张永亮,董阳,张磊,等.BRB 在双柱式桥墩抗震体系中的工作机理分析[J].地震工程学报,2018,40(5):957-962.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.957

ZHANG Yongliang,DONG Yang,ZHANG Lei,et al.Working Mechanism of Buckling-restrained Braces in the Seismic System of Double-column Bridge Piers[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(5):957-962.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.957

BRB 在双柱式桥墩抗震体系中的工作机理分析

张永亮[1,2], 董 阳[1,2], 张 磊[3], 陈兴冲[2]

(1. 兰州交通大学甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
2. 兰州交通大学道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 北京堡瑞思减震科技有限公司, 北京 100043)

摘要: 以设置防屈曲支撑(Buckling-Restrained Braces,BRB)的双柱式桥墩体系为研究对象,系统分析上部结构惯性力在该体系中的传递机理;以某 3×30 m 公路高架桥为工程背景,采用非线性时程反应分析法研究 BRB 的设置方式及参数取值对桥梁地震反应的影响规律,揭示 BRB 在双柱式桥墩中的工作机理。其研究结论为:(1)对于设置 BRB 的双柱式桥墩,当 BRB 未屈服时,通过其轴向刚度改变结构体系的传力路径,墩底弯矩、剪力降低,但墩底轴力改变量将增大,即以较大的墩身轴力改变量换取较小的墩底弯矩及剪力。(2)在 BRB 屈服的情况下,BRB 通过改变下部结构的传力路径及滞回耗能双重机制影响结构的地震反应,BRB 耗能作用将降低墩身的轴力改变量,使减震效果更优。(3)双柱式桥墩横桥向设置 BRB 是一种较为有效的减震体系,但其减震效果与 BRB 具体布置方式及力学参数取值有关。

关键词: 公路桥梁; 双柱式墩; 地震反应; BRB; 减震机理

中图分类号: TU352.11 **文献标志码**:A **文章编号**: 1000-0844(2018)05-0957-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.957

Working Mechanism of Buckling-restrained Braces in the Seismic System of Double-column Bridge Piers

ZHANG Yongliang[1,2], DONG Yang[1,2], ZHANG Lei[3], CHEN Xingchong[2]

(*1. Key Laboratory of Road & Bridges and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gandu, China;*
2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
3. Beijing Baoruisi Shock Absorption Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: This study investigates a double-column pier system with buckling-restrained braces (BRB), while focusing on the transmission mechanism of the superstructure inertial force in the system. Taking a 3×30 m highway viaduct as the engineering background, the positioning of BRB and the influence of different parameters on the seismic response of the bridge were studied

收稿日期:2017-06-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51768037,51768036);甘肃省科技计划资助(17JR5RA103)

第一作者简介:张永亮(1975-),男,内蒙古通辽人,博士,教授,主要研究方向为桥梁抗震及减隔震理论。E-mail:zhangyong_L@126.com。

通信作者:董 阳(1991-),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为结构抗震及减隔震理论。E-mail:772895499@qq.com。

by a nonlinear time-history response analysis to understand the working mechanism of BRB in double-column piers. The following can be concluded from the study: (1) For double-column piers with BRB, when BRB do not yield, it changes the force transfer path of a structure through its axial stiffness, thereby decreasing the bending moment and sheer force of the pier bottom; however, the change of axial force at the pier bottom would be enlarged. (2) When the BRB yields, it influences the seismic response of the structure by changing the force transfer path of the substructure and its hysteretic energy dissipation mechanism. The energy consumption of BRB would reduce the change of axial force of the pier and optimize the damping effect. (3) Double-column pier with BRB in transverse bridge direction is an effective damping system, and the damping effect is relevant to the specific arrangement and mechanical parameters of BRB.

Keywords: highway bridges; double-column pier; seismic response; buckling-restrained brace (BRB); seismic-reduction mechanism

0 引言

柱式桥墩是公路桥梁最常用的下部结构形式。强震作用下柱式桥墩容易遭到破坏,尤其是早期抗震设防等级低、体积配箍率及配筋率均较低的柱式桥墩,如 2008 年汶川大地震中百花大桥、顺河大桥与庙子坪大桥等柱式桥墩均发生严重的弯曲或剪切破坏[1-2]。如何有效提高这些已建桥墩的抗震性能至关重要。

近年来,在柱式桥墩的抗震体系中引入 BRB 作为保险丝单元[3-5]在业内引起了广泛关注。El-Bahey等[6-7]研究结果表明,BRB 能增加排架墩体系的强度和刚度,地震中由于其良好的滞回耗能作用可使混凝土桥墩保持弹性状态。Yuandong Wang 等[8]提出使用 BRB 对连续梁排架墩进行抗震加固,结果表明 BRB 可通过降低桥墩钢筋和混凝土的应变来提高桥梁极限状态下的抗震性能。Michel Bruneau 等[9]提出将 BRB 作为保险丝应用到双柱式墩中,并提出相应的设计步骤。孙治国等[10]提出使用 BRB 构件实现桥梁排架基于保险丝理念的抗震设计,结果表明 BRB 核心段长度为影响排架屈服顺序的关键;华承俊[11]通过增量动力分析研究了 BRB 对桥梁排架墩的损伤控制效果。以上研究均侧重于 BRB 在柱式桥墩中的减震效果,并未探讨上部结构的惯性力在整个下部结构体系中的传递机理。

本文以设置 BRB 的双柱式桥墩体系为研究对象,系统分析上部结构的惯性力在该体系中的传递机理;并以某 3×30 m 公路高架桥为工程背景,采用非线性时程反应分析法研究 BRB 的设置方式及参数取值对桥梁地震反应的影响规律,揭示 BRB 在双柱式桥墩中的耗能减震与改变惯性力传递路径的双重工作机理。

1 BRB 在双柱式桥墩抗震体系中的工作机理

在横桥向地震作用下,BRB 将通过两种方式减小双柱式墩的地震反应,一是通过 BRB 自身的屈服来耗散地震能量,从而达到减震的目的;二是通过改变桥墩的传力路径,减小墩身的弯矩与剪力。

1.1 BRB 屈服耗能的工作机理

BRB 由钢支撑内芯、外包约束构件(内填砂浆或混凝土的钢管)以及两者之间所设置的无粘结层或间隙三部分所构成。BRB 在小震的作用下处于弹性状态,对整体结构提供一定的抗侧刚度;在中震或大震作用下,支撑屈服而不屈曲,率先进入耗能状体,通过消耗输入结构中的地震能量,保护主体结构及构件免遭破坏。当地震荷载作用在 BRB 上时,BRB 的内芯承担全部轴向荷载,约束单元为内芯提供足够的侧向约束,防止其发生屈曲,使得内芯在拉压状态下均能达到屈服,故 BRB 可通过良好的滞回耗能特性来达到结构减震的目的[12]。

1.2 BRB 改变下部结构体系传力路径的工作机理

为研究 BRB 改变下部结构传力路径的机理,本文以两种结构体系为研究对象:体系 1 为双柱式墩体系,体系 2 为设置 BRB 的双柱式桥墩体系,BRB 为桁架单元。在两种体系的盖梁中心处施加一水平力 F,忽略结构自重作用,则两种体系桥墩的内力如图 1 所示。

体系 1 桥墩的内力平衡关系为:

$$F_2 = F/2 \tag{1}$$

$$M_1 = F_2 \times H/2 \tag{2}$$

$$F \times H = F_1 \times B + 2M_1 \tag{3}$$

体系 2 桥墩的内力平衡关系为:

$$F_6 \approx F_7 \approx (F - F_3 \times \cos\alpha)/2 \quad (4)$$

$$M_2 \approx M_3 \approx F_6 \times H/2 \quad (5)$$

$$F \times H = F_5 \times B + 2M_2 \quad (6)$$

式(1)～(6)及图 1 中：F_1、F_4、F_5 为桥墩轴力；F_2、F_6、F_7 为桥墩剪力；F_3 为 BRB 内力；M_1、M_2、M_3 为墩底弯矩；α 为 BRB 与水平面的夹角；H 为桥墩高度；B 为桥墩横向中心距。

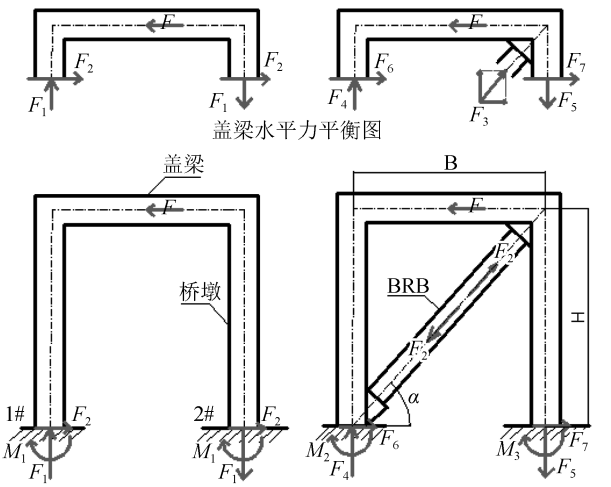


图 1　各体系内力图

Fig.1　Internal force diagram of each system

对比式(1)与式(4)，在同一水平力 F 作用下，由于 BRB 轴向力的贡献，$F_2 > F_6$，故 $M_2 < M_1$，即因 BRB 将部分水平力直接传至墩底，导致体系 2 的墩身剪力与墩底弯矩均小于体系 1。对比式(3)与式(6)，因 $M_2 < M_1$，故 $F_5 > F_1$，也即 BRB 的存在将增大体系 2 墩身轴力分量的改变量。对于双柱式桥墩体系，设置 BRB 后上部结构的惯性力在桥墩中分布规律将发生改变，墩身剪力、弯矩将减小，墩身轴力改变量将增大。即以较大的墩身轴力改变量换取较小的墩底弯矩、剪力。

2　工程案例概况

2.1　桥梁概况

以某 3×30 m 公路高架桥为研究背景，采用先简支后连续施工方法，主梁采用预应力混凝土分离式小箱梁。桥面宽度为 17.5 m，梁高为 1.6 m。下部结构为 ϕ 1.2 m的双柱墩，墩高 18 m。倒 T 形盖梁，盖梁高度 1.8 m。支座采用 GJZF4 矩形板式橡胶支座，规格为 700 mm × 700 mm。基础采用 4ϕ1.5 m的钻孔灌注桩基础，桩长 17 m。桥址区工程场地类别为Ⅱ类，地震设防烈度Ⅷ度，地震峰值加速度为 0.25g，场地特征周期为 0.45 s。

2.2　动力计算模型

采用有限元软件 MIDAS/CIVIL 建立全桥空间动力有限元计算建模(图 2)。模型中主梁、桥墩、桩基础、横系梁均采用空间梁单元模拟，板式橡胶支座采用线性弹簧单元模拟，考虑地基土的柔性效应，基础弹簧刚度按采用“m”法[13]计算，桩身底部采用固结处理。BRB 采用双线性模型模拟。二期恒载采用质量单元模拟，均匀施加在主梁上。计算模型中基本假设如下：(1)桥墩保持弹性；(2)不考虑支座摩擦滑动效应。

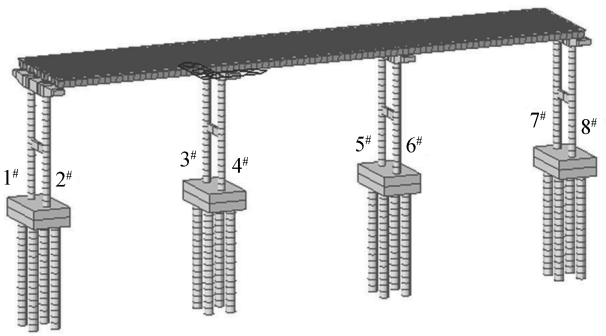


图 2　全桥空间动力分析模型

Fig.2　Spatial dynamic analysis model of full bridge

地震波采用该桥址处 50 年超越概率为 2% 的 3 条 E2 安评波，水平地震动强度 PGA 为 0.38g。其中一条典型地震波见图 3。

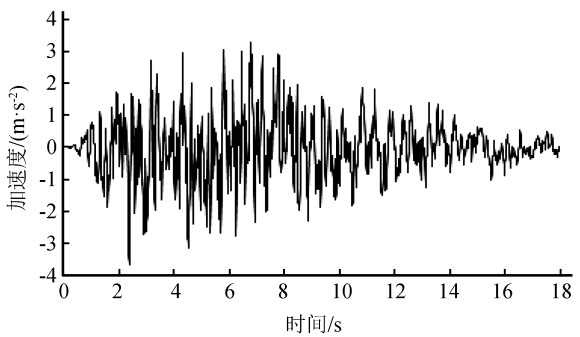


图 3　E2 地震典型安评波

Fig.3　Typical seismic wave of E2 earthquake

3　BRB 布置方式对桥梁地震反应的影响机理

为了研究 BRB 布置方式对下部结构地震反应的影响机理，本文设计了两种 BRB 的布置方式(图 4)及 4 种工况。各工况具体如下：

工况一：BRB 双单斜撑布置，且进入屈服状态；

工况二：BRB 双 V 撑布置，且进入屈服状态；

工况三：BRB 双单斜撑布置，且始终保持弹性状态；

工况四：BRB 双 V 撑布置，且始终保持弹性状态。

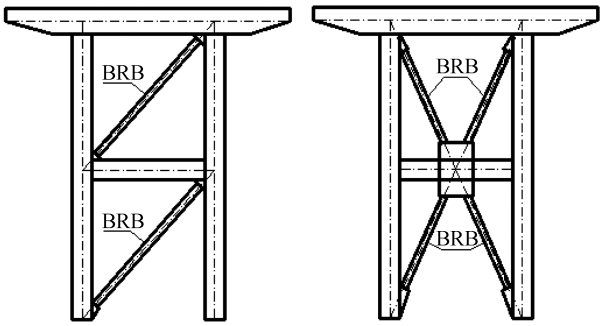


图 4 BRB 布置图

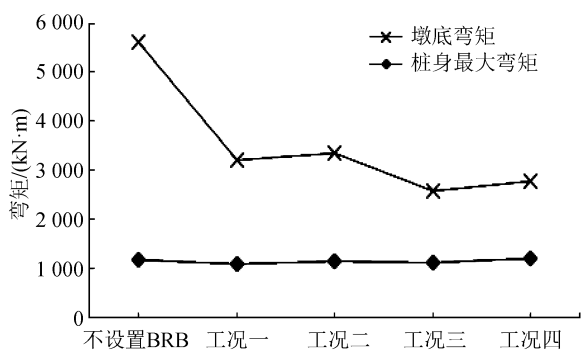
Fig.4 BRB layout drawing

其中工况一与工况三 BRB 的等效刚度为 2.06×10^5 kN/m，工况二与工况四 BRB 的等效刚度为 2.10×10^5 kN/m。

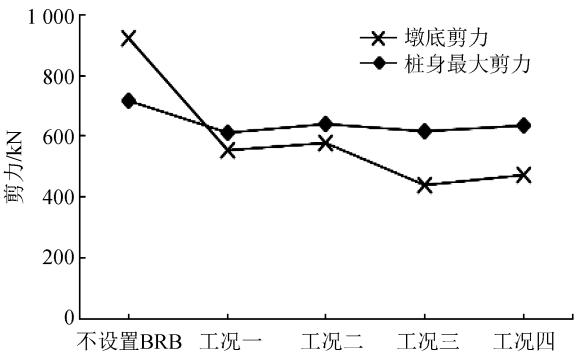
地震反应分析时，沿桥横向输入 3 条地震安评波进行非线性时程反应分析，结构的响应值取 3 条安评波地震反应的最大值。各工况作用下，3# 桥墩及桩基础控制截面的内力计算结果见图 5。

由图 5 的计算结果可知：

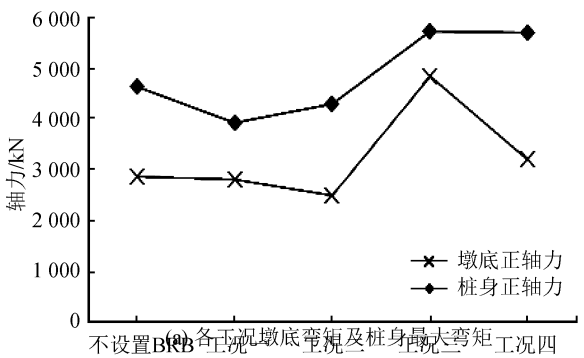
(1) BRB 双单斜撑布置时，在工况三 BRB 保持弹性的状态下，此时 BRB 仅靠改变下部结构的传力路径来影响结构的地震反应，与不设置 BRB 工况比



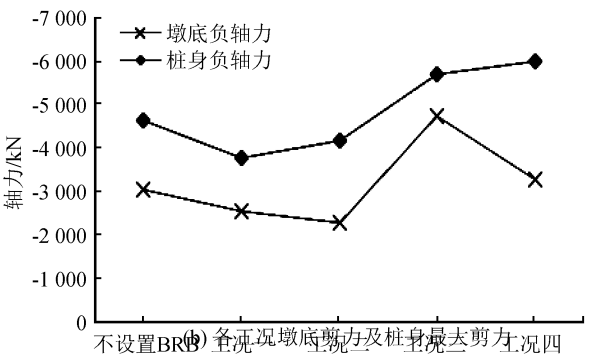
(a) 各工况墩底弯矩及桩身最大弯矩



(b) 各工况墩底剪力及桩身最大剪力



(c) 各工况墩底及桩身正轴力



(d) 各工况墩底及桩身负轴力

图 5 3# 桥墩及桩基础控制截面的内力计算结果

Fig.5 Calculation results of internal force in the control section of 3# bridge pier and pile foundation

较，墩底弯矩与剪力均降低了 50%左右，桩身弯矩变化不大，桩身剪力降低了 14%，桥墩及桩基础轴力分别增加了 56%和 23%。

(2) BRB 双单斜撑布置时，在工况一 BRB 进入屈服状态下，此时 BRB 通过改变下部结构的传力路径及滞回耗能双重机制影响结构的地震反应。与工况三比较，墩底弯矩和剪力分别增加了 10%和 12%，桥墩及桩身轴力分别减小了 72%、42%。

(3) BRB 双 V 撑布置时，工况二与工况四的计算结果与 BRB 双单斜撑布置时的规律基本一致。但双 V 撑的布置方式减震效果不如双单斜撑。

(4) 以上算例计算结果表明：对于设置 BRB 的双柱式桥墩，当 BRB 未屈服时，可以通过其轴向刚度改变结构体系的传递路径，即以较大的墩身轴力改变量换取较小的墩底弯矩及剪力；在 BRB 屈服的情况下，可因其耗能作用降低墩身的轴力改变量，使其减震效果达到最佳状态。

4 BRB 等效截面积对桥梁地震反应的影响规律

BRB 等效刚度为 $K=EA/L$，屈服力为 $F=\sigma\times A$。式中：E 为内芯的弹性模量；A 为等效截面

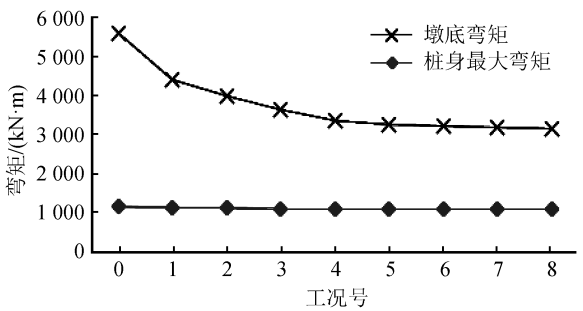
积；L 为计算长度；σ 为内芯的屈服强度。当仅改变 BRB 的等效截面积时，BRB 的刚度和屈服力均同时发生变化，因此 BRB 的等效截面积是影响其在双柱式桥墩抗震体系中减震性能的重要参数。

为研究 BRB 等效截面积对结构抗震性能的影响，设置了 8 个工况进行对比分析，BRB 采用图 4 中的双单斜撑布置方式。各工况 BRB 的参数取值如表 1 所列，相应的结构地震反应见图 6，各工况 BRB 均已进入屈服，其中工况 0 为不设置 BRB 的工况。

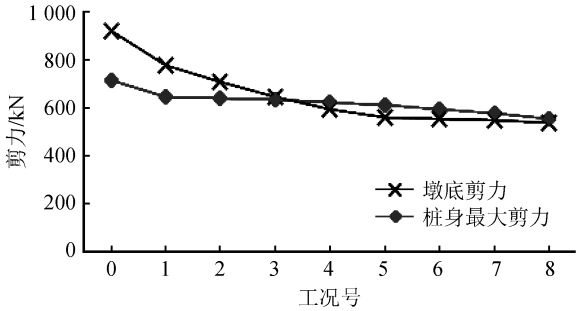
表 1　各工况 BRB 力学参数取值

Table 1　Mechanical parameters values of BRB under different conditions

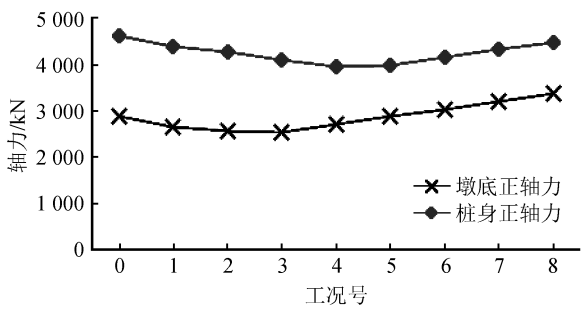
工况	A/mm²	σ/MPa	F/kN	K/(kN·m⁻¹)
1	2 000	120	240	5.72E4
2	3 000	120	360	8.58E4
3	4 000	120	480	1.14E5
4	5 000	120	600	1.43E5
5	6 000	120	720	1.71E5
6	7 000	120	840	2.01E5
7	8 000	120	960	2.28E5
8	9 000	120	1 080	2.57E5



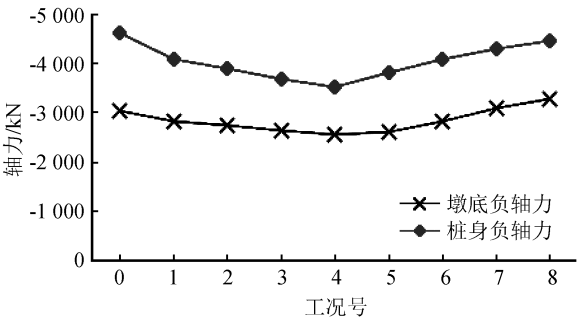
(a) 各工况墩底弯矩及桩身最大弯矩



(b) 各工况墩底剪力及桩身最大剪力



(c) 各工况墩底及桩身正轴力



(d) 各工况墩底及桩身负轴力

图 6　各工况 BRB 的地震反应

Fig.6　Seismic response of BRB under different conditions

由图 6 的计算结果可知：

(1) 针对具体工程，当 BRB 内芯屈服应力一定时，其等效截面积 A 对设置 BRB 的双柱式桥墩工作机理有较大影响。当 A 取值较大时，结构体系以 BRB 改变结构地震力传力路径为主导因素，墩底内力降低显著，但墩身轴力改变量较大。

(2) 对于本文算例，工况 4 为其最佳减震方案。此时墩底弯矩、剪力的减震率分别为 40%、35%，桥墩及桩身轴力的减震率为 15%、23%。可见在双柱式桥墩中合理设置 BRB 并取其最优力学参数，可有效改善桥梁下部结构的抗震性能。

5　结论

本文以设置 BRB 的双柱式桥墩体系为研究对象，系统分析了上部结构的惯性力在该体系中的传递机理；并以某 3×30 m 公路高架桥为工程背景，采用非线性时程反应分析法研究了 BRB 的设置方式及参数取值对桥梁地震反应的影响规律。研究结论如下：

(1) 双柱式桥墩横桥向设置 BRB 后其抗震体系的传力路径将发生改变。若 BRB 未屈服，BRB 主要以改变惯性力传递路径的方式工作，其传递荷载能力与 BRB 轴向刚度大小有关。若 BRB 屈服，BRB 将以改变惯性力传递路径与耗能减震的双重方式共同工作。

(2) 双柱式桥墩横桥向设置 BRB 且其未屈服时，因惯性力传递路径改变，墩柱将以较大的墩身轴力改变量换取较小的墩底弯矩及剪力。当 BRB 屈

服后,可充分利用 BRB 的滞回耗能降低墩身的轴力改变量,使其减震效果达到最佳状态。

(3) 双柱式桥墩横桥向设置 BRB 是一种较为有效的减震体系,但其减震效果与 BRB 具体布置方式及力学参数取值有关。

(4) 对于本文算例工程,BRB 的布置方式中双单斜撑方案优于双 V 撑方案。当采用双单斜撑方案且 BRB 在力学参数取值最优的条件下,墩底弯矩、剪力减震率分别为 40%、35%,墩底及桩身轴力的减震率为 15%、23%。

参考文献(References)

[1] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松.汶川大地震公路桥梁震害分析与对策[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1377-1387.
ZHUANG Weilin,LIU Zhenyu,JIANG Jinsong.Seismic Damage Analysis and Countermeasures of Highway Bridges in Wenchuan Earthquake[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(7):1377-1387.

[2] 王东升,郭迅,孙治国,等.汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J].地震工程与工程振动,2009,29(3):84-94.
WANG Dongsheng, GUO Xun, SUN Zhiguo, et al. Damage to Highway Bridges During Wenchuan Earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2009,29(3):84-94.

[3] 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.

[4] VAGAS R,BRUNEAU M.Analytical Response and Design of Buildings with Metallic Structural Fuse. Ⅰ[J].Journal of Structural Engineering,ASCE,2009,135(4):386-393.

[5] VAGAS R, BRUNEAU M. Experimental Response of Buildings Designed with Metallic Structural Fuse. Ⅱ[J].Journal of Structural Engineering,ASCE,2009,135(4):394-403.

[6] EI-BAHEY S,BRUNAEU M.Bridge Piers with Structural Fuses and Bi-steel Colums. Ⅰ: Experimental Testing[J].Journal of Bridge Engineering,ASCE,2011,17(1):25-35.

[7] EL-BAHEY S, BRUNEAU M. Bridge Piers with Structural Fuses and Bi-steel Columns. Ⅱ: Analytical Investigation[J]. Journal of Bridge Engineering,ASCE,2012,17(1):36-46.

[8] WANG Yuandong,ASCE S M,LUIS Ibarra,et al.Seismic Retrofit of a Three-Span RC Bridge with Buckling-Restrained Braces[J].Journal of Bridge,2016,21(7):04016073.

[9] WEI Xiaone,BRUNEAU Michel,ASCE F.Case Study on Applications of Structural Fuses in Bridge Bents[J].Journal of Bridge Engineering,2016,21(7):05016004.

[10] 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.
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.

[11] 华承俊.桥梁排架结构地震破坏机理及损伤控制方法[D].大连:大连海事大学,2015.
HUA Chengjun.Earthquake Damage Mechanism and Damage Control Method for RC Bridge Bents[D].Dalian:Dalian Maritime University,2015.

[12] 周云.防屈曲耗能支撑结构设计与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
ZHOU Yun. Structure Design and Application of Buckling-restrained Brace[M].Beijing:China Architecture & Building Press,2007.

[13] 公路桥梁抗震设计细则:JTG/T B02-01-2008[S].北京:人民交通出版社,2008.
Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges: JTG/T B02-01-2008[S].Beijing:China Communications Press,2008.