

# 摩擦摆支座在钢管混凝土拱桥中减震效果研究

黄清云<sup>1</sup>, 汪甲<sup>2</sup>, 张克<sup>1</sup>

(1. 龙岩学院 资源工程学院, 福建 龙岩 364000; 2. 厦门和诚工程技术有限公司, 福建 厦门 361000)

**摘要:**以跨度为120 m的刚性拱肋柔性系杆的下承式钢管混凝土拱桥为分析模型,利用摩擦摆减震隔震支座对简支体系的桥跨结构进行减震研究,运用MIDAS有限元软件模拟多维人工地震波输入以检验摩擦摆系统的减震效果。分析结果证明了在大跨度钢管混凝土拱桥中应用摩擦摆隔震支座系统的有效性。

**关键词:**钢管混凝土拱桥; 摩擦摆支座; 人工地震波激励; 减震效果

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)01-0020-04

## Effect of friction pendulum bearings on vibration damping of concrete-filled steel tubular arch bridge

Huang Qingyun<sup>1</sup>, Wang Jia<sup>2</sup>, Zhang Ke<sup>1</sup>

(1. College of Resource Engineering, Longyan University, Longyan 364000, China;

2. Xiamen Hecheng Engineering Technology Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

**Abstract:** The effect of friction pendulum vibration isolation and damping bearings on the vibration damping of simply supported arch structure of a rigid concrete-filled steel tubular arch bridge was analysed. The arch bridge has a span of 120 m with flexible column lower bearing. Finite element model MIDAS was employed to simulate the multidimensional artificial seismic wave input to investigate the damping effect of the friction pendulum bearing system. The results indicate that the friction pendulum bearing system is effective in the vibration damping of the large span concrete filled steel tubular arch bridge.

**Keywords:** concrete filled steel tubular arch bridge; friction pendulum bearing; artificial seismic wave excitation; damping effect

钢管混凝土(concrete-filled steel tube, CFST)拱桥为钢筋混凝土组合体系中的一种。这类结构是在钢管中充填混凝土,混凝土受到了径向的束缚作用而限制其膨胀,由于混凝土在3个方向上都受压,显著增强了混凝土抵抗压力的性能<sup>[1]</sup>。

钢管混凝土拱桥的建造在我国起步比较晚,20世纪90年代才开始。但后期发展迅速,有30多座钢管混凝土拱桥跨径都已超过200 m。以往

的桥梁损坏大都由于地震作用,而我国又处在地震高发区,且大跨度钢管混凝土拱桥是其抗震性能的弱点所在<sup>[2]</sup>。随着大跨度钢管混凝土拱桥的快速增长,相关的理论研究也逐渐增多,目前大多采用的是一致激励法输入地震波对结构进行分析,但分析结果与实际值有很大的不同。本文运用有限元软件模拟多维人工地震波输入来研究摩擦摆系统对CFST拱桥的减震效果。

# 1 摩擦摆支座理论介绍

## 1.1 摩擦摆支座简介

发生地震时,摩擦摆隔震装置将上部结构与地面相分隔开,使结构物的振动周期随之延长,这样有利于错开地震波在场地中传播的卓越周期,从而可以很大程度地减小结构物对地震波的反应,起到减震隔震的作用。并且,结构物在来回运动的过程中,摩擦摆支座的滑动面和滑块之间将出现摩阻力以抵消一大部分地震作用的能量,从而降低地震的破坏作用<sup>[3]</sup>。选取摩擦摆隔震支座装置对整个结构的隔震减震效果显著,并且震后支座可以自动复原,无需更换。

## 1.2 工作原理

桥跨结构中的抗震理论基本都是选取各类减震体系,利用减震体系本身的滞回特性来消耗地震波的输入能量,以达到地震力对下部构造影响减弱的目的<sup>[4]</sup>。

根据能量守恒原理,传统抗震结构:

$$E_{in} = E_R + E_D + E_S \quad (1)$$

消能减震结构:

$$E_{in} = E_R + E_D + E_S + E_A \quad (2)$$

式(1)、(2)中,  $E_{in}$  为地震发生时输入结构的全部能量;  $E_R$  为结构做出对地震反应的能量,包括结构的动能及势能;  $E_D$  为结构体本身阻尼部分抵消的能量( $\leq 5\%$ );  $E_S$  为主要构件的塑性变形甚至损坏所抵消的能量;  $E_A$  为摩擦摆抵消的能量。

从式(1)看出,对传统抗震模型而言,当地震输入的总能量  $E_{in}$  较大时,  $E_D$  太小(不计算入内),要使总能量全部被抵消,则  $E_R$ 、 $E_S$  的值相应就会比较大,但结构的弹性变形能即  $E_R$  的值是一定的,这样就将使  $E_S$  的值很大,最终结果将使上部结构和承重构件产生变形和开裂甚至坍塌破坏。但对于式(2)来说,同样假定  $E_D$  忽略不计,摩擦摆将首先进入消能状态,大部分输入的地震能量  $E_{in}$  都被消耗,分配给  $E_R$ 、 $E_S$  的能量将大大减小。这样不仅可以避免桥跨结构和下部墩台结构遭到损坏,还可以快速抵消结构对地震的反应( $E_{in} \rightarrow 0$ ),进而保证结构在地震中的安全<sup>[5]</sup>。

# 2 模型选取与参数确定

结构模型选取跨度为 120 m,桥宽为 31 m,拱高为 24 m,矢跨比为 1/5 的下承式钢管混凝土拱

桥。两拱肋之间设置 4 道对称分布的“K”型以及拱顶设置一道“\*”型横撑。结构为简支体系,其桥面系为漂浮体系,桥面系与一侧端横梁间设有纵、横向位移约束。并且假定土壤为刚性,墩身刚度无限大,墩底部均为固结。模拟结构的支座均选用相同规格和型号的摩擦摆支座。其支座参数为:滑动前刚度 3 490 kN/m,位移速度较慢时摩擦系数 0.05,位移速度较快时摩擦系数 0.03,摩擦系数变化参数 20,摩擦面曲率半径 1.35 m。该拱桥结构的有限单元模型如图 1。

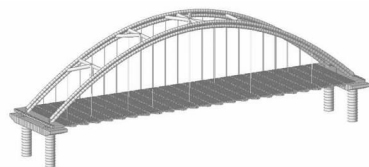


图1 拱桥有限元模型

Fig.1 Finite element model of concrete filled steel tubular arch bridge with a span of 120 m

由于地震的发生在时间与空间上具有不确定性,要选取使结构产生最大地震效应的一种地震波作用方向是极复杂的,国内外诸多学者针对地震波的选择进行了大量的研究。学者们普遍认为,波能量的输入不仅是真实的地震加速度纪录,还是人工加速度纪录。所以选取人工地震波来反映震动效应。该人工地震波调整峰值是 0.2 g,地震的时长调整成 40 s。地震波采用多维一致的方式进行输入,输入时,竖直方向的地震波大致调整成水平方向的 0.65 倍。

# 3 动力特性对比分析

## 3.1 原结构和减震结构的频率对比分析

地震波的频率与周期成反比例关系,所以频率大小直接反应减震效果的有效性。即减震模型频率的减小说明周期增大,证明了减震模型的拱脚设计成固结的桥梁模型进行减震是可行的。表 1 是原结构和减震结构前十阶频率对比情况。

通过表 1 可看出:当阶数为 1 时,原模型的频率为 0.229 8,减震模型频率为 0.205 8,减震率为 10.4%,当阶数为 5 时减震率为 11.9%,阶数为 10 时减震率为 13.42%。也就是说减震模型相对于原模型频率明显减小,且减小的幅度随阶数的增加而递增。这就说明了摩擦摆支座起到了作

用,直接导致结构的频率减小周期变大。

表 1 原结构和减震结构前十阶频率表

Tab.1 The first 10 order frequencies of the original arch bridge model and the friction pendulum vibration damping model

阶数	原结构		减震结构	
	频率/Hz	振型情况	频率/Hz	振型情况
1	0.229 8	对称侧斜	0.205 8	对称侧斜
2	0.639 7	反对称水平向弯曲	0.572 1	反对称水平向弯曲
3	0.688 5	反对称纵向弯曲	0.587 9	反对称纵向弯曲
4	1.069 9	反对称扭转	0.948 6	对称水平向弯曲
5	1.107 7	对称侧斜	0.976 2	反对称竖向弯曲加微扭转
6	1.263 1	对称竖直方向向弯曲	1.023 3	对称水平向弯曲
7	1.517 6	反对称竖弯曲	1.148 6	对称扭转
8	1.575 3	对称扭转	1.240 3	对称竖向弯曲加微扭转
9	1.758 8	整体扭转	1.362 5	反对称竖向弯曲
10	1.860 3	反对称侧斜	1.610 7	反对称扭转

3.2 原结构和减震结构的振型图

振型图是摩擦摆支座应用于减震模型有效性最直观的检验,可以通过对比原模型与减震模型的振型图来分析设计的有效性。图 2~5 是原结构和减震结构的部分阶数振型图。

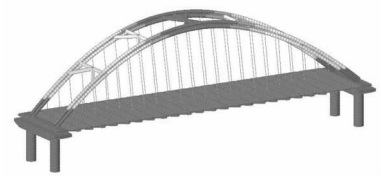


图 2 原结构一阶频率振型图

Fig.2 1st order frequency vibration mode of the original bridge model

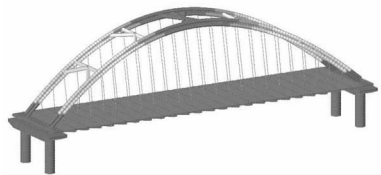


图 3 减震结构一阶频率振型图

Fig.3 1st order frequency vibration mode of the friction pendulum vibration damping model

通过对比原模型与减震模型一阶振型图可以看出,两者没什么区别,振型图基本相似,说明对于一阶模型来说减震效果不明显。不光是一阶减

震效果不佳,前三阶的原模型和减震模型振型图也基本相似。

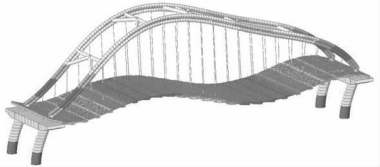


图 4 原结构七阶频率振型图

Fig.4 7th order frequency vibration mode of the original bridge model

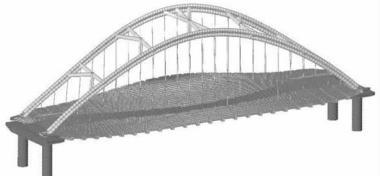


图 5 减震结构七阶频率振型图

Fig.5 7th order frequency vibration mode of the friction pendulum vibration damping model

对比分析原模型与减震模型的七阶振型图发现,在没有采用摩擦摆支座(原模型)的情况下,其振型图变形扭曲较大,当采用减震设计后模型的振型图趋于稳定状态。随着阶数的增加,对比其原模型与减震模型的振型图效果明显。

从整体的振型形式看,原结构和减震结构前

面三阶的振型图大致相同。笔者认为摩擦摆支座的设置使原结构的频率发生变化,但因为其原有的支撑结构都转变成摩擦减震隔震支座,这对整体结构来说,改变相对均匀,不会引起大的变化。因此只有在频率阶数较高时变化才明显,而低阶频率基本不发生变化。

减震结构虽然相比于原结构来说束缚作用有所减弱,但结构的扭转非但没有增强,反而有所减弱。导致这个问题出现的原因是:当地震作用输入结构时,摩擦摆支座首先要抵消掉大部分的能

量;上部结构设置了横向支撑,进一步增强了桥跨结构的整体性,有效地限制了扭转这一不利形式。

3.3 拱圈内力减震效果对比分析

选取人工地震波进行输入,通过比较分析原结构和减震结构的轴力、剪力、扭矩、竖向弯矩和横向弯矩,表明摩擦摆支座在大跨度系杆拱桥中运用的合理性。表2给出人工地震波在3个方向上一起施加时,原结构与减震结构的拱肋内力最大值和减震率的大小。

从表2可知:在人工地震波激励下,减震结构

表2 原结构和减震结构内力比较表

Tab.2 Comparison of internal force between the original bridge model and the friction pendulum vibration damping model

内力	原结构	减震结构	减震率/%	原结构峰值 作用位置	减震结构峰值 作用位置
轴力/kN	6 132.36	5 084.00	17.09	1/8 拱肋	1/8 拱肋
剪力/kN	2 866.91	1 000.56	65.10	拱端	拱端
扭矩/(kN·m)	1 477.35	1184.58	19.82	1/8 拱肋	1/8 拱肋
竖向弯矩/(kN·m)	4 760.58	3 292.17	30.85	拱端	拱端
横向弯矩/(kN·m)	4 340.60	3 603.53	16.98	拱端	拱端

的所有内力相比于原结构都有所减弱。尤其是剪力,其减震率达到65.1%,竖向弯矩的减震效果次之,而横向弯矩减少最弱,也达到16.98%。另外,从轴力和扭矩来看,两者的峰值不管是减震结构还是原结构都出现在1/8拱肋处,而剪力、竖向弯矩以及横向弯矩峰值都出现在拱端,这也就是说明原结构和减震结构各内力的变化趋势基本相同,说明对整体桥跨结构而言,摩擦摆支座的放置不会引起桥梁结构的受力形式发生大的变化。

4 结论

1)摩擦摆支座系统可以增加桥梁结构的延性,抵消掉大量的地震波能量。而且,对于刚度较

弱的大跨度钢管混凝土桥梁来说,适当延长周期有利于避开地震波在地基土中传播的卓越周期,减弱地震能量效应,对桥梁抗震非常有利。

2)减震结构的所有内力相比于原结构来说都有所减弱,但减震幅度不一。在设计桥梁结构的摩擦摆支座减震隔震系统时,应从多种内力出发分别进行研究和讨论,以能够正确判断减震幅度,最大程度实现减震效果。

3)从振型图可知:由于摩擦摆支座设置相对均匀,原结构和减震结构前三阶的振型图基本没什么变化,而到了高阶以后效果开始显现出来。进一步证明了在大跨度钢管混凝土拱桥中设置摩擦摆支座的有效性。

参考文献:

[1] 刘迎春,薛素铎,上官兴.上承式拱桥结构形式变化综述[J].公路,2012(3):50-56.

[2] 陈宝春,牟廷敏,陈宜言,等.我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J].建筑结构学报,2013,34(1):1-10.

[3] 郭俊伟.摩擦摆减隔震支座在高烈度区高架桥的减震效果分析[J],城市道路与防洪,2013(4):187-190.

[4] 杨允表.摩擦摆支座在桥梁抗震设计中的应用[J].中国市政工程,2014(5):88-91.

[5] 汪甲.多维地震作用下大跨度CFST系杆拱桥抗震性能及减震分析[D].兰州:兰州理工大学,2013.