

# 大跨度连续刚构在施工阶段的局部分析

杨允表, 陈淦伟

(合乐中国有限公司, 上海市 200003)

**摘 要:**以苏通长江大桥辅通航孔桥三跨连续刚构为例, 在分析施工阶段挂篮荷载作用下的局部应力问题时, 利用圣维南原理合理简化问题, 使分析变得简单而有效; 然后运用 SAP2000 的三维空间实体单元对局部模型进行了分析, 分析得到的结果可供实际工程参考。

**关键词:**大跨度连续刚构; 施工阶段; 局部分析; 圣维南原理; 三维空间实体单元

**中图分类号:**U448.23 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)04-0091-04

## 1 概述

苏通长江大桥辅通航孔桥为 140+268+140 m 三跨连续刚构, 单幅桥面宽 16.4 m。桥面结构采用变截面单室箱梁; 箱梁高度由中跨支点的 15 m 按 1.6 次抛物线变化到跨中或边跨合拢段的 4.5 m; 箱梁底板厚也由中跨支点的 1.7 m 按 1.6 次抛物线变化到合拢段的 0.32 m; 箱梁顶板的悬臂部分宽 4.45 m, 板厚由悬臂端的 0.18 m 变化到腹板根部处的 0.99 m, 而在箱梁中线处的厚度为 0.32 m; 腹板厚度从中跨支点的 1.0 m 逐级变化到合拢段的 0.45 m。连续刚构施工采用现浇挂篮悬臂施工方法, 节段长度分为 3 m、4 m、5 m 三种, 节段的最大重量为 2942 kN。挂篮各锚点的布置图, 其横截面及纵立面分别如图 1 与图 2 所示, 各锚点力、千斤顶作用力在浇筑箱梁节段混凝土时的最大值及作用方向如表 1 所列。

表 1 挂篮各锚点、千斤顶的最大值及作用方向

锚点与千斤顶	锚点 1	锚点 2	锚点 3	锚点 5	千斤顶
最大作用力	327 kN	244 kN	266 kN	285 kN	2704 kN
作用方向	向下	见图 1	向下	向上	向下

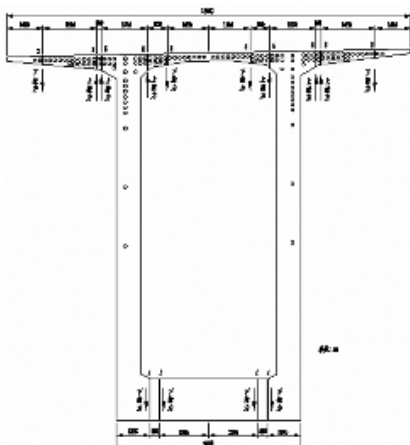


图 1 浇筑混凝土时锚点编号及布置(横截面)

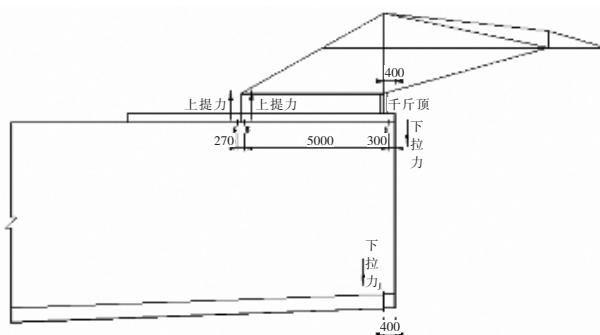


图 2 浇筑混凝土时锚点编号及布置(纵立面)

由于挂篮各锚点及千斤顶的作用力很大, 使连续刚构的锚固节段会产生比较大的局部应力, 因此有必要分析其局部效应, 为实际工程提供参考。

## 2 对问题的初步分析

在总体分析中, 一般可利用平面杆系单元或三维空间梁单元来模拟连续刚构在各个施工阶段的力学性能, 其中预应力可用等效荷载或预应力单元来模拟; 但是, 总体分析不能概括一切, 如果要解决例如箱梁在挂篮施工荷载作用下的局部应力问题, 那么须用局部分析来解决, 也就是结构设计与分析三个层次的概念<sup>[1]</sup>。在进行局部分析的结构模拟时, 可用于总体分析的梁单元、板壳单元在局部分析中可能不再有效, 就苏通大桥连续刚构来说, 如用三维板壳单元来模拟, 则无法正确模拟箱梁各个板块的交接区域, 更无法模拟预应力管道对箱梁截面的削弱效应, 也就无法得到准确的分析结果, 在一般的局部分析中, 通常用三维实体单元来模拟, 往往能得到比较令人满意的分析结果。但是, 如果对整个连续刚构都用三维实体单元来模拟, 并且运用比较精细的单元划分网格来模拟预应力管道的开孔, 则需要数以百万计的单元, 这样会对结构模型的建立、运行及计算结果的后处理等带来很大的困难, 所以对于整个大型结构

收稿日期: 2006-05-10

作者简介: 杨允表(1969-), 男, 浙江宁波人, 高级工程师, 主要从事桥梁与结构工程设计工作。

用三维实体单元来模拟在现阶段只具理论上的可行性。

利用基本的力学原理来简要分析箱梁节段在预应力作用下的应力分布特点。纵向预应力在其锚固区会产生应力集中现象,但可由预应力锚具的构造及锚固区配筋的加强来削弱;其次,根据圣维南原理,局部的应力集中对于距离锚固区大于一个梁高的截面影响已经很小,并可以由考虑箱梁剪力滞效应的梁理论来解得,也即可由总体分析得到;再者,由于箱梁的断面尺寸较大,锚固挂篮的箱梁节段由纵向预应力产生的纵向应力除锚固区之外应该不会很大,其它两个方向上的应力,即横向应力和板厚度方向上的应力也比较小。竖向预应力作用在腹板上,使腹板产生一定数量的竖向压应力,从而减少了腹板的主拉应力;在一些箱梁节段上,竖向预应力的作用线与腹板的形心线不重合,在腹板的两端产生偏心矩,使顶板和底板产生一定的横向应力,但是对纵向应力的影响极小。作用在顶板上的横向预应力会使顶板及腹板上部产生比较大的横向应力,并沿着腹板向下逐渐减小,到达底板时应力已经很小;此外,横向预应力对箱梁的纵向应力及板厚度方向的应力影响不是很大。

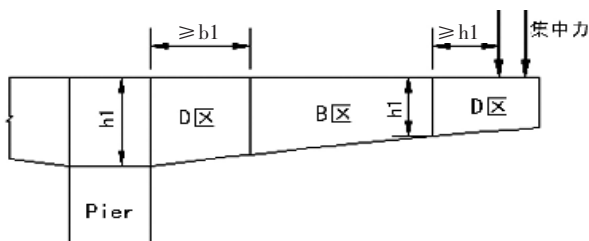


图3 D区与B区示意图

同样,箱梁节段在挂篮施工荷载作用下的局部应力分析,也可应用圣维南原理来简化,如图3所示,图中D区表示不连续区,无法用一般的梁理论解决,而B区表示梁理论区,可用考虑剪力滞效应的箱梁理论来解决<sup>[2]</sup>。总体上,箱梁节段在挂篮施工荷载作用下,不会产生很大的纵向应力,而且板厚度方向上的应力也不会很大;但是,箱梁顶、底板的横向应力和纵向局部应力是值得注意的关键问题。挂篮的千斤顶作用力直接落在腹板正对顶板的位置,顶板的横向应力在千斤顶的分布荷载范围及邻近区域可能比较大,但在顶板的绝大部分区域内应该比较小,其纵向也不会出现大的局部应力。锚点1作用在底板上,当节段的截面较大时,底板与腹板都比较厚,底板的横向应力与纵向局部应力都比较小;但是,当节段的截面比较小

时,底板与腹板比较薄,如不改变锚点的位置而使其与腹板中心线之间的距离相对增大,那么,即使锚点力不是很大,底板的局部区域也会产生比较大的横向应力及纵向局部应力。锚点2、3、5作用在顶板上,其中锚点5的作用点位于箱梁的顶板与腹板的加腋处,离腹板中心线很近,箱梁顶板由其产生的横向应力和纵向局部应力,除锚固点的应力集中区域外应该不会很大,而锚点2的与3的作用点离腹板的中心线有一定的距离,特别是锚点2的一个作用点离悬臂端比较近,在悬臂板的根部引起较大的横向弯矩和纵向弯矩,再加上纵向预应力管道的削弱作用,箱梁顶板会存在比较大的横向应力和纵向局部应力。所以,以上这些问题应当是连续刚构箱梁局部分析中最值得注意的。

### 3 三维空间实体模型的分析结果

该部分只考虑了两个有代表性的施工阶段,并分别建立了箱梁节段局部分析的三维空间实体模型:第一个模型考虑的施工阶段为0#块与1#块完成后,施加纵向预应力T1与F1并挂篮浇筑2#块混凝土;第二个模型考虑的施工阶段为30#块完成后,施加纵向预应力T30与F30并挂篮浇筑31#块混凝土。第一个模型着重考察顶板的纵向与横向应力,而第二个模型考察顶板与底板的纵向与横向应力,具体分析过程及计算结果如下所述。

#### 3.1 三维空间实体模型一(见图4)

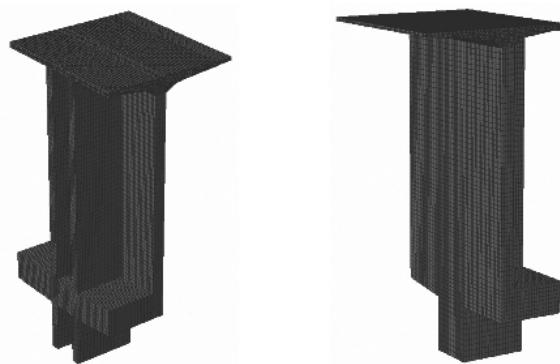


图4 三维空间实体模型一

图4所示的三维空间实体模型一包含了0#块及1#块,部分墩柱和横隔板,近似利用对称结构及对称施工的条件,取连续刚构双主墩间的中心线为其中的一个对称边界,再取其中的一半结构来进行建模,并在箱梁的顶板模拟纵向预应力管道的开孔,如图5所示。在墩柱底面引入固定约束的边界条件,并在对称边界上引入对称结构在

对称荷载作用下的位移约束边界条件。考虑的荷载工况有结构自重、箱梁节段的纵、横向及竖向预应力, 施加在横隔板的横向预应力和挂篮在浇筑节段混凝土的锚点力及千斤顶作用力。



图 5 模型一顶板纵向预应力管道的模拟

模型一的计算结果可以证明第二部分的分析内容是正确的。图 6 显示了箱梁顶板的代表截面(距离箱梁节段端部 0.45 m)在荷载组合 1 与组合 2 作用下的纵向应力的分布情况。其中荷载组合 1 表示自重与纵向预应力的组合, 而组合 2 表示自重、纵向预应力与挂篮施工荷载的组合。



(a) 荷载组合 1



(b) 荷载组合 2

图 6 箱梁顶板代表截面的纵向应力分布图

图 6 显示了代表截面的纵向应力分布情况: 除锚固区的应力集中外, 距离锚固区最近的一个预应力管道处存在 4 MPa 左右的压应力, 其余区域的压应力均  $< 1$  MPa; 拉应力在荷载组合 1 作用下最大为 0.6 MPa, 而在荷载组合 2 作用下, 顶板顶面最大为 0.9 MPa, 悬臂板底面最大达 2.2 MPa, 主要是由锚点 2 的其中一个靠近顶板悬臂端的作用力引起的, 但由于该拉应力在纵向的分布长度很窄, 属于局部性的, 其值又小于 C60 的标准抗拉强度 2.85 MPa, 在挂篮施工过程中要引起注意。

箱梁顶板在结构自重及挂篮施工荷载作用下会出现比较大的横向拉应力。如图 7 所示, 箱梁顶板顶面在荷载组合 3, 即自重与挂篮施工荷载的组合作用下, 在大范围内存在着比较大的拉应力, 图中深蓝色区域的最大拉应力约为 7.0 MPa, 浅蓝色区域的最小拉应力约为 3.2 MPa, 均大于 C60 混凝土的标准抗拉强度 2.85 MPa, 也就是顶板混凝土开裂的可能性比较大。图 8 表示了箱梁顶板代表截面的横向应力分布情况, 图中所示的最大拉应力为 6.9 MPa。

低箱梁顶板的横向拉应力水平, 其中一个可采用的方法就是在挂篮浇筑下一节段的混凝土

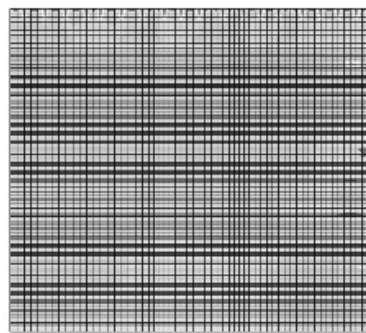


图 7 顶板顶面在荷载组合 3 作用下的横向应力分布图



图 8 代表截面在荷载组合 3 作用下的横向应力分布图

前, 张拉该节段的横向预应力, 但这与设计要求的施工顺序相冲突, 破坏了横向预应力在箱梁节段之间的连续性。定义荷载组合 4 为自重、挂篮施工荷载及考虑部分预应力损失后的横向预应力的组合, 箱梁顶板的顶面在荷载组合 4 作用下的横向应力分布如图 9 所示。

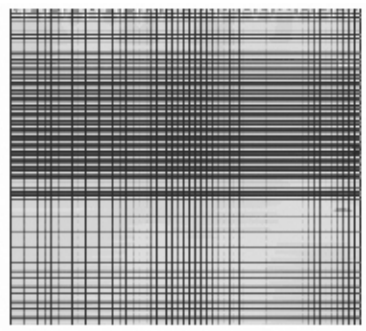


图 9 顶板顶面在荷载组合 4 作用下的横向应力分布图

图 9 中, 除横向预应力锚固区和挂篮锚点力作用点的应力集中外, 箱梁顶板顶面的最大横向拉应力为 0.2 MPa, 从而使顶板混凝土出现裂缝的机率大大降低。图 10 所显示的箱梁代表截面的横向应力分布图中, 除纵向预应力锚固区的应力集中外, 最大横向拉应力发生在纵向预应力管道之间的水平连线的区域, 但其最大值为 1.1 MPa, 小于 C60 的标准抗拉强度。



图 10 代表截面在荷载组合 4 作用下的横向应力分布图

因此, 修改横向预应力的施工顺序, 对苏通大桥连续刚构的现行挂篮施工工艺可能是必需的。



### 3.2 三维空间实体模型二

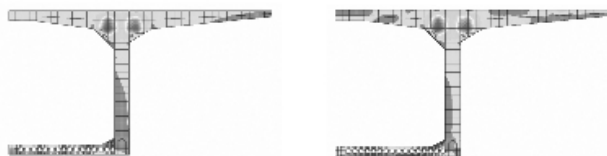


图 11 三维空间实体模型二

三维空间实体模型二,如图 11 所示,包含了箱梁节段断面比较小的 29# 块及 30# 块。模型二中,由于箱梁顶板内存在的预应力管道数较少,所以不再考虑管道的开孔对顶板截面的削弱效应;但是,由于底板内的纵向预应力管道比较密集,在建模中必须考虑底板预应力管道的开孔效应,如图 12 所示。



图 12 模型二底板纵向预应力管道的开孔模拟

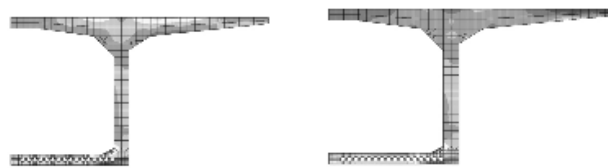


(a) 荷载组合 1

(b) 荷载组合 2

图 13 箱梁代表截面的纵向应力分布图

模型二的计算结果再次证明了第二部分的分析内容的正确性。图 13 显示了箱梁代表截面(距离箱梁节段端部 0.6 m)的纵向应力分布情况。除锚固区的应力集中外,其余大部分区域的压应力  $< 1$  MPa。纵向拉应力的分布与荷载工况有明显的关系,在荷载组合 1 作用下,顶、底板处的拉应力均  $< 0.2$  MPa;但是,在荷载组合 2 作用下,顶板的拉应力最大为 1.5 MPa,发生在顶板悬臂部分的底面,底板的最大拉应力达到了 3.8 MPa,发生在底板的底面。底板的纵向拉应力主要是由锚点 1 作用下产生的,但其纵横向的分布范围比较小,属于局部性的。再者,31# 节段混凝土重量较小,锚点力的大小也不可能达到最大值,在结构模型中施加最大的挂篮施工荷载是非常保守的。底板底面 3.8 MPa 的拉应力超过了 C60 的标准抗拉强度,但扣除锚点作用力的应力集中与作用力偏大等因素,再加上对锚点的构造局部处理,如加大锚点垫块的尺寸与刚度,在施工过程中能避免在底板的纵向出现大于 0.2 mm 宽的裂缝,甚至不出现裂缝。当然,底板的纵向局部应力还得与横向应力和面内剪应力相组合,确定最大主拉应力及其主方向的裂缝宽度。



(a) 荷载组合 3

(b) 荷载组合 4

图 14 箱梁代表截面的横向应力分布图

箱梁顶板与底板在结构自重及挂篮施工荷载作用下会出现比较大的横向拉应力。如图 14(a)所示,箱梁节段的代表截面在荷载组合 3 作用下,顶板顶面产生 5.2 MPa 的拉应力,大于 C60 的标准抗拉强度;悬臂板底面存在 1.4 MPa 的拉应力,这是由锚点 2 作用力的应力集中效应所引起的。

由于锚点 1 作用点位置距腹板的中心线有一定的距离,在底板的一定区域内产生比较大的横向弯矩,由于底板的厚度较小,再加上纵向预应力管道的削弱作用,使底板产生很大的横向拉应力。如图 14(a)所示,箱梁节段的代表截面在荷载组合 3 的作用下,底板顶面近腹板处存在 12.1 MPa 的拉应力,底板底面在锚点力作用区域也存在 9.9 MPa 的拉应力。这些拉应力是随着相应截面的纵向位置与锚点作用力之间的距离增大而衰减;但是,即使扣除了锚点力的应力集中效应与作用力偏大等因素,底板的拉应力还是远远超过 C60 的标准抗拉强度 2.85 MPa,使底板混凝土局部开裂的可能性非常大。当然,对底板进行极限强度与裂缝宽度的验算,也是设计与施工要注意的重要事项。

在引入顶板横向预应力后,箱梁节段代表截面的横向应力分布如图 14(b)所示,顶板顶面的拉应力降低为 0.4 MPa,但是悬臂板底面的拉应力有所增加,最大值为 2.5 MPa,这个拉应力一部分由锚点力的应力集中所引起的,而另一部分由横向预应力的偏心作用引起的。在扣除由锚点力的应力集中引起的那一部分拉应力后,而由横向预应力的偏心作用引起的那部分拉应力为 1.5 MPa 左右,这小于 C60 的标准抗拉强度 2.85 MPa。另外,横向预应力对底板的应力分布影响很小,可以忽略不计。

## 4 结语

根据以上的分析,可以得出以下的结论:

(1)利用圣维南原理,对苏通大桥连续刚构施工阶段的局部应力分析进行简化是非常有效的。

(2)总体上,箱梁节段的纵向应力在各种荷载工况作用下是能满足规范要求的;但是,在挂篮的施工荷载作用下,箱梁顶板与底板在局(下转 97 页)

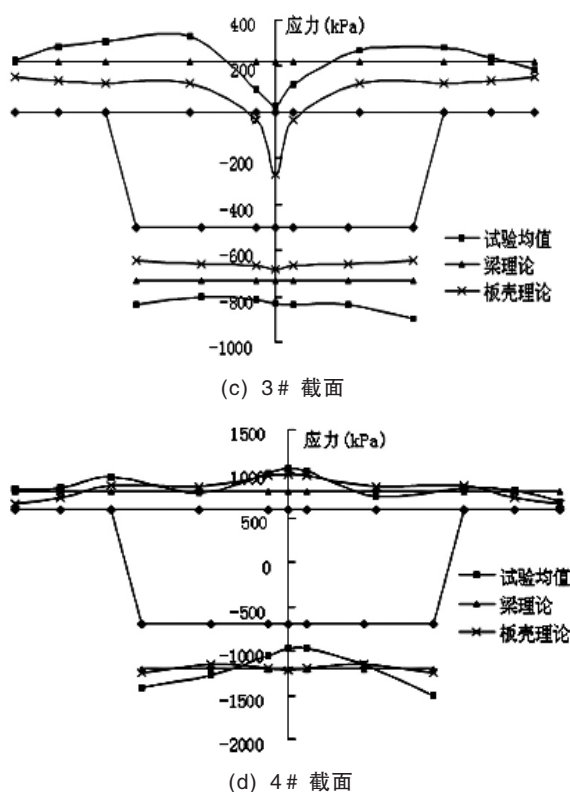


图 4 实测应力与理论计算结果比较

模型梁各截面的最大剪力滞系数示于表 3。

表 3 各截面最大剪力滞系数

截面号	梁顶面最大剪力滞系数		梁底面最大剪力滞系数	
	试验结果	板壳结果	试验结果	板壳结果
1# 截面	1.18	1.21	1.12	1.04
2# 截面	1.18	1.12	1.08	1.06
3# 截面	1.55	0.70	1.07	1.03
4# 截面	1.22	1.19	1.26	1.04

(上接 94 页) 部区域会出现一些比较大的拉应力,这些拉应力由挂篮锚点力的应力集中所引起的,可用锚点的局部构造措施来进行减弱。

(3) 箱梁顶板在挂篮施工荷载作用下会产生很大的横向拉应力,这会使顶板混凝土在施工过程中开裂,因此必须采用有效方法来降低顶板的拉应力。如果在进行挂篮浇筑下一节段的混凝土前,张拉本节段的所有或部分横向预应力,可以降低顶板的拉应力,但这与设计所要求的施工顺序相冲突,破坏了横向预应力在箱梁节段之间的连续性。

(4) 当箱梁节段的断面变小时,挂篮锚点 1 作用点位置距腹板的中心线有一定的距离,在底板的一定区域内产生比较大的横向弯矩,由于底板的厚度较小,再加上纵向预应力管道的削弱,使底

由图 4 及表 3 可以看出:

(1) 3# 截面由于靠近第一根斜拉索,产生了较大的应力集中现象,其测试结果与板壳理论分析结果相差较大,该截面处底板结果与理论分析结果较为接近;

(2) 对于模型结构,其他截面处应力测试结果与板壳分析结果较为接近,且趋势一致;

(3) 除 3# 截面外,顶板最大的剪力滞系数为 1.22,底板最大的剪力滞系数为 1.26。

(4) 由表 1 和表 3 可以看出,模型试验较为接近地反映了该桥的实际情况。

## 4 结论

通过对小西湖黄河大桥模型试验及有限元分析的对比研究,可以得出以下结论:

(1) 模型试验给出了关键截面的应力分布,对于同类工程的设计具有一定的参考价值。

(2) 通过模型试验得到了部分斜拉桥箱梁的剪力滞系数,其数值与实桥是一致的。

(3) 有限元分析结果与模型试验结果基本相符,采用板壳有限元方法能够较好地计算出部分斜拉桥箱梁的剪力滞系数。因此,可以通过有限元分析计算出实桥在各种荷载工况下的剪力滞效应。

板产生很大的横向拉应力。这些拉应力随着相应截面的纵向位置与锚点作用力之间的距离增大而衰减;但是,即使扣除了锚点力的应力集中效应与作用力偏大等因素,底板的拉应力还是远远超过 C60 的标准抗拉强度 2.85 MPa,使底板混凝土局部开裂的可能性非常大。当然,对底板进行极限强度与裂缝宽度的验算,也是设计与施工要注意的重要事项。

## 参考文献

- [1] 韩大建,梁立农等.珠江大桥有限元仿真分析[J].桥梁建设, 2004,(3):34-37
- [2] James G. MacGregor, F. Michael Bartlett. Reinforced Concrete—Mechanics and Design.[M].Prentice hall Canada Inc., Scarborough, Ontario, 2000