

文章编号: 1673-3363-(2015)03-0511-07

煤矿井巷上方大型老滑坡复活机理与致灾过程

龙建辉¹, 张吉宁^{1,2}

(1. 太原理工大学地球科学与工程系, 山西 太原 030024;

2. 山西冶金岩土工程勘察总公司, 山西 太原 030002)

摘要 我国不少矿井直接坐落在高陡斜坡或老滑坡的坡脚, 工程活动使边坡失稳或使老滑坡复活诱发地质灾害现象时有发生。对大型老滑坡而言, 其复活变形持续时间长、滑移方向因应力场条件变化而改变、且具有多级非连续破坏等特征, 给滑坡的稳定评价与科学防治带来难题。本文以朱家店煤矿滑坡为例, 通过现场勘查和监测研究, 详细查明了滑坡区工程地质条件、滑坡复活的各种诱发因素、滑坡的变形破坏特征以及工程活动与滑坡复活的时空关系等; 在此基础上, 对滑坡在井洞修筑、坡体堆载前后及坡脚开挖不同应力环境下的稳定性和变形特征进行了FLAC^{3D}数值模拟分析, 再现了滑坡质点位移、塑性状态和应变增量的变化规律, 以及滑坡下部采煤巷道的受力和位移的变化特征, 所得结论与现场监测结果一致。

关键词 矿区滑坡; 采空; 成因机理; 数值分析; 稳定性

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.03.026

Revival mechanism and disaster-causing process of old-large landslide on coal mine tunnel

LONG Jianhui¹, ZHANG Jining^{1,2}

(1. Department of Earth Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Shanxi Metallurgical Rock-Soil Engineering Reconnaissance General Company, Taiyuan, Shanxi 030002, China)

Abstract Many coal mines in China are located in the toe of high and steep slopes or old landslide. Engineering activities lead to the geological disasters of slope failure or the old landslide resurrection occasionally. As far as large old landslides are concerned, normally it has a long cycle time for resurrected deformation, with slip direction varying from the conditions of stress field, and multistage destruction bring non-continuous, which also bring many problems in stability evaluation and scientific prevention of the slope. Zhujiadian mine landslide was taken as an example in this paper to figure out the engineering geological conditions in the landslide area, revival factors of landslide, deformation failure characteristics, and the temporal and spatial relationship between the engineering activities and landslide revivification through field survey and long-term monitoring. Furthermore, FLAC^{3D} numerical simulation has been conducted for analyzing the slope stability and deformation under different stress conditions, such as caves construction, before and after the gangue filling and slope toe cutting. Under these circumstances, the change law of landslide of particle displacement, plasticity status and the shear strain increment and the characteristics of stress and displacement in the coal roadway located in the toe

收稿日期: 2013-08-21

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2013011036)

作者简介: 龙建辉(1972—), 男, 湖南省沅江市人, 博士, 副教授, 注册岩土工程师, 从事地质工程方面的研究。

通信作者: 张吉宁

E-mail: 352607016@qq.com

Tel: 18234083670

of landslide have been recreated. The result is consistent with monitoring results in the field.

Key words landslide in coal mine; gob; formation mechanism; numerical analysis; stability

在山西, 矿区滑坡是一种最为常见且致灾最严重的地质灾害类型, 给矿区生命财产及生产运营带来极大安全隐患。很多学者对滑坡的形成机理及致灾过程做了研究。王志荣等^[1]系统总结了国内外在黄土滑坡形成机理等方面所取得的研究成果及进展, 但其成果多是滑带土微观分析方面滑坡单一影响因素的研究。Li 等^[2]对某变电站土体堆载导致的滑坡做过详细的研究, 并且模拟了滑坡变形的过程; Jiao 等^[3]研究了煤矿巷道穿越古滑坡时滑体的稳定性。但对于多重应力因素影响下的滑坡, 尤其是在山西, 很多矿井直接坐落在高陡斜坡或老滑坡的坡脚, 对于井巷上方的大型老滑坡在井洞修筑、坡体堆载及坡脚开挖多重因素综合作用下的变形及形成机制尚未见相关文献。本文为科学地解释这种复杂应力和多重诱因条件下的滑坡评价机理与防治问题, 结合朱家店滑坡, 在详细查明滑坡工程地质条件和监测数据的基础上, 对滑坡在不同应力环境下的稳定性和变形特征进行了 Flac^{3D} 数值模拟, 并与滑坡监测数据对比研究, 验证了该滑坡的复活机理及其致灾过程。

1 朱家店滑坡概况

朱家店煤矿老滑坡规模长约 280 m, 宽约 250 m, 面积近 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均厚度约 25 m, 滑坡体体积约 $143 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。平面图上老滑坡呈圈椅状(见图 1 遥感图), 可清晰地辨别出其后缘, 后缘陡直, 高差 4~6 m。

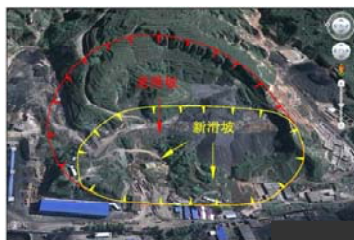


图 1 滑坡区遥感图(来自 Google earth)

Fig.1 Remote sensing map of the landslide

老滑坡基本上沿着粉质黏土及基岩面向滑动, 滑坡前缘在污水处理厂平台前部。本次复活的新滑坡为老滑坡中部及前部的局部滑体, 平面图上呈不规则椭圆状, 其规模长约 150 m, 宽约 210 m, 滑坡面积 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均厚度 15 m, 滑体体积约

$42 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属于中型滑坡。

滑坡地层主要为上覆第四系杂填土(Q_4^{ml})、粉土(Q_3^{dl})、粉质黏土(Q_2^{al})以及下伏二叠系泥岩夹砂岩(P_{2s})(图 2c、图 3), 滑动面有地下水埋藏, 滑体局部区域含有上层滞水。坡体水为大气降水补给, 在坡脚处粉质黏土底部、泥岩顶部有泉水流出, 出水量为 $4.32 \text{ m}^3/\text{d}$ (位置见图 4)。



图 2 滑坡变形特征

Fig.2 Deformation characteristics of the landslide

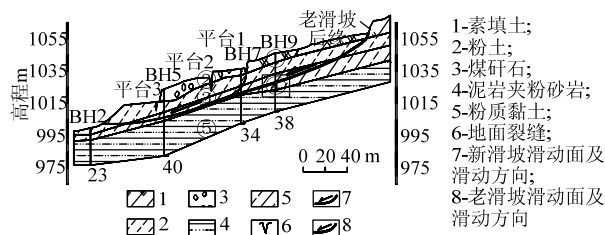


图 3 滑坡地层主剖面(1-1')

Fig.3 Cross section of main stratum of the landslide

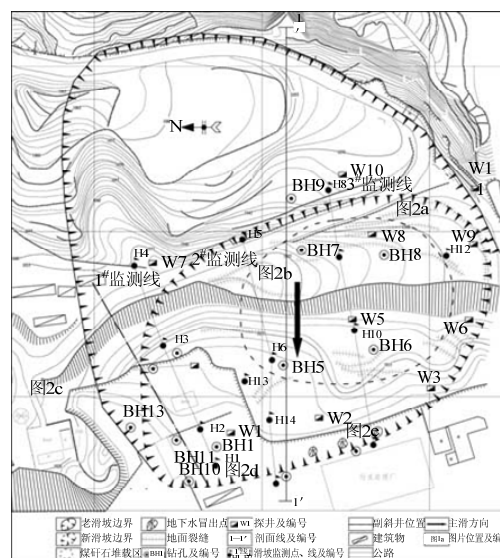


图 4 滑坡地形及平面形态特征

Fig.4 Topographies and planar shape characteristics of the landslide

2 滑坡变形历史与复活机理分析

2.1 滑体变形特征

位于煤矿西南方向坡脚处的副斜井于 1994 年开始建设, 随后井口发生大变形; 2007 年伸缩缝最大宽度达 30 cm, 沉降及侧向位移达 10 cm; 2010 年 10 月 24 日, 在副斜井南侧修建水处理厂时, 由于大面积坡脚开挖, 导致山体近 250 m 宽度范围的土体向外滑出; 10 月 31 日, 坡顶出现大量张拉横向裂缝, 裂缝宽度不断扩大, 单条裂缝长度约 50~60 m, 宽度近 1 m, 裂缝两侧高差近 2 m; 11 月 10 日, 在坡顶后缘裂缝出现滑坡后壁, 裂缝两侧高差近 2 m, 坡脚处土体挤出并发现有地下水渗流而出, 同时井口严重变形, 向地面隆起约 1 m, 向西错动约 80 cm, 向北错动约 50 cm, 致使副斜井停产, 对坡体东北侧在建水处理厂的建设造成严重威胁(见图 2 和图 4)。

新滑坡后缘位于老滑坡坡体中部公路路堤外侧(图 2a), 后缘整体下挫约 2 m, 形成近直立的新滑坡后壁。滑坡后缘发育有大量裂缝, 裂缝近似南北向, 多条裂缝平行间隔分布, 裂缝最长 110 m, 最宽近 1 m, 延伸到坡体中近 8 m 深度。主滑体呈 3 级平台及 2 级台坎(图 2b), 最顶部一级平台沿坡向东西平均宽 20 m, 由南到北宽度逐渐变小, 平台坡度向北增加, 平均坡度 7°; 中部平台位于新滑体中间靠下煤矸石堆积地带(图 2f), 坡体走向南北方向, 平台宽度 10 m 左右且由南到北宽度逐渐变小, 平台坡度近水平; 最底部平台宽约 25 m, 坡度较缓。台坎高度一般 4 m 左右, 局部高差近 20 m, 坡度 38°~43°。滑动面主要为基岩面, 滑体上部为粉质黏土滑面, 滑床基本上为基岩。在滑坡体前部, 滑体从坡脚开挖形成的陡直面上剪出(图 2e)。在坡脚北侧靠近副斜井井口处, 由于变形受阻发生滑动面反翘, 形成了滑坡鼓丘、鼓张裂缝以及井口变形(图 2d)。

2.2 矿井工程结构变形特征

由滑坡导致的工程结构变形主要表现为地表建筑物和副斜井巷道的变形。建筑物出现向西侧变形的拉裂缝, 裂缝宽度 1~5 cm, 从建筑物顶部一直延伸到底部。滑坡导致的变形最严重的是副斜井井口, 井口外地表鼓起, 并分布有鼓张裂缝(图 2d), 结构大变形直接导致矿井停产。井口内部变形主要为巷道护壁伸缩缝处的拉裂, 左侧护壁伸缩缝被压缩得更为密实, 变形主要从护壁顶部伸缩缝处开始

产生裂缝, 向右逐渐延伸扩大; 右侧护壁裂缝从顶部到侧边宽度逐渐增大, 裂缝最宽达到 20 cm, 向下一直延伸到巷道底部。

2.3 老滑坡复活机理

1) 地质条件

老滑坡中已经存在的滑动面对新滑坡的复活起到重要作用。研究区整体为第四系黄土覆盖于二叠系基岩上, 黄土覆盖层下面为基岩, 岩性主要为强风化砂岩夹泥岩, 基岩表面覆盖有一厚层粉质黏土, 属于弱透水层, 其结构松散, 含水率高, 残余抗剪强度低。

2) 煤矿巷道开挖的影响

煤矿历史记录资料表明, 矿井从 1994 年建设初期时, 副斜井井口就不断出现裂缝, 之后裂缝不断扩大。表明从矿井巷道开挖建设穿越老滑坡时, 滑体对巷道产生了较大的集中应力使其变形。

3) 滑体上煤矸石堆载的影响

从 20 世纪 90 年代矿井运营开始, 十几年来中上部滑体表面被厚层的煤矸石堆积覆盖, 厚度达 15~20 m。堆载的同时, 因煤矸石结构松散, 大大增加了雨水的入渗, 随着季节性降水, 致使滑坡体及滑动面含水量不断增加, 既增加了滑体下滑力, 又软化了滑动面强度。

4) 坡脚开挖的影响

2011 年为修建水处理厂在坡脚处大面积开挖直接触发了滑坡的发生, 致使老滑坡中上部在一周之内出现大量裂缝。坡脚开挖大大降低了滑坡坡脚处土体对滑体的阻滑力, 使坡体沿滑面下滑力大于抗滑力, 在坡脚处剪出大量土体并严重塌方阻断道路。

5) 后缘裂缝的加速作用

滑坡后缘裂缝宽度接近 1 m, 裂缝延伸到坡体中最深近 8 m, 大大割裂了滑体后侧, 使滑体抗滑力急速降低; 另一方面降雨沿着裂缝直接渗入滑动面, 加速了滑坡的滑动。

6) 巷道结构变形

从巷道内部变形结构上看到, 巷道内变形是在伸缩缝处发生的, 巷道左侧(靠北一侧)伸缩缝基本没有开裂, 也无前后相互错开现象, 而在右侧洞口处每段伸缩缝裂开宽度都近 20 cm。从力学成因上分析, 巷道右侧在受到侧向应力时, 会发生图 5 所示的一侧发生挤压裂缝密闭, 另一侧弯折裂开, 使巷道破坏。

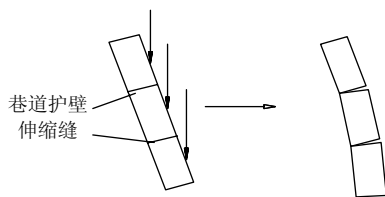


图 5 巷道受力变形分析图

Fig.5 Deformation analysis of coal seam roadway under sliding force

7) 地下水条件

在污水处理厂坡脚开挖时, 坡底出现 3 处滑坡泉眼, 单个泉流量约为 $4.32 \text{ m}^3/\text{d}$ 。滑带土含水量接近饱水状态, 局部区域甚至为流动状态的土体, 表明地下水已经贯通滑带。

3 老滑坡复活机理的数值分析

3.1 力学模型建立

国内黄润秋等^[4]最先将 FLAC 引入工程分析领域, 之后拉格朗日差分分析法在边坡研究中得到广泛应用^[5], 并针对其三维建模的缺陷进行了改进, 使该软件能较好地评价地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的三维力学行为^[6-8]。

本次研究先用程序提取出地形图基础数据, 再使用 Surfer 软件做离散化处理, 然后通过修改 Fish 程序^[9]建立数值模型。模型长 294 m、宽 270 m, 由 51 090 个单元和 29 160 个节点组成。根据地层资料, 所建立模型网格分为 5 个组, 即煤矸石堆载体、滑体土(粉土)、粉土覆盖层、粉质黏土层和泥岩夹粉砂岩。模型材料采用弹塑性材料, 其满足摩尔-库仑屈服准则^[10]。模型四周边界面设置滚支座, 底部分界面设置角支座, 以控制边界位移。在 FLAC^{3D} 中, 模型状态主要通过最大不平衡力、节点速度、节点位移以及塑性状态 4 个指标^[2]来确定模拟计算过程中材料的状态。

3.2 参数及数值模拟过程

计算所需要的参数如表 1 所列。数值模拟过程包括坡体天然条件下开挖巷道后的受力状态模拟、煤矸石堆载后坡体及巷道受力状态模拟、坡脚开挖后坡体及巷道受力模拟 3 个步骤。

1) 天然重力场状态及开挖巷道

为了避免模型网格初始平衡前变形过大而破坏并加快计算收敛速度, 在实现天然应力状态之前, 将网格本构赋予弹性模型及其属性值进行计算, 待计算稳定后将位移场清零, 然后再将网格本

构模型设置为摩尔-库仑模型再次计算, 平衡后观察坡体天然状态下的受力特征。最后将巷道网格模型设置为 null, 再次计算网格至平衡状态, 此时为坡体天然条件下开挖巷道后的受力状态。

2) 坡体煤矸石堆载

首先清除天然重力场条件下节点位移并赋予堆载体网格摩尔-库仑模型及其属性值, 然后在坡体分层堆载煤矸石, 逐次计算平衡, 最后得到煤矸石堆载条件下坡体应力应变及变形状态。

3) 坡脚开挖模拟

在上述 2 个步骤基础上, 逐段开挖坡脚, 给予开挖体网格 null 模型, 计算至平衡状态, 得到坡脚开挖后滑体及巷道受力状态。

表 1 岩土体参数

Table 1 Parameters of rock and soil

岩土类型	体积模量/MPa	剪切模量/Pa	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^\circ$
煤矸石	78.20	42.20	17.1	44.3	32.2
粉土(滑体)	3.58	1.65	18.6	12.4	17.7
粉土	3.86	2.10	19.4	22.5	19.6
粉质黏土(滑带)	4.21	1.88	19.6	9.4	13.8
基岩	8640	2150	21.6	28.2	36.3

3.3 数值模拟结果分析

1) 天然条件下开挖巷道后的受力分析

从图 6a 看到, 巷道建设完成后, 老滑坡已经出现较大位移, 位移方向基本朝向正西方向, 局部斜坡朝向西北方向。当模拟开挖巷道后, 巷道口剪应变增量集中(图 7a), 但在初期时集中量值较小, 塑性破坏网格区域较小(图 7b)。其内在原因是开拓巷道时穿越了松散的老滑体, 巷道承受了较大的推挤作用力。这与初期巷道口出现的细小裂缝情况相一致, 仅局部区域发生破坏。

2) 堆载影响分析

堆载煤矸石后, 通过数值模拟分层堆载计算观察到变形区域扩大, 位移变形增量比初始阶段增加了近 1 倍(图 6b), 质点运动方向与堆载前一致向西运动。老滑体中部粉质黏土与基岩接触面位置出现剪应变增量集中区(图 8a), 其增量大小较低, 塑性网格区得到扩展(图 8b), 但尚未完全贯通。巷道口受到老滑坡近似于巷道方向的推力, 剪应变增量明显扩大(图 8c), 比堆载煤矸石前增加了近 1 个数量级, 且表层局部区域塑性区贯通(图 8d), 发生局部破坏。其内在原因是在老滑体中部堆载了十几年煤矸石后, 滑体的自重不断增加, 随着雨水从后缘裂缝的

不断渗入滑动面, 大大降低了滑体的下滑力和坡体的抗滑力, 虽不足以使滑体整体失稳下滑, 但以黄土为主的滑体蠕变变形足以使坡体及巷道口变形, 这与2010年10月坡脚开挖前巷道口变形一致。

3) 坡脚开挖后坡体分析

2010年10月24日前的几天因修建污水处理厂开挖坡脚, 导致老滑坡复活。通过数值模拟坡脚开挖, 坡体位移较堆载后短时间内位移量扩大1倍(图6c), 质点一致性地向西运动。滑体中间剪应变增量值迅速扩大并在坡体中形成连续界面(图9a), 塑性剪切破坏区域贯通, 坡脚塑性区破坏集中(图9b)。这与坡脚开挖后滑体后缘出现大裂缝, 坡脚发生剪出口且坡脚有滑坡鼓丘现象一致。老滑坡复活发生变形时, 巷道受到与顺其延伸方向近 15° 夹角方向的侧向应力, 巷道口剪应变增量增加迅速(图9c), 井口塑性区域贯通(图9d), 已经发生破坏。通过与

坡体剧烈变形后48 d内的监测数据对比分析(监测期水平方向位移见图10), 位移最大值56.4 mm, 最小值22.3 mm, 变形具有很强的方向性, 移动方向集中在 $255^\circ\sim 277^\circ$, 总体向西, 尤其是巷道右侧附近的1剖面监测线, 表现出一致的近正西方向移动, 即滑体主滑方向, 与数值模拟结果相吻合。其变形量在监测初期位移较大(图11a~c), 后期基本处于稳定状态, 变形接近平衡。沉降数据也表现出与水平方向运动相似的特性(图11d~f), 在滑坡滑动之后的短期内变形迅速, 但随后变形趋于稳定。模拟结果、变形监测结果与巷道口大变形现象一致, 其内在机理是老滑体上大量堆载煤矸石已经使得坡体蠕变增加, 稳定性降低, 坡脚为建设厂矿而前缘坡脚开挖, 大大降低了坡体抗滑力, 加速了滑体蠕变, 直接使得坡体失稳, 产生新的滑坡。

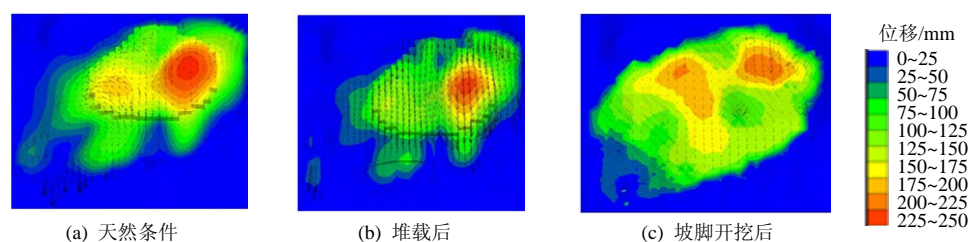


图6 不同影响因素下的滑体位移及速度矢量图

Fig.6 Displacement and velocity vector of landslide

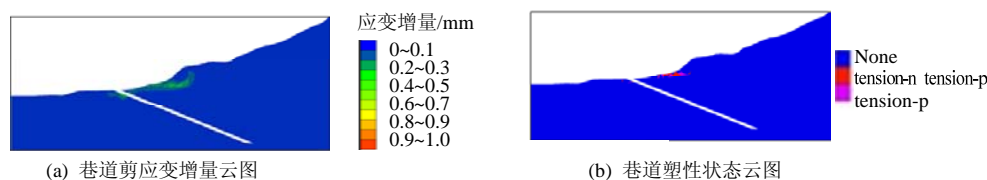


图7 天然条件下开挖巷道后剪应变增量及塑性状态云图

Fig.7 Shear strain increment and plasticity state after excavation

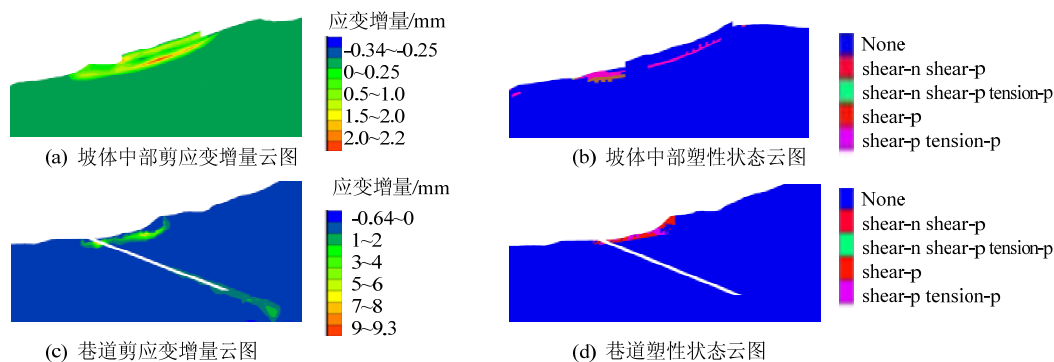


图8 滑体堆载后剪应变增量及塑性状态云图

Fig.8 Shear strain increment and plasticity state after loading on slope surface

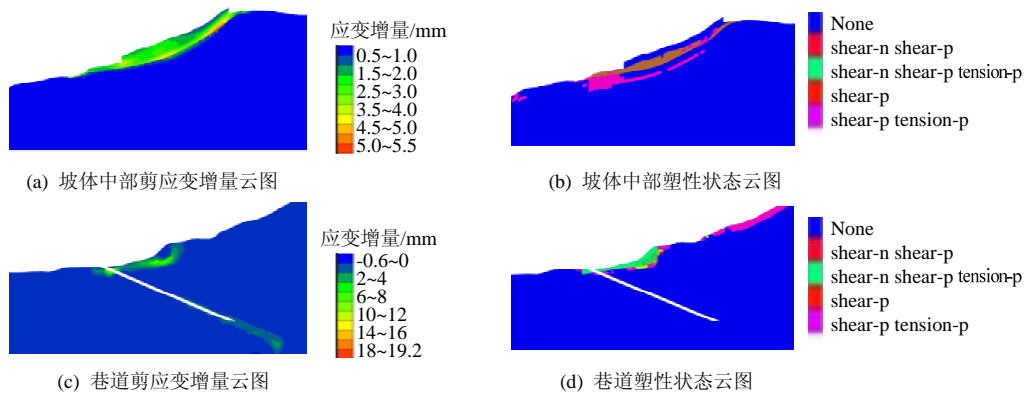


图 9 坡脚开挖后剪应变增量及塑性状态云图

Fig.9 Shear strain increment and plasticity state after cutting at slope toe

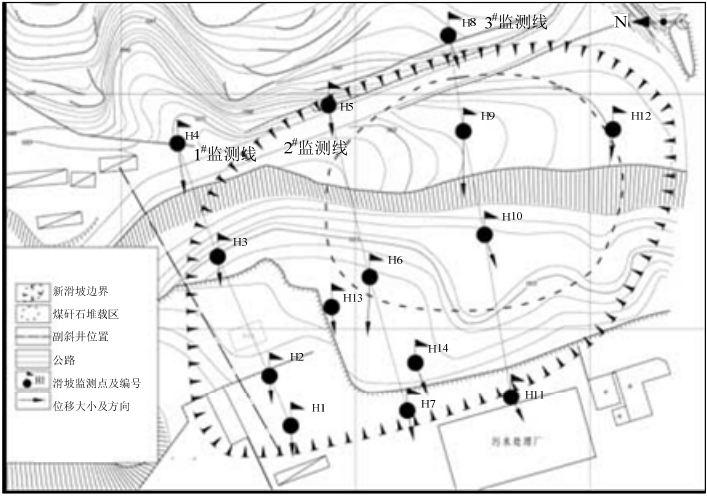


图 10 监测点水平方向位移矢量

Fig.10 Displacement vector of monitoring points in horizontal direction

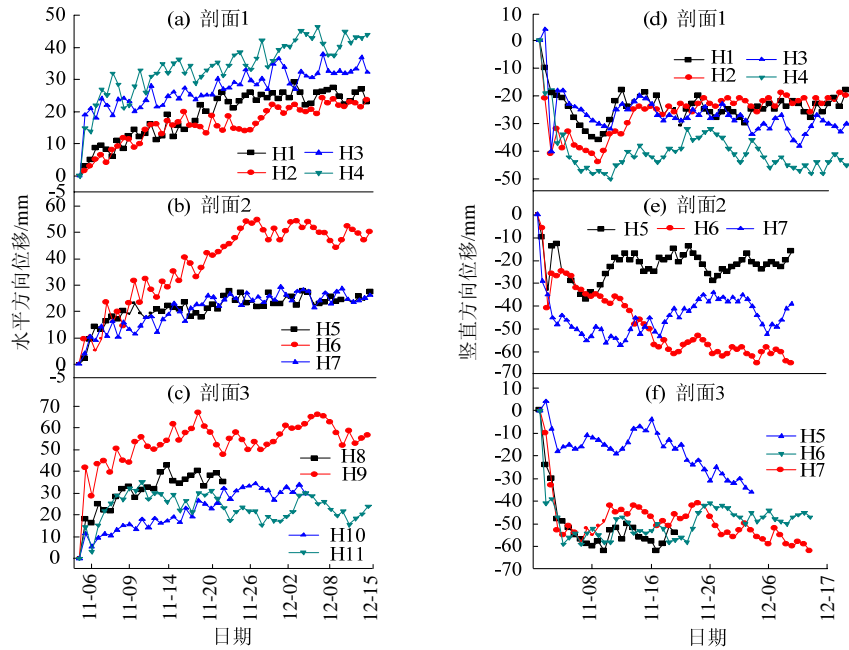


图 11 监测点相对位移-时间曲线

Fig.11 Relative displacement-time curves of monitoring points

4 结 论

以朱家店煤矿滑坡为例, 对在巷道修筑、坡体堆载及坡脚开挖前后不同应力环境下的煤矿巷道和滑坡坡体变形特征进行了 $FLAC^{3D}$ 数值模拟分析, 并结合现场监测资料成果, 得出以下结论:

1) 井洞修筑使应力场条件发生改变, 复活滑体的滑动方向与老滑坡不一致, 滑体在运动过程中沿巷道一侧产生了向近正西方向的偏转, 其滑动方向与巷道方向夹角近 15° , 使巷道内部产生了右侧拉应力集中、左侧压应力集中的现象。

2) 对多重复合成因与应力场条件发生改变的滑坡稳定性分析, 传统的极限平衡法不能解决应力集中以及变形等方面的问题, 尤其很多老滑坡复活过程中受到多种应力的作用, 应力场发生了很大变化, 难以用常规方法确定其变形方向和推力计算区域。应用数值模拟技术可再现滑坡质点位移、速度矢量和应力应变的变化规律, 为滑坡的科学防治提供理论依据。

参考文献:

- [1] 王志荣, 王念秦. 黄土滑坡研究现状综述[J]. 中国水土保持, 2004(11): 16-18.
WANG Zhirong, WANG Nianqin. A summary of present study on loess landslides[J]. Soil and Water Conservation in China, 2004(11): 16-18.
- [2] LI H J, DAI F C, LI W C, et al. Stability assessment of a slope under a transformer substation using numerical modeling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70: 385-394.
- [3] JIAO Yuyong, WANG Zihao, WANG Xinzhi, et al. Stability assessment of an ancient landslide crossed by two coal mine tunnels[J]. Engineering Geology, 2013, 159: 36-44.
- [4] 黄润秋, 许强. 显式拉格朗日差分分析在岩石边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 346-354.
HUANG Runqiu, XU Qiang. Application of explicit Lagrangian finite-difference method in rock slope engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(4): 346-354.
- [5] 张学冬, 陈剑平, 黄润秋, 等. 用 $FLAC^{3D}$ 分析呷爬滑坡的变形特征[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 131-134.
ZHANG Xuedong, CHEN Jianping, HUANG Runqiu, et al. A study of deformation features of Gapa landslide using $FLAC^{3D}$ [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 131-134.
- [6] 廖秋林, 曾钱帮, 刘彤, 等. 基于 ANSYS 平台复杂地质体 $FLAC^{3D}$ 模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1010-1013.
LIAO Qiulin, ZENG Qianbang, LIU Tong, et al. Automatic model generation of complex geologic body with $FLAC^{3D}$ based on ANSYS platform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1010-1013.
- [7] 郑文堂, 徐卫亚, 童富果, 等. 复杂边坡三维地质可视化和数值模型构建[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1633-1644.
ZHENG Wentang, XU Weiya, TONG Fuguo, et al. 3D geological visualization and numerical modeling of complicated slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1633-1644.
- [8] 崔芳鹏, 胡瑞林, 刘照连, 等. 基于 Surfer 平台的 $FLAC^{3D}$ 复杂模型三维地质建模研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 699-702.
CUI Fangpeng, HU Ruilin, LIU Zhaolian, et al. Surfer software platform based complex three-dimensional geological digital models for pre-processing of $FLAC^{3D}$ [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 699-702.
- [9] 成育民, 徐鼎平. $FLAC/FLAC^{3D}$ 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 64-73.
- [10] 刘英, 于立宏. Mohr-Coulomb 屈服准则在岩土工程中的应用[J]. 世界地质, 2010, 29(4): 633-639.
LIU Ying, YU Lihong. Application of Mohr-Coulomb yield criterion in geo-technical engineering[J]. Global Geology, 2010, 29(4): 633-639.