

Study on the Seismic Performance of Curved Bridge with a Slope of 5%

Jianxing Han¹, Yanjiang Cheng^{1,2}

¹College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing
Email: 742122853@qq.com, 13021965877@163.com

Received: May 7th, 2018; accepted: May 21st, 2018; published: May 28th, 2018

Abstract

In order to study the effect of the damping effect of the viscous damper on the curved bridge with longitudinal slope of 5%, the test was based on a curved bridge with a length of 120 meters as the prototype. According to the similarity theory, a 1/10 scale test model of the bridge was made. The experimental conditions of four kinds of seismic waves input under the uniform excitation were designed, and the model bridge vibration table test was carried out with dampers under longitudinal slope of 5%. The results show that: after installing the viscous dampers, the first order frequency of the model bridge is slightly smaller, and the damping ratio is slightly larger, indicating that the viscous damper provides some additional damping to the curved bridge. Under the consistent input, the tangential and radial displacement of the beam and the pier top under longitudinal slope of 5% are reduced, and the bottom strain of the pier is also effectively controlled.

Keywords

Shaking Table Model Test, Curved Bridge, Viscous Damper, Seismic Control

纵坡为5%下的曲线桥减震性能研究

韩建星¹, 陈彦江^{1,2}

¹北京工业大学, 建筑工程学院, 北京

²北京工业大学, 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京
Email: 742122853@qq.com, 13021965877@163.com

收稿日期: 2018年5月7日; 录用日期: 2018年5月21日; 发布日期: 2018年5月28日

摘要

为研究在纵坡为5%下曲线桥粘滞阻尼器减震效果的影响, 以一座长度为120米的曲线桥为原型, 按照相

似理论制作了该桥的1/10缩尺试验模型,设计了一致激励下四种地震波输入的试验工况,进行设置阻尼器前后的模型桥振动台试验。结果表明:安装粘滞阻尼器后,模型桥一阶频率略变小,阻尼比略变大,说明粘滞阻尼器对曲线桥提供了一定的附加阻尼。在一致激励下,主梁的跨中切向和径向位移、墩顶切向位移和径向都有所减小,墩底应变也得到了有效控制。

关键词

振动台实验模型, 曲线桥, 粘滞阻尼器, 减震控制

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济社会和城市化的迅猛发展,桥梁等基础设施得到了大力发展。根据国家铁路局数据显示:截至2017年年底,公路桥梁已超过80万座。我国早已成为世界第一桥梁大国,我国桥梁设计、施工技术已达到世界领先水平[1]。公路桥梁要适应各种复杂环境的要求,曲线桥应运而生。由于曲率的存在,曲线桥易发生弯扭耦合,相比于直桥,曲线桥更容易发生破坏。因此,减隔震技术在曲线桥上的运用越来越受到国内外学者的重视。随着对减隔震技术研究的深入,其已经成为一种在工程上最常用且最有效的减震手段[2][3][4][5]。目前在实际的桥梁中运用最普遍的减震装置是粘滞阻尼器。粘滞阻尼器具有提供附加阻尼来耗能却不提供附加刚度,不改变自振周期的特点。

针对曲线桥的抗震减震分析国内外学者都取得一定成果,王兰[6]建立三维有限元模型,通过设立铅芯橡胶支座对曲线桥进行减隔震研究,阐述了铅芯橡胶支座中的铅芯截面面积的不同对桥梁的位移有影响;李正英等[7]用CivilMidas建立两边是底墩、中间是高墩的曲线桥有限元模型,通过分别设置不同的减隔震装置进行减震分析,得出粘滞阻尼器和铅芯橡胶支座对边墩墩底切向反力具有放大作用,而摩擦摆支座对主梁位移具有放大作用,得出混合减震可以弥补单一减震的不足;陈霄[8]建立了六跨连续梁的曲线桥三维有限元模型,设置一种高阻尼叠层橡胶支座进行振动台试验,得出主梁内力和墩底剪力与弯矩都比非隔震的数小很多;Takao等[9]在桥上安装粘滞阻尼器,并进行振动台试验研究其减震效果,得出了一种理论分析模型有助于减震分析;刘奕[10]利用ANSYS建立曲线桥的有限元模型并进行分析,得出粘滞阻尼器能有效减少整体的地震反应并具有对频谱不敏感、较强的适应性和较好的减震性能等特点;陈树刚[11]利用ANSYS建立曲线梁桥的有限元模型,在设置粘滞阻尼器后研究曲率半径对减震效果的影响。有限元分析结果说明:添加粘滞阻尼器后,曲线桥主梁位移得到很好的控制,其减震率会随曲率半径的增大而变小。

总结国内外研究现状,发现对有纵坡的曲线桥振动台试验分析研究的还较少,所以本篇考虑了纵坡的影响。以一座 3×40 m的某曲线连续桥为原型,对其进行振动台试验。分析在纵坡为5%下,粘滞阻尼器对曲线桥减震控制作用。

2. 模型桥设计与制作

以一座 3×40 m的曲线连续桥为原型,按照1:10进行缩尺,模型桥全长为12 m,曲率半径为5 m,圆心角为 138° ,纵坡设计为5%。上部结构为钢箱梁,桥面宽为1.2 m;下部结构为钢筋混凝土双柱型桥

墩, 1号墩和4号墩直径为0.2 m, 2号墩和3号墩直径为0.15 m; 桥墩和盖梁均采用C30混凝土, 各盖梁顶面对称布置两个盆式橡胶支座, 其中2号墩处为固定支座, 其余支座为可沿切向滑动的单向滑动支座。试验模型图如图1所示, 相似比设计如表1所示。

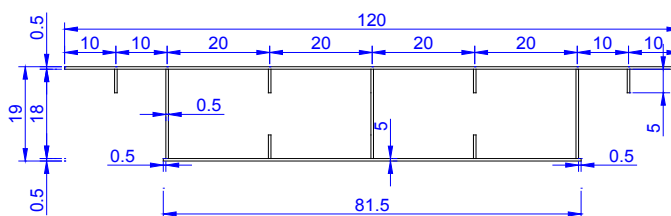
本文所分析的变纵坡的曲线桥为小半径曲线桥, 在地震作用下, 两个垂直方向的地震作用可能发生耦合, 使其动力响应变得更加复杂。因此需要通过设置粘滞阻尼器来减小上部结构的地震响应, 起到保护桥梁结构的作用。全桥共布置4个粘滞阻尼器。在1号墩与主梁、4号墩与主梁之间安装有性能良好的粘滞阻尼器各两个, 使曲线桥在两个方向综合考虑的情况下都能有良好的减震效果。粘滞阻尼器各设计参数如表2所示, 并且每个粘滞阻尼器配有一个30 kN的力传感器来测量粘滞阻尼器的出力情况。粘滞阻尼器的设计图、实物图和安装图如图2所示。

3. 振动台试验设计

在控制点处设置各种传感器来采集信息, 如: 采用ICP加速度传感器测量各跨跨中、各墩顶和墩底



(a) 模型桥整体效果图



(b) 主梁截面示意图

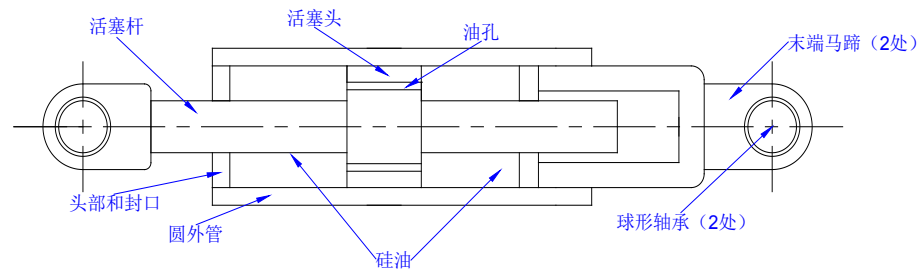
Figure 1. Map of experimental model

图 1. 试验模型图

Table 1. Similarity ratio of model test

表 1. 模型试验的相似比

类型	物理量	量纲	取值
材料特性	等效质量密度	FT^2L^{-4}	取 2
	应力	FL^{-2}	1
	弹性模量	FL^{-2}	取 1
几何尺寸	长度	L	取 0.1
	线位移	L	0.1
	周期	T	0.141
动力指标	频率	T^{-1}	7.07
	加速度	LT^{-2}	5



(a) 阻尼器设计图



(b) 阻尼器实物图

(c) 阻尼器的安装图

Figure 2. Design drawings, physical drawings and installation drawings of viscous dampers
图 2. 粘滞阻尼器设计图、实物图和安装图

Table 2. Design parameters of viscous dampers

表 2. 粘滞阻尼器设计参数

参数	数值	参数	数值
缸体直径/mm	50	阻尼孔直径/mm	2
活塞头长度/mm	50	阻尼孔长度/mm	50
活塞头直径/mm	50	阻尼孔个数	4
活塞杆直径/mm	50	粘滞液体稠度/(mm ² ·s ⁻¹)	100

切向和径向两个方向的加速度；采用 991B 型拾振测量各跨跨中、墩顶和墩底的切向和径向两个方向的位移；采用拉线位移计测量支座切向滑移位移；采用应变片测量各跨跨中、主梁底、跨端、墩顶和墩底的应变。在纵坡为 5% 下，分别选取 Chichi 波、EL-centro 波、Taft 波和根据规范反应谱设计的人工波进行一致输入，输入方向为顺桥向(1 号墩与 4 号墩的连线)和横桥向(垂直于 1 号线与 4 号线的连线)一起。输入地震波工况如表 3 所示。

4. 试验结果分析

4.1. 模型桥基本动力特性

在安装粘滞阻尼器前后，对振动台试验中运行白噪声所得到的频谱进行分析，得到曲线桥的一阶频率后再通过半功率法求得阻尼比。一阶频率和阻尼比数据如表 4 所示。

根据表 4 得到，安装粘滞阻尼器后曲线桥一阶频率略变小，阻尼比略变大。这说明粘滞阻尼器对曲线桥提供了一定的附加阻尼，能起到了一定的作用。

Table 3. Setting the dampers conditions
表 3. 设置阻尼器工况

工况	地震波	数值	台面加速度/g			
			1	2	3	4
1	白噪声	一致	-	-	-	-
2	Chichi	一致	0.902	0.801	0.701	0.652
3	EL-centro	一致	0.480	0.488	0.496	0.538
4	Taft	一致	0.510	0.583	0.678	0.615
5	人工波	一致	0.558	0.645	0.718	0.683

Table 4. Dynamic characteristics
表 4. 动力特性

模型桥状态	一阶频率/Hz	阻尼比/%
无阻尼	2.56	4.53
粘滞阻尼	2.53	6.19

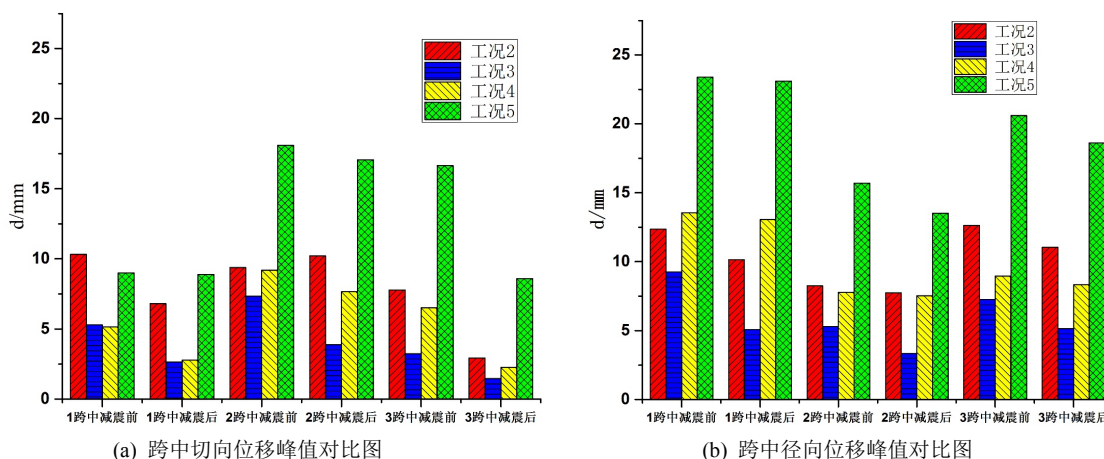


Figure 3. Peak contrast diagram of mid-span displacement before and after shock absorption
图 3. 减震前后跨中位移的峰值对比图

4.2. 主梁地震反应

设置粘滞阻尼器前后各跨跨中的切向位移与径向位移的峰值如图 3 所示。同一地震波激励下，三跨跨中位移的减震率取平均值来分析，其平均减震率如表 5 所示。

由图 3 可知，在纵坡为 5% 下，在切向位移中，在工况 5 下第二跨跨中位移和第三跨跨中位移比其他工况下的数值有明显的变大；在径向位移中，同样也是工况 5 下三跨的跨中位移要大于剩余工况的位移数值。从各跨的跨中位移来看，边跨的切向位移大于径向位移，中跨的径向位移大于切向位移。由表 5 可知，各减震工况中，切向位移的平均减震率范围在 6.51%~30.3%；径向位移的平均减震率范围在 16.56%~28.85%。从上面的数据分析中可以得出粘滞阻尼器能有效的控制主梁的切向位移和径向位移。

4.3. 桥墩的减震效果

4.3.1. 墩顶的减震效果

在这里选取 2 号墩和 4 号墩墩顶的切向位移和径向位移进行分析，而墩顶位移取自盖梁的中点。设

置粘滞阻尼器前后墩顶的切向位移与径向位移峰值对比如图 4 所示。同一地震波激励下, 切向位移取 2 号墩和 4 号墩墩顶切向位移减震率的平均值来分析, 径向位移也是如此, 其平均减震率如表 6 所示。

由图 4 可知, 在工况 2 和工况 3 下, 2 号墩和 4 号墩墩顶的径向位移都大于对应的切向位移; 在工况 4 和工况 5 下, 则正好相反, 2 号墩和 4 号墩墩顶的切向位移大于径向位移。这表明墩顶的位移响应和减震效果都与地震波有着密切的关系。由表 6 可知, 各减震工况中, 切向位移的平均减震率范围在 13.93%~26.58%; 径向位移平均减震率范围在 6.84%~18.41%。从上面的数据中可以得出粘滞阻尼器能有效的控制墩顶的切向位移和径向位移, 能起到减小墩顶地震作用的效果。

4.3.2. 墩底的减震效果

墩底测点选取为了和墩顶统一也为了便于研究, 选取 2 号墩和 4 号墩作为研究对象, 对墩底的应变进行分析。因为墩为双柱型桥墩, 所以在内外墩各贴四个应变片。一个墩的墩底应变片布置如图 5 所示。

在分析计算墩底应变峰值时, 切向应变取应变片 1 和 3 的平均值来进行分析, 径向应变取应变片 2 和 4 的平均值来进行分析。在分析计算平均减震率时, 同一地震波激励下, 切向位移取 2 号墩和 4 号墩

Table 5. Average shock absorption rate of mid-span displacement
表 5. 跨中位移平均减震率

地震波	方向	跨中平均减震率/%
chichi	切向	15.49
EL-centro	切向	30.3
Taft	切向	6.51
人工波	切向	8.23
chichi	径向	18.21
EL-centro	径向	28.85
Taft	径向	16.56
人工波	径向	21.1

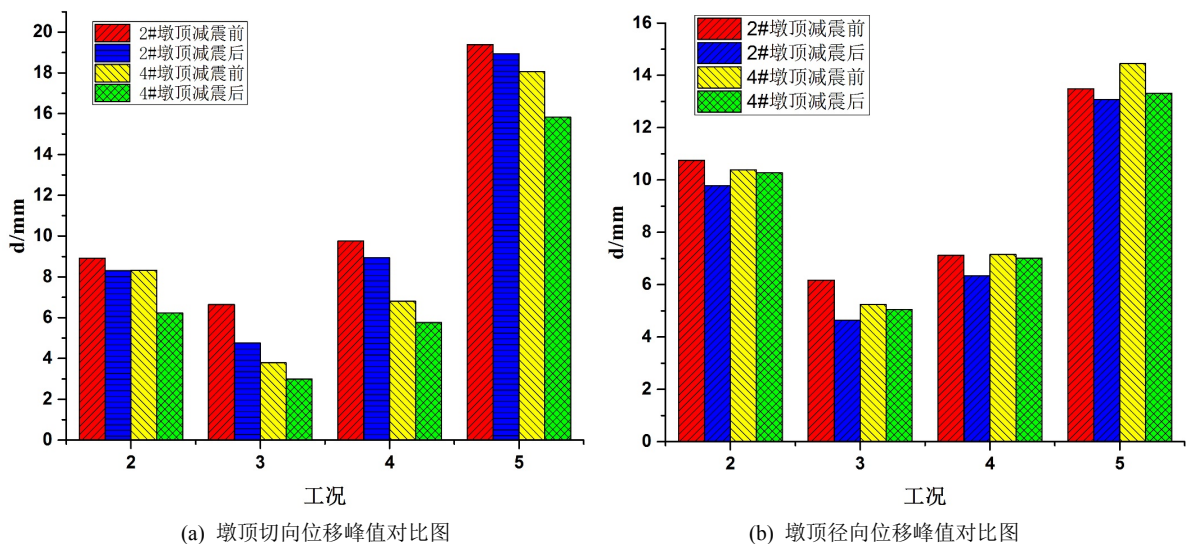


Figure 4. Peak contrast diagram of pier top displacement before and after shock absorption
图 4. 减震前后墩顶位移的峰值对比图

墩底切向应变减震率的平均值来分析, 径向应变取 2 号墩和 4 号墩墩底径向应变减震率的平均值来分析, 其平均减震率如表 7 所示。

由表 7 可知, 安装粘滞阻尼器后, 墩底的切项应变平均减震率范围在 4.75%~9.68%; 径向应变平均减震率范围在 2.75%~12.66%。也可以看出粘滞阻尼器对墩底的应变也能起到减震控制作用。

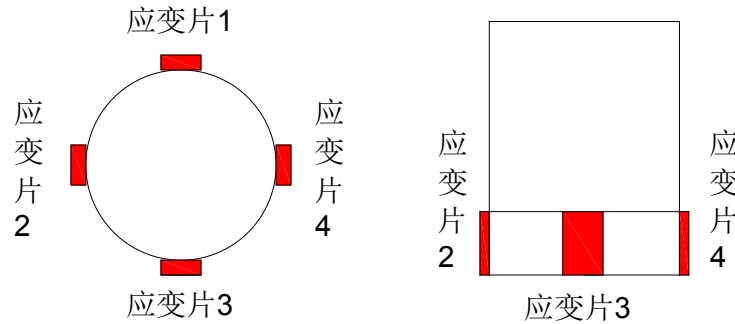


Figure 5. Picture of bottom strain layout of pier
图 5. 墩底应变布置图

Table 6. Average shock absorption rate of pier top displacement
表 6. 墩顶位移平均减震率

地震波	方向	墩顶平均减震率/%
chichi	切向	19.82
EL-centro	切向	26.58
Taft	切向	13.93
人工波	切向	14.01
chichi	径向	11.34
EL-centro	径向	18.41
Taft	径向	17.59
人工波	径向	6.84

Table 7. Average shock absorption rate of pier bottom strain
表 7. 墩底应变平均减震率

地震波	方向	内/外柱墩	墩底平均减震率/%	内/外柱墩	墩底平均减震率/%
Chichi	切向	外柱墩	4.75	内柱墩	4.63
EL-centro	切向	外柱墩	9.01	内柱墩	7.84
Taft	切向	外柱墩	9.23	内柱墩	8.48
人工波	切向	外柱墩	3.79	内柱墩	2.75
Chichi	径向	外柱墩	9.68	内柱墩	12.66
EL-centro	径向	外柱墩	7.22	内柱墩	6.08
Taft	径向	外柱墩	5.83	内柱墩	6.16
人工波	径向	外柱墩	9.42	内柱墩	7.79

5. 结论

为研究纵坡对曲线桥粘滞阻尼器减震效果的影响, 本文以纵坡为 5% 的曲线桥作为研究对象, 对安装粘滞阻尼器前后之间的地震反应进行对比。在分析了在双向地震作用下纵坡对曲线桥各工况减震效果的影响之后, 对比分析数据, 从而得到以下结论:

1) 对安装粘滞阻尼器前后对比, 发现模型桥的一阶频率变化较小且阻尼比略变大, 说明粘滞阻尼器对曲线桥提供了一定的附加阻尼。

2) 安装粘滞阻尼器后, 主梁跨中切向和径向位移得到有效控制; 墩顶切向位移和径向位移也都有一定的减小; 墩底的切向应变与径向应变也有相应的减小。从上面可以得出粘滞阻尼器能有效的控制主梁跨中和墩顶的切向位移和径向位移, 能对墩底的应变起到减小的作用。对于纵坡为 5% 的曲线桥来说, 粘滞阻尼器能起到减小地震作用从而保护曲线桥免受地震的破坏。

基金项目

国家自然科学基金(51378037)。

参考文献

- [1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [2] Ruiz Julian, F.D., Hayashikawa, T., Obata, T., *et al.* (2007) Seismic Performance of Isolated Curved Steel Viaducts Equipped with Deck Unseating Prevention Cable Restrainers. *Constructional Steel Research*, **63**, 237-253. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.03.008>
- [3] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] 汪大洋, 周云, 王烨华, 等. 粘滞阻尼器减震结构的研究与应用进展[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(4): 22-31.
- [5] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [6] 王兰. 曲线梁桥的减隔震研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [7] 李正英, 蒋林均, 李正良. 曲线连续桥不同减隔震方案对比分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 157-161.
- [8] 陈宵. 隔震曲线桥的地震反应分析研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
- [9] Takao, O. and Shigeki, U. (2008) Shake Table Tests for Bridge Model Using Structural Control Devices. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, 12-17.
- [10] 刘奕. 曲线连续梁桥耗能减震方法研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
- [11] 陈树刚, 亓兴军. 曲率半径变化对曲线桥粘滞阻尼器减震效果的影响[J]. 公路交通科技, 2012, 29(8): 56-59.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org