

文章编号: 2017-0163

屈曲约束支撑钢筋混凝土框架结构干式柔性梁柱节点的试验研究

侯和涛¹, 朱文灿¹, 曲哲², 崔士起³

(1. 山东大学土建与水利学院, 济南 250000; 2. 中国地震局工程力学研究所, 三河 065201; 3. 山东省建筑科学研究院, 济南 250000)

摘 要: 建议了一种由受弯框架与采用梁柱柔性节点的屈曲约束支撑框架并联组成的装配式混凝土双重抗侧力体系, 设计并完成了 4 个装配式梁柱节点试件和 1 个现浇节点试件的往复加载试验。研究了混凝土楼板、螺栓孔形式等因素对该柔性节点受力性能和破坏模式的影响, 并与现浇试件进行了对比。试验结果表明, 混凝土楼板对柔性节点刚度及承载力有很大的影响, 在设计时不可忽略; 螺栓孔形式在结构位移较小时对节点的受力性能没有影响, 但当结构位移较大时会影响节点的破坏模式; 与现浇节点相比, 装配式柔性节点具有很大的变形能力。

关键词: 装配式结构; 梁柱节点; 屈曲约束支撑钢筋混凝土框架; 干式连接; 楼板

中图分类号: TU375 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.03.0163

EXPERIMENTAL STUDY ON DRY FLEXIBLE BEAM-COLUMN JOINT IN BUCKLING RESTRAINED BRACED REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES

HOU He-tao¹, ZHU Wen-can¹, QU Zhe², CUI Shi-qi³

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250000, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China; 3 Shandong Academy of Building Research, Jinan 250000, China)

Abstract: A dry flexible beam-column joint was proposed for the use in prefabricated buckling restrained braced reinforced concrete frame structures. To study the mechanical properties, failure modes and load-bearing capacity of the joint, cyclic loading tests were conducted on four prefabricated joints and one cast-in-situ joint for comparison. The influence of the concrete slab and shapes of bolt holes on the performance of joints was investigated. The results show that the influence of the slab on the stiffness and flexural strength of the joints is significant, which cannot be neglected in practical design. The types of bolt holes have little effect on the joint when the structural lateral drift is small, but will influence the failure mode of connecting parts under large deformation. It is also shown that prefabricated flexible joints sustains much larger deformation capacity than cast-in-situ ones and thus are beneficial for local damage control of the structure.

Key words: prefabricated structure, beam-column joint, buckling restrained braced frame, dry connection, slab

装配式混凝土结构具有生产效率高、现场污染少、省时省力等优点, 近年来在我国得到大力推广。

装配式构件之间的连接部位往往成为装配式结构的薄弱环节, 容易在地震、爆炸等意外荷载作用下

收稿日期: 2017-03-01; 修改日期: 2017-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478441, 51578324); 山东省墙材革新与建筑节能科研开发项目(鲁财建指 20147139); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2016EEM07)

通讯作者: 曲哲(1983—), 男, 陕西人, 研究员, 博士, 主要从事建筑物的地震损伤控制与震后快速恢复的研究(E-mail: quz@iem.ac.cn).

作者简介: 侯和涛(1970—), 男, 山东人, 教授, 博士, 主要从事装配式建筑的研究(E-mail: houhetao@sdu.edu.cn).

朱文灿(1990—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事装配式框架结构的研究(E-mail: zhuwencan1234@163.com).

崔士起(1963—), 男, 山东人, 研究员, 主要建筑结构检测鉴定及加固改造方面的研究(E-mail: jiegoufenyuan@163.com).

发生破坏,甚至可能导致结构倒塌^[1]。因此,装配式构件之间的连接节点是装配式结构抗震性能的重要保证,也向来是相关研究的热点。

目前,基于“等同现浇”原则的湿式连接节点在装配式结构中的研究及应用较为广泛^[2-6],也有学者提出了一些新型的湿节点连接构造。文献[7]提出一种采用预应力钢筋与非预应力钢筋混合连接的框架节点,该节点在梁、柱内预留钢筋孔道,现场梁、柱定位后,钢筋穿过孔道并对普通钢筋孔道灌浆,等灌浆料达到一定强度之后张拉预应力筋,并对预应力钢筋孔道灌浆。试验结果表明,其抗震性能优于现浇节点。文献[8]对沙特阿拉伯常用的一种梁柱节点进行试验研究,该节点的预制柱上包含预埋传力杆的牛腿,现场拼接时将传力杆插入梁端头预留孔道内并在孔道内灌浆。试验研究表明该节点易发生损坏导致结构连续性倒塌,并建议通过角钢等对节点进行加强。文献[9]提出两种梁柱节点,该节点在柱端预埋到E形或方钢管牛腿,梁下部钢筋通过螺栓(倒E形)或者焊接(方钢管)与牛腿连接在一起,梁上部钢筋穿过柱子的预留孔道进行搭接,安装完成后在孔道及拼缝处进行灌浆。试验结果表明该节点的承载力、延性及耗散能力略低于现浇试件。文献[8][9]的做法能减少现场湿作业量,但工序相对比较复杂,施工周期长。文献[10][11]提出的节点其预制柱在节点核心区钢筋未截断,文献[10]在柱纵筋间设置斜钢筋防止钢筋受压屈曲,文献[11]柱子内预埋焊接端板的钢骨,梁端设置U型槽并预埋钢板,钢板与端板通过螺栓连接,这两种节点拼接后均需在核心区现浇混凝土,未明显降低现场湿作业量。

避免现场灌浆和混凝土浇筑的干式连接节点具有现场施工操作简便,施工质量易于保证,损伤后可以更换等优势,且更适于与消能减震技术进行结合。近年来,国内外学者对框架梁柱干式节点的研究也取得了一些成果。文献[12]提出一种装配式部分钢骨混凝土框架梁柱中节点,在预制梁柱端头的节点核心区采用钢骨混凝土,现场连接时钢骨的腹板及翼缘均焊接在一起。试验表明其承载力约为现浇试件的3倍;文献[13]提出一种高延性梁柱节点,在预制混凝土柱内预埋高延性杆,将延性杆通过高强螺栓与混凝土梁相连。试验表明,该节点性能远远高于现浇试件并具有较好的延性。文献[14]提出在梁柱内预留孔洞穿设预应力钢筋,以实现震

后的自复位,通过有限元分析,考察了张拉应力和普通钢筋配筋率对节点性能和恢复力的影响;文献[15]提出提出了一种采用顶底角钢作为耗能元件的自复位预应力预制混凝土框架节点,在梁和梁柱节点处预留预应力筋孔道和高强螺栓孔洞,预应力筋在孔道内不灌浆,通过预应力筋和高强摩擦型螺栓将梁、柱与顶底耗能角钢拼接在一起形成节点。文献[16]提出两种梁柱节点,第一种在预制梁、柱及牛腿处预留孔道,通过螺杆穿过角钢及预留孔道实现梁柱拼接,第二种与文献[8]的做法类似,只是将穿力杆换为J形螺杆,梁柱拼接时不灌浆,只需要拧紧螺杆。试验结果表明,这两种节点的承载能力均不如现浇节点,与现浇试件相比,第一种连接方式的延性及耗散能力较强而第二种较弱。文献[17]对文献[16]的第二种节点进行改进,在连接角钢上设置加劲肋,试验结果表明,这种做法能将节点的延性及耗散能力提高并高于现浇试件,但承载力仍低于现浇试件。

无论对于现浇框架结构还是预制装配式框架结构,加设斜撑都是增大结构抗侧刚度和承载力的有效方法。文献[18]提出了一种新型装配式方钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁组合框撑体系,在梁柱节点区域,带工字型钢接头的钢筋混凝土梁与柱上现场焊接的外伸工字型钢牛腿对接,对接时腹板采用螺栓连接,翼缘满焊,最后焊接斜撑节点板,完成节点区域的施工。振动台试验表明,该体系能够满足抗震要求,但是在强震作用下结构部分楼层可能因斜撑失效而形成薄弱楼层。

上述研究均着眼于实现预制装配式的刚性梁柱节点。然而在支撑框架体系中,结构的抗侧刚度和承载力主要由斜撑提供,因此可在适当部位采用柔性梁柱节点,一方面可以使预制构件的连接大为简化,另一方面通过限制框架梁传递给框架柱的弯矩,有助于避免框架柱在底层柱角以外的部分出现塑性铰,有利于控制结构的侧向变形模式,避免薄弱层破坏。与普通钢支撑相比,屈曲约束支撑(buckling restrained brace, BRB)具有受压不屈曲、耗能能力强等优点^[19]。为此,本文将装配式混凝土结构、柔性梁柱节点和BRB三者结合,建议采用具有柔性梁柱节点的屈曲约束支撑装配式钢筋混凝土框架结构体系(图1)。在该体系中,框架梁柱节点包含柔性和刚性连接两种形式,在设置BRB的跨内采用柔性连接节点,且BRB仅与梁连接,

在非支撑跨采用刚性连接节点，从而形成由 BRB 和受弯框架组成的双重抗侧力体系。其在典型侧向力作用下的弯矩及轴力分布如图 1 所示。

在该体系中，柔性节点除承担少量弯矩之外，

还会受到轴力的作用，轴力大小约等于 BRB 轴力的水平分量。本文通过一组拟静力试验，研究这种柔性节点在弯矩和轴力组合作用下的受力性能，并重点考察楼板对节点承载力和刚度的影响。

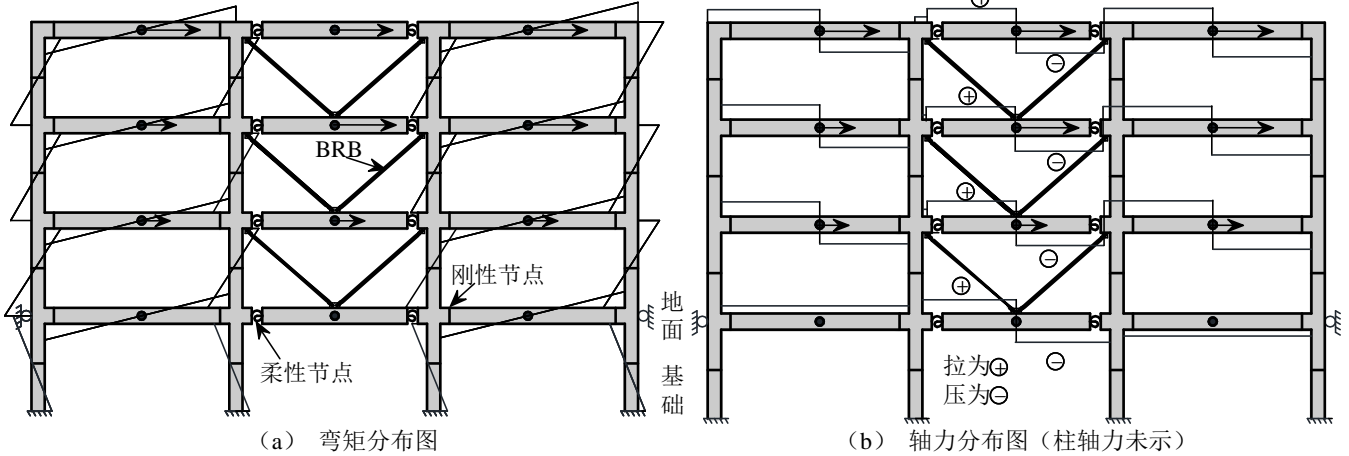


图 1 结构体系及内力图

Fig. 1 Structural system and internal force distributions

1 干式柔性梁柱节点

对于钢结构中的梁柱节点，当仅将梁腹板与柱相连时，由于转动刚度很小，通常被认为是柔性连接^[19]，在计算分析时一般可视为铰接^[20]。在现浇钢筋混凝土结构中，梁柱节点自然形成刚性连接；然而对于装配式混凝土结构，通过在预制梁、柱构件内预埋钢构件，并对钢构件进行连接，亦可在梁柱之间实现柔性连接，如图 2 所示。对于装配式结构，这种连接形式不需要现场湿作业，属于干式节点。

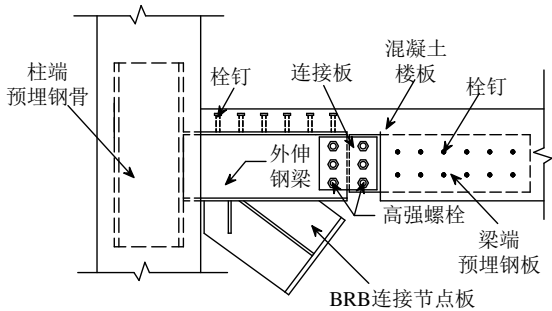


图 2 干式柔性梁柱节点构造

Fig.2 Dry flexible beam-column joint

该干式柔性节点主要由混凝土柱内预埋钢梁、混凝土梁端预埋钢板和连接板组成。在柱侧伸出一段外伸钢梁与 BRB 连接，外伸钢梁通过预埋钢骨锚固在预制混凝土柱中。外伸钢梁与楼板之间采用栓钉连接，外伸钢梁与混凝土梁端预埋钢板通过摩

擦型高强螺栓连接。

2 试验方案

2.1 试件设计

考虑楼板和连接板螺栓孔形式等影响因素，共设计五个足尺框架节点试件，包括一个传统全现浇梁柱节点试件和四个干式柔性节点试件。试件主要设计参数如表 1 所列。根据上述结构体系的受力特性，试件中梁、柱均在反弯点处截断，试件尺寸及配筋如图 3 所示。

表 1 试验参数

Table 1 Parameters of test specimens					
试件编号	试件名称	节点形式	连接板螺栓孔形式	斜向力	楼板
1	无楼板试件	装配式	长孔	无	无
2	标准试件	装配式	长孔	无	有
3	有斜向力试件	装配式	长孔	有	有
4	圆孔试件	装配式	圆孔	无	有
5	现浇对比试件	现浇	—	有	有

BRB 节点板边缘与柱表面留设 15mm 宽的间隙以防二者接触。在现浇试件中 BRB 节点板通过锚筋与混凝土梁相连，并设置端头锚板以解决钢筋锚固长度不足的问题。在装配式试件中 BRB 节点板直接焊接在外伸钢梁上。BRB 节点板与梁连接的细部构造如图 4 所示。

在装配式试件中，外伸钢梁采用 H300×150×12×12 型钢，混凝土梁端预埋钢板厚 12mm，在外伸钢梁的腹板与梁端预埋钢板间两边

分别搭接厚 6mm 的连接板, 钢梁与梁端预埋钢板通过连接板及 6 颗 10.9 级 M24 高强螺栓连接, 连接部位表面均做喷砂处理。

楼板与钢梁之间以及梁端预埋件与混凝土梁之间均设置 4.6 级 $\phi 16$ 栓钉, 节点连接部位构造见图 5。圆孔与长孔试件的区别在于连接板上螺栓孔形状的不同, 长孔连接板的形式及具体尺寸见图 6, 试验时开长孔的一侧与外伸钢梁连接, 圆孔连接板

两侧螺栓孔均为 $\phi 26$ 圆孔。

试件混凝土设计强度等级均为 C35, 试件浇筑过程中同批次制作边长为 150mm 的立方体试块和 150mm \times 150mm \times 300mm 的棱柱体试块, 与试件在同等条件下自然养护, 并且在试验加载过程中测得混凝土的立方体抗压强度 $f_c=38.4\text{MPa}$, 弹性模量 $E_c=3.2\times 10^4\text{MPa}$ 。试验所采用钢筋均为 HRB400 级, 实测力学性能见表 2。

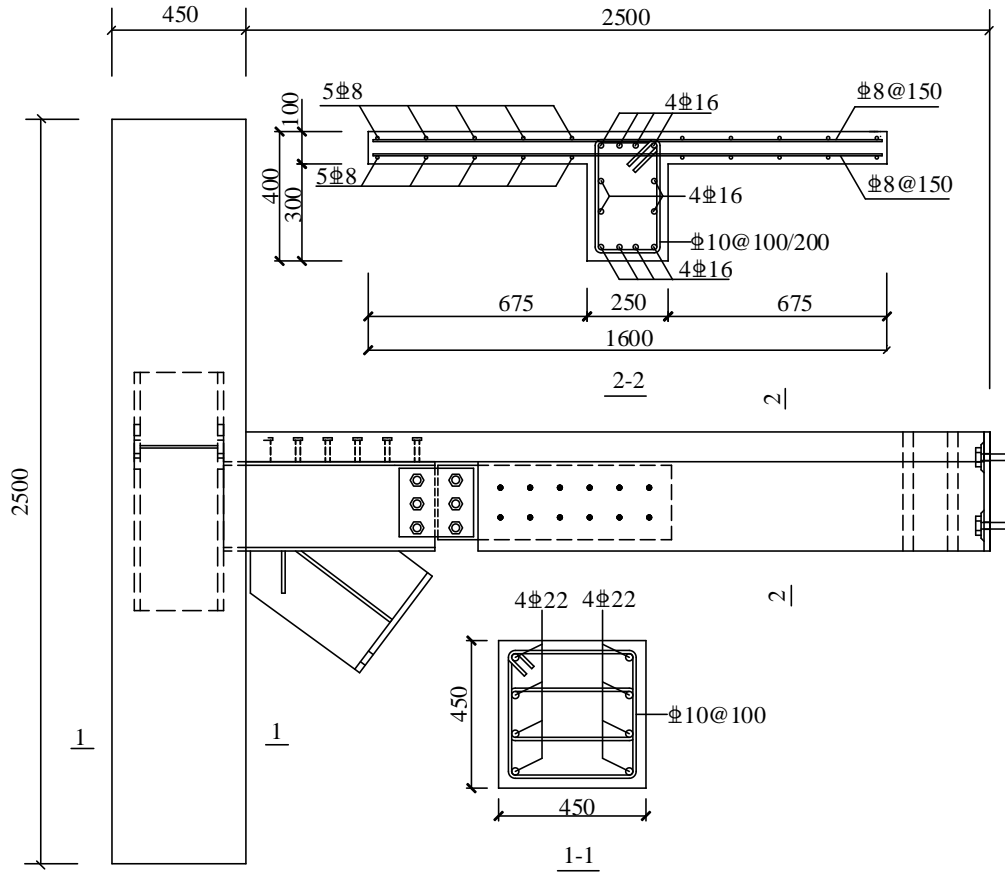


图 3 试件尺寸及配筋 /mm

Fig. 3 Dimensions and reinforcement details of specimens

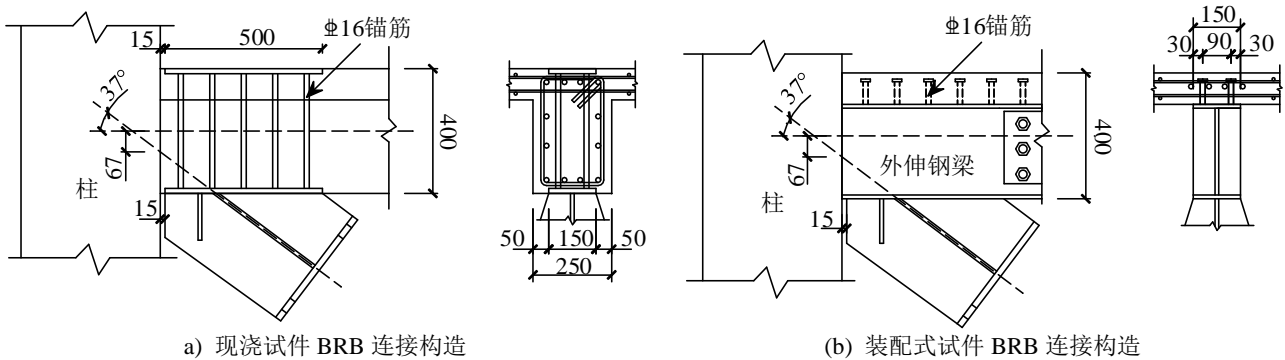


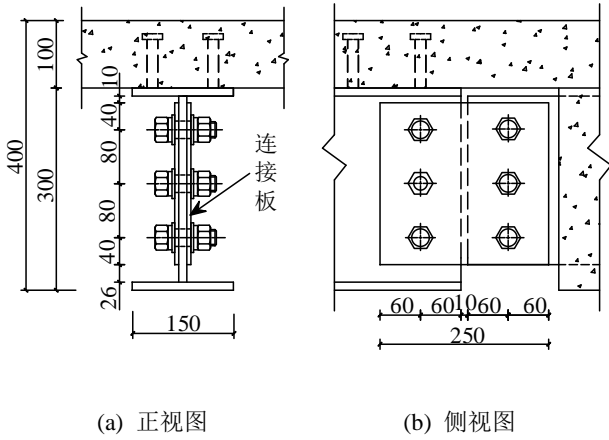
图 4 BRB 连接构造 /mm

Fig. 4 Connection details of BRB and beam

2.2 加载装置与加载制度

试验时将试件旋转 90 度, 柱子作为地梁使用,

在梁端施加往复荷载。地梁（柱）通过四根 $\phi 70$ 螺栓与试验室地面锚固，并且在地梁两端采用水平千斤顶顶紧以防止滑动。试验体净梁长为 2300mm，BRB 与梁轴线夹角 θ 为 37°



(a) 正视图 (b) 侧视图

图 5 连接部位构造 /mm

Fig. 5 Construction of connection area

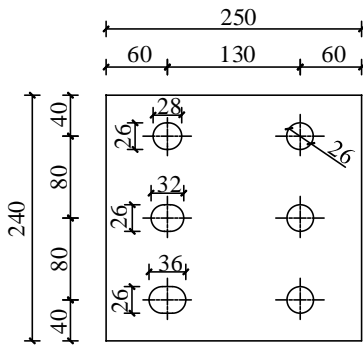


图 6 连接板尺寸 /mm

Fig. 6 Size of connection plate

表 2 实测钢筋力学性能

钢筋牌号	f_{sy}/MPa	E_s/MPa
$\phi 8$	346	2.0×10^5
$\phi 10$	425	2.0×10^5
$\phi 16$	516	2.1×10^5

Table 2 Rebar mechanical properties

假设 BRB 的滞回行为服从理想弹塑性模型，BRB 轴力 F_{BRB} 与其变形 δ_D 关系如图 7 所示。在本次试验中，设 BRB 的屈服承载力 $F_y=400\text{kN}$ ，弹性线刚度 $K_{BRB}=85\text{kN/mm}$ 。试验通过结构层间位移角控制加载，在层间位移角为 1/2000、1/800、1/550、1/200、1/100、1/50 时，每级位移循环 2 次，层间位移角为 1/30、1/15 时，每级位移循环 1 次。

为简化试验加载装置，在试验中未采用真实的 BRB，而是根据 BRB 在结构变形时的受力情况，在梁端通过一个力控制的斜向作动器与 BRB 节点板相连，以模拟 BRB 对节点板的轴力作用^[22]，同时，在梁的自由端采用一个 500kN 位移控制的水平

作动器施加水平位移，并采用一个 500kN 力控制的竖向作动器在梁的自由端施加竖向荷载以模拟梁内轴力（图 8）。三个作动器根据其与结构层间位移的关系协同变化，竖向作动器出力大小始终等于 $-F_{BRB}\cos\theta$ 。

考虑到 BRB 轴力对节点连接部位的影响主要是其沿梁轴向分力的作用，因此在试验中，1、2、4 号试件均未设置代表 BRB 的斜向作动器，而仅用梁顶自由端的竖向作动器模拟由 BRB 引入的梁的轴力。

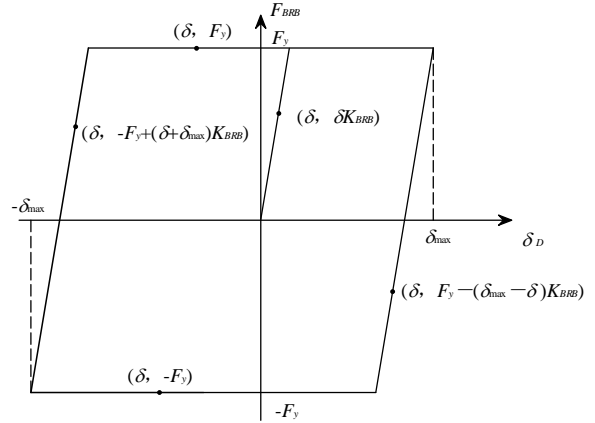


图 7 假设的 $F_{BRB}-\delta_D$ 滞回模型

Fig. 7 Assumed $F_{BRB}-\delta_D$ hysteretic model

3 试验结果

3.1 层剪力与层间位移的计算

对于装配式试件，当结构层间位移为 Δ 时，记对应的层间位移角为 α ，层剪力为 V ，梁剪力为 V_B ，此时梁在连接节点处的局部转角为 β ，BRB 的轴向变形为 δ_D ，体系的变形协调关系如图 9 (a) 所示。现浇试件的变形协调关系可参见文献[22]。

设 V_C 为柱的总剪力，则：

$$V = V_C + F_{BRB} \cos \theta \quad (1)$$

$$\alpha = \delta / (L/2) = \Delta / H \quad (2)$$

$$\beta = \alpha l / (L/2 - l) + \alpha \quad (3)$$

$$V_C \Delta = 4V_B \delta \quad (4)$$

由式(1)-式(4)可得： $\delta = \Delta L / 2H$ ， $V_C = 2V_B L / H$ 。

δ_D 与框架变形关系见式(5)

$$\delta_D = \alpha H \cos \theta + 2e\alpha \sin \theta \quad (5)$$

图 9 (a) 所示的原型框架结构的变形与试验体变形之间的对应关系如图 9 (b) 所示，图中 δ 、 F_V 、 F_N 为试验测量值， δ 为梁顶端位移， F_V 表示水平作动力， F_N 表示竖向作动力。试验体与原型框架

变形与的力关系如式(6)-式(7)所示。

$$V_B \delta = F_V \delta + F_N (\sin \gamma) \eta \quad (6)$$

$$\eta = \beta (h + L/2 - l) = \gamma f \quad (7)$$

可得 V_C 与 α 、 F_N 、 F_V 的关系如式(8)所示：

$$V_C = \frac{2F_V L}{H} + \frac{F_N \alpha}{fH} \left(\frac{L^2 - 2Ll + 2hL}{L - 2l} \right)^2 \quad (8)$$

3.2 斜向力的影响

试验加载至框架层间位移角 1/15 时因即将超过作动器量程而停止，该层间位移角已远远大于我国抗震规范^[23]规定的钢筋混凝土框架 1/50 的弹塑

性层间位移角限值。为清晰起见，下文给出 V_C - α 滞回曲线时，层间位移角小于等于 1/100 的曲线作为结构达到安全极限状态之前的部分画在一起，其余阶段画在一起。

由图 10 可以看出，2、3 号试件的滞回曲线相差较小，说明对于本文中的装配式试件，试验时移除斜向作动器，仅通过竖向作动器施加轴向拉压力以模拟 BRB 对节点性能的影响的做法，对试验结果基本没有影响。

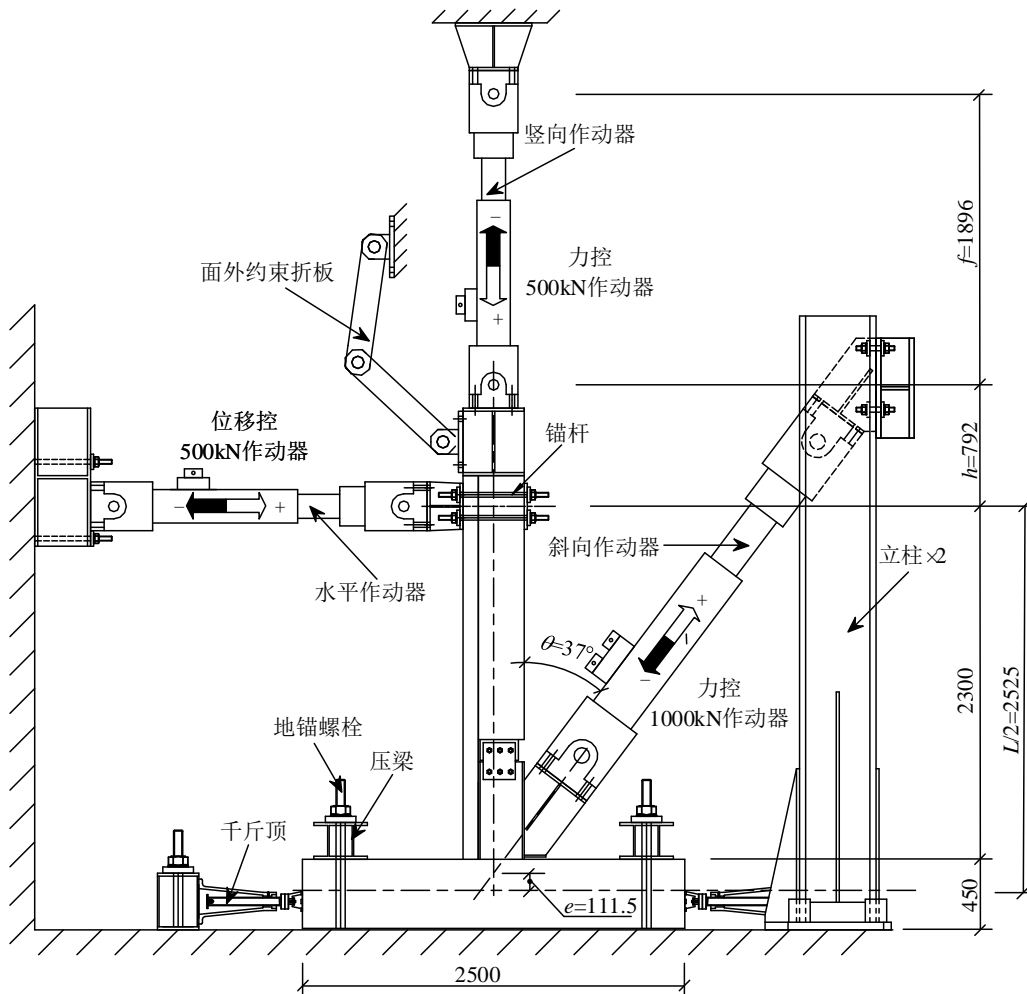


图 8 加载装置及尺寸

Fig. 8 Test setup and dimensions

3.3 楼板的影响

当层间位移角小于 1/100 时，无楼板试件（1 号）正向和负向加载过程中， $|V_C|$ 均约为 25kN，说明在此阶段，螺孔在两个方向的受力特性基本相同。当层间位移角大于 1/100 时，在正向加载过程中因螺栓与孔壁接触， V_C 明显增加，在层间位移角为 1/15 时达到 166.8kN，在负向加载时，试件在峰

值荷载处 $|V_C|$ 仍约为 25kN，说明该节点在 BRB 作用下正向及负向受力不对称，且该柔性连接构造具有一定的承载力，并非理想铰接（图 11）。

与无楼板试件相比，包含混凝土楼板的标准试件（2 号）在正向和负向加载中力学行为的对称性更好（图 12）。当层间位移角不大于 1/550 时，连接板处的摩擦性高强螺栓未发生滑移， V_C 与层间位

移角呈现线性关系，试件处于线弹性阶段。取滞回曲线中线弹性阶段正负峰值点连线的斜率作为框架部分的初始刚度，计算得到标准试件（2号）的初始刚度为 35581kN 是无楼板试件的初始刚度 13033kN 的 2.7 倍，说明楼板对节点刚度影响很大。在正向加载过程中，当层间位移角小于 1/100 时标准试件在位移峰值点处的 V_C 约为无楼板试件的 2.8 倍。当层间位移角大于等于 1/100 时，标准试件在位移峰值点处的 V_C 约为无楼板试件的 3.6 倍。在负向加载过程中，标准试件的承载力也明显大于无楼板试件。说明楼板的存在会显著提高该柔性节点的承载力。

3.4 连接板螺栓孔形式影响

在正向加载过程中，当层间位移角为 1/550-1/200 时，连接板开长圆孔的标准试件（2号）在峰值点处的 V_C 比圆孔试件（4号）大 27.8kN，

这可能是因为两个试件此时在节点处高强螺栓与孔壁均未接触，但是标准试件螺孔处摩擦力更大（标准试件初始刚度较大）；当层间位移角为 1/100-1/50 时，标准试件与圆孔试件的滞回曲线基本重合，说明此时两种节点的受力特性基本相同；当层间位移角为 1/30 时，峰值点处标准试件的 V_C 比圆孔试件小 63.2kN，此时圆孔试件中连接部位螺栓与孔壁紧密接触；层间位移角峰值为 1/15 的加载过程中，在层间位移角约为 1/20 时搭接部位的钢板出现局部屈曲（图 14），导致其承载力不能继续提高，而长孔试件承载力仍能够继续上升。在负向加载过程中，标准试件节点承载力始终小于圆孔试件，表明圆孔试件中螺栓与孔壁接触程度更大；在层间位移角为 -1/15 时，标准试件与长孔试件 V_C 数值基本相等，此时楼板损坏严重，孔壁钢材已屈服。

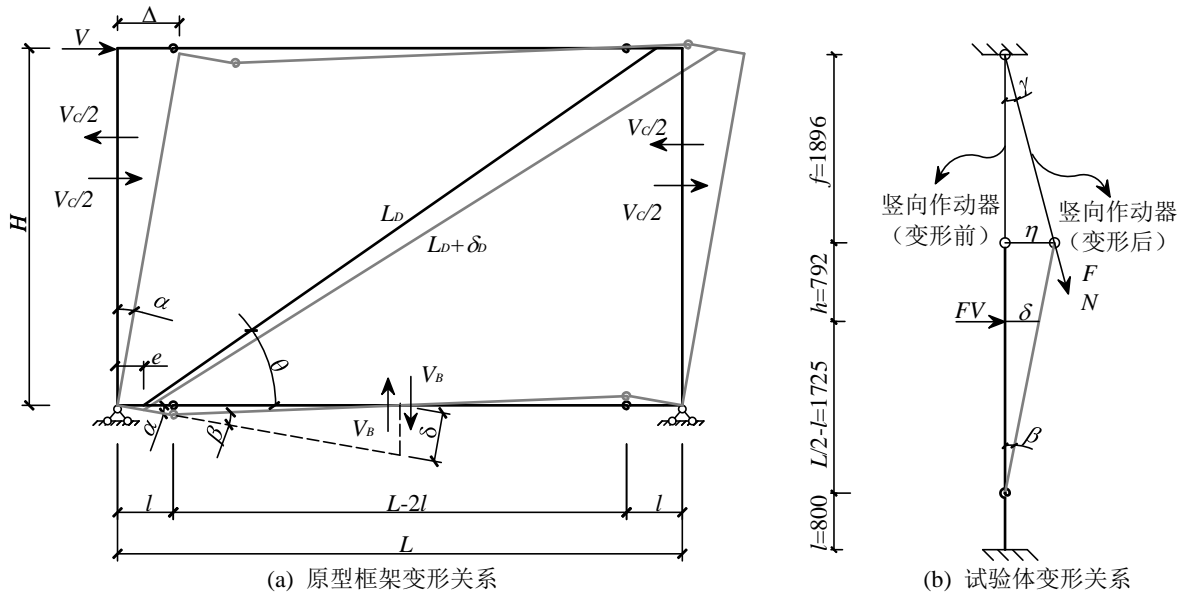


图 9 变形关系

Fig. 9 Deformation relationship

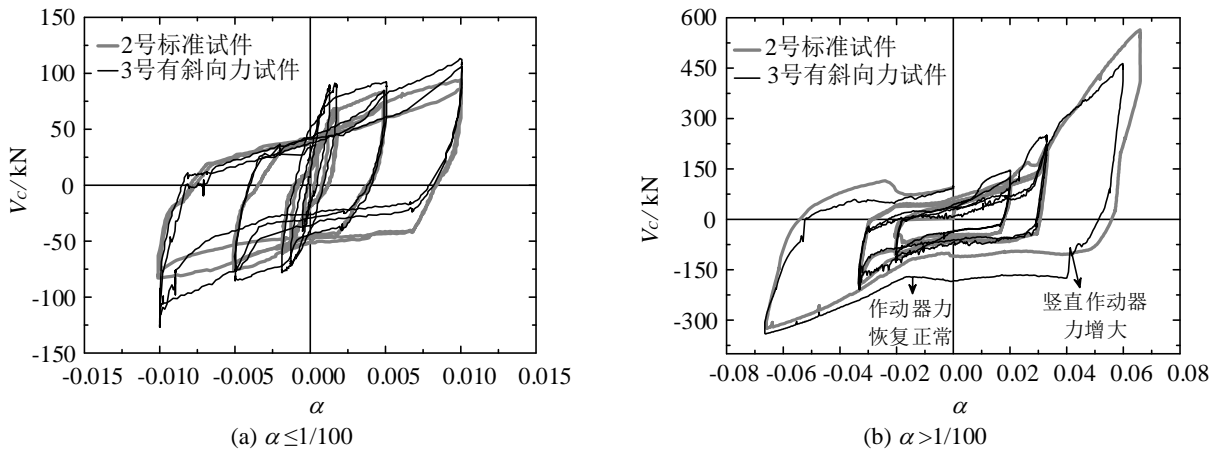


图 10 标准试件（2号）与带斜向力试件（3号） V_C - α 滞回曲线对比

Fig.10 V_c - α hysteretic curves of specimen 2 and 3

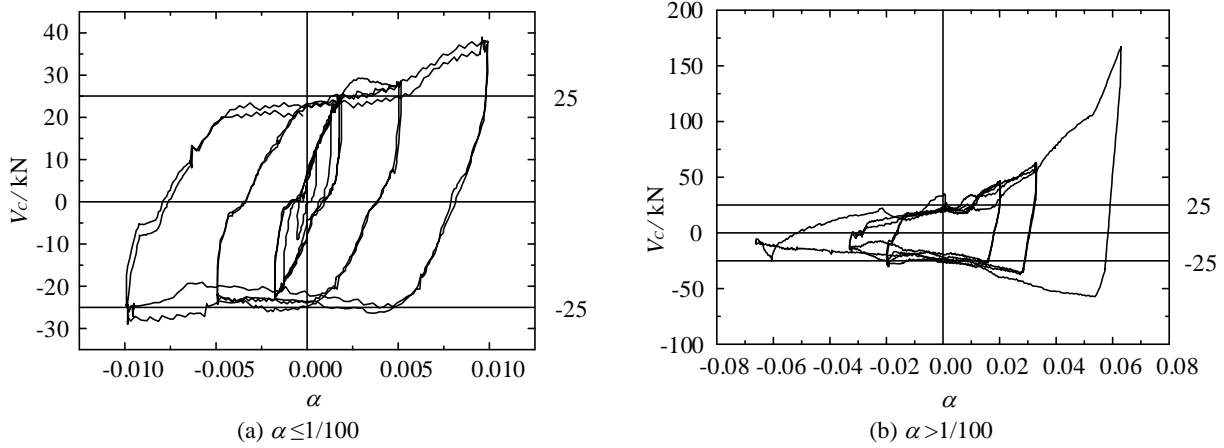


图 11 无楼板试件 (1 号) V_c - α 滞回曲线图

Fig. 11 V_c - α hysteretic curves of specimen 1

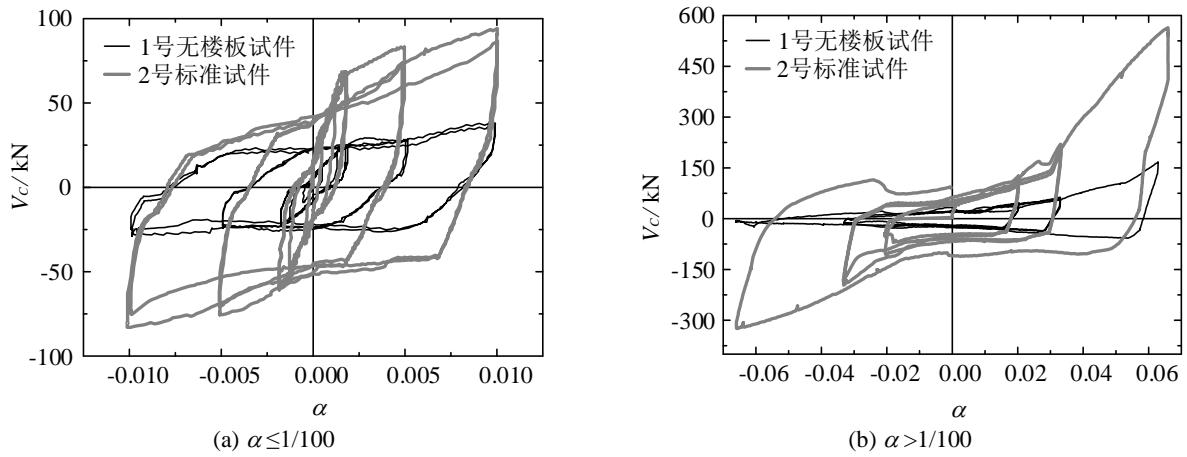


图 12 有楼板标准试件 (2 号) 与无楼板试件 (1 号) V_c - α 滞回曲线对比

Fig. 12 V_c - α hysteretic curves of specimen 2 and 1

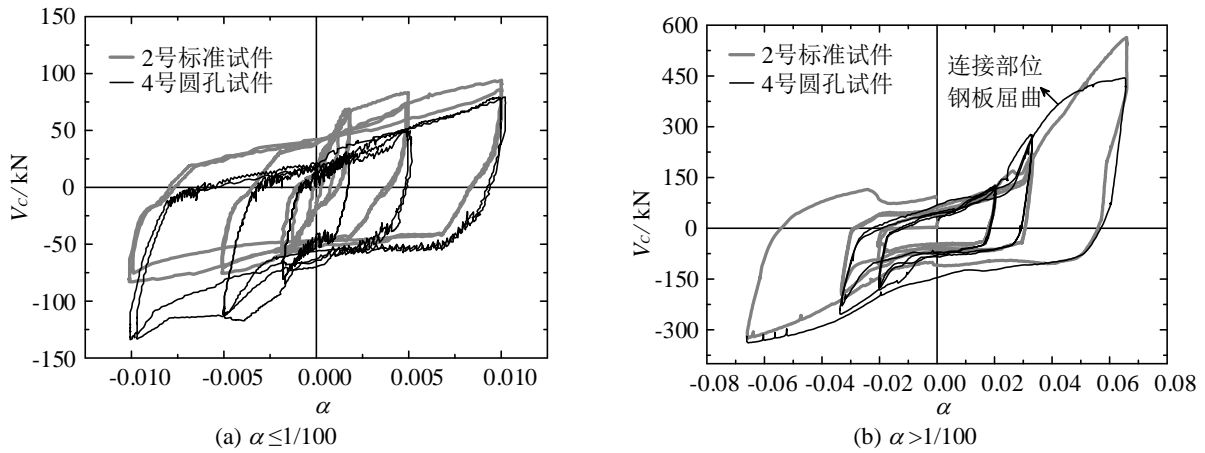


图 13 长孔标准试件 (2 号) 与圆孔试件 (4 号) V_c - α 滞回曲线对比

Fig. 13 V_c - α hysteretic curves of specimen 2 and 4

圆孔或长孔的连接方式只在层间位移角较大时影响节点的承载力和破坏模式,对结构整体的破坏形态和承载力影响不大,因此在实际应用中开设长孔意义不大。

试验结束后,连接板外表面螺孔处及垫片上均有刻痕,内表面有明显滑动痕迹,圆孔试件孔壁有明显扩展,长孔试件孔壁扩展不明显。4号试件试验后孔壁的破坏状况见图 15。由图可知,上下两排

螺栓均会发生滑移，但由于下排螺栓受力更大，当螺栓与孔壁接触后，破坏发生在下排螺栓处。

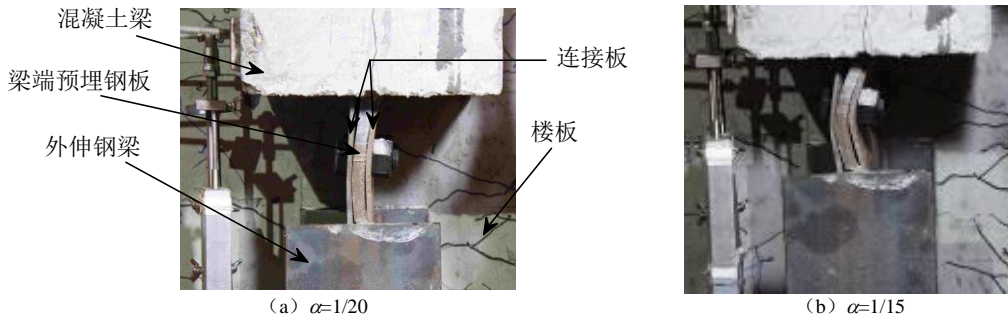


图 14 圆孔试件 (4 号) 连接部位钢板屈曲

Fig. 14 Steel plates buckling of connection zone in specimen 4

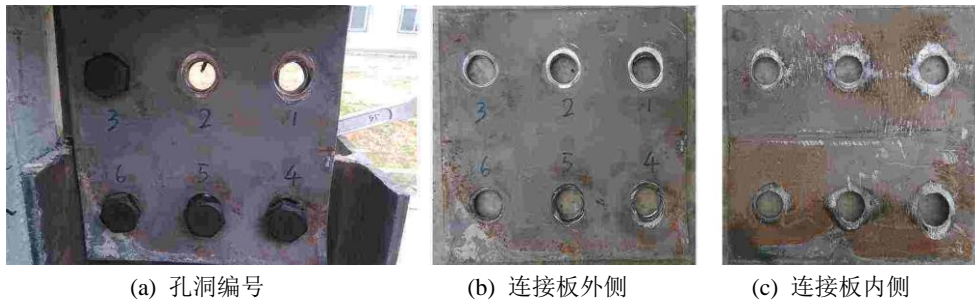


图 15 圆孔试件 (4 号) 孔壁破坏形态

Fig. 15 Failure mode of walls in specimen 4

3.5 装配式与现浇的对比

现浇试件 (5 号) 的初始刚度为 38289kN, 为标准试件 (2 号) 的 1.07 倍, 说明带有楼板的装配式柔性节点与现浇梁柱节点的初始刚度基本相同。由装配式试件与现浇试件的 $V_C-\alpha$ 滞回曲线对比 (图 16) 可知, 除层间位移角 1/15 的加载循环外, 装配式柔性节点试件的承载力均小于现浇节点 (刚性节点)。在达到各个位移峰值点时二者的承载力之比如表 3 所示。在层间位移角 1/15 加载循环的后期, 柔性节点的承载力反而大于现浇节点, 说明考虑楼板之后, 柔性节点具有较大的承载力, 与铰接相差较大, 且在大位移下螺栓与孔壁的接触会显著增大装配式节点的承载力。

在层间位移角为 -1/50 时, 现浇试件的梁柱 (地梁) 连接部位出现裂缝 (图 17 (b)), 同时柱出现裂缝。层间位移角 -1/30 时, 梁与柱连接部位出现约 8mm 裂缝 (图 17 (c)), 柱裂缝向外延展 (图 17 (d)), 梁在与 BRB 节点板连接的上部也出现裂缝 (图 (e)), 同时楼板钢筋发生屈曲 (图 17 (f)), 层间位移角为 1/15 加载过程中, 楼板钢筋发生断裂。

表 3 装配式试件与现浇试件承载力对比

Table 3 Bearing capacity comparison between specimen 2 and 5

α	V_C		V_C (装配式试件) / V_C (现浇试件)
	装配式试件	现浇试件	
1/200	79.47	136.83	0.58
-1/200	-75.53	-103.25	0.73
1/100	94.15	231.66	0.41
-1/100	-80.98	-158.15	0.51
1/50	124.69	323.65	0.39
-1/50	-104.75	-234.09	0.45
1/30	219.36	344.04	0.64
-1/30	-190.91	-241.27	0.79

3.6 楼板的损伤状态

在各个装配式试件中, 楼板的开裂形式和裂缝宽度均基本相同, 连接板螺栓孔形式对楼板的破坏模式几乎没有影响, 楼板破坏的程度主要与节点连接部位的转角有关。图 18 与图 19 分别给出了带斜向力试件和现浇对比试件在层间位移角为 -1/200、-1/100、-1/50 时楼板的裂缝分布。由楼板裂缝图可以看出, 裂缝由螺栓连接部位向外扩展并贯穿楼板, 表明梁与楼板主要绕螺栓连接部位转动, 此处相当于“塑性铰”。现浇试件破坏集中于梁柱连接部位, 梁与楼板整体性好, 楼板裂缝分布较为均匀, 且宽度较小。

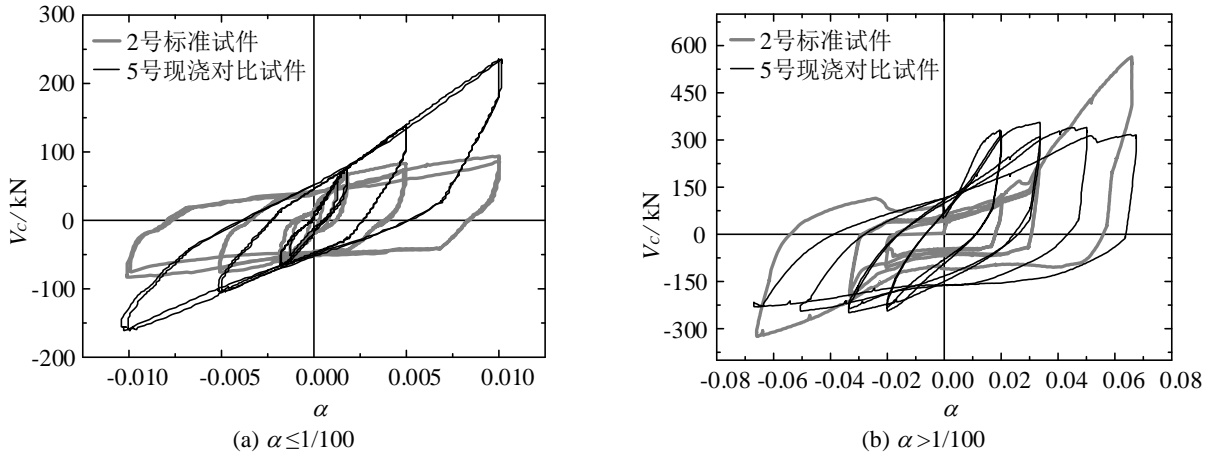


图 16 装配式试件 (2 号) 与现浇试件 (5 号) $V_c-\alpha$ 滞回曲线对比

Fig. 16 $V_c-\alpha$ hysteretic curves of specimen 2 and 5

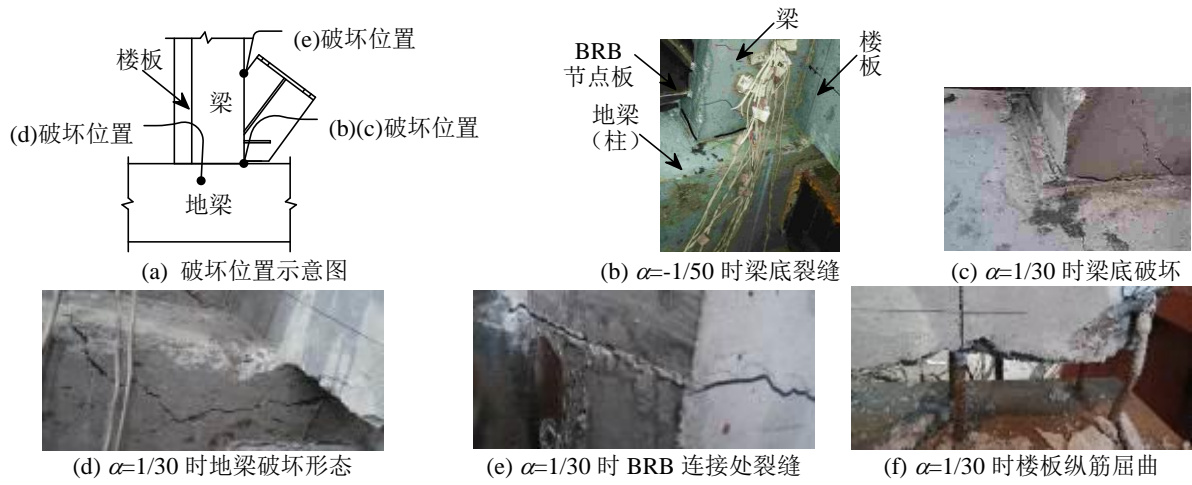


图 17 现浇试件 (5 号) 破坏形态

Fig. 17 Failure mode of specimen 5

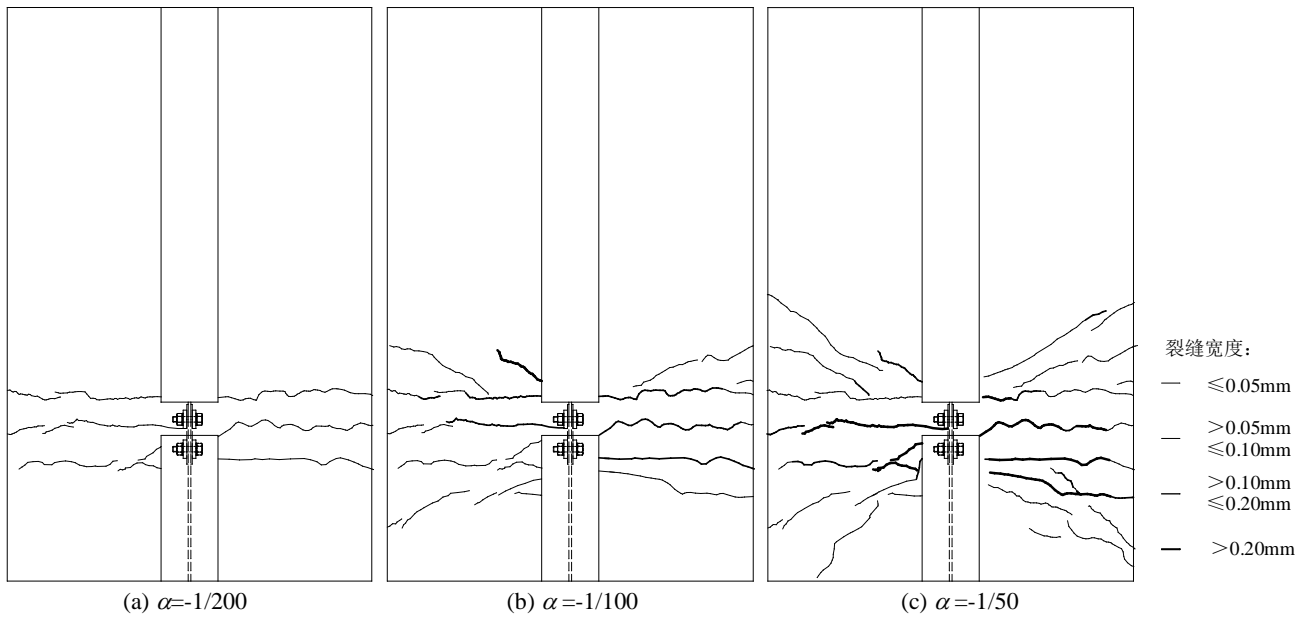


图 18 装配式试件楼板裂缝分布图

Fig. 18 Distribution of cracks in slab of prefabricated specimens

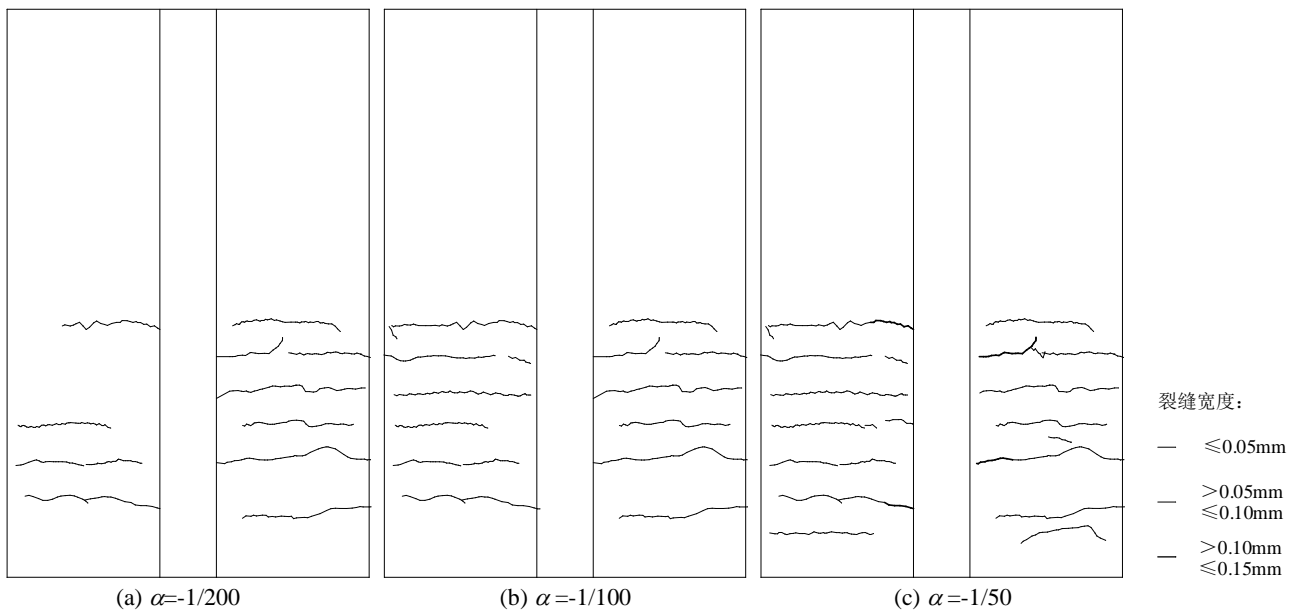


图 19 现浇试件楼板裂缝分布图

Fig. 19 Distribution of cracks in slab of cast-in-situ specimen

4 结论

建议了一种由受弯框架与采用梁柱柔性节点的屈曲约束支撑框架并联组成的装配式混凝土双重抗侧力体系，并通过试验研究了体系中的梁柱柔性节点的受力性能和损伤特性。该柔性节点不需要湿作业，能够快速安装，且在地震后可以拆卸查看及更换。通过往复加载试验研究了混凝土楼板和连接板螺栓孔形式等因素的影响，结果表明：

(1)该干式梁柱柔性节点具有很大的变形能力，能够满足抗震设计的要求；

(2)混凝土楼板会显著提高该柔性节点的刚度和承载力，这在设计时需要予以考虑；

(3)在层间位移角小于等于 $1/50$ 时，在柔性节点中采用圆孔或长圆孔的连接方式对整体结构影响不大，因此在实际应用中可不必特意留设长圆孔。

(4)带有楼板的柔性节点的承载力约为现浇试件的一半，具有半刚性的特点。此外，该干式节点在规范容许的层间位移角限值内不会发生明显的局部损伤。

参考文献：

[1] 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.
Chen Zigeng, ZHOU Yun, Zhang Jichao et al. Retroversion and forecast of present research and application of precast concrete structure[J]. Earthquake

Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(4): 1—11. (in chinese)

- [2] 高杰, 田春雨, 郝玮, 等. 装配式梁-柱-叠合楼板中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(S2).
Gao Jie, Tian Chunyu, Hao Wei, et al. Experimental study on seismic behavior of precast concrete layered slab and beam to column interior joints[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(S2). (in chinese)
- [3] 张大长, 郭雁, 李布辉. 外壳预制核心现浇装配式 T 型钢筋混凝土节点抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 156—162.
Zhang Dachang, Guo Yan, Li Buhui. Experimental studies on aseismic performance of t-shape fabricated concrete joints with precast external shell and cast-in-place core concrete[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(1): 156—162. (in chinese)
- [4] 闫维明, 王文明, 陈适才, 等. 装配式预制混凝土梁-柱-叠合板边节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(12): 56—61.
Yan Weiming, Wang Wenming, Chen Shicai et al. Experimental study of the seismic behavior of precast concrete layered slab and beam to column exterior joint[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(12): 56—61. (in chinese)
- [5] 陈适才, 闫维明, 王文明, 等. 大型预制混凝土结构梁-柱-叠合板边节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 60—67.
Chen Shicai, Yan Weiming, WANG Wenming, GAO Jie et al. Seismic behavior of exterior beam to column joints with layered slab of large precast concrete structures[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 60—67. (in

- chinese)
- [6] Guan D, Guo Z, Xiao Q, et al. Experimental study of a new beam-to-column connection for precast concrete frames under reversal cyclic loading[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(3):529-545.
- [7] 李振宝, 董挺峰, 闫维明, 等. 混合连接装配式框架内节点抗震性能研究[J]. *北京工业大学学报*, 2006, 32(10): 895-900.
- Li Zhenbao, Dong Tingfeng, YAN Weiming, et al. Study on seismic performances of hybrid precast concrete beam-to-column connections [J]. *Journal of Beijing University of technology*, 2006, 32(10): 895-900. (in chinese)
- [8] Elsanadedy H M, Almusallam T H, Al-Salloum Y A, et al. Investigation of precast RC beam-column assemblies under column-loss scenario[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 142:552-571.
- [9] Bahrami S, Madhkhan M, Shirmohammadi F, et al. Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading[J]. *Engineering Structures*, 2017, 132:808-821.
- [10] Parastesh H, Hajirasouliha I, Ramezani R. A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: An experimental investigation[J]. *Engineering Structures*, 2014, 70(9):144-157.
- [11] Choi H K, Choi Y C, Choi C S. Development and testing of precast concrete beam-to-column connections[J]. *Engineering Structures*, 2013, 56(6):1820-1835.
- [12] 程万鹏, 宋玉普, 王军. 预制装配式部分钢骨混凝土框架梁柱中节点抗震性能试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2015, 55(2): 171-178.
- Cheng Wanpeng, Song Yupu, Wang Jun. Experimental study of seismic performance for beam-column joints of precast and discontinuous steel reinforced concrete frames. [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2015, 55(2): 171-178. (in chinese)
- [13] 李向民, 高润东, 许清风. 预制装配式混凝土框架高效延性节点试验研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(8): 3453-3463.
- Li Xiangmin, Gao Rundong, Xu Qingfeng, Experimental study on high ductile joints for precast RC frame[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(8): 3453-3463. (in chinese)
- [14] 邹响, 林晖, 马卫强. 具有自复位功能装配式框架节点抗震性能的影响因素分析 [J]. *工程力学*, 2015, (S32):72-77.
- Zou Yun, Lin Hui, Ma Weiqiang, Influence factors analysis on aseismic behavior of prefabricated frame joints with capacity of self-centering[J], *Engineering Mechanics*, 2015, (S32):72-77. (in chinese)
- [15] 蔡小宁, 孟少平. 预应力自复位混凝土框架节点抗震性能数值模拟[J]. *工程力学*, 2016, 33(3):143-151.
- Cai Xiaoning, Meng Shaoping. Numerical analysis for seismic behavior of self-centering post-tensioned precast beam-to-column connections [J]. *Engineering mechanics*, 2016, 33(3):143-151
- [16] Vidjeapriya R, Jaya K P. Behaviour of precast beam-column mechanical connections under cyclic loading[J]. *Asian journal of civil engineering (Building and Housing)*, 2012, 13(2): 233-245.
- [17] Vidjeapriya R, Jaya K P. Experimental Study on Two Simple Mechanical Precast Beam-Column Connections under Reverse Cyclic Loading[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2013, 27(4):402-414.
- [18] 李正良, 徐姝亚, 刘红军, 等. 新型装配式钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁框撑体系振动台试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(2): 22-30.
- Li Zhengliang, Xu Shuya, Liu Hongjun, et al. Shake table test on a new type of precast CFST column-RC beam braced frame structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(2): 22-30. (in chinese)
- [19] 汪家铭, 陆焯. 屈曲约束支撑体系的应用与研究进展 (I)[J]. *建筑钢结构进展*, 2005, 7(1): 1-12.
- Wang Jiaming, Lu Ye. The practice and reserach development of buckling-restrained brcced frame (I) [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2005, 7(1): 1-12. (in chinese)
- [20] 陈绍蕃, 顾强. 钢结构基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003:337-339
- Chen Shaofan, Gu Qiang. Foundation of steel structure [M]. Beijing: China building industry press, 2003: 339-339(in chinese)
- [21] 王国周, 瞿履谦. 钢结构:原理与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993:327-330
- Wang Guozhou, Qu Lvqian. steel structure :[M]. Beijing: China building industry press, 1993: 327-330(in chinese)
- [22] Qu Z, Kishiki S, Maida Y, et al. Subassemblage Cyclic Loading Tests of Buckling-Restrained Braced RC Frames with Unconstrained Gusset Connections[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 142(2): 04015128.
- [23] GB 50011-2010. 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- GB 50011-2010. Code for seismic design of building [S]. Beijing: China building industry press, 2001. (in chinese)