

露天采场台阶开挖对公路路基稳定性影响的有限元数值模拟和评价

翁 翕

(振业股份有限公司, 深圳 518008)

贾立宏

(中航勘察设计研究院, 北京 100086)

张理京

(沈阳大学机械工程系, 沈阳 110006)

【摘要】针对矿山在地下开采转为露天开采过程中,原地采区域在露天采场台阶开挖过程中对露天采场公路建设及运营的影响,进行了数值模拟分析,并对通过各种岩体介质的露天采场公路路基在台阶开挖和汽车运营过程中的稳定性进行了分析评价,得出了在不同条件下,如空洞地区、台阶材料介质、材料界面、开挖台阶与公路距离等对路基稳定性影响的评价。

【关键词】采矿工程 露天开采 有限元法 路基稳定性

【Abstract】This paper gives the FE Simulating analysis of the effect on road construction in the process of mine open-cut, analysis and evaluates stability of road foundation during many rock material steps excavation, concludes that the different conditions, for example, the rock caves, steps and the distance between the steps and road have influence on the road foundation stability.

【Key words】mining Engineering open-cut Finitelement method stability of road foundation

0 引言

随着经济和生产技术的发展。以及矿产资源价格的变化,一些原地下开采闭坑的矿山现在开始转入上部的露天开采。在这种由地采转为露采的过程中,必然面对原地采残留区对上部露天开采的生产设备、人员及运输公路所造成的威胁。这类工程课题实际上是一个综合处理问题^[1],涉及到采矿工程的许多方面,本文仅使用力学数值分析方法^[2],对露天开挖过程中台阶开挖、公路建设、运输车辆运营等诸多因素相互影响下岩体强度和结构稳定性方面进行模拟计算和定量研究,为工程设计和现场施工提供科学依据。

本文以某铜矿为工程背景,该矿60年代中期至70年代中期为地下开采。现今正转入露天开采,为了解决上述问题,本文以地质勘探队提供的该铜矿地质剖面图为基础,通过详细的工程地质调查,选择合适的地质剖

面进行了动态开挖过程的有限元模拟计算。在上述计算过程中,考虑地下岩层由于地下开采而造成的松动岩体、松散体及建设公路所使用的填土体对整体结构稳定性的影响,对上覆岩层的稳定性进行评价。

1 计算模型的确立

1.1 地质模型

根据现场工程地质调查、采区空区调查及采区工程钻探结果确立地质模型。

1.2 计算模型

本次计算采用弹塑性力学模型,主要依据是:地应力测量结果表明本区属中~低地应力区;岩石力学试验显示了本区岩石强度较大,一般(湿)单轴抗压强度大于43.3MPa,在低地应力环境下主要表现为弹性;工程地质调查表明,研究区岩石节理发育,裂隙纵横交错,呈张开状态,尤其是受后期人类工程(采矿工程)活动的影响,产生了大

量的卸荷裂隙，且一般在地应力作用下主要表现为强烈的塑性变形。据此将研究区岩石力学模型确立为弹塑性模型是合理的。

1.3 模拟过程的设计

在地质模型、计算模型的基础上，依据工程设计要求确立了弹塑性有限元动态模拟分析计算模型。在计算中将公路和边坡的开挖、运输车辆对公路和岩体的影响按其施工顺序进行动态模拟，从而初始地应力场；开挖导致的次生应力场、位移场；及运输车辆对次生应力场、位移场的扰动都依次模拟描述，因而能更真实地反应最终次生应力场和位移场情况。所确定的五个剖面计算模型为：

模型一，该模型以 11 号勘探线地质剖面为原型，由四种材料介质（实体、松动体、松散体、断层）构成，在松散体内和实体内开挖形成公路，在公路下方松动体内开挖形成露采小台阶的【公路+小台阶】营运模型。

模型二，该模型以 11' 勘探线地质剖面

为原型，由四种材料介质（实体、松动体、松散体和断层）构成，公路在【松散体内开挖的单公路营运】模型。

模型三，本模型以 9' 地质勘探线剖面图为原型，由四种材料介质（实体、松动体、松散体、断层）构成，公路在【松动体内的单公路开挖、营运】模型。

模型四，本模型以 4101 勘探线地质剖面为原型，由四种材料介质（实体、松动体、松散体、填土）构成，公路设计在填土体中的营运模型。

模型五，该模型以 2101 勘探线地质剖面为原型，由四种材料介质（实体、松动体、松散体、断层）构成，公路在【松动体内的双公路开挖、营运】模型。

2 计算参数的选取

2.1 取值结果

计算参数取值结果见表 1。

2.2 取值说明

表 1 岩体力学计算参数表

力学参数 材料	弹性模量 G/MPa	粘结力 C/MPa	抗拉强度 R _t /MPa	内摩擦角 φ/(°)	泊松比 μ	法向刚度 K _n /MPa	切向刚度 K _s /MPa	残余粘结力 /MPa	残余内摩擦角 φ/(°)
实体	33000	0.45	2.0	35	0.3			0.35	25.0
松动体	1000	0.30	1.0	35	0.35			0.20	25.0
松散体	5000	0.00	0.0	30	0.42			0.0	20.0
填土	7000	0.00	0.0	30	0.40			0.00	150
断层				28.5	0.3	600.0	15.00		

①对于实体，根据试验和经验，岩块力学参数与岩体的力学值有一定的差别，有些值差别不大，可以用岩块的力学值代替岩体的对应值，如内摩擦角（φ）、泊松比（μ）等；而有些值差别则较大，如粘结力（c_m）、抗拉强度（R_t）等。对于岩体的粘结力（c_m）用下列经验公式求出

$$c_m = c [0.011e^{-0.48(i-2)} + 0.02]$$

式中：c——岩块粘结力；

i——岩石节理密度（条/m），对于岩体抗拉强度，则依据地应力测量结果取值。

②松动体、松散体计算参数的取值主要

依照德兴铜矿科研所提供的试验资料确定。

③本次计算考虑了构造应力，其分布关系为 $\sigma_H = 0.015H$ （H 为上覆岩层高度，单位 m），主要依据是，地应力测量结果表明 $\sigma_H = 0.027H$ ；研究区岩石节理发育，尤其是卸荷裂隙的存在使岩体中大部分残余应力释放了。

④计算过程中不考虑地下水作用的影响。

⑤载重矿车自重以点载荷形式施加于公路路面上。

3 计算程序

(1) 本文计算使用的有限元程序是在文

献 [3] 的基础上改造而来, 不仅能适用于地下工程有限元分析, 而且可应用于边坡工程、地基工程等的施工步骤动态模拟, 附有益于网络信息生成及显示的前处理程序。

(2) 本文计算使用的是德鲁克-普拉格准则。

(3) 由于地质条件的复杂性, 区域划分很难用一种单元来表示, 加之岩体的构造也较复杂, 故采用三种单元:

- ①较规则的区域采用等参四边形单元;
- ②特殊域或交界处为三角形单元;
- ③节理、断层及软弱夹层采用有厚度或无厚度节理单元;

(4) 开挖与支护的动态模拟

本次计算的 2101、4101、9'、11' 剖面模型分三步模拟: 初始应力场、公路开挖、运输车辆的影响; 11' 剖面模型分四步模拟: 初始应力场、公路露采台阶开挖、运输车辆的影响。

4 11' 剖面的有限元计算结果分析

为叙述简要, 本文仅对 11' 剖面模型具体阐述, 其他地质剖面的计算和分析与其相似。

4.1 11' 剖面模型

模型 (以 11' 号勘探线地质剖面为原型) 由实体、松动体、松散体三种介质构成, 断层存在于实体介质中, 其倾角为 85°, 向下延深 110m。模型结构见图 1。计算分四步进行: 第一步计算初始应力场; 第二步模拟公路开挖扰动下应力、位移、塑性区变化及影响, 公路设计在实体和松散体介质中, 路面标高为 165m; 第三步模拟在松动体中进行台阶开挖, 分析台阶开挖对公路的影响; 第四步模拟公路和台阶开挖后载重矿车在公路上运行时对公路稳定性的影响及其后果, 计算中载重矿车自重以等效节点力 ($P_1 = P_2 = 100\text{kN}$) 施加于公路路面上。

4.2 位移

从公路开挖 (图 2a)、台阶开挖 (图 2b) 和

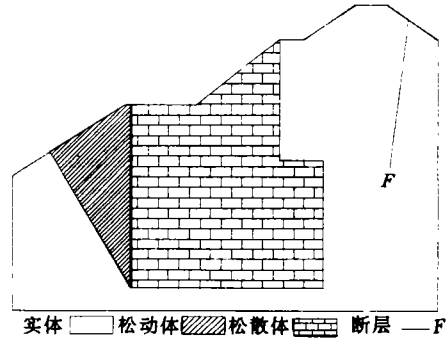


图 1 模型一结构图

矿车载重三步计算的位移矢量分布可看出, 公路开挖对这一剖面的扰动最大, 位移矢量分三个区, 公路路面正下方区, 位移显著, 位移斜指向公路上方 (U_y 为正), 从公路路面向下, 位移逐渐减小, 表现出明显的卸荷作用特点: 远离公路开挖区, 位移不明显, 位移指向剖面右下方 (U_x 为正值, U_y 为负值), 中间过渡区水平方向的位移 U_x 为正值, U_y 近于零; 第二步开挖形成露采小台阶, 位移矢量同样可分成三个区, 由于形成小台阶的开挖量小, 因而影响范围小, 仅在台阶附近位移有明显的变化, 表现为: 台阶边坡附近区, 位移近水平指向边坡, 台阶下方, 位移指向深部左下方, 向深部位移逐渐不明显, 台阶开挖对公路路面附近范围的位移影响很小。在公路上施加集中力, 对位移场的扰动不明显, 仅在施力节点附近小范围内位移略有下沉。开挖和施加矿车过程中公路路面位移变化见图 2c 所示。

4.3 主应力特征

对公路面施加集中力前, 主应力分布总的特征是: 地表 (130m 标高以上区域) 以拉应力分布为主, 但拉应力值小; 130m 标高以下则以压应力为主。

对公路路面施加集中力后, 主应力分布有一定变化。

4.4 塑性区分布

开挖前在初始应力场作用下, 塑性单元主要分布于边坡坡脚处及断层带附近区域

(见图 3a),表明这些部位是应力集中区,岩石易于塑性屈服;在边坡坡腰松散体中出现大片塑性区,显然与松散介质的陡边坡角

(43°)、低强度特性有关,岩石在自重作用下有压剪破坏失稳的可能。

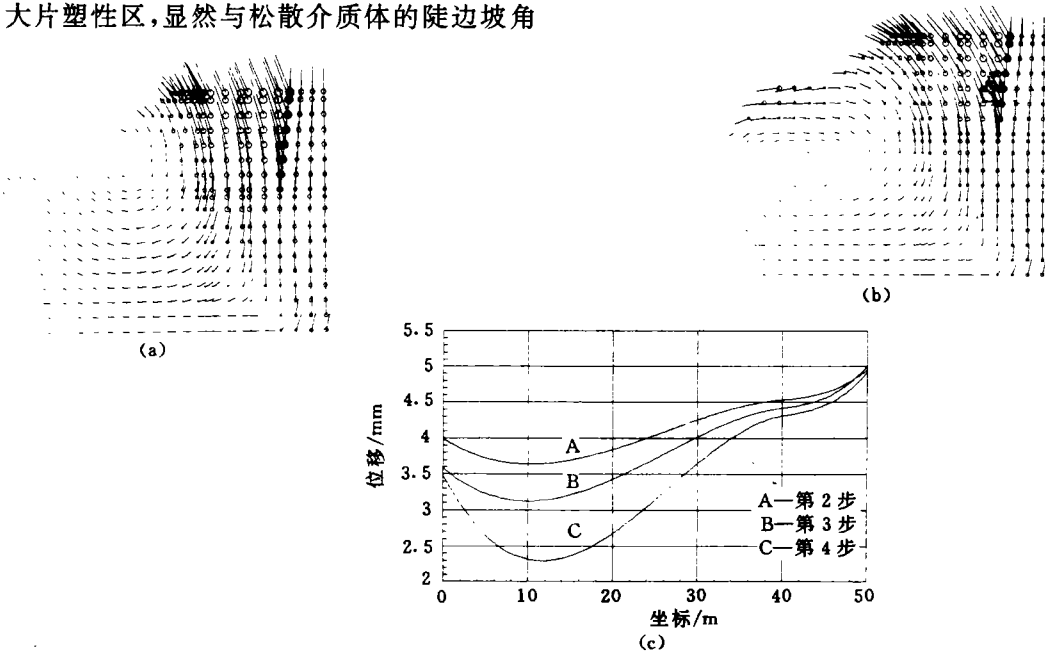


图 2 开挖位移图

(a)公路开挖位移图 (b)台阶开挖位移图 (c)公路路面位移变化曲线

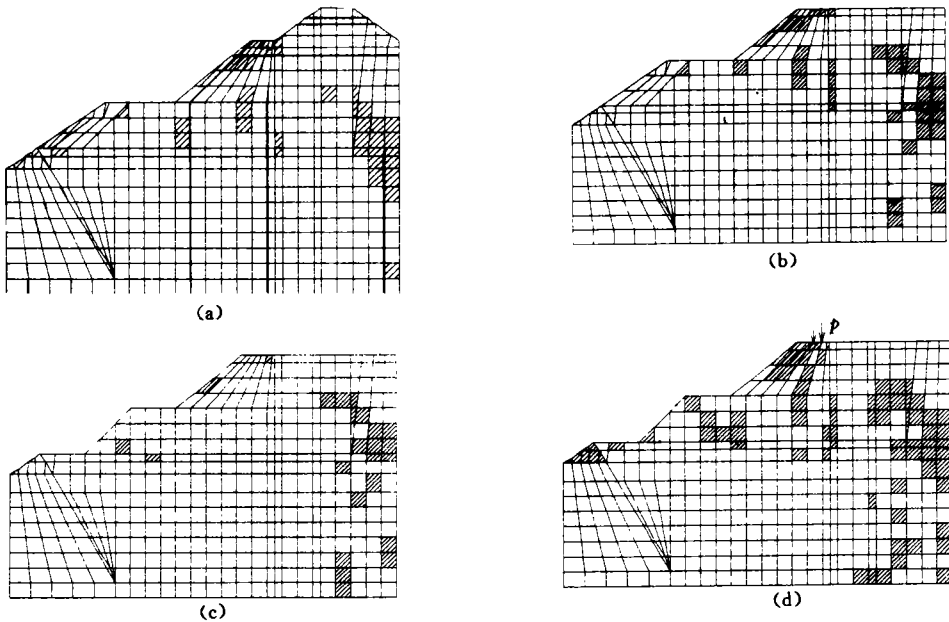


图 3 塑性区分布

(a)初始应力场塑性区图 (b)公路开挖塑性区图 (c)台阶开挖塑性区图 (d)矿车加载塑性区图

开挖条件下,第一步开挖形成公路路面(见图 3b),由于卸载作用影响,塑性区有减

少、向上移动现象,在边坡坡顶、坡腰及断层带附近出现塑性区,而坡脚处塑性区消失。第

二步开挖受小台阶开挖作用的影响(见图3c),塑性区进一步缩小,边坡附近区域塑性区趋于消失,说明开挖有利于提高这种结构模型中公路的稳定性。

对公路路面施加矿车荷载塑性区分布又有明显变化(见图3d)。比较施加集中力前后塑性区的分布和变化可看出:

①实体介质路基是稳定的:松散体介质路基将出现较明显的沉陷和产生圆弧形滑移失稳;公路下方台阶有失稳破坏的可能。

②台阶开挖不影响公路路基的稳定性。

断层、材料分界面影响,主要表现为产生应力集中,改变界面两侧位移、主应力方向,使附近岩石易于塑性变形或破坏。

5 稳定性评价

本文在前工程地质调查的基础上,选择了五个地质剖面进行了有限元数值模拟分析。综合上述研究成果对125中段采空区上覆岩层进行稳定性评价。

(1)野外地质调查和工程钻探结果表明,125中段采区大部分地区由于崩落较充分,下部采空区已基本被岩石(松散体)充实填满,不存在较大的空洞。因而这部分地区,在上覆岩层开挖公路及公路营运过程中不可能产生突然塌陷,但对存在空洞的地区,在上方进行剥离矿岩时,人员与设备受到威胁,这些已被有限元数值分析所证实。

(2)材料介质的好坏是影响公路稳定性程度的重要因素,有限元数值分析结果表明,公路在高强度、高弹模、高声速的坚硬脆性岩石(体)中开挖、营运,其稳定性最好,公路路基中很少或没有塑性区出现;而在低强度、低弹模、低声速的松散体介质中的路基稳定性差,公路在开挖、营运过程中有大量塑性区出现于公路路基中及路面边坡区,按稳定程度递减的顺序排列是:实体→松动体→松散体→填土。

(3)断层、材料界面对公路稳定性的影响,有限元数值模拟显示断层、材料界面是产

生应力集中、影响应力分布、改变位移方向使附近岩石易于塑性变形进而产生破坏的部位,建议矿山在公路设计、施工中应尽量避免公路靠近这些界面,特别是避免这些界面斜切公路边坡,以增加公路的稳定程度。

(4)在松散体内开挖公路和由填土构成的公路,其稳定性较差。在公路营运过程中出现了大量的塑性单元,随着时间的推移和外界环境因素影响,如风化、地下水作用等,有产生公路斜坡失稳和路基失稳的可能,建议矿山在公路营运过程中应加强公路的维护及观测预报工作。

(5)公路下部小台阶开挖对公路稳定性的影响,当台阶开挖离公路较远且开挖量不大时,则不影响(降低)公路的稳定性;但开挖离公路较近且开挖量大时,对公路的稳定性有较大影响。表现为:公路下方区及坡面节点位移增大、改变了节点位移方向,影响次生应力分布,增加塑性区面积,公路稳定程度则降低。

(6)前五个模型的计算结果表明,外荷载作用力的影响范围是以施力节点为中心,水平方向约30m,向下约50m区域。如果公路下50m深度以内无大空洞存在,路基不会产生塌陷。

(7)拉应力区的存在和拉应力的的大小,与地形、初始应力场及开挖断面大小等因素有关,地势越陡、初始地应力越大、开挖断面越大,则拉应力区面积和拉应力值就越大,则公路的稳定性就越差。

参 考 文 献

- 1 张幼蒂. 露天采矿系统工程. 北京:煤炭工业出版社,1991
- 2 于学馥. 信息时代岩土力学与采矿计算初步. 北京:科学出版社,1990
- 3 于学馥. 地下围岩稳定分析. 北京:煤炭工业出版社,1983

收稿日期:1997-03-20