

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.05.004

土工袋一体化柔性挡墙结构的性能

卢 凉¹, 智贤平¹, 王宗建^{1,2}, 黄 辉³, 吴近明⁴

(1.重庆大学 土木工程学院,重庆 400044;2.重庆交通大学 河海学院,重庆 400074;
3.中交二航局第二工程有限公司,重庆 401120;4.中交二公局隧道工程有限公司,西安 710075)

摘要:土工袋体之间摩擦力不足是造成土工袋挡墙整体性较差的主要原因,现阶段增强土工袋挡墙整体性的研究较少。以传统土工袋挡墙为基础,通过对墙体结构形式进行改良,提出了一种土工袋一体化柔性挡墙结构。结合室内模型试验,研究了以砂土为填料的土工袋一体化柔性挡墙结构在竖向和水平荷载作用下的墙面位移、受拉装置的应力分布规律,并与传统土工袋挡墙和加筋土挡墙进行对比分析,探讨了该挡墙结构水平承载力机制及变形机理,并进行了稳定性分析。该柔性挡墙产生一体化效果并形成连续墙体,有效控制墙面变形,提高墙体抗变形能力,使其稳定性和水平承载力比传统土工袋挡墙高。

关键词:土工袋;一体化;柔性挡墙;墙面变形;摩擦力

中图分类号:TU413

文献标志码:A **文章编号:**1000-582X(2019)05-027-10

Research on integrated retaining wall constructed with soilbag

LU Liang¹, ZHI Xianping¹, WANG Zongjian^{1,2}, HUANG Hui³, WU Jinming⁴

(1.School of Civil Engineering,Chongqing University,Chongqing 400044,P. R. China;
2.College of River & Ocean Engineering,Chongqing Jiaotong University,Chongqing 400074,P. R. China;
3.China Communications 2nd Navigational Bureau 2nd Engineering Co. Ltd,Chongqing 401120,P. R. China;
4.China Communications Second Public Bureau Tunnel Engineering Co.,Ltd., Xi'an 710075,P. R. China)

Abstract: The lack of friction between soilbags was the main reason for poor integrity of soilbag flexible retaining wall. At present, there are few researches about how to enhance integrity of soilbag retaining wall. In order to improve the wall structure of the traditional soilbag retaining wall, integrated soilbag flexible retaining wall structure which has the advantages of good integrity, and strong ability of deformation coordination was proposed. Combined with the laboratory model test, the wall displacement and stress distribution law of the tension device were studied under the vertical and horizontal loads of integrated soilbag flexible retaining wall structure with sand as filler. A comparison is made between the flexible retaining wall and the traditional soilbag and the reinforced retaining wall in terms of the horizontal bearing capacity, deformation mechanism and stability. The flexible retaining wall produces an integrated

收稿日期:2018-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51679018);重庆市基础科学与前沿技术研究专项(CSTC2017JCYJA1410);中央高校专项资金项目(106112016CDJXY200003)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51679018), Research Project of Fundamental Science and Frontier Technology of Chongqing (CSTC2017JCYJA1410), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112016CDJXY200003).

作者简介:卢凉(1978—),女,博士,副教授,博士生导师,主要从事岩土工程研究,(E-mail)luliangsky@163.com。

effect and forms a continuous wall, which effectively controls the deformation of the wall surface and improves the deformation ability of the wall, so the stability and horizontal bearing capacity are higher than that of the conventional soilbag retaining wall.

Keywords: soilbag; integration; flexible retaining wall; wall deformation; friction

土工袋是利用土袋装填砂土、碎石、建筑垃圾等经封口而成的袋装体,具有承载力高^[1-2]、减震效果明显^[3-5]、防冻胀性能良好^[6]和耐腐蚀^[7]等优点,被广泛应用于软土路堤加筋、地基加固、边坡治理等领域^[8]。近年来, Matsuoka 与刘斯宏对土工袋工作机理及工程特性进行了深入研究^[9],在此基础上直接将土工袋构筑挡土墙治理边坡工程。国内外学者通过理论推导^[10-11]、试验研究^[12-13]以及数值计算^[4]的方法对土工袋挡墙进行了研究,内容主要集中于挡墙位移模式^[14]、土压力计算及分布方面^[11]。土工袋挡墙依靠土工袋体之间的摩擦力抵抗墙后土压力,但墙体由于顶部压重较轻而产生层间滑移,造成挡墙失稳破坏^[12]。为解决传统土工袋挡墙袋体滑移问题,徐文杰等采用鑫三角系统构建了土工袋挡土墙^[15];郑斌采用不锈钢扎带将土工袋连接起来,提出了连接式土工袋挡土墙结构^[16]。黄小元在土工袋挡土墙的基础上提出了返包土工袋式加筋土结构^[17]。这些结构中土工袋体之间均采用连接扣进行机械连接,以此降低袋体层间滑移,但存在连接扣连接较为困难和需多次施加预紧力的问题,且墙体顶部袋体之间未增强摩擦力。

笔者在传统土工袋挡墙的基础上,提出了能够控制墙体变形的被动应力式挡墙^[18],为更容易在试验过程中实现挡墙控制变形的性能,提出了土工袋一体化柔性挡墙。结合室内模型试验,研究挡墙水平承载力及墙体变形规律,并对挡墙进行了稳定性分析,揭示了挡墙水平承载力机制及变形机理,为设计挡墙结构形式提供相应的参考。

1 挡墙结构形式

土工袋一体化柔性挡墙结构是在传统土工袋柔性挡墙结构的基础上加以改进,通过调整挡墙自身的结构,利用墙后土压力提高挡墙的局部或整体稳定性的一种新型挡墙。如图 1 和图 2 所示,挡墙结构由多个土工袋组成的墙体和受拉装置构成,其中受拉装置包括受拉杆和上下受压垫板,受拉杆件之间采用焊接或套筒连接,而与受压垫板之间采用螺母连接,可根据实际情况沿柔性分割体长边方向按照一定距离设置多排受拉装置。

当墙体被动受力(土压力)时,挡墙中的受拉杆会相应产生拉应力,通过墙顶和墙底的受压垫板可将产生的拉应力以拉反力方式传递给墙体,提高了一体化挡墙的整体性。拉应力增加的同时土工袋之间的正应力增加,可有效阻止土工袋的滑动,提高挡墙的局部变形能力。随着土压力增加,通过上述的应力传递可进一步提高挡墙的整体性和局部抗变形能力,形成了良性循环。当墙后土体的土压力足够大,导致挡墙产生整体滑移和倾覆时,可考虑在维持挡墙躯体体积不变时,在墙后铺设加筋材料等简单措施来提高挡墙的抗变形能力和稳定性。

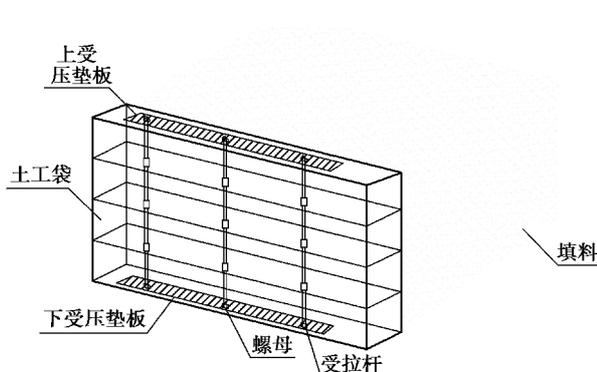


图 1 土工袋一体化柔性挡墙结构模型

Fig. 1 Structure model of integrated retaining wall constructed with soilbag

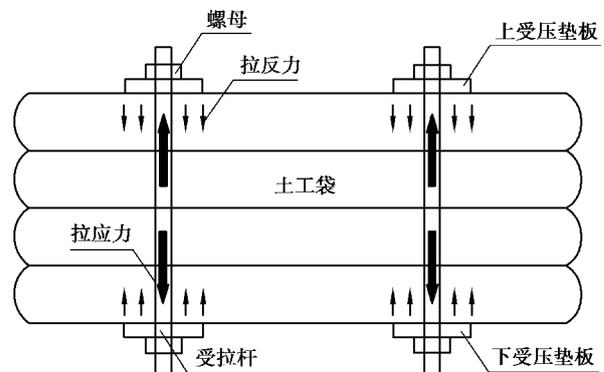


图 2 土工袋一体化柔性挡墙结构内力图

Fig. 2 Structure internal force diagram of integrated retaining wall constructed with soilbag

2 模型试验

2.1 试验模型

为了研究土工袋一体化柔性挡墙的承载力机制和变形机理,进行了室内小比例模型试验。在设计模型试验时,为了使模型试验很好地对原型进行再现并将试验结果应用到所模拟的原型系统中,试验模型与原型需要保持一定的比例关系。由于试验模型的设计参数与原型参数完全满足相似关系非常困难,根据筋材的强度相似和土工袋尺寸相似设计模型试验^[19]。筋材采用纱窗网模拟,其中 5 cm 带宽的筋材抗拉强度 $\sigma=25.3$ kN/m,工程常用的土工格栅抗拉强度为 50~200 kN/m,取相似比为 1:10。

为了使模型结构尺寸的相似比与筋材强度的相似比保持相同,试验所用模型箱是四面封闭式的长方体装置,如图 3 所示。该装置的尺寸为 75 cm(长) \times 45 cm(宽) \times 50 cm(高)。模型箱侧壁采用凡士林和保鲜膜进行光滑处理,减少侧壁对墙体的影响。其中,实际采用尺寸为 42 cm(长) \times 15 cm(宽) \times 10 cm(高)的尼龙袋子模拟土袋,工程常用土工袋大小为 100 cm(长) \times 100 cm(宽) \times 100 cm(高),取相似比为 1:10;土工袋的填料和墙背回填土采用砂土,取相似比为 1:1。

由于挡墙竖向稳定性强,竖向加载使挡墙发生破坏难度较大。为使挡墙发生破坏,模型试验的加载采用水平和竖向方式。如图 4 所示,采用可拆卸砂土堆载模拟活载或建筑物等的竖向荷载,堆载底面的尺寸为 45 cm(长) \times 10 cm(宽)。

由于墙背施加水平荷载难度较大,试验通过千斤顶抬升模型箱后缘,运用砂土在垂直面板方向的重力分力 W_x ,模拟墙后填料的水平荷载,如图 5 所示。

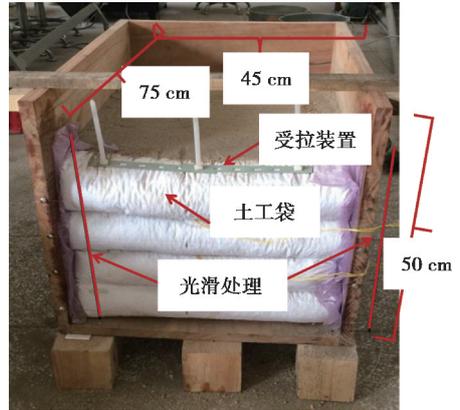


图 3 模型试验装置图

Fig. 3 Device diagram of model test

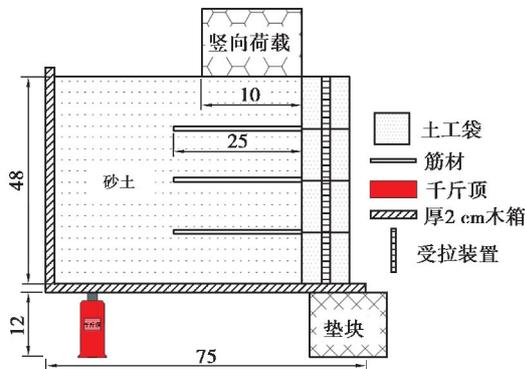


图 4 竖向荷载加载模型图 (单位:cm)

Fig. 4 Model diagram of vertical load

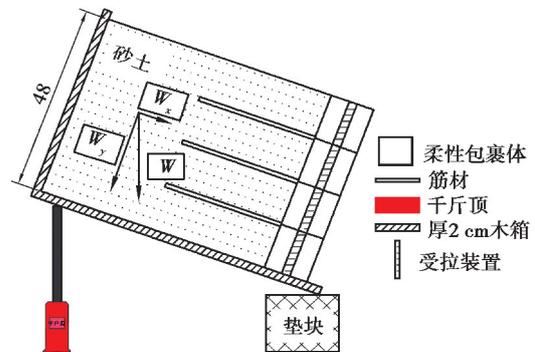


图 5 水平荷载加载模型图 (单位:cm)

Fig. 5 Model diagram of horizontal load

2.2 试验材料

根据国内外学者在土工合成材料与填料特性的研究^[20],选用砂土作为填料。砂土的物性试验包括筛分试验、比重试验、击实试验和直接剪切试验,具体步骤及数据处理参照《土工试验方法标准》^[21],其中物理力学参数如表 1 所示。

砂土的颗粒级配试验采用筛分法,颗粒级配曲线如图 6 所示。砂土的击实试验采用轻型标准击实仪进行试验,密度试验采用环刀法测量,比重试验采用比重瓶法测定,直剪试验采用应变控制式直接剪切仪测定,抗剪强度曲线如图 7 所示。

表 1 砂土的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of sand

填料	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	最小干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	相对密实度/%	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	比重 G_s	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
砂土	1.8	1.1	1.816	1.516	90	1.45	2.61	0	32.4

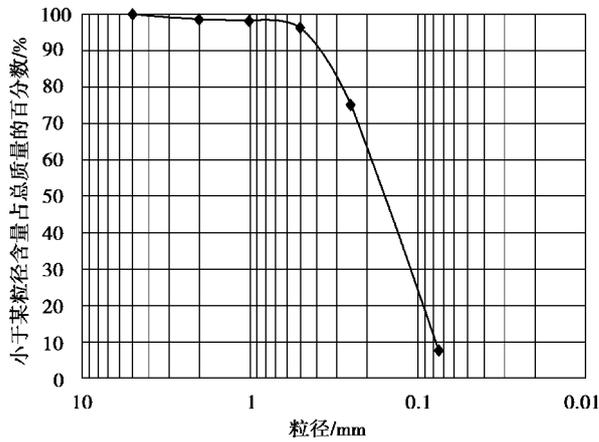


图 6 填料颗粒级配曲线

Fig. 6 Particle size distribution curve

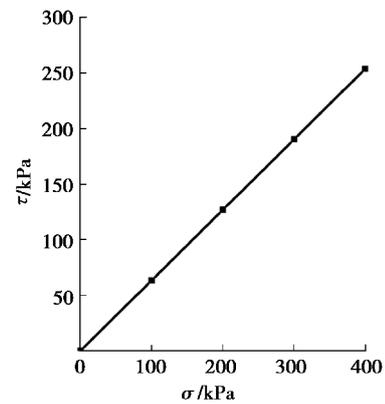


图 7 填料的抗剪强度曲线

Fig. 7 Shear strength curve of filler

纱窗作为试验筋材,其尺寸为 20 cm(长)×5 cm(宽),在万能试验机上进行标准拉伸试验,试验结果如图 8 所示。筋材的线弹性模量 E_t 根据以下公式计算:

$$E_t = \frac{\sigma \cdot t}{\varepsilon} = \frac{F_N}{b \cdot \varepsilon}, \quad (1)$$

式中: F_N 为施加的拉力值; b 为筋材宽度; ε 为筋材的应变; t 为筋材厚度。

计算得到筋材的平均线弹性模量 E_t 为 26.3 kN/m,筋材厚度 t 为 0.1 cm。

试验受拉杆采用绑扎带进行模拟,其尺寸为 20 cm(长)×0.5 cm(宽),在万能试验机上进行标准拉伸试验,试验结果如图 9 所示。通过式(1)计算受拉杆的平均线弹性模量 E_t 为 750 kN/m,实际工程中常用受拉杆弹性模量的相似比为 1:10,受拉杆厚度 t 为 0.1 cm。

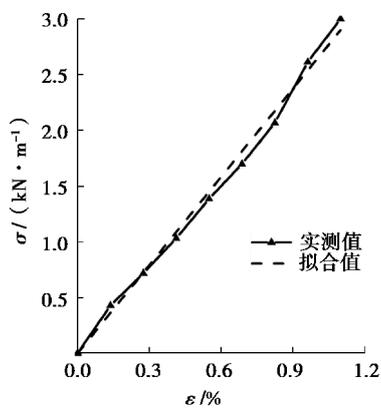


图 8 筋材的应力应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of reinforcement

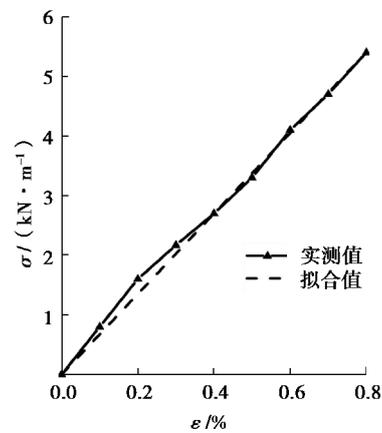


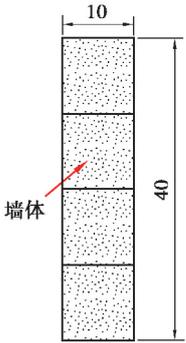
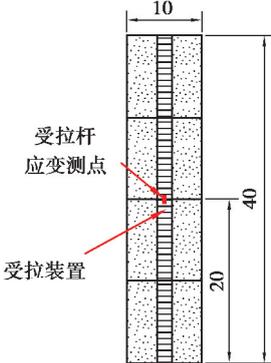
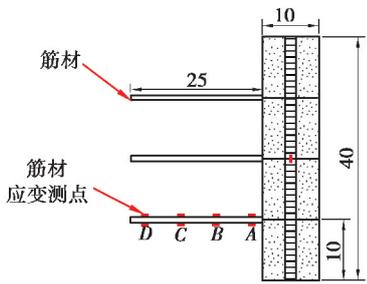
图 9 受拉杆的应力应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of steel bars

2.3 试验方案

为研究土工袋一体化柔性挡墙结构的性能,文中采用工况一(无受拉装置、无筋材)、工况二(有受拉装置、无筋材)、工况三(有受拉装置、有筋材)3种工况进行对比,试验方案如表 2 所示。其中,工况一与工况二对比研究挡墙结构对墙面变形和墙体承载力的影响,工况二与工况三对比分析挡墙加筋对墙面变形和墙体承载力的影响。

表 2 挡墙试验方案
Table 2 Experimental scheme of retaining wall

工况一 (无受拉装置、无筋材)	工况二 (有受拉装置、无筋材)	工况三 (有受拉装置、有筋材)
		

2.4 测点布置

试验中土工袋一体化柔性挡墙的变形情况由墙面中心轴到试验模型箱底边缘的距离 S_j 表示。试验挡墙填筑完成后,测量墙面中心轴位置与试验模型箱底部边缘的距离为变形初始值 S_1 ;施加荷载后,测得中心轴与边缘的距离 S_2 与基准值 S_1 的差值即为墙体的变形量 Δd_j 。试验测点布置如图 10 所示。

考虑不同荷载作用下,墙体发生变形,使受拉装置产生应力,其应力可通过应变片测得。为消除弯矩对应变测量的影响,试验应变片采用对称贴片方式,其位置如表 2 中工况二所示。根据《公路加筋土工程设计规范》^[22],筋材长度取为 25 cm。结合重力式挡墙最大变形在挡墙高度 $H/3$ 处,在相应位置筋材的中轴线上贴应变片,且 4 个测点 A、B、C、D 距墙面的水平距离分别为 2、9、16、23 cm,如表 2 中工况三所示。

2.5 试验步骤

1)为了将千斤顶安放在模型箱底部后缘中心,在模型箱底部 4 个顶角位置安装预制垫块至初始高度,如图 7 所示。将土工袋充填砂土并依次堆叠制作挡墙墙体,并在相应位置安装受拉装置,最后装填墙后回填土。试验前采用应变片和千分尺分别测量筋材、受拉装置的初始应变 ϵ_{r1} 、 ϵ_{j1} 和墙面初始变形 S_1 。

2)试验开始时,在试验模型顶部施加 0.5 kN 的竖向荷载,施加方法如图 5 所示,待挡墙稳定后测量筋材和受拉装置的应变 ϵ_{r2} 、 ϵ_{j2} ,挡墙墙面变形 S_2 。此时,所测筋材应变变化量为 $\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1}$ (即 $\Delta\epsilon_{r1}$),受拉装置的应变为 $\epsilon_{j2} - \epsilon_{j1}$ (即 $\Delta\epsilon_{j1}$),墙体变形量为 $S_1 - S_2$ (即 Δd_1)。

3)撤去竖向荷载,用千斤顶将墙体依次抬升 4、8、12 cm...,以模拟不同大小的水平荷载。在每级荷载作用下,待挡墙稳定后,分别测得筋材、受拉装置应变及墙面变形。



图 10 墙面位移测点位置图(单位:cm)
Fig. 10 Location of wall displacement measurement point

4)千斤顶持续抬升,水平荷载逐渐增加,直至挡墙破坏,试验结束。

3 试验结果及分析

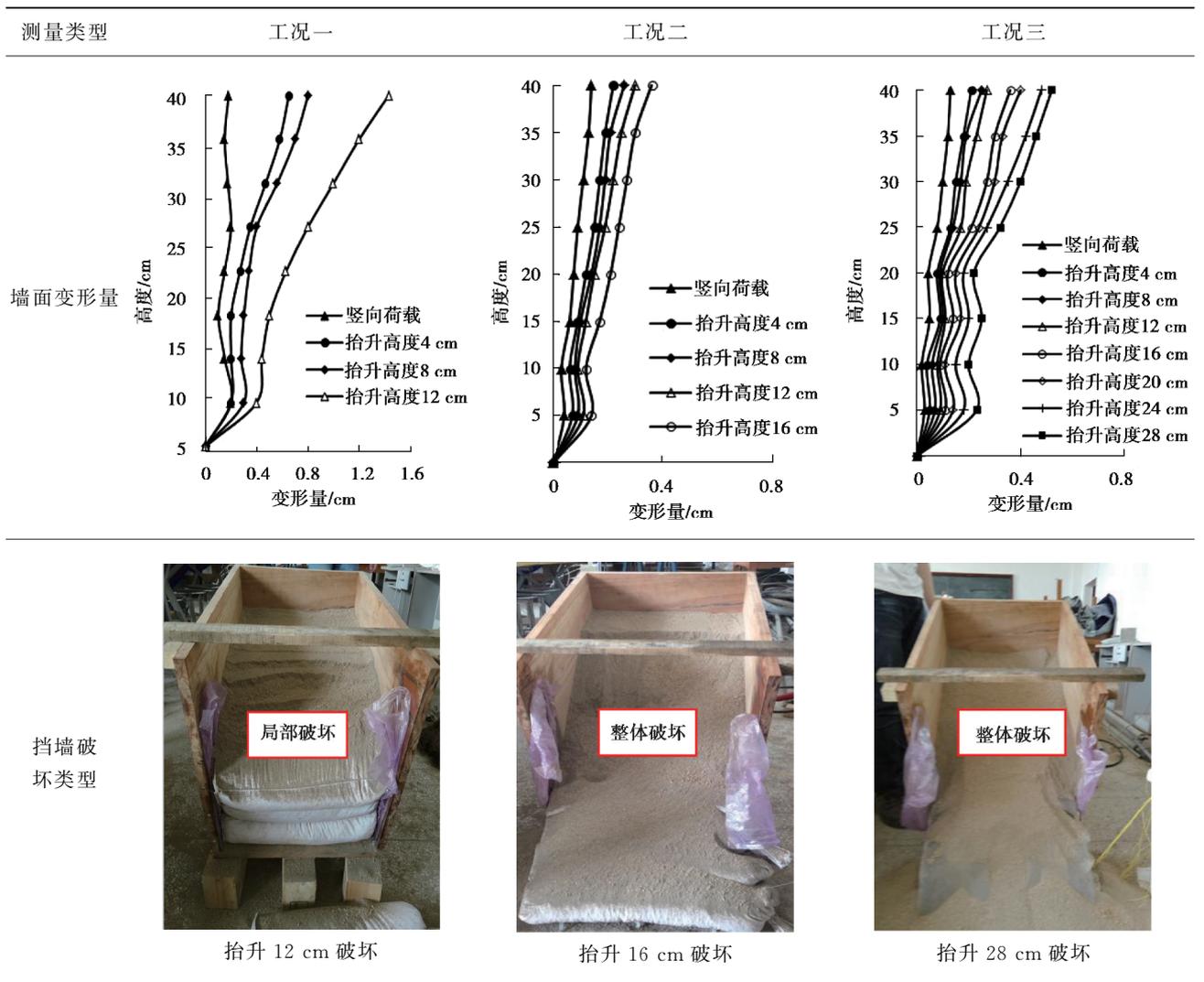
3.1 墙面变形的分析

表 3 对比了不同工况下墙面变形和墙体破坏,工况一(土工袋挡墙)墙体控制变形的能力比较低,墙面的变形量随着千斤顶抬升高度增加而增加。当抬升高度达到 12 cm 时,挡墙发生局部破坏,墙面顶端水平变形量达到 1.6 cm;工况二(一体化柔性挡墙)挡土墙控制变形的能力显著提升,当抬升高度达到 12 cm 时,墙面顶端的水平变形量为 0.34 cm,相比工况一减少 78.7%,这是由于土工袋体之间产生了一体化的效果。当抬升高度达到 16 cm,挡墙才发生破坏,其破坏类型为整体破坏;工况三(加筋一体化挡墙)在工况二基础上进行了加筋强化,其控制墙面变形能力更强。当抬升高度达到 12 cm 时,墙面顶端的水平变形量仅为 0.23 cm,相比工况一减少 85.6%,这是由于筋材和墙体产生了一体化的效果,可显著提高墙体抵抗变形的能力。当抬升高度达到 28 cm 时,挡墙才发生破坏,其破坏类型为整体破坏。

墙体破坏时墙面变形量均为下小上大,且在墙面靠下部土工袋接触面处变形量有减小趋势,特别是工况二和工况三减小趋势较明显。这是由于土工袋依靠接触面间产生的摩擦力相互约束维持稳定,当工况二和工况三墙面变形引起受拉装置产生反力,增加接触面摩擦力,故减小趋势明显。

表 3 不同工况墙面变形及墙体破坏类型图

Table 3 Wall deformation and wall damage patterns under different working conditions



3.2 受拉装置的应力分析

如图 11 所示,随着模型箱抬升高度的增加,受拉装置应力均出现先增大后减小的现象,其中,工况二、工况三所产生的最大应力分别为 560 kPa 和 630 kPa。这是由于随着模型箱的抬升,作用于墙背侧向土压力不断增加,墙体发生变形,使受拉装置应力增大。当模型箱倾斜到一定角度后,挡墙位移增大,侧向土压力减小,则受拉装置应力相应减小。

3.3 筋材的应力分析

如图 12 所示,随着模型箱抬升高度的增加,筋材应力先增大后减小。这是因为随着模型箱的抬升,墙体变形增加,筋材应力增大。但当模型箱抬升到一定高度,填土沿滑移面产生破坏,筋材发生向墙体方向移动,故应力减小。

此外,沿筋材方向应力出现先增大后减小,筋材应力成单峰值分布,如图 13 所示。这主要是由于侧向土压力对墙体附近产生的应力峰值,应力单峰值情况与文献[23]试验结果一致。

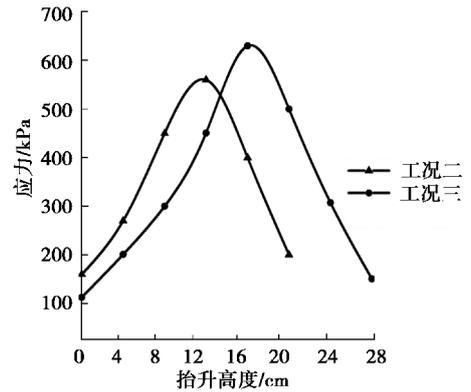


图 11 受拉装置在不同荷载条件下应力变化图
Fig.11 Stress change of tensile device under different load conditions

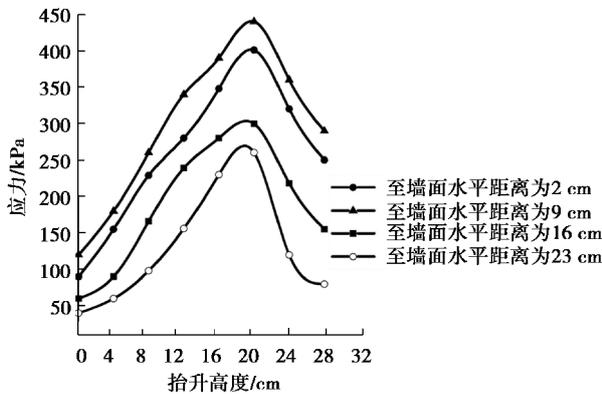


图 12 不同荷载作用下筋材的应力变化图
Fig.12 Reinforcement stress change under different load

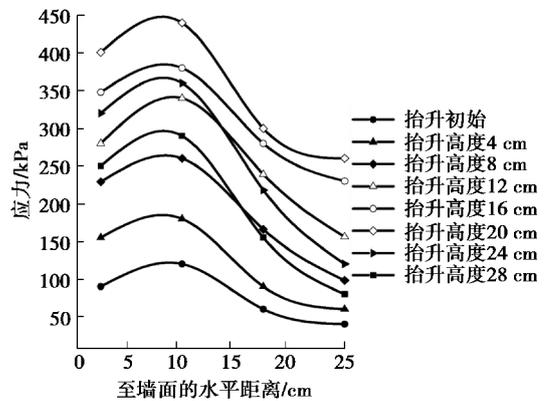


图 13 沿筋材方向的应力变化图
Fig.13 Stress change along direction of reinforcement

3.4 模型试验的稳定性分析

随着模型箱抬升高度不断增加,墙后土体侧向土压力不断增大,造成挡墙产生滑移破坏或倾覆破坏。文中对 3 个工况中的挡墙在每一级荷载作用下进行抗滑移和抗倾覆稳定性计算,计算方法如下。

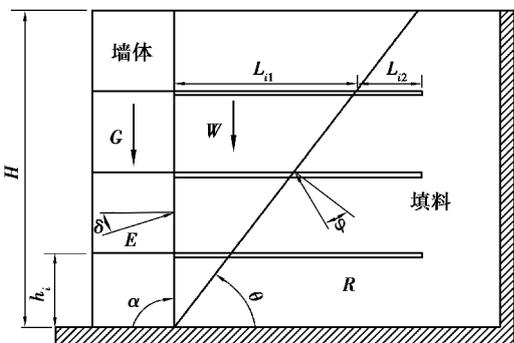


图 14 土压力计算图
Fig. 14 Calculation diagram of earth pressure

由图 14 可知,所求滑体自重为

$$w = 0.5\gamma H^2 \cot\theta + q, \tag{2}$$

式中: H 为墙体的高度, m; γ 为砂土的天然重度; θ 为滑动面与水平面的夹角, ($^\circ$); q 为上部荷载, kN。

滑块对墙面土压力为

$$E = \frac{w \sin(\theta - \varphi)}{\sin(\theta - \varphi + \alpha - \delta)}, \tag{3}$$

式中: φ 为砂土的内摩擦角, ($^\circ$); α 为墙背与墙底水平投影的夹角, ($^\circ$); δ 为墙背与岩土摩擦角,取内摩擦角的 0.33 倍, ($^\circ$)。

由于筋材的抗拉强度较高,筋材与砂土的综合摩擦系数计算公式为

$$f = \tan\varphi, \tag{4}$$

筋材的拉力计算为

$$L = L_{i1} + L_{i2}, \quad (5)$$

$$L_{i1} = \frac{h_i}{\tan\theta}, \quad (6)$$

$$T_f = 2f\sigma_v bL_{i2}, \quad (7)$$

式中： f 为综合摩擦系数； σ_v 为筋材竖向正应力，kPa； b 为筋材的宽度，m； L 为筋材的长度，m； L_{i1} 为筋材自由段； L_{i2} 为筋材的锚固段； h_i 为筋材位置距墙体底端的垂直距离。

在每一级荷载作用下改变 θ 的大小，利用式(2)和式(3)试算砂土对挡墙的土压力 E ，取其最大值作为该级的土压力，通过式(7)计算每层筋材的拉力。为了确定挡墙底端袋体与砂土之间的摩擦系数，根据设计手册^[24]，其摩擦系数 μ 为 0.4。最后，根据《建筑边坡工程技术规范》^[25] 中求解重力式挡墙稳定性的相关公式可得出挡墙的抗滑移稳定性系数、抗倾覆稳定性系数，其计算结果如表 4 所示。

表 4 挡土墙稳定性验算

Table 4 Calculation of stability of retaining wall

荷载级数	工况一(土工袋挡墙)		工况二(一体化柔性挡墙)		工况三(加筋一体化挡墙)	
	抗滑移稳定性	抗倾覆稳定性	抗滑移稳定性	抗倾覆稳定性	抗滑移稳定性	抗倾覆稳定性
竖向荷载	1.87	2.67	1.87	2.67	4.62	5.60
抬升高度 4 cm	1.66	2.45	1.66	2.45	3.91	4.78
抬升高度 8 cm	1.49	2.21	1.49	2.21	3.33	4.07
抬升高度 12 cm	1.34	1.99	1.34	1.99	2.81	3.45
抬升高度 16 cm	—	—	1.22	1.82	2.41	2.92
抬升高度 20 cm	—	—	—	—	2.05	2.48
抬升高度 24 cm	—	—	—	—	1.78	2.16
抬升高度 28 cm	—	—	—	—	1.49	1.83

由表 4 可知，随着挡墙抬升高度增加，挡墙抗滑移和抗倾覆稳定性降低，这是由于抬升高度增加，墙后侧向土压力增加，故挡墙稳定性降低；工况一抬升高度达到 12 cm 时，抗滑移稳定性系数、抗倾覆稳定性系数分别为 1.34 和 1.99，此时挡墙发生局部破坏。工况二抬升高度达到 16 cm 时，抗滑移稳定性系数、抗倾覆稳定性系数分别为 1.22 和 1.82，此时，挡墙发生整体破坏，且工况一和工况二在每一级荷载下稳定性相同，这说明受拉装置对墙体稳定性的影响较少，但能提高墙体的整体性；工况三抬升高度达到 16 cm 时，抗滑移稳定性系数为 2.41，相比工况二提高 97.5%；抗倾覆稳定性系数为 2.92，相比工况二提高了 60.4%，这表明筋材与墙体产生一体化的效果，能显著提高挡墙的稳定性和整体性。当抬升高度达到 28 cm 时，挡墙的抗滑移稳定性系数、抗倾覆稳定性系数分别为 1.49 和 1.83，挡墙发生整体破坏。此时，挡墙的抗滑移稳定性系数大于 1.3，抗倾覆稳定性系数大于 1.6，这是由于模型箱侧面对墙体的摩擦不可能完全消除，故挡墙破坏时的稳定性系数大于重力式挡墙的安全系数；3 个工况中的挡墙破坏时，挡墙的抗滑移稳定性系数和抗倾覆稳定性系数均接近重力式挡墙的安全系数，因此，用这种方法对土工袋柔性一体化挡墙进行稳定性分析是切实可行的。

4 结 论

1) 在传统土工袋挡墙结构的基础上，优化墙体结构形式，提出了一种土工袋一体化柔性结构挡墙。

2)通过模型试验表明,在水平荷载作用下,新型挡墙墙面变形及水平承载力性能与土工袋挡墙结构相比分别具有明显的降低和显著的提高。墙体抵抗变形能力增强,土工袋体之间产生了一体化的效果。

3)通过对受拉装置的应力和墙面位移分析可知,当侧向土压力作用于挡墙时,受拉装置产生变形反作用于土工袋,增加土工袋之间摩擦力,从而控制墙面变形,且墙面变形量存在下小上大的分布规律。

4)根据不同工况挡墙的稳定性的分析发现该挡墙整体性较强。在维持挡墙结构和体积不变时,还可通过加筋方式进一步提高挡墙的水平承载力和稳定性,此时墙体与筋材一体化效果更加明显。

5)通过库伦土压力理论及加筋理论分别计算土压力和筋材的拉力,结合重力式挡墙稳定性计算理论,提出了一种土工袋一体化柔性挡墙稳定性计算方法。该方法具有简单适用的特点,能够与实测结果较好吻合。

参考文献:

- [1] Matsuoka H,Liu S H. New earth reinforcement method by soilbags[J]. Soils and Foundations,2003,43(6):173-188.
- [2] Li Z H,Liu S H,Wang L J, et al. Experimental study on the effect of frost heave prevention using soilbags[J]. Cold Regions Science and Technology,2013,85:109-116.
- [3] Matsuoka H, Mauramatsu D, Liu S H, et al. Reduction of environment ground vibration by soilbags[J]. Journal of Geotechnical Engineering,2004,(764III-67):235-245.
- [4] Ye B, Muramatsu D, Ye G L, et al. Numerical assessment of vibration damping effect of soilbags[J]. Geosynthetics International,2011,18(4):159-168.
- [5] Nakagawa Y,Chen G L,Tatsui T, et al. Verification of vibration reduction characteristics with soilbag structure[C] // Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics. Shanghai:[s. n.],2008:603-608.
- [6] Li Z,Liu S H,Feng Y T. Numerical study on the effect of frost heave prevention with different canal lining structures in seasonally frozen ground regions[J]. Cold Regions Science and Technology,2013,85:242-249.
- [7] 周治民.土工袋的抗腐蚀性实验研究[J].山西建筑,2015,41(25):87-88.
ZHOU Zhimin. Experimental study on corrosion resistance of soilbag [J]. Shanxi Architecture, 2015, 41 (25): 87-88. (in Chinese)
- [8] Wang L J,Liu S H,Zhou B. Experimental study on the inclusion of soilbags in retaining walls constructed in expansive soils[J]. Geotextiles and Geomembranes,2015,43(1):89-96.
- [9] Matsuoka H,Liu S H. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. London:A.A. Balkema Publishers ,Taylor and Francis,2005.
- [10] Chen H,Liu S H. Slope failure characteristics and stabilization methods[J]. Canadian Geotechnical Journal,2007,44(4):377-391.
- [11] 应宏伟,朱伟,郑贝贝,等. 柔性挡墙的主动土压力计算及分布研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(2):1-6.
YING Hongwei,ZHU Wei,ZHENG Beibei, et al. Calculation and distribution of active earth pressure against flexible retaining walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,36(2):1-6. (in Chinese)
- [12] 薛向华,刘斯宏,樊科伟,等. 土工袋柔性挡墙模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2014,12(3):81-84.
XUE Xianghua,LIU Sihong,FAN Kewei, et al. Model test on retaining wall constructed with soilbags[J]. South to North Water Transfersand Water Science & Technolog,2014,12(3):81-84. (in Chinese)
- [13] 刘斯宏,李玲君,张雨灼,等.土工袋挡土墙小型振动台试验[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(3):236-243.
LIU Sihong,LI Lingjun,ZHANG Yuzhuo, et al.Small-scale shaking table tests on retaining wall constructed with soilbags [J]. Journal of Hohai University,2015,43(3):236-243. (in Chinese)
- [14] 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.
LIU Sihong,XUE Xianghua,FAN Kewei, et al. Earth pressure and deformation mode of a retaining wall constructed with soilbags[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,36(12):2267-2273. (in Chinese)
- [15] 徐文杰,胡瑞林,骆祥君.一种新型的软体结构在边坡防护中的应用[J].长安大学学报(自然科学版),2008,28(5):86-90.

- XU Wenjie, HU Ruilin, LUO Xiangjun. Application of a new kind of soft structure to slope protection[J]. Journal of Chang an University, 2008, 28(5): 86-90. (in Chinese)
- [16] 郑斌. 连接式土工袋结构性能的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHEN Bin. The performance study of connected soilbags structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [17] 黄小元. 返包土工袋式加筋土结构性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
HUANG Xiaoyuan. Analysis of wrap soilbags reinforced structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [18] 卢谅, 智贤平, 王宗建, 等. 一种被动应力控制墙体变形式挡墙及其构建方法; 中国, CN106013216A[P]. 2016-10-12.
LU Liang, ZHI Xianping, WANG Zongjian, et al. Passive stress control variant of retaining wall and construction method; china, CN106013216A[P]. 2016-10-12. (in Chinese)
- [19] 陈红娟, 李小军, 闫维明, 等. 锯末混合土场地模型振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2068-2077.
CHEN Hongjuan, LI Xiaojun, YAN Weiming, et al. Shaking table tests on sawdust-mixed clay site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 39(11): 2068-2077. (in Chinese)
- [20] Muhammet V A, Craig H B. Effect of temperature on shear strength of two geomembrane-geotextile interfaces[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2005(23): 443-453.
- [21] 中华人民共和国交通部. 土工试验方法标准 GB J 123-1988[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Standard for geotechnical test methods: GB J 123-1988 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese)
- [22] 中华人民共和国交通部. 公路加筋土工程设计规范 JIJ/051-91[S]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Specification for reinforced earth engineering design of highway JIJ/051-91[S]. Beijing: China Communications Press, 1991. (in Chinese)
- [23] 杨广庆, 吕鹏, 庞巍, 等. 返包式土工格栅加筋土高挡墙现场试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 517-522.
YANG Guangqing, LYU Peng, PANG Wei, et al. Research on geogrid reinforced soil retaining wall with wrapped face by in-situ tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 517-522. (in Chinese)
- [24] 堀内晴生, 辰井俊美, 了戒公利. 土研センター「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアル[J]. 土木技術資料, 2013, 55(5): 56-59.
Horiuchi H, Tatsui T, Ryokai K. Civil engineering journal design and construction manual of pile up method using weatherproof largesized sandbags[J]. Civil Engineering Journal, 2013, 55(5): 56-59. (in Japanese)
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范 GB/50330-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering GB/50330-2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)