

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.06.011

# 巨厚松散层力学性质及其对地表下沉的影响

赵高博<sup>1</sup>, 郭文兵<sup>1,2</sup>, 李新岭<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 开采引起的地表下沉与上覆岩土层的性质与结构密切相关, 巨厚松散层条件下开采下沉规律具有特殊性。采用土工试验、数值模拟等相结合的方法, 对巨厚松散层的力学性质及其对地表下沉的影响进行了研究。通过三轴不固结不排水试验对焦作矿区地表黏性土的抗剪强度进行了研究, 得到焦作矿区松散层土体的内摩擦角和内聚力范围。以巨厚松散层条件下某工作面为实例, 结合三轴试验结果, 研究了不同巨厚松散层厚度、松散层内摩擦角和内聚力对地表下沉的影响; 并将数值模拟结果与实测结果进行了对比验证。结果表明: 地表最大下沉值随松散层厚度的增加而增加, 随着松散层内摩擦角、内聚力的增加而减小。将巨厚松散层力学性质土工试验结果与开采下沉结合起来, 对开采下沉的研究具有一定的指导意义。

**关键词:** 巨厚松散层; 力学性质; 地表下沉; 三轴剪切试验; 数值模拟

**中图分类号:** TD327

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2019)06-099-10

## Study on the mechanical properties of super-thick alluvium and its influence on the surface subsidence

ZHAO Gaobo<sup>1</sup>, GUO Wenbing<sup>1,2</sup>, LI Xinling<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, P. R. China; 2. Collaborative Innovative Center of Coal Safety Production in Henan Province, Jiaozuo 454003, Henan, P. R. China)

**Abstract:** The surface subsidence caused by mining is closely related to the nature and structure of the overlying strata and soil layer, and the characteristics of mining subsidence under the condition of super-thick alluvium is special. By means of geotechnical test and numerical simulation, the mechanical properties of super-thick alluvium and its influence on the surface subsidence were studied. The shear strength of clayey soil in Jiaozuo mining area were studied through unconsolidated undrained triaxial test, and the range of internal friction angle and cohesion force of clayey soil in Jiaozuo mining area were presented. Taking a panel covered by super-thick alluvium as an example, combined with the triaxial shear test results, the influences of thickness, friction angle and cohesive force of alluvium on the surface subsidence were researched. The results of the numerical simulation were compared with the measured results. The results show that the maximum surface subsidence value increases with the increase of the thickness of alluvium, and decreases with the increase of the friction angle and cohesive force. This paper combines the

**收稿日期:** 2019-00-00

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51774111); 河南省科技创新杰出人才基金资助项目(184200510003)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51774111) and Henan Science and Technology Innovation Excellent Talents Fund(184200510003).

**作者简介:** 赵高博(1996—), 男, 河南理工大学硕士研究生, 从事岩层移动与控制研究工作, (E-mail) 644336484@qq.com。

geotechnical test results of super-thick alluvium mechanical property with the surface subsidence induced by mining, which has a certain guiding significance for the study of the mining subsidence.

**Keywords:** super-thick alluvium; mechanical property; surface subsidence; triaxial shear test; numerical simulation

煤层开采后,采空区上覆岩层发生失稳破坏,并随工作面推进距离的增加,覆岩破坏向上发育,进而波及至地表下沉,并引起一系列环境问题<sup>[1-2]</sup>。根据现场实测与理论研究表明<sup>[3-5]</sup>,在巨厚松散层条件下采煤时,地表下沉是由于上覆基岩和松散层双层介质所致,明显区别于传统长壁开采工作面,具有一定的特殊性。

相关学者在厚松散层开采地表下沉方面已经取得一定的进展。郭文兵等<sup>[6-7]</sup>通过建立地表移动观测站,分析研究了厚湿陷黄土层下开采动态地表移动特征及相关参数,提出了超前裂缝角及超前裂缝距的概念,随后基于概率积分法对下沉曲线公式进行了修正;陈俊杰等<sup>[8-9]</sup>探讨了厚松散层开采条件下采动程度与下沉系数关系,随后借助 UDEC 数值模拟软件,研究了厚松散层开采条件下地表移动变形规律;许国胜等<sup>[10]</sup>以地表移动观测站实测数据为基础,获得厚松散层下开采地表动态移动参数在开采过程中的变化规律,以及走向主断面方向上任意时刻、任意点的下沉速度预计公式;刘义新等<sup>[11-12]</sup>研究巨厚松散层下深部宽条带开采时松散层厚度变化与地表移动规律及下沉系数的关系,并对厚松散层下采煤岩土体的下沉规律进行了相似模拟试验研究,揭示了采动影响下岩土体移动机理。Hamdi 等<sup>[13]</sup>运用有限元/离散元法离散裂缝网络法研究了地表下沉特征。

上述针对厚松散层下地表下沉的研究多数将松散层视为一个整体,未考虑松散层土体内部力学性质对开采引起的地表下沉的影响。因此,笔者通过土工试验得到巨厚松散层相关物理力学参数,并结合数值模拟软件进行了不同力学参数对巨厚松散层条件下开采地表下沉影响的研究。将巨厚松散层力学性质土工试验与开采下沉结合起来,对开采下沉的研究具有一定的指导意义。

## 1 地质采矿条件

赵固一矿位于焦作煤田东部,其井田属于第四系、新近系全覆盖区,开采的二<sub>1</sub>煤层属近水平稳定型煤层,煤类属无烟煤。该矿 11011 首采工作面平均采高为 3 m,近水平煤层,开采深度约为 493 m,工作面走向长度约为 1 400 m,倾斜长度为 180 m,一次采全高走向长壁后退式综合机械化采煤,全部垮落法处理采空区。该工作面上覆地层基岩厚度约为 40 m,主要由砂质泥岩、粉砂岩、细粒砂岩、粗粒砂岩组成,第四系松散层厚度约为 450 m。

根据文献<sup>[14]</sup>,将煤层基岩以上的第四系松散层厚度小于 50 m 的矿区称为薄松散层矿区(即常规地质条件);大于 50 m 小于 100 m 的矿区称为厚松散层矿区;大于 100 m 的矿区称为巨厚松散层矿区。因此,11011 工作面属于巨厚松散层条件下开采的工作面。根据相关的研究<sup>[15-17]</sup>,影响厚松散层地表下沉增大的原因主要有:1)含水层失水沉降;2)采动附加应力导致土体塑性变形;3)离层裂缝、冒落裂缝带高度减小,减少了碎胀空间,等。因此,厚松散层矿区开采引起的地表下沉是岩体、土体及岩土体共同作用的结果。

当巨厚松散层条件下开采时,引起的地表下沉与上覆松散层土体的性质与结构密切相关,其规律表现出一些独特的现象<sup>[3]</sup>,比如下沉系数大于 1,下沉盆地边界收敛缓慢等。因此,松散层土体的力学性质对巨厚松散层条件下开采地表下沉起着重要作用。

## 2 巨厚松散层力学性质三轴试验

### 2.1 三轴试验方案设计

松散层土体的存在,使得井下开采空间由下而上传递到地表的过程中,松散层土体内部产生了复杂的变化,进而影响地表下沉<sup>[18]</sup>。为研究松散层土体的力学性质对开采引起的地表下沉的影响,笔者通过三轴不固结不排水试验对焦作矿区地表黏性土的抗剪强度进行了研究,测定了重塑土试样在不同含水量( $w$ )、不同干密度( $\rho$ )施加不同的围压( $\sigma_3$ )下的抗剪强度。具体试验方案如表 1 所示。

表1 三轴剪切试验方案  
Table 1 The schemes of triaxial shear test

方案	围压/kPa	配比	
		干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水量/%
方案一	50	1.6	18
	100	1.6	20
	200	1.6	22
	300	1.6	24
方案二	50	1.4	20
	100	1.5	20
	200	1.6	20
	300	1.7	20

其中,方案一旨在研究黏性土含水量与其抗剪强度之间的关系;方案二旨在研究黏性土干密度与其抗剪强度之间的关系。

## 2.2 试验方法及仪器

试验所用黏土土样取自焦作赵固一矿地表,将取得的土样放入恒温干燥箱内,在110℃的高温下加热8 h以上,确保完全烘干。将烘干后的土样,用孔径1 mm的土壤分析筛进行筛选,将土样中掺杂的小石子、细小草根等杂质去除,以免影响试样强度。将过筛后的土样,按照所需的含水量称取一定质量的干土和纯净水,充分搅拌均匀后配制成含水量分别为18%,20%,22%,24%的湿土,放入保湿缸中静置湿润24 h,使水分分布均匀<sup>[19-20]</sup>。

每一种含水量的湿土分别制作4个试样,控制所有试样的干密度均为1.6 g/cm<sup>3</sup>;随后取含水量为20%的湿土,按照干密度为1.40,1.50,1.60,1.70 g/cm<sup>3</sup>的标准,分别制作4个试样。综上,本次试验共制作28个试样。

试样制作模具(图1(a))内径为3.91 mm、高为80 mm。制样前先将仪器擦拭干净,并在三瓣膜内侧涂抹凡士林,以方便脱模。采用击样法,共分5层装入,每层装入一定质量的湿土,击实后再装入一层湿土,层间刨毛,防止试样出现弱面,将基本成型的试样从击样桶中缓慢取出,称重,制作好以后的试样用保鲜膜紧密包裹后贴上标签(图1(b)),放入保湿缸静置24 h。试样破坏标准首先考虑峰值强度,在没有峰值强度时,采用垂直应变变为15%时对应的主应力差作为试样的抗剪强度。剪切速率为0.4 mm/min,在垂直应变达到12 mm时停止试验。

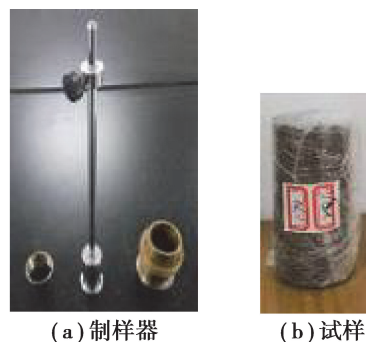


图1 制样器及三轴试样

Fig. 1 The sample making device and triaxial specimen

试验采用SLB-1型应力应变控制式三轴剪切渗透仪,分别研究含水量、干密度以及围压对试样抗剪强度的影响。

### 2.3 三轴试验结果及分析

#### 2.3.1 试验结果

本次试样经过三轴剪切试验后,试样中间有不均匀的鼓胀现象,且试样表面没有明显的裂纹。图 2 给出了本次试样经过三轴剪切试验前后变形破坏对比情况。

选取相同干密度(1.6 g/cm<sup>3</sup>)的一组试样,研究含水量对试样抗剪强度的影响,其应力-应变关系曲线如图 3 所示;选取相同含水量(20%)的一组试样,研究干密度对试样抗剪强度的影响,其应力-应变关系曲线如图 4 所示。

根据得到的应力-应变曲线(图 3、4),取应变  $\epsilon = 15\%$  时所对应的偏应力值作为试样的抗剪强度值,结果整理如表 2 所示。

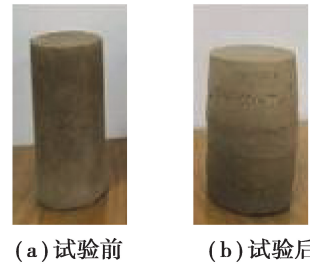


图 2 试样的变形破坏前后对比  
Fig. 2 The specimens before and after the test

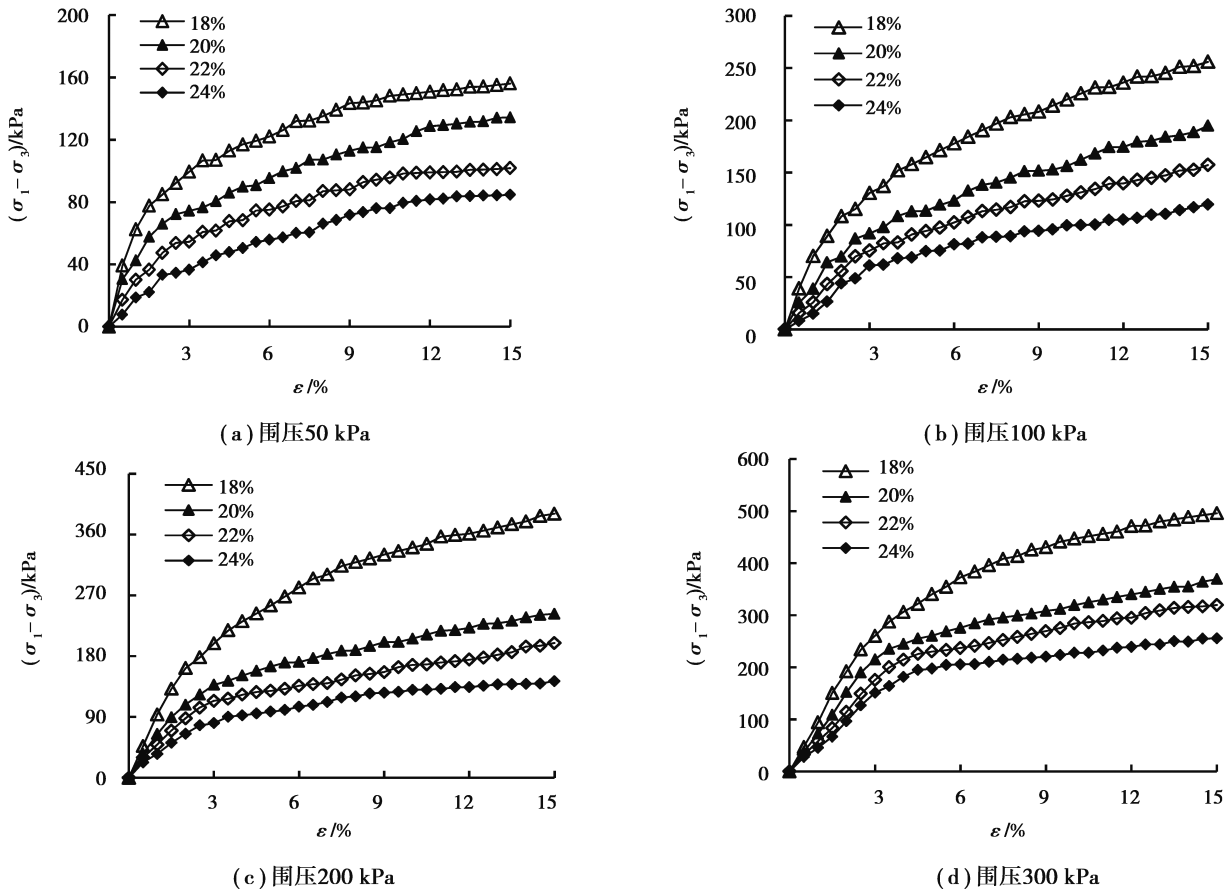


图 3 不同含水量试样应力-应变关系曲线

Fig. 3 The stress strain relation curves of samples with different water contents

表 2 试样不同含水量对应的抗剪强度 ( $\rho = 1.6 \text{ g/cm}^3$ )

Table 2 Samples' shear strengths with different water contents ( $\rho = 1.6 \text{ g/cm}^3$ )

$\sigma_3 / \text{kPa}$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f / \text{kPa}$			
	$w = 18\%$	$w = 20\%$	$w = 22\%$	$w = 24\%$
50	156.11	134.32	101.79	84.67
100	255.95	194.88	157.22	119.57
200	390.66	242.65	199.36	142.97
300	495.96	369.18	319.50	255.66

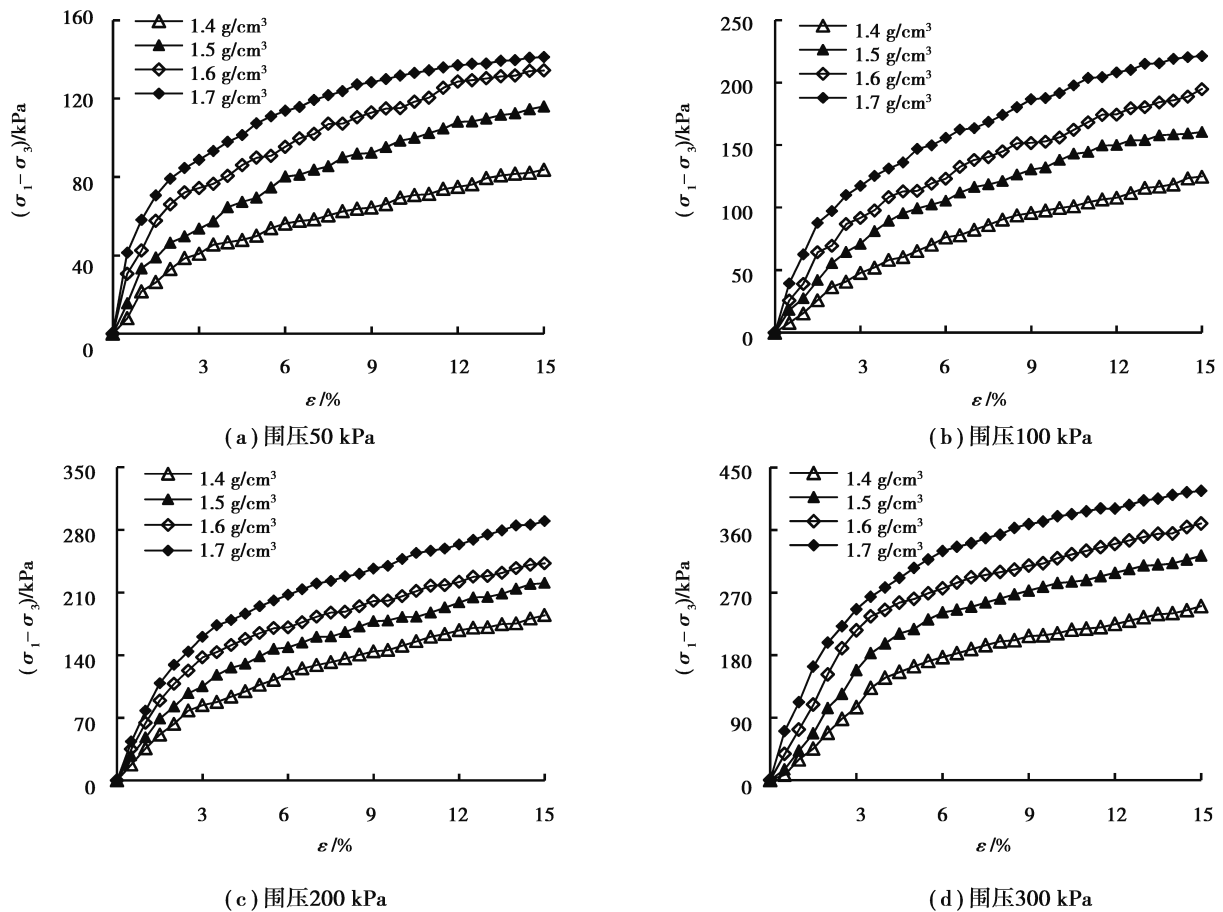


图 4 不同干密度试样应力-应变关系曲线

Fig. 4 The stress-strain curves of different dry density specimens

2.3.2 试验结果分析

由图 3、图 4 可知,相同围压时,本次试样的偏应力随着含水量的增加而减小,随着干密度的增加而增加。另一方面,起初黏性土偏应力随着应变的增加存在一个快速增加阶段,之后增长速度逐渐变缓,最终得到的应力-应变关系曲线均无峰值,说明本次三轴剪切试验的应力-应变关系曲线均为逐渐硬化型。由表 2、表 3 可知,试样的抗剪强度随着围压的增加而增加,其最大值为 495.96 kPa(干密度  $1.6 \text{ g/cm}^3$ ,含水量 18%,围压 300 kPa),最小值为 83.69 kPa(含水量 20%,干密度  $1.4 \text{ g/cm}^3$ ,围压 50 kPa)。

由表 2、表 3 中试样在不同围压下的抗剪强度,绘制出对应的抗剪强度包线,随后求得对应试样的内摩擦角和内聚力,并将求得的结果汇总,如表 4 所示。

表 3 试样不同干密度对应的抗剪强度 ( $w = 20\%$ )

Table 3 Samples' shear strengths with different dry densities ( $w = 20\%$ )

$\sigma_3/kPa$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f/kPa$			
	$\rho = 1.4 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 1.6 \text{ g/cm}^3$	$\rho = 1.7 \text{ g/cm}^3$
50	83.69	115.99	134.32	141.11
100	124.75	160.38	194.88	221.13
200	184.79	220.68	242.65	289.80
300	250.31	322.85	369.18	416.26



表 4 不同配比试样的内摩擦角和内聚力  
Table 4 The internal friction angles and cohesive forces of samples with different proportions

方案一	含水量/%	内摩擦角/(°)	内聚力/kPa
$\rho = 1.60 \text{ g/cm}^3$	18	24.0	27.7
	20	19.0	25.2
	22	17.6	21.3
	24	14.7	19.5
方案二	干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	内摩擦角/(°)	内聚力/kPa
$w = 20\%$	1.4	8.1	29.1
	1.5	11.0	41.4
	1.6	19.0	25.2
	1.7	20.1	82.4

根据表 4,得到本次试验试样的内摩擦角和内聚力区间,从而得到焦作赵固一矿矿区松散层土体的内摩擦角范围为  $8.1^\circ \sim 24^\circ$ ,内聚力范围为  $19.2 \sim 82.4 \text{ kPa}$ 。

### 3 巨厚松散层条件下开采模拟分析

为研究松散层土体不同力学参数对巨厚松散层条件下开采地表下沉的影响,以赵固一矿 11011 工作面为模拟对象,采用控制变量法进行数值模拟分析,即控制基岩厚度 40 m 不变,研究松散层厚度(150, 250, 350, 450 m)、松散层内摩擦角( $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ )和松散层内聚力(23, 53, 83, 113 kPa)对地表下沉的影响。上述松散层内摩擦角、内聚力的取值范围均依据上述三轴试验得到的赵固一矿矿区松散层土体的内摩擦角和内聚力范围进行取值。具体数值模拟实验方案如表 5 所示。

表 5 数值模拟实验方案  
Table 5 The numerical simulation experiment schemes

方案	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)	松散层厚/m
方案一	23	20	150, 250, 350, 450
方案二	23	10, 15, 20, 25	450
方案三	23, 53, 83, 113	20	450

#### 3.1 数值模型的建立

根据赵固一矿 11011 工作面具体采矿地质条件,结合计算所用到的各岩层物理力学参数(表 6),建立不同松散层厚度的三维计算模型(模型高度已达地表),其中 450 m 松散层厚度的三维数值模型见图 5。

对 11011 工作面进行开采模拟,走向长度为 1 000 m,倾向长度为 200 m,为了防止选择的模型边界对计算结果产生影响,沿着工作面走向、倾向方向各向外扩展 500 m。模型运算过程中,考虑采动影响,以 Mohr-Coulumb 准则作为判别覆岩破坏的依据。

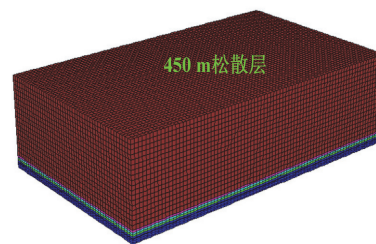


图 5 450 m 松散层厚度的数值计算模型  
Fig. 5 Numerical calculation models

表 6 工作面上覆岩层参数  
Table 6 Parameters of overlying strata

岩层名称	容重/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^3$ )	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )
松散层	1 800	0.14	0.05	0.01	0.023	20
粗粒砂岩	2 485	7.28	5.46	5.12	3.500	36
细粒砂岩	2 682	8.00	6.00	8.21	4.200	37
粉砂岩	2 570	5.33	3.20	4.35	2.100	32
砂质泥岩	2 598	2.67	1.60	2.12	1.600	30
煤层	1 770	0.37	0.19	0.56	0.800	21

### 3.2 数值模拟结果及分析

根据上述模拟方案、数值模型及工作面上覆岩层参数,通过 FLAC<sup>3D</sup>数值模拟软件,可以得到上述数值模拟各方案的地表下沉分布云图。其中图 6(a)~(d)分别给出了松散层厚度为 150,250,350,450 m 的地表下沉分布云图。为增加云图的可读性,通过可视化处理软件 Tecplot 360 对云图进行后处理,添加相应的下沉等值线,如图 6 所示。

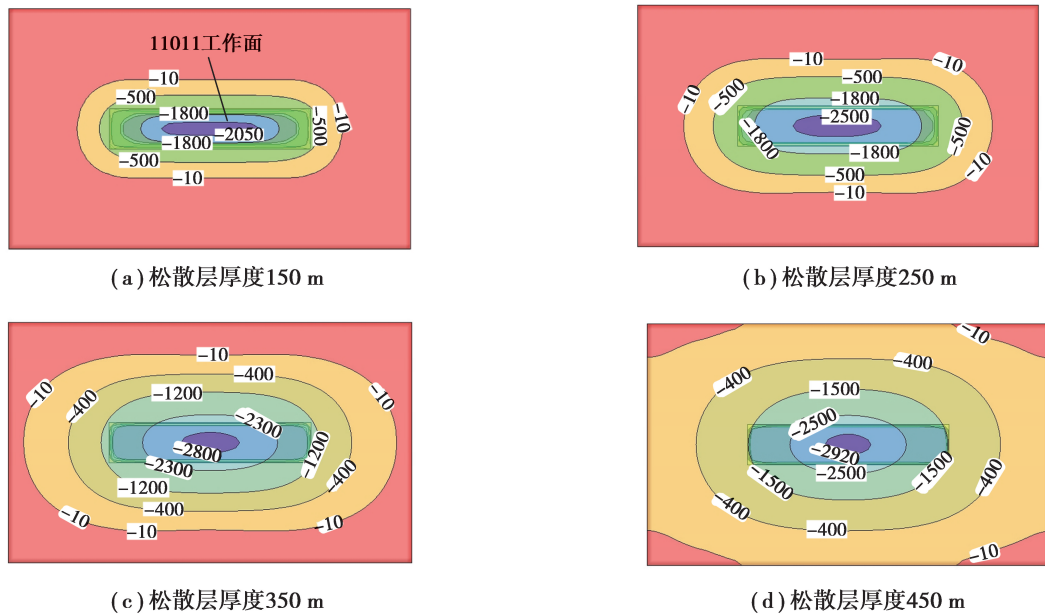


图 6 不同松散层厚度的地表下沉等值线

Fig. 6 The contour lines of surface subsidence

由图 6 可知,巨厚松散层条件下开采引起的地表下沉范围随松散层厚度的增加而扩大,地表最大下沉值也增加,且最大下沉值位于该工作面采空区的中部。为便于对比分析,分别给出了上述各方案的走向主断面最终地表下沉对比曲线,如图 7 所示。

通过对上述各方案模拟结果整理分析,得出了各方案的地表最大下沉值及地表下沉系数,见表 7。

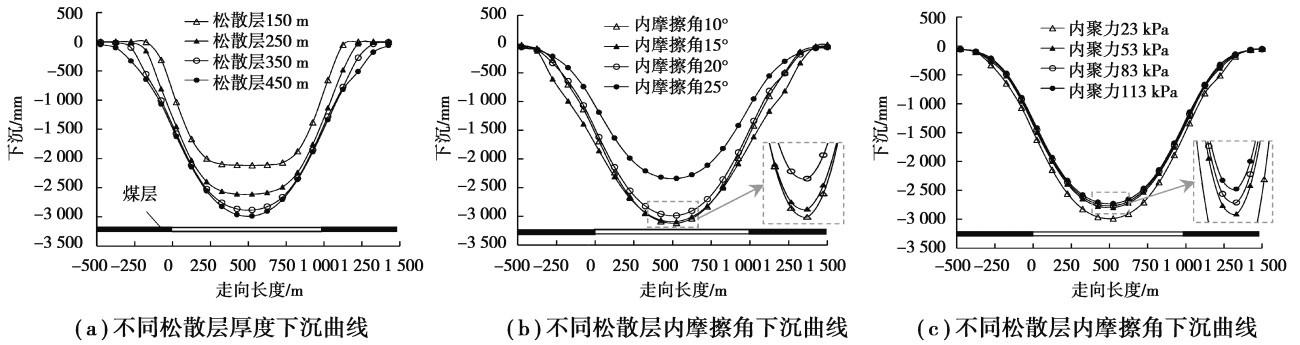


图 7 各个方案走向主断面最终地表下沉对比曲线

Fig. 7 The surface subsidence contrast curves

表 7 不同数值模拟方案的最大下沉值

Table 7 The maximum subsidence with different schemes

方案	最大下沉值/mm	下沉系数 $q$
方案一 不同松散层厚度/m	450	-2 960
	350	-2 860
	250	-2 610
	150	-2 110
方案二 不同内摩擦角/(°)	10	-3 090
	15	-3 070
	20	-2 960
方案三 不同内聚力/kPa	25	-2 320
	23	-2 960
	53	-2 770
	83	-2 740
	113	-2 710

由表 7 可知,巨厚松散层条件下开采下沉系数  $q$  随内摩擦角和内聚力的增加而减小,随松散层厚度的增加而增加,且最大值已超过 1,为 1.03。另外,地表最大下沉值随松散层厚度的增加而增加。这是因为随着巨厚松散层厚度的增加,基岩承受的荷载增加,则开采引起的破坏岩体更加被压实,岩层间的离层也趋于闭合,置换出的离层空隙以下沉的形式传递至地表,增加了地表下沉量。当巨厚松散层厚度一定时(450 m),随着松散层内摩擦角的增加,地表最大下沉量显著减小,随着内聚力的增加,地表最大下沉量减小,且减小速度缓慢。可见松散层厚度和内摩擦角对地表下沉具有显著影响,松散层内聚力对地表下沉有一定的影响,但影响不大。

因此,根据数值模拟分析,得到地表最大下沉值随松散层厚度的增加而增加,随松散层内摩擦角、内聚力的增加而减小,且 11011 工作面最大下沉为 -2 960 mm。

#### 4 数值模拟与实测结果对比分析

为进一步验证上述数值模拟结果的合理性,结合该工作面地表下沉实测结果,进行了对比分析。赵固一矿 11011 首采工作面从 2008 年 10 月开始回采,并于 2009 年 10 月结束,并在该工作面回采期间布置 3 条测线<sup>[17]</sup>:沿工作面倾向方向上布置了两条观测线:观测线 I 和观测线 II;沿工作面走向方向上布置观测线 III,其中观测线 I、II、III 分别有测点 55、48 和 10 个。该观测线具体位置布置如图 8 所示。

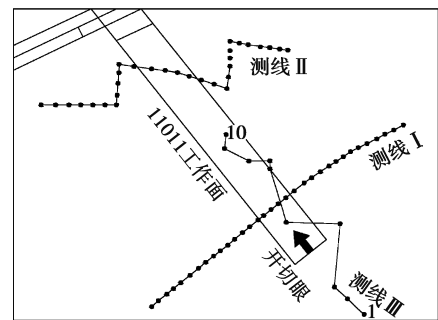


图 8 11011 工作面观测线位置布置

Fig. 8 The location layouts of 11011 observe lines



根据数值模拟得到的工作面走向主断面最终地表下沉值,选择该工作面走向方向上布置的观测线Ⅲ的实测值进行对比。观测线Ⅲ首测时间为2009年1月23日,到2009年10月30日结束,共观测了12次,工作面开采引起下沉已稳定,其观测数据见表8。

表8 观测线Ⅲ地表下沉值结果

Table 8 The surface subsidence value results of observation line Ⅲ

测点	第1次测量 高程/m	第12次测量 高程/m	下沉/ mm
1	81.538	80.158	-1 380
2	80.641	79.424	-1 217
3	80.578	79.481	-1 097
4	79.833	78.754	-1 079
5	81.938	80.581	-1 357
6	82.484	80.150	-2 334
7	82.636	80.129	-2 507
8	82.637	80.025	-2 612
9	81.453	78.695	-2 758
10	81.555	78.563	-2 992

根据表8可知,位于11011工作面中央的测点10的最大下沉值为-2 992 mm,与数值模拟地表最大值(-2 960 mm)相近,验证了上述数值模拟分析的合理性。笔者从土体性质出发,将巨厚松散层力学性质土工试验与开采下沉结合起来,对开采下沉的研究具有一定的指导意义。

## 5 结 论

1)通过三轴不固结不排水试验对焦作矿区地表黏性土抗剪强度进行了研究,其应力-应变关系曲线均为逐渐硬化型。相同围压时,试样抗剪强度随含水量的增加而减小,随干密度的增加而增加;得到焦作矿区松散层土体内摩擦角和内聚力范围。

2)以焦作赵固一矿巨厚松散层条件下11011工作面为实例,结合三轴试验结果,研究了不同巨厚松散层厚度、松散层内摩擦角、内聚力对地表下沉的影响。地表最大下沉值随松散层厚度的增加而增加,随着松散层内摩擦角、内聚力的增加而减小。

3)通过数值模拟得到松散层力学参数对开采下沉影响的规律,模拟结果并与11011工作面地表下沉实测数据进行了对比验证,将巨厚松散层力学性质土工试验结果与开采下沉结合起来,对开采下沉的研究具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Asadi A, Shahriar K, Goshtasbi K, et al. Development of a new mathematical model for prediction of surface subsidence due to inclined coal-seam mining[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105(1): 15-20.
- [2] Wang X, Meng F B. Statistical analysis of large accidents in China's coal mines in 2016[J]. Natural Hazards, 2018, 92(1): 311-325.
- [3] 王金庄, 常占强, 陈勇. 厚松散层条件下开采程度及地表下沉模式的研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(3): 230-234.  
WANG Jinzhuang, CHANG Zhanqiang, CHEN Yong. Study on mining degree and patterns of ground subsidence in condition of mining under thick unconsolidated layers[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(3): 230-234. (in Chinese)
- [4] Guo W B, Xu F Y. Numerical simulation of overburden and surface movements for Wongawilli strip pillar mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(1): 71-76.

- [5] 张文泉, 刘海林, 赵凯, 等. 厚松散层薄基岩条带开采地表沉陷影响因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1065-1071.  
ZHANG Wenquan, LIU Hailin, ZHAO Kai, et al. Influential factors on surface subsidence in stripe mining under thick unconsolidated layers and thin bedrock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(6): 1065-1071. (in Chinese)
- [6] 郭文兵, 黄成飞, 陈俊杰. 厚湿陷黄土层下综放开采动态地表移动特征[J]. 煤炭学报, 2010, 35(z1): 38-43.  
GUO Wenbing, HUANG Chengfei, CHEN Junjie. The dynamic surface movement characteristics of fully mechanized caving mining under thick hydrous collapsed loess[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(z1): 38-43. (in Chinese)
- [7] 郭文兵, 刘大超, 白二虎, 等. 基于概率积分法的下沉曲线公式修正[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 357-362.  
GUO Wenbing, LIU Dachao, BAI Erhu, et al. Modification of subsidence prediction formula based on probability integral method[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2016, 35(3): 357-362. (in Chinese)
- [8] 陈俊杰, 邹友峰, 郭文兵, 等. 厚松散层下下沉系数与采动程度关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 250-254.  
CHEN Junjie, ZOU Youfeng, GUO Wenbing, et al. Study on the relationship between subsidence coefficient and mining degree under a thick alluvium stratum[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(2): 250-254. (in Chinese)
- [9] 陈俊杰, 陈勇, 郭文兵, 等. 厚松散层开采条件下地表移动规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 95-97, 102.  
CHEN Junjie, CHEN Yong, GUO Wenbing, et al. Study on surface movement law under the condition of thick unconsolidated strata[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 95-97, 102. (in Chinese)
- [10] 许国胜, 李德海, 侯得峰, 等. 厚松散层下开采地表动态移动变形规律实测及预测研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2056-2062.  
XU Guosheng, LI Dehai, HOU Defeng, et al. Measurement and prediction of the transient surface movement and deformation induced by mining under thick alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2056-2062. (in Chinese)
- [11] 刘义新, 戴华阳, 郭文兵, 等. 巨厚松散层下深部宽条带开采地表移动规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(3): 336-340.  
LIU Yixin, DAI Huayang, GUO Wenbing, et al. Surface movement laws of deep wide strip-pillar mining under thick alluvium[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(3): 336-340. (in Chinese)
- [12] 刘义新, 戴华阳, 姜耀东. 厚松散层矿区采动岩土体移动规律模拟试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(5): 700-706.  
LIU Yixin, DAI Huayang, JIANG Yaodong. Model test for mining-induced movement law of rock and soil mass under thick unconsolidated layers[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 700-706. (in Chinese)
- [13] Hamdi P, Stead D, Elmo D, et al. Use of an integrated finite/discrete element method-discrete fracture network approach to characterize surface subsidence associated with sub-level caving[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 55-67.
- [14] 周大伟. 煤矿开采沉陷中岩土体的协同机理及预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.  
ZHOU Dawei. The synergy mechanism between rock mass and soil in mining subsidence and its prediction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] Zhou D W, Wu K, Cheng G L, et al. Mechanism of mining subsidence in coal mining area with thick alluvium soil in China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(4): 1855-1867.
- [16] Zhang J X, Zhang Q, Sun Q, et al. Surface subsidence control theory and application to backfill coal mining technology[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 1439-1448.
- [17] 陈磊. 巨厚冲积层薄基岩下开采地表移动规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.  
CHEN Lei. Study on surface movement by mining under thick alluvium and thin bedrock[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011. (in Chinese)
- [18] Wu K, Cheng G L, Zhou D W. Experimental research on dynamic movement in strata overlying coal mines using similar material modeling[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(9): 6521-6534.
- [19] Jiang M J, Zhang F G, Hu H J, et al. Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests[J]. Engineering Geology, 2014, 181: 249-260.
- [20] Mirzababaei M, Mohamed M, Arulrajah A, et al. Practical approach to predict the shear strength of fibre-reinforced clay[J]. Geosynthetics International, 2018, 25(1): 50-66.