

文章编号: 1008-2786-(2018)2-271-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000322

泥石流拦砂坝坝前沉积与坝基扬压力实验研究

张莉^{1,2,3}, 游勇^{1,2}, 柳金峰^{1,2}, 孙昊^{1,2,3}, 刘道川^{1,2,3}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 泥石流在坝前堆积固结的过程发生泥石流浆体中固体颗粒沉降和孔隙水压力消散, 它直接影响了坝基扬压力大小和变化, 对坝体稳定性造成影响。本文通过自制实验模型装置模拟不同密度泥石流作用在坝前的沉积渗透过程, 观测不同密度泥石流坝前沉积特征和浆体细颗粒沉降速率, 并通过水压传感器测得坝前沉积底部孔隙水压力和坝基扬压力随沉积时间的变化过程, 最后结合不同密度泥石流沉积特征分析了泥石流沉积过程对扬压力衰减过程的影响。研究表明: 稀性泥石流沉积过程中具有明显的颗粒分选性, 且浆体细颗粒沉降速率与泥石流密度表现出线性负相关性; 泥石流沉积底部孔隙水压力随沉积时间呈指数衰减趋势, 拟合指数函数系数与上部浆体细颗粒沉降速率满足线性正相关性; 沉积过程中坝基扬压力与坝前沉积底部孔隙水压力具有相同的对数衰减趋势, 两者呈线性正相关性。本研究着眼于拦砂坝扬压力产生机制, 研究了泥石流坝前颗粒沉积和水力扩散过程对坝基扬压力变化过程的影响, 为拦砂坝扬压力计算提供了新的视角, 具有一定的工程和理论意义。

关键词: 泥石流; 拦砂坝; 颗粒沉降; 孔隙水压力消散; 扬压力

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

泥石流是一种由地表破碎岩土体与水混合形成的饱和流体^[1]。大方量泥石流(最大达 10^9 m^3)快速流动(最快达 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)过程中对沟床和坡岸产生强烈的侵蚀, 巨大的冲击力摧毁沿途建筑物和农作物, 造成严重的人员伤亡和经济损失^[2, 3]。通常在泥石流流通区建设拦砂坝以减小泥石流流量、沟床纵坡和流速, 从而达到控制泥石流的作用。泥石流在坝前运动受阻后沉积, 其中水下渗入坝基土中产生向上的扬压力, 减小了坝体整体稳定性。泥石流沉积过程中内部孔隙水压力逐渐消散, 扬压力的大小及变化过程与坝前泥石流内部孔隙水压力消散过程紧密相关, 而泥石流密度又是影响泥石流沉积过程的关键因素。针对不同密度泥石流研究泥石流

沉积特征与坝基扬压力对今后的拦砂坝工程设计具有一定的辅助和指导意义。

以往的研究大多关注泥石流自然沉积特征和固结过程中内部孔隙水压力或含水率等的变化。泥石流自然沉积是在内、外部阻力作用下能量逐渐耗散最终停止运动的过程^[4, 5], 稀性泥石流沉积后粗颗粒停留在堆积扇上缘, 细颗粒随浆体漫流至堆积扇下缘, 具有明显的纵向颗粒分选特征; 粘性泥石流则表现为整体沉积形成垄岗地形, 除个别大石块外不具有明显的颗粒分选性^[6, 7]。据 Haas^[8]等的研究, 当粘粒含量大于 22% 后, 自然沉积过程不具有明显的颗粒分选性。Major、Iverson^[9, 10]等对不同性质泥石流展开大型水槽实验, 发现泥石流沉积后内部仍

收稿日期(Received date): 2017-9-2; 改回日期(Accepted date): 2018-4-17

基金项目(Foundation item): 中国科学院 STS 项目(KFJ-EW-ST5-094); 国家科技支撑计划课题(2014BAL05B01)。[STS Project of Chinese Academy of Sciences(KFJ-EW-ST5-094); National Science and Technology Support Program(2014BAL05B01).]

作者简介(Biography): 张莉(1992-), 女, 重庆忠县人, 硕士研究生, 主要研究方向: 山地灾害综合防治技术实验研究。[ZHANG Li(1992-), female, born in Chongqing, M. Sc. candidate, research on integrated prevention and control of mountain disasters.] E-mail: zhangli15@imde.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 游勇(1964-), 男, 四川乐山人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 山地灾害综合防治技术研究。[YOU Yong(1964-), male, born in Leshan, Sichuan Province, professor, research on integrated prevention and control of mountain disasters.] E-mail: yyong@imde.ac.cn

存在较高的孔隙水压力,通过测量自然沉积固结过程中内部孔隙水压力的变化,发现粉黏土含量对孔隙水压力消散速率影响显著。Hampton^[11]、Pierson^[12]和 He^[13]分别对稀、粘性泥石流进行室内沉积固结实验,发现在底部渗透条件下稀性泥石流孔隙水压力完全消散仅需要数小时,而粘性泥石流则需要数天。这些研究说明泥石流性质是影响泥石流沉积固结过程的关键因素,为本文提供了一定的参考,但均只关注了沉积固结泥石流流体内部的变化,未关注沉积过程渗透水的作用。

不同于泥石流自然沉积,坝前沉积是泥石流在快速流动下受到拦砂坝阻挡而停止运动的过程,此时颗粒沿泥石流前进方向还未发生沉积分选,仅在重力作用下发生竖向分选。泥石流在坝前沉积后,水无法漫流扩散仅能通过蒸发、下渗和排水孔几种方式排出,特别当排水孔堵塞后,下渗成为主要方式。水下渗在坝底产生扬压力,加上泥石流流体对坝体的冲击力和侧压力,坝体稳定性降到最低。这使得我们不能只关注泥石流沉积本身,还需关注沉积过程中水下渗在坝底产生的渗透作用和扬压力。

目前对扬压力的认识大多来源于水工坝,但由于功能、结构和基础条件等方面的区别,拦砂坝的扬压力应从根本上区别于水工坝扬压力。水工坝建设基础一般为基岩,且一般设有防渗帷幕,故主要考虑长期蓄水下混凝土坝体内部渗透产生的扬压力^[14-16];而拦砂坝通常建立在老泥石流堆积层上,且一般不存在长期水头作用,故不考虑坝体内部的渗透,仅考虑泥石流浆体渗透入泥石流堆积层中对坝基底部向上的浮托力。泥石流来临后扬压力的大小及变化机制与泥石流性质和沉积过程紧密相关,对此,以往文献中鲜有涉及,故其具体变化过程还需进一步深入研究。

本文为研究泥石流坝前沉积特征与坝底扬压力的变化,对六种不同密度的泥石流进行坝前沉积渗透实验以观测泥石流沉积过程中的颗粒分选特征和细颗粒沉降速率,再通过埋置在沉积底部和坝基底板的孔隙水压力传感器测量沉积过程中的泥石流底部孔隙水压力和扬压力,并结合坝前颗粒沉积特征研究三者之间的关系。本研究将泥石流沉积过程与扬压力衰减过程结合,旨在为今后的拦砂坝设计和扬压力计算提供一定的参考。

1 实验概况

1.1 实验测试装置

本文采用自制模型模拟泥石流坝前沉积以及水在坝基的渗透过程,图1为该实验装置的立面示意图。该模型主体为采用有机玻璃制作的“L”型箱体,包括横箱和竖箱。横箱尺寸为 $0.75 \times 0.2 \times 0.15$ m,其主要功能是盛装一定性质的土体模拟拦砂坝坝基土,其顶部为预制带孔混凝土盖板模拟拦砂坝基础底板,横箱末端5 cm处设置多孔透水板起透水性和阻隔土水的作用,横箱尾部上下分别安装出水管;竖箱尺寸为 $0.2 \times 0.2 \times 0.8$ m,其主要功能是盛装泥石流浆体和坝前堆积体模拟坝前堆积,上部0.55 m高用作盛装泥石流浆体,下部0.25 m高(包括与横箱连接的0.15 m)盛装坝前堆积体,竖箱侧壁设置有进水口和不同高度的出水口。工程中根据拦砂坝不同规模设计坝底宽度为坝体净高的0.7~1.0倍^[17,18],本装置坝宽为坝净高的0.90倍,满足设计要求。据Holt和Gibbs研究^[19],渗透实验仪器直径应不小于土样最大粒径的5~6倍,本文实验用料最大粒径不足4 cm,满足尺寸规定。

测试装置主要包括孔隙水压力测试系统和摄像机。通过埋置在坝基土表面的KPSI 735高精度水压力传感器(传感器埋置位置和编号见图1)连接16通道数据采集仪和计算机采集软件采集和记录泥石流来临后坝基扬压力的变化,采集频率为 1 s^{-1} 。采用高清摄像机拍摄泥石流沉积过程,通过分析视频图像获取粗、细颗粒沉积速率和沉积特征。

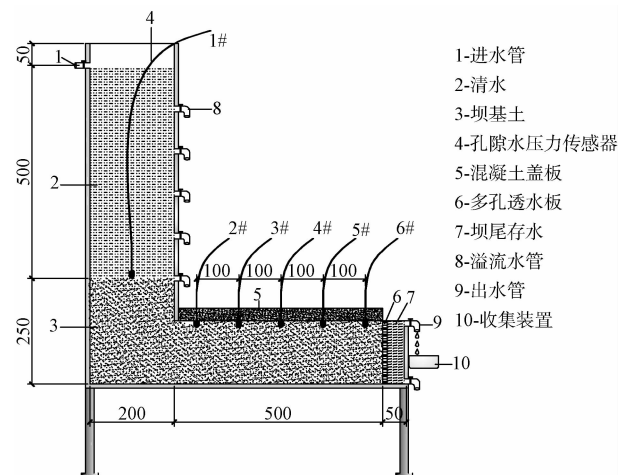


图1 泥石流坝前沉积渗透模拟装置示意图

Fig. 1 Diagram of the experimental apparatus

1.2 实验土样

本文为研究不同密度泥石流作用下的沉积特征和扬压力,控制坝基土性质不变,统一采用无粘性粗砂土(渗透系数 $1.09 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$)。泥石流原样取自彭州市龙门山镇湔江上游甘沟泥石流未经扰动的堆积扇,将原样烘干后充分碾磨,对大于 0.075 mm 的颗粒使用SZS型三维振筛机筛分,小于 0.075 mm 颗粒通过 Mastersizer 2000 激光粒度仪测量,最终得到原样颗粒级配。本文考虑原样中大颗粒的沉积对孔隙水压消散影响较小以及实验的可操作性,采用泥石流原样筛分后 2 mm ^[20]以下颗粒配制泥石流浆体代替泥石流流体进行实验,为模拟野外细颗粒含量较少的稀性泥石流的沉积,采用等量替代法^[21]改变 0.1 mm 以下细颗粒质量占比为 10% ,图2为泥石流原样和实验土样颗粒级配曲线。将实验土样分别与不同质量的水混合配制 1.1 、 1.2 、 1.3 、 1.4 、 1.5 、 1.6 g/cm^3 六种不同密度的泥石流浆体。根据浆体密度和泥石流原样换算原泥石流流体密度可按下式^[22]:

$$\rho_c = \rho_w + \frac{\rho_s - \rho_w}{1 + \frac{P_f \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f - \rho_w}} \quad (1)$$

式(1)中 ρ_c 为泥石流流体密度; ρ_f 为泥石流浆体密度; ρ_s 为固体粗颗粒密度,取 2.65 g/cm^3 ; ρ_w 为水的密度; P_f 为细颗粒占总的固体颗粒的质量比,对本文所用泥石流样品 $P_f = 48.29\%$ 。

按照式1 计算结果得到结果见表1。

表1 泥石流浆体密度换算泥石流原样密度表

Tab.1 Conversion between the slurry densities and debris flow densities

泥石流浆体密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
泥石流原样密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.20	1.37	1.52	1.66	1.78	1.90

1.3 实验步骤

称取一定质量的粗砂土按照 3% 的含水率充分润湿后,分层击实铺装于横箱中,击实后坝基土密度为 1.8 g/cm^3 。另外按照相同的密度称取一定质量的粗砂土按相同的击实度铺装于竖箱,击实后高度为 10 cm (模拟坝基埋深 10 cm)。土样装好后将混凝土盖板置于横箱土体上部,将水压力传感器探头穿过盖板上的预留孔洞,埋入土体深约 2 cm (探头前端有 2 cm 长的塑胶盖帽),在板的四周及传感器孔洞周围打密封胶以防止漏气。待密封胶固化后,

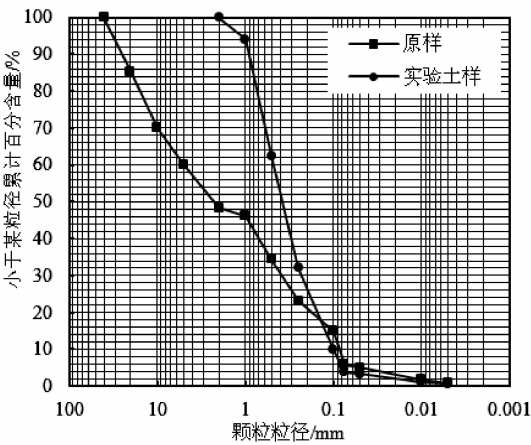


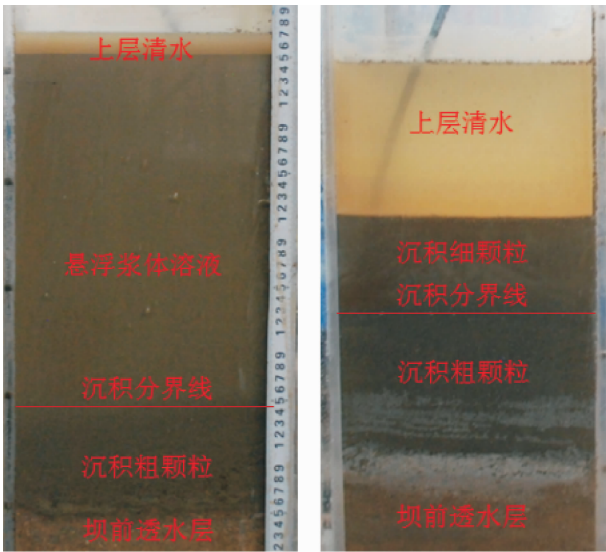
图2 泥石流原样和实验土样颗粒级配曲线
fig.2 Particle size cumulated curves of the original debris flow sample and experiment soil sample

进行12小时低水头饱和以排出坝基土中空气。土样充分饱和后,放干坝前水,并保证横箱末端与横箱高度相同的水头。

为检测水压力传感器是否正常工作 and 方便与泥石流来流时的扬压力对比,在每次实验前先进行清水满库的扬压力测试。检查传感器工作无误后,打开摄像机将镜头对准竖箱,将配制好的一定性质的泥石流搅拌均匀保持一定速度倾倒入竖箱中,为避免竖向倾倒对坝基土产生过大的冲击力影响扬压力测试结果,在竖箱中间高度处设置缓冲过流板。每次实验采集扬压力 20 min ,观察坝前泥沙分层沉积现象,接取坝尾出水口单位时间出水量。实验完毕后清理物料进行下一组实验。

2 不同性质泥石流坝前沉积特征

图3为泥石流沉积过程和沉积完成后的颗粒状态图,从图中可看出细颗粒含量少的稀性泥石流表现为明显的分层沉积特征。沉积过程(图3(a))中粗细颗粒明显分层,上层为细颗粒与水组成的浆体溶液,下层为粗颗粒沉积层;沉积完成后(图3(b))底部为砂砾等粗颗粒,中间层为细颗粒,上层为清水。这种分层沉积特性是由泥浆的悬浮力决定的,对于自身重力大于浆体悬浮力的粗颗粒,泥石流来临后在重力作用下很快沉积到底部;而对于组成浆体结构的细颗粒,在沉积初期粒间超孔隙水压力支撑上部固体颗粒的浮重力,伴随沉积时间延长,粒间孔隙水排出,超孔隙水压力逐渐消散,细颗粒间间距缩小逐渐形成结构体^[9],最终沉降完全,形成图3



(a) 泥石流沉积中期状态图 (b) 泥石流沉积后期状态图

图3 泥石流坝前颗粒沉积特征图

Fig.3 Sediment deposition features during mid and late term

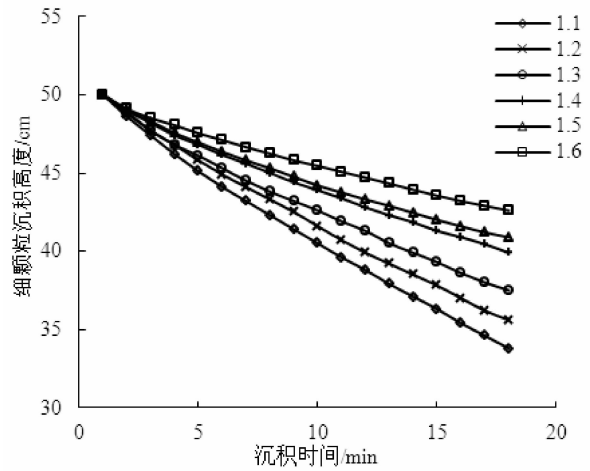
(b) 中的分层沉积特征。

泥石流坝前沉积特征与泥石流性质和浆体细颗粒浓度有关。泥石流由稀到粘,浆体悬浮力增大,组成浆体的颗粒粒径逐渐增大,颗粒分选性能逐渐减弱,粘性泥石流由于固体颗粒全部参与浆体结构组成,故不具有颗粒分选性和沉积分层特征。本文由于实验土样 0.1 mm 以下颗粒仅占 2 mm 以下颗粒的 10%,均表现为分层沉积特征。但不同密度泥石流浆体细颗粒浓度不等,浆体细颗粒浓度从低到高,粒间超孔隙水压力逐渐增大,浆体中细颗粒沉降越慢。

为深入研究泥石流密度对颗粒沉降的影响,分析数码摄像机拍摄的每组实验中细颗粒沉积过程图像,每隔一分钟读取细颗粒沉积高度得到不同密度泥石流细颗粒沉降曲线见图 4。从图 4 可看出,在实验 20 min 内,泥浆沉积速率由快及慢,但整体上泥浆沉积高度仍近似于线性降低。由于实验观测时间有限,可预测泥浆沉积速率降会逐渐减小最终趋于 0,沉积曲线变化特征与地基变形中的压缩曲线近似。但本文目的不在于获取整个压缩曲线探讨泥石流沉积全过程,而仅在于讨论泥石流沉积初期扬压力的变化,因此仅分析实验观测期(即泥石流沉降初期)内不同密度泥浆沉积特征。

为进一步分析泥石流密度与细颗粒沉降速率的关系,对图 4 中六种密度下的细颗粒沉积曲线按照式(2)进行拟合:

$$H = -v_s \cdot t + b \quad (2)$$



注:图中 1.1~1.6 表示泥浆密度,单位为 g/cm^3

图4 浆体细颗粒沉积曲线图

Fig.4 The deposition curves of debris flow slurries with different densities

式(2)中 H 为细颗粒浆体高度, t 为时间, v_s, b 为常数, v_s 代表细颗粒沉降速率。式(2)反映了泥石流沉积早期,浆体溶液保持线性变化的特征。同时可看出,泥石流密度越大,沉积速率越慢,沉积过程越长,泥石流由稀变粘,沉积时间可从数小时到数天。对于本实验采用不同密度泥石流细颗粒沉积曲线按式(2)拟合得 v_s, b 参数及相关性系数总结于表 2。根据表 2 中数据得到密度与细颗粒沉积速率的关系图 5,图中拟合曲线关系式为:

$$v_s = -1.038 \cdot \rho + 2.064 \quad R^2 = 0.9888 \quad (3)$$

式(3)中 ρ 为 2 mm 以下颗粒配制泥石流浆体密度, v_s 为泥浆沉降速率。式(3)反映了泥石流在坝前沉积早期,泥石流浆体密度与颗粒沉积速率的存在良好的线性负相关关系。式(3)的成立建立在不同密度的泥石流颗粒组成相同的条件上,颗粒组成相同时浆体浓度随泥石流密度增大而增大,式(3)实际上反映了悬浮泥浆浓度与细颗粒沉降速率之间的线性相关性。除开泥石流密度,细颗粒含量也显著影响浆体浓度,关于不同细颗粒含量的泥石

表2 泥浆沉积曲线线性拟合参数

Tab. 2 Parameters of fitting equation for slurry deposition curves

泥石流浆体密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
v_d	0.925	0.833	0.712	0.571	0.518	0.416
b	50.03	50.16	49.86	49.83	49.72	49.76
R^2	20.99	50.99	60.99	30.99	10.987	0.990

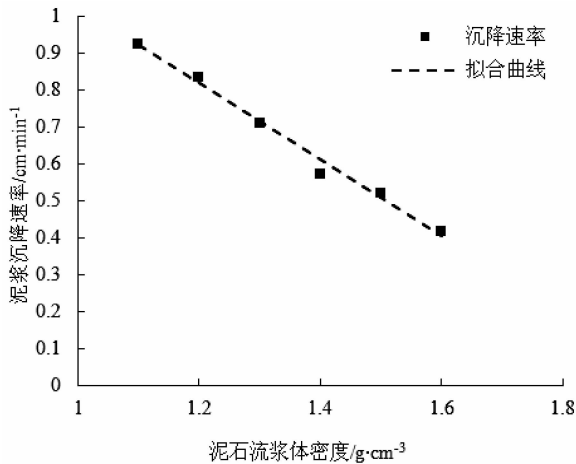


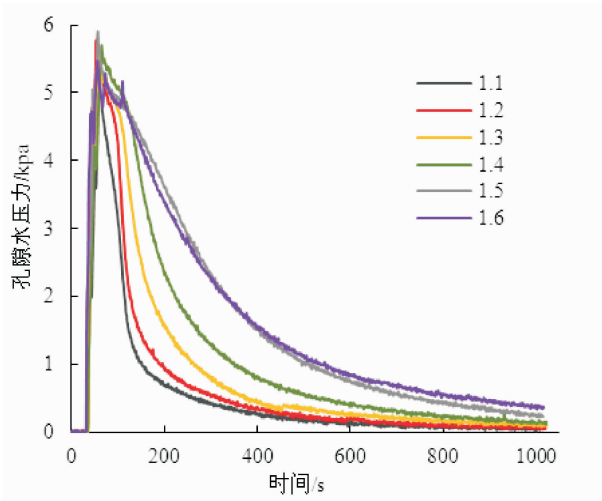
图5 泥石流密度与细颗粒沉降速率关系图

Fig.5 Relationship between the slurry deposition rate and the debris flow density

流泥浆浓度与沉积速率的关系将在下一步工作中开展。

3 泥石流沉积过程孔隙水压消散特征

泥石流在坝前沉积后的水力扩散决定渗入坝基土的水量,进而影响扬压力的大小和变化过程。图6为埋置在泥石流沉积底部的1#探头所测不同密度泥石流沉积过程中底部孔隙水压力消散曲线。前文分析稀性泥石流沉积分层后下部为粗颗粒,上部为细颗粒浆体,而1#探头埋置在沉积底部,故其所测为粗颗粒内部的孔隙水压力。



注:图中1.1~1.6表示泥浆密度,单位为 g/cm^3

图6 不同密度泥石流沉积底部孔隙水压力消散曲线

Fig.6 The pore water pressure dissipation curves of debris flows with different densities

从图6可看出不同密度孔隙消散曲线具有相似的变化趋势,即在泥石流来临之初孔隙水压达到峰值,随即快速消散,消散速率逐渐减小,最终以极小的速率缓慢下降。这种变化过程与泥石流颗粒沉降过程对应,泥石流来临之初,颗粒还保持一定的动力未发生沉积,颗粒浮重力全部由粒间孔隙水承担,粒间产生了超孔隙水压力;随着自身重力加载下孔隙水向上、下边界排出,压力逐渐从孔隙水转移至固体颗粒联结上。以上即为Terzaghi有效应力原理中超孔隙水压力转化为有效应力的过程,即式(4):

$$\sigma = \sigma' + u + u^* \quad (4)$$

式(4)中 σ 为总应力; σ' 为作用在骨架上的有效应力; u 为孔隙水压力,底部不渗透时 u 为静水压力,底部渗透时为渗透水压力; u^* 为超孔隙水压力。超孔隙水压力消散过程即 u^* 对应向 σ' 转化。颗粒沉积从底部往上沉积厚度逐渐增厚,故超孔隙水压消散从底部往上发展^[9],最终泥石流流体内部超孔隙水压完全消散,仅存在渗透水压力,直到泥石流完全固结。

不同性质泥石流颗粒沉降速率不同,颗粒分选性能也差别较大,沉积底部孔隙水压力过程也有较大差别。对于水石分离的稀性泥石流,底部沉积粗粒间孔隙水存在消散与补给两个过程:沉积底部粗粒内部孔隙水扩散至坝基土,粒间孔隙水消散;上部浆体细颗粒沉积时的孔隙水消散对下部沉积粗粒间孔隙水补给。但下部孔隙水压力消散速率远远大于上部孔隙水压力消散速率,这从图6中底部孔隙水压力曲线快速下降也可知消散作用远远大于补给作用。特别当上部浆体中细颗粒在粗颗粒沉积层上沉积后形成了阻水层,上部浆体孔隙水压力对下部粒间孔隙水补给作用大大降低,最终沉积底部孔隙水压逐渐降低至趋于0。下面结合实验结果详细分析不同密度泥石流沉积底部孔隙水压力消散过程。

为具体分析沉积底部孔隙水压力消散过程与泥石流密度和细颗粒沉降之间的关系,截取图6中最大值之后的曲线段,通过matlab拟合工具对曲线段按照下式拟合:

$$P_w = a \times \exp(-r \cdot t) \quad (5)$$

式(5)中 P_w 为孔隙水压力, t 为时间, a, r 分别为与孔隙水压峰值和下降曲率相关的常系数, a 的值代表初始时刻的峰值, r 则影响曲线的变化速率。图6中六条曲线按式(5)拟合的 a, r 参数及相关性系数总结于表3。从表中数据可看出六条曲线对应

a 的大小相差不大且不具有明显的规律性,但 r 的值却相差较大,表现为曲线越陡 r 越大,故将 r 作为表征坝前孔隙水压力消散强度指标。图 7 为根据表 3 中数据所作泥石流密度 ρ 与孔隙水压力消散强度指标 r 的关系图,图中拟合线性关系式为:

$$r = -0.025\rho + 0.0419 \quad R^2 = 0.9538 \quad (6)$$

式(6)的拟合关系说明孔隙水压力消散强度指标 r 与泥石流密度 ρ 呈线性负相关性,即 2 mm 以下颗粒配得泥石流密度越小, r 越大代表曲线下降越陡,沉积底部粗粒间孔隙水压力消散越快。这种关系的成立在于泥石流密度越小,上部悬浮浆体细颗粒浓度越小,细颗粒沉积速率越快,沉积后很快在下部粗颗粒沉积层上形成了阻水层,下部粗粒间孔隙水缺少了上部孔隙水的补给,孔隙水压力也迅速降低。而式(6)实际上间接反映了上部悬浮细颗粒沉积速率与下部粗粒间孔隙水压力散能力的线性负相关性。

表 3 孔隙水压力消散曲线指数函数拟合参数

Tab. 3 Parameters of fitting equation for pore water pressure dissipation curves

泥石流流体密度 /(g · cm ⁻³)	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
a	5.425	6.214	5.961	6.024	5.857	5.521
$r(10^3)$	15.22	12.36	8.420	6.069	3.710	3.412
R^2	0.959	0.961	0.976	0.983	0.995	0.990

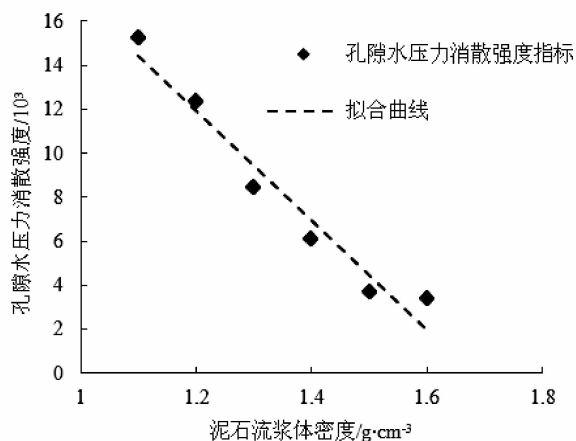
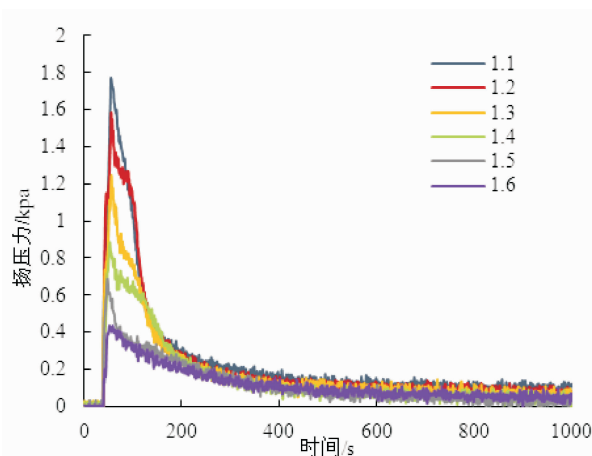


图 7 泥石流密度与孔隙水压力消散强度指标关系曲线

Fig. 7 The relationship between pore water pressure dissipation index and the debris flow density

4 泥石流沉积过程中的坝基扬压力

图 8 为不同密度泥石流浆体坝前沉积过程中坝基底部(2#探头处)扬压力的变化曲线,可看出六条扬压力曲线都具有相似的变化趋势:在泥石流来临之初,扬压力在很短时间内上升到峰值,随即快速下降,下降速率逐渐减缓,最终扬压力值趋于 0。扬压力变化过程与泥石流沉积底部孔隙水压力消散有关:泥石流孔隙水压力消散强度越大,渗透到坝基的水越多,作用在坝基底部的扬压力越大。从前文分析可知不同性质泥石流坝前粗、细颗粒沉积过程影响了底部能力。



注:图中 1.1~1.6 表示泥浆密度,单位为 g/cm³

图 8 不同密度泥石流扬压力衰减曲线图

Fig. 8 The uplift pressure attenuation curves of different densities debris flow slurries

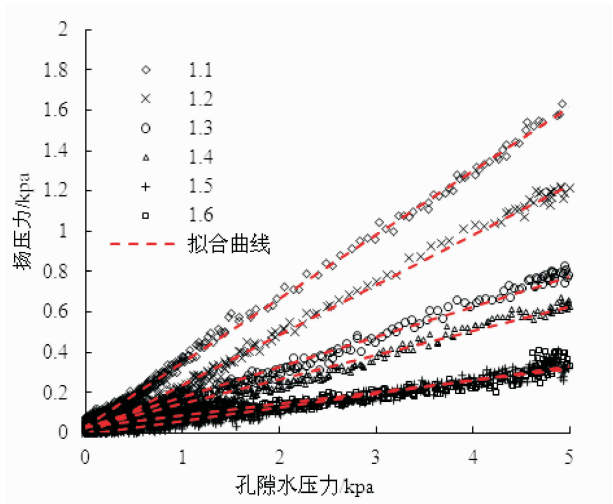
结合泥石流来临后的沉积过程和坝前孔隙水压力消散过程分析扬压力的变化。从图 8 中可看出,沉积之初扬压力上升和下降曲线形成了尖锐的峰值扬压力,这是由于泥石流来临瞬间对坝基土的冲击荷载作用,从而在坝底部产生了超孔隙水压力,随着坝基土内部水的扩散,坝基底部超孔隙水压快速消失;而后坝前孔隙水压力消散至坝基土中对扬压力补给,使扬压力仍能在短时间内保持较大值,但随着坝前颗粒沉积,扬压力又迅速减小;当坝前细颗粒沉积形成阻水层后,坝前孔隙水压力消散对扬压力的补给变得很小,最终以极慢的速度趋于 0。

图 8 中不同密度浆体扬压力峰值和变化速率差别较大,这是由于不同密度沉积过程中孔隙水压力消散速率和颗粒沉积速率的差异。由前分析可得,

坝基土内超孔隙水压力消散后,扬压力的变化过程主要受坝前孔隙水压力消散强度影响,取图 6 中孔隙水压力低于 5 kpa 的数据与图 8 中扬压力最大值以后的数据进行拟合,得到图 9 坝前沉积粗粒间孔隙水压力与坝基底部扬压力的关系曲线,图中各密度对应曲线按照下式进行线性拟合:

$$P_y = k \cdot P_w + b \tag{7}$$

式(7) P_y 表示扬压力, P_w 同前, k, b 为常系数,各密度对应曲线拟合式(7)的 k, b 常数列于表 4。表中可见 b 的值很小可以忽略不计,即说明泥石流沉积后期,坝前孔隙水压力与扬压力的值都很小接近于 0。由此斜率 k 值的大小决定了扬压力的值, k 值随泥石流密度增大而减小。



注:图中 1.1 ~ 1.6 表示泥浆密度,单位为 g/cm^3

图 9 坝前孔隙水压力与扬压力关系曲线图
Fig. 9 The relationship between pore water pressure and uplift pressure

式(7)的成立说明对于稀性泥石流,坝基扬压力与坝前泥石流沉积底部孔隙水压力在各时间段变化趋势一致且成比例,这是因为稀性泥石流的扬压力主要来源于坝前孔隙水压力消散的补给作用。而对于粘性泥石流,坝前孔隙水压力消散对扬压力的补给较小,对于式(7)的成立条件将在后续文章中进行探讨。

式(7)同时反映了在坝前孔隙水压力相同时,密度越小扬压力越大,结合前节所得结论即浆体浓度越小,坝前孔隙水压力扩散越快,扬压力越大。根据表 3 中 r 值和表 4 中 k 值绘制两者关系见图 10,拟合线性关系式:

$$k = 21.5r - 0.0168 \quad R^2 = 0.993 \tag{8}$$

表 4 孔隙水压力与扬压力关系曲线线性拟合参数

Tab.4 Parameters of fitting equation for uplift pressure attenuation curves

泥石流浆体密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
k	0.317	0.247	0.148	0.120	0.067	0.058
b	0.031	0.011	0.029	0.027	0.005	0.030
R^2	0.995	0.993	0.984	0.975	0.957	0.929

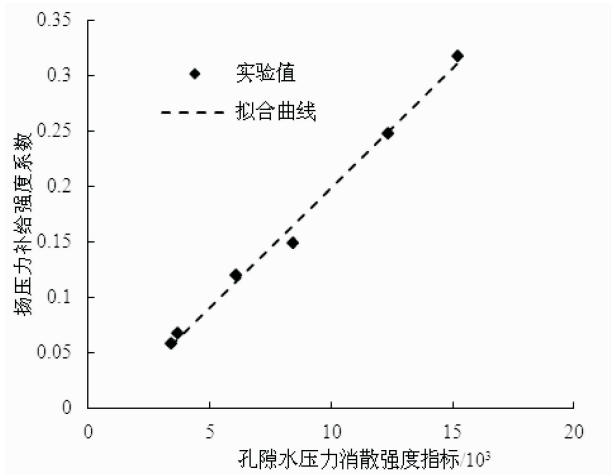


图 10 坝前泥流水力扩散指标 r 与扬压力补给强度系数 k 之间的关系

Fig. 10 The relationship between pore water pressure dissipation index r and the ratio k

式(8)反映了 r 与 k 之间的线性正相关性, r 代表坝前孔隙水压力扩散能力, k 定义为坝前孔隙水压力扩散对扬压力的补给强度系数, k 值越大,坝前孔隙水扩散对扬压力的补给越大。式(8)反映了泥石流密度越小,坝前泥石流孔隙水压力对扬压力的补给越大,且孔隙水压力消散强度与扬压力补给系数之间存在线性正相关性。

另外,坝基扬压力的值满足线性递减分布,3# ~ 6#探头测得扬压力值与 2#探头值变化规律一致,仅 k 值发生变化,故本文不再讨论其他探头的变化。

从式(3)、式(6)和式(8)分别反映了泥石流密度对浆体细颗粒沉积速率、沉积底部孔隙水压力和扬压力的影响,即在颗粒组成级配相同的情况下,泥石流固体物质浓度越小,上部悬浮浆体浓度越小,细颗粒沉降速率越快,坝前孔隙水压扩散能力更强,扬压力的值越大,衰减也越快。

5 结论与讨论

本文对不同密度的六种泥石流进行坝前沉积渗

透模拟实验,观测得到不同密度泥石流作用在坝前的粗、细颗粒沉积特征和速率,坝前孔隙水压力消散过程以及坝基扬压力的衰减变化过程,得到以下研究成果:

(1)稀性泥石流坝前沉积具有明显的颗粒分选性,从沉积底部到上部颗粒粒径逐渐减小,悬浮浆体细颗粒沉降速率与泥石流密度呈线性负相关: $v_s = -1.038 \cdot \rho + 2.064$;

(2)坝前泥石流沉积从下部逐渐往上发展,沉积底部粗粒间孔隙水压力消散过程满足指数函数变化: $P_w = a \times \exp(-r \cdot t)$,上层浆体沉降速率是影响下层粗粒间孔隙水压力衰减速率的重要因素。

(3)对于稀性泥石流,坝底扬压力主要来源于坝前孔隙水压力消散的补给作用,坝前泥石流沉积底部孔隙水压力与坝底扬压力具有相同的变化趋势且成比例,两者比例 k 值与孔压消散指标 r 呈线性正相关: $k = 21.5r - 0.0168$;

(4)泥石流沉积过程中的颗粒沉降、孔隙水压力消散和扬压力衰减是相互关联的,都受泥石流性质影响。对于水石分离的稀性泥石流,沉积分层后浆体中细颗粒浓度是影响沉积过程和扬压力的关键因素,细颗粒浓度越高,孔隙水压力消散越慢,扬压力的值越小;而对于水石一体的粘性泥石流,则表现为整体沉积,孔隙水压力消散极慢,扬压力仅产生于在泥石流最初加载时产生的超孔隙水压力,随着超孔隙水压力消散,扬压力可以忽略不计。故工程上对扬压力是否考虑的关键在于泥石流性质与孔隙水压力扩散能力,关于考虑扬压力的界限指标的研究将是后续研究扬压力的重点。

参考文献 (References)

- [1] IVERSON R M, GEORGE D L. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis [J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2014, **470**(2170): 20130819.
- [2] CUI Peng. Study on conditions and mechanisms of debris flow initiation by means of experiment [J]. Chinese Science Bulletin, 1992, **37**(9): 759.
- [3] TAKAHASHI T. Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures [M]. CRC press, 2014:1-36.
- [4] IVERSON R M. The physics of debris flows [J]. Reviews of Geophysics, 1997, **35**(3): 245-96.
- [5] 崔鹏,唐金波,林鹏智. 泥石流运动阻力特性及其研究进展 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(3): 1-11 [CUI Peng, TANG Jinbo, LIN Pengzhi. Research progress of resistance character of debris flow [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48**(3): 1-11]
- [6] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治 [M]. 清华大学出版社有限公司, 2004:22-33 [FEI Xiangjun, SHU Anping. The physics and prevention of debris flow [M]. Tsinghua University Press Ltd, 2004:22-33]
- [7] 倪晋仁,章书成. 阵性泥石流运动与堆积的欧拉-拉格朗日模型—I理论 [J]. 自然灾害学报, 2000, **9**(3): 8-14 [NI Jinren, ZHANG Shucheng, et al. An Euler-Lagrange model for non-continuous debris flow: I. theory [J]. Journal of Natural Disasters, 2000, **9**(3): 8-14.]
- [8] HAAS T, BRAAT L, LEUVEN J R F W, et al. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments [J]. Journal of Geophysical Research-Earth Surface, 2015, **120**(9): 1949-72.
- [9] MAJOR J J. Gravity-Driven Consolidation of Granular Slurries: Implications for Debris-Flow Deposition and Deposit Characteristics [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, **70**(1): 64-83.
- [10] MAJOR J J, IVERSON R M. Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins [J]. Geological Society of America Bulletin, 1999, **111**(10): 1424-34.
- [11] HAMPTON M A. Buoyancy in Debris Flows [J]. Journal of Sedimentary Research, 1979, **49**(3): 753-8.
- [12] PIERSON T C. Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility [J]. Sedimentology, 1981, **28**(1): 49-60.
- [13] HE Songtang, WANG Daojie, CHEN Shun, et al. Natural consolidation characteristics of viscous debris flow deposition [J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(10): 1723-34.
- [14] BOERR D, DIDWANIA A K. The effect of uplift in liquid-saturated porous solids-Karl Terzaghi's contributions and recent findings [J]. Geotechnique, 1997, **47**(2): 289-98.
- [15] 金峰,梁通. 扬压力问题存在的分歧及最新进展 [J]. 水力发电学报, 2009, **28**(3): 62-8 [JIN Feng, LIANG Tong, The difference in concept of uplift force and its recent progress [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, **28**(3): 62-8]
- [16] BARLA G, BONINI M, CAMMARATA G. Stress and seepage analyses for a gravity dam on a jointed granitic rock mass [C]// Proceedings of the First International UDEC/3DEC Symposium, Bochum. 2004, 29: 263-268
- [17] 钟敦伦,谢洪. 泥石流灾害及防治技术 [M]. 四川科学技术出版社, 2014:250-251 [ZHONG Dunlun, XIE Hong, Prevention and control technology of debris flow disaster [M]. Sichuan Science and Technology Press, 2014:250-251]
- [18] 李德基. 泥石流减灾理论与实践 [M]. 北京:科学出版社, 1997:96-98 [LI Deji, Theory and practice of debris flow disaster reduction [M]. Beijing: Science Press, 1997:96-98]
- [19] 邱贤德,阎宗岭,刘立,等. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响 [J]. 岩土力学, 2004, **25**(6): 950-4 [QIU Xiande, YAN Zongling, LIU Li, et al. Effect of particle-size characteristics on seepage property of rockfill [J], Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(6): 950-4]
- [20] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等. 中国泥石流研究 [M]. 科学出版社, 2004:119-123 [KANG Zhicheng, LI Zhaofen, MA

- Ainai, et al. Research on debris flow in China [M]. Science Press, 2004: 119 – 123]
- [21] 朱国胜, 张家发, 陈劲松, 等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究 [J]. 岩土力学, 2012, **33**(9): 2569 – 74 [ZHU Guosheng, ZHANG Jiafa, CHEN Jinsong, et al. Study of size and wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(9): 2569 – 74]
- [22] 陈宁生, 杨成林, 李欢. 基于浆体的泥石流容重计算 [J]. 成都理工大学学报(自科版), 2010, **37**(2): 168 – 73 [CHEN Ningsheng, YANG Chenglin, LI Huan. Calculation of debris flow concentration based on debris flow slurry [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition). 2010, **37**(2): 168 – 73]

Experimental Study on Characteristics of Debris Flow Deposition and the Uplift Pressure of a Check Dam

ZHANG Li^{1,2,3}, YOU Yong^{1,2}, LIU Jinfeng^{1,2}, SUN Hao^{1,2,3}, LIU Daochuan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Sediment deposition and pore water dissipation are two processes in which excess pore water pressure evolves into effective stress during debris flow deposition. Pore water dissipation directly affects the magnitude and variation of dam foundation uplift pressure, thus compromising the stability of check dams. In this study, a special experimental apparatus was designed to simulate debris flow deposition and dam foundation seepage. In order to investigate the sediment sorting characteristics and its influence on uplift pressure, six groups of laboratory model experiments were conducted. During each test, pore water pressure at the depositional bottom of debris flow and uplift pressure at check dam foundation were collected using six water pressure sensors. Slurry deposition rates of debris flows with different densities were measured by video recorders. The results indicated that sediment sorting and pore water dissipation properties were interrelated with the uplift pressures in the debris flow deposition process. Particle sorting occurred when dilute debris flows started to deposit, where the upper slurry deposition rates was found to be negatively correlated with debris flow density. Experimental results indicated that the pore water pressure at the depositional bottom attenuated logarithmically with an attenuation coefficient that correlated linearly with the upper slurry deposition rate. Meanwhile, the dam foundation uplift pressure attenuated logarithmically and showed a linear variation with the pore water pressure at the depositional bottom. By this study a comprehensive understanding about uplift pressure generating mechanisms in check dam foundations was obtained, with particular focus on the debris flow deposition and pore water dissipation processes. New perspective has been gained in determining uplift pressures in check dam designs, thus providing better technical support and reference for debris flow disaster prevention and mitigation.

Key words: debris flow; check dam; grain deposition; hydraulic diffusion; uplift pressure