

# 考虑位移影响的钢管砼拱面内承载力 时变可靠度研究

段伟峰, 邓继华

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为研究钢管砼抛物线拱桥在受均布竖向荷载作用下考虑位移影响时的时变可靠度, 利用差分法求得拱面内临界荷载并建立考虑徐变的极限状态函数, 采用 MATLAB 软件结合中心点法, 得到钢管砼拱面内承载力可靠度指标随时间的变化。结果表明, 砼徐变会降低钢管砼拱面内稳定临界承载力可靠性指标; 加载龄期对结构可靠性的影响较小; 考虑位移影响时钢管砼拱面内稳定临界承载力和可靠性会有一定增加, 设计时应充分考虑。

**关键词:** 桥梁; 钢管砼抛物线拱; 面内承载力; 位移影响; 时变可靠度

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)02-0097-03

钢管砼桥梁结构由于砼的徐变及长期处于大气环境和各种荷载条件下运营期间其可靠性会降低。目前世界各国均采用可靠度指标来评估结构的安全性, 采用合适的方法获得可靠度指标对桥梁结构潜在风险及后续维修加固措施制定非常重要。钢管砼拱桥具有材料轻质高强、适合快速施工等优点, 跨径也随着钢材质量的提升越来越大, 近年来得到大量应用。中国是一个钢材产量大国, 钢管砼结构应用更广泛。Wang T. 等通过研究抛物线浅拱得出几何非线性因素会影响其徐变稳定; 蒋伟等通过建立钢管砼圆弧拱徐变稳定承载力极限状态函数得到其稳定可靠度指标随时间的变化, 认为砼徐变会使其可靠性显著降低; 贡金鑫等考虑抗力随时间的变化, 得出结构的实际可靠度比预设计的可靠度低。上述研究从某方面考虑徐变稳定承载力, 但未一并考虑不确定性和位移对钢管砼抛物线拱稳定承载力的影响。该文以承受竖向均布荷载的钢管砼抛物线拱为研究对象, 考虑承受荷载后拱的位移影响和砼徐变, 建立钢管砼抛物线拱极限状态函数, 结合中心点法分析其面内稳定可靠度指标随时间的变化。

## 1 钢管砼两铰抛物线拱考虑位移影响的临界荷载表达式

### 1.1 计算模型

选取一承受竖向均布荷载  $q$  的抛物线两铰拱建立计算模型(见图 1), 拱轴方程为:

$$y = \frac{4h}{L^3}x(L-x)$$

式中:  $h$  为矢高;  $L$  为跨径。

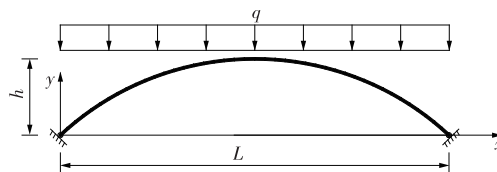


图 1 竖向均布荷载作用下钢管砼抛物线拱模型

### 1.2 临界荷载表达式

由于该抛物线拱受到完全对称的荷载作用, 其面内屈曲为正对称或反对称形式, 且轴向力和剪力对位移的影响较小, 可忽略不计。该临界荷载可采用差分法求得, 而反对称屈曲相对应的临界荷载比对称屈曲相应的荷载小, 故取反对称的位移模式进行计算。将拱沿跨径方向分为 8 等份, 即  $\Delta x = 1/8L$ (见图 2)。

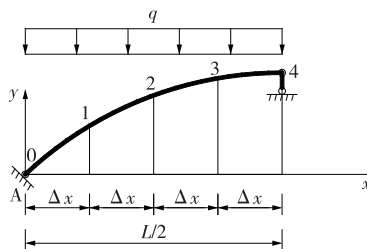


图 2 临界荷载表达式计算简图

各等份点之间可等效为拉压杆件, 即各点加载后产生的竖向位移与横向位移的比值与加载前两点间倾角的正切值一致, 同时将均布荷载等效加载到各节点上。由于点 0、4 的竖向位移为零, 以点 1、2、

3 的竖向位移  $v_1, v_2, v_3$  为独立的量。同时,设点 1、2、3、4 的横向位移为  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ ,则由上述关系建立各点竖向位移与横向位移的关系式如下:

$$\omega_1 = 0.7v_1 \quad (1)$$

$$\omega_2 = 0.2v_1 + 0.5v_2 \quad (2)$$

$$\omega_3 = 0.2v_1 + 0.2v_2 + 0.3v_3 \quad (3)$$

$$\omega_4 = 0.2v_1 + 0.2v_2 + 0.2v_3 \quad (4)$$

联立式(1)~(4),可得支座 A 处的竖向反力  $F_{Ay}$  为:

$$F_{Ay} = \frac{1}{2}qL - \left(\frac{q}{4}\omega_1 + \frac{q}{4}\omega_2 + \frac{q}{4}\omega_3 + \frac{q}{8}\omega_4\right) \quad (5)$$

又由结构屈曲状态反对称可得点 4 的弯矩为零,故有:

$$M_4 = F_{Ay}(x_4 + \omega_4) - F_{Ax}(y_4 - v_4) - \sum P_i(x_4 - x_i + \omega_4 - \omega_i) \quad (6)$$

式中: $F_{Ax}$  为支座 A 处的水平反力,即水平推力; $x_4, y_4$  分别为点 4 的横向、竖向坐标; $x_i, y_i$  分别为点  $i$  的横向、竖向坐标; $P_i$  为作用在点  $i$  的等效荷载; $i = 0, 1, 2, 3, 4$ 。

由于在屈曲前拱上各点的竖向及横向位移很小,可忽略两个位移的乘积项,则有:

$$M_4 = \frac{1}{8}qL^2 - F_{Ax}h = 0 \quad (7)$$

进而得:

$$F_{Ax} = \frac{qL^2}{8h} \quad (8)$$

同理可确定点 1、2、3 的弯矩。再由各点的差分公式建立如下表达式:

$$\left(-\frac{128EI}{L^3} + 0.881\ 4q\right)v_1 + \left(\frac{64EI}{L^3} + 0.041\ 3q\right)v_2 - 0.014\ 4qv_3 = 0 \quad (9)$$

$$\left(\frac{64EI}{L^3} + 0.149\ 5q\right)v_1 + \left(-\frac{128EI}{L^3} + 0.647\ 5q\right)v_2 + \left(\frac{64EI}{L^3} + 0.048\ 3q\right)v_3 = 0 \quad (10)$$

$$-0.046\ 4qv_1 + \left(\frac{64EI}{L^3} + 0.001\ 9q\right)v_2 + \left(-\frac{128EI}{L^3} + 0.417\ 4q\right)v_3 = 0 \quad (11)$$

式中: $E$  为截面弹性模量; $I$  为抗弯惯性矩。

在上述方程中,由于其自由项都为零,只有当未知数前的系数所组成的行列式为零时,位移  $v_1, v_2, v_3$

才可能有非零解,从而得到该临界荷载的最小值  $q_{cr}$  为:

$$q_{cr} = 51.3 \frac{EI}{L^3} \quad (12)$$

## 2 考虑徐变的钢管砼抛物线拱临界承载力

钢管砼拱为钢与砼的组合型结构,且模型为等截面,故任意截面的抗弯刚度为:

$$EI = E_s I_s + E_c I_c \quad (13)$$

式中: $E_s, E_c$  分别为截面钢管和砼的弹性模量; $I_s, I_c$  分别为截面钢管和砼的抗弯惯性矩。

考虑砼徐变对钢管砼拱面内稳定承载力的影响,其临界荷载可表示为:

$$q_{cr}(t) = \frac{1 + \rho_s \phi(t, t_0)}{1 + \phi(t, t_0)} q_{cr} \quad (14)$$

$$\rho_s = \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_c I_c} \quad (15)$$

式中: $\phi(t, t_0)$  为徐变系数。

## 3 考虑徐变时可靠度的分析方法

可靠度的分析方法已较成熟,不考虑徐变的可靠度研究更完善,但对于同时考虑徐变和位移影响的研究相对较少。考虑徐变时,可靠度会随着时间不断增长下降。由临界荷载效应与外部作用效应的关系可建立可靠度分析极限状态函数为:

$$Z(t) = q_{cr}(t) - G - Q \quad (16)$$

式中: $G$  为永久荷载效应; $Q$  为可变荷载作用。

## 4 计算参数及结果分析

结构可靠度计算常用方法主要有中心点法、JC 法、Monte Carlo 法等。由于对钢管砼抛物线拱的可靠度精度要求不是太高,采用中心点法进行计算。同时为方便对不确定性参数的计算分析,计算中假定基本随机变量服从正态分布。

### 4.1 基本随机变量统计信息

该抛物线钢管砼拱跨径  $L = 15\text{ m}$ ,矢高  $h = 3\text{ m}$ ;钢管外径  $R = 200\text{ mm}$ ,钢管壁厚  $t = 10\text{ mm}$ ,钢材弹性模量  $E_s = 2.06 \times 10^5\text{ MPa}$ ;砼采用 C50,弹性模量  $E_c = 3.55 \times 10^4\text{ MPa}$ 。计算模型基本随机变量的不确定性参数及其统计信息见表 1。

### 4.2 计算结果分析

根据随机变量的统计参数,结合中心点法,考虑加载龄期(实际工程中加载龄期一般为 7 或 28 d),

采用 MATLAB 软件计算该钢管砼两铰抛物线拱的可靠度指标,计算结果见图 3、图 4。

表 1 随机变量的不确定性参数及其统计信息

基本随机变量	变异系数
钢管外径 $R$	0.014
钢管壁厚 $t$	0.035
徐变系数 $\phi$	0.200
钢材弹性模量 $E_s$	0.060
砼弹性模量 $E_c$	0.100

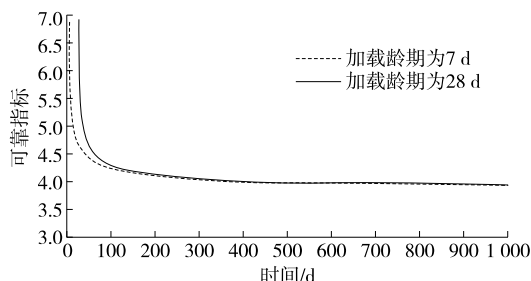


图 3 考虑加载龄期时钢管砼拱面内可靠指标随时间的变化

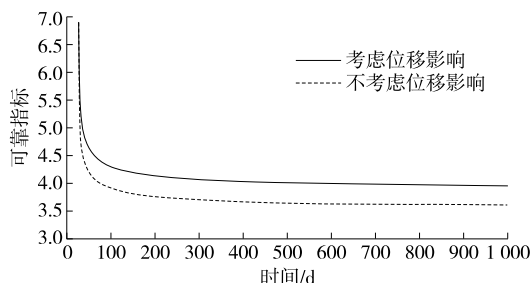


图 4 考虑位移影响时钢管砼拱面内可靠指标随时间的变化

由图 3 可知:800 d 后,钢管砼面内可靠指标随时间的变化曲线几乎与时间轴平行,7、28 d 加载龄期时的可靠指标均趋于稳定,说明时间取到 1 000 d 能反映其变化趋势;徐变发生初期 7、28 d 加载龄期时的可靠指标有一定差别,但在徐变开始约 1 年后两曲线几乎重合,表明加载龄期对钢管砼面内可靠指标的影响较小。

由图 4 可知:采用 28 d 加载龄期,时间为 0~1 000 d 时,不考虑位移影响时可靠指标从 6.1 下降到 3.6,考虑位移影响时从 6.9 下降到 3.9;考虑位移影响时可靠指标有一定增加,最终趋于稳定时的可靠指标比不考虑位移影响时的增加约 8%。

## 5 结论

(1) 加载龄期对钢管砼抛物线拱面内稳定徐变可靠指标的影响在初期较大,随着时间的增长其影

响可忽略不计。

(2) 考虑位移影响时,钢管砼抛物线拱面内稳定徐变可靠指标增加,而且在任意时间点,考虑位移影响时的可靠指标均比不考虑位移影响时的大。考虑位移影响时钢管砼拱面内稳定徐变可靠性会有一定增加,设计时应予以考虑。

## 参考文献:

- [1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [2] 陈宝春.钢管混凝土拱桥[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [3] Wang T, Bradford M A, Gilbert R I. Creep buckling of shallow parabolic concrete arches[J]. Journal of Structure Engineering, ASCE, 2005, 132(10).
- [4] 蒋伟,吕大刚.钢管混凝土拱面内稳定的时变可靠度分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2013,32(增刊 1).
- [5] 贡金鑫,赵国藩.考虑抗力随时间变化的结构可靠度分析[J].建筑结构学报,1998,19(5).
- [6] 项海帆.拱结构的稳定与振动[M].北京:人民交通出版社,1991.
- [7] 蒋伟,吕大刚.混凝土两铰圆弧拱的面内徐变稳定性[J].工程力学,2012,29(增刊 2).
- [8] JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [9] 张明.结构可靠度分析:方法与程序[M].北京:科学出版社,2009.
- [10] GB 50153—2008,工程结构可靠性设计统一标准[S].
- [11] CEB—FIP model code 1990[S].
- [12] 杨吉新,梁亚兰,余越,等.横撑对大跨度钢管砼拱桥稳定性的影响分析[J].公路与汽运,2018(5).
- [13] 李南南,陈小佳.大跨度钢管砼拱桥拱肋计算模型分析[J].公路与汽运,2017(6).
- [14] 牛凯.大跨钢管混凝土拱桥的稳定性分析[D].长沙:长沙理工大学,2011.
- [15] 龚凯.单肋斜撑钢管混凝土拱桥稳定性及动力特性分析[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [16] 蒋伟.钢管混凝土拱肋稳定性的可靠度分析与安全系数评定[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [17] 蒋伟,吕大刚.钢管混凝土拱面外稳定的可靠度与灵敏度分析[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(12).
- [18] 徐腾飞.钢管混凝土非线性稳定承载能力与可靠度研究[D].成都:西南交通大学,2010.