

悬索桥负载移梁过程静力学分析与试验研究

潘 权*, 颜东煌, 许红胜

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410114)

摘 要:针对轨索移梁新工艺在悬索桥建设中的关键技术问题进行了理论分析和整体模型试验研究。根据柔索结构基本假定,建立了轨索移梁系统负载状态下的整体力学分析模型,并推导了主缆、吊索和轨索等各构件受力状态的计算方程。理论模型中,移梁小车所在轨索节段采用4个直线索单元模拟,其他位置的轨索节段采用1个直线索单元模拟。以矮寨悬索桥为工程背景,设计制作了轨索移梁体系的整体缩尺模型用以模拟移梁过程,测试了第一段梁从入轨到安装多个子工况的体系响应。理论计算结果与模型试验结果吻合良好,表明本文的计算方法正确有效,能解决轨索移梁工艺负载移梁过程中体系整体受力分析和轨索局部变形分析求解问题。该方法可简化计算过程,计算精度和结果能够应用于工程计算分析和求解,是一种适合于轨索移梁工艺负载状态下体系的分析方法。

关键词:悬索桥;主梁施工;轨索移梁工艺;力学分析;模型试验

中图分类号:U448.25;O316

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2017)04-0474-06

1 引 言

轨索移梁新工艺首次在矮寨悬索桥主梁架设中得到成功使用,长为1000.5 m的钢桁梁安装只用了2.5个月^[1],大大节省了工期,减少了用钢量,但该工艺尚处于首次实桥使用阶段,要大量推广应用还需要积累更多的经验,同时对该工艺的认识和研究仍有待进一步加深。由主缆、吊索、吊鞍、轨索和移梁小车等组成的移梁体系为双层柔性悬索系统^[2-4]。移梁小车落在预张拉的轨索上,轨索通过变形来适应荷载的变化,起吊钢桁梁节段后,轨索局部下挠,由于吊索的约束,轨索局部形成了爬坡角,随着移梁小车的牵引前行,爬坡角度发生变化,角度的变化引起轨索索力和牵引力的变化,柔性悬索体系与之协变。过大的爬坡角将使移梁小车难以实现空中移动,过小的爬坡角又将使轨索直径和预张力过大,导致施工困难,增大成本。如何选择合适的轨索预张拉力和轨索直径,设计出合理的移梁小车结构,并确定移梁小车的牵引力大小等,均对负载移梁体系精细化计算分析提出了较高的要求。

在轨索移梁体系分析中,由于吊索是柔性索,在荷载作用下会伸长,体系的变形协调关系中须考虑这种伸长变化,特别是移梁过程中各吊索索力和伸长量时刻变化,同时移梁小车系统又处于柔性悬索体系中,主梁安装过程中悬索体系总体变形大,梁段在不同位置体系的响应也不同,而且体系计算分析时既要考虑轨索和吊索的局部变形,又要考虑体系的整体大变形,且各种变形相互耦合影响,给体系的静力分析和求解带来了难度和复杂性。在该工艺研发过程中,将主缆和轨索均当成分段悬链线单元处理^[3,5],计算过程较繁杂,且轨索有较大预张力,与两端只考虑自重作用和吊索力的主缆分段悬链线受力有一定的差异,同时建模时需要将轨索节段离散成更细的悬链线索单位,移梁小车和梁段荷载才能加在索单元节点上,轨索节段间的相对变形才能分析求解,但过多地细化轨索单元会增加计算工作量,且轨索刚度远小于主缆刚度,计算分析时存在不收敛的可能。

为了简化轨索移梁工艺移梁状态下的细化分析过程,本文根据柔索力学分析的基本假定,考虑吊索的弹性伸长,推导体系受力分析,建立主缆、吊索和轨索的整体静力学模型并求解,计算结果与模型试验结果对比分析表明,本文计算分析方法正确有效,能解决轨索移梁工艺移梁过程中体系整体受力和轨索局部受力分析问题,并可简化计算分析过程,计算精度和结果能够应用于工程实际的分析和求解。

收稿日期:2016-08-11;修改稿收到日期:2017-02-07.

基金项目:国家自然科学基金(51678069,51678071);桥梁工程安全控制省部共建教育部实验室开放基金(15KB03)资助项目.

作者简介:潘 权*(1976-),男,博士,讲师
(E-mail:panquan605@126.com).

2 负载移梁体系移梁过程力学分析模型

在移梁工作状态下,将钢桁梁节段的重量、移梁小车以及钢纵梁的重量等效到轨索的两个节点上。待安装钢桁梁标准节段常采用开口式结构,如图1所示,移梁小车两吊点所承受的荷载用 W_1 和 W_2 表示,吊点分担荷载比为 $1.7:1$ ^[3]。经过对比分析,当两对滑轮组重心处于图2所示位置时,轨索节段相对变形最大。为了简化分析过程,只将移梁小车所在区域内的轨索离散成多个等长的直线单元节点,其他各吊索间的轨索各用一个直线索单元模拟,主缆节段采用分段悬链线模拟,吊索用一个直线索单元模拟,建立移梁体系力学分析模型。

定义负载状态为主缆、吊索和索夹架设完成,吊鞍座和轨索安装就位,轨索张拉完成、跨缆吊机停待安装梁段位置且移梁小车负载的状态。为了简化负载状态下体系的计算方法,特做如下假定^[9-12]。

- (1) 柔索只能受拉,不能受压和受弯。
- (2) 柔索的应力-应变符合胡克定理。

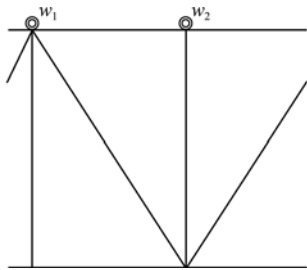


图1 钢桁梁标准节段示意图

Fig. 1 Sketch figure of standard section of steel truss girder

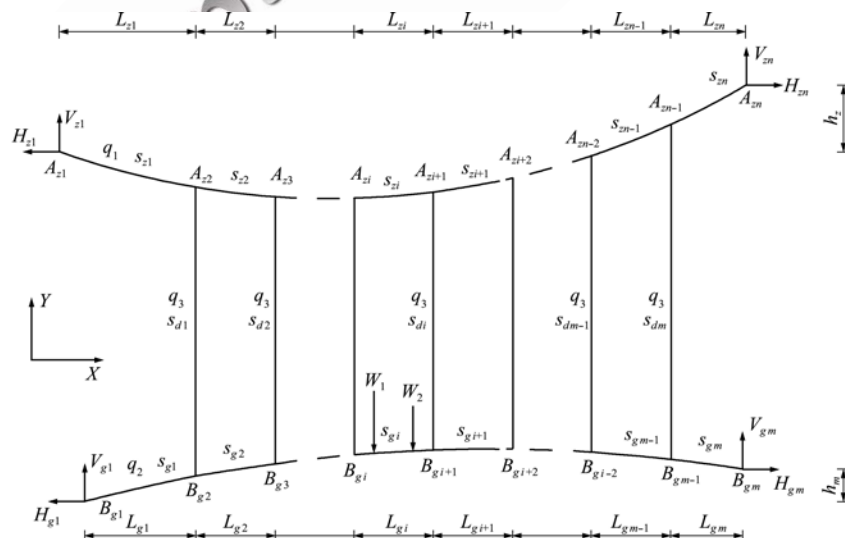


图2 轨索移梁负载状态力学分析模型

Fig. 2 Force analysis model of rail cable launching method under loading condition

(3) 受力前后主缆、轨索和吊索的抗拉刚度计算均使用变形前的截面面积。

(4) 忽略轨索与吊鞍座间的摩擦,吊索不发生倾斜。

其中,钢桁梁节段自重和移梁小车自重已知,即 W_1 和 W_2 已知。

2.1 主缆受力分析

如图3所示,在负载状态下,将主缆节段离散成2个节段 $A_{zi}-A_{zi+1}$, $A_{zi+1}-A_{zi+2}$,分别建立分段悬链线单元方程^[12-14],并求得 l_{zi} , h_{zi} , l_{zi+1} 和 h_{zi+1} :

$$l_{zi} = \frac{H_{zi} S_{zi}}{E_1 A_1} - \frac{H_{zi}}{q_1} \{ \ln[V_{zi} + \sqrt{H_{zi}^2 + V_{zi}^2}] - \ln[V_{zi} - q_1 S_{zi} + \sqrt{H_{zi}^2 + (V_{zi} - q_1 S_{zi})^2}] \} \quad (1)$$

$$h_{zi} = \frac{q_1 S_{zi}^2 - 2V_{zi} S_{zi}}{2E_1 A_1} - \frac{1}{q_1} [\sqrt{H_{zi}^2 + V_{zi}^2} - \sqrt{H_{zi}^2 + (V_{zi} - q_1 S_{zi})^2}] \quad (2)$$

$$l_{zi+1} = X_{zi+1} - X_{zi}, h_{zi+1} = Y_{zi+1} - Y_{zi} \quad (3,4)$$

式中 E_1 和 A_1 为主缆弹性模量和截面面积, q_1 为主缆单位长度的自重, S_{zi} 为空缆安装吊索后的节段索长, i 为 $1 \sim n$,其他参数如图2所示。

根据 A_{zi} 节点及吊索受力平衡状态,可以建立另外2个方程:

$$H_{zi-1} = H_{zi}, V_{zi} = V_{zi-1} - P_{zi} - q_1 S_{zi} \quad (5,6)$$

式中 P_{zi} 为 A_{zi} 节点处吊索索力作用。

2.2 吊索受力分析

吊索受力相对简单,根据假设(4),不考虑吊索的倾斜,吊索受力和变形协调关系为

$$P_{zi} = P_{gi} + q_3 s_{di} + W \quad (7)$$

$$Y_{zi} - Y_{gi} = (P_{gi}/E_3 A_3) + S_{di} \quad (8)$$

式中 W 为吊鞍的恒重, E_3 和 A_3 为吊索弹性模量和截面面积, q_3 为吊索单位长度的自重, S_{di} 为吊索无应力索长, 其他参数如图 3 所示。

2.3 轨索受力分析

为了分析体系和局部的响应, 移梁小车所在的轨索节间采用 4 个直线索单元来模拟移梁小车所在轨索区域, 并保证移梁小车轮对作用点均落在细分的直线索单元的节点上, 其他位置的轨索节段用一个直线索单元来模拟, 轨索节段离散图如图 4 所示, 分别建立 B_{gi} 和 B_{x1} 、 B_{x1} 和 B_{x2} 、 B_{x2} 和 B_{x3} 、 B_{x3} 和 B_{gi+1} 共 4 个直线索段求解方程。

以 B_{gi} 和 B_{x1} 为例, 结合图 5, 建立如下方程求解。

$$l_{x1} = \frac{H_{gi-1}}{T_{gi-1}} S_{x1}, \quad h_{x1} = \frac{V_{gi-1}}{T_{gi-1}} S_{x1} \quad (9, 10)$$

$$T_{x1} = \sqrt{V_{x1}^2 + H_{x1}^2}, \quad H_{gi-1} = H_{x1} \quad (11, 12)$$

$$V_{x1} = V_{gi-1} - q_2 S_{x1} - W_1 \quad (13)$$

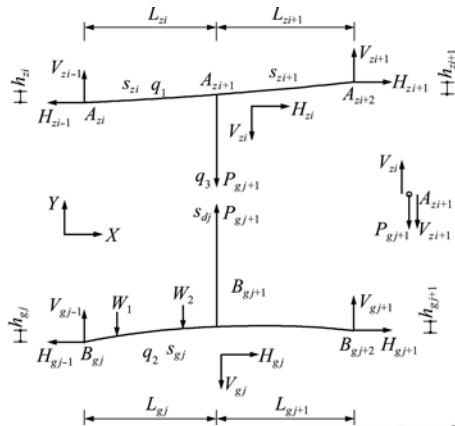


图 3 轨索移梁负载状态力学离散模型

Fig. 3 Force discrete model of rail cable launching method

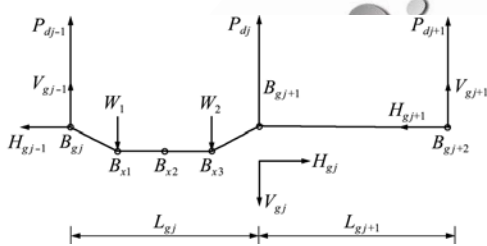


图 4 轨索节段受力分析图

Fig. 4 Stress analysis chart of rail cable segment

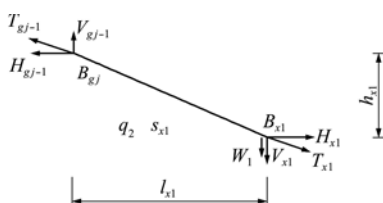


图 5 轨索节段离散模型

Fig. 5 Section of rail cable segment

$$Y_{x1} = h_{x1} + Y_{gi-1} \quad (14)$$

式中 各参数的意义如图 5 所示。用类似的方法可以建立其他轨索节段的方程。

2.4 体系求解分析

移梁状态下, 轨索材料、直径和预张拉力均已预设好, 轨索锚固点的位置 l_g 、预张拉力 T_{g0} 、吊索无应力索长 S_{di} 、主缆的索力、线形、索塔间距 l_z 及高差 h_z 可以从成桥状态倒拆计算求解得出, 在此基础上用迭代方法求解其他未知数^[15]。其迭代流程如图 6 所示。按此流程迭代计算就可以得到移梁状态下轨索的相对变形和各吊点的相对坐标, 并最终确定体系的响应。如果为了更精确地求解分析轨索局部挠度曲线变化情况, 可以通过更加细化的直线杆单元来模拟移梁小车所在的轨索节段受力, 并将体系的响应变化加在局部区域, 分析轨索局部挠度历程变化。

3 负载移梁状态下整体模型试验

为了验证本文分析方法的正确性, 以矮寨悬索桥主梁施工为工程背景, 按照 1:33 的几何缩尺比设计和制作了其整体试验室内模型, 缩尺后模型主缆孔跨尺寸为 7.333 m+35.636 m+3.515 m, 如图 7 所示。试验模型由锚碇系统、主缆、索塔、岩锚索、吊索及索夹、移梁系统和测试系统等组成, 具体设计参考文献[6, 16]。在实验室内安装索塔模型和主缆锚固模型, 架设调整完整空缆, 安装索夹、吊索、吊鞍及张拉轨索, 移梁小车模型落在轨索上, 第一个梁段 B36 移动安装, 安装全过程用 5 个子工况细

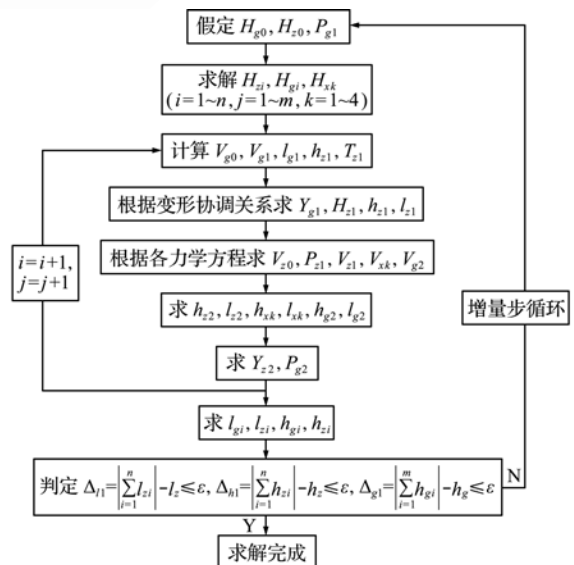


图 6 轨索移梁工艺移梁状态下的计算分析流程

Fig. 6 Analysis flow chart of rail cable launching technology under loading condition

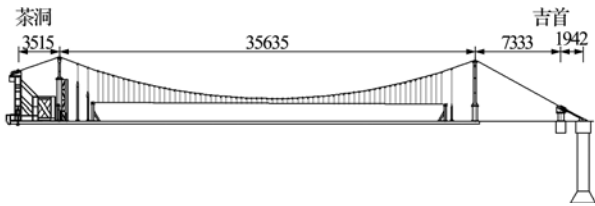


图 7 矮寨悬索桥整体模型示意图(单位:mm)
Fig. 7 Model of Aizhaisuspension bridge(unit:mm)

化模拟,从模型入轨、移动到吉首岸侧中跨 1/8 点、再移动到吉首岸侧中跨 1/4 点、3/8 点、最后移动到中跨跨中,测试各子工况下主缆控制点的挠度、主缆力、索塔偏位、轨索索力和轨索线形等的变化情况。

4 测试结果分析

5 个小工况部分测试结果列入表 1~表 3, B36 梁段移动过程中主缆挠度变化、锚固点索力和轨索锚固端索力在梁段入轨、1/8 点、1/4 点、3/8 点和跨中位置时的实测结果均与本文计算结果吻合。从 B36 梁段入轨到安装,试验结果表明,轨索移梁体系中轨索索力基本保持不变,轨索通过自身的变形来适应梁段移动时荷载作用点的变化,不会出现索力突然增大而降低索的安全系数甚至断索的风险。

表 4 为 B36 梁段在吊索 J14~J15 节间移动过程中轨索相对 J15 吊点变形量。梁段重心从吊索 J14 点向节间移动时,轨索相对变形逐渐增大,当其重心在节间中点时达到最大,最大值为 16.2 mm,后变形又逐渐减小;但这种变形受体系温度场和预张拉力的影响较大,轨索预张拉力越大,温度越低,轨索局部变形越小;在轨索移梁工艺初步方案设计时,可以根据轨索间的相对变形和实际工艺执行时的温度场来确定移梁小车的爬坡角。

表 1 B36 梁段移动过程中主缆挠度结果一览表
Tab.1 Deflection table of main cable during B36 section launching

项目	吉首岸(梁段移动过程重心到达位置)				
	入轨	1/8 点	1/4 点	3/8 点	跨中
吉首岸中跨 J14 吊点 本文计算值/mm	7.8	25.8	29.9	7.6	-11.8
吉首岸中跨 J14 吊点 实测值/mm	7.5	24.5	24.5	7.3	-11.2
中跨跨中本文计算值 /mm	7.2	2.9	-5.8	18.7	47.2
中跨跨中实测值/mm	6.5	3.0	-5.5	18.5	45.5
茶洞岸中跨 C15 吊点 本文计算值/mm	-0.4	-6.7	-10.7	-9.0	0.9
茶洞岸中跨 C15 吊点 实测值/mm	0.0	-7.5	-11.4	-10.5	1.0

表 2 B36 梁段移动过程中主缆力增量结果一览表
Tab.2 Force table of main cable during B36 section launching

项目	吉首岸(梁段移动过程到达位置)				
	入轨	1/8 点	1/4 点	3/8 点	跨中
吉首岸边跨本文 计算增量/kN	6.7	7.5	8.1	8.7	8.8
吉首岸边跨实测 增量/kN	5.1	5.9	6.3	6.9	7.1
茶洞岸边跨本文 计算增量/kN	6.5	7.2	7.8	8.2	8.3
茶洞岸边跨实测 增量/kN	5.8	6.4	7.0	7.7	7.8

表 3 B36 梁段移动过程中轨索索力结果表
Tab.3 Table cable force of rail cables during B36 section launching

项目	吉首岸(梁段移动过程到达位置)					
	设计值	入轨	1/8 点	1/4 点	3/8 点	跨中
吉首岸侧本文 计算值/kN	3.011	2.974	2.974	2.974	2.974	2.974
吉首岸侧实测 值/kN	3.011	2.995	3.011	3.009	3.016	3.011
茶洞岸侧本文 计算值/kN	3.440	3.440	3.440	3.440	3.440	3.440
茶洞岸侧实测 值/kN	3.440	3.447	3.447	3.447	3.447	3.444

表 4 B36 梁段在吊索 J14~J15 节间移动过程中轨索相对变形量
Tab.4 Relative deformation of rail cale during B36 section launching between sling J14 and sling J15

项目	吊索 J14~J15 节间(B36 梁段重心到达位置)		
	1/4 点	1/2 点	3/4 点
节间 1/4 点实测 增量/mm	12.9	13.7	11.3
节间 1/4 点本文 计算值/mm	13.1	13.9	12.1
节间中点实测 增量/mm	15.8	16.2	14.1
节间中点本文 计算值/mm	16.5	16.8	14.8
节间 3/4 点实测 增量/mm	12.5	12.8	11.0
节间 3/4 点本文 计算值/mm	12.8	13.0	11.6

5 结 论

分析了轨索移梁新工艺负载移梁过程的工作机理,建立了移梁体系力学分析模型,用多根直线索单元模拟移梁小车所在的轨索节段,其余轨索节段用直线索单元模拟,主缆节段采用分段悬链线模

拟,吊索用直线索单元模拟,并推导和分析了典型荷载工况作用下体系的内力和变形协调关系,最后建立和求解了方程。

结合轨索移梁体系整体缩尺模型,模拟移梁过程,测试了第一段梁从入轨到安装多个子工况下体系响应,并将理论分析结果与模型试验结果进行了对比分析,结果吻合良好。表明本文计算分析方法正确有效,能求解轨索移梁工艺双层索系移梁过程中整体受力和轨索局部变形问题,并可简化计算分析过程,计算精度和结果能够应用于类似工程的分析和求解,是一种适合于轨索移梁工艺负载状态下的计算分析方法。

参考文献(References):

- [1] 易继武,盛 希,张念来,等.矮寨特大悬索桥钢桁加劲梁架设方案研究[J].施工技术,2013,42(5):9-11. (YI Ji-wu, SHENG Xi, ZHANG Nian-lai, et al. Study on the erection of steel stiffening truss girder for Aizhai bridge [J]. *Construction Technology*, 2013, 42(5):9-11. (in Chinese))
- [2] 沈锐利,张丁盛,沈子钧.空中客车交通系统悬索结构的力学特性[J].土木工程学报,2004,37(4):13-18. (SHEN Rui-li, ZHANG Ding-sheng, SHEN Zi-jun. The mechanical properties of the suspension cable structure in aerobus transit system[J]. *China Civil Engineering*, 2004, 37(4):13-18. (in Chinese))
- [3] 沈锐利,闫 勇,唐茂林,等.轨索滑移法节段足尺模型试验设计与安装[J].桥梁建设,2013,43(1):15-22. (SHEN Rui-li, YAN Yong, TANG Mao-lin, et al. Design and installation of full-scale sectional model for testing of rail cable launching method[J]. *Bridge Construction*, 2013, 43(1):15-22. (in Chinese))
- [4] 闫 勇,沈锐利,唐茂林,等.轨索滑移法节段足尺模型试验研究[J].桥梁建设,2013,43(2):46-50. (YAN Yong, SHEN Rui-li, TANG Mao-lin, et al. Testing study of full-scale sectional model for rail cable launching method [J]. *Bridge Construction*, 2013, 43(2):46-50. (in Chinese))
- [5] 马碧波.悬索桥轨索运梁系统设计参数与误差影响研究[D].西南交通大学,2011. (MA Bi-bo. Research on Design Parameters and Error Effects of Track-Cable Erecting System for Suspension Bridge [D]. Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))
- [6] 颜东煌,潘 权.轨索移梁新工艺力学特性分析与试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(5):80-85. (YAN Dong-huang, PAN Quan. Force analysis and model test for new rail cable launching method under non-loading condition[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(5):80-85. (in Chinese))
- [7] Jayaraman H B, Knudson W C. A curved element for the analysis of cable structures[J]. *Computers and Structures*, 1981, 14(3):325-333.
- [8] 陈太聪,马海涛,苏 成.拉索静力状态的高精度无迭代求解方法研究[J].工程力学,2013,30(3):244-250. (CHEN Tai-cong, MA Hai-tao, SU Cheng. A study on the high accuracy of the static state of the cable without iterative method [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(3):244-250. (in Chinese))
- [9] Ren W X, Huang M G, Hu W H. A parabolic cable element for static analysis of cable structures[J]. *Engineering Computations*, 2008, 25(4):366-384.
- [10] 罗 斌,郭正兴,王永泉.基于初始平衡态的索段折线模型[J].建筑结构学报,2010,31(11):72-77. (LUO Bin, GUO Zheng-xing, WANG Yong-quan. Cable polygon model based on initial equilibrium state[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(11):72-77. (in Chinese))
- [11] 唐建民,赵 引,吴黎华.基于欧拉描述的两节点索单元非线性有限元法[J].上海力学,1999,20(1):89-94. (TANG Jian-min, ZHAO Yin, WU Li-hua. A eulerian geometrically non-linear finite element method with two-node cable element for the analysis of cable structures[J]. *Shanghai Mechanics*, 1999, 20(1):89-94. (in Chinese))
- [12] 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,2003. (TANG Mao-lin. 3D Geometric Nonlinear Analysis of Long-Span Suspension Bridge and Its Software Development[D]. Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese))
- [13] 严 琨,沈锐利.基于细长梁单元的悬索桥主缆线形分析[J].计算力学学报,2016,33(3):381-387. (YAN Kun, SHEN Rui-Li. Study on main cable shape of suspension bridge based on slender beam element[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(3):381-387. (in Chinese))
- [14] 刘树堂.等直杆单元切线刚度矩阵的精确分析方法[J].计算力学学报,2014,31(1):48-53. (LIU Shu-tang. Accurate analysis method on the tangential stiffness matrix of pinned straight rod element [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2014, 31(1):48-53. (in Chinese))
- [15] 包立新.高空悬挂运输系统的静-动力研究[D].西南交通大学,2007. (BAO Li-xin. Analysis of Aerobus Transportation System Static & Dynamic Behavior [D]. Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [16] 冯 剑.矮寨特大悬索桥缩尺模型设计研究[D].长沙理工大学,2010. (FENG Jian. The Research on Scale Model Design of Aizhai Suspension Bridge[D]. Changsha University of Science and Technology, 2010. (in Chinese))

Mechanical analysis and experimental research for rail cable launching technology about suspension bridge under loading condition

PAN Quan^{*}, YAN Dong-huang, XU Hong-sheng

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

Abstract: The key technical problems of the new technology of rail cable launching in the construction of long span suspension bridge are investigated by the theoretical research and laboratory model test. Based on the basic assumptions of flexible cable, the whole mechanical model of rail cable launching system under loaded condition is established, and equations for calculating the forces of the main cable, sling and rail cable etc. are derived. In the theoretical model, the rail cables for the segments with carrying-beam car are simulated by four straight line cable elements, while those for the other segments are simulated by one straight line cable element. Taking the Aizhai suspension bridge as engineering background, the whole reduced scale model of the rail cable launching system is designed and produced to simulate the moving process of the beam. And the system responses of the beam segment are tested on the sub-working conditions from entering-rail to installing. The theoretical and experimental results match well with each other, which verifies the accuracy and effectiveness of the presented theoretical method. And it can solve the systematic global mechanical analysis and local deformation for the rail cable launching technology under loaded condition in the process of the moving beam. This method also can simplify the calculation, and its accuracy and the results can be used to analyse and solve engineering problems, which is suitable for the studies on the rail cable launching technology under loaded condition.

Key words: suspension bridges; stiffening girder construction; rail cable launching technology; mechanical analysis; model test

引用本文/Cite this paper:

潘 权, 颜东煌, 许红胜. 悬索桥负载移梁过程静力学分析与试验研究[J]. 计算力学学报, 2017, 34(4): 474-479.

PAN Quan, YAN Dong-huang, XU Hong-sheng. Mechanical analysis and experimental research for rail cable launching technology about suspension bridge under loading condition[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, 34(4): 474-479.