

DOI: 10.11779/CJGE2016S1038

土工织物充填管袋设计计算方法研究

刘伟超, 杨广庆*, 汤劲松, 赵玉

(石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 土工织物充填管袋是土工包裹系统的一种, 它用编织土工布缝合而成, 再用高压泥浆泵充填砂浆, 最终形成管状袋体, 优点众多, 可用于堤坝填筑、抗洪抢险等工程中, 应用前景广阔。但目前关于土工管袋形状、高度、张力等参数的计算方法主要是针对高充填压力情况的, 而中国实际工程中较多的是充填压力较低即袋体扁平的情况, 因此针对目前研究的不足, 提出现有无量纲计算方法的适用条件, 并对其进行改进, 提出低充填压力下的袋体特性计算方法并进行验证, 计算结果被制成图表, 方便实际应用时查找参数。

关键词: 土工管袋; 形状; 张力; 低压力; 无量纲

中图分类号: U655.54 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S1-0203-06

作者简介: 刘伟超(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事地基处理和土工合成材料应用研究。E-mail: stdliuweichao@163.com。

Design and calculation methods of geotextile tubes

LIU Wei-chao, YANG Guang-qing, TANG Jin-song, ZHAO Yu

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Geotextile tube is one kind of the geotechnical package system. It is made of woven fabric, filled with the mortar by high-pressure mud pump, and eventually becomes a tube. The geotextile tube has many advantages and wide application prospects, and it can be used for building dams and flood prevention projects. The existing theoretical calculation methods have good applicability to calculate the shape, height, tension and other parameters of geotextile tubes under the situation of high filling pressure. However, they are not suitable for the situation of low filling pressure. As the geotextile tube applied in China is often flat, and the filling pressure is low. The applicable conditions of the current dimensionless method are proposed, and the method is proved to calculate the parameters of the geotextile tube with low filling pressure. The equations are solved by numerical integration, and the results are verified and formed into charts. Thus it is easily to find the value of the parameters in actual applications.

Key words: geotextile tube; shape; tension; low pressure; non-dimension

0 引言

土工织物充填管袋是土工包裹系统的一种, 先根据设计尺寸采用编织土工布缝合成袋, 袋体上方隔一定距离设置一个充填口, 袋体放置到指定位置并固定后, 采用高压泥浆泵将砂浆通过充填袖口送入土工袋中, 土工织物的孔隙可实现砂浆的排水固结, 最终形成管状或板状结构^[1-2]。土工织物充填管袋具有整体性好、成本低、就地取材、施工速度快、对环境影响小等优点^[1-3], 在堤坝填筑、地基加固、抗洪抢险、围海造陆等工程领域中具有广泛应用^[3-9]。为对实际应用提供指导, 许多学者对土工管袋的理论计算进行了研究。其中 Wang 等^[10]和 Leshchinsky 等^[3]均对土工管袋做了一些假设, 推导得到了袋体形状、张力等参数的解析解, 前者采用无量纲法, 其结果具有更为普遍的

适用性, 但要求袋内填料为均质的; 后者针对每一种袋体尺寸和填料均需单独计算, 但适用于非均匀填料的计算。Namias^[11]在 Wang 等^[10]的基础上, 研究了单个土工膜袋承受均布荷载时的计算方法, 提出了数值求解方法和一些近似的解析表达式。Plaut 等^[9,12], Seay 等^[13]考虑了地基变形、袋体一侧受力、土工袋充填过程和多个袋体堆叠的情况, 提出了计算方法并进行求解。Cantré^[14]运用有限元软件, 研究土工袋充填完成后袋内填料排水固结过程, 对袋体张力沿袋体周向的变化情况进行分析, 并提出排水过程中袋体高度变化

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309153, 51178280, 51108283); 河北省自然科学基金项目(E201410061); 河北省大型基础设施防灾减灾协同创新中心支持

收稿日期: 2015-11-30

的计算方法。宋为群等^[15]和刘斯宏等^[4-5]对小体积土工袋的工程应用、加筋机理和强度稳定性进行了理论和试验研究。Plaut 等^[16]对土工管袋在振动荷载作用下的特性进行了研究。邱长林等^[17]在 Leshchinsky^[3]的基础上研究了袋内砂浆重度随深度变化时土工管袋的计算方法。Ghavanloo 等^[18]研究了截面为直线、梯形、抛物线、圆弧等对称形状的地基上充气膜袋的形状和受力特性解析解。Malik 等^[19]对充填分层非均质填料的土工管袋特性进行了研究，并与均质填料进行比较。闫玥等^[20]针对国内实际应用较多的低充填压力扁平袋体，提出了适用的袋体形状、充填压力和张力等参数的计算方法。刘伟超等^[7, 21]对透水性土工管袋充填过程和不平整刚性地基上的袋体堆叠特性进行了研究。Plaut 等^[22]和张仪萍等^[23]分别研究了袋内填料与袋体之间考虑摩擦力作用时土工管袋的力学特性计算方法。

综上所述，目前关于土工管袋充填特性的计算研究较多，但大多都只考虑了袋体顶部曲线明显、充填压力较大的情况，而国内应用较多的是扁平袋体即充填压力较小的情况，闫玥等^[20]提出了适用的计算方法，但其计算方法是基于 Leshchinsky 等^[3]的研究成果，针对不同尺寸的土工袋或不同重度的充填料均需单独计算，而方程需用数值方法进行求解，给实际应用带来一定不便。因此，本文采用无量纲法进行研究，首先提出目前方法的适用范围，然后对其进行改进，提出低充填压力土工管袋的计算方法，并对计算结果进行验证，同时将袋体参数计算结果绘制成图表，方便实际应用时参数查找。

1 假设条件及计算模型

1.1 假设条件

本文采用无量纲计算方法，主要是基于 Wang 等^[10]、Plaut 等^[12]的研究成果对土工管袋进行研究。采用假设条件如下：

(1) 土工管袋长宽比足够大，可看作平面应变问题，取管袋任一横截面为研究对象。

(2) 忽略土工织物的伸长变形、抗弯刚度、重量和渗透性。

(3) 充填过程中袋内填料含水量较大，可认为填料为流态，忽略填料摩擦力。

(4) 地基为平整刚性的。

1.2 计算模型

土工管袋任一横截面如图 1 (a) 所示，以袋体右侧与地基分离点为原点 O，圆弧切线方向与水平向的夹角为 θ ，袋体截面积为 A，高度为 H_g ，宽度为 W，

周长为 L，从原点开始的弧长为 S，袋体与地基的接触长度为 C。

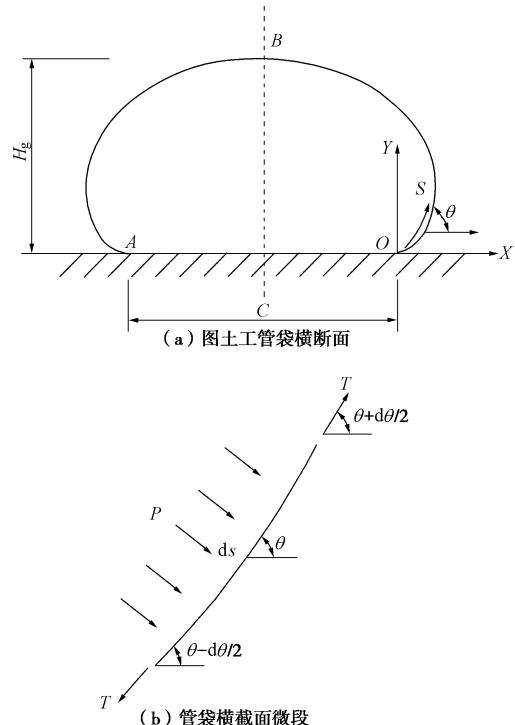


图 1 计算模型

Fig. 1 Computational model

在 $0 < S < L - C$ 范围内取一段微元体，如图 1 (b) 所示。 P 为内部流体作用在该微段上的法向压力， T 为该段土工织物所受到张力，该段上的受力平衡方程为

$$2T \sin(d\theta/2) = P ds \quad (1)$$

式 (1) 可改写为

$$T \frac{d\theta}{ds} = P \quad (2)$$

同时根据该微段的几何条件可得到：

$$\frac{dX}{ds} = \cos \theta, \quad \frac{dY}{ds} = \sin \theta \quad (3)$$

设 γ 为管袋内填料重度， P_0 和 P_{top} 分别为管袋底部 ($Y=0$) 和顶部 ($Y=H_g$) 的压力，袋内某高度 Y 处所受到的法向压力为

$$P = P_0 - \gamma Y \quad (4)$$

采用无量纲分析法，将以上参数化为无量纲量如下：

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{Y}, \quad y = \frac{Y}{L}, \quad s = \frac{S}{L}, \quad c = \frac{C}{L}, \quad w = \frac{W}{L}, \quad h_g = \frac{H_g}{L}, \\ p &= \frac{P}{rL}, \quad p_0 = \frac{P_0}{\gamma L}, \quad p_{top} = \frac{P_{top}}{rL}, \quad \tau = \frac{T}{\gamma L^2} \end{aligned} \quad (5)$$

则式 (2)、(3) 可转化为

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{p_0 - y}{\tau} \quad (6)$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta \quad , \quad (7)$$

$$\frac{dy}{ds} = \sin \theta \quad . \quad (8)$$

2 高充填压力情况下计算方法

对一般较高充填压力下的土工管袋, 此时, 底部压力 $p_0 > h$, 顶部压力 $p_{top} > 0$, 其形状一般为上半部分为椭圆形, 符合图 1 中的假设。先将式(6)~(8)进行变换, 再结合袋体几何条件进行求解, 可得式(9), 具体求解过程可参考文献[12]。

$$K(k) - E(k) = 1/(2p_0) \quad , \quad (9)$$

式中, $k = 2\sqrt{\tau}/p_0$, $F(k, \theta/2)$ 和 $E(k, \theta/2)$ 是关于参数为 k 角度为 θ 的第一类和第二类不完全椭圆积分, 其表达式分别为 $F(k, \theta/2) = \int_0^{\theta} 1/\sqrt{1-k^2 \sin^2 \phi} d\phi$, $E(k, \theta/2) = \int_0^{\theta} 1/\sqrt{1-k^2 \sin^2 \phi} d\phi$, 其中当角度 $\theta = \pi$ 时, $F(k, \pi/2) = K(k)$, $E(k, \pi/2) = E(k)$ 分别为第一类和第二类完全椭圆积分, 上式具有物理意义需满足条件: $k < 1$ 。

由式(9)可知, 在袋体底部充填压力 p_0 已知的条件下, 可求得未知数 k 。由于式中含有椭圆积分, 该式需编写程序采用数值积分方法进行求解。

在参数 k 求得之后, 土工管袋的其它参数均可由 k 表示, 其中袋体张力 τ , 底部接触长度 c , 袋体高度 h_g , 顶部压力 p_{top} 如式(10)~(13) 所示:

$$\tau = \frac{k^2 p_0^2}{4} \quad , \quad (10)$$

$$c = 2p_0 \left[(1 - k^2/2)K(k) - E(k) \right] \quad , \quad (11)$$

$$h_g = (1 - \sqrt{1 - k^2})p_0 \quad , \quad (12)$$

$$p_{top} = \sqrt{1 - k^2} p_0 \quad . \quad (13)$$

本文采用 matlab 编程对式(9)进行求解, 为验证程序和计算结果的正确性, 将本文所得结果与 Plaut 等人所得结果^[12]进行比对如表 1, 从表中结果可知, 本文的计算结果与 Plaut 一致。

表 1 计算结果比对

Table 1 Comparison of calculated results

项目	P_0	k	c	τ
Plaut ^[12]	0.2	0.9929	0.3051	0.0099
本文	0.2	0.9929	0.3051	0.0099

以上计算过程第一类椭圆积分要求参数 $k < 1$, 这在顶部压力大于 0 时是满足的, 然而当袋体高度较小充填压力较小时, 袋体顶部压力可能为 0^[20], 此时由式(13)可得 $k=1$, 则与椭圆积分式中要求的 $k < 1$ 相矛盾。因此以上计算方法适用于袋体高度较大充填压

力较大时的情况。文献[20]中计算时, 取袋体长度为 9 m, 袋体的临界高度为 0.9 m, 即无量纲临界高度为 0.1, 因此本文计算时取 h_g 临界 = 0.1, 对应的 p_0 临界 = 0.1010556, 此时参数 k 为 0.99994545025038, 则袋体高度、底部压力或参数 k 大于以上临界值时, 可认为袋体处于高充填压力状态, 反之则为低充填压力状态。

为方便实际应用时查找参数, 计算得到高充填压力下袋体各参数与底部压力 p_0 关系曲线, 如图 2 所示, 图中为避免数据点过于集中, 每 5 个数据点显示一个图例符号。从图中曲线可知, 土工管袋的高度、顶部压力、张力、袋体与地基接触长度和底部压力是单值对应的, 其中的某个参数值给定后, 可将以上方程进行变换后求得其它参数, 也可由图中查取对应的其它参数值。从图 2 中可知, 随着充填压力的增大, 袋体的高度、张力随之增大, 底部接触长度随之减小。

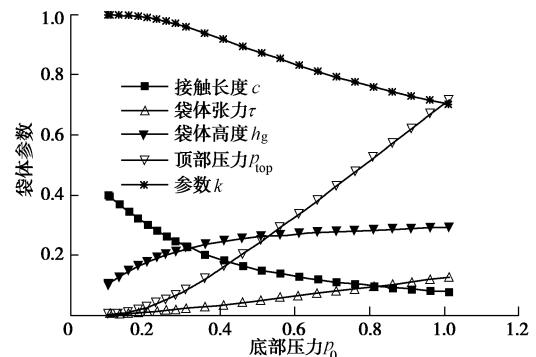


图 2 高充填压力下土工管袋各参数关系曲线

Fig. 2 Curves of parameters of geotextile tube filled under high pressure

3 低充填压力情况下计算方法

低充填压力状态时, 土工管袋截面形状如图 3 所示, 袋体两侧为两段对称的椭圆弧, 椭圆弧曲线段上仍满足基本方程式(6)~(8)。袋体顶部 DE 段可视为一条水平线, 将袋体与地基接触段即 AO 段长度记为 C_1 , 顶部直线段 DE 长度记为 C_2 , 此时袋体顶部压力为 0, 袋体高度与底部压力无量纲数值相同。

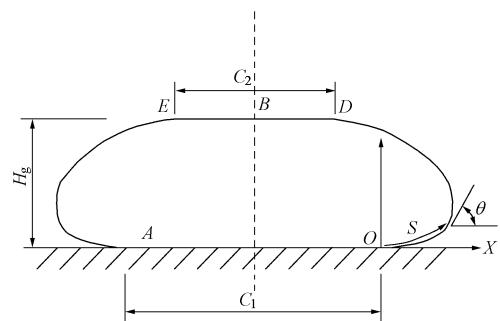


图 3 低压力下土工管袋截面

Fig. 3 Cross section of geotextile tube filled under low pressure

根据对称原则, 取右半部分袋体进行分析, 其长度和为 0.5, 即

$$\frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{2} + s_{OD} = 0.5 \quad . \quad (14)$$

在水平方向, 即 x 轴方向有

$$\frac{c_1}{2} = \frac{c_2}{2} + x_D \quad . \quad (15)$$

根据式 (6) ~ (8), 变换后可得

$$s_{OD} = s(\theta = \pi) = \sqrt{\tau} k K(k) \quad , \quad (16)$$

$$x_D = x(\theta = \pi) = p_0 \left[E(k) - \left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) \right] \quad . \quad (17)$$

将式 (16)、(17) 分别代入 (14)、(15) 后可得

$$\frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{2} + \sqrt{\tau} k K(k) = 0.5 \quad , \quad (18)$$

$$\frac{c_2}{2} = \frac{c_1}{2} + p_0 \left[E(k) - \left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) \right] \quad . \quad (19)$$

为保证计算结果的连续性, 求解式 (18)、(19) 时将 k 取为高充填压力的临界值 0.99994545025038, 在底部充填压力 p_0 已知时可由上两式求得 c_1 和 c_2 , 袋体张力可由式 (10) 求得, 袋体顶部压力为 0, 袋体高度与底部压力无量纲值相同。当已知条件为其它参数可将以上方程稍做变换进行求解。低充填压力下土工管袋各参数如图 4 所示。随着充填压力的减小, 袋体高度减小, 底部接触长度和顶部直线段长度均随之增大, 顶部直线段增大得更为明显。

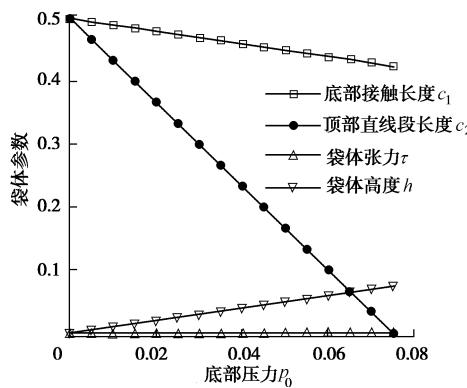


图 4 低充填压力下土工管袋各参数关系曲线

Fig. 4 Curves of parameters of geotextile tube filled under low pressure

4 算 例

(1) 算例 1

取参考文献[20]中的例子。假定充填泥浆重度 γ 为 12 kN/m^3 , 土工管袋周长 L 为 9 m , 所用的土工布强度为 24 kN/m , 换算为无量纲量分别为袋体周长为

1, 土工布强度为 0.02469。本文以文献[20]中顶部充填设计压力 5 kPa 和袋体设计高度 0.5 m 为例进行计算, 分别记为算例 a 和算例 b。

对于高充填压力算例 a, 顶部设计压力无量纲值为 0.04630, 将式 (13) 代入式 (9) 进行变换, 可由顶部压力计算得 k 和袋体其它参数值, 或由图 2 各参数关系曲线中查找得到顶部充填压力为 0.04630 时对应的其它参数值。

对于低充填压力算例 b, 袋体设计高度无量纲值与底部压力均为 0.05556, 由式 (18) 和 (19) 求得 c_1 和 c_2 , 由式 (10) 计算袋体张力, 同样也可由图 4 中各参数曲线关系进行查找。计算结果比对如表 2, 3 所示。

从表 2, 3 中可知, 无论是高压力情况还是低充填压力情况下, 本文结果与文献[20]基本一致, 存在一定差别的主要原因可能是不同数值求解方法的精度不同。

表 2 算例袋体参数无量纲结果

Table 2 Non-dimensional parameters of examples

算例	底部压力	顶部压力	袋体张力	袋体高度	底部接触长	顶部直
	p_0	P_{top}	τ	h	c_1	c_2
a	0.24625	0.04630	0.01462	0.2000	0.2693	—
b	0.05556	0	0.0007877	0.05556	0.4445	0.2252

表 3 袋体参数实际值

Table 3 Actual parameters of examples

算例	来源	底部压力	顶部压力	袋体张力	袋体高度	底部接触长	顶部直
		P_0	P_{top}	T	H/m	C_1/m	C_2/m
a	本文	26.595	5	14.2145	1.7995	2.4235	—
	文献[20]	—	5	14.2	1.8	2.4	—
b	本文	5.9994	0	0.7656	0.5	4.005	2.03
	文献[20]	—	0	0.78	0.5	4.0	2.3

另外本文采用的无量纲方法的主要优点在于, 可先将袋体各参数计算结果制成图表, 应用时先将某已知参数实际值转化为无量纲量, 再查图表求得对应的其它各参数值, 不必针对各种情况进行单独编程计算, 应用较为简便。

两种情况下的袋体截面形状如图 5 所示。

(2) 算例 2

取文献[24]中的例子, 袋体周长为 1.2 m 。充填进行前期, 袋体高度较小, 取 1 min 时, 袋体高度为 0.0915 m , 袋体底部压力为 1.06 kPa , 袋内填料重度为 11.34 kN/m^3 。此时即为低充填压力状态, 记为算例 c; 充填

2 min 时, 袋体高度为 0.1325 m, 袋体底部压力为 1.55 kPa, 袋内填料重度为 11.50 kN/m³, 此时即为高充填压力状态, 记为算例 d。其中袋内填料重度是根据充填速度和排水速度计算而来。将文献中袋体底部压力换算为无量纲量作为已知量, 用以上方法进行计算, 或由图 2,4 中曲线进行查找, 求得袋体高度无量纲值, 然后转换成实际值, 结果整理如表 4。从表中数据可知, 本文计算结果与文献结果误差极小, 进一步说明本文计算方法的合理性, 误差可能主要由袋内填料重度值误差引起, 因为底部压力进行无量纲转化时需用到填料重度, 而填料重度是根据充填砂浆重度、充填速度和排水速度计算得到, 与实际值可能有一定误差。

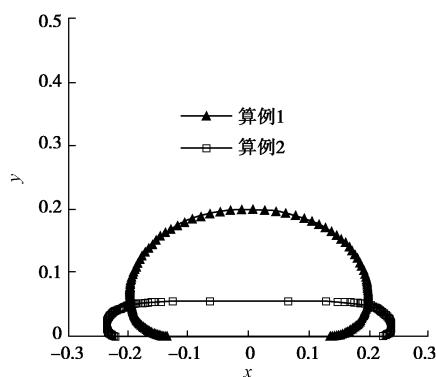


图 5 算例袋体截面形状

Fig. 5 Shape of cross section of geotextile tube of examples

表 4 算例袋体参数表

Table 4 Parameters of examples

算例	来源	底部压力		高度	
		实际值/kPa	无量纲值	实际值/m	无量纲值
c	文献[24]	1.06	0.07748	0.0915	0.07625
	本文	1.06	0.07748	0.0920	0.0766707
d	文献[24]	1.55	0.1123	0.1325	0.1104
	本文	1.55	0.1123	0.1325	0.1103754

5 结 论

现有的土工管袋计算方法, 主要适用于高充填压力即袋体顶部曲线明显的情况, 而未考虑到在充填压力较低、袋体扁平情况下的适用性。本文对现有的土工管袋无量纲计算方法进行改进, 主要结论如下:

(1) 提出袋体临界高度无量纲值为 0.1, 底部临界压力无量纲值为 0.1010556, 计算参数 k 临界值为 0.999945450250380, 袋体高度、底部压力或参数 k 大于以上临界值时, 可认为袋体处于高充填压力状态, 反之则为低充填压力状态, 两种状态可分别采用文中所述方法进行计算。

(2) 在应用本文的土工管袋无量纲计算方法时,

可根据本文制作的图表, 先将某已知袋体参数(如充填压力或袋体高度)转换成无量纲值, 在图表中查得对应的其它参数值, 再转化为实际值即可, 不必每次都进行繁琐的编程计算, 便于应用。

参考文献:

- [1] 包承纲. 土工合成材料应用原理与工程实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 7 - 9. (BAO Cheng-gang. The principle and application of geosynthetics in engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008: 7 - 9. (in Chinese))
- [2] 张文斌, 谭家华. 土工布充砂袋的应用及其研究进展 [J]. 海洋工程, 2004, 22(2): 98 - 104. (ZHANG Wen-bin, TAN Jia-hua. Application of sand-filled geotextile tubes and the state of the art of their researches[J]. The Ocean Engineering, 2004, 22(2): 98 - 104. (in Chinese))
- [3] 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.
- [4] 刘斯宏, 松冈元. 土工袋加固地基新技术 [J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1665 - 1670. (LIU Si-hong, MATSUOKA Hajime. A new earth reinforcement method by soilbags[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1665 - 1670. (in Chinese))
- [5] 刘斯宏, 汪易森. 土工袋加固地基原理及其工程应用 [J]. 岩土工程技术, 2007, 21(5): 221 - 225. (LIU Si- hong, WANG Yi-sen. Reinforcement mechanism of soilbags and its applications[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(5): 221 - 225. (in Chinese))
- [6] LAWSON C R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering[J]. Geosynthetics International, 2008, 15(6): 384 - 427.
- [7] LIU Wei-chao, ZHANG Yi-ping, LI Tao, et al. Simulation of filling construction of permeable geosynthetic tubes[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2010, 11(6): 425 - 431.
- [8] SHIN E C, OH Y I. Consolidation process geotextile tube filled with fine-grained materials[J]. Internation Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(2): 1 - 9.
- [9] PLAUT R H, KLUSMAN C R. Two-dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundations[J]. Thin-Walled Structures, 1999, 34(3): 179 - 194.
- [10] WANG C Y, WATSON L T. The fluid-filled cylindrical membrane container[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1981, 15(2): 81 - 88.

- [11] NAMIAS V. Load-supporting fluid-filled cylindrical membranes[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1985, **52**: 913 - 918.
- [12] PLAUT R H, SUHERMAN S. Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes[J]. *Acta Mechanica*, 1998, **129**(3/4): 207 - 218.
- [13] SEAY P A, PLAUT R H. Three dimensional behavior of geosynthetic tubes[J]. *Thin-Walled Structures*, 1998, **32**(4): 263 - 274.
- [14] CANTRÉ S. Geotextile tubes—analytical design aspects[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002, **20**(5): 305 - 319.
- [15] 宋为群, 叶志华, 彭良泉. 软土地基上土工管袋围堤的稳定性分析[J]. 人民长江, 2004, **35**(12): 32 - 34. (SONG Wei-qun, YE Zhi-hua, PENG Liang-quan. Study of stability of geotextile tube embankment on soft soil foundation[J]. Yangtze River, 2004, **35**(12): 32 - 34. (in Chinese))
- [16] PLAUT R H, COTTON S A. Two-dimensional vibrations of air-filled geomembrane tubes resting on rigid or deformable foundations[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, **282**(1): 265 - 276.
- [17] 邱长林, 闫 玥, 闫澍旺. 泥浆不均匀时土工织物充填袋特性[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(5): 760 - 763. (QIU Chang-lin, YAN Yue, YAN Shu-wang, Behavior of geotextile bags filled with non-uniform silty slurry[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(5): 760 - 763. (in Chinese))
- [18] GHAVANLOO E, DANESHMAND F. Two-dimensional analytical analysis of equilibrium shape of inflated geomembrane tube resting on rigid foundation with arbitrary shape[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, **27**(2): 99 - 106.
- [19] MALIK J, SYSALA S. Analysis of geosynthetic tubes filled with several liquids with different densities[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, **29**(3): 249 - 256.
- [20] 闫 玥, 闫澍旺, 邱长林, 等. 土工织物充灌袋的设计计算方法研究 [J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 327 - 330. (YAN Yue, YAN Shu-wang, QIU Chang-lin, et al. Design and calculation methods of geotextile tubes filled with soil slurry[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2010, **31**(1): 327 - 330. (in Chinese))
- [21] 刘伟超, 张仪萍, 杨 艳, 等. 任意对称刚性地基上土工管袋充填形状和受力分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, **45**(7): 1308 - 1313. (LIU Wei-chao, ZHANG Yi-ping, YANG Yan, et al. Shape and mechanical behavior of geotubes on rigid foundation with symmetry arbitrary shape[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, **45**(7): 1308 - 1313. (in Chinese))
- [22] PLAUT R H, STEPHENS T C. Analysis of geotextile tubes containing slurry and consolidated material with frictional interface[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2012, **32**: 38 - 43.
- [23] 张仪萍, 王 森, 刘伟超. 摩擦填料作用下土工充砂袋充填特性[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2012, **11**(2): 194 - 198. (ZHANG Yi-ping, WANG Miao, LIU Wei-chao. Study on the characteristics of geotextile tube and fillings with friction[J]. *Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition)*, 2012, **11**(2): 194 - 198. (in Chinese))
- [24] 刘伟超, 张仪萍, 杨广庆. 土工管袋充填特性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(12): 2544 - 2549. (LIU Wei-chao, ZHANG Yi-ping, YANG Guang-qing. Model experimental study on the filling property of the geotextile tube[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(12): 2544 - 2549. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)