



考虑袋布加筋作用的土工管袋围堰 稳定性计算方法

张哲^{1,2}, 马晓雪^{1,2}, 戴超^{1,2}, 尚志辉^{1,2}, 吕小龙³

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 天津水运工程勘察设计院有限公司, 天津 300456;
3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 在进行断面设计时, 通常将堰身视作仅由内部的充填砂构成进行稳定性计算, 这将导致设计的围堰断面不够经济并延长工期。目前国内尚未有相关规范指导考虑袋布加筋作用的土工管袋围堰稳定性计算。针对该问题, 分析土工织物的加筋作用, 并借鉴国外加筋结构计算土工织物加筋作用的方法, 提出了通过验算袋布提供的最大抗力是否满足其允许抗拉强度来考虑袋布加筋作用的计算方法。经工程实践检验, 该方法可以起到优化围堰堤身断面、缩短工期、节约投资的作用。

关键词: 土工管袋; 围堰; 整体稳定; 加筋作用

中图分类号: U 655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)02-0176-05

Method for calculating stability of geotextile cofferdam considering effect of bag reinforcement

ZHANG Zhe^{1,2}, MA Xiao-xue^{1,2}, DAI Chao^{1,2}, SHANG Zhi-hui^{1,2}, LYU Xiao-long³

(1.Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China;
2.Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China;
3.Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In the design of cofferdam section, the stability of the cofferdam body is usually considered as only the internal filling sand, which will lead to the design of the cofferdam section is not economical and extend the construction period. At present, there is no relevant code in China to guide the stability calculation of geotextile cofferdam considering the effect of bag reinforcement. In view of this problem, by analyzing the reinforcement effect of geotextile and using the method of calculating the geotextile reinforcement effect of reinforced structures abroad for reference, a calculation method is proposed to consider the reinforcement effect of the bag cloth by checking whether the maximum resistance provided by the bag cloth satisfies its allowable tensile strength. The practice shows that this method can optimize the section of cofferdam body, shorten the construction period and save the investment.

Keywords: geotechnical pipe bag; cofferdam; overall stability; reinforcement

土工管袋围堰由于工效高、造价低等, 被广泛应用于填海造陆^[1]、储泥堆场^[2]等项目中。土工管袋是土工织物经缝合或热加工制成的袋体, 袋体上留有充填口。铺筑土工管袋围堰时通过充填口将砂浆充填至土工管袋中, 充填完成后封口形成第1层堤体; 然后在第1层堤体上充填第2层

堤体, 以此类推直至目标高程。土工管袋堤体逐层铺筑过程中, 每层土工管袋的尺寸相应进行调整, 确保最终形成的土工管袋围堰符合设计断面及边坡要求。

研究成果表明, 土工织物应用于土坡、挡土墙等结构物时, 可以提供加筋效果进而提高其整

体稳定性^[3]。《水运工程地基设计规范》^[4]对水运行业的构筑物提出了验算整体稳定性的要求, 并指出可采用土工织物等加筋材料对工程结构进行增强以提高其安全性。《水运工程土工合成材料应用技术规范》^[5]要求采用加筋材料提高构筑物的安全性时应对加筋材料的抗拉强度进行验算, 并给出了土工织物极限抗拉强度与设计抗拉强度之间的转化公式。作为土工管袋围堰设计的重要参考, 上述两本规范肯定了土工织物对构筑物的加筋作用, 但均未给出土工管袋围堰考虑袋布加筋作用的计算方法。加之目前尚未有土工管袋围堰袋布加筋作用计算方法的公开成果用于参考, 设计人员在计算土工管袋围堰的整体稳定性时通常不考虑袋布的加筋作用。这种算法偏于保守, 会导致围堰的设计断面偏大、工程量增加, 并进一步影响工期和造价。综上所述, 对土工管袋围堰考虑袋布加筋作用的计算方法进行研究就具有了较高的价值。

滨州港泊位后方陆域形成项目建设过程中, 从满足工程应用的角度提出了土工管袋围堰考虑袋布加筋作用的计算方法, 并应用到该项目的设计中, 起到了缩短工期和节约投资的积极效果。

1 计算方法

1.1 不考虑加筋作用的安全系数

现阶段, 水运行业对土工管袋围堰进行整体稳定性计算时通常不考虑袋布的加筋作用, 而是将围堰堤身视作仅由土工管袋内部的充填砂构成进行计算。按照《水运工程地基设计规范》, 其危险危险滑动面应满足:

$$\gamma_0 M_{SD} \leq \frac{1}{\gamma_R} M_{RK} \quad (1)$$

式中: γ_0 为重要性系数; γ_R 为抗力分项系数; M_{SD} 为作用于危险滑动面上滑动力矩的设计值; M_{RK} 为危险滑动面上抗滑力矩的标准值。

令 $F_s = \gamma_R \gamma_0$, 则得到:

$$F_s \leq \frac{M_{RK}}{M_{SD}} \quad (2)$$

式中: F_s 为规范要求的整体稳定性最小安全系数。

1.2 加筋作用

当破坏滑弧经过筋材时, 筋材会提供有利于整体稳定的抗力^[6]。筋材抗力的方向确定起来较为复杂, 与筋材的刚度和加筋结构的变形相关。从工程应用角度, 美国 FHWA《加筋土挡墙与加筋土坡设计与施工指南》^[7] (以下简称《指南》) 根据筋材性质确定筋材抗力的方向: 土工织物等柔性的片状筋材, 其抗力方向沿滑弧的切向; 钢条等刚度大的条带式筋材, 其抗力方向沿筋材的铺设方向, 见图 1。

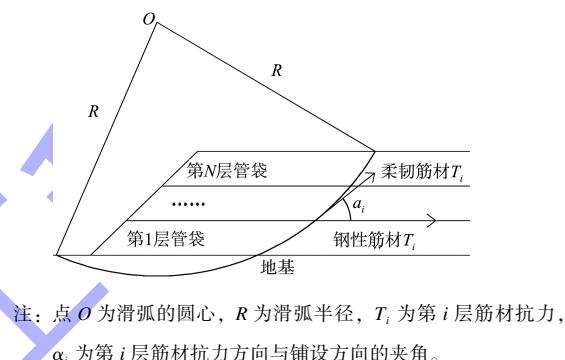


图 1 土工管袋围堰滑弧及筋材受力

土工管袋的袋布是一种柔性的土工织物, 平面内受拉力能够提供与受力方向相反的抗力。当拉力与袋布平面有夹角时, 袋布变形方向与拉力方向一致, 并提供反向的抗力。由此可见, 采用《指南》的方法确定土工管袋袋布提供的抗力方向较为合适, 即其抗力方向沿滑弧的切向, 此时受力的任何一层管袋袋布的抗力对滑弧圆心的力臂均等于滑弧的半径 R 。

1.3 筋材抗力计算

假设不考虑袋布的加筋作用时围堰的整体稳定性不满足要求, 此时围堰整体稳定性安全系数为 F_K , 若要满足《水运工程地基设计规范》要求的整体稳定性最小安全系数 F_s , 危险滑弧经过的筋材需提供的总抗力 $\sum T_i$ 为:

$$\sum T_i = (F_s - F_K) \frac{M_{SD}}{R} \quad (3)$$

文献[8]指出, 中下部的筋材对加筋结构的整体稳定性贡献最大, 这也是诸多加筋结构采用上疏下密布置方式的原因。《指南》指出: 当滑弧在

结构物内的竖直高度不超过 6 m 时, 可以按照 1 个抵抗区域布置, 即滑弧经过的所有筋材的抗力大小可以认为一致; 当滑弧在结构物内的竖直高度超过 6 m 时, 可以按照大致等高的 2 个或 3 个抵抗区域布置, 见图 2。

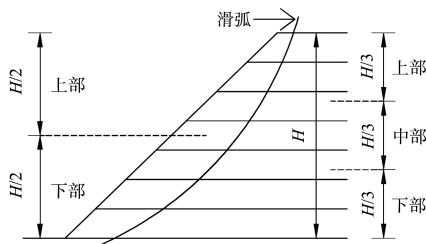


图 2 筋材抵抗区域布置

每个抵抗区域内滑弧经过的筋材所提供的总抗力 T_z 的大小可按照公式(4)~(6)计算:

1 个抵抗区域时:

$$T_z = \sum T_i \quad (4)$$

2 个抵抗区域时:

$$\begin{cases} T_{z1} = \frac{1}{4} \sum T_i & \text{(上部)} \\ T_{z2} = \frac{3}{4} \sum T_i & \text{(下部)} \end{cases} \quad (5)$$

3 个抵抗区域时:

$$\begin{cases} T_{z1} = \frac{1}{6} \sum T_i & \text{(上部)} \\ T_{z2} = \frac{1}{3} \sum T_i & \text{(中部)} \\ T_{z3} = \frac{1}{2} \sum T_i & \text{(下部)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\sum T_i$ 为危险滑弧经过的所有筋材需提供的总抗力。

设滑弧在每个抵抗区域内经过的筋材的层数为 n , 则单层筋材分担的抗力 T_j 为:

$$T_j = \frac{T_z}{n} \quad (7)$$

需要注意的是, 不考虑袋布加筋作用时围堰不满足整体稳定的滑弧可能有多个, 此时可以借助计算机搜索出所有的危险滑弧, 并分别求出每个危险滑弧对应的围堰整体稳定性安全系数 F_k 、滑弧的半径 R 、危险滑弧经过的所有筋材需提供

的总抗力 $\sum T_i$ 和危险滑动面上滑动力矩的设计值 M_{SD} , 并进一步求出单层筋材分担的抗力 T_j 的最大值 T_{jmax} 。

1.4 筋材层数确定

土工管袋围堰由多层管袋堤体逐层堆积形成, 每层管袋均有上下两层袋布。结合图 1、2, 在统计滑弧经过的筋材层数时, 应注意第 1 层管袋与地基的接触面有 1 层袋布; 第 1 层管袋与第 2 层管袋的接触面有 2 层袋布; 逐此类推, 第 N 层管袋的顶部有 1 层袋布。以图 2 为例, 当划分 1 个抵抗区域时, 滑弧经过的筋材的层数为 $n=14$; 当划分 2 个抵抗区域时, 滑弧经过的筋材的层数为: 上部 $n_1=7$, 下部 $n_2=7$; 当划分 3 个抵抗区域时, 滑弧经过的筋材的层数为: 上部 $n_1=5$, 中部 $n_2=4$, 下部 $n_3=5$ 。

1.5 筋材强度验算

《水运工程土工合成材料应用技术规范》要求土工材料的允许抗拉强度 T_a 应满足:

$$T_a \geq T_{jmax} \quad (8)$$

T_a 需根据实测的极限抗拉强度 T 与综合强度折减系数 β 确定:

$$T_a = \frac{T}{\beta} \quad (9)$$

β 是综合考虑了土工织物老化作用、施工期损伤影响和蠕变影响后的综合强度折减系数。上述 3 个因素难以测定, 因此在工程实际中通常采用经验值进行取值。《水运工程土工合成材料应用技术规范》给出的 β 建议数值为 3.0~4.0, 蠕变作用强、工程条件恶劣时取大值。《指南》建议对永久性工程取 7.0、对临时性工程取 3.0。土工管袋围堰主要用于形成封闭区域以满足封闭区域内的施工需要, 多为临时性构筑物。笔者认为, 若土工管袋围堰的工程建设条件较好, 如河湖底泥清淤时在陆地上修筑的土工管袋围堰, 可以取 $\beta=3.0$, 且该数值也在《水运工程土工合成材料应用技术规范》要求的 3.0~4.0 范围之内; 若为海洋吹填造陆项目, 因海洋作业环境较为恶劣且海水具有一定的腐蚀性, 从工程安全角度进行保守考虑, 可以取 $\beta=4.0$ 。

若计算出的 $T_a \geq T_{j\max}$, 说明袋布的强度满足需求, 可以提供满足围堰整体稳定性的加筋作用。反之, 则说明袋布无法提供满足围堰整体稳定性的加筋作用, 此时应对围堰断面进行修改加强或采用强度更高的袋布材料。

2 工程算例

2.1 工程概况

滨州港泊位后方陆域形成项目为满足成陆需求, 新建土工管袋围堰 1 053 m, 围堰位置处泥面平均高程 -2.8 m, 吹填设计高程 5.5 m, 围堰下部土层分布及力学指标见表 1、2。

表 1 土层分布及力学指标

土层名称	层底高程/m	天然密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	含水率/%	直剪快剪	
				黏聚力/ kPa	内摩擦角/(°)
淤泥	-9.216	1.66	57.7	3.8	0.6
淤泥质黏土	-16.416	1.79	41.3	8.5	1.6
粉土	-17.416	2.00	24.5	11.2	13.4
粉质黏土	-22.916	1.93	30.1	15.5	6.8

表 2 十字板强度力学指标

试验高程/m	十字板强度/kPa	试验高程/m	十字板强度/kPa
-5.42	6.02	-10.42	33.45
-6.42	6.73	-11.42	17.17
-7.42	7.97	-12.42	21.42
-8.42	9.03	-13.42	33.28
-9.42	10.44	-14.42	46.02

堰身底部铺设了厚度 1 m 的中粗砂垫层作为水平排水通道, 塑料排水板作为竖直排水通道在堰身底部按照正方形布置, 间距为 1 m。塑料排水板顶部位于中粗砂垫层内部, 底部穿透淤泥质黏土层, 高程 -16.5 m。围堰断面采用对称斜坡式结构, 每层土工管袋充填厚度 0.5 m, 堤顶高程 6.0 m、宽 9 m。堰身设置两级肩台, 第 1 级肩台宽 6 m, 高程 0.5 m, 坡度 1:2; 第 2 级肩台宽 5 m, 高程 2.5 m, 坡度 1:2。第 2 级肩台与堤顶之间坡度 1:1.5。

本工程设计低水位 0.54 m, 平均水位 2.06 m。计算时, 泥面至高程 -14.42 m 区段的土层采用十字板力学指标, 高程 -14.42 m 以下区段的土层采用直剪快剪指标。土工管袋充填砂密度 1.8 t/m³, 黏聚力 $c = 0$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 26^\circ$; 吹填土密度

1.6 t/m³, 黏聚力 $c = 5$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 2^\circ$; 中粗砂垫层密度 1.8 t/m³, 黏聚力 $c = 0$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 32^\circ$ 。

2.2 设计计算

本工程土工管袋围堰袋布采用 150 g/m² 防老化编织布, 经拉伸试验测得其极限抗拉强度 $T = 24$ kN/m。参照 1.5 节, 取综合强度折减系数 $\beta = 4.0$ 。由式(9)求得允许抗拉强度 $T_a = 6.0$ kN/m。根据现场实际情况, 确定围堰加载过程, 见表 3。

表 3 围堰加载过程

加载级	内容	工期/d	累计工期/d
1	围堰施工至高程 0.5 m	30	30
2	围堰施工至高程 2.5 m	20	50
3	围堰施工至高程 6.0 m	40	90
4	围堰内侧吹填至高程 5.5 m	90	180

本工程土工管袋围堰主要为后期吹填作业提供辅助, 属临时性工程, 根据《水运工程地基设计规范》, 安全等级为二级, 取结构重要性系数 $\gamma_0 = 1.0$ 、抗力分项系数 $\gamma_R = 1.1$, 确定围堰整体稳定性最小安全系数 $F_S = 1.1$ 。借助计算机对每级加载后的所有危险滑弧进行搜索, 确定出单层袋布出现最大抗力 $T_{j\max}$ 时的相关信息, 见表 4。由表 4 可知, 不考虑袋布的加筋作用时, 第 1 加荷级的整体稳定性安全系数 $F_K = 1.204$, 整体稳定性满足要求, 可不考虑袋布的加筋作用。第 2~4 加荷级加载后堰身的整体稳定性安全系数 F_K 均小于 1.1, 此时需对相应加载条件下的袋布的抗力进行验算, 以确定袋布的加筋作用是否可以确保围堰的整体稳定。

表 4 围堰加载信息

加载级	F_S	F_K	$M_{sd}/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^{-1})$	R/m	$\Sigma T_i/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
1	1.1	1.204	492.48	6.5	-
2	1.0	1.082	4 811.16	18.0	4.81
3	1.1	1.002	17 829.59	26.5	65.94
4	1.1	1.044	20 036.00	28.5	39.37

第 2 加荷级加载后, 危险滑弧穿过堤身的高度小于 6 m, 按照 1 个抵抗区域进行计算。总抗力 $T_z = 4.81$ kN/m, 危险滑弧共穿过堤身内 $n = 22$ 层袋布, 求得单层袋布提供的最大抗力 $T_{j\max} = 0.22$ kN/m,

小于袋布的允许抗拉强度 $T_a = 6.0 \text{ kN/m}$ 。

第 3 和第 4 加荷级加载后, 危险滑弧穿过堤身的高度大于 6 m, 按照 3 个抵抗区域进行计算。危险滑弧共穿过堤身内 $n = 33$ 层袋布, 其中上部 $n_1 = 11$ 层、中部 $n_2 = 10$ 层、下部 $n_3 = 12$ 层。单层袋布提供的最大抗力 $T_{j\max}$ 均出现在下部区域, 分别为 2.75 kN/m 和 1.64 kN/m , 均小于袋布的允许抗拉强度 T_a , 见表 5。

表 5 加载后袋布抗力验算

加荷级	抵抗区域		$T_z / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$n / \text{层}$	$T_{j\max} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$T_a / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
	数量	位置				
3	3	上部	10.99	11	1.00	
		中部	21.98	10	2.20	6.0
		下部	32.97	12	2.75	
4	3	上部	6.57	11	0.60	
		中部	13.12	10	1.31	6.0
		下部	19.68	12	1.64	

不考虑袋布的加筋作用时, 第 2~4 级加荷级加载后, 围堰的整体稳定性安全系数 F_K 均小于《水运工程地基设计规范》要求的数值。考虑袋布的加筋作用后, 围堰的整体稳定性安全系数 F_K 达到规范的要求数值时, 袋布提供的最大抗力 $T_{j\max}$ 均小于袋布的允许抗拉强度 T_a , 说明袋布可以提供确保围堰整体稳定的加筋作用。

2.3 工程效益

本工程在不考虑土工管袋围堰的袋布加筋作用时, 围堰的整体稳定性是不满足《水运工程地基设计规范》要求的。若不计围堰的袋布加筋作用, 则需要对围堰的断面进行修改增强, 比如在围堰的外侧抛设压载块石或增大围堰的断面等。这些措施都将会导致工程量上升, 并进一步导致工期延长和造价上升。基于本文的算法, 通过考虑围堰的袋布加筋作用, 本工程将土工管袋围堰的断面做到经济化、合理化, 并付诸于实施。直至本工程陆域成型, 土工管袋围堰一直处于安全稳定的状态。可见, 从满足工程应用的角度, 本文考虑土工管袋围堰袋布加筋作用的算法是可行的, 并可以起到优化围堰断面、缩短工期、节约投资的作用。

3 结论

1) 土工管袋围堰的袋布具有一定的加筋作用, 进行断面设计时应考虑袋布的加筋作用。保险起见, 土工管袋的极限抗拉强度 T 应进行试验测定, 并根据工程条件选取合理的综合强度折减系数 β , 进一步求得较为准确的允许抗拉强度 T_a 。

2) 围堰不满足整体稳定的危险滑弧可能有多个, 应搜索出所有的危险滑弧并求出单层筋材分担的抗力的最大值 $T_{j\max}$ 进行后续计算。

3) 从满足工程应用的角度, 采用本文的算法对土工管袋围堰的断面进行优化, 可以起到优化围堰断面、缩短工期、节约投资的作用。

4) 建议规范完善土工管袋围堰考虑袋布加筋作用的内容。

参考文献:

- [1] 朱卫国, 陆峰. 高韧聚丙烯土工管袋在深水围堰工程中的应用[J]. 水运工程, 2017(6): 213-216.
- [2] 赵铜军, 孙俊. 淤泥脱水固化在围堰加高工程中的应用[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(3): 58-60.
- [3] 左良栋, 周世良, 泉金. 加筋高填方区码头桩基应力影响因素分析[J]. 水运工程, 2022(5): 170-177.
- [4] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2017.
- [5] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程土工合成材料应用技术规范: JTS/T 148—2020[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2020.
- [6] 张飞, 贾世林, 朱玉明, 等. 台阶式加筋挡墙稳定所需加筋力计算方法与影响规律[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3079-3089.
- [7] National Highway Institute Federal Highway Administration and U. S. Department of Transportation. Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design & Construction Guidelines: FHWA-NHI-00-043 [S]. Washington D.C.: National Highway Institute Federal Highway Administration and U. S. Department of Transportation, 2001.
- [8] 崔新壮, 姚占勇, 商庆森, 等. 加筋土坡临界高度的极限分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 1-6.