

# 湖北郧阳膨胀土滑坡成因机制分析

## ——以黄家槽滑坡为例

祖全磊<sup>1</sup>, 苏强<sup>2</sup>, 刘帆<sup>1</sup>, 刘江伟<sup>3</sup>, 纪威<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖北地质环境总站, 湖北 武汉

<sup>2</sup>中国地质矿业集团有限公司, 北京

<sup>3</sup>四川省煤田地质局一三五队, 四川 泸州

Email: 364438187@qq.com

收稿日期: 2021年8月11日; 录用日期: 2021年9月7日; 发布日期: 2021年9月14日

### 摘要

近年来, 每逢暴雨季节, 地质灾害频发, 尤以堆积体失稳为主, 此类型的滑坡大多发生于城镇地区, 造成的危害极大, 膨胀土滑坡为其中一个典型。本文对湖北郧阳区黄家槽滑坡这一典型来分析研究膨胀土滑坡的形成机制, 这对膨胀土地区的滑坡预防和治理有着重大的意义。通过大比例工程地质测绘及工程钻探、力学试验等方法手段对黄家槽滑坡的失稳过程进行研究得出: 黄家槽滑坡覆盖层土体具有弱膨胀性, 具有浅层性、平缓性、季节性。在人工开挖的基础上形成了大量的人工切坡, 使得膨胀土质的边坡临空, 在持续的强降雨作用下由于膨胀土特有的多裂隙性质, 使得雨水易渗入, 土体遇水产生胀缩软化, 物理性质改变强度大大降低, 地下水位的上升在基覆界面处会形成饱和带, 使整个坡体的应力发生改变, 抗滑力大大降低, 从而沿基覆界面(滑面)发生蠕动变形, 随着持续的降雨, 其变形会随之增大, 促使整个坡体失稳。

### 关键词

膨胀土, 滑坡, 形成机制, 郧阳

# Analysis of Genesis Mechanism of Expansive Soil Landslide in Yunyang, Hubei

## —Taking Huangjiacao Landslide as an Example

Quanlei Zu<sup>1</sup>, Qiang Su<sup>2</sup>, Fan Liu<sup>1</sup>, Jiangwei Liu<sup>3</sup>, Wei Ji<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hubei Geological Environment General Station, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>China Geology and Mining Co., Ltd., Beijing

<sup>3</sup>C135 Team of Sichuan Coalfield Geological Bureau, Luzhou Sichuan

Email: 364438187@qq.com

## Abstract

In recent years, geological hazards frequently occur in the heavy rain season, especially the instability of sedimentary bodies. Most of the types of landslides occur in urban areas, causing great harm. Expansive soil landslides are one of the typical examples. This paper analyzes the formation mechanism of the expansive soil landslide based on the typical Huangjiacao landslide in Yunyang District, Hubei, which has great significance for the prevention and treatment of landslides in the expansive soil area. The research on the instability process of Huangjiacao landslide based on a large proportion of engineering geological mapping, engineering drilling, and mechanical tests shows that the soil of Huangjiacao landslide is weakly expansive, shallow, gentle, seasonal. Due to the formation of a large number of artificial slopes on the basis of artificial excavation, the expansive soil slope is facing the sky. Under the continuous heavy rainfall, due to the multi-fissure nature of the expansive soil, rainwater is easy to infiltrate and the soil is in contact with water. Expansion and contraction softening, physical strength changes greatly reduce the intensity, the rise of the groundwater level will form a saturation zone at the interface of the foundation, change the stress of the entire slope, greatly reduce the anti-sliding force, and thus along the interface of the foundation (sliding surface), creeping deformation occurs, and the deformation will increase with the continuous rainfall, which promotes the instability of the entire slope.

## Keywords

Expansive Soil, Landslide, Formation Mechanism, Yunyang

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

膨胀土是一类特殊性质的土，具有特殊的物理化学性质，主要由蒙脱石和高岭石等粘土矿物组成，具有亲水性[1]。膨胀土在全国范围内分布广泛，由于膨胀土的性质而诱发边坡失稳的地质灾害事例不胜枚举，在湖北、湖南、广西等地每年会发生大量的膨胀土滑坡发生，造成了巨大的财产损失，膨胀土滑坡具有三个最主要的特点：浅层性、平缓性、季节性，由于其地形平缓因此一般有大量的房屋建筑，这也是膨胀土滑坡危害巨大的主要原因之一[2] [3] [4]。

关于膨胀土滑坡，国内外学者做了大量的研究工作。主要是在膨胀土的物理、化学性质以及结构和矿物成分方面，这几个因素也是直接影响着膨胀土的工程特性是诱发膨胀土滑坡的直接原因。我国对全国各地的膨胀土进行详细的分区，对不同地区的膨胀土进行了工程特性研究，八十年代，我国出版了有关膨胀土的规范《膨胀土地区建筑技术规范》，随着经济建设的迅速发展，膨胀土的研究成为了一个热点问题。邹勇等对鄂北地区高速公路沿线的膨胀土物理性质及变形特征做了详细的表述，并提出了相关的防治措施[5]。刘义高、周玉峰等研究了不同湿度条件下膨胀土滑坡的稳定性情况，得出膨胀土中的含水率变化是影响膨胀土滑坡稳定性的主要因素[6]。殷宗泽等通过实例结合膨胀土的裂隙形成机理，证明了多裂隙性是膨胀土滑坡不同于其他粘土边坡的根本[7]。XIAO、YANG *et al.*对在开挖膨胀土边坡的过程中，其边坡的变形规律以及膨胀土浅表层的滑动进行了分析研究[8]。Ovesen、Schofield 等在研究膨胀

土滑坡稳定性的基础上,进行了室内离心机试验研究,使得对膨胀土滑坡的预防和防治有了进一步的认识[9] [10] [11]。

国内外的研究主要集中在理论分析和室内试验上,对膨胀土结构、物质组成、力学特性、膨胀机理、改良方法等提供了丰富的资料,在公、铁路路基、路堑边坡等新建工程提供了指导,但对现场的滑坡个例研究较少。湖北省膨胀土分布广泛,以十堰市郧阳区黄家槽滑坡为例,该区膨胀土厚度小,地形平缓且降雨量大,滑坡上居住着大量居民,建筑密集,且位于城镇区,对经济发展和社会生活极其重要,常规的土体改良、边坡整形、抗滑桩治理在现状下皆不适宜。本文以黄家槽滑坡为例,来分析研究膨胀土滑坡的结构特征及形成机制及监测和治理建议,这对该区域膨胀土滑坡的监测及预防有着重要的理论指导和深远的现实意义。

## 2. 研究区工程地质概况

黄家槽滑坡位于湖北省十堰市郧阳区城关镇牧场沟村,汉江流域上游左岸,北纬  $32^{\circ}51'17''\sim 32^{\circ}51'24''$ ,东经  $110^{\circ}46'31''\sim 110^{\circ}46'39''$  (图 1)。



**Figure 1.** Panorama view of the landslide area  
**图 1.** 滑坡区全景图

### 1) 地质构造及地形地貌

研究区处于秦岭褶皱系中的南秦岭印支冒地槽褶皱带,三级构造单元为金鸡岭复向斜和武当复背斜,四级构造单元为庙川褶皱束和白河褶皱束。区内自震旦系以来,经历了多次构造运动,现阶段新构造活动较弱。按其展布方向和形成的力学性质,分别属于东西向(纬向)构造体系,北西向未归属构造带和联合扭动构造体系等。郧阳区地处秦巴山区东段,是一个以丘陵低山构成的山谷相间的山区大部分为山地,山高谷深,山体浑圆,山川溪水纵横,汉江自西向东贯穿,将郧阳区分割成南北两段。地势由南、北边境向中部的汉江谷地倾斜,谷地两侧有狭窄而断续的盆地与丘陵相间分布,黄家槽滑坡地形地貌主要为侵蚀堆积丘陵地形,地势上东北高,西南低,最高点为滑坡后缘坡顶,高程 211 m,西南侧低点为汉江,高程约 170 m,相对高差 41 m。

### 2) 地层岩性

勘查区位于郧阳盆地的汉江北岸，以震旦系碳酸盐岩类、白垩系及第四系松散岩类为主。场区上覆地层为第四系滑坡堆积层( $Q_4^{del}$ )和残坡积层( $Q_4^{el+dl}$ )粉质粘土夹碎石，下伏地层为白垩系( $K_2s$ )砾岩和泥质砂岩互层以及震旦系上统灯影组( $Z_2dn$ )灰质白云岩。滑坡区大部分地段为第四系覆盖，部分地段基岩直接出露地表。

### 3) 气象和水文地质条件

区内以汉江为骨干的水系发育，构成格状、树枝状水文网，地表水系经汉江汇入丹江口水库，地表径流跃。汉江最高水位期均出现在7~8月，最低水位出现在12月至次年2月。最大径流量为 $656.4 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，最小径流量为 $210 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，洪水多系暴雨形成。区域内地表水系发育一般，在滑坡南东侧有一水塘，地表水系分布变化较大。地表水径流主要是顺地势向南侧汉水流出，东侧地区的部分径流流入南东侧的水塘。地下水主要以松散岩类孔隙水和碎屑岩类风化裂隙水主。

## 3. 滑坡基本特征

黄家槽滑坡位于郧阳区城关镇牧场沟村，平面呈“箕”形(图2)，滑坡剖面形态呈阶状，上下缓中间陡，地势北东高南西低，所处斜坡坡向约 $135^\circ$ ，地形坡度 $5^\circ \sim 18^\circ$ ，坡顶高程约200~209 m，滑坡后缘位于地形陡缓交接处即基岩与第四系堆积物的交界处；坡脚高程约170 m，位于下方乡村道路修建开挖的陡坎临空面；滑坡西北侧边界受微凸的小山脊控制，滑坡东南侧边界紧邻水塘形成一临空面。整个滑坡相对高差约40 m，主滑方向为 $230^\circ$ ，滑坡纵向长225 m，前缘宽约560 m，滑坡面积约 $10.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，滑体厚约3~9 m，平均厚约4.3 m，体积约 $44.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，整体上是一个覆盖层堆积的土质滑坡，从滑坡剖面(图3)来看，覆盖层薄，坡体上有人为开挖的大量切坡，形成了多级剪出口。

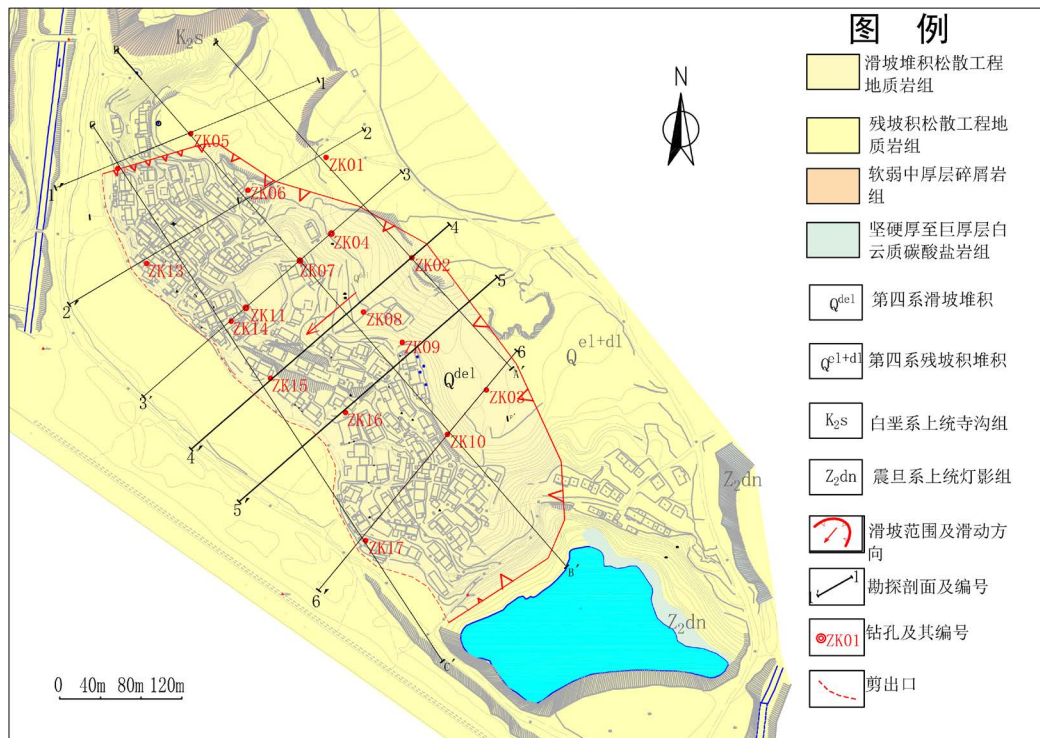


Figure 2. Geological plan of landslide engineering  
图2. 滑坡工程地质平面图

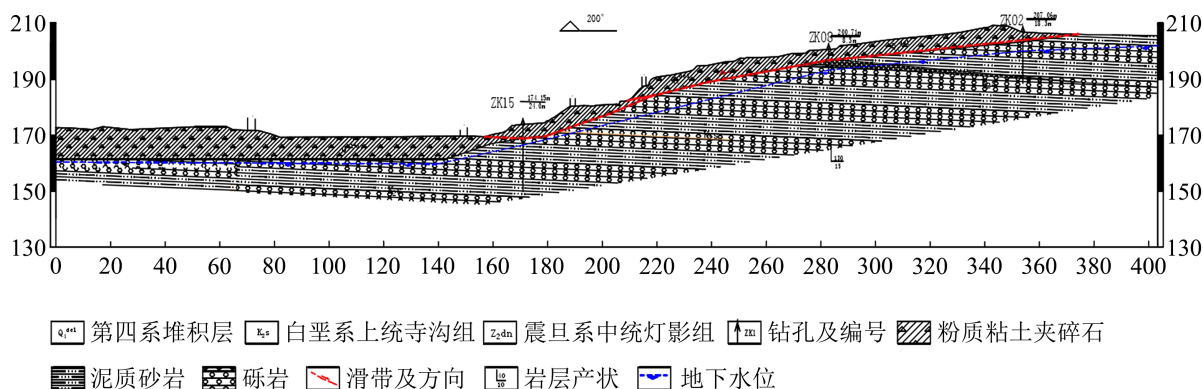


Figure 3. Typical section view of landslide

图 3. 滑坡典型剖面图

1) 滑体

黄家槽滑坡滑体物质主要为第四系覆盖层(残坡积物)粉质粘土夹碎石及局部全 - 强风化泥质砂岩为主。横向分布上表现为从西 - 东, 滑体厚度逐渐变薄, 纵向表现为以滑坡中部厚度最大(由于地形特积聚了大量的冲洪积物)向前后缘逐渐减少, 且前缘较后缘厚度大。滑体的岩性特征主要表现为: 粉质粘土夹碎石为滑体的主要组成部分, 遍布整个场区, 粉质粘土形状: 棕 - 黄褐色, 软塑 - 硬塑, 刀切面较光滑, 可见黑色铁锰质矿物; 粉质粘土中含少量卵石、圆砾、碎石, 大小不一, 粒径一般 0.2~5 cm。根据室内试验指标, 该土体含水性较差, 透水性较好, 其天然含水率 19%~32.6%, 塑性指数 13.9%~31.4%, 孔隙比 0.66~0.87, 压缩系数 0.08~0.88, 抗剪强度 18~78 KPa, 内摩擦角 15.0°~16.6°, 自由膨胀率平均值为 42.43%, 平均膨胀率 45.2%, 反映出滑体土体具有压缩性高, 中等孔隙性、中等密度、弱膨胀潜势的特点。

2) 滑面

依据钻孔揭露情况, 综合地表变形调查访问, 黄家槽滑坡历史以来皆未出现有整体性、大规模的变形痕迹, 现状多为相对零散的小规模地裂缝和室外地坪或房屋墙体变形, 尚未形成整体性的滑带, 推断本滑坡控滑结构面为第四系和白垩系的岩土接触面(图 4)。



Figure 4. Substrate interface (sliding surface)

图 4. 基覆界面(滑面)

由于滑坡体目前均为蠕变阶段，未发生整体体滑移现象，仅在局部发生小规模变形，勘查中未见明显的滑带。通过综合分析，为岩土接触面或风化差异面处的粉质粘土层，层厚约 2~5 cm，性状同上部滑体粉质粘土，透水性差，具弱膨胀趋势，第四系覆盖层较为松散、孔隙度大、透水性强，基岩透水性差，在强降雨时段会引起地下水位变化，在基岩和覆盖层之间形成浸润面，在基覆界面处的粉质粘土具有弱膨胀性，遇水后性状急剧变化，使抗剪强度大大降低，形成滑面。

### 3) 滑床

黄家槽滑坡滑床基岩为白垩系上统寺沟组(K<sub>2</sub>S)中风化泥质砂岩、中风化砾岩，岩层软硬相间，分布于黄家槽滑坡粉质粘土和白云质灰岩之间，岩性主要为白垩系砾岩、泥质砂岩等，少见泥岩，中厚层状。砾岩，呈杂色，整体外观黄褐色，胶结程度一般，主要成分为石英、砂岩及灰岩，磨圆较好，呈次圆状，砾石大小不一，砾径一般 1~5 cm，天然含水率 4.25%~6.09%。砾岩和泥质砂岩抗风化能力一般，力学强度较低，胶结程度差，风化程度高。

## 4. 滑坡变形特征及影响因素

经实地调查，黄家槽滑坡的变形主要表现为浅表层土体的拉裂、垮落及地表建筑物的开裂、倾斜等变形。坡体变形总体呈现为一种单体规模小、分布较密集的特点，目前处于长期的蠕变阶段。

据调查，1975 年雨季，滑坡体中部和后缘局部产生张拉裂缝，随着时间的发展，每年雨季整个滑坡均产生不同程度的变形，第一次显著变形始于 1992 年 7 月，近后缘处产生一条走向 310°，长 8~20 m，宽 2~10 cm 的张拉裂缝，地面下坐约 2~3 cm。该近年来变形逐渐加剧，多处居民房屋墙体出现剪切裂缝，对房屋和公路破坏严重(图 5)，局部区域出现地表开裂、地基下挫现象。据本次勘查，本滑坡目前未见整体变形迹象，现变形主要集中于建筑密集区，局部的陡坎可见小规模坍塌。



**Figure 5.** Deformation of buildings caused by landslides  
**图 5.** 滑坡造成建筑物变形

结合工程地质调查及岩土体力学性质分析，总结诱发滑坡的主控因素主要有以下三个方面：

#### 1) 岩土体工程特性

滑坡体物质组成主要为第四系粉质粘土夹碎石，具弱膨胀性。膨胀土吸水时，土体膨胀、软化，强度下降；失水后土体收缩，随之产生裂隙。膨胀土的这种遇水变化的胀缩特性，与含水量的多少密切相

关, 随着含水量的变化导致反复的胀缩导致了土体的结构发生了变化, 形成了许多不规则的裂隙破坏了土体的整体性, 为膨胀土的表层的进一步风化创造了条件。膨胀土在干燥时强度高, 具超固结性, 促使坡脚易产生集中应力, 开挖路堑和建房切坡后, 超固结土应力释放, 形成较大应力集中区, 使得整个坡体应力重新分布, 抗滑力降低, 因此膨胀土的特性是该处滑坡的主要诱发因素之一。

### 2) 大气降雨作用

滑坡区位于鄂西暴雨区, 最大月降雨量达 204.7 mm (1975 年 8 月 8 日), 经野外地质调查及工程钻孔地层揭露情况, 滑坡体的物质成分粉质粘土夹碎石, 碎石含量约为 15%~20%左右, 孔隙度中等, 且粘土具有膨胀土的特性, 居民随地形依山而建, 无统一的排水系统, 在无降雨时间段内, 地下水位线基本上保持在基覆界面以下, 每逢持续的强降雨季节, 雨水通过沿上覆土体入渗, 使得坡体内的地下水位上升, 滑坡体内地下水位线上升到比较高的位置, 滑带饱水软化, 导致孔隙水压力和土体重度增大, 同时降水入渗导致膨胀土力学强度骤降; 加之下伏泥质砂岩渗透性相对较弱, 产状平缓且有反倾的趋势, 因此对地下水的运移环境较差, 又引起透水性和渗透性都非常小, 因此可视为相对隔水边界, 从而地下水容易在基覆界面积聚形成饱水带, 坡体的抗剪强度大大降低, 不利于滑坡的稳定[12]。另外, 据当地居民了解: 滑坡区变形多集中发生于汛期雨季, 也佐证了持续的强降雨是其重要的诱发因素之一。

### 3) 人类工程活动

因受场地地形条件限制, 建筑及农业活动多为削坡倚坡而建, 坡体经人工改造形成多级平台, 而修建坡脚村级土路对坡体前缘开挖破坏了边坡的结构。这种行为使滑坡原有地应力条件发生改变, 坡脚产生应力集中区, 导致应力重分布, 进而造成滑坡抗滑力减弱, 坡体后缘逐渐形成了拉裂缝, 裂缝的产生有利于大气降水对坡体的作用, 同时生产生活的无序排放进一步加剧了滑坡变形。

## 5. 滑坡形成机制及稳定性评价

黄家槽滑坡由于大量建房和修路, 斜坡上形成多级平台和陡坎, 破坏了坡体的自稳平衡状态, 加之滑体物质结构松散, 具弱膨胀性, 松散土体厚度较小, 坡区建房多为前填后挖, 并形成房屋前后临空地, 在强降雨或长时段降雨条件下, 由于膨胀土长期的受到胀缩作用的影响, 土体内部结构存在裂隙性, 使得雨水容易进入坡体内, 坡体内孔隙水压力逐渐增大, 有效应力降低, 基岩的隔水作用使基覆界面附近土体形成暂态饱和区(图 6(右)), 同时土体膨胀, 不仅引发对周边建筑体以及滑坡后缘的拉裂变形(图 5(左)), 遇开挖形成的“脆弱”临空地形时极易发生剪出破坏, 从而对边坡稳定性造成不利影响, 形成多发密集的小型滑移变形, 并可能牵引后部滑体发生滑移, 引起滑坡大规模的失稳变形破坏。



Figure 6. Tensile cracks in the trailing edge of the landslide (left) and saturated soil in the borehole (right)  
图 6. 滑坡后缘拉裂缝(左)及钻孔出现饱和土(右)

## 6. 结论及认识

通过对黄家槽膨胀土滑坡研究分析有以下几点结论和认识:

结论: 1) 黄家槽滑坡是一大型膨胀土质滑坡, 具有浅层性、平缓性、季节性、多级剪出以及缓慢变形的特点, 现今还处于蠕变阶段, 主要以地表裂缝的变形破坏方式为主; 2) 黄家槽滑坡的成因机制为: 膨胀土本身的特性导致降雨后雨水入渗, 土体软化、饱和, 膨胀, 土体应力改变, 同时坡体上建房建路形成大量的临空切坡, 导致滑坡体上多处变形; 3) 黄家槽滑坡现状条件下, 建筑密集, 常规的膨胀土改良土体、边坡清方无法施工, 工程治理建议采取地上、地下排水措施为主, 局部采用柔性挡土墙、微型桩 + 挡土板, 同时辅以雨量和土壤含水率监测等。

认识: 1) 膨胀土特有性质是诱发滑坡的一个主要因素, 主要表现为吸水膨胀、失水收缩的胀缩特性且其含有亲水性粘土矿物遇水易软化, 导致覆盖层土体强度降低, 产生大量裂隙, 对坡体稳定性的影响较大; 2) 从膨胀土滑坡的成因机制来看, 膨胀土边坡的监测应主要采取降雨、土壤含水率等因素监测, 防治滑坡应以地表排水和地下排水为主, 同时避免开挖形成临空坡面, 坡脚设置挡墙等支挡措施时, 优先考虑柔性结构的挡土墙, 有条件时需对膨胀土进行改良处理。

## 参考文献

- [1] 谭罗荣. 膨胀土的判别与分类[J]. 土工基础, 2007, 21(4): 85-88.
- [2] 卢仁杰. 溧史杭灌区膨胀土滑坡形成机理及治理技术研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [3] 徐鹏. 膨胀土滑坡形成机理及其稳定性评价[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [4] 肖荣久. 陕南膨胀土及其灾害地质研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.
- [5] 邹勇, 潘朝, 袁葳, 等. 鄂北调水工程膨胀土渠道滑坡破坏机理及处置措施研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(9): 174-180+228.
- [6] 刘义高, 周玉峰, 郑健龙. 增湿条件下膨胀土路堑边坡稳定性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2007(12): 1870-1875.
- [7] 殷宗泽, 袁俊平, 韦杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155-2161.
- [8] Yang, H.P., Xiao, J., Cheng, B., et al. (2014) Landslide Evolution Rule of Cut Slopes in Expansive Soils. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 8, 13-20. <https://doi.org/10.1061/JHTRCQ.0000357>
- [9] Ovesen, N.K. (1979) The Use of Physical Models in Design: The Scaling Law Relationships. *7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Brighton, 318-323.
- [10] Schofield, A.N. (1981) Dynamic and Earthquake Geotechnical Centrifuge Modelling. *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, 29.
- [11] 杨文琦, 周成, 王林, 等. 降雨作用下考虑膨胀推力的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(5): 874-880.
- [12] 王文生, 谢永利, 梁军林. 膨胀土路堑边坡的破坏型式和稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005(1): 20-24.