

不同地震工况下双柱式桥梁桩柱最优配筋率 分析研究

薄士威, 郭炎峰, 刘 强

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘 要: 地震损毁作为公路常规双柱式桥梁常见的重大病害之一, 受到越来越多学者的关注, 但基于工程实体探究桥梁墩柱、桩基满足抗震性能的最优配筋率的研究相对较少。针对甘肃省常见的4种地震工况, 通过有限元软件系统分析不同尺寸双柱式桥墩满足抗震需求的控制指标, 确定了关键模型和9种最不利安全系数, 从而进一步得到4种地震工况下桥梁墩柱、桩基的最优配筋率。所得结论可供工程师在实际工程中参考应用, 为更科学合理地确定桥梁墩柱、桩基的配筋提供支撑。

关键词: 地震工况; 双柱式桥梁; 抗震性能; 最优配筋率; 安全系数

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0115-06

Study on Optimal Reinforcement Ratio of Double-column Bridge Piles under Different Seismic Conditions

BO Shiwei, GUO Yanfeng, LIU Qiang

(Gansu Province Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: Seismic damage, as one of the common major diseases of highway conventional double-column bridges, has been increasingly concerned by many scholars, but based on the actual engineering, few studies have been conducted to explore the optimal reinforcement ratio of bridge piers and pile foundations to satisfy the anti-seismic performance. For four common seismic conditions in Gansu Province, the different sizes of double-column bridge piers are systematically analyzed through a finite element software to satisfy the control indexes of anti-seismic demand, and the key model and nine most unfavorable safety factors are identified so as to further obtain the optimal reinforcement ratio of the bridge piers and pile foundations under four types of seismic conditions. The conclusion can be used by the engineers for reference in actual projects, which provides the support for more scientific and reasonable determination of reinforcement for bridge piers and pile foundations.

Keywords: seismic conditions; double-column bridge; anti-seismic performance; optimal reinforcement ratio; safety factor

0 引 言

地震损毁作为公路常规双柱式桥梁最常见的重大病害之一, 越来越受到民众的普遍关注, 相关专业书籍和行业标准的陆续发布^[1-6]为工程师在实体工程应用方面提供了技术支撑和指导。同时, 许多学者也在桥梁墩柱抗震受力分析和性能评价方面做了相关研究, 石岩等^[7]系统总结了汶川大地震双柱墩

破坏特征和研究现状, 王东升等^[8]对典型钢筋混凝土圆形截面双柱式桥墩进行了延性抗震能力评价, 贾俊峰等^[9]对我国首座自复位摇摆双柱式桥梁桥墩的抗震性能及主要影响因素进行了研究等等。

虽然当前国内学者就公路双柱式桥梁抗震性能进行了大量研究, 但基于工程实体、在不同地震工况下、针对可满足抗震性能需求的双柱式桥梁墩桩最优配筋率问题所进行的研究工作还较少。本文针对甘肃省常见的不同地震分区, 系统性计算分析了各工况下各尺寸桥梁墩桩的最优配筋率, 最终形成了四种地震工况下最经济合理的配筋率参考值, 能够方便工程师在实际工程中直接取用, 且相较此前以经验为主的设计, 能为工程师提供更加科学合理

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 甘肃省交通运输厅科技项目(2020-05); 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司科技项目(SJY-2021-08)

作者简介: 薄士威(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事桥梁设计及科研工作。

抗震设计支撑。

1 分析思路与方法

1.1 分析思路

《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)^[5]第3.1节规定,跨径不超过150 m的高速公路及一级公路上的桥梁,抗震设防类别为B类,要求E1阶段结构总体反应在弹性范围、基本无损伤,可正常使用;E2阶段应保证不致倒塌或者产生严重结构损伤,经临时加固后可供维持应急交通使用,具体验算方法按规范中第6.1.2条常规桥梁抗震设计流程执行。本文重点关注常规双柱式桥梁墩柱、桩基的抗震性能和对应的最优配筋率,因此主要分析E1阶段的墩柱强度与桩基强度以及E2阶段的墩柱纵横向变形位移、抗剪和桩基强度等相关内容。

1.2 分析方法

目前国外的AASHTO^[10]、Caltrans^[11]、ATC-40^[12]、

FEMA-274^[13]规范及我国的抗震设计规范多采用反应谱或等效静力法,对特殊及重要的桥梁结构采用线性、非线性动态时程分析方法。本文研究对象以常规双柱式桥梁为主,结合规范要求,拟在E1阶段采用设计反应谱法进行分析,以弹性强度控制;在E2阶段采用Pushover弹塑性静力分析方法,以桥墩延性位移控制。

2 计算参数与模型

2.1 初始墩柱桩基尺寸及配筋率

本文分析对象为4车道高速公路,荷载等级为公路Ⅰ级,上部结构形式采用20、30、40 m装配式预应力混凝土连续小箱梁,下部结构采用圆柱式桥墩及桩基础。地震动峰值加速度为0.15g时,墩柱主筋初始配筋率为0.8%,桩基为1.0%;地震动峰值加速度为0.2g时,墩柱主筋初始配筋率为1.0%,桩基为1.2%。墩柱、桩基详细尺寸和初始配筋情况如表1所列。

表1 墩柱、桩基尺寸及初始配筋表

跨径/ m	桥墩高度/ m	墩柱直径/ cm	主筋直径/ cm	HRB400 主筋根数	桩基直径/ cm	主筋直径/ cm	HRB400 主筋根数
20	$H<10$	120	22(28)	24(20)	140	28	24(30)
	$10<H<20$	140	22(28)	34(26)	160	28	34(39)
	$20\leq H<30$	160	22(28)	42(34)	180	28	42(51)
30	$H<15$	140	22(28)	34(26)	160	28	34(39)
	$15\leq H<25$	160	22(28)	42(34)	180	28	42(51)
	$25\leq H<35$	180	22(28)	54(42)	200	28	54(63)
40	$H<15$	160	22(28)	42(34)	180	28	42(51)
	$15\leq H<25$	180	22(28)	54(42)	200	28	54(63)
	$25\leq H<35$	200	22(28)	66(50)	220	28	66(75)

注:表中括号外数据适用于地震动峰值加速度0.15g,括号内数据适用于地震动峰值加速度0.2g。

2.2 主要材料与分析模型

桥梁上部结构采用C50混凝土,下部结构采用C35混凝土,钢筋采用HRB400与HPB300,根据表1中的跨径和桥墩高度,通过有限元软件弹性梁单元分别建立4-20 m、4-30 m、4-40 m对应的共计9种模型,典型代表如图1至图4所示。

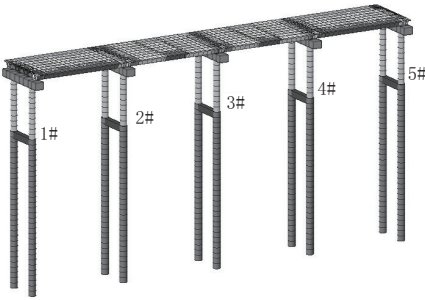


图1 4-20 m桥梁分析模型(墩高10 m)

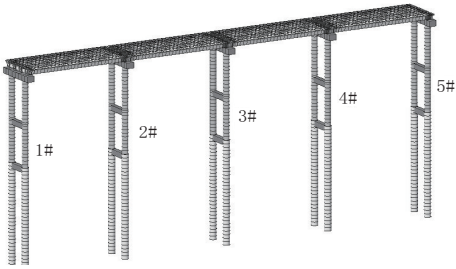


图2 4-30 m桥梁分析模型(墩高25 m)

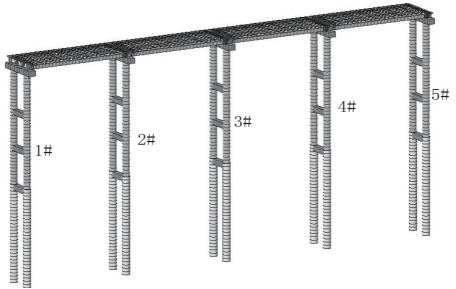


图3 4-40 m桥梁分析模型(墩高35 m)

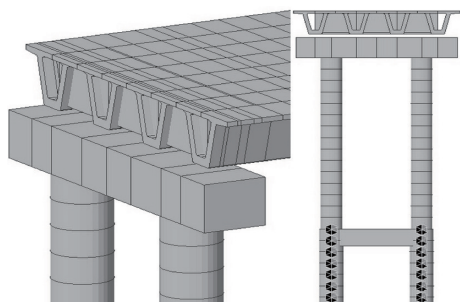


图4 计算模型横向视图

支座体系采用水平力分散型支座,其形式如图5所示。支座通过锚固螺栓固结在上、下部结构之间,顺桥向(X 向)、横桥向(Y 向)的抗剪水平刚度取值如表2所列,其中, Y 向刚度考虑了桥墩盖梁限位挡块的影响,以确保梁体不发生较大横向滑移。

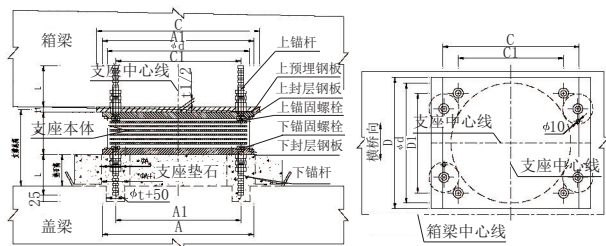


图5 水平力分散型橡胶支座示意图

2.3 计算分析工况及荷载

本文将地震工况根据不同地震动峰值加速度与场地类型划分为工况一至工况四,采用多振型反应谱法进行计算分析,相关参数如表3所示。

表3 地震工况相关参数表

工况名称	地震动峰值加速度 A	场地类型	阶段	T_g	C_i	C_s	C_d	S_{max}
工况一	0.15g	I ₁	E1	0.35	0.5	0.83	1.0	0.16
			E2	0.35	1.7	0.83	1.0	0.53
工况二	0.15g	II	E1	0.45	0.5	1.0	1.0	0.19
			E2	0.45	1.7	1.0	1.0	0.64
工况三	0.2g	I ₁	E1	0.35	0.5	0.85	1.0	0.21
			E2	0.35	1.7	0.85	1.0	0.72
工况四	0.2g	II	E1	0.45	0.5	1.0	1.0	0.20
			E2	0.45	1.7	1.0	1.0	0.85

计算荷载包括结构自重、横隔板自重、二期恒载以及顺桥向地震力(X 向)和横桥向地震力(Y 向),根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)第3.6.2条,荷载组合系数取1.0,按“恒载+地震”作用组合,荷载组合如表4所列。

3 关键控制模型确定

本文考虑了0.15g I类场地、0.15g II类场地、0.2g I类场地、0.2g II类场地4种地震工况,每种工况下需计算9种模型,每个模型需提取14个安全系数,总

表4 荷载组合设置一览表

组合名称	序号	荷载名称	描述
设置荷载	1	自重	D_1
	2	横隔板节点荷载	D_2
	3	二期恒载	D_3
	4	横桥向地震	G_x
	5	顺桥向地震	G_y
荷载组合	1	恒载	$D=D_1+D_2+D_3$
	2	恒载+地震 X	$G_1=D+G_x$
	3	恒载+地震 Y	$G_2=D+G_y$

计需计算36次,共提取分析504个安全系数,计算量巨大、重复性极高。然而对于实际工程,为便于施工,通常在每种工况下,对一种墩桩尺寸仅设置一种配筋方式。因此,通过探寻每种墩桩尺寸的最不利安全系数,即可控制该种墩桩的配筋,按此思路确定关键控制模型,能大大简化计算工作量、快速确定结果。

3.1 典型算例分析

本节以4~30 m模型(墩柱高度15 m,墩柱直径140 cm,桩基直径160 cm)作为典型算例,分析计算其在工况一(0.15g I类场地)的E1、E2阶段作用下各相关指标安全系数。

3.1.1 E1阶段墩柱承载力分析

桥梁模型沿 X 向,依次为1#~5#墩,其中1#、5#一般为过渡墩,不作为验算桥墩;2#、4#墩对称分布,计算结果相同,因此仅计算2#、3#墩即可。采用MIDAS软件的RC模块进行桥墩承载力分析,结果如表5、表6所列。

上述结果表明,采用初始配筋率,E1阶段地震作用下各桥墩的承载力均满足要求, X 向最小安全系数为2.8, Y 向最小安全系数为2.6,且有较多富余。

3.1.2 E2阶段墩柱位移变形分析

针对E2阶段,先对桥墩的承载力进行分析。经验算,部分截面不满足要求,表明模型已进入弹塑性阶段,需对桥墩的位移变形进行分析。

(1) X 向位移变形分析

考虑桥墩有效截面抗弯刚度的折减后,桥墩的位移反应结果如图6所示,可见最大墩顶位移位于2#墩顶,相对位移为10.4 cm。

根据截面初始配筋,采用材料强度标准值进行截面特性分析,由软件“弯矩-曲率($M-\varphi$)曲线分析”模块得出结果如图7所示,可见最大等效屈服弯矩位于2#墩底,为4 196.6 kN·m。

依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020)第7.4.3条公式计算,桥墩 X 向位移分析结果如

表7所列,结果满足规范要求,最小安全系数为3.0。

表5 E1阶段X向桥墩控制截面承载能力分析结果

墩号	控制截面	组合名称	类型	承载需求/ kN	承载能力/ kN	承载需求/ (kN·m)	承载能力/ (kN·m)	安全系数	验算
2#墩	墩底	$D+G_X$	轴心- $F_{x\min}$	4 845.4	19 607.9	—	—	4	通过
		$D+G_X$	偏心- $F_{x\min}(M_y)$	4 845.4	13 600.5	—	—	2.8	通过
		$D+G_X$	偏心- $M_{y\max}$	—	—	1 093.9	3 062.9	2.8	通过
		$D+G_X$	偏心- $M_{y\min}$	—	—	1 093.9	3 062.9	2.8	通过
3#墩	墩底	$D+G_X$	轴心- $F_{x\min}$	4 267.2	19 607.9	—	—	4.6	通过
		$D+G_X$	偏心- $F_{x\min}(M_y)$	4 267.2	12 093.6	—	—	2.8	通过
		$D+G_X$	偏心- $M_{y\max}$	—	—	1 081.1	3 027.1	2.8	通过
		$D+G_X$	偏心- $M_{y\min}$	—	—	1 081.1	3 027.1	2.8	通过

表6 E1阶段Y向桥墩控制截面承载能力分析结果

墩号	控制截面	组合名称	类型	承载需求/ kN	承载能力/ kN	承载需求/ (kN·m)	承载能力/ (kN·m)	安全系数	验算
2#墩	墩顶	$D+G_Y$	轴心- $F_{x\min}$	4 706.5	13 837.1	—	—	2.9	通过
		$D+G_Y$	偏心- $F_{x\min}(M_y)$	4 706.5	18 449.5	—	—	3.9	通过
		$D+G_Y$	偏心- $M_{y\max}$	—	—	1 120.1	5 410.1	4.8	通过
		$D+G_Y$	偏心- $M_{y\min}$	—	—	1 120.1	4 390.8	3.9	通过
	墩底	$D+G_Y$	轴心- $F_{x\min}$	4 148.6	13 648.9	—	—	3.3	通过
		$D+G_Y$	偏心- $F_{x\min}(M_y)$	4 148.6	18 585.7	—	—	4.5	通过
		$D+G_Y$	偏心- $M_{y\max}$	—	—	1 178.3	6 928.4	5.9	通过
		$D+G_Y$	偏心- $M_{y\min}$	—	—	1 178.3	5 278.8	4.5	通过
3#墩	墩顶	$D+G_Y$	轴心- $F_{x\min}$	5 307.7	13 746.9	—	—	2.6	通过
		$D+G_Y$	偏心- $F_{x\min}(M_y)$	5 307.7	18 577.0	—	—	3.5	通过
		$D+G_Y$	偏心- $M_{y\max}$	—	—	1 167.3	4 476.6	3.8	通过
		$D+G_Y$	偏心- $M_{y\min}$	—	—	1 167.3	3 793.7	3.3	通过
	墩底	$D+G_Y$	轴心- $F_{x\min}$	4 749.9	13 632.2	—	—	2.9	通过
		$D+G_Y$	偏心- $F_{x\min}(M_y)$	4 749.9	18 619.6	—	—	3.9	通过
		$D+G_Y$	偏心- $M_{y\max}$	—	—	1 220.6	5 553.7	4.6	通过
		$D+G_Y$	偏心- $M_{y\min}$	—	—	1 220.6	4 443.0	3.6	通过

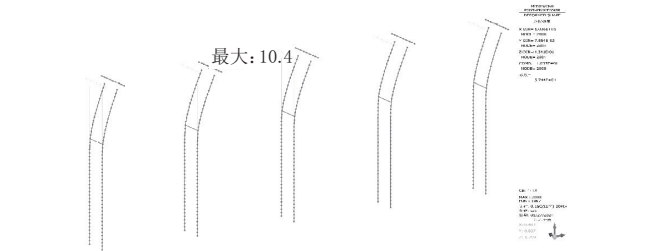


图6 E2阶段桥墩X向位移反应(单位:cm)

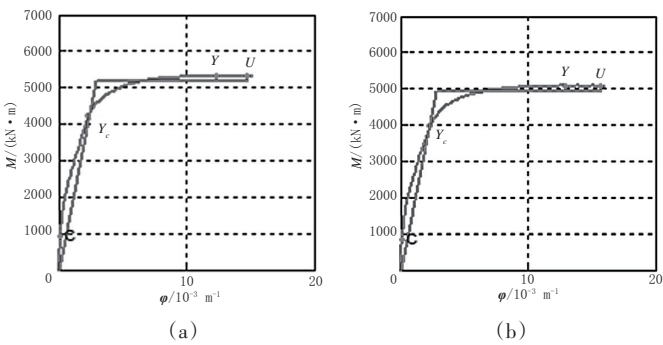


图7 2#、3#墩底截面M-φ曲线

(2)Y向位移变形分析

Y向截面特性采用Pushover分析方法,经过2次迭代,控制误差小于10%,可得出Y向桥墩截面抗震特性值如表8所示,此时施加于2#、3#墩顶盖梁处的水平力为1 743.9、1 662.5 kN,推倒力采用线性水平力施加于盖梁几何中心处,经推倒分析,2#墩计算值 Δ_d 为4.9 cm,允许值 Δ_u 为8.6 cm,安全系数为1.8;3#墩计算值 Δ_d 为5.2 cm,允许值 Δ_u 为8.5 cm,安全系数为1.6。说明E2阶段地震作用下各桥墩位移变形满足要求。

3.1.3 E2阶段墩柱塑性铰抗剪能力分析

前文已采用Pushover分析获得了桥墩极限推倒状态下的受力情况,再根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)第7.3.4条的公式验算抗剪能力,验算结果如表9所列。

由上表可知,桥墩塑性铰的抗剪能力满足要求,

表7 桥墩X向位移分析结果

墩号	ϕ_y/cm^{-1}	ϕ_u/cm^{-1}	L_p/cm	H/cm	θ_u	Δ_u/cm	Δ_d/cm	验算	安全系数
2#墩	2.90×10^{-5}	1.48×10^{-4}	93.3	1 500	5.56×10^{-3}	29.82	9.90	通过	3.0
3#墩	2.88×10^{-5}	1.58×10^{-4}	93.3	1 500	6.01×10^{-3}	30.31	9.90	通过	3.1

表8 Y向桥墩截面抗震特性值

墩号	关键截面	受压轴力 P/kN	初始屈服弯矩 $M_{y0}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	初始屈服曲率 $\varphi_{y0}/(1\cdot\text{m}^{-1})$	等效屈服弯矩 $M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	等效屈服曲率 $\varphi_y/(1\cdot\text{m}^{-1})$	极限弯矩 $M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	极限曲率 $\varphi_u/(1\cdot\text{m}^{-1})$
2#左	墩顶	6 393.8	4 788.5	0.002 5	5 779.4	0.003 0	5 947.9	0.013 1
	墩底	6 994.2	5 014.1	0.002 5	5 985.3	0.003 0	6 171.5	0.011 9
2#右	墩顶	2 093.6	3 072.5	0.002 1	4 019.1	0.002 8	4 124.4	0.020 7
	墩底	2 694.0	3 326.1	0.002 2	4 285.0	0.002 8	4 401.3	0.018 9
3#左	墩顶	5 715.5	4 544.6	0.002 4	5 526.9	0.002 9	5 684.6	0.013 8
	墩底	6 315.9	4 759.3	0.002 5	5 749.4	0.003 0	5 917.4	0.013 1
3#右	墩顶	1 617.9	2 862.4	0.002 1	3 798.0	0.002 8	3 899.0	0.022 1
	墩底	2 218.3	3 122.7	0.002 2	4 073.8	0.002 8	4 180.8	0.020 2

表9 桥墩Y向塑性铰区斜截面抗剪强度验算结果

墩号	截面	桥墩剪力设计值 V_{c0}/kN	桥墩抗剪能力 $\varphi(V_c+V_s)$	验算结果	安全系数
2#	左墩顶	932.8	1 933.0	通过	2.1
	左墩底	932.8	1 933.0	通过	2.1
	右墩顶	662.3	1 798.6	通过	2.7
	右墩底	662.3	1 857.7	通过	2.8
3#	左墩顶	891.4	1 933.0	通过	2.2
	左墩底	891.4	1 933.0	通过	2.2
	右墩顶	624.5	1 790.2	通过	2.9
	右墩底	624.5	1 659.1	通过	2.7

最小安全系数为2.1。

3.1.4 E2阶段桩基承载能力分析

在地震过程中,桩基作为能力保护设计构件,不允许发生塑性破坏,利用MIDAS GSD软件进行桩基截面分析,结果如图8、图9所示,图中小圆点位置为设计轴力、弯矩组合值,大圆点位置为轴力、弯矩组合下的承载能力值。

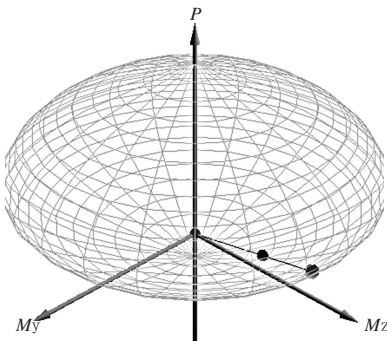


图8 2#墩桩基关键截面X向能力曲线

经分析,采用初始配筋率,桥墩桩基承载力均满足要求,X向2#桥墩安全系数最小,为1.7。

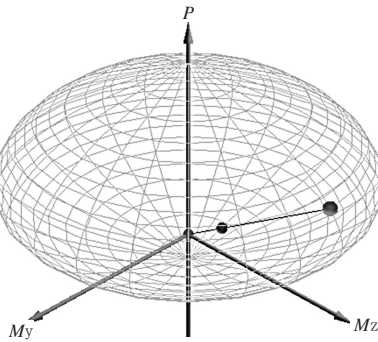


图9 2#墩桩基关键截面Y向能力曲线

综上,经对典型4~30 m模型进行分析,墩高15 m,墩桩直径140 cm、桩基直径160 cm,采用初设配筋率时,在E1、E2阶段作用下各相关指标安全系数均大于1,结构满足抗震要求。

3.2 关键控制模型选取

按3.1节的分析方法,对工况一对应的9种模型一一重复计算,并按照同尺寸墩柱分类,取每种类型中最不利安全系数作为控制值,最终可得关键控制模型及控制分析内容,如表10所列。

表10 关键控制模型及控制分析内容

桥墩直径/ m	关键控制模型	桥墩控制 分析内容	桩基控制 分析内容
1.2	4~20 m连续梁, 墩高10 m	E2阶段Y向地震	X向桩基强度
1.4	4~30 m连续梁, 墩高15 m	E2阶段Y向地震	X向桩基强度
1.6	4~30 m连续梁, 墩高25 m	—	X向桩基强度
1.8	4~30 m连续梁, 墩高35 m	E1阶段X向地震	X向桩基强度
2.0	4~40 m连续梁, 墩高35 m	E1阶段X向地震	X向桩基强度

从上表可知,运用本文推荐分析方法,每类工况下仅需计算各尺寸墩柱对应的1种模型的2个控制安全系数,总计9个安全系数,即可确定配筋率是否科学合理,大大简化了分析过程、提高了效率。

4 不同地震工况最优配筋率选取

对四类工况下各控制安全系数进行计算,若原

始配筋率满足要求,则继续计算配筋率减少15%、20%的情况下,结构是否可满足要求,从而寻找最经济的配筋率;若原始配筋率不满足要求,则继续计算配筋率增加20%、30%的情况下,结构是否可满足要求,寻找最经济安全的配筋率。计算结果如表11至表14所列。

表 11 工况一(0.15g I类场地)墩桩配筋率优化分析表

桥墩直径/m	原始配筋率		最不利安全系数		配筋率减少15%		最不利安全系数		配筋率减少20%		最不利安全系数	
	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基
1.2	0.81	0.96	1.6	1.4	0.67	0.80	1.5	1.3	0.64	0.76	1.4	1.2
1.4	0.84	1.04	1.6	1.3	0.69	0.86	1.5	1.2	0.64	0.80	1.4	1.1
1.6	0.79	1.02	—	1.2	0.68	0.87	—	1.1	0.64	0.82	—	1.0
1.8	0.81	1.06	1.5	1.2	0.69	0.90	1.4	1.1	0.66	0.86	1.3	1.0
2.0	0.80	1.07	1.6	1.3	0.68	0.91	1.5	1.2	0.63	0.84	1.4	1.1

表 12 工况二(0.15g II类场地)墩桩配筋率优化分析表

桥墩直径/m	原始配筋率		最不利安全系数		配筋率增加20%		最不利安全系数		配筋率增加30%		最不利安全系数	
	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基
1.2	0.81	0.96	0.98	1.4	0.94	1.12	1.0	1.6	1.08	1.28	1.1	1.7
1.4	0.84	1.04	0.99	1.3	0.99	1.23	1.1	1.5	1.09	1.35	1.2	1.6
1.6	0.79	1.02	—	1.2	0.95	1.21	—	1.4	1.02	1.31	—	1.5
1.8	0.81	1.06	0.98	1.2	0.96	1.25	1.0	1.4	1.05	1.37	1.1	1.5
2.0	0.80	1.07	1.10	1.2	0.94	1.26	1.1	1.4	1.04	1.39	1.3	1.5

表 13 工况三(0.2g I类场地)墩桩配筋率优化分析表

桥墩直径/m	原始配筋率		最不利安全系数		配筋率减少10%		最不利安全系数		配筋率减少20%		最不利安全系数	
	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基
1.2	1.09	1.20	1.4	1.3	0.87	1.12	1.2	1.1	0.87	0.96	1.0	0.9
1.4	1.04	1.19	1.3	1.2	0.88	1.10	1.1	1.0	0.83	0.95	0.9	0.8
1.6	1.04	1.23	—	1.1	0.92	1.11	—	—	0.83	0.98	—	0.8
1.8	1.02	1.23	1.2	1.2	0.92	1.10	1.0	1.0	0.82	0.98	0.8	0.8
2.0	0.98	1.21	1.4	1.3	0.90	1.10	1.2	1.1	0.78	0.97	1.0	0.9

表 14 工况四(0.2g II类场地)墩桩配筋率优化分析表

桥墩直径/m	原始配筋率		最不利安全系数		配筋率增加20%		最不利安全系数		配筋率增加30%		最不利安全系数	
	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基	桥墩	桩基
1.2	1.09	1.20	0.9	1.3	1.31	1.44	1.0	1.4	1.42	1.56	1.1	1.5
1.4	1.04	1.19	0.9	1.2	1.24	1.44	1.0	1.3	1.36	1.56	1.1	1.4
1.6	1.04	1.23	—	1.1	1.26	1.48	—	1.2	1.35	1.60	—	1.3
1.8	1.02	1.23	0.9	1.2	1.23	1.49	1.0	1.2	1.33	1.61	1.1	1.3
2.0	0.98	1.21	0.9	1.3	1.18	1.43	1.0	1.4	1.27	1.52	1.1	1.5

5 结 语

本文经大量计算分析,对不同地震工况下双柱式桥墩的最优配筋率进行了系统梳理,得出如下结论:

(1)在各工况下,针对不同墩柱尺寸,仅需计算关键控制模型的9种最不利安全系数,即可确定该工况桥墩配筋率是否科学合理,既能简化分析过程,

- 又提高了研究效率;
- (2)对工况一(0.15g I类场地),配筋率可优化调整为墩柱0.7%,桩基0.9%;
- (3)对工况二(0.15g II类场地),配筋率需提升为墩柱1.0%,桩基1.0%;
- (4)对工况三(0.2g I类场地),配筋率可优化调整为墩柱0.9%,桩基1.1%;
- (5)对工况四(0.2g II类场地),配筋率需提升为