

特大跨斜拉桥横向抗震设计方案研究

申现龙¹, 张海江²

(1.浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310005; 2.北京新桥科技发展有限公司, 北京市 100088)

摘要: 针对大跨度斜拉桥在高烈度横向地震作用下的抗震分析,就现今工程中常用到的添加挡块、金属阻尼器、黏滞阻尼器这3种减震设计方法,以某特大跨铁路斜拉桥为工程背景,基于MIDAS Civil建立了三维有限元动力弹性模型,分析了桥梁结构的动力特性;通过采用3种参数化后的方案与梁墩横向自由边界条件下的对比分析,研究了满足横向极限位移控制条件下,3种设计方案的结构地震响应特点;另外针对黏滞阻尼器和金属阻尼器减震方案,对2种阻尼器组合和布设方案进行了局部优化。研究表明:增设挡块减震方案要比采用阻尼器减震方案的墩塔底部内力大,采用黏滞阻尼器设计方案的减震效果最好;经过综合比较后,推荐采用组合1方案(过渡墩和辅助墩的左右侧分别设置金属阻尼器、液体黏滞阻尼器)用于铁路大跨斜拉桥。

关键词: 斜拉桥;挡块;金属阻尼器;黏滞阻尼器;横向

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)06-0101-05

0 引言

近年来,大跨度的高速铁路桥梁建设投入加大,数量增加,尤其是拱桥和斜拉桥在大跨度铁路桥梁领域得到了较快发展。若这些桥梁在地震中遭受到破坏,势必给经济发展和灾后重建或修复,以及生命安全带来无法估量的损失。

传统的控制桥梁横向地震力的方法是增加结构刚度和强度,但考虑到安全性和经济性,要通过此举来达到控制要求很难^[1]。而传统的横向限位装置是设置在墩顶的挡块,通过挡块的刚度来控制地震引起的主梁横向位移,同时将主梁横向地震力传递到桥墩及基础,但它不能消耗能量。文献[2-7]研究了挡块种类和挡块间隙设置对桥梁横向抗震性能的影响,并对主梁与挡块碰撞模型及参数特点进行了研究。另外,对于桥梁减隔震技术也有大量研究^[8-10],其中以位移相关型和速度相关型阻尼器对桥梁抗震的应用为主。位移型阻尼器主要是金属阻尼器,由于金属具有较高的刚度和较低的屈服强度,地震能量可通过金属弹塑性变形和反复循环被消耗,因而被用于桥梁抗震上。速度型阻尼器的典型代表是液体黏滞阻尼器,它通过装置本身的液体黏滞性提供阻尼及反复循环来消耗地震能量,不会引起桥梁结构刚度的改变,并满足在温度变形和收缩徐变下主梁能

够自由变形的设计要求,因而是桥梁结构消耗能量的理想阻尼器^[11-14]。

本文根据美国AASHTO桥梁抗震设计规范,对某特大跨斜拉桥采用减震体系的不同设计方案,并通过局部方案优化来确定最佳的减震设计方案。所设置的挡块或阻尼器作为支承连接装置,应使桥梁上部结构、桥塔、墩柱和基础保持弹性,其本身则作为牺牲构件而进入塑性状态,从而控制地震位移^[15]。

1 工程概况

本文研究对象是5跨连续钢桁梁双塔双索面斜拉桥,孔跨布置为72 m+96 m+312 m+96 m+72 m,桥梁结构体系为半漂浮体系,桥型布置图见图1。混凝土索塔采用宝塔式,截面均采用混凝土箱型,塔高126.5 m;主梁采用钢桁梁,梁高为14 m,主桁架为三角形桁式,主桁节间长度为12 m,桥面宽度为16 m;斜拉索采用高强平行钢丝索,全桥总共设置96根;桥面采用正交异性钢桥面板道砟桥面。桥墩为钢筋混凝土双柱式实心墩,基础采用承台群桩基础。

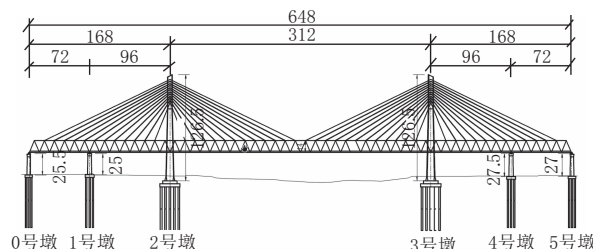


图1 桥型布置图(单位:m)

收稿日期: 2023-07-31

作者简介: 申现龙(1990—),男,硕士,工程师,从事大跨度桥梁设计与技术管理工作。

2 模型建立

2.1 动力弹性模型

本桥采用有限元分析软件 MIDAS Civil 建立三维有限元动力弹性模型,全桥结构动力弹性计算模型见图 2。

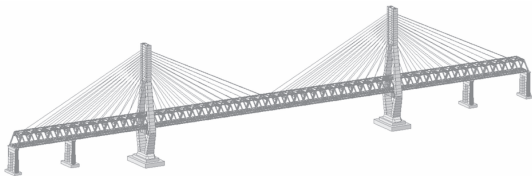


图 2 全桥结构动力弹性计算模型

全桥模型共创建 7 738 个单元,其中板单元数量 2 160 个,梁单元数量 5 482 个,桁架单元数量 96 个;全桥节点共计 3 628 个。除拉索采用桁架单元模拟、桥面板采用 U 型加劲肋板单元模拟外,其余桥梁受力构件均采用梁单元模拟;不考虑墩-桩-土对结构地震响应的影响,下部结构的承台底边界条件为一般固结;本桥采用半漂浮体系,主梁与墩台边界条件采用弹性连接的一般连接模拟;结构体系的阻尼采用瑞雷阻尼;挡块、金属阻尼器、黏滞阻尼器的边界条件分别采用一般连接的间隙(gap)单元、滞回曲线、黏弹性阻尼的 Maxwell 模型单元模拟。

2.2 结构横向自振特性分析

全桥横向自振特性选择多重 Ritz 向量法,向量方向分别取用顺桥向、横桥向和竖向;向量数量为各 33 个地面加速度向量、1 个结构恒载竖向向量,共计 100 个。第二模态为横桥向 1 阶主振型,振型参与质量为 9.64%,横桥向振型参与质量总和为 99.9%。考虑篇幅有限,本文重点分析横桥向模态参与质量在 2% 以上的前 4 阶振型形状。横桥向结构动力特性参数表和结构模态形状见表 1 和图 3。

表 1 横桥向结构动力特性参数表

模态号	周期 /s	振型参与质量 /%	振型特征
2	3.13	9.64	桁架梁跨中横向弯曲
4	1.64	2.46	桁架梁、桥塔反对称横向弯曲
5	1.57	21.54	桁架梁、桥塔对称横向弯曲
10	0.92	14.66	桁架梁、边墩横向弯曲

2.3 地震动输入

所选地震动输入是《地震安全性评估报告》提供的 3 条人工地震动加速度时程,由罕遇地震(100 a 超越概率 3%)设计加速度目标反应谱拟合而成,其水平地震基本加速度为 0.38g,地震动反应谱特征周

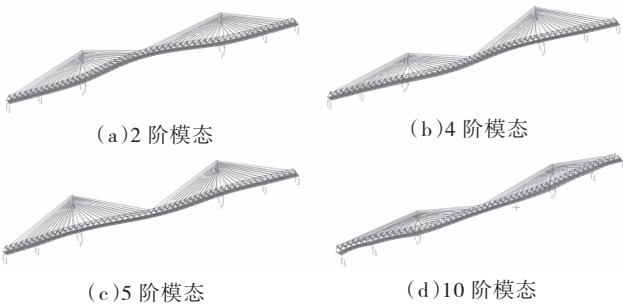
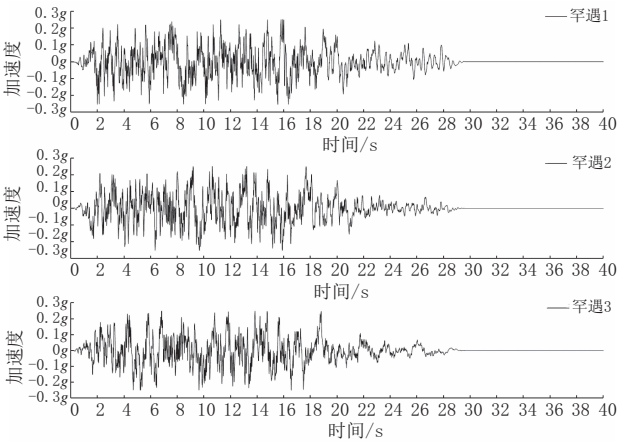
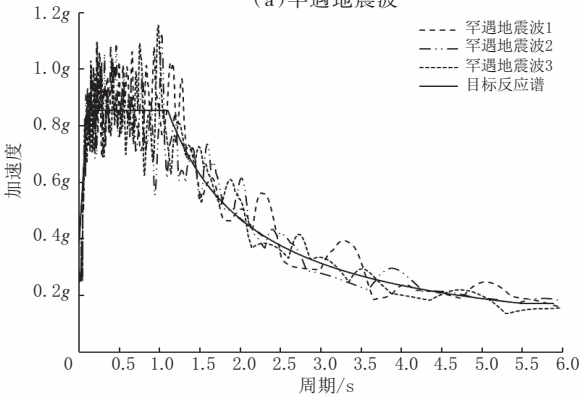


图 3 结构模态形状

期为 1.0 s。这 3 条人工地震波峰值加速度为 0.25g,地震动持续时间为 40 s(见图 4(a))。为了确保人工拟合地震波满足规范要求,将 3 条人工地震波转换为伪加速度反应谱与设计加速度目标反应谱进行对比(见图 4(b))。由此可知,所选择的 3 条人工合成地震波与目标反应谱的频谱成分吻合较好,能够有效反映场地的地震动水平。



(a)罕遇地震波



(b)拟合目标反应谱

图 4 罕遇地震波及拟合反应谱对比图

3 横向限位和减震装置方案分析

3.1 方案分析

考虑到特大跨斜拉桥受到的横向地震力可能牵涉到塔墩控制的关键截面,以及对于桥梁墩塔底部内力和将梁端横向位移控制在 15 cm 内的设计要求,采用图 5 所示的 4 种横向抗震设计方案。



图5 横向限位和减震装置平面布置图

方案一：在塔梁连接上设置横向抗风支座和双向活动支座；在墩梁连接上仅设置双向活动支座。

方案二：在方案一基础上，墩梁连接增设横向限位挡块。挡块用来限制横向位移，但不能消耗地震能量；同时忽略挡块与桁架梁之间的碰撞效应，其间隙设置为 5 cm，刚度采用 1.0×10^5 kN/m，并作为牺牲构件，在罕遇地震响应后破坏。

方案三：在方案一基础上，墩梁连接增设横向金属阻尼器。金属阻尼器用来限制横向位移，消耗地震能量，提高墩梁连接横向刚度，其屈服强度采用 2 000 kN，初始刚度为 2.0×10^5 kN/m，屈服后刚度与弹性刚度之比为 0.1。

方案四：在方案一基础上，墩梁连接增设横向黏滞阻尼器。黏滞阻尼器用来限制横向位移，消耗地震能量，通过黏滞阻尼器参数优化分析方法，最终求得阻尼系数 $C=4\,000$ kN/(m·s⁻¹)，速度指数 $\alpha=0.4$ 。

墩塔底部内力比较见表 2，梁端位移比较见表 3，金属和黏滞阻尼器耗能滞回曲线见图 6。

表 2 墩塔底部内力比较表

项目	方案一	方案二	方案三	方案四
过渡墩底	10 447	13 780	10 950	10 620
$V_{\max}$ /kN				
辅助墩底	7 252	17 543	10 637	9 530
桥塔底	77 519	87 231	91 672	75 397
过渡墩底	111 087	145 900	119 318	111 790
$M_{\max}$ / (kN·m)				
辅助墩底	72 294	177 300	124 796	91 838
桥塔底	1 404 810	1 567 459	1 656 385	1 293 888

由表 2、表 3 和图 6 可知，方案一过渡墩及辅助墩横向位移最大可达到 1.286 m，而墩底剪力和弯矩相对较小，由于墩梁连接横向无约束，使得桥梁结构

表 3 梁端位移比较表

项目	方案一	方案二	方案三	方案 4
控制装置内力 /kN		23 172	6 366	3 485
梁端位移 /mm	1 286	214	104	125
减震率 /%			88.5	87.6

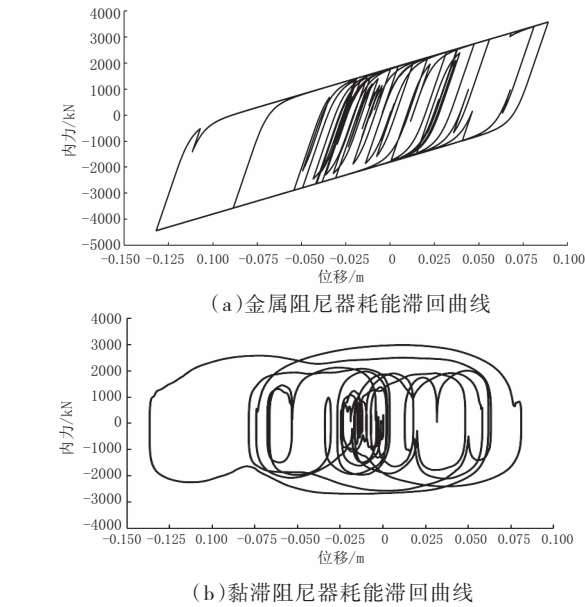


图 6 金属和黏滞阻尼器耗能滞回曲线

的基本周期较大，有效地避开了场地卓越周期，但造成了横向较大的位移。若通过设置横向限位和减震装置将横向位移控制在 15 cm 范围内，则在方案二设置挡块情况下，会使墩底部弯矩和剪力增加得最大，挡块内部剪力达到 23 172 kN，此时挡块已破坏，无法满足设计要求。在方案三和方案四设置金属阻尼器和黏滞阻尼器减震装置情况下，因金属阻尼器本身具有初始刚度，有效刚度为 45 318 kN/m，而黏滞阻尼器对结构不产生刚度，结构的基本周期分别为 5.396、9.761 s，可以看到此时墩底部剪力和弯矩要比挡块作用时小，且限制横向位移不大于 15 cm。图 6 中滞回环的面积大小表现出装置的耗能能力大小，其中金属阻尼器的最大出力几乎是黏滞阻尼器最大出力的二倍，显然黏滞阻尼器的耗能效果较好。

3.2 黏滞阻尼器及组合方案局部优化分析

通过对限位和减震装置的方案分析可知，在横向地震作用下，黏滞阻尼器的减震效果最好。在此基础上，考虑到金属阻尼器具有初始刚度及在温度作用下的横桥向主梁自由变形较小，以及车辆横向荷载、车辆振动、风荷载作用等，采用局部优化金属阻尼器和黏滞阻尼器组合和布设方案来控制地震作用。组合 1 方案为过渡墩和辅助墩的左、右侧分别设

置金属阻尼器、液体黏滞阻尼器;组合2方案采用过渡墩设置金属阻尼器,辅助墩设置液体黏滞阻尼器。将黏滞阻尼器方案、组合1和组合2方案进行比选,从中选出较好的设计方案。几种方案的减震效果对比见图7~图10。

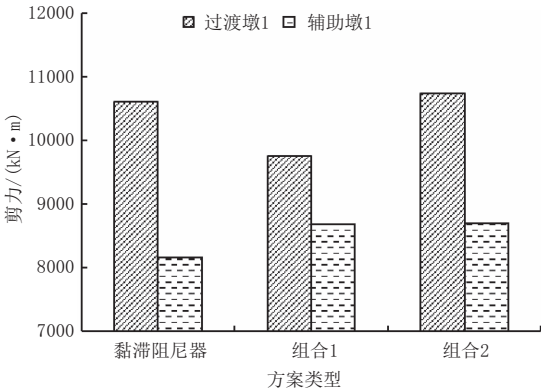


图7 墩底剪力对比结果

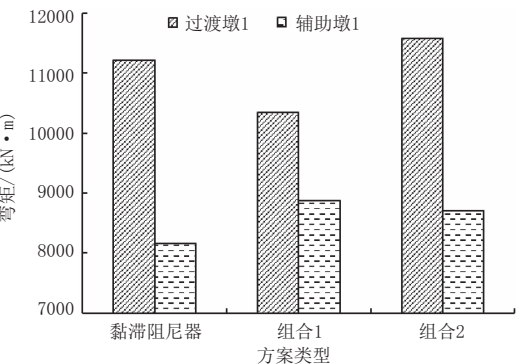


图8 墩底弯矩对比结果

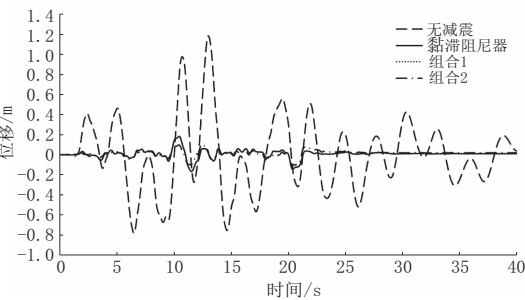


图9 横向位移减震效果对比

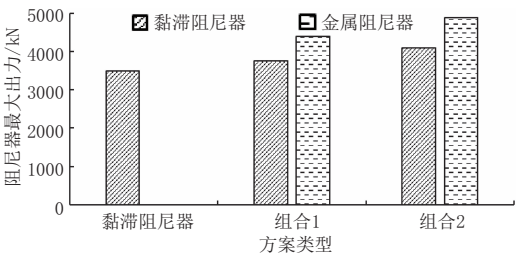


图10 阻尼器最大出力对比结果

由图7、图8可知,在桥梁横向全部采用黏滞阻尼器方案中,辅助墩底部剪力和弯矩相比其他两种方案小;而横桥向采用一端金属阻尼器、另一端黏滞阻尼器的组合1方案时,则过渡墩底部的剪力和弯

矩均为最小;只有过渡墩采用金属阻尼器、辅助墩采用黏滞阻尼器的组合2方案,其墩底部剪力和弯矩与另两种方案相比不具优势。

图9为减震前后主梁在横向的相对位移对比,可以看出3种方案位移都控制在15 cm范围内,减震效率相差不大,都可以保护主梁间伸缩缝构件。

图10为3种方案下阻尼器最大出力的分析,可见在采用黏滞阻尼器方案中,阻尼器出力最小;组合2方案的阻尼器最大出力要大于组合1方案的阻尼器最大出力。减震装置的出力会影响减震效果和减震装置造价。

综上分析,在桥梁横向减震方案选择中,采用全部设置黏滞阻尼器方案或组合1方案均可。若要求减震效果最好,建议采用全部黏滞阻尼器方案;若要考虑效果和经济的平衡,建议采用组合1方案。

4 结 语

(1)主梁和墩塔之间的连接方式对结构抗震有重要影响。在横向双向活动支座作用下,结构第一周期时间增大,使其与桥位处地震卓越周期差值增大,从而使墩塔底部受力最小,但主梁与桥墩横向位移太大。

(2)横向抗震若是采用限位装置挡块是不能消耗能量的,只能通过挡块提供的刚度来限制主梁位移。主梁对挡块产生的作用力会传递到墩塔,而使其底部内力增大,不利于结构抗震设计,无法满足抗震规范要求。

(3)金属和黏滞阻尼器都可以提供结构附加阻尼,并且消耗地震能量。黏滞阻尼器耗能效果更好,不影响结构的基本周期,有利于结构的伸缩变形,温度作用下不产生附加内力。而金属阻尼器初始刚度较大,会使结构基本周期减小,对结构受力不利。

(4)通过局部方案的优化分析可知,黏滞阻尼器方案的抗震效果最好。考虑到震后效果和经济性,应充分利用黏滞阻尼器减震效果最好、金属阻尼器能提供较大初始刚度来抗风和车辆摇摆力等优势;同时阻尼器最大出力影响着墩塔内力和阻尼器造价,应使阻尼器最大出力尽可能小,从这几方面综合比较下来,推荐采用组合1方案(过渡墩和辅助墩的左右侧分别设置金属阻尼器、液体黏滞阻尼器)用于铁路大跨斜拉桥。

参考文献:

[1] 周福霖.工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997.

[2] 石岩,王军文,秦洪果,等.桥梁抗震挡块研究进展[J].世界地震工程,2013,29(2):90-95.

[3] 孙永明,荣学亮,何晓东.混凝土连续梁桥悬浇施工控制方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(4):28-33.

[4] 朱勇毅,罗富元.中小跨桥梁横向抗震挡块的合理设置方式[J].城市道桥与防洪,2014(11):91-98.

[5] 夏人杰,赵人达.非规则多跨连续梁桥横向地震碰撞效应研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(2):327-335.

[6] 董俊,文娟娟,杨转运.高烈度区典型连续梁桥限位挡块设计参数研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(12):3678-3692.

[7] 杨孟刚,王传坤,乔建东.高速铁路连续梁桥横向地震碰撞效应及挡块间隙研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版),2019,50(9):2252-2263.

[8] 王浩,周锐,程怀宇,等.弹塑性钢阻尼器用于大跨度 CFST 拱桥的减隔震控制研究[J].振动与冲击,2013,32(12):442-446.

[9] 沈星,倪晓博,叶爱君.桥梁新型横向金属阻尼器研究[J].振动与冲击,2014,33(21):96-101.

[10] 王伟强,陈彦北,刘方成,等.横向钢阻尼器力学性能研究[J].地震工程与工程振动,2022,42(5):249-256.

[11] 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,2004,37(12):38-43.

[12] 刘伟庆,徐秀丽,吴晓兰,等.大跨度斜拉桥结构横向消能减震设计方法[J].振动工程学报,2006,19(3):426-432.

[13] 郑久建,刘晓丰,申现龙,等.基于粘滞阻尼器的元江大桥减震设计方案[J].世界地震工程,2018,34(3):169-178.

[14] 肖开乾,徐怀兵,刘敏,等.大跨度斜拉桥抗震性能分析与减震控制研究[J].自然灾害学报,2020,29(1):57-63.

[15] American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO guide specifications for LRFD seismic bridge design[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴，为您提供平台，携手共同发展！

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站：<http://www.csdqyfh.com> 电话：021-55008850 联系邮箱：cdq@smedi.com