

立井井壁竖向附加力的反演统计分析

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: 立井井壁单位外表面积竖向附加力的数值较难准确确定, 相关规范中仅注明了可根据具体条件按试验数据或经验选取。本文基于 16 个已破裂立井案例, 通过破裂断面上的强度关系反演推算得到附加力的有效均值。计算结果表明: 同一煤矿中不同立井的附加力值较为接近, 不同煤矿的附加力值相差较大。预制混凝土结构与土体的接触不够紧密, 故预制井壁的竖向附加力值较小。附加力的大小并不取决于立井的深度, 而与地质条件有关。影响竖向附加力大小的因素众多, 仅依照地质资料要准确确定某一矿井的竖向附加力取值是非常困难的。分析表明: 若新建矿井的地质条件与本文反演计算中的矿井类似或相近, 其竖向附加力可选相近矿井的相应值做参考。

关键词: 岩土工程; 井壁; 竖向附加力; 统计分析

中图分类号: TD31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4051(2014)05-0142-04

Inversion statistical analysis of vertical additive pressure at shaft wall

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: It is very difficult to confirm the value of vertical additive pressure of unit surface area of shaft wall, which could be got by test or experience suggested by correlative code. Based on 16 ruptured shaft walls, the value of vertical additive pressure has been inversion statistical analyzed in this article. It is found that the value of vertical additive pressure of different shaft walls in a same coal mine are quite closed, while which has distinguishable difference at different coal mine. Due to loose contact between soil and precast concrete shaft wall, the value of vertical additive pressure of precast concrete shaft wall is very small. The value of vertical additive pressure is not depended on the depth of shaft wall, which depend on the engineering geology of shaft wall. While the value of vertical additive pressure is influenced by many factors, which could hardly be accurately evaluated only by engineering geology. It is indicated that if the conditions of shaft wall to be constructed is similar to the cases analyzed in this article, which value of vertical additive pressure could be quoted and referenced corresponding.

Key words: geotechnical engineering; shaft wall; vertical additive pressure; statistical analysis

立井井筒工程是煤矿生产的咽喉工程, 是联系矿山地面与地下的核心通道, 具有单位造价高、施工周期长、施工条件复杂的特征, 其在煤矿生产中具有举足轻重的作用。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%。特别是随着资源不断向深部和复杂地层的开采, 新建矿井穿过的表土层厚度、冻结深度和井筒直径不断增大, 立井工程的安全越来越受到关注。

近 20 年来, 淮北、大屯、徐州、兖州等矿区大量立井井壁相继破裂, 轻者停工停产, 重者透水淹井, 给煤矿生产及煤炭工业建设造成了很大的影响^[1-2]。如兖州矿业集团公司鲍店煤矿就因主、副井井壁破

收稿日期: 2013-09-23

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, 江西宜春人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: alnie@163.com。

裂造成了 6000 余万元的经济损失。井壁破坏位置一般集中在表土与基岩交界面附近, 破裂时井筒内壁混凝土片状剥落, 纵筋向内弯曲, 混凝土横向裂缝呈水平状交圈, 破裂处有淋水、漏水甚至涌砂等现象, 严重时罐梁向上弯曲, 使罐道、排水管、压风管等发生纵向弯曲, 造成卡罐事故, 严重威胁矿井的安全和生产^[3-4]。

为了规范立井工程的设计, 2007 年国家相关部门发布了立井工程的设计规范^[5]。该规范考虑冲积层段井壁所受的竖向荷载包括: 井壁自重、竖向附加力、作用于井壁上的井塔重量、井壁上的装备重量。已有研究表明^[6-10], 水位下降引起的地表下沉对井筒产生的竖向附加力(负摩擦力)是导致井壁破坏的主要原因。一般地, 竖向附加力通过井壁单位外表面积竖向附加力乘以井壁外表面积得到。至于井壁单位外表面积竖向附加力如何确定, 规范尚未给出明确数值大小, 仅注明了可根据具体条件按试验数据或经验选取。

为此, 本文在分析已破裂立井基本特征的基础上, 基于大量已破裂立井的具体参数反演出井壁单位外表面积竖向附加力, 并得到了该附加力的统计值, 为新井井壁的设计提供参数依据。

1 井筒破裂机理与荷载计算方法

井筒的破裂是由于其承受的竖向荷载超过其材料的承载能力所致。井筒所受的竖向荷载中, 一方面包括重力, 即井壁自重、作用于井壁上的井塔重量、井壁上的装备重量等, 另一方面包括竖向附加力, 即井壁与周围土体之间、方向与自重一致的负摩擦力。中国矿业大学等单位^[1]通过大量模拟试验表明: 特殊地层含水层疏水, 水位下降引起含水土层的有效应力增大, 使土体产生固结压缩, 引起上覆表土下沉, 由于井壁与周围土体之间存在摩擦作用, 土体在下沉过程中必然施加于井壁外表面一竖直向下的附加力, 随着水位的下降该附加力不断增加, 当该附加力增加到一定值时, 即钢筋混凝土井壁不能承受巨大的竖直附加力与自重之和时发生破坏。

井筒的破裂形态可以从井壁钢筋的受力情况得到验证。大屯矿区龙东矿东风井井筒处松散层厚 195.6m, 在井深 194.8m 处的井壁钢筋应力实测值见图 1^[1]。可见, 井壁的环向钢筋应力变化率很小, 表明外部径向挤压力是持续稳定的; 而竖向钢筋则以 51.6~57.0MPa/a 的平均增长率逐年快速递增, 井筒的破裂缘于井壁竖向应力的增大。

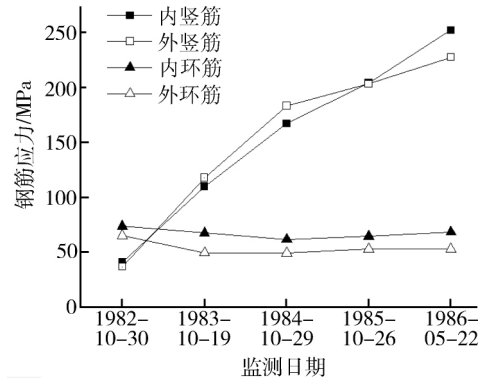


图 1 龙东煤矿东风井实测井壁钢筋应力变化

现行规范^[5]按下式计算冲积层段井壁的竖向荷载标准值, 见式(1)、式(2)。

$$Q_{z,k} = Q_{z1,k} + Q_{f,k} + Q_{1,k} + Q_{2,k} \quad (1)$$

$$Q_{f,k} = P_{f,k} \times F_w \quad (2)$$

式中: $Q_{z,k}$ 为井壁所受的竖向荷载标准值(MN); $Q_{z1,k}$ 为计算截面以上井壁自重标准值(MN); $Q_{f,k}$ 为计算截面以上井壁所受附加力标准值之和(MN); $P_{f,k}$ 为计算截面以上井壁单位外表面积竖向附加力标准值(MN/m²); F_w 为计算截面以上井壁外表面积(m²); $Q_{1,k}$ 为直接支承在井筒上的井塔重量标准值(MN); $Q_{2,k}$ 为计算截面以上井筒装备重量标准值(MN)。

可见, 要确定竖向附加力 $Q_{f,k}$, 必须知道井壁单位外表面积竖向附加力标准值 $P_{f,k}$ 。而关于井壁单位外表面积竖向附加力 $P_{f,k}$ 如何确定, 规范尚未给出明确地方法, 仅注明了可根据具体条件按试验数据或经验选取。本文将根据反演统计方法来确定 $P_{f,k}$ 值。

井壁纵向承载力的计算公式见式(3)^[5]。

$$Q_{z,k} \leq f_c \cdot A_0 + f_y A_z \quad (3)$$

式中: A_z 为竖向钢筋横截面积(m²), 一般情况下井筒全截面配筋率不应小于 0.4%; A_0 为计算截面井壁横截面积(m²); f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值(MN/m²); f_y 为普通钢筋抗拉(压)强度设计值(MN/m²)。

显然, 当井壁所受的竖向荷载标准值 $Q_{z,k}$ 过大且超过井壁纵向承载力 ($f_c \cdot A_0 + f_y A_z$) 时, 即式(3)所示的平衡条件被打破时, 井筒将产生破裂。

由于影响因素众多, 若基于式(1)~(3)来判断既有立井是否破裂、何时破裂、破裂点位置等具体信息是非常困难的。但基于已破裂立井案例, 其破裂时的相关信息已获取, 通过具体参数反演推算某个参量的特征是可行的。

2 基于破裂立井的反演分析

自 1987 年以来,淮北、大屯、徐州、永夏和兖州等矿区已有 40 余个立井井筒相继发生了井壁破裂灾害,造成了巨大的经济损失,严重地威胁着矿井的安全与生产。表 1 列出了部分煤矿立井井筒破裂情况。现根据这些已破裂井筒的相关参数反演分析竖向附加力,为此做如下假设。

- 1) 从立井井口至破裂位置范围内,井壁单位外表面积竖向附加力标准值 $P_{f,k}$ 视为恒定值,不随深度及地质条件的变化而变化。
- 2) 井筒内、外壁间无相对滑动,即认为内、外层井壁共同承担负摩擦力引起的竖向附加力。
- 3) 由于井塔基础一般不坐落在井壁上(否则加

剧井壁的破裂),故不妨取 $Q_{1,k} = 0$ 。至于破裂深度处井筒装备重量 $Q_{2,k}$,由于缺乏资料,不妨把该值取为立井重力的 0.2 倍,即 $Q_{2,k} = 0.2Q_{z1,k}$ 。

4) 井壁中配筋率均按最低配筋率考虑取 4%, II 级钢筋抗压强度 $f_y = 360\text{MPa}$ 。

钢筋混凝土井壁的重度取 25kN/m^3 ,因此破裂深度处的井壁自重荷载标准值 $Q_{z1,k}$ 可以求出。鉴于所选立井均已破裂,故各类荷载可采用标准值而不用设计值。代入各立井井壁的具体数据,便可反演计算得到井壁单位外表面积竖向附加力标准值 $P_{f,k}$,详见表 2。可见,附加力标准值 $P_{f,k}$ 取值在 22.4~67.5kPa 之间,均值为 45.66kPa。

表 1 部分煤矿立井井筒破裂情况

序号	矿名	井筒名	净径/m	混凝土	井壁结构/mm	施工方式	竣工时间	破裂时间	表土厚度/m	破坏深度/m
1		主井	6.5	C40	复合井壁外 400 内 650	冻结	1982-08-15	1988-10-06	247.2	211.7~219.7
2	海孜	副井	7.2	C40	复合井壁外 400 内 600	冻结	1983-04-16	1987-09-21	247.24	232.8~237.5
3		中风井	4.5	C40	复合井壁外 400 内 600	冻结	1980-06-15	1988-06-02	245.0	226.7~236.5
4		西风井	6.0	C40	复合井壁外 500 内 650	冻结	1980-11-15	1989-05-09	240.0	231.5~237.5
5	张双楼	主井	5.5	C35	钢筋混凝土井壁外 600 内 600	冻结	1983-06	1987-08-17	242.95	240~244
6		副井	6.5	C35	钢筋混凝土井壁外 600 内 600	冻结	1982-12-31	1987-07-29	243.15	229.3~230.6
7		主井	5.5	C50	预制钢筋混凝土井壁厚 450	冻结	1986-09-27	1991-04	230.4	230.4
8	童亭	副井	6.8	C35	预制钢筋混凝土井壁厚 600	冻结	1983-12-09	1991-04-15	230.5	195.5
9		风井	5.0	C35	钢筋混凝土井壁内、外各 450	冻结	1982-03-26	1991-04	225.3	240.0
10	孔庄	副井	6.0	C30	钢筋混凝土井壁外 450 内 500	冻结	1975-02	1989-03-21	156.0	142~145
11		风井	4.0	C30	钢筋混凝土井壁外 300 内 400	冻结	1975-07	1987-08	160.4	151.7~155.8
12	前岭	北风井	3.5	C30	预制钢筋混凝土井壁厚 200	冻结	1978-12	1987-10	96.2	112.6~113.9
13	临涣	副井	7.2	C40	钢筋混凝土井壁外 550 内 800	冻结	1979-03-25	1987-07-12	239.10	239~241
14		西风井	6.0	C50	预制钢筋混凝土井壁厚 550	冻结	1979-04-08	1993-07	244.4	227.0
15	芦岭	主井	5.2	C25	单层井壁厚 500 套 200	冻结	1964-04	1987-08-28	203.4	202.5~209.5
16		副井	6.1	C25	单层井壁厚 600 套 225	冻结	1964-03-17	1987-06-30	203.6	212.1

表 2 煤矿立井外表面积竖向附加力 $P_{f,k}$ 的反演计算

序号	矿名	井筒名	$(Q_{z1,k} + Q_{1,k} + Q_{2,k}) / \text{MN}$	$f_c \cdot A_0 / \text{MN}$	$f_y A_z / \text{MN}$	F_w / m^2	$P_{f,k} / \text{kPa}$	$P_{f,k}$ 均值/kPa
1		主井	158.09	475.44	35.84	5716.74	61.78	
2	海孜	副井	179.82	491.79	37.08	6725.13	51.90	
3		中风井	117.45	329.86	24.87	4626.95	51.28	
4		西风井	179.31	493.14	37.18	6033.35	58.18	
5	张双楼	主井	181.77	421.60	36.35	5953.44	46.39	
6		副井	199.58	484.53	41.78	6408.02	50.99	
7		主井	58.11	212.71	12.11	4630.12	36.00	
8	童亭	副井	96.41	232.82	20.08	5790.16	27.03	45.66 (有效均值为 51.1)
9		风井	55.45	128.60	11.09	4446.24	18.95	
10	孔庄	副井	88.32	296.47	29.85	3522.45	67.57	
11		风井	47.01	147.73	14.88	2572.23	44.94	
12	前岭	北风井	7.85	33.23	3.35	1378.90	20.83	
13	临涣	副井	259.87	692.25	52.19	729.55	65.22	
14		西风井	77.03	261.30	16.29	5060.74	39.63	
15	芦岭	主井	78.78	154.32	18.67	4196.61	22.45	
16		副井	114.15	213.48	25.83	5161.45	24.25	

注:表中的有效均值是指把预制混凝土立井剔除后的均值。

3 关于井壁竖向附加力的讨论

以前在设计井壁时认为表土段井壁的自重荷载的 $3/4$ 由井筒周围的土体分担,而在基岩段则基本不考虑自重荷载。实际上,在特殊地层条件下井壁不但要承受自重(含装备重量),还要承受由于含水层疏排水而产生的竖直附加力。分析表2数据可知以下方面。

1) 同一煤矿中不同立井(如主井、副井、风井等)的单位外表面积竖向附加力标准值 $P_{f,k}$ 较为接近,而不同煤矿的附加力标准值 $P_{f,k}$ 相差较大。如芦岭煤矿的 $P_{f,k}$ 值在 $22\sim 24\text{kPa}$ 之间,而海孜煤矿的 $P_{f,k}$ 值在 $51\sim 61\text{kPa}$ 之间。

2) 童亭煤矿的主井与副井、前岭煤矿北风井、临涣煤矿西风井均为预制钢筋混凝土结构,它们的附加力标准值 $P_{f,k}$ 分别为 36.0kPa 、 27.03kPa 、 20.83kPa 、 39.63kPa ,数值总体上偏小,说明预制混凝土结构与土体的接触不够紧密,土体施加给井壁的竖向附加力较小。

3) 16个破裂立井的附加力 $P_{f,k}$ 的均值为 45.66kPa ,若把上述四个预制混凝土立井剔除后,剩下12个破裂立井的附加力 $P_{f,k}$ 的均值为 51.1kPa 。中国矿业大学根据试验提出安徽省宿县矿区祁南矿井副井井筒井壁外缘单位面积的附加力值为 50kPa ;煤炭总院北京建井所提出其设计标准值,淮北矿区为 61.5kPa ,大屯、徐州矿区为 56.4kPa ,其他矿区为 62.1kPa ^[5]。本文所求的附加力 $P_{f,k}$ 均值 51.1kPa 与这些建议值较接近。一般地,由于预制立井的稳定性、安全性、耐久性与现浇混凝土相比有诸多劣势,且其厚度受到限制,已在立井设计中较少使用。故上述分析中把预制混凝土立井剔除后更为合理。

4) 孔庄煤矿副井的破裂深度为 $142\sim 145\text{m}$,该深度在所列案例中属较浅,但反演得到其单位外表面积竖向附加力标准值 $P_{f,k}$ 为 67.5kPa ,为所列案例中的最大值。可见附加力 $P_{f,k}$ 的大小并不取决于立井的深度,而与地质条件有关。

事实上,竖向附加力 $P_{f,k}$ 的大小与地层的地质和水文地质条件、地层是否疏水以及疏水的速率、井壁结构等多种因素有关。大量研究表明^[1, 11-13]:①竖向附加力与疏排水层的压缩模量成反比,与疏排水层的水压降成正比;竖向附加力是随着含水层线性降压而线性增加的,当停止疏排水后,竖向附加力也很快趋于稳定。②竖向附加力随深度呈非线性的递增关系,越靠近疏排水层与上覆土层的交界面,附加力的值越大,在表土与基岩交界面处达最大值。③竖向附加力与疏排水层的厚度成正变关系,疏排水层

越厚,竖向附加力越大。④附加力的大小与土层性质有关。一般而言,在其他条件相同时,砂、黏土质砂、砂质黏土、黏土四种土层的附加力相比,砂的附加力大,黏土质砂的附加力次之,黏土的附加力最小。

可见,影响竖向附加力大小的因素众多,仅依照地质资料要准确确定某一矿井的竖向附加力取值是非常困难的,故相关规范中也未对该值做过多地规定与阐述。

竖向附加力一般按试验数据或经验选取。鉴于试验过程的复杂性、高代价与工况局限性,参照经验选取竖向附加力 $P_{f,k}$ 是通用做法。本文依据已破裂立井资料,反演得到了各立井竖向附加力 $P_{f,k}$ 的取值。若新建矿井的地质条件与表2中某矿井类似或相近,则其竖向附加力可选取表2中的相应值做参考,这也是本文的价值所在。

4 结论

1) 井壁单位外表面积竖向附加力是井筒设计中的重要参数,但规范中尚未给出明确地数值大小,仅注明了可根据具体条件按试验数据或经验选取。本文基于大量已破裂立井案例,通过具体参数反演推算得到附加力的有效均值为 51.1kPa ,为新井井壁的设计提供参数依据。

2) 同一煤矿中不同立井的附加力值较为接近,不同煤矿的附加力值相差较大。预制混凝土结构与土体的接触不够紧密,故预制井壁的竖向附加力值较小。附加力的大小并不取决于立井的深度,而与地质条件有关。

3) 影响竖向附加力大小的因素众多,仅依照地质资料要准确确定某一矿井的竖向附加力取值是非常困难的。若新建矿井的地质条件与本文反演计算中的矿井类似或相近,则其竖向附加力可选相近矿井的相应值做参考。

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] 杨华,江向阳.立井井壁破坏机理的力学模型与分析[J].济南大学学报:自然科学版,2003,17(4):383-385.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

(下转第156页)

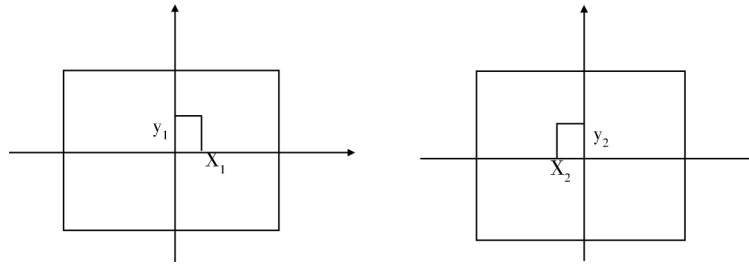


图 3 同名点像片示意图

假设

$$(X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}) = (0, 0, 0)$$

则可知

$$(X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2}) = (D_0, 0, 0)$$

由图 3、图 4 可知

$$\text{比例尺} = \frac{x_1 - x_2}{D_0}$$

此处 $x_1 - x_2$ 为左右视差。

物体点的坐标为

$$\left. \begin{aligned} X &= x_1 \frac{1}{\text{比例尺}} \\ Y &= f \frac{1}{\text{比例尺}} \\ Z &= y_1 \frac{1}{\text{比例尺}} \end{aligned} \right\}$$

3.2 精度分析

由以上原理分析可知,影响量测精度的有 $x_1, y_1, x_2, X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2}, \varphi_2, \omega_2, \kappa_2$ 。

其中 x_1, y_1, x_2 , 是在公式

$$\left. \begin{aligned} X &= x_1 \frac{1}{\text{比例尺}} \\ Y &= f \frac{1}{\text{比例尺}} \\ Z &= y_1 \frac{1}{\text{比例尺}} \end{aligned} \right\}$$

中直接体现的。因为 $(X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}) = (0, 0, 0)$ 是直接假设的,虽然拍摄时保证 S_1, S_2 在一条直线上且保证该连线与被测物保持平行。但是在实际

测量中并不能完全做到,所以 $X_{S2}, Y_{S2}, Z_{S2}, \varphi_2, \omega_2, \kappa_2$ 也成为影像精度的因素。

外业近景测量摄影时按精度划分可以分为毫米级、厘米级、分米级等精度级别范围。可以根据需要合理选择被摄物体的摄影精度。此外,摄影站、像控点、摄影纵距和摄影基线长度的选择应符合规范要求。根据工作过程中的技术要求,选择不同的内业测图方法,以满足测图精度。

4 总结

本文以通过对一实例的描述,着重阐述了如何通过影像对岩体表面进行三维建模的过程,并对软件进行了原理及精度分析,同时发现了软件精度相对较低且受人影响较大等问题。但近景摄影测量因其测量方便快捷、不干扰被测物自然状态、可提供基于三维空间坐标的各种产品等优点仍可作为某些场合的测量手段的首选。

参考文献

[1] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
 [2] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
 [3] 王萍. 近景摄影测量技术应用的回顾[J]. 铁路工程学报, 2006(S1): 168-174.
 [4] 程效军, 罗武. 基于非量测数字相机的近景摄影测量[J]. 铁路航测, 2002(1): 9-11.
 [5] 张洪溢. 基于金晶摄影技术的混凝土表面裂缝识别研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

(上接第 145 页)

[6] 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.
 [7] 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.
 [8] 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.
 [9] 张黎明, 杨建华, 张广学, 等. 深厚表土层井筒破坏预防性治理技术[J]. 煤炭科学技术, 2008, 4(3): 16-19.

[10] 姚直书, 程桦, 杨俊杰. 深表土中高强钢筋混凝土井壁力学性能的试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 167-171.
 [11] 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.
 [12] 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.
 [13] 杨维好, 李峰, 王宗胜. 冲积层疏排水与注浆过程中井壁应变变化规律实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 2713-2717.