

文章编号:1673-2049(2019)06-0088-07

双阶屈服屈曲约束支撑框架小震参数分析

孙瑛志¹, 李国强^{1,2}, 孙飞飞^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:为了弥补常规屈曲约束支撑在多遇地震作用下处于弹性状态,不能发挥消能减震作用的不足,提出了一种将金属套管阻尼器与屈曲约束支撑组合形成的双阶屈服屈曲约束支撑,经试验验证其具有良好、稳定的小震及中大震下的滞回特性。在小震作用下,金属套管阻尼器屈服消能,屈曲约束芯板保持弹性承载。借助有限元软件 ETABS 建立了一系列双阶屈服屈曲约束支撑框架模型,通过改变支撑与框架刚度比、阻尼器与芯板的轴向刚度关系以及套管阻尼器的屈服比例,对各模型进行小震作用下的动力弹塑性分析,将各模型基底剪力和最大层间位移角与相应的常规屈曲约束支撑框架的分析结果进行对比。结果表明:双阶屈服屈曲约束支撑与支撑芯板的轴向弹性刚度比取 2 左右,阻尼器屈服比例取 0.3 左右时,可取得较好的减震效果;双阶屈服屈曲约束支撑的参数取值改变,对降低结构地震响应的趋势不因支撑与框架刚度比不同而改变;当支撑刚度贡献较大时,相较常规屈曲约束支撑,双阶屈服屈曲约束支撑的设置能降低结构的层间位移角,若要同时降低基底剪力,阻尼器屈服比例不宜高于 0.3。

关键词:防灾减灾;参数分析;金属套管阻尼器;屈曲约束支撑

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

Parametric Analysis of Frames with Two-level-yielding Buckling Restrained Braces Under Frequent Earthquake

SUN Ying-zhi¹, LI Guo-qiang^{1,2}, SUN Fei-fei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to overcome the deficiency that the conventional buckling restrained braces (BRBs) were in elastic state under frequent earthquakes, and cannot dissipate energy, a novel two-level-yielding buckling restrained brace composed of conventional BRB and metal tube damper was developed, and its reliably and stable hysteretic characteristics under both frequent and large earthquakes were verified by experiments. Under frequent earthquakes, the metal tube damper yields to dissipate energy and the buckling restrained core plate keeps elastic. A series of braced frame models with the novel braces were established by means of the finite element software ETABS. By changing the stiffness ratios of braces and frames, the axial stiffness relationship of tube dampers and core plates, and the yield ratios of tube dampers, the dynamic elastoplastic analysis under frequent earthquakes of each model was carried out, while the base shear forces and the maximum inter-story drift angles were compared with the analysis results of corresponding BRB frames. The results show that when the axial elastic stiffness ratio of the

收稿日期:2019-01-17

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701203)

作者简介:孙瑛志(1993-),男,山东乳山人,工学博士研究生,E-mail:y. z. sun@tongji. edu. cn。

novel two-level-yielding buckling restrained brace and core plate is about 2, and the yield ratio of tube damper is about 0.3, the structure can achieve better seismic reduction effect. The parameter change of the two-level-yielding buckling restrained brace for the influence tendency of reducing structural seismic response does not vary with the different stiffness ratios of braces and frames. For braced frames with large brace stiffness, compared with the conventional BRB, the inter-story drift angles of the structure can be reduced by setting the two-level-yielding buckling restrained brace. If the base shear force is to be reduced at the same time, the yield ratio of damper should not be higher than 0.3.

Key words: disaster prevention and mitigation; parametric analysis; metal tube damper; buckling restrained brace

0 引言

地震是一种常见的自然现象,地震灾害的发生具有随机性、突发性,并会产生严重的次生灾害,同时也会对社会经济造成巨大影响。据统计,自 20 世纪以来,全球 7 级以上的地震约 35% 发生在中国^[1],2008 年的汶川地震更是造成了难以估量的损失^[2]。建筑结构传统的抵抗地震的方法称为“抗震”,主要通过提高结构自身的强度等性能来抵抗地震作用,以此来满足结构抗震设防目标:小震不坏、中震可修、大震不倒。这种抵抗地震的方法存在明显的缺点:提高结构自身抵抗地震的能力通常需要设置更大的构件截面和更多的配筋,而更大的截面和更多的配筋往往导致更大的质量,更大的质量又增加了结构在地震中承受的地震作用,反过来对截面尺寸和配筋提出更高要求,造成结构设计不经济。此外,地震的随机性很大,当发生超过设计烈度的地震时,往往会远超结构的设计强度,从而造成结构破坏甚至倒塌。

为节省建筑造价,同时尽量降低结构的地震损伤,采用减震技术是一种合理又经济的方法。具体来讲,是在结构中设置消能装置,通过增加结构阻尼来达到降低结构地震响应的目的。屈曲约束支撑拉压性能相当,滞回曲线饱满稳定,不但可作为结构构件,屈服后也是一种性能优良的消能部件,在中震、大震下可消耗大量能量。

屈曲约束支撑发源于日本, Kimura 等^[3-6]在理论和试验上为屈曲约束支撑的应用奠定了基础,美国的 Clark 教授等^[7]就屈曲约束支撑的结构设计和施工技术做了进一步的研究。2000 年左右,国内学者开始了屈曲约束支撑国产化的研究,众多学者对屈曲约束支撑进行了细致深入的研究^[8-15]。

虽然屈曲约束支撑在工程中广泛应用,但屈曲

约束支撑也存在着不足之处:为避免发生低周疲劳破坏,屈曲约束支撑在小震作用下被设计为弹性承载,无法消能减震。为弥补以上不足,可将屈曲约束支撑和金属套管阻尼器(图 1)结合起来,将阻尼器外套于屈曲约束支撑套筒,形成金属套管阻尼器与屈曲约束支撑套筒串联后再与支撑芯板并联的受力体系,如图 2 所示^[16]。在小震作用下套管阻尼器屈服,进入塑性消能;在中、大震作用下支撑芯板屈服,消耗地震能量。

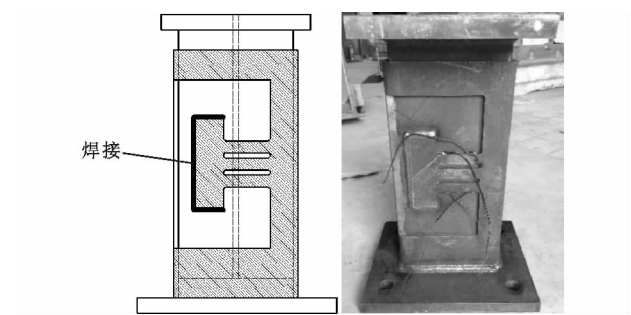


图 1 金属套管阻尼器
Fig.1 Metal Tube Damper

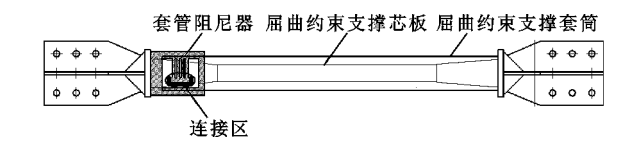


图 2 双阶屈服屈曲约束支撑构造
Fig.2 Configuration of Two-level-yielding BRB

1 试验简介

文献^[16]曾对如图 2 所示的试件进行了不同幅值的拟静力轴向往复加载试验,试验结果如图 3 所示。试验结果中,加载初期仅套管阻尼器屈服,单独消耗能量;随着加载幅值的增大,支撑芯板进入塑性,与套管阻尼器共同消耗地震能量,可见图 2 所示构造可实现双阶屈服的构想,且在不同位移幅值下,

都可以稳定地消耗能量。图 3 中采用三折线随动强化模型对滞回曲线进行模拟,该模型可较好地反映双阶屈服屈曲约束支撑的力学特性。

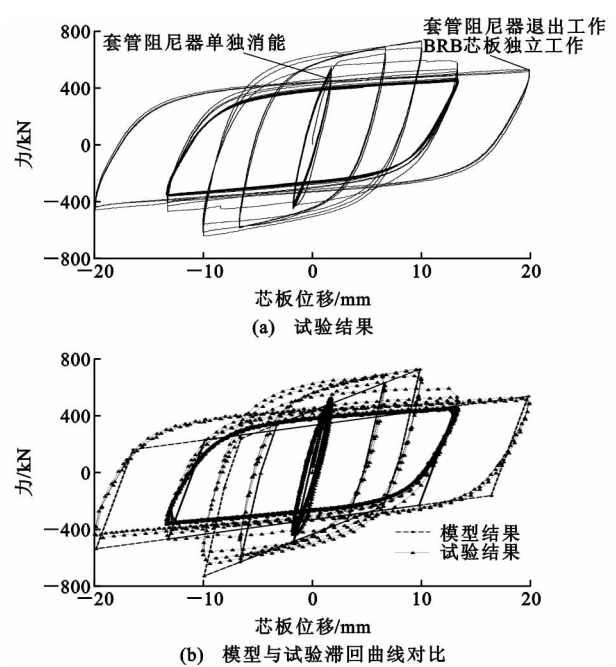


图 3 双阶屈服屈曲约束支撑试件试验结果
Fig. 3 Experimental Results of Two-level-yielding BRB

2 参数分析结构

本文通过参数分析,验证双阶屈服屈曲约束支撑较常规屈曲约束支撑在小震作用下对降低结构地震响应的有效性,并提出合理的设计参数取值。按

表 1 屈曲约束支撑框架结构参数

支撑 框架	梁截面尺寸	柱截面尺寸	支撑刚度/ (N·mm ⁻¹)	支撑屈服 位移/mm	底层支撑占结构 侧向刚度比/%
1	H400 mm×400 mm×13 mm×21 mm	H450 mm×450 mm×13 mm×21 mm	25 000	8	24
2	H350 mm×350 mm×10 mm×16 mm	H400 mm×400 mm×13 mm×21 mm	42 000	8	44
3	H280 mm×280 mm×10 mm×15 mm	H320 mm×320 mm×10 mm×16 mm	52 000	8	67

3 参数选择

3.1 支撑刚度比

本文提出的新型支撑是在常规屈曲约束支撑的基础上并联了套管阻尼器,使构件具有阻尼器与芯板先后屈服的两阶段屈服特性。将双阶屈服屈曲约束支撑的轴向弹性刚度与相应屈曲约束支撑的轴向弹性刚度之比用参数 α 表示为

$$\alpha = K_1 / K_2 \tag{1}$$

式中: K_1 为双阶屈服屈曲约束支撑的轴向弹性刚度; K_2 为相应屈曲约束支撑的轴向弹性刚度;参数 α 总大于 1。

照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2011)^[17] 要求设计了如图 4 所示的六层钢支撑框架结构,层高 3 m,柱距 9 m,在中间一跨人字形布设屈曲约束支撑,同一模型中采用相同的梁柱尺寸。设置 3 组梁柱与支撑截面尺寸,形成 3 个支撑与框架侧向刚度比例不同的屈曲约束支撑框架。

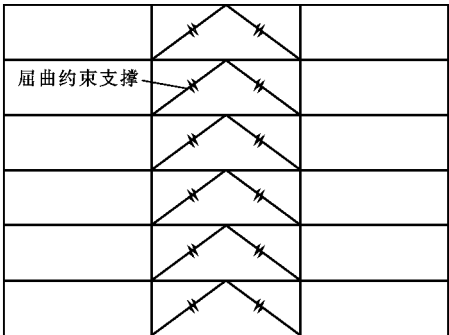


图 4 屈曲约束支撑框架
Fig. 4 Buckling Restrained Braced Frame

3 个屈曲约束支撑框架的梁柱、支撑特性和底层支撑占结构侧向刚度比例如表 1 所示,钢材选用 Q345,恒载、活载分别为 $36 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,均匀施加到每层梁上。各个双阶屈服屈曲约束支撑框架模型以此 3 组屈曲约束支撑框架结构模型为基准,分别并联不同力学性能的套管阻尼器,选择中国台湾 Chichi 地震波作为地震动输入(图 5),地震动峰值调整为 $0.07g$ (g 为重力加速度)的小震强度。

3.2 套管阻尼器屈服比例

套管阻尼器的屈服力较低时,在较小的地震作用下便可以进入塑性消耗地震能量状态,但消能能力有限;相反,较高的屈服力意味着套管阻尼器在较大的地震作用下才会进入塑性的消能状态。为确定阻尼器合适的屈服力范围,现定义套管阻尼器的屈服比例 ξ 为

$$\xi = F_y / F_a \tag{2}$$

式中: F_y 为套管阻尼器的屈服力; F_a 为屈曲约束支撑框架小震下各屈曲约束支撑最大轴力的平均值;为使阻尼器能发挥消能作用, ξ 值应不大于 1。

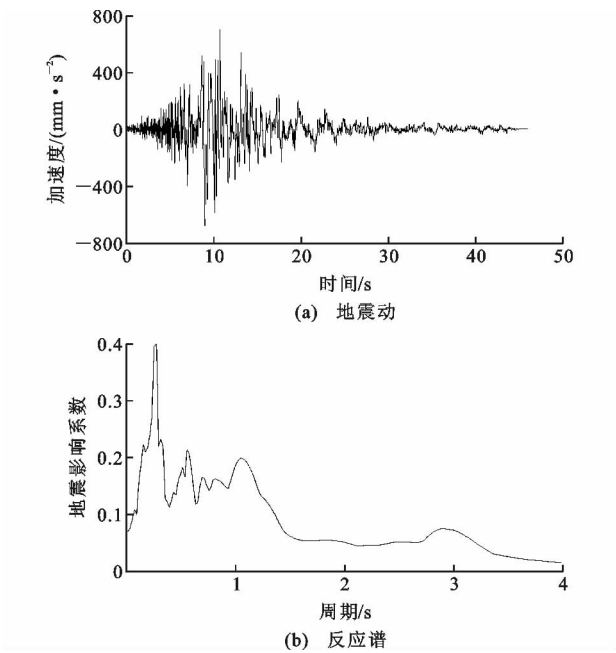


图 5 Chichi 地震波
Fig. 5 Chichi Earthquake Wave

3.3 双阶屈服屈曲约束支撑参数选择

以表 1 中的 3 个屈服约束支撑为基础,结合表 2 中 α 和 ξ 值的组合,可设计一个双阶屈服屈曲约束支撑。建立相应的双阶屈服屈曲约束支撑框架结构模型,共 3 组,每组 20 个,共 60 个,同样采用图 5 中的地震动进行动力弹塑性分析。以每组双阶屈服屈曲约束支撑框架的层间位移角、基底剪力与相应表 1 中的屈服约束支撑框架层间位移角、基底剪力相比的降低率作为评价指标。

表 2 参数选择
Tab. 2 Parameter Selection

参数	取值				
α	3.0	2.5	2.0	1.5	
ξ	0.05	0.15	0.30	0.45	0.60

4 参数分析结果及讨论

4.1 第 1 组双阶屈服屈曲约束支撑框架参数分析结果

第 1 组双阶屈服屈曲约束支撑框架的层间位移角降低率如图 6 所示。由图 6 可知:当 α 相同时,随着 ξ 的提高,层间位移角降低率先逐渐增加,在 ξ 达到 0.3 以后,层间位移角降低率不再随着 ξ 的提高而进一步增加;在 ξ 相同,即套管阻尼器屈服力相同的情况下,层间位移角在 α 较小时随 α 增加而降低, α 大于 2 后,层间位移角的降低幅度明显下降。

第 1 组双阶屈服屈曲约束支撑框架的基底剪力

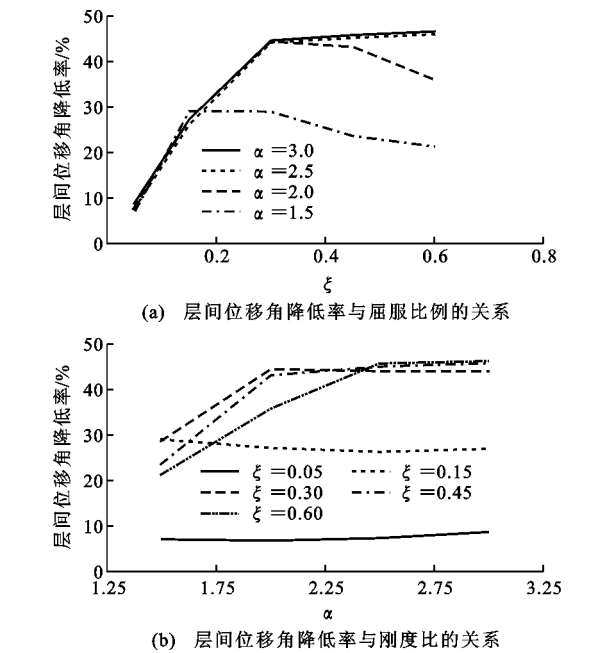


图 6 第 1 组双阶屈服屈曲约束支撑框架层间位移角降低率
Fig. 6 Reduction Rate of Inter-story Drift Angle of the First Group of Frames with Two-level-yielding BRBs

降低率如图 7 所示。由图 7 可知:当 α 相同时,随着 ξ 的提高,基底剪力降低率先变大后变小;在 ξ 约等于 0.2 时,基底剪力降低率最大;当 ξ 相同时,初期随着 α 的增加,基底剪力的降低率随之增加,当 α 大于 2.5 以后,基底剪力降低率基本趋于稳定。

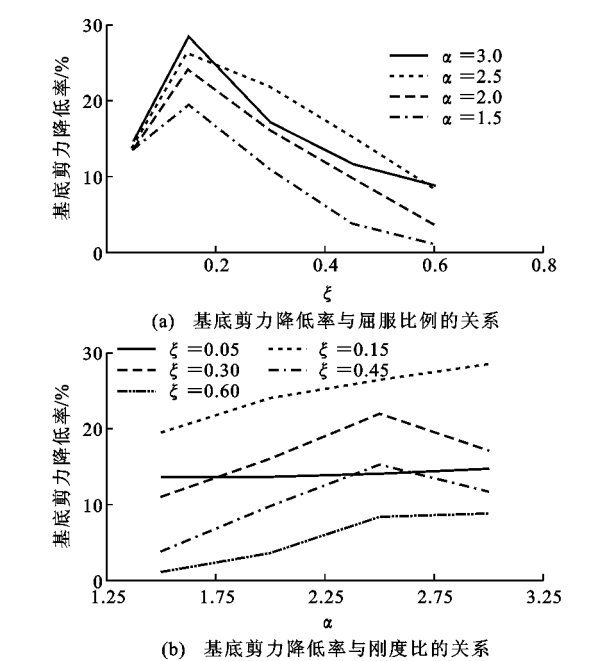


图 7 第 1 组双阶屈服屈曲约束支撑框架基底剪力降低率
Fig. 7 Reduction Rate of Base Shear Force of the First Group of Frames with Two-level-yielding BRBs

4.2 第 2 组双阶屈服屈曲约束支撑框架参数分析结果

第 2 组双阶屈服屈曲约束支撑框架的层间位移角降低率如图 8 所示, 相较第 1 组, 该组支撑与框架的刚度之比有所增加。由图 8 可知: 当 α 相同时, 随着 ξ 的提高, 层间位移角降低率逐渐增加, 在 ξ 达到 0.3 以后, 层间位移角降低率趋于稳定; 当 ξ 相同时, 层间位移角降低率随 α 的增长而增长, 但增长幅度有限。

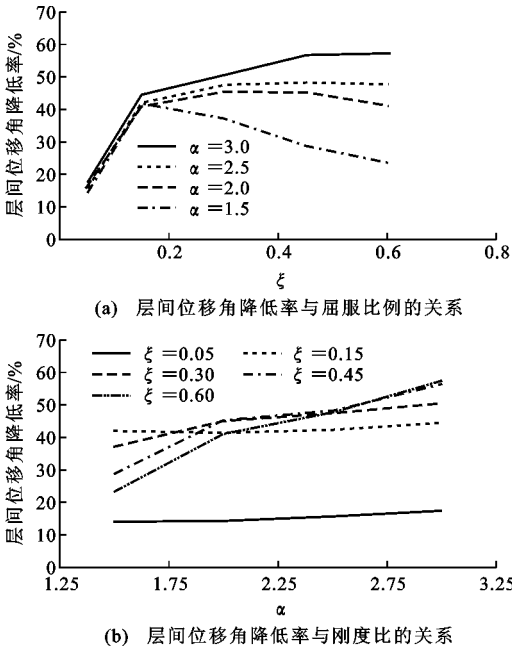


图 8 第 2 组双阶屈服屈曲约束支撑框架层间位移角降低率
Fig. 8 Reduction Rate of Inter-story Drift Angle of the Second Group of Frames with Two-level-yielding BRBs

第 2 组双阶屈服屈曲约束支撑框架的基底剪力降低率如图 9 所示, 由图 9 可知: 当 α 相同时, 随 ξ 的提高, 基底剪力降低率先变大后变小, 在 ξ 约等于 0.2 时基底剪力降低率最大, 且当 ξ 大于 0.4 后基底剪力不仅没有降低反而有所增加; 当 ξ 相同时, 基底剪力随 α 的增长而降低, 但降低幅度不大, 说明基底剪力对 α 的敏感性较低。

4.3 第 3 组双阶屈服屈曲约束支撑框架参数分析结果

第 3 组双阶屈服屈曲约束支撑框架的层间位移角降低率如图 10 所示, 相较前 2 组, 该组支撑与框架刚度比最大, 由图 10 可知: 在 α 相同时, 前期随着 ξ 的增加, 层间位移角降低率逐渐增大; 在 ξ 达到 0.3 以后, 层间位移角降低率趋于稳定, 甚至有所减少; 在 ξ 相同时, 层间位移角降低率随 α 的增加而增加, 但增幅有限, 尤其当 α 大于 2 以后。

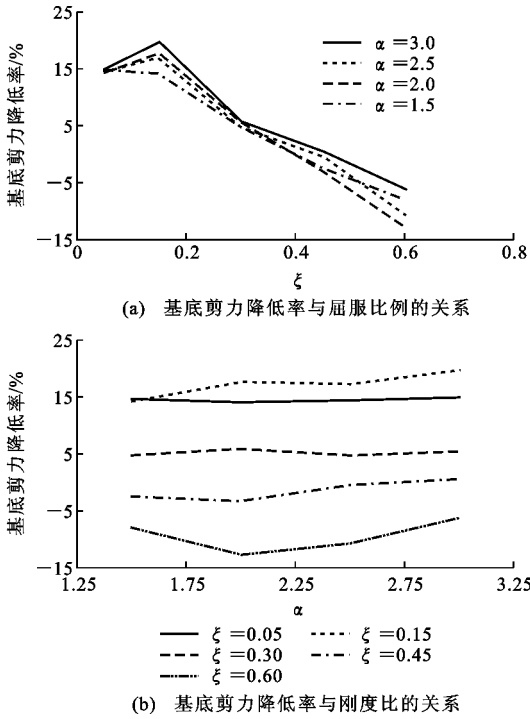


图 9 第 2 组双阶屈服屈曲约束支撑框架基底剪力降低率
Fig. 9 Reduction Rate of Base Shear Force of the Second Group of Frames with Two-level-yielding BRBs

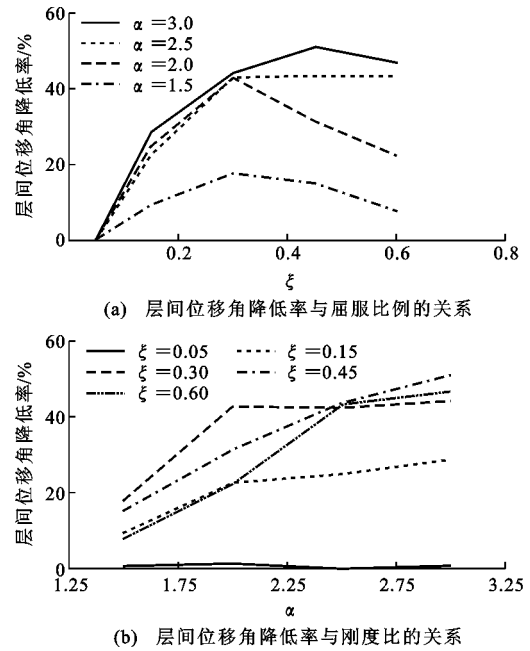


图 10 第 3 组双阶屈服屈曲约束支撑框架层间位移角降低率
Fig. 10 Reduction Rate of Inter-story Drift Angle of the Third Group of Frames with Two-level-yielding BRBs

第 3 组双阶屈服屈曲约束支撑框架的基底剪力降低率如图 11 所示, 由图 11 可知: 当 α 相同、 ξ 略小于 0.2 时, 基底剪力降低率最大, 与前 2 组结构类似; 当 ξ 相同时, 单纯改变 α 对结构基底剪力的影响

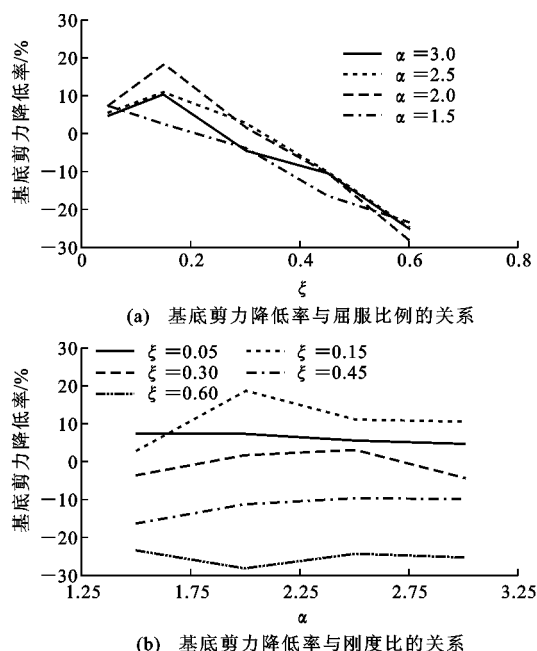


图 11 第 3 组双阶屈服屈曲约束支撑框架基底剪力降低率

Fig. 11 Reduction Rate of Base Shear Force of the Third Group of Frames with Two-level-yielding BRBs

不大。

4.4 讨论

相较常规的屈曲约束支撑框架结构,双阶屈服屈曲约束支撑框架结构的侧向刚度更大,在地震作用下,往往会带来更大的地震作用;同时,金属套管阻尼器屈服后为结构提供附加阻尼,可降低结构的地震作用。

双阶屈服屈曲约束支撑框架的层间位移角降低率总大于 0,结构位移总小于对应的屈曲约束支撑框架。在刚度比不变的情况下,层间位移角降低率随着屈服比例的提高先变大后变小,这是因为屈服比过低时,虽然阻尼器在地震时程中塑性耗能时间占比较大,但过低的屈服力限制了耗能能力且阻尼器屈服后结构刚度下降;同理,若屈服比过高,阻尼器在地震时程中塑性耗能时间较短,同样将限制其耗能能力。因此,过低或过高的屈服比都不利于阻尼器耗能能力的充分发挥。在屈服比例不变的情况下,随着刚度比的提高,结构层间位移角降低,但降低幅度逐渐放缓:刚度比的提高意味着结构侧向刚度增大,且阻尼器在地震时程中耗能总时长变长,结构层间位移角将得到控制;刚度比过大意味着屈服位移过小,阻尼器在地震时程中长时间处于塑性状态,此时再进一步提高刚度比,阻尼器在地震时程中的塑性耗能时间增加幅度有限,耗能能力的提升有限,还会提高成本。

双阶屈服屈曲约束支撑框架的底部剪力降低率在支撑刚度占结构刚度比例较低的结构中,阻尼器参数范围内总大于 0;在支撑刚度占结构刚度比例较高的结构中,并联屈服比例较高的套管阻尼器,将使结构基底剪力增大,因为此时结构刚度提升使结构地震作用的增加量大于附加阻尼对结构地震作用的降低量。在刚度比不变的情况下,基底剪力降低率随屈服比例变化的增减趋势与层间位移角降低率随屈服比例变化的增减趋势类似,其原因也是相似的。在屈服比例不变的情况下,基底剪力降低率对刚度比敏感性不高,这是因为虽然刚度比的提高增加了阻尼器在地震时程中耗能总时长,利于降低结构地震作用,但刚度增加本身也会导致地震作用的增大,因此增加刚度比并不是一个降低结构基底剪力的有效途径。

5 结语

(1)参数刚度比取 2 左右,参数屈服比例取 0.3 左右时,对降低双阶屈服屈曲约束支撑框架的层间位移角和基底剪力的效果最好。

(2)参数刚度比和屈服比例的合理取值与支撑和框架的刚度之比大小无关。

(3)对支撑提供的侧向刚度贡献较大的支撑框架而言,并联金属套管阻尼器总能降低结构的层间位移角,若要同时降低基底剪力,阻尼器屈服比例不宜高于 0.3。

(4)双阶屈服屈曲约束支撑是在原屈曲约束支撑基础上并联套管阻尼器,使之具有小震耗能能力,并不影响原屈曲约束支撑的中、大震耗能能力以及其他各项力学性能。为方便双阶屈服屈曲约束支撑结构设计,尤其当套管阻尼器刚度较低时,在小震作用下,可以保守地只考虑套管阻尼器对结构阻尼比的贡献,而不考虑其对结构侧向刚度的贡献。

参考文献:

References:

- [1] 白雪霜. 现有钢筋混凝土框架结构抗震鉴定方法试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2012.
BAI Xue-shuang. Experimental Research on Seismic Appraisal Method of Existing Reinforced Concrete Frame Structures [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2012.
- [2] 胡鞍钢. 汶川地震灾害评估及灾区重建分析报告[J]. 建材发展导向, 2008, 6(3): 8-12.
HU An-gang. Wenchuan Earthquake Disaster Assess-

- ment and Reconstruction Analysis Report[J]. Development Guide to Building Materials, 2008, 6(3): 8-12.
- [3] KIMURA K, YOSHIOKA K, TAKEDA T, et al. Tests on Braces Encased by Mortar In-filled Steel Tubes[C]//AIJ. Summaries of Technical Papers of 1980 Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan. Tokyo: AIJ, 1976: 1041-1042.
- [4] MOCHIZUKI N, MURATA Y, ANDOU N, et al. An Experimental Study on Buckling of Unbonded Braces Under Centrally Applied Loads[C]//AIJ. Summaries of Technical Papers of 1988 Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan. Tokyo: AIJ, 1988: 237-250.
- [5] FUJIMOTO M, WADA A, SAEKI E, et al. A Study on the Unbonded Brace Encased in Buckling Restraining Concrete and Steel Tube[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 1988, 34B: 249-258.
- [6] WATANABE A, HITOMOI Y, SAEKI E, et al. Properties of Brace Encased in Buckling-restraining Concrete and Steel Tube[C]//Japan Association for Earthquake Disaster Prevention. Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: Japan Association for Earthquake Disaster Prevention, 1988: 719-724.
- [7] CLARK P, AIKEN I, KASAI K, et al. Design Procedures for Buildings Incorporating Hysteretic Damping Devices[C]//SEAOC. Proceedings of the 69th Annual Convention of SEAOC. Sacramento: SEAOC, 1999: 105-122.
- [8] 蔡克铨, 黄彦智, 翁崇兴. 双管式挫屈束制(屈曲约束)支撑的耐震行为与应用[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(3): 1-8.
- TSAI Keh-chyuan, HWANG Yean-chih, WENG Chung-shing. Seismic Performance and Applications of Double Tube Buckling-restrained Braces[J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(3): 1-8.
- [9] 罗树青, 邓长根, 牛化宪. 抑制屈曲支撑的稳定研究[J]. 华东船舶工业学院学报: 自然科学版, 2005, 19(3): 28-32.
- LUO Shu-qing, DENG Chang-gen, NIU Hua-xian. Study on Stability of Buckling Restrained Brace[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute: Natural Science Edition, 2005, 19(3): 28-32.
- [10] 李妍, 吴斌, 王倩颖, 等. 防屈曲钢支撑阻尼器的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(7): 9-14.
- LI Yan, WU Bin, WANG Qian-ying, et al. An Experimental Study of Anti-buckling Steel Damping-braces [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(7): 9-14.
- [11] LI G Q, SUN F F, CHEN S W, et al. Development of TJ-type Buckling-restrained Braces and Application [C]//LIANG W H, LI Q, GAO B. Proceedings of International Conference on Earthquake Engineering — The 1st Anniversary of Wenchuan Earthquake. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009: 149-157.
- [12] 孙飞飞, 刘猛, 李国强, 等. 国产 TJ-I 型屈曲约束支撑的性能研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2009, 26(1): 5-9.
- SUN Fei-fei, LIU Meng, LI Guo-qiang, et al. Improvement and Experimental Study of Domestic TJ-I Type Buckling-restrained Brace[J]. Journal of Hebei University of Engineering: Natural Science Edition, 2009, 26(1): 5-9.
- [13] 郭彦林, 江磊鑫. 型钢组合装配式防屈曲支撑性能及设计方法研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 30-37.
- GUO Yan-lin, JIANG Lei-xin. Behavior and Application of Buckling-restrained Braces Assembled with Section Steels[J]. Building Structure, 2010, 40(1): 30-37.
- [14] 郭彦林, 江磊鑫. 双矩管带肋约束型装配式防屈曲支撑的设计方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2): 67-74.
- GUO Yan-lin, JIANG Lei-xin. Design Method of Buckling-restrained Braces Assembled with Dual Ribbed Rectangular Hollow[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2): 67-74.
- [15] 周云, 尹绕章, 张文鑫, 等. 钢板装配式屈曲约束支撑性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8): 37-43.
- ZHOU Yun, YIN Rao-zhang, ZHANG Wen-xin, et al. Experimental Study on Hysteretic Performance of Steel-plate Assembled Buckling-restrained Brace [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8): 37-43.
- [16] LI G Q, SUN Y Z, JI C, et al. Experimental Study on Two-level Yielding Buckling-restrained Braces [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 159: 260-269.
- [17] GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].