

doi: 10.3969/j.issn.1007-855x.2011.02.007

薄壁花瓶墩的拉力计算实用方法

李新平, 周晶, 张勇

(华南理工大学土木与交通学院, 广东广州 510640)

摘要: 采用 ansys 有限元分析方法和应力迹线相结合的方法对薄壁花瓶墩建立“拉-压杆模型”, 提出了适用于薄壁花瓶墩的拉力计算实用公式, 并探讨了影响薄壁花瓶墩“拉-压杆模型”中拉杆的抗力的相关因素, 为薄壁花瓶墩设计和验算提供了有效而简便的计算方法。

关键词: 花瓶墩; 拉-压杆模型; 有限元分析

中图分类号: U443.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2011)02-0032-06

Practical and Simplified Method of Tension of Thin - Walled Vase Pier

LI Xin - ping, ZHOU Jing, ZHANG Yong

(College of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper establishes strut - and - tie model in thin - walled vase pier by using combination method of ansys finite element analysis and stress trace and proposes the practical and simplified method of tension of thin - walled vase pier. The relevant factors influencing resistance of tie bar in strut - and - tie model of thin - walled vase pier are discussed. An effective and simple calculation method is provided for thin - walled vases pier design and checking.

Key words: vase pier; strut - and - tie model; finite element analysis

0 引言

目前,我国薄壁花瓶墩在城市桥梁中已被广泛应用。薄壁花瓶墩的弧线悬臂增添了美感,但同时悬臂上支座反力的作用,使墩顶在一定范围内产生拉应力。目前对于薄壁花瓶墩的墩顶拉应力的计算,还未有供设计采用的实用计算方法,而是参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG D62-2004)》中桩基承台的“撑杆-拉杆体系方法”进行薄壁花瓶墩墩顶拉力的设计计算。在采用规范的计算公式时,由于对薄壁花瓶墩的计算参数取值不明确,其计算结果往往偏差较大。

采用拉压杆模型分析结构的内力,尤其是对受力比较复杂而用经典的弹性理论不易解决的 D 区^[1](不符合平截面假定的区域)是十分简单和实用的计算方法。国内外已做的研究均表明该计算方法能满足工程精度的要求,且称它为混凝土结构的统一设计方法,能用于任何混凝土结构及荷载情况。因此本文将采用 Ansys 有限元分析方法,通过建立薄壁花瓶墩的实体有限元模型,对薄壁花瓶墩进行应力分析建立拉-压杆模型,提出了适用于薄壁花瓶墩的实用计算公式。

1 薄壁花瓶墩计算公式推导

1.1 按拉压杆设计理论设计

1) 有限元分析

采用 Ansys 有限元软件建立实体单元模型,分析所用薄壁花瓶墩参数采用工程中常用参数,其结构尺寸如下图 1 所示。

收稿日期:2010-11-01. 基金项目:华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室开发课题(2008KA07)。

作者简介:李新平(1961-),男,博士,副教授. 主要研究方向:桥梁分析计算与检测. E-mail: lxinping@scut.edu.cn

实体单元模型设计支座的集中荷载为 6 000 kN ,选用的材料物理参数为: 混凝土 C40、弹性模量为 3.25×10^{10} Pa、密度为 $2\,600\text{ kg/m}^3$ 、线膨胀系数为 1.0×10^{-5} 、泊松比为 0.167. 得到模型的应力迹线图和桥墩墩身对称轴处横向正应力图分别如图 2 和图 3 所示.

通过对图 3 正应力图进行积分, 获得薄壁花瓶墩拉力合力值 N_d 为 4 255 kN.

2) 构建模型

在构建拉 - 压杆模型时, 一般要借助于有限元分析, 得到结构内部的应力迹线后, 按照杆件中心应尽量与应力迹线重合的准则来构建拉压杆模型, 也可按照 Schlaich 提出的荷载路径法或参考已有的标准模型来构建, 本文采用前者.

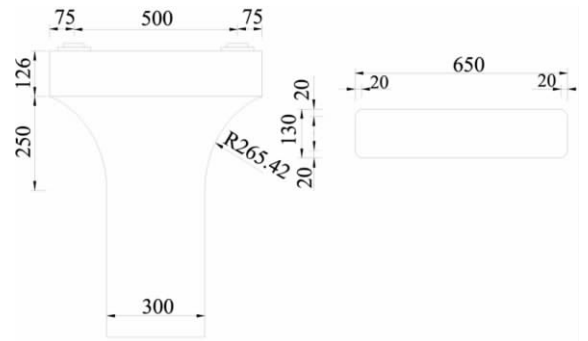


图1 薄壁花瓶墩墩示意图 (单位: cm)
Fig.1 Thin-walled vase pier (unit: cm)

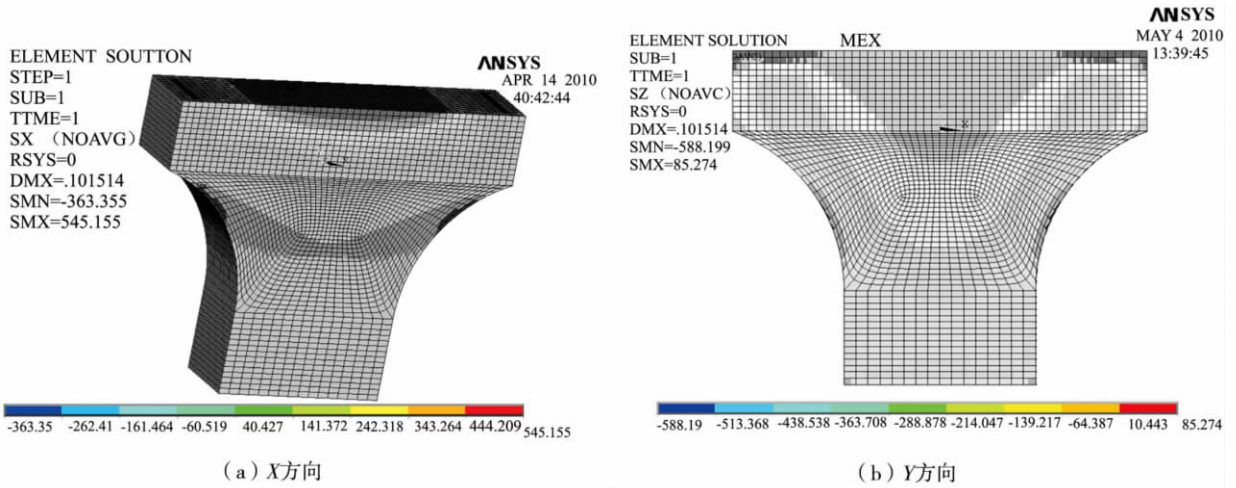


图2 应力迹线图
Fig.2 Stress tracing line

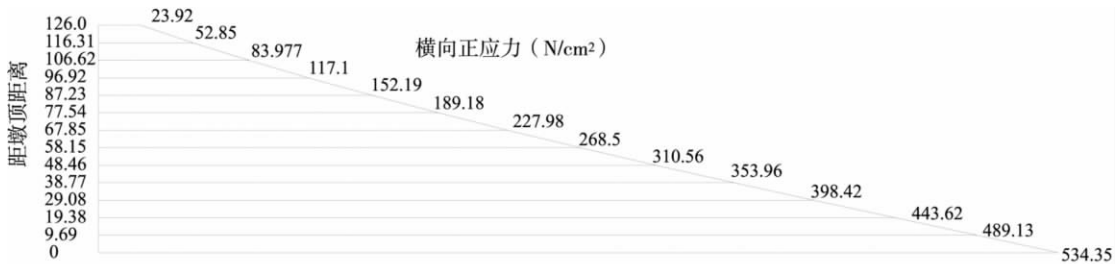


图3 横向正应力图
Fig.3 Transverse normal stress

首先要将结构划分为 B 区和 D 区(凡是应力分布呈明显非线性状态的部分或集合不连续区域称为 D 区, 凡是其应变分布基本符合伯努利(Bernoulli) 平面应变假定(即按线性分布) 的那部分区域称为 B 区). 因此以图 1 所示的薄壁花瓶墩为例, 根据参考文献 [1] 划分 B 区和 D 区, 如图 4 所示(图中阴影部分为 D 区).

然后, 从 Ansys 有限元分析得到如上图 2 中 X 方向和 Y 方向的应力云图, 从而确定如图 5 所示的荷载路径图. 最后利用由上述有限元分析得到结构内部的应力迹线, 按照杆件中心应尽量与应力迹线重合的准则来构建拉 - 压杆模型.

按照计算的应力迹线获得的荷载传力路径图得到拉杆与压杆夹角:

$$\theta = \tan^{-1}(6\,000/4\,255) = 54.7^\circ \leq 65^\circ$$

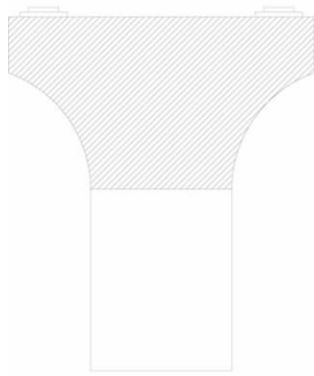


图4 B区和D区划分图
Fig.4 Division B and D

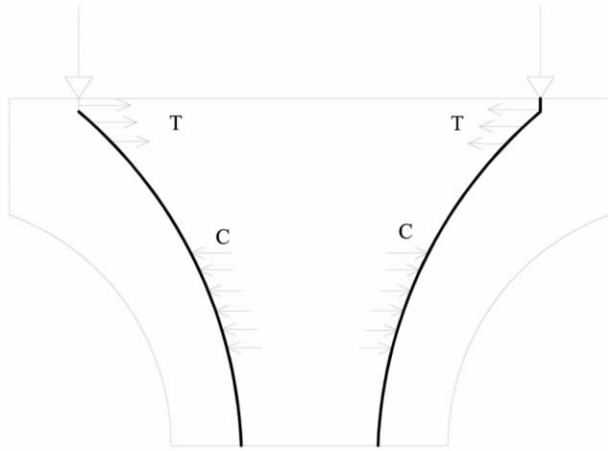


图5 荷载传力路径图
Fig.5 The transmission path load

拉杆、压杆夹角满足拉压杆建模的夹角要求^[1].

在最大拉应力位置设置拉杆,最大压应力位置设置压杆,形成拉-压杆桁架模型.由此可见,花瓶墩的拉压杆模型与《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD62-2004)中应用与承台计算的“撑杆和拉杆体系”的计算模型形式是一致的,如图6所示.

1.2 薄壁花瓶墩计算公式

1) 拉压杆计算模型的确定

依据花瓶墩的形式和有限元分析,从图6可以看出,拉-压杆模型的D区的拉杆中的拉力大小主要是决定于角度 θ .因此,如何确定角度 θ 是薄壁花瓶墩计算公式的重点.本文采用Ansys有限元对不同尺寸大小的花瓶墩进行了分析计算,发现斜压杆与弧线段中点的横向距离与水平拉杆和弧线段中点的高度比值都基本位于0.5附近,因此可以方便的确定 θ 角的计算,从而可得到一个适用于薄壁花瓶墩设计的计算公式.

本文薄壁花瓶墩设计的计算公式采用如图7所示的“拉-压杆模型”计算示意图进行推导.图中 H_0 为花瓶墩帽有效高度; H 为墩帽高度; n 为支座中心间距; D 为桥墩底部宽度; L 为悬臂长度; R 为圆弧半径; h_1 为平行于弧线段起点和终点连接直线并与弧线相切的点的高度; a 为压杆压力线在 $(H_0 + h_1)$ 处至边缘的距离,偏安全的取 $a = 0.5(H_0 + h_1)$; x_1 和 x_2 为支座中点与A点的距离.其中 x_1 和 h_1 的推导公式如下.

如图8所示,已知弧线段高度 h 和悬臂端长度 L ,圆弧半径 R 及角度 α ,求 h_1 和 x_1 的值,首先通过等腰三角形关系求得: $\beta = 90^\circ - \frac{\alpha}{2}$, $\gamma = \beta - \tan^{-1} \frac{h}{L} = 90^\circ$

$$- \tan^{-1} \frac{h}{L}.$$

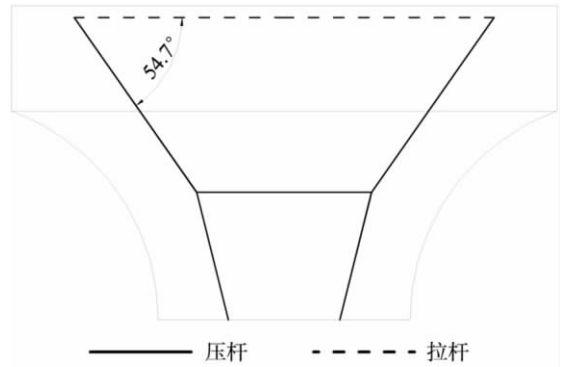


图6 拉-压杆模型图
Fig.6 Strut-and-tie model

发现斜压杆与弧线段中点的横向距离与水平拉杆和弧线段中点的高度比值都基本位于0.5附近,因此可以方便的确定 θ 角的计算,从而可得到一个适用于薄壁花瓶墩设计的计算公式.

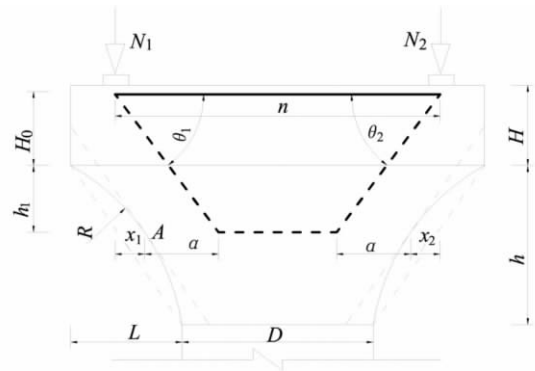


图7 按“拉-压杆模型”计算示意图
Fig.7 According to strut-and-tie model calculation

由于 $bd = R(1 - \cos \frac{\alpha}{2})$, 得到 $bc = R(1 - \cos \frac{\alpha}{2}) \tan \gamma$, 又因为 $\triangle bdc$ 相似 $\triangle aec$ 可得 ae

$$= \left[R \sin \frac{\alpha}{2} - R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \tan \gamma \right] \cos \gamma$$

故得到: $h_1 = h - \left[R \sin \frac{\alpha}{2} - R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \tan \gamma \right] \cos \gamma$

$$x_1 = \sqrt{\left(R \cdot \frac{\alpha}{2} \right)^2 + \left[R \sin \frac{\alpha}{2} - R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \tan \gamma \right]^2 \cos^2 \gamma}$$

花瓶墩的两个悬臂一般为对称布置, 因此有 $x_2 = x_1$; 当花瓶墩的两个悬臂为不对称布置时, 按上述方法可推导出 x_2 的计算公式, 此处不赘述。

所以, 由图中的几何关系很容易获得 θ_i — 压杆压力线与拉杆拉力线的夹角, $\theta_1 = \tan^{-1} \frac{H_0 + h_1}{a + x_1}$, $\theta_2 = \tan^{-1} \frac{H_0 + h_1}{a + x_2}$

2) 拉压杆的内力计算

由拉压杆中点平衡关系, 可以得出: 斜压杆压力设计值 D_i 计算公式为: $D_1 = N_1 / \sin \theta_1$, $D_2 = N_2 / \sin \theta_2$; 压杆相应的拉杆拉力设计值 T_i 计算公式为: $T_1 = N_1 / \tan \theta_1$, $T_2 = N_2 / \tan \theta_2$; 其中 N_1 和 N_2 为支座反力竖向设计值。

3) 拉压杆承载力按规定公式计算

按照图 7 的“拉杆 - 压杆模型”并参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD62 - 2004) 计算压杆的抗压承载力和拉杆的抗拉承载力公式。

① 压杆抗压承载力可按下列规定计算

$$\gamma_0 D_i \leq t b f_{cd,s} \tag{1}$$

$$f_{cd,s} = \frac{f_{cu,k}}{1.43 + 304 \varepsilon_1} \leq 0.48 f_{cu,k} \tag{2}$$

$$t = b \sin \theta_i + h_a \cos \theta_i \tag{3}$$

$$h_a = s + 6d \tag{4}$$

式中: $f_{cd,s}$ — 压杆混凝土轴心抗压强度设计值;

t — 压杆计算高度;

b — 支座的横向支撑宽度, 方形截面支座取截面边长, 圆形截面支座取直径的 0.8 倍;

$f_{cu,k}$ — 边长为 150 mm 的混凝土立方体抗压强度标准值;

s — 拉杆钢筋的顶层钢筋中心至墩顶的距离;

d — 拉杆钢筋直径, 当采用不同直径的钢筋时, 取加权平均数。

② 拉杆抗拉承载力可按下列规定计算

$$\gamma_0 T_i \leq f_{sd} A_s + f_{pd} A_p \tag{5}$$

式中: f_{sd} — 拉杆钢筋抗拉强度设计值;

f_{pd} — 横向预应力钢筋的抗拉强度设计值;

A_p — 受拉区纵向预应力钢筋的截面积;

A_s — 在压杆计算宽度 b_s (系杆计算宽度) 范围内系杆钢筋截面面积;

b_s — 压杆计算宽度, 取支座纵向支撑宽度, 方形截面支座取截面边长, 圆形截面支座取直径的 0.8 倍。

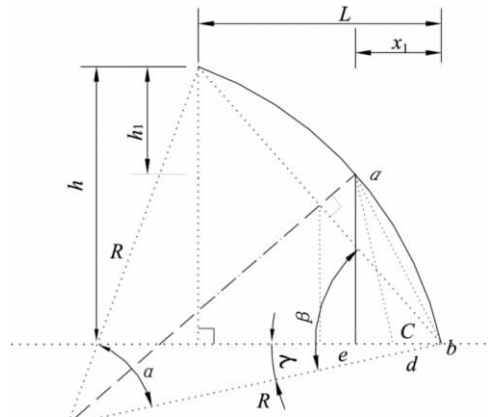


图8 弧线段示意图
Fig.8 Arc segment

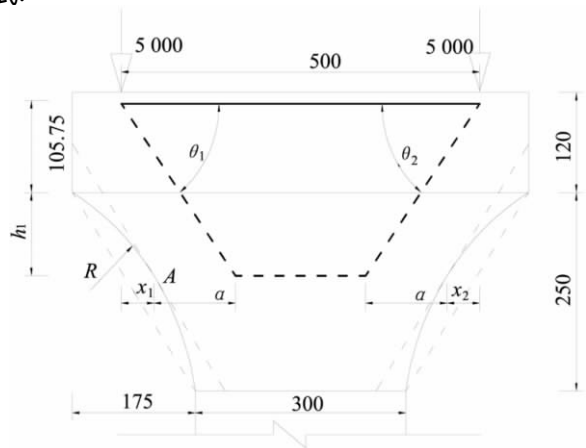


图9 薄壁花瓶墩示意图
Fig.9 Thin-wall vase piers calculation

2 参数分析及算例

对薄壁花瓶墩计算公式中的各项参数对其 D 区受拉区的影响进行详细的讨论,同时和有限元的结果进行对比.从图 7 的拉-压杆模型图看出参数的改变将导致拉杆和斜压杆的交角度 θ 的改变,从而改变了 D 区受力情况,故下面的通过参数分析与有限元计算数据结果进行对比分析.

2.1 圆弧段半径 R 的参数分析

为了讨论弧线半径 R 对 θ 的影响,取 $H=1.2\text{ m}$, $h=2.5\text{ m}$, $L=1.75\text{ m}$, $D=3\text{ m}$, $H_0=1.0575\text{ m}$, $n=5\text{ m}$,墩身厚度取 1.3 m , $N_1=N_2=5000\text{ kN}$,花瓶墩计算参数如图 8 所示.通过改变 R 为 225 250 265 275 295 350 400 时,采用本文计算方法得到结果和用 Ansys 得到的结果对比如表 1 所示.

当圆弧段半径 R 值增大时,由计算公式可以得出 θ_i 值变大,拉力合力值变小.同时,从表 1 中我们可以很清楚的看到,圆弧段半径与拉力合力成反比,随着圆弧段半径的增大拉力合力值越小.

2.2 桥墩底部宽度 D 的参数分析

讨论底部宽度 D 从而改变悬臂段长度 L 对的影响,取 $H=1.2\text{ m}$, $h=2.5\text{ m}$, $L=1.75\text{ m}$, $R=265\text{ cm}$, $H_0=1.0575\text{ m}$, $n=5\text{ m}$,墩身厚度取 1.3 m , $N_1=N_2=5000\text{ kN}$.当 D 取 250 275 300 325 350 375 400 时即 L 为 200,187.5,175,162.5,150,137.5,125 时,采用本文实用公式得到结果和用 Ansys 得到的结果对比如下表 2 所示.

当桥墩底部宽度 D 值增大和悬臂段 L 减小时,由计算公式可以得出 θ_i 值变大,拉力合力值变小.从表 2 中我们可以很清楚的看到,随着底部宽度的增大和悬臂段 L 的减小,使得拉力合力值减小.

2.3 墩帽高度 H 的参数分析

取墩帽高度 H 对拉力合力的影响,且方便建模和讨论,取 $h=2.5\text{ m}$, $L=1.75\text{ m}$, $R=250\text{ cm}$, $H-H_0=0.1425\text{ m}$, $n=5\text{ m}$,墩身厚度取 1.3 m , $N_1=N_2=5000\text{ kN}$,当 H 取 130,120,110,100,90,80 时得到结果和用 Ansys 得到的结果对比如表 3 所示.

当桥墩帽高度 H 值增大时,由计算公式可以得出 θ_i 值变大,拉力合力值变小.同时,从表 3 中我们可以很清楚的看到,公式得到的结果和有限元计算的结果相差较小.墩帽高度与拉力合力成反比,随着墩帽高度的减小,使得拉力合力增加.

通过上述参数分析计算与有限元分析计算结果相比较,计算结果都相差较小,说明本文推导计算公式的合理性,同时也表明在其他参数一定的情况下,拉力合力与圆弧段半径、桥墩底部宽度和墩帽高度成反比的规律.

表 1 圆弧段半径对受拉区合力的影响

Tab. 1 The influence of pulling force by arc radius

R	本文公式 得到结果	ANSYS 计算结果	比值
225	4 060.8	3 818.1	1.06
250	3 870.2	3 741.0	1.05
265	3 783.0	3 593.4	1.05
275	3 732.8	3 552.1	1.05
300	3 628.0	3 474.4	1.04
325	3 495.0	3 412.3	1.02
350	3 477.4	3 362.7	1.03
375	3 421.1	3 322.3	1.03
400	3 373.3	3 288.5	1.03

表 2 桥墩底部宽度 D 对受拉区合力的影响

Tab. 2 The influence of pulling force by D

D	本文公式 得到结果	ANSYS 计算结果	比值
250	4 199.9	3 828.1	1.10
275	3 986.8	3 691.0	1.08
300	3 783.0	3 593.4	1.05
325	3 587.5	3 216.3	1.12
350	3 399.6	3 024.3	1.12
375	3 218.4	2 915.5	1.10
400	3 043.4	2 783.6	1.09

表 3 墩帽高度 H 对受拉区合力的影响

Tab. 3 The influence of pulling force by H

H	本文公式 得到结果	ANSYS 计算结果	比值
130	3 805.2	3 672.3	1.04
120	3 870.2	3 741.0	1.03
110	3 941.2	3 810.5	1.03
100	4 021.7	3 942.5	1.02
90	4 110.7	4 051.2	1.01
80	4 210.8	4 112.5	1.02

