

DOI: 10.11779/CJGE201712016

基于环剪试验的汶川地震大型滑坡启动机理探索

崔圣华^{1, 2}, 裴向军¹, 王功辉², 黄润秋¹

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059, 2. 京都大学防灾研究所, 日本 京都 6110011)

摘要: 2008 年 5·12 汶川地震触发了大量滑坡灾害, 牛眠沟滑坡是发生于震中的同震大型滑坡。经过现场调查, 该滑坡启动后即与对岸山梁相撞并产生 20 m 爬高, 估算速度达 19.8 m/s, 表现出高速启动特征。取滑带材料进行室内环剪试验, 结果表明试样在不排水条件下具有很高的剪切液化能力, 且动剪应力下容易液化, 液化后材料视摩擦角仅为 9.4° , 从而得出地震滑带材料液化可能导致牛眠沟滑坡高速启动。通过能量方法, 估算了不排水动剪试验材料的液化能量和地震过程通过滑带的地震能量。结果表明, 滑带材料破坏所需峰值加速度为 192 gal, 液化所需能量为 2.3×10^4 J/m²; 汶川地震沿滑带方向提供最大地震加速度为 799 gal, 从而满足滑带液化的能量条件, 并推测滑坡可能在地震初期突然触发。

关键词: 牛眠沟滑坡; 汶川地震; 环剪试验; 高速滑坡; 滑坡启动

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)12-2268-10

作者简介: 崔圣华(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事地震大型滑坡形成机理方向的研究。E-mail: shenghuacui.geo@gmail.com。

Initiation of a large landslide triggered by Wenchuan earthquake based on ring shear tests

CUI Sheng-hua^{1, 2}, PEI Xiang-jun¹, WANG Gong-hui², HUANG Run-qiu¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China; 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji 6110011, Kyoto, Japan)

Abstract: A great number of landslides were triggered during the 2008 Wenchuan earthquake. Among them, the Niumiangou landslide is the large-scale landslide in the epicenter area. The site investigation shows that the landslide mass collides to the NE side of the valley immediately after initiation. The moving velocity estimated is 19.8 m/s, suggesting the characteristics of high initial velocity. The materials are taken from the source area and a series of ring-shear tests are conducted. The results show that the materials have a high liquefaction potential under undrained condition. They are easy to liquefy and the apparent friction angle is only 9.4° under undrained cyclic loading condition. The liquefaction of the materials in sliding zone during earthquake may cause the initiation with high velocity of Niumiangou landslide. Through an energy approach, the dissipated energy in cyclic loading tests and the possible energy dissipated to the soil layer in the slope by the earthquake are estimated. The peak acceleration for triggering sample failure is 192 gal, and the energy for sample liquefaction is 2.3×10^4 J/m². It is inferred that the possible seismic energy that can be dissipated to initiate the slope failure on the source area can be much greater than the value required for the initiation of liquefaction failure. The slope instability might have been occurring several seconds after the arrival of seismic motion.

Key words: Niumiangou landslide; Wenchuan earthquake; ring shear test; high-speed landslide; initiation of landslide

0 引言

2008 年四川汶川发生了里氏 8.0 级地震, 震源深度 19 km, 震中位于四川西北、距成都 80 km 的映秀镇^[1]。该地震发震断裂为北川—映秀断裂, 起于映秀, 呈南西—北东延伸至青川, 全长 270 km^[2-3]。地震造成了大量地质灾害, 其中仅滑坡灾害即达数万处^[4-5] (滑坡数量由于研究者统计方法、数据精度、规模尺

度等不同而有差异), 它们沿地表破裂带分布于 4400 km² 的椭圆区域^[6]。前人对于汶川地震滑坡类型和分布已有较多研究, 大型单体滑坡, 如安州区大光包滑

基金项目: 国家创新研究群体科学基金项目 (41521002); 国家自然科学基金项目 (41572302)

收稿日期: 2016-09-28

*通讯作者 (E-mail: peixj0119@tom.com)

坡 ($1.2\times10^9\text{ m}^3$)、清平文家沟滑坡 ($2.7\times10^7\text{ m}^3$)、青川东河口滑坡 ($1.5\times10^7\text{ m}^3$) 等也获得了大量关注^[7-9]; 尤其是这些滑坡的启动和运动机理。Dai 等^[10]提出汶川地震逆冲断层突然错动可能触使滑坡骤然启动, Yin 等^[11]认为气垫效应是大型滑坡远程运动原因, Wang 等^[12]通过实例研究提出沟道崩积层地震液化为滑坡物质高速远程运动提供了条件, Yang 等^[13]通过岩石高速摩擦试验认为滑带岩体高速摩擦熔融导致抗剪强度降低可能是滑坡的远程滑动机理, 胡明鉴等^[14]基于环剪试验提出剪切过程滑带高压和“速度弱化”可能是滑坡加速机理。

汶川地震较多实例表明, 一些大型滑坡具有高速启动特征, 黄润秋等^[15]提出强烈地震动是促使滑坡高速启动成因, Dai 等^[10]认为逆冲断层突然错动为滑坡启动提供了动力条件。对于地震过程滑坡滑带强度骤降机理还研究较少; 同时, 目前所研究大型滑坡, 如大光包滑坡、文家沟滑坡、东河口滑坡等, 多分布于断裂带中部和北部, 对于南部 (包括震中) 的大型滑坡研究较少。

牛眠沟滑坡以 $7.5\times10^6\text{ m}^3$ 的滑坡体积成为震中最大规模滑坡, 许强等^[16]提出该滑坡的形成与强地震动相关, 邢爱国等^[17]通过数值模拟再现了滑坡运动和堆积过程, Zhang 等^[18]认为气垫效应可能导致该滑坡高速远程。前人研究都基于现场调查提出机理模型, 本文通过系列室内实验和计算分析探讨滑坡启动机理。

1 牛眠沟滑坡概况

牛眠沟滑坡位于汶川断裂带南段 (图 1) 的汶川县映秀镇 (北纬 30.99° , 东经 103.36°), 属高山峡谷地形。该区年降雨量 1285 mm, 水系汇于主干道—岷江。区内岩性以花岗岩、砂岩及第四系崩坡积、残坡积、冲洪积层为主, 岩体较为破碎。

在汶川地震所触发的 112 个大型滑坡^[16] (单体滑坡面积 $>0.5\text{ km}^2$) 中, 牛眠沟滑坡是震中唯一的大型滑坡, 滑坡面积达 $4.07\times10^5\text{ m}^2$ ^[16], 最大长度为 2.8 km, 最大垂直高差为 0.85 m。滑坡物质失稳后, 沿两个坡度均小于 12° 沟谷 (莲花心沟和牛眠沟) 移动了约 2 km (图 2)。汶川地震断裂呈北东向从研究区通过, 区内多数滑坡发育于断裂上盘, 可以推测地震中上盘遭受了强烈地震动。牛眠沟滑坡滑源区位于断裂上盘, 其失稳方向与发震断裂走向小角度相交。

牛眠沟滑坡滑源区面积 $1.9\times10^5\text{ m}^2$, 平均坡度 30° , 高差 300~350 m, 宽度 300~400 m。滑源区为花岗岩地层, 风化卸荷强烈 (图 3)。滑源区滑体残留较少, 且残留物粒径 $<4\text{ mm}$ 占到 35%~50%, $>1\text{ m}$ 的大块石

含量不足 10%。牛眠沟滑坡滑源区位于莲花心沟沟头, 莲花心沟具有流水; 滑带位于坡表以下逾 10 m, 带内岩体经历构造碎裂和热液胶结, 方解石脉发育; 岩石块体内部和沿方解石脉的拉张裂隙发育^[18], 这些裂隙新鲜、间距小、数量多, 延伸长度不大, 可见地下水从张裂隙中渗出汇入莲花心沟。

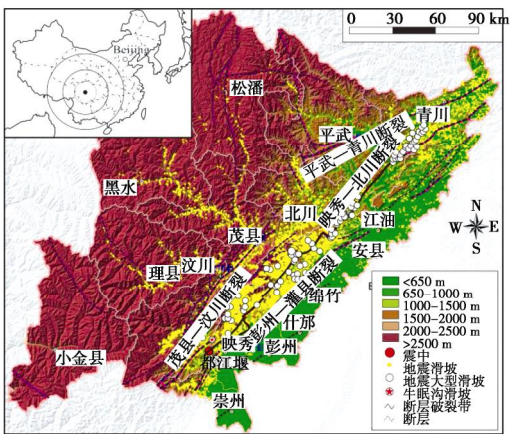


图 1 汶川地震大型滑坡分布及牛眠沟滑坡位置
Fig. 1 Large-scale landslides and Niumianguo landslide

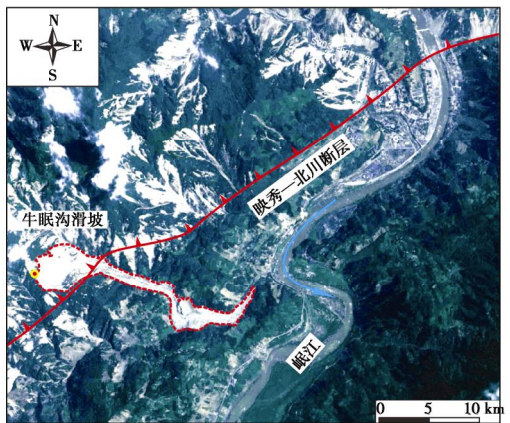


图 2 牛眠沟滑坡边界及与断层关系
Fig. 2 Boundary of Niumianguo landslide and causation fault



图 3 牛眠沟滑坡滑源区
Fig. 3 Source area of Niumianguo landslide

2 滑坡启动速度特征

图 4 为牛眠沟滑坡平面图, 为详细描述滑坡过程,

将滑坡路径分成6段，分别为A—B，B—C，C—D，D—E，E—F和F—G。通过现场调查将滑坡过程概述如下：

滑坡启动后，滑体以N80°E方向冲向莲花心沟（A—B段）；并与沟东北岸强烈撞击（B点），且超覆约20 m；余势不减的滑体物质向南偏转18°后（S72°E）进入莲花心沟（B—C部分，在沟岸两侧可见泥位及铲刮痕迹）。滑坡物质于C点再次与沟北岸碰撞，并超高13 m；部分物质翻过20 m山脊进入牛眠沟，大部分物质转弯从沟口跌落高达140 m陡崖，冲击到牛眠沟沟床沉积层（D点）。之后，滑坡物质从D点运动到F点，并最终停止于G点。由于此间沟道方向改变，物质于沟岸发生3次超高，高度分别为70，24，26 m。牛眠沟滑坡物质基本呈流态化。

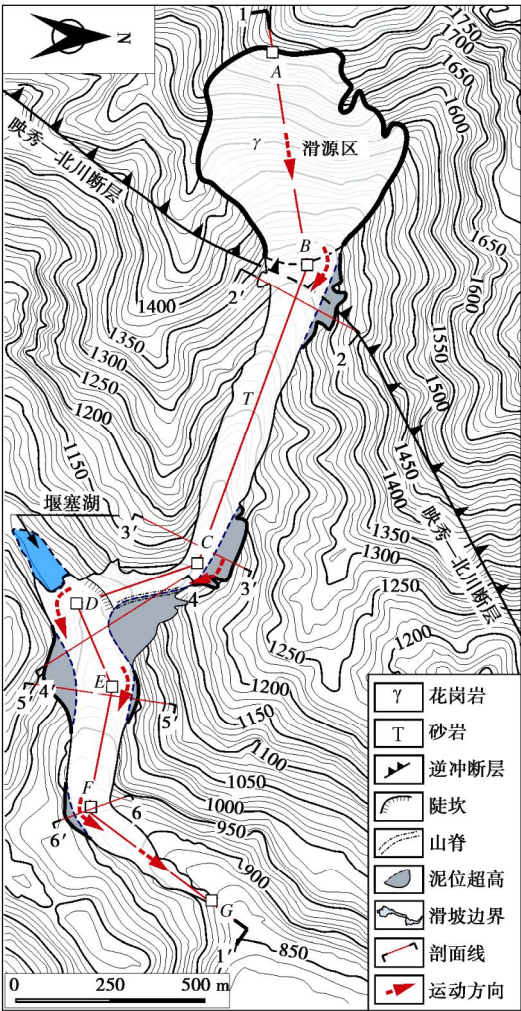


图4 牛眠沟滑坡平面图

Fig. 4 Plan of Niumiangou landslide

滑坡启动后在B点与沟岸强烈撞击，发生超高和转弯，表明此时滑坡具有较高速度，但从地形上滑坡剪出口与莲花心沟左岸仅有50 m空间距离，不具备滑坡运动加速条件。为进一步对启动速度进行估算，

采用Chow^[19]提出的流态物质沟谷运动速度估算公式：

$$u = \sqrt{Rg(d/w)} \quad (1)$$

式中，R为沟道曲率半径（m），d为弯道超高（m），w为沟道宽度（m），g为重力加速度（N/kg）。计算得B点速度为19.8 m/s。分别计算各弯道运动速度，结果表明最大速度出现在莲花心沟与牛眠沟交汇处（D点，达36 m/s），可能是由于较大落差带来的重力势能向动能转化；最小速度出现在尾部弯道处（F点）。C点和E点速度分别为20，22 m/s。可以看出，B点运动速度与其余各点相差不大，表明滑坡启动时已获得较高运动速度。

3 环剪试验研究

3.1 试验方法

本文采用京都大学防灾研究所（DPRI）研制的环剪仪（ring shear apparatus）。该仪器由Sassa设计^[20]，并由Sassa^[21-22]进行了改进和推广，现已发展为DPRI-4，DPRI-5，DPRI-6，DPRI-7代功能其全的试验系统。该装置可模拟地质体内部土质单元破坏过程和其远距离运动过程中剪切行为，最重要的设计是它的不排水剪切盒（图5），剪切盒由上下半盒组成，内部环形空间为试样室。通过下半盒内、外环镶嵌的高耐磨性、低摩擦橡皮材料，保证在正向压力下封闭试样室，达到不排水剪切目的^[23]。通过上部加载台给试样施加正向应力，在下剪切盒驱动下，剪切盒沿橡皮垫转动，从而剪切试样。通过下部排水阀门控制排水或不排水剪切条件，试验可测试剪切面孔压、剪切位移、剪应力和正应力。本文使用DPRI-5环剪仪，其剪切盒内径为120 mm，外径为180 mm，高度为115 mm。

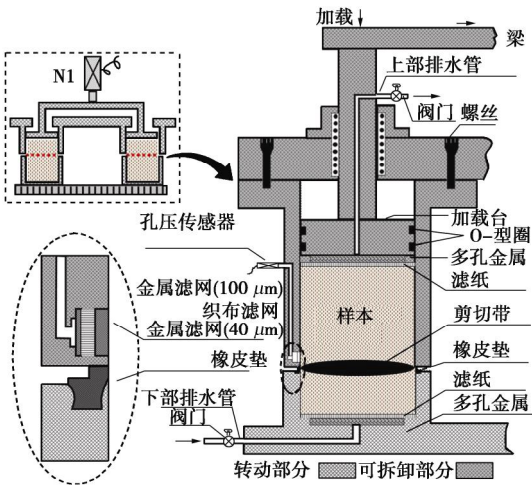


图5 DPRI环剪仪设计图^[23]

Fig.5 Design of DPRI ring shear apparatus

试样取自牛眠沟滑坡滑源区滑带, 为风化花岗岩碎屑材料, 主要成分为石英、云母和长石。首先将试样用木锤充分击碎后在 100℃烘箱内烘干; 由于环剪仪尺寸限制, 其试验盒环状空间为 30 mm, 以在 DPRI-5 环剪试验中尺寸大小成为不可回避问题。在操作中, 部分研究人员选择剔除粒径>4.75 mm 颗粒^[12], 另外也有选择剔除粒径>2 mm 颗粒^[24-25]。本文为尽量保证试样原有级配成分而选择了前者。筛除部分占试样总质量的 25.4%, Kuenza 等^[26]认为, 砾石含量<40% 时, 材料剪切特性主要受基质材料控制, 并类比相关试验成果^[12, 24-25], 认为移除砾石对本文试验基本无影响。图 6 为所得试样颗分结果, 试样物理性质: 比重 $G_s=2.70$, 最小干密度 $r_{dmin}=1.56\text{ g/cm}^3$, 最大干密度 $r_{dmax}=2.13\text{ g/cm}^3$, 黏粒含量 $C_n=21.2\%$, 累积质量分数占 50% 的最大粒径 $D_{50}=0.18\text{ mm}$, 不均匀系数 $U_c=1.15$ 。

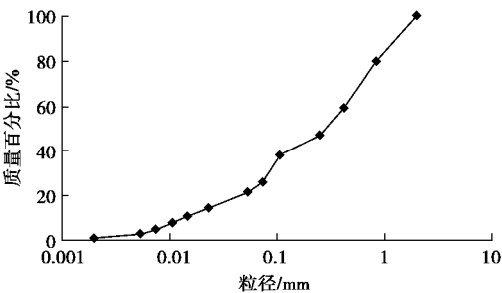


图 6 试样颗分曲线

Fig. 6 Grain-size distribution of samples

通过干沉降方法^[27]将试样放入剪切盒中。为使制样均匀, 采用漏斗放样; 首先将试样装入漏斗, 而后手持漏斗绕剪切盒缓缓移动使试样均匀漏下。制样完成后, 以 2 cm/s 速度转动剪切盒, 测试剪切盒间橡皮垫摩擦力 (图 7)。从下部阀门通 CO₂ 和水、饱和试样。通过 B_D 检测试样饱和度^[28]。首先打开上部排水阀门, 施加正应力, 等孔压降为 0 后将阀门关闭, 然后在不排水条件下增加正应力, 同时测量孔隙水压力增量。通过下式计算 B_D :

$$B_D=\Delta u/\Delta s\quad ,\quad (2)$$

式中, Δu 是孔压增量, Δs 是总正应力增量, 当 B_D

大于 0.95 时满足试验饱和要求。而后施加固结应力 (s_i) 使试样固结, 若试样竖向位移不再变化则表明固结完成。

固结后保持 s_i 不变, 关闭阀门后对试样施加静力剪切应力, 或动剪应力, 当剪应力超过试样抗剪强度时试样破坏, 剪切位移快速增加; 当剪切到剪应力基本恒定时 (表明试样达到残余抗剪强度), 试验停止, 用试验所测的峰值和残余剪应力减去环剪仪橡皮垫摩擦力即得到试样峰值抗剪强度 τ_f 和残余抗剪强度 τ_s 。为调查和分析试样材料剪切行为、液化能力、剪切强度等基本性质, 进行饱和试样的不排水静力剪切 (UDDS)、排水静力剪切 (DDS) 和干燥试样的静力剪切试验 (DS); 为研究试样材料在动剪切条件下孔压增长、液化能力、液化所需能量等特性进行饱和试样的不排水动力剪切试验 (UDCS)。试验参数和结果列于表 1。

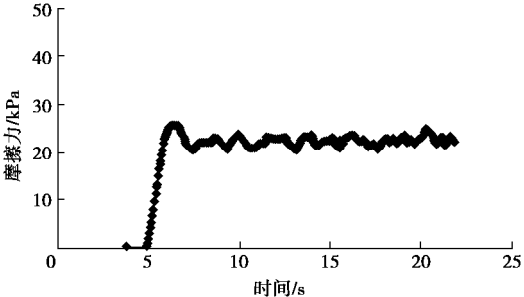


图 7 试验 S1 橡皮垫摩擦力

Fig. 7 Rubber frictions in test S1

3.2 试样剪切行为及液化特征

(1) 不排水静力剪切试验

进行不排水静力环剪试验, 试验包括不同密度试样剪切试验, 不同正应力剪切试验。对于前者, 分别选用干沉降法, 轻度击实和重度击实来获得 3 种密度试样 (S1, S2, S3), 密度分别为 1.86, 1.91, 1.96 g/cm³, 剪切过程中保持正应力 200 kPa 不变。对于后者, 选用干沉降法制样; 结合前人研究^[24], 分别采用 100, 200, 300 kPa 三种正应力 (S5, S1, S4); 对于剪应力, 可选择速度控制^[24]和应力控制^[29], 结合前人研究, 本文以 0.5 kPa/s 施加剪应力。

表 1 试验结果

Table 1 Results of undrained ring shear tests

| 编号 | 试验类型 | 干密度 $r_d/(g\cdot cm^{-3})$ | 孔隙比 e | 饱和 B_D | 正应力 S_i/kPa | 峰值强度 t_f/kPa | 残余强度 t_s/kPa | 孔压比 r |
|----|------|-------------------------------|------------|-------------|------------------|-------------------|-------------------|------------|
| S1 | UDDS | 1.86 | 0.45 | 0.99 | 198.0 | 64.3 | 21.8 | 0.91 |
| S2 | UDDS | 1.91 | 0.41 | 0.96 | 197.0 | 82.1 | 23.1 | 0.87 |
| S3 | UDDS | 1.96 | 0.38 | 0.95 | 198.0 | 140.7 | 34.3 | 0.76 |
| S4 | UDDS | 1.87 | 0.44 | 0.97 | 291.0 | 105.2 | 25.6 | 0.93 |
| S5 | UDDS | 1.84 | 0.46 | 0.98 | 99.7 | 57.2 | 22.6 | 0.96 |
| S6 | UDCS | 1.86 | 0.45 | 0.96 | 201.7 | 162.3 | 29.8 | 0.89 |
| S7 | DDS | 1.86 | 0.45 | 0.95 | 198.6 | 91.2 | 102.7 | — |
| S8 | DS | 1.73 | 0.56 | — | 191.4 | 142.3 | 141.7 | — |

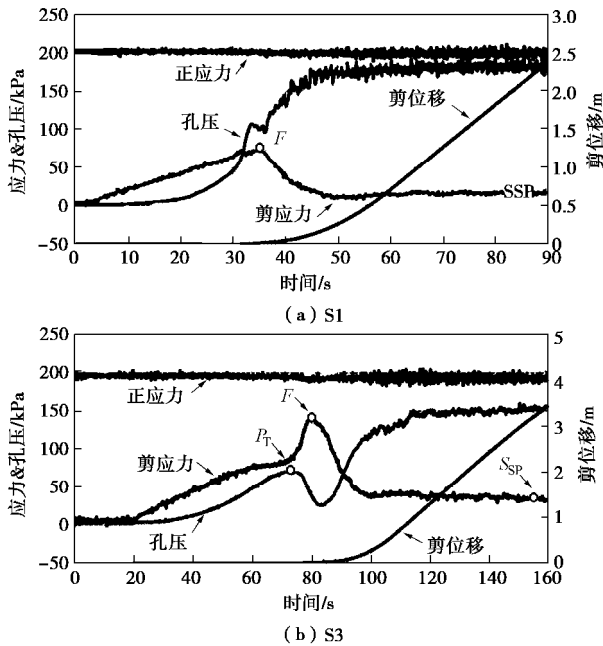


图8 典型不排水静力剪切试验数据

Fig. 8 Time series data of undrained shear tests

试样 S1 随着剪应力增加孔压逐渐增高,当到达剪应力峰值 τ_f (64.3 kPa) 后,剪切位移和孔压快速增加,剪应力快速降低。随着剪切位移进一步增加,剪应力逐渐稳定在一个较小值 (S_{SP} 点),表明试样达到残余抗剪强度 (21.8 kPa),试样液化。此时孔压基本稳定 (180.1 kPa),并将此状态称为稳态,稳态时孔压与正应力比值称为孔压比 r ,对于 S1 为 0.91 (图 8 (a))。

与 S1 类似,随着剪应力增加孔压逐渐增高,所不同的是在剪应力峰值前发生了剪切状态改变 (P_T 点),曲线表现为孔压快速下降,剪应力快速增加,表明试样发生了扩容。当到达剪应力峰值 F 点 (140.7 kPa) 后,孔压再次上升,剪应力快速降低。随着剪位移进一步增加,剪应力逐渐降低到一个较小值并基本保持不变,即达到残余抗剪强度 (34.3 kPa),试样液化,此时孔压基本稳定 (150.5 kPa),孔压比 0.76 (图 8 (b))。由表 1 可以看出,与 S1 相比 S2 和 S3 孔压比都偏小,可能是因为两者干密度较大,剪切过程中发生了明显扩容。

试验结束后,打开排水阀门待孔压消散,由剪切应力控制转换成剪切速度控制,并以 0.5 mm/s 剪切速率剪切试样,同时以 0.5 kPa/s 速率降低正应力。通过绘制该过程中剪应力与正应力关系曲线可获得残余抗剪强度线 (RFL) (图 9),由此可知试样残余内摩擦角,为 34.9° 。

图 10 (a) 为不同密度试样 (S1, S2, S3) 有效应力路径。试验开始后,随有效应力逐渐减小,剪应力逐渐增大,有效应力路径向左偏转;试样破坏后,

应力路径沿残余强度线向下发展,直至稳态点。S1 和 S2 应力路径形态基本相同, S3 出现较大差别。主要表现在 P_T 点后, S3 有效应力路径突然向右偏转,剪应力和正应力增加,达到峰值后 (F 点) 剪应力和正应力均降低,曲线再次向左发展,并沿 RFL 线逐渐达到稳态点,试样液化。

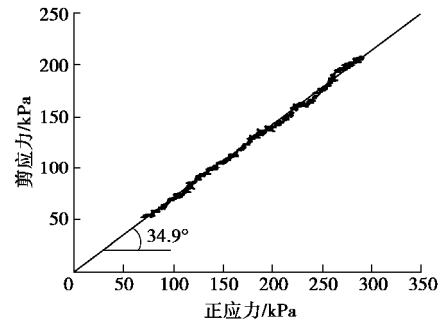
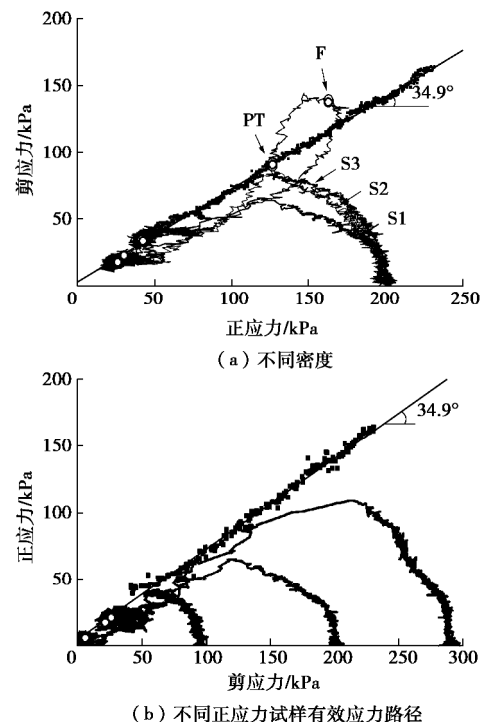


图9 残余强度线

Fig. 9 Residue failure line (RFL)

图 10 (b) 为不同正应力试样 (S5, S1, S4) 有效应力路径。3 条曲线形态基本相同,随着试验进行,剪应力逐渐增加,有效应力逐渐减小。试样破坏后剪应力降低,有效应力继续减小,有效应力路径沿 RFL 线逐渐向下发展,直至达到稳态点,试样液化。

不同试样密度、不同正应力条件下,试样剪切过程中都产生了较高孔压,且残余抗剪强度均降低到较小值,表明试样极易发生液化,且液化受试样密度、正应力影响较小。



(b) 不同正应力试样有效应力路径

图10 不排水静力剪切有效应力路径

Fig. 10 Effective stress paths of undrained shear tests

(2) 排水和干燥静力剪切试验

排水静力剪切试验 (S7) 与不排水静力剪切试样

过程基本相同, 区别是剪切过程中打开排水阀门, 超孔隙水(若产生)可排出。前者随着剪应力增加, 孔压增加, 当达到试样抗剪强度时(91.2 kPa)孔压增至最大值, 试样破坏, 剪应力降低; 而后孔压逐渐消散, 剪应力在不大降幅后开始增加; 随着孔压消散到 0, 剪应力逐渐增至稳定值(102.7 kPa)。结果表明排水条件下试样抗剪强度不会大幅降低(图 11(a))。

干试样剪切试验(S8)结果如图 11(b)所示。由时间与应力、孔压、位移曲线可以看出, 随着剪切位移增加, 剪应力不断增加, 当垂直位移达 1.3 mm 时, 试样破坏, 破坏时抗剪强度为 142.3 kPa, 剪位移快速增加, 剪应力略有降低并进入稳定状态, 残余强度为 141.7 kPa。结果表明没有水参与下滑带材料剪切强度不会大幅降低。

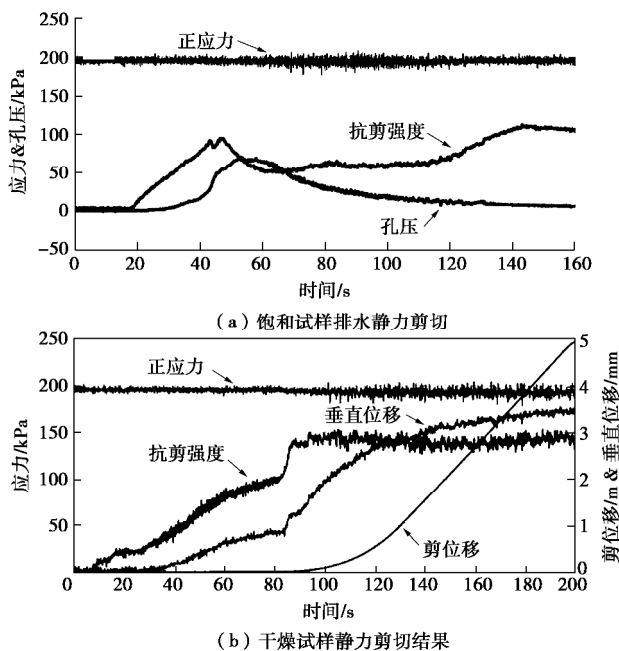


图 11 对比试验

Fig. 11 Drained and dry shear tests

(3) 不排水动剪试验

地震中, 滑坡剪切面以上土柱单元受到自重(mg)和地震力(ma_t)作用力(图 12); 对于牛眠沟滑坡, 滑面倾角 j_{si} 为 30° , 滑体厚度为 11.5 m, 饱和土体重度 g_{sat} 取 20 kN/m^3 , 由此计算得剪切面正应力 s_i 和初始剪应力 t_i 分别为 200 kPa 和 115 kPa。进行不排水动环剪试验(S6), 首先保持正应力不变, 在排水条件下以 0.5 kPa/s 速率施加初始剪应力; 而后切换至不排水状态, 并施加动荷载。考虑汶川地震由弱到强再弱, 及时较长(约 2 min, 主震时间约 1 min)的特征, 频率采用 0.5 Hz ^[12], 动荷载设置为 20 个正弦递增波和 20 个正弦递减波(即持时 80 s)(图 13(b))。

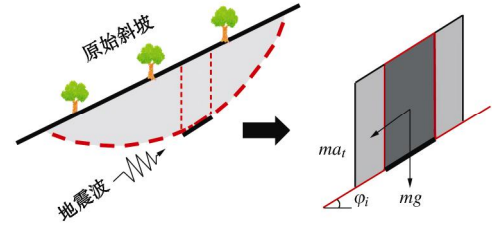


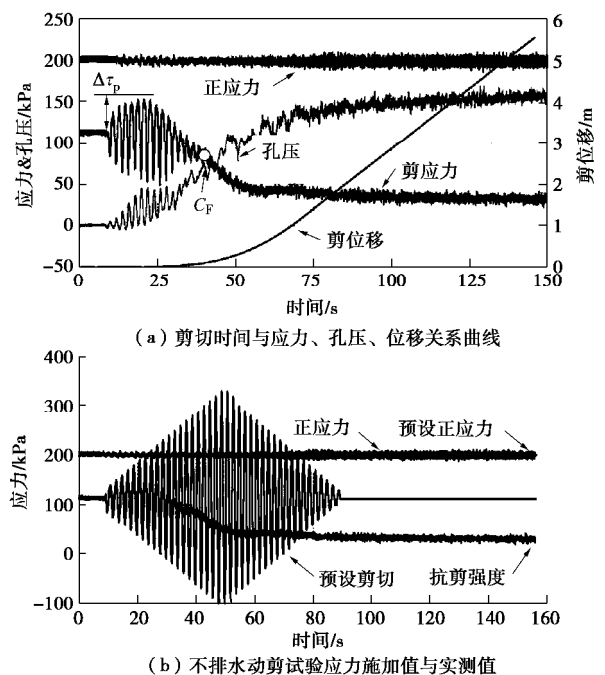
图 12 地震滑带土体单元受力分析

Fig. 12 Stress analysis of a soil element during earthquake

图 13(a)为时间与应力, 孔压, 位移关系曲线图。可以看出, 试验开始后孔压波动增加, 至第 5 个周期后剪应力达到最大值, 对应剪应力增量 $\Delta\tau$ 为 45 kPa; 随后动应力(幅值和上、下限应力)减小, 孔压和剪位移快速增加; 当剪应力降低到 C_F 点后, 由于抗剪强度较低, 动载幅值基本为零。随着剪位移的快速增加, 剪应力继续降低, 直至维持在一个较小值(29.8 kPa), 试样液化, 此时孔压比为 0.89。

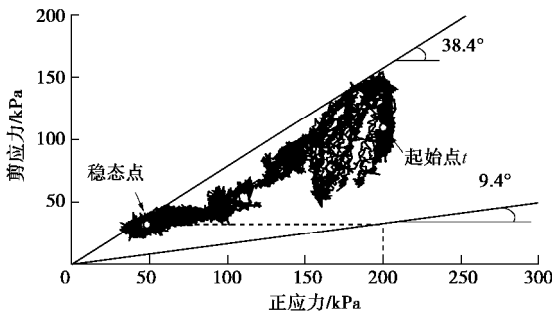
由图 13(b)可以看出, 加载初期由于孔压生成, 试样不能承载驱动剪应力, 导致抗剪强度逐渐小于预设剪应力值; 可以看出, 试样液化所需剪应力仅为预设剪应力值的很小部分。本文之所以设计较大动载信号, 是为保证试样能发生剪切破坏; 在此前提下不管动载信号幅值大小, 同一试样剪切破坏过程是相同的。

图 13(c)为有效应力路径。试验初始阶段, 有效正应力逐渐降低, 剪应力呈波动增加。经过较小剪应力增量(较短路径)后, 达到抗剪强度峰值, 峰值点对应的似摩擦角($\arctan[\tau_p/(s_i - u_e)]$), 其中 u_e 为超孔隙水压力)为 38.4° 。随后剪应力降低, 有效正应力继续下降, 应力路径基本呈斜直线向左发展, 直至稳态点, 对应似摩擦角($\arctan(\tau_e/s_i)$)仅为 9.4° 。试验结果表明, 试样在动载下易液化。



(a) 剪切时间与应力、孔压、位移关系曲线

(b) 不排水动剪试验应力施加值与实测值



(c) 不排水动剪试验有效应力路径
图 13 不排水动剪试验结果

Fig. 13 Results of undrained cyclic shear tests

3.3 试样液化成因及能量

(1) 液化成因分析

本文静力剪切试验表明，牛眠沟滑带材料液化基本不受试样密度、正应力影响；而且动载下试样极易液化。试验后取剪切带材料进行颗粒分析，结果表明剪切带颗粒明显变细，尤其是较大粒径范围（图 14）。牛眠沟滑带区岩体遭受了强烈构造、风化作用，致使剪切作用下更易碎裂。试验前试样紧密堆积，颗粒之间相互咬合；剪切过程中，颗粒之间产生相互作用力，当超过阈值时颗粒碎裂，粒径减小，试样体积产生压缩趋势，这一点由 S8 试样垂直位移的变化可以看出（图 11（b）），由此使得原本由颗粒骨架承担的荷载转而由水承担，致使孔压上升，有效应力减小。当试样发生宏观破坏时，剪位移快速增加，由图 11（b）垂直位移的快速增加可以看出，此阶段颗粒发生进一步破碎，有效应力急剧降低，从而发生剪切带的液化（图 15）。与三轴振动液化不同的是，环剪试验剪切液化属于剪切面附近的面液化^[23]，而前者属于试样内的体液化。

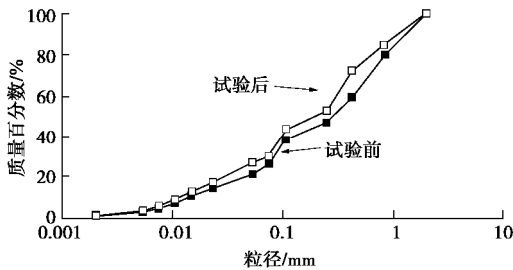


图 14 环剪试验前后剪切带颗粒分

Fig. 14 Grain-size distribution of samples before and after tests

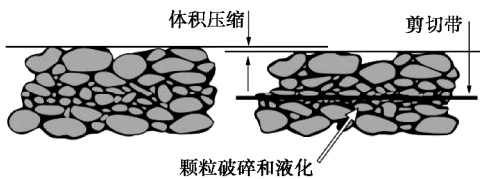


图 15 环剪试验剪切带颗粒破碎示意图

Fig. 15 Schematic illustration of occurrence of sliding-surface liquefaction

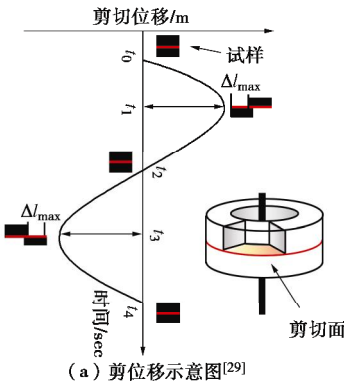
(2) 液化能量估算

试验中剪切盒在动剪应力 t 驱使下做周期剪切运动，并产生周期剪切位移 l （图 16（a））。Sassa 等^[29]提出了环剪实验中剪切面单位面积能量计算方法，一个振动周期耗能 W 计算公式如下：

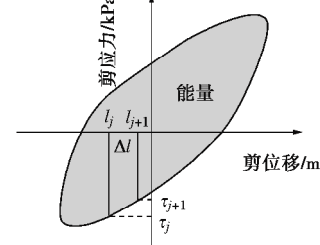
$$W = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{1}{2} (t_j + t_{j+1}) (l_{j+1} - l_j) \quad (3)$$

式中， t 为剪应力（kPa）， l 为剪位移（mm）， n 为数据采集点个数，所以一个周期内耗能为回滞环总面积（图 16（b））。试验中，总耗能 W_{total} 可由各周期耗能求和得出。

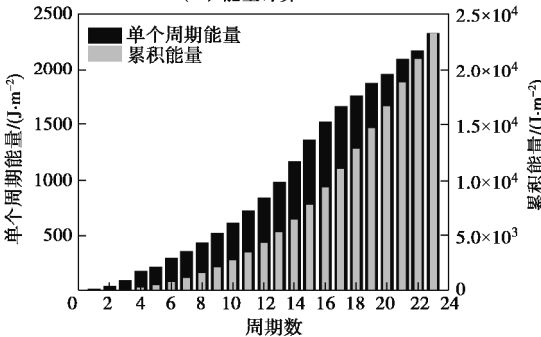
根据动剪试验结果（图 13（a）），对 C_F 点前数据进行计算，各周期能量和总能量如图 16（c）。结果表明，随着振动周期增加剪切耗能增加，单个周期最大耗能为 2105 J/m^2 ，总耗能为 $2.3 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ 。



(a) 剪位移示意图^[29]



(b) 能量计算



(c) 环剪试验能量分析结果

图 16 液化能量估算

Fig.16 Results of energy study based on ring shear tests

4 滑坡启动机理探讨

4.1 强地震动

不排水动剪试验表明, 动荷载过程中仅 45 kPa 增量就能触发滑带材料液化, 若将该应力理解为促使材料破坏的峰值剪应力, 由下式^[23]可简单估算该应力对应的加速度:

$$a_p = (\Delta t_p / m) = (\Delta t_p / t_i) \times g \sin q \quad (4)$$

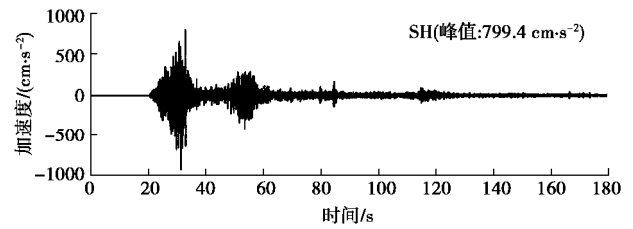
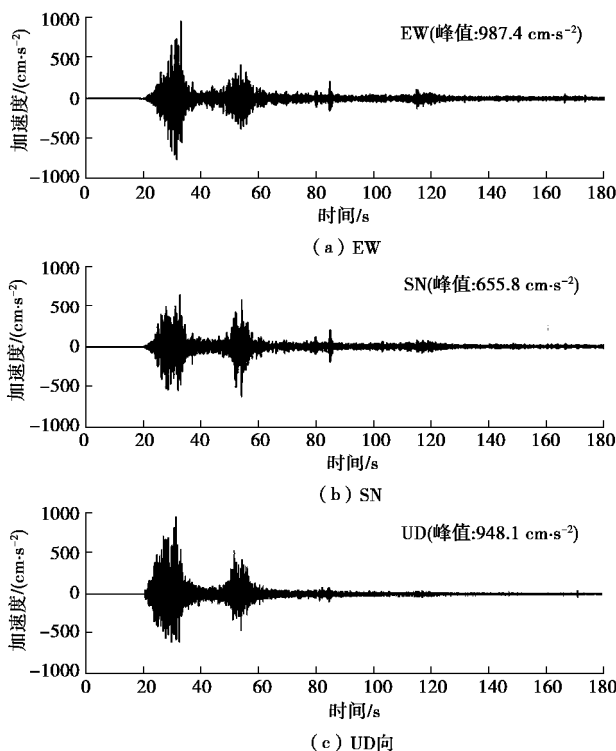
式中, m 为试样质量 (kg), q 为剪切面倾角 ($^\circ$), t_i 为初始剪应力 (kPa), Δt_p 为最大剪应力增量 (kPa), a_p 为最大剪应力对应的峰值加速度 (m/s^2)。对于牛眠沟滑坡, 滑面倾角 q 为 30° , 滑体厚度为 11.5 m, 饱和土体重度取 20 kN/m^3 , 由此计算得初始剪应力 t_i 为 115 kPa, 求得 a_p 为 192 gal (cm/s^2) ($1\text{g}=980 \text{ gal}$)。

基于 Wang 等^[25]提供方法, 对滑坡区进行地震加速度分析。由于缺少滑坡点地震记录, 本文采用卧龙台站 (距滑坡 18 km) 地震波。首先将地震加速度分解到 EW (图 17 (a)), NS (图 17 (b)) 和 UD (图 17c) 三方向, 再按下式得到平行滑面方向 (SH) 和垂直滑面方向 (HR) 地震加速度:

$$a_{\text{HR}(t)} = a_{\text{EW}(t)} \cos b + a_{\text{NS}(t)} \sin b \quad (5)$$

$$a_{\text{SH}(t)} = a_{\text{HR}(t)} \cos j_i + a_{\text{UD}(t)} \sin j_i \quad (6)$$

式中, $a_{\text{EW}(t)}$, $a_{\text{NS}(t)}$ 和 $a_{\text{UD}(t)}$ 分别是 EW, NS 和 UD 地震加速度, $a_{\text{HR}(t)}$ 和 $a_{\text{SH}(t)}$ 分别为平行和垂直滑面加速度。结果表明, 平行滑面方向最大峰值速度为 799.4 gal (图 17 (d)), 垂直滑面方向最大峰值加速度为 759.5 gal, 均形成于地震开始后 33 s。可以看出, 汶川地震波在平行滑面方向 (剪切方向) 分量的最大加速度远大于室内试验估算的液化临界值 (192 gal)。



(d) 沿潜在滑面方向地震加速度谱

图 17 汶川地震卧龙地震波加速度谱

Fig. 17 Seismic acceleration of Wenchuan earthquake

环剪试验获得了滑带材料液化能量, 为将该结果与汶川地震能量进行对比, 采用 Trifunac^[30]提出的方法估算汶川地震波通过牛眠沟滑坡滑面地震能量:

$$E_s = \left[\frac{rAa}{2\pi} \int_0^\infty \left(\frac{F(w)}{w} \right)^2 dw \right] \quad (7)$$

式中, $F(w)$ 为沿剪切面方向地震加速度傅立叶幅值谱 (cm/s) (图 18), A 为滑面面积 (m^2), a 为剪切波波速 (m/s), r 为材料密度 (kg/m^3)。为与式 (3) 对应, 计算滑面单位面积能量:

$$E_{us} (\text{J/m}^2) = \left[\frac{ra}{2\pi} \int_0^\infty \left(\frac{F(w)}{w} \right)^2 dw \right] \quad (8)$$

参考 Trifunac 等^[31]和 Trifunac 等^[30]取值, $r = 1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $a = 1 \times 10^3 \text{ m/s}$, 计算结果如图 19 所示。地震开始后, 前期能量增长缓慢, 20 s 地震能量陡然增加, 60 s 后逐渐接近终值。沿滑动面剪切方向通过的总地震能量约为 $3.5 \times 10^5 \text{ J/m}^2$, 仅地震后 28 s, 滑动面单位面积通过剪切波能量即达到本文试验所得液化临界值 $2.3 \times 10^4 \text{ J/m}^2$, 且此时伴随巨大功率释放 (图 19)。

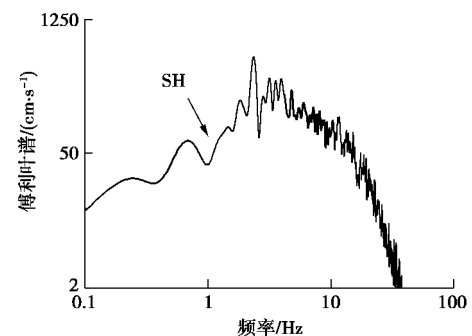


图 18 汶川地震卧龙地震波傅立叶谱

Fig. 18 Fourier amplitude

4.2 潜在滑面地震液化

本文试验表明, 牛眠沟滑坡滑带材料在动荷载下孔隙水压力快速产生, 极易液化。本文动剪试验是基于不排水条件进行的, 实际中滑面以上土层并非完全处于不排水环境, 所产生的高孔压会消散; Wang 等^[22]选用黏滞系数 15 倍于水的甲基纤维素溶液 (Metolose fluid) 饱和试样, 并进行半排水环剪试验 (将排水阀门半开), 分析动荷载下高孔压维持机理。实验结果表

明,滑面上一定厚度的饱和土层可以抑制孔隙水排出,若该厚度 $>1.25\text{ m}$,则即使处于半排水条件,动载条件孔压可产生并维持,滑面仍可液化;根据牛眠沟滑坡现场情况,滑带含水层厚度大于 2 m ,满足该条件。另外,排水静力剪切试验(S7)和干燥静力剪切试验(S8)结果表明,此条件下滑带材料抗剪强度均无显著降低,达不到牛眠沟滑坡高速启动要求。

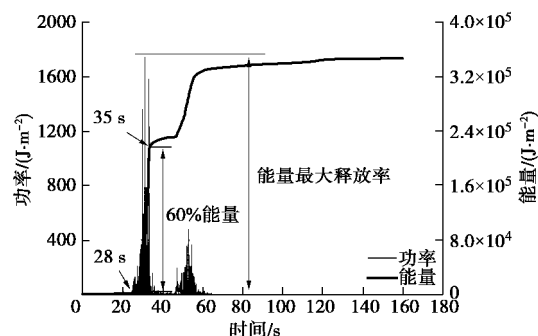


图 19 汶川地震卧龙地震波能量分析

Fig. 19 Results of energy study based on seismic acceleration of Wenchuan earthquake

故笔者认为,汶川强震过程牛眠沟滑坡潜在滑面液化,有效应力骤然降低,可能促使该滑坡骤然启动。从能量分析结果可以推测,牛眠沟滑坡可能在地震开始后即被触发。值得说明的是,本文用于峰值加速度和能量计算的地震波并非位于滑坡滑源区,加之地形地貌、与震源距离等因素都会影响到地震加速度峰值和能量大小,但此处结果可表明,汶川地震满足牛眠沟滑坡滑带液化的峰值加速度和能量要求。

本文仅基于环剪试验获得滑坡滑带材料动力液化特征和液化能量条件,并据此初步探讨了可能的滑坡启动机理,但地震大型滑坡形成是受到地形地貌、岩体结构、地质构造、水文地质等多种因素、耦合作用结果。目前,对于该滑坡形成的地质条件、斜坡动力响应、动力破坏过程等还不够清楚,尤其是滑带的形成机理,仍需从不同方向进行深入研究。

5 结 论

(1)牛眠沟滑坡是位于2008年5·12汶川地震震中的大型滑坡,滑坡具有高速启动特征。

(2)牛眠沟滑坡滑带材料在不排水条件下具有很高的剪切液化能力,且动剪应力下容易液化,液化后材料视摩擦角仅为 9.4° 。滑带材料液化可能导致牛眠沟滑坡高速启动。

(3)基于不排水环剪试验估算滑带材料动力剪切破坏的峰值加速度为 192 gal ,所需能量为 $2.3\times 10^4\text{ J/m}^2$;基于距震中 18 km 卧龙台站地震波估算滑面剪切方向最大地震加速度为 799 gal ,地震在剪切面单位

面积释放能量 $3.5\times 10^5\text{ J/m}^2$,满足该滑坡启动的能量条件。牛眠沟滑坡可能在地震初期即突然触发。

参考文献:

- [1] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(4): 433 - 444. (YIN Yue-ping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(4): 433 - 444. (in Chinese))
- [2] BURCHFIELD B C, ROYDEN L H, VAN DER HILST R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China[J]. GSA Today, 2008, **18**(7): 4 - 11.
- [3] LI Y Q, JIA D, SHAW J H, et al. Structural interpretation of the coseismic faults of the Wenchuan earthquake: three-dimensional modeling of the Longmen Shan fold-and-thrust belt[J]. J Geophys Res, 2010, **115**(B04317): 1 - 26.
- [4] GORUM T, FAN X M, VAN WESTEN C J, et al. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake[J]. Geomorphology, 2011, **133**(3): 152 - 167.
- [5] DAI F C, XU C, YAO X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. J Asian Earth Sci, 2011, **40**(4): 883 - 895.
- [6] 许 冲, 徐锡伟. 2008年汶川地震导致的斜坡物质响应率及其空间分布规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊2): 3888 - 3908. (XU Chong, XU Xi-wei. Response rate of seismic slope mass movements related to 2008 Wenchuan earthquake and its spatial distribution analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S2): 3888 - 3908. (in Chinese))
- [7] 黄润秋, 张伟锋, 裴向军. 大光包滑坡工程地质研究[J]. 工程地质学报, 2014, **22**(4): 557 - 585. (HUANG Run-qiu, ZHANG Wei-feng, PEI Xiang-jun. Engineering geological study on Daguangbao landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(4): 557 - 585. (in Chinese))
- [8] 黄河清, 赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特征及成因机制初步分析[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(2): 168 - 177. (HUANG He-qing, ZHAO Qi-hua. Basic characteristics and preliminary mechanism analysis of large scale rockslide-sturzstrom at Wenjiagou triggered by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(2): 168 - 177. (in Chinese))

- [9] 孙 萍, 张永双, 殷跃平, 等. 东河口滑坡-碎屑流高速远程运移机制探讨[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(6): 737 - 744. (SUN Ping, ZHANG Yong-shuang, YIN Yue-ping, et al. Discussion on long run-out sliding mechanism of Donghekou landslide-debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(6): 737 - 744.(in Chinese))
- [10] DAI F C, TU X B, XU C, et al. Rock avalanches triggered by oblique-thrusting during the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. Geomorphology, 2011, **132**(3/4): 300 - 318.
- [11] YIN Y P, ZHENG W M, LI X C, et al. Catastrophic landslides associated with the M8. 0 Wenchuan earthquake[J]. Bull Eng Geol Environ, 2011, **70**(1): 15 - 32.
- [12] WANG G H, HUANG R Q, CHIGIRA M, et al. Landslide amplification by liquefaction of runout-path material after the 2008 Wenchuan (M8-0) earthquake, China[J]. Earth Surf Proc Land, 2013, **38**(3): 265 - 274.
- [13] YANG C M, CHENG H Y, TSAO C C. The kinematics and initiation mechanisms of the earthquake-triggered Daguangbao landslide[J]. Geophysical Research Abstracts, V.17,EGU2015-13014-1.
- [14] 胡明鉴, 汪发武, 程谦恭. 基于高速环剪试验易贡巨型滑坡形成原因试验探索[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(10): 1602 - 1606. (HU Ming-jian, WANG Fa-wu, CHENG Qian-gong. Formation of tremendous Yigong landslide based on high-speed shear tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(10): 1602 - 1606. (in Chinese))
- [15] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(6): 730 - 741. (HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, LI Tian-bin. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(6): 730 - 741.(in Chinese))
- [16] 许 强, 裴向军, 黄润秋. 汶川地震大型滑坡研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (XU Qiang, PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu. Large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake[M]. Beijing: Science Express, 2009. (in Chinese))
- [17] XING A G, XU Q, GAN J. On characteristics and dynamic analysis of the Niumian valley rock avalanche triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Environ Earth Sci, 2015, **73**(7): 3387 - 3401.
- [18] ZHANG M, YIN Y P, WU S R, et al. Dynamics of the Niumiangou creek rock avalanche triggered by 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Landslides, 2011, **8**(3): 363 - 371.
- [19] CHOW T V. Open channel hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [20] SASSA K. The mechanism starting liquefied landslides and debris flows[C]// Proceedings of 4th International Symposium on Landslides. Toronto, 1984: 349 - 354.
- [21] SASSA K. Access to the dynamics of landslides during earthquakes by a new cyclic loading high-speed ring-shear apparatus (keynote paper)[C]// 6th International Symposium on Landslides, "Landslides". Christchurch, 1992: 1919 - 1937.
- [22] SASSA K. A new intelligent-type dynamic loading ring-shear apparatus[J]. Landslide News, 1997(10): 33.
- [23] SASSA K, FUKUOKA H, WANG G H, et al. Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics[J]. Landslides, 2004, **1**(1): 7 - 19.
- [24] XING A G, WANG G H, LI B, et al. Long-runout mechanism and landsliding behaviour of large catastrophic landslide triggered by heavy rainfall in guanling, guizhou, China[J]. Can Geotech, 2014, **52**(7): 1 - 11.
- [25] WANG G H, SASSA K. Seismic loading impacts on excess pore-water pressure maintain landslide triggered flowslides[J]. Earth Surf Proc Land, 2009, **34**(2): 232 - 241.
- [26] KUENZA K, TOWHATA I, ORENSE R P, et al. Undrained torsional shear tests on gravelly soils[J]. Landslides, 2004 **1**(3): 185 - 194.
- [27] ISHIHARA K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. Géotechnique, 1993, **43**(3): 351 - 451.
- [28] SASSA K, WANG G H, FUKUOKA H. Performing undrained shear tests on saturated sands in a new intelligent type of ring-shear apparatus[J]. Geotech Test J, 2003, **26**(3): 257 - 265.
- [29] SASSA K, WANG G H, FUKUOKA H, et al. Shear-displacement-amplitude dependent pore-pressure generation in undrained cyclic loading ring shear tests: An energy approach[J]. J Geotech Geoenviron, 2005, **131**(6): 750 - 761.
- [30] TRIFUNAC M D. Energy of strong motion at earthquake source [J]. Soil Dyn Earthq Eng, 2008, **28**(1): 1 - 6.
- [31] TRIFUNAC M D, BRADY A G. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. Bull Seismol Soc Am, 1975, **65**(3): 581 - 626.