

罗渝, 何思明, 宋鹏飞. 高速远程滑坡的热-水-力动力学研究现状与展望[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 162-165. [LUO Yu, HE Siming and SONG Pengfei. Research Status and Prospects of Thermo-poro-mechanical Analysis of Long Runout Landslides Motions[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 162-165. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.028.]

## 高速远程滑坡的热-水-力动力学 研究现状与展望\*

罗渝<sup>1,2</sup>, 何思明<sup>1,2</sup>, 宋鹏飞<sup>3</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100097)

**摘要:** 高速远程滑坡往往以其超强的动力学特性、极高的运动速度和超远的运动距离造成极为严重的生命财产损失。高速远程滑坡超强动力学特性的内在机理研究, 已成为国内外学者关注的热点问题。目前越来越多的学者开始从滑面热-水-力耦合响应的角度出发, 阐释高速远程滑坡的动力学特性。这一研究思路也越来越受到国内外学者的关注和重视。我国面临的滑坡灾害防灾减灾形势异常严峻, 而在高速远程滑坡的热-水-力动力学研究方面, 还处于刚刚起步的阶段。因此, 在查阅大量文献的基础上, 阐述了国内外从滑面热-水-力耦合响应角度, 对高速远程滑坡运动演化研究方面的研究现状, 对目前在这方面研究中所提出的理论和模型进行了归纳与总结, 同时点评了目前研究存在的难点, 并在此基础上提出了今后的研究展望。

**关键词:** 高速远程滑坡; 热-水-力; 动力学机理; 研究现状; 展望

**中图分类号:** X43; P642.2   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-811X(2016)04-0162-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.028

高速远程滑坡较一般的滑坡而言, 具有更快的运动速度和更远的运动距离, 往往造成更严重的危害, 属于灾难性滑坡。例如2009年6月5日, 发生在我国重庆武隆的鸡尾山滑坡, 滑坡运行了1.5 km, 掩埋了下游的铁矿, 造成74人死亡, 8人受伤<sup>[1]</sup>。2010年6月28日14:30, 贵州省关岭县岗乌镇大寨村山体滑坡, 滑坡方量约 $170 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 形成沿沟谷长约1.5 km的滑坡松散堆积区, 造成该村两个村民组37户被掩埋, 42人死亡, 57人失踪<sup>[2]</sup>; 2010年7月27日, 四川汉源县万工乡双合村一组万工集镇后背山(小地名二蛮山)突发滑坡, 方量约 $120 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 最终运动距离接近1.4 km, 造成万工集镇、双合一组部分村民房屋垮塌, 20人失踪, 92户村名房屋倒塌, 1500人转移<sup>[3]</sup>; 2013年7月10日, 都江堰市中心镇三溪村突发大规模山体滑坡, 滑体宽约300 m, 纵长约150 m, 体积超过 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 滑动距离1.26 km, 造成11户农房被毁、43人遇难、100多人失踪的严重

危害<sup>[4]</sup>。

高速远程滑坡灾害对人民生命财产的危害极为严重, 使得人们开始重点关注其高速远程的动力学机理研究。到目前为止, 越来越多的学者认为, 在滑动过程的摩擦生热, 使滑面剪切带温度升高, 从而导致孔隙水压力增加, 而使得滑面的法向应力减小以致滑面摩擦阻力降低, 是驱使其具有远程高速特性的关键。因此从滑面热-水-力耦合响应的角度出发, 阐释高速远程滑坡的动力学特性, 是国内外学者最为关注和重视的研究方向。

因此, 本文基于大量的文献资料, 展开了滑面热-水-力耦合的高速远程滑坡运动机理研究中所提出理论和模型的归纳、总结, 同时点评了目前研究存在的问题和不足, 并提出了相应的研究展望, 希望能为今后该领域的研究提供一些参考价值。

\* 收稿日期: 2016-04-13    修回日期: 2016-05-23

基金项目: 中国科学院西部之光人才培养计划项目“大型降雨滑坡动力过程模拟及危害范围预测”(Y5R2060060); 中国自然科学基金项目“考虑滑面热-水-力耦合响应的大型降雨滑坡运动特性研究”(41401004); 交通运输部科技项目“公路地质灾害多维网络化监测与预警关键技术及示范”(2014364J03090); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室自主基金项目

第一作者简介: 罗渝(1981-), 女, 重庆人, 博士, 助理研究员, 主要从事滑坡灾害形成演化机理及防治技术研究。

E-mail: ly@imde.ac.cn

## 1 高速远程滑坡的热-水-力动力学研究现状

从滑面摩擦生热的角度出发, 展开高速远程滑坡的动力学机理研究, 主要有两种假说: ①认为滑动过程中释放的热量使滑面内的孔隙水汽化, 形成水汽垫层, 这个水汽垫层的存在是滑坡高速远程运动的关键; ②认为由于摩擦生热, 就算滑面的水没有发生汽化作用, 滑面剪切带温度升高, 也会使孔隙水压力增加, 从而降低滑面摩擦阻力, 导致滑坡具有更大的速度和更远的距离。同时在这一假说的基础上展开的热-水-力动力学研究, 按其运动物理模型又可分为基于功能原理的滑块模型和基于流体力学深度平均理论变形体模型。

### 1.1 基于“水汽垫层”说的滑坡热-水-力动力学研究

Habib 最早从滑面摩擦生热的角度出发展开相关研究, 提出了“孔隙水压力学说”, 认为远程高速滑坡沿滑动面高速滑动时, 由于摩擦阻力做功, 会在滑面上产生热量, 而如果剪切速率足够大, 滑面释放的热量甚至可将水变成水蒸气, 产生水汽垫层。这汽垫支撑着滑坡体并产生润滑作用是其具有远程高速的运动特性<sup>[5]</sup>。随后其他学者也对远程高速滑坡滑动面上水的汽化作用导致孔隙压力的增加, 进而降低滑动面摩擦阻力, 展开了相关的研究<sup>[6-8]</sup>; 邢爱国等对大型高速岩质滑坡在启动活动阶段由于摩擦产生高温, 使滑带水突然汽化, 产生水汽垫层, 重点对高速远程滑坡启程活动阶段的孔隙水压力汽化压力效应展开了研究。计算分析了高速滑坡滑动过程中滑面温度的变化规律, 并以头寨沟滑坡为例计算其孔隙水汽化压力。研究结果证实了孔隙水汽化的可能性, 并进一步计算了孔隙水汽化压力的大小<sup>[9]</sup>。

由上述可以看出, 基于“水汽垫层说”的滑坡热-水-力动力学研究成果较少, 集中于初步的、基本的、阶段性的理论研究阶段, 研究方法与研究思想都不成熟, 没有形成完整的、规律性的成果。究其原因是在孔隙水压力与汽化的水汽压力耦合以及水汽压力与剪应力耦合的问题方面没有得到突破性的解决, 使得基于“水汽垫层说”的滑坡热-水-力动力学研究处于一个基本停滞的阶段。

### 1.2 基于热-水-力耦合运动物理模型的动力学研究

1980 年, Anderson 最早从滑面的摩擦生热导致滑面孔隙水压力增加, 使滑面摩擦阻力降低, 建立地震滑坡的一维热-水-力耦合运动物理模型, 研究其动力学特性, 其研究结果显示由于摩擦生热, 就算滑面的水没有发生汽化作用, 滑面剪切带温度升高, 也会使孔隙水压力增加, 从而降低滑面摩擦阻力, 从而导致滑坡具有更大的速度和更远的距离<sup>[10]</sup>; 随后这一结论又被 Vioght 等

在高速滑坡一维滑块模型动力学研究成果中得到证实<sup>[11]</sup>。之后这一学说受到了相关学者的广泛关注, 展开了一系列高速远程滑坡热-水-力动力学研究<sup>[12-16]</sup>。其中, Vardoulakis 基于这一理论对灾难性远程高速滑坡的热-水-力运动特性展开研究, 分析了运动过程中滑面剪切带的温度、孔隙水压力以及速度演变过程<sup>[17]</sup>。随后, Vardoulakis 又进一步对其提出的一维热-水-力运动模型进行了探讨, 指出原热-水-力运动模型的问题在于使用规则的粘滞类型和规范化的第二梯度<sup>[18]</sup>。Goren 则在以上研究的基础上, 考虑滑坡体积的影响, 研究了热-水-力耦合的滑坡体积对滑动速度、滑动距离的影响, 同时也指出大体积的滑坡其滑面剪切带越厚, 运动距离越远<sup>[19-21]</sup>。Cecinato 等在高速远程滑坡的热-水-力动力学研究方面, 采用一个更普遍和更实际的土体本构模型, 考虑滑动过程中的热产生和扩散, 孔隙压力的产生和耗散, 以及依赖于土体力学特性的温度变化, 提出一种新的研究高速远程滑坡热-水-力动力学特性的运动物理模型, 模型具有同时容纳应变-应变率-热摩擦-软化的特点。最后以 Vajont 滑坡为例, 进行了模拟分析, 揭示了该模型的摩擦软化和增压机制的敏感性<sup>[22]</sup>。刘威等在 Goren 提出的热-水-力耦合运动物理模型的基础上结合滑坡侵蚀率公式, 提出了滑坡沿程侵蚀作用下的高速远程滑坡一维热-水-力耦合运动物理模型, 研究了高速滑坡的热-水-力动力学效应及侵蚀效应。其研究结果表明: 高速滑坡运动过程中的热-水-力耦合作用效应提升了滑坡的流动性并显著影响滑坡的沿程侵蚀作用<sup>[23]</sup>。

这些模型从滑面热-水-力耦合的角度, 建立高速远程滑坡的运动物理模型, 研究滑坡的运动特性, 揭示其远程高速运动特性的内在机理, 在高速远程滑坡的动力过程研究方面取得了较大的进展, 很大程度上推进了从滑面热-水-力耦合响应的高速远程滑坡动力学机理研究。但是这些基于功能原理的滑块模型也主要集中于展开一维尺度下的研究, 同时也存在一定的缺陷, 将滑坡体简化为集中质量的刚性体, 忽略滑坡的内部变形及能量耗散, 与实际情况存在一定的差别。

### 1.3 基于流体力学深度平均理论变形体模型的滑坡热-水-力动力学研究

一些研究者, 关注到了高速远程滑坡在运动过程中呈现出的流态化特征, 针对这一特点, 人们将远程高速滑坡看成是一维浅水明渠流, 并采用流体力学深度平均方法将其简化, 滑坡基底层采用不同的流变模型, 如层流模型、塑性流模型、库伦摩擦模型、宾汉姆模型、Voellmy 模型等, 进行滑坡的动力学机理研究, 并取得了较为成熟的研究成果<sup>[24-31]</sup>。因此, 在高速远程滑坡的热-水-力动力学机理研究中, 有学者开始尝试将基于流体力学深度平均理论的滑坡运动物理模型引入热-水-力耦合的滑块模型中, 建立高速远程滑坡

的热-水-力耦合变形体运动物理模型,以解决基于功能原理滑块模型的不足。何思明、刘威等将基于浅水流模型的深度平均理论和热-水-力耦合方法相结合提出一种新的高速远程滑坡运动物理模型,采用有限体积法和 Crank-Nicolson 相结合的方法进行求解,展开了高速远程滑坡的动力学过程研究。其研究结果表明,滑坡滑动过程中的摩擦生热作用可以使孔隙水压力增大,从而降低滑面的摩擦阻力,提高滑坡体的动力学特性,促使其产生更远的滑动距离<sup>[32]</sup>。

基于流体力学深度平均理论的变形体模型能够考虑滑坡运动过程中的流态化特征,在一定程度上揭示了高速远程滑坡的热-水-力动力学机理,具有清晰的研究思路和研究方案。但是目前的研究也仅提出了一维尺度、特定条件下的变形体运动物理模型,还不具备其应用的普遍性。因此这方面的研究还有待进一步的摸索和总结。

## 2 高速远程滑坡的热-水-力动力学研究难点

综上高速远程滑坡热-水-力动力学研究方面的研究现状可以发现,目前在这方面的研究难点主要体现如下。

(1)高速远程滑坡具有体积大、突发性强的特点,而现有的监测手段和仪器都无法获取在其滑动过程中,滑面摩擦生热导致剪切带内的温度、孔隙水压力变化和扩散的数据资料。因此,缺乏有效的实际研究数据资料的支撑是高速远程滑坡的热-水-力耦合动力学机理研究的一大难点。

(2)由于高速远程滑坡的运动具有体积效应,常规的室内模型试验无法模拟出滑面的热-水-力耦合响应过程。因此,通过室内试验展开高速远程滑坡热-水-力动力学研究机理是又一研究难点。

(3)高速远程滑坡运动过程中滑面剪切带内的热-水-力耦合响应是一个复杂过程,贯穿滑坡运动的整个过程,受到滑坡体物质组成、力学性质以及运动速度、滑坡体积等诸多因素的影响,因此很难建立一个能够全面考虑众多影响因素的热-水-力耦合运动物理模型,也是这方面研究需要突破的一大难点。

因此,由于以上原因使得高速远程滑坡的热-水-力动力学研究受到阻碍,到目前为止尚有许多问题没有得到解决,其高速远程的热-水-力耦合响应动力学机理尚不明确,还需要科技工作者继续努力。

## 3 展望

基于上述分析的高速远程滑坡的热-水-力动力学研究的研究现状及研究难点,作者认为,

未来在这方面的研究可以从以下几个方面展开,以寻求突破性的进展。

(1)将高速远程滑坡的热-水-力耦合运动物理模型从一维尺度扩到二维尺度。实现在真实地形地貌条件下的高速远程滑坡热-水-力动力学研究,揭示其运动过程中滑面孔隙水压力以及温度场在二维空间上的演化规律。

(2)建立多种模型联合的高速远程滑坡的热-水-力耦合运动物理模型。高速远程滑坡的滑面热-水-力耦合效应受岩土体性质、物质组成、运动速度、滑坡体体积、摩擦软化等等多种因素的影响,而目前的研究,各种运动物理模型都仅考虑了其中一项或几项因素的影响。因此,将这些模型耦合起来进行系统地研究,以得到更加贴近实际的运动物理模型,对揭示高速远程滑坡的热-水-力动力学机理非常必要。

(3)发展物理模型试验技术。通过研发新型的可替代材料和试验设备,发展可以模拟高速远程滑坡滑面热-水-力耦合效应的模型试验技术,研究高速远程滑坡的热-水-力动力学机理。

(4)进一步发展数值模拟技术。数值模拟技术是研究高速远程滑坡热-水-力动力学机理的重要手段,未来热-水-力运动物理模型的发展,势必需要更为高性能的数值计算算法和模拟技术的支撑,以展开高速远程滑坡的热-水-力动力学机理研究。

## 参考文献:

- [1] 冯振,殷跃平,李滨,等. 重庆武隆鸡尾山滑坡视向滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2704-2712.
- [2] 张建江,杨胜元,王瑞. 贵州关岭“6·28”特大地质灾害的启示[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 137-139.
- [3] 许强,董秀军,邓茂林,等. 2010年“7·27”四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 609-622.
- [4] 殷志强,徐永强,赵无忌. 四川都江堰三溪村“7·10”高位山体滑坡研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 309-318.
- [5] Habib P. Production of gaseous pore pressure during rockslide[J]. Rock Mechanics, 1975, 7(4): 193-197.
- [6] Habibagahi K. Temperature effect and the concept of effective void ratio[J]. Indian Geotechnical Journal, 1977(1): 14-34.
- [7] Goguel J. Scale-dependent rockslide mechanisms, with emphasis on the role of pore fluid vaporization[J]. Developments in Geotechnical Engineering, 1978, 20(14a): 693-705.
- [8] Romero SU, Molina R. Kinematic aspects of the Vaiont slide[C]// Proc. 3rd Congress Int. Soc. Rock Mechanics, Denver, Vol. II, Part B, 1974: 865-870.
- [9] 邢爱国,胡厚田,姚令侃. 大型高速岩质滑坡启动活动阶段孔隙流体压力效应[J]. 水土保持学报, 2001, 21(3): 17-19.
- [10] Anderson D L. An earthquake induced heat mechanism to explain the loss of strength of large rock and earth slides[C]// Int. Conf. On Engineering for Protection from natural disasters, Bangkok, 1980.
- [11] Voight B, Faust C. Frictional heat and strength loss in some rapid

- landslides[J]. *Geotechnique*, 1982, 32: 43–54.
- [12] Lee T C, and Delaney P T. Frictional heating and pore pressure rise due to fault slip[J]. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1987, 88(3): 569–591.
- [13] Andrews D J. A fault constitutive relation accounting for thermal pressurization of pore fluid[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107 (B12), 2363–2371.
- [14] Bizzarri A, Cocco M. A thermal pressurization model for the spontaneous dynamic rupture propagation on a three-dimensional fault; 1. Methodological Approach[J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111 (B05303): 1–22.
- [15] Bizzarri A, Cocco M. A thermal pressurization model for the spontaneous dynamic rupture propagation on a three-dimensional fault; 2. Traction evolution and dynamic parameters[J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111(B05304): 1–18.
- [16] Rice J R. Heating and weakening of faults during earthquake slip [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111(B05311): 1–29.
- [17] Vardoulakis I. Catastrophic landslides due to frictional heating of the failure plane[J]. *Mech. Coh. Frict. Mat.*, 2000, 5: 443–467.
- [18] Vardoulakis I. Thermo-poro-mechanical analysis of rapid fault deformation[C]// *POWDERS & GRAINS 2001*, Proceedings of the 4th International Conference on Micromechanics of Granular Media, Sendai Japan, May 21–25, 2001.
- [19] Goren L, Aharonov E. Long runout landslides: The role of frictional heating and hydraulic diffusivity[J]. *Geophysical research letters*, 2007, 34(L07301): 1–7.
- [20] Goren L, Aharonov E, Anders M H. The long runout of the mountain landslide: Heating, pressurization, and carbonate decomposition[J]. *Journal of geophysical research*, 2010, 115(B10210): 1–15.
- [21] Goren L, Aharonov E, Anders M H. Thermo-poro-mechanical effects in landslides dynamics [C]// *EGU General Assembly 2009*, in Vienna, Austria. 2009; 8686
- [22] Francesco Cecinato, Antonis Zervos, Emmanuil Veveakis. A thermo-mechanical model for the catastrophic collapse of large landslides[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2011, 35: 1507–1535.
- [23] 刘威, 何思明, 吴清. 高速远程滑坡热-水-力耦合效应与沿程侵蚀研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(5): 54–59.
- [24] Sassa K. Geotechnical model for the motion of landslides[C]// *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslide*. Rotterdam, 1988: 37–55.
- [25] Hungr O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32: 610–625.
- [26] Dougall M, Hungr O. A model for the analysis of rapid landslide motion across three dimensional terrain [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(6): 1084–1097.
- [27] Savage S B, Hutter K. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1989, 199: 177–215.
- [28] Oldrich Hungr, Scott McDougal. Two numerical models for landslide dynamic analysis[J]. *Computers & Geosciences*, 2009, 35: 978–99.
- [29] Iverson R M, Denlinger R P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, 1. Coulomb mixture theory[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 537–555.
- [30] Denlinger R P, Iverson R M. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, 2. Numerical predictions and experimental tests [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (B1): 553–556.
- [31] 鲁晓兵, 张旭辉, 崔鹏. 碎屑流沿坡面运动的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2009, 30(S2): 524–527.
- [32] Siming He, Wei Liu, Juan Wang. Dynamic simulation of landslide based on thermo-poro-elastic approach[J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 75: 24–32.

## Research Status and Prospects of Thermo-poro-mechanical Analysis of Long Runout Landslides Motions

LUO Yu<sup>1,2</sup>, HE Siming<sup>1,2</sup> and SONG Pengfei<sup>3</sup>

(1. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China*; 2. *Institute of Mountain Hazards and Environment (IMHE), Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; 3. *China Highway Engineering Consultants Co. Ltd., Beijing 100097, China*)

**Abstract:** In China, landslide is wide distribution, high frequency and can cause serious harm. Especially, long runout landslide can cause more seriously lives and financial losses for its strong kinematics characteristics of high motion speed and long runout. So study on the kinematics mechanism for long runout landslide has become a hot issue for researchers around the world. At present, more and more researchers begin to study on the kinematics mechanism for long runout landslide by the thermo-poro-mechanical coupling effect at the sliding surface. Furthermore, more and more scholars at home and abroad have attached importance and attention to this research idea. The landslide hazard prevention and mitigation we are facing become extremely serious. The research on thermo-poro-mechanical analysis of long runout landslides motions is just at the beginning stage. Therefore, this paper expounds research status of thermo-poro-mechanical analysis of long runout landslides motions based on a review of a plenty of literatures. It summarizes the existing models, comments on the research difficulties at present. And then, puts forward the research directions in the future. We hope to make some useful to the future research, by systematically sums up the relevant research about thermo-poro-mechanical analysis of long runout landslides motions.

**Key words:** long runout landslide; thermo-poro-mechanical; kinematics mechanism; research status; prospects