

周 救,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 Mi, XU Zi-tao. 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.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.06.009

大跨钢桁梁悬索桥合理抗震约束体系

周 救,徐梓涛

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通
行业重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:为减小地震作用下大跨度悬索桥主要构件的地震响应,降低结构地震破坏风险,在概念设计阶段确定大跨度悬索桥合理抗震结构体系,针对悬索桥特点提出了 3 种不同的中央扣形式和 4 种不同的梁端约束体系,结合某主跨 640 m 单跨钢桁梁悬索桥,使用有限元分析软件,通过非线性时程分析方法获得了不同约束体系下加劲梁端部、加劲梁跨中、塔顶等位置的位移响应和塔底以及关键构件的内力响应,在此基础上评估了不同约束体系对悬索桥抗震性能的影响。结果表明:设置中央扣可影响加劲梁纵漂特性,减小加劲梁纵向地震位移;柔性中央扣地震轴力超限会使中央扣失效,刚性中央扣会造成加劲梁局部应力过大;相比无中央扣的工况,在大跨度悬索桥跨中设置防屈曲支撑式中央扣可使梁端最大纵向地震位移降低 35.29%,桥塔底部纵向弯矩和剪力分别降低 9.47%和 2.88%;防屈曲中央扣+梁端纵向黏滞阻尼器的组合布置使梁端最大纵向地震位移降低 68.68%,桥塔底部纵向弯矩和剪力分别降低 36.5%和 23.6%;加劲梁端部与桥塔间设置横向防屈曲支撑使梁端部和跨中最大横向地震位移相比设置弹性拉索的工况分别降低 73.9%和 48.16%,桥塔底部横向弯矩相比设置弹性拉索的工况降低 17.55%,横向剪力相比设置阻尼器的工况降低 27.31%。研究结果可为同类型桥梁的抗震设计提供参考。

关键词:桥梁工程;约束体系;非线性时程分析;悬索桥;抗震设计

中图分类号:U442.55 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2022)06-0090-11

Reasonable seismic restraint system of long-span steel truss girder suspension bridge

ZHOU Mi, XU Zi-tao

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Old Bridge Detection and Reinforcement Technology of the Ministry of Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reduce the seismic response of the main components of the long-span suspension bridge under the action of earthquake and reduce the seismic damage risk of the structure, the reasonable seismic structure system of the long-span suspension bridge was

收稿日期:2022-09-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB1600300);国家自然科学基金项目(51978062);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JLM-47);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102212209)

作者简介:周 救(1977-),男,陕西商州人,教授,博士研究生导师,E-mail:zhoumi@chd.edu.cn。

determined in the conceptual design stage, according to the characteristics of suspension bridges, 3 different forms of central buckles and 4 different restraint systems at the beam ends were proposed. For a single-span suspension bridge with a main span of 640 m, the finite element analysis software was used to obtain the displacement responses of the end of the stiffening beam, the mid-span and the top of the tower, and the internal force responses of the tower bottom and key components under different restraint systems. On this basis, the effects of different restraint systems on the seismic performance of suspension bridges were evaluated. The results show that setting the central buckle can affect the longitudinal drift characteristics of the stiffening beam, and reduce the longitudinal seismic displacement of the stiffening beam. The seismic axial force of the flexible central buckle exceeds the limit, which makes the central buckle invalid, and the rigid central buckle will cause the local stress of the stiffening beam to be too large. Compared with the case without the central buckle, the installation of the buckling restrained brace in the midspan of the long-span suspension bridge reduces the maximum longitudinal seismic displacement of the beam end by 35.29%, and the longitudinal bending moment and shear force at the bottom of the bridge tower by 9.47% and 2.88%, respectively. The combined arrangement of the buckling restrained brace and the longitudinal viscous damper at the beam end reduces the maximum longitudinal seismic displacement at the beam end by 68.68%, and the longitudinal bending moment and shear force at the bottom of the bridge tower by 36.5% and 23.6%, respectively. The transverse buckling restrained braces are arranged between the end of the stiffening beam and the bridge tower, which reduces the maximum transverse seismic displacement at the end of the beam and the mid-span by 73.9% and 48.16% respectively compared with the case where elastic cables are installed, the transverse bending moment at the bottom of the bridge tower is reduced by 17.55% compared with the case with elastic cables, and the transverse shear force is reduced by 27.31% compared with the case with dampers. The research results can provide reference for the seismic design of bridges of the same type. 5 tabs, 18 figs, 22 refs.

Key words: bridge engineering; constraint system; nonlinear time history analysis; suspension bridge; aseismic design

0 引言

随着大型交通基础设施的发展和国家“一带一路”倡议的推进,跨江、跨海大桥的通航、防洪及生态要求等要素使大跨度悬索桥的建设需求日益增加。尽管悬索桥有着跨越能力强的优势,但大跨径悬索桥自身刚度小、阻尼低的结构特点导致其对强风、强震等动力作用较为敏感。极端荷载尤其是地震作用成为大跨度桥梁结构动力设计的关键控制性因素,特别是跨径增大导致的加劲梁跨中横向大变位、梁端大转角、纵向大位移带来行车不舒适、危害结构安全等问题,亟需研究大跨度悬索桥的合理抗震约束体系以及相应的关键装置,控制结构整体响应,确保桥梁结构的安全耐久。

对于大跨径桥梁而言,改变边界约束条件对结构地震响应影响显著,设置合理的结构约束体系可

实现有效的减震,满足抗震设防目标^[1-2]。目前,对于控制悬索桥结构地震响应存在2种思路:一是改变结构约束体系,优化地震惯性力的传递路径或隔离;二是设置耗能装置耗散输入的地震能量,减小结构地震响应。

在加劲梁跨中部位设置中央扣能够加强加劲梁与主缆的联结,提高桥梁纵向刚度从而降低加劲梁纵向地震变位,在桥塔和加劲梁之间设置减震耗能装置的作用原理明确,效果显著。学者们针对不同类型的中央扣和耗能装置的减震效果进行了深入研究。中国刚性中央扣的首次运用是在润扬长江公路大桥上^[3]。赵恺雍等以五峰山长江大桥为对象,研究了中央扣对大跨高铁悬索桥地震响应的影响,结果表明:不同形式中央扣都有利于抑制缆梁相对位移,有效保护跨中吊索,但在高视波速输入下,设置刚性中央扣对整体结构不利^[4]。陶齐宇等在泸定大

渡河兴康特大桥抗震设计上提出了耗能中央扣的形式,研究发现耗能中央扣能显著改善高烈度震区大跨径悬索桥的抗震性能^[5]。徐勋等研究了中央扣形式对大跨悬索桥动力特性和地震响应的影响,认为一对柔性中央扣的设置方式是不利的,并且从抗震角度看设置中央扣是“有得有失”的^[6]。汪鸿鑫等研究了柔性中央扣对大跨度悬索桥地震响应的影响,认为忽略柔性中央扣只能受拉不能受压的力学特性会明显高估其减小主梁纵向地震位移的效果,且显著低估中央扣的地震轴力^[7]。李永斌等研究发现刚性中央扣减小加劲梁地震位移的同时,明显增大了加劲梁的地震内力,三向地震作用下加劲梁与中央扣连接处形成应力集中,地震响应更为不利^[8]。刘伟等研究了不同屈服力的防屈曲支撑(buckling restrained brace, BRB)中央扣的减震效果并与常规型中央扣对比,结果表明:BRB 中央扣屈服力选取应综合考虑结构的内力响应和位移响应,BRB 中央扣整体减震效果优于常规中央扣^[9]。郭志明等以南京仙新路特大跨度悬索桥为背景,研究纵向抗震体系,认为黏滞阻尼器减震效果远比柔性中央扣好,柔性中央扣在地震作用下会拉断失效,应作为牺牲构件^[10]。江辉等研究发现地震作用下加劲梁端部设置黏滞阻尼器可降低梁端位移和桥塔内力,但柔性中央扣仍会破坏,耗能型中央扣能解决柔性中央扣拉应力超限破坏的问题^[11]。卢长炯等研究了黏滞阻尼器参数对桥梁地震位移响应的影响,结果表明:在一定范围内增大阻尼系数会降低梁端的位移响应,但对桥塔顶部位移响应无明显作用,改变阻尼指数对阻尼器效果影响不大^[12]。苗润池对伍家岗长江大桥开展减隔震设计,研究结果表明:阻尼器对加劲梁纵向位移减震效果显著,对桥塔内力的减震效果不显著,抗震设计应以位移减震控制为主^[13]。Yang 等研究了磁流变阻尼器悬索桥纵向减震效果^[14]。Pourzeynali 等研究发现塔梁之间设置磁流变阻尼器能有效减少悬索桥垂直地震响应^[15]。Wang 等以润扬长江公路大桥为例研究阻尼器优化放置方法,认为一阶优化是确定阻尼器最佳位置的有效方法^[16]。Shen 等研究发现虽然横向钢阻尼器(TSD)在悬索桥横向减震控制上的效果令人满意,但会大幅增加桥塔的抗震需求^[17]。王浩等以润扬长江公路大桥为背景,比较了弹性连接装置和阻尼器的减震效果,结果表明二者均能有效控制梁端纵向位移,但阻尼器效果更加全面。单独设置中央扣和阻尼器等减震设施在发挥减震耗能作用的同时也

存在不利影响,综合设置中央扣和加劲梁端部减震耗能装置能发挥更优的整体减震效果^[18]。于德恩等研究了某大跨悬索桥的地震响应,认为最佳配置是柔性中央扣和梁端阻尼器结合^[19]。宋光松等研究发现耗能型中央扣+E形钢阻尼器在大幅降低梁端位移的同时会增大桥塔轴力,认为耗能型中央扣+黏滞阻尼器的组合减震方案更适用于高烈度区大跨度铁路悬索桥的减震控制^[20]。胡文军等研究某山区大跨度悬索桥减隔震设计方法,认为设置支座剪力销限力熔断后横向阻尼器发挥作用的体系,辅以纵桥向布置耗能型中央扣+黏滞阻尼器可以实现“设计地震弹性、罕遇地震可修的”抗震设防目标^[21]。Lu 比较了 BRB 取代跨中斜吊索和塔梁间纵向设置流体黏性阻尼器(FVD)和 BRB 的减震效果,结果表明:使用 BRB 代替跨中斜吊索有利于减少桥面位移,降低塔的剪力和弯矩,跨中设置 BRB 和塔梁间设置 FVD 的悬索桥的抗震性能最优^[22]。

综上,以往研究多集中于大跨度悬索桥纵向约束体系,对于横向约束体系研究较少,桥梁结构横向地震内力响应和位移响应同样值得关注,地震作用下加劲梁跨中和端部的横向大变位问题亟待解决。基于上述研究结果,本文以某大跨度悬索桥为研究对象,借助 CSI Bridge 有限元软件,建立跨中和端部采用不同约束形式的加劲梁计算模型,在此基础上分析其自振特性和地震响应,研究该大跨度悬索桥的合理约束形式,研究结果可为今后同类型桥梁的抗震设计提供参考。

1 控制装置原理

1.1 中央扣

常见的中央扣有柔性中央扣和刚性中央扣,见图 1。通过在跨中设置斜吊索或者杆件增加主缆和加劲梁纵向联结,从而提高结构整体纵向刚度。本研究选用的柔性中央扣为跨中设置 3 对柔性索的形式,刚性中央扣为跨中设置 1 对刚性三角桁架的形式。

1.2 防屈曲支撑

防屈曲支撑杆件由钢支撑内芯、约束构件和两者间无黏结材料或间隙组成,如图 2 所示。钢支撑内芯在拉压荷载下都能进入屈服状态,从而发挥滞回耗能作用。防屈曲支撑可用 Bouc-Wen 恢复力模型表达,其非线性力与位移关系如下

$$f = akd + (1 - \alpha)Fz \quad (1)$$

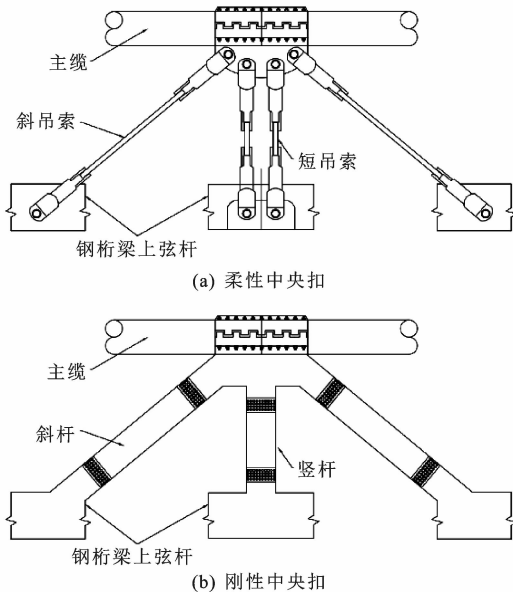


图 1 普通中央扣构造形式

Fig.1 Forms of common central buckle

$$\Delta z = \begin{cases} \frac{k}{F} \Delta d (1 - |z|^n) & \Delta d z > 0 \\ \frac{k}{F} \Delta d & \Delta d z \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f 为力; k 为初始刚度; α 为屈服后刚度比; d 为位移全量, Δd 为位移增量; F 为屈服力; z 为内部滞后变量,变量范围为 $|z| \leq 1$,其屈服面由 $|z|=1$ 表示, Δz 为滞后变量增量; n 为屈服指数,控制从弹性到非线性过渡曲线的平滑性, n 数值越大曲线越尖锐。

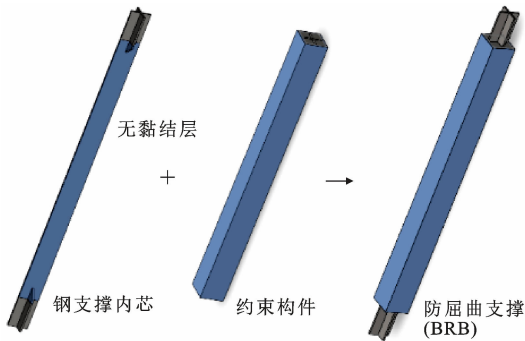


图 2 防屈曲支撑组成

Fig. 2 Compositions of buckling restrained brace

本研究拟在跨中和桥塔处设置防屈曲支撑,布置形式如图 4 所示。防屈曲支撑应在 E1 地震作用下保持完整,依靠初始刚度限制结构位移,并在 E2 地震作用下进入塑性,耗散输入结构的地震能量。为确保防屈曲支撑在地震作用下进入屈服状态,用于跨中缆梁联结的防屈曲支撑和用于加劲梁端部横向约束的防屈曲支撑的参数取值有所不同。防屈曲支撑的屈服强度越小则在 E2 地震作用下更早地发

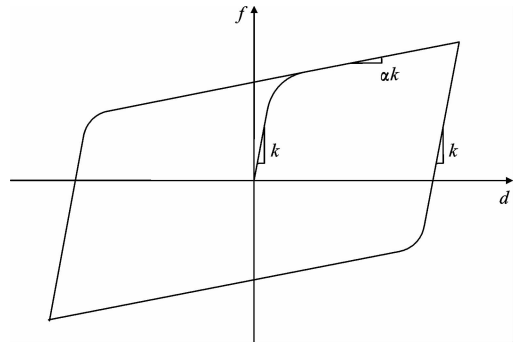


图 3 力-位移关系

Fig. 3 Force-displacement relation

挥耗能作用,但抑制地震响应的作用效果更弱,耗能抑震的效果随屈服强度增大而增加,并在屈服强度达到 7 000 kN 后趋于稳定。经过比选确定防屈曲支撑合理设置参数如表 1 所示。

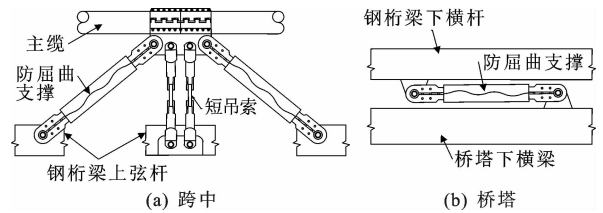


图 4 拟设置的防屈曲支撑位置

Fig. 4 Setting positions of buckling restrained brace

表 1 防屈曲支撑参数

Tab. 1 Parameters of BRBs

参数	纵向参数取值	横向参数取值
初始刚度/(kN·m ⁻¹)	650 000	650 000
屈服强度/kN	7 000	2 000
屈服后刚度比	0.03	0.03
屈服指数	20	20

1.3 黏滞阻尼器

根据桥梁纵横向地震位移响应的不同,本研究纵向和横向采用不同的黏滞阻尼器,如图 5 所示,纵桥向黏滞阻尼器设置在钢桁梁端部上弦杆上,横桥向黏滞阻尼器设置在钢桁梁端部下横杆上。

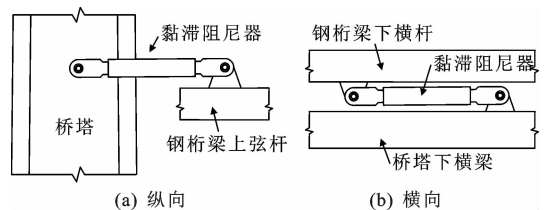


图 5 拟设置的阻尼器位置

Fig. 5 Setting positions of dampers

本文采用的黏滞阻尼器的恢复力特性可用下式表示

$$F' = CV^a \quad (3)$$

式中: F' 为阻尼力(kN); C 为阻尼系数($\text{kN} \cdot (\text{m}/\text{s})^{-a}$); a 为阻尼指数; V 为阻尼器相对速度(m/s)。

对于桥梁结构地震响应,阻尼系数的影响占主导地位,阻尼指数影响较小,结构地震响应随阻尼系数增大而减小,当达到 $3\,000\text{ kN} \cdot (\text{m}/\text{s})^{-a}$ 后,其值趋于稳定,综合考虑作用效果和经济性确定阻尼器合理参数见表2。

表2 阻尼器参数

Tab.2 Parameters of dampers

参数	纵向阻尼器参数	横向阻尼器参数
阻尼系数/ $(\text{kN} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-a})$	3 000	3 000
阻尼指数	0.3	0.3
最大阻尼力/kN	3 200	3 200
冲程/m	± 0.7	± 0.2

2 实桥应用

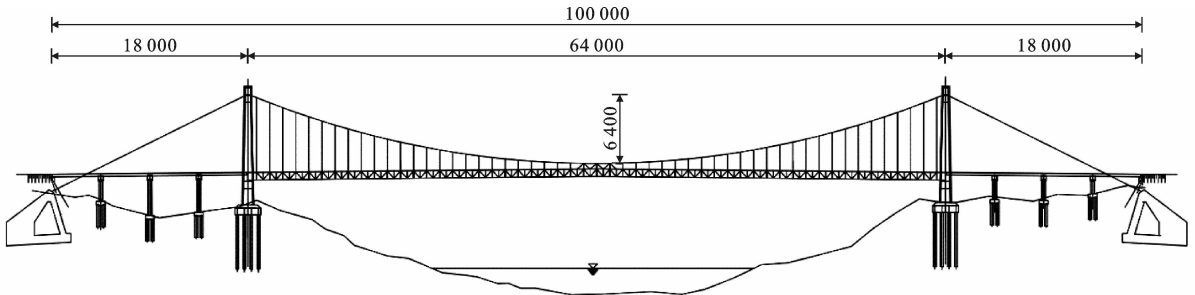
2.1 工程概况

本文研究对象为 $180\text{ m}+640\text{ m}+180\text{ m}$ 的单跨钢桁梁悬索桥,桥梁总体布置见图6,加劲梁横断面如图7所示。桥址区场地类别为II类。地震动峰

值加速度值为 $0.2g$,场地的地震基本烈度为VIII度,抗震构造措施按IX度进行抗震设防。

2.2 有限元分析模型

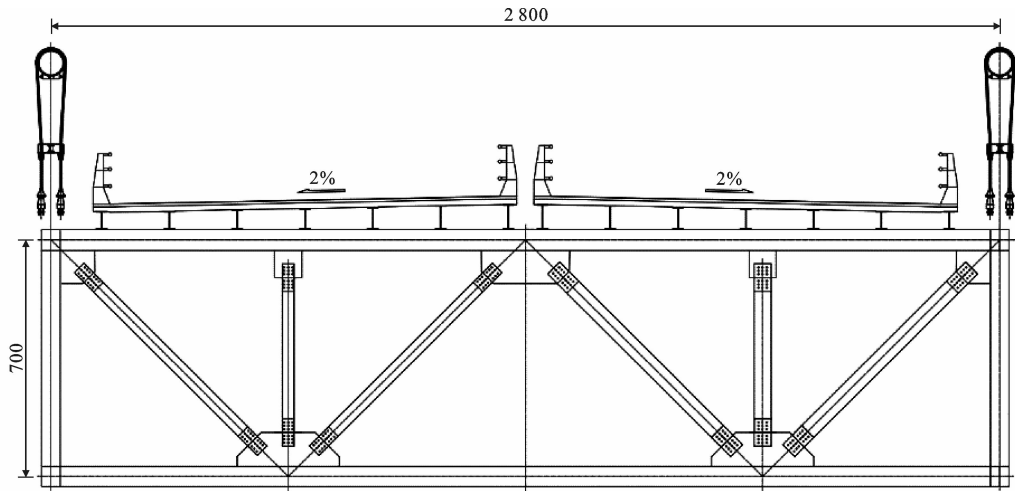
通过有限元分析软件CSI Bridge建立主桥动力空间计算模型如图8所示。计算模型以顺桥向为X轴,横桥向为Y轴,竖向为Z轴。计算模型的加劲梁和墩柱采用空间梁单元模拟,主缆和斜吊索采用空间索单元模拟,吊索采用梁单元模拟,二期铺装采用点荷载进行模拟,作用于加劲梁桁架结点上。黏滞阻尼器采用基于Maxwell模型的damper属性单元进行模拟。防屈曲支撑采用plastic-Wen连接单元模拟。根据《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05—2015),悬索桥的结构阻尼比取0.02。进行非线性时程分析时,采用瑞利阻尼,支座单元正确反映支座的力学特性。纵向地震作用组合形式为地震动加速度沿X轴和Z轴组合输入,横向地震作用组合形式为地震动加速度沿Y轴和Z轴组合输入,其中沿Z轴输入的地震动加速度均按2/3的比例进行折减。



单位: cm

图6 桥梁总体布置

Fig.6 Overall layout of bridge



单位: cm

图7 加劲梁标准断面

Fig.7 Standard cross section of stiffening girder

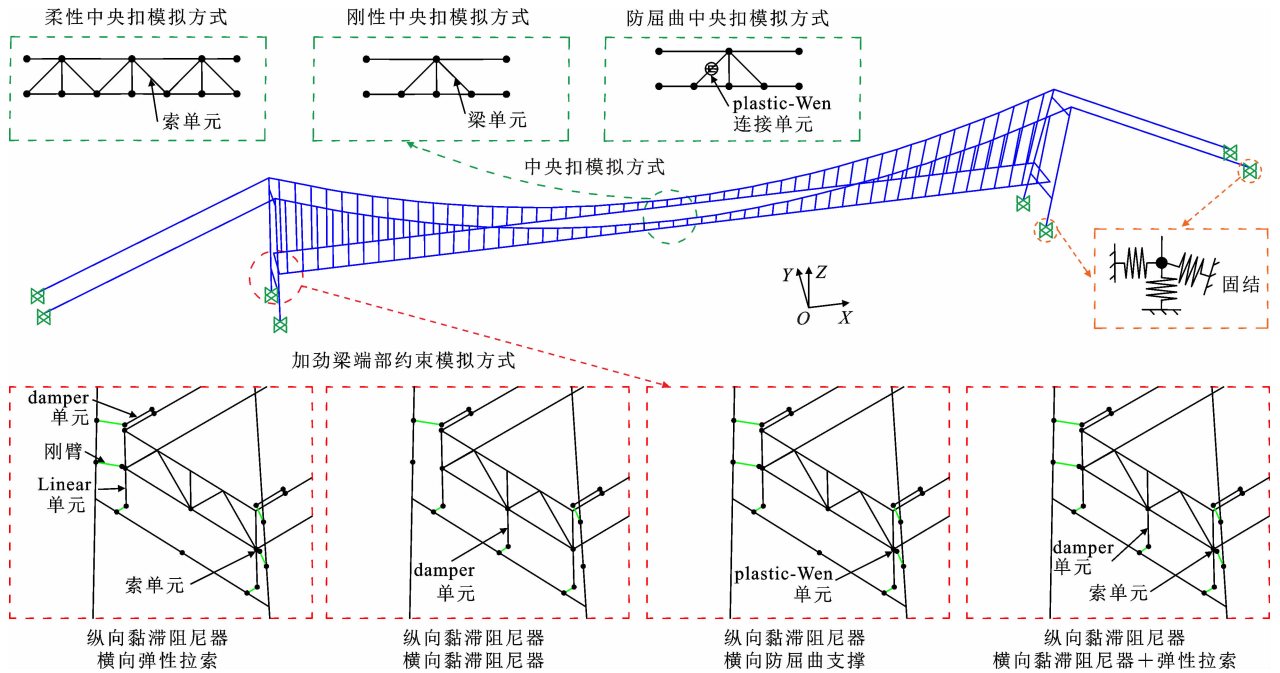


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

2.3 地震动输入

本文按照 E2 地震作用(50 年超越概率 2.5%)进行抗震设防。选取 4 条安评加速度时程曲线用于本桥非线性时程分析,如图 9 所示,将安评加速度时程曲线对应的反应谱曲线与安评反应谱曲线对比可知:安评加速度时程曲线转化成的反应谱曲线与安评反应谱吻合较好,表明本文选取的安评加速度时程曲线是准确合理的,对比结果如图 10 所示。

3 结果分析

3.1 加劲梁跨中不同约束形式影响分析

3.1.1 约束形式设置

为探究跨中缆梁联结形式对大跨径悬索桥纵桥向地震响应的影响,考虑无中央扣、柔性中央扣、刚性中央扣和防屈曲中央扣 4 种中央扣设置形式,分别建立 4 种有限元分析模型,模型信息见表 3。中央扣模拟方式如图 8 所示,支座统一采用理想约束形式, X 向自由, Y、Z 向约束,地震作用输入方向为纵桥向。

3.1.2 动力特性分析结果

对结构进行模态分析,得到不同中央扣形式下桥梁的动力特性,表 4 列举前 10 阶周期和振型。对该桥 4 种结构模式下的自振周期和振型特征进行比较分析,得出以下结论:

(1)该桥未设置中央扣时基本周期为 11.185 s,其对应振型为一阶侧弯,第 3 阶振型为主梁一阶反

对称竖弯,其对应的周期为 5.965 s,该结果与结构动力学推导的近似解较为接近,所以该桥的自振特性符合大跨度悬索桥柔性结构的特点。

(2)中央扣加强主缆与加劲梁纵桥向联系,限制主梁纵向运动。设置中央扣后纵漂振型在前 10 阶不出现,设置刚性中央扣的结构纵漂振型出现在第 14 阶,设置柔性中央扣和耗能中央扣的结构纵漂振型出现在第 15 阶,且伴随主缆和加劲梁的反对称竖弯。相比跨中缆梁无联结的桥梁,中央扣的设置提高了结构的刚度,使高阶振型出现得更早,并且同一振型下,有中央扣的桥梁周期更短。

(3)中央扣增强索的约束,导致以主缆振动为主

3.1.3 地震响应分析

为了研究 4 种中央扣约束形式对大跨度悬索桥地震响应的影响,对背景桥进行了非线性时程反应分析。位移响应控制点选取塔顶和加劲梁端部中间,内力响应分析对象选取桥塔底部弯矩和剪力、加劲梁跨中部位上弦杆内力和中央扣内力,结构响应结果取 4 条地震时程作用下的最大值,结果如图 11~图 13。

由图 11 可知,中央扣加强了加劲梁和主缆的联结,使加劲梁、主缆和桥塔成为一个整体共同受力,提高了结构的纵桥向刚度。相比无中央扣的 M-1,设置中央扣能够减少加劲梁的纵向地震位移,且中

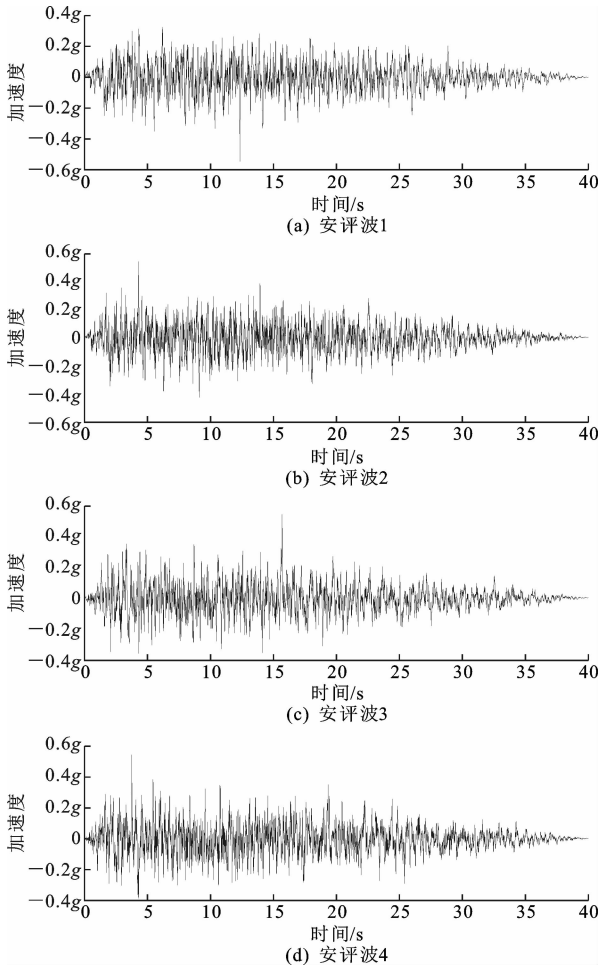


图9 地震动时程曲线

Fig. 9 Time history curves of seismic action E2

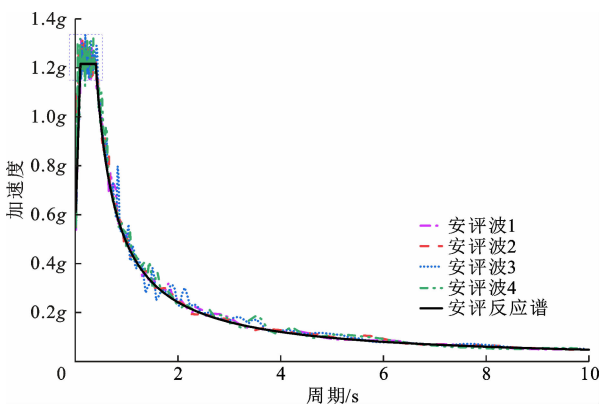


图10 地震动反应谱曲线

Fig. 10 Response spectrum curves of seismic action E2

中央扣联结作用越强则限制主梁纵向位移作用越强, M-2、M-3、M-4 分别使加劲梁纵向地震位移响应降低了 27.66%、33.23%和 35.29%,虽然不同形式中央扣对加劲梁纵向位移的抑制效果也有差异,但是这种差异相对于设置中央扣与不设置中央扣的差异是比较小的。设置中央扣对加劲梁的纵向地震位

表3 四种跨中缆梁联结形式

Tab. 3 Four connection forms between cable

		and beam		kN · m ⁻¹
模型	联结形式	中央扣构造	构件轴向刚度	
M-1	跨中短吊索			
M-2	柔性中央扣	3对斜吊索	895 850	
M-3	刚性中央扣	刚性三角桁架	12 669 000	
M-4	防屈曲中央扣	3对防屈曲支撑	650 000	

表4 四种计算模型前10阶自振特性

Tab. 4 First 10 natural vibration characteristics of four calculation models

M-1		M-2		M-3		M-4		桥梁振型特点
阶次	周期/s	阶次	周期/s	阶次	周期/s	阶次	周期/s	
1	11.185	1	11.167	1	11.109	1	11.168	一阶正对称侧弯
2	8.443							主梁纵漂
3	5.965	2	6.611	2	6.619	2	6.612	一阶反对称竖弯
4	4.510	3	4.482	3	4.517	3	4.484	一阶正对称竖弯
5	4.183	4	3.810	4	3.888	4	3.819	一阶反对称侧弯
6	3.290	5	3.283	5	3.290	5	3.284	二阶正对称竖弯
7	2.701	6	2.812	6	2.842	6	2.813	二阶反对称竖弯
8	2.625	8	2.590	7	2.559	8	2.590	主缆同向振动
9	2.590	7	2.625	8	2.410	7	2.625	主缆反向振动
10	2.367	9	2.365			9	2.365	主梁一阶扭转
		10	2.317	9	2.317	10	2.317	主缆二阶反向振动
				10	2.307			主缆二阶同向振动

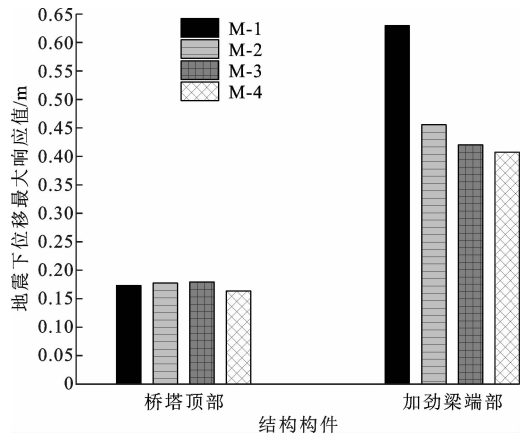


图11 桥梁纵向地震位移响应

移影响显著,但是对桥塔顶部地震位移的影响不明显,与 M-1 相比, M-2、M-3、M-4 桥塔顶部地震位移分别增加了 0.004、0.006 和 -0.01 m。

由图 11 和图 12 可知,虽然中央扣对桥塔顶部地震位移影响不显著,但是对桥塔底部地震内力影响明显。与无中央扣的 M-1 相比,柔性中央扣的 M-2 使桥塔底部最大地震弯矩降低了 5.58%,剪力增加了 6.22%;刚性中央扣的 M-3 使桥塔底部最大地震弯矩

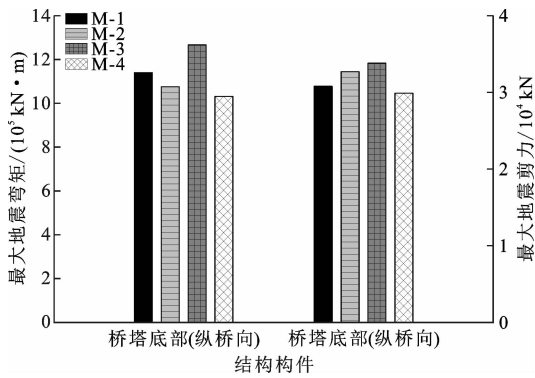


图12 桥塔地震内力响应

Fig. 12 Seismic internal force response of tower

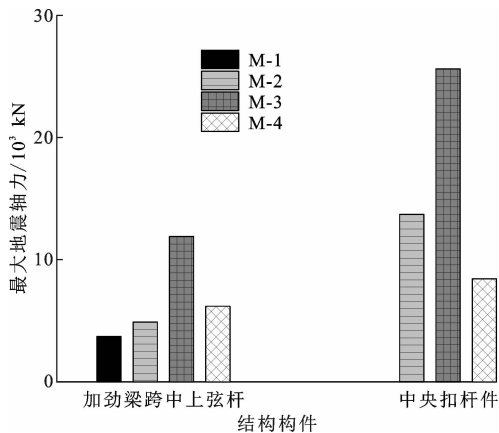


图13 关键构件最大轴力

Fig. 13 Maximum axial force of key components

增加了11.13%,剪力增加了9.81%;防屈曲中央扣的M-4使桥塔底部最大地震弯矩降低了9.47%,剪力降低了2.88%。相比于柔性中央扣,刚性中央扣的约束效果更强,造成桥塔底部地震弯矩和剪力更大,防屈曲中央扣的防屈曲支撑在地震作用下发挥滞回耗能作用,使桥塔底部弯矩和剪力均有所降低。

由图13可知,中央扣使加劲梁与主缆联结,形成一条地震作用下惯性力的传力路径。刚性中央扣加劲梁上弦杆的最大地震轴力是柔性中央扣的2.43倍,刚性中央扣自身最大地震轴力是柔性中央扣的1.868倍。柔性中央扣最大地震轴力为13719 kN,超过斜吊索的最小破断拉力,地震作用下柔性中央扣发生失效破坏。刚性中央扣在实际地震中造成的加劲梁应力集中问题值得关注。

综合图11~图13来看,在抑制加劲梁纵向地震位移方面,设置柔性中央扣会因中央扣失效影响实际效果,设置刚性中央扣和防屈曲中央扣均有明显作用,防屈曲中央扣对加劲梁纵向地震位移的抑制作用略优于刚性中央扣,但从对桥梁结构内力影响来看,设置防屈曲中央扣的M-4与刚性中央扣的

M-3相比,加劲梁跨中上弦杆最大地震轴力减小67%,桥塔弯矩减小18.53%,剪力减小11.56%。在罕遇地震下防屈曲中央扣的防屈曲支撑发生屈服实现滞回耗能,从而消散地震能量,减轻结构地震响应。综合来看,大跨度悬索桥跨中缆梁联结采用防屈曲支撑的中央扣更为合适。

3.2 加劲梁梁端不同约束形式影响分析

3.2.1 约束形式设置

在比较得出最优中央扣形式的基础上,进一步探究塔梁连接处的合理约束体系。设置中央扣能较好地提高悬索桥结构整体纵向刚度,减小主梁纵向位移。同时大跨度悬索桥具有低阻尼的特性,设置黏滞阻尼器使纵向抗震体系的减震效果更优,所以本研究在跨中设置3对防屈曲中央扣并在加劲梁端部设置2个纵向黏滞阻尼器,在此基础上比较纵横向地震动输入下的桥梁结构响应。在顺桥向地震动输入下,加劲梁端部的顺桥向最大位移为0.197 m,桥塔底部顺桥向最大弯矩为723930 kN·m,最大剪力为26411 kN。防屈曲中央扣与纵向黏滞阻尼器组合使梁端最大纵向地震位移降低68.68%,桥塔底部纵向弯矩和剪力分别降低36.5%和23.6%,桥梁结构纵向地震响应得到有效控制。在横桥向地震动输入下,加劲梁端部横向无约束时的梁端横桥向最大位移为7.133 m,梁跨中横桥向最大位移为1.79 m,加劲梁端部横向固定约束时的梁跨中横桥向最大位移为2.597 m。在桥塔地震内力响应方面,加劲梁端部横向无约束和固定约束2种工况下,桥塔横向地震剪力相比纵向地震剪力分别增大了59.9%和58.8%,桥塔横向地震弯矩相比纵向地震弯矩变化不明显,显然通过在加劲梁端部设置合理的横向约束体系对避免发生梁塔碰撞、跨中横向位移过大等危及结构安全和运营安全具有重要意义。

本研究以加劲梁端部横桥向约束体系为研究重点,根据目前工程中常见的减隔震装置提出4种不同约束体系,建立相应的计算模型,模拟方式如图8所示。每个主塔横梁处对加劲梁设置相同的约束体系,表5只列举一侧主塔横梁对加劲梁的约束体系。

上述模型具有以下特点:

(1)四种梁端约束体系在纵桥向上保持一致,因此在4种体系上只考虑横桥向的地震作用。

(2)上述模型的中央扣均采用相同的防屈曲支撑,梁端均设置相同的纵向黏滞阻尼器。梁底支座只提供竖向支撑作用,无水平向约束作用。

(3)防屈曲支撑设置方式如图4(b)所示。弹性

表5 加劲梁端部约束形式设置

Tab. 5 Constraint form settings for stiffening beam ends

项目	梁端纵向约束形式	梁端横向约束形式
体系1	2个黏滞阻尼器	2根弹性拉索
体系2	2个黏滞阻尼器	1个阻尼器
体系3	2个黏滞阻尼器	2根防屈曲支撑
体系4	2个黏滞阻尼器	2根弹性拉索+1个阻尼器

拉索设置方式是将钢桁梁底部与桥塔侧面连接。连接装置一端锚固在塔柱上,一端锚固在梁底。单根弹性拉索的刚度为30 MN/m。

(4)为确保横向防屈曲支撑能够在地震作用下发挥作用,横向防屈曲支撑的屈服刚度结合弹性拉索地震作用下的最大拉力来取值。

(5)为保证地震作用下加劲梁与桥塔不发生碰撞,梁端横向位移限值为0.4 m。

3.2.2 影响分析

为研究4种梁端约束体系下大跨度悬索桥的地震响应,采用非线性直接积分法进行时程分析。位移响应控制点选取加劲梁端部和跨中,内力响应分析对象选取桥塔底部弯矩和剪力,同时关注减隔震装置连接构件的地震轴力。结构地震响应结果如图14~图18所示。

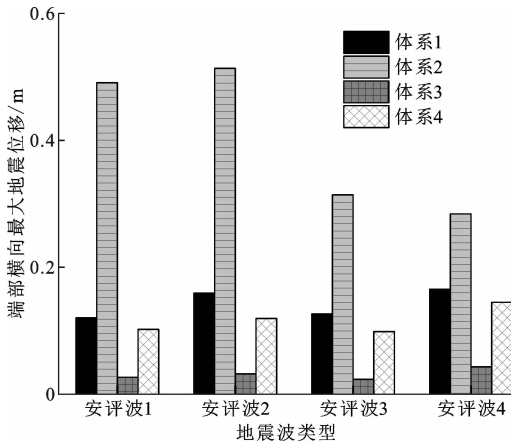


图14 梁端部地震位移

Fig. 14 Displacement at end of beam

由图14可知,体系1、体系3和体系4的梁端地震位移显著小于体系2。体系1和体系4的最大位移分别为0.165和0.145 m。体系3的梁端地震位移最大值仅有0.043 m,相比体系1减小了73.9%,而体系2的梁端地震位移最大值为0.514 m,超出了梁端横向位移限值。综合设置弹性拉索和阻尼器的体系4与单独设置弹性拉索的体系1相比,最大地震位移降低了12.12%,说明弹性拉索发挥了主要作用。综上所述可知,单独设置横向阻尼器对梁端横向地震位移的抑制效果不佳,设置弹性拉索和防屈曲支撑能有效控制

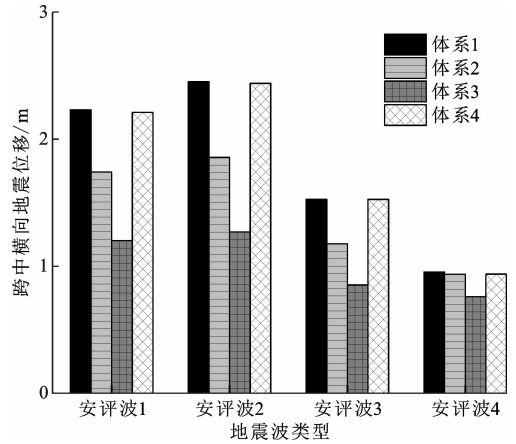


图15 梁跨中部地震位移

Fig. 15 Displacement in middle of beam

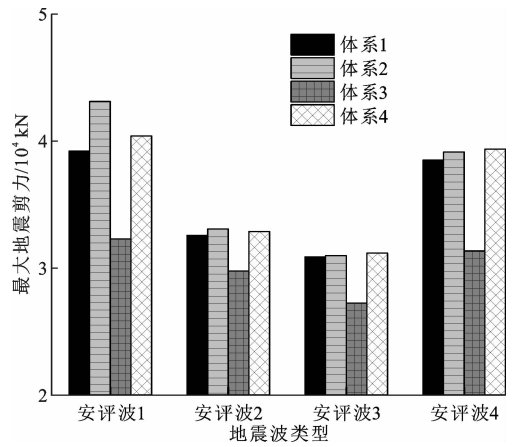


图16 桥塔底部地震剪力

Fig. 16 Seismic shear force at bottom of bridge tower

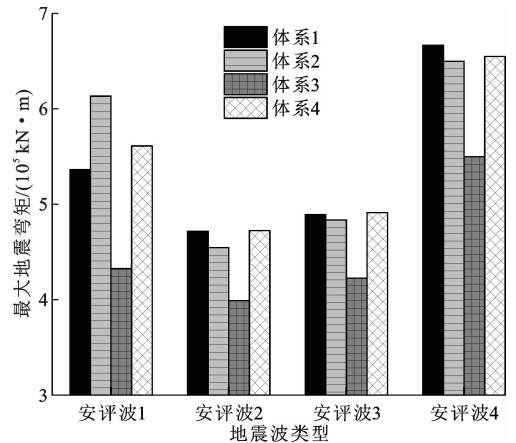


图17 桥塔底部地震弯矩

Fig. 17 Seismic bending moment at bottom of bridge tower

加劲梁端部横向地震位移。

由图15可知,体系1和体系4的加劲梁跨中最大横向地震位移值较为接近,而体系2和体系3的加劲梁跨中最大横向地震位移明显小于其他约束体系,体系2为1.858 m,相比体系1减少了24.32%,体系3为1.270 m,相比体系1减少了48.16%,说

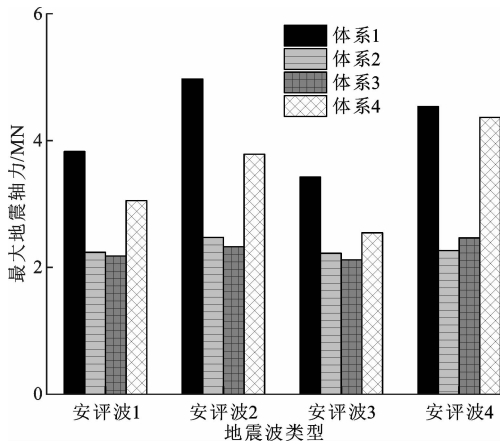


图 18 连接装置地震轴力

Fig. 18 Seismic axial force of connecting device

明设置防屈曲支撑和黏滞阻尼器均能有效减小加劲梁跨中最大横向地震位移,效果最好的是防屈曲支撑。在梁端设置滞回耗能装置能够有效减小梁跨中横向地震位移响应。

由图 16 和图 17 可知,在 4 个约束体系中,体系 3 的桥塔最大地震剪力和弯矩均最低,其中桥塔最大地震弯矩较结果最大的体系 1 减少 17.55%,桥塔最大地震剪力较结果最大的体系 2 减少 27.31%,这是因为体系 3 中横向防屈曲支撑在地震下发挥滞回耗能作用,减少了桥塔的地震内力响应。从桥塔底部最大地震弯矩来看,体系 2、体系 4 分别比体系 1 结果减小 2.54%、1.78%,说明弹性拉索和黏滞阻尼器对桥塔底部弯矩的影响效果基本一致。从桥塔底部最大地震剪力来看,体系 2、体系 4 分别比体系 1 增大 9.97%、3.04%,可以认为黏滞阻尼器相比弹性拉索会使桥塔的地震剪力响应稍微增大。

由图 18 可知,体系 2 中的黏滞阻尼器和体系 3 中的防屈曲支撑的地震轴力相差不大。由图 14 和图 18 可知,在弹性拉索基础上设置横向阻尼器使得梁端最大地震位移减少了 12.12%,弹性拉索自身最大拉力减小了 10.22%,所以弹性拉索配合黏滞阻尼器的减震效果更好。

综上所述,在 4 个约束体系中,设置横向防屈曲支撑对加劲梁端部和跨中位置的横向地震位移均有最优的抑制效果,同时桥塔底部的地震剪力和弯矩也是最小的,对单跨钢桁架悬索桥而言,横桥向地震输入是控制工况,横桥向设置防屈曲支撑的减震效果最好。

4 结 语

(1)通过桥梁结构在地震动输入下的位移和受

力结果分析可以得出,该大跨度悬索桥的最优约束体系为:跨中设置防屈曲中央扣,梁端纵向设置黏滞阻尼器、横向设置防屈曲支撑。在此体系下结构受力和结构变形均处于最优状态。

(2)在纵向地震作用下,防屈曲中央扣配合黏滞阻尼器能够发挥黏滞耗能作用,减小加劲梁纵向位移的同时减小桥塔受力;在横向地震作用下,防屈曲支撑屈服前依靠结构大刚度限制梁端横向位移,在屈服后耗散地震能量,限制梁端横向位移的效果最好,桥塔地震内力响应也最低。

(3)在梁端横向抗震约束形式上,弹性约束无法抑制加劲梁跨中横向位移,黏滞阻尼器对加劲梁端部横向位移抑制效果不佳,黏滞阻尼器和防屈曲支撑均能减少加劲梁跨中横向地震位移。在梁端设置横向滞回耗能构件是减小加劲梁跨中横向地震位移的有效手段。

(4)本文仅对大跨度悬索桥合理约束形式做出初步分析,下一步可对防屈曲支撑的合理布置形式和参数优化进行细化研究,以便适应未来更大跨度悬索桥的抗震需求。

参考文献:

References:

- [1] 周 敕,朱国强,吴 江,等.地震下大跨径连续刚构桥合理约束体系研究[J].振动与冲击,2019,38(10):98-104.
ZHOU Mi, ZHU Guo-qiang, WU Jiang, et al. Constraint system for a long-span continuous rigid frame bridge under earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(10):98-104.
- [2] 周 敕,刘 阳,赵 威.地震作用下采用 UHPC 铺装钢箱梁斜拉桥阻尼器参数优化[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(2):89-101.
ZHOU Mi, LIU Yang, ZHAO Wei. Damper parameter optimization of steel box girder cable-stayed bridge with UHPC pavement under earthquake[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41(2):89-101.
- [3] 单宏伟,韩大章,吕立人.润扬长江公路大桥悬索桥中央扣设计[J].公路,2004,49(8):58-61.
SHAN Hong-wei, HAN Da-zhang, LU Li-ren. Design of center nodes of Runyang Suspension Bridge over Yangtze River[J]. Highway, 2004, 49(8):58-61.
- [4] 赵恺雍,王 浩,郜 辉.世界首座高铁悬索桥抗震性能研究[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(9):1262-1270.
ZHAO Kai-yong, WANG Hao, GAO Hui. Antiseismic performance of the world's first high-speed railway suspension bridge[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(9):1262-1270.

- [5] 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 Qi-yu,CAO Fa-hui,JIANG Jin-song,et al. Key techniques of seismic design of Xingkang Dadu River Bridge in Luding[J]. Bridge Construction,2018,48(4):90-95.
- [6] 徐 勋,强士中. 中央扣对大跨悬索桥动力特性和地震响应的影响研究[J]. 铁道学报,2010,32(4):84-91.
XU Xun,QIANG Shi-zhong. Influence of central buckle on dynamic behavior and seismic response of long-span suspension bridge[J]. Journal of the China Railway Society,2010,32(4):84-91.
- [7] 汪鸿鑫,叶爱君. 柔性中央扣对大跨度悬索桥地震反应的影响[J]. 土木工程与管理学报,2019,36(6):161-165.
WANG Hong-xin,YE Ai-jun. Influence of flexible central buckle on seismic response of long-span suspension bridges[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2019,36(6):161-165.
- [8] 李永斌,曹 冬. 具有刚性中央扣的大跨度悬索桥随机地震响应研究[J]. 世界桥梁,2017,45(3):48-54.
LI Yong-bin,CAO Dong. Study of stochastic seismic response of long-span suspension bridge with rigid central buckle[J]. World Bridges,2017,45(3):48-54.
- [9] 刘 伟,宋松科,权新蕊,等. 悬索桥 BRB 中央扣的减震性能研究[J]. 桥梁建设,2022,52(3):61-68.
LIU Wei,SONG Song-ke,QUAN Xin-rui,et al. Study of seismic mitigation performance of BRB central buckle of suspension bridge[J]. Bridge Construction,2022,52(3):61-68.
- [10] 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 Zhi-ming,WANG Hong-xin,YE Ai-jun. Longitudinal anti-seismic system for long-span suspension bridge with flexible central buckle[J]. Bridge Construction,2020,50(1):38-43.
- [11] 江 辉,宋光松,郭 辉,等. 跨“V”形峡谷大跨度铁路悬索桥减震研究[J]. 中国铁道科学,2022,43(1):63-74.
JIANG Hui,SONG Guang-song,GUO Hui,et al. Research on seismic reduction of long-span railway suspension bridge located over V-shaped canyon[J]. China Railway Science,2022,43(1):63-74.
- [12] 卢长炯,卢明奇. 基于黏滞阻尼器的单跨悬索桥地震位移响应控制[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2021,38(2):98-103.
LU Chang-jiong,LU Ming-qi. Seismic displacement responses control of single span suspension bridges based on viscous dampers[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences),2021,38(2):98-103.
- [13] 苗润池. 宜昌伍家岗长江大桥抗震设计关键技术研究[J]. 桥梁建设,2020,50(增2):36-40.
MIAO Run-chi. Study of key seismic design techniques for Wujiaogang Changjiang River Bridge in Yichang[J]. Bridge Construction,2020,50(S2):36-40.
- [14] YANG M G,CHEN Z Q,HUA X G. An experimental study on using MR damper to mitigate longitudinal seismic response of a suspension bridge[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2011,31(8):1171-1181.
- [15] POURZEYNALI S,BAHAR A,POURZEYNALI S. Vertical vibration control of suspension bridges subjected to earthquake by semi-active MR dampers[J]. Scientia Iranica,2017,24(2):439-451.
- [16] WANG H,LI A Q,JIAO C K,et al. Damper placement for seismic control of super-long-span suspension bridges based on the first-order optimization method[J]. Science China Technological Sciences,2010,53(7):2008-2014.
- [17] SHEN Y,LI J Z,FREDDI F,et al. Numerical investigation of transverse steel damper (TSD) seismic system for suspension bridges considering pounding between girder and towers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2022,155:107203.
- [18] 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 Sciences),2006,33(3):6-10.
- [19] 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 buckle on seismic response of long-span suspension bridges[J]. Structural Engineers,2016,32(1):112-118.
- [20] 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/OL]. 铁道科学与工程学报,2022:1-12[2022-08-15]DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20211465.
SONG Guang-song,JIANG Hui,GUO Hui,et al. Research on shock absorption technology of extra-large railway suspension bridges in high-intensity areas under traveling wave excitation[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering,2022:1-12[2022-08-15]DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20211465.
- [21] 胡文军,万田保. 山区大跨度铁路悬索桥设计关键技术[J]. 铁道建筑,2022,62(5):13-17.
HU Wen-jun,WAN Tian-bao. Key design techniques for long span railway suspension bridge in mountainous area[J]. Railway Engineering,2022,62(5):13-17.
- [22] LU L. Application of buckling-restrained braces in the seismic control of suspension bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2022,21(2):543-557.