# 王家岭煤矿风井场地边坡稳定性分析与评价

杨 喆[1], 李寅良[1], 林杜军[1], 韩书栋[2]

(1. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要**: 针对王家岭煤矿风井场地边坡稳定性问题,调查分析了该边坡的工程地质条件和影响边坡稳定性的因素。在用赤平投影法对边坡稳定性进行定性评价的基础上,采用极限平衡法(Sarma 法)和有限元法对整个场地典型边坡剖面进行了不同工况条件下的稳定性分析,并给出了安全稳定系数。结果表明,二者分析结果基本一致,验证了所用方法的合理性。对类似工程问题的评价、治理有一定的借鉴和指导意义。

**关键词**: 边坡稳定性; 赤平投影法; 极限平衡法; 有限元法

**文献标识码**: A **文章编号**: 1000-288X(2013)01-0092-05 **中图分类号**: P642.22

# Assessment and Analysis of Slope Stability for Air Shaft Site of Wangjialing Coal Mine

YANG Zhe[1], LI Yin-liang[1], LIN Du-jun[1], HAN Shu-dong[2]

(1. *China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*;
2. *School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

**Abstract**: Geological conditions of slope stability and its influence factors are studied in air shaft site of Wangjialing coal mine. Based on the qualitative evaluation of slope stability by hemispherical projection method, the stability of typical slope sections in the entire site is analyzed under different operating conditions by limiting equilibrium method (Sarma law) and finite element method, with the safety coefficients given. Results show that the outcomes of the two analyses are basically equivalent and the rationality of the methods is proved. The study may also offer reference for the evaluation and management of similar geotechnical slope problems.

**Keywords**: slope stability; hemispherical projection method; limiting equilibrium method; finite element method

王家岭碟子沟风井场地边坡为典型岩、土复合边坡[1-2],其结构复杂,上部土层边坡和下部岩石边坡都存在潜在不稳定滑动面,在工程扰动和持续降雨等不利条件下,场地边坡可能会发生局部或整体的变形破坏。事实上,在场地南侧黄泥灌浆站处的斜坡开挖过程中,已经出现了多次小规模的滑坡,对场地建设造成了显著的影响。因此,对场地边坡进行合理的破坏模式分析和稳定性评价是工程首先要解决的关键问题。

## 1 边坡的工程地质条件

场地展布在两个古滑坡体上,分别称为西侧古滑坡和东侧古滑坡,其间为黄土残梁。边坡的基本地质条件如下所述。

(1) 东侧古滑坡。东侧古滑坡长约 300 m,宽约 360 m,坡度约 15°,主滑方向近正北,滑坡平面形态呈圈椅状地形,东侧为沟谷,西侧为冲沟,后缘为黄土边坡,最大高度约 45 m,黄土边坡上植被覆盖率较高,坡面无变形迹象,整体处于稳定状态。古滑坡体上可见许多小平台,台阶高 2~6 m,平台宽 5~16 m。滑坡下部坡面上可见基岩出露,覆盖土层较薄。

(2) 西侧古滑坡。场地西侧古滑坡长约 450 m,宽约 440 m,坡度约 20°,古滑坡后缘陡坎高低不一,最高处约 25 m,坡度较平缓。该滑坡为沿基岩面的顺层土质滑坡,滑体厚度 15 m 左右,下部切过土层,厚度 20 m 余,滑动方向近正北。古滑坡中部为一冲沟,将该古滑坡切分为东西两部分。在建的场地位于该古滑坡形成的滑坡平台上。

## 2 边坡稳定性因素分析

结合边坡的区域地质环境及其工程地质条件,根

收稿日期:2012-03-13 修回日期:2012-04-11
资助项目:中国中煤能源集团公司 2009 年重点科技创新项目"王家岭煤矿风井场地土、岩复合边坡稳定性及工程对策研究"
作者简介:杨喆(1983—),男(汉族),陕西省西安市人,硕士研究生,工程师,主要从事工程地质方面研究。E-mail:yz965@sohu.com。

据野外调查和室内分析结果,影响场地边坡变形破坏机制的因素主要包括 7 个方面。

(1) 岩土体结构。场地基岩与上覆盖残坡积土层的界面倾向碟子沟,坡积土之上又覆盖人工填土,在填土之前未对残坡积土层处理,填土本身也未进行处理,而且,随着场地开挖、风井的继续掘进,填土越来越多,其所造成的斜坡的坡度也越来越陡,边坡易于发生局部失稳,按照原设计,热锅炉房和烟囱位于填土部位。另外,滑坡堆积中发育大量的破裂面,其与基岩的接触面倾向与坡向一致,现场调查表明,稍有扰动即易发生局部失稳。

(2) 岩土类型。场地内有大量的人工填土,受原地形影响,其厚度不一致,而且土石混杂,干湿不均,新鲜岩石与风化的岩石杂乱,大小不一,易发生不均匀变形问题和滑移。

(3) 岩石力学性质。基岩以泥岩、粉砂岩为主,总体强度较低,遇水易软化。场地的进场公路修建过程中,开挖岩石时未进行爆破,仅使用挖掘机就完成了开挖,可见岩石强度低且软弱。

(4) 地质构造。基岩层理发育,层面黏结力小。场地内岩层倾角小于斜坡的坡角,有利于斜坡的稳定,但如果不合理地开挖坡脚,则易于沿层面发生滑动。岩层中节理较为发育,岩体完整性差。在边坡上可见 3 组节理,其中 2 组与坡面走向近平行的节理组合成"X"型,另一组近于直立,节理面上可见擦痕,节理与层面的组合易使斜坡发生局部破坏。

(5) 不良地质。场地东侧和西侧均为古滑坡,形成年代久远,目前稳定状况较好,没有发现滑动破坏迹象。但是在边坡上进行工程活动时,有可能打破边坡平衡状态,引起滑坡复活或产生新的滑坡。

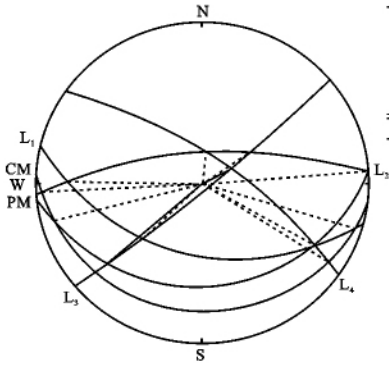
(6) 降雨。根据当地水文气象资料显示,研究区常年干旱少雨,大气降水多表现以暴雨的形式出现,易于形成较强的地表径流,由于黄土具有湿陷性,这种降雨条件将会对边坡上部土层的变形破坏方式及其稳定性具有较为不利的影响。

(7) 工程活动。水工建筑物的泄漏以及生活污水排泄不当会导致边坡内部分土体出现浸水或饱和现象,从而降低土体的力学指标。

## 3　边坡稳定性分析评价

### 3.1　赤平投影法

结构面赤平投影可定性分析边坡的稳定性,同时也可以掌握边坡的主控结构面,为进一步定量分析计算提供依据[3-4]。对碟子沟风井场地,取坡面产状为 355°∠20°,层面产状为 5°∠13°,结合 4 组优势节理面进行结构面赤平投影分析。结构面的赤平投影图如图 1 所示。




| 编号 | 结构面 | 倾向 | 倾角 |
|---|---|---|---|
| PM | 坡面 | 355 | 25 |
| CM | 层面 | 5 | 13 |
| $L_1$ | 节理1 | 14 | 42 |
| $L_2$ | 节理2 | 176 | 68 |
| $L_3$ | 节理3 | 320 | 85 |
| $L_4$ | 节理4 | 215 | 70 |

| 组合交棱线 | 倾向 | 倾角 |
|---|---|---|
| PM—CM | 75 | 4 |
| PM—$L_1$ | 302 | 16 |
| PM—$L_2$ | 266 | 0 |
| PM—$L_3$ | 49 | 15 |
| PM—$L_4$ | 299 | 15 |
| CM—$L_1$ | 287 | 3 |
| CM—$L_2$ | 87 | 2 |
| CM—$L_3$ | 49 | 9 |
| CM—$L_4$ | 303 | 6 |
| $L_1$—$L_2$ | 91 | 12 |
| $L_1$—$L_3$ | 46 | 37 |
| $L_1$—$L_4$ | 300 | 14 |
| $L_2$—$L_3$ | 236 | 51 |
| $L_2$—$L_4$ | 187 | 68 |
| $L_3$—$L_4$ | 242 | 68 |

图 1　结构面赤平投影

(1) 结构面组合 $L_1$ 和 $L_2$,$L_1$ 和 $L_3$,$L_2$ 和 $L_3$,$L_2$ 和 $L_4$,$L_3$ 和 $L_4$ 的交点都出现在坡面的对侧,说明潜在滑面的倾向与坡面倾向相反,这些结构面对坡体稳定性是有利的,它对边坡稳定性影响只是破坏坡体岩石的完整性和控制滑块边界。

(2) 层面投影弧形和边坡投影弧形方向相同,且层面投影弧形位于坡面弧形投影之外,由此可知层面与坡面倾向几近相同,且岩层倾角小于坡脚,岩层层面为场地边坡的主控结构面,边坡易沿层面出现潜在滑面。

(3) 结构面组合 $L_1$ 和 $L_4$,CM 和 $L_1$,CM 和 $L_3$,CM 和 $L_4$ 的交点与坡面在同侧,说明结构面组合交线的倾向与坡向相同,属于相对不稳定型。其中 $L_1$ 和 $L_4$ 这 2 组结构面倾角均大于坡面角,使组合交线未能在边坡出露,如果不具备临空面,滑动的可能性很小。结构面组合 CM 和 $L_1$,CM 和 $L_3$,CM 和 L4 中组合交线外倾,交角小于坡脚,该类型边坡稳定性较差,其中层面的倾角小于坡脚,节理 $L_1$,$L_3$,$L_4$ 的倾角大于坡脚,即组合结构面倾角一个大于坡面倾角,一个小于坡面倾角,有可能发生折线滑动破坏。

上述分析表明,场地边坡的主控结构面为岩层层面,边坡易沿岩层层面发生顺层滑动,其中节理 $L_1$,$L_3$,$L_4$ 和层面组合能使边坡发生折线型滑动,采用理正计算软件对结构面组合 CM 和 $L_1$,CM 和 $L_3$,CM 和 $L_4$ 进行分析计算,CM 和 $L_1$ 所切割的岩体稳定性系数为 1.343,CM 和 $L_3$ 的为 1.510,CM 和 $L_4$ 的为 1.337,均处于基本稳定状态。随着场地建设的进行,当边坡开挖出不利边坡稳定的临空面时,边坡发生滑坡破坏的可能性较大。

### 3.2　极限平衡法

极限平衡法由于简单直观,利于工程设计,因此广泛应用于工程界中。Sarma 方法属于其中一种,其在

分析岩质边坡时具有较高的精度，它的条块的分条是任意的(但不能水平分条)，无需条块边界垂直，可以对各种特殊的边坡破坏模式进行稳定性分析[5-7]，因此，本文采用此法对该岩、土复合边坡进行计算评价。

为了进一步分析场地边坡的稳定性，沿西侧古滑坡体和东侧古滑坡的主滑方向各选择 1 条典型剖面(西侧为 2—2′剖面，东侧为 6—6′剖面)进行边坡稳定性的分析计算。根据调查分析，场地边坡最可能的破坏方式主要有两种，第一种情况是沿着泥岩发生整体破坏，将该潜在破坏面定为推测泥岩滑面进行稳定性计算(图 2a)；第二种破坏情况是边坡下部粉质黏土区发生局部的破坏，定为最危险滑面进行稳定性计算(图 2b)。

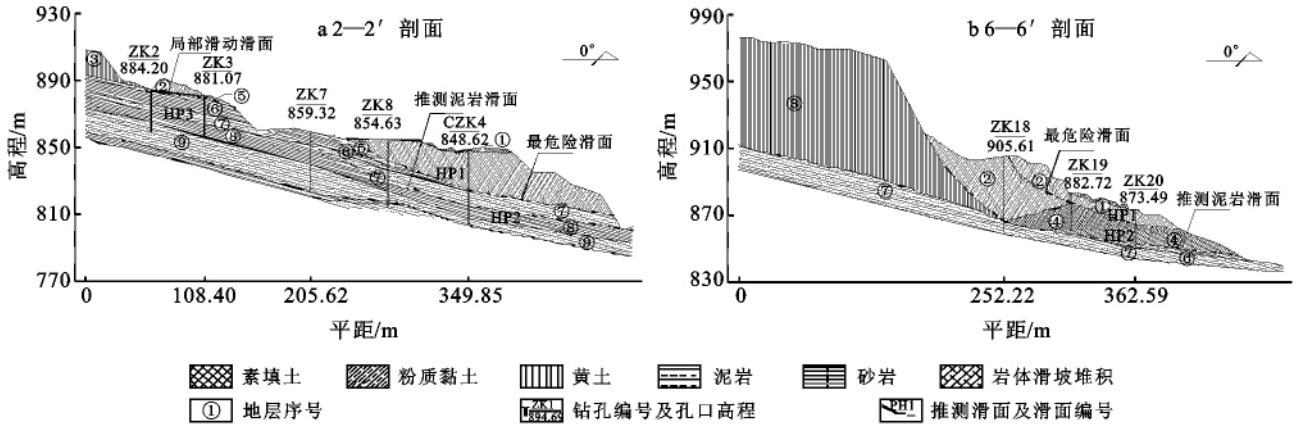



图 2 边坡稳定性计算剖面

稳定性分析所考虑的工况条件包括天然工况，饱和工况，饱和＋地震工况。所分析的滑面包括由工程地质调查推估的滑面以及搜索的最危险滑面。

3.2.1 计算参数的选取[8-10] 在岩、土界面处所选择的参数根据原位剪切试验结果和室内试验结果综合确定。

原位剪切试验由于试验点位置选择较困难，试验结果不尽合理，所得参数仅作参考。在室内进行二次剪切试验和饱和残剪试验，所得结果较符合实际，以室内试验结果为主进行参数选取。同时，参数选择时还综合考虑了反算试验结果和经验参数，综合确定的参数建议值如表 1 所示。

表 1 抗剪强度参数建议值

| 项 目 | 岩、土界面 | | | 岩体软弱面(泥岩) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 原位试验 | 室内试验 | 建议值 | 原位试验 | 经验值 | 建议值 |
| 黏聚力 $c$/kPa | 12.5 | 23.0 | 20.0 | 71.5 | 61～73 | 72 |
| 内摩擦角 $\varphi$/(°) | 46.9 | 23.4 | 23.4 | 39.7 | 33～46 | 40 |
| 残余黏聚力 $c$/kPa | 7.8 | 8.0 | 8.0 | 54.4 | 24～55 | 55 |
| 残余内摩擦角 $\varphi$/(°) | 39.5 | 16.4 | 16.4 | 27.6 | 14～25 | 25 |

3.2.2 计算结果分析

(1) 西侧边坡计算结果。由表 2 可知，在天然状态下西侧边坡总体稳定。在饱和状态下，岩质边坡处于稳定状态，岩体和土体构成的边坡处于临界状态，局部可能产生的滑动面稳定性处于极限状态。

在饱和＋地震(水平地震加速度为 0.01 g)的工况下，岩质边坡处于稳定状态，岩体和土体构成的边坡处于不稳定状态，局部可能产生的滑动面也处于不稳定状态。从稳定计算分析的结果看，西侧边坡目前在自然和饱和状态下处于稳定或基本稳定状态。虽然整体稳定性较好，但已经进行了大量工程建设，而且由于开挖不当等原因已经造成局部地段稳定性较差，因而局部存在失稳破坏的可能，在工程建设中，今后应注意合理开挖和回填，并截排地表水。

表 2 西侧边坡稳定性计算结果

| 剖 面 | 滑 面 | 稳定系数 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 天然 | 饱和 | 饱和＋地震 |
| 2—2′ | 岩、土分界滑面 | 1.185 | 0.976 | 0.843 |
| | 推测泥岩滑面 | 1.653 | 1.468 | 1.292 |
| | 局部滑动滑面 | 1.203 | 1.057 | 0.959 |

(2) 东侧边坡计算结果。由表 3 可知,东侧边坡在天然状态下,岩质边坡处于稳定状态,基岩上覆堆积体边坡处于极限状态。在饱和状态下,岩质边坡处于稳定状态,岩体和土体构成的边坡处于不稳定的状态。在饱和+地震的工况下,岩质边坡处于极限稳定状态,岩体和土体构成的边坡处于不稳定状态。

表 3　东侧边坡稳定性计算结果

| 剖 面 | 滑 面 | 稳定系数 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 天然 | 饱和 | 饱和+地震 |
| 6—6′ | 岩、土分界滑面 | 1.025 | 0.869 | 0.766 |
| | 推测泥岩滑面 | 1.235 | 1.114 | 1.004 |

从稳定计算分析的结果看,东侧边坡处于极限稳定状态,很有可能会沿土石界面形成贯通滑面,导致边坡失稳破坏。特别是在人类工程活动或持续降雨的条件下,边坡失稳破坏的可能性较大。从现场的勘查资料来看,东侧边坡为一沿基岩内软弱面发生滑动的古滑坡,由于滑坡造成局部基岩结构破坏,岩体错断、破碎现象较严重,形成裂隙发育,其上覆土体结构亦较疏松,在钻孔过程中漏浆严重。所以,地表水下渗软化岩体易形成软弱结构面,从而造成边坡整体失稳,这应该引起建设方的足够重视,采取相应治理措施保证坡体安全。总之,西侧边坡在自然状态下处于稳定状态,但存在局部滑动的可能,在降雨或工程活动等不利工况组合的条件下,边坡亦有整体滑动的可能,特别是边坡西半部分沿土、岩界面发生滑动的可能性较大。东侧边坡处于极限稳定状态,在降雨等不利条件下边坡会处于不稳定状态。

### 3.3　有限元模拟法

本次还对典型剖面(西侧边坡选择 2—2′剖面,东侧边坡选择 6—6′剖面)进行了有限元分析,拟对边坡的位移和变形趋势做出判断,进而分析边坡的稳定性。

模型中主要的岩土体分区包括了粉土、粉质黏土、黄土、泥岩、砂岩以及下伏的泥岩、砂岩互层,各层的力学参数如表 4 所示。

表 4　计算所用的力学参数

| 岩土种类 | 容重/(kN·m$^{-3}$) | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|---|---|---|---|---|---|
| 粉质黏土② | 20.1 | 5.9 | 0.49 | 23 | 23.4 |
| 黄土③ | 15.9 | 17.4 | 0.30 | 54 | 32.7 |
| 岩体滑坡堆积④ | 25.0 | 373.5 | 0.35 | 72 | 39.7 |
| 砂质泥岩⑤ | 25.0 | 622.9 | 0.30 | 558 | 37.8 |
| 砂岩⑥ | 25.0 | 2 848.5 | 0.28 | 2 368 | 41.8 |
| 砂质泥岩⑦ | 25.0 | 246.1 | 0.36 | 403 | 36.2 |
| 砂岩⑧ | 25.0 | 458.1 | 0.29 | 1 800 | 42.0 |
| 砂质泥岩⑨ | 25.0 | 863.0 | 0.28 | 1 200 | 41.5 |

注:表中序号指土层序号。

为了使有限元计算结果更为合理,计算模型适度延长右边界和下边界,且左边界与右边界的边界工况为 $x$ 方向固定,而下边界则在 $x$ 与 $y$ 方向固定。

通过有限元法求得的最小主应力、最大剪应变以及塑性区的结果整理,可以了解各边坡剖面的应力变形趋势,并借此判断该边坡的稳定性。

由图 3a 可知,2—2′剖面的最大剪应变范围出现在边坡下部粉质黏土堆积处,在该处有滑动的可能。由图 3b 可知,6—6′剖面的最大剪应变范围出现在边坡下部滑坡堆积层和上部黄土层覆盖区,在边坡下部粉质黏土区有滑动的趋势,应予以处治。导致黄土区最大剪应变值较大的原因是黄土的变形模量较低(由于黄土层较厚,上覆土压力较大,其应变也较大,但该区并未达到塑性)。

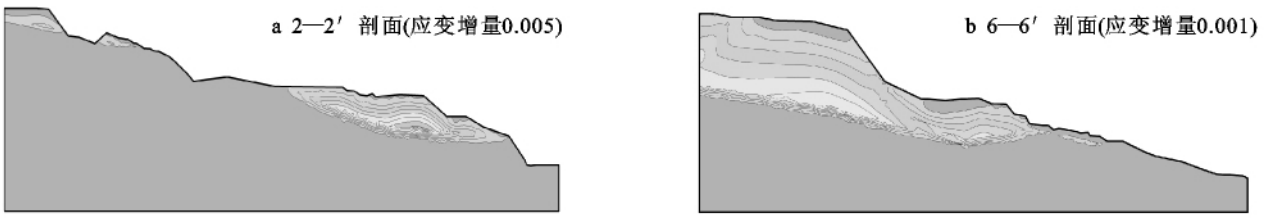



图 3　剖面最大剪应变云图

由图 4a 可知,2—2′剖面的塑性区分布范围较集中,在剪应变较大部位表层土体有塑性变形区,说明该处在一定地质条件下会发生变形破坏。由图 4b 可知,6—6′剖面的塑性区分布范围在边坡下部粉质黏土区(主要是滑坡堆积物和残坡积层),在剪应变较大部位土体有塑性变形区,说明该处地段有变形破坏趋势,应对其进行加固治理。

通过有限元法分析碟子沟风井场地边坡,可以得出:

(1) 西侧边坡整体稳定性较好,但在边坡下部的粉质黏土区稳定性较差,在一定的地质条件下有沿岩、土界面和局部不稳定地段发生滑动的可能。粉质

黏土区物质成分主要是古滑坡堆积物及人工填土，其下伏岩石为砂质泥岩，两者界面倾向碟子沟，在岩与土接触面处易形成贯通的滑面，在进行工程建设的过程中应对该处坡体实施加固。

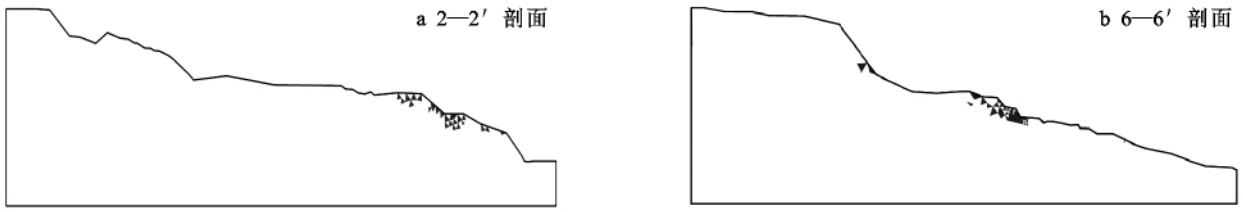



图 4 剖面塑性区范围图

（2）东侧边坡整体稳定性较差，主要的剪应力分布范围和塑性区分布范围集中在边坡的粉质黏土区，由于该处土体物质组成以滑坡堆积物和残坡积物为主，结构松散，在持续降雨和工程活动的影响下易沿土体内部或土、石界面发生贯通的滑动面。另外，根据现场勘查，该边坡是一个沿基岩内软弱结构面发生滑动的古滑坡，其下部基岩由于发生滑动、错断而反倾，下部岩层结构碎散，完整性较差，故该古滑坡仍然有沿基岩内软弱面发生活动的可能。

（3）边坡后缘的黄土覆盖区土层较厚，在模拟计算中，黄土层覆盖区最大剪应变值较大，但该区并未达到塑性，最大剪应变值较大的原因是黄土层较厚，上覆土压力较大，其应变也较大，该区域处于稳定状态。

（4）场地边坡目前虽处于整体稳定状态，但场地基岩以泥岩、粉砂岩为主，遇水易软化，总体强度较低，基岩上覆粉质黏土与基岩接触面也易形成贯通滑面，所以在受到工程影响或在持续降雨的情况下，边坡局部地段会产生蠕滑变形，甚至失稳破坏。

## 4 结 论

（1）影响研究区边坡变形破坏的因素主要有岩土体类型及结构、岩土体力学性质、地质构造、不良地质、降雨、工程活动等因素。

（2）风井场地基岩节理相对较发育，岩层层面是影响风井场地边坡稳定性最不利结构面，对坡体稳定性构成较大威胁，岩层层面与节理 $L_1$，$L_3$，$L_4$ 分别组合均可能形成折线形潜在滑面。

（3）在稳定性分析中，基岩软弱面处的抗剪强度指标采用原位剪切试验所取得的抗剪强度指标和经验参数综合确定；在岩、土界面处的抗剪强度指标根据原位剪切试验结果和室内试验结果综合确定，以室内试验结果为主。

（4）通过极限平衡法和有限元法分析碟子沟风井场地边坡，可知西侧边坡在自然状态下处于稳定状态，但存在局部滑动的可能，在降雨或工程活动等不利工况组合的条件下，边坡亦有整体滑动的可能，特别是边坡西半部分沿土、岩界面发生滑动的可能性较大。东侧边坡处于极限稳定状态，在降雨等不利条件下边坡会处于不稳定状态。主要的剪应力分布范围和塑性区分布范围集中在边坡的粉质黏土区，该区易沿岩、土界面发生滑坡，下伏基岩由于以前发生过一定程度的滑动、错断，岩层结构碎散，完整性较差，故该老滑坡仍然有沿基岩内软弱面发生活动的可能。因此，需要采取防治措施。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 王旭，李显忠. 结合 Morgenstern-Price 法与 Sarma 法计算岩质：土质混合边坡稳定性[J]. 工程质量，2010，28(8)：72-78.

[2] 张莲花，唐凌翔，罗康. 一种土岩混合边坡的稳定性分析计算方法[J]. 岩土工程技术，2008，22(3)：119-122.

[3] 孙玉科，古迅. 赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用[M]. 北京：科学出版社，1980.

[4] 宋义亮，罗延婷，井培登，等. 赤平极射投影法在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 安全与环境工程，2011，18(1)：103-105.

[5] 王静，朱银邦，张国新. Sarma 法在坝基深层稳定分析中的应用[J]. 水利水电技术，2009，40(5)：27-30.

[6] 程涛. 修正的 SARMA 法在岩质高边坡稳定分析中的应用[J]. 建筑科学，2010，26(1)：28-32.

[7] 孙玉科，杨志法，丁恩保，等. 中国露天矿边坡性稳定研究[M]. 北京：中国科学技术出版社，1999.

[8] 刘明维，郑颖人. 岩质边坡结构面抗剪强度参数的实用确定方法研究[J]. 工程勘察，2006(5)：6-9.

[9] 罗丽娟，赵法锁，陈新建，等. 巨型黄土滑坡剪出口滑带土的原位剪切试验研究[J]. 西安科技大学学报，2009，29(4)：459-464.

[10] Singh V K, Baliga B D, Dhar B B. In-situ shear test for optimum slope design of a phosphorite mine[C]// International Congress International Association of Engineering Geology, Lisboa, 1994：4055-4058.