

深海矮塔斜拉桥减震控制与参数优化研究

张建忠

(福建省交通建设质量安全中心, 福建 福州 350108)

摘要: 为了探究粘滞阻尼器对深海高桩承台矮塔斜拉桥抗震性能的影响, 基于 ABAQUS 建立考虑水-结构相互作用的矮塔斜拉桥全桥有限元模型, 采用 Morison 方程计算动水附加质量, 以 Maxwell 元件表征粘滞阻尼器的受力特性, 并在此基础上开展非线性动力时程计算, 分析不同阻尼参数组合下桥塔、桥墩内力的影响, 并进行参数分析与优化设计。结果表明: 在纵向地震作用下, 安装阻尼器后, 桥塔与主墩内力随阻尼系数增大呈先减后增趋势, 随阻尼指数增大而减小; 过渡墩内力则显著增大。当阻尼系数大于 $1\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 时, 阻尼器对塔底内力调控作用显著; 大于 $6\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 后, 参数影响减弱, 过渡墩内力变化趋于稳定。在横向地震作用下, 不同阻尼参数下桥塔与主墩响应差异显著, 需严格控制参数。经优化, 建议横向减震控制采用阻尼系数 $C = 2\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 、阻尼指数 $\alpha = 0.8$ 的粘滞阻尼器。粘滞阻尼器可有效调控深海高桩承台矮塔斜拉桥的关键构件内力, 但其参数需针对纵、横向地震作用分别优化, 以避免对过渡墩等部位产生反效果。

关键词: 粘滞阻尼器; 矮塔斜拉桥; 减震控制; 参数优化

中图分类号: U448.27; TU352.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1144(2026)02-0033-07

Vibration Control and Parameter Optimization for Deep-sea Low-pylon Cable-stayed Bridges

ZHANG Jianzhong

(Fujian Provincial Transportation Construction Quality and Safety Center, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to investigate the effects of viscous dampers on the seismic performance of a deep-sea cable-stayed bridge with a high-pile cap foundation and low pylons, a full-bridge finite element model of the low-ylon cable-stayed bridge was developed in ABAQUS with fluid-structure interaction considered. The hydrodynamic added mass was calculated using the Morison equation, and the mechanical behavior of the viscous dampers was simulated using the Maxwell model. Nonlinear time-history analyses were conducted to examine how different damping coefficients and damping exponents affect the internal forces of the pylons and piers, followed by parametric analysis and optimal design. Under longitudinal seismic excitation, after the dampers were installed, the internal forces of the pylons and main piers first decreased and then increased with increasing damping coefficient, while they decreased as the damping exponent increased; in contrast, the internal forces of the transition piers increased significantly. When the damping coefficient exceeded $1\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$, the dampers exhibited a pronounced effect on regulating the internal forces at the pylon base; when it exceeded $6\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$, the influence of parameter variations weakened and the internal forces of the transition piers tended to stabilize. Under transverse seismic excitation, the responses of different piers and pylons differed markedly, and the parameters therefore need to be strictly controlled. The optimization suggests using viscous dampers with a damping coefficient of $C = 2\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ and a damping exponent of $\alpha = 0.8$ for transverse vibration control. Viscous dampers can effectively regulate the internal forces of key components in deep-sea cable-stayed bridges with high-pile cap foundations and low pylons; however, their parameters should be optimized separately for longitudinal and transverse seismic actions to avoid adverse effects on locations such as transition piers.

Keywords: viscous damper; low-ylon cable-stayed bridge; seismic control; parameter optimization

深海矮塔斜拉桥由于水深以及高桩承台影响,其抗震性能需要开展进一步研究。与传统抗震设计相比,采用减震和隔振设计能够显著减轻桥梁结构在地震中的响应,有效防止地震引起的结构损害,极大增强桥梁的抗震安全性。特别是在设计大跨度桥梁的抗震系统时,粘滞阻尼器作为一种主要的减震设备,常被选用来提高结构的抗震能力。

目前,围绕粘滞阻尼器作用下矮塔斜拉桥纵向与横桥向地震响应特征,国内外已积累了一定研究成果。Zhang 等^[1]研究了粘滞阻尼器对矮塔斜拉桥纵向抗震性能的影响,结果表明,合理选择粘滞阻尼器的力学参数,对矮塔斜拉桥具有显著的减震效果。Zhu 等^[2]研究了粘滞阻尼器对斜拉桥地震响应的影响,并对阻尼系数和阻尼指数进行了参数化研究。刘钧壬^[3]采用粘滞阻尼器对矮塔斜拉桥横桥向进行减震研究,结果表明,粘滞阻尼器能有效降低地震作用下矮塔斜拉桥的弯矩和位移,提高结构的抗震能力。马方^[4]利用粘滞阻尼器对矮塔斜拉桥支座进行加固,计算结果表明,采用粘滞阻尼器进行减震控制可行,且效果显著。Zhong 等^[5]提出基于使斜拉桥整体性能得到改善的评价方法来推导粘滞阻尼器的最优参数。Han 等^[6]采用粘滞阻尼器与摩擦滑动支座相结合的方式对独塔斜拉桥进行了减震研究。Yi 等^[7]研究发现,在近场地震动作用下,粘滞阻尼器可以有效控制梁端位移,但会导致塔底剪力和弯矩增大。全伟等^[8]对矮塔斜拉桥采用粘滞阻尼器的减震效果进行研究,结果表明,粘滞阻尼器对内力和位移均有较好的减震效果,在实际应用中优先推荐使用。万乐乐等^[9]研究了粘滞阻尼器对矮塔斜拉桥的减隔震效果,结果表明,采用粘滞阻尼器可有效降低结构的地震响应。柳春光等^[10]通过水下振动台主塔模型试验采集应变、加速度与动水压力数据,系统揭示了动水压力对深水斜拉桥主塔地震响应与抗震性能的影响,并将验证模型用于大型桥塔抗震研究。李璐璐等^[11]基于 Stokes 二阶波理论在 FLUENT 中进行 CFD 造波计算动水压力并与试验对比验证,将点动压等效为集中波浪力施加到 ANSYS 有限元模型后评估了单塔群桩承台结构在波浪作用下的动力响应与安全性。陈智威^[12]以深水矮塔斜拉桥为例,在 ABAQUS 中通过辐射波浪理论与节点质量法考虑地震动水力,结果表明,动水力会显著延长自振周期并明显放大桥塔剪力与弯矩响应,提示抗震设计中不应忽略地震动水力效应。综上,不少国内外学者采用粘滞阻尼器对矮塔斜拉

桥纵、横向减震体系进行研究,但这些研究大部分是基于独塔或者双塔矮塔斜拉桥,针对多塔矮塔斜拉桥的减震分析较少,且以往研究较少考虑水-结构相互作用。

基于此,本文以某深海斜拉桥为背景开展阻尼器减震参数设计及优化研究,在 ABAQUS 中建立粘滞阻尼器有限元模型,并考虑桩-水-结构相互作用,建立深海斜拉桥三维非线性数值模型,在斜拉桥纵向与横向布设具有不同参数的粘滞阻尼器,探究其对斜拉桥的减震效果及影响规律,根据粘滞阻尼器的减震效果,推荐最佳的阻尼器参数组合。

1 地震动水作用

水中桥梁下部结构在地震作用下会受到明显的流体附加效应,其分析方法应结合构件尺度与流体波长之间的相对关系加以确定。设底端固结的悬臂圆柱构件处于理想无粘、不可压缩水域内,地震动以水平输入形式施加于柱基,同时不计水面自由波效应,则可建立其相应的运动控制方程:

$$M_s \ddot{u}_s + C_s \dot{u}_s + K_s u_s = -M_s \ddot{u}_g - F_w \quad (1)$$

式中: M_s 为结构的质量矩阵; C_s 为阻尼矩阵; K_s 为刚度矩阵; \ddot{u}_s 、 \dot{u}_s 、 u_s 分别为结构的加速度、速度和位移列向量; \ddot{u}_g 为地面加速度; F_w 为动水力。

赖伟^[13]基于试验数据,通过最小二乘法分析,推导出将圆形截面动水力附加质量转换为矩形截面的转换系数:

$$k = 0.94732 + \frac{2.59648}{1 + \left(\frac{D/B}{0.09516}\right)^{0.54638}} \quad 0.1 \leq D/B \leq 10 \quad (2)$$

式中: D 为迎水面宽度; B 是与 D 垂直的边长。

当迎水尺寸相对较大时,可采用辐射波理论评估水动力附加质量;当构件尺度相对较小($\frac{\text{横向尺寸 } D}{\text{流体波长 } L} \leq 0.2$) 时, Morison 方法更适合描述惯性项和阻力项共同作用下的动水力响应。

考虑水体为不可压缩流体并不考虑桥墩对水体的作用,可推导出针对单位长度柱体的动水力计算公式^[14]:

$$F_w = \rho V \ddot{u} + (C_M - 1) \rho V (\ddot{u} - \ddot{x} - \ddot{x}_g) + 0.5 C_D \rho A_p [|\dot{u} - \dot{x} - \dot{x}_g| (\ddot{u} - \ddot{x} - \ddot{x}_g)] \quad (3)$$

式中: ρ 为水体密度; V 为柱体单位长度对应的体积; A_p 为柱体单位长度在水流法向上的投影面积; \ddot{u} 、 \ddot{x} 和 \ddot{x}_g 分别为水体绝对加速度、桥墩相对加速度及地

震输入加速度; \dot{u} 、 \dot{x} 和 \dot{x}_g 分别为水体绝对速度、桥墩相对速度及地震输入速度; C_M 和 C_D 分别为惯性项系数和黏滞阻力系数。

2 工程背景及有限元建模

2.1 工程背景

研究对象为某跨海深水矮塔斜拉桥。主桥采用四跨预应力混凝土结构体系,跨径布置为 $100\text{ m} + 2 \times 180\text{ m} + 100\text{ m}$,桥梁总体布置如图 1 所示。主梁、主墩、过渡墩及高桩承台共同组成空间受力复杂的桥梁结构。由于桥址水深较大,承台与群桩长期处于水体环境中,地震作用下除结构本身的惯性响应外,还需考虑明显的水动力附加效应。主墩纵桥向宽 5.5 m ,横桥向宽 16 m ,混凝土强度等级为 C55;过渡墩纵桥向宽 4 m ,横桥向宽 9 m ,混凝土强度等级为 C40。主墩承台高 8 m ,宽 47 m ,过渡墩承台高 7 m ,宽 37 m 。承台桩基均为直径 4 m 的钻孔灌注桩,混凝土强度等级为 C35。

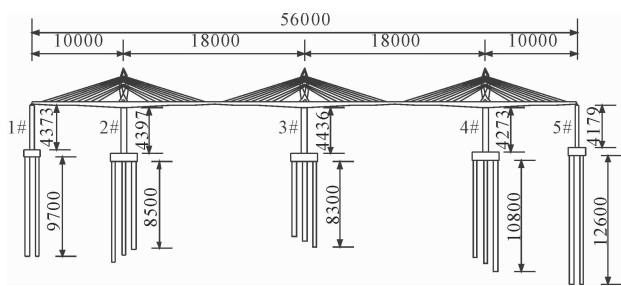


图 1 主桥总体布置图(单位:cm)

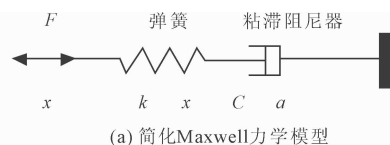
主塔设计为矩形实心截面,截面尺寸沿竖向连续变化,桥面以上高度为 33.5 m ,并与主梁固结成整体。塔柱外缘在线形上于塔顶以下 31 m 区段采用半径 45.75 m 的圆弧形式。主塔混凝土强度等级为 C60,纵筋为 HRB400。

2.2 非线性数值模型的建立

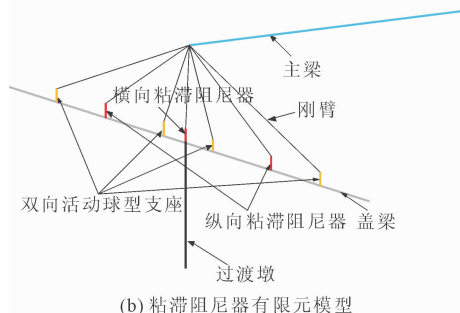
基于 ABAQUS 平台构建矮塔斜拉桥整体空间有限元模型,以反映斜拉索在桥塔处的实际布置形式及其协同受力关系。模型中,主梁、桥塔、桥墩和桩基础均选用 B31 梁单元。桥墩与桩基的混凝土材料选用 UConcrete02 本构关系以反映弹塑性行为,钢筋材料则借助 PQ-Fiber 中的 USteel05 模型模拟 HRB400 钢筋的弹塑性性能。

粘滞阻尼器具有工作性能稳定、参数控制较为可靠等特点,且在恒载状态下通常不提供附加初始刚度,因此对结构静力受力体系影响较小,已在大跨桥梁减震控制中得到较多应用。其基本构造通常包

括外筒、活塞组件、传力杆、流体通道及高黏度耗能介质等。目前,粘滞阻尼器常用 Maxwell 模型来模拟其力与位移的关系,该模型由线性弹簧与阻尼器串联而成,由刚度 K 、阻尼系数 C 和阻尼指数 α 确定该模型,如图 2(a) 所示。在 ABAQUS 中采用连接器单元模拟粘滞阻尼器,阻尼器有限元模型如图 2(b) 所示。研究不同阻尼系数与阻尼指数对斜拉桥的减震效果,阻尼属性选择为非线性,将粘滞阻尼器的力-相对速度数据输入。



(a) 简化Maxwell力学模型



(b) 粘滞阻尼器有限元模型

图 2 阻尼器模型示意图

考虑桥塔截面沿高度方向连续变化的特点,以塔梁固结段为起点按 1 m 长度进行离散,竖向共布置 34 个单元,并分别赋予对应的塑性纤维截面。斜拉索采用三维梁单元模拟,为处理斜拉索与桥塔间的耦合作用,选用同济大学团队开发的粘结滑移插件^[15],基于邻近点匹配算法自动建立连接器单元,避免了网格严格对应的建模困难。斜拉索在自重作用下呈现垂度效应,且存在应力松弛和非线性刚度特性。为此,采用 Ernst 公式对其弹性模量进行等效折减,以考虑几何非线性影响。支座方面,背景桥采用 QZ6000SX 型双向活动球型支座。数值模型中以连接单元对其力学行为进行表征,选用衬套本构,并通过六个自由度方向的刚度参数定义其力学行为。最终建立的全桥数值模型如图 3 所示。为考虑水-结构相互作用,采用第 1 节计算方法计算承台和桩基础相应位置的动水力附加质量,如表 1、表 2 所示。

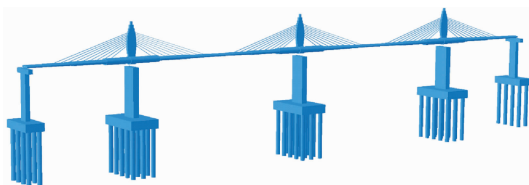


图 3 全桥三维梁单元有限元模型图

表 1 承台沿高度方向单位长度动水力附加质量 单位: 10^5 kg

构件	纵向	横向
主墩承台	24.07	9.47
过渡墩承台	14.45	3.90

表 2 背景桥桥墩群桩动水力附加质量 单位: 10^5 kg

构件	1#过渡墩		5#过渡墩		2#主墩		3#主墩		4#主墩	
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
群桩	60.69	44.95	59.28	43.91	109.3	80.94	109.9	81.41	110.3	81.67

输入地震动的特征周期 $T_g = 0.45 \text{ s}$, 反应谱在 $0.1 \sim 10 \text{ s}$ 周期范围内与规范极罕遇目标谱匹配。以《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)所给设计反应谱作为目标谱, 并据此在 PEER 的 NGA-West2 地震动数据库中筛选与谱形较为接近的地震记录。经比选后, 确定采用 1940 年 Imperial Valley 波、1942 年 Borrego 波和 1968 年 Borrego Mountain 波作为输入地震动, 对应的 PEER 记录编号分别为 RSN6、RSN9 和 RSN40, 其中 RSN6 地震动曲线如图 4 所示。为研究极罕遇地震下斜拉桥的抗震性能, 本研究选取极罕遇地震工况(超越概率 $1/2500$), 参考《公路桥梁抗震设计规范》中 II 类场地的极罕遇地震参数, 将地震动峰值加速度(PGA)调幅至 $0.150g$ 。并采用三向地震动输入, 比例为 $1:0.85:0.65$ 。

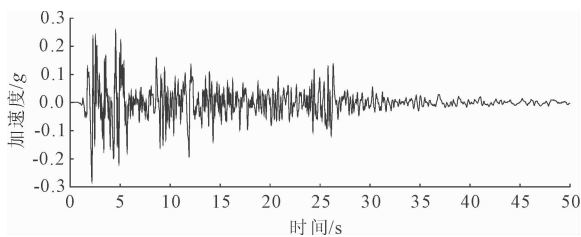


图 4 RSN6 地震动加速度时程曲线

3 阻尼器布置方式

纵向减震装置的布置方式如图 5 所示。由于背景桥采用刚构体系, 所以本文选择在每个过渡墩盖梁和主梁间布置 2 个粘滞阻尼器, 全桥共布置 4 个。

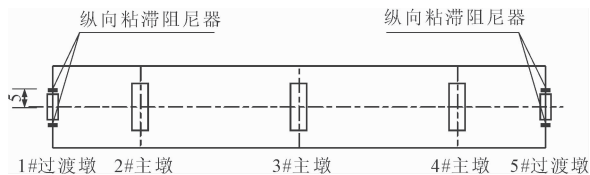


图 5 粘滞阻尼器纵向布置方式(单位:m)

从抗震的角度出发, 粘滞阻尼器的阻尼指数 α 的常用取值范围为 $0.3 \sim 1.0$ 。本文设定阻尼指数 $\alpha = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 共 4 个值, 设定阻尼系数 $C = 500, 1000, 1500, 2000, 4000, 6000, 8000 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 共 7 个值, 共 28 种粘滞阻尼器参数组合, 每组参数对应的地震反应结果都取 3 条极罕遇地震动加速度作用下矮塔斜拉桥关键部位内力 and 位移绝对值的最大值。

横向减震装置的布置方式如图 6 所示。对于背景桥横向粘滞阻尼器的布置, 本文选择在每个过渡墩盖梁和主梁间布置 1 个, 全桥共布置 2 个。

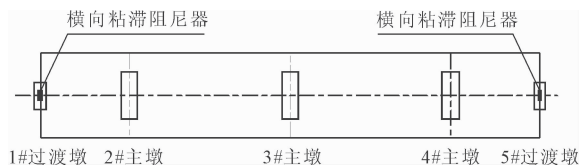


图 6 粘滞阻尼器横向布置方式

通过对模型进行试算, 发现当阻尼器的阻尼系数 C 大于 $4000 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 时, 无论阻尼指数 α 取何值, 矮塔斜拉桥 3#主墩墩底内力都大于不设置阻尼器时的结果, 起不到减震作用。基于改善结构内力的原则, 本节设定阻尼指数 $\alpha = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 共 4 个值, 阻尼系数 C 设定为 $1000, 2000, 3000, 4000 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 共 4 个值, 共 16 种阻尼器参数组合, 每组参数对应的地震反应结果, 取 3 条极罕遇地震动加速度作用下矮塔斜拉桥(墩、塔)关键部位内力绝对值的最大值。

4 矮塔斜拉桥减震分析

4.1 纵向减震效果分析

图 7—图 8 展示了桥塔塔底剪力和弯矩随阻尼器参数的变化规律。从这些图中可以看出, 当阻尼系数小于 $1000 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 时, 塔底剪力和弯矩受阻尼指数影响较小, 随阻尼参数的增加变化不大, 而阻尼系数大于 $1000 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 时, 塔底剪力和弯矩受阻尼指数和阻尼参数影响较大, 波动范围较大。值得注意的是, 当阻尼系数较小时, 塔底剪力和弯矩总体上随着阻尼指数的增大而增大, 而当阻尼系数较大时, 塔底剪力和弯矩则随着阻尼指数的增大而减小。这是因为粘滞阻尼器可以提供附加刚度的限位与协调作, 相当于在桥塔与主梁(或其他附属结构)间增设“柔性约束”, 在结构振动时参与受力分配, 减少桥塔底部因上部结构惯性力产生的剪力与弯矩, 此外, 依托粘滞/摩擦耗能的能量耗散功能, 可

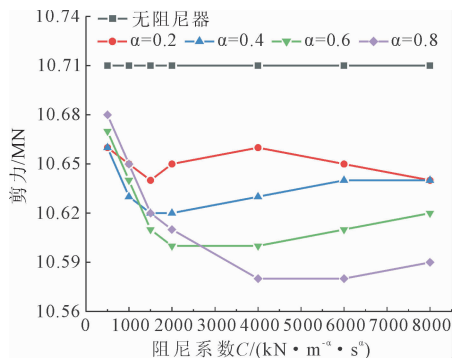


图 7 阻尼器参数对 3#桥塔塔底剪力的影响

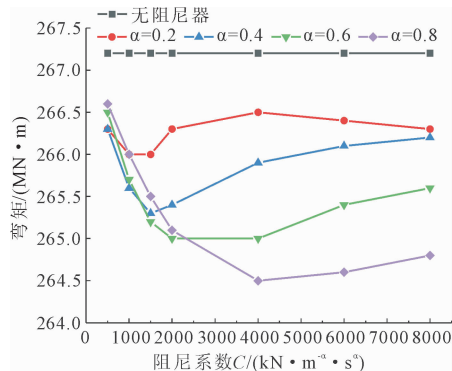
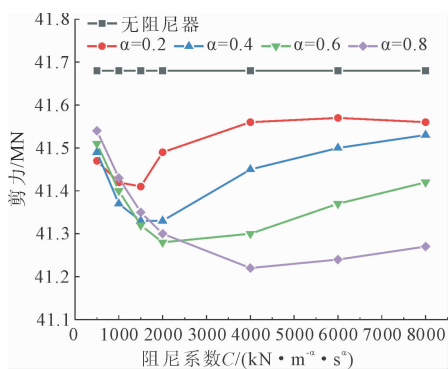
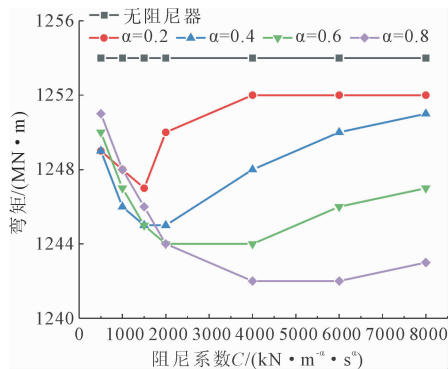


图 8 阻尼器参数对 3#桥塔塔底弯矩的影响

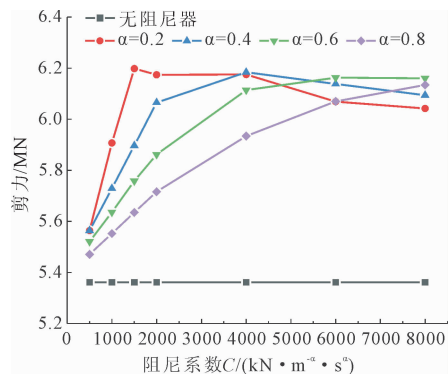


(a) 对剪力影响

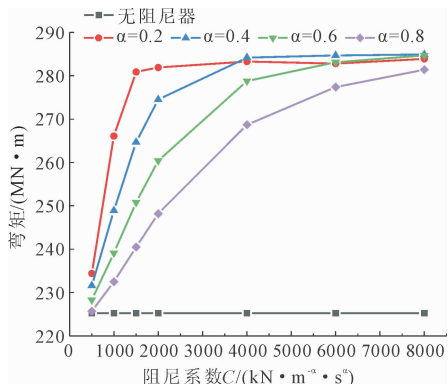


(b) 对弯矩影响

图 9 阻尼器参数对 3#主墩墩底内力的影响



(a) 对剪力影响



(b) 对弯矩影响

图 10 阻尼器参数对 1#过渡墩墩底内力的影响

以将地震、行车等动力输入的能量转化为热能等形式消耗,降低桥塔需承担的动力能量,进而减小塔底内力。此外,在较小阻尼系数条件下,随着阻尼指数提高,塔底剪力与弯矩整体呈上升趋势;而在阻尼系数取值较大时,二者则随阻尼指数增大表现为下降。随着纵向阻尼系数进一步增大,阻尼器的减震效果将下降。

图 9—图 10 展示了桥墩墩底剪力和弯矩随阻尼器参数的变化规律。从图中可以看出,阻尼器参数对主墩墩底内力的影响与阻尼器参数对桥塔塔底内力的影响基本相同,其剪力减震幅值约 4.5%,其弯矩幅值降幅相较略小。这是因为阻尼器在结构变形过程中持续提供反向阻尼力,一方面,阻尼力直接分担了一部分由外荷载引起的剪力;另一方面,阻尼器消耗了部分动能与势能,使得结构整体的动力响应(位移、加速度等)有所降低,进而间接减小了传递到墩底的剪力需求,改变了原有的受力分布格局。

但阻尼器参数对过渡墩墩底内力的影响则相反。当粘滞阻尼器的阻尼系数小于 6 000 $\text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 时,过渡墩墩底剪力和弯矩受阻尼指数影响较大,总体上随着阻尼指数的增大而减小,而阻尼系数大于

6 000 kN/(m/s) $^\alpha$ 时,过渡墩墩底剪力和弯矩受阻尼指数和阻尼系数影响较小,且不同阻尼指数、不同阻尼系数过渡墩墩底剪力和弯矩趋于一定值。另外,在阻尼指数保持不变的条件下,随着阻尼系数增大,过渡墩墩底剪力和弯矩总体呈先上升后变化趋缓的特征。相较于主墩与主塔内力,其并未达到减震效果。这是因为阻尼器产生的阻尼力作为附加作用力施加于过渡墩结构上,改变结构受力传递路径与内力分布,与原结构承受的其他荷载叠加,从而使得剪力与弯矩数值相较于无阻尼器时有所增加。

综上所述,合理选择阻尼器参数可以起到减小矮塔斜拉桥主梁梁端和桥塔塔顶位移,控制塔底和墩底内力的作用,而阻尼器参数选取不当,则可能导致结

构受力增大。基于控制结构位移,改善结构受力的原则,本文的矮塔斜拉桥采用粘滞阻尼器进行减震控制时,可选用阻尼系数 $C = 4\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$,阻尼指数 $\alpha = 0.8$ 的阻尼器。

4.2 横向减震效果分析

图 11 展示了桥塔塔底横向剪力和弯矩随阻尼参数的变化规律。从图中可以看出,当阻尼器的阻尼指数一定时,随着阻尼系数的增加,塔底剪力和弯矩总体上呈下降趋势,剪力降幅最大达 4.9%,弯矩降幅最大达 6.7%,效果较为显著。另一方面,在阻尼系数保持不变的条件下,塔底剪力和弯矩随阻尼指数提高总体呈上升趋势。

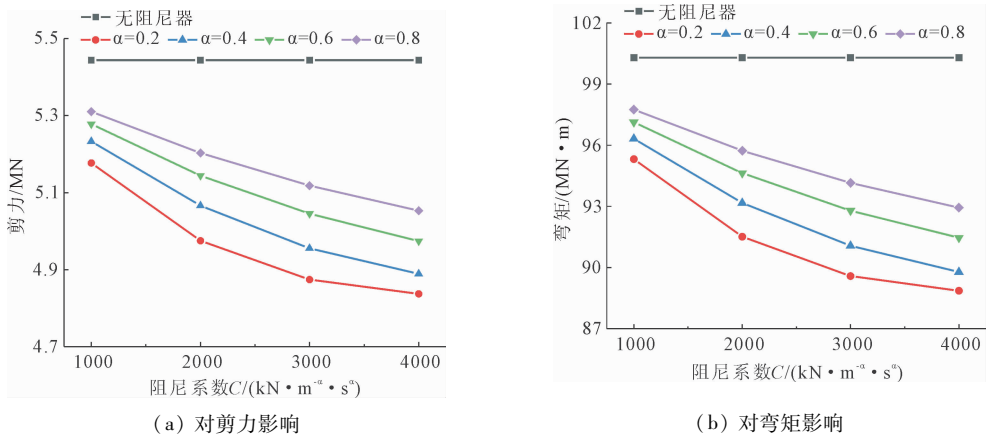


图 11 阻尼器参数对 3#桥塔塔底内力的影响

图 12—图 14 展示了桥墩墩底剪力和弯矩随阻尼器参数的变化规律。由图中结果可知,在阻尼指数保持不变时,2#主墩墩底剪力和弯矩整体随阻尼系数增大而降低,而 1#过渡墩和 3#主墩的墩底剪力和弯矩则随着阻尼系数的增加而增加,这是因为,阻尼器的加入改变了桥墩的受力分布,使得过渡墩与主墩剪力与弯矩规律不同,与纵向减震机理类似。

当阻尼系数大于 4 000 $\text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 时,无论阻尼指数取何值,墩底剪力和弯矩都大于无阻尼器时的结果,粘滞阻尼器起不到减震作用。另一方面,在阻尼系数保持不变的条件下,1#过渡墩和 3#主墩墩底剪力及弯矩总体随阻尼指数提高而呈下降趋势,而 2#主墩的墩底剪力和弯矩则随着阻尼器阻尼指数的增加而增加。

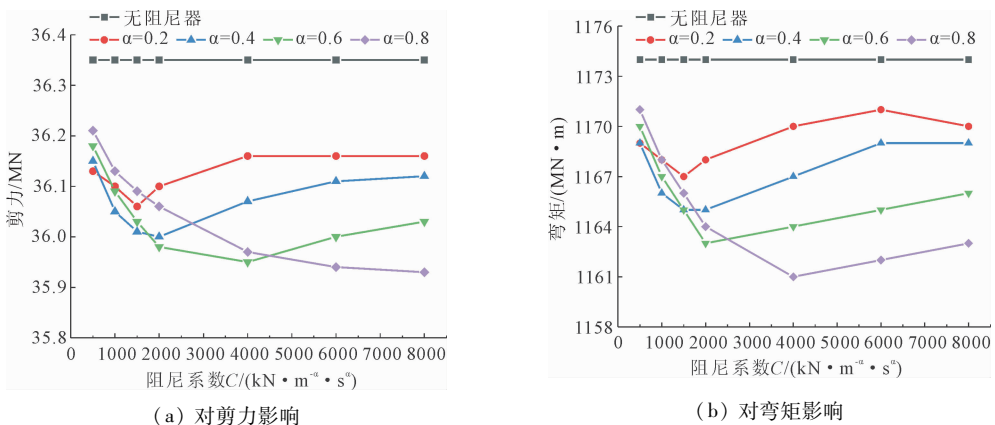


图 12 阻尼器参数对 2#主墩墩底内力的影响

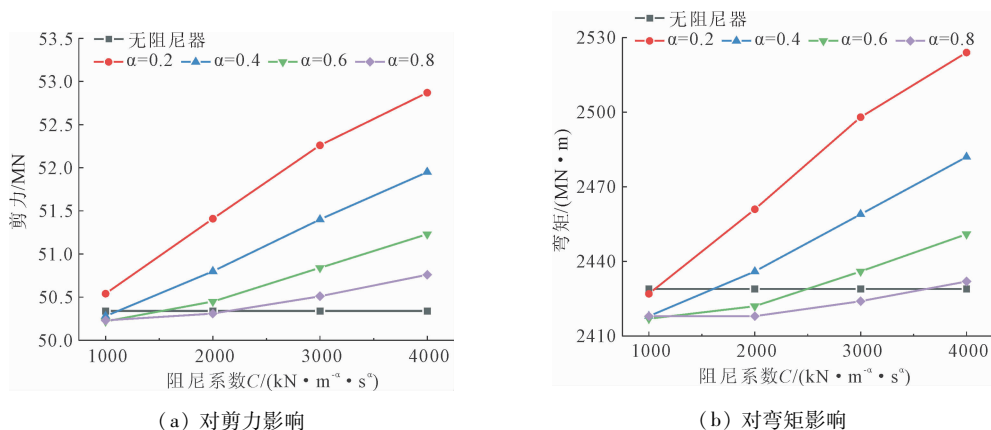


图 13 阻尼器参数对 3#主墩墩底内力的影响

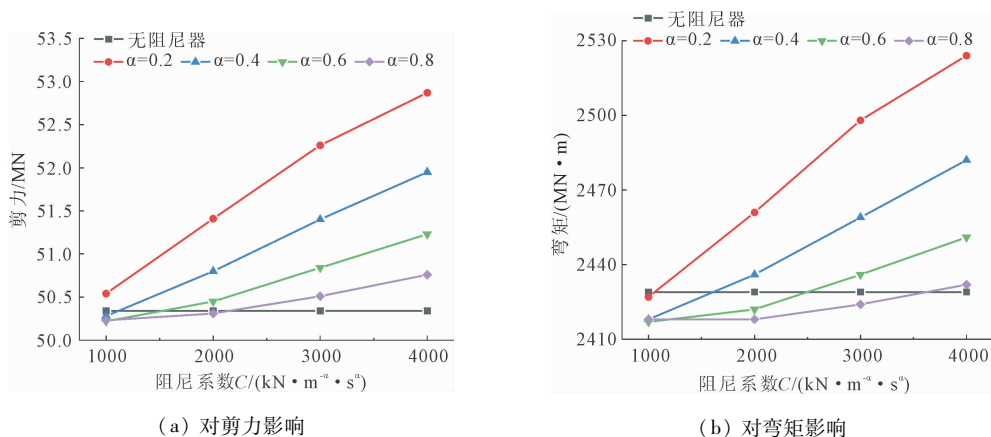


图 14 阻尼器参数对 1#过渡墩墩底内力的影响

由上述分析可知,合理选择阻尼器参数对于矮塔斜拉桥横向减震至关重要,如果阻尼器参数选取不当,不仅不会减小结构位移,反而增加了结构内力。从控制结构位移,改善结构内力的角度出发,应采用参数取值为 $C = 2\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 、阻尼指数 $\alpha = 0.8$ 的粘滞阻尼器对矮塔斜拉桥横向进行减震控制。

5 结 论

考虑深水矮塔斜拉桥在地震动水力下的受力性能,基于粘滞阻尼器的力学特性,系统分析了粘滞阻尼器对极罕遇地震作用下矮塔斜拉桥纵、横向的减震效果,并得出了粘滞阻尼器力学参数的合理取值,具体结论如下:

(1) 通过连接器单元结合衬套本构及力-速度数据对,可高效模拟非线性粘滞阻尼器,为复杂桥梁结构的减震设计提供可靠分析手段。粘滞阻尼器在矮塔斜拉桥纵、横向均能有效减震,既可降低桥塔和主墩控制截面的地震内力,又能减少主梁梁端及桥塔塔顶位移,是一种高效的抗震装置,纵向剪力降幅

可达 4.5%,横向剪力降幅最大可达 4.9%,弯矩降幅最大可达 6.7%。

(2) 矮塔斜拉桥横纵向的桥塔与主墩的内力及位移随阻尼系数 C 增大呈先降后升趋势,随阻尼指数 α 增大而减小;过渡墩内力随 C 增大而持续增大,并趋于平稳,表明减震效果通过转移内力至过渡墩实现。1#过渡墩和 3#主墩内力随 C 增大而增加,而 2#主墩及桥塔内力随 C 增大而减小,阻尼参数对不同构件与不同阻尼器方位的影响规律不一致,需针对性优化参数。

(3) 阻尼参数选取不当可能导致结构响应增大,需基于控制目标(如位移最小化或内力平衡(改善内力以达到兼顾安全与经济的全局最优))精细优化。纵向推荐 $C = 4\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 、 $\alpha = 0.8$,横向推荐 $C = 2\ 000\ \text{kN}/(\text{m}/\text{s})^\alpha$ 、 $\alpha = 0.8$ 。

参考文献:

- [1] 张永亮,陈兴冲,郭永强. 刚构连续梁体系铁路矮塔斜拉桥的减震研究[J]. 铁道学报,2011,33(10):79-85.

施建设标准^[7],以标准化引领节水技术升级。同时,设立非常规水利用补贴机制,有效降低技术采纳的成本,激发市场活力。此外,积极推广“节水细胞”模式,通过构建多层次、立体化的节水网络,实现节水行动的广泛覆盖和深度渗透,从而全面提升水资源的利用效率。

参考文献:

- [1] 左其亭,李佳伟. 黄河流域水资源承载能力与适应性调控[J]. 水利学报,2020,51(9):1009-1018.
- [2] 李远华. 节水型社会建设的重点与难点[J]. 中国水利,2005(13):66-68.
- [3] 王 治. 制度创新是建设节水型社会的关键[J]. 水利发展研究,2005(7):9-13.
- [4] 褚俊英,王 浩,秦大庸,等. 我国节水型社会建设的主要经验、问题与发展方向[J]. 中国农村水利水电,2007(1):11-15,21.
- [5] 杨德森. 浅谈节水型机关雨水的收集与利用[J]. 水上安全,2024(11):73-75.
- [6] 赵建国. 非常规水资源开发利用的政策激励与市场机制研究[J]. 水利经济,2019,37(1):22-26.
- [7] 崔 凯,高 堃,王 浩. 智慧节水监管平台助力节水

机关建设[J]. 水资源开发与管理,2022(6):47-51.

- [8] 王志勇,李 娜. 基于物联网的机关单位智慧水务系统构建与实践[J]. 中国给水排水,2022,38(15):86-91.
- [9] 刘一江,张 明,赵 静. 公共机构节水技术集成与应用模式研究[J]. 给水排水,2021,57(4):130-135.
- [10] GB/T 18920—2020 城市污水再生利用城市杂用水水质[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [11] GB 50015—2019 建筑给水排水设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [12] DB61/T 943—2020 行业用水定额[S]. 西安:陕西省市场监督管理局,2020.
- [13] 孙丽华,马 强. 公共机构节水行为引导策略与效果评估[J]. 资源科学,2020,42(10):1981-1991.
- [14] Ashton N, et al. The effectiveness of water conservation signage in public buildings: A behavioral intervention study[J]. Water Resources Management, 2022, 36(5):1450-1465.
- [15] Cominola A, Giuliani M, Piga D, et al. Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 72: 198-214.

(上接第 39 页)

- [2] Zhu Jin, Zhang Wei, Zheng Kaifeng, et al. Seismic design of a long-span cable-stayed bridge with fluid viscous dampers[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2015, 21(1):04015006-04015006.
- [3] 刘钧壬. 矮塔斜拉桥减隔震研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2016.
- [4] 马 方. 矮塔斜拉桥抗震性能与减震控制研究[J]. 施工技术,2017,46(11):16-20.
- [5] Zhong Jian, Hu Zhangliang, Yuan Wancheng, et al. System-based probabilistic optimization of fluid viscous dampers equipped in cable-stayed bridges[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(12):1815-1825.
- [6] Han Qiang, Wen Jiannian, Du Xiuli, et al. Nonlinear seismic response of a base isolated single pylon cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2018, 175: 806-821.
- [7] Yi J, Zhou J, Ye X. Seismic control of cable-stayed bridge using negative stiffness device and fluid viscous damper under near-field ground motions[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020, 26(5):2642-2659.
- [8] 全 伟,白士杰,包龙生. 高铁矮塔斜拉桥减隔震装置

性能对比研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2):299-306.

- [9] 万乐乐,季日臣,夏修身. 大跨度高速铁路矮塔斜拉桥减隔震设计研究[J]. 铁道建筑,2021, 61(12):31-35.
- [10] 柳春光,张继伟,张士博. 深水斜拉桥主塔模型水下振动台动力试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3):118-123.
- [11] 李璐璐,柳英洲. 斜拉桥单塔结构在波浪作用下的数值模拟与试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4):24-31.
- [12] 陈智威. 考虑地震动水力的深水矮塔斜拉桥地震响应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(6):23-29, 82.
- [13] 赖 伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海:同济大学,2004.
- [14] Yang Wanli, Li Ao, Feng Xiyao, et al. Calculation method of hydrodynamic force on one column of the twin columns under earthquake[J]. Ocean Engineering, 2020, 197:106874.
- [15] 苏小卒,张 强. 法向力作用下钢-混界面黏结滑移性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(6):1-9.