

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.050



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 设置弹塑性中央扣的三塔悬索桥纵向减震体系

吕龙<sup>1,2,3</sup>, 唐光武<sup>1</sup>, 于德恩<sup>4</sup>

(1. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 桥梁工程结构动力学国家重点实验室, 重庆 400067;  
2. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059; 3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;  
4. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100089)

**摘要:**以某三塔悬索桥为背景,建立桥梁有限元计算模型,采用非线性时程分析方法计算悬索桥中塔塔梁间不同弹性索刚度下桥梁的地震响应,研究中塔塔梁间设置弹性索对三塔悬索桥地震响应的影响;分析设置柔性中央扣后悬索桥的地震响应,并与无中央扣的情况进行对比;根据地震作用下三塔悬索桥柔性中央扣的受力特点,提出采用弹塑性减震装置作为三塔悬索桥中央扣,并分析不同弹塑性中央扣参数下桥梁的地震响应,研究弹塑性中央扣对三塔悬索桥地震响应的影响;探讨不同纵向减震体系下三塔悬索桥的减震效果。结果表明:中塔处塔梁间设置弹性索对中塔地震受力不利;柔性中央扣是地震作用下悬索桥的易损构件,可采用弹塑性减震装置作为悬索桥中央扣;弹塑性中央扣能有效控制三塔悬索桥的纵向地震位移,并改善中塔地震内力;采用弹性索和弹塑性中央扣组合减震体系后,悬索桥位移减小更明显,且中央扣减弱了弹性索对中塔内力的不利影响,弹塑性中央扣应用于三塔悬索桥中能有效提升桥梁的抗震性能。

**关键词:**悬索桥;地震响应;中央扣;弹性索;减震体系

中图分类号:U443.38;U448.25 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)05-0229-08

## Longitudinal seismic mitigation systems of triple-tower suspension bridge with elastic-plastic central buckle

LYU Long<sup>1,2,3</sup>, TANG Guangwu<sup>1</sup>, YU Deen<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamic, China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, P. R. China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 4. China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing 100089, P. R. China)

**Abstract:** Based on a triple-tower suspension bridge, the finite element model was established. Using nonlinear time-history analysis, the seismic responses of the suspension bridge under different stiffnesses of elastic cables

收稿日期:2024-03-08

基金项目:国家自然科学基金(52108113、12032008);桥梁工程结构动力学国家重点实验室暨桥梁结构抗震技术交通行业重点实验室开放基金(202204);重庆市博士后特别资助(2022CQBSHTB2014)

作者简介:吕龙(1986-),男,博士,副教授,主要从事桥梁抗震研究,E-mail:longl@cdut.edu.cn。

Received: 2024-03-08

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 52108113, 12032008); Fund of State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamics, Key Laboratory of Bridge Earthquake Resistance Technology, Ministry of Communications, PRC (No. 202204); Special Funding for Chongqing Postdoctoral Research Project (2022CQBSHTB2014)

**Author brief:** LYU Long (1986-), PhD, associate professor, main research interest: bridge seismic, E-mail: longl@cdut.edu.cn.

between the tower and deck were calculated, and the influence of elastic cable on the seismic response of the suspension bridge was studied. The seismic response of the suspension bridge with the flexible central buckle was analyzed, and the result was compared with that without a central buckle. According to the seismic response characteristics, the elastic-plastic seismic mitigation device was taken as the central buckle. To investigate the influence of the elastic-plastic central buckle on the bridge's seismic response, the seismic responses of the suspension bridge with different elastic-plastic central buckles were calculated. The seismic mitigation effectiveness of the long-span triple-tower bridge with different seismic mitigation systems was discussed. The results show that the elastic cables between the tower and deck are unfavorable to the seismic forces of the middle tower, the flexible central buckle is vulnerable to the suspension bridge under earthquake. The elastic-plastic device can be used as the suspension bridge central buckle. By installing the elastic-plastic central buckle, the longitudinal seismic displacement of the deck can be effectively controlled and the seismic forces of the tower can be improved. When the combination of elastic cables and the elastic-plastic central buckle was installed, the displacement of the suspension bridge is reduced more obviously, the adverse effect of the elastic cable on the middle tower can be mitigated. The seismic performance of the triple-tower suspension bridge can be effectively improved by the application of the elastic-plastic central buckle.

**Keywords:** suspension bridge; seismic response; central buckle; elastic cable; seismic mitigation system

随着大跨度三塔悬索桥建设的增多,一些学者对其抗震性能进行了研究。三塔悬索桥塔梁的连接方式是影响其抗震性能的关键,黏滞阻尼器、弹性索、弹塑性减震装置等常被用于悬索桥的地震响应控制<sup>[1-6]</sup>。研究表明,塔梁间设置弹性索或黏滞阻尼器能有效减小地震作用下三塔悬索桥主梁的纵向位移,而弹性索使中塔受力增大<sup>[1-2]</sup>;Wang 等<sup>[3]</sup>发现黏滞阻尼器对改善悬索桥抗震性能有利;Tao 等<sup>[4]</sup>、郑文智等<sup>[5]</sup>探讨了钢阻尼器对泰州长江大桥地震响应的影响,结果表明,软钢阻尼器能有效控制塔梁的相对位移,但使中塔剪力增大;Zhang 等<sup>[6]</sup>发现塔梁固结体系导致中塔地震内力增大。以往的研究表明,在三塔悬索桥塔梁间设置减震装置会对中塔地震内力产生不利影响。

为提高桥梁竖向刚度,悬索桥常采用柔性中央扣或刚性中央扣<sup>[7-8]</sup>。焦常科等<sup>[9]</sup>分析了刚性中央扣对三塔悬索桥地震响应的影响,发现刚性中央扣使主梁纵向位移和中塔剪力有所减小;徐斌等<sup>[10]</sup>发现刚性和柔性中央扣使中塔弯矩有所增大;王杰等<sup>[11]</sup>研究了采用刚性中塔的三塔悬索桥纵向约束体系,发现同时采用弹性索和柔性中央扣对减小主梁位移和索塔地震受力均有利。以上研究主要关注中央扣对桥梁地震响应的影响,而对中央扣自身的抗震性能缺乏考虑。地震作用下中央扣易发生损坏<sup>[12]</sup>,部分学者将防屈曲约束支撑作为中央扣应用于悬索桥抗震中,结果表明,采用此种中央扣代替柔性或刚性中央扣能有效控制双塔悬索桥的地震

响应<sup>[13-16]</sup>。郭志明等<sup>[17]</sup>建议将柔性中央扣设计为可熔断构件,其在地震作用下损坏,并通过塔梁间设置黏滞阻尼器来达到减震目的。以上研究表明,弹塑性中央扣可作为改善双塔悬索桥地震响应的减震装置,而三塔悬索桥与双塔悬索桥地震响应的不同之处在于中塔地震内力不易改善。以往针对中央扣的研究主要关注双塔悬索桥的抗震性能,而缺乏对三塔悬索桥自身的研究,同时,对于三塔悬索桥减震的研究主要关注塔梁连接装置,不足之处在于容易导致中塔地震内力增大,因此,有必要研究弹塑性中央扣在三塔悬索桥减震中的应用。

为改善三塔悬索桥塔梁间设置减震装置导致中塔地震内力的不利影响,以某三塔悬索桥为背景,对弹性索和弹塑性中央扣进行参数分析,研究悬索桥的地震响应特点,探讨不同纵向减震体系下三塔悬索桥的减震效果。

## 1 工程背景

以某三塔悬索桥为例,其跨径布置为 230 m + 800 m + 800 m + 358 m,桥梁总体布置如图 1 所示。主缆矢跨比为 1/10,两主缆横向间距为 40.5 m;边索塔为横向门型混凝土主塔,中索塔为纵向 A 型混凝土主塔,北塔高 137 m,中塔和南塔高 139 m;加劲梁由 3 个分离式钢箱梁组成;吊索采用预制平行钢丝束,标准纵向间距为 9.6 m;中塔和南塔为沉井基础,北塔为群桩基础;边塔和中塔处设置活动支座。

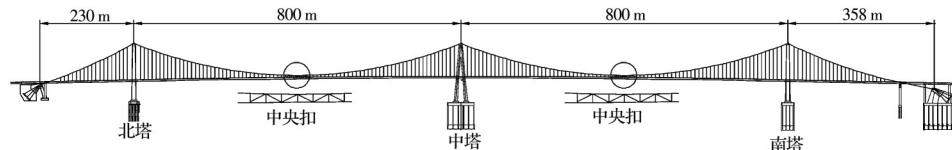


图1 桥梁总体布置图

Fig. 1 General layout of the bridge

## 2 结构分析模型及地震动输入

### 2.1 结构分析模型

采用 SAP2000 建立悬索桥三维有限元计算模型, 主梁、主塔和桥墩采用梁单元模拟, 主缆和吊杆采用桁架单元模拟, 并考虑恒载轴力引起的几何刚度效应影响, 主缆两端按固结处理; 承台按照集中质量模拟; 群桩基础在承台底采用六弹簧模拟, 沉井基础在承台底固结; 二期恒载以质量形式添加在主梁单元上, 桥梁有限元计算模型如图 2 所示。

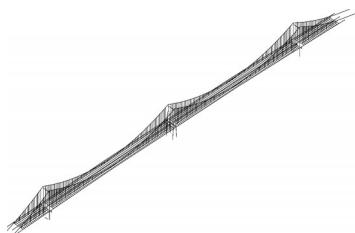


图2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element analysis model

模型中, 弹性索采用刚度为  $K$  的弹簧单元模拟, 柔性中央扣采用只受拉单元模拟, 其材料与跨中吊索一致, 截面为其 2 倍。活动支座的摩擦效应和屈曲约束支撑 BRB(buckling-restrained brace) 弹塑性中央扣耗能采用双线性模拟, 力-位移关系如图 3 所示。其中, 活动支座临界滑动摩擦力  $F_{\max} = \mu W$ ,  $W$  为恒载竖向反力,  $\mu$  为摩擦系数, 取 0.02。初始刚度  $k = F_{\max}/x_y$ ,  $x_y$  为支座屈服位移, 取值 0.2 cm。

弹塑性中央扣恢复力表达式为<sup>[18-19]</sup>

$$F_y = Af_y \quad (1)$$

$$K = EA/L_c \quad (2)$$

式中:  $f_y$  为屈服应力;  $K$  为弹塑性中央扣初始刚度;  $E$  为弹性模量;  $A$  为核心钢材截面面积;  $L_c$  为核心钢材长度, 为计算时有效长度, 其中, BRB 总长度为有效长度和两端连接长度之和。

桥梁有限元模型动力特性如表 1 所示。

### 2.2 地震动输入

采用桥址场地类型及地震安全性评价报告, 将重现期为 2 500 a 的 7 条人工地震加速度时程作为地震动输入, 结果取 7 条地震波下桥梁结构响应的平均值, 地震动输入如图 4 所示。

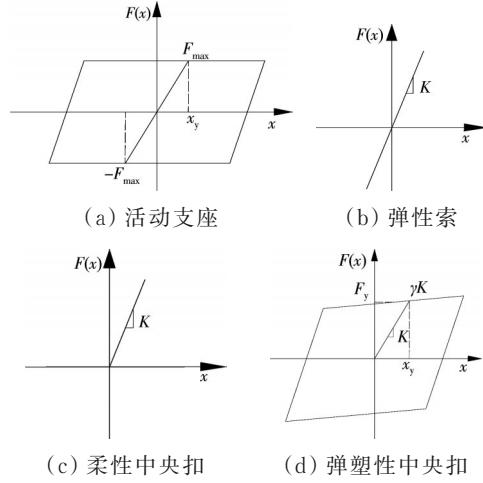
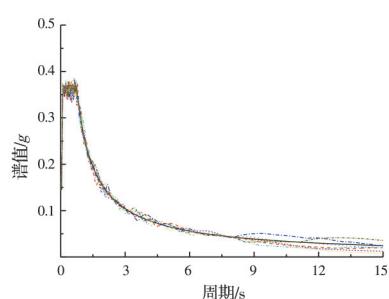
图3 连接构件力-位移关系  
Fig. 3 Force-displacement relationship of the connecting structure

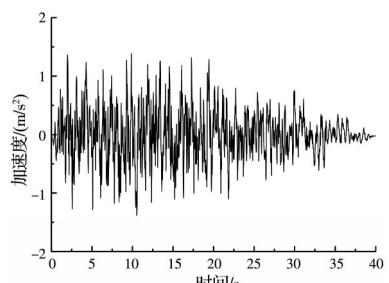
表1 桥梁结构动力特性

Table 1 Dynamic characteristics of the bridge structure

阶次	周期/s	频率/Hz	振动特性
1	9.79	0.102	主梁纵飘加竖弯
2	6.99	0.143	主梁一阶竖弯
8	4.42	0.226	主梁一阶横弯



(a) 设计反应谱和7条地震波对应的谱值



(b) 1条典型人工地震波

图4 地震动输入

Fig. 4 Earthquake input

### 3 设置弹性索后结构的地震响应

相比黏滞阻尼器和弹塑性减震装置,弹性索对悬索桥位移控制的效果更加显著,同时,黏滞阻尼器维修相对困难,且弹性索在实际悬索桥中应用相对较多。因此,为研究中塔塔梁间设置弹性索对三塔悬索桥地震响应的影响,对悬索桥不设置中央扣时弹性索弹性刚度  $K$  进行参数分析,中塔塔梁间总弹性刚度  $K$  为  $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^8 \text{ kN/m}$ 。图 5 为弹性索刚度对地震作用下悬索桥塔梁相对位移、塔底剪力和弯矩的影响。从图 5(a)可知,塔梁相对位移随弹性刚度  $K$  的增加而减小,随后逐渐趋于常数,且对中塔变化的影响更加显著。从图 5(b)、(c)可知,中塔塔底内力随弹性刚度  $K$  的增大而增大,两边塔内力受弹性刚度  $K$  的影响不显著,表明增大弹性索弹性刚度  $K$  对位移控制有利,对中塔地震内力不利。这是因为塔梁间未设置弹性索时主塔内力主要是由塔身惯性力和主塔两侧主缆不平衡力控制,设置弹性索后,主塔内力受到弹性索传递的主梁惯性力影响较大。

### 4 设置中央扣后结构的地震响应

#### 4.1 柔性中央扣

为控制悬索桥的地震响应,在桥梁跨中设置 3 组斜吊索作为柔性中央扣,分析设置柔性中央扣后桥梁的地震响应,结果如表 2 所示。由表 2 可知,设置柔性中央扣能有效减小塔梁间的相对位移;两侧桥塔内力略有增大,而中塔内力有所减小;与仅设置柔性中央扣相比,同时设置柔性中央扣和弹性索对中塔内力不利。从中央扣的响应可知,地震作用下柔性中央扣是桥梁的薄弱构件,易发生损坏,虽然设置弹性索使得柔性中央扣受力有所减小,但其

表 2 有和无柔性中央扣的悬索桥地震响应  
Table 2 Seismic responses of the suspension bridge with and without a flexible central buckle

弹性索和中央扣设置	北塔			中塔			南塔			中央扣	
	V/kN	M/(kN·m)	D/m	V/kN	M/(kN·m)	D/m	V/kN	M/(kN·m)	D/m	N/kN	$\sigma/\text{MPa}$
无中央扣+无弹性索	19 373	742 838	0.806	14 857	669 560	0.814	16 256	748 737	0.801		
柔性中央扣	20 506	849 228	0.243	12 697	548 316	0.230	16 947	764 198	0.243	13 799	2 527
柔性中央扣+弹性索	20 234	824 384	0.218	19 456	839 355	0.074	16 252	739 703	0.222	12 109	2 217

注:V 和 M 为塔底剪力和弯矩;D 为塔梁相对位移;N 和  $\sigma$  为中央扣轴力和应力。

#### 4.2 弹塑性中央扣

为分析 BRB 弹塑性中央扣对悬索桥地震响应的影响,结合图 2 中 BRB 弹塑性中央扣的力-位移关系,分析 BRB 不同参数下悬索桥的地震响应,其中,中央扣参数取值如表 3 所示,采用 Q235 钢,其屈服强度  $f_y$  为 235 MPa,计算有效长度  $L_e$  为 7 m。图 6 显示了弹塑性中央扣参数对结构地震响应的影响。

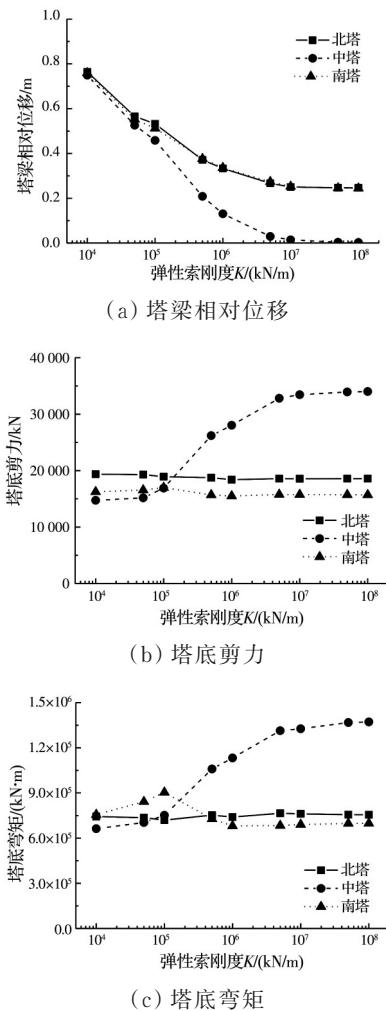


图 5 弹性索刚度对桥梁地震响应的影响

Fig. 5 Influence of elastic cable stiffness on the seismic response of the bridge

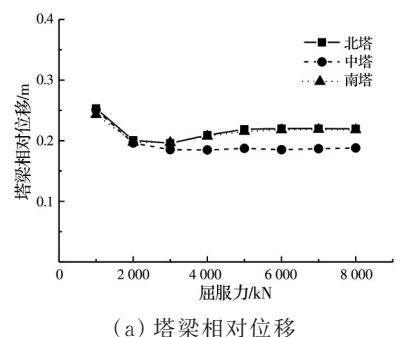
应力仍然较大,因此,将中央扣作为可牺牲构件。采用 BRB 耗能装置代替柔性中央扣作为悬索桥中央扣,并利用 BRB 的耗能性能减小结构的地震响应。

由图 6(a)可知,塔梁相对位移随弹塑性中央扣屈服力先减小后趋于稳定,中塔处塔梁相对位移较边塔处小。由图 6(b)、(c)可知,塔底剪力和弯矩随屈服力变化趋势基本一致,随着屈服力的增大,边塔塔底内力先增大后趋于稳定,中塔塔底内力先减小后趋于稳定。由图 6(d)可知,中央扣应力随屈服力的增大而逐渐减小,其钢材发生屈服,发挥耗能

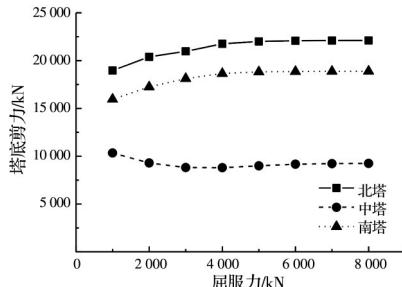
表3 弹塑性中央扣参数

Table 3 Parameters of the elastic-plastic central buckle

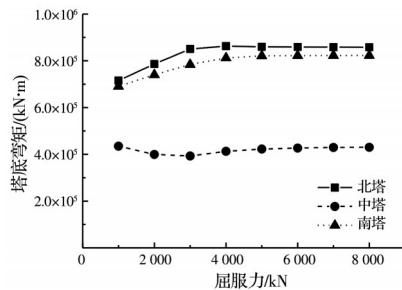
序号	$A/\text{cm}^2$	$F_y/\text{kN}$	$K/(\text{kN}/\text{m})$	$\gamma$
1	42.6	1 000	127 660	0.03
2	85.1	2 000	255 319	0.03
3	127.7	3 000	382 979	0.03
4	170.2	4 000	510 638	0.03
5	212.8	5 000	638 298	0.03
6	255.3	6 000	765 958	0.03
7	297.9	7 000	893 617	0.03
8	340.4	8 000	1 021 277	0.03



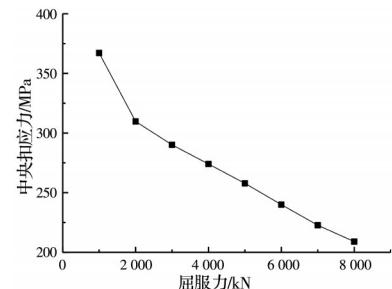
(a) 塔梁相对位移



(b) 塔底剪力



(c) 塔底弯矩



(d) 中央扣应力

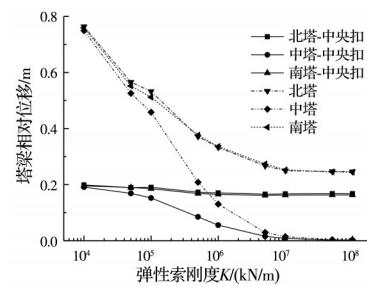
图6 中央扣参数对结构地震响应的影响

Fig. 6 Influence of central buckle parameters on structural seismic response

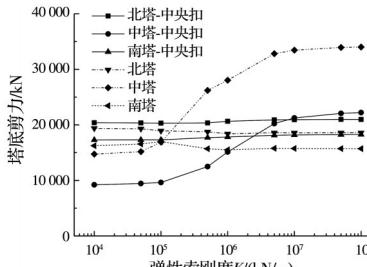
作用,但应力未达到钢材抗拉强度,因此,未发生破坏。以上分析表明,选取合适的弹塑性中央扣参数能有效减小塔梁的相对位移,对控制中塔受力有利,而对边塔受力略有不利。

#### 4.3 弹性索对有弹塑性中央扣桥梁地震响应的影响

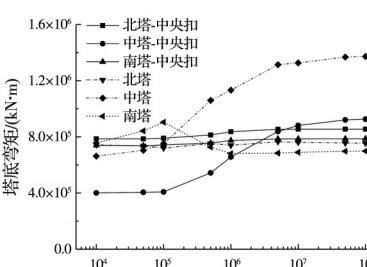
弹塑性中央扣屈服前刚度为 255 319 kN/m, 屈服力为 2 000 kN, 屈服后/屈服前刚度比为 0.03, 设置弹塑性中央扣后, 在不同弹性索刚度下, 悬索桥的地震响应如图 7 和图 8 所示。由图 7 可知, 有弹塑性中央扣的悬索桥地震响应随弹性索刚度变化趋势与无中央扣的桥梁地震响应变化趋势相近, 但与无中央扣相比, 桥梁地震响应均呈现不同程度的减小。由图 8 可知, 设置弹塑性中央扣后, 不同弹性索刚度下中塔塔底剪力和弯矩均减小 40% 左右。以上分析表明, 弹塑性中央扣对桥梁地震响应随弹性索刚度变化趋势影响不明显, 但桥梁位移和桥塔受力均发生不同程度变化, 特别是主梁位移和中塔内力显著减小, 这主要是由于有中央扣后, 增加了主



(a) 塔梁相对位移



(b) 塔底剪力



(c) 塔底弯矩

图7 弹性索刚度对有弹塑性中央扣桥梁地震响应的影响

Fig. 7 Influence of elastic cable stiffness on the seismic response of the bridge with an elastic-plastic central buckle

梁和主缆之间的整体性,使主梁位移得到控制,而中塔两侧主缆不平衡力有所减小,使得传递到桥塔内力减小。

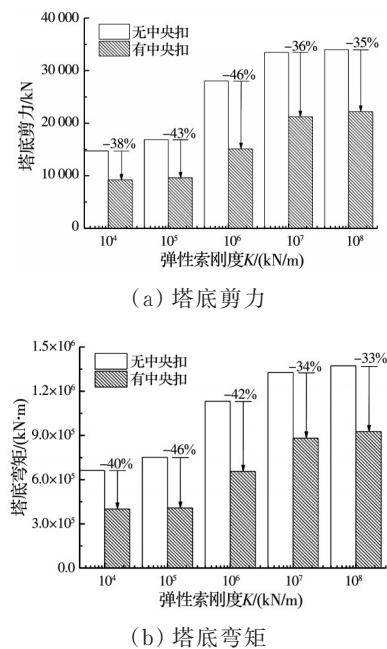


图 8 弹性索刚度对中塔地震内力的影响

Fig. 8 Influence of elastic cable stiffness on the seismic response of the seismic internal forces of the middle tower

## 5 不同减震体系下桥梁的减震效果

为研究三塔悬索桥纵向约束体系对结构地震响应的影响,对无纵向约束体系和3种减震体系进行分析。体系A:无纵向约束体系(主梁与塔、边墩

间仅采用纵向活动支座);体系B:在体系A的基础上,在主梁与中塔之间设置弹性索;体系C:在体系A的基础上,跨中设置弹塑性中央扣;体系D:在体系A的基础上,跨中设置弹塑性中央扣,主梁与中塔之间设置弹性索。其中,弹性索刚度为1000000 kN/m,弹塑性中央扣屈前刚度为255319 kN/m,屈服力为2000 kN,屈服后刚度比为0.03。图9为不同纵向约束体系下塔梁相对位移、塔底剪力和弯矩的对比。为更好地表明设置减震装置后悬索桥的减震效果,定义减震率=(减震体系下响应最大值—无纵向约束体系下响应最大值)/无纵向约束体系下响应最大值,表4为不同减震体系下悬索桥的减震率。

由图9(a)和表4可知,3种减震体系均能有效减小悬索桥塔梁的相对位移,且弹塑性中央扣+弹性索体系最有利,对北塔、中塔和南塔处塔梁相对位移的减震率分别达到78.9%、93.2%和79.4%。由图9(b)和表4可知,仅设置弹性索时,边塔剪力略有减小,而中塔剪力显著增大,增幅达88.7%;仅设置弹塑性中央扣时,边塔剪力略有增大,其影响范围保持在10%以内,中塔剪力减小约37.4%;同时设置弹塑性中央扣和弹性索对中塔剪力影响甚小。由图9(c)和表4可知,仅设置弹性索时,边塔弯矩略有减小,而中塔弯矩增大幅度达69.1%;仅设置弹塑性中央扣对边塔弯矩影响不显著,而中塔弯矩约减小40.3%;同时设置弹塑性中央扣和弹性索后,两边塔弯矩略有不同程度增大,而对中塔弯矩影响甚小。

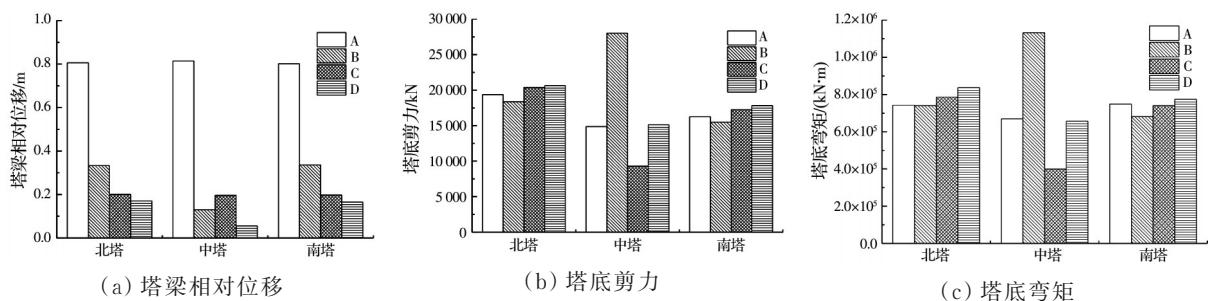


图 9 不同约束体系下桥梁动力响应对比

Fig. 9 Comparison of dynamic responses of the bridge for different restraint systems

表 4 不同减震体系下悬索桥减震率

Table 4 Reduction ratio of suspension bridge for different seismic mitigation systems

纵向减震体系 Longitudinal Seismic Mitigation System	北塔 North Tower			中塔 Middle Tower			南塔 South Tower		
	墩底剪力 Pile Base Shear Force	墩底弯矩 Pile Base Bending Moment	塔梁相对位移 Relative Displacement of Tower Beam	墩底剪力 Pile Base Shear Force	墩底弯矩 Pile Base Bending Moment	塔梁相对位移 Relative Displacement of Tower Beam	墩底剪力 Pile Base Shear Force	墩底弯矩 Pile Base Bending Moment	塔梁相对位移 Relative Displacement of Tower Beam
弹性索	-5.1	-0.4	-58.7	88.7	69.1	-84.0	-4.6	-9.0	-58.0
弹塑性中央扣	5.3	5.8	-75.1	-37.4	-40.3	-75.9	6.1	-1.1	-75.3
弹塑性中央扣+弹性索	6.6	12.6	-78.9	1.8	-1.9	-93.2	9.6	3.4	-79.4

综上,3种减震体系均对减小悬索桥位移有利,且同时设置弹性中央扣和弹性索对位移控制效果最佳。设置弹性中央扣对边塔受力有不利影响,但影响程度相对较小,对减小中塔受力有利。因此,为避免常规柔性中央扣在地震作用下发生损坏带来的不利影响,将弹性减震装置作为中央扣是控制三塔悬索桥地震响应的一种有效措施;同时设置弹性中央扣和弹性索时,弹性索对中塔地震内力产生的不利影响有所减弱,中塔地震内力得到有效改善。

## 6 结论

分析中塔处塔梁间弹性索和弹性中央扣对悬索桥地震响应的影响,探讨不同纵向减震体系下三塔悬索桥的减震效果,得到以下主要结论:

1) 中塔处塔梁间设置弹性索对控制悬索桥位移有利,但对中塔地震受力不利。

2) 柔性中央扣是地震作用下三塔悬索桥易损构件,可采用弹性装置代替柔性中央扣。

3) 弹塑性中央扣能有效控制三塔悬索桥纵向地震位移,改善中塔地震内力,且能有效减弱弹性索对中塔受力带来的不利影响,因此,将弹塑性中央扣应用于三塔悬索桥是一种有效的减震措施。

4) 采用弹性索和弹性中央扣组合减震体系后,悬索桥主梁位移明显减小,中塔受力更合理,有利于改善三塔悬索桥的抗震性能。

## 参考文献

- [1] LI J Z, YAN J K, PENG T B, et al. Shake table studies of seismic structural systems of a Taizhou Changjiang highway bridge model [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(3): 04014065.
- [2] 郑锋利,陈逸民,李建中,等.塔梁连接方式对多塔悬索桥地震反应的影响[J].公路交通科技,2020,37(8): 58-65.
- ZHENG F L, CHEN Y M, LI J Z, et al. Influence of pylon-girder connection on seismic response of multi-ponyl cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (8): 58-65. (in Chinese)
- [3] WANG H, LI J, TAO T Y, et al. Influence of apparent wave velocity on seismic performance of a super-long-span triple-tower suspension bridge [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(6): 1-14.
- [4] TAO T Y, WEN X H, WANG H, et al. Seismic control of a long-span triple-tower suspension bridge using hysteretic steel damper [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2024, 20(12): 2010-2021.
- [5] 郑文智,王浩,张玉平,等.大跨度三塔悬索桥地震位移控制效果对比[J].哈尔滨工程大学学报,2019, 40 (2): 279-284.
- ZHENG W Z, WANG H, ZHANG Y P, et al. Comparative study on the effectiveness of seismic displacement control of long-span triple-tower suspension bridge [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40 (2): 279-284. (in Chinese)
- [6] ZHANG Q, TANG H Q, YANG G W. Selection of a structural system for a three-tower suspension bridge of Maanshan Yangtze River highway bridge [J]. Structural Engineering International, 2012, 22(1): 139-143.
- [7] 常付平,陈亮,邵长宇,等.济南凤凰黄河大桥主桥设计[J].桥梁建设,2021, 51(5): 101-107.
- CHANG F P, CHEN L, SHAO C Y, et al. Design of main bridge of Fenghuang Yellow River bridge in Jinan [J]. Bridge Construction, 2021, 51(5): 101-107. (in Chinese)
- [8] CAO H Y, CHEN Y P, LI J, et al. Static characteristics analysis of three-tower suspension bridges with central buckle using a simplified model [J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112916.
- [9] 焦常科,李爱群,王浩,等.中央扣对三塔悬索桥地震反应的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2010, 40 (1): 160-164.
- JIAO C K, LI A Q, WANG H, et al. Influence of central buckle on seismic response of triple-tower suspension bridge [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(1): 160-164. (in Chinese)
- [10] 徐斌,於亚辉,张飞,等.中央扣对悬索桥地震反应的影响[J].工程与建设,2011, 25(4): 498-500.
- XU B, YU Y H, ZHANG F, et al. Influence of central buckle on seismic response of suspension bridge [J]. Engineering and Construction, 2011, 25(4): 498-500. (in Chinese)
- [11] 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 J, LI J Z. Influence of different longitudinal constrain systems on seismic response of triple-tower suspension bridge [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2016, 29(2): 1-5, 11. (in Chinese)
- [12] 管仲国,李建中.大跨度桥梁抗震体系研究[J].中国科学:技术科学,2021, 51(5): 493-504.
- GUAN Z G, LI J Z. Advances in earthquake resisting systems for long-span bridges [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(5): 493-504. (in Chinese)
- [13] 陶齐宇,曹发辉,蒋劲松,等.泸定大渡河兴康特大桥抗震设计关键技术[J].桥梁建设,2018, 48(4): 90-95.

TAO Q Y, CAO F H, JIANG J S, et al. Key

- techniques of seismic design of Xingkang Dadu River bridge in Luding [J]. Bridge Construction, 2018, 48(4): 90-95. (in Chinese)
- [14] GUO W, LI J Z, XIANG N L. Seismic performance of the buckling-restrained brace central buckle for long-span suspension bridges [J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2018, 12(5): 1850015.
- [15] 宋光松, 江辉, 郭辉, 等. 行波激励下高烈度区特大铁路悬索桥减震技术研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(11): 3303-3315.
- SONG G S, JIANG H, GUO H, et al. Seismic reduction technology of long-span railway suspension bridge in high-intensity area with the action of traveling wave effect [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(11): 3303-3315. (in Chinese)
- [16] 周敷, 徐梓涛. 大跨钢桁梁悬索桥合理抗震约束体系 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(6): 90-100.
- ZHOU M, XU Z T. Reasonable seismic restraint system of long-span steel truss girder suspension bridge [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(6): 90-100. (in Chinese)
- [17] 郭志明, 汪鸿鑫, 叶爱君. 设柔性中央扣的特大跨度悬索桥纵向抗震体系研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 38-43.
- GUO Z M, WANG H X, YE A J. Longitudinal anti-seismic system for long-span suspension bridge with flexible central buckle [J]. Bridge Construction, 2020, 50(1): 38-43. (in Chinese)
- [18] CARRION-CABRERA H, BRUNEAU M. Seismic response of regular multi-span bridges having buckling-restrained braces in their longitudinal direction [J]. Engineering Structures, 2022, 259: 114127.
- [19] DANGOL I, PANTELIDES C P. Seismic analysis of posttensioned and hybrid bridge bents with buckling restrained braces [J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28(2): 04022146.

(编辑 王秀玲)