

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.033

西安正阳大道机场东跨线桥抗震弹塑性分析与评价

甄玉杰¹, 连云杰²

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 中建三局集团有限公司)

摘要:正阳大道秦汉新城段位于西安市秦汉新城东部,是正阳大道最重要路段。该项目南起正阳大桥兰池大道互通式立交,北至秦汉新城与泾河新城交界,全长 3.51 km。机场东线跨线桥,为该项目下穿机场东线所设的一座分离式立交桥,建成后桥梁属于机场东线。该桥为一座 4×30 m 预应力混凝土现浇连续箱梁桥,桥梁全长 125 m,全宽 15.5 m。利用大型有限元软件对该桥进行了两阶段两水平抗震设计分析。结果表明:在 E1 地震作用下,采用弯矩曲率曲线进行验算,结构处于弹性状态,截面抗弯强度满足要求;在 E2 地震作用下,部分墩柱墩底截面发生屈服进入塑性状态,桥墩塑性铰区抗剪强度、墩顶位移、支座水平位移均满足规范要求。

关键词:现浇箱梁;反应谱;弹塑性;阻尼比;屈服弯矩

1 工程概述

西安正阳大道横跨南北,向北纵贯秦汉新城、泾河新城连接西咸北环线,向南通过正阳渭河大桥跨越渭河,是连接大西安各版块之间的重要交通线路之一。该项目南起正阳大桥兰池大道互通式立交,北至秦汉新城与泾河新城交界,全长 3.51 km。

机场东线跨线桥,为该项目下穿机场东线所设的

一座分离式立交桥,建成后桥梁属于机场东线。该桥为一座 4×30 m 预应力混凝土现浇连续箱梁桥,桥梁全长 125 m,桥梁全宽 15.5 m。桥梁总体布置如图 1 所示。其主要技术标准如下:设计汽车荷载等级:公路—Ⅰ级;环境类别:Ⅰ类;地震基本烈度:8 度,地震动峰值加速度为 0.20g,桥梁抗震设防措施等级为 9 度;结构安全等级:一级;设计基准期:100 年。

大桥平面位于半径 $R=4\ 550$ m 的圆曲线上;纵面位于纵坡 $i_1=-0.54\%$, $i_2=-0.3\%$ 的直线上。

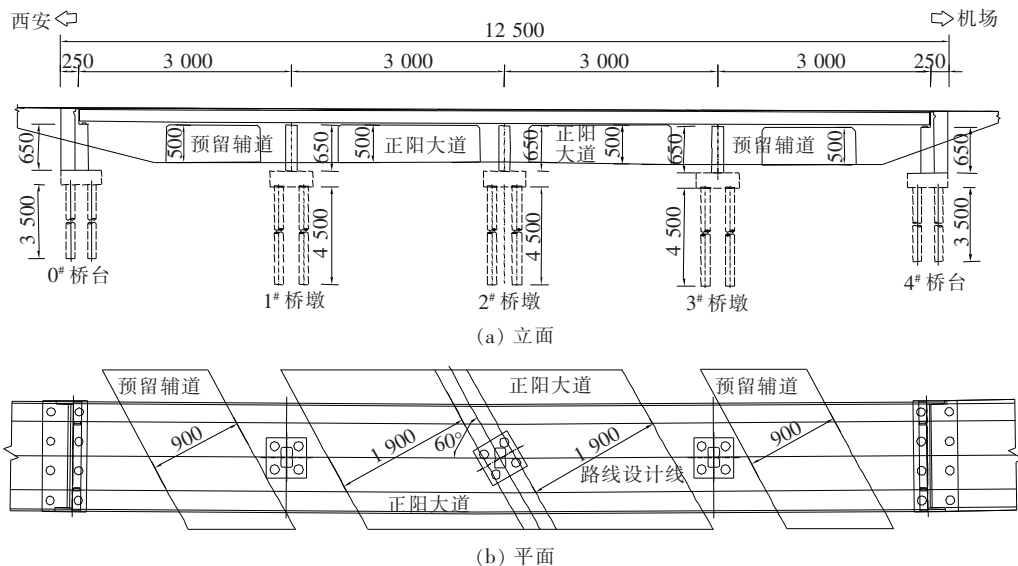


图 1 机场东线跨线桥桥型总体布置(单位:cm)

收稿日期:2020-08-06(修改稿)

作者简介:甄玉杰,男,硕士,高级工程师。E-mail:zhenyujie@foxmail.com

2 上部结构设计

上部结构采用预应力混凝土现浇连续箱梁。主梁断面图如图 2 所示。桥面宽 15.5 m(0.25 m 人行道护栏+2.75 m 人行道+9.5 m 行车道+2.75 m 人行道+0.25 m 人行道护栏),箱梁中心梁高 170 cm,双向坡度均为 2%,梁底水平。箱梁采用单箱双室截面,悬臂长度 250 cm,腹板采用斜腹板,投影水平距离为 27.5 cm,翼缘板端部厚 0.2 m,根部厚 0.45 m。箱梁顶板厚 25 cm,跨中底板厚 22 cm,腹板厚 45 cm,支点附近底板由 22 cm 线性过渡到 40 cm,横梁处腹板厚度由 45 cm 线性过渡到 65 cm,腹板变化段与底板变化段均在同一位置,变化长度为 6 m。中横梁宽 2.2 m,端横梁宽 1.5 m。

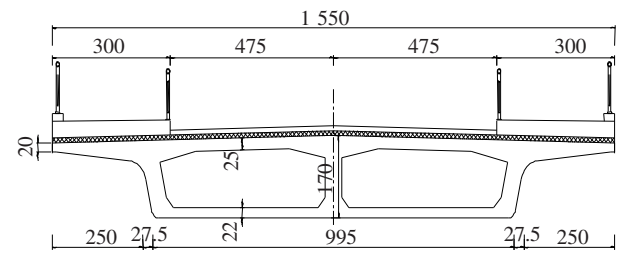


图 2 主梁断面图(单位:cm)

3 下部结构设计

大桥桥墩采用花瓶墩,墩顶截面尺寸为 5.2 m×1.6 m,墩身尺寸为 2.8 m×1.6 m。横桥向墩顶以下

0.4 m 范围为 5.2 m 宽的等宽段,0.4 m~墩底范围内通过圆弧渐变段变化至 2.8 m 宽,墩身截面边角设直径 0.2 m 的圆倒角。桥墩承台厚 2.2 m,承台尺寸为 5.6 m×5.6 m,基础采用 4 根直径 1.3 m 钻孔灌注摩擦桩。桥墩构造图如图 3 所示。

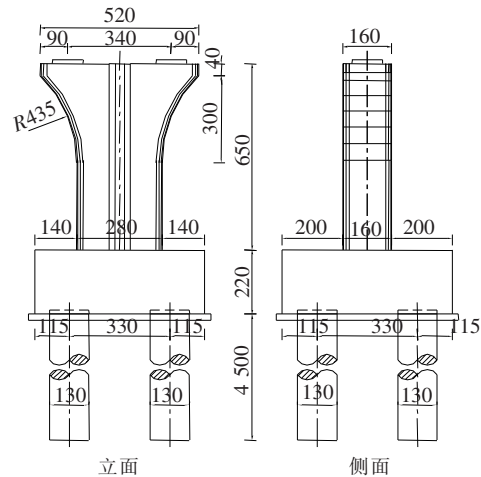


图 3 桥墩构造图(单位:cm)

桥台采用墙式台,基础采用 8 根直径 1.2 m 钻孔灌注摩擦桩。

4 结构抗震计算

4.1 结构计算模型

结构采用杆系单元建立有限元模型,全桥共分为 296 个节点,260 个单元。

全桥采用 HDR 支座,支座参数见表 1,采用铅芯橡胶支座进行模拟,桩基刚度采用土弹簧模拟。

表 1 HDR 支座参数

规格型号	竖向设计承载力/kN	设计位移/mm	容许位移/mm	极限位移/mm	水平屈服力/kN	初始水平刚度/(kN·mm ⁻¹)	屈服后水平刚度/(kN·mm ⁻¹)	水平等效刚度/(kN·mm ⁻¹)	等效阻尼比/%	竖向压缩刚度/(kN·mm ⁻¹)	预埋件重量/kg
HDR(I)-d670×266-G1.0	3 878	130	325	455	171	12.37	1.90	2.54	15	1 007	267
HDR(I)-d920×325-G1.0	7 581	180	450	630	330	17.19	2.64	3.53	15	1 422	488

4.2 自振特性计算

桥梁自振特性是研究桥梁动力问题的基础,为了计算地震作用下结构的动力响应,必须首先计算桥梁结构的自振特性。取结构前 50、100、200、300 阶模态进行试算,得到在第 289 阶模态各计算方向的有效质

量均超过了 90%。根据建立的动力计算模型,进行了结构自振特性分析,结构的自振频率及振型特征如表 2 所示。

4.3 抗震反应谱曲线

反应谱方法是将动力问题静力化,可以用较少的

表 2 成桥状态自振频率及振型

阶次/阶	频率/Hz	振型特点
1	0.423 2	主梁纵漂
2	0.423 5	桥墩同向横弯
3	0.494 2	主梁 1 阶反对称横弯
4	3.053 1	主梁 1 阶对称横弯
5	3.401 7	主梁 1 阶反对称竖弯

计算量获得结构的最大反应值。

根据工程地质勘察报告,该桥地震动峰值加速度为 $0.2g$,基本烈度为 8 度,场地类别为 II 类,分区特征周期为 0.4 s 。

阻尼是结构非常重要的动力特性,对于常规预应力混凝土箱梁,结构的阻尼比可取 0.05 。

抗震分析采用多振型反应谱法,水平设计加速度反应谱 S 根据地勘报告和 JTG/T B02-01-2008《公路桥梁抗震设计细则》确定,E1、E2 地震反应谱曲线如图 4 所示。

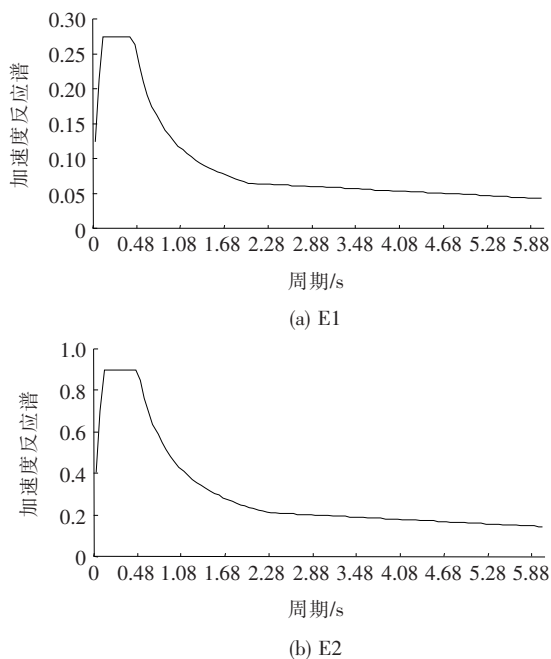


图 4 E1、E2 地震反应谱曲线图

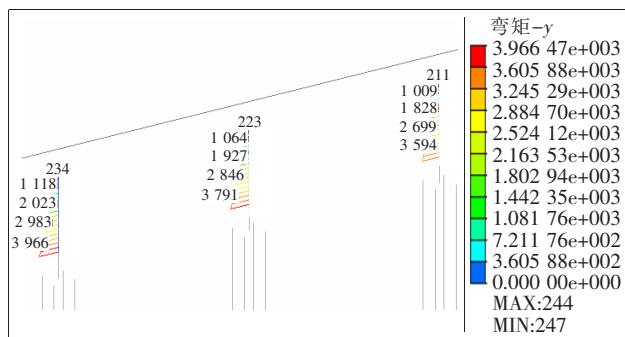
计算地震荷载组合采用 SRSS 法,纵向和横向地震作用计算时分别考虑 50% 的竖向作用。

4.4 E1 地震验算

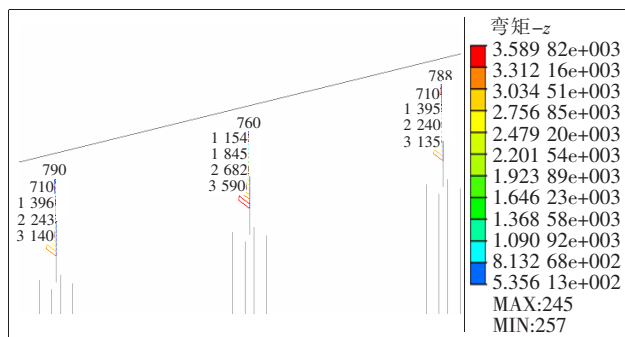
根据 JTG/TB02-01-2008《公路抗震设计细则》,E1 地震作用下桥梁结构处于弹性状态,计算采用轴力-弯矩-曲率曲线中的首次屈服弯矩进行控制,若 E1 地震作用下塑性铰区的弯矩小于首次屈服弯矩

即认为桥梁结构处于弹性状态。

纵向地震作用下,桥墩纵向弯矩如图 5 所示。

图 5 E1 地震作用下桥墩纵向弯矩(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

横向地震作用下,桥墩横向弯矩如图 6 所示。

图 6 E1 地震作用下桥墩横向弯矩(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

为了得到桥墩截面的首次屈服弯矩,需要绘制弯矩曲率曲线,混凝土材料采用 Mander 模型,钢筋采用双折线模型。

由以上可知:在 E1 地震作用下,桥墩处于弹性状态。弹性抗震设计,用构件的强度作为衡量结构性能的指标,只需校核构件的强度是否满足要求。经验算,桥墩单元强度验算满足规范要求。

4.5 E2 地震验算

在 E2 地震作用下,验算结构单元强度,发现部分墩底单元已经进入塑性状态,需进行桥墩塑性验算。在 E2 地震作用下,允许结构进入塑性状态,但应验算结构的塑性铰区抗剪强度(地震中大量钢筋混凝土墩柱的剪切破坏表明,在桥墩塑性铰区域由于弯曲延性增加会使混凝土所提供的抗剪强度降低)。对于规则桥梁,还应验算墩顶位移。桥墩塑性铰区抗剪强度验算结果见表 3。

由表 3 可知:在 E2 地震作用下,桥墩塑性铰区抗剪强度验算满足规范要求。

桥墩墩顶位移验算结果见表 4,满足规范要求。

表 3 桥墩塑性铰区抗剪强度验算结果

墩号	剪力方向	rV_d/kN	V_n/kN	安全度
1 [#]	横桥向	6 178	6 845	1.11
	顺桥向	3 612	4 084	1.13
2 [#]	横桥向	6 005	6 845	1.14
	顺桥向	3 488	4 083	1.17
3 [#]	横桥向	6 178	6 845	1.11
	顺桥向	3 612	4 084	1.13

表 4 桥墩墩顶位移验算结果

构件	$\Delta d/\text{m}$	$\Delta u/\text{m}$	验算结果
1	0.007 2	0.178 4	合格
1	0.018 3	0.306 9	合格
2	0.006 2	0.178 4	合格
2	0.018 9	0.306 9	合格
3	0.006 2	0.178 4	合格
3	0.017 4	0.306 9	合格

4.6 支座位移验算

根据桥梁实际情况以及支座检测报告中的参数,采用支座相对位移作为验算指标。

在 E2 地震作用下,支座纵向和横向位移见表 5。

表 5 支座水平位移验算结果

支座位置	地震方向	纵向/cm	横向/cm
0 [#] 台	E2 纵向	30.3	
	E2 横向		28.8
1 [#] 墩	E2 纵向	28.4	
	E2 横向		28.7
2 [#] 墩	E2 纵向	29.8	
	E2 横向		29
3 [#] 墩	E2 纵向	29.3	
	E2 横向		29.2
4 [#] 台	E2 纵向	28.9	
	E2 横向	-0.4	29

综合表 5 及 HDR 支座参数可见,支座相对位移在设计容许位移以内,支座验算满足要求。

5 结论

利用大型有限元软件对西安正阳大道机场东跨线桥进行了两阶段两水平抗震设计分析,计算分析表明,大桥结构尺寸取值基本合理,结构在地震荷载作用下,满足规范要求。

(1) 在 E1 地震作用下,采用弯矩曲率曲线进行验算,结构处于弹性状态,截面抗弯强度满足要求。

(2) 在 E2 地震作用下,部分墩柱墩底截面发生屈服进入塑性状态,桥墩塑性铰区抗剪强度、墩顶位移、支座水平位移均满足规范要求。在结构设计中,要重视并加强塑性铰区的配筋设计。

参考文献:

[1] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 西安正阳大道秦汉新城段机场东跨线桥施工图设计[Z],2017.

[2] 刘琪,聂尚杰,徐林. 大跨长联波形钢腹板连续梁桥的隔震设计研究[J]. 中外公路,2019(3).

[3] 丁礼华,段平,董熙,等. 大跨双塔自锚式悬索桥铅芯橡胶支座减震效果分析[J]. 中外公路,2017(4).

[4] 秦昌,徐略勤,刘津成,等. 高墩大跨连续刚构桥长周期地震响应对比研究[J]. 中外公路,2017(1).

[5] 顾晓燕,游新,吴刚. 考虑双向碰撞的斜交桥抗震性能分析[J]. 中外公路,2019(1).

[6] 张亚辉,林家浩. 香港青马桥抗震分析[J]. 应用力学学报,2002(3).

[7] 王克海. 桥梁抗震研究[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.

[8] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,2006.

[9] 范立础,胡世德,叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

[10] 叶爱君. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

[11] 范立础,卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

[12] 杨玉民,胡勃,袁万城. 基于位移反应谱的连续梁桥抗震设计简化方法[J]. 同济大学学报,1999(1).

[13] JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S].

[14] 王海良,张铎,王剑,等. 基于 IDA 的钢管混凝土空间组合桁架连续梁桥抗震易损性分析[J]. 世界地震工程,2015(2).