

文章编号: 1000-7709(2013)05-0113-04

# 深厚表土层井壁径向荷载的规范计算方法探讨

刘金龙<sup>1</sup>, 陈陆望<sup>2</sup>, 王吉利<sup>3</sup>

(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: 针对我国立井井筒设计规范建议的径向荷载计算方法的准确性与适用性问题, 基于多个立井工程的地质资料及参数, 根据规范方法计算得到其径向荷载的理论分布特征, 并与实测数据进行了比较。结果表明, 规范建议公式的计算结果与实测值存在一定的误差, 尤其是计算岩层中的井壁径向荷载误差较大, 且立井深度越大, 基于规范算法得到的井壁径向荷载误差越大。由此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井壁径向荷载的大小与分布规律。

关键词: 岩土工程; 井壁; 径向荷载; 规范方法; 深土力学

中图分类号: TD321

文献标志码: A

立井井壁受到的荷载一般包括水压力、径向荷载、井壁及其内侧附着物的自重、竖向附加力和温度应力等<sup>[1,2]</sup>, 其合理设计依赖于各荷载的准确计算, 尤其是径向荷载取值对井壁厚度有重要影响, 过高地估算径向荷载将导致井壁厚度急剧增大。因此, 合理有效地估算立井径向荷载是井筒设计中的重要环节。受固结时间、应力水平、应力路径等因素的影响, 深厚表土层(一般埋深大于300 m)的物理力学性质与浅层土体具有显著差异, 随浅层岩土工程建设而建立的常规土工试验方法对深层土层可能不完全适用<sup>[3]</sup>。然而, 关于深厚表土中径向荷载的计算方法, 大多是依据浅层岩土工程的测试与计算理论修正得到的, 其合理性与适用性值得探讨。为此, 本文以多个立井井壁径向荷载实测数据为依据, 分析了当前规范推荐的径向荷载计算方法的准确性与适用性, 旨在为立井井壁径向荷载的计算提供参考依据。

## 1 规范推荐的径向荷载计算方法

《煤矿立井井筒及硐室设计规范》<sup>[4]</sup>建议, 普通法凿井的井筒采用重液公式计算径向荷载, 该方法基于土层钻孔泥浆护壁的原理直接建立径向荷载与埋深的关系<sup>[5]</sup>:

$$p_h = \gamma_p H \quad (1)$$

式中,  $p_h$  为立井井筒所承受的径向荷载;  $\gamma_p$  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。

重液公式表达的径向荷载分布特征见图1。由图可看出, 径向荷载与深度成正比, 埋深越大径向荷载也越大, 且比例系数为常数。

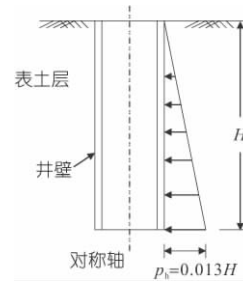


图1 径向荷载分布

Fig. 1 Distribution of radial pressure

## 2 规范方法计算值与实测值的比较

### 2.1 案例1(石集立井)

石集立井深440 m, 井筒净直径6 m, 井筒穿过第四系、侏罗系、石炭二叠系等地层。井筒围岩共分成八层, 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<sup>[6]</sup>。

王渭明等<sup>[6]</sup>对石集立井的围岩压力进行了连续观测, 得到六个测试断面上的稳定压力值。实测数据与理论计算值的比较见表2。由表可知, 式(1)计算值为实测值的95倍以上。可见, 规范

收稿日期: 2012-08-24, 修回日期: 2012-10-17

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1208085QE89)

作者简介: 刘金龙(1979-), 男, 副教授, 研究方向为岩土工程, E-mail: alnile@163.com

表 1 被测岩层的主要岩体性质指标

Tab. 1 Main rockmass property index of measured strata

层次	岩石名称	层厚 累计厚		容重 /(MN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa
		/m	度/m			
2	粉砂岩	37	178	0.024	18	1.132
3	中砂岩	43	221	0.025	21	1.153
4	粗砂岩	59	280	0.026	23	1.45
5	杂色粉砂岩	47	327	0.025	20	1.385
6	中砂岩	55	382	0.025	24	1.623
7	细砂岩	46	428	0.026	25	1.542

表 2 径向荷载的实测值与计算值

Tab. 2 Measured value and theoretical value of radial pressure

层次	岩石名称	实测值	式(1)计算值	计算值
		/MPa	/MPa	/实测值
2	粉砂岩	0.009	2.31	251.0
3	中砂岩	0.017	2.87	166.8
4	粗砂岩	0.019	3.64	195.7
5	杂色粉砂岩	0.043	4.25	100.0
6	中砂岩	0.052	4.97	95.4
7	细砂岩	0.053	5.56	105.0

建议计算径向荷载的重液公式所得计算结果与实测值具有较大的误差。

2.2 案例 2(孙疃煤矿副井)

孙疃煤矿工业广场内设有主、副、风三个井筒。主井净直径 5.0 m,井深 572.0 m,基岩破碎带段埋深为 320.65~328.98 m;副井净直径 7.0 m,井深 600.5 m,基岩破碎带段埋深为 292.61~317.28 m,风井净直径 6.0 m,井深 572.0 m,基岩破碎带段埋深为 280.91~296.17m<sup>[7]</sup>。蔡海兵等<sup>[7]</sup>根据孙疃煤矿副井井筒地质柱状图和井壁设计参数,确定布置了 2 个监测水平,监测得到的井壁压力与式(1)计算结果对比见表 3。由表 3 可看出,孙疃煤矿副井第 1、第 2 水平的井壁压力实测最大值分别为 0.232、0.590 MPa,而规范推荐公式式(1)的计算结果分别为 3.900、4.095 MPa,计算结果与实测值具有较大的误差。

表 3 孙疃煤矿副井井壁压力情况

Tab. 3 Radial pressure of auxiliary shaft of Suntuan coal mine

项目	埋深 /m	井壁压力		式(1)计 算值/MPa	计算值 /最大值
		均值/MPa	最大值/MPa		
第 1 水平	300	0.135	0.232	3.900	16.8
第 2 水平	315	0.270	0.590	4.095	6.9

2.3 案例 3(赵楼煤矿风井)

赵楼煤矿设主、副、风 3 个井筒,均采用冻结法施工。孙猛等<sup>[8]</sup>对赵楼煤矿风井的初始地压力进行了监测,监测得到的井壁压力与式(1)计算结果对比分析见表 4。由表可看出,式(1)的计算结果为实测值的 2 倍左右,计算结果与实测值存在一定的误差。

表 4 赵楼煤矿风井初始地压实测值与计算值

Tab. 4 Measured value and theoretical value of radial pressure of air shaft of Zhaolou coal mine

测点	深度/m	土性	地压实测	式(1)计算	计算值
			值/MPa	值/MPa	/实测值
1	471.5	粉砂	2.62	6.130	2.34
2	471.3	粉砂	2.77	6.127	2.21
3	468.4	粉砂	2.40	6.089	2.54
4	444.5	粘土	2.45	5.779	2.36
5	444.3	粘土	2.55	5.776	2.27
6	444.1	粘土	2.23	5.773	2.59
7	423.8	细砂	2.52	5.509	2.19
8	423.6	细砂	2.76	5.507	1.99
9	420.7	细砂	2.30	5.469	2.38
10	361.5	粘土	1.76	4.670	2.67
11	358.4	粘土	1.60	4.660	2.91
12	304.5	粘土	1.74	3.959	2.28
13	183.3	粘土	1.02	2.383	2.34
14	180.4	粘土	1.21	2.345	1.94

2.4 案例 4(龙固煤矿副井)

龙固煤矿矿井采取“两主井、一副井、一风井共四个竖井”的形式施工建设。龙固煤矿副井表土层厚 567.7 m,监测得到不同深度处的井壁径向荷载<sup>[8]</sup>与式(1)计算结果对比见表 5。由表可看出,式(1)的计算结果为实测值的 2 倍左右,计算结果与实测值具有一定的误差。

表 5 龙固煤矿副井初始地压实测值与计算值

Tab. 5 Measured value and theoretical value of radial pressure of auxiliary shaft of Longgu coal mine

测点	深度/m	土性	地压实测	式(1)计算	计算值
			值/MPa	值/MPa	/实测值
1	155.2	砂质粘土	1.15	2.018	1.75
2	245.1	粘土	1.44	3.186	2.21
3	306.4	粘土	1.76	3.983	2.26
4	446.4	砂质粘土	2.31	5.803	2.51
5	464.0	粘土	2.79	6.032	2.16
6	567.0	粘土	3.48	7.371	2.12

2.5 案例 5(红阳<sup>#</sup>1 副井、兖州兴隆庄主井等)

红阳<sup>#</sup>1 副井、兖州兴隆庄主井、蔡园主井及国内外部分矿井的永久地压实测值<sup>[5]</sup>与式(1)计算结果对比分析分别见表 6~9。由表 6~9 可看出,这些矿井的测点深度一般小于 150 m,规范推荐公式式(1)的计算结果为实测值的 1.1~1.9 倍左右,该精度在设计上是可接受的。

表 6 红阳<sup>#</sup>1 副井永久地压实测值与计算值

Tab. 6 Measured value and theoretical value of radial pressure of auxiliary shaft of Hongyang # 1 coal mine

土性	深度/m	地压实测 值/MPa	式(1)计算 值/MPa	计算值/ 实测值
粗砂	61	0.53	0.793	1.50
亚砂土	67	0.72	0.871	1.21
粘土	74	0.71	0.962	1.35
砂	80	0.77	1.040	1.35
砂砾	88	0.81	1.144	1.41
粘土	90	0.79	1.170	1.48
砂砾层	94	0.72	1.222	1.70
砂砾层	100	0.68	1.300	1.91

表 7 兖州兴隆庄主井永久地压实测值与计算值

Tab. 7 Measured value and theoretical value of radial pressure of main shaft of Xinglong zhuang coal mine at Yanzhou

土性	深度/m	地压实测值/MPa	式(1)计算值/MPa	计算值/实测值
松土	88.5	1.06	1.151	1.09
砂砾	118.0	1.04	1.534	1.48
细砂	142.5	1.40	1.853	1.32
粘土	151.0	1.40	1.963	1.40
砂质粘土	168.5	1.23	2.191	1.78

表 8 蔡园主井永久地压实测值与计算值

Tab. 8 Measured value and theoretical value of radial pressure of main shaft of Caiyuan coal mine

测点	深度/m	地压实测值/MPa	式(1)计算值/MPa	计算值/实测值
1	26.0	0.24	0.338	1.41
2	32.0	0.38	0.416	1.09
3	38.0	0.35	0.494	1.41
4	48.0	0.53	0.624	1.18
5	49.4	0.54	0.642	1.19
6	54.0	0.52	0.702	1.35
7	56.0	0.55	0.728	1.32
8	59.0	0.63	0.767	1.22
9	63.5	0.68	0.826	1.21
10	66.0	0.68	0.858	1.26
11	73.5	0.75	0.956	1.27
12	83.0	0.85	1.079	1.27
13	86.0	0.89	1.118	1.26
14	87.0	0.89	1.131	1.27

表 9 国内外部分矿井永久地压实测值与计算值

Tab. 9 Measured value and theoretical value of radial pressure of shaft wall of some domestic and foreign coal mines

井筒名称	最大实测深度/m	地压实测值/MPa	式(1)计算值/MPa	计算值/实测值
红阳#1副井	90.0	0.79	1.17	1.48
兴隆庄主井	168.5	1.23	2.19	1.78
蔡园主井	87.0	0.89	1.13	1.27
九江大桥墩沉井	40.0	0.44	0.52	1.18
日本三池新开立井	85.0	0.85	1.11	1.30
日本三池新开立井	101.0	1.01	1.31	1.30
日本三池有明立井	148.0	1.62	1.92	1.19
加拿大赤伯#1立井	380.0	3.42	4.94	1.44
德国雅科巴立井	412.0	4.53	5.36	1.18
红阳#1西风井	93.0	1.12	1.21	1.08

### 3 深厚表土段井壁径向荷载特征分析

(1) 石集立井四周为岩石,自身强度较高,故其传递给井壁的径向荷载较小,导致规范方法计算值为实测值的 95 倍以上。而赵楼煤矿风井的地层属于粉砂、粘土及细砂,其强度远小于岩石,规范方法计算值为实测值的 2 倍左右。可见,式(1)适用于计算土层中井壁的径向荷载,若用于确定岩层中井壁径向荷载则误差较大。

(2) 赵楼煤矿风井、龙固煤矿副井的深度较大(大于 150 m),式(1)的计算结果为实测值的 2 倍左右。而红阳#1 副井、兖州兴隆庄主井、蔡园主井的深度较小(小于 150 m),式(1)的计算结果为实测值的 1.1~1.9 倍左右。可见,立井深度越大,基于式(1)所计算的井壁径向荷载误差越大。立井深度较小,其属于浅土力学范畴,式(1)的计算精度在设计上可接受。

上述现象,原因在于表土层厚度较大,其作用于井壁的径向荷载受多种因素的影响,其分布特征与普通土力学中的规律不尽相同<sup>[9]</sup>。这是由于深层土体与浅层土体的力学特性具有显著差别<sup>[3]</sup>:① 固结时间不同。深层土经历了比地表或浅层土更为漫长的地质历史时期,使部分深层第三系粘土的物理力学性质接近于软岩。② 应力水平不同。深层土处于初始的高压  $K_0$  固结状态,其固结应力大于 1 MPa,甚至超过 10 MPa,而地表与浅层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层岩土工程中,土体以卸载或卸载后再加载的应力路径为主,而地表或浅层岩土工程多以加载应力路径为主。李文平等<sup>[10]</sup>对深层粘土进行高压蠕变  $K_0$  试验表明,深层粘土的侧压力系数  $K_0$  值随深度呈指数函数形式变化,在 300~500 m 深度范围内变化较大,当深度超过 500 m 后则基本保持不变;经来旺等<sup>[11]</sup>提出表土沉降过程中存在次生水平地压,次生地压随土层深度的增加会逐渐趋于一个常量,而不是线性分布的挡土墙地压和重液理论。因此,在井管开挖时当距离开挖端面很近时,表土层作用于井壁的压力很小,随着开挖面下掘,该压力逐渐增大,但当开挖至一定深度后,压力值趋于稳定,不会无限制的增大。可见,规范推荐公式的准确性与合理性仍待进一步验证。张荣立等<sup>[5]</sup>对重液公式进行了改进,提出了混合重度随深度增加而折减的公式:

$$\begin{cases} p_h = 0.013 H & H \leq 100 \text{ m} \\ p_h = 0.012 H & 100 < H \leq 200 \text{ m} \\ p_h = 0.011 H & 200 < H \leq 300 \text{ m} \\ p_h = 0.010 H & H > 300 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

但由于实测数据有限,式(2)尚未普遍使用。

综上所述,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。针对深层立井工程特点,通过模型试验、现场测试等手段,建立深厚表土中径向荷载的合理计算公式,是立井井筒正确设计的基本前提。

### 4 结语

a. 基于多个立井实测径向荷载的对比分析表明,我国现行规范建议的计算径向荷载的重液公式的计算结果与实测值存在一定的误差。

b. 立井深度越大,基于规范计算方法得到的井壁径向荷载误差越大。立井深度较小,其属于浅土力学范畴,规范计算方法的计算精度在设计上可接受。

c. 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径向荷载的大小与分布规律。

#### 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] 夏红春,汤美安. 表土层注浆加固法防治井壁破裂的机理及应用[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(4):407-412.

[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(S2):687-690.

[4] 中煤国际工程集团南京设计研究院,安徽理工大学,煤炭工业合肥设计研究院. 煤矿立井井筒及硐室设计规范(GB/50384-2007)[S]. 北京:中国计划出版社,2007.

[5] 张荣立,何国纬,李铎. 采矿工程设计手册(中册)[M]. 北京:煤炭工业出版社,2003.

[6] 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.

[7] 蔡海兵,程桦,姚直书. 基岩破碎带段立井井壁受力状况的长期监测[J]. 建井技术,2008,29(6):23-26.

[8] 孙猛,檀鲁新,齐吉龙,等. 深厚表土层冻结井筒冻结壁内压力实测研究[J]. 建井技术,2006,27(1):22-24.

[9] 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.

[10] 李文平,张志勇,孙如华,等. 深部粘土高压  $K_0$  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):185-190.

[11] 经来旺,何杰兵,张宏学. 深立井井壁结构设计存在问题及解决对策[J]. 中国矿业,2007,16(6):66-68.

## Study on Specification Calculation Method of Radial Pressure on Shaft Wall in Deep Alluvium

LIU Jinlong<sup>1</sup>,CHEN Luwang<sup>2</sup>,WANG Jili<sup>3</sup>

(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:** The correctness and applicability of radial pressure calculation method for vertical shaft design suggested by specification of China should be validated. Based on the geologic informatics and parameters of some coal mine shaft walls, the theoretical distribution of radial pressure has been obtained by specification calculation method. Comparison of the measured value, it is found that the calculated result is not consistent with the measured value obviously, especially for rock stratum engineering; the error between measured value and calculated value increases with the depth of shaft wall increasing. Therefore, it is advised to study the mechanics of deep soil, and more tests and theoretical study should be carried out to analyze the radial pressure in deep alluvium.

**Key words:** geotechnical engineering; shaft wall; radial pressure; specification method; mechanics of deep soil

\*\*\*\*\*  
(上接第 133 页)

## Study of Newly-built Anchor Reinforcement Measure for External Pre-stressing Reinforced Concrete Bridge

CHEN Zhijun<sup>1</sup>,CAO Hongyou<sup>1</sup>,GAO Hongbo<sup>2</sup>,ZHU Hongping<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd, Wuhan 430056, China)

**Abstract:** According to the occurrence of the anchor block's disease when the external tendons were stressed using external re-stressing reinforced method to reinforce a concrete bridge and the field test data, the reason of the disease is analyzed. And then the pasting steel plate method is proposed to reinforce the anchor block. The solid finite element modeling method is used to analyze the anchor's deformation and stress distribution before and after reinforcing. Finally, the structural form of the reinforcement steel plate and the most adverse stress region are obtained. The arrangement of the bolts are discussed and some useful suggestions are proposed.

**Key words:** concrete bridge; external pre-stressing; anchor block; reinforcement measure