

复杂地质条件下超深挖孔桩

混凝土护壁厚度计算的探讨

陈濡森

【摘要】随着我国桥梁、建筑技术的发展,为了最大限度降低工程成本,在复杂地质、地形条件下,需要进行超深人工挖孔桩的工程越来越多,技术难度也远远超出规范要求,为挖孔作业的安全需要带来不利。本文详细介绍了在复杂地质条件下超深挖孔桩的与施工技术和安全直接相关的护壁厚度计算公式的推导,同时,结合工程实例对计算公式进行应用说明,并加以验证

【关键词】复杂地质 超深 护壁 弹性力学 计算公式 应用

一、概述

由于人工挖孔桩成本低,无需特殊设备,质量可靠;在工程界一直大量采用,在近几年经济建设快速发展的同时,人工挖孔桩的工程数量呈直线上升,技术上远远超出目前规范所要求的深度和难度。但是,随着孔深的不断发展,给挖孔作业带来的安全系数逐渐降低,由于地质结构的复杂性,根据目前的勘测手段,还无法确保地下实际情况与勘测结果完全吻合,只能“摸着石头过河”,边施工边修正,这样,增加了施工难度,容易造成事故。

在工程实践中,人们一般根据以往经验或翻翻前人资料,按常规只要护壁厚度满足7~15cm即可;没有一个准确界定值,加之孔下施工难度大,护壁混凝土浇注质量难以保证,根据大量塌孔伤亡事故分析表明,几乎所有事故均跟护壁强度不够直接相关。在实际理论计算时,由于护壁各横截面上应力各不相同,每个微分单元体亦受到不同的三向应力,因此,属于十分复杂的空间应力、应变问题。

下面,我们试将空间问题简化为平面问题,进行混凝土护壁厚度计算公式的推导,并在实际工程应用中加以验证。

陈濡森:柳州欧维姆工程有限公司 助工

二、空间问题的平面简化假定

设护壁内、外半径分别为a和b,厚度 $t=b-a$,重力集度为 ρ ,岩土侧向压力为 $q(x, y, z)$,护壁与岩土之间摩擦力为 $f(x, y, z)$,岩土支承力为 $R(x, y, z)$,在孔口建立直角坐标系,护壁受力状况如图一所示。

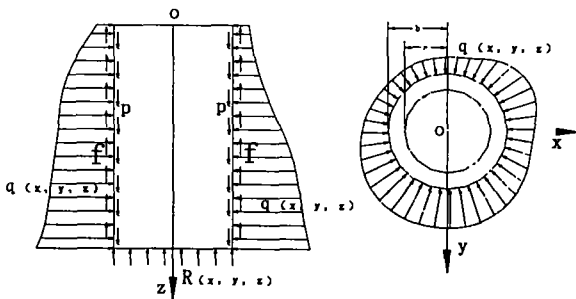


图 1

取微分单元体进行受力分析如图二所示:

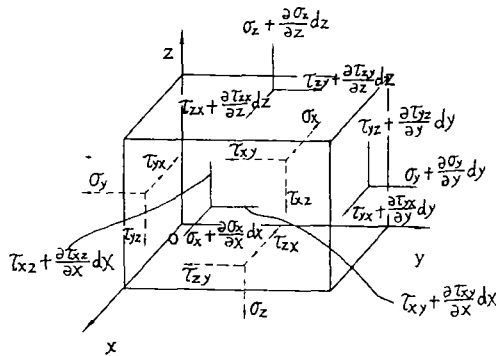


图 2

建立空间基本方程如下：

I)、静力平衡微分方程

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0$$

II)、几何方程

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \mu}{\partial x}, \gamma_{xy} = \frac{\partial \mu}{\partial y} + \frac{\partial \nu}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial \nu}{\partial y}, \gamma_{yz} = \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial \nu}{\partial z}$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial z}, \gamma_{xz} = \frac{\partial \mu}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial x}$$

III)、物理方程

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z)], \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z)], \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y)], \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}$$

式中 E — 混凝土弹模；

G — 混凝土剪模

μ — 混凝土泊松比

其中基本未知量有：

应力分量 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$

应变分量 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$

位移分量 μ, ν, ω

在工程实践中，护壁在竖直方向上受力平衡，通过对事故现场护壁破坏的大量实例分析表明，竖向力贡献很小，径向力是护壁破坏的主因，由于岩土、护壁材料的各向异性，使得护壁薄弱处应力集中而最先压碎破坏。因此，为了简化计算，假定不考虑护壁竖向受力，亦能满足工程施工需要，尽管护壁所受到的侧压力随深度及平面位置不同而不断变化，但是，每个横截面所处的深度

对应一个深度确定值，从而该横截面受到的侧压力仅与平面位置有关，在讨论某一横截面上的应力、应变问题时，就能简化为平面问题进行处理。

三、混凝土护壁厚度计算公式的简单推导

根据以上空间问题的简化思路，护壁受力分析可简化为如图三所示：

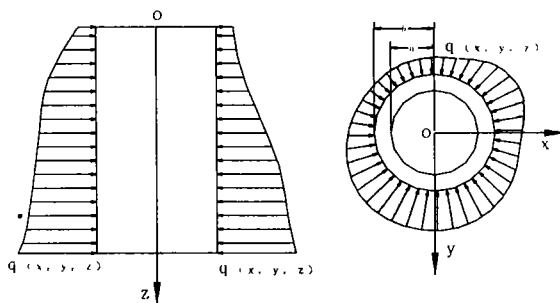
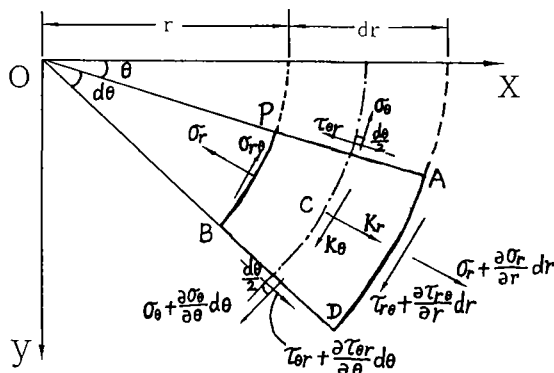


图 3

设微分单元体的体力为 (K_r, K_θ) ，取微分单元体 (d_r, d_θ) 进行受力分析，如图四所示：



于是，由以上空间问题直角坐标系基本方程不难推导出上述平面问题的极坐标基本方程如下：

I)、静力平衡微分方程

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + K_r = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{2 \tau_{r\theta}}{r} + K_\theta = 0$$

II)、几何方程

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{U_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta}$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta} + \frac{\partial U_\theta}{\partial r} - \frac{U_\theta}{r}$$

III)、物理方程

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu \sigma_\theta)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu \sigma_r)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{G} \tau_{r\theta}$$

IV)、应变相容方程

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r}\right) \varepsilon_\theta + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\right) \varepsilon_r$$

$$= \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta}\right) \gamma_{r\theta}$$

式中各变量物理意义同空间基本方程, 其中

$\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r}$, $\gamma_{r\theta} = \gamma_{\theta r}$; 基本未知量有:

应力分量 σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$

应变分量 ε_r , ε_θ , $\gamma_{r\theta}$

位移分量 U_r , U_θ

若用应力函数 $\psi(r, \theta)$ 求解以上平面问题,

因为体力 (K_r , K_θ) 可以忽略不计, 于是平面问题静力平衡微分方程可化为

$$\sigma_r = \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2}, \quad \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \theta}$$

由于护壁在同一横截面上受平面位置不同而引起的侧压力变化极小, 为了计算方便, 可以近似认为在同一横截面上各点侧压力大小相等, 此时问题简化为应力轴对称情况; 于是, 应力函数 ψ 与 θ 无关, 取 $\psi(r, \theta) = \psi(r)$, 得出, 应力函数微分方程化简为

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr}, \quad \sigma_\theta = \frac{d^2\psi}{dr^2}, \quad \tau_{r\theta} = 0$$

对应应力分量通解为

$$\sigma_r = \frac{A}{r^2} + B(1+2\ln r) + 2C$$

$$\sigma_\theta = -\frac{A}{r^2} + B(1+2\ln r) + 2C$$

$$\tau_{r\theta} = 0$$

对应的位移分量通解为

$$U_r = \frac{1}{E} \left[-(1+\mu) \frac{A}{r} + (1-3\mu)B_r + 2(1-\mu)B_r(\ln r - 1) + 2(1-\mu)C_r \right] + I \sin \theta + K \cos \theta$$

$$U_\theta = \frac{4Br}{E} \theta + H_r + I \cos \theta + K \sin \theta$$

式中 H 、 I 、 K 为护壁位移, 因为护壁四周与岩土紧密嵌固, 可近似认为护壁四周受到的约束为轴对称, 于是, $U_\theta = 0$, $B = H = I = K = 0$, 此时问题简化为位移轴对称情况, 其应力分量通解可表示为

$$\sigma_r = \frac{A}{r^2} + 2C, \quad \sigma_\theta = -\frac{A}{r^2} + 2C, \quad \tau_{r\theta} = 0$$

设护壁在该横截面上的侧压力为 q , 则由边界条件确定常数 A 和 C , 有

$$(\sigma_r)_{r=a} = 0, \quad (\sigma_r)_{r=b} = -q$$

$$A = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} q, \quad C = -\frac{b^2}{2(b^2 - a^2)} q$$

得出应力分量为

$$\sigma_r = \frac{b^2 q}{b^2 - a^2} \left(\frac{a^2}{r^2} - 1 \right)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{b^2 q}{b^2 - a^2} \left(\frac{a^2}{r^2} + 1 \right), \quad \tau_{r\theta} = 0$$

因为 $r \geq a$, 故 σ_r , σ_θ 均是压应力, 其分布规律如图五所示:

可见, 最大压应力发生在内周壁, 其值为

$$(\sigma_\theta)_{r=a} = -\frac{2b^2}{b^2 - a^2} q$$

设混凝土容许强度为 $[\sigma_c]$, 令 $(\sigma_\theta)_{r=a} = [\sigma_c]$, 将 $t = b - a$ 代入上式, 可得混凝土

护壁最小厚度为

$$t_{min} = \left(\sqrt{\frac{[\sigma_c]}{[\sigma_c] - 2q}} - 1 \right) a$$

式中 a — 孔半径；

q — 计算横截面上岩土最大侧压力。

可见,护壁厚度随岩土侧压力增大而增大,并与孔径成正比关系。

四、混凝土护壁厚度计算公式的运用及工程实例

根据以上计算公式的推演过程,由于采用了一些空间问题的简化假定,因此,应用时应注意以下几点:

I)、由于岩土各向异性,计算时应采用该横截面上最不利荷载方向的侧压力进行估算;

II)、为了施工方便,可根据不同孔深分段计算护壁厚度,分段长度不宜大于1m;

III)、公式中的各物理量均取正值;

IV)、可根据施工经验适当提高安全系数为1.2~1.4。

下面,我们以长沙市洪山大桥2#墩桩基施工为例,对公式进行应用说明,并加以实践验证。

工程概况:洪山大桥是一座跨越浏阳河的竖琴式无背索斜塔斜拉桥,主跨206m,2#墩紧靠黑石头路的路肩,受车辆动载影响大,加之地质结构复杂,穿过第四系覆盖层,杂填土,砂粘土,粘性土,砂性土,砂卵石层,卵石层,强风化板岩及中风化板岩;地下水丰富,水头高,以承压水

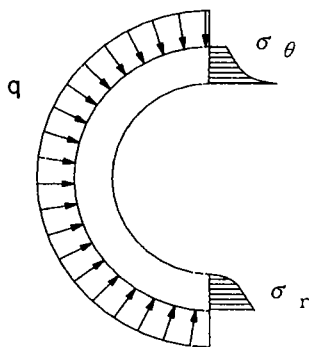


图 5

为主。最大孔深达到30m左右,孔底标高在水头以下20m以上,孔径为2.0m,采用人工挖孔。

现取孔深17.5m处混凝土护壁厚度计算为例,即计算第18阶护壁厚度(每阶护壁高度为1m),采用C15混凝土护壁,其容许应力为 $[\sigma_c] = 4.0\text{MPa}$ 。

根据各地层的土性参数,推算至孔深18m处岩土加权换算饱和容重最不利值为 $\gamma = 25\text{kN/m}^3$ (已计入岩土侧压系数),则护壁在该横截面上的侧压力为

$$\begin{aligned} q &= \gamma h \\ &= 25\text{kN/m}^3 \times 18\text{m} \\ &= 0.45\text{MPa} \end{aligned}$$

因为孔径为2.0m,取 $a = 1.0\text{m}$,于是最小护壁厚度为

$$\begin{aligned} t_{min} &= \left(\sqrt{\frac{[\sigma_c]}{[\sigma_c] - 2q}} - 1 \right) a \\ &= \left(\sqrt{\frac{4.0}{4.0 - 2 \times 0.45}} - 1 \right) 100\text{cm} \\ &= 13.6\text{cm} \end{aligned}$$

由施工经验提高安全系数到1.3,则第18阶护壁厚度值为 $t = t_{min} \times 1.3 \approx 17.7\text{cm}$,余此类推。

若按传统观念,护壁厚度在7~15cm内,则其安全系数 n 为 $0.47 \leq n \leq 1.1$

可见,这种情况下安全系数偏低,不利于保证施工安全。

在实际施工时,第18阶护壁厚度,我们采用了18cm。对每阶护壁厚度,我们都按上述公式进行推算,并根据计算结果,分别采用不同厚度的护壁;在整个施工过程中,没有出现一处塌孔事故,完全克服了车辆动载影响,突破了在复杂地质条件下,超深人工挖孔桩的技术难关;这样,既保证了工期和质量,又降低了工程成本。

可见,以上空间问题的简化处理,所采用的分析手段以及公式的推演过程,在实际工程应用

中是合理的,对以后类似工程,具有启发作用并可加以借鉴。

五、结论

1、根据挖孔桩混凝土护壁受力的空间特性,通过建立平面模型,将空间问题简化为平面应力、应变问题,并结合实际工程应用;可见,我们根据问题的空间特性,将空间问题简化为平面问题,在实际工程应用中是一种简单实用的计算方法。

2、通过弹性力学分析手段对混凝土护壁厚度计算公式的推导,并将其结果应用于实际工程加以验证,效果良好;说明公式的推证合理,方法可靠,可为以后类似工程所借鉴。

3、公式中各物理量在应用时均不带符号。应

用本公式时,首先必须准确推算护壁在计算横截面上的岩土侧压力 q 。

4、由公式表明,护壁厚度跟孔深、地质条件、地面荷载及孔径均有关系。护壁厚度随岩土侧压力增大而增大,并与孔径成正比关系。

5、从以上厚度计算公式推演过程中,根据荷载形式及边界条件的不同,可以分演出地下涵管、隧道和地下洞室的拱圈或护壁厚度计算公式,以及大型混凝土容器的器壁厚计算公式。

参考资料

- 1、杨桂通《弹性力学》(高等教育出版社)
- 2、《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041-2000)

● 信息窗 ●

OVM 柳州建机为上海卢浦大桥 成功合龙交上满意答卷

“世界第一钢拱桥”上海卢浦大桥工程经过建设者们历时两年的鏖战,于10月7日上午准确合龙。至此,世界最长的550米的巨型钢拱终于实现南北对接,犹如一道绚丽的彩虹飞架在黄浦江上。

卢浦大桥是继上海南浦大桥、杨浦大桥之后上海在“十五”期间开工建设的全钢结构特大型跨越黄浦江的桥梁,它代表和体现了上海最新桥梁科技和城市发展水平。大桥全长3900米,其中主桥长750米,宽28.75米,采用全钢结构,是目前世界上跨度最长的钢拱桥,大桥总投资22亿元。该桥桥拱由27段箱形拱肋焊接而成,每段长各13.5米,重150吨至350吨不等,分别从两岸的三角区向对岸凌空延伸。该桥重要特点之一是其拱肋承重的关键部件采用了国内首次应用的临时扣索工艺。临时扣索采用柳州市建机总厂生产的OVM200拉索体系,并由柳州市建机总厂承担安装施工任务。在施工过程中,柳州市建机总厂

(OVM)与参与大桥建设的各兄弟单位紧密配合,协同奋战,依靠自身雄厚的技术实力和丰富的施工经验,严格按操作规程严把挂索、张拉、调索等各工序的质量关,克服了夏季持续高温和连续几次强台风袭击所带来的种种困难,昼夜奋战,终于按时、优质地完成了大桥合龙前的各项工作任务,为卢浦大桥的顺利合龙交上了满意的答卷。尤值一提的是,在卢浦大桥处于大悬臂施工状态的关键时刻,OVM200拉索体系经受了两次强台风的严峻考验,在风雨激励作用下目测索体振幅达1米以上仍安然无恙,充分证明了OVM产品的优良性能和安全可靠。

据悉,卢浦大桥浦东、浦西的引桥目前已全部贯通。预计今年年底,卢浦大桥将实现主桥桥面贯通,明年上半年将全面建成通车。目前,柳州市建机总厂驻卢浦大桥项目部正紧张有序地进行大桥通车前有关扣索施工的各项工。

(何晓频)