

深厚表土中立井井壁水平地压力计算探讨

刘金龙¹, 陈陆望², 王吉利³

(1. 合肥学院建筑工程系, 安徽 合肥 230022; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 基于石集立井实测水平地压力, 对比分析了当前常见的几种水平地压力计算理论的准确性与适用性。分析表明, 我国立井井筒设计规范建议的计算水平地压力的重液公式的计算结果与实测值误差很大, 其计算均值是实测均值的 100 倍以上。以浅部土力学思路建立的水平地压力具有随着深度的增加而增大的特征。而深厚表土中的水平地压力分布规律可能与此不同, 其压力值最终趋于稳定, 不会无限制的增大。由于固结时间、应力水平、应力路径的不同, 深厚表土层的物理力学性质与浅部土体具有显著差异。建议深入开展深土力学研究, 基于更多的测试与研究来确定深厚表土中水平地压力的大小与分布规律。

关键词: 立井; 深厚表土; 水平地压力; 深土力学

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2013)04-0072-04

Calculation methods of horizontal ground pressure on shaft wall in deep alluvium

LIU Jin-long¹, CHEN Lu-wang², WANG Ji-li³

(1. Department of Civil Engineering, Hefei University, Hefei 230022, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the measured value of horizontal ground pressure of Shi-Ji vertical shaft, the veracity and applicability of major calculation methods of horizontal ground pressure on shaft wall in deep alluvium has been studied. It is found that the result of heavy liquid method, which recommended by the code for design of coal mine shaft and chamber of China, is not consistent with the value of measured value seriously, which is larger than 100 times of the measured value. The horizontal ground pressure, deduced from the mechanics of shallow soil, would increase as the depth of shaft wall increases. While the horizontal ground pressure deduced from the mechanics of deep soil, may not infinite increase with depth of shaft wall increased, which would arrived at a fixed value. Due to the difference of consolidation time, stress level and stress path, the physical and mechanical properties of deep alluvium are remarkably different with that of shallow soil. Therefore, it is imperative to study the mechanics of deep soil, and more tests and theoretical study should be carried out to analyze the horizontal ground pressure in deep alluvium.

Key words: shaft wall; deep alluvium; horizontal ground pressure; mechanics of deep soil

立井(竖井)是联系矿山地面与地下的核心通道。立井井筒的工程量虽然一般只占全矿井工程量的 3.5%~5.0%, 但建设费用有时占全矿井建设总

费用的 20%~30%。

立井井壁受到的外荷载包括: 水压力、水平地压力、井壁及其内侧附着物的自重、竖向附加力和温度应力等。一般地, 控制井壁厚度的荷载是水平地压力。因此, 合理与有效地计算水平地压力是井筒设计中的重要环节^[1-2]。

由于固结时间、应力水平、应力路径的不同, 深厚表土层(一般埋深大于 300m)的物理力学性

收稿日期: 2012-07-21

基金项目: 安徽省自然科学基金项目资助(编号: 1208085QE89)

作者简介: 刘金龙(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究, E-mail: alnile@163.com。

质与浅部土体具有显著差异, 随浅部岩土工程建设而建立的常规土工试验方法对于深部土层已不完全适用^[3]。

然而, 现行关于深厚表土中水平地压力的计算方法, 多数是依据浅部岩土工程的测试与计算理论修正而得到, 其合理性与适用性值得探讨。为此, 本文以立井井壁水平地压力实测数据为依据, 对比分析了当前常见的几种水平地压力计算理论的准确性与适用性, 为立井井壁水平地压力的计算提供依据。

1 常见水平地压力计算方法

立井井壁径向受力情况见图 1。\$p_h\$ 为深度 \$z\$ 处作用于立井表面的水平地压力, 立井的内、外半径分别为 \$a\$、\$b\$, 内、外壁的温度分别为 \$T_a\$、\$T_b\$。

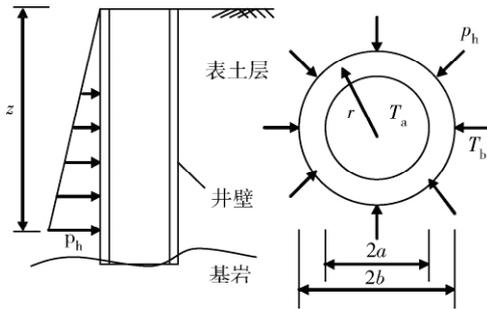


图 1 立井井筒受力分布图

一般地, 计算水平地压力 \$p_h\$ 的常用方法有下列几种:

1.1 海姆方法

在不考虑构造应力且假定变形为弹性情况下, 得到

$$p_h = \frac{\mu}{1 - \mu} p_z \quad (1)$$

式中: \$\mu\$ 为泊松比, \$p_z\$ 为竖向应力。

1.2 Jaky 方法

在普通土力学中, 可通过静止侧压力系数 \$k_0\$ 来计算侧向土压力:

$$p_h = k_0 \cdot p_z = (1 - \sin\phi) \cdot p_z \quad (2)$$

式中 \$\phi\$ 为各土层的内摩擦角。

1.3 普罗托迪雅柯诺夫方法

基于库伦有关挡土墙土压力的计算理论, 普氏建立了圆形立井井壁上矿压的计算方法:

$$p_h = p_z \cdot \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \quad (3)$$

式中 \$\phi\$ 为整个岩层的加权平均内摩擦角。

1.4 秦巴列维奇方法

秦巴列维奇认为, 一定深度的水平地压力取决于

该岩层的内摩擦角 \$\phi_n\$。第 \$n\$ 层的水平地压力 \$p_{hm}\$ 为:

$$p_{hm} = (r_1 h_1 + r_2 h_2 + \dots + r_n h_n) \cdot \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi_n}{2}\right) \quad (4)$$

式中: \$\gamma_i\$、\$h_i\$ 分别为第 \$i\$ 层土体的重度与厚度。

1.5 别林赞茨叶夫方法

其认为地压并不是随着深度的增加而无量的增加, 而只能增加到一定的最终值。较深地层的水平地压力计算公式为:

$$p_h = \gamma \cdot a \cdot \frac{\tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}{2 \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) - 1} \quad (5)$$

式中 \$a\$ 为井筒的荒半径(m)。

1.6 重液公式

我国煤矿立井井筒设计规范^[4]建议采用重液公式计算水平地压力, 其基于土层钻孔泥浆护壁的原理直接建立水平地压与埋深的关系:

$$p_h = \gamma_p \cdot H \quad (6)$$

式中: \$\gamma_p\$ 为似重度, 一般取 \$0.013 \text{ MN/m}^3\$, \$H\$ 为计算点距地面的深度, m。

2 各计算方法的对比分析

为了验证上述水平地压力计算理论的准确性与适用性, 现以石集立井地压力的长期监测数据^[5]为依据, 对比分析实测值与理论值之间的差异。

石集立井深 440m, 井筒净直径 6m, 井筒穿过第四系、侏罗系、石炭二迭系等地层。井筒围岩共分成八个分层, 围岩压力监测位于其中的 2~7 层, 被测岩层的主要岩性指标见表 1^[5]。

表 1 被测岩层的主要岩体性质指标

层次	2	3	4	5 杂色	6	7
(岩石名称)	粉砂岩	中砂岩	粗砂岩	粉砂岩	中砂岩	细砂岩
层厚/m	37	43	59	47	55	46
累厚/m	178	221	280	327	382	428
容重/(MN·m ⁻³)	0.024	0.025	0.026	0.025	0.025	0.026
内摩擦角/°	18	21	23	20	24	25
黏聚力/MPa	1.132	1.153	1.450	1.385	1.623	1.542

王渭明等对石集立井的围岩压力进行了连续观测, 得到了六个测试断面上的稳定压力值^[5]。现利用上述 6 种水平地压力计算方法, 对石集立井的围岩压力进行计算, 并与实测数据进行比较, 见表 2, 相应地压分布图见图 2, 各计算方法的加权平均值与实测地压力加权平均值的倍数关系见表 3。

表2 水平地压力的理论值与实测值(MPa)

岩层	2	3	4	5	6	7
	粉砂岩	中砂岩	粗砂岩	杂色粉砂岩	中砂岩	细砂岩
式(1)	0.443	0.562	0.733	0.862	1.016	1.149
式(2)	2.76	3.25	4.02	5.11	5.43	5.97
式(3)	1.81	2.29	2.99	3.52	4.15	4.69
式(4)	2.11	2.39	2.89	3.81	3.86	4.2
式(5)	0.0895	0.0.849	0.0766	0.0849	0.0703	0.0697
式(6)	2.31	2.87	3.64	4.25	4.97	5.56
实测	0.0092	0.0172	0.0186	0.0425	0.0521	0.0529

表3 各类方法的理论值与实测值比较

方法	式(1)	式(2)	式(3)	式(4)	式(5)	式(6)
理论均值/实测均值	24.6	136.4	100.6	98.7	2.3	121.8

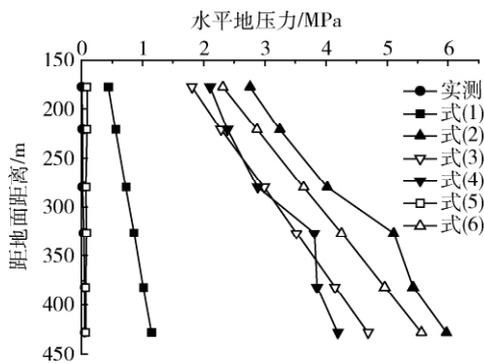


图2 水平地压力分布图

从上述图表对比关系可以得出如下结论。

1) 本文的数据表明,我国立井井筒设计相关规范^[4]建议计算水平地压力的重液公式(式(6))的计算结果与实测值误差很大,其计算均值是实测均值的121.8倍。

2) 以浅部土力学思路建立的水平地压力计算方法(式(1)~(4)),已不能满足深厚表土层水平地压力的计算需要,其计算均值是实测均值的24倍以上,特别是基于静止土压力系数 k_0 来计算侧压力的Jaky方法的误差已达到136倍,显然已不可采用。

3) 别林茨茨叶夫方法考虑了深厚表土层地压力的分布特征,认为地压并不是随着深度的增加而无量的增加,与实测值较为接近。建议立井井筒设计中水平地压力的计算采用该方法。

本文作者曾基于弹性理论,推导考虑温度应力影响的立井强度设计计算公式,并对17个立井实例进行了分析^[6-7],结果表明现有理论可推断出立井在实际破裂时间点之前早已破坏的不合理结果,即部分荷载可能被高估。现在看来,规范推荐的水平地压力计算方法——重液公式可能严重高估了深厚表土层中的水平地压力,是导致立井强度设计与计算不

准确一个重要因素。

当然,石集煤矿立井并未通过含水层,仅有围岩作用于井壁上的压力,故围岩压力很小,且随深度的增加其数值变化不显著。若井筒通过含水层,尤其是深含水层,水压将是井壁上的主要水平荷载,立井围岩压力将会显著增大,其分布规律可能与无含水层情况有所不同。

由此可见,亟待基于“深土力学”的基本特征,建立与之相适应的水平地压力计算理论,正确指导立井井筒的设计与施工。

3 深厚表土中水平地压力特征分析

深部土体与浅部土体的力学特性具有显著差别,主要原因在于以下几方面^[3]。

1) 固结时间不同。深部土经历了比地表或浅部土更为漫长的地质历史时期,使部分深部第三系黏土的物理力学性质接近于软岩。

2) 应力水平不同。深部土处于初始的高压 K_0 固结状态,其固结应力大于1MPa,甚至超过10MPa,而地表与浅部土基本处于无压或低压状态。

3) 应力路径不同。以矿山建设为代表的深部岩土工程中,土体以卸载或卸载后再加载的应力路径为主,而地表或浅部岩土工程多以加载应力路径为主。

崔广心在对深厚表土层井壁的40年工程实践和实验研究中认识到:在深厚表土层中井壁外载的确定仅借鉴岩石力学和土力学作为结构外载的基础理论有许多不适用和不足之处,建议建立和发展适用于深厚表土中地下结构物外载的土力学——“深土力学”,并分析了深土力学的任务和特点^[8]。

一般地,由于表土层厚度较大,其作用于井壁的水平地压力受到多种复杂因素的影响,其分布特征与普通土力学中的规律不尽相同。早在深基坑工程的土压力测试中,已发现土压力并不是一直随深度的增大而增大。如美国西雅图的哥伦比亚大厦深基坑工程,基坑深37m,其上半部为裂隙硬黏土,下半部为砂砾石、冰碛黏土及粉土与黏土互层。该工程E-10号挡土桩土压力实测值如图3所示^[9]。可见,该深基坑中部的土压力基本是恒定不变的,并不随深度的增加而增加。浅部土力学中的侧向土压力分布尚且如此,极为复杂的深部土力学中的水平地压力分布应该更难具有与深度成正比的特性。

可见,在确定深厚表土中水平地压力的基本分布规律时,首先需探讨的问题是:水平地压力是否随着深度的增加而增大?一般地,如某段立井通过含水层,根据有效应力原理,其水平地压力可以看成是

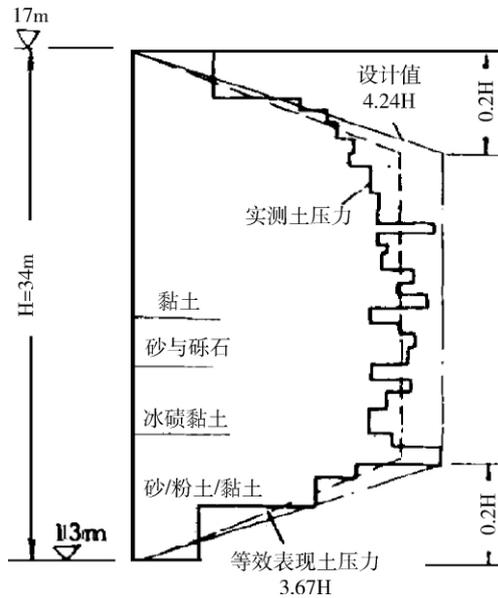


图3 哥伦比亚大厦 E-10 挡土桩土压力实测值

水压力与有效水平地压力之和,其中水压力显然是随着深度的增加而增大。但通过含水层立井段所受的有效水平地压力与未通过含水层立井段所受的总水平地压力是否随深度的增加而增大,至今尚无统一看法。李文平等对深部黏土进行高压蠕变 K_0 试验表明,深部黏土的侧压力系数 K_0 值随深度呈指数函数形式变化,在 300~500m 深度范围内变化较大,当深度超过 500m 后则基本保持不变^[10]。经来旺等基于表土沉降产生的支撑效应导致井筒周围地压重新分布的认识,提出表土沉降过程中存在着次生水平地压,次生地压随着表土深度的增加会逐渐地趋于一个常量,而不是线性分布挡土墙地压和重液理论地压^[11]。而分析我国规范建议的计算水平地压力的重液公式式(6)可知,其计算得到的水平地压力与深度 H 成正比。故规范推荐公式式(6)的准确性与合理性仍待进一步验证,采用该经验公式计算深厚表土的水平地压力也反映了深土力学理论尚欠缺的现状。

鉴于上述学者的工作及本文上述数据的分析,本文作者倾向于接受这样的观点:深厚表土中水平地压力(或有效水平地压力)随着深度的增加而趋于稳定,不会随立井深度的增加而继续增大。当距离开挖端面很近时,表土层作用于井壁的压力很小,随开挖面下掘,该压力逐渐增大,但当开挖面至一定深度后,压力值趋于稳定,不会无限制的增大。如该观点正确,则式(1)~(4)及规范推荐的式(6)均不能正确反映深厚表土中水平地压力的分布。诚然,亟待开展更多的测试与研究来确定深厚表土中水平

地压力的大小与分布规律。

可见,深厚表土中岩土工程的大规模开展对深土力学特性的研究提出了迫切要求。针对深部立井工程的特点,通过模型试验、现场测试等手段,建立深厚表土中水平地压力的合理计算公式,是确保立井井筒正确设计的基本前提。

4 结论

1) 基于石集立井实测水平地压力的对比分析表明,我国立井井筒设计规范建议的计算水平地压力的重液公式的计算结果与实测值误差很大,其计算均值是实测均值的 100 倍以上。

2) 别林茨茨叶夫方法考虑了深厚土层地压力的分布特征,认为地压并不是随着深度的增加而无限制的增加,与实测值较为接近。建议立井井筒设计中水平地压力的计算采用该方法。

3) 以浅部土力学思路建立的水平地压力具有随着深度的增加而增大的特征。而深厚表土中的水平地压力分布规律可能与此不同,其压力值最终趋于稳定,不会无限制的增大。

4) 由于固结时间、应力水平、应力路径的不同,深厚表土层的物理力学性质与浅部土体具有显著差异。亟待开展深土力学研究,基于更多的测试与研究来确定深厚表土中水平地压力的大小与分布规律。

参考文献

- [1] 崔广心,杨维好,吕恒林. 深厚表土层中的冻结壁和井壁[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [2] 孔凡顺,李文平,孙如华,齐腾. 徐淮矿区地应力与井筒破裂关系研究[J]. 中国煤田地质,2003,15(2):35-37.
- [3] 王衍森,崔广心,杨维好. 深部土的高压 K_0 固结试验研究展望[J]. 岩土力学,2003,24(增刊2):687-690.
- [4] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/50384—2007 煤矿立井井筒及硐室设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2007.
- [5] 王渭明,李术才. 石集立井围岩压力计算与量测综合分析[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(3):240-245.
- [6] 刘金龙,陈陆望,王吉利. 考虑温度应力影响的立井井筒强度设计方法[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1557-1563.
- [7] 刘金龙,陈陆望,王吉利. 立井井壁温度应力特征分析[J]. 岩土力学,2011,32(8):2386-2390.
- [8] 崔广心. 论深厚表土层中确定地下结构物外载的基础理论——深土力学[J]. 煤炭学报,1999,24(2):123-126.
- [9] 沈保汉. 深基坑工程技术讲座(12)——挡土支护结构侧压力(下)[J]. 建筑技术开发,1998,25(2):47-50.
- [10] 李文平,张志勇,孙如华,等. 深部黏土高压 K_0 蠕变试验及其微观结构各向异性特点[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1185-1190.
- [11] 经来旺,何杰兵,张宏学. 深立井井壁结构设计中存在问题及解决对策[J]. 中国矿业,2007,16(6):66-68.