



大型土工砂袋形变影响因素分析^{*}

杨立文¹, 虞莹², 高成宾¹

(1. 中交三航局第二工程有限公司, 上海 200122; 2. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

摘要: 以大型土工砂袋为研究对象, 基于受力分析建立数学方程, 探讨砂袋摩擦系数、填料侧压力系数对大型土工砂袋形变的影响, 分析两种因素的作用机理, 并结合实际工程的砂袋选型设计进行验证。结果表明, 随着砂袋摩擦系数增加, 袋体张力增大且不断隆起; 而填料侧压力系数变化时, 袋体张力虽增大但对形状几乎无影响; 砂袋摩擦系数比填料侧压力系数具有更明显作用; 建立的数学模型具有可靠性, 具有较好的实用价值。

关键词: 大型土工砂袋; 数学模型; 摩擦系数; 验证与应用

中图分类号: TU 599; U 656.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0186-05

Influencing factors of deformation of large geotechnical sand bag

YANG Li-wen¹, YU Ying², GAO Cheng-bin¹

(1.The Second Branch Company of CCCC Third Shipping Engineering Co., Ltd., Shanghai 200122, China;

2.CCCC Third Shipping Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: This paper takes the large geotechnical sand bag as the research object, and builds the mathematical equation based on the force analysis. The paper discusses the influence of friction coefficient of sand bag and lateral pressure coefficient of the filling on the deformation of large geotechnical sand bag, then analyzes mechanism of the two factors, and verifies the results with the design and selection of sand bag in an actual project. The results show that the tension of the bag increases and bulges continuously with the increase of friction coefficient. The tension of the bag increases with lateral pressure coefficient changes but the shape is nearly stable. The friction coefficient of sand bag has more obvious effect than lateral pressure coefficient of filling. The built mathematical model is basically reliable, and has excellent practical value.

Keywords: large geotechnical sand bag; mathematical model; friction coefficient; verification and application

土工砂袋在航道工程袋装砂斜坡堤中应用广泛, 为适应航道工程建设需要, 学者们开展了许多相关研究, 如楼启为^[1]提出袋装砂斜坡堤充灌及铺设成型施工工艺; 张庆文等^[2]优化充灌砂袋缝制工艺与袋装砂铺设流程; 王新强等^[3]实现大型充砂袋围堤在围海造陆工程中的应用; 周林等^[4]研发出一套水上土工砂袋装填及定位下沉施工工艺; 牛晨曦等^[5]提出航道整治工程设计优化方案。这些研究促进了土工砂袋技术的进步, 然而随着

航道工程的新发展^[6], 常规砂袋已渐渐不能满足实际需求, 如传统砂袋只有 0.5~1.0 m 的充灌高度, 无法保证工期与精度^[7]。因此研制更高性能的大型土工砂袋, 对于提升水运工程品质具有重要的现实意义。

本文以大型土工砂袋为研究对象, 基于数学方程探讨土工砂袋形变影响因素, 为大型土工砂袋制作提供技术参考, 并通过实际工程应用验证效果。相关成果可为类似工程提供参考。

收稿日期: 2022-04-21

***基金项目:** 中交第三航务工程局 2021 年科研课题项目 (21-南槽一期综-24)

作者简介: 杨立文 (1976—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程施工管理。

1 理论方程

1.1 力学计算模型

假设土工砂袋足够长且满足平面应变, 充灌后土体均匀满布袋体, 袋体周长不变, 则周长应变可忽略, 砂袋自身重力较轻也可忽略。同时充灌前后刚性地基保持稳定, 袋内土体弹性平衡, 由此得到充灌稳定的砂袋力学计算模型, 如图 1 所示。其中砂袋顶点 O 列为坐标原点, 大型土工砂袋与地基的接触长度 A_1A_2 记为 b , 袋体高度为 h , 袋体的最大宽度为 B 。

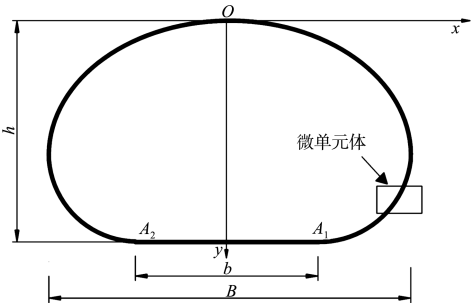


图 1 砂袋力学计算模型

1.2 静力平衡条件

从图 1 中选取力学计算模型横截面的一个微单元体, 其受力如图 2 所示。

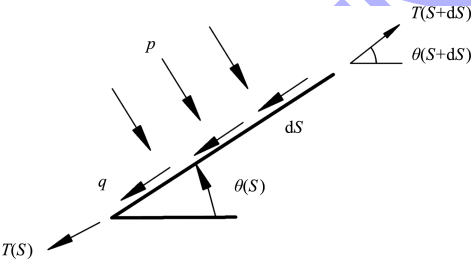


图 2 微单元体受力

经分析微单元体受力情况, 进行无量纲化处理后, 得到其静力平衡方程:

$$T \frac{d\theta}{dS} = p \tag{1}$$

$$\frac{dT}{dS} + q = 0 \tag{2}$$

$$\frac{dx}{dS} = \cos\theta \tag{3}$$

$$\frac{dy}{dS} = \sin\theta \tag{4}$$

式中: T 为袋体张力; θ 为单元体与水平线的夹

角; S 为单元体弧长; p 为袋壁压力; q 为袋壁切向力。

1.3 数学积分方程

由于微单元段切向力与法向力存在正比关系 $q = \mu p$, 将此关系代入(1)(2)求导后得:

$$T = c_1 e^{-\mu\theta} \tag{5}$$

式中: μ 为砂袋摩擦系数; c_1 为待定系数。

考虑对称性, 以图 1 的右半部分为例, 根据弹性平衡假设, 袋体侧向压力为:

$$p = K\rho_{\text{int}}g(h_0 + y) \tag{6}$$

式中: ρ_{int} 为填料密度; K 为侧压力系数; h_0 为初始袋体高度。

将式(6)无量纲化及推导后得:

$$K \int (h_0 + y) dy = \int c_1 e^{-\mu\theta} \sin\theta d\theta \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \tag{7}$$

进一步推导得水平接触宽度的计算公式:

$$x = \int_0^a \frac{c_1 e^{-\mu\theta} \cos\theta + c_2}{K\sqrt{h^2 + 2m}} d\theta \tag{8}$$

式中: a 为积分上限; c_2 为待定系数; m 由下式确定:

$$m = \frac{c_1(\mu e^{-\mu\theta} \sin\theta + e^{-\mu\theta} \cos\theta)}{K\mu^2 + 1} + c_3 \tag{9}$$

式中: c_3 为待定系数。

进一步推导得弧长的计算公式:

$$S = \int_0^a \frac{c_1 e^{-\mu\theta}}{K\sqrt{h^2 + 2m}} d\theta + c_4 \tag{10}$$

式中: c_4 为待定系数。

式(10)为非线性积分方程, 计算过程较为繁琐, 实际应用时可结合数学软件进行求解。

2 理论分析与讨论

2.1 砂袋摩擦系数的影响

2.1.1 对砂袋形状的影响

充灌时袋内砂料为流体态, 与袋壁间的摩擦很小可忽略, 但充灌完成并固结后, 袋内砂料与袋壁间的摩擦则不能忽略。考虑到填料侧压力系数基本在 0.2~0.6^[8], 假设侧压力系数 $K = 0.4$, 袋体初始高度 $h_0 = 0.02$ (无量纲), 通过求解积分方程, 得到不同摩擦系数砂袋形状参数值, 见表 1。

表 1 不同摩擦系数时的砂袋形状参数值

K	h_0	μ	B	b	h
0.4	0.02	0	0.443 8	0.423 5	0.101 9
		0.25	0.422 9	0.392 7	0.116 7
		0.50	0.412 3	0.361 8	0.135 0
		0.75	0.403 2	0.333 7	0.149 7
		1.00	0.392 8	0.297 8	0.166 5

由表 1 可看出,随着砂袋摩擦系数增加,砂袋最大宽度由 0.443 8 减小到 0.392 8,减幅约为 11.5%;同时砂袋与地基的接触宽度由 0.423 5 减小至 0.297 8,减幅约为 29.7%;而砂袋最大高度则由起始的 0.101 9 增大至 0.166 5,增幅约为 63.4%。由此可见,随着砂袋摩擦系数的增加,砂袋宽度不断减小,且砂袋高度随之增大,即砂袋在摩擦系数增加条件下,砂袋宽由扁平状态不断向隆起状态发展。

2.1.2 对袋体张力的影响

同样通过软件求解数学方程,得到不同摩擦系数下砂袋张力(无量纲)的变化情况,如图 3 所示。

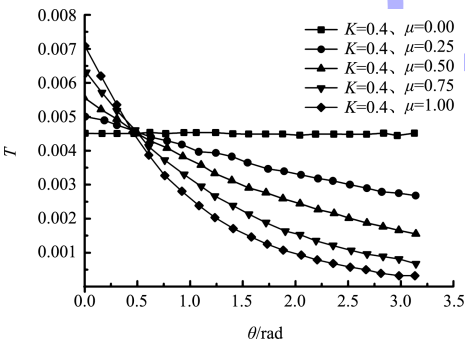


图 3 不同摩擦系数时袋体张力变化曲线

由图 3 可看出,摩擦系数对砂袋张力的影响非常显著,切角小于 0.5 rad 时砂袋摩擦系数越大则砂袋张力就越大,摩擦系数从 0 到 1 砂袋张力增加了约 61.9%;切角大于 0.5 rad 后,砂袋张力发生转变,摩擦系数越大袋体张力越小。而对于固定的摩擦系数,砂袋张力随切角变大而逐步减小,即切角为 0 时砂袋张力最大,袋体顶部处砂袋张力最大,这主要由于在顶部处的砂土颗粒向下运动,颗粒向下的趋势会使压力增加更明显。

2.2 填料侧压力系数影响

2.2.1 对砂袋形状的影响

假定摩擦系数等于 1 及砂袋初始高度为 0.02,以填料内摩擦角 30°为例,分别计算出主动土压力系数为 0.260、静止压力系数为 0.546、被动土压力系数为 1.894,并以此计算砂袋形状参数,见表 2。

表 2 不同填料侧压力系数下砂袋形状参数值

μ	h_0	K	B	b	h
1.0	0.02	0.260	0.435 3	0.416 7	0.099 5
		0.546	0.438 9	0.420 2	0.098 0
		1.894	0.442 9	0.424 2	0.096 6

由表 2 可看出,填料侧压力系数由 0.260 增加至 1.894 时,砂袋宽度仅从 0.435 3 增加到 0.442 9,增幅仅 1.7%;接触宽度从 0.416 7 增加到 0.424 2,增幅也只有 1.8%;同理可见最大高度的变化也不到 3%。因此,填料侧压力系数的改变对砂袋形状的影响较小,基本可以忽略。

2.2.2 对袋体张力的影响

类似地,求解不同填料侧压力系数下砂袋张力的变化,相关曲线如图 4 所示。由图 4 可知,砂袋张力随切角变大而逐步减小,切角为 0 时袋体顶部处砂袋张力最大。同时取静止土压力系数时,砂袋张力接近为 0.009 4,而取主动土压力系数时砂袋内部张力为 0.007 5,此时砂袋内部张力达到最小,而取被动土压力系数时为最大值 0.066 4,最大值约为最小值的 8.8 倍,可见填料侧压力系数对于砂袋内部张力的影响较为显著。

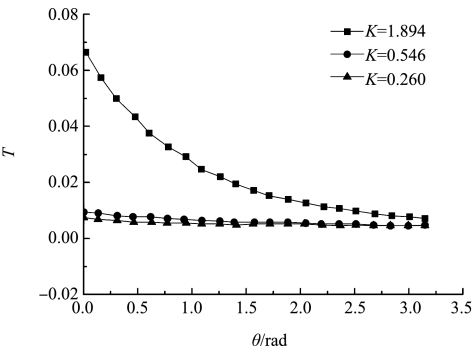


图 4 不同侧压力系数下袋体张力变化曲线

2.3 两者作用机理分析

砂袋摩擦系数体现的是袋壁与填料间的关系。砂袋摩擦系数越大, 两者相互咬合、嵌固的作用越明显, 故砂袋自稳能力越强, 直观表现为宽度减小但高度增大, 即砂袋不断由扁平状态向隆起状态发展。而填料侧压力系数反映的是竖向力的水平效应。由于砂袋近乎轴对称, 填料侧压力系数变化时, 虽然砂袋张力会相应变化, 但竖向力水平效应相互抵消, 故袋体形状变化不明显。结合定量对比可见, 砂袋摩擦系数具有比填料侧压力系数更明显的作用, 因而土工砂袋造型设计时须着重考虑摩擦系数的作用。

3 砂袋选型设计与验证

3.1 工程概况

某工程位于长江口南槽航道^[9], 是长江口航道体系的重要组成部分, 其整治建筑物堤身总长 16 km, 其中袋装砂斜坡堤长 8.875 km, 袋装砂斜坡堤采用抛石进行护脚保护, 护面结构为扭王字块体, 堤心和护面间设有 100~200 kg 垫层石与 10~100 kg 抛石进行过渡。袋装砂斜坡堤需要使用大型土工砂袋进行堤心的填筑。由于长江口南槽水流湍急, 堤顶砂袋施工时船舶吃水深度不够, 以往仅有 0.5 m 充灌高度的砂袋不适用, 急需研发出能满足现场施工需求的大型土工砂袋。

3.2 砂袋选型设计

基于前述研究, 将袋体初始高度等条件代入式(7), 使用迭代法试算求解得到待定系数 c_1 , 然后将 c_1 与初值代入其他各式, 分别求得最大高度等参数。由于计算过程较复杂, 本文开发了相应的计算程序以提高效率。经充分考虑堤顶施工船舶吃水深度等, 初步提出 2 种不同材料砂袋推荐方案, 见表 3。

表 3 两种不同材料砂袋推荐方案

方案	材料构成	摩擦系数	砂袋最大高度/m
1	620 g/m ² 丙纶长丝机织土工布+ 180 g/m ² 无纺布	0.45	4
2	510 g/m ² 丙纶长丝机织土工布+ 150 g/m ² 无纺布	0.40	3

为进一步验证技术方案可行性, 现场制作 2 种规格的大型土工砂袋, 砂袋长 10.2 m、宽 19.5 m, 但高度分别为 4、3 m (编号 W1、W2)。采用长江口充灌砂料进行试验, 砂料密实度为 0.95, 最大、最小孔隙率分别为 0.846、0.519。试验后整理得到相应的砂袋外形无量纲对比曲线, 如图 5 所示。

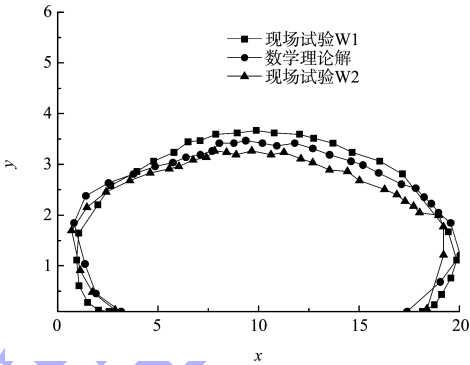


图 5 砂袋外形无量纲对比曲线

由图 5 可见, 现场试验曲线与数学理论解很接近, 两者形状相同, 且有多处曲线近乎重合, 表明了数学模型的可靠性, 研究成果具有一定的可行性与实用价值。

3.3 验证与应用

由于布料单位面积质量越大价格就越高, 考虑到成本控制, 按第 2 种方案实施, 即采用 510 g/m² 丙纶长丝机织土工布+150 g/m² 无纺布制备高性能砂袋。现场施工后, 采用测深仪法^[10] 进行检测, 结果表明新制备的砂袋充填高度大部分接近 3 m, 是传统砂袋的 2~3 倍, 如图 6 所示。

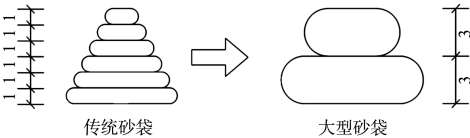


图 6 应用效果对比 (单位: m)

长江口施工受涨落潮影响, 每次潮水往往只能铺设 1 个袋体, 以 6 m 高的砂堤为例, 采用传统砂袋需要经历 6 次潮水, 而大型砂袋仅需经历 2 次潮水。据统计, 采用新研发的大型砂袋后, 工程造价节省 1 200 万元以上, 取得良好的环保、经济与社会效益。分析其内在原因, 实际上是该砂袋具有更优的性能指标, 见表 4。

表 4 砂袋布料指标对比

类型	经向抗拉强力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	经向断裂 伸长率/%	纬向抗拉强 力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	纬向断裂伸 长率/%	加州承载比 (CBR) 顶破强力/ kN	等效孔径 O_{95}/mm	缝制强力/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
本方案袋体	≥ 127	≤ 11.6	≥ 151	≤ 14.6	15.5	0.214	96.6
传统袋体	60	28.0	45	28.0	4.5	0.090	25.0

由表 4 可看出,新研制的大型复合砂袋物理指标整体优于普通袋体,特别是控制砂袋破裂的关键指标如经向、纬向抗拉强力及 CBR 顶破强力得到极大优化,因而有更高的承载力,适应 3 m 高的填筑高度。综上可见,本文研究成果安全适用,具有一定的推广价值与应用前景。

4 结论

- 1)随着砂袋摩擦系数增加,砂袋宽度不断减小且砂袋高度随之增大,砂袋由扁平状态不断向隆起状态发展。
- 2)砂袋张力随切角变大而逐步减小,切角为 0 时砂袋内部张力最大,即袋体顶部处内部张力最大。
- 3)填料侧压力系数变化时,袋体内部张力增大但对袋体形状几乎无影响,侧压力系数取被动土压力系数时约为静止土压力系数的 8.8 倍。
- 4)摩擦系数具有比填料侧压力系数更明显的作用,大型土工砂袋布料选择时应着重考虑摩擦系数的影响。
- 5)该数学模型具有一定的局限性,且应用的工程较少,后续可结合现场试验、数值分析等手段加以验证与完善。

参考文献:

[1] 楼启为.长江口深水航道治理工程袋装砂堤心成型及砂被铺设施工工艺[J].水运工程,2006(S2):74-77.

[2] 张庆文,胡子军,谭炜强.长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程深水充灌袋装砂堤心施工工艺[J].中国港湾建设,2017,37(9):70-73.

[3] 王新强,许佳,陈洁,等.围堤工程大型充砂袋高效施工技术[J].中国港湾建设,2010(2):58-59.

[4] 周林,于学付,张雪娇.大型土工砂袋边坡防护高效高精度技术研究[J].港工技术,2020,57(5):99-102.

[5] 牛晨曦,假冬冬,张幸农.长江下游黑沙洲水道航道整治二期工程模型试验研究[J].水运工程,2017(7):149-154.

[6] 曹民雄,汪路瑶,申霞,等.长江南京以下 12.5 m 深水航道工程的技术难点与建设特点分析[J].水运工程,2019(10):1-8.

[7] 孙立强,官婷婷,郭伟,等.土工织物充灌袋简易设计计算方法研究[J].岩土工程学报,2016,38(6):1014-1020.

[8] 苏栋.土力学[M].北京:清华大学出版社,2015.

[9] 施军.长江口南槽航道治理一期工程软体排铺设施工工艺[J].中国港湾建设,2020,40(11):66-70.

[10] 张才俊,郭素明,李少俊.水下软体排铺设质量检测技术对比[J].水运工程,2016(2):10-14.

(本文编辑 王璁)

(上接第 185 页)

参考文献:

[1] 李家正,严建军,杨华全.塑性混凝土在三峡工程中的应用研究[J].水力发电学报,2009,28(1):159-164.

[2] 王四巍.多轴应力下塑性混凝土力学性能及破坏特征[M].北京:中国水利水电出版社,2015.

[3] 宗敦峰,刘建发,肖恩尚,等.水工建筑物防渗墙技术 60 年 II:创新技术和工程应用[J].水利学报,2016,47(4):483-492.

[4] 中国葛洲坝集团股份有限公司,葛洲坝集团第二工程

有限公司,葛洲坝集团试验检测有限公司.水工塑性混凝土试验规程:DL/T 5303—2013[S].北京:中国电力出版社,2013.

[5] 田雷,林宁,周虎,等.膨润土掺量对自密实混凝土强度及变形能力的影响[J].工业建筑,2019,49(11):108-112.

[6] 中国水利学会地基与基础工程专业委员会,中国水电基础局有限公司.水利水电工程混凝土防渗墙施工技术规范:SL 174—2014[S].北京:中国水利水电出版社,2014.

(本文编辑 王璁)