

螺栓连接装配式混凝土梁静力性能 有限元分析

王宇¹,梁云峰¹,王芬²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 大连广播电视大学庄河分校,辽宁 大连 116400)

摘要 目的 研究型钢厚度、混凝土强度及型钢截面形式对螺栓连接装配式混凝土梁的静力性能影响。方法 采用 ABAQUS 软件,对螺栓连接装配式混凝土梁进行有限元分析,得到螺栓连接装配式混凝土梁的静力性能随混凝土强度、型钢厚度及型钢截面形式的变化规律。结果 螺栓连接装配式混凝土梁的极限承载力、屈服位移随着混凝土强度和型钢厚度的增加而增加;相同工况下,预埋矩形型钢试件极限承载力,屈服位移大于预埋工字型型钢试件。结论 螺栓连接装配式梁节点构造合理,满足结构设计使用要求。综合考虑材料及造价等因素,建议工程中采用 C30 混凝土、预埋 30 mm 厚度工字型型钢试件。

关键词 螺栓连接;装配式;静力性能;有限元分析

中图分类号 TU398.9 文献标志码 A

Finite Element Analysis of Bolted Fabricated Concrete Beams under Static Force

WANG Yu¹, LIANG Yunfeng¹, WANG Fen²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Zhuanghe Branch of Dalian Radio and Television University, Dalian, China, 116400)

Abstract: The purpose of this paper is to explore the influence of the thickness of the steel, the strength of the concrete and the section of the section steel on the static performance of the bolted assembled concrete beam. Finite element analysis of bolted fabricated concrete beam is carried out by ABAQUS software, and the trend that the static properties of bolted fabricated concrete beams depend on the strength of concrete, the thickness and the form of section steel is obtained. The results show that the ultimate bearing capacity and yield displacement of bolted fabricated concrete beam increase with the increase of the strength of concrete and the thickness of section steel, and the ultimate bearing capacity and yield displacement of the embedded rectangular steel specimen is higher than that of the embedded I-shaped steel specimen under the same working condition. The joints of bolted fabricated concrete beam can satisfy the requirements of design and constructing

收稿日期:2019-02-23

基金项目:国家自然科学基金项目(11672190)

作者简介:王宇(1977—),男,副教授,主要从事结构抗震、建筑防火等方面研究。

reasonable. It is recommended to use the strength of C30 concrete and pre-embedded 30mm I-shaped steel specimen considered the main application materials and price of the engineering.

Key words: bolted connection, prefabricated, static property, finite element analysis

装配式建筑因施工周期短、效率高、绿色环保等优势而日益成为重要的建筑形式^[1]. 在装配式建筑中关键之处在于结构连接方式^[2]. 针对装配式节点连接方式的理论研究,大部分集中在梁柱节点、柱柱节点^[3]. 但对于梁梁节点方面的研究较少. 1993年 U. Ersoy^[4]通过在梁梁节点上下焊接钢板的干连接方式,研究其在低周反复荷载下的抗震性能,结果表明该类节点延性及抗震性较好. 2016年焦燊烽^[5]提出一种在腹板及下翼缘处设置法兰板及加劲板,实现节点快速拼接的梁梁节点连接形式,通过低周反复荷载,得出该类节点受力合理,符合工业化装配式钢结构体系的设计要求. 2016年咸庆军^[6]对H型钢混凝土(SRC)梁梁连接节点的疲劳破坏模式和机理进行缩尺试验,结果表明H型钢受拉翼缘处发生疲劳断裂,梁截面同侧的受拉纵筋屈服,随后受压区混凝土逐渐压酥剥落.

针对国内外学者对装配式混凝土梁-梁节点研究较少这一现状,笔者提出一种关于梁-梁节点的新型节点连接形式,即在钢筋混凝土梁中预埋型钢和螺栓等构件,实现梁-梁节点的干连接. 研究表明,试件的极限承载力、屈服位移随混凝土强度和型钢厚度

的增加而增加,矩形型钢截面试件静力性能优于工字型截面试件.

1 建立模型

1.1 模型参数

要使梁发生弯曲破坏,要求剪跨比 $\lambda > 2$ ^[7-9],结合工程中常用梁尺寸,试验中取梁跨度为4.9 m. 螺栓连接装配式混凝土梁的配筋及钢构件布置见图1,试件参数见表1. 混凝土采用C30、C35、C40三个强度等级,预埋型钢材采用Q235B钢,型钢翼缘及腹板取25 mm、30 mm、35 mm三个厚度,型钢采用工字型及矩形两种形式. 钢筋均采用HRB400级钢筋,箍筋取 $\Phi 8@100$,螺栓采用10.9级M30高强螺栓. 配筋按下式计算:

$$A_s' = \frac{M - a_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2})}{f_y' (h_0 - a_s')}, \quad (1)$$

$$A_s = A_s' + \frac{a_1 f_c b x}{f_y}. \quad (2)$$

式中: A_s' 、 A_s 为受压区、受拉区纵向普通钢筋的截面面积; a_1 为分项系数,混凝土强度等级不超过C50时取1.0; b 为矩形截面宽度; x 为混凝土受压区高度; h_0 为截面有效高度; f_y 、 f_y' 为普通钢筋抗拉、抗压强度设计值.

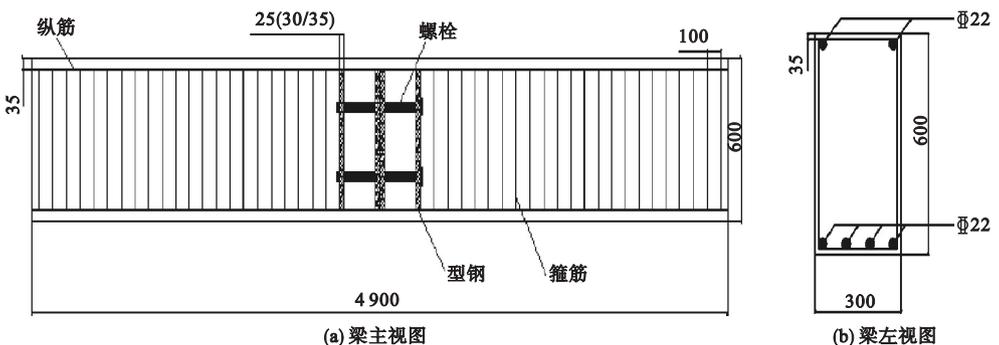


图1 梁配筋及钢构件布置图

Fig. 1 Beam reinforcement and steel component layout

表1 试件参数

Table 1 Parameters of the test specimens

梁形式	试件编号	截面 $b \times h/\text{mm}$	混凝土强度	钢筋型号	型钢厚度/mm	型钢形式
装配式梁	1	300 × 600	C30	HRB400/Φ22	25	工字型
	2	300 × 600	C30	HRB400/Φ22	30	
	3	300 × 600	C30	HRB400/Φ22	35	
	4	300 × 600	C35	HRB400/Φ22	25	
	5	300 × 600	C35	HRB400/Φ22	30	
	6	300 × 600	C35	HRB400/Φ22	35	
	7	300 × 600	C40	HRB400/Φ22	25	
	8	300 × 600	C40	HRB400/Φ22	30	
	9	300 × 600	C40	HRB400/Φ22	35	
	10	300 × 600	C30	HRB400/Φ22	25	
普通梁	11	300 × 600	C30	HRB400/Φ22	—	—

1.2 加载方式

梁两端的边界条件设为 $U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$, 即梁两端采用固接方式. 为使梁发生弯曲破坏, 荷载施加位置为距梁端 1/3 处, 边界约束及荷载施加位置见图 2. 根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T101—2015), 采用荷载随时间均匀变化的加载方式^[10], 荷载-时间曲线见图 3.

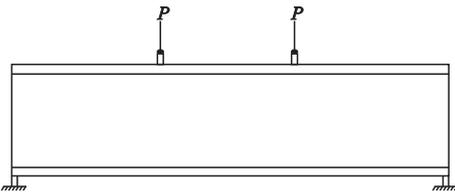


图2 梁加载方式

Fig. 2 Beam loading method

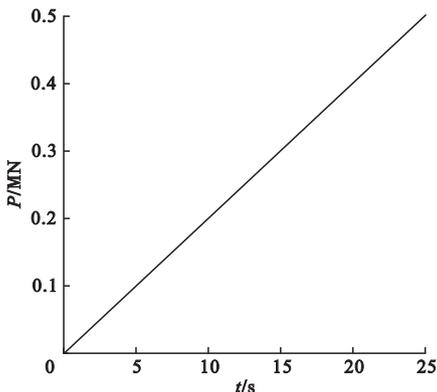


图3 荷载加载曲线

Fig. 3 Load loading curve

为提高螺栓连接的可靠性、防松能力和螺栓的抗疲劳强度, 增强连接的紧密性和刚性, 对于螺栓施加预紧力, 预紧力按下式计算^[11].

$$M_t = K \times P_0 \times d \times 0.001, \quad (3)$$

$$P_0 = \sigma_0 \times A_s, \quad (4)$$

$$A_s = \pi \times d_s^2 / 4, \quad (5)$$

$$\sigma_0 = (0.5 \sim 0.7) \sigma_s. \quad (6)$$

式中: M_t 为预紧力矩; K 为拧紧力系数; d 为螺纹公称直径; P_0 为预紧力; d_s 为螺纹部分危险剖面的计算直径; σ_s 为螺栓材料的屈服极限.

1.3 本构关系

1.3.1 混凝土本构关系

综合参考国内外学者对混凝土本构关系模型的研究^[12-15], 笔者采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010) 给出的混凝土本构关系^[16]:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon. \quad (7)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \rho_c [\alpha_a + (3 - 2\alpha_a)] x + (\alpha_a - 2) x^2, \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_d (x - 1) + x}. \end{cases} \quad (8)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}. \quad (9)$$

$$\rho_c = \frac{f_{cp}}{E_c \varepsilon_c}. \quad (10)$$

式中: α_a 、 α_d 分别为混凝土单轴受压应力 - 应变曲线上升段、下降段的参数值; f_{cp} 为混凝土单轴抗压强度; ε_c 为单轴抗压强度 f_{cp} 相应的混凝土峰值压应变; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数; E_c 为混凝土弹性模量.

表2 钢材及螺栓材料参数

Table 2 Steel and bolt material parameters

材料	E/MPa	ν	σ_y/MPa	σ_u/MPa	$\varepsilon_y/10^{-2}$	$\varepsilon_u/10^{-2}$	$\varepsilon_{st}/10^{-2}$
Q235B 钢材	2.06×10^5	0.3	299	436	0.045	19.8	34
10.9 级 M30 螺栓	2.06×10^5	0.3	980	1 100	0.47	1.36	—

注: E 为弹性模量; ν 为泊松比; σ_y 为屈服强度; σ_u 为极限抗拉强度; ε_y 为屈服应变; ε_u 为极限应变; ε_{st} 为破坏应变.

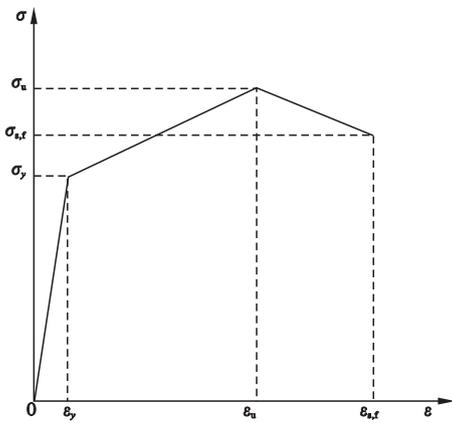


图4 钢材本构关系

Fig. 4 Steel constitutive relationship

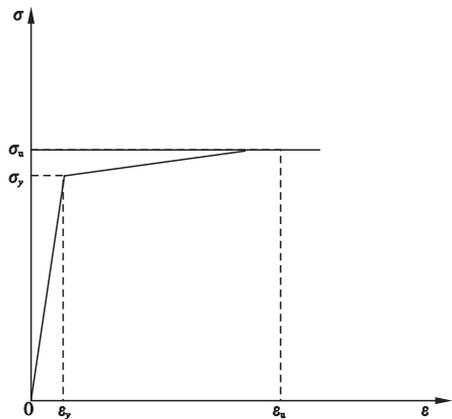


图5 螺栓本构关系

Fig. 5 Bolt constitutive relationship

1.4 单元类型及网格划分

在有限元分析中,为得到较为精确的模拟结果,一方面要考虑对构件施加的边界条件,另一方面也要考虑对构件进行网格划分

1.3.2 钢材本构关系

梁中型钢均采用 Q235B 钢材,钢材及 10.9 级 M30 螺栓参数见表 2,钢材应力 - 应变曲线见图 4,螺栓应力 - 应变曲线见图 5.

的方式^[17-18].笔者对混凝土、型钢、螺栓采用实体单元,对钢筋采用桁架单元;其中混凝土、型钢、螺栓均采用 C3D8R 计算单元;钢筋采用 T3D2 计算单元.钢筋、型钢与混凝土梁之间采用 Embedded 约束方式^[19-20];荷载加载点与梁之间采用 Coupling 约束方式^[21-22].为提高有限元模型计算速度,笔者进行有限元模拟时,对梁梁节点做如下简化,根据面积等效原则,将螺栓进行简化设计,其中螺帽转化成圆形,将螺栓帽、螺杆整体建模,忽略螺栓杆与孔壁的摩擦力.螺栓和型钢网格划分如图 6 和图 7 所示.

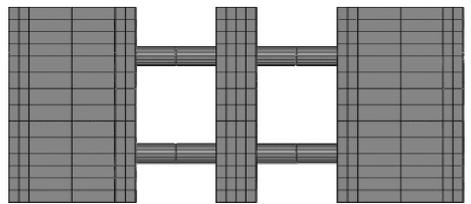


图6 螺栓网格划分

Fig. 6 Bolt meshing

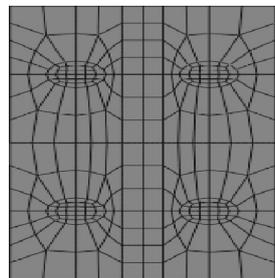


图7 型钢网格划分

Fig. 7 Steel meshing

2 结果分析

2.1 不同型钢厚度对试件受力性能影响

2.1.1 荷载-位移曲线

通过有限元分析发现,在 C30、C35、C40 混凝土强度下,每组试件变化趋势相同,因此笔者仅选取 C30 混凝土强度下不同钢板厚度对试件受力性能影响,结果见图 8。从图中可以看出,在集中荷载作用下,普通梁及装配式梁在位移为 15 mm 前荷载-位移曲线均呈线性变化,这是由于混凝土和钢材均处于弹性阶段;在位移超过 20 mm 后,两类梁的荷载-位移曲线斜率都有所减小,曲线趋于平缓。普通钢筋混凝土梁在达到最大承载力后发生破坏;而螺栓连接装配式混凝土梁的荷载-位移曲线在进入塑性阶段后,荷载缓慢增大至最大承载力,曲线斜率降低,但试件仍具有一定延性,并未发生突变,说明在这一阶段,螺栓和型钢起到了主要作用。

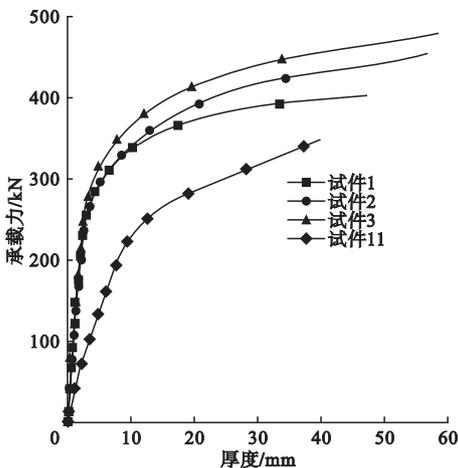


图 8 不同型钢厚度对承载力影响曲线

Fig. 8 Influence curves of steel thickness on bearing capacity

不同型钢厚度下试件极限承载力结果见表 3。可以看出,在相同混凝土强度、不同位移下,相比于 25 mm 型钢试件,30 mm 和 35 mm 的型钢试件极限承载力分别提高了 0.90%、6.39%; 2.63%、5.72%; 3.37%、7.59%。

表 3 不同型钢厚度下试件极限承载力

Table 3 Ultimate bearing capacities of test specimens under different steel thicknesses

型钢厚度/ mm	承载力/kN		
	位移 15 mm	位移 30 mm	位移 45 mm
25	352.1	379.2	395.2
30	370.5	418.2	439.6
35	396.4	432.3	440.8

由于各试件中混凝土和钢材在加载过程中的应力-应变曲线变化趋势相同,因此笔者仅选取试件 1 进行分析。钢材及混凝土应力-应变曲线见图 9,由图可知,当试件承受外荷载时,钢材和混凝土在位移为 10 mm 之前斜率相同,说明两者均处于弹性阶段,混凝土的黏结力使得二者协同工作;当试件变形位移为 20~24 mm 时,钢筋达到屈服点;当试件变形位移为 22~25 mm 时,混凝土也达到屈服状态,说明当混凝土压碎时,钢筋也同时达到屈服状态。由此可知,螺栓连接装配式混凝土梁具有较好的延性,满足混凝土梁延性破坏的要求。

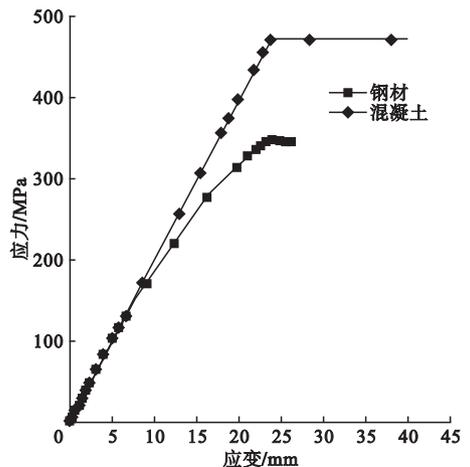


图 9 钢材及混凝土应力-应变曲线

Fig. 9 Stress and strain curves of steel and concrete

2.1.2 预埋不同厚度型钢应力分析

预埋不同厚度型钢的应力云图如图 10 所示。由图可知,试件 1、试件 2 及试件 3 在中部型钢与钢筋焊接处应力最大,形变也相对较大;而其余部分的型钢应力较小,形变也

较小;螺栓在结构承受外荷载时,受拉区螺栓的形变较大,产生的应力也相对较大;受压区螺栓的形变较小,产生的应力也相对较小.因此,在节点设计时,应充分考虑与钢筋焊接处的型钢的刚度.

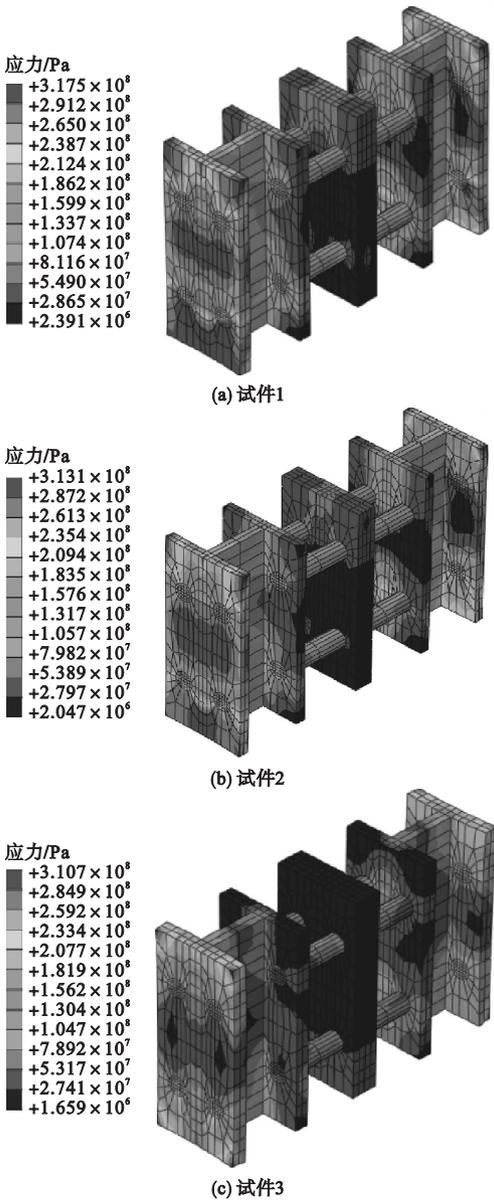


图10 螺栓连接处型钢应力云图

Fig. 10 Stress contour plots of section steel at bolted connection

2.2 不同截面型钢对试件受力性能影响

2.2.1 荷载-位移曲线

不同截面型钢的荷载-位移曲线如图

11所示.由图可知,在相同混凝土强度、钢板厚度及螺栓强度下,梁中预埋矩形钢试件的荷载位移曲线的斜率大于梁中预埋工字型钢试件的荷载-位移曲线斜率,说明在承受外荷载时,矩形钢试件刚度大于工字型钢.因此可知,预埋矩形型钢试件相较于预理工字型钢试件具有更好的刚度,延性及更大的承载力.

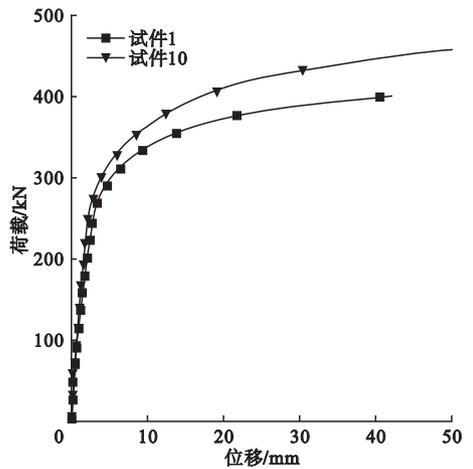


图11 不同截面型钢试件荷载-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of specimens with different section steel

2.2.2 预埋不同截面型钢应力分析

预埋不同截面型钢时试件应力云图如图12所示.由图可知,试件在承受外荷载时,矩形型钢的最大应力主要产生在上下翼缘与钢筋焊接处,工字型钢的最大应力主要产生在受拉区翼缘处.由此可知,梁中预埋的矩形型钢在试件承受外力作用下的承载力要大于工字型钢的承载力;梁中预埋的矩形型钢的整体刚度也要大于工字型钢的整体刚度.因此,改变预埋型钢的截面形式,可有效提高梁的静力性能.试件10相较于试件1,极限应力、应变分别提高了13.98%、12.87%,因此可知,改变梁端型钢形式可有效提高螺栓连接装配式混凝土梁的承载力及变形能力.

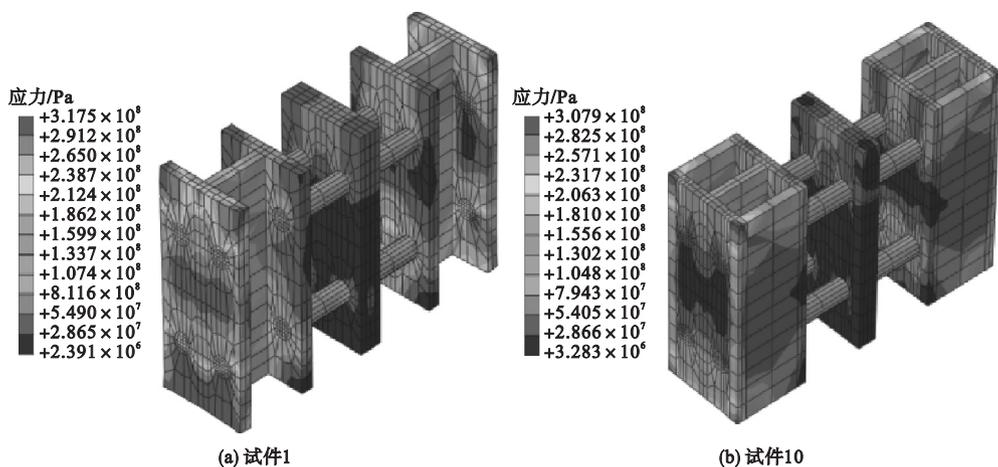


图12 不同截面型钢试件应力云图

Fig. 12 Stress contour plots of specimens with different section steel

2.3 不同混凝土强度对试件受力性能影响

由于在 25 mm、30 mm 及 35 mm 型钢厚度下,试件的变化趋势相同,因此笔者仅选取预埋 25 mm 厚度型钢试件分析不同混凝土强度对其影响,结果见图 13. 由图可知,不同混凝土强度对螺栓连接装配式混凝土梁具有较大影响. 在初期弹性阶段,低混凝土强度下的试件荷载-位移曲线斜率较小,表明其刚度较小;混凝土强度越大,试件的荷载-位移曲线斜率越大,刚度越大. 在进入塑性阶段后,不同混凝土强度的试件荷载均继续缓慢增大,位移也不断增加直至试件破坏.

强度试件的极限承载力. 由表可知,相对 C30 混凝土强度试件,C35 和 C40 混凝土强度试件在不同位移下极限承载力分别提高了 0.91%、6.39%; 2.64%、7.83%; 3.29%、7.72%. 因此可知,增大混凝土强度可提高螺栓连接装配式混凝土梁的承载力及形变能力.

表 4 不同混凝土强度下 25mm 厚型钢试件承载力
Table 4 Bearing capacity of 25mm section steel specimen under different concrete strength

混凝土强度	承载力/kN		
	位移 15 mm	位移 30 mm	位移 45 mm
C30	352.1	379.2	395.2
C35	355.3	389.3	408.5
C40	374.6	408.9	425.7

3 结论

(1) 螺栓连接装配式混凝土梁极限承载力、屈服位移随着混凝土强度、型钢厚度的增加而增加.

(2) 采用预埋矩形截面型钢试件较预埋工字型型钢试件的极限荷载及屈服位移均有所提高.

(3) 螺栓连接装配式混凝土梁与普通混凝土梁在弹性阶段的荷载-位移曲线及应力-应变曲线接近,塑性阶段前者的极限承载力、屈服位移、刚度及变形能力优于后者,螺栓连接装配式混凝土梁满足结构使用设计要求.

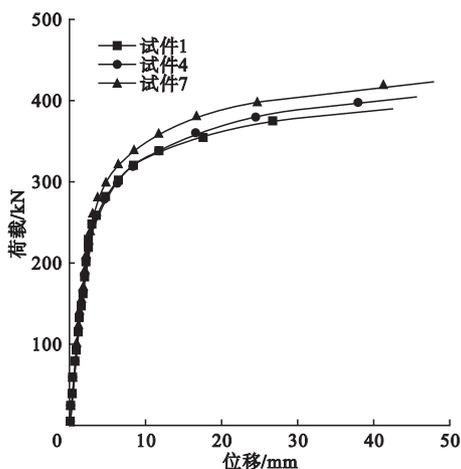


图13 不同混凝土强度下试件荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of specimens under different concrete strength

表 4 为 25mm 型钢厚度下,不同混凝土

参考文献

- [1] KORKMAZ H H, TANKUT T. Performance of a precast concrete beam-to-beam connection subject to reversed cyclic loading [J]. Engineering structures, 2005, 27(9): 1392 - 1407.
- [2] KUTTABA, DOUGILL J W. Grouted and dowelled jointed precast concrete columns: behavior in combined bending and compression [J]. Magazine of concrete research, 1998 (1): 131 - 142.
- [3] 赵斌, 吕西林, 刘丽珍. 全装配式预制混凝土结构梁柱组合件抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 82 - 87.
(ZHAO Bin, Lü Xilin, LIU Lizhen. Experimental study on seismic behavior of fully assembled precast concrete beam-column composites [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2005, 25(1): 82 - 87.)
- [4] ERSOY U, TANKUT T. Precast concrete members with welded plate connections under reversed cyclic loading [J]. Journal of precast/prestressed concrete institute, 1993, 38 (4): 94 - 100.
- [5] 焦燊烽, 张店, 刘丰军, 等. 预应力装配式梁-梁拼接节点受力性能研究 [J]. 钢结构, 2016, 31(12): 64 - 68.
(JIAO Yufeng, ZHANG Jie, LIU Fengjun, et al. Study on the mechanical behavior of prestressed beam-beam joints [J]. Steel structures, 2016, 31(12): 64 - 68.)
- [6] 咸庆军, 童乐为. 型钢混凝土梁梁连接节点疲劳强度分析 [J]. 工程力学, 2016, 33(4): 188 - 194 + 204.
(XIAN Qingjun, TONG Lewei. Fatigue strength analysis of joints of steel reinforced concrete beams and beams [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(4): 188 - 194, 204.)
- [7] 廖凌峰. 新型装配式混凝土节点性能的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
(LIAO Lingfeng. Research on the performance of new fabricated concrete joints [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.)
- [8] 朱晓宁. 新型梁柱装配式节点弱轴连接受力性能分析 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
(ZHU Xiaoning. Analysis of force performance of new beam-column assembled node weak axis connection [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2014.)
- [9] 吴世英. 《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101—96) 简介 [J]. 工程抗震与加固改造, 1997(4): 3 - 5.
(WU Shiyong. Introduction to code for seismic test methods of buildings (JGJ101—96) [J]. Engineering seismic and reinforcement, 1997 (4): 3 - 5.)
- [10] 陈瑜, 董世民, 李雨萍. 《建筑抗震试验方法规程》中的拟动力试验方法简介 [J]. 建筑科学, 1995(2): 52 - 57.
(CHEN Yu, DONG Shimin, LI Liping. Brief introduction to the quasi-dynamic test method in the code of practice for building seismic tests [J]. Architecture science, 1995(2): 52 - 57.)
- [11] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范: GB50017—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for seismic design of buildings: GB50017—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [12] NARAYANAN R S. EN1992. Eurocode2: Design of concrete structures [S]. Brussels: [s. n.], 2004.
- [13] ACI 318 committee. ACI 318 - 05 Building code requirements for structural concrete [S]. USA: American concrete Institute, 2005.
- [14] ATTOLICO A, BIONDI S, NUTI C M. Influence of buckling of longitudinal rebars in finite element modelling of reinforced concrete structures subjected to cyclic load-ing [C]//Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand: [s. n.], 2000.
- [15] 方自虎, 周海俊, 赖少颖, 等. ABAQUS 混凝土损伤参数计算方法 [J]. 建筑结构, 2014, 44 (增刊): 719 - 721.
(FANG Zihu, ZHOU Haijun, LAI Shaoying, et al. ABAQUS calculation method for concrete damage parameters [J]. Building structure, 2014, 44(S): 719 - 721.)
- [16] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
(Prepared by the Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011.)
- [17] LIU Hongbo, CHEN Zhihua, ZHOU Ting. Theoretical and experimental study on the temperature distribution of H-shaped steel members under solar radiation [J]. Applied thermal engineering, 2012, 37: 329 - 335.
- [18] IRANZAD M, AHMADIAN H. Identification of nonlinear bolted lap joint models [J]. Computers & structures, 2012, 96/97: 1 - 8.
- [19] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例讲解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
(SHI Yiping, ZHOU Yurong. An explanation of abaqus finite element analysis [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.)
- [20] 王玉镯, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例讲解 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(WANG Yuzhuo, FU Chuanguo. ABAQUS structural engineering analysis and examples [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)
- [21] GINER E, SUKUMAR N, TARANCÓN J E, et al. An abaqus implementation of the extended finite element method [J]. Engineering fracture mechanics, 2009, 76(3): 347 - 368.
- [22] XU H B, ZHANG C W, LI H, et al. Real-time hybrid simulation approach for performance validation of structural active control systems: A linear motor actuator based active mass driver case study [J]. Structural control and health monitoring, 2014, 21(4): 574 - 589.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)