

# 钢管混凝土拱的面外徐变稳定性分析

蒋伟<sup>1</sup>, 吕大刚<sup>1</sup>, 杨大伟<sup>2</sup>

(1 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨; 2 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨)

**摘要:** 为研究混凝土徐变对钢管混凝土拱面外稳定的影响,提出了一种面外徐变稳定的数值分析方法,该方法将混凝土徐变分析的修正龄期有效模量法和有限单元法进行结合,通过引入时变的初始几何缺陷描述钢管混凝土拱在任意时刻的徐变变形,并将该缺陷引入有限元模型求解面外徐变稳定承载力.基于该方法,以已有的钢管混凝土拱试验模型为基本研究对象,讨论了持荷水平、长细比、矢跨比、横向扰动力、截面含钢率和混凝土加载龄期对面外徐变稳定承载力的影响.计算结果表明:该方法具有较好的有效性和适用性;不同参数对钢管混凝土拱面外稳定承载力影响的差异较大,其中长细比、截面含钢率和混凝土加载龄期的影响较大,而矢跨比和横向扰动力的影响相对较小;徐变导致钢管混凝土拱面外稳定承载力的降低幅度可达13.8%,设计时应予以考虑.

**关键词:** 钢管混凝土拱; 面外失稳; 徐变稳定; AEMM; 时变几何缺陷

**中图分类号:** TU311.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2013)10-0001-06

## Out-plane creep stability of concrete filled steel tubular arches

JIANG Wei<sup>1</sup>, LÜ Dagang<sup>1</sup>, YANG Dawei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

**Abstract:** To investigate the influences of concrete creep on the out-plane stability of concrete-filled steel tubular (CFST) arches, a numerical method was presented for the out-plane creep stability analysis. The method combined the age-adjusted effective modulus method (AEMM) for the creep analysis and the finite element method for the structural analysis. The time-dependent initial geometric imperfection was introduced to express the creep deformation of CFST arches at any time. Then the out-plane creep stable bearing capacity could be obtained via the finite element analysis. Based on the method, an existed experimental CFST arch model was taken as a basic researching object, and the influences of the loading levels, slenderness ratios, rise-to-span ratios, lateral loads, steel ratios and loading ages on the out-plane creep stable bearing capacity were discussed. The results show that the method is of good efficiency and applicability; the slenderness ratios, steel ratios and loading ages have great influences on the creep stability, while the rise-to-span ratios and lateral loads have little influence; the creep-induced decreased degree of out-plane creep stable bearing capacity could rise to 13.8% which should be concerned in design.

**Key words:** CFST arch; out-plane instability; creep stability; AEMM; time-dependent geometric imperfection

拱桥的主拱肋以受压为主,稳定性验算是设计计算的关键内容.同时,钢管混凝土较高的极限抗压承载力使其构件通常较为细长,因而,对于钢

管混凝土拱桥,随着跨径的逐渐增大,稳定承载能力问题更为突出.

混凝土拱在短期荷载作用下的面外稳定为时不变问题<sup>[1-3]</sup>,但在长期荷载作用下,混凝土徐变增加拱肋横向变形,使得拱肋弯矩增大,导致稳定承载力降低,即徐变稳定或时变稳定.文献[4]通过理论和试验研究指出,混凝土徐变会显著影响抛物线浅拱的稳定性,且混凝土浅拱的时变性能

收稿日期: 2013-02-24.

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2013BAJ08B01); 国家自然科学基金(51178150, 50978080, 50678057).

作者简介: 蒋伟(1982—),男,博士研究生;

吕大刚(1970—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 吕大刚, ludagang@sina.com.

受几何非线性的影响显著;文献[5-6]分别基于 AEMM 和 Arutyunyan-Maslov 徐变模型推导了钢管混凝土圆弧拱在径向均布荷载作用下的徐变稳定承载力计算公式. 上述研究均得到了解析形式的徐变临界力计算公式, 但仅针对混凝土拱的面内稳定. 文献[7]采用逐步积分法 (step-by-step method, SSM) 探讨了抛物线拱在竖向均布力作用下的面外徐变稳定, 但该研究未考虑横向力的影响, 且 SSM 的计算精度受时间步长的影响较大, 当积分步较多时计算量和输入参数均显著增加<sup>[8]</sup>.

本文提出采用时变的初始几何缺陷描述混凝土拱在任意时刻的徐变变形, 并将该缺陷引入有限元模型, 进而计算拱的面外徐变稳定承载力. 在计算拱的初始几何缺陷时, 按 AEMM 换算截面的长期刚度.

## 1 钢管混凝土拱的面外徐变稳定分析方法

在经典稳定理论中, 深拱在均布荷载作用下的面内稳定近似为弹性稳定, 因而通过虚功原理、变分原理或引入徐变积分算子等方法可以直接得到解析形式的面内徐变稳定承载力计算公式.

与面内失稳相同, 面外失稳也分为弹性分支点失稳和非线性极值点失稳. 然而, 拱在承受面内荷载的同时, 不可避免地受到面外荷载如风和地震作用的影响, 而弹性特征值方法仅能得到面外稳定承载力的上限解, 且无法考虑横向力的影响. 对于面外的非线性极值点失稳, 得到解析的徐变稳定承载力表达式较为困难. 同时, 若直接采用换算以后的有效弹性模量进行结构分析, 则会低估截面的刚度, 即高估徐变的影响. 因而, 本文将混凝土徐变的 AEMM 模型与有限元结合, 提出以时变的初始几何缺陷描述混凝土拱在任意时刻的徐变变形, 即给定该缺陷求解任意时刻的徐变稳定承载力.

拱在竖向力和横向扰动力同时作用下的变形见图 1. 考虑徐变影响时, 混凝土拱在任意时刻的横向变形可以表示为

$$z = z_0 + z_c. \quad (1)$$

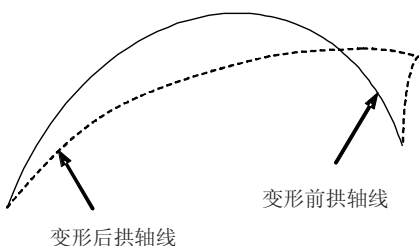


图 1 混凝土拱的横向变形

式中:  $z$  为混凝土拱在任意时刻的总变形,  $z_0$  为混凝土拱的时不变变形,  $z_c$  为混凝土拱的徐变变形.

式(1)中的  $z_0$  可以通过给定初始持荷水平直接求解, 而  $z$  则通过 AEMM 得到修正龄期后的有效模量求解, 进而通过式(1)计算  $z_c$ .

## 2 钢管混凝土的徐变模型

徐变和松弛是粘弹性材料的典型物理性质, 只是由于表现形式的不同, 工程中通常关心混凝土的徐变和钢筋的应力松弛. 粘弹性材料内的应力不仅与当时的应变有关, 而且与应变的全部变化历史有关, 即应力应变已无一一对应关系.

当混凝土中的压应力小于其极限抗压强度的 0.5 倍时, 徐变可近似认为线性, 根据 Boltzmann 叠加原理, 其单轴应力-应变关系为<sup>[9]</sup>

$$\varepsilon(t) = \int_{\tau}^t \left[ \frac{1}{E_c(\tau)} + C(t, \tau) \right] d\sigma(\tau). \quad (2)$$

式中:  $E_c(\tau)$  为  $\tau$  时刻混凝土的弹性模量;  $C(t, \tau)$  为  $\tau$  时刻施加的单位力在  $t$  时刻产生的混凝土徐变应变;  $\sigma(\tau)$  为  $\tau$  时刻的混凝土应力.

式(2)中的  $C(t, \tau)$  可采用粘弹性模型描述<sup>[9]</sup>, 如 Maxwell 流体模型、Kelvin 固体模型和标准线性固体模型等弹性元件和阻尼元件的简单组合. 文献[8, 10]通过不同徐变模型的对比, 证明了 AEMM 是兼顾计算效率和精度的比较好的方法, 且便于和已有的结构分析程序结合.

对于 AEMM,  $C(t, \tau)$  可表示为

$$\begin{cases} C(t, \tau) = \chi(t, \tau) \phi(t, \tau) / E_c(\tau), \\ \chi(t, \tau) = 1 - \frac{[1 - \chi(\infty, \tau)](t - \tau)}{20 + (t - \tau)}, \\ \chi(\infty, \tau) = k_1 \tau / (k_2 + \tau), \\ k_1 = 0.78 + 0.4e^{-1.33\phi(\infty, \tau)}, \\ k_2 = 0.16 + 0.8e^{-1.33\phi(\infty, \tau)}. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\phi(t, \tau)$  为徐变系数,  $\chi(t, \tau)$  为老化系数.

式(3)中徐变系数的计算成为关键. 根据已有的钢管混凝土徐变试验<sup>[11]</sup>, 徐变系数按 CEB-FIP 模式规范(1991)计算, 并按文献[7]取  $\phi_{RH} = 1$  且  $\beta_H = 1500$ , 其表达式为

$$\begin{cases} \phi(t, \tau) = \phi_0 \beta_c(t - \tau), \\ \phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(\tau), \\ \beta(f_{cm}) = 5.3 / (f_{cm} / f_{cm0})^{0.5}, \\ \beta(\tau) = \frac{1}{0.1 + (\tau / t_1)^{0.2}}, \\ \beta_c(t - \tau) = \left[ \frac{(t - \tau) / t_1}{1500 + (t - \tau) / t_1} \right]^{0.3}. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $f_{cm}$  为龄期 28 d 的混凝土圆柱体抗压强度均值; RH 表示相对湿度;  $h$  为构件名义尺寸;  $A_c$  为构件截面面积;  $u$  为构件与空气接触部分的周长。

### 3 钢管混凝土拱面外稳定的有限元模型

由于弹性特征值解仅为上限解, 因而拱的空间失稳应按非线性极值点失稳计算其极限承载力, 即同时考虑材料非线性、几何非线性和结构自身的初始几何缺陷。本文采用通用有限元软件 ABAQUS 计算钢管混凝土拱的面外稳定极限承载力。

#### 3.1 有限元模型

对于钢管混凝土拱, 有限元建模时以直梁单元模拟拱轴线。理论上, 当单元数目足够多时, 采用“以直代曲”的方法完全可以满足精度要求。对于面外稳定分析, 选用 ABAQUS 的空间梁单元 B31 模拟拱肋, 几何缺陷按一致缺陷模态法<sup>[12]</sup>描述。

#### 3.2 材料的本构关系

钢管混凝土在材料上属于钢-混组合结构, 同时又属于套箍混凝土的范畴, 其材料非线性的定义可采用单材料模型或双材料模型。单材料模型将钢管和核心混凝土换算或等效成同一种材料, 并定义该材料的非线性性能; 双材料模型分别定义钢管和核心混凝土的材料非线性。由于双材料模型具有较好的计算精度<sup>[13]</sup>, 因而本文在有限元分析时按双材料模型考虑。其中, 钢的本构关系为理想弹塑性, 混凝土的本构关系采用刘威<sup>[14]</sup>提出的适用于有限元分析的等效应力-应变关系模型, 表达式为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2, & x \leq 1; \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^2 + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (5a)$$

$$\beta_0 = \begin{cases} 0.12, & \leq 0.12; \\ 0.5(2.36 \times 10^{-5})^{0.25 + (\xi - 0.5)^7} f_c^{0.5}, & \geq 0.12. \end{cases} \quad (5b)$$

式中:  $x = \varepsilon/\varepsilon_0$ ;  $y = \sigma/\sigma_0$ ;  $\sigma_0 = f_c$  ( $N/mm^2$ );  $\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 800\xi^{0.2} \times 10^{-6}$ ;  $\varepsilon_c$  为混凝土压应变;  $\xi$  为约束效应系数且  $\xi = A_s f_y / A_c f_{ck}$ ;  $f_c$  为混凝土圆柱体轴心抗压强度;  $f_y$  为钢材屈服强度;  $f_{ck}$  混凝土轴心抗压强度标准值;  $A_s$  为钢管的横截面面积;  $A_c$  为核心混凝土的横截面面积。

混凝土轴心抗压强度不同表示值之间的近似对应关系见表 1<sup>[15]</sup>。

表 1 不同混凝土轴心抗压强度的近似对应关系  $N/mm^2$

强度等级	$f_{ck}$	$f_c$
C30	20.0	24.0
C40	26.8	33.0
C50	33.5	41.0
C60	41.0	51.0
C70	48.0	60.0
C80	56.0	70.0
C90	64.0	80.0

## 4 算例分析

### 4.1 试验模型及参数

选用文献[2]的试验建模, 试验模型见图 2。其中模型拱的跨径  $L$  为 7 500 mm, 矢高  $f$  为 1 500 mm, 设计拱轴线为抛物线, 方程为  $y_1 = -x_1^2/9\ 375$ , 拱肋选用  $\phi 121 \times 4.5$  mm 的直缝钢管。试验时在拱的六分点处施加竖向集中荷载, 同时在跨中施加横向集中荷载, 横向荷载为相应单个竖向荷载的 10%。模型拱的材料参数为实测值, 其中钢管的屈服强度  $f_y = 322$  MPa, 钢材的弹性模量  $E_s = 2.06 \times 10^5$  MPa, 混凝土的立方体抗压强度  $f_{cu} = 66.7$  MPa, 混凝土的弹性模量  $E_c = 3.784 \times 10^4$  MPa。

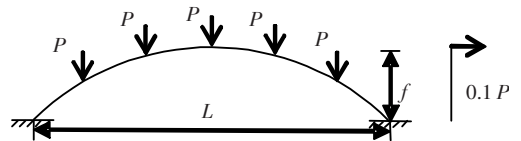


图 2 试验模型

### 4.2 时不变面外稳定承载力

利用 ABAQUS 软件计算的钢管混凝土拱面外稳定承载力及其与 ANSYS 的对比见表 2。ANSYS 中单肋拱模型由 48 个 Beam188 单元、97 个节点组成, 拱肋两端刚结。

表 2 时不变非线性稳定承载力

$\alpha/\%$	面外极限承载力 $P_u/kN$	
	ABAQUS(本文)	ANSYS <sup>[13]</sup>
3	80.71	80.30
5	75.37	74.96
8	68.61	67.98
10	64.75	64.48
20	51.45	52.35

注:  $\alpha$  为横向力与单个竖向力的比值。

计算结果表明: 钢管混凝土拱的面外非线性稳定承载力随着横向力的增加逐渐减小, 且试验值 97.11 kN 介于弹性稳定承载力 102.59 kN 和非线性稳定承载力之间。与试验加载方式相比, 有限元加载为理想加载, 使得计算值低于试验值。同

时,本文按最不利方式施加结构的初始几何缺陷,也使得计算结果偏低.本文基于 ABAQUS 的计算结果与已有 ANSYS 的结果吻合较好.

### 4.3 面外徐变稳定承载力

为方便对比,将基于时变缺陷的徐变稳定分析方法记为 A,以直接换算截面刚度进行有限元分析的方法记为 B,则考虑混凝土徐变影响后,不同持荷水平对应的钢管混凝土拱面外稳定承载力随时间变化曲线见图 3.

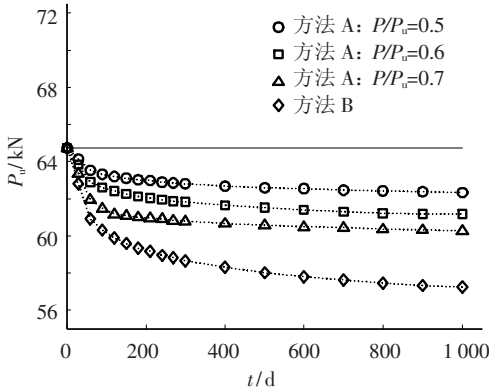


图 3 不同方法的面外徐变稳定承载力变化曲线

对比分析表明,对于方法 A,随着持荷水平的增加,钢管混凝土拱面外稳定承载能力的降低幅度逐渐增大,当  $t$  达到 1 000 d 时,降低幅度由 3.7% 提高至 6.9%;而方法 B 无法考虑持荷水平对外稳定承载力的影响,且该方法高估了徐变对稳定承载力的影响,其结果仅为下限解.

## 5 参数分析

基于上文的面外徐变稳定分析方法,以文献 [2] 的试验模型为基本研究对象进行参数分析,分析的参数为长细比、矢跨比、横向扰动力、截面含钢率以及混凝土加载龄期.

### 5.1 长细比

不同长细比对应的面外徐变稳定承载力降低幅度见图 4.

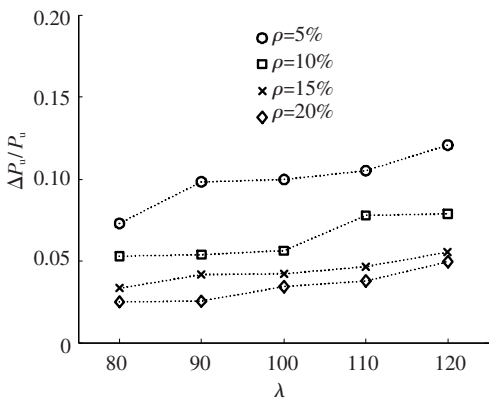


图 4 面外徐变稳定承载力降低幅度随长细比变化曲线

计算结果表明,对于不同的截面含钢率,面外徐变稳定承载力的降低幅度均随长细比的增加而增大,其值在 2.5% ~ 12% 之间变化.且截面含钢率较小时,长细比的影响相对较大,随着截面含钢率的增大,长细比的影响逐渐降低.

### 5.2 矢跨比

不同矢跨比对应的面外徐变稳定承载力降低幅度见图 5.

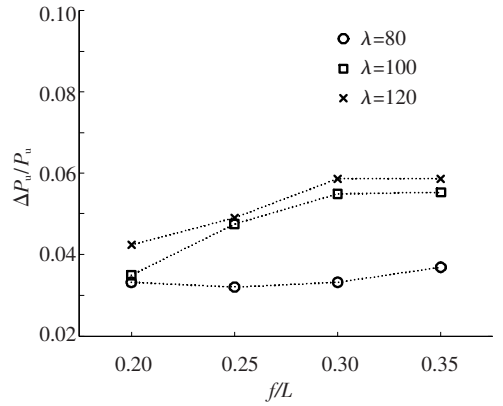


图 5 面外徐变稳定承载力降低幅度随矢跨比变化曲线

计算结果表明,对于不同的长细比,面外徐变稳定承载力的降低幅度均随矢跨比的增加而增大,其值在 3.3% ~ 5.9% 之间变化.且矢跨比的影响随长细比的增加而增大.

### 5.3 横向扰动力

不同横向扰动力对应的面外徐变稳定承载力降低幅度见图 6.

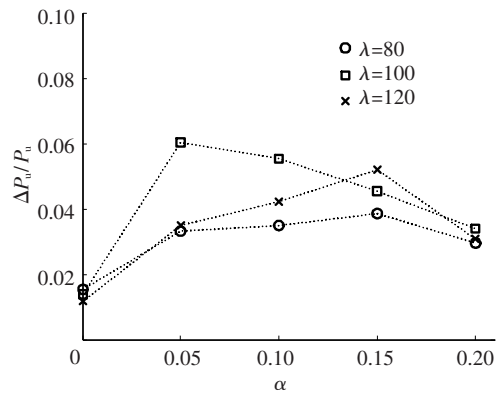


图 6 面外稳定承载力降低幅度随横向扰动力变化曲线

计算结果表明,对于不同的长细比,面外徐变稳定承载力的降低幅度均随横向扰动力的增加呈现先增大后减小的变化趋势,其原因在于,横向扰动力的增加使得初始缺陷的敏感性下降.

### 5.4 截面含钢率

不同截面含钢率对应的面外徐变稳定承载力降低幅度见图 7.

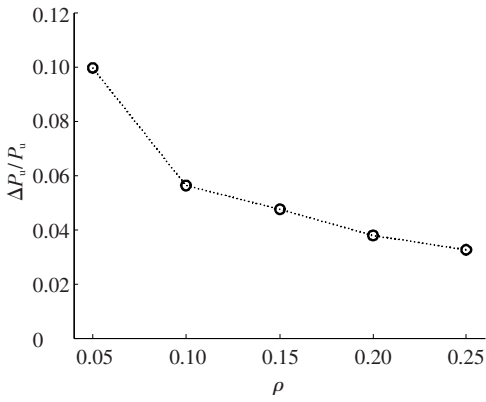
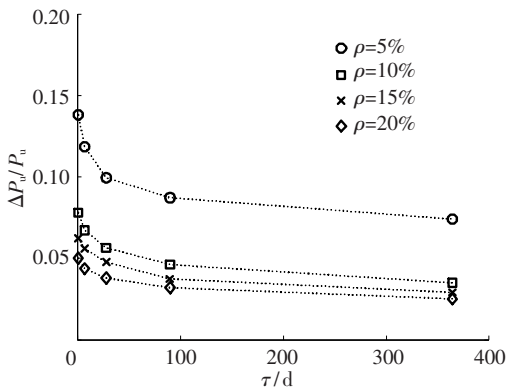


图 7 面外稳定承载力降低幅度随截面含钢率变化曲线

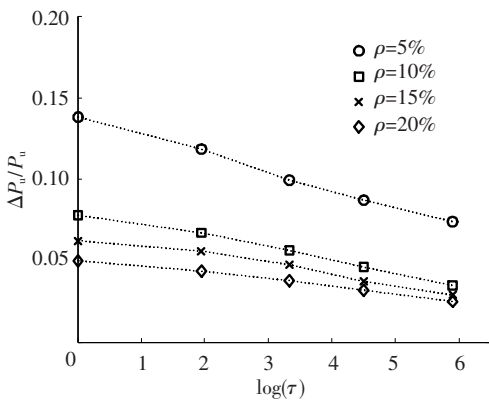
计算结果表明,面外徐变稳定承载力的降低幅度随截面含钢率的增加而减小.而随着截面含钢率的增加,徐变稳定承载力的降低幅度逐渐减小,且变化趋势逐渐平缓.当截面含钢率在 5% ~ 15% 变化时,降低幅度从 10% 降低至 4.8%,当截面含钢率继续增加至 25% 时,降低幅度仅由 4.8% 降低至 3.3%.因而从工程应用的角度,较大的钢管混凝土截面含钢率并不经济.

### 5.5 混凝土加载龄期

不同混凝土加载龄期对应的面外徐变稳定承载力降低幅度见图 8.



(a) 原始坐标



(b) 对数坐标

图 8 面外稳定承载力降低幅度随混凝土加载龄期变化曲线

计算结果表明,对于不同的截面含钢率,面外徐变稳定承载力的降低幅度均随混凝土加载龄期的增加而减小,其值在 2.5% ~ 13.8% 之间变化.同时通过对比发现,面外徐变稳定承载力降低幅度与混凝土加载龄期近似呈对数线性关系.

## 6 徐变变形

本文徐变稳定分析方法的本质是通过引入时变的初始几何缺陷描述钢管混凝土拱在任意时刻的徐变变形.从工程应用的角度,任意时刻的徐变变形更具有实际意义.因而根据公式(1),给出徐变引起的任意时刻钢管混凝土拱肋变形见图 9.

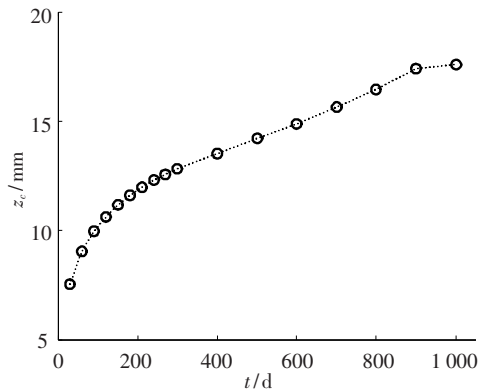


图 9 钢管混凝土拱的徐变变形随时间变化曲线

计算结果表明,徐变引起的钢管混凝土拱肋变形可达 17.61 mm,约为拱肋跨径的 1/500,该变形远大于混凝土拱肋面外几何缺陷幅值 L/6 000,因而对稳定承载力有显著影响.

## 7 结论

1) 基于 AEMM 方法和有限元相结合的徐变稳定分析方法可以考虑持荷水平对徐变稳定承载力的影响,较之直接换算截面刚度的方法具有更高的精度和适用性.

2) 不同参数对钢管混凝土拱稳定承载力影响的差异较大,其中长细比、截面含钢率和混凝土加载龄期的影响较大,而矢跨比和横向扰动力的影响相对较小.同时,截面含钢率大于 15% 时对稳定承载力降低幅度的影响已较小.

3) 在本文讨论的参数范围内,钢管混凝土拱的徐变稳定承载力降低幅度可达 13.8%,设计时应予以考虑.

## 参考文献

[1] 杨永清. 钢管混凝土拱桥横向稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1998.

- [2] 陈宝春, 韦建刚, 林嘉阳. 钢管混凝土(单圆管)单肋拱空间受力试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(5): 99-106.
- [3] 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): 8-12.
- [4] WANG T, BRADFORD M A, GILBERT R I. Creep buckling of shallow parabolic concrete arches [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 132(10): 1641-1649.
- [5] BRADFORD M A, PI Y L. Time-dependent in-plane behavior and buckling of concrete-filled steel tubular arches [J]. Engineering Structures, 2011, 33(5): 1781-1795.
- [6] 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II): 186-189.
- [7] GENG Y. Time-dependent behavior of large span concrete-filled steel tubular arch bridges [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 182.
- [8] GILBERT R I. Time effects in concrete structures [M]. Amsterdam: Elsevier, 1988.
- [9] 周光泉, 刘孝敏. 粘弹性理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.
- [10] BAZANT Z P. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1972, 69: 212-217.
- [11] SHAO X D, PENG J X, LI L F. Time-dependent behavior of concrete-filled steel tubular arch bridge. [J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(1): 98-107.
- [12] 沈世钊, 陈昕. 网壳结构的稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 52-60.
- [13] 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土拱材料非线性有限元分析方法[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 344-348.
- [14] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005: 64.
- [15] 陈肇元, 朱金铨, 吴佩刚. 高强混凝土及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.

(编辑 赵丽莹)