

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.02.007

PEC 柱-钢梁摩擦耗能部分自复位组合 框架抗震性能数值模拟

方有珍,张志成,黄志豪,季云

(苏州科技大学土木工程学院,江苏苏州 215011)

摘要:为更好满足建筑结构不同抗震性能化设计目标,对已有自复位连接节点弯矩-转角关系进行改进,提出摩擦型耗能部分自复位连接设计思路。利用 ABAQUS 软件设计了 5 榀卷边 PEC 柱-钢梁摩擦耗能型部分自复位连接组合框架模型试件,并对其在往复荷载下的抗震性能进行了数值模拟。基于模拟数据,对比分析柱顶竖向力、摩擦板长圆孔孔径、柱脚边界条件和摩擦板翼缘螺栓布置方式等设计参数对试件滞回性能、抗侧刚度退化、残余变形、耗能能力等抗震性能的影响规律。结果显示:卷边 PEC 柱满足自复位结构对竖向构件承载力及抗侧刚度的要求;摩擦板长圆孔孔径合理设置可控制摩擦滑移耗能和连接转化为承压型传力模式的发展进程,从而实现结构不同抗震性能化设计目标;摩擦板内外侧翼缘均布置高强对穿螺栓的实际工程做法可更好发挥部分自复位连接的自复位和耗能减震功效;柱脚边界条件对结构受力进程和刚度分配影响显著,柱底与基础梁刚性连接的试件承载力、抗侧刚度和耗能减震远高于柱底铰接试件;柱顶竖向力在大侧移情况下的二阶效应对试件承载力和自复位功效产生较小的不利作用。

关键词:摩擦型耗能部分自复位连接;组合框架;自复位功效;耗能能力;抗震性能;数值模拟

中图分类号:TU352.11;TU398.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)02-0140-08

Numerical simulation on seismic performance of PEC column-steel beam composite frame with friction damped self-centering connection

FANG Youzhen, ZHANG Zhicheng, HUANG Zhihao, JI Yun

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: A revised moment-rotation relationship of friction damped self-centering connection was improved and the design idea of friction damped self-centering connection was put forward to meet the design targets of different seismic performance of modern building structures. The finite element software ABAQUS was used to design 5 specimens of composite frame with friction damped self-centering connection and simulate their seismic performance under cyclic loading. Based on the simulation data, the axial compression, the dimension of the slotted hole, the boundary condition at PEC column bottom and the bolt layout of T-stub were taken into consideration to obtain influence mechanisms of these factors on the seismic performance of specimens, including the hysteresis performance, lateral stiffness degradation, residual deformation, and energy dissipation capacity. The results demonstrate that the bearing capacity and lateral stiffness of PEC column meet the requirements of the vertical members for the self-centering structures and the dimension of the slotted hole can be flexibly designed to control the developing process of friction slip energy dissipation and bearing-type force-transferring mode, to meet different seismic performance design targets. Meanwhile, the layout of high strength penetrating bolts in practice can soundly play the self-centering function and friction energy dissipation capacity of partial self-centering connection. The connection type of the PEC column bottom has meaningful effect on the loading-deformation and the stiffness distribution of the frame, while the second-order effect of the axial compression just has adverse impact on the self-centering function and bearing capacity.

Key words: friction damped self-centering connection; composite frame; self-centering function; energy dissipation capacity; seismic performance; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金(51478286);江苏省教育厅重大科研项目(18KJA56000);江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目(JZ-033)

作者简介: 方有珍(1972—),男,教授,博士,主要从事钢结构、组合结构抗震研究。E-mail:Fyz72@mail.usts.edu.cn

引用本文: 方有珍,张志成,黄志豪,等. PEC 柱-钢梁摩擦耗能部分自复位组合框架抗震性能数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021,49(2):140-147.

FANG Youzhen, ZHANG Zhicheng, HUANG Zhihao, et al. Numerical simulation on seismic performance of PEC column-steel beam composite frame with friction damped self-centering connection [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021,49(2):140-147.

随着世界经济的发展,社会对建筑结构可靠度要求日益提高。如何保证建筑结构遭遇地震后主体构件不出现严重破坏、震后残余变形控制在正常使用范围内,从而降低震后修复成本是目前结构工程领域的重要研究方向。国内外学者基于预制无黏结预应力混凝土结构的相关理念提出了一系列具有自复位能力的钢节点及其相关的结构体系并对其展开了系统研究,结果表明自复位结构能有效控制结构遭遇地震后的残余变形,实现良好的自行复位功效。

20 世纪末,Cheok 等^[1]、Priestley 等^[2]、El-Sheikh 等^[3]相继对安装有无黏结预应力的混凝土梁柱节点及框架进行了大量试验研究,结果显示此结构在地震作用下具有较好自复位效果且主体构件损坏甚微,抗震性能优越。21 世纪初,基于无黏结预应力混凝土框架良好的自复位功效,Rojas 等^[4]、Garlock 等^[5-7]、Iyama 等^[8]将此设计理念引入到抗弯钢框架中,并对设计的 8 个梁端施加预应力的钢节点进行了试验研究和数值模拟,同时对采用该节点的 6 层钢框架进行了动力时程分析,结果证实框架结构的残余变形、承载力、抗弯刚度和延性明显优于传统焊接钢框架。Wolski 等^[9]提出在梁底翼缘和梁腹板设置摩擦阻尼耗能元件的自复位抗弯钢框架,并对其进行试验研究和数值模拟;方有珍等^[10-13]在 PEC (partially encased concrete) 柱和已有自复位结构研究成果基础上,通过试验研究和数值模拟分析了柱顶竖向力、预拉杆初始预应力、PEC 柱强弱轴布置、对穿螺栓布置、不同耗能方式(BRS 板屈服耗能和 T 形件摩擦耗能)等参数对卷边 PEC 柱-钢梁节点部分自复位连接性能影响;张艳霞等^[14]采用 ABAQUS 对 2 个梁腹板带有摩擦阻尼器的自复位钢框模型,分别进行模态分析和动力时程分析,结果显示:罕遇地震作用下,钢框架柱底塑性发展及残余变形明显低于柱底刚接框架。

基于课题组前期研究成果^[10-13,15-16],本文采用 ABAQUS 软件建立了 5 个卷边 PEC 柱-钢梁摩擦耗能型自复位连接组合框架模型试件并对其在低周往复荷载下的抗震性能进行数值模拟,通过分析柱顶竖向力、摩擦板长圆孔孔径、柱底边界条件和摩擦板翼缘螺栓布置方式等设计参数对残余变形、耗能能力、抗侧刚度退化等的影响,寻求组合框架自复位功效与耗能能力最佳协调模式。

1 设计概况

1.1 摩擦型耗能部分自复位连接设计思路

课题组结合 PEC 柱和已有自复位结构研究成果^[10-13],提出改进部分自复位连接节点的弯矩-转角关系(图 1,图中 M 为节点连接弯矩, θ 为对应转角,):连接弯矩达到 M_a 前,外荷载未克服梁端预压力和连接处板间静摩擦力,各构件接触紧密;当连接弯矩处于 M_a 与 M_b 之间时,梁翼缘与摩擦 T 形件脱开,但连接部分仍未克服由高强螺栓产生的静摩擦力,相关构件只出现弹性变形;连接弯矩达到 M_b 后,梁翼缘与盖板相对 T 形件开始滑移,而 T 形件上设置的长圆孔使得连接在预设的侧移角限值范围内充分发挥摩擦滑移耗能并保证主体构件处于弹性状态;当连接弯矩达到 M_c 后,对应连接梁摩擦滑移至最大值(对应节点连接转角 θ_{fmax}),高强螺栓与 T 形件长圆孔壁接触,连接转化为螺栓承压型传力模式,钢梁进一步发挥其材料性能,即通过 T 形件上长圆孔尺寸设置以实现“小中震作用水平下利用摩擦耗能,大震作用水平下连接转化为承压型受力而发挥主体构件材料耗能”的设计思路。

1.2 基本试件设计

基本试件选取实际层高 3.0 m 的多层框架结构底部 2 层作为研究对象。试件 PEC 柱采用翼缘宽 250 mm、腹板高 240 mm 的钢板焊接组合截面(翼缘卷边高 35 mm、厚 5 mm),拉结板条尺寸为 220 mm×30 mm×4 mm;摩擦板与 PEC 柱均采用 Q235B 钢;柱内混凝土强度为 C25;钢梁选用 Q345 工字形钢;盖板由 I25a 工字钢剖分而成;卷边 PEC 柱与柱两侧板件采用 10.9 级 M20 高强螺栓连接;盖板、摩擦板与梁翼缘采用 10.9 级 M18 高强螺栓连接;预拉杆为直径 20 mm 的高强螺杆(图 2)。

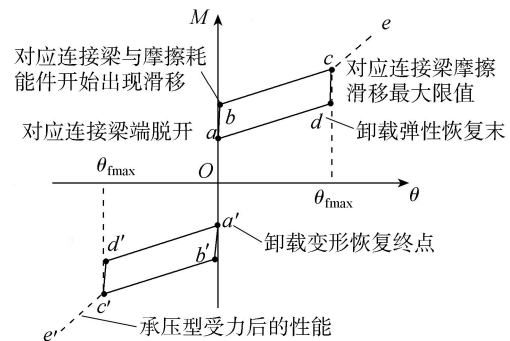


图 1 部分自复位连接弯矩-转角曲线
Fig. 1 Moment-rotation angle curves of partially self-centering connection

对应受压侧翼缘消压完成,摩擦板与梁和盖板出现摩擦滑移,曲线斜率均明显下降,其中试验试件梁端局部应力集中引起的屈服导致其耗能较大,且试验试件摩擦面粗糙程度较小而易于滑动,试验斜率小于模拟;(c)后续加载至整体侧移为 2% 后,部分自复位连接从摩擦滑移耗能转化为螺栓承压型受力,其中试件承载力增大趋势加剧,且试验 T 形件撬拔作用较模拟不明显,曲线相对饱满;(d)试验试件预应力损失相对模拟大,其自复位效果弱于模拟试件;(e)试验试件尺寸的公差、连接加工精度不够等原因,导致试验损伤进程加快。通过以上分析可知,试验与模拟得到的试件受力机理进程基本一致,验证了数值模拟方法的可行性。

3 有限元模型

3.1 模拟试件设计

基于试验基本试件 FPMFS1,考虑柱顶竖向力、摩擦板长圆孔孔径、柱底边界条件和摩擦板翼缘螺栓布置方式等设计参数设计衍生了 4 个试件,所有试件 M_a/M_b (脱开弯矩/开始出现摩擦滑移时弯矩)均为 0.7,预拉杆内预应力为 147 MPa,具体设计参数见表 1。

3.2 几何模型

建立流程:首先将各部件三维独立模型按设计图组装成整体;再将 PEC柱顶端板耦合至试验加载梁与柱顶板间铰支座转轴中心点(距柱端板中心 110 mm),释放其水平方向平动自由度与加载平面内转动自由度;随后对各部件划分网格,其中,组合柱、钢梁、摩擦板等构件均采用六面体三维实体单元(C3D8R),预拉杆选用两结点线性三维桁架单元(T3D2),为保证模拟结果的准确性,应力集中部位网格采用扫掠方式进行细分,摩擦板长圆孔壁采用对边布置方式划分为 10 个单元,而后根据研究目标定义柱底边界条件。

3.3 加载方案

加载分为 4 步:(a)对直径 20 mm 的高强螺栓分 2 次施加预紧力,将摩擦 T 形件、节点锚固板与柱翼缘连接,第一次施加较小的力(5 N),第二次施加至设计值(10 kN);(b)对预拉杆采用降温法施加预紧力至设计值;(c)对摩擦 T 形件上高强摩擦螺栓施加预紧力;(d)对试件的 PEC 柱柱顶相对试验铰支座转轴部位耦合点进行位移加载:前 4 级分别取试件整体相对侧移的 0.375%、0.500%、0.750%、1.000% 进行加载,随后按整体相对侧移 0.5% 递增,每级 1 个循环。

3.4 材料本构模型

结合课题组已有研究成果^[10-11],柱内混凝土在周边钢板的约束作用下无明显损伤脱落,故模拟中混凝土仅采用单轴应力应变损伤模型并参照文献[17]对其抗压强度代表值、峰值压应变及曲线形状参数作适当修正,钢材均采用 Von Mises 屈服准则、等向强化与相关联的流动法则处理得到的线性强化弹塑性模型。

4 模拟结果分析

4.1 滞回性能

试件自复位能力主要由预拉杆内预应力提供,基于由模拟数据整理得出的各试件滞回曲线(图 5),分析各设计参数对结构承载力、自复位与耗能减震功效、刚度退化等抗震性能的影响规律。

由图 5 可知:加载初期,所有试件梁端由预拉杆预应力引起的压力未被消除,摩擦 T 形件与梁柱翼缘接触紧密,结构实现完全自复位效果;继续加载至整体侧移 0.5%,试件 FPMFS1 由于试验试件尺寸而采取 T 形件翼缘外侧布置螺栓,T 形件撬拔作用延缓了部分自复位连接的发展进程,而其他采用实际工程做法(T 形

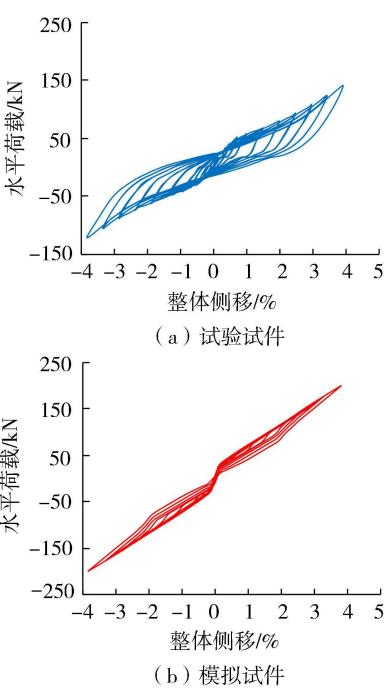


图 4 滞回曲线对比
Fig. 4 Comparison of hysteretic curves

表 1 试件具体参数
Table 1 Parameters of specimens

试件编号	摩擦板翼缘 螺栓布置	长圆孔 孔径/mm	柱底边界	竖向力/kN
FPMFS1	仅外侧	28	铰接	0
FPMFS2	内外两侧	28	铰接	0
FPMFS3	内外两侧	33	铰接	0
FPMFS4	内外两侧	28	铰接	600
FPMFS5	内外两侧	28	嵌固	0

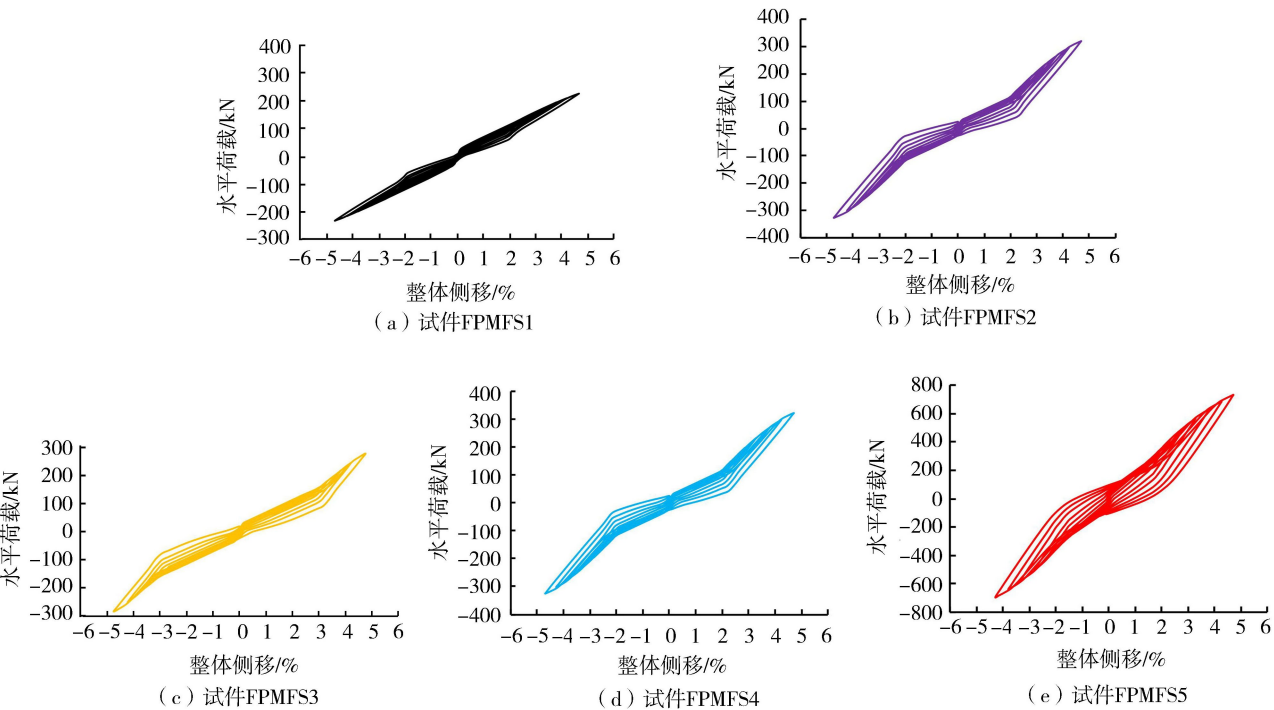


图 5 试件滞回曲线
Fig. 5 Hysteretic curves of specimens

件翼缘两侧布置螺栓)的试件均克服梁端预压力和板件间摩擦力,梁端受拉翼缘与摩擦 T 形件翼缘脱开,梁翼缘与盖板相对 T 形件产生摩擦滑移,曲线斜率明显下降,卸载后仍完全实现自复位;整体侧移达到 2.0% 后,试件 FPMFS1 仅有部分螺栓杆与长圆孔孔壁接触,承载力未出现明显提升,试件 FPMFS3 由于 T 形件长圆孔增大至 33 mm 而延缓至整体侧移达到 3.0% 后螺栓杆方与长圆孔孔壁接触,此时其他试件连接处已转化为螺栓承压受力模式,钢梁进一步发挥其材料性能,承载力开始提高,对应曲线斜率开始上升;整体侧移加载到 3.5% 过程中,摩擦 T 形件及连接端部附近梁截面开始屈服并不断发展,曲线上升段斜率因试件损伤的累积而逐级降低;加载后期,梁截面屈服区域不断向周边发展,试件残余变形持续增大,承载力提升趋势渐缓。此外,试件 FPMFS5 由于柱脚与基础梁嵌固,下层边界约束强于上层,试件材料屈服过早集中在 PEC 柱脚和上层钢梁,尤其整体相对侧移达到 2% 时连接末端附近梁截面已开始屈服,残余变形发展较快,且最终承载力几乎达到试件 FPMFS2 的 2 倍;试件 FPMFS4 滞回曲线与试件 FPMFS2 差别不明显,主要在于 PEC 柱顶竖向力产生的二阶效应不利作用由于其抗倾覆有利作用而表现不明显。

4.2 残余变形

根据整体滞回数据计算得出各试件不同加载级卸载后的残余变形,如图 6 所示。由图 6 对比分析可知:在整体侧移达到 1.5% 前,所有试件均由预拉杆提供恢复力而实现自行复位,主体构件基本处于弹性状态,卸载后均无明显残余变形。在整体侧移加载至 2% 的过程中,试件 FPMFS2 连接处高强螺栓杆与摩擦 T 形件孔壁开始接触,受压侧盖板端部开始屈服造成残余变形的出现,试件 FPMFS1 仅有部分螺栓杆与长圆孔孔壁接触,试件 FPMFS3 仍处在摩擦滑移耗能阶段,两试件残余变形均相对较小,试件 FPMFS5 组合柱柱脚与上层钢梁部分截面已进入塑性,残余变形增大趋势明显。在整体侧移达到 3% 时,各试件随摩擦 T 形件及其末端附近梁截面塑性区域的不断发展,残余变形持续增大,各试件卸载后残余变形分别为 0.036%、0.073%、0.012%、0.074% 和 0.428%,均低于小震框架层间侧移限值 0.5%,表现出良好的自行复位能力。加载至整体侧移 5% 的过程中,各试件残余变形随组合柱和钢梁损伤区域进一步扩展而持续增大,自复位功效明显减

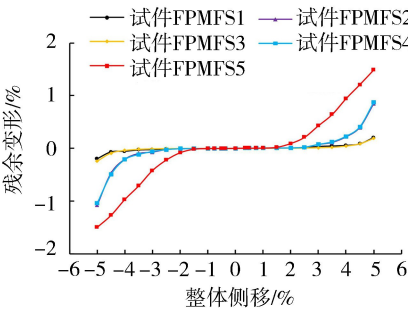


图 6 试件残余变形
Fig. 6 Residual deformation of specimens

弱,其中试件 FPMFS5 增大趋势显著,而试件 FPMFS4 的 PEC 柱顶竖向力产生的二阶效应不利作用由于其抗倾覆有利作用而表现不明显。

4.3 耗能能力

通过计算试件各加载级滞回曲线的滞回环面积对试件耗能能力加以分析(图 7)。由图 7 可知:加载至整体侧移 1.5% 之前,所有试件耗能主要由连接处 T 形件摩擦滑移提供,差异不明显;随后继续加载至高强螺栓杆与摩擦 T 形件长圆孔壁接触后,自复位连接转化为承压型受力模式,试件耗能主要由 T 形件摩擦滑移及其端部钢梁截面材料屈服耗能提供。试件 FPMFS1 由于 T 形件翼缘撬拔作用而延缓了部分自复位连接的耗能进程,试件 FPMFS5 的 PEC 柱端嵌固导致其连接盖板及钢梁截面屈服损伤进程加快,耗能增大趋势明显,试件 FPMFS4 的 PEC 柱顶竖向力产生的二阶效应不利作用由于其抗倾覆有利作用而表现不明显,后期耗能进程有一定程度加快。

4.4 抗侧刚度

根据整体滞回数据计算得出各试件不同加载级对应峰值刚度,具体见图 8。图 8 显示:加载初期,试件处在弹性状态,各试件初始刚度分别为 3.06 kN/mm、3.03 kN/mm、3.02 kN/mm、3.03 kN/mm 和 6.55 kN/mm。试件 FPMFS5 柱脚嵌固,其初始刚度超过其余试件的 2 倍。在整体侧移达到 1% 时,试件克服梁端预压力和摩擦 T 形件的静摩擦力,自复位连接进入摩擦滑移耗能阶段,各试件刚度均产生明显退化。整体侧移达到 2% 时,试件 FPMFS2、FPMFS4、FPMFS5 螺栓杆均与摩擦 T 形件孔壁开始接触,连接处转化为承压型连接,试件刚度均呈上升趋势,而试件 FPMFS1 在受力过程中摩擦 T 形件翼缘撬拔作用导致仅有部分螺栓杆与孔壁接触,其刚度无明显提升趋势,试件 FPMFS3 仍处于摩擦 T 形件的摩擦滑移耗能阶段,刚度平稳退化。当整体侧移达到 3% 时,试件 FPMFS2 和试件 FPMFS4 摩擦 T 形件及其末端附近梁截面开始屈服,刚度增大趋势趋于平缓,而试件 FPMFS3 连接处转化为承压型传力模式,刚度开始呈上升趋势,但因钢梁受力进程相对滞后,其整体刚度值低于试件 FPMFS2;试件 FPMFS5 柱脚及钢梁损伤区域高于其他试件,在整体侧移达到 2.5% 时刚度再次出现明显退化。在整体侧移加载至 5% 的过程中,各试件刚度退化基本稳定,其中试件 FPMFS2 与试件 FPMFS4 刚度退化规律基本一致,再次验证 PEC 柱顶竖向力产生的二阶效应不利作用由于其抗倾覆有利作用而表现不明显,各试件最终刚度分别为 1.31 kN/mm、1.82 kN/mm、1.58 kN/mm、1.83 kN/mm 和 4.17 kN/mm。

4.5 节点性能

节点性能是决定构件间传力的关键所在,因各试件节点受力阶段与试件整体规律大致相同,故取代表性试件 FPMFS2 的东柱上节点和西柱下节点进行分析,滞回曲线见图 9。

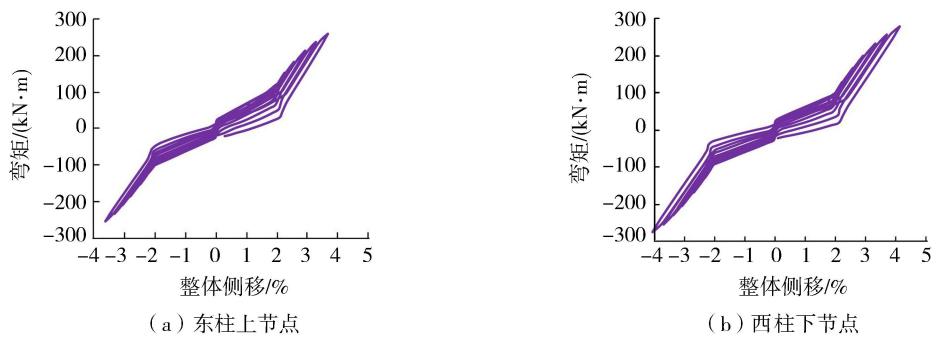


图 9 节点连接滞回曲线
Fig. 9 Hysteretic curves of joint connection

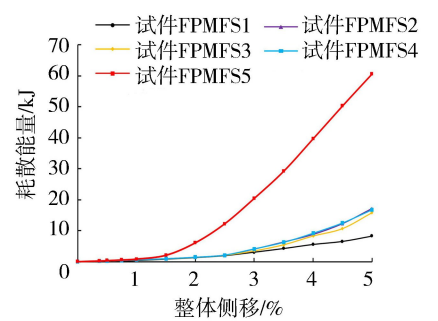


图 7 试件耗能曲线
Fig. 7 Energy dissipation of specimens

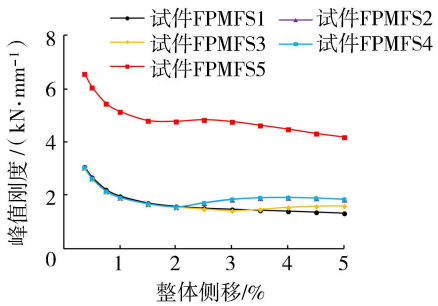


图 8 试件抗侧刚度退化
Fig. 8 Lateral stiffness degradation of specimens

图 9 节点滞回曲线对比得出:加载初期,连接处由于预拉杆预紧力未消压而紧密接触,节点连接初始刚

度较大,正反向卸载后均能实现复位。加载至整体侧移 0.5%,梁端受弯对应受压侧翼缘消压完成,梁端受拉侧与 T 形件脱开,随即摩擦 T 形件的静摩擦力被克服,摩擦 T 形件与盖板和梁翼缘产生摩擦滑移耗能,曲线斜率下降显著。加载至整体侧移 2%,高强螺栓杆与摩擦 T 形件长圆孔壁接触,连接转化为承压型受力模式,承载力进一步提高,曲线斜率再次增大。加载至整体侧移 3%,节点滞回曲线上升段斜率随摩擦 T 形件及其末端附近梁截面大面积屈服而出现下降趋势,但节点承载力仍呈明显上升趋势。加载后期,梁截面屈服区域不断扩展,残余变形逐渐增大,自复位能力逐渐减弱。

基于各试件滞回性能分析结果,选取部分试件整体及螺栓杆与摩擦板孔壁接触情况的应力云图,分析各设计参数对该组合框架抗震性能的影响规律,具体见图 10。

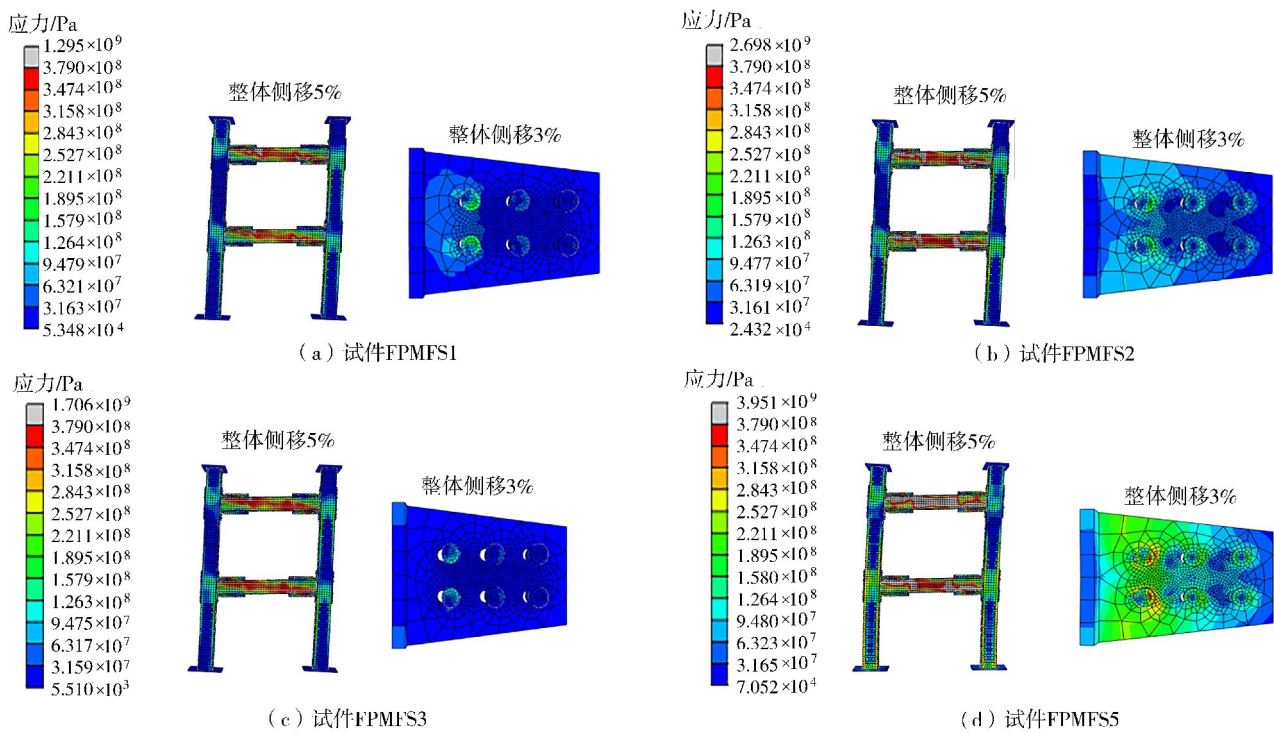


图 10 应力分布云图
Fig. 10 Color maps of stress distribution

对比图 10 可知:(a)摩擦板内外侧翼缘均布置高强螺栓的实际工程做法可较大程度消除摩擦板翼缘的面外撬拔作用变形,加快向承压型连接转化的进程,螺栓传力更均匀,试件自复位功效与耗能能力协调更优;(b)长圆孔尺寸的设计可控制连接处转化为螺栓承压传力模式的发展进程,从而适应不同抗震性能化设计目标需求;(c)柱脚连接方式决定试件结构的刚度分布,从而影响结构受力分布方式,其中铰接使得结构刚度分布均匀,受力进程相对较慢,而嵌固使得结构上层约束明显小于下层,相应上层受力发展明显快于下层。

5 结 论

- a. 卷边 PEC 柱采取翼缘卷边措施和拉结板条的设置以增强部分外包混凝土的约束作用,更好地满足了自复位结构对竖向构件承载力和抗侧刚度的要求。
- b. 摩擦板内外侧翼缘均布置高强螺栓的实际工程做法保证了钢梁受力性能的充分发挥,使结构具有良好自行复位和耗能减震功效。
- c. 组合框架不同抗震性能化设计目标可通过长圆孔孔径的合理设置加以实现,且震后残余变形均能控制在正常使用范围内。
- d. 柱脚边界条件对结构受力进程和刚度分配影响显著,其中柱脚与基础梁刚性连接的试件下层边界约束强于上层,其承载力、抗侧刚度和耗能能力远高于铰接试件。
- e. 柱顶竖向力产生的二阶效应不利作用由于其抗倾覆有利作用而表现不明显。

参考文献:

- [1] CHEOK G, LEW H. Model precast concrete beam-column connections subject to cyclic loading[J]. PCI Journal, 1993, 38(4): 80-92.
- [2] PRIESTLEY M, MACRAE G. Seismic tests of precast beam to column joint subassemblages with unbonded tendons[J]. PCI Journal, 1994, 41(1): 64-81.
- [3] EL-SHEIKH M, SAUSE R, PESSIKI S, et al. Seismic analysis, behavior, and design of unbonded post-tensioned precast concrete frame[R]. Bethlehem Pa: Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, 1997.
- [4] ROJAS P, RICLES J, SAUSE R. Seismic performance of posttensioned steel moment resisting frames with friction devices[J]. Journal of Structure Engineering, 2005, 131(4): 529-540.
- [5] GARLOCK M, RICLES J, SAUSE R. Cyclic load tests and analysis of bolted top-and-seat angle connections[J]. Journal of Structure Engineering, 2003, 129(12): 1615-1625.
- [6] GARLOCK M, RICLES J, SAUSE R. Experimental studies on full-scale post-tensioned steel connections[J]. Journal of Structure Engineering, 2005, 131(3): 438-448.
- [7] GARLOCK M, SAUSE R, RICLES J. Behavior and design of post-tensioned steel frame systems[J]. Journal of Structure Engineering, 2007, 133(3): 389-399.
- [8] IYAMA J, SEO C, RICLES J, et al. Self-centering MRFs with bottom flange friction devices under earthquake loading[J]. Journal of Construction Steel Research, 2009, 65: 314-325.
- [9] WOLSKI M, RICLES J, SAUSE R. Experimental study of a self-centering beam-column connection with bottom flange friction device[J]. Journal of Structure Engineering, 2009, 135(5): 479-488.
- [10] 方有珍, 顾强, 姚江峰, 等. 新型卷边钢板组合 PEC 柱-钢梁中节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 53-61. (FANG Youzhen, GU Qiang, YAO Jiangfeng, et al. Experimental study on seismic performance of interior connections between new crimping thin-walled built-up section PEC column and steel beam[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7): 53-61. (in Chinese))
- [11] 方有珍, 赵凯, 陈赞, 等. 新型 PEC 柱-钢梁中节点摩擦耗能型部分自复位连接抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4): 22-30. (FANG Youzhen, ZHAO Kai, CHEN Yun, et al. Experimental study on seismic performance of new crimping PEC column-steel beam interior joint with post-tensioned friction damped connection[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(4): 22-30. (in Chinese))
- [12] 赵凯, 方有珍, 杨永龙. 新型 PEC 柱-钢梁摩擦耗能部分自复位连接中节点抗震性能数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(3): 97-105. (ZHAO Kai, FANG Youzhen, YANG Yonglong. Numerical simulation on seismic performance of innovative PEC columns-steel beam interior joint with post-tensioned friction damped connection[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(3): 97-105. (in Chinese))
- [13] 方有珍, 顾强, 孙国华, 等. 部分外包混凝土组合柱-钢梁 T 型连接件连接框架层间抗震机理研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 35-42. (FANG Youzhen, GU Qiang, SUN Guohua, et al. Experimental study on seismic mechanism of inter-story substructure of PEC composite column-steel beam frame with T-stub connection[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 35-42. (in Chinese))
- [14] 张艳霞, 叶吉健, 杨凡, 等. 自复位钢框架结构抗震性能动力时程分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(7): 30-40. (ZHANG Yanxia, YE Jijian, YANG Fan, et al. Seismic behavior time-history analysis of integral steel self-centering moment resisting frame[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(7): 30-40. (in Chinese))
- [15] 方有珍, 赵帅领, 徐飞, 等. BRS 板部分自复位连接新型卷边 PEC 柱-钢梁组合框架边界点抗震机理试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 309-316. (FANG Youzhen, ZHAO Shuailing, XU Fei, et al. Experimental study on seismic mechanism of new PEC column-steel beam joint with partial self-centering BRS connection[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 309-316. (in Chinese))
- [16] 冯进, 包张君, 方有珍, 等. 卷边 PEC 柱(弱轴)-钢梁组合框架层间抗震机理试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 309-316. (FENG Jin, BAO Zhangjun, FANG Youzhen, et al. Experimental study on seismic mechanism of inter-story substructure of PEC column(weak axis)-steel beam composite frame[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(4): 309-316. (in Chinese))
- [17] 周文峰, 黄宗明, 白绍良, 等. 约束混凝土几种有代表性应力-应变模型及其比较[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(4): 121-127. (ZHOU Wenfeng, HUANG Zongming, BAI Shaoliang, et al. Introduction and comparison of several representative confinement models for concrete[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 2003, 25(4): 121-127. (in Chinese))