

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.04.031

# 基于有限元分析的桥墩钢模的结构优化分析

曹梦云,肖永久,李丹,王常峰  
(烟台大学,山东烟台264005)

**摘要:**以某特大桥桥墩混凝土施工中钢模板设计为背景,结合Midas Civil有限元分析软件建模仿真分析该钢模板在混凝土侧压力作用下的各构件受力,通过改变对拉杆刚度、对拉杆位置来确定钢模板整体结构的最优受力,结果表明:在一定的对拉杆刚度情况下,合理的对拉杆位置对结构整体受力有着很大的提升;增加对拉杆刚度可以加强结构受力,但该过程不是无止境的增加,而是非线性的,增加到一定刚度情况下结构受力达到一个相对稳固状态;同时提出一些在钢模板设计和检算中的主要问题并提出改善建议。

**关键词:**桥墩钢模板;有限元分析;对拉杆刚度;对拉杆位置;结构优化

中图分类号:U445.34

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)04-0115-04

## 0 引言

随着桥梁建设的不断发展,桥墩施工中钢模板设计也逐渐呈现出结构多样性,为了使钢模板更好地服务于桥墩混凝土浇筑施工,许多从业人士在桥墩钢模板设计上做了不少研究;桥墩钢模施工是桥梁施工的核心<sup>[1]</sup>,对钢模板要求:自重轻、强度可靠、刚度大、变形小,能保证混凝土浇筑施工质量<sup>[2-3]</sup>;因此施工前必须对桥墩模板的主要受力构件进行强度受力验算<sup>[4-7]</sup>。本文借某特大桥桥墩钢模板设计,研究对拉杆刚度、位置对结构整体受力的影响,从而确定一个最优的结构参数。

## 1 桥墩钢模板概况

### 1.1 模板结构参数

该桥墩为锥形桥墩,高为14.0 m,底部尺寸为6.6 m×2.9 m,顶部尺寸为6.0 m×2.3 m。钢模板整体结构为带肋钢板,模板厚度为6 mm;边竖肋板及上下边框横板为:厚12 mm×高120 mm;其余竖肋直线段部分为槽钢[12,圆形段部分为槽钢[10;横背肋为双拼2[20b槽钢,单侧上下两道,间距为1.0 m;圆形段抱箍为[16b槽钢,单侧上下三道,间距为0.5 m;对拉杆采用M32精轧螺纹钢,对拉在横背上,单层采用3根间距为1.4 m。直线段钢模与圆弧段钢模以及上下节段钢模板之间采用M8.8级螺栓连接。

### 1.2 荷载分析

钢模板计算分析时主要考虑结构自重(模型中已经考虑)、混凝土侧压力、风荷载、施工人员以及施工设备等荷载。由于每2 m节段内结构设计相同,故只对底部最大节段进行检算分析。

(1)荷载计算按照混凝土浇筑的速度为2 m/h,初凝时间为6 h,不掺缓凝剂。荷载分析根据《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666—2011)和《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ 162—2008)分别计算,取大值进行分析。

a. 根据《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666—2011)附录A.0.4采用内部振捣器时,新浇筑的混凝土作用于模板的最大侧压力标准值 $G_{4k}$ 可按下列公式计算,并应取其中的较小值:

$$F = 0.43 \gamma_c t_0 \beta V^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$F = \gamma_c H \quad (2)$$

式中: $F$ 为新浇筑混凝土对模板的最大侧压力, kN/m<sup>2</sup>;  $\gamma_c$ 为混凝土的重力密度, kN/m<sup>3</sup>;  $t_0$ 为新浇混凝土的初凝时间, h,可按实测确定;当缺乏试验资料时可采用 $t_0=200/(T+15)$ 计算,  $T$ 为混凝土的温度, °C;  $\beta$ 为混凝土坍落度影响修正系数:当坍落度在50~90 mm时,  $\beta$ 取0.85;坍落度在100~130 mm时,  $\beta$ 取0.9;坍落度在140~180 mm时,  $\beta$ 取1.0;  $V$ 为混凝土浇筑高度(厚度)与浇筑时间的比值,即浇筑速度, m/h;  $H$ 为混凝土侧压力计算位置处至新浇筑混凝土顶面的总高度, m。

混凝土侧压力的计算分布图形如图1所示。

$$h = F/\gamma_c \quad (3)$$

收稿日期:2022-06-20

作者简介:曹梦云(1998—),男,研究生在读,从事桥梁工程设计和施工控制研究工作。

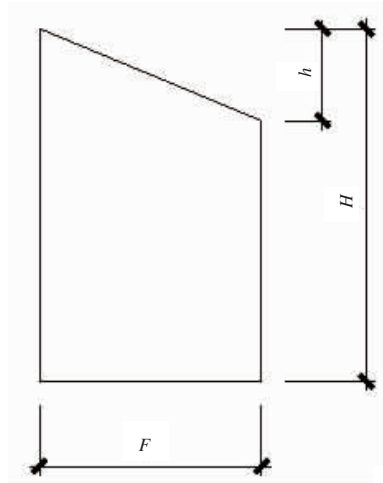


图1 混凝土侧压力分布

式中： $h$ 为有效压头高度； $H$ 为模板内混凝土总高度； $F$ 为最大侧压力。

将数据带入式(1)得到：

$$F = 0.43 \gamma_c t_0 \beta V^{\frac{1}{4}} = 0.43 \times 25.0 \times 6.0 \times 1.0 \times 2.0^{\frac{1}{4}} = 76.70 \text{ kN/m}^2$$

采用式(2)得到： $F = \gamma_c H$ ，由于墩高较高，两者中取较小值，则混凝土作用于模板的最大侧压力为76.70 kN/m<sup>2</sup>。

b.根据《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ 162—2008)中模板侧压力计算公式：

$$F = 0.22 \gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 V^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$F = \gamma_c H \quad (5)$$

式中： $\gamma_c$ 为混凝土重力密度，kN/m<sup>3</sup>； $V$ 为混凝土浇筑速度，m/h； $t_0$ 为混凝土初凝时间，h； $\beta_1$ 为外加剂影响修正系数。不掺外加剂时取1.0，掺具有缓凝作用的外加剂时取1.2； $\beta_2$ 为混凝土坍落度影响修正系数。当坍落度小于30 mm时，取0.85；坍落度为50~90 mm时，取1.00；坍落度为110~150 mm时，取1.15；坍落度为160~200 mm时，取1.3。

$$F = 0.22 \gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 V^{\frac{1}{2}} = 0.22 \times 25.0 \times 6.00 \times 1.20 \times 1.30 \times 2^{0.5} = 72.80 \text{ kN/m}^2$$

采用式(5)得到： $F = \gamma_c H$ ，由于墩高较高，两者中取较小值，则混凝土作用于模板的最大侧压力为72.80 kN/m<sup>2</sup>。

c.混凝土侧压力取值

由两规范对比分析，采用76.70 kN/m<sup>2</sup>作为新浇筑混凝土侧压力 $G_{4k}$ 的标准值进行计算。

(2)荷载组合

a.活载

施工人员及施工设备荷载 $Q_{1k}$ :2.0 kN/m<sup>2</sup>

施工人员及施工设备荷载 $Q_{2k}$ :2.0 kN/m<sup>2</sup>

施工人员及施工设备荷载 $Q_{3k}$ :2.0 kN/m<sup>2</sup>

b.风荷载

基本风压 $w_0 = 500 \text{ Pa}$ 。

风荷载标准值为：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 = 1.0 \times 1.23 \times 1.0 \times 0.50 = 0.615 \text{ kN/m}^2 \quad (6)$$

式中： $w_k$ 为风荷载标准值，kN/m<sup>2</sup>； $\beta_z$ 为高度 $Z$ 处的风振系数； $\mu_s$ 为风荷载体型系数； $\mu_z$ 为风压高度变化系数； $w_0$ 为基本风压，kN/m<sup>2</sup>。

c.荷载组合

荷载组合按照《混凝土结构工程施工规范》(GB 50666—2011)和《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ 162—2008)均采用1.35×恒载+1.30×活载+1.4×风荷载进行计算。

## 2 有限元模型建立

利用Midas Civil有限元分析软件对钢模板进行仿真建模分析，总体建模过程：建立关键节点→定义各构件材料特性→定义各构件截面特性→连接各单元→施加边界条件→设置荷载工况→施加结构自重和组合荷载→分割模板单元→运行分析。该结构中模板采用板单元，设置厚度0.006 m；对拉杆以及螺栓采用桁架单元；横肋板、竖肋板、槽钢肋以及圆形抱箍槽钢均采用梁单元。本次计算采用整体模型分析，其中节点有6 336个，单元有8 468个，模板单元与竖肋单元采用共用节点的连接方式。计算模型如图2所示。

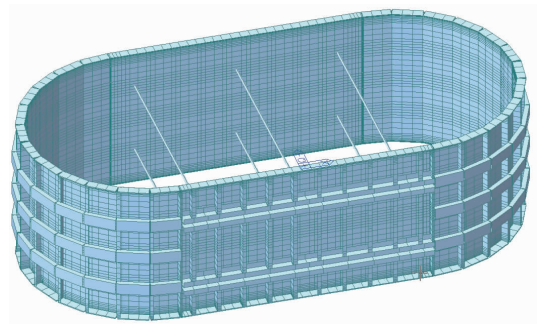


图2 钢模板计算整体模型

## 3 结构优化分析

在原来设计的结构参数基础上通过改变对拉杆刚度、位置，来对比分析钢模板整体结构在受力上的变化，从而得出符合现场施工质量、经济性良好、结构安全可靠的最优钢模板结构。

### 3.1 对拉杆刚度对结构的影响

在材料特性不变的情况下，构件的刚度取决于

其惯性矩,故实心圆形截面的对拉杆可通过改变其直径进而改变刚度,分别取对拉杆直径为:10 mm、15 mm、20 mm、25 mm(原始设计参数)、30 mm、35 mm、40 mm、45 mm、50 mm;分别得出不同对拉杆刚度情况下结构整体变形、板单元的最大应力值、梁单元即竖横肋的最大应力值。具体计算结果见表1。

表1 不同对拉杆直径下的结构计算结果

对拉杆直径/mm	10	15	20	25	30	35	40	45	50
结构变形/mm	9.67	5.28	3.53	2.67	2.19	1.89	1.89	1.95	1.98
板单元应力/MPa	291.20	233.54	211.03	200.57	194.78	191.26	188.97	188.13	188.17
梁单元应力/MPa	166.73	79.06	73.14	72.63	72.43	72.37	72.36	72.40	72.43

大变形发生改变,由直线段位置变为圆弧段位置。(2)从计算结果来看,模板单元应力值在对拉杆直径为30 mm时是194.78 MPa,较为合适且满足设计强度允许值215 MPa;继续增加对拉杆刚度对结构受力并没有大幅度提升。(3)梁单元应力值从直径10 mm到15 mm这段变化较大由166.73 MPa减小为79.06 MPa,之后再无明显变化。

综上所述,增加对拉杆刚度可以加强结构受力,但该过程并不是无止境的,是非线性的,增加到一定刚度情况下结构受力达到一个相对稳固状态,故此继续增加对拉杆刚度对提高钢模板受力没有太大意义;当然每个桥墩的大小不一样所需要的刚度也不一样,通过分析本文中的钢模板的对拉杆直径为30 mm时较为合适,当然原设计的对拉杆直径为25 mm也可满足检算要求,但模板应力200.57 MPa较大。

### 3.2 合理受力状态的对拉杆位置

钢模板结构通常是由模板+主受力骨架组成,竖横肋与模板的协调受力是对拉杆在中间起着关键性连接作用,对拉杆的位置变化意味着梁单元应力在整体结构中有了不同的分布。为了进一步研究对拉杆位置对钢模板整体受力的影响,依次分析对拉杆间距为1.0 m、1.1 m、1.2 m、1.3 m、1.4 m(原设计位置)、1.5 m、1.6 m时结构的整体变形、梁单元最大应力值、板单元最大应力值,具体见表2。

由计算结果可知:(1)结构变形随着对拉杆位置的改变,由刚开始最大变形在圆弧段逐渐减小后变为最大变形发生在直线段两对拉杆中间位置,该过程中变形值均小于允许变形值6.0 mm;(2)由于对拉杆间距逐渐增大,横背肋槽钢2[20b的跨度相对增大,故其梁单元应力也随着增大且应力最大位置发

由分析结果可得出以下结论:(1)结构变形允许值为 $1000/400+1400/400=6.0\text{mm}$ ,故在对拉杆直径为20mm或以上时结构变形满足要求且较为良好;同时可以看出,当对拉杆直径增加到35mm时,结构变形几乎没再减小,反而有增大趋势,从模型结果图中可得知,对拉杆直径增加到40mm以后,结构的

表2 不同对拉杆位置的结构计算结果

对拉杆位置/m	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
结构变形/mm	2.88	2.74	2.62	2.61	2.67	2.74	2.81	2.89
板单元应力/MPa	206.49	204.52	202.78	201.52	200.57	197.74	197.00	196.42
梁单元应力/MPa	67.02	68.92	70.24	71.45	72.63	73.72	74.74	75.69

生在中间对拉杆位置处,应力值均满足要求且还有较大的富余,可对背肋的型号进行适当优化;(3)该钢模板主要的问题是模板的受力普遍偏大,均接近设计强度允许值215 MPa;故结合模板单元受力综合分析,对拉杆位置在间距为1.7 m处时结构受力较为良好,且刚度及强度均满足要求;此处需要说明的是,不同类型钢模板结构受力情况不一样,形状和设计参数与本钢模板类似的可参考设计选择最优的模板结构。

通过以上的分析结果可知,原设计结构的整体变形及梁单元应力总体来说较为良好,不足之处是板单元应力普遍较大,原设计采用的为6 mm厚钢板,应力为200.57 MPa;由于实际情况是竖肋槽钢的翼缘板会给钢板一定支撑作用,故实际的受力会比检算结果表现更好,考虑到竖肋槽钢的作用,在模型上可优化一下钢板厚度使计算结果接近实际情况,即把计算模型的钢板厚度改为0.006 5 m,得出板单元的应力结果如图3所示。

可见,优化后的板单元应力为179.28 MPa,明显小于原先的200.57 MPa。该处优化是考虑到了槽钢翼缘板的辅助支撑作用,若竖肋不是采用槽钢或者

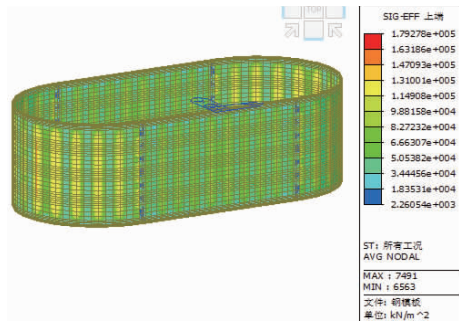


图3 板单元应力图(单位:kPa)

不是采用带翼缘板的型钢而是普通钢板时,如果板单元的应力过大则需要考虑是否增加钢板厚度,或者调小竖肋的间距。当通过检算发现是局部应力过大而其他位置应力状态良好,则也可以在应力过大位置设置加劲板。

#### 4 结论

本文基于有限元分析软件(Midas Civil 2021)以某特大桥桥墩混凝土浇筑钢模板施工为工程背景,介绍了桥墩钢模板在不同对拉杆刚度、位置下的受力情况,并结合计算结果对钢模板结构进行了优化分析,得出以下结论:

(1)通过增加对拉杆刚度,对钢模板结构的整体受力有加强作用,但刚度过大后再增加对拉杆刚度,结构的受力只是微小变化,故可结合计算分析选取合适的对拉杆刚度,保证结构的安全性和经济性。

(2)对拉杆作为连接钢板和骨架肋的主要构件,不同的对拉杆位置会使结构的受力发生很大变化,如当圆弧段的应力或者变形较大时,在满足直线段

受力强度情况下,可将对拉杆设置在靠近圆弧段位置,具体位置可根据计算结果来定。

(3)模板优化可考虑槽钢翼缘板的辅助支撑作用,若竖肋不是采用槽钢或者不是采用带翼缘板的型钢而是普通钢板时,如果板单元的应力过大则可增加钢板厚度或者调小竖肋的间距;当检算发现是局部应力过大而其他位置应力状态良好时,则可以在应力过大位置设置加劲板来加强结构整体强度。

(4)通过本文的钢模板结构优化最终得到:对拉杆直径为30 mm、间距为1.7 m、模板厚度可调6.5 mm,这种情况下该钢模板的受力相对合理;不同类型钢模板结构受力情况不一样,形状和设计参数与该钢模板类似的可参考借鉴,选择设计最优的模板结构。

#### 参考文献:

- [1] 姜会浩,马文浩,冯闯,等.基于Midas Civil建模桥墩钢模优化设计[J].建筑技术,2020,51(10):1236-1237.
- [2] 立春跃.桥墩钢模板在连续梁边跨现浇段支架中的应用[J].建筑技术,2017,48(6):642-644.
- [3] 马毅.基于有限单元法的墩柱钢模板仿真分析[J].低温建筑技术,2021,43(4):100-102.
- [4] 黄涛,卢文良.预制节段桥墩模板设计试验研究[J].施工技术,2016,45(11):1-3.
- [5] 周禾祥.Midas Civil在桥墩钢模板检算中的应用[J].城市建筑,2020,17(3):139-140,143.
- [6] 李向海.桥墩可调直径钢模板的研制与试用[J].铁道建筑,2007(5):13-15.
- [7] 王维发.异型高大桥墩钢模板设计与施工[J].铁道建筑技术,2003(4):23-25.
- [8] GB 50666—2011,混凝土结构工程施工规范[S].
- [9] JGJ 162—2008,建筑施工模板安全技术规范[S].

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)