

# 对现浇混凝土浮力的研究

李友谊, 彭兴国, 杨凯, 陈楠

(中国水利水电第十工程局有限公司 三分局, 四川 都江堰 611830)

摘要: 针对U型槽混凝土结构, 现浇混凝土浮力不容忽视。内模板的抗浮是施工的重点与难点, 而现行规范中并没有对混凝土浮力的介绍。从解析及图解两种方法出发, 介绍了解决施工中现浇混凝土的抗浮力计算问题。

关键词: 混凝土; 浮力; 研究; 红岭灌区

中图分类号: TV43; TV52

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2017)05-0018-03

## 1 工程概况

海南省红岭灌区工程为国家“十三五”规划中172项重点水利工程之一, 其中东干渠土建施工第IV标段由中国水利水电第十工程局有限公司承建, 设计桩号为90+558~118+913, 全长28355m。其中36#渡槽长4865m, 为主要控制项目之一, 结构断面为U型, 内圆半径2.4m, 外圆半径2.64m, 最薄处仅24cm, 底部逐渐加厚至50cm; 直墙部分高度为1.17m, 跨度为15m, 槽身及顶部拉杆为钢筋混凝土结构, 模板委托加工厂加工, 现场拼装成整体, 刚度较大。施工采用整体一次性浇筑, 不留施工缝, 拉杆预制后安装在内模预留位置上以增加内模重量, 抵抗混凝土浮力。其支架支撑结构布置情况见图1。

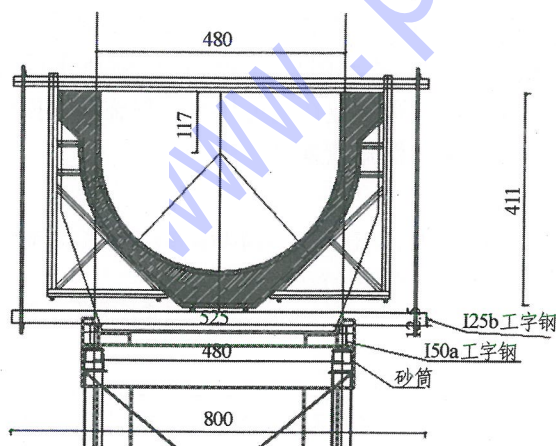


图1 支架支撑结构布置图

由于内模板的内圆直径较大, 混凝土入仓后对内圆模板产生了很大的浮力, 因此, 在模板设计中必须考虑这一因素。内模浮力通过槽身顶部工

字钢与下部工字钢用钢螺杆拉结, 抗浮工字钢间距由计算确定。

## 2 浮力计算理论

### 2.1 解析法

对于液体, 根据阿基米德定律, 浮力大小等于物体所排开液体的重力 ( $F_{浮} = G_{排} = \rho g v$ ), 式中  $\rho$  为液体的密度;  $g$  为重力加速度;  $v$  为物体所排开液体体积。而混凝土具有特殊性: ①混凝土不是全流态, 不是纯液体; ②混凝土内部相互之间具有粘结力, 可以抵抗一部分浮力; ③混凝土初凝时间在3~4h之间, 超过这段时间, 部分混凝土已无浮力。

在现行规范中, 没有关于混凝土浮力计算的相关介绍, 故混凝土浮力计算给施工现场人员带来了极大的困难。但混凝土对模板的侧压力可以参考《建筑施工手册》有关公式计算, 按以下两个公式计算并取其中最小中间值。

$$F = 0.22 \Gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 V^{1/2}$$

$$F = \Gamma_c H$$

式中  $F$  为对模板的最大侧压力 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $\Gamma_c$  为混凝土重力密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $t_0$  混凝土的初凝时间, 根据实测确定, 无资料时按  $200/(t_0 + 15)$  计;  $\beta_1$  为外加剂影响因素, 不掺外加剂时, 取1; 掺加缓凝型外加剂时, 取1.2;  $\beta_2$  为混凝土坍落度影响修正系数, 小于30mm时, 取0.85; 50~90mm时, 取1; 110~150mm时, 取1.15;  $V$  为混凝土浇筑上升速度 ( $\text{m}/\text{h}$ );  $H$  为混凝土计算位置处至新浇筑混凝土顶面的总高度 ( $\text{m}$ )。

混凝土浮力的大小与混凝土内部流体压力有着密切的关系, 混凝土对模板的侧压力由混凝土

收稿日期: 2017-08-20

内部流体的压力引起,液体内部在各方向相等。由于混凝土内部的液体随深度的分布规律不同于纯流体随深度的变化规律(纯液体是随深度增加而呈线性增加),混凝土开始为线性增加,至某个深度后达到最大值,其后开始缓慢呈线性减小。

浮力的本质是由液体中物体表面所受压力差引起的,同样,物体在混凝土中的浮力也是由于物体表面所受混凝土流体引起的。若浸在混凝土中的物体为立方体,则可以通过混凝土压力随深度变化的曲线计算出其上下表面物体的压力,然后计算出浮力(图2)。

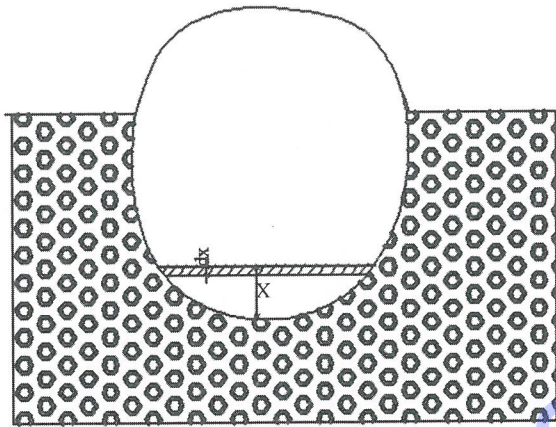


图2 立方体在混凝土中的浮力示意图

当物体为不规则体时,可将物体切割成薄片,厚度为  $dx$ ,由于  $dx$  取值很小,可以认为薄片上下面积相等,并设某一深度  $x$  薄片上下均为  $S(x)$ ,与之相邻的下部为  $S(x-dx)$ ,该深度处的混凝土压力为  $P(x)$ ,则该薄片边界圆环所受到的混凝土浮力为:

$$F_i = [S(x) - S(x-dx)] \times P(x)$$

由于  $[S(x) - S(x-dx)]/dx = S(x)'$ ,则:

$$F_i = [S(x) - S(x-dx)] \times P(x) = S(x)' \times P(x) \times dx$$

将上式积分:  $F_{浮} = \int x S(x)' \times P(x) \times dx$ ,将微分圆环压力值累积求和,上式即为混凝土浮力计算公式。

计算混凝土浮力需要计算浸入物体截面积随深度变化曲线  $S(x)$ ,混凝土随深度的变化曲线  $P(x)$ 。对于相对规则的几何体,可以计算出  $S(x)$ ,然后求导得  $S(x)'$ 。 $P(x)$ 可通过《建筑施工计算手册》求得。最后通过积分式求得浮力。

## 2.2 图解法

曲面体在水压力作用下的浮力见图3。

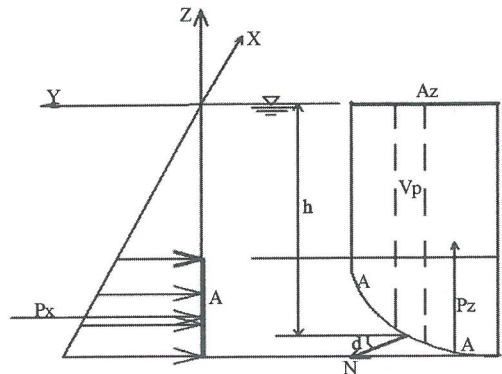


图3 曲面在水压力下的浮力示意图

$$P_z = \int A P(nz) dA = \Gamma \int A h \times \sin \alpha \times dA = \Gamma \int A_z h \times dA_z = \Gamma V_P$$

式中  $A_z$  是曲面  $A$  沿  $z$  轴向  $oxy$  平面的投影;  $V_P$  称为压力体,是曲面  $A$  与  $A_z$  之间的柱体体积,即曲面任意一点的浮力等于该处水头顶面与该处底面之间的柱体重力。曲面总浮力等于该曲面各点浮力的积分和。

根据这一原理,混凝土对于模板的浮力等于模板各处所受混凝土侧压力的总和。对于像渡槽模板这类只在  $x, z$  两个方向变化,而  $y$  方向不变的几何体,可以通过几何作图的方法,把曲面沿  $z$  方向划分为若干段,将该点侧压力值除以流体单位重度,得出该处压头线,将各处压头线浮力值线段切点连接起来,与曲面形成压力面积,再乘以长度、乘以混凝土单位重度,即为内模总体浮力。

## 3 工程计算实例

由于混凝土侧压力先是随深度的增加呈线性增加,随后混凝土随时间增加逐渐呈线性减小,故最大浮力分两种情况验算:a. 混凝土浇筑至顶部; b. 混凝土浇筑至半圆顶。

取 1 m 长的内圆长度进行计算分析:

$$S(x) = 2 \times (2.42 - (2.4 - x)^2)^{1/2} = 2(4.8x - x^2)^{1/2}$$

$$S(x)' = (4.8 - 2x)/(4.8x - x^2)^{1/2}$$

侧压力计算:混凝土的重度  $\Gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ ,混凝土的初凝时间取 3.5 h,外加剂影响因素  $\beta_1$  取 1.2,混凝土坍落度修正系数  $\beta_2$  取 1.15,混凝土浇筑速度  $V$  取 1 m/h,由公式得:

$$F = 0.22 \Gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 V^{1/2} = 2550 (\text{kg/m}^2)$$

$$F = \Gamma_c H = 2\,400 \times 3.57 = 8\,568 (\text{kg}/\text{m}^2)$$

综合上述两式,取  $F = 2\,550 \text{ kg}/\text{m}^2$ 。

$$\begin{aligned} \text{有效压头高度 } h &= F/\Gamma_c = 2\,550/2\,400 \\ &= 1.06 (\text{m})。 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{\text{浮}} &= \int xS(x)' \times P(x) \times dx \\ &= \int_0^{2.4} (4.8 - 2x) \times 10x / (4.8 - x^2)^{1/2} \times dx \\ &= 2\,457 (\text{kg}) \end{aligned}$$

根据上述分析,曲面任意一点的浮力等于该处水头顶面与该处底面之间的柱体重力。曲面总浮力等于该曲面各点浮力的积分和。其任意一点的压力可以根据混凝土侧压力公式计算,压力分布情况见图4。图4中右侧为混凝土浇筑至顶面时的压力分布图;左侧为混凝土浇筑至半圆顶面时的压力分布图,从图形看,显然其左侧浮力大于右侧浮力,也就是说,当混凝土上升速度为  $1 \text{ m}/\text{h}$  的条件下,左侧单位长度浮力  $F = 1.684 \times 2 \times$

$2\,400 = 8\,080 (\text{kg})$ ;右侧单位长度浮力  $F = 0.558 \times 2 \times 2\,400 = 2\,680 (\text{kg})$ 。公式中,1.684及0.558分别为左侧及右侧两种计算方式压头线与内模板之间的面积( $\text{m}^2$ )。从解析法与图解法看,其数值具有一定差异:解析法为2457 kg,而图解法数值为2680 kg。这种差距主要是解析法分段数量较少,误差偏大。如果将分段调整为50,浮力值变为2676 kg,则与图解法相差无几。说明只要分段越多,则精度越高、越精确。同理,图解法也是分段越多,最终数值越精确。通过图解法验证了解析法的正确性。在浇筑速度一定的情况下求最大浮力值,则选取多个不同的浇筑高度值进行比较,得出混凝土对模板的最大浮力(经过多次比较,最大浮力值发生在混凝土浇筑顶面位于反弧段与直墙段附近)。作图要点如下:

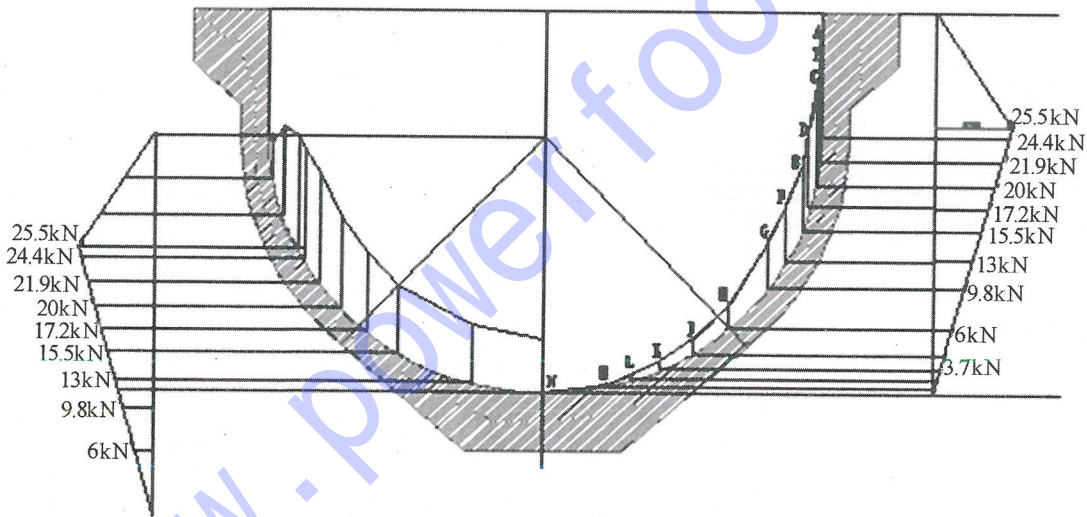


图4 浇筑上升速度为  $1 \text{ m}/\text{h}$  时的侧压力值示意图

(1) 根据混凝土侧压力计算公式计算最大压力值;

(2) 根据压力最大值,求出有效压头高度;同时,根据混凝土初凝时间和浇筑速度确定总压力高度,然后绘制压力分布图;

(3) 将各点压力值标注在分布图相应位置,在对应的模板上,绘制出压头线  $h = P_i/\Gamma_c$ ;

(4) 将各点压头线顶点连接起来(图4中A-B-C-D-E-F-G-H-I-J-K-L-M-N),与内模板线围起来的面积乘以长度,即为总的浮力。

#### 4 应用效果分析

研究混凝土浮力问题主要是从理论上解决诸如渡槽内模、圆形隧道底模及其他具有封闭性结构模板因混凝土流动体对模板的上浮大小值的问题,以便于从支撑结构上采取措施予以加固。

根据本计算理论,36#渡槽内模板计算浮力较大,超出了模板自重及预制拉杆的压重,需要采取有效的抗浮力措施。本工程采取在模板顶部设置两根20b槽钢并排焊接,间距1.8 m,外缘利用直径  $\varphi 28$  钢螺杆与槽身底部工字钢连接,使内

(下转第32页)

洞段,操作人员坐在驾驶室内,远离开挖掌子面,更加安全、舒适。

4.2 较传统钻爆法洞挖速度快、稳定且经济

毗河项目中小断面软岩隧洞采用悬臂式掘进机洞挖,仅需要 2~3 人操作和指挥机械(指挥员、机械操作员、辅助工人各 1 人),单头掘进 1.5 km 情况下按有效工作时间计,月均进尺可达 200 m 以上。而传统钻爆洞挖每班最低需 6 人,单头掘进 1 km 以内最高月进尺约 150 m,超过 1 km 后则很难保证。

4.3 受线型工程征迁影响小、利于工期履约

长期以来,线型工程征迁工作一直是工程建设重点与难点,是制约工期的关键因素。传统钻爆法爆破震动与噪音大,爆破安全管控区域内建(构)筑物未拆除时洞挖施工不能开工,受征迁影响大,维稳难,纠纷赔偿风险高,特别是距民房近的隧洞夜间不能爆破作业,更影响工程进度。

悬臂式掘进机洞挖施工采用机械切割方式,基本无爆破震动、噪音,对周边居民日常生活及建筑安全影响小,特别是不存在夜间施工投诉现象,利于工程施工期间维护社会稳定及保证工程进度。

4.4 较传统钻爆法施工洞挖成型质量好,节约成本

悬臂式掘进机洞挖施工为机械化施工,由专业培训考核合格的专职人员操作机械,开挖过程由专职人员控制,施工过程及质量完全受控。毗河项目隧洞施工采用红外线指向仪全过程测量、

(上接第 20 页)

模板由于浮力向上位移而受到约束。2017 年 2 月 22 日,36#渡槽第一跨 130#槽身浇筑,为了验证本措施的有效性,浇筑混凝土前,在内模板底部设置了 5 个高程观测点,随浇筑过程观测模板的上浮情况,采取每小时一观测,观测结果分别为向上位移 7 mm,9 mm,9 mm,8 mm,10 mm。浇筑时间共 6 h,平均浇筑上升速度为 0.8 m/h。对于上述位移情况,可以采用预留模板安装高程或降低浇筑速度予以解决。观测数据说明,本措施满足要求,取得了较好的效果。

5 结 语

在今后类似的模板形状结构中,可以采用本理论计算公式,或者用图解法解决混凝土浮力大

监控,开挖成型隧洞的超挖基本控制在 5 cm 以内,且洞壁平整,线条平顺,远远小于传统钻爆法洞挖超欠挖约 15 cm 的社会平均水平,大大减小了隧洞混凝土衬砌超挖回填量,节约了施工成本。

4.5 较全断面掘进机更加灵活、经济

悬臂式掘进机洞挖以多次上下左右连续移动截割头切割岩石方式完成全断面开挖,故洞挖不受隧洞断面形状限制,可用于任何断面形状的隧道,适应性强;体积小、重量为 85 t,转场及组装方便。较全断面掘进机结构简单、经济、组装更方便、快捷。

5 结 语

综上所述,通过毗河项目采用煤矿行业悬臂式掘进机进行中小断面软岩隧洞洞挖施工效果来看,该机械洞挖施工与传统钻爆法施工相比较,洞挖施工更安全,掘进速度更快且稳定,洞挖超欠挖小且稳定、经济,受征迁影响小,可避免爆破震动破坏纠纷赔偿问题,更有利于施工期间的社会维稳,而且不受隧洞断面形状限制,适应性强,值得类似水利水电工程软岩中小断面隧洞洞挖施工借鉴,特别推荐火工产品采购困难或人口、建筑物密集、征迁复杂的隧洞工程借鉴。

作者简介:

李有发(1978-),男,广西桂林人,高级工程师,从事项目管理工  
作;  
张 三(1976-),男,四川简阳人,工程师,从事项目管理工  
作;  
付 勇(1969-),男,四川乐至人,工程师,从事水利水电工程施工  
技术与管理工作。(责任编辑:李燕辉)

小的计算问题,从而有的放矢地采取相应措施加固模板。

参考文献:

[1] 江正荣,等. 建筑施工计算手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社. 2001.

作者简介:

李友谊(1979-),男,四川广安人,高级工程师,从事建设工程施工  
技术与管理工作;  
彭兴国(1959-),男,重庆开县人,高级工程师,从事建设工程施工  
技术与管理工作;  
杨 凯(1993-),男,四川彭州人,助理工程师,双学士,从事建设  
工程施工技术与管理工作;  
陈 楠(1993-),男,甘肃天水人,助理工程师,从事建设工程施工  
技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)