网络出版时间：2019-11-20 14:15:57

第 32 卷　第 4 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 32　No. 4
2019 年 12 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Dec. 2019

高墩刚构桥地震响应及减震控制研究

李　勇，　解梦飞，　段树金，　王军文

(石家庄铁道大学 土木工程学院，河北 石家庄　050043)

摘要：近些年，高墩甚至是超高墩刚构桥大量建设，由于其属于非规则桥梁，使得在抗震设计时需要做专项研究，加之桥墩和主梁采用现浇整体刚结的结构形式，使得隔震支座在高墩刚构桥上无法使用。选取一座典型高墩刚构桥，建立其弹塑性动力分析模型，分析了在设计地震动输入下的结构抗震性能规律，进而选取被动控制阻尼器分析了减震控制效果。分析表明：高墩刚构桥在设计地震作用下，桥墩塑性较发展程度较低，能够满足设计抗震要求，但采用阻尼器进行减震控制后，桥墩能够在设计地震作用下保证为弹性受力状态，减震控制效果优于防落梁拉杆。

关键词：高墩刚构桥；弹塑性分析；抗震性能；阻尼器；减震控制

中图分类号：T442.5　**文献标志码：**A　**文章编号：**2095-0373(2019)04-0001-07

随着高墩刚构桥的不断修建，目前已建或在建的高墩刚构桥已达几百座，且已逐步成为交通运输线上的重要组成部分。高墩刚构桥多跨越山谷沟壑，且多建于西部地区，由于高墩刚构桥桥墩较高，导致整体刚度较柔，自振周期长[1]，其结构特性及场地特性均不再适用于《公路桥梁抗震设计细则》的规定，不仅要注意设计加速度反应谱长周期段的可靠性，且当墩高超过 40 m 后，可能进入塑性的高墩桥梁应做专项研究。

与简支梁和连续梁结构体系不同，刚构桥的桥墩和主梁之间为现浇刚性节点[2-3]，只在梁端部设置单向滑动支座，所以高墩刚构桥无法使用减隔震支座进行减震控制，若采用阻尼器进行减震控制，也只能安装在梁-台、梁-过渡墩之间[4]，且既有的位移型或速度型阻尼器也多为单向耗能阻尼器，对高墩刚构桥的纵向地震响应可进行控制，无法对高墩刚构桥的横向地震响应进行减震控制。本文首先分析了高墩刚构桥梁的地震响应特性，进而对不同于普通阻尼器的多阶段出力耗能阻尼器的减震控制进行了研究，并与防落梁拉杆的控制效果进行了对比。

1　高墩刚构桥工程概况

某大桥桥梁全长 461.73 m，其中主桥为三跨预应力混凝土连续刚构桥，主梁为单箱单室箱型截面，采用 C50 混凝土，主桥支座设置于 4# 和 7# 过渡墩墩顶，分别设置 GPZ3000DX 单向和 GPZ3000SX 双向滑动盆式支座各 1 套；桥墩采用整体式钢筋混凝土空心墩，墩身横桥向宽 7 m，纵桥向宽 6.5 m，壁厚 0.7 m，采用 C40 混凝土。两侧引桥均为跨径组合为 4×20 m 的预应力混凝土箱梁桥，采用 C50 混凝土，在 0# 和 11# 桥台，1#、3#、8# 和 10# 引桥桥墩，及 4# 和 7# 过渡墩上均采用 GPZ4DX 单向活动支座，在 2# 和 9# 桥墩设置 GPZ4GD 固定支座；4# 和 7# 过渡墩采用 2.0 m×1.8 m 矩形钢筋混凝土实心墩，引桥桥墩采用直径 1.5 m 的双柱墩。本桥设防烈度为 7 度，设计基本加速度峰值为 0.15g，抗震措施按照 8 度设防。桥型

收稿日期：2018-04-24　**网络出版日期：**-　**责任编辑：**车轩玉　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20180090

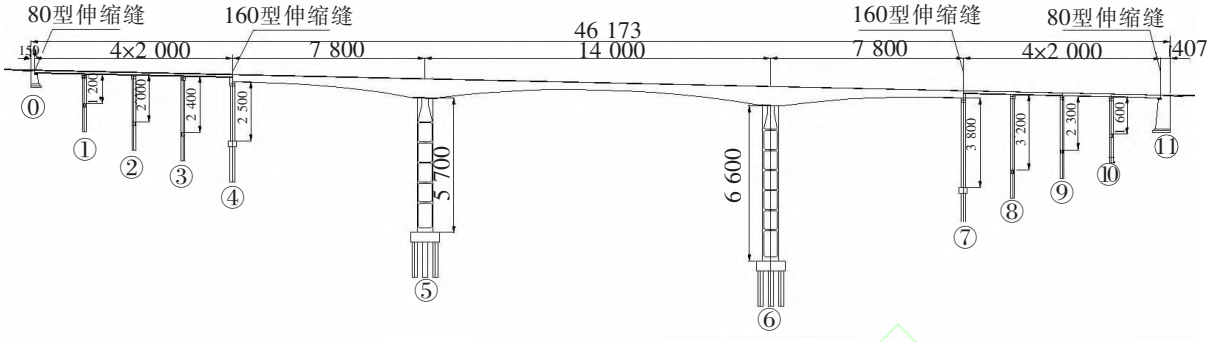
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1402.n.20191120.1354.001.html

基金项目：河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2018048)；国家自然科学基金(51508350)；河北省自然科学基金(E2016210087)；河北省大型基础设施防灾减灾协同创新中心资助项目；石家庄铁道大学在读研究生创新能力培养资助项目(YC2019008)。

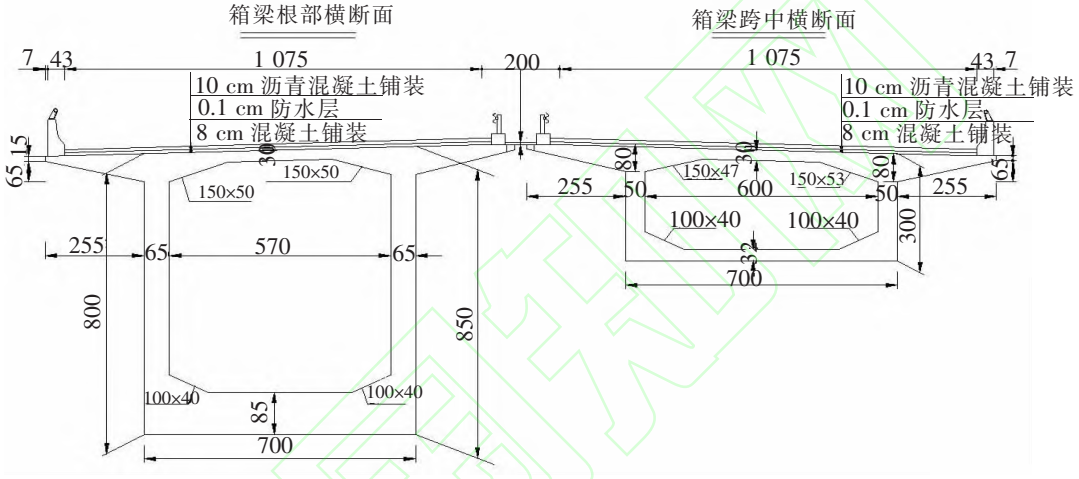
作者简介：李勇(1983—)，男，讲师，博士，主要从事桥梁抗震与减震控制研究。E-mail：lyncdw@126.com

李勇，解梦飞，段树金，王军文. 高墩刚构桥地震响应及减震控制研究[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2019，32(4)：1-7.

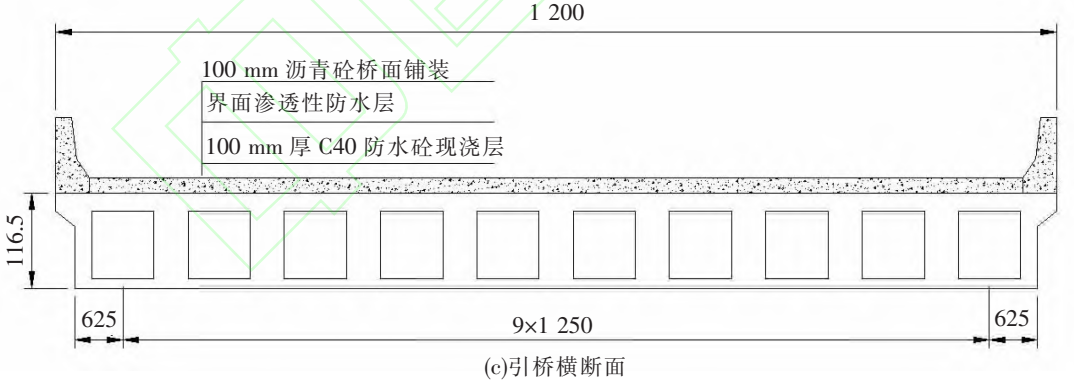
布置如图 1 所示。



(a)桥型布置图



(b)主桥横断面



(c)引桥横断面

图 1 桥梁布置及横截面(单位:cm)

2 高墩刚构桥地震响应规律

2.1 有限元建模

上部结构采用普通梁单元模拟,不考虑其非线性特性,考虑预应力钢筋和普通钢筋对于截面刚度的提高和容重的增加;固定支座及单向活动支座的限位方向均近似认为具有很大的刚度[5];单向活动支座的滑动方向,其纵桥向的往复摩擦采用双线性理想弹塑性滞回模型进行模拟[6];在地震动作用下,桥墩底部、桥墩(仅考虑有盖梁时)顶部以及横系梁梁端可能出现塑性铰的部位设置非弹性铰[7-8]。其中非弹性铰采用 Takeda(武田)三折线型滞回曲线来近似模拟钢筋混凝土柱的材料非线性特性;在 0# 和 11# 号桥台及 4# 和 7# 过渡

墩处均设置了梁-台、梁-梁弹性碰撞单元。有限元建模考虑的桥梁非线性特性如图 2 所示。

2.2　地震波选择

选用 3 条地震波,分别为 El-Centro 波、唐山波以及拟合规范反应谱的人工波,如图 3 所示。本桥抗震设防类别为 A 类,所以 E1 和 E2 地震作用的重要性系数取值为 1.0 和 1.7,场地系数取值为 1.0,阻尼调整系数取值为 1.0,则得到 E1 和 E2 地震输入有效加速度峰值分别为 0.1g 和 0.17g。

2.3　设计地震作用下的桥梁抗震性能

选取武田模型作为塑性铰的滞回模型,该塑性铰的屈服状态分为 3 个状态:第一屈服代表横截面的垂直方向应力达到了屈服应力状态,在受弯状态时,参考位置在离中和轴最远的点;第二屈服代表横截面的垂直方向应力达到了混凝土的极限强度或者钢筋的屈服强度状态,在受弯状态时,参考位置位于中和轴;第三屈服代表混凝土的破坏或者钢筋的极限强度状态。

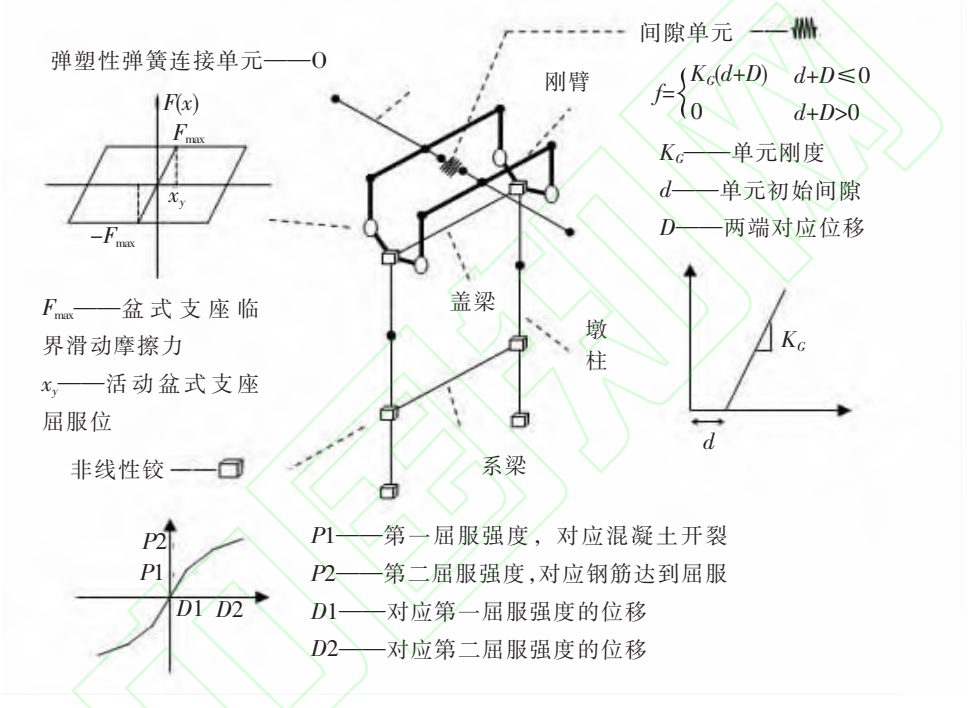


图 2　非线性模拟示意图

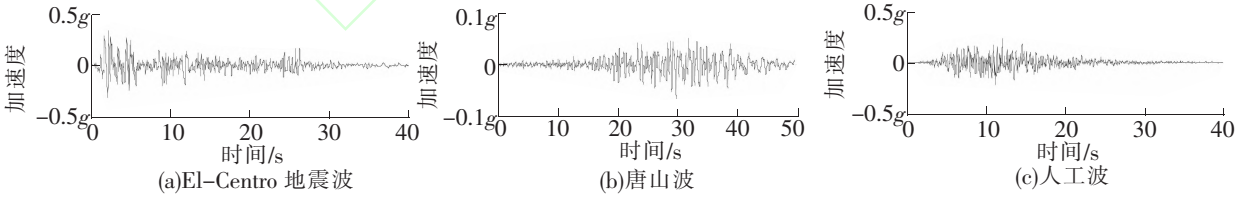


图 3　选择的地震波

E2 地震作用下,部分墩柱发生了损伤,产生了弹塑性变形,其中以引桥固定墩 2# 和 9# 桥墩的塑性变形较为明显,塑性铰屈服状态达到第二屈服状态。由于在 3 条地震波作用下,结构只是部分桥墩进入了第一屈服状态,所以,桥墩塑性铰的转角很小,均满足规范要求,如图 4 所示。

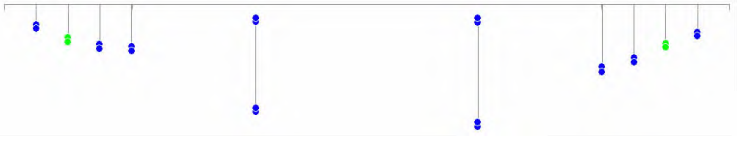


图 4　E2 地震波输入桥墩塑性铰屈服状态

桥墩抗剪按照能力保护构件计算,其值可近似取等效屈服弯矩 M_y 与墩高 H_n 的比值[2]。塑性铰区域沿纵桥向斜截面抗剪承载力满足规范要求,且由于桥墩塑性铰发展程度较低,墩顶位移均小于各墩的墩顶容许位移。

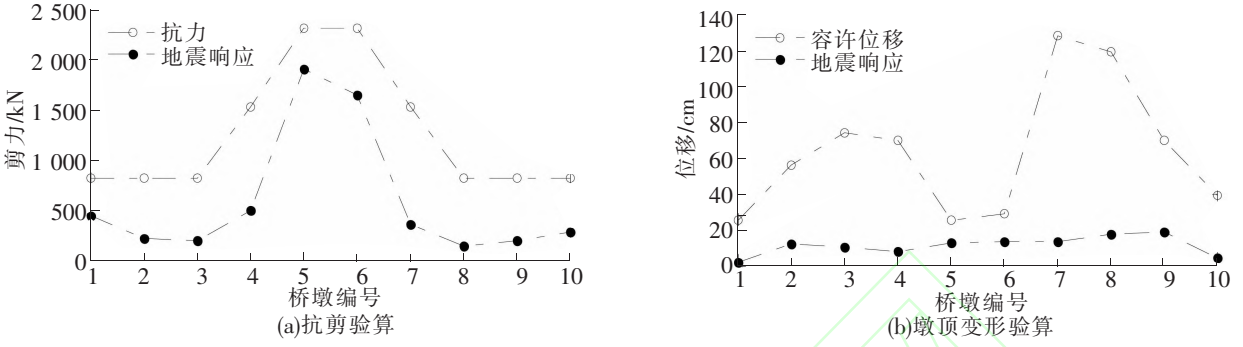


图 5 E2 地震波输入桥墩抗剪与墩顶变形验算

3 高墩刚构桥减震控制

高墩刚构桥由于墩梁固结[5],若采用单向被动耗能阻尼器,只能安装在过渡墩或者桥台处,如图 6(a)所示。单向出力阻尼器主要包括速度型阻尼器和位移型阻尼器,但是这些阻尼器只具备耗能功能,而不具备大震下'锁死'相邻结构的功能,若使用锁定装置如'Lock-up'又不具备耗能的功能。所以,选用既能耗能又能锁死的两阶段出力阻尼器,则能实现在中小震下耗能、大震下迅速增大出力使得相邻结构形成临时纵向固结以共同抵抗地震的作用,如图 6(b)、图 6(c)所示。

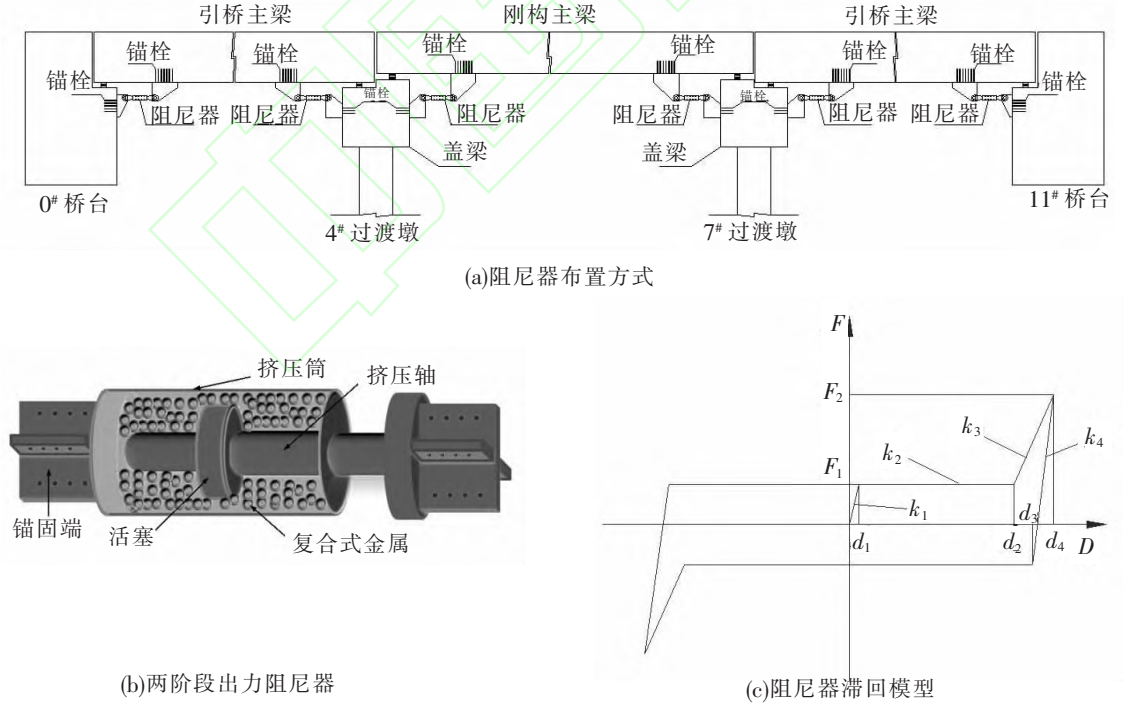


图 6 两阶段出力阻尼器布置位置及滞回模型

选取阻尼器第一屈服水平段设计位移 d_2 为 6 cm,主桥和引桥的阻尼器第一水平屈服力 F_1 设置为 200～700 kN(以 D20～D70 表示)变化,第一阶段弹性刚度 k_1 和卸载刚度 k_4 均取值为 10^7 kN/m,屈服刚度 k_2 取值为 0,第二阶段出力刚度 k_3 取值为 10^5 kN/m,主要考察 E2 地震作用下刚构桥的减震效果,如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着阻尼器出力的增加,主桥和引桥的墩底弯矩均有所降低,减震率为 33%～

55%,使得桥墩能够保持在弹性受力范围之内,图 7(f) 所示阻尼器既发挥了耗能作用,也发挥了限位的作用,避免了梁端碰撞。

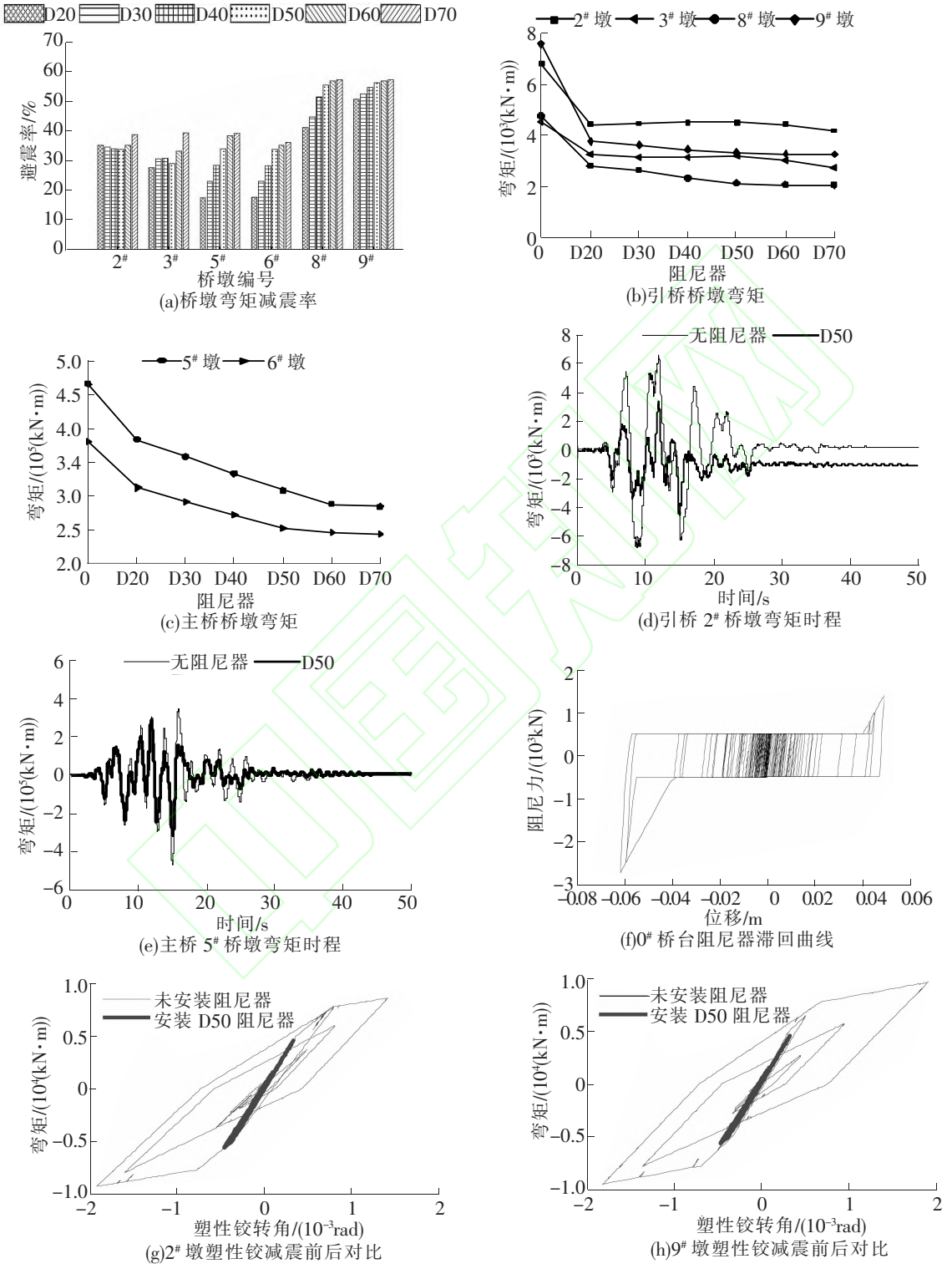


图 7　安装阻尼器后各桥墩弯矩减震效果分析

4　设置防落梁拉杆的桥梁减震控制

由于高墩刚构桥多为大型重要桥梁[10],抗震设防措施均应该按照提高 1 度进行设防,往往需要在桥

台和过渡墩处设置防落梁装置[11],以防止主梁在地震作用下与桥墩相对位移过大而发生落梁现象。但防落梁装置往往不具备耗能作用,只能在大震下锁定墩台与主梁,而无法发挥耗能作用。图 8 给出了考虑 D50 复合式金属阻尼器与防落梁拉杆分别加在桥梁上进行减震控制的对比。由图 8 可以看出,对于本桥阻尼器要比防落拉杆的减震率更高,因为阻尼器具有耗能功能,而防落梁拉杆只有当梁端相对位移过大时才会起作用,当梁端相对位移较小时不具有耗能作用。

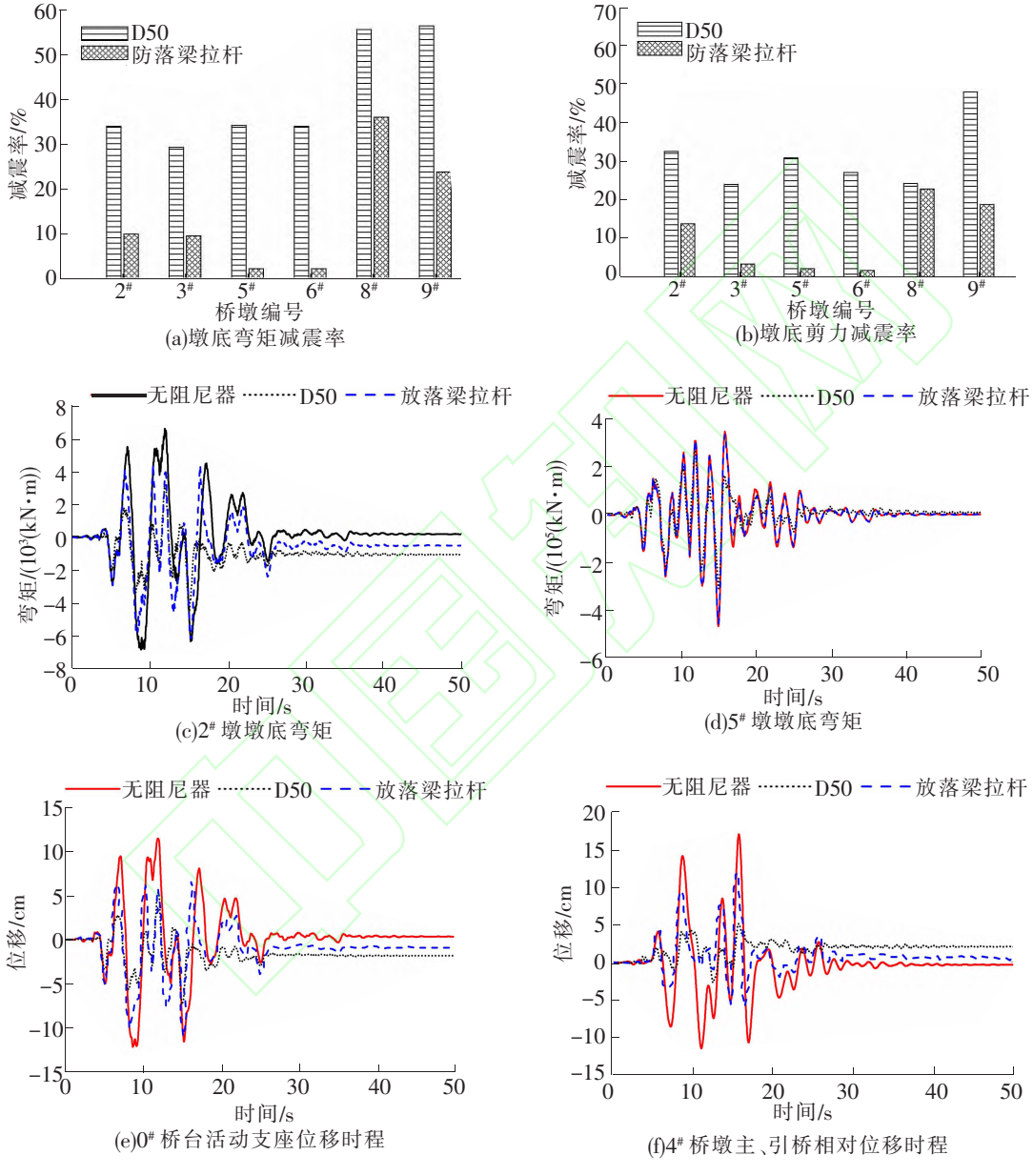


图 8 D50 阻尼器与防落梁拉杆减震效果对比

5 结论

通过选取典型高墩刚构桥进行地震作用下的弹塑性动力分析,并采用多阶段出力耗能阻尼器进行减震控制研究,可以得出以下结论:

(1)高墩刚构桥在地震作用下,梁端碰撞会限制墩顶的纵向位移,进而墩底塑性铰发展程度也较低,设计地震动作用下仅会出现塑性铰区域混凝土开裂,钢筋不会发生屈服。

(2)在刚构桥梁端优化设置多阶段出力耗能阻尼器,能够进一步限制墩顶位移并进行耗能,其减震率

能达到 30％～55％，使得桥墩能够保持在弹性工作状态，震后桥墩无需加固。

(3)防落梁拉杆在中小震作用下并不能耗能，只在大震下起到防落梁的作用，进而限制墩-梁、梁-梁相对位移，所以兼具耗能及防落梁功能的多阶段出力的耗能阻尼器减震控制效果更好，其限制位移的能力相对于防落梁拉杆要提高 40％。

参　考　文　献

[1]陈海波，刘保东．大跨度高墩连续刚构桥空间地震响应分析[J]．工程抗震与加固改造，2005，27(3)：79-80.

[2]陈昕，马麟．高墩大跨连续刚构桥抗震性能分析[J]．水利与建筑工程学报，2012，10(4)：75-77.

[3]张天俊，钟汉华，叶再军，等．高墩连续刚构桥抗震分析与设计[J]．中国水运，2008，8(5)：262.

[4]赵继栋，张永亮，陈兴冲，等．基于粘滞阻尼器的高墩大跨铁路连续刚构桥减震研究[J]．世界地震工程，2016，32(2)：94-99.

[5]王常峰，陈兴冲，夏修身．高墩大跨连续刚构桥抗震设计参数优化[J]．公路交通技术，2006，23(4)：81-83.

[6]陈思孝，夏修身，李锐．A 型高墩大跨混凝土连续刚构桥地震反应影响分析[J]．高速铁路技术，2014，5(6)：21-25.

[7]余玲玲，王解军．非一致激励下高墩大跨连续刚构桥地震反应分析[J]．中外公路，2010，30(2)：122-126.

[8]曾宗平，王曼君．高墩大跨度预应力混凝土连续刚构桥抗震设计探索[J]．黑龙江交通科技，2015，(5)：70-71.

[9]卢三平．铁路高墩大跨度连续刚构桥抗震设计分析[J]．世界桥梁，2015，43(2)：51-54.

[10]刘怀林，郑罡．大跨径连续刚构桥抗震分析及抗震性能评价[J]．公路交通技术，2009 (6)：82-84.

[11]夏修身，陈兴冲，王常峰，等．高墩大跨连续刚构桥抗震性能研究[J]．西北地震学报，2010，32(1)：89-91.

Study on Seismic Performance and Control of High-pier Rigid Frame Bridge

Li Yong，　Xie Mengfei，　Duan Shujin，　Wang Junwen

(School of Civil Engineering，Shijiazhuang Tiedao University，Shijiazhuang 050043，China)

Abstract：In recent years，high-rise-pier or super high-pier rigid frame bridges have been constructed in large numbers. Considering these bridges' irregularity，special studies are required for seismic design. In addition，the consolidation between piers and girders makes it impossible to adopt isolation seismic control. A typical high pier rigid frame bridge is chosen to establish its elastic-plastic dynamic finite element model，and a nonlinear dynamic time-history analysis is conducted to study the seismic performance subjected to design earthquakes. Then passive dampers are selected to analyze the effect of seismic control. The results show that under design seismic loads，the high-pier rigid frame bridge shows lower degree of plastic hinge. It can meet the seismic design requirements，but dampers can be used for seismic control to keep the bridge in elastic state. The damping control effect of dampers is better than that of the anti-drop braces.

Key words：high pier rigid frame bridge；elastic-plastic analysis；seismic performance；damper；damping control