

装配整体式地下车站钢管混凝土柱-型钢混凝土叠合梁节点力学性能研究^{*}

邢 琼

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//工程师)

摘 要 目的: 为了保障新型节点的传力有效性与车站安全性, 需对城市轨道交通装配式车站的新型钢管混凝土柱-型钢混凝土叠合梁节点的力学性能进行研究。方法: 针对车站正常使用阶段, 建立足尺模型; 采用原位对拉方式加载, 研究新型钢管混凝土柱-型钢混凝土叠合梁节点静载作用下的力学性能; 结合力学试验结果, 利用 ANSYS 软件中的纤维单元建立数值分析模型, 对影响节点受力性能的重要参数进行分析。结果及结论: 节点连接区的破坏形态为靠近柱端受压区位置部分混凝土压碎剥落, 梁顶的裂缝增多并发展; 通过荷载-位移曲线及应变分析验证了节点的破坏是经过了裂缝出现、屈服变形和塑性变形等几个阶段, 力学试验表明预制混凝土、现浇混凝土和型钢的粘结良好并共同工作, 节点具有良好的整体性能; 通过数值模拟及其参数分析可得出, 叠合梁节点的混凝土强度等级增加可使承载力提高, 但延性降低, 节点型钢的翼缘宽度对承载力及刚度的影响很小。

关键词 城市轨道交通车站; 装配整体式; 钢管混凝土柱-型钢混凝土叠合梁节点; 力学试验; 数值分析

中图分类号 TU311; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.011

Joint Mechanical Properties of Concrete-filled Steel Tube Columns and Steel-concrete Composite Beams in Assembled Monolithic Underground Station

XING Qiong

Abstract Objective: To ensure that the force transmission by the new type joints is effective and the station safety is secured, the mechanical properties of new type joints of CFST (concrete-filled steel tube) column and SCCB (steel-concrete composite beam) for urban rail transit assembled monolithic underground station are studied. Method: A full-scale model is built for the station in normal service stage; A dopting in-situ tensile loading method, the mechanical properties of the CFST column-SCCB joint under static load is studied; Com-

bined with the mechanical test results, a numerical analysis model is established using fiber units in ANSYS software, and the major parameters of joint stress performance are analyzed. Result & Conclusion: The failure mode of the joint connection area is that the concrete at the column end is crushed and peeled off due to compression, and more cracks developed and propagated at beam top; the load-displacement curve and strain analysis verify that the joint failure developed during stages of crack appearance, yield deformation and plastic deformation, and that the prefabricated concrete, in-situ concrete and steel are well bonded, indicating good overall performance of the joint. Through numerical simulation and parameter analysis, it can be derived that the strength grade increase of concrete at composite beam joint leads to increased bearing capacity but decreased ductility, and that the flange width of the joint steel has little effect on the bearing capacity and stiffness.

Key words urban rail transit station; assembled monolithic; joint of concrete-filled tube column and steel-concrete composite beam; mechanical test; numerical analysis

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

发展装配式绿色建筑产业是我国建筑业升级的重要途径之一。在未来十年内, 新建项目中装配式技术的应用比例将提高到 30%^[1]。装配式建筑正在向产业化方向发展, 其中地上装配式建筑的发展较为迅速, 并制定了 JGJ 1—2014《装配式混凝土结构技术规程》等相关规程。而我国装配式地下车站的发展则处于起步阶段, 与地上结构相比, 地下车站具有荷载大、构件大等特点, 相关技术规程并不能满足地下车站结构设计的需求。

目前国内外虽然对钢管混凝土柱-混凝土梁^[2-3]有所研究, 并对钢筋混凝土柱或钢管混凝土柱-型钢

^{*} 中国铁建股份有限公司 2020 年度科研计划课题(2020B16)

梁节点形式^[4-5]进行了初步研究,但这些节点形式不适用于地下车站结构中梁承受较大荷载的情况。近年来随着组合结构技术的发展,钢管混凝土柱-型钢梁的节点形式^[6-7]得到广泛关注,该节点形式可有效承担竖向与横向的荷载,并满足结构抗震延性的要求。地下车站覆土后,钢管混凝土柱-型钢混凝土梁能较好地发挥构件的承载力与延性,但其截面的尺寸明显偏大。目前装配式车站的研究还处于起步阶段,装配式结构中关键节点关系到结构整体的力学性能,节点设计的合理性关系到施工进度与施工质量,是目前装配式结构的研究重点。

本文提出了一种适用于城市轨道交通的新型装配整体式地下车站结构的梁柱及其节点形式,车站中柱采用圆钢管混凝土柱,纵梁采用型钢混凝土叠合梁,型钢与钢管采用栓焊混合连接,梁柱节点以外的柱段钢管外周包裹满足防火要求厚度的混凝土保护层,上、下节段预制柱的钢管可以采用焊接连接,两层车站可以为一节,钢管内混凝土现场灌注。车站顶层梁、柱构件由于承受较大的覆土重力荷载而成为结构设计的关键。如图 1 所示,在新型装配整体式地下车站结构体系中,车站纵向梁板柱节点由叠合板、型钢混凝土叠合梁、钢管混凝土柱等组成。叠合板将竖向均布荷载传递给型钢混凝土叠合梁,叠合梁的受力性能成为保证结构承载力的关键。因此,本文对钢管混凝土柱-型钢混凝土叠合梁连接节点的受力性能进行试验研究与数值分析,探讨其力学性能与破坏形态,为装配式地下车站的设计提供理论依据。

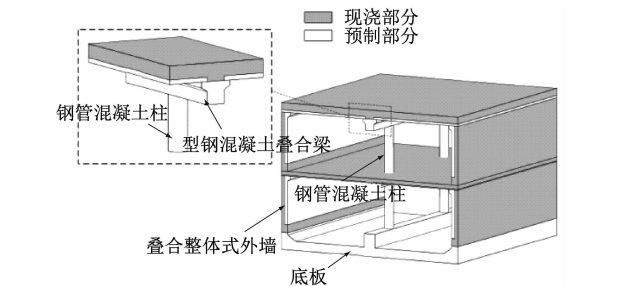


图1 新型装配整体式地下车站顶层梁板柱节点
Fig. 1 Top floor column-beam joints for new type assembled monolithic underground station

1 试验方案

该钢管混凝土柱-型钢混凝土叠合梁连接节点,经核算,在施工阶段的荷载较小,正常使用阶段因

顶层覆土回填为不利受力状态,因此针对正常使用阶段,建立足尺试验模型,采用原位对拉加载方式研究试件的破坏形态及其力学性能。

1.1 试件参数

试件由钢管混凝土柱及型钢混凝土叠合梁组成,如图 2 a) 所示。型钢混凝土叠合梁共有 4 段,其截面宽度均为 900 mm,高度均为 1 700 mm,截面形式如图 2 b) 所示。其中,预制部分高度为 900 mm,混凝土等级为 C50,现浇部分高度为 800 mm,混凝土等级为 C40;H 型钢规格为 H 1 450 mm × 600 mm × 32 mm × 40 mm,型钢上下翼缘均设置纵向抗剪栓钉,以防止与混凝土接触间的剪切滑移。叠合梁上下均设置受力钢筋。梁端预埋钢管形成张拉孔道,以便后期的对拉加载。钢管混凝土柱为 ϕ 850 mm 的圆形截面,其中钢管截面尺寸为 ϕ 700 mm × 20 mm (厚度),钢管外周包裹 75 mm 厚的细石混凝土,混凝土内设置螺旋钢筋与竖向分布筋以防止混凝土开裂。梁柱栓焊混合连接后对连接区及预制梁整体浇筑混凝土形成试件整体。试件浇筑及成型如图 3 所示。

1.2 材料性能

混凝土均制作 3 组 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试块,型钢均采用 Q345 钢,钢筋为 HRB400 级钢筋,按照 GB/T 228. 1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验法》进行材性试验。混凝土力学性能见表 1,钢材力学性能见表 2。

表 1 混凝土力学性能		
Tab. 1 Mechanical properties of concrete		
混凝土位置	混凝土标号	立方体抗压强度 f_{cu} /MPa
底层梁预制混凝土	C50	56. 4
底层梁现浇混凝土	C40	37. 7
顶层梁预制混凝土	C50	58. 2
顶层梁现浇混凝土	C40	35. 7
钢管内混凝土	C50	55. 1

1.3 试验加载与测试方案

试件加载装置如图 4 所示,试件位移计及应变计布置方案如图 5 所示。梁端初始荷载为 250 kN,每级荷载增量为 250 kN,间隔 10 min,加载稳定后进行读数,因加载设备限制,荷载加至 5 750 kN 时停止加载。

本次试验主要对试件上下层梁的梁端位移及混凝土、型钢和钢筋的应变进行测量。如图 5 a) 所

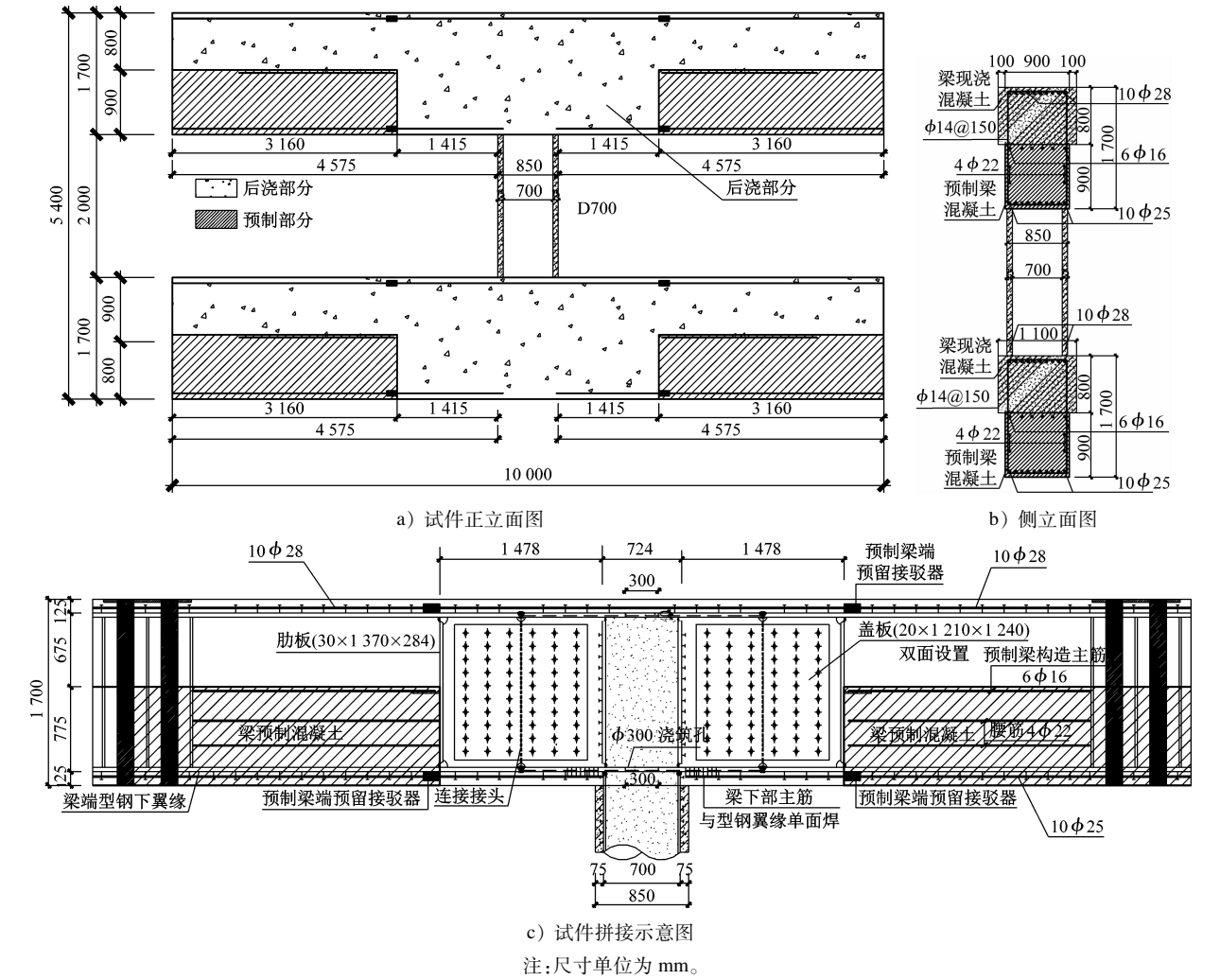


图 2 试件尺寸及配筋示意图

Fig. 2 Dimensions and reinforcement diagram of the test component

表 2 钢材力学性能				
Tab. 2 Mechanical properties of steel				
钢材型号	部件名称	强度等级	屈服强度 f_y /MPa	弹性模量/GPa
型钢 H1450 mm × 600 mm × 32 mm × 40 mm	翼缘	Q345	415	204
型钢 H1450 mm × 600 mm × 32 mm × 40 mm	腹板	Q345	410	199
钢管 ϕ 700 mm × 32 mm	钢管	Q345	409	201
钢管 ϕ 700 mm × 20 mm	钢管	Q345	412	205
钢筋 D28	纵筋	HRB400	430	200
钢筋 D25	纵筋	HRB400	450	199
钢筋 D14	箍筋	HRB400	475	199

示,梁端位移通过位移传感器进行测量,混凝土应变通过 10 cm 长的混凝土应变片测量。混凝土应变片沿连接区与梁叠合面自上向下水平布置。钢筋和型钢的应变通过预先布置在上下受力钢筋、型钢



图 3 试件浇筑及成型实景图

Fig. 3 Realistic view of the test component pouring and forming

上下翼缘及腹板上的应变片进行测量,布置位置如图 5 b) 和图 5 c) 所示。

2 试验结果及分析

2.1 节点裂缝开展及破坏特征

因构件对称,以顶层梁为研究对象进行分析。

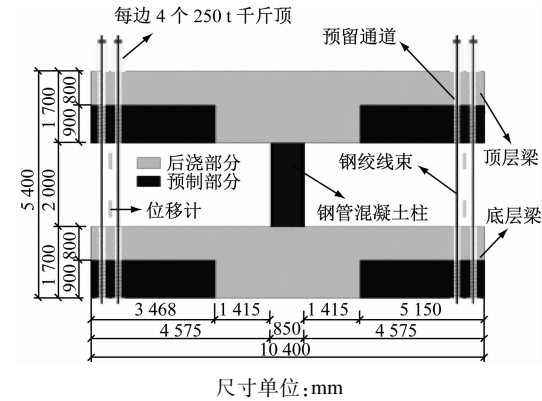
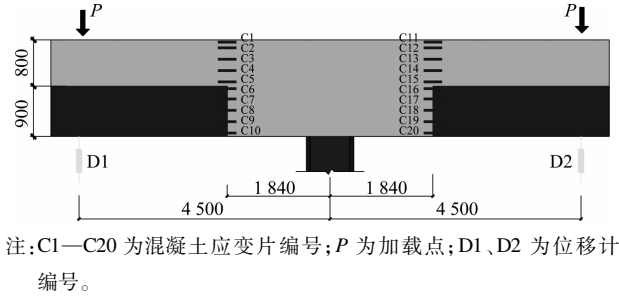
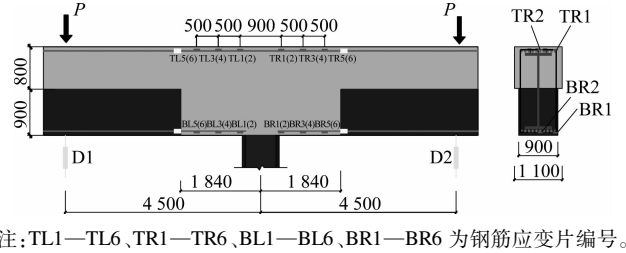


图 4 试件加载装置示意图

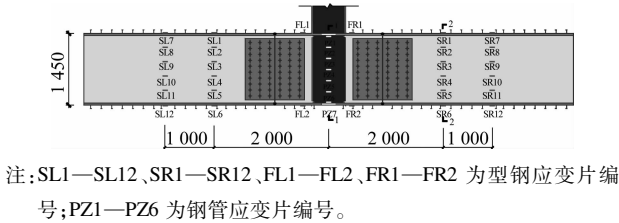
Fig. 4 Loading diagram of test component



a) 梁端位移传感器及混凝土应变片布置



b) 梁受力钢筋应变片布置



c) 型钢应变片布置

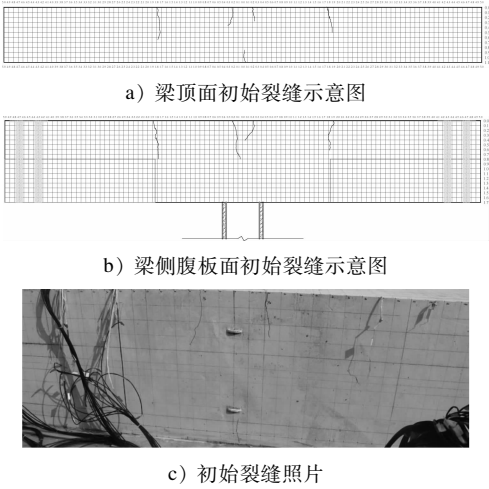
尺寸单位: mm。

图 5 试件位移计及应变计布置方案

Fig. 5 Test component displacement meter and strain gauge layout scheme

在加载过程中,钢管混凝土柱外侧混凝土未出现裂缝,节点进入塑性阶段,未出现整体性的破坏,节点整体性能良好。在节点连接区域的破坏,主要表现为靠近柱端位置处的部分混凝土压碎,梁顶面的裂缝开展,裂缝宽度为 2 mm。当梁端荷载加载至 750 kN 时,梁顶面开始出现竖向裂缝,同时,靠近节点区

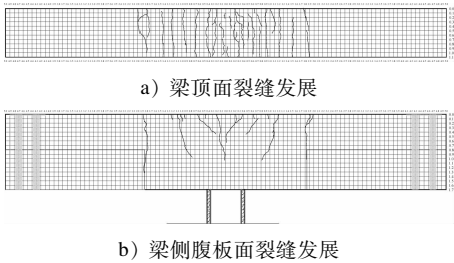
域梁的现浇与预制竖向结合面处出现裂缝,如图 6 所示。随着荷载的增加,梁顶面持续有新的竖向裂缝产生,梁侧腹板面出现多条明显的弯剪斜裂缝。梁端加载至 2 000 kN 时,梁顶面近加载端竖向裂缝基本贯通,如图 7 所示,此时跨中主裂缝宽度已经超过 0.2 mm。荷载持续增加,梁顶受拉面持续有新竖向裂缝产生并逐步贯通,弯剪裂缝逐渐从加载端向节点区域发展,裂缝宽度逐渐增加,梁两端加载至 4 000 kN 时,已基本无新裂缝产生,跨中主裂缝宽度已经超过 2 mm,其破坏形态如图 8 所示,梁底靠近柱端受压侧混凝土出现轻微剥落,梁两端加载至 5 750 kN 时,混凝土压碎剥落严重。



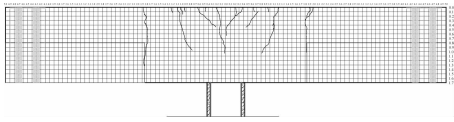
c) 初始裂缝照片

图 6 梁的初始裂缝

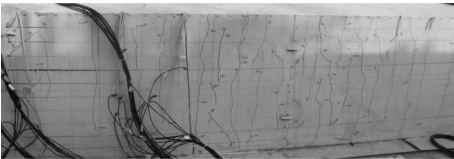
Fig. 6 Beam initial cracks



a) 梁顶面裂缝发展



b) 梁侧腹板面裂缝发展



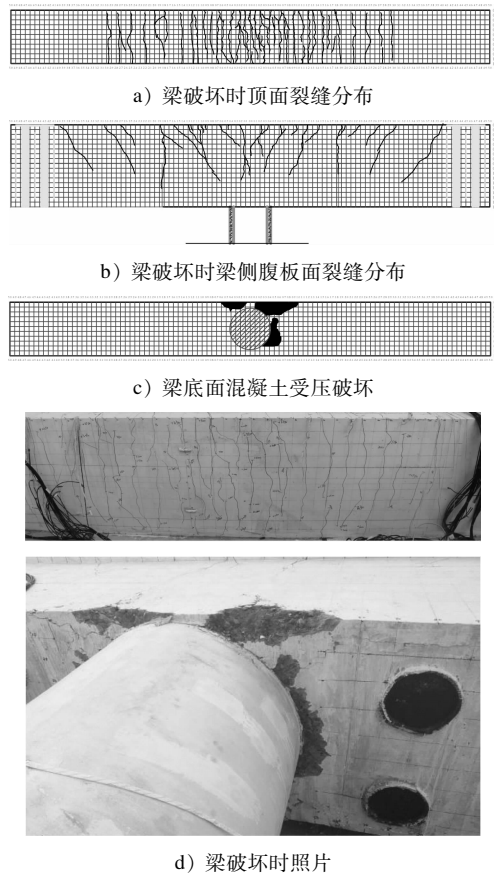
c) 裂缝发展照片

图 7 梁裂缝发展

Fig. 7 Beam crack development

2.2 节点荷载-位移曲线

试验实测梁端荷载-位移曲线见图 9。从图 9 中可以看出,在加载初期,节点尚未开裂,处于弹性阶



d) 梁破坏时照片

图8 梁破坏形态

Fig. 8 Beam failure morphology

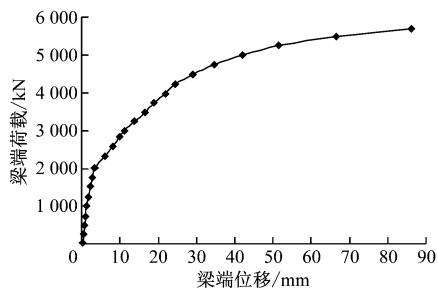


图9 梁端荷载-位移曲线

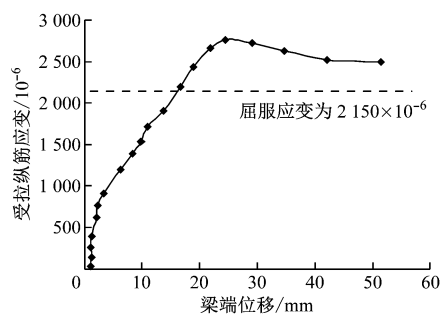
Fig. 9 Load-displacement curve of the beam end

段;当荷载增至 750 kN 时,出现裂缝,梁端位移为 1.01 mm,不过此时对试件的整体刚度影响较小,荷载-挠度曲线仍为直线;当荷载约为 2 000 kN 时,荷载-位移曲线斜率出现突变,说明裂缝的增加与发展导致试件的整体刚度发生了突变;随着荷载的增加,试件的塑性变形特征逐渐明显,挠度增长加快;在荷载增至 3 875 kN 时,构件进入屈服阶段,梁端位移为 20.3 mm,试件刚度开始退化,挠度增速加快,直至加载结束;荷载为 5 750 kN 时,梁端位移达到 86.17 mm,此时荷载-位移曲线仍未出现塑性平

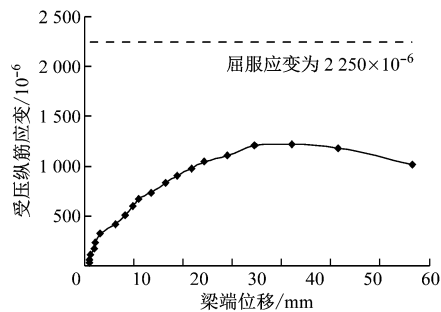
缓或下降段,可见该梁柱节点具有很好承载力和刚度。试件的位移延性系数^[8]大于 4,说明节点具有良好的延性。

2.3 节点应变分析

近加载梁端的上下纵筋应变变化如图 10 所示。可以计算出受拉纵筋(ϕ 为 28 mm 的 HRB400 钢)的屈服应变为 $2\,150 \times 10^{-6}$ 。由图 10 a) 可以看出,在梁端位移达到 21.8 mm,荷载达到 4 000 kN 时,梁受拉纵筋屈服。梁受压侧纵筋(ϕ 为 22 mm 的 HRB400 钢)的屈服应变为 $2\,250 \times 10^{-6}$;由图 10 b) 可以看出,加载全过程梁受压纵筋并未屈服。近加载梁端的型钢上下翼缘的应变变化如图 11 所示。根据型钢材性试验的结果,可以计算出翼缘钢材的屈服应变为 $2\,015 \times 10^{-6}$,上下翼缘在加载过程中的应变大小基本相同,在梁端位移达到 55.6 mm,荷载达到 5 250 kN 时,型钢翼缘屈服。



a) 梁上部受拉纵筋



b) 梁下部受压纵筋

图10 近加载梁端纵筋应变变化

Fig. 10 Strain variation of longitudinal bars near the loading beam end

节点域钢管部分在各级荷载作用下沿截面高度的应变分布如图 12 所示。从图 12 中可以看出,试件的中和轴位于钢管中,试件破坏时连接接头钢管部分的钢材并未出现屈服,且其应变在受力各阶段均沿截面高度呈线性分布。叠合梁部分型钢在沿截面高度的应变典型分布见图13,叠合梁中性轴

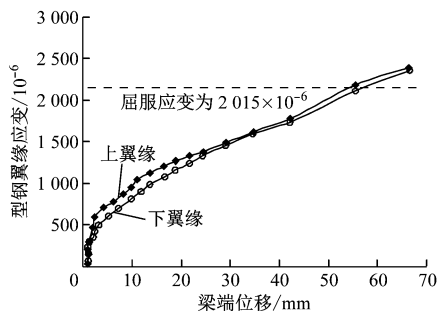


图 11 近加载梁端的型钢应变变化

Fig. 11 Strain variation of steel profile near the loading beam end

大致位于距离梁底(受压)350 mm 高度位置,由于梁截面距跨中较远,因此型钢梁并未屈服,试件本身还处于弹性状态,整个截面沿高度应变分布基本呈线性。因试件型钢上下翼缘均布置了抗剪螺栓,在破坏时试件表面均未发现平行于型钢翼缘的纵向黏结裂缝。

从试件的应变分布得出,该节点截面应变分布基本符合平截面假定,预制混凝土、现浇混凝土和型钢粘结良好并共同工作,进一步表明梁试件具有良好的整体性能。

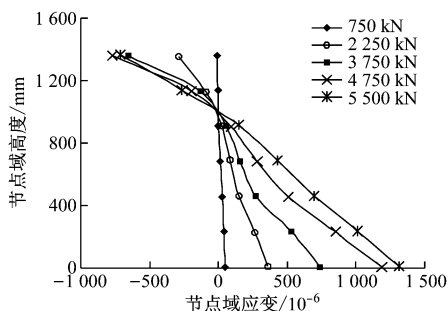


图 12 连接接头处钢管应变

Fig. 12 Strain of joint steel pipe

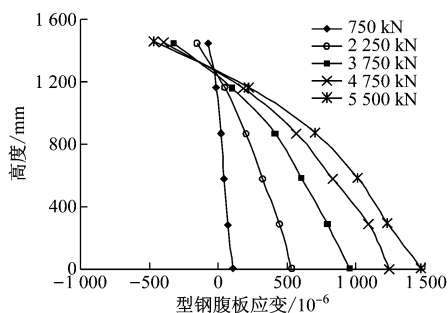


图 13 叠合梁部分型钢应变

Fig. 13 Strain of steel of composite beam

3 数值分析

3.1 有限元模型验证

采用 ANSYS 软件建立该节点有限元模型。加载方式、节点尺寸以及材料性能参数与试验相同,以进一步研究梁柱节点的力学性能。

考虑到试验过程中,钢管混凝土柱、型钢混凝土梁以及节点区域整体性良好,无接触面滑移,因此在本次数值模拟中假定钢管与混凝土、型钢与混凝土之间完全粘结。数值模拟采用 BEAM189 单元,混凝土部分采用多线性随动强化模型(KINH),钢材部分采用双线性随动强化模型(BKIN)。混凝土本构采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中的混凝土单轴受压应力-应变公式,钢筋、钢管及型钢采用单轴应力-应变关系双折线模型^[9]。节点有限元模型如图 14 所示。

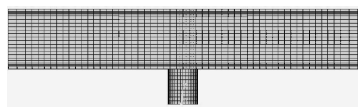


图 14 节点有限元模型截图

Fig. 14 Finite element model of the joint

节点荷载-位移曲线见图 15。有限元数值模拟的荷载-位移曲线的刚度变化趋势整体与试件的试验结果吻合良好。在最终节点位移(86.17 mm)下,数值模拟的结果比试验结果约高 10%,数值模拟结果在误差允许范围之内。因试验条件的限制,试验结果中无法给出节点的最大承载力。从数值模拟结果得出,节点的最大位移为 96.6 mm,最大加载为 6 555 kN。在弹性阶段,数值模拟的节点刚度略小于试验结果;屈服阶段后,数值分析得到的节点承载力大于试验结果。这可能是因为,在弹性阶段数值模拟采用的混凝土本构忽略了弹性阶段型钢对混凝土的约束作用,以及裂缝发展累积对节点承载

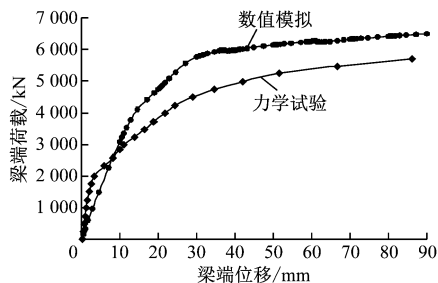


图 15 节点荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curve of the joint

力的影响。整体来看,数值模拟与试验结果的误差在允许范围内,故对节点承载的数值分析模拟是合理可靠的。

3.2 参数分析

在已有数值模型的基础上,对节点设计的关键参数进行分析。

对不同强度等级的混凝土进行分析,不同强度等级混凝土的节点荷载-位移曲线见图 16。从图 16 中可看出,当型钢梁的预制部分采用 C40 混凝土时,对节点承载力的影响可忽略。节点预制混凝土部分为受压区,说明该部分的混凝土有较大的承载力富余。当预制及现浇部分混凝土强度等级均为 C50 混凝土时,结构刚度明显增大,承载力增加约 20%,但节点延性明显降低,节点的最大位移约为 46 mm,降低约 50%。从数值分析可得出,应结合承载力与延性综合确定混凝土强度等级。

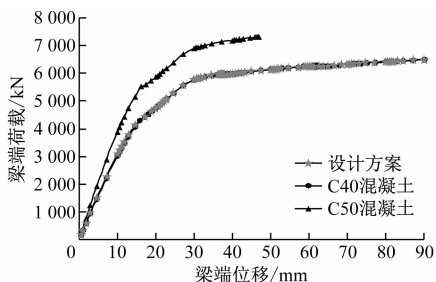
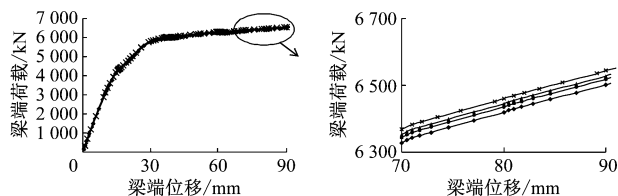


图 16 不同强度等级混凝土的节点荷载-位移曲线

Fig. 16 Node load-displacement curves of concrete with different strength grades

标准设计图集 12SG904-1《型钢混凝土结构施工钢筋排布规则与构造详图》中规定型钢梁中型钢翼缘宽度不应大于梁截面宽度的 2/3。在节点型钢截面面积不变的情况下,不同翼缘宽度(翼缘宽度变化范围为 600~400 mm)的节点荷载-位移曲线见图 17。计算结果表明,翼缘宽度的改变对节点的刚度和承载力影响较小。从图 17 中可看出,随着翼缘



a) 节点荷载-位移曲线

b) 局部放大图

注: —x— 为设计方案; —◇— 为翼缘 500 mm;
—□— 为翼缘 450 mm; —■— 为翼缘 400 mm。

图 17 不同翼缘宽度的节点荷载-位移曲线

Fig. 17 Load-displacement curves of different flange widths

宽度的减少,节点的承载力略有增加。实际工程中,型钢梁的翼缘宽度约为梁宽度的 1/2,以方便梁箍筋的布置。本文的数值分析为实际工程中的翼缘宽度选择提供了参考依据。

4 结论

在试件的试验基础上,对节点试验进行数值模拟与参数分析,得出以下结论:

1) 节点的加载试验中,节点的整体性良好,节点梁底柱端的混凝土压碎剥落,梁顶混凝土裂缝增多并发展,最大裂缝宽度为 2 mm。

2) 通过对节点的荷载-位移曲线、节点区域应变分布的分析,验证了裂缝-屈服-塑性阶段的发展过程,进一步表明预制混凝土、现浇混凝土和型钢粘结良好并共同工作,节点的整体性能良好。

3) 利用 ANSYS 软件建立数值分析模型,并与试验结果进行比较分析,确定模型的合理性。进而对混凝土等级、型钢尺寸及配筋进行参数分析。在工程实践中可结合承载力与延性来综合确定混凝土强度等级,而型钢翼缘宽度的减小对承载力的影响可忽略,这为箍筋布置提供了便利。

参考文献

- [1] 吴超,谢建和,刘锋. 装配式混凝土框架梁柱节点研究动态和展望[J]. 混凝土, 2020(4): 128.
WU Chao, XIE Jianhe, LIU Feng. Research progress and prospects on beam-to-column connections of precast concrete frame [J]. Concrete, 2020(4): 128.
- [2] 苏锋,蔡永昌,蒋晔. 新型钢管混凝土梁柱节点试验研究及数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1192.
SU Feng, CAI Yongchang, JIANG Ye. Experimental investigation and numerical analysis on the behavior of a new type of concrete-filled steel tube column joint [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6): 1192.
- [3] 李蔚,刘祖华. 钢管混凝土柱节点试验及非线性分析[J]. 低温建筑技术, 2012, 34(3): 24.
LI Wei, LIU Zuhua. Experimental investigation and nonlinear finite element analysis on the behavior of CFST column joint [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 34(3): 24.
- [4] 熊礼全,毛海涛,付亚男,等. 钢筋混凝土柱-钢梁(RCS)空间组合节点的有限元研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(3): 22.
XIONG Liquan, MAO Haitao, FU Ya'nan, et al. Nonlinear finite element modeling of three-dimensional RCS joints [J]. Structural Engineers, 2016, 32(3): 22.

问题,也涉及到管理操规、车辆、限界、站台门等多专业标准的统一,在实际工程中要综合多重因素,选择更优方案。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于培育发展现代化都市圈的指导意见:发改规划[2019]328号[A]. 北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2019.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Guiding opinions of National Development and Reform Commission on cultivating and developing modern metropolitan areas: FGGH [2019] No. 328[A]. Beijing: National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, 2019.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要:中城城轨[2020]10号[A]. 北京:中国城市轨道交通协会,2020.
China Association of Metros. Outline of smart urban rail development of urban rail transit in China: ZCG [2020] No. 10[A]. Beijing: China Association of Metros, 2020.
- [3] 中国国家铁路集团有限公司. 新时代交通强国铁路先行规划纲要[J]. 交通企业管理, 2020(5): 37.
China State Railway Group Co., Ltd. Outline of railway advance planning for a powerful transportation country in the new era[J]. Transportation Enterprise Management, 2020(5): 37.
- [4] 李亮,史宁娟,孙旺. CBTC 和 CTCS 系统差异性分析及兼容性方案探讨[C]//中国智能交通协会. 第十四届中国智能交

通年会论文集. 北京:电子工业出版社,2019: 89.

- LI Liang, SHI Ningjuan, SUN Wang. Discussion on difference analysis and compatibility scheme of CBTC and CTCS systems[C]//China Intelligent Transportation Systems Association. Proceedings of the 14 th Annual Conference on Intelligent Transportation in China. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019: 89.
- [5] 智国盛. 轨道交通“三网融合”信号技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
ZHI Guosheng. Research on signal technology of 'three networks integration' of rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [6] 李乾社. 市域铁路信号列控制制式的研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(2): 10.
LI Qianshe. Research on signal train control system for regional railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(2): 10.
- [7] 张敏慧. 国铁与城轨信号系统差异及互通性探讨[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(12): 76.
ZHANG Minhui. Exploration on the difference and interoperation between national railway and urban signaling systems[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 76.
- [8] 卿建强,雷成健,梁波. 列车自主运行控制系统研究[J]. 控制与信息技术, 2021(4): 95.
QING Jianqiang, LEI Chengjian, LIANG Bo. Research on train autonomous circumambulation system[J]. Control and Information Technology, 2021(4): 95.

(收稿日期:2022-09-20)

(上接第 65 页)

- [5] 王颖,毕灵云. 新型复式钢管混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(14): 42.
WANG Ying, BI Lingyun. Research on seismic behavior of new multiple concrete filled steel tube column-beam joints[J]. Building Structure, 2019, 49(14): 42.
- [6] 王琨,智海祥,曹大富,等. 预应力型钢混凝土梁-钢管混凝土叠合柱框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 29.
WANG Kun, ZHI Haixiang, CAO Dafu, et al. Test on hysteretic behavior of prestressed steel reinforced concrete beam to steel-tube reinforced concrete column joints[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 29.
- [7] 姜宝龙,李英民,喻雪纯,等. 圆钢管混凝土相贯斜柱-型钢混凝土梁空间节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,

2019, 40(增刊1): 99.

- JIANG Baolong, LI Yingmin, YU Xuechun, et al. Experimental study on seismic behavior of steel reinforced concrete beams to circular concrete filled steel tubular columns complex connections [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(S1): 99.
- [8] 于建兵,周莉萍,郭正兴,等. 部分高强筋预制混凝土框架节点抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 17.
YU Jianbing, ZHOU Liping, GUO Zhengxing, et al. Aseismic behavior of precast concrete frame joints with partial high strength tendons[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(11): 17.
- [9] 韩林海,陶忠,王文达. 现代组合结构和混合结构: 试验、理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
HAN Linhai, TAO Zhong, WANG Wenda. Advanced composite and mixed structures[M]. Beijing: Science Press, 2009.

(收稿日期:2021-02-08)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821