

降雨渗流及超载影响下膨胀土渠坡失稳模式研究

马文英¹,程艳艳¹,史长莹²,刘建中¹,郭秀彦¹,杨芳芳¹

(1.河北工程大学 水电学院,河北 邯郸 056021;2.黑龙江大学 水利电力学院,哈尔滨 150080)

摘要:采用极限平衡理论,对南水北调中线工程膨胀土-换填土渠坡,在降雨渗流及堤顶超载影响下的失稳模式进行计算研究及超载试验研究,得到了渠坡的最危险失稳模式及其失稳破坏状态。结果表明:(1)最危险渠坡滑裂面是位于膨胀土渠坡浅表范围内含有块间破裂面的复合曲面或单一曲面。(2)堤顶超载对渠坡稳定有显著不利影响,极限堤顶超载值约为0.44倍渠坡高度的土柱荷重或1.4倍汽20加重车均布荷重。该结果可为工程合理设计及安全施工、运行提供有益的参考。

关键词:膨胀土-换填土渠坡;降雨渗流;堤顶超载;失稳模式;试验

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0138-05

Research on Instability Modes of Expansive Soil Slope Under the Impacts of Rainfall Seepage and Overload

MA Weir ying¹, CHENG Yar yan¹, SHI Chang ying², LIU Jiarr zhong¹, GUO Xuir yan¹, YANG Fang fang¹

(1. College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056021, China;

2. Institute of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Unstable modes of expansive and replacement soil slope under the impacts of rainfall seepage and overload in the Middle Route of South to North Water Diversion Project were investigated using the limit equilibrium theory. The most dangerous instability mode and state of unstable destruction were obtained. The results showed that (1) the most dangerous sliding surface is the single curved surface or compound curved surface which has rupture surface between blocks in the shallow layer of expansive soil slope; and (2) the overload of slope top has significantly adverse impacts on slope stability. The limit overload value of slope top is about 0.44 times of the weight of the soil column with the slope height or 1.4 times of the weight of the uniformly distributed load produced by the car with a carrying capacity of 20 tons. The results can provide beneficial reference for the reasonable design and safe construction and operation of the project.

Key words: expansive and replacement soil slope; rainfall seepage; overload of slope top; instability mode; test

南水北调中线总干渠位于膨胀土层上的渠段长达346.85 km, 占总干渠全长的27%。膨胀土富含蒙脱石、伊利石等强亲水性矿物质^[1], 遇水时膨胀隆起, 失水时收缩下沉; 受环境干湿变化影响很大, 湿润时塑性很强, 干燥时裂隙发育^[2], 膨胀和收缩具有不可逆性, 处理不好对工程建设与安全运行均会带来很大危害, 例如南阳陶岔引水渠施工中, 就曾发生过14起膨胀土大规模滑坡。近年来有关单位和学者进行了不少研究, 例如陈尚法等^[3]通过现场试验研究, 提出了换填非膨胀土或改性土的置换措施; 张振华等^[4]研究了换填土施工工艺及其对渠床稳定的影响; 包承纲^[5]进行的现场试验表明, 在降雨入渗条件下膨胀土多发生浅层滑动, 裂隙性是影响边坡稳定的关键因素; 蔡耀军等^[6]根据野外勘探观测资料提出, 膨胀土开挖后可按三带(胀缩裂隙带、过渡

带、超固结非饱和带)划分, 开挖边坡力学参数可按三带分别取值^[6]。从总观上看, 目前有关研究主要集中于膨胀土力学特性、处理措施及施工工艺等方面, 对膨胀土-换填土渠坡失稳模式及其稳定分析方法的研究尚十分少见。考虑到施工与运行期间, 膨胀土-换填土渠坡不可避免将受到降雨渗流及堤顶超载作用的共同影响, 本文从极限平衡理论^[7]出发, 对膨胀土-换填土渠坡在降雨渗流与堤顶超载条件下的失稳模式进行计算研究和超载破坏试验研究, 探讨最危险失稳模式, 以为工程安全施工、运行提供依据。

2 膨胀土-换填土渠坡失稳模式

理论上认为, 渠道边坡在土体自重及其他外力作用下, 一部分土体相对于另一部分土体发生滑动现象, 边坡则丧失

收稿日期: 2013-12-11 修回日期: 2014-02-10 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

作者简介: 马文英(1956-), 女, 河北河间人, 教授, 主要从事水工结构可靠性与优化研究。E-mail: mxn840910@163.com

其原有稳定性,从而出现滑坡,其根本原因是土体内剪应力达到了土壤抗剪强度,稳定平衡遭到了破坏即发生失稳^[8]。对膨胀土-换填土渠道,施工或运行期间发生渠坡失稳,受控于如下因素影响。

(1) 膨胀土对干湿环境变化的高度敏感性^[9]。降雨渗流在渠坡内形成浸润线,一方面浸润线以下的膨胀土迅速崩解膨胀,抗剪强度降低,与浸润线以上土体构成较大反差而发生土体显著变形,形成失稳薄弱区域。渗流作用愈强,浸润线愈高,则土体变形区愈大,薄弱区域愈大。另一方面渗流使土体内孔隙压力增大,有效应力降低,进一步加剧失稳薄弱区的发展。

(2) 堤顶超载。施工或运行期间不可避免的堤顶人群荷载、车辆荷载、堆积物资构成的超载,将加剧膨胀土浅表层收缩裂隙带中裂隙的发育及失稳势态,如同文献[4]指出的那样,“裂隙性是影响膨胀土力学性质和边坡稳定性的关键因素^[4]”。

(3) 土层结合面压实质量。膨胀土-换填土结合面,施工压实质量不均处,致使粘结强度薄弱,将构成渠坡沿层面失稳的潜在诱导因素。

(4) 膨胀土、换填土及其二者者结合面,受渗水浸没后力学特性的差异。三者抗剪强度对渗流响应的差异,直接影响到渠坡失稳变形的分布和发展,影响渠坡失稳形态。

在上述因素影响下,膨胀土-换填土渠坡(以下简称P-H渠坡)坍塌破坏将会存在如下几种可能失稳模式:

模式一:当P-H土层交界面结合良好,抗剪强度较高,且膨胀土渠坡内地下水位影响较小时,黏性土渠坡失稳将沿曲面形式坍塌滑出。此时因地下渗水位对两种土体的抗剪强度衰减影响不大,失稳土体不会发生内部破裂,滑裂面将呈单一曲面形式,分析坍塌体极限平衡状态,渠坡稳定安全系数K为^[10]

$$K = \frac{\sum \text{tg} \varphi_i (W_i \cos \alpha_i - \gamma_w h_{ui} l_i) + \sum c_i l_i}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (1)$$

式中:W_i为i土条自重;φ_i为i土条在滑动面处的内摩擦角;α_i为i土条底部中点所在半径与铅直线的夹角;γ_w为水重度;h_{ui}为i土条底部中点测压管水柱高度;c_i为i土条底部单位凝聚力;l_i为i土条滑弧长度。

模式二:当降雨渗流^[11]在渠坡内引起的浸润线较高,致使浸润线以下膨胀土内孔隙压力骤增且抗剪强度大为降低,而渠坡换填土内孔隙压力及抗剪强度相对变化较小时,则会在浸润线与滑裂面的交点2处及滑裂面与P-H土层接触面的交点3处,产生块间滑裂面22'及33'(图1),形成含有块间滑裂面的复合滑动曲面1234-22'-33'。此时渠坡坍塌体被分成毗邻的上、中、下三个滑块沿底部滑裂面滑出,考虑滑块间滑裂面上的作用力Pa、Pb影响,分析其极限平衡状态可得渠坡稳定安全系数K为

$$K = \frac{\sum [\text{tg} \varphi_i (W_i \cos \alpha_i - \gamma_w h_{ui} l_i) + c_i l_i] - P_b - P_a + P_a \cos \alpha_e}{\sum W_i \sin \alpha_i - P_b \cos \alpha_e} \quad (2)$$

其中:

$$P_a = \sum [W_i \sin \alpha_i + \frac{c_i l_i}{K} + \frac{\text{tg} \varphi_i}{K} (W_i \cos \alpha_i - \gamma_w h_{ui} l_i)] \cos \alpha_e \quad (3)$$

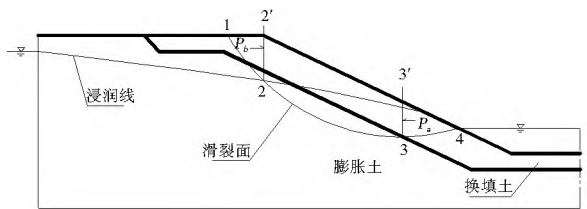


图1 含块间破裂面的复合滑动曲面

Fig. 1 Compound sliding curved surface which has rupture surface between blocks

$$P_b = \sum [W_i \sin \alpha_i + \frac{c_i l_i}{K} + \frac{\text{tg} \varphi_i}{K} (W_i \cos \alpha_i - \gamma_w h_{ui} l_i)] \cos \alpha_e \quad (4)$$

$$P_a = P_a \sin \alpha_e \text{tg} \varphi_e \quad (5)$$

$$P_b = P_b \sin \alpha_e \text{tg} \varphi_e \quad (6)$$

式中:P_b为22'破裂面以上滑块对中间滑块的水平促滑力;P_a为33'破裂面以下滑块对中间滑块的水平抗滑力;e、n为中间滑块上,分别与下滑块和上滑块紧邻的土条编号。其余符号意义同前。对式(2)-式(6)迭代求解得到K值。

模式三:当P-H土层结合面碾压不密实,层面抗剪强度较低时,渠坡失稳将会沿两种土层接触面滑出。考虑到受渗水浸没与不受水浸没状态下,土壤抗剪强度的差异及失稳沿最短路径原则,坍塌体将会在浸润线与P-H土层接触面的交点2处产生块间滑裂面22',且在换填土内曲线滑裂面与P-H土层接触面的交点3处产生块间滑裂面33',失稳滑裂面将呈包含块间滑裂面22'和33'的复合折曲面形式1234(图2)。计入块间破裂面上作用力Pa、P影响,分析诸滑块极限平衡得到渠坡稳定安全系数K为

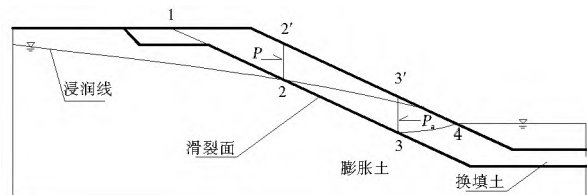


图2 折曲面复合形式滑裂面

Fig. 2 Compound fold & curved sliding surface

$$K = \frac{c_2 l_2 + \text{tg} \varphi_2 (W_2 \cos \alpha + P_a \sin \alpha - P_b \sin \alpha - \gamma_w h_{2u} l_2)}{P \cos \alpha + W_1 \sin \alpha - P_a \cos \alpha} \quad (7)$$

$$P = \frac{K W_1 \sin \alpha - c_1 l_1 - \text{tg} \varphi_1 W_1 \cos \alpha}{K \cos \alpha + \text{tg} \varphi_1 W \cos \alpha} \quad (8)$$

式中:α为渠坡面倾角;W₁为22'破裂面以上的滑块重;W₂为破裂面22'、33'之间滑块的土重;P为W₁滑块对中间滑块的水平促滑力;P_a为33'破裂面以下滑块对中间滑块的水平抗滑力,计算方法同于式(3);c₁、φ₁、l₁、c₂、φ₂、l₂分别为W₁、W₂滑块在滑动面处的土壤单位凝聚力、摩擦角及滑动面长度;其余符号意义同前。对式(7)、式(8)及式(3)迭代求解得到K值。

3 实例分析

3.1 工程概况与计算工况

南水北调中线干渠某标段膨胀土渠道(图3),底宽8m,边坡比1:2.25,渠内设计水深6m,堤顶至渠底高差7.35

m。渠道膨胀土湿重度 $\gamma_p = 18 \text{ kN/m}^3$ ，饱和重度 $\gamma_{pb} = 20.1 \text{ kN/m}^3$ ，渗透系数 $K_p = 2.4 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，土壤单位凝聚力 $c_p = 18.3 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi_p = 17^\circ$ ，浸水饱和后土壤单位凝聚力 $c_p' = 5.49 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi_p' = 14^\circ$ 。渠坡与渠底换填非膨胀黏性土，厚度分别为 2 m 与 1 m，换填土湿重度 $\gamma_h = 19.8 \text{ kN/m}^3$ ，饱和重度 $\gamma_{hb} = 20.4 \text{ kN/m}^3$ ，渗透系数 $K_h = 4.4 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，土壤单位凝聚力 $c_h = 20 \text{ kPa}$ ，内摩擦角 $\varphi_h = 23^\circ$ ，浸水饱和后 $c_h' = 8 \text{ kPa}$ ， $\varphi_h' = 21^\circ$ 。堤顶超载强度取 $q = 21 \text{ kN/m}^2$ （相当于 1.2 m 高度土柱重或汽 15 级车辆荷重）。

据施工开挖资料，降雨入渗引起的地下水位在堤顶高程以下埋深取 1 m，渗水在渠坡内形成的浸润线及渗流逸出点由水力学方法求得^[12]。

应用本文 2 设定的三种渠坡失稳模式，计算如下五种工况下最小稳定安全系数 K_{\min} 及其统计参数。

(1) 施工期，渠内无水时，渠坡失稳分别从渗流逸出点及坡脚滑出。

(2) 运用期，渠内水深 h 为设计水深 H 的 1/3（即 $h = H_{\text{设计}}/3$ ，图 3）时，渠坡失稳分别从渗流逸出点、渠内水边线处、坡脚滑出（注：满水运行时不为控制情况，故未计入）。

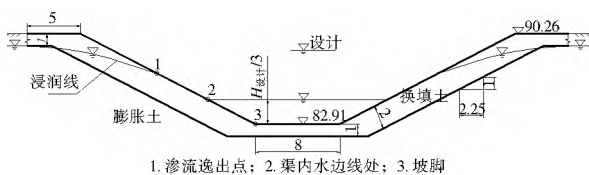


图 3 某标段膨胀土渠道(m)

Fig. 3 Cross section of expansive soil channel (m)

3.2 计算结果及其分析

对 3.1 每一渠坡失稳情况，至少计算 5~7 个 K 值，从中求得相应情况的最小 K 值（即 K_{\min} ），例如运用期渠内水深 $h = H_{\text{设计}}/3$ ，渠坡从渗流逸出点滑出时，3 种失稳模式的安全系数 K 及最小 K 值（即 K_{\min} ）值见表 1。

三种失稳模式应用于五种失稳情况，所求 K_{\min} 结果及其统计参数见表 2（ K 值结果从略）。

表 1 运用期 ($h = H_{\text{设计}}/3$) 渠坡从渗流逸出点滑出时的 K 、 K_{\min} 值

Table 1 The K and K_{\min} values of slope which slips out from seepage escape point during the operation period ($h = H_{\text{设计}}/3$)

失稳模式	计算滑裂面						K_{\min}
	1	2	3	4	5	6	
一	1.318 (1.470)	1.074 (1.244)	0.992 (1.170)	0.954 (1.132)	1.166 (1.447)	1.071 (1.307)	0.954
二	1.532 (1.565)	1.028 (1.045)	0.967 (1.071)	0.957 (1.078)	0.926 (1.079)	1.227 (1.445)	0.926
三	1.527 (1.904)	1.065 (1.705)	1.292 (2.187)	1.126 (2.200)	1.091 (2.174)	0.995 (2.060)	0.995

注：1、2、...6 为计算滑弧编号；表中 K 值显示，模式一、二、三分别第 4、5、6 滑弧处具有最小稳定安全系数 K_{\min} 值：0.954、0.926、0.995，将其摘录于表 2；表 1 中（）内数值为不计超载影响时的渠坡稳定安全系数。

表 2 各模式对五种失稳情况 K_{\min} 值计算结果及其统计参数

Table 2 The K_{\min} values and statistical parameters under five instability modes

失稳模式	坍塌体滑出点位置					μK_{\min}	δK_{\min}
	施工期		运用期				
	渗流逸出点	坡脚	渗流逸出点	渠内水边线	坡脚		
一	0.804 (0.911)	0.770 (0.874)	0.954 (1.132)	0.840 (0.968)	0.718 (0.794)	0.8175	0.109
二	0.809 (0.878)	0.707 (0.756)	0.926 (1.079)	0.846 (0.929)	0.716 (0.771)	0.8008	0.115
三	1.545 (2.065)	1.574 (2.203)	0.995 (2.060)	1.244 (2.271)	1.554 (2.505)	1.3824	0.185
K_{\min} 小值	0.804	0.707	0.926	0.840	0.716	-	-

注： μK_{\min} 、 δK_{\min} 分别为 K_{\min} 的均值和变异系数；“ K_{\min} 小值”为对应计算情况下各失稳模式所求 K_{\min} 值中的最小者；表 2（）内数值为不计超载影响时的渠坡稳定安全系数。

计算结果分析：

(1) 由表 2 可见：模式一、二、三的 μK_{\min} 值分别为 0.8175、0.8008、1.3824，其中模式二的 μK_{\min} 值最小；表 2 末行 5 个“ K_{\min} 小值”中，模式二求出的有 3 个（0.707、0.926、0.716），即求出“ K_{\min} 小值”的比率为 3/5，模式一求出的有 2 个（0.804、0.840），即求出“ K_{\min} 小值”的比率为 2/5，模式三求出的为 0。可见模式二更接近最危险失稳形态，能在更多

的工况下求出最小安全系数。

(2) 模式一的“ K_{\min} 小值”比率及 μK_{\min} 值略逊于模式二，且具有滑裂面形式单一，计算简便的优点，不失为一种求解 K_{\min} 值的简化实用计算模式。

(3) 模式三的 K_{\min} 、 μK_{\min} 值均远大于模式一、二的计算结果，表明 P-H 渠坡沿两种土层接触面剪破失稳的几率较小，模式三不是其危险失稳模式。

(4) 由表 2 末列数据可见，用模式一、二求得的各种工况 K_{\min} 的变异度 δK_{\min} 值也较小，分别为 0.109、0.115。 δK_{\min} 值小，表明 P-H 渠坡沿各工况失稳的危险度较为均衡，也表明其 K_{\min} 具有较好的代表性。

(5) 比较表 1、表 2 中的 K_{\min} 值可见，超载条件下的渠坡稳定安全系数 K_{\min} 相比不计超载情况显著降低，例如运用期渠坡从逸出点滑出时，模式一、二、三的 K_{\min} 值分别降低达 15.7%、14.2%、51.7%。

综上所述：模式二、一具有 P-H 渠坡最危险失稳模式特征；堤顶超载对 P-H 渠坡稳定存在显著不利影响。

4 试验研究

4.1 试验模型

为验证 3.2 计算结果，本文以 3.1 工程实例为原型，按几何相似、失稳临界状态相似条件，制作 P-H 渠坡试验模

型,通过增加堤顶超载荷重,使其达到极限平衡状态,考察渠坡失稳形态。

几何相似条件即:

$$\frac{L_p}{L_m} = L_r \quad (9)$$

考虑到垂直荷重(土重、堤顶超载)及渗流引起的孔隙水压力是引起渠坡失稳的主要作用力,失稳临界状态相似应同时满足重力相似及压力相似条件,即

$$\rho_r L_r^4 T_r^{-2} = \nu_r L_r^3 \quad (10)$$

$$\rho_r L_r^2 V_r^2 = \rho_r L_r^2 K_r^2 J_r^2 = P_r L_r^2 \quad (11)$$

式中: L_p 、 L_m 、 L_r 为分别为原型长度、模型长度及长度比尺; ρ_r 、 T_r 、 ν_r 、 v_r 、 K_r 、 J_r 、 P_r 为分别为密度比尺、时间比尺、重度比尺、渗流速比尺、渗透系数比尺、渗流坡降比尺、孔隙压强比尺。

由式(10)、式(11)可求得模型特性参数比尺如下:

$$T_r = L_r^{1/2} \quad (12)$$

$$K_r = g_r^{1/2} L_r^{1/2} \quad (13)$$

$$q_r = \rho_r L_r^2 T_r^{-2} \quad (14)$$

取 $L_r = 25$,由式(12)至式(14)可得模型材料参数为:膨胀土渗透系数 $K_{pm} = 0.48 \times 10^7 \text{ cm/s}$,换填土渗透系数 $K_{lm} = 0.88 \times 10^7 \text{ cm/s}$,堤顶超载 $q_m = 0.84 \text{ kN/m}^2$ 。

制作PH渠坡模型及其试验装置如图4所示,模型一侧的矩形水箱2保持恒定水位模拟地下水,由带孔栅板3输入渠坡模型产生渗流。试验时以 q_m 作为初始堤顶超载,当渠坡内形成稳定渗流后,逐级增加堤顶超载荷重,直至渠坡发生失稳破坏或显著大变形。

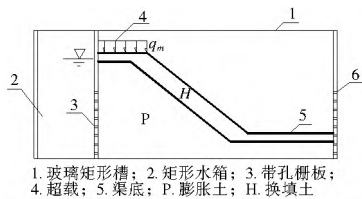


图4 渠坡模型及其试验装置

Fig. 4 Slope model and test device

4.2 试验发现

(1)在地下水渗流及较小的堤顶超载作用下,渠坡先是在膨胀土浅表层范围内出现裂隙不规则发育,呈现为互不关联的局部麻窝;

(2)随着渠坡饱和度及超载增大,麻窝区域扩展,继而坡脚处出现麻窝并较为迅速地扩展,接着在渠床部位的PH土层间出现水平张缝(图5)。



图5 渠坡浅表膨胀土内麻窝分布,PH层间张缝

Fig. 5 Hemp nest in the shallow layer of slope and crack in the PH layer

(3)随着堤顶超载继续增加,渠坡变形不断扩展,当模型

超载增大为 3.44 kN/m^2 (即初始堤顶超载值 q_m 的4.1倍)时,膨胀土渠坡浅表范围内的裂隙麻窝区,出现较大扩张近乎连通,明显出现应力集中破坏区;坡脚至渠床部位PH土层间水平张缝加宽,连通区域增大。此时整个渠坡及附近渠床出现显著大变形,失稳形态如图6所见。

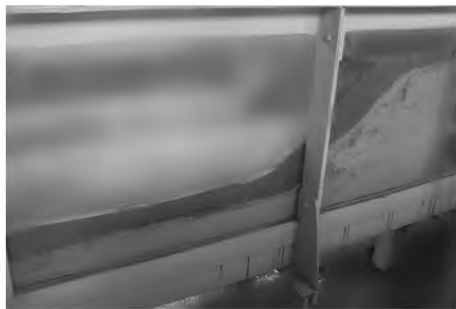


图6 渠坡试验失稳形态

Fig. 6 Instability form of slope test

4.3 试验过程及结果分析

(1)渠坡从裂隙发育至发生显著大变形失稳,有一个缓慢发展过程,表现了膨胀土的黏性土特征。

(2)渠坡出现大变形即失稳时,反推原型极限堤顶超载值为 57.9 kN/m^2 (即原型初始堤顶超载值的2.76倍),相当于0.44倍渠身高度的土柱荷重或1.4倍汽20加重车荷重在堤顶产生的超载。

(3)加载过程中,沿渠坡范围内,未发现沿PH接触层面的剪切破坏,这与模式三所求 K_{min} 及 μK_{min} 相对偏大,推断其沿PH层面失稳破坏的几率较小是一致的。

(4)在坡脚至渠床范围内,PH土层间出现连通的水平张缝,究其原因,或许是河床部位置换填土厚度不足(本模型渠底换填土厚度为渠床换填土厚度的1/2),亦或是模型试验边界效应,有待进一步研究。当渠内放水后,缝隙逐渐变小,并最终趋于闭合。

4.4 试验结论

分析图6所示渠坡失稳形态可发现如下结果。

(1)PH渠坡失稳大变形区域发生于膨胀土浅表范围内^[3],是其膨胀土浅表裂隙带在渗流及堤顶超载作用下裂隙加剧发育的结果,这与文献[4]所言“在降雨入渗条件下膨胀土多发生浅层滑动”的现场试验结论是一致的。

(2)渠坡失稳大变形区域的底部边界,基本呈上陡下缓的曲面形状,与本文“模式一、二的底部滑裂面为曲面形态”是吻合的。也表明:PH渠坡保持有黏性土坡的失稳特征。

(3)渠坡失稳大变形土体内部,在坡顶、坡脚附近^[14],可见局部应力集中破坏区,为坍塌体块间破裂面的形成提供了依据。可见本文模式二假定:在坍塌体内存在块间破裂面,从而形成复合滑动曲面,并由之求得相对更多工况的“ K_{min} 小值”和相对更小的 μK_{min} 是一致的,即渠坡模型发生的失稳形态与计算最危险失稳模式相吻合。

5 结论

本文对膨胀土-换填土渠坡,进行失稳模式及最危险失稳模式的计算研究和模型破坏试验研究,得到以下结论。

(1) 降雨渗流及堤顶超载影响下, 最危险失稳模式是膨胀土渠坡浅表范围内含有块间破裂面的复合曲面或单一曲面;

(2) 计算表明: 堤顶超载对 P H 渠坡稳定有显著不利影响; 试验显示: 极限堤顶超载值约为 0.44 倍渠坡高度的土柱荷重或 1.4 倍汽 20 加重车产生的均布荷重;

(3) 膨胀土渠坡稳定性是一个涉及多因素影响的复杂问题, 本文研究只是初步的, 有关 P H 渠坡失稳机理及渠底部位 P H 土层接触面间张裂机理的研究有待进一步进行。

参考文献(References):

[1] 王长永. 非饱和膨胀土对边坡稳定性的影响研究[J]. 煤炭技术, 2011, 30(9): 135-137. (WANG Chang yong. Study of Effect of Expansive Soil on Slope Stability [J]. Coal Technology, 2011, 30(9): 135-137. (in Chinese))

[2] XIAO Hong bin, ZHANG Chur shun, HE Jie, et al. Expansive soil structure Interaction and its Sensitive Analysis [J]. Journal of the Central South University Press and Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 14(3): 425-430.

[3] 陈尚法, 温世亿, 冷星火, 等. 南水北调中线一期工程膨胀土渠坡处理措施[J]. 人民长江, 2010, 41(16): 65-68. (CHEN Shang fa, WEN Shi yi, LENG Xing huo, et al. Treatment measures for expansive soil canal slope of Phase I Works of Middle Route Project of S N Water Diversion[J]. Yangtze River, 2010, 41(16): 65-68. (in Chinese))

[4] 张振华, 朱云飞. 高填方渠道膨胀土(岩)土体技术[J]. 施工技术, 2012, 41(367): 57-59. (ZHANG Zher hua, ZHU Yur fei. Replacing and Filling Technology of Expansive Soil(Rock) for High Filled Channel [J]. Construction Technology, 2012, 41(367): 57-59. (in Chinese))

[5] 包承纲. 南水北调中线工程膨胀土渠坡稳定问题及对策[J]. 人民长江, 2003, 34(5): 4-6. (BAO Cheng gang. On slope stability of expansive soil canal of Middle Route Project of S N Water Transfer and countermeasures [J]. Yangtze River, 2003, 34(5): 4-6. (in Chinese))

[6] 蔡耀军, 赵旻, 阳云华. 输水工程膨胀土渠坡稳定性及力学参数研究[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(4): 373-376 (CAI Yao jun, ZHAO Min, YANG Yur hua. Study on the slope stability and mechanical parameters of dilative soil canal for water conveyance project [J]. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(4): 373-376 (in Chinese))

[7] 马慧敏, 何向东, 张帅. 渠道膨胀土边坡换填处理土稳定计算分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(2): 98-102 (MA Huimin, HE Xiang dong, ZHANG Shuai. Stability Calculation and Analysis on Soil Protection Layer of Expansive Soil Slope [J]. Yellow River, 2013, 35(2): 98-102. (in Chinese))

[8] 卢廷浩. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2005. (LU Yar hao. Soil Mechanics [M]. Nanjing: Hohai university press, 2005. (in Chinese))

[9] 吴珺华, 袁俊平. 干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 103-107. (WU Jun hua, YUAN Jun ping. Field tests on expansive soil during wetting drying cycles using large [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 103-107. (in Chinese))

[10] 马文英, 刘建中, 李显军. 水工建筑物(上册)[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003. (MA Wen ying, LIU Jian zhong, LI Xian jun. Hydraulic Structures. Volume one [M]. Zhengzhou: The Yellow River water conservancy press, 2003. (in Chinese))

[11] 李龙. 膨胀土边坡稳定性分析[J]. 道路工程, 2012(7): 65-67 (LI Long. Stability of Expansive Soil Slope [J]. Highway Engineering, 2012(7): 65-67. (in Chinese))

[12] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (WU Chi gong. Hydraulics. Volume one [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))

[13] 蔡耀军. 膨胀土渠坡破坏机理及处理措施研究[J]. 人民长江, 2011, 42(22): 5-9. (CAI Yao jun. Study on failure mechanism of expansive soil canal slope and treatment measures. [J]. Yangtze River, 2011, 42(22): 5-9. (in Chinese))

[14] 孔官瑞. 膨胀土边坡问题研究现状[J]. 土工基础, 1994, 8(2): 8-12. (KONG Guan rui. State of the art on slope stability of swelling soil. [J]. Soil Eng. and foundation, 1994, 8(2): 8-12. (in Chinese))