

DOI:10.16799/j.cnki.csdfh.2021.01.026

珠海市迎宾南路人行桥动力设计

郭继业, 何帆, 杜建成, 黄政
(珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519000)

摘要: 结合珠海市迎宾南路人行桥工程实例,介绍了人行桥的动力设计方法,对墩梁固结和加装调谐质量阻尼器(TMD)这 2 种振动控制方案进行了分析对比,最终选定了造价低、施工方便、后期维护工作量小的墩梁固结方案。
关键词: 人行桥;动力设计;振动控制
中图分类号: U441+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2021)01-0097-03

0 引言

随着国民经济和现代城市的发展,人们对桥梁景观的要求越来越高,人行桥向大跨、轻柔的方向演变,导致桥梁刚度小,其固有频率接近行人的频率,在人群荷载激励下引发振动,产生不舒适的问题。我国现行《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)仅规定了人行桥的竖向频率不应低于 3 Hz,这对大跨轻柔的新型人行桥要求过高,且未考虑侧向振动问题,已不能满足人行桥设计的需要。对于人行桥的振动和动力设计,国内外已积累了大量的研究成果,很多国家的人行桥设计规范已经成功应用了这些研究成果。本文结合珠海市迎宾南路人行桥工程实例,参考德国人行桥设计指南(EN03,2007)(简称德国标准 EN03)进行动力设计。

1 人行桥动力设计方法

1.1 行人荷载模型和舒适度指标

各国规范的行人荷载模型和舒适度指标见表 1 和表 2^[1]。表 2 中 CL 为舒适级别; f_v 为结构的竖向基频。

综合比较,德国规范 EN03 的行人荷载模型考虑了不同的人流交通量,对竖向和侧向荷载均有规定,舒适度指标考虑了不同等级,各项指标也较适中,可操作性强。因此,本文采用德国规范 EN03 进行动力设计。

1.2 人行桥动力设计步骤^[2]

(1)进行结构动力特性分析,明确结构振型和自振频率 f_i 。

收稿日期:2020-06-16

作者简介:郭继业(1979—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

表 1 各国规范行人荷载模型一览表

规范	荷载模型	施加对象	人流密度	荷载方向
中国规范 CJJ 69—95	无	无	无	无
德国规范 EN03	简谐波荷载	人群	考虑	竖向和侧向
英国规范 BS5400	简谐波荷载	单人	未考虑	竖向
法国指南	简谐波荷载	单人和人群	考虑	竖向和侧向
瑞典规范 Bro 2004	简谐波荷载	人群	未考虑	竖向
欧洲规范 EN1990	未规定	未规定	未考虑	竖向和侧向
ISO 规范 10137	简谐波荷载	单人和人群	未考虑	竖向和侧向

表 2 各国规范舒适度指标一览表

规范	加速度指标	竖向加速度 限值/($m \cdot s^{-2}$)	侧向加速度 限值/($m \cdot s^{-2}$)
中国规范 CJJ69—95	无	无	无
德国规范 EN03	峰值 加速度	$<0.5, CL1$ (好) $0.5 \sim 1.0, CL2$ (中等) $1.0 \sim 2.5, CL3$ (差) $>2.5, CL4$ (不可接受)	$<0.1, CL1$ (好) $0.1 \sim 0.3, CL2$ (中等) $0.3 \sim 0.8, CL3$ (差) $>0.8, CL4$ (不可接受)
英国规范 BS5400	峰值 加速度	$\leq 0.5 \sqrt{f_v}$	无
法国指南	峰值 加速度	<0.5 (好) $0.5 \sim 1.0$ (中等) $1.0 \sim 2.5$ (差) >2.5 (不可接受)	<0.1 (好) $0.1 \sim 0.3$ (中等) $0.3 \sim 0.8$ (差) >0.8 (不可接受)
瑞典规范 Bro 2004	峰值 加速度 平方根	≤ 0.5	无
欧洲规范 EN1990	峰值 加速度	≤ 0.7	正常: ≤ 0.2 满人: ≤ 0.4
ISO 规范 10137	峰值 加速度 平方根	行走:60 倍曲线 静止:30 倍曲线	行走:60 倍曲线 静止:30 倍曲线

(2)校核自振频率 f_i 的敏感范围。竖向和纵向振动频率: $1.25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 2.3 \text{ Hz}$ 、横向振动频率: $0.5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1.2 \text{ Hz}$ (对于竖向和纵向振动频率在 $2.5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4.6 \text{ Hz}$ 的人行桥,可能会由第 2 阶简谐

行人荷载激励产生共振,横向振动不受第2阶简谐行人荷载影响。但已有文献中并未有因第2阶简谐行人荷载激励而发生人行桥振动现象的记载。若自振频率不在上述敏感范围内,则认为人致振动问题自然得到满足;若在敏感范围内,则需校核人致振动的加速度是否满足舒适性要求。

(3)确定设计工况和相应的舒适级别。一般来说可按2种设计工况进行计算,见表3。

表3 动力设计工况及相应的舒适级别

设计工况	人群密度/(人·m ⁻²)	预计出现频率	舒适级别
工况一	0.5	常遇(每天)	CL1
工况二	1.5	偶遇(节假日等特殊日期)	CL2(特殊情况可放宽至CL3)

(4)确定结构阻尼。使用状态下各种材料的阻尼比见表4。

表4 使用状态下各种材料的阻尼比

结构类型	阻尼比最小值 $\xi_{\min}/\%$	阻尼比平均值 $\xi_{\text{mean}}/\%$
钢筋混凝土结构	0.8	1.3
预应力混凝土结构	0.5	1.0
钢-混凝土组合结构	0.3	0.6
钢结构	0.2	0.4

(5)进行人致振动响应分析。行人荷载采用均布的简谐波荷载 $p(t)$,单位为 N/m²,表达式为:

$$p(t)=P \times \cos(2 \pi f_i t) \times n' \times \psi \quad (1)$$

$$\text{当人群密度 } d < 1.0 \text{ 人/m}^2 \text{ 时, } n' = \frac{10.8 \sqrt{\xi \times n}}{S} \quad (2)$$

$$\text{当人群密度 } d \geq 1.0 \text{ 人/m}^2 \text{ 时, } n' = \frac{1.85 \sqrt{n}}{S} \quad (3)$$

式中: P 为荷载幅值(竖向 $P=280$ N,纵向 $P=140$ N,横向 $P=35$ N); f_i 为桥梁某一阶模态的频率值; n' 是加载面积为 S 时的等效行人密度; n 是加载面积为 S 时的行人数量, $n=S \times d$; ξ 为结构阻尼比; ψ 为折减系数,按图1取值。

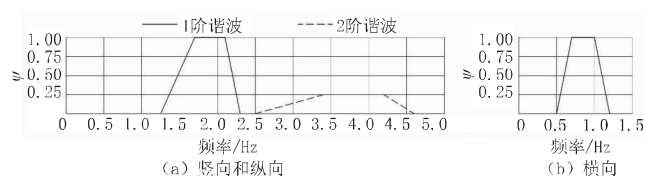


图1 折减系数 ψ 的取值

按式(1)~式(3)算出行人简谐波荷载 $p(t)$,按图2的方式加载到频率为 f_i 的模态振型上。

(6)校对侧向锁定标准。对于频率小于 1.2 Hz 的

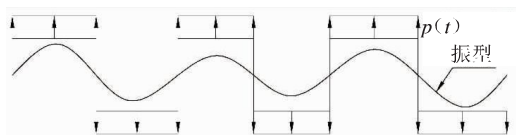


图2 根据振型施加行人简谐波荷载

横向振动,当产生较大振幅时(一般认为横向加速度大于 $0.1 \sim 0.15 \text{ m/s}^2$),应验证其产生横向动力失稳的临界行人数量是否大于设计行人数量。侧向锁定的触发行人数量,也就是使整体阻尼突然消失、结构响应突然增加的数量 N_L ,按下式计算:

$$N_L = \frac{8 \pi \xi m^* f}{k} \quad (4)$$

式中: ξ 为结构阻尼比; m^* 为模态质量; f 为固有频率; k 为常量(频率为 $0.5 \sim 1 \text{ Hz}$ 时,大约为 $300 \text{ N} \cdot \text{s/m}$)。

(7)进行振动控制设计。如舒适度或侧向锁定临界行人数量不满足要求,需采取措施改善人行桥的动力性能。目前主要有调整质量、调整结构刚度和调整结构阻尼3种方法。这3种方法中:调整质量方法一般通过增大模态质量来减小行人荷载下的动力响应,这种方法尤其适用于悬带人行桥,但增加质量会导致结构频率降低,对其他桥型通常效果不佳;调整结构刚度方法一般通过改变结构受力体系、增加梁高等方法实现,将结构的频率提高到敏感范围外;调整结构阻尼方法一般通过驱动结构内部特殊单元,或安装外部阻尼设备,以增加结构阻尼,减小结构的振动响应,而外部阻尼设备是用于吸收过量结构振动的一种有效方法,常用的有调谐质量阻尼器(TMD)、黏滞阻尼器和调谐液体阻尼器(TLD)等。

2 工程实例

珠海市迎宾南路人行桥位于迎宾南路与粤华路交叉口,目前西侧粤华路口有1座人行天桥。本次设计保留西侧现状天桥主体结构,新建天桥(平面为 α 型)跨越迎宾南路和东侧粤华路,与现状天桥通过外部装饰连成整体(平面为 ∞ 型)。

新建天桥主梁采用钢混组合梁,从西向东跨径组合为 $(5.113 \text{ m} + 40.889 \text{ m} + 49.45 \text{ m} + 2.85 \text{ m}) = 98.302 \text{ m}$,组合梁标准段总高度为 1.5 m ,上方设提篮拱,拱跨度 82.295 m ,铅垂面内矢高 8.9 m ,矢跨比 $1/9.25$,两拱之间设钢管风撑,拱和主梁采用吊杆连接。下部结构采用钢管(箱)混凝土墩柱配承台和钻孔灌注桩基础。天桥总体布置见图3。

2.1 结构动力特性

吊杆采用桁架单元模拟,其余构件采用梁单元模拟,全桥有限元模型见图4。

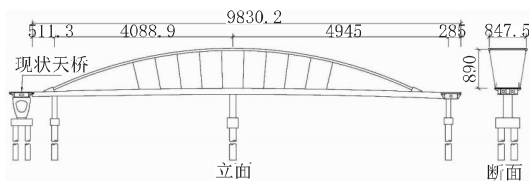


图3 迎宾南路人行桥总体布置图(单位:cm)

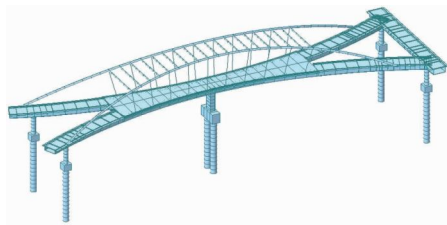


图4 全桥有限元模型

结构竖向1阶自振频率为1.57 Hz,满足 $1.25\text{ Hz} \leq f_i \leq 2.3\text{ Hz}$,位于竖向频率的敏感范围;结构横向1阶自振频率为0.57 Hz,满足 $0.5\text{ Hz} \leq f_i \leq 1.2\text{ Hz}$,位于横向频率的敏感范围,需进行人致振动分析。

2.2 人致振动分析

按表3,进行2种设计工况计算。

工况一:人群密度 $d=0.5\text{ 人/m}^2$,桥面面积 $S=961\text{ m}^2$,桥上总人数 $n=S \times d=480.5\text{ 人}$,结构阻尼比 $\xi=0.006$ (查表4),等效行人密度 $n'=\frac{10.8\sqrt{\xi \times n}}{S}=0.0191\text{ 人/m}^2$,竖向折减系数 $\psi=0.711$,横向折减系数 $\psi=0.35$ (查图1),单位面积上竖向行人荷载 $p(t)=3.80 \times \cos(3.14\pi t)\text{ N/m}^2$,单位面积上横向行人荷载 $p(t)=0.234 \times \cos(1.14\pi t)\text{ N/m}^2$ 。

工况二:人群密度 $d=1.5\text{ 人/m}^2$,桥面面积 $S=961\text{ m}^2$,桥上总人数 $n=S \times d=1441.5\text{ 人}$,等效行人密度 $n'=\frac{1.85\sqrt{n}}{S}=0.0731\text{ 人/m}^2$,单位面积上竖向行人荷载 $p(t)=14.55 \times \cos(3.14\pi t)\text{ N/m}^2$,单位面积上横向行人荷载 $p(t)=0.895 \times \cos(1.14\pi t)\text{ N/m}^2$ 。

按图2的加载方式将工况一、工况二的竖向行人荷载、横向行人荷载分别施加在振型计算模型上,根据计算结果,工况二竖向最大加速度较大,舒适级别不满足要求,需进行竖向振动控制设计,见表5。

表5 最大加速度和舒适级别

设计 工况	竖向 最大 加速度 $/(m \cdot s^{-2})$	竖向舒 适级别	横向 最大 加速度 $/(m \cdot s^{-2})$	横向舒 适级别	是否需 进行动力 设计
工况一	0.35	CL1(好)	0.007	CL1(好)	否
工况二	1.33	CL3(差)	0.028	CL1(好)	是

2.3 振动控制设计

根据本桥的特点,提出2种振动控制方案:墩梁固结和加装TMD。

2.3.1 墩梁固结方案

采用墩梁固结后,竖向最大加速度明显减小,舒适级别满足要求,见表6。

表6 最大加速度和舒适级别

设计工况	竖向最大加速度 $/(m \cdot s^{-2})$	竖向舒适级别	舒适级别 是否满足
工况一	0.15	CL1(好)	是
工况二	0.56	CL2(中等)	是

2.3.2 加装TMD方案

TMD参数包括质量比、频率比和阻尼比,计算过程如下^[2]:(1)假定TMD质量与减振模态广义质量的比值 $\mu=0.04$ (一般来说, $0.01 < \mu < 0.06$);(2)确定最优频率比 $\alpha_{opt}=\sqrt{\frac{1}{1+\mu}}=0.98$;(3)确定最优阻尼比 $\xi_{opt}=\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}}=0.12$;(4)计算TMD的物理参数,TMD的质量 $m_{TMD}=\mu \times M_i=0.04 \times 14\ 333=573\text{ kg}$ 、TMD的频率 $f_{TMD}=f_i \times \alpha_{opt}=1.57 \times 0.98=1.54\text{ Hz}$ 、TMD的刚度 $k_{TMD}=(2\pi f_{TMD})^2 \times m_{TMD}=(2 \times 3.14 \times 1.54)^2 \times 573=536\text{ kN/m}$ 、TMD的阻尼系数 $c_{TMD}=2m_{TMD} \times 2\pi f_{TMD} \times \xi_{opt}=2 \times 573 \times 2 \times 3.14 \times 1.54 \times 0.12=13.3\text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。

在40.889 m跨、49.45 m跨跨中位置安装TMD后,竖向最大加速度明显减小,舒适级别满足要求,见表7。

表7 最大加速度和舒适级别

设计工况	竖向最大加速度 $/(m \cdot s^{-2})$	竖向舒适级别	舒适级别 是否满足
工况一	0.11	CL1(好)	是
工况二	0.43	CL1(好)	是

2.3.3 方案选定

墩梁固结方案造价低、施工方便、后期维护工作量小,且能较好改善桥梁的抗振性能,因此最终采用墩梁固结方案。

3 结 语

(1)我国现行《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—95)仅规定了人行桥的竖向频率不应低于3 Hz,这对大跨轻柔的新型人行桥要求过高,且未考虑侧向振动问题,已不能满足人行桥设计的需要。

(2)大跨轻柔人行桥可参考德国人行桥设计指南(EN03,2007)进行动力设计。

(3)对于舒适性或侧向锁定临界行人人数不满足要
(下转第123页)

改造管线敷设以明挖开槽施工为主,施工确有困难的路段,采用顶管施工。

整体明挖施工占 78.2%,顶管施工占 19.5%,钢板桩支护占 2.3%。

4.4 缺陷管道修复

根据排水管道检测结果,针对设计范围内的 3 级、4 级缺陷排水管网,采用非开挖修复方式处理。

设计采用管段整体原位固化法和点状原位固化法对结构性缺陷进行修复。

对 3 级、4 级破裂、变形采用管段式原位固化法进行修复;对支管 3 级、4 级暗接、树根等进行点状原位固化法修复。对沉积、结垢等功能性缺陷管段采用清掏养护处理^[4]。

4.5 初期雨水处理

方案一:增设初雨调节池。

该项目管网末端,泾河大道以南,泾河河堤以北,为规划绿地,用地具备条件。为改善城市水环境,远期结合用地规划于雨水管网末端出口处,在排入泾河之前,在规划绿地内增设初雨调节池。

方案二:

结合远期城市规划,于泾河大道南侧规划绿地、设置人工景观水体作为氧化塘,过滤后排入泾河。在雨水进入景观水体前,设置沉淀池对雨水进行初步物理沉淀,去除较大杂质、泥沙等。

4.6 交通导改

雨污分流工程涉及的道路现状主要位于泾河新城老城区,其承担的交通主要为过境交通功能及集散交通。

该项目施工期交通组织方案设计从宏观和微观两个层面制定。

宏观方面,主要从区域交通组织入手,结合现状路网,通过采取在外围道路重要交叉口设置绕行提示牌等交通管理措施,设置提醒车辆道路施工信息的标志,在进入施工道路区域之前,提前连续设置引导过境车辆驶入施工区域外围道路上快速通过。

以先施工主干管原则、交通组织协调性原则和交通负荷均分原则将二期拟建道路分为两个批次,不同施工期通过不同道路疏解交通。

微观方面,根据施工先后顺序,施工工艺、围挡范围等不同,分别进行交通导改方案设计,分为双向四车道保通、双向两车道保通、单向通行、车行道暂时封闭等情况。

5 结 语

本文以陕西省泾阳县老县城为例,系统地阐述了项目的勘察过程,以及方案设计并对此类改造项目的难点进行分析,并从设计方案上对重难点进行解决。其内容可为类似项目提供案例参考。

参考文献:

[1] 杜良法,李先军.复杂条件下城市地下管线探测技术的应用[J].地质与勘探,2007(3):119-123.
[2] 韩世平,黄晨,叶公健,等.雨污分流改造保留合流管为雨水管的工程实例[J].中国给水排水,2007,23(8):50-52.
[3] 陈贻龙,汪传新,牛樱,等.石井河流域雨污分流工程设计[J].城市道桥与防洪,2009(1):8+48-52.
[4] 王东辉.排水管道检测与非开挖修复技术的应用[J].城市道桥与防洪,2013(1):9+87-91.

(上接第 99 页)

求的人行桥,可通过调整质量、刚度或阻尼进行振动控制。

(4)本桥采用墩梁固结(此方案造价低、施工方便、后期维护工作量小),通过提高结构刚度,使人致振动舒适性满足要求。

参考文献:

[1] 费梁.大跨径钢结构人行桥人致振动分析与控制[D].南京:东南大学,2018.
[2] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.