

80 m下承式系杆拱桥结构计算分析与对比研究

黄 灿¹, 赵冠华¹, 周小勇^{2*}, 窦志明¹

¹中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉

²中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年4月25日; 录用日期: 2022年5月10日; 发布日期: 2022年5月20日

摘 要

以灵山人行桥第四跨为背景, 利用Midas Civil和桥梁博士软件分别对桥梁进行建模计算, 将两者计算结果进行对比, 分析两款软件在桥梁内力和变形上计算结果的偏差, 并对计算结果产生差异的原因进行分析, 为判断下承式无推力系杆拱内力计算结果的准确性提供依据。

关键词

系杆拱桥, 桥梁博士, Midas, 静力计算, 对比分析

Structural Calculation Analysis and Comparative Study of 80 m Lower through Tie Arch Bridge

Can Huang¹, Guanhua Zhao¹, Xiaoyong Zhou^{2*}, Zhiming Dou¹

¹CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan Hubei

²China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Received: Apr. 25th, 2022; accepted: May 10th, 2022; published: May 20th, 2022

Abstract

Taking the fourth span of Lingshan footbridge as the background, Midas Civil and Dr. Bridge software are used to model and calculate the bridge respectively, and the calculation results of the

*通讯作者。

two software are compared to analyze the deviation of the calculation results of the internal force and deformation of the bridge, and the reasons for the difference of the calculation results are analyzed. The results provide a basis for judging the accuracy of the calculation results of the internal force of the lower thrust tie rod.

Keywords

Tied Arch Bridge, Dr. Bridge, Midas, Static Calculation, Comparison and Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国家城镇化建设的不断推进,系杆拱桥在城市桥梁中占据着越来越重要的位置[1]。系杆拱桥通过将拱和梁结合在一起,充分发挥了梁受弯、拱受压的结构性能[2]。由于系杆拱桥属于外部静定,内部超静定结构[3],采用手算的方法比较困难。为提高计算效率,市场上出现了各种计算分析软件,像 Midas Civil [4]、桥梁博士[5]等有限元软件在桥梁设计、受力计算上发挥着越来越重要的作用,两款计算软件都是将通用的有限元计算方法与土木工程结构结合起来,但两者在土木工程材料的模拟、收缩徐变计算方法等方面存在着差异,这也就使得两款软件在计算结果上产生了差异。

2. 工程概况

灵山人行桥位于河南省洛阳市宜阳县,桥梁全长 460.84 m,桥面净宽 4 m,全宽 7.8 m,全桥共 7 孔,中间孔(第四跨)单孔跨径 80 m,其余孔单孔跨径 60 m。如图 1 所示,上部结构采用下承式钢管砼系杆拱,下部结构采用群桩承台接板式实体墩。设计荷载为城市人群荷载。

灵山人行桥第四跨上部采用下承式无推力系杆拱,单钢管砼拱肋,主副拱采用 Q345 钢,使用 C50 混凝土进行填充,系梁及横梁采用 C40 进行浇筑。拱顶各设 5 道一字型风撑,拱轴线采用二次抛物线,矢跨比为 1/5,吊杆采用 GJ15-9 型钢绞线整束挤压式吊杆,吊杆共设 15 对,体系间距 5 m。如图 2 所示,桥面布置为 1.6 m (索区) + 0.3 m (栏杆) + 4 m (人行道) + 0.3 m (栏杆) + 1.6 m (索区)。

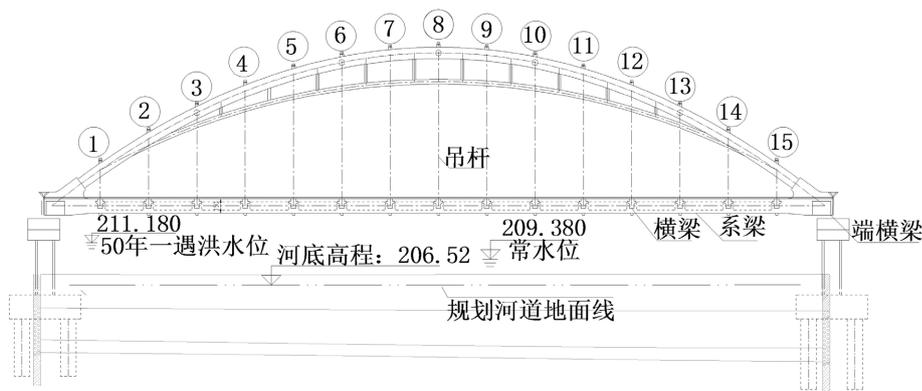


Figure 1. Layout of the fourth span main bridge (unit: m)

图 1. 第四跨主桥布置图(单位: m)

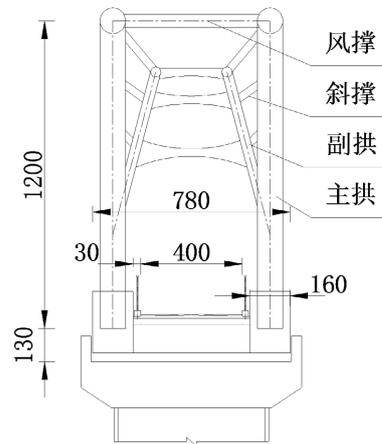


Figure 2. Section of the fourth span main bridge (unit: cm)
图 2. 第四跨主桥断面图(单位: cm)

3. 有限元建模

灵山人行桥第四跨结构静力计算采用桥梁博士 V4.3.0 和 Midas Civil 2021, 两款软件计算结果相互校核。由于主拱与副拱采用斜交的方式, 若按常规建模方法过程比较繁琐, 为更好的高效建模, 两模型的拱轴线以及主梁、横梁轴线采用 Auto CAD 文件导入方式进行建立, 保证模型尺寸一致。为减少计算误差, 两计算软件中模型的节点和单元数量及划分方式保持一致, 模型共离散为 500 个节点, 566 个单元, 共设置系梁施工、端横梁施工、钢拱施工、张拉第一批预应力、吊杆第一次张拉(分八批次张拉)、安装桥面板、桥面铺装、张拉第二批预应力、吊杆第二次张拉(分八批次张拉)、体系转换、收缩徐变共 25 个阶段。Midas Civil 计算模型如图 3 所示, 桥梁博士计算模型如图 4 所示。为保证结果对比的真实性, 两模型使用的材料、建模方式、荷载情况(活载和恒载)以及施工阶段划分均保持一致。在吊杆模拟上, 桥梁博士模型采用索单元进行建模, Midas Civil 模型采用只受拉单元进行建模, 针对吊杆计算桥梁博士计算精度要高。

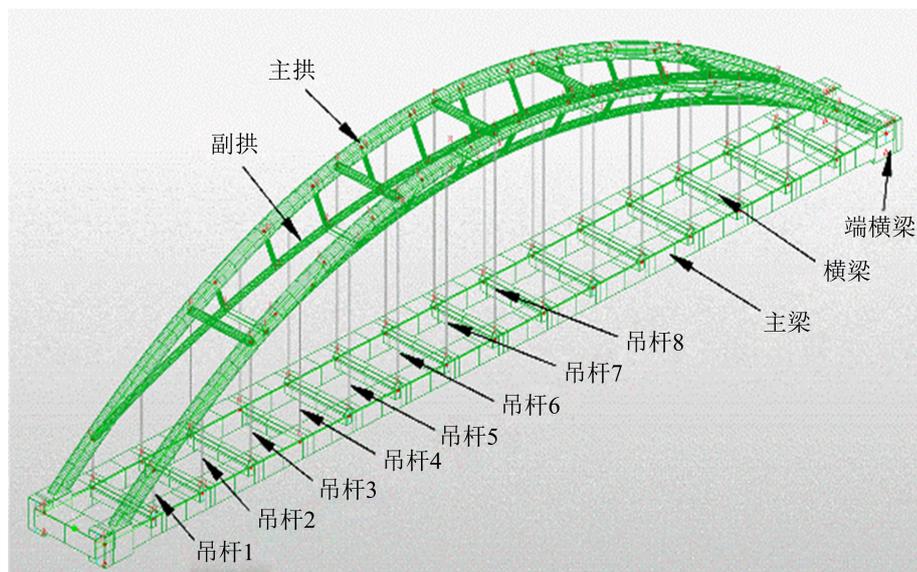


Figure 3. Midas civil computing model
图 3. Midas civil 计算模型

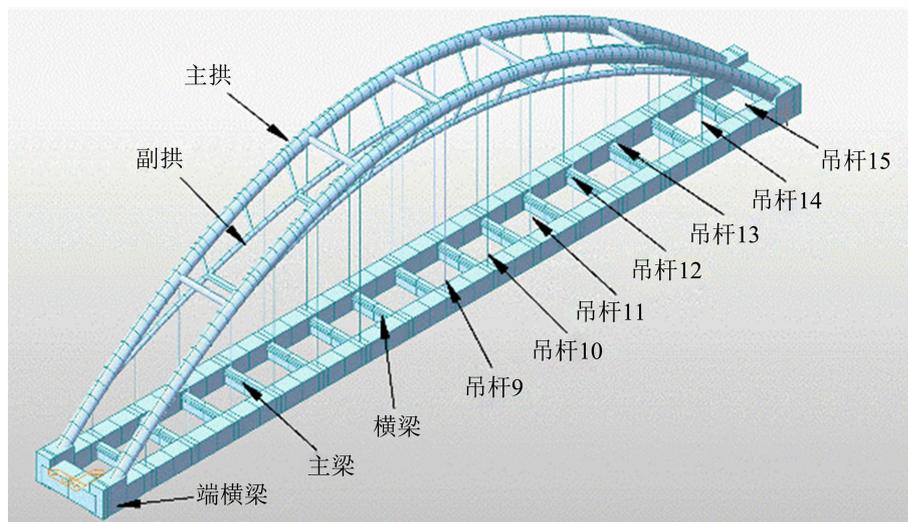


Figure 4. Dr. Bridge computing model
图 4. 桥梁博士计算模型

4. 结果对比分析

4.1. 受力分析

将有限元模型计算结果中支座、1/4 跨及跨中位置处的主拱和系梁单元在自重作用下的内力及位移提取出来，列于表 1 和表 2 之中。考虑到吊杆的对称性，故只将在荷载基本组合作用下的 1~8 号吊杆的轴力列于表 3 之中。

Table 1. Internal force and displacement of beam under dead weight (main girder)

表 1. 自重作用下系梁的内力及位移(主梁)

计算软件	剪力/kN			弯矩/(kN·m)			竖向位移(mm)	
	跨中	1/4 跨	支座	跨中	1/4 跨	支座	跨中	1/4 跨
Midas Civil (系梁)	437.5	129.2	437.5	55.4	264.5	-1180.6	16.6	13.3
桥梁博士(系梁)	427.4	118.2	424.2	62.2	222.8	-1023.6	17.0	13.1

由表 1 可知，系梁在自重荷载作用下，两款计算软件所计算的剪力值差别大不大，Midas/Civil 所计算出的剪力值比桥梁博士最大差别在 5.4%左右；在支座处的弯矩计算结果差别较大，Midas/Civil 计算结果比桥梁博士高 13%左右；在竖向位移中，两款计算软件在系梁位移计算中结果基本一致。

Table 2. Internal force and displacement of main arch under dead weight (main arch)

表 2. 自重作用下主拱的内力及位移(主拱)

计算软件	轴力/kN			弯矩/(kN·m)			竖向位移(mm)	
	跨中	1/4 跨	支座	跨中	1/4 跨	支座	跨中	1/4 跨
Midas Civil (主拱)	5018.7	5457.7	6577.2	242.0	197.5	1210.8	18.9	15.8
桥梁博士(主拱)	4722.5	5135.9	6254.0	178.5	222.8	1008.1	17.0	13.1

由表 2 可知,主拱在自重荷载作用下,两款计算软件所计算的轴力值最大差别在 6%左右;在支座处的弯矩值差别较大,Midas/Civil 计算结果比桥梁博士高 16%左右。在竖向位移计算中,Midas/Civil 模拟的钢管混凝土的刚度比桥梁博士的相对偏小,Midas/Civil 计算结果比桥梁博士高 13%左右。

4.2. 吊杆应力分析

由表 3 可知,吊杆在荷载基本组合作用下,两款计算软件所计算的吊杆轴力值出现在吊杆 3 上差别最大,最大差别在 4.8%左右。模型采用的张拉顺序:吊杆 4→吊杆 7→吊杆 2→吊杆 4→吊杆 3→吊杆 5→吊杆 1→吊杆 7 的对称张拉方式,在不同的张拉阶段各索力值基本保持一致,期间吊杆值最大差别在 5%左右。在桥梁博士中,吊杆与主梁的连接位置处需设置锚固点,锚固点与主梁形成大刚度连接单元,Midas Civil 吊杆与主梁直接进行构件连接,导致两者计算产生差异[2]。

Table 3. Internal force value of tie bar under basic combination (kN)

表 3. 基本组合下吊杆内力值(kN)

计算软件	吊杆 1	吊杆 2	吊杆 3	吊杆 4	吊杆 5	吊杆 6	吊杆 7	吊杆 8
Midas Civil	572.5	647.2	630.2	641.1	729.9	655.2	631.6	627.0
桥梁博士	590.6	673.2	662.9	645.8	694.8	678.4	620.9	678.4

4.3. 位移分析

由图 5 和图 6 可知,在桥梁中心线位置,桥梁博士计算出的活载作用下的主拱位移值与 Midas/Civil 结算结果值差别最大。在 1/4 桥跨位置处,Midas/Civil 系梁竖向位移计算结果比桥梁博士大 20%左右。

4.4. 预应力损失

如图 7 所示,在预应力损失计算上,两款计算软件结果差别十分小,需特别注意的是计算时采用的张拉方式,该桥梁模型采用两端张拉的方式,钢束在张拉位置处预应力损失较大。预应力损失自支座向跨中出现了先减小后增大的趋势,且预应力损失主要出现在 σ_{l1} 和 σ_{l2} 上, σ_{l1} 在跨中损失最大, σ_{l2} 在支座位置处损失最大,两者叠加后使得预应力损失计算结果产生了上述趋势。

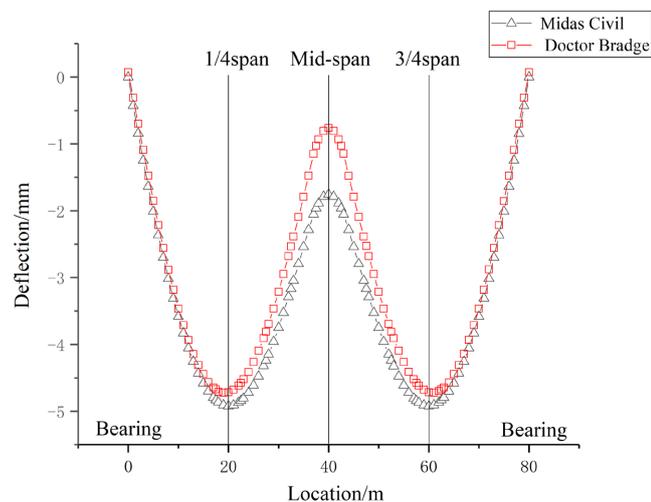


Figure 5. Vertical displacement of main arch (live load)

图 5. 主拱竖向位移(活载)

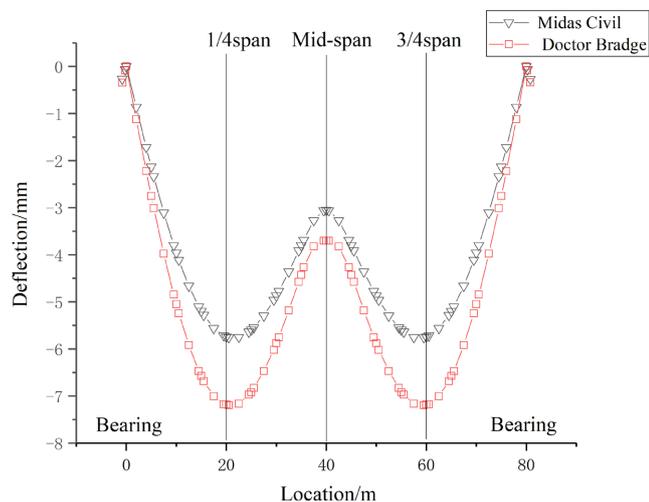


Figure 6. Vertical displacement of beam (live load)

图 6. 系梁竖向位移(活载)

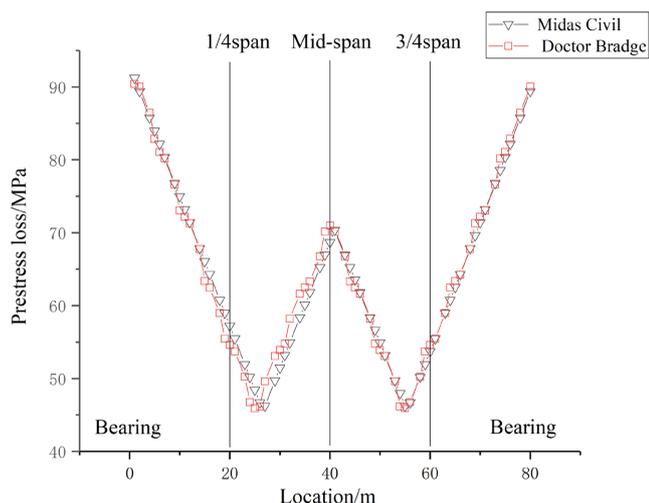


Figure 7. Prestress loss diagram

图 7. 预应力损失图

5. 数据分析

虽然两款计算软件在结果上产生了差异，但总体的计算结果还是可以接受的。在自重作用下拱脚处的弯矩、活载作用下系梁 1/4 跨位置处及主拱跨中位置处的竖向位移差别最大，在计算的时候需要特别注意。针对出现计算差异的原因，我们从自重系数及收缩徐变计算上进行了讨论。

在自重系数设置上，Midas/Civil 模型采用了统一的自重系数，即普通钢筋混凝土、预应力混凝土、及钢管混凝土的自重系数是一致的，对于组合结构来说，这种设置方法必然会对计算结果产生影响，但桥梁博士可以对每一个构件的自重系数进行单独设置，从而使桥梁的自重更加接近真实值。通过对灵山人行桥第四跨横梁、系梁、钢拱真实自重进行计算，三者的实际的自重系数分别为 1.09、1.04 和 1.20。但在 Midas/Civil 计算中采用了整体自重系数 1.04，在桥梁博士中采用了实际的自重系数。桥梁博士的单元长度为构件节点连接线上的长度，在自重荷载作用下，Midas/Civil 单个支座反力为 5645 kN，桥梁博士计算结果为 5940.3 kN。Midas/Civil 单个支座反力结果会比桥梁博士偏小 5.2%，故在计算钢管混凝土

上需要考虑自重系数的影响。

在材料类型、施工时间及温度设置一致的情况下，两款软件在收缩徐变的计算上，模型在徐变一次的竖向位移值产生了较大的差异。出现这种情况的原因是不同的计算软件在收缩徐变算法上存在差异：构件理论厚度处理方式、徐变系数的拟合方式、徐变基本算法、收缩引起的徐变算法、普通钢筋的应力和内力等方面存在差异。针对变截面单元，桥梁博士构件理论厚度随单元进行线性变化，Midas Civil 一个单元采用一个构件理论厚度值。由于模型中的构件均为等截面，构件理论厚度对计算结果无影响。针对规范中徐变系数计算结果，两款软件均采用指数函数表达式对徐变系数进行拟合，但拟合公式有所差别，桥梁博士拟合精度总体比 Midas Civil 低。在计算徐变自身所引起的徐变时，桥梁博士采用换算弹性模量法(通过调整龄期换算出该阶段的有效模量)，Midas Civil 则不考虑徐变自身在本阶段引起的徐变，不引入换算弹性模型。桥梁博士不考虑普通钢筋约束产生的内力，Midas Civil 则将其作为收缩徐变的二次效应进行输出。基于上述计算方法上的差异，导致两款软件在徐变计算上出现了较大区别。

6. 结论

本文利用有限元软件 Midas/Civil 和桥梁博士对宜阳下承式钢管拱桥进行静力分析计算，对两分析软件所计算出的桥梁的弯矩、剪力、位移、吊杆轴力情况进行了对比分析，得出如下结论：

1) 在内力计算上，两款计算软件在轴力、剪力计算上差别较小，弯矩在拱脚位置处需要特别注意；在位移计算上，主拱位移偏差较小，Midas/Civil 模拟的系梁刚度比桥梁博士要小，在 1/4 桥跨位置处计算的位移值差别最大，同样在此位置处两款计算软件的误差也最大。

2) 不同类型的构件自重系数是不一样的，一般钢管混凝土的自重系数最大，普通钢筋混凝土次之，预应力混凝土最小。Midas/Civil 只能采用一个整体系数，桥梁博士可对不同的构件单独设置自重系数，使计算结果更加接近真实值。

3) Midas/Civil 和桥梁博士在相同的条件下，徐变的计算结果产生了差异。在分阶段进行计算时，桥梁博士按照等差数列细分阶段天数，Midas Civil 按照等比数列进行细分，尤其是混凝土早期的徐变结果对位移值的计算结果影响很大，需要重点关注。

4) 通过对两款计算软件的计算结果进行对比分析，其所算出的内力、位移、吊杆轴力以及预应力损失的结果总体上是可以接受的，由于在拱脚位置处的钢骨架在建模时未考虑，需要采用 Ansys 对拱脚进行局部精细建模。

参考文献

- [1] 冯志强, 张勇, 张智乐. 某钢管混凝土系杆拱桥施工监控分析研究[J]. 公路, 2019, 64(3): 123-127.
- [2] 周德. 高速铁路下承式钢箱系杆拱钢-混凝土组合桥结构体系及受力性能研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [3] 张燕青. 确定系杆拱桥合理吊杆索力的方法及其应用[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [4] 马兰. MIDAS/CIVIL 软件在桥梁设计中的应用[J]. 四川水泥, 2016(10): 16-17.
- [5] 段红俊. 连续刚构桥三维有限元参数化建模研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学.