

降低钢桁梁悬索桥主桁疲劳应力幅的结构体系及其可行性研究

邵梦龙, 郭日强, 唐绪

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为降低带外伸跨的钢桁梁悬索桥主桁杆件疲劳应力幅,研究不同结构体系对主桁杆件疲劳应力幅的改善效果。从杆件疲劳应力幅和竖向刚度的角度给出最佳方案;并从线路坡度与曲率的角度,研究该方案对列车走行过程中线路的影响,进而确定方案的可行性。结果表明:去除桥塔处的刚性竖向支座,换成吊在主梁下弦节点的弹性吊索,能有效地降低桥塔位置处上弦杆和主梁梁端下弦杆的疲劳应力幅,且主梁的竖向刚度较理想,对列车走行线路影响很小。

关键词:铁路桥梁;结构体系;数值计算;疲劳应力幅;列车走行

铁路桥梁有以下特点:列车活载及桥面系等二期恒载较大、桥面更窄。为了保证列车运行的安全性和旅客乘坐的舒适性,要求铁路桥梁有更高的稳定性、安全性以及较高的横向、竖向刚度^[1]。铁路桥梁对刚度、梁端转角要求较高^[2],铁路悬索桥主梁梁端转角的大小可以通过合理的跨度布置进行调整。在成桥恒载状态下,吊索区主梁应力很小,基本没有压应力储备,而活载应力较大,因此主梁疲劳应力幅较大,疲劳问题较为突出,需高度重视,应处理好有关疲劳构造细节,以满足强度与疲劳设计要求^[3]。由于铁路荷载的受力特性不同于一般的公路悬索桥,需要格外注意其主梁的疲劳设计。该文以一座主跨 672 m 的钢桁梁悬索桥为背景工程,并在此工程背景基础上分别稍作修改,提出其他 3 种不同的体系方案,分析不同体系方案对主桁杆件的疲劳状态和列车走行线路的影响。

$m=672$ m,边跨不设吊索,主梁节间长度均为 12 m。中跨采用平行主缆,主缆横向中心距 22 m,钢梁主桁横向中心距 22 m;边跨采用空间缆,主塔顶主缆横向中心距 22 m,散索鞍处中心距 33 m,边缆倾角 1.5° 。桥塔采用双柱式门式框架结构,桥塔高 172.5 m,单肢桥塔柱顶纵横向尺寸为 $9\text{ m}\times 6\text{ m}$,纵横向按比例放坡。基础均采用桩基础,单肢塔柱底采用 16 根 $\phi 3\text{ m}$ 桩基,每个桥塔 32 根 $\phi 3\text{ m}$ 桩基。钢梁采用带竖杆的平行华伦桁架。节间长度 12 m,桁高 12 m,桁宽 22 m,上弦设置“米”字形纵向联结系,断面节点间设置带 K 撑的横向联结系,以减小桥面系横梁弯矩。

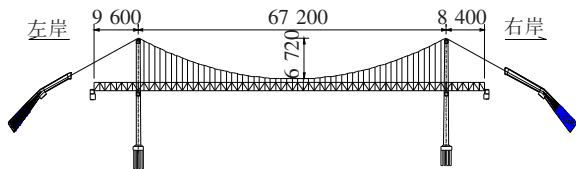


图1 立面总体布置图(单位:cm)

1 结构基本参数

1.1 结构概述

某特大三跨连续单跨悬吊下承式钢桁梁悬索桥方案立面布置图如图 1 所示。主缆三跨布置为 $(160+672+160)\text{ m}$,主梁三跨布置为 $(96+672+84)\text{ m}$ 。主缆垂跨比为 $1/10$,矢高 67.2 m。中跨 672 m 区域设置吊索,每个吊点设置两根吊索,吊索布置为 56×12

1.2 计算荷载

- (1) 设计活载:双线铁路 ZKH,牵引质量 3 000 t。
- (2) 疲劳荷载:多线铁路桥主桁(或主梁)构件检算疲劳时,疲劳荷载可按一线加载,作用于横向最不利位置,并乘以多线系数;双线铁路桥的横梁及连接横梁的主桁竖杆,按一线最大活载,另一线为相应活载图式中的均布活载加载,计算疲劳内力。

收稿日期:2020-05-20(修改稿)

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划项目(编号:2015G002-A)

作者简介:邵梦龙,男,硕士研究生, E-mail:1531741209@qq.com

(3) 计算软件与方法: 计算软件采用桥梁结构静动力非线性分析系统 BNLAS^[5]。BNLAS 采用非线性有限元理论, 考虑空间单元的大位移、大转动影响, 采用高精度方法计算单元内力及变形。计算模型中主缆采用空间悬链线索单元, 吊索采用杆单元, 桥塔和主梁均采用空间梁单元。

1.3 结构体系方案

为了探讨不同结构体系对主梁疲劳荷载及刚度的影响, 拟采用下述 4 种不同的结构体系进行分析:

方案 1: 主梁在主塔下横梁处、边墩顶均设置竖向支座与侧向抗风(抗震)支座, 所有竖向支座均为双向活动支座, 且支承在下弦节点; 所有抗风(抗震)支座均设在主桁下弦节点外侧, 除主跨有吊索支承外, 主梁在竖向、横向均为三跨连续梁结构; 主梁纵向不设固定支座约束。

方案 2: 在方案 1 的基础上去除桥塔处竖向支座, 在支座位置设置弹性吊索, 弹性吊索一端设置在桥塔顶部, 一端连接主梁的上弦节点。

方案 3: 弹性吊索的一端连接主梁的下弦节点, 其余设置与方案 2 一致。

方案 4: 在方案 1 的基础上去除桥塔处竖向支座, 在边跨各加设 3 对吊索, 两侧边跨的 3 对吊索均分别距桥塔 12、24、36 m。

2 各结构体系计算分析

2.1 主桁杆件的疲劳计算

主桁杆件的疲劳计算方法参见文献[8]4.3.6 节, 应力幅值为 0.00 的杆件为压压构件, 上弦杆中除了桥塔处为“拉—拉或以拉为主”的拉—压构件外, 其他 3 处位置的上弦杆均为“以压为主”的拉—压构件; 4 处位置的下弦杆均为“拉—拉或以拉为主”的拉—压构件。上弦杆、下弦杆在疲劳荷载作用下的应力幅值如图 2 所示。

由图 2 可知: 桥塔处的上弦杆应力幅值最为突出, 且方案 1 支承方式的应力幅值最大, 为 140.30 MPa, 由文献[8]3.2 节和 4.3 节计算可得桥塔处上弦杆的应力幅设计控制为 97.9 MPa。方案 2~4 的应力幅值相对于方案 1 分别减少了 15.57%、29.10%、41.43%。下弦杆的应力幅值问题普遍没有上弦杆突出, 但方案 2~4 中桥塔和边跨跨中处的应力幅值有一定的改善, 特别是方案 4。

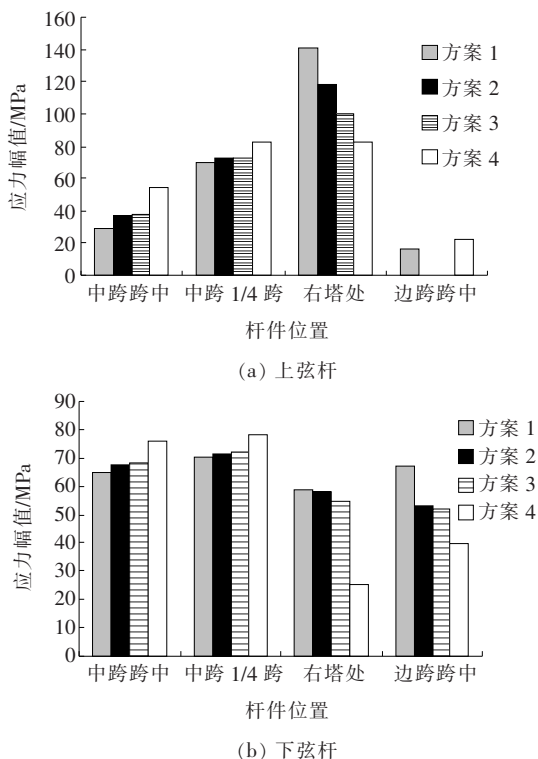


图 2 上、下弦杆疲劳应力幅

就斜腹杆的疲劳计算结果而言, 4 种方案没有太大差距。就竖腹杆而言, 应力幅值都比较小且彼此相差不大, 只有方案 2 桥塔处的竖腹杆, 其应力幅值接近 200 MPa, 这是因为方案 2 的桥塔处弹性吊索吊在主桁的上节点, 当然, 这种现象可以通过改进节点的构造来改变传力途径进行缓和。

2.2 主梁位移计算

活载作用下主梁竖向位移如图 3 所示。

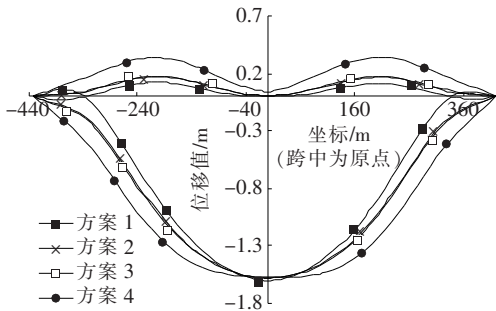


图 3 活载作用下主梁位移包络图

由图 3 可知: 方案 1~4 主梁最大正挠度分别为 1.605、1.577、1.579、1.573 m, 4 种方案相差不大, 且位置大致发生在中跨跨中。由主梁位移包络图整体分析可知: 方案 1 中主梁正负挠度最小, 最大的是方案 4; 方案 2、3 的结果相差非常小。

表 1 为活载作用下梁端纵向位移与转角。由表 1

可知:梁端位移与梁端转角的规律和主梁的竖向位移一致,即方案1最小,方案4最大,方案2、3居中且相差非常小。

表1 活载作用下梁端纵向位移与梁端转角

方案	梁端纵向位移/m		梁端转角/rad	
	最大值	最小值	最大值	最小值
1	0.112	-0.102	0.001	-0.001
2	0.134	-0.129	0.000	-0.002
3	0.138	-0.133	0.000	-0.002
4	0.208	-0.204	0.002	-0.004

2.3 各方案吊索结果分析

方案2和方案3是将方案1的刚性支座换成了弹性吊索,而方案4在桥塔处没有支承,所以靠近桥塔的中跨吊索受力会非常不利,必须对其进行加粗。由计算可知:1[#]吊索(从左塔至右塔,吊索编号依次为1[#], 2[#], …, 55[#])最为不利,接下来对方案2和3的弹性吊索、方案4的边跨新增吊索与各方案的1[#]吊索进行比较分析。

2.3.1 弹性吊索与边跨新增吊索

(1) 方案2的弹性吊索直径为284 mm,疲劳应力幅为122.78 MPa。

(2) 方案3的弹性吊索直径为284 mm,疲劳应力幅为134.65 MPa。

(3) 方案4的左边跨新增吊索从靠近梁端到左塔,规格依次为431 ϕ 5 mm、431 ϕ 5 mm、886 ϕ 5 mm,其疲劳应力幅依次为84.32、90.63、137.21 MPa。

2.3.2 1[#]吊索

在方案2~4中跨的所有吊索中,1[#]吊索受力最不利,各方案的1[#]吊索规格与疲劳应力幅如表2所示。在列车开过时,各方案的1[#]吊索受力最大值分别为5 554、5 561、9 003 kN。方案2、3中1[#]吊索的索夹抗滑可以通过增加高强紧固螺杆解决;而对于方案4,吊索力高达9 003 kN,索夹抗滑问题将不易解决。

表2 1[#]吊索的规格与疲劳应力幅

方案	单根吊索规格	应力幅/MPa
2	386 ϕ 5 mm	116.76
3	386 ϕ 5 mm	129.19
4	664 ϕ 5 mm	132.87

虽然对于桥塔处上下弦杆的疲劳问题,方案4最为有利,但是方案4中1[#]吊索轴力太大,其索夹抗滑问题不易解决;且从整体上分析,方案4中主梁的竖向

挠度、梁端位移与梁端转角都最不利;另一方面,除了方案2中桥塔处竖腹杆的受力外,方案2与3的计算结果非常接近,当然,通过改进节点的构造来改变传力途径可以缓和该问题。因此,下文分析方案3相对于方案1而言,列车行驶过程中,其对路线线形的影响程度。

3 列车走行分析

列车行驶的舒适度与曲线半径息息相关^[7],而桥梁是一个柔性结构,特别是悬索桥。当列车行驶在桥上时,主梁上各点的竖向坡度与曲线半径时刻发生变化,且列车上不同位置所经历的变化不尽相同。

3.1 竖向坡度

主梁上各点在列车车头、车中、车尾点经过时的竖向坡度如图4~6所示。由图4~6可知,在列车车头、车尾经过主梁各点时,其各点的竖向坡度方案1、3有一定的差距,但相差不大;车头经过时方案3最大竖向坡度达到7.24‰,而方案1为7.01‰。而相比于车头、车尾,车中点经过主梁各点时,两种方案竖向坡度差别更小,且变化趋势也很一致。

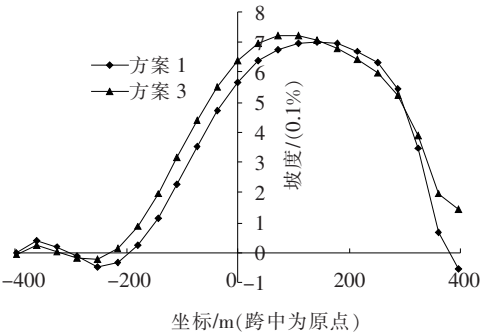


图4 车头经过时主梁上各点的竖向坡度

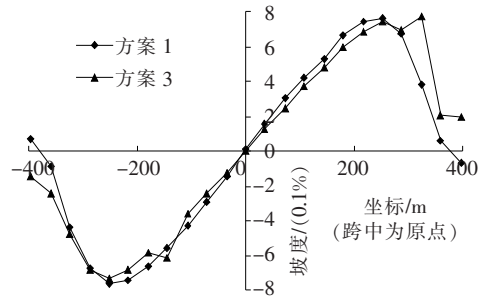


图5 车中点经过时主梁上各点的竖向坡度

3.2 线路曲率

主梁上各点在列车车头、车中、车尾点经过时的线

路曲率如图 7~9 所示。

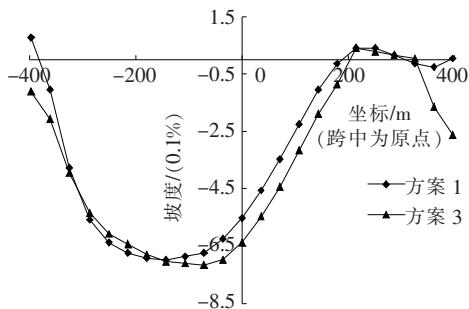


图 6 车尾经过时主梁上各点的竖向坡度

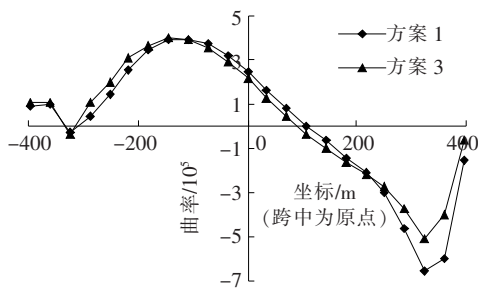


图 7 车头经过时主梁上各点的线路曲率

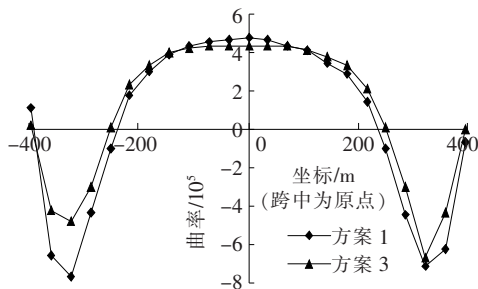


图 8 车中点经过时主梁上各点的线路曲率

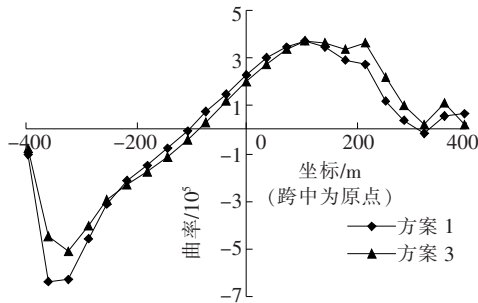


图 9 车尾经过时主梁上各点的线路曲率

由图 7~9 可知,在列车车头、车尾经过主梁各点时,方案 1、3 主梁上各点的曲率差别不大。车中点经过中跨的主梁时,线路曲率相差也不大,车中点在跨中位置时,方案 1 和 3 跨中的曲线半径分别为 20 958、22 864 m;车中在左塔位置处时,方案 1 和 3 左塔位置处的曲线半径分别为 14 028、14 984 m。

4 结论

(1) 去除桥塔处的刚性支座,如将桥塔处的刚性支座换成弹性吊索,将会较大地改善桥塔位置处上弦杆疲劳应力幅。

(2) 方案 2、3 相比于传统结构体系的方案 1,能改善梁端下弦杆的疲劳应力;但总体上来说,4 种方案中斜腹杆和竖腹杆的疲劳状态差别不大。

(3) 传统支承方式的方案 1 桥塔处上弦杆疲劳问题突出,方案 2 的桥塔处竖腹杆受力较为不利,方案 4 中 1[#] 与 55[#] 吊索的索夹抗滑移问题突出。

(4) 将桥塔处的刚性支座换成弹性吊索,对列车走行线路的影响不大。

参考文献:

- [1] 张东. 大跨度铁路悬索桥结构体系及对刚度影响的研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2011.
- [2] 沈锐利, 张东, 唐茂林. 大跨度铁路悬索桥合理刚度指标值的探讨[C]. 中国土木工程学会全国桥梁学术会议论文集, 2012.
- [3] 唐贺强, 徐恭义, 刘汉顺. 悬索桥用于铁路桥梁的可行性分析[J]. 桥梁建设, 2017, 47(2): 15-16.
- [4] 沈锐利, 廖海黎. 悬索桥静动力空间非线性计算有限元模型及其应用[C]. 全国桥梁结构学术大会论文集(下册), 1992.
- [5] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2003.
- [6] 孟凡超. 悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [7] 朱颖, 周惟俊. 铁路最小曲线半径的动力性能分析[J]. 铁道标准设计, 2005(1): 30-33.
- [8] TB 10091—2017 铁路桥梁钢结构设计规范[S].