DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241854

基于离心试验的引调水工程含深层原生裂隙膨胀土层渠坡稳定性分析

韦松涛[1],龚壁卫[2],李 波[2],胡 波[2],程展林[2]

(1. 安徽理工大学土木建筑学院,安徽 淮南 232001; 2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室,湖北 武汉 430010)

摘要:引调水工程因跨度范围大,渠道经常穿过含深层原生裂隙区域,现场滑坡膨胀土层中实际存在的深层原生裂隙顺坡向呈8°~12°,倾向河渠。为掌握深层原生裂隙对边坡稳定性的影响,通过预设双层土工膜的方式模拟倾角为12°、48°的典型组合裂隙,开展了含深层原生裂隙边坡的离心模型试验,进一步推导了计算离心模型在离心机加速度场中边坡安全系数的简化理论。结果表明,离心加速度逐级增大过程中,边坡顶部沉降和坡面水平位移逐渐增大,同时在坡肩和坡面依次出现裂隙且随之扩展,边坡失稳并沿12°裂隙面滑动;计算得到离心模型边坡安全系数随加速度增大而逐渐降低但降低速率逐渐减小,产生破坏时的安全系数已小于1.0;进一步分析表明,土工膜裂隙面贯通率越高,边坡安全系数越低,同时裂隙面分布位置也对边坡稳定性有影响。研究结果为含深层原生裂隙边坡的分析提供了依据。

关键词:边坡;裂隙;离心模型试验;安全系数;裂隙扩展

中图分类号:TV223.1;TU443 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)02-0098-06

1 引言

大气影响深度以下相对较深的膨胀土层中分布着具有明显定向特征的原生裂隙,该类裂隙较为发育,受大气影响较小,研究这种强度极低的“天然”裂隙面或软弱结构面对膨胀土渠道边坡的稳定性是必要的。程展林等[1]提出沿裂隙面的深层滑动是膨胀土边坡失稳的重要模式;吴庚等[2]针对赋存原生裂隙的膨胀土边坡开展大型现场原型试验,并结合边坡开挖卸荷的现场特征,研究了缓倾原生裂隙导致滑坡的力学机制;膨胀土边坡的抗剪强度在很大程度上受裂隙面规模与产状的影响[3-4],试验中常采用人工裂隙模拟手段。如黄鹏等[5]制配了含非贯通裂隙的膨胀土试样,利用裂隙面积占比来描述裂隙扩展状态;马鹏杰等[6]选择在两块特氟龙膜之间涂抹机械润滑油的方式模拟实际的缓倾角裂隙,采用侧向推力的方式进行边坡破坏模型试验;孙慧等[7]利用极限平衡软件计算分析了膨胀土边坡在不同裂隙产状下的稳定性,提出裂隙产状控制的边坡破坏模式的滑弧是折线型;徐光瑜等[8]探讨了不同折线计算方法的优缺点,给出折线边坡稳定分析的推荐方法。综合来看,目前针对膨胀土层原生裂隙的研究主要集中在原生裂隙的强度与模拟手段上,相关试验较少;解析计算虽针对折线滑动面,但未考虑裂隙贯通率及加载方法等因素的影响。鉴此,本文基于引调水工程江淮沟通段开展含深层原生裂隙的边坡离心模型试验,模拟含深层原生裂隙的边坡沿裂隙面滑动的过程;进一步推导了计算安全系数的简化理论公式,并对比分析了模型试验破坏过程中边坡安全系数的变化,探讨了裂隙面贯通率、裂隙分布位置、裂隙面强度对边坡稳定性的影响。

2 研究方法

2.1 离心模型试验方案

引调水工程江淮沟通段现场滑坡膨胀土层中原生裂隙相对较发育,且原生裂隙顺坡向呈8°~12°,倾

收稿日期:2024-09-30,**修回日期**:2024-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52208329);中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2023327/YT);安徽省引江济淮集团有限公司科技项目(YJJH-ZT-ZX-20230118528,YJJH-ZT-ZX-20191031216)

作者简介:韦松涛(2000-),男,硕士研究生,研究方向为岩土工程和离心模型试验技术,E-mail:3493975762@qq.com

通讯作者:李波(1982-),男,博士、正高级工程师,研究方向为岩土工程和离心模型试验技术,E-mail:auliso2004@126.com

中国知网 https://www.cnki.net

向河渠。模型设计主要以缓倾裂隙为主,研究缓倾角 12°与陡倾角 48°的典型组合裂隙对膨胀土渠道边坡稳定性的影响。边坡模型总高度 55.0 cm、坡高 40 cm、坡角 45°。采用双层土工膜模拟裂隙面,倾角 12°、48°斜面自下而上分别布置长 25、29 cm,宽 39 cm 的土工膜;土工膜面积占所在斜面面积的 67%,即裂隙贯通率为 67%,上部 33%非贯通区为中膨胀土。通过离心机旋转产生的离心加速度场模拟超重力的加载,试验中加速度每次以 10g 递增,并稳定 2 min,直至边坡发生明显破坏现象。

边坡破坏性离心模型试验在长江科学院 CKY200 型岩土离心机上进行,该离心机最大容量 200 g · t,最大离心加速度为 200g,有效半径 3.7 m,模型箱采用 100 cm×40 cm×80 cm(平面应变模型箱)。

2.2　离心模型试验监测方案

模型试验监测项目见图 1,主要包括采用非接触式激光位移传感器,测量坡肩、坡面、平台顶部的沉降及坡面水平位移;在模型内设置标识点,间距为 5 cm×5 cm,通过对比试验前后标识点位置绘制断面位移场及等值线图;在土工膜布置区域粘贴面条,以此观察试验过程中土工膜上下土体的滑动情况。

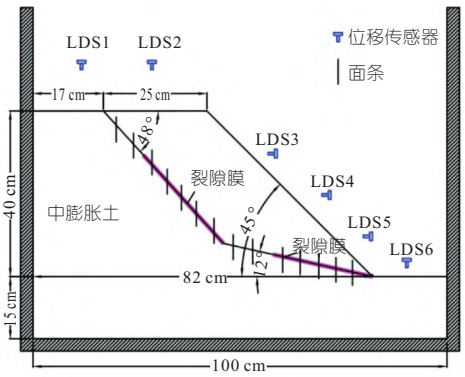


图 1　模型监测

Fig. 1　Model monitoring

2.3　材料模拟方法

离心模型试验土料采用引调水工程某段取样中膨胀土,干密度 1.69 g/cm^3、含水率 15.8%、粘聚力 20.1 kPa、内摩擦角 24.3°;现场裂隙面的粘聚力取 3.2 kPa、内摩擦角取 10°。

模型试验将 2 个相同的土工膜叠放在一起,中间涂抹油膜模拟实际裂隙面;人工预制裂隙面的强度试验在长江科学院界面摩擦仪器上进行。实测得到粘聚力为 11.2 kPa,内摩擦角为 3.2°,界面强度低于现场裂隙面的建议值,更易于在离心机负载允许条件下观察破坏现象。

2.4　模型整体制作步骤

试验中控制土样的含水率为 15.8%、干密度为 1.69 g/cm^3,依此计算每层填筑的用土量;按照裂隙面位置以每层 5 cm 的高度逐步填筑边坡模型,待填筑至裂隙面位置进行第一次削坡,随后土工膜刷油膜放置在 12°、48°斜面上;继续填筑,填筑完成后削坡;在模型断面布置蓝色位移矢量标识点和白色裂隙监测线,见图 2。

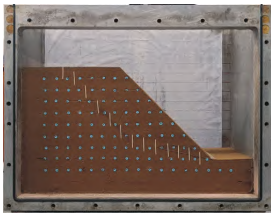


图 2　玻璃板侧标识点及面条布置

Fig. 2　Glass panel side marking points and noodle layout

2.5　简化分析方法

为了进一步探究含深层原生裂隙的边坡在离心机超重力条件下的稳定性,以试验中土工膜裂隙面以上的预设滑体作为研究对象,推导不考虑条间力的计算折线型滑动面安全系数的简化理论。进而修改参数计算实际折线滑动面的安全系数,并对裂隙面进行安全系数参数分析。

滑坡发生的本质是下滑力与抗滑力之间的力学演变[9-10],将模型的预设滑体划分为多个土条,考虑土条径向力平衡及土条所受抗滑力,定义边坡整体安全系数为各土条底部受到的抗滑力之和与滑动分力之和的比值;双折线型安全系数计算公式为:

$$F_s=\frac{\sum R_i}{\sum T_i}=\frac{\sum(c_i l_i+W_i\cos\theta_i\tan\varphi_i)}{\sum W_i\sin\theta_i} \tag{1}$$

$$N_i=W_i\cos\theta_i \tag{2}$$

$$R_i=c_i l_i+N_i\tan\varphi_i \tag{3}$$

式中,F_s 为计算安全系数;R_i 为第 i 段滑体所受的抗滑力,kN/m;N_i 为第 i 段垂直滑动面的重力分力,kN/m;W_i 为第 i 段滑体在重力加速度为 g 条件下所受的重力,kN/m;c_i 为第 i 段滑面的粘聚力,kPa;θ_i 为第 i 段滑面的倾角,(°);φ_i 为第 i 段滑面的内摩擦角,(°);l_i 为第 i 段滑动面长度,m;T_i 为作用于第 i 段滑动面上的滑动分力,kN/m。

离心机运行过程中,含深层预设裂隙的边坡稳定性是不断变化的,为计算边坡在 n 倍地球重力的超重力场中的安全系数,对于离心模型尺寸的边坡,W_i 以 nW_i 代替,则安全系数计算公式为:

中国知网　https://www.cnki.net

$$F_s=\frac{\sum R_i}{\sum T_i}=\frac{\sum(c_i l_i+nW_i\cos\theta_i\tan\varphi_i)}{\sum nW_i\sin\theta_i} \tag{4}$$

在土工膜宽度不变的情况下，通过改变土工膜的长度，即考虑贯通率 ξ_1、ξ_2 的情况，安全系数的解析计算公式为：

$$F_s(n,c_c,\varphi_c,c_s,\varphi_s,\xi_1,\xi_2)=\frac{\int c\,\mathrm{d}l+\int n\,\mathrm{d}W\cos\theta\tan\varphi}{\int n\,\mathrm{d}W\sin\theta} \tag{5}$$

式中，n 为超重力系数，即重力加速度的 n 倍；c_c 为裂隙面粘聚力，kPa；c_s 为膨胀土粘聚力，kPa；φ_c 为裂隙面内摩擦角；φ_s 为膨胀土内摩擦角；ξ_1、ξ_2 分别为双折线滑动面的裂隙贯通率；c 为滑面的粘聚力；θ 为滑面的倾角；φ 为滑面的内摩擦角；W 为 $1g$ 条件下的重力。

3 离心模型试验结果与分析

3.1 试验现象

试验过程中，边坡主要产生了 4 条裂隙，编号为 C1～C4，分别为坡肩水平裂隙、48°土工膜裂隙面上方的裂隙，以及坡面水平裂隙。离心加速度在 $50g$～$60g$ 超重力加载过程中，12°、48°土工膜布置位置的面条先后发生了剪切错动，而非土工膜位置的面条基本未错动，这表明裂隙面上部的土体沿裂隙面贯通区滑动，而非贯通区土体基本保持稳定。

边坡裂隙扩展情况见表 1。裂隙均产生于离心加速度 $40g$ 后，且逐渐连通、扩展。虽然裂隙 C1、C2 分别向预设裂隙面方向、坡面方向扩展，但最终边坡沿着 C3 裂隙及缓倾裂隙面贯通区滑动，且随着上部土体被拉裂。试验后的破坏现象见图 3，拆模发现，12°、48°土工膜分别错动 10、1 cm，这说明裂隙贯通率 67％的边坡主要沿缓倾裂隙面滑动。

表 1 边坡裂隙扩展及破坏情况

Tab. 1 Expansion and failure of slope crack

裂缝编号	离心加速度/g	边坡破坏情况
C1	40～60	裂缝形成、扩展
C2	50～60	裂缝产生、连通
C3	50～60	裂缝形成、扩展、破裂
C4	50～60	裂缝形成、扩展、破裂

3.2 边坡变形

通过激光位移传感器监测边坡的变形，其中 LDS1、LDS2、LDS6 分别监测坡肩与坡底沉降变形，LDS3～LDS5 依次监测坡面水平位移。激光位移传感器的监测结果见图 4(a)、图 5(a)，沉降速率与水平位移速率见图 4(b)、图 5(b)。

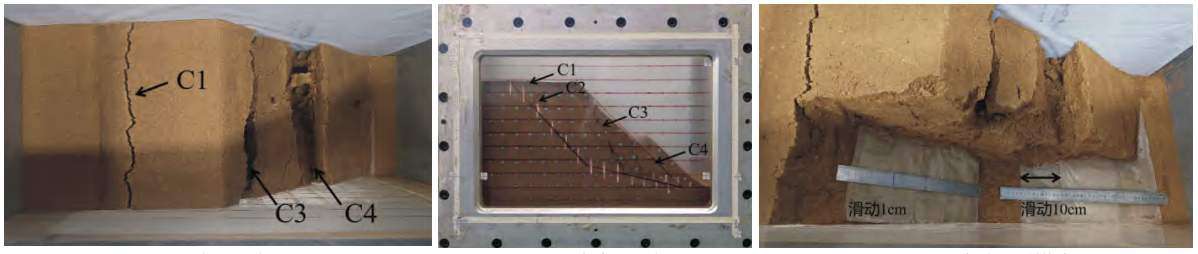
离心机加速度以 $10g$ 逐渐递增，沉降变形呈阶梯型增长，变形速率逐渐增大。离心加速度 $40g$～$60g$ 时，坡肩沉降速率峰值达到 0.64 mm/30s 后，坡肩 C1 裂缝产生。离心加速度 $1g$～$20g$ 内，LDS3～LDS5 水平变形呈阶梯型增长，离心加速度 $20g$～$30g$ 内，水平位移先后降低至零，表明坡面由沉降转变为向外滑动，且越靠近坡底，坡面越向坡外滑动；离心加速度 $50g$～$60g$，LDS3～LDS5 水平位移速率逐渐增大到－0.35、－0.50、－0.74 mm/30s 后，坡面横向裂缝 C3、C4 连通、扩展。离心加速度 $60g$～$62g$ 破坏时，坡面水平位移 LDS3、LDS4、LDS5 发生突变，表明滑动破裂是迅速发生的。

3.3 断面位移场

分析试验前后模型断面图形，得到断面位移场，并绘制等值线见图 6。由图 6 可知，坡肩靠近左侧的沉降为 0.6 cm，靠近右侧坡面的沉降为 1.2 cm，二者具有明显的沉降差，使坡肩 C1 裂缝产生并向内部扩展。预设裂隙面上部的土体沉降、水平位移均较大，滑体的位移最为明显，沿着 12°裂隙面滑动约 9.5 cm。

3.4 破坏机理分析

如图 7 所示，试验实际分成 2 段滑体，底部均与 12°裂隙面接触。土工膜裂隙面的内摩擦角为 3.2°，低于斜面缓倾角12°，只能依靠裂隙面的粘



(a) 表面裂隙 (b) 滑动破坏裂隙 (c) 模型内部土工膜错动

图 3 试验破坏现象

Fig. 3 Test failure phenomenon

中国知网 https://www.cnki.net

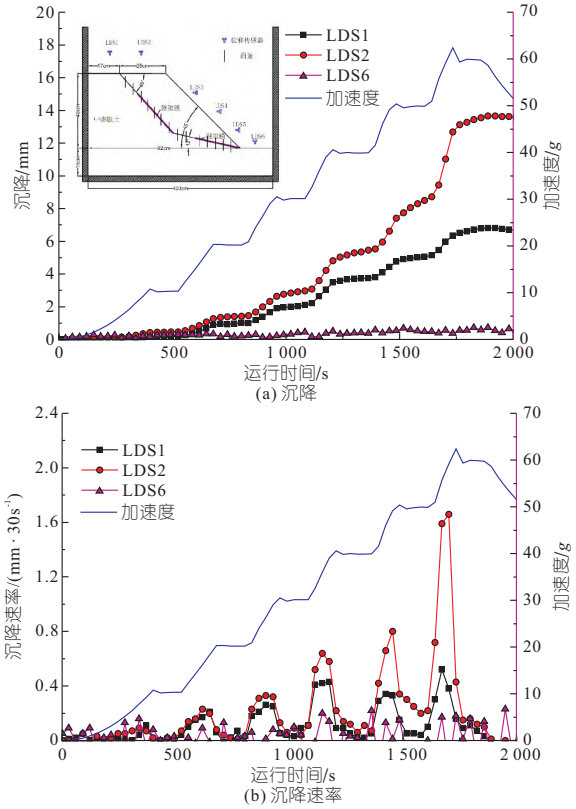


图 4　坡肩沉降

Fig. 4　Settlement of slope shoulder

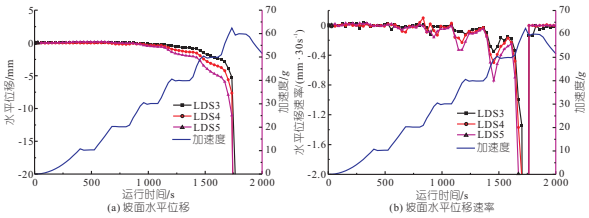


图 5　坡面水平位移

Fig. 5　Horizontal displacement of slope surface

聚力使其保持稳定,但随着离心机加速度的提高,上部土体承受 n 倍重力,滑体逐渐失稳。同理,48°裂隙面贯通区上部土体在超重力条件下也很难保持稳定,故产生沿裂隙面的滑动,此处面条发生不同程度的错动。12°裂隙面非贯通区的膨胀土内摩擦角 24.3°大于倾角 12°,该处布置的面条基本无错动,从面条变形及破坏结果看,不仅保持了自身的稳定,还阻碍了上部土体的滑动。

4　简化分析方法对比验证及参数分析

4.1　与试验结果对比分析

计算分析时折线滑动面与土工膜接触的贯通区域取裂隙面强度,非接触区域取土块强度;膨胀

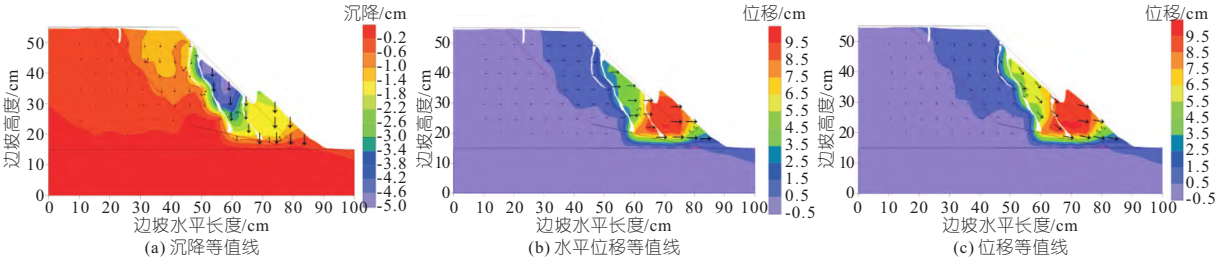


图 6　断面位移场(单位:cm)

Fig. 6　Section displacement field and contour line

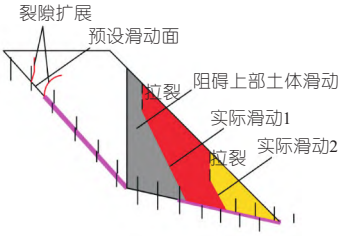


图 7　破坏机理分析图

Fig. 7　Failure mechanism analysis diagram

土重度需考虑含水率及压实度的影响,综合计算为 18.2 kN/m^3,土工膜的重度忽略不计。实际出现的 2 个滑动面近似为双折线滑动面,上部的 C3、C4 裂缝早已产生,致使拉裂土体无拉伸强度。通过分析破坏后的滑动面位置,得到具体计算参数,见表 2、3。由此,计算得到实际滑动面与预设滑动面安全系数与加速度的曲线见图 8。由图 8 可知,随着超重力的加载,滑动面的安全系数不断降低且降低速率不断减小;试验中边坡滑动破

表 2　折线滑动面几何计算参数

Tab. 2　Geometric calculation parameters of polygonal sliding surface

滑动面	几何参数					
	L_1 /cm	L_2 /cm	ξ_1 /%	ξ_2 /%	θ_1 /(°)	θ_2 /(°)
实际滑动面 1	22.4	23.8	100	0	12	64
实际滑动面 2	13.1	7.9	100	0	12	61
预设滑动面	36.9	43.2	66.7	66.7	12	48

注:L_1、L_2 分别为双折线滑动面的长度;θ_1、θ_2 分别为双折线滑动面的缓倾角、陡倾角。

表 3　土块和裂隙面计算参数

Tab. 3　Calculation parameters of soil mass and fracture surface

材料	物理力学参数		
	重度 γ/(kN · m^{-3})	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
膨胀土	18.2	20.1	24.3
土工膜裂隙面		11.2	3.2

裂虽然是瞬时的,但在破坏前,边坡早已出现明显

中国知网　https://www.cnki.net

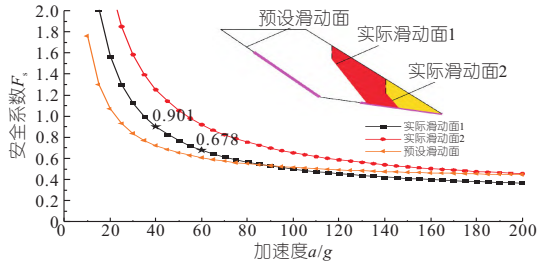


图 8 安全系数与加速度的曲线

Fig. 8 Curves of safety factor versus acceleration

裂缝。离心加速度 40g 坡肩出现 C1 裂缝直至离心加速度 60g 边坡发生破坏的过程中，沿着预设滑动面和实际滑动面 1 的安全系数分别由 0.722、0.901 降低到 0.607、0.678；虽然预设滑动面的安全系数更低，但边坡并未沿着预设裂隙面滑动，而是沿着缓倾裂隙面贯通区滑动，这与 12° 土工膜布置的长度等因素有关。

实际发生滑动的 2 个滑动面均与缓倾裂隙面贯通区接触，但实际滑动面 1 的安全系数较低。计算得到实际滑动面 1 的安全系数与离心机加速度的函数关系为：

$$F_s(n)=(7.292\ 6+0.063\ 1n)/(0.272\ 5n) \tag{6}$$

由式(6)可知安全系数的衰减速率与 n 呈平方反比关系，且衰减速率与粘聚力呈正相关而与内摩擦角无关；加速度逐渐增大，超重力逐渐克服粘聚力的影响，内摩擦角使边坡安全系数存在极小值，但边坡在此之前已发生滑动破坏。

$$\mathrm{d}F_s(n)/\mathrm{d}n=-26.762/n^2 \tag{7}$$

4.2 预设裂隙安全系数的参数分析

含深层裂隙的边坡在离心机内发生破坏时，边坡可能不完全沿着预设的深层裂隙面滑动，但探究沿着预设的深层裂隙面滑动的情况仍有意义。

图 9(a)给出不同贯通率条件下安全系数—加速度的曲线。由图 9(a)可知，曲线呈下移趋势，表明随着预设裂隙面上裂隙贯通率的提高，相同加速度条件下安全系数越小。

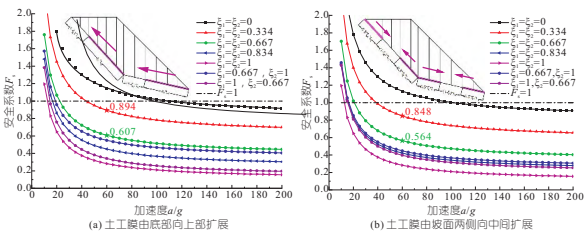


图 9 贯通率的参数分析

Fig. 9 Parameter analysis of penetration rate

在 $\xi_1=\xi_2=67\%$ 的基础上，离心加速度 60g 时安全系数为 0.607，分别将 ξ_1、ξ_2 提高到 100%，安全系数分别为 0.340、0.549，降低 44.0%、9.6%；这说明缓倾裂隙面的贯通率较陡倾裂隙面的贯通率对边坡安全系数的影响更明显。即使预设裂隙面上的裂隙贯通率一致，而裂隙的分布位置不同时，边坡稳定性显著不同。如图 9(b)考虑裂隙布置在预设裂隙面两侧，贯通率的提高是土工膜向中部增加长度；计算对比发现，这种土工膜布置方式计算相同贯通率时的安全系数更低。

控制边坡沿裂隙面滑动主要是因为裂隙面具有较低的强度参数。保持裂隙面内摩擦角及土块强度不变，裂隙面粘聚力由 0 逐渐增大到 20.1 kPa(土块粘聚力)，见图 10(a)。安全系数—加速度时间曲线整体呈收束现象，这表明初始粘聚力对安全系数的影响越来越小，超重力逐渐克服裂隙面的初始粘聚力，安全系数均趋于 0.376。

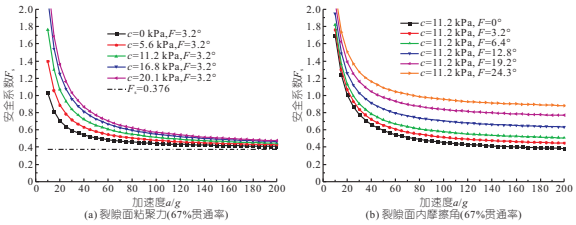


图 10 裂隙面强度的参数分析

Fig. 10 Parameter analysis of fracture surface strength

裂隙面内摩擦角由 0 逐渐增大到 24.3°(土块内摩擦角)，安全系数—加速度曲线整体上移，见图 10(b)。对比离心加速度 1g、60g、∞g 条件下的计算结果，发现裂隙面初始内摩擦角不同，安全系数最终趋向于不同的值，但加载过程中保持相同的变化率，故安全系数减小的幅度是一致的。

5 结论

a. 采用双层土工膜夹油膜的方式，通过界面摩擦试验实测人工裂隙面粘聚力 11.2 kPa、内摩擦角 3.2°，模拟了边坡沿着裂隙面滑动的破坏模式。

b. 随着离心加速度的逐渐提高，坡肩沉降变形及变形速率逐渐增大，坡面变形由向内移动转变为向外滑动；坡面出现裂缝并向下扩展，裂隙面上部的土体沿着裂隙面贯通区滑动，而非贯通区土体基本保持稳定，直至沿着预设深长缓倾裂隙滑动，表明缓倾原生裂隙对边坡稳定性存在较大影响。

c. 缓倾裂隙的贯通率较陡倾裂隙的贯通率对安全系数的影响更大；裂隙面初始内摩擦角使边坡存在最低的安全系数，超重力加载过程中，超重力克服裂隙面的粘聚力，最终趋向于无粘性时的安全系数。

中国知网 https://www.cnki.net

参考文献:

[1] 程展林,李青云,郭熙灵,等. 膨胀土边坡稳定性研究 [J]. 长江科学院院报,2011,28 (10):102-111.

[2] 吴庚,宋书学,陈雪兵,等. 深层裂隙发育型膨胀土边坡变形演化特征研究 [J]. 人民长江,2023,54 (11):175-181.

[3] 赵鑫,阳云华,朱瑛洁,等. 裂隙面对强膨胀土抗剪强度影响分析[J]. 岩土力学,2014,35(1):130-133.

[4] 龚壁卫. 膨胀土裂隙、强度及其与边坡稳定的关系 [J]. 长江科学院院报,2022,39 (10):1-7.

[5] 黄鹏,程永辉,熊勇,等. 裂隙扩展对膨胀土抗剪强度影响的试验研究 [J]. 土工基础,2023,37 (3):506-511.

[6] 马鹏杰,芮瑞,曹先振,等. 微型桩加固长大缓倾裂隙土边坡模型试验 [J]. 岩土力学,2023,44 (6):1695-1707.

[7] 孙慧,徐晗,胡波,等. 裂隙产状对膨胀土边坡稳定性的影响研究[J]. 人民长江,2012,43(21):49-51.

[8] 徐光瑜,刘福臣,张伟. 折线边坡稳定计算方法探讨 [J]. 港工技术,2009,46 (6):46-48.

[9] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析:原理·方法·程序 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[10] 郑颖人,陈祖煜,王恭先. 边坡与滑坡工程治理 [M]. 北京:人民交通出版社,2007.

Slope Stability Analysis of Expansive Soil with Diversion Project Based on Centrifugal Test

WEI Song-tao[1],GONG Bi-wei[2],LI Bo[2],HU Bo[2],CHENG Zhan-lin[2]

(1. School of Civil Enigineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Due to the large span of the water diversion project, the channel often passes through the area containing deep primary fissures, and the actual deep primary fissures in the expansive soil stratum of the on-site landslide are 8°～12° along the slope, which tends to the river channel. In order to understand the influence of deep primary crack on the stability of slope, a typical combined crack with dip angle of 12°and 48°was simulated by preset double layer geomembrane. A geotechnical centrifugal model test was carried out, and a simplified theory for calculating the safety factor of the centrifugal model slope in the centrifuge acceleration field was further derived. The results show that with the progressive increase of centrifugal acceleration, the slope top settlement and horizontal displacement gradually increase. At the same time, cracks appear and expand in the slope shoulder and slope, and the slope gradually becomes unstable and slides along the 12°fracture plane. The calculated centrifugal slope safety factor decreases gradually with the acceleration increasing, but the reduction rate decreases gradually, and the safety factor is less than 1.0 when the failure occurs. Further analysis shows that the higher the fracture penetration rate, the lower the safety factor of slope, and the distribution location of fracture surface also affects the stability of slope. The research results provide a basis for the analysis of the slope with deep primary fracture.

Key words: slope; crack; centrifugal model test; factor of safety; crack propagation

(上接第 141 页)

Multi-point Partition Intelligent Diagnosis Method for Cause of Abnormal Measured Value of Uplift Pressure of Concrete Dam

CHENG Lin,HAN Jia-xun,YANG Jie,MA Chun-hui

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problems existing in the traditional outlier detection method, a cause analysis method of abnormal measured value of uplift pressure of concrete dam based on spatio-temporal clustering and environmental variable separation is proposed. Firstly, the density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) clustering algorithm is used to spatially cluster the uplift pressure measuring points in different parts of the dam. According to the clustering results, the partition is carried out. The probabilistic principal component analysis (PPCA) is used to extract the environmental variable effects of the uplift pressure measuring points in each region. Finally, based on the square prediction error (S_{SPE}) contribution map and the control map, the outlier identification and the cause analysis of the outliers are carried out. The engineering example shows that the classification results of the measuring points are mainly determined by the location of the measuring points and the influence of environmental variables. When the monitoring data is abnormal, based on the S_{SPE} control chart and contribution chart, the most likely cause of the anomaly can be qualitatively inferred, which can provide a reference for identifying the operation behavior of the dam.

Key words: uplift pressure; abnormal measurement; partition; probabilistic principal component analysis; environmental variables; squared prediction error

中国知网 https://www.cnki.net