

PC 梁桥顶推施工过程的仿真分析

王 勇

(广东省建筑设计研究院, 广东广州 510010)

摘 要:顶推法是预应力混凝土连续梁桥的一种先进的无支架自架设施工方法, 由于其具有不影响通航、缩短工期和降低施工成本等优点而得到推广, 但在顶推施工过程中主梁的受力远较采用其他常规的施工方法要复杂, 有必要对施工过程进行准确的模拟。本文以广州市内环路的珠江东桥为工程背景, 采用了大型通用有限元程序 ANSYS 建立全桥实体模型, 对箱梁桥在顶推施工过程的受力与变形进行仿真计算分析。根据计算分析的结果, 对局部应力较大部位, 提出通过加强构造措施的建议。最后, 提出建立三维模型进行桥梁结构仿真分析的必要性。

关键词:连续梁桥; 顶推法施工; 有限元法; 仿真计算

中图分类号: U445.462 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)03-0055-03

1 概述

顶推法施工的成功采用, 为预应力混凝土桥梁开创了一种先进的无支架自架设施工方法。与其它施工方法相比, 顶推法具有以下特点和优点: 桥梁上部结构的施工作业不影响桥位处现有的交通状况; 可以减少用于桥梁上部结构施工的若干安装设备; 顶推施工中每个节段的顶推大约只需要几个小时就可以完成, 而梁体制造的工作地点集中在制梁台座上, 有利于生产作业的最佳组织, 可以用平行流水作业的方式来组织生产工作, 可以缩短结构的施工工期, 降低桥梁施工成本。另外, 采用顶推施工方法的桥梁, 其上部结构的桥面板的施工不会像悬臂浇筑法、固定支架法及移动支架法那样显著地受到模板支撑体系的限制, 因此一次整体浇筑的混凝土结构的宽度可达 20m 以上^[1]。

虽然顶推法有上述的许多优点, 但在顶推施工过程中, 主梁的受力却远较常规的施工方法复杂。在整个顶推施工过程中, 桥梁上部结构随着施工阶段的进展, 位置不断变化, 从而不断转换结构体系, 超静定次数由低到高, 逐步形成最后的结构体系。主梁各个位置的约束条件与内力、变形在整个顶推施工过程中均不断地变化。为了能够清楚地了解主梁在整个顶推施工过程中的受力情况, 有必要通过建立全桥的实体模型, 对其整个施工过程进行仿真计算分析^[2]。

外环放射线路是连接内环路与环城高速公路及向外继续辐射的联络性交通走廊, 是广州市快速路网主骨架的重要组成部分, 广佛出口放射线就是其中一条正西向的放射路, 它东起内环路的中山八路立交, 西接外环路的黄岐立交, 是广州市西部向外交通辐射的主要通道。珠江大桥工程则是该条线上的重要环节。按照广佛出口放射线的总体设计走向, 放射线沿现广茂铁路两边前行, 跨珠江时, 在现有珠江大桥两边建设新的珠江大桥, 以满足放射线过江的要求, 由于沿线跨越珠江两次, 从而形成了珠江大桥东桥、西桥各 2 座共 4 座跨江大桥。珠江大桥东、西桥分别为 $5 \times 50\text{m}$ 一联和 $7 \times 50\text{m}$ 一联的等截面预应力混凝土连续梁桥, 根据多方案比选, 最后确定采用顶推法施工。大桥的轴线在平面和竖面上均为直线; 桥面横向设置 2% 的单向横坡, 箱梁截面为非对称结构。大桥每幅桥的箱梁断面均为斜腹板单箱单室型, 桥面宽度为 15.0m (其中两侧翼板宽

度均为 3.5m), 底板宽 6.5m。大桥沿行车方向梁高不变, 行车中线处的梁高为 3.15m, 顶板厚度为 26cm, 底板厚度为 24cm, 翼板边缘处厚度为 15cm, 腹板的厚度在跨中位置处为 40cm, 在墩顶的位置处为 59cm, 见图 1 所示。顶推过程中桥梁前端设置一长 34m 的钢导梁^[3]。

由于东西桥都是在第一施工段完成并将导梁顶推出去时, 悬臂端的长度最大, 从而在箱梁顶板产生的应力最大, 其他施工阶段桥梁结构的应力变化基本呈周期性变化, 故选取其中的东桥进行仿真分析。

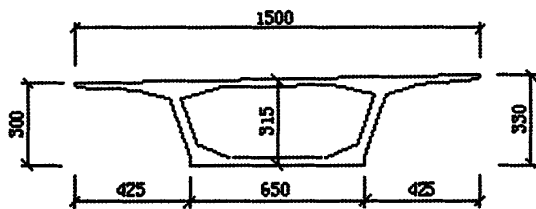


图1 珠江东桥主梁截面示意图

2 计算模型

采用顶推法施工的桥梁, 在顶推施工的过程中, 桥梁的结构体系和约束条件不断变化, 从而引起了主梁受力的不断变化, 其在施工过程中的受力特点, 与常规的支架现浇、悬臂施工等有很大的不同, 主梁各部分受力复杂, 有必要进行深入的计算和分析, 以准确地了解结构在整个顶推施工过程中的受力情况, 保障顶推施工过程中的施工安全。

现行的桥梁结构分析软件, 对桥梁在顶推施工过程所做的计算都是采用平面杆系计算程序, 将主梁简化为平面梁单元进行模拟。这种计算模型较为简单方便, 计算速度较快, 结果也具有一定的准确性。但是由于其在计算时作出了较大的简化, 只能直接计算得到主梁各部分的内力, 然后根据内力换算各截面的应力, 一般不考虑箱梁翘曲的影响。而作为横截面为单向横坡的箱梁, 其弯曲中心和剪切中心的水平坐标并不一致, 横坡越大, 剪切中心的水平坐标与弯曲中心偏离越大, 在自重的作用下, 也会产生翘曲。对于横向和竖向预应力束的作用一般平面杆系程序也不考虑。此外, 平面梁单元也无法分析结构的局部应力 (如钢导梁与混凝土梁的连接处、预应力束张拉端锚具下等处)。故选用梁单元来计算截面应力, 其结果具有一定的近似性。

收稿日期: 2006-03-07

作者简介: 王勇(1964-), 男, 安徽淮北人, 硕士, 高级工程师, 从事道桥工程设计工作。

在本文中,为了尽可能得到比较精确的计算结果,采用了大型通用有限元计算程序 ANSYS6.1 来建立全桥实体模型,对珠江东桥的顶推施工过程进行仿真分析,计算全桥施工过程的内力及挠度变化。

本次计算采用空间块体单元 Solid45 模拟珠江大桥的混凝土箱梁结构,单元数为 80455,模型中不考虑普通钢筋的影响,而纵向预应力束的影响采用 Link8 单元来模拟,单元数为 13832,竖向和横向预应力束则采用等效节点荷载施加的方式模拟。在顶推施工过程中前端的钢结构导梁也采用实体单元 Solid45 来模拟,单元数为 1098。全桥的节点总数为 112190。纵向预应力束单元与混凝土实体单元通过约束方程耦合,结构分析模型见图 2 所示。其中,混凝土的弹性模量为 $3.5 \times 10^4 \text{MPa}$,密度为 25kN/m^3 ,钢导梁的弹性模量为 $2 \times 10^5 \text{MPa}$,预应力束的弹性模量为 $1.95 \times 10^5 \text{MPa}$,密度为 78.5kN/m^3 。

模拟梁桥的顶推施工过程,有以下几个技术难点:

(1)施工过程中,施工段连续添加,即一个施工段完成后,向前推出一段,再浇注下一施工段,故使用单元“死/活”功能来模拟这一过程。ANSYS 中,单元的“生”并非真正的添加新单元,单元的“死”并非移走“死”的单元。对于死单元,程序通过一个很小的因子乘以它们的刚度,在荷载矢量中,和这些“死”单元相联系的单元荷载也被设置为 0。当单元“生”时,只是重新激活。所以,在处理前必须定义所有的单元,包括在以后分析中才会“生”的单元。在求解期间,不能建立任何新单元,为了添加新单元,首先必须让它们“死”,然后在合适的荷载步中重新激活它们。单元被激活时,它的刚度、质量和单元荷载等返回到原始值,但是没有应变记录^[4]。

(2)施工过程中,由于自重、预应力筋等的综合作用,混凝土的应力是不断变化,而且已浇注完成的梁段的总应力应等于在后面施工过程中产生的应力,累加上原有的应力。

(3)由于顶推过程中,对于结构来说,支座是变化的,可以采用两种方式来模拟,一种是结构移动,而支座位置不变,另一种是结构位置不变,而支座变化。本文采用后一种方式处理。

3 计算结果及分析

按照上述方式建立全桥的分析模型,模拟分析了珠江东桥的顶推施工全过程,整个计算总共分为 22 个施工阶段,各阶段具体的施工内容详见表 1。

表 1 施工过程计算阶段

施工阶段	施工内容
1	在制作平台浇筑 1 号梁段,张拉预应力钢筋
2	将 1 号梁段往前顶推出 12.5m,导梁处于悬臂状态
3	在预制平台上浇筑 2 号梁段,张拉预应力钢筋
4	将 2 号梁段往前顶推出 25m
5~18	浇筑 3~9 号梁段,张拉预应力钢筋,将 3~9 号梁段往前顶推 25m
19	浇筑 10 号梁段,张拉预应力钢筋
20	将 10 号梁段顶推出 25m,拆 18m 长导梁
21	浇筑 11 号梁段,张拉预应力钢筋,拆剩余导梁
22	拆临时墩,张拉后期索,上支座,落梁

表 2 珠江东桥顶推施工过程主梁的应力与变形

施工阶段	主梁最大 挠度(mm)	最大纵向 压力(MPa)	最大纵向 拉力(MPa)	侧梁纵向 压力(MPa)
1	-2.00	-11.2		-4.2~-0.3
2	-2.40	-6.0	1.7	-0.4~-1.1
3	-4.76	-10.5		-2.3~-2.6
4	14.74	-9.6	2.7	-4.0~-2.2
5	10.71	-6.7	0.0	-2.3~-2.6
6	-13.47	-7.5	1.7	-2.4~-2.7
7	-40.47	-11.5		-2.3~-2.7
8	-22.79	-12.4	2.1	-2.7~-3.1
9	-40.47	-11.5		-2.4~-2.7
10	-22.79	-12.4	2.1	-2.7~-3.1
11	-22.77	-10.8		-2.3~-2.8
12	-35.09	-18.4	1.8	-2.8~-3.1
13	-34.91	-12.5		-2.1~-2.6
14	-19.50	-9.4	2.7	-3.2~-4.3
15	-19.50	-11.8		-2.3~-2.6
16	-34.42	-12.4	2.7	-3.1~-4.3
17	-36.47	-12.5		-2.1~-2.6
18	-20.95	-12.4	3.0	-2.9~-4.3
19	-20.97	-11.9		-2.3~-2.6
20	-39.48	-15.6	2.8	-3.3~-4.4
21	-17.42	-11.6	2.5	-4.2~-4.7
22	-8.71	-15.5	2.3	-3.6~-4.4

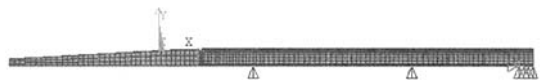


图2 第6施工阶段的结构仿真分析模型简图(纵向)

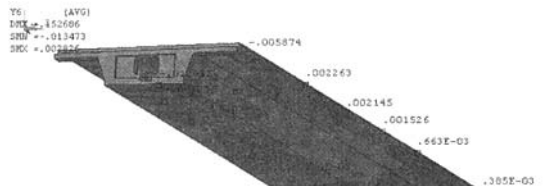


图3 竖向位移图(单位:m)

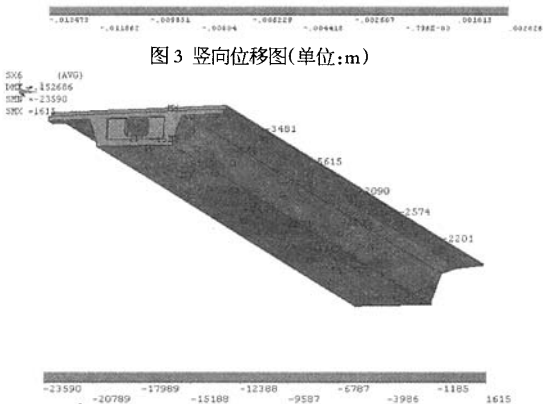


图4 纵向应力分布(单位:KPa)

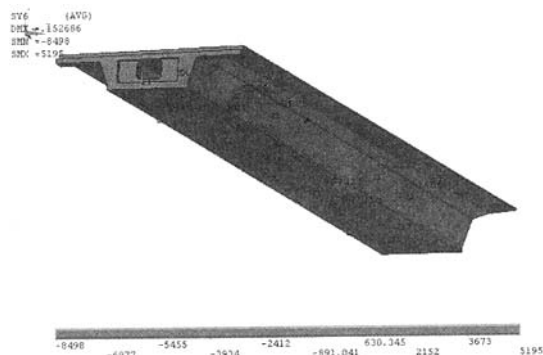


图5 竖向应力分布(单位:KPa)

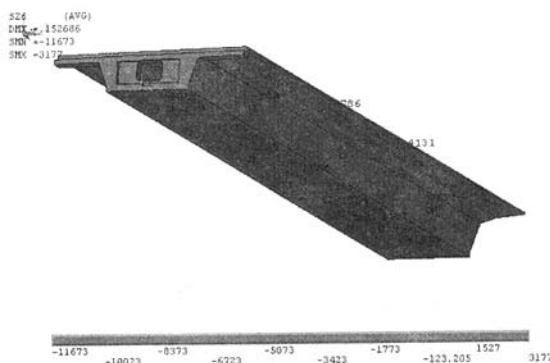


图6 横向应力分布(单位:KPa)

图2为第6施工阶段时的计算模型,前半部分纵断面为梯形的结构为钢导梁,后半部分为1~6施工阶段所添加的所有单元,至于后面的施工段单元,由于被“杀死”,在结构模型简图中未显示出来。钢导梁单元与混凝土单元通过节点的耦合来实现连接。由于文章篇幅所限,仅在图3~图6中列出了第6施工阶段的计算结果,包括大桥的竖向位移图以及箱梁结构的纵向、竖向和横向应力分布图。表2中只列出整个顶推施工阶段主梁部分断面的应力值与挠度最大值的计算结果。

综合上述施工全过程的仿真分析的结果,可以得出以下几个结论:

(1)珠江大桥东桥在顶推施工过程中,主梁往下的最大挠度不超过41mm,向上的挠度不超过3.5mm,这是由于大桥的刚度较大,施工中变形较小。

(2)从总体上看,大桥施工过程中箱梁主要承受压应力,除了少数区域外,箱梁的压应力均小于15MPa。在部分施工阶段,箱梁与钢导梁相连位置和预应力钢束锚固区域的最大压应力超过22.5MPa。

(3)距离钢导梁较远处,箱梁底板部分区域出现纵向拉应力的最大值一般小于2.0MPa,张拉端局部应力集中的区域拉应力可能达到3.5~4.0MPa,由于预应力束张拉端锚具下,配置了螺旋式钢筋,可阻止混凝土受拉开裂。

(4)距离钢导梁较远处,箱梁的横向应力由顶板和底板的应力值来控制,底板横向的最大拉应力为2.0MPa,最大压应力为-5.09MPa,基本符合混凝土的抗拉强度和抗压强度要求。

(5)距离钢导梁较远处,箱梁的竖向应力基本都是压应力,最大值和最小值都出现在腹板,其数值在-0.4~-4.7MPa

之间,远小于桥梁规范中规定的混凝土的抗压强度标准值,说明竖向预应力钢筋的配置比较合理。

(6)计算结果基本上可以用箱梁跨中截面底板和支座附近顶板的纵向应力来控制,在预应力张拉端附近区域、支座截面以及钢导梁与混凝土相连截面部分单元应力较大,这是由于这些部位的局部应力效应引起,可通过构造措施,预防受力裂缝的出现。

(7)施工过程仿真分析时,没有考虑温度的影响。而实际工程施工过程中,温度是随时间变化的,尤其是在广州地区,日温差较大,由温度产生的应力不容忽略,叠加上结构由自重和预应力等综合因素产生的应力,得到的最大主应力有可能大于混凝土的抗拉强度,从而使结构开裂。所以在桥梁施工过程中,应注意加强对混凝土的养护,预防温度裂缝出现。在箱梁的设计配筋时,根据结构各部位的受力特性,适当增加非预应力钢筋的数量。

(8)通过对桥梁结构的仿真分析发现,由于结构自重而引起箱梁翘曲变形较小,但是在预应力束的作用下,箱梁的翘曲就比较明显。结构受力分析时,只有考虑了翘曲变形,才能更好地把握结构在施工全过程各个部位的挠度变化,有利于在顶推施工时,准确将箱梁移到支座位置,减少施工误差。

4 结论

本文采用了大型通用有限元计算程序ANSYS,选择三维实体有限元模型对珠江东桥全桥的整个顶推施工过程进行了详细的计算和分析,得到了大桥在整个顶推施工过程中的应力和变形结果。计算的结果表明,在顶推施工过程中,珠江大桥东桥箱梁结构在自重、预应力束和施工荷载等综合因素下产生的最大应力值符合现行桥梁规范的限值规定,施工中箱梁挠度较小,说明结构刚度较大,设计拟定的施工流程可行。

通过建立全桥实体模型,对桥梁顶推过程中位移的准确计算,有利于严格控制底模的轴线,预防桥梁的中心线扭转;准确地将梁体移到预定的位置,减少施工误差。对预应力束张拉端锚下局部应力的正确分析,有利于在设计中合理配置螺旋式钢筋,防止张拉端锚具附近的混凝土局部受压破坏。通过对钢导梁与混凝土箱梁连接处应力的分析,及对预应力筋、构造钢筋和各种连接件纵横交错、空间布置紧凑问题的合理处理,能有效地预防与钢导梁连接处混凝土受拉开裂。

使用实体单元对桥梁顶推施工的过程进行计算分析,与通常所使用的平面杆系计算程序相比,虽然计算模型比较复杂,计算需时较长,但计算结果的准确度较高,有助于详细精确地掌握桥梁在整个顶推施工过程的受力情况和变形,是一种有效而可行的仿真分析方法。

因此,建议今后对采用顶推法施工的预应力混凝土连续箱梁桥设计时,建立三维实体有限元模型对全桥在整个施工阶段及成桥运营后整个过程的受力变化和挠度变化进行精细分析,以减少由于结构仿真计算的误差而引起结构出现受力裂缝。

参考文献

- [1] 陈青.连续梁桥的顶推施工技术[J].国外公路,1998,(1):22-25.
- [2] 刘树爱.顶推施工阶段内力分析及临时结构设计.石家庄铁道学院学报,1998,(11):1-5.
- [3] 博嘉科技.有限元分析软件——ANSYS 融会与贯通[M].中国水利水电出版社,2002:369.
- [5] 王勇.珠江大桥顶推法施工过程仿真分析及相关技术研究[D].广州:华南理工大学,2003.