

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.09.028

浅谈高地震烈度区高墩抗震设计

魏 华

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要:某项目为位于地震烈度8度区域的公路桥梁。桥梁上部结构采用40 m跨径T梁,下部桥墩在35~80 m高度范围内分别采用了实心板式桥墩及两种类型的空心薄壁桥墩。为了验证项目中这3类高墩的桥梁结构在地震作用下的安全性,分别对此3类桥墩进行了抗震分析验算。该桥采用了减隔震设计及非线性时程分析方法进行抗震分析。通过分析计算及验算后,全桥均采用高阻尼抗震橡胶支座以更好地控制位移。在此基础上,建议在施工允许的条件下对上半部分的墩身尺寸及配筋进行优化;建议对部分桩基间距进行优化,并充分重视基岩地区桩基抗拔及承载力的验算。

关键词:高地震烈度;高墩;桥梁抗震

中图分类号:U442.5+5

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)09-0119-05

0 引 言

结构简单、施工便利的双柱式桥墩、实心板式墩、空心薄壁墩在国内外中小跨径桥梁,特别是高墩公路桥中应用非常广泛。然而,当设计桥墩高度较高时,桥墩往往要承受较大的地震力作用。同时,桥墩顶部也会产生较大的水平位移,可能会造成主梁脱落甚至导致桥梁整体坍塌。因此,设计过程中应该特别重视在高地震烈度区高墩的抗震设计分析。

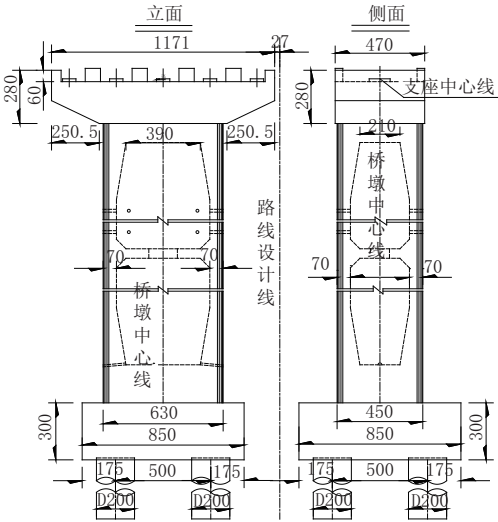
本项目桥位位于地震烈度8度区域。本文针对项目中40 m标准跨T梁(桥梁宽12.25 m)的3类高墩(1类实心板式墩及2类空心薄壁墩)进行了抗震设计分析,通过分析结果提出了解决办法并给出相关建议。

1 工程概况

本工程路线需沿沟谷两侧迂回展线下坡,因沟谷自然纵坡非常大,故需要布置不同墩高的特大桥进行跨越。项目采用四车道一级公路标准,设计速度为100 km/h,路基宽度为25.0 m。

以拟建的6号特大桥为例,桥梁分上下行两幅布置,单幅桥梁宽度为0.5 m(防撞墙)+11.25 m(车行道)+0.5 m(防撞墙)=12.25 m。其中,左幅桥跨径布置为39×40 m,右幅桥跨径布置为40×40 m。桥

梁上部结构采用标准跨径40 m的简支变连续T梁。单幅桥梁共布置5片T梁,梁高2.5 m,边梁梁宽2.05 m,中梁梁宽1.70 m,现浇段宽度为0.762 5 m。单片T梁平均重量(包括现浇段)约1 415 kN。下部结构根据桥墩高度选型,类型全覆盖:一般情况下,墩高 $H\leq 35$ m,采用柱式墩;墩高为 $35\text{ m}<H\leq 50$ m,选用实心板式墩,桥墩墩身采用6.4 m×2.4 m的矩形截面;50 m< $H\leq 65$ m,选用I型空心薄壁桥墩,墩身采用6.3 m×3.5 m×0.6 m(长×宽×壁厚)的矩形薄壁截面;65 m< $H\leq 80$ m,选用II型空心薄壁桥墩,墩身采用6.3 m×4.5 m×0.7 m(长×宽×壁厚)的矩形薄壁截面,其构造详见图1。桥台采用肋板式桥台,基础均采用钻孔灌注桩形式。



空心薄壁墩一般构造(65 m<H≤80 m)

图1 II型空心薄壁墩构造示意(单位:cm)

收稿日期:2023-08-21

作者简介:魏华(1979—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

本工程主要技术标准如下:

(1)道路等级:一级公路。

(2)荷载标准:公路-I级。

(3)安全等级:一级;桥梁结构的重要性系数:
 $\gamma_0=1.1$ 。

(4)环境类型:II类。

(5)桥梁设计基准期:100 a。

(6)抗震设防标准:抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度值为0.20g,抗震设防类别为B类。

2 桥梁抗震设计说明

2.1 结构及建模说明

本工程上部结构采用标准跨径40 m的简支变连续T梁结构,分上下行两幅布置,其中标准段单幅桥面宽度为12.25 m。下部结构桥墩根据墩高进行选型,共3类桥墩形式。由于时间关系,本文计算模型均采用3联3×40 m等墩高模型进行计算,以了解判断同类型桥梁的地震反应情况。典型计算模型详见图2。

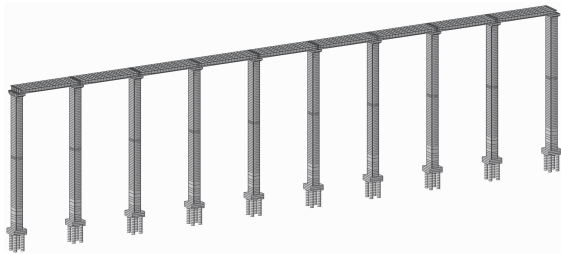


图2 典型模型示意

由于本工程采用的实心板式墩及薄壁墩桥墩为刚性桥墩、场地较为稳定,经过综合考虑,本桥最终采用减隔震设计方案进行分析验算^[1],原则控制下部墩柱均处在弹性工作范围内。

2.2 桩基础模拟

根据部分的初勘成果,桥位处地下土层以碎石土及石英云母片岩为主。由于缺乏详细的地质资料,并考虑到验算的通用性,桩基模型采用等效嵌固的方式,嵌固长度取5倍桩基直径,桩底采用固结约束。

2.3 支座模拟

原设计采用支座类型如下:边墩采用370×470×147高阻尼滑动抗震橡胶支座,中墩采用570×570×237高阻尼抗震橡胶支座。

通过分析计算,得到以下结果:

支座地震响应见表1。中墩支座位移尚在控制范围之内,边墩滑板支座如果不考虑挡块限位作用,位

移将达到0.4 m左右,突破了滑板支座的正常使用范围。

表1 支座位移响应(E2非线性时程)

截面位置	纵向/m		横向/m	
	地震位移	容许位移	地震位移	容许位移
边墩	0.43	0.36	0.39	0.29
中墩	0.10	0.275	0.11	0.275

如果考虑挡块为刚性措施来限制横向位移,试算得到的挡块受力巨大,总量达到千吨级别。因此,由于滑板支座位移较大且没有较好的控制措施(包括挡块),建议高墩取消滑板支座,最终调整为全阻尼橡胶支座。当然,后期也可以对增加阻尼器的方案进行更为深入的研究。

由上可知,对于40m T梁的支座建议边墩支座调整为420×470×197高阻尼抗震橡胶支座,中墩维持570×570×237高阻尼抗震橡胶支座。

2.4 反应谱和地震波

根据抗震规范,一般情况下,公路桥梁可只考虑水平向地震作用,直线桥可分别考虑顺桥向X和横桥向Y的地震作用。故本桥时程计算时均分别考虑纵桥向和横桥向的地震作用。

根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)第5.2条规定,采用设计加速度反应谱,按照下式进行计算。

$$S(T)=\begin{cases} S_{\max}(0.6T/T_0+0.4) & T \leq T_0 \\ S_{\max} & T_0 < T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T) & T_g < T \leq 10 \end{cases}$$

式中: T 为周期; T_0 为反应谱直线上升段最大周期,取0.1 s; T_g 为特征周期,取0.4 s; $S_{\max}$ 为设计加速度反应谱最大值,g。根据本工程桥梁类型、分区特征周期、场地类型、设防烈度,按照规范相关规定可得E2地震作用下抗震重要性系数 $C_i=1.7$,水平场地系数 $C_s=1.0$,水平向场地系数 $C_d=1.0$,水平向基本地震动峰值加速度 $A=0.2$ 。因此,E2地震作用下, $S_{\max}=2.5C_iC_sC_dA=0.85$ 。另外,结构的阻尼比应取值0.05。E2地震设计加速度反应谱曲线见图3。

地震波为根据E2地震作用反应谱曲线拟合的3条人工时程曲线,不再赘述。

2.5 荷载组合

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)及《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)的规定,本文抗震计算采用永久作用标准值和

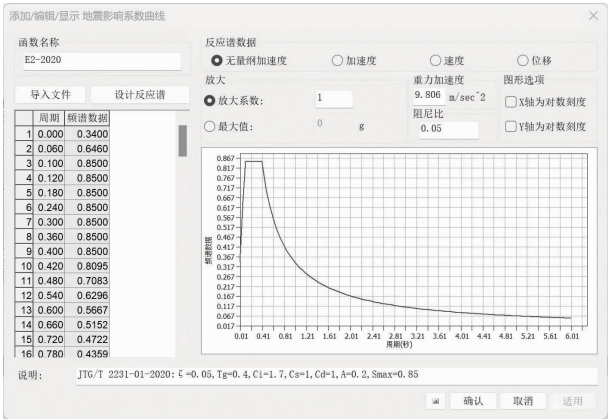


图 3 反应谱曲线

地震作用标准值进行组合。

本文仅列出 E2 地震作用下的时程抗震设计分析结果及验算^[1]。

3 80 m 高度空心薄壁墩

3.1 E2 地震桥墩响应及分析

墩柱截面为 6.3 m×4.5 m，配筋方式按照施工图，配筋率为 1.96%（不考虑内圈钢筋）。

桥墩墩柱纵、横向地震响应弯矩见图 4、图 5。

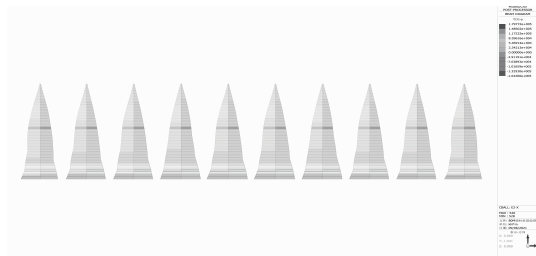


图 4 80 m 高度空心薄壁墩地震响应纵向弯矩



图 5 80 m 高度空心薄壁墩地震响应横向弯矩

根据计算结果对墩顶截面进行验算，结果见表 2、表 3，受力均满足要求。

表 2 墩底纵向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力 /kN	动载弯矩 / (kN·m)	弯矩能力 / (kN·m)	能力 / 需求
边墩	37 162	169 862	299 500	1.76
中墩	40 222	179 770	305 100	1.74

考虑墩身弯矩的非线性分布，距墩顶 45m 处，墩身弯矩也较大，因此同样取出此截面内力进行验算，结果见表 4、表 5。

表 3 墩底横向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力 /kN	动载弯矩 / (kN·m)	弯矩能力 / (kN·m)	能力 / 需求
边墩	36 771	183 514	419 300	2.28
中墩	41 072	210 100	426 200	2.06

表 4 距墩顶 45 m 截面纵向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力 /kN	动载弯矩 / (kN·m)	弯矩能力 / (kN·m)	能力 / 需求
边墩	25 860	103 446	278 000	2.69
中墩	29 885	103 018	284 000	2.76

表 5 距墩顶 45 m 截面横向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力 /kN	动载弯矩 / (kN·m)	弯矩能力 / (kN·m)	能力 / 需求
边墩	25 478	120 981	390 000	3.22
中墩	30 200	129 149	398 000	3.08

计算分析表明，墩柱的截面钢筋满足受力要求，且有一定优化空间。

3.2 E2 地震桩基响应及分析

原设计桩基直径为 2.0 m，主筋为 46 根 32 mm 钢筋，配筋率约为 1.18%。桩基纵横向间距均为 5 m。承台底地震响应内力汇总见表 6。

表 6 承台底地震作用结果

截面位置	恒载轴力 /kN	纵向地震作用			横向地震作用		
		动轴力 /kN	剪力 /kN	弯矩 / (kN·m)	动轴力 /kN	剪力 /kN	弯矩 / (kN·m)
边墩	43 305	248	7 091	193 938	641	7 161	192 349
中墩	46 435	319	6 701	185 809	543	7 323	220 316

根据上述承台底地震响应，计算桩基内力^[2]如下：
(1)纵向地震作用，桩基最大竖向压力为 29 640 kN，最大竖向拉力为 7 990 kN，最大弯矩为 7 180 kN·m。
(2)横向地震作用，桩基最大竖向压力为 32 730 kN，最大竖向拉力为 9 510 kN，最大弯矩为 8 022 kN·m。

建议调整桩基纵向间距为 6.5 m，横向间距为 7.0 m。调整桩基纵向间距为 6.5 m，对应桩基最大竖向压力为 26 200 kN，最大拔力为 4 550 kN，最大弯矩为 4 926 kN·m。调整桩基横向间距为 7.0 m，对应桩基最大竖向压力为 27 840 kN，最大拔力为 4 624 kN，最大弯矩为 4 909 kN·m。对应桩基地震作用下竖向承载力控制，抗拔为 5 000 kN，抗压为 28 000 kN。

3.3 E2 地震支座响应

支座地震响应见表 7。支座位移可控，且与挡块

间距匹配。

表 7 支座位移响应

单位:m

截面位置	纵向		横向	
	地震位移	容许位移	地震位移	容许位移
边墩	0.08	0.225	0.08	0.225
中墩	0.09	0.275	0.10	0.275

4 65 m 高度空心薄壁墩

4.1 E2 地震桥墩响应及分析

墩柱截面为 6.3 m×3.5 m,配筋方式按照施工图,配筋率为 1.74%(不考虑内圈钢筋)。

根据计算结果中的桥墩纵、横向地震响应弯矩及其他内力,对墩底截面进行验算,结果见表 8、表 9,受力均满足要求。

表 8 墩底纵向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力/kN	动载弯矩/(kN·m)	弯矩能力/(kN·m)	能力/需求
边墩	28 664	116 246	182 000	1.57
中墩	32 089	112 452	186 000	1.65

表 9 墩底横向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力/kN	动载弯矩/(kN·m)	弯矩能力/(kN·m)	能力/需求
边墩	28 625	155 533	315 000	2.03
中墩	31 827	150 496	322 000	2.14

考虑墩身弯矩的非线性分布,距墩顶 35 m 处,墩身弯矩较大,因此同样取出此截面内力进行验算,结果见表 10、表 11。

表 10 距墩顶 35 m 截面纵向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力/kN	动载弯矩/(kN·m)	弯矩能力/(kN·m)	能力/需求
边墩	21 401	68 686	172 000	2.50
中墩	24 034	70 068	176 000	2.51

表 11 距墩顶 35 m 截面横向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力/kN	动载弯矩/(kN·m)	弯矩能力/(kN·m)	能力/需求
边墩	21 363	111 658	299 000	2.68
中墩	24 292	112 959	306 000	2.71

计算分析表明,墩柱的截面钢筋满足受力要求,并有一定优化空间。

4.2 E2 地震桩基响应及分析

原设计桩基直径为 1.8 m,主筋为 38 根 32 mm

钢筋,配筋率约为 1.2%。桩基纵横向间距均为 5 m。承台底地震响应内力汇总不再赘述。

根据承台底地震响应,计算桩基内力如下:(1)纵向地震作用,桩基最大竖向压力为 20 920 kN,最大竖向拉力为 4 779 kN,最大弯矩为 4 445 kN·m。(2)横向地震作用,桩基最大竖向压力为 2 513 kN,最大竖向拉力为 7 422 kN,最大弯矩为 5 530 kN·m。

建议调整桩基纵向间距为 5.2 m,横向间距为 6.5 m。调整桩基纵向间距为 5.2 m,对应桩基最大竖向压力为 20 550 kN,最大拔力为 4 400 kN,最大弯矩为 4 212 kN·m。调整桩基横向间距为 6.5 m,对应桩基最大竖向压力为 22 060 kN,最大拔力为 4 350 kN,最大弯矩为 3 880 kN·m。对应桩基地震作用下竖向承载力控制,抗拔为 4 400 kN,抗压为 22 100 kN。

4.3 E2 地震支座响应

支座地震响应见表 12,满足使用要求。

表 12 支座位移响应

单位:m

截面位置	纵向		横向	
	地震位移	容许位移	地震位移	容许位移
边墩	0.07	0.225	0.06	0.225
中墩	0.08	0.275	0.09	0.275

5 50 m 高度实心板式墩

5.1 E2 地震桥墩响应及分析

墩柱截面为 6.4 m×2.4 m,墩底配筋率为 1.5%,距墩顶 25 m 处配筋率为 0.9%。

根据计算结果中的桥墩纵、横向地震响应弯矩及其他内力,对墩底截面进行验算,结果见表 13、表 14,受力均满足要求。

表 13 墩底纵向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力/kN	动载弯矩/(kN·m)	弯矩能力/(kN·m)	能力/需求
边墩	26 827	88 605	130 500	1.47
中墩	29 107	87 376	130 500	1.49

表 14 墩底横向地震作用验算结果

截面位置	组合轴力/kN	动载弯矩/(kN·m)	弯矩能力/(kN·m)	能力/需求
边墩	27 119	141 129	310 000	2.20
中墩	29 286	133 782	310 000	2.32

考虑墩身弯矩的非线性分布,距墩顶 25 m 处,墩身弯矩较大。因此同样取出此截面内力进行验算,结果见表 15、表 16。

表 15 距墩顶 25 m 截面纵向地震作用验算结果				
截面位置	组合轴力 /kN	动载弯矩 / (kN·m)	弯矩能力 / (kN·m)	能力 / 需求
边墩	20 879	45 530	79 500	1.75
中墩	17 859	49 186	79 500	1.62

表 16 距墩顶 25 m 截面横向地震作用验算结果				
截面位置	组合轴力 /kN	动载弯矩 / (kN·m)	弯矩能力 / (kN·m)	能力 / 需求
边墩	20 838	78 106	200 000	2.56
中墩	17 863	74 351	200 000	2.69

计算分析表明,墩柱的截面钢筋满足要求,并有一定优化空间。

5.2 E2 地震桩基响应及分析

原设计桩基直径为 1.6 m,主筋为 34 根 32 mm 钢筋,配筋率约为 1.36%。桩基纵间距均为 4.2 m,横向间距为 4.6 m。承台底地震响应内力汇总不再赘述。

根据承台底地震响应,计算桩基内力如下:(1)纵向地震作用,桩基最大竖向压力为 19 140 kN,最大竖向拉力为 3 060 kN,最大弯矩为 3 880 kN·m。(2)横向地震作用,桩基最大竖向压力为 23 760 kN,最大竖向拉力为 6 348 kN,最大弯矩为 4 750 kN·m。

建议调整横向间距为 5.8 m,对应桩基最大竖向压力为 21 240 kN,最大拔力为 3 832 kN,最大弯矩为 3 460 kN·m。

对应桩基地震作用下竖向承载力控制,抗拔为 3 9 kN,抗压为 21 300 kN。

5.3 E2 地震支座响应

支座地震响应见表 17,满足使用要求。

6 其他分析

本文还对三类桥墩在下部结构施工完毕时的地震作用进行了验算。在其他参数不变的情况下,对比成桥与施工阶段墩底的弯矩结果(见表 18)。根据计算结果可以得到以下结论:

(1)施工阶段桥墩地震响应相比成桥阶段略大。但由于施工阶段时间相比成桥后使用时间较短,建议可采用高文军等^[3]提出的方法适当调整重要性系数。由于本模型就是桥墩自身的地震反应,其结果也

表 17 支座位移响应				单位:m
截面位置	纵向		横向	
	地震位移	容许位移	地震位移	容许位移
边墩	0.07	0.225	0.07	0.225
中墩	0.08	0.275	0.10	0.275

表 18 墩底弯矩对比				单位:kN·m
桥墩类型	成桥模型		施工阶段模型	
	纵向弯矩	横向弯矩	纵向弯矩	横向弯矩
80 m 薄壁墩	179 770	210 100	196 200	236 820
65 m 薄壁墩	116 246	155 533	128 480	196 580
50 m 实心墩	88 605	141 129	92 370	171 910

说明高墩桥墩自重的地震响应非常大,也是其地震力产生的重要来源。

(2)在地震作用下,减隔震支座及阻尼器对高墩桥梁结构的位移及内力均起到较为明显的效果。

7 结 语

本文针对地震 8 度区的 3 类高墩进行分析验算后,可归纳为以下几条结论:

(1)高地震烈度区的高墩实心板式墩及空心薄壁墩桥墩的边墩支座类型应充分关注地震作用下的限位措施及其有效性。本项目建议边墩支座同样采用高阻尼抗震橡胶支座。常规静力设计中需考虑由此因素带来的边墩受力影响及支座验算。

(2)常规设计的墩身结构受力一般能够满足抗震设计要求,且有一定富裕量。根据施工阶段桥墩验算可知,桥墩自重是其地震力产生的重要来源,建议在施工可行的条件下,对上半部分的墩身尺寸及配筋进行优化。

(3)地震作用下的桩基设计需要重视,特别是基岩地区的短桩应充分考虑地震作用下的桩基抗拔及承载力的验算。本项目对 3 类基础的桩基均提出了间距布置优化建议,并给出了地震作用下桩基压、拔的竖向承载力控制值。

参考文献:

[1] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].

[2] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].

[3] 高文军,兰海燕,张奔牛,等.公路大跨度桥梁建设期抗震设防标准研究[J].桥梁建设,2021,51(2):47-53.