

DOI: 10.11779/CJGE202104006

# 邻近地层损失对地下挡土结构土压力与地表沉降影响 试验研究

芮 瑞<sup>1</sup>, 翟玉新<sup>1, 2</sup>, 徐杨青<sup>3</sup>, 何 清<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040;  
3. 中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘 要:** 城市浅层空间隧道往往从一侧或两侧地下挡土结构物之间穿过, 多数情况下会引起地层损失。目前城市地下开挖引起塌陷事故呈现逐年增多的趋势, 当地层损失产生后, 周边已建或在建基坑挡土结构的土压力和地层沉降发展规律是决定是否需要加固或处理的依据。为了获取地层损失的扰动影响规律, 开发了模型试验装置与钢棒相似土技术, 采用活动门下沉模拟地下开挖引起的地层损失, 采用挡墙平移模拟基坑开挖。分别考虑活动门深度与宽度比、活动门位置深度与距离比、活动门位置深度与侧限宽度比, 开展了 15 组二维模型试验。利用挡土板上的 18 块悬臂式载荷计测得挡土结构土压力, 采用粒子图像测速技术获取表面沉降曲线。结果表明: 地层损失会使邻近基坑挡墙上部土压力增加, 下部土压力减小; 地层损失发生后, 邻近的新建基坑如继续进行开挖施工, 由于土体受到了充分的扰动, 挡土结构底部不会出现土压力减小的箱槽效应, 挡墙平移达到主动极限状态时的土压力分布与库仑主动土压力较为吻合; 邻近地下开挖引起地层损失与挡墙平移的叠加效应影响下, 地表沉降最大值和曲线曲率随活动门宽度增加而增加, 随活动门距离和侧限宽度减小而增加。由于采用钢棒相似土, 所获得的研究成果主要反映砂土地层的土压力与变形特性。

**关键词:** 隧道开挖; 地层损失; 挡土结构; 表面沉降; 模型试验; 相似土

**中图分类号:** TU431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)04-0644-09

**作者简介:** 芮 瑞(1981—), 男, 安徽黄山人, 教授, 博士生导师, 主要从事地基处理、岩土工程加固技术方面的研究与教学工作。E-mail: r.rui@whut.edu.cn。

## Experimental investigations on influences of ground loss on earth pressure and settlement of adjacent underground retaining structures

RUI Rui<sup>1</sup>, ZHAI Yu-xin<sup>1, 2</sup>, XU Yang-qin<sup>3</sup>, HE Qing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China; 3. Wuhan Design & Research Institute Co., Ltd. of China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Underground excavations often pass through underground retaining structures on one side or between the structures. In most cases, ground loss will be caused. At present, there are more and more collapses caused by excavation. When the ground loss occurs, the development of earth pressure and ground settlement is the decision basis for structural reinforcement or treatment. To obtain the preliminary rules of disturbance influences of the ground loss, the model test setup and the steel rod analogical soil technology are developed. A trapdoor is used to simulate the stratum loss caused by underground excavation and collapse, and the foundation pit excavation is simplified as the translation of the retaining wall. Considering the ratios of trapdoor depth to width, trapdoor depth to distance and trapdoor depth to side limit width, 15 groups of two-dimensional model tests are carried out. The earth pressure of retaining structures is measured by 18 cantilevered loaders on the retaining plate, and the surface settlement curve is obtained by the particle image velocimetry. The results show that ground loss increases the earth pressure at the upper part of the retaining wall and decreases the earth pressure at the lower part of the retaining wall. After the occurrence of the ground loss, if the adjacent foundation pit continues being excavated, due to the disturbance of the soil, there is no “bin effect” of the decrease of the earth pressure at the bottom of the retaining structures, and the earth pressure distribution when the retaining wall translation reaches the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51208403, 51708438)

收稿日期: 2020-07-01

\*通信作者 (E-mail: xyq@zh-geo.com)

active limit state is in good agreement with the Coulomb's active earth pressure. Under the influences of the superposition effect of the translation of the retaining wall after the ground loss caused by the adjacent underground excavation, the maximum value of surface settlement and the curvature of curve increase with the increase of trapdoor width, and increase with the decrease of trapdoor distance and side limit width. Due to the use of steel rod analogical soil, the test results mainly reflect the earth pressure and deformation characteristics of the sandy soil.

**Key words:** tunnel excavation; ground loss; retaining structure; surface settlement; model test; analogical soil

## 0 引言

进入 21 世纪以来,伴随中国城市化进程的不断加快,人多地少的矛盾愈加突显。开发与利用地下空间不仅可以缓解地面交通压力,还能增加商业价值。因此,地下空间的开发利用日趋受到重视,2016 年 5 月住房城乡建设部编制了《城市地下空间开发利用“十三五”规划》,多个城市也在“十三五”规划中对此进行了专项布局。在此背景下,开发利用地下空间是地上地下协调发展走集约化城市建设道路的必然选择。

城市地铁隧道一般设置在市政道路下方,当其一侧或两侧存在深基坑挡土结构物时,是典型的有限土体宽度条件下的地下开挖问题。该问题存在两种工况,即隧道穿越邻近既有挡土结构物和隧道穿越在建基坑的情况。

地下隧道开挖尤其是在诱发塌陷的情况下会引起地层的较大扰动,随着国内城市地铁工程建设的推进,近年来由于隧道开挖引起的地面塌陷事故有增加的趋势。以广州市番禺区广州大道南等地段为例,2012 年至今公开报道可查的塌陷超过 5 次。2019 年 12 月,该地段一条地铁横通道矿山法施工时发生两次塌陷。2019 年 5 月,青岛地铁发生开挖塌陷事故,全线停工整顿后,当年 7 月有再次发生直径 10 m 的塌陷。2019 年 7 月,深圳地铁一号线宝体站至坪洲站区间暗挖段发生地表下沉。2019 年 12 月,厦门地铁吕厝站 10 号缓建口附近发生坍塌,发生约 500 m<sup>2</sup> 塌陷。

地面塌陷往往会造成较大的人员和经济财产损失,在城市浅层地下空间中进行地下开挖及其诱发地层塌陷的情况短期内还不能避免。那晓云等<sup>[1]</sup>基于对城市道路两侧建筑物中地基附加应力分布的分析,从力学角度提出了城市路面塌陷的内在机理。宋二祥等<sup>[2]</sup>针对广州某盾构施工岩溶场地地面连续两次塌陷事故,梳理工程场地条件及塌陷过程,对首次塌陷、局部地面冒浆及二次塌陷进行了定性的机理分析与数值模拟。张成平等<sup>[3]</sup>采用理论分析和数值模拟揭示了城市隧道施工诱发地面塌陷的灾变机制及其演化规律,在此基础上提出了城市隧道施工过程中地面塌陷的控制技术。地下开挖不可避免地会引起周边土体的变形,引起周边挡土结构土压力的变化,乃至诱发地面沉陷、基坑垮塌、周边建筑物损伤以及地下管线等城市生命

线工程破坏<sup>[4]</sup>。

Peck<sup>[5]</sup>通过对大量的表面沉降数据和有关工程资料进行分析后,得到表面沉降槽呈似正态分布的结论,并提出表面沉降分布和地表最大沉降量的估算公式。Bryson<sup>[6]</sup>、Jenck 等<sup>[7]</sup>通过数值模拟建立了隧道开挖对周边建筑影响的计算模型。徐中华等<sup>[8]</sup>基于上海外滩 596 地块项目紧邻地铁 9 号线隧道工程实例,研究发现,隧道开挖会使基坑挡土结构产生位移,基坑开挖会使隧道发生隆起。张治国等<sup>[9]</sup>引入椭圆化非等量径向土体位移控制模式,将邻近管线视为 Euler-Bernoulli 梁,同时将层状地基土体视为弹性层状地基模型,提出了层状地基中隧道开挖引起邻近管道纵向变形的位移控制边界元与有限元耦合分析方法。施成华等<sup>[10]</sup>应用随机介质理论,分析了桐油山连拱隧道浅埋段开挖引起的沿隧道纵横向的地表移动与变形,推导了复杂隧道开挖横断面的简化计算公式,并探讨了隧道开挖对地表住宅楼的影响。

对于侧限条件下地下隧道开挖对已建地下挡土结构物的影响方面,即第一种工况。前期采用自制的二维模型试验装置开展了研究,通过活动门模拟隧道开挖或地层塌陷引起的地层损失,得到了挡土结构土压力变化规律,并给出了表面沉降的改进 Peck 法修正公式<sup>[11]</sup>。对于第二种工况,尤其当地下开挖产生超量的地层损失后,邻近基坑继续在扰动土层中进行施工的工况,采用同一试验装置开展了试验。试验中将地下开挖产生的地层损失采用活动门下沉进行模拟,对扰动地层中继续进行基坑开挖时的挡土结构土压力分布变化以及地层沉降的影响规律进行了探讨。

## 1 模型试验装置与试验安排

### 1.1 模型试验装置

如图 1 所示,开发了二维挡土结构土压力与活动门模拟试验装置,该装置由活动门位移控制组件、挡土板位移控制组件、测力板、填料箱与外框架组成。填料箱的最大尺寸 800 mm×665 mm(宽×高),试验采用退火 201 不锈钢椭圆钢棒相似土填料,以消除前后挡板的摩擦影响,相似土的使用大大提高试验测试的准确性和可重复性。椭圆形钢棒相似土由短轴×长轴分别为 5 mm×10 mm、4 mm×8 mm、3 mm×6 mm

3 种尺寸 (A, B 和 C) 的椭圆钢棒按照质量比为 1 : 1 : 1 均匀混合而成。

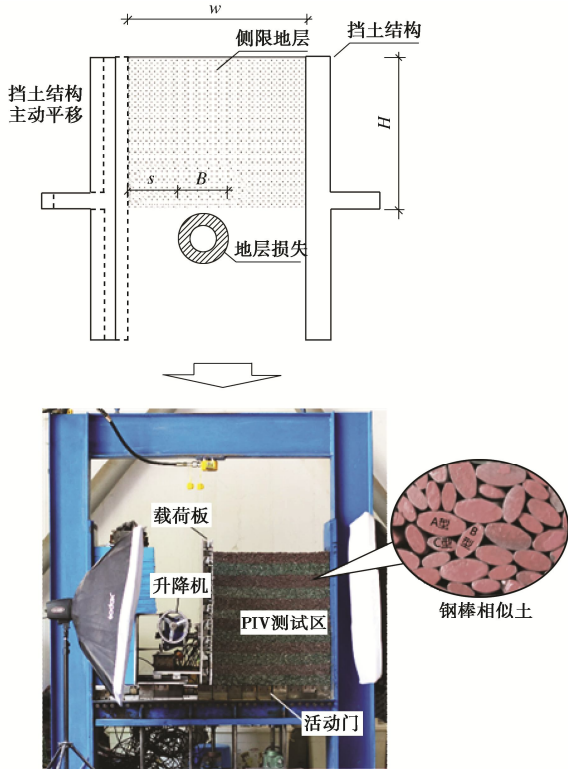


图 1 简化边界条件与试验装置实现图

Fig. 1 Simplified boundary conditions and test setup

分层填筑并充分振动后, 钢棒相似土达到最密实状态, 孔隙率约为 0.17, 对应重度为 65.93 kN/m<sup>3</sup>。对其进行了双轴压缩试验, 试验所得应力 - 应变关系曲线与密实砂土特性相似, 能较好的反映砂土的峰值强度与剪胀性, 验证了钢棒相似土与砂填料的相似性, 通过休止角试验测得相似土休止角为 28.2°<sup>[12]</sup>。

活动门位移控制组件由 10 块钢质活动板和升降机等组成, 每块活动板宽 75 mm, 可通过螺栓连接到

下方的位移控制组件以模拟地下开挖引起的地层损失。拍摄过程照片并采用粒子图像测速 (PIV) 技术<sup>[13]</sup>获取全场位移。挡土板上安放了 18 块悬臂梁式载荷计组成的测力板, 可以测量传递到挡土板上的土压力。

隧道开挖变形在断面分布存在不均匀性, 通过活动门试验证明, 不均匀分布的影响在高度达到活动门顶面 1.5 倍活动门宽度时逐渐消失<sup>[16]</sup>。

1.2 试验安排

选择侧限宽度  $w$ , 活动门距离 (活动门边缘至一侧挡墙)  $s$ , 活动门宽度  $B$  作为试验影响参数。其中侧限宽度  $w$  取 600, 450, 300 mm, 活动门距离  $s$  取 225, 150, 75 mm, 活动门宽度  $B$  取 225, 150, 75 mm。活动门深度  $H$  对于各组试验均取为 600 mm, 试验安排见表 1。

试验主要探讨了两种工况, 即邻近地层损失 (如地下开挖、塌陷等) 对地层的扰动及其引起的地下挡土结构土压力变化, 以及在地层损失扰动的地层中在建地下结构继续施工的影响。试验采用活动门下沉模拟隧道开挖引起的地层损失, 采用刚性挡墙平移的方式模拟基坑开挖支护结构的位移。

试验开始前, 调节挡土板位置至设定的侧限宽度。分层填筑钢棒, 每层填筑完毕后记录载荷计数值, 再进行下一层的填筑, 直至达到指定高度。填筑结束后, 先控制活动门下降, 每移动 0.01 mm 即采集一张图像, 并记录相应的载荷计数据。当下降距离达到 40 mm 时停止下移, 各组活动门下沉的地层损失率  $V_1$  见表 1。随后, 再用手轮控制挡土板背离土体产生平移 (主动模式), 每移动 0.01 mm 同样采集一张图像, 记录相应载荷计数据, 直至平移距离达到 40 mm 时终止试验。

表 1 试验安排

Table 1 Test arrangements

编号	活动门深度 $H$ /mm	侧限 宽度 $w$ /mm	活动门宽度 $B$ /mm	活动门距离 $s$ /mm	$H/w$	$H/B$	$H/s$	$V_1$
W1	600	600	75	225	1	8	2.67	0.68
W2	600	600	75	150	1	8	4	0.68
W3	600	600	75	75	1	8	8	0.68
W4	600	600	150	225	1	4	2.67	0.34
W5	600	600	150	150	1	4	4	0.34
W6	600	600	150	75	1	4	8	0.34
W7	600	600	225	150	1	2.67	4	0.23
W8	600	600	225	75	1	2.67	8	0.23
W9	600	450	75	150	1.3	8	4	0.68
W10	600	450	75	75	1.3	8	8	0.68
W11	600	450	150	150	1.3	4	4	0.34
W12	600	450	150	75	1.3	4	8	0.34
W13	600	450	225	75	1.3	2.67	8	0.23
W14	600	300	75	75	2	8	8	0.68
W15	600	300	150	75	2	4	8	0.34

## 2 试验结果

### 2.1 侧限条件下的静止土压力分布规律

以试验 W3、W10 和 W14 为例, 探讨不同侧限宽度  $w$  下挡墙静止土压力的分布规律, 见图 2。图中, 对深度  $z$  做标准化处理。将实测结果与不考虑摩擦影响的 Jaky 法<sup>[15]</sup>和考虑两侧箱体摩擦效应影响的 Janssen 法<sup>[16]</sup>计算结果进行对比。

从图 2 可以得到, 挡土墙静止土压力随埋深基本呈线性分布, 埋深较大时出现偏离线性分布的情况, 大小介于 Jaky 公式和 Janssen 公式(墙土摩擦角取为  $\varphi=28.2^\circ$ ) 计算值之间。侧限宽度  $w$  较小时, 接近于接近考虑两侧摩擦影响的 Janssen 公式计算值。

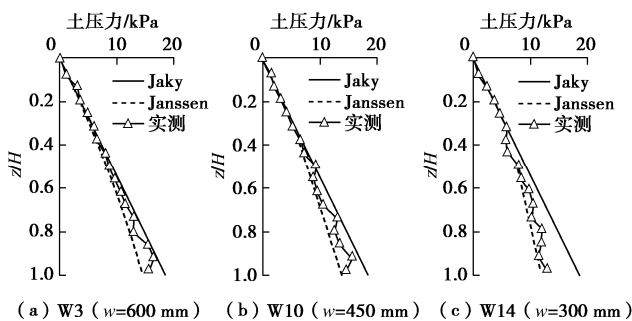


图 2 静止土压力分布

Fig. 2 Distribution of earth pressure at rest

### 2.2 地层损失对邻近挡土结构土压力的影响

以试验 W3、W10 和 W14 为例, 不同侧限宽度  $w$  下, 活动门下沉后挡墙与静止土压力相比的增量分布如图 3 所示。

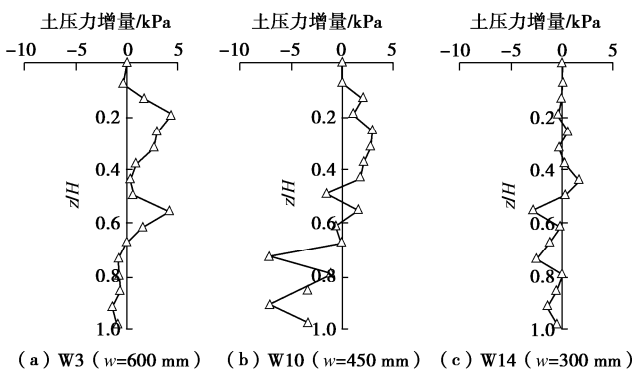


图 3 地层损失后的挡墙土压力分布

Fig. 3 Distribution of earth pressure after ground loss

从图 3 可以得到, 邻近地下开挖引起地层损失后, 会导致基坑挡土结构上部土压力增加, 3 组试验相比静止土压力分别增大 31.6%, 39.8%, 9.7%, 平均增加率 27%, 下部土压力减小, 3 组试验相比静止土压力分别减小 6.1%, 23.1%, 11.2%, 平均减小率 13.5%, 存在一个转折点。随着侧限宽度的减小, 上部荷载增加的数值减小, 与两侧摩擦影响的叠加有关。

### 2.3 扰动土体中基坑开挖过程土压力分布规律

#### (1) 挡墙平移过程土压力变化规律

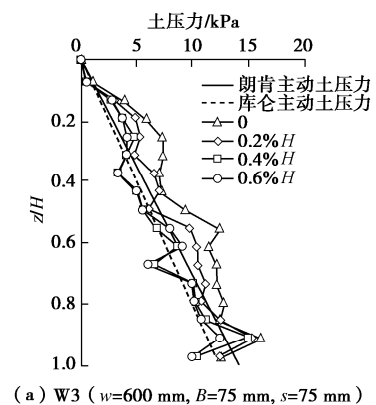
挡土墙背离土体发生主动位移过程, 墙后填土会由非极限状态逐渐过渡到主动极限状态, 芮瑞等<sup>[12]</sup>采用相同的椭圆钢棒相似土探讨了侧限填土无地下开挖扰动情况下挡墙主动位移模式下土压力的变化规律, 结果表明挡土墙的位移量为  $0.4\%H$  时, 达到主动极限状态的特征更显著。

以试验 W3、W10 和 W14 为例, 探讨邻近地层损失后继续基坑开挖时挡土板上作用的土压力随深度的关系, 取位移量为  $0.2\%H$ ,  $0.4\%H$ ,  $0.6\%H$ , 如图 4 所示。取朗肯主动土压力、库仑主动土压力进行对比。库仑主动土压力系数  $K_{a,k}$  按下式计算:

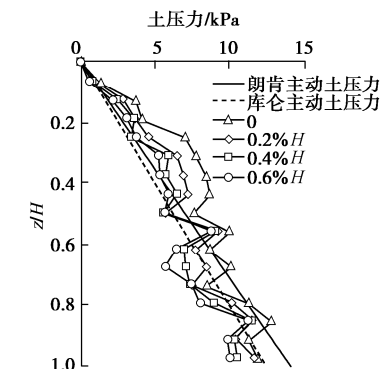
$$K_{a,k} = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\alpha + \delta) \cdot \left[ 1 + \frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cos(\alpha - \beta)} \right]^2} \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为墙背与竖直线的夹角, 取  $\alpha=0$ ;  $\beta$  为墙后填土面倾角, 取  $\beta=0$ ;  $\delta$  为墙土外摩擦角,  $\varphi$  为土体内摩擦角, 由于外墙和相似土材料均为钢, 因此  $\delta$  和  $\varphi$  均取为钢棒相似土的休止角  $28.2^\circ$  <sup>[12]</sup>。

从图 4 可以看出, 地层损失后, 随着挡墙位移量的增加, 挡土墙土压力逐渐减小, 位移量达到  $0.4\%H$  时, 实测土压力接近考虑墙土摩擦效应的库仑主动土压力。



(a) W3 ( $w=600$  mm,  $B=75$  mm,  $s=75$  mm)



(b) W10 ( $w=450$  mm,  $B=75$  mm,  $s=75$  mm)

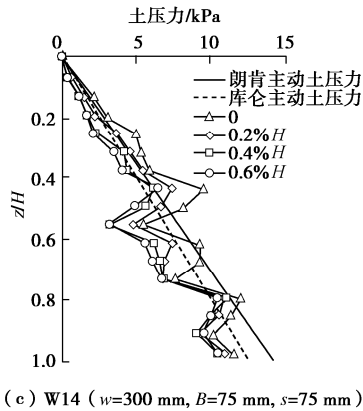


图4 挡墙平移过程中土压力分布

Fig. 4 Distribution of earth pressure during translation

## (2) 挡墙平移过程中剪应变分析

采用粒子图像测速技术 (PIV) 得到了墙后相似土填料位移, 绘制剪应变等值线图。图 5 列出了试验 W3、W10 和 W14 在位移量为 0.4 %H 时的剪应变等值线图。

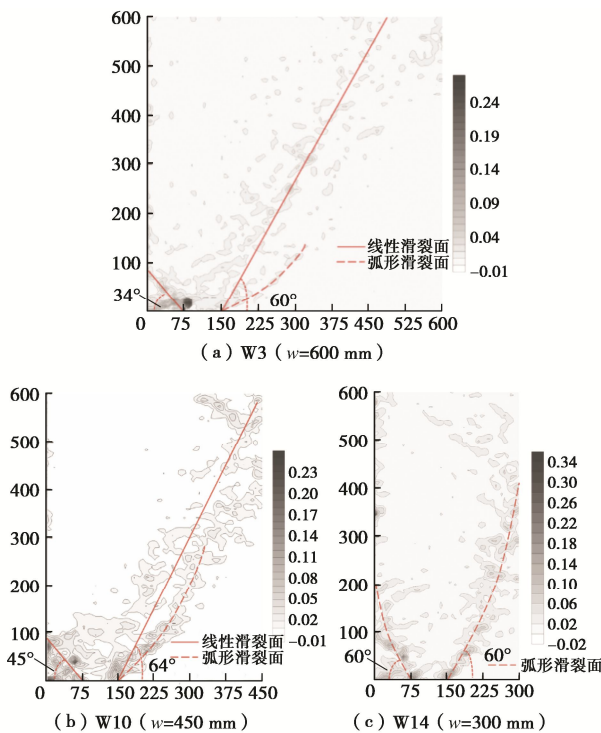


图5 不同侧限宽度墙后土体剪应变云图

Fig. 5 Development of shear strain with different side limit widths

侧限宽度越小, 墙土摩擦影响越大, 滑裂面逐渐发展至弧线, 右侧滑移面倾角基本保持不变, 左侧滑移面倾角逐渐增大。

## (3) 主动土压力

试验 W3、W10、W14 主动极限状态的 (0.4 %H) 土压力随深度的关系如图 6 所示。为了方便对比, 对埋深  $z$  做标准化处理。将实测结果与经典的朗肯、库

仑主动土压力以及考虑墙土摩擦和土拱效应的 Handy<sup>[17]</sup>、Harrop-Williams<sup>[18]</sup>和 Paik 等<sup>[19]</sup>计算结果进行对比。

## a) Handy 法主动土压力

$$\sigma_{a,H} = \frac{\gamma(H-z)\tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{\mu} \left[ 1 - \exp\left(-K_{a,H}\mu \frac{z}{(H-z)\tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}\right) \right], \quad (2)$$

$$K_{a,H} = 1.06(\cos^2\theta + K_a \sin^2\theta) \quad (3)$$

式中,  $K_a$  为朗肯主动土压力系数,  $\theta$  为滑裂角,  $\theta = 45^\circ + \varphi/2$ 。

## b) Harrop-Williams 法主动土压力

$$\sigma_{a,w} = K_{a,w}\gamma H \frac{\left(1 - \frac{z}{H}\right) - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{\beta-1}}{\beta - 2}, \quad (4)$$

$$K_{a,w} = \frac{1 + k_a \tan^2 \psi_w}{\tan^2 \psi_w + k_a}, \quad (5)$$

式中,  $\beta$  为墙后土体偏转系数,  $\psi_w$  为墙后土体主应力偏转角,  $K_{a,w}$  为 Harrop-Williams 理论土压力系数。

$$\tan \psi_w = \frac{1 - k_a}{2k_a \tan \delta} \pm \left[ \left( \frac{1 - k_a}{2k_a \tan \delta} \right)^2 - \frac{1}{k_a} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$\beta = K_{a,w} \frac{\left\{ (\cos \delta)^{\frac{1}{2}} \pm [\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi]^{\frac{1}{2}} \right\}^2}{\cos^2 \varphi}. \quad (7)$$

计算所得到的  $\tan \psi_w$  和  $\beta$  正值适用于主动土压力计算, 负值适用于被动土压力计算。

## c) Paik 法主动土压力

$$\sigma_{a,p} = \frac{\gamma H K_{a,p}}{1 - K_{a,p} \tan \delta \tan \theta} \left[ \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{K_{a,p} \tan \delta \tan \theta} - \left(1 - \frac{z}{H}\right) \right], \quad (8)$$

$$K_{a,p} = \frac{3(N \cos^2 \Psi_p + \sin^2 \Psi_p)}{3N - (N - 1) \cos^2 \Psi_p}, \quad (9)$$

$$\Psi_p = \tan^{-1} \left[ \frac{(N - 1) \pm \sqrt{(N - 1)^2 - 4N \tan^2 \delta}}{2 \tan \delta} \right], \quad (10)$$

式中,  $\Psi_p$  为墙后土体主应力偏角,  $N = 1/K_{a,k}$ ,  $K_{a,k}$  为考虑墙土摩擦效应的库仑主动土压力系数。

一般的, 基坑开挖的挡墙底部土压力逐渐减小至零, 被称为箱槽效应<sup>[17]</sup>, 模型试验<sup>[11]</sup>证明未扰动土体中挡墙主动土压力分布曲线和 Paik 法计算结果吻合

度最好。然而,从图7可以看出,邻近地下开挖引起超量地层损失后,在扰动的土体中继续开挖基坑,实测主动土压力并没有出现底部减小的情况,而与库仑土压力接近。

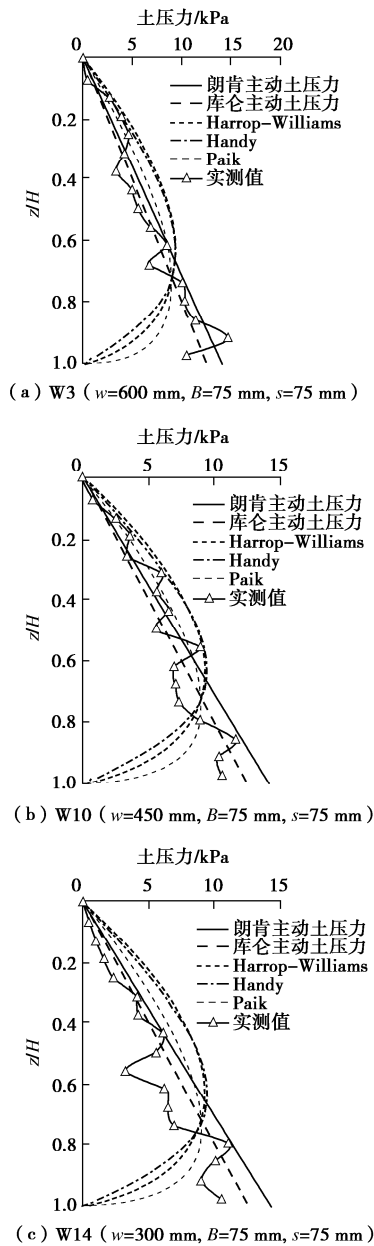


图6 主动土压力分布

Fig. 6 Distribution of active earth pressure

#### (4) 活动门宽度对土压力分布影响

为了研究坍塌宽度对土压力分布的影响,按照不同的活动门位置深度与宽度比 ( $H/B=8, 4, 2.67$ ),取试验 W2、W5、W7 ( $w=600$  mm,  $s=150$  mm) 进行对比分析。活动门下沉 40 mm 且挡墙主动平移达到极限状态时的土压力  $p$  随  $z/H$  变化关系如图 7 所示。

从图 7 可以看出,挡墙土压力分布随活动门宽度增加上部土压力有所减小,下部土压力有所增加,随后挡墙平移的主动土压力随活动门宽度的增加上部土

压力基本相等,下部略有增大。

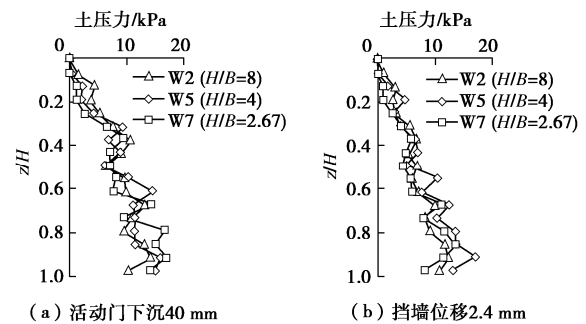


图7 不同活动门位置深度与宽度比下土压力分布

Fig. 7 Distribution of earth pressure under different ratios of trapdoor depth to width

#### (5) 活动门距离对土压力分布影响

为了探讨活动门距离对土压力分布的影响,按照不同的活动门位置深度与距离比 ( $H/s=2.67, 4, 8$ ),取试验 W1、W2、W3 ( $w=600$  mm,  $B=75$  mm) 进行对比分析。当活动门下沉 40 mm 且挡墙主动平移达到极限状态时的土压力  $p$  随  $z/H$  变化关系如图 8 所示。

从图 8 可以看出,不同的活动门位置深度与距离比  $H/s$  下,挡墙土压力分布随活动门距离的减小而逐渐增大,随后挡墙平移达到主动极限状态,活动门距离小的挡土结构的主动土压力更大。

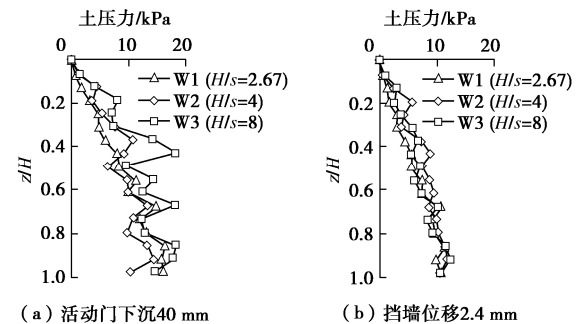


图8 不同活动门位置深度与距离比下土压力分布

Fig. 8 Distribution of earth pressure under different ratios of trapdoor depth to distance

#### (6) 侧限宽度对土压力分布影响

为了探讨侧限宽度对土压力分布的影响,按照不同的活动门位置深度与侧限宽度比 ( $H/w=1, 1.3, 2$ ),取试验 W3、W10、W14 ( $s=75$  mm,  $B=75$  mm) 进行对比,活动门下沉 40 mm 且挡墙主动平移达到极限状态时的土压力  $p$  随  $z/H$  变化关系如图 9 所示。

从图 9 可以看出,地层损失发生后,挡墙土压力分布随侧限宽度的减小逐渐减小,随后挡墙平移达到主动极限平衡状态,土压力随侧限宽度的减小也有一定的减小趋势。

### 2.4 表面沉降规律

#### (1) 挡墙平移过程中表面沉降曲线



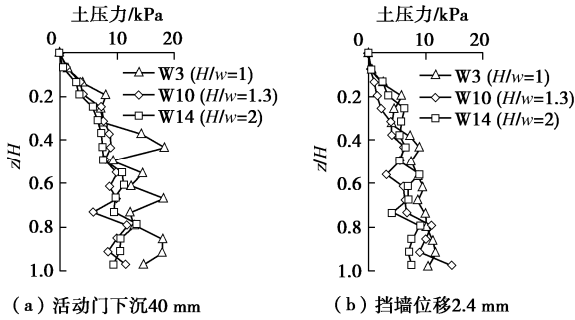


图9 不同活动门位置深度与侧限宽度比下土压力分布  
Fig. 9 Distribution of earth pressure under different ratios of trapdoor depth to side limit width

为了探讨地层损失和基坑开挖叠加影响下地层变形的规律,提取PIV全场变形的表面沉降数据。获取试验W3、W10、W14活动门下沉量为20 mm和40 mm以及挡墙位移量分为0.2%*H*, 0.4%*H*, 0.6%*H*的表面沉降曲线,如图11所示。

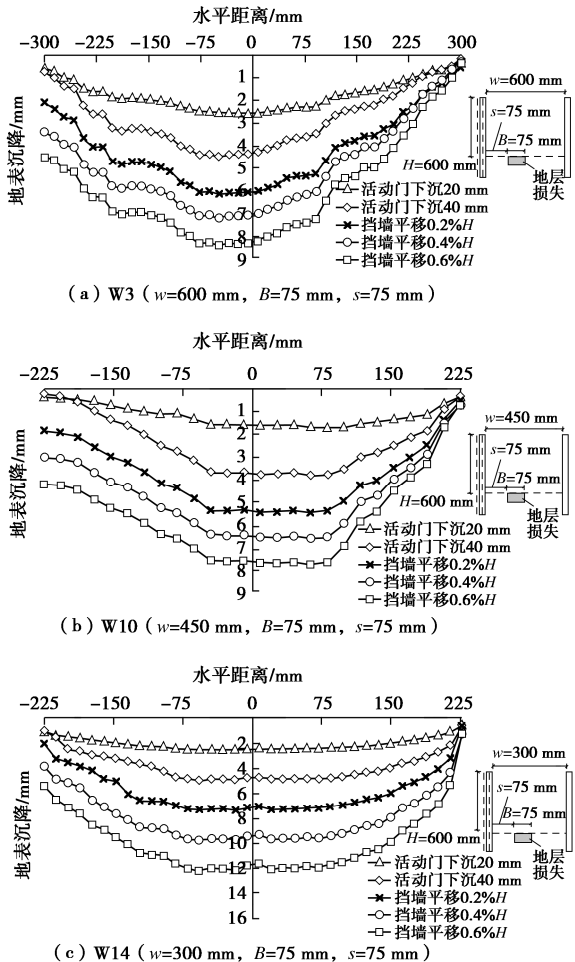


图11 挡墙平移过程中表面沉降曲线

Fig. 11 Curves of surface settlement during translation of retaining wall

从图11可以得出,随着地下开挖引起地层损失的发展,地表沉降最大值及曲线曲率增大。随后,在基坑开挖的影响下,地表沉降曲线最大值进一步扩大,

挡墙平移量为0.2%*H*, 0.4%*H*, 0.6%*H*时对应的地表沉降曲线最大值分别为活动门下沉40 mm时的1.45倍, 1.79倍, 2.15倍。

(2) 活动门宽度对表面沉降曲线的影响

为了探讨活动门宽度对在建基坑地表沉降的影响规律,按照不同的活动门位置深度与宽度比(*H/B*=8, 4, 2.67),取模型侧限宽度*w*与活动门距离*s*相同的试验组,将W2、W5、W7(*w*=600 mm, *s*=150 mm)和W10、W12、W13(*w*=450 mm, *s*=75 mm)各分为一组。活动门下沉40 mm后,再平移挡墙至0.4%*H*时,各组试验的表面沉降曲线如图12所示。

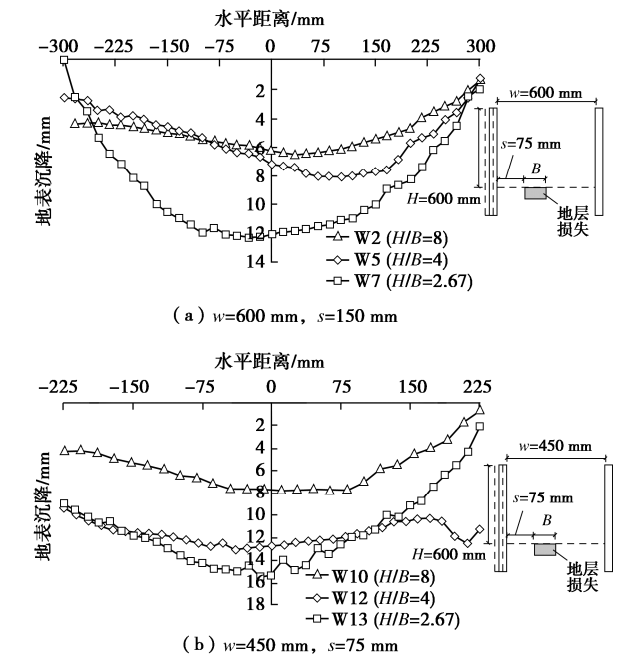


图12 不同塌陷位置深度与宽度比表面沉降曲线

Fig. 12 Curves of surface settlement under different ratios of trapdoor depth to width

从图12可以得出,在地层损失扰动和基坑开挖的叠加影响下,活动门位置深度与活动门宽度比越小,曲线曲率越大,地表沉降最大值越大,开挖宽度*B*=225 mm相比*B*=75 mm地表沉降最大值增大近1倍。

(3) 活动门距离对表面沉降曲线的影响

为了探讨塌陷距离对在建基坑地表沉降的影响规律,按照不同的活动门位置深度与活动门距离比(*H/s*=2.67, 4, 8),取侧限宽度*w*与塌陷宽度*B*相同的试验组,将T1、T2、T3(*w*=600 mm, *B*=75 mm)和T4、T5、T6(*w*=600 mm, *B*=150 mm)各分为一组,先让活动门下沉40 mm,之后平移挡墙至0.4%*H*,各组表面沉降曲线如图13所示。

从图13中可得,在地层损失和基坑开挖叠加影响下,活动门位置深度与活动门距离比越大,地表沉降最大值越大,活动门距离*s*=75 mm相比*s*=225 mm地表沉降最大值增加1倍左右,曲率变化不大。

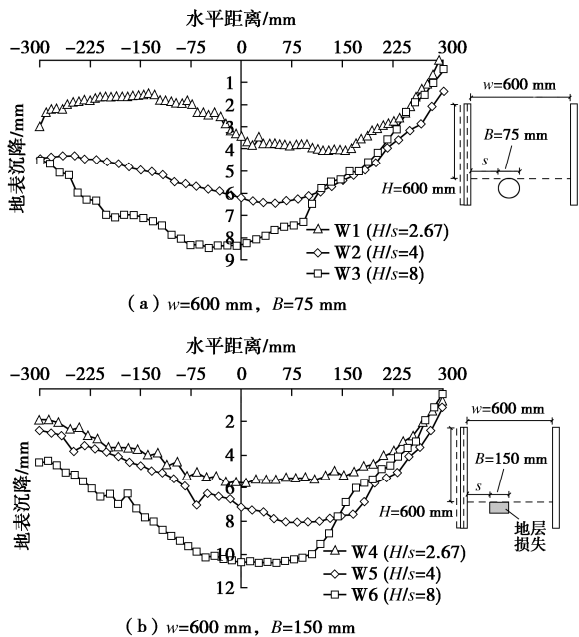


图 13 不同活动门位置深度与活动门距离比表面沉降曲线  
Fig. 13 Curves of surface settlement under different ratios of trapdoor depth to distance

(4) 侧限宽度对表面沉降曲线的影响

为了探讨侧限宽度对地表沉降的影响规律, 按照不同的活动门位置深度与侧限宽度比( $H/w=1, 1.3, 2$ ), 取活动门距离  $s$  与活动门宽度  $B$  相同的试验组, 将 T3、T10、T14 ( $s=75$  mm,  $B=75$  mm) 和 T6、T12、T15 ( $s=75$  mm,  $B=150$  mm) 各分为一组, 先让活动门下沉 40 mm, 之后平移挡墙至  $0.4\%H$ , 各组表面沉降曲线如图 14 所示。

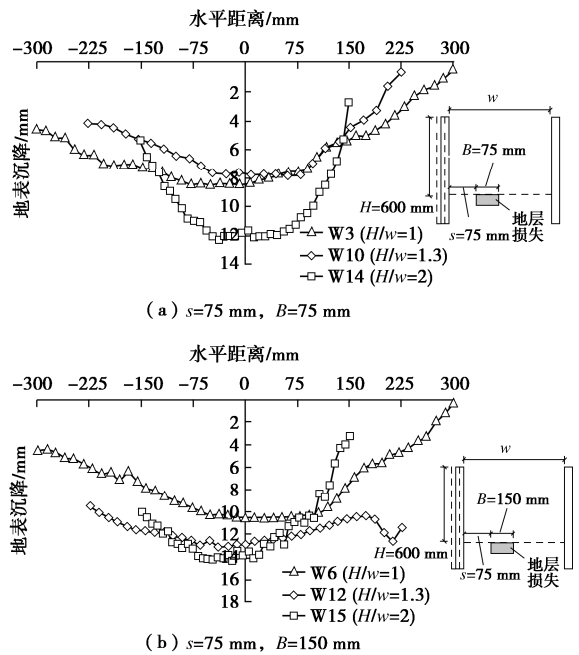


图 14 不同活动门位置深度与侧限宽度比表面沉降曲线  
Fig. 14 Surface settlement curves under different ratios of trapdoor depth to side limit width

由图 14 可以看出, 在地层损失和基坑开挖叠加影响下, 活动门位置深度与侧限宽度比越大, 地表沉降最大值越大, 侧限宽度  $w=300$  mm 相比  $w=600$  mm 地表沉降曲线最大值增加 37.8%, 曲线曲率越大。

3 结 论

通过二维模型试验, 对邻近地下开挖引起超量地层损失后, 继续进行基坑开挖, 两者叠加影响下的挡土墙土压力变化和表面沉降规律进行了探讨, 得到以下结论:

(1) 开挖引起地层损失前, 不同侧限宽度  $w$  下, 已建基坑挡墙静止土压力随埋深基本呈线性分布, 埋深较大时出现非线性, 大小介于 Jaky 公式和 Janssen 公式计算值之间, 邻近地层损失会使挡墙土压力上部土压力增加, 平均增加率 27%, 其下部土压力减小, 平均减小 13.5%。

(2) 对于试验采用的钢棒相似土, 邻近地下开挖引起地层损失后, 挡墙平移至达到主动极限状态所需的位移量约为  $0.4\%H$ 。主动土压力呈非线性分布, 实测主动土压力与库仑主动土压力吻合度最好, 挡墙底部土压力未出现明显减小的情况。

(3) 活动门宽度的增加会使挡墙上部土压力减小, 下部土压力增加, 对土压力分布的影响较小, 但是会使挡墙平移叠加影响下的地表沉降曲线曲率与沉降最大值增加。开挖宽度  $B=225$  mm 相比  $B=75$  mm 地表沉降最大值增大近 1 倍。

(4) 活动门距挡墙距离越小, 地层损失引起的挡墙土压力越大, 土压力分布影响较小, 地表沉降最大值增大。活动门距离  $s=75$  mm 相比  $s=225$  mm 地表沉降最大值增加 1 倍左右, 曲率变化不大。

(5) 侧限宽度越小, 地层损失引起的挡墙土压力越小, 地表沉降曲率与最大值增加。侧限宽度  $w=300$  mm 相比  $w=600$  mm 地表沉降曲线最大值增加 37.8%。

试验成果是采用无黏聚力的椭圆钢棒相似土作为填料的条件下获得的, 其结果与砂土地层的工程特性与影响规律类似。研究成果可以为邻近地层发生地层损失后, 在扰动地层中进行地下挡土结构物施工的参考。由于对隧道开挖地层损失以及挡土支护结构位移的简化, 相关研究结果有待实际工程实测以及更为精细化的模型试验的修正。

参考文献:

[1] 那晓云, 于 军, 王宝军. 地基附加应力分布对城市路面塌陷的影响[J]. 公路, 2019, 64(2): 8-12. (NA Xiao-yun, YU Jun, WANG Bao-jun. Influence of additional stress



- distribution of foundation on urban road surface collapse[J]. Highway, 2019, **64**(2): 8 - 12. (in Chinese)
- [2] 宋二祥, 徐明, 吴志轩, 等. 某盾构施工岩溶场地地面塌陷机理和数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, **15**(6): 1874 - 1880. (SONG Er-xiang, XU Ming, WU Zhi-xuan, et al. Mechanism analysis and numerical simulation of ground collapse in a karst site under shield tunneling construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, **15**(6): 1874 - 1880. (in Chinese))
- [3] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 303 - 309. (ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu, et al. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 303 - 309. (in Chinese))
- [4] 殷跃平, 张作辰, 张开军. 中国地面沉降现状及防治对策研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005(2): 1 - 8. (YING Yue-ping, ZHANG Zuo-chen, ZHANG Kai-jun. Land subsidence and countermeasures for its prevention in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005(2): 1 - 8. (in Chinese))
- [5] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference of Soil Mechanics & Foundation Engineering, State of the Art Volume. Balkema A A, 1969, Mexico: 225 - 290.
- [6] BRYSON L S. Performance of a Stiff Excavation Support System in Soft Clay and the Response of An Adjacent Building[D]. Illinois: Northwestern University, 2002.
- [7] JENCK O, DIAS D. 3D-finite difference analysis of the interaction between concrete building and shallow tunneling[J]. Géotechnique, 2004, **54**(8): 519 - 528.
- [8] 徐中华, 宗露丹, 沈健, 等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 1): 41 - 44. (XU Zhong-hua, ZONG Lu-dan, SHEN Jian, et al. Deformation of a deep excavation adjacent to metro tunnels in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S1): 41 - 44. (in Chinese))
- [9] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 隧道开挖对层状地基中邻近管道影响的DCBEM-FEM耦合方法[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1554 - 1561. (ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong. DCBEM-FEM coupling method for response analysis of adjacent pipelines due to tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1554 - 1561. (in Chinese))
- [10] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(19): 3310 - 3316. (SHI Cheng-hua, PENG Li-min, LIU Bao-chen. Influence of shallow tunnel excavation on ground surface buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(19): 3310 - 3316. (in Chinese))
- [11] 芮瑞, 何清, 陈成, 等. 盾构穿越临近地下挡土结构土压力及沉降影响模型试验[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(5): 864 - 872. (RUI Rui, HE Qing, CHEN Cheng, et al. Model tests on earth pressure and settlement of shield tunnel crossing adjacent underground retaining structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(5): 864 - 872. (in Chinese))
- [12] 芮瑞, 叶雨秋, 陈成, 等. 考虑墙壁摩擦影响的挡土墙主动土压力非线性分布研究[J]. 岩土力学, 2019, **40**(5): 1797 - 1804. (RUI Rui, YE Yu-qiu, CHEN Cheng, et al. Nonlinear distribution of active earth pressure on retaining wall considering wall-soil friction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(5): 1797 - 1804. (in Chinese))
- [13] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 619 - 631.
- [14] RUI R, ZHAI Y X, HAN J, et al. Deformations in trapdoor tests and piled embankments[J]. Geosynthetics International, 2020, **27**(2): 219 - 235.
- [15] JAKY J. The coefficient of earth pressure at rest[J]. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 1944, **78**(22): 355 - 358.
- [16] JENSSEN H A. Versuche uber getreidedruck in silozellen[J]. Verein Deutscher Ingenieure, 1895, **39**: 1045 - 1049.
- [17] HANDY L R. The arch in soil arching[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **111**(3): 302 - 318.
- [18] HARROP-WILLIAMS K O. Geostatic wall pressures[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, **115**(9): 1321 - 1325.
- [19] PAIK K H, SALGADO R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. Géotechnique, 2003, **53**(7): 643 - 654.