

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.02.011

# 长联大跨连续梁桥结构计算与参数敏感性分析

孙全利

(广州市城市规划勘测设计研究院, 广东 广州 510060)

**摘要:** 对一座长联大跨连续梁桥进行数值模拟分析,利用通用有限元软件 Midas Civil 建立有限元模型,对长联大跨连续梁结构在施工过程中的关键阶段进行应力和位移分析,并得出重要结论。同时对影响桥梁受力状态的各项参数进行敏感性分析,并指出预应力、弹性模量、容重是影响桥梁状态的主要参数,而混凝土徐变是不可忽视的重要参数。分析方法和部分结论对同类桥梁的设计和施工具有一定的指导意义。

**关键词:** 长联大跨;曲线梁桥;结构分析;Midas Civil

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2021)02-0041-04

## 1 概述

某座长联大跨曲线梁桥主桥为(48+7×80+48)m 预应力混凝土变截面连续梁。箱梁端支座处及边跨直线段和跨中处梁高为 3.8 m,中支点处梁高 6.6 m,箱梁横截面为单箱单室直腹板,顶板厚 0.35 m,腹板厚分别为 0.45 m、0.65 m、0.85 m,底板厚由跨中的 0.42 m 变化至中支点梁根部的 0.758 m。中支点处加厚到 1.3 m。梁高按圆曲线变化,圆曲线半径  $R=252.516$  m。箱梁采用 C55 三向预应力钢筋混凝土,纵、横向预应力均采用低松弛高强钢绞线。主桥上部结构施工方法:托架施工 0 号块,支架施工边跨现浇段,其余梁段采用挂篮对称悬臂施工,悬臂施工前做好临时锚固。

主桥施工共分 195 个梁段,中支点 0 号块长度为 13 m,一般梁段长度分为 2.5 m、3.0 m 和 3.5 m,合龙段 2.0 m,边跨直线段长为 7.65 m(含梁端至边支座中心 0.65 m)(见图 1、图 2)。

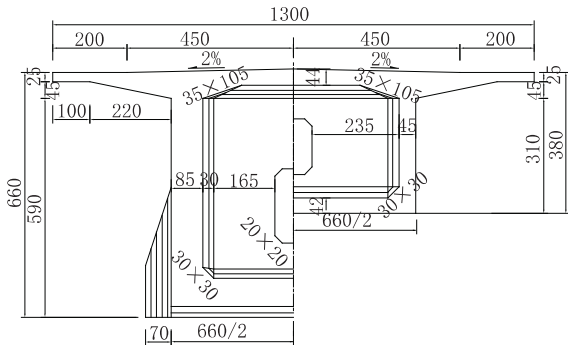


图 1 箱梁横断面图(单位:cm)

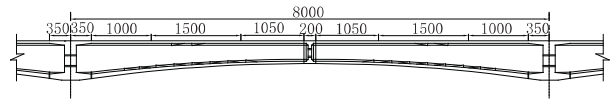


图 2 箱梁立面构造图(单位:cm)

## 2 计算模型

### 2.1 单元划分和建模

为了准确分析长联大跨曲线连续梁桥的受力情况,采用有限元分析方法,将主梁悬臂施工部分按照施工分段进行离散,同时考虑到 0 号块的特殊性,将 0 号块离散为若干单元,因此整个梁体共划分为 266 个单元、267 个节点。关于成桥后约束条件的模拟,按照该连续梁的设计,除 7 号墩顶设置有固定铰支座以外,其他墩顶的支座均为活动铰支座。

在本文的研究当中,对于施工过程的模拟主要划分为三个大的节段:悬臂施工阶段、分步合龙和体系转换阶段、成桥后直至运营阶段。在分析计算中,上述三大施工阶段可以细划分为 51 个计算节段模拟,本文的研究工作是针对上述三大施工阶段、51 个计算节段而建立结构模型,并对这三大施工阶段进行详细的状态分析。计算模型简图如图 3 所示,三维计算模型如图 4 所示(以 5 号墩为例)。



图 3 结构模型图

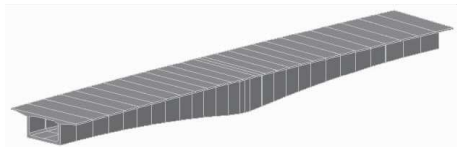


图 4 部分三维计算模型图

收稿日期: 2020-06-29

作者简介: 孙全利(1981—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

## 2.2 参数取值

在桥梁结构设计和施工过程分析中,基本参数取值的真实程度是计算结果是否可靠的关键因素。由于在设计阶段及施工前有些关键参数如材料的实际弹性模量等暂时还未获得,所以在计算中,这些基本参数的取值基本是按照桥涵设计规范和相关的设计手册中的推荐值选用的,但在施工过程中若发现这些参数与计算结果有较大出入,应调整后重新计算<sup>[1-2]</sup>。

## 2.3 施工阶段划分

全桥梁单元节点编号为1~267,单元编号为1~266,每跨支点单元节点号依次为2、22、54、118、150、182、214、246、266。每个梁段分安装挂篮、浇筑混凝土梁段、张拉钢束三个阶段完成,再加上次中跨、中跨、次边跨和边跨合龙,以及二期恒载和1500 d的收缩徐变,全桥建模共分51个阶段完成:

- CS1:浇筑0号块。
- CS2:张拉相应预应力。
- CS3:安装挂篮。
- CS4:浇筑1号块混凝土梁段。
- CS5:张拉1号块梁段相应预应力。
- CS6:移动挂篮。
- CS7:浇筑2号块混凝土梁段。
- .....
- CS31:浇筑11号块。
- CS32:张拉11号块梁段相应预应力。
- CS33:拆除挂篮,安装次中跨合龙段吊篮。
- CS34:浇筑次中跨合龙段混凝土。
- CS35:张拉次中跨第一批预应力钢束。
- CS36:拆除墩梁临时固结、次中跨合龙段吊篮及3、5、8、10号墩水平约束。
- CS37:安装中跨合龙段吊篮。
- CS38:浇筑中跨合龙段混凝土。
- CS39:张拉中跨预应力钢束及第四、六跨第二批预应力钢束。
- CS40:拆除中跨合龙段吊篮及6号墩水平约束。
- CS41:安装次边跨合龙段吊篮。
- CS42:浇筑次边跨合龙段混凝土。
- CS43:张拉次边跨预应力钢束及第二、八跨第二批预应力钢束。
- CS44:拆除次边跨合龙段吊篮及4、9号墩水平约束。
- CS45:满堂支架法浇筑边跨直线段。
- CS46:安装边跨合龙段吊篮。

CS47:浇筑边跨合龙段混凝土,解除支架的竖直方向的正向约束。

CS48:张拉边跨预应力钢束及全桥剩余钢束。

CS49:拆除边跨合龙段吊篮和支架。

CS50:施工二期恒载。

CS51:1500 d收缩徐变时间。

在悬臂施工时,在原有支座处增加临时约束,使墩梁临时固结,每合龙并张拉一跨便解除该跨的临时约束,边跨现浇段在合龙前也是采取临时固结的形式。预应力钢束按不同施工顺序及位置,一共采用了271根模拟。在各个阶段,挂篮荷载是通过全局挂篮编组和阶段挂篮操作实现的。

## 3 结果分析

为确保桥梁在施工过程中对内力、位移及稳定性进行有效控制,在设计时对桥梁结构一些关键部位、关键工况下的应力、位移进行了计算,同时也可作为后续施工提供可靠的监控参数<sup>[3-4]</sup>。

### 3.1 最大悬臂阶段

当悬臂段逐段浇筑施工到11节段(最后一个悬臂节段)时,悬臂伸长到最大,这个施工阶段是比较关键的,这个时候的挠度会对合龙精度产生直接影响;同时,这个阶段对悬臂梁根部产生的弯矩也是最大的。由于连续梁3~10号墩的悬臂部分都一样长,截面特性也相同,所以计算结果是相同的,因此现选取其中的7号墩来说明。

#### 3.1.1 梁段累积挠度计算结果

在11号块张拉后,7号墩最大悬臂阶段各单元前端阶段累计挠度值见表1,其变化规律如图5所示。

表1 7号墩最大悬臂阶段张拉后各梁段

前端累计挠度值		单位:mm					
梁段号	挠度	梁段号	挠度	梁段号	挠度	梁段号	挠度
A11	-1.4	A5	1.2	B0	0.0	B6	0.7
A10	-2.5	A4	1.2	B1	0.3	B7	-0.4
A9	-3.1	A3	1.0	B2	0.7	B8	-2.2
A8	-2.2	A2	0.7	B3	1.0	B9	-3.1
A7	-0.3	A1	0.3	B4	1.2	B10	-2.5
A6	0.8	A0	0.0	B5	1.2	B11	-1.4

#### 3.1.2 截面累计应力计算结果

在11号块张拉后,7号墩最大悬臂阶段各单元截面上、下缘阶段累计应力值见表2,其变化规律如图6所示。图表中应力所在截面若是墩左单元取右截面应力,若是墩右单元取左截面应力。

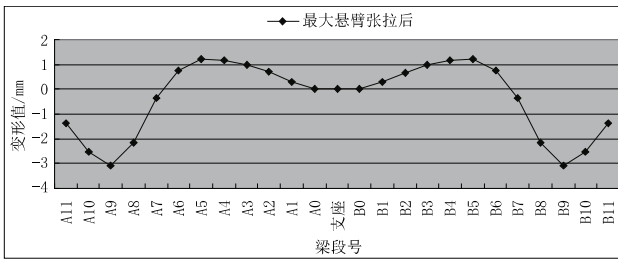


图5 7号墩最大悬臂阶段张拉后各梁段前端累计挠度

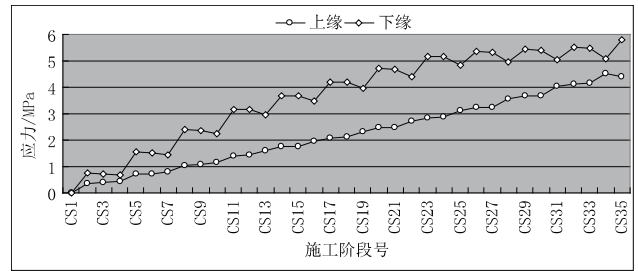


图7 悬臂过程7号墩0号块截面应力历程

表2 7号墩最大悬臂阶段张拉后各单元截面应力 单位:MPa

单元号	上缘	下缘	单元号	上缘	下缘	单元号	上缘	下缘
135	1.22	-0.163	145	9.26	3.02	155	8.23	2.94
136	2.21	0.022	146	10.3	3.11	156	7.23	2.8
137	2.73	0.441	147	9.52	3.88	157	6.34	2.35
138	3.36	0.882	148	5.86	4.14	158	6.03	2.44
139	4.16	1.65	149	4.4	5.79	159	5.05	2.13
140	5.05	2.13	150	4.4	5.79	160	4.16	1.65
141	6.03	2.44	151	5.86	4.14	161	3.36	0.882
142	6.34	2.35	152	9.52	3.88	162	2.73	0.441
143	7.22	2.8	153	10.3	3.11	163	2.21	0.022
144	8.23	2.94	154	9.27	3.02	164	1.22	-0.163

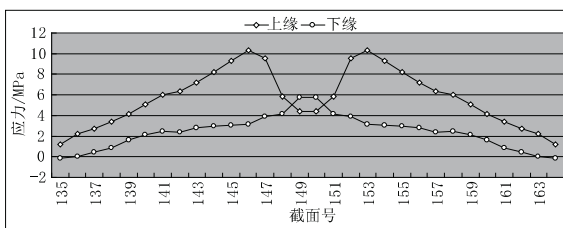


图6 7号墩最大悬臂阶段张拉后各单元截面应力

### 3.1.3 0号块梁体截面应力变化历程

在整个悬臂施工过程中,0号块梁体截面阶段累计应力变化见表3,变化规律如图7所示。

表3 施工各阶段0号块梁体截面累计应力变化 单位:MPa

施工阶段	上缘	下缘	施工阶段	上缘	下缘	施工阶段	上缘	下缘
CS1	0	0	CS13	1.59	2.98	CS25	3.14	4.85
CS2	0.369	0.763	CS14	1.76	3.7	CS26	3.23	5.36
CS3	0.394	0.734	CS15	1.78	3.67	CS27	3.25	5.33
CS4	0.442	0.677	CS16	1.96	3.47	CS28	3.57	4.96
CS5	0.716	1.57	CS17	2.1	4.22	CS29	3.68	5.45
CS6	0.739	1.53	CS18	2.13	4.19	CS30	3.7	5.42
CS7	0.818	1.44	CS19	2.33	3.95	CS31	4.04	5.03
CS8	1.05	2.39	CS20	2.47	4.71	CS32	4.12	5.54
CS9	1.07	2.36	CS21	2.49	4.68	CS33	4.15	5.5
CS10	1.18	2.23	CS22	2.73	4.41	CS34	4.52	5.08
CS11	1.42	3.18	CS23	2.86	5.18	CS35	4.4	5.79
CS12	1.44	3.15	CS24	2.88	5.15			

### 3.1.4 结果分析

从最大悬臂阶段各梁段前端阶段累计挠度图表可以看出,整个悬臂部分挠度不大,说明设计的预应力效果是非常明显的。在较大的预应力效果作用下,靠近墩顶的梁段位置比开始立模时还要高,随着梁段的伸长,梁的自重效果才慢慢超过预应力效果,梁段开始下挠。

从最大悬臂状态下各单元截面上、下缘阶段累计应力状态图表可以看出,各截面应力值具有较好的规律性:

(1)整个悬臂梁段除了11号块在预应力的作用下仅在截面下缘产生局部微小拉应力外,整个悬臂不出现拉应力,有较高的安全储备。

(2)桥梁运营时箱梁梁段离墩顶越近,负弯矩越大,越需要在截面上缘储存较大压应力。从图中可以看出,随着从墩顶往跨中方向的延伸,压应力逐步减小,最大的压应力出现在0号块上,符合桥梁的受力特性。

(3)从跨中往支墩方向压应力成递增趋势,但0号块中心局部出现应力减小的变化趋势。这主要是由于0号块在其自重作用下,对0号块内划分的各个截面处均要产生内力,越靠近支座处产生的内力越大,截面上缘产生拉应力,截面下缘产生压应力。由于该桥0号块较长,有12m长,因此这种效果比较明显。0号块的预应力在整个梁段上比较均匀,它和自重一起作用下,虽然可以减小0号块上缘的拉应力,但这种趋势并没有完全消掉。

在悬臂过程中,箱梁根部(0号块根部)截面的阶段累计应力图表来看,除了在第一个阶段,浇筑完0号块但还未张拉时,由于混凝土的自重使0号块根部上缘产生局部拉应力外,其余阶段0号块根部截面未出现过拉应力;浇筑混凝土阶段,0号块根部截面上缘的压应力要减少,而下缘的压应力是增加的,张拉预应力筋阶段这个趋势则正好反过来,在这两种阶段的循环下,0号块根部截面上、下缘的压应力总体趋势是逐步增大的。



### 3.2 全桥合龙阶段

#### 3.2.1 计算结果

当桥梁施工到悬臂部分全部完成时,形成一个静定的单T结构,以后单T结构每一次合龙,都要进行一次体系转换,直至当浇筑完边跨合龙段并张拉后,桥梁的结构由原来的8个单T结构转化为超静定结构,这时结构的内力状态变得复杂而不易掌握。全桥合龙后桥梁结构的内力状态是否合理关系到运营后桥梁的受力性能及耐久性,因此该阶段也是后期施工过程中监测的重要阶段。经计算,合龙阶段箱梁各单元截面上、下缘的应力(张拉后)规律如图8所示,合龙阶段箱梁各节点的累计挠度(张拉后)规律如图9所示。考虑到连续梁的对称性,仅给出1/2梁体的计算结果。

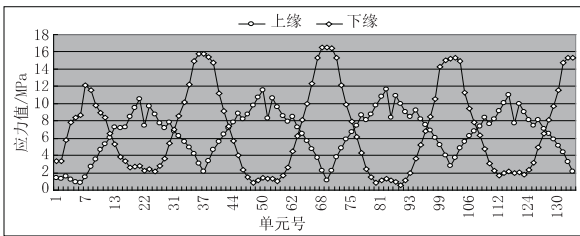


图8 全桥合龙后各梁段截面应力

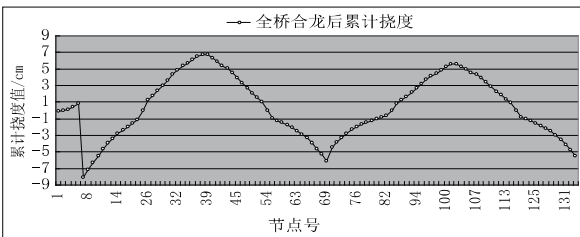


图9 全桥合龙后箱梁各节点累计挠度

#### 3.2.2 结果分析

从全桥合龙阶段各单元左截面应力状态图中可以看出:

(1)全桥整个梁段在合龙阶段没有出现拉应力,符合对全预应力混凝土桥梁的基本要求。

(2)墩顶附近梁段截面的上缘有较高的压应力,而跨中附近梁段截面的下缘有较大的压应力,这与针对桥梁在运营时墩顶部分梁段承受负弯矩、跨中承受正弯矩而预先设置相反应力储备是相适应的。

(3)全桥合龙后,主梁混凝土最大压应力在墩顶附近截面下缘出现为 16.5 MPa,在规范容许范围内。

### 4 参数敏感性分析

在有限元建模时,采用的设计参数值和结构实际状态的参数值之间是有一定偏差的。只有在施工过程中修正对结构状态影响较大的主要参数,才能

达到使桥梁结构的理想预测状态与实际状态相一致的目的。为此,首先要进行设计参数的敏感性分析,选出主要参数。

此次以桥梁结构最大悬臂阶段和全桥合龙阶段的主梁挠度为控制目标,利用桥梁结构分析系统,选取预应力、混凝土容重、混凝土弹性模量、截面尺寸、徐变系数、收缩系数为参数变量,修改单个参数值,将参数变化幅度控制在10%,计算和比较它们对主梁挠度的影响。根据计算得到的数据结果绘制出图10与图11。

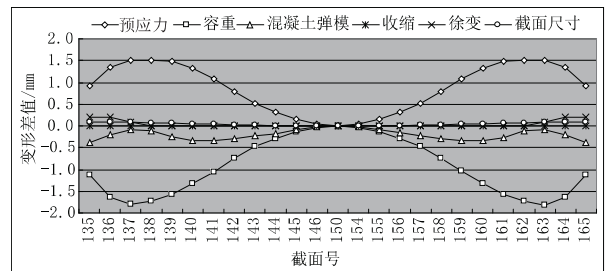


图10 7号墩最大悬臂状态梁体挠度的参数敏感性

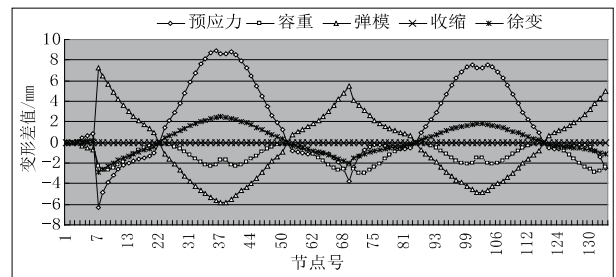


图11 全桥合龙阶段梁体挠度的参数敏感性

从图10中可以清晰地看到,由施工开始至墩最大悬臂状态时,在这段较短的时间范围内,在一系列对桥梁状态有影响的参数当中,起主要控制作用的参数是预应力、混凝土弹性模量、混凝土容重,混凝土收缩的影响可以忽略,截面尺寸的影响也非常小(截面尺寸的误差引起主梁恒载变化的同时,也引起主梁刚度的变化,两者对主梁挠度的效果可以近乎抵消),混凝土徐变的影响虽然比截面尺寸和收缩系数的影响要大,但在施工至最大悬臂时的这段时间里,其影响相对较弱。

从图11中可以看出,施工至全桥合龙时,在这段较长时间范围里,对桥梁状态影响的主要参数除预应力、混凝土弹性模量、混凝土容重之外,混凝土的徐变也起了很重要的作用,而且在桥梁合龙之后,徐变还要经历一个较为漫长的过程。

由以上分析比较可知,在这种长联大跨混凝土桥梁施工过程中,预应力、混凝土弹性模量、混凝土容重是对桥梁状态起主要控制作用的参数,而混凝土徐变也是绝不可忽视的重要参数。

保证结构的耐久性。承台构造尺寸见图7。

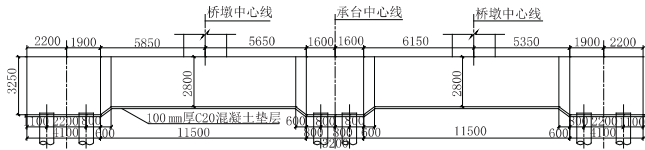


图7 承台构造图

为满足地铁运营单位对结构上方零增荷载的要求,桥头采用EPS路堤处理,避免台后荷载增加和不均匀沉降,保证了主干路的行车舒适性。另外,对侵入辅道的桥梁承台上方路面基层采用连续配筋混凝土结构的特殊设计,避免承台周围路基不均匀沉降。

### 3.5 抗震设计

在车站已处于运营的条件下,为保证结构能有较好的整体抗震性能,根据不同的抗震设防目标对延性抗震和减隔震抗震进行多方案比较。经过详细的抗震分析,全桥采用了双曲面球钢减隔震支座,通过减隔震设计减小桥梁结构对车站结构的地震作用,以提高站桥合建工程的抗震安全性。

工程抗震设防水准和抗震措施均依据城市桥梁抗震设计规范,采用全桥抗震分析计算模型。桩基采用具有6个自由度的弹簧对其进行模拟,刚度系数由m法确定。与地铁车站相连的墩柱边界条件偏于

保守地采用固结模拟。

工程的抗震设防烈度为7度,地震动峰值加速度A为0.1g,设计地震分组为第1组,场地类型为IV类,场地特征周期 $T_g$ 为0.65s,桥梁结构阻尼比取0.05。在E1地震作用下,桥梁结构尚处于弹性工作阶段,其地震作用响应采用反应谱分析方法计算。在E2地震作用下,支座抗剪销被剪断,其地震作用响应采用时程分析方法计算。经验算,全桥桥墩立柱、支座、桩基在E1、E2地震作用下均满足规范<sup>[3]</sup>要求。

## 4 结语

本工程采用桥梁与地铁地下车站合建形式。虽然工程边界条件不断变化,使跨线桥设计周期长、设计难度较大,但因精心合理的设计方案和技术措施,工程仅用半年时间即建成通车,获得了良好的社会效益。站桥合建设计方案有效节约了建设用地,降低了建设费用,为今后土地资源愈发紧张的类似城市基础设施建设提供了较好的示范案例。

### 参考文献:

[1] 上海浦东建筑设计研究院有限公司. 杨高路~民生路立交工程可行性研究报告[R].上海:上海浦东建筑设计研究院有限公司, 2007.  
 [2] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].  
 [3] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].

(上接第44页)

## 5 结语

连续梁桥是我国预应力混凝土大跨径桥梁的主要桥型之一,其设计和施工也日益引起重视,以使该桥型向更加合理化、精细化的方向发展。本文结合工程实例对长联大跨径连续梁桥进行结构计算,并对最大悬臂状态和全桥合龙阶段的计算结果进行详细分析,分析结论可以为同类型的桥梁提供借鉴。此外,本文对桥梁施工期间的诸多参数进行了敏感性

分析,相应结论有助于同类型桥梁的施工监控和运营维护。

### 参考文献:

[1] 邵容光. 混凝土弯梁桥[M].北京:人民交通出版社,1994.  
 [2] 李惠生. 曲线梁桥结构分析[M].北京:中国铁道出版社,1992.  
 [3] 葛耀君. 分段施工桥梁分析与控制[M].北京:人民交通出版社, 2003.  
 [4] 张继尧. 悬臂现浇预应力混凝土连续梁桥[M].北京:人民交通出版社,2004.