

低周反复荷载下螺栓连接装配式混凝土梁的有限元分析

王宇¹,梁云峰¹,杨春燕²,杨永生³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 辽宁省市政工程设计研究院有限责任公司,辽宁 沈阳 110055;3. 沈阳建筑大学学报编辑部,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 探究不同型钢厚度、混凝土强度对螺栓连接装配式混凝土梁的力学性能影响. 方法 利用有限元软件 ABAQUS 建立数值模型,运用拟静力方法,对结构施加低周反复荷载,对比螺栓连接装配式混凝土梁与普通混凝土梁的承载力、刚度、塑性及变形能力变化情况. 结果 螺栓连接装配式混凝土梁的滞回曲线比普通混凝土梁的滞回曲线饱满,骨架曲线斜率更高;增大型钢厚度,试件滞回曲线更饱满,滞回环面积更大;提高混凝土强度,骨架曲线斜率增大,刚度系数也增大. 结论 螺栓连接装配式混凝土梁相比于普通混凝土梁具有更好的耗能能力;增加型钢厚度及提高混凝土强度均能提高试件的形变能力及吸能能力.

关键词 螺栓连接;装配式混凝土梁;低周反复荷载;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 Low Reversed Cyclic Loading

WANG Yu¹, LIANG Yunfeng¹, YANG Chunyan², YANG Yongsheng³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Shenyang, China, 110055; 3. Editorial Department of Journal, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this paper is to investigate the influence of different steel thickness and concrete strength on the mechanical properties of bolted fabricated concrete beams. The numerical model was established by using the finite element software ABAQUS. The low-cycle repeated load to the structure was applied by using the quasi-static method. By comparing changes in bearing capacity, stiffness, plasticity and deformation capacity of bolted fabricated concrete beams and common concrete beams. Results show that the hysteretic curve of bolted fabricated concrete beams is fuller and the slope of the skeleton curve is higher than that of common concrete beams. The

收稿日期:2019-03-04

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、建筑抗火等方面研究.

hysteresis curve of the specimen is fuller and the area of the hysteresis loop is larger by increasing the thickness of the profile steel. The slope of the skeleton curve and the stiffness coefficient are also increased by increasing the strength of the concrete. The main conclusions inferred from the results are summarized below: the bolted fabricated concrete beam has better energy consumption than the common concrete beam capacity, increasing the thickness of section steel and the strength of concrete can improve the deformation and energy absorption capacity of the test piece.

Key words: bolted joints; prefabricated concrete beams; cyclic loading; finite element analysis

在装配式建筑中,节点连接方式是影响结构性能的重要因素^[1-3]。目前,国内外学者针对装配式节点连接方式研究主要集中在梁柱节点、柱柱节点,对梁梁节点连接研究较少。U. Ersoy^[4]通过在梁梁节点上下焊接钢板的干连接方式,研究其抗震性能,结果表明该类节点延性及抗震性较好。焦燊烽^[5]通过在腹板及下翼缘处设置法兰板及加劲板,实现梁梁节点连接,通过对结构施加低周反复荷载,得出该类节点与普通混凝土梁受力性能相似,现有算法满足该类结构设计验算。咸庆军^[6]对H型钢梁梁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,受压区混凝土逐渐压酥剥落。

因此,笔者针对梁梁节点连接研究较少这一现状提出一种新型节点连接形式^[7-8],

即采用在预制钢筋混凝土梁中预埋型钢,利用螺栓对梁梁节点进行连接,并通过分析有限元结果,验证此类结构抗震性能优秀,结构具有合理性。

1 建立模型

1.1 模型参数

试件参数见表1。螺栓连接装配式混凝土梁的构造如图1所示。梁截面 $b \times h = 300 \times 600$,为使梁发生弯曲破坏,根据剪跨比 $\lambda > 2$ 确定梁跨度为4.9 m。混凝土采用C30、C35、C40三个等级,预埋型钢材采用Q235B钢,型钢翼缘及腹板处钢材选取25 mm、30 mm、35 mm三种厚度,型钢截面采用工字型。试件钢筋均采用HRB400级钢筋,箍筋取 $\Phi 8 @ 100$,螺栓采用10.9级M30高强螺栓^[9]。

表1 试件参数

Table 1 Parameters of the test specimens

梁形式	试件编号	宽×高/mm	混凝土强度/MPa	钢筋型号	型钢厚度/mm	型钢形式
装配式梁	1	300×600	C30	HRB400/ $\Phi 22$	25	工字型
	2	300×600	C30	HRB400/ $\Phi 22$	30	
	3	300×600	C30	HRB400/ $\Phi 22$	35	
	4	300×600	C35	HRB400/ $\Phi 22$	25	
	5	300×600	C35	HRB400/ $\Phi 22$	30	
	6	300×600	C35	HRB400/ $\Phi 22$	35	
	7	300×600	C40	HRB400/ $\Phi 22$	25	
	8	300×600	C40	HRB400/ $\Phi 22$	30	
	9	300×600	C40	HRB400/ $\Phi 22$	35	
	10	300×600	C30	HRB400/ $\Phi 22$	—	
普通混凝土梁	11	300×600	C35	HRB400/ $\Phi 22$	—	—
	12	300×600	C40	HRB400/ $\Phi 22$	—	—

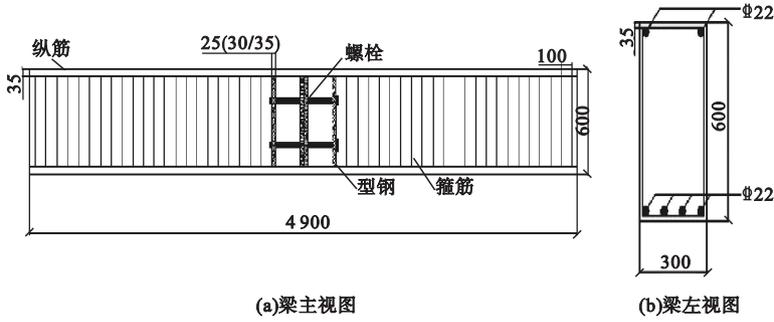


图1 梁配筋及钢构件布置图

Fig. 1 Beam reinforcement and steel component layout

1.2 加载方式

图2为螺栓连接装配式混凝土梁的边界约束及荷载施加位置. 梁两端的边界条件设置为 $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$, 即两端采用固接方式. 为使梁发生弯曲破坏, 在梁的反弯点处施加位移荷载, 梁反弯点通常位于梁跨度的 $1/6 \sim 1/2$. 位移加载方式如图3所示^[10-11].

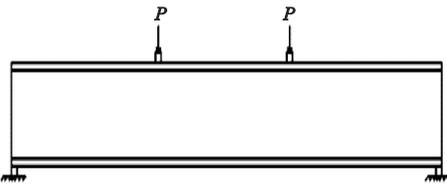


图2 荷载加载方式

Fig. 2 Loading method

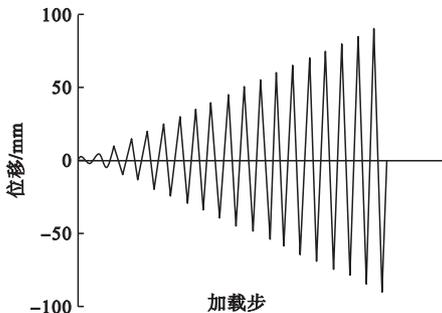


图3 位移加载曲线

Fig. 3 Displacement loading curve

1.3 本构关系

1.3.1 混凝土本构关系

根据《混凝土结构设计规范》(GB5001—2010), 混凝土本构关系及损伤参数按下式计算^[12-15]:

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon. \tag{1}$$

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

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}. \tag{3}$$

$$\rho_c = \frac{f_{cp}}{E_c \varepsilon_c}. \tag{4}$$

式中: α_a 、 α_d 为混凝土单轴受压应力-应变曲线上上升段、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.

1.3.2 钢材本构关系

梁中型钢均采用 Q235B 钢材, 钢材、螺栓材料参数见表2. 表中 E 表示弹性模量; ν 表示泊松比; δ_y 表示屈服强度; δ_u 表示极限抗拉强度; ε_y 表示屈服应变; ε_u 为极限应变;

表2 钢材及螺栓材料参数

Table 2 Steel and bolt material parameters

材料	$E/10^5 \text{MPa}$	ν	δ_y/MPa	δ_u/MPa	$\varepsilon_y/10^{-2}$	$\varepsilon_u/10^{-2}$	$\varepsilon_{yt}/10^{-2}$
Q235B 钢材	2.06	0.3	299	436	0.045	19.80	34
10.9 级 M30 螺栓	2.06	0.3	980	1 100	0.470	1.36	—

ε_{yt} 为破坏应变. 钢材本构关系按图4选取^[17], 螺栓本构关系按图5选取^[18].

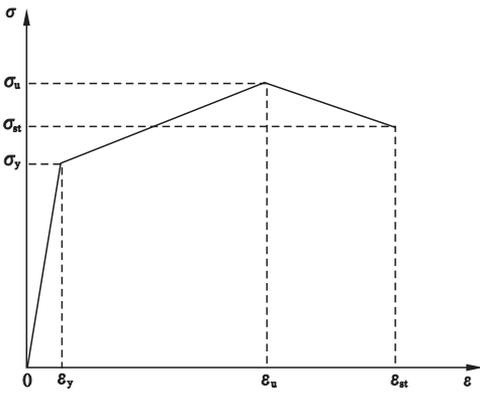


图4 钢材本构关系

Fig. 4 Steel constitutive relationship

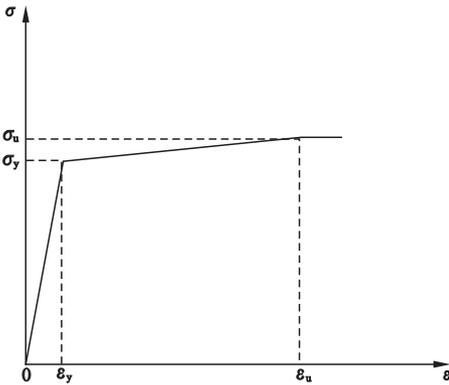


图5 螺栓本构关系

Fig. 5 Bolt constitutive relationship

1.4 螺栓预紧力

为提高螺栓连接构件的紧密性,增强螺栓的抗疲劳性,提高构件整体性,对模型中的螺栓施加预紧力,螺栓预紧力按下式计算^[19]:

$$M_t = K \times P_0 \times d \times 0.001. \quad (5)$$

$$P_0 = \sigma_0 \times A_s. \quad (6)$$

$$A_s = \pi \times d_s^2 / 4. \quad (7)$$

$$\sigma_0 = (0.5 \sim 0.7) \sigma_s. \quad (8)$$

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.

1.5 单元类型及网格划分

在ABAQUS中,合理运用单元类型对模型计算结果及收敛性具有重要影响.因此,在模型创建中,对于混凝土梁、型钢、螺栓采用

实体单元,对于钢筋采用桁架单元.在计算过程中,对于梁、型钢及螺栓采用C3D8R计算单元;对于钢筋采用T3D2计算单元^[20].型钢、螺栓及钢筋采用Embedded方式内嵌于混凝土梁中^[21].加载点与结构之间采用Coupling方式定义^[22].具体形式如图6所示,试件网格划分如图7所示.

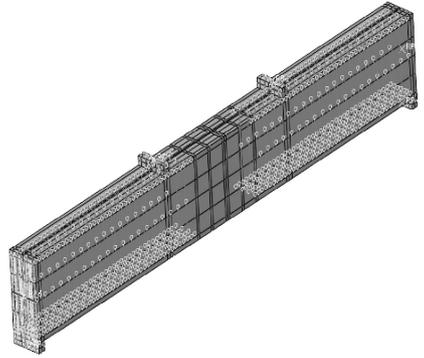


图6 混凝土梁、型钢及钢筋间相互关系

Fig. 6 Interrelationships among concrete beams, sections and steel bars

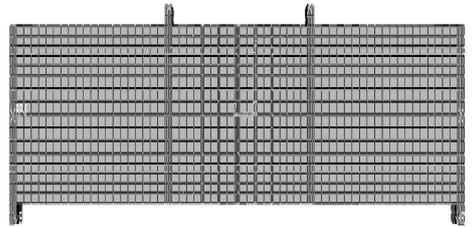


图7 试件网格划分

Fig. 7 Specimen meshing

2 模拟结果分析

2.1 不同型钢厚度对螺栓连接装配式混凝土梁的力学性能影响

2.1.1 滞回曲线

普通混凝土梁及不同型钢厚度下螺栓连接装配式混凝土梁的滞回曲线如图8所示.从图中可以看出,随着梁反弯点处荷载不断加大,各试件滞回曲线呈梭形,曲线较为饱满,曲线面积较大,无明显捏缩效应,位移加载至10 mm左右,曲线出现下降段,说明这一阶段混凝土开裂,承载力下降;随后曲线又一次上升,说明此阶段型钢等钢构件起主要

承载作用.由滞回曲线的饱满程度可知螺栓连接装配式混凝土梁较普通钢筋混凝土梁的塑性较好,具有较强的变形能力;螺栓连接装配式混凝土梁较普通钢筋混凝土梁的滞回面积更大,说明其在结构抗震性中具有更好的吸能能力.因此可知,螺栓连接装配式混凝土梁的结构较为合理,承载能力,变形能力及塑性均优于普通钢筋混凝土梁.

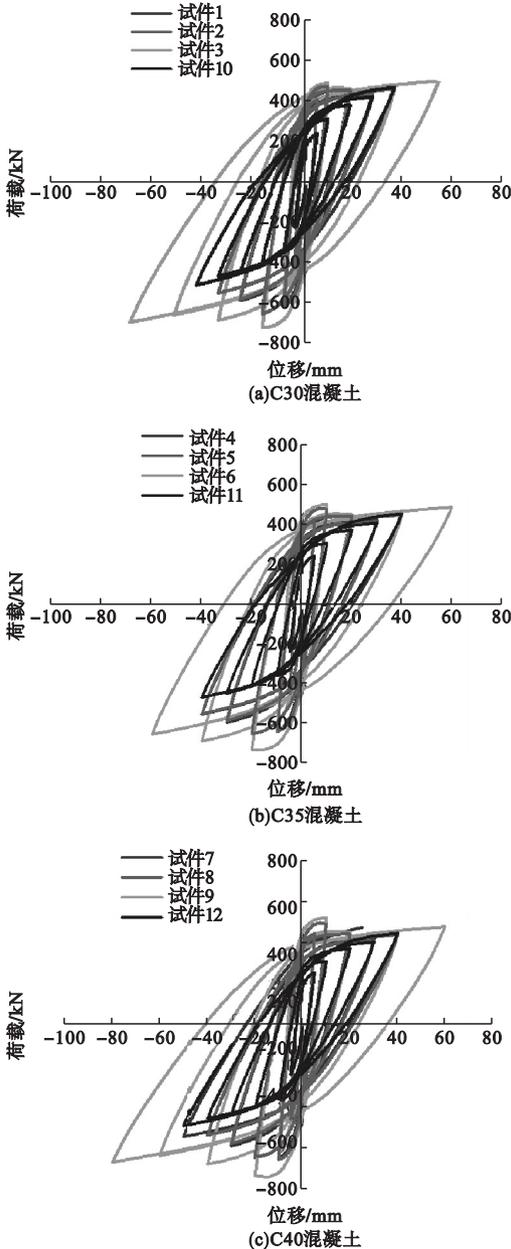


图8 不同型钢厚度下试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of test pieces under different section steel thickness

2.1.2 骨架曲线

骨架曲线可反映构件在承受低周反复荷载作用下的强度、刚度、延性等力学性能的变化情况,试件骨架曲线见图9.由图可知,螺栓连接装配式混凝土梁的极限荷载及最大位移均大于普通钢筋混凝土梁,说明螺栓连接

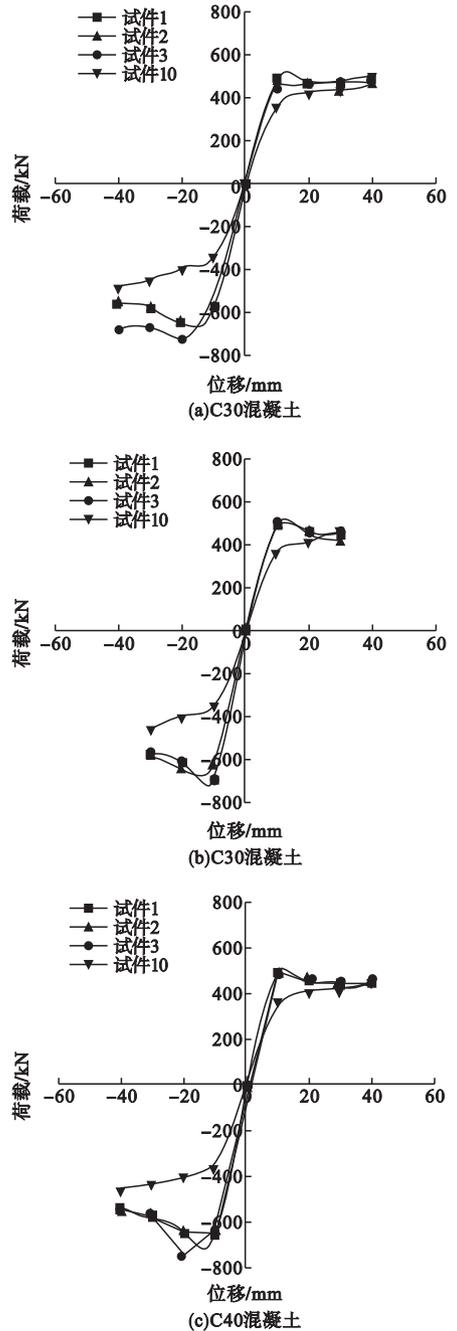


图9 不同型钢厚度下试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of test pieces under different section steel thickness

装配式混凝土梁的极限承载力及变形能力均优于普通钢筋混凝土梁.对比不同型钢厚度的试件可知,在位移小于10 mm时,各试件强度变化基本相同;位移荷载大于10 mm之后,型钢厚度为35 mm的试件荷载-位移曲线明显高于型钢厚度为30 mm及25 mm的试件,说明型钢厚度的增加对结构的承载力及变形能力略有提高.因此在结构设计时,合理增加型钢厚度可提高结构的承载力和变形能力.

2.2 不同混凝土强度对螺栓连接装配式混凝土梁的力学性能影响

相同混凝土强度下,螺栓连接装配式混凝土梁的滞回曲线见图10.对比滞回曲线可知,随着混凝土强度的提高,试件屈服强度提高,极限强度提高,滞回曲线面积增大,说明提高混凝土强度可在一定程度上增加结构刚度及塑性,但是效果不是很明显.因此在实际工程中,应在满足规范要求的承载力、挠度等基础上合理选择混凝土强度.

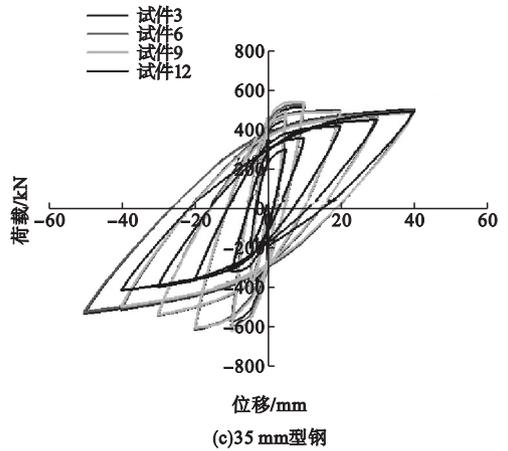


图10 不同混凝土强度下试件滞回曲线

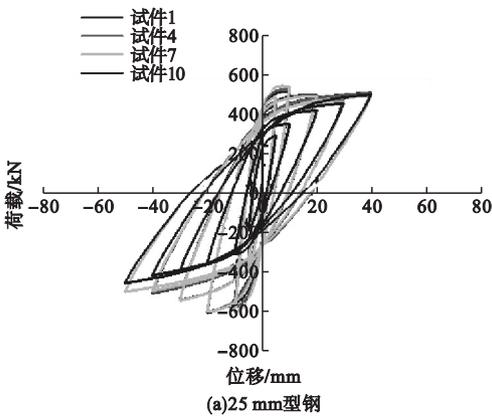
Fig. 10 Hysteresis curves of specimens under different concrete strengths

2.3 延性系数

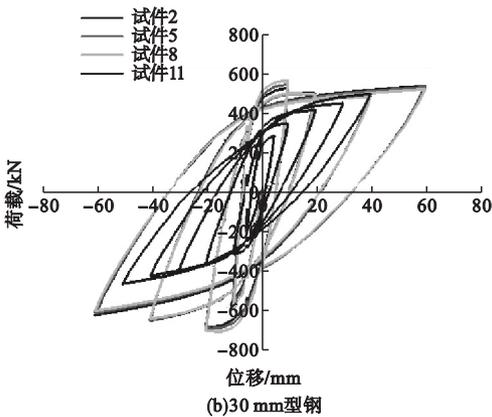
延性系数 μ 是反映结构或构件在达到屈服极限后,未破坏前的吸能变形能力,是评价结构或构件抗震性能的重要指标,延性系数越大,说明结构耗能能力越强,抗震性能越好.延性系数按式(8)计算,试件屈服位移计算方法如图11所示.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \tag{8}$$

式中: δ_u 为试件的极限位移,即骨架曲线中极限承载力下降到85%时的位移; δ_y 为试件的屈服位移.



(a)25 mm型钢



(b)30 mm型钢

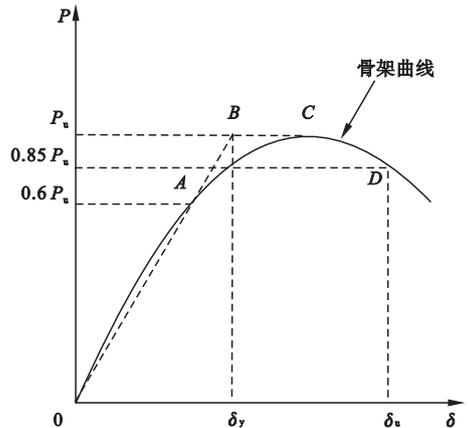


图11 等效屈服位移计算图

Fig. 11 Calculation diagram of equivalent yield displacement

不同工况下,试件的延性系数如表3所

示.分析表3可知:相同型钢厚度下,随着混凝土强度的提高,试件的延性系数在一定程度上有所增加,试件4相对于试件1延性系数提高2.40%,试件7相对于试件1延性系数提高9.28%;试件5相对于试件2延性系数提高1.13%,试件8相对于试件2延性系数提高3.66%;试件6相对于试件3延性系数提高3.75%,试件9相对于试件3延性系数提高5.63%.由此可知,提高混凝土强度能在一定程度上提高结构在抗震中的耗能能力.因此在结构设计时,应充分考虑混凝土强度及型钢厚度对结构刚度影响,合理选取型钢厚度及混凝土强度,从而使结构既满足承载力及变形要求,又可节约成本,达到绿色建筑的目的.

表3 试件延性系数

Table 3 Coefficient of ductility of specimens under table 3 different influence factors

试件编号	δ_u/mm	δ_y/mm	μ
1	19.69	5.90	3.34
4	20.73	6.06	3.42
7	23.09	6.32	3.65
2	20.93	5.88	3.55
5	23.15	6.44	3.59
8	26.50	7.20	3.68
3	25.92	6.95	3.73
6	28.67	7.41	3.87
9	29.80	7.96	3.94

2.4 等效黏滞阻尼系数

等效黏滞阻尼系数通常用于表示试件对能量的消耗能力强度及刚度退化情况.由表4可知,在25 mm工字型钢厚度下,试件4相对于试件1阻尼系数提高2.09%;试件7相对于试件1阻尼系数提高21.58%;在30 mm工字型钢厚度下,试件5相对于试件2阻尼系数提高11.41%;试件8相对于试件2提高25.54%;在35 mm工字型钢厚度下,试件6相对于试件3阻尼系数提高19.61%;试件9相对于试件3阻尼系数提高37.96%。说明提高

混凝土强度,能提高试件在承受反复荷载下的耗能能力,增加试件的抗震性能.

表4 不同试件的等效黏滞阻尼系数 h_e Table 4 Equivalent viscous damping coefficient h_e for different test pieces

试件编号	混凝土强度/MPa	型钢厚度/mm	等效黏滞阻尼系数 h_e
1	C30	25	1.098
2	C30	30	1.104
3	C30	35	1.117
4	C35	25	1.121
5	C35	30	1.230
6	C35	35	1.336
7	C40	25	1.355
8	C40	30	1.386
9	C40	35	1.541

3 结论

(1)螺栓连接装配式混凝土梁在承受低周反复荷载的情况下较普通混凝土梁的滞回曲线形状更为饱满,滞回环面积更大,说明螺栓连接装配式混凝土梁较普通钢筋混凝土梁具有更大的变形能力及耗能能力.

(2)增加型钢厚度,试件的滞回曲线、骨架曲线升高、延性系数增大,结构的承载力、变形能力、耗能能力提高.在工程中,应结合实际需求合理选择型钢厚度.

(3)提高混凝土强度能够在一定程度上提高试件在反复荷载作用下的延性,刚度及吸能能力.因此在实际工程中,应选择适当强度混凝土,从而达到节能减排,绿色建筑的目的.

参考文献

- [1] CHEOK G S, LEW H S. Performance of precast concrete beam - to - column connections subject to cyclic loads [J]. PCI journal, 1991, 26(3): 56 - 67.
- [2] KUTTAB A, DOUGILL J W. Grouted and dowelled jointed precast concrete columns: behavior in combined bending and compression [J]. Magazine of concrete research, 1988(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 Dian,LIU Fengjun, et al. Study on the mechanical behavior of prestressed beam-beam joints [J]. Steel structures,2016,31(12):64-68.)
- [6] 戚庆军,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 reinforce concrete beams[J]. Engineering mechanics,2016,33(4):188-194,204.)
- [7] 王伟玲. 预制装配式建筑结构的發展综述[J]. 价值工程,2018,37(31):286-287.
(WANG Weiling. Summarization of the development of prefabricated building structures [J]. Value engineering, 2018, 37(31):286-287.)
- [8] 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):20-33.
(CHEN Jianwei, YAN Wenshang. Research status of prefabricated prestressed concrete structure and CSI residential system[J]. World earthquake engineering,2017,33(4):20-33.)
- [9] 卢林枫,徐莹璐,郑宏,等. 带悬臂梁段的弱轴连接组合节点循环荷载试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(7):66-75.
(LU Linfeng, XU Yinglu, ZHENG Hong, et al. Experimental study on cyclic load of weak axis connection composite node with cantilever beam section[J]. Journal of building structures,2018,39(7):66-75.)
- [10] 刘菲菲,张纪刚,于德湖,等. 预制装配式混凝土结构新型梁连接节点设计与分析[J]. 施工技术,2015,44(15):44-47.
(LIU Feifei,ZHANG Jigang, YU Dehu, et al. Design and analysis of new beam connection nodes for prefabricated precast concrete structures[J]. Construction technology,2015,44(15):44-47.)
- [11] 陈瑜,董世民,李丽萍. 《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. Introduction to pseudo-dynamic test methods in "specifications for seismic test methods for buildings" [J]. Building science,1995(2):52-57.)
- [12] 严琼建. 不同本构关系对混凝土受压截面承载力的对比分析[J]. 交通科技,2017(1):128-131.
(YAN Qiongjian. Comparative analysis of bearing capacity of concrete compression sections with different constitutive relations [J]. Journal of transportation science and technology,2017(1):128-131.)
- [13] ACI Committee 322. Proposed ACI standard building code requirements for structural plain concrete [J]. Journal proceedings, 1971, 68(5):348-354.
- [14] 方自虎,周海俊,赖少颖. ABAQUS混凝土应力-应变关系选择[J]. 建筑结构,2013(增刊2):559-561.
(FANG Zihu,ZHOU Haijun, LAI Shaoying. Calculation method of ABAQUS concrete damage parameters [J]. Building structure, 2013(S2):559-561.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for design of concrete structures: GB50010—10 [S]. Beijing: China Architecture & Building press,2011.)
- [16] 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.
- [17] BOGRAD S, REUSS P, SCHMIDT A. Modeling the dynamics of mechanical joints [J]. Mechanical systems and signal processing,2011,25(8):2801-2826.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计规范:GB50017—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for seismic design of buildings: GB50017—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.)
- [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. Analysis of ABAQUS structural engineering and case study [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.)
- [21] GINER E, SUKUMAR N, TARANCÓ J, et al. An ABAQUS implementation of the extended finite element method [J]. Engineering fracture mechanics,2009,76(3):347-368.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)