

空间索面独塔钢箱梁斜拉桥索力优化

吴学义¹, 张志国¹, 朱建锋²

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 中铁二十局集团 第六工程有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要:空间索面斜拉桥由于结构特殊性, 索力相互影响复杂, 其合理成桥索力以及施工张拉力调整是需要解决的关键问题。为对以上问题进行研究, 以石家庄市学府路斜拉桥为工程背景, 将结构的弯曲和拉压应变能之和最小作为目标函数, 通过控制主梁的挠度、弯矩和斜拉索索力等条件, 采用影响矩阵法求解了成桥索力。结合钢箱梁斜拉桥先梁后索的施工特点, 研究了不同斜拉索张拉方案的可行性。结果表明, 求解得到的最优索力与设计索力误差很小, 索力分布合理; 通过正装迭代法求解得到不同方案的斜拉索张拉力及成桥索力, 分析确定了最优的斜拉索张拉方案, 为工程实际提供参考。

关键词:独塔斜拉桥; 空间索面; 索力优化; 影响矩阵法; 正装迭代法

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2024)01-0024-07

0 引言

为确保斜拉桥在成桥时能达到合理状态, 并为施工提供有效指导, 索力优化成为了斜拉桥设计中的关键问题^[1]。针对这一问题, 国内外学者提出了斜拉桥索力优化的多种不同方法, 郭忠群等^[2]通过控制主梁各截面应力在容许范围内, 构造相应的数学模型, 并通过编制 Matlab 程序实现程序化计算。高荣雄等^[3]针对独塔混合梁斜拉桥的特点, 提出以结构最大位移最小化为目标, 通过控制索力上下限值以及主梁接头处的弯矩值, 实现了成桥索力优化。秦顺全^[4]提出无应力状态法, 以结构单元的无应力长度作为控制量, 建立施工阶段和成桥状态的关系, 以达到分阶段施工的成桥状态向合理成桥逼近。颜东煌^[5]采用正装模型模拟施工过程, 计算出对应的成桥状态, 并结合最小二乘法对张拉索力进行修正, 以减小实际成桥状态与目标状态之间的差异。斜拉索优化问题已有不少相关研究, 优化方法也在不断探索, 该问题本身有一定的复杂性, 求解过程还需要反复循环修正, 耗时较长且有时收敛困难, 不同的施工工艺对最终的成桥状态也会产生影响。结合学府路钢箱梁斜拉桥先梁后索的施工特点, 考虑工期压力, 提出了 4 种不同的斜拉索张拉方案, 并通过仿真模拟求解计算, 给出了 4 种不同方案斜拉索的张拉力以及斜拉桥的成桥索力, 确定了最优的斜拉索张拉方案, 并结合工程实际做了对比分析。

1 工程概况

石家庄市学府路跨太平河桥梁主桥全长为 300 m, 结构采用 160 m+140 m 独塔钢箱梁空间索面斜拉桥, 桥宽 46.0 m, 桥下净空 3 m。主塔材料为 C55 混凝土结构, 横桥向呈人字形, 高度为 102.749 m, 塔底左右塔柱中心间距为 47.82 m。拉索采用空间双索面布置, 塔上索距 2.3~3.4 m, 梁上标准段索距 8.0 m, 边跨梁端 6.0 m。根据现场施工条件, 北侧钢箱梁采用顶推法施工, 南侧钢箱梁采用支架法施工, 主梁合龙后进行斜拉索张拉工作。全桥共 34 对斜拉索, 拉索水平倾角 28°~70°。其中, 斜拉桥主跨拉索由桥塔到边墩编号依次为 Z1~Z17, 边跨拉索由桥塔到边墩编号依次为 B1~B17, 斜拉桥立面布置图见图 1, 主桥标准横断面图见图 2。

收稿日期: 2023-10-23 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20230276

作者简介: 吴学义(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为桥梁与结构工程。E-mail: wu2919145655@126.com

吴学义, 张志国, 朱建锋. 空间索面独塔钢箱梁斜拉桥索力优化[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(1): 24-30.

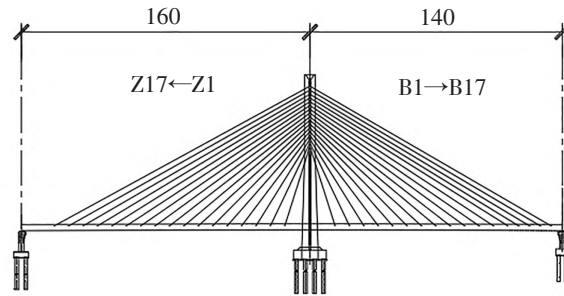


图 1 桥梁立面布置图(单位:m)

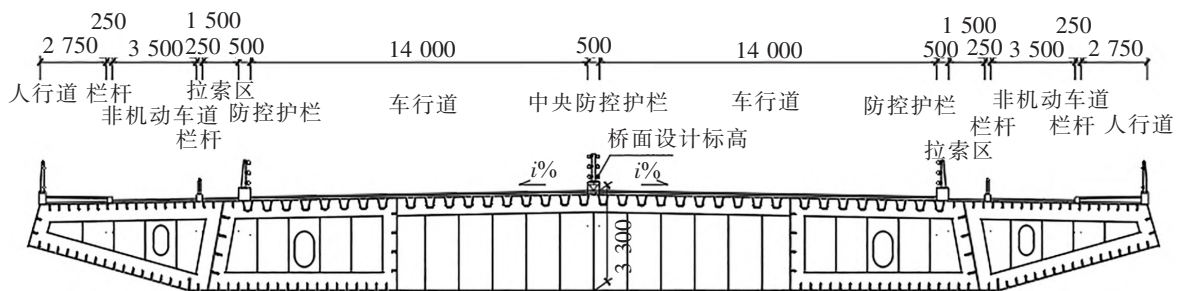


图 2 主桥标准横断面图(单位:mm)

2 成桥索力优化实现方法

2.1 影响矩阵法计算理论

影响矩阵法是一种基于线性代数方法,其核心原理在于构建一个影响矩阵,将受调向量与施调向量之间的关系转化为一个线性方程组。其中,受调向量是由结构中关心截面上 m 个独立元素所组成的列向量^[6-7]。受调向量记为 $D=[d_1, d_2, \dots, d_m]^T$ 。施调向量是由结构中选定的 l 个独立元素($l \leq m$)所组成的列向量,通过调整这些元素,可以对受调向量进行改变^[8]。施调向量记为 $X=[X_1, X_2, \dots, X_l]^T$ 。施调向量中的第 j 个元素 x_j 发生单位变化时引起受调向量 D 的变化向量称为影响向量,记为 $C=[C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{mj}]^T$ 。根据施调向量中元素的数量,对应影响向量的数量。影响矩阵则是将这些影响向量按照顺序排列形成的^[9]。根据前文所述,可以构建一个方程组,具体形式为 $CX = D$ ^[10]。通过求解这个方程组,可以获得未知量 X 的调整量。此外,根据斜拉桥的受力特征,可以设置一系列约束条件,以进一步限制和确定所需的索力值。

2.2 索力优化模型的建立

2.2.1 目标函数的确定

选取结构的弯曲应变能及拉压应变能之和为目标函数,可以考虑主梁和桥塔的整体受力情况,优化结果更为全面合理。通过目标函数最小化可以使整个结构的弯矩分布均匀,降低结构的变形量,从而优化结构的受力性能。该函数可表达为

$$U = \int \left[M^2(l) \frac{1}{2E(l)I(l)} + N^2(l) \frac{1}{2E(l)A(l)} \right] dl \quad (1)$$

式中, M 、 N 分别为结构单元的弯矩、轴力; EI 、 EA 分别为弯曲刚度、拉压刚度。

2.2.2 约束条件设定

约束拉索索力对斜拉桥受力状态非常重要,通过调整约束拉索的索力,可以使桥面保持水平、索力分布均匀以及主梁受力均衡,提高结构的安全性和稳定性。索力约束可表示为

$$T_{\min} \leq T_D + C_T t \leq T_{\max} \quad (2)$$

式中, $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 分别为成桥索力上、下限值列阵; T_D 为结构在恒载作用下的索力列阵; C_T 为索力的影响矩

阵; t 为索力调整值。

通过控制斜拉桥主梁和索塔的弯矩大小,有助于减小结构的应力集中程度,避免局部承受过大的力,从而降低桥梁结构因应力过大而出现变形、开裂甚至破坏的风险。结构单元的弯矩约束可表示为

$$\begin{cases} M_{\min}^L \leq M_D^L + C_M^L t \leq M_{\max}^L \\ M_{\min}^R \leq M_D^R + C_M^R t \leq M_{\max}^R \end{cases} \quad (3)$$

式中, $M_{\max}^L$ 、 $M_{\min}^L$ 、 $M_{\max}^R$ 、 $M_{\min}^R$ 分别为指定截面左右端弯矩上下限值列阵; M_D^L 、 M_D^R 分别为结构恒载作用下指定截面左、右端弯矩列阵; C_M^L 、 C_M^R 分别为索力对指定截面左右端弯矩的影响矩阵。

位移约束可以理解为限制主梁和索塔在斜拉桥工作状态下的位移范围。这样做的目的是确保整个桥梁结构的稳定性和安全性。过大的位移可能导致主梁和索塔产生有害变形甚至失稳,增大桥梁的弯矩和应力,从而造成桥梁使用寿命缩短。位移约束可表示为

$$D_{\min} \leq D_A + C_D t \leq D_{\max} \quad (4)$$

式中, $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$ 分别为指定节点位移上、下限值列阵; D_A 为结构恒载作用下的节点位移列阵; C_D 为索力对指定节点位移的影响矩阵。

2.2.3 优化模型建立

根据上述目标函数和约束条件推导得出索力调整的数学模型,可表示为

$$\min f(t) = \frac{1}{2} \{t\}^T [F] \{t\} + \{f\}^T \{t\} + D \quad (5)$$

式中, $[F]$ 为 t 的二次项系数; $\{f\}$ 为 t 的一次项系数; D 为常数。

优化中限值规定:斜拉索索力范围为 2 900~6 400 kN,主梁截面最大挠度不应超过 0.025 m,弯矩范围为 -36 000 ~36 000 kN·m,主塔塔顶最大水平位移不超过 0.015 m。

3 有限元计算分析

3.1 计算模型

利用有限元分析软件 Midas Civil 2021,建立该桥的有限元分析模型,共计 534 个节点和 522 个单元,其中斜拉索 68 个单元采用桁架单元模拟,主塔 156 个单元采用 C55 混凝土材料模拟,主梁 298 个单元采用 Q345 钢材模拟。同时,桥面铺装和护栏采用二期均布荷载计入计算模型。斜拉桥有限元模型示意图见图 3。斜拉索与主梁之间的连接采用刚性连接,支座与主梁采用弹性连接,桥塔及支座的锚固采用一般支承进行模拟,有限元模型锚固连接处理方式见图 4。

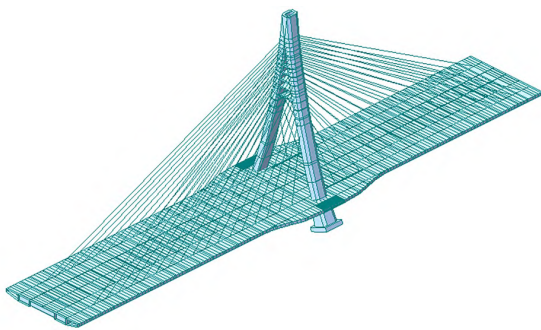


图 3 有限元模型图

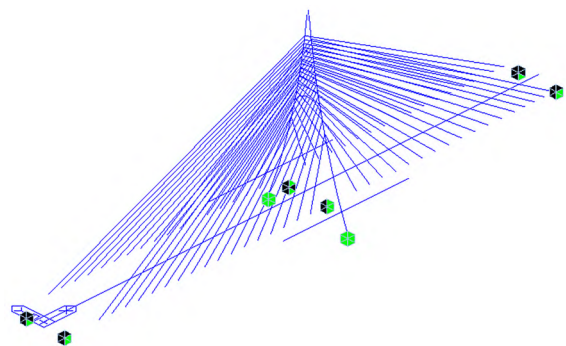


图 4 桥塔及支座锚固连接处理

3.2 成桥索力优化结果

3.2.1 斜拉桥成桥索力比较分析

首先进行成桥状态分析,即建立成桥模型,考虑结构自重、二期恒载、混凝土压重、横隔板、斜拉索的初拉力等因素。将斜拉索索力、恒载对单元内力及位移的相应影响矩阵提取出来,代入前文所述优化模型,利用 Matlab 优化工具箱中的 quadprog 函数进行求解计算。优化后的成桥索力及设计索力对比分析数据见表 1。

表 1 优化前后索力比较

拉索编号	设计索力/kN	优化索力/kN	偏差/%	拉索编号	设计索力/kN	优化索力/kN	偏差/%
Z17	6 526	6 329	−3.02	B17	6 529	6 238	−4.46
Z16	6 026	5 765	−4.33	B16	6 028	5 775	−4.20
Z15	5 077	5 047	−0.59	B15	5 498	5 438	−1.09
Z14	3 808	3 956	3.89	B14	4 126	4 239	2.74
Z13	4 461	4 496	0.78	B13	3 892	3 958	1.70
Z12	4 223	4 259	0.85	B12	4 259	4 456	4.63
Z11	4 054	3 953	−2.49	B11	4 057	4 194	3.38
Z10	3 926	3 734	−4.89	B10	3 937	4 123	4.72
Z9	3 720	3 664	−1.51	B9	3 721	3 727	0.16
Z8	3 595	3 562	−0.92	B8	3 591	3 568	−0.64
Z7	3 406	3 395	−0.32	B7	3 409	3 398	−0.32
Z6	3 256	3 261	0.15	B6	3 253	3 259	0.18
Z5	3 402	3 386	−0.47	B5	3 403	3 392	−0.32
Z4	3 306	3 274	−0.97	B4	3 304	3 281	−0.70
Z3	3 411	3 428	0.50	B3	3 414	3 435	0.62
Z2	2 864	2 952	3.07	B2	2 863	2 955	3.21
Z1	4 302	4 463	3.74	B1	4 303	4 466	3.79

从表 1 可以看出,斜拉桥合理成桥索力与设计索力趋势一致,斜拉索的索力基本满足长索索力大、短索索力小的特点,从跨中向两侧呈现增大的趋势。最大索力出现在梁端 Z17 索,索力值为 6 329 kN,相比设计索力优化了 3.02%;最小索力出现在跨中 Z2 索,索力值为 2 952 kN,相比设计索力增大了 3.07%。原设计索力值之和为 138 950 kN,而优化后索力值之和为 138 826 kN,整体来说索力有所减小,且优化后索力与设计索力误差相对较小,均在 7% 范围以内,符合要求。

3.2.2 优化前后结构内力及位移分析

从表 2 可以看出优化后的主梁受力状态得到了改善,主梁弯矩减小,最大正弯矩为 32 029 kN·m,相比设计索力作用下主梁的弯矩值减小了 5.39%;最大负弯矩为 35 614 kN·m,相比设计索力作用下主梁的弯矩值减小了 9.38%;主梁的正负弯矩绝对值相差不大。主梁的最大变形出现在两端,最大上挠值为 10.29 mm,优化了 27.13%;最大下挠值为 20.07 mm,优化了 19.04%;桥塔最大横向偏位出现在塔顶,变形值为 11.68 mm,优化了 5.12%,主梁和桥塔的受力及变形均得到了改善。

表 2 优化前后结构内力及位移

索力	主梁最大正 弯矩/(kN·m)	主梁最大负弯矩 绝对值/(kN·m)	主梁最大 上挠值/mm	主梁最大 下挠值/mm	桥塔最大 横向偏位/mm
设计索力	33 854	39 299	14.12	24.79	12.31
优化索力	32 029	35 614	10.29	20.07	11.68

3.3 施工索力优化

3.3.1 正装迭代法

在进行正装迭代计算时,合理成桥控制参数为 $\{F_0\}$,经过正装计算得到成桥控制参数为 $\{F\}$,则正装计算得到成桥状态与目标差值为

$$\{b\} = \{F\} - \{F_0\}$$

(6)

设斜拉索索力调整量为 $\{x\}$, 第 i 根斜拉索在施加单位张拉力时, 控制参数的增量为 a_{ij} , 可得到

$$[a]\{x\}=\{b\} \tag{7}$$

令 $Q(x) = ([a]\{x\} - \{b\})^2$

根据极值定理, 则有

$$[a]^T[a]\{x\}=[a]^T\{b\} \tag{8}$$

通过求解式(8), 得到索力调整向量 $\{x\}$, 则求得下一轮正装迭代索力为

$$\{T_2\}=\{T_1\}+\{x\} \tag{9}$$

式中, $\{T_1\}$ 为初次迭代张拉力。

3.3.2 斜拉索张拉方案比选

斜拉索不同的张拉方案对于桥梁的安全性、经济性和施工难度等方面均有着重要影响, 结合背景桥梁特点及其工期紧张的实际情况, 现给出以下几种斜拉索张拉施工方案, 见表 3。

表 3 斜拉索张拉方案

张拉方案	施工内容
方案 1	同时对称张拉 2 对索(8 根索)
方案 2	同时对称张拉 1 对索(4 根索)
方案 3	2 批次张拉: 从跨中向两边对称张拉斜拉索, 分成 2 批次进行张拉, 第 1 批张拉 16 对, 第 2 批张拉 18 对
方案 4	3 批次张拉: 从跨中向两边对称张拉斜拉索, 分成 3 批次进行张拉, 第 1 批张拉 10 对, 第 2 批张拉 10 对, 第 3 批张拉 14 对

3.3.3 施工索力结果分析

采用正装迭代法求解施工过程中张拉力的大小, 通过有限元软件模拟斜拉索不同的张拉方式, 进行施工过程分析, 根据模拟结果, 不断调整张拉力大小, 最终计算得到不同张拉方案所需张拉力大小, 如图 5 所示。斜拉索采用不同的张拉方案, 对最终的成桥索力有一定的影响。采用不同方案进行张拉, 所得成桥索力计算结果见图 6。

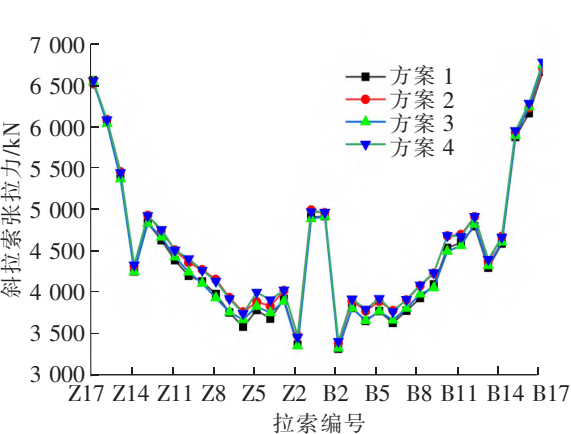


图 5 不同张拉方案下张拉力大小

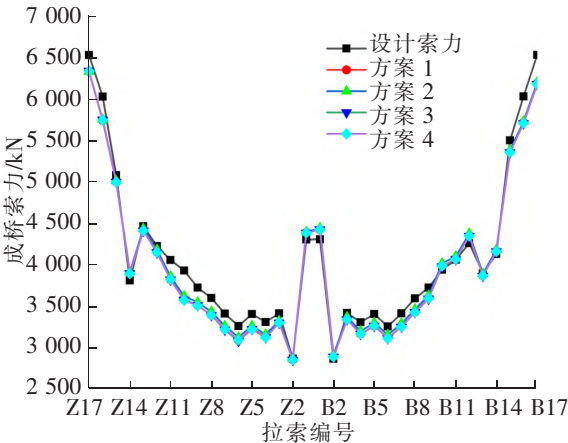


图 6 不同张拉方案下成桥索力

结果表明, 按照方案 2 进行张拉, 成桥后每根斜拉索的张拉力与目标索力最为接近, 误差很小, 控制在 7% 范围以内, 最大索力值出现在主梁两端, 从两端向跨中, 索力逐渐减小。且方案 2 施工过程中的最大拉索张拉力与最小张拉力之差小于其他方案, 索力分布更加均匀, 因此可认为方案 2 优于其他方案。

4 监控结果分析

该桥梁在实际施工时, 是按照方案 2 进行张拉的, 为安全起见, 分 2 阶段进行张拉, 每次张拉 4 根, 在

第 1 次全部张拉完成后进行第 2 次张拉。第 1 次张拉和第 2 次张拉的张拉力大小如图 7 所示,2 次全部张拉完成后的成桥索力与设计索力对比如图 8 所示。

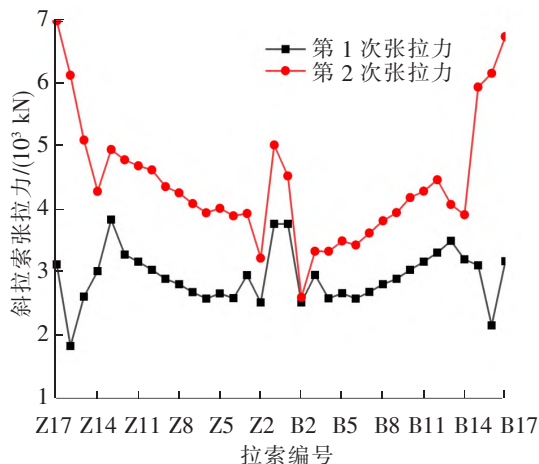


图 7 斜拉索 2 次张拉力大小

结果表明,整体来看,大多数斜拉索成桥索力与设计值相比都得到了减小,误差在较小范围内,符合工程实际,能够确保斜拉桥施工的安全性。该桥是主梁合龙后,再进行斜拉索张拉施工,因此可以考虑 1 次张拉,即施工时,每根斜拉索只张拉 1 次,不进行 2 次补张调索,通过计算得到拉索成桥索力与分 2 次张拉对比如图 9 所示。

由图 9 可知,若采用每根斜拉索均只张拉 1 次的方法,大多数斜拉索成桥后索力与设计索力相差非常小,并且索力的分布趋势与设计索力一致。斜拉索采用 1 次张拉时,最大成桥索力值为 6 328 kN,与 2 次张拉所得最大成桥索力值 6 699 kN 相比减小了 5.54%;最小索力值为 2 866 kN,与 2 次张拉所得索力值 2 712 kN 相比增大了 5.68%。最大索力出现在梁端 Z17 索,最小索力出现在跨中 Z2 索位置,全桥边跨和主跨多数拉索成桥索力比设计索力小,且误差在允许范围内,符合要求。采用 1 次张拉方法可提高工程的施工效率,缩短工期、减少张拉环节的时间,因此可为工程实际提供借鉴参考。

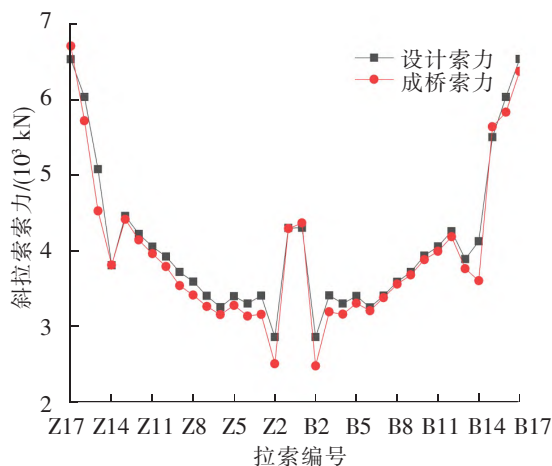


图 8 斜拉索成桥索力

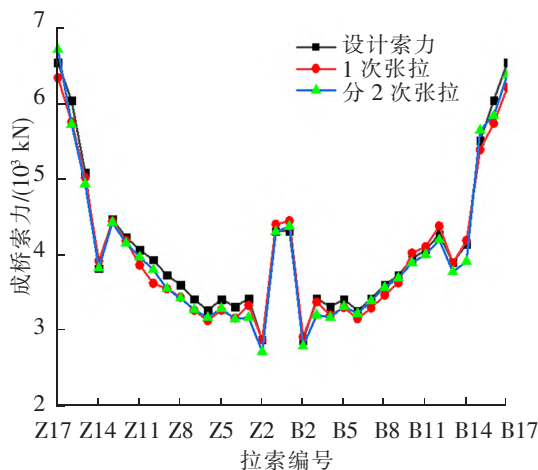


图 9 斜拉索成桥索力对比

5 结论

以空间索面独塔钢箱梁斜拉桥工程施工为背景,对斜拉桥成桥索力及不同张拉方案下的斜拉索张拉力进行了研究,得出以下结论:

(1) 采用影响矩阵法计算得到斜拉桥的最优成桥索力,索力优化结果与设计索力相差很小,且索力从桥塔向边墩呈现逐渐增大的趋势,基本满足长索索力大、短索索力小的受力特点。索力优化后,桥塔的横向偏移得到改善,主梁的最大正弯矩和负弯矩绝对值均得以减小,主梁的挠度变形也控制在较小的范围内,这意味着主梁在承受荷载时的弯曲程度降低了,结构的稳定性得到了提高。

(2) 针对钢箱梁斜拉桥先梁后索的施工特点,提出了 4 种不同的张拉方案,通过正装迭代法计算了每种方案斜拉索的张拉力以及成桥索力,对比分析得出了最优的斜拉索张拉方案,并结合工程实际做了对比,分析了斜拉桥不进行 2 次补张调索的可行性,在施工工期紧张情况下,对于减少调索次数具有较重要的工程意义。

参 考 文 献

- [1]戴杰,秦凤江,狄谨,等.斜拉桥成桥索力优化方法研究综述[J].中国公路学报,2019,32(5):17-37.
- [2]郭钟群,谢志华,赵奎,等.基于可行域法的斜拉桥索力优化[J].江西理工大学学报,2012,33(3):10-13.
- [3]高荣雄,李孟然,彭少民.斜拉桥成桥索力优化研究[J].武汉理工大学学报,2007(增刊 2):133-136.
- [4]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(1):8-14.
- [5]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.
- [6]陈秀雯.基于影响矩阵法的钢箱拱吊杆索力优化研究[J].铁道建筑技术,2021(10):104-108.
- [7]刘红云.独塔斜拉桥基于影响矩阵的索力优化[J].中外公路,2013,33(3):161-163.
- [8]杨俊.影响矩阵法在桥梁合理成桥状态确定中的应用[J].公路与汽运,2008(6):113-115.
- [9]杨吉新,张朝,吴爱平,等.基于影响矩阵法的 S 形曲线斜拉桥索力优化[J].工程与建设,2020,34(2):234-236.
- [10]郑一峰,毛健,尹笑,等.基于影响矩阵的双塔斜拉桥合理成桥状态研究[J].公路,2017,62(2):82-85.

Optimization of Rope Force in Single Tower Steel Box Girder Cable-stayed Bridge with Space Cable Face

WU Xueyi¹, ZHANG Zhiguo¹, ZHU Jianfeng²

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. No. 6 Engineering Co. Ltd. of CR20G, Xi'an 710032, China)

Abstract: Space cable-stayed bridge has complicated interaction of cable forces because of its structural particularity. Reasonable cabling force of bridge and adjustment of construction tensile force are the key problems to be solved. In order to study the above problems, the cable-stayed bridge on Xuefu Road in Shijiazhuang is used as the engineering background. By controlling the deflection, bending moment and cable-stayed cable force of the main girder, the influence matrix method is used to solve the cable-stayed cable force. Combining with the construction characteristics of steel box girder cable-stayed bridge, the feasibility of different cable-stayed tensile schemes is studied. The results show that the optimal cable forces obtained by the solution have little error with the design cable forces and a reasonable distribution of the cable forces. The cable tension and cable-forming forces of different schemes are obtained by the method of formal iteration, and the optimal cable tension scheme is determined by the analysis, which provides reference for engineering practice.

Key words: single-tower cable-stayed bridge; space rope face; optimization of rope force; influence matrix method; orthotropic iteration method