

DOI: 10.11779/CJGE201606006

土工织物充灌袋简易设计计算方法研究

孙立强^{1,2}, 官婷婷^{1,2}, 郭伟³, 路江鑫^{1,2}, 闫澍旺^{1,2}, 贾天强^{1,2}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学岩土工程研究所, 天津 300072; 3. 新加坡南洋理工大学, 新加坡)

摘要: 土工织物充灌袋广泛应用于围堤结构、挡水结构以及橡胶坝中。其理论分析方法国内外许多学者进行了较深入的研究, 但研究成果多为解析解, 在工程设计应用中具有一定的局限性。为了提出一种能够方便设计使用的简易而准确的设计计算方法, 建立了能够根据泵送压力计算充灌袋拉力、截面形状的解析方程。为了能够方便研究不同泵送压力与充灌袋周长、充灌袋拉力以及截面尺寸之间的关系, 对泵送压力、充灌袋拉力、充灌袋高度和宽度进行无量纲化处理。根据提出的解析方程编制计算程序, 计算标准化泵送压力与标准化高度、标准化截面面积以及标准化拉力之间的关系曲线。采用 Chapman-Richard 成长曲线模型对标准化的曲线进行拟合, 进而提出土工织物充灌袋简易的设计计算方法。通过与其他计算方法和模型试验结果对比, 验证了该方法的正确性。因此该方法可以用于土工织物充灌袋的工程设计。

关键词: 土工织物充灌袋; Chapman-Richard 成长曲线模型; 曲线拟合

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-1014-07

作者简介: 孙立强 (1979-), 男, 山东青岛人, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: slq0532@126.com。

Curving fitting method for design of geomembrane tubes

SUN Li-qiang^{1,2}, GUAN Ting-ting^{1,2}, GUO Wei³, LU Jiang-xin^{1,2}, YAN Shu-wang^{1,2}, JIA Tian-qiang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety in Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Institute of

Geotechnical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang

Technical University, Singapore)

Abstract: Geomembrane tubes have been widely used to construct dikes, rubber dams and flood control structures. The analytical methods for the design of geomembrane tubes have been well developed. However, these methods cannot be used directly but have to operate using computer program. For the convenience of research and design, a curve fitting method is proposed to simplify the design process for the geomembrane tubes. The pumping pressure, tensile force and geometric parameters are dimensionless. Based on the computer program, the relation curves among the pumping pressure, tensile force and geometric parameters of geomembrane tubes are established. A set of simplified dimensionless design equations are then derived using the Chapman-Richard model. The validities of these curve fitting equations are verified using the results by others and large scale laboratory model tests. The proposed curve fitting equations can be used for the preliminary design of the geomembrane tube.

Key words: geomembrane tube; Chapman-Richard model; curve fitting

0 引言

土工织物充灌袋广泛应用于各种工程, 例如围海造陆、建造防浪堤^[1]、防止海岸冲刷工程^[2]、环保工程^[3-4]等。土工织物充灌袋通常用渗透性较大的砂或粉土等材料进行充填。充灌袋设计时, 必须保证土工织物在充填过程中产生的拉应力不超过土工织物材料的抗拉强度^[5]。因此设计阶段, 必须确定充灌袋泵送压力与充灌袋几何尺寸、充填泥浆重度、土工织物拉应力之间的关系^[6]。目前已有一些学者提出解析解计

算的方法, 例如: Leshchinsky 等^[7-8]基于充灌袋周长与拉力等的关系设计的 GeoCoPs 计算程序; Plaut 等^[9]针对在变形地基上充灌袋的几何参数提出了解析方程; Chu 等^[10]、Guo 等^[11]针对充灌袋设计计算进行了试验与研究。但这些方法在实际工程应用过程中, 均需要编制复杂的计算机程序, 难以被工程设计人员采用。另有学者 Cantré 等^[12-13]提出采用图表系数法进行

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41402263); 天津市自然科学基金重点项目 (13JCZDJC35300)

收稿日期: 2015-04-28

设计。

为了提出一种简单准确的、可被工程设计人员容易接受的计算方法, 本文首先建立了能够根据泵送压力计算充灌袋拉力、截面形状的解析方程, 对泵送压力进行标准化, 对所涉及的计算参数进行无量纲化, 利用提出的解析方程编制计算程序计算标准化泵送压力与标准化高度、标准化截面面积以及标准化拉力之间的关系, 采用成长曲线模型对标准化的曲线进行拟合, 进而提出土工织物充灌袋简易的设计计算公式, 通过与其他学者方法计算和模型试验结果对比验证了该方法的正确性。

1 基本假定与计算原理

为了推导泵送压力与土工织物几何参数之间的关系, 本文的基本假定及计算原理简述如下。

基本假定: ①充灌袋轴向方向足够长, 视为平面应变问题; ②土工织物足够薄, 忽略其质量及抗弯刚度; ③忽略充灌袋与内含填充材料及硬基础间的摩擦力; ④任一时刻, 充灌袋受到的张力沿断面周长方向相同; ⑤充灌袋内填充均一液体且充灌袋外不受水压作用。(当充灌袋处于水下时, 参见Lee等^[14]。)

图1(a)为充灌袋横截面受力示意图(由于对称性, 取一半作为研究对象)。图中轴线上充灌袋的高为 H , 最大宽度为 B , 底部与地基接触宽度为 b , 泵送压力为 p_0 , 泥浆重度为 γ 。泥浆内部任意深度 x 处的压力为 $p_0 + \gamma x$ 。充灌袋的外层形状假定为未知函数 $y = f(x)$, 在任意一点 $S(x, y)$, 受力平衡分析见图1(b), 沿着水平方向作用于充灌袋的力包含水压力和拉力。

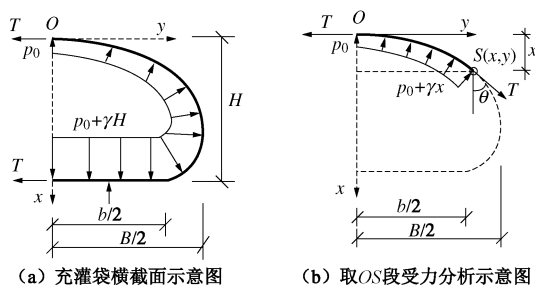


图1 充灌袋横截面示意图

Fig. 1 Free body of geosynthetic tube resting on rigid foundation

由于假定问题为平面应变问题, 且忽略充灌袋与内含填充材料及硬基础间的摩擦力, 则 $dT/dS = 0$, 即在充灌过程的某一时刻, 充灌袋所受拉力 T 沿充灌袋周长相同。充灌袋所受拉力 T 必沿切线方向且均匀, 受力分析如图2所示。

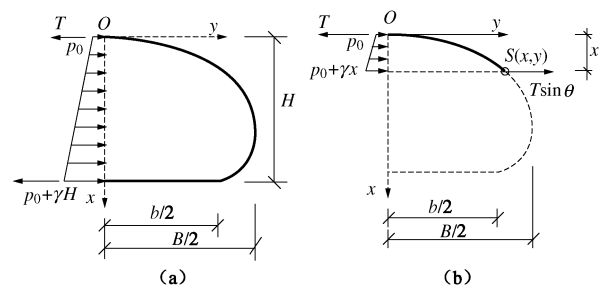


图2 y轴方向受力示意图

Fig. 2 Forces acting on y axis

对图2(a)的断面, 取中轴线做 y 轴方向的受力分析, 可得平衡方程:

$$2T = p_0 H + \frac{1}{2} \gamma H^2 \quad (1)$$

由式(1)可得

$$T = \left(p_0 H + \frac{1}{2} \gamma H^2 \right) / 2 \quad (2)$$

对图2(b)的圆弧 OS 做 y 轴方向的受力分析, 可得平衡方程:

$$T - T \sin \theta = p_0 x + \frac{\gamma x^2}{2} \quad (3)$$

x 为图中点 $S(x, y)$ 的深度, 由式(3)可解得

$$x = \frac{1}{\gamma} \left[-p_0 + \sqrt{p_0^2 + 2\gamma T(1 - \sin \theta)^2} \right] \quad (4)$$

由三角关系及曲率半径, 可得

$$y' = dy/dx = \tan \theta \quad (5)$$

$$y' / \sqrt{1 + y'^2} = \sin \theta \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{r} = \frac{1}{T} (p_0 + \gamma x) \quad (7)$$

式中, y 为图中点 $S(x, y)$ 在 y 轴方向的距离, 是充灌袋拉力 T 、夹角 θ 、泵送压力 p_0 及无量纲参数 Q 的函数(其中泥浆重度已知), 由式(5)~(7)及椭圆积分及非线性微分方程解法可得

$$y = -\sqrt{\frac{T}{2\gamma}} \int \left(\sqrt{Q - \sin \theta} - \frac{Q}{\sqrt{Q - \sin \theta}} \right) d\theta \quad (8)$$

式中, Q 为关于泵压力的无量纲参数,

$$Q = \frac{1}{2\gamma T} (p_0^2 + 2\gamma T) \quad (9)$$

结合式(8)、(3)变形, 可得

$$\sin \theta = 1 - \left(p_0 x + \frac{1}{2} \gamma x^2 \right) / T \quad (10)$$

联立式(2)、(4)、(8)、(9)、(10)得到 T 和 p_0 , 或者是 x 与 y 间的关系式, 这需要应用数值方法进行迭代计算及编写数值计算程序来实现这个计算过程。

2 设计计算方法

2.1 标准化泵送压力与无量纲参数之间的关系

根据提出的解析方程编写计算程序, 对不同泵送压力下充灌袋拉力、截面形状进行计算, 为方便建立泵送压力与充灌袋几何参数及充灌袋拉力之间的关系。将泵送压力 p_0 无量纲化, 本文将 $p_0/(\gamma L)$ 视为标准化 (无量纲化) 泵送压力。其中 γ 为充填物重度, L 为充灌袋周长。同理, 分别对充灌袋高度 H 、充灌袋横截面面积 A 、充灌袋张力 T 、充灌袋横截面宽度 B 及充灌袋与基础接触宽度 b 无量纲化, 得到标准化后的充灌袋高度为 H/L , 标准化的截面面积为 A/L^2 , 标准化的拉力为 $T/(\gamma L^2)$, 标准化的截面宽度为 B/L 及标准化的接触宽度为 b/L 。

为了建立标准化泵送压力与标准化的充灌袋高度之间的关系, 分别取工况 $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$ 、 $L = 5 \text{ m}$, $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$ 、 $L = 10 \text{ m}$, $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$ 、 $L = 20 \text{ m}$, $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ 、 $L = 10 \text{ m}$, $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$ 、 $L = 20 \text{ m}$, 取不同的泵送压力进行计算, 将所得结果绘制得到图 3。从图 3 中能看出标准化的充灌袋高度随着泵送压力的增大而增大, 并且曲线大体呈现“S”型。

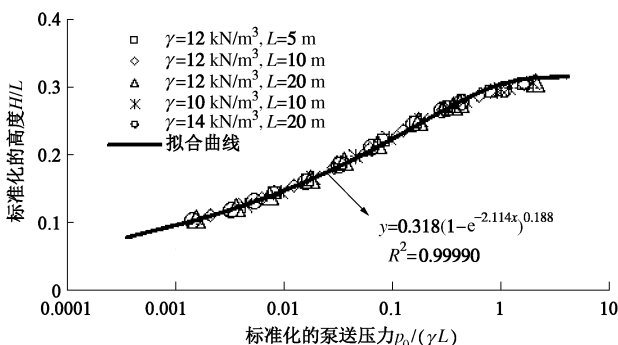


图 3 泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 与高度 H/L 的拟合曲线

Fig. 3 Curve fitting for relationship between $p_0/(\gamma L)$ and H/L

在标准化的泵送压力相对较小时, 两者关系呈线性关系; 随着泵送压力的增大, 标准化的高度不断增大, 且斜率呈现增大的趋势; 当标准化的泵送压力增大到一定阶段时, 标准化的高度增加速率不断减小并且最终趋向于 0, 标准化的高度最终趋于某一极限值。

同理, 可建立标准化的泵送压力与标准化的充灌袋横截面面积之间的关系, 如图 4。从图 4 中能看出, 拟合曲线特点与图 3 大体相似。

通过计算同样建立了标准化的泵送压力与标准化的充灌袋拉力之间的关系, 如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 两者之间呈近似线性关系。

标准化的泵送压力与标准化的充灌袋宽度之间的关系如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 拟合曲线大体呈现倒“S”型。

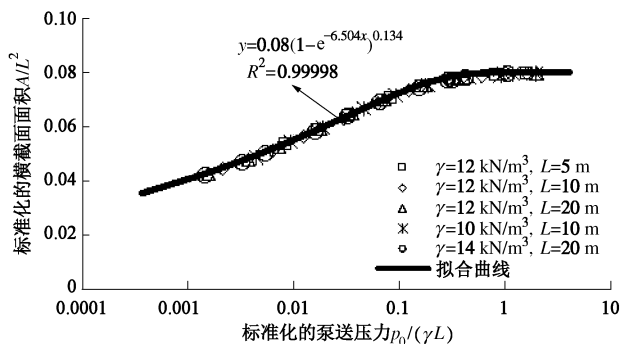


图 4 泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 与横截面面积 A/L^2 的拟合曲线

Fig. 4 Curve fitting for the relationship between $p_0/(\gamma L)$ and A/L^2

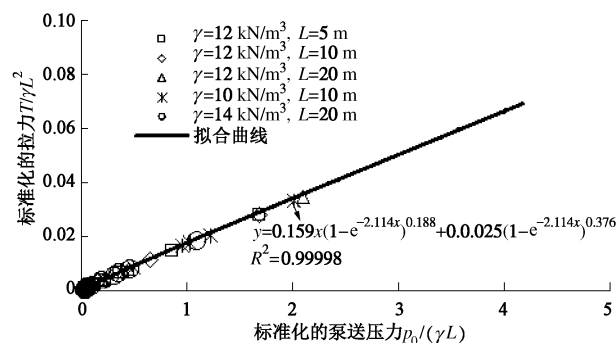


图 5 泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 与拉力 $T/(\gamma L^2)$ 的拟合曲线

Fig. 5 Curve fitting for relationship between $p_0/(\gamma L)$ and $T/(\gamma L^2)$

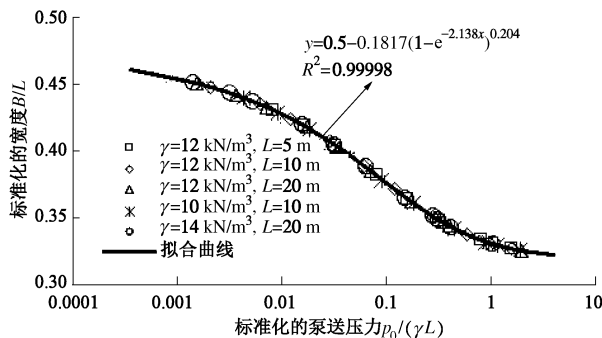


图 6 泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 与宽度 B/L 的拟合曲线

Fig. 6 Curve fitting for relationship between $p_0/(\gamma L)$ and B/L

标准化的泵送压力与标准化的充灌袋与基础接触宽度之间的关系如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 两者的拟合曲线大体也呈现倒“S”型。

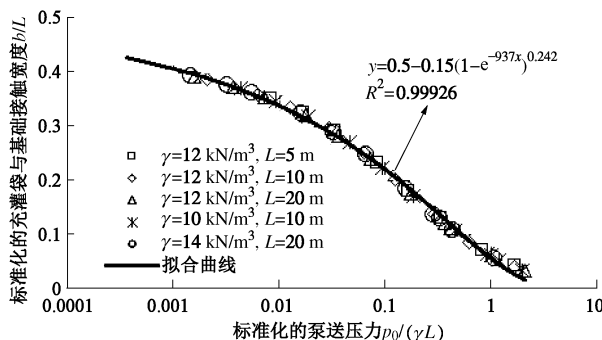


图 7 泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 与充灌袋与基础接触宽度 b/L 的拟合曲线

Fig. 7 Curve fitting for relationship between $p_0/(\gamma L)$ and b/L

图 3~7 为无量纲化的泵送压力与无量纲化的充灌袋的几何参数及无量纲化的充灌袋拉力之间的关系。这种标准化的方法与 Plaut 等采用的方法相同。这些关系都建立在一系列无量纲参数的基础上,这为不同工况下各种参数的随机组合提供了计算方法。

2.2 泵送压力与充灌袋几何尺寸拟合方程

本文采用 Chapman-Richard^[15] 成长曲线模型来拟合充灌袋泵送压力与其几何尺寸之间的关系。该模型原本是预测微生物学中,描述和预测微生物在特定条件下的增殖和衰亡的一种模型,是“S”型生长曲线模型的一种。

对于置于硬基础上的不透水型的土工充灌袋,标准化的泵送压力与其几何参数及充灌袋拉力的拟合曲线如图 3~7 所示,呈“S”型、“S”型的一部分或倒“S”型。而 Chapman-Richard 成长曲线模型的曲线也呈现“S”型。考虑两者增长方式存在较高的相似性,并且 Chapman-Richard 成长曲线模型参数有较明确的意义。因此本文采用 Chapman-Richard 成长曲线模型来描述标准化的泵送压力与充灌袋标准化的几何参数及拉力的关系。

Chapman-Richard 成长曲线模型的数学表达式如下:

$$y = \delta(1 - e^{-\mu x})^\lambda + \varepsilon, \quad (11)$$

式中, δ 为曲线幅值, ε 为 y 轴的截距, μ 和 λ 分别为速率参数和形状参数。图 8 说明了参数 δ 和 ε 的意义。从图 8 (b) 中可以看出, δ 的值也可以为负值。

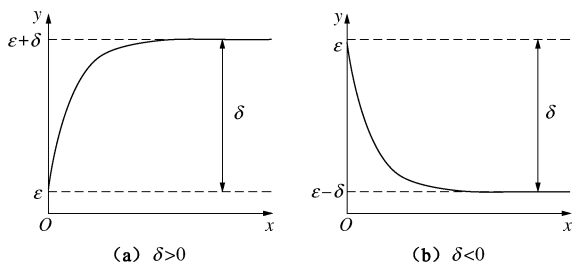


图 8 Chapman-Richard 成长曲线模型示意图

Fig. 8 Illustration of Chapman-Richard model

通过利用该模型对图 3~7 的关系进行拟合,可得出泵送压力与充灌袋几何参数之间的拟合方程,其 R^2 的值均大于 0.999,说明泵送压力与充灌袋几何参数及拉力之间有很强的线性相关性。图 3 中,当标准化的泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 趋近于 $+\infty$ 时,充灌袋标准化高度 H/L 趋于极限值,用 Chapman-Richard 成长曲线模型可计算得 $\delta = 0.318$ (或 $1/\pi$)。当 $p_0 = 0$ 时, $H = 0$, 则 $\varepsilon = 0$ 。横截面高度 H 和泵送压力 p_0 的最终关系可以用表示为

$$H = 0.318L \left(1 - e^{-\frac{2.114 p_0}{\gamma L}} \right)^{0.188}. \quad (12)$$

同理, p_0 和 A 的关系可以表示为

$$A = 0.08L^2 \left(1 - e^{-\frac{6.504 p_0}{\gamma L}} \right)^{0.134}. \quad (13)$$

由图 6, 当 $p_0 = 0$ 时, 取 $B = L/2$ 则 $\varepsilon = 0.5$ 。当 $B/L = 1/\pi$ 时, 土工织物充灌袋是圆形, 标准化的泵送压力 $p_0/(\gamma L) = +\infty$, 标准化的横截面有极限值, 则幅值参数 δ 为 $(0.5 - 1/\pi)$, 则 $\delta = 0.1817$ 。则充灌袋宽度 B 和泵送压力 p_0 的关系可以用表示为

$$B = 0.5L - 0.1817L \left(1 - e^{-\frac{2.138 p_0}{\gamma L}} \right)^{0.204}. \quad (14)$$

同理, p_0 和 b 的关系可以表示为

$$b = 0.5L - 0.5L \left(1 - e^{-\frac{0.397 p_0}{\gamma L}} \right)^{0.242}. \quad (15)$$

由图 5, 标准化的泵送压力 p_0 与标准化充灌袋拉力 T 之间的拟合曲线。可以得到 T 和 p_0 的关系:

$$T = 0.159 p_0 L \left(1 - e^{-\frac{2.114 p_0}{\gamma L}} \right)^{0.188} + 0.025 \gamma L^2 \left(1 - e^{-\frac{2.114 p_0}{\gamma L}} \right)^{0.376}. \quad (16)$$

2.3 计算参数的确定

一般来说, 依据输入数据的不同, 有以下 3 种情况:

(1) 当 γ , L 和 p_0 作为已知量时, 土工织物充灌袋的高度 H , 横截面面积 A , 横截面宽度 B , 与地基接触宽度 b 及拉力 T 可分别用式 (12)~(16) 直接计算。

(2) 当 γ , L 和 H 作为已知量时, 用式 (12) 可计算泵送压力 p_0 , 其中式 (12) 也可以写成

$$p_0 = -0.473 \gamma L \ln \left[1 - \left(\pi \frac{H}{L} \right)^{5.32} \right], \quad (17)$$

其他计算方法均与第一种情况相同。

(3) 当 γ , H 和 p_0 作为已知量时, 周长 L 由式 (12) 不能直接得出。可以查找到满足式 (12) 要求的 L , L 得到后, 计算方法均与第一种情况相同。

3 计算方法的验证

为了验证本文计算方法的准确性, 分别从理论及模型试验两方面进行验证。理论方面, 将本文所提出的方法分别与 Leshchinsky 等所提出的方法、Cantré 的设计图表法得出的结果进行对比; 模型试验方面, 将本文所提方法分别与自己设计的模型试验及与

表 1 本文方法与 Leshchinsky 所提方法结果对比
Table 1 Comparison of results calculated by curve fitting equations and Leshchinsky et al. (1996)

p_0/kPa	结果	H/m		B/m		A/m^2		$T/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	
		计算结果	偏差/%	计算结果	偏差/%	计算结果	偏差/%	计算结果	偏差/%
4.8	Leshchinsky 法	1.80	1.04	3.60	-2.84	5.56	-3.16	14.60	-2.89
	本文方法	1.82		3.50		5.38		14.18	
6.9	Leshchinsky 法	2.00	-3.01	3.64	-5.90	5.76	-2.64	18.10	-1.35
	本文方法	1.94		3.43		5.61		17.86	
34.5	Leshchinsky 法	2.50	0.15	3.21	-3.95	6.45	-1.32	61.70	0.14
	本文方法	2.50		3.08		6.36		61.79	
52.4	Leshchinsky 法	2.60	1.26	3.13	-4.01	6.51	-1.04	87.50	2.33
	本文方法	2.63		3.00		6.44		89.54	
103.5	Leshchinsky 法	2.70	3.22	3.00	-3.00	6.57	-1.40	162.00	3.25
	本文方法	2.79		2.91		6.48		167.26	
122.8	Leshchinsky 法	2.70	4.13	2.96	-2.19	6.57	-1.38	189.70	3.36
	本文方法	2.81		2.90		6.48		196.07	

Liu^[16]基于 Silvester 和 Hsu 的理论方法所做的模型试验结果相对比。

3.1 不同分析方法计算结果对比

(1) 与 Leshchinsky 法对比

Leshchinsky 等提出一种理论方法并编制计算程序——GeoCoPS。取相同条件 $L=9\text{ m}$ 和 $\gamma=12\text{ kN/m}^3$ ，作为计算的已知量，分别用 Leshchinsky 所提的方法和本文的方法计算得出结果，对比结果如表 1 所示。从表 1 可看出，两者的偏差在 5.9% 以内，结果吻合良好。

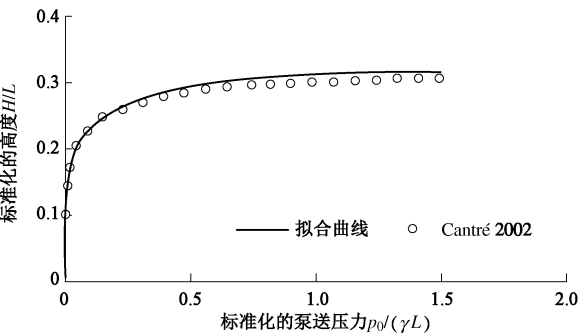
(2) 与 Cantré 图表法对比

从 $p_0(\gamma L)$ 与 H/L 、 $T(\gamma L^2)$ 与 H/L 的关系，来对比 Cantré 所提出的设计图表法与本文方法结果差异。 $p_0(\gamma L)$ 与 H/L 的关系曲线如图 9 (a) 所示， H/L 与 $T(\gamma L^2)$ 的关系曲线如图 9 (b) 所示。Cantré 基于 Plaut 和 Suherman 的无量纲设计思想得到了无量纲化的设计图表。图 9 (a) 中曲线为本文拟合方程 (12) 所得，圆点为采用 Cantré 所提出的设计图表法得到的标准化的泵送压力与标准化的泵送压力之间的关系，图 9 (b) 为本文方法和图表法确定的标准化高度和标准化充灌袋拉力之间的对比，由对比结果可知，本文所提出的方法与 Cantré 的方法结果吻合良好。

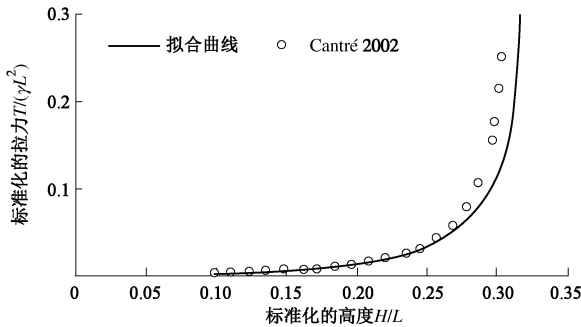
3.2 与模型试验对比

为了验证本文提出方法的可行性，设计了充灌袋充灌模型试验^[17-18]，分别采用了 3 个不同尺寸的充灌袋模型，充灌袋尺寸分别为宽 1 m、长 2 m 的模型试验 1 (T1)，宽 1.5 m、长 3 m 的模型试验 2 (T2)，宽 2 m、长 4 m 的模型试验 (T3)。采用自来水作为充灌材料，采用激光传感器测量充灌袋充灌后的截面形状

和尺寸，模型试验照片及示意图如图 10 所示。



(a) 泵送压力 $p_0(\gamma L)$ 与高度 H/L 拟合曲线对比



(b) 高度 H/L 与充灌袋所受拉力 $T(\gamma L^2)$ 拟合曲线对比

图 9 本文方法与 Cantré (2002) 的拟合曲线结果对比

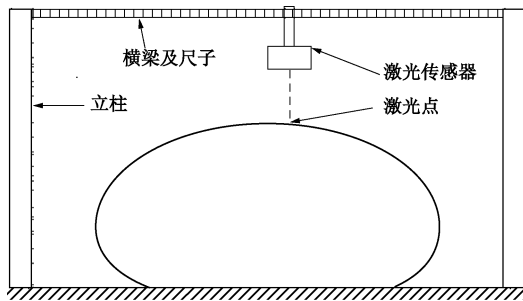
Fig. 9 Comparison of results obtained by proposed method and Cantré (2002)

当激光传感器随着 x 射线束水平移动时，可以得到激光传感器和土工织物充灌袋表面的垂直方向的距离，从而可以确定充灌过程中充灌袋的充灌高度， x 轴采用直尺测量水平方向的袋子各点的位置，从而可以确定充灌过程中充灌袋的形状。将 3 组模型试验的结果与用本文所提出方法预测的结果相对比，图 11

(a)反映的是标准化的高度 H/L 与标准化的泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 之间关系曲线, 图 11 (b) 反映的是标准化的宽度 B/L 与标准化的泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 之间关系曲线。从图 11 中可以看出, 两者吻合较好。



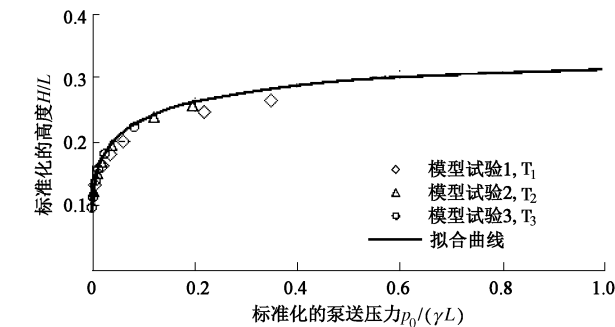
(a) 充灌袋内充满水后的模型 T3



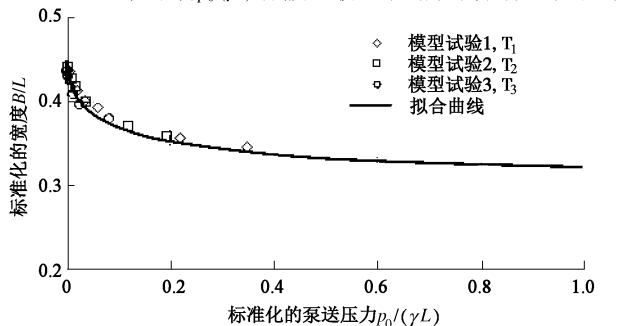
(b) 模型试验示意图

图 10 室内模型试验示意图

Fig. 10 Model test set-up



(a) 泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 与高度 H/L 模型试验结果与本文方法对比曲线



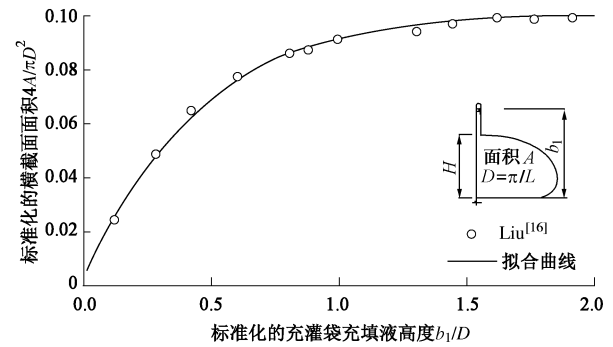
(b) 泵送压力 $p_0/(\gamma L)$ 与宽度 B/L 模型试验结果与本文方法对比曲线

图 11 模型试验结果与本文方法结果对比

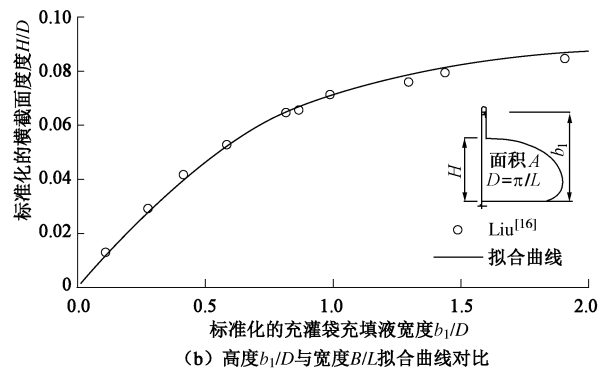
Fig. 11 Comparison of results by proposed method and laboratory model tests

为了更好地验证本文成果的正确性, 进一步与

Liu^[16]基于 Silvester 和 Hsu 的理论方法所做的模型试验结果进行对比。在 Liu 的模型试验中, 土工织物充灌袋是由塑料组成的, 充灌袋中充填的是自来水, 用 b_1 表示充灌袋中的水头压力, D 表示充灌袋的等效直径。测得 b_1 及 D , 用于式 $b_1 = p_0/\gamma + H$ 及 $D = L/\pi$ 。如图 12 为本文计算结果与 Liu 的模型试验结果对比, 由图 12 可知模型试验结果与本文方法预测结果吻合良好。



(a) 充填物高度 b_1/D 与面积 $4A/\pi D^2$ 拟合曲线对比



(b) 高度 b_1/D 与宽度 B/L 拟合曲线对比

图 12 本文方法与 Silvester 和 Hsu 模型试验结果对比

Fig. 12 Comparison of results obtained by proposed method and laboratory model tests carried out by Silvester and Hsu (1997)

4 结 论

本文根据充灌袋的受力平衡条件和几何条件, 通过对充灌袋解析解进行编程, 计算了标准化泵送压力与标准化几何参数及充灌袋拉力, 得出以下 2 点结论。

(1) 通过计算得出了标准化的泵送压力与标准化的充灌袋高度、充灌袋面积、充灌袋宽度和充灌袋拉力之间的关系曲线。

(2) 利用 Chapman-Richard 成长曲线模型得出了充灌袋泵送压力与充灌袋几何参数和充灌袋拉力之间的拟合方程, 进而提出了简易的充灌袋设计计算方法。

通过与其他方法和模型试验结果对比, 验证了本文提出方法的准确性。为工程人员设计充灌袋提供了

一种简单准确的计算方法。

参考文献:

- [1] SHIN E C, OH Y I. Coastal erosion prevention by geotextile tube technology[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, **25**(4/5): 264 - 277.
- [2] SILVESTER R, HSU J R C. Coastal stabilization[M]. Singapore: Word Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1997.
- [3] LAWSON C R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering[J]. *Geosynthetics International*, 2008, **15**(6): 384 - 427.
- [4] YEE T W, LAWSON C R, WANG Z Y, et al. Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin Eco-City, China[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, **31**: 39 - 50.
- [5] CHU J, YAN S W, LI W. Innovative methods for dike construction—An overview[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, **30**: 35 - 42.
- [6] YAN S W, CHU J. Construction of an offshore dike using slurry filled geotextile mats[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, **28**: 422 - 432.
- [7] LESHCHINSKY D, LESHCHINSKY O, LING H I, et al. Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, **122**(8): 682 - 690.
- [8] LESHCHINSKY D, LESHCHINSKY O. Geosynthetic pressurized slurry (GeoCoPS): supplemental notes for version 1.0[R]. Vicksburg: US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 1996.
- [9] PLAUT R, SUHERMAN S. Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes[J]. *Acta Mechanica*, 1998, **129**(3): 207 - 218.
- [10] CHU J, GUO W, YAN S W. Geosynthetic tubes and geosynthetic mats: analyses and applications[J]. *Geotechnical Engineering*, 2011, **42**(1): 56 - 65.
- [11] GUO W. Geosynthetic tubes and mats: experimental and analytical studies[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2012.
- [12] CANTRÉ S. Geotextile tubes: analytical design aspects[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002, **20**(5): 305 - 319.
- [13] CANTRÉ S, SAATHOFF F. Design method for geotextile tubes considering strain: formulation and verification by laboratory tests using photogrammetry[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2011, **29**(3): 201 - 210.
- [14] LEE E C, DOUGLAS R S. Geotextile tubes as submerged dykes for shoreline management in Malaysia[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, **30**: 8 - 15.
- [15] CHAPMAN-RICHARD D A. Handbook of nonlinear regression models[M]. New York: Marcel Dekker, 1990.
- [16] LIU G S. Mortar sausage units for coastal defense[D]. Perth: University of Western Australia, 1978.
- [17] LUKEHART P M. Algorithm 218: Kutta-Merson[J]. *Comm Assoc ComputMach*, 1963, **6**(12): 737 - 738.
- [18] YEE T W, LAWSON C R. Modelling the geotextile tube dewatering process[J]. *Geosynthetics International*, 2012, **19**(5): 339 - 353.

本期广告索引

- 封2 北京筑信达工程咨询有限公司
封3 北京理正软件股份有限公司
封4 上海分元土木工程科技有限公司
后插1 济南普业机电技术有限公司
后插2 西安力创材料检测技术有限公司