

引黄济宁工程古近系红层区斜坡深层变形破坏模式分析及应用

袁宝远, 李孟德

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要:为了在引黄济宁工程古近系红层区建立典型斜坡深层变形破坏模式并用于寻找和识别深层破坏型斜坡变形体,依据工程供水区斜坡变形破坏现象调查分析成果,逐个分析古近系红层区发现的深层破坏红层滑坡体的形成机制,并反向分析红层滑坡体形成前天然斜坡地质力学特征,对古近系红层区天然斜坡深层变形破坏产生的关键因素进行数值模拟分析,分别建立古近系红层区典型斜坡深层变形破坏模式,并在古近系红层区寻找符合典型斜坡深层变形破坏模式对应地质结构模式的斜坡变形体并建立三维数值模拟模型,分析古近系红层区变形体斜坡天然、地震与降雨等条件下的变形稳定特征,识别出深层破坏型变形体。结果表明:古近系红层区斜坡深层变形破坏模式与地层岩段有关,根据典型斜坡深层变形破坏模式识别出古近系红层区供水工程 24 号支线沿线有一个可能发生深层变形破坏的变形体,暴雨条件下该变形体斜坡稳定性较差。

关键词:引水工程;古近系红层;斜坡;深层变形破坏模式;引黄济宁工程

中图分类号:P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2025)06-0091-07

Analysis and application of deep deformation and failure modes for slopes in Paleogene red-bed area of the Yellow River to Xining Diversion Project//YUAN Baoyuan, LI Mengde (School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to establish typical deep deformation and failure modes for slopes in the Paleogene red-bed area of the Yellow River to Xining Diversion Project, and to identify deep failure-type slope deformation masses, based on investigation and analysis results of slope deformation and failure phenomena in the water supply area, the formation mechanism of each discovered deep-failure red-bed landslide mass was analyzed, and a reverse analysis was conducted to determine the geomechanical characteristics of natural slopes before the formation of red-bed landslides. Numerical simulations were performed to analyze the key factors causing deep deformation failure of natural slopes in the Paleogene red-bed area, and typical deep deformation and failure modes for slopes in the Paleogene red-bed area were established. Slope deformation masses with the geological structural characteristics of typical deep deformation and failure modes were identified in the Paleogene red-bed area, and a three-dimensional numerical simulation model was established to analyze the deformation and stability characteristics of these deforming slope under natural, seismic, and rainfall conditions, and identify deep failure-type slope deformation masses. The results show that the deep deformation and failure mode for slopes in the Paleogene red-bed area is related to the stratum rock segments. According to the established typical deep deformation and failure mode for slopes, a potential deformation mass is identified along the No. 24 branch line of the water supply project in the Paleogene red-bed area, showing poor stability under rainstorm conditions.

Key words: diversion project; Paleogene red bed; slope; deep deformation and failure modes; the Yellow River to Xining Diversion Project

红层为一种陆源相沉积岩石构成的地层,是具有强亲水性、遇水易发生崩解、失水易发生收缩干裂、抗风化性能弱等特殊性质^[1-3]的工程地质岩组。红层区斜坡变形破坏形式有崩塌^[4]、浅层变形破坏^[5-6]及深层变形破坏^[7]。青海省红层主要分布在

东部地区,斜坡深层变形破坏^[8-9]一般规模巨大。红层区斜坡由深层变形破坏发展成滑坡体一般经历 3 个典型阶段:无明显变形的斜坡阶段、有明显变形形成斜坡变形体阶段和发生深层变形破坏后形成滑坡体阶段。斜坡变形体在触发因素的作用下会

发展成深层变形破坏后的滑坡体,但这类斜坡变形体的发现与识别有很大难度,易出现漏判或误判的情况。青海浪加水库施工时在左坝肩附近突然发生大型红层区斜坡深层变形破坏,该斜坡在勘察设计时做过专门分析,评价为基本稳定,但实际变形破坏模式与勘察设计时判断的可能变形破坏模式不一致。兰州到西宁高铁线路由于途经红层区,山体的深层变形使线路多年处于停用状态。这些意外现象发生的主要原因是红层区斜坡变形破坏模式的认识不足。

建立区域典型斜坡深层变形破坏模式有利于发现和识别区域内可能发生该模式变形破坏的斜坡变形体^[10-11],但目前还缺乏青海东部区域红层区斜坡变形破坏模式的研究成果。红层区斜坡深层变形破坏模式分析可以依据区域内已有滑坡体的调查分析资料,根据红层滑坡体成因机制分析成果^[12-13],寻找深层变形破坏红层滑坡体,反分析滑坡体破坏前斜坡地质结构模式,模拟分析原始斜坡产生深层变形破坏的关键因素,从而建立红层区典型斜坡深层变形破坏模式。依据建立的斜坡深层变形破坏模式,寻找和识别红层区潜在的深层变形破坏斜坡变形体,可以大大减少红层区深层变形破坏的发生。斜坡变形破坏模式的研究依赖于斜坡变形破坏分析,目前斜坡变形破坏分析的方法和相关理论^[14]已越来越成熟,其中刚体极限平衡分析方法和数值模拟分析方法^[15]是斜坡变形破坏的主要分析方法,地震动力作用和降雨入渗作用^[16]是导致斜坡稳定性降低的关键因素。

红层在青海东部引黄济宁工程供水区广泛分布,其中古近系红层占比最大。本文依据引黄济宁

工程供水区斜坡变形破坏现象调查分析成果,反分析古近系红层区的深层变形破坏滑坡体深层变形破坏前斜坡地质结构模式,建立典型古近系红层区斜坡深层变形破坏模式并寻找和识别出古近系红层区潜在的深层变形破坏变形体斜坡,同时建立斜坡变形体的三维数值模拟模型分析斜坡变形体在天然、地震与降雨等条件下的稳定性,以期为工程施工图阶段设计提供依据。

1 古近系红层区基本工程地质条件

引黄济宁工程是青海省境内重大工程,从黄河干流龙羊峡水库引水至湟水流域的西宁和海东市。项目涉及青海省西宁市、海东市和海南州 3 市(州) 10 县(区)。工程由引水工程和供水工程组成。引水工程自龙羊峡水库大坝上游左岸约 5.0 km 处引水,经引水隧洞穿越拉脊山自流输水至湟水右岸支流教场河前窑村。引水隧洞长约 74.4 km,隧洞出口布设消能电站。供水工程(图 1)自教场河隧洞出口新建供水干线延伸至民和,干线以下为西宁海东城市群及 2 490 m 水位以下南岸灌区及林带供水,供水量 7.32 亿 m³。

古近系红层主要分布在工程供水区,涉及西宁市湟中区、城西区、城中区、城东区 and 海东市平安区、乐都区和民和回族土族自治县等 7 个县(区),东西方向长约 150 km,北以湟水河为界,南至拉脊山边缘,南北方向宽约 30 km。古近系红层的主要地层为:①西宁组上段(E_{x3})。紫红色、灰紫色中-薄层状泥岩为主,局部夹中厚层状粗粒岩屑长石砂岩、粉砂岩。零星见透镜状细砾岩,偶见厚约 2 cm 的石膏层。②西宁组中段(E_{x2})。灰红色中-厚层状中粗粒

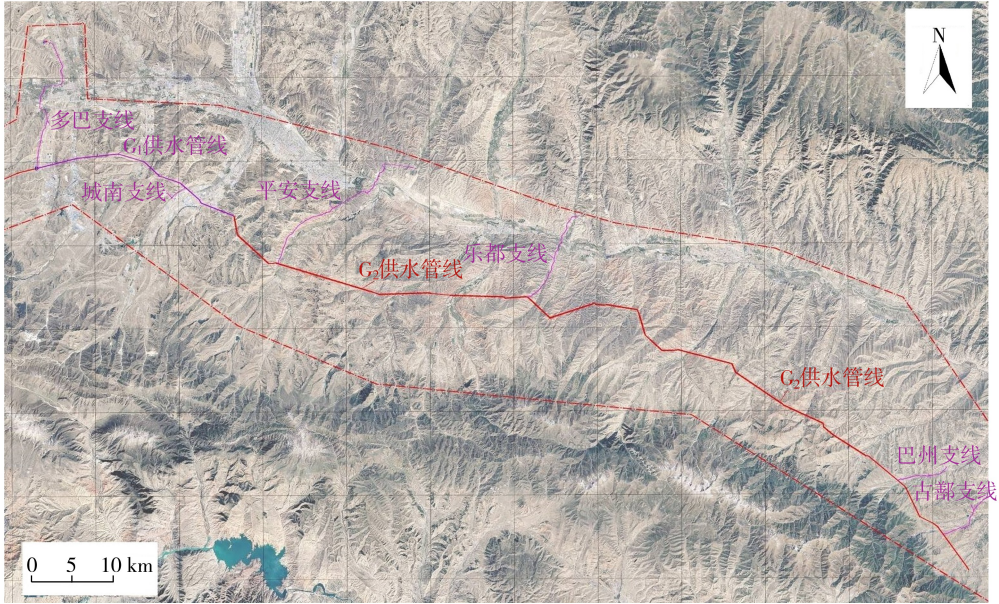


图 1 供水工程布置示意图

岩屑长石砂岩夹灰紫、紫红色泥岩、泥质粉砂岩,局部二者互层。砂岩、泥岩总体上厚度比为 5 : 3。

③西宁组下段(E_{x1})。灰紫色-紫红色复成分中砾岩夹紫红色厚层状含砾粗砂岩、砂岩、泥质粉砂岩、泥岩。

④上更新统黄土(Qp_3^{cal})。浅灰黄色风积沙土、黄土,粒度较细。

供水工程区古近系红层岩石物理力学参数见表 1,可见红层胶结很差,饱水强度极低,斜坡蠕变变形显著,泥岩浸泡后抗变形破坏能力极差。古近系红层区在供水区分布面积约占 1/3,其中西部多于东部,地层呈水平状或缓倾状,斜坡坡体基岩由红层构成,顶部一般覆盖一定厚度黄土层,坡面覆盖一定厚度表土层。引黄济宁工程供水区的 50 年超越概率为 10%时,对应的基岩水平向地震波峰值加速度为 0.195g。

2 古近系红层区斜坡深层变形破坏模式分析

引黄济宁工程供水区变形破坏现象普遍,根据工程需要,在供水区进行了多次详细的变形破坏现象现场调查分析,图 2 为现场调查路线及调查点分布图。依据调查分析资料,挑出古近系红层区中已发现的滑坡体,通过滑坡体成因机制分析,寻找深层变形破坏滑坡体,反分析其深层变形破坏前原始斜坡地质结构模式。使用 FLAC3D-7.0 软件,采用强度折减法进行原始斜坡模拟计算分析,确定其变形破坏模式。调查分析结果表明,古近系红层区斜坡深层变形破坏模式与红层岩段有关,因此针对不同岩段,分别建立斜坡深层变形破坏模式。

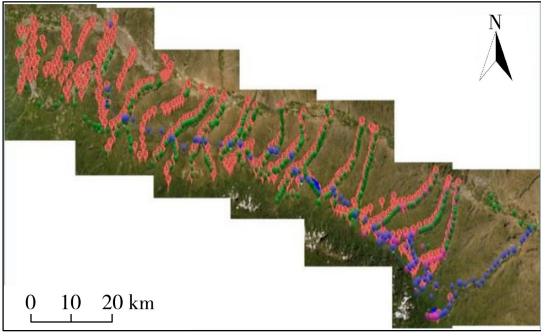


图 2 供水区现场调查路线与调查点分布

2.1 西宁组上段

西宁组上段红层涉及的地层为古近系西宁组上

段,通过对喇家山滑坡体、野牛村滑坡体、甘家村滑坡体形成前原始斜坡特征进行分析,滑坡体形成前斜坡岩性以泥岩为主,岩层缓倾角顺倾,上覆水平黄土层,斜坡后缘有垂直裂隙,原始斜坡滑面位置有薄层砂岩夹层,滑坡体破坏前的原始斜坡地质结构模式见图 3(a)。杨沟湾滑坡体原始斜坡有两个砂岩夹层与深层滑动相关,原始斜坡地质结构模式见图 3(b)。两种斜坡地质结构模式的特点是斜坡中砂岩夹层的上覆岩层被切开,砂岩夹层与地面有渗水通道。

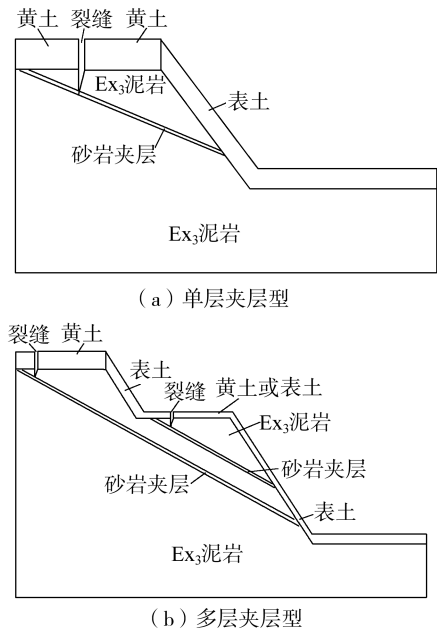


图 3 西宁组上段滑坡体破坏前的原始斜坡地质结构模式

以野牛村红层泥岩滑坡体为例,调查中发现,滑面为厚度 15 cm 的砂岩夹层与下伏泥岩界面,调查分析得出原始斜坡高为 130 m,坡度为 27°,顺倾夹层在坡面下部出露,倾角为 20°,主要岩石变形和强度参数见表 1。对原始斜坡进行天然和地震条件下强度折减法稳定性计算,得到的强度折减系数均大于 1,临界状态下变形破坏发生在斜坡浅部。取界面强度为泥岩饱和抗剪强度,对原始斜坡进行暴雨条件下强度折减法稳定性计算,得到的强度折减系数为 0.514,说明夹层没有完全饱和就发生深层变形破坏,图 4 为暴雨条件下强度折减法模拟计算得到的剪应变增量云图,破坏位置为砂岩夹层与下伏泥岩界面,可见当斜坡中界面下泥岩处于饱和状态

表 1 供水区古近系红层岩石物理力学参数

岩性	密度/(g/cm ³)	摩擦系数		黏结力/MPa		变形模量/GPa	泊松比
		天然	饱和	天然	饱和		
泥岩	2.08	0.58	0.19	1.31	0.008	0.42	0.32
砂岩	2.21	1.23	0.24	1.79	0.003	0.43	0.28
砾岩	2.39	1.34	0.38	1.62	0.012	0.68	0.24

时,斜坡稳定性差,原始斜坡会因弱面影响进入失稳状态。因此判定暴雨为该滑坡体原始斜坡形成深层变形破坏的关键因素。

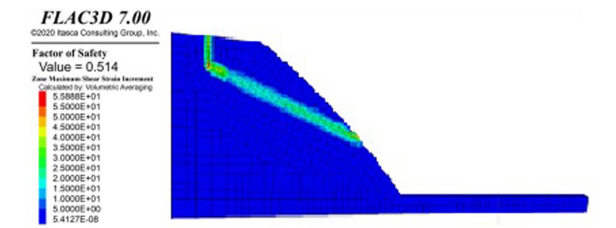


图4 野牛村红层泥岩斜坡暴雨条件下剪应变增量云图

古近系西宁组上段红层区斜坡深层变形破坏模式可归纳为:倾向坡外的缓倾地层山体斜坡坡体表面在坡体形成过程中出现应力调整,坡体因此产生变形,由于斜坡表面长期的表面蠕变变形,原始斜坡在其斜坡后缘会产生拉张裂缝,拉张裂缝发展穿过上覆的黄土层及上部泥岩,到达地层中的砂岩夹层。在暴雨条件下,雨水会顺裂缝渗流穿过黄土覆盖层及上部泥岩,到达砂岩夹层后,雨水穿过砂岩夹层到达夹层与下伏泥岩层的界面。由于下伏泥岩透水性比较差,会改变下渗雨水的流动方向,雨水由顺着泥岩中砂岩薄层夹层与下伏泥岩层界面流动转向斜坡的坡脚方向流动,浸泡一定时间后界面附近泥岩强度会显著降低而软化成饱和状态,致使斜坡顺砂岩夹层与下伏泥岩界面滑动产生斜坡深层变形破坏。

2.2 西宁组中段

西宁组中段红层涉及的地层为古近系西宁组中段,通过对尧庄村滑坡体、大坡根滑坡体、索若村滑坡体形成前原始斜坡特征的分析可知,滑坡体形成前基岩岩性为上部砂岩、下伏泥岩层,岩层缓倾角顺倾,上覆水平黄土层,滑坡体后缘有垂直裂隙,滑坡体破坏前的原始斜坡地质结构模式见图5(a);业隆村滑坡体原始斜坡上部为泥岩层、中间为厚层砂岩、下部为泥岩层,原始斜坡地质结构模式见图5(b)。两种斜坡地质结构模式的共同特点是斜坡中部有厚层砂岩,砂岩下伏泥岩层,砂岩层上部被切开,与地面有渗水通道。

以尧庄村红层砂岩滑坡体为例,调查中发现,滑面为下伏泥岩与上覆砂岩的界面。调查分析得出原始斜坡高为125 m,坡度为31°,界面在坡面下部出露,倾角为21°,主要岩石变形和强度参数见表1。对原始斜坡进行天然和地震条件下强度折减法稳定性计算,得到的强度折减系数均大于1,临界状态下变形破坏发生在斜坡浅部。对暴雨条件下原始斜坡进行强度折减法稳定性计算,得到的强度折减系数为0.561,说明界面没有完全饱和就发生了深层变形破坏,图6为暴雨条件下采用强度折减法模拟计

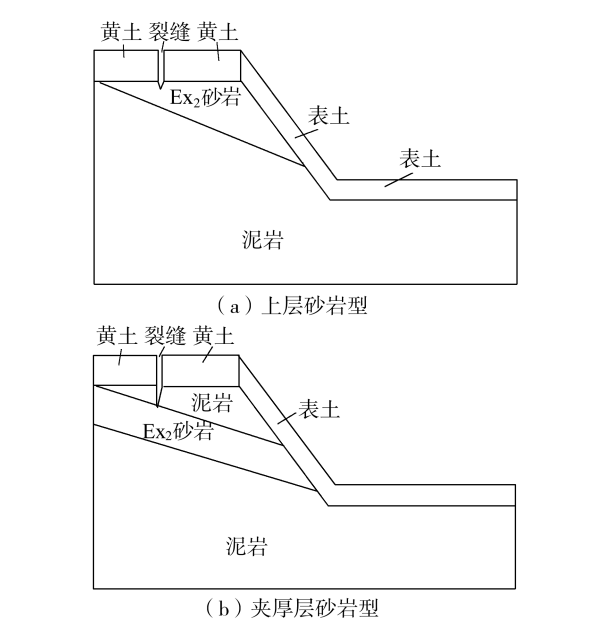


图5 西宁组中段滑坡体破坏前的原始斜坡地质结构模式

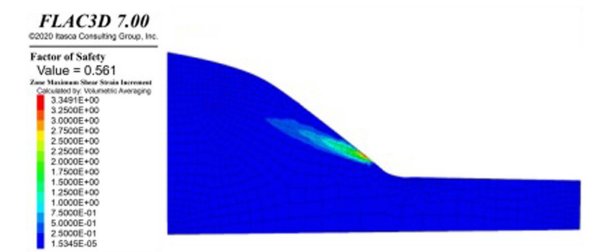


图6 尧庄村红层砂岩斜坡暴雨条件下剪应变增量云图

算得到的剪应变增量云图,破坏位置为砂岩层与下伏泥岩界面,可见当斜坡中界面下泥岩处于饱和状态时,斜坡稳定性差,原始斜坡会因弱面影响进入失稳状态。因此判定暴雨为该滑坡体原始斜坡形成深层变形破坏的关键因素。

古近系西宁组中段红层区斜坡深层变形破坏模式为:倾向坡外的红层砂岩、泥岩缓倾地层在斜坡逐步形成过程中产生应力调整,使坡体表面产生变形,斜坡坡体表面在长期的蠕变变形后在斜坡坡体表面后缘部位逐步产生垂直拉裂缝。裂缝发展后会穿过黄土层及上部泥岩层到达砂岩层,暴雨时大量雨水顺裂缝穿过上面的黄土层及上部泥岩层,向下渗流到砂岩层后,会流过砂岩层到达下伏泥岩层界面。由于斜坡体内泥岩层的透水性较差,下渗雨水到达泥岩层界面后会改变流向,沿砂岩层与泥岩层的界面向斜坡坡脚方向流动,雨水的浸泡作用使泥岩层表面逐步变成饱和状态,泥岩软化而强度降低,大面积软化使斜坡沿泥岩层表面带变形,最终产生斜坡深层变形破坏。

2.3 西宁组下段

西宁组下段红层涉及的地层为古近系西宁组下段,通过对申家村滑坡体、蒲家台滑坡体、中庄村滑

坡体形成前原始斜坡特征进行分析,滑坡体形成前岩性以砾岩为主,岩层缓倾角顺倾,上覆水平黄土层,滑坡体后缘有垂直裂隙,原始斜坡滑面位置有薄层泥岩夹层,滑坡体破坏前的原始斜坡地质结构模式见图 7(a);交头村滑坡体原始斜坡为上部砾岩层、下伏泥岩层,原始斜坡地质结构模式见图 7(b)。两种斜坡地质结构模式的特点是斜坡中砾岩下伏泥岩。

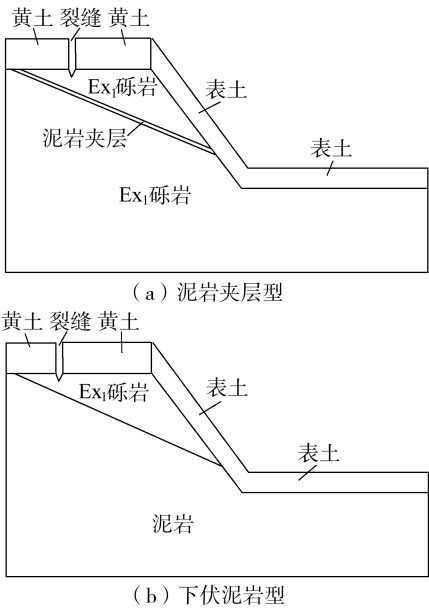


图 7 西宁组下段滑坡体破坏前的原始斜坡地质结构模式

以蒲家台红层砾岩滑坡体为例,调查中发现,滑面为厚度 8 cm 的泥岩夹层与下伏砾岩的界面。调查分析得出原始斜坡高为 145 m,坡度为 32°,界面在坡面中下部出露,倾角为 20°,主要岩石变形和强度参数见表 1。对原始斜坡进行天然和地震条件下强度折减法稳定性计算,得到的强度折减系数均大于 1,临界状态下破坏发生在斜坡浅部。对原始斜坡进行暴雨条件下强度折减法稳定性计算,得到的强度折减系数为 0.674,说明界面处没有完全饱和就发生了深层变形破坏,图 8 为暴雨条件下强度折减法模拟计算得到的剪应变增量云图,破坏位置为砾岩与泥岩夹层界面,可见当斜坡中界面下泥岩处于饱和状态时,斜坡稳定性差,原始斜坡就会因弱面影响进入失稳状态。因此判定暴雨为该滑坡体原始

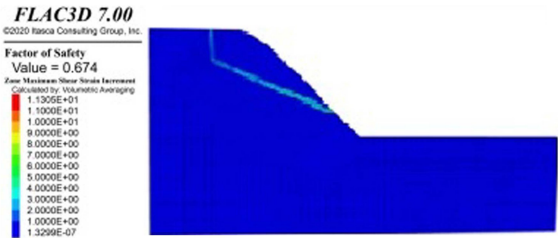


图 8 蒲家台红层砾岩斜坡暴雨条件下剪应变增量云图

斜坡形成深层变形破坏的关键因素。

古近系西宁组下段红层区斜坡深层变形破坏模式为:倾向坡外的红层砾岩缓倾地层由于在斜坡逐步形成过程中产生应力调整,使斜坡坡体表面产生变形,长期蠕变变形后在斜坡坡体表面后缘部位逐步产生垂直拉裂缝。裂缝发展后会穿过黄土层到达红层砾岩层,暴雨时大量雨水会顺裂缝穿过上面的黄土层,向下渗流经砾岩层到达泥岩界面。由于斜坡体内泥岩的透水性较差,下渗雨水到达泥岩界面后会改变流向,沿砾岩层与泥岩的界面向斜坡坡脚方向流动,浸泡作用使泥岩界面逐步变成饱和状态,泥岩软化而强度降低,大面积软化使斜坡沿泥岩界面变形,最终产生红层砾岩斜坡深层变形破坏。

3 工程应用

洪三村变形体位于虎狼沟中下游东侧,拟建工程 24 号支管从该变形体中上部通过。变形体东西方向长 1340 m、南北方向宽 1230 m、相对高差约 380 m,主体变形方向 250°。变形体斜坡后缘发育多条平行山体的裂缝,裂缝长 200~350 m,宽 40~65 cm。变形体斜坡两侧发育多条小冲沟,切割深度 2.0~3.5 m,沟谷形态呈“V”形。西趾坡脚有浅层土体滑坡体。

根据工程地质初步勘察资料分析,坡顶为水平黄土层,厚度在 12 m 左右。基岩岩性为西宁组下段红层砾岩,顺坡向倾斜,倾角 19°,没有明显的泥岩夹层。坡面覆盖第四系表土,厚度 7~23 m,为黏土与砂砾石混合物,变形体斜坡后缘裂缝深度为 13~15 m。

按照图 7(a)斜坡地质结构模式,西宁组下段红层砾岩斜坡深层变形破坏形成的条件是蠕变造成斜坡后缘裂缝和砾岩中存在泥岩夹层,该变形体斜坡形成的后缘裂缝已满足降雨入渗砾岩条件,但缺少泥岩夹层。考虑到初步勘察时对于小于 5 cm 的夹层在编录时不做记录,对该变形体斜坡进行了补充勘察,钻探结果表明,在后缘裂缝位置离地表 37 m 深处发现了一层 2.5 cm 厚的泥岩夹层,该夹层在坡体内连续性好。由此判断洪三村变形体斜坡在降雨条件下可能按照西宁组下段斜坡深层变形破坏模式发生斜坡深层变形破坏。

基于洪三村变形体斜坡的相关工程地质资料,采用 FLAC3D-7.0 软件建立变形体斜坡三维数值模拟模型进行三维数值模拟计算。本构模型采用摩尔-库仑模型,计算过程中的主要参数见表 2。

图 9 为天然条件下采用强度折减法模拟得到的剪应变增量三维云图,临界状态下破坏位置为斜坡浅部,强度折减系数为 1.57。

表 2 洪三村变形体斜坡三维数值模拟计算参数

分层	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	体积模量/GPa	黏结力/kPa	内摩擦角/(°)
黄土	1 500	0.02	0.35	0.022	15	20
表土	1 800	0.02	0.35	0.030	20	25
砾岩	2 190	0.45	0.27	0.430	1 780	51
泥岩夹层	2 070	0.42	0.33	0.430	1 200	29
饱和泥岩夹层	1 450	0.01	0.40	0.015	12	10

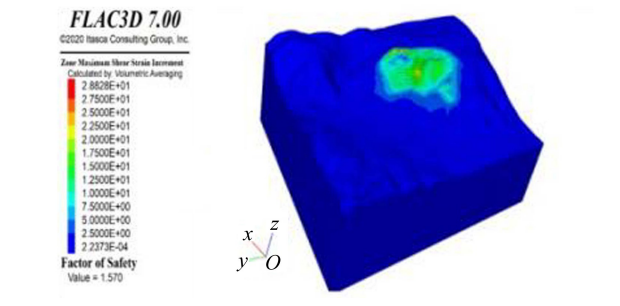


图 9 洪三村变形体斜坡天然条件下剪应变增量云图

分别采用拟静力法和加动载法计算地震条件下变形体斜坡的稳定性,结果如图 10 所示。图 10(a)为采用拟静力法模拟得到的地震条件下剪应变增量三维云图,强度折减临界状态下破坏位置为斜坡浅部,强度折减系数为 1.48。图 10(b)为选取加速度为 0.20g(50 年超越概率为 10%的基岩地震波峰值加速度)的地震波、折减系数取 1.5 时的剪应变增量剖面云图,强度折减系数取 1.4 时不收敛,据此判断该计算条件下变形体斜坡的强度折减系数约为 1.5。可见采用拟静力法和加动载法进行地震条件下模拟的结果相差不大,模拟结果都表明在地震条件下变形体斜坡不会发生深层破坏。

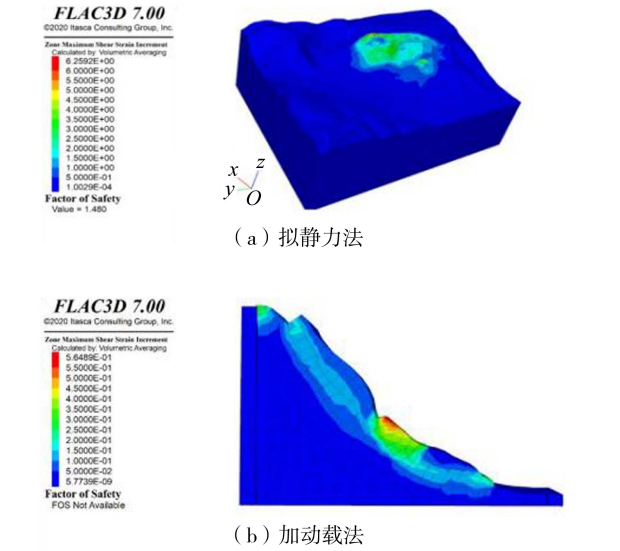


图 10 洪三村变形体斜坡地震条件下剪应变增量云图

图 11 为取饱和状态夹层参数,采用强度折减法对暴雨条件下洪三村变形体斜坡进行模拟得到的剪应变增量三维云图,强度折减系数为 0.47。由图 11 可知,强度折减临界状态下破坏位置为砾岩与

泥岩夹层界面,可见当斜坡中界面下泥岩处于饱和状态时,斜坡稳定性差。

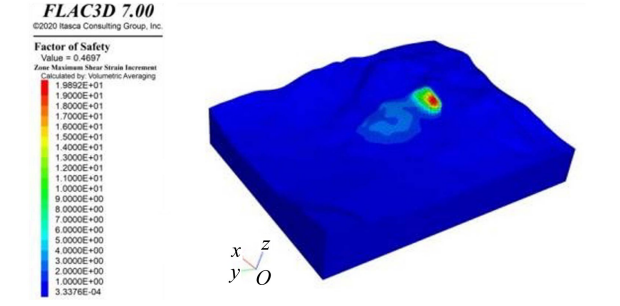


图 11 洪三村变形体斜坡暴雨条件下剪应变增量云图

综上,洪三村变形体斜坡在天然和地震条件下最易发生破坏的部位是坡体浅部,但在暴雨条件下临界状态可能沿砾岩与泥岩界面发生深层变形破坏,这与西宁组下段斜坡深层变形破坏模式的特点一致。

4 结 论

- a. 构建了西宁组不同岩段斜坡深层变形破坏模式。根据斜坡深层变形破坏模式,识别出洪三村变形体是典型的潜在深层变形破坏斜坡变形体,在暴雨条件下,沿砾岩与泥岩夹层界面发生变形破坏形成大型滑坡体,供水工程 24 号支线设计时应考虑尽量避开该变形体。
- b. 对于顺倾红层软岩斜坡,夹层的存在可能会为红层软岩斜坡发生深层变形破坏提供条件,在地质调查与钻探工程中要特别注意厘米级的夹层,这在以往的勘察工作中经常被忽略。
- c. 建立古近系红层区典型斜坡深层变形破坏模式可用于寻找和识别该类斜坡变形体,以减少意外事故。

参考文献:

[1] 李果,于继克. 红层软岩水理特性研究[J]. 黑龙江交通科技,2019,42(9):7-9. (LI Guo,YU Jike. Study on water properties of red bed soft rock [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang,2019,42(9):7-9. (in Chinese))

[2] 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. (CHENG Xianggang, HE Zhaoyu, LIU Mengnan, et al. Study on engineering geological characteristics and unfavorable geology subarea of Huabei paleogene red-bed[J]. Journal of Engineering Geology, 2023,31(1):230-241. (in Chinese))
- [3] 邓华锋,方景成,李建林,等. 含水状态对红层软岩力学特性影响机理[J]. 煤炭学报,2017,42(8):1994-2002. (DENG Huafeng, FANG Jingcheng, LI Jianlin, et al. Mechanical properties of red-bed soft rock on saturated state[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8):1994-2002. (in Chinese))
- [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. (LIU Wen, YU Tianbin, WANG Meng, et al. Preliminary analysis on basic characteristics and mechanism of rockfalls in layered red rocks with gentle dip angle:a case study of the Tiejiangwan rockfall in Hongya County, Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2023,34(5):54-63. (in Chinese))
- [5] 郭晓亮,申梦菲,苗乐骞. 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. (GUO Xiaoliang, SHEN Mengfei, MIAO Leqian. Characteristics and risk assessment of landslide occurring in typical loess-red bed area in Baoji City, Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi,2022,40(1):60-63. (in Chinese))
- [6] 田超,陈志雄,陆雄斌. 差异风化对红层边坡稳定性的影响及防护措施研究[J]. 江西建材,2023(8):207-209. (TIAN Chao, CHEN Zhixiong, LU Xiongbn. The differential weathering impact on the red beds slope stability and the measures of protection on the differential weathering[J]. Jiangxi Building Materials,2023(8):207-209. (in Chinese))
- [7] 沈昌军. 滇西南红层滑坡稳定性分析与评价[J]. 地下水,2023,45(3):170-173. (SHEN Changjun. Analysis and evaluation of the stability of red-bedded landslides in southwest Yunnan[J]. Ground Water,2023,45(3):170-173. (in Chinese))
- [8] 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. (YUAN Baoyuan, TANG Yaohao, ZHAO Yuanfeng. Formation mechanism and stability analysis of large deep layer landslide in red beds mudstone[J]. Coal Geology of China,2022,34(2):71-75. (in Chinese))
- [9] 穆文平,王康,钱程,等. 青海上湾特大型红层老滑坡体形成机制研究[J]. 岩土力学,2016,37(3):802-812. (MU Wenping, WANG Kang, QIAN Cheng, et al. Study of formation mechanism of giant red bed old landslide in Shangwan of Qinghai Province [J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(3):802-812. (in Chinese))
- [10] 沈义东,宋铮宇,李德. 大别造山带岳西县斜坡变形破坏演化模式[J]. 中国地质调查,2023,10(1):100-109. (SHEN Yidong, SONG Zhengyu, LI De. Evolution model of slope deformation and failure in Yuexi Country of Dabie mountains orogenic belt [J]. Geological Survey of China, 2023,10(1):100-109. (in Chinese))
- [11] 白永健,葛华,冯文凯,等. 乌蒙山区红层软岩滑坡地质演化及灾变过程离心机模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):3025-3035. (BAI Yongjian, GE Hua, FENG Wenkai, et al. Centrifugal tests on geological evolution and sliding process for red-bed soft rock landslide in Wumeng Mountain Area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (Sup1):3025-3035. (in Chinese))
- [12] 刘义,武选民,王兵虎,等. 青海东部西宁盆地北缘红层滑坡成因机制与稳定性评价:以石板滩滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):34-41. (LIU Yi, WU Xuanmin, WANG Binghu, et al. Formation mechanism and stability evaluation of a bedding landslide in red-bed strata in Xining north basin, eastern Qinghai Province:a case study of Shibantan landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2016,27(3):34-41. (in Chinese))
- [13] 晁刚,王鸿. 青海高原大型红层滑坡成因分析及治理[J]. 铁道建筑,2014(6):109-112. (CHAO Gang, WANG Hong. Analysis and treatment of the causes of large-scale red layer landslides in the Qinghai Plateau [J]. Railway Engineering,2014(6):109-112. (in Chinese))
- [14] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M]北京:中国水利水电出版社,2005.
- [15] 储益旭,周建伟,白玉辉,等. 基于 FLAC 3D 的强降雨作用下临夏红层滑坡稳定性研究[J]. 甘肃科技,2021,37(24):26-29. (CHU Yixu, ZHOU Jianwei, BAI Yuhui, et al. Study on the stability of Linxia red bed landslide under heavy rainfall based on FLAC 3D[J]. Gansu Science and Technology,2021,37(24):26-29. (in Chinese))
- [16] 杨玲,张柳金,吴青波,等. 降雨型红层滑坡形成机理研究[J]. 地质与资源,2021,30(4):485-491. (YANG Ling, ZHANG Liujin, WU Qingbo. Formation mechanism of rainfall-induced redbed landslide [J]. Geology and Resources2021,30(4):485-491. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-19 编辑:熊水斌)