

设置 BRB 的双柱式桥墩弹塑性地震反应分析*

刘春城, 杨爱全, 邢爽
(东北电力大学建筑工程学院 吉林, 132012)

摘要 为研究防屈曲支撑(buckling-restrained brace, 简称 BRB)对双柱式桥墩抗震性能的影响,在双柱式桥墩间设置 5 种 BRB 布置方案以提高桥墩的抗侧刚度,并与原桥墩对比研究其抗震性能。首先,进行桥墩拟静力分析,通过与文献试验数据对比,验证数值模拟方法的正确性;其次,开展桥墩的抗震性能研究,通过对 6 种模型在不同地震动(0.2g, 0.4g, 0.8g)作用下的非线性时程分析,得到桥墩的损伤、内力和变形计算结果。经对比研究,提出一种最佳的 BRB 布置方案。研究表明:双柱式桥墩设置 BRB 可以有效提高桥墩的抗侧刚度,减小桥墩在地震作用下的墩顶位移响应,降低桥墩的损伤,减少钢筋屈服和桥墩塑性铰区域,大幅减小墩底弯矩,但不同的 BRB 设置有时会导致墩底剪力有所增加。

关键词 双柱式桥墩;防屈曲支撑;非线性时程分析;抗侧刚度;抗震性能
中图分类号 TU311.3;TU352.1;TH17

引言

柱式桥墩是桥梁结构最常用的下部结构形式,而双柱式桥墩广泛应用于连续梁桥领域。在地震作用下,下部结构的破坏是导致桥梁垮塌的最直接原因,同时决定了桥梁能否继续使用。历次地震灾害表明,震后由于桥墩的破坏导致桥梁垮塌现象严重^[1-3]。因此,通过设置 BRB 技术来提高桥墩的抗震性能对于确保桥梁结构的抗震安全性至关重要。

Yoshino 等^[4]开展了 BRB 研究,提出了 BRB 的设计雏形。文献[5-6]提出了类似现代 BRB 的新型带套承压装置。文献[7]开展了设置 BRB 的非对称框架结构振动台试验和拟静力试验,发现设置 BRB 可以大幅减轻结构损伤的程度,可有效抑制结构的层间位移和扭转。El-Bahey 等^[8]将 BRB 引入桥梁双柱式桥墩来提高桥墩体系刚度,通过试验及数值模拟验证了利用 BRB 耗散能量使桥墩保持弹性的可行性。刘昕^[9]对设置 BRB 的双柱式桥墩抗震性能进行了研究,验证了在小震情况下,BRB 可有效减小桥墩的内力和变形,但会增加部分剪力,在减小桥墩最大塑性变形及控制残余应变角方面有明显效果。谢周村^[10]为克服震后桥墩残余位移大的问题,提出一种新型的设有防屈曲支撑的自复位桥墩,基

于 Opensees 平台建立模型,进行抗震性能研究。

目前,关于双柱式桥墩的抗震研究均为墩顶设置盖梁或系梁的桥墩结构,通过设置 BRB 对桥墩抗震起到一定的作用。笔者在此基础上进一步研究未设置盖梁,只考虑桥面系对双柱式桥墩横向刚度影响情况,提出 5 种 BRB 布置方案进行抗震性能研究,通过开展不同地震动作用下的非线性时程分析,研究 BRB 对双柱式桥梁抗震作用。提出一种最佳布置方案,为双柱式桥墩设置 BRB 提供参考。

1 有限元数值模拟验证

1.1 试验概况

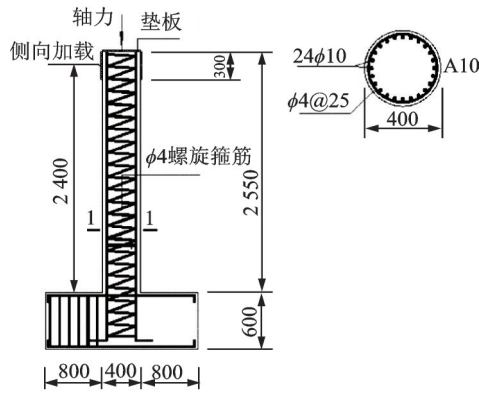
为了验证有限元数值模拟的正确性与可行性,笔者选取文献[11]的试验模型作为数值模拟算例。桥墩尺寸及有限元模型如图 1 所示。在 ABAQUS 软件中,混凝土采用实体 C3D8R 单元进行模拟,钢筋采用 T3D2 桁架单元进行模拟。

混凝土及钢筋的本构分别采用文献[12]规定的混凝土本构关系及钢筋双折线本构模型。

1.2 模型验证

有限元模型采用与文献[11]相同的控制方案进行控制,图 2 为试验加载历程^[11]。其中: F_t 为屈服荷

* 国家自然科学基金资助项目(51908106)
收稿日期:2021-07-21;修回日期:2021-09-07



(a) 桥墩尺寸(单位: mm)
(a) Bridge pier dimensions(unit: mm)



(b) 有限元模型
(b) Finite element model

图 1 桥墩尺寸及有限元模型

Fig.1 Bridge pier dimensions and finite element model

载; Δ_y 为屈服位移。图 3 为滞回曲线对比。图 4 为骨架曲线对比。可见,滞回曲线、骨架曲线计算值与试验值吻合较好。从试件的加载到屈服,从弹性阶段到塑性阶段,整个过程模拟效果较好。

图 5 为桥墩破坏形态对比^[13]。通过 ABAQUS 软件模拟得到桥墩的受拉损伤云图,并与试验桥墩混凝土开裂情况进行对比,发现桥墩在初级破坏阶段、中度破坏阶段和最终破坏阶段的开裂及贯通高

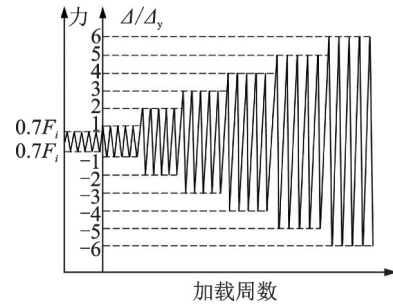


图 2 试验加载历程^[11]

Fig.2 Test loading history^[11]

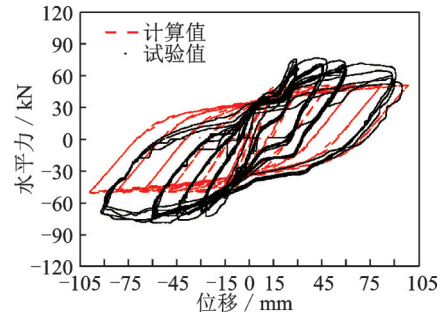


图 3 滞回曲线对比

Fig.3 Comparison of hysteresis curve

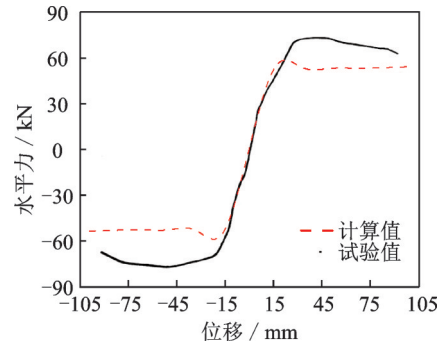


图 4 骨架曲线对比

Fig.4 Comparison of skeleton curve

度均与试验结果基本一致,验证了利用 ABAQUS 进行桥墩有限元数值模拟方法的正确性。

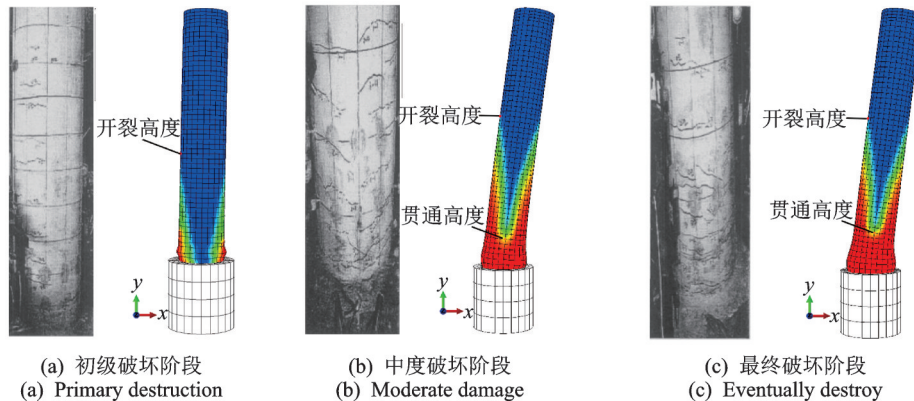


图 5 桥墩破坏形态对比^[13]

Fig.5 Comparison of experimental and analytical failure mode^[13]

2 双柱式桥墩有限元模型

以一连续梁桥为例,利用ABAQUS软件建立该桥1#双柱式桥墩精细化模型,采用C40混凝土以及R235和HRB335钢筋。由于实际桥梁的双柱式桥墩并未设置盖梁或横系梁,墩间直接通过支座及上部结构连接在一起,支座在墩顶可以沿顺桥向和横桥向发生相对转动,其余方向为固定约束,上部结构的刚度远大于桥墩,因此在有限元模型中墩顶简化设置1个刚度较大的横梁与2个桥墩绑定约束,横梁的自重等于桥墩承受的上部结构竖向荷载。双柱式桥墩有限元模型及BRB示意图如图6所示。

BRB滞回性能曲线如图7所示。图7(b)中: N_{ysc} 为防屈曲支撑的屈服承载力; k 为防屈曲支撑线

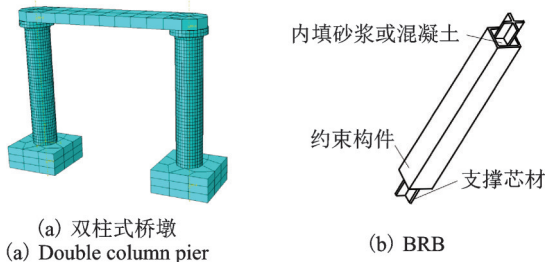


图6 双柱式桥墩有限元模型及BRB示意图
Fig.6 Finite element model of double column bridge pier and BRB schematic

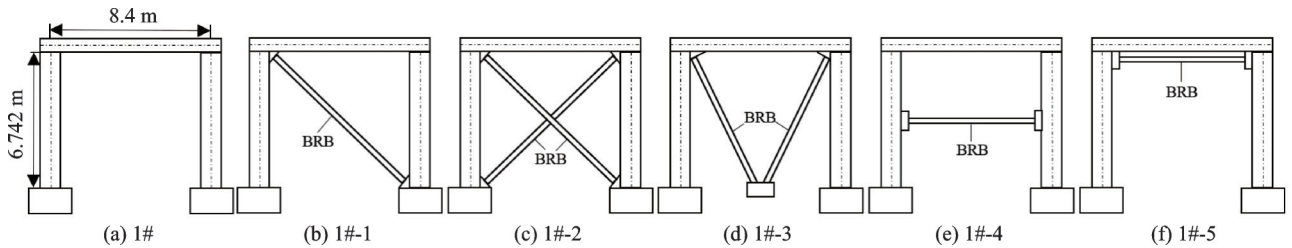


图8 BRB布置方案
Fig.8 BRB layout drawing

3 地震波选取方法

3.1 自振特性分析

结构的自振频率及振型不仅能够较好地反应出结构的动力特性,更能直观地反应出结构的刚度特征,对于结构的抗震设防有着重要的意义^[20]。同时,应用结构的自振周期作为选取地震波的控制参数,故首先对模型进行自振特性分析。

6种方案横向一阶自振特性数据如表2所示。由数据可知,1#-1~1#-3方案的自振频率均

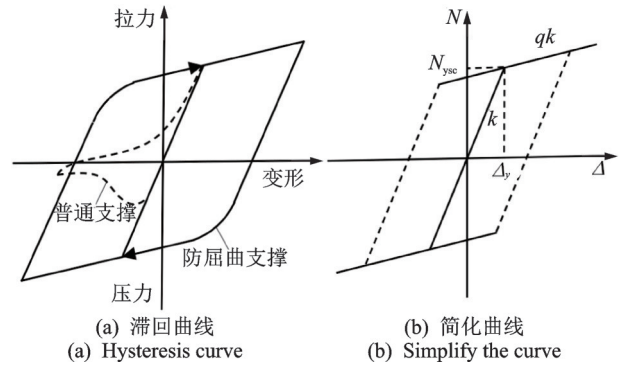


图7 滞回性能曲线

Fig.7 Hysteresis performance

弹性刚度; Δ_y 为防屈曲支撑由弹性转化为塑性时的位移; q 为钢材强化系数,取0.01。BRB的本构关系参照图7(b)。参考文献[14-19], A_1 一般取值为0.000 2~0.015 m^2 。笔者采用低屈服点钢Q160某TJ防屈曲支撑类型,BRB参数^[9]如表1所示。为了研究不同BRB布置方案对桥墩抗震性能的影响,故设置5种布置方案。图8为BRB布置方案,其中,1#为双柱式桥墩实例。

表1 BRB参数^[9]

Tab.1 Parameters of buckling-restrained brace^[9]

屈服应力/MPa	极限应力/MPa	等效截面面积/ mm^2
129.6	355.6	7 700

有明显提升,BRB有效提高了双柱式桥墩的抗侧刚度,1#-4,1#-5方案没有明显变化。可见,1#-2变化最为明显,故推测1#-2方案是最优方案。

表2 自振特性数据

Tab.2 Free vibration characteristics data sheet

方案编号	1#	1#-1	1#-2	1#-3	1#-4	1#-5
自振频率/Hz	3.03	3.42	3.76	3.36	3.04	3.03
自振周期/s	0.33	0.29	0.27	0.30	0.33	0.33

3.2 选取地震波

笔者选择桥墩所处场地抗震设防烈度为 7 度,基本地震动设计峰值加速度为 0.1g,设计反应谱的特征周期为 0.35 s,依据文献[21]得到反应谱如图 9 所示。

由于缺乏相关经验以及数据,一些学者在地震波的选用上选择各种经典波,不能正确反映目标反应谱的特征,对结构造成的影响会有很多差异。因此,对于不同场地不同的结构类型不能直接选取各经典波进行时程分析^[22]。

笔者以目标反应谱为依据,分别选取了 1966 年 Parkfield 地震 Cholame-Shandon Array#12 台站记录、1971 年 San Fernando 地震 Cedar Springs_Allen Ranch 台站记录以及 1971 年 San Fernando 地震

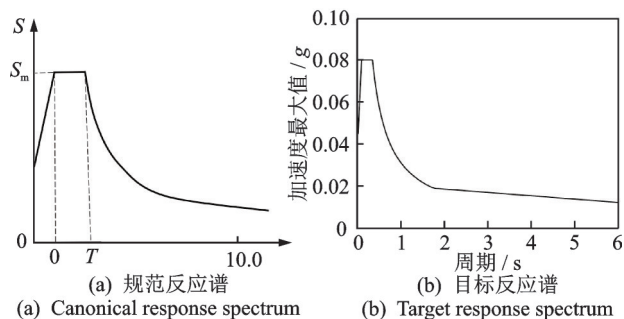


图 9 反应谱
Fig.9 Response spectrum

LA-Hollywood Stor FF 台站记录,并分别命名为 S_1 , S_2 和 S_3 ,同时生成一条人工波。图 10 为地震波。

天然波和人工波反应谱与目标反应谱对比如图 11 所示。可见,所选地震波的反应谱与目标反应谱拟合情况较好。

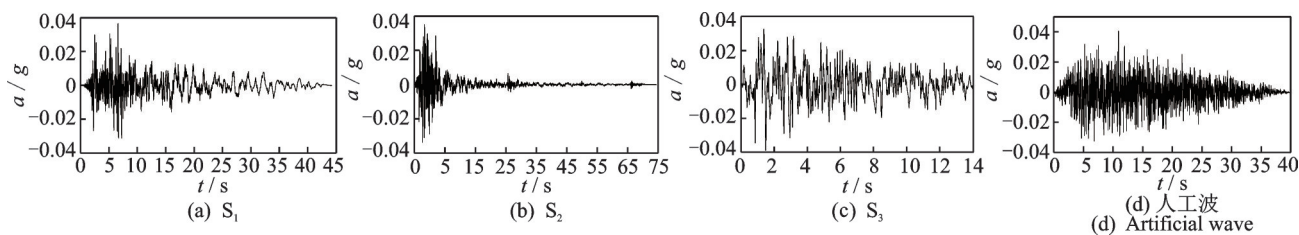


图 10 地震波
Fig.10 Seismic wave

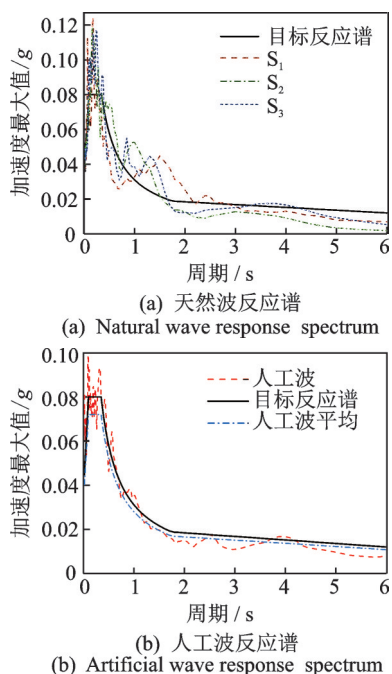


图 11 天然波和人工波反应谱与目标反应谱对比
Fig.11 Comparison of natural wave and artificial wave response spectrum with target response spectrum

4 双柱式桥墩地震反应分析

利用 ABAQUS 软件分别对不同布置方案进行 0.2g, 0.4g, 0.8g 地震作用下的非线性时程分析,研究 BRB 对双柱式桥墩抗震性能的影响,提出最佳的 BRB 设置方案。

4.1 桥墩损伤与刚度退化

以 0.2g S_2 地震作用为例,图 12 为桥墩地震损伤云图。图 12 中,红色部位为损伤最严重的区域,绿色次之,蓝色为无损伤区域。其中,1#-2 方案桥墩损伤最小,1#-1 与 1#-3 方案次之,与自振特性分析所得推论一致。由于 BRB 与双柱式桥墩的连接,使连接部位得到增强,有效降低了该部分的损伤,但使部分方案混凝土的开裂向外延伸,损伤区域高度有轻微增加,损伤破坏程度远小于 1#。

4.2 墩顶峰值位移

图 13 为位移时程响应曲线。图 14 为峰值位移对比曲线。由图可知,设置 BRB 的桥墩,在地震作

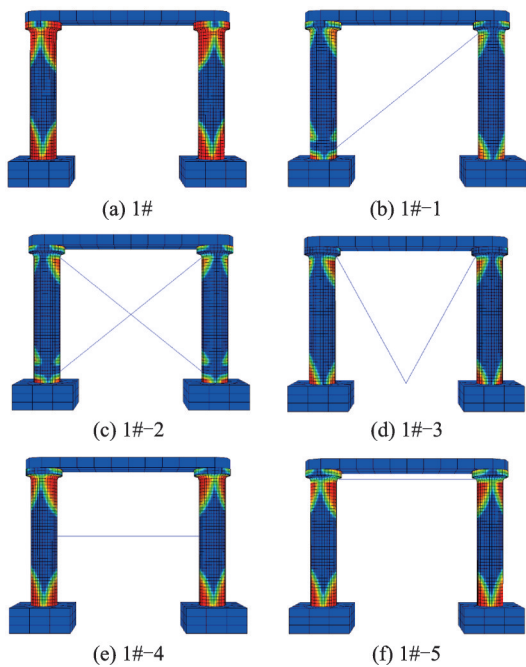


图12 桥墩地震损伤云图

Fig.12 Earthquake damage cloud map of bridge piers

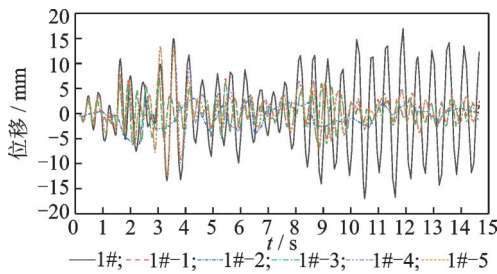


图13 位移时程响应曲线

Fig.13 Displacement time history response curve

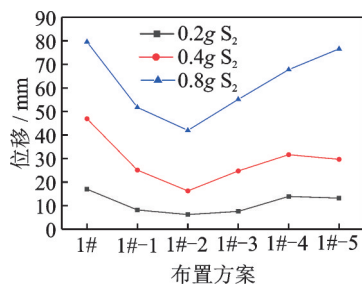


图14 峰值位移对比曲线

Fig.14 Comparative curve of peak displacement

用下的位移响应有了明显减弱。其中:1#-2方案对于墩顶位移的减小率最大;0.2g,0.4g和0.8g地震作用下分别减小约67.25%,66.69%和58.66%;而1#-4,1#-5方案减小的效果较差。

4.3 墩底弯矩峰值

图15为在0.2g S₂地震作用下双柱式桥墩不同

方案的弯矩时程响应曲线。由图可知,1#-2方案对于墩底弯矩幅值的减小程度最为明显,而1#-4,1#-5两种方案BRB均为水平布置且双柱间横梁的刚度选大于BRB,BRB所起作用较小,故曲线与1#相似且吻合度较高。

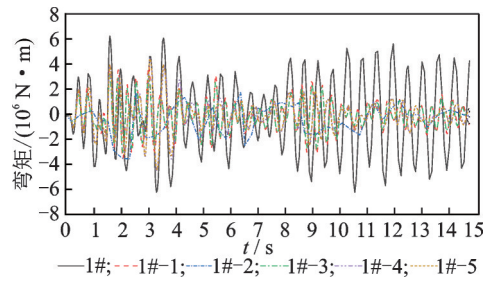


图15 弯矩时程响应曲线

Fig.15 Bending moment time history response curve

图16为桥墩墩底峰值弯矩对比。可以发现:1#-2方案对于地震作用下墩底弯矩的减弱效果最好,而图中恰好出现2种1#-3方案优于1#-2方案的个例,但效果并不显著。分析数据可知,在3种峰值加速度作用下,1#-2布置方案对于墩底峰值弯矩的减弱效果均最佳,减弱效果高达48.80%,40.79%和34.26%,反映了图15所示情况。

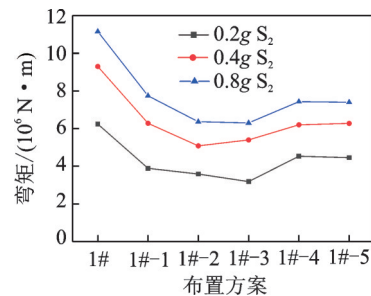


图16 峰值弯矩对比

Fig.16 Comparison of peak bending moment

4.4 墩底峰值剪力

图17为0.2g S₂地震作用下墩底剪力时程响应曲线。可以发现,1#-1,1#-2两种方案的地震响应比1#及其他方案大。图18为峰值剪力对比。图中:1#-1的峰值最高也最为明显,在不同地震作用下的增幅达到了31.26%,29.73%和33.89%;1#-2次之,其余方案除个别出现了轻微加重,墩底剪力情况对于墩底峰值剪力总体都减弱。部分方案墩底剪力加重的原因在于BRB与墩底连接,将BRB的荷载最大程度传递给了墩底,一定程度上增加了墩底的剪力。

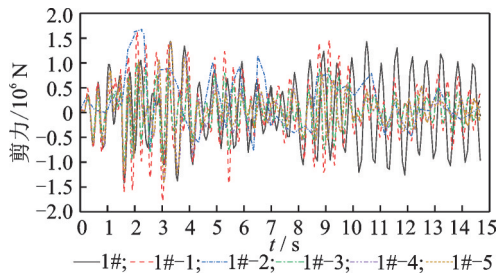


图 17 剪力时程响应曲线

Fig.17 Shear time history response curve

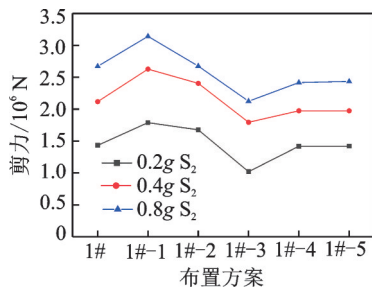


图 18 峰值剪力对比

Fig.18 Comparison of peak shear force

4.5 桥墩屈服情况

表 3 为 0.2g 地震动作用下桥墩屈服情况。其中:1#的桥墩全部屈服,前 3 种 BRB 布置方案基本保证了桥墩处于弹性工作状态,使 BRB 先于结构进入屈服,对结构起到了类似“保险丝”的保护作用;1#-2 方案 BRB 与结构都未发生屈服,说明了此布置方案具有较优的性能。

在 0.4g 及 0.8g 地震作用下,之前未屈服的桥墩及 BRB 都陆续进入屈服状态,1#-4 和 1#-5 方案桥墩均屈服而 BRB 均未屈服,说明 BRB 未起到理想作用。

表 3 0.2g 地震动作用下桥墩屈服情况

Tab.3 Yield of piers under 0.2g ground motion

方案编号	桥墩结构	S ₁	S ₂	S ₃	人工波
1#	墩柱	屈服	屈服	屈服	屈服
1#-1	墩柱	未屈服	未屈服	屈服	未屈服
	BRB	屈服	未屈服	屈服	屈服
1#-2	墩柱	未屈服	未屈服	未屈服	未屈服
	BRB	未屈服	未屈服	未屈服	未屈服
1#-3	墩柱	未屈服	未屈服	屈服	未屈服
	BRB	未屈服	未屈服	屈服	屈服
1#-4	墩柱	屈服	未屈服	屈服	屈服
	BRB	未屈服	未屈服	未屈服	未屈服
1#-5	墩柱	屈服	未屈服	屈服	屈服
	BRB	未屈服	未屈服	未屈服	未屈服

图 19 为 0.4g S₂ 地震作用下的钢筋等效塑性应变。灰色表示钢筋屈服发生的区域(即塑性铰产生区域)。钢筋等效塑性应变如表 4 所示。虽然在 0.4g 地震作用下,桥墩及 BRB 均进入屈服,但由于 BRB 的作用使桥墩整体进入塑性的区域减小,屈服程度减弱。1#-1~1#-3 方案均使桥墩顶部由 1# 的塑性状态转为弹性状态,即 BRB 可以有效保护结构,起到了提高桥墩抗震性能的作用。

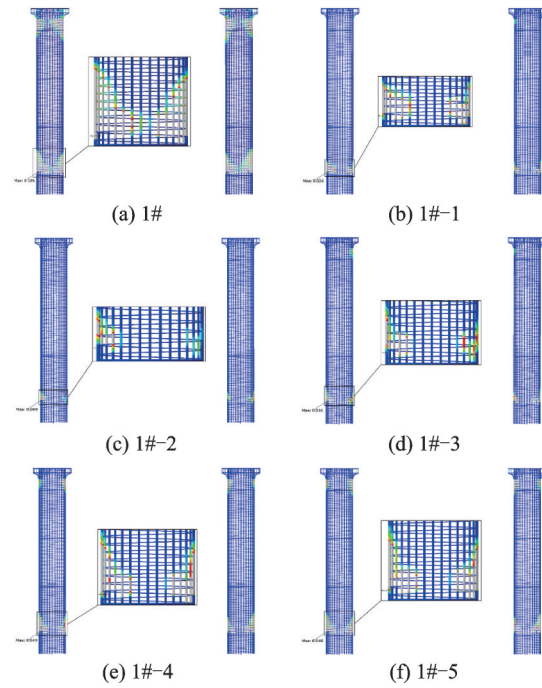


图 19 钢筋等效塑性应变

Fig.19 Rebar equivalent plastic strain diagram

表 4 钢筋等效塑性应变

Tab.4 Rebar equivalent plastic strain table

方案编号	1#	1#-1	1#-2	1#-3	1#-4	1#-5
塑性应变	0.185	0.026	0.009	0.016	0.049	0.048

5 结 论

1) 设置 BRB 增大了双柱式桥墩的横向抗侧刚度,减小桥墩在地震作用下的地震响应,有效降低桥墩的损伤。

2) 设置 BRB 可以明显降低桥墩在地震作用下的墩顶位移和墩底弯矩。由于部分 BRB 设置方案连接在桥墩墩底,使桥墩墩底剪力增大,但桥墩整体的损伤及地震响应减弱。在实际工程中可以考虑将 BRB 连接至基础,避免墩底剪力增大。

3) 1#-4, 1#-5 方案的 BRB 水平连接在桥墩之间,而桥墩横梁设置的刚度远大于桥墩,BRB 未起

到理想作用,实际工程中应予以避免。

4) 通过对不同布置方案抗震性能对比研究发现:1#-2方案减震效果最优;1#-1和1#-3减震效果一般;1#-4和1#-5减震效果最差。

参 考 文 献

- [1] 庄卫林,刘振宇,蒋劲松.汶川大地震公路桥梁震害分析及对策[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1377-1387.
ZHUANG Weilin, LIU Zhenyu, JIANG Jinsong. Earthquake-induced damage analysis of highway bridges in Wenchuan earthquake and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1377-1387.(in Chinese)
- [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]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(3): 84-94.(in Chinese)
- [3] 石岩,李军,秦洪果,等.桥梁双柱式排架墩抗震性能研究进展述评[J].中国公路学报,2021,34(2):134-154.
SHI Yan, LI Jun, QIN Hongguo, et al. Review on seismic performance of bridge double-column bents[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 134-154.(in Chinese)
- [4] YOSHINO T, KARINO Y. Experimental study on shear wall with braces: part 2[C]//Summaries of Technical Papers of Annual Meeting. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1971: 403-404.
- [5] SRIDHARA B N. Sleeved column-as a basic compression member[C]//International Conference on Steel Structures & Space Frames. Singapore: [s. n.], 1990: 181-188.
- [6] PRASAD B. Experimental investigation of sleeved column[C]//33rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Dallas: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992: 2534.
- [7] KIM J, CHOI H. Behavior and design of structures with buckling-restrained braces[J]. Engineering Structures, 2004, 26(6): 693-706.
- [8] 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.
- [9] 刘昕.设置防屈曲支撑双柱式桥墩抗震性能研究[D].大连:大连海事大学,2013.
- [10] 谢周村.设置防屈曲支撑的自复位双柱墩抗震性能研究[D].西安:长安大学,2019.
- [11] 司炳君,李宏男,王东升,等.基于位移设计的钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究(I):拟静力试验[J].地震工程与工程振动,2008(1):123-129.
SI Bingjun, LI Hongnan, WANG Dongsheng, et al. Experimental evaluation of the seismic performance of reinforced concrete bridge piers designed on the basis of displacement (I): quasistatic test [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008(1): 123-129.(in Chinese)
- [12] GB 50011—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] 孙治国.基于ANSYS的桥梁极限承载力和滞回特性研究[D].大连:大连理工大学,2006.
- [14] KIGGINS S, UANG C M. Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system[J]. Engineering Structures, 2006, 28(11): 1525-1532.
- [15] SABELLI R, MAHIN S, CHANG C. Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces [J]. Engineering Structures, 2003, 25(5): 655-666.
- [16] XIE Q. State of the art of buckling-restrained braces in Asia [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(6): 727-748.
- [17] IWATA M, KATO T, WADA A. Buckling-restrained braces as hysteretic dampers[C]//Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas: Proceedings of the Third International Conference STESSA 2000. Montreal, Canada: CRC Press, 2000: 33-38.
- [18] IWATA M, MURAI M. Buckling-restrained brace using steel mortar planks, performance evaluation as a hysteretic damper [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(14): 1807-1826.
- [19] BLACK C J, MAKRIS N, AIKEN I D. Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(6): 880-894.
- [20] 薛宪政.斜拉桥地震响应分析及其抗震研究[D].大连:大连理工大学,2010.
- [21] JTG/T 2231-01—2020 公路桥梁抗震设计规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [22] 李治国.设置防屈曲支撑的双柱式桥墩抗震性能分析[D].南京:南京理工大学,2016.



第一作者简介:刘春城,男,1969年6月生,博士、教授。主要研究方向为桥梁抗震和工程结构防灾减灾。曾发表《山脉地形迎风面输电线路风偏响应特性》(《振动工程学报》2022年第35卷第4期)等论文。
E-mail: lccheng@neepu.edu.cn