

不同大跨高铁连续梁悬臂施工变形研究

谢明志¹,杨永清¹,李晓斌¹,武兆驰²

(1. 西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031;

2. 中国中铁四局集团二工程有限责任公司,江苏 苏州 215131)

摘要 目的 探明不同特大跨度高铁连续梁桥悬臂施工变形规律. 方法 以新建成都至贵阳客运专线(60+100+60)m、(68+120+68)m、(74+136+74)m特大跨度连续梁为背景,基于有限元数值模拟并以实测数据为依托,采用Midas/Civil软件,进行线形参数敏感性研究、恒活载作用主梁变形及预拱度分析、施工方法对大悬臂变形及成桥累计位移的影响,并与实测值对比分析. 结果 预应力效应及主梁自重是影响线形的主要因素,其次是混凝土弹模及收缩徐变;中跨活载挠跨比约为1/3 300~1/2 700,是边跨的3~3.9倍,恒载下呈现边跨下挠、中跨上翘趋势;且合龙顺序、现浇段长度、墩梁临时固结拆除时间、临时荷载对结构变形影响大. 结论 先边后中合龙以及墩梁临时固结在全桥合龙后拆除可有效改善结构变形,降低线形控制风险. 实测数据与理论结果吻合高,反映结构变形规律,挠度比可作为桥梁跨越能力的指标参数.

关键词 桥梁工程;大跨连续梁;高速铁路;悬臂施工;线形变化规律;合龙顺序

中图分类号 TU745.2;U448.13;U448.21+5

文献标志码 A

Deformation Analysis of Cantilever Construction of Different Long-span Continuous Girder Bridges for High-speed Railway

XIE Mingzhi¹, YANG Yongqing¹, LI Xiaobin¹, WU Zhaochi²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. The Second Engineering Limited Liability Company, China Railway No. 4 Engineering Group Co. Ltd., Suzhou, China, 215131)

Abstract: In order to study the deformation law of different long-span continuous girder bridges for Passenger Dedicated Line, the (60+100+60)m, (68+120+68)m, (74+136+74)m total of four super long-span prestressed continuous beam bridges on the newly-built Chengdu-Guiyang Passenger Dedicated Line were taken as a case-study. According to the numerical analysis, the finite element models were set up, and sensitivity analysis of parameters was especially carried out. Besides, the deformation and pre-camber of main girder under dead load and live load were analyzed, as well as the influence of the construction method on the deformation of large cantilever

收稿日期:2018-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51508474);教育部“春晖计划项目”(Z2014034)

作者简介:谢明志(1985—),男,博士研究生,主要从事桥梁结构空间行为及损伤识别方面研究.

and the cumulative displacement upon completion state, comparing with the measured values. The results reveal that prestressing and concrete bulk are the key factors affecting the geometric linear, followed by the concrete elastic modulus and creep and shrinkage. The deformation in mid-span is about $1/3$ 300 to $1/2$ 700 of the main span under the static live load, which is 3 to 3.9 times of side-span. Besides, the deformation trend in side-span is downward compared with the upward deformation in mid-span. Structural deformation are greatly influenced by the closure sequence, the length of side span cast-in-place section, removal time of temporary rigid fixity of pier and main girder and the temporary load. The scheme of closing side span firstly, then followed by the central span and the removal of temporary rigid fixity of pier and main girder after the whole bridge closure can effectively improve the structural deformation, reducing the linear control risk. Construction experience indicates that the theoretical calculation is in well accordance with the field results, and the results can reflect the law of structural change. Finally, it is proposed that the deflection ratio can be used as the index parameter for bridge spanning capacity.

Key words: bridge engineering; long-span continuous beam bridge; high-speed railway; cantilever construction; linear variation law; closure sequence

随着高速铁路蓬勃发展建设,连续梁呈现大跨发展趋势^[1].大跨高铁桥梁技术要求高、变形控制严、信息化发展快^[2],且跨度增大使结构体系计算难度增加的同时,悬臂施工面临的困难及影响结构变形的因素也随之增多,如何保障施工及成桥安全可控、结构变形及受力合理、运营舒适性是设计和施工人员面临的重要问题之一^[3].针对客运专线连续梁施工监控,国内学者做了大量研究,谢明志^[4]基于有限元计算及现场实测数据对比分析,完善高铁连续梁施工控制技术;王赞芝^[5]应用灰色理论分析及预测高铁连续梁预拱度;于向东^[6]根据预拱度设置原则,基于有限元数值模拟,对铺轨标高进行修正,建立标高控制基本流程;杨耀^[7]基于有限元数值模拟及现场实测数据对比分析,研究了常规跨度连续梁结构变形特点.当前对连续梁桥施工控制及数据处理方面的研究取得了显著的工程实践意义,有限元计算反映结构的力学性能及变形特征,且有较充分的实测数据验证^[8-11],但尚缺少对于不同大跨连续梁悬臂施工变形普遍规律的总结及系统分析,如悬臂施工周期长、工序繁多,桥梁变形对参数变化的敏感性;结构刚度对大跨桥梁施工期合龙前后变形影响,以及恒、活载变形的影

响;合龙顺序差异对桥梁受力及线形影响程度及控制策略等.为更好推进高铁特大跨度连续梁桥监控信息化,探明这些问题对桥梁线形的影响程度、找寻该结构普遍变化规律具有重要的理论及现实意义.

笔者以新建成都至贵阳客运专线上(60+100+60)m、(68+120+68)m、(74+136+74)m特大跨度无砟轨道预应力混凝土连续梁为工程背景,基于有限元数值模拟,采用Midas/Civil软件建模,并以现场实测数据为依托,探明不同特大跨度高铁连续梁桥悬臂施工变形规律.重点进行线形参数敏感性研究、恒活载作用主梁变形及预拱度分析、施工方法对大悬臂变形及成桥累计位移的影响,并与实测值对比分析,得到施工中体系转换顺序、转换方式、荷载设置等对结构变形的影响,并提出指标参数,从经济合理性及受力安全性方面衡量大跨连续梁桥刚度及预应力的优化设置.

1 工程概况

新建成都至贵阳客运专线王湾乐宜高速公路(60+100+60)m、大渡河特大桥(60+100+60)m、(68+120+68)m、(74+136+74)m双线预应力混凝土连续梁桥采用悬臂

浇筑施工,ZK 活载设计,梁体为单箱单室、变截面,梁底下缘二次抛物线变化;合龙段长 2 m.大渡河特大桥中的三座连续梁均先边

跨合龙再中合龙,王湾乐宜高速公路特大桥采用先中合龙再单悬臂浇筑边跨一个节段后边合龙.桥梁基本信息见表 1.

表 1 桥梁基本信息

Table 1 Bridge basic information

桥梁跨度/m	中支点梁高/m	边跨直线段长/m	跨中直线段长/m	对称悬臂节段/个	桥面宽/m	梁底宽/m
大渡河(60+100+60)	7.8	15.75(梁高4.8)	10(梁高4.8)	12	12.2	6.7
大渡河(68+120+68)	9.0	13.75(梁高5.2)	10(梁高5.2)	14	12.6	7.0
大渡河(74+136+74)	10.6	15.75(梁高5.8)	18(梁高5.8)	17	12.2	7.0
王湾乐宜(60+100+60)	7.8	15.75(梁高4.8)	10(梁高4.8)	12	12.2	6.7

2 有限元仿真计算

根据施工图及施工方案,采用 Midas/Civil 建立有限元模型(见图 1).

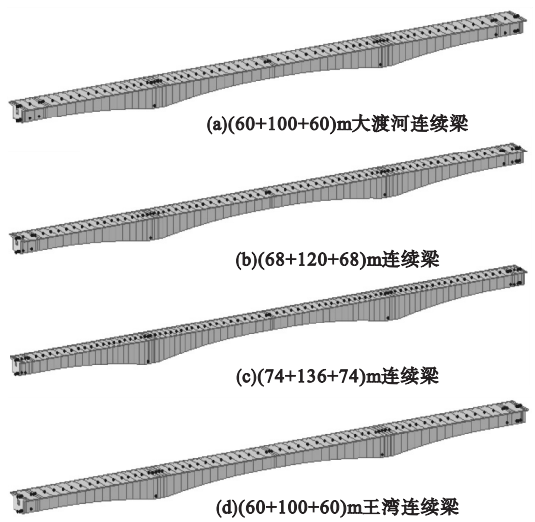


图 1 全桥有限元模型

Fig. 1 Finite element models of the bridge

考虑结构自重、预应力效应、收缩徐变、二期恒载、挂篮荷载、活载、温度效应及基础不均匀沉降,四座桥均采用梁单元模拟,支座采用一般支撑和弹性连接进行模拟.根据支座特性及工程特点,弹性连接采用刚性模拟.王湾乐宜高速公路(60+100+60)m 模型梁单元 80 个,节点 93 个;大渡河特大桥(60+100+60)m 模型梁单元 80 个,节点 95 个;(68+120+68)m 模型梁单元 88 个,节点 103 个;(74+136+74)m 模型梁单元 100 个,节点 115 个.

3 结构变形分析

悬臂施工连续梁桥,随着跨度的增大,施工工序繁多、经历周期长,结构及环境变化等诸多因素对桥梁线形的影响随之变大.笔者主要针对参数敏感性分析、恒活载变形分析及预拱度设置等方面研究,探明特大跨度高铁连续梁变形规律、施工工序对结构变形影响及设计施工中需采取的措施.

3.1 参数敏感性分析

为保障桥梁达到理想线形,高速铁路行车舒适性,深入研究参数变化对不同跨度连续梁施工期及成桥状态线形影响,探明影响结构变形的主、次要因素,从而得出大跨连续梁桥变形的普遍规律,指导设计及施工;更是桥梁施工监控体系中参数识别、误差修正的基础,对深入理解大跨结构力学行为特点具有重要的理论及现实意义^[12-14].根据工程实际情况,笔者分析管道摩阻、管道偏差、混凝土弹模、预应力效应等参数变化对大跨度连续梁施工期及成桥线形影响,根据施工经验,参数变化范围按设计值±10%进行计算分析,混凝土收缩徐变按新旧规范对比.参数变化对不同跨度大跨连续梁最大悬臂及成桥线形影响如表 2 所示.从表 2 中可以看出,混凝土自重对不同跨度桥梁线形影响“最大悬臂段”为 28.1%，“成桥阶段”最大为 48.1%；预应力效应对不同跨度桥梁线形影响“最大悬臂段”为 9.9%，“成桥阶段”最大为

68.8% ;混凝土弹模及收缩徐变对结构的影响次之. 分析表明,悬臂施工阶段混凝土自重是影响线形的主要因素,其次是预应力效应、混凝土弹模和收缩徐变,其他因素影响较小. 成桥阶段,主梁线形对预应力效应和混凝土自重最敏感,其次是收缩徐变及混凝土弹模,其他因素影响较小;其影响随桥跨的增加而增大. 预应力效应和混凝土自重在大悬臂与成桥阶段对主梁线形呈现出不同的影响态

表 2 参数变化对不同跨度连续梁大悬臂及成桥线形影响对比

参数类别	Table 2 Comparison of maximum responses upon largest cantilevers and completion of different long-span continuous girder bridges caused by parameters variation %							
	大渡河 (60 + 100 + 60) m		王湾乐宜 (60 + 100 + 60) m		大渡河 (68 + 120 + 68) m		大渡河 (74 + 136 + 74) m	
	最大悬臂段	成桥阶段	最大悬臂段	成桥阶段	最大悬臂段	成桥阶段	最大悬臂段	成桥阶段
管道摩阻	0.2	1.4	0.2	1.0	0.9	1.3	0.3	3.5
管道偏差	0.3	0.8	1.1	0.7	0.9	1.5	1.4	3.0
混凝土弹模	8.2	2.7	8.4	3.1	8.1	3.8	8.2	5.9
混凝土自重	26.5	18.4	28.1	13.9	16.2	29.3	27.4	48.1
收缩徐变	8.2	16.9	8.3	10.5	7.2	20.1	6.8	30.6
施工临时荷载	0.2	2.2	0.2	1.9	0.3	3.8	0.3	5.1
预应力效应	9.2	32.4	9.4	24.4	9.9	42.1	9.6	68.8

注:表中计算结果为单参数变化与基准状态下最大差值百分比的绝对值.

3.2 静活载挠度分析

本次计算 4 座桥采用 ZK 活载,静活载

势,主要原因在于预应力空间布置形态、合龙前后数量设置、张拉顺序等差异. 此外,对于相同主跨 100 m 连续梁^[15],因合龙顺序、节段数量、墩梁临时固结拆除时机等差异,参数变化对主梁线形影响会有所异同. 这些因素对高铁大跨连续梁的影响是设计及施工控制中面临的重要问题,需探明参数变化对大悬臂及成桥变形的影响.

作用下桥梁下挠如图 2 所示,各桥梁边、中跨最大挠度见表 3.

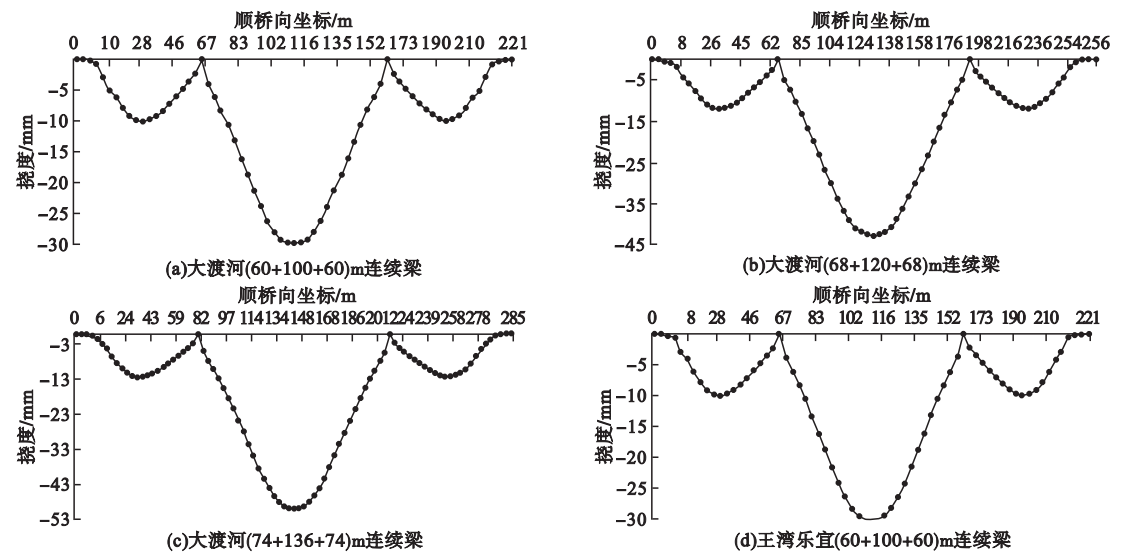


图 2 ZK 静活载作用下不同跨度连续梁桥下挠

Fig. 2 ZK static live load deflection of different long-span continuous girder bridges

表 3 不同跨度连续梁边中跨最大静活载挠度

Table 3 Maximum static live load deflection in side-span and mid-span of different long-span continuous girder bridges mm							
大渡河(60+100+60)m		王湾乐宜(60+100+60)m		大渡河(68+120+68)m		大渡河(74+136+74)m	
边跨挠度	中跨挠度	边跨挠度	中跨挠度	边跨挠度	中跨挠度	边跨挠度	中跨挠度
-10.1	-29.8	-10.1	-30.1	-12.1	-42.6	-12.6	-50.1

计算分析表明,高铁大跨连续梁桥静活载变形小,且挠度变化不受施工方法、节段数量的影响.桥梁刚度控制为主,中跨活载挠跨比约为 1/3 300~1/2 700,是边跨的 3~3.9 倍,能较好满足行车舒适性^[16-18].

3.3 恒载变形分析

恒载大小是影响桥梁几何线形的关键因

素,探明不同合龙顺序、墩梁临时固结拆除时间对主梁线形及内力的影响,可以为设计及施工监控提供参考依据.表 4 为最大悬臂段合龙、全桥合龙预应力张拉结束、10 年收缩徐变及成桥阶段等不同状态恒载作用下边中跨最大挠度对比.

表 4 不同状态边中跨恒载挠度对比

Table 4 Comparison of side-span and mid-span deflection under different conditions of dead load								
桥梁跨度/m	最大悬臂合龙后挠度/mm		全桥合龙预应力张拉后挠度/mm		10 年收缩徐变变形/mm		成桥挠度/mm	
	边跨最大	中跨悬臂段	边跨最大	中跨中	边跨最大	中跨中	边跨最大	中跨中
大渡河(60+100+60)	-7.6	5.3	-4.9	29.4	-0.4	18.9	-3.6	25.5
大渡河(68+120+68)	-11.1	11.8	-6.5	42.6	0.9	17.3	-2.6	26.6
大渡河(74+136+74)	-17	7.3	-17.5	47.6	-1.8	10.2	-14.6	18.6
王湾乐宜(60+100+60)	1.1	5.1	-20	34.7	-0.7	16.1	-18.4	29.5

由表 4 可知,成桥状态中跨变形向上 15~30 mm,边跨下挠在 20 mm 以内.相对公路桥,铁路桥虽然二期恒载大,但结构整体刚度大,预应力刚束多,结构总体呈上翘趋势.计算分析表明,高速铁路大跨连续梁收缩徐变 10 年基本趋于稳定,边跨变形较小,中跨变形趋势总体向上,在 20 mm 以内,并非与跨度成正比;且高铁桥梁活载比例较大,上挠效应明显,呈现出与大跨公路桥不同特点^[19-20].王湾乐宜 100 m 主跨大桥,先中跨合龙,再悬臂浇筑一个边跨节段,最后全桥边合龙后拆除墩梁临时固结完成体系转换再进行所有合龙段剩余预应力张拉,其变形与先边后中合龙差异较大,因此不同的合龙顺序及边跨现浇段长度大小将对结构变形产生较大影响.为进一步探明施工工序对结构线形影响,笔者以王湾乐宜(60+100+60)m 连续梁

为例,分析墩梁临时固结不同拆除时间对结构影响,计算结果如图 3、图 4 所示.

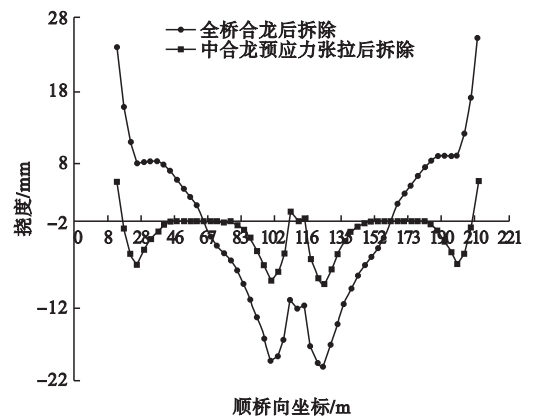


图 3 墩梁临时固结不同拆除时机中合龙变形对比

Fig. 3 Comparison of deformation after mid-span closure of temporary rigid fixity of pier and main girder at different removal time

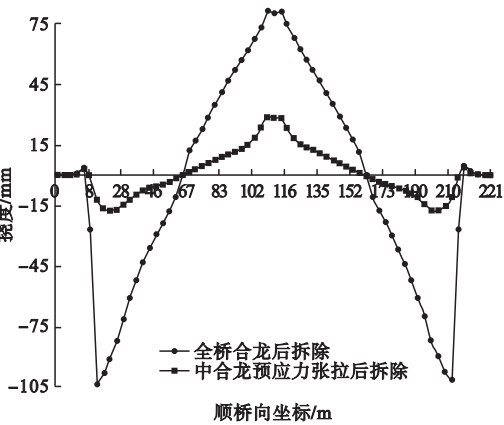


图 4 墩梁临时固结不同拆除时机成桥变形对比

Fig. 4 Comparison of deformation under completion state of temporary rigid fixity of pier and main girder at different removal time

由图 3 和图 4 恒载变形可得,桥梁线形对墩梁临时固结拆时机相当敏感.与此同时,计算分析表明,结构应力受其影响较小.墩梁临时固结在全桥合龙后拆除,中合龙挂篮前移后边跨悬臂段为上翘 5.4 mm,中跨跨中处下挠 8.8 mm;成桥后主跨跨中上翘 29.5 mm,边跨跨中附近下挠 18.4 mm.若临时固结在中合龙预应力张拉结束拆除,由于活动铰存在,中合龙挂篮前移后边跨悬臂段为上翘 25.4 mm,中跨跨中处下挠 20.1 mm;成桥累计位移急剧增大,主跨跨中上翘 81.8 mm,边跨跨中附近下挠 104.2 mm.对于大跨高铁连续梁,当跨越既有线路等障碍时,先中合龙,再悬臂浇筑节段,减小边跨支架现浇长度,可降低安全风险,同时减小主跨对桥下通行的影响.若墩梁临时固结拆除时机选择不合适,将大大增加线形控制风险与难度,成桥累计位移增大,难以保障主桥合龙精度,影响桥梁最终线形;施工中,虽可以拆除临时固结后在中合龙处加平衡配重,如本桥若保障线形满足需要,需在中合龙后合龙口两侧各加 1 300 kN 的配重,待边跨 13#节段浇筑后拆除配重,但将增大施工难度及施工风险,也影响施工周期.因此,对同类型高铁大跨连续梁,墩梁临时固结在全桥合龙后拆除,不仅有利于施工工作,更能保障线控工作的有效进行,降低线形控制风险,确保合龙精度、成桥线形满足设计需要.

3.4 施工预拱度分析

高铁大跨连续梁悬臂浇筑施工周期长且经历复杂,施工阶段立模标高的准确计算是线形控制的重点及难点^[21-22],关键是确定施工预拱度.预拱度的计算需考虑桥梁结构自重、预应力效应、二期恒载、收缩徐变、施工临时荷载、挂篮弹性变形、1/2 静活载、以及根据现场实际情况为确保线形平顺所进行的误差修正.根据恒、活载计算分析、挂篮弹性变形以及现场出现的误差进行修正计算分析,桥梁实际施工预拱度如图 5 所示.

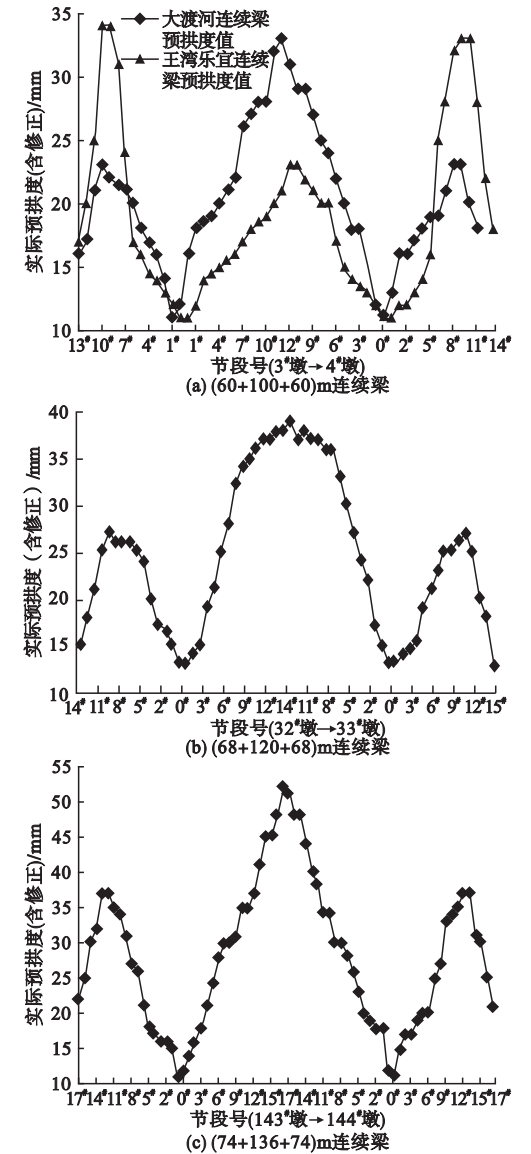


图 5 连续梁施工预拱度

Fig. 5 Construction pre-camber of continuous girder bridges

由图5可得,相对大跨公路桥,大跨高铁连续梁刚度大、预应力效应显著,有上挠趋势,总体预拱度相对不大^[7,20].主跨120 m最大预拱度39 mm,主跨136 m最大为52 mm,大渡河100 m最大为33 mm,该三座桥最大值均在中跨跨中附近;王湾乐宜100 m最大预拱度为34 mm,出现在边跨距合龙段2~3个节段处,中跨预拱度较小,仅22 mm左右,呈现与其他三座桥不同变化趋势.对于先中合龙再边合龙连续梁,施工预拱度与常规先边后中合龙差异较大,可预测这种差异会随着跨度的增大而更大.因此,对特大跨度连续梁合龙顺序的选择、节段数量设置以及墩梁临时固结拆除时间等因素不仅关系结构受力,更涉及线形控制的难易,也是设计及施工

人员需关注的重要问题.

3.5 大悬臂变形协调性分析

连续梁悬臂施工,施工临时荷载对结构线形的影响随悬臂段的增大而增加.对于不同跨度大跨连续梁,大悬臂阶段,探明施工临时荷载对结构变形影响程度及不同跨度之间挠度比值,研究桥梁跨度及变形协调性对于指导设计及施工具有重要的现实意义.笔者以大渡河特大桥主跨100 m、120 m及136 m三种跨径边合龙后最大单悬臂为背景,根据施工中可能出现临时荷载重量,按不同的荷载步,以集中荷载的形式加载于悬臂端节点,分析桥梁挠度比与跨度的协调性.不同跨度最大悬臂段变形结果见表5,挠度变化曲线如图6所示.

表5 不同跨度大悬臂变形对比

荷载/kN	桥梁主跨变形/mm			挠度比值(不同主跨变形比值)		
	主跨100 m	主跨120 m	主跨136 m	120 m/100 m	136 m/100 m	136 m/120 m
0	5.3	11.8	7.3	2.2	1.4	0.6
200	3.2	9.2	4.5	2.9	1.4	0.5
400	1.2	6.7	1.7	5.6	1.4	0.3
600	-0.9	4.1	-1.1	-4.6	1.2	-0.3
800	-3.0	1.5	-3.8	-0.5	1.3	-2.5
1 000	-5.1	-1.1	-6.6	0.2	1.3	6.0
1 200	-7.2	-3.7	-9.4	0.5	1.3	2.5
1 400	-9.3	-6.2	-12.1	0.7	1.3	2.0
1 600	-15.5	-8.8	-14.9	0.6	1.0	1.7
1 800	-11.4	-11.4	-17.7	1.0	1.6	1.6
2 000	-13.4	-14.0	-20.4	1.0	1.5	1.5

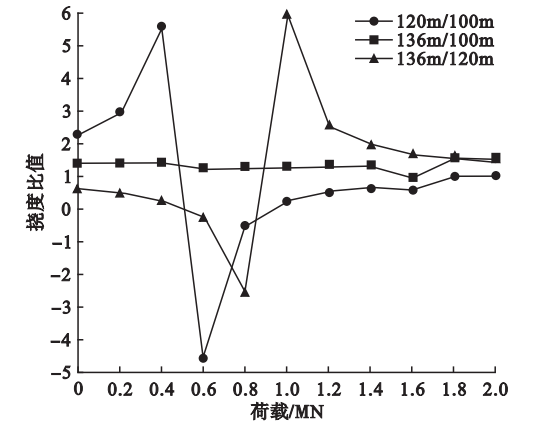


图6 不同跨度大悬臂挠度比值

Fig. 6 Deflection ratio of large cantilever with different spans

表5中,0 kN荷载代表理想情况,合龙前仅存在挂篮及模板施工临时荷载,此时结构变形作为分析的基准值;施工中可能存在的重物堆积、配重添加、汽车吊等其他临时荷载按200 kN的荷载步变化.最大荷载下主跨100 m、120 m、136 m连续梁,悬臂端变形分别为-13.4 mm、-14 mm、-20.4 mm.限于篇幅未列出结构应力变化,计算表明不同荷载步下结构均未出现拉应力,最大压应力均在10 MPa以内.与公路桥相比,高铁连续梁结构刚度大、变形小,结构安全富裕量大.从图6中可以看出,主跨136 m连续梁与主跨100 m连续梁变形协调性较好,挠度比值主

要介于 1.3 ~ 1.4, 优于主跨 120 m 连续梁. 120 m 主跨挠度与 100 m 及 136 m 连续梁相比, 反映该结构刚度及预应力布置较强, 理论变形较小, 结构富裕量大. 挠度比及绝对值反映了 136 m 桥梁刚度及预应力布置合理, 相对于常规 100 m 主跨连续梁, 该跨度高铁连续梁结构合理, 具有较好的经济指标, 可作为今后客运专线大跨度连续梁广泛采用的跨度. 主跨 120 m 连续梁, 当荷载为 400 ~ 800 kN 时, 挠度比发生突变, 也反映了施工监控中, 设计施工临时荷载重量误差尽可能控制在 500 kN 以内, 对保障结构线形平顺, 合龙口两侧高差满足精度要求具有重要意义.

根据理论研究及高铁桥梁工程实践, 对于大跨客运专线三跨连续梁桥, 当主跨在 100 ~ 150 m 时, 以目前较成熟的主跨 100 m

连续梁为基准, 笔者提出挠度比计算式:

$$\lambda = \frac{\delta_1}{\delta_2} = 1.3 \sim 1.4. \tag{1}$$

式中: λ 为 (恒载 + 施工临时荷载) 挠度比; δ_1 为计算桥跨, (恒载 + 施工临时荷载) 挠度; δ_2 为 100 m 主跨, (恒载 + 施工临时荷载) 挠度.

作为衡量大跨连续梁桥刚度及预应力优化设置的经济指标, 既可保障结构受力安全、变形合理, 且桥梁具有足够的安全富裕量.

4 梁体理论变形与实测数据对比

为验证及探明梁体变形规律, 全桥合龙预应力张拉完毕桥梁理论变形与实测值对比如图 7 所示, 合龙口两侧底板高差见表 6.

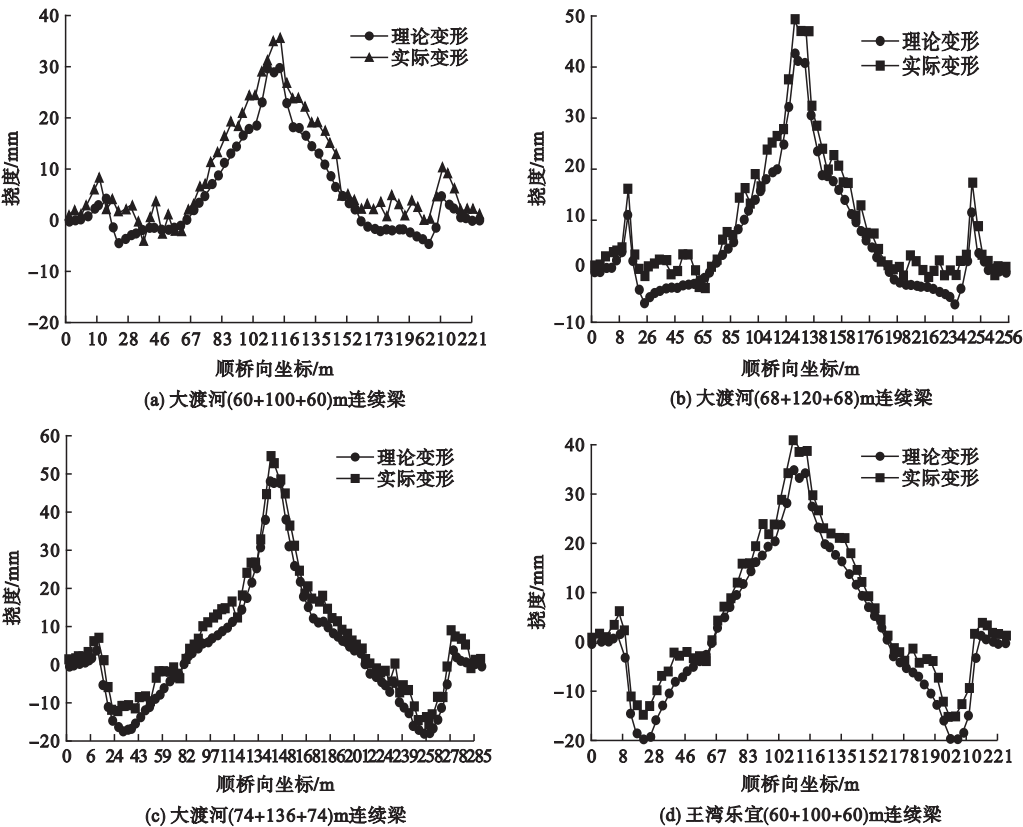


图 7 全桥合龙张拉预应力后实测变形与理论值对比

Fig. 7 Comparison of measured value and theoretical value for deflection after the whole bridge closure and the prestress tension

表6 合龙口两侧底板高差绝对值

Table 6 Absolute value of height difference of closure floor

桥梁跨度/m	边合口两侧底板高差绝对值/mm			中合口两侧底板高差绝对值/mm		
	腹板处	轴线处	腹板处	腹板处	轴线处	腹板处
大渡河(60+100+60)	10	8	9	10	5	8
大渡河(68+120+68)	8	10	10	7	6	10
大渡河(74+136+74)	6	9	8	9	10	5
王湾乐宜(60+100+60)	9	10	7	9	7	9

由图7和表6可知,实测值和理论值吻合较好,边中跨误差主要在0~8 mm,个别点误差在-3~0 mm,合龙口两侧高差均在10 mm以内,满足线形控制误差限,验证了高铁大跨连续梁变形规律,理论模型正确,和工程实际相符。

5 结 论

(1)影响高铁大跨连续梁桥线形的主要因素为预应力效应及结构自重,其次是混凝土收缩徐变及混凝土弹模,其他因素影响较小,施工中需加强对这些参数的控制,确保桥梁几何线形平顺。

(2)大跨高铁三跨连续梁刚度控制为主,静活载变形小,中跨活载挠跨比约为1/3 300~1/2 700,是边跨的3~3.9倍,能较好满足行车舒适性。

(3)高铁桥梁预应力效应强劲且结构刚度大,成桥状态恒载下中跨上翘,中跨上翘15~30 mm,边跨下挠在20 mm以内,施工预拱度呈现与公路桥较大的不同;且合龙顺序、现浇段长度、墩梁临时固结拆除时间的不同以及临时配重的添加对施工阶段恒载变形影响很大。选择合理的施工工序及工艺能有效降低线形控制风险。

(4)挠度比作为桥梁跨越能力的指标参数,反映结构变形协调性的同时,是对结构刚度及预应力设置合理性的重要反馈,可为工程人员提供参考。

参考文献

[1] 戴公连,葛浩,邱远喜,等. 高铁大跨度连续梁

桥上无砟轨道断板受力研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 100-104, 109.

(DAI Gonglian, GE Hao, QIU Yuanxi, et al. Study on broken plate force of ballastless track on high-speed railway long-span continuous beam bridge [J]. Journal of huazhong university of science and technology(natural science), 2015, 43(9): 100-104, 109.)

[2] 周岩,白丽. 高速铁路工程建设项目管理信息化的研究[J]. 铁路计算机应用, 2011, 20(2): 28-34.

(ZHOU Yan, BAI Li. Research on information of project management for engineering construction of high-speed railway [J]. Railway compute application, 2011, 20(2): 28-34.)

[3] 赵瑞鹏. 连续刚构桥与连续梁桥线形监控影响因素对比分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(2): 77-80.

(ZHAO Ruipeng. Comparative analysis of the influence factors on the linear monitoring of continuous rigid frame bridge and continuous girder bridge [J]. Railway standard design, 2016, 60(2): 77-80.)

[4] 谢明志,张涛,杨永清,等. 快速铁路大跨连续梁桥施工监控及控制体系研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(12): 59-64.

(XIE Mingzhi, ZHANG Tao, YANG Yongqing, et al. Study on construction monitoring and control system for longspan continuous girder bridge of fast-speed railway [J]. Railway standard design, 2017, 61(12): 59-64.)

[5] 王赞芝,张锴,王森. 用灰色系统理论确定高速铁路桥梁施工预拱度[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(3): 482-488.

(WANG Zanzhi, ZHANG Kai, WANG Miao. Determining construction camber of a rapid transit railway bridge by grey system theory [J]. Journal of railway science and engineering, 2015, 12(3): 482-488.)

[6] 于向东,尹亮洲. 连续梁桥无砟轨道标高控制研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(2): 76-80.

(YU Xiangdong, YIN Liangzhou. Study of elevation control of ballastless track on continuous beam bridge [J]. Bridge construction, 2016, 46

- (2):76-80.)
- [7] 杨耀,方淑君,段传武,等.不同跨径高铁连续梁桥悬臂施工线形分析研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(8):1549-1554.
(YANG Yao, FANG Shujun, DUAN Chuanwu, et al. Linear analysis research on cantilever construction of different spans continuous girder bridge for high-speed railway [J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13 (8):1549-1554.)
- [8] 宋福春,张兴,陈冲,等.大跨预应力混凝土连续梁桥悬臂施工结构控制分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(2):226-234.
(SONG Fuchun, ZHANG Xing, CHEN Chong, et al. Structural control analysis during construction of cantilever of long-span prestressed concrete continuous girder bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33(2):226-234.)
- [9] LEANDER J, ANDERSON A. Monitoring and enhanced fatigue evaluation of a steel railway bridge [J]. Engineering structures, 2010, 32 (3):854-863.
- [10] ATES S. Numerical modeling of continuous concrete box girder bridges considering construction stages [J]. Applied mathematical modeling, 2011, 35(8):3809-3820.
- [11] RICHARDM, HAKAN S. Time-dependent analyses of segmentally constructed balanced cantilever bridges [J]. Engineering structures, 2010, 32(4):1038-1045.
- [12] 谢明志,卜一之,张克跃,等.特大跨度混合梁斜拉桥几何控制法参数敏感性[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(3):66-73.
(XIE Mingzhi, BU Yizhi, ZHANG Keyue, et al. Sensitivity of parameters of super Long-span hybrid girder cable-stayed bridge based on geometry control method [J]. Journal of Chang'an university (natural science), 2014, 34 (3):66-73.)
- [13] 包龙生,肖成忠,于玲,等.大跨度混凝土连续梁桥施工监控参数敏感性分析方法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(6):1068-1073.
(BAO Longsheng, XIAO Chengzhong, YU Ling, et al. The research of the sensibility analysis of design parameters in long-span concrete continuous girder bridge construction monitoring [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28 (6):1068-1073.)
- [14] ALI Z J, MORAD S, MEHDI F M. Sensitivity analysis of bridge-track-train system to parameters of railway [J]. Latin American journal of solids and structures, 2014, 11:598-612.
- [15] 戴公连,王伟民,刘柯.基于变形的铁路混凝土连续梁合龙方案比较[J].桥梁建设,2014,44(4):96-101.
(DAI Gonglian, WANG Weimin, LIU Ke. Comparison of closure schemes for railway concrete continuous girder based on deformation [J]. Bridge construction, 2014, 44 (4):96-101.)
- [16] GAN F, DAI H, GAO H, et al. Wheel-rail wear progression of high speed train with type S1002CN wheel treads [J]. Wear, 2015(328):569-581.
- [17] WANG P, MA X, WANG J, et al. Optimization of rail profiles to improve vehicle running stability in switch panel of high-speed railway turnouts [J]. Mathematical problems in engineering, 2017, 25:1-13.
- [18] XU Jingmang, WANG Ping, WANG Li, et al. Effects of profile wear on wheel-rail contact conditions and dynamic interaction of vehicle and turnout [J]. Advances in mechanical engineering, 2016, 8(1):1-14.
- [19] 姚健鹏,梁明盛,陈忠诚.预应力混凝土连续箱梁桥悬臂施工监控[J].公路,2012(2):105-108.
(YAO Jianpeng, LIANG Mingsheng, CHEN Zhongcheng. Control of cantilever construction for prestressed concrete continuous box girder bridge [J]. Highway, 2012(2):105-108.)
- [20] 赵勃,张满平,曾红雄,等.渭河公路大桥连续梁施工监控关键技术研究[J].筑路机械与施工机械化,2015,32(8):73-77.
(ZHAO Bo, ZHANG Manping, ZENG Hongxiong, et al. Research on key technologies for monitoring of continuous beam construction of Weihe highway bridge [J]. Bridge and tunnel construction and machinery, 2015, 32(8):73-77.)
- [21] 沈金贵.时速350 km高速铁路大跨度连续梁悬浇施工监控[J].世界桥梁,2011(1):35-37.
(SHEN Jingui. Construction monitoring and control of cantilever casting of long span continuous girder for 350 km/h high-speed railway [J]. World bridge, 2011(1):35-37.)
- [22] WANG Lifeng, JIANG Hongwei, HE Dongpo. The application of the grey neural network in the deflection control of PC rigid frame continuous box girder bridges [J]. Open civil engineering journal, 2014, 8:416-419.