

DOI: 10.11779/CJGE2018S1022

饱和黄土滑坡形成中的侧压力作用 ——以甘肃黑方台为例

吴玮江¹, 宿星^{1,2}, 叶伟林^{1,2}, 魏万鸿¹, 杨涛¹, 冯乐涛¹

(1. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 由于长期农业灌溉水的入渗, 甘肃黑方台黄土台塬区自1984年以来已发生滑坡130余次, 以黄土层内滑坡为主, 占90%以上。其形成机理具有特殊性, 灌溉水大量入渗在黄土层底部形成20余米厚的饱和软弱基座, 除使该层土体抗剪强度降低外, 也使抗压强度降低, 变形能力增强, 在上部土体自重作用下, 使饱和黄土向斜坡外侧发生强烈塑流变形。同时, 在斜坡后部饱和黄土层中产生较大的侧压力, 水平作用于前部斜坡体, 助推其变形破坏和高速启程滑动, 也是区内饱和黄土滑坡形成的动力来源之一。现场不同深度的侧压力观测资料表明, 黑方台黄土台塬区侧压力主要产生在23.5 m以下的饱和黄土层中, 达30~230 kPa, 随着深度的增加而增大, 作用于滑坡体的水平推力可达2236 kN/m。以黑方台2015年发生的4·29罗家坡滑坡为例, 按不考虑侧压力和考虑侧压力分别计算其稳定系数为1.12和0.94, 可见滑坡后部饱和黄土层中产生的侧压力对其形成有重要作用。

关键词: 黄土层内滑坡; 形成机理; 饱和黄土; 侧压力; 塑流变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0135-06

作者简介: 吴玮江(1963-), 男, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: wwj0408@163.com。

Lateral pressure in formation of saturated loess landslide——Case study of Heifangtai, Gansu Province

WU Wei-jiang¹, SU Xing^{1,2}, YE Wei-lin^{1,2}, WEI Wan-hong¹, YANG Tao¹, FENG Le-tao¹

(1. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Research School of Arid

Environment and Climate Change, Key Laboratory of Western China's Environmental Systems of Ministry of Education, Lanzhou

University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Due to the long-term infiltration effect of agricultural irrigation water, more than 130 landslides have been found since 1984 in the Heifangtai loess tableland, Gansu Province. Among them, more than 90% of landslides can be classified into the homogeneous loess ones. The formation mechanism is unique. Generally, the irrigation water can permeate the loess body and gather at the bottom of loess layer to form a saturated weak base with more than 20 m in thickness. The corresponding shear strength and compressive strength of this base layer are reduced greatly, while the deformation capacity increases. Under the loading impact of overburden, the saturated loess base layer will exhibit the phenomenon of severe plastic deformation towards the outside of the slope. Moreover, the relatively large lateral pressure can be generated in the saturated loess area at the back of the landslide and horizontally act on the front slope to cause deformation damage, and then results in the high-speed slipping, which is another one of the power sources to induce the saturated loess landslide. The observed data from the in-situ investigation show that the lateral pressure of soils is mainly generated in the saturated loess layer below 23.5 m, and it can reach 30~230 kPa in Heifangtai loess terrace area. The horizontal thrust may increase with the growth of depth, and can even reach as high as 2236 kN/m. In the case of the Luojiapo landslide which occurred on 29th, April, 2015, its the stability coefficient is 1.12 when the lateral pressure is not taken into account, while it is reduced to 0.94 due to the effect of lateral pressure. Therefore, it can be concluded that the lateral pressure generated in the saturated loess layer at the back of landslide plays an important role in the formation of saturated loess landslide.

Key words: homogeneous loess landslide; formation mechanism;

基金项目: 国家自然科学基金项目(41362014); 甘肃省科学院应用研

发项目(2012JK-07); 甘肃省科学院应用研发项目(2015JK-01)

收稿日期: 2018-02-24

saturated loess; lateral pressure; plastic flow deformation

0 引言

西北黄土高原地区因农田水利灌溉诱发了大量滑坡灾害,造成巨大的人员伤亡和财产损失,其中以甘肃省永靖县黑方台灌区的滑坡灾害最为典型。自1984年以来已频繁发生滑坡130余次,造成30余人死亡,100多人受伤,直接经济损失近2亿元。黑方台是近些年来中国黄土滑坡灾害发生最为频繁和损失最为严重的地段,素称为滑坡研究的“天然实验室”。

黑方台滑坡灾害引起了广泛关注。王家鼎^[1]提出饱和黄土蠕滑液化的滑动机理;许岭等^[2]认为长期农业灌溉补给地下水是黑方台黄土滑坡根本的诱发因素;武彩霞等^[3]发现黑方台黏土隔水层控制着区内地下水运移规律;吴玮江等^[4-5]对黑方台滑坡类型、形成机理和活动特征进行了较全面的研究,认为黑方台滑坡的类型有黄土层内滑坡和黄土—泥岩顺层滑坡两种类型,黄土层内滑坡具有高速远程和继发性强的特点,黄土—泥岩顺层滑坡具有低速近程和复活性的特点;张茂省^[6]、慕焕东等^[7]、许强等^[8]对区内滑坡特征、地表水入渗机制、成因机理和滑距等方面进行了研究。

目前在滑坡形成机理研究方面,国内外学者主要侧重滑坡形成中的孔隙水压力变化^[9-10]、饱和土静态液化^[11]等作用。在黑方台滑坡的研究中,“大面积灌溉水的长期入渗,引起地下水位升高,对斜坡岩土体的软化作用是黑方台滑坡主要引发因素等”已为大家所公认,但在滑坡形成机理、突发性、继发性等方面则有不同认识。吴玮江等^[4-5]2006年初次提到了滑坡后部台塬区饱和黄土层中侧压力对滑坡形成的作用,本文通过土工试验和土侧压力监测继续深入地研究黑方台黄土滑坡形成过程中的侧压力作用,为区内滑坡灾害的防治提供科学依据。

1 黑方台滑坡发育概况

1.1 黑方台地质环境条件概况

黑方台属黄河北岸Ⅳ级基座阶地,前缘直接与Ⅱ级阶地相接,北侧为磨石沟,黑方台四周孤立,形成黄土台塬地貌。台面平整开阔,东西长约10 km,南北宽0.5~3.0 km,呈长条状展布,总面积13.44 km²。台缘为高差达100~125 m的斜坡地形,坡体上陡下缓,平均坡度35°左右。地层结构自下而上依次为白垩系河口群(K_{hk})紫红色砂质泥岩、第四系中更新统(Q₂^{al})卵石层和桔红色粉质黏土、上更新统(Q₃^{col})黄土。天然条件下大气降水是地下水的唯一补给来源,由于年降水量仅为315 mm,黑方台上部黄土层长期也处于干燥状态,天然含水量一般为6%~10%。

黑方台灌溉面积为753 ha(1 ha=10⁴ m²),年提水总量为600×10⁴~800×10⁴ m³。由于长期的大面积大水漫灌,致使大量水体渗入地下,增大了地下水的补给来源,改变了黑方台的天然水文地质条件。目前,在黄土底部已形成了20余米厚的潜水含水层,并在台缘一带以泉和面状渗出的形式大量排泄。

1.2 滑坡发育概况

在黑方台长10 km的台缘地带发育130余处滑坡,它们彼此相连,构成台缘滑坡发育群带,尤以焦家河湾地段滑坡最为密集。受独特的地质地貌控制,黑方台发育的滑坡主要为黄土层内滑坡和黄土—泥岩顺层滑坡两种类型,以黄土层内滑坡为主,占90%以上,黄土—泥岩顺层滑坡主要分布在野狐沟以西台缘区。1998年以前,滑坡主要发育在黄河一侧的南部台缘;1998年以后,磨石沟一侧的北部台缘也开始发育黄土层内滑坡且频率不断增加。2010年以来,野狐沟西侧的党川村一带则成为近年来该地区黄土层内滑坡的高发区段,已发生滑坡10余次。如2015年4月29日、2017年2月19日,党川村罗家坡一带发生2次黄土滑坡,体积分别为65×10⁴、26×10⁴ m³。

2 滑坡形成中的侧压力作用分析

2.1 侧压力作用于滑坡的认识

土的侧压力(静止、主动)在地下普遍存在,地下洞室、支挡结构等研究、设计中对其十分重视。实际上,在下部有饱和塑流性土体的斜坡中,后部土层产生的侧压力对前部滑坡的形成有非常重要的助滑作用,但仍未引起滑坡研究者的关注。对于厚层饱和黄土滑坡而言,滑坡形成过程中,滑体与滑床、滑壁之间并不是简单的主动变形与被动支撑的关系,滑坡后部饱和黄土层的侧压力对前部滑坡体产生水平推挤作用,二者之间在斜坡变形过程中还存在不断的相互作用,在侧压力的驱动下后部饱和黄土层长期缓慢流塑变形,也不断跟随滑坡体向临空面位移,出现多次后缘拉裂—黏合的往复过程,直到滑坡剧烈滑动。黄土滑坡中的侧压力作用机理与平推式滑坡中的滑坡后部裂缝充水形成静水压力作用机理^[12]具有相似性。饱和黄土滑坡形成过程中的侧压力作用机理如图1所示。

滑坡体剧滑后,滑坡后壁处形成新的临空面,滑坡后壁土层继续受到来自其后部饱和土层的侧压力作用,继续流塑变形直至形成新的滑坡,因此,黑方台地区黄土层内滑坡具有典型的继发性和多发性,尤其是同一地点滑坡的多期多次后退式发展演化特征。

滑坡后部饱和黄土含水量高,抗压强度低,变形

能力强, 在上部土体的自重作用下, 下部饱和黄土层产生较大的侧压力。黑方台黄土台塬区 20 世纪 90 年代和 2010 年前后的几次钻孔施工中, 在下部饱和黄土层均出现严重的缩孔和卡钻现象, 导致许多钻孔施工困难以致报废, 也说明在上覆土体的重力作用下, 饱和黄土层中侧压力的存在和塑流变形的严重性。

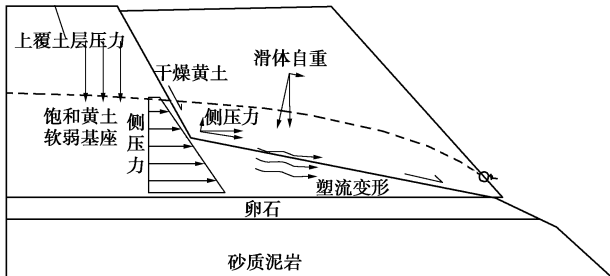


图 1 饱和黄土滑坡形成中的侧压力作用机理简图

Fig. 1 Diagram of mechanism of lateral pressure in formation of saturated loess landslide

另外, 滑坡壁后部台面一般多出现开裂和下沉, 其形成除了前部滑坡体的牵引向前转移外, 也是下部饱和黄土层塑流挤出变形的表现形式之一。受地形条件控制, 黑方台台缘一带形成三面约束、一面临空的边界条件, 致使下伏土体的围压条件不对称, 斜坡临空一侧相对较小。因此, 在侧压力作用下, 饱和黄土则更容易向临空的斜坡外侧塑流变形, 助推斜坡变形破坏和高速启程滑动。

基于上述认识和分析, 本文通过土工试验和现场饱和黄土侧压力监测等方法研究黑方台黄土滑坡形成过程中的侧压力作用。

2.2 侧压力监测试验

在黑方台采取不同深度黄土原状试样 12 组, 采用 DF3 型土压力仪测试其静止侧压力系数。总体上, 所获得的侧压力系数测试数据离散性较大, 与理论认识存在一定差异。产生该问题的原因可能与室内 K_0 试验的垂向荷载作用方式与实际有所差异。因此, 在上述室内土工试验的基础上, 考虑到饱和黄土具有塑流性、钻孔缩孔严重的特点, 重点采用现场钻孔监测的土压力测试方法对区内土体的土压力进行实时监测, 真实反映土体侧压力在滑坡形成中所起的作用。

土压力野外现场监测的试验是在钻孔中安放土压力盒及传感器、后在孔内填满细砂, 当塑流性饱和黄土在侧压力作用下, 钻孔不断缩径, 短时间内则对垂直安放的土压力盒产生水平向的土压力, 对其进行无线传输连续自动监测。通过长时间的连续自动监测, 则基本消除钻孔施工扰动对土压力的扰动和影响, 达到天然稳定状态, 所获得的土压力观测数据也更具有真实性、代表性和可靠性。

为了定量分析黑方台灌区的侧压力对滑坡的影响作用, 在距 2015.4.29 罗家坡滑坡西侧约 160 m 处,

分别布设 1 个 52 m 深的土侧压力监测孔和 1 个 40 m 深的水位监测孔, 监测黑方台台缘区的侧压力及水位变化, 实时获取监测数据。在土侧压力监测孔中自上而下共布置 14 个智能土压力盒传感器 (JMZX-5040A), 布置深度为 14, 17, 18, 20, 21, 23, 26, 29, 32, 35, 39, 42, 45, 48 m。土压力盒按布置深度竖直固定于钻孔中槽钢的外侧面, 与所监测的水平土侧压力方向垂直, 钻孔采用细砂回填均匀密实 (图 2)。

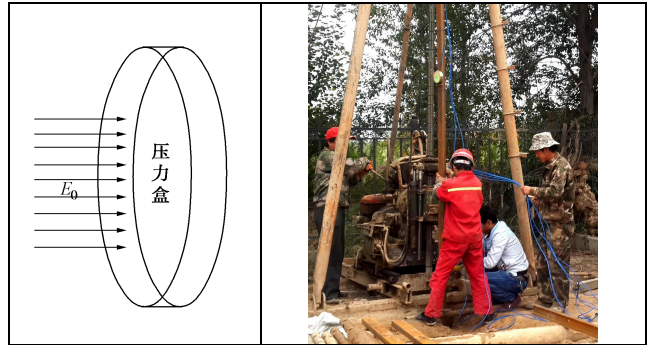


图 2 侧压力监测仪器安装

Fig. 2 Installation of monitoring equipments for lateral pressure

2.3 监测结果分析及讨论

从 2015 年 9 月开始监测, 监测时间已超过 7 个月。监测数据显示, 在监测约 10 d 后, 每个孔位的土压力数据均基本趋于稳定, 增幅甚微。监测数据揭示的黑方台台缘区黄土层中的土侧压力分布见图 3。

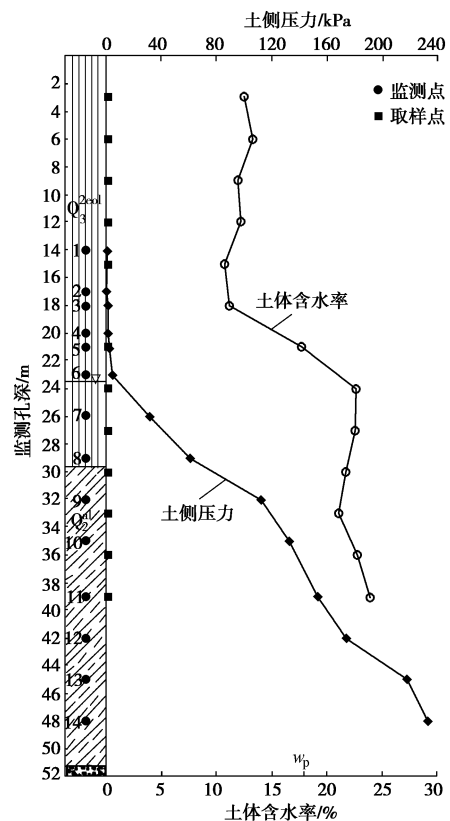


图 3 土侧压力和土体含水量随钻孔深度的变化图

Fig. 3 Change of lateral pressure and water content of soils with depth of drilling

从土侧压力随钻孔深度的变化曲线可以看出, 在

10~23 m 深度范围内土侧压力很小, 所测得的土侧压力基本在 5 kPa 以内, 变化较小; 23~48 m 范围内土侧压力明显增大, 随着深度的增加, 土侧压力基本呈线性逐渐增大, 48 m 处测得的最大值为 233 kPa。从水位监测孔测得的地下水位为 23.5 m, 即上部 23.5 m 厚土体为非饱和黄土, 下部 27.7 m 厚的土体为饱和黄土。由钻孔土压力监测数据可知, 非饱和黄土层的土侧压力很小; 而饱和黄土层的土压力随着深度的增加逐渐增大。可见, 钻孔中所测的黄土侧压力与含水量有很大关系, 含水量小于塑限 (W_p) 时, 基本不产生侧压力, 含水量大于塑限时, 产生明显的侧压力。黄土的侧压力产生与否也可能与黄土的结构强度(无侧限抗压强度)以及本测试方法在不同含水状态土层中的适用性等有关, 将有待今后进一步专门研究。

滑坡后部土体对滑体产生的是静止土压力 (E_0), 还是主动土压力 (E_a), 主要取决于滑坡发育的阶段以及滑坡体的位移大小。一般滑坡体向外位移, 相当于挡土墙外移, 当位移量小于 $0.004H$ 时, 产生静止土压力, 当位移大于 $0.004H$, 产生主动土压力^[13], 由于滑坡形成初期的缓慢位移, 以及饱和黄土层的高塑流性, 后部饱和黄土产生的土压力可能介于二者之间, 随着滑坡的变形与发展, 一般分析认为可能是从较大的静止土压力逐渐变为较小的主动土压力。当滑坡剧滑后, 作用于滑坡体上的土压力则逐渐消失(图 4)。

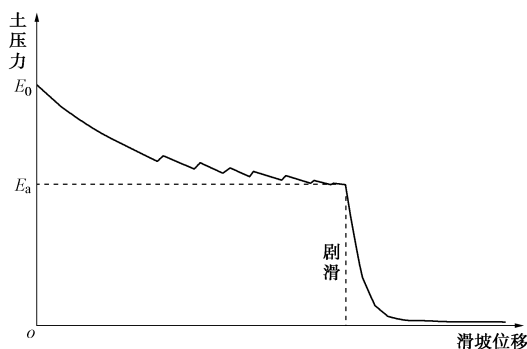


图 4 滑坡后部土压力与滑坡位移的变化关系
Fig. 4 Relationship between earth pressure and landslide displacement

3 考虑土侧压力的滑坡滑前稳定性实例分析

3.1 黑方台党川段典型滑坡

2015 年 4 月 29 日北京时间 07:55 和 10:40, 黑方台党川村罗家坡同一斜坡处连续发生了 2 次大规模黄土滑坡。滑坡总体积约 $65 \times 10^4 \text{ m}^3$, 最大滑距 630 m。滑坡摧毁了 14 户居民房屋和 3 家工厂, 破坏道路、输电线路、供水管道和引水渠道等, 直接经济损失 5654 万元^[14]。许强等^[8]认为该黄土滑坡存在静态液化现象,

属于静态液化型黄土滑坡。

2017 年 2 月 19 日凌晨 03:45, 黑方台党川村罗家坡段又发生滑坡(“4·29”滑坡点以东 100 m 处), 滑坡总体积约 $26 \times 10^4 \text{ m}^3$, 滑距约 400 m。滑坡掩埋坡脚自流渠 200 m, 损毁坡顶台缘区 2 座钢架大棚, 造成党川、黄茨、焦家 3 个村自来水中断, 6000 余人的饮水受到影响, 通讯中断。据前期野外调查和遥感影像, 近年来该滑坡点处已发生过多处滑坡, 本次滑坡为在原有滑坡基础上继发的新滑坡。据现场调查、访问, 该滑坡共发生三次剧烈滑动。

总体上, 黑方台地区发育的黄土层内滑坡具有滑距长、破坏性强、突发性等特点, 同时具有同一地点的继发性和多发性等特点。主要原因是在一次滑坡发生后, 滑坡后壁高陡, 再次形成临空面, 坡体下部黄土层仍处于饱和软化状态, 在自重、侧压力及超孔隙水压力作用下, 后缘坡体变形破坏, 再次发生滑坡, 形成同一地点多期多次滑坡的特征。

相对于一般黄土滑坡而言, 灌溉引发的黄土滑坡后壁位置距台缘较远, 在平面上形成明显的向台缘内深凹进形状, 下部常有地下水渗出。

在上部黄土层自重压力的作用下, 下部厚 20 余米的饱和黄土软弱基座向坡外产生塑性流变, 上部非饱和黄土中出现拉裂和下错, 裂缝从下向上发展, 下错更为明显。黑方台黄土层内滑坡是由非饱和黄土和饱和黄土两种物理力学性质差异较大的土层组成的层状结构滑坡, 已不是一般概念上的纯黄土滑坡, 下部饱和黄土层的整体塑性流动变形是其控制因素。因此, 黑方台黄土层内滑坡的滑面形状并非圆弧型, 而是上陡下缓的两段式, 整体为“L”型, 转折点位于饱和黄土与非饱和黄土的界面附近; 下部坡体变形发生在饱和黄土层内, 并受其控制, 初期为饱和黄土层的整体塑性流动变形, 并非一个理想的面或带, 随着饱和黄土结构强度的破坏和丧失, 最终发展为较为平直的滑面, 坡度 15° 左右; 上部滑面坡度 60° 左右, 较为平直, 为拉裂段, 也受到黄土垂直节理的控制。

3.2 2015 年 4·29 罗家坡黄土滑坡滑前稳定性分析

根据 2015 年 4·29 罗家坡黄土滑坡发生前、后的勘察资料, 选取主滑方向的原始斜坡地质剖面(图 5), 采用刚体极限平衡法中广泛应用的传递系数法, 分别计算一般工况下考虑后部土体侧压力作用和不考虑土侧压力时原始斜坡的稳定性, 其计算公式为^[15]

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + T_n}, \quad (1)$$

$$\psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1}, \quad (2)$$

$$R_i = (G_i \cos \theta_i - E_i \sin \theta_i) \tan \varphi_i + c_i L_i \quad (3)$$

$$T_i = G_i \sin \theta_i + E_i \cos \theta_i \quad (4)$$

式中 F_s 为稳定系数; R_i 为作用于第 i 块段的抗滑力 (kN/m); T_i 为作用于第 i 块段滑动面上的滑动分力 (kN/m); ψ_j 为第 i 块段的剩余下滑力传递至 $i+1$ 块段时的传递系数 ($j=i$); θ_i 为第 i 块段滑动面与水平面的夹角 ($^\circ$); φ_i 为第 i 块段土的内摩擦角 ($^\circ$); C_i 为第 i 块段土的黏聚力 (kPa); L_i 为第 i 块段滑动面长度 (m); G_i 为第 i 块段滑体重力 (kN/m); E_i 为作用于第 i 块段的土侧压力 (kN/m), 当不考虑土侧压力时, 该值取 0。

滑坡稳定性计算中的有关参数是根据该滑坡岩土体组成和本研究试验资料, 参考了区内有关岩土体抗剪强度试验值^[16]综合确定。根据钻孔中侧压力观测数据, 对应于图 5, 土侧压力主要分布于罗家坡下部饱和黄土层内, 因此, 首先对受侧压力主要作用的 2~5 滑坡条块进行侧压力计算 (表 1), 然后将侧压力作为作用于相应滑坡条块的一项水平作用力, 代入上述稳定性计算公式, 计算原始斜坡的稳定性 (表 2)。

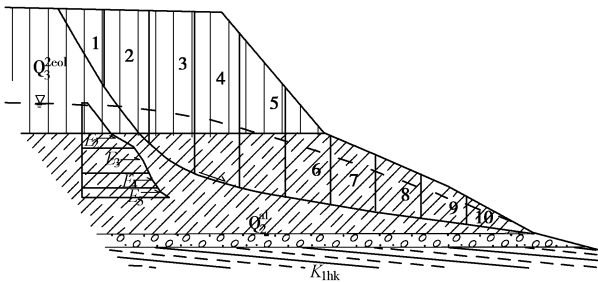


图 5 罗家坡滑坡前斜坡稳定性计算剖面简图

Fig. 5 Diagram of stability calculation of Luojiapo slope

从稳定性计算结果可以看出, 在不考虑侧压力作用的状态下, 斜坡的稳定系数为 1.12, 处于基本稳定状态; 考虑侧压力作用的状态下, 稳定系数为 0.94, 将失稳滑动。可见, 饱和黄土中的侧压力对 4·29 罗家坡黄土滑坡的形成有重要影响。作用于斜坡的侧压力最大值为 2236 kN/m, 相当于常用截面 1.8 m×2.4 m 抗滑桩抗滑力的 2 倍, 亦表明侧压力作用对黄土滑坡

的重要性, 不可忽视。

表 1 作用于罗家坡斜坡的侧压力计算表

条块编号	上部侧压力/kPa	下部侧压力/kPa	平均侧压力/kPa	计算厚度/m	作用于滑坡的侧压力/(kN·m ⁻¹)
2	12	116	64	10.0	640.0
3	116	148	132	5.4	712.8
4	148	168	158	3.2	505.6
5	168	192	180	2.1	378.0
合计					2236.4

4 结 论

(1) 黑方台地区黄土层内滑坡属典型的塑流—拉裂型滑坡, 具有发生突然、速度极快、滑程甚远、继发性强等特点。灌溉水大量入渗在黄土层底部形成 20 余米厚的饱和软弱基座, 使该层土体抗压强度降低, 变形能力增强, 在上部土体自重作用下, 使饱和黄土向斜坡外侧发生强烈塑流变形。并在滑坡后部饱和黄土层中产生较大的侧压力, 助推台缘斜坡变形破坏和高速启程滑动, 侧压力也是黄土滑坡突然破坏、高速启程的重要动力来源之一。

(2) 本次实施的侧压力监测孔中, 上部为 23.5 m 厚的非饱和黄土, 下部为 27.7 m 厚的饱和黄土层。钻孔土压力监测数据可知, 非饱和黄土层的土侧压力很小, 最大只有 5 kPa; 而 23.5 m 以下的饱和黄土层的侧压力作用明显增强, 并随着深度的增加基本呈线性增大, 48 m 处最大侧压力值为 233 kPa。可见, 土体含水量对土侧压力有重要影响, 侧压力主要产生于饱和黄土层中。

(3) 黑方台黄土层内滑坡是由非饱和黄土与饱和黄土两种物理力学性质差异较大的土层组成的层状结构滑坡, 已不是一般概念上的均质黄土层内滑坡, 下部饱和黄土层的整体塑流变形是其控制因素。此类黄土层内滑坡的滑面形状并非圆弧型, 而是上陡下缓的两段式, 整体为“L”型的折线形, 转折点位于饱和黄土与非饱和黄土的界面附近, 其上部为拉裂段。

(4) 以 2015 年 4·29 罗家坡黄土滑坡为例, 计算

表 2 罗家坡斜坡稳定性计算表

Table 2 Stability of Luojiapo slope

条块编号	条块重量/kN	滑面长度/m	滑面倾角 $\alpha/(^\circ)$	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	侧压力/(kN·m ⁻¹)	累计抗滑力/(kN·m ⁻¹)	累计下滑力/(kN·m ⁻¹)	稳定系数 F_s (不考虑土侧压力)
1	1413.6	20.5	60.5	20.0	30.0		811.9	1230.3	
2	3886.8	16.5	52.3	15.0	25.0	640.0	1750.8	4211.3	
3	5245.6	10.5	28.5	15.0	17.0	712.8	2326.2	5836.5	
4	5735.4	10.5	13.8	15.0	17.0	505.6	3439.5	6560.8	
5	4597.8	10.5	12.0	15.0	17.0	378.0	4567.5	7450.5	
6	3129.6	10.3	9.3	15.0	17.0		5595.4	7840.7	
7	2249.4	10.1	8.2	15.0	17.0		6393.7	8114.0	
8	1815.0	10.1	8.1	15.0	17.0		7091.2	8365.4	
9	1320.0	10.1	8.0	15.0	17.0		7638.5	8544.7	
10	775.5	15.2	8.0	15.0	17.0		8101.3	8652.6	(1.12/0.94)

滑坡发生前的斜坡稳定性, 结果表明: 在不考虑侧压力作用的状态下, 斜坡的稳定系数为 1.12, 处于基本稳定状态; 考虑侧压力的状态下, 稳定系数为 0.94, 将失稳滑动。作用于前部斜坡的侧压力最大值为 2236 kN/m, 相当于常用截面 1.8 m×2.4 m 抗滑桩抗滑力的 2 倍, 不可忽视。

参考文献:

- [1] 王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理—饱和黄土蠕动液化[J]. 地质论评, 1992, **38**(6): 532 - 539. (WANG Jia-ding. A mechanism of high-speed loess landslides-saturated loess creeping liquefaction[J]. Geological Review, 1992, **38**(6): 532 - 539. (in Chinese))
- [2] 许 领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律[J]. 山地学报, 2008, **26**(3): 364 - 371. (XU Ling, DAI Fu-chu, KUANG Guo-lin, et al. Types and characteristics of loess landslides at Heifangtai Loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2008, **26**(3): 364 - 371. (in Chinese))
- [3] 武彩霞, 许 领, 戴福初, 等. 黑方台黄土泥石流滑坡及发生机制研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(6): 1767 - 1773. (WU Cai-xia, XU Ling, DAI Fu-chu, et al. Topographic features and initiation of earth flows on Heifangtai loess plateau[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(6): 1767 - 1773. (in Chinese))
- [4] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006. (WU Wei-jiang, WANG Nian-qin. Landslide hazards in Gansu[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese))
- [5] WU Wei-jiang, SU Xing, MENG Xing-min. Characteristics and origin of loess landslides on loess terraces at Heifangtai, Gansu Province, China[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, **694**: 455 - 461.
- [6] 张茂省. 引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术—以黄河三峡库区甘肃黑方台移民灌区为例[J]. 地质通报, 2013, **32**(6): 833 - 839. (ZHANG Mao-sheng. Formation mechanism as well as prevention and controlling techniques of loess geo-hazards in irrigated areas: a case study of Heifangtai immigration area in the Three Gorges Reservoir of the Yellow River[J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(6): 833 - 839. (in Chinese))
- [7] 慕焕东, 宋登艳, 张茂省, 等. 灌溉诱发型黄土滑坡离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(增刊 2): 172 - 177. (MU Huan-dong, SONG Deng-yan, ZHANG Mao-sheng, et al. Centrifuge modelling tests on loess landslides induced by irrigation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 172 - 177. (in Chinese))
- [8] 许 强, 彭大雷, 亓 星, 等. 2015 年 4·29 甘肃黑方台党川#2 滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, **24**(2): 167 - 180. (XU Qiang, PENG Da-lei, QI Xing, et al. Dangchuan #2 landslide of april 29, 2015 in Heifangtai area of Gansu Province: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, **24**(2): 167 - 180. (in Chinese))
- [9] WANG Gong-hui, ZHANG De-xuan, GEN Furuya, et al. Pore-pressure generation and fluidization in a loess landslide triggered by the 1920 Haiyuan earthquake, China: a case study[J]. Engineering Geology, 2014, **174**: 36 - 45.
- [10] GIANFRANCO Urciuoli, MARIANNA Pirone, LUCA Comegna, et al. Long-term investigations on the pore pressure regime in saturated and unsaturated sloping soils[J]. Engineering Geology, 2016, **212**: 98 - 119.
- [11] 金艳丽, 戴福初. 饱和黄土的静态液化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3293 - 3298. (JIN Yan-li, DAI Fu-chu. Experimental investigation of static liquefaction of saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3293 - 3298. (in Chinese))
- [12] 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 Xuan-mei, XU Qiang, ZHANG Zhuo-yuan, et al. Study on genetic mechanism of translational landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S2): 3753 - 3759. (in Chinese))
- [13] 陈忠达. 公路挡土墙设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999. (CHEN Zhong-da. Design of highway retaining wall[M]. Beijing: China Communications Press, 1999. (in Chinese))
- [14] 吴玮江, 叶伟林, 姚正学, 等. 甘肃永靖黑方台 4·29 罗家坡黄土滑坡的特征[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(3): 662 - 670. (WU Wei-jiang, YE Wei-lin, YAO Zheng-xue, et al. Characteristics of the Luojiapo loess landslides at Heifangtai, burst on April 29, 2015, in Yongjing County, Gansu Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, **38**(3): 662 - 670. (in Chinese))
- [15] DZ/T 0218—2006 滑坡防治工程勘查规范[S]. 2006. (DZ/T 0218—2006 Specification of geological investigation for landslide stabilization[S]. 2006. (in Chinese))
- [16] 吴昊宇, 裴向军, 崔圣华. 灌溉型黄土滑坡变形破坏特征的离心机模型研究[J]. 建筑安全, 2015(5): 40 - 44. (WU Hao-yu, PEI Xiang-jun, CUI Sheng-hua. Deformation and failure characteristics of irrigated loess landslides study on centrifuge model[J]. Construction Safety, 2015(5): 40 - 44. (in Chinese))