# 兰州丘陵沟壑区挖方黄土高边坡面临的 工程地质问题及稳定性分析₀

蒲小武<sup>1,2</sup>,王兰民<sup>1,2</sup>,吴志强<sup>1,2</sup>,刘 琨<sup>1,2</sup>,赵文琛<sup>1,2</sup>,马林伟<sup>1,2</sup>,任 栋<sup>1</sup> (1.中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000; 2.中国地震局黄土地震工程重点实验室,甘肃兰州 730000) 摘要:通过对兰州黄土丘陵沟壑区大量黄土挖方高边坡的实地调查发现,这些刚开挖不久的黄土边 坡多数都出现了不同程度的工程地质问题,如卸荷裂隙、坡面冲沟、落水洞、局部滑塌等。通过有限 元方法,对挖方过程进行数值模拟,结果显示挖方后的位移场、应力及应变场都出现了显著变化,挖 方后的应力释放与局部集中、卸荷作用、风化作用及雨水冲刷等内因与外因及其相互作用是出现各 种工程地质问题的根本原因,而这些问题又会导致边坡稳定性出现不同程度的降低。黄土丘陵沟 壑区的自然边坡在天然状态下坡体稳定,用不同计算方法计算的安全系数达 1.7 左右;人工切坡以 后坡度变陡,边坡整体稳定性下降,安全系数下降了约 0.6;在 MI 度烈度地震作用下挖方边坡处于临 界状态,存在失稳风险。因此,在该类场地上的建设工程项目中必须重视挖方边坡的抗震设防问 题。

关键词:削山造地;挖方边坡;工程地质问题;稳定性 中图分类号:TU444 文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2016)05-0787-08 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0787

# Engineering Geological Problems of Loess High Excavation Slope in Loess Hilly and Gully Region of Lanzhou and Its Stability Analysis

PU Xiao-wu<sup>1,2</sup>, WANG Lan-min<sup>1,2</sup>, WU Zhi-jian<sup>1,2</sup>, LIU Kun<sup>1,2</sup>,

ZHAO Wen-chen<sup>1,2</sup>, MA Lin-wei<sup>1,2</sup>, REN Dong<sup>1</sup>

(1.Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Key laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Due to the recent rapid urbanization process, a large number of high and steep loess slopes have been excavated in the hilly-gully region of Lanzhou. Through field investigations, we found that most of the excavated high and steep loess slopes have many engineering geological problems of different degrees, such as unloading crannies, slope gullies, sinkholes, and local landslide collapses. Using finite element method, we simulated the excavation process, and the results show that the displacement and stress and strain fields of the excavation slope exhibit significant changes after excavation. These include stress release and local concentration, an unloading effect, the weathering and flushing action of water, and internal and external factors and their interaction, which lead to various engineering geological problems with respect to the exca-

① 收稿日期:2015-05-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51478444,41472297);中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项项目(2013IELSZ05) 作者简介:蒲小武(1976-),男,甘肃武都人,高级工程师,现主要从事岩土地震工程与地震预测理论研究。 E-mail:wdpuxw@163.com。

通信作者:王兰民(1960-),男,陕西蒲城人,博士,研究员,博士研究生导师,研究方向为土动力学与岩土地震工程。 E-mail:wanglm@gssb.gov.cn。

vation slope. These problems will result in reduced slope stability to different degrees. In a hillygully loess region, the slope body is stable in its natural state, with a safety factor of above 1.7 by different calculation methods. The slope gradient increases after the slope is cut, resulting in a decrease in the slope stability, and a 0.6 reduction in the safety factor. The excavation slope is close to the critical stable state, and is an instability risk for earthquake intensity values of  $\mathbb{W}$  or higher.

Key words: moving mountain and reclaiming land; excavation slope; engineering geological problems; stability

# 0 引言

黄土是一种特殊土类,有特殊的微结构,具有水 敏性和地震易损性等物理力学性质<sup>[1-2]</sup>。当黄土遭 遇中强地震作用或遇水浸湿时,其微结构遭到破坏, 强度丧失,从而产生严重的地质灾害<sup>[3-8]</sup>。黄土高原 是我国黄土主体分布区,地形地貌复杂,新构造活动 强烈,强震频发,中强以上地震就会诱发大量的黄土 滑坡灾害<sup>[9-12]</sup>。随着城镇化进程的加速推进,各地 利用切坡造地、削山造地的方式获取新的土地资源, 极易造成城镇毗邻于黄土高边坡之侧而面临潜在的 滑坡灾害风险。

据《兰州市土地规划(2011—2015年)》,兰州市 区黄河以北的青白石—九州—忠和片区已经被规划 为建设用地的重点区域。2012年启动的"兰州新 城"建设项目中预计要推平700多座荒山,开发整理 青白石低丘缓坡等未利用土地,为城市发展提供新 的建设用地。随着该项目的实施,必将会产生大量 的高陡黄土边坡。

由于城镇地带人口密集,人类工程活动强烈, 人与地质环境相互作用机制复杂,稍有不慎便有可 能引起地质环境破坏,甚至引发重大地质灾害,导 致群死群伤和巨大财产损失等灾害事件的发生。 2009 年 5 月 16 日晚 21 点兰州市九州台山体发生 滑坡,滑坡体推倒1 栋 6 层楼的 2 个单元,导致 7 死 1 伤的严重伤亡事故。这一伤亡代价还是在有关人 员发现山体异动后及时做出预警的结果。如果遭遇 尚不能准确预知的突发性强震作用,就会诱发规模 更大的突发性地震滑坡,造成难以估量的人员伤亡 和财产损失。

本文拟通过对兰州黄河北丘陵沟壑区削山造地 边坡工程地质问题的现场调查及相关数值模拟计 算,分析该场地上的边坡稳定性,以期对未来的工程 建设场地规划利用有所裨益,最大限度地规避地质 灾害事件发生的可能性。

# 削山造地区的地质环境与面临的工程地 质问题

#### 1.1 地质环境状况

兰州地处青藏高原与陇西黄土高原交接带附近,处于马衔山—雾宿山 NWW 向构造带与大黄山—积石山 NNW 向构造带交汇复合部位。根据甘肃省地震区带划分,该区处于青藏高原东北缘天水—兰州—河西走廊地震带。1125 年曾经在马衔山断裂带发生了7级地震,产生了大规模的滑坡和大量地裂缝。1995 年永登 5.8 级地震是有仪器记录以来发生的对兰州市影响较大的破坏性地震,出现了许多滑坡及震陷灾害。

本文研究的削山造地区位于兰州市黄河北青白 石镇白道坪村,处在黄河四、五级高阶地之上,地 势相对较高,海拔高程1600~1850m,比高50~ 150m。区内沟壑纵横,阶地形态已基本不存在,主 要为黄土梁峁状低山丘陵地貌。区内地层相对简 单,从新到老分别为:晚更新世马兰黄土,中更新世 离石黄土,早更新午城石黄土;黄土覆盖层之下为第 三纪红层,多为石英砂岩。该区域属半干旱温带气 候,年均气温9.4℃,降雨量仅260~360mm,而蒸 发量达1500mm,极度干旱。该区未挖方前的自然 斜坡,坡面有较好的植被覆盖,形状浑圆,无明显工 程地质问题[图1(a)]。

#### 1.2 挖方边坡出现的工程地质问题

"兰州新城"建设项目工作区内土质极其疏松, 孔隙比很大,具有粒状架空大孔隙结构,强度很低, 普遍具有严重的湿陷性、高压缩性和动力易损性。 为了减缓雨季坡面雨水冲刷,挖方边坡以多级矮坡 形式为主,并且在坡面防护了塑料网(质量较差且多 已风化)。现场测量发现,次级矮坡一般坡高5m, 坡顶面2~3m,坡角在45°~78°间变化,一般下部 几级矮坡较陡,坡角在40°~50°,中间几级很陡,六 七十度不等,最上的几级矮坡较缓[图1(b)]。项目 作业区内已经产生了许多高达数十米甚至上百米的 挖方边坡,时至 2014 年底,该类边坡已经出现了许 多工程地质问题。

(1) 卸荷作用引起的地质问题

通过现场调查,发现在挖方边坡第一、二级矮坡 坡脚1~2 m的范围内出现了大量卸荷裂隙,裂隙 倾角小于坡面倾角,张开度自坡面由外向内逐渐变 小,深度从十几厘米至几十厘米不等。对于暴露在 空气中的开挖坡面,风化作用增强,再加上雨水冲刷 剥蚀,土体浸水增重及强度降低,因此被卸荷裂隙切 割的土体出现大块掉落现象[图 1(d)]。



图1 挖方边坡工程地质问题



(2) 坡面冲沟及落水洞

兰州属温带半干旱气候,降雨多集中于 7—9月份。在降雨季节,当遇到暴雨天气时,由于非饱和黄土的渗透性较低,短时间的强降雨使得来不及渗透的雨水形成较大的坡面流,这样长期的反复冲刷作用便会在坡面形成大小不一、规模不等的坡面冲沟。现场发现,许多次级矮坡的坡面已经形成了密集的贯通坡顶至坡底的冲沟,深度 10~30 cm、宽度 10~20 cm 不等[图 1(e)]。顺坡而下的水流流至下一阶矮坡坡面处时,水势减缓并汇聚在坡顶面逐渐向下渗透,又形成大小不一的落水洞,个别矮坡坡顶面甚至形成了直径达 30~40 cm、深度超过 1 m 的落水洞[图 1(f)]。

(3) 局部滑塌

在青白石平填场地,个别挖方边坡的次级矮坡 已经出现小规模的局部滑塌现象。有一处滑塌发生 于某一边坡左侧边缘,由第二阶矮坡后缘开始至第 一阶矮坡坡面上部剪出,滑体仅限于第二级及第一 级矮坡上部,呈楔形体状,方量约5~6 m<sup>2</sup>,规模较 小,失稳滑体堆积于坡脚处[图 1(c)]。

兰州青白石挖方边坡出现的工程地质问题,表 面上看似乎主要与风化作用、雨水冲刷剥蚀等外部 因素有很大关联,但实质上对于黄土这类低强度的 土,挖方后卸荷减载使得应力的释放及重分布才是 问题的关键。要弄清楚挖方后边坡土体受到卸荷作 用的程度,就需要研究挖方后边坡位移场、应力及应 变场的量值变化特征。基于此,本文利用有限元方 法对挖方过程及边坡静动力稳定性进行了数值模拟 研究。

# 2 黄土边坡开挖过程及稳定性数值模拟分析

### 2.1 有限元方法

#### 2.1.1 有限元强度折减法

目前边坡稳定性分析最普遍、最常用、也最成熟的方法是有限元强度折减法。所谓强度折减法就是 用一个折减法系数 F 将土体的抗剪强度指标 C 和 φ 不断折减,如式(1)和(2)所示,然后用折减后抗剪 强度指标 C<sub>t</sub> 和 φ<sub>t</sub> 取代原来的抗剪强度指标 C 和 φ,这样不断增加 F 值,C 值和 φ 值则不断减小,直 到某一抗剪强度下整个土坡发生失稳。那么在发生 整体失稳前的那个折减系数值就是这个土坡的安全 系数。

$$C_{\rm f} = C/F \tag{1}$$

$$\varphi_{\rm f} = \tan^{-1} \left[ (\tan \varphi) / F \right] \tag{2}$$

$$\tau_{\rm f} = C_{\rm f} + \sigma \tan \varphi_{\rm f} \tag{3}$$

式中: $C_{f}$ 是折减后土体的黏聚力;C为土体实际黏 聚力;F为折减系数; $\varphi_{f}$ 是折减后土体内摩擦角; $\varphi$ 为土体内摩擦角; $\tau_{f}$ 是折减后的抗剪强度; $\sigma$ 为作用 在滑动面上的正应力。

2.1.2 扩展 Mohr-Coulomb 屈服准则

岩土工程领域应用最广泛的强度准则为 Mohr-Coulomb 准则,对于黄土也具适用性,但其最主要 的缺点是屈服面在应力空间中存在不连续点。基于 此,采用扩展的 Mohr-Coulomb 准则以解决上述问题。

(1) 屈服面

扩展 Mohr-Coulomb 模型屈服面函数为:

$$F = \left[\frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi}\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3}\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)\tan\varphi\right]q - p\tan\varphi - C = 0$$
(4)

$$\cos(3\alpha) = \left(\frac{J_3}{q}\right)^3 \tag{5}$$

其中:*φ* 是材料内摩擦角;*C* 是材料黏聚力;*α* 是极 偏角;*p* 为平均主应力;*q* 为广义剪应力(等效剪应 力);*J* 是第三偏应力不变量。

(2) 塑性势面

采用如下的椭圆函数作为塑性势面:

 $G = \sqrt{(\beta C_0 \tan \omega)^2 + (U_{mw}q)^2} - p \tan \omega$  (6) 式中: $\beta$  是塑性势面在子午面上的偏心率,控制塑性 势面在子午面上的形状与函数渐近线之间的相似 度; $C_0$  是初始黏聚力; $\omega$  是剪胀角; $U_{mw}$ 则控制了塑 性势面在  $\pi$  平面上的形状,其式为:

 $U_{\rm mw} =$ 

$$\frac{\left[4(1-\lambda^{2})\cos^{2}\alpha+\mathcal{C}\lambda-1\right)^{2}\right]\times\left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)}{\sqrt{3}\cos\varphi}+\frac{1}{3}\cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)\tan\varphi\right]}{2(1-\lambda^{2})\cos\alpha+(2\lambda-1)\sqrt{4(1-\lambda^{2})\cos^{2}\alpha+5\lambda^{2}-4\lambda}}$$
(7)

λ 是 π 平面上的偏心率,主要控制极偏角在  $0 \sim \frac{\pi}{3}$ 的 塑性势面的形状,由下式计算:

$$\lambda = \frac{3 - \sin\varphi}{3 + \sin\varphi} \tag{8}$$

有限元计算中,非关联流动法则能在一定程度 上减少剪胀现象的发生,因此在本文计算中选用非 关联流动准则。

# 2.2 数值模型

选取兰州青白石白道坪削山造地区某一匀质马 兰黄土边坡作为数值分析、研究对象。边坡比高为 50 m,挖方前坡度 30°,挖方后总体坡度 45°;次级矮 坡的坡度自坡底向上在 45°~75°间变化,坡高 5 m, 中间设 2 m 平台(图 2)。



图 2 边坡模型简图(单位:m) Fig.2 Slope model diagram (Unit:m)

有限元模型均采用四边形四节点平面应变单 元划分,节点总个数为15165,单元总个数为14 880。模型中所有单元均采用扩展 Mohr-Column 屈 服准则。模型参数根据现场采集土样的室内试验结 果选取,土样取自挖方边坡坡脚以上1m处,参数 通过三轴仪测定,所测参数如表1所列。

表 1 土体的基本参数

	Table 1	The basic so	n parameter	8
含水	天然密度/	干密度/	内摩擦	黏聚
量/%	$(kg \cdot m^{-3})$	$(kg \cdot m^{-3})$	角/(°)	力/kPa
5.8	1.35	1.27	34.3	25.2

# 2.3 边坡开挖前后位移场、应力场及应变场的变化 (1) 位移场

挖方前边坡总位移变化在坡脚处最大,仅为 1.222×10<sup>-7</sup>m;挖方后,坡脚区域及1~5级次级矮 坡(自下而上)出现了明显的以垂直向为主的位移变 化,上部荷重挖除得越多,向上的位移变化量越大 (图 3)。图 4是1~9级次级矮坡计算稳定后坡肩 及坡脚位移、应力应变对比曲线图,是空间尺度上的 变化。从图中可以看到,1~4级矮坡坡肩、坡脚位 移有较大差异,这种差异性自下而上逐渐减小,自第 5级矮坡,坡脚、坡肩位移基本一致且逐渐减小,至 第9级矮坡,位移变化量接近于零。

(2) Mises 应力的变化



(d) Mises应力(挖方后)

图 3 挖方前后位移、应力及应变云图

Fig.3 The displacement, stress and strain nephogram of the slope before and after the excavation

$$\sigma_{s} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2} \right]}$$
(9)

式中: σ1、σ2、σ3 为三个主应力。

挖方以后 1~8级次级矮坡坡脚都出现 Mises 应力增强、集中现象,其中第一、二级矮坡坡脚、坡 面、坡肩的 Mises 应力都比较大,应力集中的现象更





为明显(图 3)。

(3) 应变场的变化

挖方后,边坡坡脚及其相邻区域内出现较大的 应变变化[图 3(c)]。空间尺度上看,变化主要发生 在 5 级矮坡以下区域,1、2 级矮坡坡脚应变最大,达 到 0.006,自第 1 级矮坡向上,主应变逐渐变小,直到 8、9 级减小为零。

(4) 挖方后出现的工程地质问题的原因探讨

首先在挖方过程中,土体受到扰动,扰动带内土 体强度会有所降低;其次,挖方后由于卸荷减载应力 释放,土体会出现卸荷回弹作用,位移、应变都出现 较大变化,坡脚区域应力出现集中现象,对于黄土这 种具有特殊微结构的低强度土,卸荷作用使得土体 微结构有不同程度的损伤,土体强度会进一步降低; 再者,挖方后原有的植被覆盖被彻底破坏,新鲜黄土 坡面直接暴露于空气中,使得风化作用增强,当遇有 降雨天气时,坡面下一定深度范围内土体含水量增 大,土体的抗剪强度便会大大降低,日积月累受到雨 滴的溅蚀及坡面水流的冲刷剥蚀便会形成大量的坡 面冲沟。

次级矮坡的顶面由于应力释放会出现一些张性 裂隙,坡面水流的冲击便会形成许多落水洞。在坡 顶面局部水流汇集区,由于土体含水量的增加,局部 失稳风险加大,因此某些不利地段的次级矮坡就会 出现局部滑塌现象。

挖方后的边坡,由于坡度变陡,一、二级矮坡坡 脚出现了较大的应变、位移变化,产生应力集中现 象,从而产生一些张性卸荷裂隙,尤其以第一阶矮坡 出现的最多。浸水增重,土体强度降低,再加之风化 剥蚀、雨水冲刷便会使得部分被裂隙分割的土体产 生局部掉块现象。

挖方后边坡出现的这些工程地质问题,如发生 在边坡上部区域,属于卸荷减载作用,则会使边坡稳 定性增加,如发生在下部区域,则会使边坡整体稳定 性下降。现场调查发现的这些问题大多发生在边坡 下部区域,这或多或少会使得边坡稳定性有所降低。 这些削弱边坡稳定性的诸多工程地质问题,虽然影 响轻微,但在边坡总体坡度变陡的情况下其静、动力 稳定性如何还需进一步分析研究。

#### 2.4 开挖前后边坡稳定性分析

边坡开挖前,坡角约 30°,坡顶、坡面及坡脚无 裂隙存在,整个坡形呈浑圆状,坡体有较好的植被覆 盖,不同方法计算的安全系数在 1.7~1.8 间(表 2)。 有限元方法计算的安全系数相对极限平衡法偏小, 潜在最不利滑动面位于坡体深部(图 5),边坡的稳 定性较好。



(c)挖方后(动力)



挖方后,边坡的坡角总体为45°,比挖方前陡峭了 15°,不同方法计算的安全系数降低了约0.6左右,在 1.2以内。有限元方法计算的潜在最不利滑动面上 移,位于边坡坡面浅部区域,剪出口位于第二级矮坡 的坡脚处[图5(b)]。黄土是一种低强度的特殊土,通 常认为安全系数低于 1.2 便处于临界稳定状态[8]。

在 III 度地震动的作用下,极限平衡法计算的挖 方边坡安全系数接近于 1(表 2)。用有限元方法计 算安全系数时,采用了岷县漳县 6.6 级地震岷县台 记录的主震加速度时程(震中距 18 km,近场波),峰 值加速度为 220 gal,卓越频率在 4.5~5.5 Hz 间 (图 6)。计算得出的安全系数仅为 1.02,边坡处于 临界稳定状态,潜在最不利滑动面较静力下的要深, 塑性区的范围也更大[图 5(c)],因此边坡失稳滑动 时的危害性会更大。

#### 表 2 稳定安全系数计算结果

#### Table 2 The calculation results of stability safety factors

	有限元强 度折减法	Bishop 法	Janbu 法	瑞典条 分法
挖方前(静力)	1.70	1.79	1.81	1.71
挖方后(静力)	1.12	1.18	1.20	1.14
挖方后(Ⅲ度地震)	1.02	1.06	1.06	1.04



图 6 地震荷载及频谱特征



# 3 讨论与结论

(1)兰州黄土丘陵沟壑区的自然边坡在天然状态下坡体稳定;人工切坡以后,由于土体扰动、卸荷作用、风化作用、降雨渗透及坡面水流冲刷等因素,都使得土体强度降低,边坡出现卸荷破坏、坡面冲沟、落水洞、局部滑塌等工程地质问题。

(2)挖方后的边坡,坡度变陡,整体稳定性下降,处于临界稳定状态。由于边坡四季温度、干湿循环变化,土体性状随之发生变化,边坡稳定性也会发生周期性的变化。雨季时土体湿度增大、强度降低,会使得边坡局部区域处于不稳定状态。

(3)作为 Ш度设防区, 兰州及其周边是地震活动性很强的区域, 历史上曾发生过多次中强以上地震。挖方边坡在 Ш度地震作用下, 安全系数在 1 左右, 处于临界稳定状态, 存在失稳风险。在平山造地地区修建住宅等工程建筑物, 如果不对挖方产生的高陡边坡进行抗震设防, 将会使得人民的生命财产面临巨大的风险。

#### 参考文献(References)

- [1] 王兰民,黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003.
   WANG Lan-min. Loess Dynamics [M]. Beijing: Seismological Press,2003.(in Chinese)
- [2] 汪国烈,明文山.湿陷性黄土的浸水、变形规律与工程对策—— 兼谈我国对湿陷性黄土认识的深化过程[C]//湿陷性黄土研 究与工程.北京:中国建筑工业出版社,2001.

WANG Guo-lie, MING Wen-shan.Water Immerging, Deformation and Engineering Techniques of Collapsible Loess and the Understanding Process of This Problem in China[C]//Engineering and Research on Collapsible Loess.Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese)

[3] 高国瑞.黄土显微结构分类与湿陷性[J].中国科学,1980(12): 1203-1212.

GUO Guo-rui. Microstructure Classification and Collapsibility of Loess Soils[J]. Science in China, 1980(12): 1203-1212. (in Chinese)

- [4] Rogers C D F, Dijkstra T A, Smalley I J. Hydroconsolidation and Subsidence of Loess: Studies from China, Russia, North America and Europe[J].Engineering Geology, 1994, 37(2): 83-113.
- [5] Feda J. Structural Stability of Subsident Loess Soils from Praha-Dejvice[J].Engineering Geology, 1966, 1(3): 201-219.
- [6] 杨运来.黄土湿陷机理的研究[J].中国科学:B辑,1988(7): 754-766.

YANG Yun-lai. Study of the Collapsible Mechanism of Loess Soils[J].Science in China: Series B, 1988(7): 754-766. (in Chinese)

- [7] 高国瑞.我国黄土湿陷性质的形成研究[J].南京建筑工程学院 学报,1994(2):1-8.
   GAO Guo-rui. The Formation of Collapsibility of Loess Soils in China[J].Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute,1994(2):1-8.(in Chinese)
- [8] 张振中.黄土地震灾害预测[M].北京:地震出版社,1999.
   ZHANG Zhen-zhong. Prediction of Loess Seismic Disasters
   [M].Beijing:Seismological Press,1999.(in Chinese)
- [9] 吴玮江,王念秦.甘肃滑坡灾害[M].兰州:兰州大学出版社, 2006.

WU Wei-jiang, WANG Nian-qin. Landslide Disaster of Gansu [M].Lanzhou:Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese)

- [10] 车爱兰,吴志坚,彭冬,等.黄土斜坡震害面波勘探调查及其动力稳定性分析——以甘肃岷县、漳县 M<sub>S</sub>6.6 地震为例[J].地震工程学报,2013,35(4):724-729.
  CHE Ai-lan, WU Zhi-jian, PENG Dong, et al. Surface Wave Investigation and Dynamic Stability Analysis for Earthquake-induced Loess Landslides[J]. China Earthquake Engineering Journal,2013,35(4):724-729.(in Chinese)
- [11] 王兰民,吴志坚.岷县漳县 6.6 级地震震害特征及其启示[J]. 地震工程学报,2013,35(3):401-412.
  WANG Lan-min, WU Zhi-jian. Earthquake Damage Characteristics of the Minxian – Zhangxian M<sub>8</sub>6.6 Earthquake and Its Lessons[J].China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3):401-412.(in Chinese)
- [12] 徐舜华,吴志坚,孙军杰,等.岷县漳县 6.6 级地震典型滑坡特 征及其诱发机制[J].地震工程学报,2013,35(3):471-476.
  XU Shun-hua,WU Zhi-jian,SUN Jun-jie, et al. Study on the Characteristics and Inducing Mechanism of Typical Earthquake Landslides of the Minxian – Zhangxian M<sub>8</sub>6.6 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35 (3):471-476.(in Chinese)