

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.11.011

齐鲁黄河大桥约束体系及抗震计算

赵世超

(济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250131)

摘要: 济南齐鲁黄河特大桥主桥为下承式系杆拱桥,长 1 170 m,其中桥跨组合为 95 m+280 m+420 m+280 m+95 m,主桥跨度 420 m 的网状吊杆系杆拱桥,建成后将成为同类桥型跨径世界第一。桥宽 60.7 m,采用一级公路标准,双向八车道,主桥范围为公轨合建的桥梁形式,中间预留城市轨道交通空间,兼顾城市主干路功能。介绍其抗震约束体系及抗震计算。

关键词: 网状吊杆;系杆拱桥;约束体系;分离型减隔震装置;动力特性

中图分类号: U448.22+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)11-0038-04

1 工程概况

齐鲁黄河大桥是济南北跨黄河发展的“三桥一隧”战略通道之一,经过济南市槐荫区、天桥区,南起齐鲁大道与济齐路交叉口,接现状齐鲁大道,依次跨越美里路、济广高速,经过郑家店村东,跨越黄河后,与 G309 交叉相交。

项目全长 6 742 m,设计速度 60 km/h,其中跨黄河特大桥主桥为下承式系杆拱桥,长 1 170 m,其中桥跨组合 95 m+280 m+420 m+280 m+95 m,主桥跨度 420 m 的网状吊杆系杆拱桥,总体布置见图 1、图 2,建成后将成为同类桥型跨径世界第一。桥宽 60.7 m,采用一级公路标准,双向八车道,主桥范围为公轨合建的桥梁形式,中间预留城市轨道交通空间,兼顾城市主干路功能。梁高 4 m,主拱矢高 69.5 m,吊索采用 400 MPa 高应力幅钢绞线拉索,实现下承式网状系杆拱桥。这座桥也将创造最大跨度、最大梁宽、高应力索三项“世界之最”。

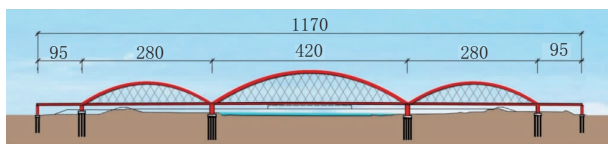


图 1 齐鲁黄河大桥立面布置(单位:m)

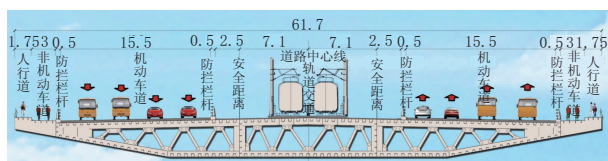


图 2 齐鲁黄河大桥横断面布置(单位:m)

收稿日期: 2020-04-24

作者简介: 赵世超(1980—),男,学士,高级工程师,从事路桥建设与管理工

2 结构约束体系

从行车舒适性角度出发,齐鲁黄河大桥主桥以布置 95 m+280 m+420 m+280 m+95 m 一联为宜,以尽量减少伸缩缝。但主桥如采用一联布置,同时也存在以下困难:(1)为适应全桥 1 170 m 的上部结构温度变形等,主、引桥交接处伸缩缝装置伸缩量需求较大;(2)280 m 跨与 420 m 跨交接墩处的支座吨位需求大,竖向承载力需求达 210 MN,国内目前可查的大吨位球钢支座为南京大胜关长江大桥 7 号墩采用的 180 MN^[1],国内外均无定型产品,必须在结构上进行创新设计、分析和试验;(3)顺桥向约束体系布置困难:全桥一联顺桥向如只布置一个固定支座,运营荷载下全联制动力及水平地震力仅由单个固定墩承受,对固定墩要求极高,从合理分配受力角度出发,应当在其他活动墩处额外设置固定支座或者 Lock-up 装置^[2],但如此势必会带来运营期间温度变形受限或构造处理复杂的影响。

综合考虑,齐鲁黄河大桥主桥采用三跨系杆拱桥,分为(95+280)m+420 m+(280+95)m 三联,三联主桥分别在 P19、P20、P21 设置固定墩,其余墩在顺向均为活动墩;各桥墩在横桥向均为一个固定支座、一个活动支座。结构约束体系布置见图 3~图 5。

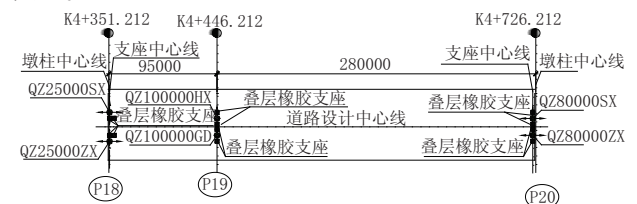


图 3 (95+280)m 联主桥约束体系(单位:mm)

考虑到本工程系杆拱桥结构振动周期较短,同时上部结构重量大,主桥最终决定采用减隔震设



图4 420 m 联主桥约束体系(单位:mm)

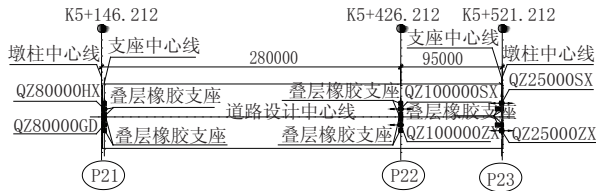


图5 (280+95)m 联主桥约束体系(单位:mm)

计。考虑到本工程主桥吨位较大,橡胶类减隔震装置(铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座)因吨位问题基本无法适用,可选择的减隔震装置主要分为两类^[1]:整体式摩擦摆式减隔震支座;分离型减隔震装置(橡胶支座+摩擦支座)。考虑到本工程为轨合建桥梁,受轨道桥梁行车平顺性和梁端转角影响,常规摩擦摆式减隔震支座滑动底盘半径不宜太小,因此减震效果一般,尤其是梁端位移控制,同时承载力130 MN的大吨位摩擦摆式减隔震支座国内工程应用并不多见。

综合考虑,齐鲁黄河大桥采用了功能分离、球钢支座与叠层橡胶支座并联的组合减隔震新体系,震后易修复,经济指标比双曲面减隔震支座节省约25%~50%。该减隔震体系适应性强,可适用于采用大吨位支座的梁桥、拱桥和斜拉桥等不同桥型。该减隔震体系已在宁波三官堂大桥(主跨465 m三跨连续钢桁梁桥)、宁波中兴大桥(主跨400 m矮塔斜拉桥)得到应用。

在运营荷载下,结构约束体系如上所述,并保证支座不发生剪断。在设计地震作用下,上述体系中的固定支座约束均发生剪断,全桥约束进入减隔震体系:一方面,利用普通球钢支座的滑动延长结构振动周期,隔离地震动输入;另一方面,利用叠层橡胶支座的弹性剪切刚度提供减隔震体系的回复力,控制结构地震位移。顺、横向固定支座剪断力设置情况见表1。

表1 支座剪断力设置

支座规格/kN	顺桥向剪断力/ 支座吨位	横桥向剪断力/ 支座吨位
QZ130000	16%	12%
QZ100000	10%	12%
QZ80000	16%	10%

叠层橡胶支座在每只普通球钢支座两侧横向布置,(95+280)m一联共12只,420 m一联共8只,(280+95)m一联共12只,全桥合计32只。每个球钢支座两侧的叠层橡胶支座提供的总弹性剪切刚度为30 720 kN/m。

3 抗震设防目标

3.1 设防目标

根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTJ/T B02-01-2008),齐鲁黄河大桥主桥按A类桥梁进行抗震设防,用E1地震作用和E2地震作用两种地震动水平进行抗震设防。大桥相应的性能目标确定为具体抗震设防标准可参见表2。

表2 抗震设防标准及性能目标

桥梁设防分类	设防地震概率水平	结构性能要求	结构校核目标
A类桥梁	E1地震作用	结构在弹性范围	主要结构校核强度,结构不发生损伤,截面不发生屈服
	E2地震作用	结构基本在弹性范围内,基本无损伤	主要结构校核强度,结构基本不发生损伤,截面基本不发生屈服

3.2 地震动参数

根据《济南齐鲁大道跨黄河通道工程工程场地地震安全性评价报告》^[4],本桥按照7度设防,场地设计反应谱取如下表达式:

$$S_a(t) = \begin{cases} A_{\max} [1+10(\beta_m-1)T] & T \leq 0.1 \text{ s} \\ A_{\max} \beta_m & 0.1 \text{ s} \leq T \leq T_g \\ A_{\max} \beta_m (T_g/T)^c & T_g \leq T \leq 5T_g \\ A_{\max} \beta_m [0.2^c - 0.02(T-5T_g)] & 5T_g \leq T \leq 6 \text{ s} \end{cases}$$

式中: A_{\max} 为设计地震动峰值加速度; β_m 为设计地震动动力放大系数最大值; T 为反应谱周期,s; T_g 为特征周期,s; c 为衰减系数。跨黄河大桥工程场地地表5%、4%阻尼比、50 a和100 a不同超越概率水平向地震动参数取值见表3。此外,对于大跨度桥梁结构,抗震计算应考虑竖向地震动的影响,本工程竖向地震动加速度取值取水平向结果的65%,反应谱形同参数与水平向反应谱相同。

本工程选用50 a10%超越概率、50 a2%超越概率分别作为E1地震作用、E2地震作用。地震动时程曲线由安评单位提供。

4 有限元计算模型

4.1 线形计算模型

主桥采用(95+280)m+420 m+(280+95)m五跨三连拱网状吊杆组合梁拱桥结构,拱肋采用焊

表3 设计地震动加速度反应谱参数取值

地表地震动参数	超越概率水平				
	100 a 63%	50 a 10%	100 a 10%	50 a 2%	100 a 2%
A_{max} (cm/m ²)水平向	52	105	138	175	230
A_{max} (cm/m ²)竖向	34	68	90	114	150
β_s (阻尼比5%)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
β_s (阻尼比4%)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7

接钢箱梁结构,主梁采用正交异性组合桥面板组合梁结构,吊杆采用钢绞线拉索,网状布置,主墩采用混凝土结构,基础采用钻孔灌注桩。

采用SAP2000有限元程序,齐鲁大道主桥的动力空间计算模型。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。主梁、拱肋、墩柱均采用空间的梁单元,斜吊索采用桁架单元。承台模拟为质点,赋予承台质量,并与墩底和桩基顶部节点形成主从连接。各桥墩处的桩基础采用土弹簧模型加以模拟。二期恒载等效为线质量均匀施加主梁上。计算模型中各部分约束条件详见表4,计算模型见图6。

表4 线性模型边界及连接条件

位置	自由度					
	X	Y	Z	θ_x	θ_y	θ_z
主梁和固定墩	1	1	1	1	0	1
主梁与活动墩	0	1	1	1	0	0
桥墩承台底	s	s	s	s	s	s

注:0表示自由,1表示主从或固结,s表示弹簧约束。

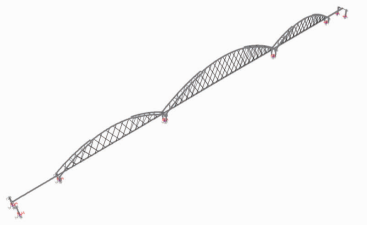


图6 齐鲁大道主桥计算模型

地震输入采用了两种方式:纵桥向+竖向;横桥向+竖向,其中竖向地震输入取水平向地震输入的65%。反应谱分析取前300阶振型进行计算,其中振型组合采用CQC法,方向组合采用SRSS法。非线性时程分析考虑的非线性因素:梁单元梁柱效应、普通球钢支座的滑动摩阻效应。

4.2 支座滑动摩阻效应

时程分析时考虑普通球钢支座的滑动摩阻效应,采用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟,其恢复力模型见图7,其中支座临界滑动摩擦力 $F_{max}=\mu R$,

μ 为滑动摩擦系数,取为0.05, R 为支座承担的上部结构重力; x_y 为支座滑动临界位移,一般取为2~3 mm。

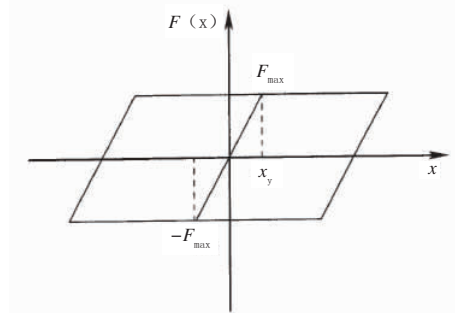


图7 支座摩阻效应恢复力模型

4.3 叠层橡胶支座恢复力模型

叠层橡胶支座采用线性弹簧进行模拟,其剪切刚度 k 按式(1)进行计算,式中: G_d 为橡胶支座动剪切模量,取为1 200 kN/m², A_r 为橡胶支座剪切面积, $\sum t$ 为橡胶层总厚度。

$$k = \frac{G_d A_r}{\sum t} \quad (1)$$

5 结构动力特性及抗震分析结果

图8、表5给出了运营荷载约束体系下结构主要振型及振动周期。前几阶振型均以拱肋振动为主,与下部结构抗震设计相关振型直至第八阶振型出现,结构振动周期1.249 s,基本位于反应谱衰减区,但考虑到本桥拱梁上部结构重量较一般连续梁桥体系大得多,每联固定支座的支座剪力远大于一般梁桥结构,即便在E1地震作用下,固定墩支座不发生剪断的剪力需求值极大,很难满足。为此,表6给出的各支座约束方向的支座剪断力为满足正常运营荷载下的剪力需求,在E1地震作用下,各支座约束方向即发生剪断,全桥进入减隔振模式。

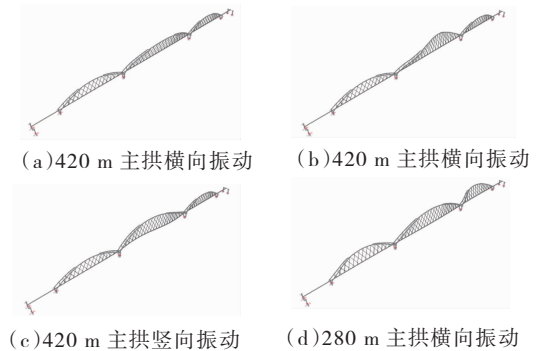


图8 主要振型

E2地震作用下,各联关键点地震位移见表6。可以看出,在纵向+竖向地震、横向+竖向地震输入下,梁端最大地震位移0.166 m,该抗震约束体

表5 结构动力特性

序号	周期 /s	频率 /Hz	振型描述
1	3.062 1	0.326 6	420 m 主拱横向振动
2	1.785 9	0.559 9	420 m 主拱横向振动
3	1.734 4	0.576 6	420 m 主拱竖向振动
4	1.610 0	0.621 1	280 m 主拱横向振动
5	1.577 9	0.633 8	280 m 主拱横向振动
6	1.558 0	0.641 8	420 m 主拱竖向振动
7	1.438 4	0.695 2	420 m 主拱竖向振动
8	1.249 0	0.800 7	(280+95)联纵向振动
9	1.225 1	0.816 2	(95+280)联纵向振动
10	1.223 0	0.817 6	420 m 主拱竖向振动

系控制结构位移效果良好。

经验算,在 E2 地震作用下,本桥抗震约束体系下,所有桥墩及桥墩桩基础均保持弹性工作状态,满足抗震设防目标和性能要求。

6 结 论

(1)本文介绍了齐鲁黄河大桥抗震约束体系综合比选及布置情况、抗震设防目标和性能要求、抗震计算模型及抗震分析结果,通过计算分析表明,大桥抗震约束体系控制结构位移效果良好,所有结构部件均满足抗震设防目标和性能要求。

(2)齐鲁黄河大桥采用了功能分离、球钢支座

表6 E2 地震作用下结构地震位移

地震输入	梁跨	关键点	单位 /m	
			纵向 + 竖向输入	横向 + 竖向输入
顺桥向	95+280	主梁左端	0.145	0.078
		固定墩处	0.146	0.117
		主梁右端	0.145	0.159
	420	主梁左端	0.166	0.161
		主梁右端	0.164	0.161
		主梁左端	0.148	0.163
280+95	固定墩处	0.147	0.118	
	主梁右端	0.146	0.076	

与叠层橡胶支座并联的组合减隔震新体系,震后易修复,经济指标比双曲面减隔震支座节省约 25%~50%。该减隔震体系适应性强,可适用于采用大吨位支座的梁桥、拱桥和斜拉桥等不同桥型,可供国内类似工程参考。

参考文献:

- [1] 查道宏.大吨位球型钢支座安装技术[J].铁道建筑技术,2011(4):1-3.
- [2] 吴陶晶,李建中,管仲国.减隔震装置作用机理及其在大跨度连续梁桥中的应用[J].结构工程师,2009(4):106-111.
- [3] JTG/T B02-01-2008,公路桥梁抗震设计细则[S].
- [4] 济南齐鲁大道跨黄河通道工程工程场地地震安全性评价报告[R].山东同方防震技术有限公司,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

电话:021-55008118 传真:021-55008850 投稿及联系邮箱:cdq@smedi.com