

文章编号:1673-2049(2019)06-0046-09

# 基于室内模型试验的锚拉式挡土墙力学特性研究

张宏博<sup>1,2</sup>, 陈 奇<sup>1,2</sup>, 孙玉海<sup>3</sup>, 孟庆宇<sup>1,2</sup>, 于 瀚<sup>1,2</sup>, 宋修广<sup>1,2</sup>

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东大学 山东省路基安全工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 3. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250014)

**摘要:**为了研究锚拉式挡土墙在非极限状态下土压力分布及墙体位移变化规律,从力学角度分析了锚拉式挡土墙的作用机理,并基于加筋原理揭示了设置锚杆具有提高墙背土体强度的作用。设计制作了室内模型试验装置,开展了一系列不同预应力水平、不同竖向荷载及二者耦合作用的室内试验。通过分析试验数据,得到了不同影响因素下的土压力合力变化规律及合力作用点位置。结果表明:锚拉式挡土墙由于锚杆的侧向约束作用,墙背土压力峰值出现在锚杆位置处;分级施加竖向荷载,墙身呈现底部位移略大的平动模式(T模式)外倾;分级施加锚杆预应力,墙身呈现底部位移略大的向外平动位移模式(T模式);二者耦合作用下,墙体呈平动叠加绕墙底转动模式(T+RB模式)内倾,但位移量较小;墙背土压力在预应力、竖向荷载及二者耦合作用下均介于静止土压力与被动土压力之间;所得结论对工程实践具有指导意义。

**关键词:**锚拉式挡土墙;土压力;假性黏聚力;预应力;竖向荷载

**中图分类号:**U411 **文献标志码:**A

## Study on Mechanical Properties of Anchored Retaining Wall Based on Indoor Model Test

ZHANG Hong-bo<sup>1,2</sup>, CHEN Qi<sup>1,2</sup>, SUN Yu-hai<sup>3</sup>, MENG Qing-yu<sup>1,2</sup>, YU Han<sup>1,2</sup>,  
SONG Xiu-guang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. Shandong Engineering & Technology Research Center for Subgrade Safety, Jinan 250061, Shandong, China; 3. Shandong Province Communications Planning and Design Institute, Shandong University, Jinan 250014, Shandong, China)

**Abstract:** In order to study the distribution of soil pressure and wall displacement of anchored retaining wall in non-limit state, the mechanism of anchor retaining wall was analyzed from the view of mechanics. Based on the principle of reinforcement, it was explained that the setting of anchor bolt increased the strength of wall back soil. The indoor model test equipment was designed and a series of laboratory tests with different prestress levels, different vertical loads and their coupling effects were carried out. By analyzing the test data, the variation law of soil pressure resultant and the position of resultant point were obtained. The results show that the anchored retaining wall is affected by lateral restraint of bolt and the peak pressure of the wall back soil appears at the position of anchor. The wall body presents a translational mode (T mode) with a slightly larger displacement at the bottom under applying vertical loads in stages.

收稿日期:2019-02-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51208284);山东省科技发展计划项目(2013GSF11603)

作者简介:张宏博(1977-),男,山东济宁人,副教授,工学博士,E-mail:zhanghongbo@sdu.edu.cn。



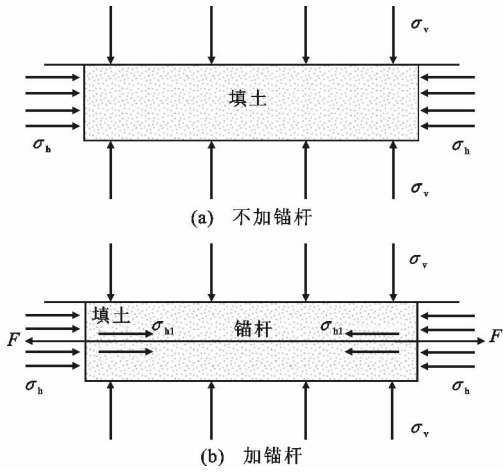


图 2 挡土墙受力机理

Fig. 2 Mechanical Mechanism of Retaining Wall

一步说明。在锚杆位置墙后填土深度  $z$  处取一处于静止状态的砂土单元体,大主应力  $\sigma_1 = \gamma z$ ,小主应力  $\sigma_3 = K_0 \gamma z$ , $\gamma$  为砂重度, $K_0$  为静止土压力系数。图 3 为单元体应力状态示意图,其中应力圆 I 表示其应力状态( $C_p$  为截距, $K_{fs}$ , $K_{fr}$  为破坏包络线, $\phi$  为  $K_{fr}$  包络线与水平线的夹角, $\sigma_{1f}$ , $\sigma_{3f}$  分别为破坏时的大主应力和小主应力)。设  $K_{fs}$  为砂土试样强度包络线,由于应力圆 I 处于静止状态,所以该圆应在  $K_{fs}$  破坏包络线之下。

如果挡土墙不布设锚杆,挡土墙背离土体方向移动时,砂土单元体小主应力  $\sigma_3$  减小,逐渐达到主动平衡状态,即图 3 所示的应力圆 II,此时, $\sigma_3 = K_a \sigma_1$ , $K_a$  为主动土压力系数, $K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ ,砂土试样达到主动破坏极限状态,其应力圆与  $K_{fs}$  破坏包络线相切。

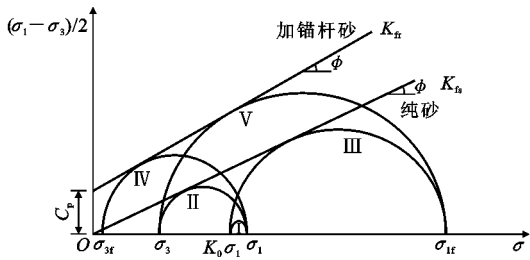


图 3 单元体应力状态示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Stress State of Unit Body

如果挡土墙布设锚杆,但不对锚杆施加预应力,挡土墙背离土体方向移动时,由于锚杆对墙身的侧向约束及锚杆与土体之间的摩擦咬合,限制了墙后填土的侧向变形,阻止了砂土单元体小主应力  $\sigma_3$  的降低,此时  $\sigma_3$  介于  $K_a \sigma_1$  和  $K_0 \sigma_1$  之间,其物理状态处于主动极限与静止状态之间的弹性稳定状态。

如果挡土墙布设锚杆,并对锚杆施加预应力,由于预应力锚杆对挡土墙的反作用力,使得墙身有向土体方向移动的趋势,此时大主应力  $\sigma_1$  逐渐增大, $\sigma_1$  介于  $\gamma z$  与  $\sigma_{1f}$  之间,其物理状态处于静止与被动极限状态之间的弹性稳定状态。

由此可知,在  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  保持不变的情况下,由于锚杆的作用限制了土体的侧向变形,相当于对砂土提供了一个侧向应力增量  $\Delta \sigma_3$  或  $\Delta \sigma_1$ ,使得锚拉结构单元体应力状态介于应力圆 I 与应力圆 II 之间或应力圆 I 与应力圆 III 之间(图 3)。

对于加锚杆砂土而言,欲使其达到极限平衡状态,可增大  $\sigma_1$  至  $\sigma_{1f}$ ,从而使墙后填土处于被动极限状态;或者减小  $\sigma_3$  至  $\sigma_{3f}$ ,从而使墙后填土处于主动极限状态,其应力圆 IV, V (图 3) 公切线  $K_{fr}$  即为加锚杆砂土的破坏包络线。基于锚杆不被拉断或滑动,只是墙后填土被破坏的假定, $K_{fr}$  线与水平线的夹角  $\phi$  和砂土的内摩擦角近似相等,并与强度坐标轴相交,截距为  $C_p$ ,由于此黏聚力非填土本身特性,因此定义  $C_p$  为假性黏聚力。

在土体中加入锚杆,约束了土体的侧向变形,增大了侧向压力,为墙后填土提供了假性黏聚力,使得该位置处土体作用到挡土墙上的土压力相应较大,因此墙背土压力峰值应位于锚杆位置处。下文结合室内模型试验数据作进一步说明。

## 2 试验模型设计及制作

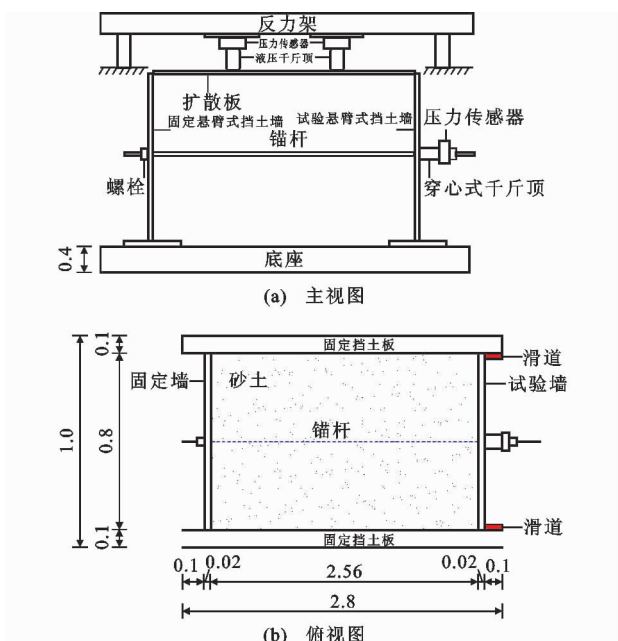
参考相关文献[21]~[24]设计制作了室内模型试验装置用于锚拉式挡土墙力学特性研究,试验装置主要包括 4 个部分:装土箱、锚拉式挡土墙、加载装置及量测装置组成。

### 2.1 装土箱

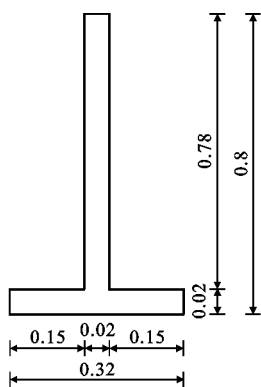
装土箱结构如图 4 所示,试验装土箱的尺寸为 2.8 m(长)×1.0 m(宽)×1.2 m(高),由底座和上部挡土板两部分组成,底座高 0.4 m,为钢板制作的框架结构,上部挡土板采用厚度为 20 mm 的碳素钢板制成,内部铺设透明高强有机玻璃,可便于观察墙后填土在试验过程中的破坏形式等变化。滑道的设置是为了保证墙体在水平方向可以自由移动。

### 2.2 锚拉式挡土墙

为方便加工挡土墙模型,选用 Q235 碳素钢板替换混凝土材料,通过相同抗弯刚度的原则确定模型薄板材料的等效厚度。如图 5 所示,挡土墙尺寸为 1.0 m(宽)×0.8 m(高)×0.02 m(厚),墙身通过焊接与墙踵和墙趾形成悬臂式挡土墙墙身。锚拉式



**Fig. 4 Packing Box Structure (Unit:m)**



**Fig. 5 Cantilever Retaining Wall Structure (Unit: m)**

挡土墙结构主要包括悬臂式挡土墙及锚杆,悬臂式挡土墙墙踵板和墙趾板长度均为 0.15 m,墙身厚度为 0.02 m,采用碳素钢板制作而成。锚杆为  $\phi 25 \times 3$  的精轧螺纹钢。悬臂式挡土墙与锚杆通过螺栓连接构成锚拉式挡土墙结构。

### 2.3 加载装置

加载装置主要包括竖向荷载的加载装置和锚杆预应力的加载装置。采用反力架及 2 台 5 t 的液压千斤顶施加竖向荷载,1 台 10 t 的穿心式千斤顶施加锚杆预应力。通过压力传感器控制加载大小,分级加载。

## 2.4 量測裝置

### 2.4.1 土压力量测

试验选用量程为 50 kPa 的 LY-350 型应变式

土压力计,土压力数据通过动态信号采集分析系统及应变式采集箱收集。试验前,对每个土压力计进行标定试验,分别确定其对应的标定曲线,对照标定曲线确定作用在土压力计上的平均应力。

土压力计布置如图 6 所示,在试验墙墙身沿高度方向每间隔 0.1 m 布设 8 个土压力计,沿墙身中部左右两侧各 0.05 m 处布设 2 排,取两侧土压力平均值进行计算分析。

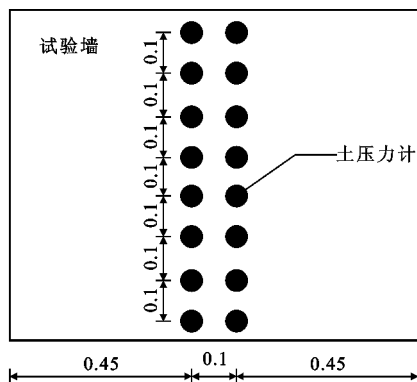


图 6 土压力计布置(单位:m)

**Fig. 6** Layout of Soil Pressure Gauge (Unit:m)

### 2.4.2 挡土墙位移量测

为了研究墙身受到锚杆约束作用后的位移变形情况,试验采用量程 50 mm、精度 0.01 mm 的电子式百分表。在试验墙墙身两侧沿高度方向每隔 0.2 m 布设 1 个百分表,共 8 个。百分表用磁架固定,其伸缩杆顶在墙身,随着千斤顶的加载,挡土墙发生位移变形,百分表便可以同步测出挡土墙位移量。

### 2.4.3 锚杆埋设及轴力量测

为保证锚杆位置处的土体相对密实度满足要求,待填土压实至高于锚杆位置 10 cm 时,采用反开挖方式埋入锚杆,如图 7(a)所示。开挖后的沟槽应进行整平处理,整平后对沟槽底部进行人工夯实再放置锚杆,并用测斜尺测量平整程度,调整好位置之后,锚杆两侧土体采用夯锤夯击 3~5 遍。锚杆穿过墙身预留的锚孔,用螺栓固定在两侧挡土墙上。为了量测锚杆轴力的变化,在锚杆三等分位置处焊接 2 个振弦式钢筋计,通过测频仪读取数据,如图 7(b)所示。

### 3 试验材料

选取一种含水率 4% 左右的试验砂用于模型试验。这种砂被用来模拟墙背填土及底座地基土。按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 的规定进行筛分试验,图 8 为试验用砂的颗粒分析曲线。平

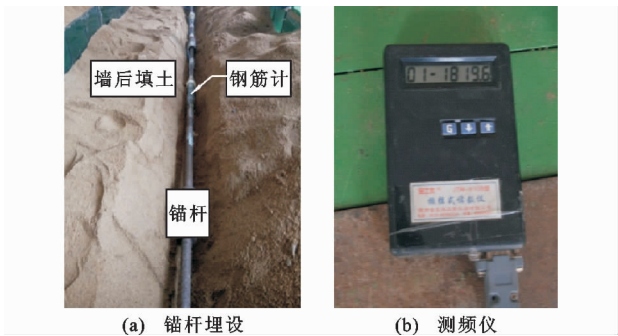


图 7 锚杆埋设及轴力量测

**Fig. 7 Anchor Bolt Buried and Axial Force Measurement**

均粒径  $D_{50}$  为 0.36 mm,其不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$  分别为 5.47 和 1.32。试验用砂重度  $\gamma=16.85\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。回填土通过压实,达到相对密实度 0.8。依据不固结不排水三轴试验,测得  $D_r=0.8$  时的砂土内摩擦角为  $38^\circ$ 。

4 试验方案

模型试验考虑锚杆预应力、竖向荷载、预应力与

表 1 预应力、竖向荷载加载范围

Tab. 1 Load Ranges of Prestress and Vertical Load

| 工况编号 | 荷载类别     | 第 1 级       | 第 2 级       | 第 3 级       | 第 4 级       | 第 N 级 | 最大级          |
|------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|--------------|
| 1    | 竖向荷载/kPa | 0           | 5           | 10          | 15          | ...   | 25           |
| 2    | 预应力/kN   | 0           | 2           | 4           | 6           | ...   | 20           |
| 3    | 竖向荷载+预应力 | 25 kPa+0 kN | 25 kPa+2 kN | 25 kPa+4 kN | 25 kPa+6 kN | ...   | 25 kPa+10 kN |

5 试验结果分析

5.1 竖向荷载对锚拉式挡土墙力学特性的影响

为了研究竖向荷载对锚拉式挡土墙力学特性的影响,在墙身中部布设不施加预应力的锚杆,通过千斤顶、反力架在墙后填土顶面施加竖向荷载。以墙后填土完成且稳定后为初始状态,此时墙身位移量设为 0,整理试验数据,绘制了墙体位移、墙背土压力、土压力合力及锚杆轴力图,如图 9~12 所示,其中  $h$  为墙体高度。

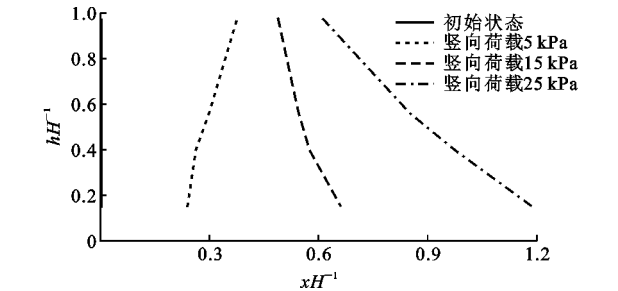


图 9 墙体位移 1

Fig. 9 Displacement 1 of Wall

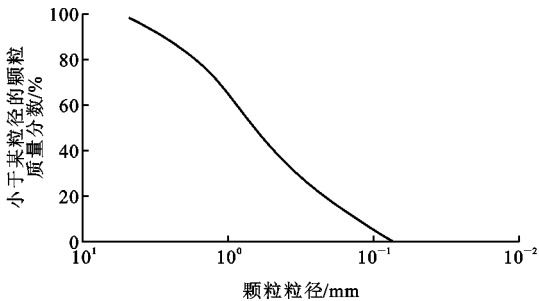


图 8 颗粒分析试验曲线

Fig. 8 Particle Analysis Test Curves

竖向荷载耦合 3 种因素对锚拉式挡土墙力学特性的影响。锚杆设置在挡墙中心,锚杆预应力的加载范围为 0~20 kN,采用 2 kN 递增分级施加。竖向荷载的加载范围为 0~25 kPa,采用 5 kPa 递增分级施加。为研究竖向荷载与预应力的耦合作用,将竖向荷载加载到 25 kPa 的基础上,对锚杆施加 0~10 kN 的预应力,采用 2 kN 递增分级施加。具体试验工况如表 1 所示。本文研究总共进行了 23 组模型试验。

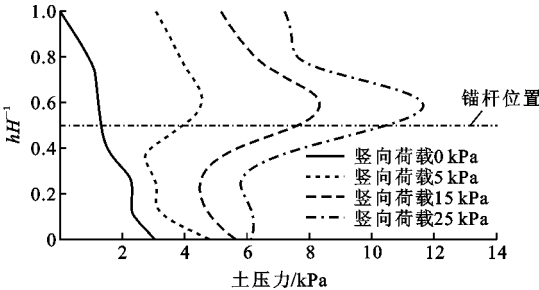


图 10 墙背土压力 1

Fig. 10 Wall Back Soil Pressure 1

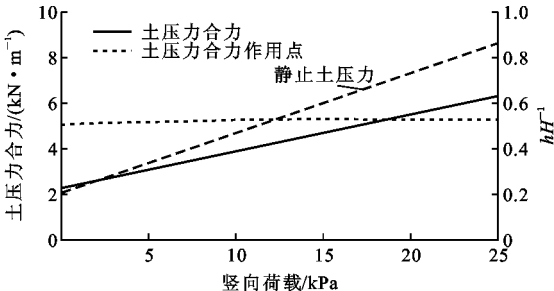


图 11 土压力合力及合力作用点 1

Fig. 11 Soil Pressure Resultant Force and Resultant Force Point 1

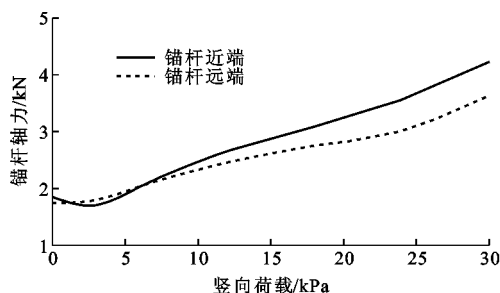


图 12 锚杆轴力变化规律 1

Fig. 12 Change Law 1 of Bolt Axial Force

由图 9 可知,在竖向荷载作用下挡土墙外倾趋势随着竖向荷载的增大而增大,呈现底部位移略大的平动(T 模式)外倾位移,且当竖向荷载为 5 kPa 时,墙体侧向位移仅为  $0.04\% H$ ,当竖向荷载为 25 kPa 时,墙体最大侧向位移约为  $0.119\% H$ 。竖向荷载小于 15 kPa 时,墙身保持竖直,呈现典型的 T 模式外倾且竖向荷载从 5 kPa 增大到 15 kPa,墙体外倾位移量从  $0.015\% H$  增大到  $0.066\% H$ ,但是竖向荷载大于 15 kPa 后墙体底部外倾较大。

由图 10 可知,锚拉式挡土墙墙背侧向土压力呈现明显的抛物线形分布,墙体土压力最大值出现在锚杆位置处,这也证明了假性黏聚力的存在,正是由于锚杆的约束作用,使得墙背土压力在此处相对其他位置大。墙体在顶部到锚杆位置处土压力逐渐增大,在锚杆位置处到墙底土压力逐渐减小。随着竖向荷载的分级增加,墙背侧向土压力基本呈线性增加。由图 11 可知,土压力合力作用点稳定在  $1/2$  墙高位置,土压力合力随着竖向荷载的增大而线性增大。

图 12 反映了锚杆轴力和竖向荷载的变化规律,试验中在锚杆三等分位置处共布设 2 个钢筋计用于量测轴力,因此,图 12 锚杆近端表示靠近试验墙一侧的钢筋计数据,锚杆远端表示靠近固定墙一侧的钢筋计数据。数据显示锚杆轴力随着竖向荷载的增加呈线性增加,靠近试验墙体的一端锚杆轴力相对远端锚杆轴力数值大。

## 5.2 预应力对锚拉式挡土墙力学特性的影响

为了研究锚杆预应力对锚拉式挡土墙力学特性的影响,在墙身中部布设锚杆,通过穿心式千斤顶施加预应力,压力传感器控制预应力大小分级施加。以墙后填土完成且稳定后为初始状态,此时墙身位移量设为 0,整理试验数据,绘制了墙体位移、墙背土压力、土压力合力及锚杆轴力图,如图 13~16 所示。

由图 13 可知,挡土墙墙身为平动叠加绕墙底转

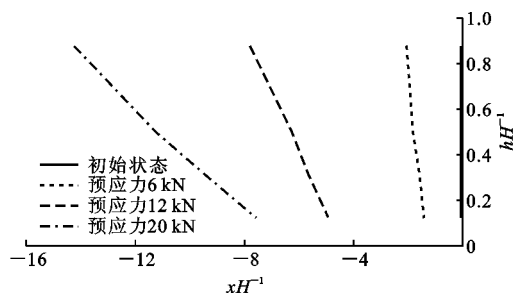


图 13 墙体位移 2

Fig. 13 Displacement 2 of Wall

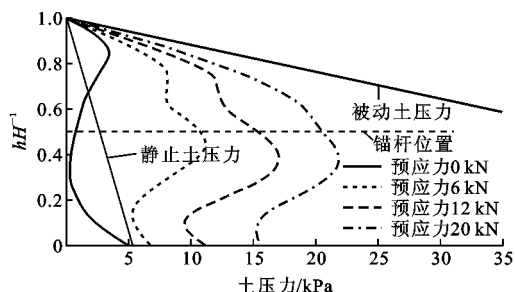


图 14 墙背土压力 2

Fig. 14 Wall Back Soil Pressure 2

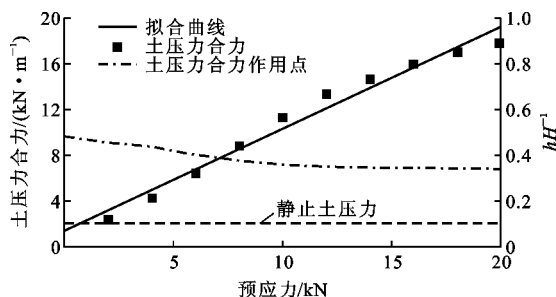


图 15 土压力合力及合力作用点 2

Fig. 15 Soil Pressure Resultant Force and Resultant Force Point 2

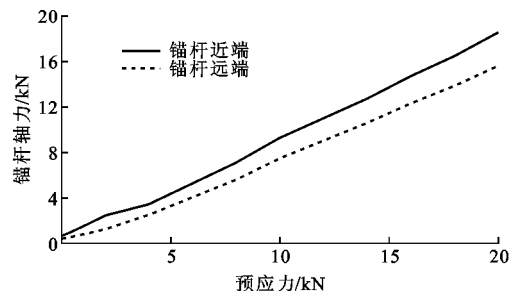


图 16 锚杆轴力变化规律 2

Fig. 16 Change Law 2 of Bolt Axial Force

动(T+RB)位移模式,随着预应力的增大,墙体位移量逐渐增大,由外倾逐渐表现为内倾且墙身倾斜程度逐渐增大。预应力较小(6 kN)时,墙身近似呈刚性平动;预应力适中(12 kN)时,墙身表现为轻微的T+RB位移模式,墙身开始倾斜;预应力较大(20

kN)时,墙身发生完全内倾,最大位移量达到了1.5%*H*。

由图 14 可知,初始状态墙背土压力近似呈静止土压力分布状态,施加预应力后,土压力自上而下普遍增大,呈抛物线形分布,逐渐向库仑被动土压力分布状态演化。土压力峰值位于锚杆位置处墙体,这与前文介绍的锚拉式挡土墙土压力分布特征理论分析结论一致。由图 15 可知,随着预应力的增大,墙背土压力合力呈增大趋势,土压力合力作用点呈降低趋势,且当预应力较小(不大于 8 kN)时,土压力合力作用点位于 1/2 墙高,而当锚杆预应力较大(大于 8 kN)时,土压力合力作用点高度降至 7/16 墙高并趋于稳定。

由图 16 可以看出,随着预应力的增加,锚杆轴力线性增大,但是锚杆不同位置的轴力存在不同程度损失,近端轴力损失约 10%,远端轴力损失约 35%,锚杆受到水平预应力作用后,其自身轴力从预应力作用点到远端逐渐衰减。

5.3 预应力与竖向荷载耦合作用对锚拉式挡土墙力学特性的影响

为了研究预应力与竖向荷载耦合作用对锚拉式挡土墙力学特性的影响,在墙身中部布设锚杆,通过千斤顶及反力架施加 25 kPa 的竖向荷载,通过穿心式千斤顶对锚杆施加预应力,施加范围为 0~10 kN,采用 2 kN 递增分级加载。以墙后填土完成稳定后为初始状态,此时墙身位移量设为 0,整理试验数据,绘制了墙体位移、土压力对比、土压力合力及锚杆轴力图,如图 17~20 所示。

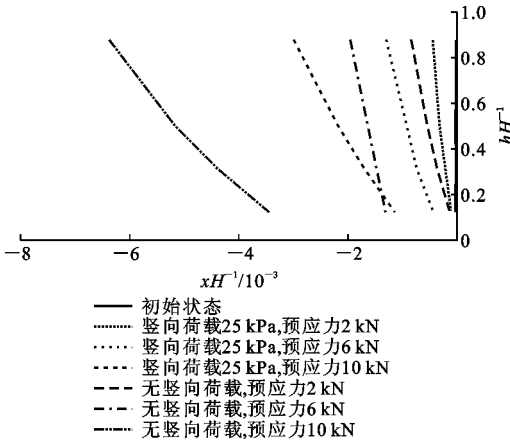


图 17 墙体位移 3

Fig. 17 Displacement 3 of Wall

由图 17 可知,施加竖向荷载后,随着锚杆预应力的增大,墙体呈平动叠加绕墙底转动(T+RB 模式)内倾,位移量逐渐增大。对比只施加锚杆预应力

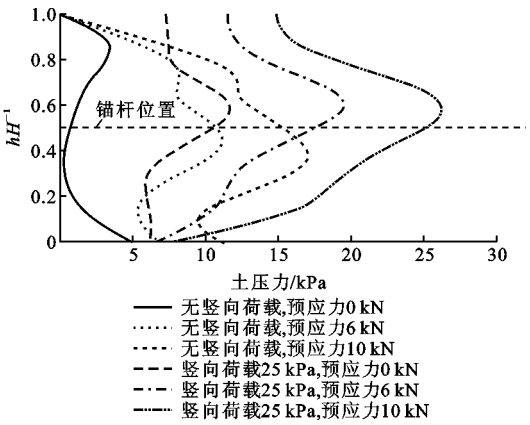


图 18 墙背侧向土压力对比

Fig. 18 Comparison of Lateral Soil Pressure on Wall Back

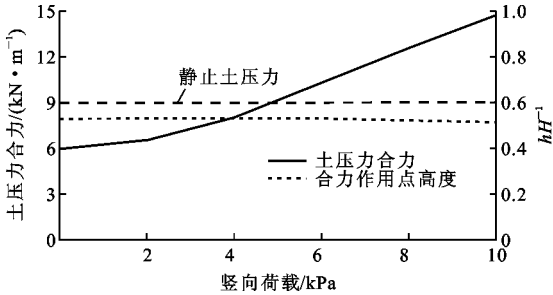


图 19 土压力合力及合力作用点 3

Fig. 19 Soil Pressure Resultant Force and Resultant Force Point 3

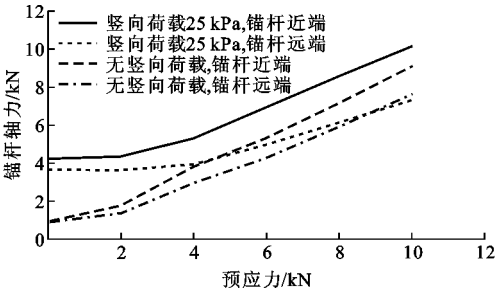


图 20 锚杆轴力变化规律 3

Fig. 20 Change Law 3 of Bolt Axial Force

的墙体位移,由于预应力与竖向荷载的耦合作用,墙体内倾位移量明显减小。

由图 18 可知,墙背侧向土压力呈抛物线形分布,土压力沿挡土墙由高到低先增大后减小,土压力最大值出现在锚杆位置附近。对比不施加竖向荷载和施加 25 kPa 竖向荷载的墙背土压力分布,可以看出施加竖向荷载后土压力数值明显增大,其土压力最大值比相同预应力作用下不施加竖向荷载的土压力多 50%左右。由图 19 可知,竖向荷载 25 kPa 下,随着锚杆预应力的增大,土压力合力逐渐增大,但是

合力作用点稳定在  $1/2$  墙高。

由图 20 可以看出,竖向荷载为 25 kPa 时,随着锚杆预应力的逐渐增大,锚杆轴力亦呈现线性增大趋势,锚杆近端锚杆轴力较远端锚杆轴力大 10% 以上。与无竖向荷载锚杆轴力相比,竖向荷载作用下锚杆轴力约为无竖向荷载的 1.1 倍,因此相同预应力作用下,竖向荷载的施加可增大锚杆轴力,有利于增强锚杆对墙体侧向变形的约束作用。

## 6 结 语

(1)结合锚拉式挡土墙的受力特点,提出了墙后填土在锚杆位置处存在假性黏聚力,预测了锚杆位置处墙背土压力存在峰值。

(2)竖向荷载作用下,锚拉式挡土墙墙体底部呈位移量略大的 T 模式外倾;锚杆预应力作用下,墙体呈 T 模式;预应力与竖向荷载耦合作用下,墙体呈内倾量较小的 T+RB 模式内倾。

(3)基于锚拉式挡土墙模型试验数据,提出了不同荷载条件下墙背土压力呈抛物线的分布规律,峰值出现在锚杆位置处,验证了锚杆加筋形成假性黏聚力的理论假定。

(4)竖向荷载、预应力及二者耦合作用下土压力合力表现出线性增大的趋势,土压力合力作用点稳定在  $1/2$  墙高附近,锚杆轴力表现为从靠近试验墙端到远离试验墙端逐渐衰减。

## 参考文献:

## References:

[1] FANG L, WU M J, WANG G D, et al. Comparative Analysis on Stress State of Submerged Floating Tunnels in Different Anchor Cable Arrangement Modes [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 166: 279-287.

[2] XU F, LI S C, ZHANG Q Q, et al. A New Type Support Structure Introduction and Its Contrast Study with Traditional Support Structure Used in Tunnel Construction [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 63: 171-178.

[3] YANG G H, ZHONG Z H, ZHANG Y C, et al. Optimal Design of Anchor Cables for Slope Reinforcement Based on Stress and Displacement Fields [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, 7(4): 411-420.

[4] LIN Y L, LI Y X, YANG G L, et al. Experimental and Numerical Study on the Seismic Behavior of Anchoring Frame Beam Supporting Soil Slope on Rock Mass [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*,

2017, 98: 12-23.

[5] TERZAGHI K. Record Earth Pressure Testing Machine [J]. *Engineering News Record*, 1932, 109(29): 365-369.

[6] TERZAGHI K. *Theoretical Soil Mechanics* [M]. New York: Wiley and Sons, 1943.

[7] ERTUGRUL O L, TRANDAFIR A C. Lateral Earth Pressures on Flexible Cantilever Retaining Walls with Deformable Geofoam Inclusions [J]. *Engineering Geology*, 2013, 158: 23-33.

[8] 卢坤林, 杨 扬. 非极限主动土压力计算方法初探 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 615-619.  
LU Kun-lin, YANG Yang. Preliminary Study of Active Earth Pressure Under Nonlimit State [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(2): 615-619.

[9] 卢坤林, 杨 扬. 考虑位移影响的主动土压力近似计算方法 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(2): 553-557.  
LU Kun-lin, YANG Yang. Approximate Calculation Method of Active Earth Pressure Considering Displacement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(2): 553-557.

[10] 卢坤林, 朱大勇, 杨 扬. 任意位移模式刚性挡土墙土压力研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(增 1): 370-375.  
LU Kun-lin, ZHU Da-yong, YANG Yang. Study on Soil Pressure of Rigid Retaining Wall with Arbitrary Displacement Mode [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(S1): 370-375.

[11] 徐日庆, 李昕睿, 朱剑锋. 刚性挡土墙平动模式下中间被动土压力的计算 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2010, 44(10): 2005-2009.  
XU Ri-qing, LI Xin-rui, ZHU Jian-feng. Calculation of Intermediate Passive Earth Pressure Against Rigid Retaining Wall with Translation Mode [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Edition*, 2010, 44(10): 2005-2009.

[12] 吴 明, 彭建兵, 徐 平, 等. 考虑土拱效应的挡墙后土压力研究 [J]. *工程力学*, 2011, 28(11): 89-95.  
WU Ming, PENG Jian-bing, XU Ping, et al. Study on Earth Pressure Against Rigid Retaining Walls Considering Soil Arching Effects [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(11): 89-95.

[13] DOU G T, XIA J W, YU W J, et al. Non-limit Passive Soil Pressure on Rigid Retaining Walls [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27: 581-587.

[14] BENMEBAREK S, KHELIFA T, BENMEBAREK N, et al. Numerical Evaluation of 3D Passive Earth Pressure Coefficients for Retaining Wall Subjected to



- Translation[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35 (1): 47-60.
- [15] PARK B S, LEE J, SANG D L. Experimental Investigation of Three-dimensional Earth Pressure According to Aspect Ratio of Retaining Wall [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36 (2): 181-189.
- [16] 李成芳. 预应力锚拉桩三维土拱效应研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- LI Cheng-fang. Study on Three-dimensional Soil Arching Effect of Pre-stressed Anchor Pile [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [17] 刘晓立, 严 驰, 吕宝柱, 等. 柔性挡墙在砂性填土中的土压力试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 505-508.
- LIU Xiao-li, YAN Chi, LU Bao-zhu, et al. An Experimental Study of Earth Pressure on Retaining Wall in Sandy Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 505-508.
- [18] 薛丽影, 杨文生. 某高边坡桩基立柱锚拉式挡土墙设计[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增 2): 1176-1179.
- XUE Li-ying, YANG Wen-sheng. Design of Upright-anchored Pile Retaining Wall in a High Slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 1176-1179.
- [19] GAZETAS G, GARINI E, ZAFEIRAKOS A. Seismic Analysis of Tall Anchored Sheet-pile Walls [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 91(12): 209-221.
- [20] BILGIN O. Numerical Studies of Anchored Sheet Pile Wall Behavior Constructed in Cut and Fill Conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37 (3): 399-407.
- [21] 张宏博, 孟庆宇, 岳红亚, 等. 对拉式挡土墙侧向土压力分布规律试验研究[J]. 公路, 2016(2): 6-11.
- ZHANG Hong-bo, MENG Qing-yu, YUE Hong-ya, et al. Test and Study of Lateral Earth Pressure Distribution Law for Mutual Anchoring Retaining Wall [J]. Highway, 2016(2): 6-11.
- [22] 张宏博, 解全一, 岳红亚, 等. 对拉式挡土墙稳定性模型试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(4): 85-89.
- ZHANG Hong-bo, XIE Quan-yi, YUE Hong-ya, et al. Study on the Stability Model of the Pull-type Retaining Wall [J]. Concrete and Cement Products, 2016(4): 85-89.
- [23] 王娅娜. 悬臂式挡土墙力学特性及结构优化研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- WANG Ya-na. Research on the Mechanical Properties and Structure Optimization of Cantilever Retaining Wall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [24] 张 勇. 悬臂式挡土墙土压力研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- ZHANG Yong. Study of Earth Pressure on Cantilever Retaining Wall [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013.