

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202211280001

文章编号:1674-599X(2025)02-0114-07

引用格式:涂光亚,刘静,江兴,等.基于梁桥性能的矮塔斜拉桥成桥状态确定方法[J].交通科学与工程,2025,41(2):114-120.

Citation: TU Guangya, LIU Jing, JIANG Xing, et al. Determination method of finished bridge state of extradosed cable-stayed bridge based on performance of beam bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 114-120.

基于梁桥性能的矮塔斜拉桥成桥状态确定方法

涂光亚,刘静,江兴,陈林伟

(长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】为合理地确定矮塔斜拉桥的成桥状态,提出一种基于梁桥受力性能的确定方法。【方法】首先不考虑索力和预应力作用,求得斜拉索在中支点处所承担的弯矩;接着以各斜拉索的竖向分力相等为原则,根据弯矩平衡求得初张索力;然后考虑索力作用,以主梁应力为控制目标,对预应力筋进行估算与布置;最后采用正装计算与荷载组合对合理成桥状态进行验证。【结果】以石滩大桥为算例进行验证,计算结果表明:所得初张索力与成桥索力由支点至跨中逐渐增大且变化均匀;主梁弯矩呈现出明显的普通梁桥的受力特征;主梁各截面的上下缘应力均满足矮塔斜拉桥对成桥状态的要求。【结论】所确定的成桥状态符合规范要求,验证了该方法的可行性,为同类型桥梁合理成桥状态的确定提供了新的思路。

关键词:矮塔斜拉桥;合理成桥状态;斜拉索索力;主梁应力;梁桥

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Determination method of finished bridge state of extradosed cable-stayed bridge based on performance of beam bridge

TU Guangya, LIU Jing, JIANG Xing, CHEN Linwei

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] To determine the finished bridge state of an extradosed cable-stayed bridge quickly and reasonably, this study proposes a method based on the stress performance of beam bridges. [Methods] The bending moment value borne by the stay cable at the central support point was obtained by disregarding the cable force and prestress. According to the principle that the vertical force components of stay cables were equal, the initial cable force was calculated based on the moment equilibrium. Then, considering the cable force, the prestressed tendons were estimated and arranged with the main beam stress as the control target. Finally, the reasonable finished bridge state was verified by forward calculation and load combination. [Findings] With the Shitan Bridge as an example for verification, the calculation results show that the obtained initial cable force and the cable force of the finished bridge gradually increase from the support point to the mid-span and change uniformly. The bending moment of the main beam shows obvious stress characteristics of common beam bridges, and the stress on the upper and lower edges of each section of the main beam meets the requirements for the finished bridge state of extradosed cable-stayed bridges. [Conclusions] The

收稿日期:2022-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51878073)

通信作者:涂光亚(1974—),男,副教授,主要从事大跨度桥梁结构分析与工程控制、钢管混凝土拱桥设计计算理论方面的研究工作。E-mail:runner_mail@126.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

determined finished bridge states all comply with the specifications, which verifies the rationality and feasibility of the proposed method. This study provides a new idea for determining the reasonable finished bridge state of similar bridges.

Key words: extradosed cable-stayed bridge; reasonable finished bridge state; stay cable force; main beam stress; beam bridge

矮塔斜拉桥是一种介于常规斜拉桥与普通梁桥之间的组合体系桥型,具有塔矮、梁刚、索集中等特点^[1]。矮塔斜拉桥由斜拉索提供弹性支撑,主梁承受由斜拉索的水平分力所产生的轴压力。另外,矮塔斜拉桥的主梁一般为变截面箱梁,在支点处梁高较高,在跨中处梁高较矮。在成桥恒载状态下,主梁弯矩基本呈抛物线变化,在中支点附近承受负弯矩,在跨中附近承受正弯矩。

矮塔斜拉桥具有常规斜拉桥的受力特征,与常规斜拉桥一样在设计过程中也面临合理成桥状态确定的问题。目前,在进行矮塔斜拉桥合理成桥状态确定的计算时,往往参考常规斜拉桥的计算方法,计算步骤可分为三步:第一步为成桥状态的初定,采用的主要方法为最小弯曲能量法^[2-4]、零位移法^[5-6];第二步为主梁弯矩可行域的求解,对全预应力构件的定义主要依据规范^[3-4],采用的主要方法为内力平衡法^[2]、应力平衡法^[5,7-8];第三步为在不同约束条件下通过索力优化确定合理成桥状态。约束条件包括主梁弯矩可行域^[2-5,7-8]、拉索索力安全性^[2-4]、塔顶偏位^[2]、主梁跨中位移^[2]、主塔弯矩值^[3,6]、结构安全^[9]、主梁弯曲应变能最小^[9-10]、主梁应力^[4]、斜拉索与主梁锚固点的竖向位移及主塔横向位移^[6]等。优化方法为刚度矩阵法^[2,6]、影响矩阵法^[3-5,7-10]、线性规划法^[3-4,7-8]、正装迭代法^[9]、最小二乘法^[5]及梯度投影法^[10]等。以上方法均为基于常规斜拉桥主梁的受力特征对矮塔斜拉桥的成桥状态进行确定的方法,但斜拉索索力的求解过程比较复杂,上述方法未能有效地考虑预应力的估算与布置对整体结构的影响。

基于普通梁桥的受力特点,张家元等^[11]以索力、预应力及恒载作用下主梁的竖向弯矩平衡为原则,提出了预应力布置与斜拉索索力调整的新方法,但该方法没有考虑可变荷载,也没有考虑截面本身所承受的弯矩,尚待进一步的优化。

综合以上研究,本文首次提出基于梁桥受力性能的矮塔斜拉桥合理成桥状态确定方法,将矮塔斜拉桥主梁的弯矩在减去索力所承担的弯矩之后,按

普通梁桥进行设计;索力所承担的弯矩根据主梁承受的总弯矩(考虑恒载与可变作用的频遇组合)按一定的比例进行确定;斜拉索索力则根据索力所承担的弯矩来进行求解。该方法为矮塔斜拉桥合理成桥状态的确定提供了新的思路。

1 总体思路

矮塔斜拉桥合理成桥状态的确定实际上是主梁合理受力状态的确定。主梁主要承受轴力、剪力和弯矩的作用,其中弯矩对主梁合理受力状态的影响最大。矮塔斜拉桥主梁的弯矩主要由索力、预应力和截面本身来承担。索力承担的弯矩主要由各斜拉索的初张力来确定,因此矮塔斜拉桥合理成桥状态的确定问题最终体现为斜拉索初张力的求解问题。

假设由索力承担的主梁弯矩为 M_1 ,主梁的总弯矩(恒载不计斜拉索索力、不计预应力,与可变作用进行频遇组合)为 M_0 ,则 $M_0 - M_1$ 为预应力与主梁截面所承担的弯矩。若已知 M_1 ,则可根据预应力与主梁截面所承担的弯矩对主梁进行预应力筋的估算与布置,该过程与普通梁桥的设计是一致的。因此,问题的关键在于如何求得 M_1 。为简化计算,假设在主梁的中支点处 $M_1 = KM_0$, K 定义为索力弯矩比,为无量纲系数($0 < K < 1$),则根据 M_0 可求得 M_1 。 K 值的大小体现了在主梁总弯矩一定的情况下主梁弯矩在索力、预应力与截面之间的分配关系。

矮塔斜拉桥的索力一般在双悬臂施工过程中进行张拉,合龙后不再调索。在双悬臂施工过程中,矮塔斜拉桥的主梁为静定的悬臂梁结构,因此 M_1 在数值上等于对各斜拉索初张力与斜拉索至中支点截面的力臂的乘积求和(在结构基本参数确定的情况下,各力臂为已知量)。为简化计算,假设各斜拉索的竖向分力相等,根据力矩平衡方程即可求得各斜拉索的初张力。

求得各斜拉索的初张力之后,考虑斜拉索索力,不计主梁预应力,对主梁的弯矩进行频遇组合,

再根据频遇组合弯矩值对主梁进行预应力筋的估算与布置,此过程即为普通梁桥的设计过程。最后,在考虑斜拉索索力和主梁预应力的条件下对矮塔斜拉桥进行永久作用正装计算,并对结构进行应力验算,验证所得到的合理成桥状态是否满足相关规范的要求。

按以上方法进行的矮塔斜拉桥合理成桥状态确定的计算,无论是在思路上还是在计算内容上均与普通梁桥的计算方法有极大的相似性。因此,将该方法称为基于梁桥受力性能的矮塔斜拉桥合理成桥状态确定方法。

2 具体计算步骤

根据以上的总体思路可确定具体的计算步骤如下:

1) 求主梁的总弯矩 M_0 。

在求主梁的总弯矩时,斜拉索索力和预应力均未知,因此在不考虑斜拉索索力和预应力作用的情况下按实际的施工过程考虑结构的收缩徐变,并通过正装计算得到恒载弯矩,然后将所得恒载弯矩与可变作用进行频遇组合,得到主梁在中支点处的频遇组合最大负弯矩,即 M_0 。

2) 确定索力弯矩比 K 。

根据对现有矮塔斜拉桥的调研,索力弯矩比 K 一般为 0.6~0.8,因此本文算例的 K 取 0.7。 K 值越大,矮塔斜拉桥的恒载索力越大,索力所承担的主梁弯矩就越大。 K 值的大小也决定了斜拉索和预应力筋的总用量,对于确定的矮塔斜拉桥,在主梁满足受力条件的情况下存在某一 K 值可使斜拉索和预应力筋的总用量最为经济^[12]。

3) 求索力所承担的弯矩 M_1 。

根据 $M_1 = KM_0$,求得 M_1 。

4) 求斜拉索的初张力。

假设各斜拉索的竖向分力相等,根据力矩平衡原理,得到弯矩平衡公式:

$$\begin{cases} m \times \sum_{i=1}^n T_i \times h_i = M_1 \\ T_1 \times \sin a_1 = T_2 \times \sin a_2 \\ T_2 \times \sin a_2 = T_3 \times \sin a_3 \\ \vdots \\ T_{n-1} \times \sin a_{n-1} = T_n \times \sin a_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为索面布置数量; i 为斜拉索的编号,从中支点往边跨或中跨方向逐渐增大; n 为边跨或中跨斜

拉索的根数; T_i 为第*i*根斜拉索的索力; h_i 为第*i*根斜拉索的索力到中支点截面形心的力臂; a_i 为第*i*根斜拉索索力与水平方向的夹角。

通过求解以上方程可得到边跨或中跨斜拉索的初张力。由于受主梁纵坡的影响,边跨、中跨的斜拉索的初张力略有不同。另外,由以上方程计算出的每一根斜拉索的索力都不相同,可以按照每三根一组对斜拉索进行分组,将该组索力的平均值作为组中各斜拉索的索力,这样可以方便斜拉索选型。

5) 求预应力筋与截面承担的主梁弯矩。

在斜拉索初张力的作用下,按实际的施工过程考虑结构的收缩徐变,并通过正装计算得到恒载弯矩,然后将所得恒载弯矩与可变作用进行频遇组合,得到主梁的频遇组合弯矩包络线,即预应力筋与主梁截面可能承担的最大、最小弯矩。

6) 预应力筋的估算与布置。

根据上一步得到的频遇组合弯矩包络线对矮塔斜拉桥主梁的预应力筋进行估算与布置,该过程与普通梁桥的设计过程是一样的。

7) 合理成桥状态验证。

根据主梁的频遇组合应力包络线,验证主梁的合理受力状态。如果最大、最小应力均满足正常使用极限状态下的应力要求^[13],则证明所计算的成桥状态是合理的。

3 计算实例

3.1 工程概况

计算实例为广州市增城区石滩大桥,该桥的主桥为分幅双塔三跨矮塔斜拉桥,整体结构采用塔梁固结体系和刚构体系。主桥全长 314.00 m,桥宽 52.50 m。主塔为独柱式钢筋混凝土结构,高度 26.00 m,立面为长腰花瓶状,断面为矩形。主塔截面等宽段顺桥向厚度为 3.50 m,横桥向宽度为 1.70~2.30 m,塔顶花瓶段顺桥向宽度为 3.50~6.00 m,横桥向厚度为 2.00~2.30 m。主梁的起始里程为 299.12 m,13#塔支点的里程为 382.00 m,14#塔支点的里程为 530.00 m,主梁终端的里程为 612.88 m。

主梁采用变高度斜腹板单箱双室形式,顶板宽 26.24 m,外侧悬臂长 4.50 m,内侧悬臂长 3.00 m。因受斜腹板的影响,主梁底宽为不定值。在跨中和边

跨处梁高 2.50 m,在主塔根部梁高 4.50 m,梁底高度曲线按二次抛物线变化。中跨直线段长 18.00 m,边跨直线段长 17.88 m。顶板厚 0.28 m,在跨中和边跨处底板厚 0.30 m,在塔根处底板厚 1.05 m。悬臂翼板端部厚 0.20 m,外侧根部厚 0.80 m,内侧根部厚 0.80 m,无折线变化段,在拉索梁段和普通梁段均设置横隔梁。

斜拉索采用公称直径 15.20 mm 的填充型环氧涂层钢绞线,标准强度为 1 860 MPa。半幅桥斜拉索为双面双排索,布置在主梁侧分带及中分带处。塔根两侧无索区长 40.70 m,边跨无索区长 18.65 m,中跨无索区长 19.30 m,梁上索距 4.00 m,塔上索距 0.80 m。斜拉索在塔上采用分丝管锚固结构,全桥共 96 根斜拉索。石滩大桥桥型布置如图 1 所示。13# 塔的斜拉索按大里程方向依次编号为 S12 ~ S1、M1 ~ M12,14# 塔的斜拉索按大里程方向依次编号为 M12 ~ M1、S1 ~ S12。

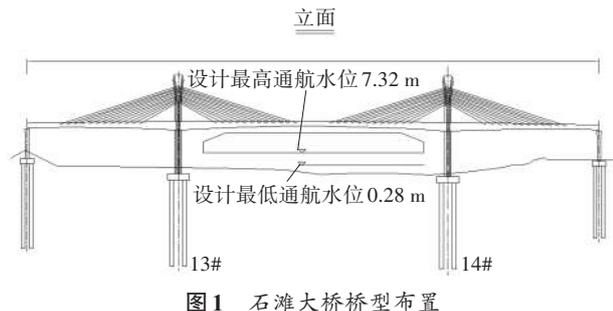


图 1 石滩大桥桥型布置

3.2 计算模型

本文采用 Midas Civil 有限元软件建立有限元计算模型,主梁、主塔和主墩用梁单元进行模拟,斜拉索用桁架单元进行模拟,全桥包括 338 个单元、439 个节点。石滩大桥有限元计算模型如图 2 所示。

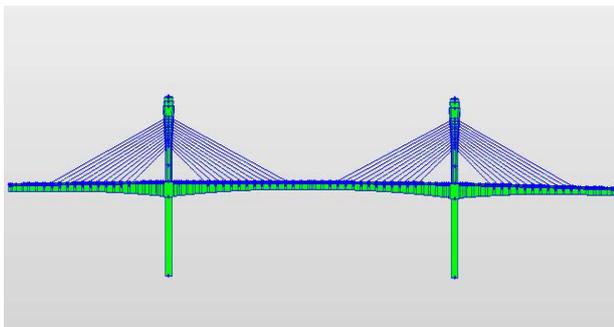


图 2 石滩大桥有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model of Shitan Bridge

塔、墩、梁三者之间的连接及斜拉索与主梁、索塔的锚固均采用弹性连接里的刚性连接,主墩采用

固定支座,边墩采用纵横向活动支座。主梁的箱内外横隔板以集中荷载的形式进行计算模拟,齿板以均布荷载的形式进行计算模拟。

挂篮按实际工序移动,二期恒载为 120 kN/m 的线荷载,收缩徐变参考规范。可变作用考虑了汽车荷载、人群荷载、温度荷载(包括整体升温 20 °C、整体降温 20 °C、主梁梯度升温 and 梯度降温)和支座沉降。

3.3 计算结果

为求得主梁的总弯矩,首先不考虑斜拉索索力和主梁预应力的作用,按实际结构考虑收缩徐变,并通过正装计算得到恒载弯矩,然后将所得恒载弯矩与可变作用(汽车荷载、人群荷载、温度荷载、支座沉降)进行频遇组合,得到主梁的总弯矩包络线。无索无预应力频遇组合弯矩包络线如图 3 所示。

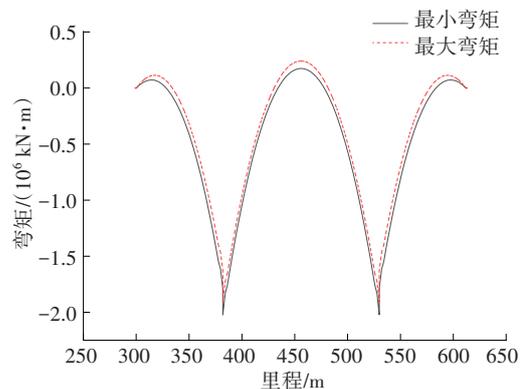


图 3 无索无预应力频遇组合弯矩包络线

Fig. 3 Envelope of bending moment under frequent combination without cable and prestress

由图 3 可知,主梁在中支点处的最大负弯矩为 $-2.20 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。索力弯矩比 K 取 0.7 时,主梁在中支点处由索力承担的弯矩为 $-1.54 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$

石滩大桥的索面布置形式为双面双排索,假设各斜拉索的竖向分力相等,根据弯矩平衡公式计算可得各斜拉索的初张力,然后每三根斜拉索一组对斜拉索的初张力取平均值,得到最终的斜拉索初张力。斜拉索初张力计算表见表 1。

由表 1 可知,由中支点至跨中和边跨所求得的斜拉索初张力逐渐增大,变化较均匀,满足矮塔斜拉桥成桥状态对索力的要求。

为得到主梁预应力与主梁截面本身所承受的弯矩,在考虑斜拉索索力和不考虑主梁预应力条件下通过正装计算得到恒载弯矩,再与可变作用进行频遇组合,得到主梁的弯矩包络线如图 4 所示。

表1 斜拉索初张力计算表

Table 1 Calculation table of initial tension of stay cable

13#塔索号	角度/(°)	力臂/m	计算索力/kN	初张力/kN	14#塔索号	角度/(°)	力臂/m	计算索力/kN	初张力/kN
S12	18.259	20.644	4 272	4 180	M12	17.405	20.710	4 287	4 189
S11	18.664	19.834	4 183	4 180	M11	17.814	19.900	4 192	4 189
S10	19.125	19.022	4 086	4 180	M10	18.280	19.087	4 089	4 189
S9	19.656	18.209	3 979	3 860	M9	18.816	18.274	3 976	3 850
S8	20.272	17.386	3 863	3 860	M8	19.439	17.450	3 853	3 850
S7	20.995	16.560	3 736	3 860	M7	20.169	16.624	3 719	3 850
S6	21.854	15.718	3 596	3 148	M6	21.038	15.781	3 572	3 107
S5	22.890	14.865	3 441	3 148	M5	22.086	14.927	3 411	3 107
S4	24.164	13.990	3 270	3 148	M4	23.375	14.052	3 232	3 107
S3	25.763	13.091	3 080	3 148	M3	24.995	13.153	3 035	3 107
S2	27.827	12.147	2 867	3 148	M2	27.086	12.208	2 817	3 107
S1	30.580	11.140	2 631	3 148	M1	29.876	11.201	2 575	3 107
M1	30.195	11.174	2 601	3 126	S1	30.894	11.113	2 654	3 163
M2	27.421	12.180	2 841	3 126	S2	28.159	12.118	2 888	3 163
M3	25.343	13.125	3 056	3 126	S3	26.108	13.062	3 097	3 163
M4	23.732	14.024	3 250	3 126	S4	24.518	13.961	3 284	3 163
M5	22.450	14.899	3 426	3 126	S5	23.251	14.836	3 452	3 163
M6	21.407	15.753	3 584	3 126	S6	22.220	15.689	3 604	3 163
M7	20.543	16.595	3 728	3 855	S7	21.365	16.530	3 741	3 861
M8	19.816	17.421	3 859	3 855	S8	20.645	17.356	3 865	3 861
M9	19.196	18.245	3 979	3 855	S9	20.033	18.178	3 978	3 861
M10	18.663	19.058	4 088	4 186	S10	19.505	18.991	4 081	4 174
M11	18.199	19.871	4 189	4 186	S11	19.045	19.803	4 176	4 174
M12	17.792	20.680	4 281	4 186	S12	18.642	20.612	4 263	4 174

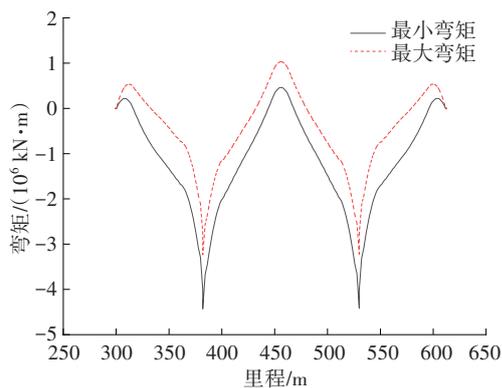


图4 有索无预应力频遇组合弯矩包络线

Fig. 4 Envelope of bending moment under frequent combination with cable and without prestress

根据图4的弯矩包络线,按普通梁桥的设计方法对主梁进行预应力筋的估算与布置,预应力筋估算结果见表2,半跨主梁预应力筋布置如图5所示。

已知斜拉索的索力和主梁的预应力,按实际施工过程中考虑结构的收缩徐变,并通过正装计算得到

成桥索力和恒载弯矩,成桥索力结果见表3。将所得恒载弯矩与可变作用进行频遇组合,得到矮塔斜拉桥最终的主梁弯矩和应力包络线如图6、图7所示。

表2 预应力钢束估算结果表

Table 2 Estimation results of prestressed tendons

钢束位置	钢束名称	数量
中跨底板束	M1 ~ M7	4
边跨底板束	SB1 ~ SB3	8
边跨顶板束	ST1、ST2	4
	ST3、ST4	8
顶板束	T1	24
	T2	12
	T3 ~ T5、T7、T10	4
	T11	8
	T12 ~ T18	4
腹板束	W1 ~ W10	4

注:钢绞线公称直径为15.20 mm,张拉控制应力为1 395 MPa

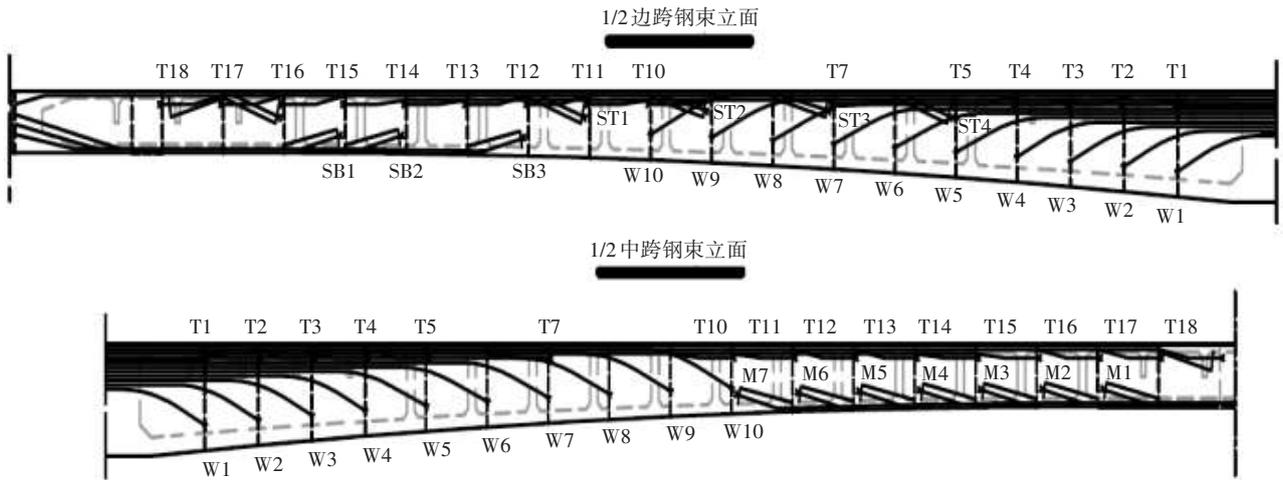


图5 半跨主梁预应力筋布置

Fig. 5 Layout of prestressed tendons of half-span main beam

表3 成桥索力结果

Table 3 Results of finished bridge cable force

13#塔 索号	成桥索 力/kN	13#塔 索号	成桥索 力/kN	14#塔 索号	成桥索 力/kN	14#塔 索号	成桥索 力/kN
S12	5 054	M1	3 263	S12	5 127	M1	3 309
S11	5 009	M2	3 313	S11	5 061	M2	3 355
S10	4 951	M3	3 359	S10	4 985	M3	3 397
S9	4 486	M4	3 397	S9	4 501	M4	3 421
S8	4 397	M5	3 429	S8	4 408	M5	3 443
S7	4 342	M6	3 480	S7	4 338	M6	3 484
S6	3 475	M7	4 355	S6	3 466	M7	4 354
S5	3 435	M8	4 412	S5	3 417	M8	4 411
S4	3 413	M9	4 507	S4	3 386	M9	4 487
S3	3 389	M10	4 990	S3	3 348	M10	4 950
S2	3 347	M11	5 067	S2	3 303	M11	5 007
S1	3 302	M12	5 132	S1	3 253	M12	5 051

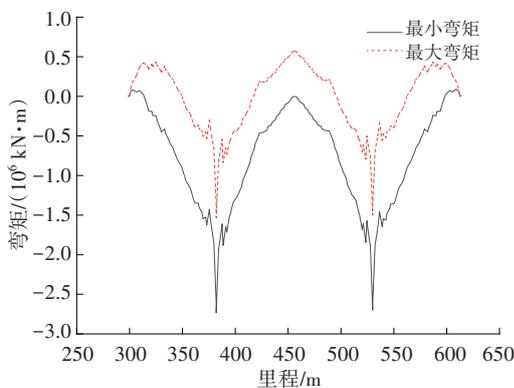


图6 主梁频遇组合弯矩包络线

Fig. 6 Envelope of bending moment of main beam under frequent combination

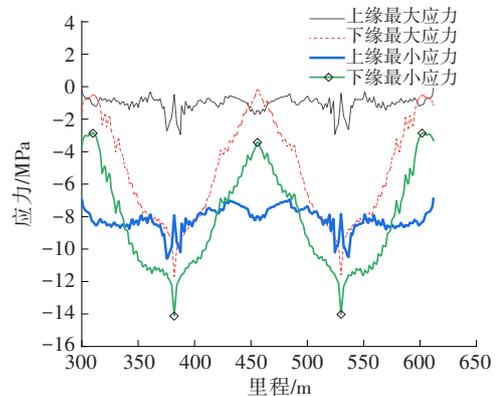


图7 主梁频遇组合应力包络线

Fig. 7 Envelope of stress of main beam under frequent combination

由表3可知,在成桥状态下索力分布均匀,从短索至尾索索力呈递增趋势。由图6可知,在荷载频遇组合作用下,矮塔斜拉桥的主梁弯矩呈现出明显的与普通梁桥一致的受力特征,而主梁截面在支点处承受较大的负弯矩(与普通斜拉桥相比),跨中附近承受一定的正弯矩。由图7可知,在荷载频遇组合作用下,主梁各截面下缘的最大压应力为14.100 MPa,最小压应力为0.197 MPa,未出现拉应力;主梁各截面上缘的最大压应力为10.700 MPa,最小压应力为0.017 MPa,未出现拉应力。主梁各截面上下缘的应力均满足规范要求,可见采用该方法进行矮塔斜拉桥成桥状态的确定是可行的。

4 结论

1) 基于梁桥的受力特征确定矮塔斜拉桥的合理成桥状态是可行的,该方法不仅考虑了恒载作用还考虑了可变作用,所得成桥状态更加合理;该方

法在确定合理成桥状态的同时也得到了各斜拉索的初张力,简化了计算过程,为矮塔斜拉桥合理成桥状态的确定提供了新的思路。

2) 已知矮塔斜拉桥索力所承担的弯矩,假设斜拉索初张力的竖向分力相等,根据弯矩平衡的原理求斜拉索初张力的方法是可行的。该方法不需要复杂的有限元建模,所求得的初张索力与成桥索力由支点至跨中逐渐增大且变化均匀,满足矮塔斜拉桥成桥状态对索力的要求。

3) 采用本文方法计算初张索力的关键在于索力弯矩比 K 的确定,本文 K 取0.7。 K 的取值关系到斜拉索与预应力材料用量的经济性,对于不同的矮塔斜拉桥, K 的取值有可能不同,如何确定最优的 K 值还有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 陈从春. 矮塔斜拉桥[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
CHEN Congchun. Extradosed cable-stayed bridge [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [2] 刘龙, 刘钊, 乔飞虹, 等. 基于内力平衡法的矮塔斜拉桥合理成桥状态研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2019(5): 19-23. DOI: 10.19332/j.cnki.1005-0574.2019.05.005.
LIU Long, LIU Zhao, QIAO Feihong, et al. Study on reasonable completion state of extradosed cable-stayed bridge based on internal force balance method [J]. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2019(5): 19-23. DOI: 10.19332/j.cnki.1005-0574.2019.05.005.
- [3] 暨仕瑀, 吴海军, 王邵锐, 等. 矮塔斜拉桥合理成桥状态及二次张拉力的确定[J]. 公路, 2022, 67(6): 122-128.
JI Shiyu, WU Haijun, WANG Shaorui, et al. Determination of reasonable bridge state and secondary tension of extradosed cable-stayed bridge [J]. Highway, 2022, 67(6): 122-128.
- [4] 陈尚. 矮塔斜拉桥索力优化设计及合理成桥状态研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
CHEN Shang. Optimal design of cable force and reasonable completion state of low-pylon cable-stayed bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [5] 陈方. 矮塔斜拉桥结构合理成桥状态索力优化及参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
CHEN Fang. Cable force optimization and parameter research of low-pylon cable-stayed bridge structure in reasonable completion state [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [6] 毛润华. 矮塔斜拉桥合理成桥状态与参数研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
MAO Runhua. Study on reasonable completion state and parameters of low-pylon cable-stayed bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018.
- [7] DONG J, LIANG T, FENG J X. Investigation on optimization of cable tension for extradosed cable-stayed bridge under the rational completion stage [J]. Advanced Materials Research, 2014, 1020: 264-269. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1020.264.
- [8] WANG X L, LIANG T, QI T D. Study on cable force optimization for extradosed cable-stayed bridge under the rational completion stage [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 501-504: 1170-1173. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.501-504.1170.
- [9] 何祖发, 李振. 七塔预应力混凝土部分斜拉桥结构性能研究[J]. 桥梁建设, 2010, 40(6): 44-48.
HE Zufa, LI Zhen. Study of structural behavior of 7-pylon PC extradosed bridge [J]. Bridge Construction, 2010, 40(6): 44-48.
- [10] 郑一峰, 黄侨, 孙永明. 部分斜拉桥合理成桥状态的研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(11): 60-63. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2006.11.015.
ZHENG Yifeng, HUANG Qiao, SUN Yongming. Research on rational state of accomplishment of partial cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(11): 60-63. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2006.11.015.
- [11] 张家元, 吴学伟, 张铭. 基于主梁受力特点的部分斜拉桥合理成桥状态确定方法研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(4): 35-41. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2021.04.006.
ZHANG Jiayuan, WU Xuewei, ZHANG Ming. Research on methods to determine rational completion state for extradosed bridge based on load bearing characteristics of main girder [J]. World Bridges, 2021, 49(4): 35-41. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2021.04.006.
- [12] 陈从春. 基于费用最小原则的矮塔斜拉桥索力优化研究[J]. 工程力学, 2012, 29(5): 141-146.
CHEN Congchun. Optimization for cable-force of extradosed cable-stayed bridges based on minimal cost principle [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(5): 141-146.
- [13] 交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.

(责任编辑:熊怡)