

钢拱桥拱脚锚固抗力分析

汤国栋¹, 侯金龙², 严 斌¹, 杨 弘³, 岳卫东³

(1. 四川大学 成都市 610021; 2. 中国路桥集团公路一局 北京市 100024; 3. 重庆市政设计院 重庆市 400020)

摘 要: 钢拱桥的拱脚, 当为固结构造时, 引用富斯·文克勒假定, 建立结构力学模型, 推导其约束抗力计算的解析表达式, 以有限元数值分析, 检核其可靠性。

关键词: 钢拱桥; 拱脚; 锚固抗力

1 概述

近期, 国内钢拱桥和钢管混凝土拱桥日益增多, 规模很大, 体系多为无铰拱。

当拱脚为锚固于桥台混凝土内的固结构造时, 其锚固设计计算的可靠性, 关系到拱跨结构的整体受力和全桥的安全性。对此, 如果仅凭主观臆断或未经研究论证的经验处理, 其可质疑处, 显而易见。

文献[1]介绍了国内 20 世纪 60 年代建成的跨径为 180 m 的钢箱拱桥的拱脚锚固构造, 见图 1 所示。即使以现今的认识来评价, 仍不失合理。因此, 其构思原则至今常被引用, 并有所发展。关于这一类问题的分析计算研究, 尚未见诸文献。

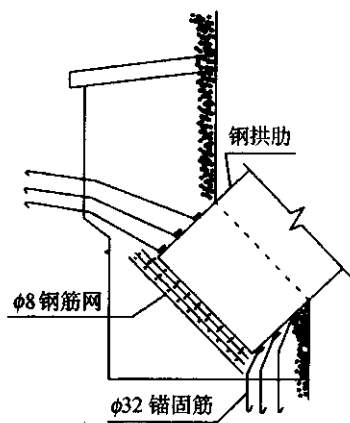


图 1

对于钢拱桥拱脚的锚固约束, 本文引用富斯·文克勒假定; 根据结构承载的主次和相对刚度的比较, 导出了锚固抗力的计算表达式。举一真实的工程

计算, 作为应用实例。进而以有限元数值分析, 论证其可靠性。本文讨论问题的方法和主要成果, 亦适用于钢管混凝土无铰拱桥类似的锚固构造。

2 锚固抗力分析及计算表达式

2.1 基本假定

现以图 2 所示的构造, 作为分析对象。分析中将引用以下假定。

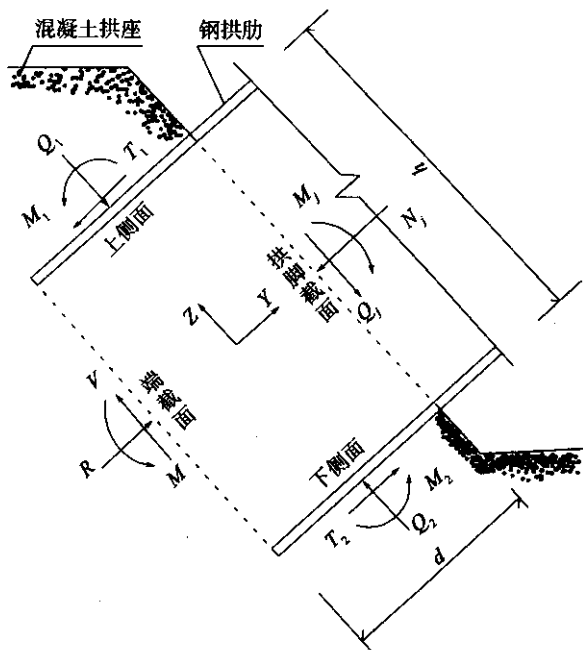


图 2

假定 1: 钢拱肋及其内填混凝土组成的埋入段, 其刚度远较拱座混凝土大得多, 因此, 假定埋入段因

受力而发生的位移,为刚性的移动和转动。不计自身的变形。

假定 2: 线弹性、小变形、平面假定成立,因而迭加原理适用。

假定 3: 拱座混凝土与拱肋间的抗力与变形适用富斯·文克勒假定,即界面压力:

$$\sigma = k\eta \quad (1)$$

式中: σ 为压力, kN/m^2 ; η 为变形, m ; k 为沉陷系数, kN/m^3 。

假定 4: 拱肋埋入段钢拱箱与拱座混凝土间之界面只能承压,不能受拉。不计埋入段自重。

2.2 锚固抗力分析

拱脚锚固构造之分析模型如图 2。由拱跨结构计算确定的,拱脚截面内力素为 N_j 、 Q_j 、 M_j , 对于图 2 为已知荷载; 拱脚埋入段的长度为 d , 其端面高度为 h 。

拱脚埋入段的荷载和约束抗力表示见图 2。分析模型之 YOZ 和 XOY 均为弯曲主平面; 其约束抗力, 分别如下。

端面: R ——轴向反力,

V ——切向反力,

M ——端面反力矩。

上侧面: Q_1 ——上侧面压力,

T_1 ——侧面摩阻力,

m_1 ——侧面反力矩。

下侧面: Q_2 ——下侧面压力,

T_2 ——侧面摩阻力,

m_2 ——侧面反力矩。

对于图 2, 有平衡方程:

$$\sum y = 0 \quad -N_j + R - (T_1 - T_2) = 0 \quad (a)$$

$$\sum z = 0 \quad -Q_j + V - (Q_1 - Q_2) = 0 \quad (b)$$

$$\sum m = 0 \quad M_j - M - (m_1 + m_2) - (T_1 + T_2) \cdot \frac{h}{2} + (Q_j + V) \frac{d}{2} = 0 \quad (c)$$

式中: 除 M_j 、 Q_j 、 N_j 为已知荷载, 其余均为未知量。

由假定 2, 下面将以 N_j 、 M_j 、 Q_j 分别地单独作用, 研究其抗力, 然后迭加。

(1) 当 N_j 单独作用时。

在图 2 中, 取 $N_j \neq 0$, $M_j = 0$, $Q_j = 0$

则由 $\sum y = 0$, 有

$$R = N_j \quad (2)$$

其余平衡方程为恒等式, 不赘述。

(2) 当 M_j 单独作用时。

如图 3 所示, 根据假定 4。

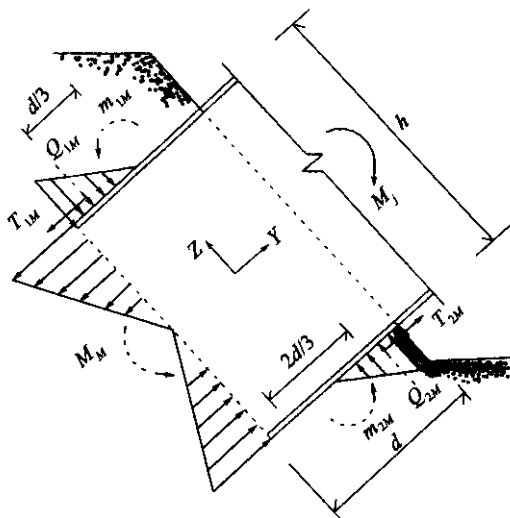


图 3

$$\sum y = 0 \quad \text{有 } T_{1M} = T_{2M} \quad \text{令其} = T_M \quad (d)$$

$$\sum z = 0 \quad \text{有 } Q_{1M} = Q_{2M} \quad \text{令其} = Q_M$$

$$\sum m = 0 \quad \text{有 } M_j - M_m - (T_{1M} + T_{2M})h/2 - (m_{1M} + m_{2M}) = 0 \quad (e)$$

式中: Q_M 和 T_M 为 M_j 作用下, 侧面之压力和摩阻力, 由图 4 积分, 求得

$$m_{1M} = m_{2M} \quad \text{令其} = m_M$$

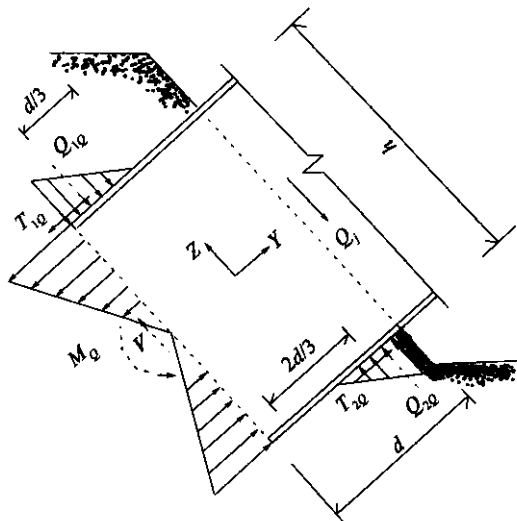


图 4

$$\text{且 } m_M = \frac{2}{3} Q_M d \quad (g)$$

又由库仑定律,

$$\text{摩阻力 } T_{1M} = T_{2M} \quad \text{令其} = T_M$$

且 $T_M = fQ_M$ (f)

式中： f 为钢与混凝土的摩阻系数。

将式(g)、式(f) 代入式(e)

有 $M_M = M_j - \left(fh + \frac{2}{3}d \right) Q_M$ (h)

(3) 当 Q_j 单独作用时。

如图 4 所示，

$\sum y=0$ 有 $T_{2Q}-T_{1Q}=0 \quad T_{2Q}=T_{1Q}$ (i)

$\sum z=0 \quad V-Q_j-(Q_{1Q}-Q_{2Q})=0$

$\sum m=0 \quad Q_jd-M_Q-T_Qh-Q_Q \frac{2d}{3}=0$ (j)

引用库仑定律(f)，式(j) 有

$Q_jd - M_Q - Q_Q \left(fh + \frac{2d}{3} \right) = 0$

则 $M_Q = Q_jd - \left(fh + \frac{2d}{3} \right) Q_Q$ (m)

参照式(f) 仍然可以得到，

由式(j) $\left. \begin{aligned} Q_{1Q} &= Q_{2Q} = Q_Q \\ T_{1Q} &= T_{2Q} = T_Q \end{aligned} \right\}$ (k)

将式(k) 代入式(j)，

得到 $V = Q_j$ (3)

(4) 埋入段端面抗力组合。

现将 N_j, M_j, Q_j 单独作用对端截面引起的抗力，进行迭加。其结果：轴向压力和切向抗力已如式(2)、式(3)；

端截面的反力矩 M ，由式(h) 和式(m) 相加，即 $M = M_M + M_Q$

得到 $M = (M_j + Q_jd) - \left(fh + \frac{2d}{3} \right) (Q_M + Q_Q)$ (n)

式中 Q_Q 及 Q_M 尚未未知，接下来将研究侧面抗压力(Q_M, Q_Q) 之计算。

2.3 侧面抗力计算

现讨论 Q_M 计算。由式(f) 可知， Q_M 与 m_M 有关，因此，需先讨论 m_M 的计算。

(1) 力矩 M_j 作用下端面抗力矩(M_M) 与侧面抗力矩(m_M) 之关系。

对于图 3， $M_M = \iint_A z \sigma dA$ (o)

设拱脚埋入段之宽度为 $b = \text{const}$ ；

由假定 1，则拱脚段之角位移 $\theta = \text{const}$ ，图中不难看出，当 η 为任一点(z) 之压缩位移时，

则有 $\theta = \eta/z$ 或 $\eta = \theta z$ (p)

引用假定 1，并将式(p) 代入式(1)，

$\sigma = k\theta z$ (q)

将式(q) 代式(o)，并计算下列积分(过程从略)，端面抗力矩

$M_M = 2b \int_o^{\frac{2}{h}} k\theta Z^2 dZ$

得到 $M_M = k\theta \frac{bh^3}{12}$ (r)

同样的运算(过程从略)，可以得到侧面抗力矩

$m_M = k\theta \frac{bd^3}{12}$ (s)

由式(r)、式(s) 相比较，有

$\frac{M_M}{m_M} = \left(\frac{h}{d} \right)^3$ (4)

这是一个颇有实用意义的结论：在荷载力矩 M_j 作用下，将产生端面的抗力矩(M_M) 和侧面的抗力矩(m_M)；二者之比，为其相应的抗力分布长度(h, d) 之比值的 3 次方。

应当注意，这是以假定 4(侧面只能抗压，不能抗拉) 为基础的，否则，若拱肋埋入段之侧面既能抗压又能抗拉，不难仿此得出另外的结论。

(2) M_j 作用之侧面抗(压) 力 Q_M 。

以式(4) 为基础求解 M_M ，进而求 Q_M 。

即 $M_M = \left(\frac{h}{d} \right)^3 m_M$

将式(g) 代入， $M_M = \frac{2h^3}{3d^2} Q_M$ (t)

以式(t) 代入式(h)，得到

$Q_M = M_M / \left(\frac{2h^3}{3d^2} + \frac{2d}{3} + fh \right)$ (5)

(3) Q_j 作用下之侧面抗(压) 力 Q_Q

作用于拱脚截面之剪力 Q_j ，等效于在埋入段端面之 Q_j 及 Q_jd 的共同作用。而由式(3) Q_j 已平衡。力矩 Q_jd 之作用，则类似于上述 M_j 。省略重复推导，不难仿照式(5) 写出 Q_Q 之表达式：

$Q_Q = (Q_jd) / \left(\frac{2h^3}{3d^2} + \frac{2d}{3} + fh \right)$ (6)

2.4 拱肋埋入段之抗力表达式

将式(5)、式(6) 代入式(n)，得到 M 之表达式；并将式(2)、式(3) 汇集，有：

端面抗力

$M = (M_j + Q_jd) \left[\frac{2h^3}{3d^2} / \left(\frac{2h^3}{3d^2} + \frac{2d}{3} + fh \right) \right]$ (7)

$V = Q_j$

$R = N_j$

由前相关方程，知侧面抗力： $m = m_M + m_Q, Q$

$$= Q_Q + Q_m, T = fQ.$$

将式(5)、式(6)代入 Q 、 T 之表达式;将式(7)代入式(4),得到:

侧面抗力

$$m = (M_j + Q_j d) \left[\frac{2d}{3} / \left(\frac{2h^3}{3d^2} + \frac{2d}{3} + fh \right) \right] \quad (8)$$

$$Q = (M_j + Q_j d) / \left(\frac{2h^3}{3d^2} + \frac{2d}{3} + fh \right) \quad (9)$$

$$T = f(M_j + Q_j d) / \left(\frac{2h^3}{3d^2} + \frac{2d}{3} + fh \right) \quad (10)$$

或 $T = fQ$

式中符号之含义,不难从图 2 和图 4 中知道。

3 算例

如图 4 所示拱脚锚固构造。已知 $M_j = 47\,790$ kN·m, $N_j = 30\,180$ kN, $Q_j = 2\,232$ kN, 截面有关参数 $b = 1.406$ m, $h = 3.440$ m, $d = 2.00$ m, $f = 0.300\,0$ 。

现计算锚固抗力,验算强度。

(1) 抗力计算。

前述式(2)~(10)中,有关参量计算:

$$\frac{2h^3}{3d^2} = \frac{2 \times 3.44^3}{3 \times 2.00^2} = 6.785 \text{ m}$$

$$\frac{2d}{3} = 1.333 \text{ m}$$

$$fh = 0.300 \times 3.44 = 1.032 \text{ m}$$

$$M_j + Q_j d = 47\,790 + 2\,232 \times 2 \\ = 52\,254 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

代入式(2)~(10),得到:

端面抗力

$$R = 30\,180 \text{ kN}$$

$$V = 2\,232 \text{ kN}$$

$$M = 52\,254 \times 6.785 / (6.785 + 1.333 + 1.032) = 38\,748 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

侧面抗力

$$Q = 52\,254 / (6.785 + 1.333 + 1.032) \\ = 5\,711 \text{ kN}$$

$$T = 0.300 \times 5\,711 = 1\,713 \text{ kN}$$

$$m = 52\,254 \times 1.333 / (6.785 + 1.333 + 1.032) \\ = 7\,613 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

校核:将式(2)等代入式(c)得到抗力矩与荷载力矩平衡:

$$M_j + Q_j d = M + m + Th \quad (11)$$

将前述数据代入式(11):

$$\text{左端 } M_j + Q_j d = 52\,254 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{右端 } M + m + Th = 38\,748 + 7\,613 + 1\,713 \\ \times 3.44 = 52\,254 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

则式(11)满足:左端 = 右端,无误!

(2) 强度校核。

① 端面拱座混凝土强度校核

$$\sigma_M^{\max} = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{z} \\ = 52\,254 \times \frac{3.44}{2} / \left(\frac{1}{12} \times 1.406 \times 3.44^3 \right) \\ = 89\,877 / 4.770 = 18\,842 \text{ kN/m}^2 = 18.84 \text{ MPa}$$

$$\sigma_N = \frac{30\,180}{3.44 \times 1.406} = 8\,277 \text{ kN/m}^2$$

则端面之最大压应力

$$\sigma_h^{\max} = 18\,842 + 8\,277 = 27\,119 \text{ kN/m}^2 = 27 \text{ MPa}$$

端面之最大拉应力

$$\sigma_{\text{拉}}^{\max} = 18\,842 - 8\,277 = 10\,565 \text{ kN/m}^2 = 10.57 \text{ MPa}$$

② 侧面混凝土抗压强度校核

侧面混凝土之最大压应力

$$\sigma_M = \frac{m}{W} = 7\,613 / \frac{1.406 \times 2^2}{6} = 8\,122 \text{ kN/m}^2 \\ = 8.12 \text{ MPa}$$

关于拱肋锚固的构造设计及验算,将另文讨论。

(3) 抗剪校核(略)。

4 讨论及结语

“没有假定,就没有科学”。本文以富斯·文克勒假定为基础,导出拱脚锚固抗力计算的解析表达式。

(1) 解析式的特点在于:将影响问题各参量的依赖关系,以函数形式表达。有利于认识、分析和调用各参量,实现设计意图。

(2) 本文的分析表明:随着端面高度与锚固段的埋深之比例(h/d)不同,锚固抗力差异很大,式(4)表达了这一关系。

(3) 在直觉上,有的认为侧面摩阻力(T),不一定靠得住,将摩阻系数(f)偏低取值,本例就取 $f = 0.300$ 或更低。

至于,设计应用时,取($f=0$) $Th=0$,将偏于安全、保守方面,是无可无不可的;但在分析中不容许,因为在未得到定量结论之前,尚不知其影响是偏安

文章编号: 0451-0712(2005)06-0035-04

中图分类号: U448.225.572

文献标识码: B

某中承式变截面悬链线无铰拱桥加固施工

张淑静

(路桥集团第一公路工程局 北京市 100024)

摘要: 某中承式变截面悬链线无铰拱桥因交通流量及超重车辆迅速增加,吊杆、横梁、桥面均表现出不同程度的病害,安全储备较低,经检测需要进行加固,以满足现状交通使用需求。

关键词: 中承式拱桥; 吊杆; 横梁; 桥面; 加固施工

1 工程概述

某中承式变截面悬链线无铰拱桥位于国道105线广东省境内,20世纪90年建成通车,主体结构为中承式混凝土肋拱,跨径90 m,桥宽为:净9 m+2×1.5 m,矢跨比为1:4.5,设12对PE防护的61根 $\phi 5$ 高强钢丝冷铸墩头锚吊杆,钢筋混凝土吊杆横梁,吊杆间距5 m,桥面板为预制钢筋混凝土空心板加现浇湿接头。设计荷载:汽车—20级、挂车—100、人群3 kN/m²。近年来由于交通流量及超重车辆迅速增加,经对该桥现状检查、结构验算、动静载试验等方式进行承载能力鉴定性检验,发现其强度、刚度的承载能力仍满足原设计荷载的使用要求,但安全储备

较低,且吊杆下锚头外部锈蚀,密封橡胶垫圈老化,其中有3根吊杆被火烧伤,PE套老化;吊杆横梁跨中下缘有大量竖向微裂缝,有些微裂缝已向上延伸超过中性轴,最大缝宽0.15 mm、长达45 cm,吊杆横梁上缘负弯矩区也有裂缝;桥面上有多条横向裂缝,靠拱脚段稍多。根据检验结果及现状荷载,主要原因是超重车辆增多,造成吊杆横梁裂缝、桥面裂缝增多加大。对于上述病害,如果不尽早对结构进行加固维修,任其发展,势必会影响行车及桥梁本身的使用安全。因而有必要对该桥吊杆、拱脚截面、横梁、桥面铺装进行加固,以满足使用。主拱结构立面见图1。

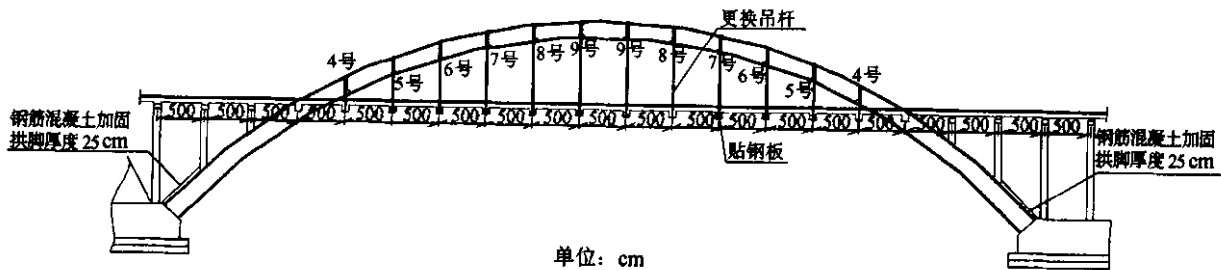


图1 主拱结构立面

收稿日期:2005-03-15

全,还是偏危险的。这也是撰写本文的意图之一。

(4)本文主要结论可应用于钢管混凝土拱桥。若构造形式与此相差较大(如桁架),亦不难对表达式稍加改造,应用于计算;必要时,亦可仿此重新推导。

(5)本文仅讨论了锚固抗力计算,至于锚固强度校核,将另文研究。顺便说明,图1所示之基础,实施时根据计算进行了加强。

参考文献:

[1] 钱冬生. 铁路钢桥[M]. 北京:人民铁道出版社,1978.
[2] 龙驭球,等. 结构力学教程[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
[3] 华东水利学院. 结构力学(下册)[M]. 北京:水利电力出版社,1983.
[4] 胡人礼. 桥梁力学[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
[5] 小西一郎. 钢桥(第四分册)[M]. 北京:人民铁道出版社,1981.
[6] 苏善根. 公路钢桥设计回顾[J]. 公路,2000,(2).