

文章编号: 1673-3363-(2014)04-0624-07

采动塌陷区建筑物地基变形影响区与特征分析

徐平^{1,2}, 茅献彪¹, 张敏霞², 周跃进¹, 曹正正¹

(1. 中国矿业大学深部岩土与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要 采动残余空洞裂隙的失稳变形是造成塌陷区上方建筑物损害的主要原因。为研究采动塌陷区建筑物地基的变形特征, 通过分析附加应力与塌陷区残余空洞裂隙区的分布, 对采动塌陷区地基变形影响区进行了研究。基于对采空塌陷残余空洞裂隙区的探测及建筑物地基附加应力分布分析, 采动塌陷区地基变形影响范围取 $p_z=0.1\sigma_z$ 所对应的深度以上土层; 当该深度下分布有残余空洞裂隙区时, 则应取残余空洞裂隙区分布深度以上土层为采动塌陷区地基变形影响范围。根据义马某矿采动塌陷区建筑物分布, 采用高密度电阻率层析成像勘探技术探测了建筑物周围残余空洞裂隙的分布, 通过分析建筑物地基中的应力分布和地基变形影响区特征, 阐明了采动塌陷区已建建筑物损害原因。通过研究影响拟建建筑地基中残余空洞裂隙和地基附加应力分布, 表明拟建建筑将受塌陷区残余空洞裂隙失稳变形影响, 需对地基基础进行加固或变更。

关键词 采动塌陷区; 地基; 变形; 附加应力; 高密度电阻率法

中图分类号 TD 327

文献标志码 A

Analysis of the deformation zone and its characteristics of the building foundations in mining-induced subsidence area

XU Ping^{1,2}, MAO Xianbiao¹, ZHANG Minxia², ZHOU Yuejin¹, CAO Zhengzheng¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract The deformation induced by mining residual cavities and fractures is a main reason causing damages to buildings in mining-induced subsidence area. In order to study the deformation characteristics of the building foundations in mining-induced subsidence area, by analyzing the distribution of the additional stress and the mining residual cavities and fractures in mining-induced subsidence area, the deformation zone of the foundations in mining-induced subsidence area has been studied. Based on the analysis of the detection for mining residual cavities and fractures and the distribution of the additional stress in the foundations, the deformation zone of the foundations in mining-induced subsidence area is above the soil depth, at which $p_z=0.1\sigma_z$. However, when there are some mining residual cavities and fractures near this depth, the deformation zone in foundations should include mining residual cavities and fractures zone and its above area. According to the location of the buildings in Yima mining-induced subsidence area, the residual cavities and fractures zones under building foundations in mining-

收稿日期: 2013-09-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227900, 2010CB226800); 国家自然科学基金项目(51374201); 河南理工大学博士基金项目(Q2013-065); 河南理工大学青年基金重点资助项目(Q2013-09A)

作者简介: 徐平(1981—), 男, 湖南省南县人, 讲师, 博士生, 从事采动岩体力学与建筑加固方面的研究。

通信作者: 茅献彪

E-mail: xbmiao@cumt.edu.cn

Tel: 13952115899

induced subsidence area have been detected by high density resistivity tomography method. In addition, the main reason causing damages to buildings has been demonstrated by analyzing the distribution of the stress and the deformation zone in foundations. The analysis of the distribution of the additional stress and the mining residual cavities and fractures zones also indicates that a proposed new structure will be affected by the deformation induced by the residual cavities and fractures zone, therefore, the new building foundation should be reinforced or changed.

Key words mining-induced subsidence area; foundation; deformation; additional stress; high density resistivity method

随着地下煤炭资源的开采,采空区上覆岩层原始平衡状态遭受破坏,岩层中产生移动变形、离层、裂缝、破坏垮落,形成大面积采动塌陷区。开采结束后,经过长时间的自然压实,采动塌陷区地表变形逐渐趋于稳定,但开采后形成的局部地下空洞、岩体离层、裂缝和欠压密岩块等残余空洞裂隙将长期存在^[1-2]。采动塌陷区上方新建建筑物后,附加应力可能诱发采动塌陷区覆岩残余空洞裂隙的失稳变形,给地表建筑物安全带来危害^[3]。

煤矿采动塌陷区的建筑物地基变形问题早就引起人们的重视。KIM Jung-Ho 等采用电阻率层析成像系统分析评价了采空区地基安全性^[4];张永波、孙占法等运用现场调查及数值模拟分析探讨老采空区建筑地基的稳定性及其变形破坏规律^[5-10]。采动塌陷区建筑物地基变形既包括附加应力作用下地基土的压缩变形,同时还可能包括塌陷区残余空洞裂隙的失稳变形;而后者在建筑地基基础设计中并没有有效考虑^[11],这是造成采动塌陷区上方新建建筑物损坏的主要原因。为了进一步研究采动塌陷区建筑物地基的变形规律,本文分析采动塌陷区地基变形特征,在现有研究基础上通过分析附加应力与塌陷区残余空洞裂隙区的分布,对采动塌陷区地基变形影响区进行系统研究。以义马某矿采动塌陷区建筑物地基变形为研究背景,采用高密度电阻率层析成像分析系统,确定塌陷区残余空洞裂隙区的分布范围;通过计算附加应力的分布,分析附加应力作用下采动塌陷区地基变形的影响区,并依此分析采动塌陷区上方建筑物的变形特征及安全性。

1 采动塌陷区建筑物地基变形特征

煤矿开采中采空区上方依次形成垮落带、裂隙带、离层带和弯曲下沉带,覆岩中产生大量破碎岩块、裂隙、离层^[12]。开采结束以后,覆岩中残余空洞裂隙等不稳定平衡结构仍将长期存在,如图1所示。垮落带主要由破碎岩块组成,该区引起的采动

塌陷区残余变形主要为欠压密区碎胀岩块的压密下沉;垮落带之上的岩块在水平推力和岩块间咬合摩擦作用下形成铰接岩梁结构,在采动作用下,形成竖向裂缝和层间离层,该区引起采动塌陷区残余变形主要为因岩块结构失稳产生的裂隙和离层的压密下沉;弯曲下沉带开采时一般为连续下沉变形,当开采稳定后未受特殊因素(如地下水流失、地震等)影响时对采动塌陷区残余变形影响较小。因此,采动塌陷区残余空洞裂隙主要分布在垮落带、裂隙带及失稳巷道的局部。当煤矿开采厚度大、埋深浅时,采动残余空洞裂隙可能分布在建筑物附加应力影响区中,如图2所示。此时,采动塌陷区地表新建建筑物后,地基变形将包括表层地基土的压缩变形和采动塌陷区的失稳变形。地基土的压缩变形是在附加应力作用下地基土空隙体积的减少,建筑地基基础设计中通常采取不同的基础类型及地基处理措施使地基压缩变形值满足建筑物变形要求^[13]。采动塌陷区残余变形是由于塌陷区局部残余空洞裂隙在附加应力作用下失稳而产生的。由于塌陷区局部残余空洞裂隙分布具有不确定性,且附加应力是否引起其失稳变形不得而知,因此建筑物设计中也未考虑到此部分变形影响,这给采动塌陷区建筑带来极大的安全隐患。

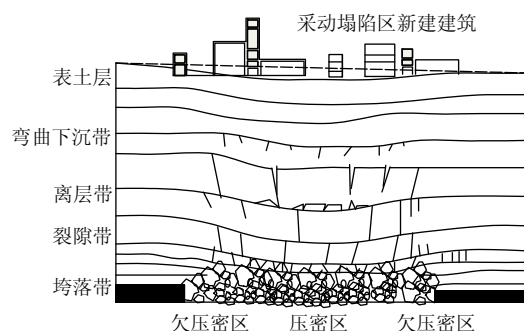


图1 采动塌陷区覆岩结构

Fig.1 Structure of overlying strata in mining-induced subsidence area

地基土的变形主要与土体受到的附加应力及地基土物理力学性质有关;因此,分析煤矿采动塌陷区地基变形不但要分析建筑附加应力分布,还应考虑塌陷区残余空洞裂隙范围。如图 2 所示,附加应力 p 随着深度增加而递减。当达到某一深度(附加应力影响深度)时,如果此影响深度远离采动塌陷区残余空洞裂隙影响范围,则地表变形主要只考虑附加应力作用下地基土压缩变形;反之则要考虑地基土压缩变形和采动塌陷残余变形的综合影响。

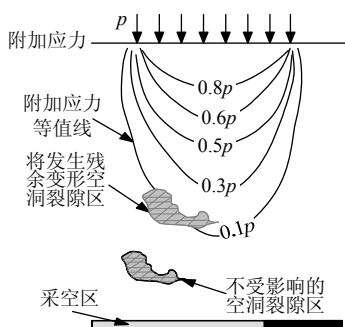


图 2 附加应力与采动塌陷区残余空洞裂隙的分布
Fig.2 Distribution of the additional stress and the mining residual stress cavities and fractures

2 采动塌陷区建筑物地基变形影响范围

传统地基变形计算范围是通过对比地基土中附加应力 p_z 和自重应力值 σ_z 来确定的:通常在地基某一深度 H 处当 $p_z=0.2\sigma_z$ 时,该深度以上的地基土层即为地基变形影响区^[13],而该深度以下的变形忽略不计,如图 3 所示。显然,传统建筑物地基变形仅考虑地基变形影响区内地基土的压缩变形,而对采动塌陷区地基中失稳变形并未有效考虑。对于采动塌陷区地基变形影响范围,需在分析地基中应力和采动塌陷区残余空洞裂隙范围后确定。

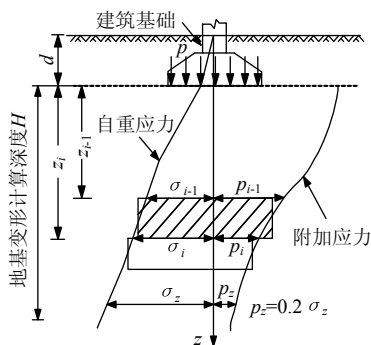


图 3 地基中应力分布与地基变形影响区
Fig.3 Stress distribution and deformation affected zone in foundation

2.1 采动塌陷区建筑物地基应力分布

1) 自重应力的分布

建筑物地基一般为成层土体,则在深度 z 处的自重应力计算公式为

$$\sigma_z = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \cdots + \gamma_n h_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \quad (1)$$

式中: h_i 为第 i 层土的厚度; γ_i 为第 i 层土的重度; n 为从天然地表到深度 z 处的土层数。

2) 土层附加应力的分布

建筑物基底附加应力通常是不均匀分布的,为了分析地基深部附加应力分布,将建筑物(或建筑群)范围的基底应力等效为均布荷载 p 。采动塌陷区残余空洞、裂隙一般位于建筑地基较深部位,此种简化对地基浅部附加应力值影响较大,但对附加应力影响深度和深部附加应力值影响较小。土是三相体,但是到目前为止,计算土中应力的方法仍是采用弹性理论公式,把地基土视为均匀的、连续的、各向同性的半无限体。这种假定与实际土体有差别,可是其计算结果能满足实际工程的要求^[14]。当建筑地基埋深较浅(浅基础)时,根据 Boussinesq 解,可得半无限表面作用一竖向集中力 F 时,地表下任一点 M 的竖向应力为^[15]

$$\sigma_h = \frac{3Fz^3}{2\pi R^5} \quad (2)$$

式中: σ_h 为 M 点竖向应力; z 为 M 点距离地表的深度; R 为 M 点与集中力作用点间的距离。

则在均布荷载作用 p 下,地基中任意一点的附加应力可用式(2)在荷载作用范围 A 内积分求得:

$$p_h = \iint_A d\sigma_h \quad (3)$$

当等效均布荷载为矩形分布时,由式(3)可求得均布矩形荷载下深度为 z 时矩形中点下附加应力 p_{zo} 和角点下附加应力 p_{zc} :

$$p_{zo} = \frac{2p}{\pi} \left[\frac{2lbz(b^2 + l^2 + 8z^2)}{\sqrt{b^2 + l^2 + 4z^2}(b^2 + 4z^2)(l^2 + 4z^2)} + \arctan \frac{lb}{2z\sqrt{b^2 + l^2 + 4z^2}} \right] \quad (4)$$

$$p_{zc} = \frac{p}{2\pi} \left[\frac{lbz(b^2 + l^2 + 2z^2)}{\sqrt{b^2 + l^2 + z^2}(b^2 + z^2)(l^2 + z^2)} + \arctan \frac{lb}{z\sqrt{b^2 + l^2 + z^2}} \right] \quad (5)$$

式中: p 为等效均布荷载; l 为矩形均布荷载的长度; b 为矩形均布荷载的宽度。

由式(4)和(5)可得到矩形均布荷载作用下附加应力沿深度方向的分布规律。在采动塌陷区地基

中, 当采动残余空洞裂隙影响区较浅时, 附加应力将引起其失稳而产生较大变形; 如果此时建筑物地基基础仍按传统方法考虑, 则附加应力诱发的塌陷区残余空洞裂隙变形将导致建筑物损害。

2.2 采动塌陷区空洞裂隙影响区

煤层开采中上覆岩层会出现采动破坏, 顶板上覆岩层产生大量裂缝或断裂。煤炭开采后岩层中的一部分空洞裂隙会随时间逐渐闭合, 另一部分残余空洞裂隙可能长期存在^[2]。显然采动塌陷区空洞裂隙区受煤炭开采厚度、采深、开采方法、顶板管理方式、岩层性质、时间等诸多因素影响; 因此, 采动塌陷区空洞裂隙分布难以由实验和理论分析精确得到, 计算建筑地基变形的定量值变得非常困难。同时, 采动塌陷区中的裂隙、空洞相对地面建筑具有随机性; 因此基于地质勘探技术探测塌陷区残余空洞裂隙分布范围, 并分析塌陷区地基是否会受到建筑附加应力影响而产生失稳变形, 从而判定塌陷区地基建建筑物的安全性更具现实意义。

2.3 采动塌陷区地基变形影响范围

文献[13]中通过对比自重应力 σ_z 和附加应力 p_z 的大小来界定地基变形影响范围: 当 $p_z=0.2\sigma_z$ 时对应的深度以上土层为地基变形影响范围; 当该深度下为高压缩性土时, 取 $p_z=0.1\sigma_z$ 时对应的深度以上土层为地基变形影响范围。现有研究认为 $p_z=0.1\sigma_z$ 时对应深度处, 附加应力已经足够小且此处土体受到较大自重应力压缩性较小, 该深度以下变形可以忽略。此分析没有考虑到采动塌陷区残余空洞裂隙的影响, 塌陷区残余空洞裂隙在附加应力作用下的变形为覆岩中不稳定平衡结构的失稳变形, 其变形具有突然性和长期性^[1,16]。通常当塌陷区残余空洞裂隙分布较浅时, 残余空洞裂隙诱发的变形甚至大于地基土在附加应力作用下的压缩变形。因此, 采动塌陷区地基变形影响范围应综合考虑附加应力及其残余空洞裂隙区的分布。基于安全性考虑, 采动塌陷区地基变形影响范围取 $p_z=0.1\sigma_z$ 时对应的深度以上土层为地基变形影响范围; 当该深度下分布有残余空洞裂隙区时, 则应取残余空洞裂隙区分布深度以上土层为采动塌陷区地基变形影响范围。

3 实例分析

3.1 工程概况

义马煤业某矿扩建 2×50 MW 煤泥矸石电厂主厂房和 2×110 kV 配电楼控制室, 周围曾有一小煤矿生产, 1998 年停止生产。该小煤矿属于无计划生

产, 采煤生产巷道、采空区没有留下相关资料, 采空区布置不明。在扩建电厂西北方向居民生活区的 8[#], 9[#], 10[#] 等居民楼和临近 110 kV 配电楼的 11[#] 和 12[#] 居民楼受小煤矿采动塌陷区残余变形的影响, 楼体建成后多处出现裂纹。新建电厂区周围极可能存在小煤矿生产残留的塌陷区残余空洞裂隙, 这给新建电厂的安全性带来极大安全隐患。为了评定电厂拟建建筑的安全性并分析居民楼局部损害原因, 急需探寻塌陷区残余空洞裂隙的分布情况。

3.2 采动塌陷区残余空洞裂隙探测

为查明采动区残余空洞裂隙范围, 采用高密度电阻率层析成像地球物理勘探技术探测塌陷区上方建筑物周围残余空洞裂隙分布情况。高密度电阻率法是根据岩石、矿体和各种覆岩空洞裂隙具有不同的导电性、介电性和电化学性质来推断矿体或地质构造的赋存状态(形状、大小、位置、产状和埋藏深度)。探测中以 WJDJ-2 型多功能数字直流激电仪为测控主机, 配以 2 台 WDZJ-1 型多路电极转换器构成 WGMD-2 高密度电阻率测量系统。根据新建电厂场地和小煤矿开采布置情况, 在探测区建筑物周围布置了 6 条高密度电阻率测量线, 如图 4 所示。

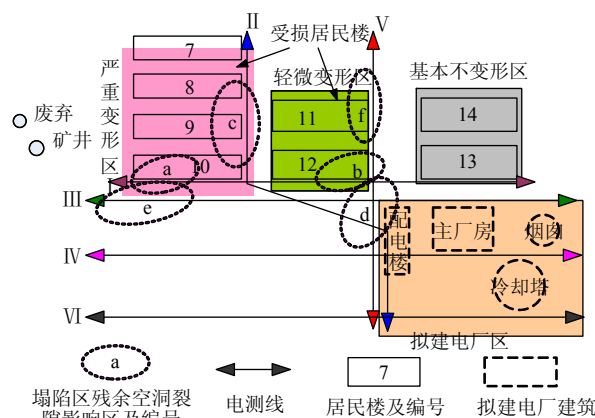


图4 高密度电阻率探测线及残余空洞裂隙分布
Fig.4 Measuring lines layout and the distribution of mining residual cavities and fractures

高密度电阻率法与传统电阻率法相比, 具有成本低、效率高、信息丰富、勘探精度高等优点。为避开工业游散电流(尤其是地下电缆)的干扰, 进行电阻率层析成像探测中采用增大供电电流的措施保证探测精度, 其探测结果如图 5 所示。高密度电阻率法确定塌陷区主要是根据电阻率值的大小、电位异常区域大小、深度及采动塌陷区已建建筑损害等条件综合判定。根据二维成像反演结果和调查资料确定塌陷残留空洞裂隙区分别分布在 I[#] 测线

90~130 m 桩号处、II[#]测线 390~430 m 处、III[#]测线 70~110 m 处、V[#]测线 60~120 m 处。将其布置到实地可知，高密度电阻率测线共探测到 a, b, c, d, e, f 共 6 个残留空洞裂隙影响区，如图 4, 5 所示。

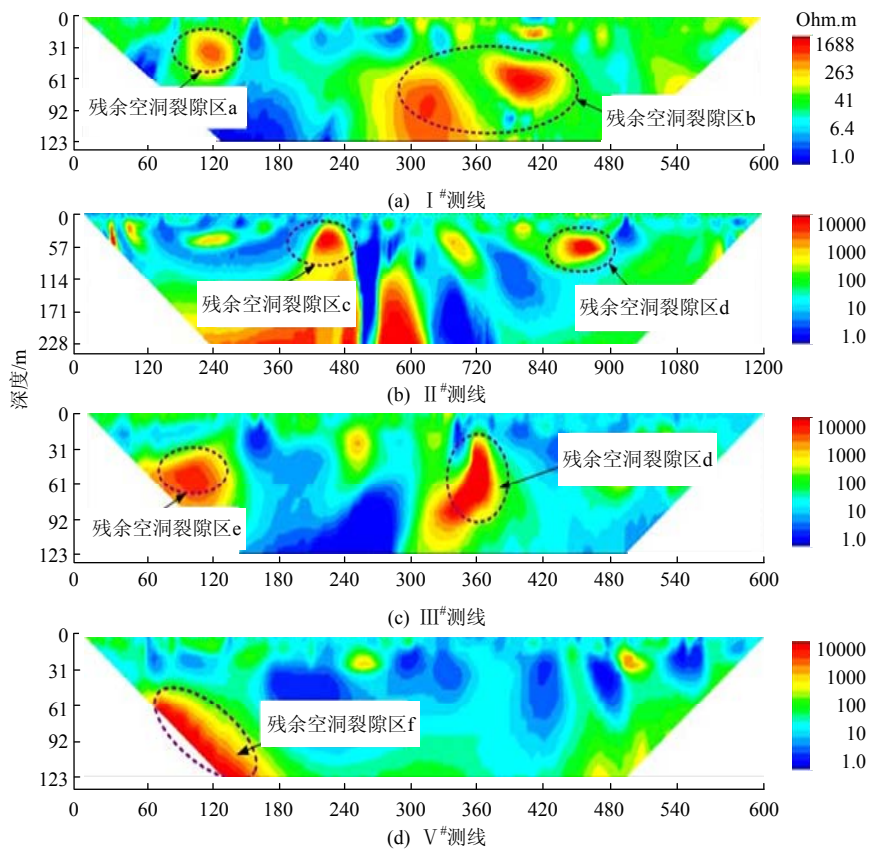


图 5 高密度电阻率层析成像勘探技术探测结果
Fig.5 Detection results by high density resistivity method

3.3 探测结果分析

从探测结果图 4, 5 可知在探测线范围内共存在 6 个空洞裂隙影响区，其中：空洞影响区 a, c 和 e 分布在 8[#], 9[#]和 10[#]楼处，且距离地表较浅，最浅处约为 30~45 m，这是造成 8[#], 9[#]和 10[#]楼出现严重变形并产生局部损害的主要原因；空洞影响区 b 和 f 分布在 11[#], 12[#]楼处，且最浅处深度 50~55 m，这是造成 11[#], 12[#]楼出现轻微变形的主要原因；此外，在拟建电厂配电楼西北角存在一个空洞裂隙影响区 d，且距离地表较浅，最浅处约为 40 m，空洞裂隙影响区 d 可能影响拟建电厂配电楼的安全性。

3.4 采动塌陷区建筑物地基变形影响范围分析

建筑物地基中应力主要为地基土的自重应力和建筑物的附加应力，采动塌陷区地基变形影响范围需根据附加应力、自重应力大小、地基土土质和地基土中采动残余空洞裂隙的分布来确定。由图 4, 5 可知，10[#]居民楼受到残余空洞裂隙区 a 的影响发生严重变形，将 10[#]楼附加应力等效为矩形均布荷载 $p=180\text{ kPa}$ ，荷载分布长度 l 为 60 m，荷载分布

宽度 b 为 40 m。根据钻孔揭露，建筑物附近地基土物理参数见表 1。

表 1 建筑物地基岩土力学参数
Table 1 Mechanics parameters of the rocks and soils in building foundation

岩土名称	厚度/m	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
杂填土	1.22	18.2	—	—	—
黏土	5.35	18.9	0.05	0.04	21
砂砾土	4.38	20.1	1.64	1.03	23
页岩	2.10	22.4	2.53	8.86	31
砾岩	8.27	23.1	3.86	11.43	32
页岩	18.35	24.2	4.52	15.32	33
砾岩	4.33	23.5	10.55	18.88	35
砂岩	3.92	24.3	14.65	16.57	37
砂质页岩	11.82	24.4	12.85	14.21	36
砾岩	35.42	24.5	13.14	18.32	40

地基土中自重应力和附加应力可由式(1)和(4)得到，如图 6a。11[#]居民楼受到残余空洞裂隙区 f 的影响发生轻微变形，同理将其附加应力等效为矩形均布荷载 $p=200\text{ kPa}$ ，荷载分布长度 l 为 60 m，

荷载分布宽度 b 为 45 m。地基土中自重应力和附加应力可由式(1)和(4)得到，如图 6b。

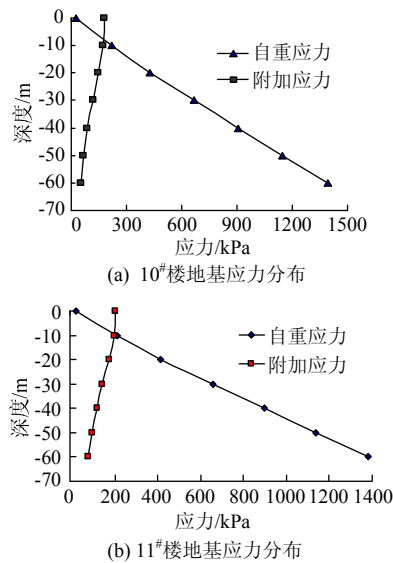


图 6 采动塌陷区建筑物地基应力分布
Fig.6 Stress distribution of building foundations
in mining-induced subsidence area

10[#]居民楼下残余空洞裂隙区 a 距离地表深度为 30~45 m，若按传统的地基变形影响区分析，即 $p_z=0.2\sigma_z$ 时，地基变形计算深度约为 27 m，显然此时没有考虑附加应力作用下残余空洞裂隙的失稳变形；当取 $p_z=0.1\sigma_z$ 时，变形计算深度约为 39 m，该深度分布在残余空洞裂隙影响区，再结合残余空洞裂隙的分布范围即可得 10[#]楼地基变形影响范围。若按传统方法考虑地基变形影响区，11[#]居民楼地基变形计算深度约为 32 m，而残余空洞裂隙区 f 距离地表深度为 50~55 m，显然没有考虑到残余空洞裂隙的失稳变形；当取 $p_z=0.1\sigma_z$ 时，此时计算深度约为 49.6 m，计算深度下为残余空洞裂隙区，结合残余空洞裂隙的分布范围可得 11[#]楼地基变形影响范围。

拟建电厂配电楼西北角存在空洞裂隙影响区 d，且距离地表最浅处约为 40 m，拟建建筑基础埋深约 1.5 m，将附加应力等效为矩形均布荷载 $p=175$ kPa，由式(1)和(4)可得拟建电厂配电楼地基中的应力分布，见表 2。

由表 2 结合以上分析，在拟建建筑基础底面以下 40 m 时 $p_z/\sigma_z=0.107>0.1$ ，即该深度位于地基变形影响区，且该深度下为残余空洞裂隙区，则在附加应力作用下地基将发生地基土压缩变形和残余空洞裂隙失稳变形；因此，拟建建筑地基或基础应

在传统设计基础上进行加固或改变基础形式，以抵抗塌陷区残余空洞裂隙失稳变形的影响。通过分析拟建建筑的地基基础设计参数，提出将原有条形基础变更为筏板基础，同时加大筏板厚度以抵抗因塌陷区残余空洞裂隙失稳而产生的不均匀变形。配电楼建成后通过实时监测，其变形在建筑容许变形范围内，建筑物未出现局部损害。

表 2 配电楼地基中应力
Table 2 The stress in switch building foundation

深度/m	重度/(kN·m ⁻³)	自重应力/kPa	附加应力/kPa
0	18.9	27.3	175.00
-10	20.1	222.3	170.45
-20	23.1	424.6	150.33
-30	24.2	666.6	123.03
-40	23.5	908.6	97.65
-50	24.4	1 148.4	77.18
-60	24.5	1 392.4	61.60

4 结 论

- 1) 在采动塌陷区地基中，当采动残余空洞裂隙区分布较浅时，建筑附加应力将引起表层地基土压缩变形和残余空洞裂隙失稳变形；如果此时建筑物地基、基础仍按传统方法设计，则附加应力诱发的残余空洞裂隙失稳变形将导致建筑物损害。
- 2) 基于对采空塌陷残余空洞裂隙区的探测及建筑物地基附加应力的分布分析，采动塌陷区地基变形影响范围可取 $p_z=0.1\sigma_z$ 时对应的深度以上土层为地基变形影响范围；当该深度下分布有残余空洞裂隙区时，则应取残余空洞裂隙区分布深度以上土层为采动塌陷区地基变形影响范围。
- 3) 采用高密度电阻率层析成像地球物理勘探技术探测了义马煤业某矿采动塌陷区残余空洞裂隙分布情况。结合建筑物地基中应力分布特征，分析了采动塌陷区已建成建筑局部损害的原因，并对拟建配电楼地基变形进行了分析。分析结果表明：拟建建筑将受塌陷区残余空洞裂隙失稳变形影响，需对地基基础进行加固或变更。

参考文献：

[1] 王录合，李亮，王新军，等. 开采沉陷区建设大型建筑群理论与实践[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2009：2-7.
[2] 郭广礼. 老采空区上方建筑地基变形机理及其控制[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2001：1-9.
[3] 马春艳. 荆各庄矿塌陷区建筑地基稳定性研究[D]. 焦

- 作: 河南理工大学, 2011.
- [4] KIM Jungho, YI Myeongjong, CHO Seongjun, et al. Anisotropic crosshole resistivity tomography for ground safety analysis of a high-storied building over an abandoned mine[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2006, 11(4): 225-235.
- [5] 张永波. 老采空区建筑地基稳定性及其变形破坏规律的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- [6] 孙占法. 老采空区埋深对其上方建筑地基稳定性影响的数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- [7] 郭惟嘉, 王勇义. 采空区上方修建大型建筑物地基稳定性评价[J]. *岩土力学*, 2004, 25(增刊 1): 57-59. GUO Weijia, WANG Yongyi. Stability evaluation of constructing large-scale building-toft above mine goaf [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(Sup 1): 57-59.
- [8] 徐平, 郭文兵, 张敏霞. 控制采动区桥梁移动变形方法研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(3): 425-429. XU Ping, GUO Wenbin, ZHANG Minxia. Methods of controlling movement and deformation of mining induced bridge[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(3): 425-429.
- [9] 谭志祥, 邓喀中. 采动区建筑物附加地基反力变化规律研究[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(9): 907-911. TAN Zhixiang, DENG Kazhong. Study on change laws of additional ground reaction force of buildings in mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9): 907-911.
- [10] 汪吉林, 丁陈建, 张云, 等. 老采空区地基变形对地面建筑影响的数值分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2008, 25(4): 476-480. WANG Jilin, DING Chenjian, ZHANG Yun, et al. Numerical analysis of effect of abandoned goaf foundation deformation on ground buildings[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2008, 25(4): 476-480.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 51-60.
- [13] 陈希哲. 土力学与地基基础[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2004: 100-112.
- [14] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 42-50.
- [15] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 220-225.
- [16] 赵德深, 范学理. 矿区地面塌陷控制技术研究现状与发展方向[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2001, 12(6): 86-89. ZHAO Deshen, FAN Xueli. The research actuality and development aspect of the technology to control the land collapse in mining area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2001, 12(6): 86-89.

(上接第 623 页)

2 个正极值不相等, 曲线关于负极值点不对称。

4 结 论

1) 地下煤炭开采引起上覆节理岩体沉陷形态出现偏态特征。最大值并不在开采对称中心, 地表沉陷曲线在最大值一侧变化较快, 影响范围较小, 在另一侧变化较缓, 影响范围较大。

2) 地下煤炭开采引起节理岩体沉陷的概率分布函数符合离散的 Bernoulli 分布。

3) 建立的考虑节理几何特征的地表沉降预测模型可以较好地表现这种地表沉陷偏态性。

参考文献:

- [1] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采流程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000: 80-81.
- [2] 于广明. 矿山开采沉陷的非线性理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998: 15-27.
- [3] 谭云亮, 刘传孝, 赵同斌. 岩石非线性动力学初论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 97-113.
- [4] 朱维申, 何满朝. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 31-51.
- [5] 凌贤长, 蔡德所. 岩体力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 131-141.
- [6] 郭建伟. 深井节理化围岩巷道破坏机理及控制技术[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(9): 1559-1563. GUO Jianwei. Roadway fracture mechanism and control technology of joint fissured surrounding rock in deep mines[J]. *Journal of China coal Society*, 2012, 37(9): 1559-1563.
- [7] 刘辉, 何春桂, 邓喀中, 等. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2013, 30(3): 380-384. LIU Hui, HE Chungui, DENG Kazhong, et al. Analysis of forming mechanism of collapsing ground fissure caused by mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(3): 380-384.
- [8] 何国清, 杨伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991: 118-124.