

基于纤维模型方法的钢管混凝土拱桥脱空研究

颜炳玲, 朱小辉, 安希杰, 王永霞

(内蒙古交通职业技术学院, 内蒙古 赤峰 024005)

摘要: 钢管混凝土结构具有承载力高、经济、实用、美观等优点, 在工业厂房、高层、桥梁建筑中得到了大量的应用。混凝土与钢管壁之间的结合质量是影响钢管混凝土承载力的重要因素。采用纤维模型方法, 分别对钢管、混凝土划分纤维单元, 设置缺陷参数, 研究各个缺陷参数对轴心受压承载力的影响, 以OpenSees为计算平台, 采用经纤维模型方法计算承载力与试验承载力方法核比过的钢管混凝土拱进行了缺陷计算分析, 主要缺陷参数为脱空角度、轴向长度、径向厚度, 计算了各个因素影响下的承载力及位移变化, 运用麦夸尔特法及通用全局优化法给出了钢管混凝土脱空承载力折减系数与缺陷参数之间的关系, 为类似的钢管混凝土拱桥的脱空研究提供借鉴。

关键词: 纤维模型; OpenSees; 钢管混凝土; 脱空

中图分类号: U448.222

文献标识码: A

文章编号: 1673-8098(2014)10-0080-03

1 钢管混凝土结构的特点及脱空现象

1.1 钢管混凝土结构的特点

- (1) 受力合理, 承载力高。
- (2) 塑性、韧性好。
- (3) 施工简单, 缩短工期。
- (4) 耐火性能较好。
- (5) 经济效益好。

1.2 钢管混凝土结构的脱空现象

钢管混凝土构件要充分发挥其优越性能, 要求钢管与混凝土两者能够共同工作。一方面, 钢管作为骨架, 起支撑模板作用; 另一方面, 钢管对混凝土有套箍作用, 混凝土处于三向围压作用下, 能够实现承载力的大幅度提高。而在实际的工程施工和使用阶段, 经常出现钢管混凝土的脱空现象。脱空有两种呈现形式, 即钢管与混凝土在交界面处(即钢管管壁)分离或者是混凝土内部出现塌落、空洞、不密实等现象。

钢管与混凝土脱空产生的根本原因是: 钢管与核心混凝土的界面拉应力超过钢管与核心混凝土的黏结强度。拱桥结构中承受轴向压力、温度变化、混凝土的泵送性、施工工艺、混凝土收缩徐变、添加剂的选择及用量等各方面因素都可能引起钢管与混凝土的脱空。

2 纤维模型计算方法

2.1 纤维模型方法

在纤维模型方法中, 结构中的每个构件都被划作一个单元, 在局部坐标系 x, y, z 中的梁单元(见图1)沿纵向划分有 m 个积分点, 单元的刚度阵通过这些积分点的截面刚度阵积分得到, 每个积分点处的横截面又进一步被离散成许多纤维(如用图1中网格划分, 每个网格内的部分即为纤维, 纤维的长度也就是该积分点的积分权系数)。纤维可能是混凝土的, 也可能是钢材的, 这些纤维被认为只有纵向变形而忽略其剪切变形。

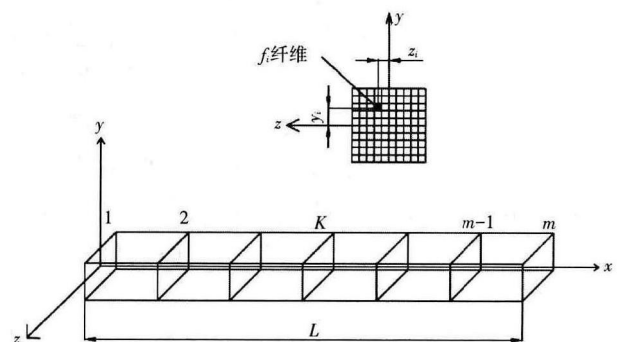


图1 局部坐标系下的梁单元及积分点、截面纤维划分

2.2 OpenSees 计算平台简介

OpenSees (Open System for Earthquake Engineer-

收稿日期: 2014-09-01

作者简介: 颜炳玲(1983—), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为桥梁结构分析、数值模拟计算。

ing Simulation, 地震工程模拟的开放体系)是由美国国家自然科学基金(NSF)资助、西部大学联盟“太平洋地震工程研究中心”及设在伯克利加州大学的机构——太平洋地震工程研究中心牵头开发的用于结构和岩土方面地震反应模拟的一个较为全面且不断发展的开放的程序软件体系。

3 局部脱空对钢管混凝土拱承载力的影响

根据工程经验,脱空较易发生在拱顶部位,根据对脱空的几何描述,对脱空进行以下不同脱空厚度、不同脱空角度、不同脱空长度几个方面的计算。

为建立计算模型,脱空缺陷用3个参数描述:径向脱空厚度 t 、轴向脱空长度 h (由于实际工程中,脱空多发生于拱顶,故本计算模型中脱空长度以拱顶为中心向拱脚对称延长)以及环向脱空角度 θ ,如图2所示。在脱空区是没有接触单元(纤维单元)的。

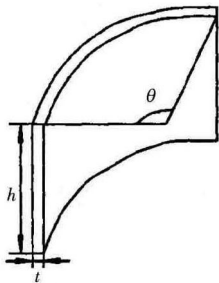


图2 钢管缺陷参数示意图

取模型肋拱的设计跨径为4.60m,拱肋下缘曲线为二次抛物线 $y=x^2/3.45$,净矢高=1.533m。钢管屈服强度 $f_y=307.67\text{MPa}$,极限抗拉强度 $f_t=460\text{MPa}$,钢材弹性模量 $E_s=206\text{GPa}$;内填C30级混凝土,共划分50个单元,51个节点。截面上核心混凝土部分分割了300根纤维,钢管部分分割了60根纤维,在拱的轴向五分点处施加竖向集中力荷载200N,荷载控制步为1。

脱空缺陷参数取值通过排列组合一共建立有48个模型,如表1所示,其中轴向脱空长度用单元序号来表示,如16~35表示从单元16到单元35脱空,以此类推。

表1 计算模型取值

t/m	0.01	0.02	0.03	
h (单元起止序号)	16~35	18~33	20~31	22~29
$\theta/^\circ$	90	180	270	360

3.1 $t=0.01\text{m}$ 时模型的计算结果

表2所示为 $t=0.01\text{m}$ 时对应不同脱空角度和脱空单元数的拱中竖向位移值。表3所示为 $t=0.01\text{m}$ 对应不同脱空角度及单元数时的轴压承载力折减系数。

表2 $t=0.01\text{m}$ 时模型的拱中位移计算结果(单位: mm)

$\theta/^\circ$	22~29	20~31	18~33	16~35
90	-2.641	-2.677	-2.672	-2.711
180	-4.175	-4.131	-4.109	-4.094
270	-2.583	-2.646	-2.663	-2.753
360	-4.132	-4.765	-4.807	-5.809

表3 $t=0.01\text{m}$ 对应不同脱空角度及单元数时的轴压承载力折减系数

$\theta/^\circ$	16~35	18~33	20~31	22~29
90	0.715 5	0.712 7	0.715 5	0.718 3
180	0.940 8	0.949 3	0.954 9	0.994 4
270	0.704 2	0.701 4	0.704 2	0.709 8
360	0.986	0.966 2	0.966 2	0.997 2

数据分析:当 $t=0.01$ 时,90°脱空为局部非对称性脱空,承载力骤减,折减程度为0.7左右。随着脱空单元的增多,拱中竖向位移值逐渐增大,但此时承载力降低趋势不明显。180°半环向脱空属于大面积对称脱空,承载力折减较90°脱空明显降低,随着脱空长度的增大,拱中位移增大不明显。270°脱空为局部非对称性脱空,承载力骤减,折减程度为0.7左右。而360°脱空时,承载力方面几乎没有较大的变化,但随着脱空长度的增大,拱中位移增大程度较明显。

3.2 $t=0.02\text{m}$ 时模型的计算结果

表4所示为 $t=0.02\text{m}$ 时对应不同脱空角度和脱空单元拱中竖向位移值。表5所示为 $t=0.02\text{m}$ 对应不同脱空角度及单元时的轴压承载力折减系数。

表4 $t=0.02$ 时模型的拱中位移计算结果(单位: mm)

$\theta/^\circ$	22~29	20~31	18~33	16~35
90	-2.637	-2.684	-2.686	-2.703
180	-4.146	-3.741	-3.740	-3.768
270	-2.719	-2.737	-2.703	-2.784
360	-4.114	-6.166	-6.257	-6.944

表5 $t=0.02m$ 对应不同脱空角度及单元时的轴压承载力折减系数

$\theta/^\circ$	16~35	18~33	20~31	22~29
90	0.709 9	0.709 9	0.712 7	0.718 3
180	0.873 2	0.884 5	0.890 1	0.991 5
270	0.692 9	0.692 9	0.701 4	0.701 4
360	0.963 4	0.966 0	0.966 0	0.997 2

数据分析:当 $t=0.02m$ 时,90°时随脱空厚度增大,对应相同的脱空单元拱中位移增大及承载力的折减不明显。180°时由于脱空厚度的增大,相比 $t=0.01m$ 时相同的脱空单元承载力的折减较为明显,270°和360°脱空时极限承载力相比 $t=0.01m$ 时相同的脱空单元承载力的折减不明显。

3.3 $t=0.03m$ 时模型的计算结果

表6所示为 $t=0.03m$ 时对应不同脱空角度和脱空单元的拱中竖向位移值。表7所示为 $t=0.03m$ 对应不同脱空角度时的轴压承载力折减系数。

表6 $t=0.03m$ 时模型的拱中位移计算结果(单位: mm)

$\theta/^\circ$	16~35	18~33	20~31	22~29
90	2.719	2.700	2.696	2.629
180	3.685	3.604	3.585	4.146
270	2.855	2.840	2.758	2.603
360	7.869	6.488	6.380	4.118

表7 $t=0.03m$ 对应不同脱空角度时的轴压承载力折减系数

$\theta/^\circ$	16~35	18~33	20~31	22~29
90	-0.710	-0.713	-0.713	-0.716
180	-0.845	-0.854	-0.862	-0.992
270	-0.690	-0.696	-0.699	-0.707
360	-0.947	-0.952	-0.952	-0.997

数据分析:当 $t=0.03m$ 时,各个不同角度的脱空随脱空厚度增大,对应相同的脱空单元拱中位移增大及承载力的折减不明显。

4 结语

钢管混凝土拱内,混凝土与钢管脱空含不同脱空厚度、长度、角度,对其承载力均有较明显的影响。钢管混凝土拱随着脱空长度及厚度的增大,顶点位移增大,承载力减小。尤其是90°及270°局部非对称脱空出现了承载力急剧下降的趋势,承载力最大折减系数达0.690 1,在实际工程

中必须引起重视,但小厚度短轴向脱空影响不大。另外,当轴向脱空长度增至1/3~2/3时,折减速度明显比小轴向1/6~1/3段要快。混凝土与钢管的泊松比不同,承受外荷载作用时,混凝土与钢管黏结界面上产生拉应力,达到极限平衡状态时引发脱空。钢管内混凝土脱空后,钢管和混凝土不能共同承受轴向力,进一步减小了钢管与核心混凝土的黏结程度,核心混凝土失去紧箍力,减轻混凝土的三向受压状态,导致偏心和失稳的加剧,使整体拱体结构承载力下降。结果说明:钢管内混凝土脱空严重影响钢管混凝土的使用安全性。

综上所述,本节根据钢管混凝土脱空的三个几何描述参数对承载力的影响进行了计算,总结表3、表5、表7,建立单拱肋钢管混凝土脱空的承载力折减系数模型:

$$\phi = \phi_t \phi_\theta \phi_h \quad (1)$$

式中: ϕ 为脱空的承载力折减系数; ϕ_t 为脱空厚度 t 对承载力折减的影响; ϕ_θ 为脱空角度对承载力折减的影响; ϕ_h 为轴向脱空长度 h 对承载力折减的影响。

通过数据分析发现: ϕ_t 与脱空厚度的关系可用线性表达式 $\phi_t = b_1 t + b_2$ 表示; ϕ_θ 与脱空角度的关系可用 $\phi_\theta = b_3 \theta^3 + b_4 \theta^2 + b_5 \theta + b_6$ 表示; ϕ_h 与轴向脱空长度的关系可用 $\phi_h = b_7 h^{b_8}$ 表示。

$$\text{则: } \phi = (b_1 t + b_2)(b_3 \theta^3 + b_4 \theta^2 + b_5 \theta + b_6)(b_7 h^{b_8}) \quad (2)$$

对此表达式进行多元非线性回归,采用麦夸尔特法(Levenberg-Marquardt)及通用全局优化法,收敛判断指标1.00E-10,进行了36次迭代,相关系数 $R=0.98$,计算结果如下:

$$\begin{aligned} b_1 &= -0.855 & b_2 &= 0.555 \\ b_3 &= 377.578 & b_4 &= -265.275 \\ b_5 &= 56.354 & b_6 &= -1.772 \\ b_7 &= 0.886 & b_8 &= -0.052 \end{aligned}$$

即可确立单拱肋的脱空状况对承载力折减的影响模型为:

$$\phi = (-0.86t + 0.56) \times (377.58\theta^3 - 265.28\theta^2 + 56.35\theta - 1.77) \times 0.89h^{-0.05} \quad (3)$$

建立脱空对承载力折减的模型,有利于定量测算钢管混凝土脱空对轴向承载力的折减影响,为施工过程中对引发脱空的因素控制提供依据。

(下转第85页)

明显下沉。分环及分段间混凝土的表面必须进行凿毛处理。另外，当混凝土初凝后，对混凝土表面进行洒水养护，当气温低于15℃时，混凝土表面采用麻袋进行覆盖保温，同时洒水养护。

5 拱圈施工控制技术

5.1 结构稳定性控制

结构的稳定关系到桥梁的安全，与桥梁的强度有着同等重要的意义。在浇筑混凝土时，随着桥梁自重荷载的增大，受动荷载或突发情况的影响，难于保证桥梁施工的安全。为此必须对施工过程中可能出现的动荷载或突发情况进行分析并找出应对措施，可能出现的情况有风荷载产生抖动、塔吊运行时产生振动、卷扬机运行时产生振动、塔吊失吊冲击时产生的振动等。

5.2 施工控制方法

针对箱拱的特点，为使成桥线形与内力状态和设计相符，保证桥梁安全、线形美观，在施工过程中建立了“三、三、三”现场管理控制系统，实施了有效的施工控制，即做到“三个阶段：事前预算，事中控制，事后预测”；“三方单位：设计方、施工方、监测方”；“三条主线：计算系统、施工系统、监测系统”。

5.3 施工控制实施

施工控制的要求是：保证施工中的安全和结构恒载内力及结构线形符合设计要求。在拱圈浇

筑过程中，确保线形平顺、正确是第一位的，施工中采用轴线、高程控制为主。拱圈采用3次浇筑，每浇筑一层要观测5个工况的轴线、高程及时间、温度：

(1) 调整好浇筑混凝土前内模、外模高程，通常是在混凝土浇筑前1~3h观测；

(2) 浇筑混凝土过程中及浇筑完毕时的轴线、高程观测及时间、温度；

(3) 预应力张拉前轴线、高程观测及时间、温度；

(4) 预应力张拉后轴线、高程观测及时间、温度，通常在混凝土浇筑完毕之后的第3天开始张拉，此时混凝土强度达到设计强度的90%（要求不得低于80%）；

(5) 拱架拆除后的轴线、高程观测及时间、温度。

6 结语

本文结合甘河沟大桥工程实例，该桥梁主拱圈混凝土施工采用悬拼拱架方式实施，在正式浇筑主拱圈混凝土前，首先对拱架采取预压处理，以有效地得到悬拼拱架的工作性能；同时具体总结出该桥梁主拱圈混凝土的浇筑技术。从工程实施效果来看，本工程主拱圈混凝土施工质量良好，本工程所采取的技术措施可以有效地确保混凝土施工质量。

（上接第82页）

参考文献：

- [1] 付超, 况勇, 蔡金火. 大跨度钢管混凝土拱桥混凝土泵送技术[J]. 铁道建筑技术, 2000(2): 6-8.
- [2] 韩西, 杨科, 杨劲, 等. 基于声振法的钢管混凝土脱空检测技术试验研究[J]. 公路工程, 2012, 37(10): 108-110.
- [3] 齐虎, 孙景江, 林淋. OPENSEES中纤维模型的研究[J]. 世界地震工程, 2007, 12(4): 48-54.
- [4] 罗辑. 基于OpenSees计算平台的钢管混凝土拱桥抗震性能分析[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [5] 郑强, 孙国安. 佛陈大桥缺陷原因分析及加固[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 21-29.
- [6] 丁睿. 钢管混凝土拱桥界面脱空光纤传感研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 69-74.
- [7] 童林, 夏桂云, 吴美君, 等. 钢管混凝土脱空的探讨[J]. 公路, 2003(5): 16-20.
- [8] 饶德军, 黎海宁, 张玉红, 等. 解决钢管混凝土拱肋泵注混凝土脱空问题的设计方案[J]. 铁道建筑, 2005(4): 25-27.
- [9] 纪洪广, 张贝贝. 有脱空缺陷的钢管混凝土短柱承载[J]. 钢结构, 2007(1): 59-61, 69.
- [10] 过镇海. 混凝土的多轴强度介绍[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(6): 72-75.