

深层破坏边坡地质结构模式与滑坡灾害点识别

袁宝远, 黄炎

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为解决青海东部红层区深层破坏型滑坡隐蔽性强、识别难及工程风险防控不足的问题,以引黄济宁工程供水区为研究区域,对红层强亲水性、遇水易崩解、力学性能弱的特性及斜坡深层破坏频发的工程现状展开研究。通过野外调查、勘探与数值模拟,建立红层区深层破坏型斜坡地质结构模式并以中坝乡斜坡点为例进行灾害点识别。结果表明:红层区存在红层泥岩为主型、泥岩与砂砾岩组合型和红层砂砾岩为主型三类典型地质结构模式,其深层破坏的核心控制因素为“可浸泡接触面(砂-泥岩/砂砾岩-泥岩)”与“后缘垂直深裂隙(降雨入渗通道)”;识别出中坝乡斜坡变形体为深层破坏型滑坡灾害点,该变形体在天然(稳定系数1.67)、地震工况(稳定系数1.38)下稳定性较好且破坏集中于表面,降雨入渗工况下稳定系数降至0.67,会沿砂岩-泥岩接触面发生深层破坏。勘察需重点关注泥岩为主型、砂砾岩为主型斜坡中的厘米级夹层。

关键词: 深层破坏型;斜坡;地质结构模式;滑坡灾害点

中图分类号: TV221

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0165-07

Geological Structure Model of Deep Failure Slope and Identification of Landslide Disaster Points

YUAN Baoyuan, HUANG Yan

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: In order to solve the problems of strong concealment, difficulty in identification and lack of engineering risk prevention and control of deep-layer destruction-landslides in the red bed area of eastern Qinghai, the water supply area of the Yellow River to Ningxia Project is taken as the study area, and strong hydrophilicity, easy disintegration when encountering water, and weak mechanical properties of the red bed and the frequent deep-layer destruction of the inclined slope are analyzed by field investigation, exploration and numerical simulation, the geological structure model of the deep-layer destruction-type inclined slope in the red bed area is established, and the disaster point is with the example of the inclined slope in Zhongba Township. The results show that there are three typical geological structure models in the red bed area: the red bed mudstone-dominated type, the mudstone and sand-gravel combination type, and the red bed sand-gravel-dominated type. The core controlling factors of deep-layer destruction are "immersible contact surface (sand-mudstone/sand-gravel-mudstone)" and "vertical deep fissure at the rear (rainfall infiltration)". The deformation body of Zhongba Township inclined slope is identified as a deep-layer destruction-type landslide disaster point. The deformation body has good stability under natural conditions (stability coefficient 1.67) and seismic conditions (stability coefficient 1.38), and the destruction is concentrated on the surface, and the stability coefficient rainfall infiltration conditions is reduced to 0.67, which will occur deep-layer destruction along the contact surface of sandstone-mudstone. The exploration needs to on the centimeter-level intercalation in the mudstone-dominated and sand-gravel-dominated inclined slopes.

Keywords: deep destructive type; slope; geological structure pattern; landslide disaster points

青海东部红层广泛分布,主要有白垩系、古近系和新近系红层,红层是具有很强的亲水性、遇水易发生崩解、力学性能弱等特殊性质的工程地质岩组^[1-3],容易产生斜坡变形破坏现象^[4-6],其中深层破坏现象具有一定的隐蔽性^[7],一般破坏规模巨大。深层破坏成因滑坡体是由稳定斜坡逐步演化而成,初期斜坡稳定性良好,中期斜坡产生显著变形(变形体),后期产生深部破坏(滑坡体)。深层破坏型斜坡变形体在外动力作用下会发生破坏形成滑坡体。但发现和与识别深层破坏型斜坡变形体有时会特别困难,出现误判或漏掉的事例时有发生。西宁到兰州高铁线路在海东地区的隧道处于红层斜坡内,由于斜坡变形线路处于多年停用状态。青海浪加水库发生斜坡深层滑动破坏,在事故调查工程中,笔者发现该滑坡属于红层斜坡产生深层破坏,勘察设计时技术人员就发现该斜坡变形严重,曾专门做过稳定性研究,认为属于基本稳定型。岩体结构控制论^[8]是现代岩体力学的基础理论,根据这一理论可以发现,这些事件的发生都是因为事先对深层破坏型红层斜坡地质结构模式认识不足。

深层破坏型滑坡灾害点的确定还依赖于滑坡与斜坡变形稳定性评价理论与方法^[9-11],现代岩体稳定性分析方法越来越趋于成熟,数值模拟方法^[12]和刚体极限平衡方法^[13]是最重要的评价方法,地震动力因素^[14]和降雨因素^[15-16]是斜坡与滑坡稳定性分析的重要因素,数值模拟分析软件系统^[17]在工程中的应用使斜坡与滑坡稳定性评价更加精细化。

引水工程供水区已经进行过详细的斜坡变形破坏现象调查分析,通过分析红层区深层破坏型斜坡典型地质结构模式,可以寻找和识别属于该类地质结构模式的斜坡变形体。根据典型深层破坏型斜坡变形体三维数值模拟计算,分析典型斜坡在不同状况下的稳定程度,确定深层破坏型滑坡灾害点,为设计人员面对供水区红层斜坡稳定问题时避免产生重大失误提供支撑,也可为青海地质灾害相关部门进行防灾分析提供借鉴。

1 工程概况

1.1 工程规模及供水管线布置

青海省引黄济宁工程从黄河引水至西宁与海东地区。起点是龙羊峡水库,终点是民和县。引水工程部分从龙羊峡水库通过引水隧洞穿越拉脊山到教场河边前窑村东侧水库,引水隧洞长约 75 km。供水部分工程主要由供水主干线、沿线城市供水支管

及农林灌溉供水支渠构成,如图 1 所示。供水主干线从教场河边前窑村隧洞出口开始至海东市民和县,长 137.04 km。共布置 6 条城市群供水支管,分别为多巴供水支管、城南供水支管、平安供水支管、乐都供水支管、巴州供水支管、古鄯供水支管,全长 60.22 km。共布置灌溉支渠(管)36 条,全长 538 km。引水工程线路总长 810 km。



图 1 供水部分工程布置示意图

1.2 工程地质条件及存在问题

引水工程相关的红层主要分布在西宁市湟中等四区和海东市平安、乐都和民和三区县的供水工程区,东西约 140 km,南北约 30 km,工程区内分布的主要沉积地层有:

① 白垩系(K):岩性为杂色或暗紫红色砾岩、砂砾岩,紫红色砾砂岩、砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩组成,山麓及河流相碎屑沉积成因建造,与下伏岩层不整合接触关系。

② 古近系(K):分布于大通盆地周边及西宁—民和狭长河谷两侧中山丘陵区。岩性为棕红,暗红色砂岩、泥岩、砂砾岩、粉砂岩、砾砂岩。

③ 新近系(N):工程区主要出露贵德群,岩性为浅红色、浅黄色泥岩夹青灰色、浅黄色砾岩、砂砾岩、石膏。

④ 第四系(Q):工程区分布广泛第四系地层,主要有上更新统风积黄土、冲洪积砂砾石,全新统冲(洪)积砂砾石、粉土、坡积碎石土、含砾粉土、黄土状土等。

供水部分工程区红层由于胶结差使斜坡蠕变变形显著,岩石饱水强度很低,斜坡内泥岩饱水状态抵抗破坏能力很差,测区岩层基本物理力学参数见表 1。由于岩石空隙率较大,红层斜坡中砂砾岩具良好透水性。测区岩层地质构造简单,斜坡顶部有黄土

层,斜坡基岩基本呈缓倾状。10%超越概率的工程测区基岩50年水平向峰值加速度为0.195g。

由于红层工程性质差,测区发现大量斜坡变形

破坏现象,其中深层破坏型滑坡体规模巨大,深层破坏型斜坡变形体产生滑坡灾害问题是工程设计施工必须面对的工程难题。

表1 测区主要红层斜坡基岩主要物理力学性质参数表

岩性	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	天然抗剪 内摩擦系数 f	天然抗剪 黏聚力 c/MPa	饱和抗剪 内摩擦系数 f	饱和抗剪 黏聚力 c/MPa	变形模量 /GPa	泊松比 μ
红层泥岩	2.06	0.58	1.23	0.17	0.015	0.43	0.34
红层砂岩	2.18	1.23	1.76	0.24	0.004	0.54	0.26
红层砾岩	2.35	0.94	1.43	0.37	0.012	0.65	0.27

2 典型深层破坏型斜坡地质结构模式

引黄济宁工程区在初步设计勘察中发现了大量斜坡变形破坏现象,为了掌握该区斜坡变形破坏发育及分布情况,总结其发生发展规律,在测区组织了系统的现场调查及勘探测试工作,结合引水线路的分布重点布置调查勘探点线,图2是测区现场勘探及野外调查的主要路线及调查分析点在测区的分布图,分析发现大部分调查分析点与红层相关。

主,坡顶覆盖一定厚度黄土,坡体内发现有延伸性很好、厚度较薄的砂岩夹层,坡体后缘普遍存在垂直裂缝带,裂缝深度能够达到坡内砂岩夹层,降雨通过后缘深裂隙渗入砂岩夹层,沿夹层与下伏泥岩接触面向坡面流动,接触面泥岩侧浸泡软化,沿接触面滑动破坏形成滑坡体。这类斜坡破坏属于深层破坏型,建立的斜坡地质结构模式见图3,形成深层破坏的重要因素是斜坡中具有可浸泡砂-泥岩接触面。

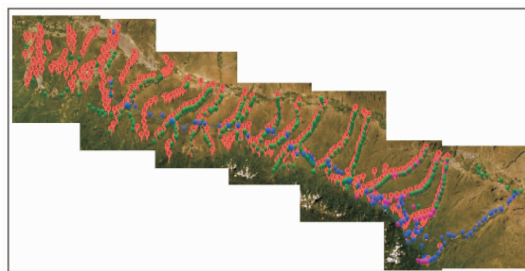


图2 工程区斜坡变形破坏调现场调查分析点分布图

在测区现场调查中,对确定存在滑坡体的斜坡地段,通过分析形成机制,识别出深层破坏成因类型滑坡体,通过地质环境分析,建立该类型滑坡体在其破坏前的斜坡地质模型,总结能够形成深层破坏的典型斜坡地质结构模式,研究发现,可以建立特定的岩石组合的深层破坏型斜坡地质结构模式,根据岩石组合特征,分别建立了红层泥岩为主型、红层泥岩与砂砾岩组合型及红层砂砾岩为主型等典型深层破坏型斜坡地质结构模式。

2.1 红层泥岩为主型地质结构模式

红层泥岩为主型地质结构模式涉及的地层为新近系上段、古近系上段及白垩系上段,通过对亲仁滑坡体、麻尔滑坡体、喇家山滑坡体、火烧沟滑坡体、红庄村滑坡体、甘家村滑坡体等进行野外调查分析,总结这些滑坡体破坏前地质结构特征,发现它们滑动破坏前斜坡基岩岩性主要以顺坡倾斜缓倾角泥岩为

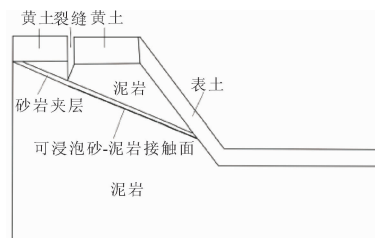


图3 红层泥岩为主型斜坡地质结构模式

喇家山滑坡体所处地段基岩岩性为古近系上段泥岩,现场调查破坏前斜坡体地质特征,发现泥岩中有一层砂岩夹层,厚度18cm,滑动面为泥岩中砂岩夹层的底面与下伏泥岩接触带。对喇家山滑坡体破坏前斜坡建立模拟分析模型,原始斜坡坡高145m,总体坡度29°,坡体岩层顺坡向倾角18.5°,砂岩夹层延伸至坡体下部,与表面碎石土相交。喇家山破坏前斜坡模拟计算主要参数见表1。对破坏前斜坡模拟计算天然状态和地震荷载作用,由成果分析可以得出喇家山原始斜坡在这两种情况下的稳定性较好,在降雨入渗到喇家山原始斜坡内砂岩夹层的情况下,对坡体破坏前斜坡分析计算,得到临界折减系数为0.434,降雨入渗情况下模拟得到的临界剪应变见图4,分析可得原始斜坡破坏位置首先在坡内砂岩夹层与下伏泥岩的接触面发生,表明该滑坡体属于深层破坏型,降雨是斜坡形成滑动破坏的触发因素。

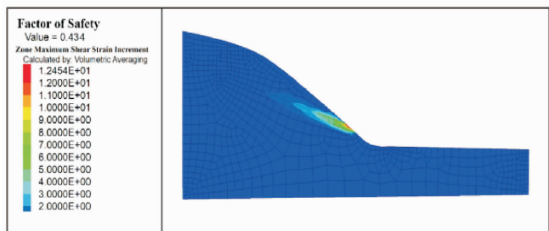
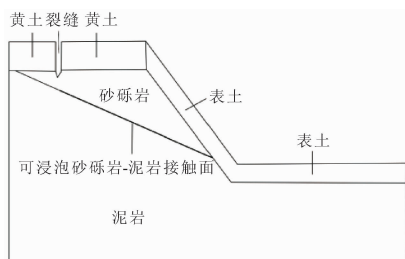


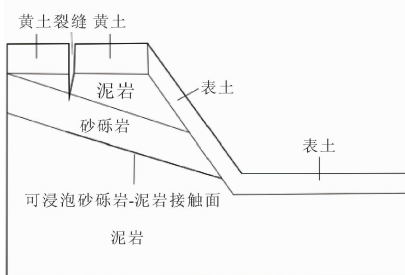
图 4 喇家山破坏前斜坡降雨条件下剪应变增量图

2.2 红层泥岩与砂砾岩组合型地质结构模式

红层泥岩与砂砾岩组合型地质结构模式的特点是,坡体由有一定厚度泥岩层和一定厚度的砂岩或砾岩层组合而成,在新近系、古近系及白垩系地层中都有发现。通过对大坡根滑坡体、索若村滑坡体、中坝滑坡体、杨果桥滑坡体、池滩村滑坡体破坏前斜坡地质结构特征进行分析,滑动破坏前斜坡岩性上部为顺层缓倾厚层砂岩或砾岩,下部为顺层缓倾厚层泥岩,顶部覆盖黄土,坡体后缘一般存在达到砂砾岩的垂直深裂隙,降雨通过后缘深裂隙渗入砂砾岩层,沿砂砾岩下渗到达砂砾岩与下伏泥岩接触面后向坡面分析流动,接触面泥岩侧岩石浸泡软化,沿接触面滑动破坏形成滑坡体。这类斜坡破坏属于深层破坏型,建立的斜坡地质结构模式见图 5(a)。业隆村滑坡体破坏前斜坡在砂砾岩之上还有一层泥岩,裂缝穿过黄土后还穿过上部泥岩到达砂砾岩层,建立的斜坡地质结构模式见图 5(b)。这类模式形成深层破坏需要斜坡中具有可浸泡砂砾岩-泥岩接触面。



(a) 砂砾岩-泥岩型



(b) 泥岩-砂砾岩-泥岩型

图 5 红层泥岩与砂砾岩组合型斜坡地质结构模式

杨果桥滑坡体所处地段基岩岩性为新近系中段上部砂岩与下部泥岩,现场调查发现破坏前斜坡体地质特征,发现滑动面为上部砂岩底面与下伏泥岩顶面间的接触带。对杨果桥滑坡体破坏前斜坡建立模拟分析模型,原始斜坡坡高 170 m,总体坡度 36° ,坡体岩层顺坡向倾角 19.5° ,杨果桥滑坡体破坏前斜坡模拟计算主要参数见表 1。对破坏前斜坡模拟计算天然状态和地震荷载作用,由成果分析可以得出杨果桥滑坡体破坏前斜坡在这两种情况下的稳定性较好,在降雨入渗到杨果桥坡体斜坡内砂岩的情况下,对坡体破坏前斜坡分析计算,得到临界折减法系数为 0.568,降雨入渗情况下模拟得到的临界剪应变见图 6,分析可得,原始斜坡破坏位置首先在坡内上部砂岩与下伏泥岩的接触面,表明该滑坡体成因类型属于深层破坏型。

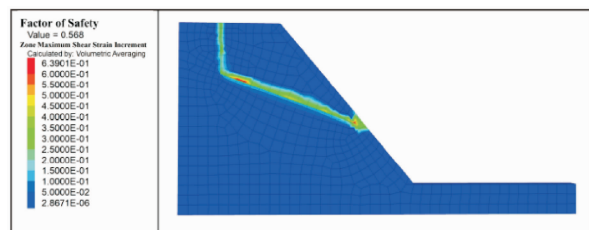


图 6 杨果桥滑坡体破坏前斜坡降雨条件下剪应变增量图

2.3 红层砂砾岩为主型斜坡地质结构模式

红层砂砾岩为主型地质结构模式涉及的地层为新近系中下段、古近系中下段及白垩系中下段,通过对祁家村滑坡体、疙瘩村滑坡体、尔官村滑坡体、山丹村滑坡体、大坡根滑坡体、索若村滑坡体等进行野外调查分析,总结这些滑坡体破坏前地质结构特征,发现它们滑动破坏前斜坡基岩岩性主要以顺坡缓倾角砂砾岩为主,上覆一定厚度黄土,斜坡内存在薄层泥岩夹层,斜坡后缘出现垂直深裂隙达到砂砾岩层,降雨通过后缘深裂隙渗入砂砾岩,沿砂砾岩达到砂砾岩与泥岩夹层的接触面,顺接触面向坡面流动,接触面泥岩夹层侧浸泡软化,沿接触面滑动破坏形成滑坡体。这类斜坡破坏为深层破坏型,建立的斜坡地质结构模式见图 7,形成深层破坏的重要原因是斜坡中存在可浸泡砂砾-泥岩接触面。

祁家村滑坡体所处地段基岩岩性为白垩系下段砾岩,现场调查发现破坏前斜坡体地质特征,发现滑动面为上部砾岩与泥岩夹层接触带。对祁家村滑坡体破坏前斜坡建立模拟分析模型,原始斜坡坡高 175 m,总体坡度 37° ,坡体岩层顺坡向倾角 18.5° ,泥岩夹层在坡体底部出露。祁家村破坏前斜坡模拟

计算主要参数见表1。对破坏前斜坡模拟计算天然状态和地震荷载作用,由成果分析可以得出祁家村原始斜坡在这两种情况下的稳定性较好,在降雨入渗到祁家村原始斜坡内砂岩夹层的情况下,对坡体破坏前斜坡分析计算,得到临界折减法系数为0.639,降雨入渗情况下模拟得到的临界剪应变见图8,分析可得原始斜坡破坏位置首先在坡内上部砾岩与泥岩夹层的接触面,表明该滑坡体属于深层破坏型,降雨是斜坡形成滑动破坏的触发因素。

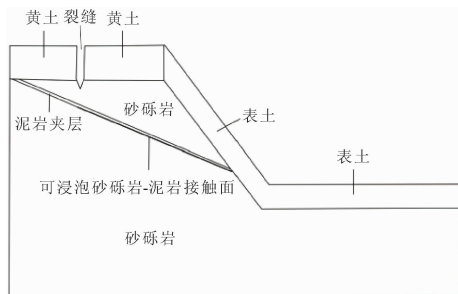


图7 红层砂砾岩为主型斜坡地质结构模式

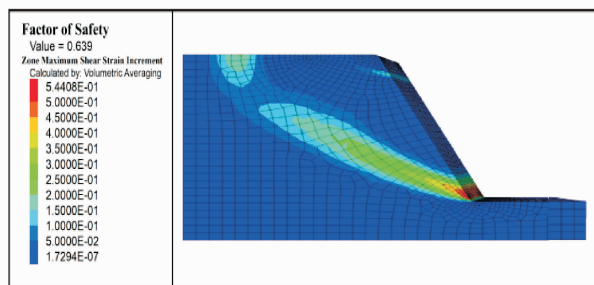


图8 降雨入渗后祁家村滑坡体破坏前斜坡临界剪应变增量图

角 23° 顺坡向古近系西宁组地层,主要岩性为泥质岩类,泥岩层中没有发现明显的砂岩夹层。坡面中下部为第四系砂砾石与黏土混合物构成的松散土层,厚度一般在 $5\text{ m} \sim 38\text{ m}$ 。勘察中发现顶部后缘存在裂缝带,普遍为张性裂缝,其深度可达 $35\text{ m} \sim 60\text{ m}$ 。

根据建立的泥岩为主型深层破坏型斜坡的地质结构模式特征,中坝变形体属于深层破坏型斜坡有两个条件,在泥岩中存在砂岩夹层形成可浸泡砂岩-泥岩接触面并且坡体后缘存在有达到可浸泡砂岩-泥岩接触面的深裂缝。后缘张性裂缝在中坝变形体大量存在,基本满足从坡顶降雨向坡内渗入深部的条件,但形成可浸泡砂岩-泥岩接触面需要泥岩中存在砂岩夹层。在与勘察单位了解后发现,钻探编录中对小于 5 cm 的薄岩层一般不做记录,针对这一情况决定对该区进行补充工程钻探,通过钻探取芯后发现在中坝变形体中存在一层连续性良好厚度 3.5 cm 的砂岩夹层,在后缘裂缝带部埋深 43 m ,斜坡典型地质剖面图如图9。由此识别出中坝变形体在降雨条件下有发生斜坡深层破坏的可能。

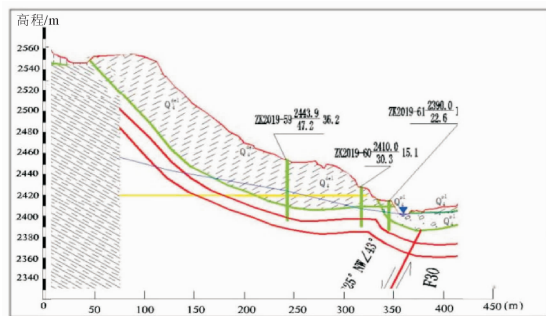


图9 红层斜坡变形体地质剖面图

3 典型深层破坏型滑坡灾害点识别

中坝斜坡变形体位于中坝乡至上游 500 m 左岸山体,在供水干线17#隧洞的出口边坡附近,斜坡坡顶至坡脚水平距离约 360 m ,沿河向宽度约 450 m ,后缘高程 2560 m ,前缘高程 2410 m 。变形体表面高低起伏,总体坡度 $30^\circ \sim 40^\circ$ 左右,外形总体呈箱形,两侧拐角呈弧形,总体变形方位为 268° 。中坝变形体坡顶存在垂直轴线的裂缝带,延伸长度 $140\text{ m} \sim 230\text{ m}$,裂缝宽 $15\text{ cm} \sim 35\text{ cm}$ 。下部沿河公路变形裂缝明显发育,局部发生错段,无明显近期破坏痕迹,变形体上有村庄。变形体两侧小冲沟比较发育,切割深度为 $2\text{ m} \sim 4\text{ m}$,宽度为 $2\text{ m} \sim 10\text{ m}$ 。

在可行性研究阶段,勘察得到变形体坡体上部普遍存在 $0 \sim 18\text{ m}$ 厚的第四系黄土,下伏基岩为倾

对中坝斜坡变形体进行三维模拟分析,计算软件选用FLAC3D数值模拟软件,利用中坝变形体的地形地质条件,考虑斜坡岩土特征及分布,在斜坡数值建模区,利用由野外测量分析得到的斜坡面等高线的数据,利用软件将等高线段变成散点,由点建立布帘,构建与之相关的面实体,构成中坝变形体的斜坡表面模型。利用建模软件,在坡体内加入各类地层面及夹层面,使用布尔运算与griddle合并得到各类界面的非流形实体。利用FLAC3D数值模拟软件中的网格自动划分功能进行实体有限差分计算网格自动划分,形成有限差分计算网格模型。模拟计算中主要使用莫尔-库伦强度理论,中坝变形体数值模拟岩土参数见表2。

对中坝斜坡变形体首先利用数值模型采用强度折减法模拟天然状态下的稳定性,图10是中坝变形

体临界状态下模拟得到的斜坡塑性区分布成果图,模拟得到的折减系数为 1.67,表明在天然状态下,斜坡稳定性最差的部位在坡体表面。

表 2 中坝变形体数值模拟岩土计算参数

分层	密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	弹性模 量/GPa	泊松 比	体积模 量/GPa	黏聚力/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
黄土	1560	0.023	0.34	0.024	16	21
表土	1850	0.021	0.33	0.028	23	24
红层泥岩	2180	0.420	0.30	0.430	1760	29
砂岩夹层	2080	0.530	0.27	0.480	1240	42
饱和泥岩	1470	0.012	0.42	0.013	13	11

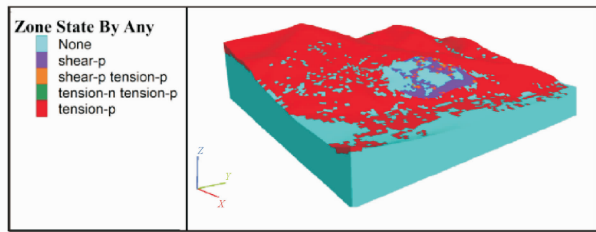


图 10 中坝变形体天然状态下塑性区分布图

考虑地震荷载作用,利用拟静力法模拟地震作用,计算地震作用下的稳定性,图 11 是中坝斜坡变形体模拟分析得到的临界状态下塑性区分布图,临界状态下强度折减法稳定系数为 1.38,起始破坏位置发生在坡体表面。

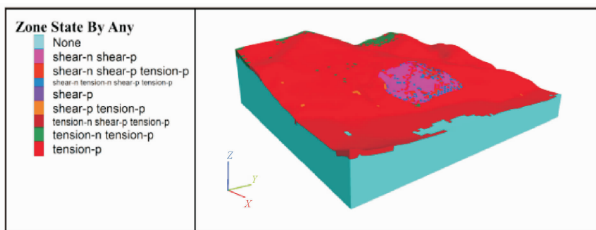


图 11 考虑地震荷载下中坝变形体塑性区分布图

对中坝斜坡变形体,考虑降雨通过裂缝入渗引起泥岩表面软化,模拟计算得到的临界状态下强度折减法稳定系数为 0.67。考虑降雨入渗到坡体内部可浸泡砂岩-泥岩接触面的影响进行模拟分析得到的塑性区分布图见图 12,计算表明,在斜坡内部的砂岩夹层与下伏泥岩的接触面位置首先发生破坏,再向其他部位发展。

综上,中坝斜坡变形体在天然状态下和地震作用下稳定性相对较好,一般破坏首先发生在坡体表面,在降雨沿裂缝入渗影响下会发生深层破坏,破坏首先发生在砂岩-泥岩交接面位置,中坝斜坡变形体属于深层破坏型滑坡灾害点。

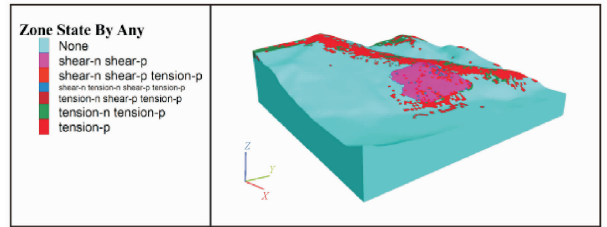


图 12 考虑降雨入渗影响下变形体塑性区分布图

4 结 论

(1) 通过供水工程区大量野外调查分析及已有滑坡体反演分析,根据已有深层破坏型红层滑坡体反分析破坏前斜坡地质模型,建立了红层泥岩为主型、泥岩与砂砾岩组合型和红层砂砾岩为主型三种典型斜坡深层破坏的地质结构模式。

(2) 根据建立的典型地质结构模式,寻找和识别出位于中坝乡的斜坡变形体是深层破坏型滑坡灾害点,在遇到强降雨时可能会发生深层滑动破坏,17#支线工程应考虑尽量避让该部位。

(3) 对于红层泥岩为主型和红层砂砾岩为主型斜坡地质结构模式,夹层的存在为斜坡发生深层破坏提供了条件,在勘察阶段中要特别注意是否存在厘米级的夹层。

(4) 通过研究引黄济宁工程供水区红层斜坡深层破坏的地质结构模式,有助于确定深层破坏型滑坡灾害点,可以为工程设计提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 程香港,何昭宇,刘梦楠,等. 淮北古近系“红层”工程地质特性及不良地质分区研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 228-239.
- [2] 张树光,郭家昊,云霄等. 水-岩相互作用下华南红层软岩力学特性[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2023, 42(6): 649-655.
- [3] 党孟琪,赵其华,王 博,等. 红层软岩崩解演化规律与强度弱化试验研究[J]. 三峡大学学报, 2024, 46(6): 57-64.
- [4] 刘 文,余天彬,王 猛,等. 缓倾红层地区岩质崩塌基本特征及成因机理初步分析——以四川洪雅铁匠湾崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(5): 54-63.
- [5] 郭晓亮,申梦菲,苗乐骞,等. 宝鸡市黄土梁峁区典型黄土-红层滑坡发育特征及风险评价[J]. 陕西地质, 2022, 40(1): 60-63.
- [6] 邵银龙,杨皓然,王俊杰,等. 切坡影响下缓倾顺层红层边坡变形的演化过程[J]. 水利水电科技进展,

- 2022,42(2):95-100.
- [7] 袁宝远,唐尧浩,赵源峰. 红层泥岩大型深层滑坡形成机制及稳定性分析[J]. 中国煤炭地质,2022,34(2):71-75.
- [8] 黄丹. 工程地质[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023:139-164.
- [9] 刘伟. 岩体力学[M]. 北京:化学工业出版社,2023:244-259.
- [10] 史绪山,柴波,杜娟,等. 铁峰山背斜构造控滑机制及斜坡破坏模式[J]. 工程地质学报,2024,32(1):159-169.
- [11] 凌斯祥,李乐,石奥博,等. 上木江坪高陡斜坡危岩特征与定量风险评估[J]. 工程地质学报,2024,32(3):1083-1097.
- [12] 胡江波,诸葛业琴. 基于有限差分法的边坡加固工后效果数值模拟研究[J]. 道路工程,2024(12):106-110.
- [13] 王泽琦,卢晓辉,谷晓冬. 基于极限平衡法的弓长岭露天矿边坡稳定性分析[J]. 现代矿业,2023,39(9):76-79.
- [14] 张家瑞,刘先林,吕龙,等. 地震作用下高桩码头岸坡整体稳定性拟静力分析[J]. 岩土工程学报,2024,46(2):205-209.
- [15] 李刚,李元浩. 降雨作用下富水软岩边坡浅层破坏机理研究[J]. 露天采矿技术,2024,39(4):11-14.
- [16] 马超. 不同降雨强度下土质边坡的稳定性分析[J]. 水利科学与寒区工程,2024,7(6):49-52.
- [17] 魏博文. 水利工程数值计算简明教程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2022:294-308.

~~~~~

(上接第16页)

- [16] 霍素斌,于志家,李艳峰,等. 超疏水表面微通道内水的流动特性[J]. 化工学报,2007,58(11):2721-2726.
- [17] 姜桂林,张承武,管宁,等. 水在不同管径超疏水性微管内的流动特性[J]. 山东科学,2015,28(1):20-27.
- [18] Kühnen J, Scarselli D, Schaner M, et al. Relaminarization by steady modification of the streamwise velocity profile in a pipe[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2018,100(4):919-943.
- [19] Elena M, Ashley P W, Rich R, et al. Stabilisation and drag reduction of pipe flows by flattening the base profile[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019,863(1):850-875.
- [20] Elena M, Zijing D, Willis A P, et al. Designing a minimal baffle to destabilise turbulence in pipe flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020,900:A31.
- [21] 张振,孙智利,颜大椿. 湍流边界层逆转挟机制的实验研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,42(3):305-309.
- [22] 王兴华,付成华,穆宵泉. 基于 FLUENT 三维数值模拟的溃坝洪水流动特性分析[J]. 中国农村水利水电,2020(4):133-138.
- [23] 徐程,李有明,龙岩. 基于 Fluent 二维流体仿真模块的调水工程分汊口处防淤研究[J]. 水电能源科学,2022,40(8):105-108.
- [24] 周亚军,王铁力,杨建峰,等. 基于 CFD 方法的竖井贯流泵装置进出水流道优化设计[J]. 水利水电技术,2019,50(11):59-66.
- [25] 巨江,刘少斌,杨晓池. Fluent 软件在泄水工程中的应用[J]. 水力发电学报,2009,28(2):110-114.
- [26] 葛新峰,程志龙,陈裕文,等. 水泵水轮机调相运行排水阀故障工况水环特性[J]. 水力发电学报,2025,44(3):38-49.
- [27] 江春波,周琦,申言霞,等. 城市街道分水口对洪水流态转换过程影响研究[J]. 水力发电学报,2021,40(8):34-42.
- [28] 俞晓伟,牧振伟,高尚. 低弗劳德数梯形墩-悬栅消力池水力特性[J]. 长江科学院院报,2023,40(1):107-115.
- [29] 郑子萱,郑飞飞,唐洪武,等. 城市入河雨水管道水动力特性试验研究[J]. 水科学进展,2025,36(1):132-142.
- [30] 申艳,姜姿云,杨利,等. 大型岔管内螺旋流涡带数值分析研究[J]. 水利学报,2024,55(7):827-837.
- [31] 张维乐,王芳芳,吴时强,等. 凹槽长度对后台阶湍流特性影响研究[J]. 水力发电学报,2023,42(1):86-94.
- [32] 乔曼曼. 通道及开口腔内外的自然对流[D]. 北京:北京交通大学,2020.