

刚性挡土墙后三维被动滑裂面的模型试验

杨山奇¹, 卢坤林^{1,2}, 史克宝¹, 赵瀚天¹, 陈一鸣¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽工业大学 建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘 要: 针对无黏性土体, 采用模型试验的方法, 研究平移模式下刚性挡土墙后被动破坏滑裂面的空间形态。自主设计一种模型试验装置, 重复开展 6 次试验, 通过记录挡土墙后土体中预埋脆性玻璃条断裂的空间坐标, 复原土体发生滑动的位置, 绘制出挡土墙后滑裂面的三维形态图。试验结果表明: 挡土墙后滑裂面具有明显的三维效应; 挡土墙宽度内滑裂面纵向高度呈先缓慢增高后近似直线增高的曲面, 初始破裂角度为 9° , 平均破裂角为 26° , 朗肯土压力理论的破裂角为 28° ; 最大纵向破裂面长度为 1.8 倍挡土墙高度, 与经典土压力理论的平面假定基本一致; 滑裂面均有一定的横向扩展, 主平面投影以初始扩散角约 45° 的斜线往外扩展, 距离挡土墙最远处是宽度为 0.7 倍挡土墙宽度的水平线, 斜线与水平线之间以半径为挡土墙宽度的圆弧过渡连接。研究结果为分析土体被动破坏的滑裂面空间形态提供了试验依据。

关 键 词: 三维滑裂面; 刚性挡土墙; 模型试验; 被动破坏

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 09-3303-010

Model tests on 3D slip surface of passive failure behind a rigid retaining wall

YANG Shan-qi¹, LU Kun-lin^{1,2}, SHI Ke-bao¹, ZHAO Han-tian¹, CHEN Yi-ming¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

2. School of Civil Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China)

Abstract: The research about spatial form of non-cohesive soil slip surface in passive failure behind the retaining wall in translation was done by the method of model tests. A model test device was designed to carry out 6 passive failure tests for soil behind the retaining wall. The spatial coordinates of the points where the fragile glass strips embedded before break were recorded, in order to determine the location where the soil slide occurred and plot the spatial form of slip surface behind the retaining wall. The test results show that: the 3D effect of the slip surface behind the retaining wall is obvious; in the width of the retaining wall, the slip surface height in longitudinal direction slowly increases in the beginning and then increases in an approximately linear pattern. The initial fracture angle is 9° and the average fracture angle is 26° while the Rankine theory fracture angle is 28° . The maximum length of longitudinal fracture surface was 1.8 times the height of the retaining wall which is generally consistent with the plane assumption of the classical soil pressure theory. The slip surface has a certain horizontal extension, and the principal plane projection extends with initial diffusion angle of about 45° . The form which is the most distant from the retaining wall is a horizontal line with 0.7 time the width of the retaining wall, and the diagonal and horizontal lines are connected with an arc with a radius equal to retaining wall width. The results provide experimental reference for analyzing the spatial form of slip surface in passive failure.

Keywords: 3D slip surface; rigid retaining wall; model test; passive failure

1 引 言

挡土类结构物是工程建设中应用广泛的一种结构形式。工程中经常遇到挡土结构物长高比较小的情况, 例如基坑围护结构、桥梁的桥台、河道局部

护岸墙、隧道洞门挡土结构等, 这些挡土结构的长高比有限, 其后滑裂面形态具有明显的三维空间特征^[1], 应按空间问题来分析。

目前, 已有不少学者就三维滑裂面开展了相应研究。杨雪强等^[2]模拟了坑壁土体的三维破坏模式;

收稿日期: 2016-11-07

基金项目: 安徽省自然科学基金 (No. 1508085QE87); 国家自然青年基金项目 (No. 41402256)。

This work was supported by the Youth Foundation of the National Science of Anhui Province of China (1508085QE87) and the Youth Foundation of National Natural Science of China (41402256).

第一作者简介: 杨山奇, 男, 1991年生, 硕士研究生, 主要从事岩土稳定理论与工程方面的研究工作。E-mail: yangshanqi2011@163.com

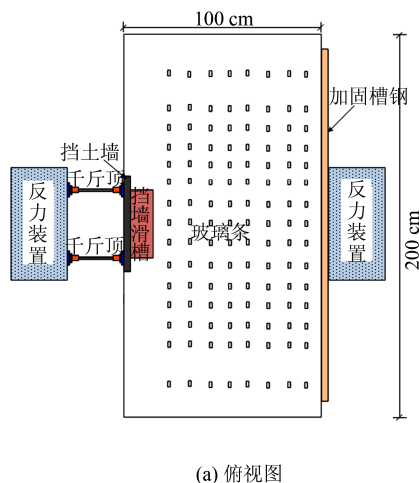
通讯作者: 卢坤林, 男, 1980 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土稳定理论与工程方面的研究工作。E-mail: lukunlin@hfut.edu.cn

Blum^[3]用极限平衡法模拟了土体被动破坏的三维滑裂面; Soubra 等^[4]模拟了 3 个运动许可的滑裂面块体破坏模式, Regenassa 等^[5]也进行了类似的研究工作; Skrabl 等^[6]模拟了满足运动许可的旋转双曲线的空间破坏模式。Benmebarek 等^[7]采用 FLAC^{3D} 分析了墙后土体被动破坏的位移和滑裂面范围。为了探索被动破坏形成的空间滑裂面在主平面上的投影形态, Meksaouine^[8]、Ducan 等^[9]进行过相关的试验研究; 顾慰慈等^[10]通过一系列的试验取得了挡土墙不同长高比时三维滑裂面的空间形态。

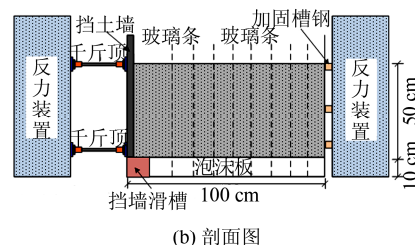
上述学者通过理论假设、数值模拟和模型试验对挡土墙后土体的三维滑裂面进行了探讨, 但均未能得到比较明确的三维滑裂面形态。本文采用自主设计的装置^[11], 研究挡土墙平移模式下, 挡土墙后土体被动破坏的三维滑裂面, 分析挡土墙后滑裂面及土体隆起空间形态特征, 探讨滑裂面在主平面投影的形态及范围。

2 试验模型设计

本模型自主设计, 用于获取三维滑裂面空间坐标。试验模型包括试验模型箱、挡土墙加载装置和数据采集系统 3 个组成部分。



(a) 俯视图



(b) 剖面图



(c) 实物图

图 1 试验系统结构图

Fig.1 Schematic of test system

2.2 加载系统

采用 4 个液压千斤顶来对挡土墙加载, 千斤顶在反力装置和挡土墙中间, 如图 1 所示。每个千斤顶都有独立的供油油泵, 保证了试验过程中可以同时逐步加载。4 个千斤顶每次实现相同位移量 Δx ,

2.1 模型箱

挡土墙宽度 $B=0.5$ m, 土体高度 $H=0.5$ m。参考 Rankine^[12]二维土压力理论, 滑裂面与水平面夹角为 $45^\circ-\varphi/2$, 则滑裂面距挡土墙最远距离为 $H/[\tan(45^\circ-\varphi/2)]=0.94$ m (本文土体内摩擦角 $\varphi=34.21^\circ$)。模型框架长×宽×高选为 2.0 m× 1.0 m× 1.1 m, 其中宽度 1.0 m > 0.94 m, 满足试验要求。

试验箱体是由厚度为 10 mm 的钢板焊接而成的箱型框架; 箱体前侧为 0.5 m× 1.0 m (宽×高) 的方形缺口, 用来放置刚性挡土墙, 挡土墙为厚度 40 mm 的钢板, 装土阶段挡土墙由螺栓固定与箱体相连接, 加载阶段去掉螺栓, 挡土墙可以按加载方式移动; 箱体后侧焊接 3 根长度 2.0 m 的槽钢, 保证加载过程中装置不发生变形; 箱体底部铺设厚度为 0.1 m 的高密度泡沫板, 用来固定玻璃条的位置; 挡土墙自重较大, 泡沫板难以承载, 挡土墙前进范围用与泡沫板等高的槽钢作为挡墙滑槽。

考虑到挡土墙移动后, 箱体前侧与挡土墙形成缝隙土体漏出, 所以加装土体之前用帆布把挡土墙两侧与箱体分别粘连在一起, 防止挡土墙加载过程中土体侧漏。箱体后侧紧贴反力装置防止加载过程中移动。箱体具体构造见图 1。

实现挡土墙平移模式, 如图 2 所示。加载过程挡土墙每次推进 1 cm 即可记录土体表面的试验现象。

2.3 量测系统

被动破坏三维滑裂面无法直观量测, 故在填筑的土体中预埋脆性的玻璃条, 这些玻璃条非常脆而

易折断, 对每根玻璃条编号, 则可以确定玻璃条平面位置。当滑裂面经过时会形成土体错动, 剪断玻璃条。根据玻璃条断裂位置距土体底部高度, 可以确定每根玻璃条断裂的空间坐标, 统计所有断裂玻璃条的空间坐标, 即可得到滑裂面的空间形态。箱体底部的泡沫板预先打孔, 模型制作之前在孔中固定圆管, 然后把玻璃条放入圆管中, 待模型制作完成后抽出圆管, 避免填装土体过程折断玻璃条。

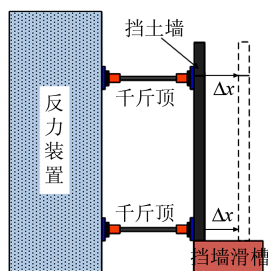


图2 挡土墙平移变位模式示意图

Fig.2 Schematic diagram of retaining wall in translation

挡土墙加载之前在土体表面画间距 10 cm 的白色直线, 挡土墙逐步加载过程中墙后土体发生错动, 土体表面的直线出现弯折, 根据弯折发生的位置即可确定土体表面发生错动的位置。

平行挡土墙的方向为 X 轴, 垂直挡土墙的方向为 Y 轴, 垂直 XOY 平面的为 Z 轴, 如图 3 所示。为了避免同时在土体中放入过多玻璃条会对土体形成加筋效果, 一次试验仅放置一半玻璃条, 即先同时放置第 1、3、5、7 排玻璃条, 下次试验同时放置第 2、4、6、8 排玻璃条。

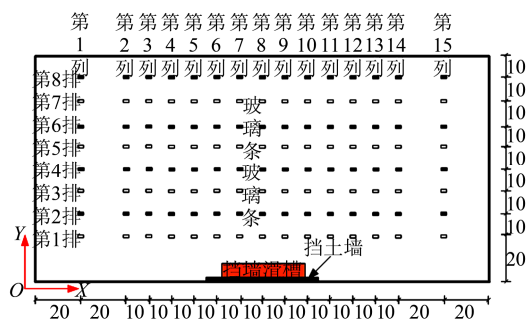


图3 玻璃条布置示意图 (单位: cm)

Fig.3 Schematic diagram of glass strips (unit: cm)

2.4 试验土样

本次试验研究对象为无黏性土体, 土样体积为 $2.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (长×宽×高), 土样基本力学参数如下: 密度 $\rho = 1.502\text{ g/cm}^3$, 含水率 $w = 0\%$, 土

粒相对密度 $d_s = 1.68$, $\varphi = 34.21^\circ$, $e = 0.667$ 。土样颗粒级配曲线如图 4 所示。

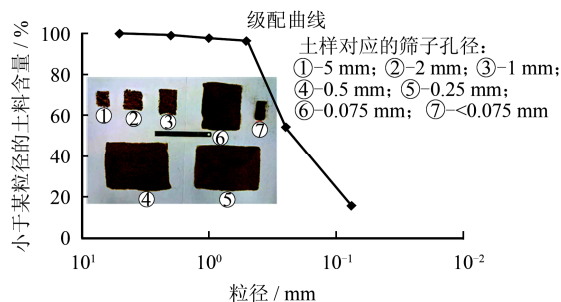


图4 土样颗粒级配曲线

Fig.4 Grading curve of soil size

2.5 保证土样孔隙比措施

试验准备阶段做了 4 组预备试验。制模型时, 土样在模型箱顶部自由下落, 土样分层均匀铺设, 每层 5 cm, 各层中间间隔 30 min。试验预制模型高度为 50 cm, 静置 2 d, 记录土样下沉的高度, 按照静置体积缩小比率制作环刀样, 测量土的干密度 ρ_d 和土粒相对密度 G_s , 算出孔隙比 e 如表 1 所示。

表1 预备试验孔隙比测量结果统计表

Table 1 Statistics of void ratio during prepared experiments

试验组号及均值	土样下沉高度/cm	孔隙比 e
1	1.0	0.681
2	1.4	0.667
3	1.8	0.653
4	1.5	0.665
均值	1.4	0.667

制作模型时, 按照静置体积缩小比率, 模型高度为 51.5 cm, 制模过程和土体分层铺设方式与预备试验时相同, 土样静置 2 d 自然密实后高度在 49.5~50.5 cm 范围内。重复试验时取土样复测, 孔隙比在 0.65~0.68 范围内。

2.6 挡土墙与土体接触面的摩擦角

为测得挡土墙与土体接触面的摩擦角, 设计测量试验示意图见图 5。与模型试验采用相同的土样分层铺设方式, 玻璃箱体内土样高度 51.5 cm, 静置 2 d 后下沉 1.7 cm, 测得孔隙比为 0.658, 满足要求。挡土墙选用钢板代替, 钢板与挡土墙的材质与涂漆相同, 保证接触面粗糙程度与模型试验基本一致。

试验测出钢板重量 G 和钢板滑动临界状态的最大静摩擦力 $F_{\max}$, 则 $F_{\max} = \mu G$, 且 $\mu = \tan \delta$, 其中 μ 为静摩擦因数, δ 为挡土墙与接触面摩擦角,

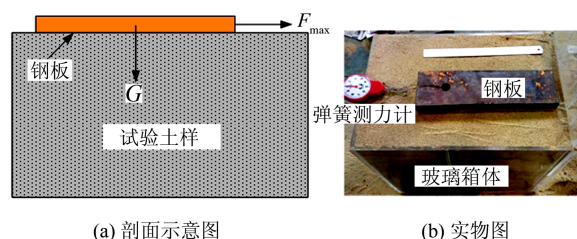


图 5 接触面摩擦角测量试验示意图

Fig.5 Schematic diagram of contact face friction angle measurement

得到 $\delta = \arctan \frac{F_{\max}}{G}$ 。测量时弹簧测力计需保持水平拉伸状态, 并记录钢板滑动临界状态时弹簧测力计的读数。重复开展 5 次试验, 结果如表 2 所示。试验得到 $\delta = 24.2^\circ$, 则 $\delta = 0.71 \varphi$ 。

表 2 接触面摩擦角测量统计表
Table 2 Statistics of contact face friction angle measurement

测量次数及均值	G/N	$F_{\max}/N$	$\delta/(^\circ)$
1	65.5	29.4	24.2
2	65.5	28.6	23.6
3	65.5	29.9	24.5
4	65.5	30.2	24.8
5	65.5	29.1	24.0
均值	/	/	24.2

2.7 试验步骤

- (1) 将泡沫板划线打孔, 放置到模型箱底部。
- (2) 把圆管一端封闭, 避免土体进入圆管, 另一端插入并固定到泡沫板中。
- (3) 土样分层铺设完成后把玻璃条插入圆管中, 然后把圆管拔出。土样静置 2 d, 自然密实。
- (4) 在挡土墙与反力装置间布设液压千斤顶。
- (5) 加载前, 在土体表面间隔 10 cm 绘制平行挡土墙的白色线条; 加载完成后, 统计玻璃条断裂位置, 分析挡土墙后土体表面破坏平面形态, 记录土样最终状态。
- (6) 撤去挡土墙, 把箱内土体移到外侧, 重复试验。

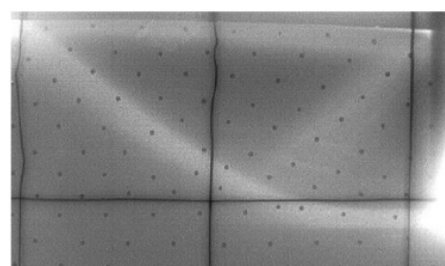
挡土墙加载完成后, 静置 2 h, 记录试验现象: 观察土体表面发生错动的形态, 即空间滑裂面在主平面上的投影形态; 记录墙后土体发生隆起的范围及形态。

重复开展 6 组试验, 由于玻璃条是分 2 次放置, 所以可获得第①~③组完整的玻璃条断裂数据。

2.8 滑裂面形成的判别依据与标准

二维模式中, 挡土墙平移模式下无黏性土体被动破坏的剪切带已经在试验中采用 X 射线技术获得^[13], 如图 6 所示, 可以看出, 挡土墙后剪切应力最大的区域形成一个连贯的剪切带, 即滑裂面的位置。

挡土墙后土体应力达到极限平衡状态时, 挡土墙后存在明显的剪切带, 并且剪切带范围内剪变形最大。由于土体剪切带内剪变形最大, 此处玻璃条断裂的可能性最大, 据此判断玻璃条断裂处发生在剪切带范围内, 即玻璃条断裂处为土体滑裂面位置。

图 6 挡土墙平移模式滑裂面二维形态^[13]Fig.6 Shear zones of 2D slip surface during retaining wall translation^[13]

关于挡土墙平移模式下无黏性土体达到被动极限状态形成滑裂面所需的位移量, 已有不少学者就此开展了相关研究。Terzaghi^[14]指出被动极限平衡的位移量为 5% H ; 徐日庆等^[15]通过试验得到最小墙体位移为 8% H 。准备试验时, 当挡土墙位移量为 4 cm 时, 增加位移土体表面发生错动的范围仍继续扩大, 当位移量大于 6 cm 时范围则不再扩大。考虑到模型尺寸和试验因素的影响, 结合试验过程中的现象, 为了得到完整的滑裂面形态, 本文挡土墙位移加载量取 12% H , 即 $\Delta x = 6$ cm。

3 试验现象

挡土墙加载过程土体表面试验现象, 以第 5 次试验加载过程的土体错动情况作为代表, 如图 7 所示。

3.1 三维滑裂面在主平面上的投影形态

挡土墙位移完成后, 根据白色线条和表面土体发生错动的位置即可绘制出光滑的滑裂面在土体表面的平面图, 即滑裂面在主平面上的投影形态。作出投影形态的切线, 切线与挡土墙垂线的夹角称为扩散角, 记为 θ 。每次试验结束后在土体表面量取计算扩散角 θ 的直角三角形边长, 两侧的扩散角的

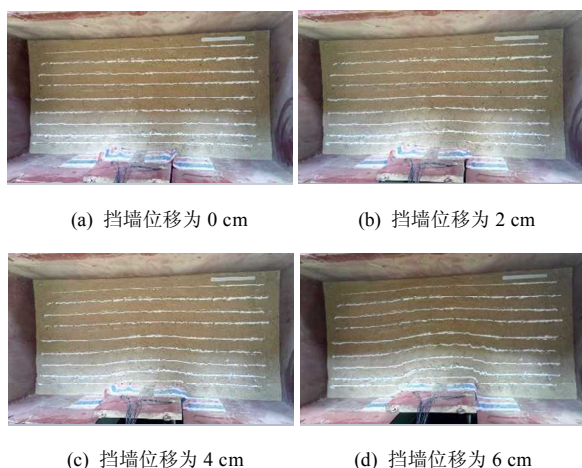


图7 加载过程土体错动情况(第5次试验)

Fig.7 Photos of soil shear condition during loading process (the fifth test)

均值作为一次试验的值。经过6次试验,扩散角 θ 分别为: 44.3° 、 46.1° 、 44.7° 、 45.6° 、 45.1° 、 44.1° , 均值为 45.0° 。试验现象以第5次试验结果为例,如图8所示。

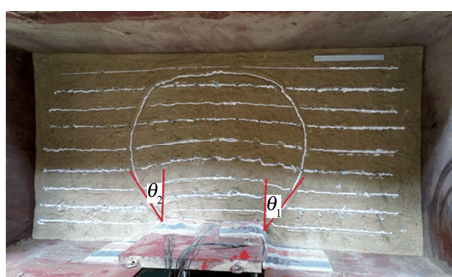


图8 主平面投影形态实物图及扩散角(第5次试验结果)

Fig.8 Photo of projection form in principal plane and spread angle (the fifth test results)

记录表面土体错动位置点的坐标,结合6次试验结果,拟合出滑裂面在主平面的示意图,如图9所示。挡土墙后滑裂面横剖面方向宽度先增大后减小,即先呈发散形态,后逐渐收敛。分析其形态,可以看出在 $Y=50\text{ cm}$ (第4排)处,滑裂面在主平面的投影平面宽度达到最大,约为 90 cm ,即滑裂面在距挡土墙 $d=H$ (H 为土体高度)处宽度达到

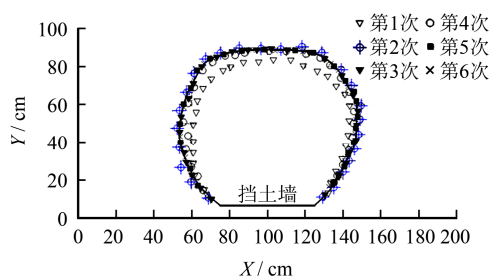


图9 主平面投影示意图(6次试验结果拟合)

Fig.9 Schematic diagram of projection form in principal plane (data fitting of 6 test results)

最大值 $l_{\max}=1.80B$ (B 为挡土墙宽度)。

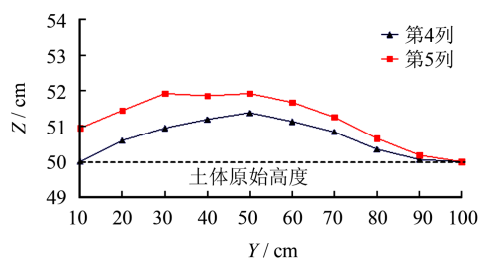
滑裂面最远处平行挡土墙的宽度约为 35 cm , 即 $0.7B$; 与挡土墙最远距离为 90 cm , 即 $d_{\max}=1.80H$, 根据朗肯理论^[12]得到滑裂面距挡土墙最远距离为 $1.88H$; 文献[8-11]研究表明,滑裂面与挡土结构物最长长度不超过 $2.50H$, 前人研究结果均与本文试验结果相符。

3.2 挡土墙后滑裂面隆起形态

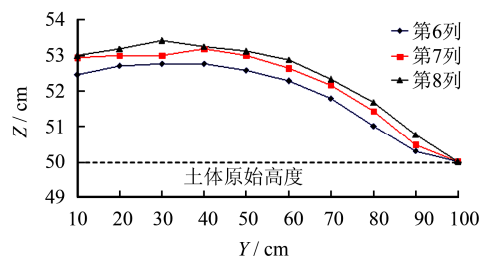
挡土墙平推结束后,挡土墙后土体会发生隆起现象。挡土墙发生位移之前土体表面平整,表面各点与箱体顶部平面距离相等。记录挡土墙发生位移之后土体表面各点与箱体顶部平面的距离,根据前者与后者的差值即可得到土体表面各点的高度。取玻璃条布置位置为监测点(如图3所示),记录各监测点处的隆起高度,取6次监测结果平均值绘制剖面图,分析挡土墙后各纵断面与横断面的土体隆起形态,如图10、11所示。

由于土体隆起形态的对称性,分析挡土墙后土体纵剖面的形态,选取第4~8列分析。由图10可以看出,挡土墙宽度外土体隆起高度先增大后减小,且距离挡土墙较近的位置土体隆起高度较小;各纵剖面土体隆起高度均先增大后减小,并且土体隆起高度变化趋势相近。挡土墙后土体隆起最高点在 $Y=30\text{ cm}$ 平面,并非在加载后的挡土墙位置,原因应该是挡土墙与土体接触面粗糙,存在摩擦角。

由图11可知,在挡土墙处与第1排,挡土墙宽度范围内($X=80\sim 120\text{ cm}$),土体隆起最高位置近似为水平面。随着距挡土墙的距离增加最高平面的



(a) 挡墙宽度外



(b) 挡墙宽度内

图10 挡土墙后土体隆起形态纵剖面图

Fig.10 Soil uplift shapes in longitudinal section behind retaining wall

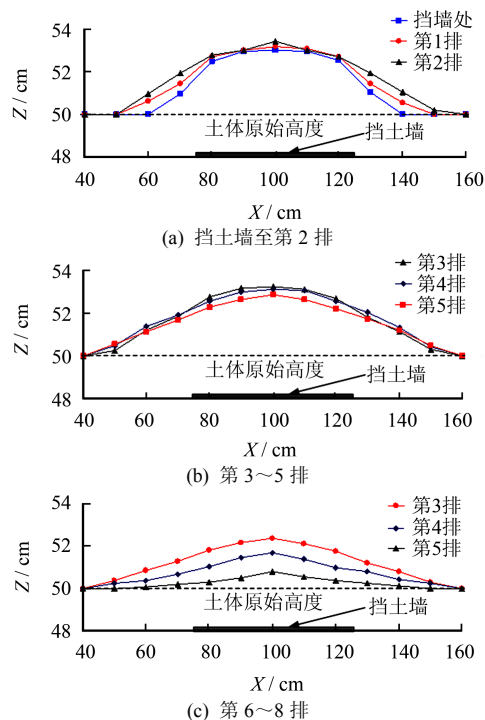


图 11 挡土墙后土体隆起形态横剖面图

Fig.11 Soil uplift shapes in transverse section behind retaining wall

宽度逐渐减小。墙后土体隆起形态沿挡土墙中垂线基本对称,中间土体隆起高度大,两侧隆起高度小。挡土墙后土体隆起宽度先增大后减小,第3、4、5

排宽度较大,且在第4排($Y=50\text{ cm}$)处平面宽度最大,这与滑裂面在主平面上的投影结果一致。根据挡土墙后土体表面各监测点隆起高度6次试验结果均值,用 Matlab 绘制墙后土体隆起形态见图 12。

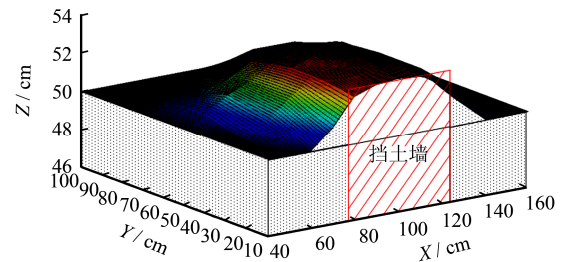


图 12 挡土墙后土体隆起形态三维示意图

Fig.12 3D schematic diagram of soil uplift shape behind retaining wall

4 试验结果

4 个液压千斤顶同步加载相同位移量,确保挡土墙沿着滑槽平行移动。挡土墙逐步加载过程中,墙后土体内部发生错动,插入土内的玻璃条逐渐发生断裂。加载完成后,从土体上部拔出玻璃条,由于每根玻璃条长度相等,即可计算出玻璃条断裂位置距底部高度。第1、2次试验得到数据①;第3、4次试验得到数据②;第5、6次试验得到数据③。整理玻璃条断裂结果如表3所示,表中“/”指玻璃

表 3 玻璃条断裂位置距底高度(单位: cm)

Table 3 Heights of glass strip fracture position from bottom (unit: cm)

排别	数据类别	第4列	第5列	第6列	第7列	第8列	第9列	第10列	第11列	第12列
第1排	数据①	/	13.6	7.1	6.9	5.5	6.5	7.3	13.1	/
	数据②	/	14.3	7.8	6.1	6.4	7.1	7.0	13.9	/
	数据③	/	13.1	6.4	7.3	5.8	6.1	6.5	14.0	/
	均值	/	13.7	7.1	6.8	5.9	6.6	6.9	13.7	/
第2排	数据①	32.6	12.8	8.9	8.5	7.6	8.8	9.3	12.8	33.1
	数据②	33.2	11.6	9.5	9.1	6.9	8.2	9.4	11.9	32.6
	数据③	31.0	13.4	8.6	9.4	8.0	9.1	8.5	12.5	32.4
	均值	32.3	12.6	9.0	9.0	7.5	8.7	9.1	12.4	32.7
第3排	数据①	23.9	14.3	11.1	9.9	9.6	9.7	10.4	14.2	23.8
	数据②	24.6	13.6	10.4	9.7	10.3	10.5	9.8	13.6	24.6
	数据③	24.0	14.1	11.7	10.6	9.1	9.4	10.5	14.0	23.7
	均值	24.2	14.0	11.0	10.1	9.7	9.9	10.2	13.9	24.0
第4排	数据①	32.9	22.6	17.9	16.2	14.5	16.7	17.8	22.6	32.6
	数据②	32.6	21.7	18.2	15.8	14.9	15.6	17.3	22.0	33.1
	数据③	31.8	22.0	17.6	16.7	15.4	15.9	18.2	21.6	32.8
	均值	32.4	22.1	17.9	16.2	14.9	16.1	17.8	22.1	32.8
第5排	数据①	/	32.6	26.9	22.8	21.9	22.5	27.3	33.6	/
	数据②	/	33.4	26.1	23.3	22.3	22.0	26.8	34.4	/
	数据③	/	33.1	27.0	22.4	21.1	21.7	26.5	32.7	/
	均值	/	33.0	26.7	22.8	21.8	22.1	26.9	33.6	/
第6排	数据①	/	44.3	37.9	31.4	29.4	31.4	37.9	43.6	/
	数据②	/	43.1	38.4	30.5	28.3	32.0	38.2	44.1	/
	数据③	/	42.9	37.1	32.0	28.6	31.0	37.4	42.9	/
	均值	/	43.4	37.8	31.3	28.8	31.5	37.8	43.5	/
第7排	数据①	/	/	/	41.6	37.6	42.3	/	/	/
	数据②	/	/	/	41.1	38.4	41.3	/	/	/
	数据③	/	/	/	42.3	38.0	42.2	/	/	/
	均值	/	/	/	41.7	38.0	41.9	/	/	/

条未断裂, 没有列出部分玻璃条均未断裂。玻璃条布置示意图如图3所示。

滑裂面距挡土墙最远处与滑裂面在主平面投影距挡土墙最远处在相同的位置, 结合图9滑裂面在主平面投影示意图, 可以判别出在玻璃条没有断裂处滑裂面距挡土墙最远处的位置。

根据各玻璃条监测点3组玻璃断裂高度的平均值, 绘制出各纵剖面、横剖面的滑裂面趋势图, 并且标注出每个玻璃条断裂高度的最大值与最小值; 每2次试验得到1组试验结果, 第①、②、③组试验结果对应的玻璃条实物图添加相应的趋势线与监测数据均值绘制的趋势图作为对比, 如图13和图14所示。

沿纵剖面方向, 主要分析挡土墙宽度范围内的滑裂面形态, 即第6~10列, 其中第8列在挡土墙中垂线上。由图13可以看出, 挡土墙后滑裂面高度第1~3排增长较平缓, 第3排以后增长速率较大, 且各纵剖面增长趋势近似呈直线状态, 顾慰慈等^[10]试验结果得到纵剖面基本上是一条指数曲线, 与本文试验结果较吻合。由图13(f)可以看出, 挡土墙后各列滑裂面在第1~3排高度大致相等, 纵向初始破

裂角为 9° ; 纵向平均破裂角为 26° , 与朗肯理论破裂角 ($45^\circ - \varphi/2 = 28^\circ$) 近似相等。

挡土墙后共8排玻璃条监测点, 仅分析前6排玻璃条断裂较多的滑裂面横剖面形态。由图14可以看出, 玻璃条断裂高度沿挡土墙中垂线(第8列)近似呈对称分布。第1~6排滑裂面横剖面宽度先增加后减小, 并且可以看出滑裂面在第3排($Y = 40\text{ cm}$)处宽度最大。第1~3排, 滑裂面底部近似为水平面, 水平面宽度逐渐增加, 横剖面形态近似为U型; 第3排之后, 底部水平面逐渐变窄直至没有水平面, 剖面形态由U型逐渐过渡为V型。根据各剖面玻璃条监测结果的均值, 绘制各横剖面、纵剖面的三维形态图, 如图15所示。

5 分析与讨论

5.1 空间滑裂面在主平面上的投影形态

滑裂面的主平面形态, 接近挡墙位置以倾角为 45° 的初始扩散角的斜线往外侧扩展, 距挡墙最远部分为比挡墙宽度小的水平线, 两者之间以圆弧段连接, 该段圆弧半径 $r = B$, 圆心 X 方向在挡土墙中垂线上, Y 方向与挡土墙距离为 H , 如图16所示。主

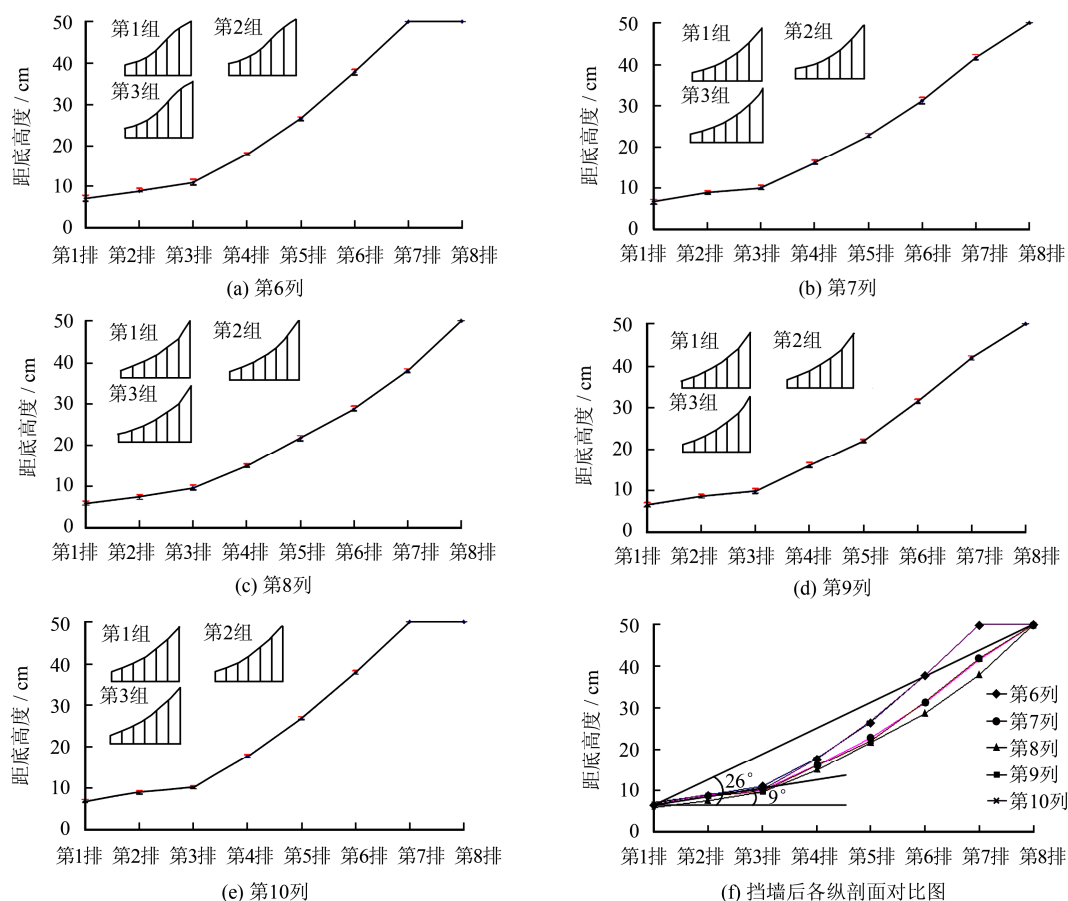


图13 纵剖面方向玻璃条断裂(均值)情况统计图

Fig.13 Statistical diagrams of fracture height (mean) of glass strips in longitudinal section

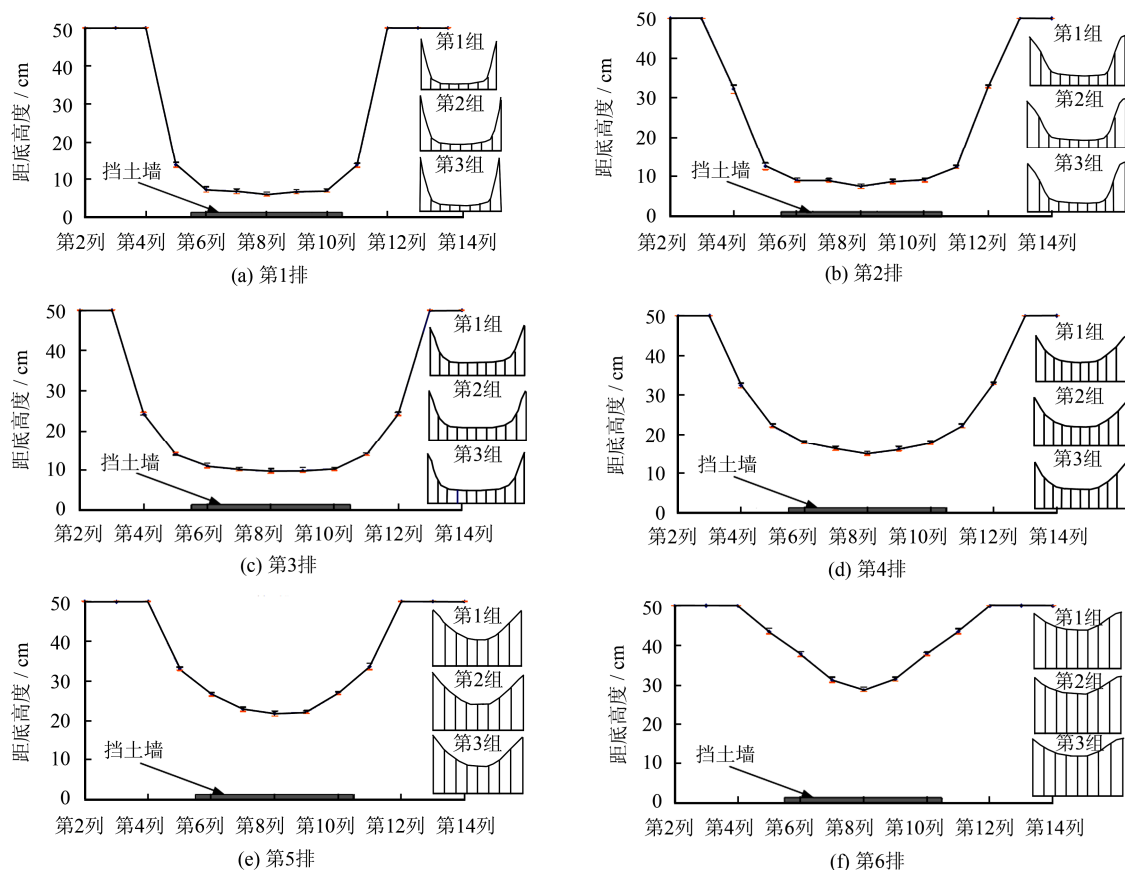


图 14 横剖面方向玻璃条断裂(均值)情况统计图

Fig.14 Statistical diagrams of fracture height (mean) of glass strips in transverse section

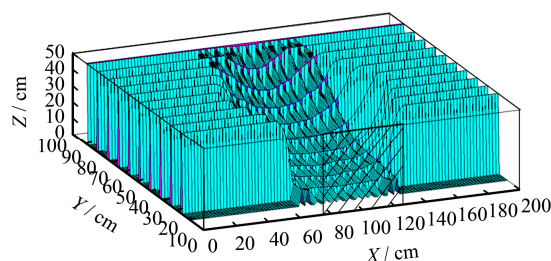


图 15 滑裂面空间各剖面形态示意图

Fig.15 Schematic diagram of spatial form of slip surface in longitudinal and transverse sections

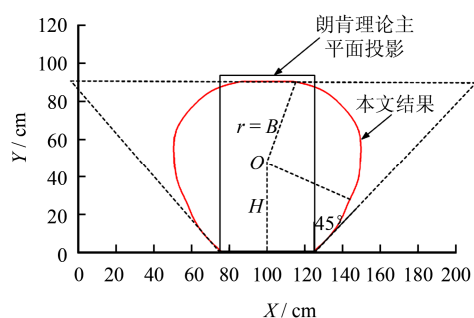


图 16 滑裂面主平面投影对比图

Fig.16 Comparison of projection form of slip surface in principal plane

平面形态沿挡土墙中心线基本对称。

朗肯理论^[12]主平面投影为规则的矩形,与本文试验结果对比如图 16 所示。本文投影距挡土墙最远距离为 90 cm,朗肯理论为 94 cm,本文试验结果略小,可能是因为当土体距挡土墙距离较远处滑动现象不明显,结果提取存在些许误差。主平面投影最远处平行挡土墙宽度约为 35 cm,即 $0.7B$,小于挡土墙宽度。本文挡土墙宽度范围外主平面投影面积约为总投影面积的 $1/3$,由此可见,挡土墙后滑裂面具有明显的三维效应。

5.2 挡土墙宽度范围后滑裂面的形态

挡土墙后滑裂面包含两部分:挡土墙后的断面、挡土墙宽度外的部分。本文试验结果得到挡土墙后滑裂面的断面形态为横剖面底部平面宽度逐渐减小的后半段近似以直线增长的曲面。

Rankine^[12]提出的被动破坏二维滑裂面为与水平面夹角为 $45^\circ - \varphi/2$ 的水平斜面,Blum^[3]根据朗肯理论提出三维滑裂面仅增加了挡土墙宽度以外的部分,挡土墙后断面与朗肯理论相同。比较本文挡土墙后纵剖面与 Blum 假设面,如图 17 所示。本文滑裂面横剖面并非水平面,纵剖面为前面部分缓慢增长,后面部分近似直线增长的曲面,与 Blum 假设

面存在显著差异。本文各滑裂面纵剖面大部分在 Blum 假设面下部, 可见滑裂面体积应比 Blum 假设要大。

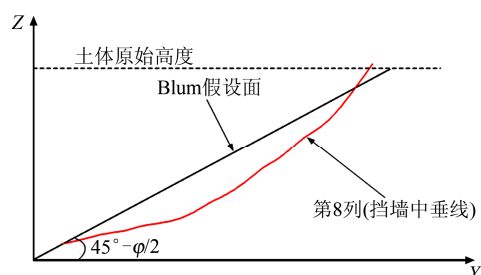


图 17 挡土墙后滑裂面纵断面对比图

Fig.17 Comparison between the longitudinal section of slip surface behind the retaining wall (this study) and the longitudinal section based on Blum assumption

由以上对比可以看出, 本文试验所得挡土墙后滑裂面断面并非水平斜面, 并且范围比 Blum 假设大。因为朗肯理论和 Blum 假设挡土墙表面光滑, 而本文试验挡土墙与土体存在摩擦角。

5.3 三维滑裂面空间形态

本文根据 6 次试验结果所得玻璃条断裂高度的均值, 用 Matlab 绘制出滑裂面的空间形态如图 18 所示。关于滑裂面破坏的空间形态, Soubra^[4]模拟了光滑多块体模式下滑裂面破坏形态, 如图 19 所示。

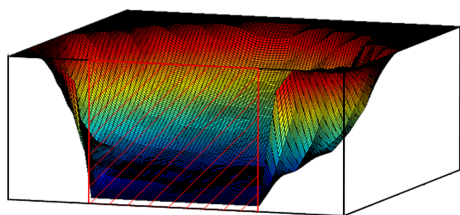


图 18 三维滑裂面空间形态图

Fig.18 Spatial form of 3D slip surface

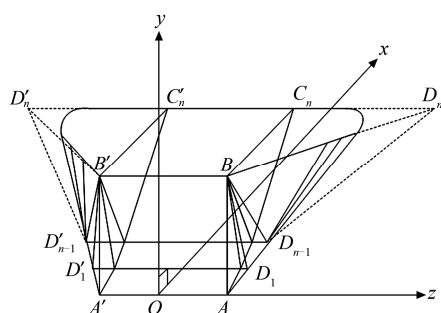


图 19 Soubra 提出的光滑多条块 M_{nt} 滑裂面破坏模式

Fig.19 Truncated multiblock mechanism failure mode of slip surface proposed by Soubra

比较图 18 和图 19, 本文试验结果中挡土墙宽度范围内的纵剖面为先增长缓慢, 后近似直线增长的曲面, 图 19 的假设与此相近, 但本文各纵剖面趋势并不一致; 在挡土墙宽度范围内, M_{nt} 滑裂面横剖面为等宽的平面, 而本文试验结果表明, 在第 1~3 排范围内横剖面近似为等宽的平面, 而在第 3~8 排范围内底部平面宽度逐渐减小。挡土墙宽度范围外的滑裂面形态两者均沿挡土墙中垂面对称。本文得到的滑裂面宽度最大处位于滑裂面距挡土墙最远距离的一半位置, Soubra 等^[4]理论滑裂面宽度最大处位于接近滑裂面距挡土墙距离最远处。由以上比较可以得出, Soubra 等^[4]模拟的 M_{nt} 滑裂面破坏形态夸大了墙后土体破坏的范围, 其得出土压力计算结果应比实际值略大。

6 结 论

(1) 自主研制的试验装置能够近似测量三维滑裂面形态。挡土墙后滑裂面具有明显的三维效应。

(2) 挡土墙宽度范围内纵剖面方向滑裂面高度增长趋势为先缓慢增长, 后近似呈直线趋势增长, 整体形态为曲面; 横剖面底部为宽度逐渐减小的平面, 其形态由 U 型逐渐过渡为 V 型, 滑裂面宽度为先增大后减小的趋势。

(3) 滑裂面在主平面的投影与挡土墙最远距离 $d_{\max} = 1.8H$; 在距挡土墙 $d=H$ 处宽度达到最大值, $l_{\max} = 1.8B$, 初始扩散角度 θ 约为 45° ; 投影形态从挡土墙后先以倾角为初始扩散角的斜线往外侧扩展, 距挡墙最远部分为 $0.7B$ 的水平线, 两者之间以半径 $r = B$ 圆弧段连接, 圆心在挡土墙中垂线上, 距挡土墙距离为 H 。

(4) 挡土墙后土体隆起高度沿纵剖面方向呈先增大后减小的趋势, 沿横剖面均呈中间高、两侧低的趋势。挡土墙与土体接触面的摩擦力对墙后土体形态有一定的影响。

本文仅研究三维滑裂面破坏特性, 下一步可在充分认识三维滑裂面的基础上进一步研究土压力分布与三维滑裂面的关系。

参 考 文 献

- [1] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2006.
GU Wei-ci. Calculation manual for earth pressure of retaining wall[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2006.
- [2] 杨雪强, 刘祖德, 何世秀. 论深基坑支护的空间效应[J].

- 岩土工程学报, 1998, 20(2): 74—78.
- YANG Xue-qiang, LIU Zu-de, HE Shi-xiu. The spatial effect of deep excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(2): 74—78.
- [3] BLUM H. Wirtschaftliche dalbenformen und deren berechnung [J]. **Bautechnik**, 1932, 10(5): 122—135.
- BLUM H. An efficient earth pressure model and its calculation[J]. **Structural Engineering**, 1932, 10(5): 122—135.
- [4] SOUBRA A H, REGENASS P. Three-dimensional passive earth pressures by kinematical approach[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(11): 969—978.
- [5] REGENASSA PIERRE, MEKSAOUINE MOHAMED, KASTNER RICHARD, et al. Study on slip surface of limited width soil considering frictional force[J]. **French Journal of Civil Engineering**, 2000, 4(4): 543—575.
- [6] SKRABL S, MACUH B. Upper-bound solutions of three-dimensional passive earth pressures[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 42(5): 1449—1460.
- [7] BENMEBAREK S, KHELIFA T, BENMEBAREK N, et al. Numerical evaluation of 3D passive earth pressure coefficients for retaining wall subjected to translation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2008, 35(1): 47—60.
- [8] MEKSAOUINE M. A theoretical and experimental study of passive pressure on rigid piles[D]. Lyon: Institute National des Sciences Appliqués de Lyon, 1993.
- [9] DUNCAN J M, MOKWA R L. Passive earth pressures: theories and tests[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(3): 248—257.
- [10] 顾慰慈, 武全社, 陈卫平. 挡土墙背填土中滑裂体形状的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(2): 49—56.
- GU Wei-ci, WU Quan-she, CHEN Wei-ping. Model test on the shape of the slide crack behind the retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 10(2): 49—56.
- [11] 卢坤林, 朱大勇, 徐小马, 等. 实验室内一种挡土墙被动破坏的三维滑面测试方法[P]. 中国专利: CN104316669A, 2015-01-28.
- LU Kun-lin, ZHU Da-yong, XU Xiao-ma, et al. A measurement method of 3D slide plane for retaining wall passive failure in the laboratory[P]. Chinese Patent: CN104316669A, 2015-01-28.
- [12] RANKINE W J M. On the stability of loose earth[J]. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 147(147): 9—27.
- [13] WIDULINSKI L, TEJCHMAN J, KOZICKI J, et al. Discrete simulations of shear zone patterning in sand in earth pressure problems of a retaining wall[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2011, 48(7—8): 1191—1209.
- [14] TERZAGHI K. Record earth pressure testing machine[J]. **Engineering News Record**, 1932, 109(29): 365—369.
- [15] 徐日庆, 陈页开, 杨仲轩, 等. 刚性挡墙被动土压力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 569—575.
- XU Ri-qing, CHEN Ye-kai, YANG Zhong-xuan, et al. Experimental research on the passive earth pressure acting on a rigid wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 569—575.
- [20] ZOU L, JING L, CVETKOVIC V. Roughness decomposition and nonlinear flow in a single rock fracture[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 75: 102—118.
- [21] TATONE B S A, GRASSELLI G. Quantitative measurement of fracture aperture and directional roughness from rock cores[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 45(4): 619—629.
- [22] 王媛, 顾智刚, 倪小东. 光滑裂隙高流速非达西渗流运动规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1404—1407.
- WANG Yuan, GU Zhi-gang, NI Xiao-dong. Experimental study of non-Darcy water flow through a single smooth fracture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1404—1407.
- [23] ZENG Z, GRIGG R A. Criterion for non-Darcy flow in porous media[J]. **Transport in Porous Media**, 2006, 63(1): 57—59.
- [24] RANJITH P G, VIETE D R. Applicability of the ‘cubic law’ for non-Darcian fracture flow[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2011, 78: 321—327.
- [25] LEE H B, YEO I W, LEE K K. The modified Reynolds equation for non-wetting fluid flow through a rough-walled rock fracture[J]. **Advances in Water Resources**, 2013, 53(1): 242—249.
- [26] 郭建春, 庄园, 刘超. 考虑非达西效应的酸蚀裂缝流场数值模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3315—3321.
- GUO Jian-chun, ZHUANG Yuan, LIU Chao. Numerical simulation of flow field of acid etched fractures considering non-Darcy effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3315—3321.

上接第 3302 页