

露天矿边坡及地表变形综合整治 总体设计有限元计算

沈新普 岑章志 徐秉业

刘天泉

(清华大学工程力学系 北京 100084)

(煤炭科学研究总院北京开采所 北京 100013)

提要 本文采用弹脆塑性有限元分析计算预测抚顺西露天矿边坡工程中的边坡岩体变形并模拟其治理措施。采用参数辨识的手段,结合弹脆塑性有限元分析程序,对边坡岩体的材料性能参数进行位移反分析,较准确地得到实际边坡结构的等效材料参数值。对1987年9月至1990年末期间开采过程的数值模拟再现了由于露天开采引起边坡与地表变形急剧增加的过程,对产生的原因给出了具有说服力的分析与论证。在此基础上,对边坡与地表在进一步的开采影响下可能产生的变形作了预测计算,并模拟了边坡整治措施对地表变形的影响。

关键词 岩石边坡,参数辨识,位移反分析,弹脆塑性,露天开采

1 引言

抚顺石油一厂建于1928年,厂区东西长约2000m,南北宽约600m,厂区以南为抚顺西露天矿,以东为胜利矿,以西为深部井田。西露天矿建于1914年,目前采深已达245—306m,预计最终采深(D界)为327—459m。矿坑北帮地面境界至厂南界的水平距离西部为80m,东部为420m。胜利矿位于石油一厂东,建于1907年,已于1987年停采,其开采对石油一厂地表产生了影响;深部井田于1952年开采,1964年停采,其开采也对石油一厂厂区地表变形产生了一定的影响。

由于厂矿具有上述平面与空间上的复杂关系,西露天矿北帮边坡与石油一厂厂区地表曾发生过不同程度变形。特别是1984年以来,露天矿按国外的设计施工后,边坡及厂区地表变形加剧,部分厂房设施损坏严重,严重影响石油一厂的安全生产,造成巨大经济损失和社会影响。1987年国家计委提出了厂矿“双保”的治理方针,将边坡和地面变形的问题列入国家“七五”攻关项目,有关各方面也围绕边坡变形问题开展了一系列的研究工作^[1~5]。

已有的诸项研究工作从边坡地质构造、岩体材料性能试验等方面,并通过模型试验、理论分析、数值模拟、灰色系统理论等各种手段对西露天矿北帮边坡及石油一厂地表变形的机理与现状进行了研究,为问题的解决积累了大量丰富的资料与经验。

但仍有若干重要的问题没有弄清。在确定工程措施时发现,目前已有的分析研究工作

1994年5月3日收到初稿,1994年11月15日收到修改稿。

不足以完全说明当前边坡与地表变形的机理与规律,有必要在已有工作的基础上对当前边坡和地表的变形作进一步的分析和数值模拟,弄清边坡结构的变形规律和不稳定变形产生原因及其发展规律,从而能更合理准确地描述该问题,计算边坡位移量,对边坡未来随露天开挖产生的变形作进一步的预测,为边坡整治提出明确有效的参考意见。

本文以北帮边坡 W 200 剖面为分析对象,采用参数辨识的手段,结合弹脆塑性有限元数值分析程序,对边坡岩体的材料性能进行位移反分析,较准确地得到了实际边坡结构的等效参数值。在此基础上,对边坡与地表在进一步的开采影响下可能产生的变形作了预测计算,并模拟了边坡整治措施对地表变形的影响。

2 当前边坡岩体弹脆塑性有限元分析

由于边坡岩体结构及材料组成的复杂性,要想精确地确定岩体的详细结构及各处材料的性能参数是不可能的,因此在现有的条件下只能采取经验方法与理论方法相结合的手段,根据地质资料,建立简化的边坡结构模型。在确定各类岩体材料的性能参数时,由于岩体种类多,分布混杂且破损程度不同,故本文采用物性辨识的手段,根据位移观测信息反演岩体的材料性能参数。由于对地表稳定性影响较大的主要是地表的下沉位移值,故本次计算依下沉位移实测值作为位移反分析的物性辨识的参照。根据上述方法建立的边坡模型由于其下沉变形与实际边坡的下沉变形的整体效果相同,故可称之为实际边坡的下沉变形功能等效模拟体,可以用来预测边坡未来的下沉变形。

2.1 建模

2.1.1 地质模型

为获得与地质结构尽可能相近的地质模型,作者曾就深层地质构造问题向露天矿的地质工程师详细了解情况,并查阅了工程有关技术资料。在本文采用的经过简化的地质模型中不仅考虑了各岩层构造,还着重考虑了断层、向斜褶曲及地下开采采空区的影响。

2.1.2 力学模型

(1) 本构模型

由于岩石类材料在发生塑性屈服后,其强度变化呈“脆性应变软化”状态。本文采用弹脆塑性本构关系模型来描述材料的应力-应变关系。该模型在计算中对未屈服过的应力点使用初始强度极限判断弹塑性状态。关于进一步的细节参见文献[6]。

(2) 单元类型与屈服准则

本次计算将结构视为弹脆塑性节理结构,采用 8 节点四边形等参单元离散结构中的连续体部分;对节理面的离散则经过比较后选用 6 节点的弹塑性节理单元。本次计算过程中 8 节点等参单元和 6 节点节理单元的屈服准则均为 Mohr-Coulomb 型的,其中 8 节点单元的屈服函数采用主应力形式表达:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin\varphi - c \cos\varphi = 0$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力, c 和 φ 为粘聚力和内摩擦角。

6 节点节理元的屈服准则取分量形式:

$$f(\sigma) = (\tau_{xy}^2 + a^2 c^2)^{\frac{1}{2}} + \mu \sigma_y - c = 0$$

式中 $a^2 = 0.0001$, 为扰动参数, 其作用是使顶点为奇点的屈服面光滑化; μ 为内摩擦系数; τ_{xy} 和 σ_y 分别为节理元的局部坐标系中的切向剪应力和法向正应力分量。对屈服过的应力点的应力状态的判断采用 βc 和 $\beta \varphi$ 代替 c 和 φ , 这里 β 为脆性跌落系数。

(3) 约束类型

考虑到计算所取剖面为从实际结构中截取的剖面, 开挖时底面深层结构位移不大, 取为 X 、 Y 双向约束。若取 Y 向单向约束则对应含水层或其它无摩擦弱层。在计算重力场时, 出于对压实作用的考虑, 取两侧边界约束为 X 向约束, Y 向自由; 在计算开挖位移场时, 由于远端离开挖面较远受影响甚少, 实际远端取 Y 向无位移。故取为 X 、 Y 双向约束; 近端侧边受开挖卸载的影响较大, 有回弹现象, 故仍为 X 向单向约束。图 1 显示了约束情况。

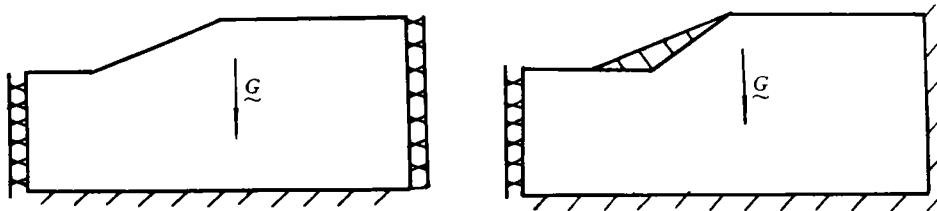


图 1 (a)计算地应力场时的位移边界条件

(b)计算开挖位移场时的位移边界条件

Fig. 1 Displacement boundary conditions assumed for the computation of

(a)initial geo-stress field;

(b)displacement field due to excavation

2.2 正解的若干初始条件

2.2.1 初应力场

初应力场在此指开挖模拟开始时刻对应的应力场。一般地说, 它包括地壳运动产生的构造应力场和重力作用下形成的应力场两部分的迭加。本次开挖开始时间取为 1979 年。由于露天开采已有 50 多年的历史, 边坡邻近地应力场中的地壳变形运动的构造应力大部分已经释放掉; 又由于矿坑采深较大, 从泥岩到煤层的各岩层都被开挖揭露出来, 水平地应力得以释放, 进一步的开采所产生的影响将主要由重力作用产生。开挖引起的沿边坡的应力集中只对边坡表面下某一较小深度以内的岩体有较大影响, 本文忽略早期开挖效应, 仅用重力构造最初的地应力场, 这与实际相应的地应力场大体上不会有太大差别。

2.2.2 φ 值的弱化

岩体从塑性变形发生到破裂这一过程中, 内摩擦角 φ 也从初始抗剪峰值降到剪断后摩擦试验值, 这从地质手册所给材料参数表中可以看得出来。岩土材料的弹脆塑性本构理论^[6]指出岩石在进入塑性以后的破损是经过若干次强度跌落才达到破裂这一最终形式的。这在细观上对应着裂纹的逐次扩展。裂纹扩展一次, 材料强度就降低一次, 同时相应的摩擦角 φ 也应作逐次减少, 直到最后的破损后内摩擦角 φ 残余值。又由于在 Mohr-Coulomb 型屈服条件中, 当岩体埋藏较深、地应力绝对值很大时, 对塑性滑移起控制作用的是摩擦

角 φ 值, 因此弄清 φ 的变化规律对岩土结构的数值计算是至关重要的。在本文中对某些材料粘聚力 c 跌落的同时, 认为内摩擦角 φ 也发生跌落, 且为了简便仅作一次脆性跌落处理。试算表明, 效果良好, 但目前 φ 随 c 的变化规律尚未有成熟的理论。

2.2.3 单元破损与开采效应

关于计算中开采单元岩石的破裂与开采分两步走: 实际工程中, 开采施工是通过先爆破破碎岩石, 然后将破碎岩石(或煤)运走。这样对应的开采载荷是分两步施加的。第一步, 单元材料破损, 粘聚力 c 及摩擦角 φ 下降到残余值, 原承受的载荷转移到别的单元上。第二步, 单元重力作用消失, 结构卸载。因此在每次开挖时, 单元破损效应和开采效应分两次计算, 然后累加的作法是合理的。当然这里的累加指的是应力历史的累计, 是个弹塑性过程, 而不是代数迭加。

2.3 求解格式与有限元离散

本文采用文献[6]提出的弹脆塑性本构积分格式与开挖数值模拟格式。

有限元离散: 如图 2 所示, W200 剖面的离散共采用了 302 个单元, 其中 6 节点节理单元 81 个, 8 节点等参单元 221 个。为了与实测对照, 全部开挖共分为三个开挖时期: 1979—1987 年末为第一个开挖时期; 1987 年末—1990 年末为第二个开挖时期; 1990 年末—2014 年 D 界开挖终了为第三个开挖时期。岩体材料参数的反演计算以实测资料较全的 1987 年末—1990 年末开挖时期内的下沉位移观测资料为参照进行。

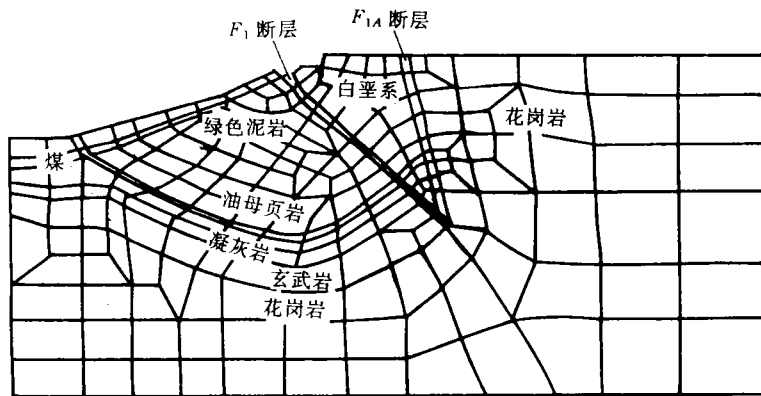


图 2 露天矿北帮边坡的一个截面
Fig. 2 A cross section of the north wall of the open-pit

2.4 岩体材料参数的弹脆塑性位移反分析

西露天矿北帮边坡地质条件复杂, 材料常数实测困难, 已有的部分资料不能满足计算需要; 又由于实际地质条件的不同, 材料参数取值不能照搬地质设计手册上现成的数值, 因此本文采用弹脆塑性位移反分析方法对边坡岩体各岩层的材料参数进行了反演计算。

需要反演的材料参数多达几十个, 如全部用正则化最小二乘迭代计算法进行反演^[6], 则计算量过于庞大, 而且边坡与地表的位移并不对所有的材料参数都很敏感, 因此为了提高求解效率, 并保证关键参数的精度, 本文对材料参数位移反分析采取分两步走的方案。

第一步采用试算法对未知材料参数进行粗略的反演计算。首先根据各种已有资料和试验类比的方法,估算材料参数的大概范围。然后试算取 20 组不同的材料参数进行试算,取计算结果与实测变形趋势最为接近的那一组参数值作为试算法的反演计算结果。第二步的位移反分析是利用文献[6]提出的正则化最小二乘迭代算法并结合弹脆塑性有限元程序来进行的。边坡材料参数反演的目标参数(即所需反演识别的参数)的正确选取是反演成功的基础,如果参数选择不当,边坡与地表位移对该参数并不敏感,则结果将在给定的初始值的上下波动。而初始参数的成功选取是建立在对结构当前变形状态的观测及对变形机理的经验判断分析以及边坡地质概况的尽可能详细了解的基础上的。

作者通过现场考察和参加有关抚顺西露天矿边坡与石油一厂地表变形问题的专家讨论会,认为西露天矿北帮边坡与石油一厂地表变形的主要原因,是露天开采导致地下开采老采空区上方围岩自承体系遭到破坏,随露天开采的不断进行,老采空区上方已经稳定的岩体又不断有新的位移生成,从而导致边坡变形的加速,同时引起地表变形的增加。老采空区上方围岩的自承体系是由原有地应力状态及上覆岩层的压力和地下开采的作用等条件共同作用下,在采空区周围岩体内部自动产生的压密区形成的拱形结构。由于岩体自承体系的作用,在采空区周围,压力拱以内的围岩呈松动破裂状态,并有塌落产生;在压力拱以外的岩体仅有少许变形而状态完好无破裂,当露天开采造成上覆岩层减薄,并引起地应力的变化时,在原有条件下形成的压力拱(压密区)必然发生变化,甚至消失,从而导致塌落区在边坡附近出现并不断向上发展,造成地表的较大幅度的变形。这一点已为西露天矿进行的钻孔勘查工作所证实。钻孔勘查发现,距采空区上方 300m 处仍有较大规模的塌落空洞存在,这表明边坡岩体曾经受到地下开采的严重损伤。另外,对边坡岩体稳定状况的统计分析表明,几处不稳定边坡局部区域均处于老采空区的上方且同时又有露天开采的影响。凡是仅有露天开采而无地下开采影响的边坡区域以及仅有地下开采而 84 年以来未有大规模露天开采的区域,均处于较稳定的状态,变形值较小。以上状况说明,露天开采引起老采空区上方塌落区的活化是边坡及地表不稳定变形的主要原因。另外,边坡向斜褶皱区的较大幅度的变形引起其上部地表 17# 测点的较大幅度的下沉,但对较远处地表影响不大;断层 F_{1A} 的存在以及断层岩体材料的不抗拉性能导致该断层处的岩体变形出现间断,断层以南测点位移大于断层以北距离断层稍远的测点的变形。这说明 F_{1A} 断层实际上保护了其北侧的地基免受严重变形的威胁,但加剧了断层以南地表的变形。

根据以上分析,选定井采区上方至地表间的各岩体材料的残余强度系数为正则化最小二乘迭代反演计算的主要目标参数。

2.4.1 直接法(试算法)反演材料参数值

(1) 初值的选取参考了煤炭科学研究总院推荐的力学参数值和《水利工程地质设计手册》中的现场岩体实测参数值。在经过 20 多次对正问题的试解后,所采用的岩体材料参数值列于表 1 中。

(2) 采用表 1 所列参数值经过正解求得的 1987—1990 年间的变形与实测值的比较如图 4 所示。从图中可以看出,两者趋势大致相同,但数值相去甚远。

表 1 材料参数

Table 1 The material parameters

| 名称 | 弹性模量 E (10^3MPa) | 泊松比 | 容重 10^3kg/m^3 | 粘聚力 c (MPa) | 内摩擦角 φ (度) | 残余强度 系数 β |
|-----------------|-------------------------------------|------|---------------------------|------------------|-----------------------|--------------------|
| 花岗片麻岩 | 2.6 | 0.15 | 2.6 | 5.0 | 40.0 | 0.5 |
| 白垩(岩)系 | 1.2 | 0.2 | 2.4 | 0.6 | 23.0 | 0.3 |
| 绿色泥岩 | 1.0 | 0.2 | 2.4 | 0.9 | 25.0 | 0.3 |
| 油页岩 | 1.5 | 0.15 | 2.4 | 3.0 | 34.0 | 0.4 |
| 煤 | 1.2 | 0.15 | 1.3 | 2.7 | 34.0 | 0.3 |
| 回填区 | 0.8 | 0.2 | 1.5 | 0.4 | 28.0 | 0.3 |
| 凝灰岩 | 2.5 | 0.15 | 2.6 | 2.5 | 34.0 | 0.3 |
| 玄武岩 | 2.4 | 0.23 | 2.9 | 1.885 | 36.0 | 0.5 |
| F_{1A} 断层下部砂岩 | 0.9 | 0.3 | 1.4 | 0.4 | 20.0 | 0.3 |
| F_1 断层下部砂岩 | 0.9 | 0.3 | 1.4 | 0.4 | 20.0 | 0.3 |
| F_{1A} 断层上部砾岩 | 0.6 | 0.3 | 1.4 | 0.08 | 23.0 | 0.5 |
| F_1 断层上部砾岩 | 0.8 | 0.3 | 1.4 | 0.05 | 25.0 | 0.5 |
| 泥岩夹层 | 0.15 | 0.2 | 2.4 | 0.05 | 10.0 | 0.4 |
| 油页岩夹层 | 0.20 | 0.15 | 2.4 | 0.05 | 10.0 | 0.4 |
| 破碎白垩系 | 0.55 | 0.2 | 2.4 | 0.05 | 10.0 | 0.3 |
| 破碎绿泥岩 | 0.5 | 0.2 | 2.4 | 0.05 | 10.0 | 0.3 |
| 破碎油页岩 | 1.2 | 0.15 | 2.4 | 0.8 | 21.0 | 0.4 |
| 塌落破裂区 | 0.8 | 0.15 | 1.8 | 1.0 | 23.0 | 0.5 |

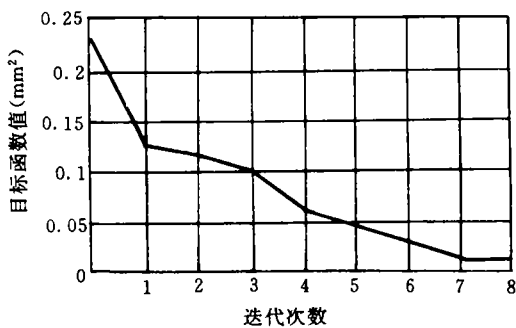


图 3 反演迭代过程中目标函数值收敛情况
Fig. 3 The convergence of the objective value during inverse iteration

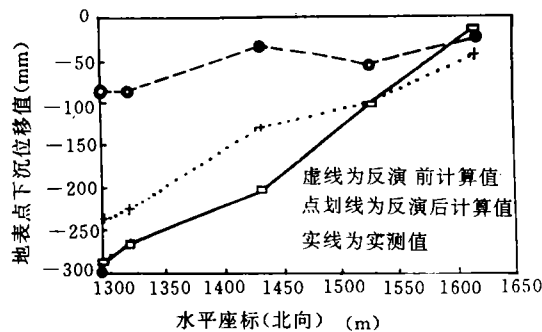


图 4 位移对比示意图
Fig. 4 The displacement comparison

2.4.2 正则化最小二乘法位移分析反演计算材料参数

取地下开采区上方的白垩系岩组(材 2)、绿色泥岩组(材 3)及塌落区(材 19)的残余强度系数 β 及破碎白垩系岩层(材 16)的模量 E_{16} 为反演目标变量,反演中取 $\beta_3 = \beta_{19} = X_1$, $\beta_2 = \beta_{16} = X_2$, $E_{16} = X_3$, 作三个参数的弹塑性反演计算。

(1) 首先选取正则阵对角元素的取值。通过大量的试算,三个参数对应的正则阵对角元素的值分别取为 0.04, 0.04, 0.02, 此时迭代过程中 β 波动幅度较小,有利于收敛。

(2) 选取差分步长。差分代替导数是以割线方向代替切线方向，理论上讲差分步长越小，割线方向越接近切线方向。但是由于大型边坡岩体的弹脆塑性有限元分析中，计算过程中包含有一定的容许误差，差分步长太小则易导致误差对目标函数下降方向的影响过大，有时甚至会使目标函数不下降。本文经过多次试算，结果表明，初始差分步长取 0.1 时较为合适。

(3) 确定收敛准则。本文计算采用目标变量的收敛与目标函数的下降双重收敛准则作为迭代收敛标准。取目标变量的收敛容许误差为 2%；要求最小二乘法目标函数下降为已知位移的二阶模量的 2% 以下。同时满足这两个条件，则认为收敛。

图 3 是迭代过程中最小二乘目标函数的下降情况。从图中可以看出迭代收敛情况是比较令人满意的。图 4 为对应 1987—1990 年露天开采所引起的观测点的沉降位移的计算值与实测值的对比曲线。

本研究还对不同的反演方案进行了计算，获得的结果均显示出地下开采区上方塌落区及稍远处的绿色泥岩的完整程度(即残余强度系数的大小)对地表变形起着控制作用。

2.5 有限元计算

采用上述反分析结果为输入参数，对边坡在 1987 年—1989 年的开挖过程进行模拟计算。计算所得的变形网格如图 5 所示。图 6 则显示了对应的塑性区分布图。从图 6 中可以看出，随着开采的进行，采空区上方的塑性区不断扩大，向上发展，一直到距地面仅有 50m 的绿色泥岩层中，这说明露天开采引起了地下开采区上方老的塌落区的“活化”。

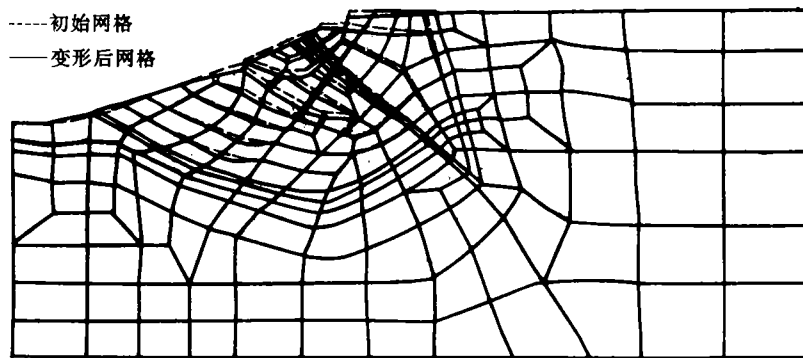


图 5 1987—1990 年间开挖引起的网格变形图

Fig 5 The deformation caused by excavation during the period of 1987—1990

3 设计终界(D界)开采引起的边坡与地表变形预测及治理措施模拟

3.1 D 界变形预测

按照前述建立的边坡岩体变形功能等效模型，在前两个开挖时期之后，对第三个开采时期即边坡设计终界开挖进行模拟。本次共分 13 个开挖步，对应的开采终了时的观测点位移示于图 8 中，塑性区分布如图 7 所示。由图 7 可见，当开挖到 D 界时岩体破裂区从 F_{14}

断层以南发展到断层以北，且断层以北的地表下沉有较多的增加，表明随露天开采的进行，在边坡变形大幅度增加的同时，石油一厂地表也将进一步下沉，且将对断层以北(目前下沉较少，尚未有严重损害)的区域产生较大的不利影响。

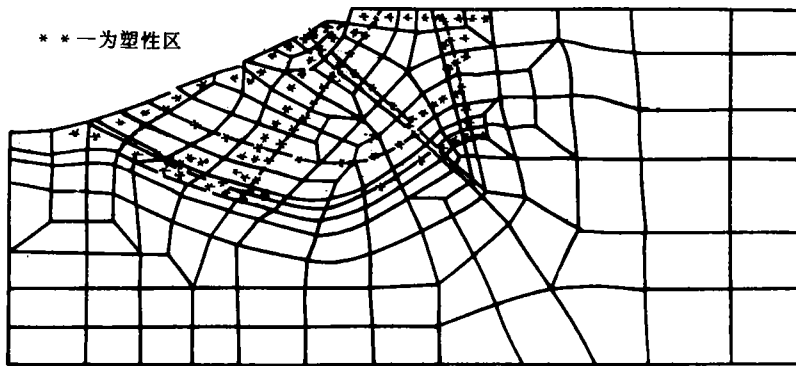


图 6 1987—1990 年间露天开采引起的塑性区

Fig. 6 The plastic region caused by the excavation from 1987 to 1990

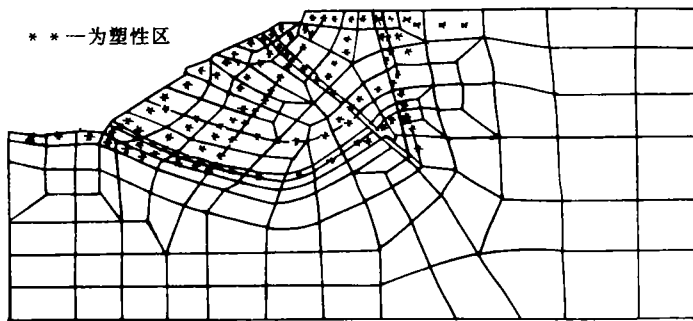


图 7 D 界开采引起的塑性区

Fig. 7 The plastic region caused by the D-bound excavation

3.2 治理措施模拟

为了保护石油一厂的设施以及边坡的安全，必须在露天开采施工进行的同时，采取治理措施，以控制边坡与地表的位移，保证石油一厂及西露天矿的安全生产。目前治理措施主要是对集中在断层带及采空区上方的离层裂缝进行注浆充填，所注浆的成分为比例可以改变的水泥与煤灰的混合浆液，其作用主要是减少离层裂缝空间、提高材料的抗剪强度指标 c 和 φ 值。当用于模量很低的断层离层带的充填时，也能提高其弹性模量 E ，提高程度按试验和经验法的估计约为其邻近基岩强度的 50%，据此，本文计算时将现有注水泥浆区(主要是采空区上方的绿色泥岩和白垩系岩层)的材料残余强度系数提高到 0.5；软弱夹层的抗剪强度提高到相邻基岩强度的 50%；对断层离层带，由于注入的成分主要是粉煤灰

含量较高的浆液,对应的计算模拟为弹性模量的提高。

采取治理措施后边坡开采到设计终界时,相应的变形大大减少,图8给出了治理措施采取前后开采引起的地表下沉位移值的对比,表明治理措施是有效的。

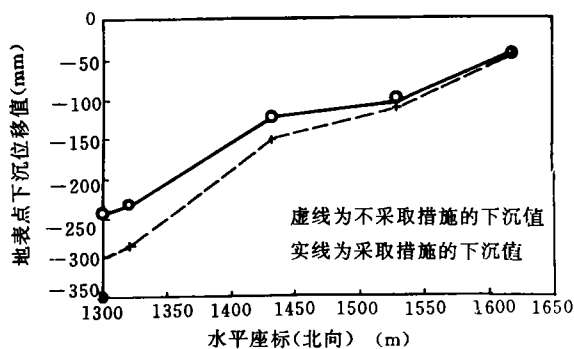


图8 综合整治前后D界开采引起的位移

Fig. 8 The deformation caused by the D-bound excavation with/without unified reinforcement

4 结论

(1) 本文首次将弹脆塑性本构理论用于复杂边坡岩体的有限元分析之中,采用的开采过程数值模拟格式比以往的算法能更好地模拟实际施工过程。

(2) 本文将系统方法与力学方法相结合,采用系统参数辨识的手段,结合弹脆塑性有限元分析程序,对边坡岩体的材料性能参数进行位移反分析,较准确地得到了实际边坡岩体的地质力学模型(变形功能等效模拟体)及其各项材料性能参数。

(3) 采用上述模型与参数对边坡在1987年末—1990年末期间的开挖施工引起的地表变形的有限元弹脆塑性数值模拟,再现了露天开采引起地下开采区上方围岩自承体系的消失、造成旧塌落区“活化”的现象。所得到的地表下沉变形结果与实测值相比较在整体上升趋势完全一致,数量上也十分接近。

(4) 有限元的分析结果还表明, F_{1A} 断层的存在及其不抗拉性能加剧了 F_{1A} 断层破碎带之上及其以南地区的地表变形,从而致使该区设施严重破坏;但另一方面却保护了 F_{1A} 断层以北的地表不致于发生严重变形,使得断层以北大量的重要设施免遭严重损坏。

(5) 通过对边坡岩体的变形功能等效模拟体在进一步的施工条件下所作的变形模拟,对终界开采可能产生的边坡与地表变形作了预测,预测结果表明D界露天开采将造成石油一厂地表的进一步下沉,且 F_{1A} 断层以北区域也将有较大幅度的下沉。因此如不采取措施,产生的后果将是严重的;在采取治理措施后,地表变形有了明显减少。若配合采取相应的地面设施的加固措施并改进施工方式之后,能够实现既保证石油一厂的安全生产,又保证露天矿的安全生产的最终目的。

(6) 通过对加固措施效果的分析,认为边坡结构加固应以老采空区上方塌落区注水泥浆充填固结,提高其抗压及抗剪能力为主要手段,辅以边坡向斜核部不稳定岩体周围软弱夹层的注浆固结和锚固,以及两条断层带的注浆充填。其中 F_{1A} 断层带的加固应以注浆

充填为主从而及时提高断层下部的支撑及抗压能力；对 F_{1A} 断层带抗拉能力的提高将导致断层南部岩体南移变形对北部稳定岩体的牵动，因此是有害的，必须引起注意。

参 考 文 献

- 1 美国福陆工程公司金属处：中国煤炭开发公司中国抚顺西露天矿设计项目第二阶段基本工程设计说明书，1983. 3
- 2 中国矿业大学北京研究生部，抚顺石油化工公司石油一厂：抚顺石油一厂地基稳定性分析研究报告（第一集至第六集），1989. 4
- 3 曲永新等：抚顺西露天矿泥质岩风化耐久性及周边风化剥落的研究，第四届全国岩土力学数值分析与解析方法讨论会论文集，1991. 4；山东泰安
- 4 清华大学工程力学系弹性与计算力学教研室：抚顺西露天矿北帮边坡及石油一厂地表变形综合整治总体设计有限元计算报告，1992. 4；北京
- 5 马新民等：抚顺矿务局西露天矿北帮西区边坡稳定研究阶段报告，1990. 2
- 6 沈新普：岩土工程弹脆塑性数值研究及材料参数识别的反演方法，清华大学博士学位论文，1993；北京

FEM COMPUTATION ON THE OVERALL DESIGN OF UNIFIED REINFORCEMENT FOR OPEN-PIT AND GROUND-SURFACE DEFORMATION

Shen Xinpu Cen Zhangzhi Xu Bingye

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Liu Tianquan

(Central Coal Mining Research Institute, Beijing 100013)

Abstract The elasto-brittle-plastic finite element analysis has been taken on the prediction for the deformation of the north wall of Fushun west open-pit. Numerical simulation has been made on the reinforcement measures of the slope structure. Using parameter identification techniques and connecting with elasto-brittle-plastic finite element program, the displacement back analysis has been made on the material parameters of the rock-slope, the equivalent parameter values of the real slope structure have been obtained. The process of the rapid increment of the slope's deformation caused by open mining during 1987-1990 has been reappeared through the numerical simulation. Convincing analysis and proof have been given out for the cause of the rapid deformation increasing of the slope and surface. On the basis of the above works, calculation has been made on the possible deformation caused by further excavation.

Key words rock-slope, parameter identification, displacement back analysis, elasto-brittle-plasticity, open mining