

# 抗风化大体积土工袋工程应用与抗压性能研究

王宗建<sup>1,2</sup>, 周政<sup>1</sup>, 曾言<sup>3</sup>, 竜田尚希<sup>4</sup>

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 南岸 400074; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 沙坪坝 400044; 3. 万州区水利局, 重庆 万州 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 文献标志码: A 文章编号:

## Compression Performance and Engineering Application for Weatherproof Large-size Soilbags

WANG Zongjian<sup>1,2</sup>, ZHOU Zheng<sup>1</sup>, ZENG Yan<sup>3</sup>, Naoki TATTA<sup>4</sup>

(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:** Abstract: Large-volume weatherproof soilbags are widely used in disaster relief and mitigation engineering. However, specific performance requirements and engineering standards for these applications have not yet been clearly established. This study integrates engineering practices from both domestic and international sources to elaborate on various fundamental performance indices for this methodology. It identifies that the key performance controlling indicator for large-volume soilbags is the compressive property experienced by the lower bags under the weight of upper bags. Compressive tests on soilbags filled with soils of three different densities were conducted to explore their compressive performance. Furthermore, based on the incremental generalized Hooke's law and considering the lateral non-linear deformation of the bags, a theoretical formula for the ultimate compressive strength of large-volume soilbags and a shear expansion equation for the soil within were derived. These equations are instrumental in calculating the failure load and settlement of the soilbags. The findings reveal that: (1) the primary factor controlling the failure of large-volume soilbags is the tensile strength of the mid-section fabric; (2) the theoretical value is basically consistent with the compression test result, providing a reference for practical engineering applications; (3) a bulging degree coefficient  $m$  for the bags was proposed, which effectively reflects the degree of lateral expansion and serves as a significant engineering index for the side expansion of large volume soilbags; (4) after reinforcement with soilbags, the soil displayed more pronounced dilatancy and increased shear strength.

**Key words:** soilbag; weatherproof; axial strain; plastic volumetric strain; dilatancy

## 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<sup>[1]</sup>, 即是在袋形土工合成材料中填入砂土、碎石、淤泥<sup>[2]</sup>或建渣<sup>[3]</sup>之后形成的稳定复合

收稿日期: 20\*\*\_\*\*\_\*\*; 修回日期: 20\*\*\_\*\*\_\*\*;

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)、广西重点研发计划(桂科 AB25069471)资助

作者简介: 王宗建(1979-), 男, 博士, 教授、硕士生导师, 主要从事岩土工程等方面的教学和研究。E-mail:wangzongjiansky@163.com。

结构。其具有施工简便、方便运输、低成本<sup>[4]</sup>等优点。在防灾减灾工程中主要用于灾后临时的修筑围堰<sup>[5]</sup>、加固河流边坡<sup>[6]</sup>、挡墙<sup>[7]</sup>等，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。刘斯宏与松岡元<sup>[8]</sup>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<sup>[9]</sup>。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<sup>[9]</sup>等人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<sup>[10,11]</sup>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<sup>[12]</sup>等人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，樊科伟学者<sup>[13]</sup>等继续针对土工袋挡土墙这一柔性材料对膨胀土做了相关

## 1 抗风化大体积土工袋的性能及规范

上世纪 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<sup>[17]</sup>。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可长达五年<sup>[17]</sup>；其体积约为 $1\text{m}^3$ 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<sup>[18]</sup>、护坡、减震<sup>[19-21]</sup>、冻土治理<sup>[22]</sup>、污染土的临时保存、灾后的道路快速修复<sup>[23]</sup>等应急工程运用。

### 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(a)为普通集装袋使用 3 个月后已经风化破裂，袋中的土体暴露；(b)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。

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<sup>[14]</sup>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<sup>[15]</sup>。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<sup>[16]</sup>不再适用。国外现行设计施工手册<sup>[17]</sup>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。



图 1 普通集装袋与抗风化大体积土工袋<sup>[17]</sup>  
Fig. 1 Ordinary soilbags and weatherproof large-sized soilbags

抗风化大体积土工袋大多数为圆柱状(如图 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 5 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。

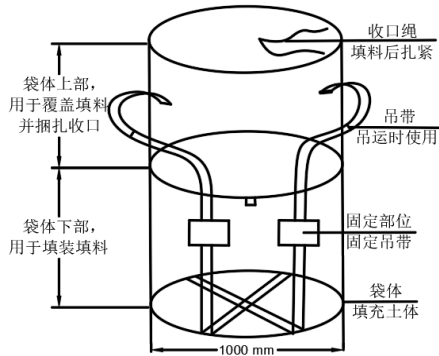


图 2 抗风化大体积土工袋示意图<sup>[11]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of weatherproof large-sized soilbags

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 3 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<sup>[24]</sup>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。

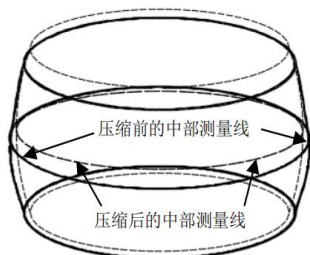


图 3 土工袋受压变形示意图

Fig. 3 Deformation of soilbags under compression



图 4 土工袋破坏示意图

Fig. 4 Soilbags' destruction model pile



图 5 抗风化大体积土工袋的用途<sup>[17]</sup>

Fig.5 Application of weatherproof large-sized soilbags

表 1 抗风化大体积袋体材料性能试验及标准<sup>[17]</sup>

Table 1 weatherproof large-sized soilbags Test and standard of the performance of materials

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	
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
环保性	耐热性	抗拉强度 240 N/cm
	耐寒性	抗拉强度 240 N/cm
	溶出物试验	无有害物溶出
排水透水性	有效开孔径	O95 小于 1.0mm
	透水性	透水系数小于 0.01cm/s

表 2 普通土工袋袋体材料性能标准<sup>[25]</sup>

Table 2 Ordinary soilbags material performance standard

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	横向 ≤28% 纵向 ≤28%
耐久性	单位面积质量	80 g/m <sup>2</sup>
	耐紫外线辐射	140 N/cm
规格	耐冻融性	160 N/cm
	长	75 cm
	宽	55 cm

文献 17 对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, 受荷载条件情况下要求大于 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冻性抗拉强度的要求都更高于普通土工袋袋体<sup>[25]</sup>。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。

表 3 单体性能试验及标准<sup>[17]</sup>  
Table 3 Tests and standard of sample

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	抗压强度不小
	抗压试验	小雨 200kPa
摩擦特性		单体之间摩擦系数不小于 0.5
	单体与单体、单体与地基土之间的摩擦系数试验方法为: 在 40kPa 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小于 0.6
		砂土与单体摩擦系数小于 0.5
		粘土与单体摩擦系数不小于 0.4
吊运稳定性	除填料自重外单体上部需增加 10kN 荷载吊运至离地 1m, 30s 内上下吊运 9 次, 再加 10kN 荷载保持起吊状态 5 分钟。	目测袋体材料无开裂
抗冲击性	起吊 0.8m 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%

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, 其具体标准如上表 3 所示。

## 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, 其平面图、剖面图分别如图 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。

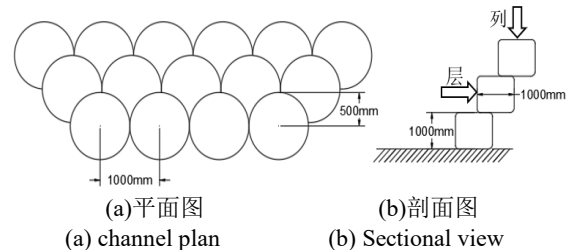


图 6 大体积土工袋挡墙的平面图和剖面图<sup>[17]</sup>

Fig. 6 The plan and section of the retaining wall

抗风化大体积土工袋构筑物设计需要满足的项目如表 4 所示, 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)。

表 4 安全标准<sup>[17]</sup>  
Table 4 Safety standard

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、沉降量满足设计要求以及不发生张拉破坏。	安全系数 $F_s \geq 1.5$
外部稳定性	结构不发生滑移、倾覆、承载力满足。	滑动安全系数 $F_s \geq 1.2$
		抗倾倒: 偏心距 $e \leq B/3$
整体稳定性	包含墙体的岩土体不发生整体滑动	承载力安全系数: $F_s \geq 2$ 圆弧滑动安全数 $F_s \geq 1.05$

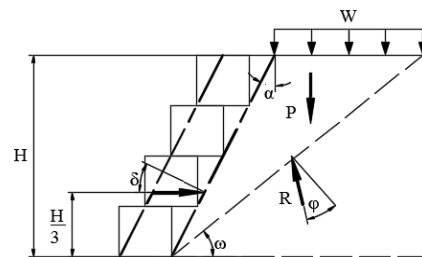


图 7 抗风化大体积挡墙剖面图

Fig. 7 The section of weatherproof large-sized soilbags retaining wall

如图 7, 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； $\varphi$  为土体内部摩擦角； $\alpha$  为构筑物与竖直方向的夹角； $\omega$  为滑移面与水平方向夹角； $\delta$  为壁面摩擦角。 $W$  在竖直方向， $R$  与滑移面的垂线夹角为 $\varphi$ ， $P$  与壁面的垂线夹角为 $\delta$ 。由此，可以求出其大小。

## 2 抗压特性试验

本文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

表 5 试验砂土各项参数

Table 5 Parameters of sandy soil

中值粒径 $d_{50}$	最大粒径 $d_{max}$	最小粒径 $d_{min}$	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 mm	10 mm	0.075 mm	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

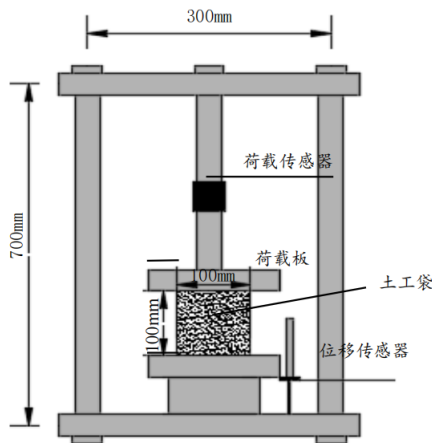


图 9 压缩试验仪器

Fig. 9 Compression test apparatus

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 5cm 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，

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如表 5 所示，每组土体相对密实度如表 6 所示。由于土体被夯的过于密实会使涤纶土工袋破裂，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  $D_r$  为土体相对密实度，之后不再赘述)

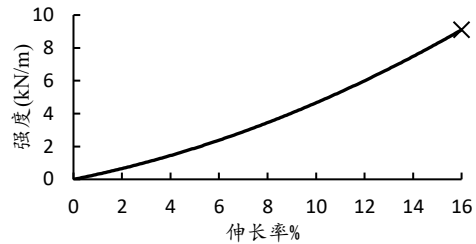


图 8 涤纶材料抗拉试验

Fig.8 The tensile test of polyester material

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。

## 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，径向应变与轴向应变的关系近似一条直线。

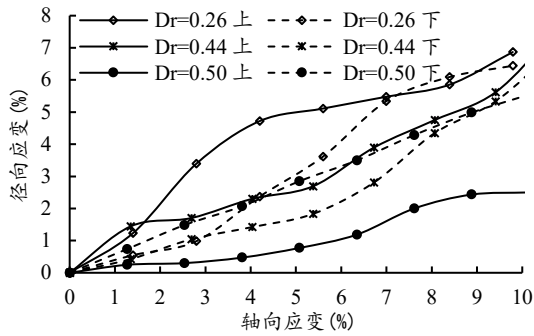


图 10 土工袋端部轴向应变和径向应变  
Fig.10 Axial an radial strains of soilbags

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如表 7 所示，最终所得平均荷载与轴向应变关系如图 12。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。

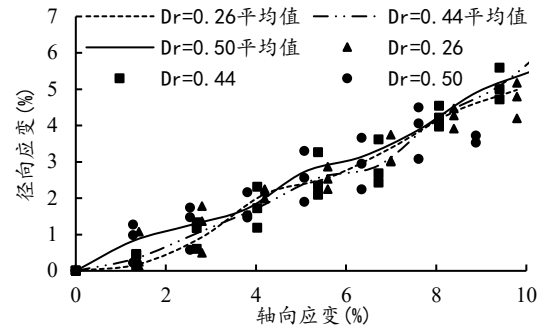


图 11 土工袋轴向应变和径向应变  
Fig. 11 Relationship of axial and average radial strains of soilbags

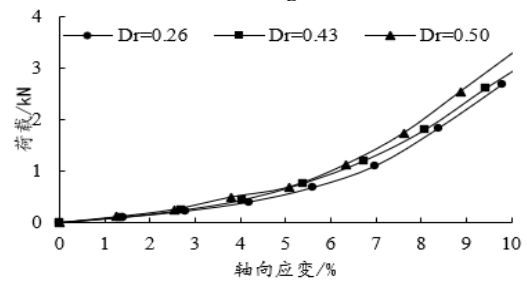


图 12 土工袋的荷载与轴向应变  
Fig. 12 Relationship of load and axial strain of soilbags

表 7 土工袋的荷载与轴向应变  
Table 7 The load and vertical strain of soilbags

单位: kN

Dr=0.26			Dr=0.44			Dr=0.50					
应变	轴力		应变	轴力		应变	轴力				
/%	(1)	(2)	/%	(1)	(2)	/%	(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

### 3 抗压特性理论研究

#### 3.1 抗压特性

本文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，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  $\sigma_1$  为外荷载， $\sigma_3$  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。

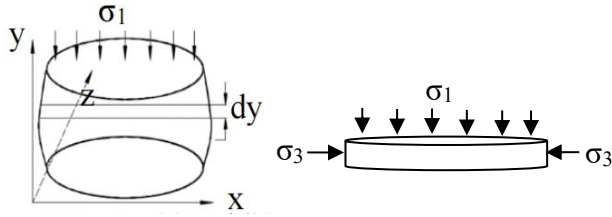


图 13 大体积土工袋微元应力受力图

Fig. 13 stresses of micro unit for large-size soilbags

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  $\theta$ 。则这段材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  $\sigma_3$ 。根据竖直方向合力为零则有式(4)，解之则有式(5)：

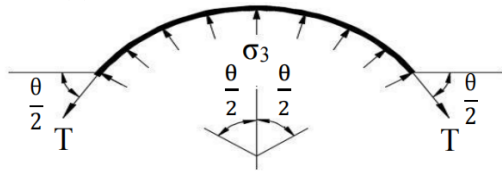


图 14 土工袋材料受力平面示意图

Fig. 14 Stresses of soilbags material

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

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

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  $\sigma_3$  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  $90^\circ$  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、土体性质、收口方式和填充高度有关。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。

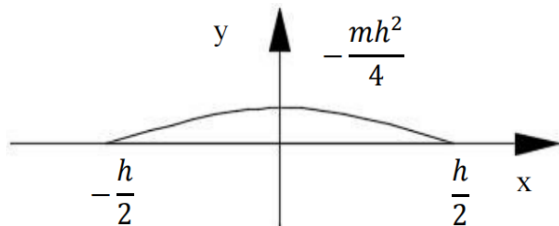


图 15 土工袋侧边鼓胀

Fig. 15 Side bulging function diagram 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  $\sigma_3$ ：

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

式(9)即为轴向位置在  $y$  处的微元上的土体所受约束应力  $\sigma_3$ 。将(9)带入广义增量胡克定律有，可得到该微元的轴向应变：

$$\Delta \varepsilon_1 = \frac{1}{E_s} \left( \sigma_1 - 4\pi E t v_s \frac{my^2 - myh}{r_0 + my^2 - myh} \right) \quad (10)$$

其中  $E_s$ ， $v_s$  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  $\sigma_1$  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：

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_s} \left\{ \frac{F}{\pi m^2} \left( \frac{mh}{2Br_0} + \frac{A}{2\sqrt{-B}} \right) - 4\pi E t v_s (1 + A) \right\} \quad (12)$$

$$F = \frac{\pi m^2 [E_s \varepsilon_1 + 4\pi E t v_s (1 + A)]}{\frac{mh}{2Br_0} + \frac{A}{2\sqrt{-B}}}$$

即

$$F = \frac{\pi m^2 [E_s \varepsilon_1 + 4\pi E t v_s (1 + A)]}{\frac{mh}{2Br_0} + \frac{A}{2\sqrt{-B}}} \quad (13)$$

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(见表 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  $\varepsilon_1$  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：

$$\varepsilon_{\text{中}} = k\varepsilon_1 \quad (16)$$

其中 $\varepsilon_{3\text{中}}$ 为中部的径向应变，将式(16)带入式(8)有：

$$m = -\frac{4k\varepsilon_1 r_0}{h^2} \quad (17)$$

根据《工程地质手册》<sup>[26]</sup>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 25MPa； $Dr=0.43$ 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。

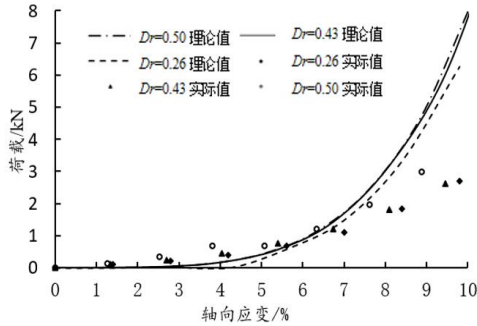


图 16 理论计算值与实际值  
Fig.16 Comparison between calculated and measured values

从图中可以看出压缩初期理论与实际值较为接近，而后理论值明显偏大。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 $\sigma_3$ ，其袋内土体剪胀模型示意图如下图 17 所示。

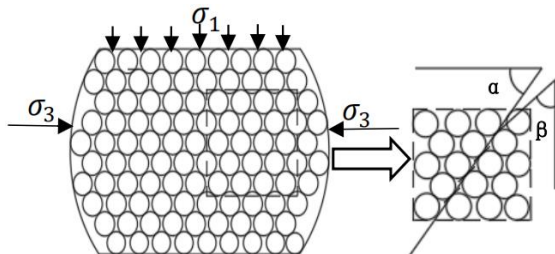


图 17 二维模型下大体积土工袋土体受力土颗粒布局模型  
Fig.17 Large-volume soilbag soil stress and soil particle layout model under two-dimensional model

图 17 中 $\alpha$ 为滑动面夹角； $\beta$ 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 $d\varepsilon_{\text{v中}}^{\text{p}}$ 代替塑性体应变 $d\varepsilon_{\text{v}}^{\text{p}}$ ，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：

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{\text{v}}^{\text{p}} &= d\varepsilon_{\text{v中}}^{\text{p}} = \frac{V_{i\text{中}} - V_{0\text{中}}}{V_0} \times 100\% \\ &= \frac{\pi r_0^2 \cdot dh - \pi r_i^2 \cdot (1 - d\varepsilon_1^{\text{p}})}{\pi r_0^2 \cdot dh} \\ &= \frac{\pi r_0^2 - \pi r_i^2 (1 - d\varepsilon_1^{\text{p}})}{\pi r_0^2} \end{aligned} \quad (18)$$

其中， $d\varepsilon_1^{\text{p}}$ 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，见下图 18。

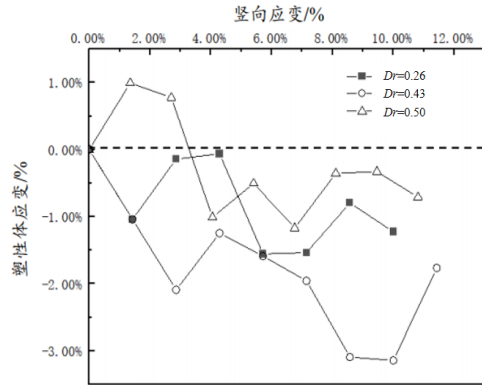


图 18 土工袋内土体体应变试验计算值  
Fig.18 Calculated value of soil stress-strain test in soilbags

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 $\eta$ 存在唯一关系<sup>[27]</sup>，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<sup>[28,29]</sup>。因此，本文亦采用剑桥模型，其表达式为：

$$d = \frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_q^p} = M - \eta = M - q/p \quad (19)$$

式中 $d\varepsilon_v^p$ 、 $d\varepsilon_q^p$ 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：

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

式中， $\eta_s$ 表示大体积土工袋内土体应力比；

Li 和 Dafalias<sup>[30]</sup>通过一系列试验总结出了圆形土颗粒模型在应力比 $\eta$ ( $\eta$ 为未经过筋材加固的土体应力比)与塑性体应变与竖向应变增量比( $d\varepsilon_v^p/d\varepsilon_1^p$ )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。

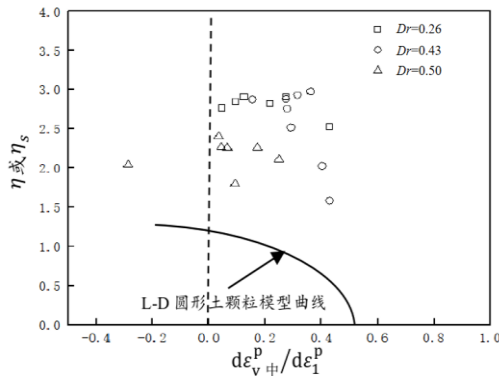


图 19 土工袋内砂土应力与剪胀关系

Fig.19 The relationship between sandy soil stress and dilatancy in soilbags

从图 19 可以看出，三组不同初始密实度  $D_r$  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 $\eta$ 小于土工袋袋内的土体应力比 $\eta_s$ ，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  $D_r$  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  $D_r$  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  $D_r$  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,(08):1665-1670.  
Liu S H, Matsuoka H. A new earth reinforcement method by soilbags[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics,2007,(08):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 Fu Q. Experimental study of strength and deformation properties of soilbags filled with mud soil[J]. Chinese Journal of Three Gorges University, 2014, 36(1): 33-36(in Chinese)
- [3] 文华,曹兴,邹娇丽敏.建渣土工袋力学特性试验研究[J].浙江工业大学报,2017,45(02):217-222.  
Wen H, Cao X, Zou J L M. An experimental study on the

- mechanical properties of soilbags filled with construction waste[J]. Chinese Journal of Zhejiang University of Technology,2017,45(02):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(06):52-61.  
Liao J, Liu S H, Xu S Y, Fan K W, Yu B W Application of soilbags Reinforced Soft Soil Subgrade in Rural Roads[J]. Highway,2024,69(06):52-61. (in Chinese)
- [5] 李明宇,郭院成,郜新军.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(08):268-274.  
Li M Y, Guo Y C, Gao X J. Field test and research on the deformation law of geo-membrane bag cofferdam coastal saturated soft soil[J]. Chinese Journal of Highway,2015,60(08):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,(07):108-111.  
Wang H J, Li X Q, Qi Y X, Cai T S. Experimental study on the stability characteristics of single geobag under the action of water flow scouring[J]. Water Resources Planning and Design,2022,(07):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 muck retaining 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 XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Foz do Iguassu,1999: 1—8.
- [9] 贾凡,刘斯宏,程宏喏.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 Hongyang. 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.土工袋垫层抗液化性能振动台试验研究[J].岩土力学,2022,43(S2):183-192.  
Liu S H, Li B W, Lu Y. Shaking table tests on liquefaction resistance performance of soilbag-stacked cushion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(S2): 183-192. (in Chinese)
- [11] 刘斯宏,薛向华,樊科伟,徐思远.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, Xu S Y. 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.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. A Small Shake Table Model Test on Soilbag Cushion with Different Structural Forms[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(9): 147-154. (in Chinese)
- [13] 樊科伟,邹维列,王柳江.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. 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.水平循环剪切作用土工袋竖向变形特性试验研究[J].振动与冲击,2023,42(22):130-137.  
Fan B X, LIU S H, Lu Y. 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. Large-scale geosoilbag slope protection technology for a river improvement project[J].Henan Water Conservancy and South-to-North Water Diversion,2023,42(22):130-137(in Chinese)
- [16] Futaki M, Inuo N, Matsuoka H. Compression tests 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 pile up Method using weatherproof large-sized soilbags[M].2012.(in Japanese)
- [18] Yamamoto K, Ishida M, Sugiyama K. Application and effect the continuous collapsible wire mesh frame with non-woven fabric liner 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 tests at a construction road in G city[C]//The Japanese Geotechnical Society,Proceedings of the Japan National Conference on Geotechnical Engineering. Osaka 2002 JGS37(0):1927-1928
- [22] Sato A, Nakamura D, Suzuki T .Method of improving soil with high water content that utilized cold climate and large soilbags[J]. Journal of Geosynthetics Engineering Journal, 2014 , 29(0):41-48(in Japanese)
- [23] Mori Y, Miyatake H, Kuko T.Study on new restored technology for large-scale sediment disaster [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F4 (Construction and Management), 2016 72(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].重庆大学,2015.  
Huang X Y. Analysis of wrap soilbags reinforced 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.  
Technical Specification for Slope Protection with Soilbags: DB32/T 3842-2020[S].Jiangsu: Jiangsu Market Supervisory Authority.2020. (in Chinese)
- [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.  
Engineering Geology Handbook” Editorial Board .Handbook of engineering geology[M].Beijing: Chinese Building Industry Press,2018. (in Chinese)
- [27] LI X S, Dafalias Y 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, Chean J J. Microscopic understanding of dilatancy in cohesionless soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1333-1339.
- [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.Study on Strength and Dilatancy Characteristics of Soils Wrapped by Soilbags[J].Water Resources and Power,2021,v.39;No.255(11):158-162(in Chinese)
- [30] Chang, C. S., & Yin, Z.-Y.. Modeling stress-dilatancy for sand under compression and extension loading conditions. Journal of Engineering Mechanics, 2010,136(6), 777 - 786.