

ECC/RC 键槽节点装配整体式梁柱结构 倒塌性能试验研究

何庆锋[†], 张麟斌, 易伟建
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了研究键槽连接节点装配整体式梁柱结构倒塌性能以及不同后浇混凝土对其性能的影响, 完成了 2 榀单层两跨梁柱结构的移柱静力加载试验, 其分别在节点键槽处后浇普通 C30 混凝土、高延性 ECC 混凝土。试验获取了构件力-位移曲线、破坏形态以及变形性能等试验数据。研究表明: 键槽连接节点梁柱结构在满足常规抗震荷载要求下, 变形过程中能较好地形成梁机制、压拱机制以及悬索机制, 是一种较好的装配式结构可采取的抗倒塌节点形式。依靠 ECC 高延性、高极限压应变等优越的材料性能, ECC 键槽节点梁柱结构能表现出更高的承载能力以及更好的节点延性。钢筋与混凝土之间的局部不均匀相对滑移有利于结构发展大变形, 提高结构的抗倒塌性能。

关键词: 键槽节点; 倒塌性能; 梁柱结构; ECC; 节点延性

中图分类号: TU317

文献标志码: A

Experiment Study on Collapse Performance of Precast ECC/RC Composite Beam-column Structure with Key-way Joints

HE Qingfeng[†], ZHANG Linbin, YI Weijian
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the collapse performance of beam-column structure with key-way joints and to study the effect of different post-cast concrete on its performance, static loading tests for two single-story two-span beam-column structures were performed. In the two specimens, ordinary C30 concrete and high ductility ECC concrete were poured at the key-way joints, respectively. The test dates of force displacement curve, failure mode and deformation performance were obtained. The research indicated that the beam-column structure with key-way joints developed beam mechanism, arch mechanism and catenary mechanism in turn during the deformation process under the requirements of the conventional seismic load. It was a good anti-collapse node form for the assembled structure. Relying on the superior material properties of ECC, such as high ductility and high ultimate compressive strain, beam-column structure with ECC key-way joints can exhibit greater load-carrying capacity and better ductility of joints. The local non-uniform relative slip between steel and concrete was conducive to the development of large deformation of the structure and improved the collapse resistance of the structure.

Key words: key-way joint; collapse performance; beam-column structure; ECC; node ductility

* 收稿日期: 2019-01-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0701400), National Key Research and Development Program of China (2016YFC0701400)

作者简介: 何庆锋(1979—), 男, 湖北黄冈人, 湖南大学高级工程师, 博士

[†] 通讯联系人, E-mail: sammyhqf@163.com

结构的连续倒塌是指由于外力使结构的某些关键构件失效后,相邻结构发生与初始破坏不相称的一系列倒塌破坏的过程^[1]。结构的连续性倒塌不仅会导致人员伤亡和财产损失,还会有比较明显的关于社会、心理、经济的不良影响。近年来,我国大力推进住宅产业化和建筑工业化,装配式结构由于现场湿作业少、建造工期短^[2]等优点逐渐走进人们的视线。然而装配式结构难以完全实现“等同现浇”的倒塌性能,在现今的倒塌事故中装配式结构不在少数,因此研究装配式结构的抗连续倒塌性能具有重要的工程意义。

当前,已有国内外学者对装配式结构的抗震性能进行了深入研究,朱张峰等人^[3]完成了 2 种不同节点连接构造的装配式混凝土剪力墙低周往复试验,试验结果表明 2 种不同节点连接构造形式的剪力墙耗能性能与现浇结构基本一致,但干湿连接形式施工较复杂且优点不明显,不建议采用。蔡建国等人^[4]完成了 3 个不同键槽长度世构体系框架中节点的低周往复试验,试验结果表明世构体系能满足现行的抗震规范要求。Vasconez 等人^[5]完成了 13 个装配式梁柱结构的低周往复试验,其后浇层采用高强高延性纤维混凝土,结果表明高强纤维混凝土能使结构节点更好地发挥塑性铰性能。装配式结构抗倒塌性能的研究还处于起步阶段,Kang 等人^[6-7]研究了梁柱结构的节点形式对结构抗连续倒塌的影响,结果表明钢筋搭接键槽节点和钢筋弯起节点的抗倒塌性能基本与现浇结构一致。

在中柱失效的情况下,结构抵抗倒塌的能力取决于破坏节点底部钢筋的连续与否以及失效节点的延性。对于装配式结构,底部钢筋的连续性至关重要,而键槽连接节点很好地解决了这个问题,其采用 U 形连续钢筋横穿中节点,另一方面,该节点使得在结构关键部位后浇高延性材料变得方便且易施工。工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite,简称 ECC)在单轴拉伸作用下表现为多缝开裂以及高拉伸应变等特性,极限拉应变可稳定地达到 3%以上^[8],因此可在节点处后浇 ECC 来提高结构的倒塌能力。

本文基于键槽节点的基本构造及特性,设计并完成 2 榀单层两跨梁柱结构的移柱静力加载试验,研究键槽连接节点梁柱结构的倒塌性能与受力特性,并通过后浇高延性 ECC 混凝土材料,分析节点延性对结构抗倒塌性能的影响。

1 试验概况

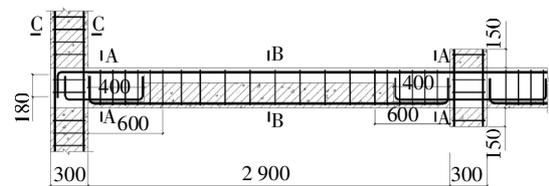
1.1 试件设计

本试验设计了 2 榀键槽连接节点单层两跨梁柱结构,编号为 J1、J2。梁截面尺寸为 150 mm×320 mm,柱截面尺寸为 300 mm×300 mm,总跨度 6 400 mm,总高度 2 570 mm,梁高跨比为 1:10。试件采用 C30 混凝土浇筑,预制梁、柱纵筋均采用 HRB400,箍筋采用 HPB300,键槽连接节点底筋基于承载能力等效原则采用 HRB400 钢筋,两榀框架节点后浇混凝土分别采用 C30 普通混凝土与高延性 ECC 混凝土。键槽连接节点主要是由 U 形钢筋、键槽、后浇混凝土三部分组成,其中 U 形钢筋的作用主要是连接节点的两端。梁柱结构均按照二级抗震等级设计。具体试件信息见表 1,键槽节点详图如图 1 所示,预制梁详图如图 2 所示。

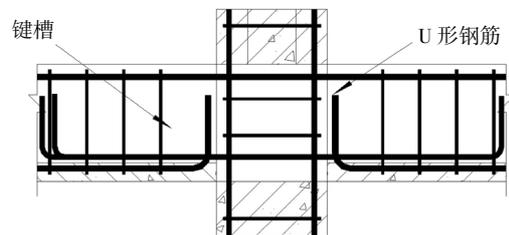
表 1 试件信息

Tab.1 Details of designed specimens

编号	节点形式	节点配筋		施工工艺
		底筋	顶筋	
J1	键槽	2 Φ 14	2 Φ 14	节点后浇 C30
J2	键槽	2 Φ 14	2 Φ 14	节点后浇 ECC



(a) 键槽节点构造



(b) 中节点构造

图 1 键槽节点详图

Fig.1 Details of the key-way node

1.2 加载装置和测量方案

试验加载装置如图 3 所示。模型框架通过压梁及地脚螺栓固定在实验室地基梁上,为防止框架在平面外失稳,在框架中柱的两侧设有侧向反力架。为了更真实地模拟结构的实际受力状态,在边柱反弯

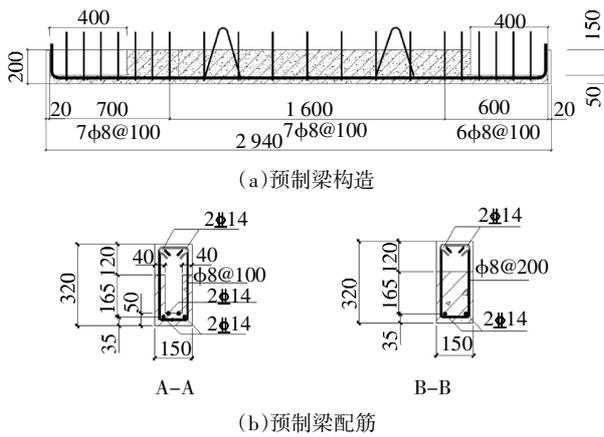
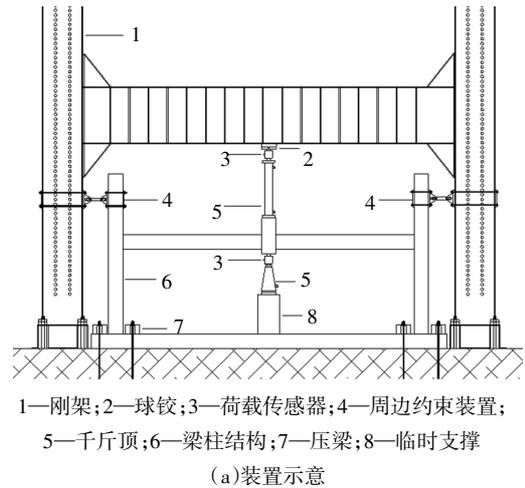


图2 J1、J2 预制梁详图

Fig.2 Details of the J1, J2 prefabricated beam

点位置设置侧向约束装置以模拟边跨对其的约束。本试验选取中柱为失效柱，在中柱上部通过液压千斤顶进行加载，在浇筑阶段由机械千斤顶顶替初始失效中柱。

试验加载过程主要分为两阶段：第一阶段为中柱下部机械千斤顶的卸载，每级卸载 2 kN，并观察是否有初始裂缝，直到千斤顶与中柱彻底脱开，到此为止，模拟中柱失效阶段结束。第二阶段为中柱上部液压千斤顶的加载，在结构未进入塑性阶段前采用荷载控制加载，每级加载 3 kN，每级加载完待数据稳定后，读取各测点的荷载、应变、位移，并绘制裂缝。当结构进入塑性状态后，采用位移控制加载，每级加载 20 mm，直到结构达到倒塌控制点。试验主要的测量内容包括中柱上下的荷载大小、各测点的位移、钢筋和混凝土的应变以及两侧约束钢杆轴力应变。其中两侧约束钢杆应变片布置及轴力计算见文献[9]。具体测点布置方案如图4所示。



(b) 现场照片

图3 试验装置

Fig.3 Details of test setup

1.3 材料性能试验

为研究梁柱节点处后浇混凝土对抗倒塌性能的影响，本文主要采用普通混凝土以及 ECC 混凝土。ECC 是一种由水、水泥、粉煤灰、石英砂、减水剂、PVA 等组成水泥基复合材料。目前常用的配合比^[10-12]见表 2，本试验采用密西根大学的配合比。

本试验所采用的 PVA 纤维为日本可乐丽公司生产，其直径为 0.04 mm，长度 12 mm。通过对 ECC

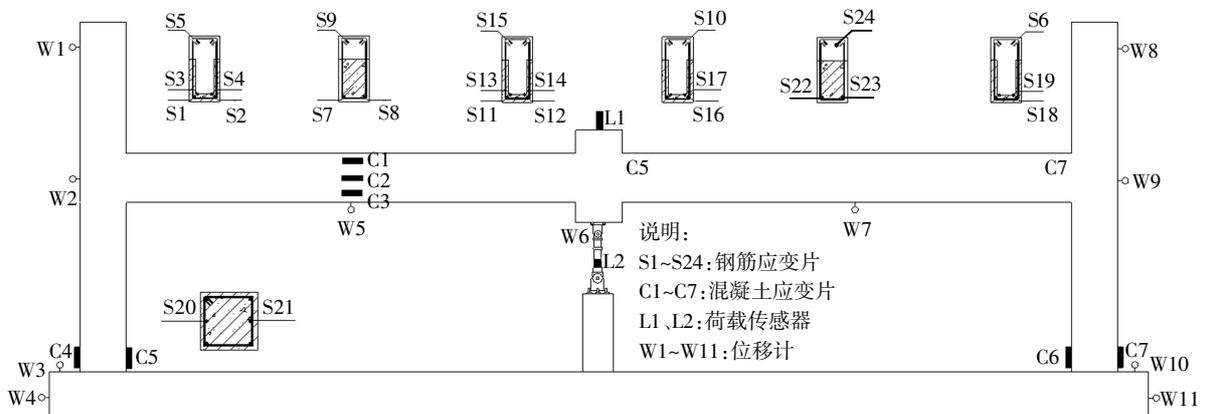


图4 测点布置

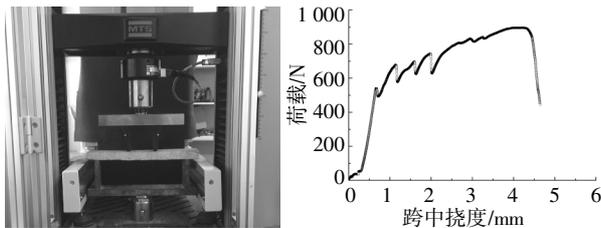
Fig.4 Arrangement of gauging points

浇筑的 300 mm×50 mm×20 mm 薄板试件进行四点弯薄板试验,可考察其弯曲变形能力及多缝开裂性能,利用反分析法^[13],可得到材料的极限拉伸应变. 四点弯试验装置图、典型荷载-挠度曲线如图 5 所示. 由图可看出,随着薄板的第一次开裂,荷载并没有突降至 0,而是继续增加,其最大跨中位移可达 4.42 mm,根据试验数据,通过文献[13]所提出的公式计算 ECC 试件的极限拉应变. 表 3 给出了 ECC 以及普通混凝土、钢筋的材料性能.

表 2 ECC 常用配合比

Tab.2 Common mix ratio of ECC

	水	水泥	粉煤灰	石英砂	减水剂	PVA
密歇根大学	0.57	1.00	1.20	0.79	0.012	2%
香港科技大学	1.07	0.90	4.00	0.98	0.042	2%
哈工大	0.76	1.00	2.33	1.19	0.012	2%



(a) 试验装置 (b) 典型荷载-挠度曲线

图 5 四点弯典型荷载-挠度曲线

Fig.5 Load-deflection curve under four-point bending

表 3 材料性能

Tab.3 Properties of materials

材料	试验项目	测试值			
		A8	C14		
钢筋	抗拉屈服强度/MPa	377	444		
	抗拉极限强度/MPa	—	597		
	伸长率/%	δ_5	—	22	
		Δ_{10}	—	18	
C30	立方体抗压强度/MPa	柱	梁	叠合层	
		36	35	33	
ECC		—	—	40	
ECC	拉伸应变/%	—	—	1.1	

2 试验结果及分析

2.1 荷载与位移曲线

图 6、图 7 分别给出了中柱竖向荷载和两侧约束

水平轴力与中柱竖向位移的关系曲线. 表 4 总结了 XJ、J1、J2 试件梁机制、压拱机制以及悬索机制最大荷载值. 其中 XJ 结构为文献[9]所完成,其结构配筋等与本文完全一致. 由图可见,随着中柱竖向位移的增加,梁柱结构依次经历了明显的梁机制阶段(0a)、压拱机制阶段(ab)、悬索机制阶段(ac).

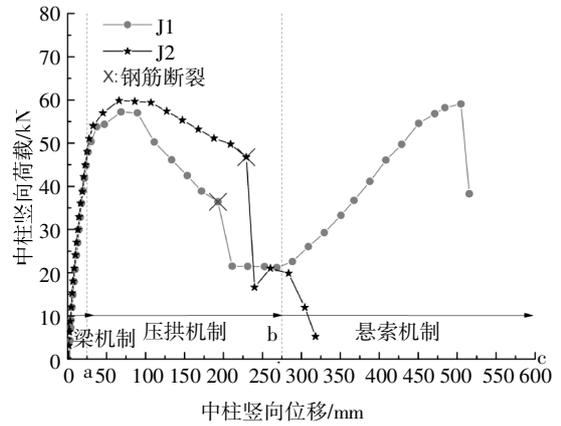


图 6 荷载-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curves

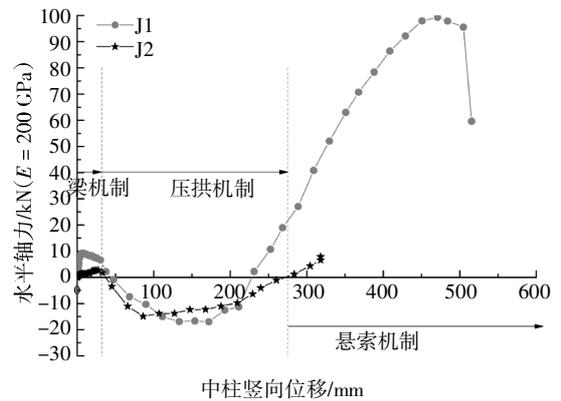


图 7 水平轴力-位移曲线

Fig.7 Horizontal axial force-displacement curves

表 4 试验结果

Tab.4 Results of tests

试件	F/kN	F_c/kN	F_{CA}/kN	压拱占比/%	F_{CA}/kN	F_{CA}/F_{CAA}
XJ	47.1	48.3	60.6	20.4	86.1	1.42
J1	46.3	47.1	57.2	17.6	59.1	1.03
J2	46.3	47.6	59.8	20.4	—	—

注:表中 F 为结构理论抗弯承载力; F_c 为梁机制最大荷载; F_{CA} 为压拱机制最大荷载; F_{CA} 为悬索机制最大荷载.

在梁机制阶段,中柱端梁截面及边柱端梁截面均受弯矩作用,直至截面受拉钢筋屈服并形成塑性铰,此阶段结构抗力主要由梁截面的抗弯承载力来

提供,即主要控制因素为梁纵筋强度.三榀框架的梁柱配筋完全相同,因此三者的梁机制阶段最大荷载基本一致.XJ结构梁机制最大荷载为48.3 kN,J1、J2结构分别为47.1 kN及47.6 kN,键槽节点相比于现浇节点梁机制最大荷载偏小的原因在于键槽节点预留键槽使得梁下部钢筋的保护层厚度增加至50 mm,因此抗弯承载力偏小.在按塑性理论计算结构的抗弯承载力时,假设了靠近中柱端梁底受拉钢筋和靠近边柱端梁顶受拉钢筋均达到屈服状态.由表4可见结构理论抗弯承载力与试验值吻合良好.

随着中柱竖向位移的继续增加,结构进入压拱机制阶段.边柱端梁中性轴的下移以及中柱端梁中性轴的上移导致中性层在梁截面高度方向进行转动,而此转动变形被两端柱所约束,从而在梁内产生了轴向压力,结构抗力得以继续增加.在此阶段,梁端纵筋已屈服,主要控制因素变为梁端截面受压区混凝土.由表4可见由于压拱作用的存在,XJ、J1、J2三个试件压拱机制阶段的最大荷载值相比于梁机制阶段最大荷载值均增加了约20%.即压拱机制阶段结构的抗力由结构抗弯承载力和压拱作用共同组成,压拱作用在结构抗力中占比约为20%,对于有压拱作用的结构,其压拱阶段结构最大抗力可由结构抗弯承载力乘一个放大系数1.25进行预测.

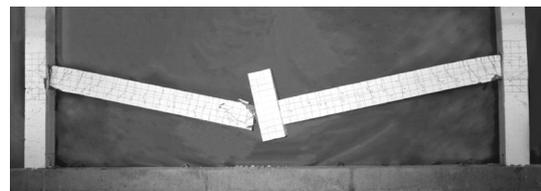
在压拱机制阶段,XJ结构的最大荷载为60.6 kN,J1结构为57.2 kN,比J1大5.6%,其同梁机制阶段荷载偏小原因一致.而在键槽内后浇高极限压应变的ECC材料使得结构压拱机制最大荷载相比于后浇普通C30混凝土增大了约4.3%.从图6曲线中可看出,随着梁端受压区混凝土的压碎,荷载开始下降,对于J1结构,普通C30混凝土由于延性、密实度较差,下降出现明显的拐点,且下降数值较大,节点延性较差;而对于J2结构,ECC混凝土延性较高,密实度较好,荷载下降平缓,且下降的幅度较小,即高延性、高密实度的ECC混凝土能有效地改善新旧混凝土表面之间的黏结问题、提高节点的延性.

在悬索机制阶段,XJ结构的最大荷载值为86.1 kN,相比于压拱机制阶段最大荷载值增加了42%,J1结构的最大荷载值为59.1 kN,相比于压拱机制阶段最大荷载增加了3%,即悬索机制的存在使得结构在大变形阶段仍能保持小变形阶段的抗力甚至更高,进而规避结构倒塌的风险.但是键槽节点悬索机制带来的效应远没有现浇结构高,其原因在于在悬索机制阶段,结构主要是通过钢筋的拉力来提供抗力,对于键槽节点,其底筋并非完全连续,需要通过钢筋与

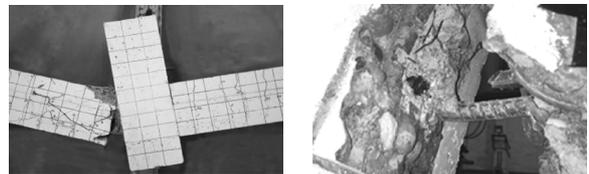
混凝土之间的摩擦力来传递拉力,因此悬索阶段的最大荷载有所降低,具体解释见下文.

2.2 破坏形态

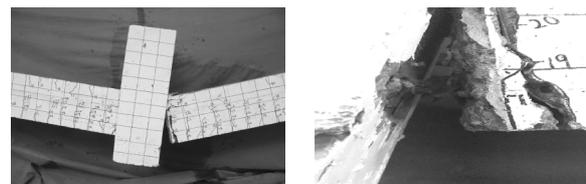
裂缝开展主要分为两阶段,即梁机制与压拱机制发展阶段.裂缝主要出现在梁两端,由受拉方向向受压方向发展.当受拉钢筋屈服后,梁端裂缝开展集中在梁与中柱交界面处,这一阶段的裂缝主要由结构发生弯曲变形所引起,此阶段J1、J2试件的裂缝发展情况基本一致.在悬索阶段,梁全截面受拉,因此从梁两端向内不断出现受拉裂缝,直至发展成截面贯通裂缝,J1由于在加载过程中中柱有一定的偏转,因此偏转侧梁的受拉裂缝明显多于另一侧梁.由图8(d)可看出,由于J2并未开展悬索阶段,因此J1比J2受拉裂缝开展更加充分,J2受拉裂缝较少,并且全截面贯穿裂缝也较少.试件最终破坏形态照片见图8,具体描述见表5.



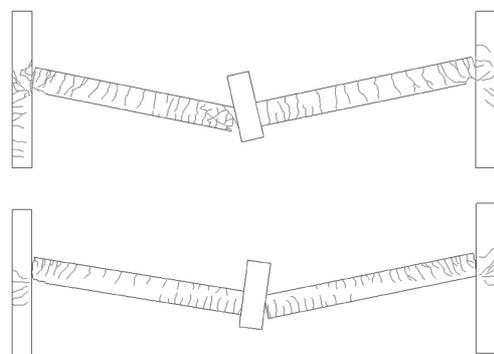
(a)倒塌极限状态



(b)J1中柱底筋断裂



(c)J2中柱底筋断裂



(d)裂缝开展情况

图8 试件典型破坏形态

Fig.8 Typical failure mode of the specimens

表 5 破坏形态

Tab.5 Failure mode

试件	左边节点	中节点	右边节点
J1	顶筋断裂	1 根底筋断裂	—
J2	—	2 根底筋断裂	—

试验中并未发生后置 U 形钢筋被拔出等黏结失效破坏,表明键槽长度能满足钢筋锚固长度要求.表 6 为各学者试验所用的键槽长度,也可表明规范^[4]规定的键槽长度能同时满足结构抗倒塌要求以及抗震要求.在梁叠合层交界面处未观察到水平裂缝,说明预制梁顶部粗糙面的施工满足要求,后浇混凝土和预制梁结合良好.

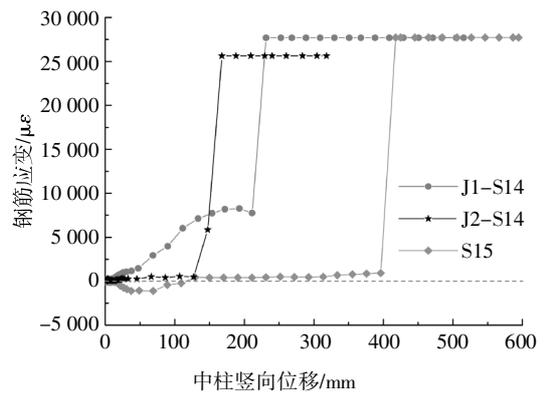
表 6 键槽长度

Tab.6 Length of keyway

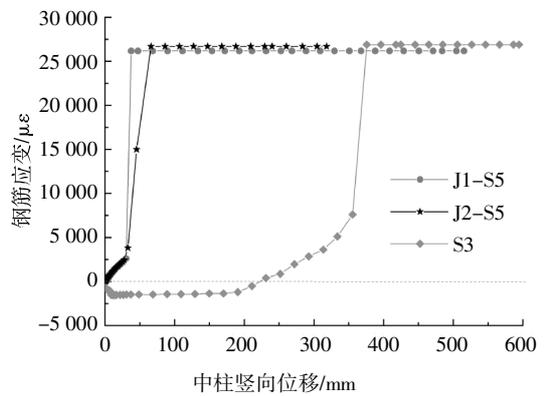
文献	键槽长度/mm	试验类型
本文	400	抗倒塌
Kang and Tan ^[6-7]	360/470	抗倒塌
蔡建国 ^[4]	400/450/500	抗震
袁晨迪 ^[5]	400	抗震

2.3 应变变化

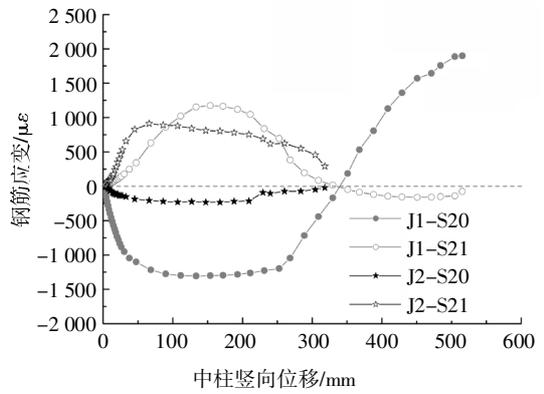
梁柱钢筋应变测点及混凝土应变测点见图 4.由图 9 可看出,靠近中柱端梁底部钢筋 S14 在试验加载开始后就一直处于受拉状态,随着悬索机制的开展,钢筋受拉导致应变片瞬间破坏.梁顶部钢筋 S15 起初处于受压状态,大约在底部钢筋屈服后,逐渐转化为受拉状态.靠近边柱梁端钢筋 S3、S5 的变化趋势与 S15、S14 基本一致.随着梁机制的形成,柱底左侧钢筋 S20 及混凝土 C4 起初处于受压状态,之后随着结构由压拱机制向悬索机制的转化,受压应变逐渐转化为受拉应变,柱底右侧的趋势刚好与左侧相反.这与结构的实际受力情况基本一致.在梁跨中沿截面布置了 3 个混凝土应变片,用来测量梁在试验中轴力的变化,布置 C1、C2 是为了消除弯矩对轴力的影响.由图中可看出,梁起初轴力为压力,这与梁机制、压拱机制的开展一致.随着悬索机制的开展,梁轴压力逐渐转化为轴拉力.



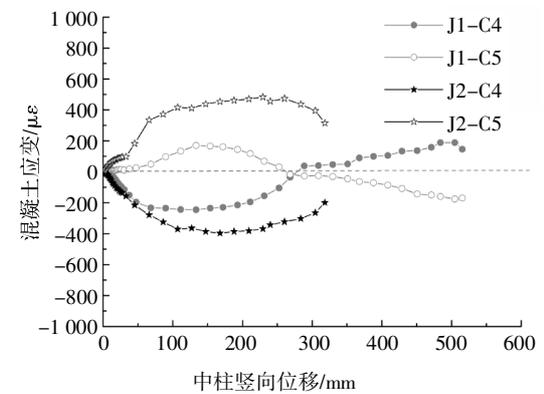
(a)中柱梁端钢筋应变



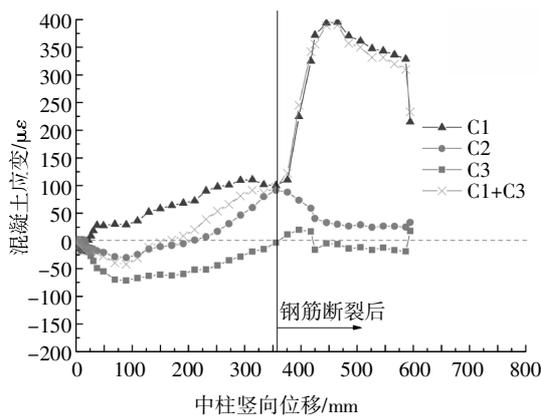
(b)边柱梁端钢筋应变



(c)边柱钢筋应变



(d)边柱混凝土应变



(e)梁跨中混凝土应变

图9 应变曲线

Fig.9 Strain curves

2.4 结构倒塌性能分析

2.4.1 变形能力

梁的变形能力通常采用弦转角来表示,依据美国规范 DOD2016^[6],其定义如下:

$$\theta = \Delta/L.$$

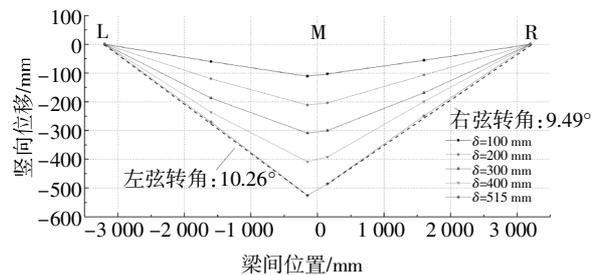
式中: Δ 为梁最大位移; L 为梁净跨长度.

试验中通过放置在梁跨中的位移计获取不同阶段的位移,图10和表7分别给出了J1、J2的梁变形曲线和弦转角.总体上看,梁变形曲线均呈现出弯曲变形状态.随着中柱位移的增加,节点处混凝土压碎剥落,边柱节点发生转动.在梁机制、压拱机制阶段,中柱位移较小,此时梁几乎保持直线,J1、J2左弦转角和右弦转角基本一致.在悬索机制阶段,J1梁的左右弦转角差别较大,这是由于键槽节点内钢筋与混凝土之间发生了相对滑移,导致中柱端左侧梁与右端梁钢筋受力不一致,中柱发生偏转.而J2梁最终状态中柱也偏转严重是因为中柱端右侧梁底部钢筋断裂之后继续加载,导致中柱往受力较弱侧方向偏转.

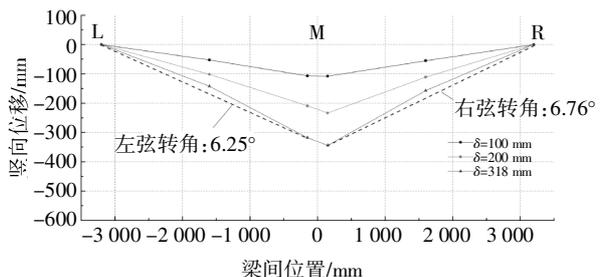
2.4.2 受力机制

图11为中节点处梁端钢筋分布的俯视图,图6中荷载突然下降点为J1、J2中柱端梁截面底纵筋A/B的断裂,在图中用x表示.由图12中柱端梁截面纵筋的应变变化情况可知,J1结构的S14钢筋应变片(钢筋B)在中柱位移150~200mm时基本保持不变,并在210mm左右有些许下降,并且包裹此钢筋键槽的混凝土也有水平裂缝,说明钢筋B相对于混凝土产生了相对滑移.其原因可能是普通C30混凝土骨料粒径相对较大且不均匀,钢筋与混凝土之间的有效握裹不佳,导致产生局部滑移.而ECC材料粒径

小,延性较好,属于自密实材料,在键槽内与钢筋黏结较好,在钢筋变形过程中,高延性ECC与钢筋的变形协调一致,2根纵筋受力情况基本一样,未发生相对滑移. J2结构S17钢筋(钢筋B)应变片,其没有相应的平直段.值得注意的是,J1结构只断裂了纵筋中的1根(钢筋B),接着顺利形成了悬索机制,而J2结构则是2根纵筋同时断裂(钢筋A和B),导致无法形成悬索机制.由此可知钢筋与混凝土之间的局部相对滑移有利于结构发生大变形,有利于提高结构的抗倒塌能力.



(a)J1 试件



(b)J2 试件

图10 梁变形曲线

Fig.10 Beam deformation curves

表7 梁弦转角

Tab.7 Rotation angle of beam (°)

试件	梁机制阶段		悬索机制阶段	
	左弦转角	右弦转角	左弦转角	右弦转角
J1	2.19	2.03	10.26	9.49
J2	2.01	2.19	—	—

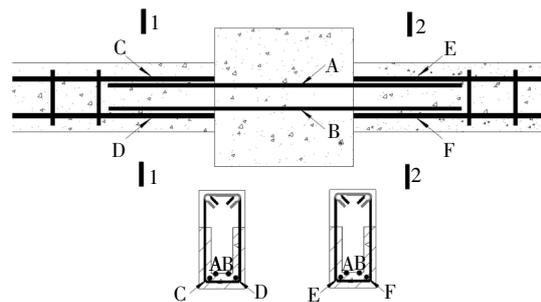
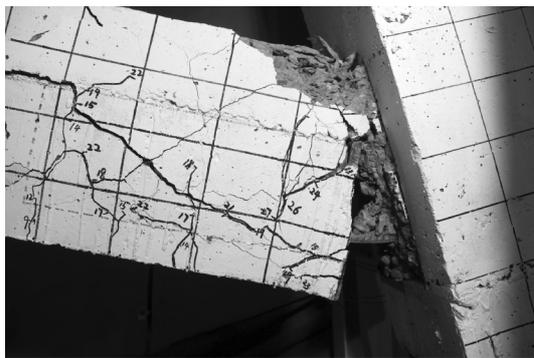
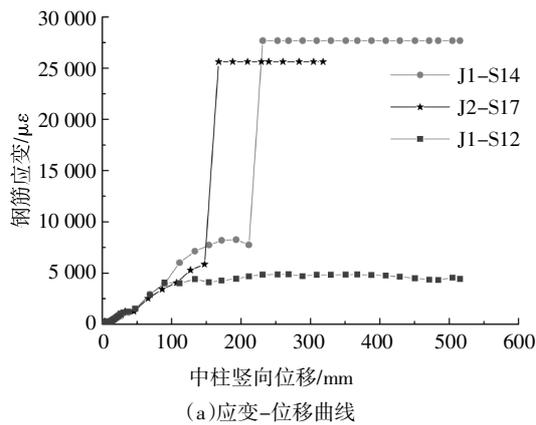


图11 中柱节点钢筋分布

Fig.11 Distribution of reinforcement for middle column joints



(b) 梁裂缝

图 12 受拉钢筋应变和梁裂缝

Fig.12 Strain curves of tensile reinforcement and beam crack

由图 7 可知, 由于 J1、J2 中柱端梁截面底纵筋的断裂, 使得水平轴力变化速率突变, 更快地向悬索机制转变, 当竖向位移达到 275 mm, 即梁高的 85% 时, 压拱机制逐渐结束, 悬索机制开始, 此时水平轴力开始表现为拉力, 并且不断增大, 直到结构发生倒塌破坏. J1 有明显的悬链线效应, 且悬索机制的最大承受荷载大于梁机制的最大荷载, 对比现浇结构悬索阶段荷载增加幅度并没有那么大, 这是由于在悬索阶段, 结构主要是通过梁内通长钢筋的拉力来提供抗力. 对于键槽节点, 从图 11 可明显看出, 其底筋并非完全连续, 贯穿中节点的 A、B 纵筋需要通过钢筋与混凝土之间的摩擦黏结力来把拉力传递给 C、D、E、F 纵筋. 从图 12 中 J1 结构 S12 应变片 (钢筋 D) 数据来看, 在悬索阶段, 钢筋 D 并没有达到极限状态, 变形以及拉力集中在 U 形钢筋, 因此悬索阶段的最大荷载有所降低.

3 结论

本文通过对 2 榀单层两跨梁柱结构的移柱静力加载试验, 对试件的力-位移曲线、结构破坏形态以

及变形性能等进行了详细分析, 得出以下结论:

1) 键槽连接节点梁柱结构在中柱失效工况下能较好地形成梁机制、压拱机制以及悬索机制, 是一种较好的装配式结构可采取的抗倒塌节点形式.

2) 由于 ECC 的高延性、高极限压应变等材料性能, 使得采用 ECC 的键槽节点梁柱结构具有较高的承载能力以及更好的节点延性, 因此, 基于梁机制设计的装配式整体式混凝土结构节点区域采用高延性材料具有较好的抗倒塌能力.

3) 钢筋与混凝土之间的不均匀相对滑移会导致裂缝的不对称发展以及钢筋的不均匀受力, 但其有利于结构倒塌过程中的大变形发展, 因此, 能大幅提高结构的抗倒塌性能.

4) 压拱作用所贡献的抗力在结构压拱阶段最大抗力中大约占 20%, 对基于梁机制倒塌设计的梁柱结构, 可以按塑性理论计算值乘放大系数 1.25 进行设计.

参考文献

- [1] GSA2013 Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project [S]. Washington, DC: United States General Services Administration, 2013: 1—3.
- [2] YEE A A. Social and environmental benefits of precast concrete technology [J]. PCI Journal, 2001, 46(3): 14—19.
- [3] 朱张锋, 郭正兴, 朱寅, 等. 不同连接构造的装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(3): 60—65.
ZHU Z F, GUO Z X, ZHU Y, et al. Experimental investigation on seismic performance of precast concrete shear walls with different connections [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 60—65. (In Chinese)
- [4] 蔡建国, 朱洪进, 冯健, 等. 世构体系框架中节点抗震性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 305—312.
CAI J G, ZHU H J, FENG J, et al. Experimental study on seismic behavior of middle joints of SCOPE system [J]. Journal of Central South University (Natural Sciences), 2012, 43(5): 305—312. (In Chinese)
- [5] VASCONEZ R M, NAAMAN A E, WIGHT J K. Behavior of HPFRC connections for precast concrete frames under reversed cyclic loading [J]. PCI Journal, 1998, 43(6): 58—71.
- [6] KANG S B, TAN K H, YANG E H. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblages with engineered cementitious composites [J]. Engineering Structures, 2015, 98:

- 186—200.
- [7] KANG S B, TAN K H. Behaviour of precast concrete beam-column sub-assemblages subject to column removal [J]. *Engineering Structures*, 2015, 93: 85—96.
- [8] 汪梦甫, 张旭. 高轴压比下 PVA-ECC 柱抗震性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(5): 1—9.
- WANG M F, ZHANG X. Experimental study on seismic performance of PVA-ECC columns with high axial load ratio [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44 (5): 1—9. (In Chinese)
- [9] 曾奕. 考虑周边约束钢筋混凝土梁柱结构抗倒塌性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2018: 15—27.
- ZENG Y. Experimental study on progressive collapse of RC frame structures with lateral restraint [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2018: 15—27. (In Chinese)
- [10] LI V. Engineered cementitious composite (ECC): material, structure and durability performance [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc, 2007: 8—11.
- [11] CHEUNG Y N. Investigation of concrete components with a pseudo-ductile layer [D]. Hongkong: Department of Civil Engineering, Hongkong University of Science and Technology, 2004: 32—50.
- [12] 杨英姿, 祝瑜, 高小建, 等. 掺粉煤灰 PVA 纤维增强水泥基复合材料的试验研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2009, 30(4): 51—54.
- YANG Y Z, ZHU Y, GAO X J, *et al.* Experimental study on high-ductile PVA fiber-reinforced cement-based composite materials with fly ash [J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2009, 30(4): 51—54. (In Chinese)
- [13] 蔡向荣, 徐世焯. UHTCC 薄板弯曲荷载-变形硬化曲线与单轴拉伸应力-应变硬化曲线对应关系研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(1): 8—16.
- CAI X R, XU S L. Study on corresponding relationships between flexural load-deformation hardening curves and tensile stress-strain hardening curves of UHTCC [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(1): 8—16. (In Chinese)
- [14] JGJ224—2010 混凝土装配整体式框架结构技术规程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 13—15.
- JGJ224—2010 Technical specification for framed structures comprised of precast prestressed concrete components [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 13—15. (In Chinese)
- [15] 袁晨迪. 键槽底筋锚入式预制框架梁柱节点相关性能研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2017: 16—18.
- YUAN C D. Experimental study on seismic behavior of a bottom reinforcement anchored precast beam-to-column connection with key slot [D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2017: 16—18. (In Chinese)
- [16] DOD2016 Design of buildings to resist progressive collapse [S]. Washington, DC: Department of Defense of USA, 2016: 12—59.