

doi: 10.12029/gc20170507

张树轩, 杨为民, 程小杰, 田尤, 李浩, 黄晓. 甘肃天水红旗山黄土滑坡群成因及稳定性分析[J]. 中国地质, 44(5): 924–937.

Zhang Shuxuan, Yang Weimin, Cheng Xiaojie, Tian You, Li Hao, Huang Xiao. Genetic mechanism and stability analysis of loess landslides group in Tianshui Hongqishan, Gansu Province[J]. Geology in China, 44(5): 924–937(in Chinese with English abstract).

## 甘肃天水红旗山黄土滑坡群成因及稳定性分析

张树轩<sup>1,2</sup> 杨为民<sup>1</sup> 程小杰<sup>1</sup> 田尤<sup>1,2</sup> 李浩<sup>1,2</sup> 黄晓<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;  
3. 河北师范大学汇华学院, 河北 石家庄 050091)

**摘要:**天水市位于西秦岭北缘断裂带, 区内活动断裂发育, 历史上强震频发, 诱发了大量黄土滑坡。基于对天水市北山地震滑坡群的野外调查, 研究了地震滑坡变形破坏特征; 以红旗山滑坡群为典型案例, 结合室内测试结果, 剖析了红旗山滑坡的变形破坏机制; 利用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟分析了现今红旗山滑坡的稳定性。研究结果表明: 天水北山滑坡群由地震作用诱发; 红旗山滑坡包含两个主滑动带, 历史上经历了 3 期以上变形活动, 演化过程复杂, 属地震–降雨耦合型滑坡。现今红旗山滑坡体在天然状态下相对稳定, 如遇强震作用将造成坡体内部塑性区贯通, 斜坡顶部岩土体将发生滑移。这一研究成果可为潜在强震区地震滑坡的变形机理及防灾减灾提供依据。

**关键词:**地震滑坡; 破坏特征; 变形演化机制; 数值模拟; 稳定性分析

中图分类号: P642.22 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2017)05–0924–14

## Genetic mechanism and stability analysis of loess landslides group in Tianshui Hongqishan, Gansu Province

ZHANG Shuxuan<sup>1,2</sup>, YANG Weimin<sup>1</sup>, CHENG Xiaojie<sup>1</sup>, TIAN You<sup>1,2</sup>, LI Hao<sup>1,2</sup>, HUANG Xiao<sup>3</sup>

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Huihua Academy, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050091, Hebei, China)

**Abstract:** Tianshui is located in the faulted zone at the northern edge of the West Qinling Mountain. The active faults in the area are well developed. According to historical record, the earthquakes used to happen frequently. A large number of loess landslides have been induced in this area. Based on field investigation of the north mountains landslide group in Tianshui, the authors studied the deformation and failure characteristics of the earthquake landslide. Taking Hongqishan landslide as a typical case, combined with laboratory test results, the authors analyzed deformation mechanism of Hongqishan landslide, and then applied FLAC<sup>3D</sup> to simulate the stability of Hongqishan landslide. The results show that the north mountain landslide group in Tianshui is induced by earthquake action; Hongqishan landslide contains two main slip belts, and it has experienced more than 3 deformation activities in history. Its

收稿日期: 2017–09–15; 改回日期: 2017–10–09

基金项目: 中国地质调查局项目“西秦岭北缘断裂带地质灾害调查”(12120114035601)资助。

作者简介: 张树轩, 男, 1993 年生, 硕士生, 从事地质灾害、工程地质及岩土工程等方面研究; E-mail: zhangsx0209@sina.com。

通讯作者: 杨为民, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 从事地质灾害、工程地质及活动断裂等研究工作; E-mail: snon\_72@163.com。

evolution process is complicated and belongs to earthquake-rainfall coupled landslide; Nowadays, the Hongqishan landslide is relatively stable under the natural condition. If a strong earthquake occurs, it will cause a breakthrough of the plastic zone inside the slope, and the soil on the top of the slope will slip. The research results can provide a basis for the deformation mechanism and disaster prevention of the earthquake landslide in the potential strong earthquake area.

**Key words:** earthquake landslide; landslide characteristics; deformation evolution mechanism; numerical simulation ; stability analysis

**About the first author:** ZHANG Shuxuan, male, born in 1993, master candidate, majors in ecological engineering, engages in research on geological hazards, engineering geology and geotechnical engineering; E-mail: zhangsx0209@sina.com.

**About the corresponding author:** YANG Weimin, male, born in 1965, professor, doctor, majors in the study of geological hazards, engineering geology and active faults; E-mail: snon\_72@163.com.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Project "investigation and evaluation of seismic geological hazard in Tianshui section of north margin fracture zone of West Qinling Mountains" (No. 12120114035601).

## 1 引言

天水市位于中国陇西黄土高原,构造上处于南北地震带与西秦岭构造带交汇处。区内地形地貌复杂,沟壑纵横,黄土分布广泛,堆积了世界上最厚的黄土(杨利荣等,2016)。研究区内现今断裂活动性较强,历史记录强震频发,因而诱发大量滑坡灾害。近年来,汶川、岷县等地区因强震导致的大规模地震滑坡灾害引起研究人员的广泛关注。国内外学者开展了大量有关地震滑坡研究工作。我国由历史地震引发崩塌滑坡地质灾害集中分布于强震多发、地形复杂的地带(孙崇绍等,1997)。地震滑坡研究依据地震滑坡的类型分为岩质地震滑坡及土质地震滑坡,研究内容包括地震滑坡特征、变形破坏机理及稳定性分析等方面。2008年汶川地震诱发了大量地质灾害(乔彦肖等,2009),其中岩质地震滑坡的主要类型分为拉裂-顺走向、拉裂-顺层、拉裂-水平、拉裂-散体、拉裂-剪断5类(许强等,2011)。在中国广泛的黄土地区,土质地震滑坡类型则包括黄土内滑坡、黄土-基岩接触面滑坡、黄土-基岩滑坡等(吴玮江等,2002;陈永明等,2006)。黄土地震滑坡的诱发条件除受地貌条件、岩层结构、地质构造、土体物理力学特性等客观因素影响外(Brian,2016;李瑞娥等,2009),也与地震震级及地震作用下滑坡土动力学特性密切相关(晏鄂川等,2003;祁生文,2004)。自20世纪90年代以来,学者们对于黄土地震滑坡成因机理研究提出了较多观点,王家鼎提出地震诱发高速黄土滑坡存在斜坡解体、斜抛和粉尘化效应等变形破坏机理(王家鼎等,

1999);毛彦龙提出地震触发斜坡岩土体变形破坏时,坡体内存在累进破坏、启动和启程加速三种效应(毛彦龙等,1998)。最新对地震滑坡的研究手段较以往更为丰富,包括通过室内模型试验模拟建立滑坡破坏前物理模型,通过振动台对室内模型加载地震波进行模拟,并利用FLAC<sup>3D</sup>数值计算对滑坡变形破坏过程进行模拟分析等方法(朱雷等,2013;夏敏等,2010)。综上所述,当前对地震滑坡的研究集中于滑坡类型、分布规律、滑动速率等方面,而地震滑坡破坏特征、形成机制、变形演化过程及稳定性仍为当当地震滑坡研究的热点及难点。本文研究重点为黄土滑坡,基于野外调查和现场测绘,剖析了天水市北山地震滑坡群的变形破坏特征,利用FLAC<sup>3D</sup>模拟分析了现今红旗山滑坡的稳定性,重点对红旗山滑坡的变形破坏机制及其稳定性进行研究,以期对潜在强震区地震滑坡的防灾减灾提供技术支撑。

## 2 滑坡孕灾背景

天水市位于西秦岭山脉与陇西黄土高原过渡带,地势呈西高东低,黄河一级支流渭河经天水自西向东流过。区内地形地貌以黄土梁峁、黄土丘陵为主,局部为基岩山区,地形起伏较大,境内冲沟发育。渭河河谷及两岸阶地,地势相对平坦(吴玮江等,1993)。沟壑纵横的地形地貌为滑坡发育提供了环境。

区内地层以第四系(Q)和新近系(N)为主,下伏下古生界牛头河群黑云母片麻岩( $P_{2,nt}^4$ )。第四系按成因划分为残坡积物、风成黄土和冲洪积物。残坡积物一般以泥岩、黄土混杂堆积为主,泥岩多呈团

块状,内夹钙质结核物。风成黄土为浅黄色、黄色粉质黏土、粉土。风成黄土以马兰黄土及离石黄土为主,中上部沉积的马兰黄土结构疏松,孔隙率大,垂直节理发育,透水性强,具湿陷性。下部离石黄土结构致密,含数层古土壤,夹有钙质结核。全区黄土厚度一般在5~30 m,最大60 m,松散披覆于新近系泥岩之上。冲洪积物主要为砂砾石,分布在冲沟和河谷之中。新近系泥岩成岩程度较低,遇水易发生软化现象使其强度降低(辛存林,2012)。故天水地区的滑坡多于黄土及泥岩等物理力学性质较差的岩层中发生,区内软弱岩层广泛分布为滑坡的发生提供了条件。

天水市发育的天水—凤凰山断裂,隶属西秦岭北缘大型断裂带(图1)。断裂两侧地形地貌差异明显,该断裂破碎带宽达300 m左右(成玉祥等,2007)。该断裂带经过多期构造活动,晚更新世以来由压性转为左旋走滑,兼有倾滑分量(腾瑞增等,1994;吴玮江等,1993;李传友等,2006),新构造运动表现为大面积、间歇性、不均匀升降运动,历史记载该区强震频发,诱发多处大规模滑坡灾害。如143年甘谷西7级地震致使山体滑坡造成大量人员伤亡(袁道阳等,2007);734年天水7级地震造成4000余人伤亡(雷中生等,2007);1654年天水南8.0级地震

诱发上百个黄土滑坡;1718年甘肃通渭7.5级地震诱发300多处规模宏大的黄土滑坡,伤亡约40000余人,波及到天水市(陈永明等,2006)。断裂活动诱发的强震对天水地区滑坡发生提供了动力。

红旗山滑坡群位于天水—凤凰山断裂附近,其发生的孕灾背景受上述地形地貌、地层岩性、断裂活动和强震等多因素控制和影响。

### 3 天水北山滑坡特征

#### 3.1 地震滑坡群特征

天水北山滑坡群位于天水市秦州区与麦积区接壤处的北山黄土斜坡上,由5个巨型滑坡体组成。根据野外调查,该滑坡群呈条带状分布于天水北山,各滑坡平面形态呈舌形或不规则形(图2)。各滑坡基本特征见表1。

天水北山滑坡群各滑体均属巨型滑坡,具有规模大、切割深的特征,各滑坡体积均大于 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。滑坡群长1.5~1.8 km不等,后缘与前缘高差300 m左右。各滑坡后壁保存完好,后壁顶部均接近黄土梁顶,所处海拔较高。后壁陡坎高30~40 m,宽度在250~500 m不等,但滑坡侧壁均不清晰。滑坡群表面坡度较缓,坡角小于 $20^\circ$ 。滑坡群各滑坡主滑向近一致,均为 $S180^\circ$ 。

天水北山滑坡群定性为地震滑坡,证据包含以下几点:天水北山滑坡群呈典型条带状分布,各滑坡滑动规模均属巨型滑坡,且可在坡面较缓的条件下发生低角度滑坡,这与前人研究同一地区黄土地震滑坡特征吻合(陈永明等,2006);依据调查统计(表2)滑坡后壁形成位置,大都存在黄土梁顶部土体整体下错,拉裂面位于坡体顶部,为受地震水平惯性力作用沿黄土梁顶后缘裂隙拉裂而成(许强等,2011),这与地震滑坡多具高位滑坡特征相符。地震滑坡滑体启动下滑时都具有较大的动能,滑动距离较远,形成杂乱堆积,勘查时于坡体各处甚至对山均可见岩性混杂的滑坡堆积体,地层层序紊乱,符合地震滑坡堆积体的特征。滑坡侧壁不明显是因为地震致使北山各滑坡体整体下错,局部滑坡边界相互挤压切割,在后期受降雨冲刷改造与剥蚀作用下,滑坡侧壁难以保存完整,滑坡侧壁消失也间接反映地震对坡体改造作用强烈。5个滑坡沿同一方向下滑,这也符合同一次地震诱发的滑坡在发震断

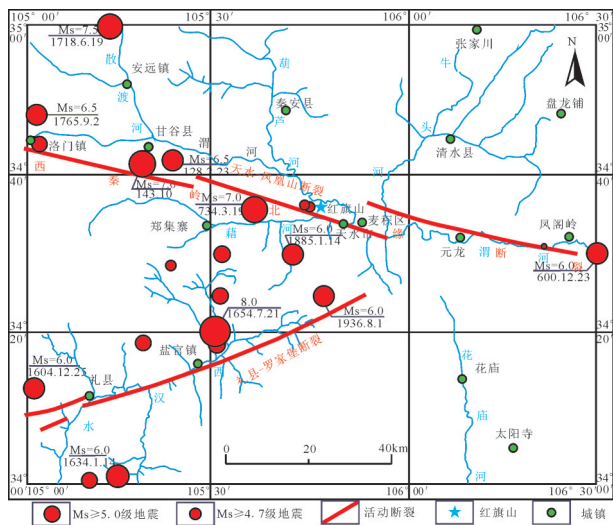


图1 天水地区主要活动断裂及地震分布图(据成玉祥等,2009 修编)

Fig.1 The main active faults and earthquake distribution in Tianshui area (modified after Cheng et al., 2009)

表1 天水北山红旗山滑坡群特征统计  
Table 1 Statistics of characteristics of Beishan landslide, Tianshui City

滑坡名称	长×宽/m	滑坡体厚度/m	滑坡体积 /10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	切割深度/m	坡体表面平均坡度/(°)	距梁顶水平距离/m	滑坡诱发因素
周家山西滑坡	1500×200	70~80	1.5	40~60	16	50	地震
小见河—周家山滑坡	1600×250	70~80	2	40~60	17	0	地震
红旗山滑坡	1500×350	30~50	1.1	20~40	15	0	地震
秀山滑坡	1800×500	70~90	4	60~80	12.5	0	地震
阎家河湾滑坡	1700×450	40~60	1.15	30~50	17.5	0	地震

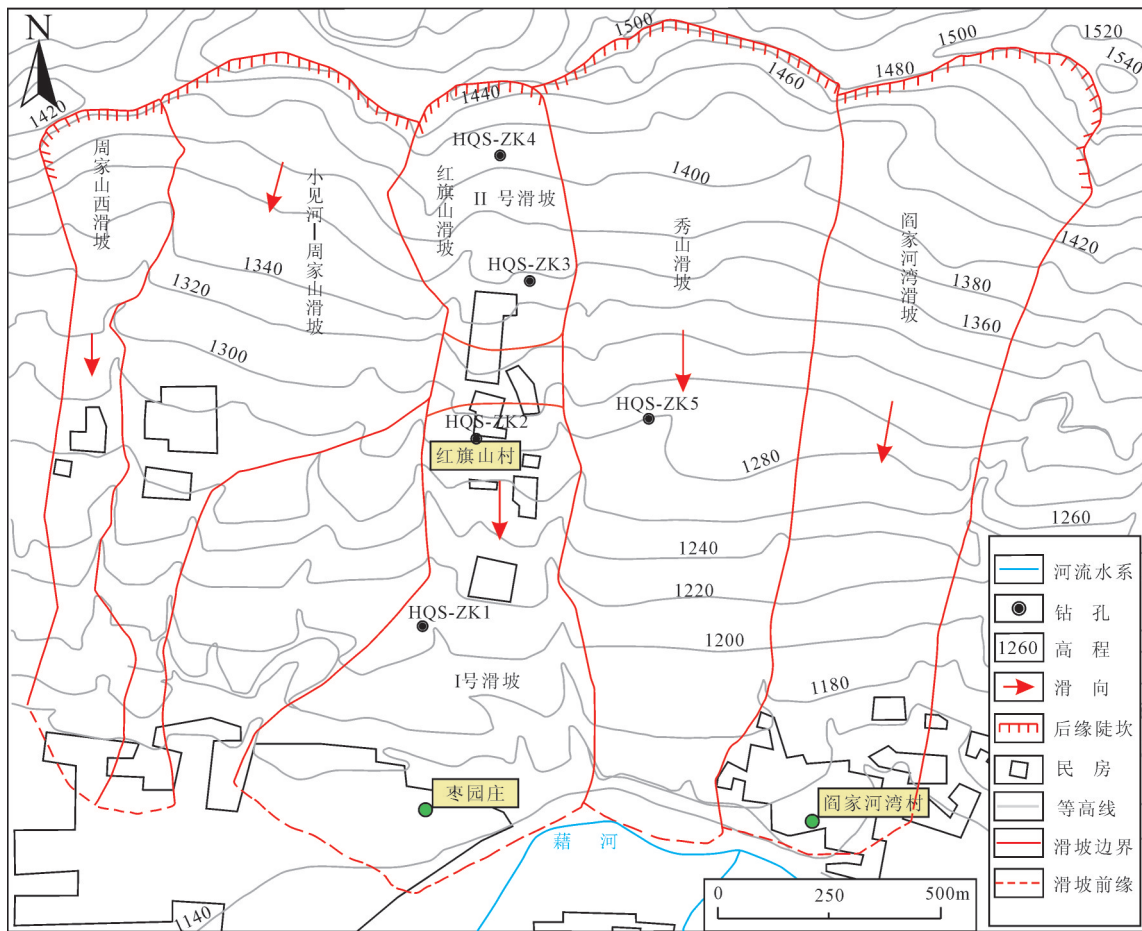


图2 天水市秦州区北山红旗山地震滑坡群平面图

Fig.2 Plan view of landslide group of Beishan-Hongqishan area, Qinzhou District, Tianshui City

裂产生的地震横波与纵波影响下,滑体沿同一方向共同下滑的特征。滑坡滑动方向近一致,这一特征除与滑坡体所处断裂构造走向有关,也受整体地震波传播方向等因素控制。

总之,天水北山滑坡群是由地震诱发的滑坡群,具有成条带状分布、滑动规模大、坡度小、后壁

清晰高陡、侧壁几近消失、整体下错、高位滑动、滑向近一致等特点。

### 3.2 红旗山滑坡特征

#### 3.2.1 基本特征

红旗山滑坡为天水北山地震滑坡群中的滑坡之一(图3)。距秦州城区约1.5 km,310国道穿过滑

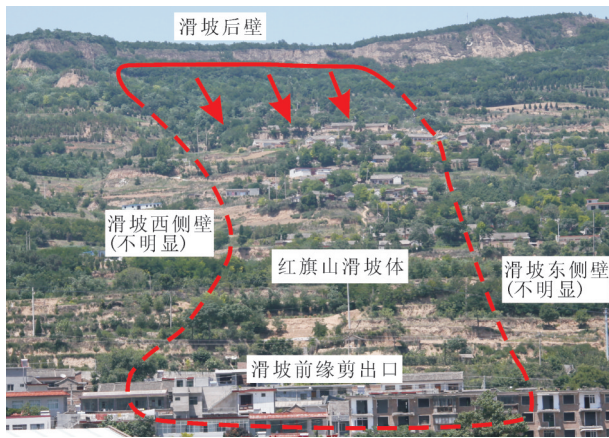


图3 红旗山滑坡全范围分布图  
Fig.3 Full range distribution of Hongqishan landslide

坡脚,属历史地震滑坡。滑坡平面上呈不规则形(图2),具“围椅状”地貌,剖面上呈“勺形”(图4)。滑坡后缘陡坎海拔高度1450 m,滑坡前缘海拔高度1150 m,纵向高差约300 m,坡度10~15°,主滑方向180°。滑坡后缘陡坎坡度约60°。滑坡体长1.5 km,宽约450 m,厚40~60 m,滑体总体积约 $1.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,属巨型黄土滑坡。滑坡体后壁高30~50 m,延伸长约200 m,侧壁后期受外力改造作用保存不完整。依据钻探揭露滑动面位置(图5),推测红旗山滑坡由I号滑坡及II号滑坡两个次级滑坡体组成。I号滑坡位于坡体中下部,长约700 m,II号滑坡体位于中上部,长约500 m。

3.2.2 滑坡体结构组成

根据滑坡调查和勘探孔岩心柱状图(图4,图5),

滑坡混杂堆积体主要由第四系马兰黄土、古土壤、离石黄土和新近系灰绿色、红褐色泥岩组成,局部夹杂中粗砂,松散披覆于中风化泥岩之上,两个次级的主滑面切穿新近系顶部泥岩强风化带软弱面。

I号滑坡体主要由粉质黏土、古土壤混杂堆积物而成,孔隙率大,较干燥。位于红旗山滑坡堆积体前缘的ZK1孔中揭露滑坡堆积体中发育三层湖相沉积的灰黑色淤泥(图6a),密度大,稍湿,有机物含量高,系滑坡体多次下滑后堵塞河道形成的堰塞湖堆积,但其沉积厚度不大,为1~2 m。湖相沉积的淤泥指示红旗山滑坡历史上应经历过至少三期滑动,佐证地震滑坡具有多期滑动的特点;滑坡堆积体下伏强、中风化泥岩,风化程度较高。ZK1孔于33~34 m的中风化泥岩中出现若干滑动面,滑面倾角约30°,滑面上擦痕发育(图6b)。I号滑坡体平均厚度为33~34 m。II号滑坡体表覆第四系次生黄土,岩土体结构疏松,孔隙率大,较干燥;深部为强风化泥岩,硬塑,稍湿,于22.7 m深处见主滑面,倾角约20°(图4、图5b),II号滑坡体厚度较I号滑坡体稍薄,II号滑体平均厚度约为23 m。

4 变形破坏特征与变形演化机制

红旗山滑坡主要是因地震诱发的,地震发生时,坡体多处产生变形,不同位置的变形特征各异。现今滑坡体变形既受堆积体自身结构控制,也与降雨及人类工程活动等因素密切相关。

4.1 变形破坏特征

地震发生时受水平地震力影响,滑坡后缘处沿

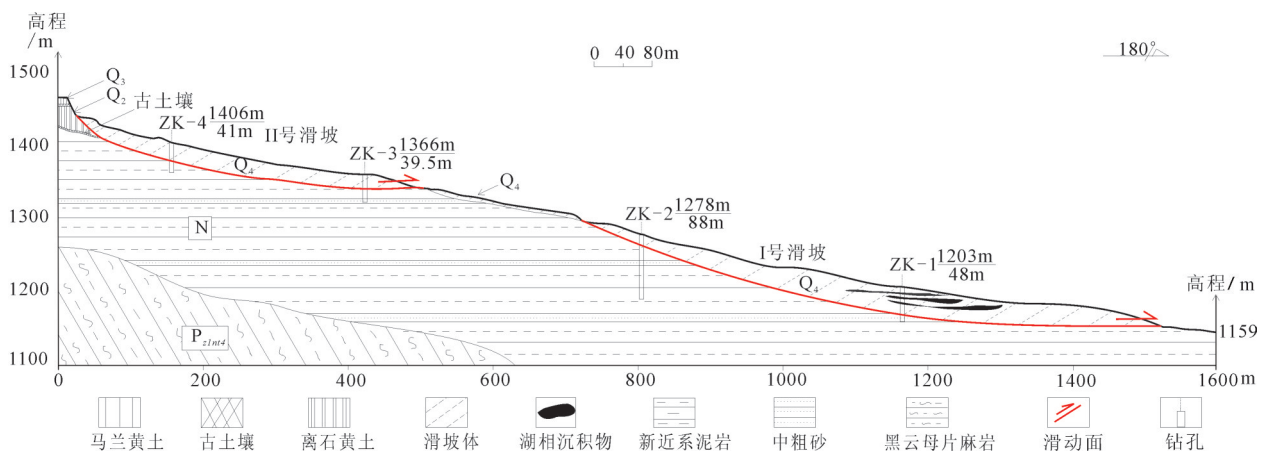


图4 红旗山滑坡工程地质剖面图  
Fig.4 Engineering geological profile of Hongqishan landslide

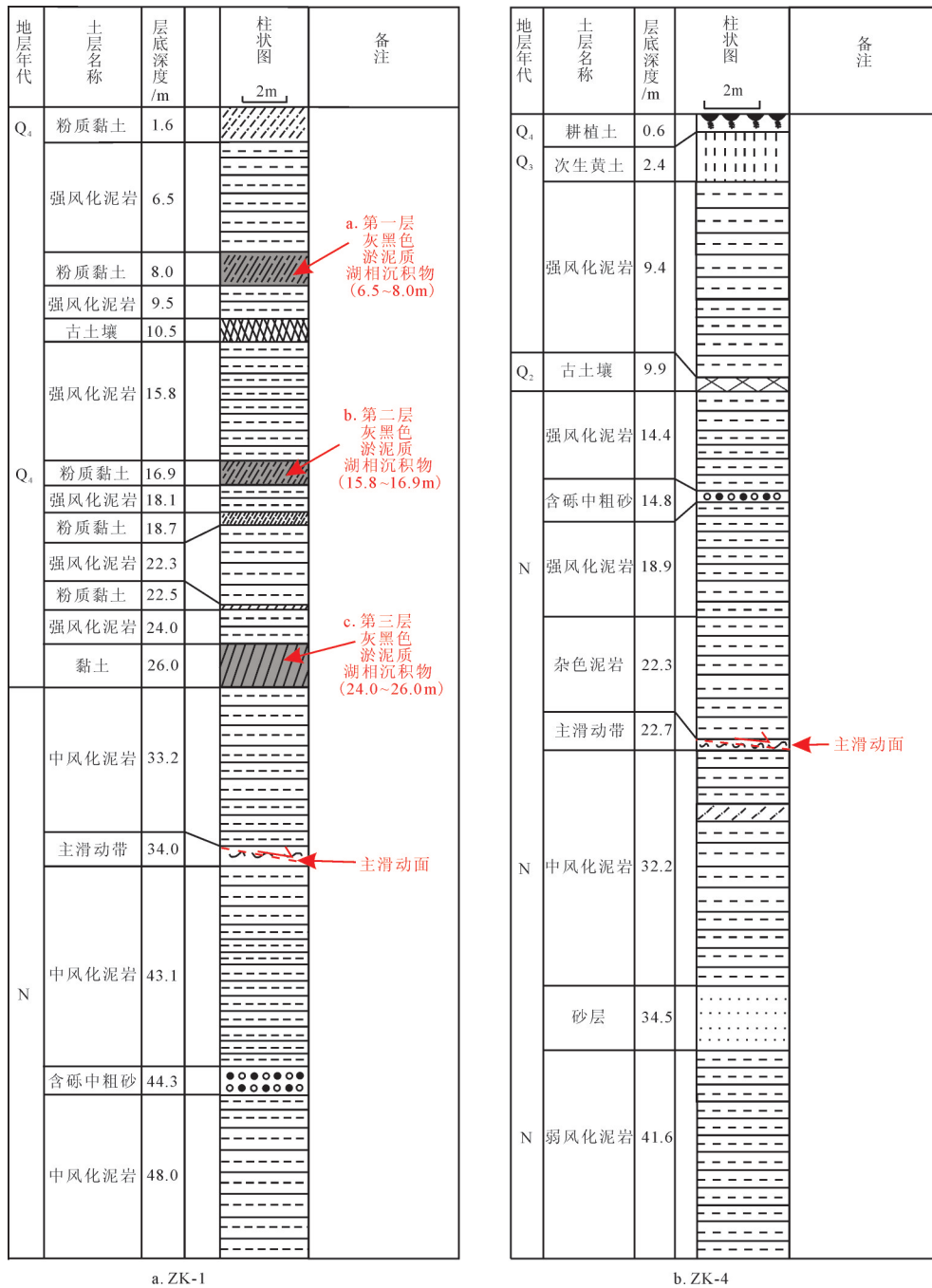


图5 红旗山滑坡钻孔柱状图  
Fig.5 Columnar section of the drill hole of Hongqishan landslide

裂隙面发生拉张破坏,坡体整体下滑并形成高陡坎(图7a,图8)。滑坡侧壁由于遭受整体下滑的相邻滑坡体双向拉剪、挤压作用,保存不完整。部分残存的滑坡侧壁受拉张应力影响形成陡坎。地震波的不均匀传播使近坡面部分土体产生剪张破坏,表现为滑坡体呈阶梯状(图7b)。由于受剪切错动,坡体

上覆土体松散软弱,在后期风化剥蚀及降雨侵蚀作用下多处形成冲沟。沿滑动面下滑的坡体于滑坡前缘附近形成次级滑动面,可见以红褐色泥岩为主的滑坡混杂堆积物覆于黄土之上(图7c)。于滑坡中揭露剖面上可见不同层的黄土及新近系泥岩混杂堆积形成次级滑面,佐证红旗山滑坡具多期活动特

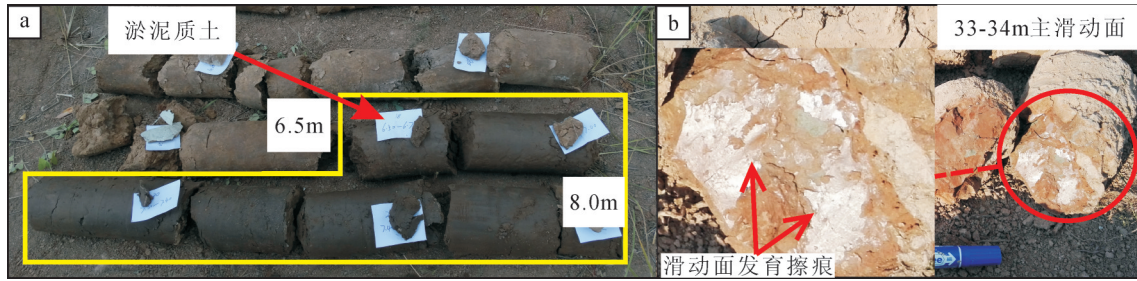


图6 红旗山滑坡钻孔岩心  
 a—ZK1 孔 6.5~8.0m 揭露的黑色湖相沉积物; b—ZK1 孔揭露滑动面  
 Fig.6 The photo of Hongqishan landslide cores  
 a—Black lake sediments revealed by ZK1; b—Slip surface exposed by ZK1

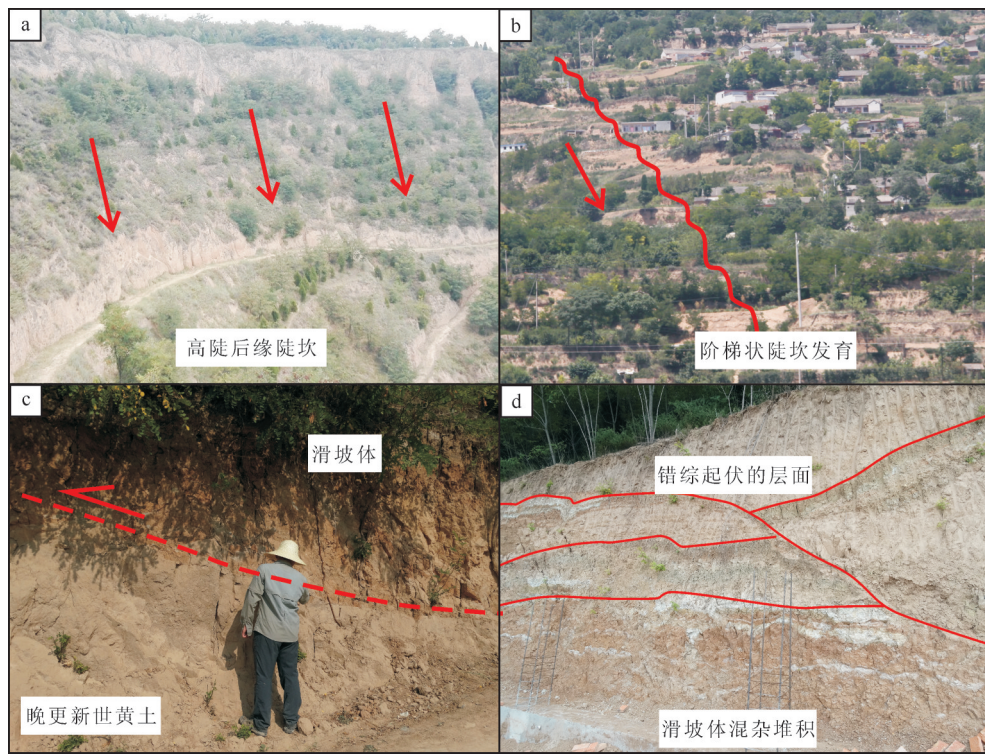


图7 地震滑坡过往变形特征  
 a—地震滑坡高陡后缘陡坎; b—坡体呈阶梯状堆积; c—由次级滑动面形成滑坡混杂堆积体堆积于黄土之上;  
 d—滑坡混杂堆积体形成错综复杂层面

Fig.7 Earthquake landslide deformation failure in the past  
 a—High steep trailing edge scarp of earthquake landslide; b—Ladder shaped accumulation slope; c—The formation of a landslide accumulation deposit on the loess from the secondary sliding surface; d—Complex layers formed by landslides deposit

征(图 7d)。

ZK1 钻孔揭露红旗山滑坡堆积体中含三层湖相有机质淤泥质土(图 5a),表明红旗山滑坡历史上至少发生过三次大规模的滑动,且于滑坡体前缘堆积体形成堰塞湖。前人学者通过开挖探槽揭露的断塞塘,通过<sup>14</sup>C测年的方法研究西秦岭北缘断裂带的活动迹象

(李传友等,2010)。本文于天水红旗山钻孔取得淤泥质土样在北大分析测试中心进行<sup>14</sup>C年龄测定。由测年结果来看(表 2),滑坡在距今 7.0 ka、14.0 ka 及 27.0 ka 前后均发生过不同规模的滑动。从堆积次序来看, Hqs-ZK1-001 与 Hqs-ZK1-005 两层湖相沉积物虽层位相近,但<sup>14</sup>C测年结果相差近 20.0 ka。第三层

表2 加速器质谱(AMS)<sup>14</sup>C测试结果(部分)

Table 2 Test results of Accelerated Mass Spectrometer <sup>14</sup>C (part)

样品原编号	HQS-ZK1-001	HQS-ZK1-005	HQS-ZK1-027
取样深度/m	7.1~7.2	7.7~7.9	25.6~25.7
<sup>14</sup> C年代(BP)/a	7405±30	27830±110	14465±45

注:由北京大学分析测试中心测试。

湖相沉积物HQS-ZK1-027测年结果为14.0 ka,与第一层湖相沉积物测年结果均不相同。湖相沉积次序上不成正序沉积的结果间接反映了地震滑坡分多期,且存在众多次级滑动面的特征。

#### 4.2 变形演化机制

基于红旗山滑坡的变形破坏特征和形成条件,对红旗山滑坡的变形演化机制分析如下:

受新近系沉积古地形控制,第四系松散黄土不均匀沉积于新近系泥岩之上。挽近时期由于区域地壳抬升,河流下切作用增强,藉河河流长期冲刷坡脚,其临空面不断扩大,于坡脚产生应力集中,坡

面局部产生拉张应力(图9a)。

随着藉河不断下切,坡体前缘临空面不断增大,坡面受拉张应力形成拉裂缝,地表水沿裂缝渗入坡体。由于黄土渗透性比泥岩好,泥岩相比黄土可视为隔水层。水入渗土体增加土体自重的同时,也造成黄土-泥岩接触面含水量上升,造成接触带软化甚至泥化,坡体形成潜在滑动面,受剪切作用更易滑动。当遭地震诱发时,致使斜坡中下部坡体失稳并沿黄土-泥岩接触面下滑形成滑坡堆积体I,堵塞藉河河道形成堰塞湖,沉积湖相含有有机质淤泥a(图9b)。

初次滑动后残余坡体局部发生卸荷回弹,由回弹的岩土于坡面重新产生张应力。I号滑坡后缘陡坎处形成新的临空面,坡内岩土体应力重分布,原滑坡后壁临空面作为新坡脚再次产生应力集中现象。其后,坡体在强震作用下,地震波所产生的动应力增加坡体的下滑力,且地震波的放大叠加效应导致斜坡中上部坡体失稳下滑。在地震波的反



图8 红旗山滑坡现今变形破坏现象

a—树木发生倾倒歪斜;b—滑坡后壁发育拉张裂隙;c—民房墙壁出现剪张裂缝;d—民房地面出现拉张裂缝

Fig.8 Deformation features of Hongqishan landslide at present

a—Trees falling and skewing; b—The development of slip cliff tension cracks;

c—Shear cracks appearing on the house wall; d—Tensile cracks appearing on the house floor



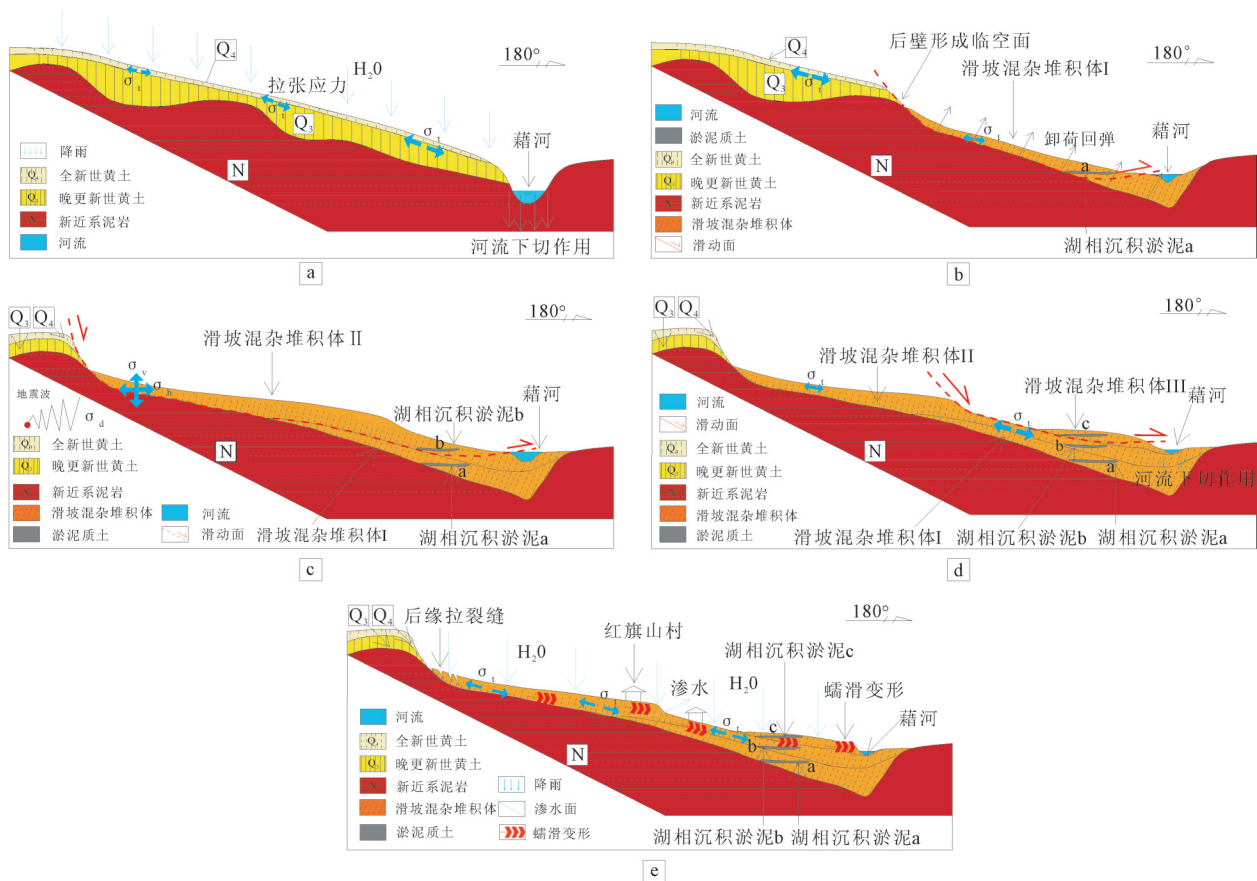


图9 红旗山滑坡形成演化

a—原始坡体;b—河流下切作用导致坡体中下部滑移;c—地震作用导致坡体高位滑移;  
d—后期降雨作用导致堆积体滑移;e—当今坡体受拉蠕变,于滑坡后缘形成拉裂缝

Fig.9 Hongqishan landslide deformation evolution

a—Original slope; b—The stream trenching effects causing the middle and lower part landslide; c—High slip of slope due to earthquake action;  
d—Accumulation of sliding due to rainfall; e—The tensile creep of the slope causes tensile cracks at the trailing edge of the landslide

复震荡作用下,坡面松散堆积的黄土及强风化泥岩受多向挤压拉伸及剪切等多重应力影响。此时地震波的横波主要提供纵向剪切力,纵波提供水平向拉张及压缩应力,研究表明垂向地震剪切作用较水平拉压作用对结构破坏更明显(钱培风,1983)。波的相互叠加所导致的岩土体局部加速度不均衡产生应力差,岩土体沿软弱结构面发生变形破坏。地震形成的滑坡体 II 堆积在滑坡堆积体 I 之上并再次堵塞藉河河道形成堰塞湖,沉积含有机质淤泥 b 湖相层(图 9c)。

滑坡体 II 部分下滑至坡脚堆积,部分残留于滑坡体 I 滑床之上。由于滑坡堆积体为松散堆积物,其岩土体结构并不稳定,残留在红旗山斜坡上的滑体在后期地震或强降雨的共同作用下,河流持续冲

刷坡脚形成临空面,坡体局部再次发生下滑,堆积于坡脚形成滑坡堆积体 III,堵塞河道形成堰塞湖,沉积湖相淤泥 c(图 9d)。

现今红旗山坡面上建筑房屋、修筑公路等人类工程活动导致坡体局部临空面增多,人类工程活动造成坡面多处受拉张应力影响,红旗山村民宅墙体和地坪出现的拉张裂缝即为坡面上张应力进一步发展、增大的佐证(图 8c,d)。调查中据村民介绍,居民楼地坪曾发生返潮现象,原因为地表水沿红旗山滑坡后缘发育多条拉裂缝(图 8b)渗入坡体,沿结构面向下渗流,由坡体中部居民楼地坪上渗出地表,弱化软化黄土/泥岩接触带物理力学性质,黄土及泥岩接触带及强风化泥岩局部贯通将使得坡体形成新潜在滑动面。目前,红旗山滑坡体整体仍处于

滑变形阶段,如遭遇强降雨或地震作用仍存在发生滑坡的危险(图9e)。

由变形演化过程可知,红旗山滑坡的变形演化机制受坡体本身典型二元结构控制。由于上覆黄土与下伏泥岩物理力学性质呈显著差异,导致潜在滑动面易形成于黄土泥岩接触面及泥岩强风化带附近。其次,外动力作用下,中下部滑坡多受河流侵蚀坡脚形成临空面,坡脚应力集中容易引起坡体发生局部滑移;中上部滑坡由强震产生的多向地震波诱发,地震横波剪切作用影响下,滑体大部分呈阶梯状披覆于坡面,纵波对滑坡体位移提供动能,地震产生的其他方向波造成滑坡堆积体内部翻转混杂。滑坡堆积体前缘多层湖相沉积物发育、沉积层序的紊乱表明红旗山滑坡体曾经历多期活动,形成的次级滑动面相互切割,使堰塞湖淤积物层位产生错动。滑坡体现今变形主要由强降雨或人类工程活动所至,表现以蠕滑变形为主(图8a)。综上所述,红旗山滑坡属具有二元结构的降雨-地震耦合型滑坡。

### 5 稳定性分析

依据红旗山地震滑坡现场调查、测绘和钻探资料建立了三维地质模型。依据野外调查和测绘,运用FLAC<sup>3D</sup>岩土数值模拟软件,建立红旗山地震滑坡三维数学模型(图10),模型长1600 m,宽350 m,高370 m,下部基岩厚30 m,共划分网格20320个,节点23474个,选用Mohr-Coulomb本构模型。模型静力边界条件以坡体表面为自由面,左、右侧边界施加水平方向约束,底部边界施加水平及竖直方向位移约束。动力计算时模型左右为自由场边界,底部施加黏滞边界,考虑阻尼影响并施加局部阻尼,根据经验值局部阻尼系数取0.15。分别模拟计算在自然及地震两种工况下,红旗山滑坡的稳定性。

依据钻探样品的土工测试结果,参考已有成果资料,模拟计算时红旗山滑坡各岩土体物理力学参数如表3所示。

采用强度折减法对现今自然工况下滑坡稳定性进行模拟计算,得到滑坡体的稳定性系数(表4)。

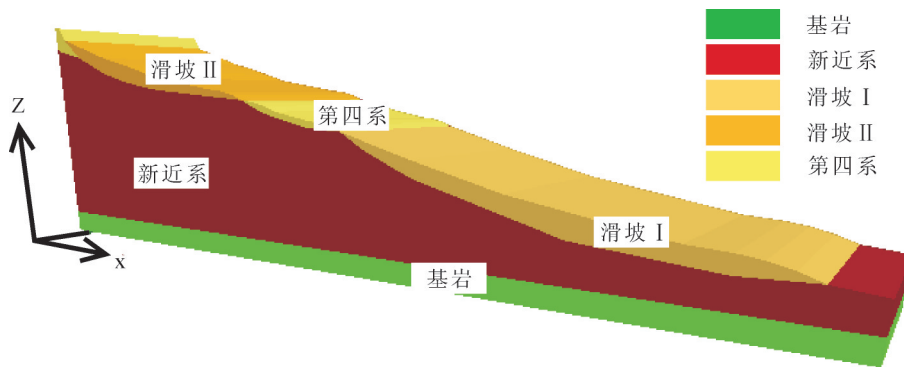


图10 红旗山滑坡FLAC<sup>3D</sup>模型  
Fig.10 FLAC<sup>3D</sup> model for Hongqishan landslide

表3 红旗山滑坡岩土物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of rock and soil for Hongqishan landslide

地层岩性	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	内摩擦角 $\phi$ (°)	内聚力 C/kPa	抗拉强度 $\sigma_t$ /kPa	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
基岩	3800	3300	34	1500	10	2.8
强、中风化泥岩	1500	1300	30	800	5	2.2
I号滑坡体	500	400	22	40	1	1.7
II号滑坡体	600	500	25	80	1	1.8
第四系黄土	1200	1000	30	100	1	1.8

表4 强度折减法计算滑坡稳定性系数  
Table 4 Calculation of landslide stability coefficients by strength reduction method

滑坡体	稳定性系数
红旗山 I 号滑坡体	1.15
红旗山 II 号滑坡体	1.24
红旗山滑坡体	1.36

由结果可知,各滑坡体稳定性系数均大于1,但均小于2.0,由此可判断目前红旗山滑坡体在自然工况下处于基本稳定状态。

利用Flac<sup>3D</sup>模拟地震工况下滑坡体稳定性时,由于四川省与甘肃省相邻,故施加于模型上的水平地震动加速度,采用2008年汶川8.0级地震所记录的数据,来替代天水市遭遇强震时红旗山坡体所遭受的地震动荷载作用。模拟结果(图11)表明,在地震动荷载影响下,红旗山坡体存在两个潜在滑带,滑带II在水平方向的位移较为明显,最大位移可达4.6 m。且滑坡体于高位沿拉张裂隙产生位移变形,与前文叙述地震滑坡变形特征相吻合;滑带I的水平方向位移相比滑带II位移小,未产生较大幅度的变形。说明在地震作用下,红旗山坡体下部岩土体与坡体上部岩土体相比,处于相对稳定状态。

由地震动荷载累加所致坡体塑性区分布图(图12)可知,红旗山滑坡体受地震波的持续剪切与拉张作用将产生两个潜在的塑性贯通区,分别位于滑坡体上部及滑坡中下部,贯通位置接近红旗山I号滑坡体及II号滑坡体与下伏新近系泥岩的接触带附近,与钻探工程调查潜在滑动面结果一致。图中的红色部分表示地震动荷载作用下,滑坡体现今受地

震波剪切作用所产生的塑性区。坡体一旦发生塑性区贯通,极易导致局部坡体失稳下滑。

总结对红旗山滑坡体自然工况与地震工况模拟的结果,知红旗山滑坡在自然工况处于稳定状态,其稳定性系数为1.36;受强震动荷载作用后,红旗山坡体于高位处产生较大水平方向位移,坡体内部发生塑性区贯通现象,滑坡体极易发生失稳下滑。

## 6 讨 论

### 6.1 地震与降雨对滑坡的耦合关系

研究表明地震与降雨滑坡的区别在于滑坡类型与滑坡规模的不同。地震与降雨两种外动力作用强度不同是形成差异的主要原因。天水地区典型降雨滑坡多发生于黄土内部,滑坡规模多以中、小型滑坡为主(薛振勇等,1991);地震滑坡则多发生于黄土-基岩接触面或基岩内部,滑体混杂无序堆积,规模属巨、大型滑坡(张帅等,2016;王鼎等,2013)。针对天水地区降雨滑坡与地震滑坡的差异,也可由滑坡形成演化的角度对比研究。对降雨滑坡而言,现今滑坡形态几乎由同一滑体连续变形演化而成(田尤等,2015);地震滑坡无论从次级滑坡体个数、滑面位置、活动期次等方面同降雨滑坡相比,其形成演化机制要复杂许多。

本文通过对天水红旗山滑坡的形成演化及稳定性研究,总结得出红旗山滑坡为地震与降雨耦合作用下形成的滑坡。从滑坡的具体特征上看,红旗山滑坡的成因仍由地震作用占主导,而降雨诱发坡体局部崩滑形成的临空面则为地震滑坡的形成提供基础条件。红旗山滑坡历史上历经多期变形演化,滑坡体过往变形特征明显,且现今仍具有较强

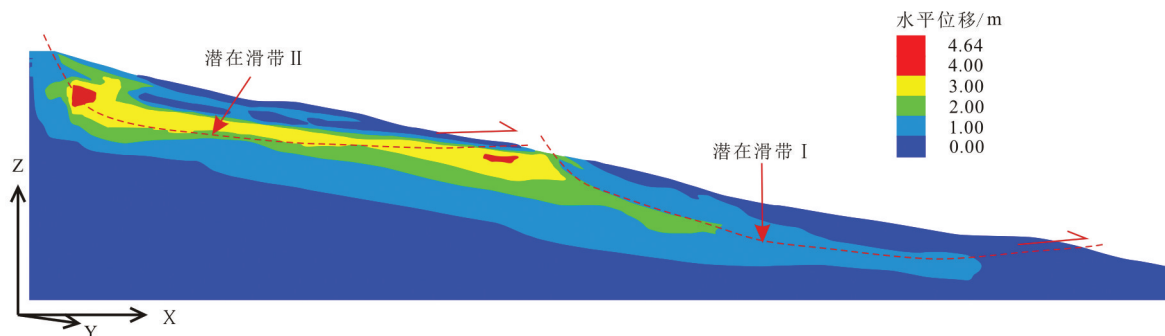


图11 地震工况作用下红旗山坡体水平位移云图

Fig.11 Horizontal displacement of Hongqishan slope under earthquake conditions

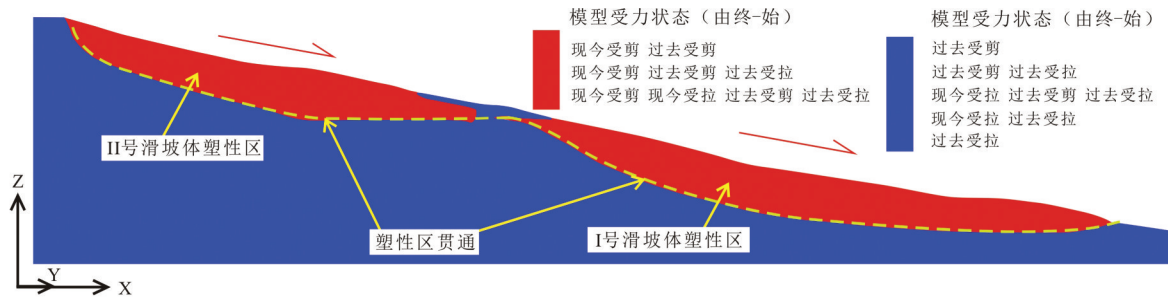


图12 地震动荷载加载后滑坡体塑性区分布云图

Fig.12 Distribution of plastic zones of landslide under earthquake working conditions

活动性,遇强震等外动力作用,潜在滑体仍可能发生失稳下滑。

本研究基于野外现象调查,进一步加深了对黄土地震-降雨耦合关系滑坡特征的认识,研究结论可为震-降雨耦合滑坡的识别提供依据,为潜在强震区地震滑坡防灾减灾提供技术支撑。

## 6.2 研究展望

随着对黄土地震滑坡研究的深入,地震滑坡的形成破坏机制仍为当前及未来的研究重点与难点。学者们提出了诸多关于地震诱发大规模低角度高速远程滑坡形成机制的不同看法(毛彦龙等,1998;王家鼎等,1999;张茂省等,2011;曾佑江,2015),但当前多方观点仍不能形成统一。现今地震滑坡研究对象多为历史记载中已发生过的地震滑坡,对于未发生的潜在地震滑坡体的判别预测及稳定性分析仍存不足之处,学者们尝试采用机载激光雷达动态监测滑坡变形、坡面位移监测潜在滑动面、数字多源信息多因素判别模型计算、有限元三维地质建模及稳定性模拟(刘圣伟等,2012;孔纪名等,2013;马明等,2014;熊海仙等,2015)等途径来解决这一问题,未来针对类似问题的研究仍有待进一步开展,以期对潜在地震滑坡判别预测提供证据。

本文虽对天水北山红旗山地震滑坡群变形破坏特征进行了总结分析,但限于研究区范围较小,难以对全区地震滑坡类型及特征进行归纳总结。数值模拟时采用汶川地震记录的水平地震动加速度曲线代替天水地区强震产生的水平地震动加速度,对地震动荷载数值计算日后也需加以完善。

## 7 结论

(1)天水北山滑坡群为地震诱发的滑坡群,平面

上呈条带状分布,具有滑动规模大、滑面缓、后壁清晰高陡、侧壁几近消失、高位滑动、主滑向近一致等地震滑坡的特点。

(2)红旗山地震滑体由两个次级滑坡体组成。滑体为第四系黄土及新近系泥岩混杂堆积物,滑床主要切割新近系顶部强风化带泥岩,属黄土-泥岩滑坡。

(3)红旗山滑坡体过往变形破坏特征表现为滑坡后缘发育高陡后壁、侧壁不完整、滑体呈阶梯状、滑坡呈多期次活动等。现今红旗山滑坡体变形破坏特征为坡体局部向下蠕滑变形及民房及坡面上发育拉张裂隙等。

(4)红旗山滑坡体变形演化机制复杂,由<sup>14</sup>C测年结果推测红旗山坡体经历多期活动演化而成,属于降雨-地震耦合型滑坡。滑坡成因受地震波放大效应、河流冲蚀作用、黄土-泥岩二元结构、人类工程活动等多因素控制。

(5)数值模拟结果表明:天然状态下滑体处于相对稳定状态,如遭受地震作用时,坡体上部水平方向将产生明显位移,坡内潜在滑动面塑性区贯通,坡体将再次失稳下滑。建议针对该滑坡编制防治预案或进行工程治理,以降低滑坡灾害对人民生命财产安全所构成的威胁。

## References

- Brian C, Amir M K, Farrokh N. 2016. Some important considerations in analysis of earthquake-induced landslides[J]. *Geoenvironmental Disasters*, 3(11)
- Chen Yongming, Shi Yucheng. 2006. Basic characteristics of seismic landslides in loess area of northwest China[J]. *Journal of Seismological Research*, 29(3): 276-280 (in Chinese with English abstract).

- Cheng Yuxiang, Zhang Jun, Du Dongju. 2007. Study on neotectonic movement features in Tianshui area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 15(4): 549–554 (in Chinese with English abstract).
- Lei Zhongsheng, Yuan Daoyang, Ge Weipeng, He Wengui, Liu Xingwang. 2007. Textual research on the Tianshui IM7 earthquake in 734AD and analysis of its causative structure[J]. *Seismology and Geology*, 29(1): 51–61 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruie, Xu Haoming, Wang Juanjuan. 2009. Characters of sliding soil of the loess landslide: A case study from Jiaoshuwan, Tianshui[J]. *Coal Geology & Exploration*, 37(1): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Li Chuanyou, Zhang Peizhen, Yuan Daoyang, Wang Zhicai, Zhang Jianxi. 2006. Late–Quaternary horizontal displacement and its associated microgeomorphology of the Western Qinling fault zone at Hangxianggou[J]. *Seismology and Geology*, 28(3): 391–403 (in Chinese with English abstract).
- Li Chuanyou, Zhang Peizhen, Yuan Daoyang, Wang Zhicai, Zheng Dewen. 2010. Sedimentary characteristics of sag–pond on the active strike slip fault and its tectonic implications: An example from sag–pond along the West Qinling fault[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(1): 90–105 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shengwei, Guo Dahai, Chen Weitao, Zheng Xiongwei, Wang Shengyao, Li Xianju. 2012. The application of airborne lidar technology in landslide investigation and monitoring of three gorges reservoir area[J]. *Geology in China*, 39(2): 507–517 (in Chinese with English abstract).
- Ma Ming, Wang Jun, Li Wei, Zhou Jie, Ding Xinpin. 2014. Identification of potential landslide slippery surface morphology based on displacement monitoring data[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 10(6): 1455–1461 (in Chinese with English abstract).
- Kong Jiming, Han Peifeng, Zhang Yin. 2013. Potential landslide discrimination model based on information of earth multi–sensor net[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(1): 97–102 (in Chinese with English abstract).
- Mao Yanlong, Hu Guangtao, Zhao Fasuo, Mao Xinhui. 1998. Mechanics of the landslide sliding caused by seismic[J]. *Journal of Xi' An Engineering University*, 20(4): 45–48 (in Chinese with English abstract).
- Qi Shengwen, Wu Faquan, Liu Chunling, Ding Yanhui. 2004. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(16): 2792–2797 (in Chinese with English abstract).
- Qian Peifeng. 1983. On vertical seismic load[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 3(2): 44–54 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Yanxiao, Ma Zhongshe, Lv Fengjun. 2009. Characteristics and dynamic cause mechanism of the Wenchuan earthquake geological hazards[J]. *Geology in China*, 36(3): 736–741 (in Chinese with English abstract).
- Sun Chongshao, Cai Guowei. 1997. Developing and distributing characteristics of collapses and landslides during strong historic earthquake in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 6(1): 25–30 (in Chinese with English abstract).
- Teng Ruizeng, Jin Yaoquan, Li Xihou, Su Xiangzhou. 1994. Recent activity characteristics of the fault zone at northern edge of western Qinling MT.[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 16(2): 85–90 (in Chinese with English abstract).
- Tian You, Yang Weimin, Liu Ting, Li Hao, Cheng Xiaojie. 2015. Deformation mechanism and evolutionary process of the Tianshui forging machine plant landslide in Gansu[J]. *Journal of Geomechanics*, 21(2): 298–307 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiading, Zhang Zhuoyuan. 1999. A study on the mechanism of high–speed loess landslide induced by the earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 21(6): 670–674 (in Chinese with English abstract).
- Wang Nai, Wang Lanmin. 2013. Characteristics and influencing factors of seismic loess slopes in valley areas[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 35(Sup.1): 434–438 (in Chinese with English abstract).
- Wu Weijiang, He Qiong, Cheng Jianxiang, Wang Xinglin, Li Shengyong. 1993. Development law of landslide in east part of Gansu province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 4(3): 89–95 (in Chinese with English abstract).
- Wu Weijiang, Wang Nianqin. 2002. Basic types and active features of loess landslide[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(2): 36–40 (in Chinese with English abstract).
- Wu Weijiang. 2003. Landslide and debris flow hazard in city of Tianshui[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 5:75–78 (in Chinese with English abstract).
- Xia Min, Ren Guangming, Guo Yasha, Lv Shengdi, Liu Rongqing. 2010. FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation of recurrence mechanism of landslide under earthquake loading [J]. *Journal of Engineering Geology*, 18(3): 305–311 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Haixian, Huang Guangqing, Gong Qinghua, Yuan Shaoxiong, Chen Bo, Zhang Dongliang. 2015. A review on application of digital terrain analysis in landslide researches[J]. *Tropical Geography*, 35(1): 139–146 (in Chinese with English abstract).
- Xin Cunlin, Yang Guolin, Zhao Zhipeng, Sun Xianhui, Ma Weiyun, Li Hongru. 2012. Geo–hazard types and causes analysis in Tianshui Beishan[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 23(2): 89–95 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qiang, Dong Xiujun. 2011. Genetic types of large–scale landslides induced by Wenchuan earthquake[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(6): 1134–1142 (in Chinese with English abstract).
- Xue Zhenyong, Hou Shuyun. 1991. The geological hazard induced by human activity—The landslide in Tianshui forging & pressing machine tool factory[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2(4): 52–60 (in Chinese with English abstract).
- Yan Echuan, Liu Hanchao, Tang Huiming. 2003. Experimental study

- on the dynamic properties of soil in slide zone of landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 11(3): 318-322 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lirong, Yue Leping, Wang Hongliang, Zhang Rui, Guo Huaijun, Zhu Xiaohui, Zhang Yunxiang, Gong Hujun. 2016. Quaternary stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qilian mountain and adjacent areas[J]. Geology in China, 43(2): 1041-1054 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Daoyang, Lei Zhongsheng, Ge Weipeng, Liu Xingwang, Liu Baichi, Zhang Junling. 2007. A new opinion about the west of Gangu M7.0 earthquake in 154 A.D. in Gansu Province[J]. Northwestern Seismological Journal, 29(1): 58-63 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Youjiang. 2015. Present situation and prospect of loess landslide[J]. Ground Water, 37(1): 221-223(in Chinese with English abstract).
- Zhang Maosheng, Li Tonglu. 2011. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 19(4): 530-540 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuai, Sun Ping, Shao Tiejuan, Shi Jusong, Meng Jing, Hu Qiuyun, Wang Tao. 2016. Earthquake-Triggered landslides in Tianshui loess hilly region, Gansu Province, China[J]. Journal of Engineering Geology, 24(4): 519-526 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lei, Wang Xiaoqun. 2013. Physical modeling and numerical simulation of deformation and failure process of large rockslide in earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 21(2): 228-235 (in Chinese with English abstract).
- 陈永明, 石玉成. 2006. 中国西北黄土地区地震滑坡基本特征[J]. 地震研究, 29(3): 276-280.
- 成玉祥, 张骏, 杜东菊. 2007. 天水地区新构造运动特征研究[J]. 工程地质学报, 15(4): 549-554.
- 雷中生, 袁道阳, 葛伟鹏, 何文贵, 刘兴旺. 2007. 734年天水7级地震考证与发震构造分析[J]. 地震地质, 29(1): 51-62.
- 李瑞娥, 徐郝明, 王娟娟. 2009. 黄土滑坡滑带土的特点——以天水椒树湾滑坡为例[J]. 煤田地质与勘探, 37(1): 43-47.
- 李传友, 张培震, 袁道阳, 王志才, 张剑玺. 2006. 西秦岭北缘断裂带黄香沟段晚第四纪水平位移特征及其微地貌响应[J]. 地震地质, 28(3): 391-404.
- 李传友, 张培震, 袁道阳, 王志才, 郑德文. 2010. 活动走滑断裂上断塞塘沉积特征及其构造含义——以西秦岭北缘断裂带断塞塘为例[J]. 地质学报, 84(1): 90-104.
- 刘圣伟, 郭大海, 陈伟涛, 郑雄伟, 王圣尧, 李显巨. 2012. 机载激光雷达技术在长江三峡工程库区滑坡灾害调查和监测中的应用[J]. 中国地质, 39(2): 508-517.
- 马明, 王俊, 李伟, 周杰, 丁鑫品. 2014. 基于位移监测数据确定潜在滑坡的滑面形态[J]. 地下空间与工程学报, 10(6): 1455-1461.
- 孔纪名, 韩培锋, 张引. 2013. 基于地球多传感器网络信息的潜在滑坡判别模型[J]. 地球科学与环境学报, 35(1): 97-102.
- 毛彦龙, 胡广韬, 赵法锁, 毛新虎. 1998. 地震动触发滑坡体滑动的机理[J]. 西安工程学院学报, 20(4): 45-48.
- 祁生文, 伍法权, 刘春玲, 丁彦慧. 2004. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 23(16): 2792-2797.
- 钱培风. 1983. 竖向地震力[J]. 地震工程与工程振动, 3(2): 44-54.
- 乔彦肖, 马中社, 吕凤军. 2009. 汶川地震地质灾害发育特点及动因机制分析[J]. 中国地质, 36(3): 736-741.
- 孙崇绍, 蔡红卫. 1997. 我国历史地震时滑坡崩塌的发育及分布特征[J]. 自然灾害学报, 6(1): 25-30.
- 腾瑞增, 金瑶泉, 李西侯, 苏向州. 1994. 西秦岭北缘断裂带活动特征[J]. 西北地震学报, 16(2): 85-90.
- 田允, 杨为民, 刘廷, 李浩, 程小杰. 2015. 天水锻压机床厂滑坡变形破坏机制及形成演化[J]. 地质力学学报, 21(2): 298-308.
- 王家鼎, 张培元. 1999. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报, 21(6): 670-674.
- 王鼎, 王兰民. 2013. 河谷地区黄土地震滑坡特征与影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 35(增刊1): 434-438.
- 吴玮江, 何琼, 程建祥, 王兴林, 李生永. 1993. 甘肃东部滑坡发育规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 4(3): 89-95.
- 吴玮江, 王念秦. 2002. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 13(2): 36-40.
- 吴玮江. 2003. 天水市滑坡泥石流灾害[J]. 水文地质工程地质, 5: 75-78.
- 夏敏, 任光明, 郭亚莎, 吕生弟, 刘荣清. 2010. 地震诱发滑坡复活机制的FLAC<sup>3D</sup>数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 18(3): 305-311.
- 熊海仙, 黄光庆, 宫清华, 袁少雄, 陈波, 张冬良. 2015. 数字地形分析在滑坡研究中的应用综述[J]. 热带地理, 35(1): 139-146.
- 辛存林, 杨国林, 赵志鹏, 孙现辉, 马维云, 李鸿儒. 2012. 甘肃省天水市北山地质灾害类型及成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 23(2): 89-95.
- 许强, 董秀军. 2011. 汶川地震大型滑坡成因模式[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 36(6): 1134-1142.
- 薛振勇, 侯书云. 1991. 人类活动诱发的地质灾害——天水锻压机床厂滑坡[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2(4): 52-60.
- 晏鄂川, 刘汉超, 唐辉明. 2003. 滑带土动力学性质试验研究[J]. 工程地质学报, 11(3): 318-322.
- 杨利荣, 岳乐平, 王洪亮, 张睿, 郭怀军, 朱小辉, 张云翔, 弓虎军. 2016. 祁连山及邻区第四纪地层区划与沉积序列[J]. 中国地质, 43(3): 1041-1054.
- 袁道阳, 雷中生, 葛伟鹏, 刘兴旺, 刘百箴, 张俊玲. 2007. 对143年甘谷西7级地震史料的新见解[J]. 西北地震学报, 29(1): 58-63.
- 曾佑江. 2015. 黄土滑坡研究现状及其展望[J]. 地下水, 37(1): 221-223.
- 张茂省, 李同录. 2011. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 19(4): 530-540.
- 张帅, 孙萍, 邵铁全, 石菊松, 孟静, 胡秋韵, 王涛. 2016. 甘肃天水黄土梁峁区强震诱发滑坡特征研究[J]. 工程地质学报, 24(4): 519-526.
- 朱雷, 王小群. 2013. 大型岩质滑坡地震变形破坏过程物理试验与数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 21(2): 228-235.

## 附中文参考文献