

不同墩柱形式的城市高架桥抗震性能研究

孟 洋

(中铁发展投资有限公司, 山东 青岛 266000)

摘 要: 研究不同墩柱形式对城市高架桥抗震性能的影响,选择合适的城市高架桥墩柱形式,依托 3 跨连续城市高架桥,采用 SAP2000 建立有限元模型,通过非线性时程分析结果对 4 种墩柱形式下城市高架桥的抗震性能进行分析。研究表明:城市高架桥双柱式桥墩设置盖梁和系梁会增大桥墩的横向刚度,使结构横向振动周期变小;桥墩设置盖梁和系梁会增大纵向地震作用下桥墩的受力;桥墩设置盖梁和系梁可以改变横向地震作用下桥墩的受力分布,使墩身弯矩变小,但会使剪力增大;盖梁和系梁的设置对摩擦摆支座和墩梁相对位移影响较小。研究成果可为同类型桥梁抗震设计提供参考。

关键词: 城市高架桥;抗震性能;墩柱形式;摩擦摆支座;非线性时程分析

中图分类号: U441+.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)12-0075-06

0 引 言

随着社会的快速发展,对城市交通要求越来越高,高架桥具有显著的空间属性,可以起到很好的疏导城市交通的作用。目前我国城市高架桥下部结构常用的墩柱类型主要为盖梁双柱墩,系梁双柱墩,系梁花瓶墩,无系梁双柱墩等几种类型。我国属于地震多发国家,城市高架桥在地震中发生破坏甚至倒塌,将会对我国城市震后救灾和重建造成重要影响,城市高架桥的抗震设计具有重要意义。

近年来,专家学者对城市高架桥的抗震性能进行了相应的研究,取得了较丰富的成果^[1-3]。对不同墩柱形式和不同抗震体系下的桥梁抗震性能也进行了相应的研究,朱勇毅等^[4]采用延性抗震设计方法对无系梁双柱墩、系梁双柱墩及盖梁双柱墩连续桥梁进行分析,结果表明横系梁的增加有利于墩柱的抗弯,但不利于固定支座、墩柱抗剪,以及基础的抗震。管仲国等^[5]以框架墩和独柱墩桥梁为研究对象,从抗震性能和经济性方面比较分析延性抗震体系和减隔震体系下的差异。沈星等^[6]基于 Pushover 方法对单柱墩、盖梁双柱墩和柔性横系梁双柱墩模型的抗震行为进行了分析,说明了横系梁对双柱式桥墩抗震的影响。目前关于减隔震体系下多种不同墩柱形式的城市高架桥抗震性能比较研究还较少。

现选用盖梁双柱墩,系梁双柱墩,系梁花瓶墩,

无系梁双柱墩 4 种墩柱形式的城市高架梁桥为研究对象,采用 SAP2000 建立有限元模型,分析减隔震体系下 4 种墩柱形式对城市高架梁桥的抗震性能的影响,为不同场地类型确定合适的墩柱形式提供依据。

1 摩擦摆支座工作原理

现研究城市高架桥采用摩擦摆支座进行设计。摩擦摆支座在桥梁建设中已经得到较多应用^[7-8],采用摩擦摆支座可以延长桥梁结构周期,减小地震下结构的响应,同时还可以耗散地震能量^[9]。摩擦摆支座可以通过球形滑动表面的运动使桥梁上部结构发生单摆运动,通过选择合适的滑动表面曲率半径来调节结构的周期和刚度,阻尼则由动摩擦系数来控制。根据摩擦摆支座的工作原理,荷载-位移滞回曲线^[10]如图 1 所示。

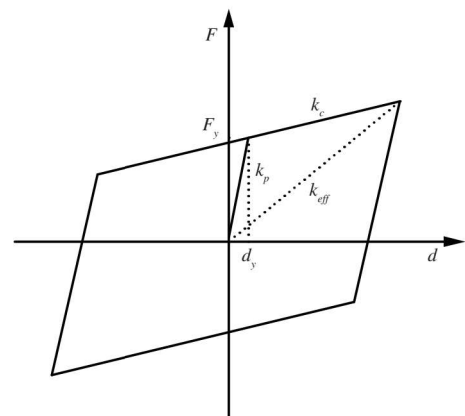


图 1 摩擦摆支座荷载-位移滞回曲线图

$$K_p = \frac{F_y}{d_y} = \frac{\mu W}{d_y}$$

收稿日期: 2022-12-26

作者简介: 孟洋(1989—),男,工程硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

$$K_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D} \right) W$$

$$K_c = \frac{W}{R}$$

式中: K_p 为支座初始刚度; K_{eff} 为等效刚度; K_c 为屈服后刚度; F_y 为屈服力; d_y 为屈服位移; μ 为动摩擦系数, 取 0.05; W 为上部结构荷载; R 为曲率半径; D 为支座位移量。

2 全桥有限元模型

2.1 工程概况

现以一典型城市高架桥连续梁桥为研究对象, 跨径布置为 (35+55+35)m, 主梁采用单箱双室变截面箱梁, 桥面宽度为 12.75 m, 桥墩采用带有系梁的花瓶墩形式, 桥墩基础采用桩基础。主梁采用 C50 混凝土, 桥墩采用 C40 混凝土和 HRB400 钢筋。桥梁布置和横截面形式见图 2 所示。支座全部采用摩擦摆支座, 支座布置形式见图 3 所示。桥址区地震动峰值加速度值为 $0.2g$, 特征周期为 0.35 s。

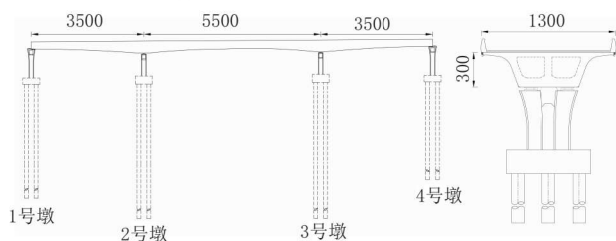


图2 依托工程总体布置图(单位:cm)



图3 支座布置示意图

2.2 有限元模型

现根据依托工程相关设计资料采用有限元分析软件 SAP2000 建立城市高架连续梁桥模型。桥面荷载通过施加在主梁上的线荷载模拟, 梁体和墩柱采用空间梁单元模拟, 对构件单元进行合理的划分, 准确定义支座的受力变形行为, 摩擦摆支座采用 Plastic-Wen 模型模拟^[11], 采用“m”法考虑桩土的相互作用, 每间隔 1 m 为一个节点。

现采用 4 种墩柱形式进行数值模型计算分析, 具体形式如下: (1) 盖梁双柱墩, (2) 系梁双柱墩, (3) 花瓶形双柱墩, (4) 无系梁双柱墩。分别记为形式 1、形式 2、形式 3 和形式 4, 它们对应的桥梁整体模型分别为模型 1、模型 2、模型 3 和模型 4。4 种桥墩形

式的构造图如图 4 所示。有限元模型考虑相邻联的影响, 有限元模型见图 5 所示。

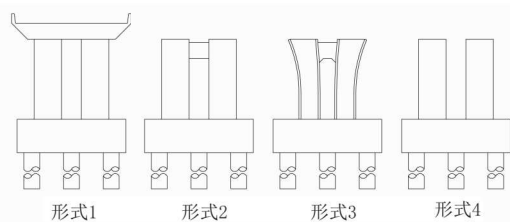


图4 桥墩形式构造图

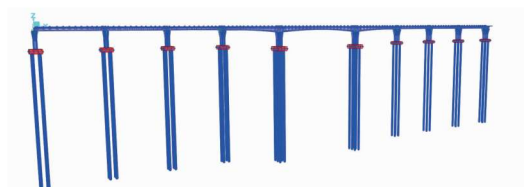


图5 有限元模型

2.3 地震动输入

依托工程采用减隔震体系进行抗震设计, 采用两阶段抗震设防水准进行计算。现主要对 E2 地震作用下的响应进行分析, 比较罕遇地震作用下不同墩柱形式的城市高架桥的抗震性能情况。

根据《城市桥梁抗震设计规范》^[12]确定反应谱曲线, 工程场地阻尼比为 0.05 的水平设计加速度反应谱由下式确定:

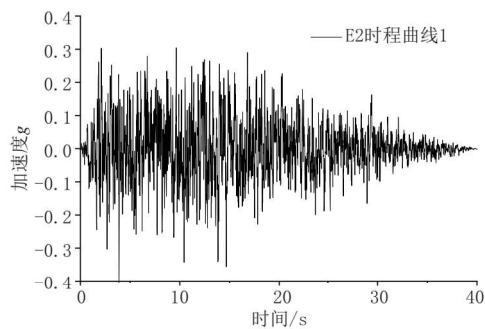
$$S = \begin{cases} 0.45 S_{\text{max}} & T=0 \text{ s} \\ \eta_2 S_{\text{max}} & 0.1 \text{ s} < T \leq T_g \\ \eta_2 S_{\text{max}} \left(\frac{T_g}{T} \right)^\gamma & T_g < T \leq 5T_g \\ \eta_2 0.2^\gamma - \eta_1 (T - 5T_g) S_{\text{max}} & 5T_g < T \leq 6 \text{ s} \end{cases}$$

式中: S_{max} 为水平设计加速度反应谱最大值; T_g 为特征周期, s; T 为结构自振周期, s; γ 为特征周期至 5 倍特征周期区段曲线衰减指数。

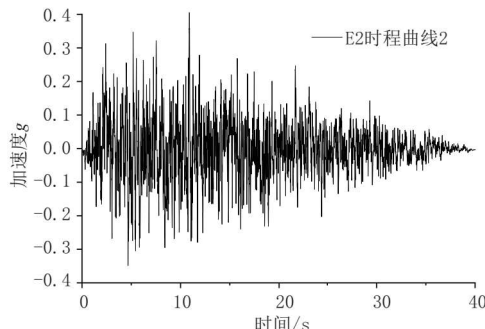
通过求得反应谱转化生成 3 条 E2 人工合成地震动时程[d3]进行非线性时程分析, 地震动时程曲线见图 6 所示。E2 时程曲线对应的反应谱曲线和设计反应谱曲线对比情况见图 7 所示, 从图中可以看出曲线吻合度较高。表 1 为 3 条时程曲线的相关系数一览表, 由表 1 可知所选地震波的相关系数均小于 0.1。选取的 E2 地震时程曲线是合适的。

3 模型计算分析

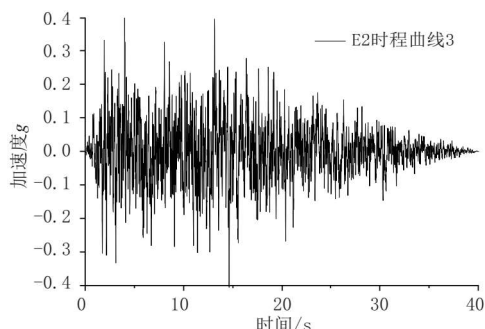
现通过桥梁结构动力特性分析和动力时程分析进行重点描述不同模型地震作用下的响应情况和抗震性能。动力时程分析主要采用非线性时程分析, 输入方式为纵向 + 竖向和横向 + 竖向。



(a)E2 时程曲线 1



(b)E2 时程曲线 2



(c)E2 时程曲线 3

图 6 E2 地震动时程曲线图

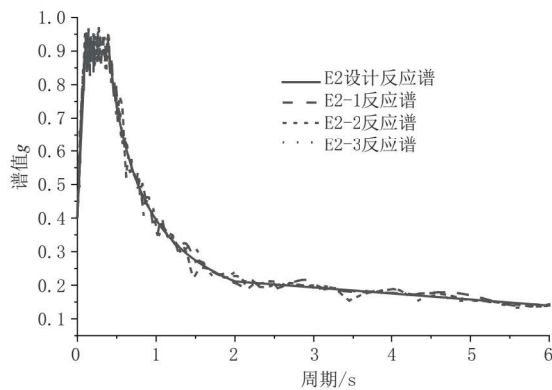


图 7 E2 对应反应谱与设计反应谱曲线图

表 1 3 条时程曲线相关系数一览表

名称	时程 1	时程 2	时程 3
时程 1	1	0.047	0.066
时程 2	0.047	1	0.049
时程 3	0.066	0.049	1

3.1 动力特性分析

动力特性是结构的固有特性,与结构质量、刚度和材料相关。通过对不同计算模型的动力特性分析,选取每个计算模型前 3 阶的周期和振型如表 2 所列。

表 2 模型动力特性一览表

阶数	周期 /s				振型
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	
1	1.402	1.394	1.389	1.392	主梁纵飘
2	0.869	0.872	0.860	1.063	主梁横飘
3	0.755	0.778	0.733	1.038	主梁反对称侧弯

从表 2 可以得到,4 个计算模型的前 3 阶振型是相同的,但振动周期会有所区别。4 个计算模型的首阶振型为主梁纵飘,自振周期是比较接近的,差距在 1.2%以内,而发生主梁横飘的第二阶振型周期差距较大,模型 1、模型 2、模型 3 的周期分别为模型 4 的 81.7%、82.0%和 80.9%。由此可见盖梁和系梁增加了横向刚度使横向振动周期变小,对于纵向振动影响较小。同时从模型 1、模型 2、模型 3 的动力特性分析可知盖梁和系梁对桥梁振动影响不大。

3.2 模型纵向动力时程分析

纵桥向 E2 地震作用下摩擦摆支座纵向的剪力螺栓均会剪断,使支座发生滑移,城市高架桥梁的墩底剪力、墩底弯矩和桩基础弯矩值列入表 3 中。从表中可以看出纵向地震作用下 4 种模型下的受力响应值边跨的 1 号墩和 4 号墩的差距较大,无系梁双柱墩模型的弯矩响应值分别为盖梁双柱墩模型、系梁双柱墩模型以及花瓶形双柱墩模型的 76.76%、92.86%以及 81.66%。墩底剪力、桩基弯矩响应值和墩底弯矩响应值的情况类似,这里不再赘述。分析原因主要是因为盖梁和系梁的增加会使桥墩承受的重力增加,在地震作用上传到下部结构的惯性力增加,使剪力和弯矩响应增大。

根据《城市桥梁抗震设计规范》规定,考虑地震轴力和恒载轴力结合的 4 种模型墩底弯矩和桩基弯矩能力需求比验算结果如图 8 所示。从图中可以看出,能力需求比都在 2 以上,说明 4 种模型满足抗震要求。从图中看出单柱墩的能力需求比最大,符合上述描述的单柱墩响应值最小的计算结果。

在进行抗震分析时,除了要进行受力的分析,还要进行位移响应值的分析,4 种模型的墩梁相对位移的时程曲线如图 9 所示。

表3 纵桥向内力响应值一览表

墩号	模型	墩底剪力 / kN	墩底弯矩 / (kN·m)	桩基弯矩 / (kN·m)
1	模型1	660.9	4 579.4	1 107.3
	模型2	549.4	3 785.5	1 059.4
	模型3	642.3	4 304.5	1 070.8
	模型4	489.4	3 515.4	943.3
2	模型1	989.5	7 825.5	1 129.5
	模型2	896.8	6 851.4	1 089.4
	模型3	915.3	6 853.1	1 080.1
	模型4	896.5	6 687.9	1 061.6
3	模型1	970.8	7 607.4	1 104.6
	模型2	914.3	6 935.5	1 101.4
	模型3	921.8	6 988.6	1 081.9
	模型4	899.3	6 701.5	1 043.2
4	模型1	636.5	4 392.0	1 221.9
	模型2	530.1	3 809.7	1 025.3
	模型3	626.4	4 157.3	1 191.7
	模型4	464.4	3 467.3	941.6

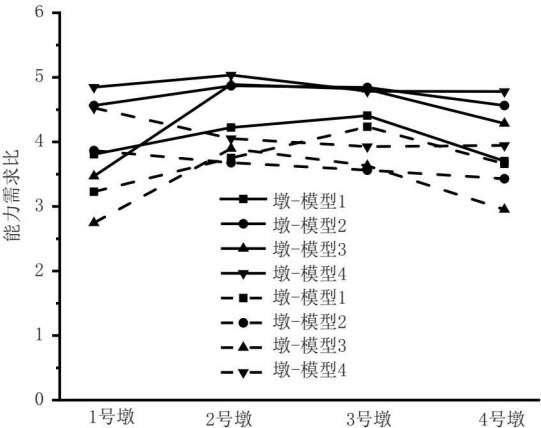


图8 纵桥向墩底弯矩和桩基弯矩能力需求比曲线图

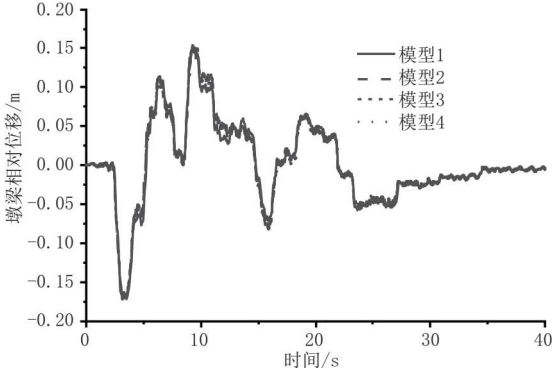


图9 2号墩墩梁相对位移时程曲线图

从图中可以看出，纵向地震作用下4种模型的墩梁相对位移值随时间的变化是高度相似的。同时将支座位移值和墩梁相对位移响应最大值列于表4中，从表中可以看出，无论是支座位移还是墩梁相对位移的差距都比较小，差值都小于5%。说明盖梁和

系梁的增加对纵桥向地震作用下的支座位移响应值和墩梁相对位移值影响较小。

表4 纵桥向位移响应值一览表

墩号	模型	支座位移 /m	墩梁相对位移 /m
1	模型1	0.175	0.174
	模型2	0.177	0.177
	模型3	0.181	0.182
	模型4	0.176	0.176
2	模型1	0.171	0.172
	模型2	0.167	0.169
	模型3	0.168	0.170
	模型4	0.168	0.168
3	模型1	0.172	0.173
	模型2	0.168	0.170
	模型3	0.169	0.171
	模型4	0.168	0.169
4	模型1	0.175	0.174
	模型2	0.173	0.172
	模型3	0.175	0.177
	模型4	0.173	0.172

根据《城市桥梁抗震设计规范》规定,4种模型支座位移能力需求比验算结果如图10所示。从图中可以看出,能力需求比都在1以上,且数值比较接近,说明4种模型满足抗震要求。

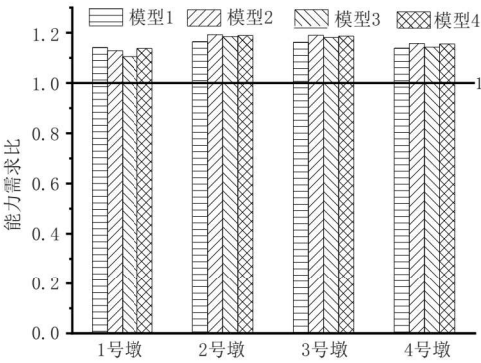


图10 支座位移能力需求比柱状图

3.3 模型横向动力时程分析

横桥向 E2 地震作用下摩擦摆支座横向的剪力螺栓均会剪断,使支座发生滑移,城市高架桥梁关键截面的墩底剪力、墩底弯矩和桩基础弯矩值列入表5中。从表5可以看出横向地震作用下4种模型下的受力响应值差距较大,以3号墩为例,无系梁双柱墩模型的弯矩响应值分别为盖梁双柱墩模型、系梁双柱墩模型以及花瓶形双柱墩模型的152.71%、146.15%以及160.22%,无系梁双柱墩模型的桩基弯矩响应值分别为盖梁双柱墩模型、系梁双柱墩模型

以及花瓶形双柱墩模型的 77.28%、96.54% 以及 93.63%，无系梁双柱墩模型的墩底剪力响应值分别为盖梁双柱墩模型、系梁双柱墩模型以及花瓶形双柱墩模型的 99.51%、96.96% 以及 72.03%。对数据进行原因分析，盖梁及系梁的增加可以增加桥墩的横向刚度，不仅使水平推力增大，同时还改变墩身受力分布情况，致使墩身的剪力增大，弯矩变小。同时传递给桩基的水平推力也会变大，桩基的弯矩值也会相应变大。需要指出的是，花瓶形双柱墩由于墩身上部与重力方向呈现一定角度，使上部结构传递下来的力和重力进行组合分布，从而剪力值最大。

表 5 横桥向内力响应值一览表

墩号	模型	墩底剪力 / kN	墩底弯矩 / (kN·m)	桩基弯矩 / (kN·m)
1	模型 1	530.4	2 334.9	1 185
	模型 2	444.3	2 157.5	959.2
	模型 3	658.9	2 037.5	1 060.2
	模型 4	423.8	3 132.2	945.5
2	模型 1	912.5	4 571.1	1 194.8
	模型 2	945.4	4 532.1	932.9
	模型 3	1258.4	4 414.0	964.3
	模型 4	906.9	6 980.7	892.8
3	模型 1	913.6	4 587.8	1 157.1
	模型 2	937.6	4 783.4	926.3
	模型 3	1262.1	4 363.4	955.1
	模型 4	909.1	6 991.1	894.3
4	模型 1	528.5	2 340.4	1 180.1
	模型 2	442.1	2 147.6	923.3
	模型 3	659.2	2 049.3	1 060.1
	模型 4	425.6	3 137.2	943.5

根据《城市桥梁抗震设计规范》规定，考虑地震轴力和恒载轴力结合的 4 种模型墩底弯矩和桩基弯矩能力需求比验算结果如图 11 所示。从图中可以看出，能力需求比都在 3 以上，说明 4 种模型满足抗震要求。图中表现出来的规律和本节上述数值分析相同。

在进行抗震分析时，除了要进行受力的分析，还要进行位移响应值的分析，横向地震作用下 4 种模型的墩梁相对位移的时程曲线如图 12 所示。从图中可以看出，横向地震作用下 4 种模型的墩梁相对位移值随时间的变化历程是高度相似的。同时将支座位移值和墩梁相对位移响应最大值列于表 6 中，从表中可以看出，无论是支座位移还是墩梁相对位移的差距都较小，差值都小于 5%。说明盖梁和系梁

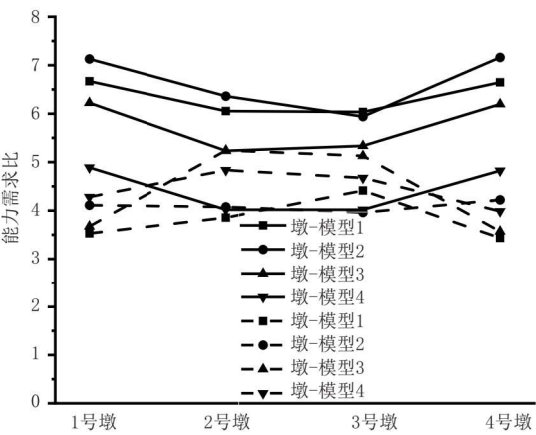


图 11 横桥向墩底弯矩和桩基弯矩能力需求比曲线图

的增加对横桥向地震作用下的支座位移响应值和墩梁相对位移值影响较小。

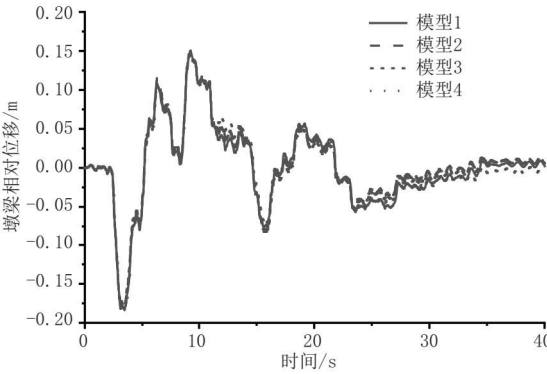


图 12 2 号墩墩梁相对位移时程曲线图

表 6 横桥向位移响应值一览表

墩号	模型	支座位移 /m	墩梁相对位移 /m
1	模型 1	0.181	0.182
	模型 2	0.184	0.185
	模型 3	0.180	0.181
	模型 4	0.179	0.180
2	模型 1	0.181	0.184
	模型 2	0.180	0.183
	模型 3	0.175	0.178
	模型 4	0.174	0.176
3	模型 1	0.181	0.183
	模型 2	0.180	0.183
	模型 3	0.175	0.178
	模型 4	0.174	0.176
4	模型 1	0.180	0.181
	模型 2	0.184	0.185
	模型 3	0.180	0.181
	模型 4	0.178	0.179

根据《城市桥梁抗震设计规范》规定，4 种模型支座位移能力需求比验算结果如图 13 所示。从图中可以看出，能力需求比都在 1 以上，且数值比较接近，

说明4种模型满足抗震要求。

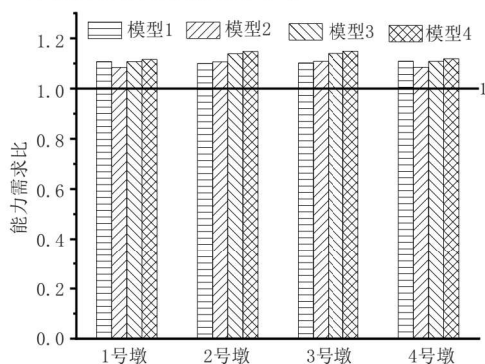


图 13 支座位移能力需求比柱状图

4 结论

本文以城市高架桥为研究对象,探讨分析4种桥墩形式对城市高架桥抗震性能的影响,通过上述分析,得到的结论如下:

(1)城市高架桥双柱墩设置盖梁和系梁可以增大桥梁的横向刚度,会使结构横向振动周期变小,对纵向振动周期影响不大。

(2)在纵向地震作用下,在城市高架桥的双柱式桥墩中增加盖梁和系梁会使桥墩和桩基弯矩增大,差距小于25%。

(3)在横向地震作用下,双柱墩设置盖梁和系梁可以减小墩身弯矩,但是会使剪力轻微增加,进而增加桥墩传递给基础的水平推力,使桩基承受内力增

加。无系梁双柱墩对桩基础抗震更为有利。

(4)无论是纵桥向还是横桥向,盖梁和系梁的增加对摩擦摆支座位移和墩梁相对位移的影响较小。

参考文献:

- [1] 范立础. 现代化城市桥梁抗震设计若干问题[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1997(2):147-154.
- [2] 管仲国, 沙丽新, 李建中. 城市高架桥抗震支撑体系优化设计与经济性分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(2):78-84.
- [3] 张新中, 何宇森, 唐克东. 基于摩擦摆支座的桥梁隔震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(1):90-96.
- [4] 朱勇毅, 陈光. 双柱墩桥梁的横向抗震设计研究[J]. 中国市政工程, 2014(6):75-78.
- [5] 管仲国, 李建中. 城市高架桥合理抗震体系选择与经济性对比[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(3):91-98.
- [6] 沈星, 叶爱君, 王晓伟. 柔性横系梁双柱墩的抗震行为分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(3):342-347.
- [7] 夏修身, 崔靛波, 陈兴冲. 超长联大跨连续梁桥摩擦摆支座隔震研究[J]. 工程力学, 2015, 32(S1):167-171.
- [8] Eroz M. Advanced Models for Sliding Seismic Isolation and Applications for Typical Multi-SAPn Highway Bridges [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [9] JANUIDR S. Optimum friction pendulum system for near-fault motions[J]. Engineering Structures, 2005, 27: 349-359.
- [10] 公路桥梁摩擦摆式减隔震支座[S]. 2013.
- [11] 张超, 刘涛, 余立, 等. 采用摩擦摆支座的超大跨连续梁桥隔震效果[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(3):449-455.
- [12] 城市桥梁抗震设计规范[S]. 2011.

(上接第60页)

装导梁。

(5)顶推西半幅钢桁架,顶推期间河面临时断航。

(6)西半幅新建桥梁顶推到位后,拆除导梁、水中临时墩、临时拼装支架等结构,施工西半幅桥面系,并将交通导改至新建桥梁,拆除保通桥。

6 结语

综合考虑桥位处前后的高速服务区及互通限制、桥梁梁高限制、交通量限制等因素,苏嘉杭高速

吴淞江大桥扩建采用钢桁架方案,以此兼顾功能和景观效果。本文介绍的下承载式钢桁架桥的设计、施工以及保通方案可为同类桥型的设计和施工提供参考。

参考文献:

- [1] 赵玲, 庄勇. 无锡市金匮桥总体设计与结构特色[J]. 桥梁建设, 2010(8):64-66.
- [2] 沈祖炎. 钢结构制作安装手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.