

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240604001

抗风化大体积土工袋工程应用与抗压性能研究*

王宗建^{1,2}, 周政¹, 曾言³, 竜田尚希⁴

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044; 3. 万州区水利局, 重庆 404100; 4. 国立富山大学大学院理工学研究部(都市デザイン学), 富山市五福 3190)

摘要: 抗风化大体积土工袋在抢险防灾减灾工程中有着广泛应用,但目前对其性能要求和工程使用规范尚不明确。通过总结国内外结合工程实践,阐述了关于该工法的多项基本性能要求指标,并发现对大体积土工袋在性能上起控制性的指标是下部土工袋在上部土工袋的自重作用下的抗压性能。对土工袋进行三种不同密实度土体的等应变压缩试验,研究其抗压性能。然后以增量广义胡克定律为基础,考虑土工袋侧向非线性变形条件,得到其大体积土工袋的极限抗压强度理论公式和袋体内部土体的剪胀方程,该方程可用于计算土工袋的破坏荷载和沉降。研究结果表明:①对大体积土工袋破坏起控制因素的是袋体中部筋材的抗拉强度;②通过抗压试验结果与理论值对比,表明极限抗压强度理论公式与试验结果基本一致,成果可以为实际工程提供参考;③提出了土工袋鼓胀度系数 m ,可反应土工袋侧边的鼓胀程度,对确定大体积土工袋侧胀的工程指标具有一定指导意义;④经过土工袋加固后土体的剪胀性更加明显,其抗剪强度也更高。

关键词: 土工袋; 抗风化; 轴向应变; 塑性体应变; 剪胀性

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1250-12

Engineering Application and Compressive Performance of Weathering-resistant Large-volume Soilbags

WANG Zongjian^{1,2}, ZHOU Zheng¹, ZENG Yan³, NAOKI TATTA⁴

(1. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Wanzhou District Water Conservancy Bureau, Chongqing 404100, China; 4. Department of Science and Technology, University of Toyama, Toyama 3190, Japan)

Abstract: Weathering-resistant large-volume soilbags are widely used in disaster prevention and mitigation engineering. However, their performance requirements and engineering application standards remain unclear. By summarizing domestic and international engineering practices, multiple fundamental performance requirement indicators for this construction method were presented. It was found that the key controlling indicator for large-volume soilbag performance was the compressive property of the lower soilbags under the self-weight of upper bags. Compression tests at equal strain were conducted on soilbags filled with soil of three different compaction levels to explore their compressive perfor-

* 收稿日期: 2024-06-04; 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51679018)、广西科技重大专项(桂科AA23023018)资助

作者简介: 王宗建(1979—), 男, 教授, 硕导, 博士。主要从事岩土工程等方面的教学和研究。

E-mail: wangzongjiansky@163.com

mance. Furthermore, based on the incremental generalized Hooke's law and considering the lateral nonlinear deformation of soilbags, a theoretical formula for the ultimate compressive strength of large-volume soilbags and a dilatancy equation for the soil inside the bags were derived. These equations could be used to calculate the failure load and settlement of the soilbags. The results showed that: (1) the controlling factor for the failure of large-volume soilbags was the tensile strength of the reinforcement materials in the mid-section of the bags. (2) Comparison between compression test results and theoretical values demonstrated that the theoretical formula for ultimate compressive strength was basically consistent with the experimental results, and these findings could serve as a reference for practical engineering. (3) A bulging degree coefficient m for soilbags was proposed, which could reflect the degree of lateral bulging of the soilbags and provide guidance for determining engineering indicators of lateral bulging of large-volume soilbags. (4) The soil after soilbag reinforcement exhibited more pronounced dilatancy and increased shear strength.

Keywords: soilbag; weathering resistance; axial strain; plastic volumetric strain; dilatancy

0 引言

土工袋是一种在防灾减灾工程中广泛使用的传统技术手段^[1],即在袋形土工合成材料中填入砂土、碎石、淤泥^[2]或建渣^[3]之后形成的稳定复合结构,具有施工简便、方便运输、低成本等^[4]优点。在防灾减灾工程中主要用于灾后临时的修筑围堰^[5]、加固河流边坡^[6],挡墙等^[7],是一种用于灾害发生时运输到现场的临时或半永久性结构。H. Matsuokah等^[8]在研究中发现土体被土工袋包裹后其内部抗剪强度增大,可视为一种简便的增加土体强度的技术手段,同时给出了二维和三维条件下土工袋的抗压强度理论计算式。但传统的土工材料暴露在自然条件下会由于紫外照射、雨水腐蚀导致材料老化破损、袋内填料漏出、整体结构失效^[9]。且体积较小,依靠人工填装、运输,不利机械施工。

近年来,国内学者也对土工袋做了不少的研究。在数值模拟方面,贾凡等^[9]采用离散单元法对土颗粒地基模型与土工袋模型对弹性波传播的衰减进行模拟,认为单个土工袋对弹性波的衰减作用主要集中在穿越土工袋上、下层土工合成材料界面之前。刘斯宏等^[10,11]通过振动台试验验证了土工袋交错的排列方式和预留相间缝隙方式,还利于孔隙水的排出,从而更好地保持整体的变形协调性,同时进行了一系列土工袋层间摩擦试验,建立了土压力与土工袋层之间的摩擦力平衡关系,具有重要的理论和应用价值;陈爽等^[12]认为土工袋的间隙裂缝对地震波在传播的过程中起着一定阻隔作用,但具

体的土工袋预留缝隙长度还未明确;在特殊土体方面,樊科伟等^[13]继续针对土工袋挡土墙这一柔性材料对膨胀土做了相关的研究,论证了土工袋作为缓冲材料可用于减压膨胀土挡墙材料;方斌昕等^[14]通过循环剪切试验发现了当竖向应力较小时土工袋比较容易发生剪胀;也有一些工程实际应用案例^[15]。总体来说,国内土工袋研究有序向前,但相对其他防灾减灾的研究方向而言,我国现阶段仍然缺少相关的土工袋成熟规范。

据日本全国防灾协会数据统计,抗风化大体积土工袋主要产自我国。大体积土工袋由于高度的增加,其抗压特性与传统土工袋相比有明显不同,故形状扁平、忽略鼓胀的计算模型^[16]不再适用。国外现行设计施工手册^[17]对土工袋单体(本文所指单体皆为包括填料和土工合成材料在内的土工袋单体)的抗压特性仅有一项标准,即通过抗压试验得到的极限承载强度,对其破坏前的一系列变形和应力应变关系则缺乏适合的分析方法。本文总结了国外抗风化大体积土工袋的工程实例和性能要求,针对设计施工中对土工袋抗压变形尚不明确的问题通过工程实践和抗压试验确定了大体积土工袋的一般变形和破坏形式。结合广义增量胡克定律提出了一种计算轴向荷载或抗压应变的方法和建立了袋内土体剪胀方程。针对性提出了表征大体积土工袋抗压特性的鼓胀度系数 m ,该系数可作为土工袋袋体(本文所指袋体为不包括填料的土工袋)制作工艺控制指标和土工袋单体的施工质量控制指标。

1 抗风化大体积土工袋的性能及规范

20世纪90年代,抗风化大体积土工袋在日本出现,2006年由日本全国防灾协会出版了其第一版应用指南,2012年由日本土木研究中心将其升级为设计施工手册^[17]。尤其是日本“3.11地震”后,这种就地取材快速高效的防灾救灾手段获得了广泛应用。抗风化大体积土工袋有很好的抗风化性,暴露于空气中使用年限长达五年^[17];其体积约为1 m³,可使用普通挖掘机填土、吊运,施工速度快、适应性好,可用于护岸^[18]、护坡、减震^[19-21]、冻土治理^[22]、污染土的临时保存、灾后的道路快速修复等^[23]应急工程运用。

1.1 性能要求

在防灾减灾工程中早期使用的大体积土工袋是港口运输粉粒货物时用的普通集装袋。图1是普通集装袋与抗风化大体积土工袋用作护坡长暴露于自然环境下的状态,其中图1(a)为普通集装袋使用3个月已经风化破裂,袋中的土体暴露;图1(b)为抗风化大体积土工袋长期使用外形没有缺损,结构整体没有失效。图中的抗风化大体积土工袋在袋体材料中加入了炭黑,增强了抗风化能力,使袋体表面呈黑色。



图1 普通集装袋与抗风化大体积土工袋^[17]

Fig.1 Ordinary bulk bags and weathering-resistant large-volume soilbags^[17]

抗风化大体积土工袋大多数为圆柱状(图2),直径与高均约为1 m。使用时将袋子套入模具内再以挖掘机填装袋体,填装完毕并收口后用起重机穿过吊带吊运单体。图3中介绍了为抗风化大体积土工袋的几种工程运用,除此之外抗风化大体积土工袋还有修筑围堰、落石防冲击墙等应用。

抗风化大体积土工袋在工程上的运用广泛,其大部分工程运用对性能起到控制指标及主要影响

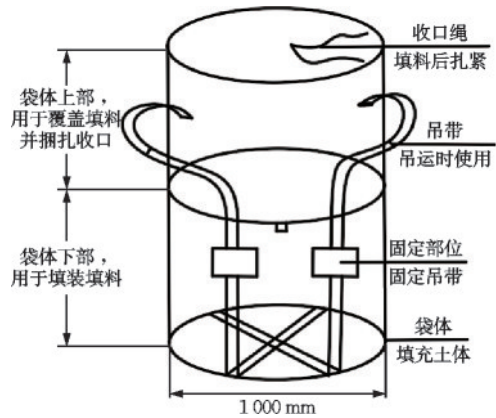


图2 抗风化大体积土工袋示意图^[11]

Fig.2 Schematic diagram of weathering-resistant large-volume soilbag^[11]

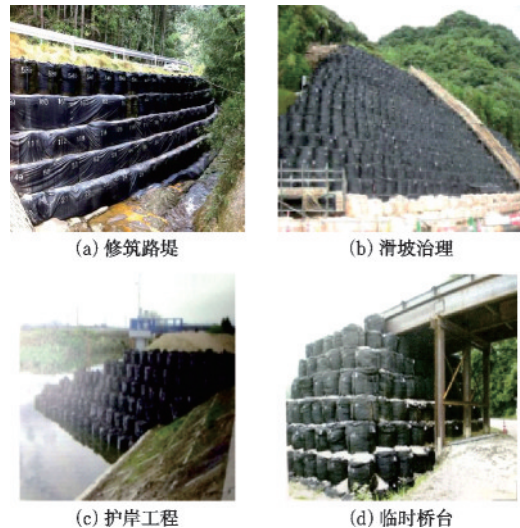


图3 抗风化大体积土工袋的用途^[17]

Fig.3 Application of weathering-resistant large-volume soilbags^[17]

要素的是上部土工袋在自重作用下对下部土工袋产生的抗压性,虽然手册中给出了抗风化大体积土工袋的极限抗压强度和变形模量的试验方法,但对袋体性能的要求尚不明确。因此,有必要深入探讨袋体抗压特性的控制指标及影响因素。目前对于土工袋力学性质的研究主要针对扁平状的袋子,忽略其侧边鼓胀变形;而大体积土工袋的变形形式如图4所示,在受压后会形成中间粗两头细的形状。在实际施工中,上部使用捆绑结扎,土体的上表面和袋体间存在一定的空隙,由于重力作用和上下两端约束的差异,下部的平均半径比上部略大。黄小元^[24]在实验中表明这种形状的土工袋受竖向荷载时的破坏位置在其上下表面,而大体积土工袋的破坏为中部位置袋体材料拉裂如图5所示。

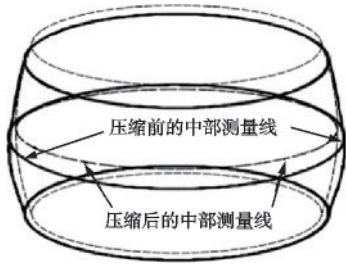


图4 土工袋受压变形示意图

Fig.4 Schematic diagram of deformation of soilbag under compression



图5 土工袋破坏示意图

Fig.5 Schematic diagram of soilbag failure

表1^[17]、表2^[25]分别介绍了大体积土工袋与抗风化大体积土工带的材料性能,对其抗风化大体积土工袋袋体材料抗拉强度在不同环境下的评价指标提出了性能要求,在不受荷载的情况下其抗拉强度均大于240 N/cm,受荷载条件下要求大于160 N/cm、大体积土工袋袋体尺寸规格的高宽在1 m左右、透水系数小于0.01 cm/s。相对于普通土工袋织物的力学性能参数来说,抗风化大体积土工袋的尺寸更大于普通土工袋,无论是耐热性还是耐

表1 抗风化大体积袋体材料性能试验及标准^[17]

Table 1 Performance tests and standards for materials of weathering-resistant large-volume soilbags^[17]

| 项目 | 评价内容 | 评价指标 |
|-------|----------------|------------------|
| 强度 | 抗拉强度 | 横向 35% 纵向 30% |
| | 伸长率 | 横向 35% 纵向 30% |
| 耐久性 | 抗风化性 | 抗拉强度 240 N/cm |
| | 受荷载条件下 抗风化性 | 抗拉强度 160 N/cm |
| | 耐药品性 | 抗拉强度 240 N/cm |
| | 耐热性 | 抗拉强度 240 N/cm |
| | 耐寒性 | 抗拉强度 240 N/cm |
| | 环保性 | 溶出物试验 |
| 排水透水性 | 有效开孔径 | O95<1.0 mm |
| | 透水性 | 透水系数<0.01 cm/s |

表2 普通土工袋袋体材料性能标准^[25]

Table 2 Performance standards for ordinary soilbag material^[25]

| 项目 | 评价内容 | 评价指标 |
|-----|--------|----------------------------|
| 强度 | 抗拉强度 | 横向 200 N/cm 纵向 150 N/cm |
| | | 伸长率 |
| | 单位面积质量 | 80 g/m ² |
| 耐久性 | 耐紫外线辐射 | 140 N/cm |
| | 耐冻融性 | 160 N/cm |
| 规格 | 长 | 75 cm |
| | 宽 | 55 cm |

冻性抗拉强度的要求都更高于普通土工袋袋体^[25]。对其耐久性来讲,土工织物的材质大多为聚乙烯土工织物、聚酯长丝土工织物,其耐久性依赖于紫外线辐射强弱以及埋藏的腐蚀环境。一些实际工程表明耐久性还与施工期对土工袋的保护有关,但需要注意的是无论是大体积抗风化土工袋还是普通土工袋在一些如高盐地区,如海水环境下,对其抗腐蚀机理都需特殊考虑。

填装后的土工袋单体则要确保其抗压强度、摩擦特性、吊运稳定性、抗冲击性、形状保持性达到标准,其具体标准见表3。

表3 单体性能试验及标准^[17]

Table 3 Performance tests and standards for single soil-bag^[17]

| 测试项目 | 测试方法 | 评价指标 |
|--------|---|-----------------|
| 抗压特性 | 填装后的单体的无侧限抗压试验 | 抗压强度 ≥200 kPa |
| | | 单体之间摩擦系数 ≥0.5 |
| 摩擦特性 | 单体与单体、单体与地基土之间的摩擦系数试验方法为:在40 kPa竖向荷载下用牵引装置使之发生,相对滑动测量其摩擦系数。 | 砾石与单体摩擦系数 ≥0.6 |
| | | 砂土与单体摩擦系数 ≥0.5 |
| | | 黏土与单体摩擦系数 ≥0.4 |
| 吊运稳定性 | 除填料自重外单体上部需增加10 kN荷载吊运至离地1 m,30 s内上下吊运9次,再加10 kN荷载保持起吊状态5 min | 目测袋体材料无开裂 |
| 抗冲击性 | 起吊0.8 m自由落体至坚硬地面,反复3次 | 目测袋体材料不开裂,填料不漏出 |
| 形状保持特性 | 装填后测量高度和直径 | 直径、变化率不高于6% |

1.2 荷载及稳定性计算方法

土工袋结构的构造要求为:一般土工构筑物砌筑高度不超过8 m,用作护岸等水工构筑物高度不得超过3 m。试以单列抗风化大体积土工袋挡墙为例,其平面、剖面分别如图6所示。需验算每层土工袋稳定性和整体结构的稳定性。当单列土工袋不能承受设计荷载时,可添加一列土工袋再次进行验算。

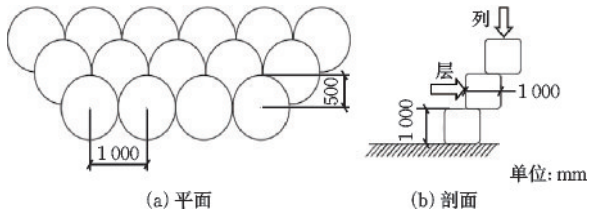


图6 大体积土工袋挡墙的平面图和剖面图^[17]

Fig.6 Plan and section views of large-volume soilbag retaining wall^[17]

抗风化大体积土工袋构筑物设计需要满足的项目见表4,其中内部稳定性安全系数 F_s 的计算方法参照式(1),其余项目安全率系数计算方法均以现行挡墙设计规范为标准。构筑物的设计荷载为:结构自重、荷载重、土压力、水压。

$$F_s = \frac{P_o}{P_m} \quad (1)$$

式中, P_o 为土工袋单体的极限抗压强度(kPa); P_m 为土工袋单体实际承受的轴向荷载(kPa)。

如图7所示,土工袋用于挡土时,其设计与挡墙相似,图中四边形虚线部分内为实际计算时的土工

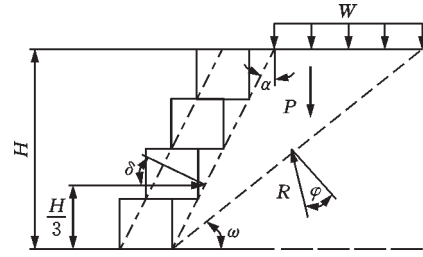


图7 抗风化大体积挡墙剖面

Fig.7 Section view of weathering-resistant large-volume retaining wall

袋挡墙的墙体,对土体应力合力为水平方向,且作用于挡土工袋结构竖直高度三分之一处,其主动土压力合理计算公式如下:

$$P = \frac{W \sin(\omega - \varphi)}{\cos(\omega - \varphi - \alpha - \delta)} \quad (2)$$

式中, P 为主动土压力合力(kN/m); R 为滑移面下部土体对上部土体的反作用力; W 为土体自重及上部荷载的总荷载; φ 为土体内部摩擦角; α 为构筑物与竖直方向的夹角; ω 为滑移面与水平方向夹角; δ 为壁面摩擦角。 W 在竖直方向,图7中 R 与滑移面的垂线夹角为 φ , P 与壁面的垂线夹角为 δ 。由此,可以求出其大小。

2 抗压特性试验

为了研究大体积土工袋压缩时的一般破坏形式,推导出荷载的理论计算式。其次使用不同密实度的砂土对涤纶土工袋进行填充之后,对土工袋进行等应变加载试验,试验得到的荷载实际值用于理论推导公式的验证。

2.1 试验器材和材料参数

涤纶抗拉强度为8.64 kN/m,线弹性模量 E_t 为52.05 kN/m。材料的抗拉试验试验结果如图8所示。试验选取的砂土各项指标见表5,每组土体相对密实度见表6。由于土体被夯的过于密实会使涤

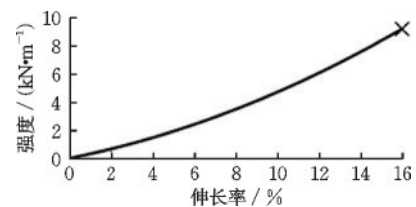


图8 涤纶材料抗拉试验

Fig.8 Tensile test of polyester material

表4 安全标准^[17]

Table 4 Safety standards^[17]

| 项目 | 含义 | 安全系数 |
|-------|-----------------------|-----------------|
| 内部稳定性 | 单体在土压力和结构自重作用下的变形、沉降量 | 安全系数 |
| | 满足设计要求以及不发生张拉破坏。 | $F_s \geq 1.5$ |
| 外部稳定性 | 结构不发生滑移、倾倒、承载力满足。 | 滑动安全系数 |
| | | $F_s \geq 1.2$ |
| | | 抗倾倒:偏心距 |
| | $e \leq B/3$ | 承载力安全系数: |
| | | $F_s \geq 2$ |
| 整体稳定性 | 包含墙体的岩土体不发生整体滑动 | 圆弧滑动安全系数 |
| | | $F_s \geq 1.05$ |

表5 试验砂土各项参数

Table 5 Parameters of test sandy soil

| 中值粒径 $d_{50}/$ mm | 最大粒径 $d_{max}/$ mm | 最小粒径 $d_{min}/$ mm | 不均匀 系数 C_u | 曲率系数 C_c | 含水率 $\omega/\%$ | 土粒比重 | 最大 孔隙比 | 最小 孔隙比 |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------------|------|-----------|-----------|
| 0.62 | 10 | 0.075 | 5.16 | 0.89 | 0.8 | 2.63 | 0.83 | 0.49 |

表6 填充土体

Table 6 Filled soil

| 组数 | 质量/g | 模具半径/cm | 填充高度/cm | Dr |
|----|------|---------|---------|------|
| 1 | 830 | 5.0 | 7.0 | 0.26 |
| 2 | 860 | 5.0 | 7.0 | 0.44 |
| 3 | 920 | 5.0 | 7.4 | 0.50 |

纶土工袋破裂,实际工程中也并不适用,故填料相对密实度均小于0.5。(表6中的 Dr 为土体相对密实度,之后不再赘述)

压缩仪器选用自制仪器,如图9所示。为了模拟实际结构中土工袋层间相互堆叠时上下表面摩擦力对于土工袋径向应变的约束作用,上下荷载板接触面用相同的涤纶材料包裹。试验时统一使用半径为5 cm的透明亚克力模具,外侧标记高度,将涤纶土工袋套在模具上,填入砂土,再使用抽绳收口。将填充完毕的土工袋模型放入荷载板间,通过仪器施加荷载,使之均匀压缩,可读出荷载和与之对应的压缩量。

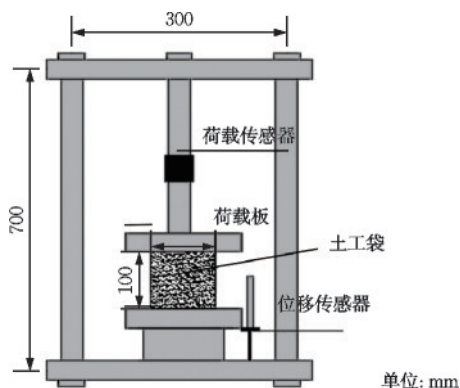


图9 压缩试验仪器

Fig.9 Compression test apparatus

2.2 试验过程和方法

(1) 将土工袋模型套入亚克力模具中,分四次填充,每层填充后整捣,填充砂土至预定固定高度后捆扎收口。收口取出后再在其顶部、底部和二分之一高度处画测量线。

(2) 为了减小因人工收口对每个单体造成的初始高度测量误差,将装填好的土工袋放入调试好的

仪器中,夹入涤纶包裹的荷载版,加载至荷载为0.2 kN再缓慢卸载,直至荷载为0以此作为抗压实验的初始状态。

(3) 以3%/min的速率对土工袋进行等应变加载试验,每下压1 mm读取一次荷载并在三条测量线处用游标卡尺多次测量土工袋的顶部、底部和中间的直径取平均值。

(4) 当袋材破裂或轴向应变达到10%时视为破坏,试验终止。同组条件反复试验三次,取平均值。

2.3 试验结果

土工袋的上部与下部的径向应变如图10所示。填料密实度较小的土工袋,由于顶部初始半径偏小,其压缩初期顶部径向应变上升较快;而密实度较大的土工袋则由于顶部初始半径较大导致顶部径向应变上升较慢。从图10可以看出由于约束条件和灌入填料的不同,上下位置径向应变的差异较大。图11为中部径向应变与轴向应变的关系,可以看出中部的径向受两端约束差异的影响较小,径向

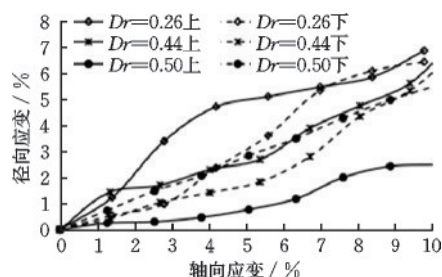


图10 土工袋端部轴向应变和径向应变

Fig.10 Axial and radial strains at soilbag ends

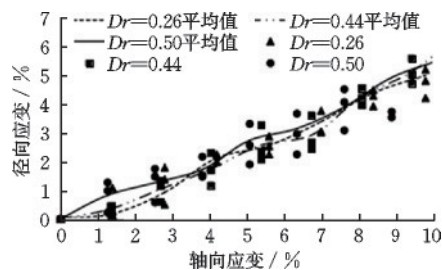


图11 土工袋轴向应变和径向应变

Fig.11 Axial and radial strains of soilbags

应变与轴向应变的关系近似一条直线。

继续压缩土工袋,最后在其中部的缝线位置发生拉裂破坏,填充的砂土漏出、刚性板倾斜,停止加压后其裂缝继续延伸,延伸长度近似对称。试验得

到3组9个样品在轴向应变下的荷载见表7,最终所得平均荷载与轴向应变关系如图12所示。由图12可见土工袋受压后的荷载与轴向应变的关系近似一条平滑曲线。

表7 土工袋的荷载与轴向应变
Table 7 Load and axial strain of soilbags

单位:kN

| 应变/% | Dr=0.26 | | | 应变/% | Dr=0.44 | | | 应变/% | Dr=0.50 | | |
|------|---------|------|------|-------|---------|-------|-------|------|---------|------|------|
| | 轴力 | | | | 轴力 | | | | 轴力 | | |
| | (1) | (2) | (3) | | (1) | (2) | (3) | | (1) | (2) | (3) |
| 1.40 | 0.1 | 0.09 | 0.11 | 1.35 | 0.12 | 0.074 | 0.103 | 1.27 | 0.08 | 0.15 | 0.18 |
| 2.80 | 0.12 | 0.18 | 0.28 | 2.70 | 0.31 | 0.16 | 0.26 | 2.54 | 0.18 | 0.35 | 0.23 |
| 4.20 | 0.39 | 0.32 | 0.49 | 4.05 | 0.58 | 0.49 | 0.53 | 3.80 | 0.39 | 0.68 | 0.42 |
| 5.60 | 0.7 | 0.52 | 0.82 | 5.40 | 0.92 | 0.77 | 0.56 | 5.08 | 0.7 | 0.68 | 0.68 |
| 7.00 | 1.31 | 0.79 | 1.22 | 6.75 | 1.58 | 0.83 | 1.20 | 6.34 | 1.19 | 1.2 | 1.01 |
| 8.40 | 2.07 | 1.13 | 2.33 | 8.10 | 2.21 | 1.30 | 1.91 | 7.61 | 1.83 | 1.91 | 1.4 |
| 10.0 | 3.06 | 1.61 | 3.4 | 9.44 | 3.03 | 1.91 | 2.82 | 8.88 | 2.68 | 3 | 1.96 |
| | | | | 10.80 | 3.83 | 2.7 | 3.14 | 10.2 | 3.61 | 3.8 | 2.68 |

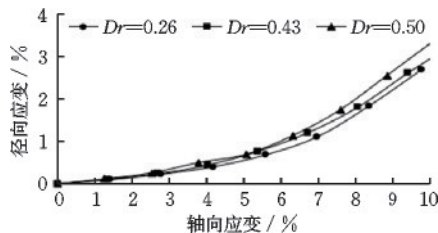


图12 土工袋的荷载与轴向应变

Fig.12 Load and axial strain of soilbags

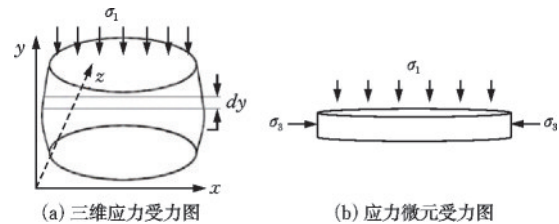


图13 大体积土工袋应力受力图

Fig.13 Stress diagrams of large-volume soilbag

3 抗压特性理论研究

3.1 抗压特性

研究土工袋的抗压特性从实际工程中出发,上部土工袋传递给下部土工袋的压力远大于其单个土工袋自身的重力,因此在不计重力的理想状况下,假定土体和袋体均为线弹性材料,土工袋上下所受约束对称。其侧面鼓胀的曲线可以认为是关于中点对称的曲线,基于实验和工程实践观察,在理想化实验模型中将侧面曲线假设为二次函数曲线。如图13所示,将土工袋放在三维坐标中沿y轴方向水平取得圆台形微元,每个微元中土体所受的 σ_1 为外荷载, σ_3 为土工袋变形所产生的约束。故在土工袋某半径为 r_y 的微元上,袋体材由于形变产生的拉力T可表示为:

$$T = 2\pi E_t (r_y - r_0) \quad (3)$$

式中, E_t 为袋材的线弹性模量; r_0 为单体变形前上下部的半径; r_y 为土工袋某一高度的微元半径。

在微元中取一小段土工袋材料做受力分析,如图14所示,该段材料对应的圆心角为 θ 。则这段材

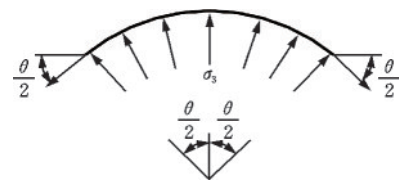


图14 土工袋材料受力平面示意图

Fig.14 Plan view of stress on soilbag material

料两端受到材料间拉力T,内侧受到土体对材料的应力,且土体对材料的应力等于微元中土体受到的 σ_3 。根据竖直方向合力为零则有式(4),解之则有式(5):

$$2T \sin \frac{\theta}{2} = \int_{-\frac{\theta}{2}}^{\frac{\theta}{2}} \sigma_3 \cos \phi r_y d\phi \quad (4)$$

$$\sigma_3 = \frac{T}{r_y} \quad (5)$$

由式(5)可知,轴向位置在 y 处的土体微元上所受的约束应力 σ_3 与该位置袋体材料的拉力以及该位置的半径有关。对于土工袋鼓胀的形态,假设受压后土工袋的纵剖面两侧为二次函数曲线,并将该曲线旋转 90° 后放入坐标系中,令其函数式为:

$$y = m \left(x^2 - \frac{h^2}{4} \right) \quad (6)$$

式(6)中, x 表示土工袋的轴向位置; y 表示土工袋单体鼓胀量; m 表示土工袋侧边的鼓胀度系数,为负值;如图15所示, m 的绝对值越大,中间越凸出,土工袋越趋于破裂状态。 m 绝对值的大小与袋子的形状、弹性模量、土体的性质、收口的方式以及填充高度有关。由于土工袋抗压时中部的半径为土工袋破坏的控制条件,故 m 可使用中部半径和高度带入式(7)中求得式(8)。因此对土工袋单体进行质量控制时需将其初始 m 值控制在一定范围内。

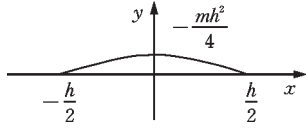


图15 土工袋侧边鼓胀

Fig.15 Lateral bulging of soilbag

图13中纵坐标为 y 的微元的半径为:

$$r_y = r_0 + my^2 - myh \quad (7)$$

m 可依据中部半径计算得到,其中, $r_{\text{中}}$ 为中部半径:

$$m = \frac{4(r_0 - r_{\text{中}})}{h^2} \quad (8)$$

式(7)将带入式(5)则有微元所受的约束应力 σ_3 :

$$\sigma_3 = \frac{2\pi Et(my^2 - myh)}{r_0 + my^2 - myh} \quad (9)$$

式(9)即为轴向位置在 y 处的微元上的土体所受约束应力 σ_3 。将(9)带入广义增量胡克定律,可得该微元的轴向应变:

$$\Delta\epsilon_1 = \frac{1}{E_s} \left(\sigma_1 - 4\pi E_t \nu_s \frac{my^2 - myh}{r_0 + my^2 - myh} \right) \quad (10)$$

其中, E_s, ν_s 为土的弹性模量和泊松比。则在不计土体自重的条件下每个土体微元的 σ_1 为:

$$\sigma_1 = \frac{F}{\pi r_y^2} \quad (11)$$

其中, F 为外荷载,将式(11)带入式(10)中,即可得到土体微元的轴向应变,再在轴向进行积分可求得整个单体则的轴向应变:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E_s} \left\{ \frac{F}{\pi m^2} \left(\frac{mh}{2Br_0} + \frac{A}{2\sqrt{-B}} \right) - 4\pi E_t \nu_s (1+A) \right\} \quad (12)$$

$$\text{即, } F = \frac{\pi m^2 [E_s \epsilon_1 + 4\pi E_t \nu_s (1+A)]}{\frac{mh}{2Br_0} + \frac{A}{2\sqrt{-B}}} \quad (13)$$

其中,

$$A = \frac{2}{\sqrt{m^2 h^2 - 4mr_0}} \ln \frac{h^2 + \sqrt{h^2 - \frac{4r_0}{m}}}{h^2 - \sqrt{h^2 - \frac{4r_0}{m}}} \quad (14)$$

$$B = \frac{r_0}{m} - \frac{h^2}{4} \quad (15)$$

式(12)、(13)分别为以轴向应变计算荷载和以荷载计算轴向应变的理论公式,在实际工程中可用于计算极限抗压强度和沉降验算。由于土工袋单体在使用前需验证其形状保持性(表2),初始半径 r_0 和初始高度 H 可直接测得,故由式(12)、(13)可知对袋体制作工艺和单体施工质量进行控制时, m 是一个重要的控制指标,其大小可由式(8)计算。又由图11可将 $r_{\text{中}}$ 与 ϵ_1 假设为线性关系,其比例系数 k 取经验参数,该参数的值与袋体的形状、模量和土的性质有关,有:

$$\epsilon_{\text{中}} = k\epsilon_1 \quad (16)$$

其中, $\epsilon_{\text{中}}$ 为中部的径向应变,将式(16)带入式(8)有:

$$m = -\frac{4k\epsilon_1 r_0}{h^2} \quad (17)$$

根据《工程地质手册》^[26]选取砂土的变形模量经验参数,当 $Dr=0.26$ 时处于松散状态,变形模量取25 MPa; $Dr=0.43$ 和 $Dr=0.50$ 处于中密状态,变形模量取30 MPa。为简化计算令 m 随轴向应变线性改变。所得计算的理论与实际值如图16所示。

从图中可以看出压缩初期理论值与实际值较为接近,而后期理论值明显偏大。这是由于后期袋体涤纶纤维发生断裂,线弹性模量减小,且理论假设中顶部和底部半径不变,而实际试验中压缩之后

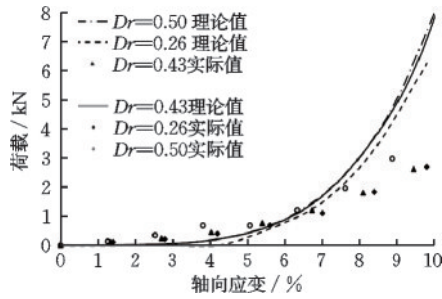


图 16 理论计算值与实际值

Fig.16 Theoretical and actual values

顶部和底部的土工袋半径会有所增大,因此由式(8)计算得到的 m 的绝对值会变小共同导致的结果。

3.2 剪胀特性

本次试验选取的砂土颗粒可近似看作为圆粒,土工袋体对内部土体的约束作用使袋体内部土体产生围压 σ_3 ,其袋内土体剪胀模型示意图如图 17 所示。

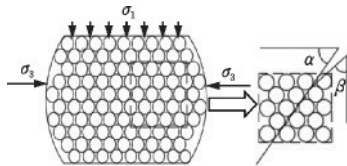


图 17 二维模型下大体积土工袋土体受力土颗粒布局模型
Fig.17 Soil particle layout model of soil stress in large-volume soilbag under two-dimensional model

图 17 中, α 为滑动面夹角; β 为颗粒接触面夹角。可以看出土体剪胀特性除了与外部荷载有关之外,土体颗粒的排列组成和摩擦角也对其有很大影响。

由 3.1 抗压特性一节可知,对大体积土工袋抗拉性能起到控制要素的是鼓胀程度最大的中部半径 $r_{\text{中}}$ 。因此,考虑将 $d\epsilon_v^p$ 代替塑性体应变 $d\epsilon_v^p$,即用土工袋中部微元“薄饼”体应变表示其大体积土工袋塑性体应变,其表达式为:

$$d\epsilon_v^p = d\epsilon_{v\text{中}}^p = \frac{V_{i\text{中}} - V_{0\text{中}}}{V_0} \times 100\% = \frac{\pi r_0^2 \cdot dh - \pi r_i^2(1 - d\epsilon_1^p)}{\pi r_0^2 \cdot dh} = \frac{\pi r_0^2 - \pi r_i^2(1 - d\epsilon_1^p)}{\pi r_0^2} \quad (18)$$

其中, $d\epsilon_1^p$ 表示土工袋竖向应变; H 表示试验土工袋填充高度。通过式(18)计算出在线性增加竖向应

力条件下大体积土工袋内不同密实度砂土的塑性体应变,如图 18 所示。

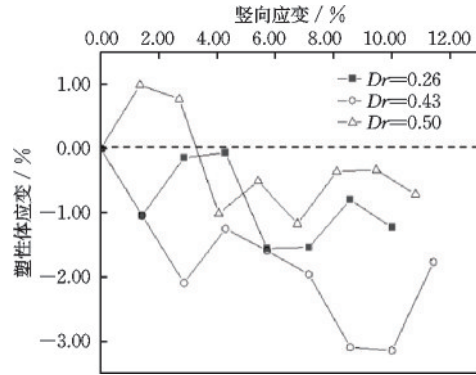


图 18 土工袋内土体体应变试验计算值

Fig.18 Calculated values of volumetric strain of soil in soilbags

从图 18 中可以看出,在进行等应变加载试验的过程中,不同组别的砂土因密实度不同其剪胀特性表现也有所不同。当 $Dr=0.26$ 、 $Dr=0.44$ 时袋内土体整体表现为剪缩,且随着竖向应变的线性增加,塑性体应变绝对值整体大于工况 $Dr=0.50$; 而当 $Dr=0.50$ 时,土体在竖向应力较小时呈现出剪胀。造成上述现象的原因是由于相对密实度较大的土体,其咬合力也越大,土颗粒之间的相对间隙更小,本身就处于相对密实情况下的土体颗粒在竖向荷载的作用下发生位移,使空间孔隙体积增大。因此,相对密实度较大的砂土试样在施加竖向荷载的初期更容易发生剪胀,其土体抗剪强度得以提高。在工程运用中,可以适当优先考虑密实度更大的砂土作为袋内填充材料。

关于剪胀特性的表达式,剑桥模型认为剪胀比 d 与应力比 η 存在唯一关系^[27],前人已经做了相关试验和理论分析。就砂土而言,剑桥模型的剪胀关系简单,同时可以很好的模拟土工袋在剪切条件下的剪胀特性,前人也做了相应的试验和理论分析^[28-29]。因此,本文亦采用剑桥模型,其表达式为:

$$d = \frac{d\epsilon_v^p}{d\epsilon_q^p} = M - \eta = M - \frac{q}{p} \quad (19)$$

式中, $d\epsilon_v^p$ 、 $d\epsilon_q^p$ 分别表示塑性体应变和剪应变增量; M 表示临界应力比; q 、 p 分别表示剪应力和平均应力,其表达式分别为:

$$q = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2} / \sqrt{2} \quad (20)$$

$$p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 2 \quad (21)$$

在本试验中,根据三轴对称可得 $\sigma_2 = \sigma_3$, 联立

式(3)、(5)、(11)、(19~21)可求得大体积土工袋内土体剪胀的剑桥模型表达式:

$$d = M - \eta_s = M - \frac{3 \left(\frac{F}{2\pi^2 E_t (r_y - r_0)} - 1 \right)}{\frac{F}{2\pi^2 E_t (r_y - r_0)} + 2} \quad (22)$$

式中, η_s 表示大体积土工袋内土体应力比。

S. Lix 等^[27]通过一系列试验总结出了圆形土颗粒模型在应力比 η (η 为未经过筋材加固的土体引力比) 与塑性体应变与竖向应变增量比 ($d\epsilon_{v,pl}^p/d\epsilon_1^p$) 之间的关系曲线。本文通过式(18)~(21)计算出土工袋内三种不同密实度砂土颗粒在应力比与增量比关系下的散点图。如图 19 所示。

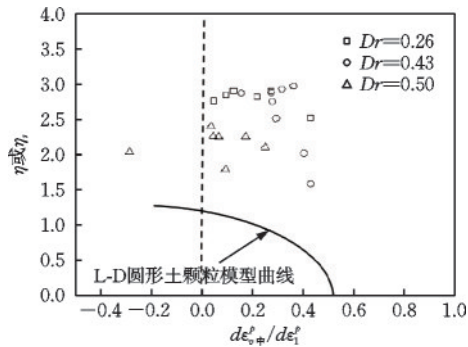


图 19 土工袋内砂土应力与剪胀关系

Fig.19 Stress-dilatancy relationship of sandy soil in soilbags

从图 19 可以看出,三组不同初始密实度 Dr 的散点均在 $L-D$ 模型曲线的右上方,这是因为随着竖向应力的增加,筋材的拉力逐渐发挥约束作用,根据土工袋对土体施加的附加应力与加固效应的讨论,未经筋材加固的一般土体的应力比 η 小于土工袋袋内的土体应力比 η_s ,因此图 19 中试验值与 $L-D$ 圆形土颗粒模型曲线相比才会更向右偏离。其次土体密实度 Dr 越大,其散点就越靠近 $L-D$ 模型曲线,而散点越向左偏离,着表示其土体的剪胀性越明显,这一点可以揭示越密实的砂土剪胀性越显著,其抗剪强度也更强。在实际工程运用中,可适当提高袋内土体的密实度 Dr 以达到更好的抗压特性。

4 结 论

根据土工袋在防灾减灾工程中的实践运用和本文进行的等应变抗压试验确定了大体积土工袋

抗压后形状和破坏的控制条件。以广义胡克定律为理论基础,推导了大体积土工袋的极限抗压强度理论公式和袋体内部土体的剪胀方程,所得结论如下:

(1) 大体积土工袋压缩后形成中间大两头小的形状,土工袋最终的破坏形式为中部的袋体材料拉裂,对破坏起控制作用的因素为袋体中部的径向应变。土工袋的轴向荷载应变曲线近似一条平滑曲线,初始相对密实度越大,荷载上升越快;

(2) 在考虑土工袋侧边鼓胀的情况下提出了土工袋的鼓胀度系数 m 。 m 的大小对于土工袋的变形破坏有一定影响,其绝对值越大,中部鼓胀越凸出。对于袋体材料的质量控制需考虑该种材料对 m 的影响;

(3) 推导出大体积土工袋的极限抗压强度理论公式,可用来计算土工袋的破坏荷载和破坏前的沉降验算,对大体积土工袋在防灾减灾工程设计上的规范化有一定意义。

(4) 本文推导了大体积土工袋内土体在考虑侧向变形时的剪胀方程,论证了与 $L-D$ 圆形土体颗粒模型的剪胀特性相比,由于土工袋的加固作用,袋内土体更加密实。同时袋内土体的 Dr 越大,剪胀性越显著,抗剪强度提高,塑性体应变越小,表明相对密实度更大的砂土更加贴合实际工程运用;

(5) 本文抗压特性试验及理论均使用中上下的摩擦约束条件相同的模型,对于上下约束还存在差异的情况;在剪胀特性理论中仅适用于土工袋内土颗粒处于较小密实度的情况,对于本文未涉及到的密实砂土填充工况以及在土工袋实际运用中在是否存在最佳相对密实度这一问题,尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘斯宏,松冈元.土工袋加固地基新技术[J].岩土力学,2007,(8):1665-1670.
Liu S H, Matsuoka H. A new earth reinforcement method by soil bags [J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2007, (8): 1665-1670. (in Chinese)
- [2] 高军军,刘斯宏,白福清.袋装淤泥土土工袋的强度变形研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2014, 36(1): 33-36.
Gao J J, Liu S H, Bai F Q. Experimental study of

- strength and deformation properties of soilbags filled with mud soil [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2014, 36(1): 33-36. (in Chinese)
- [3] 文华, 曹兴, 邹娇丽, 等. 建渣土工袋力学特性试验研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2017, 45(2): 217-222.
Wen H, Cao X, Zou J L, et al. An experimental study on the mechanical properties of geobags filled with construction waste [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2017, 45(2): 217-222. (in Chinese)
- [4] 廖洁, 刘斯宏, 徐思远, 等. 土工袋技术在乡村公路软基加固中的应用研究[J]. *公路*, 2024, 69(6): 52-61.
Liao J, Liu S H, Xu S Y, et al. Application of soilbags reinforced soft soil subgrade in rural roads [J]. *Highway*, 2024, 69(6): 52-61. (in Chinese)
- [5] 李明宇, 郭院成, 郜新军, 等. 滨海饱和软土模袋围堰变形规律现场试验研究[J]. *公路*, 2015, 60(8): 268-274.
Li M Y, Guo Y C, Gao X J, et al. Field test and research on the deformation law of geo-membrane bag cofferdam in coastal saturated soft soil [J]. *Highway*, 2015, 60(8): 268-274. (in Chinese)
- [6] 董宗炜, 李晓庆. 土工袋护岸技术在塔里木河干流应用的适宜性分析[J]. *水利规划与设计*, 2022, (7): 108-111.
Dong Z W, Li X Q. Application suitability analysis of geotextile bag revetment technology in the mainstream of Tarim river [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2022, (7): 108-111. (in Chinese)
- [7] 张敏. 建渣土工袋挡土墙承载特性与设计计算方法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
Zhang M. Study on bearing characteristics and design calculation methods of bag construction workers muckretaining wall [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [8] Matsuoka H, Liu S H. A method of bearing capacity improvement utilizing soilbags[C]//*Proceedings of XIP an american Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Fozdo Iguassu, 1999: 1-8.
- [9] 贾凡, 刘斯宏, 程宏旻. 弹性波穿越土工袋传播规律的数值模拟[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6): 108-113.
Jia Fan, Liu S H, Cheng H Y. A preliminary study on the propagation law of elastic wave through a soilbag [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(6): 108-113. (in Chinese)
- [10] 刘斯宏, 李博文, 鲁洋, 等. 土工袋垫层抗液化性能振动台试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(增2): 183-192.
Liu S H, Li B W, Lu Y, et al. Shaking table tests on liquefaction resistance performance of soilbag stacked cushion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Sup2): 183-192. (in Chinese)
- [11] 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 S H, Xue X H, Fan K W, et al. Earth pressure and deformation mode of a retaining wall constructed with soilbags [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(12): 2267-2273. (in Chinese)
- [12] 陈爽, 方斌昕, 刘斯宏, 等. 土工袋垫层不同结构形式的振动台模型试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(9): 147-154.
Chen S, Fang B X, Liu S H, et al. A small shake table model test on soilbag cushion with different structural forms [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(9): 147-154. (in Chinese)
- [13] 樊科伟, 邹维列, 王柳江, 等. 土工合成材料缓冲层减压膨胀土挡墙侧向压力的实用预测方法研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(11): 3182-3190.
Fan K W, Zou W L, Wang L J, et al. A practical approach for predicting lateral pressures on expansive soil retaining walls with geosynthetic inclusions [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(11): 3182-3190. (in Chinese)
- [14] 方斌昕, 刘斯宏, 鲁洋, 等. 水平循环剪切作用下土工袋竖向变形特性试验研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(22): 130-137.
Fang B X, Liu S H, Lu Y, et al. Experimental study on the vertical deformation performance of soilbags under horizontal cyclic shear loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(22): 130-137. (in Chinese)
- [15] 齐凯. 某河道整治项目大型土工砂袋边坡防护技术[J]. *河南水利与南水北调*, 2021, 50(11): 38-40.
Qi K. Protection technology of large scale geotechnical sand bag slope in a river regulation project [J]. *Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion*, 2021, 50(11): 38-40. (in Chinese)
- [16] Futaki M, Inoue N, Matsuoka H. Compression test on large size soilbags[C]//*Proceedings of the Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, Osaka, 2002, 37(0): 741-742.
- [17] Japan Civil Engineering Research Center. Design and construction manual of pileup Method using weather proof large-sized soil bags[M]. 2012. (in Japanese)
- [18] Yamamoto K, Ishida M, Sugiyama K. Application and

- effect the continuous collapsible wire mesh frame with non-woven fabricliner on the temporary coffering method[J]. Journal of Integrated Information for Civil Engineering, 2016, 31: 213-218. (in Japanese)
- [19] Monma T, Kubo T, Miyatake H. Dynamic centrifuge models tests for disaster prevention considering actual construction conditions[J]. Journal of Civil Engineering 2015, 57(9), 22-27. (in Japanese)
- [20] Monma T, Shimada H, Nomoto H. Liquefaction suffering reduction effect of internal constrained large-scale unique and box-shaped sand bag[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3(Ocean Engineering), 2014, 70(2): 876-881.
- [21] Matsuoka H, Liu S H, Yamamoto H. Vibration reduction test sata construction road in Gcity[C]//The Japanese Geotechnical Society, Proceedings of the Japan National Conference on Geotechnical Engineering. Osaka 2002JGS37(0): 1927-1928.
- [22] Sato A, Nakamura D, Suzuki T. Method of improving soil with high water content that utilized coldclimate and large soil bags[J]. Journal of Geosynthetic Engineering Journal, 2014, 29(0): 41-48. (in Japanese)
- [23] Mori Y, Miyatake H, Kubo T. Study on new restored technology for large-scaled imentdisaster [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F4(Construction and Management), 201672(4), I_77-I_87. (in Japanese)
- [24] 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 X Y. Analysis of wrap soilbags rein forced structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [25] 土工袋护坡技术规范: DB32/T 3842-2020[S]. 江苏: 江苏省市场监督管理局, 2020.
- [26] 工程地质手册(第五版). 编委会. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [27] Lix S, Dafalias F. Dilatancy for cohesionless soils[J]. Géotechnique, 2000, 50(4): 449-460.
- [28] 雷国辉, 陈晶晶. 无黏性土剪胀性的细观认识[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1333-1339.
Lei G H, Chen J J. Microscopic understanding of dilatancy in cohesionless soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1333-1339. (in Chinese)
- [29] 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.
Huang B, Li B W, Wu P, et al. Study on strength and dilatancy characteristics of soils wrapped by soilbags [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 158-162. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)