

高墩大跨连续刚构桥抗震性能分析

陈昕, 马麟

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 以白鹤滩工程大洪水沟连续刚构桥为研究对象, 应用 Midas 有限元软件, 并考虑了边跨支座处的弹性约束作用, 建立了该连续刚构桥的整体空间有限元计算模型。对其整体结构进行了静力和基于纤维单元的弹性反应谱和弹性时程分析, 探讨了该连续刚构桥采用薄壁空心高墩时的动力性能。分析结果表明: 该桥空心薄壁墩在强震作用下结构的强度和位移均能满足 08 抗震设计细则的要求, 同时薄壁空心高墩形式的连续刚构桥桥墩通常并没有进入弹塑性或塑性阶段, 在抗震性能方面有较好的优越性。

关键词: 有限元模型; 反应谱; 薄壁空心墩; 弹性时程; 抗震性能; 纤维单元

中图分类号: U442.5+5

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2012)04-0074-04

Analyses on Seismic Performance of Continuous Rigid Bridge with High Piers and Long Span

CHEN Xin, MA Lin

(College of Civil and Traffic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Regarding Dahongshuigou Continuous Rigid Bridge in Baihetan Project as a research object, and in consideration of the elastic restraint effect in side span bearing, the finite element software Midas is used to establish the overall spatial finite element calculating model of the bridge. The whole structure's static analysis is made, and the analyses for the elastic response spectrum and elastic time history are made based on fiber element. The dynamic characteristics of the bridge with thin-hollow-high piers are also discussed. The analysis results show that the structure intensity and displacement of the bridge's thin-hollow piers under the action of strong earthquake could satisfy the requirements of seismic design's 08 detailed rules. At the same time, the long-span continuous rigid bridges with thin-hollow-high piers would have good superiority in seismic performance because the piers usually could not enter into the elastic-plastic or plastic deformation stage.

Keywords: finite element model; response spectrum; thin hollow pier; elastic time history; seismic performance; fiber element

0 引言

随着社会经济的快速发展, 桥梁建设步伐大幅度增加, 高墩大跨混凝土连续刚构桥得到普遍的应用。特别是对于跨越深水、深谷、大河的大跨度桥梁, 采用预应力混凝土连续刚构, 十分有利。同时这种桥梁的抗震要求也同时提高。文献[1-2]建立了一座大跨度高墩连续刚构桥模型, 提出了一些在桥墩抗震设计中应该注意的问题以及相应的解决方法, 认为大跨度高墩连续刚构桥的横向地震响应要

比纵向地震响应大。文献[3]以三水二桥主桥单薄壁连续刚构桥为例, 对该桥进行了水平地震反应谱分析和时程分析, 认为高阶振型不应该被忽视。文献[4]分析比较不同桥墩结构形式对连续刚构桥抗震性能的影响, 认为与采用双肢薄壁实心墩的刚构桥相比, 双肢薄壁空心墩的刚构桥位移反应更大, 各构件轴力以及面内弯矩减小, 而面外弯矩增大。文献[5]以某双线连续刚构铁路桥为例, 对该桥进行多遇地震下的弹性地震反应分析和罕遇地震下的弹塑性地震反应分析, 得出该桥满足抗震设防要求。

文献[6]研究了桥墩外形尺寸、截面纵向刚度等参数对结构自振特性的影响,认为空心墩桥比实心墩桥的自振频率低。文献[7]以石佛沟特大桥为例,得出桥梁振动以纵向和横向振动为主,墩底为抗震设计的最不利截面。文献[8]探讨了连续刚构桥采用钢筋混凝土四柱式桥墩、双薄壁空心墩、单薄壁空心墩及独柱实心墩时的动力性能,得出4类桥梁自振频率依次增大。文献[9-10]均以某已建成的连续刚构桥为研究对象,分析了连续刚构桥采用钢筋混凝土双薄壁实心墩、双薄壁空心墩和单柱式空心墩三种截面形式的动力特性。现在国内外缺乏高墩墩经受地震的经验,发生震害后修复困难。因此,对高墩梁桥进行准确的地震响应分析,并由此提出针对高墩的抗震设计方法是十分必要的。

本文通过阐述大洪水沟大桥在地震作用下的结构计算分析过程,对薄壁空心高墩抗震性能的分析。希望以供类似桥梁设计借鉴参考。

1 工程概况

大洪水沟特大桥是白鹤滩项目宁南县葫芦口至白鹤滩公路工程第二标段上的一座大型桥梁,该桥起点桩号 K25+118,终点桩号为 K25+556.75,桥梁全长为 438.75 m。主桥为 90 m+160 m+90 m 预应力混凝土连续刚构,引桥坝址方向为 3 m×30 m 预应力混凝土连续 T 梁,葫芦口方向无引桥。

主桥上部结构为 90 m+160 m+90 m 预应力混凝土连续刚构箱梁桥,主桥横断面为单箱单室箱形断面,箱梁根部高度 10 m,跨中梁高 3.5 m,其间梁高按 1.8 次抛物线变化。采用纵向、竖向三向预应力体系。箱梁顶板为 0.28 m,底板由跨中 0.32 m 按二次抛物线变化至根部 1.2 m,箱梁顶板宽 10 m,底板宽 6 m,腹板分别为 0.4 m、0.6 m,桥墩顶部范围内箱梁顶板厚 0.5 m,底板厚 1.3 m,腹板厚 0.8 m,除桥墩顶部箱梁内设 2 道横隔板外,其余均不设横隔板。主引桥分隔墩采用薄壁空心墩,主桥墩高 80 m。属于高墩大跨连续刚构桥的典型。结构模型如图 1 所示。

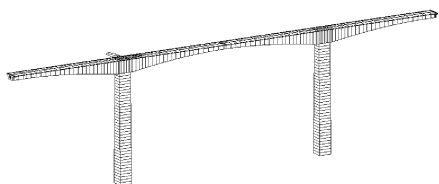


图 1 结构有限元模型图

主桥桥墩采用直径 $\Phi 1.8$ m 的钻孔灌注嵌岩桩基础;主引桥分隔墩采用直径 $\Phi 1.6$ m 的钻孔灌注桩。在设计过程中,桥墩桩基础考虑恒载、活载、支座位移、温度等因素。

2 结构计算

2.1 计算模型

采用有限元程序 Midas/civil 对全桥建立三维空间有限元模型。其中主梁、横梁、墩柱、桩基、系梁均采用空间梁单元模拟。全桥共用 202 个梁单元,计算分析中,不计桩基的作用,墩底与地面固结,梁端部约束竖向、横桥向位移及绕桥轴方向扭转。桥墩采用 C40 混凝土,主梁采用 C50 混凝土。主梁底部按 1.8 次抛物线变化。二期恒载用节点质量模拟。经过对计算数据的比较分析,得到该桥下部结构最不利受力截面,薄壁空心墩墩底单元。

2.2 计算参数

根据中国地震灾害防御中心的《白鹤滩水电站对外交通公路工程场地地震安全性评价报告》^[11],工程场址区 50 年超越概率 10% 基岩动峰值加速度 0.178 g。采用反应谱法对桥墩进行抗震分析。根据设计资料大洪水沟桥抗震设防类别为 A 类,设防烈度为 8 度,所处场地为 I 类场地。根据《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02-01-2008)(以下简称抗震规范)^[12],E1 地震作用下本桥的抗震重要性系数为 1.0。E2 地震作用下本桥的抗震重要性系数为 1.7。场地系数为 0.9。

E2 地震作用下,对该桥采用弹性反应谱分析做抗震分析,同时采用弹性动力时程分析作参考。

根据抗震规范,该桥需进行 E1、E2 地震作用下的抗震设计。根据抗震规范 5.2.1,当抗震分析采用多振型反应谱法时,水平设计加速度反应谱 S 由公式(1)确定。

$$S = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45) & T < 0.1s \\ S_{\max} & 0.1s \leq T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T) & T > T_g \end{cases} \quad (1)$$

$$S_{\max} = 2.25 C_i C_s C_d A \quad (2)$$

公式(1),(2)中, T_g 为特征周期, T 为结构自振周期, S_{\max} 为水平设计加速度反应谱最大值, C_i 为抗震重要系数, C_s 为场地系数, C_d 为阻尼调整系数, A 为水平设计基本地震加速度峰值。反应谱拟合相关参数按表 1 取值。

表 1 反应谱拟合相关参数

项目	T_g/s	C_i	C_s	C_d	$A/(m \cdot s^{-2})$
E1	0.35	1.0	0.9	1.0	0.2
E2	0.35	1.7	0.9	1.0	0.3

表 2 控制截面配筋验算表

控制截面	顺桥向组合 内力/(kN·m)	横桥向组合 内力/(kN·m)	计算配筋 横桥向	计算配筋 纵桥向	实际配筋
左墩底	3.72379×10^5	4.00697×10^5	190Φ32	176Φ32	290Φ32
右墩底	6.75125×10^5	4.00697×10^5	190Φ32	240Φ32	290Φ32

2.4 E2 地震作用下反应谱计算

2.4.1 E2 地震作用下位移计算

E2 地震作用下顺桥向最大位移 $\delta_x = 18.02$ cm, E2 地震作用下横桥向最大位移 $\delta_y = 19.74$ cm, 发生在左墩墩顶处。经分析允许位移为 26.67 cm, 所以位移满足设计要求。

2.4.2 E2 地震作用下内力计算

考虑到两桥墩为最不利构件, 所以反应谱分析主要以两桥墩为对象。采用纤维单元进行弹性反应谱分析。纤维单元是将梁单元截面分割为许多只有轴向变形的纤维的模型, 使用纤维模型时可利用纤维材料的应力 - 应变关系和截面应变的分布形状假定较为准确地截面的弯矩 - 曲率关系, 特别是可以考虑轴力引起的中和轴的变化。

纤维单元中混凝土材料采用 Kent&Park 模型, 钢筋材料采用 Menegotto - Pinto 模型。如图 2、图 3 所示。

E2 地震作用下顺桥向桥墩弯矩最大值发生在右墩墩底, 其值为 1.09625×10^6 kN·m。E2 地震作用

2.3 E1 地震作用下验算

E1 地震作用下控制截面配筋见表 2。

从表 2 中可以看出配筋满足要求。

下横桥向桥墩弯矩发生在墩底, 其值为 7.44775×10^5 kN·m。计算结果见图 4。

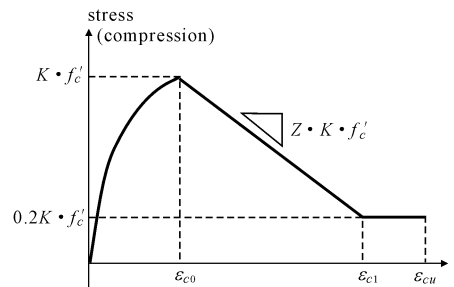


图 2 混凝土材料模型

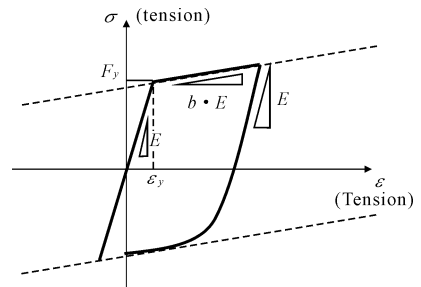


图 3 钢筋材料模型

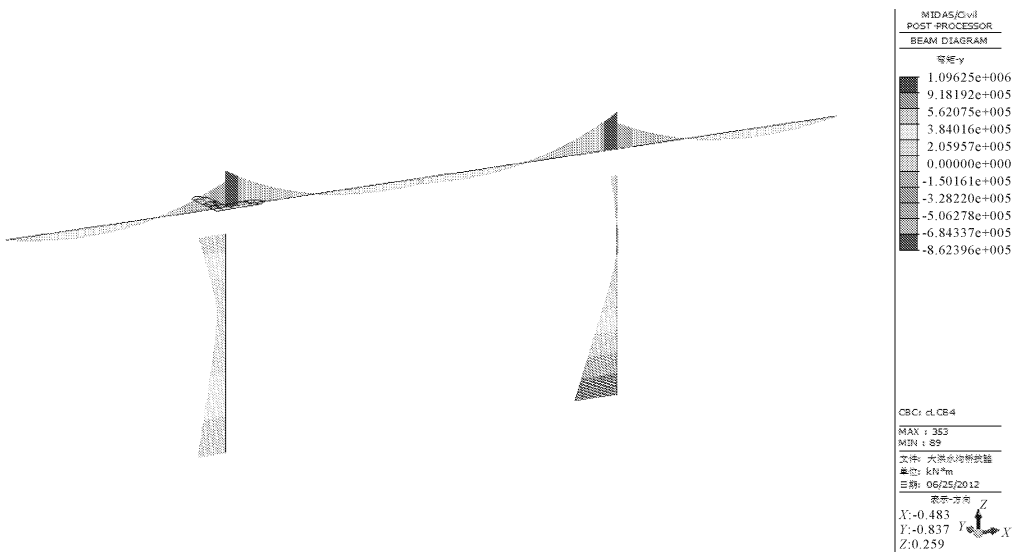


图 4 顺桥向内力响应(kN·m)

2.4.3 桥墩潜在塑性区截面抗弯能力验算

地震作用下连续刚构的潜在塑性区域均出现在墩底附近,验算墩底截面抗弯能力并与该截面的内力(弯矩)响应做对比,就可以判定该截面是否进入塑性状态。

左右墩底及墩顶的验算截面形式如图 5。根据其双向抗弯能力值,当截面弯矩响应值与能力接近时,结构在受到更大的地震作用是会产生塑性破坏,需要进行非线性时程分析,来判断结构的破坏程度是否处于限定的程度之内。

由表 3 以及图 6 可以看出,整个桥墩的抗弯能力大于中震下的弯矩响应,结构在中震作用下处于弹性状态。

2.4.4 E2 地震作用下弹性时程分析

弹性动力时程选用的分析类型为线性,分析方

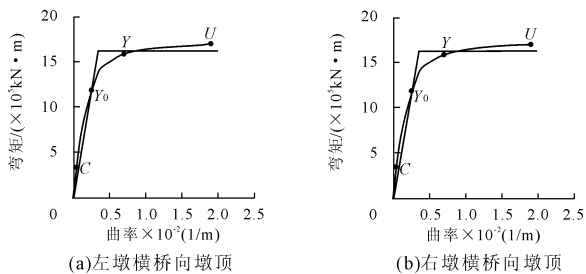
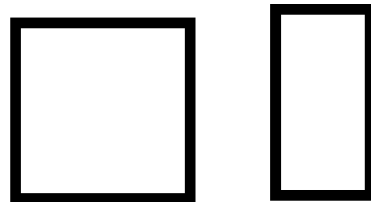


图 6 墩体截面弯矩~曲率图

法采用振型叠加法,时程类型选用瞬态。阻尼的计算方法采用质量和刚度因子法。

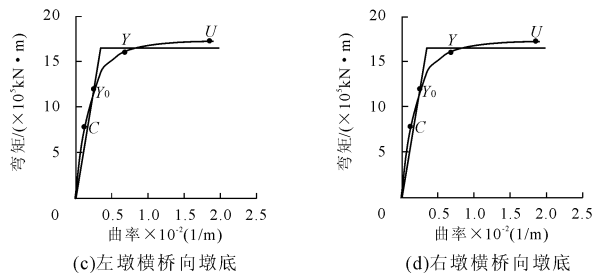
表 3 墩底截面状态判定表

方向	屈服弯矩 M_y /(kN·m)	极限弯矩 M_u /(kN·m)	响应弯矩 M /(kN·m)	结果判定
顺桥向	1.304387×10^6	1.834933×10^6	1.09625×10^6	弹性
横桥向	8.78897×10^5	1.289217×10^6	7.40134×10^5	弹性



(a)左、右墩墩底验算截面 (b)墩顶验算截面

图 5 墩体验算截面



地震波选择 El Centro Site, 270 Deg, 该地震波特征周期为 0.35 s,符合该桥工程要求。经过计算,该桥第一阶自振周期为 2.882 s,截取 El Centro 地震波前 30 s 计算,满足规范要求(计算时长大于第一阶自振周期结构的 10 倍)。同时对该地震波进行调幅处理,经过处理后,该地震波如图 7 所示。

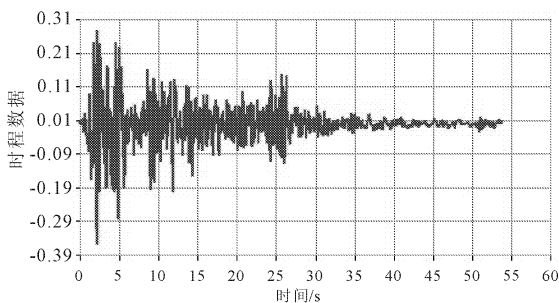


图 7 El Centro 地震波示意图

经过弹性时程分析,得到计算表明顺桥向激励时,结构的位移响应是最大的。最大位移响应发生在主梁左墩墩顶处,其值为 25.02 cm,符合设计规范。

经过弹性时程分析,得到右墩墩底的弯矩时程曲线,如图 8 所示。

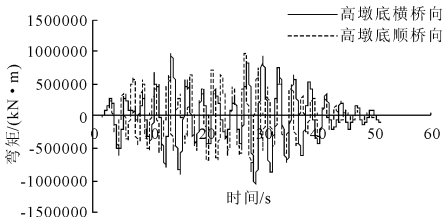


图 8 右墩底顺桥向(横桥向)弯矩时程

由上面所给的图中可以看出,虽然两墩一样,但存在行波效应,左右墩还是有些区别,另外最大弯矩激励相应是在右墩底横桥向,最大弯矩为 1.059×10^6 kN·m,其值小于弯矩-曲率线上的屈服弯矩值 1.304387×10^6 kN·m,因此结构仍处于弹性阶段。

2.4.5 E2 地震作用墩柱斜截面抗剪承载力验算

根据抗震规范,对于 A 类桥梁,地震作用下不需做墩柱斜截面抗剪承载力验算。

3 结 论

(1) 通过中震下的弹性反应谱分析以及桥墩截面抗弯能力验算,可见:整个桥墩在中震下处于弹性状态。
(下转第 91 页)

(2) 通过大震下的弹性反应谱分析、弹性时程分析以及桥墩截面抗弯能力验证表明:在大震顺桥向和横桥向地震激励下桥梁墩底及墩顶截面的弯矩响应均未超过相应截面的屈服弯矩,结构仍保持弹性,满足抗震设防标准的要求。

(3) 虽然连续刚构桥在中国建造数量较多,但是对于其动力特性的研究开展却不多,对高墩薄壁空心墩形式的连续刚构桥动力特性研究则是更少。由本文分析可知:薄壁空心高墩连续刚构桥有着较好的抗震性能,通常桥墩并没有进入弹塑性或塑性阶段,为此类桥梁的动力分析提供了新的判断思路,并对了解此类连续刚构桥的动力特性有较高的参考价值。

参考文献:

[1] 樊增彬.薄壁空心墩非线性地震反应分析[D].重庆:西南交通大学,2002.

[2] 陈海波,刘保东.大跨度高墩连续刚构桥空间地震响应分析[J].工程抗震与加固改造,2005,27(3):78-80.

[3] 黄小国.连续刚构桥水平地震反应分析[D].西安:长安大学,2006.

[4] 王维,李斌.不同桥墩形式对连续刚构桥抗震性能影响[J].公路工程,2007,32(5):101-104.

[5] 竹晓华.连续刚构桥地震反应分析[J].铁路工程学报,2008,(10):15-19.

[6] 周勇军,贺拴海,张岗,等.桥墩截面形式对弯连续刚构桥地震响应的影响[J].公路交通科技,2009,26(2):68-72.

[7] 徐贤昭,董继恩,王欣南.石佛沟特大桥梁抗震特性探讨[J].中外公路,2010,30(5):200-203.

[8] 李子春.桥墩形式对连续刚构桥动力特性的影响[J].中国公路学报,2011,24(2):70-76.

[9] 胡绘新,郑凯锋,杨平.山区公路桥梁桥墩抗震性能的弹塑性分析[J].公路交通科技(应用技术版),2011,(4):165-168.

[10] 王宝金.大跨度预应力混凝土连续刚构桥动力特性及P- Δ 效应分析[J].国防交通工程与技术,2011,(6):43-47.

[11] 白鹤滩水电站对外交通公路工程场地地震安全性评价报告[R].北京:中国地震灾害防御中心,2009.

[12] 重庆交通科研设计院.JTG/TB02-01-2008.公路桥梁抗震设计细则[S].北京:人民交通出版社,2008.