

文章编号:1672-9331(2019)01-0043-08

考虑剪切变形影响的圆形空心桥墩稳定性分析

曹志强, 胡 朵, 夏桂云

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为探究考虑剪切变形对圆形空心桥墩稳定性的影响,将圆形空心桥墩作为中厚壳结构,考虑结构和荷载的轴对称,建立了考虑剪切变形影响的圆形空心桥墩轴对称变形微分方程,其与 Winkler 地基上 Timoshenko 梁的微分方程一致;当不考虑剪切变形影响时,微分方程可退化成与 Winkler 地基上 Bernoulli-Euler 梁的微分方程一致。求解了微分方程的特征解,并结合空心桥墩的边界条件,推导了桥墩局部失稳的超越方程。通过改变算例的墩高、半径及壁厚等结构参数,对比分析了轴对称失稳临界荷载值和整体失稳临界荷载值的大小,并将其结果与不考虑剪切变形影响得到的结果进行了对比。研究结果表明,在参数特定取值条件下,轴对称失稳先于整体失稳,而剪切变形的影响不可忽视。

关键词: 圆形空心桥墩; 中厚壳; 剪切变形; 轴对称失稳; 整体失稳

中图分类号: U443.22

文献标识码: A

Stability analysis of circular hollow piers considering shear deformation

CAO Zhi-qiang, HU Duo, XIA Gui-yun

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To study the influence of shear deformation on the stability of circular hollow pier, taking the circular hollow pier as the medium thick shell structure, considering the axial symmetry of the structure and load, the differential equation for axisymmetric deformation of the circular hollow pier with the influence of shear deformation was established, which was in accordance with the differential equation of the Timoshenko beam on the Winkler foundation. When the influence of shear deformation was not considered, the differential equation can be reduced to the differential equation of Bernoulli-Euler beam on Winkler foundation. The characteristic solution of the differential equation was solved, and the transcendental equation of the local instability of the pier was derived from the boundary condition of the hollow pier. By changing the structural parameters such as the height, radius and wall thickness of the pier, the critical load value of axisymmetric instability and the value of the critical load on the overall instability were compared and analyzed. The results were compared with those obtained without considering the effect of shear deformation, it can be seen that the axisymmetric instability is preceded to the overall instability under the specific parameters of the parameter, and the influence of the shear deformation can not be ignored.

收稿日期:2018-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278072);长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新项目(16ZDXK09)

通讯作者:夏桂云(1972-),男,湖南湘阴人,长沙理工大学教授,博士,主要从事桥梁结构方面的研究。E-mail:

xiagy72@163.com

Key words: circular hollow pier; thick shell; shear deformation; axisymmetric instability; overall instability

随着高等级公路和铁路的快速发展,国内外都建设了大量的墩身桥梁。目前,国内墩身最高的桥是贵州的赫章特大桥,墩高达 195 m;国外墩身最高的桥是法国的米约大桥,墩高达到了 245 m^[1]。高墩属细长偏心受压结构,其稳定问题较为突出。国内外学者结合工程实际对高墩的稳定性展开了大量的研究,研究主要集中在墩身整体稳定和壁板局部稳定两个问题。尹俊红等^[2]在将单肢高墩和双肢高墩简化为力学模型的基础上,运用传递矩阵法建立起高墩整体稳定性传递矩阵,并根据相应的边界条件对高墩进行了静力稳定性分析。周水兴等^[3]在一端固定、一端自由的单悬臂立柱欧拉临界力微分方程的基础上,提出了几个处理组合式桥墩模型的基本假定,并利用瑞利-里兹法推导出组合式桥墩悬臂施工阶段面外屈曲临界荷载计算公式。杨建林等^[4]结合具体实例进行了矩形截面空心墩的有限元屈曲分析和理论分析,从中得出截面的宽厚比有一临界值,当宽厚比超过这一临界值时,空心墩的一阶失稳模态为局部失稳,反之为整体侧向失稳。邬晓光等^[5]依据弹性稳定理论和能量法对高墩稳定性展开了研究,提出了四个假设简化分析并推导出不同状态下高墩临界荷载的计算公式,并在算例分析中通过与有限元数值解进行对比,证明了计算公式的正确性和适用性。严成俊^[6]将成桥和施工阶段的薄壁空心墩简化为不同边界条件下的中心受压杆件,对整体稳定开展研究;将薄壁空心墩视为薄板组成的构件,对薄壁空心墩的局部稳定开展研究,探究已知板宽下的临界厚度和极限宽厚比。胡建明等^[7]基于最小势能原理推导了考虑墩顶支座弹性支承刚度和变截面影响的高墩稳定变分式,采用瑞利-里兹法求解出变分式的近似解,得到高墩挠度曲线方程,进一步推导出高墩临界压力以及计算长度系数。

目前,高速公路 50 m 以上的高墩多采用空心薄壁墩,在装配式 T 梁上的应用已超过 80 m,在连续刚构上的应用已超过 180 m^[8]。空心薄壁桥墩相较于实心桥墩,不仅能够减少圬工体积,节约材料和成本,而且还能降低桥墩自重和墩基底围

压应力^[9]。薄壳理论只适用于壁厚与曲面最小半径之比 $h/R \leq 1/20$ 的情况。实践中,空心桥墩半径较小、墩壁较厚,不在薄壳理论研究的范围内,此时应采用考虑剪切变形影响的中厚壳理论^[10]。对桥墩进行稳定分析时,除了可以按照压杆稳定理论来研究桥墩的整体稳定性,还因为空心薄壁桥墩属于壳体构件,板件的局部稳定性也应引起重视。文献^[11]探究了轴力、剪切变形、初始弯曲及弓形效应四种非线性因素对结构的稳定和极限承载力的影响,得出轴力和剪切变形对梁单元刚度的影响不是简单的叠加,二者相互作用,其共同影响比二者单独影响之和大的结果。由此可见,应重视轴力和剪切变形对结构稳定性的效应。文献^[10]考虑圆形水池的池壁剪切变形,建立了圆形水池在对称荷载作用下的微分方程,其与 Winkler 地基上 Timoshenko 梁的微分方程一致,奠定了将圆形空心结构作为中厚壁壳体分析的基础,推导了微分方程的理论解、初参数解和有限元列式。在此基础上,作者考虑桥墩墩壁剪切变形和轴力的影响,将圆形空心桥墩作为中厚壁墩,考虑结构和荷载的对称性,建立轴对称变形的微分方程,推导其微分方程的理论解、初参数解,以此分析其稳定性能。

1 圆形空心桥墩轴对称变形微分方程的推导及解的形式

1.1 考虑剪切变形影响的桥墩轴对称失稳微分方程的建立及其解

将圆形空心桥墩简化为中厚圆柱壳体,考虑结构和荷载都为轴对称形式(如图 1 所示)。桥墩中面环向应变 $(\bar{\epsilon}_\theta = \frac{w}{R})$ 、竖向应变 $(\bar{\epsilon}_x = \frac{\partial u}{\partial x})$ 、环向线段主曲率 $(\chi_\theta = -\frac{w}{R^2})$ 仍与薄壳理论^[12]一致。

考虑剪切变形的影响,桥墩的竖向主曲率取转角对坐标的导数,得:

$$\chi_x = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (1)$$

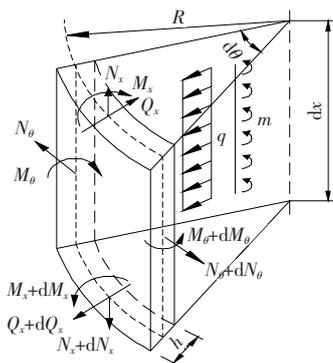


图 1 圆柱壳体微元体受力分析图

Fig. 1 Force analysis diagram of the microelement of a cylindrical shell

单位长度截面的内力可由应力积分求得:

$$\begin{cases} N_x = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \mu \frac{w}{R} \right) \\ N_\theta = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\frac{w}{R} + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ M_x = -D \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} + \mu \frac{w}{R^2} \right) \\ M_\theta = -D \left(\mu \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{w}{R^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$; h 为池壁厚; μ 为泊松比; E 为材料的弹性模量。

考虑剪切变形的影响,壳体内剪力经积分后,为:

$$Q_x = C \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) - N \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3)$$

式中: $C = \frac{5Gh}{6}$; G 为材料剪切模量。

由小挠度理论可知,由于式(2)中 $\frac{w}{R^2}$ 较小,可忽略不计,则由式(2)的第三式和第四式可知竖向弯矩和环向弯矩分别为:

$$\begin{cases} M_x = -D \frac{\partial \psi}{\partial x} \\ M_\theta = -\mu D \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{cases} \quad (4)$$

不计自重,在轴对称竖向静压作用下,壳体顶端边界轴力为 0,由式(2)第一式可知:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\mu \frac{w}{R} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2)的第二式,令 $K = \frac{Eh}{R^2}$,有

$$N_\theta = \frac{Eh}{R} w = KRw \quad (6)$$

基于剪切变形影响的中厚圆柱壳结构微段的平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[C \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) \right] - N \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{N_\theta}{R} + q = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + C \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) + m = 0 \end{cases} \quad (7)$$

一般壳体中较少有分布弯矩作用,令 $m = 0$,由式(7)推导可知:

$$\psi = \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C} \right) \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \left(1 - \frac{KD}{C^2} \right) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (8)$$

由式(7)、(8)经过一系列变化,推导出圆形中厚壳在分布荷载 q 和轴力 N 作用下的微分方程为:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{CN - DK}{(C - N)D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{CK}{(C - N)D} w = \frac{Cq}{(C - N)D} - \frac{1}{C - N} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad (9)$$

从式(9)可知,考虑剪切变形影响的圆形空心桥墩微分方程与 Winkler 地基上 Timoshenko 梁^[13]一致;当剪切刚度 $C \rightarrow \infty$ 时,式(9)可退化为不考虑剪切变形影响的圆形空心桥墩微分方程,与 Winkler 地基上 Bernoulli-Euler 梁的微分方程一致。因此,式(9)是一个从薄壳到中厚壳都适用的通用计算模型。

本研究暂不考虑分布荷载的影响,令式(9)的右端为 0,即可得到圆形桥墩在轴力作用 N 下的齐次微分方程:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{CN - DK}{(C - N)D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{CK}{(C - N)D} w = 0 \quad (10)$$

式(10)微分方程的解分 3 种特征情况,但通常情况下 $\Delta = \left[\frac{CN - KD}{(C - N)D} \right]^2 - \frac{4KC}{(C - N)D} > 0$,因此本研究只针对一种情况做分析。

当 $\Delta = \left[\frac{CN - KD}{(C - N)D} \right]^2 - \frac{4KC}{(C - N)D} > 0$ 时,上述方程关于挠度 w 的解为:

$$w = c_1 \sin \alpha x + c_2 \cos \alpha x + c_3 \sin \beta x + c_4 \cos \beta x \quad (11)$$

式中:

$$\alpha = \sqrt{\frac{CN - KD}{2(C - N)D} - \sqrt{\frac{(CN - KD)^2}{4(C - N)^2 D^2} - \frac{KC}{(C - N)D}}}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{CN-KD}{2(C-N)D}} + \sqrt{\frac{(CN-KD)^2}{4(C-N)^2 D^2} - \frac{KC}{(C-N)D}}$$

考虑轴对称失稳、圆形空心桥墩顶端一般设有实心段,对于底端固定、上端自由的圆形空心桥墩,以两端固结的边界条件来求解其超越方程:

$$\text{当 } x=0 \text{ 时, } \tau_0 = \psi_0 = 0;$$

$$\text{当 } x=L \text{ 时, } \tau_L = \psi_L = 0。$$

由式(3)、(4)、(8)可得到关于转角、剪力、弯

矩的表达式为:

$$\begin{cases} \psi = \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \frac{\partial^3 \tau}{\partial x^3} + \left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) \frac{\partial \tau}{\partial x} \\ Q = -D \left(1 - \frac{N}{C}\right) \frac{\partial^3 \tau}{\partial x^3} + \left(\frac{KD}{C} - N\right) \frac{\partial \tau}{\partial x} \\ M = -\frac{D^2}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \frac{\partial^4 \tau}{\partial x^4} - D \left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)中的第一式,可得到关于挠度 w 和转角 ψ 的计算公式为:

$$\begin{cases} w = c_1 \sin \alpha x + c_2 \cos \alpha x + c_3 \sin \beta x + c_4 \cos \beta x \\ \psi = \left[\left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) \alpha - \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \alpha^3 \right] (c_1 \cos \alpha x - c_2 \sin \alpha x) + \\ \left[\left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) \beta - \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \beta^3 \right] (c_3 \cos \beta x - c_4 \sin \beta x) \end{cases} \quad (13)$$

由边界条件可得:

$$\begin{cases} c_2 + c_4 = 0 \\ \left[\left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) \alpha - \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \alpha^3 \right] c_1 + \left[\left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) \beta - \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \beta^3 \right] c_3 = 0 \\ c_1 \sin \alpha L + c_2 \cos \alpha L + c_3 \sin \beta L + c_4 \cos \beta L = 0 \\ \left[\left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) \alpha - \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \alpha^3 \right] (c_1 \cos \alpha L - c_2 \sin \alpha L) + \\ \left[\left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) \beta - \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \beta^3 \right] (c_3 \cos \beta L - c_4 \sin \beta L) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

系数 $c_i (i=1,2,3,4)$ 有非零解的条件是:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \alpha A & 0 & \beta B & 0 \\ \sin \alpha L & \cos \alpha L & \sin \beta L & \cos \beta L \\ \alpha A \cos \alpha L & -\alpha A \sin \alpha L & \beta B \cos \beta L & -\beta B \sin \beta L \end{vmatrix} = 0。$$

式中:

$$A = \left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) - \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \alpha^2;$$

$$B = \left(1 - \frac{KD}{C^2}\right) - \frac{D}{C} \left(1 - \frac{N}{C}\right) \beta^2。$$

其解的超越方程为:

$$\begin{aligned} & (\alpha^2 A^2 + \beta^2 B^2) \sin \alpha L \sin \beta L + \\ & 2\alpha\beta AB \cos \alpha L \cos \beta L - 2\alpha\beta AB = 0。 \end{aligned} \quad (15)$$

1.2 未考虑剪切变形的圆形空心桥墩轴对称失稳微分方程的建立及其解

当剪切刚度 $C \rightarrow \infty$ 时,式(9)可退化为不考虑剪切变形影响的桥墩微分方程:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{K}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{K}{D} w = \frac{q}{D} \quad (16)$$

暂不考虑分布荷载的影响,令式(16)的右端为0,即可得到圆形桥墩在轴力作用下的齐次微分方程为:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{K}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{K}{D} w = 0。 \quad (17)$$

式(17)微分方程的解分3种特征情况,但通常情况下 $\Delta = \left[\frac{CN-KD}{(C-N)D}\right]^2 - \frac{4KC}{(C-N)D} > 0$,因此本研究只针对一种情况进行分析。

当 $\Delta = \left(\frac{N}{D}\right)^2 - \frac{4K}{D} > 0$ 时,上述方程关于挠度

w 的解为:

$$w = c_1 \sin \alpha x + c_2 \cos \alpha x + c_3 \sin \beta x + c_4 \cos \beta x。 \quad (18)$$

式中:

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{N}{2D} - \sqrt{\frac{N^2}{4D^2} - \frac{K}{D}}}; \\ \beta &= \sqrt{\frac{N}{2D} + \sqrt{\frac{N^2}{4D^2} - \frac{K}{D}}}. \end{aligned}$$

以两端固结的边界条件来求解其超越方程,当剪切刚度 $C \rightarrow \infty$ 时,式(15)可退化为不考虑剪

切变形影响的桥墩失稳超越方程,其失稳时的超越方程为:

$$(\alpha^2 + \beta^2) \sin \alpha L \sin \beta L + 2\alpha\beta \cos \alpha L \cos \beta L - 2\alpha\beta = 0. \quad (19)$$

2 整体失稳和轴对称失稳的临界荷载值分析

2.1 考虑剪切变形的整体失稳临界荷载值

采用 Timoshenko 梁理论来分析考虑剪切变形影响的轴心受压杆件的屈曲问题。圆形空心桥墩整体失稳分析时可采用一端固结一端自由的边界条件,其相应的最小临界荷载值^[13]为:

$$N_{cr} = \frac{1}{1 + \frac{D}{C} \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2} \cdot D \left(\frac{\pi}{2L}\right)^2. \quad (20)$$

2.2 未考虑剪切变形的整体失稳临界荷载值

桥墩稳定性分析通常将其作为一个承受竖向荷载的压杆,按整体 Euler 失稳分析其稳定问题,而一端固结一端自由的压杆 Euler 失稳临界力^[14]为:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\beta L)^2}. \quad (21)$$

式中:长度因素 $\beta=2$ 。

2.3 轴对称失稳的临界荷载值

轴对称失稳临界荷载力 N 为单位弧长的临界力,则桥墩发生第一阶失稳时全截面的临界荷载为:

$$F_{cr} = 2\pi R \cdot N. \quad (22)$$

3 算例分析

取一圆形空心桥墩(如图 2 所示),材料为 C30 混凝土,弹性模量 $E = 3.0 \times 10^4$ MPa,剪切模量 $G = 1.25 \times 10^4$ MPa。运用理论解析的超越方程和 ANSYS 软件,分别求解桥墩前三阶轴对称失稳临界荷载。软件方法的具体过程为:利用 ANSYS 10 中的 Beam 54 单元(2D 渐变不对称梁单元)建立一个二维梁模型,梁单元的截面长宽分别为 1 m 和 h ,通过更改实常数考虑是否计入剪切变形影响,梁的一端为固定约束,另一端除竖向方向未约束之外都被约束,并在该端施加单元力荷载,随后进行静力分析和屈曲分析,并提取其前三阶失稳临界荷载,将此作为桥墩轴对称失稳临界荷载值。

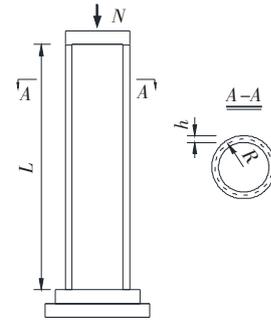


图 2 桥墩构造示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pier structure

取壁厚 $h=0.20$ m,墩壁中心圆环截面中心线半径 $R=4.5$ m,桥墩墩高 L 为 41, 44, 47, 50, 53 m 共五种情况。经计算,此桥墩的临界压力值均为 $\Delta > 0$ 情况,利用理论解析的超越方程和 ANSYS 软件同时进行求解,得到考虑剪切变形影响和不考虑剪切变形影响的前三阶轴对称失稳理论值与数值解的最大误差分别不超过 0.60% 和 0.01%,证明了本研究所推导公式的正确性。

圆形空心桥墩前三阶轴对称失稳的临界荷载值随墩高变化如图 3 所示。轴对称失稳和整体失稳的第一阶临界荷载值随墩高变化如图 4 所示。

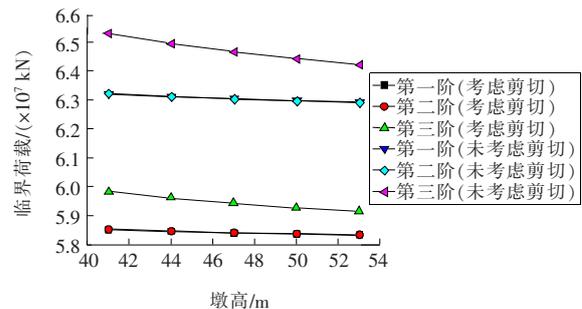


图 3 轴对称失稳前三阶临界荷载值随墩高变化图

Fig. 3 Variations of first three order critical loads of axisymmetric buckling with pier height

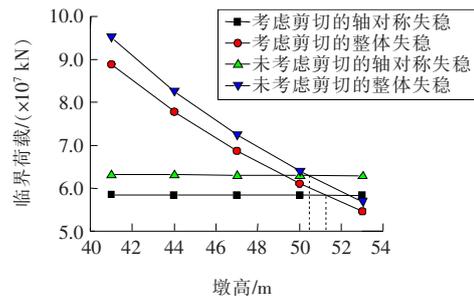


图 4 两种失稳的第一阶临界荷载值随墩高变化图

Fig. 4 Variation of the first critical load of axisymmetric buckling and overall buckling with Pier height

从图3和图4可以看出,不管是否考虑剪切变形的影响,随着墩高的增大,桥墩稳定性逐渐降低,整体失稳表现明显,其失稳曲线呈急剧线性下降趋势,而轴对称失稳曲线较为平缓;同时,未考虑剪切变形影响的桥墩临界荷载值比考虑剪切变形影响的大。在本例中,存在失稳形态转变点,考虑剪切变形时转变点墩高 $L_c = 51.25$ m,不考虑剪切变形时转变点墩高 $L_c = 50.46$ m;当 $L < L_c$ 时, $F_{cr} < N_{cr}$,轴对称失稳先于整体失稳。反之,则为整体失稳先于轴对称失稳。当墩高为 41 m 时,考虑剪切变形的轴对称失稳的临界荷载值只有相应整体失稳临界荷载值的 65.82%。由此可知,轴对称失稳不可忽视。

为了分析不同桥墩中面半径下轴对称失稳和整体失稳的临界荷载的变化规律,取桥墩墩高 $L = 47$ m,墩壁壁厚 $h = 0.75$ m,桥墩中面半径 R ,取值为 4.00, 4.25, 4.50, 4.75, 5.00 m 共五种情况,圆形空心桥墩前三阶轴对称失稳的临界荷载值随桥墩半径变化如图5所示,轴对称失稳和整体失稳的第一阶临界荷载值随桥墩半径变化如图6所示。

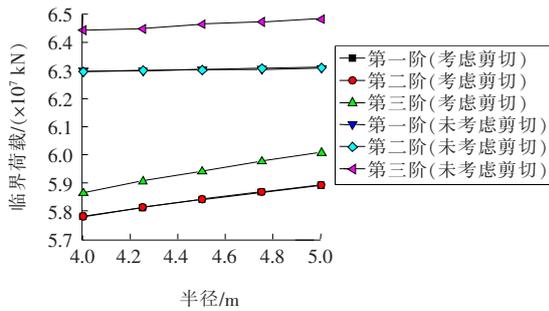


图5 轴对称失稳前三阶临界荷载值随半径变化图

Fig. 5 Variations of first three order critical loads of axisymmetric buckling with pier radius

从图5和图6可以看出,不管是否考虑剪切变形的影响,随着半径的增大,桥墩的稳定性增加,整体失稳表现明显,其失稳曲线呈急剧线性上升趋势,而轴对称失稳曲线较为平缓;同时,未考虑剪切变形影响的桥墩临界荷载值比考虑剪切变形影响的大。在本例中,存在失稳形态转变点,考虑剪切变形时转变点半径 $R_c = 4.25$ m,不考虑剪切变形时转变点半径 $R_c = 4.29$ m;当 $R < R_c$ 时, $N_{cr} \leq F_{cr}$,整体失稳先于轴对称失稳。反之,则为轴对称失稳先于整体失稳。当半径为 5 m 时,考

虑剪切变形的轴对称失稳的临界荷载值只有相应整体失稳临界荷载值的 63.31%。

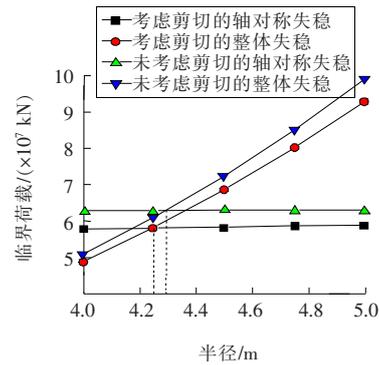


图6 两种失稳的第一阶临界荷载值随半径变化图

Fig. 6 Variation of the first critical load of axisymmetric buckling and overall buckling with Pier radius

为了分析不同壁厚下轴对称失稳和整体失稳的临界荷载的变化规律,取墩壁中心圆环截面的中心线半径 $R = 4.5$ m,桥墩高度 $L = 47$ m,改变壁厚 h 为 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90 m 共六种情况,圆形空心桥墩前三阶轴对称失稳的临界荷载值随桥墩壁厚变化如图7所示,轴对称失稳和整体失稳的第一阶临界荷载值随桥墩壁厚变化如图8所示。

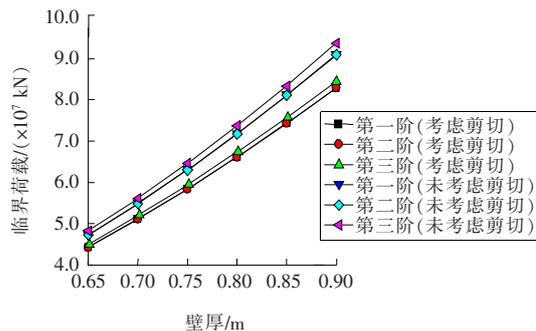


图7 轴对称失稳前三阶临界荷载值随壁厚变化图

Fig. 7 Variations of first three order critical loads of axisymmetric buckling with pier wall thickness

从图7和图8可以看出,不管是否考虑剪切变形的影响,随着壁厚的增大,桥墩的稳定性增加,轴对称失稳表现明显,其失稳曲线呈急剧线性上升趋势,而整体失稳曲线较轴对称失稳曲线平缓;同时,未考虑剪切变形影响的桥墩临界荷载值比考虑剪切变形影响的大。在本例中,存在失稳形态转变点,考虑剪切变形时转变点壁厚 $h_c =$

0.89 m,不考虑剪切变形时转变点壁厚 $h_c = 0.86$ m;当 $h < h_c$ 时, $F_{cr} < N_{cr}$,轴对称失稳先于整体失稳。当壁厚为 0.65 m 时,考虑剪切变形的轴对称失稳的临界荷载值只有相应整体失稳临界荷载值的 74.48%。

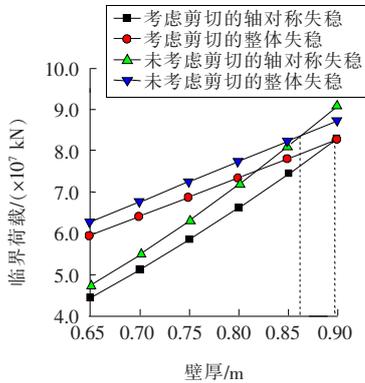


图 8 两种失稳的第一阶临界荷载值随壁厚变化图

Fig. 8 Variation of the first critical load of axisymmetric buckling and overall buckling with Pier wall thickness

为了分析不同混凝土强度下轴对称失稳和整体失稳的临界荷载的变化规律,取墩壁中心圆环截面的中心线半径 $R = 4.5$ m,桥墩高度 $L = 47$ m,壁厚 $h = 0.75$ m,改变混凝土强度等级为 C30, C35, C40, C45, C50 共五种情况,圆形空心桥墩前三阶轴对称失稳的临界荷载值随混凝土强度等级变化如图 9 所示,轴对称失稳和整体失稳的第一阶临界荷载值随混凝土强度等级变化如图 10 所示。

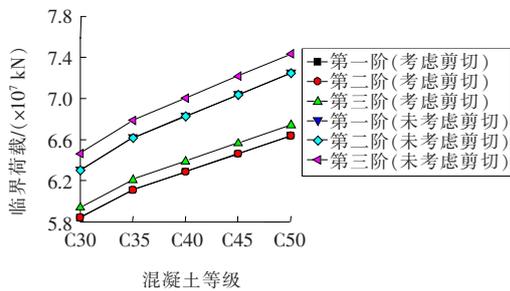


图 9 轴对称失稳前三阶临界荷载值随混凝土等级变化图

Fig. 9 variations of first three order critical loads of axisymmetric buckling with concrete grade

从图 9 和图 10 可以看出,考虑剪切变形的临界荷载总是比未考虑剪切变形的临界荷载值小;且随着混凝土强度等级的增加,桥墩稳定性逐渐增强,整体失稳和轴对称失稳曲线均呈线性上升。在本例中,并不存在失稳形态转变点。

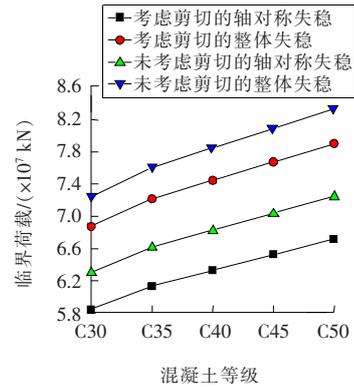


图 10 两种失稳的第一阶临界荷载值随混凝土等级变化图

Fig. 10 Variation of the first critical load of axisymmetric buckling and overall buckling with concrete grade

4 结论

1) 通过算例参数分析,考虑剪切变形影响和不考虑剪切变形影响的前三阶轴对称失稳理论值与 ANSYS 数值解的最大误差分别不超过 0.60% 和 0.01%,证明了本研究所推导公式的正确性。

2) 通过改变墩高、半径、壁厚和混凝土强度等级,对比分析了轴对称失稳和整体失稳的临界荷载,得出无论是否考虑剪切变形,当参数取值在特定范围内时,轴对称失稳可能先于整体失稳。

3) 考虑剪切变形时临界荷载普遍低于不考虑剪切变形的临界荷载,因此是否考虑剪切变形对桥墩稳定性的分析有较大的影响。

4) 可以通过适当增加桥墩壁厚和提高混凝土强度等级来提高桥墩的稳定性。

〔参考文献〕

[1] 杨昀,周列茅,周勇军.弯桥与高墩[M].北京:人民交通出版社,2011.
YANG Yun, ZHOU Lie-mao, ZHOU Yong-jun. Curved bridge with high pier [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.

[2] 尹俊红,李青宁.高墩稳定性分析的传递矩阵法[J].工业建筑,2013,43(S1):199-202.
YIN Jun-hong, LI Qing-ning. Transfer matrix method for stability analysis of tall piers [J]. Industrial Construction, 2013, 43(S1): 199-202.

[3] 周水兴,满泽联,周光强,等.连续刚构桥组合式桥墩临界荷载分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,

- 2014, 33(1): 17-20, 138.
- ZHOU Shui-xing, MAN Ze-lian, ZHOU Guang-qiang, et al. Critical load of combined pier for continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(1): 17-20, 138.
- [4] 杨建林, 庞建军. 薄壁空心高墩局部及整体稳定性分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 122-125.
- YANG Jian-lin, PANG Jian-jun. Local and global stability analysis of hollow thin-walled high piers[J]. Industrial Building, 2015, 45(11): 122-125.
- [5] 郭晓光, 李艺林, 贺攀, 等. 基于能量法分析大跨连续刚构桥高墩稳定性[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(2): 290-295.
- WU Xiao-guang, LI Yi-lin, HE Pan, et al. Stability analysis of high piers of long-span continuous rigid frame bridges based on energy method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(2): 290-295.
- [6] 严成俊. 薄壁空心桥墩截面构造研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- YAN Cheng-jun. Study on hollow thin-wall pier structure[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [7] 胡建明, 汤振农, 徐海宁, 等. 考虑支座弹性支承的变截面高墩稳定计算[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(1): 53-55.
- HU Jian-ming, TANG Zhen-nong, XU Hai-ning, et al. Stability calculation of variable cross-section high piers with elastic support of bearings[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(1): 53-55.
- [8] 郑斐. 考虑地基影响的高桥墩稳定及水平位移实用计算方法[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- ZHENG Fei. Practical calculation method about stability and displacement on the top of high pier considering influence of the foundation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [9] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- SHAO Xu-dong. Bridge engineering[M]. Beijing: China Communications Publishing House, 2014.
- [10] 夏桂云, 李传习, 曾庆元. 剪切变形对厚壁圆形贮液池的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(5): 1430-1436.
- XIA Gui-yun, LI Chuan-xi, ZENG Qing-yuan. Shear deformation influence on cylindrical liquid-storage tank with thick wall[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(5): 1430-1436.
- [11] 刘玉姝. 平面钢框架结构非线性分析及整体可靠度设计理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- LIU Yu-shu. Nonlinear analysis and overall reliability design theory of plane steel frame structure[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [12] 翁智远, 王远功. 弹性薄壳理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 38-48.
- WENG Zhi-yuan, WANG Yuan-gong. Theory of thin shells[M]. Beijing: Higher Education Press, 1988: 38-48.
- [13] 夏桂云, 李传习. 考虑剪切变形影响的杆系理论与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- XIA Gui-yun, LI Chuan-xi. Frame structure theory and its applications including shear deformation effects[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [14] 郭战胜, 施冬莉, 宋亦诚. 材料力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.
- GUO Zhan-sheng, SHI Dong-li, SONG Yi-cheng. Mechanics of materials[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013.