

大跨径混合梁斜拉桥抗震体系及阻尼参数研究

李 智

(泗阳县交通产业集团有限公司, 江苏 宿迁 223700)

摘 要: 为研究大跨径混合梁斜拉桥在不同抗震体系与阻尼参数下的抗震性能, 以主跨 385 m 的京杭运河泗阳桃源大桥为背景, 对比结构在纵桥向无连接装置、设置黏滞阻尼器、设置弹性索 3 种体系下的抗震能力, 并进行了黏滞阻尼器与弹性索的设计参数敏感性分析, 比较了不同参数下桥梁关键部位的地震响应变化, 研究了不同体系下地震力传力路径。结果表明: 选择合理阻尼参数与减隔震支座参数, 可以大幅减小关键位置位移和关键构件内力, 提高桥梁抗震性能。最后, 给出了背景工程的合理设计参数, 为同类型结构的抗震设计提供参考。

关键词: 混合梁斜拉桥; 黏滞阻尼器; 抗震体系; 参数敏感性分析

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)09-0218-04

0 引 言

地震是一种在短时间内剧烈释放能量的自然灾害, 对地面建筑与桥梁结构产生严重破坏甚至导致桥梁倒塌。近年来, 减隔震技术便得到学者的广泛关注, 越来越多的减隔震装置被开发并应用到桥梁领域, 其中以黏滞阻尼器为主的各类阻尼器发展最为迅速。黏滞阻尼器构造简单, 实用性广, 使用寿命长^[1]。目前我国有许多已建或在建的斜拉桥都成功应用黏滞阻尼器来改善结构抗震性能, 如苏通长江大桥、东海大桥^[2]等。

相关研究表明, 在塔梁连接处沿纵向安装黏滞阻尼器可以减小塔底弯矩与塔顶位移, 提高抗震能力。黏滞阻尼器的减震性能与其参数取值关系密切。巫生平等^[3]建立了关键截面参数与阻尼参数之间的数学模型。张文学等^[4]分析了桥梁相对高度对黏滞阻尼器的最优参数取值与减震效果影响。聂利英等^[5]研究了大跨斜拉桥在大型阻尼器下的主梁纵向运动阻尼水平。胡可等^[6-9]研究了斜拉桥在不同抗震体系下的减隔震性能。

本文以京杭运河泗阳桃源大桥为背景, 研究结构在纵桥向无连接装置、设置黏滞阻尼器、设置弹性索 3 种体系下的抗震性能, 并分析不同参数对地震响应的影响, 得出本工程的合理设计参数, 同时为同类工程提供参考。

1 工程背景

1.1 项目概况

京杭运河泗阳桃源大桥为独柱形混凝土塔中央双索面混合梁斜拉桥, 两侧引桥采用预应力混凝土现浇箱梁, 桥跨布置依次为 $(3 \times 30 + 4 \times 30 + 3 \times 30) + (50 + 2 \times 35 + 385 + 3 \times 40) + (5 \times 30)$ m, 全长 1 075 m。桥梁全宽 33 m, 主线采用双向 6 车道城市主干路标准, 设计速度为 60 km/h; 设计汽车荷载等级为公路 I 级。桥型布置图与梁体断面图如图 1、图 2 所示。

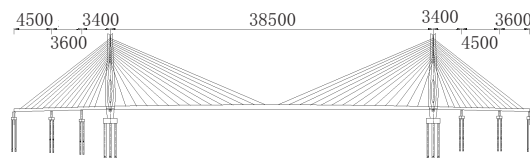


图 1 桥型总体布置(单位:cm)

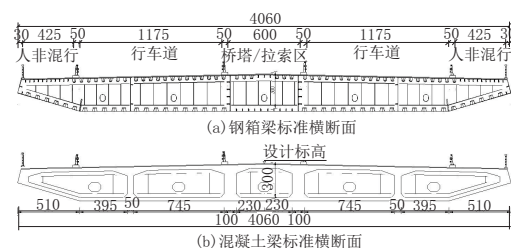


图 2 主梁标准横断面(单位:mm)

1.2 有限元模型

采用 Midas Civil 有限元分析软件建立动力分析模型, 如图 3 所示。主梁、主塔、桥墩和承台均采用梁单元模拟, 斜拉索采用桁架单元模拟。主梁与斜拉索刚接, 斜拉索和主塔均考虑了恒载几何刚度, 墩底节点与承台顶节点刚接。

收稿日期: 2022-01-10

作者简介: 李智(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁施工管理工作。

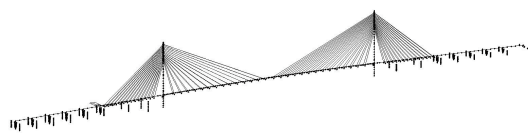


图3 京杭运河桃源大桥动力计算模型示意图

1.3 地震动输入

本文采用非线性时程分析法,输入3条E2地震波,取最大结构响应作为计算结果。本文仅探讨纵向抗震体系,因此仅考虑纵向地震动。

2 抗震体系及参数敏感性分析

按照塔梁连接处的减隔震措施,分为3种体系:无连接装置、设置阻尼器、设置弹性索。通过计算对比3种体系的抗震能力,分析阻尼器阻尼常数 C 与阻尼指数 α 对结构地震响应的影响。

2.1 结构布置形式

本桥主跨385 m。主塔牛腿处横向设置抗风支座,两个主塔的塔、梁相交处各设置4个纵向阻尼器/弹性索。支座与阻尼器/弹性索布置形式如图4所示,主桥左右半跨支座布置相同。

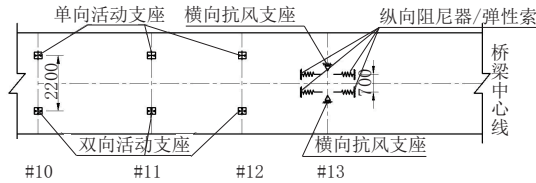


图4 主桥左半跨约束布置图(单位:cm)

本桥在辅助墩及过渡墩墩梁之间设置支座,其中一侧为纵向单向活动的摩擦摆支座,另一侧为双向活动的摩擦摆支座。支座参数见表1。

表1 摩擦摆支座参数

支座位置	竖向承载力/kN	摩擦摆启动力/kN	纵向等效曲率半径/m	纵向设计位移/mm	摩擦系数
10#墩顶	8 000	800	4.5	350	0.04
11#墩顶	10 000	1 000	4.5	350	0.04
12#墩顶	30 000	3 000	4.5	350	0.04

2.2 黏滞阻尼器与弹性索体系参数敏感性分析

在动力计算模型中,阻尼器采用Maxwell模型模拟,弹性索采用弹簧连接单元模拟。

阻尼器的主要参数为阻尼系数 C 和速度指数 α 。其中, α 常用取值为0.3~1.0。本文在进行敏感性分析时, α 取值0.3、0.4、0.5、0.6、0.8; C 取值1 500 kN、3 000 kN、4 500 kN、6 000 kN。弹性索中弹簧刚度取值1 500 kN/m、3 000 kN/m、4 500 kN/m、6 000 kN/m。

桥梁结构在地震下响应主要包括关键位移与关键构件的内力。纵桥向地震作用下,结构的关键位移

为梁端和塔顶的纵向位移;关键构件内力为主塔塔底与辅助墩墩底的弯矩、剪力、轴力。

2.2.1 位移与内力效应最大值

对纵桥向无连接装置、设置黏滞阻尼器、设置弹性索3种体系,以及不同阻尼参数组合,计算桥梁关键部位地震响应,结果如图5~图11所示。

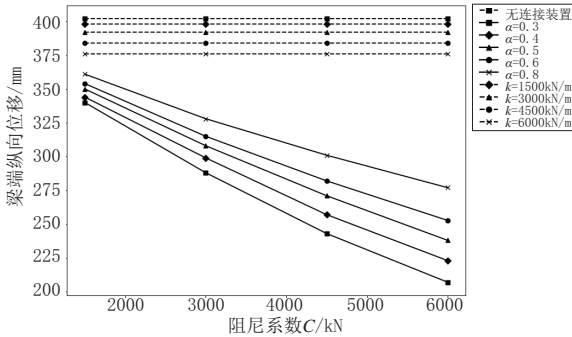


图5 梁端纵向位移(单位:mm)

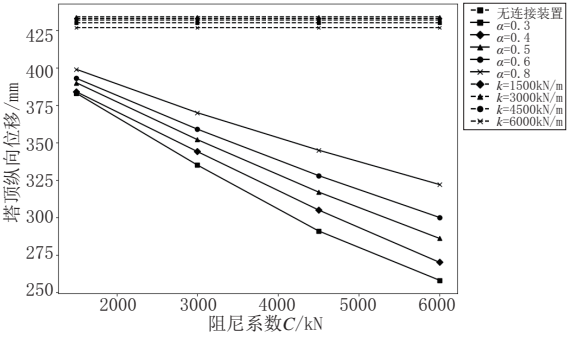


图6 塔顶纵向位移(单位:mm)

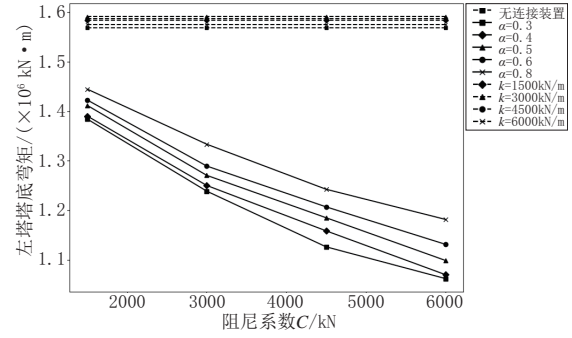


图7 塔底弯矩(单位: $\times 10^6$ kN·m)

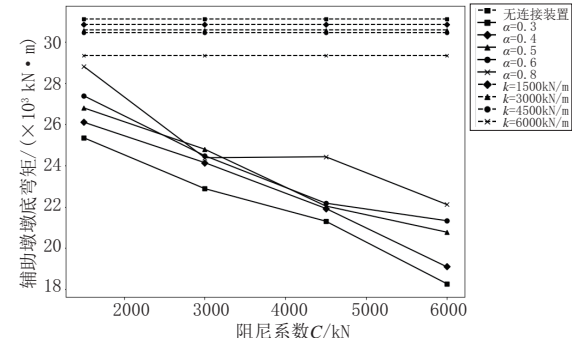
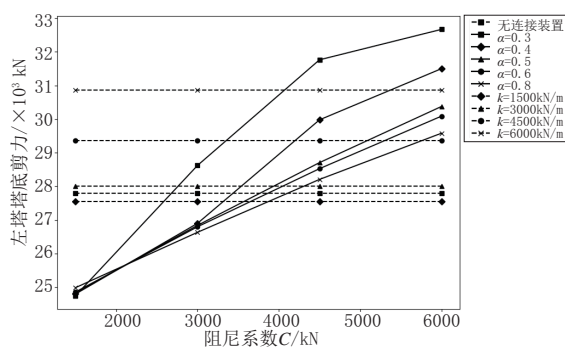
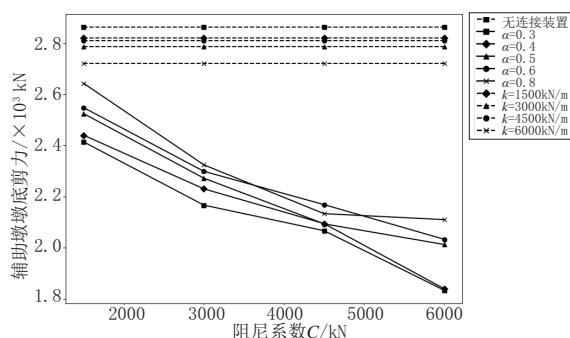
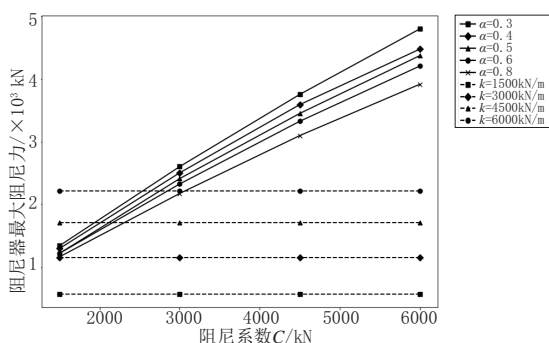


图8 辅助墩墩底弯矩(单位: $\times 10^3$ kN·m)

由图5~图11可知:

(1)相比于纵桥向无连接装置,结构设有阻尼器

图9 塔底剪力(单位: $\times 10^3$ kN)图10 辅助墩墩底剪力(单位: $\times 10^3$ kN)图11 阻尼器/弹性索轴力(单位: $\times 10^3$ kN)

时,地震下的梁端最大位移减幅 10.4%~48.5%,塔底弯矩减幅 15.9%~40.6%,辅助墩墩底弯矩减幅 7.4%~41.2%,塔底剪力减幅 -21.6%~11.9%,辅助墩墩底剪力减幅 7.6%~36.0%,塔底轴力减幅 1%~4%;辅助墩墩底轴力减幅 1%~12%。阻尼器的设置对塔底墩底弯矩、梁端位移有明显降低效果,不同阻尼参数下的降幅变化较大;阻尼器对塔底、墩底的剪力与轴力有一定程度降低。相比于弹性索体系,阻尼器对以上各种指标同样均有改善,阻尼器的设置对提高结构抗震性能有明显促进作用。

(2)阻尼系数 C 的增加有利于提高结构抗震性能。在速度指数 α 不变时,随着阻尼系数 C 的增加,梁端纵向位移、辅助墩墩底及主塔塔底弯矩、轴力均减小。以速度指数 $\alpha=0.4$ 为例,当阻尼系数由 1 500 kN 增大至 6 000 kN,梁端纵向位移减小了 35.2%;塔底弯矩减小了 21.5%;辅助墩墩底弯矩减小了 26.8%;

塔底轴力减小了 2.0%;辅助墩墩底轴力减小了 7.3%;塔底剪力增大了 25%;阻尼器最大轴力由 1 299 kN 增大至 4 472 kN,增大了 244.2%。

(3)速度指数 α 的减小可提高结构抗震性能。在阻尼指数 C 不变时,随着速度指数 α 的减小,梁端纵向位移、辅助墩墩底及主塔塔底弯矩、轴力均减小。以阻尼指数 $C=3\,000$ kN 为例,当速度指数 α 由 0.8 减小至 0.3 时,梁端纵向位移减小了 12.2%,塔底弯矩减小了 9.1%,辅助墩墩底弯矩减小了 6.1%,塔底轴力减小了 2.0%,辅助墩墩底轴力减小了 0.5%,塔底剪力增大了 10.8%,阻尼器最大轴力增大了 20.0%。

(4)弹簧刚度 k 的增大在一定程度上可以提高结构抗震性能,但效果不明显。当 k 由 1 500 kN/m 增大至 6 000 kN/m 时,梁端纵向位移减小了 5.5%,塔底弯矩减小了 3.0%,辅助墩墩底弯矩减小了 5.1%,塔底轴力减小了 0.7%,辅助墩墩底轴力减小了 3.4%,塔底剪力增加了 10.7%,弹性索最大轴力增加了 47.4%。

2.2.2 位移与内力时程分析

为研究 3 种抗震体系的减震能力,根据阻尼参数对结构抗震能力的影响规律,选择阻尼系数 $C=6\,000$ kN、速度指数 $\alpha=0.3$ 的阻尼器,弹性索体系弹簧刚度 $k=6\,000$ kN/m。梁端纵向位移、结构塔底弯矩的时程曲线如图 12、图 13 所示。

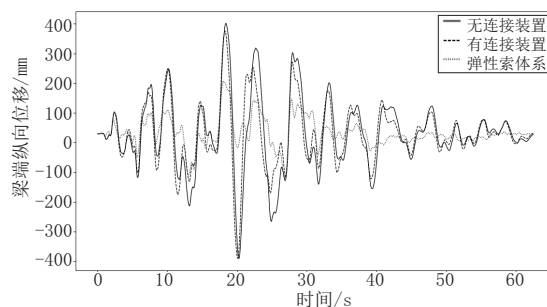
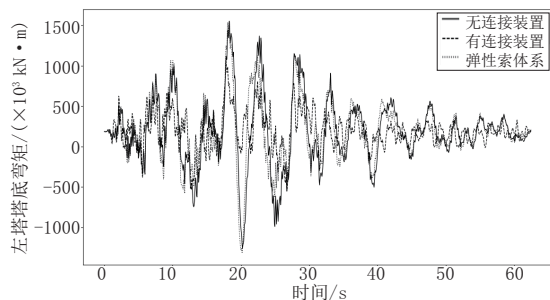


图12 梁端位移时程曲线(单位: mm)

图13 塔底弯矩时程曲线(单位: $\times 10^3$ kN·m)

由图 12、图 13 可知,阻尼器的设置可以显著减小梁端位移与塔底弯矩。合理的阻尼器参数设计对

结构抗震性能起到促进作用。

3 减隔震效果与传力路径分析

为研究3种不同体系下地震力传力路径,分别选择纵向无连接装置、设置阻尼器体系($C=6\ 000\text{ kN}$, $\alpha=0.3$)、设置弹性索体系($k=6\ 000\text{ kN/m}$),计算得到桥塔的弯矩图如图14~图16所示,桥塔剪力图如图17~图19所示。

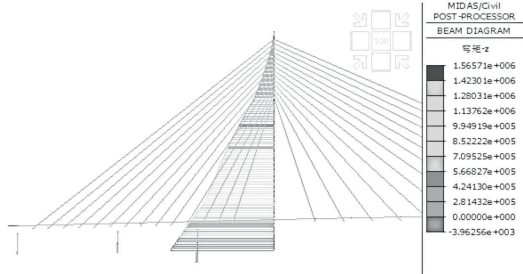


图14 纵向无连接装置体系下桥塔弯矩图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

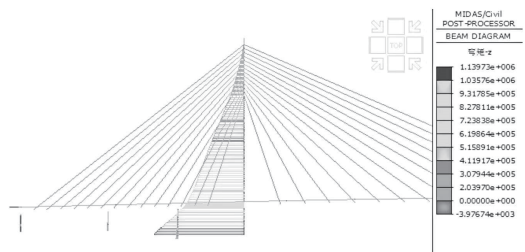


图15 设置阻尼器体系下桥塔弯矩图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

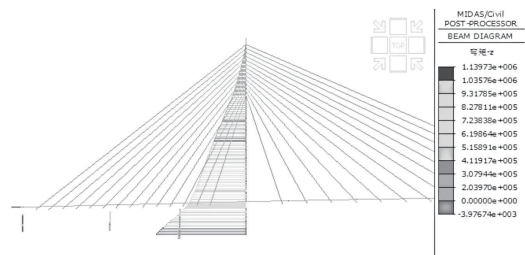


图16 弹性索体系下桥塔弯矩图(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

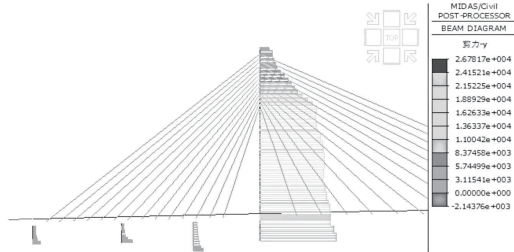


图17 纵向无连接装置体系下桥塔剪力图(单位: kN)

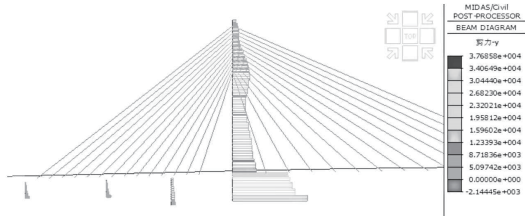


图18 设置阻尼器体系下桥塔剪力图(单位: kN)

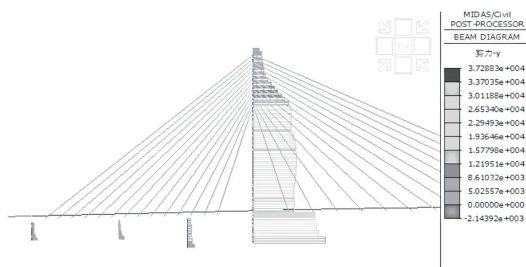


图19 弹性索体系下桥塔剪力图(单位: kN)

由图14~图19可知:

(1)地震力的传力路径为:纵桥向无连接装置时,主梁纵桥向地震力主要分为两部分,一部分通过斜拉索传递至桥塔上塔柱,由上塔柱向塔底传递;另一部分通过辅助墩与主梁连接支座向下传递。计算结果表明,传至辅助墩的纵向地震力仅为通过斜拉索传至主塔地震力的10%左右。在安装阻尼器或弹性索的体系中,纵向地震力除上述传力路径外,同时直接通过主梁直接传至主塔。

(2)在纵桥向无连接装置的体系中,主塔弯矩由上至下近似线性增加,剪力变化不明显。大跨斜拉桥的桥塔往往较高,较大的传力力臂导致下塔柱弯矩较大。在弹性索体系中,弹性索将一部分主梁的惯性力直接作用于上下塔柱之间,剪力图中出现塔梁处的剪力突变,通过减小弯矩计算时力臂来降低下塔柱弯矩与剪力。在安装阻尼器体系中,除了减小力臂外,黏滞阻尼器还可通过自身的减震耗能作用降低传递至上下塔柱间的地震力,进一步降低下塔柱弯矩,提高抗震安全性。

4 结 语

本文对比了一座主跨385 m的斜拉桥在纵桥向无连接装置、设置黏滞阻尼器、设置弹性索3种体系下的抗震能力,分析了不同参数下桥梁关键部位的地震响应变化,研究了不同体系下的地震力传力路径,得到以下4点结论:

(1)相比于无阻尼体系和弹性索体系,黏滞阻尼器的设置可以有效提高结构抗震能力,特别是在减小关键部位位移与塔底、墩底弯矩方面,效果显著。

(2)黏滞阻尼器参数的取值对结构减震能力影响较大。在合理的参数范围内,随着阻尼系数 C 的增加,梁端及塔顶纵向位移、辅助墩墩底及主塔塔底的弯矩、轴力减小,阻尼器的阻尼力增大,结构抗震性能提高。

(3)减小速度指数 α 可提高结构抗震性能, α 越小,关键部位内力位移下降越明显,但 α 过小将会影

(下转第227页)

于 0.011 m,故预偏心值为 1.668 m。经计算,此次案例中的 α 值为 0.055, n 值为 $1.06 < 5$,说明基于大量模型统计得到的 $n=5$ 的收敛标准是偏于安全的,能满足工程精度要求。

5 本工程的预偏心求解

经过上述的规律总结和方法应用,现计算本工程斜腹板变高曲线箱梁桥的预偏心值。梁顶面可设置配重 1 200 kN,收敛标准 $\delta/5=1\ 200 \times 10/145\ 296.9/5 \approx 0.017\text{ m}$ 。4 纵梁和 10 纵梁的梁格模型如图 14 所示。计算结果见表 4。

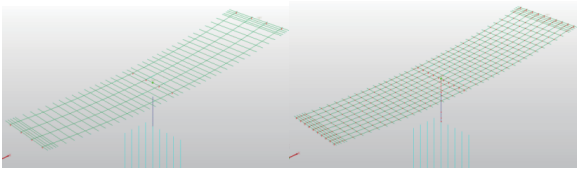


图 14 梁格模型图

表 4 单梁、梁格模型计算结果对比表

分类	单梁	4 纵梁梁格	10 纵梁梁格
反力	模型值 /kN	145 296.9	145 356.9
	前后差值百分比	0.041 29%	-0.009 43%
反力矩	模型值 /(kN·m)	121 038.7	104 663.6
	模型值	0.833 04	0.720 05
偏心距	前后模型差值 /m	0.113 00	-0.001 81
	收敛标准 /m	0.017	

可以看出,所有模型的反力 F 几乎相等,且预偏心结果呈快速收敛趋势。10 纵梁与 4 纵梁的梁格偏心距相差 0.001 8 m,显著小于 0.017 m,满足工程实际应用。最终本工程的预偏心设置为偏向曲线内侧

72 cm。

6 结 语

本文以环市南路上跨广深铁路 $2 \times 68\text{ m}$ 转体桥梁为背景,通过对矩形等截面曲线桥预偏心的理论公式推导,对不同曲线半径、桥宽、桥长和划分子纵梁数的 3 600 个梁格模型进行计算和对比,得出所有模型的反力几乎相等,子纵梁片数的增加可以极快地减小梁格预偏心误差,且呈绝对收敛趋势的规律。提出梁格收敛法求预偏心,并用该方法对等截面曲线箱梁桥进行计算,同时用实体模型进行验证,结果和规律曲线均十分吻合,最后计算出背景工程的预偏心值。本文的方法可应用于所有转体曲线桥预偏心的计算。

参考文献:

[1] E.C.汉勃利.桥梁上部构造性能[M].北京:人民交通出版社,1982.05.
[2] 徐栋,赵瑜,刘超.混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计[M].北京:人民交通出版社,2013.12
[3] 陈爱荣.大跨径小半径曲线桥梁转体结构设计[J].城市道桥与防洪,2021(6):105-108.
[4] 田山坡.小半径曲线转体桥调偏心研究[J].城市道桥与防洪,2018(4):116-118.
[5] 王博妮.小曲线半径转体桥梁不平衡力矩研究[J].科技与创新,2016(10):125-126.
[6] 曾明辉.连续弯梁桥支座预偏心设置研究[D].陕西:长安大学,2005.
[7] 鲍志旺,王晓芳,刘双喜.独柱小半径匝道弯桥的预偏心设置分析[J].桥隧工程,2017(9):182-183.
[8] 郑超,张永军.小半径连续弯箱梁桥结构分析与支座预偏心设置[J].工程技术,2015(3):135-136.

(上接第 221 页)

响阻尼器可靠性,建议计算取值范围为 0.3~1.0。

(4)虽然较大的阻尼系数 C 有利于提高结构减震性能,但大型阻尼器布置不便,且过大阻尼力对桥塔有不利影响。在同类工程中,建议沿横桥向设置多个小型阻尼器,在参数合理范围内选择较大阻尼常数 C 并配置较小速度指数 α 。

参考文献:

[1] 陈威.粘滞阻尼器的理论和实验研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
[2] 王志强,胡世德,范立础.东海大桥粘滞阻尼器参数研究[J].中国公路学报,2005,18(3):37-42.
[3] 巫生平,张超,房贞政.斜拉桥粘滞阻尼器设计方案及参数回归分析[J].桥梁建设,2014,44(5):21-26.

[4] 张文学,黄荐,王景景.斜拉桥面相对高度对粘滞阻尼器减震效果影响研究[J].振动与冲击,2015,34(16):43-47.
[5] 聂利英,郭其远,李建中.设置纵向大型液体粘滞阻尼器的大跨斜拉桥主梁纵向运动阻尼水平研究[J].工程力学,2015,32(9):141-148.
[6] 胡可,汪正兴,王胜斌,等.全飘浮体系斜拉桥斜置阻尼约束体系研究[J].桥梁建设,2018,48(4):22-26.
[7] 陈百奔,冯仲仁,王雄江.长周期地震动作用下斜拉桥粘滞阻尼器减震分析[J].桥梁建设,2018,48(5):75-80.
[8] 叶爱君,胡世德,范立础.超大跨度斜拉桥的地震位移控制[J].土木工程学报,2004(12):38-43.
[9] 亢兴军,李小军.大跨飘浮体系斜拉桥减震控制研究[J].振动与冲击,2007,26(3):79-82.