

文章编号: 1002-0268 (2006) 11-0068-05

钢管混凝土拱桥初应力问题

黄福云, 陈宝春

(福州大学 土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 钢管混凝土结构在施工过程中会在钢管内产生初应力, 因此综述了钢管混凝土柱的初应力问题和现有构件的研究成果, 并在此基础上分析了几座已修建的不同跨径及截面形式的钢管混凝土拱桥的初应力度度的范围, 同时对钢管混凝土拱桥的初应力问题进行了初步探讨, 最后提出了钢管混凝土拱桥初应力问题的研究方向及建议。

关键词: 钢管混凝土; 拱桥; 初应力度; 极限承载力; 初应力

中图分类号: TU528.59; U448.22 **文献标识码:** A

Review of Initial Stress on Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge

HUANG Fu-yun, CHEN Bao-chun

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

Abstract: The steel tube of Concrete Filled Steel Tubular (CFST) structure will produce initial stress while in the processing of construction. The initial stress problems of CFST architecture columns were reviewed, and based on the researching result of the existing members, the initial stress's degree about several existing kinds of different span and section-shape CFST arch bridges has been analyzed and the initial stress problems of CFST arch bridge were preliminary discussed. In the end, some problems that need to be solved about CFST arch bridge were indicated and its research and advice also presented.

Key words: Concrete Filled Steel Tube; arch bridges; degree of initial stress; ultimate carrying capacity; initial stress

0 概述

钢管混凝土结构在房屋柱子和拱桥中得到了广泛的应用。钢管混凝土柱的施工工序, 一般是先安装空钢管, 利用钢管作为支架与模板灌注管内混凝土。钢管混凝土拱桥的施工过程, 也是先安装空钢管拱肋, 然后再向管内灌注混凝土。因此, 无论是建筑物中的钢管混凝土柱还是钢管混凝土拱桥中的拱肋, 在管内混凝土形成强度前, 空钢管结构都要承受自重与混凝土的重量等, 因此在钢管与混凝土作为组合结构共同承受荷载之前, 空钢管中已产生了初应力和初应变, 这就是钢管混凝土结构中钢管的初应力问题, 简称初应力问题。对钢管混凝土构件的初应力问题已开展了一些研究。对钢管混凝土拱桥初应力问题也已引起重

视, 但研究还未真正开始。本文将在钢管混凝土初应力问题研究进展综述的基础上, 提出钢管混凝土拱桥初应力问题研究的方向和建议。

1 钢管混凝土构件初应力问题研究现状

1.1 理论研究

对钢管混凝土柱的初应力的研究, 主要集中在单圆管构件上, 包括轴压、偏压构件及受扭构件。其研究方法大致可分为两类, 一类是基于钢管混凝土统一理论的数值分析方法, 本文简称统一理论法, 该方法较全面的分析了初应力大小、构件的长细比、截面含钢率、钢材和混凝土的强度以及偏心率大小等因素的影响规律; 一类则是根据钢管和混凝土的屈服准则, 计入钢管初应力影响建立的极限平衡方法, 本文简称

收稿日期: 2005-06-29

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

作者简介: 黄福云 (1979 -), 男, 江西丰城人, 博士研究生, 研究方向为组合与复合桥梁结构. (huangfuyun @fzu.edu.cn)

为极限平衡法, 该法主要分析了套箍系数的影响, 其他影响因素则没有作深入探讨, 还有待完善。

1.2 试验研究

钢管混凝土初应力是指钢管与混凝土还未形成组合构件时, 钢管内所存有的初始应力, 简称初应力^[1], 通常用初应力度来描述初应力的程度。所谓初应力度 (σ_0) 是指钢管拱肋的初始应力与其屈服强度之比, 即 $\sigma_0 = \sigma / f_s$, 其中, σ_0 为初应力的值, f_s 为钢材的屈服强度。显然, 初应力度只与初应力大小和钢材的材质有关, 但有的文献也与钢管的稳定系数 ϕ_s 有关^[2], 即 $\sigma_0 = \phi_s f_s$ 。

钢管初应力的存在, 占有了钢管承载力的一部分, 显然将影响随后钢管和核心混凝土共同受力阶段的开始和终了。同时, 由于初应力的存在, 钢管屈服阶段将提前, 从而改变钢管混凝土的弹塑性工作阶段, 使其刚度下降。

文献 [3] 取构件纵向应变 $\mu = 0.003$ 时的钢管混凝土短柱的承载力为极限承载力, 同时通过试验研究认为, 初应力对钢管混凝土构件的极限承载能力和变形有影响。钢管的初应力和初应变对组合弹性模量 E_{sc} 和组合强化模量 E'_{sc} 影响不大, 对组合屈服点基本没影响, 主要的影响是弹塑性阶段扩大了, 组合切线模量也发生了变化。钢管初始应力对钢管混凝土轴心受压构件工作性能的影响典型曲线图见图 1。图中 $\bar{\sigma}$ 为试件平均应力, $\bar{\epsilon}$ 为纵向应变。曲线 (1) 为钢管无初始应力钢管混凝土构件的 $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ 曲线, a 点为组合比例极限 f_{sc}^p , b 点为组合屈服点 f_{sc}^y 。 oa 段为钢管混凝土组合材料的弹性阶段, a 点相应于钢管应力达到钢材的比例极限; b 点对应的纵向应变为 3000μ 。曲线 (2) 为钢管有初应力的钢管混凝土构件的 $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ 曲线, a' 为钢管达到比例极限点, b' 为有初应力时的极限承载力点。

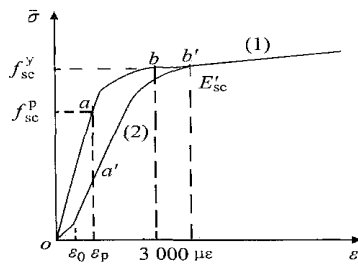


图 1 钢管混凝土初应力影响应力-应变曲线

Fig. 1 Influence of CFST initial stress on stress-strain curves

文献 [4] 对圆钢管混凝土轴压构件的初应力问题进行了试验研究与分析, 修正了不考虑初应力时的

钢管混凝土轴压构件各组合性能标准值, 包括轴心受压组合强度标准值、轴压组合比例极限、抗压组合模量。试验研究表明, 钢管初始应力和初始应变对轴压短柱的极限承载力、组合弹性模量和组合强化模量没有影响, 主要影响表现在弹塑性阶段的提前出现和组合切线模量的变化。而对于长试件, 在不考虑初始缺陷的情况下得到了其有初应力时的稳定系数 ϕ 与无初应力时的稳定系数 ϕ_0 的比值 K , 该比值主要与钢材种类、长细比以及初应力度 3 个参数有关。

文献 [5] 对钢管有无初应力的圆钢管混凝土偏压试件承载力的影响进行了 32 个构件的试验研究。试验表明, 在长细比较小的情况下, 有初应力构件的挠度比无初应力构件的挠度大, 初应力越大, 对应的挠度越大, 降低了钢管混凝土构件的刚度。当接近强度极限时, 初应力对钢管混凝土构件的承载力影响不大, 且承载力随含钢率的降低而降低。在长细比较大的情况下, 有初应力的钢管混凝土构件的挠度同样比无初应力的挠度大, 而且在压溃时, 有初应力构件的稳定承载力有所降低, 并且初应力越大, 降低得越多, 随着偏心距的增大, 构件的承载力下降。

文献 [6~8] 在钢材随动强化模型和混凝土界面模型的基础上编制了计算有初应力的钢管混凝土压弯扭构件全过程曲线的非线性有限元程序, 对钢管有初应力的圆钢管混凝土压弯扭构件进行了较系统的理论分析, 给出了考虑钢管初应力影响时的圆钢管混凝土构件承载力计算的统一理论计算公式。

文献 [9, 10] 进行了 14 个有无初应力的方钢管混凝土构件的试验研究, 建立了考虑钢管初应力影响时钢管混凝土构件荷载-变形全过程关系曲线的数值分析模型, 提出了考虑钢管初应力影响时钢管混凝土构件承载力实用验算公式, 在分析了长细比、截面含钢率、荷载偏心率以及初应力度等影响因素的基础上, 得出了承载力的简化计算公式。

文献 [11] 在极限平衡法的基础上, 分析了初应力对圆钢管混凝土轴压短柱极限承载力的影响。分析认为当套箍系数 λ 不变, 初应力 σ_0 小于典型受力状态下的钢管极限竖向应力时, σ_0 对极限承载力无不利影响; 当 σ_0 大于典型受力状态下的钢管极限竖向应力时, σ_0 对极限承载力的不利影响随初应力度度的增加而加大。此外, 当初应力度不变时, 随着 λ 的增加, σ_0 对极限承载力的不利影响会减少。

文献 [12] 取钢管混凝土短柱的受力与变形曲线中的极限点为极限承载力, 通过试验研究认为, 在相同的边界条件下, 钢管先受力、混凝土先受力和钢管与混凝土

土同时受力的3种钢管混凝土短柱的受力性能只是对受力过程有所影响,而对极限承载力影响较小。

1.3 应用研究

建筑物中钢管混凝土柱初应力度的范围未见相关文献专门的研究,只是作为一个具体的参数进行试验研究,参数值的范围为0.0~1.0。在实际工程中,针对高层和超高层建筑中的柱,为使初始应力的影响在可忽略范围内,即使其初应力度都控制在0.6以下^[13~14],根据此控制值来控制混凝土的浇灌层数。

文献[2]规定,在浇灌混凝土时,由施工阶段荷载引起的钢管初始最大应力值不宜超过 $0.35f_s$,且不应大于 $0.8f_s$ 。若超过 $0.3f_s$,应考虑钢管初应力对钢管混凝土构件承载力的影响,即在一次加载方法计算所得承载力的基础上乘以钢管初应力影响系数。

在钢管混凝土拱桥设计时,一些文献对初应力的影响采用建筑物中柱的应用方法,即限制初应力度在某一范围内时可以不预考虑其影响。对采用Q345钢(16Mn钢)、长细比 $(4L/D)$ (L 为构件长, D 为管径)小于100,可限制初应力度0.6,采用Q235钢(A3钢)时,则值可不加限制。采取限制初应力度小于0.6以下的方法时,初应力对极限承载力的影响在5%以内^[14~17]。

结构和构件在结构分析上有所不同,因而在极限承载力的分析研究上,提出的影响参数也就不同,不能简单的套用^[18],建筑结构柱的初应力研究成果是否能应用于拱桥中,还没有文献对其进行研究。但结构是以构件为基础,因而构件的研究成果可为结构的研究提供一定的借鉴^[19~24],对石潭溪大桥拱肋作初应力分析就采用建筑结构柱的成果来验算^[25]。

2 钢管混凝土拱桥中初应力度的桥例分析

钢管混凝土拱桥结构形式多样,适用的跨径范围也大,其拱肋断面有单圆管、哑铃形和桁式等,其断面形式主要与跨径有关。单圆管截面主要用于跨径不大(80 m以下)的城市桥梁和人行桥中。哑铃形断面应用的跨径从几十米到160 m,以100 m附近为多。跨径超过120 m以后,大部分采用桁式断面。而钢管混凝土拱桥的初应力度与其跨径有很大的关系,因此本文选择了单圆管、哑铃形和桁式断面的拱桥共4座,对其初应力度进行分析。

2.1 单圆管拱

福鼎市山前大桥是1座钢管-钢管混凝土单圆管复合拱桥,即仅在拱肋的拱脚段充填混凝土,其余部分仍为空钢管,钢材的材质为Q235钢。该桥主跨采

用墩中心距为80 m的下承式刚架系杆拱,净跨径75 m,净矢高为15 m,净矢跨比为1/5,拱肋间距13.30 m。有限元分析结果表明,最大应力产生在浇灌完混凝土后的拱脚处,其值为33.4 MPa,初应力度为14.2%。

2.2 哑铃形拱

郑州黄河公路大桥是京珠国道主干线跨越黄河天堑的特大型桥梁,该桥采用8×100 m的下承式钢管混凝土系杆拱桥(刚性系杆),计算跨度95.5 m,矢跨比1/4.5。拱轴线采用悬链线,拱轴系数 $m=1.347$,钢材屈服强度为325 MPa。本文对该桥施工阶段进行了初应力分析,由于该桥为哑铃形断面形式,拱肋由上下两弦管组成,混凝土浇灌顺序显然将会影响初应力的大小。对上弦管,在架设空钢管阶段和浇灌管内混凝土时,钢管内产生的应力都在20 MPa范围以内,最大应力发生在上弦管拱顶段附近区域。对下弦管,在架设空钢管阶段,管内最大应力发生在拱肋约1/8截面处,浇注上弦管和下弦管时,最大应力逐渐移向拱脚段处。在拱脚段附近区域下弦管应力大于上弦管管内应力,在拱顶段附近区域,上弦管管内应力要大于下弦管应力。将各阶段应力进行叠加后可知,以下弦管拱脚段应力最大,其值为66.2 MPa,而上缘钢管应力一般都要大于下缘钢管应力。初应力度为22.6%。

2.3 桁式拱

福建闽清石潭溪大桥为一净跨径136 m钢管混凝土桁架拱,矢跨比为1/5,拱轴线为悬链线, $m=1.167$,主拱圈采用4根550×8 mm上下平联和219×8 mm的直腹杆和斜腹杆组成高3.0 m、宽1.6 m的桁式主拱肋,钢管均为A3钢,管内灌注C40混凝土。

石潭溪大桥实际施工时,管内混凝土未达到28 d龄期就再浇下一根,一次浇1根,由于2根拱肋是通过横撑与K撑相联系的,因此浇1根拱肋时对另一拱肋影响不大,施工单位对各弦管进行编号,并根据实际安排浇注顺序为:1、5、2、6、3、7、4、8号管。第1号与第5号管采用分仓浇注,等到1号与5号管内混凝土强度达到60%后再浇注下一根,其他管则由浇注顺序从拱脚到拱顶连续浇注。采用有限元程序模拟施工过程分析后得最大应力在内侧下弦管拱脚处,其应力为96.59 MPa,初应力度为32.2%。

文献[26]对广州丫髻沙大桥主拱施工过程进行了应变测试,测试结果表明,计算值与试验值有一定的误差,初应力度小于50%。

由于计算的应力值是弦管截面的平均应力,该值

没能反映拱肋断面中的弦管截面应力是不同的这一特点, 而且从主拱施工过程中实测控截面应力的弦管截面中可知, 截面的顶、底和左右各点的应力有较大的不同, 应力梯度变化有的也很大, 这在理论计算的过程中不能体现出来, 因而还有待进一步的讨论。此外, 应变测试时发现, 温度的变化对钢管拱肋的初始应力有较大的影响, 环向初始应力也较大。

从以上 4 个实例来看, 钢管混凝土拱桥的初应力度一般大于 10% 而小于 50%。最大可达多少还不能下定论, 而建筑物中钢管混凝土柱子的初应力度一般控制在 60% 以下, 与之相比, 范围基本一致, 但由于所调查的范围有限, 只能算是初步的分析比较。

3 初应力对钢管混凝土拱桥受力影响的初步分析

3.1 初应力对容许应力验算的影响

应力验算原则是钢管应力和混凝土应力不大于各自材料的容许应力, 它包括施工阶段和使用阶段。由于钢管混凝土拱肋由钢管和管内混凝土组成, 目前工程界存在着两种设计计算方法。一种是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, 分别对钢管和混凝土的应力采用容许应力法进行验算。另一种方法, 则是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。

对组合结构, 当其处于弹性范围内时, 应力叠加法反映截面上不同材料的应力实际情况。若考虑极限承载能力, 应力叠加法及其所对应的容许应力法, 除了以某一点的屈服作为全截面屈服和全结构破坏的不合理性外, 对于组合结构它还忽略了各材料先后进入屈服引起的截面应力重分布, 使组合材料之间不能协调发挥作用。

如果钢管与混凝土是同时受力的, 以 Q345 钢管内填 C50 混凝土的钢管混凝土构件为例, 若以混凝土为标准材料, Q345 钢对 C50 混凝土的弹性模量之比为 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa} / 3.5 \times 10^4 \text{ MPa} = 6.0$, 而强度比为 $200 \text{ MPa} / 16 \text{ MPa} = 12.5$, 二者并不协调。在混凝土达到强度时, 钢材的强度才 96.1 MPa, 离实际强度 200 MPa 差 2.08 倍。反过来如果设计钢材达到强度, 则混凝土的应力将超出其容许应力的 2.08 倍。所以在设计上一般采用前者, 因此它不仅没有发挥钢管混凝土材料由于钢管对核心混凝土套箍作用而使混凝土强度得到提高的优势, 而且连两者之间按钢筋混凝土计算的极限承载能力都未达到。

然而, 钢管混凝土拱桥在施工过程中, 钢管所受的初应力较大, 累加应力也较大, 以石潭溪大桥为例^[23], 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。如果在钢管混凝土形成后考虑到徐变因素, 钢管承受的应力往往反而成为设计控制应力。

钢管混凝土单圆管肋拱模型试验表明^[26], 当钢管上的最大应力达到屈服点时, 结构的荷载-挠度曲线仍然处于线性阶段, 更不用说达到极限承载力了。因此, 采用容许应力法进行成桥后的强度验算显然存在着明显的不合理之处。这也是设计规范从过去的容许应力法改为极限承载力验算的主要原因。如果设计计算方法退回到容许应力法, 则钢管混凝土在改变构件受力性能方面的优势将由此丧失殆尽, 甚至还不如普通钢筋混凝土^[27]。

3.2 初应力对拱肋刚度的影响

由于初应力的存在, 钢管提前进入塑性, 使钢管混凝土构件的刚度下降, 对于结构的变形、稳定都有较大的影响。钢管混凝土的主要优势在于抗压强度高, 因此被大量地应用于柱子、拱桥等以承压为主的结构中, 稳定问题突出, 刚度下降对稳定的影响是初应力研究中不得不讨论的问题。在已建的钢管混凝土拱桥中, 业已发现计算的挠度值往往小于实际的挠度值, 原因除管内混凝土徐变的外, 可能也有初应力引起刚度下降带来的影响。从构件的研究结果可知, 钢管混凝土拱桥的拱肋具有较大的偏心率及长细比, 在与初应力的共同作用下将引起一类弹性稳定系数的下降, 挠度也会增加, 同时刚度的下降也会引起几何非线性影响的增大。

3.3 初应力对极限承载力的影响

目前, 钢管混凝土构件的极限承载力的定义尚未统一, 如果以受力全过程中荷载最大值作为极限承载力, 则钢管初应力对极限承载力的大小影响不大, 若要简化设计计算, 可以对其忽略; 如果以应变达到一定值时所对应的荷载作为极限承载力, 则钢管初应力对极限承载力大小的影响应予以考虑。这里所指的极限承载力包含了几何非线性的影响, 因此是稳定极限承载力。

3.4 初应力对钢管局部屈曲的影响

钢管混凝土拱桥采用自架设的施工方法, 拱肋通过不断增大而形成, 同一拱肋中各圆管的受力不同, 同一圆管中各截面的内力不同, 同一截面中也存在应力梯度且钢管与混凝土的应力历史也不同。在这些效应累积的影响下, 有可能出现局部某些点初应力较

大, 从而引起钢管的局部屈曲。为此, 在进行应力计算时, 首先应从空钢管架设阶段开始考虑, 对每一阶段应力的变化都应了解, 追踪结构的应力历史, 此过程一般采用计算机程序来分析。

4 对钢管混凝土拱桥初应力问题研究的方向和建议

(1) 本文只对 4 座钢管混凝土拱桥的初应力度进行了调查, 每个不同的拱肋断面形式也只选取了 1 座桥例进行分析, 因而初应力度的范围还有待修正。此外, 初应力度及加载方式对钢管混凝土拱桥极限承载力的影响也有待深入探讨。

(2) 现有的试验研究主要集中在构件方面的研究上, 而结构的研究还未见文献论述, 且构件方面的研究也主要集中在单圆管方面, 对哑铃形和桁式构件的研究也未开展。

(3) 对容许应力法和极限状态法计算理论的研究还有待深入, 由于初应力的存在, 拱脚钢管的应力成为设计控制应力, 该应力值可能在未成桥状态下就达到规范容许应力值, 因而对施工阶段和使用阶段都以应力值来控制设计还有待探讨。

(4) 钢管混凝土拱桥拱肋大都采用桁式截面, 钢管直径大, 产生的初应力也大, 各弦管的初应力值也不相同, 这种不同必然会引起刚度的下降, 因而各弦管的刚度下降值也不一致, 从而导致每根弦管的刚度不相同, 差别有多大, 是否有影响, 也值得研究。

(5) 在进行管内混凝土浇注时, 往往管内混凝土强度还未达到设计强度时, 就开始进行下一根的灌注, 这必将对上一根管的应力产生影响, 由于初应力的定义是沿用建筑物中柱的概念, 没有涉及施工过程, 因而初应力的定义还有待统一。

(6) 在搞清初应力不利影响的基础上, 提出对初应力的限制条件以及设计计算中对初应力影响的考虑, 同时可考虑初应力对局部屈曲的影响。顺便指出, 由于初应力对钢管的影响, 因而管内灌注高强混凝土是否有必要, 也值得研究。

参考文献:

[1] 钟善桐. 钢管混凝土结构 (修订版) [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1994.

[2] 福建省工程建设地方标准 (2003 - 11 - 01), 钢管混凝土结构技术规范 [S].

[3] 钟善桐, 查晓雄. 钢管初应力对钢管混凝土构件承载力影响的研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, (3): 13 - 22.

[4] 黄世娟. 初应力对钢管混凝土轴压构件承载力影响的实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1995.

[5] 张晓庆. 初应力对偏心受压钢管混凝土构件承载力影响的实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1995.

[6] 查晓雄. 钢管初应力对钢管混凝土压弯扭构件工作性能影响的理论分析和试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1996.

[7] 查晓雄, 钟善桐. 用有限元分析初应力对钢管混凝土构件承载力影响的研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, (1): 41 - 49.

[8] 查晓雄, 唐家祥. 钢管初始竖向应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究 [J]. 华中理工大学学报, 1998, (8): 41 - 43.

[9] 尧国皇. 钢管初应力对钢管混凝土压弯构件力学性能的影响研究 [D]. 福州: 福州大学, 2002.

[10] 韩林海, 尧国皇. 钢管初应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究 [J]. 土木工程学报, 2003, (4): 9 - 18.

[11] 黄霆明, 李少云. 管壁初始竖向应力对钢管混凝土柱极限承载力的影响 [J]. 广东土木与建筑, 2002, (5): 6 - 8.

[12] 蔡绍怀. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1992.

[13] 钟善桐, 查晓雄. 高层建筑中钢管混凝土偏压柱施工初应力的限制 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, (1): 21 - 25.

[14] 查晓雄, 唐家祥, 钟善桐. 钢管混凝土高层及超高层建筑中平行立体交叉法施工及施工中初应力的影响 [J]. 工业建筑, 1998, (11): 32 - 34.

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

[16] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.

[17] 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.

[18] 于洪刚. 初始应力对大跨径钢管混凝土拱桥稳定承载力的影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通学院, 2003.

[19] 陈宝春, 陈友杰. 钢管混凝土拱肋拱面内受力全过程试验研究 [J]. 工程力学, 2000, (2): 44 - 50.

[20] 陈宝春, 秦泽豹, 彦坂熙, 陈友杰. 钢管混凝土拱 (单圆管) 面内受力双重非线性有限元分析 [J]. 铁道学报, 2003, 25 (4): 80 - 84.

[21] 欧智箫, 陈宝春. 钢管混凝土桁拱静力性能分析 [J]. 福州大学学报, 2000, (1): 62 - 67.

[22] 韦建刚, 陈宝春, 林英. 钢管混凝土拱面内多点对称加载试验研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34 (增刊): 102 - 106.

[23] 谢幼藩, 赵雷, 谢邦珠, 等. 用劲性骨架法建造大跨钢筋混凝土拱桥的施工安全度分析 [C]. 四川省公路学会桥梁学术研讨会文集. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.

[24] 京珠国道主干线新乡至郑州段高速公路郑州黄河公路二桥主桥上部结构设计计算书 [Z]. 福州: 福州大学, 2003.

[25] 陈宝春, 孙潮. 石潭溪大桥施工受力分析 [J]. 中国公路学报, 1998, (11): 51 - 57.

[26] 徐升桥. Y 髻沙大桥主桥设计研究 [J]. 铁道标准设计, 2001, (6): 2 - 7.

[27] 林嘉阳. 钢管混凝土 (单圆管) 单肋拱空间受力研究 [D]. 福州: 福州大学, 2004.

[28] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥发展综述 [J]. 桥梁建设, 1997, (2): 1 - 9.