

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0601

水力作用诱发硬土软岩滑坡启动机制研究

朱谭方^{1,2}, 辛 鹏¹, 姚磊华², 胡 乐¹, 胡 波³

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 3. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 在我国西北地区, 降雨诱发了大量的新近纪硬土软岩滑坡灾害。为减轻该类灾害造成的损失, 以蔡家坡老滑坡为例, 采用地质分析与降雨离心机模型试验相结合的方法, 进行了两组不同水力条件的离心机模型试验, 研究水力作用下硬土软岩质滑坡的启动机制。结果表明: (1) 在水力作用下, 硬土软岩质滑坡呈多级、渐进式破坏, 变形演化具有初始变形阶段、加速变形阶段和流动破坏阶段; (2) 孔隙水沿着裂隙和结构面渗流扩散使孔隙水压力持续累积, 微地貌陡变区与坡脚强变形挤压区内的张裂隙为水体富集的主要空间; (3) 孔隙水压力的增量呈加速式变化导致了固态滑体短时流体化运动。今后在灾害风险防控过程中, 应加强裂隙化区域孔隙水压增长速度监测。

关 键 词: 硬土软岩; 滑坡; 水力作用; 启动机制; 离心模型试验

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 10-2733-09

Initiation mechanism of soft rock landslide induced by hydraulic action

ZHU Tan-fang^{1,2}, XIN Peng¹, YAO Lei-hua², HU Le¹, HU Bo³

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: Rainfall has induced many landslides of soft rock in Northwest China. To reduce the loss caused by this kind of disaster, based on the old landslide of Caijiapo town, two groups of centrifuge model tests with different hydraulic actions were conducted through the combination of geological analysis and simulated rainfall centrifuge model test, and the influence of hydraulic action on the initiation mechanism of the slope was discussed. The results show that: i) The soft rock slope is destructed by hydraulic action in a multi-staged and progressive way, and the deformation process includes the initial deformation stage, the accelerated deformation stage, and the flowing failure stage. ii) The pore water pressure obviously accumulates due to the seepage and diffusion of water towards the structural plane and the surface. Water mainly accumulates in the tensile cracks of steepened micro-geomorphologic area and areas with severe compressional deformation at the foot of slope. iii) In a short time, the increment of pore water pressure increases with time, causing the sliding mass fluidized. Therefore, in the process of disaster risk prevention and control, it is necessary to strengthen the monitoring of pore water pressure growth rate in fractured area.

Keywords: soft rock; landslide; hydraulic action; startup mechanism; centrifugal model test

1 引 言

水力作用是诱发灾难性滑坡启动的重要因素^[1-3]。硬土软岩在我国西北地区分布广泛, 降雨、地下水变动等水力作用触发了大量硬土软岩质滑坡灾害^[4-6]。为此, 围绕该类滑坡的分布规律、滑移机制与致灾风险, 诸多学者开展硬土软岩质滑坡形成机制的调查研究。王骑虎^[7]、张泽林^[8]等发现硬土

软岩质滑带内黏土矿物成分含量高, 易发生水力耦合作用。郭永春^[9]、穆文平^[10]等认为坡体启动与滑带易沿软弱层扩展联系紧密。徐则民^[11]、李峰^[12]等基于富黏粒软弱层水敏性强, 提出水力耦合作用导致边坡应力重分布与强度下降。吴道祥^[13]、吴琼^[14]等研究认为水力耦合作用导致岩体内部黏聚结构逐渐退化、摩擦强度逐渐丧失。随着观测技术的发展, 冯自立等^[15]发现水力耦合作用导致孔隙水压力激

收稿日期: 2021-05-13

修回日期: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 42077276); 中国地质调查局地质调查项目 (No. DD20190717)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42077276) and the Geological Survey Program of China Geological Survey Bureau (DD20190717).

第一作者简介: 朱谭方, 男, 1997年生, 硕士研究生, 主要从事滑坡机制方面的研究。E-mail: 2102190050@cugb.edu.cn

通讯作者: 辛鹏, 男, 1984年生, 博士, 副研究员, 主要从事滑坡机制方面的研究。E-mail: xxiinnpp@126.com

增,易触发滑坡堆积体大规模液化变形。但上述研究仍没有清晰回答水力作用诱发硬土软岩质滑坡启动的启动滑移机制及破坏模式。

离心机模型试验技术能重现原始重力场及与重力相关的变形过程,为与原型相似性较好的大型物理模型试验^[16]。张敏等^[17]率先设计离心机降雨模拟系统,该系统具有均匀分配雨水的性能。Ling 等^[18]发现斜坡破坏时坡体顶部含水率为 6%,而底部含水率为 10.5%,揭示含水率的提高导致黏聚力下降是滑坡启动的内在原因。程永辉等^[19]进行离心机模型试验,观测降雨条件下典型膨胀土边坡失稳滑动过程,发现发生滑坡时坡体含水率约为 35%,提出降雨使含水率上升,引起的土体膨胀变形导致的应力重分布诱发了边坡失稳。周跃峰等^[20]采用离心机试验模拟水位抬升诱发黄土-软岩滑坡的滑移过程,研究发现在上覆荷载作用下,当水位达到临界值(200~250 mm)时,孔隙水压力增大,土体发生迅速变形,剪切带持续发展导致坡体失稳。杜强等^[21]对砂土质边坡发生滑坡的宏微观机制进行研究,发现孔隙水压力在降雨入渗阶段可快速上升至 11.7 kPa,研究结果表明,孔隙水压力的升高降低了土体的抗剪强度并在土体上、下部间形成的水头差利于边坡发生破坏。以上诸多研究发现水力耦合作用导致坡体发生应力重分布,新的降水对坡体渗流场的影响也会促使斜坡岩土体强度下降。目前尚缺少降雨诱发硬土软岩滑坡的离心机模型试验,特别对滑坡启动过程的分析较少。

为分析水力作用诱发硬土软岩滑坡的启动滑移机制及破坏模式,论文以陕西省宝鸡市岐山县蔡家坡镇老滑坡为原型,设计了两组不同水力条件的离心机模型试验,实时观测了水体在硬土软岩质滑坡内的渗流、汇聚过程,分析了坡体应力变化规律、位移加速扩展过程及滑移模式,这些研究可为此类滑坡预防和治理等提供参考依据。

2 试验设计

2.1 试验设备

试验采用长江水利委员会长江科学院 CKY-200 型土工离心机(见图 1)。离心机主机系统有效半径为 3.7 m,有效重度为 200g·t,加速度的范围为 0~200g,调速精度为 0.1g。配套使用的模型箱侧面为透明的有机玻璃板,长×宽×高尺寸为 1.0 m×0.4 m×0.8 m。监测系统由压力监测、位移监测以及影像采集系统 3 部分组成,配有激光位移传感器、微型土压力传感器、微型孔隙水压力传感器和高清摄像机,

以记录水力作用影响下硬土软岩质滑坡的变形演化过程。试验结束后,可通过定位应力、应变大幅变动的时间来锁定启动时间。



图 1 CKY-200 型土工离心机
Fig.1 CKY-200 geotechnical centrifuge

2.2 试验模型

本次试验以宝鸡市蔡家坡老滑坡为原型,考虑到实际工况的复杂性和研究重点,对原型进行简化确定试验模型。为避免加速度过高导致线速度不同而带来的系统误差,结合原型尺寸和试验设备,最终确定试验离心加速度为 100g。

根据蔡家坡老滑坡土工试验报告,原型坡体物理力学参数值如下:含水率(15.2%~23.5%),重度(17.2~19.8 kN/m³),干重度(14.7~17.1 kN/m³),液限(33.1%~36.5%),塑限(19.5%~20.9%),黏聚力(7.0~34.0 kPa),内摩擦角(11.4°~31.1°)。试验模型采用未扰动的硬土软岩,在经过晾晒、筛析后进行重塑、控制模型密度并铺设水平滑带,确保试验模型接近原型条件。模型滑坡岩土体物理力学参数见表 1。

表 1 滑坡土体物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical properties of soils used in the landslide model

类别	最大粒径 /mm	含水率 /%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	液限 /%	塑限 /%
滑体	0.5	20.1	1.65	25.0	16.0	54.3	20.6
滑床	0.5	20.1	1.65	28.0	18.0	54.3	20.6
滑带	0.5	41.0	1.67	4.8	7.2	59.5	19.9

模型制作时,先在模型箱板上每 5 cm 分层划线并绘制滑坡模型轮廓线,作为分层与削坡的依据。随后参考勘察结果布设滑带层与后破裂壁,并在模型箱侧壁涂抹凡士林以减少试验过程中摩擦力的影响。其后,通过体积控制法控制模型密度,分层击实并划毛处理。最后按轮廓线进行削坡,完成模型 CJPI 的基本初始条件布置。考虑到硬土软岩击实

后,其渗透系数较低,为着重研究水力条件对边坡的影响,设计具有不同水力条件的模型 CJP2。模型 CJP2 基本初始条件与模型 CJP1 相同,但在坡体中增设砂井,可对滑坡现场的裂隙、碎裂带等渗水通道进行模拟。模型砂井高度为从边坡表层至滑带,使用标准砂按照直径 1 cm、间距 8 cm 均匀布置(见图 2)。

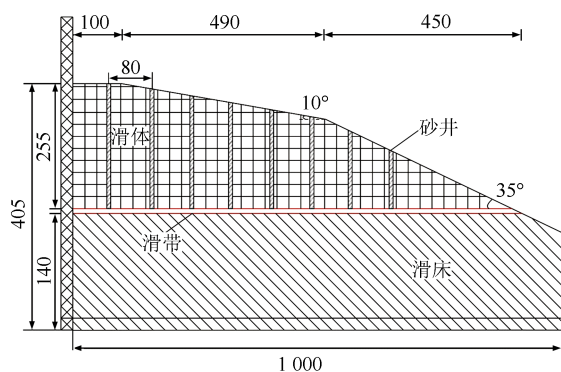


图 2 砂井布设示意图(单位: mm)

Fig.2 Schematic diagram of sand well (unit: mm)

本次试验模型监测仪器布设见图 3。坡体表面变形:沿坡面布置 5 个位移监测点以监测坡体表面变形情况。其中 LDS-1~LDS-3 负责监测边坡竖向位移, LDS-4、LDS-5 负责监测边坡水平位移(见图 4(a))。坡体内部位移场分布:在边坡断面内分层布设变形标示点,离心机运行中使用高速摄像系统进行拍摄以监测滑坡的变形。孔隙水压力:模型中布设 9 个孔隙水压力监测点,负责监测降雨并监测坡体内部孔隙水压力变化。其中 KY-1~KY-6 布置在边坡中部的不同深度, KY-7~KY-9 布置在滑带层位置。土压力:模型中布置 9 个土压监测点,以监测坡体内部土压力的变化情况。其中模型滑带处

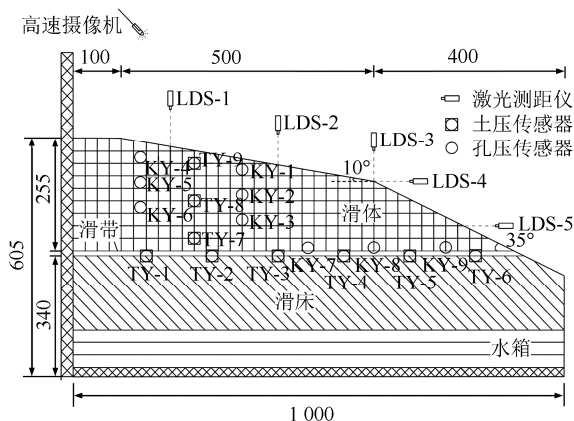


图 3 传感器布设示意图(单位: mm)

Fig.3 Schematic diagram of sensor layout (unit: mm)



(a) 位移传感器

(b) 压力传感器

图 4 离心机传感器

Fig.4 Sensors for the centrifuge

布置 TKY-1~TY-6, 在边坡中部布置 TY-7~TY-9 (见图 4(b))。

2.3 试验过程

试验设备调试完成后,每级按 20g 逐级提升离心机的加速度,运行至沉降稳定后再进入下一级。固结阶段加速度时程曲线见图 5。

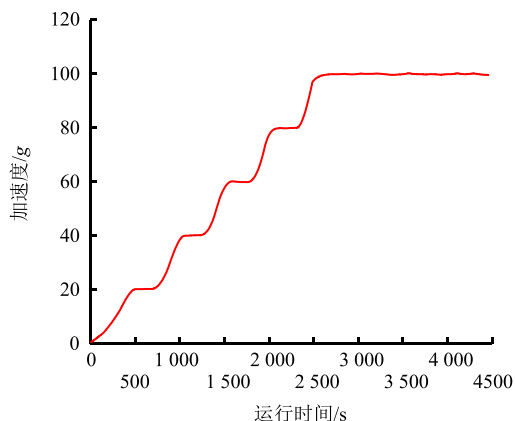


图 5 固结阶段加载时程曲线

Fig.5 Loading curve in consolidation stage

模拟降雨阶段离心机的加速度保持在 100g。模拟降雨系统主要由 3 部分组成:供水系统、降雨装置和坡面处理。预先在边坡表面覆盖土工布,以降低水的破坏作用并防止侵蚀坡面。在供水系统将水体运送到降雨装置后,由 4 个均匀布置的雾化喷头把水分散到整个模型的表面。开启供水电磁阀一段时间后停止,随后反复进行此步骤。由供水水箱中水压传感器的变化量可确定不同阶段的总降雨量,由试验过程中电磁阀每次打开的持续时间可确定不同阶段的降雨时间,参考边坡受雨面积可确定各个阶段边坡的降雨量。试验过程中为提高降雨的均匀性,尽可能加大降雨装置的出水压力且让降雨装置与坡面保持最小距离。在坡体布设砂井利于水体及时入渗至坡体内部,可以降低雾化喷头和降雨沿表

层径流造成的区域降雨差异。由降雨过程雨量表(见表2)可知,降雨累计时长为186 s,累计降雨量为16.7 mm,模拟降雨的平均强度为3.2 mm/h。

表2 降雨过程雨量表

Table 2 Rainfall scale during the rainfall process

阶段	持续时间 /s	降雨量 /mm	降雨强度 /(mm · s ⁻¹)	模拟雨强 /(mm · h ⁻¹)
1	27	2.213	0.082	2.95
2	49	5.227	0.107	3.84
3	19	2.413	0.127	4.57
4	15	1.207	0.080	2.90
5	19	1.892	0.100	3.59
6	16	1.013	0.063	2.28
7	15	1.001	0.067	2.40
8	15	1.407	0.094	3.38
9	11	1.007	0.092	3.29

3 试验结果与分析

3.1 宏观变形的模式

在试验过程中,模型 CJP1 和模型 CJP2 的坡体出现不同形式的破坏。在规定的试验时间结束时,试验模型 CJP1 未发生显著破坏(见图6)。试验模型 CJP2 出现滑坡、局部强溃散性变形(见图7)。可将其宏观变形分为初始变形阶段、加速变形阶段和流动破坏阶段。

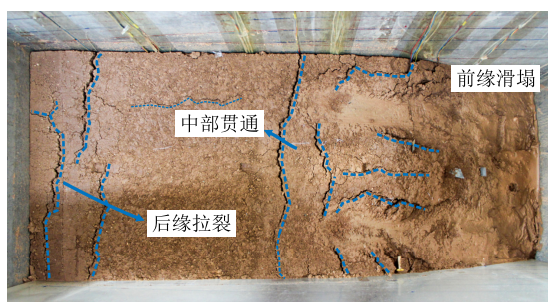


图6 模型 CJP1 试验结束后俯视图
Fig.6 Top view of model CJP1 after test

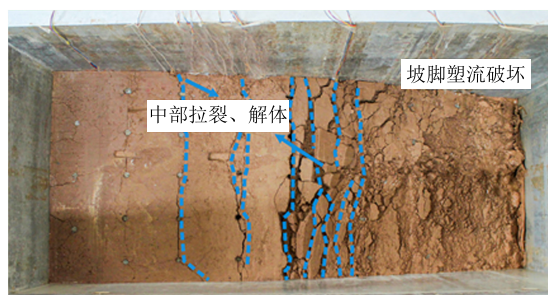


图7 模型 CJP2 试验结束后俯视图
Fig.7 Top view of model CJP2 after test

在无降雨条件下,斜坡产生初始变形。模型 CJP2 首先缓慢完成固结,斜坡的斜率由35°降至约31°。因坡体出现应力重分布,这使得坡脚强变形挤压区与微地貌陡变区等位置开始发育裂隙(见图8(a))。

在持续降雨条件下,水体沿着裂隙运移造成裂隙不断张开、扩展,使模型 CJP2 由初始变形向等速变形过渡。固结压密的岩土体孔隙度降低、粒间嵌合力增强,所以在水-土耦合作用的初级阶段,坡体呈现出小位移、低速滑动特征。随着优势渗流通道的形成,高压渗透水流使坡体的变形开始加速,



(a) 初始变形阶段



(b) 加速变形阶段



(c) 流动破坏阶段



(d) 多级-渐进式破坏阶段

图8 变形区域扩展过程
Fig.8 Deformation zone expansion process

坡脚发生失稳（见图 8(b)）。随后高压渗透水流在坡体裂隙化带引发的应力重分布导致坡体局部的溃散性变形与流动破坏，使坡体的斜率在短时间内降至约 20° （见图 8(c)）。随着变形的进一步发展，变形体后缘明显下沉，拉裂面由张开转为渐趋闭合，变形进入多级-渐进式破坏阶段（见图 8(d)）。

3.2 滑体内强变形的区域

模型 CJP2 的滑体变形位于模型的中前部，呈现出牵引式破坏（见图 9、10）。因水体对滑带和软弱基座的软化或溶蚀、潜蚀作用，下伏软岩在上覆岩层压力与水压力作用下，发生塑性流动并向临空方向挤出，导致上覆岩层拉裂、解体和不均匀沉陷（见图 11）。不均匀沉降自坡面至滑带其值递减，强变形的发育呈现明显趋表面（7.5 cm）、趋结构面特点（5.5 cm），滑带以下区域变形与不均匀沉降则不明显，滑带的强变形控制滑体活动（见图 12）。



图 9 模型 CJP2 试验开始前侧视图
Fig.9 Side view of model CJP2 before test

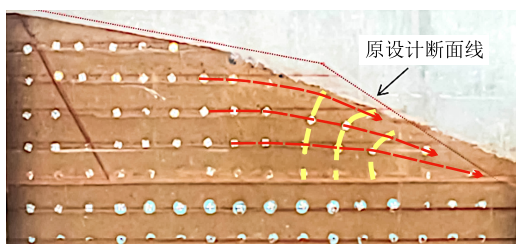


图 10 模型 CJP2 试验结束后侧视图
Fig.10 Side view of model CJP2 after test

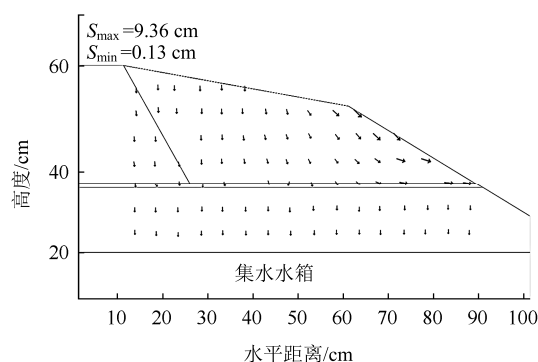


图 11 模型 CJP2 总位移矢量图
Fig.11 Total displacement vector map of model CJP2

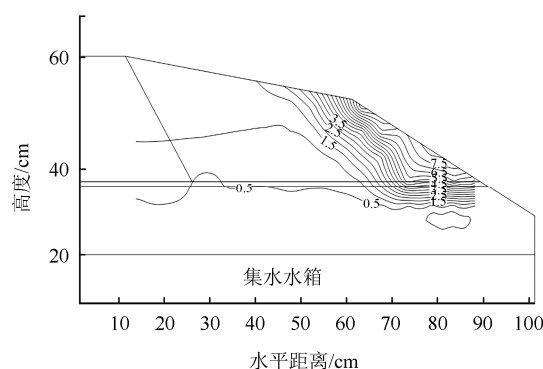


图 12 模型 CJP2 垂直变形等值线图（单位：cm）
Fig.12 Vertical deformation contour map of model CJP2 (unit: cm)

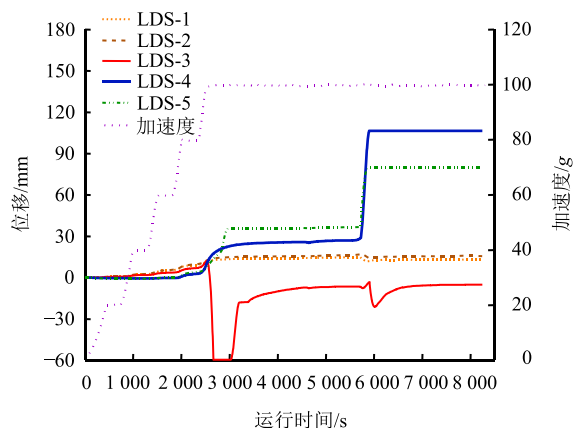
模型 CJP2 的局部因土体饱和和不排水导致的液化而发生流动。流动的区域集中于裂隙化带，呈塑性散体状堆积于前缘（见图 7）。裂隙化带与坡体裂缝的扩展密切相关。坡脚强变形挤压区、微地貌陡变区是水-土耦合作用的重点区域，发育较多裂隙。在水力因素作用下，该位置高含水率的岩土体以流动状态发生破坏（见图 11、12）。

3.3 坡体的关键参数变化

由模型 CJP2 位移与时间关系曲线（见图 13）、土压力与时间关系曲线（见图 14）及孔隙水压力与时间关系曲线（见图 15）可对坡体关键参数的变化进行分析。在试验初始阶段，坡体的变形以蠕变变形为主。随着加速度的不断增加，坡体整体沉降值与水平位移值也不断发生累积，随着固结的进行趋于稳定。模拟降雨后在水力因素的影响下，坡体在一定时间内突然破坏，LDS-3 测点处在 1 min 内的竖向变形超过 2.3 cm，LDS-4 和 LDS-5 测点在 1 min 内的水平位移分别可达 6.4 cm 和 4.3 cm。水体沿裂隙和砂井大量渗入坡体，使临近坡体表面的孔隙水压力测点 KY-1 和 KY-4 处孔隙水压力值随模拟降雨的进程产生周期性变化。高强度降雨导致水体挤入裂隙，孔隙水沿着裂隙与结构面渗流、扩散，使各个测点处的孔隙水压力持续累积，在内部形成“承压水”：KY-2（21.8 kPa→36.1 kPa）、KY-3（18.5 kPa→44.2 kPa）、KY-5（33.0 kPa→69.0 kPa）、KY-6（5.8 kPa→21.8 kPa）。水体促进裂隙向坡体内部的延伸，同样促进水体向滑坡前缘不断的汇集，显著推高滑坡前缘处的孔隙水压力：KY-7（136.1 kPa）、KY-8（163.2 kPa）、KY-9（79.0 kPa）。

由坡体关键参数的变化可以看出，坡体的变形与土压力值的变化、孔隙水压力的变化联系紧密，并且在时间上有着一定的关联性。土压力的大幅度变化（5 700 s 附近）与孔隙水压力的大幅度变化

(5 700 s 附近)具有一定的同步性;位移的大幅度变化(5 800 s 附近)相比孔隙水压力的大幅度变化(5 700 s 附近)具有一定的滞后性。



注: 正值为沉降或指向坡外位移, 负值相反。

图 13 模型 CJP2 位移与时间关系曲线

Fig.13 Relation curves of displacement with time of model CJP2

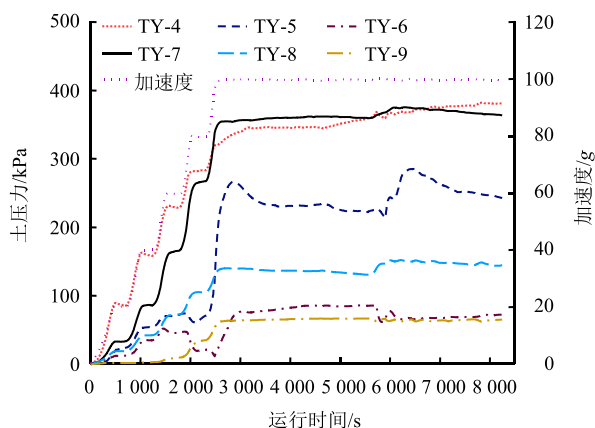


图 14 模型 CJP2 土压力与时间关系曲线

Fig.14 Relation curves of earth pressure with time of model CJP2

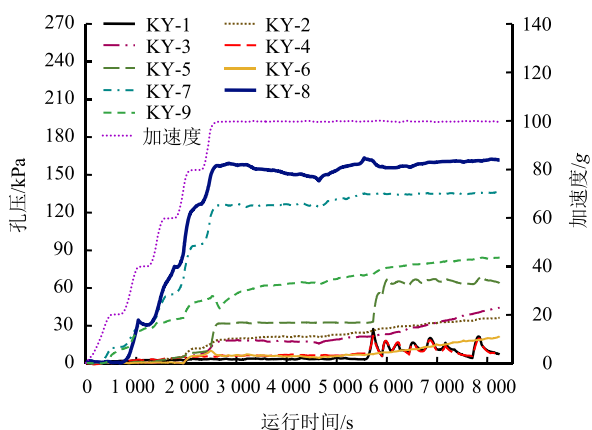


图 15 模型 CJP2 孔隙水压力与时间关系曲线

Fig.15 Relation curves of pore water pressure with time of model CJP2

4 讨论

4.1 滑坡位移加速扩展过程

由上述模型试验可知, 水力作用是模型 CJP2 坡体变形加速的重要因素。水体的下渗与聚集增大坡体土压力, 推高裂隙处水压力, 这引发坡体应力的重分布、加速了裂隙化带的形成。在多数情况下, 硬土软岩结构致密、黏粒含量高, 该岩组不具有快速渗流能力。然而, 由上述试验可见, 坡体节理和风化裂隙的发育利于降雨入渗、在地质界面与裂隙中流动(见图 16、17)。坡体微地貌陡变区、坡脚强变形挤压区等位置水体聚集形成汇水区与高压渗透水流, 使坡脚侵蚀、卸荷, 导致坡体有沿结构面向临空方向蠕动、滑移的趋势, 但 1 min 内的变形基本在 1 mm 以内。在模型 CJP2 内部, 优势渗流通道、裂隙不发育, 坡体变形量较弱(见图 17)。



图 16 模型 CJP2 初期变形阶段

Fig.16 Initial deformation stage of model CJP2



图 17 模型 CJP2 加速变形阶段

Fig.17 Accelerated deformation stage of model CJP2

高孔隙水压力是导致滑坡启动的又一重要因素。多数情况下, 高孔隙水压力的形成与高水头、饱和岩土体短时强变形等工况有关。岩土体变形速度则与变形累积量、孔隙水压力增长速度密切相关。在本次试验中, 经较长时间的降雨作用后, 坡体孔隙水压力在试验进行到 5 700 s 附近时突然加速累积, 随后坡体在 5 800 s 附近迅速发生大变形。滑体的流动破坏基本在 2 min 内完成, 局部位置 1 min

内的竖向变形超过 2.3 cm，而 1 min 内的水平位移最高可达 6.4 cm（见图 18）。模型 CJP2 坡体内部聚集的高孔隙水压力，使黏性土岩层裂隙区在水土耦合作用下迅速发生溃散性变形与后续的多级-渐进式破坏。坡脚与坡面等关键位置处孔隙水压力增量呈加速式变化是导致滑体流体化运动的重要因素。因此，坡脚支挡防护工程与坡面排水防渗措施对防治此类滑坡能起到较好效果。

4.2 滑坡启动机制

滑体具有一定的运动速度条件下，才能“流态化”，其“流态化”存在一定的临界速度。考虑到滑体运动的速度与加速度，试验中水力作用的影响可用摩尔-库仑定律和牛顿第二运动定律来进行解释：

$$ma = \tau - c(\sigma - u) \tan \varphi \quad (1)$$

式中： m 为滑坡破坏面单位面积的质量； a 为滑坡的加速度； τ 为破坏面处的剪应力； c 和 φ 为岩土体的黏聚力和内摩擦角； σ 为破坏面处的正应力； u 为破坏面处的孔隙水压力。在滑坡体快速解体的几十秒内，溃散区岩土体物质的质量、黏聚力、内摩擦角都不会快速变化，只有水体 u 值聚集才能触发加速度迅猛升高。

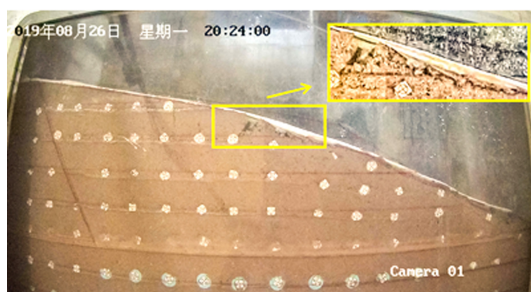


图 18 模型 CJP2 流动破坏阶段
Fig.18 Flowing failure stage of model CJP2

Iverson 等^[22]提出评价坡体变形引起孔隙水压力 u 值变化相对程度的方法：

$$t_{\text{def}} / t_{\text{diff}} \cong (KE) / (\gamma_w T v) \quad (2)$$

式中： t_{def} 为剪切带变形的时间尺度； t_{diff} 为孔隙水压力扩散的时间尺度； K 为斜坡岩土体的水导率（m/s）； E 为岩土体的杨氏模量（MPa）； γ_w 为水的重度（N/m³）； T 为滑坡的厚度（m）； v 为斜坡的滑坡速度（m/d）。如果 $t_{\text{def}} / t_{\text{diff}} < 1$ ，说明位移过程中剪切带的变形导致孔隙水压力的聚集。将 $K = 4.2 \times 10^{-2}$ m/s， $E = 5$ MPa， $\gamma_w = 9.78 \times 10^3$ N/m³， $T = 18$ m 代入式（2），可知如果 v 的取值大于 1.0 m/d，

模型 CJP2 剪切带的变形会导致孔隙水压力的聚集，而模型 CJP2 破坏过程中 v 可达 3.7 m/d。因此，当滑坡以观测速度运动时，剪切带内尤其裂隙较发育区域会产生孔隙水压力的快速累积，高静水压力与动水压力随后诱发滑坡的启动失稳。

5 结 论

基于陕西省蔡家坡典型硬土软岩质滑坡的形态特征和岩土体结构分析，采用离心机模型试验，模拟了水力作用触发硬土软岩质滑坡启动过程。通过对试验结果的分析得出如下结论：

（1）在水力作用影响下，硬土软岩质坡体发生多级、渐进式破坏。其浅层变形受到深层滑移影响，运动变化过程可概化为初始变形阶段、加速变形阶段和流动破坏阶段。

（2）深层滑移引起的张裂隙是水体聚集区。其中，坡脚强变形挤压区与后缘拉裂区是坡体张裂隙扩展区。

（3）孔隙水沿着裂隙、结构面渗流扩散。孔隙水压力加速式增大导致固态滑体短时流体化运动。

（4）坡脚支挡防护工程与坡面排水防渗措施对防治此类降雨诱发型滑坡有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 2-15.
NG W W C, CHEN Shou-yi, PANG Yue-wai. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(1): 2-15.
- [2] 黄润秋, 裴向军, 崔圣华. 大光包滑坡带岩体碎裂特征及其形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 1-15.
HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, CUI Sheng-hua. Cataclastic characteristics and formation mechanism of rock mass in sliding zone of Daguangbao landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(1): 1-15.
- [3] 黄晓虎, 雷德鑫, 夏俊宝, 等. 降雨诱发滑坡阶跃型变形的预测分析及应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3585-3592.
HUANG Xiao-hu, LEI De-xin, XIA Jun-bao, et al. Forecast analysis and application of stepwise deformation of landslide induced by rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(9): 3585-3592.
- [4] 胡乐, 辛鹏, 王涛, 等. 硬土软岩滑坡近水平滑移的离

- 心机模型试验研究[J]. 地质力学学报, 2021, 27(1): 73-82.
- HU Le, XIN Peng, WANG Tao, et al. Centrifuge model tests on the near-horizontal slide of hard soil-soft rock landslides[J]. **Journal of Geomechanics**, 2021, 27(1): 73-82.
- [5] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 530-540.
- ZHANG Mao-sheng, LI Tong-lu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslide[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(4): 530-540.
- [6] 辛鹏, 董晓娟, 吴树仁, 等. 青藏高原东北缘新近纪盆地内旋转-平推式滑坡聚集规律与机理研究[J]. 地质学报, 2017, 91(3): 499-509.
- XIN Peng, DONG Xiao-juan, WU Shu-ren, et al. The accumulation characteristics and mechanism of rotational-translational landslides in the Neogene basins on the northeastern margin of Tibet Plateau[J]. **Acta Geologica Sinica**, 2017, 91(3): 499-509.
- [7] 王骑虎, 陶连金, 罗玉玲. 降雨诱发红层滑坡的破坏形态及处治措施[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, 51(6): 809-814.
- WANG Qi-hu, TAO Lian-jin, LUO Yu-ling. Failure features of and treatment measures for red bed slides induced by rainfall[J]. **Journal of Lanzhou University (Natural Science)**, 2015, 51(6): 809-814.
- [8] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 甘肃天水泥岩剪切蠕变行为及其模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3603-3617.
- ZHANG Ze-lin, WU Shu-ren, WANG Tao, et al. Study on shear creep behavior and its model of mudstone in Tianshui, Gansu province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl.2): 3603-3617.
- [9] 郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007(6): 67-71.
- GUO Yong-chun, XIE Qiang, WEN Jiang-quan. Red beds distribution and engineering geological problem in China[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2007(6): 67-71.
- [10] 穆文平, 王康, 钱程, 等. 青海上湾特大型红层老滑坡体形成机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 802-812.
- MU Wen-ping, WANG Kang, QIAN Cheng, et al. Study of formation mechanism of giant red bed old landslide in Shangwan of Qinghai province[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(3): 802-812.
- [11] 徐则民, 黄润秋, 范柱国. 滑坡灾害孕育-激发过程中的水-岩相互作用[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 1-9.
- XU Ze-min, HUANG Run-qiu, FAN Zhu-guo. Water-rock interaction in process of landslide preparing and triggering[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2005, 14(1): 1-9.
- [12] 李峰, 郭院成. 降雨入渗对边坡稳定性作用机理分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(6): 44-45, 48.
- LI Feng, GUO Yuan-cheng. Analysis of action mechanism of rainfall infiltration on slope stability[J]. **Yellow River**, 2007, 29(6): 44-45, 48.
- [13] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 4173-4179.
- WU Dao-xiang, LIU Hong-jie, WANG Guo-qiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl.2): 4173-4179.
- [14] 吴琼, 王晓晗, 唐辉明, 等. 巴东组易滑地层异性层面剪切特性及水致劣化规律研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1881-1889, 1897.
- WU Qiong, WANG Xiao-han, TANG Hui-ming, et al. Shear property and water-induced deterioration of discontinuities between different types of rocks in Badong formation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1881-1889, 1897.
- [15] 冯自立, 崔鹏, 何思明. 滑坡转化为泥石流机理研究综述[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 8-14.
- FENG Zi-li, CUI Peng, HE Si-ming. Mechanism of conversion of landslides to debris flows[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2005, 14(3): 8-14.
- [16] 裴向军, 张硕, 黄润秋, 等. 地下水雍高诱发黄土滑坡离心模型试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 55-63.
- PEI Xiang-jun, ZHANG Shuo, HUANG Run-qiu, et al. Study on centrifuge model test of loess landslide induced by enrichment of groundwater[J]. **Advanced Engineering Sciences**, 2018, 50(5): 55-63.
- [17] 张敏, 吴宏伟. 边坡离心模型试验中的降雨模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 53-57.
- ZHANG Ming, WU Hong-wei. Rainfall simulation techniques in centrifuge modelling of slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Suppl.1): 53-57.