

# 汶川震区陇南三家地滑坡稳定性分析及防治

穆鹏<sup>1,2</sup>, 吴玮江<sup>3</sup>, 折学森<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;  
3. 甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** “5·12”汶川地震诱发了大面积的山体滑坡, 直接威胁人类的生命财产安全。陇南三家地老滑坡在这次地震期间前缘大规模滑动, 并在前缘滑动牵引下诱发后缘形成贯通裂缝, 严重威胁滑坡体上三家地村 1 732 村民的生命财产安全。因此, 准确判断该滑坡稳定性, 并采取相应的防治措施尤为重要。在对三家地滑坡进行现场勘查、室内试验和相关论证的基础上, 阐述该滑坡的基本特征和成因, 并运用传递系数法和数值模拟对该滑坡在不同工况下的稳定性及应力应变进行了计算、模拟和评价。研究结果表明, 天然状态下, 三家地老滑坡的整体稳定性系数为 1.30~1.36, 处于稳定状态; 在地震和暴雨工况下, 老滑坡的整体稳定性系数为 1.02~1.09, 处于欠稳定状态。最后, 基于滑坡成因和稳定性评价结果, 提出为提高滑坡稳定性应采取的加固措施。

**关键词:** 汶川地震; 三家地滑坡; 滑坡特征; 稳定性; 防治

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)02-0227-06

中图分类号: P642.23

## Stability Assessment and Treatment for Sanjiadi Landslide in Wenchuan Earthquake Area of Southern Gansu Province

MU Peng<sup>1,2</sup>, WU Wei-jiang<sup>3</sup>, SHE Xue-sen<sup>1,2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;  
3. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** The "5·12" Wenchuan earthquake induced a large number of landslides, which had directly threatened the safety of human lives and properties. The old Sanjiadi landslide in Southern Gansu Province experienced large-scale collapse in foreside and a long, and through cracks formed owing to the front traction during Wenchuan earthquake, which could seriously jeopardize the safety of 1 732 people of the village on it. It is therefore very important to understand adequately and maintain effectively the stability of the landslide. Based on field investigation, indoor test and related studies on Sanjiadi landslide, the basic characteristics and formation mechanism were elaborated. Assuming different working conditions, the stability and stress-strain features were calculated and analyzed by adopting transfer coefficient analysis and numerical simulation. The results show that the integral stability coefficients of the old landslides ranged 1.30~1.36, implying a steady state in the normal condition. Under rainstorm and seismic conditions, the stability coefficients of landslide were 1.02~1.09, indicating an unstable state. Finally, relevant engineering strengthening measures were provided based on the formation mechanism and quantitative evaluation results of the landslides.

**Keywords:** Wenchuan earthquake; Sanjiadi landslide; landslide characteristics; stability; control

滑坡是各种地质灾害中分布最广、发生最频繁、危害和损失最大的灾害形式之一<sup>[1-2]</sup>。汶川“5·12”大地震在震影响区内产生大量的崩塌、滑坡等地质灾害<sup>[3-4]</sup>。陇南地区是汶川地震特重灾区, 是我国滑

坡、泥石流最密集地区之一。

三家地滑坡位于陇南武都区汉林乡三家地村, 该滑坡为一老滑坡, 三家地村庄位于老滑坡的滑坡平台上。“5·12”地震使三家地村多间房屋倒塌, 并诱发

收稿日期: 2011-09-13

修回日期: 2011-10-21

资助项目: 交通运输部行业联合科技攻关项目“公路高边坡抗震技术研究”(2008353361420); 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室基金项目(CHD2010JC146); 西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放基金项目(Klmwde201004); “5·12”汶川地震中央灾后重建基金项目

作者简介: 穆鹏(1979—) 男(汉族) 安徽省宿州市人, 博士研究生, 讲师, 主要从事岩土工程研究。E-mail: 624778311@qq.com。

老滑坡前缘产生大范围的滑动,同时,三家地村上老滑坡后缘形成了一条长约 520 m,平均宽度为 1.2 m 的弧形贯通性裂缝。该滑坡一旦进一步整体复活滑动,将严重威胁三家地村 1 732 人的生命财产安全和灾后重建工作。因此,为了保证该区居民生命财产和灾后重建工作,因此,为了保证该区居民生命财产安全,研究该滑坡特征及成因,对其稳定性进行评价,并提出相应的防治对策,将对该区灾害防治具有重要指导意义。

## 1 滑坡区地质环境

### 1.1 地形地貌

研究区地貌类型属构造侵蚀、剥蚀的低中山地。滑坡地处汉林新近纪断陷盆地,受陈李沟和瓦家沟控制,形态上呈扇形。总的地势西高东低,区内海拔最大高度 1 938.8 m,最低点 1 260.0 m,相对高差 680.0 m。区内地形特点是黄土梁和冲沟相间分布。陈李沟自西南往东从滑坡前缘穿过,沟道内侵蚀切割强烈,沟底狭窄。

### 1.2 地层岩性

地层岩性是滑坡发育的物质基础,也是滑坡研究和防治中需首先查清的问题<sup>[5]</sup>。研究区出露的地层主要有:(1)志留系中上统白龙江组( $S_{2+3}$ bl)。分布于研究区周边基岩山区,岩性以中薄层—厚层硅质条带灰岩、白云质灰岩为主,节理裂隙、错断和褶曲揉皱非常发育,表层风化、破碎严重;(2)新近系( $N_b$ )。分布于整个研究区,零星出露于深切沟谷底部。岩性以桔红色、棕红色泥岩、砂质泥岩、灰白色细砂岩为主,节理裂隙发育,风化、破碎严重;(3)第四系(Q)。在研究区分布广泛,以风积黄土、滑坡堆积物为主,并有少量洪积物和湖积物等。

### 1.3 地质构造

研究区地质构造复杂,主要受控于西秦岭纬向构造带和武都“山”字形构造带,断裂构造十分发育,主要发育有 NWW 和 NEE 向两组区域性断裂带。这两条 NWW 向和两条 NEE 向的区域性断裂大致在汉林一带相交,发育形成了近东西向分布的安化—汉林新近系红色断陷盆地,三家地滑坡位于该断陷盆地的西南段,南北基岩山体的强烈上升,使汉林盆地内的新近系红色泥岩褶皱,形成向斜。该区新构造运动十分活跃,第四纪以来断裂活动明显且差异性较大,主要是在早期已有构造的基础上发生发展,具有一定的继承性和新生性。

### 1.4 地震活动

研究区处在会宁—武都南北地震带上,并受邻近松潘—平武地震带的强烈影响,属地震多发区,有文

字记载的 7 级以上强震达 15 次,是该地区大面积滑坡、崩塌形成的主要动力。最为典型的是 1879 年武都南 8 级大地震在该区造成了大量的大型滑坡、崩塌。2008 年“5·12”汶川 8 级地震强烈波及该区,在区内产生了众多的滑坡、崩塌及地裂缝,是地震特重灾区。滑坡区地震烈度为 VIII 度,设计基本地震加速度为 0.20 g,地震动反映谱特征周期为 0.40 s。

### 1.5 水文地质条件

研究区地下水按含水介质和埋藏条件可分为基岩裂隙水、黄土孔隙裂隙水和砂砾碎石孔隙水。基岩裂隙水分布于沟谷源头基岩地区,它赋存于新近系、志留系基岩构造裂隙和风化裂隙内,大部分为潜水,主要接受大气降水补给,在陈李沟上游沟底有多处泉水分布。黄土孔隙裂隙水,赋存于研究区黄土梁区低洼处,含水层主要为离石黄土,没有统一的地下水位,水量贫乏。砂砾碎石孔隙水,呈带状分布于陈李沟主沟道和支沟内,含水层主要为泥石流堆积物,含水层厚度 1~3 m,地下水位埋深一般在 1 m 左右,水量较小。

## 2 滑坡特征及成因分析

### 2.1 老滑坡基本特征

三家地滑坡为一老滑坡,形成于 1879 年武都 8 级地震。该老滑坡平面总体呈“扇型”,总长约 1 095 m,后缘宽约 312 m,前缘宽约 810 m,前后缘高差 287 m,平均坡度 14.7°,面积约 0.55 km<sup>2</sup>,总体积约 2.25 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。老滑坡后壁位于村庄上部,西侧后壁由马兰黄土和新近系泥岩组成,东侧后壁由马兰黄土和离石黄土组成。滑坡体由扰动的黄土和泥岩组成,总体上老滑坡堆积物有一定的成层性,上部为原马兰黄土和离石黄土,下部为滑动的泥岩,属巨型黄土—泥岩顺层滑坡。

老滑坡东西两侧变形有较大差异,分块特征明显,分为东西两块,其中东块滑坡又分为 3 级。西侧滑坡平面上呈长条形,滑坡长 616 m,后缘宽 116 m,前缘宽 351 m,滑坡面积 1.01 × 10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>,滑坡体平均厚度约为 43 m,总体积约为 4.35 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,主滑方向为 48°,滑坡体主要由马兰黄土、离石黄土、新近系泥岩和砂质泥岩组成。滑坡后壁及侧界明显呈不规则的圈椅状,后壁长 102 m,高 13~18 m,平均坡度为 42°。

东侧滑坡体平面上呈长条形,长 1 095 m,后缘宽约 196 m,前缘宽约 459 m,总面积 3.50 × 10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>,滑体平均厚度约为 53 m,总体积约 1.86 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,滑坡区两侧沟道侵蚀比较强烈,东侧发育瓦家沟,沟深 30~

65 m。西侧发育学校沟,沟深20~40 m。根据地形地貌、岩土体结构和滑坡变形情况,将东侧滑坡体自上而下分成3级。I级滑坡体有明显的后壁和周界,左侧界与西侧滑坡的右侧相邻,右侧界以瓦家沟右岸黄土梁为界,该级滑坡长216 m,宽约228 m,滑坡面积 $4.62 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,平均厚度约为15 m,体积 $6.93 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,主滑方向为 $71^\circ$ ,滑坡体主要由马兰黄土、离石黄土和新近系泥岩组成。II级滑坡体位于三家地村庄所在地,人口最为集中。滑坡体长约341 m,宽约410 m,滑坡面积 $1.61 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,平均厚度61 m,体积 $9.83 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,主滑方向为 $58^\circ$ 。根据Z10钻孔揭露,该滑坡体上马兰黄土、离石黄土覆盖最厚达44 m,最深的滑动面73.2 m,位于桔红色泥岩与红褐色泥岩的接触面。III级滑坡体后缘位于三家地村庄下部的陡坎,东西两侧以瓦家沟和学校沟为界,有较明显的老滑坡后壁和侧界,后壁长350 m,高约20 m,滑坡体长约556 m,宽约358 m,滑坡面积 $1.43 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,平均厚度约为56 m,体积 $8.02 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,主滑方向为 $56^\circ$ ,由马兰黄土、离石黄土和古滑坡堆积物组成。

## 2.2 汶川地震诱发三家地老滑坡破坏特征

“5·12”汶川8级地震在三家地老滑坡区作用强烈,在地震的作用下诱发了大量的裂缝和前缘强烈滑动破坏,主要包括村庄上部老滑坡后缘长约520 m的贯通裂缝 $L_1$ 和老滑坡前缘的 $H_1$ 、 $H_2$ 和 $H_3$ ,这3处较大规模的地震滑坡。

### 2.2.1 汶川地震诱发的滑坡裂缝

“5·12”汶川地震引发的滑坡裂缝主要集中在三家地滑坡的后部和前部,尤其以三家地滑坡前部裂缝最为发育。三家地村庄上部发育一条地震主裂缝 $L_1$ ,该裂缝为地震诱发,它基本上依附在II级滑坡的后缘区即老滑坡主滑壁下部与老滑体的交汇处。裂缝长520 m,宽0.3~1.8 m,最大下错1.2 m,呈不规则圆弧形,走向总体 $151^\circ$ 。该裂缝错断、错裂了大量民房、窑洞、道路和农田。 $L_1$ 裂缝产生的原因是由于三家地老滑坡下部III级滑坡体前缘的不断滑动,削弱了对上部II级滑坡体的支撑力,牵引向上发展,并受地震动的共同作用,II级滑坡体稳定性降低,产生复活蠕变,形成了 $L_1$ 裂缝。经过一年多的监测,没有发生较大变形。

$L_2$ 裂缝南端与 $L_1$ 裂缝相接,向东横穿村庄、学校,位于东西两块老滑坡的分界处,裂缝长180 m,宽0.1~0.4 m。由地震动作用和老滑坡块体在地震时的差异运动所致。

其它裂缝主要发育在老滑坡前部的III级滑坡体上,“5·12”地震引发的三处滑坡后壁以上的坡体区,与各地震滑坡后壁相对应,一般呈弧形展布,规模

较大,如 $H_1$ 滑坡后部的 $L_3$ 裂缝长149 m,宽0.4~1.5 m,下错0.3~4.0 m,由地震滑坡使前部失去支撑,产生的向后牵引作用和地震动作用共同引发。汶川地震诱发的主要裂缝特征见表1。

表1 研究区主要裂缝特征

编号	长度/m	宽度/cm	错距/cm
$L_1$	520	30~180	15~120
$L_2$	180	10~40	10~20
$L_3$	149	40~150	30~400
$L_4$	155	10~30	200~300
$L_5$	270	20~100	10~60
$L_6$	99	10~50	20~40
$L_7$	95	10~30	30~80
$L_8$	217	20~50	20~40
$L_9$	156	20~50	20~50

### 2.2.2 汶川地震诱发 $H_1$ 滑坡特征

$H_1$ 滑坡位于三家地老滑坡东侧III级滑坡体的下部,有明显的后壁和侧界,后壁及侧界明显呈不规则的M形,长544 m,高3~6 m,总滑距1.2~3.5 m。 $H_1$ 滑坡长256 m,后缘宽约195 m,前缘宽约352 m,面积约 $5.13 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,滑体厚度16~23 m,滑体体积约 $1.03 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,主滑方向 $48^\circ$ 。剪出口位于陈李沟沟底附近,随沟底地形而变,西高东低,滑体将沟道完全堵塞(图1)。组成滑体的主要物质为黄土与新近系破碎泥岩。主滑带位于破碎泥岩底部,基本沿袭了老滑坡的滑动带。滑带厚5~20 cm,主要有桔红色、红褐色泥岩混杂组成。 $Z_{24}$ 钻孔揭示了主滑面,滑面上擦痕清晰,据扫描电镜(SEM)分析,滑带土中的片柱状矿物颗粒发生了一定程度的定向排列。

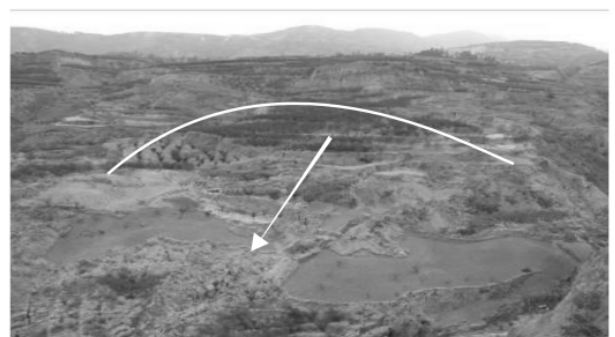


图1 研究区 $H_1$ 滑坡全貌

### 2.2.3 汶川地震诱发 $H_2$ 滑坡特征

$H_2$ 滑坡与 $H_1$ 滑坡相邻,也位于三家地老滑坡东侧III级滑坡体的下部,有明显的后壁和侧界。滑坡长150 m,后缘宽约91 m,前缘宽约240 m,滑坡前后缘高差近45 m,面积约 $1.43 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,滑体平均厚度约15 m,体积约 $2.15$

$\times 10^5 \text{ m}^3$ , 总体滑距为 2~4 m, 滑坡剪出口位于陈李沟沟底附近。

2.2.4 汶川地震诱发  $H_3$  滑坡特征  $H_3$  滑坡紧邻  $H_2$  滑坡, 位于  $H_2$  滑坡的东侧, 也是老滑坡前缘复活滑动。滑坡后壁和周界比较明显, 后壁长 502 m, 高 3~5 m, 坡度约  $64^\circ$ , 受雨水侵蚀, 擦痕不明显, 顶部高程 1 399 m。滑坡平面上呈半椭圆形, 滑坡长约 170 m, 后缘宽约 246 m, 前缘宽约 427 m, 前后缘高差近 55 m, 面积约  $5.16 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 滑体平均厚度约 16 m, 体积约  $8.26 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 主滑方向  $35^\circ$ , 剪出口位于陈李沟沟底附近, 随沟床的高低变化, 总体呈西高东低。

### 2.3 滑坡成因分析

滑坡成因按大类分主要有内因和外因两种。内因主要包括地形地貌、地质成因和构造、地层岩性、水文地质等, 外因有降雨、河流冲刷、工程活动、地震等方面<sup>[6-9]</sup>。

2.3.1 物质基础和岩土体结构条件 物质基础和岩土体结构条件是滑坡得以形成的最重内部要素。只有具备了一定的物质基础和结构条件, 地质体才可能在外因的作用下形成滑坡。三家地滑坡主要有第四系黄土和新近系泥质碎屑岩类组成, 均为软弱易滑岩层, 且为倾向坡外的黄土泥岩顺层缓倾结构, 泥质岩层理发育, 泥岩、砂岩软硬相间, 这是滑坡产生的内在因素。具有这种结构类型的坡体稳定性差, 是黄土地区滑坡最为发育、最为典型的类型之一。

2.3.2 地质构造 地处北西西和北东东两大活动构造带交汇带, 这是此次滑坡产生的内在动力。该区是构造运动能量释放强烈地区, 表现为断层、褶皱大量分布, 岩石节理裂隙发育, 局部地区异常破碎。同时, 新构造运动造成的区内地表抬升, 使沟谷侵蚀基准面不断降低, 坡体相对高差和陡度都逐渐增加, 稳定性逐渐降低。

2.3.3 老滑坡控制 三家地有利于滑坡发育的黄土、泥岩顺层缓倾斜坡, 在历史上大地震、暴雨等外部因素的影响下, 已发生多次滑动, 使坡体结构更加复杂, 稳定性降低, 已有的结构面成为倾向坡外的不良结构面, 本次地震在老滑坡前缘引发 3 处滑坡的滑动面基本继承了老滑坡的滑动面, 在其基础上发生、发展, 形成了新的滑动。村庄上部出现的  $L_1$  拉张裂缝也发育在老滑坡体后缘部位, 走向和主体均受其控制。

2.3.4 沟道侵蚀作用 滑坡区内发育的 4 条冲沟, 下切深度达到 20~60 m, 沟岸平均坡度达到  $35^\circ$ 。同时, 区内泥石流发育, 泥石流沟道侵蚀能力比普通基流或挟带少量泥沙的径流侵蚀更具冲击力和破坏力,

使得滑坡前缘形成陡峻临空面, 坡脚应力不断集中, 甚至滑坡前缘发生坍塌, 最终降低了滑坡整体稳定性, 为老滑坡体的复活创造了条件。滑坡前缘受沟道侵蚀强烈的一些滑坡体因此长期处于不稳定状态, 时有变形开裂和滑塌发生。沿陈李沟两岸, 中小型滑坡非常发育。

2.3.5 降水的影响 降雨除对滑坡表面土体造成冲刷外, 雨水渗入裂隙及潜在滑面, 将导致滑面软化, 力学性质降低, 并可能由于相对隔水层而导致水体滞留形成高动水压力, 从而导致滑坡体变形加剧。滑坡区降雨主要集中在 5—9 月份, 且降雨多以连阴雨和暴雨出现, 雨水大量渗入坡体, 使坡体内的黄土、泥岩易被软化, 强度大幅度降低, 也使土体重度增加、下滑力加大。

2.3.6 地震的影响 地震是影响斜坡、滑坡稳定性的主要因素之一<sup>[10-11]</sup>。研究区是我国著名的强震区, 其中许多地震都曾引起滑坡、崩塌。据资料记载, 最初引起三家地老滑坡的是 1879 年 7 月 1 日武都 8 级地震。“5·12”汶川 8 级大地震对三家地老滑坡的影响非常强烈。老滑坡前缘因临空条件好、地形坡度较大等原因, 地震发生过程中, 在地震力的作用下产生了强烈滑动, 向上牵引发展, 前缘的大规模滑动, 使老滑坡体失去支撑, 抗滑力也有所降低, 沿老滑坡滑面出现微小的错动, 后缘出现拉张裂缝。

## 3 滑坡稳定性分析

### 3.1 定性分析

三家地滑坡属牵引式滑坡, 现场监测资料显示滑坡后缘  $L_1$  裂缝在前缘滑坡发生后的 3 d 内变形逐渐加剧, 主要是因为地震时三家地滑坡前缘失稳,  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  滑坡的大规模滑动, 使上部斜坡失去支撑, 老滑坡体产生蠕动变形所致。同时在  $H_1$  和  $H_2$  滑坡后壁上一定范围的斜坡区也出现多条弧形的牵引性拉张裂缝。

$H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  这 3 处滑坡在 2008 年 5 月 12 日发生整体滑动以来, 前缘受到陈李沟洪水泥石流的强烈侵蚀冲刷, 1 a 多的时间内滑舌最大下切处已达 3~4 m, 形成新的临空面, 并使抗滑力降低。另一方面, 地震后滑体中裂缝也很发育, 尤其是三家地滑坡前部的 3 处地震滑坡的滑体特别松散和破碎, 暴雨很容易沿裂缝大量渗入到滑体内, 增加坡体自重和软化降低土体强度。在暴雨作用下再次发生失稳滑动的可能性很大。也将失去对后部滑体的支撑作用, 由此可能进一步降低三家地滑坡体的整体稳定性, 逐级向后牵引发展, 引起蠕动变形或失稳滑移, 最终威胁到三家地

村庄的安全。

### 3.2 定量计算

3.2.1 计算方案 根据现场勘探,三家地滑坡的滑动面较长,为折线型。故本滑坡稳定性定量计算采用刚体极限平衡法中的传递系数法计算滑坡的稳定系数。传递系数法<sup>[12-13]</sup>是刚体极限平衡法中一种应用非常广泛的方法,计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} \quad (1)$$

$$\psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i + \theta_{i+1}) \tan\varphi_{i+1} \quad (2)$$

$$R_i = N_i \tan\varphi_i + c_i L_i \quad (3)$$

式中:  $F_s$ ——稳定系数;  $\theta_i$ ——第  $i$  块段滑动面与水平面的夹角( $^\circ$ );  $R_i$ ——作用于第  $i$  块段的抗滑力(kN/m);  $N_i$ ——第  $i$  块段滑动面的法向分力(kN/m);  $\varphi_i$ ——第  $i$  块段土的内摩擦角( $^\circ$ );  $c_i$ ——第  $i$  块段土的黏聚力(kPa);  $L_i$ ——第  $i$  块段滑动面长度(m);  $T_i$ ——作用于第  $i$  块段滑动面上的滑动分力(kN/m),出现与滑动方向相反的滑动分力时, $T_i$  应取负值;  $\psi_j$ ——第  $i$  块段的剩余下滑动力传递至  $i+1$  块段时的传递系数( $j=i$ )。

本研究采用传递系数法对主剖面进行天然状态、暴雨和地震这 3 种工况条件下的稳定性计算。其中暴雨工况下,降雨强度大于 40 mm/h,持续时间在 3 h 以上;地震工况下地震烈度为 VIII 度,设计基本地震加速度为 0.20 g,地震动反映谱特征周期为 0.40 s。本次计算中,在三家地老滑坡上布设了 4 条勘探线,在  $H_1$  滑坡上布设了 2 条勘探线,在  $H_2$  滑坡上布设了 1 条勘探线,在  $H_3$  滑坡上布设了 2 条勘探线,共计 9 条。本滑坡稳定性计算利用这 9 条剖面,分别计算相应的稳定系数。

3.2.2 计算参数 滑坡稳定性计算的物理力学参数能否正确选取十分关键。该滑坡计算的有关力学参数是在试验资料的基础上,根据本滑坡的岩土体组成,并参考了当地岩土抗剪强度经验值,再根据滑坡“5·12”地震后稳定状况反算分析而综合确定的(表 2)。

表 2 三家地滑坡计算岩土体参数

岩土层	天然状态			暴雨状态		
	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内聚力/ (kPa)	内摩 擦角/ $(^\circ)$	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内聚力/ (kPa)	内摩 擦角/ $(^\circ)$
滑体	20.7	20.0	12.5	21.8	16.0	10.5
滑带	21.3	18.0	11.0	21.9	15.0	10.0
滑床	25.0	970.0	34.0	25.0	970.0	34.0

3.2.3 计算结果与评价 将传递系数法滑坡稳定系

数计算公式编制成 Excel 计算表格,代入有关计算参数,由软件进行计算。计算出了三家地滑坡 9 条剖面在天然、暴雨和地震不同工况下的稳定系数(表 3)。

表 3 三家地滑坡稳定性计算结果

滑坡	剖面	天然	地震	暴雨
老滑坡	I—I'	1.318	1.042	1.087
	II—II'	1.315	1.040	1.081
	III—III'	1.300	1.020	1.079
	IV—IV'	1.360	1.047	1.093
$H_1$	V—V'	1.076	0.875	0.921
	VI—VI'	1.065	0.856	0.913
$H_2$	VII—VII'	1.037	0.854	0.901
$H_3$	VIII—VIII'	1.041	0.857	0.906
	IX—IX'	1.055	0.882	0.910

从稳定性计算结果可以看出,地震工况下  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  滑坡的稳定系数为 0.854~0.882,处于失稳滑动状态,老滑坡整体稳定系数为 1.020~1.047,接近临界稳定状态,与“5·12”地震时滑坡体前缘产生剧烈滑动后缘产生贯通裂缝破坏的实际情况相一致;暴雨工况下  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  滑坡的稳定系数为 0.901~0.921,处于不稳定状态,老滑坡的整体稳定系数为 1.079~1.093,接近临界稳定状态;天然工况下  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  滑坡的稳定系数为 1.037~1.076,处于临界稳定状态,老滑坡的整体稳定系数为 1.300~1.360,目前处于整体稳定状态。从结果中可以进一步看出,地震对三家地老滑坡的影响作用非常明显,地震作用下稳定系数大为降低,这符合大型滑坡对地震反应敏感,多由强烈地震引发和控制的一般规律。

### 3.3 滑坡有限元数值分析

三家地滑坡有限元数值计算选取主剖面(III—III')将其概化作为计算模型,在计算分析过程中采用平面应变问题来处理,有限元网格划分后生成的结点总数为 6 203。计算模型所采用的边界条件为:设定模型的上部为自由边界,左右两侧为水平约束,底面边界采用固定约束,此外,计算中考虑由自重应力引起的初始地应力。该滑坡有限元计算岩土体的力学参数详见表 2,采用莫尔—库仑屈服准则计算,选则模型计算的工况为天然工况进行计算。

从最大主应力场特征分析结果来看,滑坡应力场总体上受重力场影响明显。最大主应力在滑坡坡面部位大体上与坡面近于平行,而在滑坡深部则与重力方向总体上一致,其量值在滑坡最深部位取最大值,而靠近坡面部位量值逐渐减小。从滑坡总位移特征分析结果可见,滑坡变形主要发生在滑坡前缘,变形

呈现出由地表向坡内递减的分布特征,从最大剪应变和塑性区分布特征可以看出,剪应变最大值分布在滑面及滑坡前缘处,塑性区主要分布在滑坡前缘、滑面和后缘。这些特征在一定程度上说明了该滑坡在汶川地震时前缘发生大规模滑动而后缘由于受前部滑动牵引而产生贯通裂缝  $L_1$  的原因。

#### 4 滑坡防治措施建议

(1) 回填反压工程。三家地滑坡属牵引式滑坡,滑坡体的 II 级和 I 级滑体目前没有太大的变形,天然条件下处于稳定状态,要确保滑坡上部的长期稳定必须要保证前部 III 级滑坡的稳定,因此治理的重点为  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  这 3 处滑坡,在陈李沟主沟段至沟口采用回填反压的方法,增加滑坡的抗滑力和防止沟道下切,起到同时治理滑坡和泥石流的效果,回填反压为三家地滑坡治理的最主要控制性工程措施。

(2) 地表排水工程。滑坡的产生和发展与地表水有密切联系,通过设置排水系统排除地表水来治理滑坡能够取得明显的效果,主要加强村庄和滑坡区地表排水沟、截水沟的建设,完善和加强村庄的水管道建设和管理,防止各种水流渗入坡体,提高滑坡的稳定性。

(3) 排导工程。采用浆砌石砌筑排导沟,使陈李沟泥石流有固定的排导沟道,用于保护回填反压区长期的稳定,防止泥石流对填方区土体的侵蚀破坏。

(4) 夯填裂缝和落水洞。对滑坡区的裂缝和落水洞进行回填和夯实,减少地表水的入渗对土体的软化作用。

#### 5 结论

(1) 三家地滑坡为一老滑坡,总体积约  $2.25 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,滑坡体主要由黄土和泥岩组成,属巨型黄土—泥岩顺层滑坡。该滑坡在汶川地震时前缘发生大规模复活滑动而后缘由于受前部滑动牵引而产生贯通裂缝,属牵引式滑坡。该滑坡严重威胁到三家地村 1 732 人的生命财产安全及灾后重建工作。

(2) 该滑坡的形成是内因和外因共同作用的结果,内因包括组成滑坡的岩土体工程地质性质、地质构造和老滑坡控制等;外因主要是沟道侵蚀作用、降雨和地震作用。

(3) 定性定量研究成果表明,三家地老滑坡整体天然状态下处于稳定状态;在地震和暴雨作用下接

近临界稳定状态。“5·12”地震产生的前缘滑坡  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_3$  天然条件下处于蠕滑状态;地震和暴雨作用下处于失稳滑动状态。由稳定性计算结果分析得出,三家地滑坡对地震反应敏感,地震作用下稳定系数大为降低,这符合大型滑坡多由强烈地震引发和控制的规律。

(4) 根据三家地滑坡的特征及稳定性计算结果,提出以回填反压工程为主,辅以地表排水工程、泥石流排导和裂缝夯填等的综合防治措施。

#### [参 考 文 献]

- [1] Schuster R L, Lynn M H. Socioeconomic impacts of landslides in the western hemisphere [R]. USA: United States Geological Survey, 2001.
- [2] 张帆宇. 积石峡水电站坝后 I 号滑坡演化过程及稳定性研究[D]. 甘肃兰州: 兰州大学, 2007.
- [3] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [4] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震地质灾害的基本特征及其对灾后重建影响的建议[J]. 中国地质教育, 2008(2): 21-24.
- [5] 吴玮江, 王念秦. 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, 2002, 13(2): 36-40.
- [6] 李晓, 张年学, 李守定, 等. 奉节白衣庵滑坡演化的工程地质与历史地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2416-2424.
- [7] 祁生文, 伍法权, 常中华, 等. 三峡地区奉节县城缓倾层状岸坡变形破坏模式及成因机制[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 88-91.
- [8] 李守定, 李晓, 董艳辉, 等. 重庆万州吉安滑坡特征与成因研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 29(9): 2159-3164.
- [9] 成国文, 李晓, 许家美, 等. 重庆涪陵五中滑坡特征及成因分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 220-227.
- [10] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [11] 祁生文, 伍法权, 严福章, 等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] 方玉树. 滑坡稳定分析传递系数法若干问题、讨论[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 607-611.
- [13] 陶志平, 周德培, 岳志勤. 滑坡推力计算中传递系数法的改进研究[J]. 路基工程, 2006(5): 80-81.
- [14] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.