

文章编号:1671-8879(2017)05-0049-07

四索面钢箱梁斜拉桥合理施工状态确定方法

袁 鹏^{1,2}, 李德建¹, 陆 尧¹, 李传习³

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 路易斯安那州立大学 土木与环境工程学院, 路易斯安那 巴吞鲁日 LA70803; 3. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:为确定四索面钢箱梁斜拉桥的合理施工状态,先以构件弯曲、扭转应变能之和为目标函数,将多索面斜拉桥的索力优化问题转变为求解线性代数方程问题,并导出合理成桥状态空间索力及外内侧拉索索力比值;再以该合理成桥状态空间索力为目标索力,通过正装迭代法确定四索面钢箱梁斜拉桥合理施工状态;最后以嘉绍大桥(六塔四索面斜拉桥)为工程算例,建立该桥同一纵向位置等索力、空间索力 2 种空间模型,对比分析 2 种四索面钢箱梁斜拉桥模型的合理施工状态及其空间结构效应,以验证该方法的正确性。研究结果表明:四索面钢箱梁斜拉桥拉索空间效应显著,外内侧拉索初拉力比值分布较离散,近塔、墩处结构构造和受力较为复杂,其索力比值略大于 1,其余标准梁段处索力比值为 0.85~0.97;采用等索力模型会导致主梁内存在较大扭矩,横梁内存在较大弯矩等不利受力状态,索力优化后的空间结构计算模型的主梁扭矩、横梁弯矩均得到了改善;钢箱梁斜拉桥施工控制应以主梁线形控制为主,索力和应力控制为辅,对于结构受力复杂的塔梁交界处及边跨附近,应对其局部采取应力控制措施,以防止局部屈曲。提出的方法同样适应于其他类型多索面斜拉桥合理施工状态的确定。

关键词:桥梁工程;斜拉桥;空间合理施工状态;空间效应;扭转应变能

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Determination method of reasonable construction state of steel box girder cable-stayed bridge with four cable planes

YUAN Peng^{1,2}, LI De-jian¹, LU Yao¹, LI Chuan-xi³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 2. School of Civil and Environment Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge LA70803, Louisiana, USA; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: To research reasonable construction state of steel box girder cable-stayed bridge with four cable planes, an objective function of the sum of bending and torsion strain energy was built. Cable forces optimization of cable-stayed bridge with multi-cable planes was then transformed into solving linear algebraic equations. Cable forces and their ratios under reasonable completed state were derived. Then, taking spatial cable forces of reasonable completed state as target, the reasonable construction state of steel box girder cable-stayed bridge with four cable planes was determined by forward-iteration method. Furthermore, taking the Jiashao Bridge (steel box girder cable-stayed bridge with six pylons and four cable planes) as an example, finite element

收稿日期:2017-04-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51078041);中南大学博士研究生自主探索创新项目(2016zzts072)

作者简介:袁 鹏(1987-),男,湖南益阳人,工学博士研究生,E-mail:yuanpeng0710@163.com.

通讯作者:李德建(1967-),男,湖南邵阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:dejianli@vip.sina.com.

models with equivalent cable force and spatial cable force at the same longitudinal position were built, and reasonable construction state and spatial structure effect of two kinds of steel box girder cable-stayed bridge with four cable planes were comparatively analyzed to verify the validity of the method. The results show that the spatial effect of steel box girder cable-stayed bridge with four cable planes is significant, and the ratio distribution of initial cable force is discrete. Ratio of cable force is slightly more than 1, nearby tower and pier due to the complicated structure configuration and force state. The ratios distribution of cable force at the other standard beam sections are from 0.85 to 0.97, the model with equal cable force causes some negative effects in structure, such as large torque in main girder and large moment in cross beam. The optimized spatial structure calculation model gets much improvement, the construction of cable-stayed bridge with steel box girder should be mainly controlled by shape of main girder and supplemented by cable forces and stress control. In order to prevent local buckling, stress control measures should be taken at the junction of pylon and girder and side span whose structure and force are complex, this method can also be applied to other cable-stayed bridges in determination of reasonable construction state. 1 tab, 5 figs, 25 refs.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge; spatial reasonable construction state; spatial effect; strain energy of torsion

0 引言

随着斜拉桥桥面宽度的增加,斜拉桥拉索趋向于采用三索面或四索面布置,将主梁横桥向转化成2跨或3跨的弹性支撑连续梁承载模式,使得主梁横向计算跨径减小、梁高压缩、剪力滞效应减缓、施工难度降低等^[1-4]。相比于单索面和双索面斜拉桥,多索面斜拉桥空间效应突出。由于主梁截面形心与质心不重合以及各种不对称荷载的作用,使得多索面斜拉桥同一纵向位置外内侧拉索索力不同,而其横桥向外内侧索力分配将影响各施工阶段主梁和横梁的受力状态^[5-10]。因此,探讨四索面斜拉桥合理施工状态及其空间效应具有重要意义。

国内外许多学者对斜拉桥合理施工状态的确定进行了研究。杨炳成等提出了对斜拉桥合理成桥状态按施工步骤倒拆来获得结构施工阶段受力的方法^[11-12];颜东煌等采用施工正装计算的方法获得结构施工阶段受力,并对其误差采用最小二乘法进行修正^[13-17];秦顺全等利用结构无应力长度和曲率为结构固有特性,且为一定值的特点,将结构施工状态与成桥状态联系起来,提出了无应力状态控制法^[18-20];朱劲松等采用神经网络分析法,利用当前施工状态的索力和标高预测下一阶段的索力和标高,以此确定斜拉桥合理施工阶段^[21-22];李乔等根据几何控制的全过程自适应施工控制系统提出了自适应控制方法^[23]。

上述方法均没有考虑多索面斜拉桥同一纵向位

置索力横向分配对结构空间合理施工状态的影响。鉴于此,本文先通过优化主梁弯曲、扭转应变能之和,获得合理成桥状态空间索力及外内侧拉索索力最优比值,再采用正装迭代法确定四索面钢箱梁斜拉桥合理施工状态,并对四索面钢箱梁斜拉桥空间效应进行了研究。

1 合理施工状态确定方法

类比于双索面斜拉桥合理施工状态的确定,先确定空间四索面斜拉桥合理成桥状态,然后根据拟定的施工工序确定合理施工状态。

四索面斜拉桥单幅主梁同一纵向位置外内侧索力的合理分配,将有效改善主梁的受扭、主梁间横梁的受力。故四索面斜拉桥索力优化时应将主梁、主塔的弯曲应变能^[24]和主梁扭转应变能之和最小为目标函数,结构的应变能 U 为

$$U = \int_x \left(\frac{M^2(x)}{2EI(x)} + \frac{M_t^2(x)}{2GI_p(x)} \right) dx + \int_z \frac{M^2(z)}{2EI(z)} dz \quad (1)$$

式中: x 、 z 分别为主梁顺桥向位置和主塔竖向位置; M 、 M_t 分别为结构相应位置处的弯矩和扭矩; E 为弹性模量; G 为剪切模量; I 为截面惯性矩; I_p 为极惯性矩。

对于离散结构,应变能可以写成

$$U = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{4E_i I_i} (M_{Li}^2 + M_{Ri}^2) + \sum_{j=1}^n \frac{L_j}{4G_j I_{pj}} \cdot (M_{Lj}^2 + M_{Rj}^2) \quad (2)$$

式中: m 为主梁和塔墩单元总数; n 为主梁单元总数

(仅考虑主梁受扭); M_{Li} 、 M_{Ri} 分别为梁单元 i 左、右两端弯矩; E_i 、 I_i 、 L_i 分别为单元 i 的材料弹性模量、截面惯性矩、单元长度; G_j 、 I_{pj} 分别为单元 j 的材料剪切模量、极惯性矩; M_{tLj} 、 M_{tRj} 分别为单元 j 左、右端扭矩。

将式(2)改为矩阵形式

$$U = M_L^T B M_L + M_R^T B M_R + M_{tL}^T D M_{tL} + M_{tR}^T D M_{tR} \quad (3)$$

式中: U 为结构的应变能向量; M_L 、 M_R 分别为梁单元左、右端弯矩向量; M_{tL} 、 M_{tR} 分别为梁单元左、右端扭矩向量, B 、 D 分别为弯矩、扭矩的对角系数矩阵, 其对角元素 b_{ii} 、 d_{jj} 为

$$\begin{cases} b_{ii} = \frac{L_i}{4E_i I_i} & i = 1, 2, \dots, m \\ d_{jj} = \frac{L_j}{4G_j I_{pj}} & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

若内力状态调整前单元左右两端弯矩、扭矩向量分别为 M_{L0} 、 M_{R0} 、 M_{tL0} 、 M_{tR0} , 索力施调向量为 T , 则结构内力状态调整后单元左右两端弯矩、扭矩向量为

$$\begin{cases} M_L = M_{L0} + C_L T \\ M_R = M_{R0} + C_R T \\ M_{tL} = M_{tL0} + C_{tL} T \\ M_{tR} = M_{tR0} + C_{tR} T \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_L 、 C_R 、 C_{tL} 、 C_{tR} 分别为索力对梁左右两端弯矩、扭矩的影响矩阵。

将式(5)代入式(3)可得

$$\begin{aligned} U = & U_0 + M_{L0}^T B C_L^T T + T^T C_L^T B M_{L0} + T^T C_L^T B C_L T + \\ & M_{R0}^T B C_R^T T + T^T C_R^T B M_{R0} + T^T C_R^T B C_R T + M_{tL0}^T D C_{tL}^T T + \\ & T^T C_{tL}^T D M_{tL0} + T^T C_{tL}^T D C_{tL} T + M_{tR0}^T D C_{tR}^T T + \\ & T^T C_{tR}^T D M_{tR0} + T^T C_{tR}^T D C_{tR} T \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$U_0 = M_{L0}^T B M_{L0} + M_{R0}^T B M_{R0} + M_{tL0}^T D M_{tL0} + M_{tR0}^T D M_{tR0}$$

式中: U_0 为与 T 无关的常数。

为了使索力调整后的结构内力状态最合理(主梁弯曲、扭转应变能最小), 令

$$\partial U / \partial T_I = 0 \quad I = 1, 2, \dots, l \quad (8)$$

式中: T_I 为第 I 根拉索索力施调向量; l 为调整的斜拉索数。

经计算可得

$$\begin{aligned} (C_L^T B C_L + C_R^T B C_R + C_{tL}^T D C_{tL} + C_{tR}^T D C_{tR}) T = \\ - C_L^T B M_{L0} - C_R^T B M_{R0} - \\ C_{tL}^T D M_{tL0} - C_{tR}^T D M_{tR0} \end{aligned} \quad (9)$$

至此, 多索面索力优化问题转变为式(9)的 l 阶线性代数方程^[3]。通过优化结构弯曲应变能与主梁

扭转应变能之和, 可确定合理成桥状态及外内侧斜拉索索力比值, 并获得空间多索面斜拉桥合理成桥状态索力以及外内侧索力比值。最后采用正装迭代法即可以获得四索面斜拉桥合理施工阶段的空间初拉力^[13]。

2 工程算例

2.1 工程概况

嘉绍大桥主航道桥为九跨六塔四索面分幅钢箱梁斜拉桥, 桥塔采用独柱形空心箱形断面, 塔梁交界处设置箱形断面的 X 形托架支撑主梁, 跨径布置为 (70+200+5×428+200+70)m。标准梁段为扁平钢箱梁, 2 幅主梁间设横梁。各梁段外内侧各有 1 根拉索, 全桥共设 576 根(纵向 1/2 立面布置见图 1)^[22]。该桥施工方法为: 无索区梁段(索塔塔周及边跨梁段)采用满堂支架节段拼装; 标准梁段采用悬臂拼装。

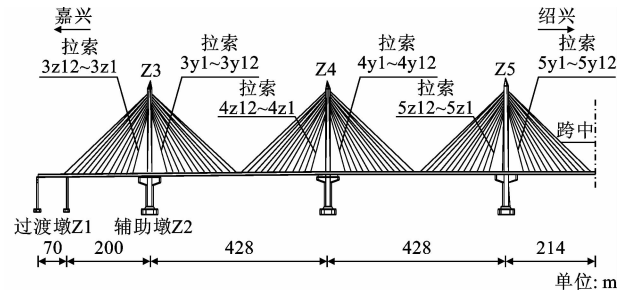


图1 嘉绍大桥主航道桥 1/2 立面布置

Fig. 1 Elevation of 1/2 main channel bridge of Jiashao Bridge

2.2 有限元模型

利用通用有限元软件 ANSYS 建立嘉绍大桥斜拉桥计算模型, 2 幅主梁均采用“鱼骨”模式, 采用 Beam44 梁单元模拟主梁及桥塔, 采用 Ernst 修正弹性模量的 Link10 桁架单元模拟斜拉索^[21], 拉索与主塔及 2 幅主梁之间通过刚臂连接。支座约束采用耦合方式模拟。计算中考虑 83 个施工阶段, 各阶段主要施工步骤见下页表 1。

2.3 合理施工状态

2.3.1 多索面钢箱梁斜拉桥空间优化效应

通过 2 种空间模型对比分析四索面斜拉桥的空间效应: ①横桥向等索力模型, 假定沿主梁同一纵向位置外内侧拉索索力相等, 且不计扭转应变能; ②空间索力模型, 假定沿主梁同一纵向位置外内侧拉索索力相等, 采用本文方法确定合理成桥状态空间索力及外内侧拉索索力比值, 并以此为目标状态, 采用正装迭代法, 获得优化后的施工阶段斜拉索空间初拉力。

表 1 施工步骤
Tab. 1 Construction stages

施工阶段	工况说明
1~8	各承台、主塔及无索区主梁施工
9~53	塔两侧标准梁段对称同步起吊
	塔两侧标准梁段和横梁生成
	塔两侧拉索第 1 次同步张拉
	塔两侧吊机同步前移
	塔两侧拉索第 2 次同步张拉
54	10 号标准梁段对称同步起吊
55	10 号标准主梁和横梁生成
56	10 号拉索第 1 次同步张拉
57	边跨合龙
58~60	边跨压重,吊机同步前移,第 2 次张拉
61	拆两侧边跨支架,体系转换
62~71	11、12 号标准梁段施工
72~73	次边跨吊梁、合龙
74~77	中跨吊梁、合龙
78~79	次中跨吊梁、合龙
80~82	解除横梁等临时约束,卸载吊机
83	二期恒载加载

图 2 为空间索力模型合理施工状态斜拉索初拉力及内外侧索力比值,由图 2 可知,经纵向优化后的拉索索力分布均匀。由于各梁段截面形心与质心位置及间距不同、同一梁段横隔板类型不同、两主梁间横梁的间距和类型不同、外内侧拉索空间角度不一致等原因,使得外侧与内侧拉索索力不同且其比值分布较为离散。除近塔处和过渡墩处由于结构构造和受力较为复杂,其索力比值略大于 1,其余标准梁段处索力比值为 0.85~0.97。

图 3 为 2 种模型成桥状态主梁扭矩及横梁弯矩计算结果。由图 3 可知:横桥向等索力模型中主梁外侧和内侧索力大小相同,索力优化中仅进行了结构弯曲应变能优化,故结构内存在较大扭矩,且分布不均匀;索塔附近无索区由于支座构造等原因使得主梁扭矩出现跳跃,且远大于标准梁段主梁扭矩;各横梁弯矩差异性也较大,横梁最大弯矩在索塔附近无索区处。空间索力模型中标准梁段主梁扭矩分布较规律,扭矩约降至原来的 33%,其扭矩为-1 000~1 000 kN·m,横梁弯矩为 200~1 200 kN·m,结构空间效应得到很大改善。由于式(6)中施调参数对索塔附近无索区主梁扭矩和横梁扭矩影响系数较小,因此索塔附近无索区结构受力变化较小。为了避免四索面斜拉桥结构内存在较大主梁扭矩、横梁弯矩,应采用空间计算模型对索力进行优化。

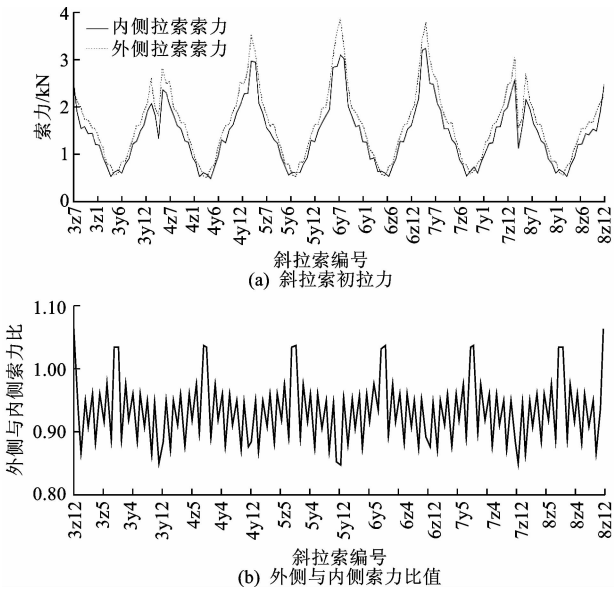


图 2 合理施工状态外侧与内侧斜拉索初拉力及其比值
Fig. 2 Outside and inside initial cable forces and their ratios under reasonable construction state

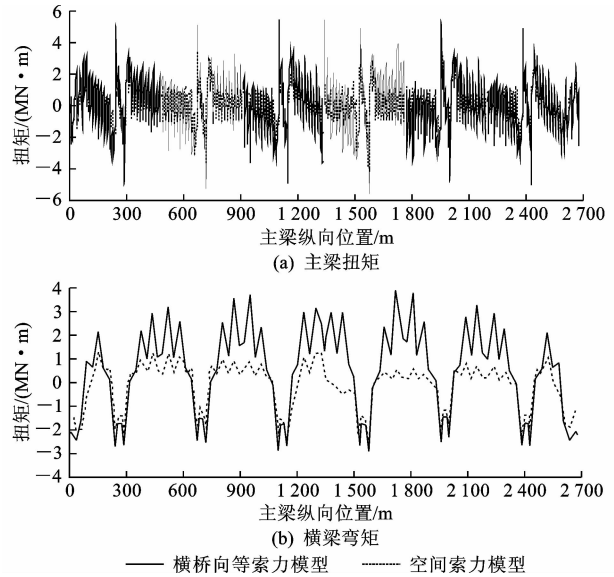


图 3 成桥阶段优化结果
Fig. 3 Optimization results under completed state

2.3.2 施工阶段应力包络

在施工过程中,结构体系、斜拉索索力、结构自重以及施工临时荷载等都在不断变化,各部分结构均需满足不同施工阶段的受力和变形要求,才能保证结构在整个施工过程中处于安全状态。下页图 4 为主塔、主梁及拉索施工阶段的应力(受拉为正、受压为负)包络(根据结构的对称性仅列出部分结果)。

由图 4(a)可知,施工过程中主塔最大压力小于 7 MPa,远小于主塔 C50 混凝土轴心抗压强度设计值 23.1 MPa,这是由于在塔梁交界处设置了

X形托架,增大了该处主塔刚度,改善了塔梁交界处主塔受力。由图 4(b)可知,各施工阶段主梁上下缘最大拉压应力幅值均小于 80 MPa,远小于主梁 Q345 钢材强度设计值 270 MPa,但主塔无索区及边跨(支点)附近主梁应力幅值较大,这些部位结构受力复杂,应采取应力控制措施。由此可见,在钢斜拉桥施工控制中,主梁应力为非主要因素,应以主梁和主塔线形、斜拉索索力控制为主,主塔墩处主梁应力控制为辅。由图 4(c)可知:斜拉索第 1 次张拉后其应力为 180~280 MPa,此类工况下,斜拉索垂度效应最明显,索力相对误差为 1.2%~3.7%^[25],但均在工程容许范围内;施工阶段内侧斜拉索最大拉应力为 685 MPa,小于其容许应力 835 MPa(施工状态安全系数为 2.0)。

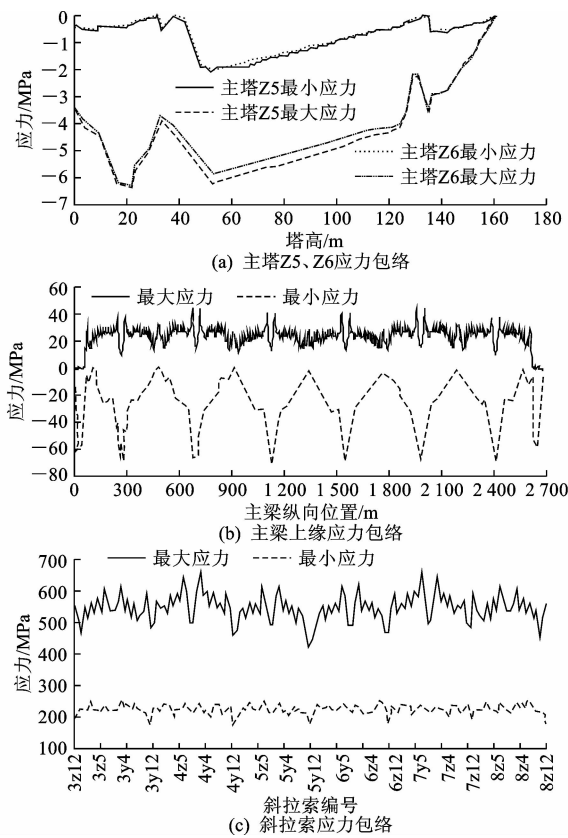


图 4 施工阶段结构应力包络

Fig. 4 Envelope of structure stress during construction

2.3.3 施工阶段结构效应时程曲线

结构效应具有随施工过程变化的特征,获得结构效应随施工阶段变化的时程曲线对加强结构监控、预测结构的受力和变形具有重要意义。图 5 为部分结构效应时程曲线。

由图 5(a)可知:由于采取同步对称施工,主塔 Z3 在边跨合龙前(第 58 号施工阶段)塔顶水平位移

基本为 0,边跨合龙后塔顶位移出现较大振荡;随着施工阶段的推进,塔顶位移向岸侧即边跨偏移(塔顶向中跨侧偏为正,向边跨侧偏为负),主塔 Z5 塔顶位移始终较小,满足多塔斜拉桥中塔塔偏要求。由图 5(b)可知:悬臂施工过程中,4 号斜拉索在第 1 次张拉后应力最小(219 MPa);在第 2 次张拉后且下一梁段吊装时应力达到最大(626 MPa),此后应力呈振荡减小趋势;当施工到离该索 6 或 7 个标准梁段时,该斜拉索应力趋于平稳;边跨合龙后,斜拉索应力在二期恒载作用下略有增加,施工阶段外内侧拉索应力比值分布较离散。由图 5(c)可知:标准梁段施工时,梁端标高呈振荡变化趋势,随后 6 或 7 个梁段的施工对该梁段标高有较大影响,但总体呈先升高,后逐渐平稳的趋势,二期恒载施工完成后,主梁达到设计标高。

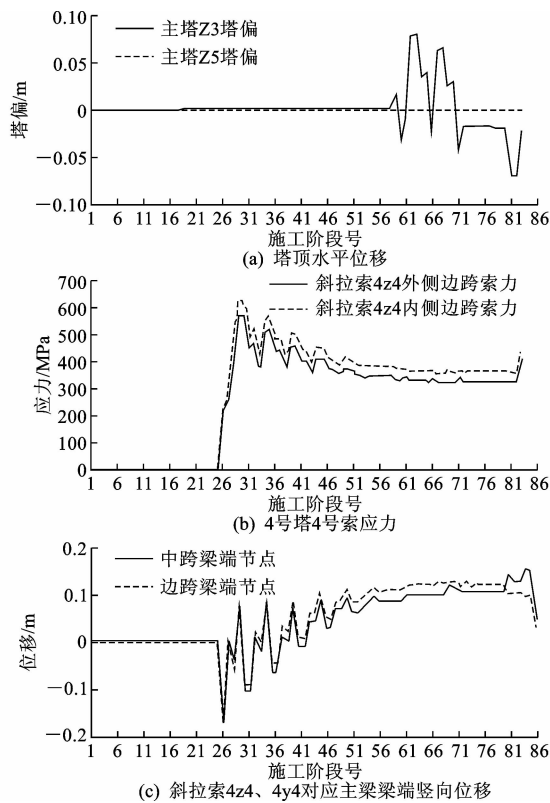


图 5 结构效应时程曲线

Fig. 5 Time history curves of structure effect

3 结 语

(1)四索面钢箱梁斜拉桥应先以构件弯曲、扭转应变能之和为目标函数,优化出其合理成桥索力,再以合理成桥状态空间索力为目标,通过正装迭代法获得其合理施工状态。

(2)四索面钢箱梁斜拉桥的空间效应显著,外内

侧拉索初拉力比值分布较离散,采取等索力模型会使主梁内存在较大扭矩,横梁内存在较大的弯矩,因此应采用空间计算模型。

(3)在钢斜拉桥施工控制中,主梁应力为非主要因素,应以主梁和主塔线形、斜拉索索力控制为主,主塔墩处主梁应力控制为辅。本文方法同样适用于其他多索面斜拉桥合理施工状态的确定。

(5)鉴于四索面斜拉桥空间效应显著,外内侧拉索初拉力分配对结构内力存在较大影响,下一步将建立近塔处无索区主梁局部模型,研究不同索力分配对结构局部内力的影响规律。

参考文献:

References:

- [1] 刘兆丰,赵人达,戴显荣,等.四索面双塔联体分幅斜拉桥塔结构模型试验研究[J].中国铁道科学,2009,30(6):12-18.
LIU Zhao-feng,ZHAO Ren-da,DAI Xian-rong,et al. Model test for the pylon of the joint-pylon cable-stayed bridge with four planes of cables and twin separate girders[J]. China Railway Science,2009,30(6):12-18.
- [2] 陈克坚,李永乐,李 龙,等.大跨度铁路钢桁梁斜拉桥刚度设计及取值研究[J].铁道工程学报,2014(3):66-71.
CHEN Ke-jian,LI Yong-le,LI Long,et al. Research on the stiffness design and its value for long span railway steel truss cable-stayed bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society,2014(3):66-71.
- [3] 袁 鹏,李德建,李传习,等.四索面钢箱梁斜拉桥合理成桥状态下的空间受力研究[J].桥梁建设,2016,46(1):47-52.
YUAN Peng,LI De-jian,LI Chuan-xi,et al. Study of spatial force conditions of steel box girder cable-stayed bridge with four cable planes under reasonable completed bridge state[J]. Bridge Construction,2016,46(1):47-52.
- [4] 赵 雷,孙才志,杨兴旺.鄂东长江大桥施工过程非线性稳定性分析[J].西南交通大学学报,2012,47(5):741-747.
ZHAO Lei,SUN Cai-zhi,YANG Xing-wang. Stability analysis of Edong Yangtze River Bridge during construction [J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2012,47(5):741-747.
- [5] 许伟龙.预应力混凝土宽箱梁单索面斜拉桥抗扭性能研究[D].杭州:浙江工业大学,2011.
XU Wei-long. Study on torsional performance of prestressed concrete cable-stayed bridge with wide box girder and single cable plane [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology,2011.
- [6] 田 俊.空间扭索斜拉桥合理成桥状态与合理施工状态耦合分析方法[D].西安:长安大学,2010.
TIAN jun. Coupling analysis of rational completion stage and rational construction stage of space twist cable-stayed bridge[D]. Xi'an:Chang'an University,2010.
- [7] 王立峰,王二强,孙永存,等.万吨级斜拉桥转体施工过程的力学特性[J].交通运输工程学报,2015,15(3):52-61.
WANG Li-feng,WANG Er-qiang,SUN Yong-cun,et al. Mechanical properties of ten thousand-ton class cable-stayed bridge in rotation construction process[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2015,15(3):52-61.
- [8] 张玉平.多塔空间索斜拉桥施工控制关键技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2014.
ZHANG Yu-ping. Research on construction control key technology of multi-pylon and spatial cable-stayed bridges[D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology,2014.
- [9] 顾箭峰,曾祥红.混合梁斜拉桥塔梁同步施工可行性分析[J].桥梁建设,2016,46(1):111-116.
GU Jian-feng,ZENG Xiang-hong. Feasibility analysis of synchronous construction of pylon and main girder of hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Bridge Construction,2016,46(1):111-116.
- [10] 孙淑红.外倾索面PC箱梁部分斜拉桥受力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
SUN Shu-hong. Behaviors of prestressed concrete box girder for partially cable-stayed bridges with double outwardly inclined cable planes[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2012.
- [11] 杨炳成,孙 明.斜拉桥索力的非线性优化倒拆分析[J].中国公路学报,1998,11(3):55-61.
YANG Bing-cheng,SUN Ming. Cable tensions for cable-stayed bridges and optimized nonlinear back-running analysis [J]. China Journal of Highway and Transport,1998,11(3):55-61.
- [12] 梅盖伟,张 敏,周水兴.用倒拆修正法计算拱桥施工扣索索力与预抬量[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(2):199-202,227.
MEI Gai-wei,ZHANG Min,ZHOU Shui-xing. Solution on cable force and segmental camber in arch bridge construction by modified inverted method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science,2009,28(2):199-202,227.

- [13] 颜东煌,刘光栋. 确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法[J]. 中国公路学报,1999,12(2):59-64.
YAN Dong-huang, LIU Guang-dong. Forward-iteration method for determining rational construction state of cable-stayed bridges[J]. China Journal of Highway and Transport,1999,12(2):59-64.
- [14] 徐 岳,申成岳,朱谊彪,等. 确定拱桥斜拉扣挂施工扣索张力的改进迭代算法[J]. 桥梁建设,2016,46(2):65-69.
XU Yue, SHEN Cheng-yue, ZHU Yi-biao, et al. Improved iteration algorithm for determination of tension of fastening stays for cantilever construction of arch bridge[J]. Bridge Construction, 2016, 46(2): 65-69.
- [15] 林 驰. 基于非线性正装迭代法的三塔结合梁斜拉桥施工索力确定[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(9):109-112.
LIN Chi. Determination of cable force in the construction of composite girder cable-stayed bridge with three pylons[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2012,34(9):109-112.
- [16] 任志刚,刘为俊,杜小勇,等. 斜拉桥施工阶段二次调索计算方法[J]. 桥梁建设,2011,41(3):56-60.
REN Zhi-gang, LIU Wei-jun, DU Xiao-yong, et al. Calculation methods of two-time cable force adjustment for cable-stayed bridges at construction stage[J]. Bridge Construction,2011,41(3):56-60.
- [17] 朱巍志,张 哲,潘盛山,等. 自锚式斜拉-悬索协作体系桥合理成桥状态确定的分步算法[J]. 土木工程学报,2010,43(10):91-97.
ZHU Wei-zhi, ZHANG Zhe, PAN Sheng-shan, et al. Stepwise method of calculation for the rational finished state of self-anchored cable-stayed suspension bridges[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(10):91-97.
- [18] 秦顺全. 分阶段施工桥梁的无应力状态控制法[J]. 桥梁建设,2008,38(1):8-14.
QIN Shun-quan. Unstressed state control method for bridges constructed in stages[J]. Bridge Construction,2008,38(1):8-14.
- [19] 刘 雄,钟新谷,熊先兰,等. 基于无应力状态控制法的斜拉桥运营期调索计算方法研究[J]. 公路交通科技,2008,38(1):8-14.
LIU Xiong, ZHONG Xin-gu, XIONG Xian-lan, et al. Study of cable adjustment calculation method of cable-stayed bridge during operation period based on control method of unstressed state[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2008,38(1):8-14.
- [20] 卫少阳. 基于 CR 列式的无应力状态控制法基本方程[J]. 应用数学和力学,2014,35(12):1352-1362.
WEI Shao-yang. Basic equations of the unstressed state control method based on co-rotational formulation[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2014,35(12):1352-1362.
- [21] 朱劲松,肖汝诚. 大跨度 PC 斜拉桥结构快速分析神经网络模型[J]. 中国铁道科学,2007,28(1):33-39.
ZHU Jin-song, XIAO Ru-cheng. Neural network model to structural simulation of large span PC cable-stayed bridges[J]. China Railway Science,2007,28(1):33-39.
- [22] 李元松,李新平,黄民水. 基于小波网络的斜拉桥施工预测方法[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(4):731-734,738.
LI Yuan-song, LI Xin-ping, HUANG Min-shui. Prediction method of cabled-stayed in construction based on wavelet neural network[J]. Journal of Wuhan University of Technology:Transportation Science & Engineering,2011,35(4):731-734,738.
- [23] 李 乔,卜一之,张清华. 基于几何控制的全过程自适应施工控制系统研究[J]. 土木工程学报,2009,42(7):69-77.
LI Qiao, BU Yi-zhi, ZHANG Qing-hua. Whole-procedure adaptive construction control system based on geometry control method[J]. China Civil Engineering Journal,2009,42(7):69-77.
- [24] 肖汝诚,项海帆. 斜拉桥索力优化及其工程应用[J]. 计算力学学报,1998,15(1):118-126.
XIAO Ru-cheng, XIANG Hai-fan. Optimization method of cable prestresses of cable-stayed bridges and its engineering applications[J]. China Journal of Computational Mechanics,1998,15(1):118-126.
- [25] 梁 鹏,徐 岳,刘永健. 斜拉索分析统一理论及其应用[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):68-77.
LIANG Peng, XU Yue, LIU Yong-jian. Unified analysis theory of cable stay and its applications[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):68-77.