

深厚表土底含失水变形时土与井壁相互作用弹塑性模型

Elasto-plastic model of the interaction between soil and shaft wall during deep soil compression due to losing water

李小琴, 李文平

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对在分析深厚表土底含失水变形过程中土与井壁相互作用时, 未考虑底含范围内压缩变形量随深度的变化这一点, 重新建立了土与井壁相互作用的底部为弹性、深部为塑性、浅部为弹性的理想弹塑性模型, 得到了计算井壁附加竖向位移、应变和应力的公式。最后给出计算实例, 说明了新模型比旧模型更加完善。

关键词: 底含压缩量; 土与井壁相互作用; 弹塑性分析; 井壁附加应力

中图分类号: TD 321

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)03-0329-04

作者简介: 李小琴(1980-), 女, 中国矿业大学在读硕士研究生, 主要从事水文地质与工程地质方面的研究。

LI Xiao-qin, LI Wen-ping

(School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Reference 1 takes no account of the variation of compression of soil with depth in the bottom aquifer (B.A) in analysis of the interaction between soil and shaft wall during deep soil dewatering. Aiming at this point, a new ideal elasto-plastic model which is elastic in the shallow and bottom parts and plastic in the deep has been established. The new formulae to calculate the additional vertical displacement, strain and stress of shaft lining are obtained. Finally presented is an example to show the feasibility of the new model.

Key words: compression of B.A; interaction between soil and shaft wall; elastic-plastic analysis; additional stress of shaft lining

0 引言

我国东部兖州、滕州、徐州、淮北、淮南等矿区(简称兖滕—徐淮矿区), 松散土层覆盖深厚, 一般 200~400 m, 一些地方达 600~800 m。在土层底部与基岩交接处, 较普遍存在一砂砾石承压含水层, 常称为底含, 其厚度一般 20~60 m, 承压水头高(一般大于 200 m), 且粒度组成很不均匀。在一些生产矿井, 由于受煤层开采长时间持续排水的影响, 底含水位持续下降, 引起底部含水层压缩变形。研究表明^[2~5], 因底含失水压缩变形产生的土层下沉而在井壁内形成的附加压应力作用是造成兖滕—徐淮矿区煤矿立井井壁破裂的主要原因。

本文第二作者在文献[1]中对井壁附加应力进行了研究, 取得了较好的效果。但应注意的一点是, 文献[1]把底含深度范围内的压缩变形量作为常数处理, 这是不尽合理的, 尤其在底含厚度较大的情况下, 忽略压缩变形量随深度的变化会对井壁附加应力的计算造成很大的影响。事实上, 在底含失水压缩变形过程中, 底含深度范围内产生的压缩变形量 S 应是深度 z 的函数, 即 $S=S(z)$ 。本文针对该点重新建立了深部土层失水变形时土与井壁相互作用的弹塑性理论分析模型, 以期使模型更加完善。

1 土与井壁相互作用弹塑性理论分析

1.1 土与井壁相互作用的力学模型

由于兖滕—徐淮矿区土层深厚, 底含之上的粘土层(三隔)固结程度高, 含水率低, 其中水主要以结合水形式存在, 当底含产生失水压缩变形时, 其上覆土层不会失水而产生压缩, 只是随底含的压缩而产生下沉位移^[3]。在受井筒存在影响范围之外, 底含上覆土层直到地表的最终沉降量都会等于底含顶部的累计压缩变形量 S (这里不考虑浅部土层的压缩)。而在土与井壁接触面附近(实际上是有一定宽度的接触带), 土的下沉位移 $U(z)$ (即土与井壁相互作用位移)因受井壁的影响而小于底含顶部累计压缩量 S 。如果在某深度 z 处井壁的附加下沉位移(因土对井壁作用引起)为 $V(z)$, 则底含上覆土层对井壁的相对下沉位移为 $(S-V(z))$, 而底含深度范围内土对井壁的相对下沉位移为 $(S(z)-V(z))$ 。虽然由于煤层开采疏水引起的底含压缩变形量一般在底含下部较大。但是, 底含范围内深度 z 处产生的自上而下累计压缩变形量 $S(z)$ 的数值在底含顶部最大, 即 $S(z)|_{z=H-H}=S$; 在底含与基岩段交界面处最小 $(S(z)|_{z=H}=0)$, 并且假设为线性变化的, 即

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40272114, 49702039)

收稿日期: 2004-03-25

$$S(z) = S(H - z)/h, \quad H - h < z \leq H, \quad (1)$$

其中 H 为井筒处松散土层总厚度(m), h 为底含厚度(m), S 为底含顶部的失水压缩变形量(m), $S(z)$ 为底含范围内深度 z 处产生的失水压缩变形量(m)。

随着底含压缩变形量的增大,土与井壁作用深部会进入塑性,浅部为弹性,但由于底含压缩变形量随深度的变化,在底含范围内靠近基岩面的部分仍为弹性。土与井壁相互作用的这种底部为弹性,深部为塑性,浅部为弹性的变形特点可用图 1(a)表示。

而文献[1]中由于未考虑底含深度范围内失水压缩变形量的线性变化,即认为整个表土层范围内的失水压缩变形量都为 S , 因此不会出现底含范围内靠近基岩面的弹性带,只有浅部的弹性带和深部的塑性带,具体可见图 1(b)。

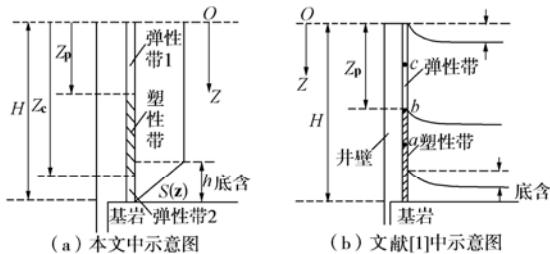


图 1 本文与文献[1]土与井壁相互作用弹塑性分析示意图比较
Fig. 1 Comparison of the schemes of ideal elasto-plastic analysis for soil-shaft wall interaction

1.2 土与井壁相互作用弹塑性理论分析

深厚表土层中的立井在不发生周围土层失水变形时,井壁只受横向土压力(立井地压)、土层正摩擦力和竖向自重应力作用;且一般认为井壁自重为相应深度段上土层对井壁形成的向上的正摩阻力所平衡。但是,一旦井壁周围土层稍下沉时,上述正摩阻力随即消失,井壁自重应力及其引起的弹性应变会在瞬间完成。所以在下面有关土与井壁相互作用时引起的井壁附加竖向位移、应变和应力分析中,不考虑因井壁自重引起的变形和应力,在最后分析井壁稳定性时,总应力可由附加应力与井壁自重应力相加得到。

由平衡条件和胡克定律得

$$Ad\sigma(z) = \pi D\tau(z)dz, \quad (2)$$

$$\sigma(z) = E\varepsilon(z) = EV'(z), \quad (3)$$

式(3)代入式(2)得

$$EAV''(z) = \pi D\tau(z), \quad (4)$$

式中 E , A , D 分别为井壁的弹性模量(MPa), 横截面积(m²)和外径(m); $V(z)$, $\varepsilon(z)$, $\sigma(z)$ 分别为井壁在深度 z 处的附加竖向位移、应变和应力; $\tau(z)$ 为深度 z 处井壁与土接触面上所受的剪应力(MPa)。

在土与井壁相互作用带的弹性区和塑性区段内(以下简称为弹性 I 区、弹性 II 区和塑性区), 式(2)中

的 $\tau(z)$ 的计算方法分别为

$$\text{弹性 I 区: } \tau(z) = K_s(S - V(z)), \quad 0 < z \leq Z_p, \quad (5)$$

$$\text{塑性区: } \tau(z) = c + \lambda\rho'z \tan\varphi, \quad Z_p < z \leq Z_c, \quad (6)$$

$$\text{弹性 II 区: } \tau(z) = K_s(S(z) - V(z)), \quad Z_c < z \leq H, \quad (7)$$

式中 K_s , c 和 φ 分别为土与井壁相互作用单位刚度系数(MPa/m), 强度指标粘聚力(MPa)和内摩擦角(°), 可由剪切试验确定; S 为底含顶部累计失水压缩变形量(m); Z_p 和 Z_c 分别为土与井壁相互作用弹性 I 区与塑性区, 塑性区与弹性 II 区交接点的埋深(见图 1(a)); λ 为 $Z_p \sim Z_c$ 深度范围内土层对井壁的平均侧压力系数; ρ' 为土层的平均有效重力密度(MN/m³)。

将式(5)、(6)、(7)分别代入式(4)整理得到以下关于井壁位移的微分方程:

$$\text{弹性 I 区: } V''(z) = a_1S - a_1V(z), \quad (8)$$

$$\text{塑性区: } V''(z) = b_1 + b_2z, \quad (9)$$

$$\text{弹性 II 区: } V''(z) = d_1 - d_2z - a_1V(z), \quad (10)$$

式中 $a_1 = \pi DK_s/(EA)$, $b_1 = c\pi D/(EA)$, $b_2 = \lambda\rho'\pi D \tan\varphi/(EA)$, $d_1 = SH\pi DK_s/(hEA)$, $d_2 = S\pi DK_s/(hEA)$ 。

微分方程(8)、(9)、(10)的解分别为

$$V(z) = C_1 \cos \beta z + C_2 \sin \beta z + S, \quad (11)$$

$$V(z) = b_2 z^3/6 + b_1 z^2/2 + C_3 z + C_4, \quad (12)$$

$$V(z) = C_5 \cos \beta z + C_6 \sin \beta z - d_2 z/a_1 + d_1/a_1, \quad (13)$$

式中 $\beta = \sqrt{a_1}$ 。 C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 和 C_6 为待定系数, 根据边界条件, 可以逐一确定。

在井壁顶端应变为零, 即有 $V'(z)|_{z=0} = 0$ 。由式(11)整理得 $\beta C_2 = 0$, 因 $\beta \neq 0$, 所以 $C_2 = 0$ 。于是式(11)为

$$V(z) = C_1 \cos \beta z + S. \quad (14)$$

在弹性 I 区与塑性区交接处($z = Z_p$)有 $S - V(z) = u_0$, 则代入式(11)得

$$-C_1 \cos \beta Z_p = u_0, \quad (15)$$

其中 u_0 为土与井壁相互剪切作用弹性极限位移值(m), 由土与井壁模拟试样相互作用剪切试验确定^[6]。又由连续条件有 $V_{\text{弹 I}} = V_{\text{塑}}$, $V'_{\text{弹 I}} = V'_{\text{塑}}$, 因此由式(12)和(14)得到

$$C_1 \cos \beta Z_p + S = b_2 Z_p^3/6 + b_1 Z_p^2/2 + C_3 Z_p + C_4, \quad (16)$$

$$-\beta C_1 \sin \beta Z_p = b_2 Z_p^2/2 + b_1 Z_p + C_3, \quad (17)$$

同理, 在塑性区与弹性 II 区交接处($z = Z_c$)也满足上述条件, 代入式(12)和(13)可得

$$b_2 Z_c^3/6 + b_1 Z_c^2/2 + C_3 Z_c + C_4 = C_5 \cos \beta Z_c + C_6 \sin \beta Z_c - d_2 Z_c/a_1 + d_1/a_1, \quad (18)$$

$$b_2 Z_c^2/2 + b_1 Z_c + C_3 = -\beta C_5 \sin \beta Z_c + \beta C_6 \cos \beta Z_c - d_2/a_1, \quad (19)$$

$$S(H - Z_c)/h -$$

$$b_2 Z_c^3/6 + b_1 Z_c^2/2 + C_3 Z_c + C_4 = u_0. \quad (20)$$

另外, 井壁在进入基岩段时($z = H$)位移为零,

代入式(13)可得

$$C_5 \cos \beta H + C_6 \sin \beta H - d_2 H / a_1 + d_1 / a_1 = 0 \quad (21)$$

方程(15)~(21)共有7个方程, 其中有7个未知数 $C_1, C_3, C_4, C_5, C_6, Z_p$ 和 Z_c , 因此可以求解。经过方程组消减未知数, 可以得到关于 Z_p 和 Z_c 的方程组。该方程组是一代数和三角函数的混合方程组, 难以得到关于 Z_p 和 Z_c 的准确解析解。考虑到 $\tan \beta Z_p$ 、 $\tan \beta Z_c$ 和 $\sin \beta Z_c$ 较小, 针对本文研究的问题, 分别取其一项目级数展开式即可满足工程精度, 即 $\tan \beta Z_p = \beta Z_p$, $\tan \beta Z_c = \beta Z_c$ 和 $\sin \beta Z_c = \beta Z_c$, 代入方程组整理得到

$$2b_2 Z_p^3 + b_2 Z_c^3 - 3b_2 Z_p^2 Z_c + (3b_1 - 6u_0 \beta^2) Z_p^2 + 3b_1 Z_c^2 + 6(u_0 \beta^2 - b_1) Z_p Z_c + 6SZ_c / h + 6S(1 - H/h) = 0 \quad (22)$$

$$2e_1 Z_p^3 Z_c + e_1 Z_c^4 - 3e_1 Z_p^2 Z_c^2 + 2e_3 Z_p^3 + (e_3 - e_2) Z_c^3 + e_3 Z_p^2 Z_c - 2e_3 Z_p Z_c^2 + (e_5 - e_4) Z_p^2 + (d_2 \tan \beta H - e_5) Z_c^2 + (e_4 - b_1 \beta / 2) Z_p Z_c + e_6 Z_p + e_7 Z_c + e_8 = 0 \quad (23)$$

式中 $e_1 = \beta^2 b_2 \tan \beta H / 6$; $e_2 = \beta b_2 / 3$; $e_3 = \beta^2 b_1 \tan \beta H / 2$; $e_4 = u_0 \beta^3$; $e_5 = \beta b_1 / 2 - b_2 \tan \beta H / 2$; $e_6 = (\beta^2 u_0 - b_1) \tan \beta H$; $e_7 = \beta^2 (S - u_0) \tan \beta H + (b_1 - d_1) \tan \beta H$; $e_8 = \beta (S - u_0) - (d_2 H - d_1) / (B \cos \beta H) - d_1 / \beta + d_2 \tan \beta H / \beta^2$ 。

对某一具体井筒, 在用方程(22)和(23)计算 Z_p 和 Z_c 时, 最后就是确定 Z_p 、 Z_c 与 S 的关系式。

Z_p 和 Z_c 求出后, 即可按下式子确定待定系数 C_1, C_3, C_4, C_5 和 C_6

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -u_0 / (\cos \beta Z_p), \\ C_3 &= -(-EA \beta u_0 \tan \beta Z_p + \frac{1}{2} b_2 Z_p^2 + b_1 Z_p), \\ C_4 &= -(\frac{1}{6} b_2 H^3 + \frac{1}{2} b_1 H^2 + C_3 H), \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} C_5 &= (\frac{1}{6} b_2 \beta Z_c^3 + \frac{1}{2} b_1 \beta Z_c^2 + \beta C_3 Z_c + \beta C_4 + \frac{d_2}{\beta} - \frac{d_1}{\beta} - \frac{1}{2} b_2 Z_c^2 \tan \beta Z_c - b_1 Z_c \tan \beta Z_c - C_3 \tan \beta Z_c - \frac{d_2}{a_1} \tan \beta Z_c) / [\beta (\cos \beta Z_c + \sin \beta Z_c)], \\ C_6 &= (\frac{1}{2} b_2 Z_c^2 + b_1 Z_c + C_3 + \beta C_5 \sin \beta Z_c + \frac{d_2}{a_1}) / (\beta \cos \beta Z_c). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

由此, 井壁的附加下沉位移 $V(z)$ 已最终确定。根据 $\varepsilon(z) = V'(z)$, $\sigma(z) = EV'(z)$, 对式(12), (13), (14)求导, 并结合式(24), (25)可得到计算井壁附加竖向应变 $\varepsilon(z)$ 和应力 $\sigma(z)$ 的计算公式

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(z) &= \frac{u_0 \beta}{\cos \beta Z_p} \sin \beta z, & 0 \leq z \leq Z_p \\ \varepsilon(z) &= \frac{1}{2} b_2 z^2 + \frac{1}{2} b_1 z + C_3, & Z_p < z \leq Z_c \\ \varepsilon(z) &= -\beta C_5 \sin \beta z + \beta C_6 \cos \beta z - \frac{d_2}{a_1}, & Z_c < z \leq H \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma(z) &= E \frac{u_0 \beta}{\cos \beta Z_p} \sin \beta z, & 0 \leq z \leq Z_p \\ \sigma(z) &= E(\frac{1}{2} b_2 z^2 + \frac{1}{2} b_1 z + C_3), & Z_p < z \leq Z_c \\ \sigma(z) &= E(-\beta C_5 \sin \beta z + \beta C_6 \cos \beta z - \frac{d_2}{a_1}), & Z_c < z \leq H \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

2 讨论

2.1 Z_p 和 Z_c 的变化规律

由以上理论分析可以看出, 影响 Z_p 和 Z_c 的因素主要有: 底含顶部压缩量 S , 井筒处松散土层厚度 H , 底含厚度 h , 土与井壁作用变形参数 K_s 以及强度参数 c 和 φ , 井壁的弹性模量 E 等。就某一具体井筒而言, 应主要考察 Z_p 、 Z_c 与底含顶部压缩变形量 S 的关系。这里以徐州矿务局张双楼矿副井为例(井筒基本参数见表1), 确定有关参数后得到的 Z_p 、 Z_c 与 S 的关系曲线具体见图2。

表1 实例井筒基本参数

Table 1 Basic parameters of shaft for different example

井筒名	D /m	A /m ²	E /MPa	H /m	K_s /(MPa·m ⁻¹)	H /m
张双楼副井	8.9	29.0	10 ⁴	243.0	113.86	30.0
井筒名	λ	Φ /°	c /MPa	u_0 /m	ρ' /(MN·m ⁻³)	
张双楼副井	0.5	18.1	0.13	0.007	0.01	

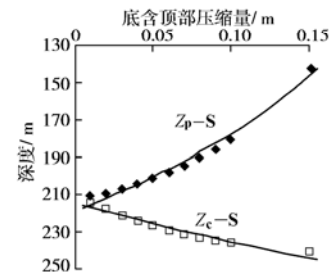


图2 Z_p 和 Z_c 与 S 的关系曲线

Fig. 2 Relationship of Z_p and Z_c to S

注意图2中的两条曲线为一元回归曲线。为便于对比, 回归模型取为与文[1]中相同的形式(即 $y = 200\sqrt[3]{a+bx}$), 得回归方程分别为

$$Z_p = 200\sqrt[3]{1.1398 - 6.1681S}, \quad Z_c = 200\sqrt[3]{1.2406 + 3.8594S}.$$

总体来说, 用该模型所得的回归方程精度较高。由图2可以看出, 随着 S 的增大, Z_p 呈非线性减少, 即随着底含顶部累计压缩变形量的增加, 弹性 I 区与塑性区交接处埋深的位置向上移动; 随着 S 的增大, Z_c 呈非线性增大, 即随着底含顶部压缩变形量的增加, 塑性区和弹性 II 区交接处埋深的位置向下移动; 随着 S 的增大, Z_p-S 曲线与 Z_c-S 曲线之间的距离在逐渐扩大, 即是说, 随着底含顶部压缩变形量的增加, 塑性变形带范围逐渐扩大。

表 2 张双楼副井井壁附加应力计算值

Table 2 Additional stress of auxiliary shaft of Zhang Shuanglou mine											
S/mm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150
Z_p/m	211.2	209.6	207.3	204.5	201.6	198.2	194.3	190.4	185.6	180.5	142.7
Z_c/m	214.1	207.3	217.4	219.1	221.3	223.8	226.3	229.2	232.4	235.8	240.1
$S_{\max}/\text{MPa}$	0.98	1.46	2.72	4.78	6.95	9.62	12.49	15.68	19.27	22.57*	

2.2 井壁附加应力变化规律

前面的分析表明,影响井壁附加应力的因素较多,主要有井筒直径 D ,横截面积 A ,弹性模量 E ,松散土层总厚度 H ,底含厚度 h ,底含顶部压缩变形量 S ,土与井壁作用变形参数 K_s 以及强度参数 c, φ 。

这里以徐州矿务局张双楼矿副井为例,计算所得的井壁竖向附加应力随深度和底含顶部压缩量 S 的变化曲线如图 3(a),文献[1]中的变化曲线如图 3(b)。对比图 3(a)与图 3(b)可以看出,底含失水变形时井壁附加竖向应力具有如下特点:

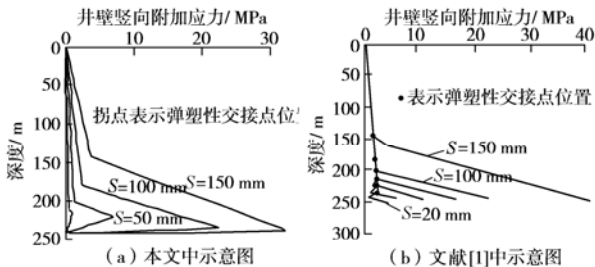


图 3 本文与文献[1]附加应力随深度和底含压缩量的变化比较

Fig. 3 Comparison between various relationship of additional stress with depth and compression of the bottom aquifer

(1) 井壁竖向附加压应力在弹性 I 区和塑性区都随深度增加呈非线性增加。在弹性 I 区内增加幅度较小,塑性区内增加幅度明显变大。

(2) 井壁竖向附加应力随底含顶部压缩变形量增加呈非线性增加。

(3) 理论上当底含压缩量 S 增加到某一界限值使 $Z_p=0$ 时,井壁附加应力会达到理论极大值。但实际上,由于土层埋深大,大部分井筒在土与井壁接触带塑性区还远未发展到接近地面时,其附加应力已足以大到使井壁发生破裂(参见表 2)。因此,井壁附加应力不能达到其理论极大值。

(4) 井壁竖向附加应力在弹性 II 区随深度增加呈非线性减少,直至井壁进入基岩面时减少到零,这与实际情况是吻合的(图 3(a))。而文[1]中由于未考虑底含范围内压缩变形量随深度的变化,所得的附加应力在进入塑性段之后一直以较大的增幅增加,这与实际情况不吻合(图 3(b))。在底含厚度较大时,由于忽略底含范围内压缩变形量随深度的变化,对井壁附加应力的计算造成的影响将更为明显。

3 井壁最大附加应力计算实例

以徐州矿务局张双楼矿副井为例,按本文方法计算所得井壁最大附加竖向应力值以及弹性 I 区与塑性区、塑性区与弹性 II 区交接点的埋深如表 2。

根据应力叠加原理,总应力等于井壁附加应力 $\sigma(z)$ 与井壁自重应力 $\gamma_c z$ (γ_c 取为 0.025 MN/m^3) 之和。表 2 中带*的附加应力值 (22.57 MPa) 加上对应深度处井壁自重应力已超过井壁混凝土的标准强度 σ_f (σ_f 取为 29.4 MPa)。即是说,张双楼矿副井在底含压缩量超过 100 mm 时,井壁开始破裂。

4 结 论

(1) 在文献[1]基础上,考虑底含范围内压缩变形量随深度的变化,提出深部土层失水变形时土与井壁相互作用的底部为弹性,深部为塑性,浅部为弹性的新的弹塑性模型。分析表明该模型更加完善与合理。

(2) 深部土层失水变形时井壁竖向附加位移、应变和应力可分别用公式(12)~(14), (26)和(27)计算。

(3) 随底含顶部压缩变形量的增加,弹性 I 区与塑性区交接点向上移动,塑性区和弹性 II 区交接点向下移动,塑性变形带范围逐渐扩大。

(4) 井壁竖向附加应力随底含顶部压缩变形量增加呈非线性增加;井壁竖向附加应力在弹性 I 区和塑性区随深度增加呈非线性增加,在弹性 II 区随深度增加呈非线性减少。

参考文献:

[1] 李文平. 深部土层失水变形时土与井壁相互作用试验与理论研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4):475 - 480.
[2] 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.
[3] 李文平, 于双忠. 徐淮矿区深部土体工程地质特性及失水变形机理[J]. 煤炭学报, 1997, 22(4):355 - 360.
[4] 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, 19(8):46 - 50.
[5] 许延春, 耿德庸, 申宝宏. 淮北临涣矿区地层非采动沉降分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(6):143 - 145.
[6] 李文平. 徐淮矿区深厚表土底含失水压缩变形试验研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(3):231 - 235.