

地应力对深大竖井稳定性影响研究*

冷希乔^{1,2}, 严金秀³, 韩瑀萱⁴

(1. 四川交通职业技术学院, 成都 611130; 2. 中铁西南科学研究院有限公司, 成都 611731;
3. 中铁科学研究院有限公司, 成都 610032; 4. 四川巴陕高速公路有限责任公司, 成都 610041)

摘要: 长大公路隧道通风竖井通常建设在地应力作用的岩体区域, 地应力状态是影响竖井工程稳定性最重要的因素之一。为探明高地应力状态对深大竖井围岩的应力演化和变形规律的影响, 依托米仓山特长隧道通风竖井工程, 采用数值模拟对不同应力系数的竖井施工过程进行分析, 研究了不同应力条件下大断面竖井沿不同深度的围岩应力特征及径向位移规律。研究表明: 相差较大地应力系数对围岩位移分布规律产生较大影响; 围岩径向位移与围岩级别及竖井深度呈正相关性, 围岩级别变差比竖井深度增大对围岩径向位移的影响更为明显; 但当竖井深度超过 200 m 时, 随地应力系数增大竖井径向位移速率急剧增大; 不同围岩级别条件下随竖井深度和应力系数的增大, 径向应力和切向应力都呈增大趋势, 但增大趋势较平缓; 研究成果可为类似竖井工程的科研、设计和施工提供参考。

关键词: 竖井; 地应力; 应力系数; 应力特征; 径向位移

中图分类号: U455.8

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2020)05-1451-08

Study on the Influence of In-situ Stress on the Stability of Deep Shaft

Leng Xiqiao^{1,2}, Yan Jinxiu³, Han Yuxuan⁴

(1. Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu 611130, P.R. China; 2. China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731, P.R. China; 3. China Railway Science Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610032, P.R. China; 4. Sichuan Bashan Expressway Co., Ltd., Chengdu 610041, P.R. China)

Abstract: The ventilation shaft of extra-long highway tunnel is usually built in the area of rock mass under the effects of in-situ stress, and the in-situ stress state is one of the most important factors affecting the stability of shaft engineering. In order to explore the influence of in-situ stress state on the stress evolution and the deformation law of surrounding rocks of the deep and large shaft, based on a ventilation shaft project of Micangshan extra-long tunnel, the numerical simulation of the process of shaft construction with different stress coefficients is carried out to study the stress characteristics and radial displacement law of surrounding rocks with different depths under various stress conditions. Study results show that the major difference among stress coefficients has a greater impacts on the displacement distribution law. The radial displacement is positively correlated with the surrounding rock classification and the shaft depth, and the influence of surrounding rock classification on radial displacement of surrounding rock is more remarkable than that of increased shaft depth. However, when the depth of shaft exceeds 200m, the rate of radial displacement of shaft is sharply soaring up with increasing of in-situ stress coefficient. Under different classification of surrounding rocks, the radial stress and the tangential stress are both on the rise with increasing of shaft depth and stress coefficient, but the increasing trend is gentle. The study can provide a reference for the research, design and construction of similar shaft projects in future.

Keywords: shaft; in-situ stress; stress coefficient; stress characteristics; radial displacement

* 收稿日期: 2020-02-20(修改稿)

作者简介: 冷希乔(1982—), 男, 辽宁锦州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道工程教学及科研工作。

E-mail: lengxiqiao@126.com

基金项目: 四川省交通科技项目(2011D-04-1)

0 引言

长大公路隧道通风竖井朝深、大方向发展,大量的深、大竖井工程建设在地应力作用的岩体区域;在诸多影响地下工程稳定性的因素中,地应力状态是最重要、最根本的因素之一^[1]。地应力状态导致竖井围岩的受力特性和位移规律更为复杂,因此,开展地应力条件下深大竖井稳定性影响研究是保证深、大竖井工程科学设计和安全施工的首要基础工作。

近年来,相关学者开展了大量的理论及实践研究,丁文其等^[2]考虑张拉破坏对终南山竖井稳定性进行了研究,认为Ⅲ级围岩对张应变破坏区施加锚杆可保持围岩稳定;王忠福等^[3]对高地应力区煤矿深部巷道开展了模型试验和数值模拟研究,分析了锚杆的变形破坏特征,得出了加固区锚杆的长度、间距等相关参数。宋朝阳等^[4]分析侧压力系数下不同轴比的椭圆巷道围岩应力演化 and 变形规律,研究表明,围岩的等应力轴比与水平主应力有关,不同截面轴比条件下应力集中区分布在 x 轴两端及变形较大 y 轴两端。李桂臣等^[5]对高地应力巷道断面型式优化开展了研究,提出“等效开挖”理念和“无效加固区”概念,建议高地应力巷道根据侧压力系数和主应力方向选择开挖断面形状。范明建等^[6]对深井高地应力复合岩层巷道加固措施开展了试验研究,结合监测分析了锚杆(索)的作用效果。周舒威等^[7]分析了不同衬砌厚度下竖井的稳定性,认为改变衬砌厚度对围岩横向位移限制有限,对纵向和总位移影响较大;李丰果等^[8-9]采用数值模拟对超深竖井施工过程开展研究,随竖井开挖深度增加,围岩侧向变形和应力增大;靳晓光等^[10]分析了高地应力区深埋隧道钢支撑及锚杆的结构力学特性;李鹏飞等^[11]结合现场监测对高地应力软弱围岩隧道初支力学特性进行了分析,认为初支应力呈“上部大,下部小”的特征,强调高地应力区隧道初支和超前支护的作用;张梅等^[12]以兰渝铁路高地应力软岩隧道为研究对象,提出了高地应力隧道的围岩分级标准,制订了“预留变形量、合理的初期支护、可靠的开挖工法、关键部位锚注加强、动态支护补强”等 5 项控制技术措施。综上,在高地应力区的竖井及交通隧道工程围岩稳定性及控制措施等方面取得了许多研究成果,但在交通工程领域针对高地应力深、大竖井围岩非线性受力特性及变形规律的系

统性研究较少,鉴于竖井工程的特殊性,使得高地应力条件下深、大竖井工程的设计和施工难度显著加大。

本文以米仓山特长隧道通风竖井工程为研究对象,采用数值模拟分析了地应力条件下深、大竖井工程的围岩稳定性,得出了不同应力条件下大断面竖井沿不同深度的围岩应力特征及位移规律。

1 工程概况

米仓山特长公路隧道在其中部设通风竖井一座,竖井中心地面高程 1 452 m,井深 435 m,竖井内径 9 m,外径 10.2 m。竖井围岩以石英闪长岩为主,岩体较完整,呈巨块石状镶嵌结构或块状整体结构,工程地质条件较好,围岩级别以Ⅱ、Ⅲ级为主,Ⅳ、Ⅴ级为辅。竖井区域根据地应力测试结果^[13],最大水平主应力值为 17.36 MPa,岩石单轴抗压强度为 64 MPa,根据规范^[14]围岩强度应力比为 3.7,属极高地应力,竖井开挖成洞性较好,稳定性一般。该竖井工程覆盖段地质状况如图 1 所示。

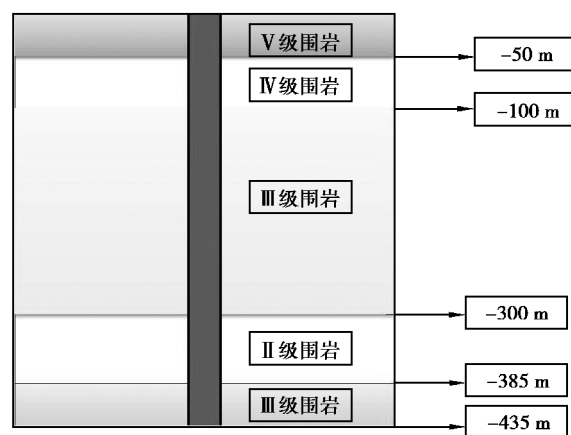


图 1 竖井工程地质状况

Fig. 1 Geological condition of shaft

2 数值模拟

2.1 计算参数及数值模型

根据米仓山隧道勘察设计资料^[13],竖井围岩岩性为火成岩,岩体完整性较好,本构模型采用 Hoek-Brown 屈服准则,数值模拟为连续介质模型,计算中仅对应力及位移趋势进行分析,同时不考虑地下水和岩体蠕变的影响;应力场考虑自重应力场与地层的构造应力场。围岩物理力学参数^[15-16]和结构支护参数分别见表 1 和表 2。

表 1 围岩物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of surrounding rock

围岩级别	H-B 岩石参数 m_i	地质强度指标 GSI	岩体特征经验参数		
			m_b	s	a
II	20	65	5.73	0.020 5	0.5
III	20	55	4.01	0.006 74	0.5
IV	20	35	1.96	0.000 73	0.5
V	20	20	1.15	0	0.55

表 2 结构支护参数

Table 2 The parameters of structural support

支护方式	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹模/GPa	泊松比
单层模筑衬砌	25.0	30	0.22

计算应用 FALC3D 软件,竖井模型 X 和 Y 向各取 50 m,竖井 Z 向取 480 m,开挖直径取 10.2 m,混凝土衬砌厚度为 60 cm,取半结构计算网格两侧及底部约束。计算模型如图 2 所示,监测测点布置如图 3 所示。

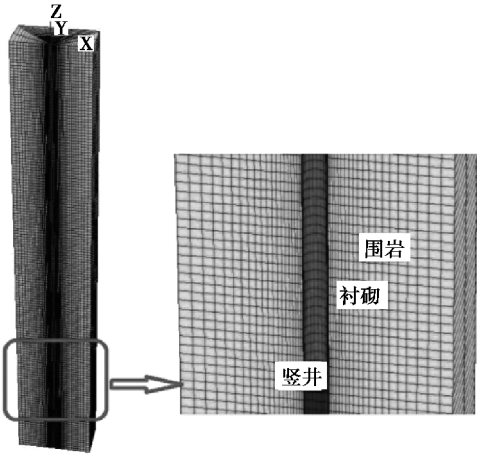


图 2 竖井计算模型

Fig. 2 Calculation model of shaft

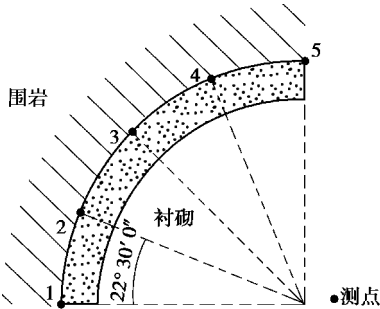


图 3 监测测点布置

Fig. 3 Layout of monitoring points

2.2 计算工况

对于山岭隧道深大竖井,通常存在较大的构造应力,假设以自重应力为基准,考虑不同优势方向地应力系数进行研究,计算工况见表 3。

表 3 计算工况

Table 3 Calculation conditions

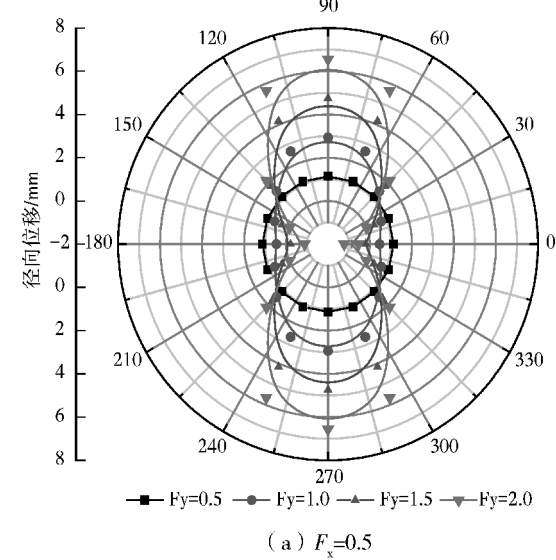
F_y	F_x			
	0.5	1.0	1.5	2.0
0.5	工况 1	工况 2	工况 4	工况 7
1.0		工况 3	工况 5	工况 8
1.5			工况 6	工况 9
2.0				工况 10

3 计算结果分析

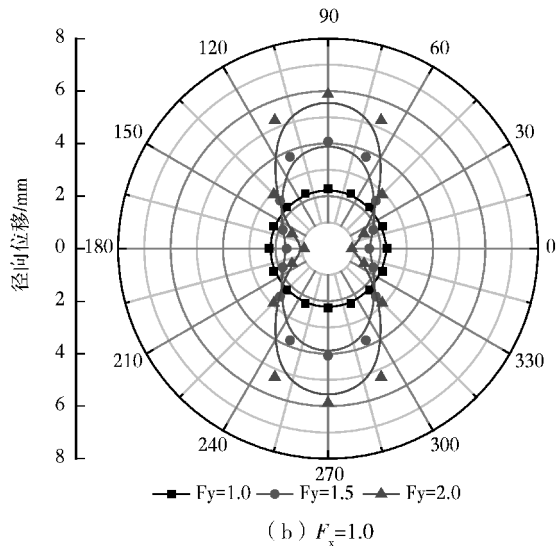
3.1 变形规律分析

3.1.1 地应力作用围岩径向位移规律

选取井深 200 m(Ⅲ级为主),分析地应力作用下围岩径向位移规律,位移规律如图 4 所示。



(a) $F_x=0.5$



(b) $F_x=1.0$

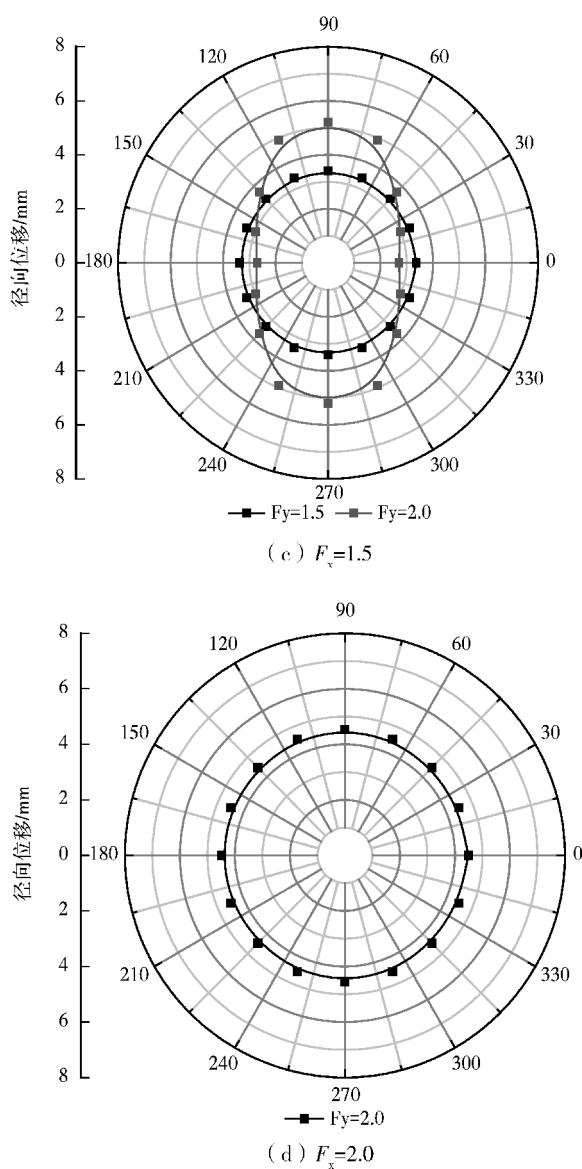


图 4 围岩径向位移规律

Fig. 4 Radial displacement law of surrounding rock

由图 4 知:

(1) 当应力系数 F_x 一定而应力系数 F_y 逐渐增大时, x 轴围岩径向位移呈逐渐减小趋势, 而 y 轴围岩径向位移呈逐渐增大趋势, 其最大径向位移为 6.3 mm; 围岩径向位移图由初期“圆形”逐渐过渡“0 字形”, 最后到“8 字形”, 说明不同优势方向且相差较大地应力系数对围岩位移分布规律产生较大影响。

(2) 当应力系数 F_x 与 F_y 相同且同时增大时, 围岩径向位移值随之增大; 当 $F_x = F_y = 0.5$ 与 2.0 时, 2 种工况对应的径向位移值分别为 1.1 mm 与 4.5 mm, 说明地应力较大时围岩变形会急剧增大。

3.1.2 围岩径向位移随深度变形规律

由图 5 知:

(1) 围岩径向位移大小与竖井深度呈正相关; 在竖井深度 150~300 m 段 (III 级围岩), 围岩径向位移随竖井深度的增大而增大, 但增大趋势较平缓。

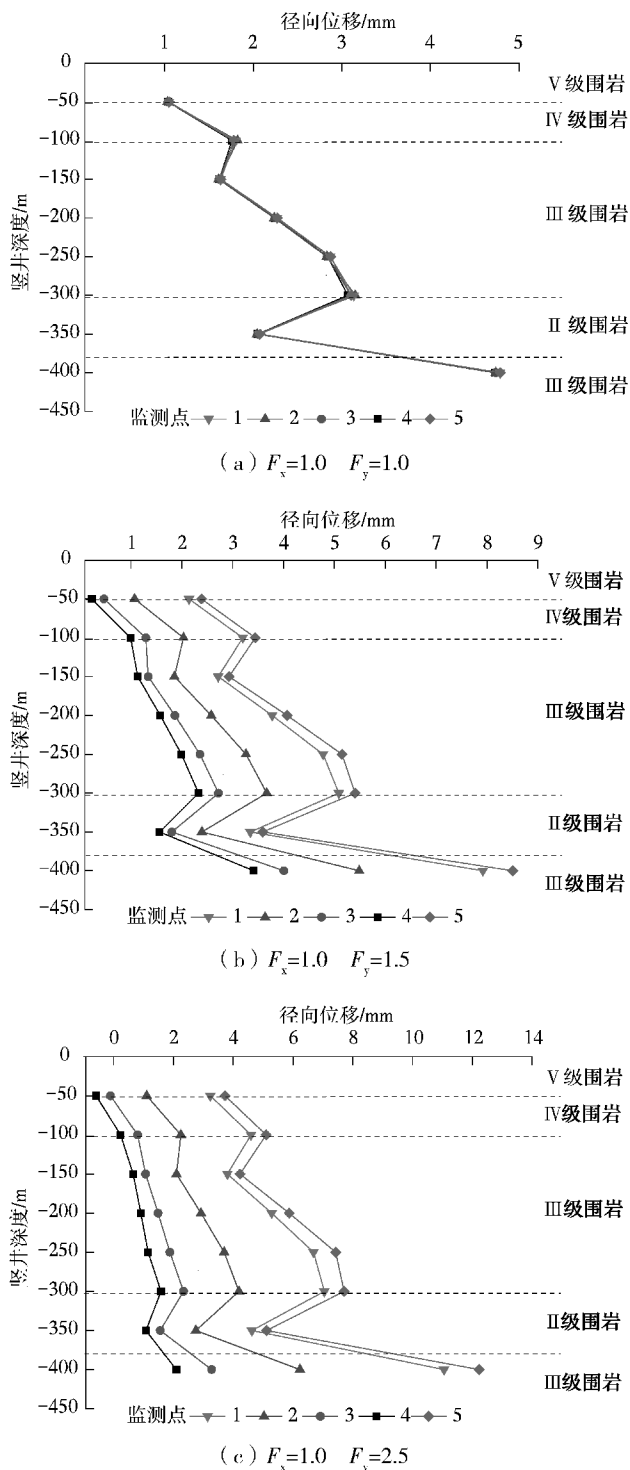


图 5 围岩径向位移随深度变化规律

Fig. 5 Variation law of radial displacement with depth

(2) 围岩级别比竖井深度对围岩径向位移的影响更为明显;例如图 5(a) 中测点 5: 深度 300 m (Ⅲ级围岩) 其径向位移为 3.16 mm, 深度 350 m (Ⅱ级围岩) 其径向位移为 2.07 mm, 说明围岩径向位移受围岩级别的影响更大。

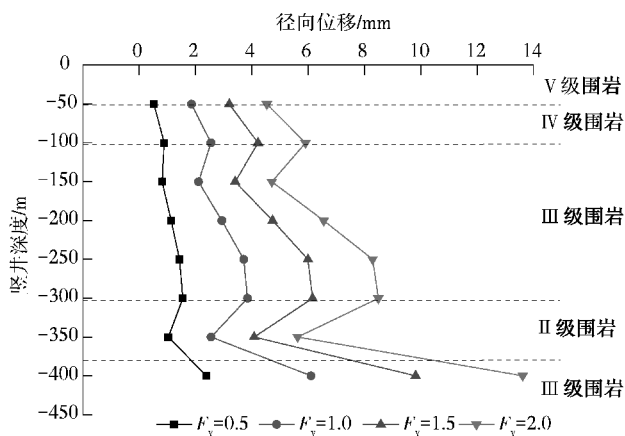
(3) 在三向应力状态下, 随竖井深度增大, 虽然围岩位移变化趋势较平缓, 但竖井爆破震动开挖导致围岩平整度较差, 应及时施做竖井衬砌支护, 避免竖井围岩发生系统性离散破坏。

3.1.3 测点 5 径向位移随深度变化规律

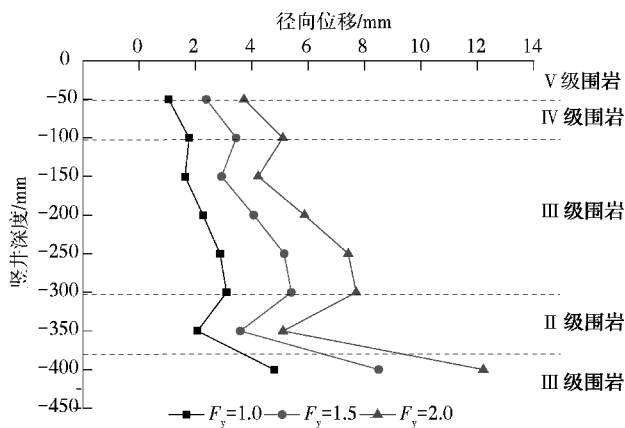
由图 6 知:

(1) 随着应力系数 F_y 逐渐增大, 测点 5 的径向位移随竖井深度的增加而增大, 且增大趋势与围岩级别有关, 围岩级别越差其径向位移越大。

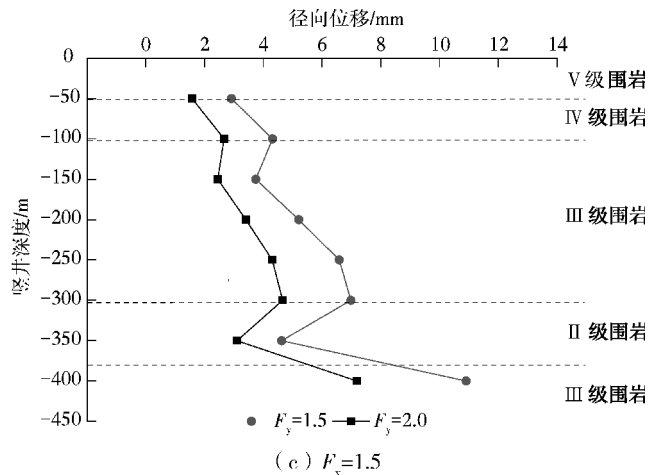
(2) 当不同优势方向且相差较大的应力系数 F_x 和 F_y 时, 对测点 5 的径向位移影响较大; 如图 6(a) 中 $F_x=0.5$ 且 $F_y=2.0$, 测点 5 的径向位移最大, 其值为 13.8 mm, 表明沿某方向应力系数较大时, 沿该方向的围岩径向位移较大; 当岩体中某方向的构造应力较大时, 施工应加强监测并采取必要工程措施。



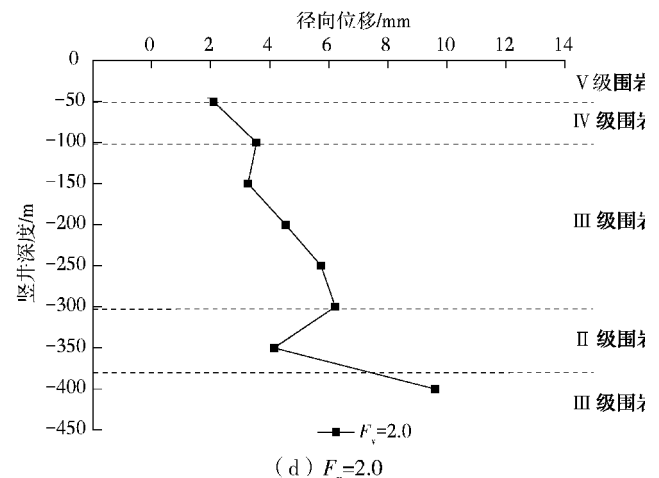
(a) $F_x=0.5$



(b) $F_x=1.0$



(c) $F_x=1.5$



(d) $F_x=2.0$

图 6 测点 5 径向位移随深度变化规律

Fig. 6 Variation law of radial displacement with the depth for monitoring point 5

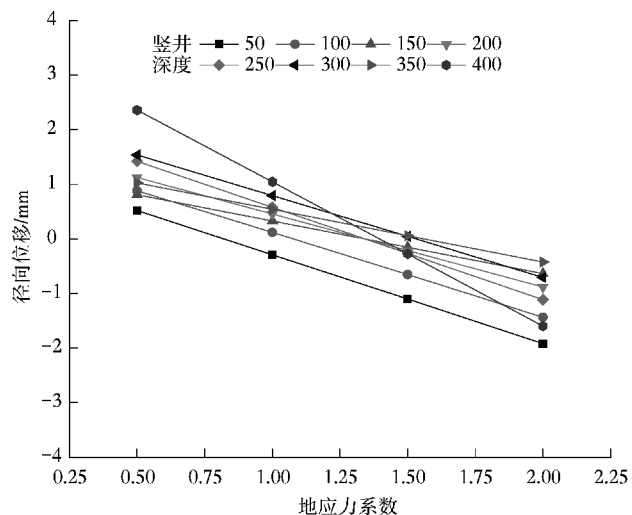
3.1.4 不同位置围岩径向位移随地应力系数变化规律

由图 7 知:

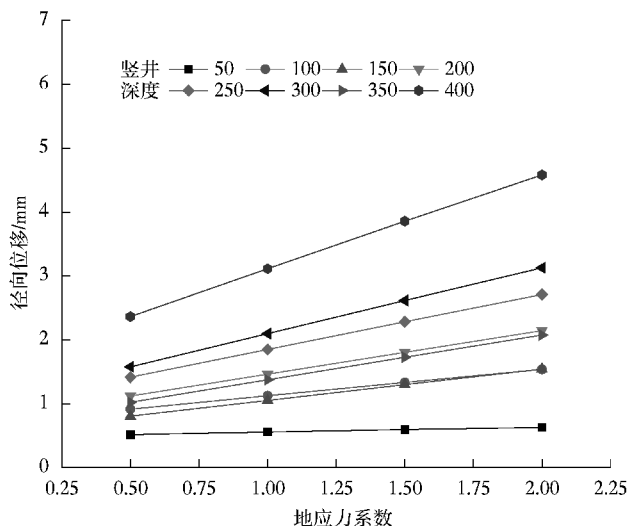
(1) 测点 1 的径向位移与应力系数 F_y 呈近似线性相关, 竖井深度越深, 其径向位移随地应力系数变化趋势越明显; 在竖井深度 400 m 时, 其线性斜率最大, 为 -2.64 mm/单位。

(2) 测点 3 和测点 5 径向位移与应力系数 F_y 也呈近似线性相关, 径向位移随应力系数 F_y 的增大而增大; 测点 5 的径向位移变化趋势最大, 在竖井深度 400 m 时, 其线性斜率为 7.48 mm/单位。

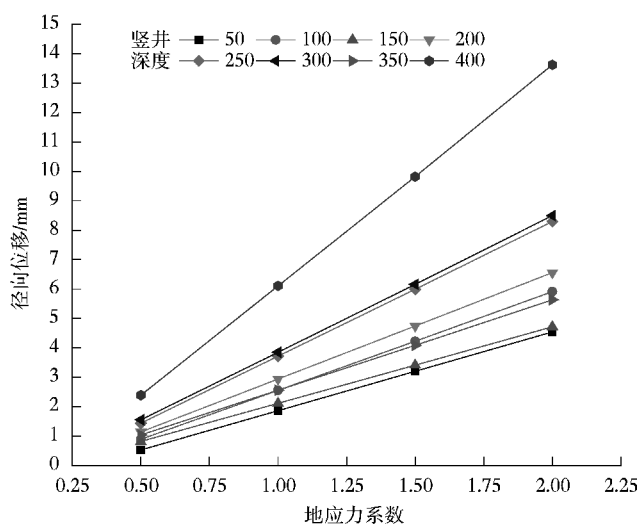
(3) 结合 3 个监测点的径向位移规律, 说明竖井深度较深时应力系数对径向位移的影响较大; 相同围岩类别, 在竖井深度为 150 m、200 m、250 m、300 m、400 m 情况下, 当竖井深度超过 200 m 时, 随地应力增大竖井径向位移速率急剧增大。因此, 建议当竖井深度超过 200 m 时, 当地质条件较差时其施工措施及衬砌支护设计参数应进行专项研究。



(a) 监测点1



(b) 监测点3



(c) 监测点5

图7 测点径向位移随地应力系数变化规律

Fig. 7 Variation law of radial displacement with the earth stress coefficient

3.2 受力特征分析

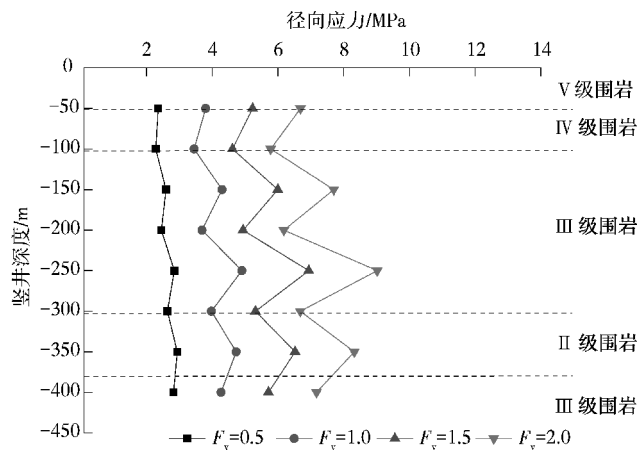
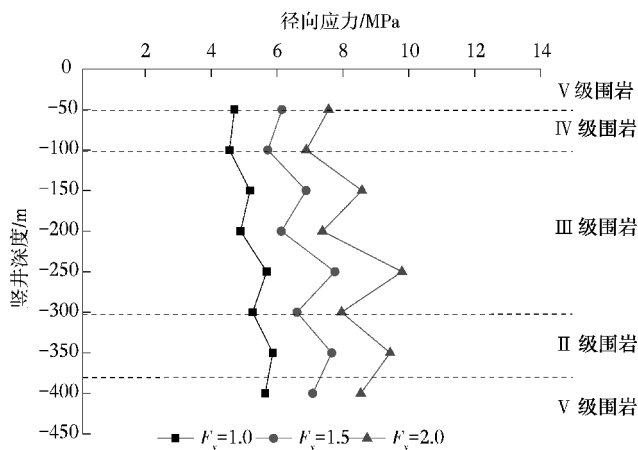
3.2.1 测点3围岩径向应力随深度变化特征

由图8知:

(1)不同围岩级别条件下随竖井深度的增大,径向应力小幅增大且存在一定波动趋势,其总体变化量较小,而波动主要是受围岩级别及支护结构等非线性力学特性的影响;从规律上看,径向应力与深度呈一定相关性,但径向应力受围岩级别的影响较小,与前述位移变化规律存在一定的区别。

(2)当不同优势方向且相差较大的应力系数 F_x 和 F_y 时,显然受优势方向应力系数影响,会产生较大围岩径向应力;随着竖井深度增大,优势方向应力系数变化会略增大径向应力随深度变化幅度。

(3)当应力系数 F_x 与 F_y 相同且同时增大时,围岩径向应力值随之增大;当 $F_x = F_y = 0.5$ 与2.0时,围岩径向应力整体呈增大趋势,如围岩最大径向应力由2.8 MPa增加至11.7 MPa;说明地应力较大时围岩围岩径向应力急剧增大。

(a) $F_x=0.5$ (b) $F_x=1.0$

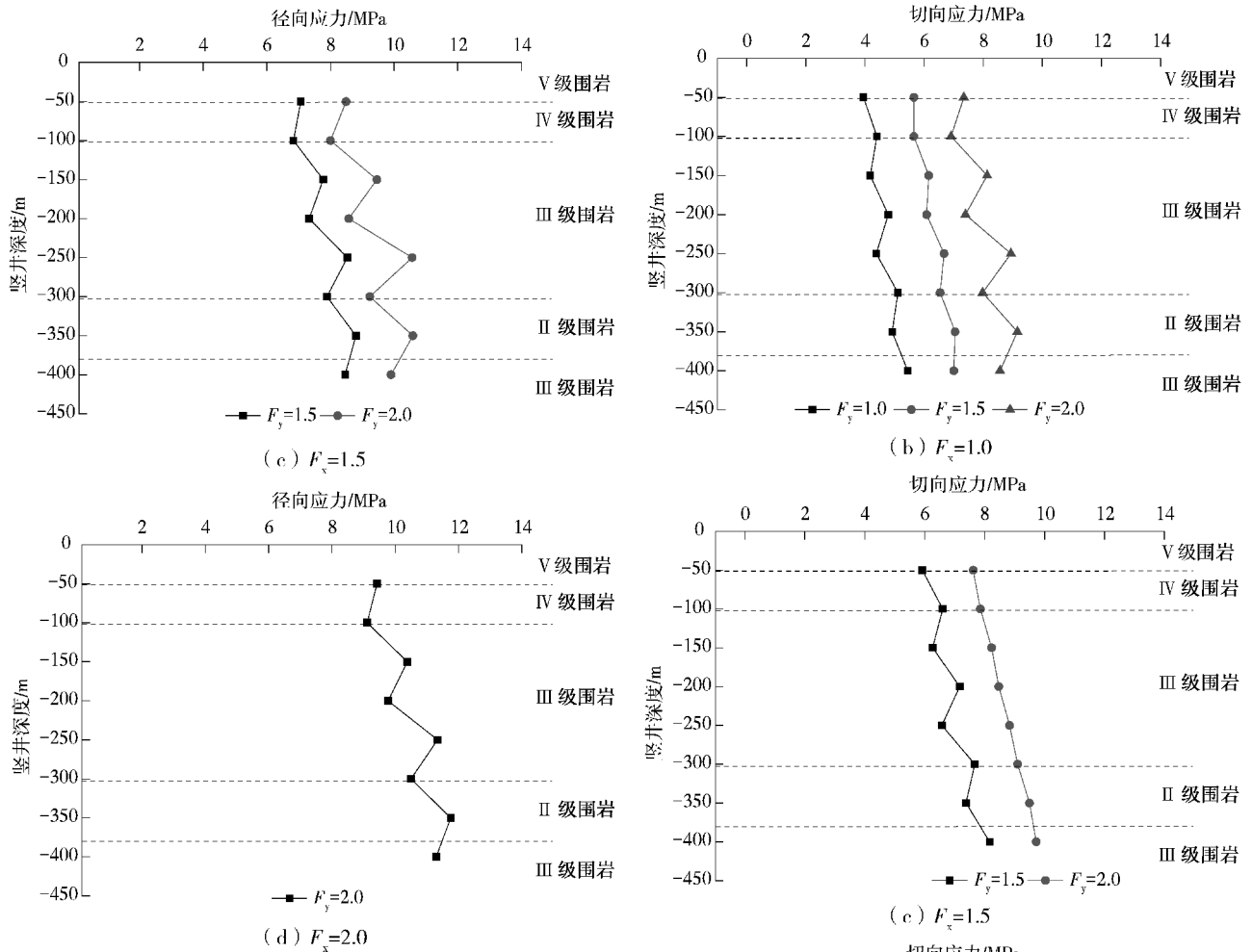


图8 测点3径向应力随深度变化特征

Fig. 8 Variation characteristic of radial stress with the depth for monitoring point 3

3.2.2 测点3围岩切向应力随深度变化特征

由图9知:

(1)不同围岩级别条件下随竖井深度增大,切向应力小幅增大且呈一定波动趋势,从规律上看切向应力增大趋势仍然较平缓。

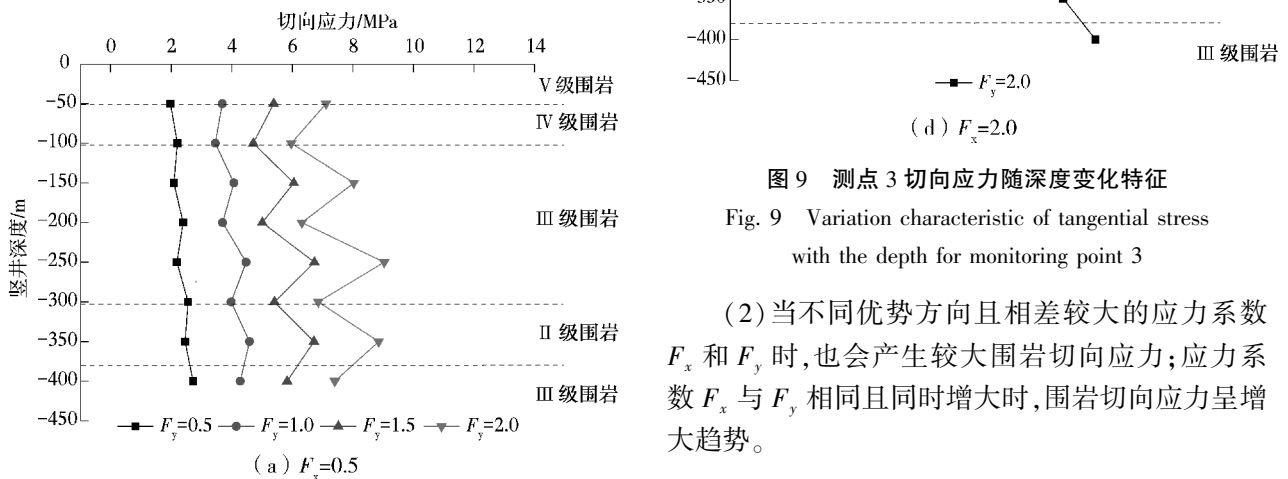


图9 测点3切向应力随深度变化特征

Fig. 9 Variation characteristic of tangential stress with the depth for monitoring point 3

(2)当不同优势方向且相差较大的应力系数 F_x 和 F_y 时,也会产生较大围岩切向应力;应力系数 F_x 与 F_y 相同且同时增大时,围岩切向应力呈增大趋势。

(3)在静力连续介质模型计算中,随竖井深度增大及围岩级别的改变,虽然围岩应力增大趋势均较平缓,并非随着竖井深度的增大而线性增加,但在施工过程中,开挖面不规则会导致围岩应力集中,围岩的楔形块体存在接触面滑塌等现象,易导致局部掉块,应早施做竖井衬砌支护结构。

4 结论

(1)地应力越大围岩的位移通常越大,当系数 F_x 一定而系数 F_y 逐渐增大时,围岩径向位移图由初期“圆形”逐渐过渡“0”字形,最后为“8”字形,说明不同优势方向且相差较大地应力系数对围岩位移分布规律产生较大影响。因此,建议深大竖井的衬砌支护参数应充分考虑地应力的优势方向,当地质条件较差时,采用注浆及增设长锚杆等工程措施。

(2)围岩径向位移与围岩级别及竖井深度呈正相关性,在三向应力状态下,虽然围岩位移变化趋势较平缓,但竖井爆破震动开挖导致围岩平整度较差,应及早支护避免围岩系统性离散破坏。

(3)围岩级别变差比竖井深度增大对围岩径向位移的影响更为明显;当竖井深度超过200 m时,随地应力增大竖井径向位移速率急剧增大。因此,建议当竖井深度超过200 m时,若地质条件较差,施工措施及衬砌支护设计参数应进行专项研究。

(4)在静力连续介质模型计算中,不同围岩级别条件下随竖井深度的增大,径向和切向应力均呈增大趋势,与位移变化规律相比,径向和切向应力受围岩级别的影响较小;随竖井深度增大及围岩级别的改变,虽然围岩应力增大趋势较平缓,但在施工过程中,开挖面不规则会导致围岩应力集中,围岩的楔形块体存在接触面滑塌等现象,易导致局部掉块,应早施做竖井衬砌支护结构。

参考文献(References)

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社, 2002.(Cai Meifeng. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [2] 丁文其, 孙伟杰, 崔振东. 考虑脆性张拉破坏的终南山超大直径深埋竖井稳定分析[J]. 公路交通科技, 2010, 27(3): 103-107.(Ding Wenqi, Sun Weijie, Cui Zhendong. Analysis of stability of super large diameter deep shaft of Zhongnanshan road tunnel considering tensile failure of brittle surrounding rock[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(3): 103-107.(in Chinese))
- [3] 王忠福, 刘汉东, 王四巍, 等. 深部高地应力区软岩巷道模型试验及数值优化[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 710-715.(Wang Zhongfu, Liu Handong, Wang Siwei, et al. Deep soft rock roadway model experiment and numerical optimization of support in high geo-stress area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 710-715.(in Chinese))
- [4] 宋朝阳, 纪洪广, 孙利辉. 高地应力深立井井筒围岩应力演化与变形规律及支护分析[J]. 煤炭工程, 2016, 48(10): 45-48.(Song Zhaoyang, Ji Hongguang, Sun Lihui. Evolution-deformation law and support of surrounding rock in deep vertical shaft under high ground stress[J]. Coal Engineering, 2016, 48(10): 45-48.(in Chinese))
- [5] 李桂臣, 张农, 王成, 等. 高地应力巷道断面形状优化数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(5): 652-658.(Li Guichen, Zhang Nong, Wang Chen, et al. Optimizing the section shape of roadways in high stress ground by numerical simulation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(5): 652-658.(in Chinese))
- [6] 范明建, 任勇杰, 段昌瑞, 等. 深井高地应力复合岩层巷道围岩控制技术研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(7): 95-99.(Fan Mingjian, Ren Yongjie, Duan Changrui, et al. Study on surrounding rock control technology of roadway with high in-situ stress and compound strata in deep coal mine[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(7): 95-99.(in Chinese))
- [7] 周舒威, 李庶林, 徐宏斌. 长大竖井围岩稳定性有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(增1): 1413-1418.(Zhou Shuwei, Li Shulin, Xu Hongbin. Stability Analysis for the surrounding rockmass of a long shaft by FEM[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(Supp.1): 1413-1418.(in Chinese))
- [8] 李丰果, 韩亮, 徐娇. 基于数值方法的超深竖井围岩力学特性变化规律研究[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(2): 61-66.(Li Fengguo, Han Liang, Xu Jiao. The change of the mechanics properties of super-deep vertical shaft surrounding rock based on numerical methods [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2012, 28(2): 61-66.(in Chinese))
- [9] 代鑫, 徐伟, 邹丽, 等. 竖井开挖过程的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增1): 154-157.

(下转第1483页)