

刘三县, 龙祖惠, 刘晓红, 等. 填土宽高比及内摩擦角对刚性墙后有限土体主动滑裂面的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 587-594.

LIU Sanxian, LONG Zuhui, LIU Xiaohong, et al. Study on the influence of fill aspect ratio and internal friction angle on the active sliding surface of finite soil behind rigid walls[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 587-594.

# 填土宽高比及内摩擦角对刚性墙后有限土体主动滑裂面的影响研究

刘三县<sup>1,2</sup>, 龙祖惠<sup>2</sup>, 刘晓红<sup>1</sup>, 曾永庆<sup>1</sup>, 刘昱辰<sup>1</sup>, 王宇鑫<sup>1</sup>

(1. 湖南理工学院 土木建筑工程学院, 湖南 岳阳 414006;

2. 岳阳市规划勘测设计院有限公司, 湖南 岳阳 414000)

**摘要:** 刚性挡墙后有限宽度土体破坏模式不同于经典库仑理论, 滑裂面的位置及形式是影响土压力计算的重要因素。通过研究有限土体主动破坏模式研究, 为主动土压力理论研究提供依据。以 TT 模式为例, 利用自制模型, 开展无黏性土主动破坏试验, 利用数字图像法对试验过程中的土体图像进行采集和分析, 与数值模拟结果进行对比, 研究有限土体主动滑裂面特征。结果显示: 有限土体主动破坏滑裂面为经过墙踵的“折线”, 滑裂面与宽高比、内摩擦角有密切关系。结果表明: (1) 宽高比越小, 滑裂面折线段数越多, 土体起始破裂角越大, 滑裂面逐渐变陡, 有限土体临界宽高比  $n_{cr}=0.49$ 。(2) 内摩擦角越小, 折线段数越多, 滑裂面破裂角越小, 有限土体临界内摩擦角稍大于  $43.1^\circ$ 。(3) 有限土体主动土压力由滑裂面左侧“三角形”滑体产生, 小于库仑土压力的梯形滑裂楔体土压力。填土宽高比、内摩擦角是影响有限土体破坏模式的重要因素, 是界定墙后土体为有限或半无限状态不容忽视的考量指标。

**关键词:** 有限土体; 模型试验; 数值模拟; 主动破坏; 滑裂面

**DOI:** 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.093

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0587-08

## Study on the influence of fill aspect ratio and internal friction angle on the active sliding surface of finite soil behind rigid walls

LIU Sanxian<sup>1,2</sup>, LONG Zuhui<sup>2</sup>, LIU Xiaohong<sup>1</sup>, ZENG Yongqing<sup>1</sup>, LIU Yuchen<sup>1</sup>, WANG Yuxing<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering & Architecture, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, Hunan, China;

2. Yueyang City Planning Survey and Design Institute Co., Ltd., Yueyang 414000, Hunan, China)

**Abstract:** The failure mode of soil with limited width behind a rigid retaining wall differs from the classical Coulomb theory. Position and form of the slip surface are crucial factors affecting the calculation of earth pressure. This study investigates the active failure modes of limited soil to provide basis for the theoretical research on active earth pressure. Taking the TT mode as an

收稿日期: 2025-01-26

基金项目: 湖南省自然科学基金青年项目(2022JJ40160); 岳阳市规划勘测设计院有限公司校企研发项目(2024430607002014)

作者简介: 刘三县(1987—), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事岩土工程勘察、设计及科研工作。E-mail: 330224270@qq.com

通信作者: 刘晓红(1967—), 女, 教授, 博士, 主要从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: 840552192@qq.com

example, the study uses a self-made model to conduct active failure tests on cohesion soil. The digital image method is employed to collect and analyze the soil images during the testing process, and the result are compared with numerical simulation result to study the of the active slip surface in limited soil. The result show that the active failure slip surface in limited soil is a “broken line” passing through heel of the wall, and the slip surface is closely related to the width-to-height ratio and the internal friction angle. The result indicate that: (1) The smaller the width-to-height ratio, the more segments the slip surface has, the larger the initial rupture angle of the soil, and the steeper slip surface becomes. The critical width-to-height ratio for limited soil is 0.49. (2) The smaller the internal friction angle, the more the slip surface has, and the smaller the rupture angle of the slip surface. The critical internal friction angle for limited soil is slightly greater than 43.1°. (3) The active earth pressure in limited soil is generated by the “triangular” sliding mass on the left side of the slip surface, which less than the earth pressure of the trapezoidal sliding wedge in Coulomb’s theory. The width-to-height ratio and the internal friction angle of the fill are important factors affecting the failure mode of limited soil, and they are indispensable considerations for determining whether the soil behind the wall is in a limited or semi-infinite.

**Keywords:** limited soil; model test; numerical simulation; active failure; slip surface

## 0 引言

经典的土压力理论均假设边坡挡墙后填土为半无限土体, 且其破裂面为始于墙踵止于填土表面的平面。随着城市的快速发展, 在既有地下结构旁进行深基坑开挖, 此类有限土体变形及土压力问题无法找到合适的计算依据。库仑理论假设墙后填土为半无限土体, 且其破裂面为始于墙踵止于填土表面的平面<sup>[1-2]</sup>。挡墙临近既有地下结构(见图1)或岩体(见图2)的现象成为常态, 由于邻近地下刚性结构的隔断, 土体滑裂面不能延伸至地面, 无法形成经典土压力的假定滑裂面, 此时二者间的有限宽度填土称为有限土体, 其产生的土压力称为有限土压力。

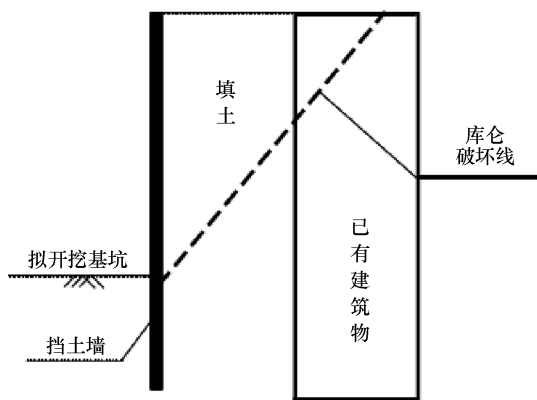


图1 拟建基坑与临近地下结构间的有限土体

很多学者针对有限土体主动破坏模式进行模型试验、数值模拟、理论分析等相关研究。

模型试验方面: 方焘等<sup>[3]</sup>利用无黏性砂土为填料, 开展了挡墙平动、绕墙顶及墙趾转动等3种变位模式(见图3)下的有限土体主动土压力分布特性研

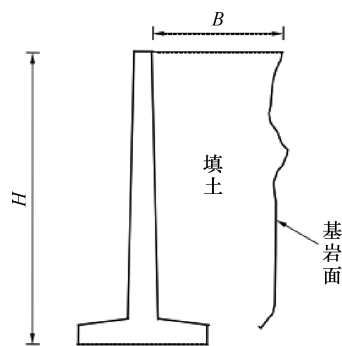


图2 挡墙与临近基岩间的有限土体

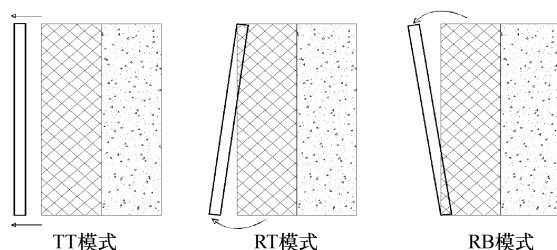


图3 挡墙三种变位模式示意

究, 试验表明, 宽度减小, 土体滑裂面由三角形变为梯形。夏明镏<sup>[4]</sup>开展了基坑地连墙后有限土体主动破坏模型试验, 获得了松散砂土主动破裂面形态特征, 滑动面以曲面形式呈现。FRYDMAN等<sup>[5]</sup>开展了离心模型试验, 对刚性挡墙和临近岩壁之间的有限土压力进行了研究。王崇宇等<sup>[6]</sup>利用模型试验装置, 开展松散砂土的主动破坏模型试验, 获得了三种变位模式下不同宽高比松散砂土主动破坏变形规律及破裂面形态特征, 得到了TT模式下松散砂土的滑裂面形态为“多折线”, 折线折返与固定挡墙和活动挡墙之间, 临界宽高比  $n_{cr} \leq 0.6$ 。杨明辉等<sup>[7]</sup>通过不同宽高比松散砂土的主动破坏模型试验, 获得了墙后松散砂土主动破裂面形态特征, 破坏面为连续曲面, 库仑土

压力理论不适用于有限土体。KHOSRAVI 等<sup>[8]</sup>基于模型试验及粒子图像测速技术, 获得了 TT 模式下挡墙后无黏性土的变形破坏特征及主动土压力分布规律。

数值模拟方面: 房凯等<sup>[9]</sup>利用 PFC2D 软件分析了有限土体的变形规律和土压力影响机理, 提出了在挡墙变位模式下有限土体主动土压力的计算方法。万励等<sup>[10]</sup>利用离散元方法进行建模分析, 获得了 TT 模式下墙后填土主动变形规律及破坏特征。张恒志等<sup>[11-13]</sup>采用离散元方法进行建模分析, 获得了三种挡墙变位模式下不同宽高比的松散砂土主动变形破坏特征及土压力分布规律, TT 模式下其临界宽高比约为 0.7。

理论分析方面: 刘新喜等<sup>[14]</sup>采用曲线薄层单元法, 研究了无黏性填土在平动模式下的滑裂面特征及主动土压力, 平动模式下有限土体的临界宽高比为 0.71。文献[15-21]分别对土体相互作用等条件进行了不同假定, 提出了不同的有限土体主动土压力理论计算方法。XU 等<sup>[22]</sup>通过 TT 模式下刚性挡土墙后填土的破坏特征和土压力研究, 土体宽度越小, 滑动面反射数量越多; 活动挡墙主动土压力小于库仑理论计算结果。张建成等<sup>[23]</sup>研究了轻量填土的主动土压力, 揭示了轻量土的主动土压力特性。邓波等<sup>[24]</sup>研究了平动模式下刚性墙后砂土的主动土压力及滑裂面特征。

上述研究表明, 有限土体与半无限土体在滑裂面形态、土压力分布等方面相差较大, 多数学者主要研究方向为有限土体临界宽高比的确定, 对折线型滑裂面及内摩擦角对滑裂面的影响研究较少。

本文通过无黏性砂土模型试验对 TT 模式下刚性挡墙后有限土体进行了主动破坏模式研究, 利用高频相机连续记录土体变形图像, 基于数字图像法(DIC)对土体的滑裂面剪切应变图进行分析, 得到不同宽高比、内摩擦角有限土体主动破坏滑裂面的破裂角、折线段数关系。利用数值模拟主动滑裂面进行对比分析。得到了填土宽高比及内摩擦角对刚性墙后有限土体主动滑裂面特征变化规律, 通过分析得到有限土体临界宽高比、内摩擦角。通过滑裂面受力平衡分析, 活动挡墙上的主动土压力由滑裂面左侧“三角形”滑体产生, 小于库仑土压力的梯形滑裂楔体土压力。《建筑基坑支护技术规程》推荐的经典库仑楔体滑面扩大了实际下滑土体, 墙后有限土体主动土压力实际值小于规范推荐库仑楔体计算值。本文成果进一步丰富了有限土体主动破坏滑裂面特性研究, 为有限土体

主动土压力静力平衡理论公式推导提供试验依据, 具有非常重要的理论价值和工程实践意义。

## 1 模型试验

### 1.1 试验装置

模型试验装置由填土箱、固定挡墙、活动挡墙、活动挡墙变位控制系统、图像采集与处理系统组成, 如图 4 所示。

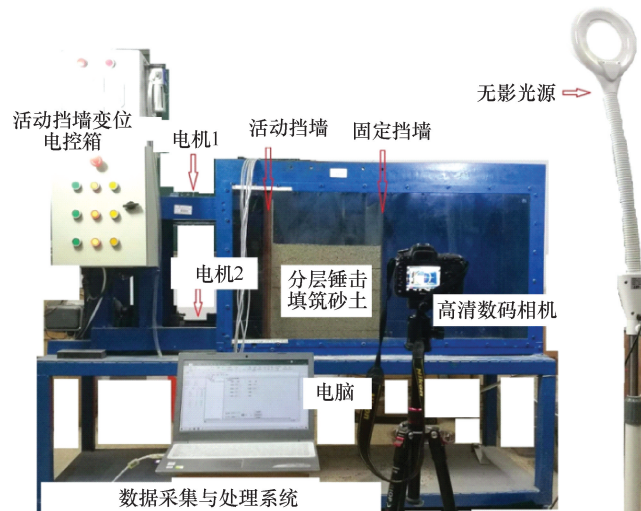


图 4 模型试验装置

填土箱为钢结构长方体, 其长 1 200 mm、宽 400 mm、高 700 mm, 箱体正面为透明钢化玻璃, 用于试验过程中观察和拍照。挡墙采用硬质钢板, 活动挡墙厚 16 mm。固定挡墙厚 12 mm, 箱内每隔 100 mm 设置固定卡位。

活动挡墙变位控制通过上、下两套性能相同的三相异步电机完成, 动力推进速度为 0.02 mm/s, 当上部电机 1 和底部电机 2 同时向左运动时, 可实现主动条件下的 TT 模式。图像采集与处理系统由高清数码相机、无影光源、计算机与数据采集处理软件等组成。

### 1.2 试验方案

为了探寻活动挡墙 TT 变位模式下填土内摩擦角、宽高比对有限土体变形破坏模式的影响规律, 设计了如表 1 所列的模型试验方案。如表 1 所列, 内摩擦角最小值 34.9°为试验砂土的自然休止角。

表 1 模型试验方案

填土内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	填土宽度 $B / \text{mm}$	填土高度 $H / \text{mm}$	宽高比 $n = B/H$
34.9	80、120、160、200、240	400	0.2、0.3、0.4、0.5、0.6
35.6	80	400	0.2
37.7	80	400	0.2
41.0	80	400	0.2
43.1	80	400	0.2

### 1.3 填料试验

本次试验所用砂土取自岳阳东洞庭湖,经清洗、晾晒、筛分后备用,填料粒径主要集中在 0.5~2 mm。为了减少模型试验过程中繁复的称重、计算等工作,获得不同密度填土的内摩擦角,在正式模型试验前,进行内摩擦角  $\varphi$  与密度  $\rho$  的关系试验,试验结果如表 2 所列。

对表 2 中数据进行拟合,获得砂土密度  $\rho$  与内摩擦角  $\varphi$  之间的关系式, $\rho$  随  $\varphi$  的增大而线性增大,相关度  $R^2=0.99$ ,二者高度线性相关。公式为

$$\rho = 0.037\varphi + 0.106, R^2 = 0.993 \quad (1)$$

### 1.4 试验方法

以内摩擦角 35.6°、宽高比为 0.2(宽为 80 mm,高为 400 mm)工况为例,介绍试验方法。

(1) 试验准备。将活动挡墙定位至初始位置,选择宽度为 80 mm 卡槽安装固定挡墙,形成长、宽、高分别为 400 mm、80 mm、400 mm 的长方体填土空间,该空间体积为 12 800 000 mm<sup>3</sup>。

(2) 砂土填筑。分 4 层填筑砂土,每一分层厚 100 mm。按(1)式计算内摩擦角为 35.6°的砂土密度为 1.423 g/cm<sup>3</sup>,每一分层砂土的体积。

(3) 砂土填筑。分 4 层填筑砂土,每一分层厚 100 mm。按(1)式计算内摩擦角为 35.6°的砂土密度为 1.423 g/cm<sup>3</sup>,每一分层砂土的体积  $V=12\ 800\ 000\ \text{mm}^3/4=3\ 200\ 000\ \text{mm}^3$ ,则每一分层砂土的重量  $G=3\ 200\ \text{cm}^3 \times 1.423\ \text{g/cm}^3=4\ 553.6\ \text{g}$ 。称取 4 553.6 g 砂土倒入第一分层,平整后在上方放置一块长、宽、高分别为 395 mm、75 mm、20 mm 载荷钢板,用 10 kg 重力锤连续冲击钢板直至钢板下边缘与 100 mm 厚度线平齐,移出钢板,用毛刷将第一分层表层刨毛,并在贴近玻璃处铺设一条黑色砂线。以此类推,之后三层也使用此方法铺设。最后一层表面对齐的厚度线为 400 mm。

(4) 试验进行。将高清相机、无影光源、计算机布设在合适的位置,相机拍摄频率设置为 0.5 s/张。关闭室内灯光及窗帘,营造室内暗室效果。打开相机开始拍摄,之后马上通过活动挡墙变位控制系统启动上、下 2 台电机,使活动挡墙在 TT 变位模式下产生位移直至墙后土体达到极限破坏状态。

(5) 试验结束准则。试验时活动挡墙位移控制值采用最大水平位移  $\Delta x \geq 0.02 H$ ,结束试验。

(6) 图像分析。将高清相机采集的照片导入 GOM-Correlate 分析软件中,获得墙后土体的剪应变云图及位移云图。

## 2 数值模拟

为了验证模型试验结果的合理性,进一步研究 TT 位移模式下挡墙后填土宽高比、内摩擦角对有限土体主动变形破坏及滑裂面形态特征的影响规律,本文采用 PLAXIS-2 D 有限元计算软件,按模型试验 1:1 比例进行建模分析。

### 2.1 基本假设与材料参数

本文数值建模的基本假设:活动挡墙和固定挡墙均为刚性挡墙且墙背竖直;活动挡墙、固定挡墙与土体间的摩擦角一致;墙后填土表面水平;按平面应变问题考虑。土体采用摩尔-库仑本构模型,两侧刚性挡墙采用线弹性模型。土体参数采用模型试验砂土参数,如表 3 所列,刚性挡墙参数如表 4 所列。

### 2.2 模型尺寸与网格划分

下面以宽高比为 0.2(宽为 80 mm,高为 400 mm)为例介绍模型尺寸及网格的划分。模型尺寸如图 5 所示,假设两侧墙体为刚性板,左侧为活动板,右侧为固定板。采用界面单元模拟和定义两侧挡墙与填土之间的相互作用;模型底部实施全约束,右侧固定挡墙约束  $X$  和  $Y$  方向,左侧活动挡墙约束  $Y$  方向。通过对活动板施加一个向左的 8 mm 水平位移,模拟墙后土体由静止状态转变为主动极限平衡状态的全过程。本文土体单元采用 15 节点的三角形单元,网格划分如图 6 所示。

## 3 结果与分析

### 3.1 有限土体主动滑裂面动态发展及形态特征

以内摩擦角  $\varphi=34.9^\circ$ 、宽高比  $n=0.2$  为例,展示活动挡墙 TT 变位模式下有限土体主动滑裂面的动态发展过程。有限土体主动滑裂面剪应变云图试验结果、模拟结果剪应变云图如图 7 所示。

对比图 7(a)、图 7(b)可知,有限土体主动变形破坏过程及形态特征试验结果与模拟结果基本一致,均为始于墙踵,往返于活动挡墙与固定挡墙之间,止于填土表面的折线。说明本文所建有限元模型是合理的。如图 7 所示,随着活动挡墙位移的增大,滑裂面自墙踵逐步斜向上方发展,因遇到固定挡墙的阻断

表 2 不同密度砂土的内摩擦角

密度 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^3$	1.41	1.45	1.47	1.50	1.53	1.62	1.67	1.70	1.72	1.73	1.73
内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	34.9	36.0	36.5	37.3	38.1	40.5	41.9	42.7	43.2	43.5	43.5

表 3 土体参数

粒径范围/mm	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	泊松比
0.5~2.0	14.1~17.2	3	34.9~43.1	0.3

表 4 挡墙参数

板材类型	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	抗弯刚度 $EI$ / $\text{N} \cdot \text{m}^2$	法向刚度 $EA/\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$	透水情况
刚性板	78.5	1 000 000	7 500 000	不透水

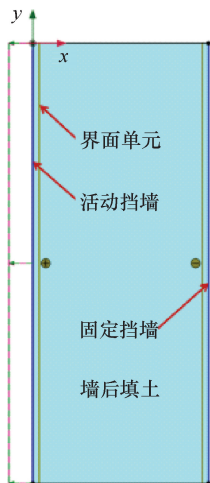


图 5 有限元模型

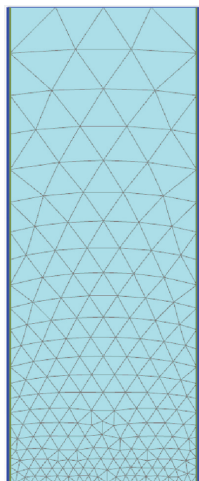


图 6 有限元网格

折向活动挡墙发展, 又因活动挡墙的阻断折向填土面发展, 最后形成连续贯通的折线型滑裂面, 土体达到

主动破坏状态。有限土体折线型滑裂面由 3 段组成, 第 1 段始于活动挡墙墙踵, 止于固定挡墙约 3/5 墙高处; 第 2 段, 始于固定挡墙约 3/5 墙高处, 止于活动挡墙约 4/5 墙高处, 同时第 1 段剪应变增大, 颜色变深; 第 3 段始于活动挡墙约 4/5 墙高处, 止于土体上表面, 同时第 1、2 段剪应变相应增大, 颜色相继变深。

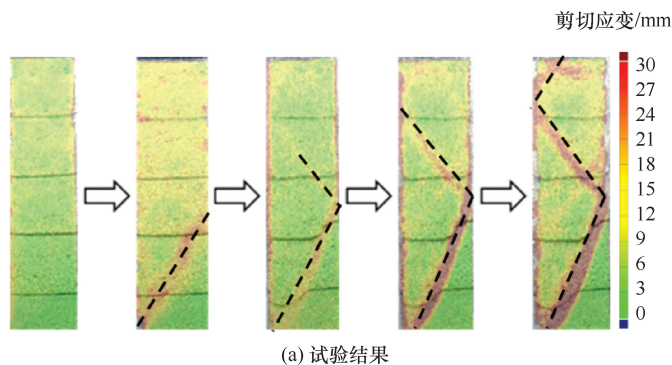
### 3.2 填土宽高比对主动滑裂面的影响

以内摩擦角  $34.9^\circ$  的填土为例, 探讨填土宽高比  $n$  对主动滑裂面的影响规律。不同宽高比主动滑裂面剪应变云图试验结果与模拟结果如图 8 所示。

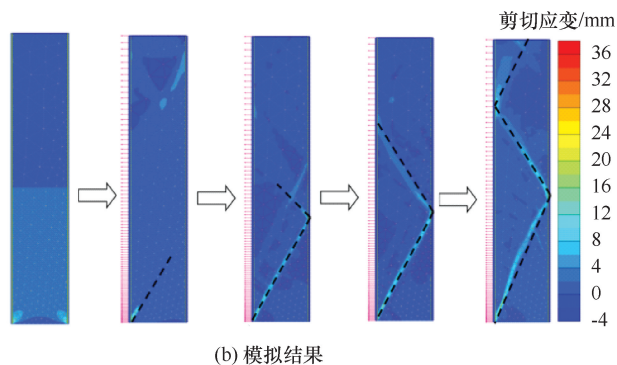
当内摩擦角一定时 ( $\varphi = 34.9^\circ$ ), 随填土宽高比  $n$  的增大, 滑裂面由折线逐渐转变为直线, 墙后土体由有限土体转变为半无限土体。 $n = 0.2$  时, 滑裂面为三段折线;  $n = 0.3、0.4$  时滑裂面为两段折线;  $B/H \leq 0.5$  时滑裂面为与填土表面相交的一条直线, 不与固定挡墙相交。可以推断, 内摩擦角为  $34.9^\circ$  时的有限土体临界宽高比大致为 0.49。

### 3.3 填土内摩擦角对主动滑裂面的影响

以填土宽高比  $n = 0.2$  为例, 探讨填土内摩擦角对主动滑裂面的影响规律。不同内摩擦角填土主动滑裂面剪应变云图试验结果与有限元结果如图 9 所示。

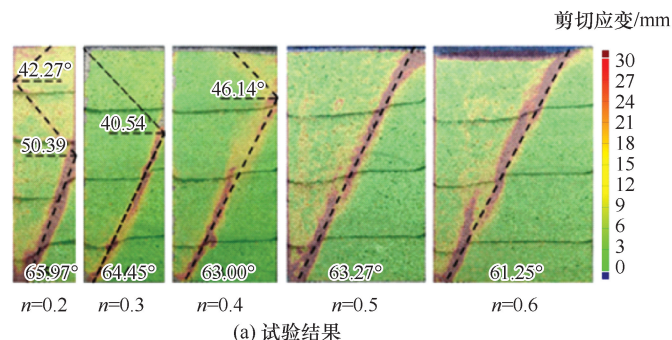


(a) 试验结果

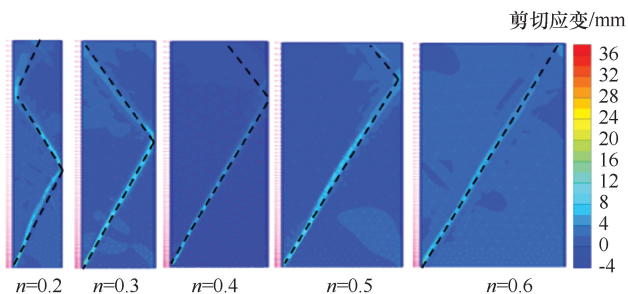


(b) 模拟结果

图 7 有限土体主动滑裂面动态发展过程 ( $\varphi = 34.9^\circ, n = 0.2$ )



(a) 试验结果



(b) 模拟结果

图 8 不同宽高比填土主动滑裂面形态特征 ( $\varphi = 34.9^\circ$ )

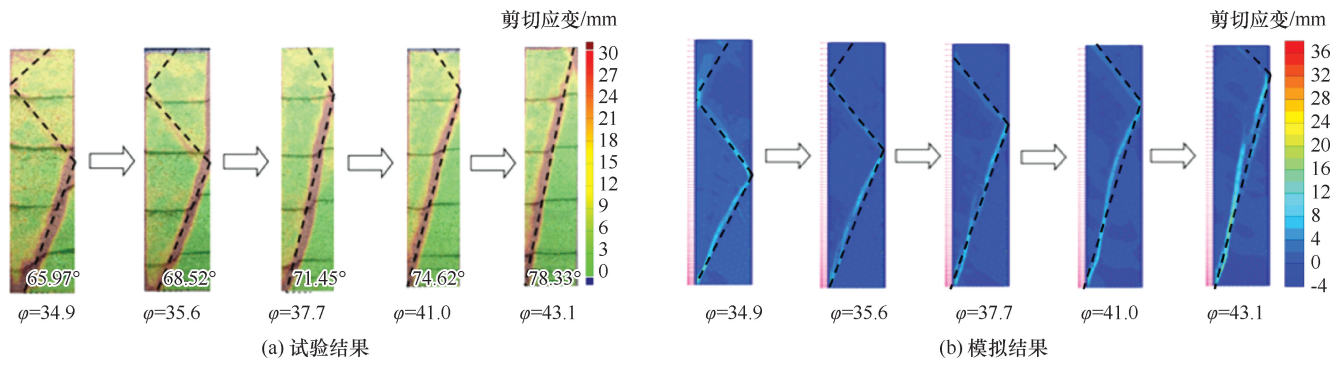


图9 填土内摩擦角对主动滑裂面的影响 ( $n=0.2$ )

填土宽高比一定时 ( $n=0.2$ ), 随内摩擦角  $\varphi$  的增大, 填土滑裂面由折线逐渐转变为直线, 墙后土体由有限土体逐渐转变为半无限土体; 有限土体折线型滑裂面段数随内摩擦角的增大而减小。内摩擦角  $\varphi = 34.9^\circ$  时, 滑裂面交于固定挡墙与填土表面角点处,  $\varphi = 34.9^\circ$  接近有限土体临界内摩擦角。

### 3.4 有限土体主动破坏位移特征

为了深入地探究有限土体的主动破坏机理, 经数值模拟, 获得了不同宽高比填土 (内摩擦角均为  $34.9^\circ$ ) 达到主动极限状态时的剪应变、总位移、 $X$  方向位移、 $Y$  方向位移云图 (见图 10)。

如图 10 所示, 滑裂面剪切应变与总位移、 $X$  方向、 $Y$  方向位移相吻合, 根据挡墙后填土位移云图,

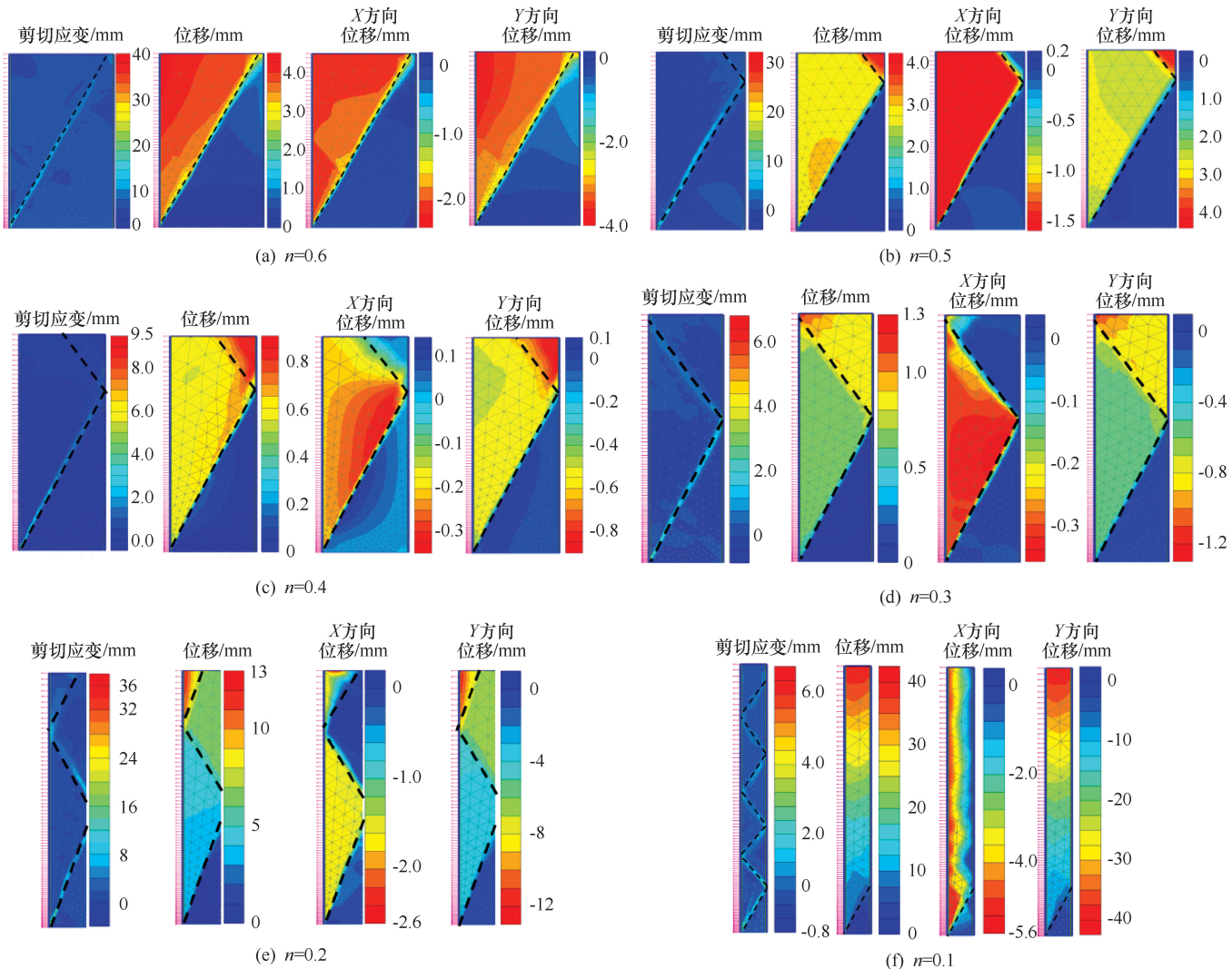


图 10 不同宽高比填土极限状态剪应变与位移云图 ( $\varphi = 34.9^\circ$ )

亦容易判断主动滑裂面所在位置及形态特征。当宽高比  $n \geq 0.6$  时, 墙后土体为半无限土体, 滑裂面与填土表面交点位于地表, 滑裂面为一条直线, 为经典库仑滑裂面; 当  $n \leq 0.5$  时, 墙后土体为有限土体, 其滑裂面为折线, 且折线的段数随宽高比  $n$  的减小而增多。当  $n = 0.3, 0.4, 0.5$  时, 滑裂面段数为 2 段; 当  $n = 0.2$  时, 滑裂面段数为 3 段; 当  $n = 0.1$  时, 滑裂面段数为 7 段; 有限土体与半无限土体滑裂面变形特性有明显区别。

由图 10 中  $X$  方向位移对比可知, 固定挡墙(右侧)底部和顶部深蓝色部分“三角形”土体未产生移动变形, 未产生主动土压力; 活动挡墙(左侧)上的主动土压力由滑裂面左侧“三角形”滑体产生, 小于库仑土压力的梯形滑裂楔体土压力。

由图 10 中  $Y$  方向位移对比可知, 当宽高比  $n \geq 0.6$  时, 右下角填土内部位移呈明显水平分层, 位移量呈线性变化; 当宽高比  $n = 0.4, 0.5$  时, 右下角填土内部位移呈平行滑裂面斜角度分层, 位移量呈线性变化; 当宽高比  $n \leq 0.3$  时, 右下角填土内部基本未产生位移。

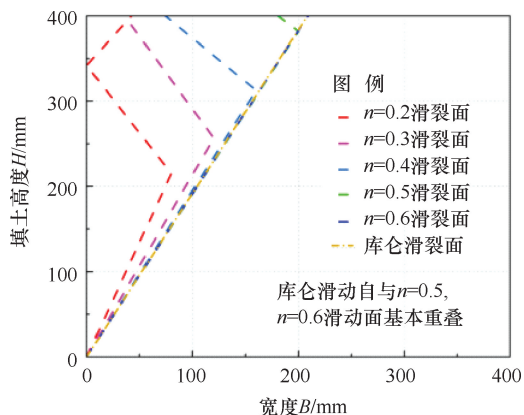
## 4 填土主动滑裂面对比分析

### 4.1 本文结果与库仑滑裂面对比

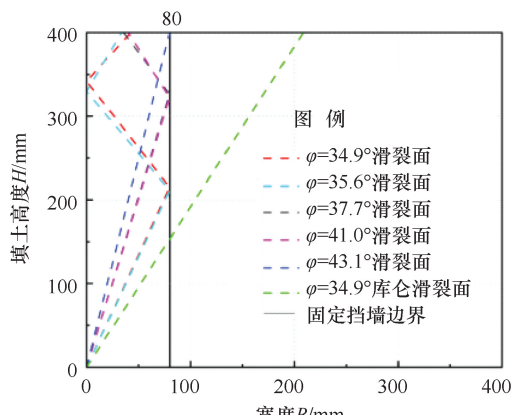
为了进一步分析填土宽高比  $n$  及内摩擦角对主动滑裂面的影响规律, 分别将不同工况下填土主动滑裂面及库仑滑裂面绘制在同一坐标系下, 如图 11 所示。图 11(a) 为内摩擦角一定时( $\varphi = 34.9^\circ$ ) 不同宽高比填土主动滑裂面及库仑滑裂面, 图 11(b) 为宽高比一定( $n = 0.2$ ) 时不同内摩擦角填土主动滑裂面及库仑滑裂面。

由图 11(a) 可知: (1) 内摩擦角不变时, 不同宽高比填土主动滑裂面均位于库仑滑裂面左侧, 当宽高比  $n \geq 0.5$  时, 填土滑裂面与库仑滑裂面趋于重合, 这说明有限土体滑裂体体积小于半无限土体, 有限土体土压力小于半无限土体。(2) 内摩擦角不变时, 随填土宽高比的减小, 折线型滑裂面段数逐渐增大, 且其第一段滑裂面倾角逐渐变陡。

由图 11(b) 可知: (1) 宽高比一定( $n = 0.2$ ) 时的有限土体, 其主动滑裂面均位于库仑滑裂面左侧。(2) 随填土内摩擦角的增大, 滑裂面由折线逐渐转变为直线, 墙后土体由有限土体变为半无限土体, 折线型滑裂面段数逐渐减小, 其第一段滑裂面倾角逐渐变陡, 且倾角均大于库仑滑裂面。



(a) 不同宽高比填土滑裂面与库仑滑裂面( $\varphi = 34.9^\circ$ )



(b) 不同内摩擦角填土滑裂面与库仑滑裂面( $n = 0.2$ )

图 11 不同工况下本文滑裂面与库仑滑裂面

### 4.2 本文与王崇宇主动滑裂面对比

为了验证本文结果的正确性, 将本文与王崇宇<sup>[6]</sup>主动滑裂面进行对比。二者均利用自制模型试验装置开展试验, 所用填料均为无黏性砂土, 填土参数较为接近。同一试验条件(宽高比为 0.2 的松散砂土)下二者主动滑裂面及库仑滑裂面如图 12 所示。

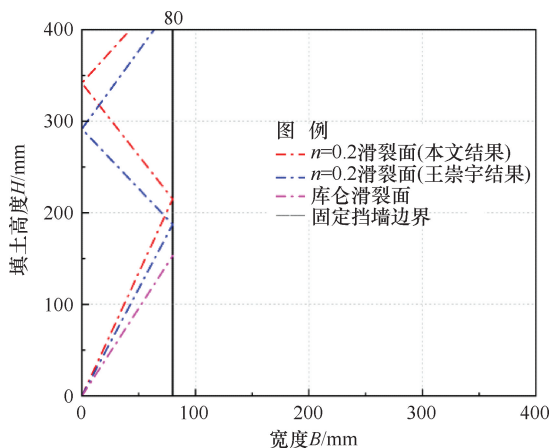


图 12 本文与王崇宇主动滑裂面( $n = 0.2$ , 松散砂土)

如图 12 所示,本文有限土体主动滑裂面与王崇宇结果较为接近,其发展趋势及形态特征基本一致,二者均为折线型滑裂面,均位于库仑直线型滑裂面左侧,折线型滑裂面第一段倾角均大于库仑滑裂面倾角。

## 5 结论

本文通过模型试验、数值模拟及对比分析等方法,研究了刚性挡土墙后有限土体主动变形破坏特征,主要结论如下:

(1)既有地下结构对土体存在“隔断”作用,限制了土压力的发展,滑裂面为经过墙踵的“折线”。有限土体主动破坏滑裂面特征与宽高比、内摩擦角有密切关系。

(2)填土宽高比对 TT 模式下主动滑裂面形态特征具有明显影响。主动破坏滑面由直线向折线转变,宽高比越小,滑裂面折线段数越多,土体起始破裂角越大,滑裂面越陡。内摩擦角  $34.9^\circ$  时的有限土体临界宽高比大致为 0.49。

(3)填土内摩擦角对 TT 模式下主动滑裂面形态特征具有明显影响。主动破坏滑面由直线向折线转变,内摩擦角越小,滑裂面折线段数越多,土体起始破裂角越小,滑裂面越平缓。宽高比 0.2 时的有限土体临界内摩擦角稍大于  $43.1^\circ$ 。

(4)固定挡墙底部和顶部深蓝色部分“三角形”土体未产生主动土压力;活动挡墙上的主动土压力由滑裂面左侧“三角形”滑体产生,小于库仑土压力的梯形滑裂楔体土压力。《建筑基坑支护技术规程》推荐的经典库仑楔体滑面扩大了实际下滑土体,墙后有限土体主动土压力实际值小于规范推荐库仑楔体计算值。

## 参考文献:

[1] 龚晓南. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[3] 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.

[4] 夏明镝. 基坑地连墙后有限土受力特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(2): 546-553.

[5] FRYDMAN S, KEISSAR I. Earth pressure on retaining walls near rock faces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(6): 586-599.

[6] 王崇宇, 刘晓平, 曹周红, 等. 刚性墙后有限宽度土体主动滑裂面特征试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 2943-2952.

[7] 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.

[8] KHOSRAVI M H, PIPATPONGSA T, TAKEMURA J. Experimental analysis of earth pressure against rigid retaining walls under translation mode[J]. Géotechnique, 2013, 63(12): 1020-1028.

[9] 房凯, 王硕, 刘念武. 临近基坑开挖条件下有限土体主动土压力分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(3): 1-10.

[10] 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.

[11] 张恒志, 徐长节, 何寨兵, 等. 基于离散元方法的不同挡墙变位模式下有限土体主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 257-267.

[12] 张恒志, 徐长节, 梁禄钜, 等. RB 模式下刚性挡墙有限土体主动土压力的离散元模拟与理论研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2895-2907.

[13] 张恒志. 不同挡墙变位模式下有限土体主动土压力的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.

[14] 刘新喜, 李彬, 王玮玮, 等. 基于主应力迹线分层的有限土体土压力计算[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1175-1186.

[15] 张振波, 周佳迪, 孙明磊, 等. 近接建基坑有限土体土压力计算方法探究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 2091-2102.

[16] 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.

[17] 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.

[18] AHMED S M, BASHA B M. Seismic active earth pressure on narrow backfill retaining walls considering strain localization[J]. Indian Geotechnical Journal, 2021, 51(6): 1263-1282.

[19] 岳树桥, 左人宇, 陆钊. 相邻基坑有限宽度土条主动土压力的计算[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2063-2069.

[20] 陈桥枫, 雷升祥, 赵伟, 等. 基于渐近法的城市近接地下空间有限土体土压力计算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(10): 3025-3034.

[21] 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.

[22] XU L, CHEN H B, CHEN F Q, et al. An experimental study of the active failure mechanism of narrow backfills installed behind rigid retaining walls conducted using Geo-PIV[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(9): 4051-4068.

[23] 张建成, 侯天顺, 刘浩钰, 等. 刚性挡土墙后轻量土主动土压力特性模型试验研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(6): 1397-1407.

[24] 邓波, 杨明辉, 赵明华. 主动平移模式下墙后非饱和砂土破坏模式及侧向土压力分布试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 94-102.

(责任编辑 王海锋)