

文章编号:1672 - 4348(2004)01 - 0017 - 06

钢管混凝土系杆拱桥空间效应分析

孙潮¹,陈宝春¹,张伟中²,汤意²,陈友杰¹,黄文金¹

(1. 福州大学土木建筑工程学院,福建 福州 350002; 2. 河南省交通规划勘察设计院,河南 郑州 450052)

摘要:建立平面与空间有限元模型,对郑州黄河公路钢管混凝土系杆拱桥(二桥)的活载横向分布系数、横梁、拱肋和系梁的受力特点进行比较分析,重点考察结构的空问效应问题,并分析了结构第一类空问稳定系数及其主要影响因素。分析结果表明,活载横向分布系数采用杠杆法与空问分析结果相近,可用于设计计算之中;系梁承受有较大的扭矩;吊杆横梁的受力性质接近于简支梁,而端横梁的受力要进行空问分析,考虑系梁扭矩的作用;K撑中的斜撑和系梁安装支架对提高结构稳定系数贡献较大。

关键词:钢管混凝土;系杆拱桥;设计;空问效应;黄河

中图分类号:U448.14

文献标识码:A

Spatial effect analysis of concrete filled steel tubular tied arch bridge

SUN Chao¹, CHEN Bao - chun¹, ZHANG Wei - zhong², TANG Yi², CHEN You - jie¹, HUANG Wen - jin¹

(1. Civil Engineering and Architectures College, Fuzhou University, Fujian 350002, China; 2. Henan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Zhengzhou, 450052, China)

Abstract: The Second Highway Bridge over Yellow River is located in the national highway trunk linking the north to the south from Beijing to Zhuhai in Guangdong Province. The main part consists of 8 identical 100m Concrete Filled Steel Tubes (CFST) tied arch bridge. In this paper, both plane and space finite element models are developed to analyze lateral distribution coefficients of live load, behaviors of cross beam, arch rib and tie girders, emphasis on the spatial effect of the structure. And the elastic buckling of the bridge is also be investigated by the space finite element model. The analysis results show that the lateral distribution coefficients of live load calculated by from the principle of the lever distribution are almost equal to the result from the space FEM, so the principle of lever distribution can be used in the design calculation; the tie girder beam is subject to considerable torsion moment; the hanger crossbeam's structural behavior is similar to simple beam while end cross beam is influenced by tie beam and should be analyzed by space FEM; and the batter brace and supporting frame of tie beam contribute to stability prominently.

Key words: concrete filled steel tube; tied arch bridge; design; spatial effect; Yellow River

1 概述

系杆拱的系杆与车道系的纵梁合二为一,属

拉弯构件。当其抗弯刚度较小时称为系杆,刚度较大时称为系梁。拱与梁在拱脚处刚结,支承于墩台支座之上。这种结构受力明确,一般为外部

收稿日期:2004 - 02 - 15

基金项目:国家自然科学基金项目(50078016),河南省重大科技项目(2001 D04)。

第一作者简介:孙潮(1970 -),男(汉),福建福州人,讲师,博士生。

通讯作者简介:陈宝春(1958 -),男(汉),福建福州人,教授,博士生导师。

静定、内部超静定结构,下部结构类似于梁桥的下部结构。这种结构体系,一方面可使拱梁共同承受荷载,从整体上节约材料,另一方面对墩台与基础的要求降低。由于外部为静定结构,它可应用于多孔结构,不存在连拱作用问题。因此,在跨越宽浅河流架设多跨拱桥时,系杆拱是一种具有竞争力的桥型^[1]。郑州黄河公路二桥主桥采用了上下行分离的8孔下承式钢管混凝土系杆拱结构,其单跨的上部结构一般构造图(见图1)。

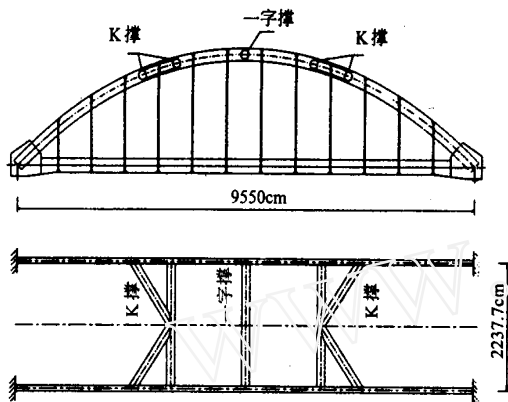


图1 上部结构一般构造图

Fig. 1 Elevation of superstructure

郑州黄河公路二桥主桥计算跨径为95.5m,矢跨比1/4.5。拱轴线采用 $m=1.347$ 的悬链线。拱肋为2根 $1000 \times 16\text{mm}$ 钢管和16腹板组成高2.4m的哑铃形断面,钢管内浇注C50混凝土。两拱肋中心距22.377m,由三道哑铃形断面的横撑联系两拱肋,形成空间结构。系梁采用预应力混凝土箱梁,梁宽2.0m,高2.75m,上、下翼缘宽2.0m,厚30cm,腹板厚25cm。吊杆采用91根7mm镀锌高强钢丝,双层PE保护,采用OVM冷铸镦头锚。吊杆纵桥向间距7.1m。两系梁间由两根端横梁与12根中横梁联成整体。端横梁为C50预应力混凝土箱梁,高3.22m,宽2.9m。中横梁采用预应力混凝土T梁,梁高2.2m。桥面板为钢筋混凝土预制形板,高40cm,翼缘板厚12cm。在桥面板与横梁之上现浇8cm的钢纤维混凝土形成整体受力的结构。桥面铺装为9cm的沥青混凝土。

由拱肋、系梁和吊杆组成的纵桥向的受力体系是系杆拱的主要受力体系,为分析方便,设计计算时常将荷载分配到这两片结构上作平面结构分析。在荷载分配计算时,一般纵桥向和横桥向均采用杠杆法。然而,由于两片纵向受力结构之间

存在着联系(横梁与横撑),荷载横向分布并不服从杠杆分配原则;同时全跨连续的系梁与桥面板使得纵桥向的荷载也不是按杠杆分配。此外,通过横梁传递的荷载将在系梁上产生扭矩,而横梁又对其有约束作用。这些空间效应是平面模型无法给出的。

此外,平面分析模型中无法考虑横梁的受力,因此,一般只是简单地取固端梁的负弯矩和简支梁的正弯矩对其进行设计计算与配筋。但是,由于横梁是弹性嵌固于系梁上的,其两端的转角(弯矩)与系梁的扭转(扭矩)有相互作用,这种简化分析是否合理有待空间分析确认。此外,大量的分析表明,拱结构的面外稳定问题十分突出,而平面模型无法进行面外稳定分析。因此,进行空间模型计算是十分必要的。当然,空间分析模型复杂、计算费时,而平面模型简单快速而深受设计人员欢迎。所以本文试图通过郑州黄河二桥主桥的实例分析,对这种结构的空间效应进行研究,以供此类桥梁设计计算参考。

2 有限元计算模型

平面模型运用桥梁博士程序,空间模型运用ANSYS程序进行分析。平面模型包括拱肋、系梁和吊杆。钢管混凝土拱肋用组合构件单元,共56个;系梁用预应力混凝土梁单元,共60个;吊杆采用索单元建立计算模型,共12个索单元(见图2)。平面模型中先按杠杆法计算荷载横向分布系数,再将横梁传递来的荷载作用在系梁吊点处。

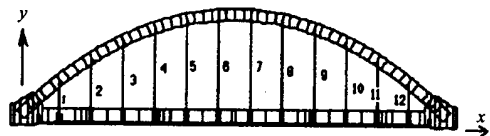


图2 平面有限元模型示意图

Fig. 2 Plane finite element model

空间模型中,拱肋、系梁、横梁和横撑采用空间梁单元(beam4),桥面板采用板单元(shell63),吊杆采用索单元(link10),共计261梁单元、24个索单元、268个板单元(见图3)。系梁和横梁预应力通过结点荷载作用在模型,忽略曲线配筋的初预矩沿构件长度变化的影响,模型没有反映预拱度及索力调整影响。

钢管混凝土拱肋为组合材料,其刚度计算不

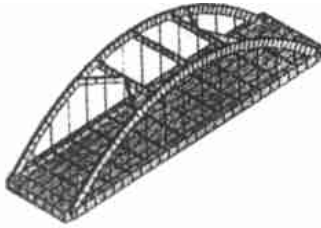


图 3 空间有限元模型轴侧

Fig. 3 Space finite element model

同的钢管混凝土结构设计规程有不同的计算方法。由于钢管混凝土拱桥多为超静定结构,在内力计算时刚度越大所计算的内力也越大,文献[2]的分析认为在内力计算时宜采用较大值。因此,本文有限元模型中钢管混凝土拱肋截面刚度按《CECS 28:90》^[3]的方法考虑钢管和混凝土刚度的直接迭加进行计算。

3 荷载横向分布系数

平面模型按杠杆法计算荷载横向分布系数,其值沿纵桥向是相同的,而在空间模型中,荷载横向分布系数沿纵桥向是不同的。为了简化计算,本文分析时直接通过比较全桥满载(拱脚轴力最大)偏载时的两肋吊杆索力大小,来确定空间模型的偏载系数。图 4 为两种模型的荷载横向分布系数沿纵桥向的变化曲线,图中直线段和所标数字

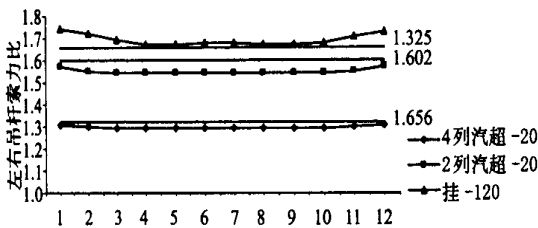


图 4 荷载横向分布系数变化曲线

Fig. 4 Variation of lateral distribution coefficients of live load

为平面模型中杠杆法的计算结果,折线为空间模型的计算结果。由图 4 可看出,空间模型计算结果中拱脚段的比跨中的略大 4%,且 4 列汽-20 的偏载系数最大为 1.31,最小为 1.29;2 列汽-20 的偏载系数最大为 1.57,最小为 1.5;挂-120 的偏载系数最大为 1.74,最小为 1.67;这些数值与杠杆法的计算值都很接近,最大偏差不超过 5%。由于 4 列汽超-20 为结构计算的控制荷载,杠杆

法计算的偏载系数略大于空间计算结果。江苏苏州斜港桥(跨径 100.5m 的钢管混凝土系杆拱)和江苏吴县市尹山大桥(跨径 80.5m 的钢管混凝土系杆拱)的实桥静载试验表明,实桥的荷载横向分布系数与杠杆法计算结果非常接近,最大误差在 15%左右,且杠杆法计算结果偏于安全^[4]。本文的分析结果与这两座桥的实测结果的趋势是一致的,因此在结构计算时可用杠杆法计算荷载横向分布系数,它能满足工程设计要求,且稍偏于保守。

4 主拱与系梁

由于平面模型中所有荷载均在同一平面内,因此在各工况下,各构件没有面外弯矩和扭矩。实际上系杆拱通过横撑与端横梁形成空间结构,因此在安装吊杆横梁、桥面板,以及在桥面荷载等作用下将在主拱和系梁中产生面外弯矩和扭矩。为此,本文利用空间模型重点分析了主拱和系梁在几个典型工况下承受面外弯矩和扭矩的情况。

施工中,当系梁、拱肋和端横梁形成后,开始安装吊杆横梁。由于横梁与系梁的结合点并不在系梁轴线上,因此横梁自重将在系梁上产生很大的扭矩。特别是吊装第一根吊杆横梁时,吊杆横梁对系梁扭转的约束作用没有形成,系梁上的扭矩将全部传到拱脚处。图 5 为安装吊杆横梁时结构内力分布情况。一根吊杆横梁的设计自重为 46.3t,计算吊装重量以 500kN 计,加载点与系梁轴线相距 1m 时,在一根系梁的拱脚处产生 250kN·m 的扭矩,并使得端横梁梁端承受 243kN·m 的面内弯矩,即 97.3% 的系梁扭矩转化为端横梁面内弯矩。因此应注意施工中的系梁承受扭矩能力的验算。

成桥后,吊杆横梁与桥面系参与了荷载分配也承担了系梁的部分扭矩。拱脚处系梁扭矩沿纵桥向的影响线近似为三次抛物线,荷载作用在跨中时产生的扭矩最大。由于桥面结构参与荷载分配,系梁扭矩虽与活载到系梁轴线的距离有关,但并不是简单的力与距离相乘。当活载距离从 1m 增大到 2m 时,系梁扭矩增大到 35%。

成桥后对于拱脚结点来说,端横梁的面内抗弯刚度是拱肋抗扭刚度的 8.72 倍,是系梁抗扭刚度的 3.90 倍,因此空间模型中大部分的系梁扭矩将转化为端横梁面内弯矩。当桥面活载满布在 2# 吊杆和 11# 吊杆之间的桥面上时,系梁扭矩

沿着系梁轴线向拱脚处传播,在拱脚处 95.8% 的系梁扭矩转化为端横梁面内弯矩,2.8% 的系梁扭矩转化为拱肋扭矩,余下的系梁扭矩转化为拱肋面外弯矩。而当荷载直接作用在端横梁上时,端横梁上的面内弯矩将引起系梁和拱肋扭转,即 84.5% 端横梁面内弯矩转化为系梁扭矩,而仅有 9% 转化为拱肋扭矩。当荷载作用在端横梁和 1# 吊杆横梁之间的桥面板时,荷载传力途径介于上述两种情况之间。

从以上分析可以看出,无论荷载作用在什么位置,它所产生的拱肋面外弯矩和扭矩均很小,但系梁的扭矩和端横梁面内的弯矩均较大。

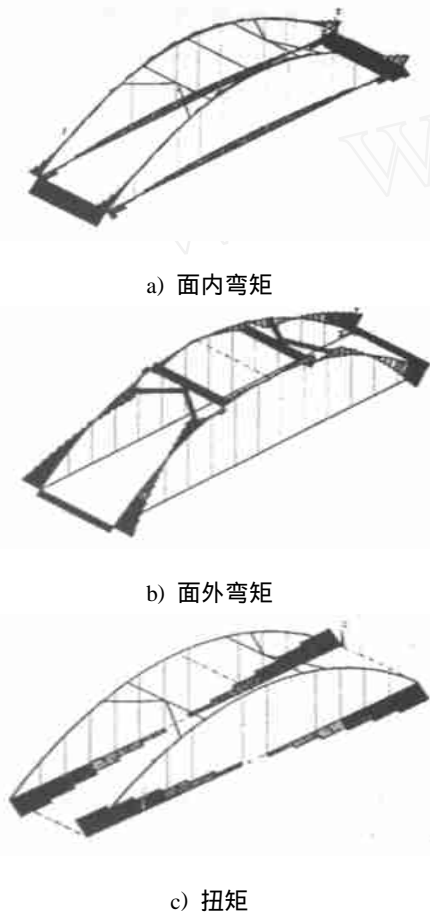


图 5 安装吊杆横梁阶段内力分布

Fig. 5 Distribution of internal force during installation of crossbeam

5 吊杆横梁和端横梁

吊杆横梁的受力在平面模型中无法考虑,初步设计时偏保守地取简支梁的跨中正弯矩作为其跨中正弯矩,取固端梁的固端负弯矩作为横梁与

系梁相接处的负弯矩。空间模型中则根据实际构造将吊杆横梁与系梁固结在一起,吊杆横梁受力状态介于简支梁和固端梁之间。设吊杆横梁的梁端负弯矩与跨中正弯矩绝对值之比为 (简称弯矩比),显然,它与系梁抗扭刚度与横梁抗弯刚度之比为 (简称刚度比) 有关。对郑州黄河公路二桥主桥的吊杆横梁在均布恒载作用下的 与 的关系进行了计算。计算结果表明,除了靠近拱脚处的一两根横梁的 值受 值的影响较大外,其余横梁 与 的关联性不大。

图 6 和表 1 分别给出了均布荷载作用下各吊杆横梁的弯矩图和弯矩值。显然,跨中部分的横梁与简支梁受力性能相近,基本上受正弯矩作用,只有靠近拱脚处的一两根横梁有绝对值不大的负弯矩。靠近拱脚处的横梁,由于强大的端横梁的约束作用,使得系梁的抗扭刚度对横梁的受力有较大的影响。对于郑州黄河公路二桥主桥,系梁抗扭刚度为 $4.41 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$,吊杆横梁抗弯刚度为 $1.49 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $\alpha = 2.96$, $\beta = 0.46$ 。为分析刚度比 对弯矩比 的影响,对郑州黄河公路二桥主桥 1# 和 12# 横梁进行分析,设余参数不变,仅考虑刚度比 变化时,得到 与 的关系曲线如图 7 所示。显然,随 的增长呈非线性增长。换言之,系梁的抗扭刚度越大,横梁的负弯矩也越大。

表 1 均布荷载作用下吊杆横梁正负弯矩比

Tab.1 Ratio of negative moment verse positive moment of crossbeam under uniformly distributed load

吊杆横梁编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#
梁端负弯矩 (kN·m)	-2049.6	-1142.5	-735.6	-495.2	-358.4	-296.6
跨中正弯矩 (kN·m)	4543.9	5057.1	5456.4	5703.4	5843.5	5906.7
弯矩比	0.45	0.23	0.14	0.09	0.06	0.05

说明:表中吊杆编号见图 2。



图 6 吊杆横梁均布荷载面内弯矩

Fig. 6 moment in plane of crossbeam under uniformly distributed load

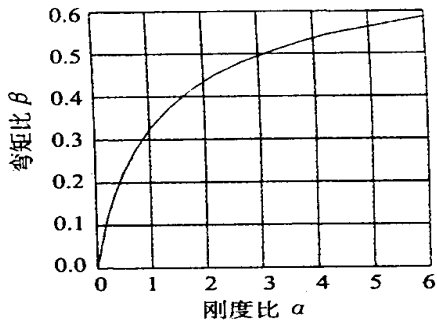


图 7 刚度比 与弯矩比 的关系曲线

Fig.7 Relation between stiffness ratio and in - plant moment ratio

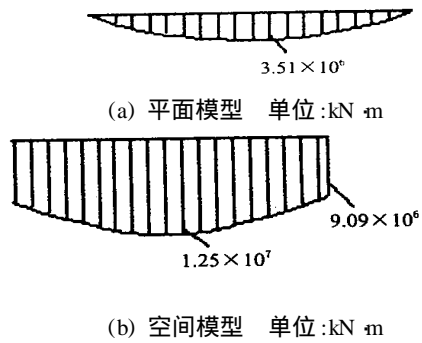


图 8 成桥后端横梁恒载面内弯矩

Fig.8 In - plane moment of end floor beam of completed bridge

为简化设计与施工,一般在设计时考虑所有吊杆横梁的构造与配筋相同。因此,其跨中正弯矩取简支梁的跨中弯矩,与系梁相接处的负弯矩按靠近拱脚的第一根吊杆横梁的负弯矩来设计或按跨中正弯矩的 50% 考虑^[5]。一般情况下,与系梁联结处的数值不大的负弯矩可以靠配置普通钢筋或正弯矩配的预应力筋在梁端时弯起来解决,不必配直索来承担负弯矩筋。反过来说,初步设计进行平面模型计算时,考虑负弯矩按固端梁负弯矩(跨中正弯矩的 200%)来配预应力筋是不合理的。它不仅没有必要,而且配直索时还会削弱正弯矩筋的作用,造成材料的浪费与施工的复杂。

对于端横梁的受力,平面模型计算时同样无法考虑,因此它常被简化为简支梁。实际上,从上一节的分析可知,系梁传来的扭矩绝大部分都转化为端横梁的梁端正弯矩,因此它具有远大于简支梁的正弯矩。图 8 为成桥后端横梁在恒载作用下其面内弯矩分布情况。桥面荷载在端横梁中产生的正弯矩随桥面刚度的增大而减小。在施工阶段,端横梁梁端正弯矩可达跨中弯矩的 40%;成桥后,当 4 列汽超 - 20 车队的重车轮子作用在端横梁上时,端横梁梁端具有较大的正弯矩,为跨中正弯矩的 24%;挂车引起的端横梁梁端正弯矩相对较小,为跨中正弯矩的 7%。由于 4 列汽超 - 20 产生的内力起控制作用,因此设计中可以认为在活载作用下,端横梁梁段正弯矩与跨中弯矩之比为 24%。因此,端横梁空间受力性质与按平面模型分析的相差很大,在设计时应应对端横梁进行空间分析,重点考虑系梁传递来的扭矩。

6 空间第一类弹性稳定分析

系杆拱第一阶失稳模态一般为拱肋面外失稳,而钢管混凝土拱桥因材料强度高和跨越能力强,其拱肋侧向稳定问题越显突出^[6]。为缩短系杆拱桥的工期,可在保证施工稳定的前提下边架设剩下的横撑边灌注拱肋混凝土。由于平面模型无法进行面外稳定分析,因此,本文利用空间模型分析了不同横撑设置条件对施工稳定的影响,同时分析系梁安装支架、系梁预应力和桥面板横向刚度对第一类稳定问题的影响程度。

K 撑中的斜撑可提高结构面外变形时的抗剪切错动变形能力以及缩短拱肋的自由长度。图 9 为郑州黄河二桥在灌注拱肋混凝土阶段的失稳模态。设置有不同的横撑时拱肋失稳模态均为面外半波正弦,但仅有三根一字撑(两个 K 撑中的斜撑未安装)时,结构稳定系数将降低 37%,且拱肋失稳变形在 K 撑的斜撑处也发生一定的变化。然而,此时结构的一类弹性稳定系数仍大于 4,因此为满足施工进度要求,实际施工时是在仅架设三根一字撑的情况下进行拱肋混凝土灌注的。

郑州黄河二桥主桥系梁安装采用少支架法进行。系梁形成后是否保留支架,对后期施工的结构稳定性有相当的影响。安装吊杆横梁阶段,有支架时,拱肋失稳模态为面外半波正弦(图 10a),而无支架时拱肋失稳模态为面外全波正弦(图 10b),同时结构稳定安全系数降低 30% 左右。横撑越弱,支架对提高拱肋侧向稳定的贡献越大。因此,保留系梁安装支架对提高结构在安装吊杆横梁阶段的稳定性具有很大作用。

拱肋的弹性一类稳定系数主要与拱肋的轴压

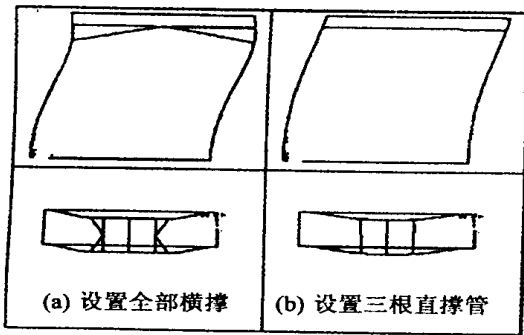


图9 灌注拱肋混凝土阶段失稳模式

Fig. 9 Buckling mode during concrete filling of arch rib

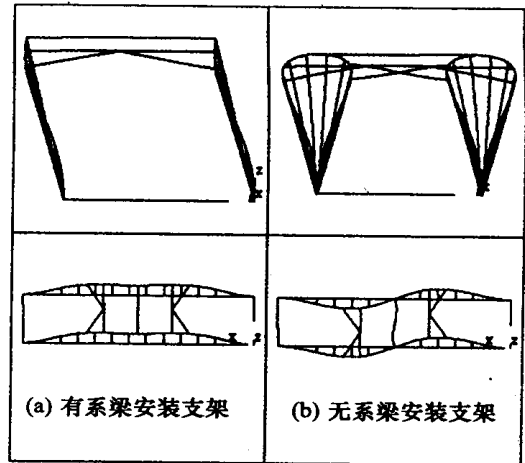


图10 安装吊杆横梁阶段失稳模式

Fig. 10 Buckling mode during installation of crossbeam

力水平有关,施工中系梁施加的预应力将有一小部分由拱来承担,增大了拱的压力降低了拱的弹性一类稳定系数,但降低幅度不大。对郑州黄河公路二桥主桥,其降低幅度均小于6%。成桥阶段预应力对拱肋第一类弹性稳定的影响更小,可以忽略不计。

郑州黄河公路二桥成桥阶段结构失稳模式为拱肋面外正弦波,与施工阶段无系梁安装支架时的失稳模式相同(图10b)。仅在结构自重作用下的稳定系数为6.398;在结构自重和汽超-20作用下的最小稳定系数为5.215,满足大于4~6的要求。

7 结论

7.1 杠杆法计算的荷载横向分配系数与空间模型计算结果接近,最大不超过5%。结构设计计算时可以按杠杆法计算活载的偏载系数。

7.2 在竖直荷载作用下,主拱与系梁是以面内受力为主的构件,但考虑空间效应后,拱脚处还将受到面外弯矩与扭矩,但其值较小一般可以忽略不

计;但系梁所受到的扭矩较大,设计与施工中应予考虑。

7.3 吊杆横梁受力介于简支梁和固端梁之间,但偏于简支梁,设计时其正弯矩可按简支梁的跨中正弯矩来考虑。但横梁与系梁相接处的负弯矩在平面模型计算中按固端梁的固端负弯矩来考虑是不合理的。按靠近拱脚的第一根吊杆横梁的负弯矩来考虑较为合理。

7.4 系梁的扭矩绝大部分由端横梁的弯矩承担,在结构自重作用下,支点处有较大的正弯矩,因此不能按平面模型中的简支梁来考虑,而应采用空间计算分析结果来设计。

7.5 K的斜撑与系梁安装支架能较大地提高结构空间一类弹性稳定系数。施工中可根据稳定计算结果与施工实际情况综合考虑、合理安排,在保证安全的前提下,方便施工,加快施工进度。

参考文献

- [1] 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. 91,100~101.
- [2] CHEN Baochun. Nonlinear Characteristics and Ultimate Load - Carrying Capacity of Concrete Filled Tubular Arch[D]. Japan: Kyushu University, 2003. 121~127.
- [3] CECS28:90, 钢管混凝土结构设计及施工规程[S].
- [4] 金成棣. 预应力梁拱组合式桥梁 - 设计研究与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2001. 62,147~148.
- [5] 顾安邦,孙国柱. 公路桥涵设计手册(拱桥)[M]. 北京:人民交通出版社,2000. 278~279.
- [6] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥计算理论研究进展[J]. 土木工程学报,2003,36(12):47~57.