

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.08.022

# 主跨 136 m 空间钢桁拱与预应力混凝土梁 组合桥受力性能分析

王 鹏  
(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

**摘 要:**为研究空间钢桁拱与预应力混凝土梁组合桥的力学性能,以广州市从化大桥为例,采用空间有限元分析软件对影响空间钢桁拱稳定性的主要控制因素以及拱与主梁抗弯刚度变化等对结构内力和位移的影响进行了参数分析。结果表明拱肋刚度对桥梁整体稳定性影响较大,横、斜撑刚度的影响不大;只有中间吊杆时,拱肋的稳定性较差;主梁刚度对桥梁受力影响较大;吊杆初始张拉力大小影响恒载作用下主梁和拱肋的受力状态。  
**关键词:**空间钢桁拱;预应力混凝土梁;稳定性;刚度;参数分析  
**中图分类号:** U442.5      **文献标志码:** B      **文章编号:** 1009-7716(2023)08-0088-05

## 0 引 言

拱梁组合体系桥在桥梁组合结构史上产生较早且应用相当广泛。它能有效的将主要承受压力的拱结构和主要承受弯矩的梁结构组合起来以达到共同抵抗荷载的目的,充分利用了拱结构及梁结构的力学特点,同时也充分体现了组合结构力学行为的优越性<sup>[1]</sup>。

拱梁组合体系桥按主梁与拱肋相对刚度的大小可分为柔拱刚梁桥、刚梁柔拱桥和刚拱刚梁桥。按外部是否存在冗余约束,可分为简支拱梁组合桥、悬臂拱梁组合桥、连续拱梁组合桥三种结构类型。按结构材料不同可分为钢结构拱梁组合桥、钢筋混凝土拱梁组合桥和预应力混凝土拱梁组合桥。广州市从化大桥是一座空间钢桁拱与预应力混凝土梁组合简支体系桥,属于柔拱刚梁体系桥。这种类型桥梁施工简便,且对地质条件要求不高,造价较低而造型优美。本文以该桥的设计作为背景,对影响空间钢桁拱与预应力混凝土梁组合桥的整体稳定性、拱肋及横斜撑的结构尺寸、主梁刚度等关键因素进行系统的研究,以便于做出更好的优化分析,为同类型桥梁设计提供参考<sup>[2]</sup>。

## 1 工程概况

广州市从化大桥主桥采用单跨 136 m 的空间钢

桁拱与预应力混凝土梁组合桥。主桥宽度为 40 m,为双向六车道,两侧分别设置 3.5 m 的人行道。道路等级为城市主干路,汽车荷载等级为城—A 级。其总体布置见图 1、图 2。

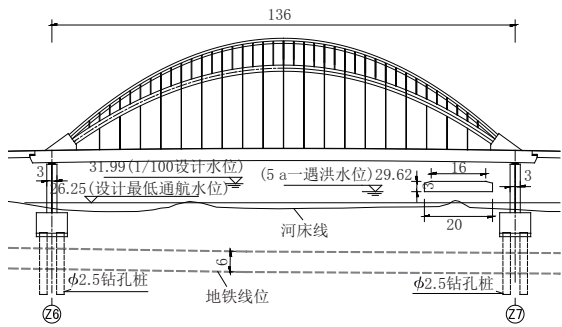


图 1 桥梁立面布置图(单位:m)

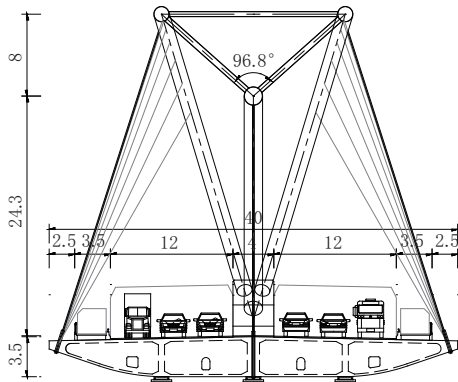


图 2 桥梁横断面布置图(单位:m)

该桥主拱由三根钢管拱肋通过横撑、斜撑组合而成的倒三角形,造型独特,拱肋结构新颖美观,呈现“新月临江”的建筑美学创意<sup>[3]</sup>。三根钢管拱肋线型均为二次抛物线,为了降低钢管的应力,并提高其稳定性,拱肋采用钢管混凝土结构。主拱外径为 1.8 m,钢

收稿日期: 2022-11-08  
作者简介: 王鹏(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

管壁厚为 26 mm,内填 C50 微膨胀混凝土。主拱拱肋位于竖直平面内,其中心线理论跨径 136 m,理论矢高为 26.2 m,矢跨比为 1/5.2。两根副拱肋钢管直径为 1.5 m,钢管壁厚为 22 mm,内填 C50 微膨胀混凝土。副拱肋由竖直平面向外侧旋转 16.8°而成。副拱肋中心线理论跨径也是 136 m,理论矢高为 31.7 m,理论矢跨比  $f/L=1/4.1$ 。三根拱肋之间每隔 3 m 设置一道横撑以及两道斜撑,将主副拱肋连接起来,形成稳定的空间三角形拱肋,全桥共设置 37 组横、斜撑。横、斜撑的断面均为 60 cm × 50 cm 的矩形断面,钢板厚度为 16 mm。

主梁采用预应力混凝土箱梁,箱梁底面水平,顶面设置 2% 的横坡,箱梁最高处梁高为 3.5 m。箱梁宽度为 40 m,横断面做成鱼腹形,不设置挑臂。箱梁纵向在正中间与拱肋锚固区相对应位置设置一道较厚的中腹板,两侧距离 9.0 m 处各设置一道边腹板。箱梁横向与吊杆相对应处设置一道较厚的横隔梁,其厚度为 25 cm,间距为 6.0 m。在两道横隔梁之间再设置一道小的横隔板,其厚度为 16 cm。主梁标准横断面见图 3。

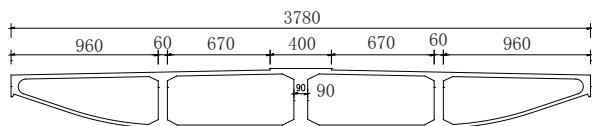


图 3 主梁横断面图(单位:cm)

主桥设置中间竖直吊杆 19 根,规格为 PES(FD) 7-187。两侧设置斜吊杆 26 根,规格为 PES(FD) 7-73,吊杆的纵桥向间距均为 6.0 m。

## 2 分析模型

结构计算分析采用空间有限元分析软件 Midas/Civil。主梁、拱肋以及横向连接件采用梁单元模拟,吊杆则采用桁架单元模拟,斜吊杆与主梁之间采用虚拟的刚性横梁连接。全桥共划分为 426 个单元,331 个节点。全桥计算模型见图 4。

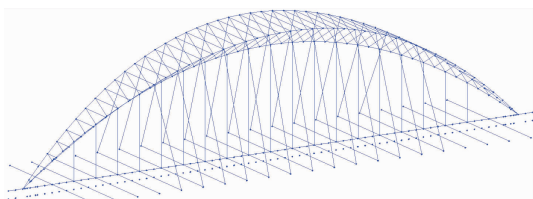


图 4 全桥计算模型

计算过程按实际施工顺序模拟,先施工主墩、主梁,张拉预应力,再安装拱肋及吊杆,然后调整吊杆力,拆除满堂支架,最后施加二期恒载。

## 3 拱肋稳定性分析

空间钢桁拱的侧向刚度相对较小,容易发生拱的侧倾或侧屈<sup>[4]</sup>。为了得到影响钢桁拱拱肋稳定性的关键性因素,对拱肋刚度、横向连接系刚度、吊杆布置等方面进行参数分析。

### 3.1 拱肋刚度影响分析

为了研究拱肋刚度对空间钢桁拱稳定性的影响,将拱肋的刚度放大到原来的 2 倍和 5 倍,再将拱肋的刚度缩小到原来的 1/2 和 1/5,分别计算空间钢桁拱的稳定系数。其第一阶失稳模态见图 5。

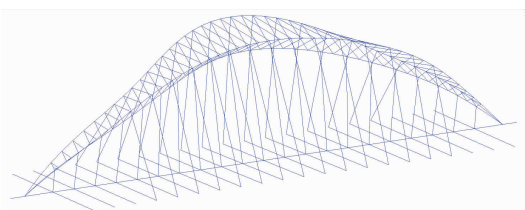


图 5 第一阶失稳模态图

在实际工程中,由于结构的更低阶失稳所需要的能量更小,所以越低阶失稳是越容易发生的。根据计算结果,空间钢桁拱的第一阶和第二阶稳定系数相差不大,说明第一阶和第二阶失稳都比较容易发生。现在提取不同的拱肋刚度,将其对应的第一阶失稳系数绘制成曲线,见图 6。

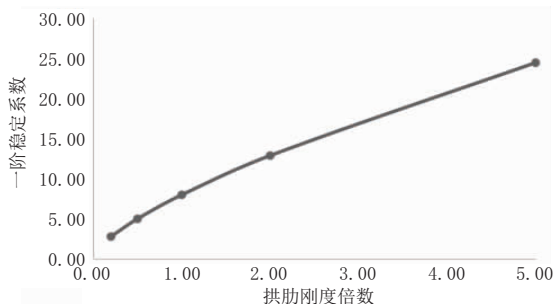


图 6 拱肋刚度对稳定系数影响曲线

由以上曲线图可以看出,空间钢桁拱的一阶稳定系数随拱肋刚度的增加而增大,说明拱肋本身的刚度对空间钢桁拱的整体稳定性影响很大。设计中在满足整体稳定性要求的前提下,综合考虑景观因素,满足桥面行车净空要求以及施工的方便性,选择合适的拱肋截面尺寸显得尤为重要。

### 3.2 斜撑及横撑刚度影响分析

斜撑及横撑的主要作用就是将主、副拱肋连接起来,形成稳定的空间三角形桁架,其对空间钢桁拱的整体稳定性起着至关重要的作用。为了研究斜撑及横撑刚度对空间钢桁拱稳定性的影响<sup>[5]</sup>,将斜撑及横撑的刚度放大到原来的 2 倍和 5 倍,再将斜撑及

横撑的刚度缩小到原来的 1/2 和 1/5,分别计算空间钢桁拱的稳定系数。现在提取不同的斜撑及横撑刚度,将其对应的第一阶失稳系数绘制成曲线,见图 7。

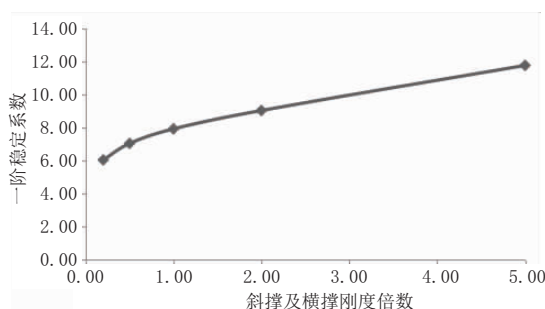


图 7 斜撑及横撑刚度对稳定系数影响曲线

由以上曲线图可以看出,随着斜撑及横撑刚度的增加,空间钢桁拱的一阶稳定系数有所增加,但增加的幅度不是很明显,曲线增长比较平缓。这说明虽然是否有斜撑及横撑对空间钢桁拱整体稳定性起着决定性的作用,但其本身的刚度大小对空间钢桁拱的整体稳定性影响并不是特别大。因此,在设计中主要考虑斜撑及横撑本身的应力状态,同时兼顾景观因素,选择合适的斜撑及横撑结构尺寸。

### 3.3 吊杆影响分析

由于本桥较宽,桥面总宽达到 40 m,除中间主拱设置竖向吊杆,两侧副拱还设置了斜吊杆。斜吊杆的设置极大改善了主梁横向受力性能,并限制了空间钢桁拱的侧向位移,从而有效增加了其侧向稳定性。但在施工过程中,空间钢桁拱会有裸拱的工况(工况一),只有中间吊杆的工况(工况二),直到成桥全部吊杆安装就绪的工况(工况三)。为了研究空间钢桁拱在各种工况下的整体稳定性,分别计算各种工况下空间钢桁拱前三阶稳定系数,计算结果见表 1。

表 1 不同工况对应的空间钢桁拱稳定系数

| 模态 | 失稳形式    | 工况一   | 工况二  | 工况三   |
|----|---------|-------|------|-------|
| 1  | 轴对称侧倾失稳 | 5.79  | 3.30 | 7.91  |
| 2  | 反对称侧倾失稳 | 11.43 | 4.35 | 8.01  |
| 3  | 反对称侧倾失稳 | 12.48 | 8.57 | 12.20 |

根据以上计算结果,空间钢桁拱在裸拱状态下的整体稳定性满足规范要求,其二、三阶失稳特征值比成桥状态时还要高,这是因为在裸拱状态下,拱肋的应力状态比较低。而当只有中间吊杆时,空间钢桁拱的整体稳定性较差,不满足规范要求。因此,在施工过程中,当张拉中间吊杆时,要设置足够的临时支撑,限值拱肋的侧向位移。在成桥状态下,由于有斜吊杆,当拱肋发生面外侧向失稳时,斜吊杆提供的非保向力限制了拱肋的位移,从而大幅提高了空间钢

桁拱的整体稳定性。

为了研究吊杆初始张拉力对拱肋稳定性的影响,分别取主拱肋中间吊杆初始张拉力为 10 kN、1 000 kN、2 000 kN、3 000 kN 和 4 000 kN,相对应的副拱肋斜吊杆的初始张拉力分别为 10 kN、100 kN、200 kN、300 kN 和 400 kN。计算空间钢桁拱的稳定系数,现在提取不同的吊杆初始张拉力,将其对应的第一阶失稳系数绘制成曲线,见图 8。

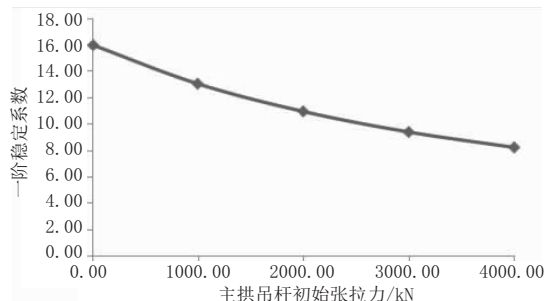


图 8 吊杆初始张拉力对稳定系数影响曲线

由以上曲线图可以看出,随着吊杆初始张拉力的增加,空间钢桁拱的一阶稳定系数有所降低。这是由于吊杆初始张拉力的增加导致拱肋应力增大,从而降低了拱肋的稳定系数。因此,在设计时应选择合理的吊杆初始张拉力,在保证拱肋稳定性满足要求的情况下,使得结构受力处于合理状态。

## 4 刚度对结构受力影响分析

广州市从化大桥与地铁十四号线共线且同步建设,其中左线隧道在从化大桥西侧通过,右线隧道中心线与从化大桥中心线重合,大桥桩基布置受限于地铁隧道线位,且两个项目工期重叠,两者施工相互影响,形成复杂的施工工况,影响到桥梁和地铁的安全。为了减少桩基沉降对桥梁结构安全的影响,主桥选择外部约束静定的简支拱梁组合体系。施工时,先满堂支架浇筑预应力混凝土主梁,再安装拱肋及吊杆,张拉吊杆力,最后拆除支架,使得全桥共同受力,承受恒载及活载。针对此类桥梁,设计中选择合适的拱梁刚度,合理的吊杆张拉力,以达到最优的设计显得尤为重要。

为此,通过调整空间钢桁拱拱肋和预应力混凝土主梁的刚度,调整吊杆张拉力,分析主拱拱顶、副拱拱顶以及主梁跨中在恒载、活载作用下的弯矩及竖向位移变化情况,得出空间钢桁拱拱肋、预应力混凝土主梁刚度变化,以及吊杆张拉力大小对全桥结构内力和竖向位移变化的影响规律,从而给设计起到指导作用。

4.1 主梁刚度对结构受力影响分析

为了研究主梁刚度对结构整体受力的影响规律,分别取梁高为 2.9 m、3.4 m、3.9 m、4.4 m 和 4.9 m,在不考虑预应力及吊杆初始张拉力的情况下,计算主梁跨中及主、副拱肋拱顶在恒载及活载作用下的弯矩及挠度。现将计算结果列于表 2~ 表 5。

| 表 2 不同梁高对应恒载弯矩值  |         |        |        |        |        |
|------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 恒载弯矩 /<br>(kN·m) | 主梁梁高 /m |        |        |        |        |
|                  | 2.9     | 3.4    | 3.9    | 4.4    | 4.9    |
| 主梁跨中             | 24 458  | 35 134 | 46 242 | 70 279 | 89 403 |
| 主拱拱顶             | 2 298   | 2 233  | 2 184  | 2 281  | 2 294  |
| 副拱拱顶             | 665     | 634    | 613    | 631    | 629    |

| 表 3 不同梁高对应恒载挠度 |         |        |        |        |        |
|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 恒载挠度<br>/mm    | 主梁梁高 /m |        |        |        |        |
|                | 2.9     | 3.4    | 3.9    | 4.4    | 4.9    |
| 主梁跨中           | 114.60  | 113.57 | 112.43 | 117.89 | 118.96 |
| 主拱拱顶           | 75.67   | 74.67  | 73.80  | 75.84  | 76.07  |
| 副拱拱顶           | 69.10   | 68.10  | 67.28  | 68.93  | 69.07  |

| 表 4 不同梁高对应活载弯矩值  |         |        |        |        |        |
|------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 活载弯矩 /<br>(kN·m) | 主梁梁高 /m |        |        |        |        |
|                  | 2.9     | 3.4    | 3.9    | 4.4    | 4.9    |
| 主梁跨中             | 15 047  | 16 101 | 17 133 | 18 888 | 20 332 |
| 主拱拱顶             | 449     | 346    | 288    | 232    | 206    |
| 副拱拱顶             | 195     | 146    | 119    | 91     | 78     |

| 表 5 不同梁高对应活载挠度 |         |      |      |      |      |
|----------------|---------|------|------|------|------|
| 活载挠度<br>/mm    | 主梁梁高 /m |      |      |      |      |
|                | 2.9     | 3.4  | 3.9  | 4.4  | 4.9  |
| 主梁跨中           | 8.50    | 7.73 | 7.35 | 6.89 | 6.64 |
| 主拱拱顶           | 5.86    | 5.02 | 4.57 | 4.12 | 3.93 |
| 副拱拱顶           | 7.82    | 6.33 | 5.51 | 4.51 | 4.06 |

根据以上计算结果,随着主梁高度的增加,主梁刚度变大,在恒载作用下,主梁所承受的弯矩也越来越大,而空间钢桁拱的主、副拱肋弯矩值变化不大。这是由于相对于整体现浇主梁,拱肋的刚度相对较小,拱肋所承担的弯矩也较小。而在活载作用下,随着主梁刚度的增加,主梁所承受的弯矩也相应增加,拱肋所承担的弯矩明显减少。与此同时,主梁及拱肋的挠度都随之降低,这说明桥梁的整体刚度有所提高。

4.2 拱肋刚度对结构受力影响分析

为了研究拱肋刚度对结构整体受力的影响规律,分别取主拱肋直径为 1.4 m、1.6 m、1.8 m、2.0 m

和 2.2 m,相对应的副拱肋直径分别为 1.1 m、1.3 m、1.5 m、1.7 m 和 1.9 m,计算主梁跨中及主、副拱肋拱顶在恒载及活载作用下的弯矩及挠度。现将计算结果列于表 6~ 表 9。

| 表 6 不同拱肋直径对应恒载弯矩值 |          |        |        |        |        |
|-------------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| 恒载弯矩 /<br>(kN·m)  | 主拱肋直径 /m |        |        |        |        |
|                   | 1.4      | 1.6    | 1.8    | 2.0    | 2.2    |
| 主梁跨中              | 59 479   | 51 813 | 46 242 | 41 830 | 38 075 |
| 主拱拱顶              | 2 009    | 2 056  | 2 184  | 2 438  | 2 836  |
| 副拱拱顶              | 469      | 520    | 613    | 778    | 1 033  |

| 表 7 不同拱肋直径对应恒载挠度 |          |        |        |        |       |
|------------------|----------|--------|--------|--------|-------|
| 恒载挠度<br>/mm      | 主拱肋直径 /m |        |        |        |       |
|                  | 1.4      | 1.6    | 1.8    | 2.0    | 2.2   |
| 主梁跨中             | 142.02   | 124.55 | 112.43 | 103.60 | 96.92 |
| 主拱拱顶             | 106.63   | 86.41  | 73.80  | 65.46  | 59.66 |
| 副拱拱顶             | 100.36   | 79.98  | 67.28  | 58.86  | 53.02 |

| 表 8 不同拱肋直径对应活载弯矩值 |          |        |        |        |        |
|-------------------|----------|--------|--------|--------|--------|
| 活载弯矩 /<br>(kN·m)  | 主拱肋直径 /m |        |        |        |        |
|                   | 1.4      | 1.6    | 1.8    | 2.0    | 2.2    |
| 主梁跨中              | 18 382   | 17 680 | 17 133 | 16 661 | 16 227 |
| 主拱拱顶              | 170      | 220    | 288    | 374    | 477    |
| 副拱拱顶              | 52       | 80     | 119    | 169    | 232    |

| 表 9 不同拱肋直径对应活载挠度 |          |      |      |      |      |
|------------------|----------|------|------|------|------|
| 活载挠度<br>/mm      | 主拱肋直径 /m |      |      |      |      |
|                  | 1.4      | 1.6  | 1.8  | 2.0  | 2.2  |
| 主梁跨中             | 9.02     | 8.04 | 7.35 | 6.83 | 6.43 |
| 主拱拱顶             | 6.24     | 5.25 | 4.57 | 4.06 | 3.65 |
| 副拱拱顶             | 6.91     | 6.10 | 5.51 | 5.04 | 4.64 |

根据以上计算结果,随着拱肋刚度的增加,无论是恒载还是活载作用下,拱肋所承担的弯矩都有所增加,主梁所承担的弯矩都有所降低。主梁和拱肋的挠度都有所减少,说明桥梁的整体刚度有很大的提高。

由此可见,拱肋的刚度大小对拱梁组合体系桥的结构受力性能起着至关重要的作用。但在设计中也不可能一味的加大拱肋的刚度,需要综合考虑景观因素,中央分隔带宽度,不能影响行车净空等方面的要求,适当选取拱肋结构尺寸。

4.3 吊杆初始张拉力对结构受力影响分析

为了研究吊杆初始张拉力对结构整体受力的影响规律,分别取主拱肋中间吊杆初始张拉力为 10 kN、500 kN、1 000 kN、1 500 kN 和 2 000 kN,相对应的

副拱肋斜吊杆的初始张拉力分别为 10 kN、250 kN、500 kN、750 kN 和 1 000 kN。由于吊杆初始张拉力对于拱梁组合桥梁来说,是属于体系内部力,不影响成桥后活载作用的内力及变形。因此,只计算主梁跨中及主、副拱肋拱顶在恒载作用下的弯矩及挠度。现将计算结果列于表 10、表 11。

表 10 不同吊杆张拉力对应恒载弯矩值

| 恒载弯矩 /<br>(kN·m) | 主拱吊杆初始张拉力 /kN |        |        |       |        |
|------------------|---------------|--------|--------|-------|--------|
|                  | 10            | 500    | 1 000  | 1 500 | 2 000  |
| 主梁跨中             | 46 242        | 34 391 | 22 146 | 9 897 | -2 353 |
| 主拱拱顶             | 2184          | 4 276  | 6 450  | 8 624 | 10 798 |
| 副拱拱顶             | 613           | 1 696  | 2 822  | 3 948 | 5 075  |

表 11 不同吊杆张拉力对应恒载挠度

| 恒载挠度 /<br>mm | 主拱吊杆初始张拉力 /kN |       |        |        |        |
|--------------|---------------|-------|--------|--------|--------|
|              | 10            | 500   | 1 000  | 1 500  | 2 000  |
| 主梁跨中         | 112.43        | 92.42 | 71.79  | 51.15  | 30.52  |
| 主拱拱顶         | 73.80         | 97.71 | 121.32 | 145.54 | 169.76 |
| 副拱拱顶         | 67.28         | 91.38 | 116.44 | 141.51 | 166.57 |

根据以上计算结果,随着吊杆初始张拉力的增加,在恒载作用下,主梁跨中弯矩越来越小,直到接近零弯矩的状态,如果继续加大吊杆初始张拉力,主梁跨中将会出现负弯矩。而与此同时,拱肋的弯矩越来越大。从恒载挠度的计算结果也能看到这种趋势。

因此,在设计中应选择合适的吊杆初始张拉力,以使得主梁和拱肋均处于比较良好的受力状态,确保主梁和拱肋的应力状态符合规范要求。

## 5 结 语

空间钢桁拱与预应力混凝土梁组合体系简支桥结构新颖,外形美观,特别适用于地质条件不好,容

易产生不均匀沉降情况下的城市景观桥梁。本文以广州市从化大桥为例,采用空间有限元分析软件对影响空间钢桁拱稳定性的主要控制因素以及拱与主梁抗弯刚度变化等对结构内力和位移的影响进行了参数分析。得出以下几点结论与建议:

(1)拱肋本身的刚度对空间钢桁拱的整体稳定性影响很大,而横撑及斜撑的刚度大小对空间钢桁拱的整体稳定性影响不是很明显。

(2)在施工过程中,当只有中间吊杆时,空间钢桁拱的整体稳定性较差,不满足规范要求,应设置足够的临时支撑,限制拱肋的侧向位移。

(3)由于相对于预应力混凝土主梁而言,拱肋的刚度相对较小,拱肋所承担的弯矩也较小。因此,在设计中主要考虑主梁的弯矩和应力状态,综合考虑景观因素,中央分隔带的宽度等方面的要求,适当选取拱肋的结构尺寸。

(4)吊杆的初始张拉力对于主梁和空间钢桁拱的受力影响都很大,在设计中应选择合适的吊杆初始张拉力,以使得主梁和拱肋均处于比较良好的受力状态。

### 参考文献:

- [1] 曾祥林.异型拱梁组合体系桥梁结构行为及施工控制研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [2] 翟晓亮,刘喆,冯云成.新月形拱-连续梁组合体系桥优化分析[J].公路交通科技,2015(3):68-74.
- [3] 周朝阳,李伟平.长丰桥异型组合拱圈安装施工技术[J].市政技术,2010(5):41-44.
- [4] 韩洪举,张基进.大跨度钢筋混凝土拱桥施工阶段动力特性分析[J].中外公路,2020,40(5):165-167.
- [5] 王胜杰.尼尔森体系钢管混凝土系杆拱桥拱肋稳定性及系梁横向受力研究[D].兰州:兰州交通大学,2017.

(上接第 87 页)

### 参考文献:

- [1] 张海.42 m 简支多主梁活载组合钢板梁有限元分析[J].交通与运输,2019,35(4):31-34.
- [2] 黄玲.钢板组合梁桥结构受力分析[J].桥梁建设,2020,50(S2):48-54.

- [3] 杨松,席进.三维梁格有限元计算方法在钢板组合梁结构计算中的应用[J].工程与建设,2017,31(4):484-486.
- [4] 刘青茹,吉伯海,姚悦,等.钢板组合梁桥主梁与竖向加劲肋连接细节疲劳应力特征[J].南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(3):381-389.