

大吨位摩擦摆支座在空腹式连续梁桥中的应用

武电坤, 冯鹏程, 吴晓勤, 朱玉

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:马尾大桥为主跨 240 m 空腹式连续梁桥, 支座最大设计承载力达 130 MN, 为满足高抗震性要求, 拟在墩梁之间增加减隔震体系。在对 FPQZ 摩擦摆支座构造及力学模型分析的基础上, 采用有限元软件 SAP2000 建立该桥空间动力模型, 以 E2 水准下地震波作为激励, 采用非线性时程分析方法对比研究了 5 种支座布置情况的受力, 初定摩擦摆支座(两主墩)+柱面型支座(其他墩)组合的减隔震方案, 并确定出支座球面摩擦系数 μ 和半径 R 的合理取值。因主墩摩擦摆支座尺寸较大, 通过速度锁定装置在 15# 主墩处支座中增加了平滑动面, 以避免在正常运营状态下由温度等作用引起梁体抬升而产生附加内力。最后对设计进行验证, 结果表明合理的摩擦摆支座类型及约束体系, 可达到较为理想的减隔震效果。

关键词:空腹式; 连续梁; 减隔震; 摩擦摆支座; 速度锁定; 柱面

减隔震设计是抗震设计的一种重要方法。减隔震结构以良好的抗震性能和较低的抗震设防成本受到重视, 众多学者对减隔震支座的类型、非线性力学特性及其力学模型进行了大量的研究。减隔震支座不仅可以起到隔震的作用, 还可使能量在变形过程中消耗, 墩底的内力大量减少, 上部结构与桥墩顶部的相对位移降低到可控范围, 达到抗震的目标。常用的摩擦摆式支座是 20 世纪 90 年代提出来的, 相比其他类型抗震支座, 因其优异的力学可靠性及对地震激励频率范围的高稳定性与低敏感性, 在桥梁结构中得到广泛应用。

福州马尾大桥采用主跨跨径 240 m 的空腹式连续梁形式, 单支座最大竖向承载力达 130 MN, 超越了标准常规支座承载能力范围, 且桥址建筑场地类别为 III 类, 地震设防烈度较高, 需要合理的抗震设计才能保障结构安全。因此该文在对中国 FPQZ 支座(即摩擦摆球形支座)分析的基础上, 为寻求多墩支座的合理布置及力学参数取值, 避免主梁正常使用情况下因支座竖向位移引起附加内力, 通过采用有限元软件建立分析模型进行研究, 以选取合适的支座类型。

1 支座构造及抗震原理

1.1 支座结构特点

FPQZ 系列摩擦摆球形支座主要由上支座板组

件、滑动组件、下支座板组件及锚固组件等构件组成(图 1)。上、下支座组件钢板为凹形球面, 其球面半径即为摩擦摆支座的摆动半径。地震发生时, 滑动组件在上、下支座组件的两个曲面间发生相对滑动, 与单滑动面相比, 可以用较小的构造尺寸完成相同的滑动位移及动能势能转换, 达到相同的回复力及摩擦耗能性能。

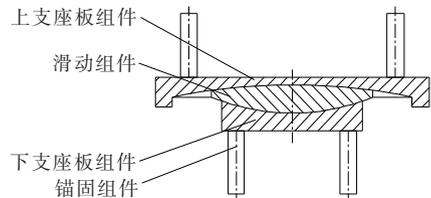


图 1 FPQZ 摩擦摆支座构造示意图

FPQZ 摩擦摆支座类型分为 4 种。分别为: 固定型(FPQZ-GD)和单向活动型(FPQZ-DX)支座。通过与限位剪断装置组合, 在正常使用下, 上、下支座板间的相对水平位移受到约束, 而在地震作用下, 限位装置达到设计荷载则被剪断释放约束, 开始发挥抗震功能; 双向活动型(FPQZ-SX)支座。纵、横向无限位, 水平运动支座摆动滑移, 高度可发生较小变化, 地震时, 球面摆动发挥抗震功能。也可增设水平滑动面与速度锁定装置, 保证正常使用下, 大的水平变形时支座无抬高, 消除因竖向位移引起的结构附加内力; 柱面型(FPQZ-ZM)支座。通常适用跨度较大或多联连续

梁桥的活动墩,在活动方向为柱面,受热胀冷缩等水平运动支座高度不变,地震时水平、垂直向可起到减隔震效果。

1.2 减隔震原理

FPQZ 摩擦摆支座的工作模式类似于单摆简谐运动(图 2),单摆的周期跟摆长的平方根成正比,跟重力加速度的平方根成反比,而与振幅、摆球的质量无关。单摆周期 T 可表示为:

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

式中: R 为摆动半径, $\alpha \leq \pm 5^\circ$ 。

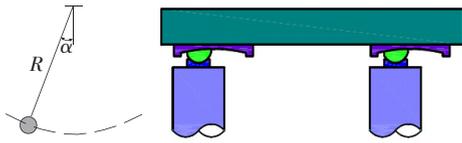


图 2 摩擦摆支座减隔震模型

桥梁结构安装摩擦摆支座后一起组成减震耗能体系,这时等效周期 T_e 表示为:

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \times \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d}\right)}} \quad (2)$$

式中: R 为球面半径; μ 为摩擦系数; d 为摆动位移。

由式(2)可知:摩擦摆减隔震体系自振周期与支承结构本身无关,具有较好的稳定性。只需合理选择球面半径,即可有效延长结构的自振周期。

根据 JTG/T B02-01-2008《公路桥梁抗震设计细则》中图 5.2.1 所示水平设计加速度反应谱,横坐标为结构自振周期 T ,竖坐标为设计加速度反应谱最大值 S_{max} ,当结构自振周期为 $0.1 \sim T_g$ 时,结构地震动加速度最大;当结构自振周期大于 T_g ,地震动加速度呈指数衰减。摩擦摆支座通过增加结构自振周期,使结构远离地震动加速度曲线峰值达到减震的目的,一

般只要将连续梁桥的自振周期延长至 3、4 s 或更长,就可以大大降低桥梁结构的地震响应。

摩擦摆支座的本构模型为双折线形,滞回曲线为规则平行四边形,如图 3 所示,计算时略去支座的恢复弹性,力学参数计算公式如下。

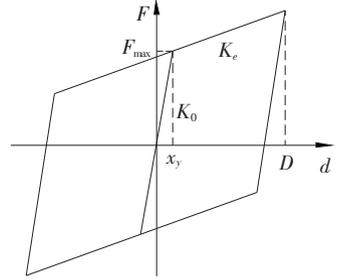


图 3 摩擦摆支座力学本构模型

(1) 初始屈服力 F_{max} :

$$F_{max} = \mu_d \cdot W \quad (3)$$

式中: W 为支座承担的上部结构重; μ_d 为支座设计滑动摩擦系数。

(2) 初始刚度 K_0 :

$$K_0 = \frac{F_{max}}{x_y} \quad (4)$$

式中: x_y 为支座屈服位移。

(3) 屈服后等效刚度 K_e :

$$K_e = W \times \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu_d}{d}\right) \quad (5)$$

2 工程概况

马尾大桥分主副两联,主桥长 795 m,最大跨径 240 m,跨径布置为(71+83+123.5+240+123.5+83+71) m,为连续梁桥(图 4)。该桥小墩号侧接副桥;大墩号侧顺接立交互通,因此其平面在 71 m 跨变宽。桥梁标准宽 42.5 m,设双向八车道,分两幅设计,单幅宽 20.25 m。

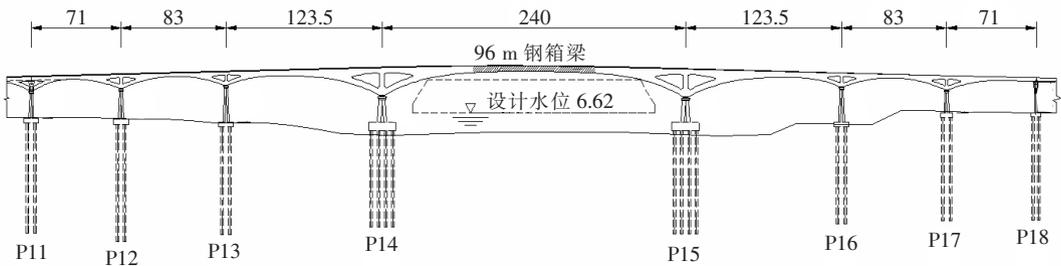


图 4 主桥桥型立面布置图(单位:m)

主梁采用空腹式混合梁连续体系,除主跨跨中 96 m 长采用钢箱梁外,其余均为预应力混凝土箱梁结构。桥墩为顺桥向变厚的八边形实心墩,下接矩形承台配钻孔灌注桩基础。

桥址场地工程地质分区属闽江河道冲积区,中细砂、淤泥和黏土等覆盖层较厚。地震设防烈度为Ⅶ度,动峰值加速度为 $0.10g$,特征周期为 0.65 s 。主桥抗震设防类别为 A 类,设防措施等级为 8 度,设防标准: E1 概率:100 年 10%; E2 概率:100 年 3%。

3 支座布置方案

3.1 方案选择

对于非抗震支座设置的长联连续梁桥在地震作用下,受力一般呈现“纵桥向弯矩主要由固定墩承受,横桥向弯矩由中墩到边墩逐渐减少的对称分布”特点。为了实现结构体系抗震的最好效果,在增设减隔震支座的布置上,应从多种组合方式考虑,才能得到一个合

理的方案。设马尾大桥 P14 主墩为固定墩,采用 FPQZ 摩擦摆支座,支座的布置方案如表 1 所示。

摩擦摆支座本构模型的力学参数中支反力通过全桥建模计算自重作用下得到,其他假设:摩擦系数全部取值 0.03 ,屈服位移 3 mm ,考虑到各支座承载重量区别较大,摆动球面半径 P14、P15 主墩采用 9 m ; P13、P16 墩采用 6 m ; P12、P17 墩采用 7.5 m ; P11、P18 过渡墩采用 5 m 。

3.2 计算分析

马尾大桥采用 SAP2000 有限元软件建立空间动力计算模型,上下结构均用弹性框架单元模拟,桩土作用采用“m”法等代土弹簧模拟,把桩周土按照等刚度原则简化为土弹簧,一端与桩基相连,另一端固定。结构自重自动添加,二期恒载换算为均布荷载,为考虑相邻结构的影响,在过渡墩顶加等效竖向荷载。

地震输入使用安全性评价报告中提供的 E2 水准地震波时程曲线(图 5)。

表 1 支座布置方案

方案	桥墩							
	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
1	—	—	—	FPQZ	—	—	—	—
2	—	—	—	FPQZ	FPQZ	—	—	—
3	—	—	FPQZ	FPQZ	FPQZ	FPQZ	—	—
4	—	FPQZ	FPQZ	FPQZ	FPQZ	FPQZ	FPQZ	—
5	FPQZ							

注:“—”代表纵向活动、横向固结的单向活动普通盆式支座;FPQZ 支座约束类型与常规连续梁桥布置相同。

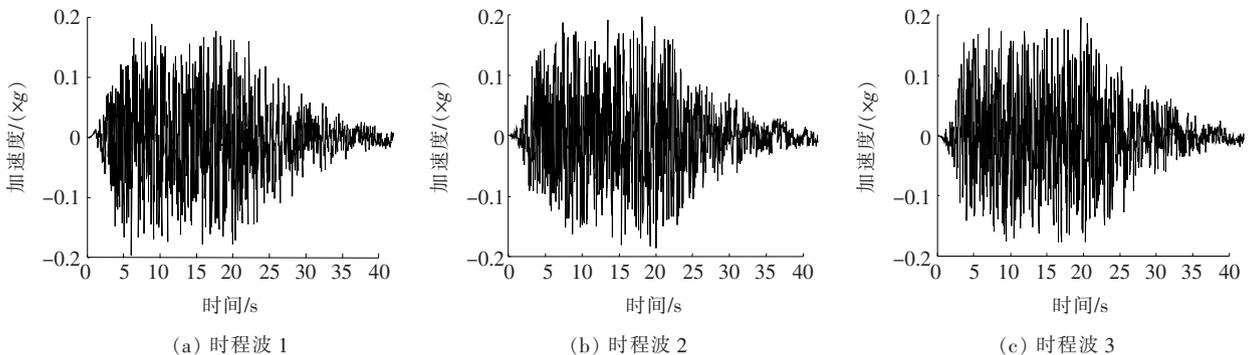


图 5 E2 水准加速度时程曲线

以墩底的剪力和弯矩为研究对象,提取支座不同布置方案对应计算值进行比较,寻找最优目标。

图 6 为 E2 水准下顺桥向地震作用下的内力图,

由图 6 可知:摩擦摆支座布置方案 1~5,墩底内力逐步加大,而结果反映的支座位移量逐步减小。方案 1 虽然墩底内力最小,但 P14 主墩支座位移量接近 36

cm;方案 2 最大位移量为 12.5 cm,墩底内力已有很大改善。按照控制位移为主,控制墩底内力为辅的原则,方案 2 是最优的。

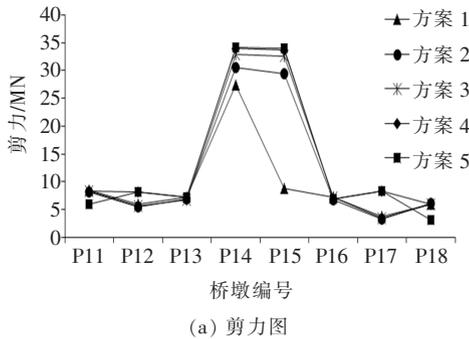


图 7 为 E2 水准下横桥向地震作用下的内力图,由图 7 可知:摩擦摆支座布置方案 1~5,墩底的内力、支座位移量均减小,方案 5 减隔震效果是最优的。

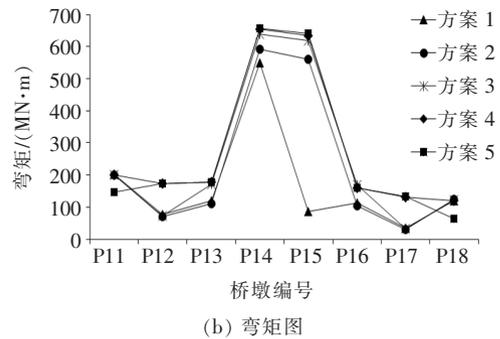


图 6 顺桥向墩底最大内力图

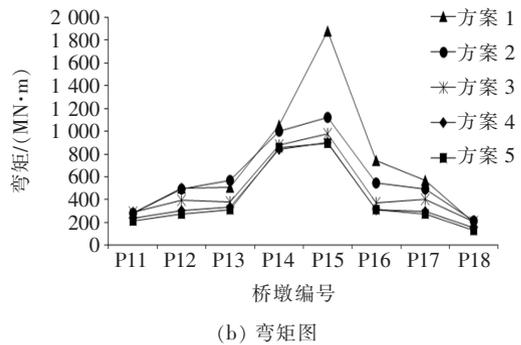
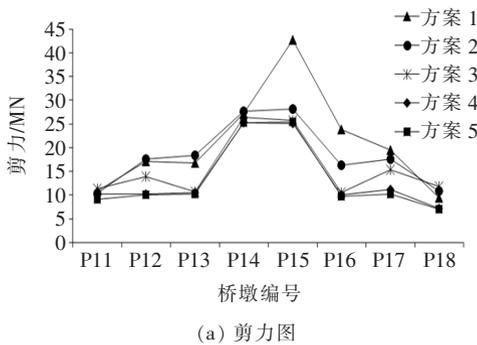


图 7 横桥向墩底最大内力图

3.3 初定方案

综合分析,根据 FPQZ 柱面型摩擦摆支座可以实现单向活动、垂直向减震的特点,拟在 P14、P15 主墩设置常规 FPQZ 摩擦摆支座,其他墩设置柱面型摩擦摆支座,即可满足比较优的减震需求。

4 支座结构设计

4.1 确定力学参数

影响支座减隔震效果的因素为球面接触摩擦系数 μ 和半径 R 。在上述支座布置方案 5 的基础上,分别取摩擦系数 0.02、0.03、0.04、0.05、0.06 几种情况进行分析。计算结果与文献[11]结论相近,地震响应对摩擦系数的变化非常敏感,墩顶位移、墩底剪力和弯矩随摩擦系数的增大而增大,主梁位移逐渐减小。但摩擦系数的增大虽可提升支座耗能能力,但不利于阻断惯性力的传递,所以推荐设计摩擦系数为 0.03。

主墩相比其他墩,支座承载力和结构尺寸都是最大的,因此选其为研究对象,分别取球面半径为 6、

7.5、9、10.5、12 m 等进行分析。结果表明:地震响应对半径的变化并不敏感,地震响应结果差别较小,为适当减少支座的尺寸便于安装,推荐球面半径为 9 m。并根据此结论,结合全桥考虑选择其他墩支座的球面半径。

4.2 主墩支座设计

选择 P14 主墩为固定墩,设置固定型摩擦摆支座,P15 主墩若设置为常规的单向活动型摩擦摆支座,在正常使用情况下,将在温度、收缩、徐变和制动力等水平力的影响下,因球面上的滑动,主梁会发生竖向位移引起次内力。速度锁定器在慢速工作状态下,阻抗力很小,而地震作用时,提供一定的锁定力,可限制支座的水平移动。因此为避免以上问题,P15 主墩摩擦摆支座在原 FPQZ 结构的基础上增加平滑面,并配备纵桥向速度锁定器,进行个别化设计(图 8),以保证结构在正常使用下与常规长联连续桥的约束体系无异,而在地震作用下,转化为减隔震支座与 P14 主墩联合发挥效应,延长结构周期、提升摩擦耗能降低地震响应。

4.3 最终方案确定

依据以上研究成果,通过主桥结构有限元模型在恒载和活载作用下的分析,确定出支座类型及主要设计参数值,如表2所示。

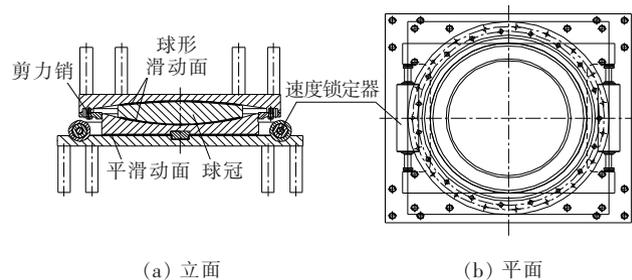
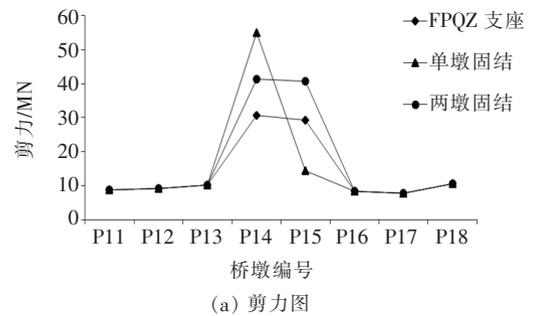


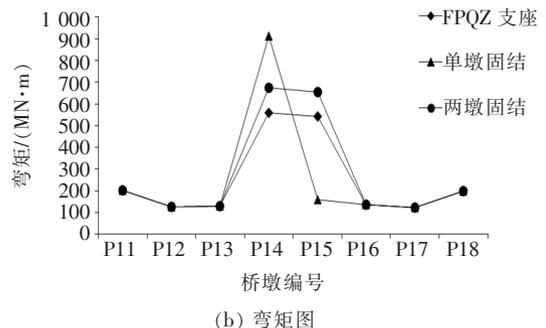
图8 P15主墩支座构造图

表2 支座设置和主要参数

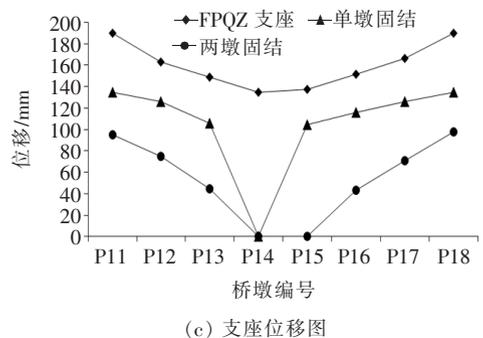
桥墩编号	FPQZ 支座类型	设计承载力/kN	球面半径/m	摩擦系数	备注
P11	柱面型	10 000	4.0	0.03	纵向活动
P12	柱面型	45 000	7.5	0.03	纵向活动
P13	柱面型	40 000	6.0	0.03	纵向活动
P14	固定型	130 000	9.0	0.03	常态固定
P15	活动+锁定器	130 000	9.0	0.03	常态滑动
P16	柱面型	40 000	6.0	0.03	纵向活动
P17	柱面型	50 000	7.5	0.03	纵向活动
P18	柱面型	12 500	5.0	0.03	纵向活动



(a) 剪力图



(b) 弯矩图



(c) 支座位移图

图9 顺桥向墩底最大内力和支座位移图

5 成果验证

为验证 FPQZ 摩擦摆支座布置和设计的减隔震效果,采用 Midas Civil 有限元程序建立全桥空间杆系模型,荷载输入值和桩土作用模拟同 3.2 节。分别与全桥均采用普通球形支座(P14 主墩单独固结和 P14、P15 主墩两处固结)两种工况进行对比,结果见图 9。

由图 9 可知:

(1) 采用 FPQZ 摩擦摆支座结构第 1 阶振型周期延长至 5.71 s,有效延长了大桥的自振周期。反应谱相对加速度系数由 0.83 m/s^2 减少至 0.47 m/s^2 ,具有显著效果。

(2) 由于摩擦摆支座分摊了上部结构产生的惯性力,地震作用下墩底内力明显降低,相比单墩固结工况,顺桥向剪力减震率达 77%,支座位移较普通支座虽有增加,但在合理范围,横桥向减震效果与支座布置方案 5 计算结果相近,达到了预期效果。

6 结论

以马尾大桥为工程背景,结合长联连续梁桥结构特点,在对 FPQZ 摩擦摆支座构造及本构模型分析基础上,对大桥减隔震体系进行设计,通过计算验证了选择方案的效果,并得到以下结论:

(1) 摩擦摆支座是性能良好的减震装置,对长联空腹式连续梁桥可大幅提升其抗震性能,但由于多支点约束的影响,需要对支座的布置合理选择,不仅能达到分散地震效应的效果,而且可充分发挥墩群协同抗震能力,进而节约工程造价。

(2) FPQZ 摩擦摆支座采用双曲面滑动,可以有效减小其尺寸,但在具体结构设计时,还要结合支座球面摩擦系数和半径影响情况综合决定。

(3) 通过速度锁定装置特性实现了摩擦摆支座与滑板支座的有效结合,保障了设计承载力为 130 MN 超常规支座在正常运营状态下不会因外力作用引起梁