

砂土拱效应的挡板下落试验及机理研究

加 瑞¹, 朱 伟^{1,2}, 钟小春¹

(1. 河海大学 土木工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学 环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘 要: 土拱效应对考虑拱效应时土压力的计算非常重要, 而目前对土拱效应的形成机理认识还不深刻。通过自行设计的室内挡板下落试验对砂土拱效应的问题进行了试验研究。得到了不同的土体埋深情况下, 随挡板下移挡板上土体重量、箱内土体的应力和侧压力系数的变化规律。试验结果表明, 挡板微小的位移挡板上土体的重量就会快速降低; 随着挡板继续下移挡板上土体重量降低的趋势逐渐减缓, 认为挡板下移 2.5 mm 时上部土体达到临界状态; 随挡板下移箱底挡板上部中心线上的竖向土压力减小, 挡板两侧上部土体的竖向土压力增大; 挡板上部中心线上的侧压力系数明显增大。通过土体内的应力变化规律对砂土拱效应的形成机理进行了分析。

关 键 词: 土拱效应; 砂土; 土压力; 侧压力系数

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

On baffle drop test and mechanism of sand arching effect

JIA Rui¹, ZHU Wei^{1, 2}, ZHONG Xiao-chun¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Environment Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Soil arching effect is very important to the soil pressure calculations. The problem of the sand arching effect was studied through the indoors baffle drop test designed by the authors. Along with the baffle's drop, the sand's weight on the baffle, the sand's stress and the lateral pressure coefficient that under different buried depths of sand in the box were characterized. It is shown that the sand's weight on the baffle reduces quickly when the baffle has a small displacement. The sand's weight on the baffle reduces slowly when the baffle drops gradually. We consider that the sand reaches the critical state when the baffle's displacement is 2.5mm. While the baffle drops, the vertical soil pressure reduces in the central line on the top of the baffle and the vertical soil pressure increases in the line on the top of the baffle's sides. Lateral pressure coefficients in the central line on the top of the baffle increase obviously. Finally, the formation mechanism of the sand arching effect was analyzed through the stress variety regularities in the sand.

Key words: soil arching effect; sand; soil pressure; lateral pressure coefficient

1 引 言

土拱效应是岩土工程中一个广泛存在的现象, 如地下管道、盾构施工的隧道、抗滑桩、粘土心墙坝等结构中都存在着土拱效应。采用盾构法施工的隧道中^[1], 作用在管片上实测土压力远小于上覆土体自重, 就是因为在上覆土体中形成了土拱效应的缘故。土拱效应是由于土体的不均匀位移引起的, 土体内的应力进行了重分布, 移动土体把部分自身的压力传递给了相邻的不动土体, 这种应力转移是通过土体抗剪强度的发挥而实现的。

1943 年, 太沙基^[2,3]通过活动门试验证实了土力学领域拱效应的存在; 1985 年, Handy^[4]首次描绘出拱形为近似于悬链线的主应力流线; 2001, 朱碧亮^[5]对基坑开挖和支护中的土拱效应进行了研究; 20 世纪末以来, 在岩土工程领域, 有关土拱效应的实测、模型试验、数值模拟以及理论研究^[6,7]越来越多, 并开始将土拱理论应用于实践, 指导工程设计也取得了较好的效果。土拱效应概念的提出迄今已有 100 多年的历史, 但仍存在很多值得探讨的问题, 如土拱效应中是否有客观的拱体和作为支撑的拱脚还有争议。对形成拱效应时土体内的应力变化及传递情况即土拱效应的形成机理认识的还不

深刻, 理论研究还有待深入开展。

本文设计了研究土拱效应的室内挡板下落试验, 研究了箱内不同埋深的土体随挡板下移挡板上土体重量的变化和箱内土体应力的变化规律, 并探讨了砂土拱效应的形成机理。

2 室内模型试验装置和试验方法

2.1 试验装置设计

本文设计了室内挡板下落模型试验, 试验装置的示意图如图 1 所示。

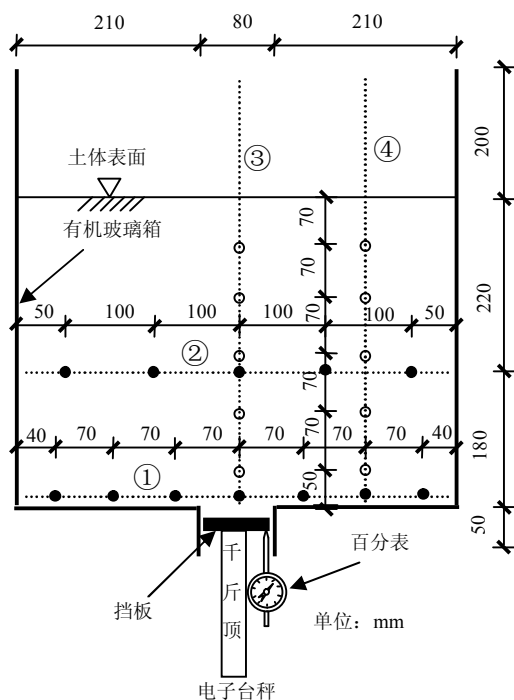


图 1 挡板下落模型示意图
Fig.1 Sketch map of the baffle drop model

试验的模型箱用有机玻璃制成, 模型箱的宽度为 500 mm, 长度为 600 mm, 高度为 600 mm。用千斤顶来控制挡板的位移, 用电子台秤来称量挡板上的砂土重量。挡板的宽度为 78 mm, 比模型箱底部开口的宽度 (80 mm) 小; 挡板的长度为 596 mm, 比模型底部开口的长度 (600 mm) 小。这样就可以消除挡板和箱壁之间的摩擦力, 使挡板能够顺利下移。为了不使砂土从挡板与箱壁之间的空隙中漏出, 在模型箱底部开口的一周贴了一层薄的光滑条带, 盖过挡板与箱壁之间的空隙, 再延伸 2 cm。试验中使用的是手动立式油压千斤顶, 起重重量为 2 吨, 起重高度为 100 mm; 使用的电子台秤是 TCS 系列电子台秤, 最大称量为 100 kg, 分度值为 50 g。采用 TYJ 型钢弦式微型土压力计测量箱内土体的竖向土压力和水平土压力, 它的直径为 6 cm, 采用 ZXY-2

型频率读数仪对其进行读数。

2.2 试验材料与方法

本试验采用的是干砂, 干密度 ρ_d 为 1.44 g/cm^3 , 比重 G_s 为 2.65, 内摩擦角 φ 为 34° , 砂土的粒径分布曲线如图 2 所示。

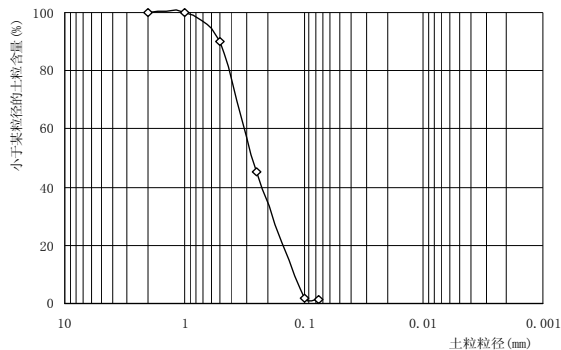


图 2 砂土的粒径分布曲线
Fig.2 Sand's particle size distribution curve

为了下面叙述方便, 对以下符号进行如下说明: B 为挡板的宽度, H 为箱内砂土的埋深, δ 为挡板下移的位移量, Q_0 为挡板上土体的初始重量, Q 为每次下移后挡板上土体的重量, P_v 为某一点的竖向土压力, P_{v0} 为某一点的竖向土压力的初始值, P_h 为某一点的水平土压力。

每次试验前, 首先应架好模型箱和电子台秤, 在电子台秤上放好千斤顶和百分表, 然后调零, 以后电子台秤的读数即为挡板上砂土的重量。在箱内装砂土, 到设定的位置时埋设土压力计。装砂土到指定的高度时, 读百分表的初始读数, 挡板每次下移后再读百分表的读数, 减去初始读数即为挡板的下移量。试验时测量了箱内①、②、③和④线上土体中应力的变化情况, 测量竖向土压力时, 土压力计水平放置; 测量水平土压力时, 土压力计竖向放置。①和②水平线上的土压力计的布置情况如图 1 中的小黑圈所示; ③和④竖向上的土压力计的布置情况如图 1 中的小圆圈所示。

3 试验结果及分析

3.1 挡板上土体重量随挡板下移的变化规律

随挡板下移测量挡板上土体重量的变化情况时, 控制挡板的下移量为 1.0 mm, 每次下移后当箱内砂土稳定后, 读百分表的读数和电子台秤的读数。

图 3 为 H/B 等于 2, 3, 4 和 5 时 δ 与 Q/Q_0 的关系。从图 3 可以看出: 不同 H/B 时随挡板下移挡板上土体重量的变化规律相似。挡板开始下移之前, 挡板上土体重量为 Q_0 。随着挡板逐渐下移, 挡板上土体重量的变化过程可分为三个阶段: 第一阶段为

快速下降阶段, 挡板微小的位移挡板上土体的重量就会快速的降低; 随着挡板的继续下移, 挡板上土体重量降低的趋势逐渐减缓, 从图 3 中可以看出, 挡板下移到 2.5 mm 左右时为一拐点, 可认为此时上部土体已达到临界状态, 此后挡板上土体重量微小的减小就需要很大的挡板位移, 可认为此时挡板上的土压力即为松动土压力, 此阶段为缓慢下降的第二阶段; 此后随着挡板的继续下移, 挡板上的土体重量变化不大并逐渐达到最小值, 然后部分土体慢慢破坏, 挡板上的土体的重量会有一定的增加, 此阶段为流动破坏的第三阶段。

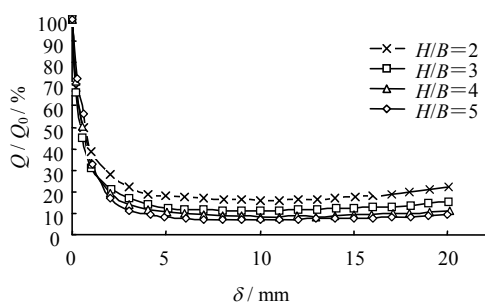


图 3 不同 H/B 时 δ 与 Q/Q_0 的关系
Fig.3 Relationship between δ and Q/Q_0
under different value of H/B

由图 3 可知: 挡板下移 3 mm 时, 挡板上土体的重量为初始值的 22.45 % ($H/B=2$)、16.85 % ($H/B=3$)、14.29 % ($H/B=4$) 和 11.14 % ($H/B=5$); 可见, 挡板下移后, 挡板上土体的重量相对于初始值会明显的减小; 随着 H/B 的增大, 在挡板位移一定时, 挡板上土体重量的降低量越大。

3.2 箱内土体的应力随挡板下移的变化规律

随挡板下移测量箱内土体应力的变化情况时, 控制挡板的下移量为 2.5 mm、8 mm、14 mm 和 20 mm, 每次下移后当箱内砂土稳定后, 读百分表的读数和电子台秤的读数。

图 4 为 H/B 为 5 时, 随挡板下移模型箱底面水平中心线上 (图 1 中①线) 竖向土压力的分布情况。在①线上均匀布置了 7 个土压力计, 它们到箱底中心的距离分别为 -21 cm、-14 cm、-7 cm、0 cm、7 cm、14 cm 和 21 cm。由图 4 可以看出, 当挡板下移 2.5 mm 时, 挡板上的土压力就会有明显的减少, 减少量为初始值的 72 %; 而相邻的箱底不动部分上的土压力则相应增加。随着挡板的下移, 土拱效应更加明显, 挡板上土压力的减少量可达初始值的 85 %; 相邻的箱底不动部分上的土压力则会继续增加。

可见, 土拱效应就是屈服部位土压力的降低和

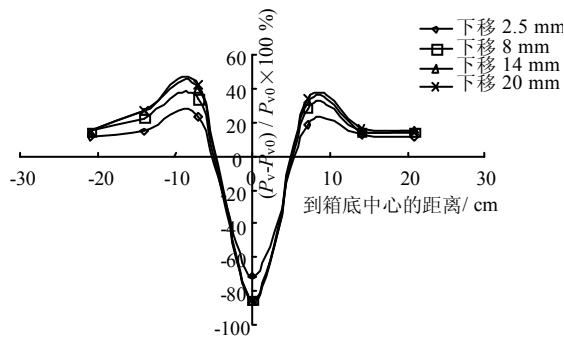


图 4 5 倍埋深时随挡板下移①线上竖向土压力的分布
Fig.4 Vertical soil pressure distribution with baffle drop
along line ① when H/B is 5

邻近位置土压力的增加, 且随着土体内不均匀位移的增加, 土拱效应更加明显。

图 5 为 H/B 为 2、3、4 和 5, 挡板下移量为 2.5 mm 时, ①线上竖向土压力的分布情况。每次试验时土压力计的布置和图 4 中的布置都相同。

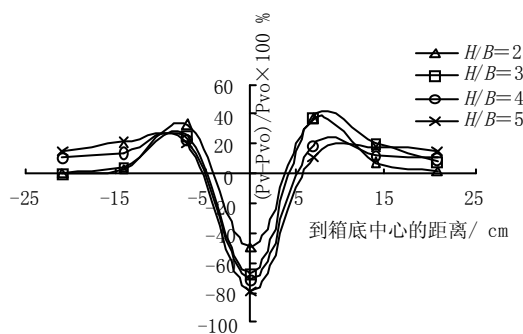


图 5 挡板下移 2.5mm 不同埋深时①线上
竖向土压力的分布

Fig.5 Vertical soil pressure distribution along line ① when
baffle displacement is 2.5 mm under different value of H/B

由图 5 可以看出, 随着 H/B 的增加, 挡板上竖向土压力相对于初始值的减少量会逐渐增大, 从 50 % 增大到 80 %; 挡板两侧附近部分 (-7 cm 和 7 cm) 上竖向土压力相对于初始值的增加量逐渐减少, 从 35 % 左右减少到 15 % 左右。挡板两侧较远部分 (-21 cm 和 21 cm) 上竖向土压力相对于初始值的增加量逐渐增加, 从 0 增加 15 %; 可知, 土拱效应对上部土体的影响是有范围的, 且随着 H/B 的增加, 影响的范围逐渐增加。

图 6 为 H/B 为 5 时, 随挡板下移通过模型箱底面中点的竖向中心线上 (图 1 中③线) 竖向土压力的分布情况。在该中心线均匀布置了 5 个土压力计 (水平放置), 它们到土体表面的距离分别为 7 cm、14 cm、21 cm、28 cm 和 35 cm。图中初始值为某点

竖向土压力的理论值, 即砂土的重度 γ 乘以该点距土体表面的距离。挡板下移后的竖向土压力值为下移后的测量值与初始测量值的比值再乘以该点竖向土压力的初始值。

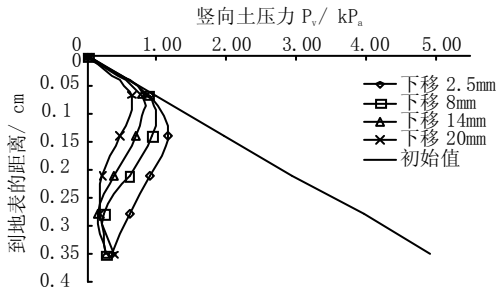


图 6 5 倍埋深时随挡板下移③线上竖向土压力的分布
Fig.6 Vertical soil pressure distribution with the baffle's drop along line ③ when H/B is 5

由图 6 可以看出挡板下移 2.5mm 时, 各点的竖向土压力就会明显的减少; 距离挡板越近, 竖向土压力相对于该点的初始土压力的减少量越大; 随着挡板的继续下移, 各点的竖向土压力会继续减少。

图 7 为 H/B 为 5, 随挡板下移③线上水平土压力的分布情况。在该中心线均匀布置了五个土压力计(竖向放置), 它们到土体表面的距离分别为 7cm、14cm、21cm、28cm 和 35cm。图中初始值为某点水平土压力的理论值, 即该点的竖向土压力乘以侧压力系数。挡板下移后的水平土压力值为下移后的测量值与初始测量值的比值再乘以该点的水平土压力的初始值。

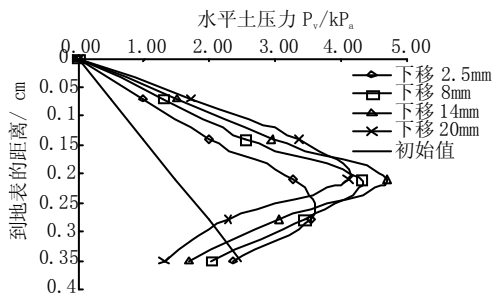


图 7 5 倍埋深时随挡板下移③线上水平土压力的分布
Fig.7 Horizontal soil pressure distribution with the baffle's drop along line ③ when H/B is 5

由图 7 可以看出挡板下移 2.5 mm 时, 到土体表面距离为 7 cm、14 cm、21 cm 和 28 cm 的点的水平土压力会明显的增大, 到土体表面距离为 35 cm 点的水平土压力稍微有所减小。随着挡板的下移, 箱内上部土体内的水平土压力会继续增大; 靠近挡板的土体内的水平土压力会减小, 这是因为靠近挡板的土体会跟着挡板下移, 这部分土体有所松动的

缘故。到地表距离为 21 cm 的点的水平土压力的值最大, 说明该点的土体被压缩的最紧密。

图 8 为 H/B 为 5 时, 随挡板下移通过距模型箱底面中点的距离为 14 cm 的点的竖向线上(图 1 中④线)竖向土压力的分布情况。土压力计的布置与图 6 相同。

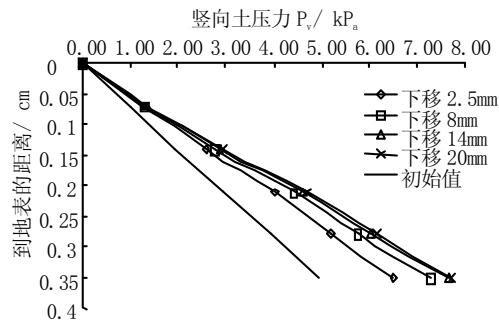


图 8 5 倍埋深时随挡板下移④线上竖向土压力的分布
Fig.8 Vertical soil pressure distribution with the baffle's drop along line ④ when H/B is 5

由图 8 可以看出, 挡板下移 2.5 mm 时, 各点的竖向土压力就会明显的增大; 随着挡板的继续下移, 各点的竖向土压力继续增大。

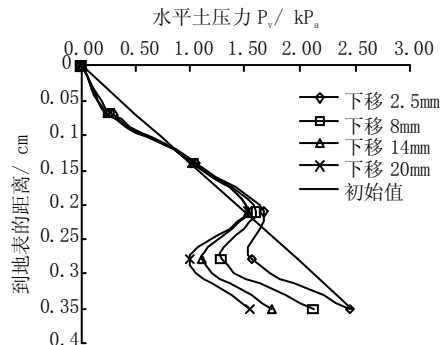


图 9 5 倍埋深时随挡板下移④线上水平土压力的分布
Fig.9 Horizontal soil pressure distribution with the baffle's drop along line ④ when H/B is 5

图 9 为 H/B 为 5 时, 随挡板下移④线上水平土压力的分布情况。土压力计的布置与图 7 相同。由图 9 可以看出随着挡板的下移, 到土体表面的距离为 7 cm、28 cm 和 35 cm 点的水平土压力会减小, 到土体表面的距离为 14 cm 和 21 cm 点的水平土压力会增大。但总的来说, 各点的水平土压力变化不大。

3.3 侧压力系数随挡板下移的变化规律

图 10 为 H/B 为 5 时, 随挡板下移③线上侧压力系数的分布情况。由图 10 可以看出, 当挡板下移 2.5 mm 时, 该线上侧压力系数就会明显的增大, 各

点的侧压力系数基本都超过了 1。随着挡板的继续下移, 侧压力系数会继续增大, 最大的侧压力系数可达 5 以上。挡板下移量达到 14 mm 时, 到土体表面距离为 35 cm 的点的侧压力系数减小是因为此时该点的水平土压力减小的缘故。

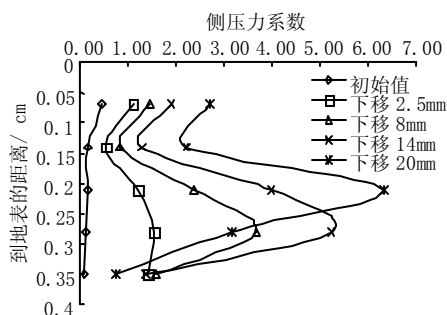


图 10 5 倍埋深时随挡板下移③线上侧压力系数的变化
Fig.10 Lateral pressure coefficient distribution with the baffle's drop along line ③ when H/B is 5

图 11 为 H/B 为 5, 随挡板下移通过距模型箱底面为 18cm 高度的平面的中点的水平中心线上(图 1 中②线)侧压力系数的分布情况。在该水平中心线均匀布置了 5 个土压力计, 它们到平面中点的距离分别为 -20 cm、-10 cm、0 cm、10 cm 和 20 cm。测量这些点随挡板下移竖向土压力和水平土压力的变化情况, 从而可得到这些点的侧压力系数。

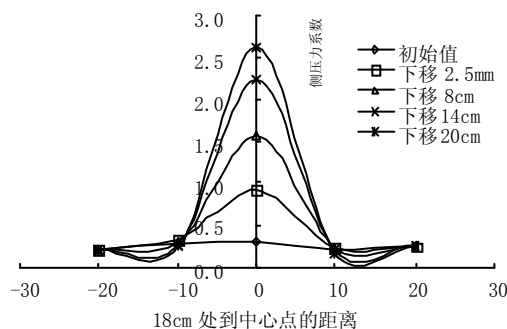


图 11 5 倍埋深时随挡板下移②线上侧压力系数的变化
Fig.11 Lateral pressure coefficient distribution with the baffle's drop along line ② when H/B is 5

由图 11 可以看出, 随着挡板的下移, ②线上各点侧压力系数变化是不同的, 中点的侧压力系数变化较大。当挡板下移 2.5 mm 时, 该线中点的侧压力系数就会明显的增大, 且随着挡板的下移, 该点的侧压力系数会继续增大, 最大值可达 2.5 以上。这是因为随着挡板的下移, 该点的竖向土压力会不断的减小, 水平土压力会不断的增大。而中点两侧点的侧压力系数略有减小, 这是因为随着挡板的下移, 两侧点的竖向土压力会有所增大, 但水平土压

力的变化不大。

4 砂土拱效应形成机理探讨

4.1 试验结果与太沙基松动土压力的比较

在盾构法隧道垂直土压力的计算时, 当土体中存在拱效应时(覆土厚度大于隧道的外径时)一般采用太沙基的松动土压力公式^[8]。太沙基以松散体压力为基础, 从应力传递的概念出发, 认为隧道在开挖以后, 顶部的土体由重力作用而向下移动, 在隧道两侧至地面出现了两个剪切面, 根据微分土条的竖向力的平衡列出方程, 积分后得到松动土压力的计算公式。

如果取挡板下移 2 mm 时挡板上的力为松动土压力。此时挡板上土体的重量为初始值的 28.26 % ($H/B=2$)、21.25 % ($H/B=3$)、19.41 % ($H/B=4$) 和 17.06 % ($H/B=5$)。可采用太沙基松动土压力公式计算本文试验条件下的松动土压力, 与试验结果进行对比。周小文通过隧道开挖离心模型试验得出, 滑动土体的宽度基本等于隧道的直径^[7]。假定滑动土体的宽度即为挡板的宽度 (80 mm); 内摩擦角 φ 为 34° ; 粘聚力 c 为 0; 土的重度 γ 为 14.1 kN/m^3 ; 侧压力系数 k 为 1。则由太沙基松动土压力公式计算出的松动土压力为初始值的 34.57 % ($H/B=2$)、24.28 % ($H/B=3$)、18.45 % ($H/B=4$) 和 14.81 % ($H/B=5$)。可见, 试验结果和理论计算结果的差别不大。

4.2 砂土拱效应的形成机理

土拱效应的产生与拱结构物不一样, 拱结构是把材料制成拱形状, 在荷载作用下发挥其承受压力的作用。通过实验可以发现, 土拱有其自身的形成过程: 在荷载或自重作用下, 土体发生压缩和变形, 从而产生不均匀沉降, 土体之间产生了摩擦力, 土体内的应力发生了转移, 移动土体把部分压力传递给了相邻的不动土体。

在试验中, H/B 为 2 时, 挡板下移 20 mm 时, 挡板正上部的土体表面会出现一条很窄的凹槽, 土体表面的最大沉降可达 1.0 cm 左右; H/B 为 5 时, 挡板下移 20 mm 时, 土体表面的最大沉降为 3.5 mm 左右。可见, H/B 越大, 土体表面的最大沉降越小; H/B 越大, 土体表面沉降的范围越大。不同埋深时, 挡板下移后箱内下部和中间土体的位移都较大, 而上部和两侧土体的位移都较小。③线上竖向土压力的减小和④线上竖向土压力的增加就是箱内挡板上部中间土体的位移较两侧土体位移大, 在中间土体和两侧土体之间产生了摩擦抵抗的缘故。在取出箱内

砂土的时候发现,在取出一定量的砂土后,挡板上的重量反而增加了。这就是因为在取出砂土的过程中扰动了土体,破坏了土拱效应,土体内的摩擦抵抗作用消失的缘故。由于中间的土体下移较快,所以两侧土体除有下移趋势外,还有向中间移动的趋势,这就是③线上的水平土压力增加的原因。

土拱效应的形成机理就是当土体的一部分有位移时,这部分移动土体会带动周围土体移动,距离移动土体越近的土体的位移量越大,随着离移动土体距离的增大,土体的位移量逐渐减小。通过土体的抗剪强度移动土体把部分自身的压力逐渐的传递给了周围土体,土体内的应力进行了重分布。当土体的性质、埋深和位移量等条件发生变化时,土体内形成拱效应的范围和程度也就不同,土体内各点的压紧程度、摩擦力和土压力的转移量也就不同。要准确计算不同条件下由于土拱效应引起的土压力的变化量还是比较困难的。

5 结 论

本文设计了研究土拱效应的室内挡板下落模型试验,对箱内不同土体埋深的砂土进行了试验研究,得到了不同埋深时随挡板下移挡板上土体的重量和箱内土体应力的变化规律。通过研究可以得到以下结论:

(1) 挡板微小的位移挡板上土体的重量就会快速降低;随着挡板继续下移挡板上土体重量降低的趋势逐渐减缓,认为挡板下移 2.5mm 时上部土体达到临界状态;上部土体形成拱效应后,挡板上土体的重量变化不大。 H/B 越大,挡板上土体的重量比初始值的降低量也越大。

(2) 挡板下移后,挡板上竖向土压力减小和挡板两侧箱底竖向土压力增大;挡板上部中心线上竖向土压力减少和挡板两侧上部土体竖向土压力增大。证明砂土中有不均匀位移时,移动土体把部分压力传递给了相邻的不动土体,土体内产生了拱效应。随着土体内不均匀位移的增加,土拱效应更加明显;随着 H/B 的增大,土拱效应的影响范围逐渐增大。

(3) 挡板下移后,挡板上部中心线上的竖向

土压力减少,水平土压力增大;挡板两侧上部土体的竖向土压力增大,水平土压力变化不大。所以箱内土体同一水平面上各点侧压力系数的变化是不同的,在挡板上部中心线上各点的侧压力系数明显增大,而挡板两侧上部各点的侧压力系数略有减小。

(4) 取滑动土体的宽度为挡板的宽度时,采用太沙基松动土压力公式计算本文试验条件下的松动土压力的计算值与试验结果差别不大;土拱效应的形成机理可认为是通过土体的抗剪强度移动土体把部分自身的压力逐渐地传递给了周围土体。

本文只对土拱效应进行了试验研究,测量了随挡板下移挡板上土体的重量和土体内应力的变化情况。为了更加深刻认识土拱效应的形成机理,运用颗粒流程序(PFC^{2D})对该试验的模拟正在进行中。

参 考 文 献

- [1] Yukinori Koyama. Present status and technology of shield tunneling method in Japan [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(2): 145-159.
- [2] Terzaghi K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door [A]. In: **Proceedings of 1st Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering** [C]. Boston:[s.n] 1936. 307-316.
- [3] Terzaghi K. *Theoretical soil mechanics* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1947.
- [4] Handy R L. The arch in soil arching [J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, (American Society of Civil Engineering), 1985, 3(3): 302-318.
- [5] 朱碧堂, 刘一亮. 基坑开挖和支护中的土工效应 [J]. *岩土工程师*, 2001, 13(1): 1-4.
- [6] Hsien-jen Stephen tien. The arching mechanism on the micro level utilizing photoelasticity modeling [D] USA: University of Massachusetts Lowell, 2001.
- [7] 周小文. 盾构隧道土压力离心模型试验及理论研究[博士论文 D]. 北京: 清华大学, 1999.
- [8] 朱伟译. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.