

文章编号: 1001-4888(2018)05-0696-11

无横隔板空心薄壁高墩稳定性的实验研究^{*}

李世亚¹, 陈展标², 周昊³, 姚国文¹, 黄培彦²

(1. 重庆交通大学山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地, 重庆 400074; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640;
3. 五邑大学土木建筑学院, 广东江门 529020)

摘要: 在山区公路建设中, 空心薄壁高桥墩得到了广泛的应用。然而, 横隔板会对空心薄壁高墩的施工进度造成较大的困难。针对空心薄壁高墩的横隔板设置问题, 本文从稳定性分析入手, 通过数值实验来设计有/无横隔板、不同宽厚比及壁厚条件的缩尺实验模型, 对7个空心薄壁高墩缩尺模型实施轴压实验, 探讨了模型墩的失稳破坏模式、受力和变形特性, 以及可以不设置横隔板的判别条件, 并与有限元计算结果进行了对比分析。研究表明, 在满足本文提出的容许宽厚比的条件下, 混凝土空心薄壁高墩可以不设置横隔板; 采用墩底固结、墩顶自由的独立桥墩模型对空心薄壁墩的稳定性进行非线性分析的方法是可行的。

关键词: 空心薄壁高墩; 横隔板; 稳定性; 缩尺模型; 轴压实验

中图分类号: U446.1

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-032

0 引言

在山区进行公路建设经常要跨越河流、峡谷等复杂地形, 高桥墩的修建日益增多^[1]。由于高桥墩主要采用空心薄壁结构, 其稳定性问题得到了学者们极大的关注^[2, 3]。在我国的桥梁工程中, 为防止高墩的局部失稳, 一般采取每隔一定间距设置横隔板的方式对结构予以加强。

目前, 国内外学者对横隔板的设置问题进行了一些研究, 主要着眼点为局部稳定问题^[4]。这些研究取得了一定的成果, 给后继探索者提供了宝贵经验。但是, 目前的研究成果主要针对个例的数值分析^[5, 6]和实验研究^[7, 8], 无法推广应用于其他高墩的结构设计; 虽然个别学者给出了空心薄壁墩局部稳定的解析解^[9], 但仅适用于特定结构和边界条件, 而且没有考虑桥墩的初始缺陷、材料非线性、几何非线性等的影响; 另外, 国内外规范^[10, 11]中也没有明确的计算和分析方法。

鉴于上述高墩稳定性研究的问题, 并探讨取消横隔板的可行性, 本课题组通过大量的数值分析, 建立了考虑桥墩的初始缺陷、材料非线性、几何非线性等影响的容许宽厚比的线弹性经验公式^[12], 并从位移、稳定性和抗扭性能等方面论述了取消高墩横隔板的可行性^[13, 14]。然而, 这些计算分析成果的适用性如何, 还没有得到实验或理论的验证。

为了对本课题组上述研究成果进行实验验证, 并为工程设计和施工提供更好的建议和指导, 本研究建立混凝土空心薄壁高墩可以不设置横隔板的判别条件, 并按照有/无横隔板、不同宽厚比及壁厚条件等设计缩尺模型墩, 对空心薄壁高墩缩尺模型实施有限元分析和轴压实验, 以探讨模型墩的失稳破坏模式、受力及变形特性, 并根据物理实验与数值实验结果对有/无横隔板的空心薄壁高墩稳定性进行对比

^{*} 收稿日期: 2018-02-10; 修回日期: 2018-03-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0806000)、国家自然科学基金项目(11627802, 51678249)、广东省交通运输厅科技计划项目(科技-2015-02-025)资助

通讯作者: 李世亚, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 桥梁工程、结构耐久性。Email: lishiya@sina.com

分析。

1 空心薄壁高墩不设置横隔板的判别条件

为了探讨在混凝土空心薄壁高墩中不设置横隔板的可能性,本研究采用理论推导和数值分析的方法,分别对空心薄壁混凝土高墩进行整体稳定分析和局部稳定分析。其中,在整体稳定分析中分别实施第一类弹性稳定分析和考虑了材料非线性及几何非线性影响的第二类稳定分析^[15]。

对于薄壁空心墩,其与实体墩相比,能够以较少的材料数量获得较大的截面抵抗惯性矩,充分利用材料的力学性能来满足刚度要求。但薄壁高墩除了存在整体稳定问题外,还存在墩壁的局部稳定问题。墩壁的局部稳定分析,可以通过限制边长与壁厚的比值来保证结构局部屈曲临界应力高于材料的强度极限。具体分析方法如下:

基于偏安全的考虑,为了简化计算,箱型空心薄壁截面的局部稳定可通过四边简支板的弹性屈曲理论分析导出,即其局部屈曲临界应力 σ_{cr} 应满足下式:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\lambda} \frac{4\pi^2 \eta E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \geq f_c \quad (1)$$

式中各参数的确定方法如下:根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》规定的混凝土受压区最大压应力验算指标, f_c 取 0.5 倍混凝土的轴心抗压标准强度 f_{ck} ,泊松比 ν 取 0.2,弹性模量折减系数 η 取 0.8。由于混凝土结构存在原始缺陷,实际的临界应力将远低于理论值,且离散性偏大,故稳定安全系数 λ 由实验结果的统计分析确定,根据目前的研究结果,可粗略地取为 5。将上述参数代入式(1),可得到箱型混凝土薄壁截面的局部稳定容许宽厚比(边长 b 与厚度 t 之比)的表达式为:

$$b/t \leq 0.936 \sqrt{E/f_{ck}} \quad (2)$$

将常用的 C30~C60 混凝土的弹性模量 E 和轴心抗压标准强度 f_{ck} 代入式(2),可计算得到相对应混凝土等级的薄壁墩局部稳定最大容许宽厚比 $(b/t)_{max}$ 如表 1 所示。

表 1 薄壁墩局部稳定的最大容许宽厚比

Tab. 1 The maximum tolerable ratio of width to thickness for the local stability of thin-walled pier

混凝土 强度等级	弹性模量 E/GPa	轴心抗压 标准强度 f_{ck} /MPa	理论值 (b/t) _{max}	建议值 (b/t) _{max}
C30	30.0	20.1	36.2	9.04~18.1
C40	32.5	26.8	32.6	8.16~16.3
C50	34.5	32.4	30.6	7.64~15.3
C60	36.0	38.5	28.6	7.16~14.3

由表 1 的理论计算值可知,箱型混凝土薄壁截面稳定的最大容许宽厚比约为 28。在此宽厚比以内,箱型薄壁墩的设计由位移、强度、整体稳定等因素控制,而不是由局部稳定控制。然而,需要指出的是,表 1 列出的薄壁截面宽厚比限值 $(b/t)_{max}$ 是基于四边简支板的弹性屈曲理论,同时考虑了适当的安全系数(本文取 5.0)推导得到的。在推导中墩高、边界条件和初始缺陷等问题均未予以考虑,所以这样导出的容许宽厚比偏于不安全。例如,C60 混凝土薄壁高墩容许宽厚比约为 28,但此时桥墩无法满足强度要求。根据本课题组对 58 个 C30~C60 混凝土、40m~190m 高的空心薄壁墩的有限元计算结果^[15],一阶非线性稳定系数约为弹性稳定系数的 10%~30%。因此,建议在确定容许宽厚比时考虑较高的稳定安全系数(取 10~20),即箱型混凝土薄壁截面稳定的最大容许宽厚比判别条件为:

$$(b/t)_{max} \leq (0.234 \sim 0.468) \sqrt{E/f_{ck}} \quad (3)$$

根据判别式(3),将结构重量较大的桥墩取高值进行计算。如果满足该判别条件,并满足强度、刚度、整体稳定等要求,则混凝土空心薄壁高墩可以不设置横隔板。

2 实验模型设计

为了验证混凝土空心薄壁高墩中不设置横隔板的可行性以及判别式(3)的有效性,本文按照选材、

模型相似设计、数值实验、模型确定等步骤,设计了 3 组 7 个有/无横隔板的缩尺模型墩。

2.1 混凝土材料

空心薄壁高桥墩发生局部失稳时,失稳部位的横向变形较大,材料的泊松比对高墩局部失稳的影响较大。在选择实验模型材料时,应尽量与原桥墩材料接近,以避免实验结果产生较大的误差。因此,本实验采用素混凝土材料,其配合比设计按照 C30 混凝土的标准进行。试配后,C30 混凝土标准试块(各 3 组,每组 3 块)的抗压强度和弹性模量的实验结果如表 2 所示。

表 2 C30 混凝土的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of C30 concrete

试件组号	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa
1	30.3	31.5
2	31.2	31.8
3	29.5	31.4

2.2 模型相似设计

选定模型材料后,实验模型设计按照相似理论进行。根据结构特点,考虑几何相似、荷载相似、边界条件相似等原则对空心薄壁高墩的实验模型(缩尺模型墩)进行初步设计,然后,根据判别式(3)检验其尺寸是否满足不设置横隔板的条件。另外,为了保证实验模型在现有设备条件下能够被压坏,缩尺模型墩的尺寸也不能太大。

2.2.1 荷载相似

本次缩尺模型实验不考虑实桥的横向荷载,只考虑单轴竖向荷载。为了保证荷载均匀以及尽可能避免承载处的局部破坏,在实验模型(图 1)的墩顶部预埋了 20mm 厚钢板,并在墩顶部的实心段铺设了 100mm×100mm 的 Φ8 钢筋网。

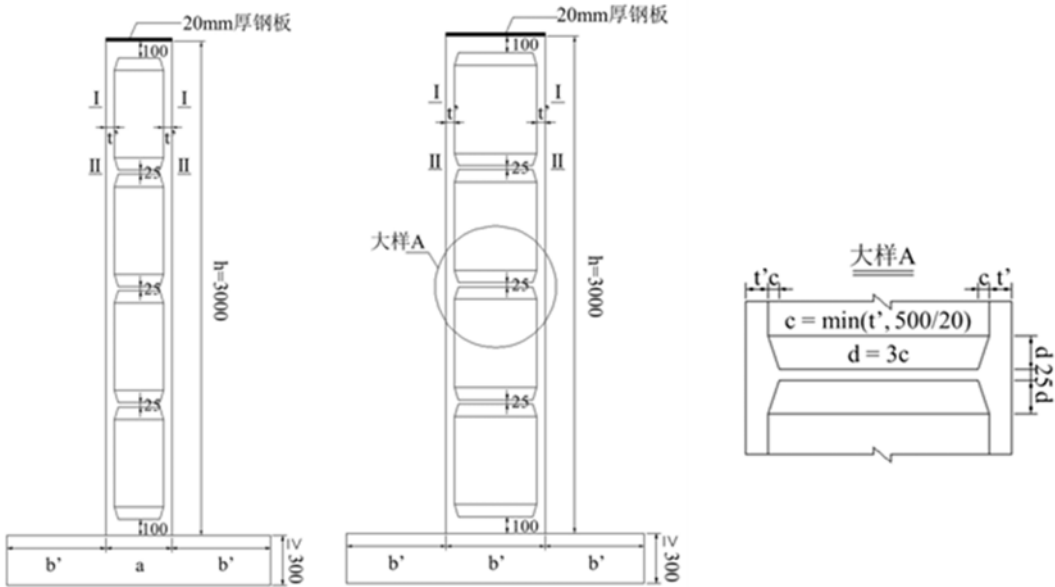


图 1 薄壁高墩模型横隔板设置示意

Fig. 1 Setting of the transverse diaphragm on thin-walled high pier model

2.2.2 边界条件相似

根据前期研究结果和大量工程实践表明,实桥空心薄壁高墩最不利工况时的边界条件类似于悬臂梁。因此,为了模拟该边界条件,实验模型将其底部固结于较大的基座上。基座高度可取为 0.3~0.5m,基座截面每边尺寸不小于桥墩外轮廓尺寸与截面最大高度之和。

2.2.3 几何相似

由于实验大厅及 1000t 长轴压力机空间的限制,模型高度不能大于 3.6m。以广东省交通运输厅科技计划项目依托工程仁博高速公路某桥梁高墩的实际尺寸取整,以墩高 60m 为基准,取缩尺比例为 1/20,则实验模型净高为 $h=3.0\text{m}$,并将基座高度设定为 0.3m。按照缩尺比例,不同宽厚比、墩高为 60m 的空心薄壁墩的实验模型尺寸如表 3 所示。对于有横隔板的模型,横隔板设置方式及各种符号的定义如图 1 所示。其中, $t=t'$, $b=b'-t$ 。

2.3 数值实验

在确定了实验模型的几何形状、尺寸和组成材料后,为了验证上述缩尺模型设计的可行性,采用弹性稳定分析和非线性稳定分析的方法,对表 3 所示的 3 组 7 个模型进行稳定分析。本研究采用 ANSYS 软件分别对不设横隔板和有横隔板的模型进行了弹性稳定分析(特征值分析)和非线性稳定分析(几何及材料双重非线性分析),得到了模型的极限承载力(表 3)、屈曲模态(图 2)和前 2 阶稳定特征值(表 4)。由这些分析结果可知,本研究所设计的模型是可行的。

表 3 实验模型尺寸及极限承载力

Tab. 3 Sizes and the ultimate load-bearing capacity of the testing models

编号	h/mm	b'/mm	a/mm	h/b'	b'/a	壁厚 t'/mm	横隔板 /mm	极限承载力/kN		
								计算值	实验值	相对误差
1-1	3000	600	600	5	1.0	36.5	无	1.54×10^3	1.26×10^3	22.2%
1-2	3000	600	600	5	1.0	46.5	无	1.90×10^3	1.84×10^3	3.26%
2-1	3000	600	300	5	2.0	32.3	有/25	1.03×10^3	9.72×10^2	5.97%
2-2	3000	600	300	5	2.0	32.3	无	1.03×10^3	9.27×10^2	11.1%
2-3	3000	600	300	5	2.0	53.0	无	1.60×10^3	1.61×10^3	0.621%
2-4	3000	600	300	5	2.0	73.7	无	2.13×10^3	2.32×10^3	8.19%
3-1	3000	300	300	10	1.0	29.8	无	6.29×10^2	6.11×10^2	2.95%

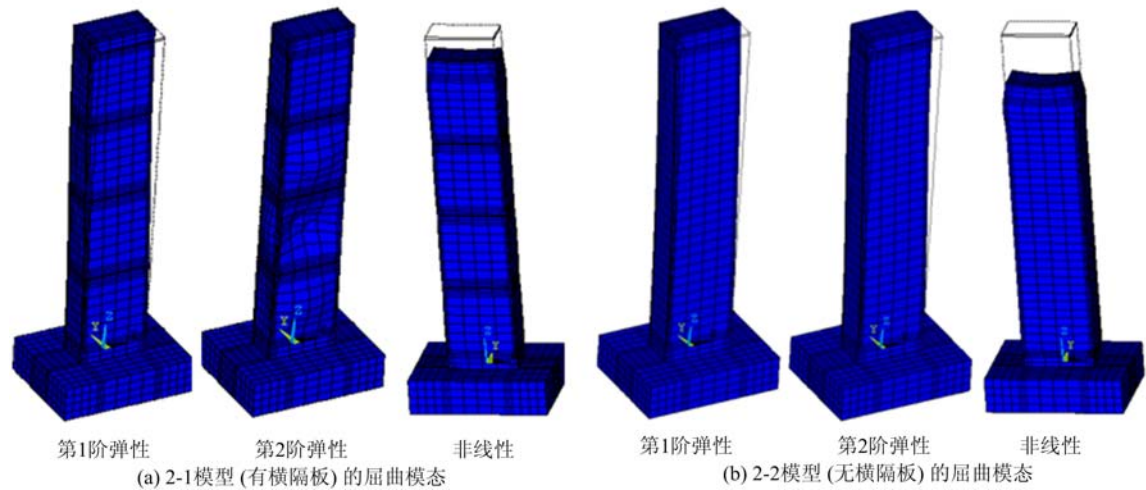


图 2 模型屈曲模态

Fig. 2 Buckling modes of the models

对于工程结构而言,第一阶稳定系数才有实际意义。由计算结果可知,不论有/无横隔板,模型墩的前几阶屈曲模态均表现为整体失稳,所有模型墩的第一阶稳定系数都大于 7,而考虑几何及材料的双重非线性会得到较不利的计算结果。另外,对于本次数值实验,由模型 2-1、2-2 的分析结果(表 4)可知,如果同时考虑混凝土的双重非线性,则有/无横隔板模型墩的非线性稳定系数都是 0.95。而且,横隔板对模型墩的非线性稳定系数以及极限位移的影响均小于 5%。也就是说,数值分析结果表明,按照本文方

法设计的无横隔板模型墩,其稳定性满足规范要求。

表 4 模型墩的稳定特征值
Tab. 4 Stable characteristic values of the models

编号	横隔板	第一阶稳定系数	第二阶稳定系数	非线性稳定系数
1-1	无	18.0	—	0.93
1-2	无	29.6	—	0.92
2-1	有	16.4	16.4	0.95
2-2	无	10.6	15.9	0.95
2-3	无	8.99	8.99	0.95
2-4	无	7.80	12.1	0.96
3-1	无	9.39	9.39	0.92

3 模型墩轴压实验

3.1 模型制作

经过数值分析验证了表 3 所示模型的设计可行后,根据几何相似分析,并考虑本次实验条件,采用胶合板(九夹板)制作模板,在模板内直接浇筑混凝土成型。由于本次实验的墩壁较薄,缩尺模型无法设置钢筋,而且混凝土强度不会对实验结果产生影响,故墩身采用 C30 素混凝土浇筑。同时,为了满足吊装和墩顶均匀受力的需要,在模型的底座和墩顶处增设钢筋网,如图 3 所示。钢筋的弹性模量为 $E_g=206\text{GPa}$ 。

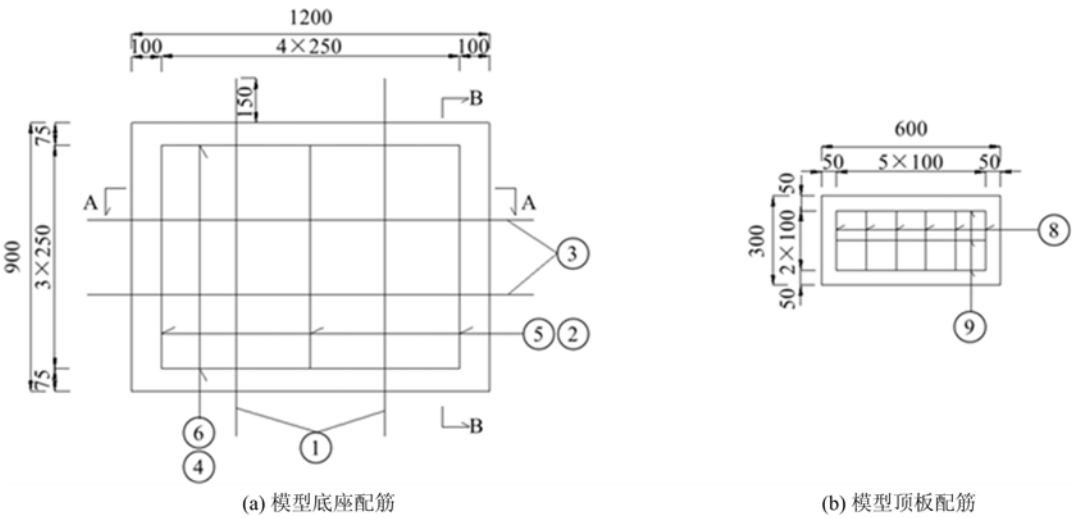


图 3 实验模型配筋
Fig. 3 Reinforcement of testing model

模型墩由下往上、边支模边浇筑(图 4),全程控制墩身的垂直度。待墩身空心段内模完全拆除后再浇筑墩顶渐变段,并放置钢筋网和钢板,使其成为一体。相邻两段混凝土的龄期差控制在 12h 以内。浇筑完成后进行为期 28d 的养护。

3.2 实验方法及装置

本文实验采用 YAW-10000F 微机控制电液伺服长轴压力机进行加载。加载前,先对模型墩进行预压,预压值不宜超过混凝土开裂荷载值的 70%。由于本文实验模型是高度达 3m 的素混凝土墩且墩身是空心薄壁结构,可能会存在难以避免的制作误差和残余应力等因素对其承载力产生影响,因此,预压值按较小值拟定,定为开裂荷载的 15%。预压中,逐级施加预压荷载直至开裂荷载的 15%后,持荷 30min,保证试件各部分接触良好,同时检查全部测试仪器仪表是否正常工作。正式加载时,采用位移

控制加载方式,加载速率为 $0.1\text{mm}/\text{min}$,连续加载直至模型破坏。

实验过程中,YAW-10000F 微机控制电液伺服长轴压力机的控制系统自动记录荷载、试件纵向位移等数据。模型墩的表面应变由 TDS-530 型静态数据采集仪进行采集。



图4 混凝土模型墩浇筑

Fig. 4 Casting of concrete models

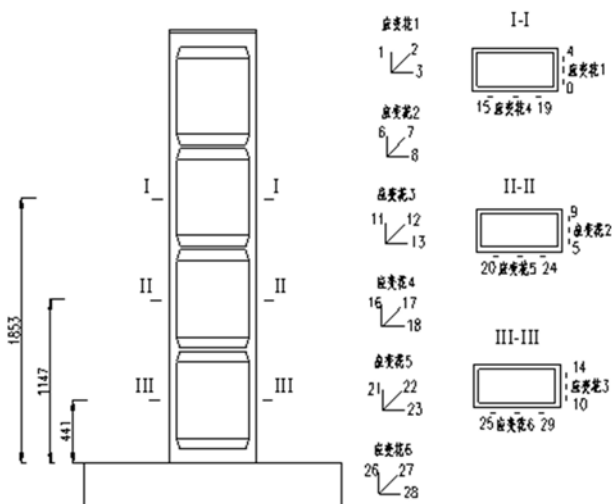


图5 应变测点布置

Fig. 5 Arrangement of strain gauges

对于有横隔板的模型墩,由 ANSYS 计算结果可知,其屈曲部位发生在两横隔板之间的墩壁上。因此,选取该模型截面 I-I、II-II 和 III-III 作为测试截面,在各截面上沿墩高度方向对称粘贴竖向应变片和应变花,而且在相邻的壁板上应变片的布置方式相同,如图 5 所示。同时,在几何相似的无横隔板空心薄壁桥墩模型的对应位置也布置了相同方式的应变片,作为对比分析用。

由于模型墩的变形量较小,为了能对模型的变形及裂纹的产生和扩展全过程进行实时跟踪测量,本次实验应用 DIC 技术^[16,17],采用两套 DIC 测试系统(PMLAB DIC-3D,分辨率 ≥ 400 万像素,帧率 ≥ 75 帧,位移测试精度为 $5\mu\text{m}$,应变测试精度为 $10\mu\epsilon$),对所有模型墩的两个互相垂直的表面变形做全程跟踪测量,而后经计算处理即可得到该两表面的位移数据、应力—应变数据和裂缝的形态。而且,DIC 的测试结果还可以与应变片所测数据作对比分析。

4 实验结果及分析

对于混凝土空心薄壁高墩,其稳定性需要满足整体稳定和局部稳定的要求,这可以从实验模型的破坏模式进行讨论。另外,桥墩除了需要满足稳定性的要求外,还需要满足刚度和强度的要求,而这可以从实验模型墩的变形及承载力的实验结果进行分析。

4.1 模型墩的破坏模式

对于有/无横隔板的所有模型墩,在轴压实验的加载初期,荷载较小时,模型墩的水平方向和竖直方向变形均增加缓慢。随着荷载的增加,模型墩逐渐被压弯。根据 DIC 图像的后处理,可以观察到在空心薄壁模型墩顶下面的 $1/4 h \sim 1/3 h$ 处出现了弯曲变形,如图 6 所示。

随着荷载的逐渐增加,无横隔板的模型墩墩顶出现劈裂裂缝,并逐渐向下扩展,如图 7(a)所示。当裂缝扩展长度超过墩身高度 h 的 $1/4 \sim 1/3$ 时,模型墩的承载力开始出现下降,并迅速发生破坏。对于设置了横隔板的模型墩,在两横隔板之间的壁板出现凸曲和凹曲,之后发展成横向及斜向的裂缝,并随着裂缝的扩展而导致破坏,如图 7(b)所示。这一破坏模式与数值实验结果中的第二阶弹性模态相符。而且,有/无横隔板的模型墩的破坏模式均属于整体弯曲失稳破坏,没有发生局部失稳。所有模型墩的破坏模式都与数值分析结果相符。这表明在满足判别式(3)的条件下,取消横隔板并不会引起桥墩发生

局部失稳。

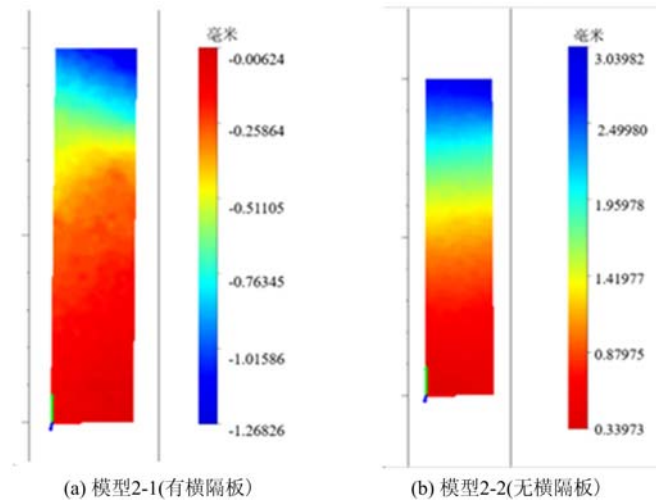


图 6 DIC 位移云图

Fig. 6 Displacement distribution obtained by DIC

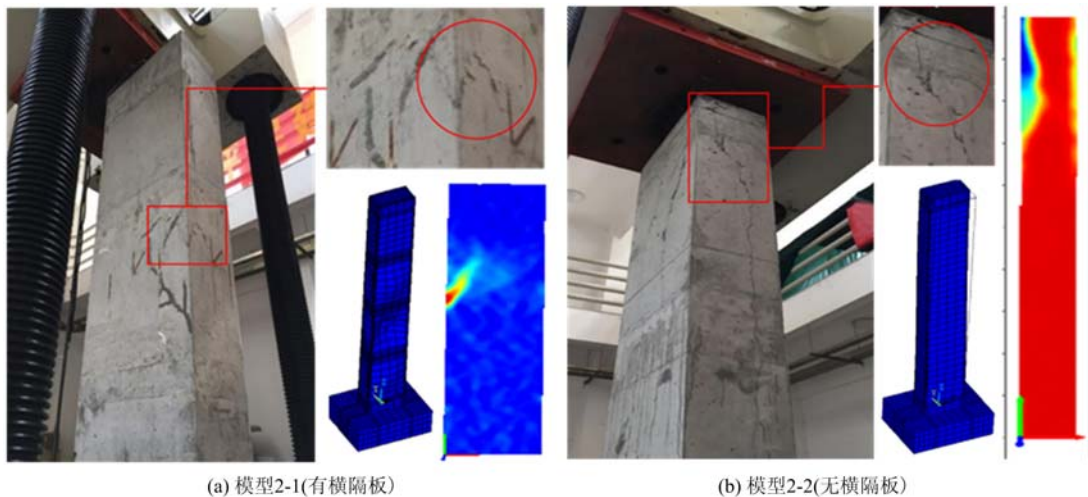


图 7 模型墩破坏模式

Fig. 7 Failure modes of the testing models

4.2 应变分析

4.2.1 水平应变

根据等速率位移加载时静态应变仪采集到的模型墩 3 个主要截面的水平应变数据,处理后可得到模型墩各应变测点的荷载—应变曲线。其中,两个相同尺寸的有/无横隔板模型墩各应变测点的荷载—水平应变曲线如图 8 所示。由图 8 可知,有横隔板的模型墩 I-I 截面的水平方向应变远大于另外两个截面,从加载初期,应变就以比较快的速度增长,而加载到中后期,应变增长速率迅速增大,直至试件破坏。

无横隔板的模型墩各个测试截面水平方向的应变相差较小。I-I 截面的水平应变的变化规律与有横隔板的模型墩 I-I 截面的相同,其荷载—应变曲线的斜率逐渐减少,但应变增长速率随荷载的增加而逐渐增大,直至试件破坏。对于 II-II 截面和 III-III 截面,其荷载—应变曲线都有一段缓慢的上升阶段。出现这种现象的原因可认为是应力传递不均匀,导致这两个截面的测点在加载初期存在压应力,抵消了部分拉应变的缘故。

比较有/无横隔板模型墩的三个测试截面水平方向的荷载—应变曲线,可以明显地看出所测截面越靠近墩顶,水平应变的增加速率越快。而且,有横隔板模型墩的 I-I 截面的应变数据远大于无横隔板模型墩的应变数据。产生这种现象的原因是因为横隔板的存在增加了混凝土墩身局部的横向约束,改变

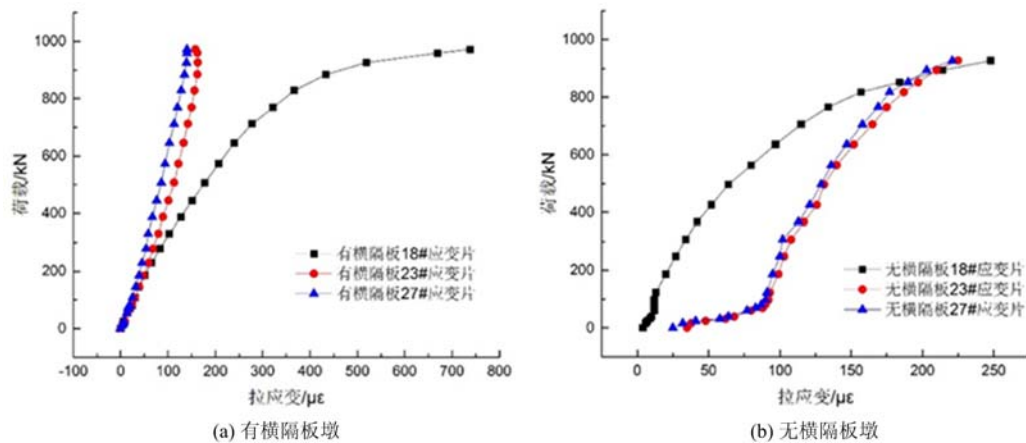


图8 模型墩水平方向的荷载—应变曲线

Fig. 8 Loading-strain curves of the testing models (horizontal direction)

了混凝土墩的破坏位置和变形模式,即从 $1/4 \sim 1/3$ 墩高处的弯曲变形改变为两横隔板之间墩壁的凸曲和凹曲变形。然而,无横隔板的模型墩的三个截面的应变增长都较为均匀,相差也较小。上述变形规律也与有限元计算结果^[15]相吻合。

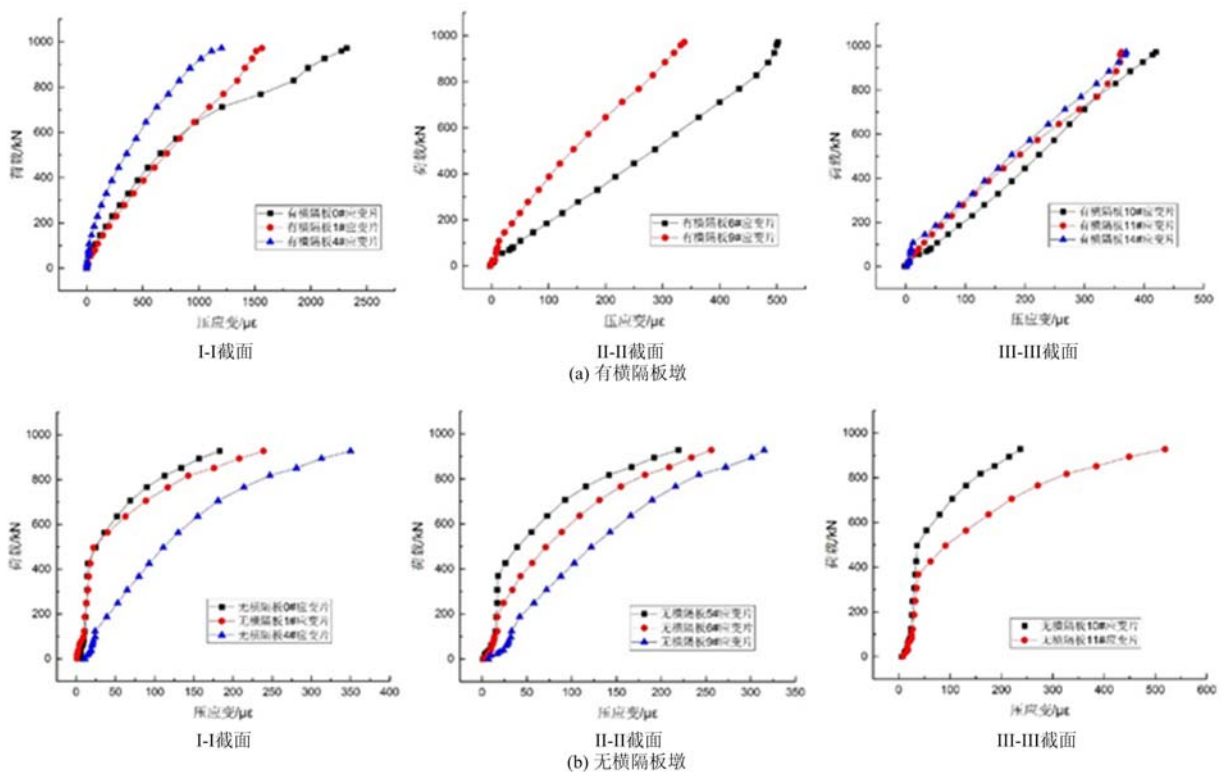


图9 模型墩垂直方向的荷载—应变曲线

Fig. 9 Loading-strain curves of the testing models (vertical direction)

4.2.2 竖向应变

与水平应变的处理一样,根据采集到的模型墩3个主要截面的竖向应变数据,处理后可得到模型墩各竖向应变测点的荷载—应变曲线。其中,两个相同尺寸的有/无横隔板模型墩各应变测点的荷载—竖向应变曲线如图9所示。由该图可知,有横隔板的模型墩I-I截面上的竖向应变数值远大于另外两个截面,而II-II截面和III-III截面的应变数值相差不大。另外,一个侧面I-I和II-II截面的应变数值大于另外一侧的,表明墩身存在弯曲变形。这与DIC的测试结果相一致。

无横隔板的模型墩3个测试截面的竖向应变数值相差较小。所有荷载—竖向应变曲线的斜率都逐

渐减少,但应变增长速率随荷载的增加逐渐增大,直至试件破坏。与有横隔板墩的情况相似,无横隔板墩一侧的竖向应变数值大于另外一侧的,表明墩身也存在弯曲变形。这也与 DIC 的测试结果吻合。

比较有/无横隔板模型墩 3 个测试截面的荷载—竖向应变曲线,可知其与水平方向的应变分布规律相似,即有横隔板的模型墩 I-I 截面的竖向应变数据远大于其他两个截面的,而无横隔板的模型墩各截面的竖向应变数据差距较小。横隔板之间墩壁的局部凹凸是造成应变数据相差较大的原因。另外,不论有/无横隔板,模型墩均发生整体弯曲变形,直至破坏。这又从一个侧面说明,有/无横隔板的模型墩的失稳模态都是整体失稳,没有发生局部失稳,这与有限元计算结果相吻合,也说明应用判别式(3)来指导模型墩的设计是可行的。

4.3 极限承载力

对 YAW-10000F 微机控制电液伺服压力机控制系统记录的荷载—位移实验数据进行分析,并与 ANSYS 的数值计算结果相比较(表 3),可知模型墩极限承载力的实验数据与 ANSYS 计算值之间的相对误差在 0.621%~22.2% 范围内,其平均相对误差为 7.76%,即所有模型墩极限承载力的实验结果与数值分析结果吻合得较好。另外,由表 3 所示无横隔板模型的实验结果可知,相同外形尺寸、不同壁厚的模型墩,其极限承载力的实验值与计算值的比值随着壁厚的增加而增大,也就是说,模型墩的非线性稳定系数随壁厚的增加而增大。

将尺寸相同的有横隔板模型墩 2-1 与无横隔板模型墩 2-2 的实验数据进行比较,两者的极限承载力分别为 972kN 和 927kN(表 3),且其荷载—位移曲线十分相似,如图 10 所示。因此,可认为横隔板对混凝土空心薄壁高墩极限承载力的贡献小于 5%。另外,与实桥的高墩相比,本次实验是在稳定性较差的条件下进行的,即模型墩的材料为素混凝土,没有布置钢筋,而且,设定的实验边界条件(一端固定,一端自由)也是最严峻的。因此,横隔板的设置在实际的成桥阶段对混凝土空心薄壁高墩稳定性的贡献度会更小。

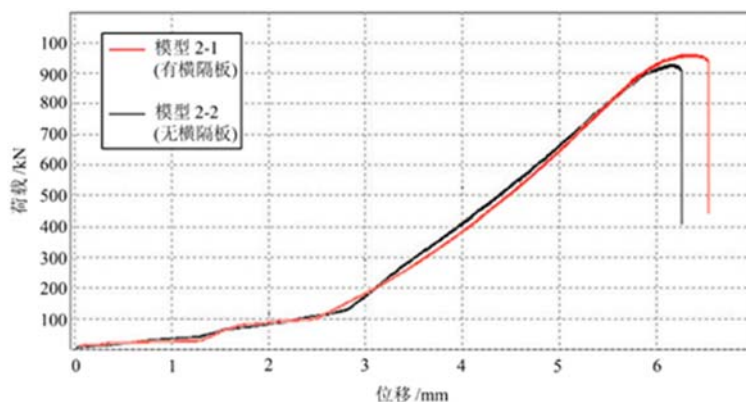


图 10 实验模型的荷载—位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of the testing models

5 结论

本文根据本课题组在前期研究中对实际桥墩稳定性的大量计算,建立了混凝土空心薄壁高墩不设置横隔板的判别条件,并结合广东省内高校实验室的现有实验条件,按照有/无横隔板、不同宽厚比及壁厚条件等设计了缩尺模型墩,对空心薄壁高墩缩尺模型实施了有限元分析和轴压实验研究,探讨了有/无横隔板的空心薄壁高墩稳定性,得到了以下结论:

(1) 采用弹性屈曲理论,并考虑结构缺陷、材料性能和几何非线性的影响,对混凝土空心薄壁高墩的壁板局部进行屈曲分析,建立了混凝土空心薄壁高墩不设置横隔板的最大容许宽厚比的半经验判别式: $(b/t)_{\max} \leq (0.234 \sim 0.468) \sqrt{E/f_{ck}}$ 。如果桥墩满足该判别条件,并满足强度和刚度等要求,则混凝土空心薄壁高墩可以不设置横隔板。

(2) 有限元分析和轴压实验结果均表明,按照上述判别条件设计的有/无横隔板模型墩的破坏模式都为整体失稳破坏。在轴压荷载下二者均会产生整体弯曲,但这种弯曲是细微的,可凭借数字图像相关(DIC)测试系统的位移场观察到。

(3) 在相同壁厚条件下,有/无横隔板模型墩极限承载力的实验值相差仅为5%左右,而且与有限元计算结果相吻合。这表明横隔板对提高混凝土高墩极限承载力的贡献很小。

(4) 实验研究与数值分析结果都表明,在本研究条件的范围内,混凝土空心薄壁高墩可以不设置横隔板;采用墩底固结、墩顶自由的独立桥墩模型对混凝土空心薄壁墩进行非线性稳定性分析的方法是可行的。这些研究成果已成功应用于本研究依托工程的刚构桥、连续箱梁桥、T型梁桥的空心薄壁高墩。

参考文献:

- [1] 陈辉. 空心薄壁高墩结构优化设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2011 (CHEN Hui. Optimization of hollow high pier with thin wall[D]. Harbin Institute of Technology, 2011 (in Chinese))
- [2] 曹新建. 材料非线性对钢筋混凝土高墩稳定性的影响[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(3):34—37 (CAO Xinjian. Stability effect on reinforced concrete for high piers considering material non-linearity [J]. Computer Aided Engineering, 2007, 16(3):34—37 (in Chinese))
- [3] 李黎, 廖萍, 龙晓鸿, 等. 薄壁高墩大跨度连续刚构桥的非线性稳定分析[J]. 工程力学, 2006, 23(5):119—124 (LI Li, LIAO Ping, LONG Xiaohong, et al. Nonlinear stability analysis of long-span continuous rigid frame bridge with thin-wall high piers[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(5):119—124 (in Chinese))
- [4] MOMII Hideto, TSUTSUMI Seiichiro, FINCATO Riccardo. Cyclic and tangential plasticity effects for the buckling behavior of a thin wall pier under multiaxial and non-proportional loading conditions[J]. Transactions of JWRI, 2015(44):41—47.
- [5] 方磊, 王晓谋. 钢筋混凝土空心高桥墩非线性极限承载力分析[J]. 微计算机信息, 2011(5):229—231 (FANG Lei, WANG Xiaomou. Ultimate bearing capacity analysis of reinforced concrete hollow tall pier [J]. Microcomputer Information, 2011(5):229—231 (in Chinese))
- [6] 宁明哲, 李德建, 邹振兴. 变截面双肢薄壁高墩基础约束刚度动力识别方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2013(6):74—78 (NING Mingzhe, LI Dejian, ZOU Zhenxing. Dynamic identification method of foundation restraint stiffness of double-leg thin-wall tapered high pier[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013(6):74—78 (in Chinese))
- [7] Taylor A W, Rowell R B, Breen J E. Behavior of thin-walled concrete box piers[J]. Aci Structural Journal, 1995, 92(3):319—333.
- [8] Calvi G M, Pavese A, Rasulo A, et al. Experimental and numerical studies on the seismic response of R. C. hollow bridge piers[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2005, 3(3):267—297.
- [9] 何黎. 薄壁空心桥墩非线性失稳研究[D]. 重庆交通大学, 2011 (HE Li. Research on the nonlinear instability of the thin-wall hollow pier[D]. Chongqing Jiaotong University, 2011 (in Chinese))
- [10] 中华人民共和国交通部. JTG D60—2004:公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004 (Ministry of Transport of P. R. China. JTG D60—2004: General code of design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004 (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG D62—2004:公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004 (Ministry of Transport of P. R. China. JTG D62—2004: Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004 (in Chinese))
- [12] 陈发强, 陈记, 孙晓立. 空心薄壁高墩横隔板设置条件中线弹性经验公式研究[J]. 公路交通技术, 2016, 32(4):68—71 (CHEN Faqiang, CHEN Ji, SUN Xiaoli. Study on the elastic empirical formula for setting condition of transverse diaphragm on hollow thin-walled high pier[J]. Technology of Highway and Transportation, 2016, 32(4):68—71 (in Chinese))
- [13] 陈发强. 山区高速公路空心薄壁高墩横隔板设置研究[J]. 建材与装饰, 2016(26):255—257 (CHEN Faqiang. Research of transverse diagram setting on thin-walled high piers of highway in mountain areas[J]. Construction

- Materials & Decoration, 2016:255—257 (in Chinese))
- [14] 舒长征, 贾新卷. 空心薄壁墩横隔板设置研究[J]. 中外公路, 2016, 36(6):155—158 (SHU Changzheng, JIA Xinjuan. Research of transverse diaphragm setting on thin-walled high piers[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(6):155—158 (in Chinese))
- [15] 华南理工大学土木与交通学院, 广东省南粤交通仁博高速管理中心. 广东省交通运输厅科技计划项目研究技术报告(网络公开版)[R]. 2018. 2 (School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangdong Province Nanyue Traffic Renbo Highway Management Center. Research report of science & technology project of transportation department of Guangdong Province (Internet Version)[R]. 2018. 2 (in Chinese))
- [16] 苏勇, 张青川. 数字图像相关的噪声导致系统误差及散斑质量评价标准[J]. 实验力学, 2017, 32(5):699—717 (SU Yong, ZHANG Qingchuan. Noise-induced bias and evaluation criterion of speckle quality in digital image correlation [J]. 2017, 32(5):699—717 (in Chinese))
- [17] 邵新星, 陈振宁, 何小元, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32(3):305—325 (SHAO Xinxing, CHEN Zhenning, HE Xiaoyuan, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method [J]. 2017, 32(3):305—325 (in Chinese))

Experimental study of the stability of hollow thin-walled high piers without transverse diaphragm

LI Shi-ya¹, CHEN Zhan-biao², ZHOU Hao³, YAO Guo-wen¹, HUANG Pei-yan²

(1. State Key Laboratory Breeding Base of the Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

Abstract: Hollow thin-walled high bridge piers have been widely used in mountain highway construction. However, the transverse diaphragm has caused great difficulty to the construction progress of hollow thin walled high pier. In this paper, for setting problem of the transverse diaphragm of hollow thin-walled high piers, seven reduced-scale experiment models of the hollow thin-walled high piers with presence or absence of the transverse diaphragm, different ratio of width to thickness (b/t), and different wall thickness by numerical experiments to design obtained from the stability analysis. And then, axial compression experiments for seven reduced scale models were carried out, and the failure modes, stresses and deformation characteristics of the model piers, and the discriminant conditions which do not set the transverse diaphragm were discussed and compared with the finite element calculating results. Study results show that if the condition of proposed allowable ratio $(b/t)_{\max}$ is satisfied, the transverse diaphragm would not be set in concrete hollow thin-walled high piers; The nonlinear analysis method is feasible to analyze the stability of the hollow thin-walled high piers with the independent bridge pier model which the bottom was fixed and the top was free.

Keywords: hollow thin-walled high pier; transverse diaphragm; stability; reduced scale model; axial compression experiment