

斜拉桥索力优化理论研究

王永安¹, 刘世同¹, 谭红梅², 肖汝诚²

(1. 江苏省高速公路建设指挥部 南京市 210004; 2. 同济大学桥梁工程系 上海市 200092)

摘 要: 斜拉桥的索力优化可分为成桥索力的优化和施工索力的优化。而根据所要研究对象所处的不同状态, 两者又可细分成不同的类型, 不同类型的索力优化有各自的特点, 运用的思路和方法也有差别。本文简要介绍各种类型索力优化的特点和方法。

关键词: 斜拉桥; 索力优化; 成桥索力; 施工索力

对于高次超静定结构体系的斜拉桥来说, 拉索在整个受力体系中占有重要的地位, 它起着传递外荷载的作用。分析时一般将拉索的索力视作“外力”作用在结构上, 其大小可在一定的范围内人为调整。此时的斜拉桥就是一个静定或者低次超静定结构。通过主动改变索力来调整结构的内力分配, 使其趋于优化合理。

对于斜拉桥来说, 我们一般关心的是它的施工索力(有时候也叫做施工张拉力)和成桥索力。根据所要研究的不同内容, 斜拉桥的索力优化可分为两大类: 成桥索力的优化和施工索力的优化。根据研究对象所处的不同状态, 成桥索力的优化可分为设计阶段的成桥索力优化、已设计好未施工成桥索力优化和已营运的成桥索力优化。同样, 根据研究内容的不同, 斜拉桥施工索力的优化可以分为为达到合理成桥索力而进行的施工索力优化和为纠正施工误差的施工索力优化。

本文简要地介绍各种类型的索力优化的研究内容及研究方法。

1 成桥索力的优化

在结构体系明确的情况下, 成桥索力的取值会极大地影响斜拉桥的成桥受力状态的合理性。为使斜拉桥的成桥受力状态最为合理, 可以在方案设计阶段、初步设计甚至施工图设计以后进行索力优化。斜拉桥尤其是预应力混凝土斜拉桥经过多年的运营以后, 由于结构参数发生了变化, 体系的受力状态不同于理想的成桥状态, 同样可以通过索力的优化, 改善其受力状态。

1.1 设计阶段的成桥索力优化

处于该阶段的斜拉桥, 结构构造及结构尺寸、预应力和斜拉索索力均有待确定。在初拟了结构构造和尺寸后, 斜拉桥成桥状态的恒载内力主要同主梁预应力和斜拉索索力有关, 此时的优化问题实质上是主梁预应力和斜拉索索力共同优化的问题。

针对此阶段斜拉桥的索力优化, 国内外已有很多学者进行研究, 方法可分为三大类: 指定受力状态的索力优化研究、无约束的索力优化、有约束的索力优化以及影响矩阵法^[1,2]。

收稿日期: 2006-03-10

同济大学学报, 1998, (6).

[2] 颜东煌. 斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D]. 湖南大学博士学位论文, 2001.

[3] 许瑞红. 五河口斜拉桥施工索力优化的研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 2004.

[4] 唐祖宁. 既有预应力混凝土斜拉桥内力优化与调整的研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 2004.

[5] 陆楸, 徐有光. 斜拉桥最优索力的探讨[J]. 中国公路学报, 1990.

[6] 王勋文, 辛学忠, 潘家英, 等. 确定 PC 斜拉桥合理恒载索力方法的探索[J]. 桥梁建设, 1996.

[7] 汪劲丰, 施笃铮, 徐兴. 确定斜拉桥最优恒载索力方法的探索[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002.

[8] M Z Cohn, Z Lounis. Optimal Design of Structural Concrete Bridge Systems[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 9(120), 1994.

[9] 项海帆, 等. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

指定受力状态的索力优化法,以刚性支承梁法和零位移法为代表。刚性支承连续梁法将斜拉桥主梁在恒载作用下弯曲内力呈刚性支承连续梁状态作为优化目标。零位移法以结构在恒载作用下梁的节点位移为零作为优化目标。典型的斜拉索索力的无约束优化法是弯曲能量最小法和弯矩最小法,弯曲能量最小法是用结构的弯曲应变能作为目标函数;弯矩最小法是以弯矩平方和作为目标函数。索力的有约束优化法以索量最小法和最大偏差最小法为代表,索量最小法是用斜拉桥索的用量(张拉力乘索长)作为目标函数,用关心截面内力、位移期望值范围作为约束条件;最大偏差最小法将可行域中参量与期望值的偏差作为目标函数,使最大偏差达到最小。这些方法都是针对单一的优化目标进行索力优化的,它们都有各自的局限性,它们各自的优缺点在文献[2]中有详细的论述。

影响矩阵法实现了对多种目标函数的统一,克服了单一目标函数优化的缺点,可以用较小的计算量得到较为理想的结果。主要思路如下。

如果结构满足线性叠加原理,则:

$$[C]\{X\}=\{D\} \quad (1)$$

式中:[C]为影响矩阵; $\{X\}$ 为施调向量,指结构中指定可实施调整以改变受调向量的 n 个独立元素所组成的列向量; $\{D\}$ 为受调向量,指结构物中关心截面上 $m(m \geq n)$ 个独立元素所组成的列向量,这些元素一般是截面内力、应力或位移。它们在调值过程中接受调整,以期达到某种期望状态。

影响矩阵中的元素可对应于内力、应力、位移等力学量中的一个,形成影响矩阵[C],就是求出所有施调元素的影响向量,然后建立受调向量和施调向量的关系。

影响矩阵法将斜拉桥弯曲能量最小、弯矩最小、部分构件受力优化、不同受力构件加权优化等问题统一为同一问题,力学概念明确,实现程序化计算方便,可以使设计者同时获得多种目标的最优索力及其结构内力状态,方便设计者对多种方案进行比选。

影响矩阵法曾成功地应用于湖南洞庭湖大桥的索力优化。

1.2 已设计好但尚未施工的成桥索力优化

对于已设计好但尚未施工的斜拉桥,结构构造和尺寸、主梁预应力、斜拉索索力和施工步骤都已确定。处于该阶段的斜拉桥的索力优化就是在施工阶段和成桥阶段保证结构受力安全的条件下,调整施

工阶段的斜拉索索力,使成桥阶段结构的应力状况(包括成桥索力)比优化前好,更大程度地发挥材料的性能,提高结构安全度,并使得斜拉桥最终达到成桥合理状态。

通常,斜拉桥的合理成桥状态要满足:索力分布均匀、主塔弯矩不能太大、主梁应力要控制在其“可行域”范围内、边墩的支座反力在恒载下要有足够的压力储备,其中,主梁的应力最为关键。

作者针对五河口斜拉桥进行了这方面的研究。五河口斜拉桥是一座主跨为370 m的双塔双索面预应力混凝土斜拉桥。对于该类型斜拉桥,根据规范(JTG D62-2004),受压区混凝土的最大压应力应符合:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a &\leq 0.5f_{ck}(\text{持久状况}) \\ \sigma_a &\leq 0.70f'_{ck}(\text{短暂状况}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

主梁受压区混凝土的应力效应由永久作用产生的效应($\sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_{di}$,以 σ_d 代替)和可变作用产生的效应($\sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_{li}$,以 σ_l 代替)两大部分组成:

$$0 \leq \sigma = \sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_{di} + \sum_{i=1}^m \gamma_i \sigma_{li} = \sigma_d + \sigma_l \leq [\sigma_a] \quad (3)$$

然而在荷载等级一定的情况下,已设计好的斜拉桥在可变作用下的结构响应是一定的,可以忽略非线性效应。故要使五河口斜拉桥达到合理成桥状态,其主梁成桥恒载应力应在其可行域范围内,且尽量在可行域中居中:

$$-\sigma_{lmin} \leq \sigma_d \leq [\sigma_a] - \sigma_{lmax} \quad (4)$$

根据主梁上下缘应力在各自可行域的居中性,来确定最优的成桥合理状态。因而索力优化问题即转化为找出一组最佳的施工索力值,使得主梁恒载应力均匀且居中,其实现过程还需结合本文2.1节的影响线法。

1.3 已营运斜拉桥的成桥索力优化

由于受施工、混凝土收缩徐变和拉索松弛等因素的影响,已营运桥梁的真实特征必然与设计存在差别。对于混凝土斜拉桥而言,经过多年的服役运营,结构状态会发生明显的恶化:主梁线形下挠,横桥向倾斜,基础沉降,以及梁体里出现大量的裂缝。所有这些都使得结构的当前状态严重偏离设计要求,甚至继续恶化。

改善已运营桥梁受力状态的最佳措施是调整斜拉索的索力。由于索力的优化是在当前结构的基础

上进行的,所以,对当前结构的参数识别是索力优化调整的先决条件。在正确模拟斜拉桥结构参数后,即可在此基础上通过改变结构索力来确定一个合理的内力状态。

优化已运营斜拉桥的索力时,首先从不同索号拉索张拉后对总体结构的影响进行分析,也就是对目标内力状态关于不同拉索索力变化的灵敏度进行分析研究。在斜拉桥索力调整优化的计算分析中,拉索索力是自变量,结构产生的响应是索力的函数。由于结构产生的响应是由永久作用和可变作用共同作用的结果,在荷载等级一定的情况下,已运营斜拉桥在可变作用下的结构响应是一定的,可以忽略非线性效应。故索力优化调整时,我们只需使得索力优化调整后,结构在永久作用下的响应在其可行域范围内,并具有一定的安全储备。根据永久作用下的结构响应的优劣来找出最佳的索力变化值。

文献[4]中即利用了该法对上虞市人民大桥(预应力混凝土独塔斜拉桥)进行索力优化,结果达到了预期的目标。

2 施工索力的优化

斜拉桥施工索力的优化不仅是为了使成桥的受力状态更加合理,也要保证施工阶段的受力安全。同样,根据研究内容的不同,斜拉桥施工索力的优化可以分为:为达到合理成桥索力而进行的施工索力优化和为纠正施工误差的施工索力优化。

2.1 以合理成桥状态为目的的施工索力优化

当斜拉桥的合理成桥状态确定后,可通过施工索力的优化,以使成桥时达到合理的成桥状态。根据《公路斜拉桥设计规范》(试行)(JTJ027-96)第5.1.2.2条,“初拉力的确定是斜拉桥设计中比较繁复的一项计算工作,要通过多次试算、调整才能取得较满意的成果。希望主梁及索塔在各个受力阶段中能满足设计要求,并有较小的弯矩。对拉索索力的均匀性,一方面是拉索索力在各受力阶段的应力变化幅度不要过大,再一方面是对拉索规格的调整,使规格减少。”因此,优化后的施工索力必须满足两方面的要求:一是施工过程中结构的受力安全,即要保证施工过程中应力不超过规范规定;二是成桥后能满足合理成桥状态的要求。

根据成桥状态确定施工中的控制目标,目前常用的做法主要有倒退分析法、考虑非线性因素的倒退分析法、倒退正装交替迭代法、无应力状态法、结

合影响矩阵的正装迭代法以及影响线法。

(1) 倒退分析法。

该方法以成桥状态为初始状态,按照施工步骤的逆过程,对结构进行倒拆,分析每次卸除一个施工阶段对剩余结构的影响,从而推算得各施工阶段的斜拉索施工张拉力和结构状态。但是,由于结构预应力、混凝土徐变收缩、斜拉索的垂度效应和结构大位移效应等非线性因素的存在,结构倒拆分析内力与实际施工内力往往不闭合。因此,单用倒退分析法确定的斜拉桥初始张拉力与施工预拱度往往是失真的,无法直接用于工程实践。

(2) 前进、倒退分析迭代法。

该方法先进行倒退计算,不计各种非线性问题,然后根据倒拆结果,前进计算,计入各种非线性因素,如索的垂度效应和混凝土的徐变,并将非线性影响贮存下来;再做倒退计算,此时计入上轮前进计算式贮存下来的非线性影响值,得到新一轮的倒退分析结果,反复迭代来得到较满意的施工状态。

(3) 无应力状态法。

该方法是在线性状态下对一座已建成的桥梁进行解体,只要各单元的长度和曲率不变,则无论按什么程序恢复,还原后的结构内力和线型将与原结构一致。应用这一原理建立斜拉桥施工阶段与成桥状态的联系。由于实际结构是非线性的(包括材料、几何两方面),实施起来要做迭代。

(4) 结合影响矩阵的正装迭代法^[3]。

对于线弹性结构,求解施工张拉力的影响矩阵方程:

$$[C]\{X\} = \{\tilde{X}_0\} \quad (5)$$

式中:[C]为后期索力张拉与临时约束释放对拉索的综合影响矩阵; $\{\tilde{X}_0\}$ 为考虑施工因素的广义索力向量。

求解上式,就得到了相应的施工张拉力向量 $\{X\}$ 。

对于线弹性结构,只要进行一次前进分析,在完成一次影响矩阵方程计算即可。而对于非线性结构,则需进行非线性正装迭代计算。

该法曾用于浙江钱塘江三桥(单索面独塔斜拉桥),得到了理想的结果。

(5) 影响线法^[5]。

将该法与本文1.2节中成桥合理状态的确定一起使用,但对已设计好但尚未施工的斜拉桥进行施

工索力优化。

在斜拉桥主梁成桥阶段上(下)缘恒载应力可行域已确定之后,分别求出每对斜拉索最后一次张拉索力的单位变化对主梁各截面上下缘应力的影响值(或影响幅度),根据此影响值或影响幅度推导主梁各截面上(下)缘应力所对应的最敏感斜拉索。在斜拉桥成桥状态,当主梁的某些截面上(下)缘恒载应力不在可行域内,或应力状况不理想(如应力大小接近可行域上限或下限,不居中)时,通过调整主梁这些截面对应的最敏感索的施工索力,就可以最有效地调节该截面的上(下)缘应力值,使结构通过最优的途径达到合理的成桥状态。

作者曾将该法应用于五河口斜拉桥的索力优化中,由于篇幅有限,该法的具体过程就不详细介绍,另见其他论文。

2.2 以纠正施工误差为目的的施工索力优化调整^[2]

在实际施工中,由于构件自重、刚度、施工精度、索力张拉误差、温差等诸方面因素影响,可使施工阶段结构实际状态严重偏离理想状态。对索力的优化调整是施工阶段纠偏的重要手段。

工程中常用的方法是适当调整索力,使关心截面上控制变量的偏差最大限度地减小。施工过程中控制变量以位移为主,成桥状态下控制变量以内力和索力为主。

设关心截面上 n 个控制变量(关心截面上的内力、位移、支反力等混合控制变量组成的向量)的误

差向量为 $\{\chi_0\}$,通过 1 根索的索力施调向量 $\{T\}$ 作用,使误差向量变为 $\{\chi\}$,则:

$$\{\chi\} = \{\chi_0\} + [C]\{T\}$$

式中: $[C]$ 为索力对控制变量 $\{\chi\}$ 的影响矩阵。

3 小结

斜拉索是斜拉桥中较为灵活的构件,其索力的大小可以人为地调整,从而改善斜拉桥的内力状态。由于研究对象以及所处阶段的不同,索力优化研究的内容及方法也各有差异。本文简要又系统地介绍了国内桥梁界出现过的索力优化理论及方法,以期对将继续进行这方面研究的专家或研究员提供一个总体的认识,并对提高既有斜拉桥索力优化理论水平起到积极的作用。

参考文献:

- [1] 肖汝诚,项海帆. 斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J]. 同济大学学报,1998.
- [2] 项海帆,等. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 贾丽君,肖汝诚,等. 确定斜拉桥施工张拉力的影响矩阵法[J]. 苏州城建环保学院学报,2000,(12).
- [4] 唐祖宁. 既有预应力混凝土斜拉桥内力优化与调整的研究[D]. 同济大学硕士学位论文,2004.
- [5] 许瑞红. 五河口斜拉桥施工索力优化研究[D]. 同济大学硕士学位论文,2004.

Theoretical Study on Optimization of Cable Force in Cable-stayed Bridge

WANG Yong-an¹, LIU Shi-tong¹, TAN Hong-mei², XIAO Ru-cheng²

(1. Jiangsu Provincial Department for Expressway Construction, Nanjing 210004, China;

2. Bridge Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The optimization of cable force in cable-stayed bridge is divided into the optimization of finished-stage cable force and construction-stage cable force. There are many kinds of theories, because of their different research intentions, different condition which the research object is in, and different methods that can be used. Each of them is briefly narrated in this paper.

Key words: cable-stayed bridge; optimization of cable force; finished-stage cable force; construction-stage cable force