

无背索斜拉桥主梁空间内力分析方法

——以长沙市环线浏阳河洪山大桥无背索斜拉桥为例

戴公连, 李德建, 曾庆元

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 采用空间剪力柔性梁格法离散桥面结构, 建立了大悬臂钢脊骨箱梁主梁-混凝土桥面组合截面徐变内力重分布计算的初应变法, 编制了模拟无背索斜塔异形斜拉桥施工过程和使用阶段的空间内力及稳定分析程序. 以此为基础, 分析计算了长沙市环线浏阳河洪山大桥无背索斜拉桥主梁内力分布规律、徐变内力重分布对结构内力分配的影响、结构的整体稳定性安全系数等. 采用 3 种计算模式进行分析, 结果表明: 梁跟部全截面轴力基本一致, 但轴力的分配差别较大, 若不考虑徐变影响, 钢箱梁承担的轴力为全截面轴力的 0.47~0.50 倍; 考虑徐变内力重分布, 钢箱梁承担的轴力为全截面轴力的 0.78 倍, 而对应的主梁钢箱梁稳定安全系数分别为 4.18 及 3.1, 可见, 钢箱梁轴力是该桥钢箱梁设计的控制因素.

关键词: 无背索斜拉桥; 徐变; 内力; 重分布; 稳定安全系数

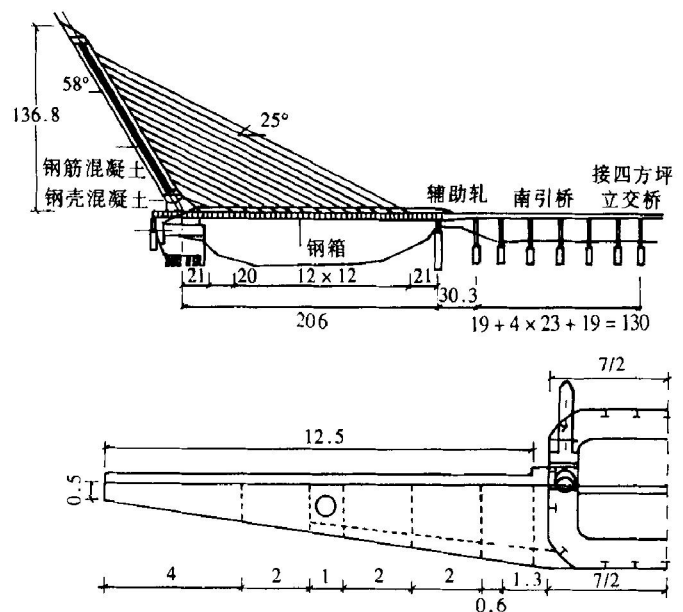
中图分类号: U448.22⁺5; TU312⁺.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-9792(2002)04-0348-04

无背索斜拉桥是一种新型的桥梁结构形式, 它采用倾斜的塔柱与来自主梁的荷载相平衡, 组成一种传力体系. 长沙市环线浏阳河洪山大桥是继西班牙卡拉米诺桥之后的第 2 座独柱斜塔无背索斜拉桥, 主孔跨径 206 m, 比卡拉米诺桥跨度多 6 m, 桥面宽 33.2 m. 该桥主梁为钢箱梁断面, 箱梁宽 7 m, 高 4.4 m, 钢箱梁板厚 28 mm, 箱梁与塔柱固结; 横梁采用钢箱梁悬臂挑梁, 悬臂长度 12.9 m, 横梁间距 4 m; 在横梁之上用预制混凝土板通过湿接头形成桥面板, 桥面板厚 21 cm, 桥面板处在钢箱梁的截面形心轴上, 截面为钢箱梁与混凝土桥面板的混合截面共同受力; 斜拉桥塔柱倾斜, 仅主孔有拉索, 拉索位于主梁之上, 横桥向拉索中心距 6 m, 纵向索距 12 m, 结构布置如图 1 所示. 该桥结构新颖, 空间受力特征明显, 尤其是塔墩梁固接节点部位, 承受来自主梁的轴力、剪力、弯矩及扭矩作用. 在设计分析过程中, 必须考虑结构的传力途径及截面组成材料的材料特性对结构应力的影响, 钢-混组合截面的徐变效应及对钢箱梁应力的影响、汽车及挂车的空间效应、

钢箱梁的受力特性及空间稳定性等. 为此, 作者采用空间梁格模型对浏阳河洪山大桥无背索斜拉桥进行



尺寸单位: m

图 1 长沙市环线洪山浏阳河大桥无背索斜拉桥示意图

收稿日期: 2002-04-22

基金项目: 长沙市建委科研项目(长环指合[2000]126号)

作者简介: 戴公连(1964-), 男, 河南商丘人, 中南大学副教授, 博士, 从事桥梁复杂结构空间分析研究.

空间内力及稳定性分析,分析其组合截面的传力途径,结构内力的分布规律,施工阶段及桥面板徐变效应对结构内力及应力的影响,结构的失稳模态及稳定安全系数.

1 计算模型

1.1 单元离散

采用空间剪力柔性梁格模型模拟实桥结构.将混凝土桥面板按纵向离散成4道纵向梁格,这样,纵向梁格由主梁钢箱梁、混凝土桥面板、悬臂挑梁端部钢侧板共7道梁格组成,横向梁格由钢混凝土结合横梁组成,纵向梁格、横向梁格组成桥面梁格体系;塔柱自承台顶以上用空间梁元模拟;拉索由索单元模拟.其步骤为:首先,按成桥状态的梁体位移及塔柱应力为目标进行调索计算,确定成桥状态的理想目标索力;然后,按桥梁的典型施工阶段从顶推至成桥的全过程进行仿真计算,从而得到桥梁从安装至就位后各施工阶段及成桥阶段的受力情况,计算结构的整体稳定临界失稳荷载^[1],并对活载空间影响面加载^[2].

1.2 混凝土收缩徐变内力重分布计算的初应变法

对于图1所示的钢脊骨-混凝土板结构,在斜拉索轴力作用下,混凝土桥面板徐变和收缩变形受钢箱梁结构制约,导致结构内力重分布,使钢箱梁应力增加.用有限元数值分析方法解决这种次内力时,必须采用迭代的格式,将计算时间区间分段,逐步完成.在此,将每个时间段的混凝土徐变和收缩应变作为初应变来处理,忽略钢箱梁蠕变产生的影响.

在计算混凝土徐变和收缩应变引起的次内力时,梁体单元广义应变为:

$$\{\epsilon_j\} = \begin{Bmatrix} \epsilon \\ K_y \\ K_z \\ K_x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

在时间 t_1 到 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 段内,单元中由于徐变和收缩引起的初应变为:

$$\{\epsilon_0\} = \{\epsilon_{0i}, K_{y0}, K_{z0}, K_{x0}\}^T. \quad (2)$$

其中:

$$\epsilon_{0i} = (1 - \zeta) \epsilon_{0i} + \zeta \epsilon_{0j};$$

$$K_{y0} = (1 - \zeta) K_{y0i} + \zeta K_{y0j};$$

$$K_{z0} = (1 - \zeta) K_{z0i} + \zeta K_{z0j};$$

$$K_{x0} = (1 - \zeta) K_{x0i} + \zeta K_{x0j}.$$

单元 i 端截面应变为:

$$\epsilon_{0i} = [N_i / (EA)] \cdot \varphi(t_2, t_1) - \epsilon(t_2, t_1);$$

$$\epsilon_{0j} = [N_j / (EA)] \cdot \varphi(t_2, t_1) - \epsilon(t_2, t_1);$$

$$K_{y0i} = [M_{yi} / (EI_y)] \cdot \varphi(t_2, t_1).$$

同理,也可得出 j 端截面应变.其中: $N_i, M_{yi}, M_{zi}, M_{xi}, N_j, M_{yj}, M_{zj}, M_{xj}$ 为 t_1 时刻的单元杆端力.在计算杆初应变时,所采用的方法是用单元杆端力导出杆初应变方程,然后由单元杆端初应变线性内插而得单元内的初应变,而不是根据位移微分方法,这样,可避免非协调位移模式中初应变的不连续性,以保证迭代时解的稳定性,提高计算精度. $\varphi(t)$ 按公路桥规规定的系数得出^[3].

由广义应变和初应变的计算式可得:

$$U_E = \frac{1}{2} \{ \delta_j^T [K]_E \delta_j - \delta_j^T \{F^0\} \}. \quad (3)$$

由式(3)可以得出梁单元不计剪切变形时的刚度矩阵 $[K]_E$ 及初应变引起的等效节点力 $\{F^0\}$.

1.3 施工阶段模拟

斜塔斜拉桥与一般斜拉桥受力不同,在施工阶段不仅要控制梁体内的位移及应力,而且要控制塔柱内的应力及塔柱位移.为了简化施工,采用主梁顶推,分阶段浇注塔柱的施工方法.将整个计算分为16个典型阶段进行.其中:阶段1~15为施工阶段,各阶段混凝土加载龄期按30d计算;阶段16为成桥阶段.根据各施工阶段的情况,可以模拟、分析桥梁各施工阶段及成桥后的的受力特性.

2 主梁内力及传力途径分析

2.1 主梁内力及应力计算结果

按上述施工阶段进行模拟计算,既可得出成桥阶段恒载(包括自重、预应力、铺装、调索、徐变)钢箱梁主梁内力结果,也可将纵向7条分梁格纵梁内力合成即可得出各工况作用下主梁全截面(包括钢箱梁、混凝土桥面板、悬臂挑梁端部侧板)的总内力结果,梁根部内力计算结果如表1所示.可见:

a. 混凝土桥面板的徐变效应对结构截面内力的分布影响很大.在拉索力及自重作用下,钢箱梁承担的轴力与全截面轴力之比为0.787,而不考虑徐变影响时,该比值为0.49,活载作用下最大轴力之比为

表 1 成桥阶段主梁内力计算结果

	轴力/kN		剪力/kN		弯矩/(kN·m)		扭矩/(kN·m)	
	钢箱梁	全截面	钢箱梁	全截面	钢箱梁	全截面	钢箱梁	全截面
恒载	- 99 523	- 126 479	- 3 301	- 3 642	931	960	0	0
二恒	- 8 973	- 18 380	- 2 608	- 2 694	60 780	61 254	0	0
汽车超 20	- 8 126	- 17 129	- 3 628	- 3 868	61 278	61 794	38 115	44 135
挂车 120	- 1 025	- 2 166	- 996	- 1 019	9 223	9 281	12 020	14 398

表 2 不同计算模式下主梁根部内力比较

计算模式	轴力/kN		剪力/kN		弯矩/(kN·m)	
	钢箱梁	全截面	钢箱梁	全截面	钢箱梁	全截面
模式 1	- 99 523	- 126 479	- 3 301	- 3 662	931	960
模式 2	- 63 791	- 126 172	- 3 391	- 2 950	- 11 350	- 8 666
模式 3	- 61 074	- 128 932	- 2 786	- 2 110	- 12 596	- 10 602

0.475. 可见, 徐变效应对钢箱梁的影响很大, 结构分析中必须充分考虑混凝土桥面板的徐变影响.

b. 剪力及弯矩主要由钢箱梁承受, 徐变效应对剪力及弯矩影响不大, 其原因是桥面板处在截面中心处, 承担的弯矩及剪力较小.

2.2 关于计算模式的讨论

为了分析、探讨桥面板徐变收缩效应对钢箱梁应力的影响, 这里采用 3 种模型进行分析计算.

2.2.1 计算模式 1

按桥梁的典型施工阶段从顶推至成桥的全过程仿真分析模型, 考虑施工阶段体系转换及徐变效应的影响, 对施工阶段及成桥阶段各工况荷载作用下主梁、横梁、塔柱的内力、应力及位移进行计算.

2.2.2 计算模式 2

按桥梁的典型施工阶段从顶推至成桥的全过程仿真分析模型, 仅考虑施工阶段的体系转换而不计徐变效应的影响; 对施工阶段及成桥阶段各工况荷载作用下主梁、横梁、塔柱的内力、应力及位移进行计算.

2.2.3 计算模式 3

一次成桥法不考虑施工阶段的体系转换及徐变效应的影响, 对调索时及各工况荷载作用下主梁、横梁、塔柱的内力、应力及位移进行计算.

表 2 给出了 3 种计算模式梁根部内力结果. 可见, 由于调索时位移及内力的控制, 剪力和弯矩数值较小; 3 种计算模式得出的梁根部全截面轴力基本一

致, 但轴力的分配差别较大. 因此, 梁根部轴力是该桥钢箱梁设计的控制因素. 若不考虑徐变影响, 则钢箱梁承担的轴力为全截面轴力的 0.47~ 0.50 倍; 而若考虑徐变内力重分布, 则钢箱梁承担的轴力为全截面轴力的 0.78 倍.

3 空间整体弹性稳定性分析

根据有限变位理论, 并记入塔梁 $P-\Delta$ 效应, 对成桥阶段空间整体弹性稳定性进行分析. 以二期恒载即桥面均布荷载作为荷载增量, 按非线性迭代得出其失稳时的荷载以及结构失稳时的内力和变形.

结构失稳时的变形如图 2 所示. 正常使用荷载以及结构失稳时主梁钢箱梁根部轴力如表 3 所示. 由结构失稳时的变形图可以看出, 结构失稳表现为主梁弯曲失稳.

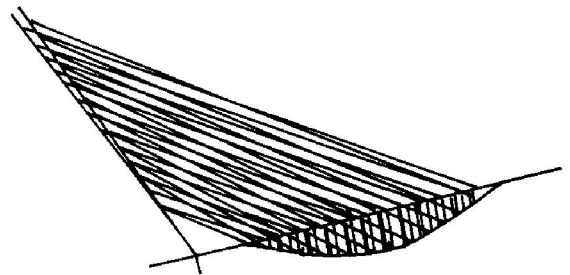


图 2 结构失稳时的变形图

根据稳定安全系数的定义 $n = N_{cr}/N$, 可得出成桥阶段弹性稳定安全系数, 如表 4 所示. 可见, 计算

模式不同,得出的稳定安全系数差别较大,而考虑徐变内力重分布后该桥整体稳定安全系数偏小.《公路斜拉桥设计规范(试行)JTJ027—96》规定,对索塔和主梁进行稳定性分析,其稳定安全系数应大于4.为此,将第1根拉索至塔跟区段钢箱梁壁厚增加为36 mm,以增加结构总体稳定安全系数.

表3 正常使用荷载及结构失稳时主梁钢箱梁根部轴力

计算模式	梁根部轴力				f/kN
	恒载时	汽车-C20	挂车-120	满布人群时	
模式1	-99 523.3	-8 073.3	-1 018.5	-11 334.9	-332 503.4
模式2	-63 791.0	-8 073.3	-1 018.5	-11 334.9	-332 503.4
模式3	-61 074.0	-8 073.3	-1 018.5	-11 334.9	-332 503.4

表4 稳定安全系数

计算模式	恒载+汽车-超20组合	恒载+挂车120组合	恒载+满布人群组合
模式1	3.10	3.30	3.00
模式2	4.62	5.13	4.42
模式3	4.81	5.35	4.59

参考文献:

- [1] 戴公连,李德建,曾庆元.深圳市芙蓉大桥连续系杆拱桥空间稳定性分析[J].中国公路学报,2001,14(1):48-51.
- [2] 戴公连,李德建.桥梁结构空间分析设计方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [3] JTJ023-85,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

The spacial analysis of internal force on cable-stayed bridge without back stay over Liuyang river in Changsha

DAI Gong-lian, LI De-jian, ZENG Qing-yuan

(Department of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The initial strain method of calculating redistribution of internal force by creep in concrete steel combined section is established and the program of internal force and space stability analysis of cable-stayed bridge without back stay is developed based on the flexible shear grillage. The principle of internal force distribution, and the influence of creep on internal force distribution between steel girder and concrete deck and the safety factors of cable-stayed bridge without back stay in Liuyang river are presented. Three methods are conducted. The analysis results show that the internal force of whole section is the same but the distribution between steel girder and concrete deck is very different. If influence of concrete creep is ignored, the internal force of steel girder is 0.47~0.50 times as great as that of the whole combined section and the safety factor of steel girder is 4.18. On the other hand, if influence of concrete creep is considered, the internal force of steel girder is 0.78 times as great as that of the whole combined section and the safety factor of steel girder is 3.1.

Key words: cable-stayed bridge without back stay; creep; redistribution of internal force; safety factor of stability