

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0752

刚性墙后有限宽度土体主动滑裂面特征试验研究

王崇宇^{1,2}, 刘晓平¹, 曹周红¹, 江 旭³, 张家强¹

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省水务规划设计院有限公司, 湖南 长沙 410008;
3. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘 要: 墙后土体滑裂面特征是土压力计算的重要依据, 为了研究刚性墙后有限宽度土体主动滑裂面特征, 利用无黏性砂开展室内模型试验, 采集了试验过程中的土体图像, 并采用数字图像相关法进行了分析, 得到了土体的剪切应变、位移等, 对平动(T 模式)、绕墙底转动(RB 模式)、绕墙顶转动(RT 模式)变位模式进行了研究。研究表明: T 模式、RB 模式下有限宽度主动土体临界宽高比相近, RT 模式宽临界高比相对较小; T 模式有限宽度土体主动滑裂面呈现为“多折线”特征, 根据滑裂角相似性可分为以移动挡墙、固定挡墙为起点发展的滑裂面; RB 模式有限宽度主动滑裂面起点为墙踵上部, RT 模式起点为墙踵, 均延伸至固定挡墙中部; T 模式、RT 模式有限宽度土体水平和垂直位移可观察到明显的土拱特征, 土拱边缘即为滑裂面。

关 键 词: 模型试验; 有限宽度土体; 主动变位模式; 滑裂面; 砂

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 11-2943-10

Experimental study on characteristics of active slip surface of limited width soil behind rigid wall

WANG Chong-yu^{1,2}, LIU Xiao-ping¹, CAO Zhou-hong¹, JIANG Xu³, ZHANG Jia-qiang¹

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2. Hunan Water Planning & Design Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410008, China;

3. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & design Institute Co., Ltd, Changsha, Hunan 410200, China)

Abstract: The characteristics of the slip surface of the soil are highly important for the calculation of earth pressure. In order to study the characteristics of the limited width soil active slip surface behind the rigid wall, laboratory model tests were carried out using non-cohesive sand, the images of soil during the test were collected and analyzed by digital image correlation method, the shear strain and displacement of soil are obtained, and the translation (T-mode) and rotation around the bottom of the wall are analyzed. The research results show that the critical aspect ratio of active soil with limited width is similar in T mode and RB mode, while in RT mode, the critical aspect ratio is relatively small; the active sliding surface of the soil with limited width in T mode presents the characteristic of "multi-refraction lines". According to the similarity of the sliding angle, it can be divided into the slip surface developed from the mobile retaining wall and the fixed retaining wall, the starting point of the active slip surface of limited-width soil in RB mode is the upper part of the wall heel, and the starting point of the RT mode is the wall heel, both of which extend to the middle of the fixed retaining wall. Obvious soil arch characteristics can be observed in the horizontal and vertical displacement of soil with limited width in T mode and RT mode, and the edge of soil arch is the sliding surface.

Keywords: model experiment; soil of limited width; active displacement mode; slip surface; sand

1 引 言

随着城市建设中深基坑、地下(地铁)工程不断增多, 在既有建筑物旁进行基坑工程施工, 有限

宽度土体两侧, 其中一侧为基坑支护结构, 另一侧为既有建筑物结构, 此类有限宽度土体土压力及变形问题, 已常见于大型城市建设之中, 其土压力计算方法尚未定论, 因而此类基坑支护工程的设计、

收稿日期: 2021-05-20

修回日期: 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51309037); 湖南省重点实验室基金项目(No. 2018DT04)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51309037) and Hunan Provincial Key Laboratory Fund Project (2018DT04).

第一作者简介: 王崇宇, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事结构与土相互作用方面的研究。E-mail: 273053581@qq.com

通讯作者: 刘晓平, 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构及地基基础工程方面的研究。E-mail: lxplyt@163.com

施工均难以找到合适的计算依据。朗肯理论采用的土体极限平衡状态已广泛应用于各类计算,而有限宽度土体条件下的土体滑裂面特征与土压力大小及分布密切相关,图1为有限宽度土体主动土压力模式示意图。

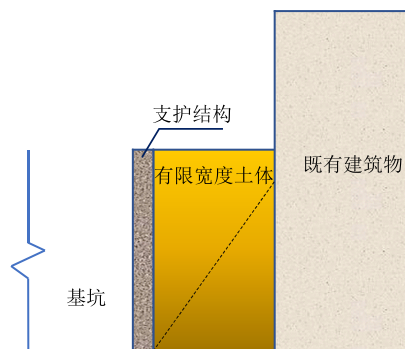


图1 有限宽度土体主动土压力模式示意图

Fig.1 Schematic diagram of active earth pressure mode of limited width soil

关于有限宽度土体的主动土压力研究,Frydman等^[1]采用离心试验模型研究了刚性挡土墙和临近岩壁之间的土体的土压力;Take等^[2]通过小尺寸离心模型试验研究了狭窄回填宽度下刚性挡土墙的主动土压力,分析认为狭窄的回填宽度可导致墙后土压力降低;马平等^[3]建立有限土体土压力计算模型,基于极限平衡理论及平面滑裂面假定,在考虑土黏聚力及有限土体宽度的基础上,推导有限土体滑裂面剪切破坏角的数学表达式,并建立有限宽度土体主动土压力计算公式;党发宁等^[4]依据线弹性本构理论建立了有限位移条件下挡土墙上的土压力计算式,并推导出发生朗肯主动土压力、静止土压力、主应力方向偏转、朗肯被动土压力的界限应变,依据这4个界限应变将作用在挡土墙上的土压力分为5个状态分区。王闰超^[5]、王洪亮^[6]、徐日庆^[7]、Xie^[8]、杨明辉^[9]等学者分别根据不同的假设条件提出了有限宽度土体主动土压力的理论计算方法;杨明辉等^[10-11]针对无黏性土体,开展了刚性挡墙平动、绕墙底转动和绕墙顶转动3种墙体主动变位模式情况下墙后有限宽度土体土压力试验;方焘等^[12]采用砂土开展挡土墙绕墙趾及墙顶转动、平动等3种变位模式下的有限土体主动土压力分布特性模型试验研究;万励等^[13]采用离散元方法对有限宽度土体主动破坏过程进行了研究。

针对墙后土体的变形特征研究,Khosravi等^[14]对刚性挡土墙平移模式下的主动土压力进行了一系列模型试验,采用微型压力传感器和粒子图像测速

技术,对颗粒土的力学行为进行了试验研究。杨明辉等^[10]采用色砂分层法观测了有限宽度主动土压力区的土体破坏模式,应宏伟等^[15]采用粒子图像测速技术测量了有限被动土体的位移矢量场。

上述研究表明,有限宽度土体与半无限土体在土压力分布、土体变形特征等方面均相差较大,诸多学者针对有限土体主动土压力问题分别在理论研究、试验研究、数值模拟等方面开展了研究,其中试验研究主要集中在土压力测量、土体位移矢量分析等。参照传统土压力的极限平衡理论,土压力大小与滑裂面特征是密切相关的,而相关研究均尚未对有限宽度土体滑裂面特征研究开展系统性研究。

本文采用无黏性砂土进行刚性挡土墙不同主动变位模式下的有限宽度土体模型试验,利用高速相机记录土体连续变形图像,基于数字图像相关法^[16-19]

(digital image correlation, DIC)对土体的位移、剪切应变进行分析,对挡墙不同主动变位模式下、土体不同宽高比的有限宽度土体滑裂面进行分析,为有限宽度主动土压力理论计算、试验研究、数值模拟等提供参考。

2 试验装置及方案

2.1 试验装置

模型试验装置由装土箱、挡土墙、挡墙变位控制系统、图像采集系统组成。试验装置如图2所示。

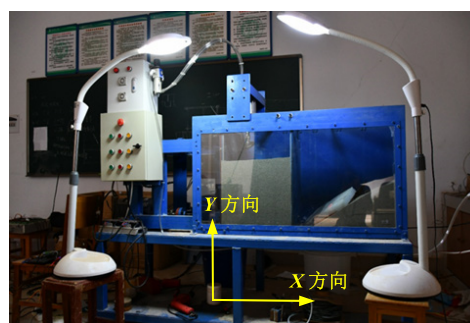


图2 模型试验装置

Fig.2 Device of model test

(1) 装土箱: 试验箱体采用箱型框架,尺寸为1 200 mm×400 mm×700 mm(长×宽×高),模型箱正面一侧为16 mm厚高强度透明钢化玻璃,在模型箱后方每隔一定距离设置固定卡位,用来放置固定挡墙,以此实现不同的填土宽度。

(2) 挡土墙: 移动挡墙为16 mm厚钢板,固定挡板为12 mm厚钢板;钢板外侧焊接铰接支座,与加载系统传动轴进行铰接连接。

(3) 挡墙变位控制系统: 移动挡墙外侧设置了

上下两个电动机带动上下螺杆转动，上下电机螺杆间距为 500 mm，各距上下边 100 mm，上下两根螺杆可控制活动挡墙往后移动来实现挡墙的变位，按照电机旋转速度推算，移动挡墙向远离土体方向的额定平移速度为 0.02 mm/s。

(4) 图像采集系统：试验过程中，对土体区域采用高速相机自动拍照，确保相机与测量表面呈垂直状态，光源置于试验箱体两侧以减小镜面反射。

2.2 试验土样参数

试验土样采用洞庭湖砂，取回试验材料后分别进行了筛分、清洗、烘干，试验选用粒径在 0.315~0.630 mm 规格间的均匀砂作为试验研究材料。土样参数见表 1。

表 1 试验土样参数

Table 1 Parameters of the soil sample

粒径范围 / mm	重度 / (kN · m ⁻³)	内摩擦角φ / (°)	孔隙比 e
0.315~0.630	14.39	30	0.64

2.3 试验方案及安排

试验土体高度 H 均采用 400 mm，分别开展了平动模式 (T 模式)、绕墙底转动模式 (RB 模式)、绕墙顶转动模式 (RT 模式) 3 类试验，挡墙变位模式示意图见图 3，试验考虑了不同宽高比 B/H (B 为试验土体宽度) 条件。综合考虑上述因素，共开展了试验 19 组，其中 T 模式 7 组、RB 模式和 RT 模式各 6 组，试验安排见表 2。

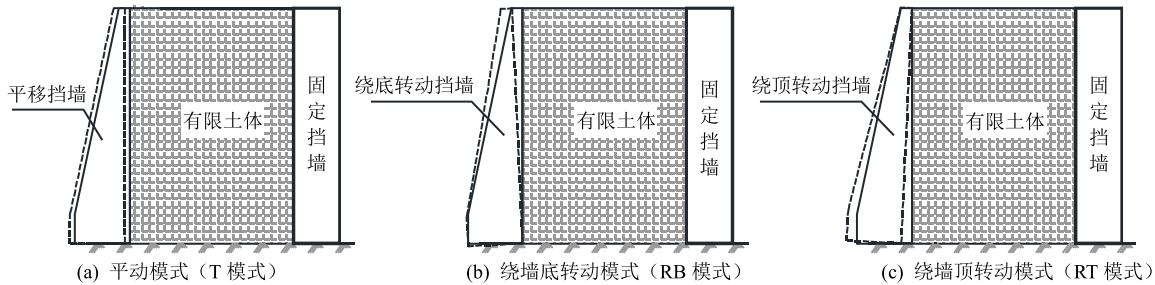


图 3 挡墙不同变位模式示意图

Fig.3 Diagram of different displacement modes of retaining wall

表 2 试验安排表
Table 2 Test schedule

序号	B/H	土体宽度 B	土体高度 H	有限宽度土体试验		
		/ mm	/ mm	T 模式	RB 模式	RT 模式
1	1.7	680	400	√	√	√
2	1.4	560	400	√	√	√
3	1.1	440	400	√	√	√
4	0.8	320	400	√	√	√
5	0.6	240	400	√	√	√
6	0.3	120	400	√	√	√
7	0.2	80	400	√		

2.4 试验步骤

(1) 试验准备：移动挡墙定位至初始位置，选择相应的插槽安装固定挡墙，对模型箱移动、固定挡墙表面上均匀涂抹一层凡士林并铺设一层保鲜膜，以减少土样与挡墙的摩擦，采用干抹布擦拭钢化玻璃内外侧。

(2) 土样填筑：试验装砂采用人工落砂法分层填砂，每 50 mm 高度填筑一层砂土，使其在自然状态下压实。

(3) 试验进行：启动移动挡墙变位系统，同时进行图像采集。

(4) 试验结束准则：根据之前的主动土压力试

验，以 T 模式为例，达到主动土压力平衡状态时移动挡墙位移一般为 $0.001H \sim 0.004H$ ^[20]，考虑到本文试验结束后可在图像分析时选择适宜时段的图片进行分析，因此试验时移动位移控制值相对宽松，采用当试验土体出现明显变形，移动挡墙最大水平位移 $\Delta x \geq 0.025H$ (T 模式、RT 模式)、 $\Delta x \geq 0.075H$ (RB 模式)，结束试验。

3 试验结果及分析

基于数字图像相关法(DIC)采用 GOM correlate 软件分析了土体图像^[19]，分析结果包括土体剪切应变、总体位移、水平位移、竖向位移等。

3.1 T 模式土体滑裂面特征

图 4 为 T 模式下 $B/H = 1.7$ 时土体变形图，土体总位移在变形区域内分布较为均匀，其中较大的 X 向位移区域出现在土体表面，较大的 Y 向位移区域出现在挡墙侧临近墙顶处，土体变形区域距离固定挡墙(右侧边界)较远，可判定为半无限土体。

图 5 为 T 模式下 B/H 分别为 1.4、0.8、0.6 时的土体剪切应变图，其滑裂面均由墙踵为起点，斜向土体上方发展并破裂至土体表面，越接近墙踵的滑裂带剪切应变值越大。

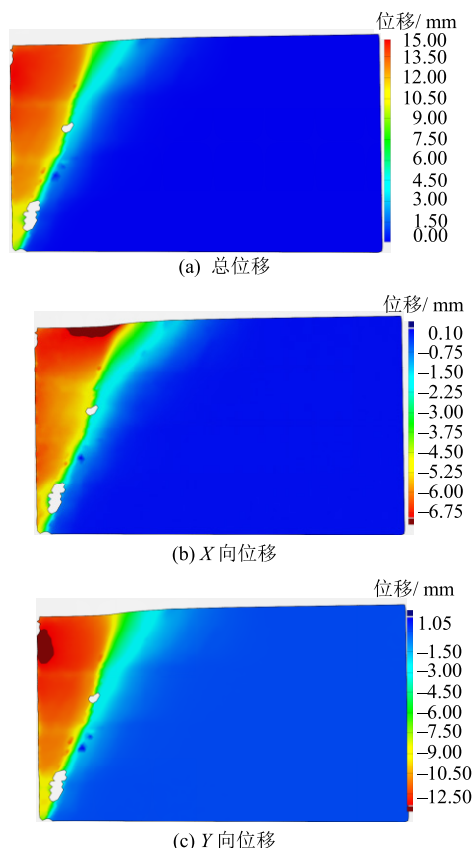


图 4 T 模式土体变形特征 ($B/H=1.7$)
Fig.4 Soil deformation characteristics in T-mode ($B/H=1.7$)

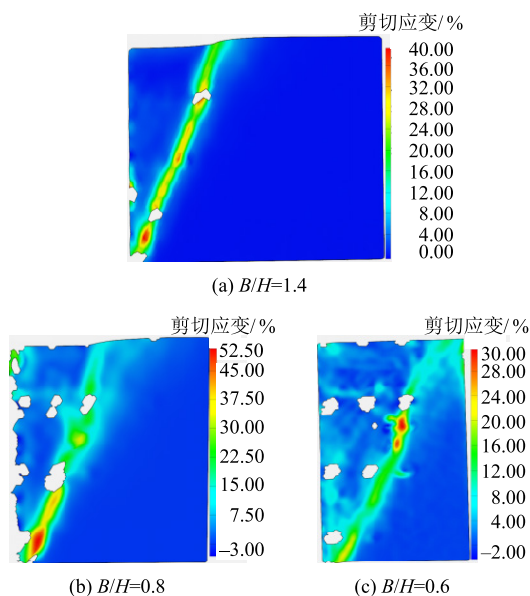


图 5 T 模式土体剪切应变图
Fig.5 Soil shear strain cloud map in T-mode

图 6 为 T 模式下 $B/H=0.6$ 时的土体变形特征图, 土体的滑裂面 (见图 5(c))、变形特征与半无限土体较为相似, 但随着土体宽度的减少, 滑裂面顶点与固定挡墙墙顶重合, 土体总位移较大区域仍然出现在移动挡墙墙顶附近, 而当 $B/H < 0.6$ 时,

土体滑裂面、变形特征已开始受到固定挡墙的影响, 因此, 相应的计算分析应考虑为有限宽度土体问题。

图 7、8 分别为 T 模式下 $B/H=0.3$ 时不同阶段的土体剪切应变和变形特征图。

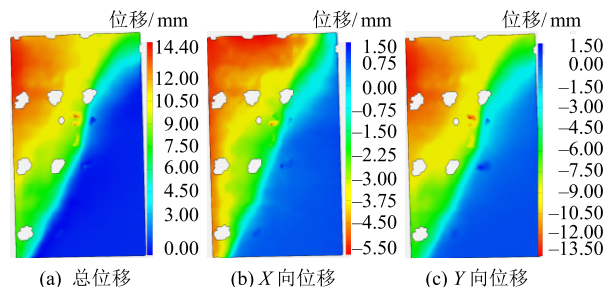


图 6 T 模式土体变形特征 ($B/H=0.6$)
Fig.6 Soil deformation characteristics in T-mode ($B/H=0.6$)

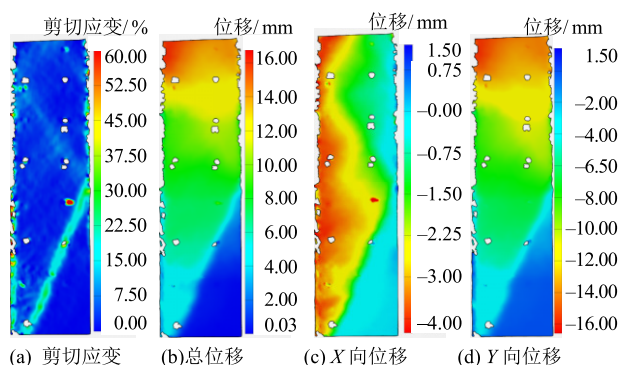


图 7 T 模式土体剪切应变图及变形特征
($B/H=0.3, \Delta x=4 \text{ mm}$)

Fig.7 Soil shear strain cloud map and deformation characteristics in T-mode ($B/H=0.3, \Delta x=4 \text{ mm}$)

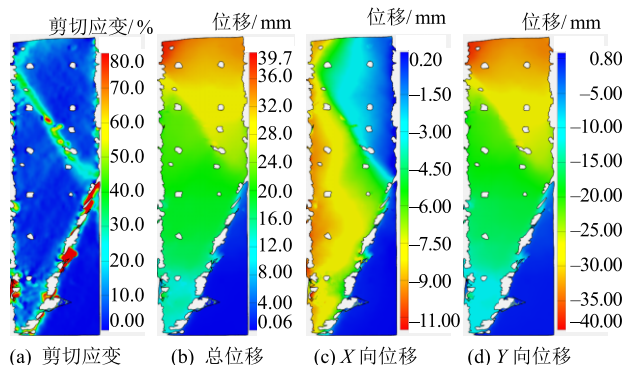


图 8 T 模式土体剪切应变图及变形特征
($B/H=0.3, \Delta x=10 \text{ mm}$)

Fig.8 Soil shear strain cloud map and deformation characteristics in T-mode ($B/H=0.3, \Delta x=10 \text{ mm}$)

阶段 1 (移动挡墙位移 $\Delta x = 4 \text{ mm}$) 时, 土体剪切应变出现滑裂面 1, 由墙踵至固定挡墙中部 ($h_1 = 0.5H$) 的滑裂面, 土体总位移、Y 向位移均随深度逐渐降低, X 向位移则出现凸向固定挡墙的土拱。阶段 2 ($\Delta x = 10 \text{ mm}$) 的土体剪切应变图中,

滑裂面 1 (图中标记, 下同) 的剪切应变值增加较大; 滑裂面 2 由固定挡墙中部 (滑裂面 1 终点) 反射向上延伸至移动挡墙墙身 ($h_2 = 0.875H$); 滑裂面 3 由滑裂面 2 终点发展至土体表面, 最终形成由 3 条斜线组成的“多折线”滑裂面 1、2、3。

图 9、10 分别为 T 模式下 $B/H = 0.2$ 时不同阶段 (阶段 1、阶段 2 移动挡墙位移 Δx 分别为 4、10 mm) 的土体剪切应变和变形特征图。 $B/H = 0.2$ 时的滑裂面及土体变形特征与 $B/H = 0.3$ 基本一致, 较为明显的区别是滑裂面 1、2 的终点高程明显下降, $h_1 = 0.46H$, $h_2 = 0.725H$ 。

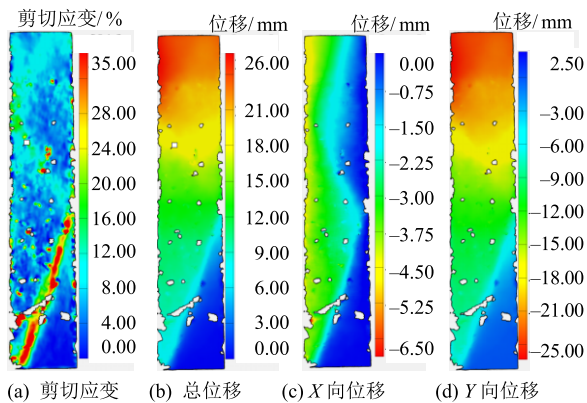


图 9 T 模式土体剪切应变图及变形特征
($B/H=0.2$ 、 $\Delta x=4$ mm)

Fig.9 Soil shear strain cloud map and deformation characteristics in T-mode($B/H=0.2$, $\Delta x=4$ mm)

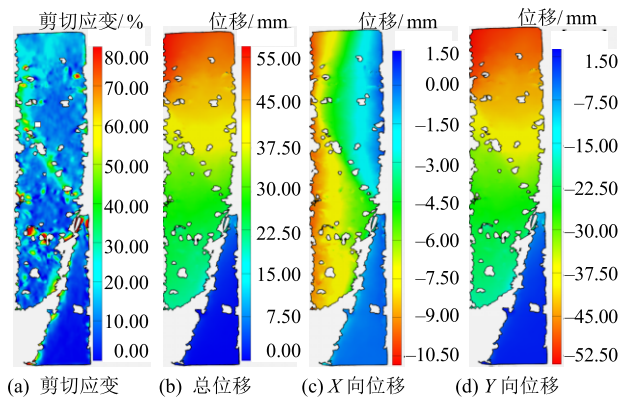


图 10 T 模式土体剪切应变图及变形特征
($B/H=0.2$ 、 $\Delta x=10$ mm)

Fig.10 Soil shear strain cloud map and deformation characteristics in T-mode ($B/H=0.2$, $\Delta x=10$ mm)

朗肯主动土压力理论滑裂面与水平面夹角 $\alpha_1 = 45^\circ + \varphi/2$, 其中, φ 为土体内摩擦角。根据试验土样参数计算, 临界宽高比 $B/H = \cot(45^\circ + \varphi/2) = 0.577$ 。图 11 为 T 模式不同 B/H 时的土体滑裂面特征汇总图, 并将其与朗肯理论滑裂面进行了对比。

(1) 当 $B/H > 0.6$ 时, 土体的主动滑裂面形状、

滑裂角 ($\alpha_1 \approx 60^\circ$) 与朗肯理论均非常相似, 该范围内的土压力及变形相关计算分析可以参考半无限土体的土压力理论。

(2) 当 $B/H \leq 0.6$ 时, 土体主动滑裂面将受到固定挡墙的影响, 有限宽度土体范围出现连续“多折线”滑裂面, 在 B/H 分别为 0.3、0.2 时滑裂面均由 3 个面组成, 当 B/H 更小时滑裂面数量或将继续增加至 4 个或更多, 对不同分段滑裂面的滑裂角比较分析, 如图 11 中 B/H 分别为 0.2、0.3 的奇数滑裂面 (滑裂面 1、3...) 水平夹角相近, 即 $\alpha_1 = 60^\circ$, 将分段滑裂面区分为移动挡墙发展面 (奇数面)、固定挡墙发展面 (偶数面), 其中奇数面滑裂角 $\alpha_1 \approx 45^\circ + \varphi/2$, B/H 分别为 0.3、0.2 的偶数面的滑裂角相近, 为 $\alpha_2 = 52^\circ$, 较 α_1 略小, 由于试验组数有限, 偶数面的滑裂角的影响参数相关性尚难以确定。

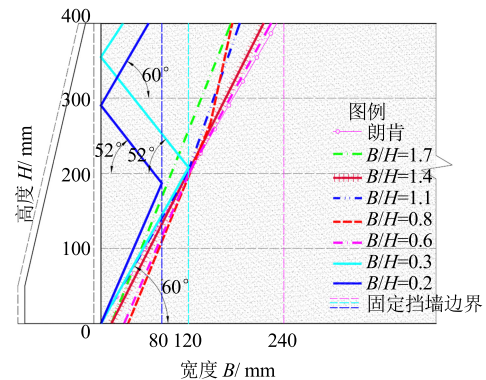


图 11 T 模式不同 B/H 土体滑裂面特征

Fig.11 Characteristics of soil slip surface in T mode with different B/H

3.2 RB 模式土体滑裂面特征

图 12 为 RB 模式下 B/H 分别为 1.7、1.4、1.1、0.8、0.6、0.3 时的剪切应变图, 图 13、14 分为 B/H 为 0.6、0.3 时的土体位移图。在 RB 模式下, 墙后土体无明显滑裂带, 对滑裂区边线特征进行分析, 滑裂外沿线下端点位于墙踵上部, 上端点位于土体表面或固定挡墙, 线型为向右倾斜斜线。图 15 为 RB 模式不同 B/H 时的土体剪切区外沿线特征比较图, 并加入了朗肯理论滑裂面进行了对比, 综合分析如下:

(1) 当 $B/H \geq 0.6$ 时, 土体滑裂外沿线的滑裂角 α_1 与朗肯理论相似, 主剪切带可出现 2 条或多条以上, 主剪切带与滑裂外沿线平行, 滑裂外沿线下端点位于墙踵上部 $0.2H$, 上端点则距离墙顶约 $0.5H$ 。其中 $B/H = 0.6$ 时, 土体滑裂区外沿线顶点、变形区右侧角点均与固定挡墙墙顶相接。

(2) 当 $B/H < 0.6$ 时 ($B/H = 0.3$)，土体滑裂范围开始受到固定挡墙的影响，随着土体宽度的减少，滑裂外沿线上端点位于固定挡墙中部，滑裂角 α_1 略有增大。

3.3 RT 模式土体滑裂面特征

图 16 为 RT 模式下 B/H 分别为 1.7、1.4、1.1、0.8、0.6、0.3 时的剪切应变图，图 17、18 分为 B/H 为 0.6、0.3 时的土体位移图，图 19 为不同 B/H 土体滑裂面特征对比图。滑裂面均是由墙踵为起点，斜向土体上方以曲线发展并破裂至土体表面。综合分析如下：

(1) 当 $B/H \geq 0.6$ 时，剪切区范围、大小、特征基本保持一致，滑裂面由 2 段组成，分别经过墙踵的下部直线段、贯穿至土体表面的上部曲线段，其中下段滑裂角与朗肯主动理论基本一致，顶点与移动挡墙墙顶的距离处于 $0.30H \sim 0.35H$ 之间；分析土体位移图， $B/H = 0.6$ 的土体位移特征，其中较大的 X 向位移区域位于墙踵后方较小范围， Y 向位移在土体变形区域分布均匀。考虑到半无限土体下 RT 模式的土体影响宽度为 $0.35H$ ，而 $B/H = 0.3$ 时滑裂面特征明显改变，分析认为 $B/H = 0.35$ 为有限土体临界宽高比。

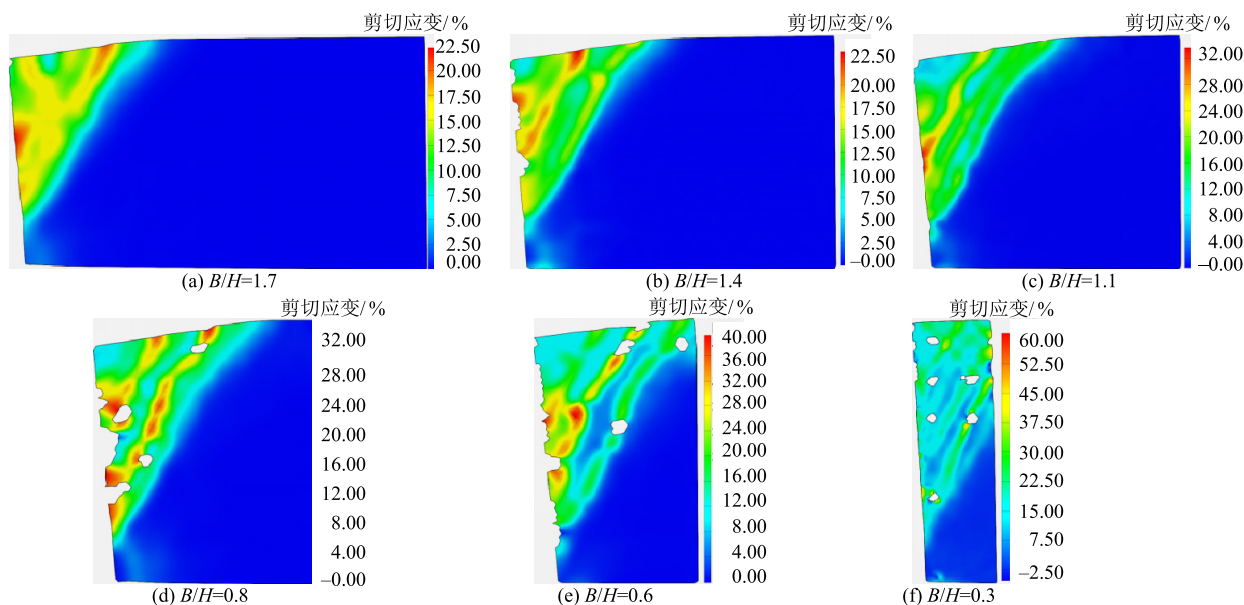


图 12 RB 模式土体剪切应变图
Fig.12 Soil shear strain cloud maps in RB-mode

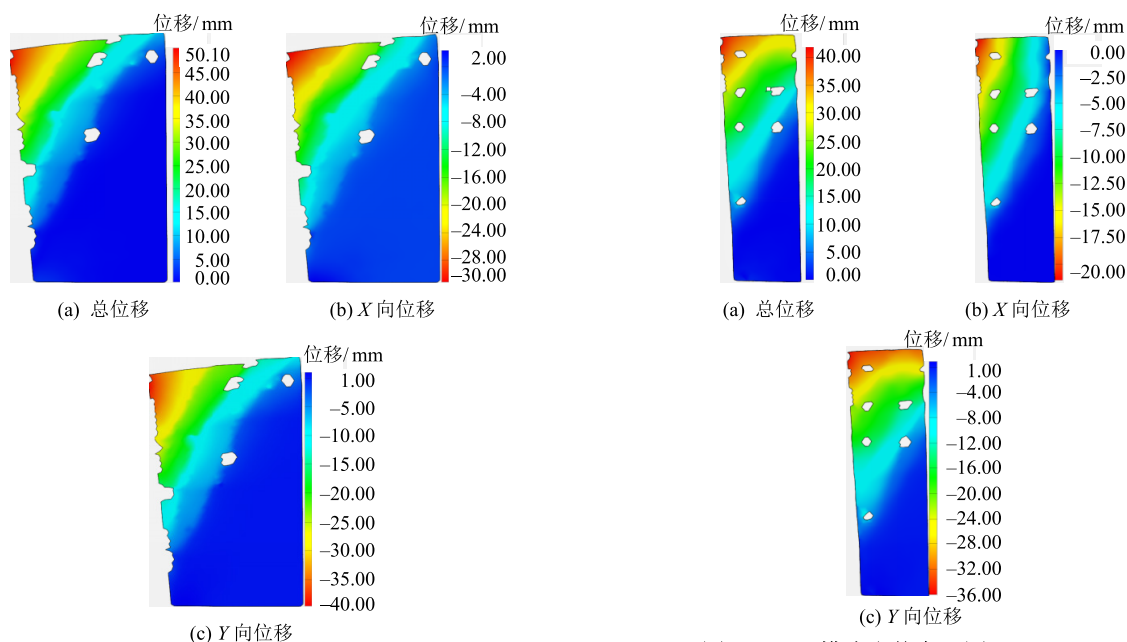


图 13 RB 模式土体变形图 ($B/H=0.6$)
Fig.13 Soil deformation characteristics in RB-mode ($B/H=0.6$)

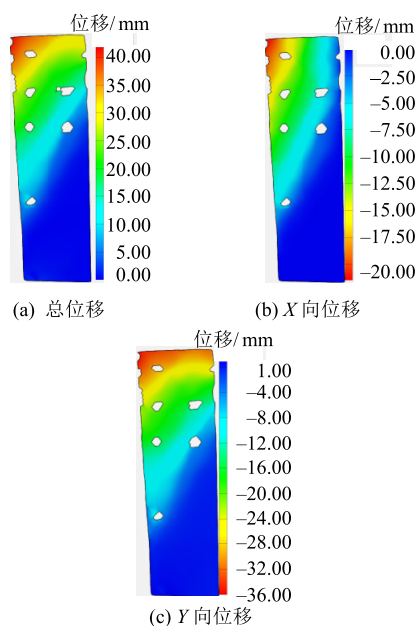


图 14 RB 模式土体变形图 ($B/H=0.3$)
Fig.14 Soil deformation characteristics in RB-mode ($B/H=0.3$)

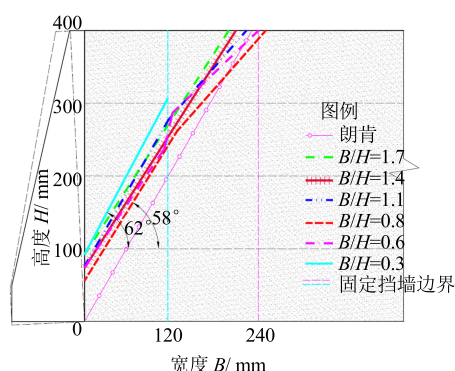
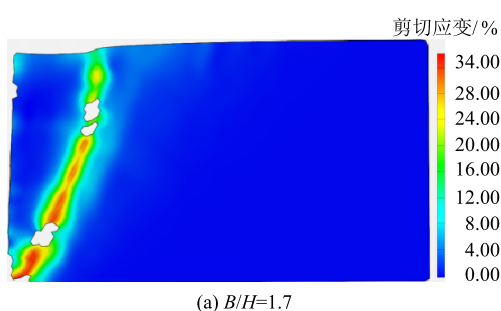
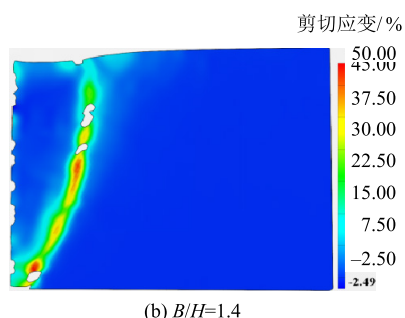


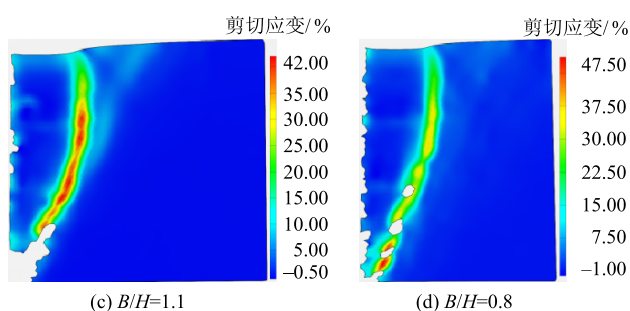
图 15 RB 模式不同 B/H 土体滑裂面特征
Fig.15 Characteristics of soil slip surface in RB mode with different B/H



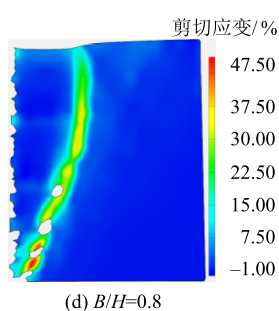
(a) $B/H=1.7$



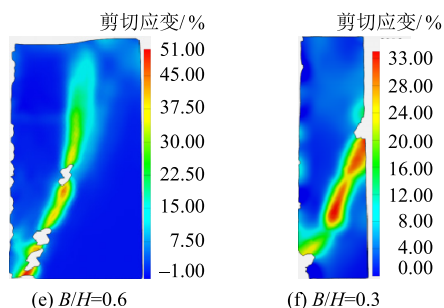
(b) $B/H=1.4$



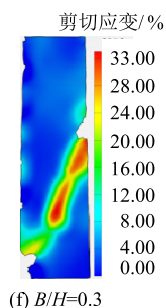
(c) $B/H=1.1$



(d) $B/H=0.8$



(e) $B/H=0.6$



(f) $B/H=0.3$

图 16 RT 模式土体剪切应变图
Fig.16 Soil shear strain cloud maps in RT-mode

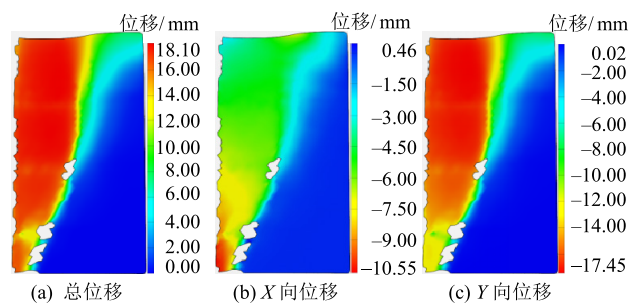


图 17 Soil shear strain and deformation in RT-mode
($B/H=0.6$)

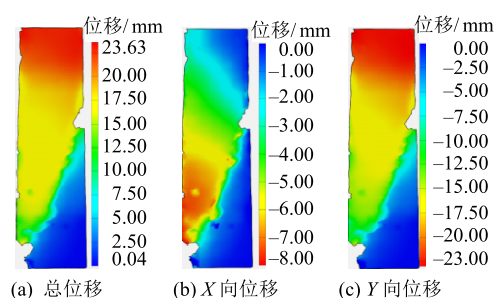


图 18 RT 模式土体剪切应变及变形特征图 ($B/H=0.3$)
Fig.18 Soil shear strain and deformation in RT-mode
($B/H=0.3$)

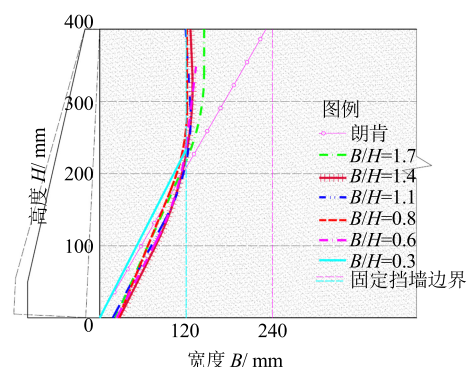


图 19 RT 模式不同 B/H 土体滑裂面特征
Fig.19 Characteristics of soil slip surface in RT mode with different B/H

(2) 当 $B/H < 0.35$ 时 ($B/H = 0.3$)，土体滑裂面为一经过移动挡墙墙踵、固定挡墙中部的斜线，滑裂区变形土体为直角梯形，土体变形特征与半无限土体也不同，其中 X 向位移土体范围增大，挡墙下半部分表现为土拱特征， Y 向位移沿竖直方面随土体深度逐步减小。

4 试验对比及讨论

4.1 不同变位模式滑裂面特征

分别选取半无限土体 ($B/H = 1.4$) 和有限宽度土体 ($B/H = 1.4$) 的主动滑裂面进行比较，图 20 为不同变位模式下 B/H 分别为 1.4、0.3 时的土体滑裂面特征对比。表 3 为不同变位模式有限宽度土体

主动滑裂特征汇总表, 其中滑裂顶宽 b 为移动挡墙至滑裂面顶点的水平投影长度。

半无限土体下 ($B/H=1.4$), T 模式滑裂面为经过墙踵斜线, RB 模式滑裂外沿线为由墙踵上部 $0.2H$ 为起点的斜线, RT 模式滑裂面则由下滑裂面 (墙踵斜线)、曲线 2 段组成, 滑裂角 α_1 均等于 $45^\circ + \varphi/2$ 。

有限宽度土体条件下 ($B/H=0.3$), 3 种模式的土体滑裂面与半无限土体明显不同, 其中 RB 模式、RT 模式滑裂面由于土体宽度减小截止与固定挡墙中部, T 模式滑裂面则呈现为“多折线”特征, 分别由奇数面 (滑裂角 α_1)、偶数面 (滑裂角 α_2)、奇数面 (滑裂角 α_1) ……组成, 起点为墙踵, 终点

位于土体表面。

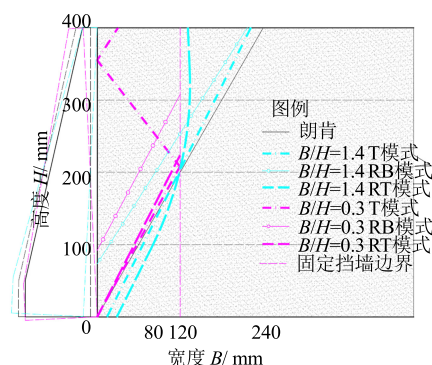


图 20 不同变位模式土体滑裂面特征

Fig.20 Characteristics of soil slip surface in different displacement modes

表 3 不同变位模式有限宽度土体主动滑裂面特征

Table 3 Characteristics of active slip surface of limited width soils in different displacement modes

模式	半无限土体			有限宽度土体		
	滑裂顶宽 b	滑裂面特征	滑裂角	滑裂顶宽 b	滑裂面特征	滑裂角
T 模式	$\geq 0.60H$	经过墙踵、土体表面的斜线	$\alpha_1 \approx 60^\circ$ ($45^\circ + \varphi/2 = 60^\circ$)	$< 0.60H$	经过墙踵、固定挡墙、移动挡墙的多段多折线	α_1, α_3 约为 60° α_2, α_4 约为 52°
RB 模式	$\geq 0.60H$	滑裂外沿线经过墙踵上部 $H/2$ 、土体表面的斜线	$\alpha_1 \approx 58^\circ \sim 62^\circ$	$< 0.60H$	滑裂外沿线经过墙踵上部 $H/2$ 、固定挡墙的斜线	$\alpha_1 \approx 58^\circ \sim 62^\circ$
RT 模式	$\geq 0.35H$	经过墙踵、土体表面, 由直线-曲线-直线组成	$\alpha_1 \approx 60^\circ \sim 64^\circ$	$< 0.35H$	经过墙踵、固定挡墙的斜线	$\alpha_1 \approx 60^\circ \sim 64^\circ$

4.2 与杨明辉滑裂面的对比

将本文试验结果与杨明辉试验结果进行比较, 两种试验均采用无黏性土, 试验土力学参数较为接近, 差别较大的为试验土体高度: 本文为 400 mm, 杨明辉试验为 1 300 mm。图 21 为本文 $B/H=0.3$ 、文献[10]中 $B/H=0.277$ 的不同变位模式的滑裂面特征, 结果比较如下:

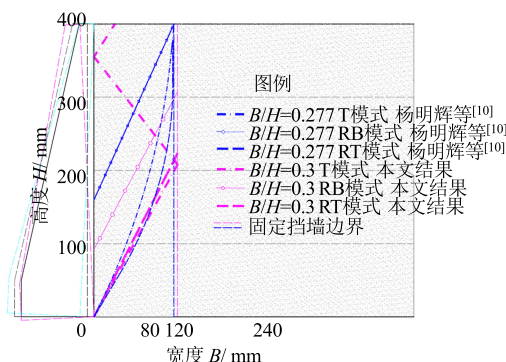


图 21 与杨明辉试验结果的比较

Fig.21 Comparison of the experimental results with those of Yang et al.

(1) T模式、RT模式下, 滑裂面均由墙踵为起点发展形成, 本文试验所获取的滑裂面为直线, 由于试验的移动挡墙位移较大, T模式滑裂面呈现为

多段折线, 而杨明辉滑裂面则具有明显的曲线特征, 初步分析原因认为, 本文试验采用的是光滑移动挡墙表面, 而杨明辉试验为粗糙表面。

(2) RB 模式下, 本文试验和杨明辉试验滑裂面特征相似, 但滑裂面发生的高度相差较大, 鉴于 RB 模式滑裂面具有多层次平行面特征, 无明显指导意义。

5 结 论

本文采用无黏性砂进行了刚性墙主动变位模式下有限宽度土体滑裂面特征模型试验, 利用数字图像相关法, 分析研究了 T 模式、RB 模式、RT 模式下不同宽高比 (B/H) 的土体滑裂面特征, 结论如下:

(1) 挡墙主动变位模式下半无限土体、有限宽度土体的宽高比界限值, T 模式、RB 模式为 $B/H \leq 0.6$, RT 模式 $B/H \leq 0.35$ 。

(2) T 模式, 半无限土体情况下, 滑裂面为经过墙踵的斜线, 有限宽度土体情况下, 滑裂面由多道相接的“多折线”组成, 按照滑裂角相似性可分为移动挡墙、固定挡墙发展滑裂面。

(3) RB 模式, 半无限土体情况下, 滑裂面起点位于墙踵上部 $0.2H$ 处, 顶部终点位于土体表面,

距离移动挡墙距离约 $0.35H$, 有限宽度土体情况下, 滑裂角与半无限土体相似, 滑裂面终点位于固定挡墙中部。

(4) RT 模式, 半无限土体情况下, 滑裂面由经过墙踵的下部斜线段滑裂面、上部曲线段组成, 有限宽度土体情况下, 滑裂角与半无限土体相近, 滑裂面终点位于固定挡墙中部。

(5) 有限宽度土体条件下, T 模式、RT 模式土体水平、竖向位移可观察到明显的土拱特征, 土拱边缘即为滑裂面。

参 考 文 献

- [1] FRYDMAN S, KEISSAR I. Earth pressures on retaining walls near rock faces[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(6): 586-599.
- [2] TAKE W A, VALSANGKAR A J. Earth pressures on unyielding retaining walls of narrow backfill width[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2001, 38(6): 1220-1230.
- [3] 马平, 秦四清, 钱海涛. 有限土体主动土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, (增刊 1): 3070-3074.
MA Ping, QIN Si-qing, QIAN Hai-tao. Calculation of active earth pressure for limited soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, (Suppl.1): 3070-3074.
- [4] 党发宁, 张乐, 王旭, 等. 基于弹性理论的有限位移条件下挡土墙上土压力解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2094-2103.
DANG Fa-ning, ZHANG Le, WANG Xu, et al. Analysis of earth pressure on retaining walls with limited displacement based on elastic theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(10): 2094-2103.
- [5] 王闰超, 晏鄂川, 陆文博, 等. 无黏性有限土体主动土压力解析[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2513-2520.
WANG Yan-chao, YAN E-chuan, LU Wen-bo, et al. Analytical solution of active earth pressure for limited cohesionless soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2513-2520.
- [6] 王洪亮, 宋二祥, 宋福渊. 紧邻既有建筑基坑有限土体主动土压力计算方法[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 76-81.
WANG Hong-liang, SONG Er-xiang, SONG Fu-yuan. Calculation of active earth pressure for limited soil between existing building and excavation[J]. **Engineering Mechanics**, 2014, 31(4): 76-81.
- [7] 徐日庆, 徐叶斌, 程康, 等. 有限土体下考虑土拱效应的非极限主动土压力解[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 362-371.
XU Ri-qing, XU Ye-bin, CHENG Kang, et al. Method to calculate active earth pressure considering soil arching effect under no limit state of clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(2): 362-371.
- [8] XIE M X, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Active earth pressure on rigid retaining walls built near rock faces[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2020, 20(6): 1-13.
- [9] 杨明辉, 吴志勇, 赵明华. 挡墙后有限宽度土体土拱效应分析及土压力计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 19-27.
YANG Ming-hui, WU Zhi-yong, ZHAO Min-hua. Soil arch effect analysis and earth pressure calculating method for finite width soil behind retaining wall[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2020, 47(3): 19-27.
- [10] 杨明辉, 戴夏斌, 赵明华, 等. 墙后有限宽度无黏性土主动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 131-137.
YANG Ming-hui, DAI Xia-bin, ZHAO Ming-hua, et al. Experimental study on active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(1): 131-137.
- [11] YANG M H, TANG X C, WU Z Y. Slip surface and active earth pressure of cohesionless narrow backfill behind rigid retaining walls under translation movement mode[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2020, 20(8): 1-11.
- [12] 方焘, 孙书翰, 徐长节, 等. 考虑挡墙变位模式的有限土体主动土压力试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(5): 1178-1185.
FANG Tao, SUN Shu-han, XU Chang-jie, et al. Earth pressure experimental study of limited soil considering the mode of displacement of retaining wall[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2019, 16(5): 1178-1185.
- [13] 万励, 张兴周, 王宇峰, 等. 无黏性有限土体主动破坏及土压力离散元分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3): 19-26.
WAN Li, ZHANG Xing-zhou, WANG Yu-feng, et al. DEM study on active failure and earth pressure of

- cohesionless soil with limited width behind retaining wall[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2019, 41(3): 19-26.
- [14] KHOSRAVI M H, PIPATPOMGSA T, TAKEMURA J. Experimental analysis of earth pressure against rigid walls under translation mode[J]. **Geotechnique**, 2013, 63(12): 1020-1028.
- [15] 应宏伟, 张金红, 王小刚, 等. 有限土体刚性挡墙平动模式被动土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 978-986.
- YING Hong-wei, ZHANG Jin-hong, WANG Xiao-gang, et al. Experimental analysis of passive earth pressure against rigid retaining wall under translation mode for finite soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(6): 978-986.
- [16] 史旦达, 毛逸瑶, 杨勇, 等. 基于 DIC 技术的砂土中圆形锚板上拔土体变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3201-3213.
- SHI Dan-da, MAO Yi-yao, YANG Yong, et al. Experimental study on the deformation characteristics of soils around uplift circular plate anchors using digital image correlation technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(10): 3201-3213.
- [17] 林鑫, 唐朝生, 程青, 等. 基于数字图像相关技术的土体干缩开裂过程研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1311-1318.
- 1311-1318.
- LIN Luan, TANG Chao-sheng, CHENG Qing, et al. Desiccation cracking behavior of soils based on digital image correlation technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(7): 1311-1318.
- [18] DAIKI T, NICOLAS L, JUN O, et al. Localised deformation in a wide-grained sand under triaxial compression revealed by X-ray tomography and digital image correlation[J]. **Soils and Foundations**, 2015, 55(4): 1-10.
- [19] 王崇宇, 刘晓平, 张家强, 等. 刚性挡土墙后有限宽度土体被动滑裂面特征试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 44(7): 1839-1849, 1860.
- WANG Chong-yu, LIU Xiao-ping, ZHANG Jia-qiang, et al. Experimental study on passive slip surface of limited width soil behind rigid wall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 44(7): 1839-1849, 1860.
- [20] 张常光, 单冶鹏, 高本贤, 等. 刚性挡墙位移土压力的数学拟合公式研究综述[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 19-30.
- ZHANG Chang-guang, SHAN Ye-peng, GAO Ben-xian, et al. State-of-the-art review on displacement-dependent earth pressure formulations of rigid retaining walls via mathematical fitting functions[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2020, 42(6): 19-30.

上接第 2924 页

- [7] DAVIS E H, BOOKER J R. The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays[J]. **Geotechnique**, 1973, 23(4): 551-563.
- [8] 涂园, 王奎华, 周建, 等. 有效应力法和有效固结压力法在预压地基强度计算中的应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 645-654.
- TU Yuan, WANG Kui-hua, ZHOU Jian, et al. Application of effective stress method and effective consolidation stress method for strength calculation in preloading ground[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(2): 645-654.
- [9] 李广信. 有效自重压力下预固结的三轴不排水试验[J]. 工程勘察, 2010(12): 1-4.
- LI Guang-xin. Undrained triaxial tests with pre-consolidation under effective overburden pressures[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2010(12): 1-4.
- [10] CRAIG R F. Soil mechanics[M]. 3rd ed. London: [s. n.], 1983.
- [11] KRABBENHOFT K. OPTUM G2: theory[M]. [S. l.]: [s. n.], 2019.
- [12] 宋二祥, 孔郁斐, 杨军. 土工结构安全系数定义及相应计算方法讨论[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 1-6.
- SONG Er-xiang, KONG Yu-fei, YANG Jun. Discussion of safety factor definitions and computation methods for geotechnical structures[J]. **Engineering Mechanics**, 2016, 33(11): 1-6.
- [13] 李贤杰. 深基坑坑底抗隆起验算方法及圆形基坑分析方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2020.
- LI Xian-jie. Calculation method for basal stability of deep excavation and analysis of circular foundation pit[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.