

基于 ANSYS/LS-DYNA 的矿区 地下巷道三维动力响应分析*

刘书贤¹, 刘少栋¹, 魏晓刚^{2,3}, 麻凤海⁴

(1. 辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 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;
4. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要: 为研究煤矿地下巷道在地震作用下的动力响应, 考虑巷道结构的损伤效应, 基于显式算法的土结构体系动力学方程, 建立 ANSYS/LS-DYNA 三维数值模型, 并在模型指定位置设置观测点。通过观测点的动力响应特征研究巷道的动态响应。结果表明: 巷道在地震作用下, 半拱形巷道应力主要分布在拱帮和墙角立板、底板处, 且拱帮和墙角处塑性体积应变明显, 巷道墙角处的损伤明显大于其他各部, 是巷道容易发生破坏的部位。

关键词: 地下巷道; 动力响应; 有限元分析; 地震作用; ANSYS/LS-DYNA

中图分类号: TD32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2016)01-0022-06

0 引言

近年来, 随着我国煤炭资源开采的增多, 我国煤矿区形成了大量形式各异、大小功能不同、纵横交错的地下巷道。我国 80% 的矿区处于地震多发区, 由于缺少完善的地下结构抗震设计规范, 巷道在地震作用下的稳定性值得我们关注, 因此研究巷道的地震动力响应特征及其变化规律十分必要。孙超等 (2009) 已经对地下结构的动力稳定性问题做了大量研究: 刘晶波等 (2005) 对地铁盾构隧道的地震响应进行了数值分析; 刘书贤等 (2013) 研究了煤矿采动与地震耦合作用下建筑物灾变机理; 章泳健等 (2010) 基于 LS-DYNA 研究了隧道的初应力计算方法; 姜耀东等 (2005) 分析了放炮震动引发煤矿巷道动力失稳的机理; 高富强等 (2009) 分析了动力扰动下巷道围岩力学响应。

对于地下结构的研究比较多的是对地铁等浅埋结构的研究, 但对于地震作用下巷道响应的研究较少, 且考虑因素单一, 对于巷道结构在地震中的损伤 (赵宝友, 2009)、岩层分布及其与巷道的接触和波动效应未给予充分的考虑。本文针对

煤矿开采地下巷道在初始应力场和地震共同作用下巷道的地震响应研究的不足, 基于 ANSYS/LS-DYNA 的显式动力有限元模型, 考虑巷道在地震过程中的损伤及巷道与围岩的接触效应, 在模型边界设置无反射边界, 对煤矿采煤地下巷道进行了三维数值地震动响应分析研究。

1 巷道围岩-结构体系动力有限元分析

由于巷道结构与围岩之间存在相互作用, 在分析巷道围岩体系结构的同时还要对结构围岩进行分析。围岩作为一种半无限介质, 在数值计算中一方面主要是通过引入人工边界 (如粘性边界、粘弹性边界等) 模拟连续介质的辐射阻尼, 保证散射波能量从有限区域穿过人工边界 (何伟, 2011)。另一方面是模拟围岩的非线性, 本文考虑围岩材料非线性和接触非线性, 围岩采用 D-P 理想弹塑性模型, 就可以很好地描述围岩的非线性行为。

1.1 巷道围岩-结构体系动力方程

根据达朗贝尔原理可以建立该体系地震动作用下任意时刻有限元平衡方程 (克拉夫, 彭津, 2006):

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P. \quad (1)$$

* 收稿日期: 2015-11-16.

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) 联合资助.

式中， \boldsymbol{M} 为质量矩阵， \boldsymbol{C} 为阻尼矩阵， \boldsymbol{K} 为刚度矩阵， \boldsymbol{P} 是节点荷载向量； \boldsymbol{u} 、 $\dot{\boldsymbol{u}}$ 、 $\ddot{\boldsymbol{u}}$ 分别是体系的位移、速度和加速度。该运动方程一般将整个地震过程分成若干微小时间段 h ，假设体系在微小时间段内体系是线性变化的，然后采用直接积分法解得，LS - DYNA 采用显式中心差分法，即：

$$\dot{\boldsymbol{u}}_t = \frac{\boldsymbol{u}_{t+h} - \boldsymbol{u}_{t-h}}{2h},$$
$$\ddot{\boldsymbol{u}}_t = \frac{\boldsymbol{u}_{t+h} - 2\boldsymbol{u}_t + \boldsymbol{u}_{t-h}}{h^2}.$$

(2)

阻尼采用 Rayleigh 阻尼，它是将结构整体阻尼矩阵 \boldsymbol{C} 表示成整体质量矩阵 \boldsymbol{M} 和整体刚度矩阵 \boldsymbol{K} 的线性组合： $\boldsymbol{C} = \alpha \boldsymbol{M} + \beta \boldsymbol{K}$ ，式中比例常数 α 和 β 阻尼系数可以由振型阻尼比计算得到，在 LS - DYNA 中通过关键字 * DAMPING 设置 (LSCT, 2007)。

2 地震作用下巷道 - 围岩动力失稳演化分析

2.1 有限元分析模型

建立三维有限元模型，模型尺寸为 Y 向 610 m， X 向 660 m， Z 向 300 m；岩层和巷道物理力学性能如表 1，岩层分布如表 2。巷道为半拱形巷道，拱直径 4 m，巷道的纵向长度为 200 m，衬砌厚度为 400 mm。围岩和巷道衬砌使用 solid164 体单元，人工边界采用无反射边界。岩层材料

采用理想弹塑性 DP 材料，巷道结构采用 C50 混凝土，LS - DYNA 中通过 * MAT_ 072R3 材料模型实现巷道损伤本构。

2.2 地震波的选取与调整

国内外研究表明，选取地震波需满足强

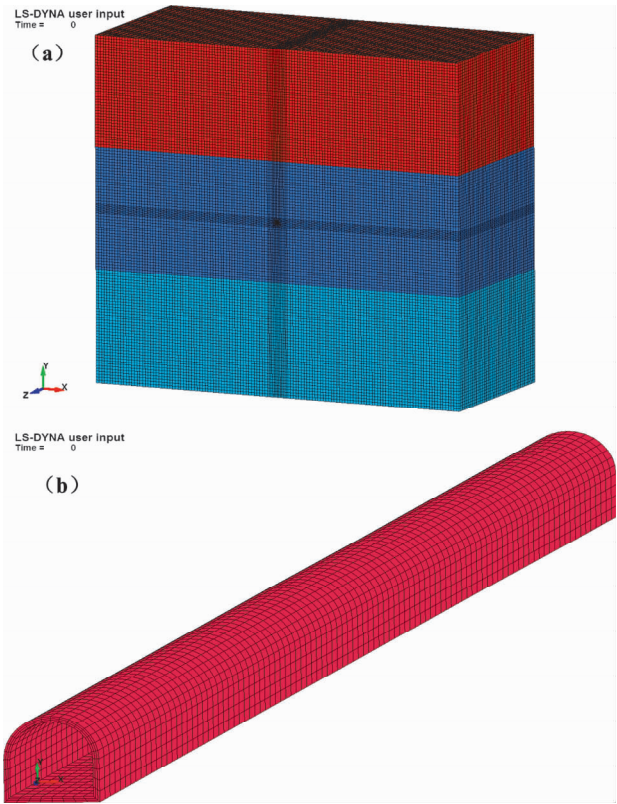


图 1 围岩 (a)、巷道 (b) 有限元模型
Fig. 1 The finite element model of rock (a) and roadway (b)

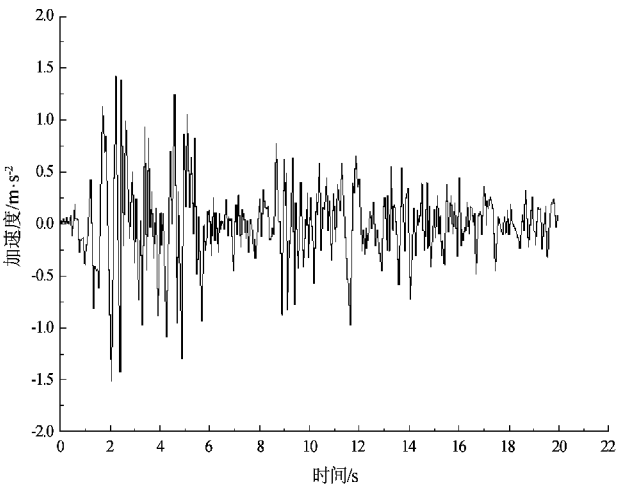


图 2 El Centro 地震波 (南北向)
Fig. 2 El Centro earthquake wave (NS direction)

表 1 岩层力学参数

Tab. 1 The rock mechanics parameter				
参数	I 类围岩	II 类围岩	III 类围岩	混凝土
密度/kg · m ⁻³	2 200	2 700	2 800	2 493
弹性模量/GPa	5. 2	21	26	31. 5
泊松比	0. 26	0. 2	0. 22	0. 26
内摩擦角	29. 5	27. 8	32. 1	—
粘聚力/MPa	1. 7	27. 2	34. 7	—

表 2 岩层分布

Tab. 2 Strata distribution		
岩层数目	岩层类别	岩层厚度/m
第 1 层	I 类围岩	196
第 2 层	II 类围岩	213
第 3 层	III 类围岩	200

度、频谱特性、波的持时的要求,不同地震波参数得出的地震响应可能相差明显,因而选择合理的地震波参数进行动力分析是必要的。本文选用了 15 s 的 El Centro 地震波,最大加速度调整为 150 cm/s^2 ,如图 2 所示,地震波在基岩底部沿 X 水平输入。

2.3 数值模拟结果分析

在巷道 100 m 处截取截面,并在截面不同部位设置观测点,如图 3 所示。

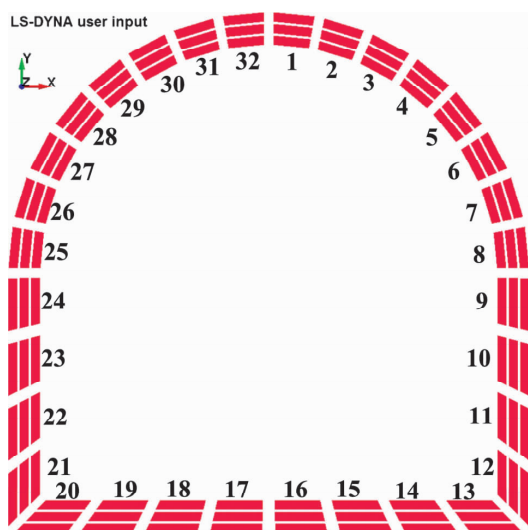


图 3 巷道观测位置

Fig. 3 Observation position of the roadway

2.3.1 巷道应力分析

图 4 为巷道应力的典型分布图,从图中可知,巷道的等效应力和 S1 主要分布在墙角和拱帮偏下, S3 主要分布两侧拱腰处;最大剪应力在墙角处最大,拱帮偏下处次之;这说明巷道的墙角立板和拱腰处成了高应力集中区。

图 5 为巷道取 100 m 纵深截面时不同部位的最大应力(等效、S1、S3、剪应力),由图可知,等效应力、S3 和最大剪应力的峰值在左右拱帮偏下的位置(5、6、7、26、27、28 号点)和墙角立板的位置(12、13、20、21 号点);S1 峰值在左右拱帮偏下(8 号点)和左右立板腰部(10、11、22、23 号点)位置;这说明巷道的拱帮偏下和墙角是拉、剪复合最大应力区,巷道的立板腰部主要受拉应力作用;地震作用下的高应力反复的加、卸载会对巷道的这些部位造成较大破坏,对于在拉、剪复合应力区的拱帮和墙角破坏更明显,墙角处尤其明显。

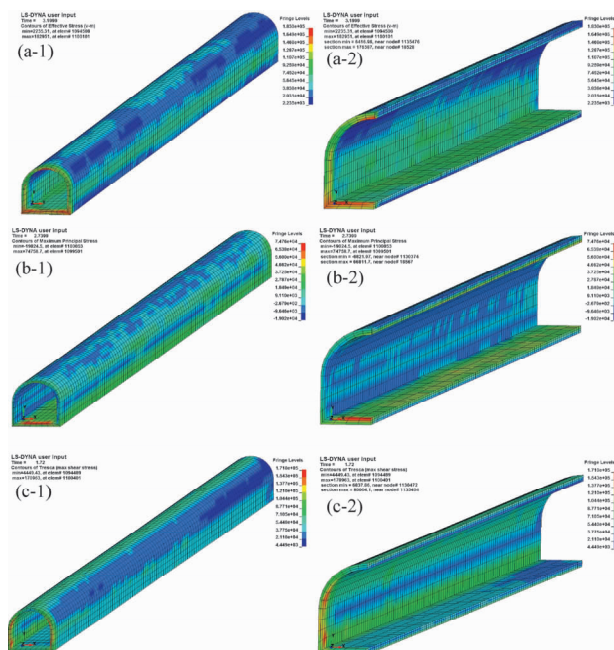


图 4 巷道等效应力 (a)、S1 应力 (b) 最大剪应力 (c)

Fig. 4 Effective stress (a), S1 stress (b) and maximum shear stress (c) of the roadway

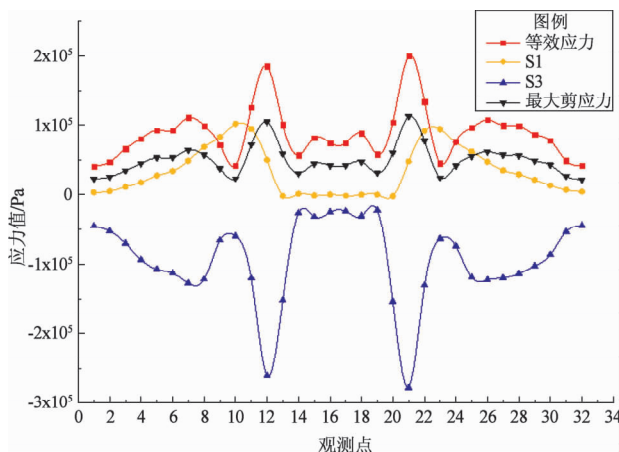


图 5 巷道截面应力最大值

Fig. 5 The maximum stress value of cross section of the roadway

2.3.2 损伤分析

图 6 为巷道的塑性体积应变,从图中可知巷道拱帮发生了明显的塑性体积应变,且由巷道中部向巷道两端扩展时,巷道的塑性体积应变有减小的趋势,但是在巷道的两个端部又有所增大,造成巷道两端塑性体积应变有所增大的主要原因是端部边界条件不同;其次在巷道内侧的墙角处也出现了明显的塑性体积应变,在巷道发生塑性体

积应变的部位(巷道帮部、腰部至墙角立板)积累了明显的损伤,这些损伤使得巷道在这些部位更容易遭到破坏。

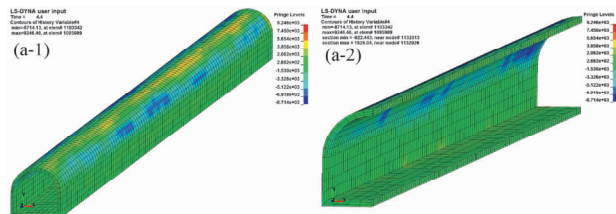


图6 巷道塑性体积应变

Fig. 6 Plastic volume strain of the roadway

图7为巷道取100 m纵深截面时不同部位的最大塑性体积应变,由图可知,巷道的左右帮部(5、28号点)和墙角底板(13、20号点)的塑性体积应变最为明显,这说明巷道的左右帮部和墙角底板会发生相对于其他部位更明显的变形,这可能造成帮部开裂、墙角底板翘起,同时伴随着小块石飞溅。由于巷道的墙角立板(13、21号点)和帮部偏上(5、28号点)的塑性变形较为明显,因此在这两处积累损伤较为明显,其中墙角底板

损伤尤为严重,这说明在地震作用过程中,墙角立板在拉、剪应力反复作用下会积累大量的损伤,拱帮偏上损伤程度也要明显大于其他部位,这会造成墙角立板和拱帮偏上处最先发生破坏,随着这种破坏的扩展,就可能引发立板和上帮失效,进而引发整个巷道的破坏。

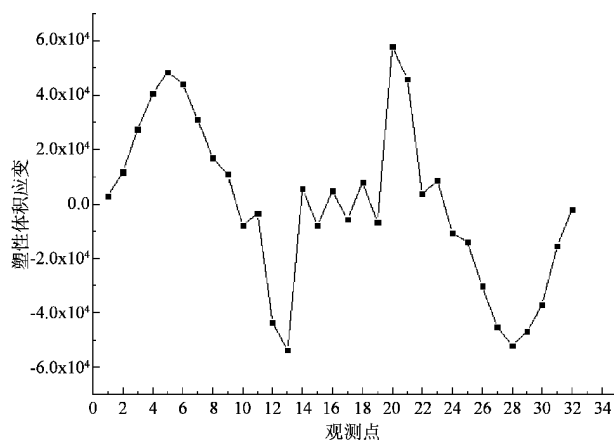


图7 巷道截面塑性体积应变最大值

Fig. 7 The maximum value of plastic volume strain of cross section of the roadway

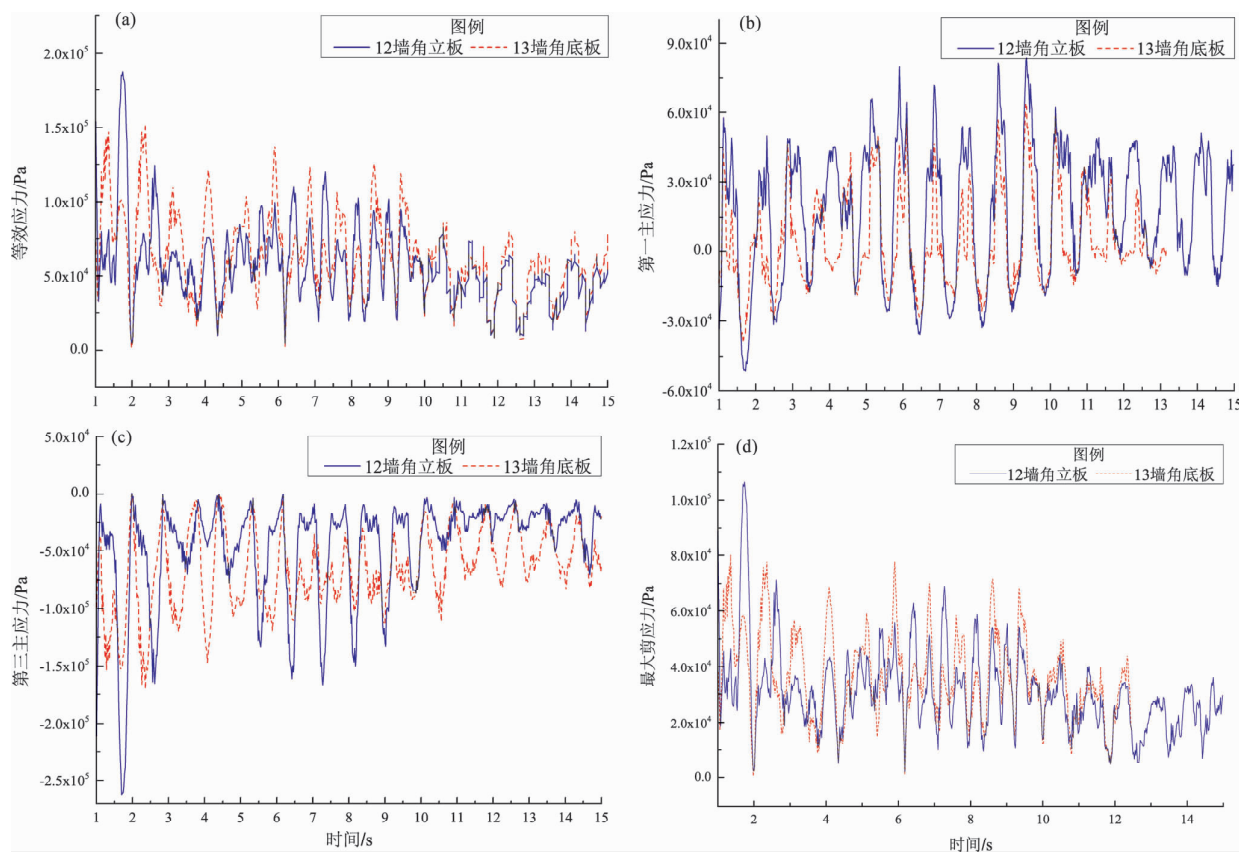


图8 巷道截面等效应力(a)、S1应力(b)、S3应力(c)、最大剪应力(d)时程曲线

Fig. 8 The effective stress(a)、S1 stress(b)、S3 stress(c) and maximum shear stress(d) of cross section of the roadway

2.3.3 时程分析

由上述可知,地震作用过程中巷道的墙角处应力最为复杂,变形最为明显。本节提取了巷道墙角 12 和 13 号观测单元的应力和塑性体积应变的时程曲线。分析图 8 的巷道墙角立板和底板的应力时程曲线可知:巷道墙角的应力在 $t=2\text{ s}$ 和 $t=8\text{ s}$ 会出现两个峰值,在基道取 100 m 纵深截面的前提下, $t=2\text{ s}$ 时的应力峰值与输入加速度的峰值时刻基本一致, $t=8\text{ s}$ 的应力峰值较加速度峰值有所提前;巷道墙角立板的等效应力在整个时程中小于墙角底板的等效应力, S1 应力的墙角立板的应力大于底板的应力, S3 应力中间时刻较为明显,最大剪应力墙角底板在整个过程中基本大于立板。

图 9 为巷道墙角的塑性体积应变时程曲线。由时程曲线可知立板和底板的塑性体积应变变化基本一致,底板的塑性体积应变大于立板的,从而使得底板的损伤大于立板。故可得出在整个地震过程中,半拱形巷道的墙角底板应作为抗震的重点防护部位。

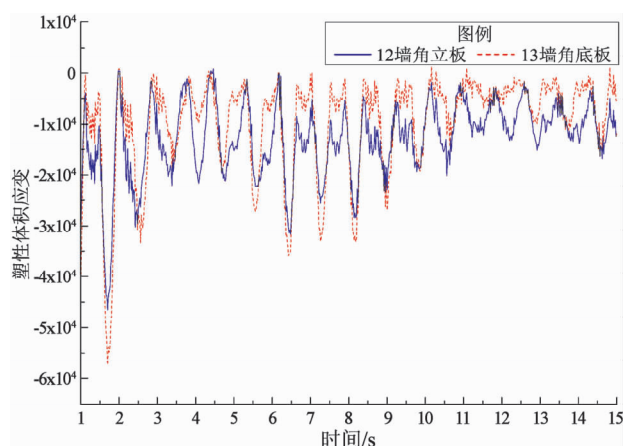


图 9 巷道截面塑性体积应变时程曲线

Fig. 9 Plastic volumetric strain time history curve of cross section of the roadway

3 结论与讨论

本文基于显式动力有限元理论,分析研究了地震作用下地下巷道结构动力响应及其损伤破坏,

利用 ANSYS/LS-DYNA 建立了地下巷道地震作用下的三维计算模型,通过有限元分析计算得到如下结论:

(1) 地震作用下巷道结构的拱帮和墙角处会出现周期性高应力集中区域,在墙角处会出现拉、剪同时达到最大,说明了半拱形巷道的拱帮和墙角最容易发生动力破坏,在巷道的拱帮偏下和墙角处会发生明显的塑性变形以及发生较严重的损伤,需要重视对巷道结构拱帮和墙角的设计,同时也要及时进行加固维护,以保证巷道结构的安全使用。

(2) 地震动力荷载作用下巷道的拱帮和墙角容易发生塑性变形和损伤,引发巷道变形开裂甚至混凝土块塌落、墙角底板翘起出现裂缝等破坏现象,由于地下巷道工程地质背景的复杂性,对于巷道发生的破坏类型,需要根据巷道的实际破坏现象及工程背景进行分析计算,来保证计算的可靠性。

(3) 地震发生初期,巷道的墙角底板破坏明显强于墙角立板,可能会发生墙角立板破裂引发巷道腰部立板倾斜下沉,造成巷道塌落,导致巷道产生整体失稳破坏。

参考文献:

- 高富强,高新峰,康红普. 2009. 动力扰动下深部巷道围岩力学响应 FLAC 分析[J]. 地下空间与工程学报,5(4):680-685.
- 何伟. 2011. 地下结构地震响应及其与地表建筑的影响研究[D]. 大连:大连理工大学.
- 姜耀东,赵毅鑫,宋彦琦. 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.
- 克拉夫 R,彭津 J. 2006. 结构动力学[M]. 王光远,译. 北京:高等教育出版社.
- 刘晶波,李彬,谷音. 2005. 地铁盾构隧道地震反应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版)2005,45(6):757-760.
- 刘书贤,魏晓刚,王伟等. 2013. 煤矿采动与地震耦合作用下建筑物灾变分析[J]. 中国矿业大学学报,42(4):526-534.
- 孙超,薄景山,齐文浩等. 2009. 地下结构抗震研究现状及展望[J]. 世界地震工程,25(2):94-99.
- 章泳健,金先龙,王建炜等. 2010. 基于动力松弛原理的地下隧道工程初始应力场计算方法研究[J]. 现代隧道技术,47(4):6-11.
- 赵宝友. 2009. 大型岩体洞室地震响应及减震措施研究[D]. 大连:大连理工大学.
- LSTC. 2007. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL[M]. California: Livermore Software Technology Corporation.

3D Dynamic Response Analysis of Underground Tunnels in Mining Area based on ANSYS/LS – DYNA

LIU Shuxian¹, LIU Shaodong¹, WEI Xiaogang^{2,3}, MA Fenghai⁴

(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, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

(4. *College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, Liaoning, China*)

Abstract

In order to study the dynamic response of underground tunnel in coal mine area under the action of earthquake, considering the damage effect of the tunnel structure and the soil structure dynamic equation based on explicit algorithm, we established the 3D ANSYS/LS – DYNA numerical model, and set the observation point in the specified location in the model. Through studying the dynamic response characteristic of observation point, we analyzed the dynamic response characteristics of the roadway. The results show that under the seismic action, the stress of semi arch roadway mainly distribute in the arch help, the stand plate and bottom plate of the corner of the wall, and the plastic volumetric strain is obvious at the arch help and at the corner of the wall, the damage in the corner of the roadway which is easy to damage significantly is greater than that of other ministries.

Key words: underground tunnel; dynamic response; finite element analysis; seismic action; ANSYS/LS – DYNA