

文章编号: 1674—8247(2019)03—0038—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.04.008

# 大跨度连续梁悬臂灌注施工线形监控技术研究

刘 强

(中铁十六局集团第四工程有限公司, 北京 101400)

**摘 要:**蒙华铁路跨京广铁路特大桥中大跨度预应力混凝土连续梁采用单箱单室、变高度、变截面直腹板,施工工序和施工阶段较多。为确保梁体能够按设计及规范要求顺利合龙,文章利用有限元正装分析法进行模拟计算,计算出在各种外界因素影响下的梁体预拱度设置,然后通过实测数据与理论数据进行比较分析,对计算模型进行修正。通过施工线形监控、及时发现、及时调整,解决合龙前悬臂端竖向挠度的偏差,使得主梁轴线的横向位移不超过容许值,确保合龙后的梁体线形良好。

**关键词:**合龙; 监控; 竖向挠度; 位移; 线形

**中图分类号:**U445.1      **文献标志码:**A

## Research on Linear Monitoring Technology of Long-span Continuous Beam Cantilevered Construction

LIU Qiang

(The Fourth Engineering Co., Ltd., of China Railway 16th Bureau Group, Beijing 101400, China)

**Abstract:** The long span prestressed concrete continuous beam of Meng Hua railway across Jing Guang railway of adopts single box single room, straight webs with variable height and variable cross-section, and there are many construction procedures and stages. In order to ensure the beam body can successfully closed, according to the design and specification requirements, in this paper, the precamber setting of beam under the influence of various external factors is calculated by using finite element method, and then by comparing analyzing the measured data and theoretical data, the calculation model is modified. Through the construction linear monitoring, timely detection, timely adjustment, the deviation of the vertical deflection of the cantilever end before closure is solved, the transverse displacement of the main beam axis does not exceed the allowable value, the good alignment of the beam body after closure ensured.

**Key words:** closure; monitoring; vertical deflection; displacement; linear

大跨度预应力混凝土连续梁多采用对称悬臂施工,其各阶段施工过程复杂,影响因素较多,各阶段施工结构受力随约束条件、荷载作用和结构体系的变化而不断变化,导致桥梁连续梁结构的实际状态偏离设计值和理论计算值。因此,在大跨度悬臂连续梁施工

过程中必须实施严格的全过程施工控制,对桥梁的实际反应(线形、高程、应力等)进行线形监控,控制桥梁线形和结构内力等在规范和设计允许范围内,确保桥梁悬臂施工顺利合龙。

收稿日期:2018-11-01

作者简介:刘强(1983-),男,工程师。

引文格式:刘强. 大跨度连续梁悬臂灌注施工线形监控技术研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(4):38-43.

LIU Qiang. Research on Linear Monitoring Technology of Long-span Continuous Beam Cantilevered Construction [J]. High Speed Railway Technology,2019,10(4):38-43.

## 1 工程概况

蒙华铁路26标段位于蒙西-华中地区铁路煤运通道的中段、湖南省岳阳市,由北至南依次经过岳阳市建新农场、君山区、岳阳楼区和云溪区。

蒙华铁路26标段跨京广铁路特大桥梁体截面均为单箱单室、变截面、变高度箱梁,底板、腹板、顶板内侧局部加厚,均按直线线形变化,箱梁顶面宽度11.02~12.02 m,线间距4 m,箱梁顶宽11.02 m线间距5 m,箱梁顶宽12.02 m,线间距大于4 m,相应增加翼缘悬臂板长度,桥上部结构,如图1所示。曲线梁梁体沿左线中心线布置,左线中心线的展开尺寸为梁体对应轮廓尺寸,位于曲线段时,以左线中心线为基准线沿径向依据曲率对梁体轮廓、普通钢筋、预应力钢束及管道等进行相应的调整。本桥采用挂篮悬臂施工,虽然悬臂施工方法优点多,但是这类桥梁的建造需经过一个复杂的过程,当跨数较多,跨径较大时,为保证两悬臂端合龙前竖向挠度偏差不超过容许范围<sup>[1]</sup>,须对该类桥梁悬臂灌注施工线形进行严格监控<sup>[2]</sup>。

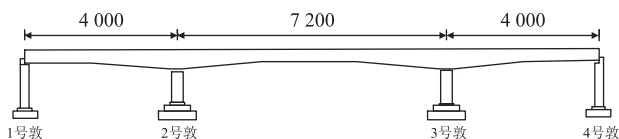


图1 跨京广铁路特大桥(40+72+40)m上部结构图(cm)

## 2 大跨度连续梁悬臂浇筑施工线形监控应用

随着交通运输业的快速发展,大跨度桥梁建设的不断涌现,挂篮悬臂浇筑法在大跨度预应力混凝土连续梁施工中的应用越来越广泛。大跨径预应力混凝土连续梁施工过程受挂篮自重、风力、施工荷载、变形等因素的影响,使得桥梁线形的控制难度增大。为确保两悬臂端梁体合龙前轴线、高程误差及合龙后梁体各项指标控制符合规范、设计要求,主梁挠度等必须明确施工控制参数,并加强施工过程控制和管理,及时调整线形控制值参数,以确保桥梁施工过程中结构的安全可靠,并确保主梁成桥后的线形偏差在设计允许范围内<sup>[3]</sup>。

### 2.1 施工监控的必要性

桥梁设计和施工方法的科学合理性是影响桥梁几何线形和结构内力状态的主要因素,施工过程中如何加强管理和控制是桥梁施工的关键问题。首先,在施工前应取得设计应力状态和几何线形,同时,在施工控制中取得桥梁长期监测原始数据,这也是桥梁运营监

测的起点。

尽管设计时已考虑了悬臂浇筑的预应力混凝土连续梁的施工,但是实际施工中还会有设计无法精确把握的因素出现,如混凝土徐变收缩、材料弹性模量、施工荷载、有效预应力大小、挂篮重量的取值和温度变化对结构的非线性影响、设计计算与实际施工阶段及相应的外部条件存在差异等。为使桥梁建造成型后达到设计要求,施工过程必须严格监测,并对监测结果进行分析比较,从而对施工过程进行相应调整,使桥梁结构状态达到施工与设计一致。

### 2.2 施工监控基本理论

对跨京广铁路特大桥(40+72+40)m重点进行梁体线形监控。监控采用最小二乘法进行结构参数调整、估计。

#### (1) 悬臂施工阶段控制特点

悬臂施工阶段连续梁桥是静定结构,成桥后内力偏离设计值(合龙过程中如不施加额外压力)一般不会偏离太多,因此,施工要严格控制连续梁主梁线形<sup>[4]</sup>。若施工梁段出现误差,只能对预备预应力束张拉进行调整,这种调整手段对梁体受力不利,允许调整量也有限。因此,线形误差一旦出现,将会永远存在,已施工梁段的残余误差只能通过调整未施工梁段的立模标高来解决,对于残余误差较大的,需经过多个梁段的调整才能完成。

综上所述,控制连续梁悬臂浇筑施工标高的特点,在于无法调整已完梁段的误差,正装模拟计算的立模标高影响未完梁段,与已完梁段误差基本无关。因此,下半环自适应施工控制原理,对反馈计算连续梁施工控制量一般不起作用。而上半环实际施工过程与计算模型计算出的预报标高是否吻合,对计算模型及参数估计的修正尤为重要。自适应施工控制基本原理,如图2所示。

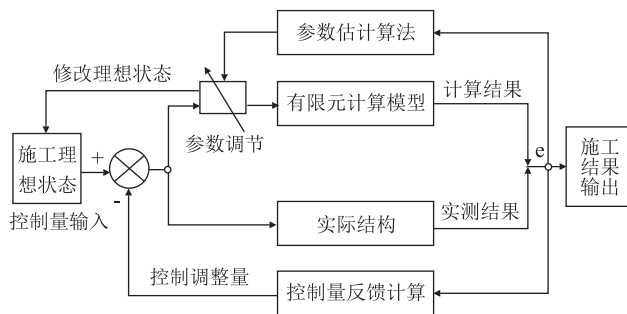


图2 自适应施工控制基本原理示意图

#### (2) 自适应施工控制系统

预应力混凝土连续梁在有限元计算模型中的计算参数取值,是影响结构受力的重要因素。计算模型中

的参数取值根据施工实测的结构反应进行修正,自适应结构的物理力学规律须在实际结构与计算模型磨合一段时间后,在自适应控制系统闭环反馈控制的基础上,再辨识一个系统参数,能使控制调整量更为精确。

桥梁悬臂浇筑施工中,主梁墩顶附近线刚度大、变形小,因此,自适应控制思路在全桥线形初期控制对参数不准确带来的误差影响较小。施工多节段后,不断的修正计算参数来调整跨中变形较大的节段,可为全桥施工控制营造良好条件<sup>[5]</sup>。

### 3 桥梁施工线形控制分析

#### 3.1 施工控制方法

每个阶段的变形计算和受力分析是连续梁悬臂灌注施工的基本分析手段,施工过程复杂需经过结构体系转化。为确保桥梁结构受力和线形符合设计要求,须在各阶段施工对桥梁受力状态和变形情况进行预测和监控<sup>[6]</sup>。确定桥梁各阶段结构状态需采取合理的理论分析和计算方法,针对桥梁实际情况,施工控制结构分析采用正装分析法和倒退分析法。

(1)正装分析法是施工实际加载顺序对桥梁结构变形和受力分析的一种方法,该方法不仅能较好地模拟出各施工阶段的位移和受力状态,还能为桥梁施工控制提供了依据。正装分析法不仅为成桥结构的受力提供精确数据,还为结构刚度和刚度验算提供依据。

(2)倒退分析法是按照桥梁结构进行倒拆前进分析的逆过程,分析剩余结构在每个施工阶段的影响。假设  $t = t_0$  时刻,成桥结构内力分布前进分析  $t_0$  时刻的结果满足要求,轴线符合设计线形要求,各阶段内力状态、结构位移便是该阶段结构的理想施工状态。对各阶段理想状态和实际状态进行偏差调整、误差分析,最终控制全桥形态和受力特性。

#### 3.2 计算模型及分析方法

桥梁前期计算根据设计图纸提供的施工步骤进行,按照设计提供的结构自重系数、横隔板重量、收缩徐变系数、摩阻系数等参数进行计算,并与设计结果做对比,准确计算分析模型,考虑成桥运营阶段收缩徐变梁体产生的累计位移。

在施工中,结构计算模型按照实际的结构参数进行跟踪计算修正,使实际发生位移与结构预测位移相吻合。桥梁空间构模计算分析采用有限元程序软件,运用正装迭代分析方法对施工架设过程进行模拟计算分析,结构计算模型,如图3所示。

#### 3.3 立模标高的确定

为确保主梁线形平顺、满足设计要求,主梁悬臂浇

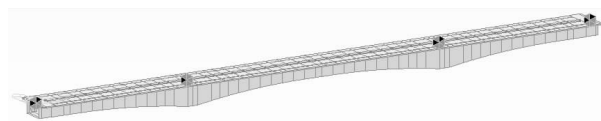


图3 结构计算模型

筑需对梁段立模标高严格控制。在确定立模标高时,充分考虑桥面线形控制的实际因素,施工时严格控制,最终达到良好效果。

预留一定量的预拱度可抵消施工产生的各种变形,同时也可解决立模标高与桥梁设计建成后标高不相等的问题,其计算公式如下:

$$H_{lmi} = H_{sji} + \sum f_{1i} + \sum f_{2i} + f_{3i} + f_{4i} + f_{5i} + f_{gl} \quad (1)$$

式中:  $H_{lmi}$  ——  $i$  阶段的立模标高;

$H_{sji}$  ——  $i$  阶段的设计标高;

$\sum f_{1i}$  ——在  $i$  阶段自重引起的挠度在本阶段及后续施工阶段梁段总和;

$\sum f_{2i}$  ——在  $i$  阶段预应力在本阶段及张拉后续施工阶段产生的挠度;

$f_{3i}$  ——在  $i$  阶段挠度由混凝土收缩、徐变产生的;

$f_{4i}$  ——在  $i$  阶段挠度由施工临时荷载产生的;

$f_{5i}$  ——在  $i$  阶段取使用荷载产生 50% 的挠度;

$f_{gl}$  ——挂篮变形值。

#### 3.4 施工控制流程

桥梁施工控制的核心任务是对各种误差进行分析、识别、调整,预测未来结构状态,确保结构施工安全,保证结构外型美观、内力合理。桥梁结构内力和主梁标高在施工过程中必须进行双控<sup>[7]</sup>。施工控制按照预测→施工→量测→识别→修正→施工的过程循环。为控制结构内力和长期徐变挠度,施工中必须严格按规范操作。在施工中及合龙时梁体不具备调整能力是连续梁线形误差产生的原因,因此,在施工控制时及时发现误差产生原因是尽量减小误差发生的可能性的关键。

施工中误差的纠正措施有限,因此,采用自适应控制法对桥梁已完阶段的线形和不可控性进行控制,就显得尤为重要。当结构实测状态与模型计算结果不同时,通过计算模型参数调整,将误差输入到参数辨别算法中,使实测结果与模型输出结果一致,计算模型参数修正获取后,各阶段施工理想状态重新计算,从而反复识别各阶段施工过程,使计算模型基本与实际结构相吻合。跨京广铁路特大桥(40+72+40)m的自适应施工控制流程,如图4所示。

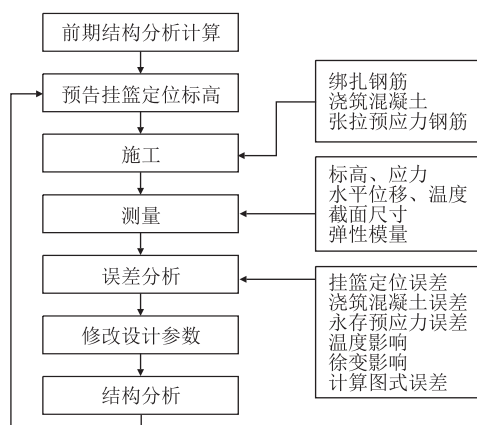


图4 跨京广铁路特大桥自适应施工控制方法流程图

## 4 线形监测

采用悬臂施工的连续梁,施工过程中对主梁线形进行控制,是确保梁体线形符合设计要求的一种措施。桥梁合龙困难的主要原因在于各施工节段每个结点坐标位置的变化与偏离。根据施工进度安排制定对应的施工控制工作程序,使各个施工控制步骤程序化。

### 4.1 位移测点布置

成桥线形控制的依据来源于挠度观测资料,线形监测设在各阶段预应力混凝土连续梁断面端部,如图5所示。



图5 桥梁线形监测测点示意图

顶板设计标高的控制需在0号块件上布置高程测点,该点同时也作为悬浇阶段高程观测基准点。在每个0号块顶板各布置9个高程观测点,如图6所示。

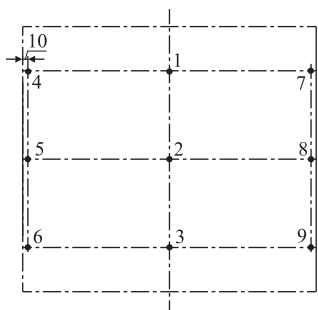


图6 0号块顶板高程观测点布置示意图

桥梁悬浇阶段每个监测断面高程观测点都是对称布置的,如图7所示。标高测点顶部由磨平 $\phi 16$ 的圆钢制作,用红油漆作为标记,并露出顶板2~3 cm。不仅可测量梁体挠度,还可测量梁体扭转变形。

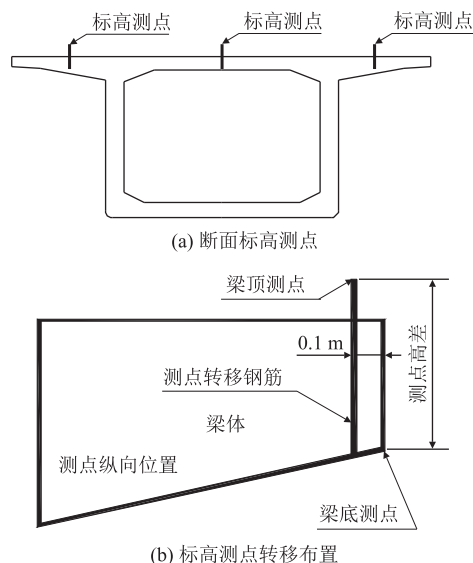


图7 高程观测点布置示意图

测点布置原则:①尽量靠近腹板;②测点距离端部梁段10 cm;③不妨碍施工和挂篮行走、固定等;④容易保护;⑤测点尽量设置在挂篮内侧,减少测量工作量,全部测点的高程尽可能架设一次仪器即可测试完成,以减少转仪器产生的误差。

### 4.2 观测时间与项目

为减小温度对观测的影响,挠度安排在温度相对恒定的时间段测量,根据施工进度安排制定每个施工阶段的变形测试时间。施工观测主要内容有:①混凝土浇筑前各阶段高程测量;②混凝土浇筑后、预应力张拉前各阶段高程测量;③预应力张拉后、挂篮行走前各阶段高程测量;④挂篮行走后各阶段高程测量;⑤测量挂篮拆除后、边(中)跨合龙前高程测量;⑥最终成桥前高程测量。

### 4.3 控制网的建立与复测

0号块梁顶面高程控制点采用检校后的钢尺和电子水准仪引入,并做好标记和保护。采用该点作为施工期后视基准点进行梁顶高程测量。基准点在每一墩顶至少布置2个,每次测试前应先对基准点进行相互校核。

### 4.4 轴线偏移测量

在墩顶梁面中心架设全站仪,基准线以视线为基准,后视另一墩顶梁面中心,小钢尺放置在梁前端中心标记处,使梁端中心点与钢尺基准点重合,轴线偏移值直接读取仪器钢尺读数。

### 4.5 墩顶沉降和水平位移测量

连续梁2个站点布设在两端,采用全站仪测量出梁体水平位移、墩顶沉降,墩顶空间坐标值需先测量出



墩顶测点的三维坐标,再换算成水平位移值和标高。测试值与初始值的差值是每一测试工况变位产生的。初始值是自由状态下主墩刚建完后在无日照影响、气温恒定时的测量值。

#### 4.6 调查大气温度对主桥线形影响

大气温度对主桥线形影响较大,为便于设计人员在施工初期、施工中期和施工末期精确定出施工架设阶段的主要技术参数,须对大气温度进行调查。各选2个阴晴或冬夏气温变化较大的工作日,24 h连续对各测点的主墩和主梁线形变化进行测量,白天每2 h测量1次,夜晚每4 h测量1次,桥梁悬臂端合龙前进行24 h连测,从而找出桥梁线形受大气温度的影响规律。

### 5 误差分析与识别

对施工阶段监测得到的位移与理论值进行误差分析,分析误差产生的原因。根据本阶段结果进行下一阶段的误差预测、调整以及报告预制梁段架设标高施工状态等。主要对施工阶段以下几个方面进行误差分析和整理记录。

#### (1) 梁体位移误差分析

梁体竖向和扭转位移在各施工阶段混凝土浇筑及预应力张拉后出现,竖向位移对比如图8所示。

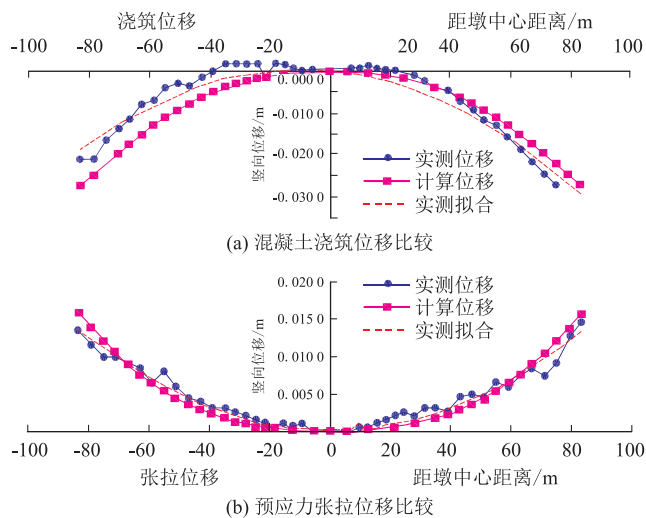


图8 施工阶段位移比较图

在完成标高测试后,梁体扭转可由两端标高测点的变形差值求出,对梁体各阶段的扭转情况进行统计,并与理论值相比较。

#### (2) 梁体实际位置与理想位置比较

施工完成后,各阶段梁体的理想位置合龙误差在1 cm范围内,成桥后梁底标高误差在1.5 cm范围内

时,可采用倒退分析法分析,实际线形表示实际位置、设计线形表示理想位,施工阶段梁体线形如图9所示。

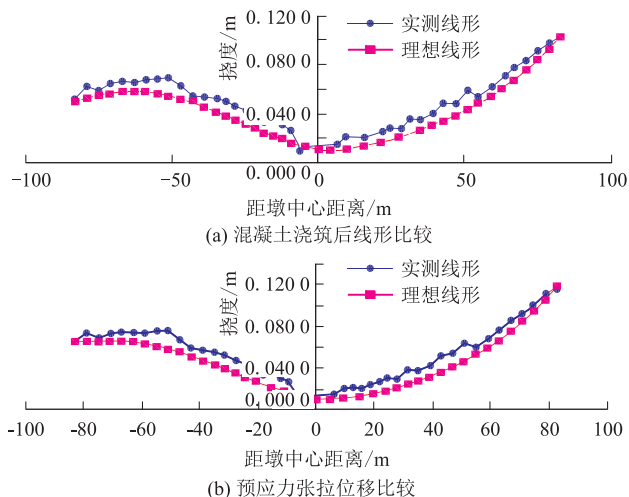


图9 施工阶段梁体线形

#### (3) 理想线形与成桥线形比较

桥梁施工完成后,对成桥平面位置及梁部标高进行测量,并与理想成桥位置对比,平面位置由设计水平位置与实测水平位置的误差值来表示。成桥后全桥线形分析如图10所示。

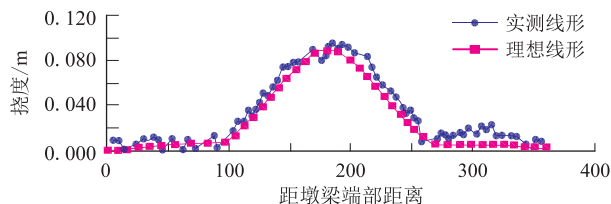


图10 成桥后全桥线形分析图

### 6 结论

大跨度预应力混凝土连续梁桥分阶段悬臂浇筑,是目前铁路桥梁施工的一种常见方法,受施工过程复杂性以及混凝土材料性质、环境条件的非确定性,对桥梁合龙和桥梁线形的影响,须确定和调整立模标高、优化合龙方案数据。为确保桥梁建成后结构内力和线形满足设计要求,本文通过对桥梁施工期间应力测量、挠度监测、施工过程的仿真计算三方面的线形监测,用理论数值与实际检测数值作比较,排除不良因素,从而更为精确地认识桥梁真实情况,提高稳定系数,确保设计施工安全性、可靠性<sup>[8]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 韩红春. 大跨度预应力混凝土连续梁桥悬臂施工控制研究与实践 [D]. 成都:西南交通大学,2007.

- HAN Hongchun. Research and Practice on Construction Control of Long-span PC Continuous Beam Bridge by Cantilever Casting [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [2] 姜伟. 大跨度连续梁施工和线型控制技术[J]. 铁道建筑, 2010, 50(1): 92-94.
- JIANG Wei. Long-span Continuous Beam Construction and Linear Control Technology[J]. Railway Construction, 2010, 50(1): 92-94.
- [3] 张国碧. 大跨度铁路桥连续梁线形监控的研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2012.
- ZHANG Guobi. Research on Linear Monitoring of Continuous Beam of Long-span Railway Bridge [D]. Beijing: North China University of Technology, 2012.
- [4] 丁晖东. 大跨度预应力混凝土连续梁桥施工控制[J]. 甘肃科技学报, 2013, 25(3): 116-119.
- DING Huidong. Construction Control of Long Span Prestressed Concrete Continuous Girder Bridge[J]. Journal of Gansu Science and Technology, 2013, 25(3): 116-119.
- [5] 陈明山. 大跨度连续梁桥悬臂施工线形控制实施方案[J]. 工程建设, 2011, 25(4): 540-542.
- CHEN Mingshan. Implementation Scheme of Linear Control for Cantilever Construction of Long Span Continuous Beam Bridge[J]. Engineering Construction, 2011, 25(4): 540-542.
- [6] 艾晓东, 何志勇. 预应力混凝土连续梁悬臂法施工应力监测[J]. 铁道标准设计, 1999, 43(Z1): 16-19.
- AI Xiaodong, HE Zhiyong. Cantilever Method Construction Stress Monitoring of Prestressed Concrete Continuous Beam [J]. Railway Standard Design, 1999, 43(Z1): 16-19.
- [7] 周大勇. 大跨度连续梁施工线形控制技术探讨[J]. 绿色科技, 2011, 49(12): 214-217.
- ZHOU Dayong. Discussion on Linear Control Technology for Long-span Continuous Beam Construction [J]. Green Technology, 2011, 49(12): 214-217.
- [8] 向木生, 刘志雄, 张开银, 等. 大跨度预应力混凝土桥梁监测监控技术研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(4): 52-56.
- XIANG Musheng, LIU Zhixiong, ZHANG Kaiyin, et al. Large-span Prestressed Concrete Bridge Monitoring and Control Technology Research [J]. Highway Traffic Technology, 2002, 19(4): 52-56.
- (编辑: 赵立红 苏玲梅)

(上接第28页)

- [9] 周荣军, 陈国星, 李勇, 等. 四川西部理塘-巴塘地区的活动断裂与1989年巴塘6.7级震群发震构造研究[J]. 地震地质, 2005, 27(1): 31-43.
- ZHOU Rongjun, CHEN Guoxing, LI Yong, et al. Research on Active Faults in Litang-batang Region, Western Sichuan Province, and the Seismogenic Structure of the 1989 Batang M6.7 Earthquake Swarm [J]. Seismology and Geology, 2005, 27(1): 31-43.
- [10] 中铁二院工程集团有限责任公司. 川藏线泸定至江达段活动断裂分布概况及线路方案可行性评价报告[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2010.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Distribution of Active Fault and Feasibility Evaluation Report of Route Scheme in Luding-Jiangda section of Sichuan-Tibet Railway [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2010.
- [11] 李渝生, 黄超, 蒋良文, 等. 川藏铁路金沙江结合带地壳构造动力学效应[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 1-5.
- LI Yusheng, HUANG Chao, JIANG Liangwen, et al. The Crustal Tectonic Dynamic Effects of Jinshajiang Combination Zone of Sichuan-Tibet Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(11): 1-5.
- [12] TANG Maoyun, LIU Zengjing, Hoke Gregory, et al. Paleoelevation Reconstruction of the Paleocene-Eocene Gonjo Basin, SE-central Tibet [J]. Tectonophysics, 2017, 712: 170-181.
- [13] HOU Zengqian. The Himalayan Yulong Porphyry Copper Belt: Product of Large-scale Strike-slip Faulting in Eastern Tibet [J]. Economic Geology, 2003, 98(1): 125-145.
- [14] 王力伟. 静态库仑应力触发计算参数敏感性分析及应用研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2010.
- WANG Liwei. Sensitivity Analysis and Application of Static Coulomb Stress Triggering Calculating Parameters [D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting of China Earthquake Administration, 2010.
- [15] GB 50111-2001 岩土工程勘察规范[S].
- GB 50111-2001 Code for Investigation of Geotechnical Engineering [S].
- (编辑: 刘会娟 张红英)