

独塔斜拉桥的抗震分析及减隔震措施研究

马军伟

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125]

摘要:对于大跨径斜拉桥,抗震计算涉及的因素较多,需要根据其自身特点,进行专项研究,以昆阳路闵浦三桥为研究对象,分别采用反应谱法和时程分析法对半飘浮体系独塔斜拉桥的结构地震响应进行对比分析,选取合适的地震波和阻尼参数。在E2地震作用下,采用时程分析法分别对塔梁间纵向约束支座剪坏前后两种不同的受力体系进行分析,结果表明,对支座剪坏前的纵向约束体系,主塔支座承受较大的水平力,而对支座剪坏后的纵向活动体系,主塔塔顶位移和主梁梁端的纵向位移均较大。针对大跨度独塔斜拉桥桥型方案特点,采用减隔震组合体系,不仅可大幅降低塔底纵向受力,同时可将塔顶和梁端的纵向位移控制在合理范围之内,是理想的抗震约束体系。

关键词:独塔斜拉桥;半飘浮体系;抗震分析;给定支座剪断力;减隔震组合体系

中图分类号:U442.5+5

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)07-0082-05

0 引言

半个世纪以来,我国地震频发,其中七级以上的地震就有十数次,多次破坏性地震显示出桥梁工程遭到破坏的严重后果,也一再表明对桥梁工程进行合理抗震设计的重要性。自2008年汶川地震后,我国先后出版公布了《公路桥梁抗震设计细则》(2008)、《城市桥梁抗震设计规范》(2011)、《公路工程抗震规范》(2013)和《公路桥梁抗震设计规范》(2020)等抗震设计规范,桥梁结构地震分析方法也由静力法演变为动力法(反应谱方法和时程分析方法),桥梁抗震的设计方法也由起初的单一强度控制到强度、位移双标准控制[1],使我国的抗震设计水平上了一个新台阶。

目前国内对大跨径斜拉桥抗震体系的研究,普遍认为大跨度斜拉桥的地震反应与抗震体系的选择尤其是塔梁之间的连接密切相关,不同的塔梁连接方式将导致结构的地震响应发生很大的变化[2-3],采用合适的减隔震装置可有效改善斜拉桥的抗震性能[4-6],对于跨径较大的独塔斜拉桥,由于涉及到材料非线性、几何非线性、边界非线性以及阻尼等问题,结构较为复杂,需要根据桥梁的自身特点,进行专门的研究设计[7-8]。本文以昆阳路闵浦三桥为研究对象,对比分析不同约束条件下的地震响应,研究分

析大跨度独塔半飘浮斜拉桥合理的抗震体系,探索能同时兼顾了静力工况和地震工况,且养护更换方便、造价经济的减隔震措施。

1 工程概况

闵浦三桥位于上海西南部,为昆阳路越江工程的跨黄浦江大桥,北起闵行区,南联奉贤区,是上海黄浦江上游由内河Ⅲ级航道进入到海轮双向航道的第一座桥梁。桥位处河口宽度约390 m,江中设一墩,桥型采用独塔双跨式斜拉桥,主桥跨径布置为:50 m+220 m+220 m+50 m。立面布置见图1。场地抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度为0.10g,所属的设计地震分组为第一组,地基土属软弱地基土,建筑场地类别为Ⅳ类,处于建筑抗震不利地段。

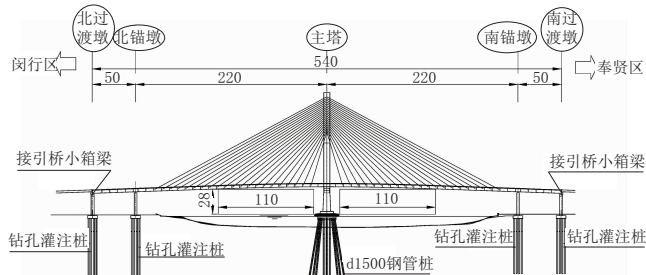


图1 主桥立面布置图(单位:m)

主桥断面错层布置,上层桥面为机动车双向6车道,总宽为28.5 m,下层设4.0 m人非混行道(含栏杆),主桥横断面布置见图2。主塔采用钻石型桥塔,塔高136 m,桥面以上高度103.8 m,高跨比0.47:1,在下设置一道横梁,见图3。主塔基础采用 $\phi 1500$ 钢管桩,锚墩和过墩墩基础采用1.2 m直径的钻孔灌

收稿日期:2023-01-03

作者简介:马军伟(1980—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

注桩。

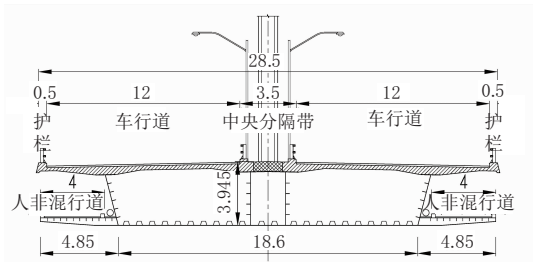


图 2 主桥横断面布置图 (单位: m)

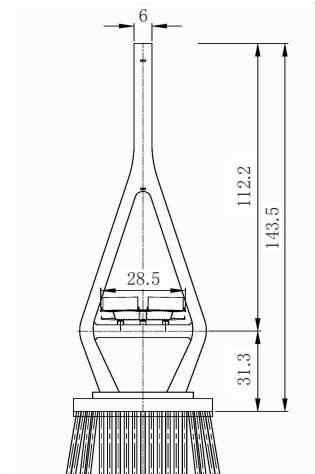


图 3 主塔横断面布置图 (单位: m)

引桥采用标准跨径 35 m 的结构简支桥面连续小箱梁,分上下行两幅布置,单幅桥宽为 13 m。基础采用 0.8 m 直径的钻孔灌注桩。

2 桥梁抗震计算模型及参数取用

2.1 设防水准、性能目标及抗震设计方法

本工程道路等级为二级公路,桥梁抗震设防类别主桥为 A 类。抗震设计方法为 1 类,即同时进行 E1 和 E2 地震作用下的抗震分析和抗震验算,并满足相关构造和抗震措施的要求。

2.2 桥梁结构抗震分析模型

采用通用有限元分析程序 MIDAS Civil 建立桥梁结构的三维空间动力计算分析模型,考虑到与相邻引桥动力特性的相互影响,动力分析模型将两侧引桥各 35 m 一联简支组合小箱梁一起考虑进行结构建模。有限元计算模型以顺桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖向为 Z 轴。其中主塔、主梁、锚墩和过渡墩均离散为空间梁单元,其中主梁采用单梁式力学模型,在主塔、锚墩和过渡墩处主梁通过刚臂与梁底建立弹性连接中的刚性连接约束,二期恒载采用集中质量添加到主梁模型。斜拉索采用空间桁架单元,同时考虑垂度效应,采用 Ernst 公式对其弹性模量进行修正,拉索与主梁采用弹性连接中的刚性连接约束。桩基础考虑桩土相互作用,采用集中六个自由度的弹

簧支撑模拟,等代土弹簧刚度采用 m 法计算,取 $m_{动} = 2 m_{静}$ 。

支座及阻尼通过在柱顶与梁底之间按照相应的一般连接特性建立一般连接模拟。斜拉桥的阻尼比采用 0.03。建立的结构空间有限元分析模型见图 4。

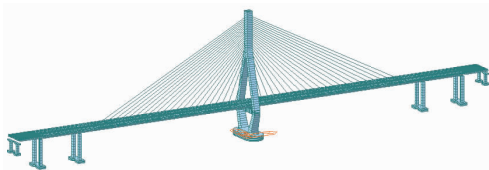


图 4 结构有限元计算模型

3 独塔斜拉桥的抗震分析

独塔斜拉桥半飘浮体系的特点是塔墩固结,主梁在塔墩上设置竖向支座。采用反应谱计算方法和时程分析法分别对梁塔纵向约束体系(不考虑支座剪坏)的结构地震响应进行对比分析,主桥支座布置见图 5。

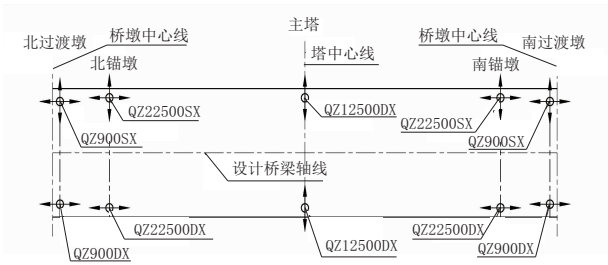


图 5 主桥支座布置图 (单位: kN)

3.1 反应谱法计算

根据《昆阳路越江工程(闵浦三桥)场地地震安全性评价报告》,本工程场地的基本烈度为 7 度,场地为 IV 类场地。地震影响系数用下列分段函数的形式表示。

$$\alpha = \begin{cases} (C_1 + C_2 \cdot T) \cdot \alpha_{\max} & 0 \leq T \leq T_1 \\ \alpha_{\max} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ (T_2/T)^R \cdot \alpha_{\max} & T_2 \leq T \leq 8.0 \end{cases}$$

昆阳路越江工程(闵浦三桥)场地的地震影响系数列于表 1。

表 1 地表地震影响系数								单位: s
方向	超越概率	PGA (g)	$\alpha_{\max}$	C_1	C_2	T_1	T_2	R
水平向	50 a	0.109	0.270	0.404	3.726	0.16	0.70	0.9
	10%							
	50 a	0.181	0.450	0.403	2.986	0.20	0.80	0.9
	3%							
垂直向	50 a	0.068	0.190	0.357	8.039	0.08	0.20	0.9
	10%							
	50 a	0.131	0.450	0.290	8.874	0.08	0.15	0.9
	3%							

主桥抗震设防类别采用 A 类,选取 50 a 超越概率 10%(即重现期约 475 a)的反应谱作为 E1 地震荷载,选取 50 a 超越概率 3%(即重现期约为 1 650 a)的反应谱作为 E2 地震荷载。地震重现期 T 与设计基准期 T_0 内超越概率 P 之间的换算关系为^[9]:

$$T=\frac{-T_0}{\ln(1-P)}$$

特征值分析采用多重 Ritz 向量法,取前 120 阶对称振型进行组合,X 轴、Y 轴、Z 轴三个方向的质量参与系数分别为 94.6%、96.6%和 93.34%,均超过 90%。不同方向的地震作用组合采用 SRSS 组合,计算得到在 E2 地震作用下主桥结构的主要计算结果见表 2。

表 2 E2 地震作用下反应谱法的主要计算结果

地震响应名称	反应谱法计算结果
塔底弯矩(顺桥向)/(kN·m)	3 180 067
塔底弯矩(横桥向)/(kN·m)	2 937 657
塔底剪力(顺桥向)/kN	106 696
塔底剪力(横桥向)/kN	42 509
塔顶位移(顺桥向)/m	0.126
塔顶位移(横桥向)/m	0.221
主梁的梁端纵向位移 /m	0.169
主塔支座纵向反力 /kN	44 627

3.2 时程分析法计算

根据 E2 地震作用反应谱曲线拟合人工时程曲线,选择 3 组地震波,每组地震波包括 1 条水平向地震波和 1 条竖向地震波。针对这 3 组波分别运行时程分析,分析方法采用非线性直接积分法,分析时间与地震波时长一致,采用 30 m,步长为 0.01 秒,阻尼的计算方法采用质量和刚度因子法,阻尼比采用 0.03。

经计算,可得到 3 组地震波下结构的内力和位移时程计算结果,最终计算结果取 3 组地震波计算结果的最大值,整理得到主桥结构的主要计算结果见表 3。

从表 3 分析得知,时程分析计算结果均略大于反应谱法计算结果,偏差在 25%以内,表明时程分析基本可靠,根据 E2 反应谱函数拟合的 3 组地震波基本合适。同时,主塔支座承受较大的水平力,达到 54 220 kN,为支座竖向力的 4.34 倍,传统的抗震支座或抗剪销难以达到这么大的承载力,同时梁端位移仅为 169 mm,小于静力作用下的伸缩缝位移量。支座剪坏后,在 E2 地震作用下,主塔纵向位移达到

表 3 E2 地震作用下时程分析法的主要计算结果

地震响应名称	时程分析结果	与反应谱之比
塔底弯矩(顺桥向)/(kN·m)	3 623 877	1.140
塔底弯矩(横桥向)/(kN·m)	3 607 778	1.228
塔底剪力(顺桥向)/kN	132 583	1.243
塔底剪力(横桥向)/kN	52 777.35	1.242
塔顶位移(顺桥向)/m	0.136	1.079
塔顶位移(横桥向)/m	0.265	1.199
主梁的梁端纵向位移 /m	0.169	1.000
主塔支座纵向反力 /kN	54 220	1.215

1.189 m,主梁纵向位移量达到 1.271 m,说明 E2 地震作用下梁塔间纵向约束或纵向活动的半飘浮体系都是不合理的。

4 独塔斜拉桥的减隔震措施研究

基于上节分析,昆阳路大跨度独塔斜拉桥的纵向约束体系采用一种给定剪断力的固定支座和钢阻尼器的组合体系。

在结构静力荷载工况下,桥梁主塔墩的主要计算结果见表 4,计算结果均采用荷载标准组合。

表 4 静力荷载工况下主塔墩的主要计算结果

地震响应名称	最终结果
塔底弯矩(顺桥向)/(kN·m)	402 493
塔底弯矩(横桥向)/(kN·m)	617 080
塔底剪力(顺桥向)/kN	6 260
塔底剪力(横桥向)/kN	9 583
主塔支座纵向反力 /kN	2 701

在静力作用下纵向固结,按照静力荷载要求设置主塔处固定支座剪断力 3 400 kN,在地震作用下固定支座剪断后变成普通滑动支座;同时主塔横梁的两个支座中间设置纵横双向金属棒卡隼阻尼器作为减隔震装置,在过渡墩处设横向金属板卡隼阻尼器作为减隔震装置,主桥的约束体系见图 6。主塔墩阻尼器主要设计参数见表 5,过渡墩阻尼器主要设计参数见表 6,其恢复力模型均为双线性滞回曲线,在 MIDAS 计算模型中采用一般连接的滞后系统进行模拟。

计算同样采用前文根据 E2 地震作用反应谱曲线拟合的 3 组地震波,由图 7~图 10 可知,在 E2 地震作用下,主塔纵横向阻尼器所承受的纵向水平力小于极限力 8 100 kN,所承受的横向水平力应小于极限力 4 050 kN,满足要求,主塔阻尼器上下节点之

范对 E2 地震作用下斜拉桥 A 类抗震设防的目标;在主塔支座被剪坏后,主塔的塔顶位移和主梁位移均超过 1 m,过大的变形不仅增加了梁端伸缩缝量,同时也增加了斜拉索的索力。而采用给定剪断力的纵向约束支座和钢阻尼器的组合体系,塔底弯矩大幅降低,仅为约束体系的 30%,同时也比塔梁活动体系要小,为塔梁活动体系的 58.9%,塔底剪力为约束体系的 37.7%,比塔梁活动体系相比也增加不多;塔顶位移与塔梁活动体系相比则大大降低,仅为 20.3%,主梁位移为 15.2%,与塔梁固结体系相比增加的不多,最大位移均小于 250 mm,为可控范围。

通过以上比选,设计采用给定设计剪断力的固定支座并配合金属板减隔震阻尼器,不仅可大幅降低塔底弯矩和塔底剪力,同时可将塔顶纵向位移和梁端纵向位移控制在合理范围之内。

4 结 论

(1)对于大跨径斜拉桥的抗震分析,建议同时采用反应谱法和时程分析法进行计算,计算结果互相校核,以保证人工拟合地震波和阻尼参数选取的合理性。

(2)对于半飘浮体系的独塔斜拉桥,采用塔梁纵向约束体系,主塔支座承受较大的水平力,传统的抗震支座或抗剪销均难以满足要求,而塔梁纵向活动体系,主塔塔顶位移和主梁梁端的纵向位移均较大,

说明对于半飘浮体系的独塔斜拉桥,单独采用梁塔间纵向约束或纵向活动都是不合理的。

(3)针对大跨度独塔斜拉桥桥型方案特点,采用减隔震组合体系,即给定设计剪断力的固定支座并配合金属板减隔震阻尼器,不仅可大幅降低塔底弯矩和塔底剪力,同时可将塔顶纵向位移和梁端纵向位移控制在合理范围之内。该体系同时兼顾了静力工况和地震工况,而且卡隼钢阻尼养护更换方便、造价经济,是理想的独塔斜拉桥抗震约束体系。

参考文献:

- [1] 王克海.桥梁抗震研究(第二版)[M].北京:中国铁道出版社,2015.
- [2] 叶爱君,胡世德,范立础.桥梁抗震体系研究[J].桥梁建设,2002(4):1-4.
- [3] 姜冲虎,杨博闻,李德建,等.独塔斜拉桥抗震分析及其合理约束体系研究[J].铁路科学和工程学报,2014,11(6):6-12.
- [4] 韩冰水,张玲,袁涌.斜拉桥抗震性能评价[J].西安科技大学学报,2013,33(2):131-138.
- [5] 王军,王萍,王泽银.多种减隔震装置共同作用的斜拉桥抗震分析[J].城市道桥与防洪,2021(10):95-98.
- [6] 赵人达,许智强,邹建波,等.大跨度斜拉桥阻尼约束体系减震优化研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(3):385-393.
- [7] 贾毅,赵人达,李福海,等.减隔震混合装置对大跨度斜拉桥地震响应的影响[J].吉林大学学报,2020,50(7):1411-1418.
- [8] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- [9] 叶爱军,管仲国.桥梁抗震(第三版)[M].北京:人民交通出版社,2017.

《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

投稿邮箱:cdq@smc.com 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smc.com