

大跨度连续刚构桥施工监控线形分析

肖光清

(广东省公路工程质量监测中心, 广东 广州 510500)

摘要: 运用有限元软件对某大跨度连续刚构桥的施工过程进行仿真计算分析, 通过仿真计算获得主梁立模标高的理论预拱度和各施工阶段的累计位移, 并对施工全过程进行跟踪监测, 对比分析现场实测值和理论计算值, 得出结构在施工过程及成桥阶段的变形状态与理论计算及设计、监控要求基本一致。

关键词: 桥梁; 连续刚构桥; 施工监控; 线形分析

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0103-04

大跨度连续刚构桥多采用挂篮对称悬臂浇筑施工, 这种分节段浇筑施工方法会使结构受力和线形变得较复杂。为保证施工过程中桥梁结构的安全, 确保成桥后结构应力和线形满足设计要求, 施工过程控制必不可少。桥梁的施工监控是施工→测量→识别→修正→预告→施工的循环过程, 其目的主要包括: 1) 成桥后主梁纵面线形符合设计和规范要求; 2) 分析各种偏差的产生原因及后果, 研究并采取适当措施, 使施工过程中每一阶段及成桥后结构的作用效应符合规范和设计要求, 从作用效应的角度确保施工过程及成桥结构的安全; 3) 对重要的施工工序进行复核、论证或优化, 以降低造价, 缩短工期, 从理论分析角度保证施工期和成桥后结构的安全。该文以某大跨度连续刚构桥为工程背景, 运用有限元软件对其施工过程进行仿真计算, 并对施工全过程进行跟踪监测, 采用自适应控制方法预测、调整变形数据, 使最终成桥线形满足设计要求。

1 工程概况

一座跨径布置为 110 m+195 m+110 m 的大

跨度三向预应力砼连续刚构桥, 主梁采用单箱单室箱形截面, 箱梁高度和底板厚度均按二次抛物线变化, 设 3% 单向横坡。箱梁根部中心线高 11.50 m, 高跨比为 1/16.96; 箱梁跨中中心线高 4.0 m, 高跨比为 1/48.75。箱梁顶板全宽 16.40 m, 底板宽 8.40 m。箱内顶板标准段厚度为 0.30 m, 根部加厚到 0.50 m。腹板厚度由根部到合龙段的变化为 1.20~0.90~0.70~0.55 m。根部底板厚度为 1.1 m, 跨中为 0.32 m, 变化规律同梁底变化曲线。箱梁在墩顶处设 2 道 0.60 m 厚横隔板, 在边墩墩顶梁端处设 2.00 m 厚横隔板。

主墩基础采用钻孔灌注桩和整体式承台, 主墩采用钢筋砼双肢墩, 墩顶单肢截面尺寸为 2.4 m×8.4 m, 墩顶以下呈曲线变化, 承台顶面以上至高程 7.400 m 范围内设防撞段, 双肢合并为独柱空心结构, 并向墩底逐渐打开, 墩底截面尺寸为 11.6 m×10.1 m。过渡墩采用花瓶墩设计, 墩底截面为 5.5 m×3.0 m, 墩顶截面为 9.0 m×3.0 m。墩顶设置盖梁, 盖梁悬臂长 3.475 m, 端部高 1.0 m, 根部高 2.0 m, 顺桥向宽度为 3.5 m。主桥桥型布置见图 1。

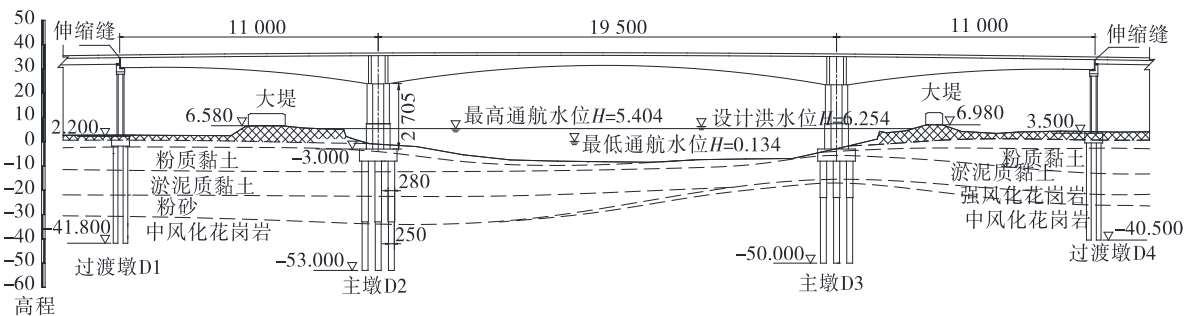


图 1 桥型布置示意图(单位: 高程为 m, 其他为 cm)

2 有限元模型计算

为了解该桥各施工阶段的受力和变形情况,采用 MIDAS/Civil 对各施工阶段进行仿真计算。计算坐标系定义如下:顺桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖向向为 Z 轴。所有结构均模拟为梁单元,全桥共计 868 个节点、823 个梁单元(主梁 116 个、桩基 667 个)。有限元模型见图 2。

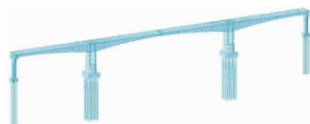


图 2 全桥有限元模型

(1) 计算荷载。计算荷载包括结构自重、挂篮

重量 81 t、二期荷载(按照 71 kN/m 计)、反向顶推力 5 000 kN、汽车荷载和活载等。

(2) 边界条件。1) 悬臂施工阶段。桩与土体作用力采用土弹簧模拟,土弹簧刚度系数采用 m 法计算,桩基底部约束所有自由度;桩基与承台、主梁与主墩均采用刚性连接。2) 边跨现浇段。梁端位置约束 DX 、 DY 、 DZ ,其他位置只约束 DZ 。3) 成桥阶段。过渡墩处按球形支座实际刚度采用一般连接,其他位置边界条件同悬臂施工阶段。

(3) 计算工况。主桥最大悬臂长度为 96.5 m,分 22 个梁段,梁段最大重量为 2 748 kN,采用挂篮对称悬臂浇筑。每个阶段分为挂篮前移(立模)、浇筑砼和张拉预应力 3 个工序,共划分 81 个施工阶段(见表 1)。

表 1 施工阶段划分

施工阶段	施工内容	持续时间/d
桩基、承台施工		100
桥墩施工		100
0# 块施工	在托架上立模;分层浇筑砼;张拉预应力钢束	12
1# 块施工	拆除托架,挂篮就位;浇筑砼;张拉预应力钢束	10
2# ~ 22# 块施工	挂篮前移;浇筑砼;张拉预应力钢束	210
边跨现浇段施工	在支架上立模;浇筑砼	10
边跨合龙段施工	挂篮前移;浇筑砼;张拉预应力钢束	10
反向顶推	在 T 构悬臂末端施加反向顶推力 5 000 kN	1
中跨合龙段施工	浇筑砼;张拉预应力钢束;拆除挂篮	10
二期铺装		20
成桥 10 年		3 650

3 线形监测分析

3.1 立模标高的确定及监测分析

3.1.1 立模标高的确定

立模标高的确定是决定成桥线形的最重要因素之一。考虑施工过程的仿真分析计算完成后,即可确定主梁的施工预拱度,从而确定各施工节段的立模标高。成桥状态设计线形为考虑砼收缩徐变基本完成后(一般计算到成桥 10 年后)的成桥线形。主梁节段立模标高计算公式为:

$$f_{\text{预拱度}} = f_s + 1/2 f_h \quad (1)$$

$$H_{\text{立模}} = H_{\text{设计}} - f_{\text{预拱度}} + f_w \quad (2)$$

式中: f_s 为主梁从立模完成到成桥状态(一般到成桥 10 年后砼收缩徐变基本完成)的累计位移,以向下为负; f_h 为主梁的活载变形值,以向下为负; $H_{\text{立模}}$ 、 $H_{\text{设计}}$ 分别为梁段立模和设计标高; f_w 为线形

误差调整值,根据实际情况设置。

立模标高的影响因素较多,施工误差的出现不可避免。因此,立模标高的确定和对下一主梁节段立模标高的调整是施工监控的关键环节。通过对立模完成、节段砼浇筑后、张拉预应力后、挂篮前移到位 4 种工况的施工监测成果进行误差分析,并与理论计算值进行对比,明确差异因素,进而对计算模型进行修正和重新计算,根据计算结果调整下一节段的立模标高。

3.1.2 立模标高监测分析

立模标高是监控单位以设计单位提供的箱梁底模设计标高为基准,以施工单位的施工方案和施工工序为依据进行施工阶段计算,综合考虑各施工阶段砼收缩徐变及日照温度场等影响合理确定预抬值,再根据各工况下箱梁位移及挂篮变形给出悬臂施工中梁段的施工立模标高指导施工。

经有限元仿真计算,该桥主梁在成桥 10 年后和移动荷载作用下的竖向累计位移见图 3~4。由式(1)可得该桥理论预拱度,最大预拱度为 100 mm,位于边跨靠近 1/4 位置(19# 块)。限于篇幅,仅列出 D2、D3 墩部分主梁节段底板立模标高实测值与理论值(见表 2~3)。

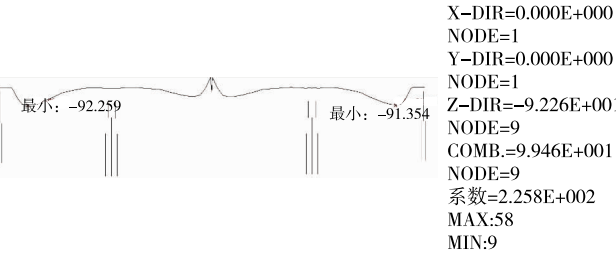


图 3 成桥 10 年后的竖向累计位移变形(单位:mm)

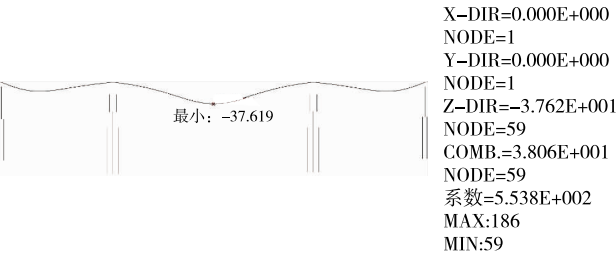


图 4 移动荷载作用下竖向位移变形(单位:mm)

表 2 D2 墩主梁底板立模标高实测值与理论值对比 m

梁段号	边跨侧标高			中跨侧标高		
	实测值	理论值	差值	实测值	理论值	差值
1# 块	24.972	24.976	0.005	25.069	25.074	0.005
4# 块	26.213	26.208	-0.005	26.382	26.386	0.005
7# 块	27.336	27.335	-0.001	27.569	27.564	-0.005
10# 块	28.600	28.601	0.001	28.923	28.926	0.004
13# 块	29.600	29.601	0.002	30.011	30.016	0.005
16# 块	30.443	30.443	0.000	30.976	30.972	-0.004
19# 块	30.929	30.932	0.003	31.581	31.580	-0.001
22# 块	30.922	30.922	0.001	31.751	31.750	-0.001

由表 2~3 可知:主梁底板立模标高精度均控制在-5~+5 mm,满足要求。

3.2 预应力张拉后梁底标高监测分析

每节段预应力钢束张拉后,监测当前阶段及其前 3~4 节段(随着悬臂长度的增大,可适当增加测量节段数量)的累计位移,对比实测与理论计算结果,若误差大于 15 mm,则在后续节段逐步平滑地进行调整,将误差控制在要求范围内。

由于砼浇筑后顶板抹面不平,且挂篮等施工机具易遮挡测点,通常立模时在底板相应节段末端预

表 3 D3 墩主梁底板立模标高实测值与理论值对比 m

梁段号	中跨侧标高			边跨侧标高		
	实测值	理论值	差值	实测值	理论值	差值
1# 块	24.718	24.722	0.004	24.542	24.545	0.003
4# 块	26.085	26.081	-0.003	25.750	25.752	0.003
7# 块	27.293	27.295	0.002	26.841	26.844	0.004
10# 块	28.698	28.703	0.005	28.058	28.062	0.004
13# 块	29.840	29.840	0.000	29.007	29.010	0.003
16# 块	30.850	30.852	0.002	29.792	29.792	0.000
19# 块	31.523	31.519	-0.003	30.214	30.215	0.001
22# 块	31.746	31.746	0.001	30.142	30.139	-0.003

埋高出砼大约 5 cm 的钢筋头,用于监测主梁变形,待成桥后切割预埋钢筋头。限于篇幅,仅列出 D2、D3 墩部分主梁节段在张拉预应力钢束后底板标高实测值与理论值(见表 4~5)。

表 4 D2 墩预应力钢束张拉后主梁底板标高理论值与实测值对比 m

梁段号	边跨侧标高			中跨侧标高		
	实测值	理论值	差值	实测值	理论值	差值
1# 块	24.938	24.940	0.002	25.038	25.036	-0.002
4 号#	26.203	26.198	-0.005	26.375	26.376	0.001
7# 块	27.328	27.328	0.000	27.557	27.557	0.000
10# 块	28.585	28.591	0.007	28.908	28.916	0.008
13# 块	29.599	29.602	0.003	30.012	30.017	0.005
16# 块	30.439	30.444	0.005	30.966	30.973	0.008
19# 块	30.930	30.939	0.009	31.577	31.587	0.010
22# 块	30.914	30.925	0.011	31.741	31.753	0.012

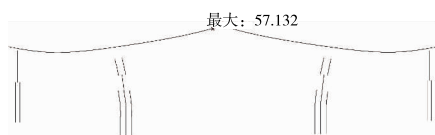
表 5 D3 墩预应力钢束张拉后主梁底板标高理论值与实测值对比 m

梁段号	中跨侧标高			边跨侧标高		
	实测值	理论值	差值	实测值	理论值	差值
1# 块	24.700	24.696	-0.004	24.522	24.519	-0.003
4# 块	26.074	26.071	-0.003	25.742	25.742	0.001
7# 块	27.283	27.288	0.005	26.838	26.837	-0.001
10# 块	28.689	28.693	0.005	28.051	28.052	0.001
13# 块	29.834	29.841	0.007	29.003	29.011	0.008
16# 块	30.848	30.853	0.005	29.782	29.793	0.011
19# 块	31.518	31.526	0.008	30.216	30.222	0.006
22# 块	31.739	31.749	0.010	30.132	30.142	0.010

由表 4~5 可知:主梁在悬臂施工过程中的挠度变化基本接近计算预测值,仅在接近最大悬臂状态的梁段差异较大。这是由于在接近最大悬臂状态时,随着悬臂长度的增大,位移非线性变化较强烈,最大差值为 12 mm,小于控制要求(15 mm)。

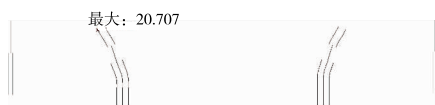
3.3 顶推位移计算及监测分析

该桥为大跨度矮墩连续刚构桥,存在墩身和基础受力过大的问题,为改善其受力状况,施工过程中在中跨合龙前在跨中处向桥两端施加水平顶推力。经计算,预先在该桥腹板和底板的梗腋处施加合力为5 000 kN的水平推力。在墩顶便于观测的适当位置布置主墩偏位测点,采用全站仪和棱镜进行测量。在主墩施工过程中,对每个阶段的坐标进行测量,以控制主墩线形。主墩施工完成后,在D2、D3墩顶各设一个棱镜,地面设相应的测点和后视点,定期进行桥墩偏位测量。顶推力引起的两侧主梁竖向位移理论计算值为50.5 mm,实测值为48.8 mm,中跨合龙段高差为10 mm,合龙精度高,理论变形计算结果见图5;顶推力引起的两侧主墩纵向位移最大理论计算值为20.7 mm,理论变形计算结果见图6,主墩偏位实测值与理论值对比见表6。



X-Dir=-2.681E+001
NODE=58
Y-Dir=2.238E-004
NODE=444
Z-Dir=5.045E+001
NODE=58
COMB.=5.713E+001
NODE=58
系数=3.647E+002
MAX:58
MIN:186

图5 顶推阶段主梁的位移变形(单位:mm)



X-Dir=-2.066E+001
NODE=129
Y-Dir=2.238E-004
NODE=444
Z-Dir=1.716E+000
NODE=470
COMB.=2.071E+001
NODE=129
系数=1.006E+003
MAX:129
MIN:186

图6 顶推阶段桥墩的位移变形(单位:mm)

表6 顶推阶段主墩偏位实测值与理论值对比

mm

位置	实测值			理论值			差值		
	DX	DY	DZ	DX	DY	DZ	ΔDX	ΔDY	ΔDZ
D2墩顶	-16.7	0.3	-2.0	-20.7	0.0	-1.4	-4.0	-0.3	0.6
D3墩顶	13.3	-0.1	-2.2	18.2	0.0	-1.3	4.9	0.1	0.9

由表6可知:主墩偏位控制在5 mm以内,偏位较小,满足规范要求。

4 结论

通过综合分析某大跨度连续刚构桥立模标高控制数据和实测悬臂施工节段位移数据,对设计、监控要求和理论计算值进行对比分析,得出如下结论:

(1) 主梁底板立模标高精度控制在 $-5 \sim +5$ mm,定位精度满足要求,施工过程中主梁线形良好,对主梁位移变化的跟踪调整起到了良好效果。

(2) 主梁在悬臂施工过程中的累计挠度变化基本接近计算预测值,仅在接近最大悬臂状态的两个梁段差异较大。总体来讲,主梁线形良好,各悬浇块段之间衔接顺畅。

(3) 合龙段两侧高程偏差均控制在10 mm以内,合龙精度较高,符合设计和监控要求。

(4) 顶推阶段主墩沉降偏位控制在5 mm以内,偏位较小,满足要求。

参考文献:

[1] 白光耀.大跨度连续刚构桥的施工监控与结构仿真分

析[D].南宁:广西大学,2006.

- [2] 丁晗.高墩大跨连续刚构桥施工监控中的标高及线形监测研究[D].西安:长安大学,2010.
- [3] 范立础.预应力混凝土连续梁桥[M].北京:人民交通出版社,1997.
- [4] 徐君兰,项海帆.大跨度桥梁施工控制[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [5] 罗书舟,张谢东.窄幅大跨连续梁桥线形控制研究[J].公路与汽运,2019(3).
- [6] 袁武林,殷新锋,郑辉,等.短线拼装曲线连续梁桥预制线形研究[J].公路与汽运,2018(5).
- [7] 丁鑫,刘海宽.基于三维坐标观测的大跨连续刚构桥主梁挠度监测与评估[J].公路与汽运,2017(6).
- [8] 胡清和.多跨连续刚构桥构造分析及合龙技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [9] 张永辰,祝建波,张丽芳.高墩大跨连续刚构桥设计控制参数优化研究[J].公路与汽运,2018(2).
- [10] 陈兴冲,王常峰,夏修身,等.非对称大跨连续刚构桥线形控制技术研究[A].第19届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅱ册)[C].2010.

收稿日期:2019-04-09