

Seismic Isolation Analysis of Low-Pier and Long-Span Continuous Beam Bridge

Zhenlin Xie

Lin Tung-Yen & Li Guo-Hao Consultants Shanghai Co., Ltd., 200437, China

Abstract

Taking a prestressed concrete continuous beam with a span of 64 + 106 + 64 as an example, this paper studies the application of friction pendulum bearing in the seismic isolation design of low pier and long-span continuous beam bridge. Through nonlinear time history analysis, the common seismic design methods of low pier bridges are compared. The results show that the basic natural vibration period of the structure can be significantly prolonged and the response of the low pier under the earthquake can be greatly reduced by using the friction pendulum to reduce the isolation system.

Keywords

low-pier; friction pendulum support; bridge vibration reduction and isolation

矮墩大跨径连续梁桥减隔震分析

谢振林

上海林同炎李国豪土建工程咨询有限公司, 中国·上海 200437

摘要

以一座跨径布置为 64+106+64 的预应力混凝土连续梁为例, 研究摩擦摆支座在矮墩大跨径连续梁桥减隔震设计中的应用。通过非线性时程分析, 对矮墩桥梁常用的抗震设计方法进行比较研究。结果表明, 采用摩擦摆减隔震体系可以显著延长结构基本自振周期, 大幅减小矮桥墩在地震作用下的响应。

关键词

矮桥墩; 摩擦摆支座; 桥梁减隔震

1 引言

城市桥梁建设中, 为了减小桥梁两侧接线长度, 降低工程总体造价, 设计中经常出现剪跨比小于 2.5 的矮桥墩。矮墩在地震作用下容易发生脆性剪切破坏。而规范要求罕遇地震作用下矮桥墩结构保持在弹性范围内, 抗震设计难度较大^[1]。

矮墩抗震设计第一类方法是通过强大桥墩刚度, 增大桥墩配筋, 加强下部基础来增强矮墩的抗震能力, 即通常所讲的硬抗策略; 第二类方法是改变地震作用下结构体系。具体方法有分散地震作用, 利用多墩抗震从而减小单个桥墩地震作用, 或者改变地震作用下结构自振特性, 从而减小整个下部结构地震响应, 即减隔震设计^[2]。

论文以一座跨径布置为 64+106+64 的预应力混凝土连续梁为例, 研究摩擦摆支座在矮墩桥梁减隔震设计中的应用。

2 工程概况

本桥梁工程位于上海市松江区一条与坝河斜交道路上。根据坝河通航论证结论, 本段坝河通航净宽应不小于 30.8m, 梁底高程不小于 6.0m。但桥梁位于航道曲线上, 航道近 90° 转弯, 转弯半径仅为 100m 左右, 故桥梁不宜在水中设置桥墩。

根据道路推荐平面布置图(见图一), 坝河修正口宽考虑桥梁分幅建设时约为 106m。

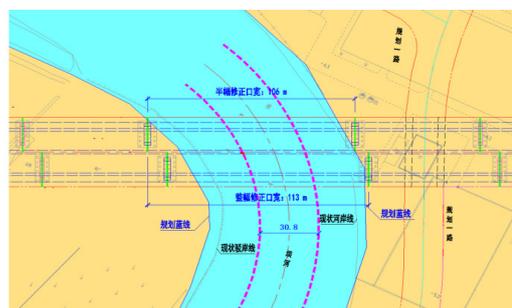


图 1 主桥平面布置图

道路跨越坝河小半径曲线航道段,桥梁布孔需考虑曲线通航安全。同时,坝河大桥需满足坝河东侧规划一路的下穿净空要求。

推荐方案主桥采用变截面连续箱梁桥,主桥采用分幅设计,跨径布置为64+106+64=234m。全桥总体布置如图2,3所示。

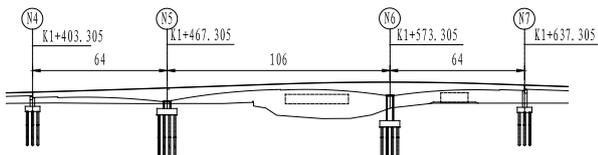


图2 主桥立面布置图

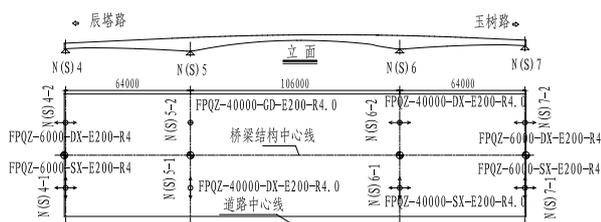


图3 主桥支座布置图

主桥主墩墩身采用矩形截面,断面尺寸11.5×3.5m,采用钢筋混凝土结构,5号墩墩高1.3m,6号墩高4.5m。

在正常使用下,5号墩上支座纵桥向固定,其余墩支座纵桥向活动以满足温度,收缩徐变等变形要求;桥梁外侧,远离道路中心线一侧的支座横桥向限位。

在地震作用下,摩擦摆支座在固定位移方向提供一定的抗力,当地震作用超过限位装置抗剪能力时,支座限位抗剪销剪坏,此时支座体系变为双向活动,摩擦摆支座可以起到双向减隔震的作用。

3 摩擦摆隔震支座原理

摩擦摆支座是一种有效的干摩擦滑移隔震体系。摩擦摆支座具有优良的隔震耗能机制及自复位能力,近年来得到了越来越多的应用^[3,4]。

桥梁结构采用摩擦摆支座后结构周期基本上只取决于支座滑动球面半径R,而与支撑的上部桥梁结构无关。一般工程应用中只需调整支座滑动球面半径R与接触面滑动摩擦系数μ,便能地对桥梁结构的地震响应进行预测和控制。

摩擦摆系统的周期T可表示为:

$$T = 2\pi\sqrt{R/g} \quad (1)$$

式中:R为滑动面半径;g为重力加速度。

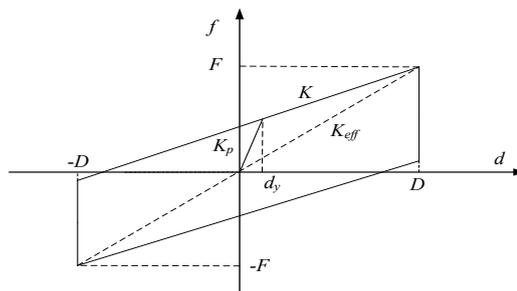


图4 摩擦摆支座荷载-位移滞回曲线

摩擦摆减隔震支座的力学特性可以按图4所示的荷载-位移滞回曲线模型来模拟。图中,D为支座最大位移;F为支座水平回复力; K_p 为初始摩擦刚度。摩擦摆支座的等效刚度 K_{eff} 为:

$$K_{eff} = \frac{F}{D} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} \quad (2)$$

摩擦摆支座的等效刚度 K_{eff} 由初始摩擦刚度 K_p 与摆动刚度K两部分组成。

式中μ为滑动面动摩擦系数,一般可以取0.05;W为上部结构竖向荷载; d_y 为支座屈服位移,一般可取 $d_y=2.5\text{mm}$ 。

4 抗震性能分析

4.1 有限元模型

利用有限元软件Midas Civil建立桥梁动力分析模型。同时建立左右引桥作为边界联模型,来考虑相邻联桥梁动力特性对总体分析的影响。

主梁、盖梁、主墩及桩基础均采用采用空间梁单元进行模拟,二期恒载以外荷载的形式添加到相应的主梁上,计算分析时使用荷载转换为质量功能,使恒载作用下主梁的质量与实际工况相同,建立图5所示为带边界联的全桥分析模型。

为考虑桩土相互作用,使用m法估算土体对桩基的弹性支撑刚度,m值取静力计算值的2倍。

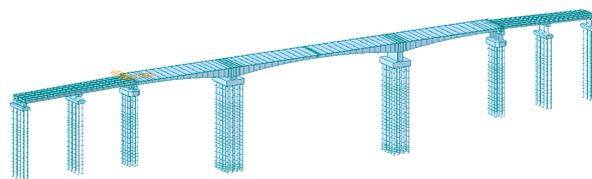


图5 全桥有限元模型

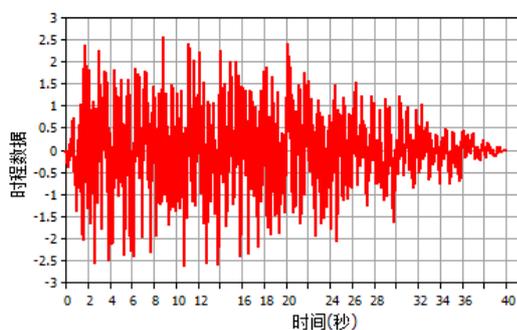
摩擦摆减隔震支座参数:支座摩擦系数μ=0.04,滑动球

面半径 $R=4.0\text{m}$ ，支座周期为 $T=4.0\text{s}$ 。支座特性使用 Midas Civil 提供的摩擦摆装置进行模拟。为计算结构动力特性，在线性特性中输入摩擦摆支座的等效刚度。

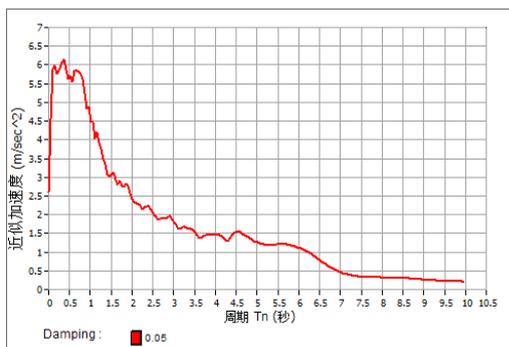
4.2 地震波输入

中国上海松江区基本地震烈度为 7 度 ($0.10g$)，拟建场地类别为 IV 类，所属的设计地震分组为第二组，地基土属软弱土。

本工程的场地加速度反应谱特征周期为 0.75s ，根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015) 附录 E.1，调整后本工程的 IV 类场地地震动峰值加速度调整为 $0.12g$ 。



(a) x 方向地震动时程 (m/s^2)



(b) 地震动时程拟合反应谱

图 6 地震动输入时程与反应谱

根据《城市桥梁抗震设计规范》，抗震设防分类丙类，抗震设计方法为 A 类，地震作用调整系数：E1 地震 $C_i=0.46$ ，E2 地震 $C_i=2.2$ 。

由规范反应谱生成人工时程曲线作为地震波输入进行非线性时程分析。对应 E2 反应谱生成 7 条地震波，并取 7 条地震波响应平均值作为 E2 地震作用计算结果。图 6 为所选用的其中一条波 E2 水平向地震动加速度时程曲线 (x 方向)。

4.3 动力特性分析

采用多重 Ritz 法进行结构动力特性分析，三个方向地面

加速度初始向量分别取 50 个。每个方向有效振型参与质量均大于该方向总质量的 90%。

表 1 减隔震前后动力特性

振型序号	减隔震体系		非减隔震体系	
	周期 (s)	振型特征	周期 (s)	振型特征
第一阶	3.145	主桥横摆	1.044	主桥竖弯
第二阶	2.931	主桥横飘	0.633	主桥竖弯
第三阶	2.915	主桥纵飘	0.604	主桥横弯

表 1 列出了采用摩擦摆减隔震体系前后主桥主要动力特性对比，在应用了摩擦摆减隔震体系后，结构的基本周期延长到 3s，显著大于场地周期 0.75s 。

采用摩擦摆支座后，结构第一阶自振周期延长了 201%。采用摩擦摆减隔震支座对延长主桥结构基本自振周期作用非常显著。

4.4 时程分析结果

应用非线性时程方法进行动力分析，研究结构在地震波作用下的响应。表 2、表 3 为矮主墩采用减隔震体系前后地震响应。表中隔震率 = $(\text{隔震前} - \text{隔震后}) / \text{隔震前} \times 100\%$ 。

表 2 减隔震前后地震响应 (纵桥向)

墩号	地震响应	常规体系	减隔震体系	减震率 (%)
墩 5	支座位移 (mm)	—	163	—
	墩底剪力 (kN)	55241	3507	93.7%
	墩底弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	66474	8150	87.7%
墩 6	支座位移 (mm)	49	173	-250.2%
	墩底剪力 (kN)	2234	3464	-55.1%
	墩底弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	14134	18087	-28.0%

表 3 减隔震前后地震响应 (横桥向)

墩号	地震响应	常规体系	减隔震体系	减震率 (%)
墩 5	支座位移 (mm)	—	187	—
	墩底剪力 (kN)	29235	3773	87.1%
	墩底弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	209350	34034	83.7%
墩 6	支座位移 (mm)	—	186	—
	墩底剪力 (kN)	31888	3747	88.2%
	墩底弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	338086	43384	87.2%

支座体系为常规布置时，纵桥向地震作用主要由 5 号主墩承担，横向地震作用由 8 个桥墩共同承担。采用减隔震体系时，纵向地震作用与横向地震作用由 8 个桥墩共同承担，减隔震体系更能充分发挥各个桥墩的抗力，体系更为合理。

矮主墩水平向抗推刚度远大于交界墩，承担 80% 以上的地震作用。下面对矮主墩上摩擦摆支座的减隔震效率进行分析。

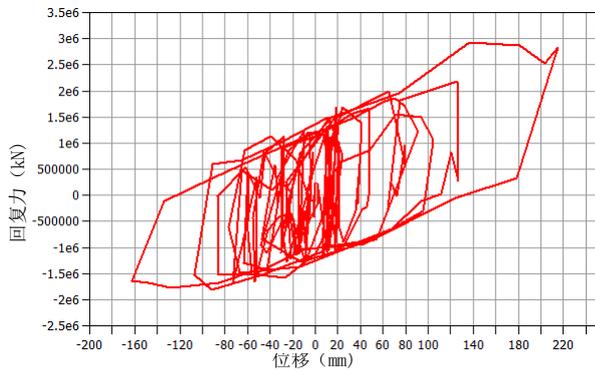


图7 摩擦摆支座荷载 - 位移滞回曲线

由表2、表3分析结果可知,采用摩擦摆支座体系后,5号矮主墩柱地震响应大幅减小。横桥向剪力减震率在87%左右,弯矩减震率在83%左右。纵桥向减震效果尤为明显,矮主墩底剪力与弯矩减震率在87%以上。6号主墩在常规体系下为非制动墩,纵桥向地震响应比制动墩小很多,在减隔震体系下,6号墩与5号墩共同承担地震作用。

减隔震体系下6号墩纵桥向地震响应均有所增加。

应用摩擦摆支座后,可以显著减小墩柱在地震作用下的内力响应,但同时梁底与墩顶相对位移即支座位移大大增加。通过较小的摩擦摆滑动半径可以得到较大的回复力,从而减小支座位移,但此时会增加墩柱的内力。所以使用何种半径的摩擦摆要进行综合分析。

由图7可知,摩擦摆支座的荷载 - 位移滞回曲线与支座的荷载 - 位移滞回曲线理论模型吻合。滞回曲线形状饱满,说明在地震作用下摩擦摆支座可以发挥良好的耗能能力。

5 结语

通过计算分析,对于矮墩大跨连续梁桥,在采用了摩擦摆减隔震支座体系后,显著延长了结构自振周期,通过改变自身动力特性,从而避开场地周期来提高结构的抗震性能。

通过对比分析,应用摩擦摆支座可以显著降低矮墩结构在地震作用下的响应,减震率在80%以上。但支座位移响应较大,可通过调整摩擦摆减支座的摩擦系数、曲率半径等参数来改变支座在地震作用下的位移响应。要在墩柱内力响应与支座位移间综合考量来最终确定支座的各项参数。

参考文献

- [1] 侯冠文.矮墩大跨连续梁体系桥纵向减隔震设计[J].中国市政工程,2012(06):20-23,102.
- [2] 杨喜文,钟建辉,冯福洋.矮墩铁路桥梁抗震体系研究[J].铁道勘察,2015(02):97-100
- [3] 戴世宏;基于摩擦摆球型支座的桁架拱桥减震设计[J].中国市政工程,2020(01):21-23+91
- [4] 刘奕.曲线连续梁桥耗能减震方法研究[D].山东建筑大学,2011.