

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.02.015

深中通道伶仃洋大桥猫道计算方法研究

范传斌¹, 李 冕^{2,3,4}, 田 浩²

(1. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510623;

2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430014;

3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430014;

4. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100011)

摘要: 深中通道伶仃洋大桥为主跨1 666 m的三跨全漂浮体系钢箱梁悬索桥, 上部结构施工采用三跨连续式猫道作为空中施工平台, 采用12根(强度1 960 MPa, 直径54 mm)的钢丝绳做猫道承重索, 全线共设置17道横向通道及53道猫道门架, 猫道索与主缆中心距1.8 m。为保证上部结构施工的安全及便利, 需要准确计算承重索无应力索长及各关键工况的索力大小及变形情况。而大跨度柔性索结构存在大变形和几何非线性特点, 猫道线形变化复杂, 线形分析的精度和效率都不容易保障。针对这一特点, 通过解析法、Midas/Civil、Ansys这3种计算方法对比计算, 以分段悬链线为基础, 以力学平衡条件和变形相容为约束条件, 利用最小二乘法进行了迭代来确定猫道线形。解析法采用分段悬链线计算模式, 迭代后的误差精度可以控制到1.13 mm。有限元模拟时, Midas采用先简化计算, 单侧仅建立单根索、面积为猫道索、门架索、扶手索的总面积, 再按刚度分配原则求解索力的方法; Ansys则建立了猫道索、门架索、扶手索及大小横梁等的整体有限元模型进行计算, 后期不再进行刚度分配。计算结果表明: 位移最大差值为5.9 cm, 索力最大差值为1.36 t、无应力索长最大偏差8 cm、伸长量最大偏差1.2 cm, 这3种方法计算结果接近, 均能满足猫道设计及施工的要求。

关键词: 桥梁工程; 计算方法; 解析法; 猫道结构; 悬索桥; Midas/Civil; Ansys

中图分类号: U445

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 02-0121-06

Study on Calculation Method of Catwalk of Lingdingyang Bridge on Shenzhen-Zhongshan Link

FAN Chuan-bin¹, LI Mian^{2,3,4}, TIAN Hao²

(1. Guangdong Provincial Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510623, China;

2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan Hubei 430014, China;

3. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology of Transport Industry, Wuhan Hubei 430014, China;

4. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: The Lingdingyang Bridge on Shenzhen-Zhongshan Link is a 3-span full floating system steel box girder suspension bridge with a main span of 1 666 m. The 3-span continuous catwalk is used as the aerial construction platform for the superstructure construction, and 12 steel wire ropes (with strength of 1 960 MPa and diameter of 54 mm) are used as catwalk load-bearing cables. A total of 17 transverse channels and 53 catwalk gantries are set along the whole line, and the center distance between catwalk cables and main cables is 1.8 m. In order to ensure the safety and convenience of superstructure construction, it is necessary to accurately calculate the unstressed length of the bearing cable and the cable force and deformation under different key working conditions. However, the long-span flexible cable structure has the characteristics of

收稿日期: 2022-05-24

作者简介: 范传斌 (1973-), 男, 安徽含山人, 高级工程师. (564448142@qq.com)

large deformation and geometric nonlinearity, and the geometric shape of the catwalk changes complicatedly, so its accuracy and efficiency analyses are not easy to guarantee. In view of this feature, the comparative calculations are carried out by using analytical method, Midas/Civil and Ansys. Based on the segmented catenary, taking the mechanical equilibrium condition and deformation compatibility as constraints, the geometric shape of the catwalk is determined iteratively by using the minimum dichotomy. The analytical method adopts the segmented catenary calculation mode, and the error accuracy after iteration can be controlled to 1.13 mm. During the finite element simulation, Midas adopted the method of simplifying the calculation first, establishing only single cable on one side, the area of which is the total area of catwalk cable, gantry cable and handrail cable, and then calculating the cable force according to the stiffness distribution principle. Ansys established the overall finite element model of catwalk cable, gantry cable, handrail cable and large, and small beams for calculation, and will not conduct stiffness distribution in the later stage. The calculation result shows that the maximum difference of displacement is 5.9 cm, the maximum difference of cable force is 1.36 t, the maximum deviation of unstressed cable length is 8 cm, and the maximum deviation of elongation is 1.2 cm. The calculation results obtained by the 3 methods are close, which can meet the requirements of catwalk design and construction.

Key words: calculation method; bridge engineering; suspension bridge; analytic method; catwalk structure; finite element; Midas/Civil; Ansys

0 引言

深中通道东起机荷高速,跨越珠江口,西至中山马鞍岛,全长 24.03 km,跨海段长 22.39 km,是集“桥、岛、隧、地下互通”为一体的系统集群工程。伶仃洋大桥作为其主通航孔桥,是

1 座跨径为 (580+1 666+580) m 的两塔三跨钢箱梁全漂浮体系悬索桥,其混凝土主塔高度+262.5 m,塔顶控制 IP 点+265.95 m,跨中点空缆标高+106.14 m,边跨锚碇散索鞍散索点高程+48.4 m,边跨跨中控制点标高为+136.84 m^[1-3],如图 1 所示。

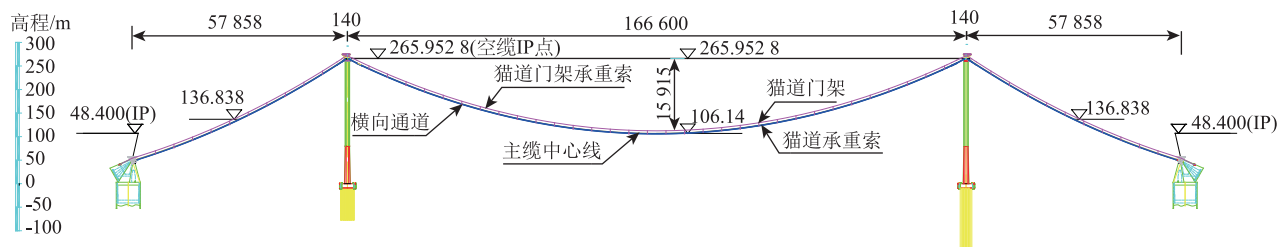


图1 伶仃洋大桥桥型布置图(单位:cm)

Fig.1 Layout of type of Lingdingyang Bridge (unit: cm)

伶仃洋大桥为三跨连续式猫道,猫道宽度 4.5 m,扶手立柱高度 1.5 m,底部设置 12 根猫道承重索 ($\phi 54$ mm, 1 960 MPa, $6 \times 37S+IWR$),侧面各设置 1 根扶手索 ($\phi 36$ mm, 1 870 MPa, $6 \times 37S+IWR$), 2 根防护绳 ($\phi 22$ mm, 1 870 MPa, $6 \times 37S+SF$),猫道门架设置 2 根门架承重索 (54 mm, 1 960 MPa, $6 \times 37S+IWR$),猫道底网为双层面网,底层面网直径 5 mm,孔距 50×70 mm,表层面网直径为 2 mm,孔距为 25×25 mm,侧网钢丝直径 5 mm,孔距 50×100 mm。人行道位置设置 5×5 cm 防滑木条,间距 50 cm。大小横梁均为方钢,截面尺寸分别为 $80 \times 80 \times 4$ mm, $50 \times 50 \times 4$ mm,全线考虑双线

往复式牵引系统,进而在猫道面层上布置 2 列主缆托轮。同时伶仃洋大桥位于宽阔海域,其抗风性能要求较高,因此全桥共设置 17 道横向通道,间距 150 m,共设置门架 53 道,门架高度 7 m,门架间距 50 m。

猫道作为悬索桥上部结构施工的主要施工平台,其结构线性对施工效率和施工安全起着关键性作用。同时猫道贯穿上部结构所有施工阶段,一直持续至主梁架设完成,其周期很长,且悬索桥各施工阶段猫道线形的要求均不一样,这就需要在前期充分考虑猫道荷载和非线性特性,对猫道线形进行精确的分析计算,设计较为合适的猫道线形,并确定猫道

索的无应力长度和锚固系统的调节量,以保证上部结构各施工阶段的顺利实施。

1 猫道荷载及计算工况

1.1 猫道荷载

猫道荷载中自重占比较大,结构自重主要包括:猫道索、猫道面网、防滑木条、大小横梁、扶手立柱、猫道门架、变位钢架、横向通道、主缆托轮、电缆照明系统;除此之外的其他荷载主要包括:2根架设索股自重、风荷载(20.7 m/s, 43 m/s)、人群荷载、温度荷载(按 $\pm 15^\circ$ 考虑)、下拉装置下拉力等。

1.2 计算工况

猫道结构计算工况主要分为5种工况:(1)猫道恒载作用下,安全系数 ≥ 3.2 。(2)猫道恒载+索股施工荷载作用下,安全系数 ≥ 2.7 。(3)猫道恒载+索股施工荷载+温度荷载(按 $\pm 15^\circ$ 考虑),安全系数 ≥ 2.7 。(4)猫道恒载+索股施工荷载+施工阶段风荷载(按正常风速计算),安全系数 ≥ 2.7 。(5)猫道恒载+台风荷载,安全系数 ≥ 2.5 。

2 猫道结构计算

为了对5种工况下猫道结构的应力、变形以及线形情况进行准确的分析,分别采用解析法、Midas/Civil和Ansys有限元模型进行了对比计算^[4]。

2.1 解析法计算

(1) 假设条件及计算方法

对于大跨度悬索桥来说,猫道索由于其抗弯刚度较低完全可以当成柔性索来考虑,且其在外荷载下索自身横截面积变化较小,可忽略不计,猫道线形一般为悬链线,但对于具有较多较大集中荷载(猫道门架、横向通道、变位钢架等)的猫道结构来说,分段悬链线更符合实际情况,索段微分单元如图2所示。

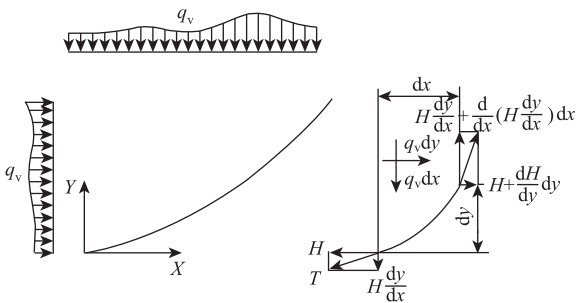


图2 索段微分单元

Fig. 2 Differential element of cable segment

因此该索段微分单元满足以下几点规律^[5]:(1)索的张力 T 只能沿着索的切线方向。(2)在 X 方向、

Y 方向上都应满足力的平衡, $\sum X = \frac{dH}{dy}dy + q_x dy =$

0, $\sum Y = \frac{d}{dx}\left(H \frac{dy}{dx}\right)dx - q_y dx = 0$ 。(3)悬索桥计算

中,水平分布荷载为 $q_x=0$ 。(4)对于中跨两侧塔高相等,其微分单元高差之和 $\sum c_i=0$ 。(5)对于有集中荷载的位置其平衡方程应该为 $H y'_{i+1}|_{x_{i+1}=l_{i-1}} - H y'_i|_{x_{i+1}=0} = P_{i-1}$ 。(6)对于中跨和边跨来说,两段索力在塔顶位置应该相等。(7)分段悬链线求解时应采用二分法进行迭代计算,直至满足精度要求。(8)猫道索的计算线形应以其恒载作用下平行于主缆线形,并间隔1.8 m为标准。

(2) 计算方法验算及结果

为验算计算精度,首先将索股空缆状态利用分段悬链线二分迭代后求出各点坐标,然后与悬链线公式 $\left(y = -\frac{H}{q}ch\left(\frac{q_1 x}{H} - \alpha\right) + \alpha_1\right)$ 计算得到的线形进行对比,验证其二分迭代的精度是否能满足要求,对比计算的结果如图3所示。由图3可以看出,差值最大值为1.13 mm,其收敛性优异,完全能够满足计算需要。按照上述方法进行迭代计算,得到索股架设阶段单根猫道承重索最大索力为63.58 t,跨中最大位移为-1.926 m。

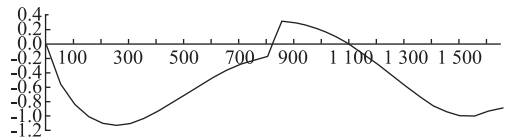


图3 二分迭代与悬链线公式坐标差值(单位:mm)

Fig. 3 Difference between coordinates of dichotomy iteration and catenary formula (unit: mm)

2.2 Midas/Civil 计算

大跨悬索桥猫道线形计算一般采用节线法,一般采用主边跨分别建模后再整合的方式^[6-7],为节省建模时间,采取将主边跨同时建立,然后对主边跨的关键节点进行约束,调整其主边跨线形的方式,建立Midas/Civil整体有限元模型如图4所示。

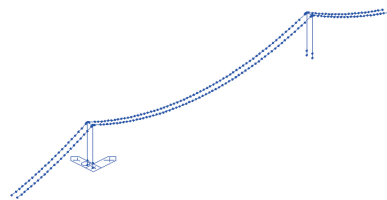


图4 Midas/Civil 整体有限元模型

Fig. 4 Midas/Civil finite element model

建模过程中的边界条件为将锚固点和塔底固结,释放塔顶纵桥向约束。计算过程中还应对索截面进行简化:(1)认为塔身刚度较大,不考虑猫道作用下塔顶纵桥向的偏位,只考虑主缆的偏位影响。(2)将猫道承重索、猫道门架承重索的总面积换算成单根索单元进行计算。(3)采用限制塔顶节点位移和垂点位移作为指定点的迭代约束。

进了包含平衡节点内力的非线性独立模型计算一次落架时的猫道线形和内力,直至恒载作用下的猫道线形与设计线形控制点坐标位移偏差满足设计要求后,在此基础上进行悬索桥倒拆分析,求得各控制工况下控制点的位移和索张力变化。按照上述方法进行迭代倒拆分析,得到索股架设阶段单根猫道承重索最大索力为 63.67 t,跨中最大位移为 -1.907 m。

2.3 基于 Ansys 的二次开发

猫道分析为非线性分析,猫道承重索、门架承重索、扶手索均采用 link10 单元模拟,门架和横向通道均采用 beam4 单元模拟^[8-10],整体猫道进行建模过程主要分为以下几步:(1)首先通过二分迭代逼近法求得空缆线形,空缆垂度势必要与给定的空缆垂度一致,经计算对比空缆状态的垂度误差在 1 mm 以内。(2)其次建立门架和横向通道,横向通道采用等刚度、等惯性矩的梁单元模拟,横向通道自重通过集中质量模拟。(3)将猫道面层等效重量和两根主缆的施工荷载平均分配给猫道承重索,采用均布荷载施加^[11-12]。与 Midas/Civil 的计算模型不一样的是 Ansys 采用 APDL 命令流形式进行建模,可以按施工步骤依次建立,通过假定空缆控制点标高,求解得到猫道恒载线形,将与设计线形的差值作为循环约束条件进行迭代求解,因此无需进行倒拆分析,Ansys 整体有限元模型如图 5 所示^[13]。按照上述方法进行迭代倒拆分析,得到索股架设阶段单根猫道承重索最大索力为 63.94 t,跨中最大位移为 -1.911 m。

2.4 计算结果对比

按(空缆)→(恒载)→(恒载+施工荷载)→(恒载+施工荷载+温度荷载)→(恒载+施工荷载+工作风荷载)→(恒载+台风荷载)6种工况时不同计算方法的计算结果进行汇总对比如下,跨中控制点位移及猫道索力变化值如表1所示^[14-15]。

由上表可以看出,各计算方法的计算结果相差较小,均能满足猫道施工精度的要求。3种计算方法的中跨(跨度1666m)猫道承重索无应力索长分别

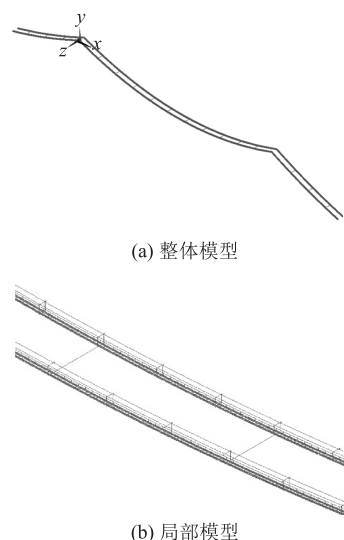


图5 Ansys有限元模型

Fig. 5 Ansys finite element model

表1 跨中控制点位移、索力变化

Tab. 1 Displacement and cable force changes at mid-span control point

工 况	跨中点位移及猫道承重索索力						备注
	解析法		Midas/Civil		Ansys		
	位移/m	索力/t	位移/m	索力/t	位移/m	索力/t	
1	5.208	29.28	5.206	29.27	5.386	29.33	空缆
2	0.001	54.08	0	54.14	0.063	54.56	恒载
3	-1.926	63.58	-1.907	63.67	-1.911	63.94	恒载+施工荷载
4	-2.544	63.30	-2.485	63.45	-2.537	63.73	恒载+施工荷载+降温
5	-1.335	64.01	-1.328	63.87	-1.282	64.59	恒载+施工荷载+工作风
6	22.12	66.62	22.89	66.43	20.81	67.79	恒载+台风荷载

为 1 695.388, 1 695.328, 1 695.308 m, 偏差在 8 cm 以内;恒载下的伸长量分别为 2.987, 2.990, 2.999 m, 偏差在 1.2 cm 以内,如图 6 所示。根据现场实测结果单根索股荷载时单根小拉杆的最大索力为 55.1 t,与计算值 58.83 t 较为接近^[16]。

同时针对实际过程中出现的索股架设时的偏载情况进行了分析,由于大小横梁的布置对索股荷载的布置在横桥向有着分担荷载的作用,同时托辊布置位置距离中间位置约 1 m 左右,偏载对猫道承重索索力影响较小,最大索力差值为 3 t。

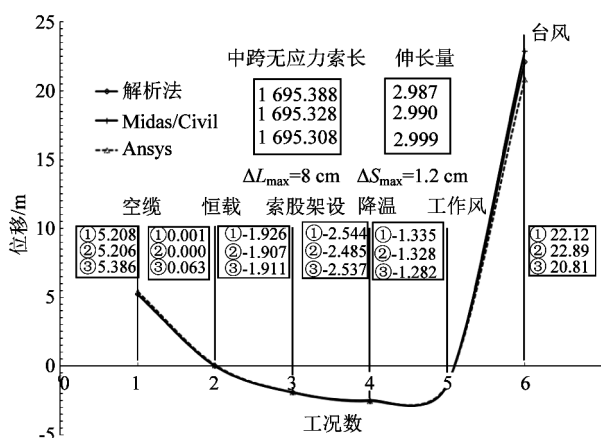


图6 跨中控制点位移变化曲线(单位:m)

Fig. 6 Displacement variation curve of control point at mid-span (unit: m)

根据风洞试验相关结果得到各个风攻角下的三分力系数(阻力系数、升力系数、扭矩系数)^[17-18],结合猫道结构自身的扭转角对风攻角进行修正,计算得到随着风速的增加,猫道跨中扭转角也在不断增大,在风速为100 m/s时,其跨中扭转角达到14.8°,并符合之前的变化规律,即此时猫道并未失稳,因此该猫道的极限风速应大于100 m/s。

3 结论

本研究依托伶仃洋大桥对猫道结构计算方法进行了研究,分别采用解析法、Midas/Civil、Ansys这3种计算手段进行对比计算分析,对各方法的精度和偏差进行了细致的描述,得到如下几点结论:(1)验证了解析法中的分段悬链线法的计算精度,最大偏差为1.13 mm。(2)验证了有限元方法边界条件和荷载施加的正确性。(3)3种方法位移计算结果最大差值为5.9 cm,索力最大差值为1.36 t、无应力索长最大偏差8 cm、伸长量最大偏差1.2 cm。截止到2022年1月18日,深中通道伶仃洋大桥猫道及牵引系统设计已全部完成,正在进行上部结构施工准备工作,通过以上3种猫道结构计算方法均能满足猫道结构设计和现场施工的要求,这对以后更大跨悬索桥猫道结构设计积累了经验,具有良好的借鉴意义。

参考文献:

References:

- [1] 黄厚卿,李冕,刘建波.深中通道伶仃洋大桥东锚碇筑岛围堰施工方案优化[J].桥梁建设,2020,50(6):104-109.
HUANG Hou-qin, LI Mian, LIU Jian-bo. Optimization of Construction Scheme for Cofferdam of East Anchorage of Lingdingyang Bridge on Shenzhen-Zhongshan Link [J]. Bridge Construction, 2020, 50 (6): 104-109.
- [2] 李冕,廖林冲.伶仃洋大桥东泄洪区非通航孔桥盖梁支架方案优化[J].公路,2021,66(11):138-143.
LI Mian, LIAO Lin-chong. Optimization of Cap Beam Support Scheme for Non-navigation Span Bridge in East Flood Discharge Area of Lingdingyang Bridge [J]. Highway, 2021, 66 (11): 138-143.
- [3] 李冕,李思吟,袁航.深中通道伶仃洋大桥东锚碇基坑开挖数值模拟及施工技术研究[J].公路,2021,66(10):130-134.
LI Mian, LI Si-yin, YUAN Hang. Research on the Numerical Simulation and Construction Techniques for the Excavation of the East Anchorage Foundation Pit of the Lingdingyang Bridge on Shenzhen-Zhongshan Link [J]. Highway, 2021, 66 (10): 130-134.
- [4] 白晓宏,李俊霖.重庆万州新田长江大桥猫道线形分析[J].公路,2021,66(12):177-181.
BAI Xiao-hong, LI Jun-lin. Analysis of Catwalk Alignment of Chongqing Wanzhou Xintian Yangtze River Bridge [J]. Highway, 2021, 66 (12): 177-181.
- [5] 邵旭东.桥梁设计与计算[M].2版.北京:人民交通出版社,2012.
SHAO Xu-dong. Bridge Design and Calculation [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [6] 何加江.武汉杨泗港长江大桥猫道设计[J].世界桥梁,2021,49(2):18-24.
HE Jia-jiang. Key Construction Technology of Super-long-span Catwalk of Yangsigang Changjiang River Bridge in Wuhan [J]. World Bridges, 2021, 49 (2): 18-24.
- [7] 卞佳,李元博,闫文亮.三跨连续式猫道施工阶段计算分析[J].公路交通科技,2018,35(增1):98-104.
BIAN Jia, LI Yuan-bo, YAN Wen-liang. Calculation and Analysis on Three-span Continuous Catwalk Construction during Construction Stage [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (S1): 98-104.
- [8] 唐茂林,曾前程,吴玉刚.猫道施工控制计算方法[J].公路,2018,63(5):157-161.
TANG Mao-lin, ZENG Qian-cheng, WU Yu-gang. Calculation Method for Catwalk Construction Control [J]. Highway, 2018, 63 (5): 157-161.
- [9] 张宇,方小林,刘晓升,等.伍家岗长江大桥猫道设计与施工[J].世界桥梁,2020,48(6):16-20.
ZHANG Yu, FANG Xiao-lin, LIU Xiao-sheng, et al. Design and Construction of Catwalks of Wujiagang Changjiang River Bridge [J]. World Bridge, 2020, 48 (6): 16-20.
- [10] 郭瑞,杨博,仝增毅,等.基于悬索桥空中纺线(AS)法架设主缆的猫道设计与施工关键技术[J].公路,2021,66(8):163-169.

- GUO Rui, YANG Bo, TONG Zeng-yi, et al. Key Technologies for Catwalk Design and Construction Based on Suspension Bridge Air Spinning (AS) method to Erect Main Cables [J]. Highway, 2021, 66 (8): 163-169.
- [11] 王强, 闫文亮, 宋冰. 大跨径悬索桥猫道架设控制技术 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (增1): 92-97.
- WANG Qiang, YAN Wen-liang, SONG Bing. Installation and Control Technology of Long-span Suspension Bridge Catwalks [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (S1): 92-97.
- [12] 伍艺. 重庆寸滩长江大桥主缆施工技术介绍 [J]. 公路交通技术, 2017, 33 (5): 82-87.
- WU Yi. Introduction of Main Cable Construction Technology for Chongqing Cuntan Yangtze River Bridge [J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33 (5): 82-87.
- [13] 刘家敏, 崔英明, 肖军, 等. 基于解析法的悬索桥上部结构施工控制程序开发 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2012, 31 (4): 760-763, 880.
- LIU Jia-min, CUI Ying-ming, XIAO Jun, et al. Construction Control Program Development for Superstructure Suspension Bridge Based on Analytical Method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2012, 31 (4): 760-763, 880.
- [14] 郭雪妍, 王超, 张恒心, 等. 潮河大桥悬索桥猫道设计与计算分析 [J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2017, 29 (1): 66-70.
- GUO Xue-yan, WANG Chao, ZHANG Heng-xin, et al. Design and Calculation Analysis of Catwalk of Chaohe Suspension Bridge [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science Edition), 2017, 29 (1): 66-70.
- [15] 宾熊, 屈加林, 曾杰. 驸马长江大桥猫道设计与施工技术 [J]. 公路, 2017, 62 (3): 110-116.
- BIN Xiong, QU Jia-lin, ZENG Jie. Design and Construction Technology of Catwalk of Fuma Yangtze River Bridge [J]. Highway, 2017, 62 (3): 110-116.
- [16] 郑大超. 至喜长江大桥猫道设计与施工 [J]. 世界桥梁, 2016, 44 (5): 16-20.
- ZHENG Da-chao. Design and Construction of Catwalk of Zhixi Changjiang River Bridge [J]. World Bridge, 2016, 44 (5): 16-20.
- [17] 张晨星. 悬索桥主缆施工中的静力特性及调控研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2021.
- ZHANG Chen-xing. Research on Static Characteristics and Regulation of Suspension Bridge Main Cable Construction [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2021.
- [18] 王迟. 悬索桥猫道合理线形计算优化及选型研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- WANG Chi. Study on Calculation Optimization and Type Selection of Reasonable Geometric Shape of Suspension Bridge Catwalk [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2019.
- ~~~~~
- (上接第 27 页)
- JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [10] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S].
- JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [11] JTG E42—2005, 公路工程集料试验规程 [S].
- JTG E42—2005, Test Methods of Aggregate for Highway Engineering [S].
- [12] 张智勇, 刘祖国, 方杨, 等. 废旧塑料在沥青路面中的应用 [J]. 国外建材科技, 2008, 29 (3): 29-31.
- ZHANG Zhi-yong, LIU Zu-guo, FANG Yang, et al. Application of Recycled Plastic in Asphalt Concrete Pavement [J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2008, 29 (3): 29-31.
- [13] 张争奇. 聚乙烯塑料改性沥青 [J]. 重庆交通学院学报, 2000, 19 (4): 30-32.
- ZHANG Zheng-qi. A Study on PE Modified Asphalt [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 2000, 19 (4): 30-32.
- [14] 秦亚萍. 聚乙烯及其共混物改性沥青的微观结构与流变性能研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019.
- QIN Ya-ping. Microstructure and Rheological Properties of Bitumen Modified by Polyethylene and Its Blend [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019.
- [15] 王淑华, 刘囡囡, 徐良军, 等. 直投式 SBS 改性沥青及其沥青混合料路面性能研究 [J]. 山东交通科技, 2019 (2): 26-31.
- WANG Shu-hua, LIU Nan-nan, XU Liang-jun, et al. Pavement Performance of Direct-cast SBS Modified Asphalt and Its Asphalt Mixture [J]. Shandong Transport Technology, 2019 (2): 26-31.
- [16] JTG 3450—2019, 公路路基路面现场测试规程 [S].
- JTG 3450—2019, Field Test Methods of Subgrade and Pavement for Highway Engineering [S].
- [17] JTG 5210—2018, 公路技术状况评定标准 [S].
- JTG 5210—2018, Highway Performance Assessment Standards [S].
- [18] JTG F80/1—2017, 公路工程质量检验评定标准 第一册 (土建工程) [S].
- JTG F80/1—2017, Inspection and Evaluation Quality Standards for Highway Engineering - Section 1 - Civil Engineering [S].