

1 前 言

1.1 项目背景、目的及意义

露天矿边坡的稳定性是关系到露天矿安全生产的极其重要因素，是矿山开采设计和生产过程中首先遇到并应解决的安全技术问题。随着露天矿开采的不断深入，随时会有边坡问题的发生，特别是中软岩边坡。如何针对不同露天矿的工程地质特征，对中软岩露天矿采掘场及排土场边坡稳定性进行科学的评价，提出合理的边坡治理措施，确保露天矿实现高效、安全及持续生产。

内蒙古宏燃能源有限公司煤矿（以下简称“宏燃煤矿”）原名为内蒙古特弘全盈煤炭有限责任公司煤矿，2016年11月更名为宏燃煤矿。宏燃煤矿为合法生产煤矿，采矿许可证证号为C1500002010031120059731，生产规模为120万吨/年，开采方式为露天开采，矿田面积6.0059km²。

目前采场在首采区东部，已采至1050m水平，形成12个剥离台阶，形成6、9号煤层2个采煤工作面；已有2处排土场，其中一号外排土场位于矿田内，采场西北侧，二号外排土场位于矿田外，采场西侧，当前最大排弃标高1260m水平，台阶高度10-20m。目前已建成的地面设施均位于矿田外西侧。采掘场边坡岩性主要为煤层、泥岩、砂质泥岩和第四系砂土等，属于典型中软岩边坡，未发生大的滑坡。

本矿排土场排弃物料主要为第四系松散层中的砂土、泥岩和砂质泥岩等中软岩，排土场采用单斗-汽车工艺进行排弃，排弃时分层排弃，分层压实。本矿目前已实现完全内排，排土场位于采掘场东南侧。

本次边坡稳定分析区域为宏燃煤矿采掘场边坡及排土场边坡。目的是

通过查清边坡重点部位煤岩产状、岩性、构造等赋存特征，对重点区域边坡稳定性作出科学评价，提出边坡稳定性的综合治理措施以及合理的监测方案，对保障煤矿重要设施安全具有重要意义，为露天矿边坡工程设计与安全实施提供依据。

1.2 工作依据

- 1、设计委托书。
- 2、采矿许可证，证号：C1500002010031120059731。
- 3、《煤矿安全生产标准化基本要求及评分方法》。
- 4、《煤炭工业露天矿设计规范》（GB50197-2015）。
- 5、《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001）。
- 6、《地质灾害防治条例》（国务院[2003]394 号令）。
- 7、《滑坡防治工程勘察规范》（DZ/T0218-2006）。
- 8、《煤矿安全规程》（2016）。
- 9、《土工试验规程》（SL237-1999）。
- 10、《工程岩体分级标准》（GB/T 50218-2014）。
- 11、《内蒙古特弘全盈煤炭有限责任公司煤矿生产地质报告》。
- 12、《内蒙古特弘全盈煤炭有限责任公司煤矿技术改造修改初步设计》。
- 13、《内蒙古宏燃能源有限公司煤矿技术改造修改初步设计变更》。
- 14、《煤炭工业露天矿边坡工程监测规范》（GB51214—2017）。
- 15、《露天煤矿岩土工程勘察规范》（GB50778-2012）。
- 16、《水土保持工程设计规范》（GB 51018-2014）。
- 17、《煤炭工业露天矿边坡工程设计标准》（GB 51289-2018）。
- 18、其它有关的规程、规范和标准。

1.3 分析内容

为实现上述目标，项目主要针对以下几方面内容进行分析：

1、露天矿工程概况及地质概况分析

- (1) 分析宏燃煤矿剥采工程发展、地面设施布置情况及周边环境；
- (2) 总结以往的地质工作成果。

2、边坡工程地质分析

对露天矿开采范围内的边坡进行有针对性工程地质分析，进一步明确各层岩性、厚度，与边坡稳定性有关的地质构造的赋存状态、分布规律、接触关系及接触面的特征，分析影响边坡的工程地质因素，评价边坡稳定性。

3、岩土体物理力学参数分析

根据现有地质报告，结合以往本矿及邻矿的地质工作成果，综合确定边坡稳定性验算指标。

4、边坡稳定性影响因素

(1) 分析岩性、地质构造、岩体结构、水及采矿工程活动等因素对边坡稳定性的影响；

(2) 对各影响因素进行定性评价，确定滑坡的形成条件及诱发因素并分析可能造成的灾害；

(3) 结合工程地质及影响因素分析结果，判定采掘场边坡、排土场边坡的潜在滑坡模式。

5、滑坡机理数值模拟

- (1) 结合边坡工程地质条件，建立边坡数值模拟模型；
- (2) 对边坡失稳特征进行分析，揭示滑坡机理。

6、边坡稳定性控制措施分析

- (1) 对常用的露天矿滑坡防治方法适用性进行分析；

(2) 根据边坡稳定性极限平衡验算和数值模拟结果, 提出合理的边坡稳定性控制方案及措施, 以避免滑坡灾害发生, 为实现露天矿安全生产及最大限度回收煤炭资源提供技术保证。

1.4 分析方法及技术路线

本项目拟采用现场调研、工程地质分析、岩土体物理力学指标选定、理论分析、极限平衡分析法、数值模拟等手段和方法, 综合分析和评价宏燃煤矿不同区段采掘场现状边坡、排土场现状边坡的稳定性, 提出合理的边坡稳定性控制措施。

1、现场调研

了解宏燃煤矿剥采工程现状、发展规划情况以及采掘场、排土场边坡地质概况, 掌握剥采排工程发展到不同时期形成的边坡类型及特征。

2、工程地质模型确立

对露天矿区域地质背景及现状边坡工程地质特征进行分析, 查清各地层及弱层赋存特征, 为稳定性影响因素及滑坡模式分析提供基础。

3、岩土体力学指标分析

根据《内蒙古特弘全盈煤炭有限责任公司煤矿生产地质报告》, 结合以往本矿及邻矿的地质工作及成果, 同时考虑工程地质特征, 综合确定宏燃煤矿排土场排弃物料及采掘场各岩体物理力学指标, 为排土场及采掘场边坡稳定性分析提供基础资料。

4、理论分析

综合分析并确定采掘场地层岩土体的物理力学参数, 结合工程地质踏勘成果, 分析边坡稳定性影响因素, 并初步判定潜在滑坡模式, 为稳定性验算方法的选取提供依据。

5、极限平衡分析法

迄今为止, 在边坡稳定分析中, 刚体极限平衡法以其概念清晰、计算

简单、工程资料丰富而应用得最为广泛。常用的刚体极限平衡分析方法有：瑞典圆弧法、瑞典条分法、Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法、Sarma 法、剩余推力法、通用条分法、楔形体法、Newmark 法和美国陆军工程师团法。本项目采用 Bishop 法和 Morgenstern-Price 法验算边坡的稳定性。

6、数值模拟

由于传统的刚体极限平衡理论没有考虑岩土体内部的应力应变关系，无法分析边坡变形对边坡稳定性的影响。因此，本项目采用专业的有限元边坡分析软件来分析边坡岩体的应力情况，揭示滑坡机理。

2 矿区概况及工程地质特征分析

2.1 矿区概况

2.1.1 位置与交通

宏燃煤矿位于牛连沟地方煤矿详终区东部的 2 线与 7 线之间，行政区划隶属准格尔旗薛家湾镇，距薛家湾镇约 15km。其地理坐标为：

东 经：111°22'05"~111°24'22"；

北 纬：39°53'23"~39°55'21"。

根据原内蒙古自治区国土资源厅 2017 年 1 月颁发的采矿许可证，矿区范围由 20 个坐标拐点圈定，矿田面积 6.0059km²，开采深度 1120m 至 1023m。矿田各拐点直角坐标见表 2-1-1。

矿区范围拐点坐标表

表 2-1-1

拐点 编号	80 西安坐标系		拐点 编号	80 西安坐标系	
	X	Y		X	Y
1	4421063.37	37531629.17	11	4418353.34	37534659.19
2	4421013.36	37532529.18	12	4418253.34	37534324.19
3	4420560.36	37532239.17	13	4418118.34	37534239.19
4	4420553.36	37533459.18	14	4417953.34	37534234.19
5	4419213.35	37533459.18	15	4417383.34	37533449.18
6	4418878.35	37534214.19	16	4417453.34	37533349.18
7	4418493.34	37533859.18	17	4417453.34	37532429.17
8	4418453.34	37533909.18	18	4418193.34	37532019.17
9	4418733.35	37534174.19	19	4420373.36	37532019.17
10	4418563.34	37534659.19	20	4420378.36	37531429.17

宏燃煤矿经当地运煤公路（玻璃圪旦—扶贫煤矿沥青路）可至其西南部的薛家湾镇，距离约 15km。由薛家湾镇经 103 省道北至呼和浩特市 120km，经 109 国道西至鄂尔多斯市 145km，薛家湾至万家寨的薛魏线 80km；丰准铁路从薛家湾镇通过，是承担准格尔地区煤炭外运的专线，矿区到丰准铁路唐公塔集装站约 12km。

2.1.2 自然地理与气候条件

黄河流经矿区所在的煤田东缘，由北向南径流，是煤田周边的最大地表水体，为煤田的最低侵蚀基准面。贾窑圪旦南黄河水位标高为 968.53m（1985 年 9 月实测），煤田及边缘除黄河外无长年性地表水。矿田距离黄河边缘约 2km，矿田内也无常年地表水。

矿区属大陆半干旱性气候。冬季严寒而漫长，夏季炎热而短暂，昼夜温差大。春季多风，多为西北风，一般风速 10~15m/s，最大风速 18 m/s。每年十月至翌年四月为冻结期，最大冻土层深度为 1.50m。年平均温度 5.3℃~7.6℃，最高温度为 39.5℃，最低温度为 -24.3℃。年总降水量 231mm~459mm，平均 400mm，年总蒸发量 1824.7mm~2204.6mm。降水多集中在 7、8、9 三个月，占年降水量的 60~70%，而且多为雷暴雨，形成集中补给与集中排泄，由于地表植被稀少，沟深坡度大，大气降水以地表径流形式注入本区东缘最大的地表水体黄河之中，只有少数渗入地下。

根据《中国地震动参数区划图》（TB-18306-2015），煤矿所在区域地震动峰值加速度（g）为 0.10，对照烈度为 VII 度。

2.2 边坡工程地质特征

2.2.1 地层岩性

矿区内大部分地区被第四系黄土和风积沙所覆盖，只有局部的梁顶或冲沟中才有基岩出露。由于本区地处准格尔煤田东北部边缘，地层遭受剥蚀严重，部分地层缺失。根据地表出露及钻孔揭露，本区地层层序自下而

上为：奥陶系、上石炭统太原组，下二叠统山西组、下石盒子组，第三系上新统，第四系上更新统及全新统的近代沉积。由老到新分述如下：

1、中下奥陶统（ O_{1+2} ）

为浅海相沉积。岩性上部为浅灰、灰黄色中厚层白云岩。致密性脆，风化后呈黄褐色，下部为灰黄色薄层白云岩、白云岩夹竹叶状白云岩，化石少见。区内 9 个孔见到此层，钻孔揭露厚度 1.00m~5.67m。

2、上石炭统（ C_2 ）

(1)太原组下部（ C_{2t}^1 ）：为一套浅海相—过渡相细碎屑岩沉积。岩性由灰色、深灰色粘土岩、泥岩、砂岩及泥灰岩组成，上部夹有不稳定的煤线。底部为较稳定的灰色、灰白色厚层状铝土质泥岩（相当于 G 层铝土矿层位）和一层鸡窝状褐铁矿层（即“山西式铁矿”层）。

本组矿区内钻孔揭露厚度 2.97m~53.89m，平均 17.42m，全区分布。与下伏地层中下奥陶统（ O_{1+2} ）平行不整合接触。区内沟谷中有出露。

(2)太原组上部（ C_{2t}^2 ）：为海陆交互相沉积，是本区主要含煤地层。岩性以砂岩为主，其次为粘土岩、砂质粘土岩，含煤多层，根据岩性组合本组可划分为三个岩段。现由下至上分述如下：

第一段：起自底部粗砂岩（ K_1 ）至 9 号煤（或 9[±]煤）顶板之粘土岩或砂质粘土岩，含 10、9 号煤，局部含 9[±]煤层。岩性主要为灰白、浅黄褐色厚层~巨厚层状砂岩，黑、灰黑、青灰色粘土岩或砂质粘土岩夹煤层。在矿区西部发育 9[±]煤层，系由 9 号煤分叉而成。

第二段：起自第一段之上砂岩至 8 号煤（或 7 号煤）顶板之粘土岩，含 8 号煤，有时含 7 号煤，岩性以砂岩为主，灰白色长石质石英砂岩，厚层~巨厚层状，厚度变化大。

第三段：起自 K_2 砂岩至 6 号煤顶板粘土岩，含 6 号煤层，岩性以灰白色砂岩为主，及褐黄色长石石英砂岩，灰、灰白色粘土岩，灰色泥岩及砂

质粘土岩，厚～巨厚层状，厚度变化大。

本组地层在矿区内厚 12.24m～83.39m，平均 57.76m，全区分布。与下伏地层上石炭统太原组下部（ C_2t' ）整合接触，区内沟谷中有出露。

3、二叠系（P）

(1)山西组（ P_{1s} ）：为陆相碎屑岩沉积。含煤有 3 号、5 号煤，在矿区煤已风化为风化煤和风化粘土。山西组地层主要为砂岩、砂质粘土岩、风化粘土岩，山西组与太原组的分界砂岩（ K_3 ）基本上在全区发育，厚度变化大，但层位稳定。

本组地层在矿区内遭受剥蚀，大部分厚度不全，厚度 9.44m～63.63m，一般厚 39.86m，与下伏地层上石炭统太原组上部（ C_2t' ）整合接触。区内沟谷中有出露。

(2)下石盒子组（ P_{1x} ）：为内陆盆地砂泥质沉积。由于风化剥蚀，下石盒子组在矿区只保存了残留部分；地表出露多为该组的底部岩层，上部为灰绿色粗砂岩、砂质泥岩、砂质粘土岩、砂岩，局部含砾；下部由紫红色、绛紫色砂岩、砂质泥岩、泥岩，灰、灰绿色砂质粘土岩；底部为灰白、黄色粗砂岩（ K_4 ），局部含砾，为与山西组的分界标志。

本组地层厚度 0～35.76m，大部遭受剥蚀，厚度不全，与下伏地层山西组（ P_{1s} ）整合接触，区内沟谷中有出露。

4、第四系（Q）

(1)上更新统马兰组（ Q_3m ）：广布全区，为浅黄色黄土层，柱状节理发育，含钙质结核。

本统地层厚度变化较大为 2.82～108.00m，一般在 31.70m 左右。全区分布，不整合于下伏地层之上。

(2)全新统（ Q_4 ）：为近代风积沙，冲洪积砂砾层，淤泥、残坡积物等，厚度 0～5.00m。

2.2.2 地质构造

矿田构造简单，以宽缓的褶曲为主。矿区位于窑沟背斜的东翼，受褶曲的影响，矿区南部主要构造为走向近北东 25° 的一组背斜和向斜，以 346 号钻孔控制轴部的背斜（后脑包湾背斜），以及永 124 号钻孔控制轴部的向斜（后脑包湾向斜）。在西南部永 134 号孔附近有一小背斜，但均为十分宽缓的褶皱，倾角很缓，一般为 $3\sim6^\circ$ 左右。矿区北部为一具微弱波状起伏的宽缓褶曲基础上走向近南北，倾向东的单斜构造。

1、后脑包湾向斜：位于矿区南东部，总体方向呈北北东—南南西延伸，局部方向有变化，矿区内长约 1.85km，两端分别延出区外，西翼 $3\sim7^\circ$ ，东翼 $3\sim6^\circ$ ，为比较宽缓的近于对称的向斜。

2、后脑包湾背斜：位于矿区南东部，呈北北东—南南西延伸，矿区内长约 1.55km，两端延出区外，东翼倾角 $2\sim6^\circ$ ，西翼倾角 $3\sim6^\circ$ ，局部 9° ，在背斜轴部有后期产生的马家疙旦柱状陷落，位于矿区第 15、16 拐点处。

矿区内未发现断层及岩浆活动。矿田构造属简单类型。

2.2.3 岩体结构类型

本区第四系为松散土体，煤系地层为层状结构的中软岩体。

2.2.4 水文地质

1、岩性特征及含（隔）水性

将矿区各地层岩性及含（隔）水性特征由新至老分述如下：

（1）第四系全新统风积沙（ Q_4^{eol} ）：矿区内仅零星分布，一般在背风（东南）坡呈很小的新月形沙丘、沙梁。成分多为石英、燧石，厚度小。因受风力作用，位置不固定，透水而不含水。

（2）第四系全新统冲洪积层（ Q_4^{al+pl} ）：主要零星分布于窑沟，分布范围小、连续性差、厚 $0\sim3\text{m}$ 。岩性以中、细砂为主，夹砂砾石、卵石及淤泥。含孔隙潜水，因受厚度、分布面积的限制，富水性差。补给源为大气

降水，潜水位季节变化幅度大，对矿床充水无影响。

(3) 第四系上更新统马兰组 (Q_{3m})：黄土层，试验室定名为轻亚粘土。淡黄、褐黄色，粒度较均匀，以粉粒为主，垂直节理发育，局部含钙质结核，基本全区分布，2.80~108.00m，平均 32.78m；为透水不含水层。

(4) 二叠系下统下石盒子组 (P_{lx})：基本全区分布，在沟谷的沟头见有零星出露。受后期剥蚀作用的影响，本区仅残存中下部，地层厚度 0~35.76m。钻探中钻井液消耗量大，为透水不含水层。

(5) 二叠系下统山西组 (P_{ls})：基本全区分布，在较大沟谷有出露，平均厚 39.86m。岩性由灰白色中、粗砂岩，浅灰及灰黑色砂质泥岩、泥岩，褐灰色粘土岩，煤层组成。砂岩以泥质胶结为主，分选中等，局部含砾，裂隙较发育。在钻探过程中钻至下部砂岩层，钻井液消耗量明显增大，甚至严重漏水至不返水。

该组地层含裂隙砂岩承压水，是开采 6 号煤的直接充水含水层，据原详终区钻孔抽水试验资料：水头埋深 54.71m~59.40m，水头标高 1077.29m~1091.27m，单位涌水量 0.00218 L/s.m~0.00232L/s.m，渗透系数 0.01728m/d~0.006926m/d，矿化度 0.470g/l~0.516g/L，pH 值 7.1~7.9。

由以上资料知：山西组裂隙砂岩含水岩组富水性差。

(6) 石炭系上统太原组上部 (C_2t^2)：全区分布，区内较大沟谷有出露，平均厚 57.76m，是本矿区的主要含煤地层。上部为灰白色粗砂岩，深灰、灰黑色砂质泥岩、泥岩，6 号煤；中下部为灰黑、深灰色砂质泥岩、泥岩夹灰白色砂岩，底部为灰白色粗砂岩，硅质胶结，较致密。

本组地层含裂隙砂岩承压水，是开采 9 号煤的直接充水含水层。据钻孔抽水试验资料：水头埋深 57.82~61.24m，水头标高 1065.68~1091.96m，单位涌水量 0.002005~0.00219L/s.m，渗透系数 0.004419~0.006278m/d，矿化度 0.499~0.516g/L，pH 值 7.3~7.9。

由以上资料知：太原组裂隙砂岩含水岩组富水性差。山西组裂隙砂岩含水岩组与太原组裂隙砂岩含水岩组间有全区分布、层位稳定、厚度大的6号煤相隔，但受煤层风化的影响，二者有合二为一的趋势。

(7) 石炭系上统太原组下部 ($C_{2t'}$)：全区分布，出露于各沟口，据钻孔揭露，平均厚 17.42m。岩性以深灰、灰色砂质泥岩、泥岩为主，夹浅灰色细砂岩透镜体。本组地层以泥岩类为主，厚度稳定，硬度大，岩体完整性好，裂隙不发育，是本矿区及全煤田稳定的良好隔水层。与下伏地层为不整合接触。

(8) 奥陶系中统马家沟组 (O_2)：全区分布、各沟沟口有出露，厚约 100m。岩性为灰黄、棕灰色泥质灰岩，豹皮灰岩。据钻孔穿该层的资料，未见溶洞，仅见少量裂隙。

(9) 寒武系上统炒米店组 (C_3)：区内无出露，厚约 80m。上部为浅灰色、灰白色白云质灰岩及薄层泥灰岩，夹黄褐色中厚层竹叶状灰岩；中部为灰色泥灰岩及生物碎屑灰岩；下部为白云质灰岩，裂隙较发育。

(10) 寒武系中统张夏组 (C_2)：区内无出露，厚约 80m。岩性为浅灰、灰色鲕状灰岩、生物碎屑灰岩、含泥质白云质灰岩，夹竹叶状灰岩、钙质粉砂岩，裂隙较发育。

(11) 寒武系下统馒头组 (C_1)：区内无出露，厚约 30m，上部为紫、灰紫色含粉砂质泥岩、粘土质粉砂岩夹粉砂质白云岩；下部为肉红、灰白色细砾石英砂岩，泥质细粉砂岩，底部有 0.20m 左右暗紫色含砾石英砂岩。致密，不含水。

2、地质构造、地表水、地下水之间的关系

准格尔煤田总体构造轮廓控制着地下水的储存、富集、运动。走向近南北、东部隆起、西部拗陷，向西倾斜的单斜构造决定了地下水总的运动趋势为由东向西。总体的单斜及其间发育的幅度较小的宽缓褶皱形不成良

好储水构造，不易形成地下水的富集带，仅对地下水运动方向有所影响。

矿区内构造简单，产状平缓，大部分地段倾角小于 5° ，局部地段受后脑包湾向斜的影响，倾角达 10° 左右。构造对矿床充水无影响。

黄河流经矿区的东缘，距矿区东部边界约 2km。在矿区周边地段，黄河河床坡度大，下切侵蚀作用强烈，河谷狭窄。黄河河床地层全部为寒武、奥陶系，与石炭、二叠系地层未直接接触。准格尔煤田的众多生产窑及黑岱沟露天矿，矿坑涌水量均较小，从未发生过底板突涌水现象。可见寒武、奥陶系灰岩岩溶承压水与煤系地层含水岩组无水力联系。黄河是排泄东岸寒武、奥陶系地下水及煤田内地表水的天然场所，同时亦是西岸寒武、奥陶系含水层的补给源之一，与煤系地层含水岩组无水力联系。

小鱼沟有季节性溪流，流量变化大，常有断流。雨季水大，遇大到暴雨时汇集地表表流形成洪水，流量较大，但时间短暂，全年大部分时间无水。

综上：本矿区构造简单，构造对矿床充水无影响，矿区内无常年地表水体，黄河是矿区周边最大且唯一的地表水体，其与煤层直接充水含水层无水力联系，是排泄地表水的天然场所，为本矿区及全煤田的最低侵蚀基准面。

3、矿区水文地质勘查类型及复杂程度

本矿区主要可采煤层 6、9 号煤的直接充水含水岩组分别为山西组裂隙砂岩含水岩组、太原组裂隙砂岩含水岩组。各含水岩组的岩性由不同粒度的砂岩（细砂岩及以上砂岩）组成，其不同程度地发育有裂隙，充水空间较发育，连通性较好。山西组裂隙砂岩含水岩组顶部普遍有 1~2 层泥岩、粘土岩、砂质泥岩为隔水层与上覆地层相隔。下石盒子组的砂质泥岩、泥岩段亦为较好的隔水层，对阻隔大气降水渗入补给直接充水含水岩组起着良好作用。直接充水含水岩组间有全矿区稳定分布，厚度大的 6 号煤相隔，

但由于煤层风化，使局部地段的隔水性差，含水岩组有相互连通的趋势。各直接充水含水岩组补给源为，大气降水通过煤系地层露头或隐覆于黄土层之下的露头补给，补给区面积小，分布不集中，降水量少，决定了补给量有限，富水性差。

煤系之下的寒武、奥陶系灰岩、白云岩岩溶裂隙发育极不均匀，富水性差异极大。据区域资料，本矿区寒武、奥陶系岩溶裂隙承压水头标高 860m~880m。全区 6、9 号煤底板最低标高 1023m，即全部位于寒武、奥陶系岩溶裂隙承压水头标高（880m）之上，开采过程中不受寒武、奥陶系岩溶裂隙承压水的威胁。

黄河虽流经矿区东缘，但其仅与寒武、奥陶系地层有水力联系，与煤系地层无水力联系，是排泄区内地表汇水的天然场所。其排泄东岸（河东）寒武、奥陶系地下水，补给西岸（河西）寒武、奥陶系地下水。全区 6、9 号煤开采最低标高 1023m，即全部位于黄河水位标高（贾窑圪旦南 1985 年 9 月实测黄河水位标高 968.53m）之上。

综上：本矿区开采煤层的直接充水含水岩组为：裂隙砂岩充水（单位涌水量 $<1\text{L/s}\cdot\text{m}$ ），且易疏干，水文地质条件简单类型，即二类一型。

4、生产小窑水文地质特征

原报告调查小窑 19 个。据当时调查结果，大部分生产小窑无水，仅个别小窑有裂隙水渗出，最大的为永成一号井，排水量为 $46\text{m}^3/\text{d}$ 。

5、矿床充水水源、通道

矿区构造简单，其间发育有次一级波状起伏。构造对地下水的储存、富集及各含水岩组间的连通无影响，在采矿过程中，地下水不会通过构造导水通道进入矿坑。

2.2.5 工程地质

本矿田未做专门的工程地质工作，矿田南部与召富煤矿相邻，现为露

天开采，《生产地质报告》引用了召富煤矿的工程地质资料。

1、露天开采剥离物由黄土、岩石、煤组成。岩石自然状态单轴抗压强度以 $>15\text{MPa}$ 的硬岩为主，占基岩段的96.2%，需爆破松动。黄土层强度低，无需松动爆破。

依据《煤、泥炭地质勘查规范》（DZ/T0215-2002）：露天开采剥离物勘查类型：松散层（黄土）为第一类，即松散岩类；基岩为第三类，即硬岩类。

2、露天开采边坡为混合类型边坡。黄土层岩性比较单一，基本不含水，不需要专门疏干，依据《煤泥、炭地质勘查规范》（DZ/T0215~20027）：松散层边坡为一类一型，即松散岩石类简单型；岩石及煤边坡岩性组合较简单，结构面不甚发育，产状平缓，未发现明显的较弱夹层，含水层富水性差、水头压力小、持水性弱、易疏干，依据《煤泥、炭地质勘查规范》，岩石及煤层边坡为二类一型，即半硬岩石类工程地质条件简单型。

影响边坡稳定性的主要工程地质问题是：雨季遇大雨、暴雨，窑沟流域汇集的洪水对矿田南部边坡产生附加应力，及大雨、暴雨引起的地下水位迅速上升，水力坡度增大，渗透速度加快，渗透压力聚增，将对边坡的稳定性构成威胁。

2.3 岩土体物理力学指标确定

根据《内蒙古特弘全盈煤炭有限责任公司煤矿生产地质报告》。以及对各岩层粘聚力指标采用经验折减，并结合宏燃煤矿工程地质条件，确定岩土体物理力学指标如表 2-3-1 所示。

岩土体物理力学指标

表 2-3-1

岩石	容重(kN/m³)	粘聚力(Kpa)	内摩擦角(°)
第四系	18.22	25	19
泥岩	22.64	120	33
砂质泥岩	21.17	85	29
煤	13.13	46	27
排弃物	19.31	20	24

3 边坡稳定性影响因素及滑坡模式分析

边坡岩体的移动变形是一个复杂、不可逆的动态过程，且边坡的演变受到多方面因素的影响，正是由于不同条件下的边坡变形及稳定性作用因素不同，其变形破坏机制存在较大差异。因此，针对宏燃煤矿的实际条件，分析边坡稳定性影响因素及潜在滑坡模式至关重要。

3.1 边坡稳定性影响因素分析

边坡失稳的实质就是边坡岩体发生变形破坏的过程，而岩体的变形破坏则取决于岩体本身的强度特性和所处的应力状态。可以认为，边坡的失稳过程是在各种影响因素的共同作用下，岩体应力分布状态与其自身强度特性之间不断地相互作用而寻求新的平衡的过程。鉴于以上分析，边坡稳定性的影响因素可概括为岩体强度特性的影响因素和岩体应力分布的影响因素两大方面。改变或影响边坡岩体应力状态和强度特性的因素很多，其中主要有岩性、岩体结构、水的作用、风化作用、地震、天然应力、地形地貌及人为因素等。总的来说，露天矿边坡稳定性影响因素可分为自然因素、工程因素及时间效应。

3.1.1 自然因素

影响边坡稳定性的自然因素较多，主要包括岩体岩性特征、岩体结构、地质构造、原岩应力、地震作用、地下水及气象条件、风化作用等。

1、岩体岩性

边坡岩体的岩性是决定边坡稳定性及临近地表变形程度的关键因素。一般来说，矿物软，岩石强度较低；但矿物硬，岩石强度不一定高，岩石

强度的大小除取决于组成其矿物成份外，还取决于矿物颗粒间的组合特征。岩体的物理性质主要包括比重、容重、空隙度、含水率、吸水率、透水性、饱和度、可溶性、热胀性等；岩体的力学性质包括抗拉强度、抗压强度、抗剪强度、残余强度、粘聚力、摩擦系数、阻尼系数、弹性模量、泊松比等。上述物理力学参数相互效应明显，一个参数的变化在一定的工程地质条件下则引起另外几个参数的相应变化。

2、地质构造

地质构造对岩质边坡稳定性的影响是十分明显的，在区域构造复杂，新构造运动比较活动的地区，边坡稳定性较差，失稳边坡发育的方式、分布的疏密与构造线的方向及部位有密切的关系。控制区域性滑坡、崩塌发育分布的最基本的构造因素是构造线走向，当河谷走向与构造线方向垂直时，岸坡比较稳定，较少发生滑坡与崩塌；当河谷走向与构造线方向一致时，处于向斜河谷的顺向坡是滑坡发育敏感的部位；几种构造体系复合交接部位的向斜河谷则是滑坡、崩塌发育均敏感的部位。地质构造构成边坡失稳的破坏面或周界，直接控制边坡变形破坏的形式和规模。

3、岩体结构

岩体是地质历史上遭受变形、破坏、多种结构面切割的地质体。岩体结构是结构面性状和结构面切割程度的反映，表征了地质构造作用严重程度和结构面发育情况，是岩体的基本特性之一。岩体结构发育特征是岩体强度、变形、渗透性和边坡岩体移动变形破坏模式的控制因素。地质构造因素对岩质边坡的稳定性影响十分明显，岩层或结构面的产状对边坡稳定亦有很大影响。岩体结构面的成因类型很多，性质也很复杂，各具不同的特征，考察结构面的状态，主要考虑以下几点：①结构面的物质组成；②结构面的延展性与贯通性；③结构面的平整光滑程度、平直完整程度、光滑度以及起伏差等特征；④结构面的密集程度。

岩体的岩性和岩体结构虽然是自然地质运动形成的，但是人类活动也可以改变其结构和性态。采矿活动破坏了岩体的完整性，使其周围岩层产生松动和裂隙；在水或其他因素的作用下，坚硬岩性的岩石组成的岩体也可以弱化或软化，容易被破坏。为了保护岩体或与岩体相关的建筑物，通过有意识的治理，也可以改善岩体的强度或结构，使其向有利的方向发展。

4、原岩应力

原岩应力是控制边坡岩体节理裂隙发育及边坡岩体变形的重要因素之一。边坡内部的初始应力主体是自重应力和构造应力。坡体中结构面的存在使边坡内部应力场分布变得复杂，在结构面周边会产生应力集中或应力阻滞现象，当应力集中的量值超过岩体的强度时，边坡岩体便会发生破坏。

5、地下水及气象条件

地下水对边坡岩体变形破坏的影响主要表现在以下几个方面：软化组成岩石的矿物，降低岩体特别是滑面岩体的强度，对于软弱岩体，强度软化系数一般仅为 0.5~0.7 左右；地下水的静水压力一方面降低了滑面上的有效法向应力，从而降低滑面的抗滑力，另一方面切割面中的静水压力又增加了滑体的下滑力，从而使边坡的稳定条件恶化；在节理化岩体中，地下水还会产生渗透力，增加岩体变形失稳的作用力。气象条件影响边坡稳定的方式多种多样，有风化作用、降雨作用、风蚀作用以及冻融作用等，但较为突出的是降水作用，尤其是暴雨。大量的边坡失稳均发生在暴雨季节。

6、风化作用

长期暴露在地表的边坡岩体，受水文、气象变化的影响，逐渐产生物理和化学风化作用，出现各种不良现象，如产生次生矿物、节理张开或裂隙扩大，并出现新的风化裂隙，岩体结构破坏、容重减小、物理力学特性降低等，对边坡变形的发生和发展起着促进作用。实际资料表明，岩石遭受风化作用后，边坡的稳定性均有不同程度的降低。岩石风化愈深，边坡

的稳定性愈差。

7、地震效应

地震力对边坡稳定性的影响主要体现在对边坡岩体结构的破坏和动力作用上。地震一方面可以直接触发边坡破坏失稳，另一方面还会使边坡岩体的结构发生破坏或改变，形成特殊的边坡岩体结构。

3.1.2 工程因素

对露天矿边坡稳定性的工程因素主要包括开挖卸荷效应、爆破振动效应以及边坡设计等。

1、开挖卸荷效应

露天矿开挖作业会引起边坡岩体的卸荷回弹，导致坡面岩体应力发生松弛。由于开挖破坏了岩体中的自然平衡状态，使岩体中应力场的重新分布，从而导致边坡产生变形和位移。当这种应力重新分布的结果处在边坡岩体强度的允许范围内时，边坡岩体将不致破坏，边坡是稳定的；当这种自我调节的应力、变形超过了边坡岩体的允许范围，边坡岩体将发生失稳破坏，此时要保持边坡稳定则必须采取人工加固工程措施。因此，开挖卸荷效应是露天矿边坡变形和破坏的根本原因。

2、爆破振动效应

对露天矿边坡的开挖作业一般采取钻孔爆破方式，但爆破炸药量、爆破方式及起爆顺序的不同，对岩质边坡的稳定性动力作用和松动作用也不同。爆破产生的冲击应力对边坡岩体产生冲击和剪切作用，引起边坡岩体强度衰减，导致边坡失稳；另外，爆破作用会使岩体中原有的节理、裂隙张开并产生新的裂隙，引起岩体产生松动而破坏其原有的完整性，致使边坡稳定性降低。实践表明，常规爆破方法对边坡稳定性影响最大，而微差爆破、预裂爆破和光面爆破的影响则相对较小。

3、边坡设计

边坡设计也是其稳定性的关键影响因素，边坡形状与几何尺寸即边坡施工断面形状、边坡高度、坡度等均会对边坡稳定性起到巨大的影响。边坡坡度越大越易失稳，边坡坡度小则越稳定；边坡高度越大越易失稳，边坡高度越小越稳定。坡形对边坡稳定性的影响主要有：

（1） 边坡角

随开挖形成的边坡角的加大，坡肩附近的张应力和坡脚处的剪应力将发生较大的变化，特别是坡脚处的剪应力集中程度将显著提高，从而直接影响边坡的稳定程度。

（2） 边坡高度

边坡高度对边坡稳定性的影响类似于开挖坡度的变化，但其影响比坡度的影响要小得多，开挖相同高度的边坡时，坡内应力的变化是很平缓的，一般，在坡高变化不大的情况下，坡高的影响很小，可不作考虑。

3.1.3 时间效应

露天矿边坡的变形和破坏大多与岩体中软弱夹层的时效蠕变特征有着较大的关系，其抗剪强度随时间的增加而降低。如剪力不超过层面的长期剪切强度时，边坡处于稳定状态；如剪力超过层面的长期抗剪强度时，边坡便发生不稳定蠕变，最后达到加速蠕变而发生滑坡。

针对宏燃煤矿的实际条件，影响排土场及采掘场边坡稳定性的主要因素为煤层顶底板弱层、地下水、边坡的坡高和坡角、岩土体物理力学性质和排弃场地基底岩土体的物理力学特性等。

3.2 边坡潜在滑坡模式分析

3.2.1 采掘场边坡滑坡模式

露天矿采掘场边坡的破坏模式主要有剥落、崩落、倾倒、滑动(包括平面滑动、圆弧滑动和楔体滑动)等，其中，滑动是最主要和最常见的变形破

坏类型。每种模式都由不同的因素所控制，因此在对宏燃煤矿排土场及采掘场边坡进行稳定分析和治理时，首先要判断清楚可能存在的破坏模式，然后再采取相应的分析方法和治理措施。从岩体结构控制论的角度出发，边坡破坏模式主要取决于节理、裂隙的发育情况。边坡失稳主要取决于抗滑力和下滑力之间的关系，对于宏燃煤矿采掘场边坡滑坡模式主要受采矿工程活动及弱层(带)控制，即随着采剥工程的发展，逐渐将边坡内赋存的弱层揭露于边坡坡面上，被揭露的弱层极可能成为滑体的下部边界。当然，弱层的强度指标不是特别差时，仍可能发生近似的圆弧滑动。

鉴于以上分析，宏燃煤矿采掘场边坡存在 2 种潜在的滑坡模式：不受弱层影响时，易发生圆弧滑动；受到弱层影响时，易发生以出露弱层为底界面的圆弧-直线滑动。

3.2.2 排土场边坡滑坡模式

根据以往的分析成果，排土场边坡主要的滑坡模式有 5 种，具体见表所列 3-2-1。

排土场的典型滑坡模式

表 3-2-1

序号	滑坡模式	发生条件
1	沿排土场地地表接触面发生的滑坡	当排土场地的坡度较大或者当排土场地表面上的抗剪强度低于坡体与场地地层的抗剪强度时，排土场边坡容易沿着堆积场地表面发生滑动，从而形成滑坡。
2	沿排土场地下部的软弱夹层发生的滑坡	若排土场地内部含有软弱层时，随着排斥物的堆积高度不断增加，一旦坡体的自身荷载超过下部软弱层的承载能力，排土场边坡将会沿着场地下部的软弱层发生滑坡。
3	排土场边坡表层的局部坍塌、错动	由于排土场的局部堆积坡度过大，若上部继续进行堆积时，有可能打破局部应力平衡，引发坡体错动，形成新的应力平衡状态。
4	沿排土场边坡内部滑面形成的滑坡	主要是由于排斥物料堆积过高，同时受到降雨、地震等不利因素的影响，坡体内部材料的抗剪强度降低，从而导致滑坡的发生。

5	泥石流	由于排土场坡体的物质结构较松散，因而为泥石流的形成提供了丰富的物质来源。若排土场地位于山谷之中，遇到暴雨等特定的水动力时，就会激发排土场边坡发生滑坡，然后快速转化成高速流动的泥石流。多见于南方露天矿排土场。
---	-----	---

对比该表，可以看出，宏燃煤矿排土场边坡的稳定性主要受地形条件、基底性质和排弃物性质的影响，考虑到宏燃煤矿排土场的工程地质条件，其潜在滑移模式主要有 2 种：排土场边坡内部滑面发生的圆弧形滑动和以基底四系弱层为底界面的圆弧-直线组合滑动。

4 边坡稳定性分析

极限平衡分析法是工程界运用最早、最广泛的分析方法。20 世纪 30～40 年代，费伦纽斯和泰勒根据极限平衡原理，在前人工作的基础上提出了条分法(瑞典法)，此后，毕肖普、萨尔玛、简布等提出了各种假设条件及其稳定分析方法。这些方法实质都是条分法，即凭经验将边坡体分成若干条块，在对条块的侧面的作用力作适当假定后对各条块作静力平衡分析，通过代数和求边坡安全系数。在计算机发展的今天，可以编制程序，通过各种优化方法来计算得到最危险滑动面和最小安全系数。对于一般岩质边坡，由于实际岩体中含有大量不同产状和特性的不连续结构面，因此可按刚体极限平衡理论，对控制边坡稳定的某一组结构面来分析边坡的稳定性，并考虑各种不利因素影响。

由于传统的刚体极限平衡理论没有考虑岩土体内部的应力应变关系，无法分析边坡破坏的发生和发展过程，无法边坡变形等因素对边坡稳定性的影响。因此，当边坡破坏机制复杂或边坡分析需要考虑应力变形时，宜结合数值模拟进行分析。

因此，本项目采取极限平衡和数值模拟相结合的方式分析与评价宏燃煤矿采掘场和排土场边坡稳定性。

4.1 极限平衡

4.1.1 极限平衡理论概述

1、安全稳定系数定义

边坡安全系数 F 指把岩土体的抗剪强度指标减小至 c'/F 和 $\tan \phi'/F$ ，则

岩土体沿着滑面各处都处于极限平衡，如下：

$$\tau = c'_e + \sigma'_n \cdot \tan \phi'_e, \quad (4.1)$$

式中： $\tan \phi'_e$ —值为 $\tan \phi' / F$ ；

c'_e —值为 c' / F ；

F —稳定系数；

c' —内聚力；

ϕ' —内摩擦角。

2、摩尔—库仑强度准则

假如岩土体某段顺着某滑面发生滑动。该段在这个滑面各处均达极限平衡，就是 σ'_n 和 τ 遵循 Mohr-Coulumb 强度准则。设置条块底的法向力和切向力分别为 N 和 T ，则有：

$$\Delta T = c'_e \Delta x \sec \alpha + (\Delta N - u \Delta x \sec \alpha) \tan \phi'_e \quad (4.2)$$

式中： $\tan \alpha$ —块底倾角，值为 dy / dx ；

u —孔隙水压力，通常定义孔隙水压力系数 $r_u = u / (dW / dx)$ 。

3、力平衡条件

对已划分的条块，各条块和整个岩土体均需要求力和力矩平衡。

4.1.2 方法的选择

极限平衡法是当前边坡稳定性分析的常用方法，其具有计算模型简单、计算参数量化准确、计算结果直截实用的特点。在极限平衡法理论体系形成的过程中，出现过一系列简化计算方法，诸如瑞典法、毕肖普法和陆军工程师团法等，不同的计算方法，其力学机理与适用条件均有所不同。随着计算机的出现和发展，又出现了一些求解步骤更为严格的方法，如 Morgenstern-Price 法、Spencer 法等。

考虑到采掘场和排土场滑坡的潜在模式是圆弧滑面滑动和圆弧直线型滑动，因此本评价报告仅对 Bishop 法和 Morgenstern-Price 法进行分析，并

选用基于该 2 种算法原理的软件进行边坡稳定性验算。2 种方法的原理分述如下：

1、Bishop 法

Bishop 法是对提出边坡稳定分析圆弧滑动分析法的 Fellenius 法作了重要改进的一种计算方法，Bishop 法率先提出了安全系数的定义，对条分法的发展起到了重要的作用。然后通过假定土条间的作用力为水平方向，求出土条间的法向力。它都是通过力矩平衡来确定安全系数。

Bishop 法设滑面为圆弧面，安全系数表述为对滑面旋转中心的抗滑力矩与下滑力矩之比，每个分条都处于力的平衡状态。

按分条铅垂方向力的平衡，则分条底部的有效法向力 P'_n (参见图 4-1-1)：

$$P'_n = \frac{[W + (X_n - X_{n+1}) - L(u \cos \alpha + \frac{C}{F} \sin \alpha)]}{m_\alpha} \quad (4.3)$$

式中： $m_\alpha = \cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi / F_s$ 。

安全系数为：

$$\frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \{ [Cb + \tan \phi (W - ub) + (X_n - X_{n+1})] / m_\alpha \} \quad (4.4)$$

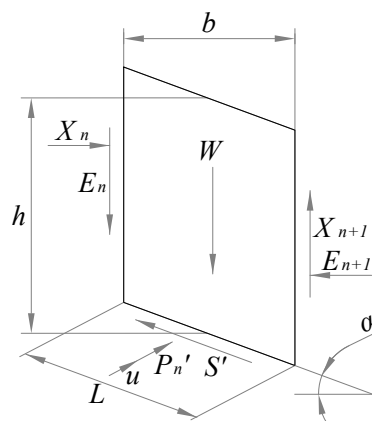


图 4-1-1 毕肖普法分条间力

Bishop 方法是考虑了分条间力的作用进而来求解安全系数的。 E_n 和 E_{n+1}

是分条间的法向力，它不存在于安全系数的表达式中，因为它是通过平衡方程在推导安全系数的过程中被消去的，每个分条的力都处于平衡状态，整个滑体的力矩处于平衡状态，单个分条力矩的平衡条件没有被考虑，由于很难准确求得分条间的剪力 $X_n - X_{n+1}$ ，所以为了考虑实用性，设 $X_n - X_{n+1} = 0$ ，即分条间剪力的作用被忽略，这就是 Bishop 简化法。

2、Morgenstern-Price 法

Morgenstern-Price 法的特点是考虑了全部平衡条件与边界条件，这样做的目的是为了消除计算方法上的误差，并对 Janbu 推导出来的近似解法提供了更加精确的解答。对方程式的求解采用的是数值解法，滑面的形状为任意的，稳定系数采用力平衡法。

Morgenstern-Price 法对任意曲线形状的滑裂面进行分析，推导出了既满足力平衡又满足力矩平衡条件的微分方程，是国际公认的最严密的边坡稳定性分析方法。虽获得了数学形式上的严格，但计算起来很不方便，一些学者对其进行了改进，陈昌富在他们的基础上，不改变其基本假定，建立了便于计算的非微分形式的 Morgenstern-Price 法。如图 4-1-2 所示，作用在土条上的作用力有：①土条的自重 W_i 。②条块底面的法向反力 N_i 、抗剪力 T_i 及孔隙水压力 u_i 。③土条两侧的法向力 E_i 、 E_{i+1} 及竖向剪切力 X_i 、 X_{i+1} 。④土条重心作用着水平地震惯性力 KG_i ， K 称为地震加速度。

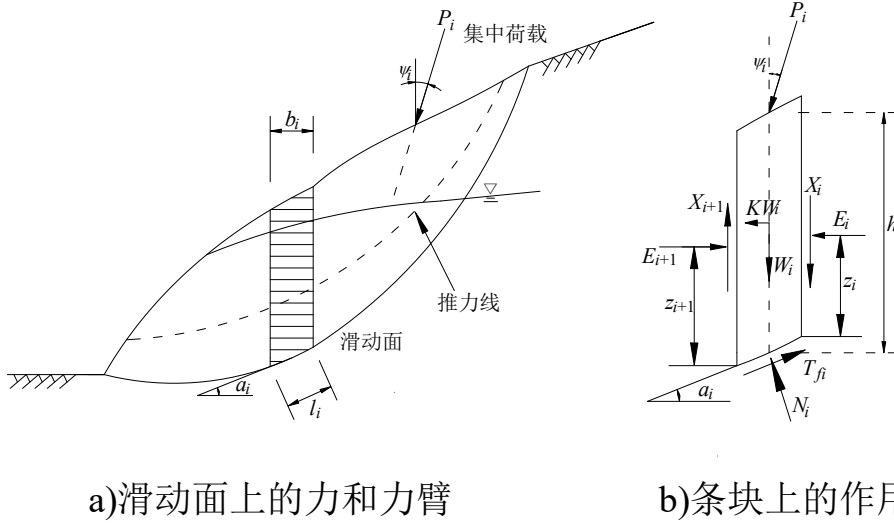


图 4-1-2 Morgenstern-Price 法验算简图

取土条底面切向力的平衡，有

$$T_{fi} = (P_i \cos \psi_i + W_i + X_i - X_{i+1}) \sin \alpha_i + (P_i \sin \psi_i + KW_i + E_i - E_{i+1}) \cos \alpha_i \quad (4.5)$$

根据安全系数的定义和摩尔-库伦破坏准则

$$T_{fi} = \frac{c'_i l_i}{F_s} + (N_i - u_i l_i) \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \quad (4.6)$$

取土条底面法向力的平衡，有

$$N_i = (P_i \cos \psi_i + W_i + X_i - X_{i+1}) \cos \alpha_i + (P_i \sin \psi_i + KW_i + E_i - E_{i+1}) \sin \alpha_i \quad (4.7)$$

在 Morgenstern-Price 法中，假定各条块之间的条间力 E 和 X 存在以下函数关系：

$$X = \lambda f(x) E \quad (4.8)$$

式中： λ 为任意常数； $f(x)$ 为条间力函数，它与边坡坡面形状和滑动面形态有关，当 $f(x)$ 为常数，即为 Spencer 法；如取 $f(x)=0$ ，即为 Bishop 法。其中 x 为线性归一化后滑动体水平方向的坐标。

联立式(4.5)~式(4.8)，最终可得条间力 E 的递推公式

$$E_{i+1} = \frac{A_i + \lambda f_i B_i}{A_i + \lambda f_{i+1} B_i} E_i + \frac{G_i (B_i + A_i K) - C_i P_i + D_i}{A_i + \lambda f_{i+1} B_i} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4.9)$$

$$\text{式中: } A_i = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \sin \alpha_i, \quad B_i = \sin \alpha_i - \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \cos \alpha_i$$

$$C_i = \sin(\psi_i - \alpha_i) + \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \cos(\psi_i - \alpha_i), \quad D_i = \frac{u_i l_i \tan \varphi'_i - c'_i b_i}{F_s \cos \alpha_i}$$

若定义条间力矩为条间力对条间界面与滑动面的交点的力矩,从而可得条间力矩为

$$\begin{cases} M_i = E_i z_i \\ M_{i+1} = E_{i+1} z_{i+1} \end{cases} \quad (4.10)$$

因而得条间力矩递推公式

$$M_{i+1} = M_i + \frac{b_i}{2} (\tan \alpha_i - \lambda_i f_i) E_i + \frac{b_i}{2} (\tan \alpha_i - \lambda_i f_{i+1}) E_{i+1} + \frac{1}{2} K W_i h_i - P_i h_i \sin \psi_i \quad (4.11)$$

由式(4.9)和式(4.11)可得一非线性方程组,未知量为 λ 和 F_s ,解此方程组便可解得安全系数 F_s 。求解上述方程组应满足边界条件

$$\begin{cases} E_1 = E_a, M_1 = M_a = E_a z_a \\ E_{n+1} = E_b, M_{n+1} = M_b = E_b z_b \end{cases} \quad (4.12)$$

式中: E_a , E_b , M_a , M_b 分别为端部条间力和力矩。

这样,式(4.9)和式(4.11)组成的方程组可简化为如下形式

$$\begin{cases} g_1(\lambda, F_s) = E_{n+1} - E_b = 0 \\ g_2(\lambda, F_s) = M_{n+1} - M_b = 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

其中, E_{n+1} 和 M_{n+1} 分别称为不平衡推力和不平衡力矩,分别由式(4.9)和(4.11)递推求得。方程组(4.13)只含有 λ 和 F_s ,可利用 Newton-Raphson 法求解。

4.2 数值模拟

本项目边坡数值模拟采用有限元分析软件,该软件是一款用于岩土结构中的应力和变形分析的专业软件,可以求解线弹性变形问题、高度复杂的非线性弹塑性问题,用总应力法和有效应力分析方法,还可以执行诸如堆载和开挖等工况分析,进行软土固结分析,以及包含排水措施的固结分析。

有限单元法考虑了边坡岩体的不连续介质特点，避免了极限平衡法将坡体视为刚体和过于简化边界条件的缺点，能够接近实际的边坡的应力场和变形场。

有限单元法可用于求解弹性、弹塑性、粘弹塑性、粘塑性等问题。将连续系统分割为有限个分区或单元,对每个单元提出一个近似解,再将所有单元按标准方法组合为一个与原有系统近似的系统,基于等价于微分方程的积分原理组建节点平衡方程组,并利用虚功原理与最小势能原理求解。

1、有限元分析的数学—力学原理

有限元法与具体力学模型相结合，求解边坡变形失稳的数学—力学原理、分析步骤如下：

(1) 建立离散化有限元计算模型

用一定形式的单元类型（三角形或四边形），将计算模型划分为适当大小的有限个单元，并假定各单元间的连接通过节点来实现，同时确定荷载及位移边界条件。

(2) 单元位移模式分析、单元应变及应力

位移模式一般选择为坐标的多项式，写成矩阵的形式则有：

$$f=[N]\{\delta\} \quad (4.14)$$

式中：[N]为形函数矩阵；

$\{\delta\}$ 为单元节点位移矩阵。

根据几何方程，对上式求偏导数，可得到单元应变，即：

$$\{\varepsilon\}=[B]\{\delta\} \quad (4.15)$$

式中：[B]为应变矩阵。

根据物理方程及(4.15)式，从而可得到单元节点位移 $\{\delta\}$ 表达的单元应力计算公式：

$$\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon\}=[D][B]\{\delta\} \quad (4.16)$$

(3) 单元刚度分析

通过虚功原理，对于单元节点与节点位移之间的关系为：

$$[Ke]\{\delta\} = \{F\} \quad (4.17)$$

式中： $\{F\}$ 为单元节点力；

$[Ke]$ 为单元刚度矩阵，可由下式确定：

$$[Ke] = \int_u [B]^T [D] [B] du \quad (4.18)$$

式中： $[D]$ 为弹性矩阵。

(4) 形成荷载列阵 $\{R\}$

将各单元的体积力、面力等均静力等效原则移置到各单元的节点上，计算公式为：

$$\begin{aligned} \{P_u\} &= \int_u [N]^T \{P\} du \\ \{P_s\} &= \int_s [N]^T \{P\} ds \end{aligned} \quad (4.19)$$

式中 $\{P_u\}$ 、 $\{P_s\}$ 分别为作用于单元的体积力及面力的等效节点荷载，设环绕某节点I有K个单元，则I节点上的外荷载 $\{R_i\}$ 为：

$$\{R_i\} = \sum_{e=1}^k \{P_{ui}^{(e)}\} + \sum_{s=1}^k \{P_{si}^{(e)}\} + P_i \quad (4.20)$$

式中 P_i 为作用于I节点上的集中力，荷载列阵 $\{R\}$ 为：

$$\{R\} = [R_1, R_2, R_3, \dots, R_n]^T$$

(5) 形成总体平衡方程

将各单元节点力与节点位移之间的关系迭加，形成以节点位移列阵 $\{\delta\}$ 为基本未知量的线性代数方程组：

$$\begin{aligned} [K] &= \sum_{e=1}^n [K_e] \\ [K]\{\delta\} &= \{R\} \end{aligned} \quad (4.21)$$

式中： $[K]$ 为总体刚度矩阵。

(6) 破坏准则

破坏准则通常采用比较符合岩石材料的 Druck-Prager 准则:

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K$$

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{(9 + 3 \sin^2 \phi)}} \quad (4.22)$$

$$K = \frac{3C \cdot \cos \phi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \phi}}$$

式中: I_1 、 J_2 分别为应力张量和应力偏量的第一和第二不变量;

C 、 ϕ 为岩石的抗剪强度参数;

对于破坏单元要进行应力转移, 破坏单元的转移应力为:

$$\{\sigma_0\} [D_{ep}] [B] \{\sigma\}^e \quad (4.23)$$

式中: $[D_{ep}]$ 为弹塑性矩阵, 调整后单元的应力为 $\{\sigma\} - \{\sigma_0\}$ 。

(7) 总体平衡方程求解

求解 (4.21) 式, 通常采用增量初应力法, 得出节点位移矢量 $\{U\}$ 。根据相应节点的位移 (4.15)、(4.16) 式计算各单元的应变和应力, 然后根据材料力学的应力状态理论求出各单元的主应力 (σ_1 、 σ_3) 和最大主应力 (σ_1) 与 X 轴的夹角 (α):

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2/4 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2/4 + \tau_{xy}^2} \quad (4.24)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

4.3 储备系数确定

本项目稳定系数的确定主要按照 (表 4-3-1) 《煤炭工业露天矿设计规范》(GB50197-2015) 有关规定, 依据我们对宏燃煤矿地质条件的认识程度和对所收集到的资料的掌握程度, 结合边坡存留时间, 综合分析确定本项目的稳定系数如下: 采掘场边坡稳定系数为 1.1, 排土场边坡稳定系数为 1.2。

边 坡 稳 定 系 数 K

表 4-3-1

边 坡 类 型	服务年限（a）	稳定系数 K
边坡上有特别重要建筑物或边坡滑落 会造成生命财产重大损失者	>20	>1.5
采掘场最终边坡	>20	1.3~1.5
非工作帮边坡	<10	1.1~1.2
	10~20	1.2~1.3
	>20	1.3~1.5
工作帮边坡	临 时	1.05~1.2
外排土场边坡	>20	1.2~1.5
内排土场边坡	<10	1.2
	≥10	1.3

4.4 验算剖面的选取

根据宏燃煤矿 2022 年 10 月份提供的现场实测图，结合采掘场、排土场现场踏勘的实际情况选取验算剖面。验算剖面位置见附图。

4.5 采掘场边坡验算

1、采掘场北帮

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 51m，边坡角 35°，具体分析如图 4-5-1~图 4-5-4 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，采掘场边坡底部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 1.263>1.1 和 Morgenstern-Price 法为 1.262>1.1，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

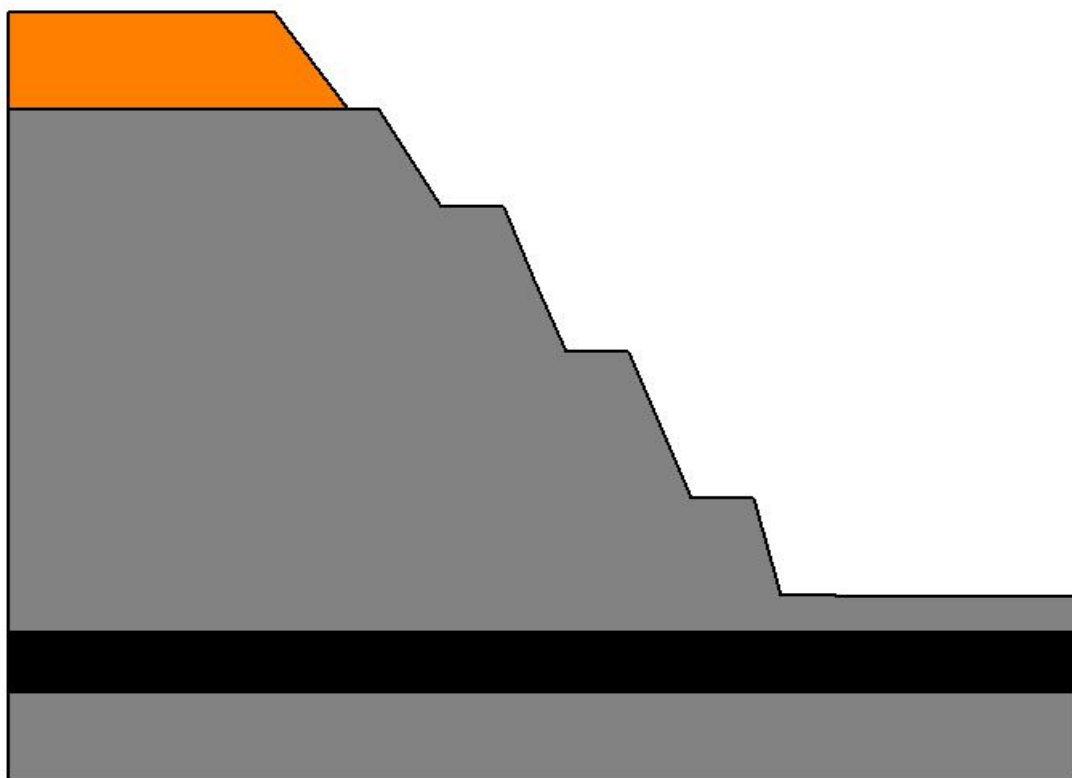


图 4-5-1 边坡体模型示意图

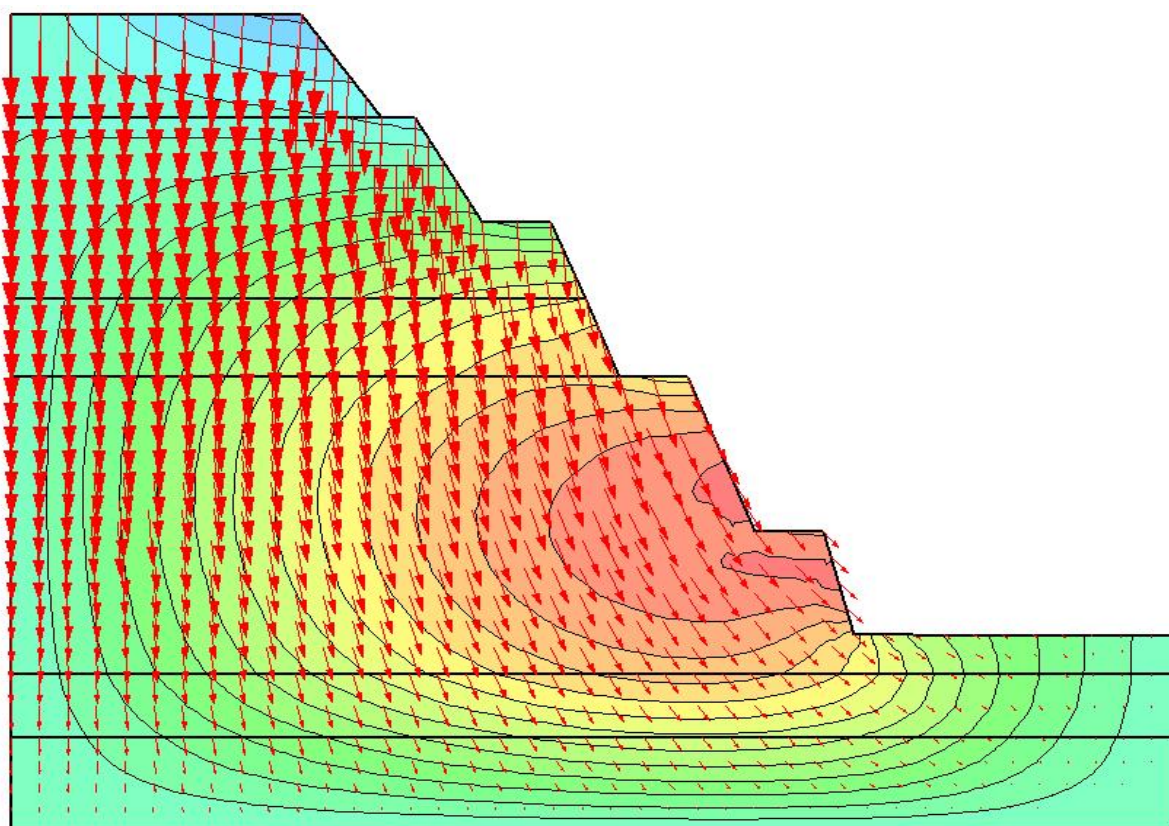


图 4-5-2 位移运动矢量图

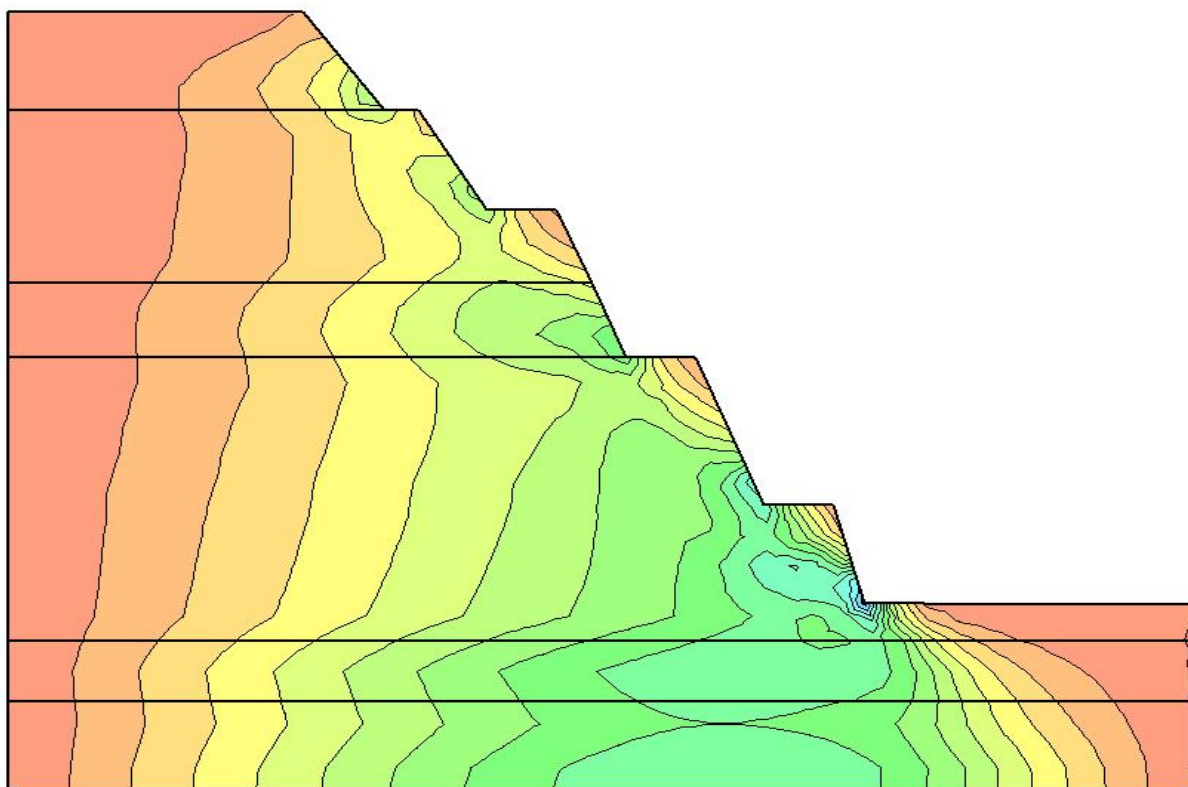


图 4-5-3 剪切应力应变云图

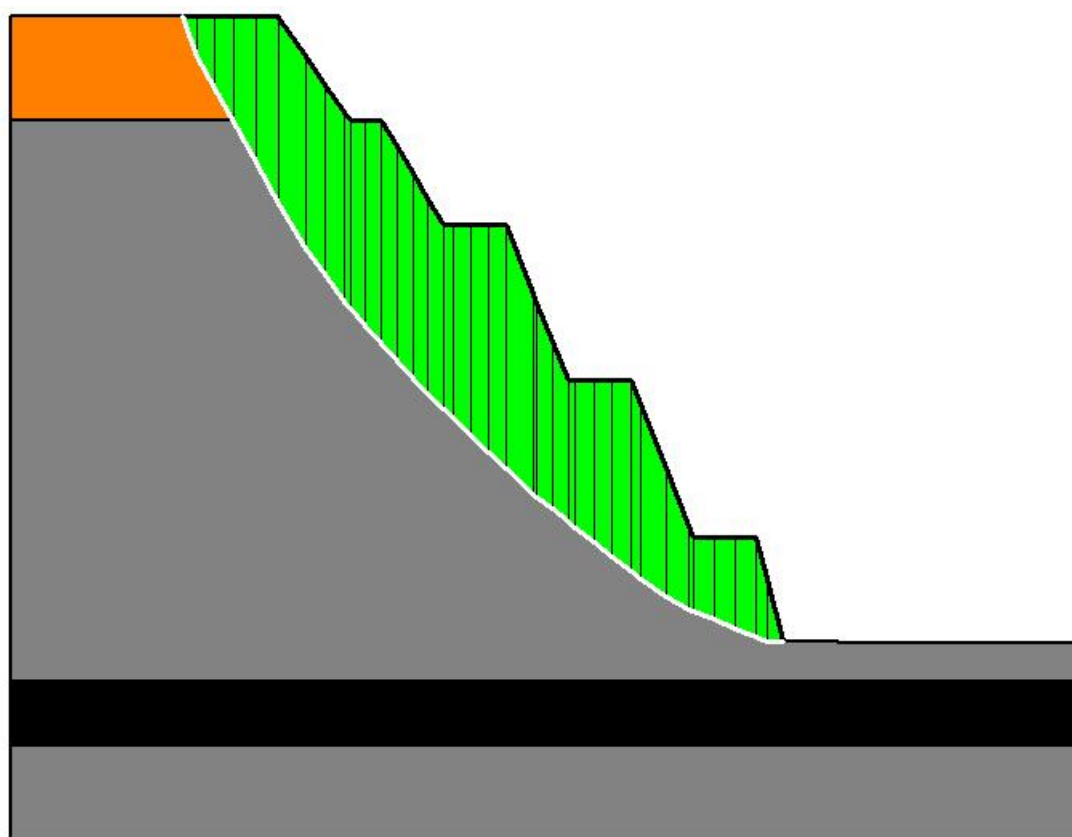


图 4-5-4 极限平衡验算示意图

2、采掘场南帮

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 106m，边坡角 35° ，具体分析如图 4-5-5～图 4-5-8 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，采掘场边坡底部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.206 > 1.1$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.203 > 1.1$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

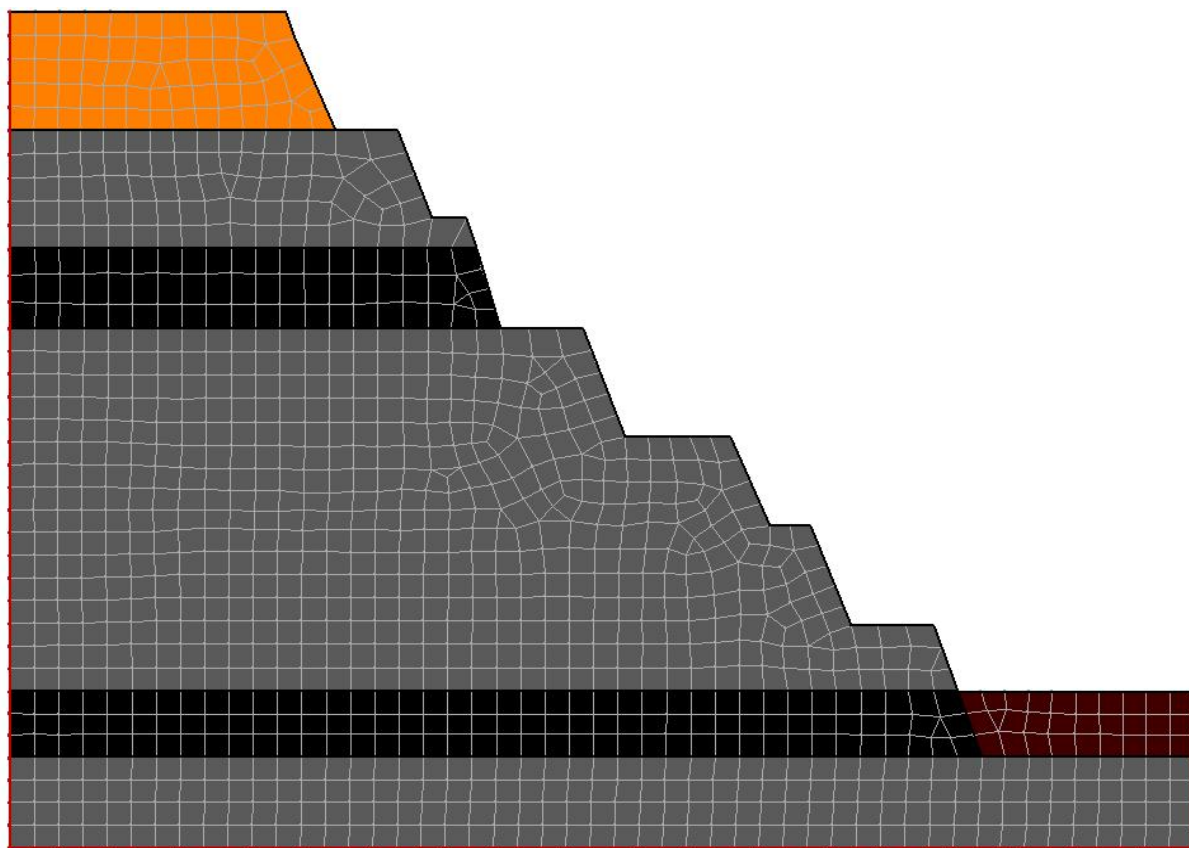


图 4-5-5 边坡体模型示意图

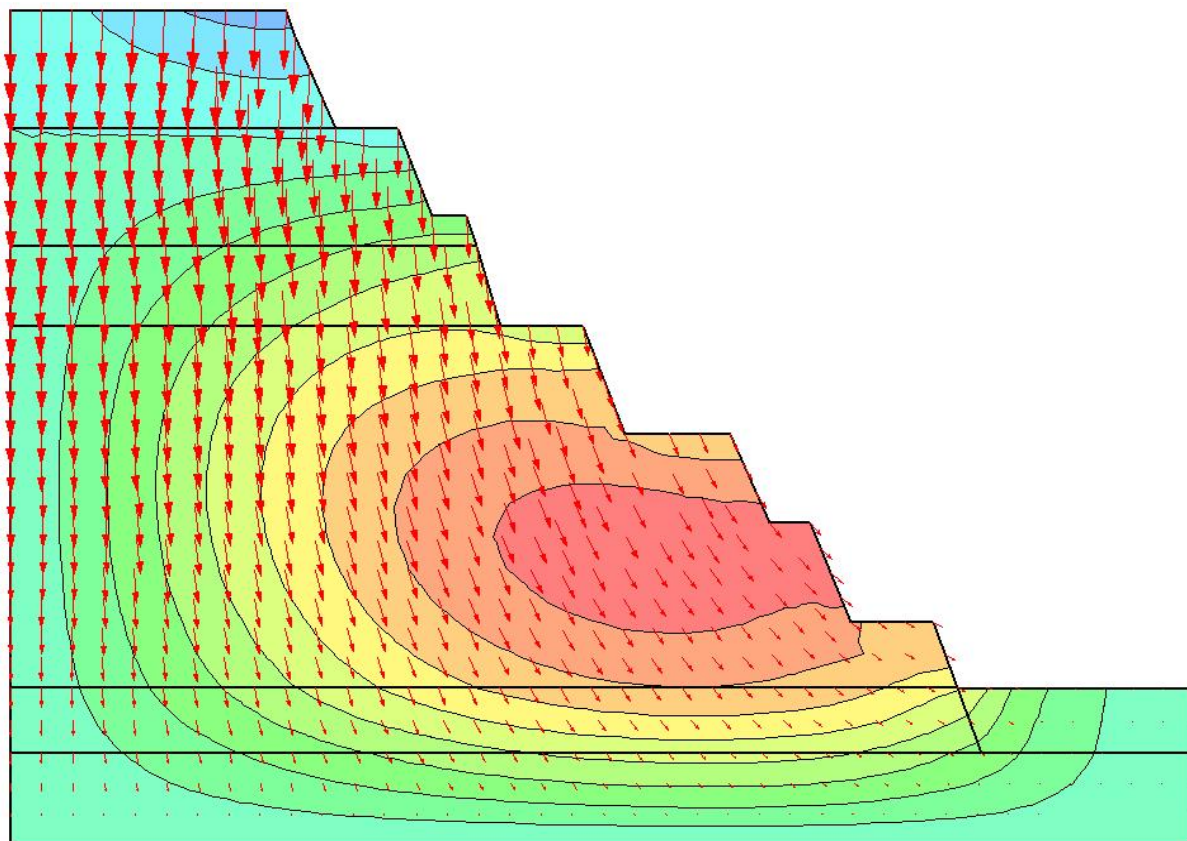


图 4-5-6 位移运动矢量图

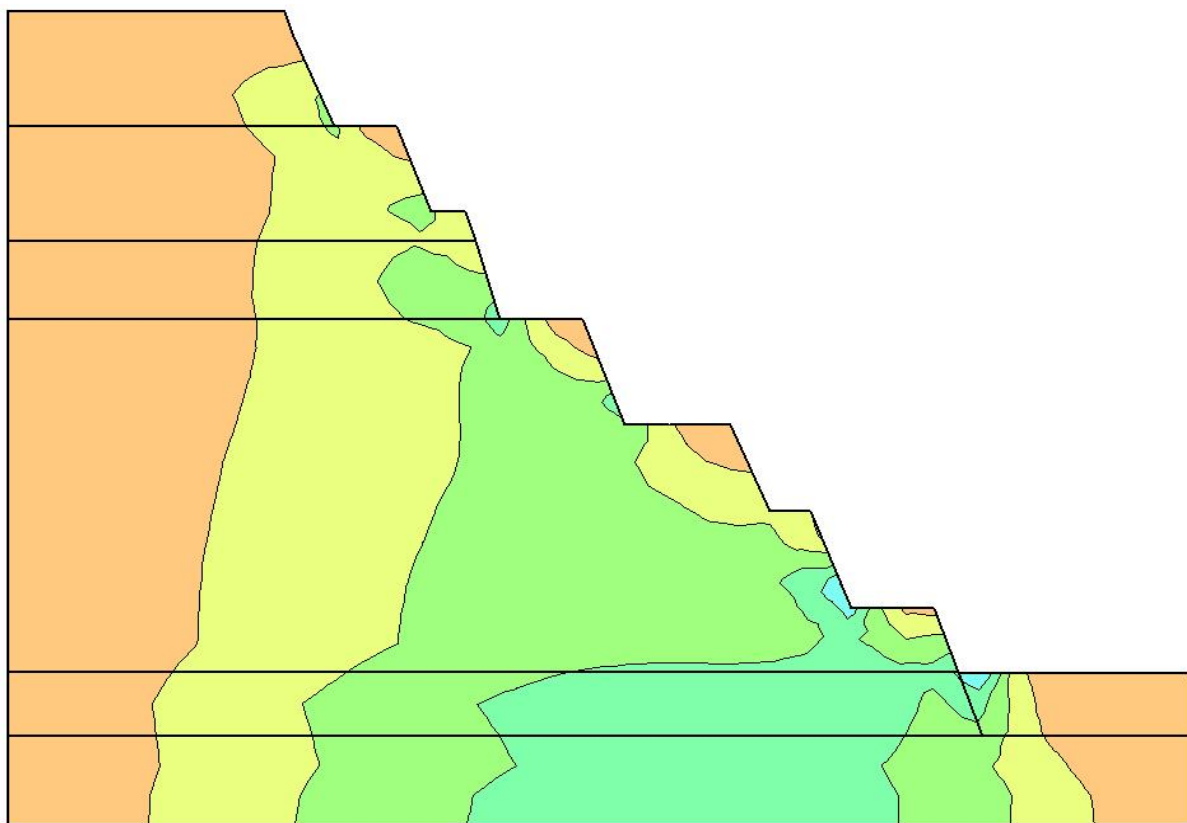


图 4-5-7 剪切应力应变云图

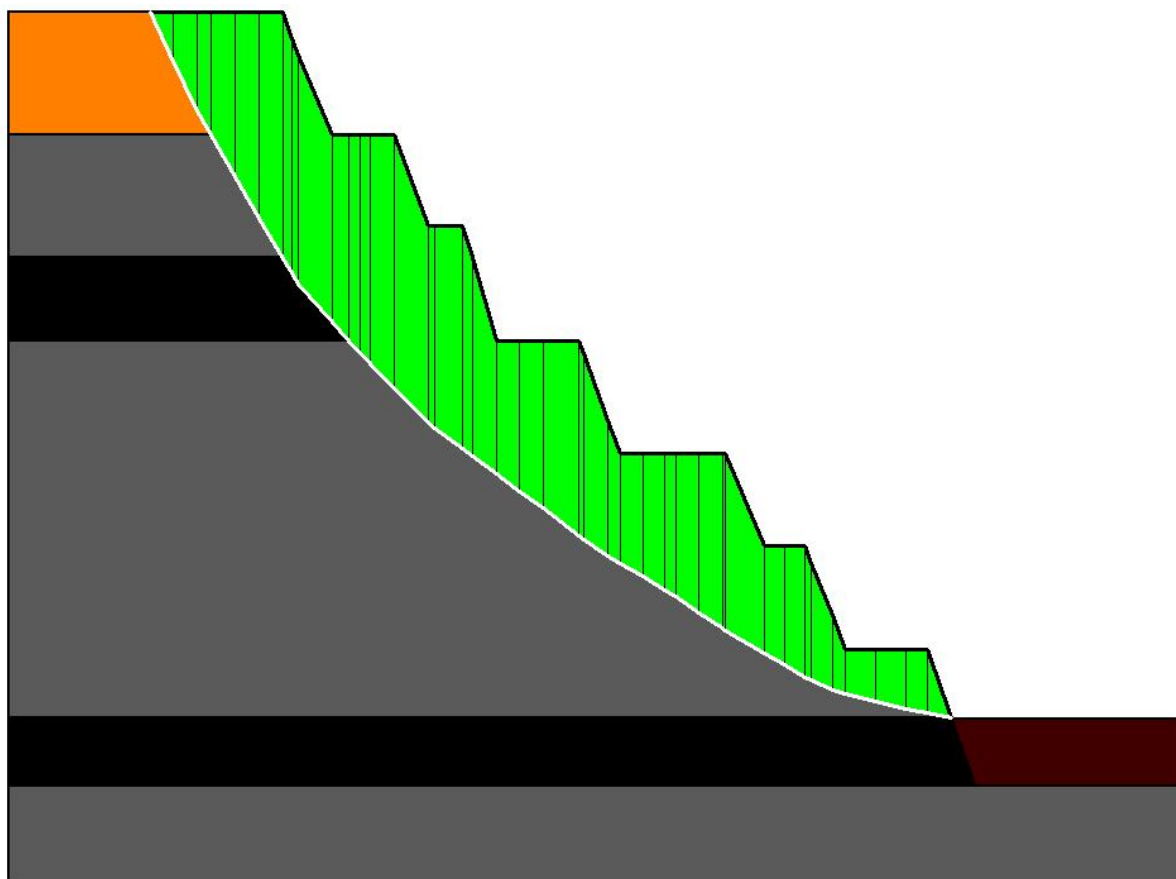


图 4-5-8 极限平衡验算示意图

3、采掘场西帮 1

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 30m，边坡角 35° ，具体分析如图 4-5-9～图 4-5-12 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，采掘场边坡中部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.285 > 1.1$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.281 > 1.1$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

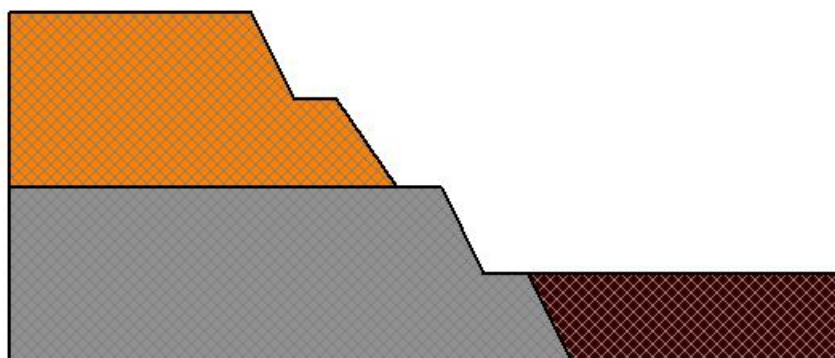


图 4-5-9 边坡体模型示意图

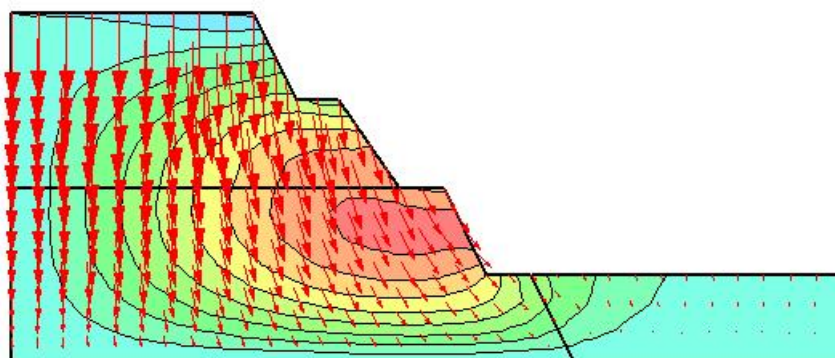


图 4-5-10 位移运动矢量图

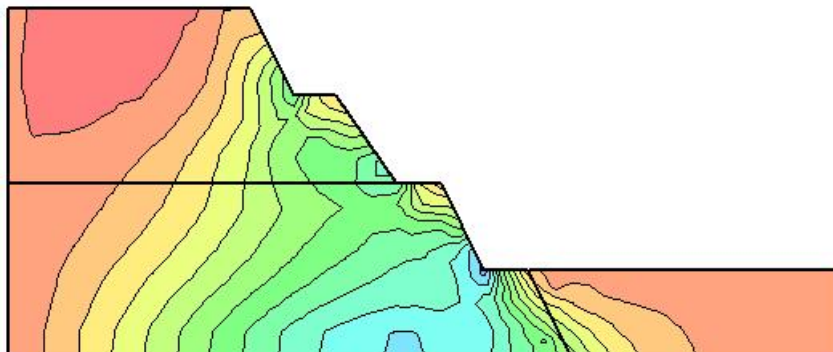


图 4-5-11 剪切应力应变云图

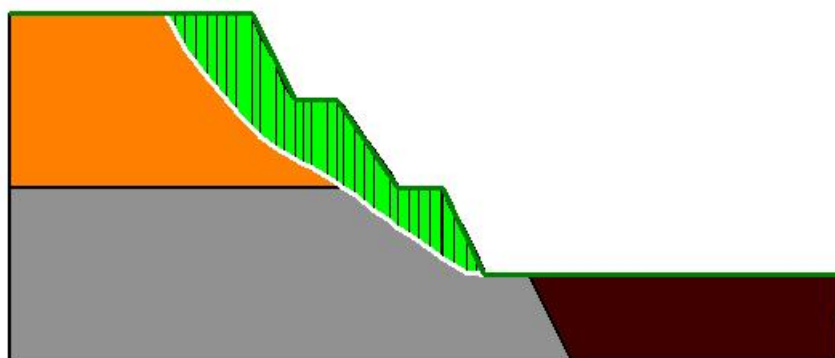


图 4-5-12 极限平衡验算示意图

4、采掘场西帮 2

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 40m，边坡角 35° ，具体分析如图 4-5-13～图 4-5-16 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，采掘场边坡中部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.277 > 1.1$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.274 > 1.1$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

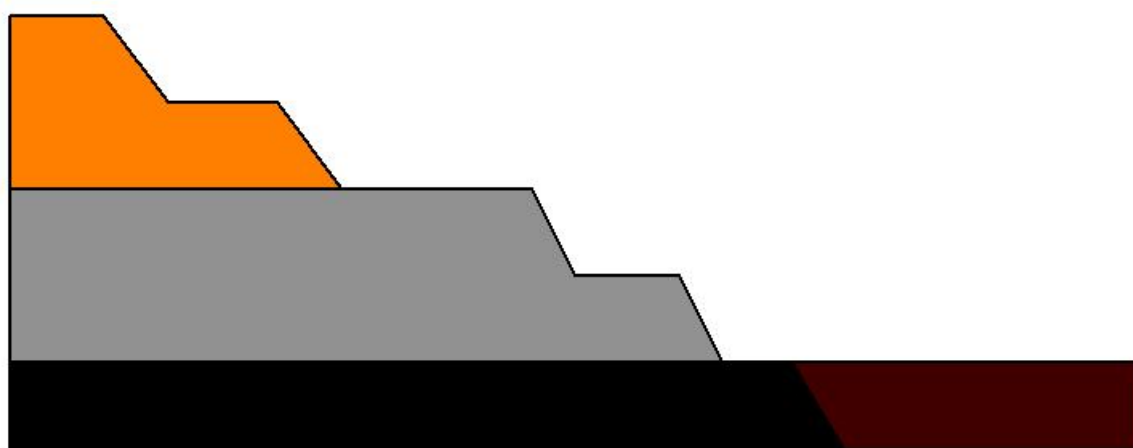


图 4-5-13 边坡体模型示意图

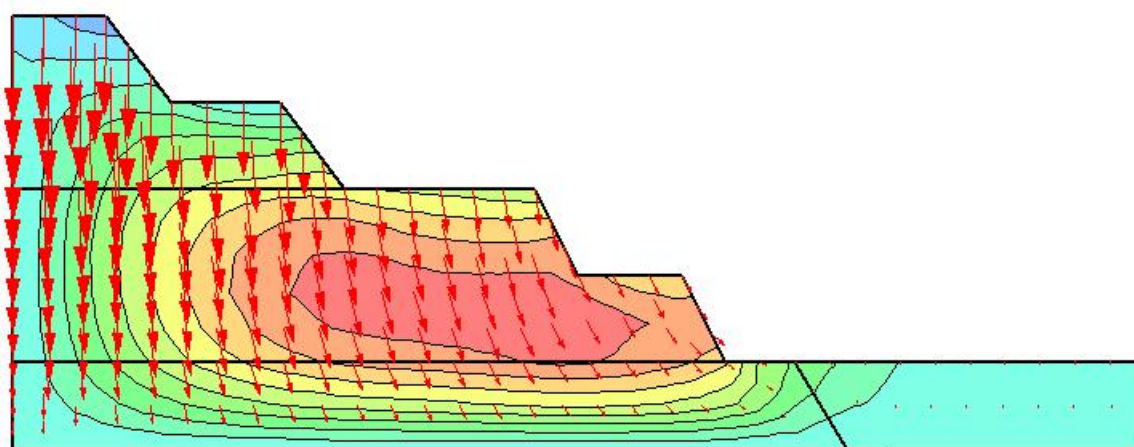


图 4-5-14 位移运动矢量图

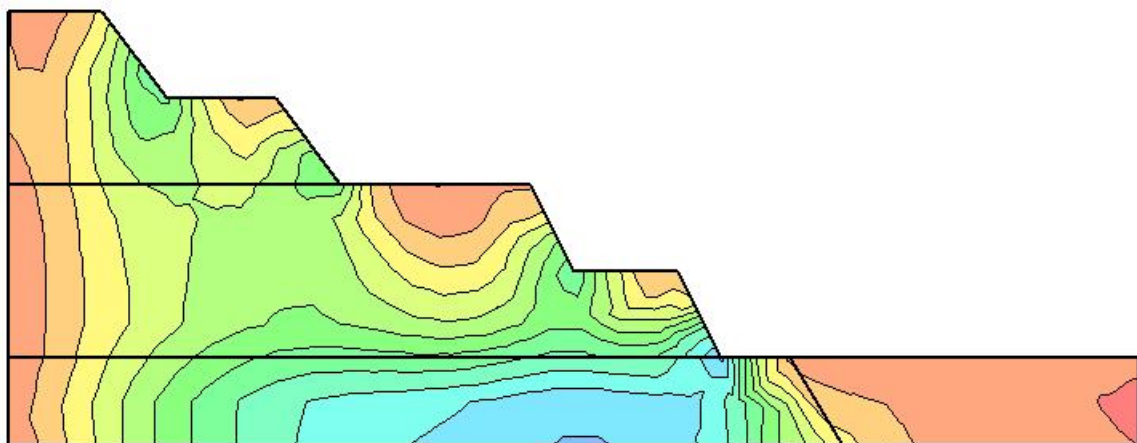


图 4-5-15 剪切应力应变云图

图 4-5-16 极限平衡验算示意图

5、采掘场西帮 3

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 121m，边坡角 35° ，具体分析如图 4-5-17～图 4-5-20 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，采掘场边坡中部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.198 > 1.1$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.196 > 1.1$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

图 4-5-17 边坡体模型示意图

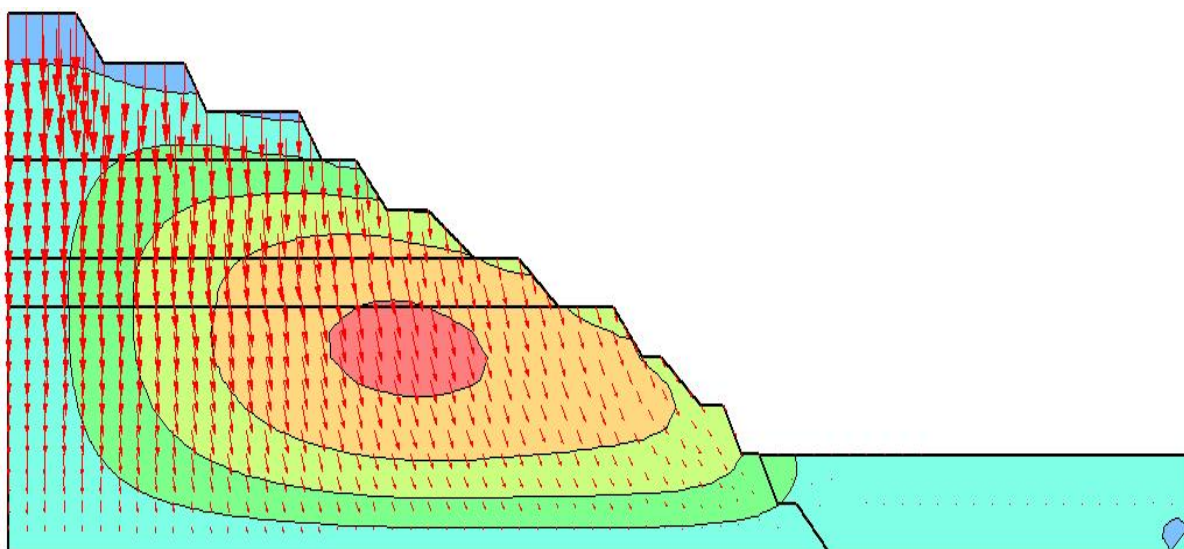


图 4-5-18 位移运动矢量图

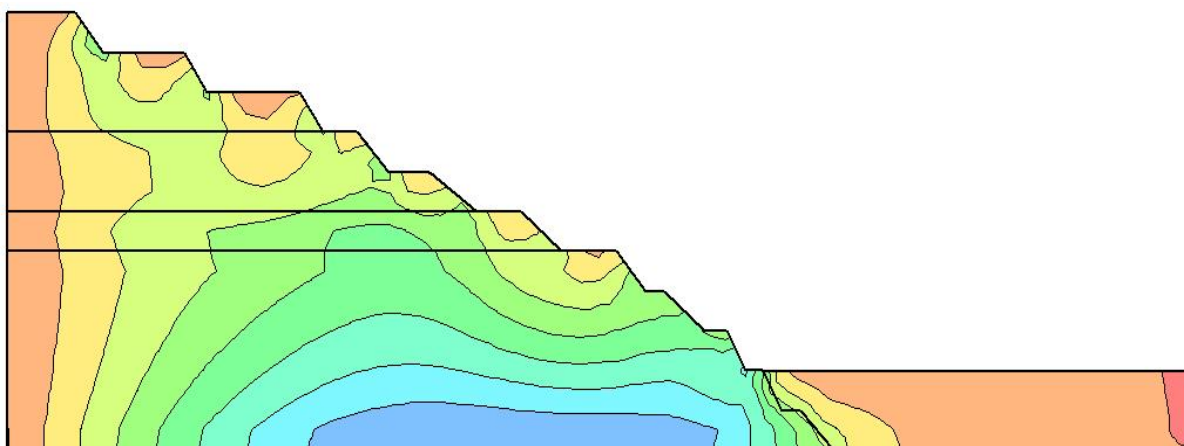


图 4-5-19 剪切应力应变云图

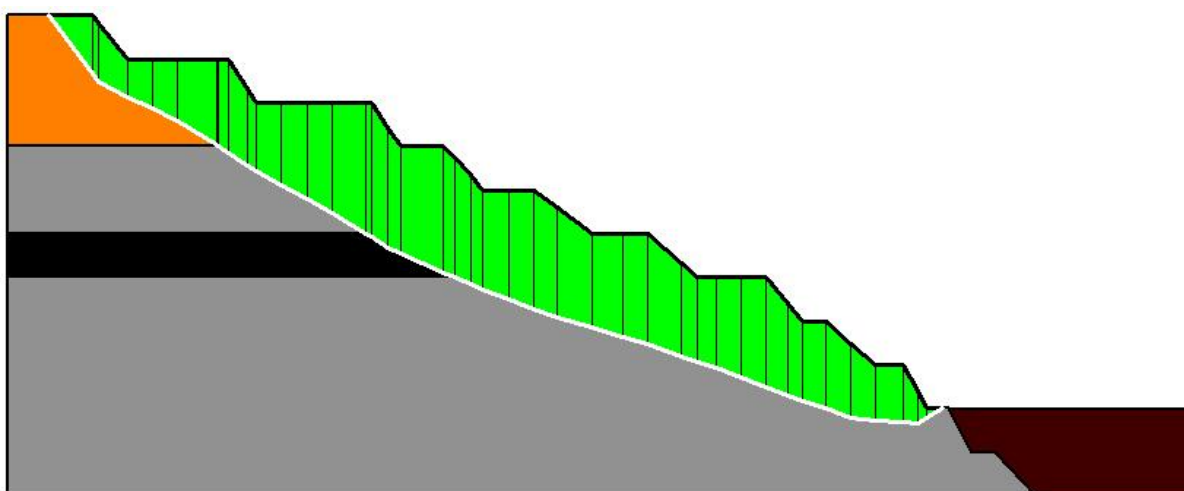


图 4-5-20 极限平衡验算示意图

6、采掘场东北帮 1

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 46m，边坡角 35° ，具体分析如图 4-5-21～图 4-5-24 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，采掘场边坡底部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.267 > 1.1$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.265 > 1.1$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

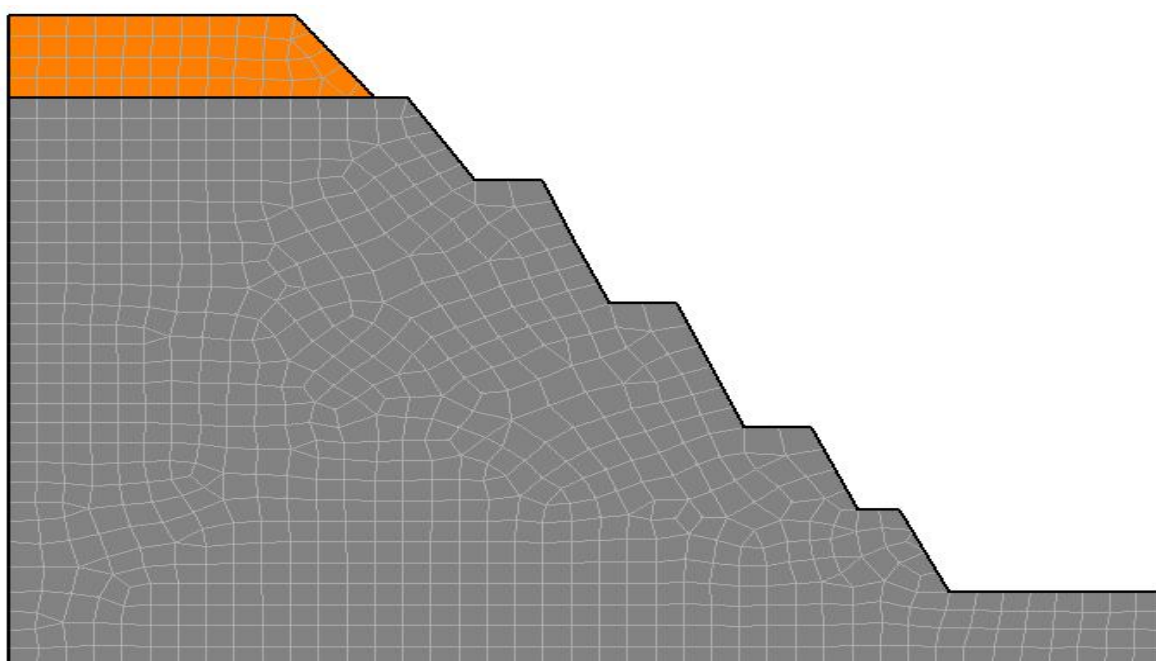


图 4-5-21 边坡体模型示意图

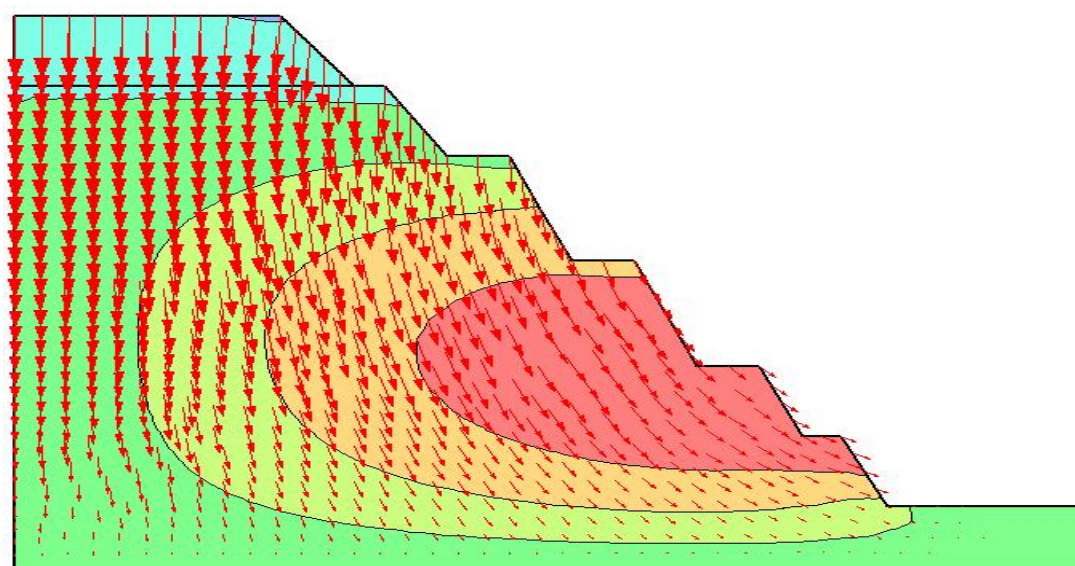


图 4-5-22 位移运动矢量图

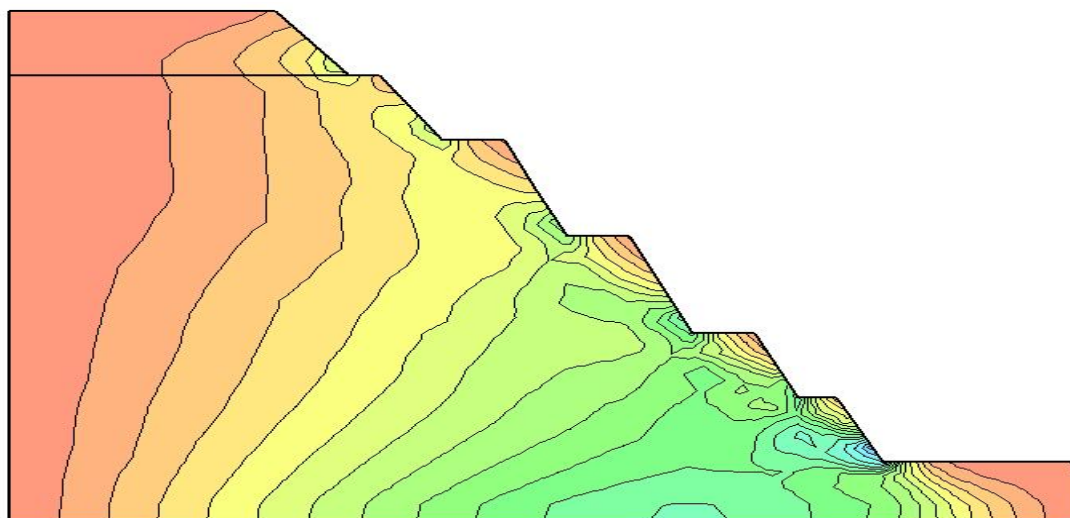


图 4-5-23 剪切应力应变云图

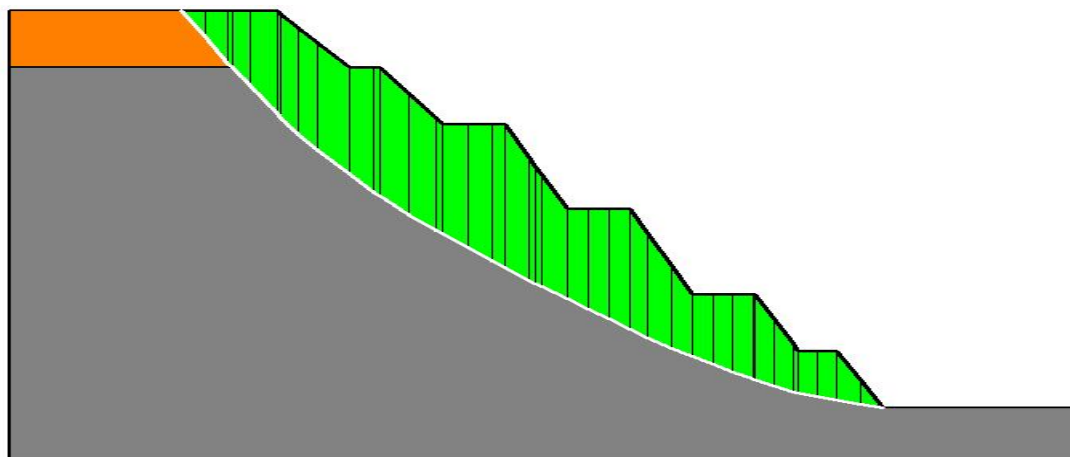


图 4-5-24 极限平衡验算示意图

7、采掘场东北帮 2

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 125m，边坡角 18° ，具体分析如图 4-5-25～图 4-5-28 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，采掘场边坡底部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.249 > 1.1$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.246 > 1.1$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

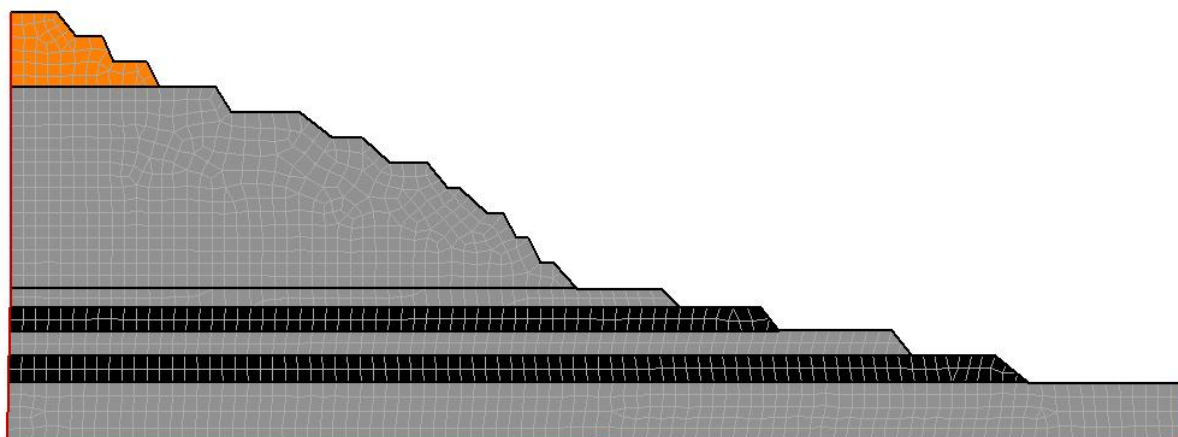


图 4-5-25 边坡体模型示意图

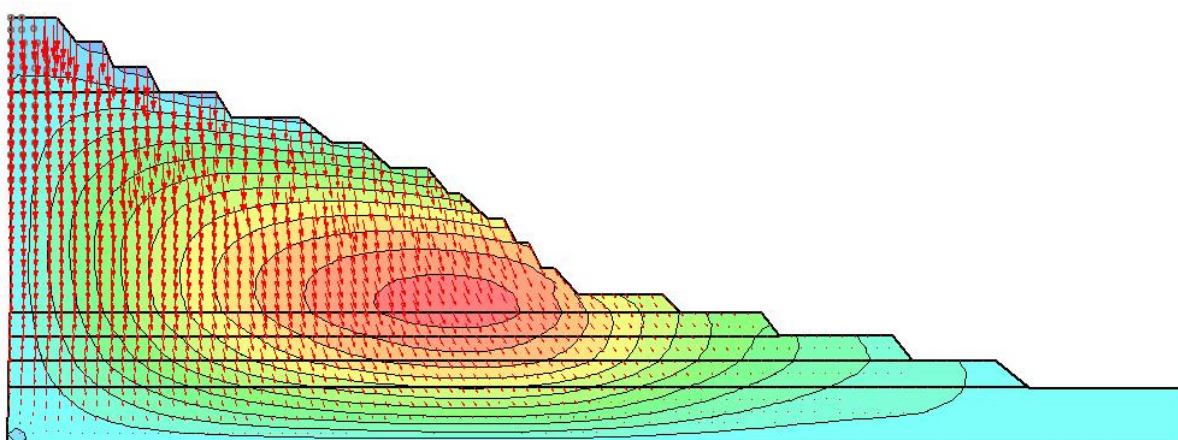


图 4-5-26 位移运动矢量图

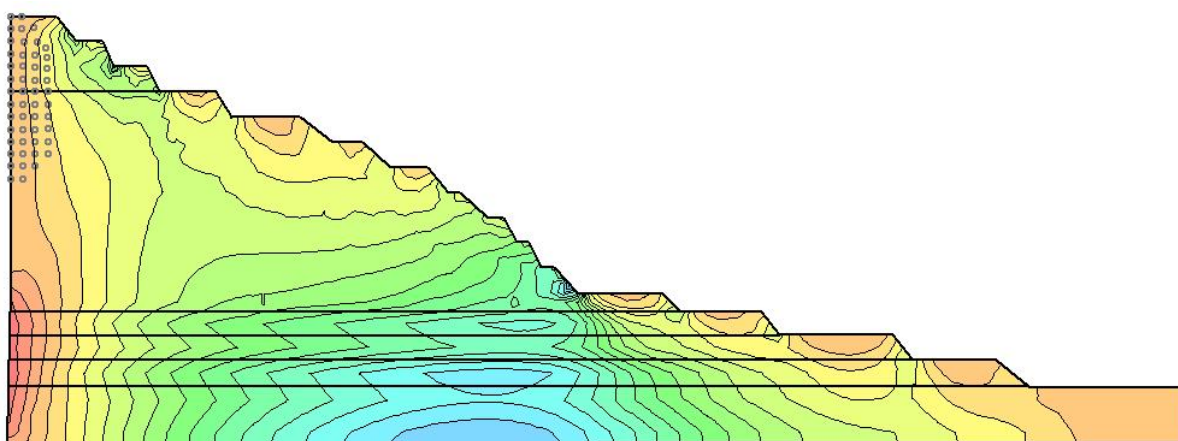


图 4-5-27 剪切应力应变云图

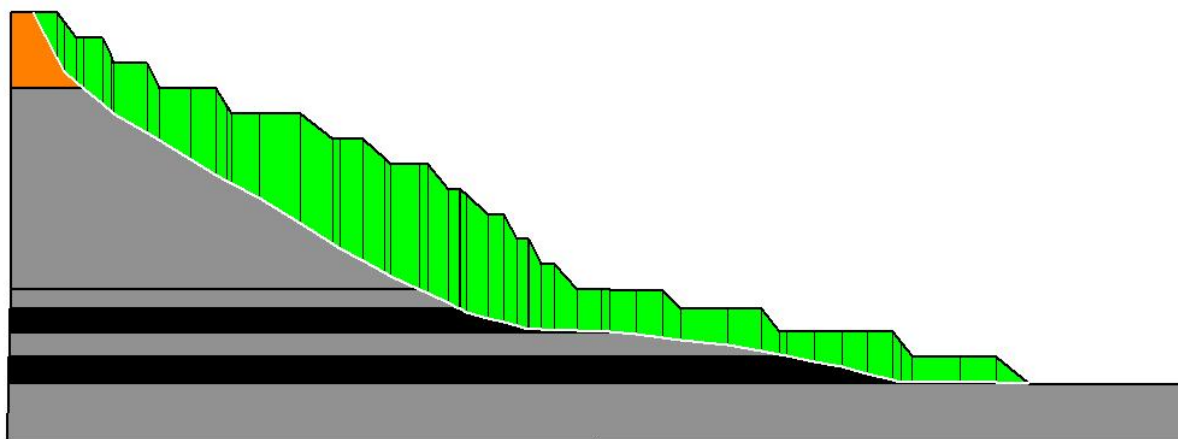


图 4-5-28 极限平衡验算示意图

4.6 排土场边坡验算

1、影响排土场稳定性的主要因素

本矿排土场排弃物料松散，凝聚力较小。特别是排弃物料中的泥岩及砂质泥岩遇水强度明显减弱，降低排土场稳定性。影响排土场稳定性的主要因素有：基底、地表及第四系潜水和排弃物料荷载等。

（1）排土场基底：根据《内蒙古特弘全盈煤炭有限责任公司煤矿生产地质报告》，排土场基底岩性主要为砂质泥岩、泥岩等，稳定性较好。

（2）潜水：由于大气降水引起的排弃物含水增加，排弃物和基底力学强度指标弱化，增加了下滑力，减小了抗滑力。

（3）排弃物荷载作用：排土场排弃高度越高、排土场边坡角越陡，对基底压力越大，越容易产生底鼓。

2、排土场边坡稳定性验算

（1）外排土场边坡验算剖面 1

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 50m，边坡角 18° ，具体分析如图 4-6-1～图 4-6-4 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，排土场边坡底部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最

危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.254 > 1.2$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.252 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

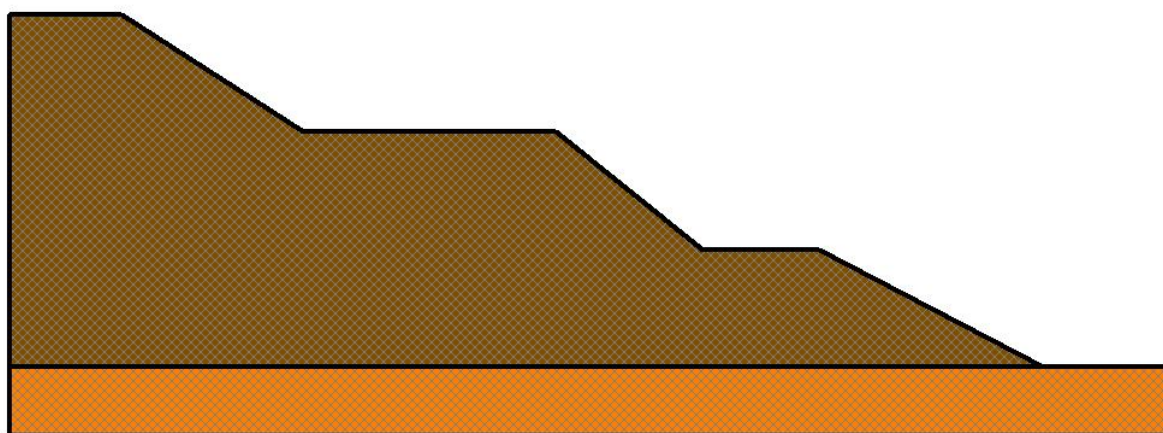


图 4-6-1 边坡体模型示意图

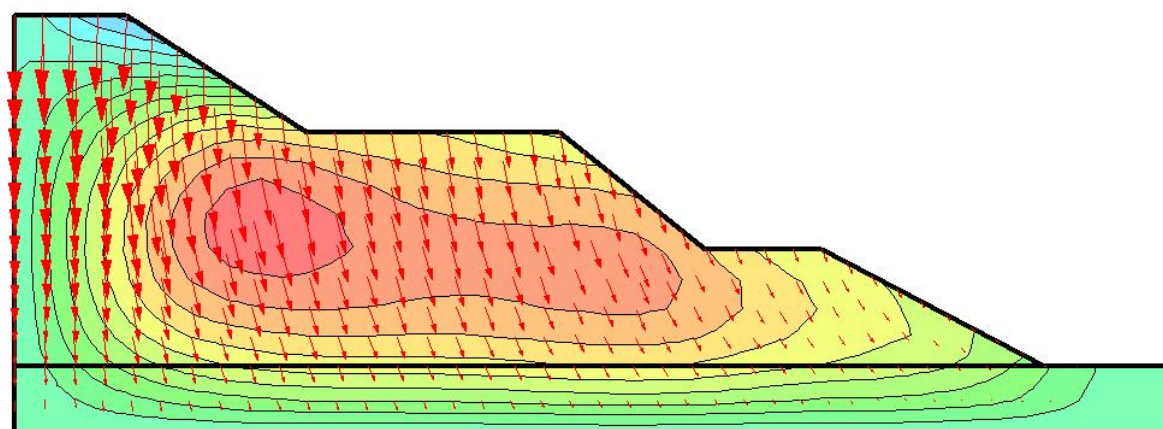


图 4-6-2 位移运动矢量图

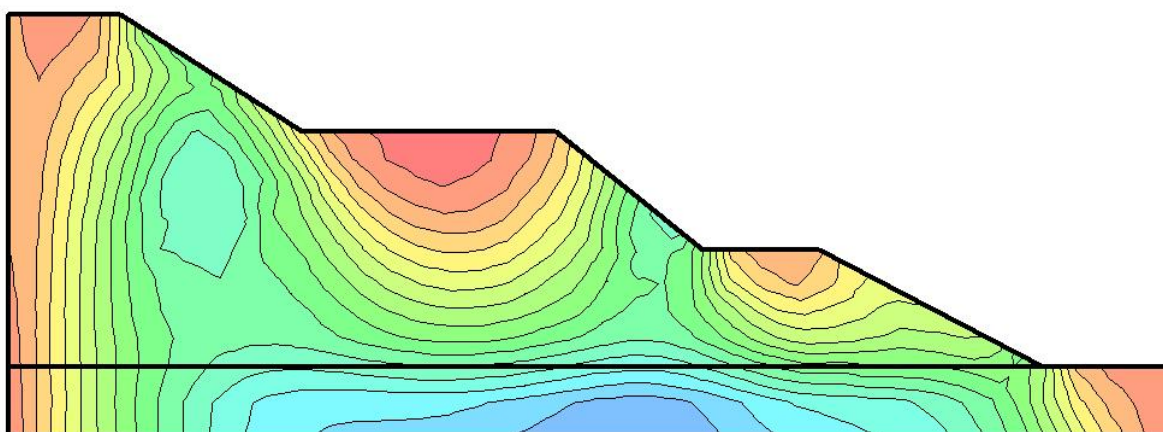


图 4-6-3 剪切应力应变云图

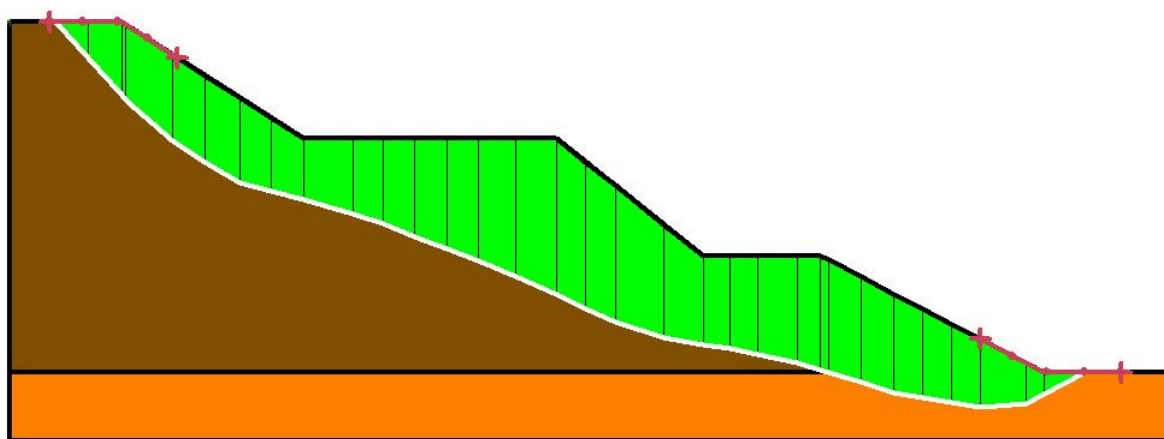


图 4-6-4 极限平衡验算示意图

(2) 外排土场边坡验算剖面 2

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 110m，边坡角 18° ，具体分析如图 4-6-5～图 4-6-8 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，排土场各个台阶底部边坡产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.214 > 1.2$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.209 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

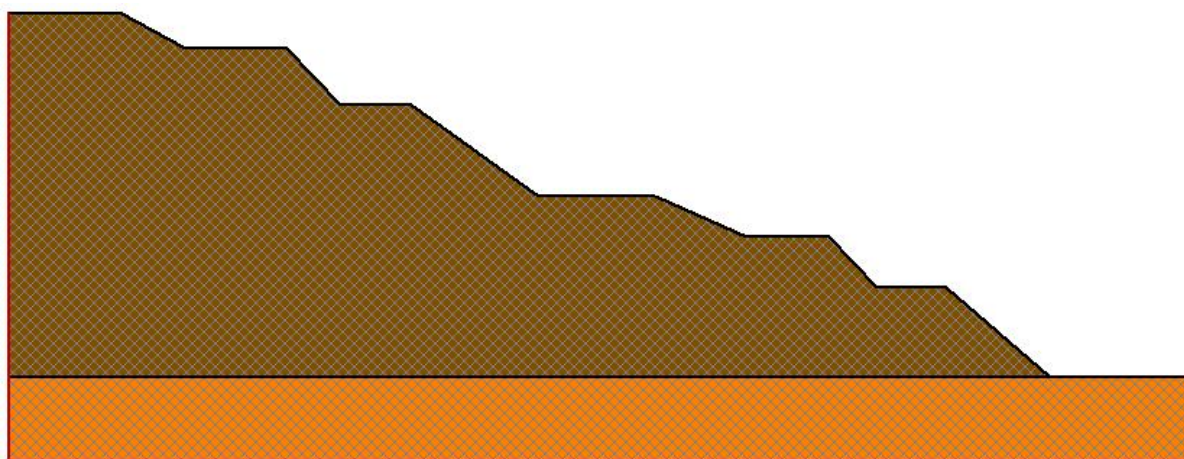


图 4-6-5 边坡体模型示意图

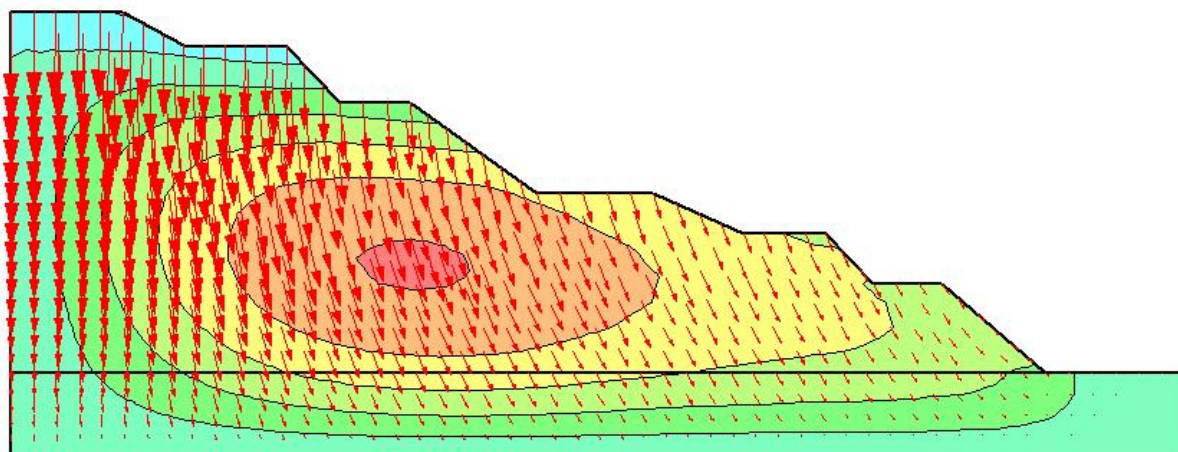


图 4-6-6 位移运动矢量图

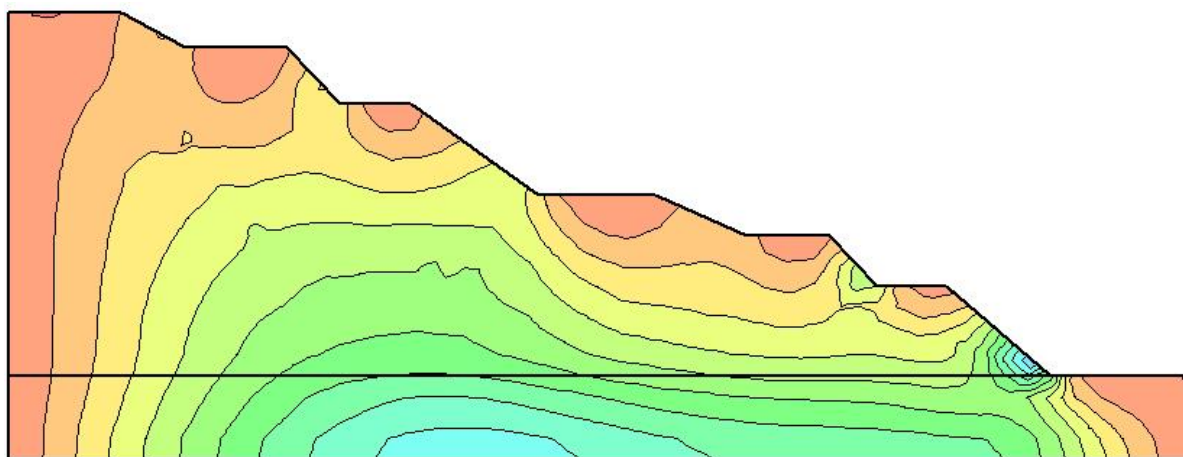


图 4-6-7 剪切应力应变云图

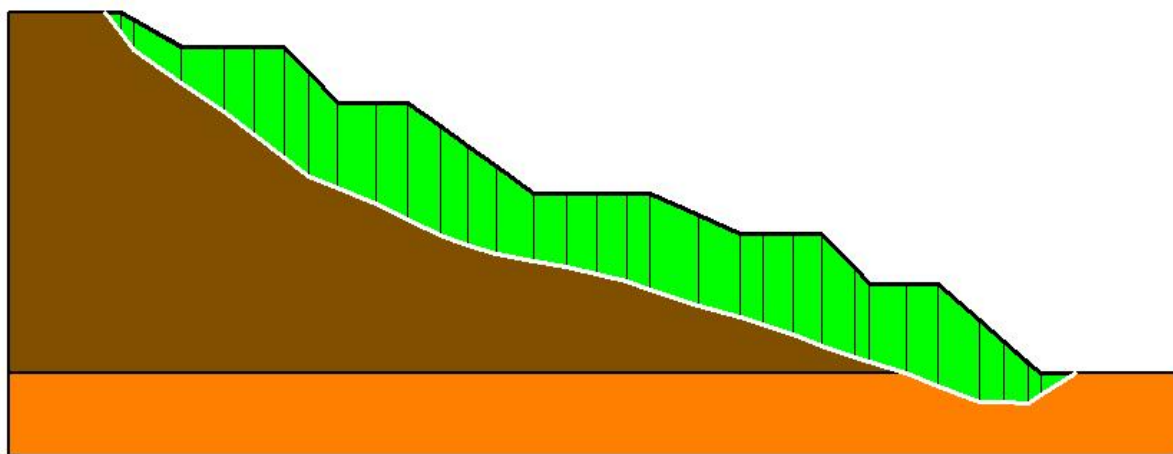


图 4-6-8 极限平衡验算示意图

(3) 外排土场边坡验算剖面 3

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 100m，边坡角 18° ，具体分析

如图 4-6-9~图 4-6-12 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，排土场边坡顶部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.238 > 1.2$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.237 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

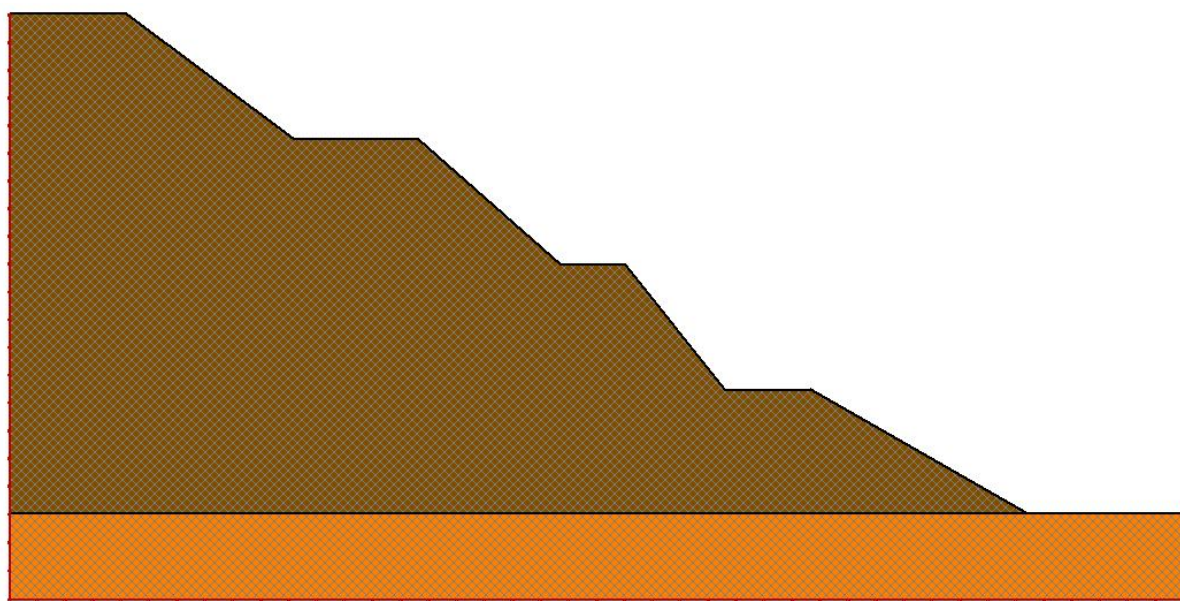


图 4-6-9 边坡体模型示意图

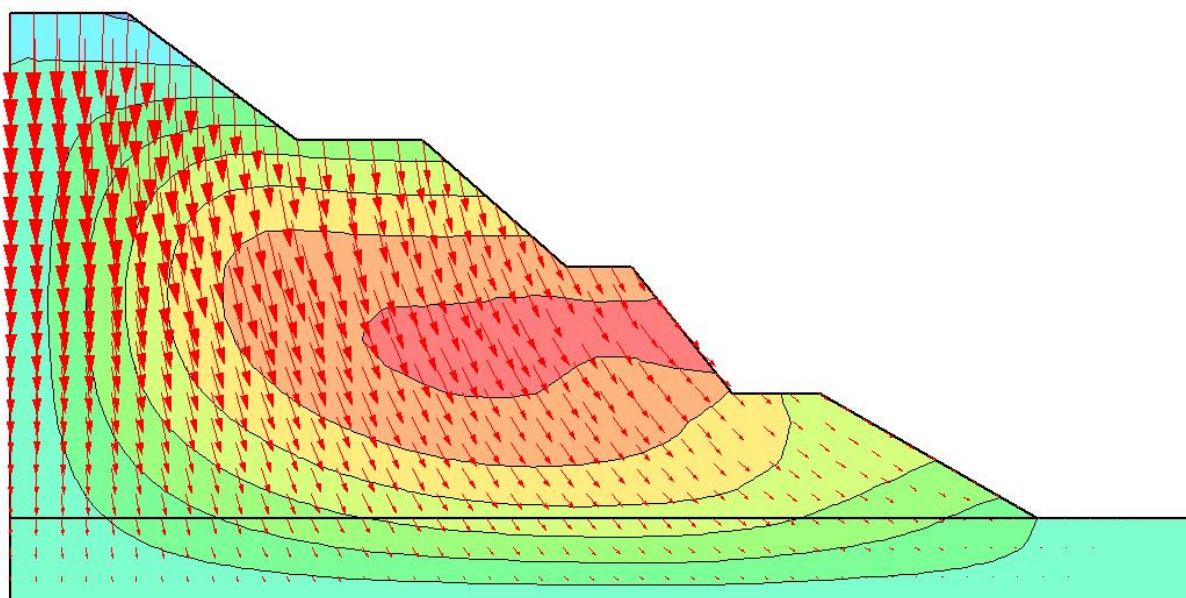


图 4-6-10 位移运动矢量图

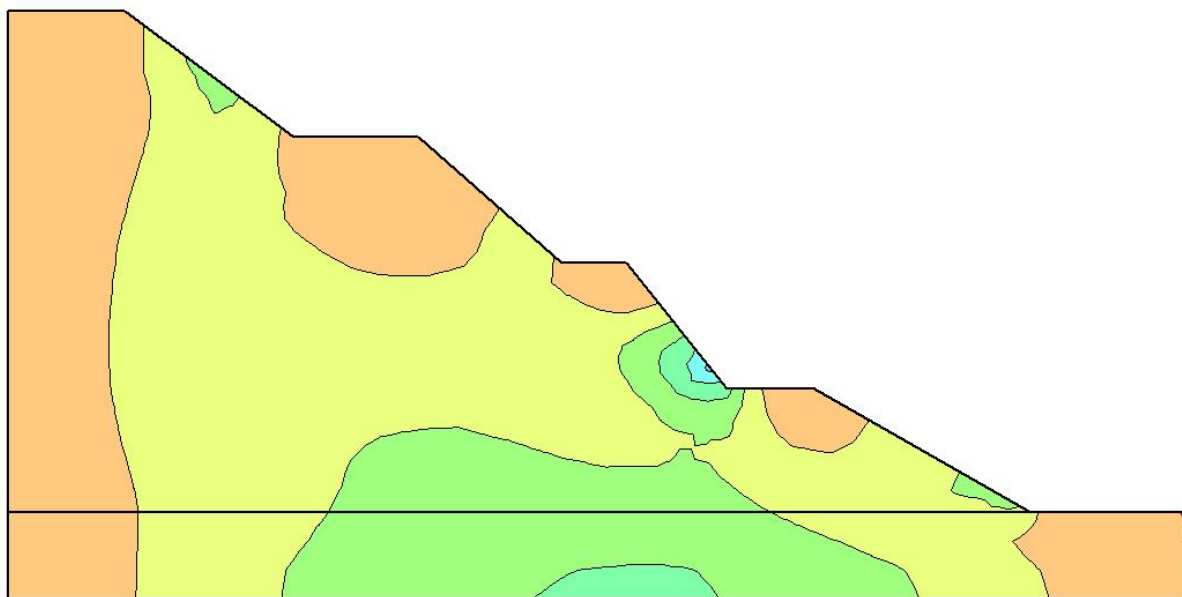


图 4-6-11 剪切应力应变云图

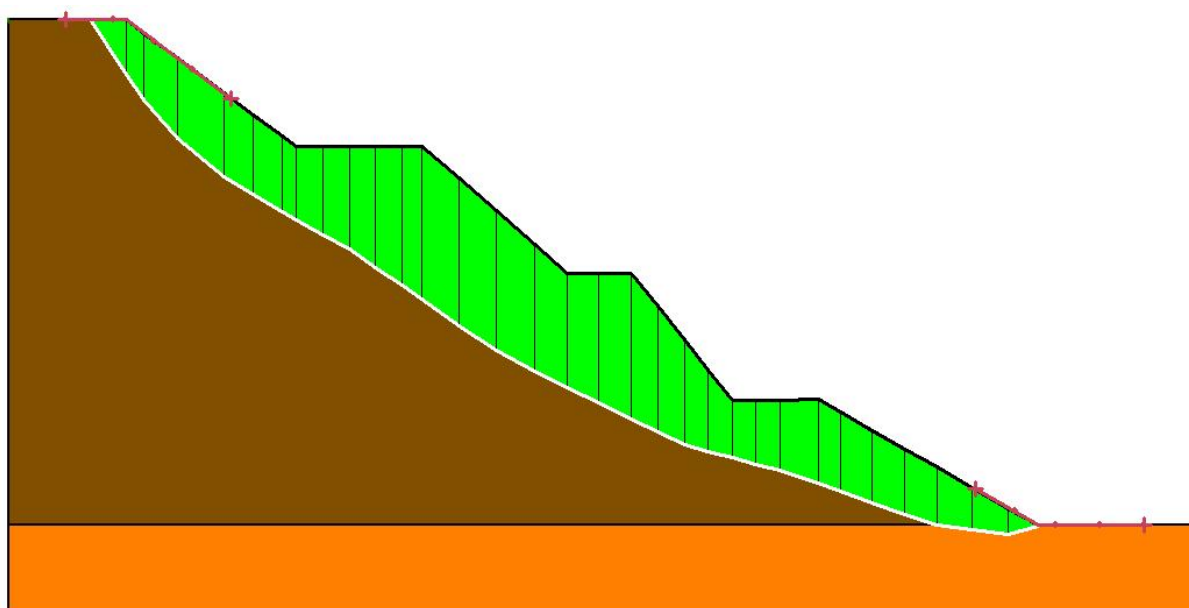


图 4-6-12 极限平衡验算示意图

(4) 外排土场边坡验算剖面 4

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 20m，边坡角 18° ，具体分析如图 4-6-13～图 4-6-16 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，排土场边坡底部产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.302 > 1.2$ 和 Morgenstern-Price

法为 $1.301 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

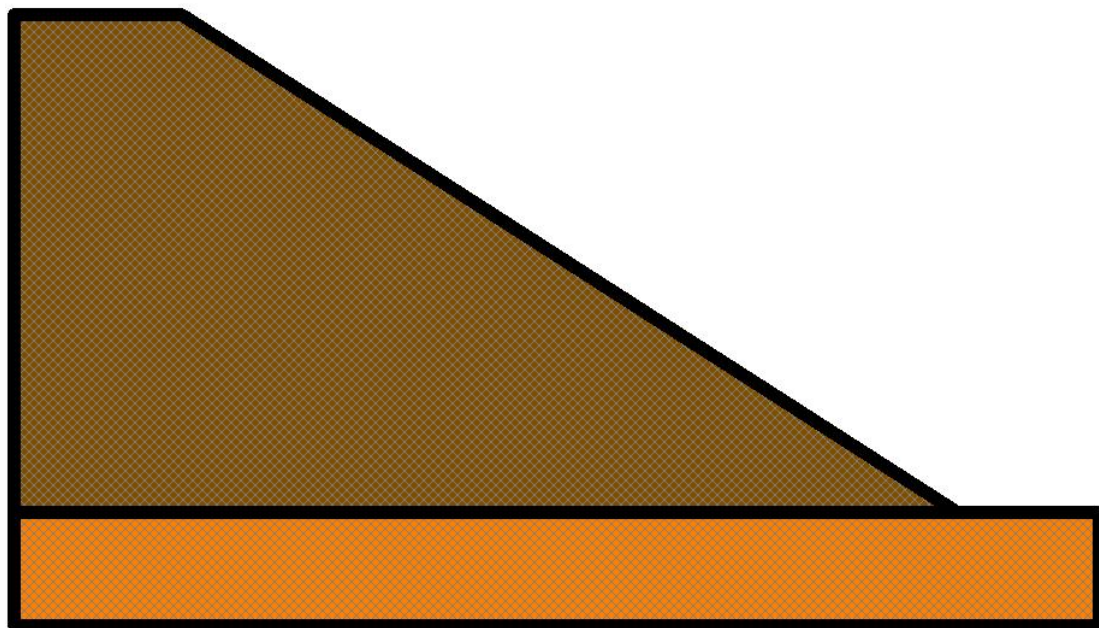


图 4-6-13 边坡体模型示意图

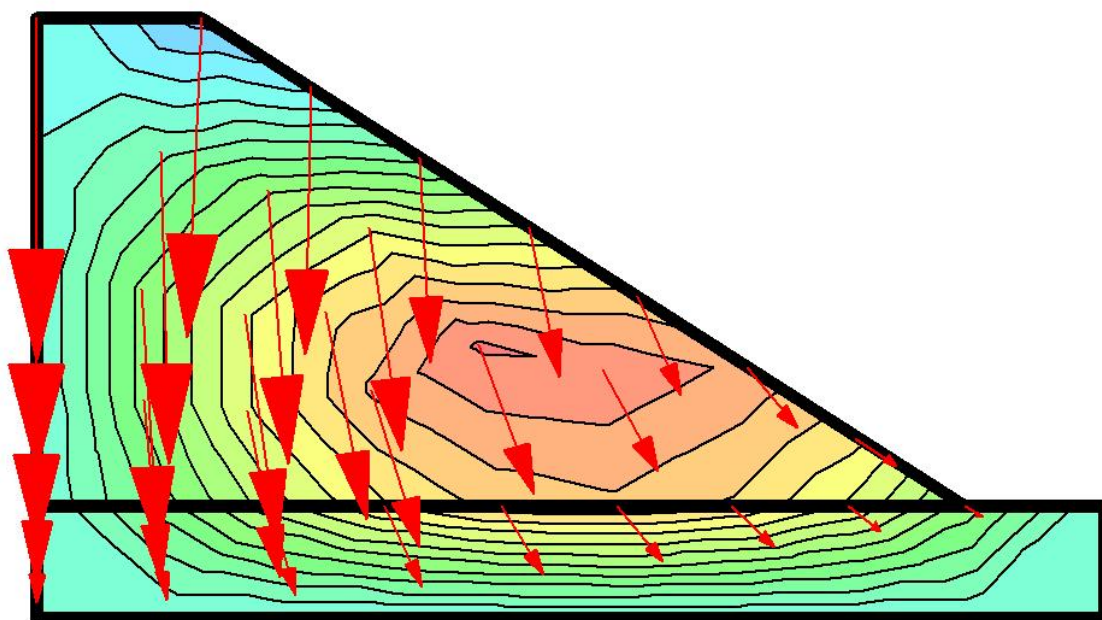


图 4-6-14 位移运动矢量图

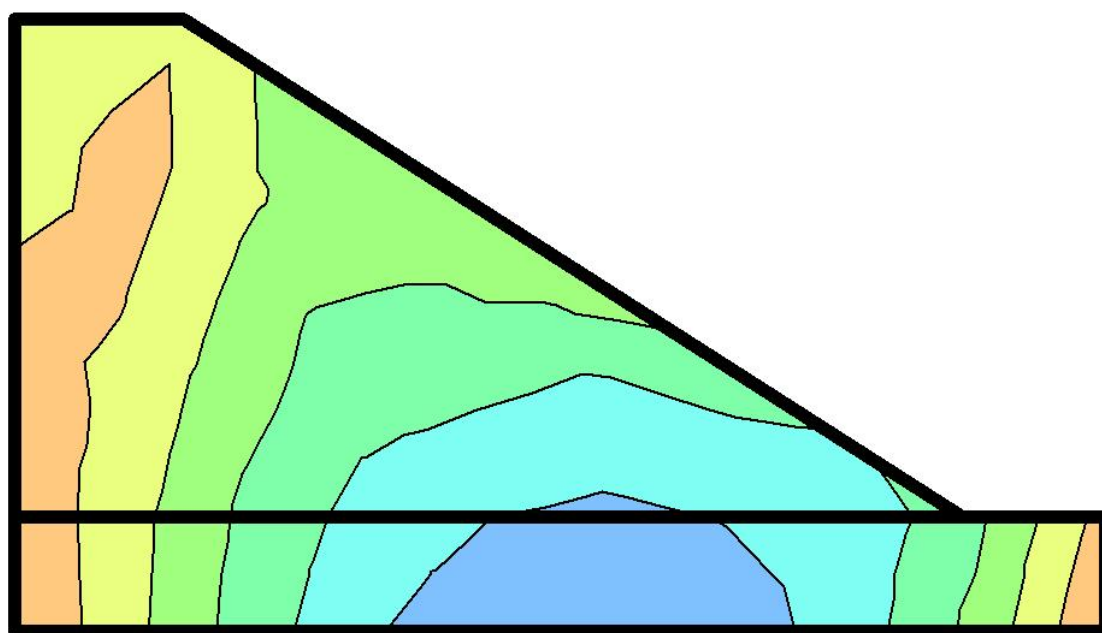


图 4-6-15 剪切应力应变云图

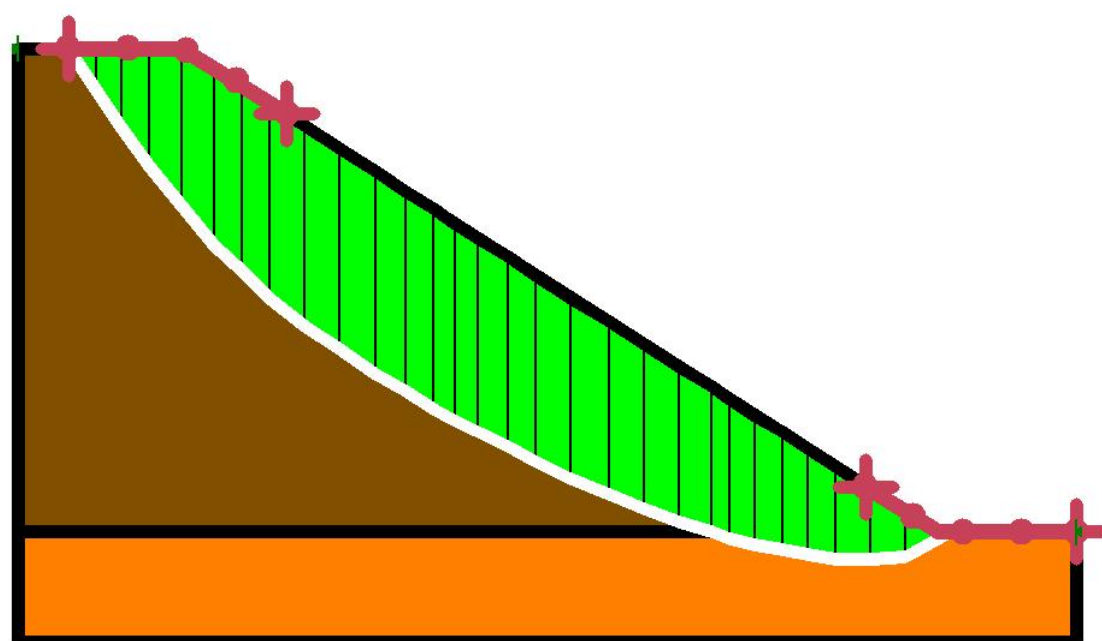


图 4-6-16 极限平衡验算示意图

(6) 外排土场边坡验算剖面 5

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 20m，边坡角 18° ，具体分析如图 4-6-21～图 4-6-24 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云

图可以看出，排土场底部边坡产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.299 > 1.2$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.295 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

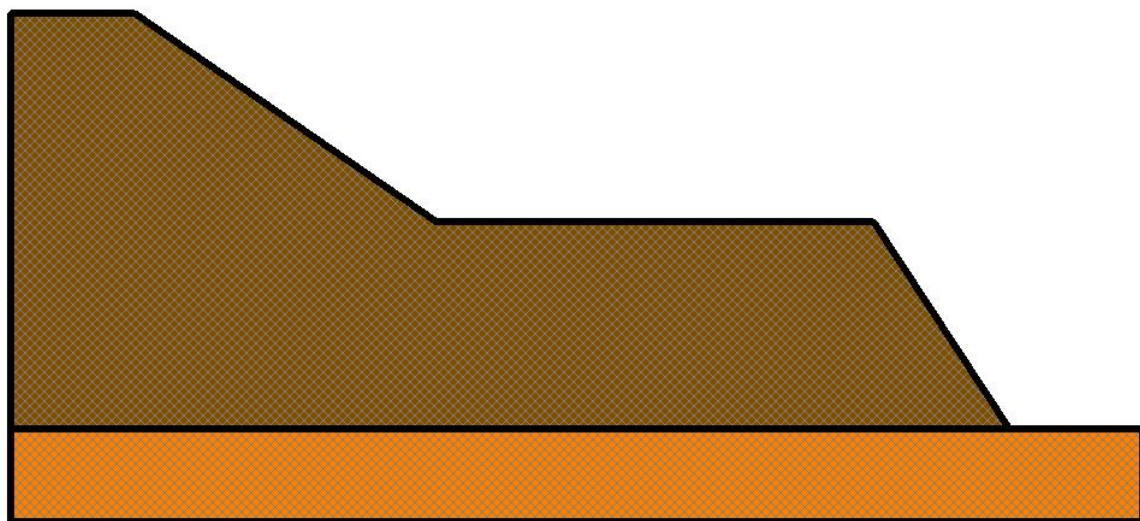


图 4-6-21 边坡体模型示意图

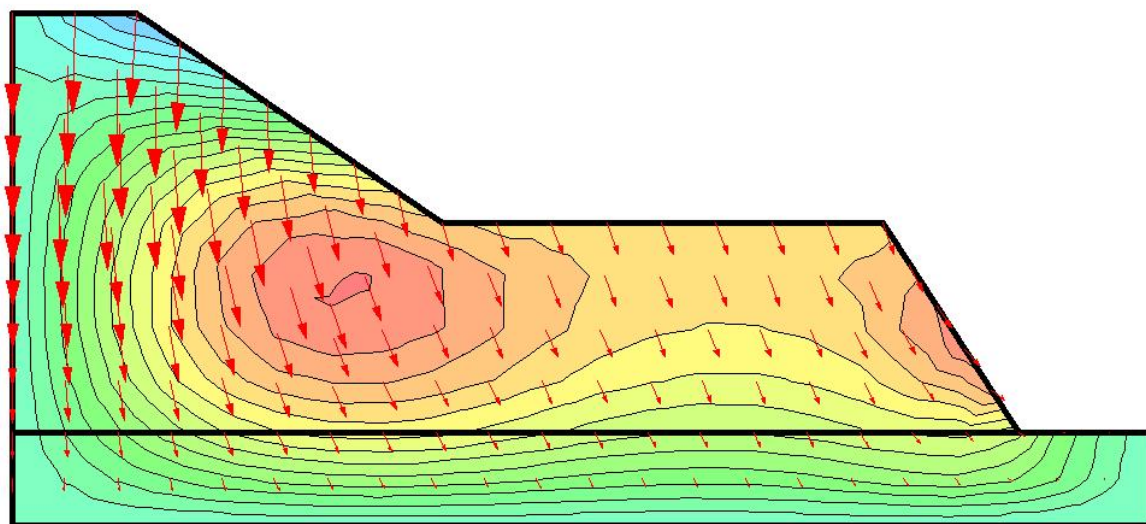


图 4-6-22 位移运动矢量图

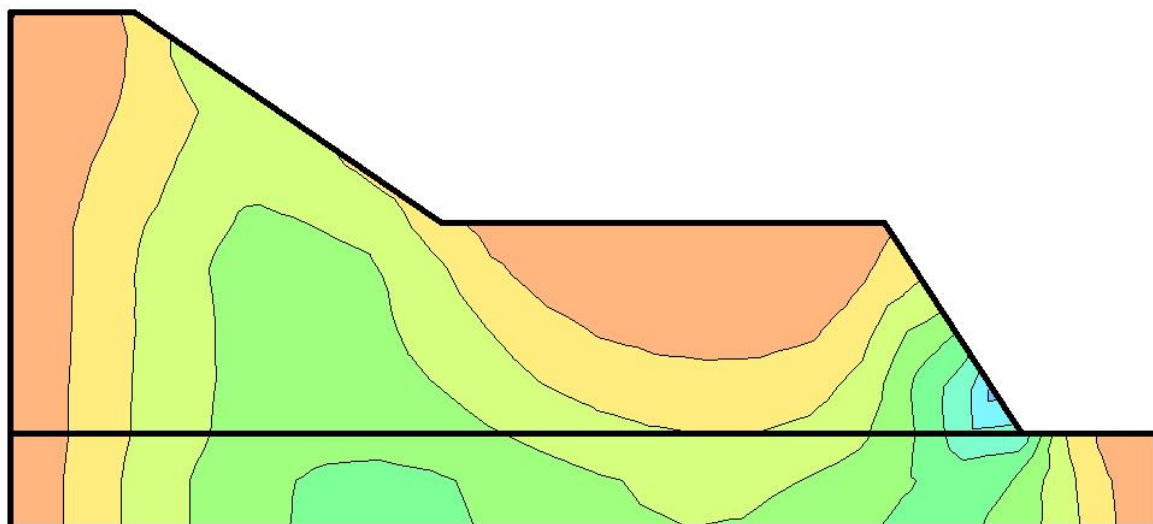


图 4-6-23 剪切应力应变云图

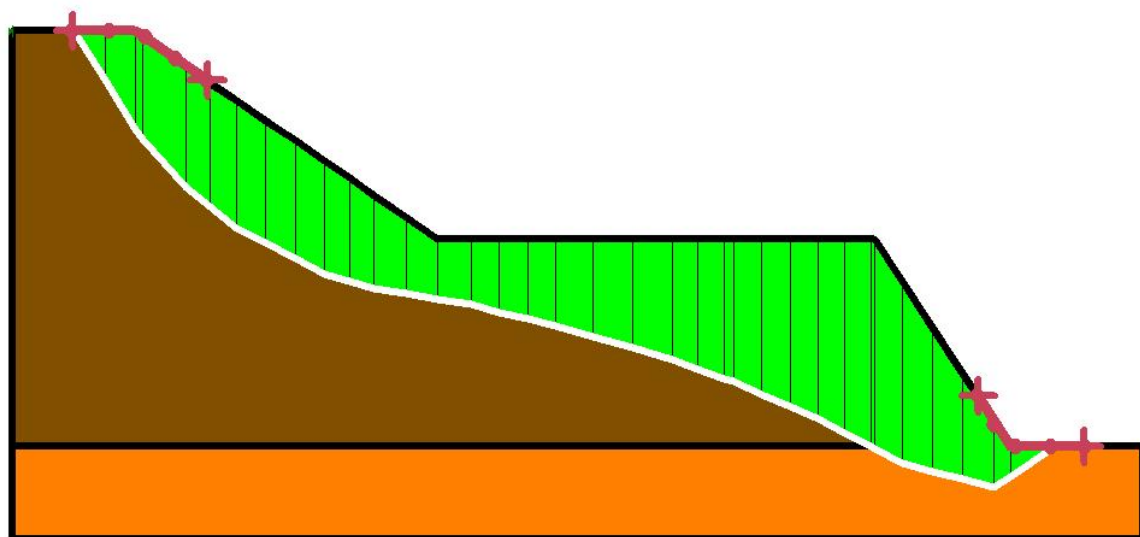


图 4-6-24 极限平衡验算示意图

(5) 外排土场边坡验算剖面 6

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 40m，边坡角 18° ，具体分析如图 4-6-17～图 4-6-20 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，排土场各个台阶底部边坡产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.276 > 1.2$ 和

Morgenstern-Price 法为 $1.273 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

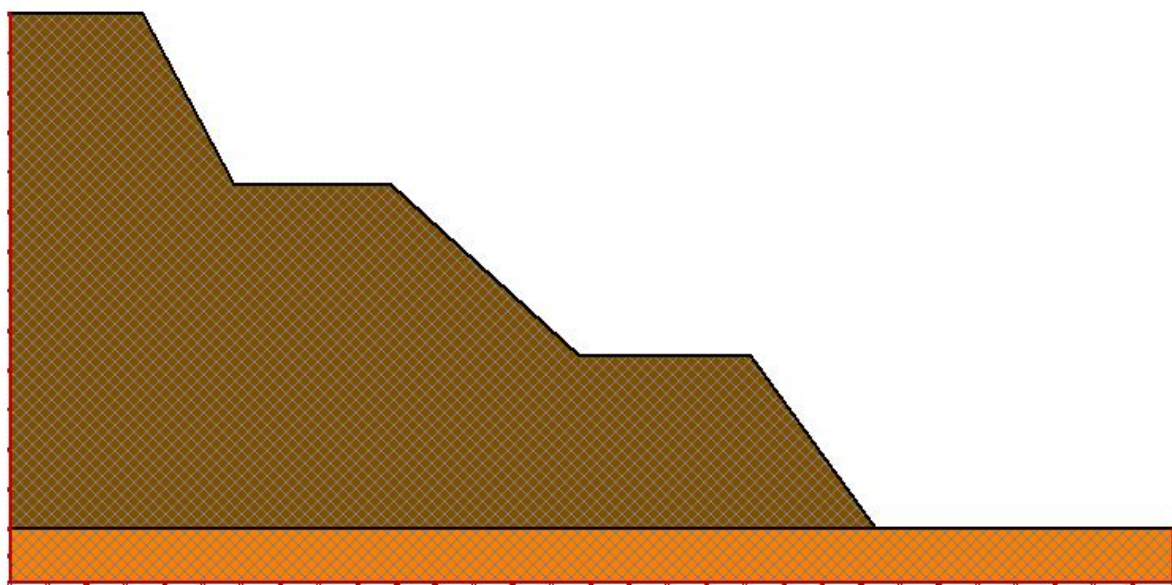


图 4-6-17 边坡体模型示意图

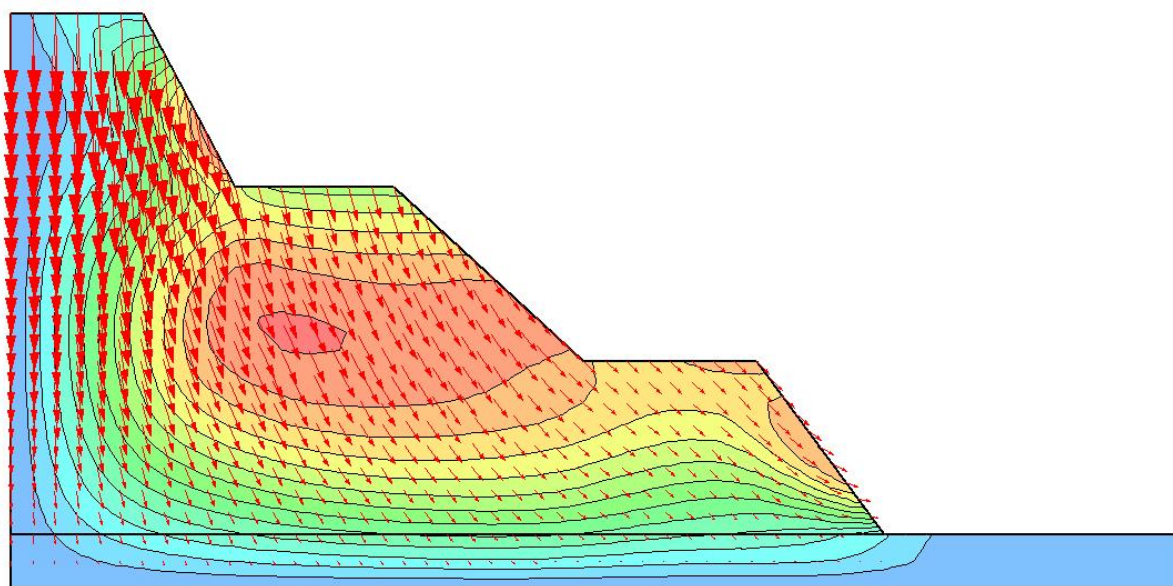


图 4-6-18 位移运动矢量图

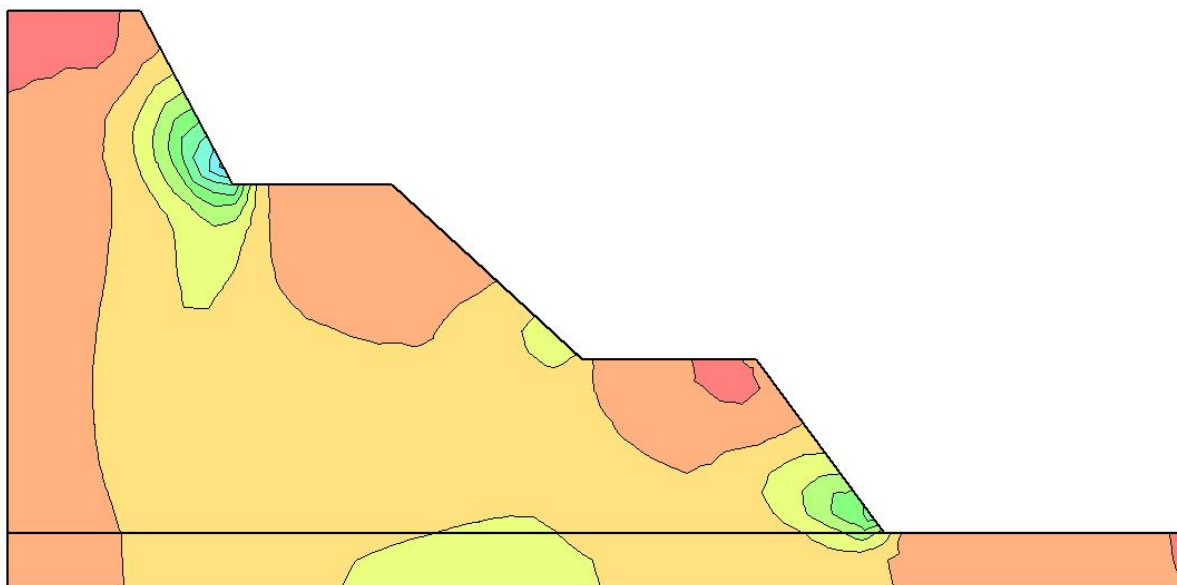


图 4-6-19 剪切应力应变云图

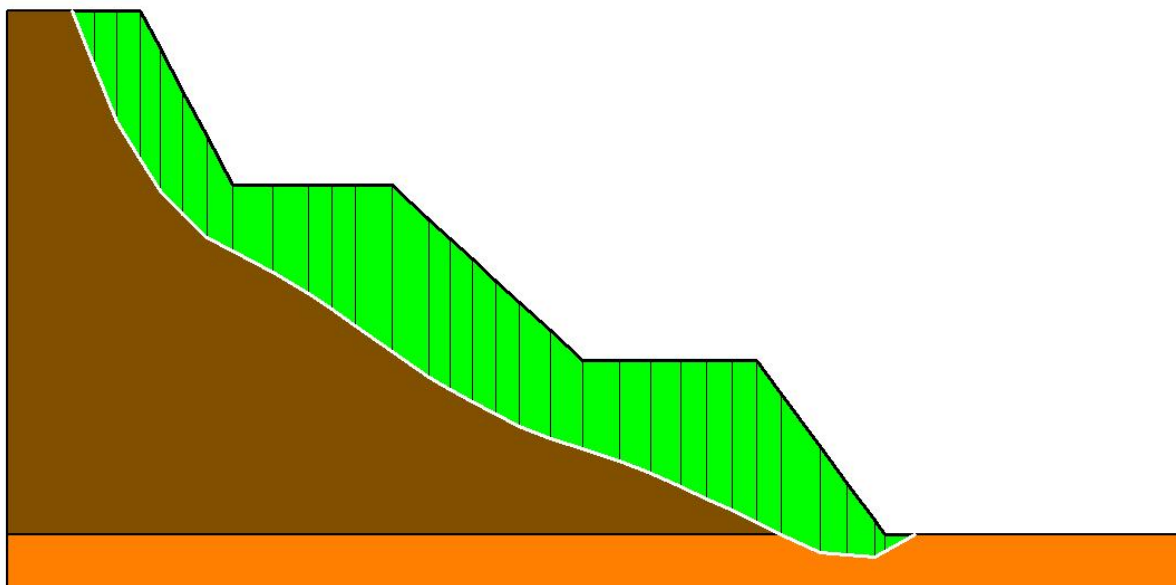


图 4-6-20 极限平衡验算示意图

(7) 外排土场边坡验算剖面 7

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 79m，边坡角 12° ，具体分析如图 4-6-25～图 4-6-28 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，排土场底部边坡产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.301 > 1.2$ 和 Morgenstern-Price

法为 $1.297 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

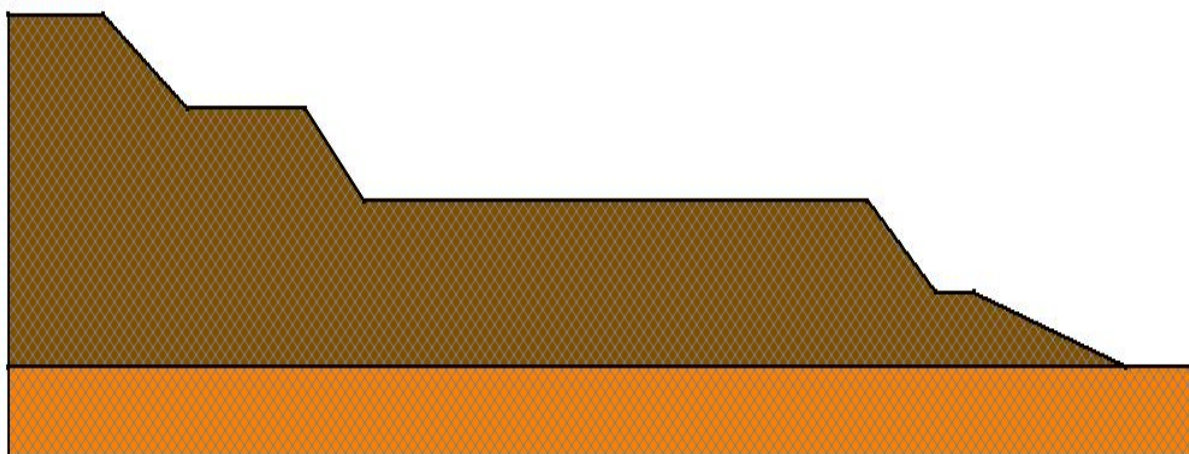


图 4-6-25 边坡体模型示意图

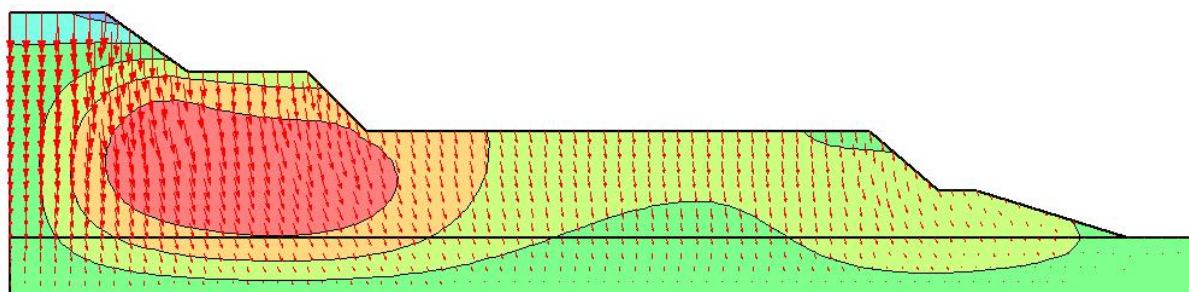


图 4-6-26 位移运动矢量图

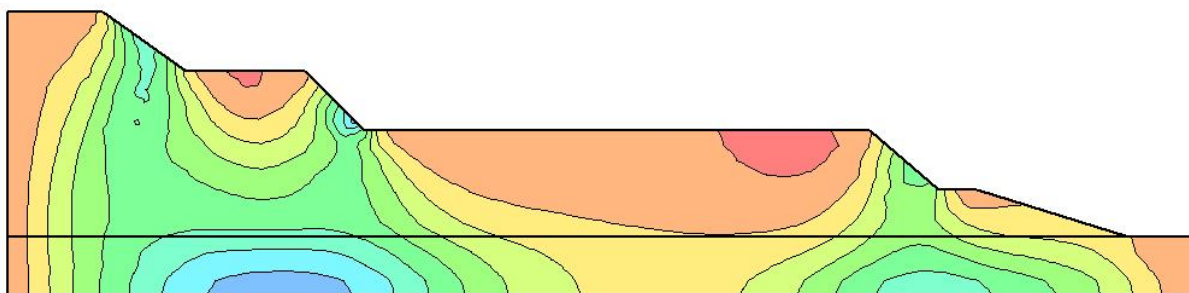


图 4-6-27 剪切应力应变云图



图 4-6-28 极限平衡验算示意图

(8) 外排土场边坡验算剖面 8

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 69m，边坡角 18° ，具体分析如图 4-6-29～图 4-6-32 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，排土场底部边坡产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.263 > 1.2$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.262 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

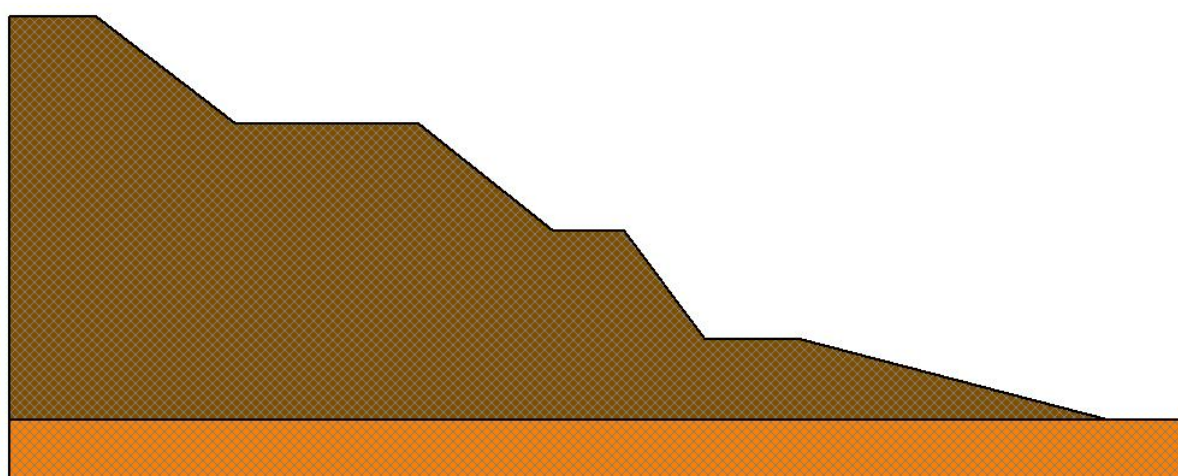


图 4-6-29 边坡体模型示意图

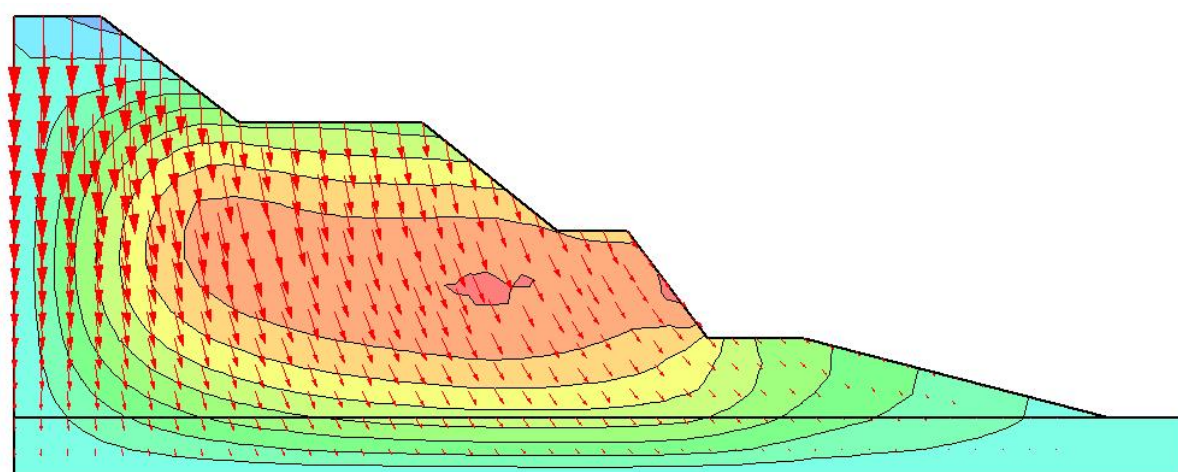


图 4-6-30 位移运动矢量图

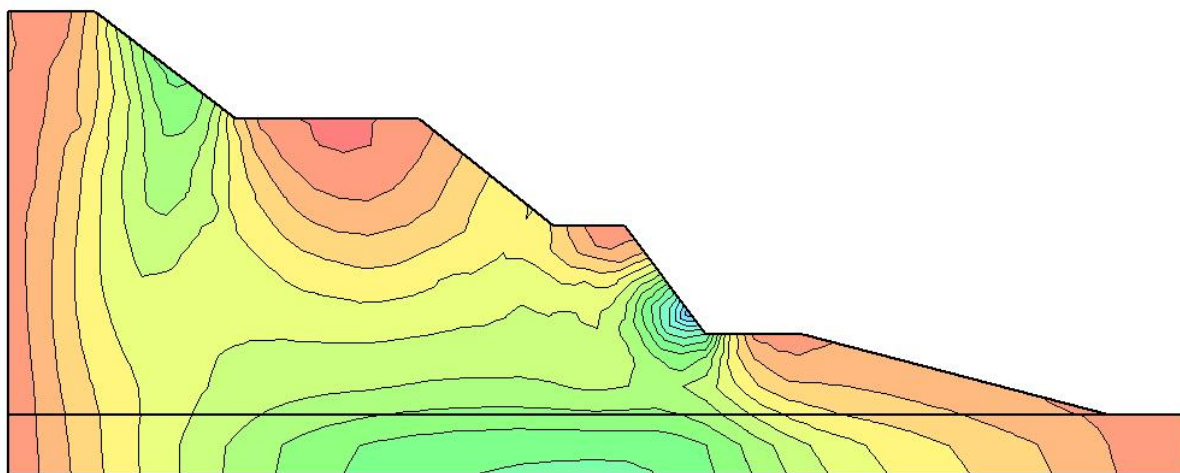


图 4-6-31 剪切应力应变云图

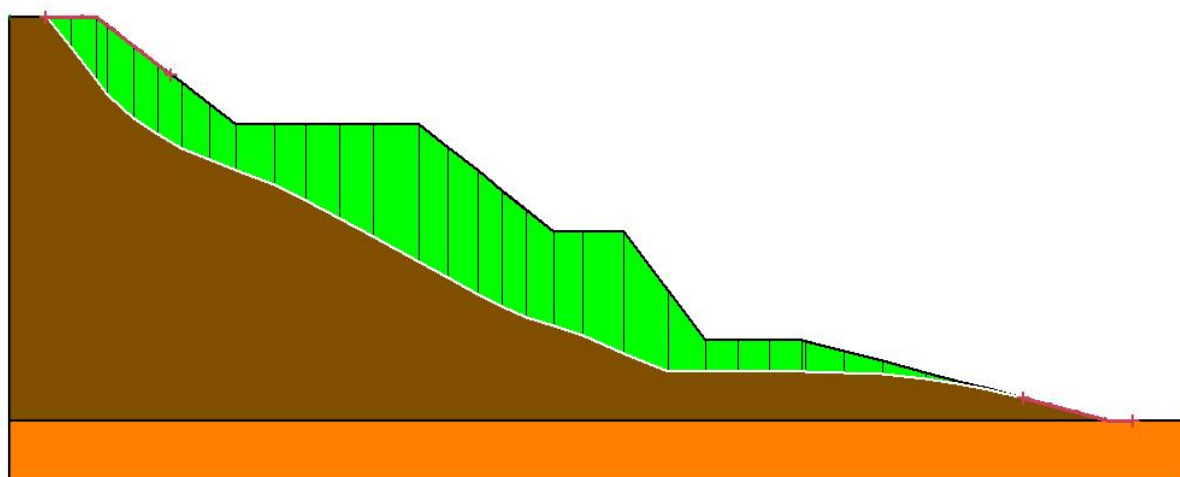


图 4-6-32 极限平衡验算示意图

(9) 内排土场边坡验算剖面

根据边坡剖面建立模型，该现状边坡高 40m，边坡角 18° ，具体分析如图 4-6-33～图 4-6-36 所示，从矢量图可以看出位移的运动趋势，从应力云图可以看出，排土场台阶底部边坡产生较大变形，对后缘有一定的拉应力，整体边坡稳定性较好，整体滑落可能性不大，但应防止局部坍塌。对其进行最危险滑面搜索，验算稳定系数 Bishop 法为 $1.293 > 1.2$ 和 Morgenstern-Price 法为 $1.292 > 1.2$ ，满足安全储备系数要求，边坡处于稳定状态。

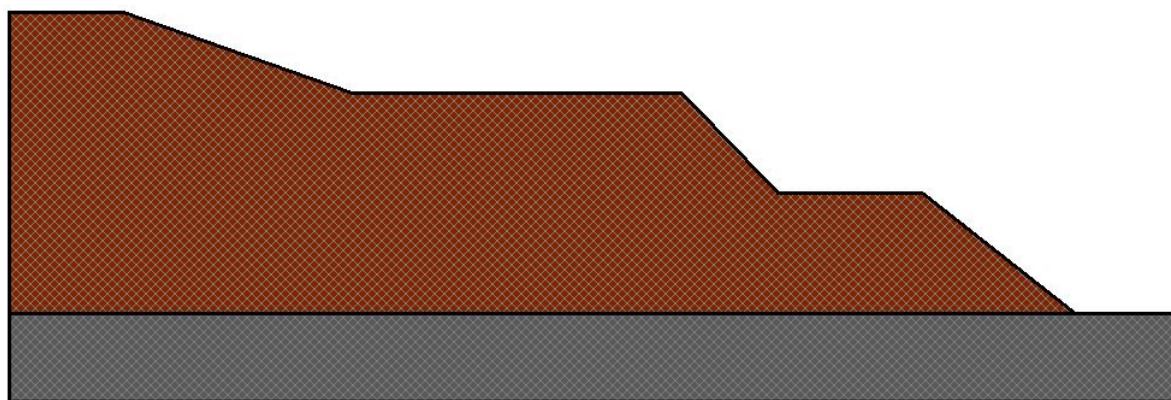


图 4-6-33 边坡体模型示意图

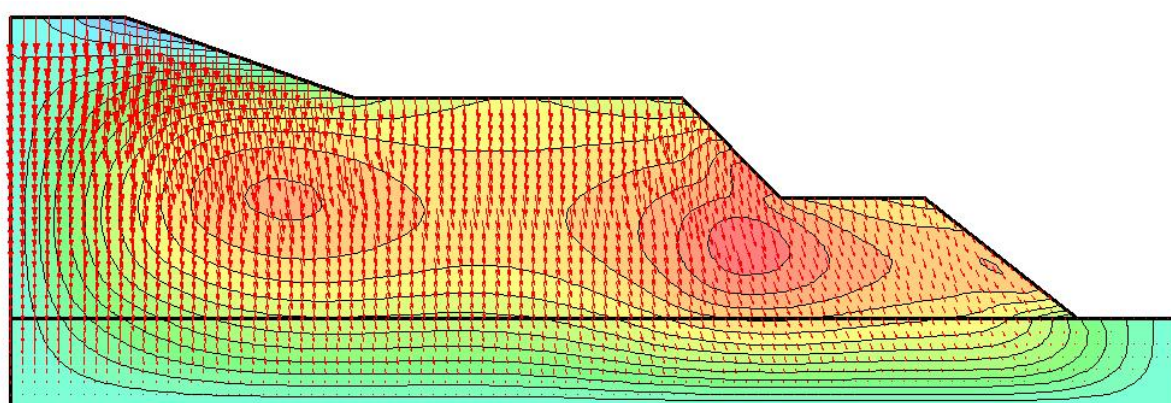


图 4-6-34 位移运动矢量图

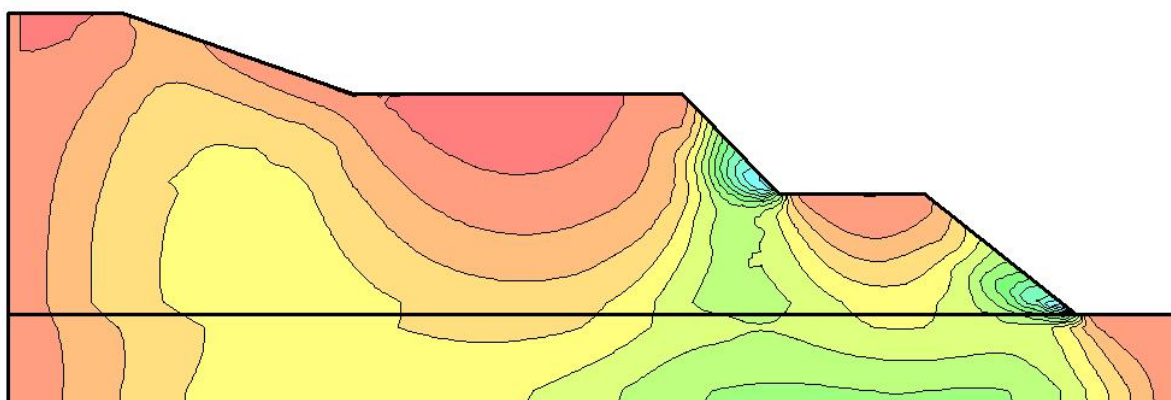


图 4-6-35 剪切应力应变云图

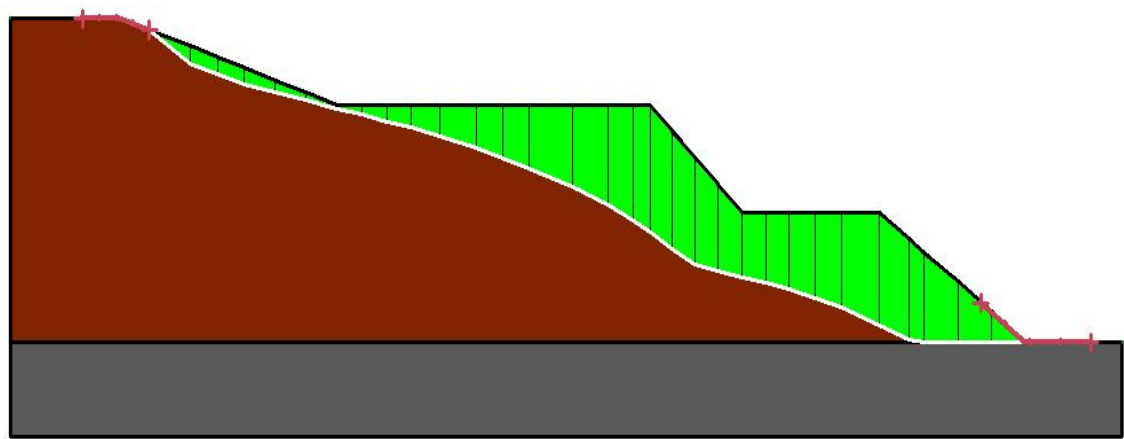


图 4-6-36 极限平衡验算示意图

4.7 评价结果

通过对宏燃煤矿的现场实地踏勘，针对其采掘场和排土场边坡，通过运用极限平衡法（Bishop 法和 Morgenstern-Price 法）和数值模拟对其边坡稳定性进行了全面验算分析，获得主要成果见表 4-7-1。

各剖面边坡稳定系数验算、模拟结果表

表 4-7-1

边坡 区域	边坡 高度	边坡 组成	边坡角	稳定系数	
				Bishop 法	M-P 法
采掘场北帮	51m	第四系、泥岩、砂质泥岩、 煤层等	35°	1.263	1.262
采掘场南帮	106m	第四系、泥岩、砂质泥岩、 煤层等	35°	1.206	1.203
采掘场西帮 1	30m	第四系、泥岩	35°	1.285	1.281
采掘场西帮 2	40m	第四系、泥岩、砂质泥岩、 煤层等	35°	1.277	1.274
采掘场西帮 3	121m	第四系、泥岩、砂质泥岩、 煤层等	35°	1.198	1.196

采掘场东北帮 1	46m	第四系、泥岩、砂质泥岩、煤层等	35°	1.267	1.265
采掘场东北帮 2	125m	第四系、泥岩、砂质泥岩、煤层等	18°	1.249	1.246
外排土场 1	50m	排弃物	18°	1.254	1.252
外排土场 2	110m	排弃物	18°	1.214	1.209
外排土场 3	100m	排弃物	18°	1.238	1.237
外排土场 4	20m	排弃物	18°	1.302	1.301
外排土场 5	20m	排弃物	18°	1.299	1.295
外排土场 6	40m	排弃物	18°	1.276	1.273
外排土场 7	79m	排弃物	12°	1.301	1.297
外排土场 8	69m	排弃物	18°	1.263	1.262
内排土场	40m	排弃物	18°	1.293	1.292

由上表可知，该矿排土场基底地质条件较好，采掘场和排土场边坡是稳定的，满足《煤炭工业露天矿设计规范》（GB50197-2015）中 6.0.8 规定要求。

5 边坡防治措施

露天矿边坡受诸多不确定性因素的影响，对于不稳定或有潜在滑坡危险的边坡，一方面要加强监测，同时应根据边坡岩体的工程性质、环境因素、地质条件及地表水汇集等因素进行综合控制，以改善边坡的稳定性。

5.1 常用的边坡防治方法

露天矿边坡防治方法很多，归纳起来，有三大类：削坡、压坡脚；增大或维持边坡岩体强度；人工建造支挡物(人工加固)。

露天矿边坡防治工作应立足于防，治次之。它贯穿于露天矿设计、施工、生产各个阶段。边坡防治工作应按一定程序进行，它反映了各项防治措施的轻重缓急次序。这一程序是：

- 1、进行有关滑坡原因的工程地质、水文地质的勘探工作；
- 2、截集并排出流入滑坡区的地表水；
- 3、疏干滑坡区或附近的地下水，或附近低地下水位；
- 4、削坡减载、反压坡脚或清除滑体、爆破减震等；
- 5、采用人工支挡物和其他预防措施。

各种方法及其作用和适用条件详见表 5-1-1。

露天矿边坡防治方法

表 5-1-1

类型	方 法	作 用	适 用 条 件
削坡、压坡脚	缓坡清理	对滑体上部或中上部进行削坡，减小边坡角，从而减小下滑力。	滑体确有抗滑部分存在才能应用。能及时调入采运设备的滑坡区段可采用。
	减重压坡脚	对滑体上部削坡，减小下滑力，同时将土岩堆积在滑体下部抗滑部分，使抗滑力增大。	滑体下部确有抗滑部分存在，并要求滑体下部有足够的宽度以容纳滑体上部的土岩。

增大或维持边坡岩体强度	疏干排水	将滑体内及附近岩体地下水疏干，从而减小动、静水压力，并维持岩体强度不致降低。	边坡岩体内含水多，滑床岩体渗透性差。
	爆破滑面	松动爆破滑面，增大滑面附近岩体内摩擦角，使滑体中地下水渗至滑床下岩体中。	滑面单一，弱层不太厚，滑体上无重要建筑物。
	破坏弱层、回填岩石	用采掘机械破坏弱面，并立即回填透水岩石，回填后的岩石内摩擦角大于弱面内摩擦角。	滑面单一的浅层顺层滑坡。
	爆破减震	用多排毫秒微差爆破，减小地震波对岩体的破坏作用。	岩石坚硬且爆破量较大。
	预裂爆破	为了维持到界边坡的岩体强度不致因爆破而降低，用预裂爆破减少爆破对岩体的破坏。	到界边坡。
	注 浆	用浆液充填岩体中裂隙，使岩体整体强度提高，并堵塞地下水活动的通道，或用浆液建立防渗帷幕，阻截地下水。	岩体中岩块较坚硬，裂隙发育、连通，地下水丰富，严重影响边坡稳定。
人工加固	大型预应力锚杆(索)加固	用锚杆(索)并施加预应力以增大滑面上的正压力，使岩体的整体强度有所提高。	潜在滑面清楚，岩体中的岩块较坚硬，可加固深层滑坡。
	抗滑桩支挡	桩体与桩周岩体相互作用，桩体将滑体的推力传递给滑面以下的稳定岩体。	滑面较单一、清楚，滑体完整性较好的浅层、中厚层滑坡。
	挡 墙	在滑体下部修筑挡墙，以增大抗滑力。	滑体较松散的浅层滑坡，要求有足够的施工场地和建材供应。
	超前挡墙法	在滑体下部的滑动方向上预先修筑人工挡墙。	一般在山坡排土场的下部应用。

宏燃煤矿采掘场边坡岩体主要为中软岩，排土场排弃物松散，因此，露天矿采掘场及排土场边坡防治措施应采取的是疏干排水与内排工程相结合的综合措施。

5.2 边坡稳定控制措施

根据大量工程实践及分析表明，影响边坡稳定性因素很多，诸如基底工程地质条件、气候和水的影响、排土工艺、排弃物料物理力学性质，而这些因素又都是在相互作用、相互制约着。对边坡而言，导致其失稳的原因往往是许多因素综合作用的结果，就其作用机制而言，边坡的稳定主要

取决于边坡体的结构、组成边坡体材料的性质与所受的应力状态。因此边坡稳定措施不可能是单一化的，而必须采取综合防治措施，所有措施必须满足经济合理，技术可行。

1、当边坡疏干条件差，边坡体内水压形成，则边坡的稳定性就会变得很差，即使进行减缓坡角，由于其对稳定性灵敏度不高，减缓量小，也不能达到理想稳定系数要求，因此，一定要加强边坡监测，发现边坡体有水渗出时，可修筑渗堤、排水沟等，将水排出。

2、宏燃煤矿施工队生活区等重要设施均位于外排土场东北侧区域，距离较近，本次评价报告针对该处布有监测点，针对这些区域必须要做好边坡实时监测工作，排土场周围设警戒线，派专人监管，特别是春融、雨天，发现滑坡迹象，立即撤离人员设备。排土场四周应修筑可靠的截泥、防洪和排水设施。排土场台阶应保持平整，不应有积水，排土场上部应修建围埂，修建防渗排水设施，完善排土场顶面、马道及坡体的排水及排水顺接措施。

3、强化边坡管理工作，严格按照采矿设计进行生产。边坡防护措施的实现均以边坡管理的严格要求为前提，应时刻注意各项措施的维护与保养工作。在生产过程中加强边坡管理工作，对保证边坡稳定、防止泥石流发生，是不可忽视的措施。如严格洒水制度，能有效的控制风沙，防止排土场尘土污染；保持排土场台阶及台阶坡面平整，减少坡面侵蚀冲沟的形成，并及时平整冲沟，及时监测处理平盘及坡面裂缝；在雨量集中季节和冬季要加强边坡观测工作，春季雪融化时要多注意防止滑坡，旱季多注意沉降变形不均匀性对边坡稳定的影响。

4、采掘场、排土场应进行长期监测，做好险情预测，保证坡体安全。建立健全地质灾害监测体系，责任明确，并保证体系的正常运行。

5、进行专门边坡工程、地质勘探工程和稳定性分析评价，非工作帮形

成一定范围的到界台阶后，定期进行边坡稳定分析和评价，工作帮边坡在临近最终设计的边坡之前，对其进行稳定性分析和评价。

6、露天煤矿长远和年度采矿工程设计中，含边坡稳定性验算。定期对排土场边坡进行稳定性分析，采取防治措施。制定边坡监测措施。

7、定期巡视采掘场及排土场边坡，设运输道路、采运机械和重要设施边坡采取安全措施，对滑坡区采取的安全措施，专门的勘查、评价与治理工程设计，对影响生产安全的不稳定边坡采取安全措施。

8、采掘场最终边坡管理，采掘作业按设计进行，不超挖坡底线，临近到界台阶时，采用控制爆破，最终煤台阶采取防止煤风化、自然发火及沿煤层底板滑坡等措施。

9、排土场边坡管理，内排土场最下部台阶的坡底与采掘台阶坡底之间留有足够的安全距离。排土场保持平整，没有积水，修筑截泥、防洪和排水设施，防止或者减少水流入排土场。

5.3 边坡监测方案

边坡的稳定性涉及地面设施的安全及生产的连续性。鉴于边坡变形破坏的复杂性和影响因素的不确定性，除了采取必要的边坡防护措施外，还须实施边坡监测，以实时掌握剥采过程中边坡的稳定性状态，对于避免滑坡灾害的发生具有重要意义。常用的边坡监测内容有应力监测、位移监测、地下水监测、震动监测等，本项目拟采用全站仪配合 RTK 监测地表位移。

1、位移监测

边坡从受到力的作用变形到最终破坏，通常要经历一个相当长的演化过程。边坡失稳的发展过程，往往伴随着一系列边坡地表、地下的宏观与微观变形现象，包括边坡地表的位移、地面裂缝的出现和发展、地下滑动面的形成等，通过位移监测，可实时掌握这些现象的发生发展过程。目前采用的矿

山边坡位移监测手段主要有地表位移监测和地下位移监测，而地表位移监测由于容易实现应用十分广泛，设备的可操作性和精度也相对较高。

2、监测网的建立及监测管理措施

（1）监测网的建立

监测网的布置形式可分为正方格网、任意方格网、十字交叉网、射线网和基线交点网等5种。采用何种监测网要根据观测区的地形条件确定。

监测网的形成应不但在平面上，更重要的应体现在空间上的展开布置，监测网的形成可能是一次完成，也可分阶段按不同时期和不同的要求形成。主滑面和可能滑动面上、地质分层及界限面，不同风化带上都应有测点，可能形成的滑动带，重点监测部位和可疑点需加深加密布点。这样可以使监测工作在不同阶段做到有的放矢，在边坡工程监测的过程中，监测方案必须随时调整，使能有效地监测边坡工程的岩土变形的动态变化和发展趋势，具体了解和掌握其演变过程，及时捕捉崩滑灾害的特征信息，预报崩滑险情，防灾于未然，同时为危岩的稳定性评价和防治提供可靠依据。

（2）边坡监测管理措施

边坡的安全管理与采矿作业的安全息息相关，因此应加强排土场的边坡监测和管理，防止滑坡、坍塌、泥石流等地质灾害发生。

煤矿应成立边坡管理小组，选派技术人员或有经验的工人专门负责边坡监测和管理。边坡监测工作主要是建立边坡监测管理系统，定期进行地表、地下位移监测，掌握第一手资料，所有边坡安全检查均应做好记录，由专职安全员归档，应用计算机进行边坡位移分析，每个月作出边坡监测分析报告。边坡管理工作主要是边坡专业技术人员日常对排土场等边坡进行检查，加强生产现场管理，严禁出现超高台阶，加强工作面水的管理，如发现不按设计施工或违反规定以及出现滑坡险情时，有权责成两矿及时处理。边坡监测或现场检查有重大滑坡征兆等紧急情况时，边坡管理

人员有权停止有滑坡险情或险情危及区域的生产或施工作业，并向矿山负责人报告，保证生产安全。

3、应力监测

岩体在力的作用下产生变形，内部应力状态发生变化，当应力达到岩体强度时，岩体发生破坏。因此，监测岩体应力是一种积极主动的监测措施，对及时掌握滑坡动态和采取治理措施至关重要。

4、宏燃煤矿边坡监测系统的建立

根据宏燃煤矿采掘场和排土场的实际情况，对其边坡做出监测方案和监测网。

（1）监测设备

根据本矿边坡监测的需要，目前选用的边坡监测设备为RTK型GPS系统一套。

（2）边坡监测

在边坡影响范围内和边缘布置相应数量的网格形分布的监测点,以此来反映边坡的沉降和位移变形。

根据采掘场和排土场现状，宏燃煤矿在排土场和采掘场共布设监测线4条，监测点12个，监测线上的监测点结构采用钢筋混凝土桩。

（3）边坡工程监测周期与频率

正常情况下，采掘场、排土场要进行实时监测，雨季及冬季要加强监测强度。

6 结论与建议

6.1 结 论

通过对宏燃煤矿排土场区域工程地质、水文地质勘察、采用数值模拟分析等手段，对宏燃煤矿采掘场、排土场边坡稳定性进行了详细的分析，提出了边坡防治、自动监测等措施，达到了采掘场、排土场边坡和对周围环境保护的目标，主要分析成果总结如下：

1、进行了采掘场和排土场岩土物理力学指标搜集、分析，确定了本次报告的岩土力学指标，其基本满足边坡稳定性分析要求。

2、采用极限平衡法与有限元对宏燃煤矿现状边坡稳定性进行了分析评价，得出了排土场基底基本稳定，边坡潜在的滑坡模式为圆弧型滑面和圆弧直线型滑面，得出结果如下表

边坡 区域	边坡 高度	边坡角	稳定系数		稳定性
			Bishop 法	M-P 法	
采掘场北帮	51m	35°	1.263	1.262	稳定
采掘场南帮	106m	35°	1.206	1.203	稳定
采掘场西帮 1	30m	35°	1.285	1.281	稳定
采掘场西帮 2	40m	35°	1.277	1.274	稳定
采掘场西帮 3	121m	35°	1.198	1.196	稳定
采掘场东北帮 1	46m	35°	1.267	1.265	稳定

采掘场东北帮 2	125m	18°	1.249	1.246	稳定
外排土场 1	50m	18°	1.254	1.252	稳定
外排土场 2	110m	18°	1.214	1.209	稳定
外排土场 3	100m	18°	1.238	1.237	稳定
外排土场 4	20m	18°	1.302	1.301	稳定
外排土场 5	20m	18°	1.299	1.295	稳定
外排土场 6	40m	18°	1.276	1.273	稳定
外排土场 7	79m	12°	1.301	1.297	稳定
外排土场 8	69m	18°	1.263	1.262	稳定
内排土场	40m	18°	1.293	1.292	稳定

由上表可知，数值模拟、验算结果均表明现状采掘场和排土场边坡是稳定的。

3、根据边坡稳定性分析评价结果，提出了可行的边坡防治措施。

6.2 建 议

本次评价只是在现有工程地质、水文地质勘察条件下进行的，建议开展以下工作。

1、高度重视采掘场和排土场边坡管理工作，建立健全边坡安全管理机构制度。

2、加强边坡变形监测工作，及时掌握边坡变形的动态情况和规律，对采掘场、排土场边坡进行实时监测，专人监管，一旦发现滑坡迹象，应立即撤离人员设备，对于出现的任何局部、小规模边坡坍塌滑落还要进行专门

的勘察、评价与治理工程设计。

3、本报告是根据煤矿实际现状边坡进行验算、分析，仅适用于现阶段。建议煤矿在今后的生产过程中严格按照设计及规范要求进行了采剥作业，同时加强边坡监测工作，发现边坡有滑坡迹象时，应立即采取防治措施，尽快组织人员及设备撤离，保证人员及设备的安全。

目 录

1	前 言	1
1.1	项目背景、目的及意义	1
1.2	工作依据	2
1.3	分析内容	2
1.4	分析方法及技术路线	4
2	矿区概况及工程地质特征分析	6
2.1	矿区概况	6
2.2	边坡工程地质特征	7
2.3	岩土体物理力学指标确定	16
3	边坡稳定性影响因素及滑坡模式分析	17
3.1	边坡稳定性影响因素分析	17
3.2	边坡潜在滑坡模式分析	21
4	边坡稳定性分析	24
4.1	极限平衡	24
4.2	数值模拟	29
4.3	储备系数确定	32
4.4	验算剖面的选取	33
4.5	采掘场边坡验算	33
4.6	排土场边坡验算	46
4.7	评价结果	62
5	边坡防治措施	64
5.1	常用的边坡防治方法	64

5.2	边坡稳定控制措施	65
5.3	边坡监测方案	67
6	结论与建议	70
6.1	结 论	70
6.2	建 议	71