

• 防震减灾工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800592

设置BRB的桥梁排架墩抗震性能参数分析

石岩^{1,2}, 张展宏¹, 韩建平¹, 许继祥¹

(1.兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2.河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要:汶川大地震中, 桥梁双柱式排架墩遭到了严重的破坏, 其抗震问题被广泛关注。作者基于结构“保险丝”的损伤控制理念, 在双柱式桥梁排架墩中设置屈曲约束支撑(BRB), 以提高横桥向的抗震性能。建立了考虑墩柱弹塑性、梁体与挡块碰撞和支座滑动效应的单个排架墩动力分析模型, 通过输入远场地震动、具有向前方向性效应和滑冲效应的近断层地震动进行非线性地震反应时程分析, 研究了BRB与排架墩水平刚度比、水平屈服位移比、BRB布置形式和排架墩形式等参数对桥梁排架墩抗震性能的影响。结果表明: 设置BRB能有效地减小规则和不规则排架墩的地震损伤, BRB与排架墩水平刚度比和水平屈服位移比的合理取值范围分别为0.5~2.0和0.5~1.5。

关键词:桥梁工程; 双柱式排架墩; 屈曲约束支撑; 近断层地震动; 速度脉冲

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)06-0071-06

Parametric Analysis of Seismic Performance for Bridge Bents with Buckling-restrained Braces (BRBs)

SHI Yan^{1,2}, ZHANG Zhanhong¹, HAN Jianping¹, XU Jixiang¹

(1.School of Civil Eng., Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China; 2.Key Lab. for Health Monitoring and Control of Large Structures, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: During Wenchuan earthquake, some bridge bents with double piers suffered severe damage and much attention has been paid to the seismic performance of bridge bents. Based on the structural fuse concept, the bridge bents by using buckling-restrained brace (BRB) was proposed to control its damage in transverse direction. An analytical model of single bridge bents considering the elasto-plastic behaviors of piers, the pounding response between shear keys and girders and the sliding friction behavior of laminated rubber bearing was developed. Nonlinear response history analyses were conducted with far-fault and near-fault ground motion records including velocity pulse of forward rupture directivity effect and fling-step effect. Many parameters such as the ratio of horizontal stiffness between BRBs and bents, the ratio of horizontal yielding displacement between BRBs and bents, the arrangement form of BRBs, the bent with unequal-high piers, and the intensity of ground motion were analyzed. Results indicated that the damage of regular and irregular bridge bents can be effectively controlled by using BRBs, and the rational sampling ranges of the horizontal stiffness ratio and horizontal yielding displacement ratio between BRBs and bents are found to be 0.5~2.0 and 0.5~1.5, respectively.

Key words: bridge engineering; bent with double columns; buckling-restrained brace (BRB); near-fault ground motion; velocity pulse

双柱式排架墩在中国中小跨径公路桥梁和城市高架桥中应用非常广泛。以往地震中桥梁排架结构的震害也证实了其抗震的薄弱性^[1], 例如美国Loma Prita地震中Cypress高架桥、日本Kobe地震中Hansui高架桥、台湾集集地震中Yen Feng桥等的震害引起了双柱墩抗震问题的广泛重视^[2-4]。汶川地震中, 强震区(IX-XI烈度)简支梁桥中双柱墩的比例达

到78%, 且20%简支梁桥的双柱墩和40%连续梁桥的双柱墩遭到严重破坏或完全失效^[5]。为此, 不同学者对桥梁排架墩展开了研究。沈星等^[6]发展了双柱墩的弹塑性位移能力简化计算方法; 吴宜峰等^[7]研究了轴压比、配筋率、配箍率、混凝土强度对钢筋混凝土双柱墩滞回性能的影响。另外, 沈星^[8]、孙治国^[9]等研究了不同形式横系梁对排架墩抗震能力的影响。

收稿日期:2018-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51768042; 51868048); 甘肃省自然科学基金资助项目(1610RJZA002); 建工七七基金资助(TM-QK-1602); 甘肃省高等学校科研项目资助

作者简介:石岩(1985—), 男, 副教授, 博士。研究方向:桥梁抗震。E-mail: syky86@163.com

网络出版时间:2018-10-22 15:54:00 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.tb.20181019.1319.011.html>

随着基于性能抗震设计理论的发展,对结构损伤控制的要求更加严格、迫切。近年来,基于结构保险丝(structural fuse)的损伤控制理念已逐渐形成:将结构体系中非关键构件(即保险丝构件)设计为先于主要结构(构件)屈服,通过保险丝构件的被动耗能降低地震能量,使主结构处于弹性状或只发生轻微损伤;保险丝构件为非承重构件,震后易于更换且不影响结构的正常使用。El-Bahey等^[10]最早将保险丝引入到桥梁排架墩以提高其抗震能力,利用保险丝构件提供的附加强度与刚度及其滞回耗能作用使双柱墩本身保持弹性。在国内,谢文等^[11]对安装耗能装置的双柱墩进行理论分析和试验研究;孙治国等^[1]初步发展利用屈曲约束支撑(buckling restrained brace, BRB)实现桥梁排架墩基于保险丝理念的抗震设计方法;韩强等^[12]提出摇摆式排架墩及其在消压、屈服和设计极限状态的计算方法,发展了基于性能的摇摆排架墩抗震设计方法,并将其应用于余黄徐路跨线桥梁。可见,目前对排架墩损伤控制的研究尚处于初步探索阶段,对桥梁排架墩的损伤控制方法,以及设置损伤控制构件排架墩(如BRB)的抗震性能、地震反应规律、参数取值范围和影响程度等尚无全面认识。为此,在设置BRB桥梁排架墩抗震设计方法^[1, 13]的基础上,选择高烈度地区典型的双柱式排架墩体系,建立考虑墩柱弹塑性、梁体与挡块碰撞和支座滑动效应的单个排架墩动力分析模型,通过输入远场地震动和近断层地震动进行非线性地震反应时程分析,研究BRB与排架墩水平刚度比、水平屈服位移比、BRB布置形式和排架墩形式等参数对桥梁排架墩抗震性能和地震反应规律的影响。

1 工程概况与分析模型

1.1 工程概况

以典型30 m跨径的公路连续梁桥(简支变连续)中采用的双柱式排架墩为研究对象,排架墩体系如图1所示,墩柱为直径1 500 mm的圆形墩,上部结构为5片T型梁结构,盖梁上的每片T梁下各设1块板式橡胶支座。

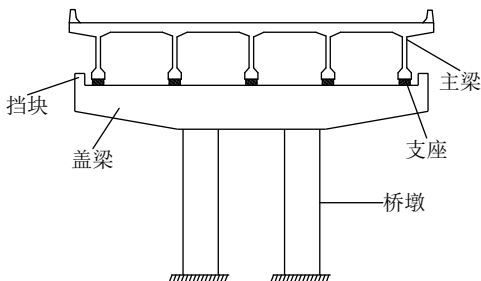


图1 桥梁排架墩及结构体系

Fig. 1 Bridge bent and structural system

1.2 动力分析模型与分析工况

基于OpenSees地震分析平台建立考虑上、下部结构相互作用的单个排架墩动力分析模型,如图2所示。上部结构等效为集中质量,桥墩和盖梁采用非线性梁柱单元模拟,屈曲约束支撑采用steel02材料的桁架单元模拟。桥梁采用的板式橡胶支座在强震中通常会发生滑动,故采用理想双线性滞回模型模拟橡胶支座与墩顶和梁底接触面之间产生的滑动效应^[14]。为防止支座过大的滑动和移位引起的横桥向落梁等灾难性损坏,通常在盖梁上设置横向挡块等限位措施。考虑到强震作用下,桥梁上、下部结构的不同相振动可能导致梁体与抗震挡块间发生碰撞^[15],故在主梁与挡块之间设置一个碰撞(接触)单元,其恢复力关系采用Hertz-damp模型^[16],该模型能够较好地模拟碰撞过程中的接触和能量耗散。

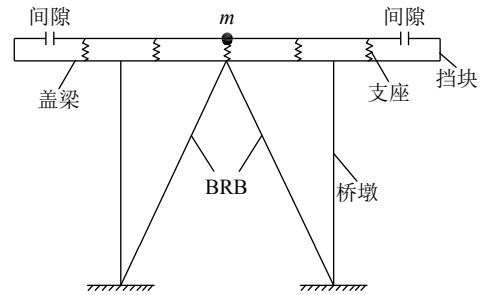


图2 计算模型示意图

Fig. 2 Analytical model of bridge bent

通过Pushover分析得到排架墩和BRB排架墩体系的恢复力。动力分析中,混凝土结构的阻尼比取5%,采用Rayleigh阻尼;分别采用10条远断层地震动(FF)、具有向前方向性效应(NFa)和具有滑冲效应(NFb)的近断层地震动^[15]进行非线性动力时程分析,以每类地震动记录的平均反应作为讨论依据。

为分析屈服位移比 α 、水平刚度比 β ^[13]、BRB布置形式和排架墩形式等参数对排架墩体系地震反应、减震率^[15]的影响,采用分析工况如表1所示,其中, $H_a = H_b$ 分别为排架墩左、右墩柱高度, K_{F1} 为排架墩初始刚度, D_{Fy} 为排架墩屈服位移, L_{RC} 为BRB核心段长度, A_{R1} 和 A_{R2} 为BRB核心段截面积。

2 抗震性能参数分析

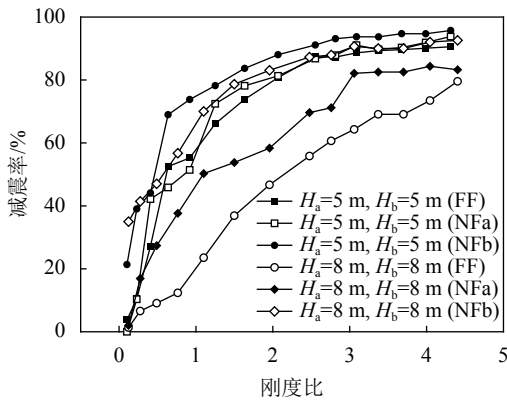
2.1 刚度比

由于BRB的等效刚度与轴心受压构件相同,屈服位移由BRB(核心段)长度唯一确定,因此在讨论刚度比 α 影响时,假定BRB(核心段)长度不变,即屈服位移比 β 为常数,分别取 β 为0.81和0.50,据此分为工况I A和I B。在 $PGA=0.4g$ 的地震动作用下,研究不同刚度比下减震率、BRB应变和位移延性系数的变化规律,如图3所示。

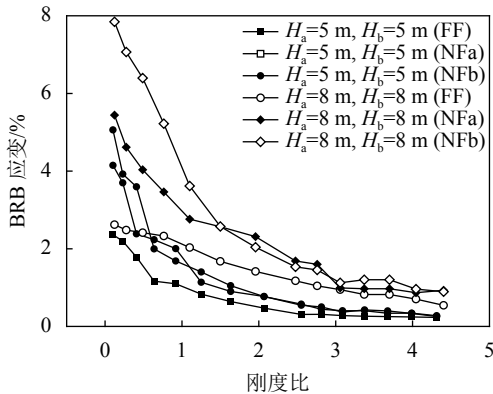
表1 分析工况及参数

Tab. 1 Analysis cases and parameters

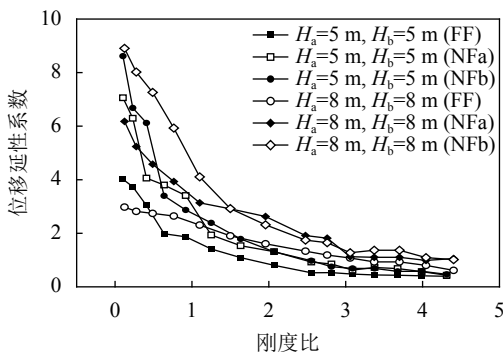
工况编号	分析参数	排架墩参数	BRB参数
工况 I A	刚度比 α	$H_a = H_b = 5 \text{ m}, K_{F1} = 4.9 \times 10^8 \text{ N/m}, D_{Fy} = 0.006 \text{ 5 m}$	人字撑, $L_{RC} = 2.0 \text{ m}, \beta = 0.81$
工况 I B		$H_a = H_b = 8 \text{ m}, K_{F1} = 1.2 \times 10^8 \text{ N/m}, D_{Fy} = 0.016 \text{ 0 m}$	人字撑, $L_{RC} = 3.0 \text{ m}, \beta = 0.50$
工况 II A	屈服位移比 β	$H_a = H_b = 5 \text{ m}, K_{F1} = 4.9 \times 10^8 \text{ N/m}, D_{Fy} = 0.006 \text{ 5 m}$	人字撑, $A_{R1} = 7 \text{ 854 mm}^2$
工况 II B		$H_a = H_b = 5 \text{ m}, K_{F1} = 4.9 \times 10^8 \text{ N/m}, D_{Fy} = 0.006 \text{ 5 m}$	人字撑, $A_{R2} = 20 \text{ 106 mm}^2$
工况 III	BRB形式	$H_a = H_b = 5 \text{ m}, K_{F1} = 4.9 \times 10^8 \text{ N/m}, D_{Fy} = 0.006 \text{ 5 m}$	单斜撑, $\beta = 0.81$
工况 IV A	排架墩形式	$H_a = 5 \text{ m}, H_b = 8 \text{ m}, K_{F1} = 3.3 \times 10^8 \text{ N/m}, D_{Fy} = 0.007 \text{ 0 m}$	单斜撑, $\beta = 0.70$
工况 IV B		$H_a = 5 \text{ m}, H_b = 10 \text{ m}, K_{F1} = 2.8 \times 10^8 \text{ N/m}, D_{Fy} = 0.007 \text{ 0 m}$	单斜撑, $\beta = 0.70$



(a) 减震率



(b) BRB 应变



(c) 位移延性系数

图3 刚度比的影响

Fig. 3 Effects of stiffness ratio

由图3可知:

1) BRB的减震率随着刚度比 α 单调递增,即刚度比越大, BRB减震效果越好;刚度比 α 处于0.2~2.0时增幅最为明显,处于2.0~3.0时增幅相对缓慢,当刚度比 $\alpha > 3.0$ 时,减震率基本不变。

2) 考虑到BRB变形段在大应变下疲劳寿命衰减,其轴向最大设计应变通常不超过3%^[17-18]。随着刚度比的增大, BRB的应变随之减小;当刚度比 $\alpha < 0.5$ 时,在近断层地震动作用下的BRB应变达到3%,为控制BRB的损伤、保证排架墩安全性,不建议刚度比小于0.5。

3) BRB的位移延性系数随着刚度比的增大而减小;当 $\alpha < 2.0$ 和 $\alpha < 2.5$ 时, 5 m和8 m高排架墩上BRB的位移延性系数基本都大于1.0,表明BRB处于屈服状态。从依靠BRB屈服耗能的角度,不建议刚度比大于2.0(或2.5)。

4) 当排架墩的高度不同时, BRB的减震率、应变、位移延性系数也有所不同,但是与刚度比的变化规律一致且相差不大,可认为无量纲参数 α 具有普遍意义。另外,具有向前方向性效应和滑冲效应的近断层地震动作用强于无脉冲效应的远断层地震动作用。

综上所述,从BRB的减震效果、安全及经济角度考虑,认为BRB和排架墩刚度比 α 的合理设计范围为0.5~2.0。

2.2 屈服位移比

在讨论屈服位移比 β 的影响时,假定核心段的截面积不变,通过改变核心段长度实现屈服位移的改变,刚度也随之改变。

排架墩同工况 I A(表1);采用不同截面面积的人字形BRB,工况 II A中BRB内芯截面面积 $A_{R1} = 7 \text{ 854 mm}^2$,工况 II B中 $A_{R2} = 20 \text{ 106 mm}^2$ 。通过非线性时程分析研究采用不同屈服位移比的BRB对整个体系抗震性能的影响,如减震率、BRB轴向应变、BRB位移延性系数等。

图4分别给出了不同屈服位移比 β 时的减震率、BRB应变和位移延性系数的变化规律。

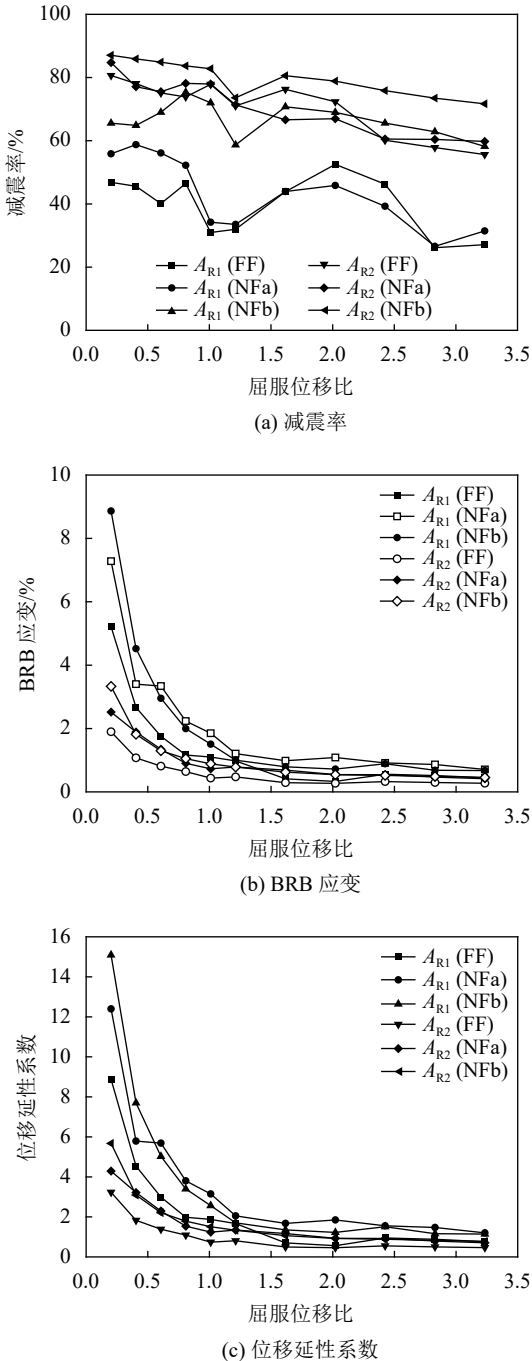


图 4 屈服位移比的影响

Fig. 4 Effects of yielding displacement ratio

由图4可知:

1) BRB的减震率随着屈服位移比 β 增大具有减小趋势,尤其是当 $\beta > 1.5$ 时,减震率的较小趋势比较明显。

2) 随着屈服位移比 β 的增大, BRB的应变随之减小;当屈服位移比 $\beta < 0.5$ 时,较小截面($A_{R1} = 7\ 854\ \text{mm}^2$) BRB的应变超过3%,较大截面($A_{R2} = 20\ 106\ \text{mm}^2$)

BRB的应变接近3%;为控制BRB的损伤,保证排架墩安全性,建议屈服位移比不小于0.5。

3) BRB的位移延性系数随着屈服位移比的增大而减小;当 $\beta < 1.5$ 时BRB的位移延性系数基本都大于1.0,表明BRB处于屈服状态;从充分发挥BRB滞回耗能的角度,屈服位移比宜小于1.5。

4) 当采用不同截面大小的BRB时,其减震率、应变、位移延性系数有所不同,如相同屈服位移比下较大截面($A_{R2} = 20\ 106\ \text{mm}^2$) BRB的减震率明显较大,但其应变和延性系数则明显较小, BRB未必充分发挥其滞回耗能作用。另外,地震反应与屈服位移比的变化规律与截面大小无关,可认为无量纲参数 β 具有普遍意义。具有向前方向性效应和滑冲效应近断层地震动作用强于无脉冲效应的远断层地震动作用;在远断层地震动作用下,较大截面($A_{R2} = 20\ 106\ \text{mm}^2$) BRB在 $\beta < 0.75$ 时才不会发生屈服,故对经受近断层地震动可能性较低的桥梁,建议采用截面面积相对较小的BRB。

根据以上内容可知,当屈服位移比 β 为0.5~1.5时, BRB的最大应变为1%~3%,在容许范围之内;其位移的延性系数较大,发生了一定的塑性变形,整体减震率也较高,具有比较好的减震效果。因此,建议BRB和排架墩屈服位移比 β 的合理设计范围为0.5~1.5。

值得说明的是, El-Bahey等^[11]期望BRB先于框架屈服且通过其滞回耗能作用消耗地震能力,从而使排架墩保持弹性。实际上,随着BRB的屈服,整个体系的刚度随之降低, BRB的屈服耗能也需要一定的位移需求,故排架墩保持弹性将不易实现,对于一些屈服位移往往较小的(非延性)排架墩更难实现。因此,建议的屈服位移比合理设计范围(0.5~1.5)允许BRB的屈服位移略大于排架墩的屈服位移,实际应用意义更加突出。

2.3 BRB布置形式

工况 III: 排架墩同工况 I A(表1),通过在排架墩中加设单斜式和人字形的BRB并调整其刚度,对比研究采用单斜撑和人字撑的排架墩的抗震性能。由图5和6可以看出:

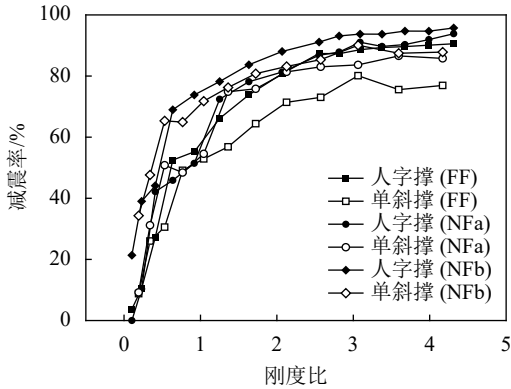
1) 采用单斜撑的减震效果略大于人字撑,但受地震动的特性影响,如在具有向前方向性效应的近断层地震动下二者基本一致。

2) 当刚度比 $\alpha > 2.5$ 时,单斜撑的轴向应变略大于人字撑;当 $\alpha < 2.5$ 时,人字撑略大于单斜撑。单斜撑的位移延性系数较人字撑大。

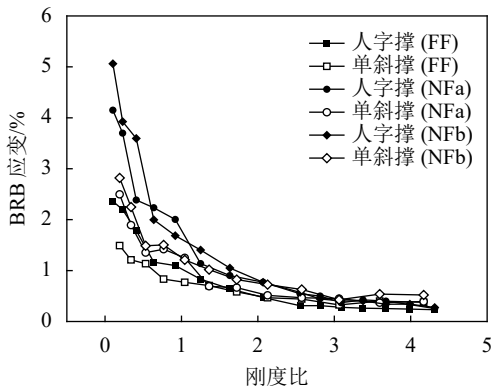
3) 当BRB在排架墩平面内沿对角线单斜式布置

时,明显放大了下端连接墩(左墩)的剪力反应,适当减小了上端连接墩的剪力;布置人字撑时两个墩的剪力基本相当;两种布置形式的总反力(左右墩相加)比基本一致,如图6(b)所示。

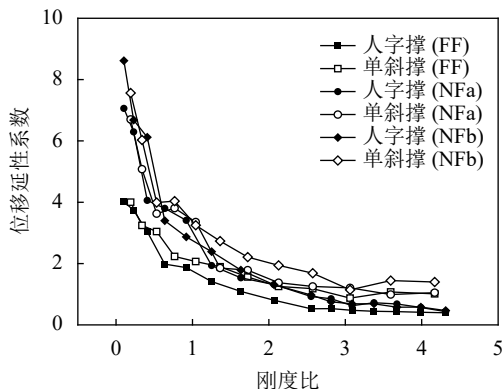
通过对比两种支撑形式的抗震性能,可以认为:同刚度比下的两种支撑的减震效果基本相当,但是单斜撑的剪力放大效应主要集中在BRB下端的连接墩上,对于桥梁基础承载力提出了比较高的要求。设计中应该通过考虑基础承载能力,决定BRB的布置形式。



(a) 减震率



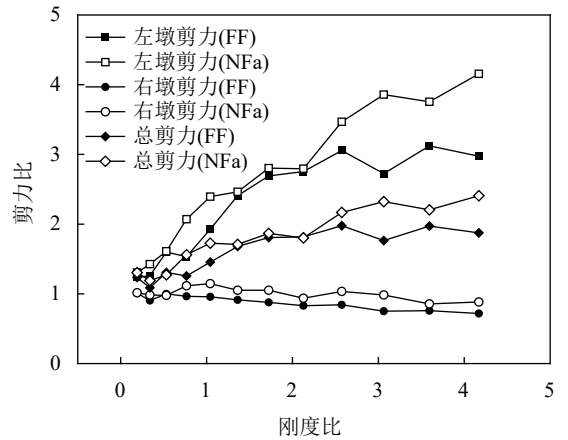
(b) BRB 应变



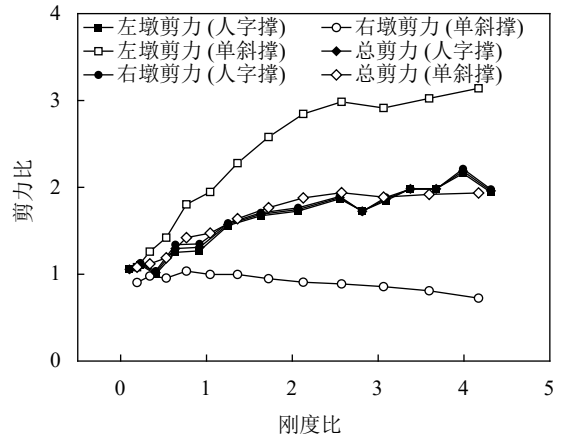
(c) 位移延性系数

图5 人字撑与单斜撑的比较

Fig. 5 Comparison between single brace and double braces



(a) 单斜撑的桥墩剪力比



(b) 人字撑与单斜撑剪力比的比较 (FFb)

图6 人字撑与单斜撑剪力比的比较(FFb)

Fig. 6 Difference of piers shear of bridge bent with single brace and double braces

2.4 排架墩形式

由于受地形因素的限制,排架中两个墩的高度不一致,表现为典型的不规则排架。当不规则两侧的墩高相差不大时,可以采用人字撑形式;当墩高相差较大时,人字撑的两个BRB长度也相差较大,设计中不容易做到位移协调,在基础承载力容许的情况下,建议采用单斜撑。如表1中的工况IV A,两个排架墩中的BRB都采用单斜式布置,沿左墩墩底至右墩顶部斜向加设,BRB变形段长度 $L_{RC}=3.0\text{ m}$,屈服位移比 $\beta=0.70$ 。

图7给出了两个高墩不同的排架墩设置BRB时减震率和BRB应变与刚度比的关系。

由图7可知:设置BRB对非规则排架墩具有较好的减震作用,减震率大致在30%~80%,与上述分析的规则排架墩基本相当;刚度比和屈服位移比的合理取值范围与前面的分析基本一致。

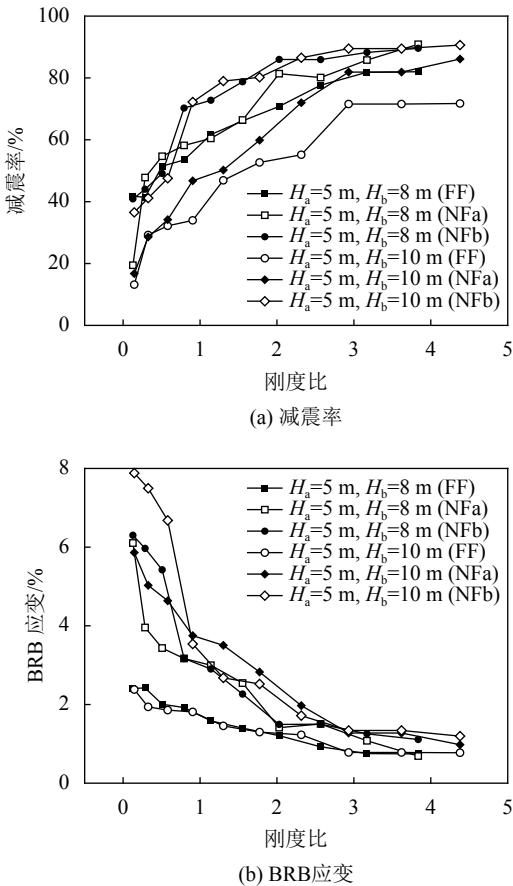


图 7 刚度比对不规则排架墩的影响

Fig. 7 Effects of stiffness ratio on bent with unequal-high piers

3 结论

通过横桥向单个排架墩动力模型分析了不同参数对设置BRB排架墩抗震性能的影响,得出以下结论:

1) 无论远、近断层地震动作用下,设置BRB均能有效地减小不规则和不规则排架墩的地震损伤,降低其最大位移需求,减震率在30%~80%。

2) 从BRB的减震效果、安全及经济角度,建议BRB和排架墩刚度比 α 的取值范围为0.5~2.0,屈服位移比 β 的取值为0.5~1.5。

3) 相同刚度比下,单斜式和人字形支撑的减震效果基本相当,但单斜撑的剪力放大效应主要集中在BRB下端连接墩上,对基础承载力要求较高。

参考文献:

[1] Sun Zhiguo, Hua Chengjun, Shi Yan, et al. Seismic design of bridge bents with BRB as a structural fuse[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(22): 199–205. [孙治国, 华承俊, 石岩, 等. 利用BRB实现桥梁排架基于保险丝理念的抗震设计[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(22): 199–205.]

[2] Kunnath S K, Cross J L. Inelastic response of the Cypress

viaduct to the Loma Prieta earthquake[J]. *Engineering Structures*, 1995, 17(7): 485–493.

[3] Marini A, Spacone E. Analysis of reinforced concrete elements including shear effects[J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(5): 645–655.

[4] Christopoulos C, Garcia D L, Tsai K C. Educational reconnaissance of the area affected by the 1999 Chi-Chi earthquake-three years later[J]. *Earthquake Spectra*, 2005, 21(1): 31–52.

[5] 陈乐生, 庄卫林, 赵河清, 等. 汶川地震公路震害调查: 桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[6] Shen Xing, Ye Aijun, Wang Xiaowei. Simplified calculation method of elastic-plastic displacement capacity for double-column bent[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(4): 513–519. [沈星, 叶爱君, 王晓伟. 双柱墩弹塑性位移能力简化计算方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(4): 513–519.]

[7] Wu Yifeng, Li Aiqun, Wang Hao, et al. Numerical simulation and analysis of hysteretic behavior of RC two-column piers[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(4): 776–781. [吴宜峰, 李爱群, 王浩, 等. 钢筋混凝土双柱墩滞回性能数值模拟与分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(4): 776–781.]

[8] Shen Xing, Ye Aijun, Wang Xiaowei. Seismic behavior analysis for link beam of double-column bent[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(3): 342–347. [沈星, 叶爱君, 王晓伟. 柔性横梁双柱墩的抗震行为分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(3): 342–347.]

[9] Sun Zhiguo, Hua Chengjun, Si Bingjun, et al. Study of seismic resistance capacity of double-column bridge pier arranged with ductile tie beam[J]. *Bridge Construction*, 2015, 45(1): 39–44. [孙治国, 华承俊, 司炳君, 等. 设置延性系梁的桥梁双柱墩抗震能力研究[J]. *桥梁建设*, 2015, 45(1): 39–44.]

[10] El-Bahey S, Bruneau M. Buckling restrained braces as structural fuses for the seismic retrofit of reinforced concrete bridge bents[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(3): 1052–1061.

[11] Xie Wen, Sun Limin, Wei Jun. Experimental study on seismic performance of bridge piers with structural fuses and its application[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(3): 59–70. [谢文, 孙利民, 魏俊. 附有结构“保险丝”构件的桥墩抗震性能试验研究及其应用[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(3): 59–70.]

[12] Han Qiang, Jia Zhenlei, He Weili, et al. Seismic design method and its engineering application of self-centering double-column rocking bridge[J]. *China Journal Highway Transportation*, 2017, 30(12): 169–177. [韩强, 贾振雷, 何维利, 等. 自复位双柱式摇摆桥梁抗震设计方法及工程应用[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(12): 169–177.]