

基于 ANSYS 的薄壁墩受力性能分析及参数优化研究

唐先习,张景伟,孙拴虎,何勇
(兰州理工大学土木工程学院,730050)

摘要:在高速公路刚构桥墩台设计与施工中,箱型薄壁墩与双薄壁墩因其施工简便,经济实用等特点而被广泛采用。本文基于 ANSYS 有限元软件分别对这两种结构形式进行了建模分析,以期通过对比他们的力学性能来优化设计方案,选取合理的设计参数,进一步指导施工。通过分析对比在荷载作用下最不利截面上应力和位移的变化情况,总结出同一形式薄壁墩在同一截面与不同截面下应力的变化规律,以及不同横截面积情况下桥墩顶端位移的变化规律。在考虑两种形式的薄壁墩受力性能的基础上,给出了优化箱型薄壁墩薄壁厚度的选取范围,并针对双薄壁墩提出增加横向连接的建议。

关键词:桥梁工程;箱型薄壁墩;双薄壁墩;数值分析;受力性能

Abstract: During the construction of rigid frame piers of expressways, box thin-walled piers and double thin-walled piers are widely used because of their lots of characteristic, such as simple construction, economy, practicality and so on. ANSYS finite element software is used to model and analyze the two types of structures, in order to optimize the design scheme by comparing their mechanical properties, and select reasonable design parameters, and guide the construction. By analyzing and comparing the changes of stress and displacement on the most dangerous cross-section under the load, the law of stress variation of the same type of thin-walled pier under the same cross-section and different cross-section are summarized. On the basis of considering the mechanical properties of two types of thin-walled piers, the thin-walled thickness of box thin-walled piers is given, and suggestions for adding the lateral connection of double thin-walled piers are put forward.

Key words: Bridge structure; Thin-wall box pier; Double thin-wall pier; Numerical analysis; Mechanical performance

中图分类号:TU312 文献标识码:A doi:10.19761/j.1000-4637.2019.01.085.06

0 前言

交通运输业的蓬勃发展,促使了我国桥梁基础建设的日益完善。用薄壁墩代替以往的实心墩作为桥梁下部结构,不但可节省材料,减轻桥墩自重,还能增强构件的柔性,满足桥梁的抗震性能。薄壁墩有多种形式,其中,箱型薄壁墩和双薄壁墩是最常见的两种形式。箱型薄壁墩截面面积小、自重轻、节省材料、结构刚度和强度大,并具有较好的抗扭能力和较强的抗推能力。双薄壁墩较其他形式的墩台形式而言柔度较好,能显著减小墩顶的负弯矩,增加桥墩刚度。此外,由于其本身抗推能力较小使得桥梁结构容许沿其纵向产生较大的位移,使其内力分配更为合理。同时,由于其双墩柱的特殊形式,使得墩顶最大弯矩出现在两支壁墩的墩顶,而不像单柱墩集中在墩顶一处,因此,最大弯矩值也明显较

单柱墩要小,这样可以保证在较小墩柱面积的情况下依然能够充分发挥材料的力学性能,并增加桥梁结构的整体美感。

目前,关于桥梁薄壁墩台的研究国内外均已取得很大进展。对于箱型薄壁墩,张永亮、Prakit Chomchuen 等^[1-2]以桥梁下部结构为研究对象进行了抗震性能分析;Collins M P、夏樟华等^[3-4]基于双向拟静力试验考察了配筋率等对薄壁墩荷载滞回曲线、位移延性等特性的影响;李宁、杨绿峰等^[5-6]提出考虑弯剪耦联变形的混凝土墩柱模拟模型以及剪力滞效应下箱型梁附加挠度和经典挠度的解耦求解方法;安里鹏、Lee J H 等^[7-8]分析了温差效应对墩身线性的影响并导出了计算公式以及施工期间预应力混凝土桥梁的热效应。对于双薄壁墩,沈星等^[9]在单柱墩延性能力研究的基础上,得出了双柱墩弹塑性位移能力简化计算方法并进行了误差分析;张建军、Peng W 等^[10-11]利用软件进行稳定分析,得到了结

基金项目:国家自然科学基金项目(51668042)。

构失稳的相关曲线以及不同工况下的失稳荷载和稳定安全系数;宋黎明等^[12]以实际工程为例,对比分析了不同因素对桥梁地震响应的规律,总结出双支薄壁刚构桥在烈度地震中面临的问题,并提出了新的抗震体系。目前,将箱型薄壁墩与双薄壁墩结合起来的研究相对较少,最新研究表明,对于钢管混凝土组合格构墩较薄壁墩而言,前者具有更好的经济性^[13];而从整体稳定性来看,双薄壁墩和变截面独墩墩高比例在 0.5~1.0 的范围内比较适宜^[14];矩形空心墩在刚构桥桥墩墩高度不小于 100 m 的情况下,能够保证在满足纵向柔度的同时,还可提供相当大的横向刚度,而在相同情况下双薄壁墩则需要有较大的横截面面积,这就使得其经济指标不如矩形空心墩。

但这些研究主要是从纵向位移、力学性能、动力性能等方面展开,而对于薄壁墩的厚度、宽度和截面选取等构造方面的研究相对较少。有关墩台在相同截面面积下最适宜参数选取的研究鲜有提及。因此,本文主要通过通过对相同截面面积、不同截面尺寸的箱型薄壁墩与双薄壁墩在纵向荷载作用下的墩台受力性能和顶部位移进行有限元分析,进而获得最优的截面尺寸设计参数,并通过调整结构构造来提升桥梁的可靠度,进而保证成桥阶段的使用性能和耐久性能。

1 有限元分析模型

1.1 材料本构关系确定和单元选取

本文针对钢筋混凝土桩柱式桥墩进行模拟分析,采用 ANSYS 有限元软件中的三维实体 Solid65 单元模拟桥墩,混凝土强度等级 C40,钢筋选用具有拉压、扭转和弯曲性能的 Pipe16 整体式模型进行模拟。

材料本构关系对钢筋混凝土结构的分析具有重大影响,本文在考虑力学特性的基础上,对混凝土单轴应力应变关系进行确定,其中的上升段按照 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》附录中钢筋、混凝土本构关系与混凝土多轴强度准则的规定选取,见图 1(a),下降段则采用 Hongnestad 的处理方法,见图 1(b)。

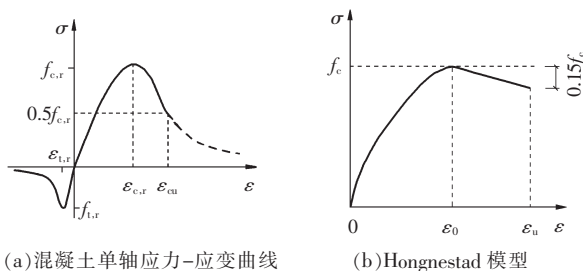


图 1 混凝土本构关系

上升段:

$$\sigma=(1-d_t)E_c\varepsilon$$

$$d_t=1-\rho_t(1.2-0.2x^5),x\leq 1$$

$$x=\frac{f_{1,\tau}}{E_c\varepsilon_{1,\tau}}$$

$$\rho_t=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{1,\tau}}$$

式中:

d_t ——混凝土的单轴受拉损伤演化参数;

$f_{1,\tau}$ ——混凝土的单轴抗拉强度代表值,其值可根据实际结构分析的具体情况分别选取 f_t 、 f_{tk} 、 f_{tm} ;

$\varepsilon_{1,\tau}$ ——对应于单轴抗拉强度代表值 $f_{1,\tau}$ 时的混凝土峰值拉应变。

下降段:

$$\varepsilon_0\leq\varepsilon\leq\varepsilon_u$$

$$\sigma=f_c\left(1-0.15\frac{\varepsilon-\varepsilon_0}{\varepsilon_u-\varepsilon_0}\right)$$

式中:

f_c ——峰值应力(棱柱体抗压强度);

ε_0 ——相应于峰值应力时的应变;

ε_u ——极限压应变。

钢筋采用 HRB335 型普通热轧钢筋,钢筋应力-应变关系采用具有强化阶段的弹性模型,见图 2。

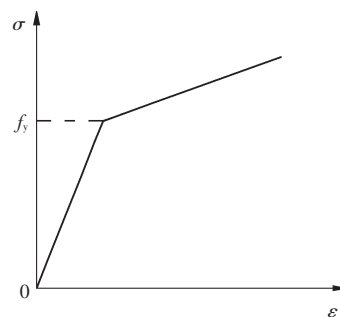


图 2 钢筋本构关系

在 ANSYS 有限元软件中,混凝土采用的是五参数破坏曲面,围压较小的情况下,失效面也仅可通过两个参数和确定,其他参数采用 Willam-Warnke 模型的默认值,即: $f_{cb}=1.2f_c$, $f_t=1.45f_c$, $f_2=1.725f_c$ 。

1.2 有限元分析时横截面的选取

在桥梁结构中,薄壁墩主要应用在墩身较高的刚构桥中。在沿桥梁纵向荷载作用下,最大第一主应力通常出现在墩台底部断面上,故取这一面上的应力进行分析。墩身主要承受桥梁上部结构传递下来的竖向力、水平力以及弯矩等作用。在进行截面选取时,采用了如下的方法:针对结构上部传来的竖向力,各个断面的截面面积采用相同的值,不考

虑上部结构传来的弯矩。对于薄壁墩,桥墩垂直于桥向的宽度取为 6 m,顺桥向宽度则由 2 m 向 4 m 逐渐增加,递增间隔为 0.5 m,然后分别对各个截面进行相应的数值分析。

2 数值模拟结果及分析

2.1 箱型薄壁墩的力学性能数值分析

2.1.1 横桥向薄壁厚度不变

在进行有限元建模分析时,桥墩的边界条件采用底部固结,顶部可以水平移动的方式。桥墩的高度取为 50 m,截面面积取为 9 m²,并且保持两者的大小不变,桥墩的具体截面尺寸按表 1 所列的值采用。施加大小为 100 kN,方向为垂直于截面的长边方向的水平荷载,所加荷载的作用位置选在桥墩顶部。进行截面应力分析时,由于桥墩底部截面应力最大,故选取此截面为研究对象;同样,在进行位移分析时,也选取桥墩位移最大截面处,即墩顶位置

表 1 箱型薄壁墩截面尺寸表

序号	桥墩顺桥向宽度/cm	墩身顺桥向壁厚/cm	薄壁厚度/cm	桥墩编号
1	200	150	50	I
2	250	100	50	II
3	300	75	50	III
4	350	60	50	IV
5	400	50	50	V

进行。

图 3~图 10 为不同截面尺寸的箱型薄壁墩数值分析的相关结果。

图 3 为桥墩底部截面的第一主应力分布云图。由图 3 可知,对于箱型截面墩而言,当水平荷载作用在沿桥墩顶部长边方向时,桥墩底部横截面上第一主应力的值沿着荷载作用的方向逐渐变小,而且拉应力逐渐变化为压应力。

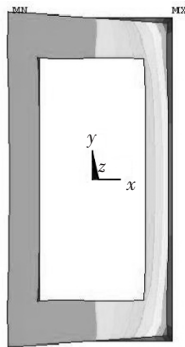


图 3 桥墩底部截面第一主应力分布云图

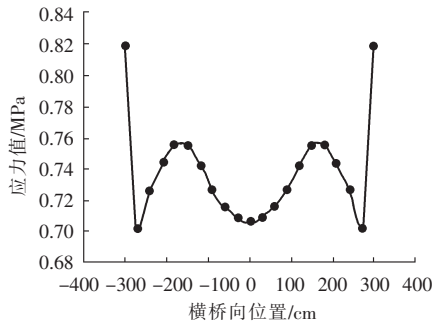


图 4 I 号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

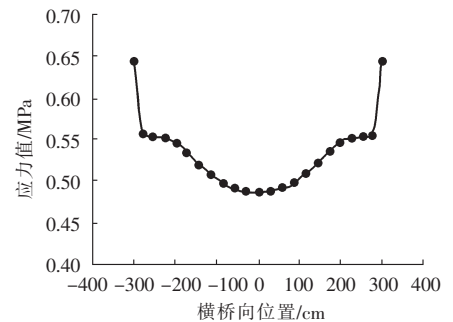


图 5 II 号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

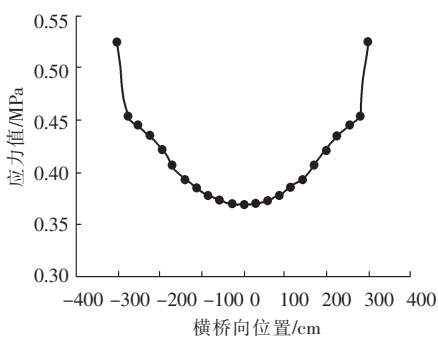


图 6 III 号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

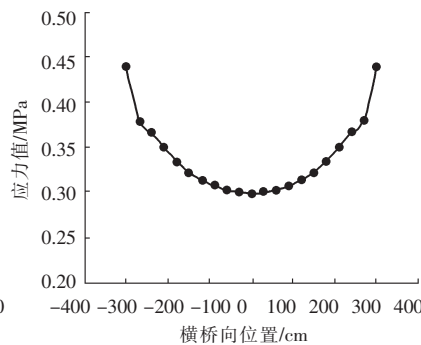


图 7 IV 号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

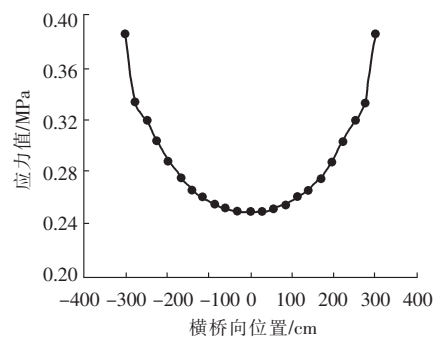


图 8 V 号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

图 4~图 8 为第一主应力在不同顺桥向宽度时桥墩底部截面沿长边方向的分布曲线,并且长边的中部就是图中横坐标为零的点所代表的位置。图 9 为不同顺桥向宽度的各部位第一主应力值曲线,图 10 为不同顺桥向宽度的墩顶水平位移曲线。由图 9~图 10 可以看出,当荷载垂直作用在桥墩顶部沿薄壁长边方向的位置处,随着箱型薄壁墩短边方向长度的增加,即顺桥向壁厚与薄壁厚度的减小,底

部横断面所受第一主应力沿断面呈现出以下变化规律:

(1)对某一顺桥向宽度的桥墩而言,从棱角处到断面中部,主应力值逐渐减小,这与矩形截面的主应力变化规律相反。

(2)棱角处的应力突然增大值不断减小,棱角内侧应力增加的现象越发不明显。

(3)对不同顺桥向宽度的桥墩而言,棱角处主

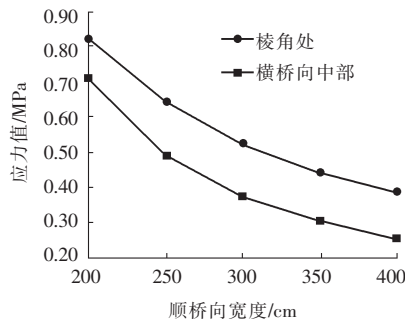


图9 不同宽度时各部位第一主应力值曲线

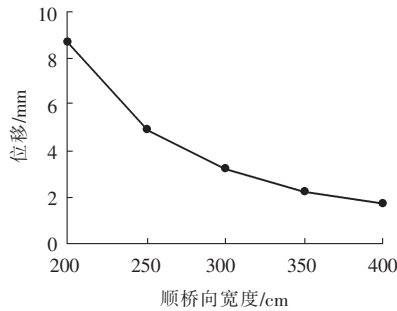


图10 不同宽度时墩顶水平位移曲线

应力和侧面中部主应力逐渐减小,但减小的幅度越来越小。

(4)对不同顺桥向宽度的桥墩而言,随着顺桥向桥墩宽度的增加,墩顶水平位移逐渐减小,但减小幅度越来越小。

2.1.2 双向薄壁厚度相同

在进行数值分析时,桥墩的约束形式、桥墩横截面面积、桥墩高度、施加荷载等均保持不变,桥墩墩壁的厚度取长边和短边双向相同,桥墩的具体截面尺寸按表2中所列值采用。在建模分析选取截面时,同样选取桥墩底部应力最大的截面进行应力分析,选择桥墩顶部位移最大截面进行位移分析。

表2 箱型双向薄壁墩截面尺寸表

序号	桥墩顺桥向宽度/cm	墩身顺桥向壁厚/cm	薄壁厚度/cm	桥墩编号
1	200	67.7	67.7	VI
2	250	62.0	62.0	VII
3	300	57.3	57.3	VIII
4	350	53.4	53.4	IX
5	400	50.0	50.0	X

图11~图17为箱型薄壁墩在不同截面尺寸时的数值分析结果。

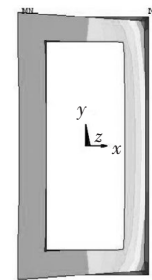


图11 桥墩底部第一主应力分布云图

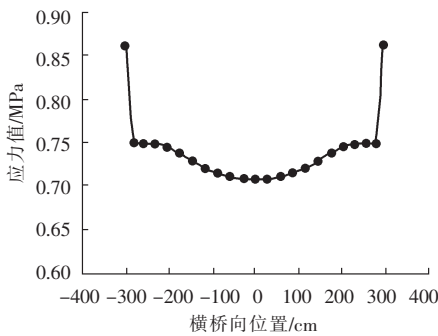


图12 VI号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

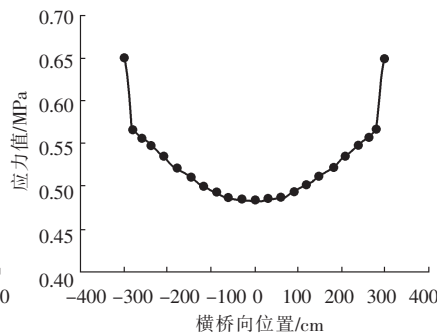


图13 VII号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

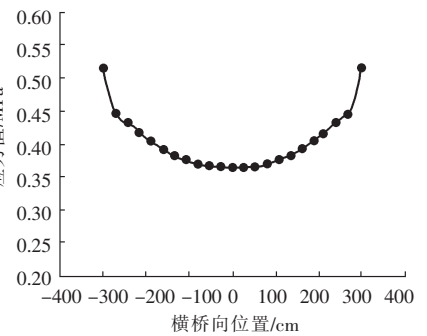


图14 VIII号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

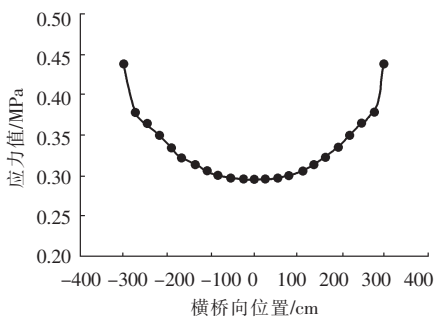


图15 IX号桥墩底部受拉侧第一主应力分布曲线

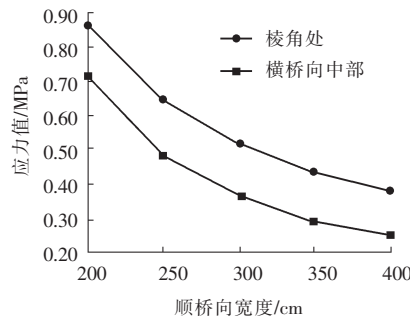


图16 不同宽度时箱形薄壁墩各部位第一主应力值曲线

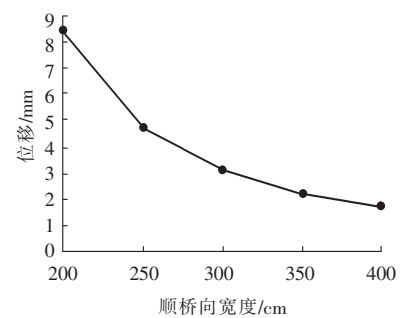


图17 不同宽度时箱形薄壁墩墩顶水平位移曲线

图 11 为箱型薄壁墩底部截面第一主应力分布云图。图 12~图 15 为第一主应力在不同顺桥向宽度时桥墩底部截面沿长边方向的分布曲线。图 15 为不同顺桥向宽度的墩顶水平位移曲线,图 16 为不同顺桥向宽度的各部位第一主应力值曲线。分析图 11~图 17 可知,除 VI 号桥墩与 I 号桥墩的应力变化规律相差较大外,其余桥墩应力与位移的变化规律与两向壁厚不相同时的变化规律基本一致,且应力与位移的数值大小也基本相同。通过分析对比 VI 号桥墩与 I 号桥墩的应力变化规律可知,VI 号桥墩应力变化规律比 I 号桥墩的应力变化规律更有利于设计时的应力控制,因此,在进行箱型薄壁墩的设计时应将两向薄壁的厚度比例控制在一定范围内。同样选取桥墩底部应力最大的截面进行应力分析,选择桥墩顶部位移最大截面进行位移分析。

2.2 双薄壁墩的力学性能数值分析

对双薄壁墩进行数值分析时,由于要与箱型薄壁墩进行对比,所以,桥墩的约束形式、桥墩横截面积、桥墩高度、施加荷载等均保持不变,由于桥墩的横截面积 9 m^2 是不变的,桥墩垂直于桥向宽度 6 m 也是定值,因此,双薄壁墩的壁厚也是固定的,只是两个薄壁墩之间的距离发生了改变。在这种情况下,若不考虑上部结构对桥墩的弯矩作用,就相当于有两个单独的薄壁在起作用,薄壁之间的距离对应力和位移没有影响。数值分析结果也同样证实了这一点。具体的双薄壁墩横截面尺寸按表 3 所列值采用。在建模分析选取截面时,同样选取桥墩底部应力最大的截面进行应力分析,选择桥墩顶部位移最大截面进行位移分析。

表 3 双薄壁墩横截面尺寸表

序号	桥墩顺桥向宽度 /cm	薄壁厚度 /cm
1	200	75
2	250	75
3	300	75
4	350	75
5	400	75

图 18~图 21 为双薄壁墩在不同截面尺寸时的数值分析结果。

图 18 为双薄壁墩底部截面第一主应力分布云图,图 19 为第一主应力在不同顺桥向宽度时桥墩底部截面沿长边方向的分布曲线。图 20 为不同顺桥向宽度各部位第一主应力值曲线,图 21 为不同顺桥向宽度的墩顶水平位移曲线。因双薄壁墩的两个薄壁变化规律相同,故取一个薄壁进行分析。

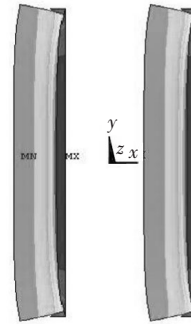


图 18 双薄壁墩桥墩底部第一主应力分布云图

由图 18 可以看出,当荷载垂直作用在双薄壁墩其中一个墩柱顶部沿桥墩长边方向位置处时,薄壁墩底部横断面上的第一主应力沿荷载作用的方向逐渐变小,且由拉应力逐渐变化为压应力。由图 19 可以看出,对于双薄壁墩的一个薄壁而言,应力除了在棱角部位有突然变大的情况外,其值从棱角内侧向受拉侧面中部不断增大,而不是减小,明显区别于箱型薄壁墩应力的变化情况。这是因为对于双薄壁墩的一个薄壁,在没有中间连接的情况下,其实就相当于一个矩形桥墩。因此,在双薄壁桥墩设计时,应根据实际工程情况在两个薄壁墩之间的合适部位进行横向连接。

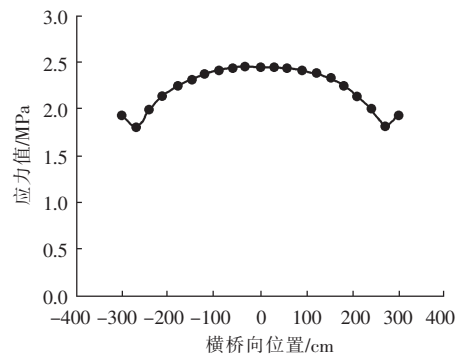


图 19 双薄壁墩桥墩底部受拉侧第一主应力曲线

将图 20、图 21 与箱型薄壁墩的图 16、图 17 进行对比可知,在桥墩横截面积相同、作用的水平力相同的情况下,双薄壁墩的第一主应力和墩顶位移较箱型薄壁墩而言,前者都远远大于后者,例如对于桥墩底部截面中部的第一主应力,当桥墩顺桥向宽度皆为 2 m 时,箱型薄壁墩的应力值为 0.707 MPa ,双薄壁墩为 2.45 MPa ;当桥墩顺桥向宽度为 4 m 时,箱型薄壁墩的应力值为 0.250 MPa ,而双薄壁墩仍然为 2.45 MPa 。再比较墩顶位移,当桥墩顺桥向宽度为 2 m 时,箱型薄壁墩的位移为 8.4 mm ,双薄壁墩为 75.7 mm ;当桥墩顺桥向宽度为 4 m 时,箱型薄壁墩的位移为 1.6 mm ,而双薄壁墩仍为 75.7 mm ,后者较前者几乎大了一个数量级。因此,进行薄壁

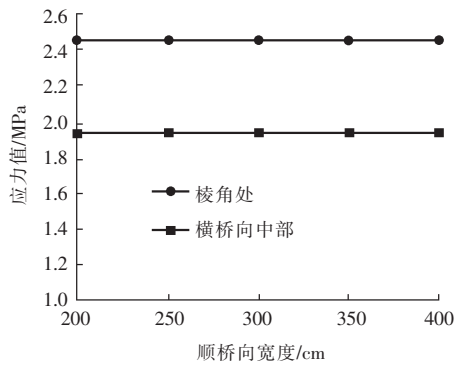


图20 不同宽度时双薄壁桥墩各部位第一主应力值曲线

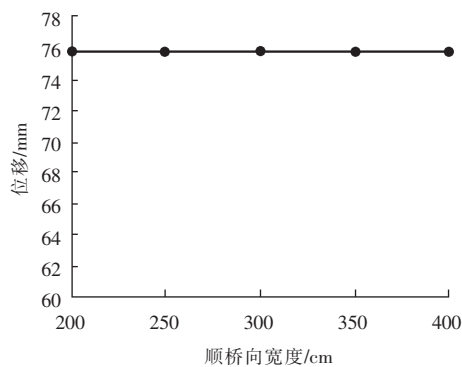


图21 不同宽度时双薄壁桥墩墩顶水平位移曲线

墩设计时,应根据桥梁的具体情况,选择适宜的薄壁墩横断面形式。

3 结论

(1)对某一顺桥向宽度的桥墩而言,从棱角处到横断面中部,主应力值逐渐减小,这与矩形截面的主应力变化规律相反。在桥墩横断面面积不变的情况下,随着纵桥向宽度增大和纵向壁厚减小,桥墩底部横截面棱角处的应力突变值逐渐减小,棱角内侧应力增加的现象逐渐消失。棱角处的主应力值和侧面中部的主应力值都逐渐减小,但减小幅度越来越缓。对于桥墩顶部位移而言,其值逐渐减小,且减小幅度越来越缓。在桥墩横断面面积不变的情况下,随着纵桥向宽度增大和纵横向壁厚同时减小的箱型薄壁墩的应力及位移变化规律大体相同。因此,对于空心薄壁墩而言,顺桥向宽度值不应设计太小,一般应大于250 cm。而对于薄壁墩的壁厚,纵横向厚度值最好能保持适当的比例,考虑到钢筋布置等原因,最薄的薄壁不应小于50 cm。

(2)对于双薄壁墩而言,若不考虑上部结构对桥墩的弯矩作用,就相当于有两个单独的薄壁在起作用,薄壁之间的距离对应力和位移没有影响。在桥墩横截面积相同、作用水平力相同的情况下,相对于箱型薄壁墩位移和应力的变化情况而言,双薄壁墩的第一主应力和墩顶位移都远大于后者。因

此,对于双薄壁墩时,可根据刚构桥梁墩刚度的协调要求进行选用。

(3)对钢筋混凝土箱型薄壁墩与双薄壁墩的受力性能的分析,本文进行了静力方面的分析对比,没有考虑桥梁振动和混凝土疲劳等因素的影响,并且数值模型采用了较简单分析的方法,未考虑到混凝土产生裂缝后的应力重分布等问题,因此,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张永亮,卢肖素,陈兴冲,等.高烈度区实体双薄壁矮墩连续刚构桥抗震设计[J].铁道工程学报,2017,34(11):45-50.
- [2] Prakit Chomchuen,Virote Boonyapinyo. Incremental dynamic analysis with multi-modes for seismic performance evaluation of RC bridges[J]. Engineering Structures,2017,132,29-43.
- [3] Collins M P, Bentz E C, Vecchio F J. Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements [J]. Aci Structural Journal Technical Paper,2006,103(4):614-624.
- [4] 夏樟华,宗周红,钟儒勉.基于双向拟静力试验的钢筋混凝土箱型薄壁墩抗震性能[J].东南大学学报:自然科学版,2013,43(1):180-187.
- [5] 李宁,李忠献,谢礼立.基于纤维截面的弯剪耦联薄壁墩柱模拟模型[J].天津大学学报,2013,46(8):686-692.
- [6] 杨绿峰,曾有凤,周月娥.箱型梁剪力滞效应的解耦求解[J].中国铁道科学,2014,35(1):21-27.
- [7] 安里鹏,李德建,陈鹏,等.基于实测日照温差的空心薄壁高墩线形解析算法[J].应用力学学报,2016(5):878-885,940-941.
- [8] Lee J H. Behavior of precast prestressed concrete bridge girders involving thermal effects and initial imperfections during construction[J].Engineering Structures,2012,42(12):1-8.
- [9] 沈星,叶爱君,王晓伟.双柱墩弹塑性位移能力简化计算方法[J].同济大学学报:自然科学版,2014,42(4):513-519.
- [10] 张建军,钟凯,杨美良,等.薄壁高墩连续刚构桥的稳定分析[J].公路工程,2016,41(1):139-142,162.
- [11] Peng W,Zhao H,Dai F,et al.Analytical Method for Overtuning Limit Analysis of Single-Column Pier Bridges[J].Journal of Performance of Constructed Facilities,2017,31(4):7-17.
- [12] 宋黎明,徐源庆,杨海洋.高烈度地震区双肢薄壁高墩刚构桥合理抗震体系研究[J].公路,2017,62(7):110-115.
- [13] 占玉林,宋瑞年,胡靖,等.钢管混凝土组合格构柱高墩的弯曲性能研究[J].建筑结构学报,2013,34(S1):240-245.
- [14] 李璐,周水兴,江雄飞.双薄壁-独墩组合型桥墩合理构造形式研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(1):19-21,153.

收稿日期:2018-09-17

作者简介:张景伟(1993-),男,硕士研究生。

联系电话:18368913808

E-mail:760943815@qq.com