

基于七自由度的大跨预应力曲线刚构桥分析

冷文华

(湖南中大设计院有限公司, 湖南 长沙 410075)

摘要: 在进行曲线桥梁设计时,一般将活载放大 1.05~1.15 倍(偏载系数)来考虑偏心影响。为探讨这种做法的合理性,该文结合一大跨预应力混凝土曲线刚构桥,采用空间有限元软件 Midas/Civil 进行七自由度受力分析,并与六自由度的计算结果进行对比验证。结果表明:传统经验系数法在跨中梁段较为合理,但对于支点附近梁段则偏于不安全。因此,对于大跨预应力曲线刚构桥有必要进行七自由度分析,以便更为准确地考虑其弯扭耦合效应。

关键词: 七自由度; 大跨预应力曲线刚构桥; 弯扭耦合; 翘曲; 约束扭转

近年来,城市基础设施建设蓬勃发展,在中国许多山区城市,桥梁建设经常面临地形、地物的限制,一方面需要依山就势,合理利用城市空间;另一方面又需跨越河流、山谷等。因此,大跨度曲线桥梁有增多的趋势,另外大跨预应力混凝土曲线刚构桥整体性能优越、造型美观、养护方便,在这种情况下,是一种非常有竞争力的桥型。

目前工程设计中一般采用六自由度梁单元模型进行整体分析,这样忽略了主梁的约束扭转效应。

曲线桥梁弯扭耦合效应较为明显,采用七自由度梁单元模型进行精确分析对于控制曲线箱梁的薄壁效应有积极意义。该文结合湖南省张家界市滨水内环线白马泉高架桥工程,采用空间有限元软件 Midas/Civil 进行七自由度受力分析,并与六自由度计算结果进行对比、验证,分析约束扭转效应对大跨曲线刚构桥的影响程度,以期为同类型桥梁设计提供参考。

1 工程概况

张家界市滨水内环线白马泉高架桥工程主桥上部结构采用(36+60+36) m 变截面预应力混凝土连续刚构,曲率半径 300 m,如图 1 所示。

箱梁施工时先分段浇筑“T”构,0# 梁段长 12.0 m,其余 1#~7# 梁段分段长为 $5 \times 3.0 \text{ m} + 2 \times 4.0 \text{ m}$,0# 段采用搭设托架浇筑,边跨现浇段采用支架现浇,其余梁段采用挂篮悬浇。

1.1 上部结构

主桥箱梁为单箱单室箱形截面,支点梁高 3.8 m,

跨中梁高 2.0 m,箱梁梁高按 1.8 次抛物线变化;箱梁顶板全宽 12 m,底板宽度 7.0 m,顶板厚度为 0.30 m,底板厚度为由根部 0.6 m 按 1.8 次抛物线渐变成跨中 0.30 m;顶板悬臂长 2.5 m,根部厚 0.65 m,腹板厚度 0.70 m,如图 2 所示。

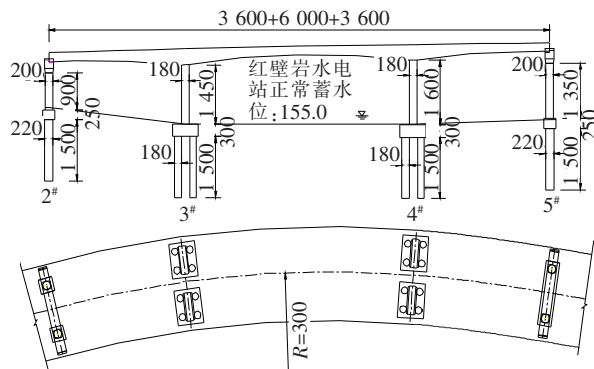


图1 桥梁总体布置图(除标高为 m 外,其余单位:cm)

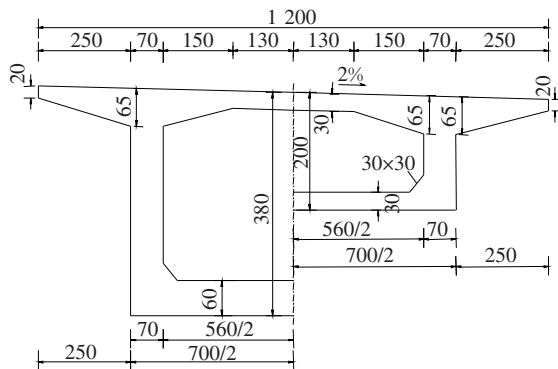


图2 主梁跨中和根部截面(单位:cm)

箱梁设置纵、竖向预应力。纵向预应力束根据张

拉时间与形状不同可分为悬浇顶板束、腹板束和合龙束,悬浇顶板束、腹板束在浇筑“T”构时进行张拉,合龙束主桥合龙后进行张拉。纵向预应力钢筋采用 $10\phi^{*}15.2\text{ mm}$ 和 $15\phi^{*}15.2\text{ mm}$ 两种规格钢绞线,顶板束张拉控制应力为 $\sigma_{\text{con}}=0.72f_{pk}=1\,339.2\text{ MPa}$,腹板束及底板束张拉控制应力为 $\sigma_{\text{con}}=0.75f_{pk}=1\,395\text{ MPa}$,预应力孔道采用塑料波纹管成型。悬浇顶板束、腹板束采用两端张拉锚固于顶板承托或腹板内;合龙顶板束、底板束则锚固于齿板。

1.2 下部结构

3[#]、4[#]主墩采用 1.8 m 厚矩形薄壁墩, $D180\text{ cm}$ 钻孔灌注桩基础,墩身与桩基采用承台连接。

过渡墩采用 $200\text{ cm}\times 200\text{ cm}$ 双柱矩形桥墩,盖梁按全预应力混凝土构件设计,桩基采用 $D220\text{ cm}$ 单柱单桩基础。

2 七自由度理论

弯箱梁桥的弯扭耦合效应明显,结构受力分析中,扭转作用往往不能忽略。

对于理想的自由扭转而言,截面纵向变形自由,纵向翘曲不受约束,纵向纤维无伸长或缩短,不产生正应力 σ_x ,只产生剪应力 τ_t 。

但实际工程中的薄壁箱梁桥,因荷载、支座、横隔板等原因,使截面的翘曲受到限制。在扭矩作用下截面上会额外产生翘曲正应力 σ_w 、约束扭转剪应力 τ_w ,如图 3 所示。

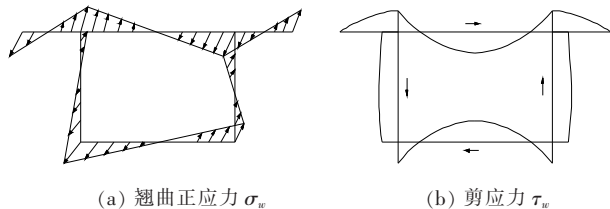


图 3 约束扭转截面应力分布

结构受力计算中的第七个自由度,即在六自由度的基础上增加一个“翘曲约束 R_w ”,从而分析薄壁箱梁截面上的翘曲正应力和剪应力,而这正是传统六自由度理论选择忽略的地方。

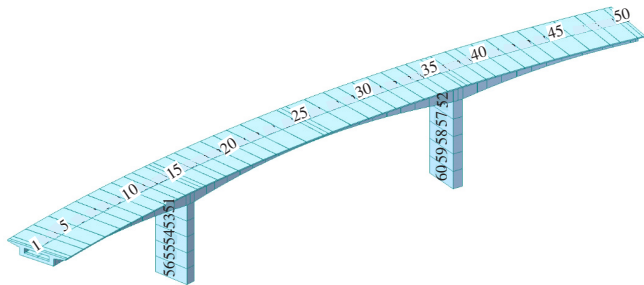
3 空间有限元模拟

3.1 有限元模型建立

采用 Midas/Civil 对桥梁右半幅进行施工仿真分

析。桥墩采用六自由度梁单元模拟,墩底按固结处理。

分别建立桥梁的六自由度模型与七自由度模型。两模型不同之处在于:① 七自由度模型主梁采用考虑翘曲效应的梁单元,而六自由度模型的主梁单元则不考虑翘曲效应;② 七自由度模型在主梁 4 个支点处额外增加 1 个边界条件 R_w ,以考虑横梁、桥墩以及支座对主梁薄壁箱形截面的翘曲约束。六自由度和七自由度空间有限元模型单元划分如图 4 所示。



进行对比分析,选取同一加载工况,分别对比截面顶底板正应力和腹板竖向剪应力。因曲线桥的扭矩主要由移动荷载偏心产生,该文重点对比活载偏载工况的结果。

4.1 活载偏载作用下箱梁截面正应力对比

曲梁截面正应力主要由3部分组成:①纵向弯曲正应力;②横向弯曲正应力;③约束扭转扭矩产生的翘曲正应力。在两个空间曲梁模型中,六自由度模型可以考虑①+②两项产生的截面正应力,而七自由度模型则可以考虑①+②+③共3项产生的截面正应力。在七自由度模型中,活载产生的正应力加入了约束扭转产生的翘曲正应力。考虑到箱梁截面的约束扭转翘曲正应力近似反对称分布(截面左右正应力方向相反,如图3所示),即翘曲正应力在有的位置是有利的,有的位置则是不利的,结构验算采用最不利效应来控制,因此该文偏安全地取顶底板出现的最不利正应力来比较。分别绘制六自由度和七自由度模型截面顶底板正应力包络图,如图6、7所示。

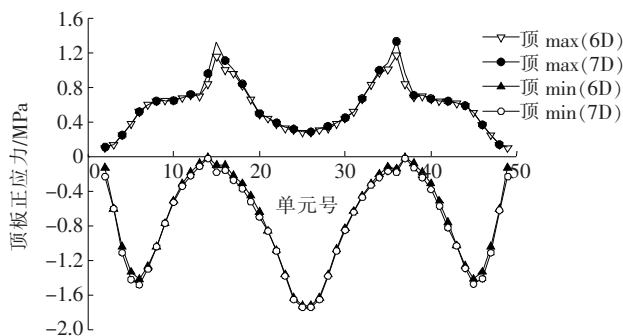


图6 活载偏载顶板正应力分布

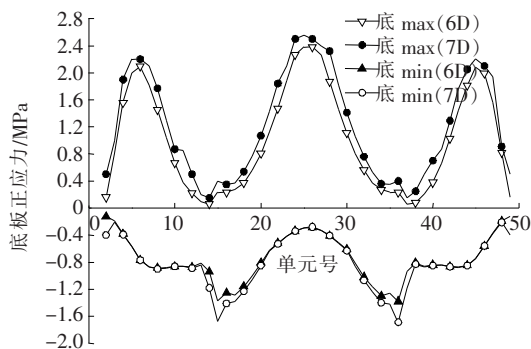


图7 活载偏载底板正应力分布

由图6、7可知:七自由度模型活载正应力计入了约束扭转产生的翘曲正应力后,相同断面顶底板的正应力最大值、最小值均大于六自由度模型,而在支座位置由于约束扭转扭矩较大,正应力的增加幅度更为显著。

4.2 活载偏载作用下箱梁截面剪应力对比

曲梁截面的剪应力主要由4部分组成:①纵向弯

曲剪应力;②自由扭转剪应力;③约束扭转剪应力;④畸变剪应力。由于梁单元模型均无法考虑箱梁的畸变效应,该文暂不讨论。六自由度梁单元模型可以考虑①+②两项产生的截面剪应力,而七自由度梁单元模型则可以考虑①+②+③共3项产生的截面剪应力。在活载偏载时,七自由度活载产生的剪应力考虑了约束扭转。扭转剪应力在两个腹板中分别和纵向弯曲剪应力叠加,可能在左右腹板中一个是有利的,而另一个是不利的,该文偏安全地以剪应力最不利组合来进行比较。分别绘制六自由度和七自由度模型截面剪应力包络图,如图8所示。

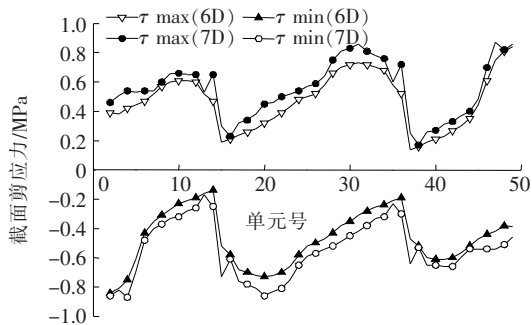


图8 活载偏载截面剪应力分布

由图8可知:七自由度模型计入了约束扭转产生的剪应力后,相同断面腹板的剪应力最大值、最小值均大于六自由度模型,而支座附近由于约束扭转扭矩较大,剪应力的增加幅度更为显著。

4.3 活载偏载作用下弯扭耦合放大系数

七自由度单梁模型可以得到截面应力分布,设计时梁体的内力依然起着主导作用,偏于安全考虑,根据七自由度单梁模型与六自由度单梁模型应力结果的差别,得到弯矩和剪力放大系数。

4.3.1 弯矩放大系数

截面正应力主要有弯曲正应力与约束扭转引起的翘曲正应力,翘曲正应力在有的位置是有利的,有的位置是不利的。结构设计基本采用不利效应作为控制参数。因此该文选取顶底板上出现的最不利应力来代替整个顶底板的内力,并以这个应力来反算弯矩值,该弯矩是原有弯矩与约束扭转正应力的等效弯矩,采用这个等效弯矩来指导梁体的抗弯配筋,是偏于安全的。

根据计算结果,定义顶板(底板)弯矩放大系数=顶板(底板)出现的总拉应力最大值/弯曲拉应力最大值,得出顶板(底板)活载弯矩放大系数沿梁体的分布如图9、10所示。

由图9可知:跨中梁段顶板活载弯矩放大系数为

1.05~1.17,这说明传统偏载系数对于顶板大多数位置是安全的。但支点附近顶板活载弯矩放大系数存在突变,为1.6~1.8,远大于传统活载弯矩的偏载系数1.15。

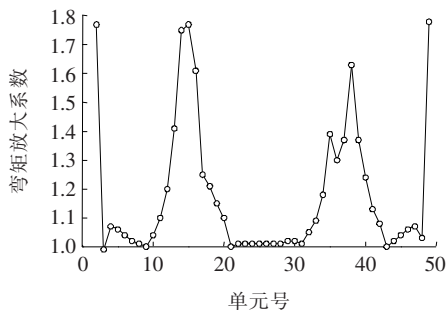


图9 顶板活载弯矩放大系数分布

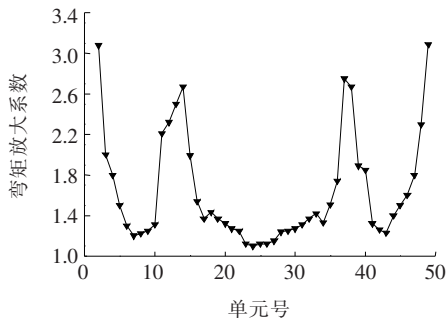


图10 底板活载弯矩放大系数分布

由图10可知:对于底板,传统偏载系数(1.05~1.15)仅在各跨跨中位置接近计算所得的活载弯矩放大系数,而在全桥大多数位置是无法覆盖约束扭转对底板正应力的影响。

4.3.2 剪力放大系数

梁体的自由扭转与约束扭转都会产生剪应力,这两种剪应力在顶底板的情况比较复杂,而在腹板中是一致的。对于梁体承受较大扭矩的弯桥来说,腹板在承受弯曲剪应力时还有扭转剪应力,两种扭转在腹板中产生的剪应力与弯曲剪应力叠加,可能在左右腹板中一个是有利的,另一个是不利的。考虑剪应力不利组合的腹板控制抗剪配筋是偏安全的。

根据计算结果,定义腹板剪力放大系数=剪应力不利组合的腹板出现的总剪应力最大值/弯曲剪应力最大值,得出腹板活载剪力放大系数沿梁体的分布如图11所示。

由图11可知:由于弯桥曲率的影响与活载在桥面的偏载作用,箱梁腹板剪力受到较大的扭矩影响,活载剪力放大系数均较大,为1.2~3.0。而且较大的剪力放大系数出现在支座附近,边支座的剪力放大系数为

3左右。支座附近梁体受到的剪力是设计的主要依据,这些位置的剪力放大系数显得尤为重要。传统的剪力活载偏载系数仅为1.05~1.15,这对于弯箱梁桥而言显然是严重低估的。

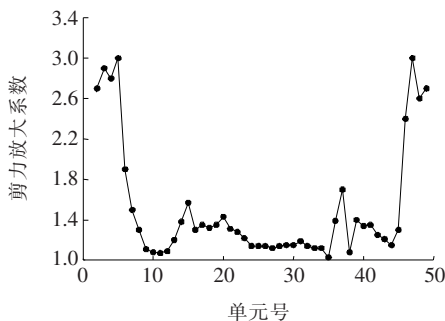


图11 腹板活载剪力放大系数分布

5 结论

通过对一大跨预应力混凝土曲线刚构桥分别建立六自由度单梁模型与七自由度单梁模型进行受力分析。选取活载偏载这一工况,分别对比截面顶底板正应力结果和截面竖向剪应力结果,得出以下结论:

(1) 大跨预应力曲线刚构桥的弯、剪、扭耦合作用会导致截面两侧产生正应力差及剪应力差。

(2) 七自由度单梁模型在活载偏载工况下截面顶底板正应力最值和腹板剪应力最值均大于六自由度单梁模型,且跨中和支点的增加幅度不一致,与传统工程经验采用同一偏载系数存在较大差异。

(3) 传统偏载系数1.05~1.15在跨中梁段较为合理,但对于支点附近梁段则偏于不安全。因此,对于大跨预应力混凝土曲线刚构桥有必要进行七自由度分析,以便更为准确地考虑其弯扭耦合效应。

参考文献:

- [1] 徐栋,赵瑜,刘超. 混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计[M]. 北京:人民交通出版社,2013.
- [2] JTG 3362-2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [4] 王会利,谢常领,秦泗凤. 中国连续刚构桥的调查与分析[J]. 中外公路,2019(2).
- [5] 赵成功,王小冬,杨德厚. 既有中小跨径曲线梁桥梁体径向爬移机理分析[J]. 中外公路,2018(3).
- [6] 夏志远,端茂军. 预应力混凝土连续宽箱梁空间效应分析[J]. 中外公路,2016(2).