

# 石首长江公路大桥宽幅短线预制混凝土箱梁 横向受力有限元计算模型分析

黄运林<sup>1</sup>, 杨聪<sup>2</sup>, 万和安<sup>3</sup>, 涂光亚<sup>2</sup>, 贾伟<sup>1</sup>

(1.湖北省交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430074; 2.长沙理工大学; 3.湖北交投智能检测股份有限公司)

**摘要:**在短线法预制施工中,主梁往往伴随着多次体系转换。对于宽幅混凝土主梁,在多次的体系转换中混凝土梁段横向受力问题突出,对混凝土梁段施工过程中的受力与变形进行有限元计算分析是十分必要的。目前对于宽幅混凝土主梁横向受力分析多采用实体单元模拟计算,然而应用实体单元建模计算有着建模复杂、对计算机要求高等缺点,影响了计算效率。该文以石首长江公路大桥北边跨混凝土标准梁段预制施工的模拟计算为例,详细对比分析了梁单元与实体单元建模计算的优缺点。研究结果表明:用梁单元模拟宽幅箱梁的计算结果精确度略逊于实体单元,但已满足工程应用精度要求,用梁单元建模比实体单元建模更加简便、对计算机的要求要低,能大大提高计算效率。

**关键词:**短线法预制;宽幅混凝土主梁;有限元计算分析;梁单元;实体单元

随着经济的发展,中国对桥梁建设的要求不再仅仅停留在能不能建成的问题,而更多的专注于能不能建好的问题。短线节段预制拼装施工技术作为一种拥有技术新、工期短、质量好、占地少、对地基要求低等各种优点的施工技术在中国被越来越多地采用。同时由于中国交通量发展迅速,桥梁需要设计出比以前更多的车道数才能满足需求,从而使得桥梁宽度得到大幅的增加。短线节段预制拼装施工技术在超宽桥梁中的应用也变得普及起来。混合梁斜拉桥充分结合了混凝土箱梁刚度大、钢箱梁跨越能力大的优点,在大跨径斜拉桥中应用十分广泛,其边跨混凝土主梁的施工越来越多地应用短线预制节段拼装施工方法。混合梁斜拉桥的桥宽通常都超过了30 m,而划分的梁段长度通常只有几米,所以在体系转换过程中混凝土主梁的横向受力问题更为突出,不同类型的梁段横向受力情况也会有所不同。因此需要对宽幅短线预制混凝土箱梁进行横向受力的有限元分析。对于这种宽幅主梁,若能将其视为横向的梁单元来进行计算分析,能大大地简化计算分析的工作量。该文以石首长江公路大桥北边跨混凝土主梁的施工为工程背景,选取北边跨主梁标准梁段,对采用梁单元建模和采用实体单元建模进行比较研究。

## 1 箱梁构造

主跨820 m的石首长江公路大桥为双塔不对称混合梁斜拉桥,其北边跨为采用短线法施工的混凝土主梁。北边跨混凝土主梁全长251.5 m,混凝土材料为C55,设计断面为分离式双边箱的PK箱梁断面,两边箱之间以横隔板相连接,混凝土梁全宽38.5 m,中心线梁高3.822 m,桥面横坡2%,由箱梁顶板斜置而成。标准梁段顶板厚35 cm,底板厚40 cm,斜底板厚35 cm,内腹板厚55 cm。标准横隔板厚32 cm,标准梁段长7.5 m,标准横隔板间距3.75 m。标准梁段截面形式如图1所示。

北边跨混凝土箱梁为三向预应力混凝土结构,除了布置有纵向预应力钢束外,还设有竖向预应力束以及横向预应力束。在梁段预制过程中,主要依靠张拉横向预应力束来确保梁段受力安全。标准梁段横向预应力束共有3类,分别为:横隔板束、顶板束和底板束。横隔板束N4、N4'各2束,N5、N5'各2束;顶板束N1有12束,底板束N2有24束。其中N4、N4'的规格为 $17\phi^{*}15.2$ ,N5、N5'的规格为 $16\phi^{*}15.2$ ,N1的规格为 $4\phi^{*}15.2$ ,N2的规格为 $3\phi^{*}15.2$ 。预应力筋为低松弛1860 MPa钢绞线,最终张拉控制应力均为1395

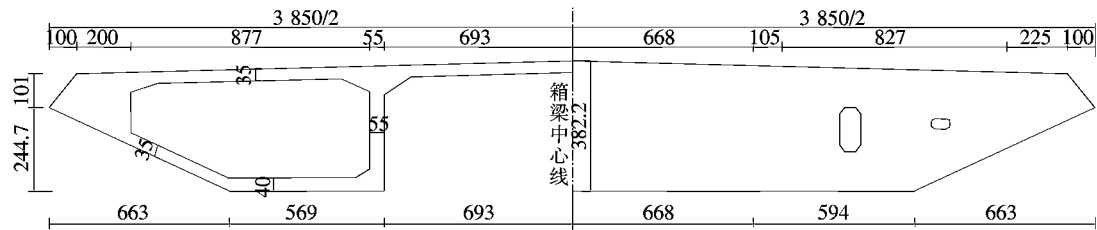


图 1 北边跨混凝土标准梁段横截面图(单位:cm)

MPa。横向预应力束布置如图 2 所示。

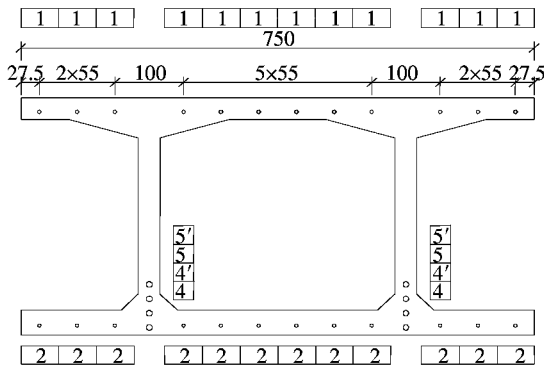


图 2 标准梁段横向预应力束布置图(单位:cm)

单片混凝土主梁预制过程:主梁在台座上浇筑成型并养护,达到一定强度后第一次张拉横向预应力,第一次预应力张拉完成后脱掉底模并移出台座,此时主梁边界条件为 4 点支撑,主梁移出台座后移至匹配位作为下一片梁段的匹配梁段,而后移至梁段提升位张拉第二次横向预应力,第二次横向预应力张拉完成后通过龙门吊把梁段提升至存梁支架上存梁。

## 2 空间梁模型

梁段梁单元模型的建立采用了 Midas/Civil 有限元计算软件,根据梁段横向截面特征,将标准梁段风嘴及竖腹板处横向划分成矩形截面,两边箱室部分横向划分为双工形截面,而横隔板部分横向划分为双 T 形截面。通过修改截面特性设置是否考虑剪切变形。模型中考虑了顺桥向的倒角,而忽略了横桥向的倒角。根据梁段的横向特征点以及精细准确的划分原则划分单元,单元长度均不超过 1 m,整个模型共 42 个单元,43 个节点。

根据实际施工过程,计算模型考虑了收缩徐变,并进行了施工阶段分析。施工阶段划分如表 1 所示。在计算软件中设定混凝土标准强度、环境年平均相对湿度、构件理论厚度、水泥种类系数、混凝土收缩开始时的龄期等计算参数,程序即可按规范自动计算收缩徐

变。横向预应力钢束按实际面积和线形进行输入,程序同样按规范自行考虑了各项预应力损失。第一次横向预应力张拉控制值为:所有顶板束张拉至  $50\%\sigma_{con}$ ,所有底板束张拉至  $50\%\sigma_{con}$ ,横隔板束 N4 和 N4' 张拉至  $40\%\sigma_{con}$ ;第二次横向预应力张拉控制值为:所有顶板束张拉至  $100\%\sigma_{con}$ ,所有底板束张拉至  $100\%\sigma_{con}$ ,横隔板束 N4 和 N4' 张拉至  $100\%\sigma_{con}$ 。

表 1 施工阶段划分

施工阶段	持续时间/d	累积时间/d
混凝土浇筑养护	3	3
预应力第一次张拉	2	5
拆模滑移匹配	7	12
预应力第二次张拉	2	14
提升	1	15
落梁存 10 d	10	25
存梁 30 d	20	45
存梁 60 d	30	75
存梁 90 d	30	105

在不同的施工阶段,主梁的边界条件有所不同,在节点上添加相应约束,即可模拟相应的边界条件。浇筑养护到第一次横向预应力张拉期间,主梁模型的边界条件为满堂支架支撑;从拆除底模到第二次横向预应力张拉期间,主梁模型的边界条件为两点支撑,一个为固定铰支,另一个为活动铰支,两个支撑点间距 24 m;梁段提升期间主梁模型的边界条件与拆模滑移期间类似,但是两个支撑点间距变成了 33 m;梁段存梁期间主梁模型边界条件与拆模滑移期间相同。

## 3 空间实体模型

采用了 Midas/FEA 有限元计算软件建立标准梁段实体单元模型,混凝土主体材料以及横向预应力钢束分别通过三维的实体单元和一维的钢筋单元模拟。

对实体单元以及钢筋单元均进行了网格细化,实体单元最大 0.3 m 一个单元,钢筋单元最长 1 m 一个单元。为了增强实体单元模型与梁单元模型的可比性,实体单元模型考虑的倒角与梁单元的一致,即模型中考虑了顺桥向的倒角,而忽略了横桥向的倒角。整个模型共 69 343 个单元,19 241 个节点,规模远大于梁单元模型,计算时间也远大于梁单元模型。

主梁实体单元模型中同样计入了收缩徐变以及考虑了施工阶段。Midas/FEA 中计入收缩徐变的方式与 Midas/Civil 中计入收缩徐变的方式基本相同,不同的是 Midas/FEA 中每一种材料只能有一个固定的构件理论厚度,且需要手动计算并输入。预应力的损失同样由程序按规范自动考虑。施工阶段的划分与梁单元模型相同,边界条件处理也与空间梁单元类似。

4 模型验证

以横向预应力作用下横向跨中截面上、下缘应力与手算的计算结果对比验证两个计算模型的正确性,手算方法为将跨中截面的有效预应力等效成作用在跨中截面的轴力和弯矩,通过式(1)计算截面上、下缘应力。

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{My}{I}$$
 (1)

式中: $N$  为由有效预应力引起的横向跨中截面轴力; $M$  为有效预应力引起的横向跨中截面弯矩; $A$  为截面面积; $I$  为截面抗弯惯性矩; $y$  为截面某点至截面形心的距离。

计算结果如表 2 所示。

表 2 由预应力引起的梁段横向跨中应力比较

工况	梁单元跨中应力/MPa		实体单元跨中应力/MPa		手算跨中应力/MPa	
	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘
一次张拉后	-0.35	-5.30	-0.45	-5.16	-0.49	-4.91
二次张拉后	-0.28	-13.91	-0.51	-13.75	-0.45	-13.59

从表 2 可以看出:实体单元的应力计算结果与手算结果最大差值为-0.25 MPa,梁单元计算结果与手算结果最大差值为-0.39 MPa,两种单元类型的计算结果与手算结果均吻合较好,都可以满足工程应用的精度要求,但实体单元的计算结果精度略高。

5 计算结果分析

采用梁单元建模和采用实体单元分别对标准梁段

进行建模计算,根据现场实际情况采用相同的施工阶段划分、设置相同的计算参数。对施工阶段中比较关心的梁段截面应力和位移的计算结果进行比较,如表 3、4 所示。

从表 3、4 可以看出:标准梁段第一次横向预应力张拉后梁单元的计算结果比实体单元的计算结果上缘应力最大偏差 0.2 MPa,下缘应力最大偏差 0.5 MPa,跨中上拱值偏差 1.1 mm;标准梁段第二次横向预应力张拉后梁单元的计算结果比实体单元的计算结果上缘

表 3 横向预应力张拉后结果对比

计算方法	第一次张拉完并脱模后					第二次张拉完后				
	支点位置应力/MPa		横向跨中应力/MPa		横向跨中相对风嘴上拱值/mm	支点位置应力/MPa		横向跨中应力/MPa		横向跨中相对风嘴上拱值/mm
	上缘	下缘	上缘	下缘		上缘	下缘	上缘	下缘	
按梁单元建模计算	-0.6	-2.2	-1.3	-2.6	3.3	-1.7	-4.8	-1.2	-11.1	14.5
按实体单元建模计算	-0.7	-2.5	-1.5	-2.1	2.2	-1.9	-5.5	-1.7	-10.7	12.6

表 4 梁段提升过程中结果对比

计算方法	横向跨中应力/MPa		横向跨中相对风嘴上拱值/mm
	上缘	下缘	
按梁单元建模计算	-3.8	-3.8	1.7
按实体单元建模计算	-3.9	-4.0	0.5

应力最大偏差 0.5 MPa,下缘应力最大偏差 0.7 MPa,跨中上拱值偏差 1.9 mm;标准梁段提升过程中梁单元的计算结果比实体单元的计算结果上缘应力最大偏差 0.1 MPa,下缘应力最大偏差 0.2 MPa,跨中上拱值偏差 1.2 mm。梁单元的应力计算结果与实体单元基本

吻合,整体看来横向跨中位置梁单元的计算结果上缘压应力较为偏小,下缘压应力较为偏大,梁单元计算的竖向位移较为偏大。由以上计算结果可知,采用空间梁单元进行施工过程中的横向受力与变形计算可行。

为对梁单元计算模型进一步优化,下文对梁单元计算模型是否考虑剪切变形及是否考虑竖腹板进一步分析。对于梁单元建立的计算模型,是否考虑剪切变形计算结果如表 5 所示。

表 5 一张、二张后标准梁段梁单元考虑剪切与不考虑剪切结果对比

计算方法	一张后					二张后				
	支点位置应力/MPa		横向跨中应力/MPa		横向跨中相对风嘴上拱值/mm	支点位置应力/MPa		横向跨中应力/MPa		横向跨中相对风嘴上拱值/mm
	上缘	下缘	上缘	下缘		上缘	下缘	上缘	下缘	
考虑剪切变形计算	-0.6	-2.2	-1.3	-2.6	3.3	-1.7	-4.8	-1.2	-11.1	14.5
不考虑剪切变形计算	-0.6	-2.2	-1.3	-2.6	3.3	-1.8	-4.9	-1.2	-11.3	13.6

从表 5 可以看出:主梁横向第二次张拉后,考虑与不考虑剪切变形对主梁应力和变形略有影响,实际建模计算时建议考虑剪切变形。

对于梁单元建立的计算模型,是否考虑竖腹板的计算结果如表 6 所示。

表 6 一张后标准梁段考虑与不考虑竖腹板预应力效应结果对比

计算方法	一张后					二张后				
	支点位置应力/MPa		横向跨中应力/MPa		横向跨中相对风嘴上拱值/mm	支点位置应力/MPa		横向跨中应力/MPa		横向跨中相对风嘴上拱值/mm
	上缘	下缘	上缘	下缘		上缘	下缘	上缘	下缘	
考虑竖腹板计算	-1.1	-1.6	-0.4	-5.3	7.2	-2.4	-4.2	-0.3	-13.8	18.3
不考虑竖腹板计算	-1.1	-1.6	-0.4	-5.3	7.7	-2.4	-4.2	-0.3	-13.8	18.4

从表 6 可以看出:主梁横向预应力第一次张拉后或者第二次张拉后,考虑与不考虑竖腹板的模拟对主梁应力的计算结果基本没有影响,对主梁的变形略有影响,但影响很小。因此为进一步简化计算模型,在建模时可不考虑竖腹板的刚度贡献,仅计其自重荷载。

6 结论

以石首长江公路大桥北边跨混凝土梁为工程背景,考虑施工过程,建立了标准梁段的空间梁单元、实体单元有限元模型进行横向受力与变形计算分析,通过对两种不同单元类型计算结果的对比,得出以下结论:

(1) 空间梁单元、实体单元均可用于宽幅短线预制梁段的横向受力与变形计算分析,计算精度能够满足工程应用要求。

(2) 空间梁单元的计算精度略逊于实体单元计算精度,但采用空间梁单元,计算模型大为简化,考虑预应力和收缩徐变更为方便,计算时间也大为缩短。

(3) 采用空间梁单元计算宽幅短线预制梁段的横向受力与变形时,宜考虑剪切变形,为进一步简化计算模型,竖腹板可以不考虑刚度,仅计其自重荷载即可。

参考文献:

[1] 黄宏辉,黄筱琪,袁晟,等.预应力混凝土单箱多室宽箱梁桥空间受力性能研究[J].中外公路,2015(4).

[2] 陆永林,吕颖钊.宽幅单箱多室箱梁受力特性分析[J].浙江交通职业技术学院学报,2013(1).

[3] 刘泰松,史松磊.单箱多室箱梁横向受力研究[J].城市道桥与防洪,2012(8).

[4] 陶舍辉,项贻强,吴明.预应力箱梁桥横向受力分析方法的研究比较[J].公路交通科技,2005(7).