

基于摩擦摆式支座的波形钢腹板 PC 刚构-连续组合梁抗震性能分析

徐皓甜

(华设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210005)

摘 要:以某黄河大桥为例,介绍了基于摩擦摆式支座的波形钢腹板 PC 刚构-连续组合梁桥的抗震特性。同时,分析对比了采用摩擦摆式支座和普通支座在动力特性、力学性能和位移响应的区别,得出采用摩擦摆式支座具有较优的抗震性能,为同类型桥梁抗震设计提供了借鉴和参考。

关键词:波形钢腹板;非线性动力分析;抗震性能;减隔震;摩擦摆式支座

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)12-0097-03

0 引言

当前,对于连续梁桥的抗震分析思路主要有两种:一是延性抗震设计,二是减隔震抗震设计^[1]。减隔震设计针对的是采用减隔震支座的桥梁。在桥梁抗震设计中,引入减隔震技术的目的是利用减隔震装置在满足正常使用功能要求的前提下,延长结构自振周期和增大阻尼,达到消耗地震能量和降低结构地震响应的目的^[2-3]。波形钢腹板 PC 组合箱梁桥作为新型钢-混凝土组合结构中的一种^[4],能够有效地降低结构自重。本文以(80+7×120+80)m 波形钢腹板 PC 刚构-连续组合体系为例,通过非线性动力时程分析,对分别采用减隔震支座和普通支座两种情况,研究桥梁的受力特点。

1 工程概况

本文依托的工程背景桥梁联数较多,取其中一联 9 跨波形钢腹板 PC 刚构-连续组合梁桥,跨径布置为(80+7×120+80)m,总体布置如图 1 所示。

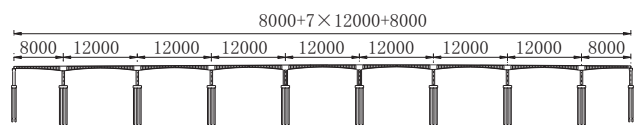


图 1 波形钢腹板 PC 刚构-连续组合梁桥总体布置图(单位:cm)

当一联的桥梁跨数较多且长时,结构在收缩徐变和整体升降温的作用下,连续刚构桥次边墩及其

相邻主墩墩身弯矩效应大、适应温度变形能力差,导致墩身纵向配筋率偏大,进一步影响桥墩抗震性能,(80+7×120+80)m 主桥采用刚构-连续梁协作体系,中间 2 个主墩墩梁固结,其余主墩及边墩墩梁分离,梁底设置支座。

主梁采用单箱单室断面,箱梁顶宽 16.0 m,底宽 8.5 m,悬臂长 3.5 m,端部厚 0.2 m,悬臂根部为 0.7 m。墩顶根部梁高 7.5 m,跨中梁高 3.5 m,底板厚 0.3~0.9 m,梁高和底部按照二次抛物线变化。桥梁主梁典型断面图如图 2 所示。

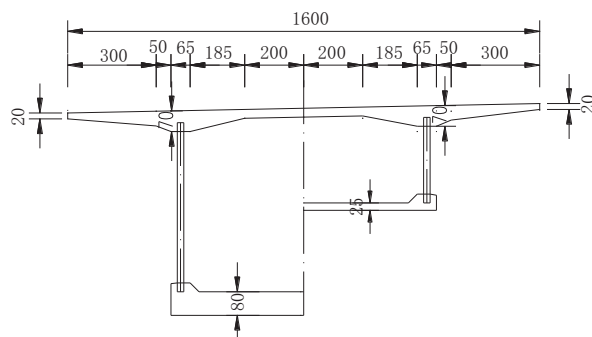


图 2 主梁典型断面图(单位:cm)

2 抗震分析计算模型

2.1 模型建立

采用 Midas Civil 软件建立边界非线性动力分析模型。主梁、墩柱、承台和桩基采用梁单元模拟,摩擦摆式支座采用一般连接。按 m 法设置土弹簧并考虑动力对土具有刚度强化作用(强化系数取 2.5),以模拟桩土相互作用。结构一期恒载按照实际截面尺寸建模考虑,桥面二期恒载转化为质量加到主梁上。整个

收稿日期: 2022-03-07

作者简介: 徐皓甜(1996—),女,硕士,助理工程师,从事桥梁设计工作。

有限元模型如图 3 所示。



图 3 桥梁有限元模型

2.2 摩擦摆式支座

本桥采用摩擦摆式减隔震支座,墩顶支承连接条件按实际支座布置方式建模,通过在墩梁交接处建立支座单元,采用一般连接单元模拟。支座的滑动摩擦系数取 0.03,屈服位移取 0.005 m。

摩擦摆式支座通过球形滑动表面的运动使上部结构发生单摆运动,隔震系统的周期和刚度通过选择合适的滑动表面曲率半径来控制,阻尼由动摩擦系数来控制。在时程分析中考虑支座滑动后的摩擦耗能作用,采用图 4 中的双线性恢复力模型模拟滑动支座的力和位移关系。摩擦摆式减隔震支座参数见表 1。

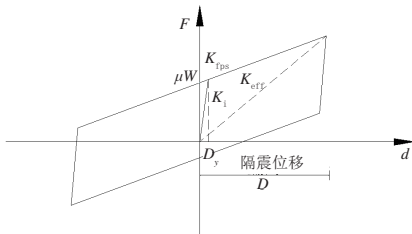


图 4 摩擦摆式支座的滞回曲线

表 1 摩擦摆式减隔震支座的参数

墩柱	支座曲率半径 /m	摩擦系数	容许位移 /mm	有效刚度 /(kN·m ⁻¹)	屈服前刚度 /(kN·m ⁻¹)
边墩	4	0.03	150	3 375	45 000
中墩	4	0.03	150	16 200	216 000

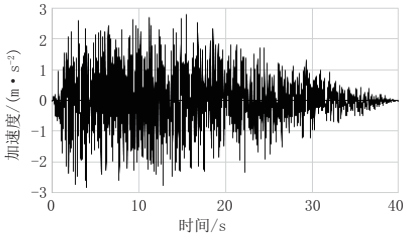
$$K_{\text{eff}} = W \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D} \right) \quad K_i = W \frac{\mu}{D_y}$$
$$F = \frac{W}{R} \times D + \mu \cdot W \quad K_{\text{ips}} = W \frac{1}{R}$$

式中:W 为支座承受竖向荷载; μ 为摩擦摆式支座摩擦系数;R 为摩擦摆式支座球面半径; D_y 为摩擦摆式支座屈服位移;D 为摩擦摆式支座容许位移;F 为摩擦摆式支座水平力; K_{eff} 为摩擦摆式支座等效刚度; K_i 为摩擦摆式支座屈服前刚度; K_{ips} 为摩擦摆式支座屈服后刚度。

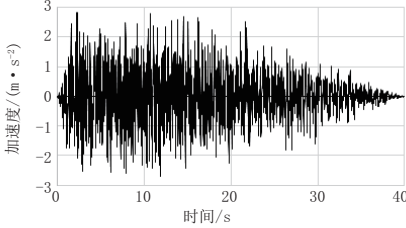
2.3 地震动输入

根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)6.1.4 的条文说明,对于多联大跨度连续梁桥等复杂结构,只有采用非线性时程的方法,才能正确预计结构的非线性地震反应^[2]。根据《公路桥梁

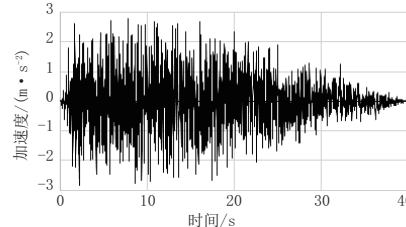
抗震设计规范》(JTG/T 2231-01-2020)10.1.3 可知,采用减隔震设计的桥梁,可只进行 E2 地震作用下的抗震设计^[2]。E2 地震选取《安评报告》提供的重现期约 2 000 a 的 3 条地震波。3 条地震波的时程曲线如图 5 所示。



(a)全桥 E2-1 加速度时程曲线



(b)全桥 E2-2 加速度时程曲线



(c)全桥 E2-3 加速度时程曲线

图 5 生成的加速度时程曲线

E2 地震作用下,3 条时程波之间的相关系数为: $\rho_{12}=0.051\ 3, \rho_{13}=0.049\ 3, \rho_{23}=0.027\ 6$,均小于《公路桥梁抗震设计规范》5.3.3 规定的 0.1。因此,可以选取上述 3 条加速度时程波作为本桥 E2 地震作用的地震动输入时程曲线。

3 动力特性对比分析

桥梁结构抗震性能分析不可或缺的一个环节是对桥梁结构的动力特性进行分析。因此,采用现有结构动力计算模型,基于不同支座的情况,对结构进行动力特性分析。

结构动力特性分析中,特征方程求解采用里兹向量法,取前 300 阶阵型进行计算,阵型的有效参与质量达到 90%以上。基于此阵型数计算的地震响应精度可满足要求,因阶数较多,取前十阶不同支座下桥梁成桥状态的动力特性见表 2。

从表 2 中可以看出,从一阶模态到十阶模态,采用摩擦摆式支座的结构自振周期高于采用普通支座的结构自振周期。这说明摩擦摆式支座可以有效地

表 2 前十阶振动周期

模态号	摩擦摆式支座 /s	普通支座 /s	相对差值 /%
1	3.028	2.259	34.01
2	2.323	1.835	26.59
3	2.212	1.822	21.37
4	2.106	1.771	18.88
5	2.063	1.768	16.66
6	1.919	1.676	14.50
7	1.809	1.538	17.63
8	1.689	1.368	23.48
9	1.646	1.358	21.21
10	1.552	1.344	15.46

延长结构自振周期,能够起到较好的减隔震作用。

4 非线性动力时程对比分析

4.1 结构内力对比分析

在顺桥向 E2 地震作用下,计算结果取 3 组时程中最大值,主梁最不利弯矩如图 6 所示。从图中可以看出,采用普通支座的刚构-连续梁桥,主梁的弯矩明显大于采用摩擦摆式支座桥梁的主梁,且中间两个固定墩处的弯矩较大。由此可以得出,在顺桥向 E2 地震作用下,固定墩位置处的受力较不利;采用摩擦摆式支座,能够有效地减小主梁的弯矩,使整个主梁受力更合理。

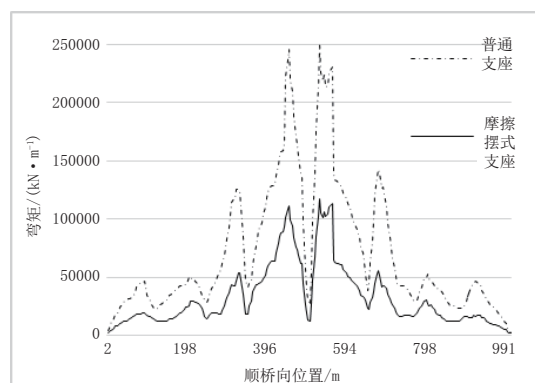


图 6 顺桥向 E2 地震作用下主梁最不利弯矩图

根据刚构-连续梁的受力特点,选取固定墩作为分析对象,其固定墩关键截面的地震响应值,具体见表 3。

从表 3 可知,相对于普通支座,采用摩擦摆式支座时,在 E2 地震顺桥向作用下,固定墩的墩顶、墩底和承台底的轴力、剪力和弯矩都有明显降低。总之,采用摩擦摆式支座可以降低桥墩的内力,能够有效地起到顺桥向减震的作用。

4.2 墩顶位移对比分析

在 E2 地震顺桥向作用下,各个桥墩的墩顶位移见表 4。

表 3 E2 地震顺桥向作用下结构主要截面地震响应

墩号	位置	摩擦摆式支座			普通支座		
		轴力 / kN	剪力 / kN	弯矩 / (kN·m)	轴力 / kN	剪力 / kN	弯矩 / (kN·m)
4#	墩顶	11 424	7 407	54 994	13 349	8 565	64 147
	墩底	11 474	7 359	84 621	13 329	8 592	107 299
	承台底	6 023	15 987	218 898	5 188	17 923	269 484
5#	墩顶	11 815	7 236	89 109	11 794	8 587	106 122
	墩底	11 629	7 284	85 512	11 821	8 625	107 426
	承台底	6 506	15 930	217 206	4 578	17 941	269 314

表 4 E2 地震顺桥向作用下墩顶位移

墩号	摩擦摆式支座 /mm	普通支座 /mm	相对差值 /%
1#	61.45	67.23	9.40
2#	47.67	51.99	9.05
3#	47.71	51.99	8.96
4#	47.67	51.99	9.07
5#	121.32	153.51	26.53
6#	121.56	153.53	26.30
7#	47.56	51.99	9.32
8#	47.74	51.99	8.90
9#	47.69	51.99	9.02
10#	61.32	67.23	9.64

从表 4 可以看出,采用摩擦摆式支座的墩顶位移相比于采用普通支座的墩顶位移,呈现出减小的趋势,且满足容许位移小于 150 mm 的要求。而 4# 墩和 5# 墩作为固定墩,可以得出采用摩擦摆式支座可以有效地减小固定墩的墩顶位移。

5 结 论

本文运用 Midas Civil 软件建立了大跨径波形钢腹板 PC 刚构-连续组合梁桥的有限元模型。通过改变桥梁支座,分别对两种支座状况下的结构抗震性能进行了比较和分析,主要结论如下:

- (1)采用减隔震支座中的摩擦摆式支座可以适当增加结构自振周期,起到良好的减隔震作用。
- (2)将摩擦摆式支座运用到波形钢腹板 PC 刚构-连续组合梁桥中,可以优化主梁和桥墩的受力情况。
- (3)在波形钢腹板 PC 刚构-连续梁桥中采用摩擦摆式支座,可以有效地减小固定墩的墩顶位移。

参考文献:

- [1] 刘峰,王振海,王哲.基于摩擦摆支座的连续梁桥减隔震设计参数分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2015,34(6):7.
- [2] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- [3] 郑涛.波形钢腹板 PC 组合连续梁桥动力特性与地震响应研究[D].南京:东南大学,2019.
- [4] 王毅力.高墩大跨波形钢腹板 PC 刚构-连续组合梁桥力学性能研究[D].南京:东南大学,2014.