

有初应力的钢管混凝土轴压柱设计计算方法研究

陈宝春, 黄福云

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 应用有限元计算方法, 对有初应力的钢管混凝土轴压柱容许应力法和极限状态法中所对应的弹性极限荷载和塑性或稳定极限荷载进行了数值计算分析. 分析表明, 一般情况下钢管与管内混凝土不可能同时达到容许应力. 传统的容许应力法计算的弹性极限荷载连两种材料的弹性极限荷载的简单叠加都无法达到, 更不用说组合作用使承载力提高的部分了, 因此, 它存在着明显的不合理之处. 建议定义钢管混凝土轴压构件弹性极限荷载为钢管的最大应力达到屈服应力时所对应的荷载. 初应力的存在使构件弹性极限承载力下降明显, 而对塑性或稳定极限荷载的影响相对不大. 初应力度越大, 构件弹性极限承载力与其塑性或稳定极限承载力的比值越小, 以弹性极限荷载为控制的容许应力法计算结果越保守. 对于钢管混凝土拱桥, 其初应力度一般较大, 设计计算建议采用极限状态法.

关键词: 钢管混凝土; 初应力; 长细比; 极限承载力; 容许应力

中图分类号: TU398

文献标识码: A

Research on design and calculated methods of concrete filled steel tube columns with initial stress under axial loads

CHEN Bao - chun, HUANG Fu - yun

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Applying finite element method, the elastic ultimate load and plastic or stability ultimate load corresponding to the allowable stress method and ultimate state method of concrete filled steel tube (CFST) columns with initial stress under axial loads are calculated and analyzed. Results indicate that it is impossible for the steel and concrete stresses reaching their allowable stress simultaneously in generally, but the stress of steel is more feasible for the checking stress than the concrete's for the suited match of CFST. It can be regarded as the elastic ultimate load when the moment of the steel tube is yielded. The allowable stress method for calculating elastic ultimate load of members and structures of CFST is irrational in practice engineering. The presence of initial stress drops the elastic ultimate load more distinct than the strength and the ultimate load - carrying capacity. The ratio of elastic ultimate load to plastic ultimate load is decreased with the increasing of initial stress degree (ISD) and allowable stress method is conservative. As to the CFST arch bridge with large ISD, the ultimate state method is suited to use in practical engineering.

Keywords: concrete filled steel tube; initial stress; slenderness ratio; ultimate load-carrying capacity; allowable stress

钢管混凝土拱桥的施工, 一般是先架设钢管拱肋, 再灌注管内混凝土形成钢管混凝土拱, 在组合结构共同作用之前, 钢管中就存在着因承受钢管和混凝土重量而产生的应力, 即钢管初始应力, 简称初应力^[1].

钢管混凝土拱桥主要应用于公路与城市桥梁之中, 我国现有的公路桥梁的设计规范对于钢筋混凝土结构采用的是极限状态法, 而钢结构采用的是容许应力法. 钢管混凝土拱桥目前尚无专用的设计规范, 实

收稿日期: 2007 - 08 - 28

作者简介: 陈宝春 (1958 -), 男, 教授, 博导.

基金项目: 交通部西部交通科技资助项目 (2003 - 318 - 798 - 20 - 1)

际工程设计时存在着两种设计计算与验算方法, 即参照钢结构的容许应力法和参照钢筋混凝土结构的极限状态法。容许应力法从架设钢管拱肋开始, 采用应力叠加法分别计算钢管和管内混凝土的应力, 最后验算截面的容许应力。应用极限状态法时, 在施工阶段进行应力验算, 而对成桥后的受力视钢管混凝土为整体采用内力叠加法计算内力, 然后进行整体和局部构件的承载力验算。这两种计算方法哪一种更合理、二者之间的关系如何, 已引起注意但仍缺乏深入的研究。本文以文献 [2] 进行的有初应力的钢管混凝土轴压试件为主要分析对象, 以有限元为分析手段, 对这两种计算方法进行分析探讨。

1 试验与有限元方法简介

文献 [2] 设计制作了 9 个钢管混凝土试件, 钢管外径 D 为 108 mm、壁厚 t 为 4 mm, 按长细比 ($\lambda = 4L/D$) 的不同分为 3 组, L 为沿试件纵向长度, 3 组试件长分别为 1 944、1 296 与 324 mm, 对应长细比为 72、48 与 12, 每组试件按初应力度不同各有 3 个。钢材采用 Q345 钢, 3 个标准试件测得钢材平均屈服强度 f_s 为 336.0 MPa, 对应屈服应变为 1.980×10^{-6} ; 比例极限为 270 MPa, 对应应变为 1.350×10^{-6} ; 抗拉强度 f_u 为 550.4 MPa, 弹性模量 E_s 为 2.00×10^5 MPa, 泊松比 μ_s 为 0.286。管内浇灌 C50 混凝土, 试件含钢率为 0.168, 套箍系数为 1.515。混凝土 28 d 立方体抗压强度 f_{cu} 为 54.9 MPa。同时每组试件制作了 1 个相同尺寸的空钢管试件。试验在福州大学工程结构实验中心 200 t 的油压试验机上进行, 试件两端采用平板铰加载。试验采用分级加载, 每级荷载持荷时间约为 3 min, 数据采用自动采集系统进行采集。各试件详细资料及加载装置见文献 [2] 所示。

有限元分析采用大型通用软件 ANSYS 进行, 有限元模型采用 Beam188 单元建模。钢管混凝土组合材料采用双单元法建模, 不同材料分别赋予不同的材料属性, 截面的划分采用平面单元 plane82 单元。假定钢管与混凝土之间无相对滑移, 钢材的应力-应变关系采用五线段模型, 核心混凝土采用考虑了钢管套箍作用的以一维方式表达的应力-应变关系。钢管初应力通过单元生死技术来实现, 分析参数包括初应力度与长细比。文献 [2] 进行的分析表明, 有限元分析结果与实测结果吻合良好, 表明了有限元方法的可行性。本文将以此有限元方法在文献 [2] 分析的基础上, 通过大量的数值分析, 对有初应力的钢管混凝土轴压构件的弹性极限荷载和塑性或稳定极限荷载进行了分析, 对它们的计算方法进行了讨论, 给出实际应用的建议。

2 弹性极限荷载

2.1 弹性极限荷载定义的讨论

以弹性理论为基础的容许应力法, 它要求在规定的标准荷载作用下按弹性理论计算得到的构件截面任一点的应力不大于规定的容许应力, 这时结构或构件所对应的荷载为弹性极限荷载 N_e 。

对于单一材料的结构或构件, 在容许应力法中, 材料的容许应力是由材料强度除以安全系数求得的, 安全系数则依据工程经验和主观判断来确定, 因此, 存在着诸多不足之处。对于钢管混凝土结构来说, 容许应力法除存在着上述问题之外, 还因其由两种不同的材料组成出现新的问题。一方面两种材料之间存在着相互作用, 混凝土为三向受力, 应力复杂, 且混凝土是一种非弹性非均质材料, 因此以弹性理论为基础的计算方法不可能如实反映构件截面破坏时的应力和正确地计算出结构构件的承载能力的。另一方面, 钢管和混凝土弹性模量比与容许应力比不一致致使按容许应力法验算 (构件达到弹性极限荷载) 时, 两种材料的承载能力无法得到充分发挥。

对于钢管与混凝土同时受力的构件, 采用弹性理论计算构件的应力时, 一般假定二者变形协调, 则钢管和混凝土无法同时达到容许应力。例如, 文献 [2] 中由 Q345 钢管与 C50 混凝土组成的钢管混凝土的轴压短试件, 两种材料的弹性模量之比为 $n = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa} / 3.4 \times 10^4 \text{ MPa} = 5.88$, 而容许应力之比为 $198 \text{ MPa} / 17.5 \text{ MPa} = 11.5$ 。在混凝土达到容许应力时, 钢材的应力才 102.9 MPa, 离容许应力 198 MPa 差 1.95 倍。反过来如果钢材达到设计容许应力, 则混凝土的应力将超出其容许应力的 1.95 倍, 或者说应力比值是模量比值的 1.95 倍。也就是说, 如果二者同时受力且满足共同变形假定, 钢管混凝土轴压构件弹性极限荷载是受混凝土的应力控制, 钢材的强度没有充分发挥作用。

另一方面,对于实际的钢管混凝土结构,由于施工时先架设空钢管结构,钢管中有了初应力,考虑了混凝土收缩徐变后,钢管应力进一步增大而混凝土应力减小.因此,钢管混凝土的弹性极限荷载则可能反过来以钢管的容许应力控制,对于钢管混凝土拱桥常常出现拱脚处钢管应力控制设计的情况.

以石潭溪大桥为例^[3],钢管拱肋为 Q235 钢,其容许应力为 140 MPa,混凝土为 C40 混凝土,相应容许应力为 12.5 MPa,施工过程中钢管最不利应力为 125.3 MPa,混凝土最不利应力仅为 2.9 MPa,两者之比为 43.2,当混凝土达到容许应力时,钢管的应力将达到 182.9 MPa,远远超过了其容许应力.如果在钢管混凝土形成后考虑到收缩徐变因素,钢管的应力有可能更大.又如丫髻沙大桥,考虑了初应力和管内混凝土徐变等因素后,钢管应力超过了其容许应力^[4].设计中钢管应力起控制作用,混凝土的作用没有得到充分发挥.在实际工程中,为使钢管应力满足容许应力要求,势必采用较厚的管壁,除了不经济外,增加了加工、焊接困难.

因此,采用容许应力法,实验室构件考虑两种材料共同作用时以混凝土应力控制,实际拱桥中考虑初应力、徐变等因素后又往往以钢管应力控制,都无法达到两种材料极限荷载的简单叠加值,更不用说组合作用使承载力提高的部分了^[4].

以上分析表明,钢管混凝土拱桥设计计算中采用容许应力法存在着不合理之处.从根本上来说,应采用极限状态法.在当前缺乏专门规范、仍有相当多设计人员采用容许应力法的情况下,本文建议对于合理匹配的钢管混凝土构件,定义钢管的最大应力达到屈服应力时所对应的荷载为其弹性极限荷载,而不考虑管内混凝土的应力.这种定义的考虑有以下几点,1)管内核心混凝土处于三向受力状态,其强度、塑性等均比一维受力的普通混凝土有很大的提高,难以用简单的一维应力计算分析,试验时测试费用也高;2)钢管虽然处于二维受力状态,但以轴向受力为主,与一维受力性能差别不大,试验时钢管应变的测试技术较为成熟与经济方便;3)实际工程中,初应力的存在往往使钢管的应力成为钢管混凝土构件弹性极限荷载的控制应力.本文的后面分析中,也都以此作为钢管混凝土的弹性极限荷载.

2.2 弹性极限荷载参数分析

2.2.1 初应力度

图 1 给出了不同长细比 (λ) 试件的弹性极限荷载 N_e 与初应力度 (β) 的关系曲线有限元计算结果,其中虚线表示由于初应力过大,空钢管构件的破坏荷载.由图 1 可知,试件弹性极限荷载明显随着初应力的增大而下降.初应力度在 0.6 之前,弹性极限荷载随初应力度的增大基本呈线性减小.初应力度达 0.6 之后,弹性极限荷载随初应力增大而减小的斜率明显增大,但当初应力大到一定值时,这种减小趋势又有所减缓.换言之,在初应力度大于 0.6 之后,弹性极限荷载与初应力之间呈非线性关系.

此外,对于短柱,初应力度达到 1.0 时,空钢管将出现强度破坏;对于中长柱或长柱,初应力度 (初应力度小于 1.0 的某个值) 还有可能使空钢管发生弹塑性或弹性失稳破坏,称这个值为初应力界限值,文献 [2] 以曲线的形式给出了 Q235 钢和 Q345 钢的界限初应力值,该值也可通过有关钢结构规范^[5] 查到.初应力还有可能使空钢管发生局部屈曲破坏,这主要靠径厚比的限制来防止.

因此,在实际工程中应限制初应力小于初应力临界值.对于以容许应力法 (弹性极限荷载) 为设计计算理论时,为减小初应力对弹性极限荷载减小的影响,还可限制初应力度小于 0.6

2.2.2 长细比

图 2 为不同初应力度 (β) 时试件的弹性极限荷载与长细比 (λ) 的关系曲线有限元计算结果 (如同图 1, 虚线表示空钢管构件的破坏荷载).由图 2 可知,随着长细比的增加,在相同初应力度下试件弹性极限承

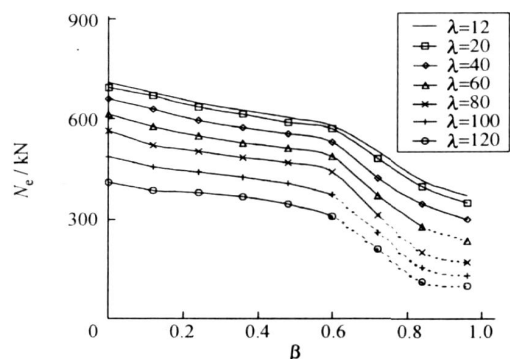


图 1 弹性极限承载力与初应力度的关系曲线
Fig 1 Curves of elastic ultimate load-initial stress degree

载力不断减小, 其减小趋势基本成非线性下降, 初应力度的增加几乎不影响其下降趋势, 各曲线也基本保持为同步下降.

2.3 弹性极限荷载实用计算方法

由图 1、图 2 可以看出, 以初应力度或长细比为参数的各构件弹性极限荷载的关系曲线基本平行, 二者对弹性极限荷载的影响基本相互独立, 可以采用分离变量法的方法考虑它们对弹性极限荷载的影响, 即

$$N_e = K_c \cdot K_l \cdot N_e^0 \quad (1)$$

式中: N_e 为钢管混凝土轴压构件的弹性极限荷载; K_c 为初应力影响系数; K_l 为长细比影响系数; N_e^0 为未考虑初应力和长细比影响的钢管混凝土轴压构件的弹性极限荷载.

$$N_e^0 = f_s A_s + f_c A_c \quad (2)$$

式中: f_s 和 f_c 分别为钢材的屈服应力和混凝土的弹性极限应力, $f_c = 0.8 \times 0.67 \times f_{cu}$, f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; A_s 和 A_c 分别为钢管和混凝土的截面面积.

对图 1 和图 2 弹性极限荷载的有限元计算值, 应用回归方法, 对式 (1) 中的 K_c 和 K_l 进行曲线拟合. 这些算例以文献 [2] 试件为基本构件, 初应力度为 0.0~0.96, 长细比为 12~120, 共有 90 个构件.

根据上节分析, 初应力应小于临界值且不大于 0.6, 所以下面的分析仅考虑初应力度小于 0.6 的情况. 从图 1 可知, 此时初应力度与弹性极限荷载的关系为线性关系. 通过回归拟合 (均值为 1.068, 方差为 0.057), 得出了初应力影响系数 K_c 与初应力度 的关系式:

$$K_c = 1 - 0.305 \quad (3)$$

从图 2 可知, 长细比与弹性极限荷载成曲线关系, 将其拟合成二次抛物线, 得出长细比影响系数 K_l 与长细比参数 $x = \lambda/16$ 的关系式 (均值为 1.061、方差为 0.035):

$$K_l = -0.00567x^2 - 0.0156x + 1.0 \quad (4)$$

3 塑性和稳定极限荷载

3.1 塑性和稳定稳定极限荷载的参数分析

图 3 给出了具有不同初应力的钢管混凝土轴压柱极限承载力与长细比的关系曲线. 与其它轴压柱相似, 钢管混凝土轴压柱, 也可分为短柱、中长柱和长柱 3 种, 如图 3 所示.

短柱属于强度破坏, 其极限承载力也就是构件的强度, 由于钢管混凝土具有很强的塑性性能, 因而也称之为塑性极限承载力, 所对应的荷载称为塑性极限荷载, 与上节的弹性极限荷载相对应, 工程应用中的塑性破坏对应的界限长细比大致取值为 16 左右 [6, 7].

钢管混凝土轴压构件塑性极限荷载 (强度) 的定义有多种方法. 在我国常用的钢管混凝土结构设计规程中, CECS28: 90 [8] 以最大荷载为极限荷载, JGJ01 - 89 [9] 视钢管混凝土为塑性材料, 取其屈服时的应力为强度值, DL/T 5058 - 1999 [10] 以钢管应变达到 3.000×10^{-6} 时所对应的荷载值 N_y 为极限荷载. 在上述三本规程中, 只有 DL/T 给出了有初应力构件的

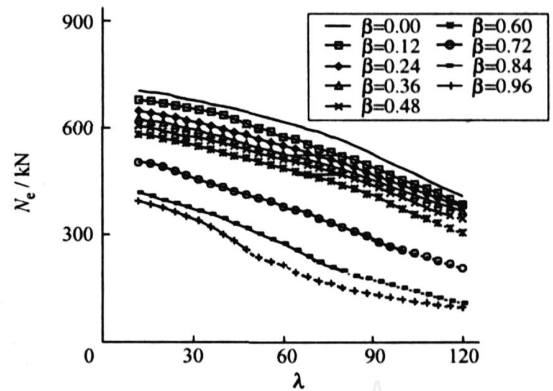


图 2 弹性极限承载力与长细比的关系曲线

Fig 2 Curves of elastic ultimate load-slenderness ratio

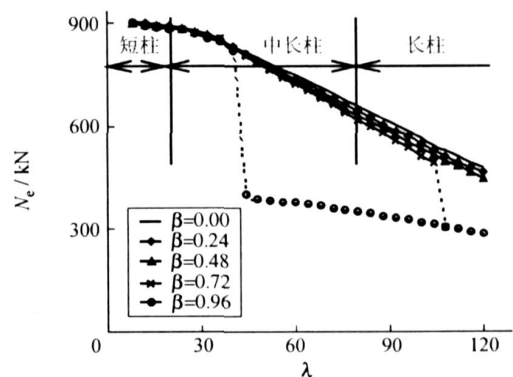


图 3 极限承载力与和长细比的关系曲线 ($\lambda < 120$)

Fig 3 Curves of elastic ultimate load-slenderness ratio

计算方法, 因此, 本文也采用 N_y 为极限荷载进行分析. N_y 计算时, 对于有初应力的构件, 钢管的应变应包含钢管初应力所对应的初应变.

从图 3 可以看出, 短柱的极限荷载与长细比的关系曲线的下降斜率很小, 构件属强度破坏, $P - \delta$ 效应很小, 工程应用时可不考虑长细比的影响.

同时, 短柱时, 具有不同初应力度的各构件的曲线几乎重合, 说明初应力影响很小. 更进一步的分析表明, 初应力会使塑性限承载力有所降低, 但降低幅度很小, 最大仅 4%, 工程应用时也可以忽略此影响.

对于中长柱, 它属于弹塑性失稳破坏, 长细比对构件的稳定极限承载力影响很大. 与此同时, 初应力对承载力的影响也增大, 各曲线的分离明显, 这是因为钢管初应力的增大使构件的抗弯刚度降低, 影响到构件的稳定承载力.

文献 [7] 通过一系列分析认为, 对于工程应用当承载力影响控制在 5% 以下时, 建议对于采用 Q345 和 Q390 钢的构件, 构件长细比为 70 ~ 100 时, 可限制 $\lambda_0 \leq 0.6$, 而其它情况以及采用 Q235 钢时, λ_0 值可不加限制. 上述的 λ_0 为试验中采用的初应力比值 $\lambda_0 = \sigma_s / f_s$, 设计中采用的比值是 $\lambda_0 = \sigma_s / f$ (f 为钢材设计强度), 所以对长细比为 70 ~ 100 的 Q345 和 Q390 钢的钢管混凝土构件, 限制的 λ_0 值应为 0.65.

与以往的研究相同, 本文的分析表明, 初应力对稳定极限承载力的影响并不大, 算例中最大的下降幅度仅在 10% 左右, 其影响明显小于初应力对弹性极限荷载的影响. 从这一点来说, 如果在设计计算时考虑了初应力对承载力的影响, 当采用极限状态法时, 可以不考虑对初应力的限制; 如果下降幅度小于 5%, 可以不考虑初应力的影响, 可限制初应力度小于 0.3.

中长柱和长柱的界限长细比是当构件为弹性失稳破坏时对应的长细比, 其值与构件的材料属性和截面尺寸相关, 实际应用中的取值范围多为 80 ~ 100. 调查分析表明^[4], 钢管混凝土单圆管拱桥等效梁柱的长细比一般在 80 ~ 120. 因此, 钢管混凝土单圆管拱肋成桥后基本上不会出现面内弹性失稳现象.

钢管混凝土构件当长细比增大到一定值时, 将会出现弹性失稳 (图 3 中只给出了部分曲线), 此时的极限承载力指的是弹性分支屈曲临界荷载, 初应力对构件的稳定临界荷载的影响进一步加大. 实际上, 当构件长细比很大时, 初应力极易使空钢管出现弹性分支失稳 (如图 3 中虚线所示). 工程应用中一般要防止构件出现弹性分支屈曲出现. 具体而言, 对于有无初应力的构件, 应防止空钢管的弹性分支屈曲; 对于无初应力的构件, 应防止钢管混凝土的弹性分支屈曲.

3.2 塑性和稳定极限荷载的计算方法

DBJ13 - 51 - 2003^[11] 给出的初应力对钢管混凝土轴压构件极限荷载 N_u 的计算方法为:

$$N_u = K_p \cdot \lambda_1 \cdot N_y \tag{5}$$

式中: K_p 为初应力影响系数; λ_1 为长细比影响系数; N_y 为未考虑初应力和长细比影响的钢管混凝土轴压构件的塑性极限荷载.

λ_1 和 N_y 的计算见文献 [10], K_p 的计算为:

$$K_p = 1 - f(\lambda) \cdot (\sigma_s / f) \tag{6}$$

$$\text{其中: } f(\lambda) = \begin{cases} 0.002125 - 0.02 & (\lambda \leq 80) \\ -0.0000203125 \lambda^2 + 0.004375 - 0.07 & (\lambda > 80) \end{cases} \tag{80}$$

式中: λ 为试件长细比, σ_s 为初应力度, K_p 为单根圆管空钢管稳定系数.

应用该规程计算所得的钢管混凝土轴压构件的极限荷载 ($\lambda_0 = 120$, $\sigma_s = 0.8$) 与有限元值相比, 均值为 1.083, 方差为 0.1551, 表明采用公式 (5) 基本上是可行的.

4 弹性极限荷载与塑性或稳定极限荷载的比较

以文献 [2] 的构件为基本构件, 应用有限元进行了初应力对钢管混凝土轴压构件受力性能和承载力的分析. 分析的参数包括长细比和初应力度, 其中, 长细比为 12 ~ 120, 初应力度为 0.0 ~ 0.96, 共计 90 个构件. 限于篇幅, 图 4 的构件荷载 - 纵向变形关系曲线只给出了长细比分别为 12 和 72 的构件在初应力度为 0.0 ~ 0.96 时的荷载 - 纵向变形曲线, 并以虚线 1 和虚线 2 划出了弹性极限荷载和塑性或稳定极限荷载大致位置. 表 1 为 90 个构件的弹性极限荷载与塑性或稳定极限荷载的比值, 表中 “ - ” 表示构件空钢

管在该初应力时出现了破坏.

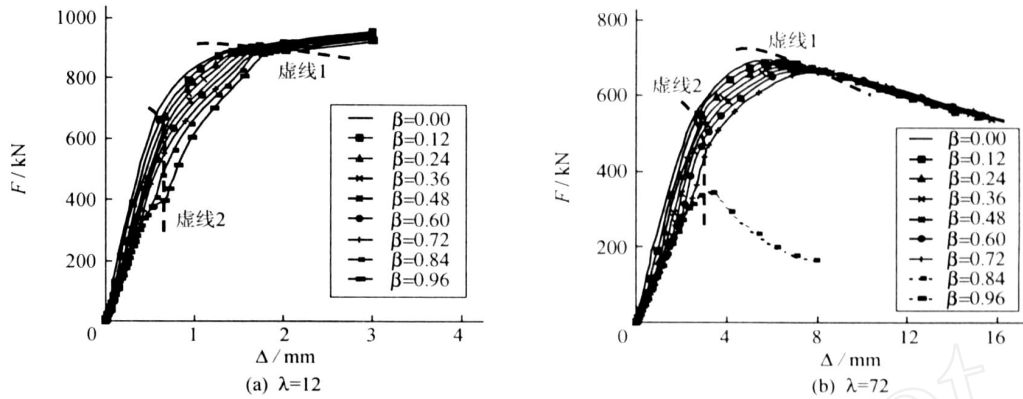


图 4 荷载 - 纵向变形关系曲线

Fig 4 Load-deformation curves

从图 4 和表 1 可以看出, 弹性极限荷载与塑性或稳定极限荷载的比值随着初应力度的增大而减小; 当初应力度小于 0.6 时, 其值随着长细比的增大而增大, 当初应力度大于 0.6 时, 其值随着长细比的增大而有所减小. 当长细比为 12~36 时, 其值从 0.76 减小至 0.38, 减小幅度达到 2 倍左右, 说明初应力对弹性极限荷载降低的影响远大于对塑性极限荷载的; 当长细比超过 100 时, 比值降低的幅度有所减缓.

表 1 弹性极限荷载与塑性或稳定极限荷载的比值

Tab 1 The ratio of elastic ultimate load and plastic or stability ultimate load

	=0.0	=0.12	=0.24	=0.36	=0.48	=0.60	=0.72	=0.84	=0.96
12	0.767	0.749	0.713	0.688	0.668	0.643	0.558	0.456	0.432
24	0.776	0.750	0.712	0.685	0.660	0.640	0.544	0.441	0.413
36	0.784	0.759	0.711	0.684	0.662	0.631	0.530	0.420	0.381
48	0.809	0.770	0.734	0.702	0.684	0.656	0.526	0.410	-
60	0.826	0.776	0.746	0.719	0.702	0.675	0.525	0.386	-
72	0.848	0.788	0.764	0.745	0.727	0.692	0.521	-	-
84	0.861	0.810	0.785	0.764	0.749	0.695	0.520	-	-
96	0.862	0.817	0.796	0.778	0.755	0.693	0.500	-	-
108	0.862	0.820	0.812	0.797	0.756	0.602	-	-	-
120	0.864	0.821	0.818	0.803	0.761	0.597	-	-	-

总之, 初应力度对构件弹性极限荷载的降低作用要远大于对塑性或稳定极限荷载的影响, 因此, 随着初应力的增大, 前者对于后者的比值越来越小. 也就是说, 以弹性极限荷载为控制的容许应力法, 对于初应力越大的构件, 计算结果越保守. 从文献 [1] 分析可知, 钢管混凝土拱桥中初应力较大, 跨径越大初应力也越大, 应用容许应力法也越不合理. 因此, 本文建议钢管混凝土拱桥的设计计算采用极限状态法.

采用极限状态法时, 如果设计计算中不考虑初应力对构件承载力的影响, 可限制初应力度小于 0.3. 如果在设计计算中考虑了初应力度对极限承载力降低的影响, 则对初应力度可以不加限制. 当然, 无论何种情况, 初应力作用时均应保证空钢管结构在施工阶段的安全.

5 结语

1) 无论是试验室中同时受力的钢管混凝土轴压构件, 还是实际桥梁中考虑了初应力和混凝土徐变的钢管混凝土拱肋, 采用容许应力法计算的弹性极限荷载, 连两种材料的弹性极限荷载的简单叠加都无法达到, 更不用说组合作用使承载力提高的部分了. 因此, 现有的容许应力法存在着明显的不合理之处. 从根本上来说, 应采用极限状态法. 在当前缺乏专门规范、仍有相当多设计人员采用容许应力法的情况下,

建议应用容许应力法计算钢管混凝土构件弹性极限荷载时,对于合理匹配的钢管混凝土构件,以钢管的应力来控制,而不考虑混凝土的应力。

2)无论采用容许应力法还是极限状态法,初应力都应该在施工阶段空钢管受力的安全范围内。

3)初应力的存在使构件弹性极限承载力的下降明显,当初应力度小于 0.6 时,其下降趋势基本成线性关系,当初应力度大于 0.6 时,初应力度对其弹性极限荷载的影响显著增加。因此,如果实际工程中对于以弹性极限荷载为控制荷载时,可限制初应力度小于 0.6。本文在数值计算的基础上通过回归给出了钢管混凝土构件弹性极限荷载计算公式,可供工程应用参考。

4)初应力对钢管混凝土轴压构件塑性或稳定极限荷载降低的影响相对来说不大。本文的数值计算结果表明 DBJ 13 - 51 - 2003 给出的初应力对钢管混凝土轴压构件极限荷载的计算方法基本上是可行的。如果设计计算中考虑了初应力对塑性或稳定极限荷载的影响,对钢管混凝土构件受力可以不考虑对初应力的限制。

5)弹性极限荷载与塑性或稳定极限荷载的比值随着初应力度度的增大而减小。初应力越大,以弹性极限荷载为控制的容许应力法计算结果越保守。对于初应力度较大的钢管混凝土拱桥,建议采用极限状态设计方法。

6)采用极限状态法时,如果设计计算中不考虑初应力对构件承载力的影响,可限制初应力度小于 0.3。如果在设计计算中考虑了初应力度对极限承载力降低的影响,则对初应力度可以不加限制。当然,无论何种情况,初应力作用时均应保证空钢管结构在施工阶段的安全。

参考文献:

- [1] 黄福云,陈宝春. 钢管混凝土拱桥初应力问题研究综述 [J]. 公路交通科技, 2006(11): 68 - 72
- [2] 黄福云,陈宝春. 初应力对钢管混凝土轴压构件受力性能影响研究 [J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(2): 272 - 277.
- [3] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥实例集(一) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [4] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥 [M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [5] GB 50017 - 2003 钢结构设计规范 [S].
- [6] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [7] 钟善桐. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] CECS 28: 90 钢管混凝土结构设计与施工规程 [S].
- [9] JCJ 01 - 89 钢管混凝土结构设计与施工规程 [S].
- [10] DL/T 5085 - 1999 钢管混凝土组合结构设计规程 [S].
- [11] DBJ 13 - 51 - 2003 钢管混凝土结构技术规程 [S].

(责任编辑: 沈芸)