

管袋结构在波浪作用下的稳定尺度试验

戴林军¹, 束一鸣¹, 林 刚²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 烟台市水利局, 山东 烟台 264000)

摘要 针对土工管袋结构在波浪作用下的变形分析, 试验采用堤体模型高度 $D_c = 50\text{ cm}$, 分别测得 40 cm 和 47 cm 两种堤前水深下的临界波高值范围, 同时观察和记录在临界稳定状态下管袋的具体位置和长度 l 。通过抗滑和抗倾覆稳定公式计算出管袋在相同波浪条件下以及在结构中同一位置处保持稳定所应具有的理论长度, 最后通过对两者的分析比较给出结论和建议。

关键词 土工管袋 堤前水深 临界波高 临界稳定 管袋长度 抗滑稳定

中图分类号 TV139.2⁺6 **文献标识码** B **文章编号** 1006-7647(2011)S1-0056-03

随着经济的发展, 生态以及环境保护日益得到人们的重视。传统形式的水利工程兴建与维修需要消耗大量的天然材料, 与生态、环保的倡议格格不入; 同时, 由于某些地区的过度开发, 造成天然材料如石材等的大量短缺, 使工程造价变得十分昂贵。因此, 土工合成材料等环保型新材料应运而生, 土工管袋技术在河流、海岸等领域逐渐得到了广泛的应用。

土工管袋是以高强编织型土工织物缝制成的长管袋制品。管袋内冲灌泥沙, 可堆积成堤坝 或用于保护河岸、海岸的坡脚, 防止冲刷; 或铺在软弱地基上作为临时工作平台^[1]。与传统的混凝土预制块结构相比, 土工管袋具有就地取材、降低工作量、加快施工进度、缩短施工周期等优点, 从而大幅度节约了工程造价。

国内外大量的试验研究表明, 单层管袋的变形对于整体结构的稳定起到了决定性作用, 在波浪条件下, 各层管袋上的作用力主要包括 顺水流方向的拖曳力 F_D 和惯性力 F_M , 管袋层与层之间的摩擦力 F_R , 垂直于水流方向的上抬力 F_L , 以及浮密度 G 等, 如图 1 所示。

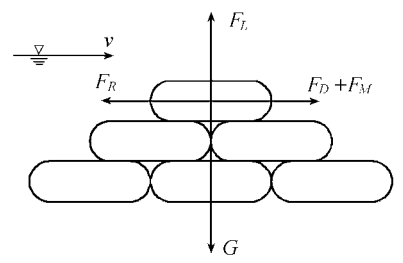


图 1 管袋受力分析示意图

管袋的变形还受充填材料的种类、饱和度、填充率、管袋之间的摩擦系数以及波浪要素等条件的影响, 笔者主要对沿海土工管袋结构进行试验模拟, 针对无防护土工管袋结构在波浪作用下的变形进行分析研究。

1 土工管袋变形研究现状

1.1 国外研究现状

Platut 等^[2]对可变形地基上的土工管袋在静水压力作用下进行了二维分析。研究表明 管袋内部压力水头的升高将会导致管袋拉力和高度增加, 外部水位的变化与结构总高度成正比, 与底部临水面管袋的拉力成反比, 其余管袋影响不大。外部水位一定时, 填充材料密度与拉力成正比, 与总高度成反比。

Cantré 应用有限元软件 ABAQUS 研究了 3-2-1 堆积形式下土工管袋的变形和应力, 分别绘制了管袋最大拉力、充填比、泵压与高度以及泵压与宽度、接触长度和拉力之间的关系图, 继而得出结论 堆积时土工管袋的周向拉力较充填时小^[3]。

Recio 等^[4]利用流体体积模型、有限元和离散元模型对波浪作用下土工布充沙袋的变形进行了分析, 研究结果表明: ①迎水面, 静水位处的砂袋处于水力稳定的临界位置; ②波向下冲的阶段, 结构稳定性最差; ③变形实质 由于袋中砂的运动引起了砂袋变形, 使相互之间的接触面积减小, 接触抗力随之减弱, 从而极大程度上破坏了整体结构的稳定; ④破碎波对稳定影响不大。

作者简介 戴林军(1986—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 从事土工合成材料研究。E-mail: dailj86@163.com

在原有大量试验和数值模拟成果的基础上, Recio 等^[5]提出了关于土工布充砂袋在变形工况下的稳定计算公式。根据试验目的,对同一种水工模型在不同结构形状和边界条件下进行测试,分别得到相应的拉力、惯性力和抬升力系数 C_D, C_M, C_L 。试验表明相邻砂袋的数量和位置对波浪作用力有很大的影响。

1.2 国内研究现状

20 世纪 90 年代国内就已引入土工管袋技术,并广泛地应用于围海造地、堤防、环境和河道整治等工程,虽然该项技术日益得到成熟和完善,但截至目前,国内尚无一套成熟的管袋变形计算理论,大多是根据工程经验或者引用国外已有研究结论进行分析计算。

朱朝荣等^[6]根据扁平管袋堤坝在波浪作用下的模型试验,利用极限平衡原理和量纲统一法推导了波浪作用下的稳定公式,该公式能对扁平管袋堤坝在波浪作用下的安全系数作出初步判断。同时,试验表明 在同一堤前水深下,波坦越小,其相对临界波高就越小,管袋越容易失稳 在堤前水深与坝高齐平下,坝高与临界波高成反比,坝高越高,管袋越容易失稳。

林刚^[7]在波浪作用下的土工管袋模型试验中采用修正的 Goda 公式计算了作用于管袋上的水平波浪压力和上抬力,得出了上下层土工管袋之间直接滑动的安全因子 F_s ,即作用在管袋上的抗滑力和波浪推力之比。

通过 F_s 的分析和计算,就可以大致确定土工管袋在波浪作用下的结构稳定性。在此基础上,笔者采用块体滑移理论和库伦准则,利用位移函数可以计算出土工管袋在波浪持续作用下的位移。

2 模型试验与数据分析

2.1 试验目的与建模

本次试验的主要目的是 通过模型试验,测出同一种坝型结构在不同水深下的临界波高,同时对于在相应临界波高条件下发生临界稳定破坏的管袋,应确定其与波浪行进方向平行的边的长度 l 和位置(结构自上而下计为第 N 层)。根据大量的波浪模型试验,得出管袋稳定工况的判定条件如下^[7] ①稳定状态 堤坝管袋结构保持静止,管袋之间无任何滑动,即没有位移产生,同时也未出现管袋被掀翻现象。②临界稳定 某高程上、下管袋之间有明显的掀翻现象并伴有滑移,即位移产生,但在持续波浪作用下滑移不明显,且结构仍能保持其完整性及功能。③失稳破坏 在持续波浪作用下,某高程管袋产生较大的持续位移,甚至冲出堤体,破坏了结构的整体性和功能,发生失稳破坏。

本次波浪模型试验采用长 80 m、宽 1.0 m、高 1.5 m 的长方体玻璃水槽,中间由 1 块玻璃挡板将其各分为 0.5 m 宽,一侧用于堆放模型,另一侧用于消除二次波的反射作用。水槽一端安有造波机,由微机系统控制,通过调节波浪要素生成各种工况所需波型(本次试验在规则波条件下进行),并且水槽两端设有消能防冲设施,如图 2 所示。

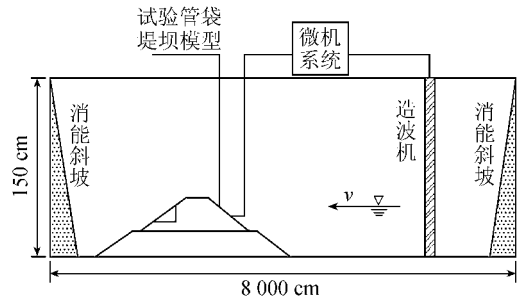


图 2 波浪水槽模型示意图

试验中模型长度比尺 $\lambda = 30$,管袋堤坝模型高度 $D_c = 50$ cm,管袋中充填砂的干密度 $\rho_s = 1\ 650$ kg/m³,摩擦系数 $\mu = 0.30$,充填率为 80%,管袋尺寸分别为 50 cm × 18 cm × 2 cm,50 cm × 24 cm × 2 cm,50 cm × 30 cm × 2 cm,50 cm × 36 cm × 2 cm,50 cm × 42 cm × 2 cm,如图 3 所示。每层都有若干个管袋并列相叠而成,其中顶层管袋固定长度 $l = 18$ cm,坡比 $m = 1.5$,波坦(波高与波长之比) $H/L = 1/25$ 。在此基础上,根据不同的堤前水深 D 进行波浪模拟试验。

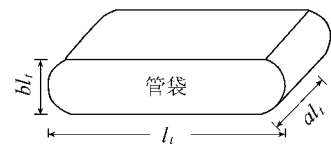


图 3 管袋尺寸示意图

2.2 试验现象

首先将试验管袋堤体按照模型长度比尺 $\lambda = 30$ 堆叠于水槽之中,堤前水深 $D_1 = 40$ cm, $D_2 = 47$ cm,结构处于静止即稳定状态,此时管袋无任何位移产生,然后由造波机打出具有不同波浪要素的各种波形,依次作用于管袋堤体之上,直至结构失稳破坏,造波结束。

期间,根据不同的波型,结构经历了稳定—临界稳定—失稳破坏 3 种过程 起先在波高较小的情况下,管袋处于静止状态 随着波高的增大,第 1 层管袋迎水面最先发生轻微的上抬效应,继而传至第 2、第 3、第 4、第 5 层及以下 在波浪的持续作用下,若干层管袋开始有持续位移产生,并不断向下游开展,直至冲出堤体。如图 4、图 5 所示。

2.3 数据采集

理论而言,同一堤体结构在某一特定水深下有



图4 管袋处于稳定状态



图5 管袋处于临界稳定状态

且只有1组临界波高。如上所述,本次试验根据2组堤前水深的大小,通过调节波浪要素 $H/L = 1/25, m = 1.5, D_c = 50 \text{ cm}$,使管袋处于临界稳定状态,最终测得相应的临界波高 堤前水深为 40 cm 和 47 cm 时的临界波高分别为 11.67 ~ 13.33 cm(该范围内临界波高更倾向于 11.67 cm)和 10 cm。

临界稳定状态下,由于波浪的持续作用,不同层次、不同尺寸的管袋产生的位移大小各异;另一方面,根据已有的试验规律,临界稳定工况中一般只有顶层管袋发生位移,而不会顶部多层管袋同时发生位移^[8],所以应该分别观察此工况下顶层管袋和边坡管袋的具体位置和长度:

- 顶层管袋:不同堤前水深,当结构分别达到上述临界稳定状态时,第1层管袋均产生了掀翻现象,其长度 $l = 18 \text{ cm}$ 。
- 边坡管袋:在某一堤前水深下,结构往往会有1层或多层管袋同时处于临界稳定状态,具体变形工况见表1。

表1 临界稳定管袋的位置及长度 l cm

堤前水深/ cm	管袋长度			
	第2层 管袋	第3层 管袋	第4层 管袋	第5层或 以下管袋
$D_1 = 40$	24			42
$D_2 = 47$	24	30		42

注 空白处说明该层管袋未达到临界稳定状态。

由多组试验现象可得:①第1层管袋极易发生临界失稳破坏,且一般不会连续多层管袋同时发生变形;②堤前水深越大,临界稳定工况下相应的管袋变形越剧烈;③同一堤前水深下,管袋所处水位越深则越不易达到临界稳定状态。

2.4 数据分析

为了验证试验所用管袋尺寸能否满足结构在相

应临界稳定工况下的稳定性,本文通过已有理论公式进行校核。目前,国内外有多种关于管袋尺寸的计算公式,如:Wouters 曾于 1998 年提出公式

$$\frac{H_s}{\left(\frac{\rho_E}{\rho_W} - 1\right) D} = \frac{2.5}{\sqrt{\xi_0}}; \text{同年 Bouyze 和 Schram 推出}$$

$$\frac{u_{cr}}{(g\Delta D)^{0.5}} = 1.0, \text{其中 } D = l_c; \text{非变形管袋抗滑稳定}$$

$$\text{公式 } l_c \geq u^2 \frac{(0.5 C_D + 2.5 C_L \mu)}{\left(1.6 \mu \Delta g - C_M \frac{\partial u}{\partial t}\right)}。 \text{本文引用了林刚}$$

等改进的非变形管袋抗滑、抗倾覆稳定公式进行计算:

抗滑稳定公式

$$l_g \geq \frac{bu|u|K_D C_D + a\mu u^2 K_L C_L}{2ab\left(\mu \Delta K_{RG} - K_I C_I \frac{\partial u}{\partial t}\right)} \quad (1)$$

抗倾覆稳定公式

$$l_g \geq \frac{b^2 u|u|K_{OD} C_D + a^2 u^2 K_{OL} C_L}{2\left(\Delta K_{ORG} a^2 b - ab^2 K_{OI} C_I \frac{\partial u}{\partial t}\right)} \quad (2)$$

根据计算结果,取两者较大值作为管袋的理论尺寸。公式考虑了管袋在波浪作用下的变形效应,分别掺入了滑移、倾覆变形系数 K_D, K_L, K_R, K_I 和 $K_{OD}, K_{OL}, K_{OR}, K_{OI}$,通过计算,可得到处于临界稳定工况下的管袋理论长度,数据见表2。

表2 临界稳定管袋的理论长度 l' cm

堤前水深/ cm	管袋长度				
	第1层 管袋	第2层 管袋	第3层 管袋	第4层 管袋	第5层或 以下管袋
$D_1 = 40$	28.4	21.6			35.2
$D_2 = 47$	31.5	23.4	18.8		37.6

注 表中数据皆为抗滑移和抗倾覆2个理论值中的较大值。

由表1,2中数据可知第1层管袋模型尺寸都小于理论长度,故会发生临界失稳破坏,且破坏形式为倾覆破坏,与试验现象相符第2层及以下管袋,其模型尺寸皆大于理论长度,在波浪的作用下产生一定的滑移位移后结构即能保持稳定,与试验结果一致。根据理论计算和试验现象可知,倾覆破坏主要发生在结构的顶层管袋附近,边坡管袋只发生滑移破坏。

3 结 语

土工管袋结构在沿海开发等水利工程中得到了广泛应用,其变形分析对于工程的设计、施工和安全监测都具有十分重要的意义。

- 设计期通过模型试验和变形计算,可以选择最佳的管袋尺寸,从而使工程造价和结构安全达到最优。

(下转第68页)

属于 1 类城市,北京市市辖县(门头沟、通州、顺义、昌平、大兴、怀柔、延庆)以及天津市武清区属于 2 类城市,河北省廊坊市属于 3 类城市,河北省香河县属于 5 类城市。这 4 类城市所对应的城镇居民生活污水排放系数分别为 145 L/(人·d),135 L/(人·d),125 L/(人·d),105 L/(人·d)。

应用式(1),将城镇生活污水排放系数与空间展布后水流汇集单元内的非农业人口相乘,得到以流域为单元的城镇生活污水排放量,经汇总得到研究区域内城镇生活污水总排放量为 8.99 亿 t/a,见表 1。

表 1 城镇生活污水排放量

区域范围	统计年鉴 人口数/ 万人	空间展布 人口数/ 万人	排放系数/ (L·人 ⁻¹ ·d ⁻¹)	生活污水 排放量/ (亿 t·a ⁻¹)
北京市城八区	1361	1362	145	7.21
北京市市辖县和 天津市武清区	343	341	135	1.68
河北省廊坊市	23	23	125	1.05
河北省香河县	0	0	105	0
合 计	1727	1726		8.99

3.3 结果分析

查阅 2008 年北京市城八区、北京市市辖县、天津市武清区、河北省廊坊市以及河北省香河县统计年鉴,汇总得研究区域内非农业人口数为 1 727 万;而本文采用 GCAWI 空间展布研究区域内人口数为 1 726 万,两者相差不大。又根据北京市、天津市、河北省 2000 年城镇生活污水污染源调查统计可知,研究区域内城镇生活污水总排放量为 7.26 亿 t/a,人口数为 1300 多万,而本文计算所用数据基于 2008 年,得到的城镇生活污水总排放量为 8.99 亿 t/a,人口数为 1700 多万。人口数后者是前者的 1.31 倍,而城镇生活污水总排放量后者是前者的 1.24 倍,表明随着人口的增加,城镇生活污水总排放量也在增加,但增加幅度没有人口增加的快,可能是由于居民素质的提高以及相关部门的大力控制与处理产生的结果。

4 结 语

以北运河流域为研究对象,借助 GIS 工具,采用网格单元面积权重内插法空间展布研究区域内的人口,获得水流汇集单元内的人口分布,解决了以行政区为单元统计获得的人口数据与污水的排放或汇集途径不一致的问题。本文首先根据乡镇驻地理位置点构造 Voronoi 图来替代乡镇边界,并从全国 1:50 000 DLG 数据中提取非农业居住区地块,划分 200 m×200 m 规则网格,把乡镇非农业人口按照一定原则展布到每个规则格网上,最后采用移动搜索法将网格属性值进行空间平滑,生成人口栅格图,获得水流汇集单元内的人口分布,经汇总得到研究区域内非农业人口数为 1 726 万,再乘以城镇生活污水

排放系数,计算得到以流域为单元的城镇生活污水排放量。研究区域内城镇生活污水总排放量为 8.99 亿 t/a,经统计数据验证,该成果合理,表明以流域为单元的城镇生活污水排放量估算方法可行。

参考文献:

[1] 牛存稳.流域水资源水环境综合模拟及其应用[D].北京:中国水利水电科学研究院,2008.
[2] 闫庆武,卞正富,赵华.人口密度空间化的一种方法[J].地理与地理信息科学,2005,21(5):45-48.
[3] 闫庆武,卞正富.基于 GIS 的社会统计数据空间化处理方法[J].云南地理环境研究,2007,19(2):92-97.
[4] 环境保护部华南环境科学研究所.第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册[M].北京:国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室,2008.
[5] 刘业森,杨小唤.基于边界替代的人口数据空间化方法研究[J].地球信息科学,2005,4(7):54-58.
[6] 尹京苑,张桂芳,单新建.基于 TM 影像的人口密度数字模拟——以北京地区为例[J].灾害学,2007,22(1):31-35.

(收稿日期:2010-12-07 编辑:骆超)

(上接第 58 页)

- b. 施工期通过管袋的变形分析,有利于更加准确地总结出结构的变形规律,及时调整工程的施工方案,采取必要的工程措施,减小损失。同时,根据变形计算,施工过程可以预留一定的变形空间,结构经过后期发展可自身达到设计标准。
- c. 对于已建管袋工程,通过变形计算,可以比较准确地掌握管袋的工作状况,对管袋实施及时有效的安全监测,确保结构的整体稳定。

参考文献:

[1] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会.土工合成材料工程应用手册[M].2 版.北京:中国建筑工业出版社,2000:67.
[2] PLATUTR H, KLUSMAN C R. Two-dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundations[J]. Thin-Walled Structures,1999,34:179-194.
[3] 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.
[4] RECIO J, OUMERACI H. Effect of deformations on the hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers[J]. Geotextiles and Geomembranes,2007,25:278-292.
[5] RECIO J, OUMERACI H. Process based stability formulae for coastal strutures made of geotextile sand containers[J]. Coastal Engineering,2009,56:632-658.
[6] 朱朝荣,束一鸣,汪军,等.扁平管袋堤坝在波浪作用下稳定性试验研究[J].人民长江,2008,39(1):94-96.
[7] 林刚.土工管袋结构坝体在波浪作用下的试验研究[D].南京:河海大学,2005.
[8] 朱朝荣.管袋堤坝施工期稳定性试验研究[D].南京:河海大学,2006.

(收稿日期:2011-01-19 编辑:高建群)