

宝鸡渭河北岸大型深层黄土滑坡基本特征与稳定性研究

孟静^{1,2}, 胡秋韵³, 石菊松³, 辛鹏^{1,2}, 李滨^{1,2}, 王涛^{1,2}

(1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要: 以宝鸡渭河北岸杨家村大型深层黄土滑坡为研究对象, 综合应用野外地质详细调查、工程地质勘察和高密度直流电阻率地球物理勘探等方法, 基本查明了杨家村滑坡的特征和稳定性。调查研究结果表明, 杨家村滑坡属于深层多级旋转型黄土滑坡, 滑面总体呈圆弧形, 渭河北缘断裂从杨家村滑坡滑体中部通过, 对滑坡结构具有控制性作用, 新近纪三门组粘土层的变形破坏是滑坡形成的主要内因。综合评价结果表明杨家村滑坡目前总体处于稳定状态, 需关注前缘局部失稳, 研究结果可为杨家村滑坡防治提供依据。

关键词: 大型深层黄土滑坡; 高密度直流电阻率法; 活动断裂带; 滑坡稳定性

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

RESEARCH ON BASIC FEATURES AND STABILITY OF LARGE AND DEEP-SEATED LOESS LANDSLIDE ON THE NORTH BANK OF THE WEIHE RIVER IN BAOJI AREA

MENG Jing^{1,2}, HU Qiuyun³, SHI Jusong³, XIN Peng^{1,2}, LI Bin^{1,2}, WANG Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The Yangjiacun large scale deep-seated loess landslide on the north bank of the Weihe River in Baoji area is taken as the research sample in this article. Field geological detailed survey, engineering geological exploration as well as high density DC resistivity geophysical exploration method were comprehensively applied to reveal the basic features and stability of the Yangjiacun landslide. The research findings indicate that: The Yangjiacun landslide is a deep-seated multiple rotational loess landslide with a general shape of circular arc characteristic sliding surface. The northern Weihe fault just passes through from the central part of the Yangjiacun landslide mass, which might control the structure features of the landslide. The deformation of the Neogene Sanmen formation clay layers serves as the main internal cause of landslide occurrence. Comprehensive evaluation results indicate that the Yangjiacun landslide mass generally is in a stable state; however, the local deformation of landslide toe should be

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40802085); 科技支持计划项目 (2012BAK10B02)

作者简介: 孟静 (1984-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事岩土力学与地质灾害研究。E-mail: MexiJay@sina.com

通讯作者: 胡秋韵 (1983-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事环境地质调查研究与管理工作。E-mail: hqiyun@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2017-09-15; 修回日期: 2017-11-02

范二平编辑

paid attention to. The research results will provide basis for early warning and risk control of the Yangjiacun landslide.

Key words: large scale deep-seated loess landslide; high density direct current resistivity method; active fault zone; landslide stability

大型深层黄土滑坡是宝鸡渭河北岸黄土塬边斜坡的主要地质灾害类型, 严重威胁当地的社会发展和人民生命财产的安全^[1-3]。渭河北岸黄土塬边斜坡地形陡立、高差大、古老滑坡密集发育、呈成群成带和新老叠置的分布状态。斜坡主要由近水平层状的黄土古土壤、渭河河流阶地砾石层及其下伏新近纪三门组地层构成。渭河北缘断裂以地堑—地垒的形式沿塬边斜坡通过, 为大型深层滑坡形成提供了重要的边界条件^[4-25]。为查明和分析渭河北岸黄土塬边大型深层黄土滑坡的基本特征和成因机制, 探讨渭河北缘断裂对大型深层黄土滑坡结构的控制作用, 以杨家村大型黄土滑坡为研究对象, 在野外地质调查、工程地质勘查和物探工作的基础上, 初步分析滑坡的基本特征, 探讨滑坡成因机制, 旨在为杨家村滑坡防治和监测预警提供基础地质资料和理论指导。

1 杨家村滑坡基本特征

1.1 野外地质调查

宝鸡渭河北岸滑坡成群成带、呈新老叠置的发育分布, 在空间上主要分布在宝鸡市区北坡

(引渭渠沿线)、长寿沟两岸、金陵河东岸, 其中在东西向渭河北岸黄土塬边滑坡占斜坡总长度的 96% 以上 (见图 1), 大多数滑坡具有明显的圈椅状后壁。杨家村滑坡总体形态近似圆弧形 (见图 2), 南北斜长约 600 m, 东西宽约 580 m, 最大厚度约 80 m, 体积约 $1680 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡经后期剥蚀和人类活动改造, 滑坡后壁的圈椅状轮廓尚基本清楚, 后壁面最大高度可达 70 m, 坡度 $65^\circ \sim 70^\circ$, 滑体坡面较为平缓, 坡度 20° 左右, 呈多个陡坎, 高一般 10 ~ 20 m。宝鸡峡引渭水利工程渠道从滑坡后缘平台通过; 滑坡中部以耕地、果园为主; 前缘局部发育湿地, 多处泉眼常年流水, 涌水量较大。

1.2 地质工程勘察

为查明滑坡滑体结构特征, 沿杨家村黄土滑坡的主滑方向部署了 5 个地质工程勘察钻孔 (见图 2、图 3), 发现: 滑坡地层结构主要由黄土 (马兰黄土和 15 层离石黄土) 和渭河高阶地 (砾石层 + 粘土层) 组成, 滑带位于阶地的粘土层中, 滑床基岩为新近纪三门组硬粘土层、砾石层等。由于滑坡滑面呈圆弧形, 滑坡体整体呈明显分带性, 后部黄土较厚, 前缘砾石层较厚且出露斜坡地表。

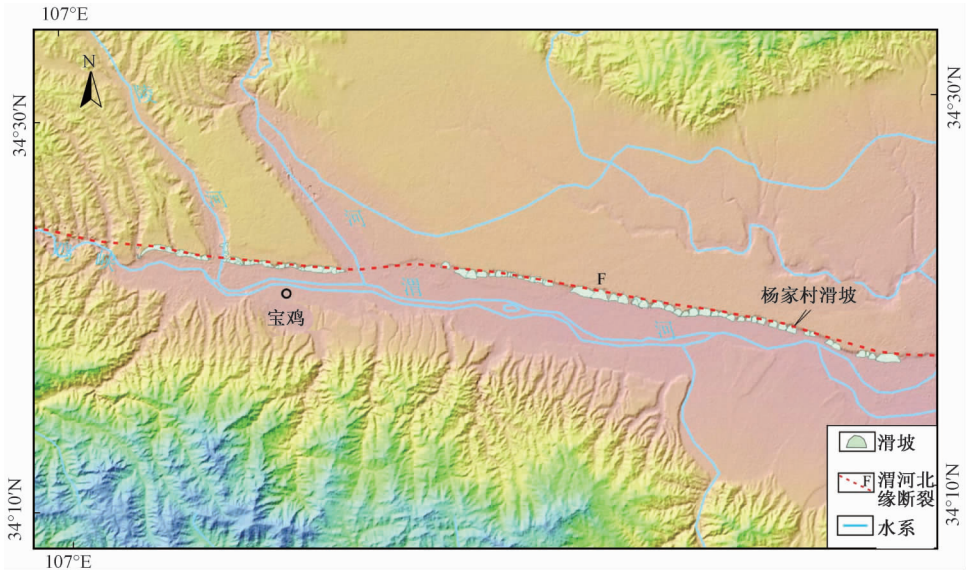


图 1 宝鸡渭河北岸滑坡分布图

Fig. 1 Distribution of landslide on the north bank of the Weihe River in Baoji area

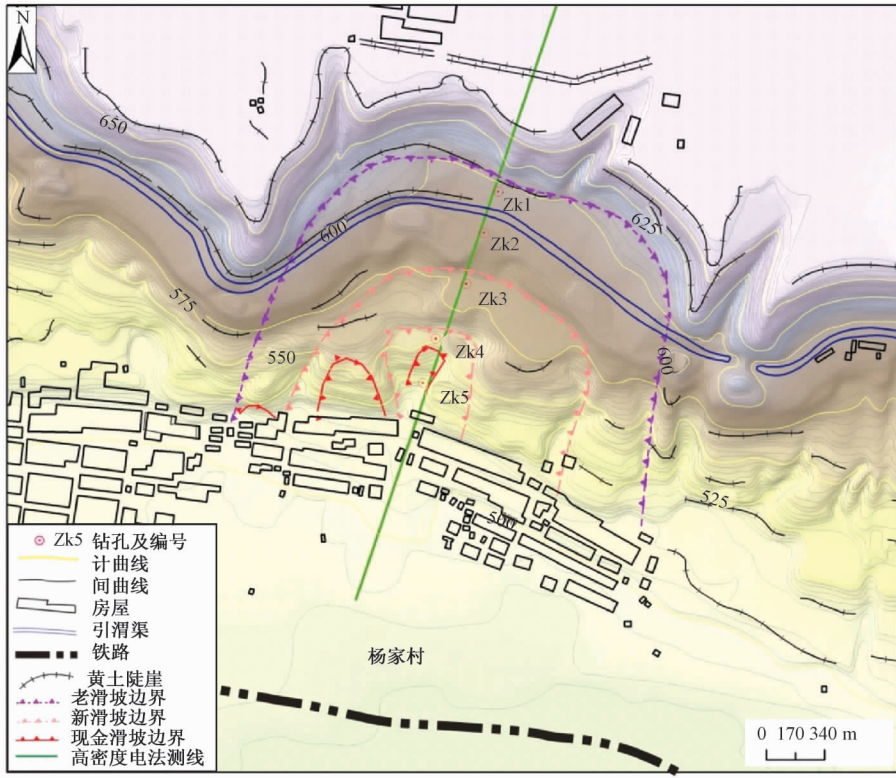


图2 渭河北岸杨家村黄土滑坡形态特征与地球物理勘探部署图

Fig. 2 Morphological features and geophysical exploration deployment of Yangjiacun loess landslide on the north bank of the Weihe River

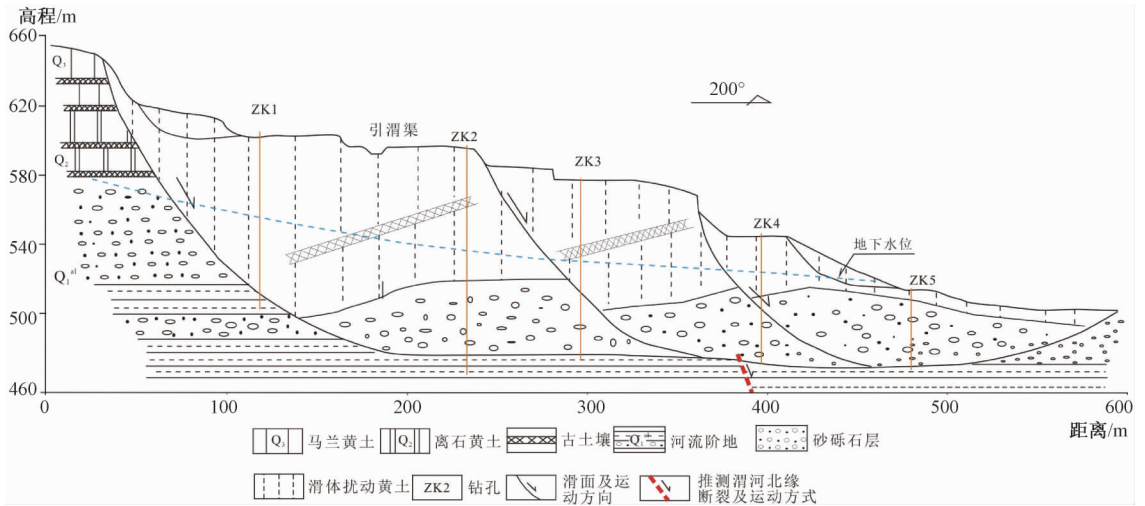


图3 渭河北岸杨家村黄土滑坡工程勘察剖面图

Fig. 3 Engineering exploration section of Yangjiacun loess landslide on the north bank of the Weihe River

杨家村滑坡后缘斜坡主要地层上部为中、上更新世黄土，下部为渭河五级阶地冲积砂砾石、粘土和砂质粘土层。滑体上的地层较为零乱，表层覆盖厚度约1~5 m的 Q_4 黄土，后缘 Q_4 黄土下为10~20 m厚的中、晚更新世黄土，前缘 Q_4 黄土下为5~8 m厚的中、晚更新世黄土，黄土下伏阶

地为砾石层和粘土，地层破碎。老滑坡旋转滑动过后，出现砂砾石层夹粘土透镜体，滑坡中后部的砂砾石较多，厚度不一，前缘反转出露砂砾石层。据工程勘察揭示，钻孔中粘土层可见多个错动带，剪切面近水平（见图4、图5），滑坡底部坐落在粘土及砂砾石层之上。根据钻孔揭露，杨

家村滑坡的后缘滑面呈较陡圆弧形, 深度 73 m 左右, 滑坡高陡的后壁主要受黄土节理和坡高的控制, 中前部滑面平缓, 深度 40 ~ 50 m, 前部滑面破坏了当时的河流侵蚀堆积面, 滑床形态及其埋深反映了滑坡运动特征 (见图 3)。



图 4 ZK1 中滑体内硬粘土扰动面

Fig. 4 The disturbed surface in stiff clay of the sliding body in borehole 1



图 5 ZK2 中滑坡主滑面

Fig. 5 The major sliding surface of landslide in borehole 2

滑体内地下水富集, 主要集中在砂砾石含水层中, 地下水主要由宽广的黄土塬下渗汇聚而成, 地下水通过滑坡体向渭河河漫滩排泄, 与滑坡的产生及稳定性关系密切。根据钻孔揭露, 滑坡体内沿滑坡主轴线的潜水位普遍低于地面 3 ~ 15 m, 流向一般为南南西, 水力坡度约 6% ~ 10%。坡体内的地下潜水主要来源于三个方面: 大气降水、高阶地下部砂砾层中的地下水溢出和中后缘的引渭渠渗漏。

1.3 地球物理探测

在野外详细调查和工程勘察的基础上, 针对杨家村大型黄土滑坡的发育特点, 为进一步查明滑体不同岩性结构面在空间上的分布特征, 开展了高密度直流电阻率法地球物理探测 (见图 2)^[26-30], 以期作为野外调查和工程勘察的补充和验证。

1.3.1 高密度直流电阻率法简介与工作部署

高密度直流电阻率法是一种二维电阻率测量方法, 该方法兼有电剖面法和电测深法的特点, 可同时提供地下勘探深度范围内岩土体电性的横向和垂向变化特征, 以达到勘探目的。实验采用重庆地质仪器厂生产的 DUK-2B 高密度直流电阻率法测量系统。如图 2 所示, 主勘探线布置在滑坡体中间, 与初步认定的滑体滑动方向平行, 全长 935 m。

测量采用温纳装置, 该装置受地形影响较小, 在滑坡斜坡上能够展开排列。主勘探线由 13 组排列组成, 各排列间的重复测点数据经算术平均合并为一个测点, 形成相当于由 198 根电极组成的长测线。

1.3.2 物探成果解译

关于物探成果资料分析和综合解释, 一是需要对剖面图的地球物理参数属性及图面主要标识进行说明; 二是圈定异常、地质成因分析及其解释推断, 进而给出易于直观阅读的解释标注线, 必要时对某些解释结果及要点问题作相应文字补充; 三是对确认的物探异常进行综合评价和定量分析, 最后给出推断地质体要素的解释参数。

高密度直流电阻率法数据反演使用 RES2DINV 软件, 该软件基于实测拟断面视电阻率数据, 采用强制平滑的最小二乘法反演技术, 经过多次迭代形成满足均方根误差要求的电阻率断面图。该软件在建立初始模型时加入地形信息, 反演过程采用带地形的 2D 反演算法, 可以最大程度地削弱地形影响。

杨家村滑坡高密度电阻率法主勘探线剖面反演视电阻率成像如图 6 所示, 主勘探线剖面解译深度约 80 m。经过 5 次迭代后, 各反演视电阻率成像均方根误差均小于 10%。对杨家村滑坡高密度电阻率反演图像的地质解释主要基于滑坡岩土体电性特征的基本认识: 在浅部, 一般低阻区出现在粉砂岩层、粗砂和含水量较大的粘土层中, 而高阻区则对应为贫水的粘土层和冲沟陡坎壁; 在深部, 高阻区主要为致密、硬质粘土层、砂砾层或基岩层。

对于主勘探线反演成像剖面所示推断解译如下:

(1) 在浅部 5 ~ 10 m 的深度附近有一个低阻带, 电阻率值为 10 ~ 20 $\Omega \cdot m$, 推测为潜水的高导

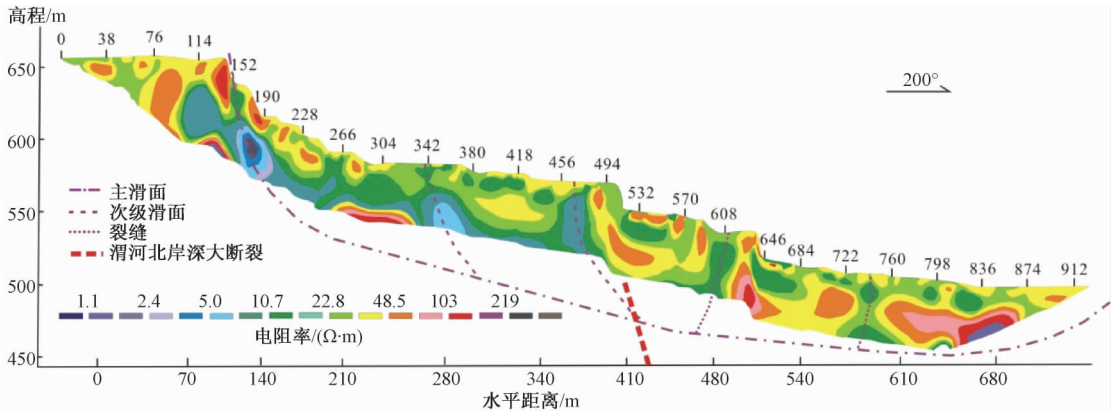


图6 高密度电阻率成像剖面及解译结果

Fig. 6 High density resistivity imaging section and interpretation results

电性所致，可以反映潜水面的位置，与钻孔揭示情况基本一致。

(2) 近地表地带分布有较高电阻率的不均匀体，电阻率值为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 左右，这可能与表层黄土和古土壤分布及其所含钙质结核有关。

(3) 随地形变化，表层黄土的电阻率发生相应变化，尤其在冲沟陡坎壁上，表现为高电阻率值，可达 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 以上。

(4) 在测量桩号 266 ~ 342 之间有一高阻体，电阻率值最大在 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 以上，深度约在 70 m 以下，推测为砂体或致密坚硬土体。由于高密度电法探测深度限制，没有得到 80 m 以下电阻率数据。

(5) 在测量桩号 114 ~ 532 之间 40 ~ 80 m 深度范围内存在一个低阻带，电阻率值在几 $\Omega \cdot \text{m}$ 到十几 $\Omega \cdot \text{m}$ ，推测为滑带位置。低阻带分布在滑坡后缘附近较浅，向滑坡前缘逐渐变深，在滑坡前缘附近没有变浅滑出的迹象。

(6) 在测量桩号 152 ~ 190、342 ~ 380、456 ~ 494 附近分布有与推断滑坡体次级滑面倾伏方向一致的低阻条带，向下延伸深度均大于探测深度。

(7) 在测量桩号 608、722 ~ 760 处分布有反向低阻条带，向下延伸深度均大于探测深度，推测为反向裂缝的影响。

(8) 从滑坡体地球物理探测结果可以看出，滑体在测量桩号 494 ~ 912 之间地球物理特征反映其构造变动较在测量桩号 114 ~ 456 之间强烈，可能是由于断裂正断作用引起上盘地质体发生较强烈的变形和改造的结果，由此推测渭河北岸深大断裂可能在测量桩号 456 ~ 494 之间通过，为渭河北岸大型深层黄土滑坡的形成和变形破坏机制研究提供了新的依据。

上述解译与地质调查和工程勘察结果基本一致。

1.4 新构造活动和地震

渭河北部黄土台塬区及南部秦岭山区相对渭河断陷盆地大面积抬升，渭河北岸断裂向南倾斜，秦岭山前断裂向北倾斜，均为高角度断层，构成了阶梯状下降的复式地堑盆地^[24]。在渭河北岸由于断裂的控制形成明显的多级台坎地貌，塬边及河流沟谷深切，台坎的后缘形成裂隙，前缘形成临空面，为大型深层黄土滑坡的形成奠定了基础。

研究表明渭河北岸塬边大型深层黄土滑坡与区域新构造活动密切相关，中更新世以来，渭河谷地分别在 1.2 MaB. P.、0.8 MaB. P.、0.5 MaB. P.、0.13 MaB. P. 与 0.009 MaB. P. 形成了 5 级阶地^[31]。在 II 级、III 级阶地形成期，渭河紧邻北岸，岸坡侵蚀形成大量的古滑坡、老滑坡，以致阶地缺失。目前渭河远离北岸斜坡，侧向侵蚀作用消失，河流侵蚀作用已无诱发深层滑坡可能，降雨、人类工程活动和地震诱发老滑坡复活成为现今滑坡的主要形式。

杨家村黄土滑坡所在地震烈度为 VII 度区，地震动峰值加速度为 $0.15 g$ 。从长达 2000 多年的地震史料表明，该滑坡附近（半径 100 km 范围）在 1570—1595 年期间发生过三次 3 ~ 4 级地震，但在该滑坡周围（半径 300 ~ 400 km 范围），历史强震频发，对渭河北岸大型深层黄土滑坡的发生起到决定性作用。

2 杨家村滑坡形成机制

在新构造运动背景下，渭河北岸黄土台塬因

长期遭受渭河的下切和侧蚀, 斜坡坡高增大, 前缘坡度变陡, 隔水层高阶地粘土层在坡脚附近出露, 形成前临宽阔河谷的高陡斜坡。斜坡在重力作用下, 前缘坡脚部位近水平的软化红色硬粘土层在压力作用下, 坡脚处产生塑性变形, 后缘部分形成拉应力集中区, 并沿黄土节理裂隙发展形成深大拉张裂缝, 为地表水入渗提供了良好通道, 随着外部因素的影响, 加速了坡体的变形。斜坡中部和前缘则由于剪应力不断集中, 剪切变形逐渐扩大。

从斜坡结构来看, 上部黄土为拉应力集中区, 沿黄土节理裂隙容易形成坡度较陡的拉张断裂面, 下部粘土及砂质粘土层岩性相近, 属于剪应力集中区, 滑面呈近圆弧形, 底部由于隔水层层面的控制, 逐渐形成软弱地层, 圆弧形滑面在该层发生偏转, 形成近水平的主滑动面。在斜坡剪切滑动面全部贯通之后, 斜坡的高势能迅速转变为高动能, 加之滑坡前缘开阔的地形为其破坏提供充分的滑移空间, 斜坡沿近水平软弱地层滑动, 滑动时斜坡重心后移, 发生剧烈旋转滑动, 滑坡滑动过后, 形成较为平坦的地形, 势能较低, 具有较好的稳定性。

杨家村滑坡变形受新近纪三门组粘土滑动带控制^[6-8]。三门组粘土层作为区域性易滑地层, 与其物质组成有密切关系。研究表明三门组粘粒含量较高, 具有强烈的蠕变、强度衰减性质, 易发生层间的滑动、错动, 形成斜坡的层间剪切带。移液管全分散法粒度分析与粘土矿物 X 射线衍射定量测试表明三门组粘粒 (<0.005 mm) 体积分数为 35% ~ 45%, 胶粒 (<0.002 mm) 平均为 26% ~ 40%, 伊利石、蒙脱石混层矿物绝对质量分数约占天然干土重的 23.90%。高粘粒含量, 导致三门组粘土的液限、塑限较大, 其中塑限平均值为 23, 粘土岩长期吸水后强度软化显著, 干湿循环下, 极易涨缩破坏。此外, 三门组地层具有砂砾石与粘土的互层二相结构, 砂砾石为导水层, 因断裂错动、贯穿作用, 加速了地下水从砂砾石层之间的传输。地下水位上涨后, 粘土层在剪切作用下更易变形破坏。

斜坡向滑坡转换过程中, 节理裂隙面、断裂结构面及岩层原生结构面是滑坡体内的优势结构面, 限制了滑坡边界的扩展, 影响着滑坡的总体形态, 是滑坡形成的重要边界条件, 三门组粘土

层的变形破坏特性是滑坡形成的主要内因, 滑坡前缘的渭河河流的长期下切和侧蚀是滑坡形成的主要诱发因素。

3 杨家村滑坡稳定性评价

3.1 多级旋转滑坡稳定性分析方法

根据多级旋转滑坡的变形破坏模式 (见图 7), 可以将多级旋转滑坡分为前缘牵引式和后缘推移式。这两类滑坡的变形特征如下:

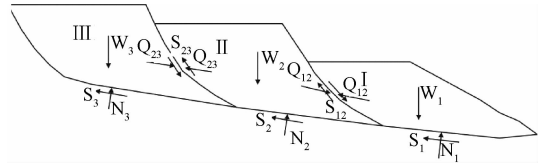


图 7 多级旋转滑坡示意图

Fig. 7 Schematic drawing of multi-rotational landslide

(1) 牵引式多级旋转滑坡: 由于前缘多次滑动, 滑带强度低, 一般前缘 I 号滑体将率先滑动, 导致后缘 II、III 号滑体丧失支撑, 逐渐逐级发生滑动, 推动前缘滑体向前扩展。这类滑坡在一次大规模的滑动过程中将发生次级滑面多次滑动情况。

(2) 推移式多级旋转滑坡: 一般前缘 I 号滑坡体由于势能低, 稳定性很好, 起到抗滑作用, 而 II、III 号滑坡体是主要下滑段, 当其下滑力大于前缘坡体抗滑力时, 滑坡将发生大规模整体滑动。

根据多级旋转滑坡的变形破坏机制, 对于其稳定性评价, 可采用“滑坡单个块体”和“滑坡整体组合”稳定性评价方法, 即在滑坡稳定性评价过程中, 从滑坡前缘滑体开始进行逐级稳定性评价, 找出滑坡体中最不稳定的关键块体, 然后整体考虑不稳定关键块体对滑坡整体破坏方式的影响, 并进行“滑坡单个块体”分块叠加, 求出滑坡整体稳定系数, 综合确定滑坡稳定状态^[24-25]。图 8 为多级旋转滑坡的稳定性评价示意图。

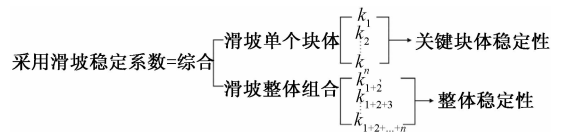


图 8 多级旋转滑坡稳定系数计算方法示意图

Fig. 8 Schematic drawing of stability coefficient calculation method of multi-rotational landslide

关于多级旋转滑坡稳定性评价, 其主要研究

步骤如下。

(1) 滑坡基本特征分析：通过野外调查、工程勘察、地球物理探测等方法揭示滑坡基本特征，根据滑坡的变形破坏特点，确定滑坡的变形破坏模式。

(2) 滑体分块稳定性计算：采用常规方法，考虑不同工况，从滑坡前缘开始逐级分析每一个滑坡体的稳定性，独立计算每级滑体的下滑力和抗滑力，求出其稳定系数 K_1, K_2, \dots, K_n ，这一阶段的计算，不考虑分界面之间作用力。

(3) 滑坡整体稳定性叠加计算：根据分块滑体的稳定系数，判断滑坡基本稳定情况，然后从前缘开始逐级向后叠加滑体，计算每次叠加滑体的稳定系数， $K_1, K_{1+2}, K_{1+2+3}, \dots, K_{1+\dots+n}$ 。

(4) 滑坡综合稳定性评价分析：根据(2)和(3)的计算结果，综合评价滑坡的稳定性，为地质灾害防治区划和监测预警提供依据。

3.2 杨家村滑坡稳定性评价

杨家村滑坡属于典型的牵引式多级旋转滑坡。按照上述滑坡稳定性分析方法，对杨家村滑坡稳定性按以下三种工况进行评价。工况1：天然状态；工况2：降雨10年一遇和降雨50年一遇；工况3：地震动峰值加速度 $a=0.15g$ 和 $a=0.2g$ 。

计算时考虑滑坡工况1—工况3三种情况，对滑坡稳定性进行分析，计算结果见表1所示。滑体稳定系数 $K < 1$ 时为滑动状态， $1 \leq K < 1.10$ 时为临界滑动状态， $K \geq 1.10$ 为稳定状态。

表1 杨家村滑坡稳定系数计算结果

Table 1 Calculated results of stability coefficient of the Yangjiacun landslide

计算工况	滑体单元	滑坡稳定系数 K		
		Fellenius 法	Bishop 法	Sarma 法
工况1 天然状态	I号	1.115	1.243	1.128
	I + II号	1.268	1.459	1.367
	I + II + III号	1.337	1.635	1.412
工况2 降雨	I号	0.989	1.087	1.035
	I + II号	1.116	1.208	1.148
	I + II + III号	1.295	1.417	1.342
50年一遇	I号	0.956	1.002	0.979
	I + II号	1.012	1.098	1.043
	I + II + III号	1.128	1.364	1.233
$a=0.15g$	I号	0.938	0.989	0.943
	I + II号	1.096	1.197	1.136
	I + II + III号	1.134	1.312	1.203
工况3 地震	I号	0.776	0.889	0.847
	I + II号	0.912	1.075	0.989
	I + II + III号	0.926	1.082	1.001

根据上面对滑坡体采用的“分级叠加”方法稳定性计算结果，可以得到以下结论。

①工况1—天然状态：前缘I号滑坡稳定系数 $K=1.115 \sim 1.243$ ，I + II号滑体稳定系数 $K=1.268 \sim 1.459$ ，I + II + III号滑体稳定系数 $K=1.337 \sim 1.635$ ，计算结果表明，天然状态时杨家村滑坡整体及前缘滑体均处于稳定状态，前缘I号滑坡稳定系数最低，每向后增加一级滑体，稳定系数逐渐增加，说明天然状态下杨家村滑坡后缘滑体处于稳定状态，不产生下滑推力，而前缘由于是地下水排泄区，稳定性最差。

②工况2—降雨：降雨分为10年一遇和50年一遇两种情况；计算结果表明，滑坡在两种情况下前缘I号滑体稳定系数 $K=0.956 \sim 1.087$ ，滑体处于滑动状态，这与实际情况相符合，在降雨情况下，前缘发生多次滑动，滑坡一般只发生小规模蠕变形；I + II号滑体在10年一遇降雨时稳定系数 $K=1.116 \sim 1.208$ ，处于稳定状态，在50年一遇降雨时稳定系数 $K=1.032 \sim 1.098$ ，滑体基本稳定，但会发生蠕变形；而I + II + III号滑体稳定系数 $K=1.128 \sim 1.417$ ，滑体稳定。上述结果表明在降雨环境下滑坡整体是稳定的，仅前缘I、II号滑体会发生小规模滑动变形。

③工况3—地震：计算结果表明地震加速度为 $0.15g$ 和 $0.2g$ 时，滑坡前缘I、I + II、I + II + III号滑体稳定系数 $K < 1.10$ ，基本处于临界滑动或滑动状态，滑坡整体将发生滑动。

综上所述，杨家村滑坡目前总体处于稳定状态，但前缘由于局部滑体饱和，多发生蠕变形，应关注局部滑体失稳及其危害。

4 结论与认识

(1) 杨家村滑坡属于典型的前缘牵引式深层多级旋转型滑坡，滑面总体呈圆弧形。

(2) 物探解译结果表明渭河北缘断裂在杨家村滑坡中部通过，控制了滑坡次级破裂面的结构特征。高密度电阻率法可有效用于黄土滑坡结构和断裂构造探测，在获取连续滑坡剖面方面具有优势。

(3) 新近纪三门组粘土层的变形破坏特征是杨家村滑坡形成的易发地质条件，渭河的长期下切和侧蚀作用是主要诱发因素。

(4) 杨家村滑坡目前总体处于稳定状态, 但前缘由于局部滑体饱和, 多发生蠕动变形, 需关注前缘局部滑坡或崩塌的稳定性及其危害。滑坡稳定性评价结果可为杨家村滑坡防治和监测预警提供依据。

参考文献/References

- [1] 胡海涛, 项式均, 王肇芬, 等. 关中西部滑坡的结构、构造特征及稳定性分析 [J]. 地质学报, 1965, 45 (4): 435 ~ 458.
HU Haitao, XIANG Shijun, WANG Zhaofen, et al. The characteristic constitution and structure of landslides in western Kwangchung region and analysis of their stability [J]. Acta Geologica Sinica, 1965, 45 (4): 435 ~ 458. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡广韬. 宝鸡-常兴-带黄土原边滑坡原因与因素的历史转化性 [J]. 西安地质学院学报, 1986, 8 (4): 23 ~ 27.
HU Guangtao. The historical transformation of the landsliding causes and factors in the border slopes of loessial highland in the Baoji-Changxing area [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 1986, 8 (4): 23 ~ 27. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王佳运, 石小亚, 冯卫. 宝鸡-常兴段滑坡分布规律与发育背景 [J]. 工程地质学报, 2014, 22 (3): 379 ~ 384.
WANG Jiayun, SHI Xiaoya, FENG Wei. Distribution regularity and development background of landslides at edge of loess table land from Baoji to Changxing [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22 (3): 379 ~ 384. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孙波. 陕北黄土滑坡地貌演变分析 [J]. 铁道工程学报, 1999, 16 (1): 67 ~ 71.
SUN Bo. Analysis on development of landform for loess landslide in northern region of Shanxi Province [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999, 16 (1): 67 ~ 71. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王维升, 万鑫. 浅议黄土滑坡的分布规律及形成条件 [J]. 灾害学, 2001, 16 (2): 82 ~ 86.
WANG Weisheng, WAN Xin. Distribution regularity and forming condition of loess landslide [J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16 (2): 82 ~ 86. (in Chinese with English abstract)
- [6] 曲永新, 张永双, 覃祖森. 三趾马红土与西北黄土高原滑坡 [J]. 工程地质学报, 1999, 7 (3): 257 ~ 265.
QU Yongxin, ZHANG Yongshuang, QIN Zumiao. Hipparion laterite and landslide hazards on Loess Plateau of Northwestern China [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7 (3): 257 ~ 265. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张永双, 曲永新. 万家寨引黄工程大梁段砂黄土的工程特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (2): 229 ~ 233.
ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Engineering properties of sand-loess from the Daliang region along the Wanjiashai water diversion project [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26 (2): 229 ~ 233. (in Chinese with English abstract)
- [8] 谭成轩, 孙伟锋, 张春山, 等. 宝鸡地区典型黄土剖面钻孔岩芯工程地质特性研究 [J]. 工程地质学报, 2011, 19 (5): 732 ~ 748.
TAN Chengxuan, SUN Weifeng, ZHANG Chunshan, et al. Engineering geological features from borehole cores for typical loess section in Baoji region of Loess Plateau [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (5): 732 ~ 748. (in Chinese with English abstract)
- [9] 谭成轩, 雷伟志, 孙伟锋, 等. 中国典型粘黄土区地质灾害风险评估危险性影响因素分析 [J]. 地质通报, 2008, 27 (11): 1771 ~ 1781.
TAN Chengxuan, LEI Weizhi, SUN Weifeng, et al. An analysis of the danger influence factors of geohazard risk assessments in typical stick loess regions in China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (11): 1771 ~ 1781. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙伟锋, 谭成轩, 王继明, 等. 陕西宝鸡地区千阳县地质灾害易发性评价 [J]. 地质通报, 2008, 27 (11): 1846 ~ 1853.
SUN Weifeng, TAN Chengxuan, WANG Jiming, et al. Geohazard susceptibility evaluation of Qianyang County, Baoji area, Shaanxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (11): 1846 ~ 1853. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨为民, 吴树仁, 谭成轩, 等. 陕西宝鸡地区对滑式黄土滑坡的特征及其碰撞诱发机理 [J]. 地质通报, 2008, 27 (11): 1854 ~ 1861.
YANG Weimin, WU Shuren, TAN Chengxuan, et al. Characteristics of opposite-slip loess landslides and its collision induced mechanism in the Baoji area, Shaanxi, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (11): 1854 ~ 1861. (in Chinese with English abstract)
- [12] 石菊松, 曲永新, 李滨, 等. 陕西宝鸡市新近系硬粘土工程地质特性与斜坡失稳效应 [J]. 地质通报, 2013, 32 (12): 1911 ~ 1917.
SHI Jusong, QU Yongxin, LI Bin, et al. Engineering geological properties of neogene hard clays in Baoji City area, Shaanxi Province, and their effect on slope failure [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32 (12): 1911 ~ 1917. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李滨, 吴树仁, 石菊松, 等. 陕西宝鸡市三趾马红土工程地质特性及灾害效应 [J]. 地质通报, 2013, 32 (12): 1918 ~ 1924.
LI Bin, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Engineering geological properties and hazard effects of Hipparion laterite in Baoji, Shaanxi Province [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32 (12): 1918 ~ 1924. (in Chinese with English abstract)
- [14] 文宝萍, 王思敬, 王恩志, 等. 黄土-红层接触面滑坡的变形特征 [J]. 地质学报, 2005, 79 (1): 144.

- WEN Baoping, WANG Sijing, WANG Enzhi, et al. The deformation characteristics of the loess-red beds interface landslide [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79 (1): 144. (in Chinese)
- [15] 岳应利. 黄土工程力学性质的变化及控制因素 [J]. 陕西师范大学学报 (自然科学版), 2002, 30 (1): 111 ~ 114, 120.
YUE Yingli. Change of engineering mechanics character of loess and controlling factors [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2002, 30 (1): 111 ~ 114, 120. (in Chinese with English abstract)
- [16] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来 [J]. 地下空间, 1999, 19 (4): 273 ~ 284.
XIE Dingyi. The past, present and future of the research on mechanical characteristics and application of loess [J]. *Underground Space*, 1999, 19 (4): 273 ~ 284. (in Chinese with English abstract)
- [17] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (1): 3 ~ 12.
XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23 (1): 3 ~ 12. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张永双, 曲永新. 黄土高原马兰黄土粘土矿物的定量研究 [J]. 地质论评, 2004, 50 (5): 530 ~ 537.
ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Quantitative research on clay mineral composition of the Malan loess from the Loess Plateau in China [J]. *Geological Review*, 2004, 50 (5): 530 ~ 537. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张永双, 曲永新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究 [J]. 工程地质学报, 2005, 13 (1): 18 ~ 28.
ZHANG Yongshuang, QU Yongxin. Cements of sand loess and their cementation in North Shaanxi and West Shanxi [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13 (1): 18 ~ 28. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王永焱, 林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
WANG Yongyan, LIN Zaiguan. The structural characteristics and physical and mechanical properties of loess in China [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [21] 殷跃平, 张作辰, 黎志恒, 等. 兰州皋兰山黄土滑坡特征及灾度评估研究 [J]. 第四纪研究, 2004, 24 (3): 302 ~ 310.
YIN Yueping, ZHANG Zuochen, LI Zhiheng, et al. Occurrence and hazard assessment on loess landslide of Gaolanshan in Lanzhou [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24 (3): 302 ~ 310. (in Chinese with English abstract)
- [22] Skempton A W. Residual Strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory [J]. *Géotechnique*, 1985, 35 (1): 3 ~ 18.
- [23] 冯希杰, 戴王强, 董星宏. 从陕西省扶风县古水路塬剖面剖析渭河断裂第四纪活动 [J]. 中国地震, 2003, 19 (2): 188 ~ 193.
- FENG Xijie, DAI Wangqiang, DONG Xinghong. Quaternary activity of the Weihe fault obtained from the analysis of Gushui trough profile in Fufeng County, Shaanxi Province [J]. *Earthquake Research in China*, 2003, 19 (2): 188 ~ 193. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘传正, 张明霞, 邹正盛, 等. 宝鸡市狄家坡滑坡稳定性研究 [J]. 工程地质学报, 1998, 6 (2): 103 ~ 113.
LIU Chuanzheng, ZHANG Mingxia, ZOU Zhengsheng, et al. Research on the stability of Dijiaopo slope in Baoji City [J]. *Journal of Engineering Geology*, 1998, 6 (2): 103 ~ 113. (in Chinese with English abstract)
- [25] 雷祥义, 屈红军. 西安白鹿塬边黄土滑坡的稳定性与人类活动 [J]. 地质论评, 1991, 37 (3): 258 ~ 264.
LEI Xiangyi, QU Hongjun. The stability of loess landslides on the edges of the Bailu tableland, Xi'an and their relationship with human activities [J]. *Geological Review*, 1991, 37 (3): 258 ~ 264. (in Chinese with English abstract)
- [26] 江玉乐, 周清强, 黄鑫, 等. 高密度电阻率法在滑坡探测中的应用 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2008, 35 (5): 542 ~ 546.
JIANG Yule, ZHOU Qingqiang, HUANG Xin, et al. Application of the high density resistivity method to landslide prediction [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2008, 35 (5): 542 ~ 546. (in Chinese with English abstract)
- [27] 高志亮, 刘永华. 环境地球物理勘探及在滑坡中的应用 [J]. 西安工程学院学报, 2001, 23 (2): 71 ~ 74.
GAO Zhiliang, LIU Yonghua. Environment geophysics exploration and its application in landslide [J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2001, 23 (2): 71 ~ 74. (in Chinese with English abstract)
- [28] Göktürkler G, Balkaya Ç, Erhan Z. Geophysical investigation of a landslide: the Altındağ landslide site, İzmir (western Turkey) [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2008, 65 (2): 84 ~ 96.
- [29] Mauritsch H J, Seiberl W, Arndt R, et al. Geophysical investigations of large landslides in the Carnic region of southern Austria [J]. *Engineering Geology*, 2000, 56 (3 ~ 4): 373 ~ 388.
- [30] Shi J S, Wu L Z, Wu S R, et al. Analysis of the causes of large-scale loess landslides in Baoji, China [J]. *Geomorphology*, 2016, 264: 109 ~ 117.
- [31] 张永双, 曲永新, 周瑞光. 南水北调中线工程上第三系膨胀性硬粘土的工程地质特性研究 [J]. 工程地质学报, 2002, 10 (4): 367 ~ 377.
ZHANG Yongshuang, QU Yongxin, ZHOU Ruiguang. Engineering geological properties of Neogene hard clay along the middle line of the north-south diversion water project in China [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10 (4): 367 ~ 377.