

装配式钢筋混凝土梁螺栓连接受力性能试验研究

吴东平, 杨逸东, 李成玉

(武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065)

摘要: 为验证装配式钢筋混凝土梁螺栓连接的合理性和可行性。按工程中常见的梁尺寸, 等比例设计并制作3个试验构件, 通过控制试件节点处的高强螺栓规格进行对比, 对3根足尺试验梁进行静力加载试验与分析, 来研究装配式钢筋混凝土梁螺栓连接受力性能。通过观察试验过程、分析试验结果, 对比分析各试验试件的破坏形态、开裂荷载、屈服荷载、极限荷载、刚度变化、挠度实测值、延性等力学性能指标。结果表明: 新型试验梁的破坏形式为适筋破坏, 满足适筋梁正截面受弯三个受力阶段, 破坏位置出现在螺栓连接节点外混凝土处10 cm~15 cm, 梁支座处及节点核心区未发生破坏。节点传力性能好, 承载力高, 受力性能好, 此新型梁螺栓连接合理、可行。螺栓规格的降低使构件承载力下降, 初始刚度变化较小。研究结果可为类似梁螺栓连接提供参考依据。

关键词: 预制装配; 螺栓连接; 混凝土梁; 受力性能

中图分类号: TU39

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)03-0146-06

Experimental Study of Stress Performance of Bolt Connection of Prefabricated Reinforced Concrete Beam

WU Dongping, YANG Yidong, LI Chengyu

(College of City Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China)

Abstract: In order to verify the rationality and feasibility of the prefabricated reinforced concrete beam bolting connection. According to the common beam size in the project, three test components are designed and made in equal proportion. By comparing the specifications of the high strength bolts at the test joints, the static loading test and analysis are conducted on the three full ruler test beams, so as to evaluate the connection performance of the prefabricated reinforced concrete beam bolts. By analyzing the test process and results, the failure form, cracking load, yield load, limit load, limit load, stiffness change, deflection and ductility of each test specimen were compared and analyzed. The results show that the failure form of the new test beam is the failure of suitable reinforcement, which meets the three stress stages of the front section of the suitable reinforcement beam. The failure position is 10 cm~15 cm at the concrete outside the bolted connection node, and the beam support and the node core area of the beam are not damaged. With good force transfer performance, high bearing capacity and good bearing performance, the new beam bolt connection is reasonable and feasible. The decrease of the bolt size reduces the bearing capacity of the member, and the initial stiffness change is small. The research results provide a reference for similar beam bolting.

Keywords: prefabricated assembly; bolted connection; concrete beam; force performance

装配式钢筋混凝土结构是我国建筑结构发展的重要方向之一, 具有缩短工程施工工期、降低劳动力

成本、提高工程建设效率^[1-2]、改善施工现场及周边环境、为绿色施工提供保障、便于模数化批量生产等

优势^[3-5],遵循我国可持续发展的原则,有利于我国建筑工业化的发展,是实现绿色环保建筑、绿色施工的重要途径^[6-10]。因此,我国对于装配式混凝土结构的性能研究十分重视。

然而,在装配式建筑中,节点连接方式是否合理和高效是装配式建筑发展和实际建设中重要的制约因素。因此,设计并研究各种预制结构建筑的主体结构连接方式,对于实现我国建筑工业化的发展,提高生产效率,提高和保证建筑工程质量非常重要^[11]。目前,在装配式结构中,按照连接方式可分为干连接和湿连接;按照连接部位,可分为梁-柱连接,柱-柱连接及梁-梁连接^[12-14]。

本文针对装配式结构梁-梁节点连接方式,提出一种新型的装配式钢筋混凝土螺栓连接方式,即在预制钢筋混凝土梁中预埋钢套筒、铆钉等构件,通过在梁-梁连接节点处设置端板、螺栓、加劲肋,以螺栓连接两根预制装配式混凝土梁,增强了装配式梁的整体性能,达到缩短工期的目的。通过对试验梁进行静力加载试验与分析,为装配式建筑的梁节点连接提供了依据以及借鉴。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文提出的节点取自门式刚架结构梁跨中屋脊节点,如图 1 所示。以某酒厂项目为研究背景,由于酒厂处于酸性环境中,具有腐蚀性,采用钢结构形式门式刚架,容易对钢材腐蚀,故采用装配式钢筋混凝土梁进行拼接,研究装配式钢筋混凝土梁的力学性能。为了方便试验,将有坡度的屋脊节点转换成水平的梁拼接节点,如图 2 所示。本试验设计并制作了 3 个装配式钢筋混凝土梁螺栓连接节点试件 DH-1、DH-2、DH-3。试验节点的具体设计参数见表 1。试验构件采用 C30 混凝土,保护层取 30 mm。钢筋级别均为 HRB400,箍筋直径为 10 mm,间距为 100 mm,配筋根据《混凝土结构设计规范》^[15](GB 50010—2010)。螺栓连接节点处使用钢材等级均为 Q355。本试验通过改变试验控制参数,高强螺栓规格,来研究装配式钢筋混凝土梁螺栓连接节点试件的承载力和整体性。试件梁由钢套筒、端板、螺栓、加劲肋、铆钉及混凝土梁组成,端板、螺栓、加劲肋及钢套均在工厂中预制,梁钢套筒和端板焊接,梁纵筋、栓钉与梁钢套内部焊接,并以整体浇筑的方式连接形成整体,再以高强螺栓将节点相对连接,最后形成完整试件。试件详图如图 3 所示。

表 1 试件主要设计参数

编号	节点形式	高强螺栓规格	螺栓等级
DH-1	装配式	M22	10.9 级
DH-2	装配式	M20	10.9 级
DH-3	装配式	M18	10.9 级

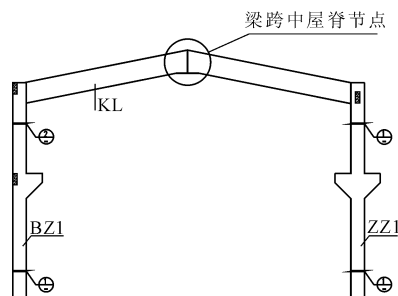


图 1 门式刚架节点布置

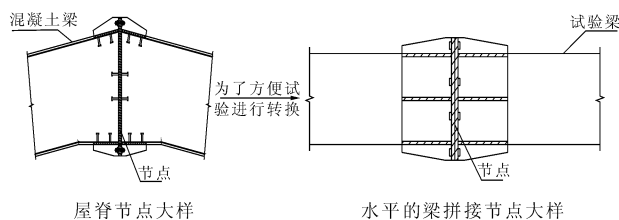


图 2 屋脊节点转换成水平的梁拼接节点

1.2 试件材料力学性能

本试验制作的装配式钢筋混凝土梁螺栓连接节点构件均采用 C30 混凝土进行浇筑,在现场浇筑构件的同时,根据我国《混凝土结构设计规范》^[15](GB 50010—2010)规定,用模具制作 3 个以边长为 150 mm 的立方体标准试块,并与现场浇筑的试验构件在相同条件下养护 28 d 以上。试验测得混凝土的抗压强度平均值为 $f_{cu} = 30.3$ MPa。

在试件梁制作时所采用的钢筋型号以及钢节点处所采用的钢材,均预留了钢筋、钢材的试样。钢材的力学性能测定在学校土木工程试验中心进行,试验按照《金属材料拉伸试验》^[16](GB/T 228.1—2010)进行材性试验。钢材力学性能结果如表 2。

表 2 钢筋及其他钢构件力学性能

类别	钢筋直径 / 钢板厚度 / mm	屈服强度 / MPa	极限强度 / MPa	弹性模量 / (N · mm ⁻²)
HRB400	10	408	549	2.00×10^5
HRB400	18	417	566	2.00×10^5
Q355	8	365	484	2.02×10^5
Q355	14	356	524	2.02×10^5
Q355	20	389	531	2.02×10^5

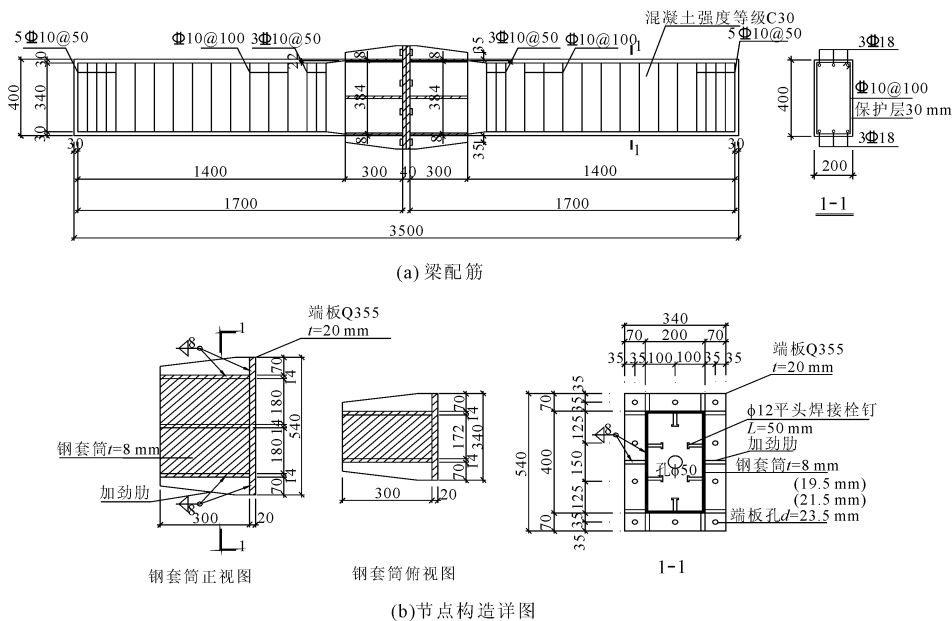
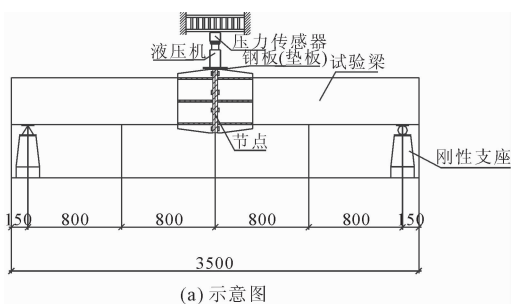


图 3 试件详图(单位:mm)

1.3 试验加载装置及加载制度

本试验在学校土木工程试验中心进行。试验梁为简支梁,一端为固定铰支座,另一端为滚动铰支座,梁的两端支座处各留出 150 mm,加载点处垫有钢板“以防止局部压坏”加载方式如图 4 所示。



(a) 示意图



(b) 实物图

图 4 试验装置(单位:mm)

试验采用单调加载方式。此次试验为装配式钢筋混凝土梁螺栓连接节点试件静力试验,采用梁跨中处施加集中荷载,由电液伺服压力试验机施加集中力来实现单调加载方式,通过力控制静力加载。本试验通过预加载与正式加载两个阶段进行^[17]。

预加载按 3 级加载进行,并且预加载的最大值不得超过开裂荷载的 70%,检验试验装置是否正常工作,试验人员能够准确读取并记录仪表数据,确保试验仪器所得数据的精确度。正式加载严格按照预加载的制度进行,并结合位移加载直至试件的承载力下降到最大荷载 85% 以下或出现试件梁受压区边缘混凝土压碎的破坏特征时,截面破坏,停止加载。为了防止对试件性能的误判,第一个试验梁的加载制度采取保守加载的原则,以 5 kN 为一级进行加载,来观察试件情况,往后的两个试验梁,按规定程序加载。

1.4 测点布置

通过百分表记录螺栓连接节点核心区以及梁跨中、支座处竖向位移,在梁纵筋、螺栓连接节点、混凝土处布置电阻应变片,通过电阻应变仪读取对应的应变。百分表及应变片布置见图 5。

2 试验现象及破坏形态

DH1 试验梁采取的高强螺栓规格为 M22,在正式加载前进行预加载,检查百分表、电阻应变箱能够正常工作,以及试验人员确保读数无误。试验刚开始加载时,试件竖向荷载较小,试验梁混凝土表面无裂缝,此时梁的受力情况与匀质弹性体梁相似。正式加载时,随着荷载的增加,试件跨中加载点处的竖向位移线性增长,增长速度比较缓,钢筋、钢节点和混凝土的应变变化也较为稳定。当竖向加载到 60 kN 时,试验梁螺栓连接节点两侧边缘同时在第 3

网格处出现第一条竖直向上横跨三个网格的细微裂缝。随着荷载增大,试验梁表面开始出现多条细微竖向裂缝,且沿着原来的裂缝继续往上开展。当竖向加载至 100 kN 时,试验梁螺栓连接节点左侧 9 网格处往上两个网格出现第一条横跨三个网格的斜裂缝,且试验梁螺栓连接节点两边的混凝土基本对称分布出现新的裂缝。当竖向加载至 120 kN 时,前期出现的裂缝逐渐向上发展成为主裂缝,试验梁螺栓连接节点左侧斜裂缝继续往上开展,试验梁螺栓连接节点右侧 3 网格处沿着主裂缝出现一条水平的斜裂缝。当竖向加载至 180 kN 时,梁纵筋应变为 $2115 \mu\epsilon$,试件达到屈服状态,试验梁螺栓连接节点左侧沿着 11 网格往上 2 网格出现一条向下的斜裂

缝,8 网格出现一条向下的斜裂缝,试验梁螺栓连接节点右侧 3 网格往上两网格出现一条往 4 网格延伸的斜裂缝,此时主裂缝宽度为 4 mm。当竖向加载至 210 kN 时,试验梁螺栓连接节点两侧的受压区混凝土起皮,受拉区混凝土形成一条贯通的主裂缝,试验梁螺栓连接节点左侧继续沿着主裂缝向 3 网格开展一条斜裂缝,受压区 2 网格附近出现一条水平裂缝,试验梁螺栓连接节点右侧 14 网格处出现一条竖直向上的裂缝。当竖向加载至 240 kN 时,试验梁钢节点两侧的受压区混凝土压碎,竖向位移变化较大,主裂缝宽度为 1 cm。继续加载,荷载下降到峰值荷载 85% 以下,停止加载。试验梁 DH1 破坏形态如图 6 所示。

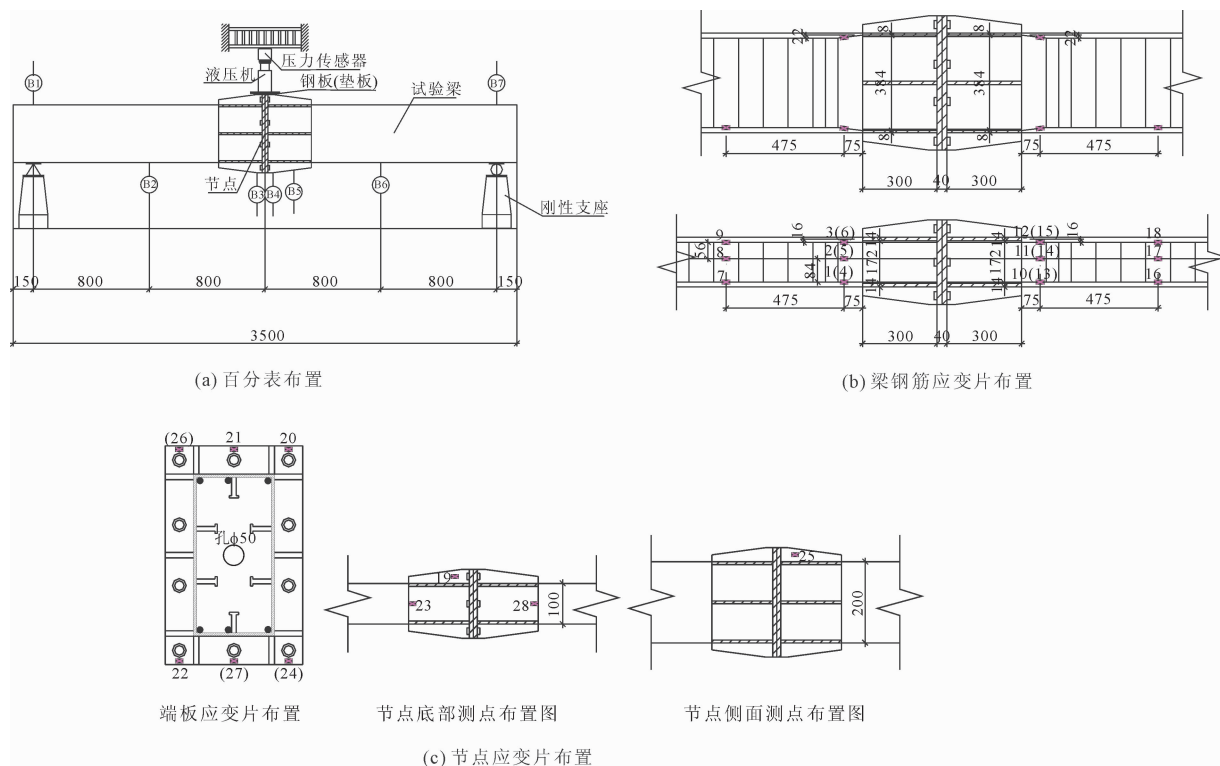


图5 测点布置(单位:mm)



图6 DH1 破坏形态

DH2 试验梁采取的高强螺栓规格为 M20, 同样

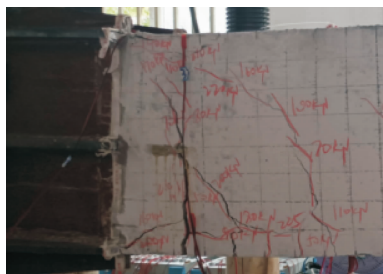
在正式加载前先进行预加载,当竖向加载到 50 kN

时,试验梁螺栓连接节点两侧边缘同时在第 3 网格出现第一条竖直向上的细微裂缝,且横跨三个网格。当竖向加载至 90 kN 时,试验梁螺栓连接节点右侧 11 网格处出现一条斜裂缝,试验梁螺栓连接节点左侧沿着 3 网格主裂缝继续向上开展,6 网格向上一网格出现一条横跨三个网格的竖向裂缝。当竖向加载至 170 kN 时,梁纵筋应变为 $2\ 037\ \mu\epsilon$,试件达到屈服状态,试验梁螺栓连接节点左侧沿着主裂缝向 2 网格延伸,18 网格沿着 2 网格出现一条向上的斜裂缝,试验梁螺栓连接节点右侧沿着 2 网格向上 6 网格向受压区开展斜裂缝,前期出现的裂缝发展成为主裂缝,主裂缝宽度为 2.5 mm。当竖向加载至 200 kN 时,试验梁螺栓连接节点两侧的受压区混凝土起皮,受拉区混凝土形成一条贯通的主裂缝,主裂缝附近裂缝呈网状分布,向四周开展,主裂缝宽度 6.5 mm。当竖向加载至 230 kN 时,试验梁螺栓连接节点两侧的受压区混凝土压碎,竖向位移变化较大,主裂缝宽度为 8 mm。继续加载,荷载下降到峰值荷载 85% 以下,停止加载。试验梁 DH2 破坏形态如图 7 所示。

DH3 试验梁采取的高强螺栓规格为 M18,同样在正式加载前先进行预加载,当竖向加载到 40 kN 时,试验梁螺栓连接节点两侧边缘同时在第 3 网格出现第一条竖直向上的细微裂缝,且横跨三个网格。当竖向加载至 80 kN 时,试验梁螺栓连接节点右侧

10 网格处出现一条斜裂缝,试验梁螺栓连接节点左侧沿着 3 网格主裂缝继续向上开展。当竖向加载至 160 kN 时,梁纵筋应变为 $2\ 032\ \mu\epsilon$,试件达到屈服状态,试验梁螺栓连接节点左侧 3 网格处沿着原有裂缝向上开展,16 网格往上 4 网格出现一条往 15 网格发展的向上斜裂缝,试验梁螺栓连接节点右侧 21 网格处出现一条向上的裂缝,前期出现的裂缝发展成为主裂缝,主裂缝宽度为 2 mm。当竖向加载至 190 kN 时,试验梁螺栓连接节点两侧的受压区混凝土起皮,受拉区混凝土形成一条贯通的主裂缝,主裂缝附近裂缝呈网状分布,向四周开展,主裂缝宽度 4 mm。当竖向加载至 220 kN 时,试验梁螺栓连接节点两侧的受压区混凝土压碎,竖向位移变化较大,主裂缝宽度为 7 mm。继续加载,荷载下降到峰值荷载 85% 以下,停止加载。试验梁 DH3 破坏形态如图 8 所示。

通过观察试验现象,可知试验梁满足适筋梁的三个受力阶段。随着试验梁螺栓连接节点两侧同时第 3 网格处沿着主裂缝出现多条裂缝向四周延伸,呈网状分布,直至形成较宽的贯通裂缝,同时试验梁螺栓连接节点两侧的受压区混凝土压碎,竖向位移变化较大,构件破坏。试验梁满足“强节点弱构件”的设计原则,试验过程中试验梁螺栓连接节点未发生破坏。试验梁在破坏前,变形较大,有明显的破坏预兆,故试验梁破坏形式为延性破坏。

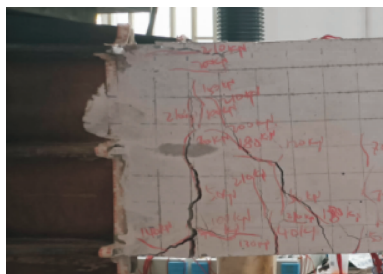


(a) 受压区混凝土破坏形态



(b) 试验过程

图 7 DH2 破坏形态



(a) 受压区混凝土破坏形态



(b) 试验过程

图 8 DH3 破坏形态

3 试验结果及分析

3.1 荷载-位移曲线

本试验共布置了7个百分表测点,在试验梁两端支座位置的混凝土上表面处各布置一个百分表为B1、B7,用来测量构件支座处的沉降。试验梁底部分别布置了5个百分表,在试验梁两端支座往螺栓连接节点方向距离为800 mm处对称各布置百分表B2、B6,在钢节点处布置百分表B3、B4、B5,且百分表B3、B4为对称布置,通过B2—B6来测量试验梁的挠度变形,详见图5(a)。本试验的加载点位于梁跨中螺栓连接节点处,故取螺栓连接节点处的百分表B3、B4的实测平均值来获取位移,并绘制试验构件梁的跨中及加载点处荷载-位移曲线如图9所示。

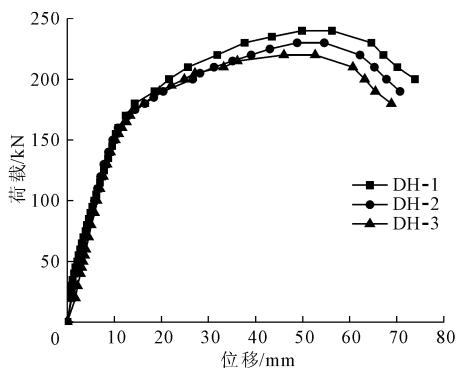


图9 跨中加载点处荷载-位移曲线图

根据图9可以看出,试验梁在单调加载过程中变化主要分为弹性工作、弹塑性工作、破坏工作三个阶段。

在弹性工作阶段中,试验梁出现裂缝前的荷载-位移曲线呈线性关系。在单调加载过程中,当试验梁下部的混凝土达到其抗拉极限时,试验梁受拉区混凝土表面产生裂缝,此时对应的荷载为试件梁的开裂荷载。

在弹塑性工作阶段中,试验梁到达开裂荷载后,受拉区混凝土表面出现多条竖向的细微裂缝。继续加载,试验梁的刚度下降,荷载-位移曲线由线性关系变成曲线关系,直至试验梁的钢筋发生屈服。此时荷载-位移曲线上第二个拐点所对应的荷载就是屈服荷载。

在破坏工作阶段中,试验梁受拉区钢筋开始屈服,试验梁跨中位移快速增长,裂缝急剧开展,直到最后试验梁受压区混凝土达到极限压应变时,受压区混凝土被压碎,试验梁破坏。试验梁的刚度减小

速度增大。此时荷载-位移曲线有明显转折,曲线最高点对应的荷载为极限荷载。

DH1、DH2、DH3试件梁的参数变量为高强螺栓的规格,通过分析跨中及加载点处荷载-位移曲线图,可得连接节点的高强螺栓规格对试件的承载力、刚度有一定的影响。高强螺栓的规格越大,试件梁的承载力有所增大,初始刚度变化较小。体现了此节点设计合理,试验梁符合适筋梁的破坏过程,可用于此类构件的完全装配式节点设计参考。

3.2 开裂荷载、屈服荷载、极限荷载实测值和挠度实测值

本试验通过电液伺服压力试验机施加荷载来实现单调加载,结合试验现象和数据,分析出试验试件梁的开裂荷载(P_{cr})、屈服荷载(P_y)、极限荷载(P_u)与其对应荷载的梁跨中加载点处B3、B4挠度实测值,如表3所示。

表3 开裂荷载、屈服荷载、极限荷载、跨中加载点处挠度实测值

试件编号	P_{cr} /kN	开裂挠度 /mm	P_y /kN	屈服挠度 /mm	P_u /kN	峰值挠度 /mm
DH-1	60	2.735	180	14.352	240	56.248
DH-2	50	2.231	170	12.919	230	54.623
DH-3	40	2.796	160	11.677	220	52.685

对表3进行分析,DH1、DH2、DH3三个试件梁的开裂荷载与极限荷载的比值分别约为0.25、0.22、0.18,屈服荷载与极限荷载的比值分别为约0.75、0.74、0.73。三个试验梁的开裂荷载对应的位移基本相同。分析试件DH1与DH2、DH2与DH3,随着高强螺栓的规格的减小,极限荷载有所降低,降低幅度均约为4%。当试验梁跨中竖向位移加载至接近 $l_0/55$ 时仍能呈现出良好的工作性能,即试验梁的延性性能较好,试件的延性系数均大于4。

4 结论

本文试验共设计制作了3根装配式钢筋混凝土梁螺栓连接节点试件,分别采用不同的高强螺栓的规格,完成竖向静力荷载作用下的梁抗弯性能试验,得到以下结论:

(1) 实测跨中及加载点处荷载-位移关系曲线表明:本试验中的3个试件在梁跨中处施加集中力作用下工作性能相近,均呈现出良好的三阶段受力工作状态,具有良好的承载能力、变形能力。

(下转第186页)

- [10] 刘娟. 半潜式平台结构强度评估与疲劳寿命评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [11] 邓露, 王彪, 肖志颖, 等. 半潜型浮式风机平台研究综述[J]. 船舶工程, 2016, 38(4): 1-6.
- [12] 唐友刚, 桂龙, 曹菡, 等. 海上风机半潜式基础概念设计与水动力性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(11): 1314-1319.
- [13] DNV GL. Stability and Watertight Integrity: DNVGL-OS-C301[S]. DNV GL, 2020.
- [14] 阮胜福. 海上风电浮式基础动力响应研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [15] 刘毅. 单柱式浮式风机结构强度分析方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [16] 尚景宏. 海上风力机基础结构设计选型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [17] 桑松, 于梅, 石晓, 等. 基于设计波法的半潜型浮式风力机结构强度校核[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 185-191.
- [18] 邓露, 王彪, 肖志颖, 等. 钢筋混凝土浮式风机平台概念设计与性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 11-15, 21.
- [19] Code for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units, Consolidated Edition[S]. London: International Maritime Organization, 2001.
- [20] Structural Design of Column Stabilised Units-LRFD Method: DNVGL-OS-C103[S]. DNV GL, 2020.

(上接第 151 页)

(2) 破坏位置出现在螺栓连接节点外 10 cm ~ 15 cm 混凝土处, 最终破坏形态是受压区混凝土剥落, 梁支座处及节点核心区未发生破坏, 在荷载作用下具备良好的抵抗变形能力, 满足“强柱弱梁, 强节点弱构件”的设计要求, 说明本文装配式钢筋混凝土梁螺栓连接节点的连接方式合理、可行。

(3) 此装配式钢筋混凝土梁螺栓连接节点实现完全预制装配式, 使用高强螺栓连接的新型预制节点更加方便进行安装与拆卸, 使安装工艺更为简便, 施工工期大大缩短。

参考文献:

- [1] 张津荣. 浅谈建筑装配化发展历程及思考[J]. 江西建材, 2021(5): 11-12.
- [2] 黄小坤, 田春雨, 万墨林, 等. 我国装配式混凝土结构的研究与实践[J]. 建筑科学, 2018, 34(9): 50-55.
- [3] 陈子康, 周云, 张季超, 等. 装配式混凝土框架结构的研究与应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(4): 1-11.
- [4] Hossein Parastesh, Iman Hajirasouliha, Reza Ramezani. A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: An experimental investigation[J]. Engineering Structures, 2014, 70: 144-157.
- [5] Zhang Zhuangnan, Zhang Yan. Research status on reinforcement connection form of precast concrete shear wall structure[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 322(4): 1-5.
- [6] 叶浩文, 周冲. 装配式建筑的设计-加工-装配一体化技术[J]. 施工技术, 2017, 46(9): 17-19.
- [7] 陈建伟, 闫文赏. 装配式预应力混凝土结构及 CSI 住宅体系研究现状[J]. 世界地震工程, 2017, 33(4): 18-31.
- [8] 樊军, 杨嗣信. 关于实现装配式建筑的思考及建议[J]. 建筑技术, 2017, 48(2): 118-122.
- [9] 陈东浩. 装配式建筑的规范与发展状况分析[J]. 建筑技术, 2018, 49(S1): 253-254.
- [10] 孙明洁. 装配式建筑的发展与设计应用研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(8): 187-189.
- [11] 梁云峰. 螺栓连接装配式混凝土梁力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- [12] 李惠. 装配式建筑节点连接方法及其施工质量控制研究[J]. 价值工程, 2019, 38(27): 38-41.
- [13] 石彩华. 钢板螺栓连接装配式混凝土梁柱节点试验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [14] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41(12): 1074-1077.
- [15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [16] 金属材料拉伸试验: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [17] 混凝土结构试验方法标准: CB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.