

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221455

面板对土工袋挡土墙工作性状影响的足尺试验研究

李 钊¹, 林国兵¹, 王雅华², 樊科伟³

(1. 深圳市公明供水调蓄工程管理处, 广东 深圳 518107; 2. 华北水利水电大学管理与经济学院, 河南 郑州 450045; 3. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 鉴于在土工袋挡土墙外侧设置面板可能会影响土工袋挡土墙的工作性状, 开展了固定面板和不固定面板的土工袋挡土墙的足尺试验, 探究了面板对土工袋挡土墙变形模式与土压力的影响。结果表明, 固定和不固定面板的土工袋挡土墙均表现为悬臂式变形模式, 但作用在不固定面板上的土压力小于作用在固定面板上的土压力。基于弹性理论建立了有限位移条件下土工袋挡土墙土压力的解析解, 分析了土工袋挡土墙土压力与水平变形的关系, 发现由于不固定面板的变形约束作用小于固定面板, 作用在不固定面板上的土压力与不带面板的土工袋挡土墙的土压力均接近于计算主动土压力, 表明不固定面板土工袋挡土墙能更加充分利用土工袋挡土墙柔性的特点, 从而有效降低墙后侧向土压力。

关键词: 土工袋挡土墙; 面板; 变形模式; 土压力; 足尺试验

中图分类号: TU43; [TV16]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0133-04

1 引言

土工袋是指将土、砂或碎石等材料装入编织袋形成的袋装物。土工袋具有很高的强度和良好的自立性, 故可直接用于构筑挡土墙^[1,2]。由于土工袋具有一定的变形能力, 堆筑成的土工袋挡土墙在承受较大墙后土压力时, 能依靠土工袋的柔性变形, 减少墙后土压力^[3], 因此土工袋挡土墙是一种柔性挡土墙, 具有造价低、地基处理简便和抗震性能好的优点。土压力是进行挡土墙断面设计和稳定验算的重要荷载, 而挡土墙变形模式与墙后土压力的计算密切相关^[4]。目前对土工袋挡土墙位移模式和墙后土压力已有一些研究, 如薛向华等^[5]通过模型试验, 研究了土工袋挡土墙的变形模式与墙后土压力分布和水平传递规律。由于土工袋挡土墙稳定性与土工袋层间摩擦密切相关, 因此刘斯宏等^[6,7]研究了袋内材料和排列方式对土工袋层间摩擦特性的影响, 并通过水平单元法推导了土工袋墙后土压力的计算公式, 结合土工袋层间摩擦特性, 建立了土工袋挡土墙的抗滑稳定性分析方法。然而, 以往研究土工袋挡土

墙时, 均未在墙前设计面板。但在实际工程中, 为防止车船等蹭撞对土工袋挡土墙的破坏及保护土工袋免受紫外线的照射, 需在土工袋挡土墙前设置面板^[3], 而面板的存在有可能影响土工袋挡土墙位移模式与土压力大小。因此, 本文开展了土工袋挡土墙的足尺试验, 探究了不同固定形式的面板对土工袋挡土墙位移模式与墙后土压力的影响。

2 足尺试验

足尺试验中土工袋挡土墙尺寸为 2.0 m × 1.2 m × 1.8 m (长 × 宽 × 高), 见图 1。土工袋挡土墙由两种规格 (宽 × 长 × 高分别为 40 cm × 40 cm × 10 cm、20 cm × 40 cm × 10 cm) 的土工袋交错布置、垂直堆放而成。土工编织袋原材料为聚丙烯 (PP), 克重为 150 g/m², 经向、纬向抗拉强度分别为 25.0、18.0 kN/m, 经纬向伸长率均小于 18%, 编织袋间摩擦系数为 0.3。现场开挖的粘土作为填土被分层放置墙后, 并用挖掘机反铲压实, 填土物理力学性质见表 1。土工袋袋内充填土体同样为试验所在地点开挖的粘土。为使挡土

收稿日期: 2022-07-15, **修回日期:** 2022-08-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0128900)

作者简介: 李钊(1973-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为岩土工程, E-mail: 183268163@qq.com

通讯作者: 王雅华(1980-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水利水电工程和交通物流, E-mail: wyh_111999@163.com

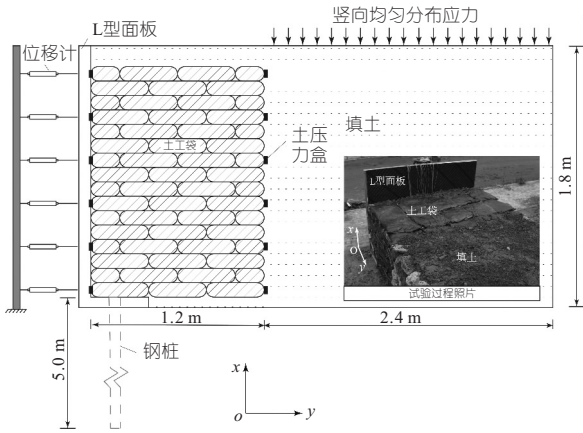


图1 土工袋挡土墙足尺试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of full-scale test on soilbags-constructed retaining wall

表1 填土物理力学性质

Tab. 1 Physical and mechanical properties of excavated soil

含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	液限	塑限	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
16.0	1.48	42	23	9.2	19.8

墙发生变形,在填土表面上放置吨袋,吨袋产生的最大竖向应力为 33.2 kPa。

实际工程中,通常在土工袋挡土墙前方设置 L 型面板,用于防止土工袋挡土墙被撞撞及保护土工袋免受紫外线的照射,有时面板底部还要设置桩基以保障挡土墙的稳定性^[3]。因此,足尺试验中放置了一个 2.0 cm 厚的 L 型铝制面板用于模拟面板,挡板下方沿宽度方向每 0.4 m 设置一根钢柱用于模拟桩基。分别开展两次土工袋挡土墙足尺试验,其中一组面板下方设置钢桩,一组不设置,分别用于研究固定(设置桩基)和不固定(不设置桩基)的 L 型面板对土工袋挡土墙土压力和位移模式的影响。

为量测面板和土工袋挡土墙墙后土压力大小,在面板和土工袋墙后布置了 12 个土压力计,埋设位置见图 1(需要注意的是,试验中所测的均为侧向土压力,故土压力计的受力面应保持水平);为量测面板位移模式,在 L 型面板前方设置 6 个位移计。

3 试验结果与分析

3.1 位移

图 2 为位移计量测的固定和不固定面板的水平位移。由图 2 可看出,竖向应力为 16.8 kPa 时,固定和不固定面板水平位移模式类似于悬臂梁变形模式,即水平位移随墙高增大而逐渐增大;当竖向应力达到 33.6 kPa 时,面板变形量进一步

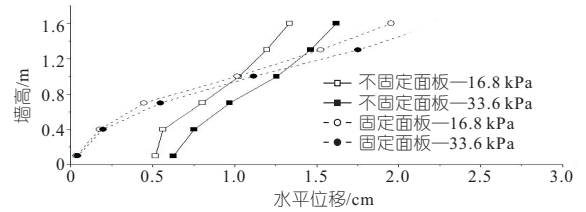


图2 固定和不固定面板的水平位移

Fig. 2 Deformation of fixed panel and unfixed panel

增大。其中,固定面板顶部的水平位移大于不固定面板顶部的水平位移,其底部水平位移则小于不固定面板底部的水平位移。

3.2 侧向土压力

图 3 为固定和不固定面板的土工袋挡土墙中作用在固定面板与土工袋上土压力沿墙高的分布。由图 3 可看出,作用在面板和土工袋上的土压力基本上随墙深度的增加而增大,其中由于土工袋的层间摩擦作用^[3],相同高度处作用在土工袋的土压力大于作用在面板的土压力。然而,固定面板的土工袋挡土墙中作用在相同深度的面板上土压力与土工袋上土压力之间的差值小于不固定面板的土工袋挡土墙中的差值。这是由于固定面板阻碍了土工袋挡土墙的侧向变形,使挡土墙内土工袋压缩的更严重,土工袋刚度也越大,力的传递变得更容易,因此固定面板的土工袋挡土墙中面板上的土压力与土工袋上的土压力之间的差值较小。

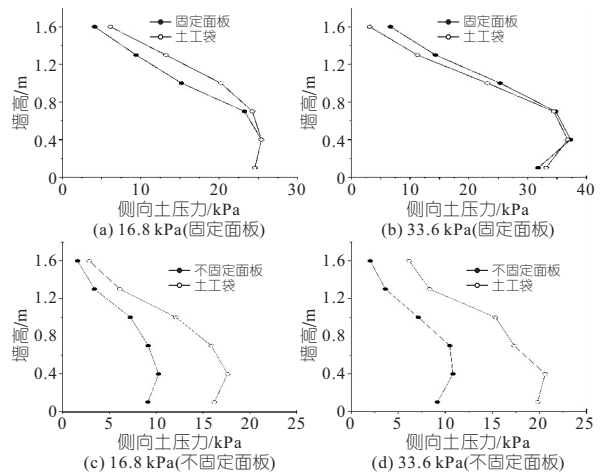


图3 不同竖向压力下固定、不固定面板的土工袋挡土墙土压力沿墙高的分布

Fig. 3 Distributions of measured lateral earth pressures in fixed-panel and unfixed-panel wall under different vertical stresses

图 4 为不同竖向应力下固定和不固定面板的土工袋挡土墙中的土压力对比。由图 4 可看出,竖向应力未施加时,作用在面板上的土压力差值很小,但当竖向应力达到 33.6 kPa 时的差异显著,且作用在土工袋上的土压力也出现了类似现

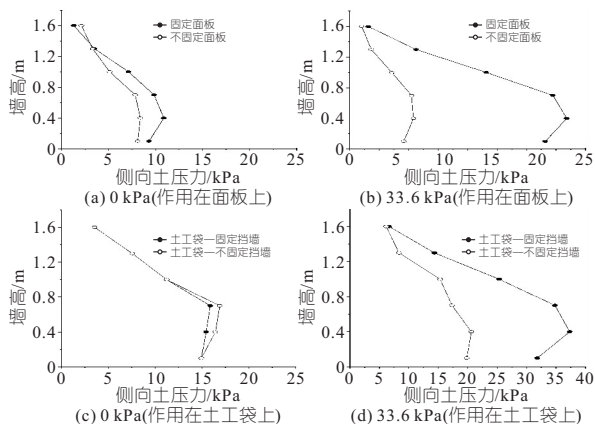


图 4 不同竖向压力下作用在面板上、土工袋上侧向土压力沿墙高的分布

Fig. 4 Distributions of measured lateral earth pressures acting on panel and soilbags under different vertical stresses

象。当竖向应力为 33.6 kPa 时,侧向土压力差值显著是因为不固定面板的挡土墙在墙后土压力作用下整体发生了水平位移(图 2),从而释放了作用在面板和土工袋挡土墙的侧向压力。相比之下,固定面板的挡土墙只有上部面板发生了较明显的水平位移,因此只有该区域的土压力得到释放。因此,竖向应力为 33.6 kPa 时固定面板的挡土墙上部土压力与不固定面板的挡土墙接近,而固定面板的挡土墙下部的土压力明显大于不固定面板的挡土墙。

4 讨论

在实际工程建设中,挡土墙离开土体方向和向着土体方向的偏移量均是有限的,能达到极限平衡状态的工况很少。因此,建立有限位移条件下挡土结构上的土压力十分必要。本文采用党发宁等^[8]方法建立了土工袋挡土墙土压力的解析解,并通过模型试验结果验证了解析解的正确性。

墙后填土上方无荷载的挡土墙静止土压力 σ_0 ^[8] 为:

$$\sigma_0 = \mu \gamma z / (1 - \mu) \tag{1}$$

式中, μ 为土体泊松比; γ 为土的重度; z 为墙体深度。

当土体未达到临界应变时(即有限位移条件),其主动土压力 σ_x ^[8] 表达式为:

$$\sigma_x = \epsilon_x \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 \cdot K p_a (\sigma_3 / p_a)^n + K_0 \gamma z \tag{2}$$

式中, ϵ_x 为侧向应变; σ_1 、 σ_3 分别为大、小主应力; R_f 为破坏比,通常在 0.75~1.00 范围,且实际上与侧限压力无关; c 、 φ 分别为土的粘聚力、内摩擦

角; p_a 为大气压, $p_a = 101 \text{ kPa}$; K 为模量参数,其值为 50~200(软粘土)、200~500(硬粘土)、200~3 000(砂料); n 为无因次指数,其值为 0.3~0.8; K_0 为静止土压力系数。

当土体达到极限平衡时的主动土压力 σ_x ^[8] 为:

$$\sigma_x = \sigma_a = \gamma z K_a - 2c \sqrt{K_a} \tag{3}$$

式中, σ_a 为朗肯主动土压力; K_a 为主动土压力系数, $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ 。

发生朗肯主动土压力的临界应变 ϵ_a 为:

$$\epsilon_a = (\gamma z K_a - 2c \sqrt{K_a}) / E_t - K_0 \gamma z / E_t \tag{4}$$

对于墙体上方有荷载 q 的挡土墙,式(1)~(4)变为:

$$\sigma_0 = \mu(\gamma z + q) / (1 - \mu) \tag{5}$$

$$\sigma_x = \epsilon_x \left[1 - \frac{R_f(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin\varphi)}{2c \cos\varphi + 2\sigma_3 \sin\varphi} \right]^2 \cdot$$

$$K p_a (\sigma_3 / p_a)^n + K_0(\gamma z + q) \tag{6}$$

$$\sigma_x = K_a(\gamma z + q) - 2c \sqrt{K_a} \tag{7}$$

$$\epsilon_a = [(\gamma z + q) K_a - 2c \sqrt{K_a}] / E_t - K_0(\gamma z + q) / E_t \tag{8}$$

为进一步分析面板对土工袋挡土墙侧向土压力的影响,通过土压力理论计算了土工袋挡土墙墙后土压力。模型试验中,墙高 1.8 m,填土密度 1.72 g/cm³,摩擦角 19.8°,粘聚力 9.2 kPa,泊松比取 0.4。填土荷载为 33.6 kPa 时,不固定面板土工袋挡土墙墙后实测土压力接近于计算得到的主动土压力,可认为挡墙此时的水平位移为临界位移 S_{cr} ,因此本文选择临界位移 $S = 0, 0.2S_{cr}, 0.4S_{cr}, 0.6S_{cr}, 0.8S_{cr}, S_{cr}$ 共 6 个有限位移,计算了有限位移条件下土工袋挡土墙墙后土压力沿墙高的分布,计算结果见图 5。由图 5 可看出,随着位移的增大,土工袋挡土墙土压力逐渐从静止土压力转变为主动土压力。其中,固定面板的土工袋挡土墙上部土压力接近于主动土压力,底部土压力接近于静止土压力。总体而言,固定面板的土工袋挡土墙墙后土压力介于主动土压力与静止土压力之间。

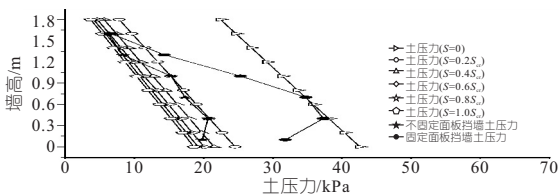


图 5 有限位移条件下土工袋挡土墙土压力沿墙高的分布

Fig. 5 Distribution of lateral earth pressures in soilbags-constructed walls with limited displacement

刘斯宏等^[7]对无面板的土工袋挡土墙开展了模型试验,发现无面板挡土墙位移模式接近于平

动,墙后侧向土压力值与朗肯主动土压力计算值接近。这说明当面板不固定时,土工袋挡土墙由于自身的位移变形未被约束,因此可充分利用自身柔性的特点从而有效降低墙后土压力。

5 结论

固定面板和不固定面板的土工袋挡土墙在墙后土压力的作用下均表现为悬臂式变形模式,但由于固定面板约束了土工袋挡土墙底部的侧向变形,导致作用在固定面板下部的侧向土压力接近于静止土压力,而作用在不固定面板上的侧向土压力接近主动土压力,这说明不固定挡板的土工袋挡土墙能充分利用其自身柔性的特点。

参考文献:

[1] 刘斯宏,汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用[J]. 岩土工程技术, 2007,21(5):221-225.

[2] 黄波,李博文,吴平,等. 土工袋袋内土体强度与剪胀特性研究[J]. 水电能源科学, 2021,39(11):158-162.
 [3] 樊科伟,刘斯宏,徐思远,等. 袋装淤泥质土挡墙现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2341-2348.
 [4] 陈奕柏,柯才桐,高洪波,等. 考虑变位影响的刚性挡墙非极限土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(5): 1060-1070.
 [5] 薛向华,刘斯宏,樊科伟,等. 土工袋柔性挡土墙模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014,12(3):81-84,142.
 [6] 刘斯宏,樊科伟,陈笑林,等. 土工袋层间摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016,38(10):1874-1880.
 [7] 刘斯宏,薛向华,樊科伟,等. 土工袋柔性挡墙位移模式及土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2267-2273.
 [8] 党发宁,张乐,王旭,等. 基于弹性理论的有限位移条件下挡土墙上土压力解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2094-2103.

Full Scale Experimental Study on Influence of Panels on Behavior of Soilbag-constructed Retaining Walls

LI Fan¹, LIN Guo-bing¹, WANG Ya-hua², FAN Ke-wei³

(1. Shenzhen Gongming Water Supply and Storage Engineering Management, Shenzhen 518107, China; 2. School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Setting a panel outside the soilbags-constructed retaining wall may affect the behavior of the wall. Therefore, a full-scale test of the soilbags-constructed retaining wall with fixed panels and with unfixed panels were conducted to explore the influence of the panel on the deformation mode and lateral earth pressure of the wall. The results show the walls with fixed and unfixed panels deformed laterally in a cantilever-like manner, but the lateral earth pressure acting in the fixed-panel wall is greater than that in the unfixed-panel wall. A calculation formula for calculating the earth pressure acting on the soilbags-constructed retaining wall under limited displacement was established based on the linear elastic constitution theory, and then it was used to analyze the relationship between the lateral earth pressures and lateral strain. It is found that distribution of the lateral earth pressure of the soilbags-constructed retaining wall with unfixed panel is close to the calculated active earth pressure as a result of the poor deformation constraint of the unfixed-panel, which indicates that the flexible characteristics of the soilbags-constructed retaining wall can be fully utilized by the wall with unfixed panel, so as to effectively reduce the earth pressure behind the wall.

Key words: soilbags-constructed retaining wall; panel; deformation mode; lateral earth pressure; full scale test

(上接第 132 页)

[5] 谭尧升,樊启祥,汪志林,等. 白鹤滩特高拱坝智能建造技术与应用实践[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021,61(7):694-704.
 [6] 字政明,朱宝凡,吴强,等. 乌弄龙水电站智能灌浆系统应用及探究[J]. 云南水力发电, 2021,37(5):62-66.

[7] 肖锐,宋崔蓉,水小宁. 杨房沟水电站智能灌浆控制系统的设计研究与应用[J]. 四川水力发电, 2020,39(6):16-20,64.
 [8] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范:SL 62-2014[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.

Research and Application of Intelligent Grouting Technology under Complex Geological Conditions

XIAO Bi¹, LI Shu-you², FU Xing-an¹, JIANG Xiao-chun³, LI Guo³

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. South to North Water Diversion Middle Route Industrial Development Co., Ltd., Beijing 100176, China; 3. Chengdu Spring Energy Technology Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Research and exploration on intelligent grouting technology has been conducted in some hydro-power stations in recent years. Intelligent grouting equipment has been invented and intelligent control strategies for conventional geological conditions have been developed. However, the existing technology lacks the intelligent control strategies for pressure sensitive and weak stratum, and is not suitable for grouting construction under complex geological conditions. Relying on the Xiong'an regulation and storage reservoir project and based on the empirical research method, this paper has carried out researches on new intelligent strategies for weak strata such as lift sensitive and split sensitive. The field test results show that the intelligent grouting technology meets the needs of field construction, in which the water pressure and grouting construction process can be intelligently completed, and the lifting and splitting situation can be handled. The research is conducive to ensuring the quality of grouting projects and improving the level of intelligent construction.

Key words: intelligent process control strategy; intelligent grouting; one-button grouting; intelligent construction; xiong'an regulation and storage reservoir project