

外置 K 形屈曲约束支撑与普通支撑钢框架 受力性能对比分析

李帼昌,田 飞,杨志坚,张国忠

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 提出一种外置 K 形支撑-钢框架结构体系,分析 K 形屈曲约束支撑与普通支撑对钢框架抗震性能的影响,进而提高框架的抗侧刚度. 方法 采用 ABAQUS 建立有限元分析模型,通过分析拉压支撑轴力、超强系数、抗侧力和滞回曲线等参数,对比两种框架的受力性能. 结果 在支撑用钢量相同的情况下,长细比较大时,K 形屈曲约束支撑框架的耗能能力和抗侧能力要优于普通支撑框架,K 形屈曲约束支撑框架抗震性能明显更好;对于较小支撑长细比,K 形屈曲约束支撑框架的耗能能力和抗侧能力与普通支撑框架相差较小,两者的抗震性能几乎一样. 结论 K 形屈曲约束支撑相比于普通支撑,能够更好地增加钢框架结构的抗侧刚度,超强系数更高,滞回曲线更加饱满,耗能能力更好.

关键词 外置 K 形支撑;屈曲约束支撑;抗侧性能;滞回性能;有限元分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Analysis on Mechanical Behaviors of K-type External Buckling Restrained Braced and Ordinary Concentrically Braced Steel Frame

LI Guochang, TIAN Fei, YANG Zhijian, ZHANG Guozhong

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The concept of moment resisting frames with K-type external braces is proposed to increase the lateral stiffness. In order to investigate the effect of seismic performance K-type buckling restrained brace and ordinary concentrically brace on steel frame. The finite element analysis model is established by ABAQUS, and the mechanical properties of the two frames are compared by analyzing the parameters of axial force, super strength coefficient, lateral force and hysteretic curve. The results showed that under the same steel volumes of braces, for large brace slenderness ratio, the energy dissipation capacity and lateral resistance of K-type BRBF is superior

收稿日期:2018-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51178276);沈阳市民用钢结构建筑产业化工程技术研究中心建设项目(F16-076-8-00)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士,主要从事结构抗震等方面研究.

to common braced frame, and the seismic behavior of K-type BRBF is obviously better; For small brace slenderness ratio, the energy dissipation capacity and lateral resistance of K-type BRBF and common braced frame is little difference, both seismic behaviors is nearly the same; Compared with the ordinary concentrically brace, the overstrength coefficient and hysteretic behavior and the energy dissipation capacity are better. Applicable reference suggestions are given to K-type BRB and ordinary concentrically brace.

Key words: external K-type steel brace; buckling restrained brace; lateral resistance; hysteretic behavior; finite element analysis

钢框架的形式可以分为纯框架、中心支撑框架、偏心支撑框架和隅撑支撑框架^[1-3]. 随着经济的发展, 纯钢结构框架已经无法满足需求, 为了使结构能够抵抗更大的地震, 必须增大构件的截面尺寸, 将会导致用钢量增多, 造成成本增加. 为了解决这个问题, 可在钢框架的内部布置支撑, 从而提高框架整体的抗侧刚度. 在1995年阪神大地震和1994年美国北岭地震中, 中心支撑钢框架建筑物遭到了严重毁坏^[4-5], 主要原因是在地震作用下, 大量的支撑都出现了侧向屈曲, 致使许多结构整体发生了严重的破坏. 高层建筑一般采用X支撑、人字支撑、V型支撑和单斜支撑, 而K形支撑在受压支撑屈曲时, 将会对柱产生不平衡力, 可能导致柱子发生破坏. 《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 和美国规范 AISC341—10 严格限制了K支撑的应用^[6-7]. 梁剑^[8]对跨层跨柱K形中心支撑框架进行有限元分析, 研究表明K形中心支撑不仅能有效抵抗地震作用, 而且与外部框架柱共同形成抗侧力体系.

O. Pourabdollah^[9]通过对K支撑节点处改进以研究其抗震性能, 结果表明合理的节点可以使K支撑有更好的抗震性能. 陈以一^[10]提出配置耗能梁的复合高强钢框架结构体系, 该体系的特点是耗能梁外置, 没有支撑, 而且这种外置耗能梁钢框架结构体系具有优良的抗震性能. 外置K支撑很好地解决了内部空间布置等问题, 并且不影响住宅的美观, 具有杆件数量少、节约钢材、制作安装

方便的优点. 在弹性阶段, 普通支撑钢框架一般延性相对较小, 在地震作用下, 受压支撑易发生屈曲, 从而使支撑的承载力迅速减小. 屈曲约束支撑有效地克服了受压支撑屈曲的缺点, 在框架结构中合理的布置屈曲约束支撑, 不仅能够很好地消耗地震能量, 而且可以增大其抗侧刚度, 使整体框架结构具有更好的抗震性能. M. Yamaguchi^[11]利用试验对比分析了屈曲约束支撑框架和普通支撑框架的抗震性能, 试验结果表明, 屈曲约束支撑框架中支撑承担大部分水平剪力, 变形相比于普通支撑框架小很多. M. Valente^[12]将屈曲约束支撑布置在不同层高的钢结构框架中进行研究, 结果表明BRB的布置对钢框架侧移刚度有很大的提高, BRB具有很好的耗能能力. 李国强^[13]通过算例计算给出了屈曲约束支撑钢框架的设计方法和设计公式, 该方法很好地解决了现有设计方法存在的问题, 在设计过程中, 可以减少大量复杂的验算, 使整个设计更为简单, 而且经济性更好. 冯玉龙^[14]对BRB布置原则进行了研究, 结果表明BRB能够很好地提高钢框架的抗震性能, 并且总结出了BRBF的设计方法.

笔者提出一种外置K形支撑—钢框架结构体系, 通过ABAQUS有限元对比分析, 研究表明, 长细比较大时, K形屈曲约束支撑框架的耗能能力和抗侧能力要明显优于普通支撑框架, K形屈曲约束支撑框架抗震性能更好. 合理的布置K形屈曲约束支撑能够很好地提高钢框架的抗震性能.

1 建立模型

1.1 几何模型

K 形支撑布置时,普通中心支撑由于受拉屈服和受压屈曲的影响,在柱中会产生水平方向的不平衡力作用,对柱的设计提出了更高的要求;而屈曲约束支撑由于拉压等强的特性,

在任意时刻,受拉支撑和受压支撑轴力的水平分量始终大小相等、方向相反,所以合力一直为零. 为了研究两者抗震性能,笔者从三层外置 K 形支撑-钢框架结构取出单层外置 K 形支撑钢框架进行研究分析. 几何模型如图 1 所示,其中图(a)为三层外置 K 形支撑-钢框架,图(b)为单层外置 K 形支撑钢框架.

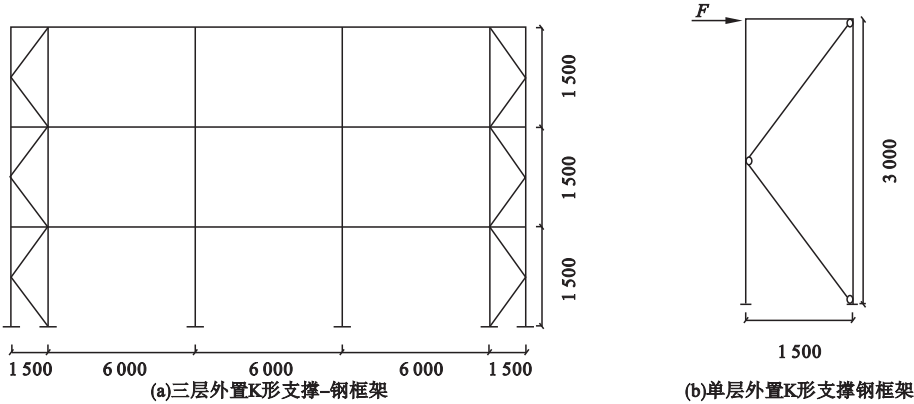


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

在支撑用钢量相同的情况下,柱子按文献[6]建议支撑不平衡力设计. 支撑长细比 λ 取值 50 ~ 150,建立 11 组模型进行对比分析. 长细比的变化通过改变支撑截面尺寸实现. 支撑截面采用工字型,宽度和高度比为 3:5,腹板的高厚比为 17,翼缘的宽厚比为 7. 柱和横梁截面采用工字型,横梁的设计采用中震性能设计方法进行^[15]. 柱的高度和宽度比为 1,腹板高厚比为 32,翼缘宽厚比为 13,均满足《钢结构设计规范》(GB50017—2010)和《高层民用建筑钢结构设计规程》(JGJ99—2015)相关要求^[16-17]. 屈曲约束支撑的芯材取 Q235,芯材截面面积与普通钢支撑截面面积 A 相同. 支撑截面高度 h 、支撑截面面积 A 、柱截面高度 h_c 和横梁截面高度 h_b 取值见表 1.

1.2 有限元模型

采用 ABAQUS 对上述几何模型进行静力弹塑性和滞回性能分析. 有限元模型中的梁采用剪切梁单元^[18],屈曲约束支撑和普通

表 1 试件参数

Table 1 The number and parameters of simulated specimens				
编号	h/mm	A/mm^2	h_c/mm	h_b/mm
SR-150	100.2	1 333	284.1	198.8
SR-140	107.4	1 432	303.2	212.2
SR-130	115.6	1 679	330.7	231.1
SR-120	125.6	1 982	366.4	256.5
SR-110	136.7	2 325	394.7	276.5
SR-100	148.8	2 807	438.6	307
SR-90	165.7	3 322	481.2	336.8
SR-80	198.1	4 406	548.3	383.8
SR-70	216.8	5 528	619.7	434.1
SR-60	249.3	7 649	704.8	493.4
SR-50	299.5	9 835	825.6	557.9

支撑采用梁单元模拟,对普通支撑加 $l_{zc}/1\,000$ 几何初始缺陷,用于模拟普通受压支撑屈曲^[19], l_{zc} 为支撑长度,屈曲约束支撑和普通支撑与框架都为铰接. 滞回循环加载按照 $\Delta y/4$ 、 $\Delta y/2$ 、 $3\Delta y/4$ 、 Δy 、 $2\Delta y$ 、 $3\Delta y$... 的方式进行, Δy 为屈服位移. 支撑、横梁以及柱的

钢材强度等级 Q235, 屈服强度 $f_y = 235 \text{ MPa}$, 采用双折线本构关系, 弹性模量 $E_s = 206\,000 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$. 笔者将普通支撑长细比为 150 的钢框架和对应屈曲约束支撑框架模型分别记为 P-150. 其他模型编号以此类推.

2 外置 K 支撑钢框架的静力弹塑性分析

2.1 拉压支撑轴力对比分析

外置 K 支撑钢框架的抗侧承载力主要由两部分组成, 分别由受压支撑和受拉支撑的轴力水平分量提供. 将支撑轴力与 $A_{sc}f_y$ 的比值定义为支撑比例系数 α_{sc} . 图 2 为支撑比

例系数与层侧移角关系曲线. 由图可以看出, 对于屈曲约束支撑和普通钢支撑, 在弹性阶段, 受拉支撑轴力增加的速度都比受压支撑轴力增加的快. 在弹塑性阶段, 对于屈曲约束支撑, 当层侧移角在 $0.28\% \sim 0.32\%$ 时, 受拉支撑先发生屈服, 达到支撑的极限承载力, 然后其轴力不再增加, 趋于平缓. 当层侧移角在 $0.34\% \sim 0.37\%$ 时, 受压支撑发生屈服, 也达到了支撑的极限承载力, 不再变化. 最后拉压支撑轴力相等, 两者不会产生不平衡力. 当层侧移角在 $0.15\% \sim 0.25\%$ 时, 普通支撑受压支撑屈曲, 轴力发生快速折减, 拉压支撑的轴力不再相等, 将会对柱产生较大的不平衡力, 容易使柱发生破坏.

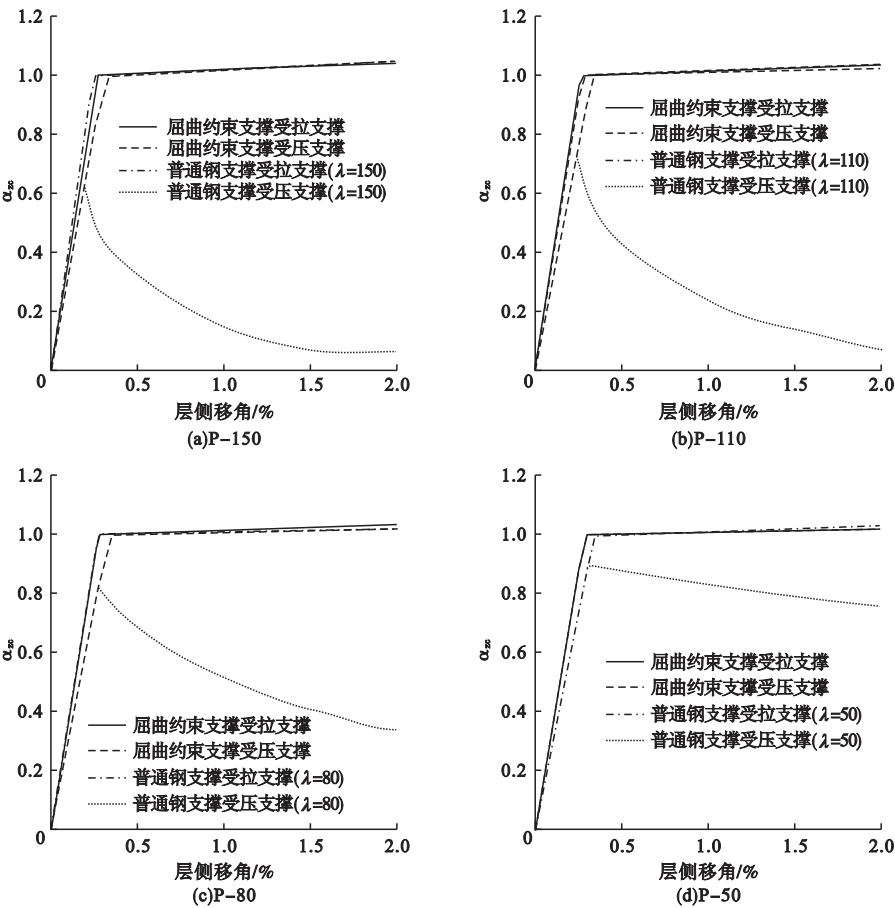


图 2 受拉和受压支撑轴力关系曲线

Fig. 2 Axial forces of the compressive and tensile braces curves

2.2 支撑抗侧极限承载力对比分析

普通支撑与屈曲约束支撑框架结构抗侧

极限承载力与支撑长细比变化结果见表 2. 从表中可以看出, 与普通支撑相比, 屈曲约束

支撑抗侧极限承载力增加百分比 η 随支撑长细比的增大而增加. 当支撑长细比在 90 ~ 150 时, η 增加的幅度超过 43.3%, 增长幅度比较大; 当长细比在 50 ~ 80 时, η 增幅在 14.1% ~ 34.3%, 增加相对较小. 虽然屈曲约束有较大的抗侧极限承载力, 但是对于支撑长细比小于 80 的钢框架结构, 提高相对较小.

表 2 支撑抗侧极限承载力

Table 2 Lateral ultimate bearing capacity of braces

λ	$F_{\text{普通}}/\text{kN}$	$F_{\text{屈曲}}/\text{kN}$	$\eta/\%$
150	243.9	438.5	0.798
140	264.7	471.1	0.780
130	315.8	552.4	0.749
120	389.2	652.1	0.675
110	480.1	764.9	0.593
100	604.7	923.4	0.527
90	762.5	1 092.9	0.433
80	1 079.2	1 449.1	0.343
70	1 424.3	1 818.6	0.277
60	2 093.5	2 515.9	0.202
50	2 836.4	3 235.5	0.141

注: $F_{\text{普通}}$ 为普通支撑抗侧极限承载力; $F_{\text{屈曲}}$ 为屈曲约束支撑抗侧极限承载力; η 为屈曲约束支撑相对于普通支撑抗侧极限承载力增加百分比.

2.3 超强系数对比分析

文献[7]中超强系数 Ω 是结构有效抗侧屈服承载力 V_y 与基底剪力 V_d 的比值. 由于影响超强系数的因素有很多, 笔者并没有考虑截面几何性质所带的影响. 图 3 为超强系数与普通支撑长细比的变化曲线. 由图可以看出, 当支撑长细比在 80 ~ 150 时, 其对应超强系数的变化在 4.8% ~ 11.5%, 增加的相对比较明显; 当支撑长小于 80 时, 对应的超强系数低于 4.8%, 增加幅度很小; 对于支撑长细比在 50 ~ 60 时, 两者的超强系数基本一致. 由此可以看出, 支撑长细比是影响超强系数的主要原因, 长细比越大, 超强系数越大. 在支撑用钢量相同的情况下, 当普通支撑长细比大于 80 时, 屈曲约束支撑的超强

系数比普通支撑更大, 屈曲约束支撑更具有优势.

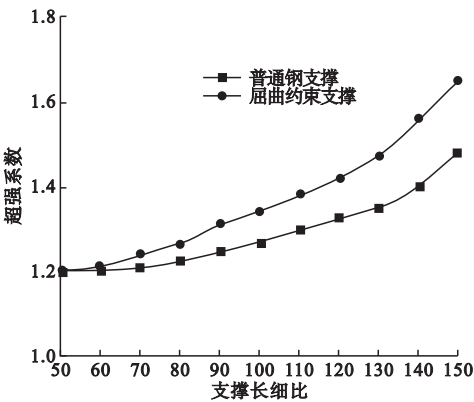


图 3 超强系数与支撑长细比变化曲线

Fig. 3 The overstrength coefficient brace slenderness ratio curves

3 外置 K 支撑钢框滞回性能分析

3.1 滞回曲线

表 3 为依据滞回曲线计算出模型耗散的能量. 图 4 为普通钢支撑与屈曲约束支撑钢框架滞回曲线.

表 3 外置 K 支撑框架耗散能量

Table 3 Dissipative energy of the external K brace frames

λ	屈曲约束支撑 框架耗散能量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	普通支撑框 架耗散能量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	能量提高 比率/%
150	262.4	156.3	0.679
130	376.9	261.8	0.440
110	598.1	458.9	0.303
90	1 035.2	892.8	0.159
80	1 495.9	1 350.6	0.108
50	2 767.2	2 750.1	0.006

由图 4 可以看出, 当长细比大于 110 时, 两者的滞回曲线面积相差较大, K 形屈曲约束支撑的耗能明显更好; 当长细比小于 110 时, 两者的滞回曲线面积相差比较小, 耗能能力相差较小. 由表 3 可知, 两者的耗能能量差值随着普通支撑长细比增大而增大, 当支撑长细比在 110 ~ 150 时, 耗散能量提高百分比

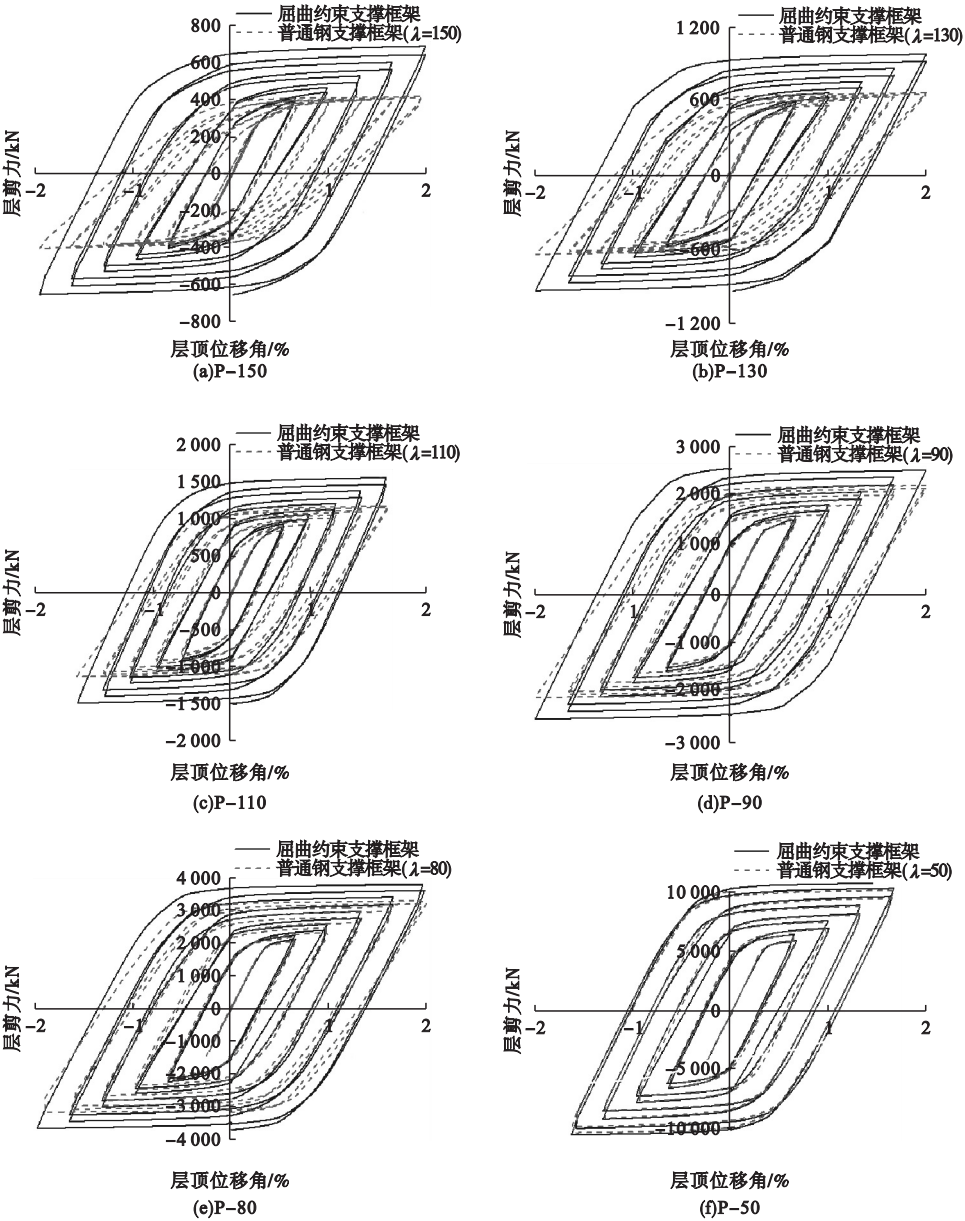


图4 屈曲约束支撑与普通中心支撑钢框架滞回曲线

Fig.4 Hysteretic curves of BRB and ordinary center brace steel frames

在 30.3% ~67.9% ,屈曲约束支撑框架耗能显著增加,其抗震性能更好;当长细比在 80 ~110 时,耗散能量提高百分比在 10.8% ~30.3% ,耗散能量增加相对不多;当支撑长细比小于 80 ,耗散能量提高百分比小于 10.8% ,抗震性能相差很小。

3.2 骨架曲线

屈曲约束支撑框架和普通支撑钢框架骨架曲线见图 5。由图可以看出,在弹性阶段,屈

曲约束支撑钢框架和普通支撑钢框架的骨架曲线增长趋势一致,结构刚度基本保持不变;在弹塑性阶段,屈曲约束支撑钢框架的承载力增加速度大于普通支撑框架,钢框架 P-50、P-80、P-90、P-110、P-130、P-150 相比普通支撑框架,总剪力分别提高了 1.2%、5.2%、12.3%、18.6%、24.1%、39.6% ,随着支撑长细比的增大而增大。因此,对于支撑长细比在 80 ~150 时,屈曲约束支撑框架的抗侧性能要

好于普通支撑钢框架;支撑长细比小于 80 时, 两者抗侧性能相差不大.

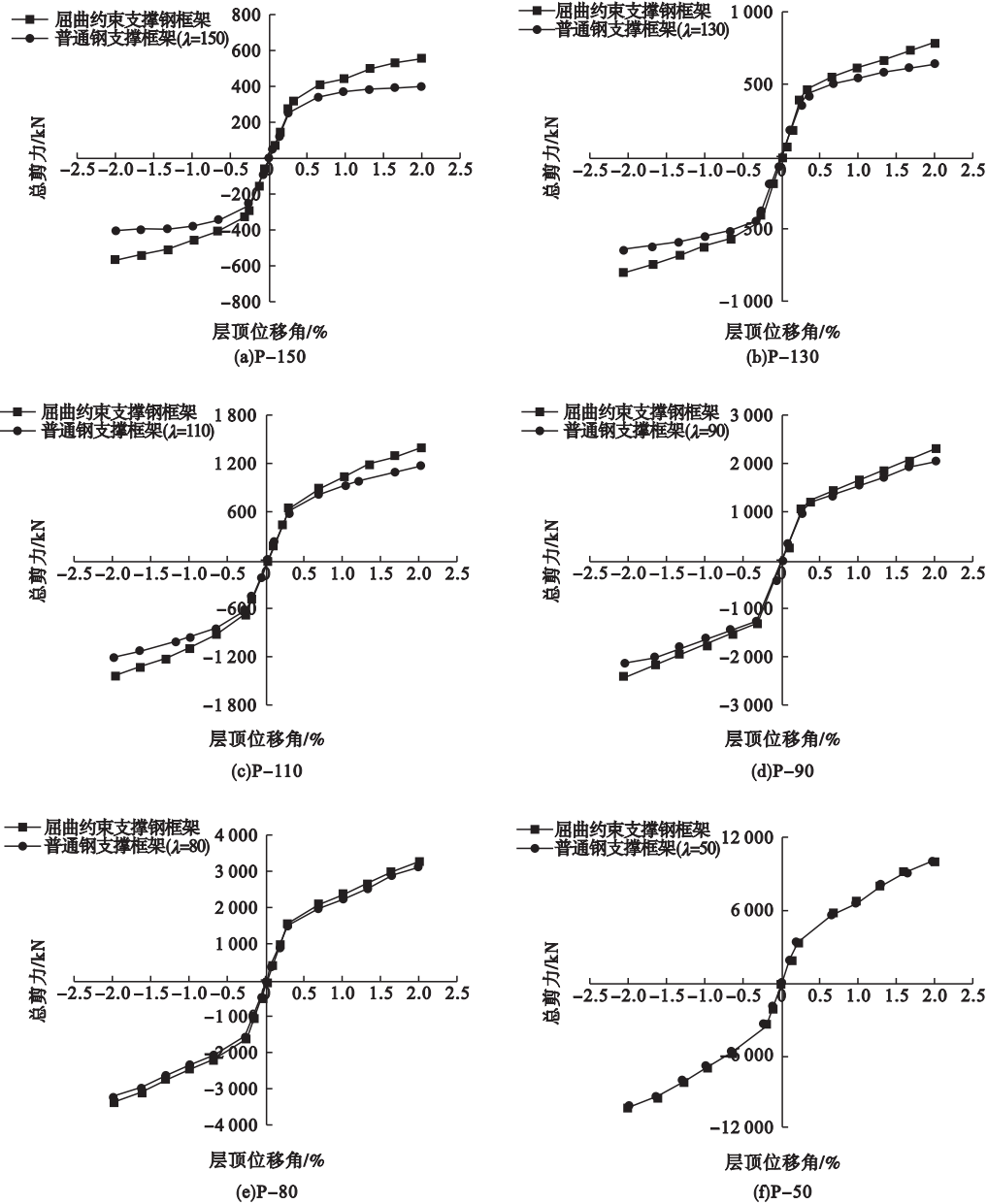


图5 屈曲约束支撑与普通中心支撑钢框架滞回性能比较

Fig. 5 Comparison of hysteretic behavior between BRB and common central braced steel frames

3.3 刚度退化分析

采用计算等效割线刚度的方法来表示结构的刚度,等效刚度可以用来评价结构在往复荷载下的受力性能.图6为结构的刚度退化与层侧移角变化曲线.由图可以看出,当层侧移角在0~0.5%时,屈曲约束支撑钢框架和普通支撑钢框架的刚度退化基本一致.当层侧移角在0.5%~2%时,

P-90~P-150构件的刚度提高百分比在11.9%~40.3%,屈曲约束支撑钢框架刚度退化明显小于普通支撑钢框架;P-80和P-50刚度提高百分比为5.7%、1.8%,差别极小.由此得出,当支撑长细比大于80时,屈曲约束支撑钢框架的抗侧性能要好于普通支撑钢框架.

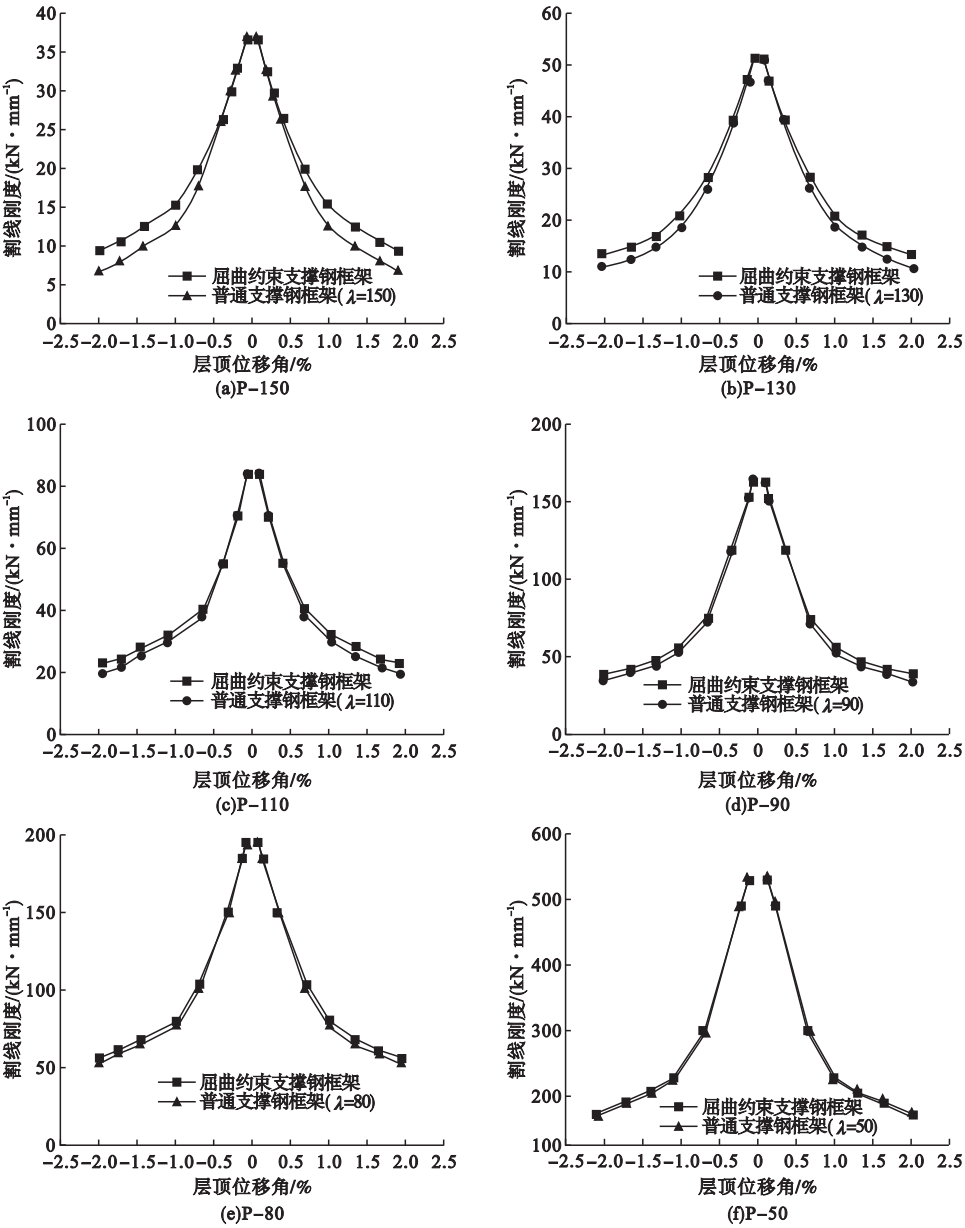


图 6 刚度退化曲线

Fig. 6 Stiffness degradation curves

4 结 论

(1) 当支撑长细比大于 110 时, 屈曲约束支撑框架的抗侧极限承载力相比普通支撑框架更大, 耗能能力更好; 当支撑长细比小于 110 时, 两者的抗震性能相差不大。

(2) 当支撑长细比大于 80 时, 屈曲约束支撑比普通支撑的超强系数更大, 即屈曲约束支撑储备承载力更大, 优势更为明显。

(3) 对于外置 K 支撑钢框架, 在支撑用钢量相同的情况下, 当支撑长细比大于 110 时, 建议采用屈曲约束支撑; 当长细比在 80 ~ 110 时, 根据设计需求, 可以考虑选用屈曲约束支撑; 当支撑长细比小于 80 时, 建议采用普通支撑。

参考文献

[1] 于海丰, 方斌. 钢框架 - 中心支撑双重体系抗弯框架设计方法研究[J]. 土木工程学报,

- 2013,30(2):117-123.
(YU Haifeng, FANG Bin. Design method of moment frame for the dual system combining moment frame with braced frame [J]. China civil engineering journal, 2013, 30(2):117-123.)
- [2] LONGO A, MONTUORI R, PILUSO V. Moment frames-concentrically braced frames dual systems; analysis of different design criteria [J]. Structure and infrastructure engineering, 2014, 12(1):122-141.
- [3] 周伟, 巫恩海, 吴文平. 隅撑支撑钢框架的抗震性能分析 [J]. 钢结构, 2009, 24(11): 7-14.
(ZHOU Wei, WU Enhai, WU Wenping. Aseismic behavior analysis of the knee braced steel frame [J]. Steel construction, 2009, 24(11):7-14.)
- [4] TAKABATAKE H, NONAKA T. Numerical study of fracture propagating through column and brace of Ashiyahama residential building in Kobe earthquake [J]. The structural design of tall and special buildings, 2005, 14(2):91-105.
- [5] LEE H, DOUGLAS A. Seismic Performance evaluation of pre-northridge steel frame buildings with brittle connections [J]. Journal of structural engineering, 2002, 128(4):546-555.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings:GB50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [7] AISC. Seismic provisions for structural steel buildings [S]. American: [s. n.], 2010.
- [8] 梁剑. 框架—跨层跨柱 K 形中心支撑结构性能分析 [D]. 成都:西南交通大学, 2009.
(LIANG Jian. Analysis of the performance of concentrically cross-layer and cross-column K-braced frames [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.)
- [9] POURABDOLLAH O, FARAHBOD F, ROFOOEI F R. The seismic performance of K-braced cold-formed steel shear panels with improved connections [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 135:56-68.
- [10] 陈以一, 柯珂, 贺修樟, 等. 配置耗能梁的复合高强钢框架抗震性能实验研究 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11):1-9.
(CHEN Yiyi, KE Ke, HE Xiuzhang, et al. Experimental study on seismic performance of high strength moment resisting frames with energy dissipation beams [J]. Journal of building structures, 2015, 36(11):1-9.)
- [11] YAMAGUCHI M, YAMADA S, MATSUMOTO Y, et al. Full-scale shaking table test of damage tolerant structure with a buckling restrained brace [J]. Journal of structural and construction engineering, 2002, 558:189-196.
- [12] VALENTE M. Displacement-based seismic design of steel frames strengthened by buckling-restrained braces [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 217:1114-1118.
- [13] 李国强, 郭小康. 基于极限承载力平面屈曲约束支撑钢框架整体可靠度设计 [J]. 建筑结构, 2011, 41(8):68-71.
(LI Guoqiang, GUO Xiaokang. Integrated reliability design of planar steel frames with buckling restrained braces based on ultimate bearing capacity [J]. Building structure, 2011, 41(8):68-71.)
- [14] 冯玉龙, 吴京, 孟少平. 屈曲约束支撑框架的支撑布置原则研究 [J]. 工程力学, 2016, 33(12):104-111.
(FENG Yulong, WU Jing, MENG Shaoping. Research on layout principle of braces for buckling-restrained braced frames [J]. Engineering mechanics, 2016, 33(12):104-111.)
- [15] 邹祖栋. 中震性能设计与小震常规设计方法比较研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2013.
(ZOU Zudong. Comparative study on performance-based design under moderate earthquake and conventional design under minimum earthquake [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.)
- [16] 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:中国计划出版社, 2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel structures:GB50017—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构设计规程:JGJ99—2015 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design rules for steel structure of high rise civil buildings: JGJ99—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [18] 庄茁, 由小川. ABAQUS 非线性有限元分析与实例 [S]. 北京:科学出版社, 2009.
(ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan. ABAQUS nonlinear finite element analysis and examples [S]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [19] 赵瑛, 郭彦林. 防屈曲支撑框架设计方法研究 [J]. 建筑结构, 2010, 40(1):38-43.
(ZHAO Ying, GUO Yanlin. Research on design method of buckling restrained braced frames [J]. Building structure, 2010, 40(1):38-43.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)