足环内平面的受力要求。长春地铁 2 号线袁家店站基于对单榀槽式和双榀槽式接头破坏形态和力学性能的数值模拟和结构加载试验研

究^[5-7],最终在环内预制块间采用双榫槽式接头的连接方式。

然而,现有装配式车站围护结构采用地下连续墙或围护桩+锚杆支护,接头难以适用于富水地层结构和城市用地红线要求。因此,需要一种能适用于地下连续墙或围护桩+内支撑支护方式的接头形式。将型钢与混凝土通过预制和后安装工艺相结合,形成的新型 CHC 型钢-混凝土组合接头(以下简称“双 CHC 接头”),既能满足内支撑下装配式车站的分块需求,也能满足无柱站台层大跨度中板的预制要求。本文以南方富水地区的某地下装配式地铁车站为例,通过四点弯曲足尺加载试验,分析双 CHC 接头的受弯性能。

1 试验概况

本试验为四点弯曲足尺实体试验。双 CHC 接头混凝土组合梁的截面为 $1\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ 的矩形,长度为 $3\,000\text{ mm}$ 。2 段混凝土组合梁接头两侧在受压区和受拉区分别埋设 $850\text{ mm} \times 115\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的 C 型钢,并在 C 型钢背部设置 10 根直径 28 mm 的锚固钢筋。2 根混凝土组合梁通过 C 型钢中间设置的 $700\text{ mm} \times 110\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ H 型钢连接为 $6\,000\text{ mm}$ 长的试验梁体。混凝土标号 C50,立方体实测抗压强度 58.2 MPa ;C 型钢及 H 型钢均为 Q345B 级。锚固钢筋长 $1\,600\text{ mm}$,纵向间距为 80 mm ,采用 HRB400 钢;实测钢筋焊接强度超过钢筋母材的屈服强度。

试验梁全长 $6\,000\text{ mm}$,居中放置,梁端支座中心线间距 $5\,600\text{ mm}$,加载装置采用 200 t 电液伺服加载系统。荷载通过分配梁支座平衡作用于梁顶,两分配梁支座中心线间距离为 $1\,200\text{ mm}$,宽度为 150 mm ,如图 1 所示。分配梁上设置采用同步加载方式控制的两个作动器,作动器的有效动程为 $\pm 200\text{ mm}$,任意时刻施加荷载差值不超过 5 kN ;试验过程中荷载逐级增加,初期单个作动器的每级荷载增量为 100 kN ,当梁体裂缝逐渐开始出现后,每级荷载增量减小为 50 kN 。试验采用测试精度为 0.01 mm 的 SDP 系列位移传感器,布置在试验梁的跨中接头和支座处以测量相应位置的竖向位移,为了测量试验梁跨中接头截面的应变分布规律,在试验梁的侧面不同高度位置粘贴应变片。

1.1 车站结构

案例车站为地下双层无柱结构,其主体结构由

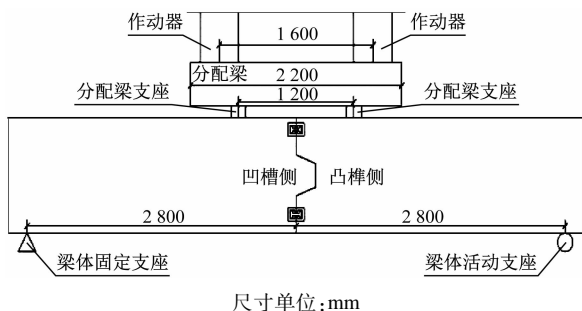
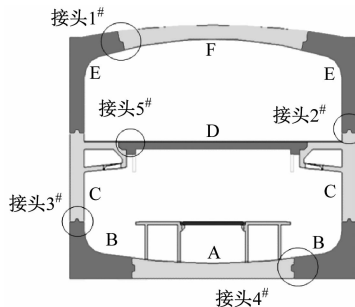


图 1 加载装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of loading device

预制混凝土块环状拼装而成,其整环结构如图 2 所示。预制混凝土车站结构分为纵向和环向 2 个方向,为满足运输和拼装的要求,沿纵向环宽为 2 m 。考虑内支撑布置和拆卸的要求,每环分为 9 片预制混凝土构件(A~F),有 10 处环内块间接头(采用双 CHC 接头)。



注:A~F为预制混凝土构件。

图 2 案例车站的整环结构示意图

Fig. 2 Diagram of sample station whole-ring structure

1.2 双 CHC 接头

双 CHC 接头的结构如图 3 所示。图 3 中的预制混凝土的凸榫和凹槽互相适应以抵抗剪力。在接头截面预制混凝土的受拉侧和受压侧,各埋设 1

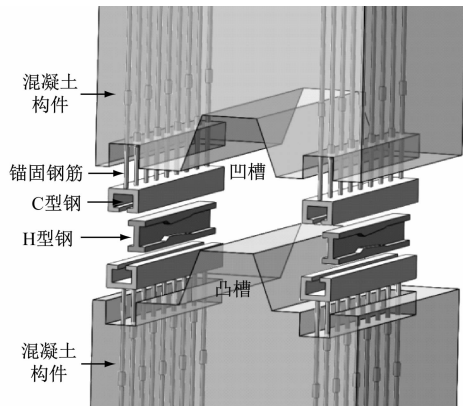


图 3 双 CHC 接头结构示意图

Fig. 3 Diagram of double CHC joint structure

对 C 型卷边槽钢 (即 C 型钢)。为了提高组合接头的刚度和承载力,减小混凝土和型钢材料之间的相对滑移,采用后焊接的锚固钢筋将 C 型钢固定。在两侧混凝土构件就位对中后,插入的 H 型钢将接头两侧的 2 组 C 型钢连接。C 型钢和 H 型钢之间采用翼缘中部设置坡段的楔形自锁设计。

为提高接头结构的稳定性和传力的均匀性、改善 H 型钢的防水性能和耐腐蚀性,C 型钢外的预埋注浆管连通槽腔,待 H 型钢插入到位后通过注浆管对槽腔空间进行注浆。

2 试验及结果分析

为研究双 CHC 接头的受力性能,本文采用四点弯曲足尺加载试验,总结接头裂缝分布及破坏状态规律,分析组合接头荷载-位移曲线、弯矩-转角曲线、接头截面混凝土应变分布、后锚固钢筋的应力分布,以及弯曲荷载下组合接头试验梁的破坏模式、截面刚度及承载力。

设试验中单个作动器的荷载为 F ,固定支座、跨中接头和活动支座处位移测量值分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 ,则有:

$$M = a \cdot F \quad (1)$$

$$\tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2} = \frac{U_2 - U_1}{L_1} = \frac{U_3 - U_2}{L_2} \quad (2)$$

式中:

a ——作动器作用点与支座之间的水平距离;

M ——梁体纯弯段的弯矩;

θ ——接头两侧相对转角;

L_1 、 L_2 ——位移计与接头中心线的初始水平距离。

设观测开口量位置沿梁高度方向与试验梁顶的距离为 h ,则接头两侧相对开口量 δ 为:

$$\delta = 2h \tan \frac{\theta}{2} = 2h \frac{U_2 - U_1}{L_1} = 2h \frac{U_3 - U_2}{L_2} \quad (3)$$

2.1 接头裂缝分布及破坏状态

混凝土试验梁间通过双 CHC 接头连接,进而实现整体受力。加载过程的试验梁破坏经历及裂缝变化规律为:

1) 随着弯矩增加,凹槽受拉侧 C 型钢后出现第一条裂缝 C1;C1 随着荷载的增加而增长,且近似呈水平方向发展;C1 出现在 C 型钢的锚固区。经分析,C1 处应力比较集中,混凝土应力最先达到混凝土的极限抗拉强度。

2) 在裂缝 C1 继续发展、大致延伸过 C 型钢腹板延长线时,受弯区梁底位置出现第二条裂缝 C2。

3) 随着弯矩继续增大,跨中接头受压侧混凝土及凹槽受压侧 C 型钢后混凝土相继出现了裂缝 C3,且呈水平方向分布。

4) 凹槽受拉侧 C 型钢后混凝土构件的上角部和下角部相继出现裂缝 C4 和 C5,并分别沿斜上方 45°及斜下方 45°方向延伸。

5) 荷载继续增加,靠近分配梁支座下方梁底附近出现受剪斜裂缝。该受剪斜裂缝沿梁腹板高度方向发展,是由混凝土同时受到较大的弯矩与剪力作用而引起的。当弯矩进一步增大时,受压侧混凝土压碎,受拉侧 C 型钢与其下方混凝土脱粘,梁体挠度突然增加,试件失去承载力。此时,C 型钢后锚固钢筋达到屈服状态,C 型钢卷边产生屈曲破坏。

试验梁的破坏符合适筋破坏形态。试验过程中型钢接头与混凝土梁体协同工作,双 CHC 型钢接头接近刚性接头的力学特征。破坏发生前梁体整体发生了较大变形,破坏具有延性。

2.2 荷载-位移曲线

以 F 和接头位置竖向位移 U 为坐标,绘制加载试验的荷载-位移关系曲线,并根据试验结果进行拟合 (拟合优度 $R^2 = 0.999\ 1$),如图 4 所示。拟合曲线为:

$$F = 998.9 - 998.9 e^{-151.6U} \quad (4)$$

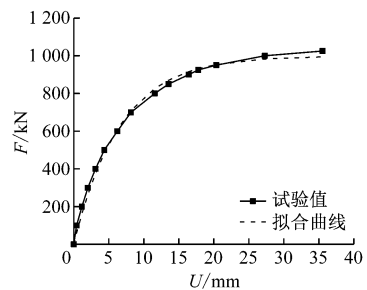


图 4 双 CHC 接头的荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve of double CHC joint

在初始加载阶段,荷载-位移曲线基本呈线性。随着 F 的增大, U 不断增大,且逐渐呈现非线性变化,此时, F 约为极限荷载的 50%。经分析,由于 C 型钢与 H 型钢槽腔内混凝土浆体逐渐受剪压破损,C 型钢后锚固钢筋与预制混凝土的界面滑移不断增加,故 U 呈非线性发展。随着梁体截面刚度的逐渐下降,荷载-位移曲线的非线性变化越来越明显。当 F 接近破坏荷载时, F 的小幅增加就会引起 U 大幅

增大。 F 达到破坏荷载后, U 急剧增加, 直至截面刚度丧失。截面对应极限荷载时的跨中位移为 27 mm, 约为试件跨度的 1/220。

接头的正常使用极限状态以开口量进行衡量。截面不同高度 H 处的开口量-荷载曲线如图 5 所示。开口量随荷载变化的规律与挠度随荷载变化的规律一致, 并与 H 成正比相关, 受拉侧有效高度截面开口量为 16.4 mm。

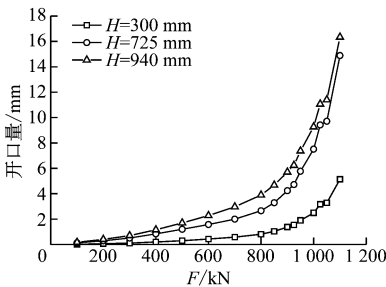


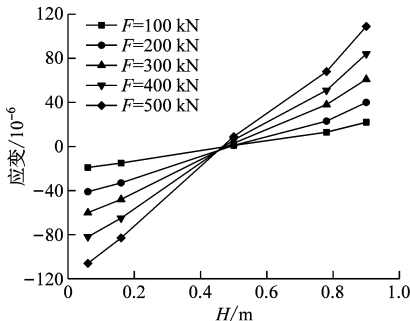
图 5 H 不同时双 CHC 接头的开口量-荷载曲线

Fig. 5 Open-load curve of double CHC joint at different H

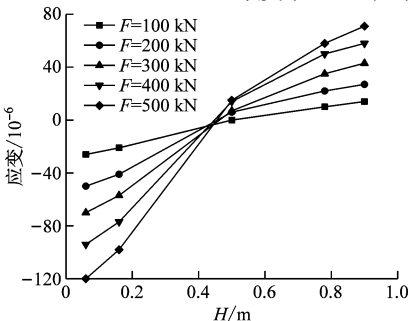
2.3 混凝土应变及钢筋应力分布

2.3.1 混凝土应变分布

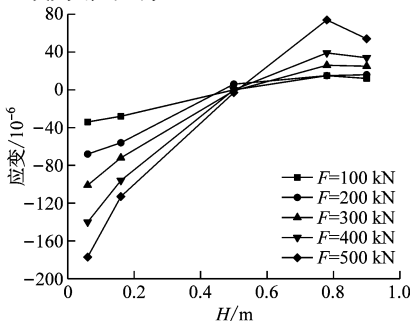
图 6 为距接头 1.0 m 处截面的凹槽侧、裂缝未开裂阶段试验梁的截面荷载-应变关系曲线。由图 6 可见: 截面对应的混凝土应变和荷载近似呈线性关系; 几何中心轴 ($H = 500$ mm 处) 的荷载-应变曲线随荷载的增加逐渐出现正应变, 表明截面受拉区高度增加, 截面中性轴上移。表 1 为不同截面处中性轴距梁顶的距离。



a) 截面距接头 1.0 m



b) 截面距接头 0.6 m



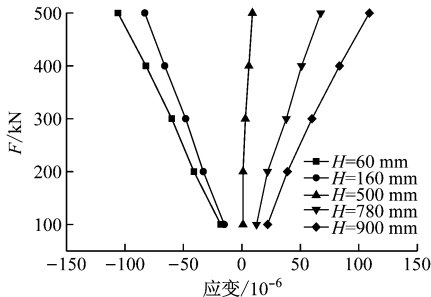
c) 截面距接头 0.3 m

图 7 不同荷载下接头截面混凝土应变-截面高度分布

Fig. 7 Distribution of joint section concrete strain-height under different loads

2.3.2 C 型钢锚固钢筋应力变化

锚固钢筋随 F 变化的应力分布如图 8 所示。随着 F 的增加, 楔形接触范围内的锚固钢筋应力显著大于两端范围内的锚固钢筋应力。这是由于两



注: 应变为正表示受拉, 应变为负表示受压。

图 6 试验梁截面对应的混凝土荷载-应变曲线

Fig. 6 Load-strain curve of test beam surface concrete

表 1 不同截面处中性轴距顶梁距离

Tab. 1 Comparison of different distances between neutral axis and top beam at different sections

截面距接头距离/m	中性轴距梁顶距离/mm
1.0	485
0.6	475
0.3	520

凹槽侧的混凝土截面应变分布曲线如图 7 所示。由图 7 可知: 当梁截面距接头 0.6 m、1.0 m 时, 中性轴位置变化较小, 均接近截面 1/2 位置; 当梁截面距接头 0.3 m 时, 中性轴在截面 1/2 位置以下 35 mm。这表明双 CHC 接头对受压区混凝土产生约束作用, 凸榫与凹槽之间的相互咬合能提高混凝土受压区高度。双 CHC 接头约束作用的范围主要集中在与接头距离为 1.5 倍凹槽深度 (0.3 m) 区域内, 区域外的接头约束作用效应逐渐减弱, 与接头距离超过 5 倍凹槽深度 (1.0 m) 的区域为非影响区。

端范围传递荷载的水泥浆填料弹性模量小于钢材弹性模量, 故楔形范围的应力充分传递至 C 型钢后锚固钢筋, 且开口面一端的锚固钢筋应力大于闭口面一端的锚固钢筋应力。当 F 继续增加时, 楔形范

围钢筋应力增长加快。当 F 超过 800 kN 后,楔形范围锚固钢筋率先发生屈服。随着屈服区急速向两端扩大,邻近楔形接触范围的两端范围内钢筋也先后发生屈服。

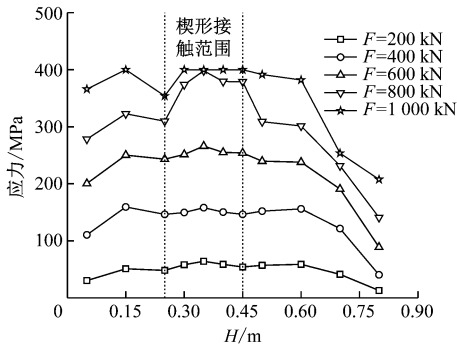


图8 锚固钢筋随荷载变化的应力分布

Fig. 8 Distribution of anchored steel bar stress with load variation

2.4 协同系数

双 CHC 接头与混凝土梁的协同工作效果采用协同系数 I 表示:如应力完全均匀传递,则 $I=1$;如应力完全不均匀传递,则 $I=0$;协同系数 I 越大,协同工作效果越好,结构刚度和承载力越大。协同系数 I 计算公式如下:

$$I = \frac{\sum S - n \cdot S_{\min}}{n \cdot S_{\max} - n \cdot S_{\min}} \quad (5)$$

式中:

n ——锚固钢筋根数;

S ——锚固钢筋应力, S_{\max} 和 S_{\min} 分别为锚固钢筋应力的最大值和最小值。

图9为 I - F 关系图。

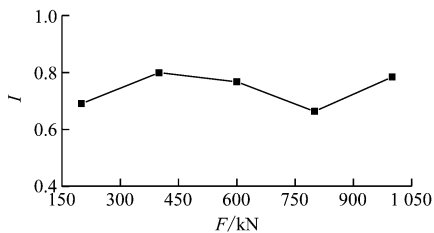


图9 协同系数-荷载曲线

Fig. 9 Correlation coefficient-load curve

在初始阶段,由于型钢之间率先通过楔形区域接触,故 I 较小。楔形区域位于接触截面的刚度峰值区,是应力传递的主要路径,而开口端和闭口端的 S 水平较低,反映了此时应力传递不均匀。

之后, I 逐渐增大。一方面, H 型钢和 C 型钢槽

腔内的填料受到“抱箍作用”,使填料承载力提高;另一方面,混凝土裂缝的发展导致 C 型钢的后锚固区出现钢筋-混凝土滑移界面,锚固钢筋间应力重分布,两端 S 比例提高,并使 I 提高至峰值。

随后,型钢的扭拉作用带动槽钢口部的填料拉裂,“抱箍作用”消失,填料失去承载力,型钢上的应力增量向楔形接触区域转移,其后 S 增加, I 减小。

当 F 达到屈服荷载时,楔形接触区内锚固钢筋先屈服;随着塑性区的扩大,楔形接触区外的 S 随后到达屈服强度, I 重新提高。

经测算, $I=0.66 \sim 0.78$,说明 CHC 接头与混凝土梁之间具有较高的协同工作效果, CHC 接头工作具有良好的整体性。

3 结论

1) 破坏发生前梁体整体发生了较大变形,破坏之前有明显的预兆,破坏具有延性。裂缝先后出现分布于 C 型钢锚固区、梁体受弯区的受拉侧以及剪斜区,破坏状态下受压混凝土压碎,受拉侧 C 型钢后锚固钢筋屈服,试验梁在极限荷载时的破坏模式符合适筋破坏形态, CHC 型钢-混凝土组合接头的力学性能符合刚性接头的特征。

2) 得到了加载过程中接头的荷载-位移曲线和荷载-开口量曲线。 CHC 型钢-混凝土接头组合梁在极限荷载下的跨中位移为 27 mm,有效高度位置最大开口量为 16.4 mm。

3) 接头结构对受压区混凝土产生约束作用,凸榫-凹槽之间的相互咬合能提高混凝土受压区高度。约束作用主要范围在与接头距离 1.5 倍凹槽深度 (0.3 m) 区域内,当距离超过 5 倍凹槽深度时,效应不明显。

4) C 型钢后锚固钢筋的应力分布的均匀性呈现先提高后下降,在屈服荷载下重新提高至接近峰值的规律。协同系数为 0.66 ~ 0.78,表明 CHC 接头工作具有良好的整体性。

参考文献

- [1] 陈久恒. 预制装配式地铁车站施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2015(11): 62.
- CHEN Jiuheng. Construction technique of prefabricated subway station[J]. Railway Construction Technology, 2015(11): 62.

(下转第 131 页)