

墩高渐变的多联桥梁下部结构抗震配筋设计方法研究

徐岩州

(中国铁路设计集团有限公司, 天津市 300140)

摘要: 为研究上下部结构形式一致、墩高渐变的多联桥梁在地震作用下的内力响应特点及规律,从而优化结构的抗震设计,以唐山地区某座城市桥梁为例,通过建立的三维有限元模型对其进行抗震计算,重点归纳探讨了高墩和矮墩的优势和劣势。在此基础上,提出了“先定义临界墩高,再以此划分高墩和矮墩;在 E2 地震作用下允许高墩进入塑性、矮墩保持弹性”的设计思路,并按此思路对案例工程进行了计算和配筋设计。结果表明,所提出的设计思路具有较高实用性,可有效减少配筋量和计算工作量,兼顾结构的安全性和经济性,可为类似多联桥梁抗震设计提供参考。

关键词: 桥梁工程;抗震设计;有限元分析;Pushover;MIDAS Civil

中图分类号: U443.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0097-04

Research on Seismic Reinforcement Design Method for Substructures of Multi-span Bridges with Gradually Changing Pier Heights

XU Yanzhou

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300140, China)

Abstract: To study the internal force response characteristics and patterns of multi-span bridges with consistent superstructure and substructure forms and gradually changing pier heights under seismic action, the structural seismic design is optimized. Taking an urban bridge in Tangshan as an example, the seismic calculation is carried out through the established three-dimensional finite element model, and the advantages and disadvantages of high piers and low piers are mainly summarized and discussed. On this basis, the design concept of "first defining the critical pier height, and then classifying the high piers and low piers based on this, and allowing high piers to enter plasticity and low piers to maintain elasticity under the action of the E2 earthquake" is proposed. And based on this thought, the calculation and reinforcement design of the case project are carried out. The results demonstrate that the proposed design concept has the higher practicality, can effectively reduce the reinforcement quantities and computational workload, and take into account both the safety and economy of the structure, which can provide the reference for seismic design of similar multi-span bridges.

Keywords: bridge engineering; seismic design; finite element analysis; Pushover; MIDAS Civil

0 引言

地震的发生具有偶然性和强破坏性,严重威胁着人民的生命财产安全。目前,城市规模越来越大,人口越来越密集,城市道路对桥梁的依赖性也越来越高^[1]。一旦发生地震,将对城市造成不可估量的破坏。因此,桥梁的抗震设计显得尤为重要^[2]。对于墩高在一定范围内逐渐变化的多联桥梁,高度不

同的桥墩在地震作用下具有不同的优势和劣势。基于此,本文提出了一种抗震设计思路,以减小计算工作量和结构配筋,并以唐山地区一座城市桥梁作为案例,利用 MIDAS^[3] 软件进行了计算,以期为此类桥梁的抗震设计提供参考。

1 工程概况

该工程为唐山地区城市主干路上跨既有铁路匝道桥,上部结构跨径组合为 5×30 m+4×30 m+37 m+26.5 m+28.7 m+33 m+43 m+42 m+31 m+5×30 m+40 m+4×30 m;第 3 联和第 5 联为简支小箱梁(桥面连续),

收稿日期: 2025-02-14

作者简介: 徐岩州(1996—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

梁高 2.0 m;第4联为连续钢箱梁,其余均为简支变连续小箱梁,梁高 1.8 m。其中第4联不在本文研究范围内,后续不再介绍。桥面宽度为 9.13 m。梁高变化处的盖梁高度为 1.8 m,其余为 1.6 m。下部结构为桩柱式,桥墩采用双柱墩,直径 1.4 m,桩基直径 1.6 m,桩顶设置系梁。盖梁、墩身使用 C40 混凝土,桩基、地系梁使用 C35 混凝土,钢筋为 HRB400。联间墩和桥台处支座选用四氟滑板支座,其余均采用板式橡胶支座。桥梁典型断面见图 1。

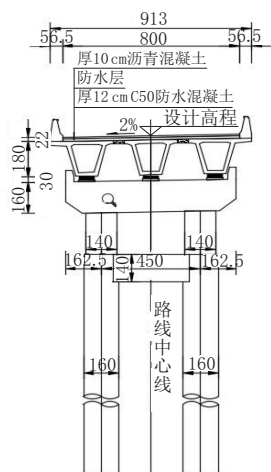


图1 桥梁典型断面图(单位:cm)

该工程上跨铁路,根据《公路铁路交叉路段技术要求》(JT/T 1311—2020),桥梁抗震设防等级分类应为乙类;场地类型为Ⅲ类,桥址区域根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)查得分区特征周期为 0.45 s,设防烈度为Ⅶ度(0.15g)。

该工程典型特征是各跨和各联上部结构形式一致,断面尺寸一致;下部结构形式和桩柱直径一致,墩高从 2.2 m 渐变至 10.8 m(见图 2)。一般来说,对于结构形式一致的多联桥梁来说,选取部分联数进行计算以保证全桥满足抗震需求即可,但是由于墩高不同的桥跨对地震的响应存在较大差距,因此造成了计算联数选取上的困难。

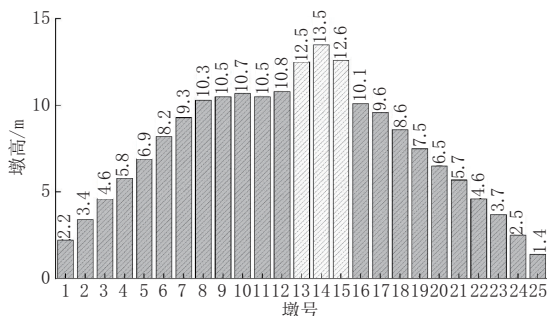


图2 各墩墩高变化图

2 抗震计算及配筋设计

2.1 确定设计地震作用

根据《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)(以下简称《城规》),本桥只考虑水平向地震作用,不考虑竖向地震作用。水平向地震作用以顺桥向和横桥向分别进行输入。根据《城规》中设计加速度反应谱的计算公式,结合本桥梁所处场地的各项参数,求得设计加速度反应谱,见图 3,其中平台段谱值 E1 为 0.21g, E2 为 0.69g。

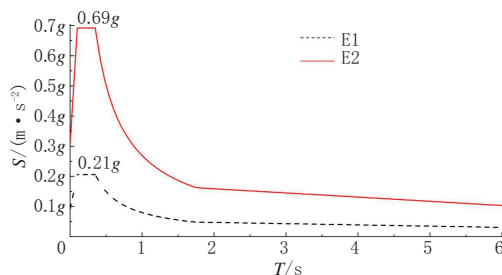


图3 设计加速度反应谱

2.2 桥墩配筋

桥墩配筋的计算视性能目标而定。E1地震作用下桥墩要求保持弹性,E2地震作用下允许桥墩进入塑性时,配筋根据E1地震作用下内力确定。E1、E2地震作用下均要求桥墩保持弹性时,配筋根据E2地震作用下内力确定。

2.3 盖梁和桩基配筋

根据《城规》,盖梁和桩基属于能力保护构件,其内力设计值的确定因E2地震作用下桥墩弹塑性状态的不同而有2种情况:

(1)桥墩未屈服。此时内力设计值可直接取全桥计算模型中E2地震作用下的内力计算结果。

(2)桥墩进入塑性。此时应根据具体构件,画出其分离体受力图,建立静力学模型,根据墩柱塑性铰区域截面超强弯矩,计算其对应的内力设计值。对于双柱墩,在横桥向需要通过Pushover方法^[46]迭代求出其超强弯矩,再求盖梁和桩基的内力。

上述2种方法求出的内力设计值差别较大,因此E2地震作用下桥墩的弹塑性状态对盖梁和桩基配筋有很大影响。

2.4 确定性能目标

随着墩高的变化,存在2个规律:

(1)墩高越大,地震作用下的内力越大,相同配筋下桥墩更容易进入塑性^[7]。

(2)对于E2地震作用下屈服的双柱墩,桥墩越

低, Pushover 求得的桥墩超强弯矩越大, 盖梁和桩基的内力越大, 配筋越高^[8]。

就该工程而言, 一般情况下, 最高的桥墩在 E2 地震作用下进入塑性, 最低的桥墩按规范规定为矮墩, E2 地震作用下不屈服, 按弹性方法设计; 对于中间的桥墩如 18~21 号墩等, E2 地震作用下的弹塑性状态不明确, 而 E2 地震作用下的状态又决定能力保护构件采取哪种方法求解内力设计值, 并导致内力差距较大。因此对于墩高在一定范围内逐渐变化的工程来说, 不同墩高性能目标的确定是计算前的重点。

另外, 在 E2 地震作用下屈服后的桥墩, 其主筋越多, 抗弯能力越强, 超强弯矩越大, 能力保护构件的内力设计值也就越大^[9]。

根据上述 3 个规律, 分别对高墩和矮墩(本文后续提到的高墩、矮墩均是墩高相对而言, 不是按照规范中的计算进行定义)在不同性能目标下的总体配筋量进行大致对比, 结果见表 1。

表 1 高、矮墩在不同性能目标下的总体配筋量

墩高	弯矩 (E2)	性能目标	桥墩配筋需求	能力保护构件配筋需求	总体配筋需求
高	大	保持弹性	大	很大	很大
	大	进入塑性	小	小	小
矮	小	保持弹性	小	小	小
	小	进入塑性	较小	很大	很大

由表 1 可见, 高墩在 E2 地震作用下允许进入塑性时, 总体配筋量低, 并且桥墩配筋越少, 总体配筋越少, 因此高墩的性能目标宜定为 E2 地震作用下允许进入塑性。矮墩在 E2 地震作用下保持弹性时, 总体配筋量低, 因此矮墩的性能目标宜定为 E2 地震作用下保持弹性。

2.5 确定临界墩高

对于桥墩属于高墩还是矮墩的判别方法为: 确定一个临界墩高 h_{cr} , 墩高 $h \geq h_{cr}$ 为高墩, $h \leq h_{cr}$ 为矮墩。

h_{cr} 不宜过大, 否则矮墩中最大墩高较大, 在 E2 地震作用下保持弹性将需要较多配筋。但 h_{cr} 也不宜太小, 否则高墩中最小墩高较小, 能力保护构件配筋较多。

结合该项目桥墩高度及其在各联中的分布, 取 20 号墩墩高 6.5 m 为 h_{cr} , 则第 1、6、7 联桥墩在 E2 地震作用下保持弹性, 直接根据 E2 地震作用下内力结果确定这几联桥墩、盖梁和桩基配筋。第 2、3、5 联桥墩在 E1 地震作用下保持弹性, 则根据 E1 地震作用

下的内力结果确定桥墩配筋; 在 E2 地震作用下允许进入塑性, 则根据 20 号墩的 Pushover 结果确定盖梁和桩基配筋。

2.6 选取计算联

全桥中计算部分的选取:

(1) 第 3 联。该联桥墩墩高最大, 上部跨度较大, 自重较大, E1 地震作用下的桥墩内力也较大, 用于确定延性墩的配筋。

(2) 20 号墩 Pushover 模型。塑性铰采用压弯组合型塑性铰, 即考虑轴力-弯矩相互作用的影响。根据 20 号墩 Pushover 结果, 确定延性墩盖梁和桩基配筋。

(3) 第 6、7 联。第 7 联墩高最小, 且第 6 联单跨 40 m, 自重较大, 因此对第 6、7 联同时建模计算, 根据 E2 地震作用下的地震反应来确定桥墩、盖梁和桩基配筋。

2.7 建立有限元模型

选用 MIDAS Civil 软件, 根据《城规》相关规定建模。桥梁上部和下部结构均以梁单元进行模拟, 板式橡胶支座以线弹簧单元进行模拟, 桩土相互作用以等代土弹簧模拟, 弹簧刚度根据 m 法^[10]计算确定。计算方法选用多振型反应谱法^[11], 振型以 CQC 法^[12]组合。分别求出桥梁在顺桥向和水平向地震下的效应, 根据 SRSS 法进行组合求得地震总效应, 并与恒载效应进行组合。选取计算联的三维有限元模型见图 4 至图 6。

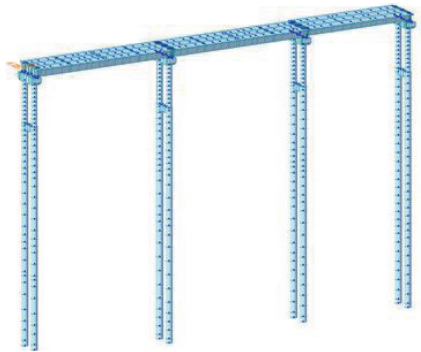


图 4 第 3 联模型(9~12 号墩)

2.8 高墩计算结果及配筋

(1) E1 地震作用下, 应满足结构在弹性范围内的性能目标。2 个计算模型中最不利内力组合出现在 10 号墩, 轴力为 4 308 kN, 弯矩为 3 895 kN·m。当桥墩主筋配置 31 根 $\phi 25$ 时, 通过弯矩曲率分析求得初始屈服弯矩为 4 338 kN·m, 满足性能目标要求。

(2) E2 地震作用下, 第 3 联各墩的最不利内力组

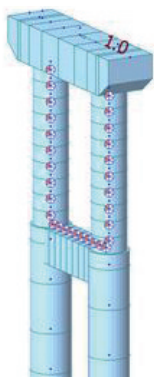


图5 20号墩Pushover模型

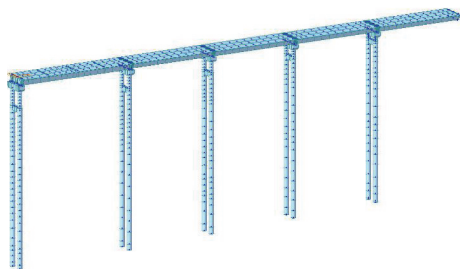


图6 第6、7联模型(21~25号墩)

合及按照 E1 地震作用确定的配筋下等效屈服弯矩如表 2 所示。由表 2 可见,10 号墩、11 号墩屈服。尽管对于 9~12 号墩之外的桥墩,E2 地震作用下的弹塑性状态不明确,但在求盖梁和桩基配筋时,假定 20 号墩屈服,按对其进行 Pushover 分析的结果进行配筋,其余桥墩则无论是否进入塑性,均满足需求。

表 2 高墩在 E2 地震作用下计算结果

墩号	E2 地震作用下最不利内力		等效屈服弯矩/ (kN·m)	状态
	轴力/kN	弯矩/(kN·m)		
9	3 773	5 068	5 376	弹性
10	4 252	12 545	5 645	屈服
11	3 515	11 019	5 378	屈服
12	2 575	4 682	4 930	弹性

(3)根据 Pushover 分析结果求得 20 号墩盖梁和桩基的内力设计值,结果见表 3。经过验算,表中配筋满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)(以下简称《预规》)相关要求。

表 3 20 号墩 Pushover 计算结果

构件	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	主筋
盖梁	5 132		10 263	36 根 28 mm
桩基		-3 095	6 659	62 根 32 mm

2.9 矮墩计算结果及配筋

在 E2 地震作用下,矮墩各构件最不利组合下的

内力计算结果见表 4。按照表中配筋,桥墩等效屈服弯矩为 6 037 kN·m,可在 E2 地震作用下保持弹性状态;盖梁和桩基验算均满足《预规》相关要求。

表 4 矮墩在 E2 地震作用下的计算结果

构件	剪力/kN	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	主筋
桥墩		3 676	5 540	37 根 25 mm
盖梁	5 132		5 828	23 根 28 mm
桩基		3 639	7 137	37 根 28 mm

3 结 语

对于上下部结构形式一致、墩高在一定范围内逐渐变化的多联桥梁,提出了一种桥墩、盖梁和桩基的抗震设计配筋方法,即:先确定一个临界墩高,并以此划分高墩和低墩;高墩以 E2 地震作用下允许进入塑性为性能目标,适当减小桥墩配筋,在满足 E1 地震要求的同时,满足 E2 地震作用下塑性桥墩的变形能力要求;矮墩以 E2 地震作用下保持弹性为性能目标,从而避免了进行 Pushover 分析,减小了盖梁和桩基的配筋量。

唐山某工程按照上述方法完成了抗震设计。结果表明,该设计思路简单可行,且在保证满足规范抗震要求的条件下,减小了配筋量和计算工作量。

参考文献:

[1] 宋波,陈彦然.城市灾害与抗震防灾对策[M].北京:中国水利水电出版社,2017.

[2] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].北京:人民交通出版社,2017.

[3] 姚德隆.基于 Midas / civil 的公路桥梁抗震安全性分析[D].衡阳:南华大学,2019.

[4] 张善稳,王修信.Pushover 加载模式对圆形双柱墩地震反应的影响[J].地震工程与工程振动,2015,35(3):94-99.

[5] 王文科,李雪红,徐秀丽,等.基于 Pushover 的双柱墩桥梁抗震延性能力分析[J].工程抗震与加固改造,2015,37(5):75-81

[6] 包龙生,桑中伟,叶学峰.基于 Pushover 分析方法的双柱桥墩抗震性能评估[J].沈阳工业大学学报,2021,43(2):228-234.

[7] 黄志涵,李名华,师少辉,等.双层三柱式门架墩高架桥抗震性能及合理约束体系研究[J].公路,2024,69(7):110-115.

[8] 徐瑾.公路桥梁双柱式墩横桥向抗震性能分析[D].兰州:兰州交通大学,2021.

[9] 徐佳.城市高架桥梁延性抗震设计方法研究[J].城市道桥与防洪,2024(7):245-248.

[10] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].

[11] 赵雄辉,王汉伟.高震区双柱墩设计[J].城市道桥与防洪,2018(11):85-87.

[12] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].