

# 轨道交通高架桥下部结构水平变形计算及控制探讨

马 佳

(上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092)

**摘 要:**城市轨道交通高架桥梁设计中, 由于多采用无缝线路设计来提供列车运行时的平稳性和舒适性, 因此轨道结构多为长钢轨形式。由此对高架桥梁的下部结构产生了一个特殊的长轨纵向力。为使下部结构变形在纵向力作用下控制在规范要求范围内, 必须在设计中对下部结构在长轨纵向力作用下的表现进行研究。通过明珠线一期北延伸工程的设计实践认为: 在长轨高架桥下部结构设计中合理地选择墩柱及基础形式是控制下部结构变形的关键, 也是优化下部结构设计的关键。

**关键词:**城市轨道交通; 高架桥梁; 墩柱; 长轨纵向力; 水平位移; 设计; 上海市

**中图分类号:** U443.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)02-0034-03

## 1 下部结构水平变形分析

下部墩柱结构水平变形一般以墩顶水平位移值控制, 它是由三部分的变形组成的:

- (1) 由基础水平变形产生的墩顶水平位移。
- (2) 由基础转角变形产生的墩顶水平位移。
- (3) 由墩柱变形产生的墩顶水平位移。

墩柱在水平荷载作用下的水平位移可按结构力学悬臂梁方式直接计算得到。

基础在水平荷载作用下的水平变位则要复杂得多, 因为其周围的介质是可以提供反力的土体。桩基和周围的土体将表现为共同工作。因此桩基周围土体抗力分布计算是基础在水平荷载作用下的水平变位计算中的一个关键点。

计算基础在水平荷载作用下水平抗力的计算方法主要有: 极限平衡法、弹性地基反力法、复合地基反力法。

其中弹性地基反力法中又根据不同的地基土反力分布假设分为常数法、m 法、C 值法、K 法和双参数法等多种不同的计算方法。目前国内公路规范和铁路规范中推荐采用的是 m 法, 同时它们又根据各自的工程特点对 m 法计算参数进行了不同的修正, 但对地基土反力分布的基本假设是一直的, 即将土体假设为弹性体, 其弹性参数地基系数随深度呈线性增加。

城市轨道交通高架桥梁的设计目前在国内尚无一套完善规范, 实际设计时基本是以铁路规范为基

础, 部分参考公路规范的相关条文。

## 2 影响下部结构水平变形因素的讨论

墩柱在水平荷载作用下水平位移的控制因素比较简单, 主要是截面尺寸, 墩柱高度和截面材料属性。以图 1 的桥墩结构为例:

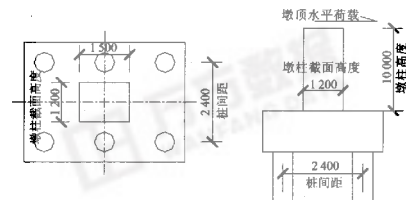


图 1 桥墩结构(单位:mm)

假设墩顶水平力为 300 kN, 通过表 1、表 2 的对比, 可以看出墩柱截面尺寸和墩柱高度对墩顶变形的影响。

表 1 墩柱截面尺寸对墩顶变形的影响

| 墩柱尺寸(截面宽×<br>截面高)(m <sup>2</sup> ) | 墩柱变形引起的墩顶<br>变形值(mm) | 承台转角引起的墩顶<br>变形值(mm) |
|------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1.5×1.2                            | 140                  | 75                   |
| 1.5×1.8                            | 42                   | 75                   |
| 1.5×2.4                            | 18                   | 75                   |

由表 1 可见, 墩柱截面尺寸对墩柱变形引起的墩顶变形值的影响也是很大的。

表 2 墩柱高度对墩顶变形的影响

| 墩柱高度 H(m) | 墩柱变形引起的墩顶<br>变形值(mm) | 承台转角引起的墩顶<br>变形值(mm) |
|-----------|----------------------|----------------------|
| 10        | 18                   | 21                   |
| 15        | 59                   | 43                   |
| 20        | 140                  | 75                   |

由表 2 可见, 随墩柱高度增加, 墩柱自身变形增

收稿日期: 2005-07-03

作者简介: 马佳(1977-), 男, 浙江金华人, 工程师, 从事轨道交通高架结构设计。

加很快。因此在划分下部结构类型时,随着墩柱高度增加,应注意按墩柱高度划分的档次要逐渐加密,这样设计将更加合理。

基础在水平荷载作用下水平变位的影响因素有  $m$  的取值、桩基础的布置情况、桩的截面尺寸、桩基材料属性以及桩基施工方法等等。

在运用  $m$  法计算桩基水平荷载作用下变形值时,  $m$  值的取值是唯一反映土体性质的参数,它将直接影响计算结果。在地质勘察中可以通过一定的实验方法得到原状土的  $m$  值,但与土体在经受反复荷载作用后的  $m$  值有一定的差别。目前根据工程经验,上海地区  $m$  值的取值一般在  $4\,000 \sim 5\,000\text{ kN/m}^4$ ,这一取值也同样运用于上海地区基坑围护设计的土体抗力计算中。提高  $m$  值对控制由基础水平变形产生的墩顶水平位移和由基础转角变形产生的墩顶水平位移有一定的作用,仍然以上的桥墩结构为例:

假设墩顶水平推力为  $300\text{ kN}$ ,比较不同  $m$  值条件下的水平变形值见表 3。

表 3 不同  $m$  值条件下的水平变形值

| $m$ 值( $\text{kN/m}^4$ ) | 承台水平变形引起的墩顶变形值(mm) | 承台转角引起的墩顶变形值(mm) |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| 1000                     | 11                 | 21               |
| 10000                    | 4                  | 18               |
| 100000                   | 2                  | 16               |

由表 3 可见,  $m$  值的提高对承台水平变形引起的墩顶变形有较大的影响,这种影响随着  $m$  值的增加而减弱,因此一味地通过改变承台周边土体性质,提高  $m$  值,对控制墩顶变形效果并不一定就好。而且  $m$  值对承台转角引起的墩顶变形的影响较小。

对承台转角引起的墩顶变形产生较大影响的是桩基的布置形式和桩身材料的弹性模量。同样以上的桥墩为例,比较不同桩距条件下的水平变形值见表 4。

表 4 不同桩距条件下的水平变形值

| 桩距(m) | 承台水平变形引起的墩顶变形值(mm) | 承台转角引起的墩顶变形值(mm) |
|-------|--------------------|------------------|
| 2.4   | 11                 | 21               |
| 3.6   | 8                  | 13               |
| 4.8   | 6                  | 6                |

由表 4 可见,桩距的调整对承台转角引起的墩顶变形影响很大。当然,桩距的加大势必增加承台的尺寸,过大的桩距将降低承台协调各根桩反力的能力,同时承台将承受较大的弯矩。这样将增加承台的含筋量。

综合上述分析,可见,墩顶水平变形的三个组成

部分,对于下部结构设计参数的敏感性是完全不同的。控制墩顶水平变形,必须首先弄清上述三个组成部分在总的墩顶水平变形中各自所占的比重,然后再针对比重最大的部分采取相应的构造措施。

通过分析,可以发现当墩柱高度较低时,墩柱自身变形的影响,与承台引起的变形基本接近,以上的桥墩为例,墩柱高度  $10\text{ m}$  时,三者(由基础水平变形产生的墩顶水平位移、由基础转角变形产生的墩顶水平位移、由墩柱变形产生的墩顶水平位移)的值见表 5。

表 5 墩柱高度较低时墩顶变形值

|          | 墩柱变形引起的墩顶变形值(mm) | 承台水平变形引起的墩顶变形值(mm) | 承台转角引起的墩顶变形值(mm) |
|----------|------------------|--------------------|------------------|
| 变形值      | 18               | 11                 | 21               |
| 占总变形的百分比 | 35%              | 22%                | 43%              |

因此对于低墩,合理地调整桩基布置方式,对控制墩顶水平变形较为有效。

而当墩柱高度达到  $15\text{ m}$ ,上述其它条件不发生变化,这三个值见表 6。

表 6 墩柱高度较高时墩顶变形值

|          | 墩柱变形引起的墩顶变形值(mm) | 承台水平变形引起的墩顶变形值(mm) | 承台转角引起的墩顶变形值(mm) |
|----------|------------------|--------------------|------------------|
| 变形值      | 140              | 15                 | 73               |
| 占总变形的百分比 | 61%              | 6%                 | 33%              |

由表 6 可见,高墩的墩顶水平变形占比重最大的是墩柱变形引起的墩顶变形,通过调整墩柱截面尺寸来控制墩顶水平变形将更加有效。相反通过改变  $m$  值或拉开桩间距离的效果就相对差一些了。

此外,在铁路规范里,对于低桩承台部分考虑了承台侧面土的影响,公路规范没有考虑这个因素。对比考虑与不考虑承台侧面土的影响,见表 7。

表 7 侧面土对墩顶变形值的影响

|          | 墩柱变形引起的墩顶变形值(mm) | 承台水平变形引起的墩顶变形值(mm) | 承台转角引起的墩顶变形值(mm) |
|----------|------------------|--------------------|------------------|
| 考虑承台侧面土  | 18               | 11                 | 21               |
| 不考虑承台侧面土 | 18               | 8                  | 21               |

由表 7 可见,考虑承台侧面土的影响较不考虑其影响的主要区别在于承台水平变形引起变形值,其本身占的比例也较小。由于轨道交通的往复荷载作用下,承台侧地表附近土体较松散,因此可以保守地按无影响的方式考虑。

### 3 在实际工程中的运用

明珠线北延伸工程中,采用的是钢轮钢轨系统,由于长钢轨而产生的长轨纵向荷载主要有三个:轨道伸缩力、轨道挠曲力和断轨力。根据铁路规范以及参考明珠一期工程的荷载组合要求,北延伸工程下部结构采用的水平荷载组合情况如表8~11。

表8 明珠线北延伸工程下部结构水平荷载组合情况之一

| 组合名称                 | 荷载组合说明                                     |
|----------------------|--|
| 双跨双线有车<br>(主力+纵向附加力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力)<br>+附加力(单线制动力)         |
| 双跨单线有车<br>(主力+纵向附加力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>单跨单线伸缩力)+附加力(单线制动力) |
| 单跨双线有车<br>(主力+纵向附加力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>1/2跨双线挠曲力)          |
| 单跨单线有车<br>(主力+纵向附加力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>单跨单线伸缩力+1/2跨单线挠曲力)  |
| 桥上无车<br>(主力+纵向附加力)   | 恒载+活载(单跨双线伸缩力)                             |

表9 明珠线北延伸工程下部结构水平荷载组合情况之二

| 组合名称                 | 荷载组合说明  |
|----------------------|---|
| 双跨双线有车<br>(主力+横向附加力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力)<br>+附加力(风力)                       |
| 双跨单线有车<br>(主力+横向附加力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>单跨单线伸缩力)+附加力(风力)               |
| 单跨双线有车<br>(主力+横向附加力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>1/2跨双线挠曲力)+附加力(风力)             |
| 单跨单线有车<br>(主力+横向附加力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>单跨单线伸缩力+1/2跨单线挠曲力)+附<br>加力(风力) |
| 桥上无车<br>(主力+横向附加力)   | 恒载+活载(单跨双线伸缩力)+附加力(风<br>力)                            |

表10 明珠线北延伸工程下部结构水平荷载组合情况之三

| 组合名称                 | 荷载组合说明   |
|----------------------|--|
| 双跨双线有车<br>(主力+横向附加力) | 恒载+活载(列车活载+冲击力)+附加力<br>(横向摇摆力)                       |
| 双跨单线有车<br>(主力+横向附加力) | 恒载+活载(列车活载+冲击力+单线伸缩<br>力)+附加力(横向摇摆力)                 |
| 单跨双线有车<br>(主力+横向附加力) | 恒载+活载(列车活载+冲击力+1/2跨双<br>线挠曲力)+附加力(横向摇摆力)             |
| 单跨单线有车<br>(主力+横向附加力) | 恒载+活载(列车活载+冲击力+单跨单线<br>伸缩力+1/2跨单线挠曲力)+附加力(横<br>向摇摆力) |
| 桥上无车<br>(主力+横向附加力)   | 恒载+活载(单跨双线伸缩力)                                       |

表11 明珠线北延伸工程下部结构水平荷载组合情况之四

| 组合名称               | 荷载组合说明                                    |
|--------------------|---|
| 双跨双线有车<br>(主力+特殊力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力)                       |
| 双跨单线有车<br>(主力+特殊力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>单跨单线伸缩力)           |
| 单跨双线有车<br>(主力+特殊力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>1/2跨双线挠曲力)         |
| 单跨单线有车<br>(主力+特殊力) | 恒载+活载(列车活载+离心力+冲击力+<br>单跨单线伸缩力+1/2跨单线挠曲力) |
| 桥上无车               | 恒载+活载(单跨三轨伸缩力)+特殊力<br>(1/2跨单线断轨力)         |

通过对22m跨至35m跨的纵向荷载组合计算,可以得到各跨径的纵向荷载最大值见表12。

表12 各跨径纵向荷载最大值

| 跨径组合  | 墩顶水平荷载<br>最大值(kN) | 墩顶竖向荷载<br>最大值(kN) | 单墩桩基数量 |
|-------|-------------------|-------------------|--------|
| 22+22 | 133               | 5151              | 6      |
| 25+25 | 148               | 5766              | 6      |
| 30+30 | 175               | 7258              | 8      |
| 35+35 | 197               | 9418              | 8      |

由于沉降控制的需要,上海软土地区轨道交通桥梁的桩基一般选择一些性质较好,埋深较深的土层,这样单桩承载力往往在2000kN以上。在这样的情况下,根据上述荷载设计下部结构时,主要是水平变位值控制桩基的根数,而不再是根据竖向荷载计算桩基根数。这也是城市轨道交通桥梁与城市道路交通桥梁下部结构的一个不同点。

作者在北延伸工程的设计过程中,针对轨道交通高架桥梁的特殊性,分析不同情况下影响墩顶水平变位的最主要的因素,合理地对不同高度、不同跨径组合条件下的下部结构进行了分类,使之更加合理、经济。

### 4 结束语

目前,高架轨道交通线的下部结构设计中,墩顶水平位移的控制值是参照公路规范制定的,在实际设计中已经成为下部结构构造参数确定的控制因素。要达到结构分类合理、施工方便、经济的目的,设计人员应该仔细分析控制因素的内部主要矛盾,有针对性地加以解决。

## 欢迎选购合订本

本刊2005年度合订本已出版,另有少量2004年度合订本(每本均为100元)可供读者选购,售完为止。若需购买者,请先电话预购,说明期刊年度及数量,待确认后请将订费邮汇给本刊编辑部。

(编辑部电话:021-51298850)