

## 基于流固耦合的强震大型滑坡水力激发效应研究

时幸幸, 崔圣华, 裴向军, 朱凌, 杨晴雯

### A study of the pro-water pressure for initiation of a large landslide triggered by a strong earthquake based on fluid-structure coupling

SHI Xingxing, CUI Shenghua, PEI Xiangjun, ZHU Ling, and YANG Qingwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104052>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 竹节桩复合地基沉桩施工超孔隙水压力研究

A study of the excess pore water pressure during pile-sinking construction of nodular pile composite foundation

叶俊能, 周晔, 朱瑶宏, 刘干斌 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 103-103

#### 基于FLAC3D的危岩撑-锚联合支护分配比研究

A study of the distribution ratio for combined spore-anchor supporting of unstable rocks based on FLAC3D

陈涛 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 64-64

#### 基于非线性损伤理论的改进CVISC模型及其在FLAC3D中实现

A non-linear damage rheological constitutive model and its application to a giant slow-moving landslide

蒋树, 文宝萍, 蒋秀姿, 李瑞冬, 赵成 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 56-56

#### 基于FEFLOW的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究

Numerical simulation of three-dimensional soil-groundwater coupled chromium contamination based on FEFLOW

刘玲, 陈坚, 牛浩博, 李璐, 殷乐宜, 魏亚强 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 164-174

#### 大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究

A study of the deformation of anti-slide pile and pile-plate structure in large landslide

向俐蓉, 陈伟志, 郭在旭, 叶丹, 姜雷 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 125-131

#### 地下水井水位及化学组分的同震差异响应特征分析

An analysis of the coseismic differential response characteristics of well water levels and chemical components : A case study triggered by the Qingbaijiang earthquake

顾鸿宇, 王东辉, 李胜伟, 郑万模, 刘港, 向元英, 李丹, 陈能德 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 44-53



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104052

时幸幸, 崔圣华, 裴向军, 等. 基于流固耦合的强震大型滑坡水力激发效应研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 102-114.  
SHI Xingxing, CUI Shenghua, PEI Xiangjun, *et al.* A study of the pro-water pressure for initiation of a large landslide triggered by a strong earthquake based on fluid-structure coupling[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 102-114.

## 基于流固耦合的强震大型滑坡水力激发效应研究

时幸幸, 崔圣华, 裴向军, 朱 凌, 杨晴雯

(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)

**摘要:** 2008 年汶川  $M_s 8.0$  级强震触发了体积近  $12 \times 10^8 \text{ m}^3$  的大光包滑坡。该滑坡发生于古生代碳酸盐岩地层, 滑带地质背景为斜坡内部深埋 400 m、最大厚度达 5 m 的先期间构造错动带。最新调查表明, 该错动带是斜坡内部地下水通道, 错动带岩体处于饱和状态。为揭示强震过程与地下水相关的大光包滑坡启动机制, 提出了一种具有软弱层带的硬质碳酸盐岩边坡简化模型, 将层间构造错动带概化为碳酸盐岩硬层内部软弱层带, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 程序中的流固耦合算法模拟了模型的响应特性。研究表明: 强震过程中软弱层带上下碳酸盐岩硬层的变形响应时间、波型、大小出现明显差异, 上硬层相对于下硬层产生了张离、压缩和剪切 3 种非协调变形模式, 由此对软弱层带产生了振动冲压-张拉和振动剪切动力学行为, 饱水软弱层带形成了具有瞬间放大和累积增压特征的超孔隙水压力。这里将上下硬层差异性变形称为非协调变形, 认为非协调变形是软弱层带应力放大成因, 推测软弱层带应力瞬间放大以及放大应力长持时作用下的岩体致损是超孔隙水压力激发和累积的成因; 强震过程软弱层带超孔隙水压力导致其内有效应力快速降低, 使得斜坡前部锁固段应力快速集中, 而后被突然剪断, 滑坡骤然启动, 揭示了强震过程中超孔隙水压力是大光包滑坡启动的主要原因。

**关键词:** 汶川地震; 大光包滑坡; 地下水; 超孔隙水压力; 流固耦合; FLAC<sup>3D</sup>

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0102-13

## A study of the pro-water pressure for initiation of a large landslide triggered by a strong earthquake based on fluid-structure coupling

SHI Xingxing, CUI Shenghua, PEI Xiangjun, ZHU Ling, YANG Qingwen

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** The Daguangbao landslide is the largest co-seismic landslide with a volume of approximately  $12 \times 10^8 \text{ m}^3$ , which triggered by the Wenchuan earthquake ( $M_s 8.0$ ) occurred on May 12, 2008. The slide zone is located in the Paleozoic carbonate strata and it is an interlayer structural dislocation zone with a depth of 400 m and a maximum thickness of 5 m inside the slope. A previous study concluded that the shear failure of the Daguangbao landslide developed within the bedding fault. Our latest investigation showed that this bedding fault was under the water table, and its rock mass was saturated before the landslide. To reveal the initiation mechanism of the Daguangbao landslide related to the groundwater, a simplified model of a hard carbonate slope with an inter-weak layer is given. The response characteristics of the model are stimulated by a fluid-structure coupling algorithm

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-06-20

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1501002); 国家自然科学基金青年基金(41907254); 国家创新研究群体科学基金(41521002)

第一作者: 时幸幸(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治研究工作。E-mail: [singing\\_10@qq.com](mailto:singing_10@qq.com)

通讯作者: 崔圣华(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地震大型滑坡形成机制等方面的研究工作。E-mail: [shenghuacui.geo@gmail.com](mailto:shenghuacui.geo@gmail.com)

using the FLAC<sup>3D</sup>. The results show that significant differences in deformation patterns during the earthquake, such as response time, wave shape, and amplitude exist between the upper and lower hard layers. Three uncoordinated deformation patterns, i.e., tension, compress, and shearing coming from the upper layer to the weak layer, are identified. The deformation pattern results in the amplification of compress and shear forces within the weak layer. The stress amplification subsequently induces excess pore water pressure with instant amplification and accumulation features. It is reasonably inferred that the excess pore water pressure essentially reduces the effective stress of the bedding fault. Our simulation confirms that the excess pore-water pressure can be generated within a saturated bedding fault deep situated in a slope during a strong earthquake. We propose that the excess pore water pressure within the saturated fault at 400 m underground is the cause of the Daguangbao landslide.

**Keywords:** Wenchuan earthquake; Daguangbao landslide; groundwater; excess pore water pressure; fluid-structure coupling; FLAC<sup>3D</sup>

强震通常触发众多滑坡,造成严重生命财产损失。2008年5月12日,我国四川省汶川县发生了 $M_s8.0$ 级强震,是20世纪我国发生的震级最大、能量最高的一次灾难性地震,触发滑坡数万处<sup>[1-2]</sup>,其中单体滑坡面积大于 $0.5\text{ km}^2$ 的大型滑坡达112处,而大光包滑坡是单体规模最大的滑坡<sup>[2-3]</sup>,受到国内外广泛关注。

大光包滑坡发生以来,研究者从现场调查、室内试验、数值模拟等方面开展了系列研究,揭示滑坡滑带地质背景为先期层间构造错动带,与区域背斜相关的3组节理控制了滑坡后缘高陡断壁<sup>[4-5]</sup>;提出强震过程该错动带岩体遭受震裂损伤,并发生动力扩容<sup>[6]</sup>,认为水平加速度利于大光包坡体前缘顺层失稳滑动<sup>[7]</sup>、垂直地震动对滑坡失稳有显著影响<sup>[8]</sup>、启动后滑动面摩擦系数弱化造成了滑坡高速运动<sup>[9]</sup>;从而,长时强地震动<sup>[10]</sup>、地形放大<sup>[11]</sup>、断层破裂<sup>[11]</sup>、白云岩溶蚀沙化<sup>[12]</sup>、不连续地质结构<sup>[13]</sup>等被不同学者认为是大光包滑坡启动的可能成因。

最新调查<sup>[14-15]</sup>发现,大光包滑坡前坡体内存在丰富地下水,在此基础上学者提出强震过程滑带的水击效应可能是大光包滑坡启动成因<sup>[14]</sup>,随后开展的层间错动带材料动三轴试验揭示其具有较高液化潜能,从而提出滑坡滑带液化启动成因<sup>[16-17]</sup>。崔圣华等<sup>[18]</sup>利用地质体单元模型开展振动台试验,发现强震过程软弱层带表现出应力放大现象,并认为与应力放大相关的超孔隙水压力是滑坡启动成因。实际上,一直以来地下水在大型滑坡启动方面扮演着重要的角色,甚至很多不可能发生的近平缓状滑坡在地下水影响下启动,如天台乡滑坡<sup>[19]</sup>、垮梁子滑坡<sup>[20]</sup>等,很多研究认为超孔隙水压力是滑坡启动成因<sup>[21-23]</sup>。

虽然如此,但与超孔隙水压力相关的滑坡启动研究基本都针对于重力滑坡,鲜有见到强震过程滑带超

孔隙水压力对大型岩质滑坡启动的激发作用研究。对于大光包滑坡,虽然一些学者尝试开展滑带超孔隙水压力研究<sup>[14-17]</sup>,但主要根据室内小尺度试样和小型模型试验,而大光包滑坡滑带埋深很大(达400 m)、滑坡体积巨大( $12\times 10^8\text{ m}^3$ ),导致小尺度试验无法完全反映实际滑坡状况。因此,本文选择数值模拟手段,建立真实尺寸模型,采用流固耦合数值方法,考虑斜坡震前地下水条件和地震条件进行模拟研究,探讨与地下水相关的大光包滑坡启动机理。

## 1 大光包滑坡概述

大光包滑坡发生于震旦系灯影组白云岩层内,具有后缘拉裂、底部滑移特征,规模近 $12\times 10^8\text{ m}^3$ ,是汶川地震触发的最大滑坡(图1),也是世界罕见的巨型滑坡。滑坡滑缘区拉裂边界长达2.5 km,后缘陡壁最大高度达650 m,陡壁上暴露从震旦系到三叠系清晰的沉积地层。滑源区南侧出露长达1.8 km、水平投影面积达 $0.3\text{ km}^2$ 的滑移面。巨型滑坡体离开斜坡向下运动,在滑源区留下了面积达 $2.7\text{ km}^2$ 的滑坡凹槽<sup>[4-5]</sup>;滑坡主体物质堆积于前部横向河谷(黄洞子沟),形成最大堆积厚度达550 m的滑坡坝。余势不减的滑坡物质因受对岸山体的阻挡而超覆,垂直最大超高达500 m<sup>[4]</sup>;同时,物质在黄洞子沟内发生侧向扩离,形成的横向宽度最大达 $3.2\text{ km}^{[13]}$ 。

已有研究表明<sup>[6]</sup>,大光包滑坡滑带产生于埋深400 m、最大厚度达5 m的层间错动带(图1、图2);该层间错动带具有多期碎裂和再胶结特征,形成了白云质断层岩,由上而下可划分为:①损伤带(受断层影响,厚0.5~1 m);②构造角砾岩带和碎裂岩带(破劈理发育,钙质胶结普遍存在,厚1~4 m);③糜棱质带(主要包括岩屑和细砾,厚3~45 cm);④断层泥化带

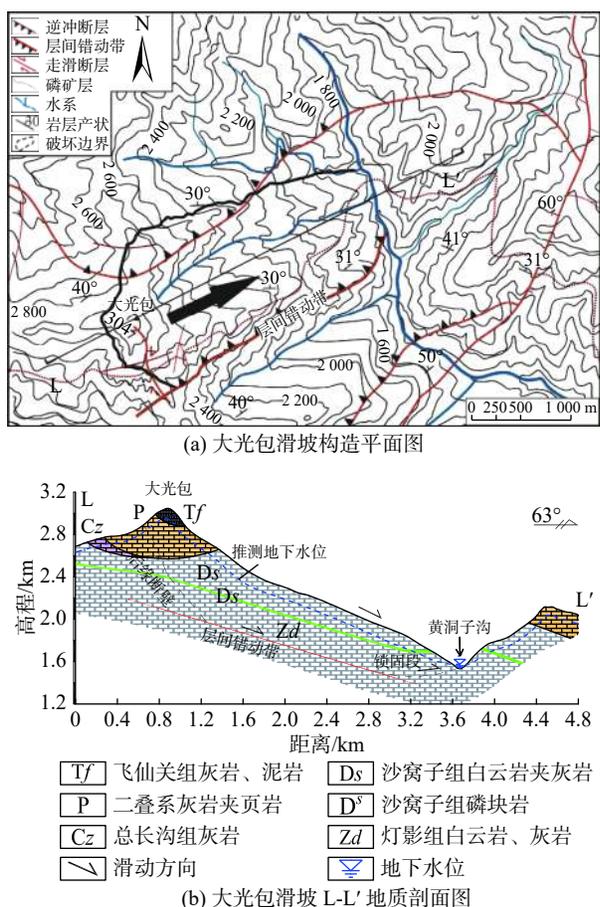


图 1 大光包滑坡构造地质剖面图<sup>[14]</sup>

Fig. 1 Geological map profile of the Daguangbao landslide<sup>[14]</sup>

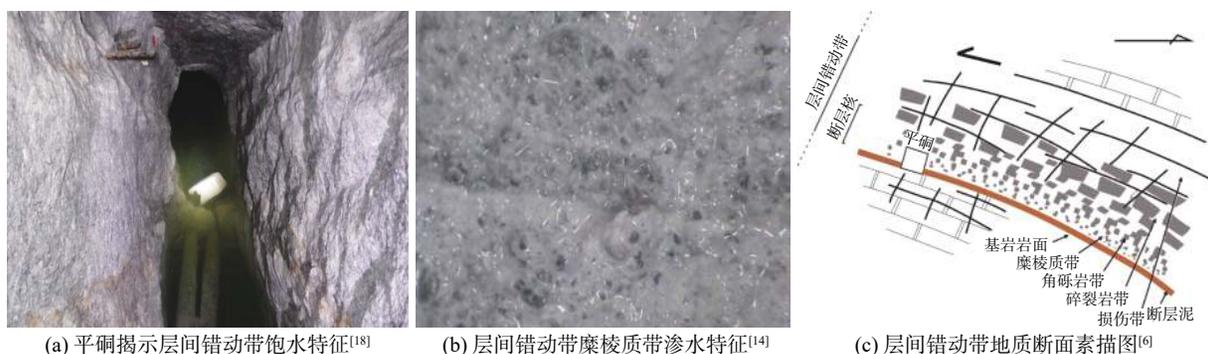


图 2 饱水层间构造错动带

Fig. 2 Water-saturated interlayer structural dislocation zone

Finn 模型在 Mohr-Coulomb 模型基础上增加了与塑性体积应变增量相关的动态孔隙水压力上升程序,可模拟动力作用下材料孔隙水压力的积累和超孔隙水压力的形成<sup>[24]</sup>。本文采用 FLAC<sup>3D</sup> 程序及 Finn 模型进行考虑地下水的强震大光包滑坡流固耦合分析。

假设在有效应力为  $\sigma_0$  时,材料一维回弹模量为  $\bar{E}_r$ ,则在不排水条件下孔隙水压力增量  $\Delta u$  与塑性体积应变增量  $\Delta \epsilon_{vd}$  间关系表达为:

$$\Delta u = \bar{E}_r \Delta \epsilon_{vd} \quad (1)$$

若采用 Byrne 模式计算塑性体积应变增量,有:

$$\frac{\Delta \epsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2 \frac{\epsilon_{vd}}{\gamma}) \quad (2)$$

式中:  $\Delta \epsilon_{vd}$ ——塑性体积应变增量;

$\epsilon_{vd}$ ——总累积体积应变;

$\gamma$ ——剪应变;

$C_1, C_2$ ——常数。

(稍湿软塑状态,厚 0.2 ~ 5.0 cm),如图 2(c) 所示。

崔圣华等<sup>[14]</sup>从区域环境条件、滑坡前斜坡多处水沟、泉眼出露分布认为滑坡前坡体内存在丰富地下水:1)大光包所在区域为中亚热带湿润季风气候,雨量充沛,多年平均降水量达 1 260 mm;2)滑坡区发育的长石板沟、门槛石沟、黑沟均为常年流水沟,水流汇于前缘黄洞子沟;3)滑坡前在高程约 2 600 m 处长石板沟沟头发育“大岩窝天井”大泉,出水量常年不衰,属基岩裂隙水;4)在高程约 1 550 m 的滑坡山脚处发育“青蛙岩”大泉,属溶岩裂隙水,这些地下水点有助于帮助推测地下水位;5)黄洞子沟为区内主沟,枯水期流量达 0.3 m<sup>3</sup>/s,最大洪水流量达 60 m<sup>3</sup>/s。进一步,通过平硐揭示了该层间错动带岩体饱水<sup>[21]</sup>,地下水从层间错动带糜棱质带、角砾岩带孔隙和碎裂岩带、破裂岩带裂隙流出(图 2);认为层间错动带底部厚约 5 cm 的泥化带为不透水边界,它满足了地下水在层间错动带内连续流动的条件(而非向下渗流),从而证实了该层间错动带是斜坡内部长大的导水通道。

## 2 流固耦合数值方法

### 2.1 基本理论

FLAC<sup>3D</sup> 程序采用基于显式有限差分的完全非线性方法,能够进行动力与渗流的耦合分析。其中

其中,  $C_1$  可以由标准贯入击数公式  $C_1 = 8.7(N_{60})^{-1.25}$  得到;  $C_2$  由  $C_2 = \frac{0.4}{C_1}$  换算得到。

进行完全流固耦合计算耗时大, 参考陈育民等<sup>[24]</sup>方法, 本文在计算中通过力学时标与扩散时间关系、施加力学和流体扰动属性, 以及选择合适流固刚度比(流体模量与固体模量之比), 进行非完全耦合分析。这是因为强震过程力学计算时间相对于流体耦合扩散时间很短, 可以不考虑渗流的影响, 认为是不排水分析; 而当力学扰动造成的系统状态失衡时, 需考虑流固刚度比进行流体与力学进程的耦合。在固体刚度很大时, 流固刚度比远小于 1, 称为刚性骨架问题(反之为柔性骨架问题)。大光包滑坡为白云岩质滑坡, 固体刚度大, 针对刚性骨架可以忽略流体与固体的完全耦合计算。

## 2.2 模型建立与监测点布置

对于像大光包滑坡这样的巨型滑坡, 通过建立真实岩性组合的三维地质模型进行数值动力计算用时将非常长; 本文并非再现大光包滑坡启动过程, 而是揭示强震过程与地下水相关的响应特征和对滑坡启动的可能贡献, 所以有必要对地质原型进行简化。层间错动带是存在于坡体内部的软弱层带, 本文后续将层间错动带直接称为软弱层带。

根据图 1(b) 地质剖面图, 数值模型纵长 4 600 m, 最大高度 2 500 m, 软弱层带厚度为 5 m, 岩层倾角为 18°(图 3); 由于大光包滑坡白云岩占滑体绝大部分, 将滑坡体数值模型整体考虑为白云岩; 软弱层带简化为仅具有角砾岩带参数的孔隙介质体, 将软弱层带底部设置为因实际泥化带阻水的隔水层, 同时忽略软弱层带下部地层的水文条件。由滑坡前斜坡上泉眼位置推测的地下水位线定义了数值模型地下水位, 软弱层带泥化层以上、地下水位线以下的区域设置为饱

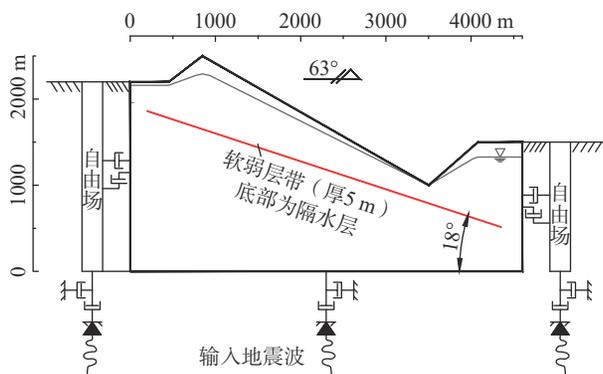


图 3 模型尺寸及自由场边界示意图

Fig. 3 Diagram showing the model size and free field boundary

水。数值模型网格划分最稀疏部位为软弱层带底部白云岩, 网格最大尺寸约 160 m; 网格划分最密处为软弱层带, 网格最小尺寸约 1 m。

为研究地震过程、地下水参与下与滑坡剪滑启动相关动力响应, 将监测点集中于软弱层带及其附近区域。模型共布置 15 个监测点, 沿软弱层带在其内部布置 6 个监测点(编号 J1—J6), 监测点间距 600 m, 其中 J3 与两侧间距 300 m; 同时, 选择位于软弱层带后段的 J1、中段的 J3 和位于前段的 J6 布置垂直监测点; 每处垂直监测点垂向间距 20 m, 1 个点位于软弱层带下部地层, 2 个点位于上部地层, 分别标记为 K1—K9。为获得软弱层带孔隙水压力的空间变化, 将监测点分为三个区, 其中 A 区位于滑坡拉裂边界靠近坡内一侧; C 区在滑坡锁固段附近; B 区位于 A、C 区之间, 并且为初始孔隙水压力分布最大位置处。监测点具体布置情况详见图 4。

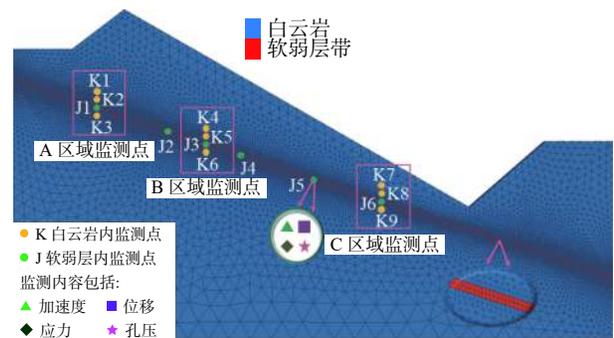


图 4 模型监测点分布图

Fig. 4 Distribution map showing the model monitoring points

## 2.3 参数取值

前人试验研究表明<sup>[16-17]</sup>, 大光包软弱层带是具有很高液化潜能的破碎岩体材料, 所以本文数值模拟为其选择摩尔-库伦本构与液化本构模型, 在经过静力平衡后更换为 Finn 模型的 Byrne 模式以研究动力荷载作用下带内的孔压积累; 为求取式(2)中的常数  $C_1$  和  $C_2$ , 假设软弱层带为中密-密实砂土, 依据《工程地质手册》第 5 版<sup>[25]</sup>可查得标贯数  $N_1$  为 30, 从而得到  $C_1$  和  $C_2$  分别为 0.124 和 3.228。上下硬层的白云岩弹性模量高达  $6 \times 10^{10}$  Pa, 为其选择弹性本构模型。

在渗流计算中, 认为材料颗粒不可压缩, 同时考虑坡体为各向同性渗流模型。水的体积模量采用室温下纯水体积模量, 即  $0.2 \times 10^{10}$  Pa, 水位以下初始饱和度假设为 1.0, 即孔隙被水完全充填。通过式(3)将土力学中渗透系数换算为 FLAC<sup>3D</sup> 中渗透系数。

$$k(\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})) = k(\text{cm}/\text{s}) \times 1.02 \times 10^{-6} \quad (3)$$

材料体积模量和剪切模量由式(4)(5)计算。

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (4)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (5)$$

式中:  $E$ ——弹性模量/Pa;

$\mu$ ——泊松比;

$K$ ——体积模量/Pa;

$G$ ——剪切模量/Pa。

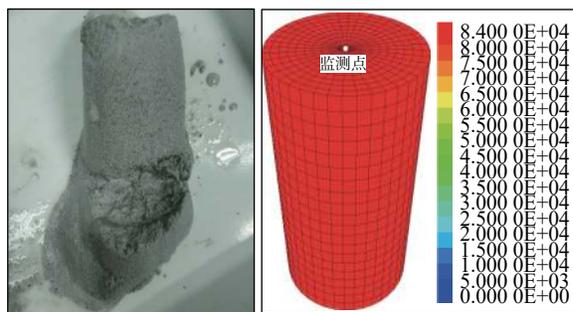
为了合理选择数值模型本构关系和参数, 本文依据崔圣华等<sup>[5-6]</sup>、殷跃平等<sup>[7]</sup>、朱凌等<sup>[16-17]</sup>研究成果综合选取, 结果见表 1。

表 1 数值模拟参数与本构模型综合选取表

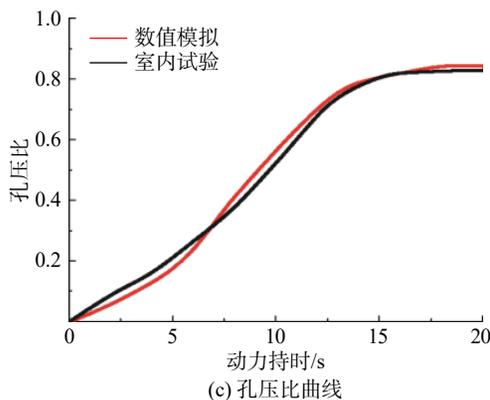
Table 1 Comprehensive selection of the numerical simulation parameters and constitutive model

岩层	本构模型	干密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	内聚力/Pa	内摩擦角/( $^\circ$ )	体积模量/Pa	剪切模量/Pa	抗拉强度/Pa	孔隙率/%	渗透系数/( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
白云岩	弹性	2 700	$1.8 \times 10^7$	42	$3 \times 10^{10}$	$2.6 \times 10^{10}$	$1 \times 10^7$	2	$1 \times 10^{-12}$
软弱层带	摩尔-库伦; Finn(Byrne)	2 300	$3 \times 10^5$	25	$1.1 \times 10^8$	$3.5 \times 10^7$	$1 \times 10^6$	20	$5.9 \times 10^{-7}$

为了验证所取参数的有效性, 本文根据表 1 中的参数在 FLAC<sup>3D</sup> 建立数值模型, 开展动三轴试验(图 5), 试验条件与朱凌等<sup>[16-17]</sup>室内试验条件保持一致。将数值模拟结果与朱凌等<sup>[16-17]</sup>室内试验结果进行对比, 可以看出试样模型随着动荷载持时的增加, 孔压比(孔压与围压的比值)逐渐上升, 最后趋于稳定; 孔压比曲线与室内动三轴试验一致, 数值试验孔压比稳定时达到 0.84, 与室内试验接近(室内试验为 0.83)。这表明本文软弱层带材料参数是有效的。



(a) 试样液化破坏 (b) 数值试样液化孔压云图



(c) 孔压比曲线

图 5 动三轴试验(围压 100 kPa, 循环偏应力 100 kPa)

Fig. 5 Dynamic triaxle test (the confining pressure is 100 kPa and the cyclic deviatoric stress is 100 kPa)

在给出表 1 参数后, 通过静力平衡, 可得到震前斜坡初始重力, 以及初始渗流条件下的应力分布和孔压分布(图 6、图 7)。可以看出, 坡体竖向应力场分布基本与上部山体高程一致, 最大应力位于模型底部左下角, 最大值为 62 MPa, 软弱层带内应力为 12~18 MPa; 孔压场分布与设置的水位线深度直接相关, 震前滑坡区软弱层带孔压为 2~4 MPa, 孔压最大值位于软弱层带 J3 监测点附近(4 MPa)。沟谷右侧区域不在本文考虑范围。



图 6 震前竖向应力场分布

Fig. 6 Vertical stress field before the earthquake

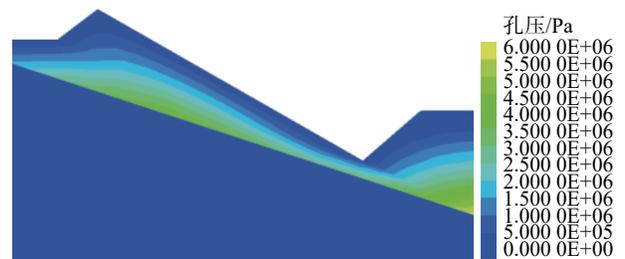


图 7 震前孔压场分布

Fig. 7 Pore water pressure field before the earthquake

#### 2.4 加载方案

通过在模型四周添加自由场边界来吸收地震波, 达到减少边界处地震波反射、模拟半无限空间条件的

目的(图3)。坡体模型采用局部阻尼来消耗模型中地震波的大量能量,重现模型本身的阻尼大小,局部阻尼系数取0.016。当不设置阻尼参数,在重力条件下求解一定步数,让模型产生震荡(图8),此时的位移震荡周期倒数即为自振频率;模型自振频率为0.25 Hz,处于后续输入波振动频率范围内,可能发生共振。

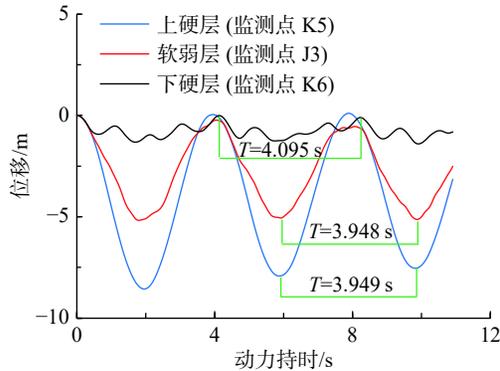


图8 模型位移震荡曲线

Fig. 8 Oscillation curve of the model displacement

本文动荷载施加于模型底部,以加速度时程作为输入荷载。选择距离滑坡最近(约4.5 km)的清平地震台站的三向地震动数据,对于水平EW与NS向地震波,将其合成到沿滑坡滑动方向,作为水平地震输入波,监测的垂直(UD)地震波作为垂直地震输入波。

滑坡滑动方向水平地震波合成换算公式如下:

$$a_H(t) = a_{EW}(t) \cdot \sin \alpha + a_{NS}(t) \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

式中:  $a_H(t)$ ——滑坡滑动方向水平加速度/( $m \cdot s^{-2}$ );

$a_{EW}(t)$ ——清平波东西向加速度分量/( $m \cdot s^{-2}$ );

$a_{NS}(t)$ ——清平波南北向加速度分量/( $m \cdot s^{-2}$ );

$\alpha$ ——滑坡滑动方向,本文为  $63^\circ$ 。

为了减少地震模拟时间,同时保证地震对模型的动力作用,对水平和垂直输入波均截取天然波主震部分;结合前人研究<sup>[7]</sup>,选取清平波主震13~33 s之间的20 s进行后续研究,具体如图9(a)(b)所示。在保证波的准确传播情况下,由于汶川地震动强烈,天然具有显著的非平稳特性,为减小模型网格对地震波中最大频率的要求,且满足陈育民等<sup>[24]</sup>认为保证波准确传播前提(式7),滤除了3 Hz以上的高频部分,保留低频部分;为保证动力计算结束时模型底部不会出现继续的速度和残余的位移,对加速度时程进行基线校正后作为输入荷载,具体见图9(c)(d)。

为保证数值模型中波传播的数值精度,模型网格尺寸与输入波形频率的关系为:

$$\Delta l \leq \left( \frac{1}{8} \sim \frac{1}{10} \right) \lambda \quad (7)$$

式中:  $\Delta l$ ——模型网格尺寸/m;

$\lambda$ ——模型输入最高频率对应的波长/m。

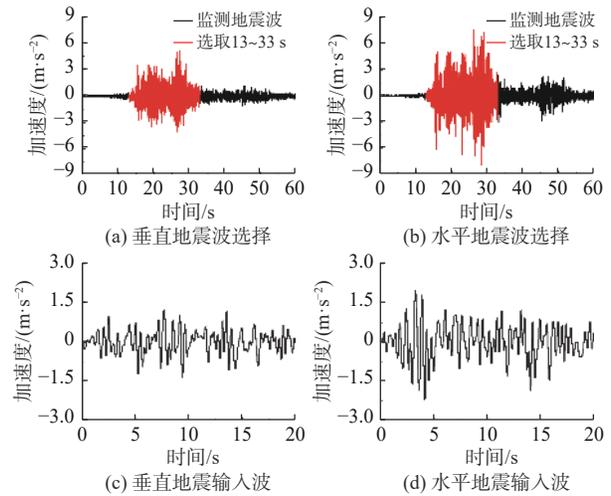


图9 模型施加动力荷载

Fig. 9 Dynamic load applied by the model

本文分别考虑了有水位和无水位两种情况:在有水位情况下分别进行了垂直和水平地震动模拟,与无水位情况的垂直和水平地震动模拟进行对比;同时,有、无水位情况下还进行了双向地震动模拟,探讨双向加速度与地下水耦合作用下斜坡动力响应。模拟方案见表2。

表2 模拟工况一览表

Table 2 Test of the numerical simulation conditions

水位	垂直向振动	水平向振动	双向振动(垂直与水平向同时振动)
无水位	√	√	√
有水位	√	√	√

## 3 试验结果

### 3.1 基本动力响应特征

震前滑坡区软弱层带孔压最大值位于B区的J3监测点;同时B区动力响应最为剧烈,这里以B区为代表进行坡体基本动力响应特征的阐述。

#### (1) 加速度

无论垂直还是水平地震动条件,无水位情况下,下硬层加速度峰值大于上硬层(正值表示向上加速,负值表示向下加速);考虑水位情况下,下硬层的加速度峰值小于上硬层。有无水位对下硬层响应频率和峰值影响不大,但对上硬层来说,加速度响应频率和峰值比无水位情况时显著增加,有水位时上硬层局部响应峰值可达无水位的3倍(图10、图11)。

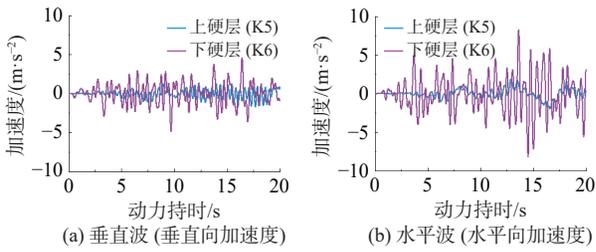


图 10 无水位下加速度响应曲线

Fig. 10 Acceleration response curves without groundwater level

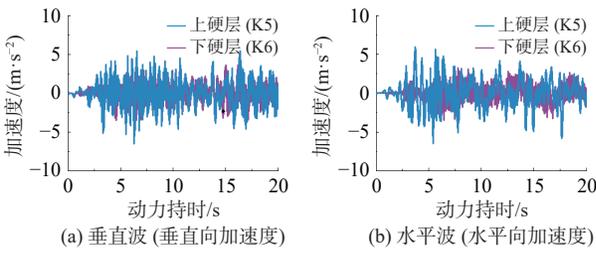


图 11 考虑水位时的加速度响应曲线

Fig. 11 Acceleration response curves with groundwater level

(2) 位移

无论垂直还是水平地震动条件,无水位时下硬层位移峰值大于上硬层(竖向位移的正负号分别表示相对上、下移动;水平侧向位移的正负号分别表示相对向右(坡外侧)、向左(坡内侧)移动);但有水位时下硬层位移频率和峰值却小于上硬层。单独对比上硬层,有水水位时,其位移响应频率和峰值比无水位情况明显增大(图 12、图 13)。

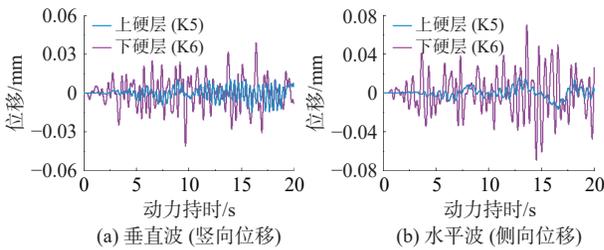


图 12 无水位下瞬时位移响应曲线

Fig. 12 Instantaneous displacement responses curve without groundwater level

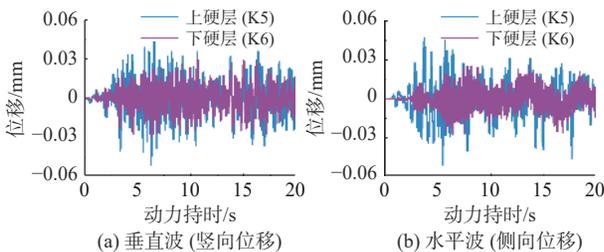


图 13 考虑水位时的瞬时位移响应曲线

Fig. 13 Instantaneous displacement response curves with groundwater level

(3) 应力

无论垂直还是水平地震动条件,无水位时整个模型监测点处于压应力状态,下硬层压应力最大,上硬层压应力最小(负值表示压力,正值表示拉力);有水水位时,监测点应力大小波动幅度明显增大,局部响应峰值甚至达到动荷载施加前应力的 3 倍。局部时刻出现软弱层带拉应力或压应力大于上硬层或下硬层的现象(图 14、图 15)。

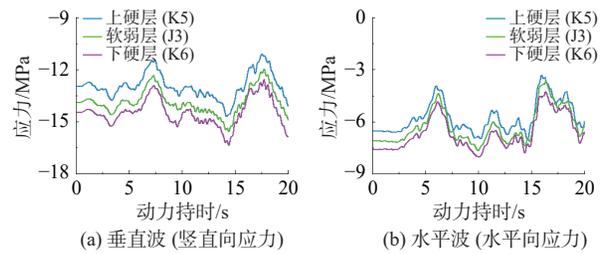


图 14 无水位下应力响应曲线

Fig. 14 Stress response curves without groundwater level

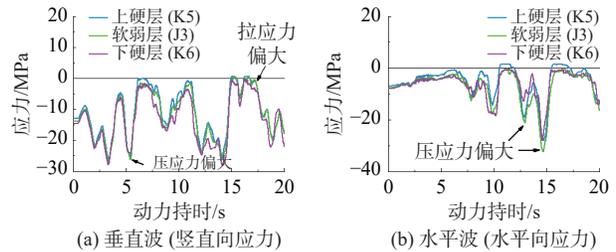


图 15 考虑水位时的应力响应曲线

Fig. 15 Stress response curves with groundwater level

3.2 孔隙水压力响应特征

有水水位时,无论垂直、水平还是双向地震动条件,上硬层孔隙水压力响应峰值基本一致,软弱层带孔隙水压力响应强度远大于上硬层(因模拟将下硬层假设为无水条件,所以没有孔压)(图 16)。垂直地震动条件下,软弱层带孔隙水压力呈现阶段累积上升,孔压响应峰值最大超过上硬层的 6 倍;水平地震动条件下,软弱层带孔隙水压力具有瞬态爬升特点,但孔隙水压力响应小于垂直地震动条件,孔压响应峰值最大约为上硬层的 2 倍;双向地震动条件下,软弱层带孔隙水压力响应具有与垂直地震动条件下的阶段累积特征和水平地震动条件下的瞬间突然增大特征,同时软弱层带孔压响应峰值增大,最大峰值为 32 MPa。

孔压响应峰值主要集中于软弱层带中后段,现以垂直地震动条件为例进行说明(图 16a)。在上硬层孔压变化幅度较小的情况下,软弱层带孔压随动力荷载作用随即发生快速上升,软弱层带孔压在 3 s 之前处于加速累积阶段,在 3 s 后迎来一个相对较大的峰值,

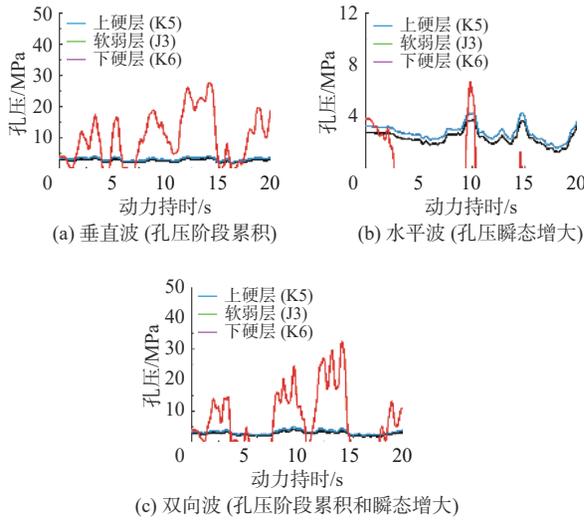


图 16 坡体孔压响应曲线

Fig. 16 Response curves of pore water pressure in a slope body

随后的孔压值不断波动变化并具有阶段累积特征: 软弱层带初始孔压最大值 J3 监测点处 (4 MPa) 分别在 9, 12, 14 s 时达到峰值的 18, 26, 27 MPa, 如图 17 所示。

### 4 讨论

#### 4.1 动力非协调变形

通过建立含软弱层带的大光包滑坡数值模型, 考虑水位条件和软弱层带饱水特征, 进行动力响应分析。当无水位时, 上硬层地震加速度和位移小于下硬层, 表明地震波能量穿过软弱层带后能量被吸收。斜

坡内部软弱层带的研究较多, 同时软弱层带吸能现象已经被理论和室内试验所证实<sup>[26-30]</sup>, 这里不再赘述。然而, 进一步对无水时上下硬层响应的位移曲线(图 18a)放大分析时发现, 上下硬层位移不但有大小差异, 而且振动方向也不相同, 甚至出现上下硬层反向振动的情况。即, 上硬层向上振动、下硬层向下振动, 则软弱层被“拉离”, 相反则软弱层带被“压缩”; 上硬层水平向左振动时, 下硬层水平向右振动, 则软弱层被剪切, 反之亦然。本文将由于软弱层带存在, 导致斜坡上下硬层振动“步调”不一致的现象称为非协调变形。大光包滑坡软弱层带的这一现象, 在崔圣华等<sup>[12]</sup>基于简化的地质体单元模型开展的振动台模型试验中同样被揭示。前人研究仅考虑软弱层带及上下硬层组成的一个地质体单元, 本文通过实际尺寸的斜坡模型进一步论证了这种非协调变形现象的实际存在性。崔圣华等<sup>[12]</sup>将大光包滑坡软弱层带受力问题考虑为平面应变问题, 从而不忽略单元体边界, 以简化试验条件; 同时, 他们没有考虑实际斜坡软弱层带上覆地层厚度的变化影响。本文数值模拟发现, 由于边界条件和上覆地层厚度不同, 导致 B 区非协调变形强度大于 A 区和 C 区。

当有水位时, 非协调变形现象仍然存在(图 18b), 但上下硬层位移大小关系发生了变化, 即有水位时上硬层加速度、位移响应均大于下硬层。本文认为这种改变与软弱层带内孔隙水压力相关。由于水是不可压缩的, 在瞬时变化的动荷载作用下, 水因无法快速

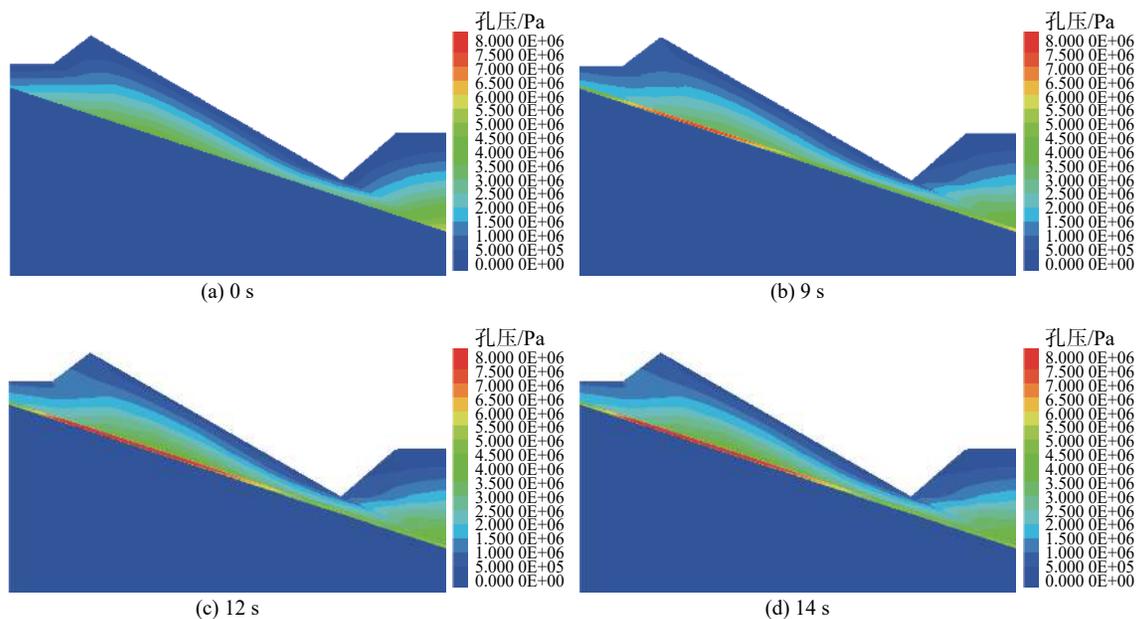


图 17 垂直波作用下孔压分布云图

Fig. 17 Pore water pressure distribution under vertical wave action

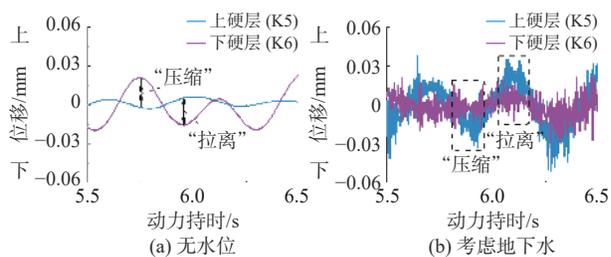


图 18 非协调变形现象

Fig. 18 Uncoordinated deformation

排出导致孔压急剧上升,从而又反向影响了坡体的加速度响应,但超孔隙水压力对加速度的作用机制仍需进一步探讨。虽然在FLAC<sup>3D</sup>中本文的模拟无法反映损伤和破坏,但可以合理推测,在软弱层带被“拉离”过程中,带内拉应力放大,将产生张拉损伤和破坏;在软弱层带被“压缩”过程中,带内压应力放大,将产生冲压损伤和破坏。

### 4.2 超孔隙水压力激发与累积

强震过程,上硬层孔压波动较小,软弱层带内孔压波动较大,孔压的上升和下降都是在很短时间完成的,且能够在短暂时间内达到极值(图16),这反映了软弱层带孔压响应的瞬态特征。

如前所述,目前本文无法阐述软弱层超孔隙水压力对上硬层加速度放大的作用机制,这里仅对软弱层带瞬态超孔隙水压力的成因进行分析:(1)通过对比

软弱层带孔压和上下硬层应力曲线(图19)发现,当软弱层带孔压瞬态增加时,软弱层带内应力表现为冲压应力(图20),此时发生的是上硬层相对向下运动、下硬层相对向上运动的非协调变形,软弱层带被“压缩”;(2)相反的,当软弱层带孔压瞬态降低时,软弱层带内应力表现为张拉应力(图21),此时发生的是上硬层相对向上运动、下硬层相对向下运动的非协调变形,软弱层带被“拉离”。所以可以认为,软弱层带超孔隙水压力是由于上下硬层非协调变形导致的。值得注意的是,张拉过程孔压多次降低为0,这是由于软件无法监测到负孔压,即使产生了负孔压,软件中也被记为0。

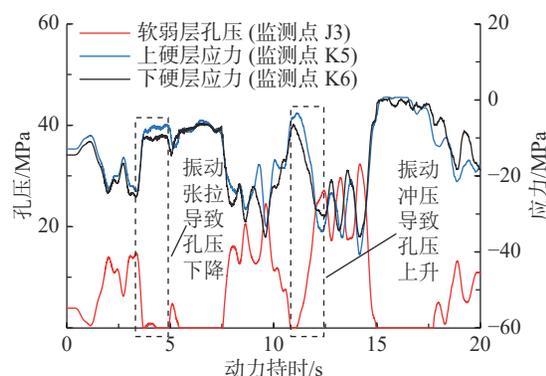


图 19 软弱层带孔压响应机制

Fig. 19 Response mechanism of pore water pressure in the weak zone

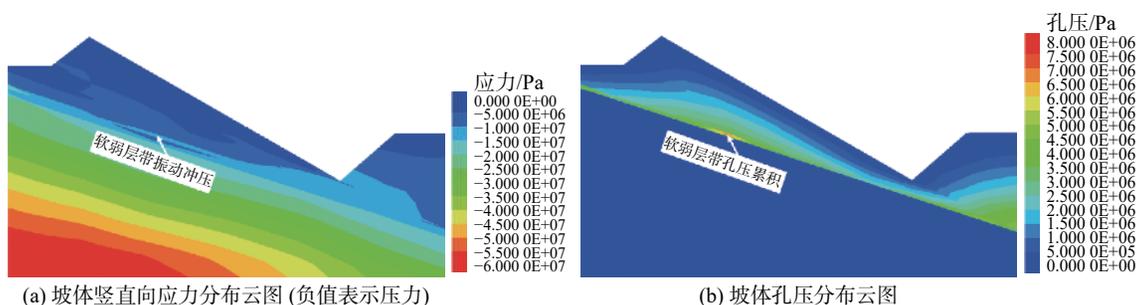


图 20 软弱层带振动冲压效应导致孔压累积 (11.5 s)

Fig. 20 Vibration stamping effect of the weak zone results in the accumulation of pore water pressure (11.5 s)

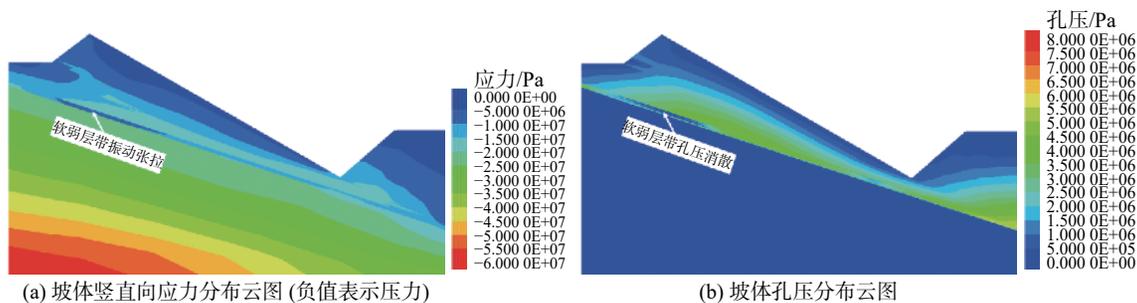


图 21 软弱层带振动张拉效应导致孔压消散 (4.5 s)

Fig. 21 Vibration tensing effect of weak zone results in the dissipation of pore water pressure (4.5 s)

虽然孔压具有瞬态增加和降低特征,但对于孔压极值,可以看出有累积增加的趋势(图 17、图 19)。其原因可能为,无论软弱层带内的冲压还是张拉作用力,都会导致软弱层带损伤破裂,导致软弱层带裂隙连通率增加,岩桥占比减少,从而使得软弱层发生扩容,材料孔隙率增大。但由于 FLAC<sup>3D</sup> 并不能显示损伤破裂,无法获得软弱层带内部孔隙率变化。另一方面,可以合理推测,当软弱层带受到压缩时,孔隙被压缩、材料被挤密;当受到张拉时,原有孔隙和损伤空间都被拉伸,材料孔隙空间增大,地下水会挤入扩容空间,导致软弱层带含水率累积增加。总之,软弱层带材料损伤累积、含水率累积增加是导致其内孔压累积的原因。

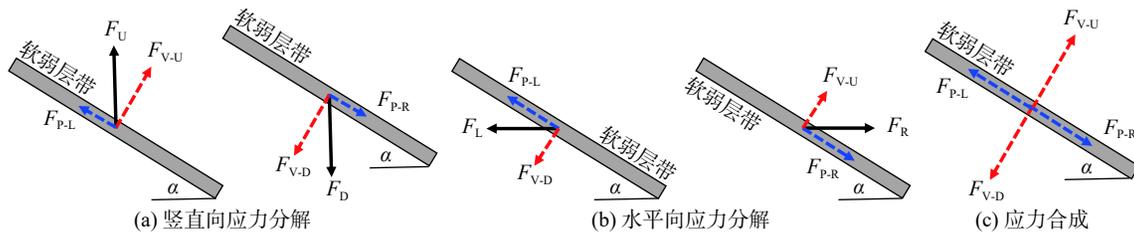


图 22 力学模型概化

Fig. 22 Simplified mechanical model

$F_V$ 根据地震动作用产生的竖向与水平向应力的不同情况进行计算:

$$F_V = F_L \cdot \sin\alpha + F_D \cdot \cos\alpha \quad (10)$$

$$F_V = F_L \cdot \sin\alpha - F_U \cdot \cos\alpha \quad (11)$$

$$F_V = -F_R \cdot \sin\alpha + F_D \cdot \cos\alpha \quad (12)$$

$$F_V = -F_R \cdot \sin\alpha - F_U \cdot \cos\alpha \quad (13)$$

式中:  $F_L$ ——水平向压应力/Pa;

$F_R$ ——水平向拉应力/Pa;

$F_D$ ——竖向压应力/Pa;

$F_U$ ——竖向拉应力/Pa;

$\alpha$ ——软弱层带与水平向的夹角/(°)。

当 $F_V$ 为正值时:

$$F_{V-D} = F_V \quad (14)$$

当 $F_V$ 为负值时:

$$F_{V-U} = F_V \quad (15)$$

式中:  $F_{V-D}$ ——垂直滑面压应力/Pa;

$F_{V-U}$ ——垂直滑面拉应力/Pa。

为更加接近实际地震动环境,这部分分析本文采用双向地震动模拟结果。通过式(8)-(15)进行软弱层带有效应力计算,结果如图 23 所示。可以看出,软

### 4.3 有效应力降低与滑坡启动

为揭示强震过程饱水滑带(软弱层带)有效应力响应特征,对滑带力学模型进行概化(图 22)。即,将垂直向应力( $F_U$ 、 $F_D$ )与水平向应力( $F_L$ 、 $F_R$ )分解为垂直滑面分力( $F_{V-U}$ 、 $F_{V-D}$ )和平行滑面分力( $F_{P-L}$ 、 $F_{P-R}$ ),根据垂直滑面上的应力计算有效应力,即:

$$\sigma' = \sigma - P \quad (8)$$

$$\sigma = F_V \quad (9)$$

式中:  $\sigma'$ ——有效应力/Pa;

$\sigma$ ——总应力/Pa;

$P$ ——孔隙水压力/Pa;

$F_V$ ——垂直滑面分力/Pa。

弱层带有效应力在地震动发生之后便开始降低,在 2 s 之后 A 区监测点 J1 有效应力计算结果降低为 0,其次是在 A、B 区之间的 J2 监测点计算有效应力降低为 0(5 s),紧接着为 B、C 区之间,靠近 B 区的 J4 监测点(8 s);位于中前段的 J5 和 J6 监测点虽然有下降趋势,但未达到 0。值得注意的是,从监测数值上看,软弱层带孔隙水压力出现大于上覆应力情况(J1 测点),即有效应力小于 0,滑体被托浮向上运动,这与实际情况不符合。但需要说明的是,一个监测点的数值仅反映这个监测点的应力状态,对于长达约 3.6 km 的软弱层带,允许出现某些位置有效应力小于 0,但其它位置有效应力仍是大于 0 的情况,而并不会造成整个滑带有效应力小于 0。在 11 s 后,滑带中前段有效应力为 5 ~ 22 MPa,而中后段有效应力已经小于 0(图 23),在坡体软弱层中后段超孔压引起向上的力,对滑坡有托顶作用。

随着软弱层带振动损伤,抗剪强度降低,有效应力向锁固段转移(图 24)。在坡体软弱层带的高孔压作用下,由于软弱层带有效应力降低幅度和面积更大,锁固段应力集中程度更大(图 25),初始剪应力由 1 MPa 增加到 4 MPa,可以合理推测该过程可能导致

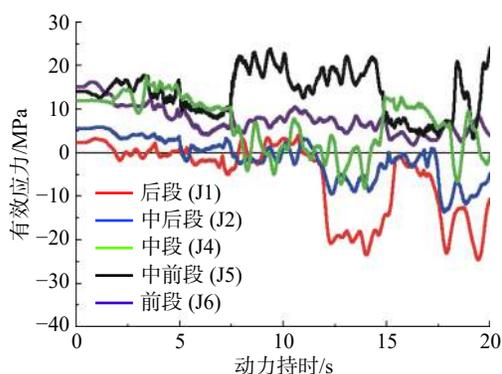


图 23 软弱层带有效应力响应曲线

Fig. 23 Effective stress response curves of the weak zone

锁固段被突然剪断, 从而导致滑体剧烈启动。

根据上述研究最终将大光包滑坡启动演化机制归纳为: 强震动力响应—软弱层带非协调变形—动力损伤—超孔压积累—有效应力骤降—锁固段应力集中剪断—滑坡剧烈启动。

## 5 结论

本文以大光包滑坡为地质模型, 运用 FLAC<sup>3D</sup> 流固耦合动力分析理论和方法进行了强震过程饱和水软弱层带动力响应数值模拟, 根据模拟结果发现:

(1) 强震过程, 软弱层带上、下硬岩动力响应“步

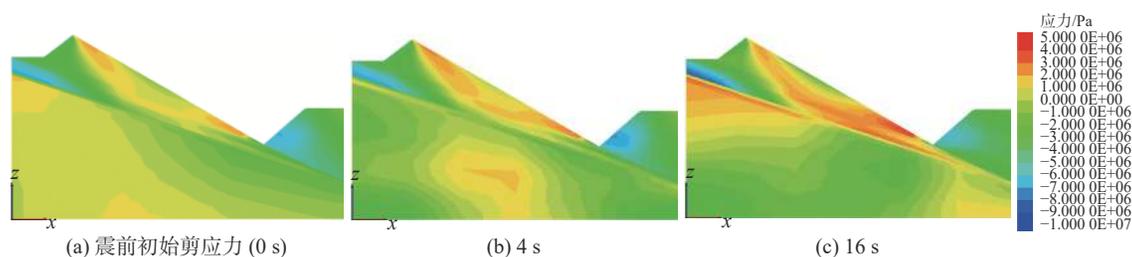


图 24 双向地震动下坡体 ZX 向剪应力云图 (无水位)

Fig. 24 ZX-direction shear stress of seismic acceleration in both directions (groundwater conditions are not considered)

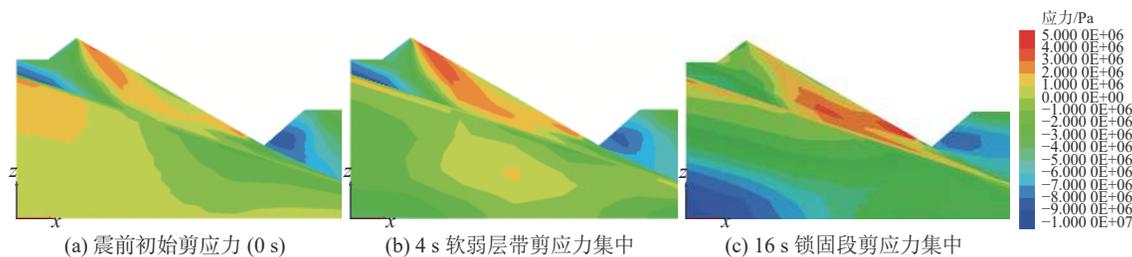


图 25 双向地震动下坡体 ZX 向剪应力云图 (有水位)

Fig. 25 ZX-direction shear stress of seismic acceleration in both directions (groundwater conditions are considered)

调”不一致导致非协调变形; 造成了软弱层带振动冲压-张拉和振动剪切动力学行为;

(2) 软弱层带上下硬岩非协调变形导致的振动冲压效应引起软弱层带应力瞬间放大, 是软弱层带超孔隙水压力瞬态激发成因; 而非协调变形致损是软弱层带超孔隙水压力累积的原因;

(3) 强震过程, 软弱层带中后段 2 km 范围孔隙水压力累积上升, 有效应力在 11 ~ 14 s 降为 0; 在软弱层带超孔压响应下, 滑体的重力分量由软弱层带向锁固段转移, 造成锁固段因应力集中被突然剪断, 促使滑坡启动。

### 参考文献 (References) :

[ 1 ] DAI F C, XU C, YAO X, et al. Spatial distribution of

landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(4): 883 - 895.

[ 2 ] 许强, 裴向军, 黄润秋, 等. 汶川地震大型滑坡研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1 - 18. [ XU Qiang, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2009: 1 - 18. (in Chinese) ]

[ 3 ] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析 [J]. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 29 - 38. [ YIN Yueping. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 29 - 38. (in Chinese with English abstract) ]

[ 4 ] 黄润秋, 裴向军, 张伟锋, 等. 再论大光包滑坡特征与形成机制 [J]. *工程地质学报*, 2009, 17(6): 725 - 736.

- [ HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, ZHANG Weifeng, et al. Further examination on characteristics and formation mechanism of Daguangbao landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(6): 725 - 736. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 5 ] 崔圣华. 强震过程软弱层带地震动响应及大型滑坡启动机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [ CUI Shenghua. Seismic responses of wake interlayer and initiation mechanisms of large landslide during strong earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 崔圣华, 裴向军, 黄润秋. 大光包滑坡启动机制: 强震过程滑带非协调变形与岩体动力致损[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(2): 237 - 253. [ CUI Shenghua, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. An initiation model of DGB landslide: Non-coordinated deformation inducing rock damage in sliding zone during strong seismic shaking[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(2): 237 - 253. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 7 ] 殷跃平, 王猛, 李滨, 等. 汶川地震大光包滑坡动力响应特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(10): 1969 - 1982. [ YIN Yueping, WANG Meng, LI Bin, et al. Dynamic response characteristics of Daguangbao landslide triggered by Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(10): 1969 - 1982. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] ZHANG Y B, CHEN G Q, ZHENG L, et al. Effects of near-fault seismic loadings on run-out of large-scale landslide: A case study[J]. *Engineering Geology*, 2013, 166: 216 - 236.
- [ 9 ] SONG Y X, HUANG D, CEN D F. Numerical modelling of the 2008 Wenchuan earthquake-triggered Daguangbao landslide using a velocity and displacement dependent friction law[J]. *Engineering Geology*, 2016, 215: 50 - 68.
- [ 10 ] XU X W, WEN X Z, YU G H, et al. Coseismic reverse-and oblique-slip surface faulting generated by the 2008  $M_w$  7.9 Wenchuan earthquake, China[J]. *Geology*, 2009, 37(6): 515 - 518.
- [ 11 ] YANG C W, ZHANG J J, LIU F C, et al. Analysis on two typical landslide hazard phenomena in the Wenchuan earthquake by field investigations and shaking table tests[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(8): 9181 - 9198.
- [ 12 ] 许向宁, 李胜伟, 王小群, 等. 安县大光包滑坡形成机制与运动学特征讨论[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2): 269 - 281. [ XU Xiangning, LI Shengwei, WANG Xiaoqun, et al. Characteristics of formation mechanism and kinematics of Daguangbao landslide caused by Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(2): 269 - 281. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 13 ] 崔圣华, 裴向军, 黄润秋, 等. 大光包滑坡不连续地质特征及其工程地质意义[J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(1): 61 - 72. [ CUI Shenghua, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Discontinuities and engineering geological significances of strong earthquake-induced Daguangbao landslide[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(1): 61 - 72. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 14 ] 裴向军, 崔圣华, 黄润秋. 大光包滑坡启动机制: 强震过程滑带动力扩容与水击效应[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2): 430 - 448. [ PEI Xiangjun, CUI Shenghua, HUANG Runqiu. A model of initiation of Daguangbao landslide: Dynamic dilation and water hammer in sliding zone during strong seismic shaking[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2): 430 - 448. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 15 ] CUI S H, YANG Q W, PEI X J, et al. Geological and morphological study of the Daguangbao landslide triggered by the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 370: 107394.
- [ 16 ] 朱凌, 裴向军, 崔圣华, 等. 基于动三轴试验的大光包滑坡层间错动带动力特性研究[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(3): 647 - 654. [ ZHU ling, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Triaxial tests for dynamic characterstics of the bedding fault material within basal layer of Daguangbao landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(3): 647 - 654. ( in Chinese with English abstract ) ]
- [ 17 ] CUI S H, PEI X J, JIANG Y, et al. Liquefaction within a bedding fault: Understanding the initiation and movement of the Daguangbao landslide triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake ( $M_s = 8.0$ ) [J]. *Engineering Geology*, 2021, 295: 106455.
- [ 18 ] 崔圣华, 裴向军, 黄润秋, 等. 强震过程滑带超间隙水压力效应研究: 大光包滑坡启动机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(3): 522 - 539. [ CUI Shenghua, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Excess interstitial water pressure within sliding zone induced by strong seismic shaking: An initiation model of the Daguangbao

- landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 522 – 539. (in Chinese with English abstract) ]
- [19] 范宣梅, 许强, 张倬元, 等. 平推式滑坡成因机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2): 3753 – 3759. [ FAN Xuanmei, XU Qiang, ZHANG Zhuoyuan, et al. Study on genetic mechanism of translational landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup2): 3753 – 3759. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] XU Q, LIU H X, RAN J X, et al. Field monitoring of groundwater responses to heavy rainfalls and the early warning of the Kualiangzi landslide in Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Landslides*, 2016, 13(6): 1555 – 1570.
- [21] 高杨, 卫童瑶, 李滨, 等. 深圳“12.20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 129 – 138. [ GAO Yang, WEI Tongyao, LI Bin, et al. Dynamics process simulation of long run-out catastrophic landfill flowslide on December 20<sup>th</sup>, 2015 in Shenzhen, China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(1): 129 – 138. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J]. *地质力学学报*, 2020, 26(5): 714 – 730. [ PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 714 – 730. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 李浩, 乐琪浪, 孙向东, 等. 巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(2): 13 – 20. [ LI Hao, LE Qilang, SUN Xiangdong, et al. A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi county[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 13 – 20. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 193 – 259. [ CHEN Yumin, XU Dingping. *FLAC/FLAC3D foundation and engineering examples*[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009: 193 – 259. (in Chinese) ]
- [25] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 210. [ Geological engineering handbook editorial board. *Geological engineering handbook* [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 210. (in Chinese) ]
- [26] 李远征, 陈强, 潘远阳, 等. 西南某电站坝址右岸含软弱层带岩质斜坡变形破坏机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 1 – 10. [ LI Yuanzheng, CHEN Qiang, PAN Yuanyang, et al. Deformation and failure mechanism of rock slope with soft strata in the right bank of a power station dam site in Southwest China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 1 – 10. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 范昊天, 孙少锐, 王亚山, 等. 基于离散元的含软弱夹层岩质边坡滑移机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 12 – 17. [ FAN Haotian, SUN Shaorui, WANG Yashan, et al. Sliding failure mechanism of bedding rock slope with weak intercalated layer based on discrete element method[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 12 – 17. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 李宏儒, 张盼, 王神尼, 等. 降雨条件下顺倾向煤系地层边坡稳定性的影响研究[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(6): 836 – 848. [ LI Hongru, ZHANG Pan, WANG Shenni, et al. A study of the influence of rainfall on slope stability along the tendency of coal measure strata[J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(6): 836 – 848. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 李夕兵. 论岩体软弱结构面对应力波传播的影响[J]. *爆炸与冲击*, 1993, 13(4): 334 – 342. [ LI Xibing. Influence of the structural weakness planes in rock mass on the propagation of stress waves[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1993, 13(4): 334 – 342. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 杨峥, 许强, 刘汉香, 等. 地震作用下含反倾软弱夹层斜坡的动力变形破坏特征研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(19): 134 – 139. [ YANG Zheng, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. Dynamic deformation and failure of slopes with an anti-dip weak interlayer under earthquakes[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(19): 134 – 139. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 汪美华