

考虑轨道约束的连续梁拱桥地震反应 及减震控制研究

石岩,赵翔宇,焦应乾,刘云帅,张胶玲

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:以一座大跨度单线铁路连续梁拱桥为背景,建立了考虑轨道约束和相邻构件碰撞效应的动力分析模型;通过输入40组水平双向地震动记录进行非线性时程分析,探究轨道约束和拱肋对桥梁地震响应的影响,采用“减震榫-拉索限位器”与“自恢复耗能支撑(SCEDB)-屈曲约束支撑(BRB)”控制水平向地震反应,并对比两种组合减震控制系统的减震效果,研究了耗能支撑布置角度对主梁位移响应的的影响。结果表明:考虑轨道约束减小了主梁的位移响应;支撑总强度相等的情况下,“SCEDB-BRB”较之于“减震榫-拉索限位器”的减震效果更佳;当支撑布置角度在 40° ~ 45° 时,主梁位移较小,残余位移得到有效控制,结构可基本实现自复位。

关键词:连续梁拱桥;轨道约束;减隔震;地震反应;自复位性能

中图分类号:U442.55

文献标识码:A

Seismic response and control study of continuous beam arch bridges under track constraint

SHI Yan, ZHAO Xiangyu, JIAO Yingqian, LIU Yunshuai, ZHANG Jiaoling

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking a single track railway long span continuous beam arch bridge as the prototype structure, a dynamic analysis model considering the track constraint and pounding effect was established. To investigate the influence of track constraint and arch rib on the seismic response of bridge, 40 sets of bidirectional horizontal ground motion records were selected to conduct the nonlinear time history analysis. Two strategies were used to control the horizontal seismic response, one was the combination of steel energy absorber and cable restrainer (SEA-CR), the other was the combination of self-centering energy dissipation braces and bucking-restrained brace (SCEDB-BRB). Anti-vibration effect of the two vibration control systems was compared. Then, effect of layout of braces on displacement of girder was studied. Results indicate that the track constraint will reduce the displacement response of the girder. SCEDB-BRB has better damping effect than SEA-CR. The bridge is able to achieve self centering target when layout angle of braces ranges from 40° to 45° , the peak and residual displacement of girder can be controlled effectively.

Key words: continuous beam-arch bridge; track constraint effect; seismic isolation; seismic response; self-centering performance

收稿日期:2021-02-28; 修订日期:2021-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51908265)、红柳优秀青年人才资助计划(04-061810)

作者简介:石岩(1985-),男,博士,副教授,主要从事桥梁抗震研究. E-mail: syky86@163.com

引言

连续梁拱组合桥因其横向刚度大、跨越能力强以及造型优美而广泛应用于铁路桥梁中^[1-3]。近年来,国内学者围绕其动力响应问题开展了一些研究。黄艳等^[4]采用非线性弹簧单元模拟道床的纵向位移阻力关系,建立了桥梁与轨道一体化模型,分析了桥墩刚度相近和相差较大时道床阻力对桥梁的地震反应;谢旭等^[5]发现随着道床阻力系数增大,桥梁纵向自振频率也随之增大,且当道床阻力系数超过 10 kN/m 时,道床阻力系数增加对结构自振频率及地震响应影响较小;戴公连等^[6]对比了温度、活载和混凝土收缩徐变等作用下连续梁桥与梁拱组合桥上无缝线路纵向力的分布规律;刘正楠等^[7]分析了行波效应对有轨道约束和无轨道约束两种体系桥梁地震响应的影响。已有研究表明轨道约束可以降低桥梁的地震响应,但钢轨应力又与桥墩刚度有关,轨道约束不可忽略^[5,8]。可见,既有研究关注轨道约束效应对地震响应的影响较多,对连续梁拱桥与连续梁桥的差异及拱肋的影响等问题涉及较少。

目前,减隔震装置在建筑和公路桥梁中应用广泛,而铁路桥梁需要保证行车安全和稳定性,使其应用减隔震技术时需更加谨慎。另外,铁路震后的首要任务是在尽短的时间内恢复通车,这要求桥梁要满足地震损伤可控及具备被快速修复条件^[9]。因此,功能分离理念在铁路桥梁减隔震设计中得到较多关注,温留汉·黑沙等^[10]提出了摩擦支座提供竖向支撑,铅芯橡胶支座提供横向约束的减震系统,并通过振动台试验验证了减震系统的有效性;李爱丽等^[11]提出了“活动盆式支座-减震樨”的高速铁路桥梁减震系统,通过数值分析和试验研究表明可以取得较好的减震效果;石岩等^[12,23]对“活动盆式支座-耗能支撑”和“活动盆式支座-减震樨-拉索限位器”两种减震体系在近断层地震动下的性能进行研究。以上研究提出了一些铁路桥梁的组合减隔震装置并验证了其有效性,但均未考虑轨道约束对减隔震桥梁抗震性能的影响。

本文以一座连续梁拱桥为研究对象,通过非线性动力时程分析,研究了轨道约束和拱肋对连续梁拱桥地震位移响应的影响,比较了“减震樨-拉索限位器”与“SCEDB-BRB”两种减震控制系统的减震效果,最后对耗能支撑的布置角度进行了优化设计。

1 工程概况及分析模型

1.1 工程概况

以一座跨径为(62+132+62)m的铁路连续梁拱桥为研究对象,其主梁采用单箱单室预应力混凝土连续梁,拱肋采用哑铃型截面的钢管混凝土,拱轴线为二次抛物线,跨中截面高3.5 m,其拱肋设计矢高为22 m,矢跨比为1/6。桥墩为双流线型圆端实体墩,净高9 m,全桥设14对吊杆,吊杆沿顺桥向间距8 m。0#和3#台设置有纵向和多向活动的球形钢支座GTQZ-Ⅲ-3 500 ZX(DX),1#墩顶安装有纵向和多向的球形钢支座GTQZ-Ⅲ-45 000 ZX(DX),2#墩顶安装有横向和固定的球形钢支座GTQZ-Ⅲ-45 000 HX(GD)。梁拱组合桥布置图如图1所示。

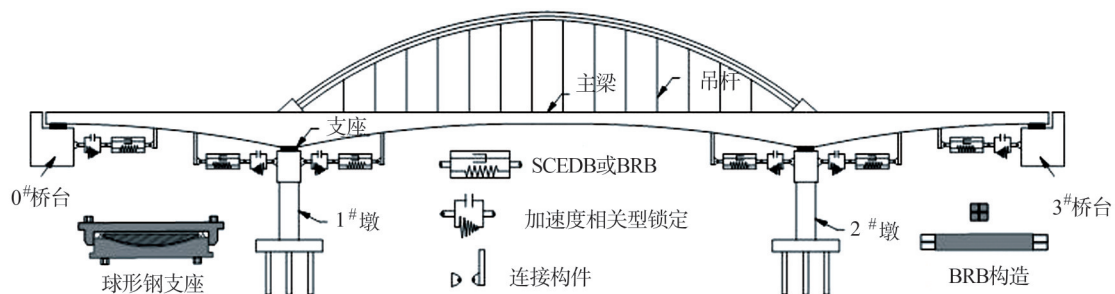


图1 大跨度铁路连续梁桥

Fig. 1 Long-span railway continuous beam-arch bridge

1.2 分析模型

基于OpenSees地震分析平台建立连续梁拱桥的动力分析模型,如图2所示。主梁、拱肋、吊杆以及钢轨用弹性梁柱单元模拟,桥墩采用纤维截面的非线性梁柱单元模拟,其中混凝土为Concrete01材料本构,其单

轴应力-应变关系采用 Kent-Scott-Park 的混凝土模型, 钢筋采用 Steel02 材料, 其应力-应变关系基于 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型; 线路阻力选用双线性本构模型 Steel01; 滑动支座选用 FlatSliderBearing 单元模拟; 1# 和 2# 桥墩上为钢挡块, 采用 Steel01 本构模型; 桥台处为钢筋混凝土挡块, 其应力-应变关系采用 Hysteretic Material 模拟, 挡块与主梁的碰撞均采用 ImpactMaterial 本构模型。墩底固结, 不考虑桩土相互作用。

为了讨论轨道约束效应、拱肋对连续梁拱桥动力特性和地震反应的影响, 以及不同类型减震控制系统的性能, 本文共采用了 6 种分析模型, 其基本特征见表 1。其中: 除模型 A 外, 其他模型都考虑了轨道约束效应, 6 种分析模型的上部结构总质量均相等。

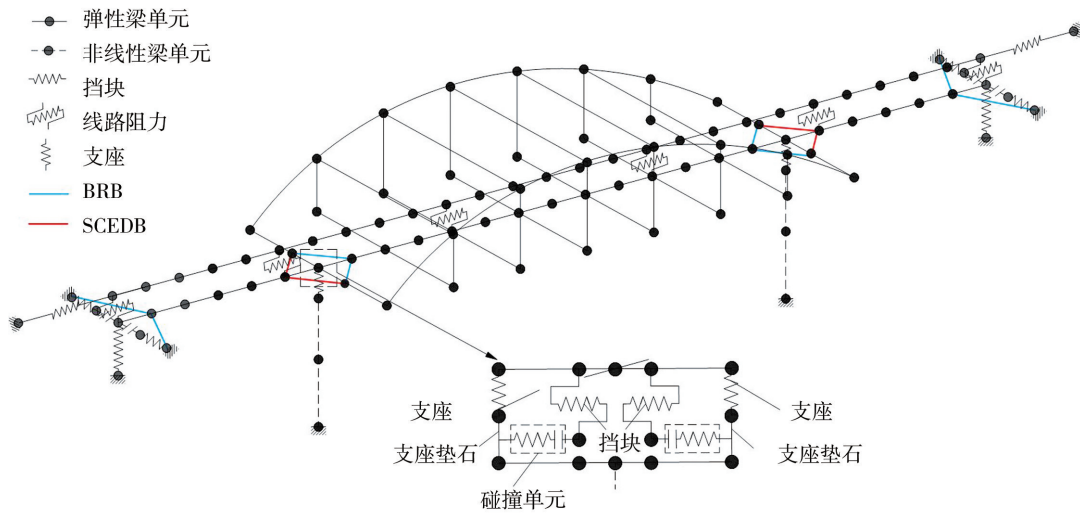


图 2 有限元模型图

Fig. 2 Finite-element model of prototype bridge

表 1 分析模型特征

Table 1 Characteristics of analysis models

模型	轨道约束	挡块约束	模型特征
A	无	无	连续梁拱桥
B	有	无	连续梁拱桥
C	有	无	连续梁拱桥(拱肋质量分配给主梁, 仅考虑拱肋刚度贡献)
D	有	无	连续梁桥(拱肋质量分配给主梁, 不考虑拱肋刚度贡献)
E	有	有	连续梁拱桥(减震系统采用“减震樨-拉索限位器”的组合)
F	有	有	连续梁拱桥(减震系统采用“SCEDB-BRB”的组合)

(1) 轨道约束效应

桥梁和钢轨之间连接单元的模拟是分析梁轨相互作用的关键, 模拟方式主要为非线性弹簧单元、抗弯杆件以及桁式杆件等^[13-15], 其中: 非线性弹簧来模拟纵向阻力的传力规律已经得到了国内众多学者的认同。轨道边界的约束条件是解决桥梁与路堤连接问题的关键, 文献[5]提出当路堤上轨道长度为 200 m 及以上时对结构的地震响应影响较小, 因此本文取 200 m 为路堤上轨道长度, 并把此长度内弹簧简化为单一弹簧来模拟桥梁与路堤的连接。FRYBA^[16]最早提出描述纵向阻力的弹簧模型, 其位移-阻力关系如图 3(a) 所示。连接弹簧的刚度由纵向阻力推导得出, 假设弹簧刚度为 k_{0c} ; 弹簧间距为 l_0 ; 梁轨相对位移为 μ ; 纵向阻力为 r ; 一个等效弹簧的纵向阻力总和为:

$$F_{yc} = k_{0c} \cdot \mu \tag{1}$$

非线性弹簧提供的纵向阻力总和为:

$$F'_{yc} = r \cdot l_0 \tag{2}$$

由 $F_{yc} = F'_{yc}$ 得弹簧纵向刚度 k_{0c} :

$$k_{oc} = r \cdot l_0 / \mu \tag{3}$$

在无上部荷载作用时小阻力扣件线路阻力根据《铁路无缝线路设计规范》的规定取 F_{yc} 为 15 kN/m, 屈服位移为 2 mm。由式(3)可得梁轨相对位移小于等于屈服位移时弹簧刚度取 7 500 kN/m, 当 μ 大于 2 mm 时, $k_c=0$ 。

(2)耗能支撑和支座

为了控制连续梁拱桥的地震反应,采用 BRB 和 SCEDB 作为水平耗能减震装置。BRB 芯材为钢材,截面为十字形,约束屈服段包在砂浆套筒中,SCEDB 核芯为形状记忆合金棒。SCEDB 自恢复耗能支撑的滞回模型呈旗帜型,其特点是在加载、卸载恢复至初始状态时,对应的残余位移为零,具有良好的自恢复性能,其恢复力曲线如图 3(b)所示。在本构关系中, α 表示屈服后刚度和初始刚度的比值(α_s 表示 SCEDB, α_b 表示 BRB), β 为耗能能力参数,反应了支撑耗能能力的大小, βF_{ys} 定义为支撑的自恢复力,文中 β 取文献[17-18]中采用的 0.95。BRB 本构采用经典的双线型滞回模型,如图 3(c)所示。GTQZ 球形钢支座采用理想弹塑性模型模拟,其初始刚度按 $k_{ohb}=\mu R/D_{yhb}$ 计算, μ 为滑动摩擦系数; R 为支座所承担的上部结构重力; D_{yhb} 为支座的屈服位移,如图 3(d)所示。文中分析模型为宏观模型,主要体现单元整体力学特性对结构的影响,故不考虑构造细节对于单元力学特性的影响。单元力学参数见表 2。

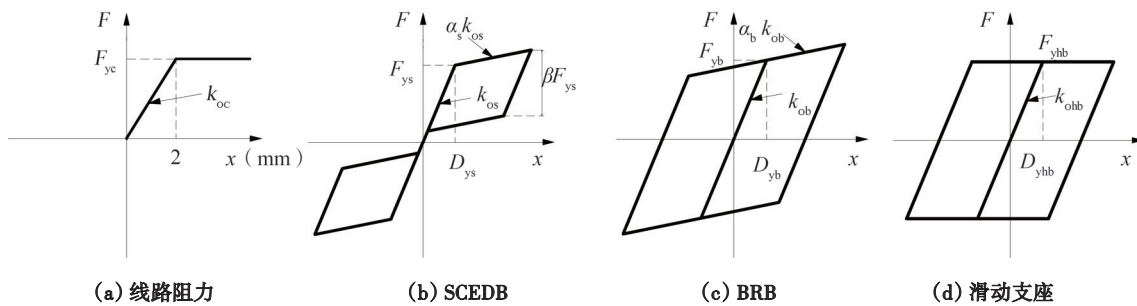


图 3 恢复力曲线

Fig. 3 Restoring force curve

表 2 单元力学特性参数

Table 2 Mechanical feature parameters of element

类型	$k_0/(kN \cdot m^{-1})$	$\alpha k_0/(kN \cdot m^{-1})$	F_y/kN	D_y/mm	材料本构/单元类型
支座(桥墩)	282 657	0	848	3	Flat Slider Bearing
支座(桥台)	33 159	0	99	3	Flat Slider Bearing
线路阻力	7 500	0	30	2	Steel01
屈曲约束支撑(BRB)	1 000 000	32 900	2 350	2.35	Steel01
自恢复耗能支撑(SCEDB)	1 000 000	32 900	2 350	2.35	Self Centering
减震棒	55 461	892	325	5.86	Steel01
拉索限位器	1 922 000	-	-	-	Elastic PP Gap

1.3 地震动记录

BAKER 等^[19]建立了广泛适用于交通领域结构动力分析的地震动记录集合,本文选取其地震动集合(SET#1B)中的 40 组 2 个水平分量的地震动记录。沿纵桥向输入垂直于断层的地震动分量(FN),沿横桥向输入平行于断层的地震动分量(FP),将 FN 的 PGA 调整为 0.3 g(设计地震);FP 按 FN 的调幅比例因子进行调幅后沿横桥向输入。

2 轨道约束的影响

铁路桥梁的轨道约束效应对减隔震装置的减震耗能作用可能起到限制作用。表 3 给出了考虑轨道约束效应(模型 A 和模型 B)对连续梁拱桥自振周期和振型特征的影响,可以看出:轨道约束对结构纵向动力特性

的影响较大,不考虑轨道约束模型(模型A)的第四阶振型为主梁沿纵桥向的刚体运动,而考虑轨道约束后该振型出现在第八阶,说明轨道约束给结构提供了一定的纵向刚度,使得结构沿纵桥向更不易发生振动。同时,轨道约束对结构横向变形的影响甚微,其原因在于轨道截面面积远小于主梁截面面积,其提供的横向刚度极其有限,可以忽略不计。

图4为模型A和模型B在40条双向地震动下主梁关键部位的峰值位移响应平均值,轨道约束对主梁沿横桥向的位移影响较小,而对主梁沿纵桥向的峰值位移有较大的约束作用,与表3中动力特性的结果一致。可以认为,考虑轨道约束降低了上部结构纵桥向的地震反应,对限制桥梁上部结构纵向位移是有利的。但是,考虑到地震动的随机性、道床摩阻力的离散型、边界条件和减震装置工作原理差异等实际情况,为更准确地分析铁路桥梁的地震反应,非常有必要考虑轨道约束的影响。

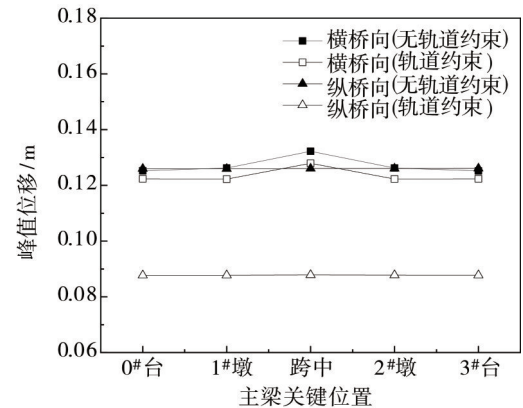


图4 主梁关键部位的峰值位移

Fig. 4 Peak displacement of key positions of girder

表3 轨道约束对自振特性的影响

Table 3 Effect of track constraints on self-vibration characteristics

模态	模型A:不考虑轨道约束		模型B:考虑轨道约束	
	T_A/s	振型特征	T_B/s	振型特征
1	2.32	拱肋对称一阶横弯	2.32	拱肋对称一阶横弯
2	1.34	拱肋反对称一阶横弯	1.34	拱肋反对称一阶横弯
3	1.05	主梁对称一阶横弯	1.05	主梁对称一阶横弯
4	0.76	主梁纵向平动	0.73	拱肋对称二阶横弯
5	0.73	拱肋对称二阶横弯	0.72	拱肋对称三阶横弯
6	0.72	拱肋对称三阶横弯	0.68	拱肋对称四阶横弯
7	0.68	拱肋对称四阶横弯	0.62	主梁反对称一阶横弯
8	0.62	主梁反对称一阶横弯	0.58	主梁纵向平动
9	0.51	拱肋反对称二阶横弯	0.51	拱肋反对称二阶横弯
10	0.48	拱肋对称五阶横弯	0.48	拱肋对称五阶横弯

3 拱肋对横向地震反应的影响

连续梁拱结构是连续梁的中跨上架设拱肋的结构体系,拱肋对其竖向刚度和承载力提升较大,纵桥向与主梁整体性较好,但拱肋沿横桥向的刚度相对较小,容易发生横向变形,如表3中的前两阶振型皆为拱肋的横向变形。梁拱组合结构作为一种复杂受力体系,拱肋与主梁的连接从施工到维护都增加了结构的安全风险^[20]。汶川地震中黄江大桥和安州大桥在拱脚和主梁连接处均表现出较为严重的破坏,可见在横向地震作用下拱肋的存在对主梁地震反应可能存在不利影响。

为进一步探索拱肋对横向地震反应的影响,在考虑轨道约束(模型B)的情况下,假定桥台和桥墩处都设置滑动支座且没有侧向挡块,使得主梁能够自由运动;将拱肋质量分配给主梁,建立只考虑拱肋刚度贡献的连续梁拱桥模型(模型C);模型D为直接删除拱肋的连续梁桥,不考虑拱肋刚度,仅将拱肋的质量分配给主梁,使得3种模型的上部结构总质量相等。表4对比了模型C和模型D的前五阶周期和振型,二者的主要差异在于是否考虑拱肋的刚度,从两种模型的第一阶振型都为主梁的横向振动,周期相差不大,与模型B的第三阶振型对应,说明两种模型的动力特性基本相同,拱肋对整个结构的横向刚度贡献较小,而拱肋自身的动

力特性对该类结构的影响较大。

为了解拱肋对该桥横向地震反应的影响,在模型 B、模型 C 和模型 D 基础上进行时程分析,图 5 给出了主梁关键部位的横向峰值位移,图 6 为模型 B 中主梁和拱肋的位移时程曲线,表 5 给出了可判定主梁和拱肋的横向位移模式的“横向位移变异系数”^[21],可以看出:

表 4 拱肋对自振特性的影响

Table 4 Effect of arch ribs on self-vibration characteristics

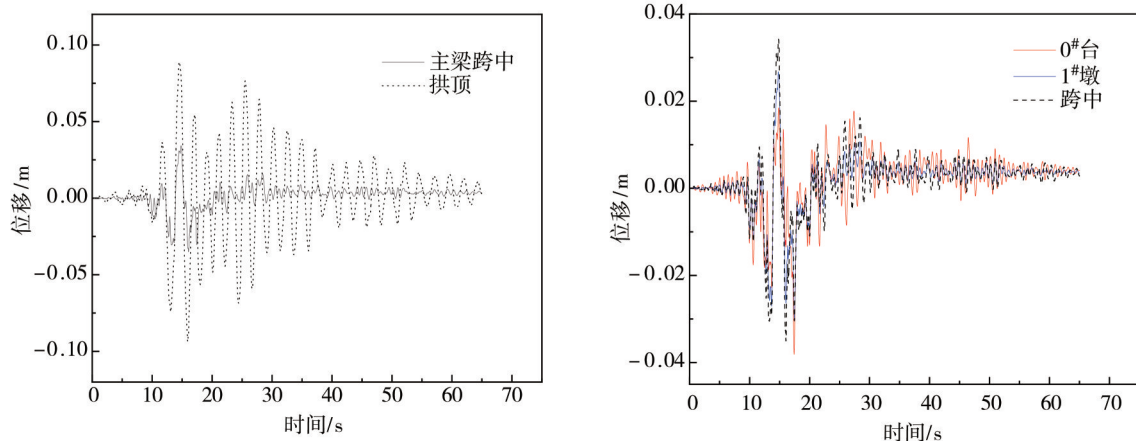
模态	周期 T/s		振型特征
	模型 C	模型 D	
1	1.17	1.19	主梁对称一阶横弯
2	0.73	0.73	主梁一侧横弯
3	0.72	0.72	主梁另一侧横弯
4	0.58	0.58	主梁纵向平动
5	0.51	0.52	主梁反对称一阶横弯

表 5 主梁和拱肋横向位移变化系数(单位:%)

Table 5 Coefficient of displacement variation of girder and arch ribs(unit:%)

位置	模型 B	模型 C	模型 D
主梁	1.2(2.5)	1.8(3.5)	1.3(3.2)
拱肋	9.3(11.5)	1.3(1.8)	-

注:括号外数值表示坐标轴正向的变异系数,括号内表示负向。



(a) 主梁跨中和拱肋的位移时程曲线

(b) 主梁位移时程曲线

图 5 位移时程曲线

Fig. 5 Displacement time-history curve of girder and arch ribs

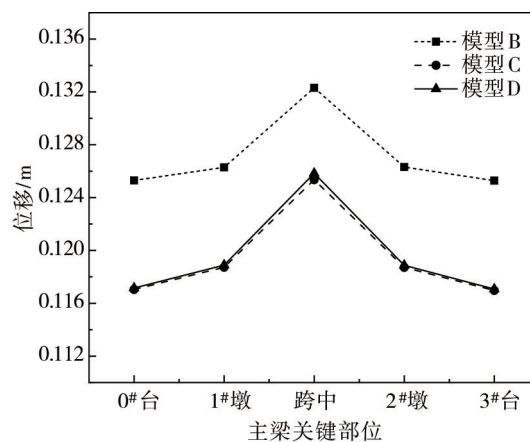


图 6 主梁关键部位的峰值位移

Fig. 6 Peak displacement of key position of girder

(1)连续梁拱桥(模型 B)的主梁横向位移大于相等质量的连续梁桥(模型 D),说明拱肋的存在放大了主梁的位移响应,主要是由于主梁与拱肋在地震作用下为同相运动,如图 5(a)所示。

(2)图5(b)中主梁各关键位置的位移时程曲线基本相近,当主梁的位移较大时,关键部位的位移呈横桥向同相运动;主梁的横向位移变异系数远小于5%(表5),说明主梁的振动形式为横桥向的刚体运动;而拱肋的横向刚度较小,横向变异系数大于10%,发生弯曲变形的可能性较大,与表3中振型特征的分析结果一致。需要说明的是:图5(b)中位移很小时,可能存在异相运动,由于位移和结构响应很小,可以忽略。

(3)图6中连续梁桥(模型D)与不考虑拱肋质量的连续梁拱桥(模型C)主梁横向位移基本一致,说明拱肋刚度对主梁变形的影响很小。

4 减震控制系统及其性能优化

为了控制连续梁拱桥的地震反应,基于功能分离的设计理念,发展“支座加耗能装置”的减震控制系统,通过滑动支座来控制主梁的竖向荷载,通过减震装置来控制主梁的水平向位移,甚至于实现自复位;组合减震隔震控制系统包括:(1)减震樨和拉索限位器组合^[23]。(2)SCEDB和BRB组合^[12]。前者可以起到水平向耗能和限位的作用,后者可同时发挥两种支撑的优点,通过控制定义的无量纲参数自恢复力比 ζ ,可使整个体系达到最佳的减震和自复位效果。在无速度脉冲效应地震动作用下,SCEDB和BRB的组合形式按自恢复力比 $\zeta=0.05$ 来选定^[12],最终确定4根SCEDB和8根BRB组合的方式。减震樨采用和文献[22]相同的构件和参数,拉索限位器依据等强度原则,由相应的支撑总强度,推算出其力学参数。表2给出了4种减震装置的力学特性参数,经计算共需要12根减震樨和12根拉索限位器,沿纵桥向在桥墩两侧和桥台背墙内侧布置耗能支撑和拉索限位器。地震反应分析时,皆以40组地震动作用下反应峰值的平均值为讨论指标。

4.1 减震效果对比

在考虑轨道约束的情况下,模型E(减震樨-拉索限位器)的拉索沿纵桥向布置,模型F(SCEDB-BRB)的耗能支撑延45°方向布置。文中的连续梁拱桥其下部结构为重力式桥墩,桥墩的变形能力很小,水平变形主要集中在减震装置即主梁关键部位处,桥梁的震后功能可恢复性主要由减震控制系统的性能来体现。图7给出了布置两种组合减震系统后主梁关键部位的峰值位移和残余位移。

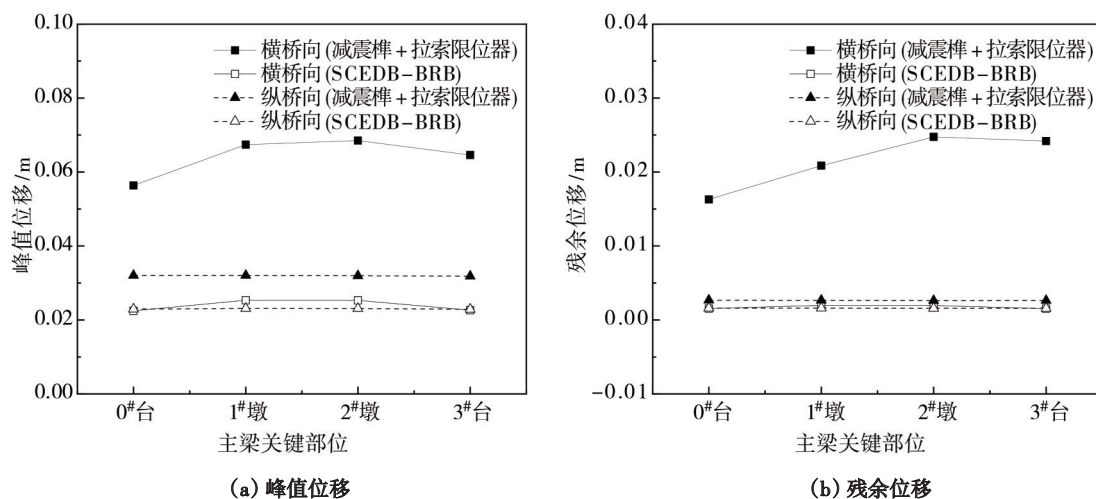


图7 主梁关键部位的峰值位移和残余位移

Fig. 7 Peak displacement of key positions of girder

从图7可以看出:减震樨和拉索限位器组合使用时的减震系统位移大于耗能支撑的组合系统,尤其是减震樨在横桥向的位移更大,接近于其极限位移(72 mm)^[23],这主要是由于该组合减震系统中拉索限位器仅对纵桥向起作用,而耗能支撑组合系统斜向布置时,沿纵桥向和横桥向皆可发挥作用。同样,对于铁路桥梁而言,减震樨横桥向的残余位移较大,是难以接受的,而耗能支撑组合系统几乎没有残余位移,即可实现自复位。

4.2 支撑布置角度分析

为了进一步了解支撑布置角度对减震效果的影响,故在模型F的基础上,对支撑的布置角度(支撑轴线与主梁轴线夹角)在区间30°~60°之间划分了7种布置方式。由于主梁各位置处位移变化规律基本相同,故

以0#桥台处主梁的位移响应为例进行说明。图8给出了0#桥台处主梁沿横桥向和纵桥向的位移和残余位移,可以看出:

当布置角度在 $40^\circ \sim 45^\circ$ 时,主梁沿横桥向和纵桥向的位移都能控制在较小范围内,同时残余位移也较小。另外,考虑轨道约束对主梁沿纵桥向的峰值位移有明显的约束作用,而对横桥向的约束作用较小,图8(a)中考虑轨道约束后横桥向峰值位移减小的原因可能是钢轨的纵向连接对横桥向地震反应的耦合作用所致。

在实际工程中,支撑布置角度应综合考虑两个方向的地震位移需求差异,以及结构或构件的变形能力与允许的变形范围。考虑到行车安全性等要求,铁路桥梁的横向地震峰值位移和震后残余位移限制较为严格。因此,该连续梁拱桥的耗能支撑布置角度宜在 $40^\circ \sim 45^\circ$ 。

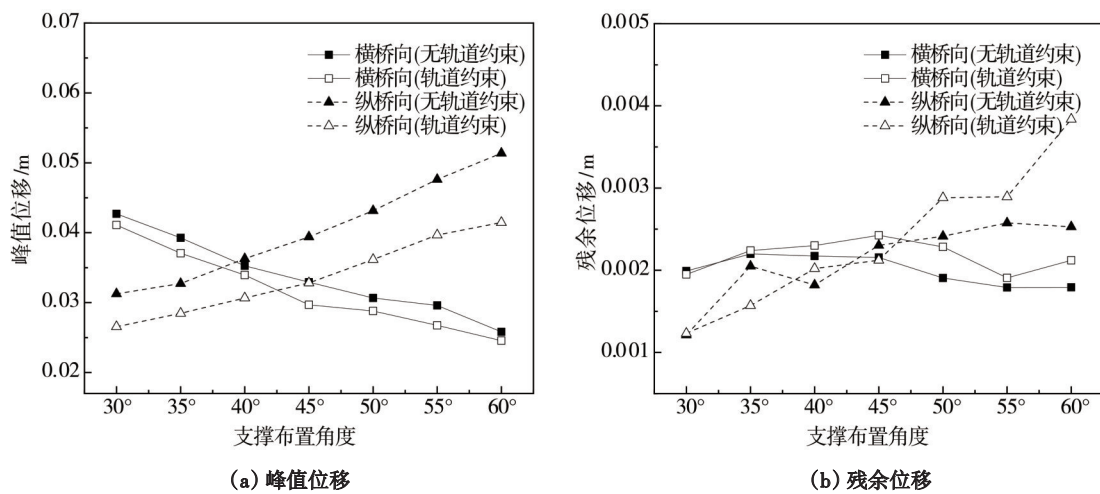


图8 0#桥台处主梁的位移响应

Fig. 8 Displacement response of girder at 0#abutment

5 结论

本文探讨了轨道约束和拱肋对铁路连续梁拱桥地震反应的影响;对比了两种减震系统的减震效果;分析了组合耗能支撑布置角度对减震效果的影响。由于拱肋对主梁位移反应的影响在实际工程中尚不明确,故文中数值模拟结果仅作为理论层次的讨论。主要得到以下结论:

(1)轨道约束对桥梁上部结构纵向动力特性的影响较大,一定程度上降低了纵桥向的地震反应。

(2)SCEDB-BRB组合减震效果在纵桥向和横桥向均表现出比减震樨-拉索组合更优异的减震效果。

(3)采用SCEDB-BRB组合减震系统,当支撑布置角度在 $40^\circ \sim 45^\circ$ 时,主梁沿横桥向和纵桥向的位移都能控制在较小范围内;当SCEDB-BRB的组合形式按自恢复力比 $\zeta=0.05$ 分配时,残余位移可得到有效控制。建议综合考虑桥梁纵横向的地震位移需求及结构或构件允许的变形范围选择合适的布置角度。

参考文献

- [1] 李国平. 连续拱梁组合桥的性能与特点[J]. 桥梁建设, 1999(1): 10-13.
LI Guoping. Performance and characteristic of continuous composite arch bridge[J]. Bridge Construction, 1999(1): 10-13. (in Chinese)
- [2] 曹新建,袁万城,高永,等. 大跨度连续梁拱组合体系桥梁减震设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(3): 30-35.
CAO Xinjian, YUAN Wancheng, GAO Yong, et al. Aseismic design of long-span continuous beam arch combination bridges[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(3): 30-35. (in Chinese)
- [3] 王克海,韦韩,李茜,等. 中小跨径公路桥梁抗震设计理念[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 115-121.
WANG Kehai, WEI Han, LI Qian, et al. Philosophies on seismic design of highway bridges of small or medium spans[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 115-121. (in Chinese)
- [4] 黄艳,阎贵平,刘林. 轨道约束对铁路桥梁纵向地震反应特性的影响[J]. 铁道学报, 2002, 24(5): 124-128.

- HUANG Yan, YAN Guiping, LIU Lin. Effects of rail restraints on longitudinal seismic responses of railway bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2002, 24(5): 124 – 128. (in Chinese)
- [5] 谢旭, 王炎, 陈列. 轨道约束对铁路减隔震桥梁地震响应的影响[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 75 – 82.
XIE Xu, WANG Yan, CHEN Lie. Effect of rail restraints on seismic responses of cushioning railway bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 75 – 82. (in Chinese)
- [6] 戴公连, 刘瑶, 刘文硕. 大跨度连续梁桥与梁拱组合桥梁轨相互作用比较[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48(1): 233 – 238.
DAI Gonglian, LIU Yao, LIU Wenshuo. Comparison of track-bridge interaction between long-span continuous girder bridge and continuous arch bridge[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48(1): 233 – 238. (in Chinese)
- [7] 刘正楠, 陈兴冲, 张永亮, 等. 考虑行波效应的无砟轨道铁路桥梁纵桥向地震响应[J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 142 – 149.
LIU Zhengnan, CHEN Xingchong, ZHANG Yongliang, et al. Longitudinal seismic response of ballastless railway bridges considering traveling wave effect[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 142 – 149. (in Chinese)
- [8] 闫斌, 戴公连, 魏标. 考虑地震行波效应的高铁连续梁桥梁轨互制[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 87 – 90.
YAN Bin, DAI Gonglian, WEI Biao. Interaction between CWR and continuous beam bridge carrying high-speed railway under action of seismic traveling wave[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(5): 87 – 90. (in Chinese)
- [9] 石岩, 王东升, 韩建平, 等. 桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5): 118 – 128.
SHI Yan, WANG Dongsheng, HAN Jianping, et al. Application status of seismic isolation for bridges and its development tendency[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(5): 118 – 128. (in Chinese)
- [10] 温留汉·黑沙, 邹爽, 周福霖, 等. 高速铁路梁桥减隔震研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(7): 47 – 52.
WENLIUHAN·HEISHA, ZOU Shuang, ZHOU Fulin, et al. Research on the seismic isolation of high-speed railway bridges[J]. Journal of Railway Engineering, 2017, 34(7): 47 – 52. (in Chinese)
- [11] 李爱丽, 高日, 李承根, 等. 一种新型软钢减震棒的设计与试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 23 – 28.
LI Aili, GAO Ri, LI Chenggen, et al. Design and experimental study of a novel type of mild steel shock absorber[J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 23 – 28. (in Chinese)
- [12] 石岩, 张展宏, 韩建平, 等. 近断层地震动下大跨度铁路连续梁拱桥的自复位性能[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(3): 390 – 396.
SHI Yan, ZHANG Zhanhong, HAN Jianping, et al. Self-centering performance of long-span railway continuous beam-arch bridge subjected to near-fault ground motions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(3): 390 – 396. (in Chinese)
- [13] 徐庆元, 陈秀方. 小阻力扣件桥上无缝线路附加力[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(1): 25 – 29.
XU Qingyuan, CHEN Xiufang. Additional longitudinal forces transmission between bridges and continuously welded rails with small resistance fasteners[J]. Journal of Traffic And Transportation Engineering, 2003, 3(1): 25 – 29. (in Chinese)
- [14] 杨梦蛟, 邢建鑫. 轨道结构与桥梁共同作用力学计算模型的研究[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(3): 57 – 62.
YANG Mengjiao, XING Jianxin. Investigation of mechanics model of interaction between bridge and track[J]. China Railway Sciences, 2001, 22(3): 57 – 62. (in Chinese)
- [15] 卜一之, 张进. 高速铁路简支梁桥纵向力计算分析[J]. 桥梁建设, 1996, (2): 53 – 56.
BU Yizhi, ZHANG Jin. Calculation and analysis of longitudinal force of high-speed railway simply-supported bridge[J]. Bridge Construction, 1996, (2): 53 – 56. (in Chinese)
- [16] FRYBA L. Quasi-Static distribution of braking and starting forces in rails and bridge[J]. Rail International, 1974, 5(11): 698 – 716.
- [17] TREMBLAY R, LACERTE M, Christopoulos C. Seismic response of multistory buildings with self-centering energy dissipative steel braces[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(1): 108 – 120.
- [18] CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R, KIM H J, et al. Self-Centering energy dissipative bracing system for the seismic resistance of structures: development and validation[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(1): 96 – 107.
- [19] BAKER J W, LIN T, SHAHI S K, et al. New ground motion selection procedures and selected motions for the peer transportation research program [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), 2011.
- [20] 马庭林, 杨国静, 曾永平, 等. 铁路混凝土连续梁桥采用加劲拱的必要性分析[J]. 桥梁建设, 2018, 48(6): 12 – 17.
MA Tinglin, YANG Guojing, ZENG Yongping, et al. Necessity analysis on railway pc continuous beam bridges with stiffened arch rib[J]. Bridge Construction, 2018, 48(6): 12 – 17. (in Chinese)
- [21] DWAIRI H, KOWALSKY M. Implementation of inelastic displacement patterns in direct displacement-based design of continuous bridge structures[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(3): 631 – 662.
- [22] 李承根, 高日. 高速铁路桥梁减隔震技术研究[J]. 中国工程科学, 2009, 11(1): 81 – 86.
LI Chenggen, GAO Ri. Study on the shock absorbing technique of high-speed railway bridges[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(1): 81 – 86. (in Chinese)
- [23] 石岩, 王东升, 孙治国. 近断层地震动下的高速铁路桥梁减隔震设计[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6): 34 – 40.
SHI Yan, WANG Dongsheng, SUN Zhiguo. Seismic isolation design for high speed railway bridge under near-fault ground motions[J]. China Railway Science, 2014, 35(6): 34 – 40. (in Chinese)

附录 A:地震动选取记录

Table A1 Selected earthquake records

编号	地震名称	台站	震级	断层距 (km)	PGA(g)	
					FN	FP
1	Imperial Valley-06	Superstition Mtn Camera	6.5	24.6	0.097	0.20
2	Imperial Valley-06	Plaster City	6.5	30.3	0.041	0.055
3	Big Bear-01	Lake Cachulla	6.5	-	0.034	0.035
4	Big Bear-01	Snow Creek	6.5	-	0.131	0.175
5	Big Bear-01	North Shore-Salton Sea Pk HQ	6.5	-	0.088	0.065
6	Big Bear-01	Seal Beach - Office Bldg	6.5	-	0.043	0.034
7	Loma Prieta	Fremont -Emerson Court	6.9	39.9	0.127	0.196
8	Loma Prieta	Fremont - Mission San Jose	6.9	39.5	0.144	0.136
9	Loma Prieta	Dumbarton Bridge West End FF	6.9	35.5	0.143	0.119
10	CA/Baja Border Area	El Centro Array #7	5.3	-	0.083	0.056
11	CA/Baja Border Area	Calexico Fire Station	5.3	-	0.079	0.113
12	CA/Baja Border Area	Holtville Post Office	5.3	0.0	0.039	0.026
13	Chalfant Valley-02	Lake Crowley-Shehorn Res.	6.2	24.5	0.126	0.121
14	Northridge-01	Elizabeth Lake	6.7	36.6	0.136	0.136
15	Northridge-01	Bell Gardens-Jaboneria	6.7	44.1	0.097	0.069
16	Northridge-01	Compton-Castlegate St	6.7	47.0	0.085	0.142
17	Northwest China-02	Jiashi	5.9	-	0.163	0.102
18	Victoria, Mexico	SAHOP Casa Flores	6.3	39.3	0.070	0.086
19	Whittier Narrows-01	Norwalk-Imp Hwy, S Grnd	6.0	20.4	0.236	0.129
20	Whittier Narrows-01	West Covina-S Orange Ave	6.0	16.3	0.124	0.157
21	Whittier Narrows-01	Canoga Park-Topanga Can	6.0	49.0	0.123	0.132
22	San Fernando	Santa Felita Dam (Outlet)	6.6	24.9	0.180	0.146
23	Coalinga-01	Parkfield -Stone Corral 3E	6.4	34.0	0.128	0.114
24	Coalinga-01	Parkfield-Cholame 3W	6.4	45.7	0.126	0.068
25	Coalinga-01	Parkfield-Fault Zone 16	6.4	27.7	0.142	0.207
26	El Alamo	El Centro Array #9	6.8	-	0.045	0.045
27	N. Palm Springs	San Jacinto -Valley Cemetary	6.1	31.0	0.069	0.060
28	N. Palm Springs	Indio	6.1	35.6	0.063	0.124
29	Chi-Chi, Taiwan-03	CHY034	6.2	37.0	0.074	0.083
30	Chi-Chi, Taiwan-03	TCU145	6.2	48.5	0.041	0.031
31	Chi-Chi, Taiwan-03	CHY047	6.2	46.2	0.054	0.054
32	Chi-Chi, Taiwan-06	CHY036	6.3	46.2	0.196	0.124
33	Morgan Hill	Gilroy Array #2	6.2	13.7	0.178	0.146
34	Morgan Hill	San Juan Bautista, 24 Polk St	6.2	27.2	0.045	0.033
35	Morgan Hill	Gilroy Array #7	6.2	12.1	0.138	0.158
36	Livermore-01	Tracy-Sewage Treatm Plant	5.8	-	0.052	0.069
37	Livermore-01	San Ramon-Eastman Kodak	5.8	-	0.054	0.159
38	Friuli, Italy-01	Codroipo	6.5	33.4	0.064	0.097
39	Friuli, Italy-02	Codroipo	5.9	41.4	0.019	0.026
40	Mammoth Lakes-06	Bishop-Paradise Lodge	5.9	-	0.096	0.107