

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.06.024

# 大挑臂桩柱式桥墩抗震性能分析

程利鹏

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:**以南宁市某大桥引桥为工程实例,分析采用桩柱形式的双柱墩结构的抗震性能。结果表明,上部结构采用小箱梁结构,并通过合理的跨径布置和支座选型,能够保证下部结构在按静力受力要求配筋的情况下,在E1和E2地震作用下均处于弹性工作状态。

**关键词:**桩柱式;双柱墩;抗震分析

**中图分类号:** U442.5+5

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2021)06-0095-03

## 0 引言

广西部分地区地下岩溶现象十分普遍,在桥梁设计过程中应尽量采用少桩、大桩的理念,以减少桩基施工中地质情况的不确定性风险。因此,桩柱式桥墩在当地工程中较普遍。相对于群桩基础,桩柱式桥墩桩基直接承受立柱传递的荷载,特别是弯矩的作用。对于抗震设防要求较高的大型工程,为了满足桩基在罕遇地震作用下仍处于弹性工作状态的要求,合理上部结构形式和支承体系选择至关重要。

## 1 工程背景

某大桥位于南宁市区西北部某镇,线路分幅设计,桥梁和引道全长约1.08 km。

桥梁工程包括新建跨右江 $L=(75+180+75)$  m的钢混凝土组合连续梁桥、两岸标准跨径29 m的简支变连续小箱梁桥,分幅设计、分幅施工,单幅标准桥宽23.5 m。

引桥采用标准跨径29 m的简支变连续小箱梁,3~4跨一联,分幅设计,单幅标准桥宽23.5 m(除去两侧栏杆滴水檐宽0.15 m,实际净宽23.2 m),两幅桥之间净距1.5~5 m。单幅桥设置7片小箱梁,标准梁距3.34 m,单片梁顶宽2.4 m,底宽1.2 m,高1.6 m,梁底横向水平,梁顶设2%横坡。

桥墩采用预应力盖梁+双桩柱式结构,盖梁采用大挑臂梯形预应力盖梁,立柱尺寸1.5 m×1.5 m(带圆弧),桩基采用直径2 000 mm钻孔灌注桩,桩

基持力层为中风化灰岩,桩基进入完整岩层不小于2 m,桩之间设置系梁,如图1所示。

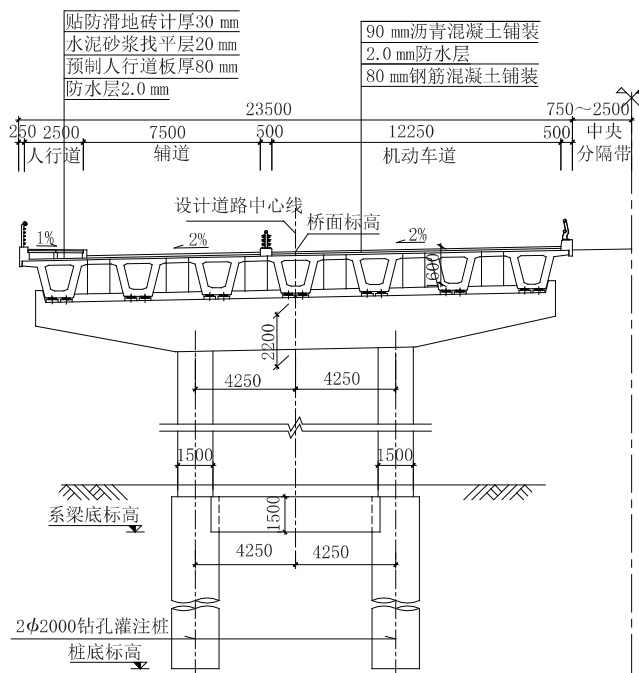


图1 某大桥引桥横断面布置图(单位:mm)

## 2 结构抗震设防目标

桥梁下部结构抗震设计理论可分为强度设计、延性设计和减隔震设计<sup>[1-3]</sup>。采用强度设计时,即使在罕遇地震作用下,也要求结构仍处于弹性工作状态。其优点是震后结构无损伤,无须修复;缺点是对于地震效应较大的地区下部结构截面和配筋设计较困难,经济性较差。采用延性设计理念时,要求在多遇地震作用下结构处于弹性工作状态,在罕遇地震作用下立柱可进入塑性状态,在立柱地震作用弯矩较大的部位形成塑性铰,通过塑性铰耗能并降低结构的自振周期,进而降低地震作用效应,使下部结构设计较为经济。

收稿日期: 2021-03-28

作者简介:程利鹏(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

其缺点在于罕遇地震作用下,立柱塑性铰区结构产生一定程度的损伤,震后需要修复。因而,对于延性设计要控制立柱的塑性铰区塑性转角和墩顶位移,进而控制立柱的损伤程度,做到“小震不坏、中震可修、大震不倒”。采用减隔震设计时,通常是通过变形能力和耗能能力较强的减隔震支座将上部结构与下部结构隔开,通过大幅增加结构自振周期同时伴以支座耗能,使地震作用效应大幅降低。但减隔震设计使用的支座单价比常规支座高,对支座变形空间需求也较大。

根据本工程场地地震安全性评价报告,本工程范围内 E1 地震作用水平向地震加速度动峰值  $0.099g$ ,特征周期  $0.35\text{ s}$ ;E2 地震作用水平向地震加速度峰值  $0.152g$ ,特征周期  $0.4\text{ s}$ ,引桥设防类别为乙类。根据地震峰值加速度,场地的地震强度介于 6 度区和 7 度区之间。相比于盆式支座,本桥采用板式橡胶支座能有效降低结构的自振基频,减小结构的地震响应,并且可以通过调节板式橡胶支座的厚度来平衡不同立柱高度的桥墩的刚度差。另外,还避免了采用固定支座导致一联中某个单墩受力不利的问题。

根据抗震设防类别要求,E1 地震作用下要求立柱和桩基保持弹性工作状态,E2 地震作用下立柱可以进入塑性工作状态,但桩基作为能力保护构件必须仍然保持在弹性工作状态。对于桩柱式桥墩来说,桩基直接承受立柱传递而来的弯矩和轴力,而桩基采用圆形截面,抗弯效率较低,桩基一般难以在立柱已经屈服的情况下只身仍保持弹性工作状态,这就形成了桩柱式桥墩抗震设计的特点:为了保持桩基的弹性工作状态,立柱也必须保持弹性工作状态。因此,本工程下部结构设计拟采用强度设计的方法,使下部结构在 E1 和 E2 地震作用下均处于弹性工作状态。

### 3 桥墩抗震分析

引桥采用简支变连续小箱梁,3~4 跨一联,标准跨径为  $3 \times 29.0\text{ m}$  和  $4 \times 29.0\text{ m}$ ,采用板式橡胶支座。选取标注跨径为  $3 \times 29.0\text{ m}$  的一联进行抗震分析。

#### 3.1 桥墩构造和配筋

桥墩盖梁的高度为  $2.2\text{ m}$ ,立柱的尺寸为  $1.7\text{ m} \times 1.7\text{ m}$ (带圆弧倒角),立柱的高度约为  $8\text{ m}$ 。桩基直径为  $2.0\text{ m}$ ,与上部立柱直接相连,桩顶采用系梁连接。系梁的高度为  $1.5\text{ m}$ ,宽度为  $1.7\text{ m}$ 。立柱配筋每边

为中间 8 根  $\phi 28$  的 HRB400 钢筋加倒角处 3 根  $\phi 28$  的 HRB400 钢筋。系梁的上缘和下缘分别配置 11 根  $\phi 25$  的 HRB400 钢筋,如图 2 所示。盖梁采用 C50 混凝土,立柱采用 C40 混凝土,系梁采用 C35 混凝土。

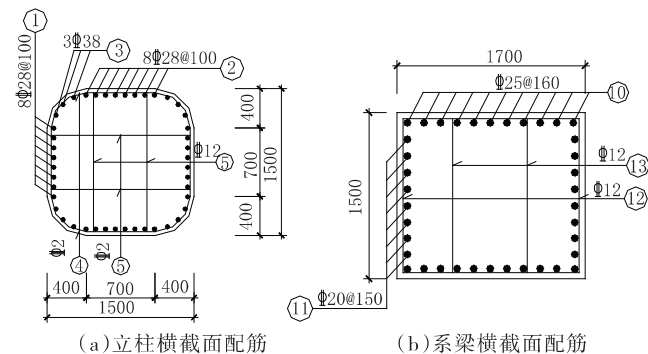


图 2 桥墩配筋图(单位:mm)

#### 3.2 边界条件刚度分析

桥梁从上到下的传力路径为小箱梁—支座—盖梁—立柱—桩基,因此在建立抗震分析模型时涉及两处连接部位的模拟:支座与桩基。分别论述如下:

板式橡胶支座可采用线性弹簧单元模拟,其剪切刚度可按式计算:

$$k = \frac{G_d A_r}{\sum t} \quad (1)$$

式中: $G_d$ 为板式橡胶支座的动剪切模量, $\text{kN/m}^2$ ,一般取  $1\,200\text{ kN/m}^2$ ;  $A_r$ 为橡胶支座的剪切面积, $\text{m}^2$ ;  $\sum t$ 为橡胶层的总厚度, $\text{m}$ 。

桩基刚度应采用六弹簧模型进行模拟,各方向的刚度系数可采用 m 法求解,求出单位力作用下的位移即可。

#### 3.3 计算模型

对于桥墩地震作用效应的计算,采用空间有限元分析软件 Midas 对桥宽  $B=23.5\text{ m}$ 、跨径  $L=3 \times 29.0\text{ m}$  的一联建立计算模型。为了考虑相邻一联的影响,在左右各建立一联边界联,如图 3 所示。输入地震作用参数:E1 峰值加速度  $0.099g$ ,特征周期  $0.35\text{ s}$ ;E2 峰值加速度  $0.152g$ ,特征周期  $0.4\text{ s}$ 。模型通过剪切弹簧考虑板式橡胶支座的刚度,六自由度弹性约束考虑桩基的基础柔度的影响,采用多振型反应谱法计算立柱地震效应。

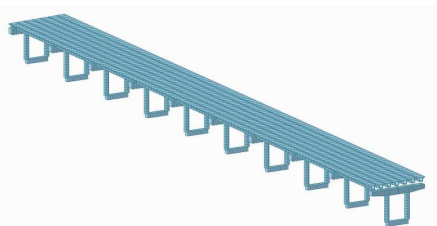


图 3 引桥桥墩地震效应计算模型

3.4 分析结果

提取中间一联受力较不利の中墩在 E1 和 E2 地震作用下,横桥向和顺桥向的响应如图 4、图 5 所示。

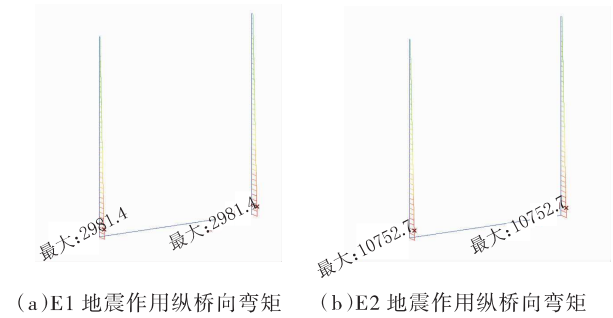


图 4 地震作用下立柱纵桥向弯矩(单位:kN·m)

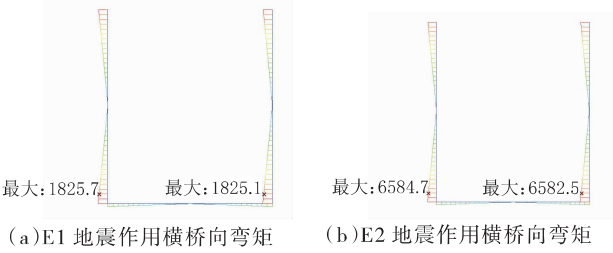


图 5 地震作用下立柱横桥向弯矩(单位:kN·m)

上述结果是单独地震力作用下的效应,还应与恒载、预应力效应相组合。组合后的内力结果见表 1~表 3。为了判断立柱是否屈服,采用 Ucfyber 程序计算立柱的相应轴力下的抗弯能力。同时需注意的是,E1 地震时材料强度取设计值,E2 地震时材料强度取标准值。

表 1 纵桥向立柱强度检算结果

| 地震强度 | 验算截面 | 组合轴力 /kN | 组合弯矩 / (kN·m) | 等效屈服弯矩 / (kN·m) | 验算结果 |
|------|------|----------|---------------|-----------------|------|
| E1   | 墩底   | 8 170    | 2 981         | 7 675           | 满足   |
| E2   | 墩底   | 8 170    | 10 752        | 11 530          | 满足   |

表 2 E1 横桥向立柱强度检算结果

| 立柱  | 验算截面 | 组合轴力 /kN | 组合弯矩 / (kN·m) | 等效屈服弯矩 / (kN·m) | 验算结果 |
|-----|------|----------|---------------|-----------------|------|
| 受拉侧 | 墩顶   | 7 033    | 2 155         | 7 310           | 满足   |
|     | 墩底   | 7 564    | 2 464         | 7 575           | 满足   |
| 受压侧 | 墩顶   | 8 433    | 2 155         | 7 970           | 满足   |
|     | 墩底   | 8 964    | 2 464         | 8 194           | 满足   |

表 3 E2 横桥向立柱强度检算结果

| 立柱  | 验算截面 | 组合轴力 /kN | 组合弯矩 / (kN·m) | 等效屈服弯矩 / (kN·m) | 验算结果 |
|-----|------|----------|---------------|-----------------|------|
| 受拉侧 | 墩顶   | 5 211    | 6 696         | 9 148           | 满足   |
|     | 墩底   | 5 742    | 7 224         | 9 447           | 满足   |
| 受压侧 | 墩顶   | 10 255   | 6 696         | 11 230          | 满足   |
|     | 墩底   | 10 786   | 7 224         | 11 620          | 满足   |

从表 1~表 3 中可以看出,E1 和 E2 地震作用下立柱均处于弹性工作状态,满足设计要求。

在 E2 地震作用下,立柱未屈服,立柱的抗剪强度需求为 1 766 kN。按照《城市桥梁抗震设计规范》进行截面抗剪强度验算结果为 3 908 kN,立柱的抗剪强度满足要求。

4 桩基抗震分析

桩基采用直径 2.0 m 的钻孔灌注桩,桩基配筋采用 36 根  $\phi 32$  钢筋沿桩截面环形布置。E2 地震作用下桩基按能力保护构件计算桩身强度。

E1 纵向地震作用下,桩顶的最大弯矩为 2 981 kN·m,轴力为 8 170 kN;E1 横向地震作用下,桩顶的最大弯矩为 2 464 kN·m,最小轴力为 7 564 kN。

E2 纵向地震作用下,桩顶的最大弯矩为 10 752 kN·m,轴力为 8 170 kN;E2 横向地震作用下,桩顶的最大弯矩为 7 224 kN·m,最小轴力为 5 742 kN。

考虑最不利组合,以最小单桩轴力时,验算桩身抗弯强度,利用 Ucfyber 程序求得 E2 横向地震作用下,桩基的屈服弯矩为 12 870 kN·m,如图 6 所示。桩基处于弹性工作状态,满足设计要求。

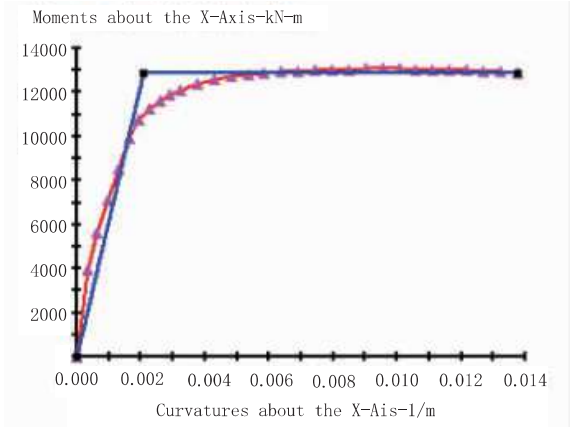


图 6 桩基等效屈服弯矩计算

5 结 语

(1)本文以南宁市某大桥引桥为工程实例,对上部结构为连续小箱梁、采用板式橡胶支座,下部结构为桩柱式双柱墩的桥梁受力体系进行了抗震分析。结果表明,在按静力要求配筋的情况下,桥梁下部结构在 E1 和 E2 地震作用下均保持弹性工作状态。

(2)桥梁下部结构抗震设计理论可分为强度设计、延性设计和减隔震设计。实际设计时应根据具体条件,在满足结构安全的前提下,尽可能满足经济性的

(下转第 104 页)

算。采用 Madis/Civil 空间分析程序进行计算,得到各工况计算结果及成桥状态失稳模态(见表5);主桥结构第1阶、第2阶失稳模态见图8、图9。

表5 弹性屈曲特性表

| 阶数 | 1类安全稳定系数  | 失稳模态   |
|----|-----------|--------|
| 1  | 15.045 48 | 主梁面外失稳 |
| 2  | 30.030 04 | 边塔面内失稳 |
| 3  | 42.917 64 |        |
| 4  | 49.657 69 |        |
| 5  | 50.129 85 |        |

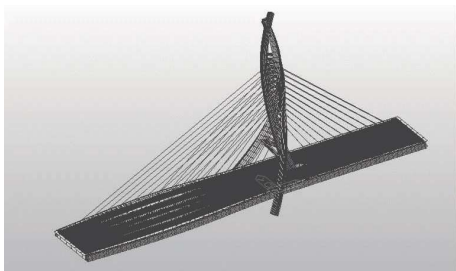


图8 主桥结构第1阶失稳模态



图9 主桥结构第2阶失稳模态

成桥状态1类稳定系数约为15,远大于4,表明结构在施工阶段以及成桥运营阶段的稳定性较好。

主要是因为主塔的刚度较大,而空间索面的布置对桥梁的侧倾提供了较好的约束作用。

## 6 结 语

(1)在设计中,为了保守起见,通常在第1体系中不考虑UHPC桥面铺装参与受力,但在第2体系分析中UHPC铺装对桥面的刚度及强度均有较大贡献,计算中应加以考虑,可更接近于真实受力情况。

(2)为了避免中塔柱,主梁桥面采用了开孔的处理手段。支座处横隔板被中塔柱切断,原有的横向传力模式被破坏,邻近孔洞的2个横隔板受力而产生应力集中现象,应对该处横隔梁进行加强处理。

(3)在成桥索力作用下塔顶有超过15 cm的水平位移,索长设计计算中应考虑该因素的影响。

(4)空间三维斜拉桥设计时,需要采用三维放样或类似的BIM手段,索、塔、连杆、梁的相对关系必须明确,否则很容易造成位置冲突的问题。

(5)桥塔的布置及刚性连接使得主塔的整体刚度较大,而空间索面的布置对桥梁的侧倾能提供了很好的约束作用。

### 参考文献:

- [1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2014.
- [2] 郑钊.空间曲面钢塔半漂浮体系钢梁斜拉桥设计[J].城市道桥与防洪,2020(7):85-90.
- [3] JTG/T D65-01—2007:公路斜拉桥设计细则[S].
- [4] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社,2012.

(上接第97页)

要求。具体到广西南宁地区,由于地下溶洞发育,一般采用少桩、大桩的设计思路。目前南宁抗震设防要求已经提高到Ⅶ度,本文的桥梁结构体系将具有较好的适用性和经济性。

### 参考文献:

- [1] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].2版.北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 范立础,卓卫东.桥梁延性抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].