

桥梁墩台顺桥向水平力分配计算

李学有,李顺波

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430056)

摘要:准确计算桥梁墩台顺桥向水平力,是桥梁下部结构分析的基础工作。该文基于刚度集成法,综合考虑活动支座的非线性影响和不同作用的加载顺序,提出墩台顺桥向水平力分配计算的非线性分析方法。计算结果表明:该方法能够充分考虑活动支座水平力与摩阻力之间的关系,给出不同作用下各墩台的精确水平力结果,计算结果更趋合理。

关键词:桥梁工程;刚度集成法;制动力;温度作用;非线性

1 前言

近年来,随着中国交通运输事业的快速发展,桥梁建造技术不断进步。其中,中小跨径连续梁桥、连续桥面简支梁桥、多跨连续简支梁桥的应用极为普遍,由于该类桥梁量大面广,对其经济性和安全性的平衡,一直是桥梁工程师的探索目标。

梁式桥的上部结构,多采用相关的通用标准图集,鉴于有限元分析软件的日益成熟,计算软件可提供一站式分析功能,计算结果相对明确。而下部结构,由于地质条件、桥墩高度、桥梁跨径等因素,较难采用通用标准图集,一般均需针对具体项目进行具体计算分析。

该文基于刚度集成法,考虑活动支座的非线性影响和不同作用的加载顺序,提出墩台顺桥向水平力分配计算的非线性分析方法。

2 墩台顺桥向水平力计算方法讨论

梁式桥下部结构一般采用柔性桥墩,其计算分析的要点是墩台顺桥向水平力的分配计算。许多学者对此进行了大量的分析研究,提出的方法有三推力方程法、一次迭代法、柔度系数法、刚度集成法等。

总体而言,桥梁顺桥向水平力包括汽车制动力、温度作用、上部结构梁体收缩徐变引起的水平力等。具体计算过程中,上部结构梁体收缩徐变引起的水平力一般等效为整体降温处理。因此,墩台顺桥向水平力

分配计算简化为汽车制动力和温度作用(含升温 and 降温)的水平力计算。

梁式桥一般在一联之内设置活动支座(盆式活动支座或四氟滑板橡胶支座等),当活动支座分配的纵向水平力大于摩阻力时,设置活动支座的墩台不再参与纵向水平力分配。因此,设置活动支座的桥梁墩台水平力计算,实质是一个非线性分析过程。

虽然,针对制动力和温度作用的水平力计算,学者们提出了较多的分析方法,但是桥梁下部结构水平力计算,通常采用以下简化方法:

(1) 不考虑活动支座的非线性影响,纵向水平力在不设置活动支座的桥墩间分配,将非线性问题转化为线性问题。

(2) 由于采用第(1)项假定,当不同类型的纵向水平力共同作用时,将计算结果线性相加,未考虑非线性问题的作用效应与作用加载顺序相关。

3 墩台集成刚度计算

目前已提出的三推力方程法、一次迭代法、柔度系数法、刚度集成法等方法,在工程设计中应用最为普遍的是刚度集成法。

刚度集成法的原理,首先是计算每个墩台的集成刚度,其次是根据各墩台集成刚度的比例,分配墩台顶部水平力。下面简述墩台集成刚度的计算方法。

3.1 支座刚度计算

现阶段,桥梁使用较多的支座是板式橡胶支座和

盆式支座。

(1) 板式橡胶支座刚度

板式橡胶支座刚度的计算,可参考 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》8.7 节的规定,支座刚度按下式计算:

$$K_z = n \frac{G_e A}{t} \quad (1)$$

式中: n 为墩台顶部支座个数; G_e 为支座剪变模量; A 为支座平面面积; t 为支座橡胶层总厚度。

(2) 盆式支座刚度

固定盆式支座的支座刚度,在合理的支座受力范围内,可近似按无穷大考虑。

活动盆式支座的支座刚度,可参考 JTG/T B02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》6.3.7 条规定,支座刚度按下式计算:

$$K_z = \frac{F_{\max}}{x_y} \quad (2)$$

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

式中: μ_d 为摩擦系数,一般取 0.02; R 为支座承担的上部结构自重; x_y 为盆式支座屈服位移,一般取 0.002~0.005 m。

3.2 墩台刚度计算

(1) 桥台刚度计算

总体而言,目前桥梁设计中应用较为普遍的重力式桥台、肋板桥台等,台身刚度可近似按无穷大考虑。至于柔性桥台,可参考文献[4]所述简化方法进行台身刚度计算。

(2) 桥墩刚度计算

桥墩刚度的计算方法,其焦点在于桥墩顶部边界条件的确定。文献[8]认为,上部结构对于桥墩具有一定的约束,提出考虑墩顶弹性嵌固的刚度耦合模型。一般而言,传统的刚度集成法不考虑上部结构对于桥墩的约束作用,墩顶按自由边界考虑,在文献[4]第 3.2 节对此进行过详细论述。

桥墩顶部边界条件,影响的是单个桥墩的刚度数值,并不影响刚度集成法的计算原理。有关桥墩刚度的简化计算方法,可参考相关文献[5,8]。

(3) 墩台刚度计算的有限元方法

墩台刚度计算的简化计算方法,相关文献已有较多论述。鉴于有限元计算方法的不断普及,墩台刚度可通过有限元软件进行计算。

具体计算方法为:在有限元软件中,准确建立墩台

结构的离散模型,合理确定边界条件(包括桩基弹簧模拟、墩台顶支承方式等),然后在墩台顶部施加单位作用力 $F=1$ (图 1),求解得到墩台顶部位移 δ ,则墩台刚度 K_d 为: $K_d = \frac{1}{\delta}$ 。

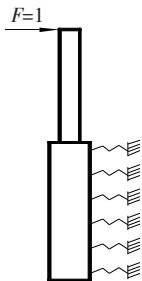


图 1 桥墩刚度计算示意图

3.3 集成刚度计算

针对单个墩台而言,支座刚度与墩台刚度是串联关系,则墩台集成刚度 K_i 为:

$$K_i = \frac{K_z \cdot K_d}{K_z + K_d} \quad (4)$$

针对某一联桥梁而言,各墩台刚度是并联关系,则整联桥梁抗推刚度为:

$$K = \sum K_i \quad (5)$$

4 水平力分配计算方法

在前述集成刚度计算的基础上,考虑活动支座的非线性影响和作用加载顺序,给出桥梁墩台顺桥向水平力分配计算的非线性分析方法。

4.1 制动力作用下水平力计算

由于存在活动支座,需要判断活动支座分配水平力是否大于摩阻力,因此,制动力的分配计算是反复迭代的过程,其迭代步骤为:

(1) 初估迭代初值:根据各墩台刚度,按比例分配制动力 F ,则墩台 i 分配的制动力 F_{zi} 为:

$$F_{zi} = \frac{K_i}{K} \cdot F \quad (i = 1, 2, \dots, m; m \text{ 为墩台数}) \quad (6)$$

(2) 活动支座水平力判断调整:

① 若各活动支座分配水平力 F_{zj} 不大于摩阻力 μR ,转至(4);② 若活动支座分配水平力 F_{zj} 大于摩阻力 μR ,活动支座水平力取为 μR ,对应墩台刚度 K_j 设置为 0,大于摩阻力的水平力在其他墩台间分配,即:

$$F_{zj} = \mu R, K_j = 0 \quad (7)$$

$$F_t = \sum (F_j - \mu R) \quad (8)$$

式中: F_t 为再分配水平力。

$$K = \sum K_i \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (9)$$

$$F_{zit} = \frac{K_i}{K} \cdot F_t \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (10)$$

(3) 计算各墩台分配的水平力:

$$F_{zi} = F_{zi} + F_{zit} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (11)$$

并转至(2)。

(4) 确定各墩台分配水平力为 F_{zi} 。

4.2 温度作用下水平力计算

与制动力分配计算类似,温度作用引起的水平力计算也是反复迭代的过程,其迭代步骤为:

(1) 初定温度零点:

$$L_0 = \frac{\alpha \cdot t \cdot \sum K_i L_i}{\alpha \cdot t \cdot \sum K_i} \quad (12)$$

式中: α 为线膨胀系数; t 为温度差值; L_i 为 i 号墩台距离桥梁左端的距离。

(2) 初估迭代初值:根据初定的温度零点,计算各墩台的水平力 F_{wi} :

$$F_{wi} = K_i \cdot \alpha \cdot (L_i - L_0) \cdot t \quad (13)$$

(3) 活动支座水平力判断调整:

① 若各活动支座分配水平力 F_{wj} 不大于摩阻力 μR , 转至(5);② 若活动支座分配水平力 F_{wj} 大于摩阻力 μR , 活动支座水平力取为 μR , 即 $F_{wj} = \mu R$ 。

(4) 重新确定温度零点和墩台水平力:

$$L_0 = \frac{\alpha \cdot t \cdot \sum K_i L_i \pm \sum \mu R}{\alpha \cdot t \cdot \sum K_i} \quad (i=1,2,\dots,m; i \neq j) \quad (14)$$

$$F_{wi} = K_i \cdot \alpha \cdot (L_i - L_0) \cdot t \quad (15)$$

转至(3)。

(5) 确定各墩台分配水平力为 F_{wi} 。

4.3 作用组合下水平力计算

如前所述,作用组合下水平力计算主要涉及制动力和温度作用的组合。由于活动支座的非线性影响,作用组合结果,不是简单地将各作用的计算结果线性相加,而是需要考虑作用的加载顺序。

4.3.1 “温度力+制动力”作用

“温度力+制动力”作用,表示桥梁墩台先承受温度作用,然后再分配制动力。其计算步骤为:

(1) 用温度作用迭代计算程序,得到温度作用下

各墩台分配水平力 F_{wi} 。

(2) 初估迭代初值:根据各墩台刚度,按比例分配制动力 F ,则墩台 i 分配的制动力 F_{zi} 按式(6)计算。然后以 $F_i = F_{wi} + F_{zi}$ 作为迭代初值。

(3) 活动支座水平力判断调整:

① 若各活动支座分配水平力 F_j 不大于摩阻力 μR , 转至(4);② 若活动支座分配水平力 F_j 大于摩阻力 μR , 活动支座水平力取为 μR , 对应墩台刚度 K_j 设置为 0, 大于摩阻力的水平力在其他墩台间分配,即:

$$F_j = \mu R, K_j = 0 \quad (16)$$

$$F_t = \sum (F_j - \mu R) \quad (17)$$

$$K = \sum K_i \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (18)$$

$$F_{it} = \frac{K_i}{K} \cdot F_t \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (19)$$

(4) 计算各墩台分配的水平力:

$$F_i = F_i + F_{it} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (20)$$

并转至(3)。

(5) 确定各墩台分配水平力为 F_i 。

4.3.2 “制动力+温度力”作用

“制动力+温度力”作用,表示桥梁墩台先分配制动力,然后再承受温度作用。此种工况在现实情况中较少出现,为了阐述不同加载顺序对水平力分配结果的影响,该文给出定量分析算法,其计算步骤为:

(1) 调用制动力迭代计算程序,得到制动力作用下各墩台分配水平力 F_{zi} 。

(2) 初定温度零点和迭代初值:

温度零点按式(12)计算。根据初定的温度零点,计算各墩台的水平力 F_{wi} 。以 $F_i = F_{zi} + F_{wi}$ 作为迭代初值。

(3) 活动支座水平力判断调整:

① 若各活动支座分配水平力 F_j 不大于摩阻力 μR , 转至(5);② 若活动支座分配水平力 F_j 大于摩阻力 μR , 活动支座水平力取为 μR , 即 $F_j = \mu R$ 。

(4) 重新确定温度零点和墩台水平力:

$$L_0 = \frac{\alpha \cdot t \cdot \sum K_i L_i \pm \sum \mu R}{\alpha \cdot t \cdot \sum K_i} \quad (i=1,2,\dots,m; i \neq j) \quad (21)$$

$$F_i = F_{zi} + K_i \cdot \alpha \cdot (L_i - L_0) \cdot t \quad (22)$$

转至(3)。

(5) 确定各墩台分配水平力为 F_i 。

5 算例

某桥梁上部结构采用 30 m 简支 T 梁,5 孔一联,每跨 T 梁横向 5 片(图 2)。桥台设置一排聚四氟乙烯滑板支座,规格为 250 mm×350 mm×59 mm;桥墩设置两排板式橡胶支座,规格为 250 mm×350 mm×57 mm。

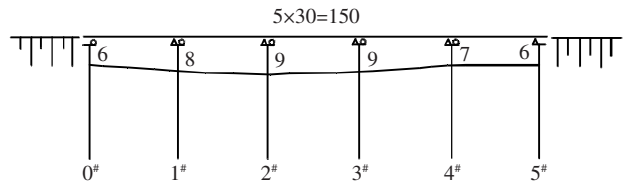


图 2 桥梁立面图(单位:m)

桥梁制动力取 103.7 kN,整体升温 20 ℃,整体降温 55 ℃(考虑收缩徐变)。

参考部版通用图,简支 T 梁梁端恒载反力取值为 2 830.0 kN;滑板支座摩阻系数取 0.06,则活动支座摩阻力为 169.8 kN。

桥台台身刚度近似按无穷大考虑,则桥台刚度采用支座刚度,数值为 10 417.0 kN/m。各墩台刚度计算结果见表 1。

表 1 墩台刚度计算结果

墩台号	刚度/(kN·m ⁻¹)	墩台号	刚度/(kN·m ⁻¹)
0 [#]	10 417	3 [#]	11 237
1 [#]	12 150	4 [#]	13 084
2 [#]	11 237	5 [#]	10 417

根据上述桥梁参数,采用该文提出的水平力分配计算方法,计算墩台水平力,计算结果如表 2 所示;同时表 3 为文献[8]对应计算结果。

表中水平力方向规定为:正值表示水平力由 0[#]台往 5[#]台方向,负值表示水平力由 5[#]台往 0[#]台方向。

表中作用工况:①表示降温作用;②表示升温作用;③表示正向制动力;④表示负向制动力。

表 2 墩台水平力计算结果

作用	各墩台水平力/kN					
工况	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
①	169.8	306.6	98.2	-97.3	-317.5	-169.8
②	-157.5	-110.8	-35.1	32.3	116.1	155.0
③	15.8	18.4	17.0	17.0	19.8	15.8

续表 2

作用	各墩台水平力/kN					
工况	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
④	-15.8	-18.4	-17.0	-17.0	-19.8	-15.8
①+③	169.8	328.3	118.2	-67.2	-294.1	-151.2
②+③	-141.6	-92.2	-17.9	49.5	136.2	169.8
①+④	151.2	284.9	78.1	-107.3	-340.8	-169.8
②+④	-169.8	-130.0	-52.8	14.7	95.6	138.5
③+①	169.8	325.0	115.2	-70.3	-297.7	-169.8
③+②	-144.4	-95.5	-21.0	46.5	132.6	169.8
④+①	169.8	288.2	81.2	-104.3	-337.3	-169.8
④+②	-169.8	-126.7	-49.7	17.7	99.1	141.4

表 3 文献[8]桥墩水平力计算结果

作用	各桥墩水平力/kN			
工况	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
①	306.6	98.2	-87.3	-317.5
②	-110.9	-35.1	32.3	116.1
③	27.3	25.3	25.3	29.4
④	-27.3	-25.3	-25.3	-29.4
②+③	-83.6	-9.9	57.5	145.5
①+④	279.3	72.9	-112.5	-346.9

比较表 2、3 可以看出:① 工况①作用下,该文计算方法与常规计算方法得到的桥墩水平力结果相同。常规墩台水平力计算方法不考虑活动支座影响,纵向水平力在不设置活动支座的桥墩间分配,本质上是假定活动支座分配水平力默认为摩阻力的简化计算方法,不能准确给出各工况下,桥梁墩台的水平力计算结果;② 由表 2 可知:一般情况下,0[#]桥台与 5[#]桥台的水平力,并不是同时达到摩阻力。该文给出的水平力分配分析方法,充分考虑活动支座的非线性影响和作用加载顺序,能够充分考虑活动支座水平力与摩阻力之间的关系,能够给出不同作用下各墩台的精确水平力结果,较常规方法而言,计算结果更趋合理。

6 结论

(1) 桥梁墩台顺桥向水平力计算,许多学者进行了大量的分析研究,提出了较多的计算方法,但总体而言,未考虑不同作用工况下,活动支座的非线性影响,通常将非线性问题简化成线性问题进行处理。