

埋深对软岩圆形巷道变形破裂规律的影响分析*

林志斌¹, 朱昌星¹, 李元海²

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为研究埋深对深部岩体稳定性的影响,采用离散颗粒元软件 PFC^{3D}和透明岩体实验技术对不同埋深下圆形巷道周边岩体的变形破裂时空演变规律展开研究。研究表明:(1)不同埋深条件下,圆形巷道顶底板岩体与帮部岩体都会约在模型两个对角线方向上发生水平交错分离现象;(2)巷道周边岩体的径向位移都与其距巷道表面的距离呈指数衰减式分布,且随着埋深的增大,巷道周边岩体的连续性变形现象将越来越不明显;(3)随着巷道埋深的增加,巷道两帮岩体破裂逐渐往深处及拱顶底方向扩展,导致巷道顶底部岩体会因在拱腰处“立足不稳”,形成“X”型破裂;(4)巷道岩体裂纹总数和横断面岩体裂隙分形盒维数分别与巷道埋深呈指数增长和线性增长关系。

关键词:埋深;PFC^{3D};变形破裂

中图分类号:TU45

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)05-1242-08

Influence Analysis of Buried Depth on Deformation and Cracking Laws of Soft Rock Circular Roadway

Lin Zhibin¹, Zhu Changxing¹, Li Yuanhai²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan 454000, P.R. China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, P.R. China)

Abstract: To study the influence of buried depth on the stability of deep rock, the discrete particle flow code software PFC^{3D} and experimental techniques which using transparent rock were adopted to obtain the deformation and fracture laws of circular roadway surrounding rock under different depth. The results show that: (1) The surrounding rock of circular roadway will arose a horizontal interlaced separation phenomenon occurring on the two diagonal directions of model in different buried depth condition. (2) The radial rock displacement of surrounding rock has an exponential attenuation relationship with the distance from the roadway surface, and with the increase of buried depth, the continuity of deformation of surrounding rock will be more obvious. (3) As the buried depth of roadway growing, the fracture of two sides rock extend gradually to the depth and top/bottom of roadway, which cause the top/bottom rock of roadway occurring “unstable foothold” at the hance and forming an “X” type burst. (4) The total number of crack and the fractal box dimension of rock fracture in cross section have exponential and linear growth relation to depth of roadway respectively.

Keywords: buried depth; PFC^{3D}; deformation and fracture

* 收稿日期:2016-12-27(修改稿)

作者简介:林志斌(1988-),男,福建宁德人,博士,讲师,主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。

E-mail:linzhibin999999999@163.com

基金项目:国家自然科学基金(51174197);国家重点基础研究发展计划 973 项目(2014CB046905);河南理工大学博士基金(B2017-51)

0 引言

随着我国浅部矿产资源的枯竭以及城市间交通联系的日益密切,深埋巷(隧)道工程日渐增多,如秦岭终南山隧道最深达 1 640 m,锦屏隧道最大埋深则超过了 2 370 m。众多研究成果^[1-3]表明,这些深部巷(隧)道工程会由于地应力的急剧增大或力学环境的更加复杂而表现出与浅部明显不同的变形破坏特征。因此,关于埋深对巷(隧)道工程围岩稳定控制的影响研究就显得愈加重要。

王贵君^[4]针对一高速公路隧道工程,应用离散单元法对节理裂隙岩体中不同埋深无支护暗挖隧洞的稳定性及其机理进行了数值分析;程立朝等^[5]采用数值模拟方法研究了不同埋深对巷道交岔点处应力和变形破坏特征的影响;李彦斌等^[6]根据南山煤矿 2 号煤的地质力学条件,应用数值模拟和工程实践等方法,得到了埋深对巷道塑性区、应力分布及位移分布的影响规律;方建勤等^[7]研究了埋深对于二次衬砌合理支护时机的影响,并提出了考虑埋深的修正后的二次衬砌合理支护时机的确定方法;李倩倩等^[8]采用实测统计和数值模拟方法获得了北京黏性地层中不同埋深条件下地铁区间隧道的地层应力、塑性区分布及地层变形规律;唐康皿^[9]采用有限元强度折减法对不同埋深隧洞的稳定性问题进行研究,并对其破坏机理进行了探讨。

由上述研究成果可以看出,物理模型实验和数值模拟方法是研究不同埋深下巷(隧)道围岩变形破裂问题最常采用的两种方法。其中,数值模拟方法更是由于其成本低、速度快、灵活性强等特点而广泛受到研究人员的青睐。但目前,这些数值模拟研究所采用的大多仍是 FLAC^[5]、ANSYS^[9]这类基于连续性假设前提的有限元软件,与实际岩体是一种非连续、非均质的介质存在较大差异。

因此,本文以一条深埋无构造应力圆形巷道为工程背景,采用新兴离散颗粒流软件 PFC^{3D[10-11]}和透明岩体实验技术^[12]对不同埋深软岩巷道变形破裂规律展开研究,研究成果对指导相关工程施工及认识软岩随埋深的变形破裂机理具有重要意义。

1 工程背景

以一条埋深约 980 m 的软岩巷道为工程背景,

该巷道上覆岩层平均重度为 24.5 kN/m³,掘进断面形状为直径 3 m 的圆形,巷道所处地层为单一性质泥岩,泥岩的基本物理力学参数如表 1 所示。

表 1 泥岩基本物理力学参数
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of mudstone

岩层名称	抗压强度 σ_c /MPa	抗拉强度 σ_t /MPa	弹性模量 E /GPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 c /MPa
泥岩	21.5	1.28	2.68	0.23	40.0	2.5

2 基于 PFC^{3D}的巷道模型建立

2.1 巷道岩体细观参数确定

首先建立一个高度为 91.7 mm、直径为 55.3 mm 的圆柱 PFC^{3D}模型,接着根据文献[13]给出的岩体细观参数确定方法,大致确定出岩体各个细观参数初值,然后在此基础上不断调整各个细观参数,使圆柱试样的单三轴压缩试验结果与表 1 给定的宏观参数基本相符合,最终确定得到本文泥岩在 PFC^{3D}中的各个细观力学参数如表 2 所示。

表 2 巷道岩体在 PFC^{3D}中的各个细观力学参数
Table 2 Micro-scope mechanical parameters of roadway rock in PFC^{3D}

材料	变量参数	数值
颗粒	密度/(kg·m ⁻³)	3000
	最小半径/mm	0.8
	粒径比	1.66
	接触模量/Pa	3.0×10 ⁹
	刚度比	1.0
	摩擦系数	0.6
胶结物 (平行连接)	法向强度均值/Pa	1×10 ⁷
	法向强度标准差/Pa	1×10 ⁶
	切向强度均值/Pa	2×10 ⁷
	切向强度标准差/Pa	1×10 ⁶
	弹性模量/Pa	1×10 ⁹
	刚度比	1.0

2.2 巷道数值模型建立

由于本次模拟巷道开挖直径为 3 m,因此,为忽略模型边界效应的影响,根据圣维南原理,取

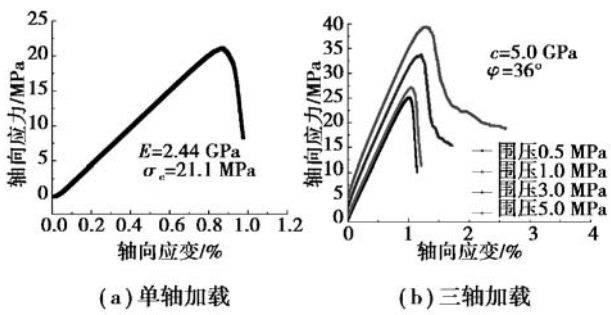


图 1 基于 PFC^{3D}的巷道围岩压缩试验

Fig. 1 Compression tests of surrounding rock in roadway based on PFC^{3D}

PFC^{3D}巷道模型横向 X 和竖向 Y 范围都为 12 m, 纵向 Z 范围则为 10 m, 共分 5 步开挖完成(图 2(a)). 同时, 为监测巷道周边岩体应力和变形随时间的变化情况, 考虑模型的对称情况, 分别在模型纵向中间横断面位置的右帮和顶板布置了 5 个监控点(5 个监控点距巷道临空面的距离分别为 0 m、0.5 m、1.0 m、2.0 m、3.5 m), 如图 2(b)所示。另外, 根据表 3 所示的 6 种应力边界条件来模拟埋深对巷道周边岩体变形破裂规律的影响。

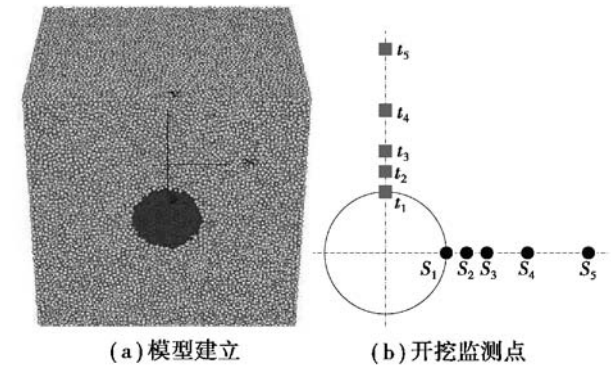


图 2 巷道开挖数值模型

Fig. 2 Numerical model of tunnel excavation

表 3 不同埋深下巷道模型各边界压力

Table 3 Boundary pressure of each roadway model under different buried depth			
工况	相对埋深 K (980 m)	顶底部压力 /MPa	四侧压力 /MPa
1.0	0.5	12.0	3.60
2	0.8	19.2	5.76
3	1.0	24.0	7.20
4	1.2	28.8	8.44
5	1.5	36.0	10.80
6	2.0	48.0	14.40

3 数值模拟结果分析

3.1 埋深对巷道周边岩体变形规律的影响

3.1.1 横断面竖向位移分布规律

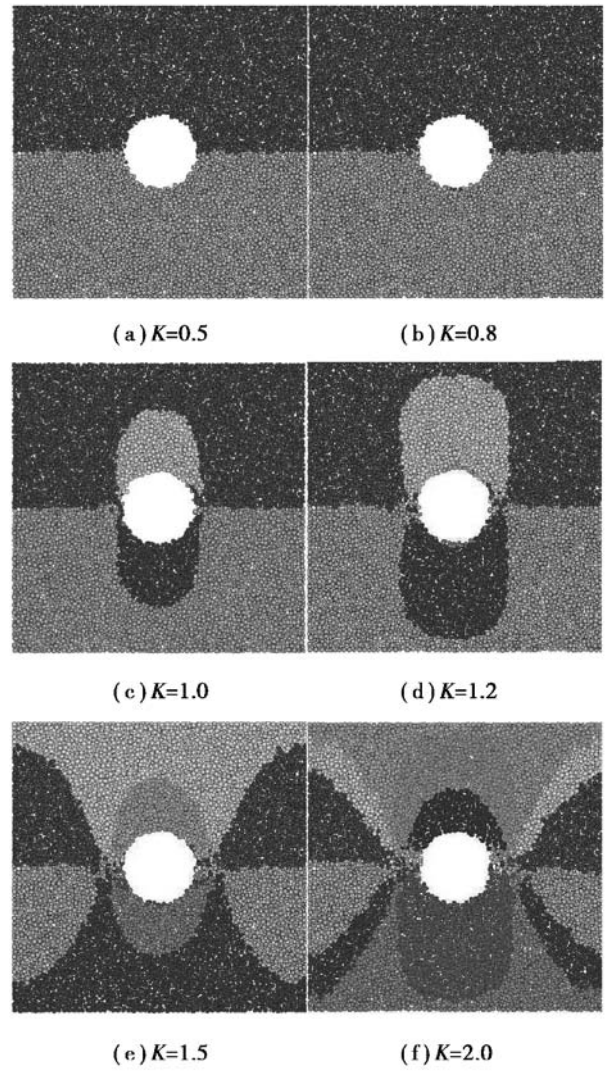
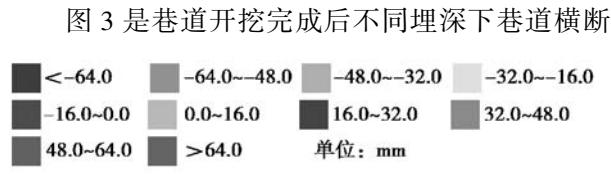


图 3 不同埋深下巷道横断面岩体的竖向位移云图

Fig. 3 Vertical displacement nephograms of rock at the cross section in different buried depth

面岩体的竖向位移云图。不同埋深下, 巷道两帮岩体除两拱腰处发生片帮剥落现象导致该处岩体竖向位移较大外, 其余各处岩体竖向位移都很小, 甚至忽略不计。而巷道顶底板岩体的最大竖向位移都是出现在拱顶和拱底位置, 并由拱顶和拱底处往外侧呈“花瓣式”逐渐递减, 且埋深越大, 这种向外递减的速度和范围也会越来越大。

从图 4(a)看,不同埋深下,巷道顶底部岩体的位移与其距巷道表面的距离呈指数衰减式分布,且随着埋深的增大,巷道顶底板岩体的竖向位移也越来越大,但其在空间分布上的连续性(位移分布曲

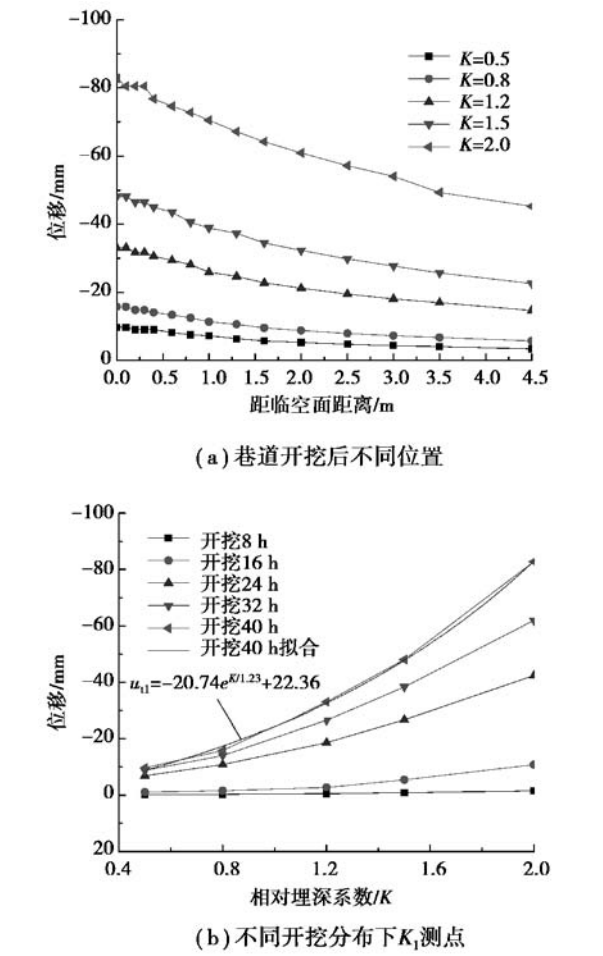


图 4 不同埋深下巷道顶部围岩的竖向位移曲线
Fig. 4 Vertical displacement curves of roadway roof under different buried depth

线出现不连续点)将逐渐减弱,即随着埋深的增大,巷道周边岩体(特别是在浅部)的连续性变形现象将越来越不明显。出现这种非连续变形的原因是,当埋深达到一定程度时,巷道顶部靠近巷道表面的岩体将会开始出现细微破裂并不断扩展,导致细微裂纹两侧岩体因受裂纹扩张影响而出现不一致变形。

由图 4(b)可知,不同开挖时间段下测点 t_1 的竖向位移 u_{t1} 都与相对埋深系数 K 呈指数增长关系。其中,巷道开挖完成后, u_{t1} 与 K 的关系式为 $u_{t1} = -20.74e^{K/1.23} + 22.36$ 。

3.1.2 横断面水平位移分布规律

图 5 给出了不同埋深下巷道横断面岩体的水

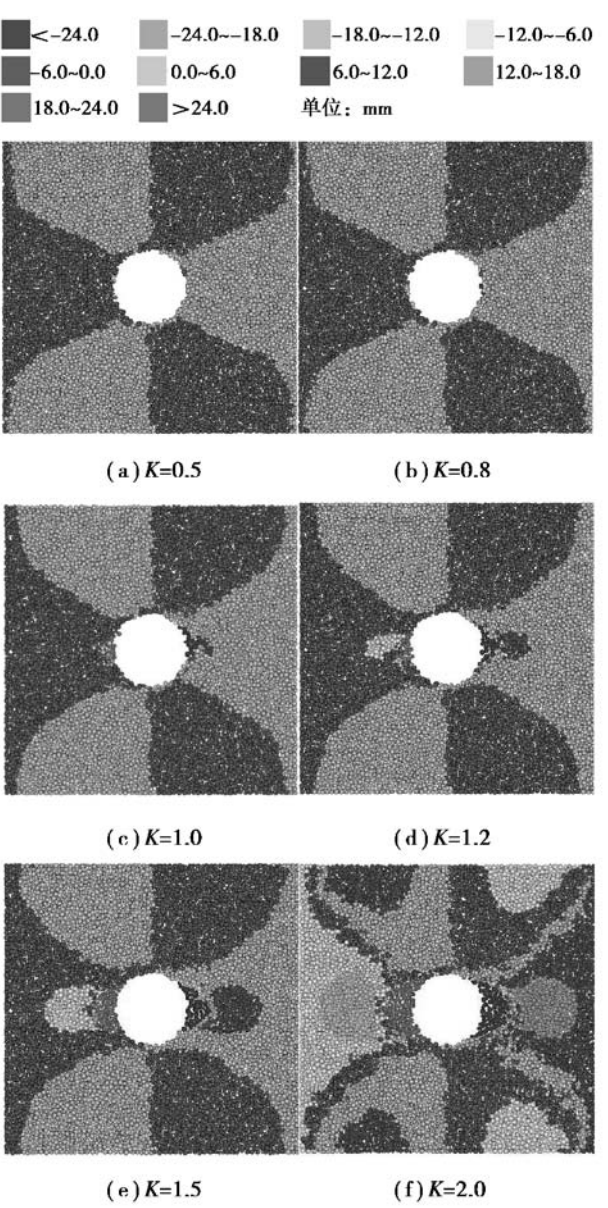


图 5 不同埋深下巷道横断面岩体的水平位移云图
Fig. 5 Horizontal displacement nephograms of rock at the cross section in different buried depth

平位移云图。不同埋深下,巷道开挖后顶底板岩体的水平位移都很小,而两帮岩体则在浅部出现往巷道内的水平位移,在深部出现往外的水平位移。同时也可看出,巷道横断面顶底板岩体与帮部岩体会约在模型两个对角线方向上发生水平交错分离,之所以出现这种现象的原因可能是本次模拟巷道的侧压力系数为 0.3 且模型边界是应力约束边界,导致巷道开挖后两帮出现了类似岩石在单轴压缩破坏时往两侧相对滑动的现象。另外,随着巷道埋深的增加,巷道周边岩体各向应力值会不断增大,导致巷道两帮浅部岩体的破裂范围逐渐加大并往围岩深处扩展,于是两帮浅部岩体往巷道内移动的范围

围和水平位移值逐渐加大,两帮深部岩体往巷道外的岩体水平位移值也越来越大。

由图 6 可知,当 $K \geq 0.8$ 时,巷道两帮岩体就会出现非连续性大变形,且埋深越大,非连续性大变形区域也越大,当 $K=2.0$ 时,该区域大小约为距巷道表面 1.3 m。

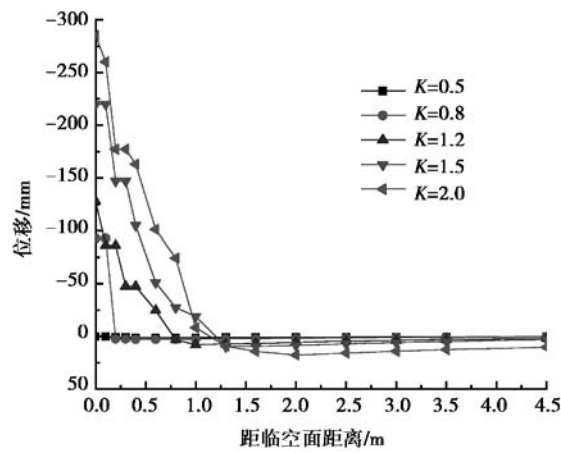


图 6 不同埋深下巷道顶部围岩的水平位移曲线

Fig. 6 Horizontal displacement curves of roadway roof under different buried depth

3.2 巷道周边岩体破裂时空演变规律

3.2.1 破裂分布模式

不同埋深下巷道横断面岩体的破裂如图 7 所示。可以看出,在竖向应力集中系数 K 由 0.5 增至 2 的过程中:①巷道顶底板的岩体都基本不发生破裂,而巷道帮部岩体则随着埋深的增大,其破裂范围由距巷道表面 0 m 逐渐扩至 3 m;②岩体在横断面两条对角线附近产生的张拉或剪切微裂纹逐渐增多,最后在 $K=2$ 时,岩体的这些微裂纹将贯通形成两条明显的主裂纹,即呈“X”型破裂。分析巷道周边岩体随埋深变化出现这种“X”型破裂现象的原因是,随着巷道埋深的增加,巷道四周压力都将逐渐增大,但顶底部竖向压力增大的幅度要明显大于两侧(侧压力系数小于 1),导致巷道两帮岩体破裂逐渐往深处及拱顶底方向扩展,其破裂程度和破裂范围逐渐增大,该部分岩体承载能力逐渐降低,最终,巷道顶底部岩体会因在拱腰处“立足不稳”而发生类似于边坡的滑坡失稳现象,形成“X”型破裂。

3.2.2 裂隙分形维数、动能、裂纹数目

图 8 给出了不同埋深下巷道岩体动能随开挖时间的变化曲线。不同埋深情况下,巷道岩体动能随时间的变化发展规律基本保持一致,但埋深越大,巷道岩体在每步开挖后的动能值也就越大。由

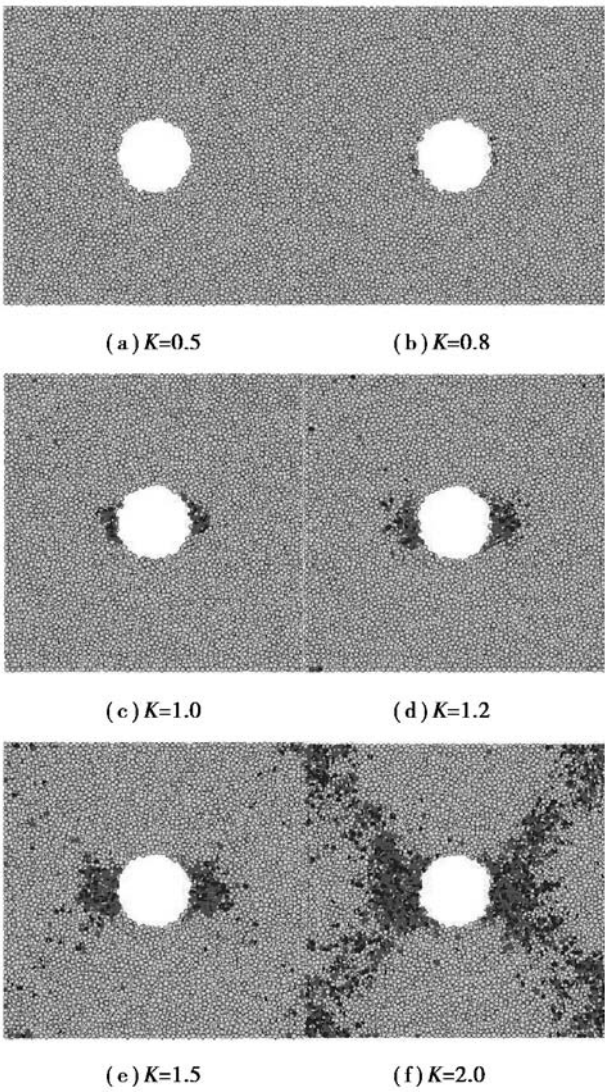


图 7 不同埋深下巷道围岩的破裂空间分布模式

Fig. 7 Spatial distribution pattern of surrounding rocks cracking under different buried depth

图 9 可知,巷道开挖后横断面岩体裂隙分形盒维数 D 与 K 呈线性关系: $D=0.005\ 31+0.8141\ 1K$;岩体总裂纹数 n 与 K 呈指数增长关系: $n=1\ 365.7e^{K/0.42}-6\ 491.6$ 。

4 与模型巷道开挖加载结果的对比

4.1 物理试验设计

物理试验选用透明岩体相似材料来模拟本文巷道工程岩体,其模型长宽高分别为 400 mm、350 mm、150 mm,模拟实际岩体范围为 13.2 m×11.6 m×5.0 m,模型巷道直径为 90 mm(实际为 3 m),几何相似比 C_L 和容重相似比 C_γ 分别为 33 和 2.29。以抗压强度作为主要指标来进行透明岩体模型材料的配制,根据现有研究成果^[12,14],为使透明岩体相

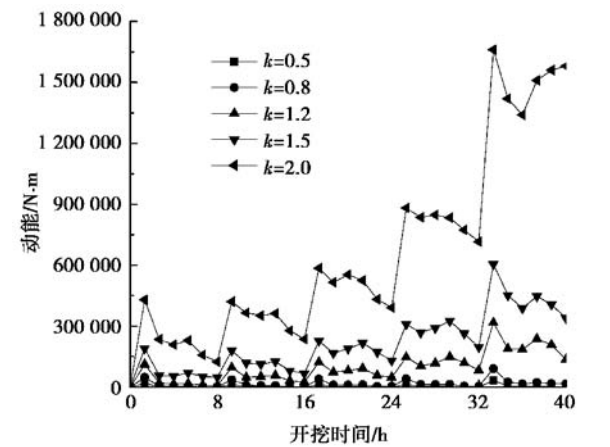


图 8 不同埋深下巷道围岩的动能变化曲线

Fig.8 Kinetic energy change curve of surrounding rocks under different buried depth

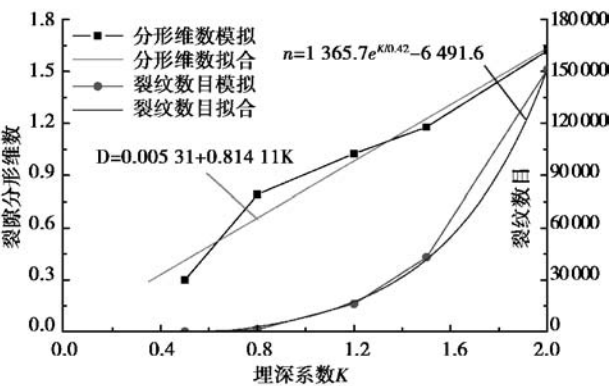


图 9 不同埋深下巷道围岩裂隙分形维数和裂纹数目

Fig. 9 Cracking fractal dimension and number of cracks in surrounding rocks under different buried depth

似材料具有相应的强度,需对模型进行为期 30 d 的固结,且固结应力应为 1 MPa。并由边界面力相似比可得,在巷道开挖过程中,模型顶部应施加的荷载大小为 0.318 MPa(实际为 24.0 MPa)。当模型开挖完成后,对模型顶部进行加载来模拟巷道埋深对围岩变形破裂的影响,如图 10 所示。

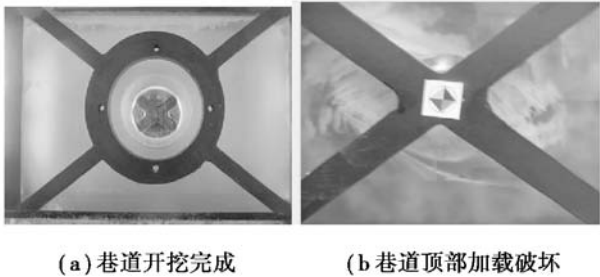


图 10 透明岩体物理试验模型

Fig. 10 Physical test model using transparent rock

4.2 变形结果比较

将物理试验的巷道开挖加载结果与数值模拟结果进行对比,如图 11~13 所示。不难看出,相对埋深系数为 1.0~1.5 时物理试验和数值模拟两者得出的巷道围岩变形大小与规律大体一致,即随着埋深的增大:①巷道顶部底部岩体的竖向位移也将逐渐增大,但其最大值仍是出现在拱顶和拱底位置,并由拱顶和拱底处往外侧逐渐递减;②巷道两侧岩体的水平位移将逐渐增大,但最大水平位移却一直出现在巷道两侧拱腰附近;③巷道周边岩体的径向位移将与巷道埋深呈指数增长关系,但巷道两帮拱腰处岩体的径向位移要明显大于拱顶和拱底;④巷道横断面顶底板岩体与帮部岩体的交错分离现象越来越明显。当相对埋深系数在 1.5 以上时,由于物理实验和数值模拟两者的破裂区域大小存在较大差别,导致顶底部岩体发生整体性滑动失稳的时刻与滑动位置也存在较大不同,所以,这两者的岩体径向位移在此时就差别较大。

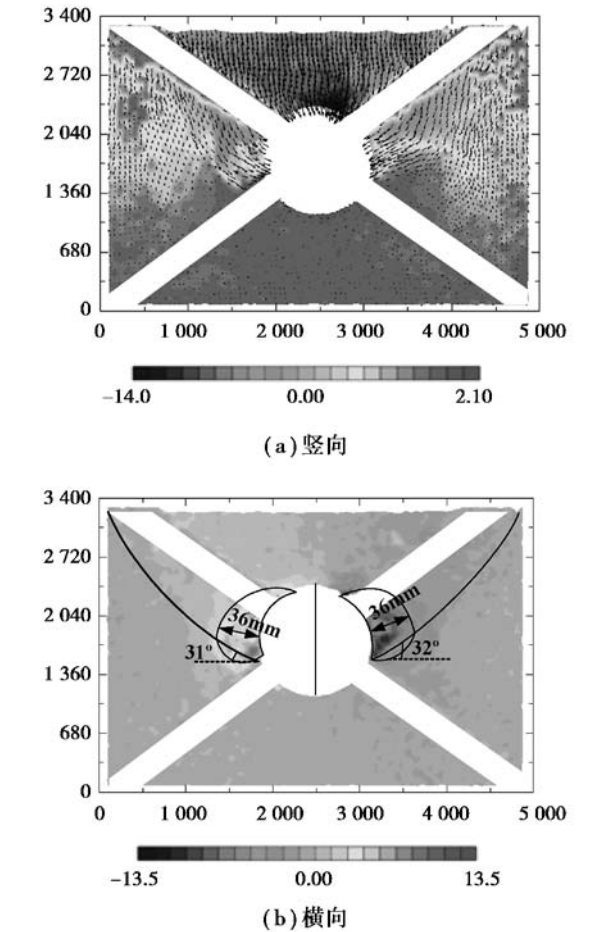


图 11 模型巷道加载破坏位移云图

Fig.11 Displacement contours of roadway model under loading damage

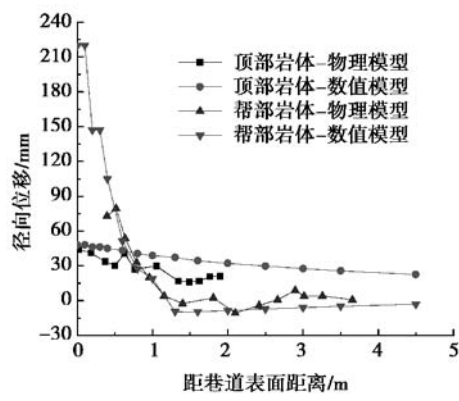


图 12 K = 1.5 时围岩径向位移的空间分布对比
Fig. 12 Comparison of the radial displacement distribution of surrounding rocks when K = 1.5

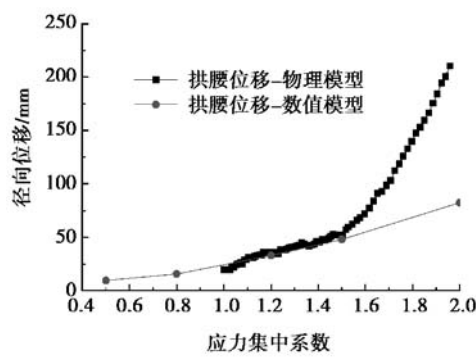


图 13 围岩径向位移随巷道埋深的变化规律对比
Fig. 13 Comparison of the rules that surrounding rocks radial displacement changing with burying depth

4.3 破裂结果比较

对比物理试验和数值试验的巷道破裂结果,由图 14、图 15 以及图 10(b) 容易看出,物理试验与数值模拟两者得出的巷道围岩破裂区域范围存在较大差别,但破裂位置与裂纹发展规律基本保持一致:①随着埋深的增大,巷道顶底板的岩体都基本不发生破裂,而巷道帮部岩体的破裂则往巷道深部和顶底板方向逐渐扩展,破裂范围越来越大;②巷道横断面岩体的宏观裂纹数目与巷道埋深呈指数增长关系;③随着埋深的加大,岩体在横断面两条对角线附近产生的张拉或剪切微裂纹将逐渐增多,即巷道顶底部岩体将沿对角线附近的一个平面或弧面向巷道内发生整体性剪切滑动,导致巷道失稳破坏。

5 结论

本文以一条深部巷道工程为背景,对不同埋深下无构造应力圆形巷道岩体的变形破裂时空演化规律展开了研究,得到了以下结论:

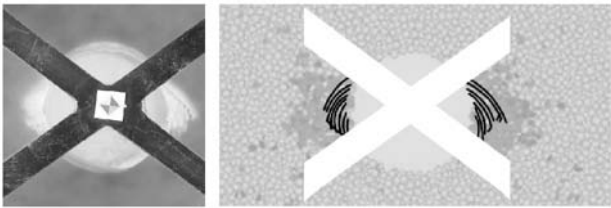


图 14 K = 1.5 时裂隙的分布形态对比
Fig. 14 Comparison of distribution pattern of cracking when K = 1.5

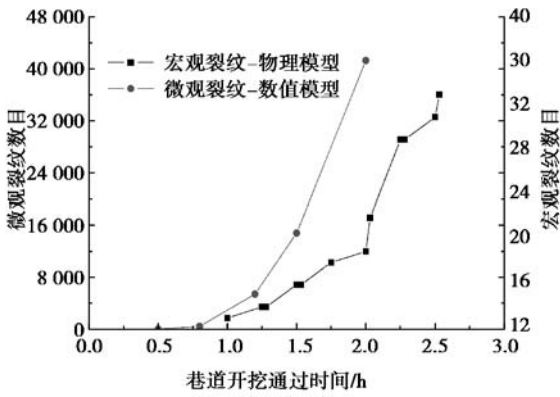


图 15 围岩裂纹数目随巷道埋深的变化规律对比
Fig. 15 Contrast variation for numbers of surrounding rock cracks with depth

- (1) 不考虑片帮剥落处的岩体,巷道最大竖向位移总是出现在拱顶和拱底位置,并由拱顶和拱底处往外侧呈“花瓣式”逐渐递减,且埋深越大,这种向外递减的速度和范围也会越来越大。
- (2) 巷道两帮岩体在浅部出现往巷道内的水平位移,在深部出现往外的水平位移。同时,巷道顶底板岩体与帮部岩体会约在模型两个对角线方向上发生水平交错分离现象。
- (3) 巷道周边岩体的径向位移都与其距巷道表面的距离呈指数衰减式分布,且随着埋深的增大,巷道周边岩体的连续性变形现象将越来越不明显。
- (4) 随着巷道埋深的增加,巷道两帮岩体破裂逐渐往深处及拱顶底方向扩展,其破裂程度和破裂范围逐渐增大,该部分岩体承载能力逐渐降低。最终,巷道顶底部岩体会因在拱腰处“立足不稳”而发生类似于边坡的滑坡失稳现象,形成“X”型破裂。
- (5) 巷道开挖后横断面岩体裂隙分形盒维数与巷道埋深呈线性增长关系,而岩体总裂纹数则与埋深呈指数增长关系。

参考文献(References)

- [1] 胡静, 刘杰, 宛良朋, 等. 丹巴水电站高埋深下含片理试验洞稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增2): 2012-2018. (Hu Jing, Liu Jie, Wan Liangpeng, et al. Research on the stability of simulation test hole in rock foliation angles of deeply-buried rock of Danba hydropower station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(Supp. 2): 2012-2018. (in Chinese))
- [2] 周宏伟, 谢和平, 左建平. 深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(1): 91-99. (Zhou Hongwei, Xie Heping, Zuo Jianping. Developments in researches on mechanical behaviors of rocks under the condition of high ground pressure in the depths[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(1): 91-99. (in Chinese))
- [3] 查文华, 华心祝, 陈登红. 基于实测地应力深埋巷道塑性区定量分析[J]. 实验力学, 2013, 28(5): 657-662. (Zha Wenhua, Hua Xinzhua, Chen Denghong. Quantitative analysis of plastic region in deep buried tunnel based on in-situ stress test [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2013, 28(5): 657-662. (in Chinese))
- [4] 王贵君. 节理裂隙岩体中不同埋深无支护暗挖隧洞稳定性的离散元法数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1154-1157. (Wang Guijun. DEM analysis on stability of unsupported tunnels in jointed rock masses at different depths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1154-1157. (in Chinese))
- [5] 程立朝, 陆庭侃. 埋深对巷道交岔点围岩稳定性的影响[J]. 西北煤炭, 2006, 4(1): 40-43. (Cheng Lichao, Lu Tingkan. The influence of mining depth to country rock stability of roadway intersections [J]. Northwest Coal, 2006, 4(1): 40-43. (in Chinese))
- [6] 李彦斌, 杨永康, 苏学贵. 埋深对巷道围岩稳定性影响研究[J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(6): 603-606. (Li Yanbin, Yang Yongkang, Su Xuegui. Study on the stability of surrounding rocks of a coal roadway in different depth [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(6): 603-606. (in Chinese))
- [7] 方建勤, 夏才初, 卞跃威, 等. 隧道埋深对二衬合理支护时机影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 263-267. (Fang Jianqin, Xia Caichu, Bian Yuewei, et al. Analysis on relationship between tunnel depth and supporting time of secondary liner[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2): 263-267. (in Chinese))
- [8] 李倩倩, 张顶立, 张成平, 等. 不同埋深下暗挖隧道施工的地层响应[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(1): 27-33. (Li Qianqian, Zhang Dingli, Zhang Chengping, et al. Ground response caused by undercutting subway tunnel under different overburden depths [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(1): 27-33. (in Chinese))
- [9] 唐康皿. 不同埋深隧道围岩稳定性问题研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014. (Tang Kangmin. Stability study on the tunnel surrounding rock with different buried depth [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [10] 刘先珊, 董存军. 三维颗粒流数值模型的胶结砂岩力学特性[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(2): 37-44. (Liu Xianshan, Dong Cunjun. Research on mechanical characteristics of the cemented sandstone based on 3dimensional PFC numerical model [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(2): 37-44. (in Chinese))
- [11] 吴谦, 王常明, 宋朋燃, 等. 黄土陡坡降雨冲刷试验及其三维颗粒流流-固耦合模拟[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 977-985. (Wu Qian, Wang Changming, Song Pengran, et al. Rainfall erosion experiment for steep loess slope and fluid-soil coupling simulation with PFC3D[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 977-985. (in Chinese))
- [12] 林志斌, 李元海, 高文艺, 等. 非构造应力下圆形巷道的内部变形破裂规律研究[J]. 采矿与安全学报, 2015, 32(3): 977-985. (Lin Zhibin, Li Yuanhai, Gao wenyi, et al. Research on the internal deformation and cracking law of circular tunnels under non-tectonic stress [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 32(3): 977-985. (in Chinese))
- [13] 徐金明, 谢芝蕾, 贾海涛. 石灰岩细观力学特性的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(增2): 390-395. (Xu Jinming, Xie Zhilei, Jia Haitao. Simulation of mesomechanical properties of limestone using particle flow code [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp.2): 390-395. (in Chinese))
- [14] 许国安. 深部巷道围岩变形损伤机理及破裂演化规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011. (Xu Guoan. Research on the mechanism and evolution law of rock deformation and cracking around deep tunnels [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011. (in Chinese))