

何鑫,雷尊贵.独柱墩长悬臂隐式盖梁施工方法及抗震性能[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(2):51-59. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.007

He X, Lei Z G. Construction Method and Seismic Performance of Long Cantilever Hidden Cover Beam with Single Column Pier[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019, 34(2): 51-59. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.02.007

独柱墩长悬臂隐式盖梁施工方法及 抗震性能

何鑫*,雷尊贵

(广东省长大公路工程有限公司,广东 广州 510620)

摘要:独柱墩因占用空间小特别适用于城市桥梁,其抗震性能是设计的关键问题.本文结合某城市快速路工程,介绍了26 m宽桥梁独柱墩的设计和施工,并采用有限元软件建立空间动力有限元模型,对其抗震性能进行了详细分析.结果表明,在E1/E2地震作用效应+永久作用效应最不利作用下,桥墩仍处于弹性受力阶段;桩基和支座受力性能亦均满足设计要求.该26 m宽城市桥梁独柱墩抗震设计可为同类工程提供参考.

关键词:城市桥梁;独柱墩;抗震;动力有限元模型

中图分类号:U455.4 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2019)02-0051-09

Construction Method and Seismic Performance of Long Cantilever Hidden Cover Beam with Single Column Pier

He Xin, Lei Zungui

(Guangdong Changda Highway Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510620, China)

Abstract: Because of the small footprint, the single-column pier is especially suitable for urban bridges, and its seismic performance is a key issue in design. The design and construction of a 26 m wide bridge single column pier, which combined with a city expressway project, was introduced, and the finite element software was used to establish a space dynamic finite element model, and its seismic performance in detail was analyzed. The results show that under the most unfavorable effect of E1 / E2 seismic action and permanent action effect, the pier is still in the elastic stress stage; the bearing performance of the pile foundation and the bearing also meet the design requirements. The seismic design of the single-column pier of the 26 m wide urban bridge provide reference for similar projects.

Keywords: Urban bridge; single column pier; seismic resistance; dynamic finite element model

桥墩按照墩柱的个数,可分为独柱墩、双柱墩和多柱墩.独柱墩具有以下优点:外形美观、视觉通透、可改良下部结构布局,占用较小的空间,特别适用于城市用地紧张的区域^[1].对于多车道的城市桥梁,独柱墩往往与长悬臂盖梁配合使用,但由于独柱墩稳定性能较差,且受力情况复杂,在地震作用下,桥墩产生弯剪

收稿日期:2019-02-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408218);湖南省科技厅资助项目(14JJ2094; 18A202)

*通信作者, E-mail: 258465767@qq.com

破坏,从而导致整个桥梁坍塌.因此,抗震性能是独柱墩桥梁设计的控制因素和难点^[2-4].

本文结合某城市快速路工程,介绍了26 m宽桥梁独柱墩的设计和施工,并采用有限元软件建立空间动力有限元模型,对其抗震性能进行了详细分析.该设计可供同类桥梁参考.

1 工程背景

中山市某快速路项目主线采用双向6车道一级公路兼顾城市快速路标准建设.主线道路设计速度为80 km/h,辅助道路设计速度为40 km/h.整体式路基宽33.0~64.5 m.项目设互通式立交4处,高架桥21 515 m共14座,辅道设中桥208 m共4座,小桥123 m共8座.

该桥梁上部结构共三联,桥梁跨径组合为(4×30+4×30+4×30) m的先简支后连续预应力混凝土小箱梁.单幅桥宽为26 m,横向设8片小箱梁.采用GJZ450×550×99板式橡胶支座,下部结构采用300 cm×350 cm方形截面独柱墩,配合单侧悬臂长度达15.55 m的隐式盖梁使用.墩柱及桩基受力钢筋均用HRB400钢筋,桩径为D180.桥梁盖梁、桥墩和桩基分别采用C50、C40和C35混凝土.中央独柱墩横断面及一般构造见图1.

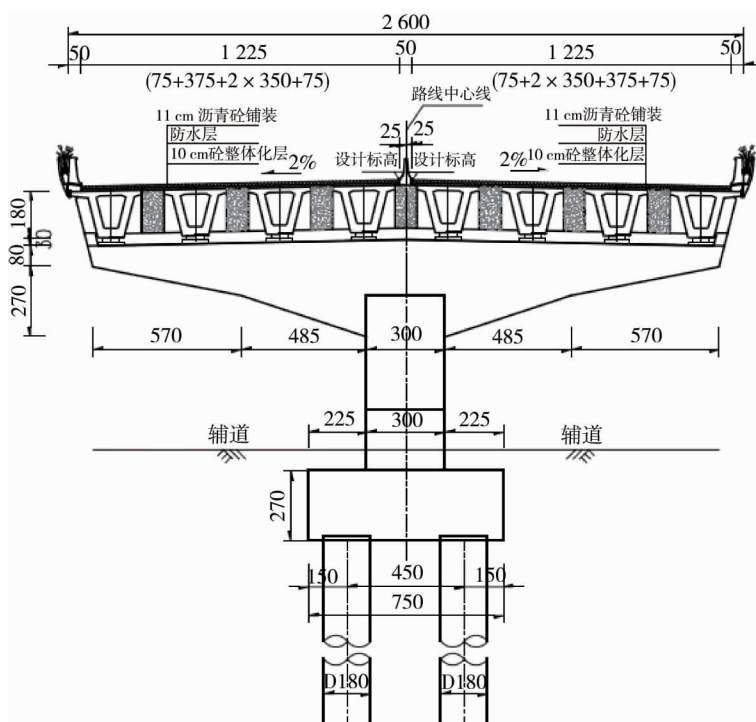


图1 中央墩横断面及一般构造(单位:cm)

2 中央隐式墩盖梁设计与施工

2.1 中央隐式墩盖梁设计

中央独柱墩结构形式:隐形盖梁长为25.3 m,单侧悬臂长度达15.55 m;盖梁宽3.0 m,高2.5~5.2 m,独柱墩身采用300 cm×350 cm方形截面.独柱墩墩身和盖梁的截面配筋见图2.

中央独柱墩盖梁设单向横坡.单个盖梁布设19束钢绞线预应力钢束,均采用两端张拉.盖梁钢束分2次张拉,待盖梁混凝土浇筑完成并达到张拉强度后进行第一次张拉,共10束;待两孔预制梁均架设完毕后进行第2次张拉,共9束.

2.2 中央隐式墩盖梁施工

本工程墩柱位于现有市政公路上,为不影响车辆的通行,利用围蔽区进行立柱施工,围蔽区域围蔽宽度为12~14 m.墩身施工采取翻模法结合组合拼装式脚手架的施工工艺.中央独柱墩先施工基础调节段(控制在地面埋深以下),然后根据墩柱高度采用分节段浇筑^[5-7].

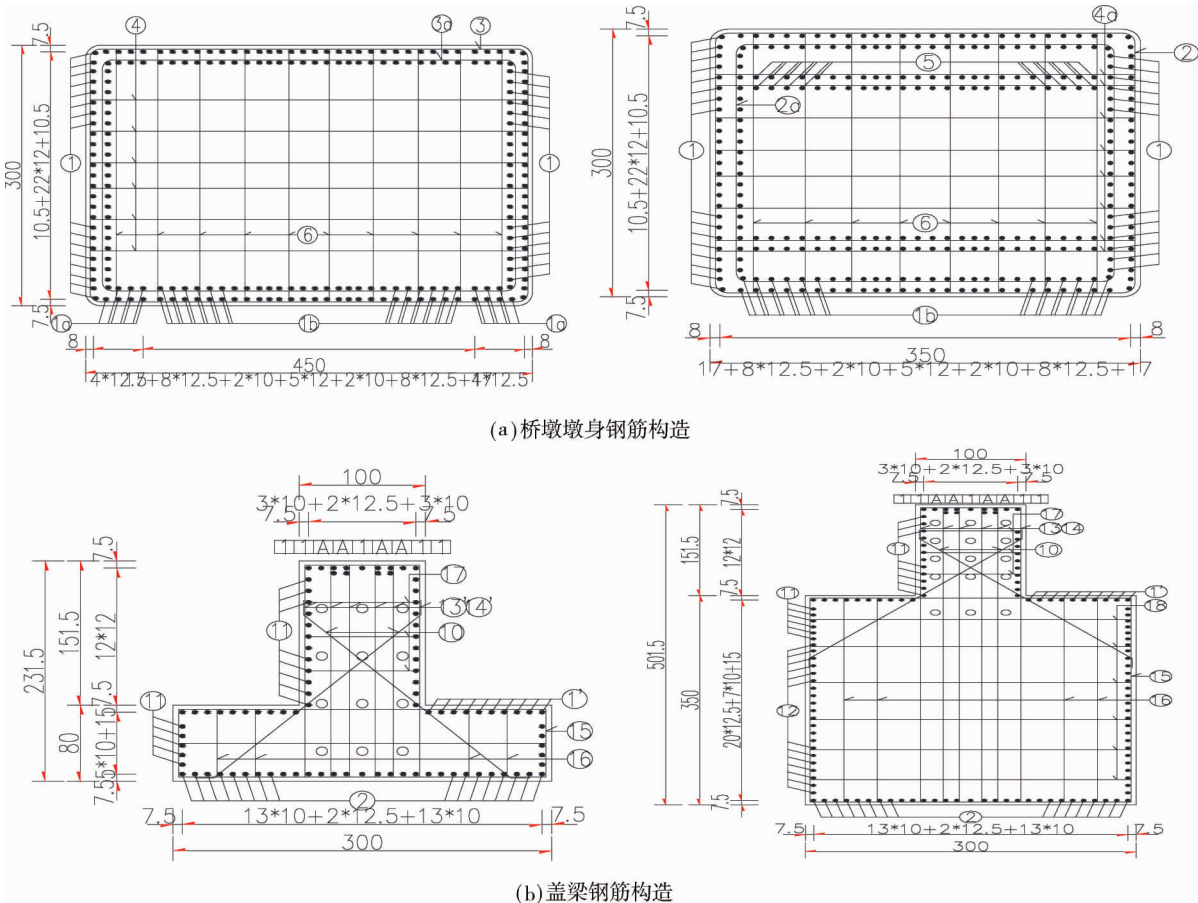


图 2 中央墩盖梁钢筋构造(单位:cm)

中央隐式墩盖梁采用钢护筒+贝雷梁或工字钢+工字钢支撑系统,作为盖梁施工平台支承的方法进行施工.钢护筒上设置两排双拼 I56b 工字钢主梁,间距 2.5 m,单根盖梁长 26.4 m.盖梁上布设 32 排 I45b 工字钢作为横梁,作为三角桁架及模板支撑.盖梁钢筋在后场整体绑扎成型,完成钢绞线穿束,利用改装后的拖车运输到现场,采用 1 台 260 t 汽车吊和专用吊架吊装盖梁钢筋骨架.预应力施工采用智能张拉和真空压浆工艺.

盖梁施工工艺流程如图 3 所示.

2.2.1 盖梁的支架搭设

中央独柱墩盖梁支架采用 $\Phi 630 \times \delta 12$ mm 钢管作为支撑,沿桥梁横向布设四排钢管,内侧两排紧贴墩身布设,外侧距离内侧钢管 9 m,布设于原有道路上.每排各布中心间距为 2.5 m 的双排钢管,钢管通过法兰和螺栓连接,可根据墩身高度进行调整.钢管上设置双排 I45b 工字钢帽梁,支架主梁采用 5 组 10 排贝雷架等间距布置,外侧两组总长度为 27 m,中间 3 组总长度分别为 18,24,18 m.钢管柱、工字钢帽梁以及贝雷主梁通过辅助钢板焊接处理,以确保整体支架稳定,荷载传递均匀.盖梁支架立面布置图如图 4 所示.

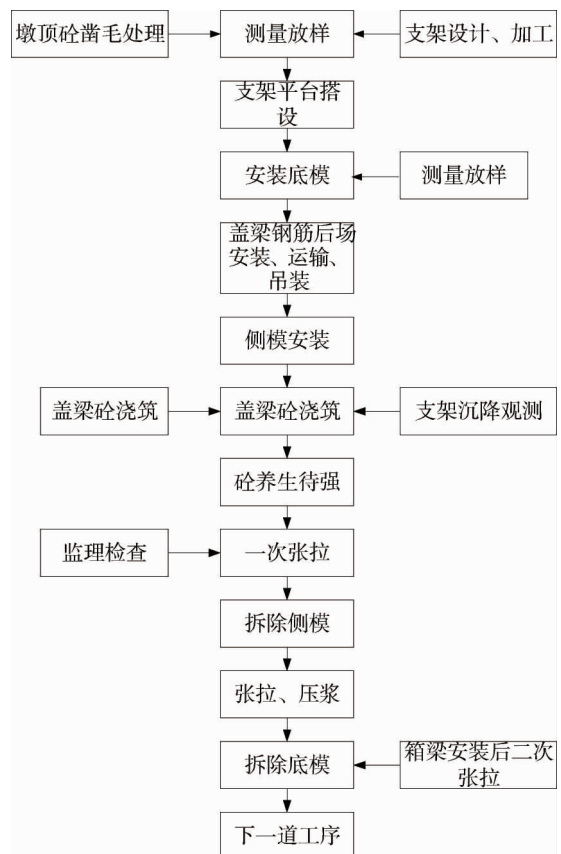


图 3 盖梁施工流程

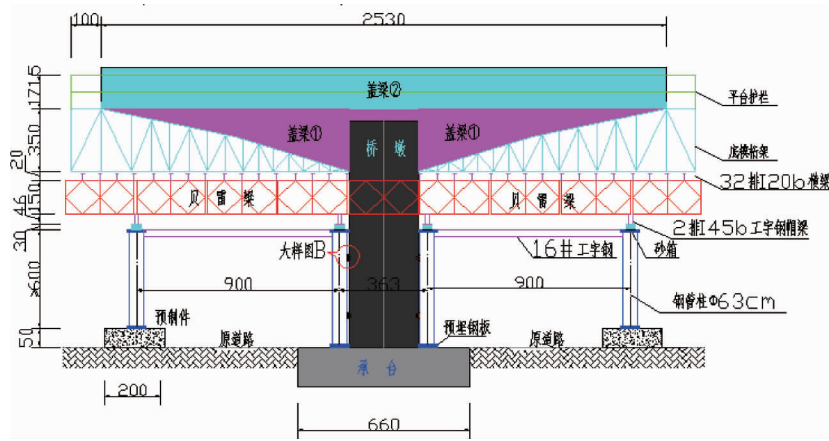


图4 盖梁支架立面布置

2.2.2 盖梁的支架受力模拟分析

采用通用有限元软件建立模型,对盖梁受力进行模拟分析.各构件均使用梁单元模拟.托架上横梁和主横梁之间、主横梁和桁架下横梁之间均采用主从节点连接.整个模型总共有 19 831 个节点、10 157 个单元、48 个主从节点连接,4 个工况共计 20 036 个单元荷载.盖梁支架结构的整体模型详见图 5.

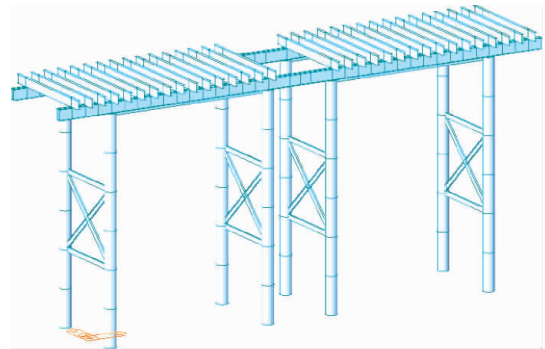


图5 盖梁模板支架系统整体模型

盖梁容量按 26 kN/m³ 进行计算,模板体系重量按 2.0 kN/m² 考虑,施工人员及设备荷载按 2.5 kN/m²,混凝土倾倒和振捣荷载按 2.0 kN/m² 考虑.根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)考虑风荷载.

$$\omega_k = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0$$

式中: ω_k 为风荷载标准值, kN/m²; β_z 为高度 z 处的风振系数; μ_s 为风荷载体型系数,圆截面取 1.2,型钢、模板取 1.3; μ_z 为风压高度变化系数,地面粗糙度 A 类,取 1.97; ω_0 为基本风压, kN/m².

按最不利原则,主要考虑以下工况:

工况一: 支架搭设完成.最大风速条件下,支架安装到位,还未现浇盖梁.

工况二: 施工盖梁.工作风速条件下,进行盖梁施工.

计算结果表明,支架的强度、刚度和稳定性均满足要求.

2.2.3 盖梁模板施工

盖梁的施工采用大块定型钢模板,支座垫石浇筑在盖梁梁身浇筑完成后现场采用木模完成.底模采用大块钢板下加垫(10 槽钢,间距为 0.35 m,槽钢直接架设在三角桁架上,底模纵向用扁钢联系,加强底模板稳定性.侧模的刚模纵向采用双拼)16 槽钢背楞,中心间距为 75 cm,背肋上下各设置 T22 对拉杆连接,外围可在下部设置托管及小型槽钢支承在施工平台上做为加固措施.模板的安装采用汽车吊配合安装一次到位,中间底模直接铺装承重梁上,端部异形部分安放在槽钢搭设的三角桁架上,并固定.底模铺设好后,在底模上放样,安装钢筋骨架,钢筋骨架安装完成报监理验收合格后安装侧模,侧模均采用标准钢模板加工安装.

模板要求内表面光滑、平整,接头严密不漏浆.模板的设计、加工需经验收合格后方可使用,模板使用前应在场外进行预拼.模板支立前,应在模板内表面涂刷脱模剂,脱模剂应采用同一种品种,以保证混凝土表面色泽一致.

2.2.4 盖梁的浇筑

支架经预压合格后,即可进行盖梁混凝土浇筑.混凝土坍落度控制在 16~18 cm,初始凝固时间控制在

12 h 左右,并根据实际施工条件进行调整.由于本项目盖梁形式特殊,属于“凸型”结构,上半部分1.71 m 为隐形盖梁部分,因此在盖梁混凝土浇筑时应分2次浇筑,首先浇筑3.5 m 下半部分的全截面盖梁,待混凝土初凝后进行上半部分隐形盖梁混凝土浇筑,2次全部浇筑完毕后方可拆模.

2.2.5 盖梁预应力施工

盖梁梁内布置4束13钢绞线和15束12钢绞线,钢绞线锚下张拉控制应力为1320 MPa(预制箱梁处)和1339 MPa(叠合梁处).所有预应力锚固点均设置在盖梁外侧,预应力管道采用直径90 mm 塑料波纹管、真空压浆工艺.

中央独柱墩盖梁预应力钢绞线立面和截面如图6和图7.

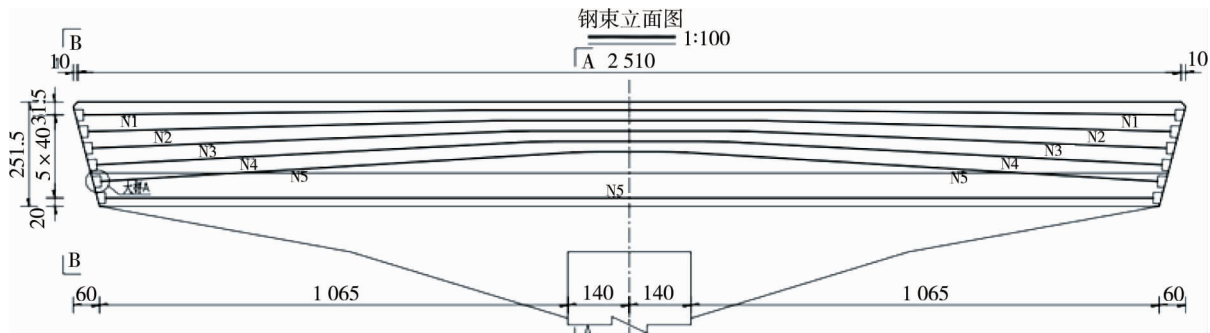


图6 中央独柱墩盖梁预应力钢绞线立面

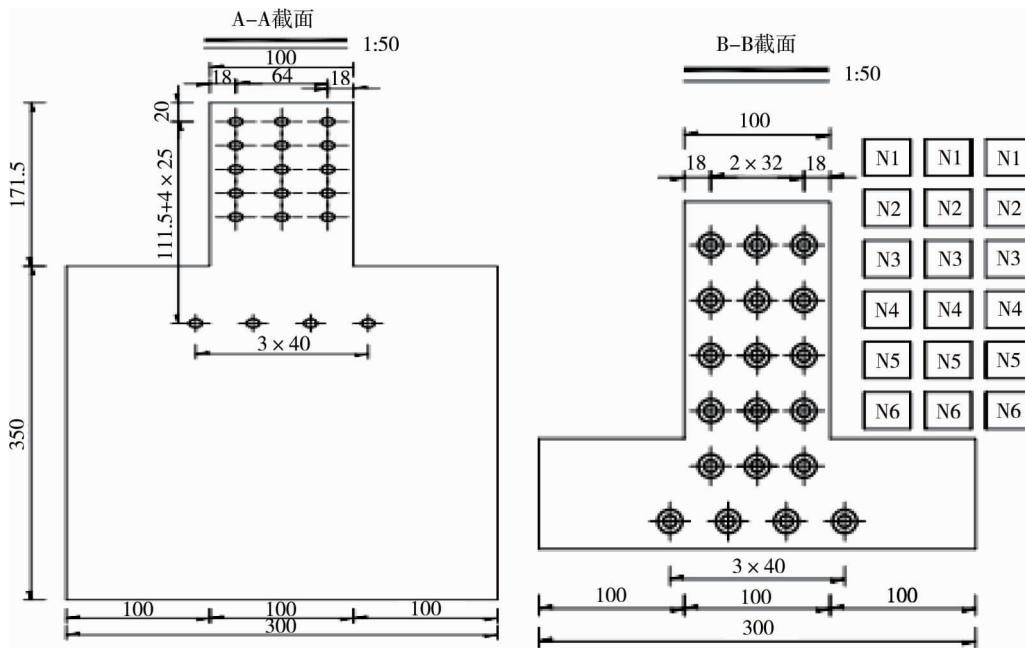


图7 中央独柱墩盖梁预应力钢绞线截面

3 中央隐式墩盖梁抗震

3.1 桥址区地震条件

3.1.1 抗震设防标准与性能目标

根据有关资料,桥梁所在地域的地震动峰加速度为0.10 g,属于地震烈度VII度区,按《公路桥梁抗震设计细则》中的规定属于B类桥梁.桥梁抗震设防采用E1和E2这2种地震动水平进行抗震设防^[8-9].加速度反应谱为

$$S = \begin{cases} S_{Amax}(5.5T + 0.45)0.04s \leq T < 0.1s; \\ S_{Amax}0.1s \leq T \leq T_g; \\ S_{Amax}(T_g/T)^\gamma T_g \leq T < 8s. \end{cases}$$

式中： S 为地震影响系数； S_{Amax} 为地震影响系数最大值； T 为结构自振周期，s； T_g 为特征周期，s，它是反应谱峰值区拐点处的周期，可根据场地类别、地震震级和震中距确定。

参考《公路桥梁抗震设计细则》相关条款，以及类似桥梁的研究成果，将桥梁的抗震性能目标确定：遭受 E1 地震作用时，桥墩、过渡墩以及各桥墩桩基础不发生损伤或不需要修复可继续使用；遭受 E2 地震作用时，应保证不致倒塌或产生严重结构损伤，经加固修复后仍可继续使用^[8-9]。

3.1.2 场地地震动参数

根据资料，确定地震动加速度反应谱特征参数为 E1 和 E2 地震作用的设计地震输入参数见表 1，相应的反应谱函数如图 8 和图 9。

表 1 设计地震动参数

阻尼比	地震作用	S_{Amax}	T_g/s	γ
0.05	E1	0.142	0.48	1.0
	E2	0.504	0.54	1.0

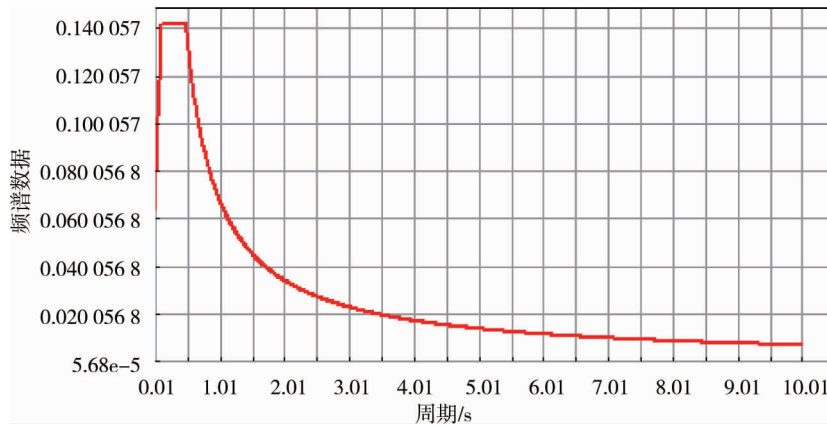


图 8 E1 水平设计加速度反应谱

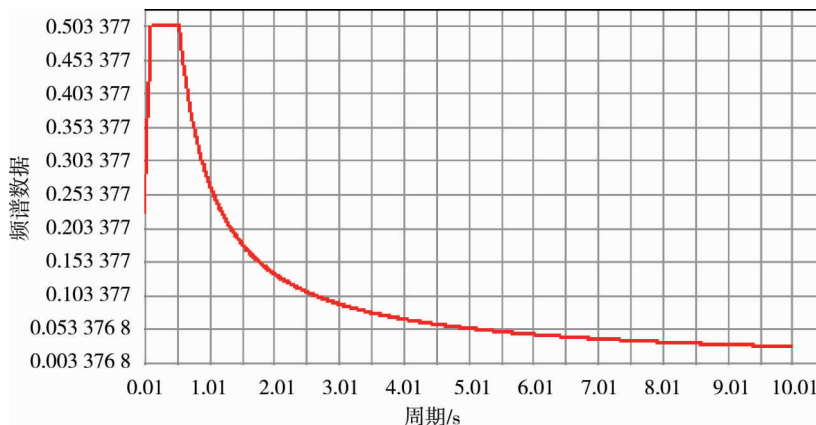


图 9 E2 水平设计加速度反应谱

3.2 桥梁动力特性分析

3.2.1 动力分析模型的建立

采用 Midas/Civil2012 建立后三联空间有限元模型，对有结构进行反应谱分析计算。图 10 所示为中央墩隐式盖梁有限元动力分析模型。

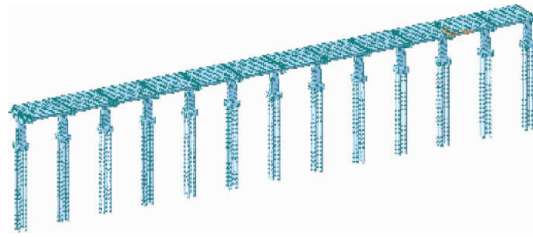


图10 中央墩隐式盖梁有限元动力分析模型

模型中主梁和桥墩均采用三维梁单元,二期恒载和横隔板荷载作为梁单元的附加质量计入.全桥考虑土-下部结构-上部结构的协同工作抵抗纵横桥向的地震作用,采用表征土介质弹性值的 m 参数计算的等代土弹簧刚度模拟桩-土相互作用.

3.2.2 边界条件

在动态计算模型中,板式橡胶支座采用弹簧单元进行模拟,其刚度按下式计算:

$$k = \frac{G_d A_r}{\sum t}$$

式中: G_d 为板式橡胶支座的动剪切模量, kN/m^2 ; A_r 为橡胶支座的剪切面积, m^2 ; $\sum t$ 为橡胶层的总厚度, m .

采用 GJZ-450×550×99 板式橡胶支座,支座承载力为 2 156 kN,容许剪切位移为 71 mm,竖向等效刚度为 618 808 kN/m ,水平设计刚度为 1 902 kN/m .

3.2.3 桥梁自振特性分析

由特征值分析可知,结构的振型以桥墩顺桥向弯曲为主,结构一阶周期为 1.682 9 s.表 2 所列出前 5 阶的动力特性计算结果.限于篇幅,给出相应的第一、第二、第五阶阵型图,如图 11 所示.

表2 前5阶频率及阵型描述

阶数	频率/Hz	周期/s	振型特征
1	0.529 0	1.682 9	桥墩横桥向弯曲
2	0.604 0	1.655 5	桥墩横桥向弯曲
3	0.618 7	1.616 3	桥墩横桥向弯曲
4	0.638 1	1.567 0	桥墩顺桥向弯曲
5	0.639 9	1.562 7	桥墩横桥向弯曲

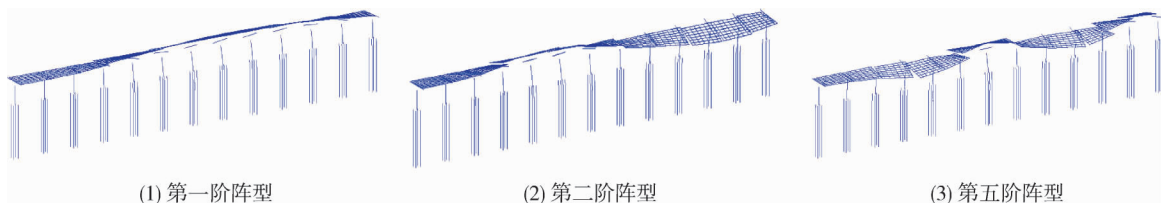


图11 阵型图

3.3 地震作用下桥梁地震响应及验算

3.3.1 E1 地震作用下桥墩和桩基强度验算

根据《细则》的规定,一般情况下,公路桥梁可只考虑水平地震作用,直线桥桥可分别考虑顺桥向 X 和横桥向 Y 的地震作用,本节即分别计算桥梁结构在 E1 纵向及横向地震下的地震反应.

采用上述有限元模型,输入 E1 地震下的水平设计加速度反应谱,进行反应谱分析.在 E1 地震作用下,桥墩和桩基截面弯矩在地震作用下的截面弯矩应小于截面的首次抗弯屈服弯矩(考虑轴力) M_y .整个截面仍保持弹性,结构没有损坏.弯矩-曲率曲线如图 12 所示.

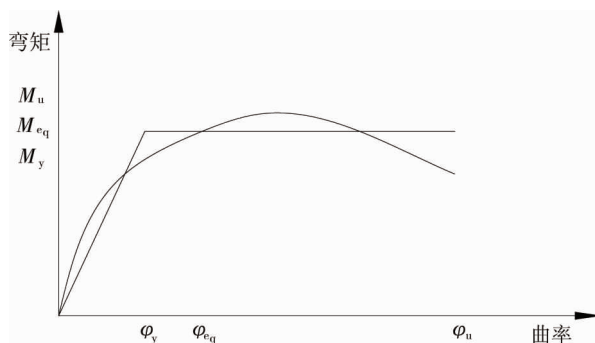


图 12 弯矩-曲率曲线

图 12 中: M_y 为截面首次抗弯屈服弯矩; M_u 为截面极限弯矩; M_{eq} 为截面等效抗弯屈服弯矩. 即把实际弯矩-曲率曲线等效为图中所示弹塑性双线性恢复模型时的等效抗弯屈服弯矩. 恒载+E1 地震作用下桥墩验算结果如表 3 所示.

表 3 恒载+E1 地震作用下桥墩验算

荷载工况	轴向/kN	弯矩/(kN·m)	首次屈服弯矩/(kN·m)	配筋	配筋率	是否屈服	安全系数
恒载+E1 顺向	22 539.44	12 718.34	93 670	$\Phi 32@195$	1.24%	否	7.36
恒载+E1 横向	22 565.69	12 178.37	60 000	$\Phi 32@195$	1.24%	否	4.93

计算表明:E1 地震作用效应+永久作用效应最不利作用下,桥墩处于弹性受力阶段,E1 水准下桥墩验算满足要求.

桩基配筋由 E2 地震控制设计,故此处不对 E1 地震下的桩基进行配筋设计验算.同理,此处不对 E1 地震下的支座进行验算.

3.3.2 E2 地震作用下桥墩及桩基受力状态

根据地震作用下的内力水平,采用纤维分析软件 UCFYBER 对墩柱相应截面进行弹塑性分析,并判断桥墩截面是否进入塑性阶段.判断原则:在 E2 地震作用下,若桥墩截面内力超过等效屈服弯矩则为延性状态,应该进行刚度折减^[10-11].恒载+E2 地震作用下桥墩和桩基验算结果如表 4 和表 5 所示.

表 4 恒载+E2 地震作用下桥墩验算

荷载工况	轴向/kN	弯矩/(kN·m)	等效屈服弯矩/(kN·m)	配筋	配筋率	是否屈服	安全系数
恒载+E2 顺向	22 486.45	48 906.95	161 600	$\Phi 32@195$	1.24%	否	3.30
恒载+E2 竖向	22 563.11	48 604.26	100 700	$\Phi 32@195$	1.24%	否	2.07

计算表明:在 E2 地震作用效应和永久作用效应最不利的情况下,桥墩仍处于弹性应力阶段,计算符合要求.

表 5 恒载+E2 地震作用下桩基验算

荷载工况	轴向/kN	弯矩/(kN·m)	等效屈服弯矩/(kN·m)	配筋	配筋率	是否屈服	安全系数
恒载+E2 顺向	350.55	2 490.41	5 055	$\Phi 28@34$	1.04%	否	2.03
恒载+E2 竖向	644.12	2 347.47	5 224	$\Phi 28@34$	1.04%	否	2.03

计算表明:在 E2 地震作用效应和永久作用效应最不利的情况下,桩基处于弹性应力阶段,计算符合要求.

3.3.3 E2 地震作用下支座验算

对 E2 地震作用下的支座进行验算,结果如表 6 所示.计算表明:E2 地震作用效应+永久作用效应最不利作用下,支座的厚度和抗滑移稳定性均满足要求.

表6 恒载+E2地震作用下支座验算

验算内容	项目	横桥向	顺桥向
	支座类型	板式橡胶支座	
	数量(桥墩/支座)	1/8	
	支座规格	GJZ450×550×99	
支座厚度验算	橡胶层总厚度/m	0.071	0.071
	橡胶剪切角正切值 $\tan\gamma$	1	1
	橡胶支座水平位移 X_0 /m	0.05	0.04
	支座厚度验算	YES	YES
支座厚度验算	支座的动摩阻系数 μ_d	0.15	0.15
	上部结构重力 R_0 /kN	1 604	1 604

4 结论

1) 本文以中山市某城市快速路 26 m 宽桥梁为工程案例,对 26 m 宽城市桥梁独柱墩+长悬臂隐式盖梁施工方法及抗震性能进行研究,为用地紧张的城市桥梁工程提供参考。

2) 结构的振型以桥墩顺桥向弯曲为主,结构一阶周期为 1.682 9 s.E1 和 E2 地震作用效应+永久作用效应最不利作用下,桥墩均处于弹性受力阶段,安全系数分别在 4.93 和 2.07 以上;在 E2 作用下,支座厚度及抗滑稳定性均满足规范要求。

参考文献:

- [1] 邱文亮,胡美.城市独柱墩梁桥结构体系研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(s1):164-167.
- [2] 邱文亮,姜萌,张哲.城市独柱墩桥梁结构体系非线性抗震研究[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(1): 161-166.
- [3] 马坤全,陈文艳.轨道交通高架桥合理抗震设计参数及抗震措施研究[J].中国铁道科学, 2001, 22(4): 63-68.
- [4] 中华人民共和国行业标准:公路桥涵设计通用规范(JTG D60-2015) [S]. 2015.
- [5] 张亚军.高速公路特大桥独柱墩预应力盖梁施工技术[J]. 隧道建设, 2006, 27(2):30-33.5
- [6] 杨罗飞.白河大桥独柱墩预应力盖梁抱箍法施工技术[J].公路交通技术, 2012(4):88-91.
- [7] 中华人民共和国行业标准.公路桥涵施工技术规范(JTG/T F50-2011) [S]. 2011.
- [8] 中华人民共和国行业标准.公路工程抗震规范(JTG B02-2013) [S]. 2014.
- [9] 中华人民共和国行业推荐标准.公路桥梁抗震设计细则(JTG/T B02-01-2008) [S]. 2008.
- [10] 黄敦文,舒小娟,沈明燕,等. 预应力混凝土箱梁桥施工过程剪力滞试验[J].湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(1):42-46.
- [11] 郑玉国,袁万城.典型大跨连续梁桥悬臂施工全过程地震反应谱分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版), 2013,28(3):59-65.