

钢管混凝土拱桥计算理论研究进展

陈宝春

(福州大学)

摘要 综述了钢管混凝土拱桥设计计算理论的研究进展,着重刚度取值、内力计算、应力计算与验算、极限承载力验算、局部受力计算、稳定计算与验算、变形计算与验算和动力性能分析等,同时指出存在的主要问题和今后努力的方向。

关键词 钢管混凝土 拱桥 计算

中图分类号: U441 U498.22 **文献标识码**: A

文章编号: 1000-131X (2003) 12-0047-11

STATE - OF - THE - ART THEORY OF CALCULATION FOR CONCRETE - FILLED STEEL TUBULAR ARCH BRIDGE

Chen Baochun

(Fuzhou University)

Abstract

State - of - the - art theory of calculation for concrete - filled steel tubular arch bridge is reviewed and summarized with the emphasis on the rigidity, internal force, stress, ultimate load - bearing capacity, local bearing carrier, stability, deformation and dynamic property etc. of concrete - filled steel tubular arch bridge. Meanwhile, the existing main problems and the topics for further research are pointed out.

Keywords: concrete - filled steel tubular arch bridge, calculation

钢管混凝土拱桥在我国的发展已有十余年的历史,其计算理论也在不断的研究之中。文献 [1]、[2] 曾对其作过综述。然而,钢管混凝土拱桥计算理论还有许多问题有待进一步深入研究。交通部规范《钢管混凝土拱桥设计规范》也还在制定之中。本文综述了近几年在钢管混凝土拱桥计算理论方面的研究进展并提出进一步努力的方向,以供工程人员和理论研究者参考。

1 刚度取值问题

钢管混凝土由两种材料组成,管内混凝土是在钢管拱合拢后现浇的,因此在施工加载过程中管内混凝土的刚度取值和管内混凝土达到强度后拱肋断面的刚度取值都是计算中要考虑的一个问题,它对施工过程中成桥后拱肋的内力、应力、变形和稳定计算都有一定的影响

对于由多根钢管组成的拱肋,一般来说,管内混

凝土是逐根灌注的,为了缩短工期,通常前面一根管内混凝土强度达到 80% 左右就开始灌注下一根,因此施工过程中管内混凝土的刚度如何取值,就将影响到钢管与管内混凝土的应力分配,也影响到施工过程的线形控制和稳定计算。文献 [3] 对未达到强度时管内混凝土的刚度按对数曲线的取值方法进行计算。

成桥以后,钢管混凝土拱肋作为组合材料,其刚度的取值对结构的变形和稳定计算也有一定的影响,而且由于钢管混凝土拱桥一般为超静定结构,所以刚度取值对内力计算结果也有一定的影响。国内外现有的钢管混凝土的设计规程或规范对钢管混凝土材料的刚度计算存在着差异。文献 [2]、[4] 对此进行了比较。对钢管混凝土构件刚度,中国规范 CECS 28:90^[5] 和英国规范 BS5400^[6] 用钢管与混凝土刚度直接叠加的计算方法,其他规范则对混凝土刚度进行了不同程度的折减^[7~12]。因此,如何取值?不同取值对内力、变形和稳定的计算结果影响有多大?这些问题都有待研究。由于刚度取值对内力计算结果与对变形和稳定计算结果的影响不同,本文认为在没有定论之前宜分开取用。刚度大则超静定结构产生的附加内力也

收稿日期:2001-11-12,收到修改稿日期:2002-05-20

国家自然科学基金项目(50078016)

大,因此,内力计算时刚度宜取大值,即按中国 CECS 28:90^[5]和英国 BS5400^[6]取钢管与混凝土刚度直接叠加的计算方法;在计算变形和稳定时,则考虑对管内混凝土的刚度进行折减。但如何折减,则有待进一步的探讨。

2 内力计算

对于超静定的钢管混凝土拱桥,除了恒载和车辆、人群等活载之外,温度变化、混凝土收缩徐变引起的结构变形和支座的位移也会产生内力。

一般桥梁结构在计算温度附加内力时,基准温度取结构的合拢温度,计算温度根据建桥地区的气温条件确定。钢结构可按当地最高和最低气温确定;砖、石、混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土结构一般按当地月平均最高和最低气温确定。计算温度减去合拢温度(基准温度)即温度变化值。钢管混凝土拱肋因其材料、截面构成和施工方法等与其它拱桥不同,采用上述方法确定温度变化值并不合适。首先,钢管混凝土拱桥施工采用自架设方法,不存在实际的合拢温度。而且管内现浇的混凝土的水化热对钢管混凝土拱肋的温度场有很大的影响。其次,钢管混凝土拱桥为组合结构,组合材料的传热性能、截面的构成等不同与圬工拱桥、钢筋混凝土拱桥和钢拱桥,其计算温度值的取值也不同。

文献[13]、[14]对钢管混凝土拱桥温度问题进行了研究。文献[13]进行了三根管径为550mm的钢管混凝土构件温度场44天的实测和实桥浇筑混凝土过程的温度场实测,提出了拱肋截面温度场的差分计算方法和温度内力的有限元计算方法。在上述研究的基础上进行了实用算法的初步研究,提出钢管混凝土拱桥计算合拢温度的概念。认为钢管混凝土拱桥不能以空钢管的合拢温度作为结构温度内力计算的基准温度,而应该采用考虑管径大小、水灰比、空钢管合拢温度等因素的计算合拢温度,而年温度取值取钢筋混凝土结构的月平均温度偏小,取钢结构的极值温度则太高,取日平均温度较为合适。由于受地域和桥例研究数量的限制,实用算法的研究还有待深入。

除了结构线性温差引起的附加内力外,有些桥梁还存在着体系非线性温差引起的附加内力,如中承式拱桥桥面以上与桥面以下拱肋的温差、系杆拱桥拱肋与系杆的温差等等,这方面的研究尚未见有关报导。

已进行的少量的试验研究认为,在钢管混凝土构件中,核心混凝土因处于密闭保水状态下凝固,所以其收缩量大约仅为通常情况下的一半。对于极限承载

能力来说,混凝土的收缩影响不大^[15]。然而,收缩如同温度变化一样会在超静定拱中产生附加内力。因此,管内混凝土沿轴线方向的收缩量多大,需进一步的研究。

钢管混凝土拱桥在计算支座位移引起的结构内力方面,对于固定拱其计算方法与一般拱桥相同,但对于刚架系杆拱,由于在其它拱桥中少有这种结构形式,所以有必要对其进行探讨。

刚架系杆拱为超静定结构,桥梁上部、下部以及基础甚至地基连成一体,结构的超静定次数较多,受力复杂。由于其系杆刚度与拱梁组合体系中的系杆梁刚度相比小很多,特别对于大跨径桥梁,系杆拉力增量将产生很大的变形,而拱肋、系杆和墩柱固结在一起,根据位移变形协调条件,拱的水平推力的增量主要由桥墩和拱肋自身承受。因而考虑系杆变形后它是有推力的结构。系杆的作用是对拱施加预应力以抵消拱的大部分水平推力(主要是恒载产生的水平推力),因此通常把系杆看成体外预应力索。减去系杆承受的水平推力后余下的拱的水平推力一般来说不大,还可以通过适当的超张拉给予最大限度的减小,从这个角度看可以视为无推力拱。除在荷载增量下拱脚的水平位移外,拱脚与桥墩固结点处还存在转动的可能。目前的设计计算一般采用有限元方法,建模时将拱肋、系杆、墩台柱、基础和地基土构成一个受力整体,地基土用弹性支承来模拟其对桩的水平抗力。在计算系杆张拉力时,通常是将系杆的 EA 趋于无穷大, EI 趋于无穷小,计算在各级荷载下的系杆力。然后,再将系杆张拉力作为外力,将系杆抗拉刚度取实际刚度,计算拱肋的内力和系杆的附加力^[16,17]。然而,手算简化算法的计算模型和刚架系杆拱与其它拱桥结构的受力特点比较尚缺乏研究。

3 应力计算与验算

钢管混凝土拱桥采用自架设的施工方法,拱肋通过不断增加截面组成和面积而形成,同一拱肋中各截面的受力不同,同一截面中各弦管的内力不同,同一弦管中钢管与混凝土的应力历史也不同。进行应力计算就要从空钢管架设开始考虑,跟踪结构的应力历史。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。这种验算方法的合理性将在4.3节中讨论。

应力计算工作量大,只能采用计算机分析。采用通用程序分析时,有限元计算模型有两种。一种是采用全断面的杆单元,架设空钢管到管内混凝土开始形

成强度前,为钢管杆件,其后将钢管混凝土作为一个杆件,计算出内力后,再根据钢管和混凝土的刚度分配其应力。另一种计算方法是将钢管与混凝土各作为一个杆单元,若考虑二者完全粘结,则在节点处完全固结,否则采用铰接或采用无几何尺寸的联结单元。文献[18]提出了能适应这种截面材料与尺寸都在变化的分析方法并编制了相应的程序。

除了上述荷载应力外,在钢管混凝土拱桥计算中还要考虑钢管和混凝土由于受截面非线性温差、混凝土徐变、收缩引起的截面自应力。这种自应力在截面上自相平衡,不产生内力,不能通过求内力的方法求得。

研究表明,钢管混凝土拱肋截面温度场属于非线性温度场。在混凝土灌注后的一段时间内由于水化热的作用,管内混凝土的温度高于环境温度,截面上温度场从圆心向外呈内高外低状的非线性分布;在混凝土水化热放热结束后,钢管混凝土构件温度场相对滞后于环境温度的变化,越靠近圆心变化幅度越小,因此截面上的温度场也呈非线性分布。

非线性温度场可分解为“等效的线性温度场”和“等效的非线性温度场”。前者对超静定拱产生的温度附加内力在前一节已讨论。后者引起正截面的非线性变形受到平截面假定的约束而在截面上产生自相平衡的约束力,称为温度自应力,它对整个结构不产生内力和变形。文献[19]提出应用差分原理分析钢管混凝土拱肋非线性温差应力的计算方法,并进行了钢管混凝土桁拱和单圆管肋拱的两座实桥的桥例分析。计算结果表明,钢管混凝土拱桥线性温度应力与非线性温度应力接近或超过拱肋自重产生的应力。对于大体积混凝土结构,非线性温差是混凝土温度裂缝产生的主要原因。对于钢管混凝土拱肋,非线性温差主要引起钢管应力的增加,主要在施工应力验算时考虑。非线性温差自应力对成桥后拱的极限承载力可以认为没有影响。

核心混凝土的徐变问题,研究难度较大,迄今为止也十分有限。对万县长江大桥主要是外包混凝土的徐变问题进行了模型试验和有限元分析^[20],结果表明,受徐变的影响钢管骨架的应力增加,最大的可增加(40~50)%,而外包混凝土的应变增加、应力下降,施工过程中新混凝土在某些阶段还可能受拉。文献[21]对跨径338m、钢管直径为1220mm、壁厚16mm的某钢管混凝土桁拱的徐变影响进行了分析,结果表明,由于钢管直径较大,在混凝土的应力松弛仅为14%~15%的情况下,导致钢管应力增加达40%~50%。

在钢管混凝土构件中,由于管内混凝土密封在钢管中,没有水分的流失,其徐变特性应不同于普通干燥的混凝土。文献[15]通过对两批试验的分析认为,钢管混凝土的徐变早期发展很快,五个月时曲线趋平缓,一年后几乎停止。比单向受压混凝土的小很多,当含钢率 $\mu=0.05\sim 0.2$ 时,钢管混凝土的徐变约为单向受压混凝土的74%。徐变量与持荷值成正比。文献[22]的理论分析认为,虽然在常应力下钢管混凝土的初期徐变较小,但在对数时间坐标上,即使几十年后也不会趋于水平。因此,对于徐变引起钢管混凝土截面应力重分布的计算,关键在于对其徐变特性的了解程度,而目前这方面的研究还很不充分。在工程实践中,套用普通混凝土的徐变特性进行钢管混凝土拱桥的徐变应力计算显然存在着不合理之处。

与徐变密切相关的混凝土收缩也缺乏深入的研究。在钢管混凝土拱桥中,管内混凝土的收缩带动钢管的变形也会引起截面上的应力重分布。这个问题目前还没有被提出来。

当前在工程实践中,对于非线性温差自应力、混凝土收缩自应力均少有考虑,对于混凝土徐变自应力在采用容许应力法验算时考虑进去,但徐变模型一般是采用普通混凝土的徐变模型或对其参数进行一些修改。因此,今后对于各个自应力的计算以及相互之间的影响,还有许多工作要做。

4 极限承载力验算

4.1 理论与试验研究

虽然钢管混凝土拱桥作为新桥型,进行了相当多的成桥静载试验,但实桥测试时结构基本处于弹性阶段,无法反映出钢管混凝土拱的非线性性能和极限承载能力。对于模型试验,由于钢管管径小、管壁薄,模型制作成本高,钢管与混凝土共同作用性能受尺寸效应影响等等,使得模型试验困难。迄今为止,已进行的受力全过程的模型试验较少,且仅限于单圆管拱肋。

福州大学迄今共进行了共8个有关的面内受力模型试验^[23~25],其中一组模型设计跨径为460cm,拱肋为 $\phi 76 \times 3.792$ mm的钢管内灌C40混凝土,共2个模型,一个在 $L/4$ 点处加集中力,另一个在 $L/2$ 点处加集中力。另一组模型设计跨径为750cm,拱肋为 $\phi 121 \times 4.5$ mm,钢管内灌C40混凝土,共制作了10根,已进行了两根空钢管、两根钢管混凝土和两根拱脚段灌注混凝土的模型试验,加载方式分别为五点集中荷载的对称荷载和同一侧两点集中荷载的非对称荷载。

西南交大进行了钢管混凝土单圆管平行双肋拱和X型双肋拱(提篮拱)在面内和面外共同受力的全过程试验^[26]。模型拱的跨径为600cm,拱肋为 $\phi 82 \times 4\text{mm}$ 的钢管,内灌混凝土。平行双肋拱的宽跨比为1/20,X型双肋拱的拱顶宽跨比为1/40,拱脚宽跨比为1/20。

上述试验研究表明,钢管混凝土拱具有较好的弹塑性工作性能,与钢筋混凝土拱桥相比其弹性、塑性、延性均较好,与空钢管拱相比,刚度大、承载力高。模型试验研究反映出钢管混凝土拱桥的受力性能更接近于钢拱桥的受力性能,而钢拱桥的研究在我国很薄弱。当进入材料非线性后,钢管混凝土拱存在截面的应力重分布和结构的内力重分布现象。其塑性区域沿轴线方向的发展速度大于截面高度方向的发展速度,因而具有较大的塑性区,且结构受几何非线性的影响较大,其极限承载力不能忽略轴力在竖向挠度方向产生的附加弯矩,也就是说钢管混凝土拱的极限承载力计算应该考虑材料非线性和几何非线性的影响,是极值点失稳的极限承载力问题。只计材料非线性的小变形小应变的结构极限承载力的验算才是结构的强度验算,显然强度极限承载力是极值点稳定极限承载力的上限,因此,如果面内极值点稳定极限承载力验算通过则面内整体强度验算也一定通过。

模型试验由于前述的困难和成本较高,一些研究者进行了考虑双重非线性的数值计算模拟,希望能应用经少量试验验证的计算程序求得钢管混凝土拱的极限承载力,并应用程序进行大量的参数分析得出简化算法以供工程应用。在双重非线性分析中,几何非线性已有较成熟的算法,因此,材料非线性分析是其关键问题。

钢管混凝土的材料非线性本构关系数值模型主要有两大类。一类是有限元模型,它分别考虑钢管二维或三维和混凝土三维的本构关系,通过联结单元考虑二者之间的相互作用^[15]。由于混凝土材料的三维本构关系迄今尚无较成熟的模型,再加上钢管与混凝土的复杂的相互作用,因此,迄今尚未出现适用范围广、便于应用的此类模型。一些研究者在进行钢管混凝土拱双重非线性分析时采用了这种模型,将大量的精力集中于钢管混凝土短柱的本构关系的研究之上,未对拱的受力性能进行深入的分析,而提出的本构关系缺乏大量的钢管混凝土短柱试验结果的验证,研究结果并不理想^[27,28]。

另一类是纤维单元模型,钢管与混凝土均采用一维形式的本构关系模型,通过选择合适的参数与数学

模型,根据大量试验数据分析求得有关的系数,将钢管与混凝土的相互作用直接反映到钢管和混凝土以一维形式表达的本构关系之中。文献[29]、[30]分别从50根和300多根钢管混凝土构件的试验结果中分析得出了用紧箍系数表达的核心混凝土的本构关系模型,这两种模型是这类模型中较为成熟的两种模型。文献[26]、[31]应用钢管混凝土统一理论分别对钢管混凝土肋拱面外和面内受力全过程进行了考虑双重非线性的有限元计算,核心混凝土的本构关系模型,分别采用文献[29]和[30]的模型。计算结果与前述的试验结果比较表明,程序能够反映钢管混凝土肋拱受力全过程的基本特性,在结构受力前期二者吻合较好,但在后期计算结果偏离试验结果较大。分析认为,在受力前期,钢管混凝土拱以受压为主,截面数值积分所采用的材料轴压本构关系与实际较吻合,而在受力后期,拱以受弯为主(空间受力时还有受扭),截面数值积分所采用的轴压本构关系与实际情况有较大的偏离。因此,研究适合于钢管混凝土肋拱受力特性的材料本构关系是使钢管混凝土拱桥考虑材料非线性失稳计算方法更加适合实际情况的重要方面。为此,文献[32]进行了钢管混凝土偏心受压短柱的试验,在此基础上提出了修正的钢管混凝土偏压构件核心混凝土的本构关系,将其应用于钢管混凝土拱面内的双重非线性有限元分析中,后期与试验结果的吻合程度好于文献[29]的计算结果。

还有一些研究者或工程人员采用大型通用程序,将钢管混凝土构件采用理想弹塑性本构关系模型或其它的简化模型^[33]。由于将钢管混凝土视为理想弹塑性材料与实际材料存在着一定的差异,并不适合作为研究计算。对于实际工程计算,这种计算的安全系数的取值等问题也有待进一步的研究。

由于模型试验数量有限、计算机算法还不够成熟,所以得出较为适用的简化算法还有许多工作要做。文献[34]参照钢筋混凝土拱的算法探讨了对面内极限承载力验算将无铰拱拱肋等效成0.36S(S为拱肋弧长)钢管混凝土柱的计算方法,文献[23]应用这一方法对面内受力模型拱的计算表明,该方法偏于保守。

4.2 构件承载力验算

构件承载力验算包括前述将拱肋等效成梁柱的构件承载力验算和结构局部构件(如桁肋的弦杆)的承载力验算。由于桥梁设计规范中没有钢管混凝土构件承载力验算的内容,交通部《钢管混凝土拱桥设计规范》尚在制定之中,有些设计人员对钢管混凝土拱肋截面的验算套用钢筋混凝土构件的计算方法,将钢管

比拟成钢筋。显然这种算法是不合理的。因此许多研究者建议采用建筑方面的有关钢管混凝土结构的设计规程或规范进行钢管混凝土拱肋的构件承载力验算。由于公路桥梁规范与建筑规范存在着体系上的差异,在借用建筑方面的有关规范时要对此进行相应的变换,文献[2]和文献[35]对此进行了探讨。除此之外,建筑方面有关钢管混凝土结构设计规范较多,不同规范的钢管混凝土构件承载力的计算方法也不尽相同,计算结果之间的差异又因不同受力状态而不同^[4]。对于我国有关钢管混凝土结构的三本设计规程^[5,7,8],轴压构件承载力的计算结果,三本规程计算结果以CECS 28:90^[5]最大,JCJ 01-89^[7]和DL/T 5085-1999^[8]较小且二者较接近,但总体上三本规程计算结果相差不是太大^[2]。对于偏压构件,当偏心率较大时,DL/T 5085-1999^[8]计算结果与试验结果吻合较好,其余两本计算结果偏大些^[36]。因此,对于钢管混凝土拱桥的构件承载力验算选用何种规范也有待进一步的研究。

钢管混凝土拱肋的截面形式主要有单圆管、哑铃形和桁式。不同截面的受力性能也不同。单圆管的拱肋可能要承受较大的弯矩而使其成为偏压构件,钢管对核心混凝土的套箍作用随偏心率的增大而急剧降低,因此当偏心率较大时,不计套箍作用或按钢筋混凝土的计算方法与实际结果相差较小些。桁式拱肋的弦杆以受轴压为主,不计套箍作用明显低估了钢管混凝土构件的承载能力,是不合理和不经济的^[2,37]。对于哑铃形拱肋,由于腹腔内的混凝土受钢板横向约束作用效应明显小于圆钢管混凝土,且受力机理复杂,缺乏研究,所以无法采用钢管混凝土理论进行计算。因此在计算上有两种处理方法,一种是将整个断面按钢筋混凝土构件进行计算,另一种是上下管按钢管混凝土理论计算,不计腹腔内混凝土的作用,而只计及自重。这两种方法显然都有不足之处。对哑铃形截面的承载力目前未见试验研究报告。除受力方面的不合理外,哑铃形断面还存在着施工方面的问题^[38],因此这种断面形式应缩小其使用范围或加以改进,如腹腔加拉杆或腔内不灌混凝土。对于其它非圆形钢管混凝土拱肋,其截面验算通常采用钢筋混凝土的计算方法。

根据有关研究^[15],钢管混凝土构件承载力受环境温度、收缩徐变的影响一般较小,对于钢管混凝土拱肋的构件承载力验算,这种影响可以略去不计。但对于钢管初应力问题,由于钢管混凝土拱桥施工引起的初应力较大,因此这一问题引起了工程界的关注。研究表明,以构件所承受的最大荷载值作为构件极限

承载力时,初应力的影响较小^[39];而对于以一定的纵向应变值所对应的荷载值作为极限承载力时,初应力的影响较大,对于工程应用当承载力影响控制在5%以下时,建议对采用Q345钢(16Mn钢)的构件,构件长细比 λ ($4L/D$, L 为构件长, D 为管径)为70~100之间时,可限制 $\beta \leq 0.6$,而其它情况以及采用Q235钢(A3钢)时, β 值可不加限制^[40]。上述的 β 值为 σ_s/f_y (σ_s 为钢材容许应力, f_y 为设计强度),所以对 $\lambda = 70 \sim 100$ 的Q345钢构件,限制的 β 值应为0.65。文献[41]对石潭溪大桥的受力分析表明,拱脚处的下弦杆长细比 $\lambda = 91.2$ 在70~100之间,初始应力比 $\beta = 0.296$,小于限制的 β 值0.65。因此,初始应力对钢管轴压构件稳定承载力的影响在5%以内,可忽略不计。但对于其它桥梁,初应力影响则应根据具体情况具体分析。

由于核心混凝土的收缩,钢管混凝土拱肋中常会出现钢管与混凝土不密贴现象,尤其在拱顶段,工程中通常要靠核心混凝土固结后压浆,或采用微膨胀混凝土来解决混凝土收缩问题。但微膨胀混凝土的效果也缺乏深入细致的研究。此外,还有人认为在日照下钢管与混凝土会受到温差的影响而出现空隙。因此,对紧箍力能否发挥作用工程界存在怀疑。这也是目前有些钢管混凝土拱桥设计中不考虑钢管对于核心混凝土紧箍力,而仅将钢管混凝土视为钢筋混凝土的主要原因。对于这个问题,目前尚缺乏系统深入的研究。

4.3 对容许应力法和极限状态法的讨论

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。一种是第3节介绍的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,如本节前述所介绍的。

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 $2.1 \times 10^5 \text{ Pa} / 3.5 \times 10^4 \text{ Pa} = 6.0$, 而强度比为 $200 \text{ Pa} / 16 \text{ Pa} = 12.5$, 二者并不协调。在混凝土达到强度时, 钢材的强度才 96.1 MPa , 只达到实际强度 200 MPa 的 48% 。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。所以在设计上只能采用前者, 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^[41], 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。

对于钢管混凝土劲性骨架拱桥来说, 这个问题更为突出。为节约施工用钢, 钢管骨架在施工中一般受力较大, 成桥后若还是采用应力叠加法计算, 则钢管骨架可能超出其容许应力, 这样就要加大其材料用量, 结果将使这种桥型的经济性丧失。实际上, 由于外包混凝土的面积远大于钢管骨架, 在成桥之后埋在拱肋之中的钢管骨架所起的作用很小, 考虑材料非线性时截面会进行应力重分布, 因此, 部分钢管的应力屈服对拱肋的整体受力影响不大^[42]。

钢管混凝土单圆管肋拱模型试验表明^[25], 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, 因为钢筋混凝土拱已不用容许应力法了。

然而, 在施工过程中, 虽然混凝土浇筑后管内混凝土的强度在不断地增长, 但在它达到设计强度以前, 所分担的荷载有限, 荷载主要由钢管承受, 这时采用应力叠加法验算钢管拱架的强度与稳定性较为合理。

因此, 本文认为施工过程的受力宜以应力叠加法计算应力, 以容许应力法进行验算, 而在成桥阶段则宜采用内力叠加法计算内力, 验算结构的整体极限承载力和构件局部承载力(截面承载力)并考虑钢管初应力对承载力的影响。当然, 极限承载力的计算方法正如本节前述的, 还有许多工作要做。

5 局部受力计算

钢管混凝土拱桥中的局部受力计算包括无推力拱中拱脚固结点的计算、拱肋吊杆处的受力计算、吊点处拱肋开孔的局部受力计算、拱肋吊装接头的受力计算等。

无推力拱拱脚固结点几何形状很复杂, 其受力也很复杂, 因此, 有必要对局部结构采用空间有限元进行应力分析, 必要时还应进行模型试验, 如成都青龙场立交桥进行了混凝土模型试验^[43], 深圳北站大桥进行了光弹模型试验^[44]。但由于拱脚固结点的受力复杂和不具普遍性, 因此对于具体桥梁仍要进行具体分析。

拱肋与桥面系传力构件相交处局部受力较大, 需单独计算。对于中下承式拱, 当吊杆穿过拱肋主管时, 主管的钢管受到削弱, 该处的受力和对整体结构承载力的影响, 也是需要研究的。

钢管混凝土桁拱中, 弦管(主管)采用钢管混凝土, 支管采用空钢管, 主支管通过钢管直接相贯线焊接形成节点。桁式拱肋在承受弯矩时, 剪力通过支管传递给主管的钢管, 再由主管的钢管传给管内的混凝土。因此, 主管在节点处的钢管与管内混凝土的传力或者说相互作用就显得非常重要。现有钢管混凝土桁拱结构能否保证这种力的传递, 或者说平截面假定能否成立, 迄今未见相关研究。

对于桁拱钢管节点的应力集中问题, 文献[45]进行了有限元分析, 文献[46]认为应力集中很严重, 再考虑到多次焊接的材质变异、节点防腐等问题, 钢管混凝土桁架节点的设计值得认真考虑。文献[47]、[48]介绍了空心管结构连接的静力设计, 可供钢管混凝土桁拱设计时参考。然而, 上述文献均是指空心管结构, 至于钢管混凝土节点设计是否与空心管节点有不同之处, 还缺乏针对性的研究。

6 稳定计算与验算

拱作为压弯结构, 稳定问题是计算理论要研究的重要内容之一。拱的稳定从失稳形态分为面内稳定和面外稳定, 从失稳时是否发生平衡分枝又分为分枝点失稳和极值点失稳。拱的稳定问题, 在材料性能方面又有线性弹性稳定和非线性非弹性问题, 在几何方面又有小挠度和大挠度问题。因此, 拱的稳定问题是一个复杂的问题。

分枝点失稳常用的计算方法是通过解特征值求弹

性临界荷载,一般的通用程序都能求解,由于没有考虑材料的非线性和大挠度影响,因此它只是真实解的上限。对于受非对称荷载以极值点失稳的结构来说,弹性分枝点临界荷载与真实解的偏差可能很大,再加上失稳的突然性和可怕后果,所以在工程上常采用较大的安全系数,一般要求弹性分枝点失稳的临界荷载为实际荷载的 4~6 倍。对于钢管混凝土拱,考虑材料非线性和大挠度的分枝点失稳计算目前还没有引起重视,未见有关研究报道,还有待开展。

极值点失稳的计算方法一般应采用数值方法,如第 4 节所讨论的钢管混凝土拱的双重非线性有限元方法。然而目前这一方法还不成熟,因此,在工程实践中,无论是面内稳定还是面外稳定,通常都进行弹性分枝点失稳(通常又称为一类失稳)的计算。对于面内稳定,由于非对称荷载作用下拱肋的弯矩较大,而弹性分枝点临界荷载无法考虑弯矩与挠度影响,因此它一般要比极值点失稳临界荷载(极限承载力)大许多。对于面外稳定,考虑横向力(如风力)和结构缺陷后,它也是极值点失稳问题,但由于拱桥以面内受力为主,因此,横向的不利作用引起的极值点失稳临界荷载与分枝点失稳临界荷载的差距一般要小于面内失稳情况,也就是说对实际结构的失稳问题,面外失稳较之面内失稳更接近于分枝点失稳。同时应该指出,由于分枝点失稳临界荷载只与拱的刚度、约束条件和轴力水平有关,因此,面外分枝点失稳计算时,考虑与不考虑风力的结果相差甚微,但这并不说明风力对面外失稳没有影响。考虑风力对面外失稳的影响只能用极值点失稳的计算方法。

对于大跨度钢管混凝土拱桥,考虑到其挠度可能较大,一些研究者在稳定分析中考虑了大挠度对拱的稳定的影响,编制了应用程序^[49~52]。在这些分析中,考虑了结构的大变形对平衡方程的影响,以结构的荷载-挠度曲线达到极值点作为极值点失稳的临界荷载,一般没有考虑材料的非线性问题。这种方法对于在非对称荷载作用下出现的极值点问题能够反映结构大挠度的影响。但如果没有考虑材料非线性问题,则大挠度极值点荷载与真实解的偏差有多大,未见研究报道,因此其验算应取用多大的稳定系数尚难下定论。另一方面,它无法求得在对称荷载作用下的分枝点失稳模态和临界荷载值,并不能取代分枝点失稳的计算。

结构的刚度是结构稳定的关键。因此,使用阶段的稳定问题必然要考虑管内混凝土徐变的影响。对于采用预应力混凝土系杆的钢管混凝土拱桥,还要考虑系杆的徐变问题。然而,徐变对稳定影响的研究还开

展较少。

此外,对于长细比较大的轴压构件和压弯构件,钢管的初应力将影响构件的刚度,进而影响构件的稳定极限承载力。钢管初应力对钢管混凝土拱桥稳定极限承载力的影响也未见研究报导。

7 变形计算与验算

拱的变形不仅影响到结构的受力,还影响到使用性能,因此,变形计算与验算就显得十分重要。变形对弯矩的影响很大。在传统的圬工拱桥和钢筋混凝土拱桥中,由于采用实体截面,材料的受拉性能又较弱,所以对拱轴线型的控制十分重视。对于钢管混凝土桁拱,由于弯矩主要由上下弦杆的轴力组成,所以拱轴线的变形对弯矩的影响转化到上下弦轴力后影响不是很大,但对于单圆管和哑铃形断面,其影响还是不容忽视的。

变形计算的关键是结构的刚度取值,对于钢管混凝土拱肋的刚度取值问题第一节已有叙述,此处不再重复。钢管混凝土拱桥的长期变形计算中,徐变问题的考虑已引起工程界的注意。实践表明,钢管混凝土拱桥的长期实测变形要比弹性变形计算值大许多,其主要影响就是管内混凝土的徐变。然而,如同徐变对稳定影响一样,徐变对长期变形的影响方面的研究也开展得不够。对管内混凝土的徐变问题的研究中,对应力重分布影响的过多考虑,而对变形和稳定影响的关注不够是目前钢管混凝土拱桥徐变问题研究中的主要不足之处。

变形控制是结构使用极限状态中的重要内容之一。《JTJ 022-85》^[53]对圬工拱桥的变形控制条件是按规定的汽车荷载(不计冲击力)计算的拱桥上部结构在一个桥跨范围内的计算挠度最大绝对值之和不大于 $L/1000$ 。《JTJ 025-86》^[54]对钢筋混凝土拱桥的变形控制条件是 $L/800$ 。用挂车或履带车验算时,上述挠度可增加 20%。目前,钢管混凝土拱桥挠度的设计验算,一般按钢筋混凝土拱桥要求的 $L/800$ 进行验算。钢管混凝土拱桥由于承载能力较大,特别是大跨度的桥,变形控制条件是否应比钢筋混凝土拱桥的 $L/800$ 更宽些,以充分发挥结构的承载能力,尚缺乏研究。此外,对于刚架系杆拱桥墩顶水平位移的控制要求也未见研究报道。这些都是今后要加以研究的内容。

8 动力性能分析

8.1 动力基本性能

钢管混凝土拱的动力性能方面,一些桥梁进行了

实桥的振型、频率、阻尼及动挠度的测试,一些桥梁则进行了动力特性的计算机分析。文献[55]、[56]对此进行了综述。实测和计算分析表明,钢管混凝土肋拱一般来说面内的自振频率较面外的稍大,但二者较接近。横向及竖向基频与桥梁跨径、结构型式、及拱圈截面的几何性质有关。它受跨径的影响最大,跨径越大基频越低;其次是结构型式,下承式刚架系杆拱的基频最低,中承式次之,上承式最大。除非跨径特别大,其面内、面外基频均大于结构较柔的斜拉桥或悬索桥的基频;但又小于一般刚性拱桥的基频。因此,钢管混凝土拱桥的动力特性与动力性能有其自身的特点。

钢管混凝土拱桥的面外基频较面内基频略低。反映出钢管混凝土拱桥横向稳定问题较为突出,尤其是大跨度时。在设计时,可通过优化横撑布置、增加横撑数量、增大拱肋刚度等方法来增加拱横向的整体刚度,以保证其横向稳定性。然而,横撑在增加横向稳定的同时,也加大了拱的横向整体刚度和质量,提高了拱肋重心位置,使得拱对迎面地震波的响应增大。因此在实际应用中,不应盲目地设置横向联系,应该综合考虑横向稳定与横向地震力问题。

文献[55]还应用收集到的分析和实测资料,对钢管混凝土拱桥横撑与横向基频的关系、构件刚度的影响、支承条件的影响、拱肋前几阶面内和面外振型序列、桥面系振型等进行了分析。

阻尼对钢管混凝土拱桥的动力特性影响较大,阻尼主要来自于结构与支承之间的摩擦、材料之间的摩擦及周围介质之间的阻力等等。但是,由于阻尼计算相对较复杂,一般只能通过实测求得。目前仅见文献[57]对柳州文惠桥实测结果,其阻尼比在0.05~0.03之间。

8.2 抗震性能研究

较早进行抗震分析的钢管混凝土拱桥有黄柏河大桥和龙潭溪大桥^[58,59]。分析时,将钢管混凝土简化为单一的材料并假定其为弹性材料,采用反应谱法或时程分析法。分析结果表明,拱肋在地震作用下所承受的内力较活载内力小,在各自工程场地的地震环境下,具有足够的抗震能力,显示了这类结构自重轻、强度高的特点。

对大跨度钢管混凝土拱桥的地震响应分析,一些研究者着重考察了几何非线性影响与行波效应。文献[60]对主跨208m的湖北龙潭河大桥进行的分析表明,无论是位移响应还是内力响应,除在极值点附近,几何线性与几何非线性分析的结果相差均不大。文献[61]至[63]对目前跨径最大(主跨360m)

的广州丫髻沙大桥进行了抗震性能研究。文献[61]和[62]主要探讨了行波效应对大跨度拱桥地震反应的影响,认为对大跨度拱桥行波效应十分重要,在抗震设计中不可忽略。文献[63]则采用矢量随机过程建立了考虑二维空间相关性的非一致地震激励模型,进行了大跨度钢管混凝土拱桥地震响应的非线性时程响应分析。分析结果表明,几何非线性对于大跨度钢管混凝土拱桥的地震响应有较大的影响,这种影响有随拱肋倾角和激励维数增加而增大的趋势。

对于材料非线性影响,一般将钢管混凝土简化为理想弹塑性材料^[63~65],只有文献[66]采用了统一理论的钢管混凝土材料非线性模型。分析表明,大跨度钢管混凝土拱桥由于结构刚度较小、拱肋自重较轻且拱肋为桁式,其弦杆以受压为主弯矩较小,因此在地震荷载作用下拱肋因强度不足引起破坏的可能性一般较小^[62,63]。对于拱肋为单圆管或哑铃形的中小跨度的钢管混凝土拱桥,在地震荷载作用下拱肋材料有可能进入非线性。至于结构首先发生屈服的部位,与结构形式有很大的关系,有的可能在拱脚,有的可能在拱上立柱。

文献[65]则对钢管混凝土拱的管内混凝土对抗震性能的影响进行了分析。对某钢管混凝土拱桥的实例分析表明,钢管混凝土拱较之空钢管拱面内基频增大,而面外基频降低;钢管混凝土拱在纵向地震波作用下,拱肋处于弹性状态;在横向地震波作用下,拱肋与桥面结合部的轴力与弯矩最大,达到屈服。而空钢管拱在横向地震波的作用下,其面外弯矩仅为钢管混凝土拱的一半左右。分析表明,在横向受力时,由于结构受力并非以受压为主,因此钢管混凝土抗压强度高特点没有得到充分发挥。相对于空钢管拱桥来说,管内混凝土的质量还加大了拱的横向受力(特别是中下承式拱桥),因此,管内混凝土加大了结构的自重和横向刚度,对拱的横向抗震性能产生了不利影响。根据上述分析结果和钢管混凝土拱桥的实践,文献[67]提出了钢管-钢管混凝土复合拱桥的新桥型,首座试验桥已建成通车,实桥动测结果表明这种桥型具有较好的横向受力性能^[68]。

除上述针对具体桥梁的抗震计算与研究外,1999年土木工程防灾国家重点实验室开放课题基金资助了“钢管混凝土拱桥抗震性能研究”项目,国家自然科学基金2001年资助了“钢管混凝土拱桥抗震理论研究”项目,由福州大学、同济大学和四川大学联合承担,两个项目都在进行之中,其中2001年4月份进行了钢管混凝土肋拱模型的震动台试验。模型跨度为6m,矢高1m,由两根单圆管拱肋组成,设有五道空

钢管一字撑。拱肋为不锈钢钢管，直径 76mm，壁厚 1mm，内灌 C25 细石混凝土。输入的地震波为横桥向、纵桥向和横纵两个方向，首先用 EL - CENTRO 波，加速度峰值达 1.6g，仍未破坏，后分别去掉两个横撑和全部横撑，横桥向加速度峰值达 2.0g，也还未破坏，最后对无风撑模型横桥向输入上海人工地震波，当加速度峰值达 0.8g 时，拱肋因横向失稳破坏。对试验结果初步分析表明，钢管混凝土拱具有较高的抗震能力，横向动力失稳可能是结构破坏的主要原因。文献 [69] 建立了钢管混凝土拱桥三维弹塑性动力分析公式，编制了相应的程序，并以上述模型试验当横桥向加速度峰值达 0.4g 和 0.6g 作为算例进行了分析。

8.3 车振与风振分析

随着交通事业的发展，汽车的行驶速度不断提高、载重不断增加；材料工业的不断发展，高强材料的普遍应用使桥梁向轻型化发展，活载在总荷载中所占的比重不断增加，恒载占总荷载的比例减少。因此，公路桥梁的车振问题日益突出。但我国对公路桥梁车振研究总体上开展得较晚，钢管混凝土拱桥的车振问题研究也刚刚起步。一些实桥通车时进行的动测包括了车振测试，如南海三山西大桥、柳州文惠桥等^[2]。

钢管混凝土拱桥中的中下承式拱桥基本上采用柔性吊杆联结拱肋与桥面系，除少数拱梁组合体系外，大部分桥梁的桥面系与拱肋在面内是相互独立的结构，在振型计算结果中表现为二者的振动不同步（通常桥面系振动滞后于拱肋的振动）；在使用中表现为车辆经过时桥面振动较大。动测结果也表明了这一点，但其冲击系数应如何取值未见研究报道。

文献 [70] 视桥梁与车辆为一个相互作用的整体系统，用计算机模拟钢管混凝土拱桥在汽车通过时的动态响应，并以江西瓷都大桥为例进行了计算分析。但该文未考虑桥面的平整度，也未与实测结果进行比较。因此，对钢管混凝土拱桥的车振问题的研究还是初步的。

对钢管混凝土拱桥的风振问题研究较少，仅见文献 [71] 对广州丫髻沙大桥进行了有限元时域抖振分析，分析表明，该桥动力放大系统不足 1.5，动力响应不明显，与斜拉桥和悬索桥相比，其刚度系数较大，抗风能力较强。由于该桥是目前跨径最大的钢管混凝土拱桥，又处于风力较大的沿海地区，因此，该桥的分析结果具有较为重要的参考价值。

8.4 疲劳验算

钢管混凝土拱桥中的疲劳问题主要有桁式拱肋的

节点疲劳问题和柔性吊杆的疲劳问题。

钢管混凝土桁式拱肋节点的受力问题，除第 5 节中论述的静力问题外，更为突出的问题是疲劳问题。文献 [72] 介绍了管结构节点的疲劳问题、计算方法和设计方法。文献 [45] 则对桥梁管结构的节点疲劳问题采用有限元方法进行了具体的分析，对国内某跨径 150m 的钢管混凝土桁拱取不同的交通流量及初裂深度，分析结果认为其节点失效寿命仅为 15 ~ 40 年。然而，我国公路和市政桥梁尚无疲劳荷载谱，文献 [45] 进行分析时引用的是上海市 1994 和 1995 年两次交通调查所制定的疲劳荷载谱，作为该桥的反应谱不一定符合实际情况；在分析中没有考虑管内混凝土的作用且未进行试验研究。所以，对钢管混凝土桁拱节点的疲劳问题还需要进一步的研究。

对于中下承式钢管混凝土拱桥，受车振和风振的作用，柔性吊杆也存在着疲劳问题。由于在设计中，柔性吊杆基本上采用斜拉桥的拉索系统，一般认为其疲劳问题没有斜拉桥的拉索严重，所以极少对中下承式拱桥中的柔性系杆的疲劳问题进行研究。近年的个别中下承式拱桥由于吊杆破坏引发的事故引起了对拱桥吊杆设计计算以及防腐、检查、更换等问题的关注，然而它的研究才刚刚开始。文献 [73] 对某中承式拱的短吊杆受力分析表明，短吊杆要比长吊杆受动荷载冲击影响大得多，有时甚至达两倍以上，设计时应应对短吊杆的受力和疲劳问题给予高度的重视。

9 结束语

钢管混凝土拱桥在我国走过了十余年的发展历程，无论是其应用规模，还是跨径增大的速度都是惊人的^[2,74]。国内目前有多座大跨径、大规模的钢管混凝土拱桥正在施工，如主跨 308m 的浙江省淳安县（千岛湖）南浦大桥（中承拱）；主跨为 338m 的南宁永和桥；主跨达 460m 的重庆巫峡长江大桥（中承拱）；浙江省杭州市钱江四桥（复兴大桥），主桥长约 1km，为双层桥面，上层通行汽车，下层通行轻轨；8 跨（每跨 100m）、上下行分离的郑州黄河公路二桥主桥（下承式系杆拱）；主跨为 368m 的湖南省洞庭湖茅草街大桥（飞燕式）等。国外，法国和美国已有修建钢管混凝土拱桥的报导^[75,76]，筹建中的日本长崎西海二桥也拟采用钢管混凝土拱桥，跨径 230m，中承式，正在设计之中^[77]。由此可以看出，钢管混凝土拱桥有着广阔的应用前景，钢管混凝土拱桥计算理论的研究任重而道远。

参 考 文 献

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥的设计计算 [J]. 工程力学, 1997 (增刊): 450 ~ 454
- [2] 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
- [3] 陈宝春, 孙潮. 石潭溪大桥施工受力分析 [J]. 中国公路学报, 1998 (4): 51 ~ 57
- [4] 王来永, 陈宝春, 孙潮. 钢管混凝土设计方法比较 [J]. 工程力学, 2001, 18 (增刊): 544 ~ 548
- [5] 中国工程建设标准化协会标准 [S]. 《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS 28:90), 北京: 中国计划出版社, 1990
- [6] British Standards Institute, BS5400, Part 5, Concrete and Composite Bridges [S], 1979
- [7] 国家建筑材料工业局标准. 钢管混凝土结构设计与施工规程 (JCJ 01 - 89) [S]. 上海: 同济大学出版社, 1989
- [8] 中国电力行业标准, 钢管混凝土组合结构设计规程 (DL/T 5085 - 1999) [S]. 北京: 中国电力出版社, 1999
- [9] 日本建筑学会. コンクリート充填钢管構造設計施工指針 [S]. 1997
- [10] Load and Resistance Factor Design, Specification for Structural Steel Building [S]. 1986
- [11] American Concrete Institute. Building Code Requirement for Reinforced Concrete (ACI 318 - 89) [S], 1989
- [12] European Committee for Standardization. Eurocode 4 (draft): Design of Composite Steel and Concrete Structures [S]. 1992
- [13] 陈宝春, 孙潮, 徐爱民. 钢管混凝土拱桥温度内力计算时温差取值分析 [J]. 中国公路学报, 2000 (2): 52 ~ 56
- [14] 何雄君, 文武松. 钢管混凝土拱桥温度荷载分析 [J]. 桥梁建设 [J], 2000 (1): 17 ~ 19
- [15] 钟善桐. 钢管混凝土结构 (修订版) [M]. 哈尔滨: 黑龙江省科学技术出版社, 1994
- [16] 陈宝春, 邹中权. 兰溪大桥钢管混凝土刚架系杆拱设计 [J]. 湘潭矿业学院学报, 1998 (4): 73 ~ 76
- [17] 孙潮, 陈宝春. 深圳北站大桥静力计算分析 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 1999 (3): 27 ~ 30
- [18] 刘忠. 大跨径钢-混凝土复合桥梁的时间、几何、材料、温度非线性空间分析 [D]. 上海: 同济大学, 1996
- [19] 徐爱民, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥温度应力数值分析 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 1999 (3): 15 ~ 18
- [20] 顾安邦, 周水兴. 万县长江大桥徐变收缩模型试验研究 [A]. 四川省公路学会桥梁学术研讨会论文集 [C]. 西南交通大学出版社, 1996: 157 ~ 167
- [21] 谢肖礼. 钢管混凝土拱桥徐变收缩对任意形状拱肋截面应力重分布的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2001
- [22] 顾建中. 钢管混凝土拱桥的徐变分析及其应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2001
- [23] 陈宝春, 陈友杰. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程试验研究 [J]. 工程力学, 2000, 17 (2): 44 ~ 50
- [24] 林英. 钢管-混凝土复合拱桥面内受力性能试验研究 [D]. 福州: 福州大学, 2001
- [25] 韦建刚. 钢管混凝土对称弯压拱分枝点失稳问题研究 [D]. 福州: 福州大学, 2002
- [26] 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
- [27] 童嵩. 钢管混凝土拱结构的非线性分析 [D]. 成都: 四川大学, 2000
- [28] 毛裕青. 钢管混凝土拱桥的极限承载力研究 [D]. 上海: 同济大学, 2000
- [29] 潘友光. 圆钢管混凝土轴心受力作用下本构关系的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑工程学院, 1989
- [30] 韩林海. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [31] 陈友杰, 陈宝春. 钢管混凝土肋拱面内受力全过程有限元分析 [J]. 工程力学, 2000 (增刊): 753 ~ 758
- [32] 欧智菁. 钢管混凝土偏心受压本构关系及其在钢管混凝土拱桥受力分析中的应用 [D]. 福州: 福州大学, 2000
- [33] 王国鼎, 钟圣斌. 桥梁计算实例集—拱桥 (第二版) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [34] 陈宝春. 钢管混凝土单圆管肋拱桥设计计算探讨 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 1998 (6): 81 ~ 85
- [35] 涂凌. 钢管混凝土拱桥承载力计算 [J]. 重庆交通学院学报, 1999 (2): 8 ~ 12
- [36] 王来永. 钢管混凝土梁柱受力性能分析 [D]. 福州: 福州大学, 2002
- [37] 贺桂海, 宋一凡, 周彦军. CFST 拱桥承载能力分析 [J]. 西安公路交通大学学报, 1998 (4): 132 ~ 136
- [38] 秦荣, 谢肖礼, 彭文立等. 钢管混凝土拱桥钢管开裂事故分析 [J]. 土木工程学报, 2001 (3): 74 ~ 77
- [39] 蔡绍怀. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1994
- [40] 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
- [41] 欧智菁, 陈宝春. 钢管混凝土桁拱静力性能分析 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2000 (1): 62 ~ 67
- [42] 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 [A]. 四川省公路学会桥梁学术研讨会论文集 [C]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996: 46 ~ 53
- [43] 汤国栋, 廖光明等. 拱式桥梁的新进展 [A]. 四川省公路学会桥梁学术研讨会论文集 [C]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996: 370 ~ 380
- [44] 郑振飞, 徐艳, 陈宝春. 深圳北站大桥拱墩固结点局部应力 [J]. 中国公路学报, 2000 (2): 67 ~ 72

- [45] 袁慧芳. 桥梁管道结构节点应力集中及疲劳寿命 [D]. 成都: 四川大学, 2000
- [46] 汤国栋, 熊峰, 谢玲玲等. 集束钢管混凝土提篮拱桥研究进展 [A]. 中国土木工程学会桥梁与结构学会第十三届学术讨论会论文集 [C], 1998.11, 上海: 195 ~ 201
- [47] J.A.Packer, J.E.Henderson, J.J.Cao (曹俊杰). 空心管结构连接设计指南 [M]. 北京: 科学出版社, 1997
- [48] 范文理. 空心管结构及连接的静力设计 [A]. 1999年四川省公路学会桥梁学术研讨会论文集 [C], 成都: 175 ~ 184
- [49] 赵雷, 杜正国. 大跨度钢筋混凝土拱桥钢管混凝土劲性骨架施工阶段稳定性分析 [J]. 西南交通大学学报, 1994 (4): 446 ~ 452
- [50] 颜全胜, 韩大建. 钢管混凝土系杆拱桥的非线性与稳定分析 [A]. 第十三届全国桥梁学术会议论文集 [C], 1998年, 上海: 491 ~ 497
- [51] 赵长军, 王锋君, 陈强等. 大跨度钢管混凝土拱桥空间稳定性分析 [J]. 公路, 2001 (2): 15 ~ 17
- [52] 胡大琳, 艾夫·哈依姆, 黄安录. 大跨径钢管混凝土拱桥空间几何非线性分析 [J]. 中国公路学报, 1998 (2): 45 ~ 51
- [53] 交通部标准, 公路桥涵及混凝土桥涵设计规范 (JTJ 022-85) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1985
- [54] 交通部标准, 公路桥涵钢结构与木结构设计规范 (JTJ 025-86) [S]. 北京: 人民交通出版社, 1986
- [55] 陈水盛, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥动力特性分析 [J]. 公路, 2001 (2): 10 ~ 14
- [56] 杨华, 韩林海. 钢管混凝土拱桥动力性能研究现状 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001 (增刊): 133 ~ 137
- [57] 欧享德, 韦明吉. 柳州文惠钢管混凝土中承载拱桥 [A]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会 1996 年桥梁学术会议论文集 [C], 北京: 人民交通出版社, 1996: 56 ~ 67
- [58] 李涛. 大跨度钢管混凝土拱桥的抗震分析 [J]. 公路, 1996 (1): 10 ~ 13
- [59] 彭大文, 王忠. 中承式钢管混凝土肋拱桥的地震响应分析 [J]. 工程力学, 1997 (增刊):
- [60] 郑家树. 大跨度钢管混凝土拱桥非线性地震反应分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2000
- [61] 郑史雄, 周述华, 丁桂保. 大跨度钢管混凝土拱桥的地震反应性能 [J]. 西南交通大学学报, 1999 (6): 320 ~ 324
- [62] 胡世德, 王君杰, 魏红一等. Y 髻沙大桥主桥抗震性能研究 [J]. 铁道标准设计, 2001 (6): 21 ~ 25
- [63] 赵灿晖. 大跨度钢管混凝土拱桥的地震响应研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2001
- [64] 刘玉擎, 陈宝春, 彦阪熙. 架構式合成タイドアーチ橋の構造特性および耐震性能 [A]. 見構造工学論文集 [C], Vol. 47A, 2001.3: 1475 ~ 1484
- [65] 刘玉擎, 陈宝春, 彦阪熙等. コンクリート充填鋼管アーチ橋の非線形地震応答特性 [A]. 見日本第 25 回地震工学研究発表会講演文集 [C], 1999.7: 889 ~ 892
- [66] 苏虹. 钢管混凝土拱桥的地震响应分析 [D]. 上海: 同济大学, 2002
- [67] 陈宝春, 陈友杰, 刘玉擎. 钢管与钢管混凝土复合拱桥 [J]. 桥梁建设, 2001 (1): 17 ~ 20
- [68] 孙潮, 陈宝春, 陈水盛. 钢管-钢管混凝土复合拱桥动力特性分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2001 (2): 48 ~ 52
- [69] 李巧, 熊峰. 钢管混凝土拱桥三维弹塑性时程分析 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001 (增刊): 128 ~ 132
- [70] 许士杰, 王元丰. 钢管混凝土肋拱桥与车辆动力相互作用的研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999 (增刊): 50 ~ 54
- [71] 罗雄, 潘言喻. 大跨度钢管混凝土拱桥时域抖振分析 [J]. 西南交通大学学报, 2000 (5): 475 ~ 479
- [72] 范文理. 管结构节点疲劳设计 [A]. 中国土木工程学会桥梁与结构学会第十四届学术讨论会论文集 [C], 2000年11月, 南京: 495 ~ 500
- [73] 顾安邦, 徐群兰. 中下承式拱桥短吊杆结构行为分析, 海威姆预应力技术, 2002 (1): 7 ~ 8
- [74] 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展 [J]. 土木工程学报, 1999 (4): 16 ~ 26
- [75] 白宝鸿. 法国昂特那斯钢管拱桥 [J]. 国外桥梁, 1998 (3): 5 ~ 6
- [76] 陈炳坤, 胡贵琼. 美国的 17 座新建大桥 [J]. 国外公路, 2000 (2): 21 ~ 25
- [77] 吴庆雄, 陈宝春, 高桥和雄等. 中国におけるコンクリート充填鋼管合成アーチ橋の建設の状況と技術の課題 [J]. 橋梁と基礎 (日), 2001 (10): 40 ~ 46

陈宝春 教授, 博导。主要从事桥梁工程方面的教学、科研与设计工作, 获省部级科技进步奖四项, 近年来主攻钢管混凝土拱桥结构。通讯地址: 350002 福州市工业路 523 号 福州大学土木建筑工程学院