

文章编号:1003-4722(2020)01-0038-06

# 设柔性中央扣的特大跨度悬索桥纵向抗震体系研究

郭志明<sup>1</sup>,汪鸿鑫<sup>2</sup>,叶爱君<sup>2</sup>

(1.南京市公共工程建设中心,江苏南京 210019; 2.同济大学土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

**摘要:**为针对设有柔性中央扣的特大跨度悬索桥选择合理的纵向抗震体系,以设有柔性中央扣的南京仙新路特大跨度悬索桥(主跨1 760 m的双塔单跨地锚式悬索桥)为背景进行研究。采用SAP 2000软件,考虑柔性中央扣只能受拉不能受压的力学特性建立该桥非线性有限元模型,对柔性中央扣、粘滞阻尼器以及两者组合作用的减震效果进行对比分析,在此基础上提出合理的减震体系,并确定合理的体系参数。结果表明:粘滞阻尼器的减震效果远好于柔性中央扣;在设有柔性中央扣的特大跨度悬索桥中,由于柔性中央扣在地震作用下会被拉断而失效,因此建议将柔性中央扣的销钉设计为“熔断”部件,同时在塔、梁连接处设置粘滞阻尼器减小加劲梁地震位移;粘滞阻尼器的参数应综合考虑静力和地震响应优化确定。

**关键词:**悬索桥;柔性中央扣;粘滞阻尼器;纵向抗震体系;减震效果;参数优化;有限元法

**中图分类号:** U442.25;U442.55 **文献标志码:** A

## Longitudinal Anti-Seismic System for Long-Span Suspension Bridge with Flexible Central Buckle

GUO Zhi-ming<sup>1</sup>, WANG Hong-xin<sup>2</sup>, YE Ai-jun<sup>2</sup>

(1. Nanjing Public Project Construction Center, Nanjing 210019, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To select a rational longitudinal anti-seismic system for the long-span suspension bridge with flexible central buckle, the long-span suspension bridge on the Xianxin Road in Nanjing, which is a two-tower single span earth-anchored suspension bridge with a main span of 1 760 m, was taken as the study background. The software SAP 2000 was used to build the nonlinear finite element model of the bridge, taking into consideration of the mechanical property of the flexible central buckle that can bear tensile forces and cannot accommodate compressive force. The seismic mitigation effects of the flexible central buckle and viscous dampers as well as the collaborated effect of the two were compared and analyzed, based on which, a rational anti-seismic system was proposed and the rational systematic parameters were determined. The results show that the seismic mitigation effect of viscous dampers is far better than that of the flexible central buckle. In the long-span suspension bridge, the flexible central buckle is possible to be pulled to break, and thus fail under the action of earthquakes, therefore, it is suggested that the pins be able to function like circuit breakers, and viscous dampers be installed at the tower-girder connections to reduce the displacement of the stiffening girder induced by earthquakes. When determining the parameters of the viscous dampers, the static forces and seismic responses should be considered.

**Key words:** suspension bridge; flexible central buckle; viscous damper; longitudinal anti-seismic system; seismic mitigation effect; parameter optimization; finite element method

收稿日期: 2019-08-27

作者简介: 郭志明,高级工程师,E-mail:25157710@qq.com。研究方向:桥梁与隧道建设管理。

### 1 引言

悬索桥是一种柔性结构,在汽车荷载和风荷载下,加劲梁、主缆会产生纵、横向位移。为了减小活载、风荷载引起的加劲梁纵向位移,常采用在跨中设置中央扣联结主缆和加劲梁的措施。中央扣主要有2种形式,一种是刚性中央扣,即用刚性三角桁架联结主缆与加劲梁;另一种为柔性中央扣,即用一对或多对斜吊索建立缆、梁纵向约束。润扬长江大桥和四渡河特大桥均采用了刚性中央扣;而贵州坝陵河大桥、矮寨大桥等多座悬索桥则采用了柔性中央扣。相对而言,柔性中央扣由于施工的便利性,更为设计师所青睐。

柔性中央扣提高了悬索桥刚度,因此对桥梁的动力特性和地震响应也有明显影响。肖勇刚等<sup>[1]</sup>发现柔性中央扣能提高悬索桥加劲梁的纵向刚度、限制加劲梁的纵飘振型;于德恩等<sup>[2]</sup>、王杰等<sup>[3]</sup>的研究表明加设柔性中央扣能限制加劲梁的纵向地震位移、改善塔底的受力。但这些文献均假定柔性中央扣正常发挥作用,没有关注其自身的抗震性能。如果柔性中央扣在地震下发生破坏,不仅无法发挥其限位作用,更会由于不明确的破坏模式导致震后不易修复。

另一方面,在特大跨度悬索桥的设计中,通常选用纵向飘浮体系以减小桥塔及其基础的地震内力,但是飘浮体系会使得强震下的梁端位移过大,必须采取控制措施以保证整体结构的抗震安全性<sup>[4]</sup>。在塔、梁间设置液压粘滞阻尼器是一种有效且常用的减小加劲梁纵向地震位移的措施,也能减缓车辆和风致振动<sup>[5-6]</sup>。而粘滞阻尼器的减震效果不仅取决于阻尼器的阻尼系数和速度指数<sup>[7-8]</sup>,而且也受悬索桥的动力特性及其所处的地震环境的影响<sup>[9]</sup>。由于每一座悬索桥的动力特性有其独特性,所处的地震环境也各有不同,因此需要具体工程具体分析。

如前所述,柔性中央扣和液压粘滞阻尼器均能减小悬索桥加劲梁的纵向地震位移,但是哪一种措施具有更好的减震效果,柔性中央扣在强震下是否能正常发挥作用,目前还缺少结合实际工程的研究。进一步地,对于设有柔性中央扣的特大跨度悬索桥,其合理可行的纵向减震体系还需要结合实际工程进行详细研究。鉴于此,以在建南京仙新路特大跨度悬索桥为背景,对设柔性中央扣的特大跨度悬索桥纵向抗震体系进行研究。

### 2 工程概况

在建的南京仙新路过江通道主桥,是一座跨径布置为(580+1 760+580) m的双塔单跨地锚式悬索桥(图1),建成之后将成为主跨跨径世界第二、国内第一的悬索桥。该桥加劲梁采用封闭式流线型扁平钢箱梁;塔身采用门式框架混凝土结构,2根塔柱间的距离从塔顶至塔底呈直线变化;南、北桥塔承台均为矩形承台;承台下设摩擦桩基础。主桥支座均为球型钢支座,纵向滑动、横向约束;为了减小温度、活载和风荷载下的加劲梁位移,并保护短吊索,在主跨跨中设置柔性中央扣。

### 3 动力分析模型及地震输入

#### 3.1 动力分析模型

由于在设防地震作用下,南京仙新路过江通道主桥柔性中央扣的地震内力很大,同时加劲梁纵向地震位移也依然过大,因此需要进行合理减震体系研究。采用SAP 2000软件建立该桥有限元动力分析模型(图2),为了更准确地模拟在地震作用下主桥结构的响应,建模时考虑了边界联对主桥的影响。加劲梁、桥塔、塔座和承台根据实际截面尺寸采用框架单元模拟;主缆和吊杆采用桁架单元模拟,吊杆通过主从约束与加劲梁连接。主缆、吊杆和桥塔考虑

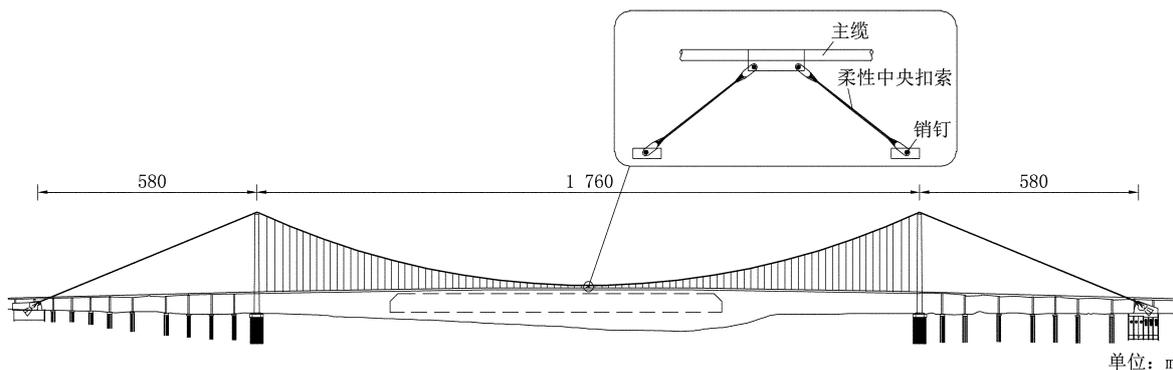


图1 南京仙新路过江通道主桥立面布置

Fig. 1 General Layout of Main Bridge of River Crossing Passage on Nanjing Xianxin Road

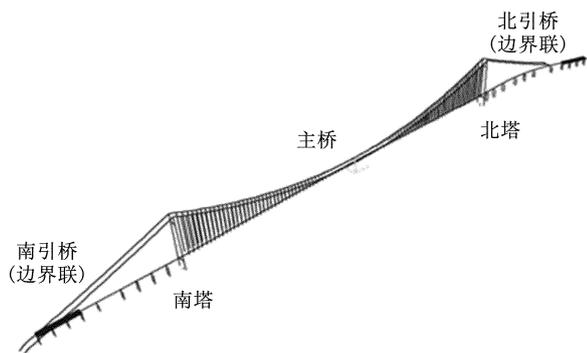


图2 有限元动力分析模型  
Fig. 2 Finite Element Model for Dynamic Analysis

了恒载作用对结构几何刚度的影响<sup>[10]</sup>,二期恒载以线质量的形式加在梁单元上。采用六弹簧模型模拟各群桩基础的影响。

在非线形时程反应分析中,考虑滑动支座的摩擦耗能作用,采用理想弹塑性恢复力模型模拟滑动支座的力~位移滞回关系,弹性段支座刚度计算公式为:

$$K \cdot x_y = F_{\max} = fN$$

式中, $K$ 为支座弹性刚度; $x_y$ 为滑动支座弹性段临界位移,本文取2 mm; $F_{\max}$ 为滑动摩擦力; $f$ 为滑动摩擦系数,球型钢支座的滑动摩擦系数取为0.02; $N$ 为支座所承担的上部结构恒载反力。

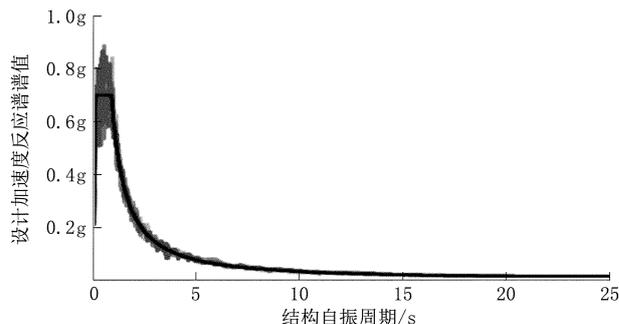
采用桁架单元模拟柔性中央扣,并只考虑抗拉刚度(单根柔性中央扣吊索的抗拉刚度为 $9.2 \times 10^4$  kN/m),设定受压限值为0,以此准确模拟其只能受拉不能受压的力学特性。对比有、无柔性中央扣的主桥模型的动力特性显示,无柔性中央扣模型的纵向基本周期为13.755 s,有柔性中央扣模型的纵向基本周期为12.898 s,可见,柔性中央扣增强了主桥的纵向刚度。

### 3.2 地震动输入

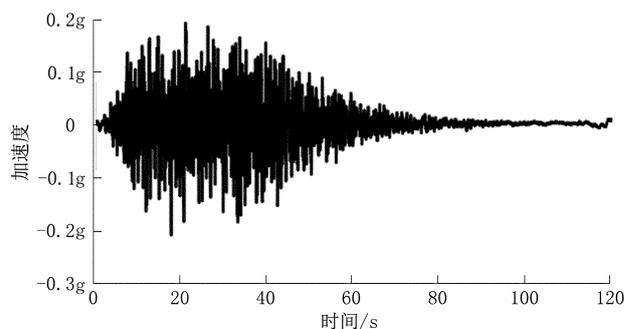
采用桥址场地地震安评报告提供的E2地震(重现期2 500年)的7条加速度时程作为地震输入,7条地震加速度时程对应的反应谱和设计反应谱以及其中一条地震加速度时程曲线见图3。地震反应分析中,还考虑了竖向地震动的影响,竖向地震动按照水平向地震动乘以0.65得到。对每一条地震加速度时程均进行地震反应计算,结果取平均值。

## 4 柔性中央扣和粘滞阻尼器的减震效果分析

为分析柔性中央扣、粘滞阻尼器以及两者组合



(a) 7条地震加速度时程对应的反应谱和设计反应谱



(b) 一条地震加速度时程曲线

图3 地震动输入  
Fig. 3 Earthquake Input

作用的减震效果,首先假定中央扣和阻尼器能正常工作,建立4种有限元模型,对应不同的减震体系。模型A:无柔性中央扣、无粘滞阻尼器;模型B:仅设柔性中央扣;模型C:仅设粘滞阻尼器;模型D:设柔性中央扣+粘滞阻尼器。其中,粘滞阻尼器在每个塔、梁连接处各布置2个,单个阻尼器的阻尼系数 $C=2\ 500\text{ kN} \cdot (\text{m/s})^{-\alpha}$ ,速度指数 $\alpha=0.1$ 。

针对4种模型,采用时程分析方法进行纵向+竖向地震输入下的地震响应分析,采用瑞利阻尼,阻尼比为2%。不同减震体系桥塔塔底与承台底的地震内力见表1。由表1可知:不同减震体系下,塔底与承台底的地震轴力的变化很小,说明柔性中央扣和粘滞阻尼器对桥塔的地震轴力几乎没有影响;柔性中央扣和粘滞阻尼器均能减小塔底和承台底地震剪力,但减小幅度总体在10%以内,同时加设柔性中央扣和粘滞阻尼器对减小主桥地震剪力的作用也没有明显提高;柔性中央扣和粘滞阻尼器均能减小塔底和承台底的地震弯矩,但减小幅度较小,均在10%左右;同时加设柔性中央扣和粘滞阻尼器可提高减小桥塔地震弯矩的能力,幅度约5%。

不同减震体系结构关键位置的地震位移见表2。由表2可知:粘滞阻尼器减小加劲梁、支座的纵

表 1 不同减震体系下桥塔关键截面的地震内力

Tab. 1 Seismic Internal Forces of Key Sections of Main Towers with Different Seismic Mitigation Systems

模型	轴力/ $\times 10^4$ kN				剪力/ $\times 10^4$ kN				弯矩/ $\times 10^6$ kN·m			
	塔底		承台底		塔底		承台底		塔底		承台底	
	南塔	北塔	南塔	北塔	南塔	北塔	南塔	北塔	南塔	北塔	南塔	北塔
A	7.32	6.28	20.9	18.2	3.47	3.25	13.8	13.2	2.12	1.87	4.77	4.28
B	7.19	6.20	20.7	18.2	3.18	3.04	12.7	12.2	1.90	1.72	4.26	3.88
C	7.21	6.23	20.7	18.6	3.18	2.87	13.6	12.9	1.89	1.66	4.34	3.74
D	7.15	6.28	20.6	18.6	3.14	2.95	12.7	12.0	1.81	1.64	4.07	3.68

向位移以及主、引桥纵向相对位移的能力远大于柔性中央扣;同时增设柔性中央扣和粘滞阻尼器后,柔性中央扣限制地震位移的作用被显著削弱。

表 2 不同减震体系结构关键位置的地震位移

Tab. 2 Displacement at Key Locations of Structure with Different Seismic Mitigation Systems

模型	结构关键位置的地震位移/m		
	支座纵向位移	加劲梁纵向位移	主、引桥纵向相对位移
A	0.67	0.62	0.72
B	0.51	0.44	0.56
C	0.32	0.26	0.39
D	0.32	0.26	0.38

采用不同减震体系桥梁模型的加劲梁梁端的位移时程见图 4。由图 4 可知:不采用减震措施的加劲梁位移最大,设置柔性中央扣的加劲梁位移有所减小,同时振动频率显著提高;设置粘滞阻尼器的加劲梁位移显著减小,峰值为 0.26 m,在此基础上再加设柔性中央扣时,加劲梁位移峰值没有变化。

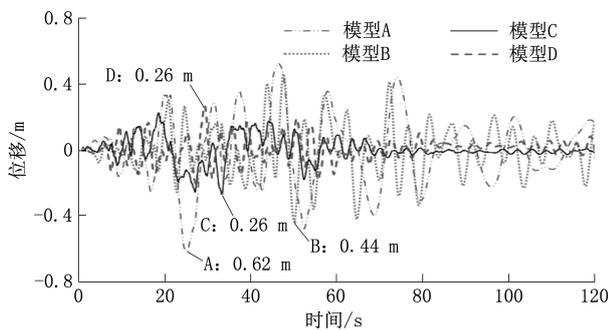


图 4 不同纵向减震体系的加劲梁梁端位移时程

Fig. 4 Girder-End Displacement Time History of Stiffening Girder with Different Longitudinal Seismic Mitigation Systems

不设置与设置纵向粘滞阻尼器的主桥模型中,柔性中央扣在恒载作用与地震作用下的内力和应力见表 3。由表 3 可知:设置了粘滞阻尼器后,柔性中央扣的地震应力减小为原来的 41%,但是地震应力依旧远大于恒载应力,而且超过了中央扣柔性索的强度,会被拉断。

表 3 设置纵向粘滞阻尼器与否对柔性中央扣的影响

Tab. 3 Condition of Flexible Central Buckle with and without Installation of Longitudinal Viscous Dampers

设置纵向粘滞阻尼器与否	恒载作用		地震作用	
	中央扣内力/kN	中央扣应力/MPa	中央扣内力/kN	中央扣应力/MPa
未设置(模型 B)	500	121	21 000	5 070
设置(模型 D)	500	121	8 710	2 100

### 5 有中央扣特大跨度悬索桥的合理纵向减震体系及参数优化

由前述分析可知,柔性中央扣和粘滞阻尼器对悬索桥桥塔和承台底的地震响应影响均比较小,但是粘滞阻尼器限制加劲梁纵向位移的能力远大于柔性中央扣。同时,加设粘滞阻尼器后,柔性中央扣的减震作用不明显,而且中央扣索股在设防地震下会被拉断。

因此,对于风荷载和汽车荷载作用下需要设置中央扣的特大悬索桥,比较适合的纵向减震体系为:在地震作用下,将柔性中央扣作为牺牲构件,在给定拉力下失效,同时在塔、梁间设置纵向液压粘滞阻尼器以减小加劲梁的地震位移。柔性中央扣的具体设计方案为:将连接索股与索夹耳板的销钉作为“熔断”部件,允许其剪断,引入能力设计方法,保护索夹和索股不受损坏,地震后更换销钉,桥梁即可恢复正常使用功能。在南京仙新路过江通道主桥中,根据正常使用要求,最终确定销钉的抗剪强度为 3 000 kN,索股与索夹耳板的强度要求比销钉高一等级,建议大于 1.2 倍的销钉强度,最终取 3 600 kN。

这一减震体系依靠粘滞阻尼器进行耗能减震,而粘滞阻尼器的力学参数包括阻尼系数和速度指数。在该桥中,速度指数根据静力性能要求确定,取 0.1,而阻尼系数需要根据抗震性能要求进行优化。为此,选取 7 种阻尼系数,  $C=0, 750, 1 500, 2 500, 4 000, 6 000, 9 000 \text{ kN} \cdot (\text{m/s})^{-0.1}$ ,分析阻尼系数对结构关键截面的内力和关键位置位移地震响应的影响。

采用不同阻尼系数时,桥塔塔底与承台底截面的地震剪力、地震弯矩的变化见图5。由图5可知:随着粘滞阻尼器阻尼系数的增加,桥塔塔底与承台底截面地震剪力、地震弯矩均呈现先减小后增大的趋势,当阻尼系数为 $2\,500\text{ kN}\cdot(\text{m/s})^{-0.1}$ 时,地震响应达到最小值。

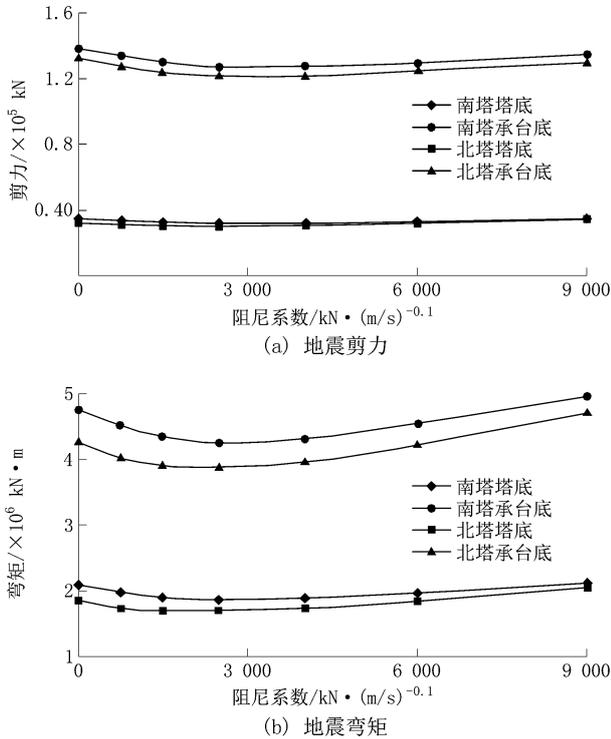


图5 阻尼系数对桥塔地震内力的影响  
Fig. 5 Effect of Damping Coefficient on Internal Forces of Towers under Earthquake

采用不同阻尼系数时,阻尼器位移、桥塔和主桥梁端最大纵向位移以及主、引桥最大纵向相对位移的变化情况见图6。由图6可知:随着粘滞阻尼器阻尼系数的逐渐增大,阻尼器位移逐渐减小;桥塔、梁端最大纵向位移以及主、引桥最大纵向相对位移随着阻尼系数的增大而减小,但当阻尼系数大于 $4\,000\text{ kN}\cdot(\text{m/s})^{-0.1}$ 后,继续增加阻尼系数,位移趋于平缓,甚至小幅度增加,最后趋近于塔、梁纵向固定约束的情况。

因此,兼顾加劲梁纵向位移和主、引桥纵向相对位移以及桥塔地震内力,比较合理的阻尼系数为 $2\,500\text{ kN}\cdot(\text{m/s})^{-0.1}$ 。

## 6 结论

本文以在建的南京仙新路特大跨度悬索桥为背景,采用SAP 2000软件,通过比较柔性中央扣和粘

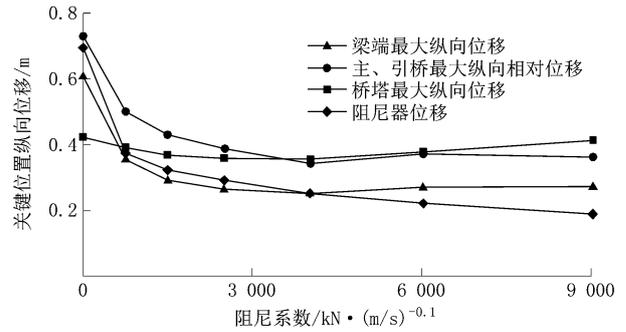


图6 阻尼系数对结构关键位移的影响  
Fig. 6 Influence of Damping Coefficient on Displacement at Key Locations of Structure

滞阻尼器的减震效果,提出有中央扣特大跨度悬索桥的合理减震体系。结果表明:

(1) 柔性中央扣能显著减小特大跨度悬索桥加劲梁和支座的地震位移,但中央扣自身地震内力远大于恒载内力,会被拉断从而无法发挥作用,而粘滞阻尼器限制加劲梁地震位移的能力远大于柔性中央扣,是更好的选择。

(2) 设置粘滞阻尼器会显著减小柔性中央扣的地震内力,同时抑制其减震作用,而中央扣在地震作用下依然会被拉断。

(3) 对于设置柔性中央扣的特大跨度悬索桥的合理纵向减震体系为在地震作用下将柔性中央扣作为牺牲构件,让连接索股与索夹耳板的销钉在给定拉力下剪断,并采用能力设计方法进行索夹和索股强度设计,使其不受地震损坏,同时在塔、梁间设置纵向液压粘滞阻尼器以减小加劲梁的地震位移。

(4) 粘滞阻尼器的速度指数可以由静力设计确定,但阻尼系数应综合考虑加劲梁地震位移和桥塔地震内力优化确定。

## 参考文献 (References):

- [1] 肖勇刚,陈伟华. 大跨度悬索桥动力特性的参数分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2016,13(1): 28-33.  
(XIAO Yong-gang, CHEN Wei-hua. Parameter Analysis of Long Span Suspension Bridge Dynamic Characteristics[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 13(1): 28-33. in Chinese)
- [2] 于德恩,李建中. 中央扣对大跨悬索桥地震响应的影响研究[J]. 结构工程师,2016,32(1):112-118.  
(YU De-en, LI Jian-zhong. Influence of Central Buck-

le on Seismic Response of Long-Span Suspension Bridges[J]. *Structural Engineer*, 2016, 32(1): 112-118. in Chinese)

[3] 王杰,李建中. 不同纵向约束体系对三塔悬索桥地震反应影响研究[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2016, 29(2): 1-5, 11.  
(WANG Jie, LI Jian-zhong. Influence of Different Longitudinal Constrain Systems on Seismic Response of Triple-Tower Suspension Bridge[J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science)*, 2016, 29(2): 1-5, 11. in Chinese)

[4] 王浩,李爱群,郭彤. 超大跨悬索桥地震响应的综合最优控制研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(3): 6-10.  
(WANG Hao, LI Ai-qun, GUO Tong. Compositive Optimal Control of the Seismic Response for Super-Long-Span Suspension Bridges[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2006, 33(3): 6-10. in Chinese)

[5] 黄康. 郭家沱长江大桥非线性粘滞阻尼器参数研究[J]. *公路交通技术*, 2016, 32(6): 32-37.  
(HUANG Kang. Study on Non-linear Viscous Damper Parameters of Guojiatuo Yangtze River Bridge [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2016, 32(6): 32-37. in Chinese)

[6] 吕龙,李建中. 粘滞阻尼器对地震、列车制动和运行作用下公铁两用斜拉桥振动控制效果分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(12): 139-146.  
(LYU Long, LI Jian-zhong. Study on Vibration Control Effect of Viscous Dampers for Rail-cum-Road Cable-Stayed Bridge during Earthquake, Train Braking and Running [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(12): 139-146. in Chinese)

[7] 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): 93-99.  
(ZHAO Ji-dong, ZHANG Yong-liang, CHEN Xing-chong, *et al.* Research on Seismic Reduction of Tall-Pier and Long-Span Railway Continuous Rigid-Framed Bridge Based on Viscous Damper [J]. *World Earthquake Engineering*, 2016, 32(2): 93-99. in Chinese)

[8] 韩振峰,叶爱君. 千米级斜拉桥的纵向减震体系研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2015, 35(6): 64-70.  
(HAN Zhen-feng, YE Ai-jun. Research on the Longitudinal Earthquake-Reduction System of Cable-Stayed

Bridges over Kilometers [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2015, 35(6): 64-70. in Chinese)

[9] 阮怀圣,屈爱平,何友娣,等. 大跨度公铁两用钢桁梁斜拉桥结构地震响应特征研究[J]. *桥梁建设*, 2015, 45(2): 32-38.  
(RUAN Huai-sheng, QU Ai-ping, HE You-di, *et al.* Study of Structural Seismic Response Characteristics of Long Span Rail-cum-Road Steel Truss Girder Cable-Stayed Bridges [J]. *Bridge Construction*, 2015, 45(2): 32-38. in Chinese)

[10] Zhou L, Wang X, Ye A. Shake Table Test on Transverse Steel Damper Seismic System for Long Span Cable-Stayed Bridges [J]. *Engineering Structures*, 2019, 179: 106-119.



GUO Zhi-ming

**郭志明**

1971-，男，高级工程师  
1994年毕业于同济大学桥梁与隧道工程专业，工学学士，1997年毕业于同济大学桥梁与隧道工程专业，工学硕士。研究方向：桥梁与隧道建设管理

E-mail: 25157710@qq.com



WANG Hong-xin

**汪鸿鑫**

1995-，男，硕士生  
2018年毕业于福州大学土木工程专业，工学学士。研究方向：桥梁抗震

E-mail: whx@tongji.edu.cn



YE Ai-jun

**叶爱君**

1970-，女，教授  
1992年毕业于同济大学桥梁与隧道工程专业，工学学士，1995年毕业于同济大学桥梁与隧道工程专业，工学硕士，1998年毕业于同济大学桥梁与隧道工程专业，工学博士。研究方向：桥梁抗震

E-mail: yeaijun@tongji.edu.cn

(编辑：叶青)