

DOI: 10.11779/CJGE201601014

# 墙后有限宽度无黏性土主动土压力试验研究

杨明辉, 戴夏斌, 赵明华, 罗 宏

(湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 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。通过观察墙后不同宽度土体的破坏过程及对土压力的全程量测, 对其破坏模式及土压力分布规律进行了探讨。试验结果表明, 墙后有限宽度土体的破坏面为一连续曲面, 随着墙后土体宽度的增加, 土体破坏面逐渐向外侧偏移, 最终趋于某一固定位置, 但始终位于库仑破坏面内侧。土压力值监测表明, 库仑土压力理论并不适用于有限宽度土体。当填土宽度为有限宽度时, 土压力值小于库仑主动土压力值, 其差距随土体宽度减小而逐渐增大。当墙体平动时, 土压力值沿墙高先增大后减小; 墙体绕墙底转动时土压力值则呈线性增长趋势; 而当墙体绕墙顶转动时, 在挡墙土体上部出现了明显的土拱效应。

**关键词:** 主动土压力; 有限土体; 刚性挡墙; 破坏模式; 主动变位模式

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)01-0131-07

作者简介: 杨明辉(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事桩基础及特殊土路基工程研究。E-mail: yamih@hnu.edu.cn。

## Experimental study on active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall

YANG Ming-hui, DAI Xia-bin, ZHAO Ming-hua, LUO Hong

(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** An experiment is conducted to study the active earth pressure of cohesionless soil with limited width behind retaining wall in three different modes, which are translational motion, rotation around bottom and rotation around top. In the experiment, the failure modes of the soil and the distribution of the active earth pressure with different backfill widths are observed. The results show that the failure surface of the limited-width soil behind the retaining wall is a continuous one, which continuously moves to the outside and approaches a fixed position with the increase of the backfill width. But the failure surface of cohesionless soil is always located inside the Coulomb failure surface. Furthermore, the actual active earth pressure is less than that calculated by the Coulomb's theory, and the difference increases with the decrease of the backfill width, which indicates the Coulomb's theory is not applicable anymore for the backfilled soil with limited width. In addition, the motion patterns of retaining wall have great effects on the distribution of the active earth pressure. When the motion of retaining wall is translational, the earth pressure increases to a peak value first, then decreases with the increase of depth; when the retaining wall is rotating around the bottom, the earth pressure linearly increases with the increase of depth; and when it is rotating around the top, a significant earth arch effect is observed at the upper part of the retaining wall.

**Key words:** active earth pressure; limited backfill; rigid retaining wall; failure mode; active movement mode

## 0 引言

墙后土压力计算是岩土工程领域的基本课题之一。目前常用的土压力计算大多采用朗肯或库仑土压力理论, 但其前提是墙后土体为半无限土体。然而, 实际工程中, 墙后土体宽度有时并不满足该条件, 如商业密集区基坑挡土墙与邻近既有建(构)筑物、山区挡墙与墙后岩体等, 此时, 墙后土体破坏模式及土压力分布规律能否仍符合经典的朗肯或库仑土压力理论, 成为密切关注的问题。

目前, 针对墙后有限土体土压力计算尚缺乏公认合理的计算方法, 亦缺乏相应的规范指导<sup>[1]</sup>。但已有不少学者针对该问题展开了研究, 如 Frydman 等<sup>[2]</sup>采用谷仓土压力公式计算临近基岩面挡土墙的无黏性土主动和静止土压力; Greco<sup>[3-4]</sup>针对无黏性土提出多折线的土体破坏模式; 高印立<sup>[5]</sup>采用土体塑性上限理论

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278184, 50708030); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-194)

收稿日期: 2015-04-07

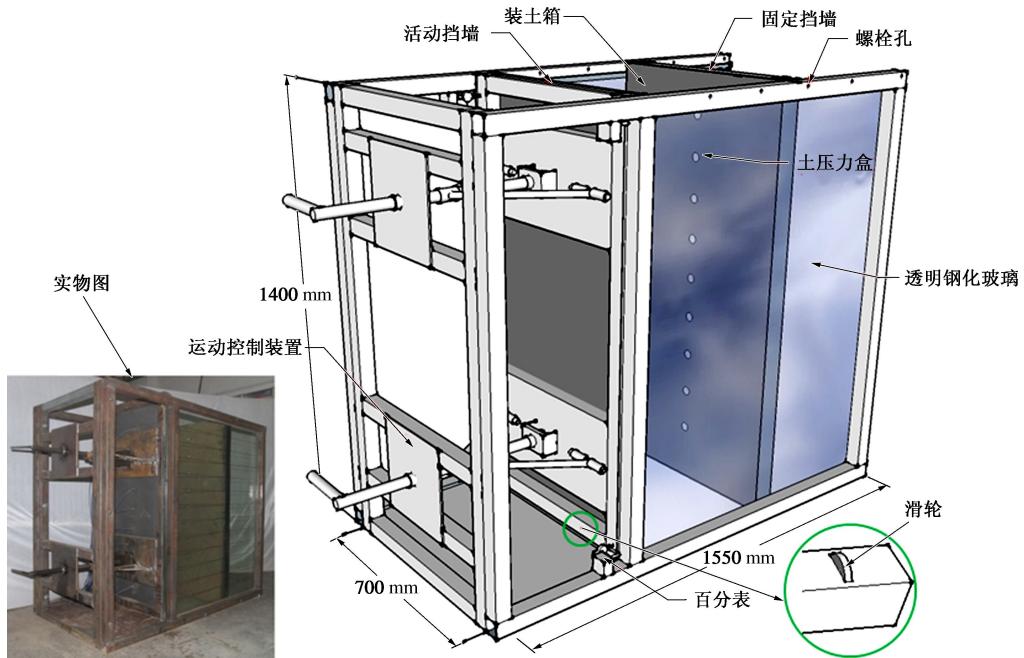


图 1 试验系统结构图

Fig. 1 Setup of testing system

研究了有限范围土体土压力分布规律, 分析了其与朗肯土压力理论差异; 马平等<sup>[6]</sup>考虑土黏聚力的影响, 认为有限土体承受主动土压力时, 其滑裂面仍满足直线, 但其剪切破坏角不为定值; 应宏伟等<sup>[7]</sup>采用有限元分析软件 ABAQUS, 对狭窄黏性填土刚性挡土墙的主动土压力问题进行了研究; 杨明辉等<sup>[8]</sup>分析了墙后有限土体的土拱现象, 由此建立了有限土体侧向土压力的求解方法, 但其基本前提仍假定土体破坏为直线破坏模式。

上述研究均为针对墙后有限土体土压力计算的理论分析或数值模拟, 仅从理论上阐明了有限土体土压力与常规土压力的差异, 仍有待试验或工程实测结果验证。可见, 开展墙后有限土体的试验工作, 对于明确有限宽度土体的土压力发挥机制及变化规律, 进一步完善土压力计算理论, 具有重要的理论价值与工程意义。鉴于此, 本文针对墙后有限宽度无黏性土体, 开展不同墙体变位模式和填土宽度的土压力室内模型试验, 从而深入分析墙后有限土体破坏模式及主动土压力分布规律, 以期为建立更为合理的有限土体土压力计算方法提供依据。

## 1 试验模型设计

采用自制的模型箱进行墙后有限宽度砂土的主动土压力试验。试验模型包括试验装土箱、挡墙运动控制系统和数据量测系统 3 个组成部分。

### 1.1 装土箱

试验箱体是由宽 50 mm 方钢焊接而成的箱型框架; 框架左侧为活动挡墙, 其移动量由墙后螺杆控制, 移动量大小由活动挡墙上下端安装的百分表测得; 框架右侧为固定挡墙, 通过改变其位置来控制墙后填土的宽度。其中活动挡墙和固定挡墙都为刚性挡墙。装土箱两侧为厚 20 mm 的透明钢化玻璃; 活动挡墙下面铺设一块木质垫板, 方便观察挡墙移动时墙后土体的破坏模式。装土箱内部尺寸为 1550 mm×700 mm×1400 mm (长×宽×高)。

为探讨不同变位模式对土体破坏及土压力分布的影响, 在活动挡墙底部开暗槽并安装滑轮, 然后通过运动控制装置进行精确侧移。同时, 将活动挡墙下面木质垫板右端厚度加高 10 mm, 以防止砂土从墙底漏出, 具体结构见图 1。

### 1.2 挡墙运动控制系统

Terzaghi<sup>[9]</sup>指出, 挡土墙主动土压力的分布受墙体变位模式的影响, 后来众多研究亦表明了这一点<sup>[10-16]</sup>。因此, 本次试验将模拟墙体平动、绕墙底转动及绕墙顶转动 3 种不同墙体变位模式。为此, 需对挡墙运动控制系统进行特别设计。

在装土箱左侧上下端安装两个螺杆, 用轴承将其固定; 螺杆右边套上槽钢, 然后焊接一个活动球头, 再将槽钢固定在活动挡墙上。同时, 在螺杆中间套上轴承, 活动挡墙上安装倾斜活动套, 用圆钢将二者连接起来, 形成能上下转动的三角支撑架, 见图 2。

操作时, 同速率转动上下螺杆, 模拟挡墙平动(以

下称 T 模式); 控制上螺杆转动速率为下螺杆 4 倍, 模拟挡墙绕墙底转动 (以下称 RB 模式); 相反, 控制下螺杆转动速率为上螺杆 4 倍, 模拟挡墙绕墙顶转动 (以下称 RT 模式), 见图 3。

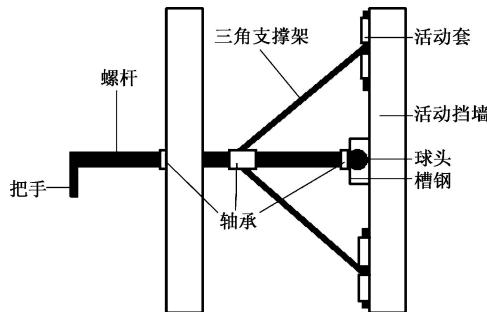


图 2 活动挡墙运动控制装置 (俯视图)

Fig. 2 Motion control device of active retaining wall (top view)

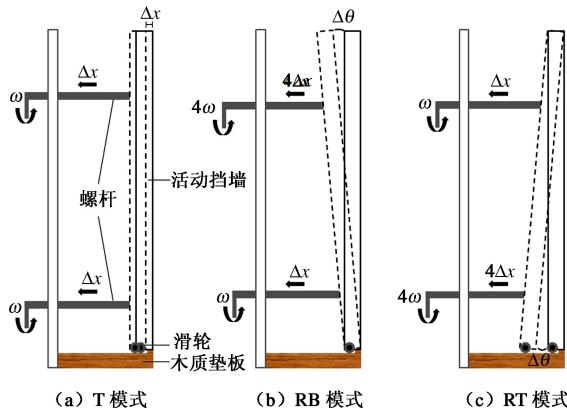


图 3 刚性挡墙变位模式

Fig. 3 Motion modes of rigid retaining wall

### 1.3 量测系统

试验过程中将改变两挡墙间距 (即改变墙后土体宽度) 及变位模式, 对挡墙上的土压力进行监测。为此, 在两挡墙上不同位置埋入一定量微型土压力盒, 具体布置见图 4。在活动挡墙的中线区域布置 9 个土压力盒; 水平方向布置了两个土压力盒, 用以考察土样与钢化玻璃间的摩擦效应消除情况。固定挡墙的中线区域对称布置了 9 个土压力盒。应注意的是, 土压力盒埋设过程中应采用先挖凹槽, 再埋设土压力盒的方法, 从而减少土压力盒对墙面平整度的影响。安置完毕后将土压力盒电缆线从凹槽侧边引出。

### 1.4 试验土样

为使问题简化, 本次试验将研究对象限定为无黏性土体, 土样基本力学参数:  $\rho=1.488 \text{ g/cm}^3$ ,  $w=0\%$ ,  $d_s=2.56$ ,  $\varphi=32.75^\circ$ ,  $e=0.679$ 。为方便观察土体的破坏模式, 砂体铺设时以黄、绿、红循环分层设色 (每层厚度 100 mm), 如图 5 所示。铺设好的土样静置 2 d,

使土样在自然状态下压实。

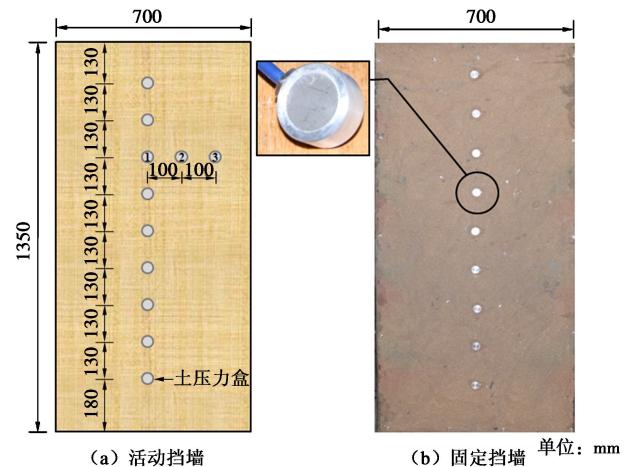


图 4 土压力盒布置示意图

Fig. 4 Layout of earth pressure cells



图 5 砂体铺设方式

Fig. 5 Laying pattern of sand

### 1.5 试验步骤

- (1) 用内外墙水性色浆将土样染色, 然后将其放置烘箱 24 h 后取出, 揉碎冷却至常温。
- (2) 将土压力盒黏贴在设计位置, 引出电缆线, 用玻璃胶将孔洞塞实。
- (3) 用 502 胶水将布置土压力盒的墙面黏满试验土样, 保证挡墙表面的粗糙度。
- (4) 将固定挡墙移至距活动挡墙最小间距处, 通过螺栓将其固定。
- (5) 在挡墙与装土箱侧壁的缝隙间涂抹适量橡皮泥, 以确保试验过程中砂土不会漏出。
- (6) 在装土箱的侧壁均匀涂抹一定厚度润滑油, 减少土样与侧壁的摩擦。
- (7) 将土样分层装入模型箱。
- (8) 控制挡墙平行移动, 记录此时主动土压力强度沿墙高的分布数值, 并记录百分表数值, 同时观测

土样破坏过程及最终状态。

(9) 撤去螺栓, 移动固定挡墙, 将里面的砂移至箱外。

(10) 重复以上步骤, 开展平动模式下活动挡墙与固定挡墙其它间距时的土压力试验。

(11) 开展绕墙底转动及绕墙顶转动两种模式下的土压力试验, 观察试验土体破坏及土压力变化规律, 并记录数据。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 边界效应消除情况

为了考察试验中边界效应的消除效果, 表 1 为同一水平线布置的土压力盒 (编号 #1、#2、#3, 见图 4) 在不同墙体变位模式下的实测数据。由表可知, 三者读数相差很小, 从而保证采用挡墙中线上土压力盒的读数来代表挡墙所受土压力的合理性。

表 1 同一深度在不同墙体变位模式下的土压力值

Table 1 Values of earth pressure at same depth under different wall motion modes

填土宽度/m	编 号	T 模式下土 压力强度测 试值/kPa	RB 模式下土 压力强度测 试值/kPa	RT 模式下土 压力强度测 试值/kPa
0.16	#1	1.3005	1.3414	1.2048
	#2	1.2894	1.3200	1.1945
	#3	1.2795	1.2999	1.1856
0.36	#1	1.6084	1.6774	1.6091
	#2	1.5956	1.6568	1.5589
	#3	1.5846	1.6324	1.5648

### 2.2 不同宽度填土体破坏模式

根据库仑土压力公式, 对本次试验砂土, 要满足半无限土体的条件, 其宽度  $B$  应大于 877 mm, 因此, 为分析对比有限土体与无限土体的差异, 本次墙后土体宽度设置为 160, 360, 560, 760, 960 mm 五档, 其中间距为 960 mm 时, 墙后土体可视为半无限土体。

#### (1) T 模式

显然, 当活动挡墙平行移动时, 墙后土体将出现滑动破坏, 俯视整个墙后土体, 可见土体出现明显的整体下沉, 说明试验采用的消除边界效应的措施是成功的, 见图 6。因此, 通过侧面透明玻璃观察到的土体移动形态可视为整个土体的破坏模式。

由于砂土分层设色, 从装土箱的侧面可明显观测到破坏面, 如图 7 (b) 所示。为方便比较, 将不同宽度的砂土破坏面汇总至图 7 (a)。由图可知, 砂土的破坏面始终为通过墙踵的连续曲面, 随着墙后土体宽度的增加, 土体破坏面逐渐外移, 但宽度增加至一定

值后 (本试验为 560 mm), 破坏面趋于固定。同时可以看出, 砂土的破坏面始终位于库仑破坏面内侧, 表明砂土破坏面的宽度小于库仑主动土压力理论假设的宽度, 而当墙后填土为有限宽度时, 二者的差距更大。此外, 随着填土宽度的减小, 破坏面的剪切破坏角逐渐增大, 这与文献[6]的结论一致; 当填土宽度为半无限时, 破坏面基本和库仑破坏面相切。

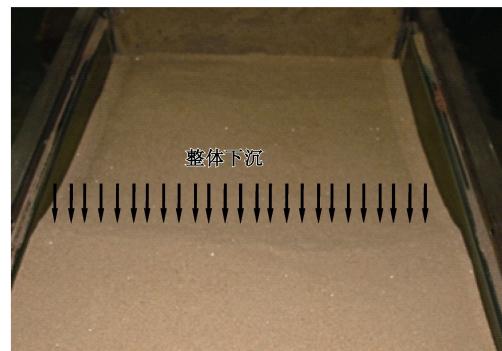


图 6 砂体整体下沉

Fig. 6 Integral settlement of sand

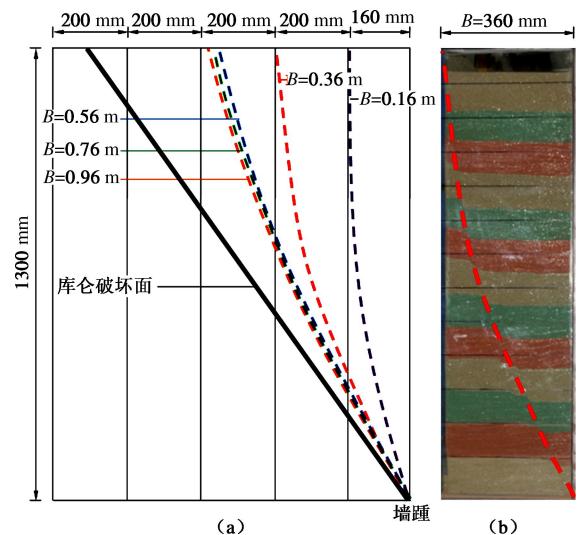


图 7 T 模式下土体破坏模式

Fig. 7 Failure mode of soil in T mode

#### (2) RB 模式

图 8 为 RB 模式墙后土体的破坏模式。由图可知, 当填土宽度较小时, 破坏面近似为不通过墙踵的局部平面, 随着填土宽度的增大, 破坏面逐渐转变为通过墙踵的平面, 亦趋于某一稳定位置, 但仍位于库仑破坏面内侧, 且大于 T 模式下的破坏宽度。其剪切破坏角始终大于库仑土压力理论假设的数值。

#### (3) RT 模式

图 9 为 RT 模式墙后土体的破坏模式。由图可知, 砂土的破坏面亦为通过墙踵的连续曲面, 位于库仑破坏面的内侧, 但与前两种变位模式不同, 其上部都为

一接近竖直的平面, 这与 Terzaghi<sup>[16]</sup>的试验结果一致。随着填土宽度的增大, 破坏面趋于某一固定位置。当填土宽度为半无限时, 破坏面宽度小于 T 模式下的宽度。

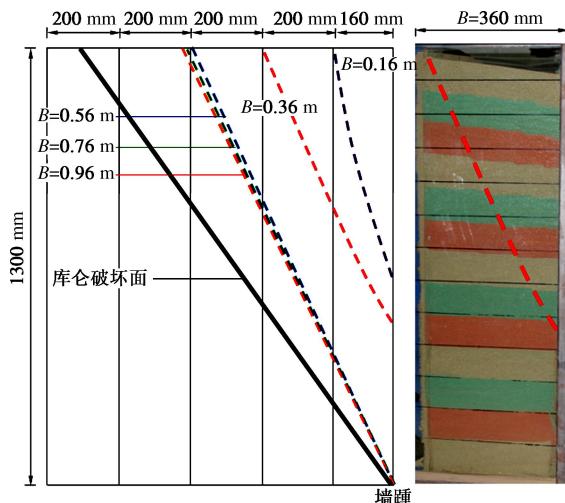


图 8 RB 模式下土体破坏模式

Fig. 8 Failure mode of soil in RB mode

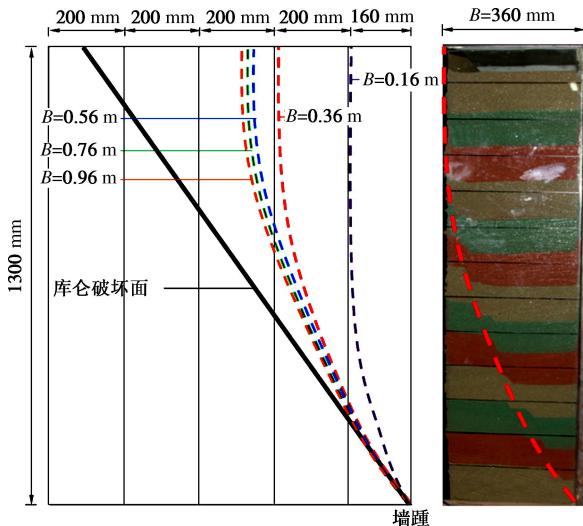


图 9 RT 模式下土体破坏模式

Fig. 9 Failure mode of soil in RT mode

综上可知, 3 种变位模式下的土体破坏面宽度大小为: RB 模式最大, T 模式次之, RT 模式最小。但无论是哪种变位模式, 经典的库仑主动土压力理论均夸大了砂土的破坏面宽度, 而对于有限宽度土体, 其差别更大。

值得注意的是, Greco<sup>[3]</sup>针对无黏性土提出的多折线破坏模式, 本次试验未观察到。

### 2.3 活动挡墙上主动土压力分布规律

试验过程中, 对不同变位模式下, 挡墙上不同深度处的主动土压力进行了量测, 并与经典土压力理论

进行对比。考虑到墙背粗糙度对主动土压力影响较大, 因此本文选用考虑该因素的库仑土压力理论与本次试验结果进行对比分析; 同时应注意, 本次试验土压力盒测得的是主动土压力在水平方向上的分力, 因此对比时, 根据库仑理论计算得到的土压力值需乘以  $\cos\delta$  ( $\delta$  为墙背与填土的摩擦角)。

#### (1) T 模式

如图 10 所示, T 模式下, 当墙后土体为有限宽度时, 挡墙上水平土压力呈非线性鼓形分布, 水平土压力大小随深度先逐渐增大, 在距墙底约  $H/4$  处达到最大值, 而后逐渐减小, 其值明显小于库仑土压力值(最大处差值达 128%)。而随着填土宽度的增大, 挡土墙水平土压力逐渐增大; 当填土宽度  $B=560 \text{ mm}$  时, 挡墙上水平土压力已接近于库仑土压力, 其分布曲线上半段基本重合于库仑土压力线, 下半段则分布于库仑土压力线两侧。

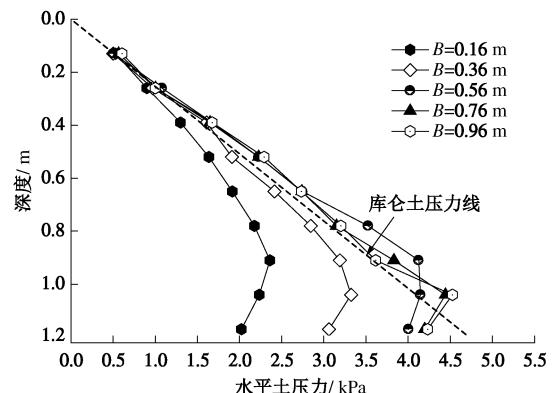


图 10 T 模式下不同填土宽度水平土压力分布

Fig. 10 Distribution of lateral earth pressure with different widths of backfill in T mode

#### (2) RB 模式

该模式下水平土压力强度沿墙高接近线性分布, 随着深度的增加逐渐增大, 并无明显的极值点; 当土体宽度逐渐增加时, 挡墙上水平土压力值逐渐接近于库仑土压力值, 见图 11。表明, 选用库仑土压力理论计算 RB 模式下墙后半无限砂土主动土压力, 误差相对较小。

#### (3) RT 模式

图 12 为 RT 模式下的土压力强度沿墙高分布图。由图可知, 该模式下, 在土体宽度为有限宽度时, 土压力分布呈现出与 T 模式类似的鼓形分布, 但随着土体宽度的增加, 其分布呈现“R”字形, 其原因在于随着土体宽度的增大 ( $B \geq 0.56 \text{ m}$  时), 在墙后出现明显的土拱效应, 从而导致水平土压力分布的变化, 这与徐日庆等<sup>[14]</sup>的试验结果相吻合。而对比破坏曲线可

以看出, 随着土体宽度的增大, 在竖直破坏面深度范围内, 挡墙上水平土压力值大于库仑土压力值, 而在竖直破坏面以下部分, 水平土压力值则小于库仑土压力值。

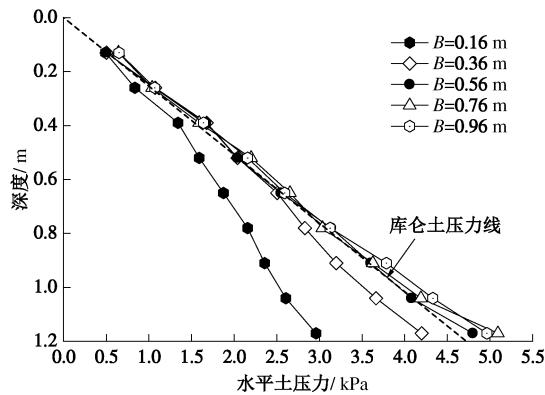


图 11 RB 模式下不同填土宽度水平土压力分布

Fig. 11 Distribution of lateral earth pressure with different widths of backfill in RB mode

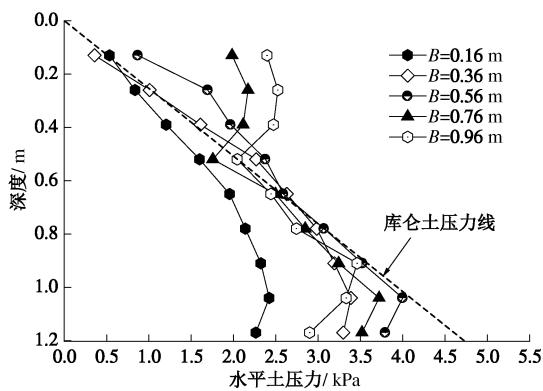


图 12 RT 模式下不同填土宽度水平土压力分布

Fig. 12 Distribution of lateral earth pressure with different widths of backfill in RT mode

#### (4) 不同变位模式对比

为对比不同变位模式下的水平土压力差异, 图 13 列出了同一宽度下的水平土压力分布。由图可见, 在不同模式下, 挡土墙水平土压力分布有着明显差异。其中 T、RB 两种模式下活动挡墙上的水平土压力分布线比较接近, 仅在靠近墙底处, RB 模式下活动挡墙上的水平土压力值大于 T 模式下的土压力值。

当墙后土体为有限宽度时, RT 模式和 T、RB 模式下的水平土压力分布线基本重合。而当宽度增大至一定值后, 填土内将产生明显土拱效应, 使得 RT 模式下的水平土压力呈“R”字形分布, 挡墙上半部分的水平土压力值明显大于 T、RB 模式下的土压力值, 而下半部分则小于 T、RB 模式下的土压力值。

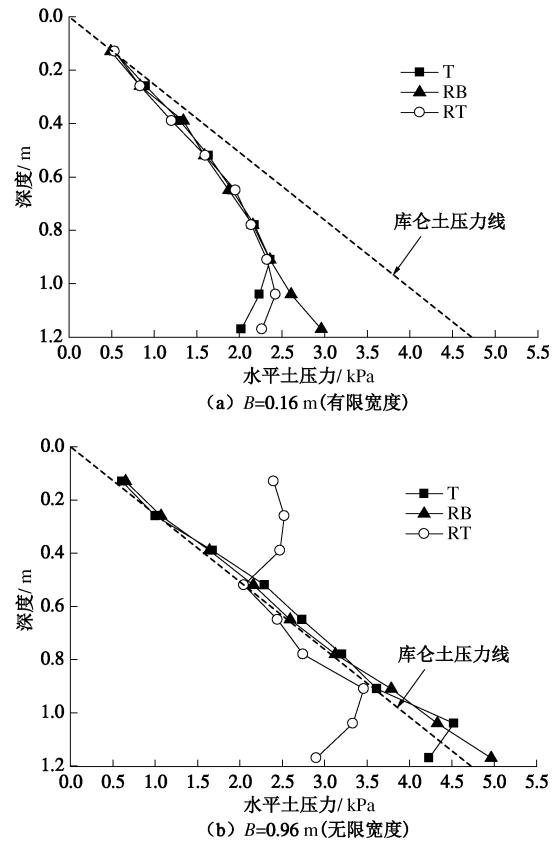


图 13 不同模式下水平土压力对比

Fig. 13 Comparison of lateral earth pressures in different modes

### 3 结 论

基于自制试验设备, 对不同变位模式下墙后有限宽度无黏性土体主动土压力进行了试验研究, 并与经典土压力理论进行了对比分析, 得出主要结论如下:

(1) 墙后有限宽度砂土的破坏面为一连续曲面, 经典的库仑土压力理论所假设的破坏面夸大了其破坏宽度; 当墙体平动及绕墙顶转动时, 破坏面始终通过墙踵, 但当墙体绕墙底转动时, 土体宽度较小时破坏面为不通过墙踵的局部破坏面。

(2) 当墙体平动时, 有限宽度砂土土压力值沿墙高先增大后减小; 墙体绕墙底转动土压力值则呈线性增长趋势; 而当墙体绕墙顶转动时, 在挡墙上部出现了明显的土拱效应, 土压力值呈“R”字形分布, 该规律随土体宽度增加愈加明显。

(3) 当填土宽度为有限宽度时, 墙后主动土压力值小于库仑主动土压力值, 其差值随着填土宽度的减小而逐渐增大, 表明库仑土压力理论并不适用于有限宽度土体。

本文仅针对墙后有限宽度无黏性土的主动土压力规律进行了分析, 而对于黏性土的相关规律仍有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 2002. (GB 50007—2002 Code for design of building foundation[S]. 2002. (in Chinese))
- [2] FRYDMAN S, KEISSAR I. Earth pressures on retaining walls near rock faces[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1987, **113**(6): 586 – 599.
- [3] GRECO V. Active thrust on retaining walls of narrow backfill width[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **50**: 66 – 78.
- [4] GRECO V. Analytical solution of seismic pseudo-static active thrust acting on fascia retaining walls[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, **57**: 25 – 36.
- [5] 高印立. 极限分析法计算有限范围土体土压力[J]. 建筑结构, 2001, **17**(8): 66 – 68. (GAO Yin-li. Calculation of finite earth pressure by limit analysis[J]. Building Structures, 2001, **17**(8): 66 – 68. (in Chinese))
- [6] 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, **27**(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, **27**(S1): 3070 – 3074. (in Chinese))
- [7] 应宏伟, 朱 伟, 黄 东, 等. 狹窄黏性填土刚性挡墙主动土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊1): 13 – 18. (YING Hong-wei, ZHU Wei, HUANG Dong, et al. Active earth pressures against rigid retaining walls with narrow cohesive backfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 13 – 18. (in Chinese))
- [8] 杨明辉, 汪罗成, 赵明华. 有限土体主动土压力计算的土拱效应分析[J]. 建筑结构, 2013, **43**(2): 71 – 75. (YANG Ming-hui, WANG Luo-cheng, ZHAO Ming-hua. Calculation of active earth pressure for finite soils based on the soil arching theory[J]. Building Structure, 2013, **43**(2): 71 – 75. (in Chinese))
- [9] TERZAGHI K. Large retaining wall tests[J]. ASCE Transaction, 1941, **106**(67): 68 – 80.
- [10] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static earth pressure with various wall movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, **112**(3): 317 – 333.
- [11] FANG Y S, CHEN T J, WU B F. Passive earth pressures with various walls movements[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, **120**(8): 651 – 659.
- [12] 周应英. 桥用刚性挡土墙的土压力模型试验研究[J]. 国外公路, 1987, **7**(3): 14 – 17. (ZHOU Ying-ying. Model test study of the earth pressure on the rigid retaining wall used in bridges[J]. Journal of Foreign Highway, 1987, **7**(3): 14 – 17. (in Chinese))
- [13] 周应英, 任美龙. 刚性挡土墙后主动土压力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(2): 19 – 26. (ZHOU Ying-ying, REN Mei-long. Experimental study of the active earth pressure on rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(2): 19 – 26. (in Chinese))
- [14] 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 rigid wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2002, **24**(5): 569 – 575. (in Chinese))
- [15] 李兴高, 刘维宁. 挡墙上作用土压力和水土压力的测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **24**(12): 2149 – 2154. (LI Xing-gao, LIU Wei-ning. Study on measurements of earth pressure and water-soil pressure acting on retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **24**(12): 2149 – 2154. (in Chinese))
- [16] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley, 1943.