

井壁竖直附加力变化规律模拟试验研究

黄家会, 杨维好

(中国矿业大学建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 利用大型竖井模拟试验台, 对冲积层疏排水过程中立井井壁受到的竖直附加力的变化规律开展了模拟试验研究。试验结果表明: 竖直附加力随含水层降压量的增大而线性增加, 随深度增大而增大, 随土层中粗颗粒含量增多而增大。分析计算表明: 应采用竖向可缩新型井壁结构防止井壁因冲积层疏排水而破坏。

关键词: 冲积层; 疏排水; 井壁; 竖直附加力; 模拟试验

中图分类号: TD35

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)10-1204-04

作者简介: 黄家会(1965-), 男, 博士, 副教授, 现在中国矿业大学从事岩土特殊施工技术方面的科研与教学工作。

Study on variation of vertical additional force on shaft lining by simulation tests

HUANG Jia-hui, YANG Wei-hao

(China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The simulation tests were carried out to study the variation of the vertical additional force acted on shaft lining by surrounding soils during dewatering of alluvium by means of multi-function rig in vertical shaft. On the basis of the analysis of the test data, the additional force linearly increased with variation of water pressure in the aquifer, and increased with the increase of the depth and with the content of coarse soil particle in the overburden layer. According to calculations, it was necessary to adopt a new type of structure of the shaft lining with vertically yieldable segments for reason of safety.

Key words: alluvium; drainage; shaft lining; vertical additional force; simulation test

0 概 述

自1987年以来, 安徽省淮北矿区, 江苏省徐州、大屯矿区, 山东省兖州、济宁、枣庄矿区, 河南省永夏矿区, 黑龙江省东荣矿区等地已有99个在厚冲积层中的立井井筒发生了井壁破裂灾害, 造成了重大损失。

中国矿业大学的研究表明^[1], 当开采活动导致冲积层失水时, 土层在因疏排水而发生固结沉降的过程中, 施加给井壁外表面一个向下的面力——竖直附加力(以前在设计井壁时尚未认识到此荷载), 井壁正是受到了竖直附加力的作用才破裂的(机理见图1)。

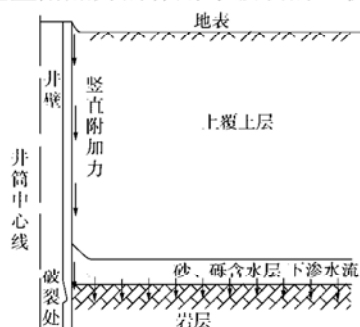


图1 井壁破裂机理

Fig. 1 Mechanism of shaft lining cracking

在冲积层可能产生失水固结沉降的地区, 竖直附加力的大小和变化规律是新井井壁结构设计的主要理论依据之一。本文用物理模拟方法对其进行研究。

1 相似模化与试验

1.1 相似准则与模拟参数

上述发生破裂灾害的立井井壁在轴向上无井壁可缩装置。本文即以此井壁结构为模拟对象, 研究表土含水层疏水固结时的井壁受力规律。原型条件为:

(1) 地层分别为粘土、砂质粘土和粘土质砂。

(2) 冲积层厚度为50~300 m。

(3) 井壁破裂灾害多在井筒建成后4~10 a内发生, 因此确定原型疏排水时间为7 a。

(4) 破裂井筒所穿过的冲积层底部含水层的厚度一般在4~16 m范围内, 故试验原型厚度取为10 m。

(5) 表土含水层的降压速率最大为0.114 MPa/a, 试验中按0.114 MPa/a考虑。

考虑主要影响因素, 根据相似理论^[2]得相似准则:

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50234030)

收稿日期: 2005-08-01

$$\pi_1 = \frac{R_0}{H}; \pi_2 = \frac{h}{H}; \pi_3 = \frac{z}{H}; \pi_4 = \frac{\gamma_L H}{E_L}; \pi_5 = \frac{\gamma_s H}{E_s};$$
$$\pi_6 = \frac{E_s}{E_L}; \pi_7 = \frac{p_0}{E_s}; \pi_8 = \frac{f_n}{E_s}; \pi_9 = \frac{c}{E_s}; \pi_{10} = \frac{C_v \tau}{h^2};$$
$$\pi_{11} = \frac{V \tau}{E_s}; \pi_{12} = v_L; \pi_{13} = v_s; \pi_{14} = \phi。式中 R_0 为$$

井壁外半径 (m); H 为冲积层总厚度 (m); z 为研究段的埋深 (m); h 为疏排水含水层厚度 (m); E_L, E_s 为井壁、土体的变形模量 (Pa); v_L, v_s 为井壁、土体的泊松比 (无量纲); γ_L, γ_s 为井壁、土体的容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); p_0 为疏排水含水层的初始水压 (Pa); V 为含水层的降压速率 ($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$); C_v 为土的固结系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); f_n 为井壁受到的竖直附加力 (Pa); τ 为疏排水时间 (s); ϕ 为土体的内摩擦角 (无量纲); c 为土体的粘聚力 (Pa)。

根据试验台的条件, 取几何缩比为 $C_R=24$, 故模型尺寸应按 π_1, π_2, π_3 确定。模型井壁的材料与原型相同。土层材料有 3 种, 纯粘土, 砂质粘土, 粘土质砂。含水层用细砂模拟。流体材料在原、模型中相同, 均是水。这样, 对于普通模拟试验, 有如下参数: $E_L, E_s, v_L, v_s, C_v, \phi, c$ 的相似常数为 1, 并有准则 $\pi_6, \pi_9, \pi_{12}, \pi_{13}, \pi_{14}$ 自动满足。根据 π_4, π_5 , 要求模型材料的容重是原型的 24 倍, 使用加面力 P_v 补偿的办法可以保证近似相似^[2]。由 π_7, π_8 可得: p_0 和 f_n 的相似常数为 1, 即要求施加于模型上的外荷载与原型相同, 这样, 模型与原型中对应点的竖直附加力是相同的。由 π_{10} 可得: $C_\tau = C_R^2 = 576$, 即: 模拟试验中的 1 d 相当于原型的 576 d。故模拟 7 a 时间需要 4.44 d, 约 106.5 h。由 π_{11} 有: $C_v = 1/C_\tau = 1/576$, 即: 试验中含水层水压的下降的速率是现场的 576 倍, 为 7346 Pa/h。

综上所述, 模型在几何量、物理参数、边界条件、时间等方面与原型相似或近似相似。模拟参数见表 1。

1.2 试验与测试方法

试验模型见图 2。试验台的有效试验空间为 $\phi 1.6 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$ 。试验中用荷重传感器测量模型井壁竖向附

加总力, 顶囊中的水压和土体中的孔隙水压均用水压传感器测量。试验中分段模拟井壁的受力情况, 顶囊的压力值取为地表至模拟段下端的土柱自重应力值 P_v 。每次试验中 P_v 值维持不变, 而模拟疏排水层的底部砂层的水压 p_0 随时间线性下降。试验参数见表 2。

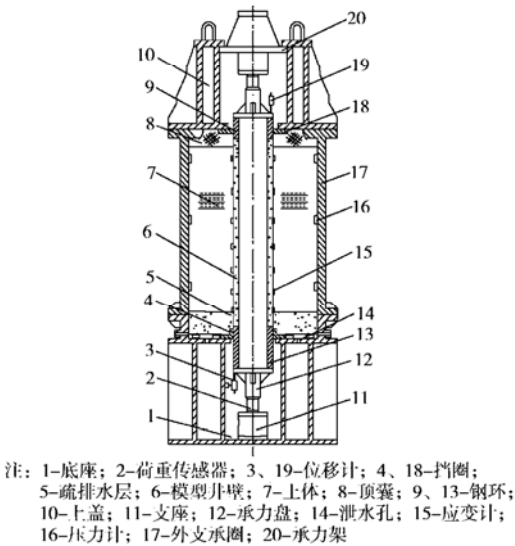


图 2 试验模型示意图
Fig. 2 Layout for model test

2 试验结果

2.1 竖直附加力 f_n 随含水层水压降 Δp 的变化规律

荷重传感器测得的竖向附加总力除以模型井壁的有效外表面面积即得该模拟段井壁的平均竖直附加力 f_n 。从图 3 可见: f_n 随 Δp 线性增长, f_n 与 Δp 的关系按式 (1) 回归, 回归的效果是高度显著的, 见表 3。

$$f_n = a + b \Delta p \quad (1)$$

式中 Δp 为含水层水压下降量 (MPa); a 为回归系数 (kPa); b 为另一回归系数, 为 f_n 随 Δp 的增长率 ($\text{kPa} \cdot \text{MPa}^{-1}$)。

表 1 模拟参数

Table 1 Simulated parameters

参数	几何缩比	井壁外径/m	排水层厚度/m	模拟段高/m	时间缩比	模拟时间	井壁材料	降水速率	流体材料
模型	1	0.40	0.417	2.1	1	4.44d	C40 砼	114 kPa/a	水
原型	24	9.60	10.0	50.4	576	7a	C40 砼	7346 Pa/h	水

表 2 试验参数

Table 2 Test parameters

编号	土性	H/m	P_v/MPa	p_0/MPa	编号	土性	H/m	P_v/MPa	p_0/MPa	编号	土性	H/m	P_v/MPa	p_0/MPa
CC1		0~50	1.0	0.5	SC1		0~50	1.0	0.5	CS1		0~50	1.0	0.5
CC2		50~100	2.0	1.0	SC2	砂	50~100	2.0	1.0	CS2	粘	50~100	2.0	1.0
CC3	粘	100~150	3.0	1.5	SC3	质	100~150	3.0	1.5	CS3	土	100~150	3.0	1.5
CC4	土	150~200	4.0	2.0	SC4	粘	150~200	4.0	2.0	CS4	质	150~200	4.0	2.0
CC5		200~250	5.0	2.5	SC5	土	200~250	5.0	2.5	CS5	砂	200~250	5.0	2.5
CC6		250~300	6.0	3.0	SC6		250~300	6.0	3.0	CS6		250~300	6.0	3.0

表 3 试验数据回归结果

		Table 3 Regression results of test data								
		回归结果(注: 试验数据样本数均为 214, R 为相关系数)								
模拟深度 z/m	顶压 P_v $/\text{MPa}$	粘土			砂质粘土			粘土质砂		
		a	b	R	a	b	R	a	b	R
0~50	1.0	-0.406	10.699	0.985	-0.815	21.08	0.981	2.392	48.13	0.972
50~100	2.0	0.1716	16.66	0.998	-2.616	42.17	0.981	4.425	82.77	0.982
100~150	3.0	-1.520	20.05	0.993	-2.254	56.46	0.995	2.416	99.79	0.998
150~200	4.0	-0.927	27.16	0.993	-1.145	58.15	0.999	5.46	113.2	0.996
200~250	5.0	1.372	30.53	0.996	2.401	59.54	0.995	-6.145	122.1	0.989
250~300	6.0	-1.311	34.99	0.992	0.551	61.52	0.997	-3.718	129.5	0.997

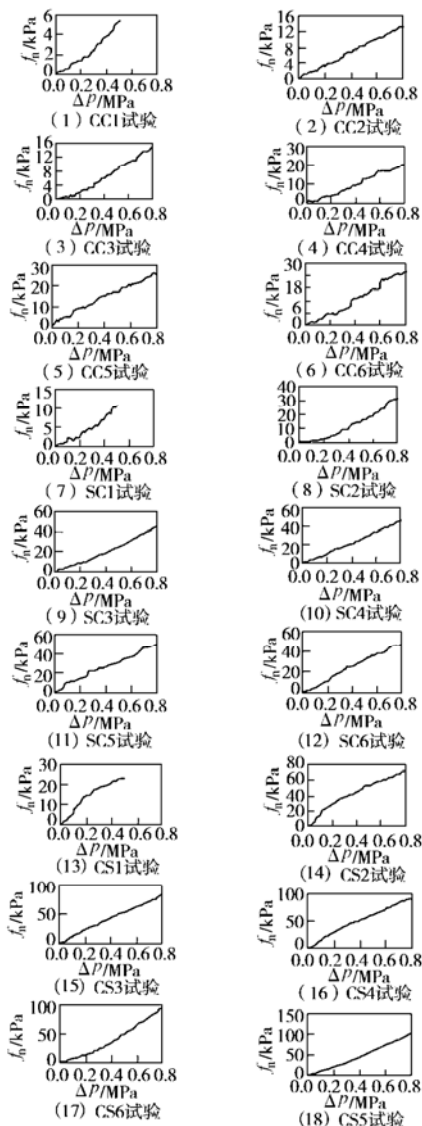


图 3 竖直附加力随水压降的变化曲线

Fig. 3 Variation of the vertical additional force with increase of water pressure in the aquifer

对于降压速率为 0.114 MPa/a 的各次试验来说, 回归系数 a 的绝对值与试验所得最大竖直附加力相比要小的多, 可将其忽略, 这样, f_n 近似与 Δp 成正比。

$$f_n = b \Delta p \quad (2)$$

2.2 b 与深度和土层性质的关系

从图 4 可见: 对于粘土、砂质粘土、粘土质砂, f_n 的增长率均随深度增加。在其它条件相同时, 粘土

质砂中 f_n 的增长率约为砂质粘土中 2 倍、约是粘土中 4 倍。因此, 土层中粗骨架颗粒越多, f_n 的值越大。

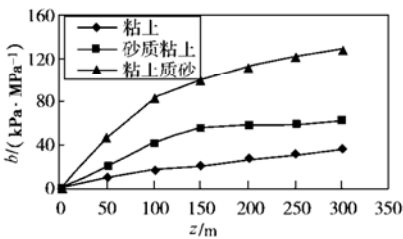


图 4 不同土层 b 与深度的关系曲线

Fig. 4 b - z curves for clay, sandy clay, and clayey sand

3 讨 论

3.1 竖直附加力的最大值是多少?

根据公式(2), 当表土含水层水压下降为 0 时(此时, $\Delta p = p_0$), f_n 将会达到最大值

$$f_{n \max} = b p_0 \quad (3)$$

事实上 f_n 的最大值受到如下因素的影响:

(1) 疏排水含水层的最终水压下降量 $\Delta p_{\max}$ 。实际中, 含水层疏干的情况是存在的 ($\Delta p = p_0$), 如安徽淮北矿区冲积层厚度多在 300 m 以内, 为提高开采上限, 采取了疏干冲积层下部砂、砾含水层的措施; 但是多数情况下含水层是不疏干的(特别是冲积层很厚时), 这时有 $\Delta p_{\max} < p_0$, 当水位不再下降时有

$$f_{n \max 1} = b \Delta p_{\max} \quad (4)$$

(2) 土与井壁交界面的长时抗剪强度。竖直附加力的最大值不可能超过土与井壁交界面的长时抗剪强度, 当二者相等时土与井壁之间就会滑动, 因此有

$$f_{n \max 2} = \sigma \tan \varphi + c \quad (5)$$

$$\sigma = 0.003 H \quad (6)$$

式中 σ 为作用于井壁上的有效水平土压力 (MPa); 根据表土地压重液公式^[3], σ 可用式 (6) 表示; φ 为井壁和土层交界面的长时内摩擦角($^\circ$); c 为井壁和土层交界面的长时粘聚力 (MPa); H 为土层的埋深 (m)。

(3) 井壁的竖向极限承载力。当井壁竖向受力达到极限承载力时, 井壁会产生破裂灾害, 井壁的竖向刚度减小, 井壁不能承受更大的荷载。因此存在与井壁竖向极限承载力相对应的一种可能的最大竖直附加

力 $f_{n\max 3}$ 。
因此, f_n 的最大值应等于 $f_{n\max 1}$ 、 $f_{n\max 2}$ 和 $f_{n\max 3}$ 中的最小值, 即有

$$f_{n\max} = \min (f_{n\max 1}, f_{n\max 2}, f_{n\max 3}) \quad (7)$$

3.2 井壁结构是“抗”还是“让”？

f_n 随疏排水降压量的增大而增大, 因此是一个动态荷载。当存在冲积含水层疏水的条件时, 应将井壁受力从传统的按静态、二维问题处理转变为按动态、三维问题处理。这样, f_n 的大小就成为影响选择井壁结构形式、确定井壁材料和尺寸的决定因素之一。下面以一个计算实例说明 f_n 对井壁结构选择的影响。

井筒净半径 $r_1=2.5\text{ m}$, 外半径 $r_2=3.9\text{ m}$ 。内层井壁和外层井壁均为 700 mm 厚的 C45 混凝土 (注: 不考虑竖直附加力存在时是安全的)。冲积层厚度为 300 m。井筒周围的地层主要为砂质粘土层, 土层与井壁交界面的长时粘聚力和内摩擦角可取为^[4]: $c=30\text{ kPa}$, $\varphi=15^\circ$ 。冲积层下部有一厚度为 10 m 的粗砂含水层, 其初始水压 $p_0=3.0\text{ MPa}$, 预计其最终水压下降量 $\Delta p_{\max}=2\text{ MPa}$ 。

根据式 (4) 和式 (5) 的计算结果见表 4, 有 $f_{n\max 1} < f_{n\max 2}$, 故取 $f_{n\max}=f_{n\max 1}$ 。

在 $H=300\text{ m}$ 处, 井壁的自重应力 $\sigma_g=7.5\text{ MPa}$; 在 f_n 作用下, 井壁内竖向附加应力 σ_f 为

$$\sigma_f = \frac{1}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \int_0^{300} 2\pi r_2 f_{n\max} dh = 26.02\text{ MPa} \quad。$$

故竖向总应力 $\sigma_z = \sigma_f + \sigma_g = 26.02 + 7.5 = 33.52\text{ MPa}$ 。

C45 混凝土的单轴抗压强度取为强度标准值^[5] 29.6 MPa, 显然有 $\sigma_z > 29.6\text{ MPa}$ 。考虑到内层井壁内缘为双向受压状态, C45 混凝土的双轴受压强度可取为 1.2 倍的单轴抗压强度^[5-6], 故有 $29.6 \times 1.2 = 35.52\text{ MPa} > \sigma_z = 33.52\text{ MPa}$ 。因此井壁濒临破坏, 是十分危险的。

表 4 竖直附加力 $f_{n\max}$ 计算结果
Table 4 Calculated results of $f_{n\max}$

深度 z/m	$f_{n\max 1}/\text{kPa}$	$f_{n\max 2}/\text{kPa}$	$f_{n\max 3}/\text{kPa}$
50	42.16	70.19	42.16
100	84.34	110.38	84.34
150	112.92	150.58	112.92
200	116.30	190.77	116.30
250	119.08	230.96	119.08
300	123.04	271.15	123.04

为安全地承受井壁自重荷载和竖直附加力, 按照规范进行设计^[5], 荷载分项系数为 1.35, 井壁的重要性系数取为 1.1, 混凝土双向受压强度提高系数为 1.2, 则内层和外层井壁混凝土的强度设计值应为 $f_c = 1.1 \times 1.35 \times \sigma_z / 1.2 = 41.48\text{ MPa}$, 因此混凝土的强度等级必须达到 C95 才行。C95 混凝土在井下施工具有很大的难度, 而且比 C45 混凝土的造价高得多。

因此, 笔者认为: 采取提高井壁材料强度和加大井壁厚度的方法来“硬抗”竖直附加力虽是可行的, 但是是不经济的, 应采用竖向可缩新型井壁结构限制竖直附加力的增长, 以确保井壁安全。

4 结 论

- (1) 表土含水层疏排水必然会引起井壁竖直附加力 f_n 。 f_n 随含水层降压量的增大而线性增加。
- (2) f_n 随深度呈非线性的递增关系。
- (3) f_n 的大小与土层性质有关。土层的粗颗粒含量越多, f_n 越大。粘土质砂中 f_n 随疏排水降压量的增长率约为砂质粘土中的 2 倍、约粘土中的 4 倍。
- (4) f_n 的最大值取决于井壁和土层交界面的长时抗剪强度、含水层最大降压量和井壁的竖向极限承载能力。
- (5) 当存在冲积含水层失水的条件时, 应采用竖向可缩新型井壁结构限制竖直附加力的增长, 采取提高井壁材料强度和加大井壁厚度的“硬抗”方法是不经济的。

参考文献:

[1] 崔广心,程锡禄. 徐淮地区井壁破裂原因的初步研究[J]. 煤炭科学技术,1991(8):46 - 50. (CUI Guang-xin, CHENG Xi-lu. Preliminary research on the rupture mechanism of mine shaft linings in Xuzhou and Huaibei Districts[J]. Coal Science & Technology, 1991(8):46 - 50.)

[2] 崔广心.相似理论与模型试验[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990. (CUI Guang-xin. Similitude theory and model test[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1990.)

[3] 翁家杰.井巷特殊施工[M].北京:煤炭工业出版社,1991. (WENG Jia-jie. Special construction engineering of mine shaft and drift[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1991.)

[4] 李文平.深厚表土层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. (LI Wen-ping, Engineering geological study on the shaft lining ruptures of coal mine in deep alluvium[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2000.)

[5] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S].2002. (GB 50010—2002 Code for design of concrete structures[S]. 2002.)

[6] 过镇海.混凝土的强度和本构关系——原理与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2004. (GUO Zhen-hai. Strength and constitutive law of concrete——principle and application[M]. Beijing: China Architecture & Building Industry Press, 2004.)