

# 地震作用下巷道破坏模拟和实验对比分析\*

刘书贤<sup>1</sup>, 张森林<sup>1</sup>, 魏晓刚<sup>2,3</sup>, 路沙沙<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 郑州航空工业管理学院 土木建筑工程学院, 河南 郑州 450046;  
3. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 基于工程结构波动及结构动力学理论, 建立煤矿采空区岩层的动力学方程, 将小型室内相似振动台实验结合 ANSYS 有限元数值计算, 对比分析巷道的地震动力破坏特征。研究发现: 在地震作用下, 在拱形和圆形巷道的几何中心水平线正负 45° 区域以及拱形巷道底角处的剪应力、主应力最显著, 而在拱形巷道的两底角及顶板处易产生破坏, 圆形巷道的顶板产生了裂纹, 圆形巷道的最大主应力及剪应力分布偏向右侧; 拱形巷道最大主应力偏向右侧, 剪应力呈对称分布, 拱形巷道的两底角及顶板易产生破坏。在巷道的抗震设计中, 可对巷道受力薄弱处加强加固和采取抗震措施, 提高巷道的抗震性能。

**关键词:** 巷道; 地震波; ANSYS; 相似材料实验

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)04-0661-07

## 0 引言

煤炭是我国主要能源之一, 分别占能源生产和消费总量的 76% 和 69%, 是我国国民经济和社会发展不可缺少的物资基础。我国煤炭资源丰富, 探明储量达 10 202 亿吨, 其中可开采储量 1 891 亿吨; 目前我国的煤炭产业仍然处在“高开采、低利用、高排放”的状况之中(薛冰, 2012)。煤矿不断开采致使煤矿不断深入地下, 煤矿巷道的安全问题显得尤为重要。一般情况下, 岩体地下工程由于受到岩体介质强约束作用, 其抗震性能明显优于地上结构(Lanzano *et al.*, 2008)。尽管如此, 国内外的震害调查统计发现, 由于地震的作用, 地下巷道也出现了损伤、破坏。陈晓祥和韦四江(2008)基于柴里矿二水固南轨上山实际的地质情况, 应用 UDEC 数值模拟分析了初始地应力对巷道围岩稳定性的影响。吴多华等(2016)采用 FLAC3D 数值模拟分析了地震荷载对巷道稳定性的影响, 指出地震作用会使巷道发生低鼓和冒顶现象。姜耀东等(2005)研究了放炮震动下巷道围岩失稳机理, 指出放炮震动波导致围岩产生裂纹并诱发了煤层和顶底板间滑动。马行东等

(2005, 2006)、李海波等(2005)通过研究西部强震区地震波的不同参数对地下洞室的动力响应, 得出地震波的入射方向、空间不均匀性对地下洞室的动力响应的影响主要与地下洞室的埋置深度、地应力等因素有关。

目前我国关于煤矿巷道的研究多是静力荷载作用下的巷道支护方面或静载作用下巷道的破坏方面的研究。即使是动荷载作用下, 巷道的响应研究多是采用数值模拟, 而相似材料振动台试验方面的研究较少。本文结合 ANSYS 数值模拟计算分析和相似材料试验结果对比分析, 对地震作用下巷道的响应问题进行研究。

## 1 地震作用下煤矿巷道-围岩结构动力响应的分析方法

在地震波作用下煤矿巷道围岩介质在水平方向(x 方向)上会发生一定的位移, 假设在地震波作用下煤矿采空区围岩所产生的应力为  $\sigma$ , 应变为  $\varepsilon$ , 位移为  $\mu$ (魏晓刚等, 2016)。

在围岩介质的弹性变形阶段, 岩体内纵向地震波传播的波动方程为:

$$\frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2017-01-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474045, 51174038)和河南省高等学校重点科研项目(16A560013, 16A560012)共同赞助。

式中:  $u' = u - u_0$  为地震波引起围岩介质发生的位移;  $c_0$  为地震波在岩体中的传播速度。

由工程结构波动理论可知, 在围岩介质的岩体中  $c_0^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}$ ,  $\lambda$ 、 $\mu$  均为拉梅常数, 可以判断地震波的传播速度与岩体的材料性质密切相关。

对 (1) 式进行求解可以得到:

$$\mu'(x, t) = f(x - c_0 t) + g(x + c_0 t) \quad (2)$$

式中:  $f(x - c_0 t)$  为地震波入射纵波的波动方程,  $g(x + c_0 t)$  为地震波反射纵波的波动方程。地震作用下在围岩介质的弹性变形阶段, 分别求解地震波作用下煤矿巷道围岩在水平方向上所产生的应力  $\sigma$ 、应变  $\varepsilon$ 、位移  $u$  的数值解:

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\partial' u_x}{\partial x} = \varepsilon_0 + \frac{\partial f(x - c_0 t)}{\partial x} + \frac{\partial g(x + c_0 t)}{\partial x} \\ \sigma = E \varepsilon = E \varepsilon_0 + E \frac{\partial' u_x}{\partial x} = E \varepsilon_0 + E \frac{\partial f(x - c_0 t)}{\partial x} + E \frac{\partial g(x + c_0 t)}{\partial x} \\ u = \frac{-\partial' u_x}{\partial x} = - \left( c_0 \frac{\partial f(x - c_0 t)}{\partial x} + c_0 \frac{\partial g(x + c_0 t)}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (3)$$

对上式进行积分求解, 可以得到地震作用下煤矿采空区围岩结构体系的应变能为:

$$U = \int_0^A \int_0^{\varepsilon T} \sigma d\varepsilon dA \quad (4)$$

通过分析煤矿巷道围岩在地震作用下所产生的应力、应变、位移可以较为直观地判断煤矿巷道-围岩介质的动力稳定性。由于部分煤矿巷道的埋置深度较大, 此时煤矿巷道及围岩介质所承受的矿山岩层压力加大。在外界动力荷载的扰动下, 即使是较小的扰动荷载, 围岩介质所承受的应力都有可能超过自身的屈服应力, 导致围岩进入塑性损伤状态, 此时围岩发生动力失稳破坏的可能性较大。

## 2 相似材料实验

### 2.1 实验设计

材料配合比参照了康希并和张建义 (1988) 相似材料的配比, 砂: 石灰: 石膏: 水 = 5: 0.5: 0.5: 0.6, 如图 1 所示。拟定模型的几何相似比为 1/20, 容重比为 0.7, (模型容重在 1.5 ~ 1.8 g/cm<sup>3</sup>

间较为合适), 弹性模量相似比为 1/20。抗压强度为 1/20。选择的实际岩体抗压强度为 20 MPa, 则模拟材料的强度约为 1.0 MPa。

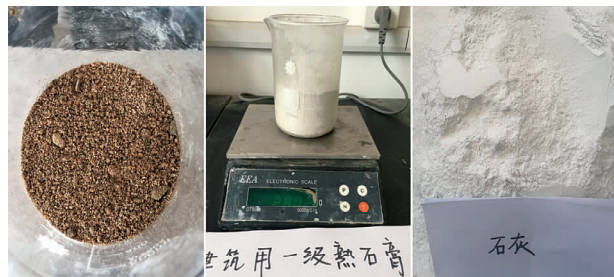


图 1 相似材料组分

Fig. 1 Similar material components

模具设计为 40 mm × 40 mm × 100 mm 的长方体相似材料试块, 磨具中心为巷道, 巷道分两种形式, 分别为半径为 4 cm 的圆形巷道和底宽为 8 cm 的直墙拱形巷道。巷道及周围岩土体磨具设计如图 2 所示。



图 2 巷道模型磨具

Fig. 2 Roadway model tool

按照上述配比制作相似材料, 材料用量为砂子 46.528 kg, 石灰 4.652 8 kg, 石膏 4.528 kg, 水 5.568 kg。先将材料搅拌均匀后, 最后分两次加入水, 再次搅拌均匀, 相似材料的制备完成。浇注放入磨具, 经振捣严实, 再将其表面进行摸平处理, 对成型的试件进行衬砌保护, 衬砌材料为厚 6 mm 的水泥砂浆组成, 水泥砂浆配合比为水泥: 砂: 水 = 1: 6.9: 2.18。按材料强度的相似比, 水泥砂浆强度约为 1.35 MPa 最后放在实验室进行养护, 如图 3 所示。



图 3 巷道模型养护  
Fig. 3 Model of roadway maintenance

3 天后对其进行拆模，待 7 天后成型将模型立起，对巷道内部进行拍照，圆形巷道内部如图 4 所示。



图 4 巷道成型观测图  
Fig. 4 Roadway forming observation

试验时首先施加竖向正弦波，频率为 5 Hz，振动时间为 20 s，试验试块并未发现裂纹。改变频率为 1 Hz，振幅为 5 mm，加速度约为 0.1 g。振动时间为 20 s。实验仪器见图 5。

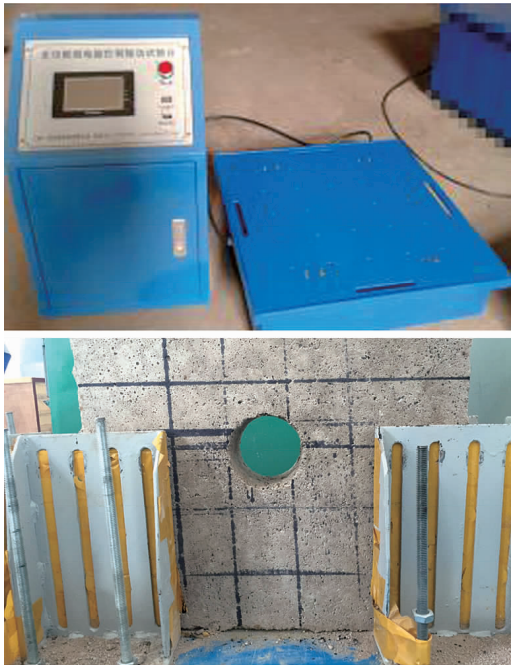


图 5 小型振动台  
Fig. 5 Small vibration table

3 巷道地震动力响应数值模拟

3.1 数值模型的建立

位于黑龙江省的七台河煤矿开采 3#煤层，地质地层主要分层及物理性能参数如表 1 所示。

表 1 各岩层力学参数						
Tab. 1 The rock mechanics parameter						
岩层编号	厚度/m	密度/kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa
砂质泥岩	7.5	2 130	2	0.35	36.45	21.62
II 页岩	8.4	2 589	3.8	0.18	41.12	16.27
12 煤	0.5	1 360	2.9	0.32	40.21	20.13
III 砂岩	2.5	2 642	2.0	0.25	40.20	24.65
砂质泥岩	3.1	2 130	2	0.35	36.45	21.62
C25 混凝土（衬砌）	0.3	2 378	28	0.2	—	—

根据表 1 中参数，利用有限元软件 ANSYS 对其进行建模如图 6，主要模拟巷道区域岩层的初始地应力，最后再进行地震加速度时程输入，对模型进行动力分析。模型简化后宽为 1 050 m，高度

为 1 010 m，沿巷道轴线纵向长度为 12 m。网格划分为 5 m 左右的单元网格，巷道周围网格加密处理，大小是 1.5 m 的网格单元。地应力的确定，以水平地应力与竖向地应力比值，作为侧压力系数，

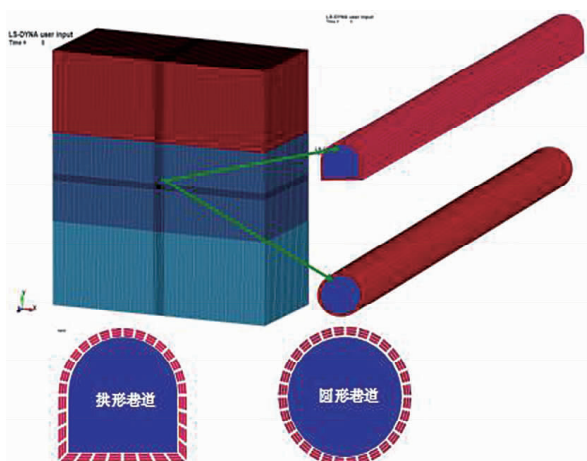


图6 巷道三维模型

Fig. 6 Roadway 3D model

通常情况取值范围在 0.5 ~ 5.5 之间, 模型中侧压力系数取值为 0.5。巷道截面分别取两种截面, 即直墙拱形、圆形, 巷道埋深为 400 m。

围岩和衬砌采 (C25 混凝土) 用 Solid164 实体单元, 巷道围岩级别为本文中所写的页岩即 II 类岩石。

### 3.2 地震波的调整 and 选取

地下结构所在的场地类型决定了它本身的一些特性, 当地震波周期与场地结构特征周期相近或相同时, 结构的地震动力响应最为强烈。所以地震波的选取首先要考虑的就是与场地相关的场地类别、地震烈度和卓越周期等。而地震波本身的三要素也是要考虑的重点, 即地震动峰值、地震动持时和地震动频谱特性, 最后地震波要进行选取和修正 (陈厚群等, 1996; Clough, Penzien, 1983; 王智军等, 2013)。以地震波 EL - Centro 波加速度时程输入, 最大加速度为 0.15 g, 持续时间为 15 s。并对地震波进行基线校正处理后再进行输入, 修正后的加速度时程曲线如图 7 所示。直墙拱形底边长为 4 m, 高为 4 m, 拱上部为半径为 2 m 的半圆, 两侧直墙高度为 2 m。圆形巷道半径为 2 m。

## 4 数值计算与实验结果对比分析

以圆形巷道的几何中心为圆心, 做极坐标的 S1 (最大主应力) 和 SXY (平面剪应力) 范围如图 8a、b 所示, 即在整个地震动过程中, 主应力及剪应力变化的范围图, 其中等值线处受力为 0。巷道各点以径向方向计算, 距离等值线越远, 则此

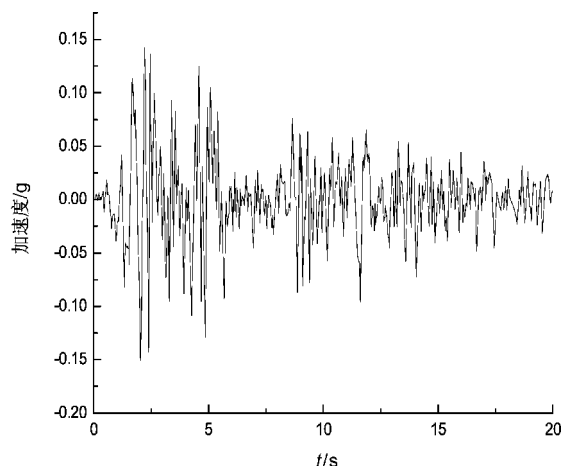


图7 修正后的 EL - Centro 波

Fig. 7 EL - Centro wave after correction

点的剪应力越大。零等值线以内, 剪应力为负, 零等值线以外剪应力为正。

图 8a、b 中, 在  $0^\circ \sim 90^\circ$  以及  $180^\circ \sim 270^\circ$  巷道所受的压应力大于巷道其它部分, 最大压应力值达到 5 MPa, 而最小压应力为 0.5 MPa; 拉应力基本为 0。巷道所受的应力值明显偏于右上顶角和左下底角处, 即极坐标  $45^\circ$ 、 $225^\circ$  处。圆形巷道在约  $60^\circ \sim 84^\circ$  及  $240^\circ \sim 264^\circ$  正剪应力较大, 最大值达到 7.51 MPa, 最小值为 0。最小值集中在  $0^\circ$  和  $180^\circ$ , 即圆形巷道的顶点和底板中心。最大负剪应力发生在两腰处, 最大值达到 2.98 MPa, 并且只有顶点和底点处的剪应力为 0。这说明巷道在水平地震作用下, 巷道的  $60^\circ \sim 84^\circ$ 、 $240^\circ \sim 264^\circ$  处最易受到正负剪应力作用。圆形巷道在 EL - Centro 水平方向地震波的作用下, 巷道所受最大主应力以及剪应力并不是对称分布的, 而是偏向于一侧, 偏向为  $45^\circ$  及  $215^\circ$ , 在正弦波作用下, 以 15 Hz 为振动频率, 持续振动, 在 75 s 时圆形巷道顶板及底板底板都出现细小的裂纹。在持续震动过程中, 巷道围岩受力是在拉压、正负剪交替作用下进行, 并不是某个区域只受一种力的作用。

对比分析图 8 发现, 地震作用下, 圆形巷道的最大主应力以及剪应力分布并不对称, 而是偏向巷道右侧。

由拱形巷道受力图可见 (图 9a、b), 在 EL - Centro 水平地震波作用下, 直墙拱形巷道的右侧拱受的压应力最大, 其次是左底角处压应力较大, 其中左脚处也受到一定的压应力。左侧拱和右底角处也是应力集中处, 巷道几何中心最大主应力

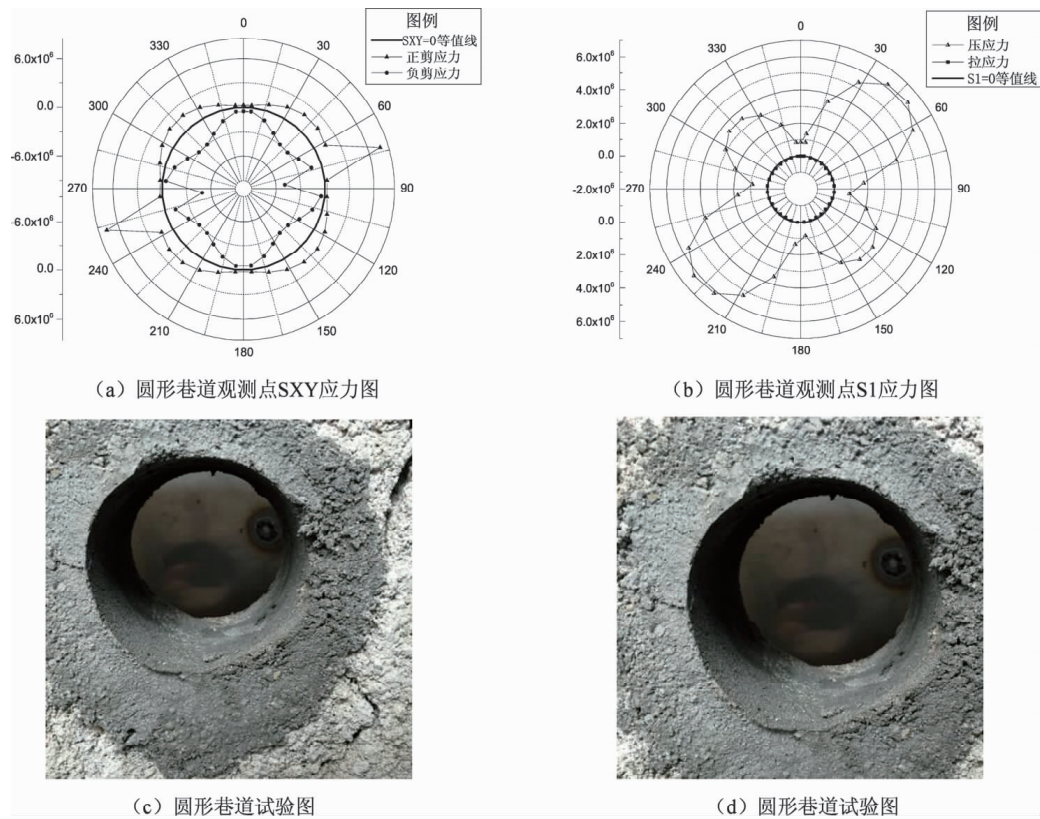


图8 圆形巷道观测点 SXY 和 S1 应力分布和试验结果对比图

Fig. 8 Comparison of stress distribution and test results of SXY and S1 in circular tunnel test

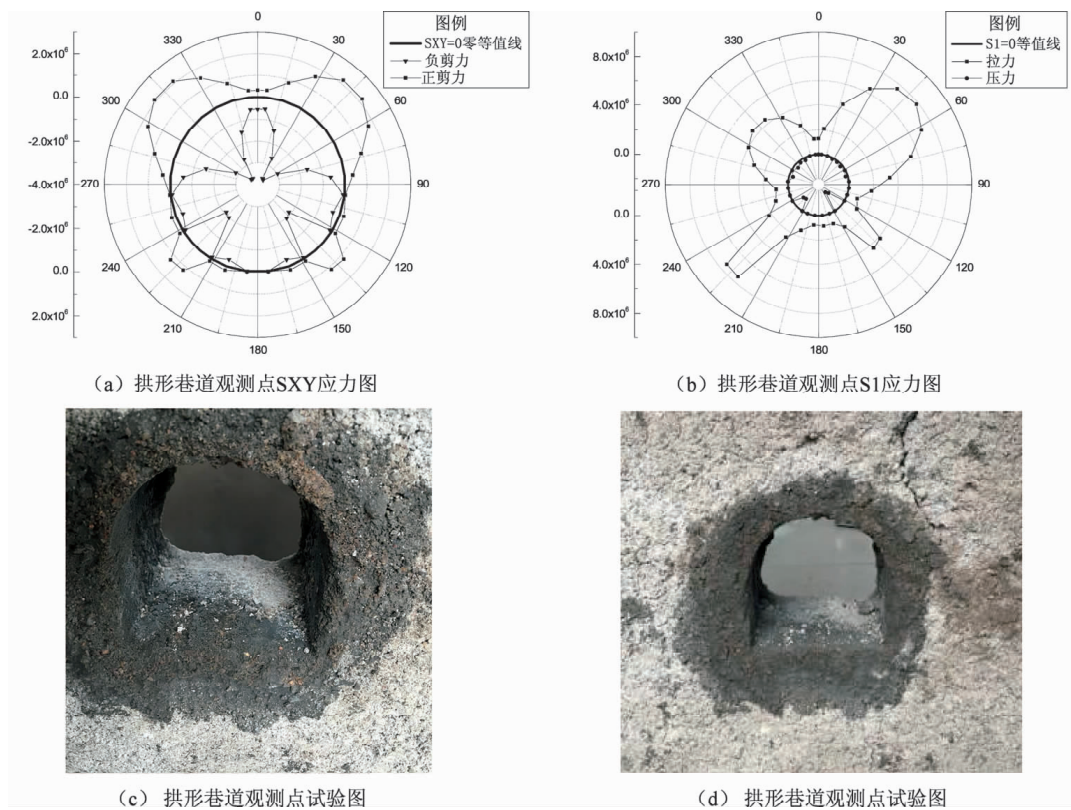


图9 拱形巷道观测点 SXY 及 S1 应力分布和试验结果对比图

Fig. 9 Arched roadway observation points SXY and S1 stress and experimental contrast figure

分布并不是完全对称的,偏向角度为 $45^{\circ} \sim 225^{\circ}$ 。在极坐标中的 $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $315^{\circ}$ 最大主应力最为尖锐,也就是巷道的两侧拱及底角处应力集中明显,巷道的拱两侧及底角处易发生剪切破坏。底板是最稳定的部位,剪应力值为0。极坐标中的 $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $315^{\circ}$ 处剪应力值最为尖锐。剪应力基本呈对称分布,这与主应力偏向一侧不同。剪应力基本呈几何对称分布,在 $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $315^{\circ}$ 剪应力尖锐,两侧拱、底角处正负剪应力值都较大,巷道衬砌易发生剪切破坏。直墙拱形巷道的两侧受到压应力及正负剪应力作用。在 $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $315^{\circ}$ 出现了最大的主应力和剪应力。

拆除拱形巷道的内部模具后,发现拱形巷道的内壁有细小碎屑的脱落。正弦波作用下,在45 s时巷道的两底角先出现开裂,地震波的剪切作用,正负剪应力周期性的作用,巷道的几何突变加重了拱形巷道底角处的应力集中。随着振动持续进行,巷道的顶板处出现了裂纹,剪应力反复作用导致了底角发生挤压和剪切破坏(图9c、d),而顶板由于垂直方向的压应力过大,而产生裂纹。两种截面的巷道都在顶部出现了裂纹,这是由于巷道顶部在开挖后会受到拉应力作用,而岩石的抗拉强度极低,约为抗压强度的1/10。在地震的反复周期荷载作用下,巷道的顶板都产生了裂纹。而在拱形巷道偏向右侧出现了帮部裂纹。拱形巷道最大主应力偏向右侧,而剪应力呈对称分布。拱形巷道的相似试验破坏形式与数值模拟试验中的破坏形式较为吻合。

从实验和数值计算分析结果对比中可以得出:在相似试验中,巷道的顶板都发生了破坏,这与数值模拟结果有所偏差,这可能与相似材料强度过低有关,两种截面的巷道在顶部都出现了裂纹,由于巷道顶部在开挖后会受到拉应力作用,而岩石的抗拉强度极低,约为抗压强度的1/10。在地震的反复周期荷载作用下,巷道的顶板都产生了裂纹。但总体上数值模拟与相似试验中巷道的破坏形式相吻合。

## 5 结论

采用数值模拟软件 ANSYS 模拟了地震作用下拱形巷道及圆形巷道的应力、剪力范围和位移时程曲线,并进行了巷道围岩相似材料试验,以试

验的形式研究了拱形和圆形巷道的破坏形式。通过对比分析试验所得的巷道破坏形式得到以下结论:

(1) 地震作用下,圆形巷道的最大主应力分布在偏右 $45^{\circ}$ ,剪应力分布在偏右 $75^{\circ}$ 左右。拱形巷道最大主应力偏右 $45^{\circ}$ ,最大剪应力呈对称分布。圆形、拱形巷道顶板都发生了破坏,拱形巷道两底角处最先发生破坏。

(2) 振动持时越长,地震波的反复周期性荷载对巷道的不利性越大,圆形巷道的抗震性优于拱形巷道。地震作用下,巷道会受到剪应力、拉压应力,而圆形巷道在整个地震过程中受拉力基本为零而拱形巷道受到了拉力作用。

(3) 在地震波作用下,拱形巷道的两底角及侧拱处易发生破坏,这在相似材料实验及数值模拟中得到了相互验证。

## 参考文献:

- 陈厚群,李敏,张艳红. 1996. 300 m 级高拱坝抗震技术研究——地震危险性分析和地震输入机制研究成果汇编[R]. 北京:中国水利水电科学研究院.
- 陈晓祥,韦四江. 2008. 初始地应力场对煤矿巷道围岩稳定性的影响[J]. 矿冶工程,28(6):1-4.
- 姜耀东,赵毅鑫,宋彦琦,等. 2005. 放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳机理分析[J]. 岩石力学与工程学报,24(17):3131-3136.
- 康希并,张建业. 1988. 相似材料模拟中的材料配比[J]. 淮南矿业学院学报,(2):50-64.
- 李海波,马行东,邵蔚,等. 2005. 地震波参数对地下岩体洞室位移特性的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报,24(S1):4627-4634.
- 马行东,李海波,肖克强,等. 2006. 动荷载作用下地下岩体洞室应力特征的影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报,26(2):164-169,228.
- 马行东. 2005. 地震动荷载作用下地下洞室响应的初步分析[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所).
- 王智军,王斌,李银文. 2013. 结构动力弹塑性分析地震波的选取原则[J]. 兰州理工大学学报,39(4):138-142.
- 魏晓刚,麻凤海,刘书贤. 2016. 煤矿采空区岩体结构及地面建筑地震安全防护. [M]. 北京:科学出版社.
- 吴多华,乔卫国,李伟,等. 2016. 地震荷载对巷道稳定性影响分析及控制技术[J]. 煤矿安全,47(3):79-82.
- 薛冰. 2012. 浅析我国煤炭资源发展现状[J]. 科技广场,(2):25-27.
- CLOUGH R W, PENZIEN J. 1983. 结构动力学[M]. 王光远等,译. 北京:科学出版社.
- LANZANO E, BILOTTA G, RUSSO. 2008. Tunnels under seismic loading: a review of damage case histories and protection methods[C]. Mitigation of the earthquake effects in towns and in industrial regional districts.

## Comparative Analysis of Simulation and Experiment of Roadway Damage under the Effect of Earthquake

LIU Shuxian<sup>1</sup>, ZHANG Senlin<sup>1</sup>, WEI Xiaogang<sup>2,3</sup>, LU Shasha<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

(2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450046, Henan, China)

(3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

### Abstract

In order to study the dynamic instability mechanism of roadway structure under earthquake loading. Engineering structure fluctuation and structure based on the kinetic theory, the establishment of coal mine goaf rock dynamics equation, the small interior similarity calculation of ANSYS finite element numerical shaking table experiment combined with comparative analysis of seismic dynamic, dynamic characteristics of roadway. Study results show, in the arched and circular tunnel geometric center horizontal line of  $\pm 45^\circ$  regions and the arch tunnel at the bottom corner of the shear stress, principal stress is the most significant, while in the two corners and roof arch roadway damage is easy to produce, the roof of a circular tunnel crack, the maximum principal stress of circular tunnel and the distribution of shear stress are shown on the right direction under the earthquake effect. The maximum principal stress of arch roadway is on the right side and the distribution of shear stress and the two corner roof and arched tunnel are easily damaged. Strengthening and anti-seismic measures to the weak strength of the roadway will improve the seismic performance of roadway in the seismic design of roadway.

**Keywords:** roadway; seismic wave; ANSYS; similar material test