

岩土工程

深部土 K_0 参量在井壁稳定性验算中的研究

孙如华¹, 李文平¹, 张志勇², 王维理³

(1 中国矿业大学资源学院, 徐州 221116; 2 上海市地矿建设有限责任公司, 上海 200072;

3 北京市勘察设计院, 北京 100038)

[摘 要] 水平地压计算方式考虑了土的天然特性, 利用自行设计的高压 K_0 蠕变试验系统试验得到深部土的 K_0 参量, 作为研究山东省巨野矿区埋深近 700m 的巨厚土层中煤矿立井水平地压大小计算参数, 模拟实际状况。分析表明, 在厚表土地区进行井筒建设中, 由于含水层失水造成井壁竖向附加应力的存在, 所以在该类地区进行井筒建设时, 不但要进行环向稳定性验算, 还应该进行竖向稳定性验算, 该类地区井筒破坏主要是由于竖向附加应力引起的。

[关键词] 深部土 井壁稳定性 K_0 参量 地压 附加应力

[中图分类号] P628 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495 - 5331 (2008) 02 - 0083 - 04

立井是矿井的咽喉, 其安全稳定性非常重要, 尤其是在徐淮矿区, 表土层厚, 井筒更容易产生破裂, 所以在井筒投入使用之前对其稳定性进行验算非常必要。

井壁稳定性验算问题牵涉到井壁厚度的确定以及井筒最大附加应力的确定。尤其井壁厚度的计算是立井井筒设计中一项十分关键的工作, 特别是近几年来徐淮地区井筒破坏事故的发生, 更是引起设计、研究部门对井壁厚度计算的重视。井壁厚度是依据井壁结构及材料、立井地压、井筒施工时的临时荷载 (如冻结张力、吊挂力以及注浆压力等)、井口构筑物 (如井塔井口房等), 对井壁施加的附加载荷等, 通过计算和工程类比法确定。其中立井地压是作用在井壁上的主要荷载, 是设计井壁的主要依据^[1]。

立井地压分布规律与岩 (土) 体的性质、地层环境和产状、垂直深度、井筒开挖方式、井壁结构形式等多种因素有关。而表土段井壁的厚度主要由水平地压大小决定^[2]。

1 深部土 K_0 参量应用分析

文中深部土^[3-6]的 K_0 是在空间轴对称应力状态下由蠕变试验确定的, 符合井壁围土的受力特点,

因此采用本文中的 K_0 计算公式确定水平地压^[7-8], 更能符合实际的应力状态。依据自重应力场条件下水平地压发生机理, 运用分层总和法, 可按式计算深土水平地压:

$$P_H = K_0 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1)$$

式中: P_H —计算点 H 处水平地压, MPa, $H = \sum_{i=1}^n h_i$;

γ_i —第 i 层土的天然重度, kN/m^3 ;

h_i —第 i 层土的厚度, m;

K_0 —计算点土层水平侧压力系数, 由土体 K_0 固结试验确定。

若计算点位于粘土层中, K_0 试验及参数详见作者发表于《岩土工程学报》2006 年第 10 期的“深部粘土高压 K_0 蠕变试验及其微观结构各向异性特点”一文, 按分层总和法, 其表达式为:

$$K_0 = a + b e^{\left(\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i / 10^6 p_a \right)} \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为与土性有关的无量纲试验参数, 对于本次研究用粘土, 建议 $a = 0.79 \sim 0.82$, $b = -1.76$, $c = -0.47$ 。适用于 $H \geq 300\text{m}$; γ_i —第 i 层粘土的重度, kN/m^3 ; h_i —第 i 层的厚度, m; p_a —压强, N/m^2 。

若计算点位于砂土层中, K_0 及试验参数可由式 (3) 确定, 按分层总和法, 其表达式为:

[收稿日期] 2008 - 03 - 20; **[修订日期]** 2008 - 04 - 10。

[基金项目] 国家自然科学基金项目 (编号: 40272114, 40572160) 与中国矿业大学青年科研基金项目 (编号: 206A017) 共同资助。

[第一作者简介] 孙如华 (1977—), 男, 2003 年毕业于中国矿业大学, 获硕士学位, 讲师, 在读博士生, 现主要从事水文地质工程地质及岩土工程方面的科研和教学工作。

$$K_0 = a + b \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i h_i / 10^6 \right) \tag{3}$$

式中： a, b —与土性有关的无量纲试验参数,对于本次试验所用砂土,建议 $a = 0.13 \sim 0.16, b = 0.002$,适用于 $H \geq 300$ γ_i —第 i 层土的重度, kN/m^3 ; h_i —第 i 层土的厚度, m 。

2 实际应用

以山东巨野矿区龙固矿井检查孔为例,该井筒表土段厚 566.20m,这里仅列出 300m 以下每层土的重度与厚度如表 1所示。

表 1 土层厚度及重度一览表

土样 编号	土样 名称	深度 (m)	重度 (kN/m^3)	厚度 (m)	土样 编号	土样 名称	深度 (m)	重度 (kN/m^3)	厚度 (m)
22	含砂粘土	289.60 - 309.00	19.5	19.40	41	粉砂	437.60 - 441.10	21.1	3.50
23	粘土	309.00 - 326.40	19.5	17.40	42	粉土	441.10 - 444.30	21.2	3.20
24	粉质粘土	326.40 - 328.60	19.9	2.20	43	粉土	444.30 - 452.20	20.7	7.90
25	粘土	328.60 - 341.80	20.6	13.20	44	粉质粘土	452.20 - 457.50	19.6	5.30
26	细砂	341.80 - 349.40	19.8	7.60	45	粘土	457.50 - 468.50	18.6	11.00
27	细砂	349.40 - 360.00	19.3	10.60	46	粉砂	468.50 - 472.20	21.0	3.70
28	粘土	360.00 - 367.50	19.9	7.50	47	粘土	472.20 - 481.30	20.6	9.10
29	粘土	367.50 - 372.80	19.4	5.30	48	细砂	481.30 - 483.30	19.2	2.00
30	粉质粘土	372.80 - 377.10	21.8	4.30	49	含砂粘土	483.30 - 495.50	19.2	12.20
31	细砂	377.10 - 382.90	18.5	5.80	50	粉砂	495.50 - 498.90	19.4	3.40
32	粘土	382.90 - 385.90	19.6	3.00	51	粘土	498.90 - 499.30	19.3	0.40
33	粘土	385.90 - 388.00	19.6	2.10	52	粘土	499.30 - 510.50	22.0	11.20
34	细砂	388.00 - 391.10	19.4	3.10	53	粘土	510.50 - 521.60	21.2	11.10
35	砂质粘土	391.10 - 397.40	21.0	6.30	54	砂质粘土	521.60 - 526.80	22.2	5.20
36	粉土	397.40 - 405.50	20.6	8.10	55	粉质粘土	526.80 - 532.30	21.4	5.50
37	粉砂	405.50 - 417.10	19.2	11.60	56	粘土	532.30 - 538.70	21.2	6.40
38	砂质粘土	417.10 - 426.50	19.2	9.40	57	粘土	538.70 - 546.00	22.1	7.30
39	粘土	426.50 - 431.80	19.3	5.30	58	粉土	546.00 - 551.70	19.7	5.70
40	粉砂	431.80 - 437.60	20.9	5.80	59	粘土	551.70 - 566.20	21.1	14.50

2.1 井壁厚度的确定

当立井地压确定以后,可采用厚壁筒公式(即拉麦公式)计算井壁厚度:

$$d = R \left(\sqrt{\frac{[\sigma_a]}{\sqrt{[\sigma_a]} - 2P_{\max}}} - 1 \right) \tag{4}$$

式中： R —井筒掘进半径, m ;
 σ_a —井壁材料抗压允许应力, MPa ;
 $P_{\max}$ —作用在井壁上的最大水平地压值, MPa 。
根据拉麦公式,取井壁内径为 8m,井壁材料抗压允许应力为 29.4 MPa ,表土厚 566m,利用上述立井地压计算公式确定地压最大值为:

$$P_{\max} = K_0 \sum_{i=1}^{59} \gamma_i h_i = 9.2 \text{MPa}$$

则井壁厚度为:

$$d = 4 \times \left\{ \sqrt{\frac{29.4}{\sqrt{29.4} - 2 \times 9.2}} - 1 \right\} = 2.54 \text{m}, \text{取}$$

$d = 2.6 \text{m}$,则井筒外径为 13.2m,显然井壁内侧最大应力不能导致井壁破裂,环向是安全的。

2.2 井壁竖向稳定性验算

从徐淮地区井筒破坏特征看,深厚含水冲积表

土层中的井壁除受平面荷载外,同时还受到井壁附加应力的作用,杨维好等^[9-11]做的模拟试验证明井壁附加应力不仅存在,而且还相当大。因此在类似徐淮地区条件下的井壁稳定性验算中,还应考虑在井壁竖直附加应力作用下井壁的竖向稳定性。

对于深部土来说,其侧压力系数并不是一定值,而是深度的函数,根据本文所确定的粘性土在高压 K_0 蠕变条件下的土的侧压力系数 K_0 ,结合平衡条件和胡克定律,可以得到计算井壁竖直附加应力的计算公式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma(z) &= \frac{Eu_0\beta}{\cos\beta Z_p} \sin\beta z & z \leq Z_p \\ \sigma(z) &= \frac{1}{A} \left(\frac{1}{2} b_2 z^2 + b_1 z + C_1 \right) & z > Z_p \\ C_1 &= EA\beta u_0 \tan\beta Z_p - \frac{1}{2} b_2 Z_p^2 - b_1 Z_p \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中： $b_1 = \sigma \pi D, b_2 = K_0 \rho \pi D \tan\Phi, \beta = \sqrt{a_1/(EA)}, a_1 = \pi D K_s; \sigma(z)$ —井壁竖直附加应力 (MPa); E —井壁的弹性模量 (MPa); A —井壁的横截面积 (m^2); D —井筒外径 (m); u_0 —土与井壁相互剪切作用弹性极

限位移值 (m),由相互作用剪切试验确定; K_0 、 α 、 Φ —土与井壁相互作用单位刚度系数 (MPa/m 或 MN/m³),强度指标粘聚力 (MPa)和内摩擦角 (°),可由试验确定; ρ' —土层的平均有效重力密度 (MN/m³); z —土层深度 (m)。

对于龙固矿井来说,表土段最大深度 566.20m,

在 - 483.30 ~ - 566.20m 范围内为粘土,所以在此深度范围内没有竖向附加应力,而在 - 481.30 ~ - 483.30m 范围内为细砂,相当于一含水层,此含水层在井筒建设过程中会发生失水会造成其上覆土层产生垂直下沉位移,所以最大附加应力发生在 - 481.30m 处。龙固矿井的基本情况如表 2 所示。

表 2 龙固井筒基本情况参数

D/m	A/m^2	E/MPa	H/m	$K_S/MPa \cdot m^{-1}$	u_0/m	c/MPa	$\Phi/^\circ$	K_0	$\rho'/MN \cdot m^{-3}$
13.2	86.58	10^4	481.30	113.86	0.007	0.13	18.1	0.82	0.01

按以上方法计算所得井壁最大附加应力值(处)为 174.5MPa,明显大于井壁混凝土的强度 29.4MPa,所以井壁在竖向上由于附加应力的存在会产生破裂。

对兖滕 - 徐淮矿区或类似条件的矿区,还可通过确定致使井筒发生破裂的土层临界厚度值 H_{max} 来判别井壁的稳定性。如果某井筒处实际土层厚度 H 大于或等于 H_{max} ,则该井筒具备发生破裂的土层厚度条件,井筒有产生底含失水压缩诱发井壁破裂的可能;而当实际土层厚度 H 小于 H_{max} ,则所计算结构参数的井筒不会产生井壁破裂。

当 $Z_p = 0$ 时井壁附加应力达最大值,此时 (5) 式中 $C_1 = 0$,由 (5) 式并考虑井壁自重应力有

$$\sigma_f = \frac{1}{A} \left(\frac{1}{2} b_2 H_{max}^2 + b_1 H_{max} \right) + \gamma_c H_{max} \tag{6}$$

方程 (6 - 4) 的一个正根即为计算 H_{max} 的表达式

$$H_{max} = \frac{-(b_1 + A\gamma_c) + \sqrt{(b_1 + A\gamma_c)^2 + 2Ab_2\sigma_f}}{b_2} \tag{7}$$

式中 σ_f 、 γ_c 分别为井壁混凝土的标准强度 (MPa) 和重度 (MN/m³)。其它符号意义同前。

对应表 2 中参数 (取 $\sigma_f = 29.4MPa$, $\gamma_c = 0.025MN/m^3$),计算得井筒发生井壁破裂的土层临界厚度值 H_{max} 为 158.11m,而龙固矿井上覆土层的厚度为 481.30m,大于井筒发生破裂的土层临界厚度 158.11m。所以,龙固矿井在 - 158.11 ~ - 481.30m 深度范围内会发生井壁破裂,应在此范围内增大井壁厚度。

3 结论

1) 深部土的静止侧压力系数 K_0 值的变化,对于确定深厚表土矿区的井筒地压有重要的工程意

义。

2) 传统的水平地压计算方式均不符合井筒受力的实际状况,本文研究的水平地压计算方式考虑了土的天然特性,可以较好的模拟实际状况。不但能为井筒的安全性建设提供依据,而且可以使井筒的建设更加经济合理。

3) 在厚表土地区进行井筒建设,由于含水层失水造成井壁竖向附加应力的存在,所以在该类地区进行井筒建设时,不但要进行环向稳定性验算,还应该进行竖向稳定性验算。实例分析表明,该类地区井筒破坏主要是由于竖向附加应力引起的。

[参考文献]

[1] 李文平. 深厚表土中煤矿立井破裂工程地质研究 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000, 11.

[2] 洪伯潜. 巨野煤田开发条件及井筒施工关键技术 [J]. 中国煤炭, 2002, 28 (4): 5 - 7.

[3] 张永双, 曲永新. 鲁西南地区上第三系硬粘土的工程特性及其工程环境效应研究 [J]. 岩土工程学报, 2000, 22 (4): 446 - 449.

[4] 蒋明镜, 沈珠江. 结构性粘土研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 1999, 19 (1): 26 - 31.

[5] 王清, 王凤艳, 肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程中的应用 [J]. 成都理工学院学报, 2001, 28 (2): 148 - 153.

[6] 张志勇. 深部土高压结构力学性研究 [D]. 中国矿业大学硕士学位论文, 2004, 6.

[7] 李文平, 张志勇, 孙如华. 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): 1185 - 1190.

[8] 李文平, 孙如华. 深部土高压卸载变形结构性量化参数确定及本构模型 [J]. 工程地质学报, 2006, 15 (3): 384 - 389.

[9] 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, 增刊: 687 - 690.

[10] 杨维好, 崔广心, 程锡禄. 特殊地层条件下井壁破坏机理与防治技术的研究 (之一) [J]. 中国矿业大学学报, 1996, 25 (4): 1 - 6.

[11] 吕恒林, 杨维好, 程锡禄, 等. 特殊地层条件下井壁破坏机理与防治技术的研究 (之二) [J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26 (2): 1 - 4.

APPLICATION OF K_0 PARAMETER OF DEEP BURIED SOILS IN CHECKING COMPUTATION OF SHAFT STABILITY

SUN Ru-hua¹, LI Wen-ping¹, ZHANG Zhi-yong², WANG Wei-li³

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008;

2. Shanghai Geological Construction Co. Ltd, Shanghai 200072; 3. Beijing Geotechnical Institute, Beijing 100038)

Abstract: Natural feature of soils is considered during calculation of horizontal geopressure. K_0 parameter gained from the high-pressure creep equipment is used to calculate horizontal stress of shaft lining with nearly 700 m buried soils in the Juye coal mine, Shandong province. Analyses prove that there exists a vertical additional stress due to dehydration of aquifer during shaft construction in a thick regolith area. Checking computations of the vertical stability and the hoop stability are needed. Destruction of shaft is mainly caused by vertical additional stress.

Key words: deep buried soil, shaft stability, K_0 parameter, geopressure, additional stress

www.cnki.net