

## 托口水电站业主营地地基稳定性分析研究

张炳银 余亮 刘林其

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410000

[摘要]托口水电站业主营地建筑物基础主要坐落于第四系残坡积土层上,其下伏基岩为岩溶发育的碳酸盐岩类地层。文章针对了建筑场地岩溶(土洞)发育特征,分别采用弹性理论和圆弧滑动法,对营地地基稳定进行了计算的基础上,并对地基承载力及地基变形进行了分析。提出了一些相应的加固处理方案。

[关键词]地质灾害防治;托口水电站;地基稳定性;碳酸盐岩;岩溶土洞;加固处理

DOI: 10.33142/hst.v2i3.854

中图分类号: TV737

文献标识码: A

### Study on Foundation Stability Analysis of Owner Camp of Tuokou Hydropower Station

ZHANG Bingyin, YU Liang, LIU Linqi

China Electrical Construction Group Zhongnan Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

**Abstract:** The building foundation of the owner camp of Tuokou Hydropower Station is mainly located on the Quaternary residual slope accumulation layer, and the underlying basement rock is a carbonate strata developed by Karst. In this paper, according to the development characteristics of Karst (soil cave) in construction site, the stability of camp foundation is calculated by using elastic theory and circular sliding method, and the bearing capacity and deformation of foundation are analyzed. Some corresponding reinforcement schemes are put forward.

**Keywords:** prevention and control of geological disasters; Tuokou hydropower station; foundation stability; carbonate rock; karst soil cave; reinforcement treatment

### 引言

岩溶是石灰岩、白云岩等可溶性岩石在长期受水的化学溶蚀和机械作用下岩层内形成溶洞、溶沟、暗河、石芽等现象的总称,土洞是岩溶区常见的一种岩溶作用产物,土洞是由地下水或地表水对岩溶岩层上覆土层的冲蚀、潜蚀及崩解作用形成的。尽管国内外许多学者在岩溶发育的成因、机制、影响因素、岩溶塌陷及地基处理等方面已进行了大量卓有成效的研究与实践,但是,因为当下覆岩内存在溶洞、土洞时,在附加荷载作用下易于导致岩溶区出现地基不均与沉降、地基失稳破坏等各种地表变形破坏现象,进而诱发结构物破坏、甚至危及人类生命财产安全。随着水电项目建设的快速推进,岩溶地区的工程建设项目在规模和数量上都急剧增大,建造在灰岩等可溶性岩石上的建筑物常常遇到隐伏岩溶地基承载力不足、不均与沉降、地基滑动、地表坍塌等问题,这些问题受到业界的普遍关注。因此,研究覆盖型岩溶区不均匀地基的空间分布及建筑地基处理,对加强岩溶地基稳定性分析评价有着重要的技术价值和经济意义。本文以托口水电站业主营地一建筑工程项目为工程案例,通过分析溶洞、土洞发育强烈的覆盖型岩溶区不均匀地地基土层的工程特征,以及建筑地基的稳定性评价,通过地基承载力的验算和沉降估计,探索符合当地实情的安全可靠、经济合理的岩溶区地基处理方法,以期对岩溶地区的地基分布和工程建设提供了有益的工程借鉴。

### 1 建筑场地岩溶(土洞)发育特征

托口水电站营地建筑物基础主要坐落于第四系残坡积土层上,其下伏基岩为岩溶发育的碳酸盐岩类地层,2006年5月5日,宿舍楼左后角受降雨影响,出现面积约15m<sup>2</sup>的地面塌陷,变电站左后角发生地表水集中入渗,办公楼后面也出现地表水集中消失现象,建筑物存在严重的安全隐患。

根据营地地基岩溶补充勘探钻孔和物探CT测试成果,以及邻近营地的厂房区左岸开挖揭露情况,营地岩溶发育与分布具有如下特征。

营地下伏石炭系、二叠系可溶岩地层岩溶发育,发育方向以近SN向和近EW向为主。可溶岩顶界面起伏不平,多沟槽、洼地分布。营地钻孔综合遇洞率为74%,平均线岩溶率为14.35%,最大单孔线岩溶率为56.47%;物探CT测试剖面绝大部分测试有溶洞,平均面岩溶率为4.57%。溶洞大小不一,且差异性较大,钻孔显示,溶洞高度大多小于2.0m,最大溶洞高度达6.30m;物探CT测试显示,溶洞面积一般小于10m<sup>2</sup>,最大为33.27m<sup>2</sup>。

溶洞充填物以次生黄泥夹灰岩碎块石为主,就整个营地而言,充填状况以半充填为主,但营地各部位溶洞充填状

况不尽相同，食堂、变电站分布区溶洞呈未充填、半充填状，宿舍楼、机电仓库分布区溶洞呈半充填、全充填状；办公楼区溶洞以全充填为主，半充填、未充填次之；车库区溶洞以半充填为主，全充填次之。另营地地下伏可溶岩内存在岩溶渗漏通道。

通过平面地质调查，营地存在土洞 2 个，其高度分别为 4.8m 和 0.3m，土洞均位于可溶岩顶界面附近，推测土洞的出现与下部可溶岩岩溶发育相关。

## 2 建筑场地地基分析

### 2.1 地基稳定计算

地基稳定计算采用圆弧滑动法进行验算。由于营地地基中发育有土洞，因此地基中的局部稳定判定应从弹塑性力学理论出发，分析地基中土洞洞壁周围土体的应力状态，再利用莫尔—库仑屈服准则进行土洞周围土体的稳定性计算评价土洞地基的稳定性。

#### (1) 土洞地基弹性理论稳定分析

土洞的塌陷首先是从土洞内壁开始破坏，然后向周围扩展，最后导致整个土洞地基失稳塌陷。

设距地面以下  $h$  处有一半径为  $a$  的圆形土洞 ( $h > 6a$ )，地基土是均质的各向同性弹性体。如图 2.1-1，把地基土层中的土洞周围土体应力分布视作一个双向受压无限板孔应力分布问题，因此圆形断面土洞周边 ( $r=a$ ) 处的应力为：

$$\sigma_{\theta} = p(1 + 2\cos 2\theta) + q(1 - 2\cos 2\theta) \quad \sigma_r = \gamma_w h_w$$

在建筑物荷载作用下，地基中土洞周围土体的应力：

$$p = \partial_A p_0 + \sigma_{CA}$$

$$q = \lambda(\partial_B p_0 + \sigma_{CB})$$

式中： $\sigma_{\theta}$  为土洞的切向应力； $\sigma_r$  为土洞的径向应力； $\theta$  为土洞周边计算点的圆心角（与水平轴夹角）； $\partial_A$ 、 $\partial_B$  为基底至 A、B 点处的附加应力系数； $p_0$  为基底附加应力； $\sigma_{CA}$ 、 $\sigma_{CB}$  为 A、B 点处岩体自重应力； $\lambda$  为岩（土）体侧压系数； $P$  为作用在土洞周围土体上的垂直应力； $q$  为作用在土洞周围土体上的水平应力； $\gamma_w$  为水的重度； $h_w$  为地下水位距洞中心的高度； $\varphi$  为土的内摩擦角。

土洞周围土的极限平衡条件：

$\sigma_{\theta} > \sigma_1 = \sigma_r \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot \text{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$	土洞破坏
$\sigma_{\theta} < \sigma_1 = \sigma_r \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot \text{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$	土洞安全
$\sigma_{\theta} = \sigma_1 = \sigma_r \cdot \text{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot \text{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$	土洞处于极限平衡状态

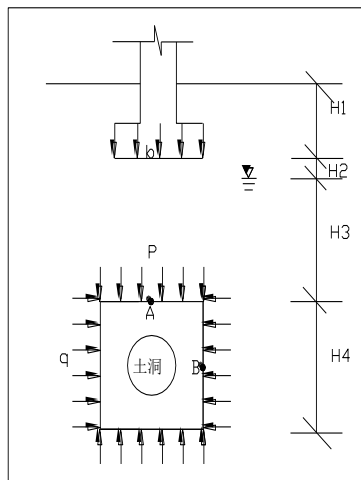


图 2.1-1 独立柱下土洞应力计算图

以发现的土洞为例分析地基的稳定性，土洞上方采用  $2 \times 1.6\text{m}$  的独立柱基，基础埋深 2.2m，水库蓄水到 250m 高程时，地下水位埋深 8.3m，粘土的地基承载力标准值为 250kPa，粘土的重度  $19\text{kN/m}^3$ ，饱和重度  $20\text{kN/m}^3$ ，凝聚力为 29.9

kPa, 内摩擦角为  $16.8^\circ$ , 地基附加应力 210kPa, 土洞位于基础下 15m。地下水位上升到 250 m 高程时, 土洞周边的应力见表 2.1-1。

表 2.1-1 地下水位上升到 250 m 高程时土洞周边的应力

$\theta$ ( $^\circ$ )	0	15	30	45	60	75	90
$\sigma_\theta$ (kpa)	842	811	727	612	496	412	381
$\sigma_r$ (kpa)	179.25	179.25	179.25	179.25	179.25	179.25	179.25

将  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$  代入土的极限平衡条件,  $\sigma_1=405\text{kPa}$ , 从表 2.1-1 看出,  $\sigma_\theta$  大多大于  $\sigma_1$ , 土洞不稳定。因此土洞地基不稳定。

假设在地下水位为 250m 高程时该土洞存在, 判断地下水位下降到 246m 高程时土洞的稳定性。经计算地下水位下降到 246m 高程时土洞周边的应力见表 2.1-2。

表 2.1-2 地下水位下降到 246m 高程时土洞周边的应力

$\theta$ ( $^\circ$ )	0	15	30	45	60	75	90
$\sigma_\theta$ (kpa)	378	369	342	305	268	241	231
$\sigma_r$ (kpa)	0	0	0	0	0	0	0

将  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$  代入土的极限平衡条件,  $\sigma_1=80\text{kPa}$ , 从表 4.1-2 看出,  $\sigma_\theta$  均大于  $\sigma_1$ , 土洞不稳定。

经计算表明, 营地地基土中由于有土洞的存在, 库水位的升降对该区地基稳定有较大的影响, 有产生塌陷的可能。

(2) 圆弧滑动法进行地基稳定验算

根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)规定:地基稳定验算采用瑞典圆弧法进行验算, 计算参数见表 2.1-3, 计算成果见表 2.1-4, 计算图见图 2.1-1~2.1-5。计算成果表明在不考虑地基土层中有土洞存在时, 地基稳定系数均大于 1.2, 地基是稳定的。

上述分析表明, 当地基中不存在土洞时, 地基是稳定的; 当地基中有土洞存在时, 地下水位的升降会引起土洞塌陷, 可能导致地基失稳。

表 2.1-3 岩(土)体物理力学参数建议值

土体名称	重度 $\gamma$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )		抗剪强度 $\tau_f$ (标准值)		压缩模量 $E_s$ (MPa)	
	天然	饱和	粘聚力 $C$ (kPa)	内摩擦角 $\phi$ ( $^\circ$ )	天然	饱和
黏土	19.1	20	29.9	16.8	12.95	6.67

表 2.1-4 地基稳定验算表

建筑物部位	食堂	宿舍楼	办公楼	车库	变电站
稳定系数	1.918	1.511	1.727	1.403	1.547

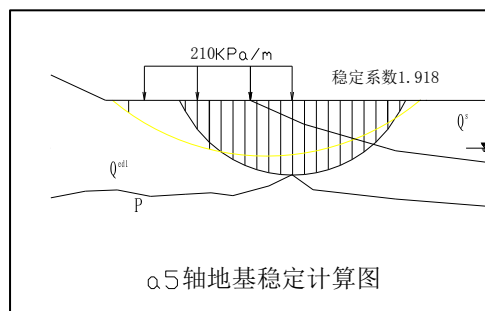


图 2.1-1 综合楼 a5 地基稳定计算图

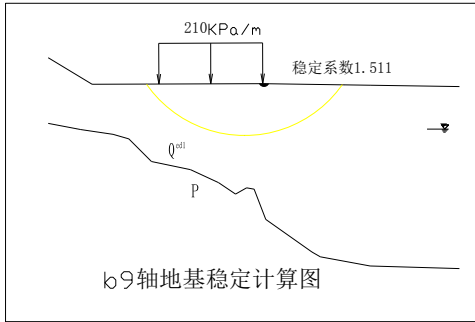


图 2.1-2 综合楼 b9 地基稳定计算

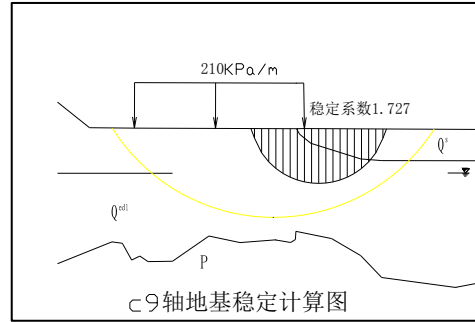


图 2.1-3 综合楼 c9 地基稳定计算

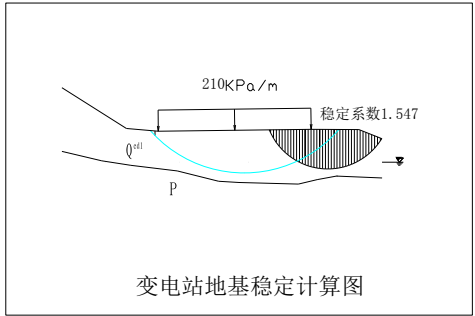


图 2.1-4 变电站地基稳定计算

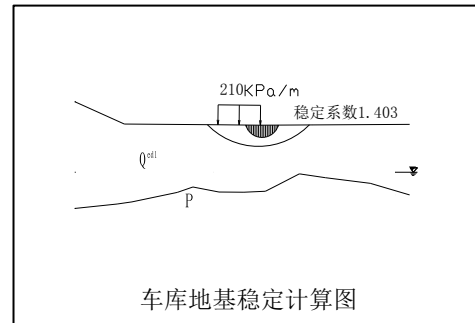


图 2.1-5 车库地基稳定计算

## 2.2 建筑场地地基承载力分析

地基中土洞和溶洞的存在影响地基的稳定性，同时也将影响地基的承载能力。其承载力与土洞地基的  $c$ 、 $\varphi$  值、洞顶土层厚度有关外，还与土洞尺寸有关，土洞半径越大，土洞地基的承载力  $R$  越低

另外由于库水位上升引起地下水位大幅上升，使地基土长期处于饱水状态，其承载力也将大大降低。

(1) 当地基中存在土洞时，含土洞地基的承载力可根据土洞坍塌平衡法原理（如图 2.2-1）可求得长条形土洞地基的承载力  $R$  计算式：

$$R = \frac{\gamma h^2 \cdot K_0 \cdot \text{tg} \varphi + 2c \cdot h}{2} - \gamma h$$

式中： $h$  为地面至土洞顶面的距离。

(2) 当土洞为圆形的地基时，可得圆形土洞地基的承载力  $R$ 。即得：

$$R = \gamma h^2 \cdot K_0 \cdot \text{tg} \varphi + \frac{2c \cdot h}{a} - \gamma h$$

由此可见，其承载力与土洞地基的  $c$ 、 $\varphi$  值、洞顶土层厚度  $h$  有关外，还与土洞尺寸有关，土洞半径越大，土洞地基的承载力  $R$  越低。

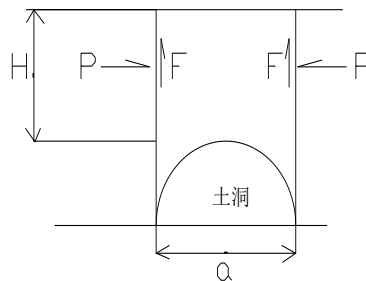


图 2.2-1 土洞坍塌平衡法原理图

(3) 当地基中没有土洞存在时，地基土承载力按《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002) 的规定计算地基土承载力或通过现场原位测试求得。即：

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c C_R$$

式中： $f_a$  为土的抗剪强度指标确定的地基承载力特征值； $M_b$ 、 $M_c$ 、 $M_d$  为承载力系数； $b$  为基础底面宽度； $C_R$  为

基底下二倍外边宽深度内土的粘聚力标准值。

因此含有土洞的地基土承载力的确定应满足上述两个条件,并取两者地基土承载力的小值。在地下水位上升到 250m 高程时地基承载力计算成果见表 2.2-1, 计算参数见前表 2.1-3。

表 2.2-1 地基土承载力计算成果表

建筑物部位	食堂	宿舍楼	办公楼	车库	机电仓库	变电站
残坡积物厚度(m)	19.1~13.4	8.3~25.6	17.55~41.5	7~14.25	0~7.4	0~10.9
假设土洞顶距基础的距离(m)	11	6	15	5.5	4	5
假设土洞半径(m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
坍塌平衡法计算承载力(kPa)	293	119.5	497	103.0	66.3	90.2
规范法计算承载力(kPa)	263.65	250.62	272.5	250.62	250.62	250.60
地基承载力设计值(kPa)	250	250	250	250	250	180

从计算成果表中可以看出,地基中不存在土洞时,地基土承载力基本满足设计要求,当地基中存在土洞时,土层薄的地方地基土承载力不满足设计要求。

### 2.3 建筑场地地基变形分析

在不考虑地基土层中有土洞的情况下,地基变形计算根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)规定进行计算,其最终变形量可按下式计算:

$$s = \psi_s S = \psi_s \sum_{i=1}^n P_0 / E_{si} (z_i a_i - z_{i-1} a_{i-1})$$

式中:  $s$  为地基最终变形量(mm);  $S$  为按分层总和法计算出的地基变形量;  $\psi_s$  为沉降计算经验系数,  $n$  为地基变形计算深度范围内所划分的土层数;  $p_0$  为对应于荷载效应准永久组合时的基础底面处的附加压力(kPa);  $E_{si}$  为基础底面下第  $i$  层土的压缩模量,应取土的自重压力至土的自重压力与附加压力之和的压力段计算(MPa);  $z_i, z_{i-1}$  为基础底面至第  $i$  层土、第  $i-1$  层土底面的距离(m);  $a_i, a_{i-1}$  为基础底面计算点至第  $i$  层土、第  $i-1$  层土底面范围内平均附加应力系数。

计算成果见表 2.3-1。

表 2.3-1 地基变形计算成果表

建筑物部位	食堂							宿舍楼	办公楼					车库	机电仓库	变电站
	Zj3 ~ zj5	Zj2 ~ zj5	Zj3 ~ zj4	Zj5 ~ zj6	Zj4 ~ zj2	Zj1 ~ zj2	Zj1 ~ zj5		Zj1 ~ zj2	Zj2 ~ zj3	Zj1 ~ zj3	Zj4 ~ zj5	Zj3 ~ zj4			
沉降差 (mm)	23.7	26.4	15.6	8.06	18.3	4.32	30.68	15.3	10.6	5.0	15.6	3.45	4.7			
规范标准 0.0021	22.8	22.8	22.8	27	16.2	16.2	13.2		6	7.8	10.8	9	7.8			

地基变形计算成果表明建筑物相邻柱基沉降差基本满足规范要求。

由于地基中土洞的存在,在地下水位升降时,会引起土洞应力状态的变化而产生附加沉降,将土洞看成厚壁圆筒,

求出土洞周围土体的切向应力 $\sigma_r$ 与径向应力 $\sigma_r$ ，然后利用物理方程求出土洞周围土体的应变变量，最后求得土洞周边所产生的位移 $u_{ab}$ 。

$$u_{ab} = \frac{1+\mu}{E}(P-P_1) \cdot a$$

式中： $\mu$ 为泊松比；E为变形模量；P为土洞周围的原始应力； $P_1$ 为水压力。

当地下水位为250m高程时，土洞地基产生的附加沉降为27.8cm；

当地下水位下降为246m高程时，土洞地基产生的附加沉降增大到47.32cm因地下水下降引起的的额外沉降达19.52cm，远大于《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)规定的要求。

由于营地基础土层厚度基本满足《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2002)规定的要求，土质均一，地基产生不均匀沉降的可能性较小。地基变形分析计算表明，在不考虑地基土层中有土洞的情况下，相邻柱基沉降差基本满足规范要求。当地基土层中有土洞时，水位升降会引起地基局部沉降量加大，导致地基塌陷，须对地基中发育的土洞进行处理。

### 3 加固处理措施

根据场地的工程地质条件、地基计算分析结论及建筑物的使用功能，只对办公综合楼，车库、变电站地基进行加固。机电仓库、监理实验室基础暂时不进行处理。

营地地基加固以不破坏建筑物内的设施和影响其正常使用为原则，在室外布置多排直孔和斜孔对建筑物基础下的土洞进行探查并充填、对软流塑土体进行加固。以防止土洞塌陷，阻止新的土洞产生。注浆孔深到达基岩面顶部即可。

建筑物室外加固宽度以基础附加应力扩散角 $45^\circ + \phi/2$ 和基础附加应力扩散深度的交点到建筑物外水平距离作为控制标准，经计算室外注浆加固宽度为5m。

### 结束语

托口水电站业主营地岩溶发育，在库水位每年在246~250m之间变化，车库、机电仓库、变电站及食堂和宿舍楼部分地段有可能产生岩溶（土洞）塌陷和新的土洞。在营地地基没有土洞或不产生新的土洞情况下，水库蓄水前地基承载力、稳定和沉降基本满足要求。在营地地基存在土洞或产生新的土洞情况下，水库水位升降对营地局部地基承载力、稳定和沉降产生较大的影响。为了阻止土洞的发育，提高营地地基土的承载力和稳定性，消除工程安全隐患。采用注浆工法对营地基础下的土洞和软流塑土体进行加固处理。

### [参考文献]

- [1]万军.托口水电站业主营地地基基础加固设计报告[D].湖南:中国水电顾问集团中南勘测设计研究院,2007.  
[2]黄熙龄等.建筑地基基础设计规范(GB50007-2002)[D].北京:中国建筑工业出版社,2002.  
[3]卢廷浩.土力学[D].江苏:河海大学出版社,2002.

作者简介:张炳银,男(1979.2-),汉族,高级工程师,国家注册一级建造师(市政),主要从事工程地质勘察、岩土工程设计工作。余亮,男(1973.2-),汉族,教授级高级工程师,国家注册监理工程师,主要从事工程地质、新能源地质勘察工作。刘林其,男(1962.3-),汉族,教授级高级工程师,国家注册土木工程师(岩土),主要从事国家大型水电、海上风电工程地质勘察工作。