

文章编号:1673-2049(2007)01-0059-05

PC 斜拉式桁架梁桥敏感参数分析

黄平明,王 达,张永健

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:为了准确地把握 PC 斜拉桥在各施工阶段及营运阶段内力及线形变化情况,以某 PC 斜拉式桁架梁桥为例,借助大型有限元计算程序,建立了三维空间有限元模型。运用仿真分析方法,对该结构受力特性进行了相应的研究,得出混凝土收缩徐变、温度变化、非线性等敏感参数对该桥内力及线形的影响规律。结果表明:混凝土收缩徐变、非线性及刚度误差对结构内力影响较小,对结构挠度的影响较大,挠度变化值自中跨跨中向两侧呈线性递减趋势;温度与自重误差对结构的内力及线形影响相对较小,挠度变化值自跨中对称向两侧呈抛物线变化,而轴力变化值在全桥范围内分布较为均匀。

关键词:桥梁工程;有限元;敏感参数;收缩徐变;非线性;静力特性

中图分类号:TU448.224

文献标志码:A

Sensitivity Parameters Analysis of PC Oblique-pulling Truss Bridge

HUANG Ping-ming, WANG Da, ZHANG Yong-jian

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University,
Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to accurately grasp variation situations of inner force and deflection for PC cable-stayed bridge during construction and running stage and study the mechanical characteristics of this type bridge, a PC oblique-pulling truss bridge was taken as the studying case. A three-dimensional space finite element model was built with the large-scale finite element calculation program. The related researches were carried on the structure by computer simulation analysis method. The influence rules and levels of the bridge static characteristics were obtained, which were affected by the sensitivity parameters, such as shrinkage and creep of concrete, changing of the temperature, nonlinearity and so on. The results indicate that shrinkage and creep of concrete, nonlinear and rigidity deviation have a less affection on inner force of bridge, while they have a greater affection on deflection of structure, and changes of deflection value linearity decrease from middle span to two side spans. But temperature and self-weights deviation have a smaller affection on deflection and inner force than the other sensitivity parameters and changes of deflection of them are taken as parabolic distribution from middle span to two side spans, while changes of inner force don't have much variation on the whole bridge.

Key words: bridge engineering; finite element; sensitivity parameter; shrinkage and creep; non-linearity; static characteristic

收稿日期:2006-12-12

基金项目:湖北省交通科研计划项目(鄂交 2004343-1203)

作者简介:黄平明(1965-),男,湖北当阳人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:hpming@vip.sina.com。

0 引言

PC 斜拉式桁架梁桥具有结构新颖、桥型独特、受力明确等特点,该结构不但能充分发挥预应力混凝土的优越性,还具有耐腐蚀性强、抗疲劳强度高优点。修建 PC 斜拉式桁架梁桥不但能节省投资、缩短工期,也能满足中、大跨径的要求,因此,该类型桥梁有着广阔的应用前景;但各国已建成的该类型桥为数不多,与之相应的设计、施工及施工控制等方面积累的经验较为欠缺,通常是通过对结构的仿真计算来掌握结构在施工各阶段及营运阶段的内力及线形的变化情况,由于影响该类桥型的内力及线形敏感参数较多,因此往往很难准确地把握该类结构在各施工阶段及营运阶段的内力及线形变化情况^[1-5],所以对结构的敏感参数进行有效的识别,并对其结构产生的影响进行相应的分析研究,显得十分必要。笔者以某 PC 斜拉式桁架梁桥为背景,研究了敏感参数对该类结构的内力及线形的影响,得出的结论可为今后修建同类桥梁提供有益的理论参考依据。

1 敏感参数分析

影响 PC 斜拉式桁架梁桥受力的参数很多,其中影响较明显的有混凝土收缩徐变、温度、非线性、自重误差和结构刚度误差,因此只有准确地分析出这些敏感参数对结构各施工阶段的内力及线形的影响,把握内力的变化情况,才可以保证结构安全,提高施工控制精度,确保成桥线形及受力状态满足设计要求。

1.1 混凝土收缩徐变

在普通钢筋混凝土或预应力混凝土等配筋构件中,随时间而变化的混凝土收缩徐变受到内部配筋的约束将导致应力的重分配;预制的混凝土梁或钢梁与现浇的混凝土顶板组成的叠合梁,将由于构件各组成部分之间不同的收缩徐变值而导致内力及线形发生变化;构件各组成部分因具有不同的收缩徐变特性,亦将由于变形不同、相互制约而引起内力及线形的变化;分阶段施工的超静定混凝土结构,从前期结构继承下来的应力状态所产生的徐变变形增量及到后期结构的约束,也将会使结构内力及线形发生变化。由于该类桥梁上部结构是由高标号混凝土预制杆件通过张拉预应力拼装而成,混凝土的收缩徐变效应明显,因此,在 PC 混凝土桥梁计算过程中考虑混凝土的收缩徐变显得十分重要。

混凝土徐变的变形计算公式为

$$\Delta_{kp} = \int_L \frac{M_0 \bar{M}_k}{EI} [1 + \varphi(t, \tau_0)] dx + \int_L \frac{M(t) \bar{M}_k}{E_\varphi I} dx \quad (1)$$

式中: Δ_{kp} 为 k 点处徐变产生的位移; $\varphi(t, \tau_0)$ 为徐变系数; M_0 为结构初始弯矩; \bar{M}_k 为单位力产生的弯矩; $M(t)$ 为结构徐变次内力; EI 为结构抗弯刚度; $E_\varphi I$ 为结构折减抗弯刚度。

设桥梁结构各构件的收缩徐变特性相同,后期结构为 n 次超静定,则从体系转换时刻 t_0 至以后任一时刻 t ,因收缩徐变而产生于第 i 个赘余力方向的相对变位的相容条件表达式为

$$\Delta_{i,1} \varphi(t, t_0) + \sum_{i=1}^n X_{i(t,t_0)} \delta_{ij} [1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0)] + \Delta_{i,s(t,t_0)} = 0 \quad (2)$$

将式(2)做相应变换,求解可得

$$X_{i(t,t_0)} = \frac{\varphi(t, t_0)}{1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0)} (X_{i,2} - X_{i,1}) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: $\Delta_{i,1}$ 为荷载前期结构继承下来的初内力产生于基本静定结构第 i 个赘余力方向的变位; $X_{i(t,t_0)}$ 为从时刻 t_0 至时刻 t 的时间内产生于第 i 个赘余力方向的截面徐变次内力; δ_{ij} 为当 $X_j=1$ 时产生于基本静定结构第 i 个赘余力方向的变位; $\Delta_{i,s(t,t_0)}$ 为从时刻 t_0 至时刻 t 的时间内的收缩增量产生于基本静定结构第 i 个赘余力方向的变位。

1.2 温度

温度变化对结构的影响可分为两种情况:均匀温度的变化;不均匀温度的变化。该类桥型由于节点刚性,在温度变化的情况下,其受力更趋向于刚架桥的力学特性,但是由于桁架梁桥杆件截面尺寸较小,截面四周所处的环境温度基本一致,局部温差不是很明显,所以由不均匀温度引起的结构内力和位移变化不是很明显,只需考虑均匀温度的变化。目前,在考虑温度对这种 PC 斜拉式桁架梁桥的影响时,通常采用近似简化的计算方法来考虑温度变化的影响。在温度荷载作用下,结构的典型方程一般式为

$$\delta_{i1} X_1 + \delta_{i2} X_2 + \dots + \delta_{ij} X_j + \delta_{in} X_n + \Delta_i = 0 \quad i, j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: δ_{ij} 为 j 点单位力在 i 点产生的位移; X_i 为温度变化引起的力; Δ_i 为温度变化引起的沿 X_i 方向的位移。

根据式(4)可得 n 个方程,联立此 n 个方程即可求解结构的温度内力及位移。

1.3 非线性

PC 斜拉式桁架梁桥桥型多采用悬臂拼装施工,由于施工过程中结构悬臂端较长,在荷载作用下,施工过程中节点发生较大位移,所以有必要考虑既有的节点位移对结构刚度矩阵的影响,即考虑非线性效应,程序在进行结构下次计算之前,修正节点的坐标值,将原有刚度 K_0 进行修正,重新计算单元的刚度矩阵 K_1 ,使结构的平衡位置建立在新的节点位置上,这样计算结果会更加精确。

1.4 自重误差

预制杆件自重误差主要来源于混凝土重度误差和杆件成型尺寸误差。这些误差带有随机性,呈偏态分布,有系统偏差的成分^[6-8]。C50 混凝土的重度按照现行桥梁规范取值为 $25\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,但是对于高标号混凝土,由于空隙小,其实测值较理论值偏大。在该类型桥施工过程中根据现场实测,C50 混凝土的重度为 $26.2\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,增大幅度达到 5%。由于现在的设计其配筋普遍比过去多,按钢筋混凝土材料取值则偏小,而规范值更小。预制杆件成型尺寸与预制场模板制作精度有关,常有尺寸超过设计值的情况,根据相关经验,预制杆件自重一般都会超过设计值,其超出的幅度一般在 2% 左右。综合混凝土重度差和杆件成型尺寸误差,该类桥梁的预制杆件的自重增加幅度达到 7%。计算过程可通过提高单元的自重系数来达到考虑杆件自重误差的效果,即将单元的自重系数由初始值 1 提高到 1.07。

1.5 刚度误差

对于该 PC 斜拉式桁架梁桥,结构的刚度主要取决于墩及各部分杆件的弹性模量 E 、截面 A 和惯性矩 I 。试验证明,混凝土弹性模量 E 随着时间的变化而变化,一般可增加 10%~15%。由于混凝土强度实际值比规范建议值要高,这使得混凝土弹性模量 E 值比规范建议值也要高,所以参考规范建议值及结合具体实际情况,计算时混凝土弹性模量 E 的取值应在原有基础上增加 10% 较为合适。

2 实例分析

2.1 工程实例

该桥位于三峡库区秭归县归州镇境内,桥型结构系主跨为 140 m 的 PC 斜拉式桁架梁桥,桥面宽为 8 m,主桥布置如图 1 所示。

2.1.1 上部结构

主桥桁架由对称的 4 个桁架片通过一道跨中横梁、两道塔顶横梁及两道端横梁连接成整体采用预

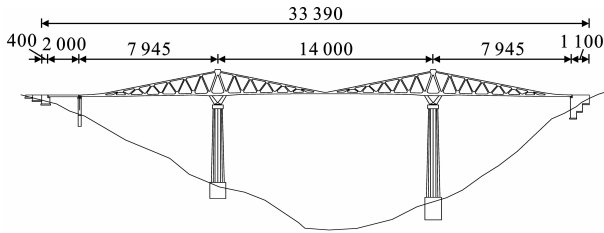


图 1 主桥布置(单位:cm)

Fig. 1 Main Bridge Layout (Unit: cm)

制(或部分预制)拼装,在主桁架片之间搭放预制空心板,浇筑湿接缝混凝土形成桥面系。

2.1.2 下部结构

该桥桥墩较高,两主桥墩高度分别为 59、71 m。主墩墩身为空心圆形墩,上端为 V 形斜腿,与桁架下弦杆固结形成刚构体系。墩身采用 C25 混凝土,墩壁厚度为 0.8 m,整个墩身向下按 100 : 2 设坡。基础采用挖孔嵌岩圆形空心桩基础,桩壁厚度为 3 m,桩内采用片石混凝土填充。

2.2 计算模型

通过采用通用程序建立空间三维有限元模型,对该桥进行仿真模拟计算,桁架杆件、横系梁及桥墩采用空间三维梁单元(梁划分为 188 个单元、6 个自由度),对预应力进行换算,按结构温度变化进行等效。全桥结构共划分为 1 415 个单元、1 817 个节点。边界条件为:桥墩处均为固结,支座处限制竖向位移。

2.3 计算结果分析

2.3.1 收缩徐变效应

图 2(a)为考虑混凝土收缩徐变 1 000 d 与不考虑混凝土收缩徐变二者挠度比较。由图 2(a)可以发现,1 000 d 后在桥跨跨中,由混凝土的累计收缩徐变产生的挠度变化值可达到 6.91 cm,占由结构自重引起的位移的 20% 左右,在全桥范围内引起了较大的竖向位移,对桥面线形影响较大;而收缩徐变引起的下弦杆轴力变化较小,变化范围为 -8~ -5 kN,如图 2(b)所示。

2.3.2 温度效应

当该结构整体升温(25 °C)、整体降温(15 °C)时,结构对温度变化的敏感程度如图 3 所示。由图 3 发现,该桥的桥面线形,受温度变化影响明显,越接近跨中,受温度的影响越大,最大可达到 4 cm 左右,节点位移曲线自跨中对称向两侧呈抛物线变化,对杆件轴力变化影响较小,在全桥范围内分布较均匀。

2.3.3 非线性效应

图 4 为综合考虑材料非线性、梁-柱非线性及几何非线性效应与不考虑非线性效应,计算而得的挠

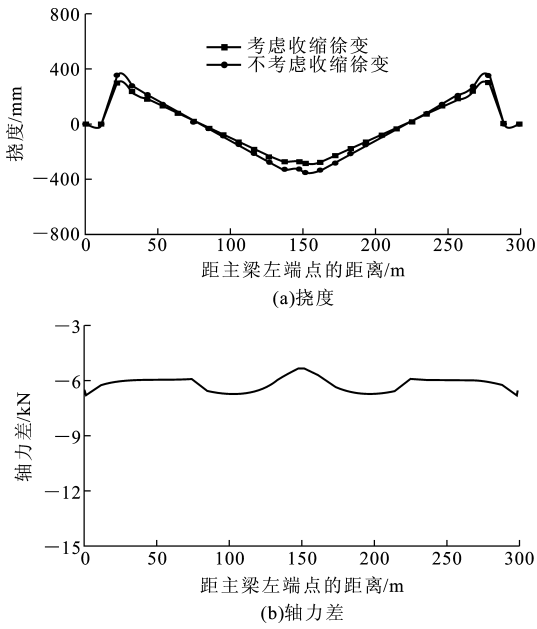


图 2 收缩徐变效应
Fig. 2 Shrinkage and Creep Effect

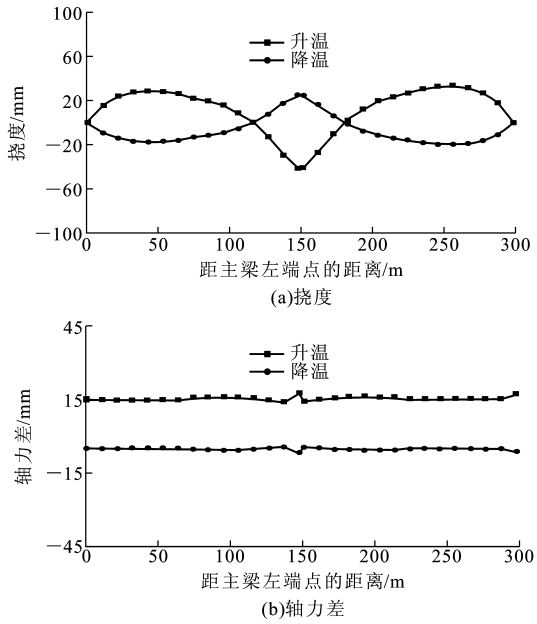


图 3 温度效应
Fig. 3 Temperature Effect

度比较。由图 4 可以看出,非线性效应引起的结构节点位移,最大可达到 10 cm 左右,自跨中向两边对称呈直线锐减。计入非线性因素的影响,是保证成桥线形合理的另一个重要因素。

2.3.4 自重误差效应

现按所有杆件均超重 7% (其他参数取理论值),比较成桥状态下考虑自重误差与不计自重误差各自所产生的挠度值,比较结果如图 5 所示。考虑自重误差,成桥 1 000 d 后混凝土收缩徐变的增大效

应如图 6 所示。

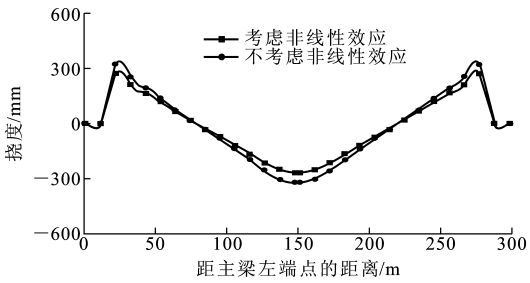


图 4 非线性效应 (挠度值)
Fig. 4 Nonlinear Effect (Deflection Value)

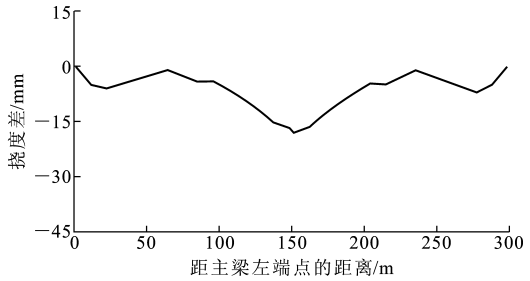


图 5 自重误差效应 (挠度差值)
Fig. 5 Self-weights Deviation Effect (Deflection Differential Value)

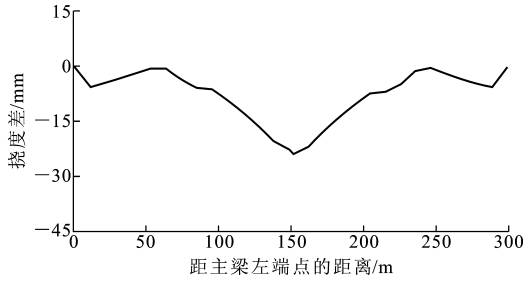


图 6 自重误差引起的收缩徐变效应 (挠度差值)
Fig. 6 Shrinkage and Creep Effect by Self-weights Deviation (Deflection Differential Value)

由图 5、6 可以看出,自重误差将导致成桥状态下桥面整体下挠,跨中最为明显,最大可达到 2 cm 左右,而边跨跨中只有 0.3 cm 左右。由文献[9]可知,随着时间的推移,自重误差产生的挠度差有增大的趋势,说明自重误差增大了徐变产生的挠度。

2.3.5 刚度误差效应

混凝土弹性模量随着时间的变化而变化,一般可增加 10%~15%。混凝土强度实际值往往比规范建议值高,这使得混凝土弹性模量 E 值比规范建议值高。参考规范建议值及结合具体情况,实际中混凝土弹性模量 E 取值通常比理论值要高 10% 左右。若假设混凝土弹性模量 E 增大 10% (其他参数取理论值),对合龙前最大悬臂施工阶段的挠度影响如图 7 所示。

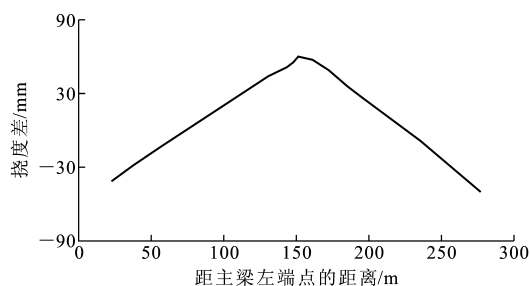


图7 刚度误差效应(挠度差值)

Fig. 7 Rigidity Deviation Effect
(Deflection Differential Value)

由图7可以看出,由于结构的刚度误差,在最大悬臂施工阶段,结构在跨中上拱5.98 cm,在最大悬臂端下挠5.87 cm,且在结构范围内呈线性变化。在施工过程中若能准确得到混凝土的实际弹性模量,将提高计算结果的精度,对未来各施工阶段桥面线形的变化做出准确预测,提高施工控制精度,有着重要的意义。

3 结 语

(1)各敏感参数对结构节点标高和桥面线形影响较大,但对结构内力影响相对较小,其中以混凝土收缩徐变及非线性影响最为明显。

(2)在混凝土收缩徐变、温度变化、自重误差及刚度误差等敏感参数影响下,边、中跨跨中处节点位移变化幅度较大,该部位内力变化也明显,建议在设计过程中对该处进行优化设计,适当增强边跨及中跨跨中附近结构节点强度。

(3)考虑各敏感参数的影响,能提高结构仿真计算的精度,准确地把握施工各阶段结构内力及线形变化,从而提高施工的控制精度。

参考文献:

References:

- [1] 刘 扬,张建仁.斜拉桥施工期时变可靠度的参数敏感性分析[J].长沙交通学院学报,2004,20(4):45-49.
LIU Yang, ZHANG Jian-ren. Parameters Sensitivity Analysis for Time-dependent Reliability of Cable-stayed Bridges During Construction[J]. Journal of Changsha Communications University, 2004, 20(4): 45-49.
- [2] 项贻强,姚永丁,胡峰强.体外索加固T型刚构桥的静动力性能研究[J].中国公路学报,2004,17(1):39-44.
XIANG Yi-qiang, YAO Yong-ding, HU Feng-qiang. Study of Static and Dynamic Behavior of T-shape Rigid Frame Bridge Reinforced by Prestressed External Ten-

don[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 39-44.

- [3] 郭 健.混凝土斜拉桥主梁的非稳态温度场与应力场分析[J].中国公路学报,2005,18(2):65-68.
GUO Jian. Analysis of Unsteady Temperature Gradient and Thermal Stress Field for Concrete Girder of Cable-stayed Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 65-68.
- [4] 李忠献,黄 健,丁 阳,等.不同地震激励下大跨度斜拉桥的地震反应分析[J].中国公路学报,2005,18(3):48-53.
LI Zhong-xian, HUANG Jian, DING Yang, et al. Seismic Responses of Long-span Cable-stayed Bridges Under Different Patterns of Earthquake Excitations[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 48-53.
- [5] 刘小燕,颜东煌,张 峰,等.预应力高强混凝土梁极限承载力分析[J].中国公路学报,2006,19(1):58-61.
LIU Xiao-yan, YAN Dong-huang, ZHANG Feng, et al. Ultimate Load Analysis of Prestressed High-strength Concrete Beam[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(1): 58-61.
- [6] 颜东煌,陈常松,涂光亚.混凝土斜拉桥施工控制温度影响及其现场修正[J].中国公路学报,2006,19(4):71-76.
YAN Dong-huang, CHEN Chang-song, TU Guang-ya. Temperature Influence and Its Field Correction During Construction Control of Concrete Cable-stayed Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 71-76.
- [7] 颜东煌.斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D].长沙:湖南大学,2001.
YAN Dong-huang. Determining of Reasonable Design States and Construction Controlling of Cable-stayed Bridges[D]. Changsha: Hunan University, 2001.
- [8] 樊可清,倪一清,高赞明.大跨度桥梁模态频率识别中的温度影响研究[J].中国公路学报,2006,19(2):67-73.
FAN Ke-qing, NI Yi-qing, GAO Zan-ming. Research on Temperature Influences in Long-span Bridge Eigenfrequencies Identification[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 67-73.
- [9] 陈太聪,韩大建.大跨度斜拉桥施工过程中的主梁节段自重识别[J].土木工程学报,2005,38(2):68-74.
CHEN Tai-cong, HAN Da-jian. Identification of Self-weights Girders During the Construction Process of a Long Span Cable-stayed Bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(2): 68-74.